



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΗ - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΕΠΙΒΑΤΗΓΩΝ - ΟΧΗΜΑΤΑΓΩΓΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΝΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

Σωτήριος Α. Σκούπας
Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Επιβλέπων:

Ζαραφωνίτης Γεώργιος
Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ
ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ & ΣΧΕΔΙΑΣΗ - ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΕΠΙΒΑΤΗΓΩΝ - ΟΧΗΜΑΤΑΓΩΓΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΝΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

Σωτήριος Α. Σκούπας

Διπλωματούχος Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Παπανικολάου Απόστολος, Καθηγητής ΕΜΠ

Κακλής Παναγιώτης, Καθηγητής ΕΜΠ

Ζαραφωνίτης Γεώργιος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ (επιβλέπων)

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Παπανικολάου Απόστολος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Κακλής Παναγιώτης

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Φραγκόπουλος Χρίστος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σαμουηλίδης Εμμανουήλ

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σαπίδης Νικόλαος

Καθηγητής Παν. Δ. Μακεδονίας

Ζαραφωνίτης Γεώργιος

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γκίνης Αλέξανδρος

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2011

Η διατριβή αυτή χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) στα πλαίσια τριετούς Μεταπτυχιακού Προγράμματος Εσωτερικού για Πτυχιούχους Πανεπιστημίων.

Θα ήταν παράληψη να μην ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υπομονή που επέδειξε και τη συμπαράσταση που μου πρόσφερε στην πορεία για την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μου σπουδών. Τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ζαραφωνίτη για την ουσιαστική καθοδήγηση και τις εποικοδομητικές παρεμβάσεις καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διατριβής. Τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής για τις πολύτιμες συμβουλές και οδηγίες που μου πρόσφεραν προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Στη γυναίκα μου Νάνσυ &

στα παιδιά μας Ανδρέα και Δωρονίκη

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	- v -
ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΩΝ.....	- xi -
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- xiii -
EXTENDED ABSTRACT.....	- xv -
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	- 1 -
1.1. Βασικός στόχος και περίγραμμα.....	- 2 -
1.2. Στοιχεία πρωτοτυπίας.....	- 2 -
1.3. Περιεχόμενα.....	- 3 -
1.4. Μελέτη Πλοίου.....	- 4 -
1.5. Παραμετρική Σχεδίαση	- 9 -
1.6. Βελτιστοποίηση.....	- 12 -
1.7. Πλοία Νέας Τεχνολογίας.....	- 15 -
2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ	- 23 -
2.1. Ιστορική αναδρομή	- 23 -
2.2. Παραμετρική Σχεδίαση – Βελτιστοποίηση στη Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίου	- 26 -
2.3. Συστηματικές σειρές γαστρών ημιεκτοπίσματος	- 38 -
2.4. Στοιχεία από τις θεωρίες Βελτιστοποίησης και Λήψης Αποφάσεων	- 42 -
3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ	- 55 -
3.1. Ανάπτυξη της επιφάνειας της γάστρας	- 58 -
3.1.1. Η συστηματική σειρά NPL (NPL-series, 1969, 1976)	- 59 -
3.1.2. Η συστηματική σειρά του ΕΜΠ (NTUA-series, 2001)	- 62 -
3.2. Υπολογισμοί αντίστασης και πρόωσης.....	- 64 -
3.3. Κατασκευή της εσωτερικής διαμέρισης	- 70 -
3.3.1. Στεγανή υποδιαίρεση	- 73 -
3.3.2. Χώροι μεταφοράς οχημάτων.....	- 78 -
3.3.3. Χώροι ενδιαίτησης επιβατών και πληρώματος.....	- 79 -
3.3.4. Λοιποί χώροι	- 82 -
3.4. Υπολογισμός βάρους άφορτου σκάφους	- 82 -
3.4.1. Βάρος μεταλλικής κατασκευής.....	- 84 -
3.4.2. Βάρος κύριας προωστήριας εγκατάστασης	- 88 -

3.4.3. Βάρος ηλεκτρογεννητριών & λοιπών βοηθητικών μηχανημάτων	- 92 -
3.4.4. Βάρος εξοπλισμού	- 95 -
3.4.5. Βάρος ενδιαιτήσεων	- 100 -
3.4.6. Βάρος ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	- 103 -
3.4.7. Βάρος δικτύων	- 104 -
3.4.8. Λοιπά βάρη	- 104 -
3.5. Υπολογισμός πρόσθετου βάρους	- 104 -
3.6. Καταστάσεις φόρτωσης	- 107 -
3.7. Έλεγχος άθικτης ευστάθειας και ευστάθειας μετά από βλάβη	- 109 -
3.7.1. Άθικτη ευστάθεια.....	- 109 -
3.7.2. Ευστάθεια μετά από βλάβη.....	- 113 -
3.8. Οικονομική αξιολόγηση	- 118 -
3.9. Χαρακτηριστικές Εφαρμογές Παραμετρικής Σχεδίασης	- 122 -
3.9.1. Παραμετρική Σχεδίαση Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου μεσαίου μεγέθους	- 123 -
3.9.2. Παραμετρική Σχεδίαση Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου μεγάλου μεγέθους	- 126 -
4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....	- 131 -
4.1. Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση.....	- 132 -
4.2. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	- 132 -
4.3. Γενετικοί αλγόριθμοι.....	- 133 -
4.3.1. Βασική Ορολογία	- 133 -
4.3.2. Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και πεδία εφαρμογής.....	- 134 -
4.3.3. Κατηγορίες γενετικών αλγορίθμων	- 135 -
4.3.4. Εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων.....	- 135 -
4.3.5. Γενετικές πράξεις ή γενετικοί τελεστές	- 138 -
4.4. Ανάπτυξη Εφαρμογών Βελτιστοποίησης	- 145 -
5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	- 147 -
5.1. Σύνθεση του προβλήματος	- 147 -
5.1.1. Αντικειμενικές συναρτήσεις	- 147 -
5.1.2. Ελεύθερες μεταβλητές.....	- 148 -
5.1.3. Περιορισμοί	- 148 -
5.1.4. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος.....	- 149 -
5.2. Παραμετρική Σχεδίαση	- 149 -
5.2.1. Σχεδιαστικές παράμετροι	- 150 -
5.2.2. Οικονομικοτεχνικές παράμετροι	- 152 -

5.3. Επίλυση του προβλήματος	- 154 -
5.3.1. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης.....	- 154 -
5.3.2. Αρχικός Πληθυσμός	- 155 -
5.3.3. Περιβάλλον βελτιστοποίησης.....	- 156 -
5.4. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	- 158 -
5.4.1. Αρχικός πληθυσμός.....	- 158 -
5.4.2. Ολικός πληθυσμός.....	- 164 -
5.4.3. Το όριο Pareto.....	- 178 -
5.5. Επιλογή της βέλτιστης λύσης.....	- 182 -
5.5.1. 1 ^ο Πρόβλημα Επιλογής.....	- 182 -
Α΄ Μέθοδος επιλογής: Πλησιέστερη στην ουτοπική λύση	- 182 -
Β΄ Μέθοδος επιλογής: Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	- 184 -
5.5.2. 2 ^ο Πρόβλημα Επιλογής.....	- 185 -
Α΄ Μέθοδος επιλογής: Πλησιέστερη στην ουτοπική λύση	- 186 -
Β΄ Μέθοδος επιλογής: Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	- 187 -
Συμπεράσματα	- 188 -
ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	- 193 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 199 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Αναλυτικός Προσδιορισμός του Βάρους Εξαρτισμού	- Π1 -
Δείκτης εξαρτισμού	- Π1 -
Γραμμές αγκυροβόλησης (anchoring lines)	- Π1 -
Γραμμές πρόσδεσης (mooring lines).....	- Π4 -
Γραμμές ρυμούλκησης (towing lines).....	- Π8 -
ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	- Β1 -

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Σύμβολο	Περιγραφή	Μονάδες
∇	όγκος εκτοπίσματος	m^3
$ d(\mathbf{x}) _{\min}$	ελάχιστη απόσταση από την ουτοπική λύση	–
Δ	εκτόπισμα	t
ΔGM	περιθώριο ευστάθειας του πλοίου	m
ΔGM^{dam}	περιθώριο ευστάθειας του πλοίου, βεβλαμμένη κατάσταση	m
ΔGM^{int}	περιθώριο ευστάθειας του πλοίου, άθικτη κατάσταση	m
ΔGM_i^{int}	ΔGM^{int} για την κατάσταση φόρτωσης i	m
ΔGM_i^{dam}	ΔGM^{dam} για την κατάσταση φόρτωσης i	m
ρ	πυκνότητα θαλασσινού νερού	$kp\ sec^2 / m^4$
τ	δυναμική διαγωγή	deg
Ω	σύνολο αποδεκτών λύσεων	–
Ω_0	σύνολο λύσεων Pareto	–
A_{acc}	επιφάνεια καταστροφμάτων ενδιαίτησης	m^2
A_{gar}	επιφάνεια καταστροφμάτων μεταφοράς οχημάτων	m^2
b_D	ειδική κατανάλωση καυσίμου μηχανών Diesel	gr / kWh
b_{DO}	ειδική κατανάλωση καυσίμου ηλ/τριών	t / kWh
b_{LOD}	ειδική κατανάλωση λιπαντικού μηχανών Diesel	gr / kWh
b_{LOD}	ειδική κατανάλωση λιπαντικού μηχανών Diesel	t / kWh
b_{LOT}	ειδική κατανάλωση λιπαντικού αεριοστρόβιλων	gr / kWh
b_{LOT}	ειδική κατανάλωση λιπαντικού αεριοστρόβιλων	t / kWh
B, B_{\max}	μέγιστο πλάτος πλοίου	m
b_T	ειδική κατανάλωση καυσίμου αεριοστρόβιλων	gr / kWh
C_0	κόστος ναυπήγησης	€
$C_A(\mathbf{x})$	αντικειμενική συνάρτηση κόστους ναυπήγησης	€
C_{DO}	κόστος καυσίμου ηλεκτρογεννητριών ανά ταξίδι	€
C_{DL}	αδιάστατος λόγος όγκου εκτοπίσματος	€
c_{DO}	τιμή αγοράς καυσίμου ηλ/τριών	€/t
c_F	συντελεστής αντίστασης τριβής	–
C_F	το συνολικές ετήσιες χρηματοροές	€
C_{FO}	κόστος καυσίμων κυρίων μηχανών ανά ταξίδι	€
c_{FO}	τιμή αγοράς καυσίμου κυρίων μηχανών	€/t
C_I	ετήσιο κόστος ασφάλισης	€
C_{LO}	κόστος λιπαντικών ανά ταξίδι	€
c_{LOT}	τιμή αγοράς λιπαντικού αεριοστρόβιλων	€/t

c_{LOD}	τιμή αγοράς λιπαντικού μηχανών Diesel	€/t
$C_M(t)$	ετήσιο κόστος συντήρησης το έτος t	€
C_P	κόστος ελλιμενισμού ανά ταξίδι	€
c_R	συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης	–
C_s	αξία μεταπώλησης	€
C_t	συνολικά έξοδα της επένδυσης «πλοίο» το έτος t	€
c_T	συντελεστής ολικής αντίστασης	–
CT_F	συνολικό κόστος καυσίμων και λιπαντικών ανά ταξίδι	€
D	κοίλο	m
D_{chain}	ονομαστική διάμετρος αλυσίδας άγκυρας	mm
$D_{fibre\ rope}$	ονομαστική διάμετρος σχοινιού πρόσδεσης	mm
$D_{wire\ rope}$	ονομαστική διάμετρος σχοινιού ρυμούλκησης	mm
DWT	πρόσθετο βάρος	t
EHP	ισχύς ρυμούλκησης	kW
EN	δείκτης εξαρτισμού	–
F	μέσος ετήσιος ναύλος	€/t
F^*	ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος	€/t
$F(\mathbf{x}), f(\mathbf{x})$	αντικειμενική συνάρτηση	–
F^*, f^*	βέλτιστη τιμή αντικειμενική συνάρτησης	–
$\mathbf{f}(\mathbf{x})$	διάνυσμα αντικειμενικών συναρτήσεων	–
F_{∇}	ογκομετρικός αριθμός Froude	–
F_b	ύψος εξάλων	m
f_i	αντικειμενική συνάρτηση	–
f_i^{\max}	μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_i	–
f_i^{\min}	ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_i	–
F_N	αριθμός Froude	–
g	επιτάχυνση της βαρύτητας	m/s^2
GM	μετακεντρικό ύψος	m
GM_i	μετακεντρικό ύψος στην κατάσταση φόρτωσης i	m
GM_{req}	ελάχιστο απαιτούμενο μετακεντρικό ύψος	m
$GM_{\min}^{int\ i}$	GM_{\min} άθικτης ευστάθειας, κατάσταση φόρτωσης i	m
$GM_{\min}^{dam\ i}$	GM_{\min} ευστάθειας μετά από βλάβη, κατάσταση φόρτωσης i	m
GRT	μεικτή χωρητικότητα	–
i	πληθωρισμός	–
KG	κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους του πλοίου	m
KG_{\max}	μέγιστο επιτρεπόμενο KG	m
L_{bp}	μήκος μεταξύ καθέτων	m
LCB	διαμήκης θέση κέντρου άντωσης	m
L	μήκος ισάλου σχεδίασης	m
L_{chain}	μήκος αλυσίδας άγκυρας	m

L_{Dmin}	ελάχιστο μήκος βλάβης	m
L_{ER}	μήκος μηχανοστασίου	m
$L_{fibre\ rope}$	μήκος σχοινιού πρόσδεσης	m
L_{OA}	ολικό μήκος πλοίου	m
L_{PR}	μήκος αντλιοστασίου (rump room)	m
L_{SH}	μήκος κυρίου άξονα συστήματος πρόωσης	m
$L_{wire\ rope}$	μήκος σχοινιού ρυμούλκισης	m
L_{WL}	μήκος ισάλου πλευσης	m
M	συντελεστής λυγρότητας	m
N_{1PC}	αριθμός ΙΧ αυτοκινήτων βασιζόμενος στην επιφάνεια κατ/των	—
N_{1TR}	αριθμός ΦΓ αυτοκινήτων βασιζόμενος στην επιφάνεια κατ/των	—
N_{2PC}	αριθμός ΙΧ αυτοκινήτων βασιζόμενος στο εκτόπισμα σχεδίασης	—
N_{2TR}	αριθμός ΦΓ αυτοκινήτων βασιζόμενος στο εκτόπισμα σχεδίασης	—
N_{anchor}	αριθμός αγκύρων	—
$N_{CARS}(\mathbf{x})$	αντικειμενική συνάρτηση μεταφορικής ικανότητας ΙΧ αυτ/των	—
N_{CR}	αριθμός μελών πληρώματος	—
N_D	αριθμός κυρίων μηχανών Diesel	—
n_{ER}	αριθμός μηχανοστασίων	—
N_F	αριθμός αντικειμενικών συναρτήσεων	—
n_H	βαθμός απόδοσης γάστρας	—
$N_{mooring}$	αριθμός γραμμών πρόσδεσης	—
N_P	συνολικός αριθμός επιβατών	—
N_{P1}	αριθμός επιβατών που διαθέτουν καμπίνες	—
N_{P2}	αριθμός επιβατών που δεν διαθέτουν καμπίνες	—
$N_{PASS.}(\mathbf{x})$	αντικειμενική συνάρτηση μεταφορικής ικανότητας επιβατών	—
NPV	καθαρή παρούσα αξία	€
N_T	αριθμός αεριοστρόβιλων	—
n_R	βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής	—
N_V	αριθμός ελεύθερων μεταβλητών	—
n_{WJ}, N_{WJ}	αριθμός προωθητήρων αντίδρασης (water-jets)	—
OPC	συνολικός βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης	—
P_{1D}	ισχύς μηχανής Diesel	kW
P_{1WJ}	ισχύς μονάδας water-jet	kW
P_{BTH}	ισχύς bow thruster	kW
P_C	πιθανότητα διασταύρωσης	—
P_D	ισχύς λειτουργίας κυρίων μηχανών Diesel	kW
P_{EG}	ισχύς ηλ/τριας εκτάκτου ανάγκης	kW
P_{EL}	ηλεκτρική εγκατεστημένη ισχύς	kW
P_M	πιθανότητα μετάλλαξης	—

P_{ME}	εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης	kW
P_{OP}	απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας	kW
P_S	πιθανότητα επιλογής	–
P_{SH}	φορτίο κυρίου άξονα συστήματος πρόωσης	kW
P_T	ισχύς λειτουργίας αεριοστρόβιλων	kW
$P_W(\mathbf{x})$	αντικειμενική συνάρτηση εγκατεστημένης ισχύος πρόωσης	kW
r	το επιτόκιο αναγωγής	–
R	ακτίνα ενεργείας	sm
Re	αριθμός Reynolds	–
RFR	ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος	€/ t, €/ p
R_R	υπόλοιπη αντίσταση	t
R_S	απόσταση ταξιδιού	sm
R_T	ολική αντίσταση	kN
S	βρεχόμενη επιφάνεια	m^2
$S_{fibre\ rope}$	ελάχιστη επιτρεπόμενη δύναμη θραύσης σχοινιού πρόσδεσης	kN
SHP	ισχύς άξονα	kW
$S_{wire\ rope}$	ελάχιστη επιτρεπόμενη δύναμη θραύσης σχοινιού ρυμούγκισης	kN
T	βύθισμα	m
t_d	συντελεστής ώσης	–
t_D	έτος ολοκλήρωσης νέας κατασκευής	–
T_d	βύθισμα σχεδίασης	m
t_P	συνολικός χρόνος ελλιμενισμού ανά ταξίδι	h
t_S	συνολικός χρόνος εν πλω ανά ταξίδι	h
$u(f(\mathbf{x}))$	συνάρτηση χρησιμότητας της συνάρτησης $f(\mathbf{x})$	–
$u(\mathbf{f}(\mathbf{x}))$	ολική συνάρτηση χρησιμότητας	–
$U(f_i)$	κανονικοποιημένη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_i	–
V	ταχύτητα	$kn, m / s$
V_S	ταχύτητα υπηρεσίας	kn
W_{1WJ}	βάρος προωθητήρα αντίδρασης (water-jet)	t
W_{2PC}	βάρος ΙΧ αυτοκινήτων βασιζόμενο στο εκτόπισμα σχεδίασης	t
w_{PC}	μέσο βάρος ανά όχημα	t
W_{AC}	βάρος ενδιαιτήσεων	t
W_{AM}	βάρος βοηθητικών μηχανημάτων	t
W_{AN}	βάρος ηλεκτρογεννητριών & λοιπών μηχανημάτων	t
$W_{anchor\ lines}$	συνολικό βάρος γραμμών αγκυροβόλησης	t
$W_{anc.\ windlass}$	βάρος εργάτη άγκυρας	kg
$W_{anc.\ fairleader}$	βάρος fairleader αλυσίδας άγκυρας	kg
$W_{anc.\ cable\ stopper}$	βάρος μηχανισμού ασφάλισης αλυσίδας άγκυρας	kg

W_{BTH}	βάρος bow thruster	<i>t</i>
$W_{cbollard}$	βάρος σταυροειδούς δέστρας (cruciform bollard)	<i>kg</i>
W_{cchock}	βάρος closed chock	<i>kg</i>
W_{chain}	βάρος αλυσίδας αγκύρων	<i>kg</i>
W_{CR}	βάρος μελών πληρώματος	<i>t</i>
$W_{dbollard}$	βάρος διπλής δέστρας (double bollard)	<i>kg</i>
W_{DO}	βάρος καυσίμων ηλεκτρογεννητριών	<i>t</i>
W_{EG}	βάρος ηλεκτρογεννήτριας εκτάκτου ανάγκης	<i>t</i>
W_{EL}	βάρος ηλεκτρολογικού εξοπλισμού	<i>t</i>
$W_{elevator}$	βάρος ανελκυστήρα	<i>t</i>
W_{EN}, W_{EN}^*	βάρος εξαρτισμού	<i>t</i>
$W_{escalator}$	βάρος κυλιόμενων κλιμάκων	<i>t</i>
$W_{fibre\ rope}$	βάρος σχοινιού πρόσδεσης κατασκευασμένο από ίνες	<i>kg</i>
W_{FW}	βάρος γλυκού νερού	<i>t</i>
W_{FO}	βάρος καυσίμων κυρίων μηχανών	<i>t</i>
W_{HVAC}	βάρος κεντρικής μονάδας κλιματισμού	<i>t</i>
w_i	συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου βελτιστοποίησης <i>i</i>	—
W_{LI}	βάρος υπόλοιπων υγρών	<i>t</i>
W_{LO}	βάρος λιπαντικών	<i>t</i>
W_{LS}	βάρος άφορτου σκάφους	<i>t</i>
W_M	βάρος προωστήριας εγκατάστασης	<i>t</i>
W_{ME}^D	βάρος κυρίων μηχανών Diesel	<i>t</i>
W_{ME}^T	βάρος αεριοστροβίλων	<i>t</i>
$W_{mooring\ lines}$	συνολικό βάρος γραμμών πρόσδεσης	<i>t</i>
W_{OT}	βάρος εξοπλισμού	<i>t</i>
W_P	βάρος επιβατών	<i>t</i>
W_{PP}	βάρος δικτύων	<i>t</i>
W_{PR}	βάρος εφοδίων	<i>t</i>
$W_{p\ roller}$	βάρος μηχανισμού κατεύθυνσης σχοινιών ρυμούλκησης (roller)	<i>kg</i>
W_{roller}	βάρος μηχανισμού κατεύθυνσης σχοινιών πρόσδεσης (roller)	<i>kg</i>
W_{RV}	λοιπά βάρη άφορτου σκάφους	<i>t</i>
$W_{s\ drum}$	βάρος κυλίνδρου αποθήκευσης σχοινιού ρυμούλκησης (drum)	<i>kg</i>
W_{SH}	βάρος κυρίου άξονα συστήματος πρόωσης	<i>t</i>
W_{ST}	βάρος μεταλλικής κατασκευής	<i>t</i>
$W_{t\ bracket}$	βάρος ισχυρού σημείου στήριξης γραμμής ρυμούλκησης (t bracket)	<i>kg</i>
$W_{towing\ lines}$	συνολικό βάρος γραμμών ρυμούλκησης	<i>t</i>
W_{VH}	βάρος οχημάτων	<i>t</i>

W_{winch}	βάρος υδραυλικού βαρούλκου	kg
$W_{wire rope}$	βάρος συρματοσχοινου	kg
W_{WJ}	βάρος συστημάτων προωθητήρων αντίδρασης (water-jets)	t
x_i	ελεύθερη μεταβλητή	—
\mathbf{x}, \vec{x}	διάνυσμα ελεύθερων μεταβλητών	—
X_t	ωφέλιμο φορτίο για το έτος t	t

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΩΝ

Αρκτικόλεξο	Περιγραφή
ΓΑ	Γενετικοί Αλγόριθμοι
Ε/Γ-Ο/Γ	Επιβατηγό – Οχηματαγωγό
ΕΑ	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι
ΕΑΝ	Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος
ΕΜΠ	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
ΕΝΘΥ	Εργαστήριο Ναυτικής & Θαλάσσιας Υδροδυναμικής
ΕΠΑΝ	Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητας
ΙΧ	Ιδιωτικής Χρήσης
ΚΠΑ	Καθαρή Παρούσα Αξία
ΠΔ	Προεδρικό Διάταγμα
ΤΝΔ	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα
ΦΓ	Φορτηγά
3D	Three Dimensional
ACV	Air Cushion Vehicle
B-Rep	Boundary Representation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAGD	Computer Aided Geometrical Design
CASD	Computer Aided Ship Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMP	Critical Path Method
DXF	Drawing Exchange Format
DNV	Det Norske Veritas
DSS	Decision Support System
EN	Equipment Number
FEM	Finite Element Method
GA	Genetic Algorithm
GA-MCDM	Genetic Algorithm – Multiple Criteria Decision Making
HSCC	High Speed Craft Code
HSV	High Speed Vessel
HYSWAS	Hydrofoil Small Waterplane Area Ship
ITTC	International Towing Tank Conference
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MODM	Multi-Objective Decision Making
MOEA	Multi-Objective Evolutionary Algorithm
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm

MSC	Marine Safety Committee
NPL	National Physical Laboratory
NPV	Net Present Value
NPVI	Net Present Value Index
NTUA	National Technical University of Athens
PERT	Programme Evaluation Review Technique
RFR	Required Freight Rate
SES	Surface Effect Ship
SWATH	Small Waterplane Twin Hull
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Θεμελιώδες στάδιο της σχεδίασης ενός πλοίου αποτελεί η «προμελέτη» (preliminary design). Στη φάση αυτή, υπολογίζονται όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά ενός πλοίου (κύριες διαστάσεις, βάρη, ισχύς πρόωσης, κ.ά.), τα οποία πρέπει να είναι γνωστά προκειμένου να ξεκινήσει η λεπτομερής σχεδίαση. Είναι φανερό ότι στη φάση αυτή πρέπει να υπάρχει μία εξισορροπημένη σχέση μεταξύ της ακρίβειας και της χρονικής διάρκειας των υπολογισμών, κάτι που δεν επιτυγχάνεται πάντοτε εύκολα. Μία αρκετά ασφαλής και σχεδόν παγιωμένη μέθοδος σχεδίασης είναι η χρήση ενός ή περισσότερων τεχνικά συναφών πλοίων (όμοια πλοία), ως πλοίων αναφοράς. Στοιχεία που ενδεχομένως ενδιαφέρουν το μελετητή μπορούν να προέλθουν από ένα ή περισσότερα όμοια πλοία και να αναχθούν κατάλληλα στη νέα σχεδίαση. Τι συμβαίνει όμως στην περίπτωση όπου υπάρχουν ελλιπή ή καθόλου διαθέσιμα στοιχεία από όμοια πλοία;

Η απάντηση βρίσκεται σε μία μεθοδολογία σχεδίασης η οποία θα βασίζεται περισσότερο σε υπολογιστικές μεθόδους και λιγότερο σε εμπειρικούς κανόνες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ναυπήγηση πλοίων των οποίων η σχεδίαση, η κατασκευή και η λειτουργία διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα συμβατικά μονόαστρα πλοία εκτοπίσματος. Τα πλοία αυτά, η χρήση των οποίων έγκειται κυρίως στην ταχεία μεταφορά επιβατών και οχημάτων με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, αποκαλούνται συχνά πλοία «Νέας Τεχνολογίας». Οι καινοτομίες στη σχεδίαση των πλοίων αυτών έχουν οδηγήσει στη γέννηση και στην εξέλιξη μίας σειράς από διαφορετικούς βασικούς τύπους (π.χ. Catamaran, Small Waterplane Area Twin Hull - SWATH, Air Cushion Vehicle - ACV) αλλά και στην εμφάνιση διαφόρων υβριδικών τύπων σκαφών (π.χ. Surface Effect Ship - SES), τα οποία συνδυάζουν χαρακτηριστικά δύο ή περισσότερων βασικών τύπων.

Εκτός από την έλλειψη στοιχείων, μία επιπλέον δυσκολία που καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής, στη φάση του αρχικού σχεδιασμού πλοίων Νέας Τεχνολογίας, είναι η απαίτηση για υψηλή ακρίβεια υπολογισμών. Δεδομένου του πρωταρχικού στόχου που χαρακτηρίζει όλα τα ταχύπλοα σκάφη, ο οποίος δεν είναι τίποτε άλλο παρά η επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων υπηρεσίας, αλλά και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών σχεδίασης που απορρέουν από αυτόν, επιβάλλεται ο ακριβής προσδιορισμός τόσο των κυρίων διαστάσεων και της μορφής της γάστρας, όσο και των βαρών και των επιμέρους χαρακτηριστικών του πλοίου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η συσσωρευμένη εμπειρία που υπάρχει στη μελέτη και σχεδίαση συμβατικών πλοίων περιορίζεται σημαντικά στην περίπτωση των πλοίων Νέας Τεχνολογίας. Αν αναλογιστεί κανείς ότι το πρώτο ταχύπλοο Επιβατηγό - Οχηματαγωγό (Ε/Γ-Ο/Γ) πλοίο μονής γάστρας κατελκύστηκε το 1993, κατανοεί ότι το πεδίο επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας που αφορά τη σχεδίαση και κατασκευή των πλοίων αυτών, αν και παρουσιάζει σήμερα κάποια ωρίμανση, βρίσκεται σε μία συνεχή πορεία ανάπτυξης και καινοτομίας. Με σκοπό τη θετική συνεισφορά στην εξέλιξη του πεδίου αυτού, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία μελέτης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας, η οποία βασίζεται στη χρήση σύγχρονων τεχνικών σχεδίασης.

Παρουσιάζοντας μία εναλλακτική προσέγγιση για τη μελέτη και σχεδίαση πλοίων, η μεθοδολογία αυτή μπορεί διαχωριστεί σε δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο από αυτά ενσωματώνε-

ται η αυτοματοποιημένη παραγωγή μίας ολοκληρωμένης σχεδίασης με τη χρήση σύγχρονων ναυπηγικών λογισμικών. Πρόκειται ουσιαστικά για την παραμετρική σχεδίαση ενός πλοίου, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή της εξωτερικής και εσωτερικής γεωμετρίας, με βάση ένα σύνολο ελεύθερων μεταβλητών και παραμέτρων, καθώς και τη διεξαγωγή όλων των απαραίτητων υπολογισμών για την αξιολόγησή του. Το δεύτερο μέρος της μεθοδολογίας έγκειται στη διατύπωση και επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης. Αφορά δηλαδή τον ορισμό των ελεύθερων μεταβλητών, των περιορισμών και των κριτηρίων βελτιστοποίησης, την επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου επίλυσης, τη μέθοδο και τα κριτήρια διερεύνησης του συνόλου των πιθανών βέλτιστων λύσεων, από το οποίο θα προκύψει η τελικά βέλτιστη σχεδίαση.

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τη βελτιστοποίηση της μελέτης και σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας. Μέσω ενός κατάλληλου συνόλου σχεδιαστικών παραμέτρων επιτυγχάνεται αφενός η αυτοματοποιημένη παραγωγή εναλλακτικών σχεδιάσεων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και αφετέρου ο ορθολογικός προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης με βάση έναν αριθμό κριτηρίων επιλογής.

Με γνώμονα την ποιότητα των αποτελεσμάτων αλλά και την ταχύτητα των υπολογισμών, η παρούσα μεθοδολογία περιλαμβάνει συνοπτικά:

- την αυτοματοποιημένη παραγωγή της γεωμετρίας της γάστρας, της στεγανής υποδιαίρεσης και των υπερκατασκευών καθώς και των βασικών στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, με βάση ένα σύνολο προκαθορισμένων ελεύθερων μεταβλητών και παραμέτρων σχεδίασης.
- τη διεξαγωγή όλων των απαραίτητων υπολογισμών, όπως η εκτίμηση της ισχύος πρόωσης, ο προσδιορισμός του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και των υπόλοιπων βαρών του άφορτου σκάφους, ο υπολογισμός του ωφέλιμου φορτίου, η μελέτη της ευστάθειας στην άθικτη και βεβλαμμένη κατάσταση, η μελέτη της διαμήκου αντοχής, καθώς και η οικονομική αξιολόγηση της σχεδίασης για δεδομένα σενάρια αγοράς, κατασκευής και λειτουργίας.
- τη διασύνδεση του περιβάλλοντος παραμετρικής σχεδίασης με ένα κατάλληλο περιβάλλον βελτιστοποίησης και λήψης αποφάσεων για τον ορισμό και την επίλυση διαφορετικών μεταξύ τους προβλημάτων σχεδίασης.

EXTENDED ABSTRACT

Quite often during the preliminary ship design stage, the designer in search of the “optimal vessel” for a specified operation scenario is faced with a series of important decisions with crucial impact on the vessel’s performance. It is the nature of the designer’s work that requires many of these decisions to be made during the early stages, based usually on limited, vague or undependable information. In such cases, the designer needs to rely on his experience, human intuition and engineering judgment, occasionally supported by the exploitation of relevant data available from past designs. In such cases, advanced design tools, making use of modern CAD technology to facilitate the elaboration of a vessel’s preliminary design in limited time and with minimal effort, yet at the same time with reasonable detail and accuracy, would be undoubtedly of great assistance to the designer. Such tools, if available, would enable the application, testing and verification of crucial assumptions and decisions regarding the ship’s main technical characteristics on a large number of design alternatives, in order to identify the most suitable design according to a set of selected criteria, to serve as the basis for the subsequent detailed design stages.

Employing the parametric design, or parametric modelling procedure, the design of a certain object, component or system may be based on a set of design variables, in association with the required software tools. These tools are specifically developed to undertake the elaboration of the corresponding design, for each particular set of values of the design parameters defined by the designer. Such a procedure may be relatively easily implemented in the case of simple objects or components. In the case of integrated systems however, such as an entire industrial plant, or in the particular case a large commercial ship, the implementation of a parametric model is no more a simple task, if possible at all, as the level of complexity increases exponentially. In such cases, the design of the parametric model requires particular attention, in order to ensure its integrity, accuracy, robustness and functionality. Such a model should be flexible and generic, so that it can be applicable to as many design alternatives as possible, detailed enough in order to depict all the essential characteristics of the design, and at the same time as simple as possible, to avoid any unnecessary complexities and implications during the development of the corresponding software tools.

The development of an integrated methodology for the preliminary design, evaluation and optimisation of high-speed monohull ROPAX vessels, applying state of the art design software and computational tools is the main objective of the current Thesis, carried out in the Ship Design Laboratory of the National Technical University of Athens. The core of the above methodology consists of a set of software tools, specifically developed for the parametric design and evaluation of the specific types of vessels. The design procedure has been linked with a multicriteria optimisation software, to form an integrated ship-design methodology facilitating the design space exploration in a rational and efficient way. The developed methodology has been applied to the design of a series of vessels of various sizes. Typical results from these studies are presented.

The integrated methodology for the parametric design of high-speed monohull ROPAX vessels has been developed within the well known commercial ship design software NAPA[®], taking advantage of the programming capabilities of the NAPA[®] macro language. The vessel’s hull form and internal layout are generated automatically by a series of NAPA[®] macros, followed by a preliminary structural design. Suitable macros are called to perform the assessment of the technical, operational and economic performance of each design.

The basic tasks of the developed parametric design methodology are:

1. Hull form development
2. Resistance and propulsion estimations
3. Development of internal layout
4. Preliminary structural design
5. Weights estimation
6. Intact and damaged stability calculations
7. Assessment of economic performance

A set of macros has been developed to facilitate the automatic development of the vessel's external surface, based on two parent hulls forms: The first one is derived from the parent hull of the NTUA high-speed, Deep-V, double chine systematic series. The second alternative is a round-bilge hullform, derived from the well known NPL series. Each hullform is derived from the corresponding prototype, according to the user's selection (either double-chine or round bilge), applying a linear transformation based on the specified principal dimensions. For the Deep-V, double chine vessels, estimations are based on the decomposition of total resistance in a frictional and a residual component. The corresponding frictional resistance coefficient is calculated applying the ITTC empirical formula. The residual resistance coefficient as well as the running trim are calculated by a polynomial expression, derived from the regression analysis of experimental measurements. For water-jet propelled vessels, the required propulsion power estimation is based on empirical expressions for the calculation of the overall propulsion efficiency. The resulting propulsion power is increased by a suitable power margin to derive the required propulsion engines maximum continuous rating.

The development of the vessel's internal layout starts with the definition the watertight subdivision bellow the main vehicles deck. The first step consists of the definition of the bulkhead deck, the strength deck, the double bottom and the remaining vehicles decks, according to the particular design characteristics. The double bottom height is accordingly defined to ensure effective protection in the event of racking damage, as defined in Chapter 2, Regulation 2.6 of the HSC Code. In the second step, the size and position of the main engines rooms and the pump room is determined from the installed propulsion power, using suitable empirical expressions, derived from existing vessels. Subsequently, the transverse watertight bulkheads, forward of the engine room are automatically positioned.

The user has limited control on the resulting compartmentation, mainly by overriding the default values of the relevant design parameters. The number of car decks is either defined by the user, or is internally calculated according to the required private cars transport capacity. In the former case, the private cars transport capacity is calculated by the design software, while in the later case it is treated as a design parameter. Alternative layouts with central or side casings may be specified by the user. A number of upper decks are then created to provide the required accommodation and public space areas. Once again, the number of accommodation decks may be either defined by the user, in which case the design software calculates the resulting passengers transport capacity, or may be calculated according to the required number of passengers.

The preliminary 3D structural design is performed by a set of NAPA[®] macros, developed for the calculation of the required plate thickness, along with the section modulus and other cross-sectional characteristics of the attached primary and secondary stiffeners. Calculations are performed applying an IACS member Classification Society. The ship is longitudinally subdivided in a number of sections, between successive transverse bulkheads. The sections are vertically subdivided in sub-sections between successive decks up to the strength deck, above which the superstructures sub-sections are defined. The construction material is

selected by the user. The available options include construction of the entire vessel from high tensile steel or aluminum alloys, or the partial use of HTS grades for the hull, up to a deck defined by the user (either the subdivision deck, or the top of the upper vehicles deck, herein considered as the strength deck), combined with aluminum superstructure.

Following the definition of the geometry of the various parts of the ship structure, the local loading calculations are performed and the maximum allowable stresses for the local strength analysis are determined according to the Class rules. The required thickness for the plates along with the section modulus and other cross-sectional characteristics of the attached stiffeners are subsequently calculated. Based on the above requirements, the selection of structural members is finalized, with an appropriate corrosion thickness allowance. Secondary stiffeners, minimising the combined plate-stiffener weight, are selected from a data base. For the primary stiffeners, builtup cross sections, minimising steel weight, while satisfying all the structural requirements and geometric constraints are evaluated.

Based on the results of the preliminary structural analysis module, a detailed structural arrangement is created within the NAPA® environment. Following a bottom-up procedure, the plate elements with the attached stiffeners are combined to form planar or curved panels. The elementary panels are grouped together to form sub-arrangements corresponding to larger parts of the outer shell, entire decks and bulkheads. The sub-arrangements are then combined to create the structural arrangement of the entire steel basic structure. Based on the definition of the structural arrangement, the attained section modulus amidships is calculated, using standard tools available within the NAPA® Steel module. Compliance with the Class requirements with respect to vertical bending in calm waters and in waves is verified. If the attained section modulus is less than the required, the bottom and strength deck scantlings are accordingly increased and the procedure is repeated.

The vessel's light weight is divided in the following basic weight categories: structural, propulsion, auxiliary, deck machinery and outfitting, electrical, piping, heating and air-conditioning, accommodation and miscellaneous. With the vessel's detailed structural arrangement readily available, the structural weight is obtained by direct calculation. Machinery weight is further divided in subitems (main engines, gear-boxes, shafting, water-jets). The remaining basic weight categories are also further divided in sub-items and relevant expressions have been developed for the estimation of the corresponding weights and weight centres. The results of the above procedure have been compared with available data from a number of existing vessels and appropriate correction coefficients have been derived. Payload is determined, subtracting the light weight and the various DWT items (consumables, provisions, stores etc.) from the vessel's displacement.

Stability calculations are performed for the vessel in intact and damaged condition (both for side damage and bottom racking) to verify compliance with the requirements of the 2000 High-Speed Craft Code. A series of macros has been prepared to control the process flow, while the actual stability analysis is performed using the calculation capabilities provided by the NAPA® software. Calculations are performed for a predetermined range of initial draughts at zero trim and also for specific loading cases, with 100% passengers and variable vehicles loadings both in the departure and arrival condition. The selected vehicles loadings correspond to a. a private cars loading at 100%, 30% and 0% of the vessel's total capacity without trucks and b. for the ships with truck carrying capacity, the specified number of trucks, combined with 100%, 30% and 0% of the remaining private cars capacity.

Building and operating costs are decomposed in major items and sub-items and suitable expressions have been derived for their calculation. Crew synthesis and the corresponding

crew costs are determined according to the Greek statutory regulations. The annual income is calculated for the particular service conditions specified by the user. Based on these calculations, the vessel's economic performance is assessed using appropriate economic indices, such as the Required Freight Rate, or the Net Present Value. These are complex criteria, encompassing in a rational way the building and operating costs as well as the annual revenues. Transport capacity and propulsion power are therefore accounted, via the annual income, the fuel costs and the acquisition cost of the propulsion plant.

The developed parametric design software has been linked to a commercial multi-objective optimisation code, namely modeFRONTIER[®], to form an integrated design and optimization environment. The method of Genetic Algorithms was selected as the most suitable choice for the specific problem, for its inherent capability to deal with multi-objective optimisation problems with mixed continuous-discrete variables and discontinuous and non-convex design spaces. The developed ship design methodology applied for solving a specific optimization problem. In this problem was searching the best combination between the Length, the Breadth, the Draught and the Freeboard of a mid-sized vessel for which the number of Passengers and Private Cars will be maximise stimulatingly with the minimization of the Propulsion Power and the Acquisition Cost. Below is the mathematical definition of the optimization problem.

$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{array}{l} \underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} \{C_A(\mathbf{x}), P_W(\mathbf{x})\} \\ \wedge \\ \underset{\mathbf{x}}{\text{maximize}} \{N_{PASS.}(\mathbf{x}), N_{CARS}(\mathbf{x})\} \end{array} \right\}, \mathbf{x} = [L_{bp}, B_{max}, T_d, F_b]^T, \begin{array}{l} L_{bp} \in [90.0, 110.0], \text{ step} = 0.20m \\ B_{max} \in [16.5, 19.5], \text{ step} = 0.05m \\ T_d \in [2.3, 3.5], \text{ step} = 0.02m \\ F_b \in [2.0, 3.0], \text{ step} = 0.05m \end{array} \\
 \text{subject to} & \left\{ \begin{array}{l} \Delta GM \geq 0.3m \\ (M) - 6.183 \geq 0, \quad L/B - 4.2935 \geq 0 \\ (M) - 0.070288 \cdot (L/B)^2 + 0.477113 \cdot (L/B) - 6.544157 \geq 0 \\ L/B - 7.525 \leq 0, \quad (M) - 8.532 \leq 0 \\ (M) - 0.115364 \cdot (L/B)^2 + 0.195794 \cdot (L/B) + 5.648 \leq 0 \\ F_N - 0.23 \geq 0 \\ (M) - 12.7 \cdot F_N^2 + 34.75 \cdot F_N - 29.05 \leq 0 \end{array} \right. \\
 & \text{where } (M) = L_{WL} / \nabla^{1/3}
 \end{aligned}$$

Due to the conflicting among the optimization criteria, for the determination of the best compromise solution two alternative Multi-Criteria Decision Methods are used for solving two different decision problems. Both the overall problem's set-up and the optimization results are well presented and studied in order to show the importance of using state-of-the-art techniques for solving multi-attribute, multi-objective optimization problems with constraints, in the ship design.

Κεφάλαιο 1:
Εισαγωγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Θεμελιώδες στάδιο της σχεδίασης ενός πλοίου αποτελεί η «προμελέτη» (preliminary design). Στη φάση αυτή, υπολογίζονται όλα εκείνα τα χαρακτηριστικά ενός πλοίου (κύριες διαστάσεις, βάρη, ισχύς πρόωσης, κ.ά.), τα οποία πρέπει να είναι γνωστά προκειμένου να ξεκινήσει η λεπτομερής σχεδίαση. Είναι φανερό ότι στη φάση αυτή πρέπει να υπάρχει μία εξισορροπημένη σχέση μεταξύ της ακρίβειας και της χρονικής διάρκειας των υπολογισμών, κάτι που δεν επιτυγχάνεται πάντοτε εύκολα. Μία αρκετά ασφαλής και σχεδόν παγιωμένη μέθοδος σχεδίασης είναι η χρήση ενός ή περισσότερων τεχνικά συναφών πλοίων (όμοια πλοία), ως πλοίων αναφοράς. Στοιχεία που ενδεχομένως ενδιαφέρουν το μελετητή μπορούν να προέλθουν από ένα ή περισσότερα όμοια πλοία και να αναχθούν κατάλληλα στη νέα σχεδίαση. Τι συμβαίνει όμως στην περίπτωση όπου υπάρχουν ελλιπή ή καθόλου διαθέσιμα στοιχεία από όμοια πλοία;

Η απάντηση βρίσκεται σε μία μεθοδολογία σχεδίασης η οποία θα βασίζεται περισσότερο σε υπολογιστικές μεθόδους και λιγότερο σε εμπειρικούς κανόνες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ναυπήγηση πλοίων των οποίων η σχεδίαση, η κατασκευή και η λειτουργία διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα συμβατικά μονόαστρα πλοία εκτοπίσματος. Τα πλοία αυτά, η χρήση των οποίων έγκειται κυρίως στην ταχεία μεταφορά επιβατών και οχημάτων με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος, αποκαλούνται συχνά πλοία «Νέας Τεχνολογίας». Οι καινοτομίες στη σχεδίαση των πλοίων αυτών έχουν οδηγήσει στη γέννηση και στην εξέλιξη μίας σειράς από διαφορετικούς βασικούς τύπους (π.χ. Catamaran, Small Waterplane Area Twin Hull - SWATH, Air Cushion Vehicle - ACV) αλλά και στην εμφάνιση διαφόρων υβριδικών τύπων σκαφών (π.χ. Surface Effect Ship - SES), τα οποία συνδυάζουν χαρακτηριστικά δύο ή περισσότερων βασικών τύπων.

Εκτός από την έλλειψη στοιχείων, μία επιπλέον δυσκολία που καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής, στη φάση του αρχικού σχεδιασμού πλοίων Νέας Τεχνολογίας, είναι η απαίτηση για υψηλή ακρίβεια υπολογισμών. Δεδομένου του πρωταρχικού στόχου που χαρακτηρίζει όλα τα ταχύπλοα σκάφη, ο οποίος δεν είναι τίποτε άλλο παρά η επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων υπηρεσίας, αλλά και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών σχεδίασης που απορρέουν από αυτόν, επιβάλλεται ο ακριβής προσδιορισμός τόσο των κυρίων διαστάσεων και της μορφής της γάστρας, όσο και των βαρών και των επιμέρους χαρακτηριστικών του πλοίου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η συσσωρευμένη εμπειρία που υπάρχει στη μελέτη και σχεδίαση συμβατικών πλοίων περιορίζεται σημαντικά στην περίπτωση των πλοίων Νέας Τεχνολογίας. Αν αναλογιστεί κανείς ότι το πρώτο ταχύπλοο Επιβατηγό - Οχηματαγωγό (Ε/Γ-Ο/Γ) πλοίο μονής γάστρας κατελκύστηκε το 1993, κατανοεί ότι το πεδίο επιστημονικής και τεχνολογικής έρευνας που αφορά τη σχεδίαση και κατασκευή των πλοίων αυτών, αν και παρουσιάζει σήμερα κάποια ωρίμανση, βρίσκεται σε μία συνεχή πορεία ανάπτυξης και καινοτομίας. Με σκοπό τη θετική συνεισφορά στην εξέλιξη του πεδίου αυτού, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία μελέτης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας, η οποία βασίζεται στη χρήση σύγχρονων τεχνικών σχεδίασης.

Παρουσιάζοντας μία εναλλακτική προσέγγιση για τη μελέτη και σχεδίαση πλοίων, η μεθοδολογία αυτή μπορεί διαχωριστεί σε δύο βασικά μέρη. Στο πρώτο από αυτά ενσωματώνε-

ται η αυτοματοποιημένη παραγωγή μίας ολοκληρωμένης σχεδίασης με τη χρήση σύγχρονων ναυπηγικών λογισμικών. Πρόκειται ουσιαστικά για την παραμετρική σχεδίαση ενός πλοίου, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή της εξωτερικής και εσωτερικής γεωμετρίας, με βάση ένα σύνολο ελεύθερων μεταβλητών και παραμέτρων, καθώς και τη διεξαγωγή όλων των απαραίτητων υπολογισμών για την αξιολόγησή του. Το δεύτερο μέρος της μεθοδολογίας έγκειται στη διατύπωση και επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης. Αφορά δηλαδή τον ορισμό των ελεύθερων μεταβλητών, των περιορισμών και των κριτηρίων βελτιστοποίησης, την επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου επίλυσης, τη μέθοδο και τα κριτήρια διερεύνησης του συνόλου των πιθανών βέλτιστων λύσεων, από το οποίο θα προκύψει η τελικά βέλτιστη σχεδίαση.

1.1. Βασικός στόχος και περίγραμμα

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, στόχος της παρούσας διατριβής είναι η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τη βελτιστοποίηση της μελέτης και σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας. Μέσω ενός κατάλληλου συνόλου σχεδιαστικών παραμέτρων επιτυγχάνεται αφενός η αυτοματοποιημένη παραγωγή εναλλακτικών σχεδιάσεων σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και αφετέρου ο ορθολογικός προσδιορισμός της βέλτιστης λύσης με βάση έναν αριθμό κριτηρίων επιλογής.

Με γνώμονα την ποιότητα των αποτελεσμάτων αλλά και την ταχύτητα των υπολογισμών, η παρούσα μεθοδολογία περιλαμβάνει συνοπτικά:

- την αυτοματοποιημένη παραγωγή της γεωμετρίας της γάστρας, της στεγανής υποδιαίρεσης και των υπερκατασκευών καθώς και των βασικών στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, με βάση ένα σύνολο προκαθορισμένων ελεύθερων μεταβλητών και παραμέτρων σχεδίασης.
- τη διεξαγωγή όλων των απαραίτητων υπολογισμών, όπως η εκτίμηση της ισχύος πρόωσης, ο προσδιορισμός του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και των υπόλοιπων βαρών του άφορτου σκάφους, ο υπολογισμός του ωφέλιμου φορτίου, η μελέτη της ευστάθειας στην άθικτη και βεβλαμμένη κατάσταση, η μελέτη της διαμήκουσ αντοχής, καθώς και η οικονομική αξιολόγηση της σχεδίασης για δεδομένα σενάρια αγοράς, κατασκευής και λειτουργίας.
- τη διασύνδεση του περιβάλλοντος παραμετρικής σχεδίασης με ένα κατάλληλο περιβάλλον βελτιστοποίησης και λήψης αποφάσεων για τον ορισμό και την επίλυση διαφορετικών μεταξύ τους προβλημάτων σχεδίασης.

1.2. Στοιχεία πρωτοτυπίας

Λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο της τεχνογνωσίας που σχετίζεται με τη θεματολογία της παρούσας διατριβής, όπως αποτυπώνεται στη διεθνή βιβλιογραφία, ως στοιχεία πρωτοτυπίας αναφέρονται τα παρακάτω:

- Το πρόβλημα της μελέτης και σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης - λήψης απόφασης, αποφεύγοντας την ελικοειδή πορεία σχεδίασης η οποία χαρακτηρίζει τις παραδοσιακές μεθοδολογίες μελέτης πλοίου.

- Η παραμετρική σχεδίαση περιλαμβάνει όλα τα στάδια της προμελέτης ενός πλοίου και δεν αφορά ένα μεμονωμένο πρόβλημα σχεδίασης, όπως είναι για παράδειγμα η μορφοποίηση μέρους ή ολόκληρης της επιφάνειας της γάστρας. Επιπλέον, για κάθε παραγόμενη σχεδίαση υπάρχει στη διάθεση του μελετητή μία πληθώρα πληροφοριών, συμπεριλαμβανομένου ενός πλήρους γεωμετρικού μοντέλου, για περαιτέρω λεπτομερή μελέτη και σχεδίαση. Με αυτήν την έννοια η παρούσα εργασία προχωρά λίγο παραπέρα από τα καθιερωμένα όρια της προμελέτης και εισέρχεται στην περιοχή του λεπτομερούς σχεδιασμού.
- Η παραμετροποίηση δε βασίστηκε στη διατύπωση ενός συγκεκριμένου προβλήματος βελτιστοποίησης και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση διαφορετικών μεταξύ τους προβλημάτων σχεδίασης. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να αφορούν την επιλογή των κυρίων διαστάσεων, την υδροδυναμική απόδοση της γάστρας, τη μεταφορική ικανότητα, την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, το κόστος λειτουργίας, τα βάρη του πλοίου, κ.ά.
- Η γεωμετρία των κύριων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής παράγεται αυτόματα με βάση ένα σύνολο παραμέτρων και κανονισμούς νηογνομόνων. Ο μελετητής έχει στη διάθεσή του ένα ολοκληρωμένο παραμετρικό μοντέλο της βασικής μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, από το οποίο απορρέουν άμεσα μία σειρά από πληροφορίες, όπως το βάρος και το συνολικό τρέχον μήκος ανά τύπο ενισχυτικού, το βάρος και το εμβαδόν ελασμάτων ιδίου πάχους καθώς και μία σειρά από κατασκευαστικά σχέδια, όπως το Ανάπτυγμα του Περιβλήματος της Γάστρας (Shell Expansion), το σχέδιο Μέσης Τομής (Midship Section), κ.ά. Ο υπολογισμός των βαρών και κέντρων βαρών βασίζεται αποκλειστικά στη γεωμετρία του πλοίου.
- Για τον προσδιορισμό των επιμέρους βαρών του άφορτου σκάφους, εκτός του βάρους της μεταλλικής κατασκευής, όπως και για τον καθορισμό της στεγανής υποδιαίρεσης και της διάταξης των υπερκατασκευών, συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν κατάλληλα στοιχεία από κατασκευαστές και υπάρχουσες σχεδιάσεις. Με βάση τα στοιχεία αυτά αναπτύχθηκαν πρωτότυποι εμπειρικοί κανόνες, ορισμένοι από τους οποίους, όπως αυτοί που αφορούν τα βάρη εξαρτισμού και ενδιαίτησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, στη μελέτη και σχεδίαση και άλλων τύπων πλοίων, όπως Ε/Γ-Ο/Γ εκτοπίσματος, Catamarans, κ.ά.

1.3. Περιεχόμενα

Η παρούσα διατριβή απαρτίζεται από πέντε κύρια κεφάλαια και ένα παράρτημα. Το παρόν πρώτο κεφάλαιο αποτελεί εισαγωγή στη θεματολογία της διατριβής. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μία ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας και παρουσιάζονται επιλεγμένες εργασίες από το ευρύ πεδίο εφαρμογών της μελέτης και σχεδίασης πλοίων. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρώτη από τις δύο βασικές φάσεις της προτεινόμενης μεθοδολογίας προμελέτης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας, η οποία αφορά την υλοποίηση του παραμετρικού μοντέλου και τη διεξαγωγή όλων των απαραίτητων υπολογισμών στη φάση της προμελέτης. Το τέταρτο κεφάλαιο περιέχει στοιχεία από τη θεωρία βελτιστοποίησης και τους γενετικούς αλγόριθμους και περιγράφει τον τρόπο ανάπτυξης εφαρμογών βελτιστοποίησης στη μελέτη και σχεδίαση πλοίων. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναπτύσσεται μία

ολοκληρωμένη εφαρμογή σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας, η οποία βασίζεται στη νέα μεθοδολογία προμελέτης. Μέσα από τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής διακρίνεται ο σύγχρονος τρόπος σχεδίασης, ο οποίος διαφέρει σημαντικά από τις παραδοσιακές μεθόδους μελέτης πλοίου. Εκτός από την εφαρμογή αυτή, υπάρχει επίσης διαθέσιμη στη διεθνή βιβλιογραφία μία σειρά από εργασίες οι οποίες βασιστήκαν στο περιεχόμενο της παρούσας διατριβής και δημοσιεύτηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησής της. Οι αναφορές των εργασιών αυτών, μαζί με ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία παρατίθενται μετά το τέλος του πέμπτου κεφαλαίου. Το παράρτημα είναι συμπληρωματικό ως προς το κυρίως κείμενο και αφορά αναλυτικούς υπολογισμούς βαρών.

1.4. Μελέτη Πλοίου

Από τη στιγμή που λαμβάνεται από τον πλοιοκτήτη η απόφαση για την απόκτηση ενός νεότευκτου πλοίου συγκεκριμένων απαιτήσεων έως την έναρξη της κατασκευής του απαιτείται η ολοκλήρωση μίας σειράς μελετών, υπολογισμών και σχεδίων. Αρχικά, προσδιορίζονται οι κύριες διαστάσεις και επιλέγεται η μορφή της γάστρας. Ακολουθούν ο προκαταρκτικός υπολογισμός της ισχύος πρόωσης και των βαρών του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου του ωφέλιμου φορτίου (payload). Επόμενα βήματα αποτελούν ο σχεδιασμός της διάταξης των χώρων εντός του περιβλήματος της γάστρας, η μελέτη της ευστάθειας και της αντοχής, καθώς και η αρχική εκτίμηση του κόστους ναυπήγησης. Αφού διαπιστωθεί η εφικτότητα της κατασκευής, με βάση τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, οι παραπάνω διαδικασίες επαναλαμβάνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, ώστε να προκύψουν με τη μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια όλες οι προδιαγραφές κατασκευής και λειτουργίας του πλοίου. Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν μεταξύ άλλων, τα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής, του μηχανολογικού και ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, τις καταστάσεις φόρτωσης, τη συμμόρφωση προς εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς, τις απαιτήσεις του νηογνώμονα, κ.ά..

Τα παραπάνω στάδια της σχεδίασης-κατασκευής ενός πλοίου αποτελούν τη «Μελέτη Πλοίου», η οποία γενικά μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερις βασικές φάσεις [Evans, 1959]:

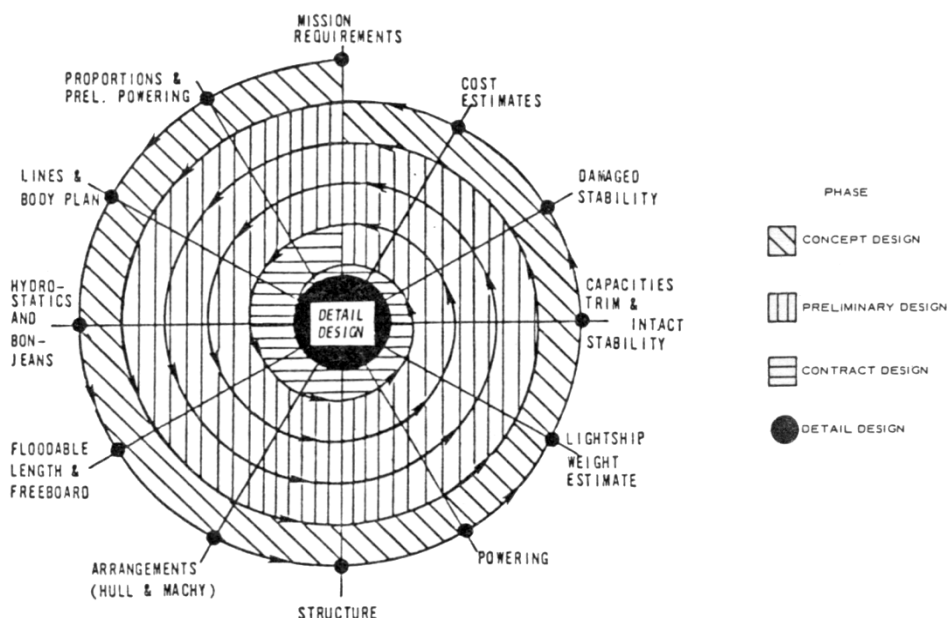
- I. Μελέτη Εφικτότητας ή Αρχικού Σχεδιασμού (Concept Design)
- II. Προμελέτη (Preliminary Design)
- III. Συμβατική ή Μελέτη Προδιαγραφών Συμβολαίου (Contract Design)
- IV. Μελέτη Λεπτομερούς Σχεδιασμού (Detailed Design)

Οι δύο πρώτες φάσεις της μελέτης ενός πλοίου είναι γνωστές και ως Βασική Μελέτη (Basic Design), αλλά συχνά συγχωνεύονται στον γενικότερο ορισμό της Προμελέτης Πλοίου.

Ο Παπανικολάου, ορίζει την προμελέτη πλοίου ως *μία τεχνικο-οικονομική πραγματεία – μελέτη του αντικειμένου «πλοίο» σαν μέρος του ευρύτερου συστήματος των μεταφορών και της παροχής υπηρεσιών, η οποία περιλαμβάνει την εκλογή των κυρίων διαστάσεων του πλοίου, τον αρχικό προσδιορισμό του σχήματος της γάστρας, του τύπου και της ισχύος της προωστήριας εγκατάστασης. Ακόμα, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της στεγανής υποδιαίρεσης και της διάταξης των δεξαμενών του πλοίου, της γενικής διάταξης των χώρων άνωθεν του κυρίου καταστρώματος, των κύριων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής, τον υπολογισμό του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και άλλων ομάδων βαρών, τον έλεγχο*

της ευστάθειας και διαγωγής κ.ά.. Τα παραπάνω στοιχεία καθορίζονται από τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, τις προδιαγραφές κανονισμών, οι οποίοι απορρέουν από την Εθνική Νομοθεσία, από Διεθνείς Συμβάσεις και Νηογνώμονες, καθώς και από τη σύγχρονη αντίληψη της ναυπηγικής επιστήμης [Παπανικολάου, 1994].

Στη φάση της προμελέτης επιχειρείται ο συγκερασμός των διαφόρων απαιτήσεων και η εύρεση της βέλτιστης λύσης με κριτήρια συνήθως οικονομικά. Οι βασικές δυσκολίες που αντιμετωπίζει ο μελετητής σε αυτή τη φάση της σχεδίασης ενός πλοίου, προέρχονται από την περιπλοκή των διάφορων τεχνικο-οικονομικών απαιτήσεων, οι οποίες κατά μεγάλο μέρος είναι αντικρουόμενες. Όπως γίνεται κατανοητό, τα μεγέθη που προσδιορίζονται κατά την προμελέτη ενός πλοίου, όπως οι κύριες διαστάσεις, η μορφή της γάστρας, η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης, κ.ά., έχουν σημαντική επίδραση στην τελική σχεδίαση. Πιθανές αστοχίες ή λάθος εκτιμήσεις στη φάση αυτή μπορεί να επιβαρύνουν σημαντικά τόσο το χρόνο όσο και το κόστος κατασκευής. Επιπλέον, το φυσικό περιβάλλον μέσα στο οποίο λειτουργεί το πλοίο είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο με πολλές παραμέτρους αβεβαιότητας (π.χ. κατάσταση θάλασσας, ταχύτητα ανέμου, κ.ά.). Το φυσικό περιβάλλον μαζί με το πλοίο αποτελεί ένα δυναμικό σύστημα μέσα στο οποίο το δεύτερο καλείται να αντεπεξέλθει με επιτυχία, όχι μόνο σε ό,τι αφορά την αντοχή της μεταλλικής του κατασκευής, αλλά και την ευστάθεια και ασφάλεια, ακόμα και σε καταστάσεις που έχει υποστεί κάποιο ρήγμα ή βλάβη. Εάν κάποιος προσθέσει στο σύστημα περιβάλλον – πλοίο και την αγορά μέσα στην οποία αυτό καλείται να λειτουργήσει, τότε το πρόβλημα της μελέτης και σχεδίασης γίνεται ακόμα πιο περίπλοκο. Γενικά, η μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου ξεφεύγουν από τα πλαίσια της αυστηρής τεχνολογίας και επιστήμης και σε πολλά σημεία της διαδικασίας τους πλησιάζουν τις θεωρούμενες «Καλές Τέχνες» [Παπανικολάου, 1994].

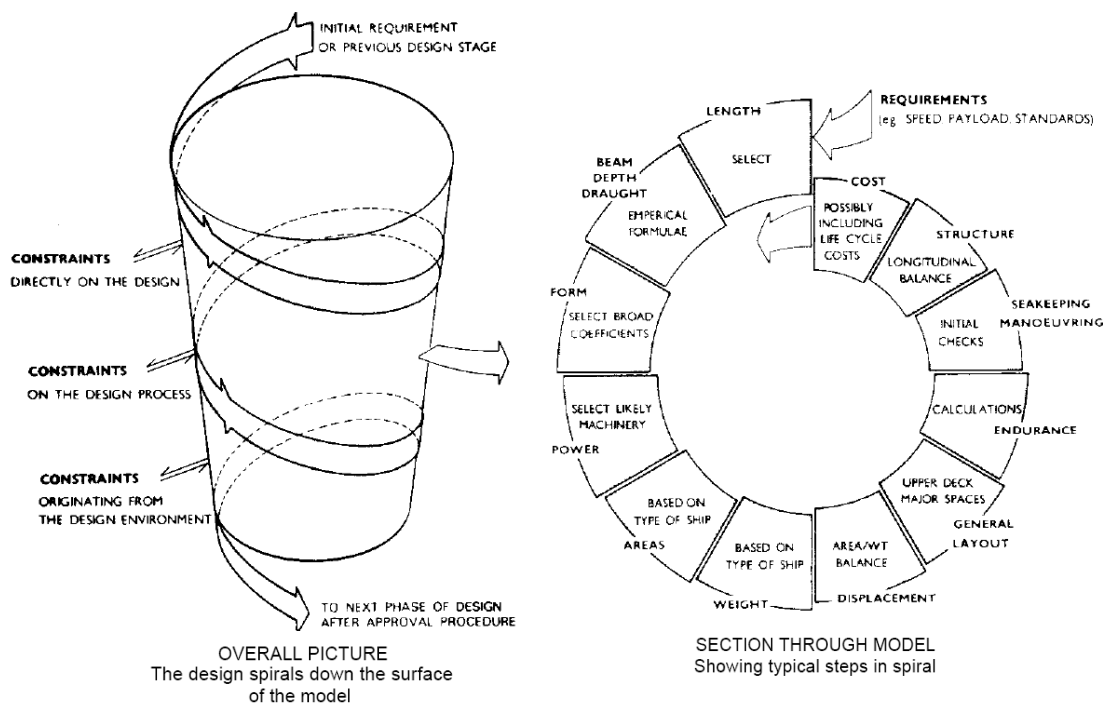


Σχήμα 1.1: Ελικοειδής Καμπύλη Μελέτης κατά J.H. Evans [Παπανικολάου, 1994]

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν παρουσιαστεί αρκετά μοντέλα που περιγράφουν τα διάφορα στάδια της Μελέτης Πλοίου. Το πιο γνωστό και εφαρμοζόμενο ακόμα και σήμερα είναι το μοντέλο κατά Evans [Evans, 1959], όπου οι διάφορες φάσεις της μελέτης περιγράφονται

παραστατικά μέσω της Ελικοειδούς Καμπύλης Μελέτης (Σχήμα 1.1). Η περιστροφική αυτή καμπύλη δείχνει αφενός τη διαδοχική διέλευση από τα διάφορα στάδια της μελέτης και αφετέρου τη βαθμιαία προσέγγιση του τελικού στόχου. Βασικό μειονέκτημα της θεώρησης αυτής είναι το γεγονός ότι τόσο η διάρκεια της μελέτης όσο και η τελική σχεδίαση, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το σημείο εκκίνησης. Όσο πλησιέστερα βρίσκονται οι αρχικές επιλογές (π.χ. κύριες διαστάσεις) με τα αντίστοιχα μεγέθη της τελικής σχεδίασης τόσο μειώνεται ο αριθμός των σπειρών της Ελικοειδούς Καμπύλης Μελέτης. Από την άλλη, ενώ εξασφαλίζεται σε μεγάλο βαθμό ότι το τελικό πλοίο θα είναι τεχνικά σωστό, δεν υπάρχει η βεβαιότητα ότι θα αποτελεί και την καλύτερη δυνατή επιλογή από τη σκοπιά της οικονομικής εκμετάλλευσης.

Αρκετές παρεμβάσεις έχουν γίνει στην Ελικοειδή Καμπύλη Μελέτης στο πέρασμα των χρόνων δημιουργώντας νέα μοντέλα μελέτης με τη βασική όμως δομή να παραμένει αμετάβλητη. Ο Buxton [Buxton, 1972], εισήγαγε οικονομικά μεγέθη στη σπείρα, ενώ ο χρόνος εισήχθη ως μία τρίτη διάσταση από τον Andrews [Andrews, 1981], ο οποίος δημιούργησε μία τρισδιάστατη σπειροειδή καμπύλη τύπου «tire-boucheon» (Σχήμα 1.2), για να αναπαραστήσει σταθερές που προκύπτουν από τη διαδικασία σχεδίασης και σταθερές που προέρχονται από άλλους παράγοντες και υπεισέρχονται σε αυτή, στα διάφορα στάδια. Το μοντέλο που προκύπτει τελικά εξακολουθεί να είναι σειριακό και επαναληπτικό.

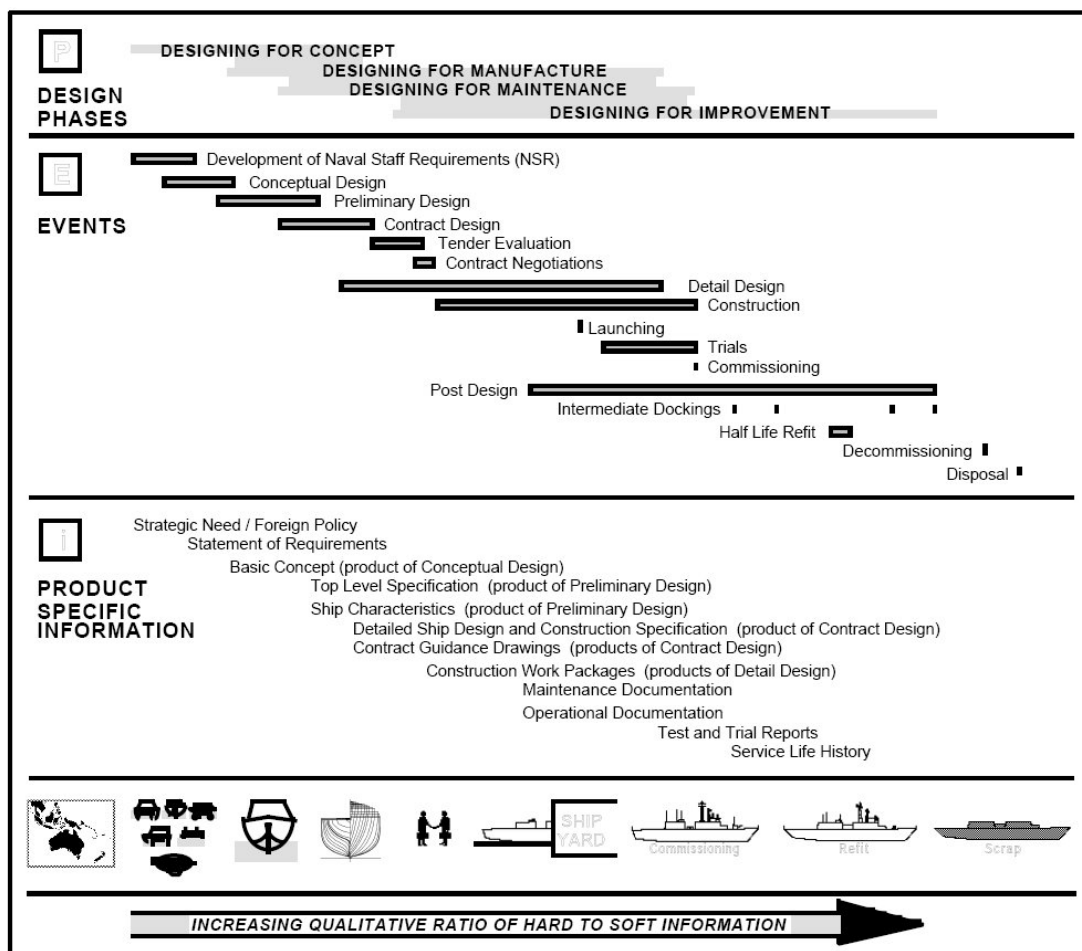


Σχήμα 1.2: Το μοντέλο Μελέτης Πλοίου κατά Andrews [Andrews, 1998]

Οι Mistree et al., αν και αναγνωρίζουν το μοντέλο της Ελικοειδούς Καμπύλης Μελέτης ως θεμελιώδες, χαρακτηρίζουν τη διαδικασία που προκύπτει από αυτό ως επίπονη και δαπανηρή, ενώ σημειώνουν ότι μέσω αυτής είναι δύσκολο να ενσωματωθεί ο κύκλος ζωής και οι ιδιαιτερότητες κάθε σχεδίασης, [Mistree et al., 1990]. Έτσι, περιγράφουν μια διαφορετική θεώρηση της διαδικασίας μελέτης πλοίου, βασιζόμενη σε ένα σύστημα αποφάσεων (Decision-Based Design), η οποία εκτείνεται από την απόφαση της ναυπήγησης έως και την απόσυρση του πλοίου, με σκοπό να βελτιώσουν την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότη-

τα των σχεδιαστών και των διαδικασιών που χρησιμοποιούν (Σχήμα 1.3). Μερικά βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτής της προσέγγισης είναι :

- Ο σχεδιαστής είναι ο κύριος ιθύνων.
- Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει ένα συνδυασμό μερικών διαδοχικών και μερικών ταυτόχρονων αποφάσεων.
- Μία απόφαση βασίζεται σε πληροφορίες που προέρχονται από διαφορετικές πηγές αλλά και σε περιορισμούς. Σε πολλές περιπτώσεις, μερικές ή και όλες οι πληροφορίες για τη λήψη μιας απόφασης μπορεί να μην είναι διαθέσιμες.
- Η λήψη αποφάσεων είναι ιεραρχική και η αλληλεπίδραση μεταξύ των αποφάσεων είναι καθοριστική.
- Η χρήση της νέας τεχνολογίας σε όλες τις φάσεις της μελέτης πλοίου αυξάνει την παραγωγικότητα.



Σχήμα 1.3: Εφαρμογή του μοντέλου Μελέτης Πλοίου κατά Mistree et al. σε μία φρεγάτα [Mistree et al., 1990]

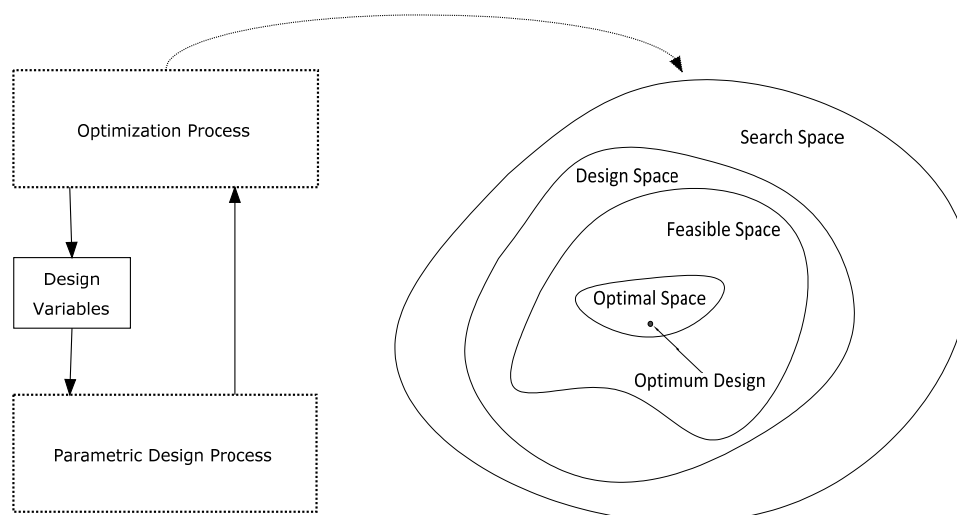
Μία διαφορετική θεώρηση στη σχεδίαση βιομηχανικών προϊόντων αποτελεί ο Παράλληλος ή Σύγχρονος Σχεδιασμός (Concurrent Engineering Design) [Winner et al., 1988]. Σύμφωνα με αυτή, τα διάφορα στάδια της σχεδίασης και κατασκευής ενός σύνθετου προϊόντος αναπτύσσονται παράλληλα μέσω μίας ολοκληρωμένης διαδικασίας. Η προσέγγιση αυτή καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος αλλά και όλων των υποπροϊόντων από τα οποία αποτελείται, ξεκινώντας από την αρχική ιδέα έως την απόσυρση. Η θεώρηση αυτή αν

και εφαρμόζεται εν μέρει στη Ναυπηγική Βιομηχανία, κυρίως σε μέρη του εξοπλισμού, είναι δύσκολο να ενσωματώσει το πλοίο σαν ολότητα. Η πολυπλοκότητα της κατασκευής, τα τμήματα της οποίας σχεδιάζονται, ελέγχονται και κατασκευάζονται από ένα μεγάλο πλήθος μελετητών και τεχνικών διαφόρων ειδικοτήτων σε διαφορετικά ενδεχομένως σημεία του πλανήτη, καθώς και οι πολλαπλές αλλαγές που υφίσταται ένα πλοίο στη διάρκεια της οικονομικής του ζωής (μετασκευές, ιδιοκτησία, σημαία, νηογνώμονας, κλπ.), συνιστούν μεγάλη αβεβαιότητα στην εφαρμογή μίας συγκεκριμένης ολοκληρωμένης διαδικασίας Σύγχρονου Σχεδιασμού.

Σήμερα, περισσότερο από ποτέ, εκτός από την επίτευξη μίας πολύ καλής σχεδίασης με βάση τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, το ίδιο σημαντική είναι και η ταχύτητα υλοποίησής της. Ο χρόνος είναι μία βασική παράμετρος που αφορά όλες τις φάσεις της μελέτης και της κατασκευής ενός πλοίου. Αρκετά συχνά στη φάση της προμελέτης απαιτείται να βρεθεί η χρυσή τομή μεταξύ της χρονικής διάρκειας και της ακρίβειας των υπολογισμών. Πολλές φορές ο πλοιοκτήτης ενδιαφέρεται περισσότερο για μία άμεση απάντηση, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει διάφορες εναλλακτικές σχεδιάσεις, παρά για τη μεγάλη ακρίβεια ορισμένων υπολογισμών. Τις τελευταίες δεκαετίες η τεχνολογική εξέλιξη δημιούργησε νέα δεδομένα αλλάζοντας την αντίληψη για τη διαδικασία σχεδίασης. Ο υπολογιστής χρησιμοποιείται πια όχι μόνο σαν υπολογιστική μηχανή, αλλά και σαν μέσο το οποίο βοηθάει το μελετητή - μηχανικό να διερευνήσει, να λάβει αποφάσεις και να αποτυπώσει στοιχεία καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης και σχεδίασης, της κατασκευής αλλά και της οικονομικής ζωής ενός πλοίου.

Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται στην Προμελέτη ή αλλιώς Βασική Σχεδίαση Πλοίου (φάσεις I και II της Μελέτης Πλοίου). Με στόχο τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό μεταξύ της ακρίβειας και της ταχύτητας, παρουσιάζεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία η οποία βασίζεται στη χρήση σύγχρονων σχεδιαστικών τεχνικών. Εδώ, η Προμελέτη ενός πλοίου αντιμετωπίζεται ως ένα πρόβλημα πολυπαραμετρικής – πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Η λύση ενός τέτοιου προβλήματος έγκειται στην αναζήτηση του πλοίου εκείνου για το οποίο βελτιστοποιούνται μία σειρά από κριτήρια, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται κάποιοι περιορισμοί. Η παραγωγή των διαφορετικών μεταξύ τους λύσεων πραγματοποιείται μέσω μιας αυτοματοποιημένης μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης πολλαπλών ελεύθερων μεταβλητών.

Το Σχήμα 1.4 απεικονίζει τη θεώρηση της Προμελέτης πλοίου ως πρόβλημα βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με αυτό, οι τιμές των ελεύθερων μεταβλητών κάθε σχεδίασης καθορίζονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης καθώς αυτός αναζητά με συστηματικό τρόπο λύσεις μέσα σε ένα ευρύ πεπερασμένο σύνολο (Search Space). Για κάθε συνδυασμό ελεύθερων μεταβλητών παράγεται αυτόματα η αντίστοιχη σχεδίαση (Parametric Design Process). Τελικά παράγονται N σχεδιάσεις που απαρτίζουν το σύνολο σχεδιάσεων (Design Space), το οποίο είναι υποσύνολο του χώρου αναζήτησης. Από αυτές μόνο N-K ικανοποιούν όλους τους περιορισμούς και ανήκουν στο σύνολο των υλοποιήσιμων ή αλλιώς αποδεκτών σχεδιάσεων (Feasible Space). Οι λύσεις εκείνες που βελτιστοποιούν τα κριτήρια απαρτίζουν το σύνολο των υποψήφιων βέλτιστων λύσεων (Optimal Space) και μόνο μία από αυτές επιλέγεται τελικά ως βέλτιστη (Optimum Design) με βάση μία σειρά από κριτήρια επιλογής.



Σχήμα 1.4: Μελέτη και σχεδίαση πλοίου μέσω πολυπαραμετρικής - πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

1.5. Παραμετρική Σχεδίαση

Όταν σχεδιάζεται ένα βιομηχανικό προϊόν, ο μηχανικός καλείται να παράγει, να μελετήσει και να αξιολογήσει διάφορες εναλλακτικές λύσεις. Η χρήση των υπολογιστών και οι εκτεταμένες δυνατότητες που παρέχονται μέσω των λογισμικών γεωμετρικής αναπαράστασης (συστήματα CAD - Computer Aided Design systems) αποτελούν σήμερα σημαντική πηγή βοήθειας στον τομέα αυτό. Η γεωμετρική αναπαράσταση ενός προϊόντος μέσω ενός συστήματος CAD, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρόπο ώστε, με βάση ένα σύνολο ελεύθερων μεταβλητών, να επιτρέπεται η αυτοματοποιημένη υλοποίηση διαφορετικών μεταξύ τους σχεδιάσεων. Γενικά, ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης εξαρτάται τόσο από τη γεωμετρική πολυπλοκότητα του προϊόντος όσο και από το βαθμό πιστότητας της γεωμετρικής απεικόνισης που επιθυμείται ή επιβάλλεται να υπάρχει. Σημαντικά στοιχεία αξιολόγησης της παραμετρικής γεωμετρικής απεικόνισης ενός προϊόντος αποτελούν τόσο η ποιότητα των στοιχείων που την αποτελούν, όσο και η ταχύτητα υλοποίησής της.

Εκτός από τη γεωμετρική αναπαράσταση ενός προϊόντος, η παραμετρική σχεδίαση αφορά επίσης τη διεξαγωγή υπολογισμών οι οποίοι είναι απαραίτητοι για την αξιολόγησή του. Σε ό,τι αφορά τη μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου, ο μελετητής έχει σήμερα στη διάθεσή του μία σειρά από λογισμικά πακέτα (CAD, CASD, CFD, CAE, κ.ά.) τα οποία μπορεί να χρησιμοποιήσει, στα πλαίσια ανάπτυξης μιας μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, προκειμένου να προβεί στη διεξαγωγή ναυπηγικών υπολογισμών, όπως η εκτίμηση της ισχύος πρόωσης, ο προσδιορισμός των επιμέρους βαρών, η μελέτη της ευστάθειας, κ.ά. Γενικά, η δυναμική μιας παραμετρικής σχεδίασης έγκειται στο γεγονός ότι, καθώς «χτίζεται» το γεωμετρικό μοντέλο και γίνεται γνωστός ένας αριθμός από χαρακτηριστικά του πλοίου (π.χ. αντίσταση - ισχύς κυρίων μηχανών) είναι δυνατή η περαιτέρω ανάπτυξη της γεωμετρικής αναπαράστασης (π.χ. μήκος μηχανοστασίου - στεγανή υποδιαίρεση) και η διεξαγωγή νέων υπολογισμών.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ως παραμετρική σχεδίαση νοείται η διαδικασία εκείνη κατά την οποία ολοκληρώνονται τόσο η αυτοματοποιημένη παραγωγή της γεωμετρίας όσο και η εκτέλεση των υπολογισμών που αφορούν την αξιολόγηση της εκάστοτε σχεδίασης.

Σε ό,τι αφορά την προμελέτη ενός πλοίου, η παραμετρική σχεδίαση έχει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών με πιο συνηθισμένο τη γεωμετρική αναπαράσταση της εξωτερικής επιφάνειας της γάστρας, προκειμένου στη συνέχεια να υπολογιστεί η αντίσταση ή άλλα στοιχεία υδροδυναμικής συμπεριφοράς. Εάν ο μελετητής θελήσει να αναπαραστήσει παραμετρικά τη λεπτομερή γεωμετρική αναπαράσταση ενός πλοίου, η οποία θα περιλαμβάνει για παράδειγμα εκτός από την επιφάνεια της γάστρας, την εσωτερική υποδιαίρεση, τις υπερκατασκευές, στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής, παρελκόμενα ή στοιχεία του εξοπλισμού, έρχεται αντιμέτωπος με μία σειρά από προβληματισμούς:

- Πόσο πιστή πρέπει να είναι η γεωμετρική αναπαράσταση σε σχέση με το πραγματικό πλοίο; Με άλλα λόγια, ποιά είναι τα εκείνα τα γεωμετρικά στοιχεία του πλοίου που πρέπει να αναπαραχθούν;
- Ποιές και πόσες πρέπει να είναι οι ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης;
- Πως θα επιτευχθεί η ορθή γεωμετρική αναπαράσταση εντός ενός προκαθορισμένου εύρους τιμών των ελεύθερων μεταβλητών;
- Ποιά χαρακτηριστικά της σχεδίασης πρέπει να αξιολογηθούν και με ποιο τρόπο θα γίνουν γνωστά;
- Ποιά «εργαλεία» θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της παραμετρικής σχεδίασης;

Ο πρώτος προβληματισμός μπορεί να βρει λύση μέσω της συστηματικής μελέτης και επεξεργασίας γενικών διατάξεων ιδίου τύπου πλοίων (π.χ. Bulk Carriers, Ε/Γ-ΟΓ, κλπ.). Ο μελετητής θα πρέπει να αφαιρέσει χαρακτηριστικά τα οποία είναι πολύ εξειδικευμένα και αφορούν ενδεχομένως κάποιο συγκεκριμένο πλοίο ή δεν επηρεάζουν σημαντικά τους υπολογισμούς που θα πραγματοποιηθούν περαιτέρω και βασίζονται στη γεωμετρική αναπαράσταση. Χωρίς να αλλοιωθούν τα γενικά χαρακτηριστικά του πλοίου, τα οποία είναι άμεσα συνδεδεμένα με τον τύπο του, το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί ως βάση για την παραμετρική σχεδίαση θα πρέπει γενικά να είναι απλουστευμένο, ρεαλιστικό και να εξυπηρετεί το σκοπό της εκάστοτε μελέτης.

Αφού οριστεί το βασικό γεωμετρικό μοντέλο, θα πρέπει να καθοριστούν οι ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης ώστε να επιτυγχάνεται, αφενός μεγάλη γενίκευση και ευελιξία και αφετέρου να δίνεται η δυνατότητα της μελέτης μίας σειράς από διαφορετικά μεταξύ τους προβλήματα. Έτσι, εάν για παράδειγμα η απόφαση ότι η στεγανή υποδιαίρεση του γεωμετρικού μοντέλου ενός Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου θα αποτελείται από εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές, είναι μέρος του πρώτου προβληματισμού, ο τρόπος με τον οποίο θα ορίζεται η θέση και η διάταξή τους, αποτελεί μέρος του δεύτερου. Γενικά, ο μελετητής, κυρίως σε πολύπλοκα προβλήματα παραμετροποίησης πρέπει να περιορίζει στο μέγιστο δυνατό βαθμό τον αριθμό των μεταβλητών σχεδίασης, κάνοντας ενδεχομένως ορισμένες παραδοχές.

Ο τρίτος στη σειρά προβληματισμός αφορά τα όρια διακύμανσης της παραμετροποίησης και είναι άμεσα συνδεδεμένος με τα προηγούμενα. Αντικατοπτρίζει το πρόβλημα που αντιμετωπίζει ο μελετητής ως προς ποια, πόσα και με ποιον τρόπο θα πρέπει να ορίσει τα διάφορα γεωμετρικά στοιχεία (καμπύλες, επιφάνειες και όγκους), προκειμένου να επιτυγχάνεται η ορθή παραγωγή της γεωμετρίας, εντός ενός επιθυμητού εύρους τιμών των παραμέτρων σχεδίασης. Για παράδειγμα, ένα σύνολο καμπυλών θα πρέπει να είναι ικανό να παράγει μία ρεαλιστική επιφάνεια γάστρας, τόσο για ένα πλοίο 100 μέτρων όσο και για ένα

πλοίο 70 ή 130 μέτρων μεταβαλλόμενων, πέραν του μήκους, και των υπόλοιπων ελεύθερων μεταβλητών που καθορίζουν τη γεωμετρία της.

Ο τρόπος με τον οποίον θα γίνουν γνωστές όλες εκείνες οι πληροφορίες που χρειάζεται ο μελετητής προκειμένου να αξιολογήσει μία σχεδίαση ή να προχωρήσει περαιτέρω σε μία πιο λεπτομερή μελέτη, αποτελεί μέρος του τέταρτου προβληματισμού. Πολλές φορές, το πλήθος και η ακρίβεια των υπολογισμών εξαρτώνται από τις δυνατότητες των εμπορικών ή μη λογισμικών, αλλά και από την εξέλιξη της τεχνολογίας. Από την άλλη, πολύ συχνά το είδος, η ακρίβεια αλλά και η ταχύτητα των υπολογισμών καθορίζουν τα «εργαλεία» εκείνα τα οποία πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επιτυχή υλοποίηση μιας παραμετρικής σχεδίασης.

Σε ό,τι αφορά την αξιολόγηση μίας διαδικασίας παραμετρικής σχεδίασης σημειώνεται ότι αυτή θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτρέπεται η εφαρμογή πιθανών μελλοντικών αλλαγών ή επεκτάσεων χωρίς αυξημένο κόστος. Για παράδειγμα, η προσθήκη μίας επιπλέον παραμέτρου ή η αλλαγή της στεγανής υποδιαίρεσης στο βασικό γεωμετρικό μοντέλο ή ο τρόπος παραγωγής της επιφάνειας της γάστρας, θα πρέπει να μπορούν να ενσωματωθούν άμεσα σε μία υπάρχουσα μεθοδολογία. Επιπλέον, η αξιολόγηση αυτή σχετίζεται τόσο με το εύρος, την ακρίβεια και την ταχύτητα των υπολογισμών, όσο και με το βαθμό αυτοματοποίησης των διαδικασιών που ακολουθούνται για την υλοποίηση κάθε εναλλακτικής σχεδίασης. Με άλλα λόγια, η ευελιξία, η προσαρμοστικότητα και η επεκτασιμότητα είναι μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά, για την αξιολόγηση μίας διαδικασίας παραμετρικής σχεδίασης.

Η έννοια της παραμετρικής σχεδίασης αλλά και η εφαρμογή της στη ναυπηγική επιστήμη δεν είναι κάτι καινούριο. Από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αιώνα και παράλληλα με την εξέλιξη άλλων συναφών επιστημών άρχισαν να εμφανίζονται οι πρώτες εφαρμογές παραμετρικής σχεδίασης πλοίων. Δεδομένου ότι την εποχή εκείνη η τεχνολογία των υπολογιστών δεν επέτρεπε τη γεωμετρική αναπαράσταση ενός πλοίου, η έννοια της παραμετρικής σχεδίασης περιοριζόταν κυρίως στη διεξαγωγή υπολογισμών, οι οποίοι αφορούσαν τη φάση της προμελέτης. Βασικό πλεονέκτημα, έως και σήμερα, της νέας αυτής τεχνικής ήταν η παραγωγή μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σχεδιάσεων και η διεξαγωγή των απαραίτητων υπολογισμών σε μικρό χρονικό διάστημα. Το γεγονός αυτό αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την παραγωγικότητα του μελετητή, καθώς αυτός μπορεί σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα να παράγει και να αξιολογήσει διαφορετικές μεταξύ τους σχεδιαστικές λύσεις, βοηθώντας τον πλοιοκτήτη στην επιλογή της καταλληλότερης από αυτές. Από τις πρώτες κίβλας εφαρμογές παραμετρικής σχεδίασης φαίνεται ότι οι μελετητές, εκτός από τη διεξαγωγή ναυπηγικών υπολογισμών, άρχισαν να χρησιμοποιούν τεχνικές αναζήτησης προκειμένου, με βάση μία σειρά από κριτήρια, να αναζητήσουν με μεθοδικό τρόπο τη βέλτιστη λύση.

Οι εργασίες των Murphy et al. και Mandel et al. στις αρχές της δεκαετίας του 1960 αποτελούν δύο από τις πρώτες εφαρμογές παραμετρικής σχεδίασης πλοίου, στις οποίες χρησιμοποιούνται τεχνικές ορθολογικής αναζήτησης για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης στη φάση της προμελέτης [Murphy et al., 1963], [Mandel et al., 1966]. Στη μεταπτυχιακή εργασία του, λίγο πριν το 1970, ο Chryssostomidis παρουσιάζει μία μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης-βελτιστοποίησης πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων [Chryssostomidis, 1967]. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει η εργασία του Lyon η οποία δημοσιεύτηκε το

1982 [Lyon, 1982]. Εδώ, ο συγγραφέας στηριζόμενος στην τεχνολογία της εποχής και αποφεύγοντας τη χρήση Η/Υ ως πολυδάπανη προτείνει μια διαδικασία προμελέτης βασιζόμενη στον προγραμματισμό ενός TI-59 calculator. Το 1989 οι Paranikolaou et al., παρουσιάζουν μία από τις πρώτες εργασίες σχετικά με την παραμετρική σχεδίαση - βελτιστοποίηση Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας [Paranikolaou et al., 1989]. Η τεχνολογία υπολογιστών της εποχής, έκανε δυνατή τόσο τη γεωμετρική αναπαράσταση της επιφάνειας της γάστρας, η μορφή της οποίας καθορίζεται από ένα πλέγμα κατάλληλων καμπυλών, όσο και τη διεξαγωγή όλων των υπολογισμών που απορρέουν από αυτή (υδροστατικά χαρακτηριστικά, ευστάθεια, κ.ά.). Στην εργασία αυτή λοιπόν, η έννοια της παραμετρικής σχεδίασης περιλαμβάνει τόσο τη γεωμετρική αναπαράσταση του πλοίου όσο και τη διεξαγωγή κατάλληλων υπολογισμών.

Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση της υπολογιστικής ισχύος καθώς και η ανάπτυξη και επέκταση των αριθμητικών μεθόδων για εφαρμογές που αφορούν τη ναυπηγική επιστήμη, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχεδιαστικών λογισμικών έδωσαν τη δυνατότητα επίλυσης ενός μεγάλου αριθμού προβλημάτων που αφορούν τη μελέτη και σχεδίαση πλοίων. Τα περισσότερα από αυτά αναφέρονται σε επιμέρους φάσεις της προμελέτης ενός πλοίου, με την πλειονότητα να αφορά την υδροδυναμική σχεδίαση της επιφάνειας της γάστρας.

1.6. Βελτιστοποίηση

Η έννοια της Βελτιστοποίησης στη Μηχανική είναι σχεδόν τόσο παλιά όσο και η πρώτη ανθρώπινη κατασκευή. Ο άνθρωπος καλείται πολλές φορές, εκούσια ή ακούσια, να επιλύσει προβλήματα βελτιστοποίησης ακόμα και στην καθημερινή του ζωή. Ιστορικά, η παλαιότερη καταγραφή ενός σαφώς διατυπωμένου προβλήματος βελτιστοποίησης, εμφανίζεται το 19 π.Χ. [Βιργίλιος, 19 π.Χ.] και ανήκει στην Ελληνική Μυθολογία. Σύμφωνα με αυτήν, η Διδώ, βασίλισσα της Τύρου, όταν κατέφυγε στη Λιβύη στη χώρα Γετουλία ή Νουμιδία, θέλησε να χτίσει μία νέα πόλη. Ο τοπικός βασιλιάς, αφού αρχικά αρνήθηκε, της επέτρεψε εν τέλει να χτίσει μία πόλη με τον όρο ότι αυτή θα καταλάμβανε τόση έκταση όση ένα τομάρι βοδιού. Η Διδώ τότε έκοψε το τομάρι σε πολύ στενές λωρίδες και, ενώνοντας τη μία με την άλλη περικύκλωσε τόσο χώρο, ώστε της έφθασε να κτίσει την Καρχηδόνα και την ακρόπολή της, τη Βύρσα (βύρσος=δέρμα, τομάρι). Ο μύθος αυτός αποτελεί την πρωταρχική εκδοχή επίλυσης ενός ισοπεριμετρικού προβλήματος, δηλαδή ποιο είναι το βέλτιστο σχήμα μίας κλειστής καμπύλης με δεδομένη περίμετρο, έτσι ώστε αυτό να καταλαμβάνει το μέγιστο εμβαδόν. Πολλά παρόμοια μαθηματικά και φυσικά προβλήματα μελετήθηκαν και επιλύθηκαν στη συνέχεια από τους Έλληνες μαθηματικούς κατά την αρχαιότητα και τους Ευρωπαίους φυσικούς και μαθηματικούς στη νεότερη ιστορία.

Γενικά, κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης ακολουθεί την παρακάτω λογική πορεία:

«Βρες τις τιμές των ελευθέρων μεταβλητών που καθορίζουν την τιμή μίας ποσότητας (συνάρτησης), για τις οποίες η τιμή αυτή γίνεται ελάχιστη ή μέγιστη, χωρίς να παραβιάζονται κάποιοι περιορισμοί.»

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία υπάρχει μία πληθώρα εφαρμογών βελτιστοποίησης οι οποίες περιλαμβάνουν μία σειρά από προβλήματα τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους τόσο ως προς

τη φυσιολογία όσο και ως προς τη διατύπωση και επίλυσή τους. Για το διαχωρισμό των προβλημάτων αυτών έχουν προταθεί ομαδοποιήσεις οι οποίες εστιάζουν σε διαφορετικά κοινά χαρακτηριστικά. Ο διαχωρισμός των προβλημάτων βελτιστοποίησης σε υποκατηγορίες βασίζεται συνήθως στον τύπο των ελεύθερων μεταβλητών, στον βαθμό αβεβαιότητας των παραμέτρων, στον αριθμό των κριτηρίων και στα στάδια επίλυσης. Γενικά, τα όρια μεταξύ των διάφορων κατηγοριών δεν είναι απολύτως σαφή, ενώ ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να ανήκει σε περισσότερες από μία κατηγορίες. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες από τις βασικές προσεγγίσεις κατηγοριοποίησης όπως συναντώνται στη βιβλιογραφία:

Διαχωρισμός με βάση τις ελεύθερες μεταβλητές βελτιστοποίησης:

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να υπάρχουν ελεύθερες μεταβλητές οι οποίες είναι συνεχείς ή διακριτές. Συνεχείς ελεύθερες μεταβλητές χρησιμοποιούνται συνήθως όταν επιλύονται προβλήματα καθαρά μαθηματικής φύσεως. Στη μηχανική, αν και τα πεδία τιμών των ελεύθερων μεταβλητών είναι σχεδόν πάντα συνεχή, μετατρέπονται σε διακριτά ανάλογα με τα μεγέθη που περιγράφονται από αυτές ή την ακρίβεια των υπολογισμών που επιθυμεί ο μελετητής. Για παράδειγμα, εάν το μήκος ενός πλοίου είναι μια ελεύθερη μεταβλητή σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, θεωρητικά μπορεί να λάβει οποιαδήποτε πραγματική θετική τιμή, εντός του εύρους τιμών που ενδιαφέρει το μελετητή. Στην πραγματικότητα όμως τιμές του μήκους, με ακρίβεια τεσσάρων ή ακόμα και τριών δεκαδικών ψηφίων, δεν έχουν ιδιαίτερη πρακτική αξία στη μελέτη ενός πλοίου. Έτσι, το συνεχές πεδίο τιμών του μήκους μετατρέπεται σε διακριτό, ορίζοντας ένα κατάλληλο βήμα τιμών, ανάλογα με την ακρίβεια που επιθυμεί ο μελετητής. Επίσης, υπάρχουν ελεύθερες μεταβλητές οι οποίες είναι εξ ορισμού διακριτές, δηλαδή λαμβάνουν τιμές από το σύνολο των ακεραίων αριθμών. Τέτοιες μεταβλητές είναι για παράδειγμα, ο αριθμός των καταστρωμάτων ή ο αριθμός των εγκαρσίων στεγανών φρακτών.

Διαχωρισμός με βάση τη φύση των παραμέτρων βελτιστοποίησης:

Οι παράμετροι ενός προβλήματος μπορεί να είναι γνωστές στο μελετητή με απόλυτη βεβαιότητα (αιτιοκρατικό πρόβλημα) ή να εμπεριέχουν ένα βαθμό αβεβαιότητας (στοχαστικό πρόβλημα). Το πρόβλημα της μελέτης και σχεδίασης ενός πλοίου, μπορεί διατυπωθεί και να επιλυθεί, εν μέρει ή στο σύνολό του ακολουθώντας κάποια ντετερμινιστική, στοχαστική ή μικτή διαδικασία. Όταν για παράδειγμα υπολογίζεται η θέση του κέντρου βάρους του φορτίου, αυτή μπορεί να οριστεί απόλυτα ή να εμπεριέχει μία αβεβαιότητα, η οποία εκφράζεται μέσω κάποιας κατανομής πιθανότητας. Στη βιβλιογραφία τα προβλήματα σχεδίασης που περιέχουν αβεβαιότητα, είναι γνωστά ως Design Under Uncertainty, και συνήθως μελετούν παραμέτρους οι οποίες δεν είναι εύκολο να ελεγχθούν από τον ίδιο το μελετητή, αλλά εξαρτώνται από εξωγενείς παράγοντες, όπως το περιβάλλον. Στη ναυπηγική επιστήμη οι παράγοντες αυτοί προέρχονται συνήθως από τη θάλασσα, τον άνεμο, τον άνθρωπο και την αγορά (τιμές ναύλων και καυσίμων, κ.ά.). Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεικτής διαδικασίας αποτελεί το γεγονός ότι αν και οι κινήσεις του πλοίου μπορούν να υπολογιστούν με βάση ένα ντετερμινιστικό μοντέλο, η μοντελοποίηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος, μέσω του φάσματος κυματισμών, βασίζεται σε μία στοχαστική διαδικασία. Πολλές φορές, τα κριτήρια σχεδίασης ενδέχεται να μην αφορούν χαρακτηριστικά μεγέθη του πλοίου αλλά πιθανότητες μεγεθών ή συμβάντων. Για παράδειγμα, πρόβλημα σχεδίασης θα μπορούσε να α-

ποτελεί ο προσδιορισμός της ταχύτητας ώστε να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα ο αριθμός των σφυροκρούσεων της πλώρης να ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή. Σημειώνεται ότι γενικά σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, οι τιμές μίας ή περισσότερων ελεύθερων μεταβλητών μπορεί και αυτές να προέρχονται από κάποια στοχαστική θεώρηση.

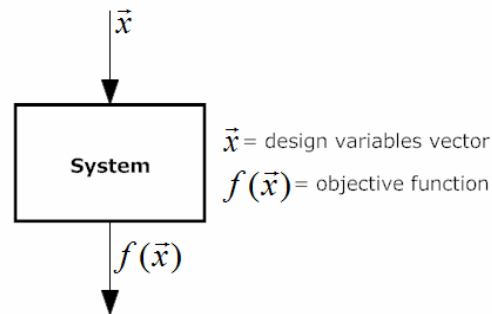
Διαχωρισμός με βάση τα κριτήρια βελτιστοποίησης:

Κριτήριο σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ο στόχος που έχει θέσει ο μελετητής σε ό,τι αφορά την τιμή του αντίστοιχου μεγέθους. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης ονομάζονται και αντικειμενικές συναρτήσεις (objective functions) ή συναρτήσεις κόστους (cost functions). Κατά τον Sen, ένα μέγεθος (χαρακτηριστικό) με κατεύθυνση αποτελεί αντικειμενική συνάρτηση [Sen, 1992]. Εάν δηλαδή η ισχύς πρόωσης ενός πλοίου είναι ένα χαρακτηριστικό της σχεδίασης, η ελαχιστοποίησή της αποτελεί αντικειμενική συνάρτηση (στόχο). Τα προβλήματα βελτιστοποίησης, ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων, μπορεί να διαχωριστούν σε μονοκριτηριακά (single-objective) ή πολυκριτηριακά (multi-objective). Στα μονοκριτηριακά προβλήματα υπάρχει μία μόνο αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μπορεί να στοχεύει στην εύρεση της μέγιστης (maximization), της ελάχιστης (minimization) ή κάποιας προκαθορισμένης τιμής (target) μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Στην περίπτωση αυτή, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναζητεί το ολικό βέλτιστο μέσα στο σύνολο όλων των εναλλακτικών λύσεων, το οποίο αποτελεί και την τελική λύση του προβλήματος. Στα πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης, οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι περισσότερες από μία. Εδώ, πολύ συχνά τα κριτήρια ανταγωνίζονται ή αντικρούονται μεταξύ τους. Η λύση ενός τέτοιου προβλήματος συνήθως δεν είναι μοναδική, αλλά περιλαμβάνει έναν αριθμό υποψήφια βέλτιστων λύσεων. Ο μελετητής πρέπει να επιλέξει ως βέλτιστη τη λύση εκείνη η οποία αντανακλά στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό το σκοπό της σχεδίασης αλλά και τις προτιμήσεις του πλοιοκτήτη. Ένα παράδειγμα από τη ναυπηγική βιομηχανία αποτελεί η περίπτωση όπου ο μελετητής αναζητεί, με βάση έναν αριθμό ελεύθερων μεταβλητών και περιορισμών, το πλοίο εκείνο το οποίο έχει τη μέγιστη μεταφορική ικανότητα και τη μικρότερη δυνατή ισχύ πρόωσης. Όπως γίνεται κατανοητό, τα δύο αυτά κριτήρια αντικρούονται μεταξύ τους, ενώ η λύση που προκύπτει μέσω του αλγόριθμου βελτιστοποίησης, αποτελείται από ένα σύνολο σχεδιάσεων. Το τελικό βέλτιστο πλοίο θα προκύψει μετά από κατάλληλη αξιολόγηση των σχεδιάσεων αυτών, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και ενδεχομένως κάποιων άλλων χαρακτηριστικών σχεδίασης. Γενικά, τα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ανήκουν στην ευρύτερη επιστημονική περιοχή της Λήψης Αποφάσεων (Decision Making) όπου, κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιήσει ο μελετητής ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζει, προκειμένου να λάβει την καλύτερη δυνατή απόφαση.

Διαχωρισμός με βάση τα στάδια βελτιστοποίησης:

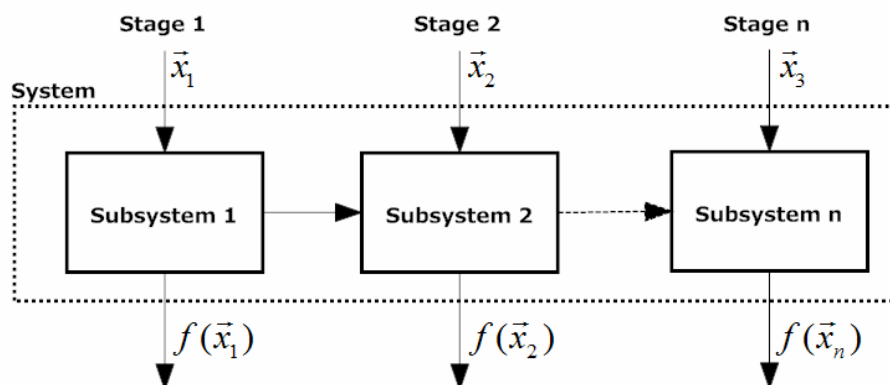
Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορεί να διατυπωθεί και να επιλυθεί σε ένα ή περισσότερα στάδια, αποτελώντας ένα «μονής φάσης» (single-stage) ή «πολλαπλών φάσεων» (multi-stage) σύστημα, αντίστοιχα. Στην πρώτη περίπτωση, αναζητείται ο βέλτιστος συνδυασμός των τιμών ενός προεπιλεγμένου αριθμού ελεύθερων μεταβλητών, από τον οποίο θα προκύψει η τελική λύση (Σχήμα 1.5). Αντίθετα, στη δεύτερη περίπτωση, η βελτιστοποίηση γίνεται σταδιακά και αφορά επιμέρους ελεύθερες μεταβλητές και αντικειμενικές συναρ-

τήσεις του προβλήματος (Σχήμα 1.6). Εδώ, αποτιμάται η επίδραση και η συνεισφορά κάθε συνδυασμού των τιμών των ελεύθερων μεταβλητών, για κάθε στάδιο της βελτιστοποίησης.



Σχήμα 1.5: Βελτιστοποίηση μόνης φάσης (single-stage system)

Το πλεονέκτημα αυτού του διαχωρισμού, είναι η μείωση του αριθμού των ελεύθερων μεταβλητών ανά φάση, ορίζοντας για κάθε μία από αυτές ένα διαφορετικό διάνυσμα. Η θεωρία Δυναμικού Προγραμματισμού (Dynamic Programming), περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο τα αποτελέσματα κάθε φάσης μπορούν να συνδυαστούν ώστε να προκύψει το ολικό βέλτιστο του συστήματος. Τα διάφορα υποσυστήματα (φάσεις βελτιστοποίησης) μπορεί να είναι συνδεδεμένα εν σειρά (serial systems) ή όχι (non-serial systems). Για την επίλυση προβλημάτων που περιέχουν μη-σειριακά συστήματα, χρησιμοποιείται συνήθως η Θεωρία Γράφων ή Γραφημάτων (Graph Theory).



Σχήμα 1.6: Βελτιστοποίηση πολλαπλών φάσεων (multi-stage system)

1.7. Πλοία Νέας Τεχνολογίας

Είδη από το δεύτερο μισό του 19^{ου} αιώνα, αρχίζουν να κάνουν την εμφάνισή τους διάφοροι νέοι τύποι πλοίων, οι οποίοι διέφεραν κατά πολύ από τους ήδη υπάρχοντες. Τα πλοία αυτά, αποτελούσαν πρωτότυπες ιδέες και είχαν περιορισμένη χρήση, κυρίως για πειραματικούς και στρατιωτικούς σκοπούς. Το 1873 κατασκευάζεται, για το Βασιλικό Ναυτικό της Νορβηγίας, από την Αγγλική εταιρία John I. Thornycroft Ltd. μία τορπιλάκατος (HNoMS *Rap*) μήκους 59ft 9in (18.2m) και πλάτους 7ft 10in (2.74m), η οποία κινούταν σε μια περιοχή του αριθμού Froude γύρω στο 0.60. Λίγο αργότερα, η ίδια εταιρία κατασκεύασε μία σειρά από τορπιλάκατους, όπως το MHS *Lightning*, οι οποίες μπορούσαν να επιχειρούν σε αριθμούς Froude της τάξης του 0.66.

Αναμφιβόλως, τομή στην εξέλιξη των ταχύπλων σκαφών αποτέλεσε η κατασκευή του ιστορικού *Turbinia* το 1894 (Σχήμα 1.7). Το πλοίο αυτό σχεδιάστηκε από τον Sir Charles Algernon Parson, πρωτοπόρο στην κατασκευή ατμοστροβίλων και κατασκευάστηκε στη Μ. Βρετανία. Το σκάφος αυτό είχε μήκος 100 πόδια (30.48m) και κατάφερε να αναπτύξει ταχύτητα 34.5 κόμβων με τη βοήθεια εννέα ελίκων τοποθετημένων ανά τρεις σε σειρά, τις οποίες κινούσαν τρεις ατμοστρόβιλοι. Στην επίτευξη της ταχύτητας αυτής συνέβαλε επίσης η λεπτόγραμμη γάστρα, της οποίας ο λόγος μήκους προς πλάτος ήταν 11.1, καθώς και το μειωμένο βάρος του, κυρίως λόγω του τύπου της προωστήριας εγκατάστασης. Σημειώνεται δε, ότι το πλοίο αυτό ήταν το πρώτο που κατόρθωσε να κινηθεί σε αριθμούς Froude λίγο παραπάνω από τη μονάδα. Με την πάροδο των ετών έκαναν την εμφάνισή τους διάφορες πρωτοποριακές σχεδιάσεις, εγκαινιάζοντας μία καινούρια εποχή στις θαλάσσιες συγκοινωνίες.

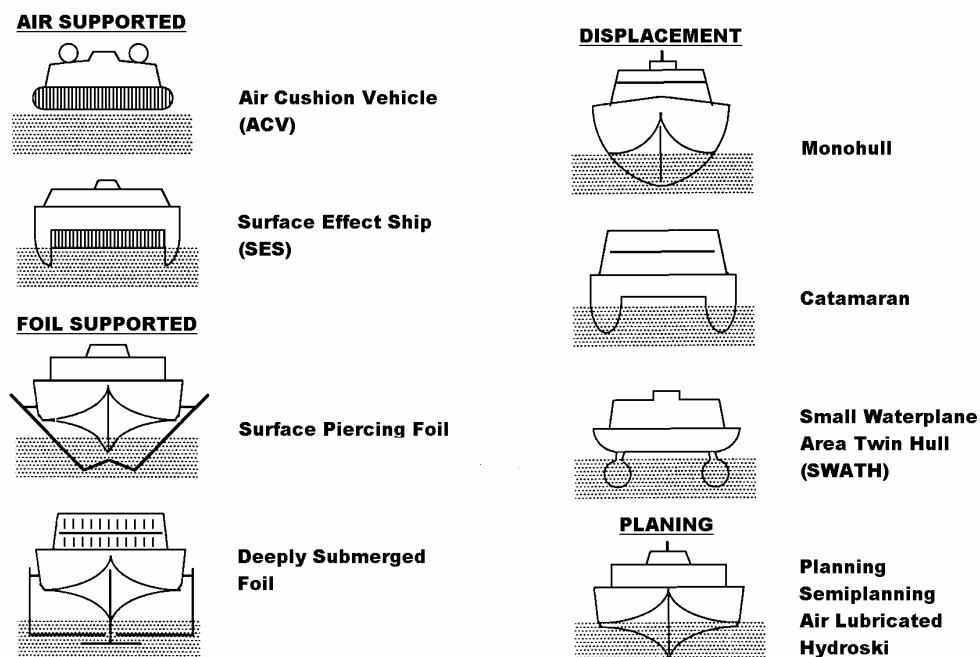


Σχήμα 1.7: Το πλοίο *Turbinia* σε ταχύτητα 34.5 κόμβων [Wikipedia]

Τις τελευταίες δεκαετίες, παράλληλα με την εξέλιξη στη σχεδίαση μονόγαστρων πλοίων εκτοπίσματος, παρατηρείται η εμφάνιση και η ανάπτυξη αρκετών νέων τύπων πλοίων. Η χρήση των πλοίων αυτών συνίσταται συνήθως στη μεταφορά επιβατών και οχημάτων, ενώ χρησιμοποιούνται ευρέως και για διάφορους επιχειρησιακούς σκοπούς. Η χρήση τους για τη μεταφορά φορτίων όπως εμπορευματοκιβώτια, αυτοκίνητα ή άλλα ελαφριά φορτία, είναι σχετικά περιορισμένη. Οι πιο διαδεδομένοι νέοι τύποι πλοίων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.8, είναι τα ταχύπλοα Μονόγαστρα σκάφη ημiekτοπίσματος, οι Ολισθάκατοι, τα Υδροπτέρυγα, τα Catamaran, τα SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull), τα Wave Piercers, τα Αερόστρωμα ή ACV (Air Cushion Vehicle) και τα SES (Surface Effect Ship).

Εκτός από τους παραπάνω τύπους, υπάρχουν και αρκετές παραλλαγές ή υβρίδια που συνδυάζουν χαρακτηριστικά δύο ή περισσότερων κυρίων τύπων. Τα πλοία αυτά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποκαλούνται «μη Συμβατικά» πλοία ή πλοία «Νέας Τεχνολογίας». Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς και από το Σχήμα 1.8, οι τύποι πλοίων Νέας Τεχνολογίας, παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους όσον αφορά την αρχή λειτουργίας τους, τη σχε-

δίαση και την κατασκευή τους. Παρόλα αυτά, ένα κοινό χαρακτηριστικό για όλους τους τύπους αυτών των πλοίων είναι η ιδιαίτερα μεγάλη ταχύτητα υπηρεσίας, η οποία είναι της τάξης των 30 με 40 κόμβους, ενώ για ορισμένους τύπους (υδροπτέρυγα, ACV, SES) μπορεί να ξεπεράσει και τους 50. Ένα βασικό μειονέκτημα που παρουσιάζουν ορισμένοι από τους παραπάνω τύπους πλοίων Νέας Τεχνολογίας, το οποίο περιορίζει τη χρήση τους σε προστατευμένα ύδατα, είναι η κακή συμπεριφορά στους θαλάσσιους κυματισμούς κυρίως όταν πλέουν με μεγάλη ταχύτητα υπηρεσίας. Παρόλα αυτά, τα πλοία αυτά, αποτελούν πλέον καταξιωμένες λύσεις και αξιόπιστους ανταγωνιστές των συμβατικών πλοίων.



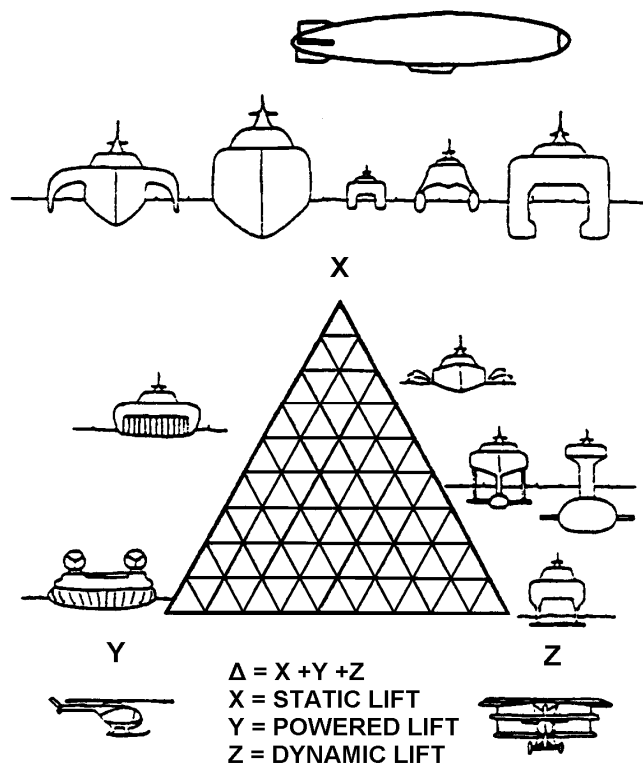
Σχήμα 1.8: Τύποι Πλοίων Νέας Τεχνολογίας [Ζαραφωνίτης, 2007]

Προϋπόθεση για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων είναι η μείωση της αντίστασης κυματισμού του σκάφους στο ελάχιστο, η οποία από ένα σημείο και πέρα αυξάνει δραματικά αυξανόμενη της ταχύτητας. Για το λόγο αυτό, η σχεδίαση των διάφορων τύπων αυτών των πλοίων χαρακτηρίζεται από την προσπάθεια μεταφοράς του εκτοπίσματος μακριά από την ελεύθερη επιφάνεια. Με βάση τον τρόπο που αυτό επιτυγχάνεται, τα πλοία Νέας Τεχνολογίας μπορεί να διαχωριστούν στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:

1. Πλοία στα οποία παρατηρείται μερική ανύψωση της γάστρας (πλοία ημεκτοπίσματος, ολισθάκατοι, SES, Foil Assisted Catamarans)
2. Πλοία τα οποία χαρακτηρίζονται από τη βύθιση όσο το δυνατόν περισσότερου όγκου εκτοπίσματος αρκετά κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια σε συνδυασμό με μικρό εμβαδόν ισάλου επιφανείας (SWATH, Semi-SWATH, Hydrofoil Small Waterplane Area Ship - HYSWAS, High Speed Vessel - HSV series)
3. Πλοία τα οποία χαρακτηρίζονται από τη μεταφορά ολόκληρου του όγκου εκτοπίσματος έξω από το νερό (υδροπτέρυγα, αερόστρωμα, Foilcats)

Κάθε πλοίο που ανήκει σε μία από τις παραπάνω κατηγορίες, παρουσιάζει ορισμένα βασικά πλεονεκτήματα. Η μερική ανύψωση του σκάφους όπως και η μεταφορά του όγκου εκτο-

πίσματος έξω από το νερό μειώνει την αντίσταση κυματισμού ενώ για ορισμένους τύπους και σε θάλασσες με σχετικά χαμηλό ύψος κύματος, περιορίζει την επίδραση των κυματισμών. Η βύθιση του όγκου εκτοπίσματος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια, εκτός από τη μείωση της αντίστασης κυματισμού, προσδίδει στο σκάφος εξαιρετικά καλή συμπεριφορά σε κυματισμούς. Αναφορικά με τους δύο πρώτους τρόπους σχεδίασης πλοίων Νέας Τεχνολογίας για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων υπηρεσίας σημαντικό ρόλο έχει η μορφή της επιφάνειας της γάστρας. Για τους περισσότερους σχετικούς τύπους πλοίων, αυτή χαρακτηρίζεται κυρίως από το μεγάλο λόγο μήκους προς πλάτος ισάλου πλεύσης (πλην των ολισθακάτων), από τη μεγάλη τιμή του συντελεστή λυγηρότητας ($L/\nabla^{1/3}$) και το μικρό συντελεστή γάστρας (C_B).



Σχήμα 1.9: Το τρίγωνο της άντωσης [Jewell, 1973]

Η άντωση, η οποία ασκείται στο περίβλημα της γάστρας των πλοίων Νέας τεχνολογίας, διακρίνεται στις παρακάτω μορφές:

1. Υδροστατική άντωση (Static lift)

Η υδροστατική άντωση προκύπτει από την ολοκλήρωση των υδροστατικών πιέσεων πάνω στην βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας ενός πλοίου. Εκτός από τα συμβατικά πλοία, αμιγή πλοία εκτοπίσματος είναι και τα πλοία SWATH.

2. Δυναμική άντωση (Dynamic lift)

Η δυναμική άντωση εμφανίζεται, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου, όταν η ταχύτητα ξεπεράσει μία χαρακτηριστική τιμή. Προέρχεται δε, από τις δυναμικές πιέσεις που αναπτύσσονται στη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας ολισθακάτων και πλοίων ημικτοπίσματος και τα βυθισμένα πτερύγια των υδροπτερυγων ή των Foilcats.

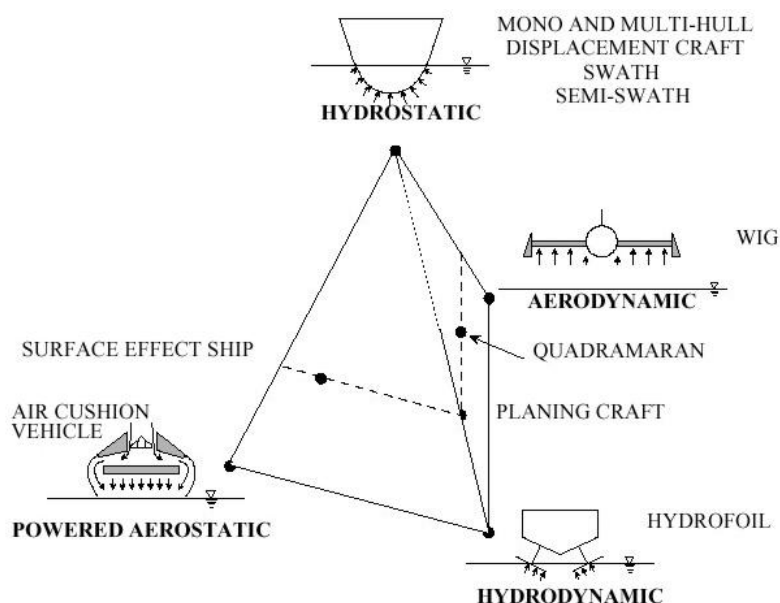
3. Μηχανική άντωση (Powered lift)

Η μηχανική άντωση αναπτύσσεται με τη βοήθεια μηχανικής ισχύος, η οποία προέρχεται από το ίδιο το σκάφος. Τη μορφή αυτή της άντωσης χρησιμοποιούν τα αερόστρωμα πλοία (ACV, SES), τα οποία στηρίζονται πάνω σε στρώμα αέρα που δημιουργείται και συντηρείται με τη βοήθεια ανεμιστήρων.

Οι περισσότεροι τύποι πλοίων Νέας Τεχνολογίας, δεν χρησιμοποιούν αποκλειστικά μια και μόνο από τις παραπάνω μορφές της άντωσης. Έτσι, το βάρος των ολισθακάτων και των πλοίων ημικτοπίσματος εξισορροπείται κατά ένα μέρος από την υδροστατική άντωση ενώ το υπόλοιπο από την υδροδυναμική άντωση, η οποία γίνεται σημαντική όταν αυτά κινούνται σε αριθμούς Froude από 0.7 περίπου και πάνω.

Επίσης, στα πλοία SES, μόνο το 10% έως 20% της άντωσης κατά την πλεύση, οφείλεται στις υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις που αναπτύσσονται στις δύο ημιγάστρες, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό προέρχεται από τη μηχανική άντωση που αναπτύσσεται μέσω του στρώματος αέρα. Τέλος, στα Foil Assisted Catamarans, η υδροδυναμικές πιέσεις που αναπτύσσονται στα βυθισμένα πτερύγια, αθροίζονται με τις υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις που εμφανίζονται στις δύο ημιγάστρες, προκειμένου να προκύψει η συνολική άντωση του σκάφους.

Στο Σχήμα 1.9 παρουσιάζεται το γνωστό Τρίγωνο της Άντωσης [Jewell, 1973], όπου σημειώνονται διάφορα μηχανικά μέσα μεταφοράς, ανάλογα με τη φύση της άντωσης που αναπτύσσουν. Στις τρεις κορυφές του τριγώνου τοποθετούνται τα μέσα εκείνα που χρησιμοποιούν αμιγώς μία από τις τρεις μορφές άντωσης: πλοία εκτοπίσματος και αερόπλοια (στατική άντωση), αερόστρωμα πλοία και ελικόπτερα (μηχανική άντωση), υδροπτέρυγα πλοία και αεροπλάνα (δυναμική άντωση). Οι διάφοροι τύποι πλοίων Νέας Τεχνολογίας τοποθετούνται στις πλευρές και το εσωτερικό του τριγώνου, ανάλογα με το ποσοστό των τριών συνιστωσών της άντωσης που εμφανίζουν.



Σχήμα 1.10: Η πυραμίδα της άντωσης

Εάν διαχωριστούν οι δύο μορφές δυναμικής άντωσης, σε υδροδυναμική και αεροδυναμική, τότε το παραπάνω Τρίγωνο της άντωση μετατρέπεται σε πυραμίδα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.10.

Εκτός από τη μορφή της επιφάνειας της γάστρας, καθοριστικό παράγοντα στη μελέτη και κατασκευή πλοίων Νέας Τεχνολογίας αποτελεί η απαίτηση για την ελαχιστοποίηση του βάρους του άφορτου σκάφους (lightship), προκειμένου να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ταχύτητα και μεταφορική ικανότητα. Σημαντικό ρόλο προς την κατεύθυνση αυτή παίζει η επιλογή του υλικού κατασκευής.

Σε μικρότερα σκάφη χρησιμοποιούνται συνήθως σύνθετα υλικά, ενώ σε μεγαλύτερα ειδικά κράματα αλουμινίου. Στα μεγάλα ταχύπλοα σκάφη χρησιμοποιούνται συνήθως περισσότερα από ένα υλικά για τα διάφορα μέρη της φέρουσας κατασκευής, όπως για παράδειγμα χάλυβας υψηλής αντοχής σε συνδυασμό με αλουμίνιο ή σύνθετα υλικά σε συνδυασμό με αλουμίνιο. Σε κάθε περίπτωση και δεδομένης της απαίτησης για ελαφριά κατασκευή, απαιτείται προσεκτική και λεπτομερής μελέτη αντοχής όλων των επιμέρους στοιχείων της φέρουσας κατασκευής, κυρίως σε περιοχές όπου συναντώνται υλικά με διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, επιβάλλεται η επιλογή των διάφορων στοιχείων του εξοπλισμού να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη, πέρα των άλλων χαρακτηριστικών, την επίδραση στο συνολικό βάρος του άφορτου σκάφους.

Για την παραγωγή της ισχύος πρόωσης των πλοίων Νέας Τεχνολογίας, χρησιμοποιούνται ταχύστροφοι ή μεσόστροφοι κινητήρες Diesel. Σε μεγάλα πλοία χρησιμοποιείται συχνά συνδυασμός κινητήρων Diesel με έναν ή περισσότερους αεριοστρόβιλους, ικανοποιώντας έτσι την απαίτηση της μεγάλης συγκέντρωσης ισχύος σε συνδυασμό με τη μείωση του βάρους και τις περιορισμένες διαστάσεις μηχανοστασίων.



Σχήμα 1.11: Ταχύπλοο Ε/Γ-Ο/Γ πλοίο εφοδιασμένο με water-jets σε δοκιμές ελιγμών [Wikipedia]

Σχεδόν όλοι οι τύποι πλοίων Νέας Τεχνολογίας χρησιμοποιούν σαν αποκλειστικό μέσο πρόωσης τους προωθητήρες αντίδρασης (water-jets). Η ευρεία χρήση τους οφείλεται σε

μία σειρά από πλεονεκτήματα, όπως η μεγάλη ώση και ο ικανοποιητικός βαθμός απόδοσης ο οποίος για ταχύτητες άνω των 35kn είναι σημαντικά μεγαλύτερος από εκείνον που αντιστοιχεί στους διάφορους τύπους ελίκων, φτάνοντας έως και το 75% στην περιοχή των 50kn [Blount, 1993]. Δύο ακόμη σημεία στα οποία τα water-jets υπερέχουν έναντι των ελίκων είναι ο περιορισμός των προβλημάτων σπηλαίωσης, καθώς και εκείνων που οφείλονται στους κραδασμούς σε συνδυασμό με την ελαφριά κατασκευή των πλοίων Νέας Τεχνολογίας. Όταν τα water-jets είναι εξοπλισμένα με τις κατάλληλες διατάξεις αντικαθιστούν πλήρως το πηδάλιο, απλουστεύοντας την κατασκευή, ενώ ταυτόχρονα προσδίδουν πολύ καλές ελλικτικές ικανότητες στο πλοίο (Σχήμα 1.11).

Η πολυμορφία και οι ιδιαίτερες λειτουργικές απαιτήσεις των πλοίων Νέας Τεχνολογίας, προσδίδουν μεγάλη σχεδιαστική ελευθερία. Ο μελετητής δύναται να πειραματιστεί και να καινοτομήσει σχεδόν σε όλους τους τομείς της μελέτης και κατασκευής ενός τέτοιου πλοίου. Ξεκινώντας από τη μορφή της γάστρας, τα υλικά, την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής, την πρόωση, τη συμπεριφορά σε κυματισμούς, κ.ά., το πεδίο έρευνας και τεχνολογίας που σχετίζεται με τη σχεδίαση, κατασκευή και λειτουργία αυτών των πλοίων μοιάζει σχεδόν ανεξάντλητο. Η ανάγκη για την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας, οδηγεί είδη από το στάδιο της προμελέτης στην ανάγκη για την αναζήτηση της σχεδίασης εκείνης η οποία ικανοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό απαιτήσεις οι οποίες πολύ συχνά αντικρούονται μεταξύ τους.

Κεφάλαιο 2:
Ανασκόπηση Βασικής Βιβλιογραφίας

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΒΑΣΙΚΗΣ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑΣ

Μετά το 1960 και παράλληλα με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, άρχισαν να παρουσιάζονται οι πρώτες επιστημονικές εργασίες σχετικά με την παραμετρική σχεδίαση - βελτιστοποίηση πλοίων στη φάση της προμελέτης. Η χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών έδωσε τη δυνατότητα στους μελετητές να διερευνήσουν και να βελτιώσουν ορισμένες από τις ήδη υπάρχουσες διαδικασίες σχεδίασης, καθώς και να αναπτύξουν νέες τεχνικές με βάση τις εξελίξεις στην τεχνολογία υπολογιστών. Ολοκληρώνοντας τη βασική μελέτη ενός πλοίου σε αρκετά λιγότερο χρόνο, μπορούσαν τώρα να αναπαράγουν έναν μεγάλο αριθμό εναλλακτικών σχεδιάσεων αναζητώντας την καταλληλότερη από αυτές. Καθώς οι υπολογιστικές δυνατότητες αυξάνονταν και το πλήθος των εναλλακτικών σχεδιάσεων μεγάλωνε, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης άρχισε να βασίζεται όλο και περισσότερο σε μαθηματικούς αλγόριθμους (αλγόριθμους βελτιστοποίησης), οι οποίοι αποτελούν πλέον ουσιώδες συμπλήρωμα της εμπειρίας του μελετητή.

2.1. Ιστορική αναδρομή

Η απαρχή της θεωρίας βελτιστοποίησης προσδιορίζεται στην εποχή των Newton, Lagrange και Cauchy. Η ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης βασισμένων στο διαφορικό λογισμό έγινε δυνατή χάρις στη συνεισφορά των Newton και Leibnitz. Η εισαγωγή του λογισμού των μεταβολών (calculus of variations) για την ελαχιστοποίηση συναρτησιακών (functionals) από τους Bernoulli, Euler, Lagrange και Weirstrass, υπήρξε καθοριστική στην εισαγωγή νέων μεθόδων βελτιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος ελαχιστοποίησης στατικών συναρτήσεων με περιορισμούς (constraint problems), με τη χρήση άγνωστων πολλαπλασιαστών, είναι γνωστή ακόμη και σήμερα με την ονομασία του Lagrange, που την ανακάλυψε. Ο Cauchy πρώτος πρότεινε έναν αλγόριθμο μεγίστης ή ταχέως καθόδου (steepest descent) για την επίλυση προβλημάτων ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς.

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών έκανε δυνατή την εξέλιξη των υπαρχόντων αλλά και την εμφάνιση αρκετών νέων μεθόδων βελτιστοποίησης. Η ανάπτυξη του γενικευμένου αλγορίθμου SIMPLEX από τον Αμερικανό μαθηματικό Dantzig το 1947, για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού (linear programming) [Dantzig et al., 1955], [Dantzig, 1963] καθώς και η εισαγωγή, δέκα χρόνια αργότερα, του δυναμικού προγραμματισμού (dynamic programming) από τον επίσης Αμερικανό Bellman [Bellman, 1957], άνοιξαν το δρόμο για την ανάπτυξη νέων μεθόδων επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Σημειώνεται ότι ως «προγραμματισμός» νοείται ο Μαθηματικός Προγραμματισμός, δηλαδή η ανάπτυξη μεθόδων για την επίλυση διάφορων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Σήμερα, ο όρος αυτός, περιλαμβάνει στη γενικότητά του αρκετές μεθόδους βελτιστοποίησης, όπως αναφέρεται στη συνέχεια της παρούσας διατριβής.

Η εργασία των Kuhn και Tucker το 1951 σχετικά με τις ικανές και αναγκαίες συνθήκες (KKT conditions) που πρέπει να υπάρχουν ώστε η λύση ενός μη γραμμικού προβλήματος να είναι βέλτιστη, έθεσε τη βάση για την περαιτέρω ανάπτυξη μεθόδων επίλυσης προβλημάτων μη

γραμμικού προγραμματισμού (nonlinear programming) [Kuhn & Tucker, 1951]. Πολύ σημαντική συνεισφορά στην εξέλιξη του πεδίου αυτού είχαν επίσης, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, οι εργασίες των Zoutendijk [Zoutendijk, 1960] και Rosen [Rosen, 1960]. Παρόλο που την εποχή εκείνη δεν υπήρχε μία γενικευμένη μέθοδος η οποία θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε όλα τα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού, η εργασία του Carroll [Carroll, 1961] όπως και η εργασία των Fiacco και McCormick [Fiacco & McCormick, 1964] επάνω στη διαχείριση των περιορισμών, επέτρεψαν την επίλυση πολλών δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι Dantzig [Dantzig, 1955] και Charnes & Cooper [Charnes & Cooper, 1959] εισήγαγαν την έννοια στοχαστικού προγραμματισμού και ανέπτυξαν τεχνικές για την επίλυση προβλημάτων στα οποία οι ανεξάρτητες μεταβλητές δεν είναι τυχαίες αλλά ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ο γεωμετρικός προγραμματισμός αναπτύχθηκε στα τέλη της δεκαετίας του 1960 από τους Duffin, Zener και Peterson [Duffin et al., 1967]. Ο Gomory εργάστηκε σημαντικά επάνω στον ακέραιο προγραμματισμό (integer programming) [Gomory, 1963], έναν από τους πιο ενδιαφέροντες και ραγδαία εξελισσόμενους τομείς της βελτιστοποίησης, λόγω του γεγονότος ότι τα περισσότερα προβλήματα του πραγματικού κόσμου εμπίπτουν στην κατηγορία αυτή.

Οι μέθοδοι που επιλύουν προβλήματα βελτιστοποίησης με περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, ανήκουν στην περιοχή του πολυκριτηριακού προγραμματισμού. Μία από τις πλέον γνωστές μεθόδους για την επίλυση ειδικών προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, είναι ο προγραμματισμός στόχων (goal programming), ο οποίος αρχικά προτάθηκε από τους Charnes και Cooper το 1961 [Charnes & Cooper, 1961]. Η θεωρία παιγνίων (game theory) εισήχθη από τον von Neumann αρκετές δεκαετίες νωρίτερα για να επιλύσει μερικά ειδικευμένα προβλήματα μαθηματικής, οικονομικής και επιχειρησιακής φύσεως [Neumann, 1928]. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης στη μηχανική εμφανίστηκε μόλις τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια.

Μία νέα κατηγορία τεχνικών βελτιστοποίησης, οι οποίες βασίζονται σε θεωρίες που προέρχονται από επιστημονικές περιοχές πέραν των μαθηματικών, έκαναν την εμφάνισή τους τις τελευταίες δεκαετίες. Η εξομοιωμένη απόπτωση (simulated annealing) μιμείται τη φυσική διαδικασία της απόπτωσης των στερεών υλικών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι (genetic algorithms) βασίζονται στη θεωρία της εξέλιξης των ειδών και την ιδιότητά τους να προσαρμόζονται στις αλλαγές του φυσικού περιβάλλοντος μέσα στο οποίο ζουν. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (neural networks), μιμούνται τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται και επεξεργάζονται τις πληροφορίες οι νευρώνες του ανθρώπινου εγκεφάλου καθώς και την ικανότητα της μάθησης. Τέλος, αρκετές υβριδικές μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν προταθεί την τελευταία δεκαετία όπως η αρμονική αναζήτηση (harmony search), όπου προσομοιάζεται ο τρόπος με τον οποίο συνδυάζουν τις νότες οι μουσικοί μίας ορχήστρας προκειμένου να παραχθεί ο πιο μελωδικός ήχος ή ο αλγόριθμος των μελισσών (bees algorithm), ο οποίος αντλεί στοιχεία από τον τρόπο με τον οποίο τα σμήνη των μελισσών αναζητούν τη γύρη προκειμένου να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή μελιού της κυψέλης.

Η σχεδίαση ενός πλοίου αποτελεί γενικά ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επιπλέον, καθώς το πλοίο στο σύνολό του είναι μία πολύπλοκη κατασκευή, ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης, όπως επίσης και των περιορισμών, είναι πάρα πολύ μεγάλος. Οι μέθοδοι σύγκλισης συναρτήσεων (Lagrange, Euler, Newton, Leibnitz, Cauchy, κλπ) δεν μπορούν να εφαρμοστούν με επιτυχία για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη μελέτη

και σχεδίαση πλοίων. Τα περισσότερα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη σχεδίαση ενός πλοίου είναι πρακτικώς διακριτά, οι σχέσεις που τα συνδέουν μη γραμμικές, ενώ σχεδόν πάντα υπάρχουν περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιούνται. Η χρήση τεχνικών στοχαστικής βελτιστοποίησης άνοιξε το δρόμο για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων, όπως το πρόβλημα της σχεδίασης πλοίων. Οι πιο γνωστές στοχαστικές ή αλλιώς εξελικτικές μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) [Holland, 1975] οι Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies) [Rechenberg, 1973] και [Schwefel, 1995] ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming) [Fogel et al., 1966] και ο Γενετικός Προγραμματισμός (Genetic Programming) [Koza, 1992].

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά παραδείγματα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν κυρίως τη φάση της προμελέτης με συχνότερα, την εύρεση των κυρίων διαστάσεων, τη διαμόρφωση της επιφάνειας της γάστρας για μικρότερη αντίσταση, και καλύτερη συμπεριφορά σε κυματισμούς, την εσωτερική υποδιαίρεση και διαμόρφωση για καλύτερη ευστάθεια μετά από βλάβη και κατανομή χώρων, κ.ά. Σήμερα, οι θεωρητικές προσεγγίσεις του προβλήματος της μελέτης και σχεδίασης πλοίου διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από εκείνες των πρώτων ερευνητών. Σε αυτές περιλαμβάνονται νέες έννοιες όπως η αβεβαιότητα (design under uncertainty, π.χ. [He et al., 2008]) και το ρίσκο (risk-based design, π.χ. [Papanikolaou, 2009]) καθώς και νέα χαρακτηριστικά τα οποία αφορούν σε μεγάλο βαθμό τόσο την αλληλεπίδραση φυσικού περιβάλλοντος – πλοίου όσο και τον ανθρώπινο παράγοντα. Έτσι, τα προβλήματα σχεδίασης γίνονται όλο και πιο περίπλοκα απαιτώντας τη χρήση εξελιγμένων τεχνικών βελτιστοποίησης. Η ανάπτυξη μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας βελτιστοποίησης για τη μελέτη και σχεδίαση πλοίων αποτελεί σήμερα ένα περίπλοκο πρόβλημα και μία μεγάλη πρόκληση για το μελετητή.

Μια από τις πρώτες εφαρμογές τεχνικών βελτιστοποίησης στη σχεδίαση πλοίων αποτελεί η εργασία των Murthy et al. το 1963. Σε αυτήν παρουσιάζεται μία διαδικασία για τον προσδιορισμό του βέλτιστου συνδυασμού μήκους, πλάτους, βυθίσματος, κοίλου και συντελεστή γάστρας, ενός πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου, το οποίο ικανοποιεί τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη (ταχύτητα, αυτονομία, συντελεστή στοιβασίας και μεταφορική ικανότητα), και έχει το μικρότερο δυνατό κόστος [Murthy et al., 1963]. Η μέθοδος αναζήτησης που χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή βασίζεται στο συνδυασμό τεσσάρων διαφορετικών τιμών για κάθε μία μεταβλητή σχεδίασης. Η τεχνική αυτή, ενώ θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως απλουστευμένη σε σύγκριση με τα σύγχρονα δεδομένα, φανερώνει την ανάγκη για αναζήτηση νέων και πιο παραγωγικών τεχνικών μελέτης και σχεδίασης πλοίων. Τρία χρόνια αργότερα οι Mandel et al., προτείνουν μία γενικευμένη μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης πετρελαιοφόρων αλλά και πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου με βάση οικονομικά κριτήρια και χρήση τεχνικών τυχαίας αναζήτησης [Mandel et al., 1966].

Η χρήση του Μη-Γραμμικού προγραμματισμού για την επίλυση προβλημάτων σχεδίασης πλοίου άρχισε περί το 1970, όπου κανείς μπορεί να βρει εργασίες των Puchstein [Puchstein, 1969], Nowacki [Nowacki, 1970], Lorentz [Lorentz, 1973] και άλλων. Οι εργασίες αυτές αφορούν τη σχεδίαση πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην και πετρελαιοειδών με βάση το οικονομικό κριτήριο του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου (RFR) ή της Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPV). Εξέλιξη των παραπάνω αποτελεί η διερεύνηση και η επίλυση μίας σειράς από προβλήματα σχεδίασης, στα οποία περιλαμβάνονται περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις καθώς και περιορισμοί. Στα μέσα της προηγούμενης δεκαετίας οι Ray et

α). παρουσιάζουν μία μεθοδολογία σχεδίασης-βελτιστοποίησης με τη χρήση εμπειρικών κανόνων, η οποία αφορά την προμελέτη πλοίου [Ray et al., 1995]. Σύμφωνα με αυτή αναζητούνται οι κύριες διαστάσεις (μήκος, πλάτος, βύθισμα και κοίλο) και η μορφή της γάστρας μέσω κατάλληλων γεωμετρικών συντελεστών, ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, της εγκατεστημένης ισχύος και του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη (ταχύτητα, μεταφορική ικανότητα και ακτίνα ενεργείας), τους διεθνείς κανονισμούς (ευστάθεια και ύψος εξάλων) και τη γεωμετρία της γάστρας. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με τρεις διαφορετικές μεθόδους, για τις οποίες παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα μέσω των οποίων γίνεται φανερή η δυσκολία προσδιορισμού της βέλτιστης λύσης λόγω κυρίως της έντονης μη-γραμμικότητας και του μη-κυρτού πεδίου τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων αλλά και της ύπαρξης των περιορισμών.

2.2. Παραμετρική Σχεδίαση – Βελτιστοποίηση στη Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίου

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά ορισμένες βιβλιογραφικές αναφορές οι οποίες ανήκουν στο επιστημονικό πεδίο της παραμετρικής σχεδίασης - βελτιστοποίησης πλοίου. Στόχος της παρουσίασης αυτής είναι να γίνει μία εισαγωγική προσέγγιση στο πρόβλημα της μελέτης και σχεδίασης πλοίων μέσω της σχετικής βιβλιογραφίας των τελευταίων δεκαετιών. Στις εργασίες αυτές, όπως σχεδόν και στο σύνολο των σχετικών επιστημονικών άρθρων, κοινούς στόχους αποτελούν η αύξηση της παραγωγικότητας και η εξεύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης σε μια σειρά από διαφορετικά προβλήματα σχεδίασης.

Από τα μισά του περασμένου αιώνα έχει δημοσιευτεί μία πληθώρα εργασιών οι οποίες περιέχουν εφαρμογές παραμετρικής σχεδίασης και βελτιστοποίησης στη σχεδίαση πλοίων. Μία από τις πρώτες είναι η διδακτορική διατριβή του Χ. Χρυσσοστομίδη το 1967 στην οποία προτείνεται μία μεθοδολογία προμελέτης – βελτιστοποίησης για τη σχεδίαση πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) χρησιμοποιώντας τεχνικές τυχαίας αναζήτησης της εποχής (Kanorr (1961), Gall (1964)) και στοιχεία από εργασίες των Mandel & Leopold (1966) και Somekh (1966) [Chryssostomidis, 1967]. Η εργασία του είναι χωρισμένη σε έξι βασικά κεφάλαια. Το πρώτο από αυτά περιέχει την εισαγωγή της διατριβής και την διατύπωση του υπό μελέτη προβλήματος σχεδίασης. Στο δεύτερο κεφάλαιο, ο συγγραφέας αναφέρεται στις βασικές αρχές της σχεδίασης containerships, ενώ στο τρίτο και το τέταρτο περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία και τον αλγόριθμο παραμετρικής σχεδίασης και παρουσιάζει την εφαρμογή τους με ένα συγκεκριμένο παράδειγμα. Στο πέμπτο κεφάλαιο υπάρχουν τα αποτελέσματα της εφαρμογής ενώ ακολουθεί ο επίλογος και ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα. Στο τέλος της εργασίας υπάρχουν δύο παραρτήματα, στο πρώτο παρατίθεται εξολοκλήρου ο κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ενώ το δεύτερο αναφέρεται στην εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού της αντίστασης.

Ξεκινώντας την εργασία του ο Χ. Χρυσσοστομίδης, αναφέρει ότι οι κύριες διαστάσεις ενός containership είναι συνάρτηση του αριθμού, της διάταξης και του μεγέθους των κιβωτίων (Twenty-foot Equivalent Unit - TEU). Εξαιτίας αυτού, το πλάτος και το κοίλο του πλοίου δεν αποτελούν ανεξάρτητες μεταβλητές, σε αντίθεση με το μήκος, το οποίο λαμβάνεται ως ανεξάρτητη μεταβλητή με περιορισμούς. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναζητά με τυχαίο

τρόπο τον καλύτερο συνδυασμό των τεσσάρων αυτών μεταβλητών για τον οποίο το τελικό πλοίο έχει το μικρότερο δυνατό ετήσιο κόστος, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιεί τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη. Επιπλέον, κάθε εναλλακτική σχεδίαση για να είναι αποδεκτή θα πρέπει να ικανοποιεί ένα σύνολο από περιορισμούς οι οποίοι αφορούν τη διάταξη του φορτίου, τον υπολογισμό της αντίστασης (Taylor's Standard Series), τα βάρη του πλοίου, την αντοχή και την ευστάθεια. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ελάχιστο επιτρεπόμενο μετακεντρικό ύψος (GM) ορίζεται ως το 4% του πλάτους του πλοίου. Η απαίτηση αυτή προέκυψε έπειτα από ανάλυση στοιχείων υπαρκτών πλοίων της εποχής και αποτελεί το μοναδικό κριτήριο ευσταθείας.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα να παράγει εναλλακτικές σχεδιάσεις με προκαθορισμένη διάταξη TEU. Όπως σημειώνει ο συγγραφέας, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δεν έχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της βέλτιστης διάταξης. Λόγω όμως των διάφορων περιορισμών, υπάρχει ένας μικρός αριθμός διατάξεων που οδηγούν σε αποδεκτές σχεδιάσεις. Ο χρήστης θα πρέπει να διερευνήσει διάφορες πιθανές διατάξεις έως ότου προσεγγίσει την βέλτιστη λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος.

Όλοι οι υπολογισμοί βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις, πολλές από τις οποίες παρουσιάζονται για πρώτη φορά από τον συγγραφέα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης συνοψίζεται τελικά ως εξής:

Βρες εκείνες τις μεταβλητές \mathbf{x} για τις οποίες το κόστος c ελαχιστοποιείται, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη και τους περιορισμούς. Όπου το κόστος ισούται με:

$$c = f(\mathbf{x}, \bar{P}, \bar{D})$$

όπου $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ οι ανεξάρτητες μεταβλητές

\bar{P} το σύνολο των απαιτήσεων του πλοιοκτήτη

\bar{D} η προκαθορισμένη διάταξη TEU

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παράγει κάθε εναλλακτική σχεδίαση σε πέντε βήματα και τερματίζει όταν ο αριθμός των εναλλακτικών σχεδιάσεων λάβει μία προκαθορισμένη τιμή.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εργασία του T. Lyon το 1982, στην οποία προτείνεται μία μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης – βελτιστοποίησης φορτηγών πλοίων, με τη βοήθεια ενός TI-59 calculator [Lyon, 1982]. Στην εργασία αυτή ο συγγραφέας δεν προτείνει κάποια νέα μεθοδολογία σχεδίασης ή βελτιστοποίησης, αλλά εφαρμόζει είδη υπάρχουσες, οι οποίες αντί να εφαρμοστούν χειροκίνητα εκτελούνται μέσω μιας υπολογιστικής μηχανής (αυτοματοποίηση). Σκοπός του είναι να αυξήσει την παραγωγικότητα του μελετητή μειώνοντας τον υπολογιστικό χρόνο και το κόστος παραγωγής μιας σχεδίασης και για αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως πρωτοπόρος διαδικασία για την εποχή της.

Λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων του TI-59 calculator, ο συγγραφέας χρησιμοποιεί τεχνικές βελτιστοποίησης από το χώρο του Γραμμικού Προγραμματισμού (Linear Programming) με περιορισμούς, βασιζόμενος στις εργασίες των Bazaraa et al., (1977), Philips et al., (1976) και Ang et al., (1975). Φυσικά αναγνωρίζει ότι γενικά το πρόβλημα της σχεδίασης - βελτιστοποίησης ενός πλοίου είναι μη γραμμικό, όμως θεωρεί ότι η γραμμική προσέγγιση μπορεί να επιλύσει ικανοποιητικά ορισμένα συγκεκριμένα υπο-προβλήματα μελέτης και σχεδίασης. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία μελετώνται δύο προβλήματα σχεδίασης τα οποία

διαφοροποιούνται ως προς την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Στο πρώτο, κριτήριο βελτιστοποίησης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του κόστους ναυπήγησης το οποίο εκφράζεται μέσω του εκτόπισματος (μικρότερο εκτόπισμα → μικρότερο κόστος), ενώ στο δεύτερο κριτήριο αποτελεί η αύξηση της ευστάθειας η οποία εκφράζεται μέσω του ελάχιστου απαιτούμενου μετακεντρικού ύψους (μικρότερο GM_{req} → καλύτερη ευστάθεια).

Η μεθοδολογία σχεδίασης – βελτιστοποίησης αποτελείται από έξι (6) βασικά βήματα:

1. Αρχική εκτίμηση των κυρίων διαστάσεων (initial estimate of dimensions)..
2. Εκτίμηση της εγκατεστημένης ισχύος (power estimate).
3. Δεδομένα γραμμικοποίησης (data for linearization).
4. Γραμμικοποίηση (linearization).
5. Γραμμικός Προγραμματισμός (linear programming).
6. Περαιτέρω διερεύνηση (post solution analysis).

Ο συγγραφέας στο τέλος της εργασίας του παραθέτει ένα παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας. Το παράδειγμα αυτό αφορά τον προσδιορισμό των βέλτιστων κυρίων διαστάσεων ενός πλοίου bulk carrier με συγκεκριμένες απαιτήσεις πλοιοκτήτη οι οποίες αφορούν το πρόσθετο βάρος (DWT), την ταχύτητα, την ακτίνα ενεργείας και το μετακεντρικό ύψος (GM), για τις οποίες το ελαχιστοποιείται το απαιτούμενο μετακεντρικό ύψος (GM_{req}) ή το εκτόπισμα και ικανοποιείται ένα σύνολο από περιορισμούς.

Σημειώνεται ότι, τρία χρόνια αργότερα δημοσιεύεται μία νέα εργασία [Lyon & Mistree, 1985], κατά την οποία επιλύεται το ίδιο πρόβλημα σχεδίασης χρησιμοποιώντας όμως αυτή τη φορά ηλεκτρονικούς υπολογιστές και τη γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ξεπερνώντας έτσι τους περιορισμούς που έθετε η χρήση του calculator. Επιπλέον, οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν βασισμένες στον Προγραμματισμό Στόχων (Goal Programming) και όχι στον Γραμμικό Προγραμματισμό.

Το 1989 οι Papanikolaou et al. παρουσίασαν μία εργασία σχετικά με τη σχεδίαση ταχύπλων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων διπλής γάστρας [Papanikolaou et al., 1989]. Η μεθοδολογία βελτιστοποίησης περιγράφεται μέσω μίας συγκεκριμένης εφαρμογής που αφορά τη σχεδίαση ενός πλοίου SWATH (Small Waterplane Area Twin Hull) για την ελληνική ακτοπλοΐα. Στόχος ήταν ο προσδιορισμός εκείνων των κύριων διαστάσεων αλλά και της μορφής της ημιγάστρας, έτσι ώστε το τελικό πλοίο να είναι όσο το δυνατόν πιο επικερδές για τον πλοιοκτήτη (με βάση ένα συγκεκριμένο σενάριο λειτουργίας), να έχει τη μικρότερη δυνατή ισχύ πρόωσης και καλή υδροδυναμική συμπεριφορά σε συγκεκριμένες θάλασσες. Ως αφετηρία χρησιμοποιήθηκε η υπάρχουσα σχεδίαση ενός Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου τύπου SWATH, από την οποία μετά από αναλυτικότερη μελέτη των οικονομικών παραμέτρων και συστηματική διερεύνηση των διαστάσεων της κατώτερης γάστρας και του strut προέκυψε μία νέα σχεδίαση με μικρότερη ισχύ πρόωσης και εκτόπισμα.

Η βελτιστοποίηση του πρωτοτύπου πραγματοποιείται σε τρία (3) βασικά βήματα. Πρόκειται δηλαδή για ένα σύστημα βελτιστοποίησης σε περισσότερα του ενός σταδίων (multi-stage system), όπως αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 1.6, όπου κάθε στάδιο αφορά επιμέρους παραμέτρους του προβλήματος. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η οικονομική μελέτη και η αξιολόγηση της σχεδίασης αναφορικά με την επίδραση του μεγέθους, της μεταφορικής

ικανότητας και της ταχύτητας χρησιμοποιώντας τα οικονομικά κριτήρια του Δείκτη Καθαρής Παρούσας Αξίας (NPVI) και του ελάχιστου απαιτούμενου Ναύλου (RFR).

Στο δεύτερο στάδιο, για δεδομένες τιμές της μεταφορικής ικανότητας (μέσω της τιμής του εκτοπίσματος) και της ταχύτητας αναζητούνται, με χρήση του αλγορίθμου *tangent search*, οι κύριες διαστάσεις αλλά και η μορφή της κατώτερης γάστρας και των *struts* (οι οποίες καθορίζονται μέσω ορισμένων βασικών παραμέτρων) για τα οποία ελαχιστοποιείται η ισχύς πρόωσης. Η εκτίμηση του συντελεστή της αντίστασης κυματισμού βασίστηκε στην θεωρία αντίστασης κυματισμού λεπτού πλοίου (*thin ship wave resistance theory*), ενώ για τον υπολογισμό της αντίστασης τριβής χρησιμοποιήθηκαν οι συντελεστές για πτερύγια και αξονοσυμμετρικά σχήματα.

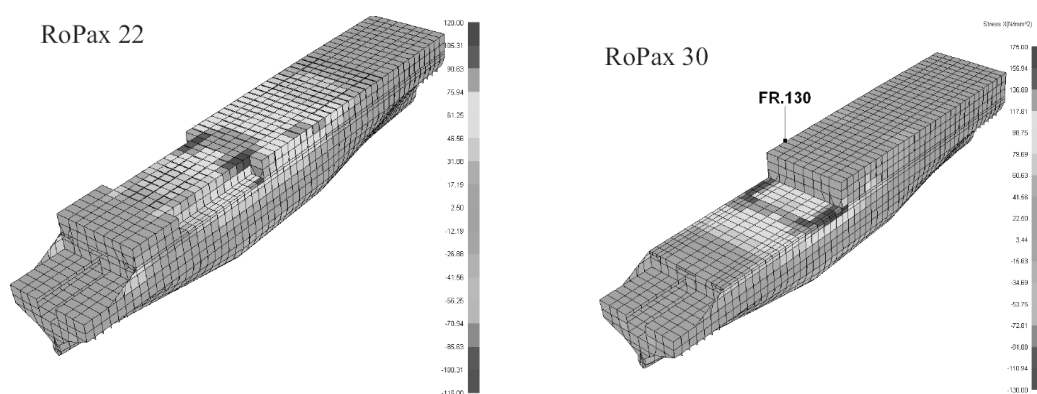
Στο τελευταίο στάδιο πραγματοποιείται τοπική βελτιστοποίηση μορφής κατά την οποία επαναπροσδιορίζεται το σχήμα της τελικής γάστρας και των *struts* με μεγαλύτερη λεπτομέρεια με σκοπό την περαιτέρω μείωση της ισχύος πρόωσης. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό είναι αρκετά πιο χρονοβόρα από εκείνη του δεύτερου σταδίου, καθώς περιέχει εκτός των άλλων τη γεωμετρική αναπαράσταση της γάστρας μέσω επιπέδων τμημάτων (*planar panels mesh generation*). Οι τεταγμένες των κόμβων των *panels* αποτελούν ελεύθερες μεταβλητές. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προσπαθεί τώρα να ελαχιστοποιήσει την αντίσταση κυματισμού μεταβάλλοντας τις τεταμένες των κόμβων, διατηρώντας παράλληλα σταθερό το εκτόπισμα. Έτσι, βελτιώνοντας τη λύση που επιτεύχθηκε στο δεύτερο στάδιο της βελτιστοποίησης, επιτυγχάνεται περαιτέρω μείωση της ισχύος πρόωσης.

Δύο χρόνια αργότερα οι Paranikolaou et al. παρουσιάζουν μία νέα εργασία με τίτλο «*Preliminary Design of a High-Speed SWATH Passenger/Car Ferry*» [Paranikolaou et al., 1991]. Η εργασία αυτή αποτελεί ουσιαστικά μία αναλυτικότερη και πιο ολοκληρωμένη παρουσίαση της εργασίας του 1989. Η βασική διαφορά είναι ότι τώρα παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την αντίσταση και την υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου. Τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό τη μαθηματική μοντελοποίηση και τα αποτελέσματα της μεθόδου βελτιστοποίησης.

Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Method, FEM*) είναι αρκετά περίπλοκο και παρουσιάζει πολύ υψηλό υπολογιστικό κόστος. Χαρακτηριστική εφαρμογή του προβλήματος αυτού αποτελεί η πρόσφατη εργασία των Zanic et al. στην οποία προτείνεται μία μεθοδολογία βελτιστοποίησης της μεταλλικής κατασκευής ενός Ε/Γ-Ο/Γ το οποίο έχει δεδομένες κύριες διαστάσεις και μορφή γάστρας, στη φάση του αρχικού σχεδιασμού [Zanic et al., 2010]. Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει τρία βασικά στάδια τα οποία σχετίζονται με την «τοπολογία», τη γεωμετρία και την διαστασιολόγηση των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής, αντίστοιχα. Σε κάθε ένα από τα τρία αυτά στάδια διατυπώνονται και επιλύονται διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης δημιουργώντας, ένα σειριακό σύστημα (Σχήμα 1.6). Στο τελικό στάδιο κατασκευάζεται το πλήρες τρισδιάστατο FEM μοντέλο του πλοίου το οποίο αξιολογείται με βάση την ασφάλεια (τοπική αντοχή), το βάρος, το κόστος και την αντοχή της κατασκευής σε κόπωση. Το αποτέλεσμα της μεθοδολογίας αυτής είναι η εύρεση των βέλτιστων χαρακτηριστικών της μεταλλικής κατασκευής ενός Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου το οποίο διαθέτει δύο καταστρώματα ενδιαίτησης, μεγάλους χώρους μεταφοράς οχημάτων και συν-

δυσάζει χαμηλό κέντρο βάρους, μειωμένο βάρος άφορτου σκάφους (lightweight) και μειωμένα λειτουργικά έξοδα.

Στο πρώτο στάδιο καθορίζεται η βέλτιστη «τοπολογία» της μεταλλικής κατασκευής, η οποία αφορά τον αριθμό των καταστρωμάτων υπερκατασκευών (δύο ή τρία), το πλάτος του lower hold (τρεις διαφορετικές θέσεις της διαμήκουσ φρακτής) και τις διαστάσεις των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής. Συνολικά κατασκευάστηκαν έξι διαφορετικά FEM μοντέλα (2x3), ένα για κάθε γενική διάταξη, τα οποία ελέγχθηκαν σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα και αξιολογήθηκαν με βάση το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, το κόστος των υλικών και την κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους. Στο στάδιο αυτό τα μοντέλα δεν είναι πλήρη αλλά περιλαμβάνουν το μέρος εκείνο του πλοίου του οποίου η γενική διάταξη διαφοροποιείται ανάλογα με μεταβλητές του προβλήματος (Σχήμα 2.1). Θέτοντας μια σειρά από κριτήρια επιλογής όπως η ευστάθεια, το εμβαδόν μεταφοράς οχημάτων, το κόστος κατασκευής κ.α., γίνεται η επιλογή της σχεδίασης εκείνης η οποία ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τις προτιμήσεις των μελετητών. Η σχεδίαση αυτή θα χρησιμοποιηθεί ως σχεδίαση αναφοράς για το επόμενο στάδιο της βελτιστοποίησης.

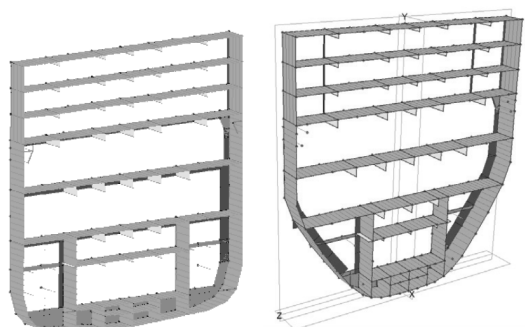


Σχήμα 2.1: Κατανομή διαμήκων τάσεων στις δύο εναλλακτικές σχεδιάσεις με τρία (αριστερά) και δύο (δεξιά) καταστρώματα υπερκατασκευών [Zanic et al., 2010]

Στο δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης κατασκευάζονται δύο 2.5D FEM μοντέλα εγκάρσιων τομών της μεταλλικής κατασκευής, το πρώτο στον μέσο νομέα και το δεύτερο σε έναν πρωραίο νομέα του πλοίου (Σχήμα 2.2). Έπειτα από κατάλληλους υπολογισμούς, επιλέγονται τελικά δέκα διαφορετικές λύσεις για κάθε έναν από τους παραπάνω νομείς με κριτήρια που σχετίζονται με τις απαιτήσεις του νηογνώμονα, το βάρος και το κέντρο βάρους, προκειμένου να αποτελέσουν στη συνέχεια τον αρχικό πληθυσμό (Design Of Experiments, DOE) του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στο πρόβλημα αυτό αντικειμενικές συναρτήσεις αποτελούν η μείωση του κόστους κατασκευής και του βάρους, καθώς και η αύξηση της επάρκειας σε αντοχή. Εκτός από τις απαιτήσεις του νηογνώμονα, περιορισμό αποτελεί και η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του βάρους προκειμένου να επιτευχθεί μείωση της έκστασης των πιθανών βέλτιστων λύσεων (Pareto optimal solutions).

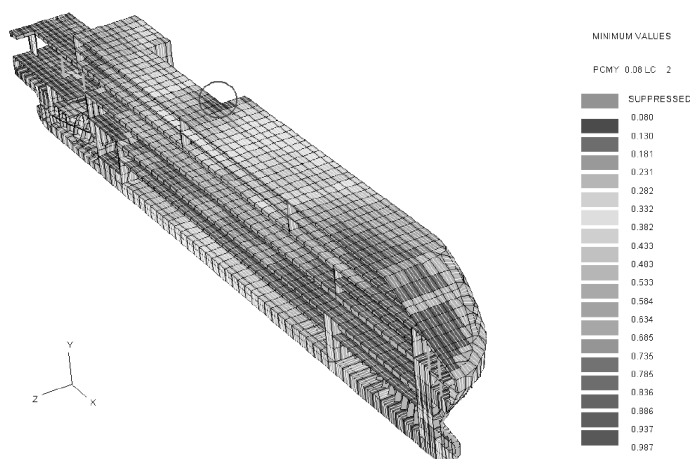
Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους, για κάθε ένα από τα μοντέλα των δύο νομέων πραγματοποιείται περαιτέρω μελέτη αντοχής σε καμπτικές φορτίσεις μόνο για τις λύσεις εκείνες που ανήκουν στο σύνολο Pareto. Για την επιλογή της λύσης εκείνης (βέλτιστης) που θα χρησιμοποιηθεί στο επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας, ορίζεται ένας αριθμός οικονομι-

κοτεχνικών κριτηρίων επιλογής τα οποία αφορούν το «ολικό» Pareto σύνολο στο οποίο εμπεριέχονται οι λύσεις Pareto και των δύο υπό εξέταση νομέων. Η τελική επιλογή πραγματοποιείται από τον πλοιοκτήτη με βάση το μικρότερο δυνατό κόστος λειτουργίας (κόστος καυσίμου). Για τη σχεδίαση αυτή πραγματοποιούνται έπειτα περαιτέρω υπολογισμοί αντοχής με βάση τα υπάρχοντα 2.5D FEM μοντέλα.



Σχήμα 2.2: 2.5D FEM μοντέλο για τους δύο υπό εξέταση νομείς [Zanic et al., 2010]

Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας κατασκευάζεται το πλήρες 3D FEM μοντέλο της επιλεγείσας σχεδίασης, στο οποίο συμπεριλαμβάνονται οι περιοχές της πρύμνης και της πλώρης (Σχήμα 2.3). Οι υπολογισμοί αντοχής πραγματοποιήθηκαν με βάση τους κανονισμούς του νηογνώμονα για πλοίο που καταπονείται λόγω κυματισμών. Αν και η διαστασιολόγηση των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής προέρχεται από το προηγούμενο στάδιο, πραγματοποιείται περαιτέρω βελτιστοποίηση στα σημεία εκείνα των υπερκατασκευών στα οποία παρατηρείται ανάπτυξη υψηλών τάσεων, με μοναδική αντικειμενική συνάρτηση το βάρος. Τέλος για το τελικό πλοίο πραγματοποιήθηκε μελέτη εφικτότητας, στην οποία περιλαμβάνονται οι υπολογισμοί των φορτίσεων και αποκρίσεων του πλοίου με βάση τις φυσικές συνθήκες στην περιοχή την οποία πρόκειται αυτό να λειτουργήσει.

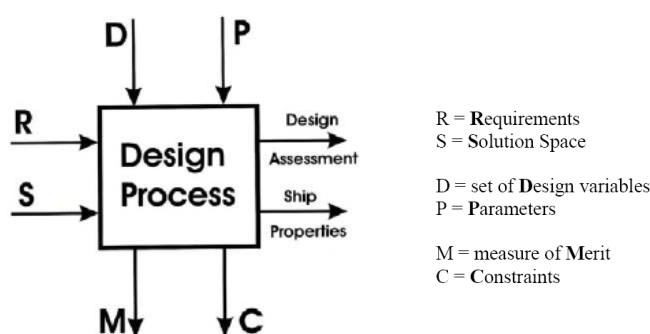


Σχήμα 2.3: Πλήρες 3D FEM μοντέλο του τελικού πλοίου [Zanic et al., 2010]

Ο Nowacki σε πρόσφατη εργασία του πραγματοποιεί μία ιστορική αναδρομή στην εξέλιξη της χρήσης υπολογιστών στη ναυπηγική επιστήμη, αποτυπώνοντας επιπλέον τις σύγχρονες τάσεις και επιχειρώντας να προβλέψει τις μελλοντικές εξελίξεις στην ανάπτυξη μεθόδων μελέτης και σχεδίασης πλοίων [Nowaki, 2009]. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς για πάνω από έξι δεκαετίες. Αν και η αρχική τους χρήση περιορι-

ζόταν στη εκτέλεση υπολογισμών, γρήγορα έγιναν ένα πολύτιμο βοήθημα για την επίλυση προβλημάτων λήψης αποφάσεων

Στο πρώτο μέρος της παραπάνω εργασίας παρουσιάζονται οι ορισμοί των όρων «Design», «CAD» και «CASD». Σύμφωνα με αυτό, η σχεδίαση (design) στη Μηχανική αποτελεί γενικά μία διαδικασία λήψης αποφάσεων, η οποία ξεκινά από έναν αριθμό προκαθορισμένων προδιαγραφών και καταλήγει στον ορισμό των γεωμετρικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος. Όπως ισχύει και για άλλα βιομηχανικά προϊόντα, έτσι και το πρόβλημα της σχεδίασης πλοίου είναι ένα πολυσύνθετο πρόβλημα, στο οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη ένας σημαντικός αριθμός από παραμέτρους διαφορετικής φύσεως, οι οποίες αφορούν διαφορετικά χαρακτηριστικά του πλοίου και καθορίζουν σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό την τελική λύση (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Στοιχεία που περιλαμβάνονται στη διαδικασία σχεδίασης [Nowaki, 2009]

Για το λόγο αυτό η αναγκαιότητα της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών στη σχεδίαση φάνηκε από πολύ νωρίς, ξεκινώντας από τον εννοιολογικό ορισμό «CAD» (Computer-Aided Design) από τον Ross το 1960 και συνεχίζοντας έξι χρόνια αργότερα με την εμφάνιση του όρου «CASD» (Computer-Aided Ship Design) σε ένα ομώνυμο συμπόσιο στις ΗΠΑ. Στη ναυπηγική βιομηχανία η πρώτη εφαρμογή συστημάτων CAD στην παραγωγική διαδικασία καταγράφεται το 1968 και αφορά την αυτοματοποιημένη μορφοποίηση και κοπή ελασμάτων με βάση το σχέδιο των ναυπηγικών γραμμών, από το Νορβηγικό σύστημα AUTOKON.

Στη συνέχεια του άρθρου γίνεται μία αναδρομή στη δομή των λειτουργιών που ενσωμάτωσαν τα πρώτα λογισμικά σχεδίασης και αναφέρονται οι στόχοι που αυτά έπρεπε να επιτυγχάνουν. Θεμελιώδες χαρακτηριστικό των συστημάτων CAD και CASD είναι η δυνατότητα γεωμετρικής αναπαράστασης γραμμών και επιφανειών και γενικότερα σχημάτων ελευθέρως μορφής. Σημαντική συνεισφορά στον τομέα αυτό παρείχαν οι εργασίες των Coops (1964), Bezier (1966/67) και Riesenfeld (1973), οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για τις σύγχρονες μεθόδους γεωμετρικής αναπαράστασης, όπως τα NURBS (Piegl 1987). Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων στατικότητας κτιρίων και μηχανικής των ρευστών ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1960. Στην επιστήμη της ναυπηγικής, οι πρώτες εφαρμογές αφορούσαν τη διεξαγωγή υπολογισμών αντίστασης και πρόωσης και η χρήση τους περιοριζόταν στους εξειδικευμένους επιστήμονες της εποχής, οι οποίοι ανέπτυσαν συνήθως τους δικούς τους κώδικες (π.χ. Pien & Moore 1963). Παράλληλα όμως με την πρόοδο στον τομέα της ρευστομηχανικής, οι αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών έγιναν αναπόσπαστο κομμάτι σε πολλές από τις μεθοδολογίες μελέτης και σχεδίασης πλοίου που αναπτύχθηκαν στη συνέχεια.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας, ο Nowacki αναφέρεται στη δομή και την εξέλιξη των σύγχρονων λογισμικών σχεδίασης, μέσω συγκεκριμένων εφαρμογών από τη διεθνή βιβλιογραφία, οι οποίες σχετίζονται με την επίλυση προβλημάτων σχεδίασης-βελτιστοποίησης πλοίου. Με τη βοήθεια των σύγχρονων CASD συστημάτων μπορούν σήμερα να επιλυθούν μία σειρά από τέτοια προβλήματα τα οποία πολλές φορές χαρακτηρίζονται από πολυπλοκότητα και την ανάγκη διεξαγωγής μεγάλου όγκου υπολογισμών. Ένα από τα βασικά προβλήματα στη σχεδίαση ενός πλοίου αποτελεί η αναζήτηση των βέλτιστων κυρίων διαστάσεων με βάση έναν αριθμό προκαθορισμένων κριτηρίων και περιορισμών. Το πρόβλημα αυτό εμφανίζεται στη βιβλιογραφία από πολύ νωρίς, ενώ συνεχίζει μέχρι και σήμερα να αποτελεί ένα πεδίο συνεχιζόμενης έρευνας. Γενικά, στην πρώτη γενιά των προβλημάτων βελτιστοποίησης πλοίου εντάσσονται εκείνα τα προβλήματα που περιέχουν μία αντικειμενική συνάρτηση, συνήθως κάποιο οικονομικό κριτήριο. Αρχικά, η βέλτιστη λύση προσδιοριζόταν με συστηματική μεταβολή των κυρίων διαστάσεων (Murphy 1966, Gallin 1967, Kuniyasu 1968, Gilfillan 1969) ή με τη χρήση κάποιου αλγορίθμου τυχαίας αναζήτησης (Mandel 1966). Εξέλιξη των παραπάνω μεθόδων αποτέλεσε η εισαγωγή ενός ή περισσοτέρων περιορισμών, οι οποίοι αφορούσαν συνήθως το φορτίο, την ευστάθεια, την αντοχή, κ.ά. Δεδομένου όμως ότι τόσο οι αντικειμενικές συναρτήσεις όσο και οι περιορισμοί των προβλημάτων βελτιστοποίησης στη σχεδίαση ενός πλοίου είναι συνήθως μη γραμμικές συναρτήσεις, για την επίλυσή τους ήταν απαραίτητη η χρήση τεχνικών Μη-Γραμμικού Προγραμματισμού (Non-Linear Programming, NLP). Μερικά προβλήματα σχεδίασης πλοίου, τα οποία μπορούν να διερευνηθούν μέσω των συστημάτων CAD ή CASD, είναι η μη γραμμική παρεμβολή σημείων από ομαλές καμπύλες γραμμές, η ορθή παραγωγή επιφανειών μέσω κατάλληλου πλέγματος καμπυλών, η βελτιστοποίηση της ομαλότητας ενός πλέγματος καμπυλών και της παραγόμενης επιφάνειας, η παραμετρική σχεδίαση της επιφάνειας της γάστρας ως σύνολο και ανά τμήματα, η υδροδυναμική βελτιστοποίηση του πλοίου, η γεωμετρική αναπαράσταση και μελέτη της μεταλλικής κατασκευής, κ.ά. [Bertram, 2003].

Πέραν από τα μεμονωμένα προβλήματα σχεδίασης, τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά μοντέλα Μελέτης πλοίου, ξεκινώντας από τη γνωστή ελικοειδή καμπύλη του Evans [Evans, 1959] και φτάνοντας έως τις σύγχρονες Risk-based μεθοδολογίες [Ραρανικόλαου, 2009]. Ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των μεθοδολογιών μελέτης και σχεδίασης που βασίζονται στη χρήση CASD συστημάτων αποτελούν η βελτιστοποίηση (Optimization & Multi-criteria optimization), η εξασφάλιση του κέρδους και η μείωση του ρίσκου (Economy & Safety), η διαδραστικότητα (Integration), η προσομοίωση (Simulation, Visualization), η παράλληλη σχεδίαση (Collaborative & concurrent design), η ολοκληρωμένη διαχείριση σχεδίασης (Database support design) και η διάσπαση μεγάλων προβλημάτων σε μικρότερα (Problem decomposition and size reduction).

Το 1992 ο Sen παρουσιάζει μία εργασία στην οποία εντάσσει το πρόβλημα της σχεδίασης πλοίου στο επιστημονικό πεδίο της Λήψης Αποφάσεων (Decision Making Theory) [Sen, 1992]. Προτείνει μία μεθοδολογία επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης σχεδίασης με περιορισμούς βασισμένη στη θεωρία Προγραμματισμού Στόχων (Goal Programming). Ο συγγραφέας αρχικά αναφέρεται στην ανάπτυξη και την εφαρμογή των θεωριών βελτιστοποίησης στη μελέτη και σχεδίαση πλοίου όπου, σε αντίθεση με το μοντέλο της ελικοειδούς καμπύλης μελέτης [Evans, 1959] ή του τρισδιάστατου κώνου σχεδίασης [Andrews, 1981], ο μελετητής έχει τη δυνατότητα, αρχικά να παράγει έναν αριθμό εναλλακτικών σχεδιάσεων και στη συνέχεια να αναζητήσει το βέλτιστο πλοίο λαμβάνοντας υπόψη

ταυτόχρονα μια σειρά από κριτήρια και περιορισμούς. Περισσότερο ενδιαφέρον και φυσικά μεγαλύτερο βαθμό δυσκολίας παρουσιάζουν τα προβλήματα με αντικρουόμενα κριτήρια και διαφορετικής σπουδαιότητας περιορισμούς (hard, soft constraints).

Για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, είδη το 1992 υπήρχαν αρκετές μέθοδοι που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στη μελέτη και σχεδίαση πλοίου. Μία από αυτές παρουσιάζεται από το συγγραφέα με αναφορές σε αρκετά προγενέστερες εργασίες, όπως τις εργασίες των Fiacco et al. (1968) και των Moe et al. (1971), όπου ένα πρόβλημα με περιορισμούς μπορεί να μετατραπεί σε πρόβλημα χωρίς περιορισμούς με τη χρήση συναρτήσεων ποινής (penalty functions). Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, με τη χρήση κατάλληλων συναρτήσεων ποινής, αρχικά εξασφαλίζεται ότι όλες οι εναλλακτικές σχεδιάσεις θα βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν οι περιορισμοί του προβλήματος, ενώ στη συνέχεια με κατάλληλα βήματα προσεγγίζεται η λύση εκείνη η οποία ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Ως μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής αναφέρονται το γεγονός ότι όλοι οι περιορισμοί λαμβάνονται ως ίδιας σπουδαιότητας, ενώ δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη η σύγκρουση μεταξύ των περιορισμών ή/και των κριτηρίων του προβλήματος.

Αναλύοντας την έννοια της επιλογής στη σχεδίαση, ο συγγραφέας αναφέρεται στο διαχωρισμό, από τους Hwang & Yoon [Hwang & Yoon, 1981], των πολυκριτηριακών προβλημάτων λήψης αποφάσεων (Multi Criteria Decision Making – MCDM problems) σε εκείνα όπου η παραγωγή του συνόλου των εναλλακτικών λύσεων αποτελεί μέρος του προβλήματος (Multiple Objective Decision Making – MODM) και σε εκείνα όπου το πρόβλημα έγκειται αποκλειστικά στην αναζήτηση του βέλτιστου από ένα προκαθορισμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων (Multiple Attribute Decision Making – MADM). Επιπλέον ορίζει ως «χαρακτηριστικό» (attribute) μίας πιθανής λύσης ένα γνώρισμα της λύσης αυτής, όπως για παράδειγμα το βάρος ενός πλοίου το οποίο είναι ανεξάρτητο από την κρίση του μελετητή, ενώ ο «αντικειμενικός στόχος» (objective) ενός προβλήματος προσδίδει στο αντίστοιχο «χαρακτηριστικό» μία κατεύθυνση στην οποία επιθυμεί ο μελετητής αυτό να κινηθεί. Έτσι ένα «χαρακτηριστικό» με κατεύθυνση, όπως η ελαχιστοποίηση του βάρους του πλοίου, αποτελεί «αντικειμενικό στόχο». Ο «σκοπός» (goal) σε ένα πρόβλημα MCDM επιτυγχάνεται όταν ένα «χαρακτηριστικό» καθοδηγούμενο από τον «αντικειμενικό στόχο» υπερβεί ένα προκαθορισμένο επίπεδο, για παράδειγμα το βάρος του πλοίου μειωθεί κατά 10%.

Στη συνέχεια ο συγγραφέας, χρησιμοποιώντας τη θεωρία Προγραμματισμού Στόχων, προτείνει μία εναλλακτική μεθοδολογία για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης στη σχεδίαση πλοίων, την οποία ονομάζει «*Generalized Goal Programming Approach to the Marine Design*». Βασιζόμενος σε προηγούμενη εργασία των Dlesk και Liebman, διατυπώνει το μαθηματικό ορισμό του προβλήματος σύμφωνα με τον οποίο, η τελική λύση δεν είναι οπωσδήποτε και η «βέλτιστη» (optimum), με τη στενή έννοια του όρου, αλλά μία «συμβιβαστική» (compromise) λύση μεταξύ των στόχων και των περιορισμών. Σημειώνεται ότι στην προσέγγιση αυτή οι «περιορισμοί» (goal constraints) δημιουργούν ένα σύνολο το οποίο πρέπει να προσδιοριστεί όσο το δυνατόν πληρέστερα, ενώ γενικά οι περιορισμοί, με την κλασική έννοια, δημιουργούν ένα σύνορο εντός του οποίου πρέπει να βρίσκεται κάθε εναλλακτική λύση προκειμένου να χαρακτηριστεί ως εφικτή (feasible solution). Προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της αριθμητικής εφαρμογής της μεθόδου, είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των στόχων. Επιπλέον, προκειμένου να υπάρξει λύση θα πρέπει οι περιορισμοί να είναι συνεχείς, κάτι που δεν είναι απαραίτητο να ισχύει και για τους

«σκοπούς» (goals) του προβλήματος. Ακολουθώντας την προτεινόμενη μέθοδο επιλογής οι στόχοι που έχει θέσει ο μελετητής είναι δυνατόν να ταξινομηθούν, ως προς τη σπουδαιότητά τους, με τη χρήση κατάλληλων συντελεστών βάρους για κάθε έναν από αυτούς.

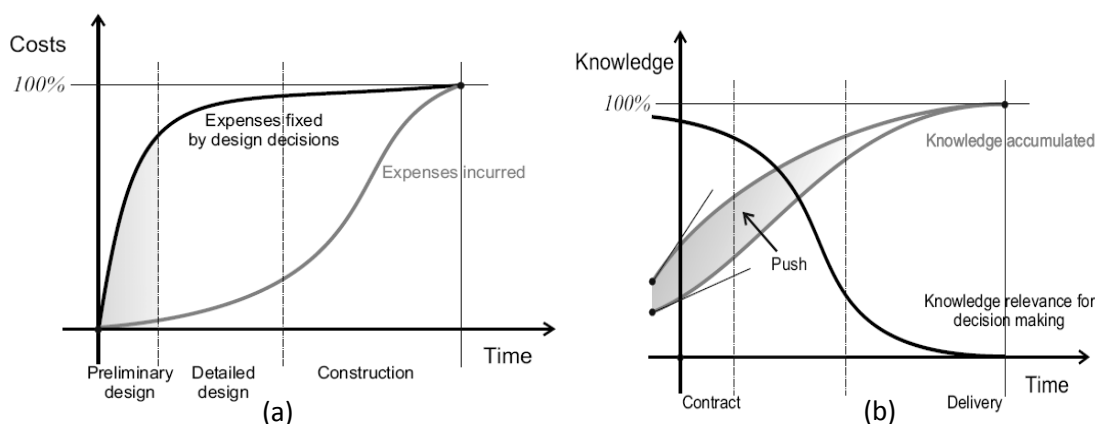
Προκειμένου να στηρίξει τη νέα αυτή μέθοδο πολυκριτηριακής λήψης απόφασης, ο συγγραφέας παρουσιάζει μία εφαρμογή κατά την οποία αναζητά το βέλτιστο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containership) με βάση την επίτευξη της απαιτούμενης μεταφορικής ικανότητας (TEU), την ικανοποίηση της εξίσωσης του εκτοπίσματος, την ελαχιστοποίηση του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου (RFR) και την ελαχιστοποίηση του βάρους θαλάσσιου έρματος. Είναι φανερό ότι οι δύο πρώτοι στόχοι του προβλήματος αποτελούν «περιορισμούς» (goal constraints), ενώ οι τελευταίοι «αντικειμενικούς στόχους» (goals). Στο παράδειγμα αυτό χρησιμοποιούνται στοιχεία από τη Διδακτορική Διατριβή του W. Wimal Siri, στην οποία περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης που εφαρμόζεται για την παραγωγή του συνόλου των λύσεων. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής, αφορούν διαφορετικές μεταξύ τους λύσεις, για διαφορετικούς βαθμούς ιεράρχησης των τεσσάρων στόχων του προβλήματος. Στην προτελευταία ενότητα της εργασίας του Sen παρατίθενται στοιχεία από τη θεωρία λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων (MADM) και την εφαρμογή τους στη σχεδίαση βιομηχανικών προϊόντων. Αν και γενικά το πρόβλημα της σχεδίασης πλοίου ανήκει στην κατηγορία των MODM προβλημάτων, όπου η παραγωγή των υποψήφιων βέλτιστων λύσεων αποτελεί μέρος του προβλήματος, οι μέθοδοι επιλογής που παρουσιάζονται από τον συγγραφέα μπορούν χρησιμοποιηθούν, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, για την επιλογή της βέλτιστης σχεδίασης από ένα προϋπάρχον σύνολο, όπως για παράδειγμα το σύνολο Pareto.

Το 2004 οι Harries et al. παρουσιάζουν μία εργασία στην οποία αναλύεται το γενικό πρόβλημα της σχεδίασης πλοίου και περιγράφεται η χρήση σύγχρονων σχεδιαστικών εργαλείων (CAD, CASD, CAGD – Computer Aided Geometric Design, CAE – Computer Aided Engineering, CFD – Computational Fluid Dynamics) για την αύξηση της παραγωγικότητας αλλά και της ποιότητας της τελικής σχεδίασης [Harries et al., 2004]. Η εργασία αυτή δεν περιλαμβάνει αποκλειστικά την ανάπτυξη κάποιας εφαρμογής βελτιστοποίησης αλλά περιγράφει, μέσα από ένα θεωρητικό υπόβαθρο, τη σύγχρονη τάση στη μελέτη και σχεδίαση πλοίων.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται, οι σχεδιάσεις πλοίων αφορούν ως επί των πλείστων την κατασκευή ενός (one-off design) ή μικρού αριθμού όμοιων πλοίων (small-series design). Γενικά, η απόκτηση ενός πλοίου αποτελεί αναμφίβολα μία πολύ μεγάλη επένδυση, ενώ η διαχείρισή του είναι μία πολύπλοκη και πολυδάπανη διαδικασία. Κάθε αστοχία στη σχεδίαση ή την κατασκευή έχει σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομική εκμετάλλευση του πλοίου, καθώς μπορεί να επηρεάσει άμεσα τη λειτουργική αξία και την αξία μεταπώλησης του πλοίου. Ως εκ τούτου, οι περισσότερες σχεδιάσεις, κυρίως εμπορικών πλοίων, στηρίζονται σε δοκιμασμένες «συνταγές» και χαρακτηρίζονται από έναν εγγενή συντηρητισμό. Παρόλα αυτά, η ναυπηγική βιομηχανία είναι παγκόσμια με έντονο ανταγωνισμό κάτι που συνεπάγεται την ανάγκη ύπαρξης καινοτομιών σε όλες τις φάσεις της ζωής ενός πλοίου (σχεδιασμός, παραγωγή, διαχείριση και λειτουργία, απόσυρση).

Ο σχεδιασμός ενός πλοίου χαρακτηρίζεται από έναν σημαντικό αριθμό παραμέτρων, κριτηρίων και περιορισμών ο οποίος αφορά το σύνολο της οικονομικής του ζωής, ξεκινώντας με την απόφαση του επενδυτή (planning) και το σχεδιασμό (design). Όπως συμβαίνει στο σχε-

διασμό όλων των πολύπλοκων συστημάτων, έτσι και σε ό,τι αφορά το πλοίο δεν είναι ξεκάθαρο κατά το αρχικό στάδιο ποιες σχεδιαστικές παράμετροι θα πρέπει να ληφθούν ως ελεύθερες μεταβλητές και ποιες ως περιορισμοί.



Σχήμα 2.5: Κόστος και γνώση σε συνάρτηση με το χρόνο [Harries et al., 2004]

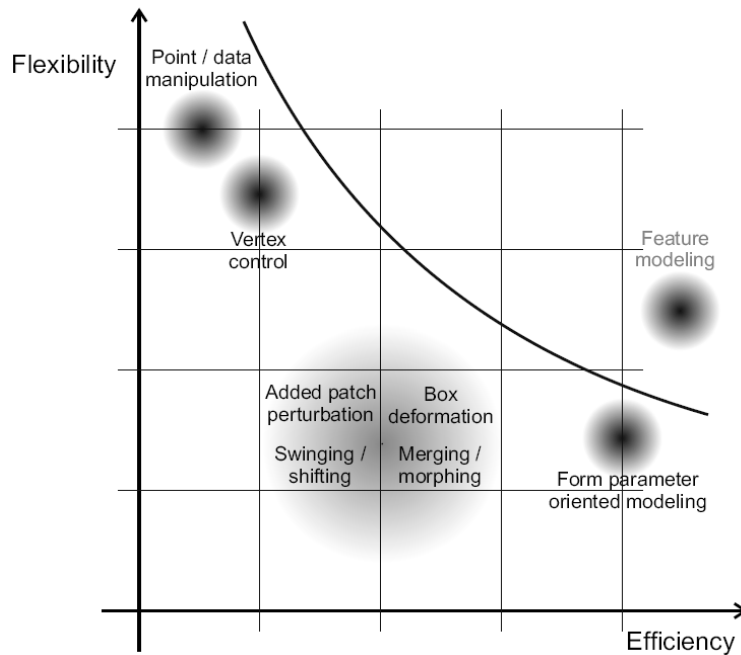
Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5a, οι αποφάσεις που λαμβάνονται στη φάση του αρχικού σχεδιασμού (κύριες διαστάσεις, μορφή της γάστρας, κ.ά.) επηρεάζουν πολύ περισσότερο το τελικό κόστος από ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται στα επόμενα στάδια σχεδίασης αλλά και κατά την κατασκευή του πλοίου. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5b, η ελευθερία της λήψης αποφάσεων που αφορούν τη σχεδίαση είναι υψηλή στην αρχή, αλλά προσεγγίζει το μηδέν καθώς το προϊόν αρχίζει να κατασκευάζεται. Παρόλα αυτά, στη φάση του αρχικού σχεδιασμού η γνώση για το τελικό προϊόν είναι αρκετά περιορισμένη. Οι Mistree et al. σε σχετική εργασία το 1990 περιγράφουν τα παραπάνω ως ένα «δίλλημα» που αντιμετωπίζει ο μελετητής προκειμένου να επιτύχει τον περιορισμό του κενού μεταξύ της γνώσης και της σχεδιαστικής ελευθερίας στη φάση του αρχικού σχεδιασμού. Όσο περισσότερες πληροφορίες γίνονται γνωστές στη φάση αυτή, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα οι αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τον αρχικό σχεδιασμό, όχι μόνο να είναι σύμφωνες αλλά να οδηγούν και σε μείωση του προβλεπόμενου κόστους [Mistree et al., 1990].

Για να συμβεί αυτό, θα πρέπει εκτός το σύνολο των πληροφοριών στην αρχή μιας διαδικασίας σχεδίασης, να αυξηθεί επίσης και ο ρυθμός απόκτησης της γνώσης (Σχήμα 2.5b). Η ποσότητα της γνώσης στην αρχή μίας διαδικασίας σχεδίασης είναι συνυφασμένη με το παρελθόν και είναι συνάρτηση της εμπειρίας καθώς και της δυνατότητας εύρεσης, απόκτησης και επεξεργασίας δεδομένων. Από την άλλη, η ταχύτητα απόκτησης της γνώσης σχετίζεται με το μέλλον και τη δυνατότητα άντλησης πληροφοριών για το συγκεκριμένο προϊόν μέσω της γεωμετρικής αναπαράστασης (modeling) και της μαθηματικής προσομοίωσης (simulation).

Στη συνέχεια της εργασίας οι συγγραφείς παρουσιάζουν το γενικό πρόβλημα της γεωμετρικής αναπαράστασης ενός προϊόντος και ειδικότερα της μοντελοποίησης της επιφάνειας της γάστρας ενός πλοίου. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι που αφορούν εφαρμογές CAGD (Computer Aided Geometric Design). Στο πρόβλημα της σχεδίασης πλοίου χρησιμοποιούνται κυρίως τεχνικές B-Rep (Boundary Representation

Techiques)⁴ καθώς είναι καταλληλότερες για την αναπαραγωγή σχημάτων ελεύθερης μορφής. Η γεωμετρική αναπαράσταση ενός προϊόντος, μέσω ενός συστήματος CAGD μπορεί γενικά να πραγματοποιηθεί με δύο διαφορετικούς τρόπους: συμβατικά (conventional modeling) ή παραμετρικά (parametric modeling). Ποιοτικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα και των δύο αυτών προσεγγίσεων είναι:

- Η γενίκευση (Flexibility), δηλαδή η δυνατότητα αναπαραγωγής οποιουδήποτε σχήματος
- Η αποδοτικότητα (Efficiency) - δηλαδή η ταχύτητα παραγωγής της γεωμετρίας
- Η ποιότητα (Effectiveness) – δηλαδή η ποιότητα της γεωμετρίας (πιστότητα, πληρότητα)



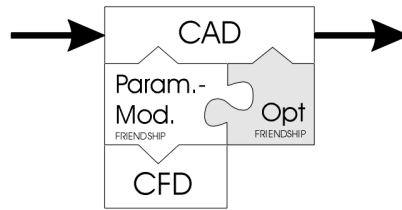
Σχήμα 2.6: Ευελιξία έναντι της αποτελεσματικότητας στη γεωμετρική μοντελοποίηση [Harries et al., 2004]

Γενικά σε ένα σύστημα B-Rep (όπως και σε άλλα συστήματα), η γενίκευση και η αποδοτικότητα είναι δύο αντικρουόμενα χαρακτηριστικά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.6. Αν και η εφαρμογή που παρουσιάζεται εδώ αφορά τη σχεδίαση της επιφάνειας της γάστρας, τα παραπάνω ισχύουν εξίσου στο γενικότερο πρόβλημα της παραμετρικής σχεδίασης πλοίου. Για παράδειγμα, όταν μοντελοποιείται η Γενική Διάταξη ενός πλοίου είναι επιθυμητό ο αλγόριθμος να μπορεί να αναπαράγει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά τη γεωμετρία των εσωτερικών χώρων, στο λιγότερο δυνατό χρόνο. Είναι κατανοητό ότι θα πρέπει να βρεθεί μια «χρυσή τομή» ώστε, χωρίς να μειωθεί η ποιότητα του αποτελέσματος (περισσότερο δε όταν από αυτήν εξαρτάται η ακρίβεια των υπολογισμών), το σύστημα να διαθέτει πολύ καλή γενίκευση και καλή αποδοτικότητα. Θεωρούμε δηλαδή ότι η ταχύτητα παραγωγής της γεωμετρίας έχει λιγότερη σημασία από ότι η δυνατότητα παραγωγής της, δεδομένου ότι η πρώτη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υπολογιστική ισχύ η οποία συνεχώς αυξάνει καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία των Η/Υ.

Μέσω του προβλήματος της υδροδυναμικής βελτιστοποίησης της γάστρας με χρήση CFD λογισμικών, αναλύεται στη συνέχεια ο τρόπος με τον οποίο συνδέεται η παραγωγή της γεωμετρίας, η προσομοίωση της κίνησης του πλοίου και η διεξαγωγή των υπολογισμών με το

⁴ π.χ. Ian Stroud, *Boundary Representation Modelling Techniques*, Springer, 2006 (ISBN: 978-1-84628-312-3)

περιβάλλον βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με τους συγγραφείς το μέλλον της παραμετρικής σχεδίασης-βελτιστοποίησης βρίσκεται σε εκείνα τα λογισμικά πακέτα που ενσωματώνουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7: Παράδειγμα ολοκληρωμένου λογισμικού σχεδίασης-βελτιστοποίησης [Harries et al., 2004]

Μέσω ενός συνοπτικού παραδείγματος παρουσιάζονται οι τρεις κύριες φάσεις επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, οι οποίες σύμφωνα με τους συγγραφείς είναι η προκαταρκτική (pre-processing), η κύρια (actual optimization) και η τελική (post-processing). Η εφαρμογή αφορά την αναζήτηση της βέλτιστης μορφής της γάστρας ενός ταχύπλοου Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου συγκεκριμένων διαστάσεων με βάση την ελαχιστοποίηση της ολικής αντίστασης αλλά και του δείκτη ναυτίας MSI (Motion Sickness Incidence) και αποτελεί, όπως αναφέρεται και στον επίλογο της εργασίας, απόδειξη της χρησιμότητας εφαρμογής της θεωρίας βελτιστοποίησης στη σχεδίαση πλοίων.

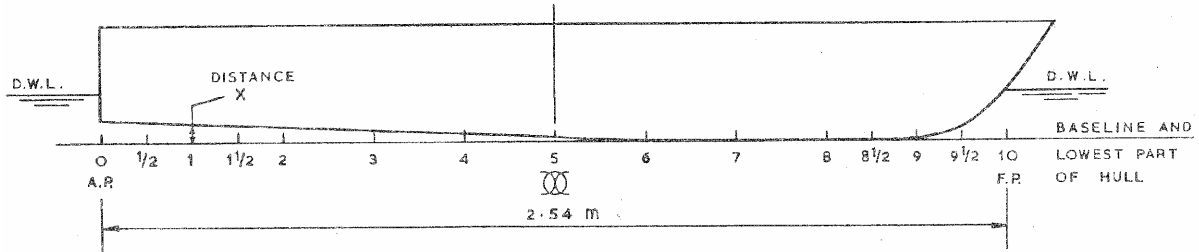
2.3. Συστηματικές σειρές γαστρών ημικτοπίσματος

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται δύο εργασίες οι οποίες αφορούν τη συστηματική σειρά ταχύπλων γαστρών στρογγυλού πυθμένα NPL και τη συστηματική σειρά γαστρών με διπλή ακμή (NTUA), αντίστοιχα. Όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο, στη μεθοδολογία προμελέτης η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, οι δύο παραπάνω συστηματικές σειρές χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή της γεωμετρίας της γάστρας, κατά τη διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης.

Η συστηματική σειρά ταχύπλων γαστρών στρογγυλού πυθμένα NPL παρουσιάστηκε το 1969 προκειμένου να εφαρμοστεί στη σχεδίαση πλοίων τα οποία λειτουργούν σε ταχύτητες $F_N = 0.4 \div 1.1$ [Marwood et al., 1969]. Στην παρακάτω εργασία ο Bailey, παρουσιάζει μια σειρά από πειραματικά αποτελέσματα τα οποία αφορούν την αντίσταση, την πρόωση και τη δυναμική συμπεριφορά της συστηματικής σειράς [Bailey, 1976]. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, εκτός των άλλων, για τον υπολογισμό της ισχύος πρόωσης, και της επίδρασης της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης, των πρυμναίων σφηνών και των αντιδιαβροχικών λωρίδων στην αντίσταση μιας γάστρας η οποία έχει συγκεκριμένες κύριες διαστάσεις.

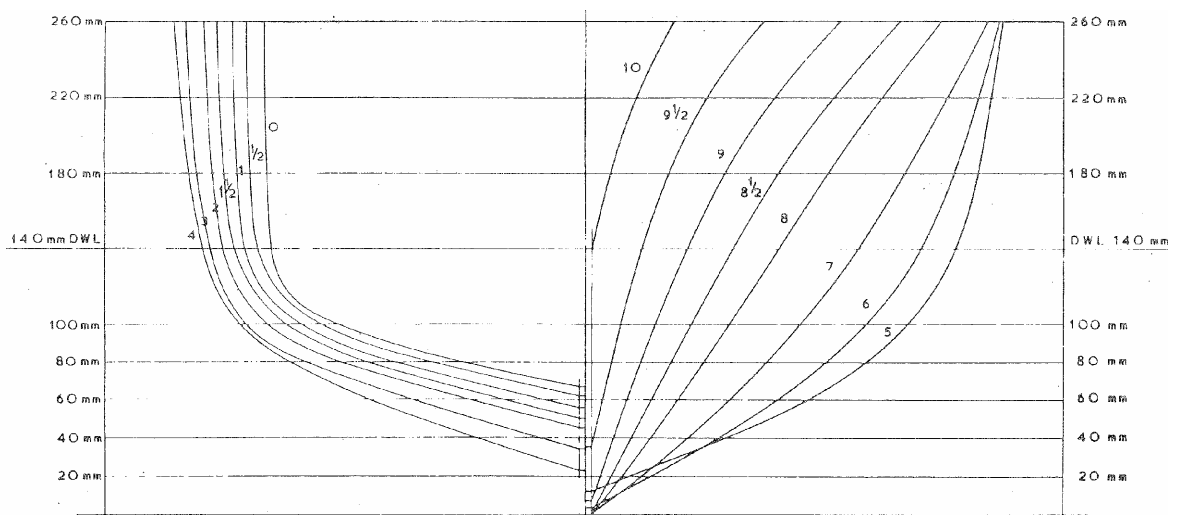
Τα βασικά γενικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σειράς, εκτός από τον στρογγυλό πυθμένα και τον επίπεδο καθρέφτη, είναι η ευθεία κατάληξη των ίσαλων στην πλώρη, οι νομείς σχήματος U στην πρύμνη και οι ευθείες διαμήκεις τομές. Επιπλέον, η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης LCB σε όλα τα μοντέλα της σειράς βρίσκεται πρύμνηθεν του μέσου νομεία. Το πατρικό μοντέλο, το προφίλ του οποίου φαίνεται στο Σχήμα 2.8 και το σχέδιο εγκαρσίων τομών στο Σχήμα 2.9, έχει λόγο μήκους προς πλάτος $L/B = 6.25$, λόγο πλάτους

προς βύθισμα $B/T = 2.90$ και συντελεστή λυγρότητας $M = L/\nabla^{1/3} = 6.59$. Τα υπόλοιπα πειραματικά μοντέλα της σειράς προήλθαν από το πατρικό με μεταβολή του λόγου μήκους προς πλάτος ($L/B = 3.33, 4.54, 5.41, 6.25, 7.50$) και του συντελεστή λυγρότητας ($M = 4.47 \div 8.30$). Συνολικά, από το πατρικό σκάφος προέκυψαν 21 μοντέλα με σταθερό μήκος ισάλου και σταθερή διαμήκη θέση του κέντρου άντωσης (43.6% LWL), για τα οποία πραγματοποιήθηκαν πειράματα αντίστασης.



Σχήμα 2.8: Το profile του πατρικού μοντέλου στη centre line [Bailey, 1976]

Από τα πειράματα αυτά προέκυψαν κατάλληλα διαγράμματα τα οποία περιέχουν τις τιμές της υπόλοιπης αντίστασης (R_R / Δ , Δ =εκτόπισμα) συναρτήσει του συντελεστή λυγρότητας M και της ταχύτητας F_∇ ($F_\nabla = V / \sqrt{g\nabla^{1/3}}$). Σε άλλα διαγράμματα παρουσιάζονται αποτελέσματα τα οποία αφορούν τη γωνία δυναμικής διαγωγής και τη σχετική ανύψωση ή βύθιση του σκάφους στη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους, το οποίο για μηδενική ταχύτητα ταυτίζεται με το κέντρο άντωσης. Η χρήση αντιδιαβροχικών λωρίδων στις υψηλές ταχύτητες χαρακτηρίζεται ως απαραίτητη, καθώς μειώνει σημαντικά τη διαβροχή της πρύμνης από τους παραγόμενους κυματισμούς, ενώ σε μερικά πειράματα λόγω της ελαφριάς μείωσης της δυναμικής διαγωγής παρουσιάζεται αντίστοιχη μείωση της αντίστασης.



Σχήμα 2.9: Σχέδιο εγκάρσιων τομών πατρικού μοντέλου [Bailey, 1976]

Μέρος των πειραμάτων αντίστασης αποτέλεσε και η μελέτη της χρήσης πρυμναίων σφηνών για τη μείωση της δυναμικής διαγωγής και της αντίστασης. Από τα αντίστοιχα πειράματα προέκυψε ότι καλύτερα αποτελέσματα αντίστασης παρουσίασαν τα μοντέλα εκείνα στα οποία, με τη χρήση κατάλληλων σφηνών η γωνία δυναμικής διαγωγής κυμαινόταν μεταξύ

1° και 1.5° , ενώ η λειτουργία των σφηνών είναι πιο αποδοτική σε μια περιοχή ταχυτήτων γύρω από $F_N = 0.5$.

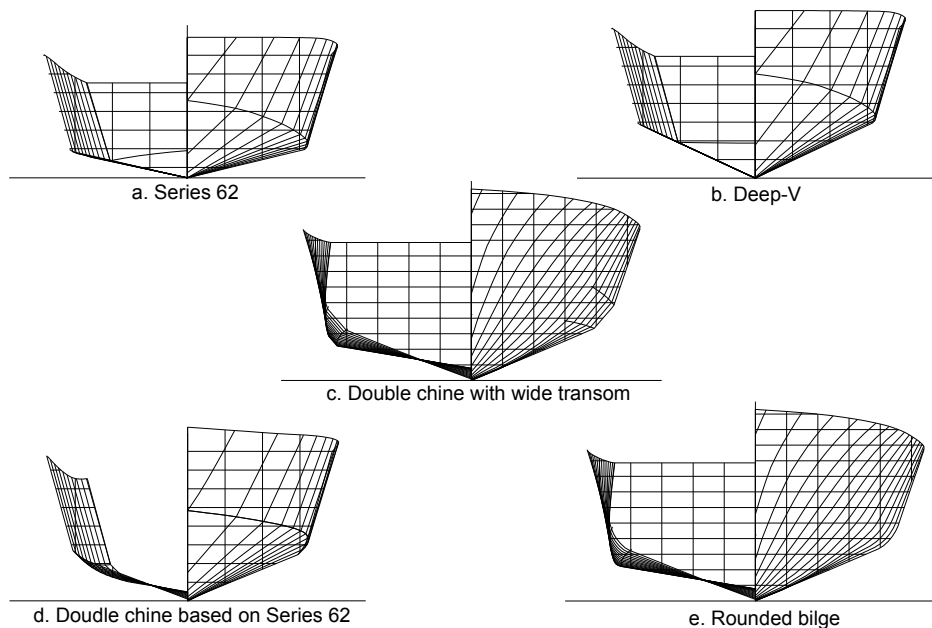
Εκτός από τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν την αντίσταση, στην εργασία αυτή παρατίθενται αποτελέσματα μετρήσεων αυτοπρόωσης τα οποία προέκυψαν έπειτα από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε υπαρκτά πλοία, τα οποία είχαν κατασκευαστεί με βάση το πατρικό μοντέλο της σειράς NPL. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τον προσδιορισμό του συντελεστή μείωσης της ώσης (t_d), του βαθμού απόδοσης της γάστρας (n_H), του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής (n_R) και των συντελεστών συσχέτισης μοντέλου-πλοίου, για πλοία με ή χωρίς πρυμναίες σφήνες. Στα πλοία αυτά πραγματοποιήθηκαν επίσης πειράματα seakeeping στα οποία μετρήθηκαν οι βασικές κινήσεις του πλοίου συναρτήσει της ταχύτητας (F_N) σε συγκεκριμένες καταστάσεις θάλασσες και για διαφορετικά ύψη κύματος. Επιπλέον, από τα πειράματα manoeuvring τα οποία πραγματοποιήθηκαν διαπιστώθηκε ότι ακόμα και σε μικρές γωνίες περιστροφής του πηδαλίου δεν εμφανίζονται φαινόμενα αστάθειας.

Με βάση την εργασία του Bailey, το 1997 οι Radojicic et al. παρουσίασαν μία αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό της αντίστασης και της δυναμικής διαγωγής πλοίων της συστηματικής σειράς NPL βασιζόμενη σε παλινδρομική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων [Radojicic et al., 1997]. Η αριθμητική αυτή μέθοδος, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή για την εκτίμηση της αντίστασης και της δυναμικής διαγωγής, αποτελεί σημαντικό βοήθημα για την επίλυση προβλημάτων σχεδίασης της επιφάνειας της γάστρας καθώς ελαττώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος σε σχέση με τη χειροκίνητη διαδικασία ή τη χρήση CFD λογισμικών.

Στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής (ΕΝΘΥ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου μια συστηματική σειρά γαστρών με διπλή ακμή (Double Chine), πλατύ καθρέπτη και στρεβλή επιφάνεια ολίσθησης [Grigoropoulos et al., 2002]. Η σειρά αυτή είναι κατάλληλη για τη σχεδίαση Ε/Γ, Ε/Γ-Ο/Γ, πλοίων αναψυχής ή πλοίων ειδικών προδιαγραφών (π.χ. πολεμικά, ακτοφυλακής) τα οποία λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες. Η σειρά αποτελείται από πέντε διαφορετικές μορφές γάστρας με λόγο μήκους προς πλάτος 4.00, 4.75, 5.50, 6.25 και 7.00. Το πατρικό σκάφος είναι αυτό με λόγο $L/B=5.50$, ενώ η μικρότερη τιμή του λόγου είναι 4.00 επειδή η σειρά δεν αναφέρεται σε μικρά σκάφη αναψυχής και η μεγαλύτερη τιμή 7.00 προκειμένου να καλύπτεται η συνήθης περιοχή σχεδιασμού επιβατηγών πλοίων.

Το πατρικό σκάφος έχει δύο ακμές οι οποίες εκτείνονται από τον καθρέπτη έως περίπου το 70% του μήκους στην πλώρη. Η γάστρα έχει πλατύ καθρέπτη και κοίλες πλευρές στην περιοχή της πλώρης ενώ η γωνία ανύψωσης πυθμένα μεταβάλλεται με το μήκος και κυμαίνεται από 10% στον καθρέπτη έως και 70% στην πλώρη. Τα μέλη της σειράς προέκυψαν από το πατρικό κρατώντας την ίδια μορφή στην μέση τομή και μετατρέποντας κατάλληλα τα υπόλοιπα μεγέθη. Βασική παράμετρο της σειράς αποτελεί ο αδιάστατος λόγος όγκου εκτοπίσματος $C_{DL} = \nabla / (0.1L_{WL})^3$, όπου ∇ είναι ο όγκος εκτοπίσματος και L_{WL} το μήκος της ισάλου. Γενικά, οι χαμηλές τιμές του λόγου C_{DL} αντιστοιχούν σε καταστάσεις λειτουργίας μεγάλων πλοίων, ενώ οι υψηλότερες σε μικρότερα επιβατηγά σκάφη και σκάφη αναψυχής.

Μια σειρά από εκτενή πειράματα στην πειραματική δεξαμενή του ΕΝΘΥ επιβεβαίωσαν τα πολύ καλά χαρακτηριστικά αντίστασης αλλά και την άριστη συμπεριφορά των μελών της σειράς σε κυματισμούς.



Σχήμα 2.10: Σχέδιο εγκαρσίων τομών των πέντε «ισοδύναμων γαστρών [Grigoropoulos et al., 2002].

Για την αξιολόγηση των χαρακτηριστικών της αντίστασης του πατρικού σκάφους, πραγματοποιήθηκαν επίσης εκτενή πειράματα (με και χωρίς αντιδιαβροχικές λωρίδες) και σύγκριση των αποτελεσμάτων με πέντε «ισοδύναμες», ισομήκεις γάστρες βασιζόμενες στις παρακάτω συστηματικές σειρές:

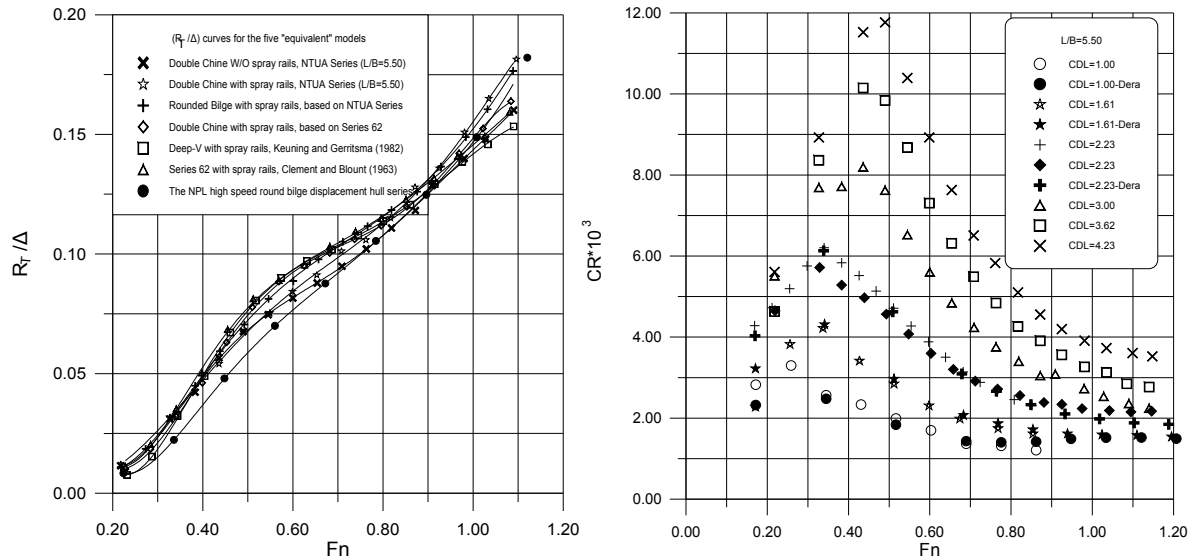
- Σειρά 62, απλής ακμής, Clement & Blount (1963)
- Βαθύ “V”, απλής ακμής, Keuning & Gerritsma (1982)
- Διπλής ακμής, βασισμένη στη σειρά 62, Grigoropoulos & Loukakis (1995)
- Με διπλή ακμή και πλατύ καθρέπτη, Savitsky et al (1972)
- Παραλλαγή της προηγούμενης με στρογγυλό πυθμένα και πλατύ καθρέπτη, Grigoropoulos & Loukakis (1995)

Το σχέδιο εγκαρσίων τομών των παραπάνω γαστρών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 ενώ τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τη μελέτη αυτή είναι τα εξής:

- Το πρότυπο με διπλή ακμή και πλατύ καθρέπτη, παρουσιάζει καλύτερα χαρακτηριστικά αντίστασης στην προ-ολισθητική περιοχή ταχυτήτων.
- Οι αντιδιαβροχικές λωρίδες δεν είναι απαραίτητες για τη συγκεκριμένη μορφή γάστρας. Στην πραγματικότητα αυξάνουν την αντίσταση, ενώ τη βελτιώνουν στις υπόλοιπες μορφές γαστρών.

Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η σύγκριση των τιμών της αντίστασης των πέντε “ισοδύναμων” γαστρών. Στο ίδιο Σχήμα παρουσιάζονται επίσης για το πατρικό σκάφος τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων που αφορούν την τιμή της υπόλοιπης αντίστασης για διάφορες καταστάσεις φόρτωσης.

Το 2001 οι Radojčić et al. παρουσίασαν μία αριθμητική μέθοδο για τον υπολογισμό της αντίστασης και της δυναμικής διαγωγής των πλοίων της σειράς NTUA [Radojčić et al., 2001]. Οι εξισώσεις υπολογισμού προήλθαν έπειτα από παλινδρομική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα παραμετρικής σχεδίασης και βελτιστοποίησης αποφεύγοντας τη χρήση CFD λογισμικών. Για το λόγο αυτό η παραπάνω μέθοδος χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή για την εκτίμηση της ισχύος πρόωσης και τον υπολογισμό της δυναμικής διαγωγής, στην περίπτωση που η γεωμετρία της επιφάνειας της γάστρας βασίζεται στη συστηματική σειρά NTUA.



Σχήμα 2.11: α) Σύγκριση αντίστασης των πέντε ισοδύναμων γαστρών και β) υπόλοιπη αντίσταση πατρικής γάστρας [Grigoropoulos et al., 2002].

2.4. Στοιχεία από τις θεωρίες Βελτιστοποίησης και Λήψης Αποφάσεων

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται στοιχεία και βιβλιογραφικές αναφορές από την επιστημονική περιοχή της Βελτιστοποίησης και της Λήψης Αποφάσεων (Decision Making). Συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία τα προβλήματα βελτιστοποίησης αντιμετωπίζονται ως προβλήματα λήψης απόφασης. Στην προσέγγιση αυτή μέρος ενός προβλήματος βελτιστοποίησης θεωρείται όχι μόνο η επίλυση αλλά και η σύνθεσή του, όπως η επιλογή των κατάλληλων ελεύθερων μεταβλητών και περιορισμών, καθώς και η επιλογή του καταλληλότερου αλγορίθμου επίλυσης.

Γενικά, η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου για την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης δεν είναι πάντοτε εύκολη. Εξαρτάται τόσο από τη φύση των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών, όσο και από την ταχύτητα και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου, καθώς και από την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορεί να κατηγοριοποιηθούν με βάση διάφορα κριτήρια ως εξής [Rao, 1996]:

Διαχωρισμός με βάση τον αριθμό των παραμέτρων

- Μονοπαραμετρικά
- Πολυπαραμετρικά

Διαχωρισμός με βάση τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων

- Μονοκριτηριακά (single objective)
- Πολυκριτηριακά (multiple objective)

Διαχωρισμός με βάση την ύπαρξη περιορισμών

- Χωρίς περιορισμούς (unconstrained)
- Με περιορισμούς (constrained)

Διαχωρισμός με βάση της φύση των μεταβλητών

- Στατικά (static)
- Δυναμικά (dynamic)

Διαχωρισμός με βάση τη φύση του προβλήματος

- Βέλτιστου ελέγχου (optimal control)
- Μη Βέλτιστου ελέγχου (non optimal control)

Διαχωρισμός με βάση τη φύση των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών

- Γραμμικά (linear)
- Μη γραμμικά (nonlinear)
- Γεωμετρικά (geometric)

Διαχωρισμός με βάση την αιτιοκρατική φύση των παραμέτρων

- Ντετερμινιστικά (deterministic)
- Στοχαστικά (stochastic)

Διαχωρισμός με βάση τη διαχωρισιμότητα των εξισώσεων

- Διαχωρίσιμα (Separable)
- Μη διαχώριμα (Non Separable)

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, συναντώνται στη βιβλιογραφία και ως Τεχνικές Μαθηματικού Προγραμματισμού και αποτελούν αντικείμενο μελέτης ξεχωριστού κλάδου των Μαθηματικών. Παρακάτω παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των μεθόδων αυτών σε κατηγορίες, όπως συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία. Ο διαχωρισμός αυτός δεν είναι απόλυτος, ενώ μία μέθοδος βελτιστοποίησης μπορεί να περιέχει στοιχεία από μία ή περισσότερες κατηγορίες.

Διαχωρισμός με βάση τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων

- Προγραμματισμός μιας αντικειμενικής συνάρτησης (single-objective programming)
- Προγραμματισμός πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων (multi-objective programming)

Διαχωρισμός με βάση την ύπαρξη παραγώγων [Andersson, 2000]

- Μέθοδοι βασιζόμενες στην ύπαρξη παραγώγων (Derivative methods): π.χ. μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange, μέθοδος της διχοτόμου, μέθοδος Newton, κ.ά.

- Μέθοδοι μη βασιζόμενες στην ύπαρξη παραγώγων (Non derivative methods): π.χ. Προσομοιούμενη Ανόπτηση (Simulated Annealing), Τυχαία αναζήτηση (Random search), αναζήτηση Ταμπού (Tabu search), Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms), Complex/Simplex, κ.ά.

Διαχωρισμός με βάση τον αριθμό και τη γραμμικότητα των εξισώσεων και των παραμέτρων [Rao, 1996]:

- Γραμμικός προγραμματισμός (linear programming): Οι μέθοδοι αυτές επιλύουν προβλήματα που περιέχουν μόνο γραμμικές εξισώσεις, οι παράμετροι των οποίων λαμβάνουν πραγματικές τιμές.
- Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (mixed integer linear programming): Οι μέθοδοι αυτές επιλύουν προβλήματα που περιέχουν μεν μόνο γραμμικές εξισώσεις, ορισμένες όμως από τις παραμέτρους λαμβάνουν ακέραιες τιμές.
- Μη γραμμικός προγραμματισμός (non linear programming): Οι μέθοδοι αυτές επιλύουν προβλήματα που περιέχουν μη γραμμικές εξισώσεις, οι παράμετροι των οποίων λαμβάνουν πραγματικές τιμές.
- Μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (mixed integer non linear programming): Οι μέθοδοι αυτές επιλύουν προβλήματα που περιέχουν μη γραμμικές εξισώσεις, ορισμένες όμως από τις παραμέτρους λαμβάνουν ακέραιες τιμές.

Γενικευμένος διαχωρισμός [Rao, 1996]:

- Μέθοδοι λογισμού (Calculus methods)
- Λογισμός μεταβολών (Calculus of variations)
- Μη γραμμικός προγραμματισμός (Non linear programming)
- Γεωμετρικός προγραμματισμός (Geometrical programming)
- Τετραγωνικός προγραμματισμός (Quadratic programming)
- Γραμμικός προγραμματισμός (Linear programming)
- Δυναμικός προγραμματισμός (Dynamic programming)
- Ακέραιος προγραμματισμός (Integer programming)
- Στοχαστικός προγραμματισμός (Stochastic programming)
- Διαχωρίσιμος προγραμματισμός (Separable programming)
- Προγραμματισμός στόχων (Goal programming)
- Μέθοδοι δικτύων (Network methods): CPM, PERT
- Θεωρία παιγνίων (Game theory)
- Προσομοιωμένη ανόπτηση (Simulated annealing)
- Γενετικοί ή εξελικτικοί αλγόριθμοι (Genetic or evolutionary algorithms)
- Εξελικτικός προγραμματισμός (Evolutionary programming)
- Νευρωνικά δίκτυα (Neural Networks)
- Ευριστικές (αυτοδιδασχείς) μέθοδοι (Heuristic, Metaheuristic)

Στα πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης οι αντικειμενικές συναρτήσεις συχνά αντικρούονται ή ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Ως εκ τούτου η λύση δεν είναι μονοσήμαντη αλλά ένα σύνολο πιθανών βέλτιστων λύσεων.

Η πιο κοινή μέθοδος παραγωγής του συνόλου αυτού είναι η βελτιστότητα Pareto (Pareto optimality) και η χρήση του ορίου Pareto (Pareto front). Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε από τον Ιταλογαλλικής καταγωγής οικονομολόγο V. Pareto το 1906 και σήμερα συχνά αναφέρεται ως Edgeworth-Pareto Optimality [Pareto, 1906]:

Μία λύση είναι Pareto βέλτιστη, εάν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και είναι τέτοια ώστε δεν υπάρχει άλλη αποδεκτή λύση η οποία να οδηγεί σε βελτίωση ενός κριτηρίου χωρίς να εξαναγκάζει τουλάχιστον ένα από τα υπόλοιπα κριτήρια του προβλήματος σε ύφεση.

Έστω δύο διανύσματα \mathbf{x} και \mathbf{x}^* , τα οποία αποτελούν αποδεκτές λύσεις ενός k -κριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης και $\mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$ τα αντίστοιχα διανύσματα που αποτελούνται από τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Σύμφωνα με τη θεωρία Pareto, σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης, η λύση \mathbf{x}^* είναι κατά Pareto βέλτιστη της λύσης \mathbf{x} αν και μόνο αν:

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, \mathbf{f}_i(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}_i(\mathbf{x}^*) \quad \wedge \quad \exists j \in \{1, \dots, k\}: \mathbf{f}_j(\mathbf{x}) < \mathbf{f}_j(\mathbf{x}^*) \quad (2.1)$$

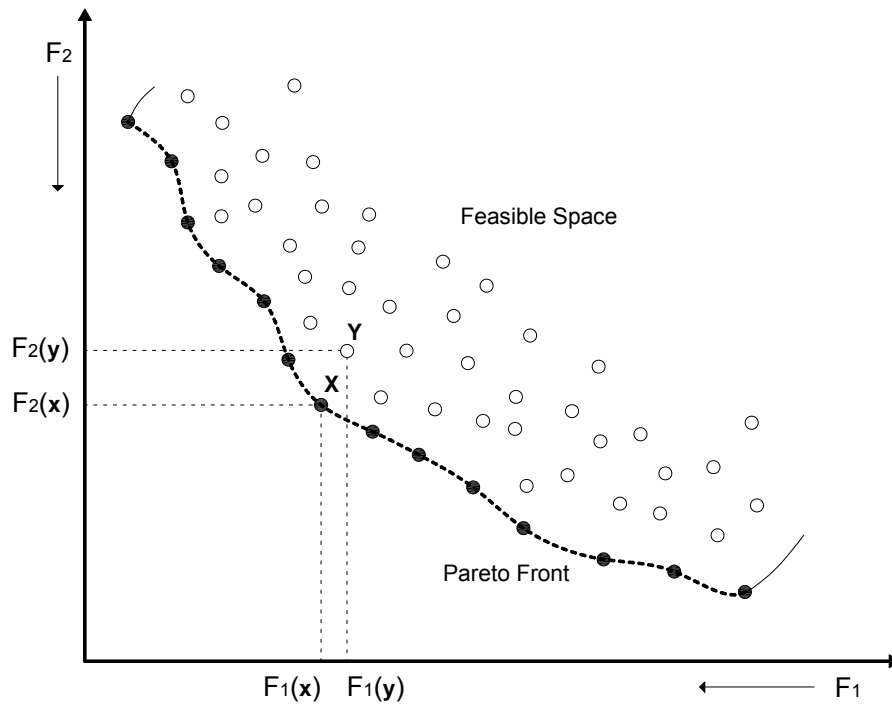
Αντίστοιχα, σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, η λύση \mathbf{x}^* είναι κατά Pareto βέλτιστη της λύσης \mathbf{x} αν και μόνο αν:

$$\forall i \in \{1, \dots, k\}, \mathbf{f}_i(\mathbf{x}) \geq \mathbf{f}_i(\mathbf{x}^*) \quad \wedge \quad \exists j \in \{1, \dots, k\}: \mathbf{f}_j(\mathbf{x}) > \mathbf{f}_j(\mathbf{x}^*) \quad (2.2)$$

Όταν ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι δύο, τότε το Pareto όριο αναπαρίσταται από μία καμπύλη γραμμή, ενώ εάν ο αριθμός τους είναι τρία, από μία καμπύλη επιφάνεια. Εάν ο αριθμός των κριτηρίων βελτιστοποίησης είναι μεγαλύτερος των τριών, τότε δεν μπορεί να υπάρξει γεωμετρική αναπαράσταση του ορίου Pareto.

Η γενική περίπτωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης (ελαχιστοποίησης), με δύο κριτήρια φαίνεται στο Σχήμα 2.12. Στο καρτεσιανό αυτό διάγραμμα, φαίνεται μέρος των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων του συνόλου των αποδεκτών λύσεων (feasible space) και το Pareto όριο μεταξύ των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων.

Η ανάγκη για την επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης με αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις δεν αφορά μόνο την επιστήμη της Ναυπηγικής, αλλά ολόκληρο το φάσμα της μηχανικής και γενικότερα κάθε τομέα Λήψης Αποφάσεων. Για το λόγο αυτό τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί αρκετές πλατφόρμες βοήθειας στη Λήψη Αποφάσεων, τα λεγόμενα Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support Systems – DSS) τα οποία ανήκουν στην ευρύτερη επιστημονική περιοχή της Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (Multicriteria Decision Making MCDM).



Σχήμα 2.12: Το όριο Pareto μεταξύ δύο αντικειμενικών συναρτήσεων και η βελτιστότητα Pareto

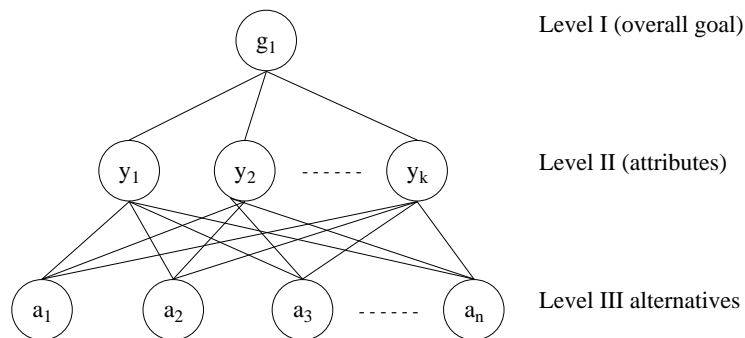
Γενικά, τα πολυκριτηριακά προβλήματα Λήψης Αποφάσεων έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά:

- Πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις / κριτήρια (Multiple objectives /attributes): Κάθε πρόβλημα έχει περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις / κριτήρια. Ο μελετητής πρέπει να δημιουργήσει διαφορετικές αντικειμενικές συναρτήσεις για κάθε υποπρόβλημα. Για παράδειγμα, η βελτιστοποίηση στη σχεδίαση ενός πλοίου μπορεί να περιλαμβάνει την ελαχιστοποίηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και την ελαχιστοποίηση της εγκατεστημένης ισχύος για δεδομένη ταχύτητα.
- Αντικρουόμενα κριτήρια (Conflict among criteria): Αρκετά κριτήρια αντικρούονται ή ανταγωνίζονται μεταξύ τους. Για παράδειγμα, το κριτήριο της ελαχιστοποίησης της αντίστασης, που συνεπάγεται την κατασκευή λεπτόγραμμης γάστρας, έρχεται σε αντίθεση με τη μεγιστοποίηση της μεταφορικής ικανότητας, δηλαδή την κατασκευή μεγαλύτερων χώρων φορτίου.
- Διαφορετικές μονάδες μέτρησης (Incommensurable units): Κάθε αντικειμενική συνάρτηση έχει τη δική της μονάδα μέτρησης. Για παράδειγμα, το κόστος κτήσης μετράται σε ευρώ, το βάρος σε τόνους και η ισχύς σε kW. Είναι λοιπόν δύσκολο να συγκριθούν άμεσα και να αποτιμηθεί η μεταξύ τους αλληλεπίδραση.
- Επιλογή της βέλτιστης λύσης (Design Selection): Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η επίλυση ενός πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης δεν οδηγεί σε μία μόνο λύση αλλά αποτελείται από ένα σύνολο υποψήφια βέλτιστων λύσεων. Για την επιλογή μίας και μόνο λύσης ως βέλτιστης, απαιτούνται κανόνες και διερεύνηση του συνόλου αυτού ώστε να βρεθεί μια λύση, συγκρινόμενη με τις υπόλοιπες, ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τους κανόνες αυτούς.

Στο σύνολό τους, τα πολυκριτηριακά προβλήματα λήψης αποφάσεων, μπορεί να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες [Hwang & Yoon, 1981]:

- Προβλήματα λήψης αποφάσεων πολλαπλών χαρακτηριστικών (Multiattribute Decision Making, MADM)
- Προβλήματα λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων (Multiobjective Decision Making, MODM)

Ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων πολλαπλών χαρακτηριστικών (MADM), περιλαμβάνει ένα σύνολο προκαθορισμένων λύσεων και έναν αριθμό συγκεκριμένων κριτηρίων επιλογής. Ένα πρόβλημα MADM μπορεί να περιέχει ποσοτικά ή ποιοτικά δεδομένα. Η «επιλογή» συνίσταται στην εκλογή της βέλτιστης λύσης από ένα προϋπάρχον σύνολο εναλλακτικών λύσεων ή την ταξινόμηση των λύσεων αυτών, με βάση το βαθμό ικανοποίησης διάφορων κριτηρίων [Sen et al., 1998]. Παράδειγμα αποτελεί η επιλογή του καταλληλότερου προς αγορά μεταχειρισμένου πλοίου, με βάση έναν αριθμό ποιοτικών και οικονομικών κριτηρίων.



Σχήμα 2.13: Σχηματική αναπαράσταση προβλήματος MADM ενός επιπέδου [Sen et al., 1998]

Στο Σχήμα 2.13 απεικονίζεται το βασικό MADM πρόβλημα με n εναλλακτικές λύσεις ($a_i, i = 1, \dots, n$) και k κριτήρια ($y_j, j = 1, \dots, k$). Κάθε ζευγάρι εναλλακτικών λύσεων ($a_i, a_l; i, l = 1, \dots, n; i \neq l$), συγκρίνεται ως προς κάθε κριτήριο ($y_j, j = 1, \dots, k$). Εάν m_{il} είναι η σχετική υπεροχή της λύσης a_i σε σχέση με τη λύση a_l σε ό,τι αφορά το κριτήριο y_j , τότε μπορεί να κατασκευαστεί ένας συγκριτικός πίνακας με βάση το κριτήριο y_j για όλες τις λύσεις a_1, \dots, a_n όπως στην εξίσωση (2.3). Η διατύπωση του προβλήματος συνίσταται τότε στη δημιουργία k τέτοιων πινάκων σύγκρισης, δηλαδή έναν για κάθε κριτήριο.

$$M = \{m_{il}\}_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & 1 & \dots & m_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

όπου $m_{lh} = 1 / m_{hl}$ για όλα τα l, h , δεδομένης της συμμετρίας που προέρχεται από τη σύγκριση, $h = 1, \dots, n$

Ο παραπάνω πίνακας είναι απαραίτητος σε όλες σχεδόν τις μεθόδους επίλυσης προβλημάτων MADM, ενώ η προτίμηση του μελετητή σε ορισμένες από αυτές εκφράζεται με διαφορετικό τρόπο. Στη σύγχρονη βιβλιογραφία μπορεί κανείς να βρει διαφορετικούς τρόπους κατηγοριοποίησης των μεθόδων αυτών. Ο Sen κάνει ένα διαχωρισμό με βάση το είδος της πληροφορίας που χρειάζεται κάθε μία από αυτές προκειμένου να εφαρμοστεί, [Sen et al., 1998]. Έτσι ορισμένες μέθοδοι δεν χρειάζονται καμία πληροφορία (π.χ. Maximax, Maximin, κ.α.), ενώ σε άλλες απαιτείται ο καθορισμός κριτηρίων επιλογής ή προτιμήσεων μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων. Στις περισσότερες από τις υπάρχουσες μεθόδους είναι δυνατή η αντιστοίχιση βαρών στα κριτήρια επιλογής τα οποία αντικατοπτρίζουν τις προτιμήσεις του μελετητή. Σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα σχεδίασης πλοίου, για το οποίο έχει προκύψει ένα σύνολο υποψήφιων βέλτιστων λύσεων (π.χ. Pareto όριο), μπορεί κανείς να εφαρμόσει μια κατάλληλη μέθοδο επίλυσης MADM προβλημάτων, προκειμένου να οδηγηθεί στην επιλογή της βέλτιστης σχεδίασης.

Η παραγωγή κατάλληλων λύσεων βασιζόμενων σε ταξινομημένες αντικειμενικές συναρτήσεις και ενδεχομένως κάποιους περιορισμούς, αποτελεί πρόβλημα λήψης αποφάσεων πολλαπλών στόχων (MODM). Ουσιαστικά στα προβλήματα αυτά, δεν υπάρχει προκαθορισμένο σύνολο εναλλακτικών λύσεων, από το οποίο κάποιος μπορεί να επιλέξει, αλλά μόνο κανόνες που πρέπει να ικανοποιούνται (αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί). Η ορθολογική παραγωγή του συνόλου των λύσεων αποτελεί, σε αντίθεση με τη λήψη απόφασης MADM, μέρος του προβλήματος.

Η Εξίσωση (2.4) αποτελεί τη γενική μαθηματική διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που αφορά K αντικειμενικές συναρτήσεις.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) &= [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_K(\mathbf{x})], \quad \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \Omega \\ \text{subj.to} \quad h_i(\mathbf{x}) &= 0, \quad i = 1, \dots, I \quad g_j(\mathbf{x}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \end{aligned} \quad (2.4)$$

Μία από τις δυσκολίες που έχει να αντιμετωπίσει ο μελετητής σε τέτοιου είδους προβλήματα, είναι θα μπορέσει να καταλήξει σε μία και μόνο βέλτιστη λύση, αξιολογώντας ταυτόχρονα όλα τα κριτήρια. Εάν όλα τα κριτήρια εκφραστούν μέσω μίας αθροιστικής αντικειμενικής συνάρτησης (Συνάρτηση Χρησιμότητας - Utility Function),

$$u(\mathbf{f}(\mathbf{x})) = u(f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_K(\mathbf{x})), \quad \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \Omega \quad (2.5)$$

όπου Ω , το σύνολο των αποδεκτών λύσεων (feasible space), δηλαδή το σύνολο εκείνο των λύσεων που ικανοποιεί τους περιορισμούς:

$$\begin{aligned} h_i(\mathbf{x}) &= 0, & i &= 1, \dots, I \\ g_j(\mathbf{x}) &\geq 0, & j &= 1, \dots, J \end{aligned}$$

τότε η βέλτιστη λύση είναι εκείνη που μεγιστοποιεί την Συνάρτηση Χρησιμότητας $u(\mathbf{f}(\mathbf{x})) \forall \mathbf{x} \in \Omega$. Η εύρεση κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας (weight factors) των αντικειμενικών συναρτήσεων, είναι μία από τις πλέον καθιερωμένες τεχνικές επίλυσης

MODM προβλημάτων. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της εξίσωσης (2.4) ισοδυναμεί με την:

$$u(\mathbf{f}(\mathbf{x})) = \mathbf{w}^T \mathbf{f}(\mathbf{x}) \quad (2.6)$$

όπου $\mathbf{x} \in \Omega$, $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_k]^T$, $\sum_{i=1}^k w_i = 1$

και w_i ο συντελεστής βαρύτητας του κριτηρίου (αντικειμενικής συνάρτησης) i .

Για τον προσδιορισμό της συνάρτησης χρησιμότητας και την εύρεση των συντελεστών βαρύτητας έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες αρκετές μέθοδοι. Μερικές από αυτές είναι η Goal Programming Method (Charne & Cooper 1977), η Geoffrion's Method (Geoffrion 1972), η Interactive Step Trade-off Method (ISTM, Yang 1988, 1990), η Local Utility Function Method (Yang et al., 1996) και άλλες. Πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές, που αφορούν την επίλυση MADM και MODM προβλημάτων, βασιζόμενες στους Γενετικούς Αλγορίθμους και τα Νευρωνικά Δίκτυα.

Γενικά, το πρόβλημα της επιλογής μίας και μόνο λύσης ως βέλτιστη, από το σύνολο των σχεδιάσεων που ανήκουν στο Pareto όριο, δεν έχει μονοσήμαντη λύση και πολλές φορές εξαρτάται από τη μέθοδο λήψης απόφασης που θα ακολουθήσει ο μελετητής. Ο μελετητής καλείται, σχεδόν πάντοτε, να επιλέξει μία από τις λύσεις που ικανοποιούν τη βελτιστότητα Pareto ως τελικά βέλτιστη. Η λύση αυτή εξαρτάται πολλές φορές τόσο από τα κριτήρια επιλογής, όσο και από τη μέθοδο που θα εφαρμοστεί. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τρεις σύγχρονες μέθοδοι οι οποίες δύναται να εφαρμοστούν σε προβλήματα σχεδίασης πλοίου.

Η λύση min-max

Μία συνηθισμένη τεχνική επιλογής της βέλτιστης λύσης από το Pareto όριο, η οποία δε χρησιμοποιείται συχνά κατά την επίλυση προβλημάτων σχεδίασης πλοίου, είναι η μέθοδος min-max (Min-Max Compromise Solution - Osyczka 1984, Sen & Yang 1998). Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος που καλείται να επιλύσει ο μελετητής είναι η εξής:

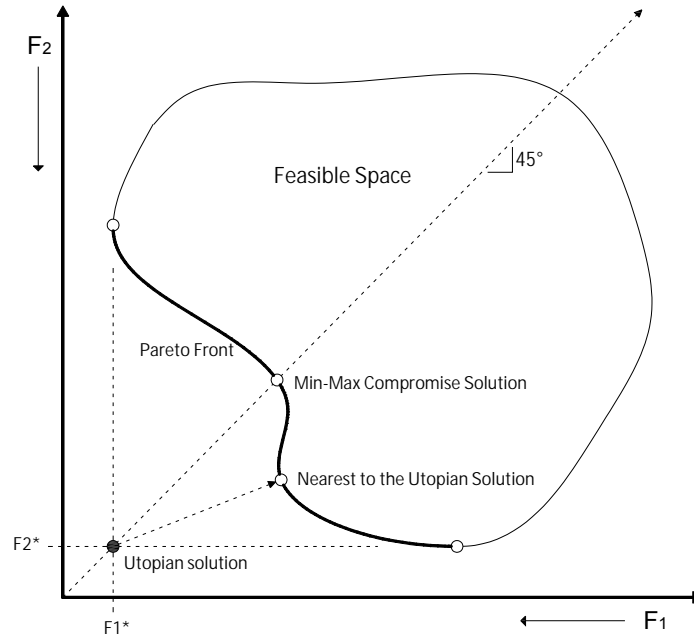
$$\min_{\mathbf{x}} \left(\max_i [w_i z_i(\mathbf{x})] \right), \quad \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \Omega_0, \quad \sum_{i=1}^K w_i = 1 \quad (2.7)$$

όπου Ω_0 το σύνολο των λύσεων Pareto, K ο αριθμός των κριτηρίων του προβλήματος βελτιστοποίησης, w_i οι συντελεστές βαρύτητας οι οποίοι έχουν άθροισμα τη μονάδα και z_i η σχετική διαφορά μεταξύ της $f_i(\mathbf{x})$ και της βέλτιστης τιμής της f_i^*

$$z_i(\mathbf{x}) = \frac{|f_i(\mathbf{x}) - f_i^*|}{|f_i^*|} \quad (2.8)$$

Στην περίπτωση που οι συντελεστές βαρύτητας είναι ίσοι μεταξύ τους, θεωρείται ότι κάθε κριτήριο έχει την ίδια σπουδαιότητα (Σχήμα 2.14). Η ονομασία mini-max προέρχεται από το

γεγονός ότι αρχικά υπολογίζεται η μέγιστη διαφορά $w_i z_i(\mathbf{x})$ για κάθε κριτήριο για όλα τα \mathbf{x} και στη συνέχεια ως βέλτιστη λύση προσδιορίζεται εκείνη για την οποία η τιμή αυτών των διαφορών είναι η ελάχιστη. Φυσικά νοείται ότι η τιμή στον παρονομαστή της Εξίσωσης (2.8) πρέπει να είναι διάφορη του μηδενός για κάθε κριτήριο. Στην αντίθετη περίπτωση πρέπει να γίνει κατάλληλος μετασχηματισμός του συνόλου τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων.



Σχήμα 2.14: Οι λύσεις «min-max» και «Nearest to the utopian solution» [Parsons et al., 2006]

Η πλησιέστερη στην ουτοπική λύση (Nearest to the Utopian Compromise Solution)

Μία διαφορετική τεχνική για τον προσδιορισμό μίας και μόνο βέλτιστης λύσης από το Pareto Όριο είναι η «Πλησιέστερη στην Ουτοπική Λύση» (Nearest to the Utopian Compromise Solution). Η «ουτοπική λύση» είναι αυτή κατά την οποία όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_K(\mathbf{x})$ αποκτούν τις βέλτιστες τιμές τους $f_1^*, f_2^*, \dots, f_K^*$, αντίστοιχα. Η λύση αυτή συνήθως βρίσκεται έξω από τον κυρτό χώρο όλων των αποδεκτών τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων (Feasible Space) εξαιτίας των περιορισμών (Σχήμα 2.14). Η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης, στην περίπτωση αυτή, έγκειται στην εύρεση της μικρότερης απόστασης $|d(\mathbf{x})|_{\min}$ των λύσεων Pareto από την «ουτοπική λύση».

Η απόσταση αυτή μπορεί να είναι σταθμισμένη ως προς τη σπουδαιότητα κάθε κριτηρίου, μέσω κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας. Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος επιλογής είναι:

$$\min_{\mathbf{x}} |d(\mathbf{x})| = \left\{ \sum_{i=1}^K \left[w_i \left(\frac{f_i(\mathbf{x}) - f_i^*}{f_i^*} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (2.9)$$

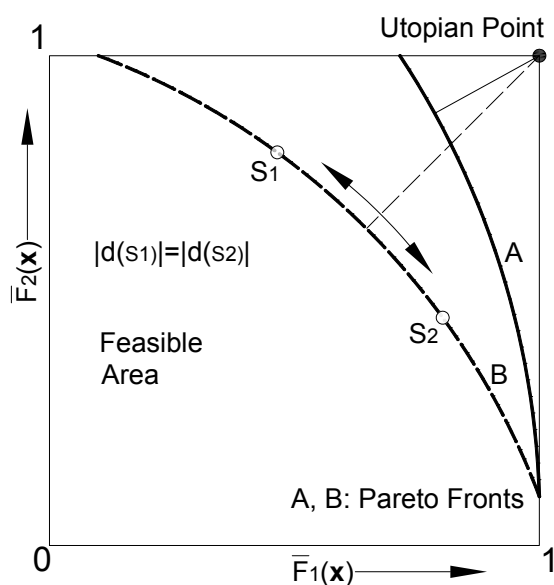
$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \Omega_0, \quad \sum_{i=1}^K w_i = 1$$

Σημειώνεται ότι στην ιδανική περίπτωση όπου το Pareto Όριο είναι το τεταρτημόριο ενός κύκλου τότε η «Λύση min-max» και η «Πλησιέστερη στην Ουτοπική Λύση» συμπίπτουν. Όπως και προηγουμένως, έτσι και εδώ η τιμή του παρονομαστή στην Εξίσωση (2.9) θα πρέπει να είναι διάφορη του μηδενός για κάθε αντικειμενική συνάρτηση.

Η μέθοδος αυτή αν και αναζητά με ορθολογικό τρόπο τη βέλτιστη λύση θα πρέπει το όριο Pareto να περιέχει ικανοποιητικό αριθμό λύσεων και να αποτελεί σύνορο ενός κυρτού συνόλου. Επιπλέον, υπάρχει ο κίνδυνος στη σχετικά σπάνια περίπτωση όπου δύο λύσεις ισαπέχουν από την ουτοπική, όπως οι λύσεις S_1 και S_2 στο Σχήμα 2.15 – Pareto B, η επιλογή να γίνει ως προς την κατεύθυνση εκείνη η οποία δεν αντανάκλα τις προτιμήσεις του μελετητή. Μία ακόμα δυσκολία στην επιλογή της καταλληλότερης λύσης παρουσιάζεται όταν το εύρος των κανονικοποιημένων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων δεν είναι συγκρίσιμο, (π.χ. Σχήμα 2.15 - Pareto A). Στην περίπτωση αυτή θα υπερισχύει σχεδόν πάντοτε το κριτήριο εκείνο με το μικρότερο εύρος τιμών. Προκειμένου να ξεπεραστεί η δυσκολία αυτή και να γίνει δυνατή η εύρεση κατάλληλων συντελεστών βαρύτητας (w_i), ώστε μέσω της εξίσωσης (2.9) να προσδιοριστεί η λύση εκείνη η οποία αντανάκλα στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τις προτιμήσεις (p_i) του μελετητή, προτείνεται η χρήση της παρακάτω γραμμικής εξίσωσης:

$$w_i = p_i \frac{f_i^{\min}}{f_i^{\max}} + \frac{1}{K} \left(1 - \sum_{i=1}^K p_i \frac{f_i^{\min}}{f_i^{\max}} \right) \quad (2.10)$$

όπου p_i η προτίμηση του μελετητή ως προς την αντικειμενική συνάρτηση $f_i(\mathbf{x})$ με $\sum_{i=1}^K p_i = 1$, f_i^{\min} η ελάχιστη και f_i^{\max} η μέγιστη τιμή αντίστοιχα της αντικειμενικής συνάρτησης $f_i(\mathbf{x})$, $\mathbf{x} \in \Omega_0$ και Ω_0 το σύνολο των λύσεων Pareto.



Σχήμα 2.15: Η μορφή του συνόρου Pareto μπορεί να επηρεάσει την επιλογή της βέλτιστης λύσης

Με την παραπάνω εξίσωση οι συντελεστές βαρύτητας w_i προσδιορίζονται ως συνάρτηση των κανονικοποιημένων τιμών $U(p_i)$ των προτιμήσεων p_i .

$$U(p_i) = p_i \frac{f_i^{\min}}{f_i^{\max}} \quad (2.11)$$

Ξεκινώντας από το γεγονός ότι άθροισμα των προτιμήσεων $p_1 + \dots + p_K$ ισούται με τη μονάδα προκύπτει ότι $\exists e \in (0,1)$ έτσι ώστε:

$$p_1 \frac{f_1^{\min}}{f_1^{\max}} + \dots + p_K \frac{f_K^{\min}}{f_K^{\max}} = 1 - e \Rightarrow \sum_{i=1}^K p_i \frac{f_i^{\min}}{f_i^{\max}} = 1 - e \Rightarrow e = 1 - \sum_{i=1}^K p_i \frac{f_i^{\min}}{f_i^{\max}}$$

Εάν η ποσότητα αυτή διαιρεθεί με τον αριθμό K των αντικειμενικών συναρτήσεων και προστεθεί στην Εξίσωση (2.11) προκύπτει τελικά η Εξίσωση (2.10), για την οποία φυσικά

ισχύει ότι $\sum_{i=1}^K w_i = 1$.

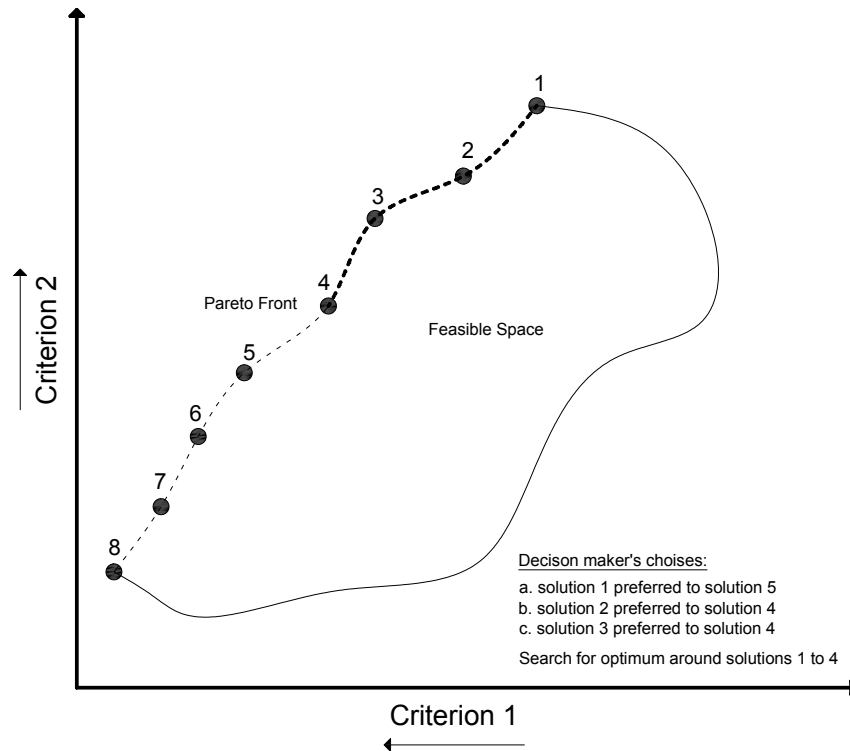
Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic Algorithm Multi-Criteria Decision Making, GA-MCDM)

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ιεράρχηση από το μελετητή της σπουδαιότητας μεταξύ των κριτηρίων βελτιστοποίησης ή/και των υποψήφια βέλτιστων λύσεων. Αν και η ιεράρχηση αυτή προσδίδει στο πρόβλημα επιλογής μία φυσική διάσταση, προϋποθέτει από το μελετητή τη συσχέτιση μεγεθών για τα οποία πολλές φορές δεν είναι ξεκάθαρη η μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη όταν ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων ή/και των υποψήφια βέλτιστων λύσεων δεν είναι πολύ μεγάλος.

Έτσι ο μελετητής μπορεί να κάνει τις παρακάτω επιλογές:

- Το κριτήριο βελτιστοποίησης i έχει περίπου κ-πλάσια σπουδαιότητα από το κριτήριο j ή/και
- Η λύση i είναι προτιμότερη από τη λύση j
- Η λύση i έχει περίπου την ίδια προτίμηση με τη λύση j

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω συσχετίσεις ανά ζεύγη, κατασκευάζονται τόσες οριακές συναρτήσεις χρησιμότητας (marginal utility functions), όσα και τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Οι συναρτήσεις αυτές, οι οποίες μπορεί να είναι γραμμικές ή μη, στη συνέχεια συνδυάζονται ώστε να δημιουργήσουν μία τοπική (βέλτιστη ή μέση) συνάρτηση χρησιμότητας (local, optimal or mean utility function) [Yang et al., 1996]. Η συνάρτηση αυτή αποτελεί τη συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) ενός γενετικού αλγορίθμου (π.χ. SIMPLEX ή MOGA), ώστε αυτός να επικεντρώσει την αναζήτηση στην περιοχή ενδιαφέροντος του μελετητή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.16.



Σχήμα 2.16: Αναζήτηση της βέλτιστης λύσης στο Pareto όριο με τη χρήση ΓΑ [Sen et al., 1998]

Εάν σε ένα πρόβλημα υπάρχουν K αντικειμενικές συναρτήσεις, τότε η τοπική συνάρτηση χρησιμότητας, η οποία συναθροίζει όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος είναι:

$$u(\mathbf{f}(\mathbf{x})) = \sum_{i=1}^K u_i(f_i(\mathbf{x})), \quad \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (2.12)$$

όπου Ω_0 το σύνολο των λύσεων Pareto και u_i η οριακή συνάρτηση χρησιμότητας της αντικειμενικής συνάρτησης f_i .

Έστω ότι σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης υπάρχουν δύο αντικειμενικές συναρτήσεις $f_1(\mathbf{x})$, $f_2(\mathbf{x})$ και έστω ότι ο μελετητής ορίζει ότι το κριτήριο 1 είναι τουλάχιστον k φορές πιο σημαντικό από το κριτήριο 2. Εάν οι οριακές συναρτήσεις χρησιμότητας είναι γραμμικές, τότε η ολική συνάρτηση χρησιμότητας του προβλήματος θα έχει τη μορφή:

$$u(\mathbf{f}(\mathbf{x})) = w_1 \cdot f_1(\mathbf{x}) + w_2 \cdot f_2(\mathbf{x}), \quad w_1 \geq k \cdot w_2, \quad w_1 + w_2 = 1, \quad \mathbf{x} \in \Omega_0 \quad (2.13)$$

όπου w_i συντελεστές βαρύτητας η τιμή των οποίων είναι ανάλογη της σπουδαιότητας των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Σημειώνεται ότι γενικά οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας κάθε αντικειμενικής συνάρτησης αντιστοιχούν στην μέγιστη τιμή της αντίστοιχης οριακής συνάρτησης χρησιμότητας (Σχήμα 2.17).

Το διάνυσμα \mathbf{x} για το οποίο μεγιστοποιείται η Εξίσωση (2.13) αποτελεί τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Οι υποψήφιες βέλτιστες λύσεις μπορεί να ταξινομηθούν με βάση την τιμή του βαθμού ιεράρχησης (rank value), ο οποίος είναι ένας πραγματικός αριθμός που λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$ και αντιστοιχεί στην κανονικοποιημένη τιμή της εξίσω-

σης (2.13) για κάθε υποψήφια βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση όπου υπάρχουν δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, ο βαθμός ιεράρχησης των λύσεων υπολογίζεται ως εξής:

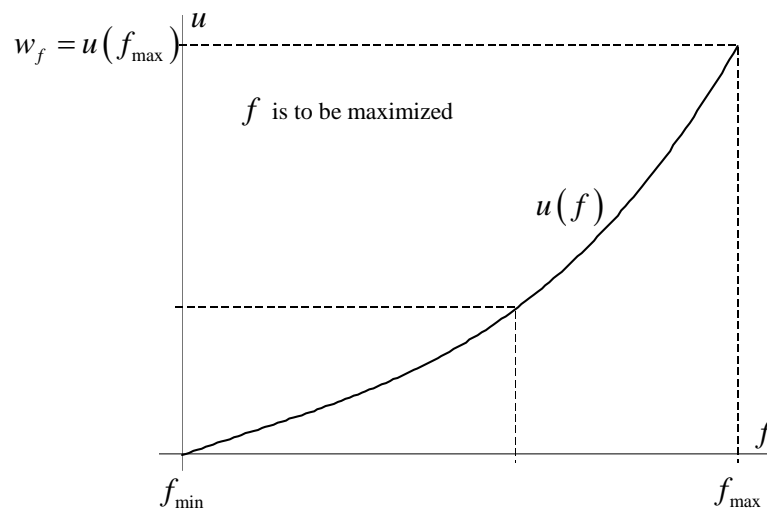
$$u_d = w_1 \cdot U(f_1^d) + w_2 \cdot U(f_2^d) \quad (2.14)$$

όπου $U(f_i)$, $i=1,2$ είναι η κανονικοποιημένη τιμή της συνάρτησης f_i , η οποία προκύπτει ως εξής:

$$U(f_i) = \frac{f_i^d - f_i^{\min}}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \text{ εάν η συνάρτηση } f_i \text{ πρέπει να μεγιστοποιηθεί}$$

$$U(f_i) = \frac{f_i^{\max} - f_i^d}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, \text{ εάν η συνάρτηση } f_i \text{ πρέπει να ελαχιστοποιηθεί,}$$

όπου f_i^{\min} , f_i^{\max} είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή της συνάρτησης f_i αντίστοιχα, για όλες τις υποψήφιες βέλτιστες λύσεις, ενώ όπου f_i^d είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f_i που αντιστοιχεί στη λύση d .

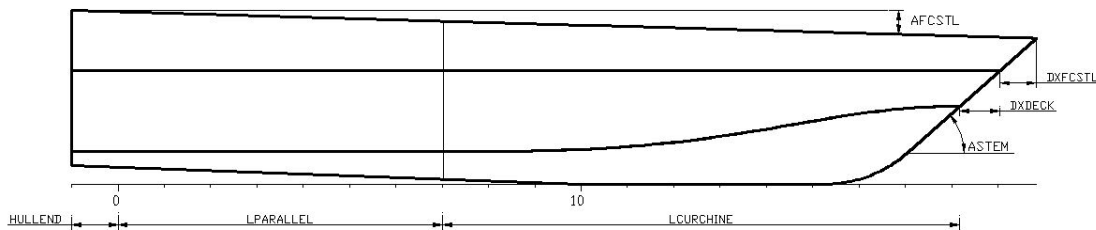


Σχήμα 2.17: Μη γραμμική συνάρτηση χρησιμότητας

Κεφάλαιο 3:
Παραμετρική Σχεδίαση

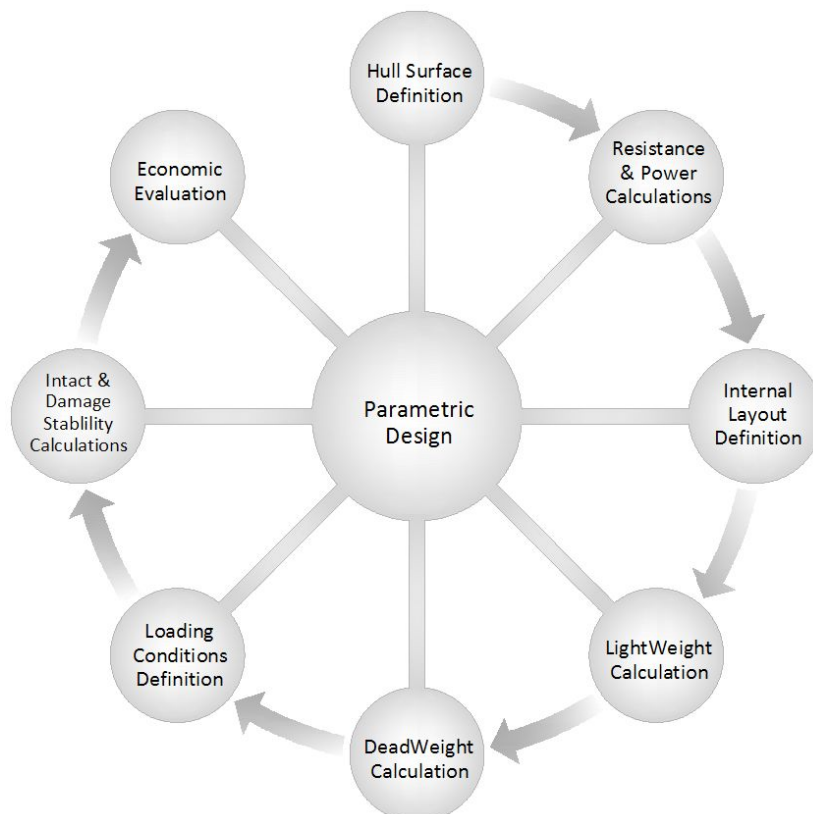
3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ

Η παραμετρική σχεδίαση ενός βιομηχανικού προϊόντος περιλαμβάνει τη γεωμετρική του αναπαράσταση, με βάση ένα προκαθορισμένο σύνολο μεταβλητών, καθώς και τη διεξαγωγή μιας σειράς από υπολογισμούς οι οποίοι αφορούν την κατασκευή και τη λειτουργία του. Η παραμετρική σχεδίαση στον τομέα των κατασκευών και ιδιαίτερα στη σχεδίαση μεταφορικών μέσων, έχει σήμερα ευρεία εφαρμογή. Στη Ναυπηγική οι περισσότερες εφαρμογές παραμετρικής σχεδίασης αφορούν τη διερεύνηση της επίδρασης της μορφής της γάστρας στην αντίσταση ή/και την υδροδυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Παράδειγμα παραμετρικής σχεδίασης μικρού σκάφους

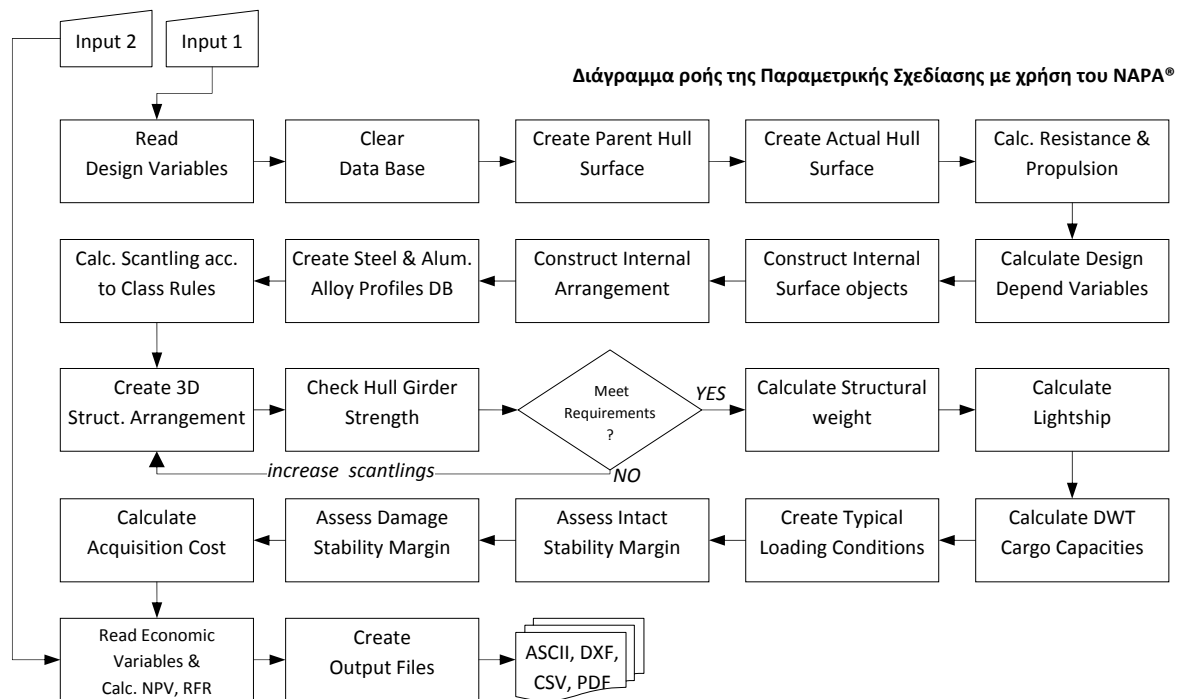
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μία μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης η οποία περιλαμβάνει όλες τις φάσεις της προμελέτης ενός πλοίου, όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Αφορά ταχύπλοα μονόγαστρα πλοία μεταφοράς επιβατών και οχημάτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε πλοία μεσαίου και μεγάλου μεγέθους, δηλαδή σε πλοία με μήκος μεταξύ καθέτων από 70 έως 140 μέτρα, περίπου.



Σχήμα 3.2: Παραμετρική σχεδίαση πλοίου στη φάση της προμελέτης

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 3.2, αρχικά μοντελοποιείται η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας ενώ ακολουθεί ο υπολογισμός της αντίστασης με βάση υπάρχουσες αριθμητικές μεθόδους και προσδιορίζεται η εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης. Στη συνέχεια, διαμορφώνεται η στεγανή υποδιαίρεση και η εσωτερική διαμέριση (χώροι άνω του καταστρώματος στεγανών φρακτών) σύμφωνα με τις απαιτήσεις της μεταφορικής ικανότητας. Από την υπάρχουσα γεωμετρία και κανονισμούς νηογνωμόνων πραγματοποιείται η τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση των κύριων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, μέσω της οποίας προσδιορίζεται το βάρος και το κέντρο βάρους αυτής. Στη συνέχεια ελέγχεται η ροπή αδρανείας της μέσης τομής και υπολογίζεται το βάρος του άφορτου σκάφους (LightWeight), αναλύοντας τα επιμέρους βάρη σε κατάλληλο αριθμό υποομάδων. Ακολουθεί ο προσδιορισμός του πρόσθετου βάρους στην κατάσταση αναχώρησης πλήρους φορτίου και πραγματοποιείται έλεγχος της μεταφορικής ικανότητας. Στην επόμενη φάση διεξάγεται η μελέτη της άθικτης ευστάθειας και της ευστάθειας μετά από βλάβη. Για μια σειρά από καταστάσεις φόρτωσης ελέγχεται η ικανοποίηση των κριτηρίων ευστάθειας που θέτει ο Κώδικας Ταχυπλών Σκαφών (HSCC). Τέλος, προσδιορίζεται το κόστος κατασκευής και πραγματοποιείται οικονομική αξιολόγηση της σχεδίασης με βάση τους δείκτες της Καθαρής Παρούσας Αξίας και του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου.

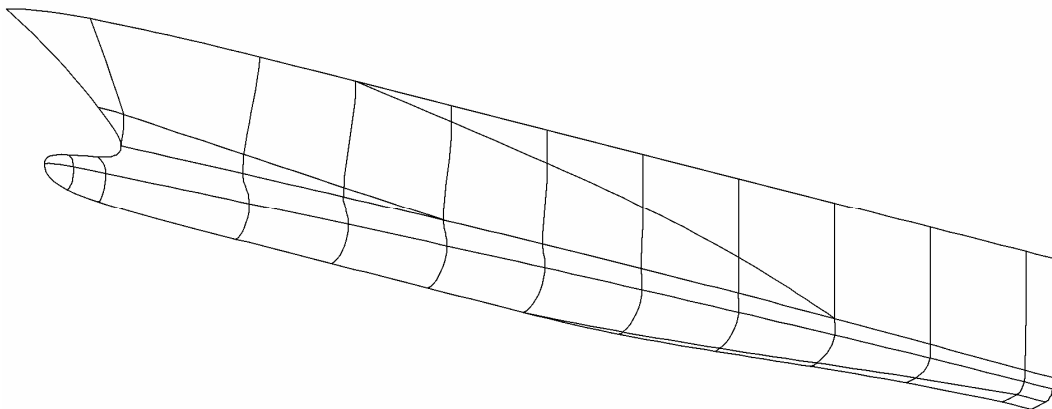
Η παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, το διάγραμμα ροής της οποίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3 περιλαμβάνει ένα ευρύ σύνολο ανεξάρτητων μεταβλητών και παραμέτρων σχεδίασης. Είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του γνωστού ναυπηγικού – σχεδιαστικού λογισμικού NAPA®, χρησιμοποιώντας τις εκτεταμένες δυνατότητες ανάπτυξης εφαρμογών μέσω της γλώσσας προγραμματισμού NAPA® Basic.



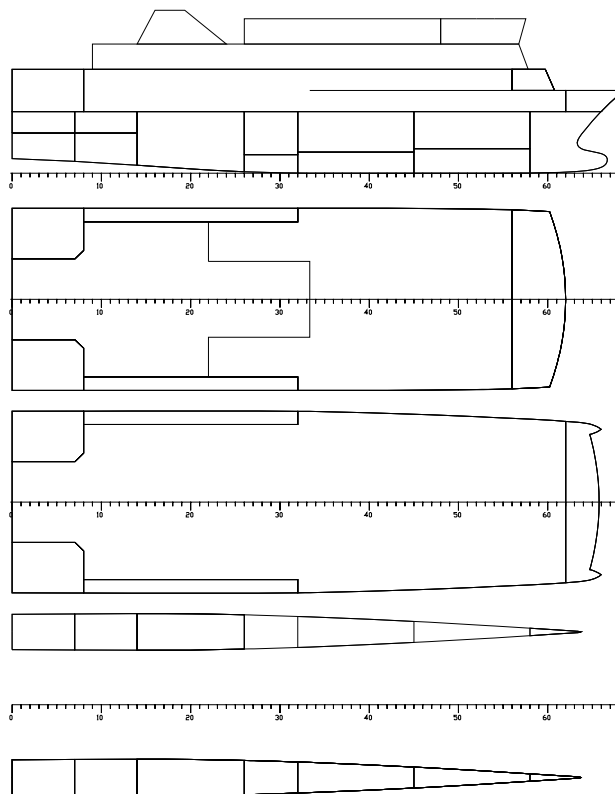
Σχήμα 3.3: Παραμετρική σχεδίαση ταχύπλων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων σε περιβάλλον NAPA®

Με ορισμένες παραλλαγές η μεθοδολογία αυτή έχει εφαρμοστεί και σε πλοία διπλής γάστρας τύπου SemiSwath [ΕΠΑΝ, 2004-2007]. Η παραμετρική σχεδίαση των πλοίων αυτών

ακολουθεί τις φάσεις της προμελέτης που φαίνονται στο Σχήμα 3.2 και αφορά Ε/Γ-Ο/Γ πλοία μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. Εκτός από τον αριθμό και το είδος των ελεύθερων μεταβλητών σχεδίασης, άλλες βασικές διαφορές είναι ότι για τα πλοία SemiSwath η μορφή της γάστρας δεν προέρχεται από κάποια συστηματική σειρά, για το λόγο αυτό ο υπολογισμός της αντίστασης γίνεται με τη βοήθεια κατάλληλου CFD λογισμικού. Οι υπόλοιπες φάσεις της προμελέτης, όπως για παράδειγμα ο προσδιορισμός των βαρών, η οικονομική αξιολόγηση, κ.ά., περιλαμβάνουν ορισμένους κοινούς υπολογισμούς και στους δύο τύπους πλοίων. Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζεται το πλέγμα των παραμετρικών καμπύλων από το οποίο παράγεται η επιφάνεια της ημι-γάστρας, ενώ στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται μέρος της γενικής διάταξης μιας σχεδίασης η οποία έχει προκύψει με εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας.



Σχήμα 3.4: Το πλέγμα των καμπύλων από όπου παράγεται η επιφάνεια της γάστρας, πλοία SemiSwath



Σχήμα 3.5: Διάταξη χώρων άνω και κάτω του καταστρώματος στεγανών φρακτών, πλοία SemiSwath

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου, παρουσιάζεται αναλυτικά κάθε μία από τις φάσεις της παραμετρικής σχεδίασης – προμελέτης πλοίων μονής γάστρας, όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.2. Η παρουσίαση αφορά τις ελεύθερες μεταβλητές, την κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου καθώς και την ανάλυση της διεξαγωγής των επιμέρους υπολογισμών. Στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται επιλεγμένα παραδείγματα εφαρμογής της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης τα οποία αφορούν υπάρχοντα πλοία.

3.1. Ανάπτυξη της επιφάνειας της γάστρας

Για τον καθορισμό της μορφής της γάστρας επιλέχτηκε η χρήση συστηματικών σειρών, για τις οποίες υπάρχουν στη βιβλιογραφία αριθμητικές μέθοδοι υπολογισμού της αντίστασης. Η επιλογή αυτή αφορά κυρίως τη βούληση για τη μη χρήση CFD τεχνικών κυρίως λόγω του αυξημένου υπολογιστικού κόστους, αλλά και της μικρότερης ακρίβειας των αποτελεσμάτων σε σχέση με υπάρχουσες αριθμητικές μεθόδους που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα. Παρόλα αυτά, η χρήση συστηματικών σειρών περιορίζει την ελευθερία στη σχεδίαση νέων μορφών γάστρας. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ένας αριθμός από υπορουτίνες που αφορούν την κατασκευή κατάλληλου πλέγματος αλλά και τη σύνδεση της διαδικασίας παραμετρικής σχεδίασης με κατάλληλο CFD λογισμικό (π.χ. Shipflow®).

Έτσι, η μορφή της επιφάνειας της γάστρας μπορεί να προέλθει είτε από τη συστηματική σειρά γαστρών ημικτοπίσματος διπλής ακμής του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του ΕΜΠ [Grigoriopoulos et al., 2002], είτε από τη συστηματική σειρά γαστρών ημι-εκτοπίσματος στρογγυλού πυθμένα NPL [Marwood et al., 1969], [Bailey, 1976]. Η δημιουργία επιφανειών εντός του λογισμικού NAPA®, μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Προκειμένου για την επιφάνεια της γάστρας χρησιμοποιείται ένας αριθμός κατάλληλων καμπύλων B-spline 3^{ου} βαθμού, οι οποίες παρεμβάλουν έναν δεδομένο αριθμό σημείων. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι χαρακτηριστικές ή βασικές καμπύλες της γάστρας (π.χ. stem και stern profile, flat of bottom, flat of side), καθώς και ορισμένες άλλες οι οποίες μπορεί να είναι διδιάστατες (νομείς, ίσαλοι ή διαμήκεις τομές) ή τρισδιάστατες (π.χ. chines, deck). Η συνολική επιφάνεια της γάστρας αποτελείται από patches, τα οποία οριοθετούνται από τις καμπύλες του πλέγματος των καμπύλων και σχηματίζονται με μη γραμμικό τρόπο. Προκειμένου η τελική επιφάνεια να είναι επαρκώς εξομαλυμένη, αρχικά εξομαλύνεται κάθε καμπύλη μεμονωμένα και ελέγχεται η ομαλότητα ολόκληρου του πλέγματος. Στη συνέχεια κατασκευάζεται η επιφάνεια της γάστρας και ελέγχεται η ομαλότητά της. Η διαδικασία εξομάλυνσης επαναλαμβάνεται με νέα διόρθωση της θέσης των σημείων των καμπύλων του πλέγματος, και ούτω καθεξής. Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει τη δυνατότητα οπτικού και αριθμητικού ελέγχου της επίδρασης που έχει η μεταβολή της θέσης ενός σημείου σε ολόκληρη την καμπύλη αλλά και την επιφάνεια της γάστρας, σε πραγματικό χρόνο. Το επίπεδο εξομάλυνσης που επιτυγχάνεται μέσω της παρούσας μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, δεν είναι το μέγιστο δυνατό είναι όμως αρκετά υψηλό και κατάλληλο για όλους τους περαιτέρω υπολογισμούς.

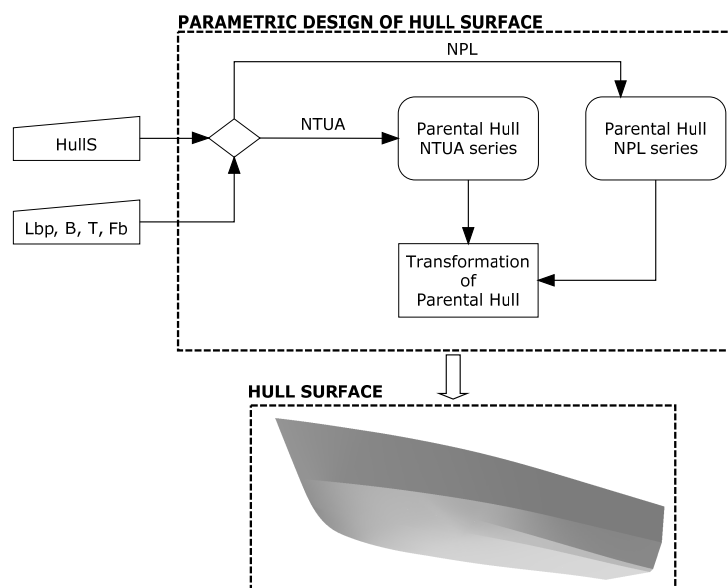
Και για τις δύο συστηματικές σειρές, αρχικά μοντελοποιείται η πατρική γάστρα. Η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας για κάθε εναλλακτική σχεδίαση προκύπτει με γραμμικό μετασχηματισμό της αντίστοιχης πατρικής, με βάση το μήκος μεταξύ καθέτων, το μέγιστο πλά-

τος, το βύθισμα και το ύψος εξάλων. Το ύψος εξάλων αφορά, εκτός από τον καθορισμό της θέσης του καταστρώματος στεγανών φρακτών και τη σχεδίαση μιας οριζόντιας ακμής κατά μήκος του πλοίου, πάνω από την οποία και σε μεγάλη έκταση, η επιφάνεια της γάστρας διατηρείται κατακόρυφη. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι ελεύθερες μεταβλητές, που αφορούν την παραμετρική σχεδίαση της γάστρας.

Πίνακας 3.1: Ελεύθερες μεταβλητές για την παραμετρική μοντελοποίηση της επιφάνειας της γάστρας

α/α	Μεταβλητή	Μονάδες	Επεξήγηση
1	<i>Hulls</i>	-	Συστηματική Σειρά
2	<i>Lbp</i>	m	Μήκος μεταξύ καθέτων
3	<i>B</i>	m	Μέγιστο πλάτος
4	<i>T</i>	m	Ύψος ισάλου σχεδίασης
5	<i>Fb</i>	m	Ύψος εξάλων

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής της προαναφερθείσας διαδικασίας παραμετρικής μοντελοποίησης της γάστρας ταχύπλων μονόαστρων Ε/Γ-Ο/Γ Πλοίων.



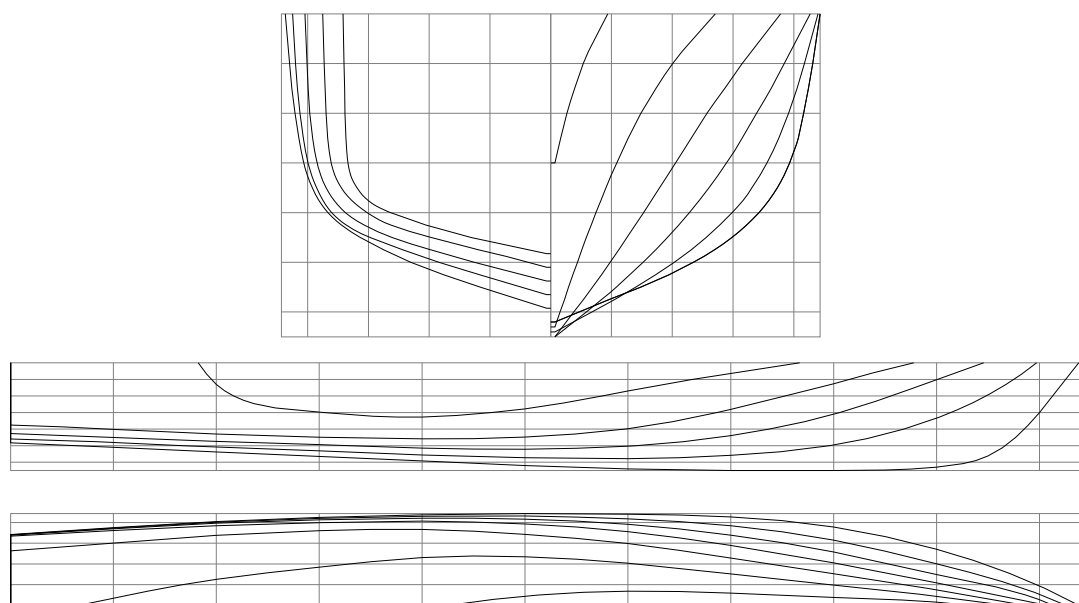
Σχήμα 3.6: Παραμετρική μοντελοποίηση της επιφάνειας της γάστρας

3.1.1. Η συστηματική σειρά NPL (NPL-series, 1969, 1976)

Η συστηματική σειρά της NPL (National Physical Laboratory) είναι η πιο γνωστή σειρά ταχύπλων σκαφών στρογγυλού πυθμένα. Η σειρά αυτή αποτελείται από 22 πρότυπα που προέρχονται από το πατρικό σκάφος της σειράς με μεταβολή των λόγων L/B ($L/B = 7.5, 6.25, 5.41, 4.54$ και 3.33) και του αδιάστατου λόγου $M = 1.0083L_{WL} / \nabla^{1/3}$ ($M = 8.3, 7.1, 6.59, 5.76, 5.23, 4.86$ και 4.47), κρατώντας σταθερούς τους συντελεστές μορφής C_B , C_P και C_M καθώς και τη διαμήκη θέση του κέντρου άντωσης. Το πατρικό σκάφος έχει λόγο μήκους προς πλάτος $L/B = 6.25$, πλάτους προς βύθισμα $B/T = 2.9$, ενώ οι τιμές των συ-

ντελεστών μορφής είναι $C_B = 0.397$, $C_P = 0.693$ και $C_M = 0.573$ και η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης βρίσκεται σε απόσταση $43.6\% L_{WL}$ από τον καθρέφτη (Σχήμα 3.7).

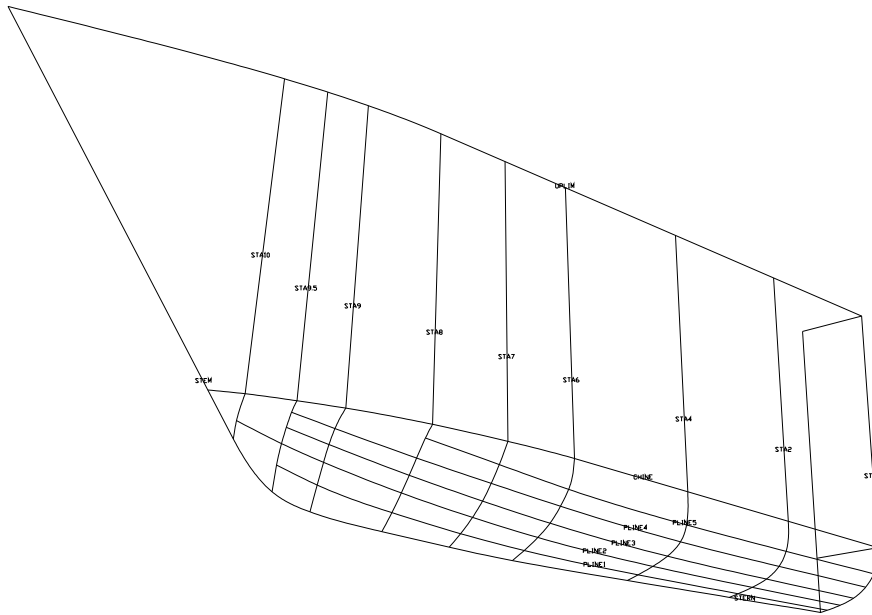
Η γωνία εισόδου της ισάλου γραμμής (half entrance angle) είναι 11° , ενώ η γωνία ανύψωσης πυθμένα στην περιοχή του καθρέφτη είναι 12° . Η συστηματική σειρά NPL αφορά ταχύπλοες γάστρες οι οποίες λειτουργούν σε μία περιοχή ταχυτήτων από $Fn=0.4$ έως $Fn=1.1$. Δηλαδή, καλύπτει τις περιοχές λειτουργίας σε καταστάσεις εκτοπίσματος, ημι-εκτοπίσματος και πλήρους ολίσθησης, ενώ συχνά χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση σκαφών αναψυχής διαφόρων μεγεθών, αλλά και ημιγαστρών πλοίων τύπου catamaran.



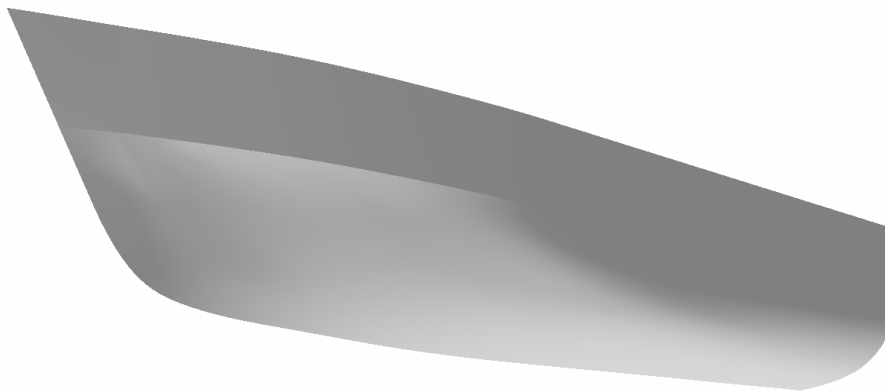
Σχήμα 3.7: Σχέδιο γραμμών της πατρικής γάστρας (model No. 100A) της συστηματικής σειράς NPL

Η πατρική γάστρα της συστηματικής σειράς NPL σχεδιάστηκε με τη βοήθεια κατάλληλου πλέγματος καμπύλων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.8. Η μορφή της γάστρας έχει κρατηθεί αναλλοίωτη κάτω από την ισάλο γραμμή και με τη βοήθεια μιας τρίτης ακμής, τη θέση της οποία καθορίζει η τιμή του ύψους εξάλων, μεταβάλλεται ομαλά στην πρυμναία περιοχή προκειμένου ο «καθρέφτης» (transom) να αποκτήσει το μέγιστο πλάτος του πλοίου στο ύψος του καταστρώματος στεγανών φρακτών.

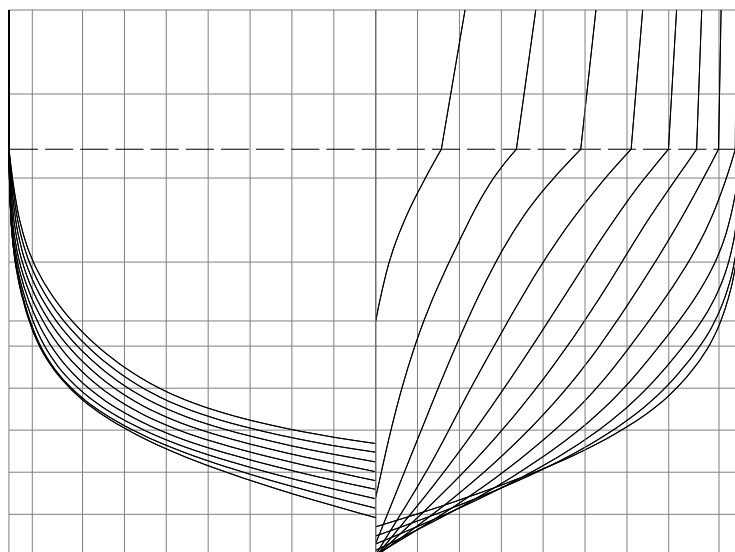
Τόσο η επιφάνεια της πατρικής, όσο και της τελικής γάστρας μετά το μετασχηματισμό, είναι επαρκώς εξομαλυμένες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, η γεωμετρική αναπαράσταση της γάστρας φτάνει σε αρκετά μεγάλο ύψος. Αυτό συμβαίνει προκειμένου στη συνέχεια να μοντελοποιηθούν οι υπερκατασκευές του πλοίου, το μέγιστο ύψος των οποίων στο παρόν στάδιο της παραμετρικής σχεδίασης είναι άγνωστο. Τέλος, το Σχήμα 3.10 απεικονίζει το σχέδιο γραμμών εγκαρσίων τομών (Body Plan) της πατρικής γάστρας της συστηματικής σειράς NPL, όπως αυτή μοντελοποιήθηκε εντός του λογισμικού NAPA®.



Σχήμα 3.8: Το πλέγμα των καμπυλών από όπου προέρχεται η επιφάνεια της γάστρας – σειρά NPL



Σχήμα 3.9: Η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας – σειρά NPL

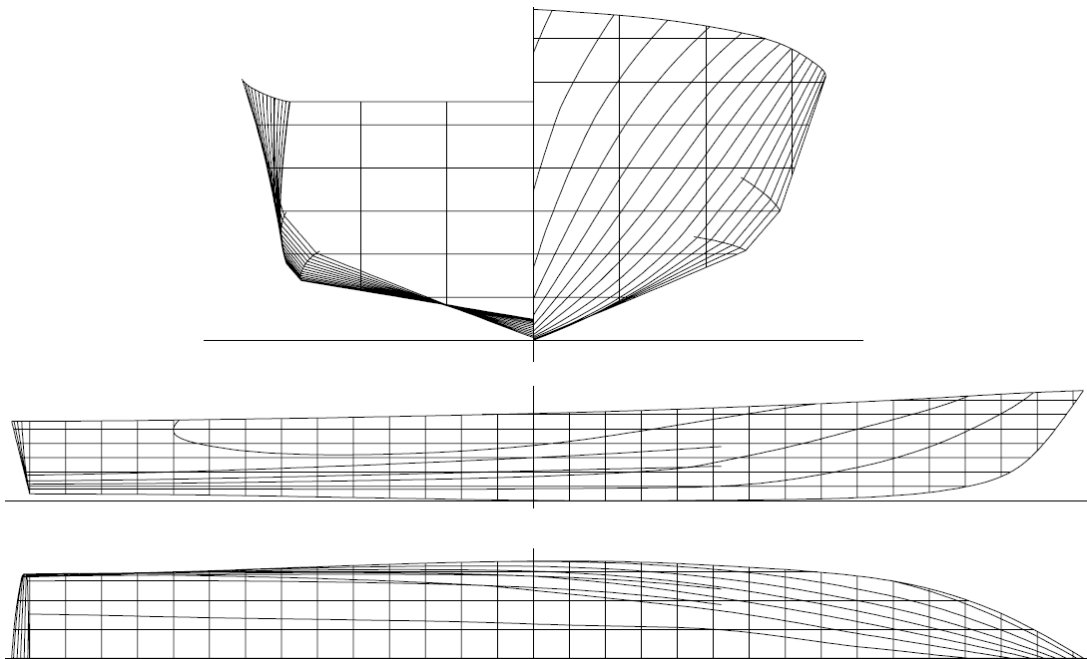


Σχήμα 3.10: Σχέδιο εγκαρσίων τομών πατρικής γάστρας - σειρά NPL

3.1.2. Η συστηματική σειρά του ΕΜΠ (NTUA-series, 2001)

Η συστηματική σειρά γαστρών με διπλή ακμή (Double Chine), με πλατύ καθρέπτη και με στρεβλή επιφάνεια ολίσθησης αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Η συστηματική σειρά του ΕΜΠ αφορά πλοία ημιεκτοπίσματος. Ειδικότερα, αναφέρεται σε Ε/Γ και Ε/Γ-Ο/Γ πλοία, τα οποία λειτουργούν στην προ-ολισθητική (pre-planing) περιοχή ταχυτήτων, δηλαδή σε ταχύτητες λειτουργίας που αντιστοιχούν σε αριθμούς Froude μεγαλύτερους από 0.40 και συνήθως στην περιοχή του 0.60 και 0.70.

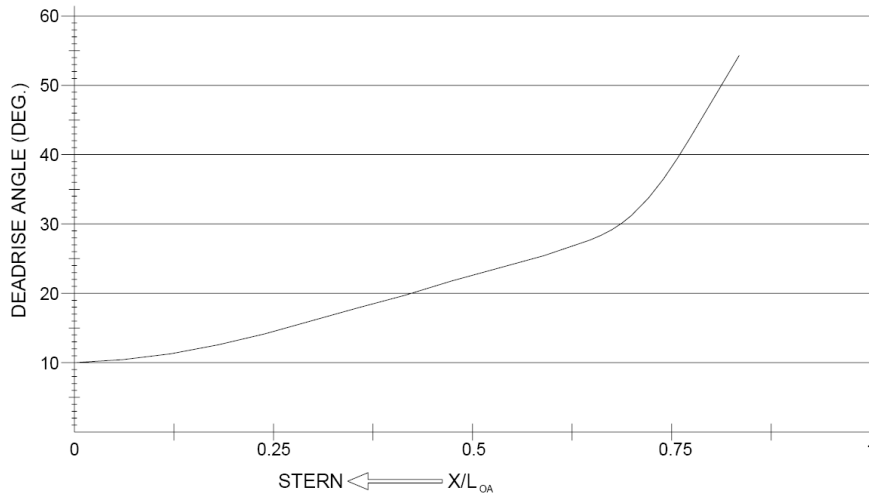
Αυτό που χαρακτηρίζει τη συστηματική σειρά NTUA είναι η ύπαρξη δύο ακμών (chines) στην περιοχή της ισάλου σχεδίασης, οι οποίες ξεκινούν από τον καθρέπτη και σβήνουν σταδιακά μετά το μέσο του πλοίου (περίπου στο 70% του μήκους). Η σειρά αποτελείται από πέντε πρότυπα με διαφορετικούς λόγους $L/B = 4.00, 4.75, 5.50, 6.25$ και 7.00 . Το σχέδιο γραμμών του πατρικού σκάφους ($L/B = 5.50$) της σειράς NTUA, φαίνεται στο Σχήμα 3.11, ενώ η μεταβολή της γωνίας ανύψωσης πυθμένα συναρτήσει του μήκους της τρόπιδας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. Τα υπόλοιπα σκάφη της σειράς προέκυψαν από το πατρικό κρατώντας σταθερή τη μορφή της μέσης τομής και μεταβάλλοντας κατάλληλα τα υπόλοιπα μεγέθη.



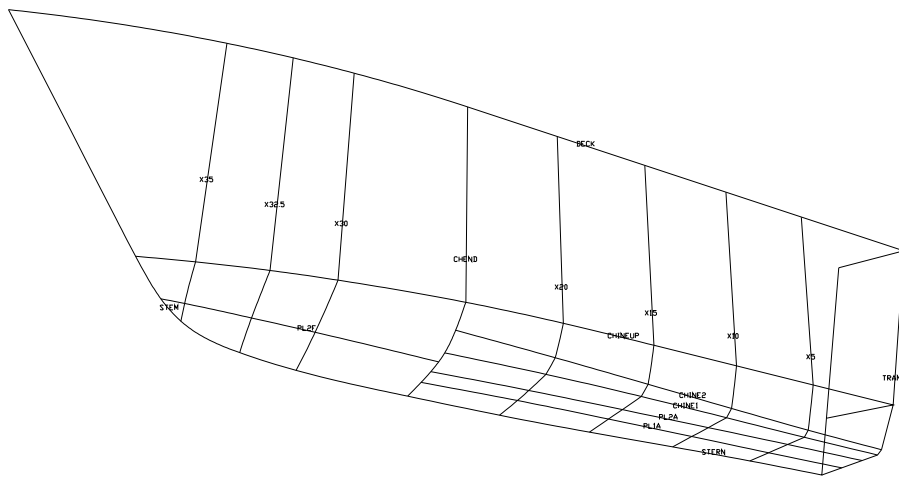
Σχήμα 3.11: Σχέδιο γραμμών πατρικού σκάφους της συστηματικής σειράς NTUA (σχέδιο εγκαρσίων τομών σε κλίμακα 3:1), [Δαμάλα, κ.ά. 2002]

Λόγω του φαρδύ καθρέπτη τα σκάφη της συστηματικής σειράς NTUA, παρουσιάζουν πολύ καλά χαρακτηριστικά αντίστασης στην προ-ολισθητική περιοχή ταχυτήτων. Στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του ΕΜΠ, επιλέχθηκαν και δοκιμάστηκαν έξι διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης για κάθε πρότυπο της σειράς, οι οποίες αντιστοιχούν σε αδιάστατους λόγους όγκου εκτοπίσματος $C_{DL} = \nabla / (0.1L_{WL})^3 = 1.00, 1.61, 2.23, 3.00, 3.62$ και 4.23 . Οι χαμηλότερες τιμές του λόγου

C_{DL} αντιστοιχούν σε καταστάσεις λειτουργίας μεγάλων πλοίων, ενώ οι υψηλότερες σε μικρότερα επιβατηγά σκάφη και σκάφη αναψυχής. Για δύο διαφορετικές τιμές ταχυτήτων, που αντιστοιχούν σε αριθμούς Froude 0.34 και 0.68, εκτός από τα χαρακτηριστικά αντίστασης, μελετήθηκαν η δυναμική συμπεριφορά σε αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς και σε φάσματα κυματισμών που αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες των ελληνικών θαλασσών.



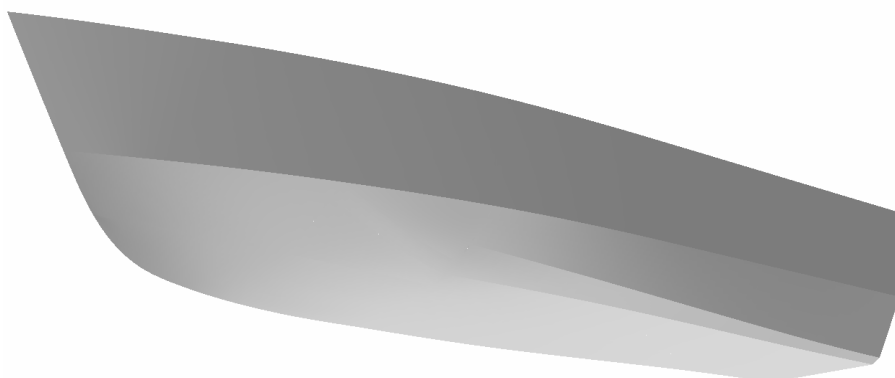
Σχήμα 3.12: Γωνία ανύψωσης πυθμένα συναρτήσει του αδιάστατου μήκους της τρόπιδας (x/L_{OA}), [Δαμάλα, κ.ά 2002]



Σχήμα 3.13: Το πλέγμα των καμπυλών από όπου προέρχεται η επιφάνεια της γάστρας – σειρά NTUA

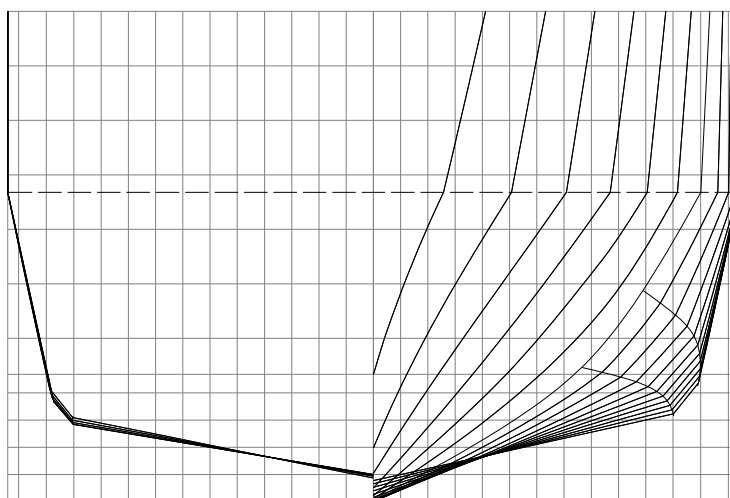
Στα πλαίσια της παραμετρικής σχεδίασης, η γεωμετρική αναπαράσταση της πατρικής γάστρας της συστηματικής σειράς NTUA, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια κατάλληλου πλέγματος καμπυλών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.13. Όπως και στη συστηματική σειρά NPL, έτσι και εδώ η σχεδίαση της γάστρας φτάνει σε αρκετά μεγάλο ύψος λόγω του άγνωστου ύψους των υπερκατασκευών. Επιπλέον, η μορφή της γάστρας έχει κρατηθεί αναλλοίωτη κάτω από την ίσαλο γραμμή και με τη βοήθεια μιας οριζόντιας ακμής, τη θέση της οποίας καθορίζει η τιμή του ύψους εξάλων, μεταβάλλεται ομαλά στην πρυμναία περιοχή προκειμένου ο καθρέφτης να αποκτήσει το μέγιστο πλάτος του πλοίου στο ύψος του κυρί-

ου καταστρώματος. Τόσο η επιφάνεια της πατρικής, όσο και της τελικής γάστρας μετά το μετασχηματισμό, είναι επαρκώς εξομαλυμένες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.14.



Σχήμα 3.14: Η εξωτερική επιφάνεια της πατρικής γάστρας – σειρά NTUA

Το Σχήμα 3.15 απεικονίζει το σχέδιο γραμμών εγκαρσίων τομών (Body Plan) της πατρικής γάστρας, όπως αυτή μοντελοποιήθηκε εντός του λογισμικού NAPA®. Όπως φαίνεται, πάνω από την ανώτερη ακμή (διακεκομμένη γραμμή), οι γραμμές ακολουθούν τη σχεδιαστική φιλοσοφία σύγχρονων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων που θέλει όσο το δυνατόν περισσότερο μήκος κατακόρυφων πλευρών υπερκατασκευών, προκειμένου να μεγιστοποιούνται οι χώροι φόρτωσης οχημάτων, και ενδιαίτησης επιβατών.



Σχήμα 3.15: Σχέδιο εγκαρσίων τομών πατρικής γάστρας - σειρά NTUA

3.2. Υπολογισμοί αντίστασης και πρόωσης

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης της γάστρας, επόμενο βήμα της διαδικασίας μελέτης και σχεδίασης αποτελεί ο υπολογισμός της αντίστασης του πλοίου, της ισχύος πρόωσης και της δυναμικής διαγωγής. Μέσω της ισχύος αυτής προσδιορίζονται, όπως περιγράφεται στην επόμενη ενότητα, τα μήκη των μηχανοστασίων και του αντλιοστασίου (pump room), ενώ η διαγωγή χρησιμεύει στην οριοθέτηση του καταστρώματος διπυθμένων. Δεδομένου ότι η ανάπτυξη της επιφάνειας της γάστρας βασίζεται σε μία από τις δύο προαναφερθείσες

συστηματικές σειρές (NTUA ή NPL), για τον προσδιορισμό της αντίστασης ρυμούλκησης χρησιμοποιούνται αντίστοιχες αριθμητικές μέθοδοι που βασίζονται σε παλινδρομική ανάλυση δεδομένων από πειράματα προτύπων σε πειραματική δεξαμενή. Συγκεκριμένα:

Συστηματική σειρά NPL

Για τη συστηματική σειρά NPL χρησιμοποιείται η μέθοδος των Radojčić et al., κατά την οποία υπολογίζονται η γωνία δυναμικής διαγωγής τ και ο λόγος $R_T / g\Delta$, όπου R_T η συνολική αντίσταση σε kN και Δ το εκτόπισμα του πλοίου σε t [Radojčić et al., 1997]. Στην εργασία αυτή, προτείνονται δύο διαφορετικές μέθοδοι για τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών. Στην πρώτη (speed independent), προσδιορίζονται τιμές σε συγκεκριμένους αριθμούς Froude (0.8, 1.0, ..., 2.8, 3.0) και στη συνέχεια με γραμμική παρεμβολή υπολογίζονται οι τιμές στην υπό εξέταση ταχύτητα. Στη δεύτερη (speed dependent), οι οποία προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα αλλά είναι πιο σύνθετη, οι τιμές των τ και $R_T / g\Delta$ που υπολογίζονται αφορούν την υπό εξέταση ταχύτητα v . Στα πλαίσια της παραμετρικής σχεδίασης, για τους υπολογισμούς της αντίστασης και της δυναμικής διαγωγής, χρησιμοποιείται η δεύτερη μέθοδος σύμφωνα με την οποία οι τιμές της γωνίας τ και του λόγου $R_T / g\Delta$, υπολογίζονται μέσω πολυωνύμων ογδού βαθμού της μορφής:

$$(R_T / g\Delta) = \sum_{i=0}^8 a_i \varphi_{n\bar{v}^i} + \left(\sum_{i=0}^8 a_{i+9} \varphi_{n\bar{v}^i} \right) x_1 + \dots + \left(\sum_{i=0}^8 a_{i+17} \varphi_{n\bar{v}^i} \right) x_{27} \quad (3.1)$$

$$\tau = \sum_{i=0}^8 b_i \varphi_{n\bar{v}^i} + \left(\sum_{i=0}^8 b_{i+9} \varphi_{n\bar{v}^i} \right) x_2 + \dots + \left(\sum_{i=0}^8 b_{i+126} \varphi_{n\bar{v}^i} \right) x_{27} \quad (3.2)$$

$$\text{όπου: } \varphi_{n\bar{v}} = (F_{n\bar{v}} - 1.8) / 1.2, \quad F_{n\bar{v}} = v / \sqrt{g\nabla^{1/3}} \quad \text{και} \quad \varphi_{n\bar{v}^i} = \begin{cases} (\varphi_{n\bar{v}})^i, & i = 1, \dots, 8 \\ 1, & i = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Οι συντελεστές a_i της εξίσωσης (3.1) και b_i της εξίσωσης (3.2), λαμβάνουν τιμές από δύο πίνακες 14×9 και 15×9 , αντίστοιχα.

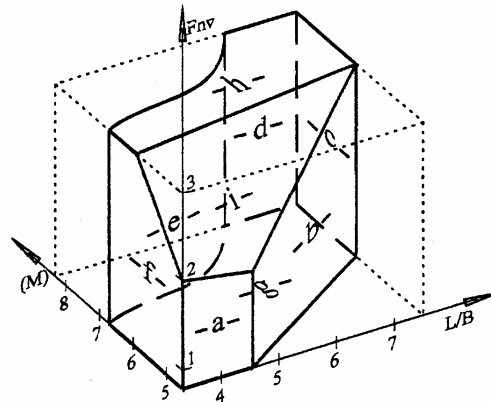
Η εξίσωση (3.1) περιλαμβάνει, εκτός από τον πρώτο όρο, άλλους δεκατρείς, των οποίων οι συντελεστές x_j υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} x_1 &= [(L/B) - 5.415] / 2.028 \\ x_2 &= [(M) - 6.4] / 1.9, \quad (M) = L_{wl} / \nabla^{1/3} \\ x_3 &= [(B/T) - 6.2615] / 4.5063 \\ x_5 &= x_2^2, & x_{12} &= x_2^2 x_1, & x_{13} &= x_2^2 x_3, & x_{16} &= x_2^2 x_2, \\ x_{19} &= x_1^3 x_2, & x_{20} &= x_1^3 x_3, & x_{22} &= x_2^3 x_3, & x_{23} &= x_3^3 x_1, \\ x_{26} &= x_1^2 x_3^2, & x_{27} &= x_2^2 x_3^2 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Αντίστοιχα, η εξίσωση (3.2) περιλαμβάνει, εκτός από τον πρώτο όρο, άλλους δεκατέσσερις, των οποίων οι συντελεστές x_j υπολογίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned}
 x_7 &= x_1 x_2, & x_9 &= x_2 x_3, \\
 x_{10} &= x_1^2 x_2, & x_{11} &= x_1^2 x_3, & x_{14} &= x_3^2 x_1, \\
 x_{18} &= x_3^3, & x_{19} &= x_1^3 x_2, & x_{20} &= x_1^3 x_3, & x_{23} &= x_3^3 x_1, & x_{24} &= x_3^3 x_2, \\
 x_{25} &= x_1^2 x_2^2, & x_{26} &= x_1^2 x_3^2, & x_{27} &= x_2^2 x_3^2
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Γενικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παλινδρομική ανάλυση προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα αντίστοιχα πειραματικά. Η αριθμητική αυτή μέθοδος αποτελεί ένα σημαντικό βοήθημα για τον υπολογισμό της αντίστασης και της δυναμικής διαγωγής σκαφών που ανήκουν στη συστηματική σειρά NPL, όταν δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή πειραμάτων ή όταν πρέπει να διερευνηθούν τα παραπάνω μεγέθη για έναν μεγάλο αριθμό εναλλακτικών σχεδιάσεων, οπότε και η χρήση διαγραμμάτων καθίσταται ουσιαστικά αδύνατη. Στο παρακάτω Σχήμα 3.16 παρουσιάζονται τα όρια εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού αντίστασης και δυναμικής διαγωγής.



- a - $(M) \geq 4.5$
- b - $(M) \geq 0.6757 \cdot (L/B) + 1.4324$
- c - $(L/B) \leq 7.5$
- d - $(M) \leq 8.3$
- e - $(M) \leq 0.1534 \cdot (L/B)^3 - 1.9906 \cdot (L/B)^2 + 8.732 \cdot (L/B) - 5.9683$
- f - $(L/B) \geq 3.33$
- g - $F_{nv} \geq 0.8$
- h - $F_{nv} \leq 3.0$
- i - $F_{nv} \leq 0.714 \cdot (M) - 0.103 \cdot (L/B) - 0.872$

Σχήμα 3.16: Τα όρια εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού της αντίστασης και της δυναμικής διαγωγής, σειρά NPL [Radojčić et al., 1997]

Συστηματική σειρά NTUA

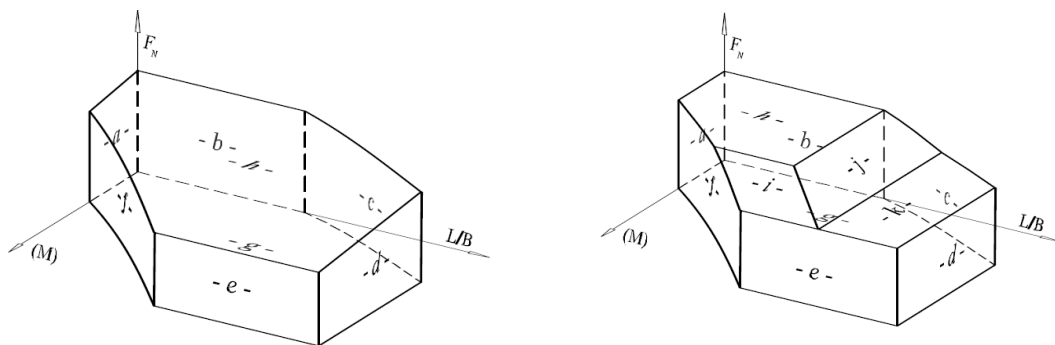
Για τη συστηματική σειρά NTUA χρησιμοποιείται η μέθοδος των Radojčić et al., κατά την οποία υπολογίζονται ο συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης C_R και η γωνία δυναμικής διαγωγής τ , [Radojčić et al., 2001]. Σύμφωνα με αυτή, η τιμή του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης και της γωνίας δυναμικής διαγωγής υπολογίζονται με τη χρήση πολυωνύμων εβδόμου και πέμπτου βαθμού ως προς την ταχύτητα (αριθμό Froude) αντίστοιχα, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$10^3 C_R = \sum_{i=1}^{31} a_i x_i \quad (3.6)$$

$$\tau = \sum_{i=1}^{28} b_i y_i \quad (3.7)$$

όπου οι τιμές των μεγεθών x_i και y_i εξαρτώνται από τον αριθμό Froude, τον αδιάστατο λόγο $(M) = L_{WL} / \nabla^{1/3}$, το λόγο μήκους προς πλάτος L/B και το λόγο πλάτους προς βύθισμα B/T .

Οι τιμές των σταθερών συντελεστών a_i και b_i είναι πραγματικοί αριθμοί και παρουσιάζονται σε αντίστοιχους πίνακες στη σχετική βιβλιογραφία. Σημειώνεται ότι αν και οι Radojčić et al., περιλαμβάνουν στην εργασία τους αντίστοιχη πολυωνυμική εξίσωση για τον προσεγγιστικό υπολογισμό του εμβαδού της βρεχόμενης επιφάνειας, αυτή δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διατριβή. Δεδομένου ότι η γεωμετρία της γάστρας είναι γνωστή, η βρεχόμενη επιφάνεια υπολογίζεται απευθείας μέσω του λογισμικού παραμετρικής σχεδίασης. Γενικά, όπως προκύπτει από την εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου στο σύνολο των μοντέλων της συστηματικής σειράς NTUA, τα αποτελέσματα που προκύπτουν προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τα αντίστοιχα πειραματικά. Στο Σχήμα 3.17 παρουσιάζονται τα όρια εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου των Radojčić et al.



-a-	$L/B \geq 4.2935$	-a-	$L/B \geq 4.2935$
-b-	$(M) \geq 6.183$	-b-	$(M) \geq 6.183$
-c-	$(M) \geq 0.070288 \cdot (L/B)^2 - 0.477113 \cdot (L/B) + 6.544157$	-c-	$(M) \geq 0.070288 \cdot (L/B)^2 - 0.477113 \cdot (L/B) + 6.544157$
-d-	$L/B \leq 7.525$	-d-	$L/B \leq 7.525$
-e-	$(M) \leq 8.532$	-e-	$(M) \leq 8.532$
-f-	$(M) \leq 0.115364 \cdot (L/B)^2 - 0.195794 \cdot (L/B) + 5.648$	-f-	$(M) \leq 0.115364 \cdot (L/B)^2 - 0.195794 \cdot (L/B) + 5.648$
-g-	$F_N \geq 0.23$	-g-	$F_N \geq 0.3$
-h-	$(M) \leq 12.7 \cdot F_N^2 - 34.75 \cdot F_N + 29.05$	-h-	$F_N \leq 1.1$
		-i-	$(M) \leq 17.312 - 8.78 \cdot F_N$
		-j-	$L/B \leq 14.742 - 8.02 \cdot F_N$
		-k-	$F_N \leq 1.0$ (for $L/B > 6.722$)

Σχήμα 3.17: Τα όρια εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού της αντίστασης (αριστερά) και της δυναμικής διαγωγής (δεξιά), σειρά NTUA [Radojčić et al., 2001]

Με γνωστό το συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης, η συνολική αντίσταση προκύπτει στη συνέχεια από την παρακάτω εξίσωση:

$$R_T = \frac{1}{2} \rho g c_T V^2 S \times 10^{-3} \quad (3.8)$$

όπου R_T σε kN , $c_T = c_R + c_F$ ο συνολικός συντελεστής αντίστασης,

$c_F = 0.075 / (\log_{10} Re - 2)^2$ ο συντελεστής τριβής σύμφωνα με την καμπύλη της ΙΤΤC ,

$\rho = 104.61 \frac{kp \text{ sec}^2}{m^4}$ η πυκνότητα του θαλασσινού νερού σε θερμοκρασία $15^\circ C$,

V η ταχύτητα σε m/sec και S η βρεχόμενη επιφάνεια σε m^2 .

Υπολογισμός εγκατεστημένης ισχύος

Με γνωστή την τιμή της αντίστασης, η ισχύς ρυμούλκησης υπολογίζεται και για τις δύο συστηματικές σειρές από την εξίσωση:

$$EHP = R_T V \quad (3.9)$$

όπου EHP σε kW , R_T η αντίσταση σε kN και V η ταχύτητα του πλοίου σε m/s .

Η ισχύς στον άξονα προκύπτει από το λόγο:

$$SHP = \frac{EHP}{OPC} \quad (3.10)$$

Σύμφωνα με τον J. Knox ο συνολικός βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης με προωθητήρες αντίδρασης (water-jets) μπορεί να εκτιμηθεί από τον ακόλουθο εμπειρικό τύπο [Knox, 2004]:

$$OPC = aV^3 + bV^2 + cV + d \quad (3.11)$$

όπου V η ταχύτητα του πλοίου σε κόμβους ($10 kn \leq V \leq 80 kn$) και

$$a = 2.963e^{-19}, \quad b = -0.0003, \quad c = 0.0295, \quad d = -0.0250$$

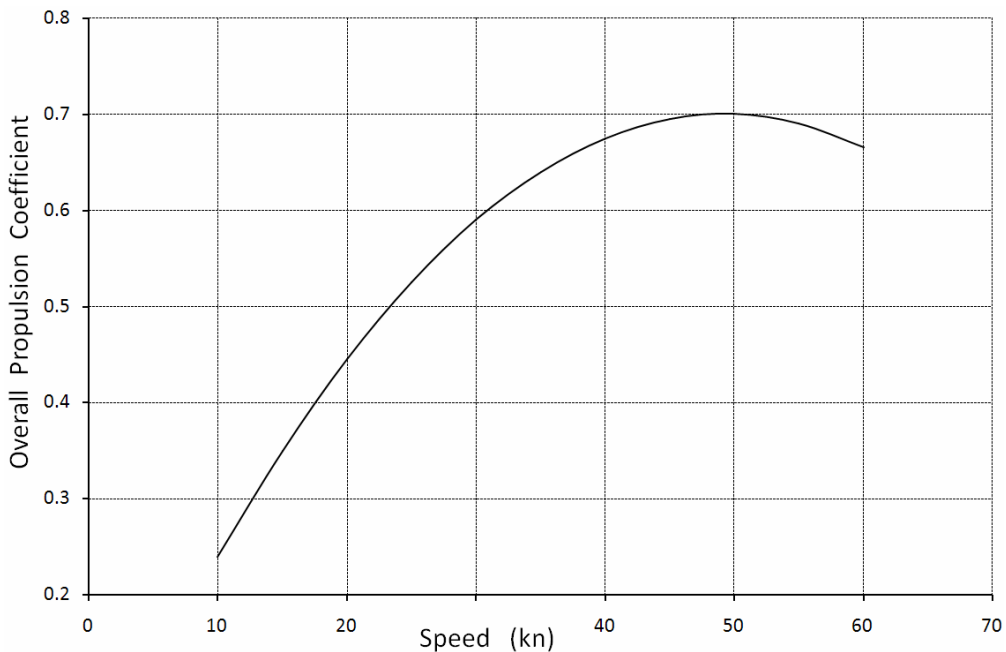
Η γραφική απεικόνιση της παραπάνω εξίσωσης (3.11) φαίνεται στο Σχήμα 3.18.

Λαμβάνοντας υπόψη τη ρύπανση της γάστρας αλλά και την επίδραση των θαλασσίων κυματισμών, καθώς και την αντίσταση του ανέμου, η παραπάνω ισχύς προσαυξάνεται κατά 25%, για να προκύψει η απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας:

$$P_{OP} = 1.25 \times SHP \quad (3.12)$$

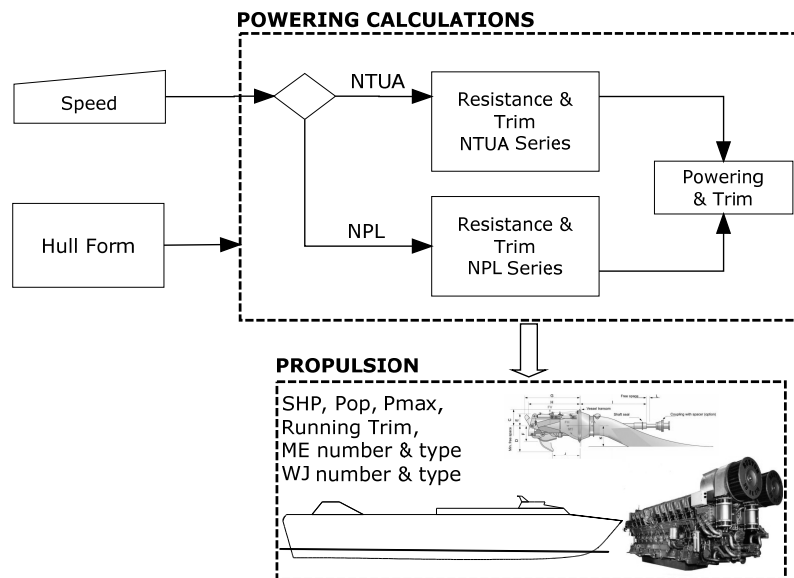
Δεδομένου ότι η παραπάνω ισχύς αντιστοιχεί στο 90% της MCR, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης προκύπτει τελικά με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$P_{ME} = 1.1 \times P_{op} \quad (3.13)$$



Σχήμα 3.18: Συνολικός βαθμός απόδοσης προωστήριας εγκατάστασης με water-jets

Από τη γωνία δυναμικής διαγωγής τ υπολογίζεται η κεκλιμένη ίσαλος πλεύσης του πλοίου καθώς αυτό κινείται με την δεδομένη ταχύτητα. Γενικά, τόσο η εγκατεστημένη ισχύς όσο και η γωνία δυναμικής διαγωγής είναι δύο σημαντικά μεγέθη καθώς από αυτά απορρέουν εκτός των άλλων, στοιχεία που αφορούν την εσωτερική υποδιαίρεση, τα βάρη και το κόστος του υπό σχεδίαση πλοίου. Στο Σχήμα 3.19 φαίνεται το διάγραμμα ροής της παραπάνω διαδικασίας υπολογισμών αντίστασης και πρόωσης.



Σχήμα 3.19: Υπολογισμοί αντίστασης και πρόωσης

3.3. Κατασκευή της εσωτερικής διαμέρισης

Με δεδομένη μορφή γάστρας, επόμενο βήμα της παρούσας μεθοδολογίας σχεδίασης αποτελεί η γεωμετρική αναπαράσταση της εσωτερικής διαμέρισης του πλοίου. Η παραμετροποίηση των διαμερισμάτων ενός πλοίου είναι γενικά ένα περίπλοκο πρόβλημα, δεδομένου κυρίως του μεγάλου αριθμού των ελεύθερων μεταβλητών σχεδίασης. Ο μελετητής πρέπει να καθορίσει τους χώρους εσωτερικά της γάστρας του πλοίου ανάλογα με τη μεταφορική ικανότητα, τις διατάξεις και τους κανονισμούς που αφορούν την ενδιαιτήση επιβατών και πληρώματος, το μέγεθος της μηχανολογικής εγκατάστασης κ.ά. Στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε περιλαμβάνεται ένας αριθμός κατάλληλων μεταβλητών σχεδίασης (Πίνακας 3.2) προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική γενίκευση του γεωμετρικού μοντέλου. Μέσω μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας, προκύπτει η διάταξη των χώρων υπό το κύριο κατάστρωμα (στεγανή υποδιαίρεση), των χώρων μεταφοράς οχημάτων, ενδιαιτήσεως επιβατών και πληρώματος, καθώς και άλλων χώρων υπερκατασκευών (γέφυρα, δωμάτια κεντρικής μονάδας κλιματισμού και εκτάκτου ανάγκης, χώροι διέλευσης συστημάτων απαγωγής καυσαερίων, κ.ά.)

Γενικά, ανάλογα με τις τιμές των ελευθέρων μεταβλητών, υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής εναλλακτικών διατάξεων των εσωτερικών χώρων κάθε σχεδίασης. Παρόλα αυτά, όλες οι σχεδιάσεις έχουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Αυτά είναι:

- Το κατάστρωμα στεγανής υποδιαίρεσης είναι το κύριο κατάστρωμα οχημάτων.
- Οι εγκάρσιες φρακτές διαιρούν το χώρο κάτω του κυρίου καταστρώματος οχημάτων σε αντίστοιχες υδατοστεγείς ζώνες.
- Δεν υπάρχουν διαμήκεις στεγανές φρακτές.
- Όλα τα καταστρώματα είναι συνεχή εκτός από την πλατφόρμα ΙΧ αυτοκινήτων (όταν αυτή υπάρχει).
- Όλα τα καταστρώματα εκτείνονται έως τη φρακτή σύγκρουσης, εκτός από το κύριο κατάστρωμα οχημάτων και το πρώτο κατάστρωμα επιβατών, τα οποία εκτείνονται έως την πλώρη.
- Η φορτοεκφόρτωση των οχημάτων γίνεται πάντοτε από την πρύμνη.
- Οι επιβάτες εισέρχονται και εξέρχονται από το πλοίο μέσω δύο κλιμακοστασίων που βρίσκονται επίσης στην πρύμνη του πλοίου.

Οι παραδοχές αυτές, όπως αναφέρεται και στην Εισαγωγή της διατριβής, είναι απαραίτητες προκειμένου το βασικό γεωμετρικό μοντέλο να είναι κατά το δυνατόν απλουστευμένο αλλά ταυτόχρονα ρεαλιστικό. Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθούνται προκειμένου να κατασκευαστούν τόσο η στεγανή υποδιαίρεση όσο και η εσωτερική διάταξη των υπερκατασκευών του πλοίου. Στο Σχήμα 3.20 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αυτής όπου φαίνονται οι μεταβλητές σχεδίασης οι οποίες χρησιμοποιούνται για την παραμετροποίηση της σχεδίασης των επιμέρους περιοχών της εσωτερικής διάταξης ενός πλοίου.

Πίνακας 3.2: Ελεύθερες μεταβλητές για την παραμετρική μοντελοποίηση της εσωτερικής διαμέρισης

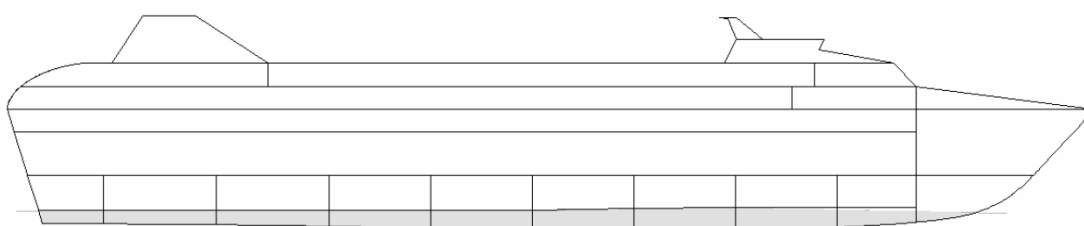
α/α	Μεταβλητή	Μο- νάδες	Επεξήγηση
1	<i>Ndam</i>	-	Αριθμός καταστρωμάτων μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων πάνω από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών
2	<i>Nad</i>	-	Αριθμός καταστρωμάτων ενδιαίτησης
3	<i>Ner</i>	-	Αριθμός μηχανοστασίων
4	<i>Nbhd</i>	-	Αριθμός εγκαρσίων φρακτών εκτός της φρακτής σύγκρουσης
5	<i>BHDi</i>	#	Διαμήκης θέση εγκαρσίων φρακτών, $i=1, \dots, n$
6	<i>Npass</i>	-	Αριθμός επιβατών
7	<i>Ncrew</i>	-	Αριθμός μελών πληρώματος
8	<i>Ncars</i>	-	Αριθμός ΙΧ αυτοκινήτων
9	<i>Ntrucks</i>	-	Αριθμός ΦΓ αυτοκινήτων
10	<i>Platform</i>	-	Καθορίζει ή μη τη δημιουργία πλατφόρμας στο κύριο κατάστρωμα μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων
11	<i>Trucks</i>	-	Καθορίζει τη δυνατότητα ή μη μεταφοράς φορτηγών αυτοκινήτων
12	<i>Mdb</i>	-	Καθορίζει τη μέθοδο υλοποίησης του εσωτερικού πυθμένα
13	<i>Mbhds</i>	-	Καθορίζει τη μέθοδο υπολογισμού της θέσης εγκαρσίων στεγανών φρακτών
14	<i>Mcars</i>	-	Καθορίζει τη μέθοδο υπολογισμού του αριθμού και των χώρων φόρτωσης ΙΧ αυτοκινήτων
15	<i>Mpass</i>	-	Καθορίζει τη μέθοδο υπολογισμού του αριθμού και των χώρων ενδιαίτησης επιβατών
16	<i>Mcrew</i>	-	Καθορίζει τη μέθοδο υπολογισμού του αριθμού και των χώρων ενδιαίτησης των μελών πληρώματος
17	<i>Hdb</i>	m	Κατακόρυφη θέση του οριζόντιου εσωτερικού πυθμένα
18	<i>Hpd</i>	m	Ύψος χώρου πλατφόρμας κυρίου καταστρώματος μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων
19	<i>Had</i>	m	Ύψος χώρων ενδιαίτησης
20	<i>FrSp1, FrSp2, FrSp3</i>	m	Ισαπόσταση κανονικών νομέων (frame Spacing) στην πρυμναία, ενδιαμέση και πρωραία περιοχή, αντίστοιχα
21	<i>WsA, WsF, WsM</i>	-	Βήμα επί του frame spacing για την ύπαρξη ενισχυμένων νομέων στην πρυμναία, πρωραία και ενδιαμέση περιοχή, αντίστοιχα
22	<i>Casing</i>	-	Καθορίζει τη θέση του casing
23	<i>CasingB</i>	m	Συντελεστής για τον υπολογισμό του πλάτους των casings
24	<i>CasingL</i>	m	Συντελεστής για τον υπολογισμό του μήκους των casings
25	<i>EntrL, EntrB</i>	m	Μήκος και πλάτος κλιμακοστασίων εισόδου επιβατών, αντίστοιχα
26	<i>Ltr, Btr</i>	m	Μήκος και πλάτος φορτηγών αυτοκινήτων, αντίστοιχα
27	<i>Lpc, Bpc</i>	m	Μήκος και πλάτος αυτοκινήτων ιδιωτικής χρήσης, αντίστοιχα
28	<i>Pci</i>	-	Μέσος αριθμός ατόμων κατώτερου πληρώματος ανά καμπίνα
29	<i>Pco</i>	-	Μέσος αριθμός αξιωματικών πληρώματος ανά καμπίνα
30	<i>Nb</i>	-	Αριθμός σαλονιών ανά κατάστρωμα ενδιαίτησης επιβατών
31	<i>Galley</i>	-	Καθορίζει την ύπαρξη ή μη κουζίνας
32	<i>Feeder</i>	-	Καθορίζει εάν το πλοίο ακολουθεί πλόες τροφοδοτικών γραμμών
33	<i>Restaurant</i>	-	Καθορίζει την ύπαρξη ή μη εστιατορίου
34	<i>SelfService</i>	-	Καθορίζει την ύπαρξη ή μη εστιατορίου self service
35	<i>Cld</i>	-	Καθορίζει το ποσοστό προσαύξησης του ελάχιστου μήκους βλάβης

3.3.1. Στεγανή υποδιαίρεση

Στη φάση αυτή καθορίζεται η γεωμετρία του διπυθμένου, του καταστρώματος στεγανών φρακτών και των εγκαρσίων φρακτών και μοντελοποιούνται όλοι οι χώροι που βρίσκονται κάτω από το κύριο κατάστρωμα μεταφοράς οχημάτων. Η δυσκολία έγκειται στον καθορισμό των μηκών των κυρίων μηχανοστασίων και του χώρου όπου υπάρχουν τα water-jets. Προκειμένου να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό, προηγήθηκε συστηματική μελέτη και ανάλυση γενικών διατάξεων ταχύπλων μονόγαστρων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων και στοιχείων κατασκευαστών προωπηρίων συστημάτων, με σκοπό τη συσχέτιση των μηκών των παραπάνω χώρων με την εγκατεστημένη σε αυτούς ισχύ.

Κατάστρωμα διπυθμένων

Σύμφωνα με την παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, ένα πλοίο μπορεί να μη διαθέτει καθόλου εσωτερικό πυθμένα ή να διαθέτει έναν οριζόντιο εσωτερικό πυθμένα η κατακόρυφη θέση του οποίου αποτελεί ελεύθερη μεταβλητή. Εναλλακτικά, η διαμόρφωση της γεωμετρίας του διπυθμένου μπορεί να είναι τέτοια, ώστε το πλοίο να προστατεύεται από βλάβες μικρής διάρτησης και μεγάλου μήκους (raking damage), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.21. Σύμφωνα με τον Κώδικα Ταχυπλών Σκαφών ειδικά για τα πλοία Κατηγορίας Β¹, πρέπει να εξεταστεί η ευστάθεια μετά από βλάβη σε συγκεκριμένες περιοχές του πυθμένα, η οποία εκτείνεται έως και το 100% του μήκους της ισάλου σχεδίασης. Σύμφωνα με την εναλλακτική αυτή μέθοδο κατασκευής, το διπύθμενο είναι οριζόντιο έως το μέσο του πλοίου και κεκλιμένο έως τη φρακτή σύγκρουσης. Καθ' όλο το μήκος του, αυτό βρίσκεται πάνω από το κατακόρυφο όριο της βλάβης, όπως αυτό περιγράφεται από τους κανονισμούς², αποκλείοντας έτσι την θεωρητική εισροή υδάτων. Ο προσδιορισμός των περιοχών που είναι ευπρόσβλητες σε raking damage αναφέρεται στην ενότητα 3.7.2, στην οποία περιγράφονται οι υπολογισμοί ευστάθειας του πλοίου μετά από βλάβη.



Σχήμα 3.21: Η κατασκευή του διπυθμένου και η περιοχή που είναι ευάλωτη σε raking damage

Κατάστρωμα στεγανών φρακτών

Η θέση του καταστρώματος στεγανών φρακτών (κύριο κατάστρωμα μεταφοράς οχημάτων), καθορίζεται από το άθροισμα δύο ελεύθερων μεταβλητών: του βυθίσματος σχεδίασης και του ύψους εξάλων. Ως εκ τούτου, το κατάστρωμα αυτό είναι οριζόντιο, δηλαδή έχει μηδε-

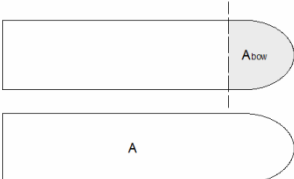
¹ Πλοίο Κατηγορίας Β είναι κάθε ταχύπλοο σκάφος το οποίο μεταφέρει πάνω από 450 επιβάτες με διάταξη των διαφόρων μηχανημάτων και συστημάτων ασφαλείας τέτοια ώστε να επιτρέπει την ασφαλή πλοήγησή του, στην περίπτωση αδυναμίας λειτουργίας των μηχανημάτων και συστημάτων ασφαλείας που υπάρχουν σε οποιοδήποτε διαμέρισμα.

² MSC 73/21 Annex 5 Ch.2 §2.6.8.1.3

νική σιμότητα και κυρτότητα. Πρώραθεν, εκτείνεται πέραν της φρακτής σύγκρουσης προκειμένου να αυξηθεί η ακαμψία της μεταλλικής κατασκευής, όπως συμβαίνει σε πολλές υπάρχουσες σχεδιάσεις μεσαίων και μεγάλων μονόγαστρων ταχύπλων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων.

Εγκάρσιες στεγανές φρακτές

Αρχικά υπολογίζεται η διαμήκης θέση της φρακτής σύγκρουσης σύμφωνα με τους κανονισμούς του Κώδικα Ταχυπλών Σκαφών (MSC 73/21 Annex 5, Ch. 4). Σύμφωνα με αυτόν, το εμβαδόν A_{bow} της προβεβλημένης στο οριζόντιο επίπεδο επιφάνειας της κατασκευής πρώραθεν της φρακτής σύγκρουσης θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση (3.14), προκειμένου το ποσοστό της ενέργειας που αποσβένεται έπειτα από πιθανή σύγκρουση να θεωρείται αποδεκτό:



$$A_{bow} \geq 0.0035 A m f V \quad \text{και} \quad A_{bow} > 0.04 A \quad (3.14)$$

όπου

- f , συντελεστής που εξαρτάται από το σύστημα ενίσχυσης
- V , η ταχύτητα του πλοίου σε m/sec
- A , η συνολική προβεβλημένη επιφάνεια της κατασκευής

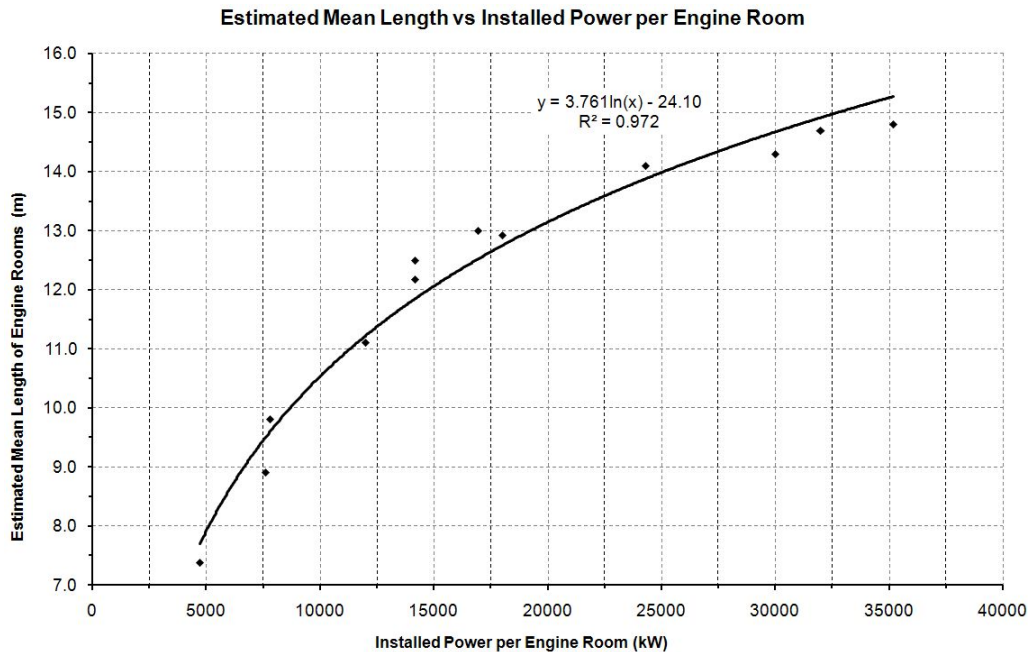
Σχήμα 3.22: Υπολογισμός της θέσης της φρακτής σύγκρουσης

Επιπλέον, ο ίδιος κανονισμός προβλέπει ότι όλοι οι κλειστοί χώροι που προορίζονται για κοινή χρήση ή ενδιαίτηση πληρώματος ή έλεγχο μηχανημάτων, πρέπει να βρίσκονται πρύμνηθεν της φρακτής σύγκρουσης. Επειδή στη φάση αυτή το ύψος των υπερκατασκευών δεν είναι γνωστό, θεωρείται ότι η κατασκευή του πλοίου που μπορεί να απορροφήσει ενέργεια από πιθανή σύγκρουση εκτείνεται έως την οροφή του κυρίου καταστρώματος μεταφοράς οχημάτων.

Εκτός από τη θέση της φρακτής σύγκρουσης, η οποία πάντοτε υπολογίζεται όπως παραπάνω, οι θέσεις των υπόλοιπων στεγανών φρακτών μπορούν να καθοριστούν με τρεις εναλλακτικές μεθόδους. Στην πρώτη, ο αριθμός των εγκαρσίων φρακτών και οι αντίστοιχες διαμήκεις θέσεις τους, καθορίζονται από τον χρήστη. Η μέθοδος αυτή είναι χρήσιμη όταν επιθυμείται να μελετηθεί μια συγκεκριμένη σχεδίαση με γνωστή στεγανή υποδιαίρεση. Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο, οι θέσεις των φρακτών των μηχανοστασίων υπολογίζονται αυτόματα, ενώ ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον αριθμό και τη θέση των υπολοίπων. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις όπου δεν είναι γνωστή η θέση ή/και ο αριθμός των μηχανοστασίων, ενώ ο χρήστης επιθυμεί να καθορίσει ο ίδιος τους υπόλοιπους χώρους κάτω από το κύριο κατάστρωμα. Τέλος, στην τρίτη μέθοδο ολόκληρη η στεγανή υποδιαίρεση παράγεται αυτόματα. Σύμφωνα με αυτή, οι φρακτές τοποθετούνται σε θέσεις που αντιστοιχούν σε ενισχυμένους νομείς (web frames), ενώ ο χώρος μεταξύ της πρωραίας φρακτής των μηχανοστασίων και της φρακτής σύγκρουσης χωρίζεται σε ζώνες περίπου ίδιου μήκους. Το μήκος αυτό καθορίζεται από το ελάχιστο μήκος βλάβης και έναν συντελεστή προσαύξησης αυτού, ο οποίος αποτελεί παράμετρο σχεδίασης.

Το μήκος των μηχανοστασίων καθορίζεται από την εξίσωση (3.15), η οποία αναφέρεται τόσο σε πλοία τα οποία διαθέτουν μόνο κινητήρες Diesel, όσο και σε πλοία στα οποία υπάρχει συνδυασμός κινητήρων Diesel και αεριοστρόβιλων. Στην παρούσα μεθοδολογία θεωρείται

ότι η συνολική ισχύς διανέμεται ισόποσα από κάθε μηχανοστάσιο και ως εκ τούτου καθένα από αυτά έχει την ίδια διαμήκη έκταση με τα υπόλοιπα.



Σχήμα 3.23: Εκτίμηση του μήκους κάθε μηχανοστασίου συναρτήσει της ισχύος

Γενικά, η έκταση των μηχανοστασίων εξαρτάται τόσο από την εγκατεστημένη σε καθένα από αυτά ισχύ, όσο και από την ύπαρξη βοηθητικών μηχανημάτων και χώρων, όπως το δωμάτιο ελέγχου (control room). Έτσι, η εξίσωση (3.15) εκτιμά ουσιαστικά το μέσο μήκος των χώρων μηχανοστασίου για δεδομένη εγκατεστημένη ισχύ και αριθμό μηχανοστασίων. Γενικά, θεωρείται ότι πλοία με συνολική εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη από 24300 kW ανά μηχανοστάσιο, δεν διαθέτουν αεριοστρόβιλους, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για μεγαλύτερες τιμές της εγκατεστημένης ισχύος. Το όριο αυτό προκύπτει από την υπόθεση ότι σε κάθε μηχανοστάσιο μπορεί να υπάρχουν το πολύ τρεις κινητήρες Diesel, μέγιστης ισχύος 8100 kW έκαστος. Στο Σχήμα 3.23 οι τιμές ισχύος ανά μηχανοστάσιο μικρότερες από 20000 kW, αναφέρονται σε πλοία που διαθέτουν μόνο κινητήρες Diesel. Αντίστοιχα, τιμές μεγαλύτερες από 30000 kW προέρχονται από πλοία με δύο αεριοστρόβιλους, ενώ η ενδιάμεση τιμή από πλοίο με έναν αεριοστρόβιλο.

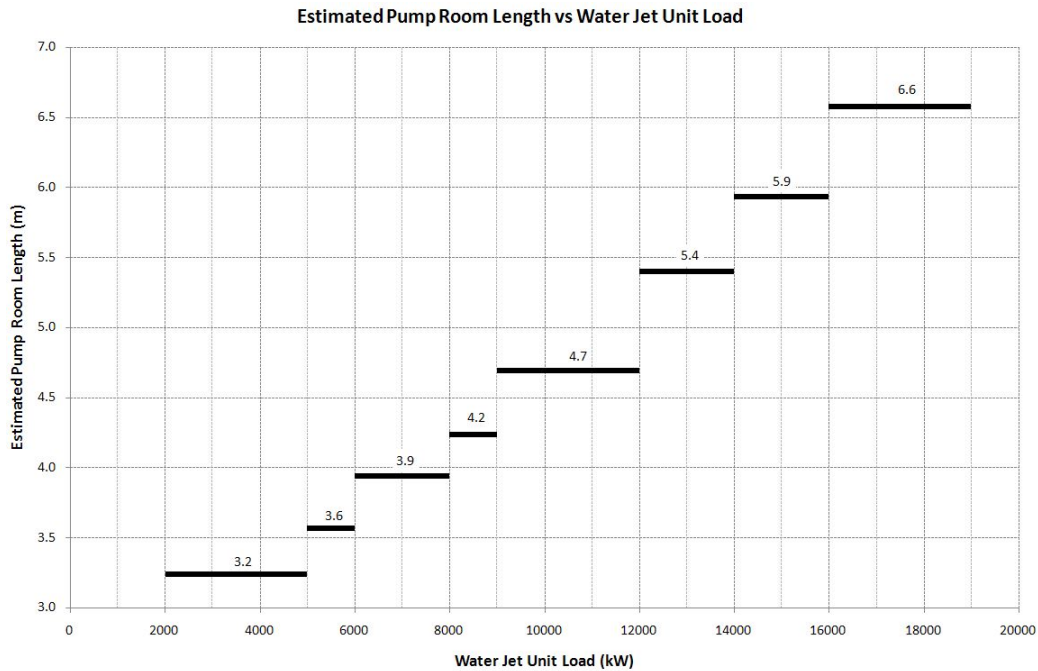
Η εξίσωση που εκτιμά το μέσο μήκος μηχανοστασίων συναρτήσει της ισχύος είναι:

$$L_{ER} = 3.761 \ln(P_{ME}/n_{ER}) - 24.10 \quad (3.15)$$

όπου L_{ER} σε m , P_{ME} η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε kW και n_{ER} ο αριθμός των μηχανοστασίων, ο οποίος αποτελεί ανεξάρτητη μεταβλητή, η οποία μπορεί να λάβει τις τιμές 1, 2 ή 3.

Για την εκτίμηση μήκους του χώρου όπου είναι εγκατεστημένα τα water-jets (pump room), χρησιμοποιείται το διάγραμμα που υπάρχει στο Σχήμα 3.24. Το διάγραμμα αυτό προέκυψε έπειτα από ανάλυση στοιχείων κατασκευαστών και γενικών διατάξεων υπαρκτών πλοίων

και συνδέει το φορτίο ανά μονάδα water-jet με το μήκος του pump room. Για την κατασκευή του διαγράμματος αυτού, θεωρήθηκε ότι ο αριθμός των water-jets είναι ίσος με τον αριθμό των κυρίων μηχανών, εκτός εάν αυτές είναι περισσότερες από τέσσερις οπότε ο αριθμός των water-jets ίσος με πέντε.



Σχήμα 3.24: Μήκος pump room συναρτήσει της ισχύος των water-jets

Γενικά, θεωρείται ότι η συνολική ισχύς των κυρίων μηχανών ισοκατανέμεται σε κάθε ένα water-jet. Επειδή τα water-jets λειτουργούν σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος ισχύος δεν είναι δυνατή η εύρεση μιας συνεχούς συνάρτησης που να συνδέει τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά με την ισχύ λειτουργίας τους.

Η τμηματική εξίσωση που εκτιμά το μήκος του pump room σε m συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος είναι:

$$L_{PR} = \begin{cases} 3.2, & (P_{ME} / n_{WJ}) < 5000 \text{ kW} \\ 3.6, & 5000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) < 6000 \text{ kW} \\ 3.9, & 6000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) < 8000 \text{ kW} \\ 4.2, & 8000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) < 9000 \text{ kW} \\ 4.7, & 9000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) < 12000 \text{ kW} \\ 5.4, & 12000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) < 14000 \text{ kW} \\ 5.9, & 14000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) < 16000 \text{ kW} \\ 6.6, & 16000 \text{ kW} \leq (P_{ME} / n_{WJ}) \end{cases} \quad (3.16)$$

όπου L_{PR} σε m , P_{ME} η συνολική εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης σε kW και n_{WJ} ο αριθμός των water-jets.

Η διαμήκης θέση των υπόλοιπων στεγανών φρακτών, οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα στην πρωραία φρακτή των μηχανοστασίων και τη φρακτή σύγκρουσης, υπολογίζεται έτσι ώστε τα διαμερίσματα που προκύπτουν:

- α) να μην έχουν μήκος μικρότερο από το ελάχιστο μήκος βλάβης, όπως καθορίζεται από τον Κώδικα Ταχυπλόων Σκαφών, προσαυξημένο κατά ένα ποσοστό που θέτει ο μελετητής. Η προκαθορισμένη τιμή του ποσοστού αυτού είναι 50%.

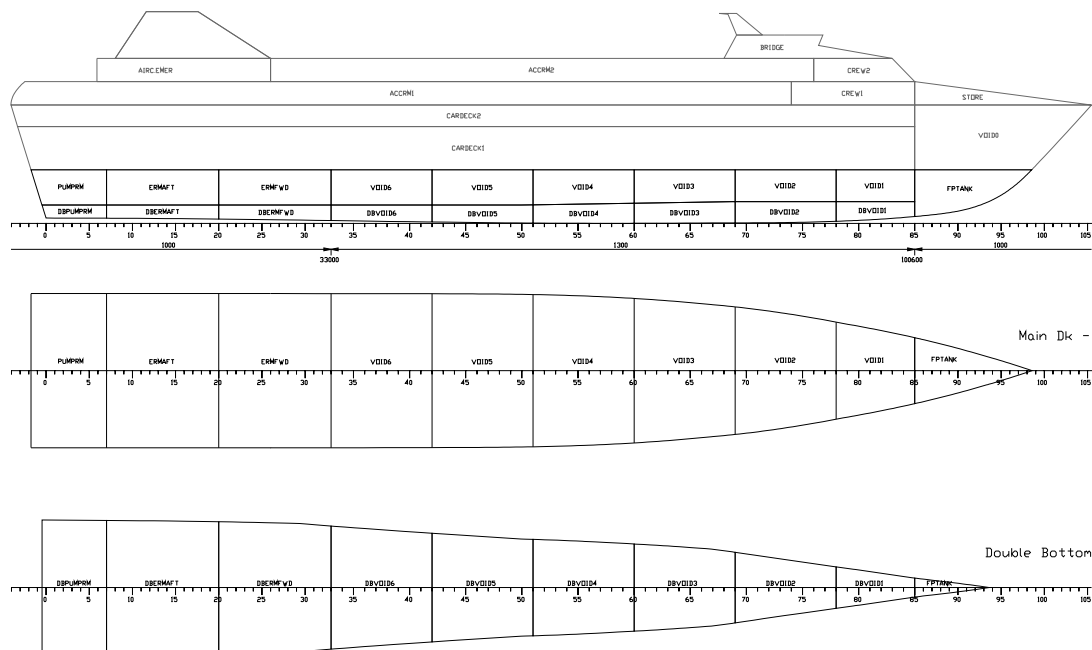
$$L_{D\min} = \min \{ 11, 0.75 \nabla^{1/3}, 3 + 0.225 \nabla^{1/3} \} \quad (3.17)$$

όπου $L_{D\min}$ σε m , ∇ (m^3) ο όγκος του πλοίου έως την ίσαλο σχεδίασης και

- β) το μήκος τους να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ισαπόστασης των ενισχυμένων νομέων (web spacing).

Χώροι κάτω από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών

Όλοι οι χώροι που βρίσκονται κάτω από το κύριο κατάστρωμα μεταφοράς οχημάτων, οριοθετούνται από τις εγκάρσιες φρακτές, το διπύθμενο (εάν υπάρχει) και το κατάστρωμα στεγανών φρακτών. Στο πρυμναίο άκρο του πλοίου τοποθετείται το διαμέρισμα εκείνο που χρησιμοποιείται για την εγκατάσταση των water-jets (rump room), ακολουθούν το(α) μηχανοστάσιο(α) και διάφοροι κενοί χώροι και χώροι δεξαμενών υγρού φορτίου. Κάτω από τους χώρους αυτούς δημιουργούνται αντίστοιχα διαμερίσματα στην περιοχή των διπυθμένων, ενώ πώραθεν της φρακτής σύγκρουσης υπάρχει μία μικρή δεξαμενή ζυγοστάθμισης για τον περιορισμό της πρυμναίας διαγωγής. Η διάταξη αυτή, αποτελεί το βασικό μοντέλο στεγανής υποδιαίρεσης για κάθε εναλλακτική σχεδίαση που αναπτύσσεται μέσω της παραμετρικής σχεδίασης (Σχήμα 3.25).



Σχήμα 3.25: Τυπική διάταξη των χώρων κάτω από το κύριο κατάστρωμα

Η έλλειψη διαμήκων στεγανών φρακτών, όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, οφείλεται αφενός στην έλλειψη χώρων μεταφοράς οχημάτων κάτω από το κύριο κατάστρωμα (Lower Hold) και αφετέρου στην προσπάθεια για απλούστευση της κατασκευής και αποφυγή ασύμμετρης κατάκλισης.

3.3.2. Χώροι μεταφοράς οχημάτων

Βασικές παράμετροι για τον καθορισμό των χώρων μεταφοράς οχημάτων είναι ο αριθμός των ΙΧ και ΦΓ αυτοκινήτων (εφόσον απαιτείται) καθώς και οι διαστάσεις τους. Τα ΦΓ αυτοκίνητα θεωρείται ότι μεταφέρονται μόνο επί του κυρίου καταστρώματος.

Κύριο κατάστρωμα μεταφοράς οχημάτων

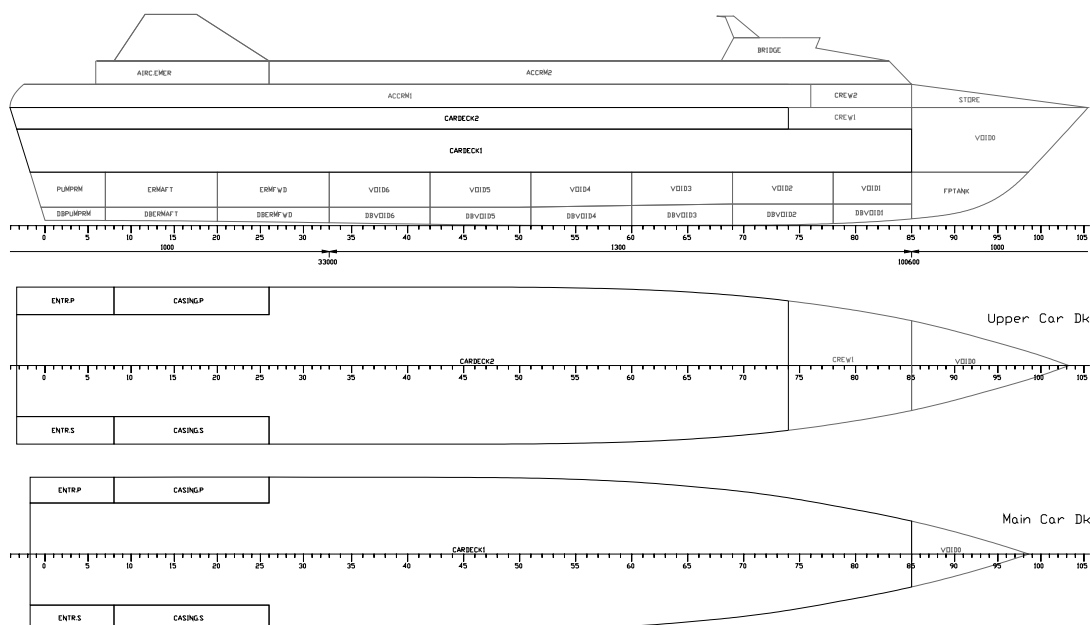
Σε όλες τις εναλλακτικές σχεδιάσεις, που παράγονται μέσω του λογισμικού παραμετρικής σχεδίασης, θεωρείται ότι υπάρχει ένας τουλάχιστον χώρος μεταφοράς οχημάτων. Ο χώρος αυτός οριοθετείται από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών και τη φρακτή σύγκρουσης, το δε ύψος του αποτελεί ελεύθερη μεταβλητή, η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη δυνατότητα ή μη μεταφοράς φορτηγών (ΦΓ) αυτοκινήτων. Για να προσδιοριστεί το «καθαρό» εμβαδόν, φόρτωσης, χρειάζεται προηγουμένως να ολοκληρωθεί η γεωμετρική μοντελοποίηση των κλιμακοστασίων εισόδου επιβατών και ο χώρος τον οποίο καταλαμβάνουν οι χώροι που περικλείουν τις εξαγωγές καυσαερίων των κυρίων και βοηθητικών μηχανών (casings). Γενικά, θεωρείται ότι υπάρχουν δύο συμμετρικές εισοδοί για τους επιβάτες στην περιοχή της πρύμνης, οι οποίες εκτείνονται καθ' ύψος από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών, έως και το πρώτο κατάστρωμα ενδιάμεσης. Σχετικά με τα casings, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής ενός κεντρικού χώρου (center casing), ή δύο συμμετρικών (side casings), τα οποία εφάπτονται στην αριστερή και δεξιά πλευρά της γάστρας του πλοίου, αντίστοιχα.

Καταστρώματα μεταφοράς οχημάτων άνωθεν του κυρίου

Εκτός από το κύριο κατάστρωμα, υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής επιπλέον χώρων μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων, στα ανώτερα καταστρώματα. Για το σκοπό αυτό, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές μέθοδοι. Στην πρώτη, ως ελεύθερη μεταβλητή θεωρείται ο αριθμός των επιπλέον καταστρωμάτων μεταφοράς αυτοκινήτων. Η γεωμετρική μοντελοποίηση των αντίστοιχων χώρων πραγματοποιείται αυτόματα, ενώ στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική μεταφορική ικανότητα ιδιωτικής χρήσης (ΙΧ) αυτοκινήτων και φορτηγών (εάν υπάρχουν), με βάση το μήκος των λωρίδων φόρτωσης (lanes). Στη δεύτερη μέθοδο, ελεύθερη μεταβλητή αποτελεί ο συνολικός αριθμός των μεταφερόμενων ΙΧ αυτοκινήτων. Με βάση τον αριθμό αυτό υπολογίζεται το απαιτούμενο συνολικό μήκος λωρίδων και στη συνέχεια εφόσον απαιτείται προστίθεται κατάλληλος αριθμός, πλέον του κυρίου, καταστρωμάτων μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων. Όλοι οι χώροι μεταφοράς οχημάτων και τα αντίστοιχα καταστρώματα, εκτείνονται γενικά έως τη φρακτή σύγκρουσης. Ειδικά στο τελευταίο κατάστρωμα που προστίθεται, και εφόσον παραμένει ελεύθερο ένα ποσοστό της επιφάνειάς του, τοποθετούνται στην πρωραία περιοχή αυτού, χώροι ενδιάμεσης κατώτερου πληρώματος ή/και χώροι αποθήκευσης.

Ανεξάρτητα των δυο παραπάνω μεθόδων γεωμετρικής αναπαράστασης των χώρων μεταφοράς οχημάτων, υπάρχει η δυνατότητα ύπαρξης πλατφόρμας στο χώρο του κυρίου κατα-

στρώματος μεταφοράς οχημάτων, εφόσον το συνολικό ύψος του επιτρέπει την κατασκευή της. Στη φάση αυτή επίσης, υπολογίζεται το κέντρο βάρους των μεταφερόμενων οχημάτων στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης. Στο Σχήμα 3.26 φαίνεται η διάταξη των χώρων μεταφοράς οχημάτων, για ένα πλοίο που έχει τη δυνατότητα μεταφοράς ΦΓ αυτοκινήτων στο κύριο κατάστρωμα ενώ διαθέτει ένα επιπλέον ανώτερο κατάστρωμα για τη μεταφορά ΙΧ αυτοκινήτων.



Σχήμα 3.26: Τυπική διάταξη των χώρων μεταφοράς οχημάτων

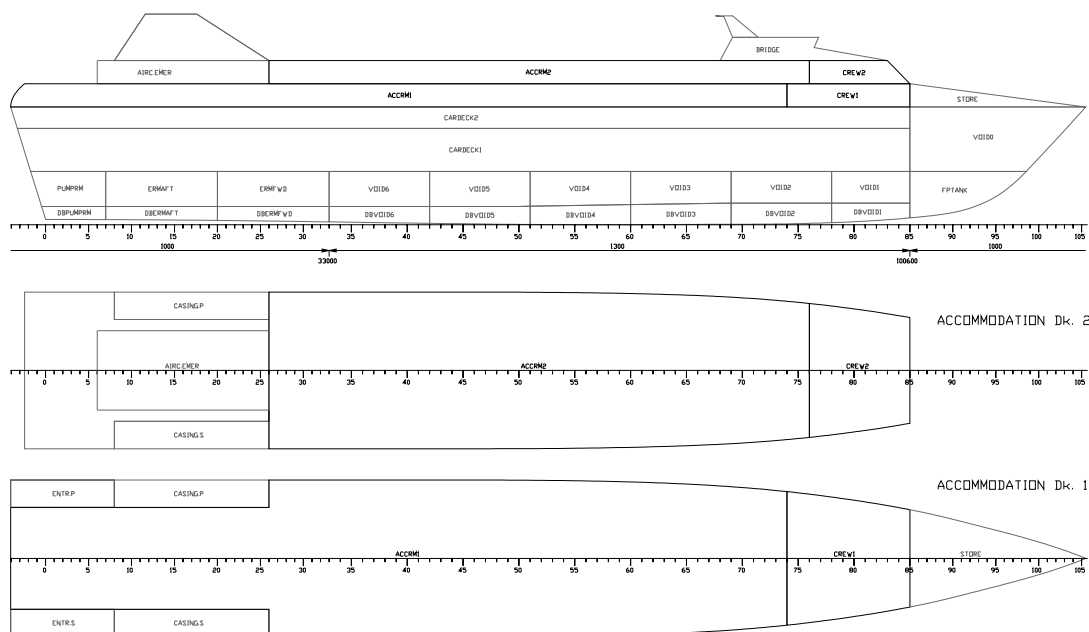
3.3.3. Χώροι ενδιαίτησης επιβατών και πληρώματος

Γενικά, η παραμετρική σχεδίαση των χώρων ενδιαίτησης πληρώματος και επιβατών παρουσιάζει μία ιδιαίτερη δυσκολία, δεδομένου ότι για να καθοριστεί η σύνθεση του πληρώματος, θα πρέπει εκτός των άλλων, να είναι γνωστός ο αριθμός των επιβατών αλλά και η ολική χωρητικότητα του πλοίου (gross tonnage). Επιπλέον, προκειμένου να προσδιοριστεί ο αριθμός των επιβατών και η απαίτηση σε εμβαδόν καταστρωμάτων, θα πρέπει να είναι γνωστός ο χώρος που καταλαμβάνουν οι ενδιαίτησεις του πληρώματος. Έτσι, στη μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης που περιγράφεται, ο καθορισμός των χώρων ενδιαίτησης επιβατών και πληρώματος πραγματοποιείται ταυτόχρονα μέσω επαναληπτικών διαδικασιών. Τόσο ο αριθμός των επιβατών, όσο και του πληρώματος μπορούν εναλλακτικά να αποτελέσουν ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης. Στο Σχήμα 3.27 φαίνεται η διάταξη των χώρων, για ένα πλοίο με δύο καταστρώματα ενδιαίτησης, το οποίο μεταφέρει περισσότερους από χίλιους επιβάτες.

Αριθμός και χώροι ενδιαίτησης επιβατών

Για την κατασκευή των χώρων ενδιαίτησης επιβατών, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές μέθοδοι. Στην πρώτη, ελεύθερη μεταβλητή σχεδίασης αποτελεί ο αριθμός των επιβατών, βάσει του οποίου υπολογίζεται η απαιτούμενη επιφάνεια καταστρωμάτων σύμφωνα με την

Εθνική Νομοθεσία³ και λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία από Γενικές Διατάξεις υπαρκτών μονόστρωτων ταχύπλων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων. Στους υπολογισμούς του εμβαδού της επιφάνειας αυτής συμπεριλαμβάνονται οι χώροι αεροπορικών καθισμάτων και φύλαξης αποσκευών, οι αίθουσες παραμονής, ο χώρος υποδοχής, οι χώροι υγιεινής, οι χώροι καμπινών (εάν υπάρχουν), τα κλιμακοστάσια, οι διάδρομοι καθώς και διάφοροι βοηθητικοί και αποθηκευτικοί χώροι. Ο αριθμός των καταστρωμάτων που προστίθενται τελικά είναι τέτοιος ώστε η συνολική επιφάνειά τους να είναι οριακά μεγαλύτερη από εκείνη που απαιτείται, τόσο για την ενδιαίτηση των επιβατών όσο και του πληρώματος.



Σχήμα 3.27: Τυπική διάταξη των χώρων ενδιαίτησης επιβατών και πληρώματος

Γενικά, όλοι οι χώροι ενδιαίτησης εκτείνονται από το πρυμναίο άκρο του πλοίου έως τη φρακτή σύγκρουσης, ενώ το ύψος τους αποτελεί ελεύθερη μεταβλητή σχεδίασης. Εξάιρεση αποτελεί το ανώτερο κατάστρωμα, του οποίου η έκταση εξαρτάται από τον αριθμό επιβατών που απομένουν να ενδιαιτηθούν σε αυτό, ύστερα από την πλήρωση των υπόλοιπων. Σύμφωνα με τη δεύτερη μέθοδο, ελεύθερη μεταβλητή αποτελεί ο συνολικός αριθμός των καταστρωμάτων ενδιαίτησης. Με βάση αυτόν, πραγματοποιείται η γεωμετρική μοντελοποίηση των αντίστοιχων καταστρωμάτων και υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός επιβατών που μπορούν να φιλοξενηθούν στους αντίστοιχους χώρους, μέσω της αντίστροφης διαδικασίας υπολογισμών της πρώτης μεθόδου. Γενικά, η έκταση του ανώτερου χώρου ενδιαίτησης και στις δύο μεθόδους, είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την κατασκευή των χώρων της κεντρικής μονάδας κλιματισμού (air-condition room), της γεννήτριας εκτάκτου ανάγκης και διάφορων άλλων μηχανικών συστημάτων.

Αριθμός και χώροι ενδιαίτησης πληρώματος

Για την κατασκευή των χώρων ενδιαίτησης πληρώματος, έχουν αναπτυχθεί δύο διαφορετικές μέθοδοι. Στην πρώτη, ο αριθμός των μελών του πληρώματος υπολογίζεται αυτόματα,

³ ΠΔ 221/2001 και ΠΔ 101/1995 όπως αυτό τροποποιήθηκε από τα ΠΔ 381/1996 και 279/2002

ενώ η πλήρης σύνθεσή του προσδιορίζεται με βάση την Εθνική Νομοθεσία⁴. Στη συνέχεια υπολογίζεται η απαιτούμενη επιφάνεια ενδιαίτησης για το ανώτερο και κατώτερο πλήρωμα, επίσης με βάση τις Εθνικές διατάξεις⁵ και διαμορφώνονται οι αντίστοιχοι χώροι. Στη δεύτερη μέθοδο ο αριθμός των μελών του πληρώματος καθορίζεται από το χρήστη. Στην περίπτωση αυτή η σύνθεση του πληρώματος προσδιορίζεται, όπως και προηγούμενα, με βάση την Εθνική Νομοθεσία. Στην περίπτωση που αριθμός των μελών του πληρώματος είναι διαφορετικός από το δεδομένο, τότε επαναπροσδιορίζεται κατάλληλα η σύνθεσή του. Ο όσο το δυνατόν πιο ακριβής υπολογισμός της σύνθεσης του πληρώματος είναι απαραίτητος καθώς από αυτήν εξαρτώνται, εκτός των άλλων, το βάρος ενδειαίτησεως, η μεταφορική ικανότητα σε επιβάτες και κυρίως τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου. Τόσο στη μία όσο και στην άλλη μέθοδο, οι οποίες αναλύθηκαν παραπάνω, το μήκος των χώρων ενδιαίτησης του πληρώματος δεν μπορεί να ξεπερνάει το 20% του συνολικού μήκους του αντίστοιχου καταστρώματος. Επίσης, σε κάθε περίπτωση, το κατώτερο σε σχέση με το ανώτερο πλήρωμα βρίσκεται σε χαμηλότερα καταστρώματα.

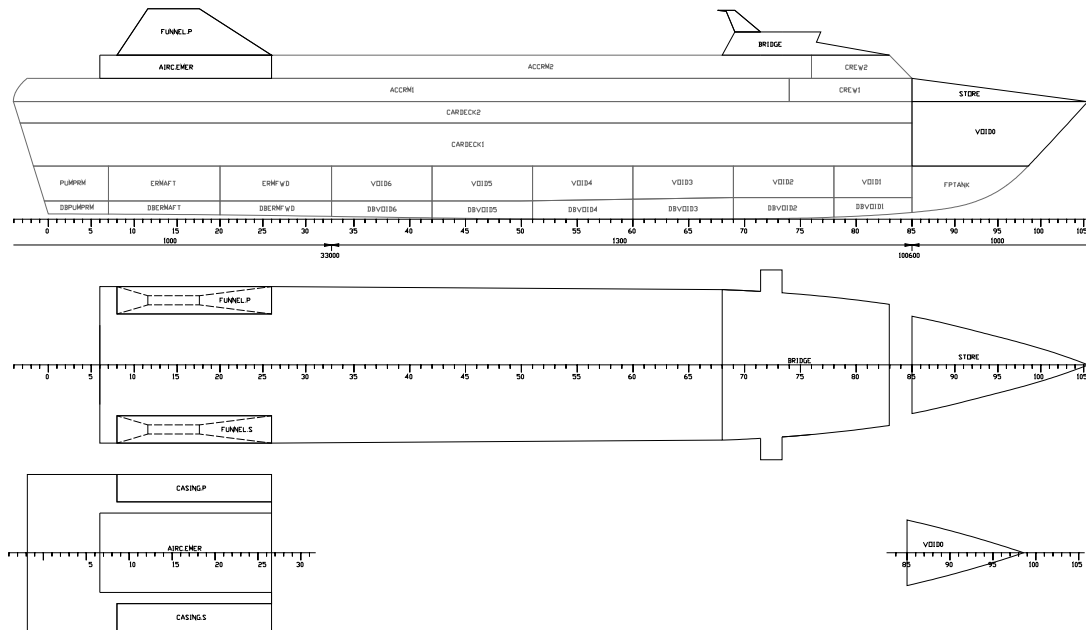
Γενικά, ο υπολογισμός της σύνθεσης των μελών του πληρώματος εξαρτάται από την ολική χωρητικότητα του πλοίου, την εγκατεστημένη ισχύ, τον αριθμό των μηχανών και μηχανοστασίων, τον αριθμό των οχημάτων και τον αριθμό των επιβατών. Επίσης εξαρτάται από το είδος των χώρων ενδιαίτησης, δηλαδή από την ύπαρξη ή μη καμπινών, αεροπορικών καθισμάτων, κουζίνας, self service, εστιατορίων, καφετεριών, κ.ά. Ως εκ τούτου, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παρούσας ενότητας, για τον καθορισμό της απαιτείται μία επαναληπτική διαδικασία, η οποία έχει ως εξής: Εάν ο αριθμός των επιβατών δίνεται από το χρήστη, οπότε και ο αριθμός των καταστρωμάτων ενδιαίτησης είναι άγνωστος, το πλοίο θεωρείται αρχικά ότι εκτείνεται έως την οροφή του ανώτερου διαμερίσματος μεταφοράς οχημάτων και υπολογίζεται η ολική του χωρητικότητα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται μία αρχική σύνθεση πληρώματος για το δεδομένο αριθμό επιβατών και υπολογίζεται η απαιτούμενη επιφάνεια για την ενδιαίτησή του. Ακολούθως, μοντελοποιείται το πρώτο διαμέρισμα ενδιαίτησης και υπολογίζεται ο αριθμός των επιβατών που μπορούν να ενδειαίτηθούν σε αυτό με βάση την επιφάνειά του, εξαιρώντας αυτή που προορίζεται για το πλήρωμα. Στη φάση αυτή υπολογίζεται εκ νέου η ολική χωρητικότητα του πλοίου και επαναπροσδιορίζεται η σύνθεση του πληρώματος. Εάν αυτή μεταβάλλεται τότε προσαρμόζονται ανάλογα οι χώροι ενδιαίτησης πληρώματος και επιβατών. Εάν ο αριθμός των επιβατών που αφορά το συγκεκριμένο κατάστρωμα είναι ίσος με το δεδομένο και η υπάρχουσα επιφάνεια του είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για την ενδιαίτηση πληρώματος και επιβατών, τότε η διαδικασία σταματά. Εάν όχι, επαναλαμβάνεται για το επόμενο κατάστρωμα ενδιαίτησης και ούτω καθεξής. Αντίθετα, εάν ο αριθμός των επιβατών δε δίνεται από το χρήστη, οπότε και ο αριθμός των καταστρωμάτων ενδιαίτησης είναι γνωστός, υπολογίζεται η ολική χωρητικότητα και μία αρχική σύνθεση πληρώματος για μηδενικό αριθμό επιβατών καθώς και η απαιτούμενη επιφάνεια για την ενδιαίτησή του. Η επιφάνεια αυτή στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς του αριθμού των επιβατών που αφορούν το κάθε κατάστρωμα. Κατόπιν, επαναπροσδιορίζεται η σύνθεση του πληρώματος και εάν αυτή μεταβάλλεται τότε προσαρμόζονται ανάλογα οι χώροι ενδιαίτησης πληρώματος και επιβατών και προσδιορίζεται ο τελικός αριθμός επιβατών.

⁴ ΠΔ 177/1974 όπως αυτό τροποποιήθηκε από τα ΠΔ 581/1977, 230/1984 και 319/1996

⁵ ΠΔ 221/2001 και ΠΔ 259/1981 όπως αυτό τροποποιήθηκε από τα ΠΔ 1594/1986, 1637/1986 και 236/1996

3.3.4. Λοιποί χώροι

Η γεωμετρική μοντελοποίηση των χώρων αυτών περιλαμβάνει, εκτός από τα κλιμακοστάσια εισόδου των επιβατών και τα casings των μηχανοστασίων, τα διαμερίσματα της κεντρικής μονάδας κλιματισμού και της γεννήτριας εκτάκτου ανάγκης, το διαμέρισμα ναυσιπλοΐας, τα funnels, μία πρωραία δεξαμενή έρματος και αποθηκευτικούς χώρους (Σχήμα 3.28)..

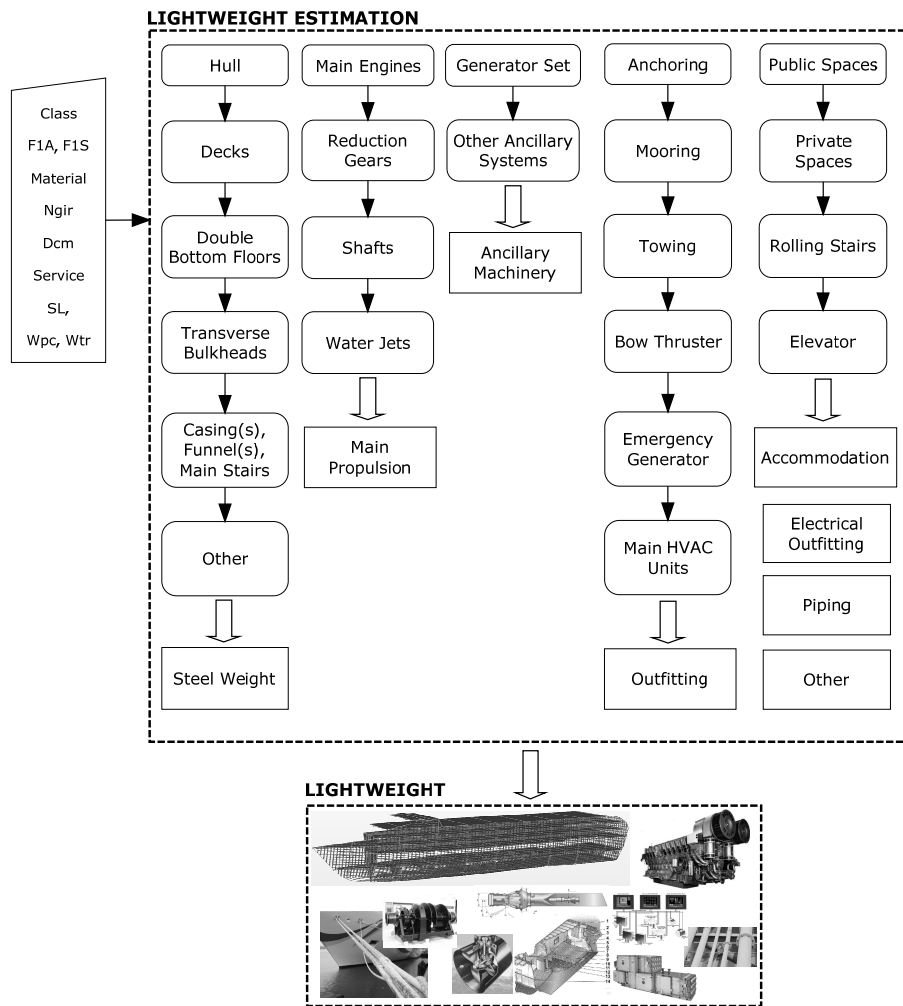


Σχήμα 3.28: Τυπική διάταξη λοιπών χώρων

Το διαμέρισμα ναυσιπλοΐας τοποθετείται στο πρωραίο τμήμα του πλοίου και πάνω από το ανώτερο κατάστρωμα ενδιαίτησης, ενώ το μέγεθός του είναι ανάλογο του αριθμού ανώτερου πληρώματος γέφυρας και του μεγέθους του πλοίου. Τα διαμερίσματα που προορίζονται για την κεντρική μονάδα κλιματισμού και την γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης τοποθετούνται στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου και στο ίδιο επίπεδο με το ανώτερο κατάστρωμα ενδιαίτησης. Τα funnels έχουν πυραμοειδές σχήμα και νοούνται σαν συνέχεια των casings

3.4. Υπολογισμός βάρους άφορτου σκάφους

Ο υπολογισμός του βάρους του άφορτου σκάφους (lightweight ή lightship weight) στη φάση της προμελέτης συνήθως πραγματοποιείται με προσεγγιστικές μεθόδους που βασίζονται σε εμπειρικές ή ημιεμπειρικές σχέσεις που προέρχονται από τη στατιστική επεξεργασία δεδομένων από υπάρχοντα πλοία. Παρόλα αυτά, σε ό,τι αφορά τα πλοία Νέας Τεχνολογίας, δεν υπάρχει επάρκεια εμπειρικών μεθόδων για τον προσδιορισμό των βαρών του πλοίου. Επιπλέον, είναι αναγκαίοι οι διάφοροι υπολογισμοί και εκτιμήσεις, που πραγματοποιούνται σε αυτή τη φάση, να έχουν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, σε σχέση με την τελική σχεδίαση. Για το λόγο αυτό, στη μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης που αναπτύχθηκε, γίνεται η προσπάθεια ώστε, ο υπολογισμός των βαρών να είναι όσο το δυνατόν αναλυτικός, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ακρίβεια των εξαγόμενων αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3.29: Διάγραμμα ροής της διαδικασίας υπολογισμού του βάρους άφορτου σκάφους

Έτσι, το βάρος του άφορτου σκάφους αρχικά αναλύεται στις βασικές ομάδες βαρών (Πίνακας 3.3). Κάθε μία από αυτές αναλύεται σε μικρότερες υποομάδες, σύμφωνα με το διάγραμμα που υπάρχει στο Σχήμα 3.29. Στις επόμενες ενότητες περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού για κάθε μία από τις βασικές ομάδες βαρών.

Πίνακας 3.3: Ανάλυση του βάρους του άφορτου σκάφους σε υποομάδες

α/α	Βάρος	Επεξήγηση
1	W_{ST}	Βάρος μεταλλικής κατασκευής
2	W_M	Βάρος προωστήριας εγκατάστασης
3	W_{AN}	Βάρος ηλεκτρογεννητριών & λοιπών μηχανημάτων
4	W_{OT}	Βάρος εξοπλισμού
5	W_{AC}	Βάρος ενδιαιτήσεων
6	W_{EL}	Βάρος ηλεκτρολογικού εξοπλισμού
7	W_{PP}	Βάρος δικτύων
8	W_{RV}	Λοιπά βάρη

3.4.1. Βάρος μεταλλικής κατασκευής

Η εκτίμηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής (W_{st}) ενός πλοίου, στη φάση της προμελέτης, βασίζεται συνήθως στην εφαρμογή εμπειρικών μεθόδων. Προκειμένου να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια, στην παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, ο υπολογισμός αυτός πραγματοποιείται με αναλυτικό τρόπο. Σύμφωνα με αυτόν, με βάση ένα σύνολο ελεύθερων μεταβλητών υλοποιείται, εντός του λογισμικού NAPA®, η τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση της μεταλλικής κατασκευής (structural arrangement) για κάθε εναλλακτική σχεδίαση. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε κατάλληλος κώδικας, ο οποίος ενσωματώνει τους κανονισμούς του Νορβηγικού Νηογνώμονα που εφαρμόζονται σε ταχύπλοα Ε/Γ-Ο/Γ πλοία [DNV, 2002]. Ο Πίνακας 3.4 δείχνει τις επιπλέον ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης που αφορούν τους υπολογισμούς του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Όπως και στην κατασκευή της εσωτερικής υποδιαίρεσης, έτσι και εδώ η γεωμετρική αναπαράσταση της μεταλλικής κατασκευής πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε με σχετικά μικρό υπολογιστικό κόστος να επιτυγχάνεται ικανοποιητική εκτίμηση του βάρους. Έτσι, μοντελοποιούνται τα ελάσματα, τα κύρια και δευτερεύοντα διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά, οι οπές των εδρών του πυθμένα, ενώ δε λαμβάνονται υπόψη δευτερεύοντα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής όπως brackets, cut outs, κ.ά. Σημειώνεται ότι ο μέσος υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή της γεωμετρίας και τον προσδιορισμό του βάρους είναι περίπου 40 sec.

Πίνακας 3.4: Ελεύθερες μεταβλητές για τους υπολογισμούς του βάρους της μεταλλικής κατασκευής

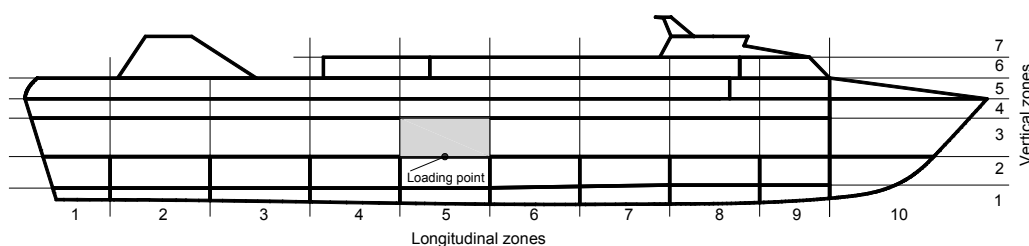
α/α	Ονομασία	Μο- νάδες	Επεξήγηση
1	<i>Class</i>	-	Κλάση πλοίου, σύμφωνα με τη λειτουργία του (R0, R1, R2, R3, R4, R5R6)
2	<i>F1A, F1S</i>	-	Συντελεστής υλικού για κατασκευές από αλουμίνιο και χάλυβα, αντίστοιχα
3	<i>Material</i>	-	Υλικό κατασκευής (μπορεί να είναι αλουμίνιο, χάλυβας ή συνδυασμός των δύο)
4	<i>Ngir</i>	-	Αριθμός κυρίων διαμήκων σταθμίδων στα καταστρώματα (girders)
5	<i>Dcm</i>	-	Κατάστρωμα στο οποίο γίνεται ο διαχωρισμός των υλικών κατασκευής (κύριο κατάστρωμα ή κατάστρωμα αντοχής)
6	<i>Service</i>	-	Τύπος πλοίου (passenger, carferry cargo, patrol, yacht)
7	<i>SL</i>	m	Ισαπόσταση διαμήκων ενισχυτικών
8	<i>Wpc, Wtr</i>	t	Βάρος μονάδας ΦΓ και ΙΧ αυτοκινήτων, αντίστοιχα

Γενικά, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής διαιρείται στις παρακάτω κύριες υποομάδες:

- Βάρος περιβλήματος γάστρας
- Βάρος καταστρωμάτων
- Βάρος εγκαρσίων φρακτών
- Βάρος εδρών διπτυγμένου
- Βάρη casing(s), funnel(s), κύριων κλιμακοστασίων εισόδου επιβατών
- Λοιπά βάρη

Για την εφαρμογή των κανονισμών του Νηογνώμονα, το πλοίο χωρίζεται σε οριζόντιες και κατακόρυφες ζώνες, οι οποίες οριοθετούνται από τις εγκάρσιες στεγανές φρακτές και τα καταστρώματα, αντίστοιχα. Το σημείο εφαρμογής του φορτίου (loading point) βρίσκεται στο μέσο κάθε διαμήκου και το κάτω όριο κάθε οριζόντιας ζώνης (Σχήμα 3.30). Σε ό,τι αφορά το περίβλημα της γάστρας, θεωρείται ότι τα μεταλλικά στοιχεία που ανήκουν στην ίδια περιοχή (ανάμεσα σε δύο διαδοχικές φρακτές και καταστρώματα), έχουν τα ίδια γεω-

μετρικά χαρακτηριστικά. Η παραδοχή αυτή ισχύει, κατά αντίστοιχο τρόπο, τόσο για τα καταστρώματα, όσο και για τις εγκάρσιες στεγανές φρακτές και τις έδρες των διπυθμένων.



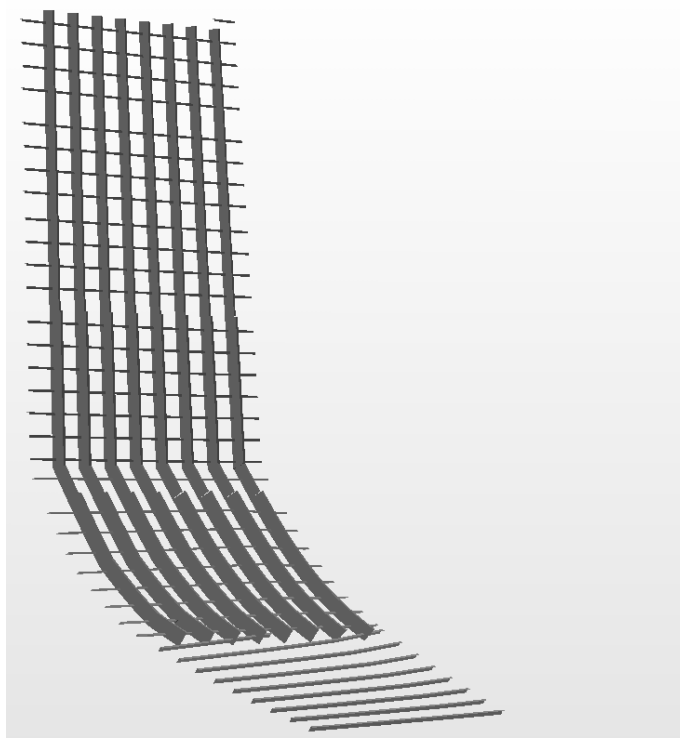
Σχήμα 3.30: Διαμήκης και κατακόρυφη διαίρεση σε ζώνες

Γενικά, το υλικό κατασκευής μπορεί να είναι αλουμίνιο, χάλυβας ή συνδυασμός των δύο. Στην περίπτωση που υπάρχουν δύο υλικά κατασκευής, θεωρείται ότι το πλοίο είναι κατασκευασμένο από χάλυβα έως και το κατάστρωμα στεγανών φρακτών ή το κατάστρωμα αντοχής (πρώτο κατάστρωμα ενδιαίτησης), ανάλογα με την τιμή που θα λάβει η αντίστοιχη μεταβλητή σχεδίασης (Πίνακας 3.4), ενώ από εκεί και πάνω ως υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται το αλουμίνιο.

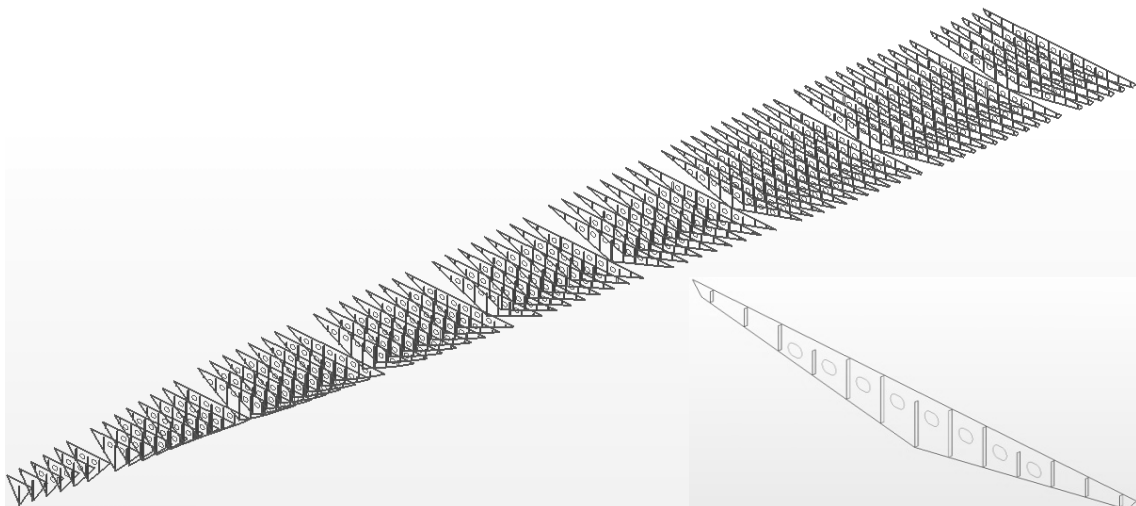
Η διαδικασία υπολογισμών περιλαμβάνει την κατασκευή μίας βάσης δεδομένων τεσσάρων διαφορετικών τύπων διατομών ενισχυτικών (Flat-bar, Angle, Bulb-bar και T-bar). Στη βάση αυτή περιλαμβάνονται, σε μορφή πινάκων, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατομών ενισχυτικών διάφορων μεγεθών, συναρτήσει της ροπής αδρανείας. Ακολουθεί η εφαρμογή των κανονισμών του Νηογνώμονα και η διαστασιολόγηση των ελασμάτων και των διατομών των διαμηκών και εγκάρσιων ενισχυτικών, για κάθε μία από τις τέσσερις πρώτες ομάδες βαρών. Για τις ομάδες αυτές, δημιουργείται η αντίστοιχη κατασκευαστική διάταξη (structural arrangement), μέσω της οποίας παράγεται το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο. Ο τρόπος αυτός υπολογισμού προσδίδει, εκτός των άλλων, πολλές δυνατότητες στο μελετητή, καθώς αυτός μπορεί να λάβει πολλαπλές πληροφορίες για τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, όπως βάρη και μήκη ανά τύπο ενισχυτικού, βάρη ανά ζώνη (block weight), κ.ά. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί επίσης ο σχετικά ακριβής προσδιορισμός της θέσης του κέντρου βάρους, ένα μέγεθος που επιδρά σε μεγάλο βαθμό στην εκτίμηση της θέσης κέντρου βάρους του άφορτου σκάφους.

Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται έλεγχος της διαμήκου αντοχής, μέσω της απαιτούμενης ροπής αδρανείας της μέσης τομής. Μέσω του κατασκευαστικού μοντέλου, υπολογίζεται η υπάρχουσα ροπή αντίστασης σε πυθμένα και ανώτερο κατάστρωμα, ανάλογα και με το υλικό κατασκευής. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται με τις απαιτούμενες τιμές του Νηογνώμονα για καταστάσεις στις οποίες το πλοίο βρίσκεται στην κορυφή (hogging) και την κοιλάδα (sagging) του κύματος. Εάν οι υπάρχουσες τιμές είναι μικρότερες από τις απαιτούμενες, τότε αυξάνονται τα πάχη των ελασμάτων κατά 0.5 mm και οι διατομές των ενισχυτικών άνωθεν ή κάτωθεν του ουδέτερου άξονα, ανάλογα με την έλλειψη ροπής στο κατάστρωμα ή τον πυθμένα αντίστοιχα. Στη συνέχεια, δημιουργείται εκ νέου το κατασκευαστικό μοντέλο, επαναπροσδιορίζεται το βάρος της μεταλλικής κατασκευής και ελέγχεται η αντοχή σε διαμήκη κάμψη. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το πλοίο αποκτήσει επαρκή διαμήκη αντοχή, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Νηογνώμονα.

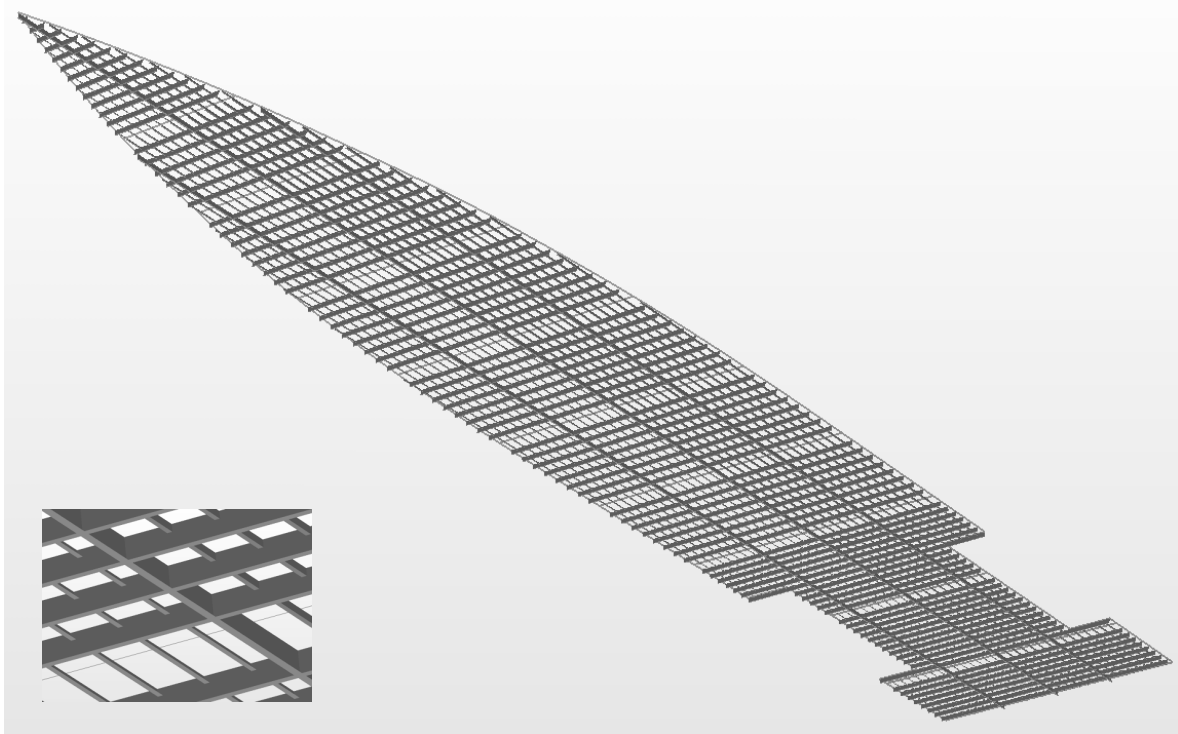
Σε ό,τι αφορά τα casings, τα funnels και τις εισόδους των επιβατών δεν κατασκευάστηκαν το αντίστοιχα κατασκευαστικά μοντέλα. Ο προσδιορισμός των βαρών έγινε με βάση τη γεωμετρία των αντίστοιχων διαμερισμάτων και την εφαρμογή των κανονισμών που προδιαγράφουν τα απαραίτητα πάχη ελασμάτων και διατομές ενισχυτικών. Τέλος, τα λοιπά βάρη προέρχονται ουσιαστικά από μία προσαύξηση της τάξης του 3% λόγω της ύπαρξης διαφόρων και δευτερευόντων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής, τα οποία δεν έχουν συμπεριληφθεί στους ανωτέρω υπολογισμούς.



Σχήμα 3.31: Στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής στην πλευρά του πλοίου

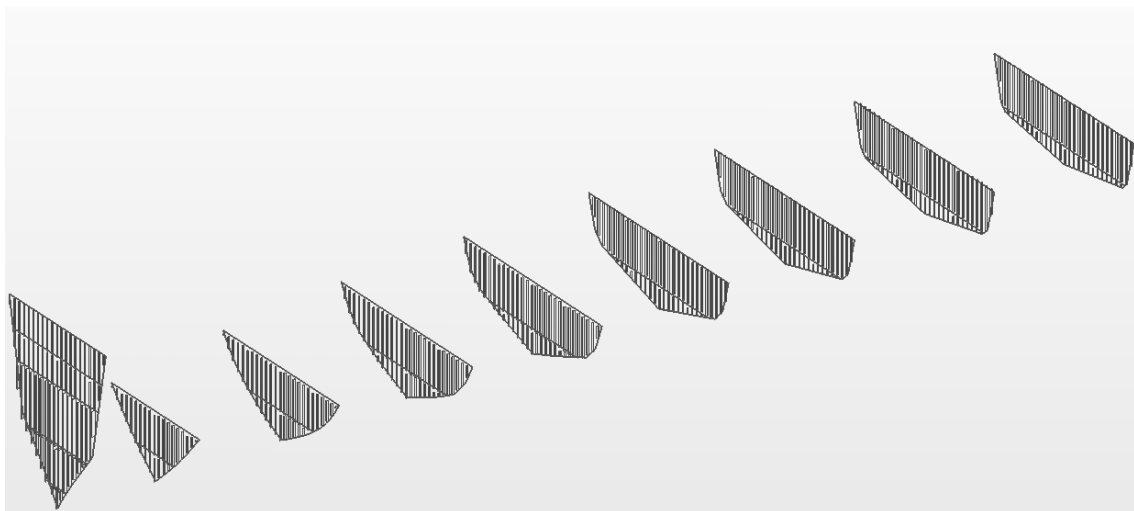


Σχήμα 3.32: Τυπική διάταξη και στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής των εδρών στα διπύθμενα

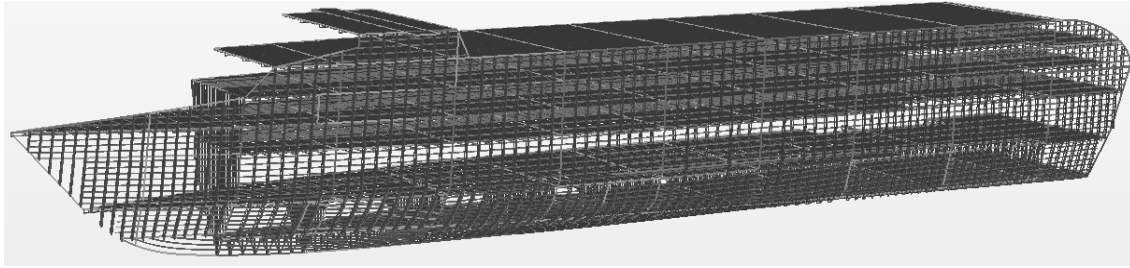


Σχήμα 3.33: Στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του κύριου καταστρώματος

Στο Σχήμα 3.31 φαίνεται η γραφική απεικόνιση του τρισδιάστατου μοντέλου τμήματος της μεταλλικής κατασκευής της γάστρας το οποίο αποτελείται από διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά. Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.32 φαίνεται η διάταξη των εδρών στην περιοχή των διπυθμένων ενώ στο Σχήμα 3.33 διακρίνονται τα διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά της μεταλλικής κατασκευής του κυρίου καταστρώματος. Τέλος, στο Σχήμα 3.34 φαίνεται μία τυπική διάταξη εγκαρσίων φρακτών, όπου διακρίνεται η κατακόρυφη ενίσχυση ενώ στο Σχήμα 3.35 παρουσιάζεται ολόκληρο το τρισδιάστατο μοντέλο της μεταλλικής κατασκευής χωρίς τα ελάσματα του περιβλήματος της γάστρας.



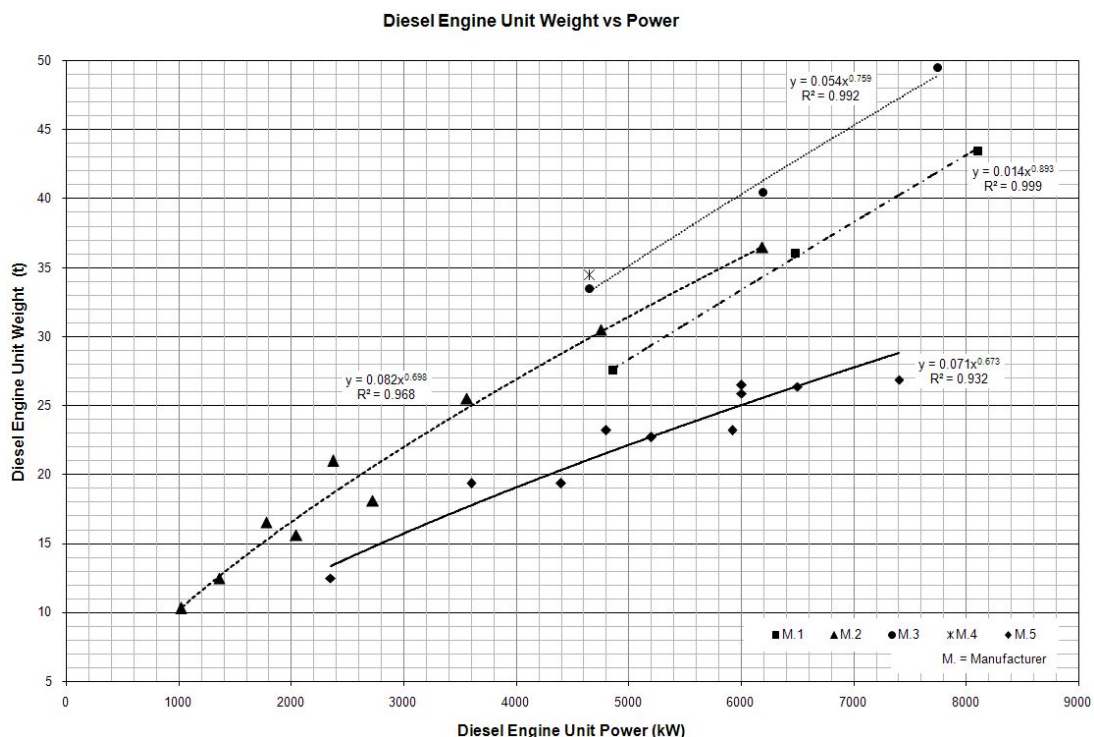
Σχήμα 3.34: Τυπική διάταξη και στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής των εγκαρσίων φρακτών



Σχήμα 3.35: Τρισδιάστατη απεικόνιση των κύριων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής

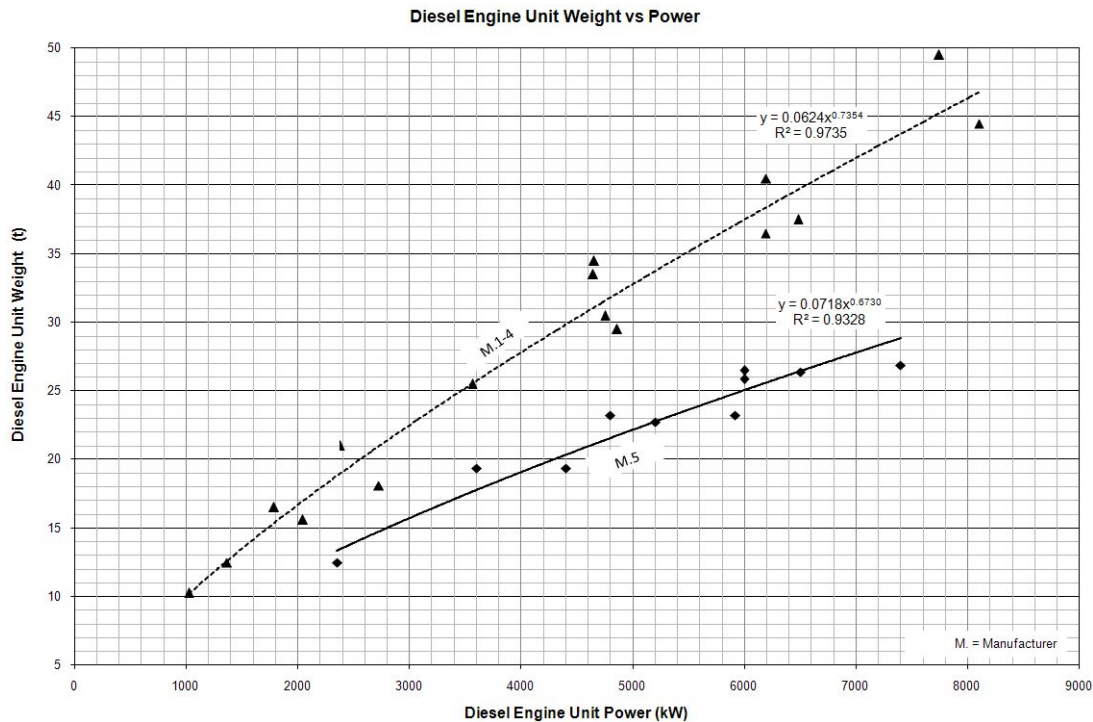
3.4.2. Βάρος κύριας προωστήριας εγκατάστασης

Η κύρια προωστήρια εγκατάσταση θεωρείται ότι αποτελείται από τις κύριες μηχανές, τους μειωτήρες, τους άξονες και τα water-jets. Για τον υπολογισμό του βάρους των κυρίων μηχανών και των μειωτήρων, αρχικά συγκεντρώθηκαν στοιχεία από υπάρχοντα ταχύπλοα Ε/Γ-Ο/Γ πλοία καθώς και από κατασκευαστές συστημάτων πρόωσης. Τα στοιχεία αυτά αναλύθηκαν προκειμένου να προκύψουν κατάλληλα διαγράμματα στα οποία συσχετίζεται το βάρος με την ισχύ. Η δυσκολία της ανάλυσης αυτής έγκειται στο γεγονός ότι η ισχύς μιας μηχανής Diesel, εκτός από το μέγεθός της (αριθμός και διαστάσεις κυλίνδρων), συσχετίζεται και με τον αριθμό των στροφών λειτουργίας. Ως εκ τούτου, το βάρος μιας μηχανής Diesel είναι συνάρτηση τόσο της ισχύος όσο και της ταχύτητας περιστροφής του άξονα. Προκειμένου να απαλειφθεί η τελευταία παράμετρος και να προκύψουν εξισώσεις ανεξάρτητες των στροφών, για τον ίδιο ταχύστροφο κινητήρα, ως ονομαστική ισχύς λειτουργίας λαμβάνεται ο μέσος όρος των τιμών ισχύος για όλους τους διαφορετικούς αριθμούς στροφών. Στο Σχήμα 3.36, φαίνεται η συσχέτιση της ισχύος αυτής με το βάρος κύριας μηχανής για πέντε διαφορετικούς κατασκευαστές.



Σχήμα 3.36: Εκτίμηση του βάρους των κυρίων μηχανών συναρτήσει της ισχύος

Προκειμένου να μειωθεί ο αριθμός των εξισώσεων, κατασκευάστηκε το διάγραμμα που παρατίθεται στο Σχήμα 3.37, στο οποίο οι τέσσερις πρώτες ομάδες κατασκευαστών του προηγούμενου διαγράμματος, έχουν ενσωματωθεί σε μία. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η ακρίβεια χάριν της γενίκευσης, κάτι το οποίο συχνά είναι απαραίτητο όταν αναπτύσσεται μία μεθοδολογία προμελέτης. Σημειώνεται ότι και στα δύο διαγράμματα (Σχήμα 3.36 και Σχήμα 3.37), στο βάρος των κυρίων μηχανών συμπεριλαμβάνεται και το βάρος των μειωτήρων.



Σχήμα 3.37: Εκτίμηση του βάρους των κυρίων μηχανών συναρτήσει της ισχύος

Έτσι, με βάση τις καμπύλες του παραπάνω σχήματος, το βάρος των κυρίων μηχανών Diesel σε t , μπορεί να εκτιμηθεί με βάση μία από τις δύο παρακάτω εξισώσεις (Σχήμα 3.37):

$$W_{ME}^D = N_D (0.0718 P_{1D}^{0.673}) \quad (3.18)$$

$$W_{ME}^D = N_D (0.0624 P_{1D}^{0.7354}) \quad (3.19)$$

όπου W_{ME}^D σε t , N_D ο αριθμός των κινητήρων Diesel και P_{1D} η ισχύς του κάθε ενός από αυτούς σε kW .

Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι καμπύλες που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.36. Γενικά, η επιλογή των κυρίων μηχανών είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων και αποτελεί από μόνη της ένα σημαντικό πρόβλημα. Στην παρούσα φάση η επιλογή αυτή γίνεται με μοναδικό κριτήριο το μικρότερο βάρος (3.18).

Στην περίπτωση όπου η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από 48600 kW, τότε θεωρείται ότι η μηχανολογική εγκατάσταση περιλαμβάνει, εκτός των άλλων, έναν ή περισσότερους αεριοστρόβιλους. Έτσι, δεδομένου του εύρους ονομαστικής ισχύος των ταχύστροφων κινητήρων Diesel, γίνεται η θεώρηση ότι ένα πλοίο δεν μπορεί να διαθέτει

περισσότερους από έξι κινητήρες Diesel μέγιστης ισχύος 8100 kW έκαστος. Ανάλογα με την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης, τοποθετούνται ένας ή περισσότεροι αεριοστρόβιλοι, ισχύος 25000 kW έκαστος, σε συνδυασμό με άρτιο αριθμό κινητήρων Diesel ίδιας ισχύος. Με βάση προδιαγραφές κατασκευαστών, το βάρος κάθε μονάδας αεριοστρόβιλου μαζί με το μειωτήρα λαμβάνεται ίσο με 20.0 τόνους. Έτσι, το συνολικό τους βάρος προκύπτει ίσο με:

$$W_{ME}^T = N_T 20 \quad (3.20)$$

όπου W_{ME}^T σε t και N_T ο αριθμός των αεριοστρόβιλων.

Η εύρεση μίας εξίσωσης για την εκτίμηση του βάρους των αξόνων, παρουσιάζει παρόμοιες δυσκολίες σε ό,τι αφορά τις στροφές λειτουργίας με τις μηχανές Diesel. Αυτό γιατί η διάμετρος ενός άξονα, εκτός από το φορτίο που μεταφέρει, εξαρτάται και από την ταχύτητα περιστροφής. Στο Σχήμα 3.38 παρουσιάζεται η καμπύλη μέσω της οποίας συσχετίζεται το βάρος ανά τρέχον μέτρο άξονα με το φορτίο που αυτός λαμβάνει. Η καμπύλη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το συνηθισμένο εύρος ταχυτήτων περιστροφής στο οποίο λειτουργούν οι άξονες των πλοίων Νέας τεχνολογίας.



Σχήμα 3.38: Βάρος ανά τρέχον μέτρο του άξονα

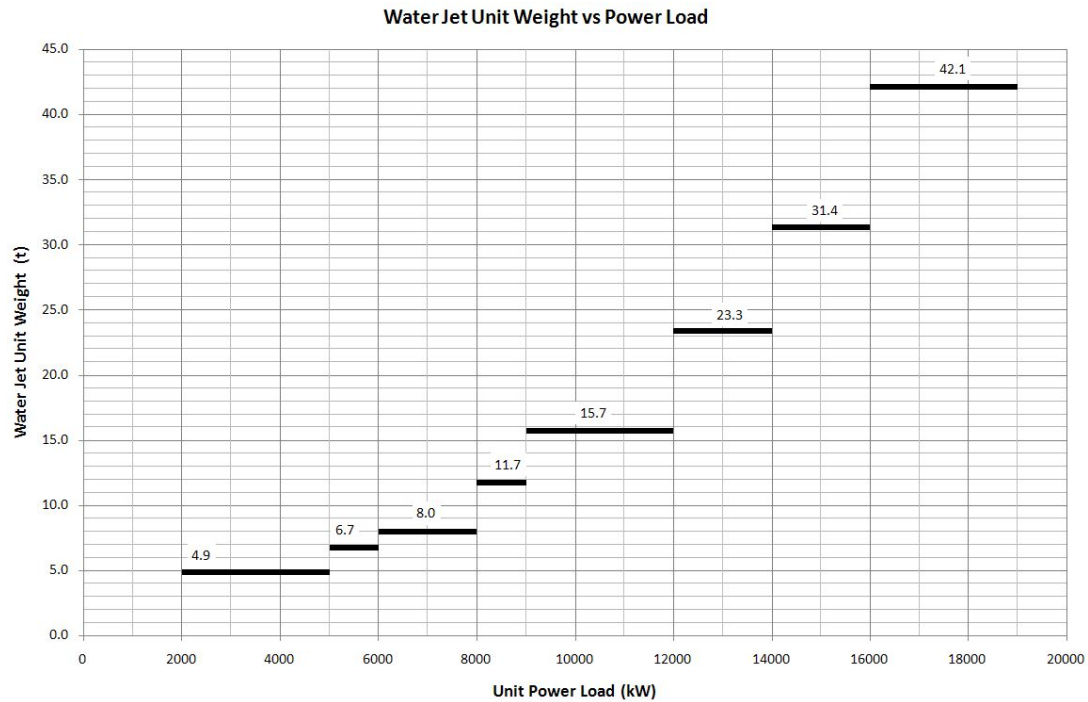
Η αντίστοιχη εξίσωση για την εκτίμηση του βάρους κάθε άξονα είναι:

$$W_{SH} = L_{SH} (0.962P_{SH} - 33.793) \times 10^{-3} \quad (3.21)$$

όπου W_{SH} σε t , L_{SH} το μήκος του άξονα σε m και P_{SH} το φορτίο σε kW .

Επειδή τα water-jets λειτουργούν σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος ισχύος, δεν είναι δυνατή η εύρεση μιας συνεχούς συνάρτησης που να συνδέει το βάρος τους με την ισχύ λειτουργίας. Μετά από συστηματική επεξεργασία στοιχείων κατασκευαστών προέκυψε το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.39, από το οποίο μπορεί κανείς να εκτιμήσει το βάρος κάθε water-jet, σαν συνάρτηση του φορτίου του. Σημειώνεται ότι στην εκτίμηση αυτή δεν συ-

μπεριλαμβάνεται το βάρος του νερού που υπάρχει στις αντλίες, το οποίο κυμαίνεται γενικά από το 30% έως το 45% του συνολικού βάρους της εγκατάστασης.



Σχήμα 3.39: Εκτίμηση του βάρους των water-jets συναρτήσει του φορτίου

Η αντίστοιχη τμηματική εξίσωση που εκτιμά το βάρος κάθε water-jet συναρτήσει της ισχύος λειτουργίας του είναι:

$$W_{1WJ} = \begin{cases} 4.9, & P_{1WJ} < 5000 \text{ kW} \\ 6.7, & 5000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} < 6000 \text{ kW} \\ 8.0, & 6000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} < 8000 \text{ kW} \\ 11.7, & 8000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} < 9000 \text{ kW} \\ 15.7, & 9000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} < 12000 \text{ kW} \\ 22.3, & 12000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} < 14000 \text{ kW} \\ 31.4, & 14000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} < 16000 \text{ kW} \\ 42.1, & 16000 \text{ kW} \leq P_{1WJ} \end{cases} \quad (3.22)$$

όπου W_{1WJ} σε t , P_{1WJ} η ισχύς λειτουργίας κάθε water-jet σε kW .

Έτσι, το συνολικό βάρος των water-jets είναι ίσο με:

$$W_{WJ} = \sum_{i=1}^{N_{WJ}} W_{1WJ} P_{1WJ} \quad (3.23)$$

όπου N_{WJ} το πλήθος των water-jets.

Γενικά, θεωρείται ότι ο αριθμός των water-jets είναι ίσος με τον αριθμό των κυρίων μηχανών. Εάν στην κύρια μηχανολογική εγκατάσταση υπάρχουν έξι κινητήρες Diesel, τότε ο αριθμός των water-jets λαμβάνεται ίσος με πέντε. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει ένα κεντρι-

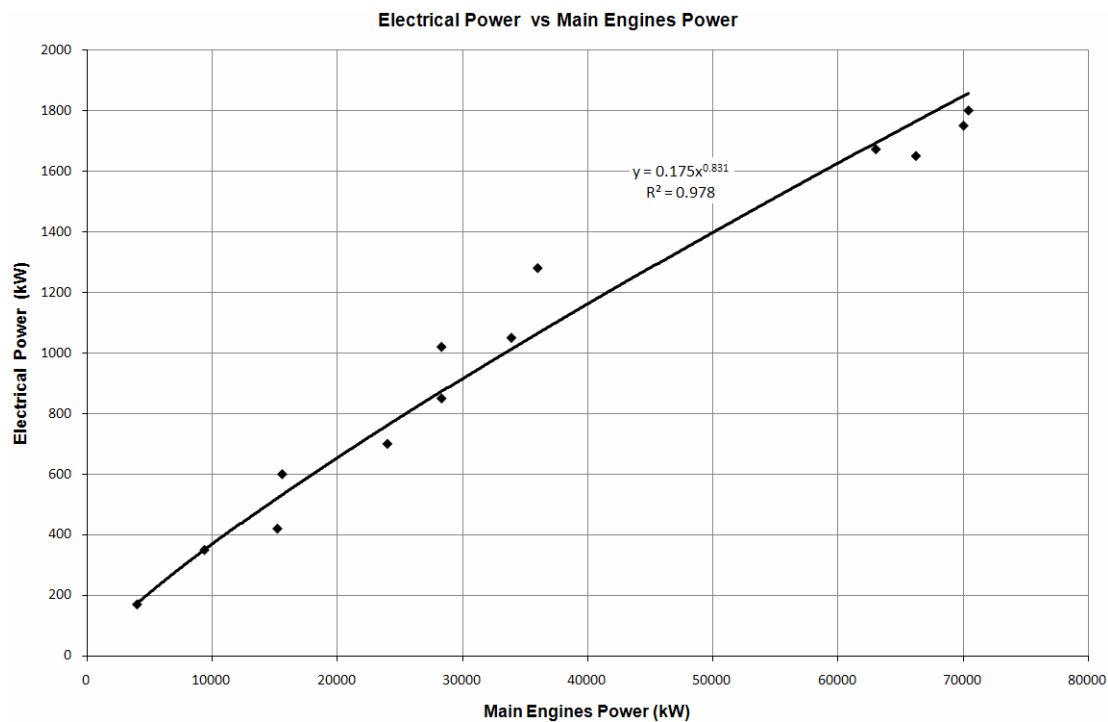
κό water-jet (booster) το οποίο παραλαμβάνει τη διπλάσια ισχύ από τα υπόλοιπα. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση όπου υπάρχει, για παράδειγμα συνδυασμός ενός αεριοστρόβιλου με δύο κινητήρες ή τέσσερις κινητήρες Diesel. Αντίστοιχα, εάν υπάρχει συνδυασμός δύο αεριοστρόβιλων με δύο κινητήρες Diesel (όπως συμβαίνει στα πολύ μεγάλα ταχύπλοα Ε/Γ-Ο/Γ πλοία), τότε θεωρείται ότι υπάρχουν δύο μεγαλύτερα κεντρικά και δύο μικρότερα περιφερειακά water-jets.

Τελικά, το συνολικό βάρος της κύριας προωστήριας εγκατάστασης προκύπτει ως:

$$W_M = W_{ME} + W_{SH} + W_{WJ} \quad (3.24)$$

3.4.3. Βάρος ηλεκτρογεννητριών & λοιπών βοηθητικών μηχανημάτων

Προκειμένου να υπολογιστεί το βάρος των ηλεκτρογεννητριών, θα πρέπει αρχικά να εκτιμηθεί η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς. Για το σκοπό αυτό συγκεντρώθηκαν και αναλύθηκαν στοιχεία από υπάρχοντα ταχύπλοα Ε/Γ-Ο/Γ, για τα οποία ήταν γνωστή η εγκατεστημένη ισχύς των ηλεκτρογεννητριών.



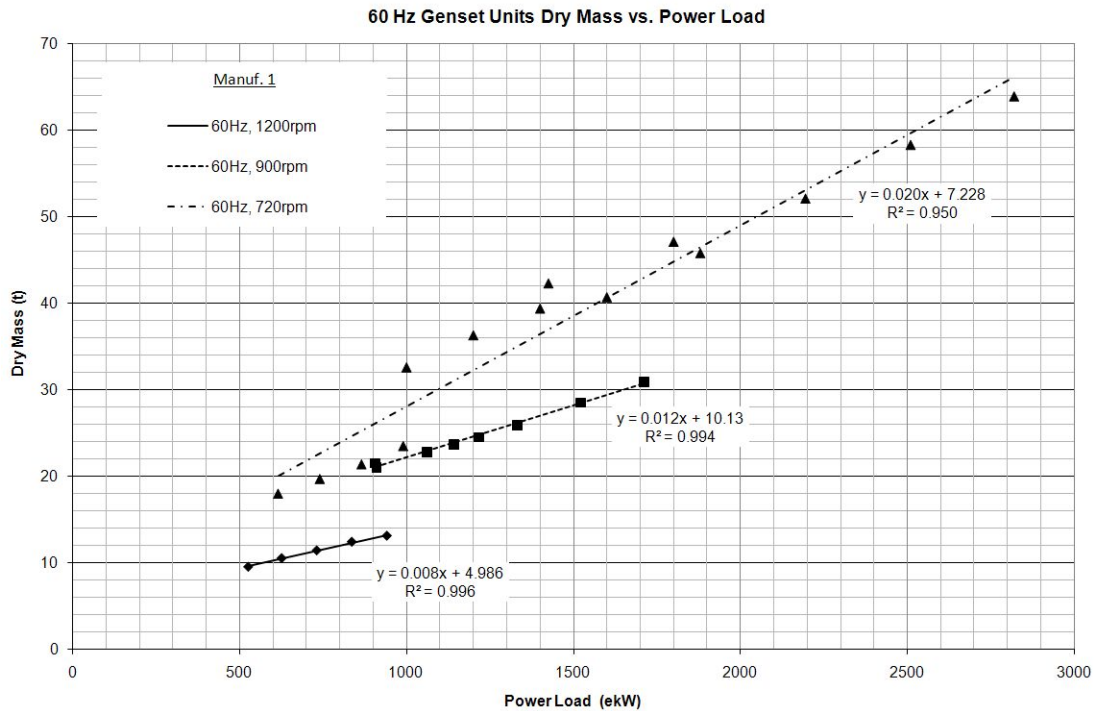
Σχήμα 3.40: Εκτίμηση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος συναρτήσει της ισχύος των κυρίων μηχανών

Έτσι, προέκυψε το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.40, στο οποίο εκτιμάται η ηλεκτρική ισχύς ταχύπλοων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων συναρτήσει της ισχύος των κυρίων μηχανών. Η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

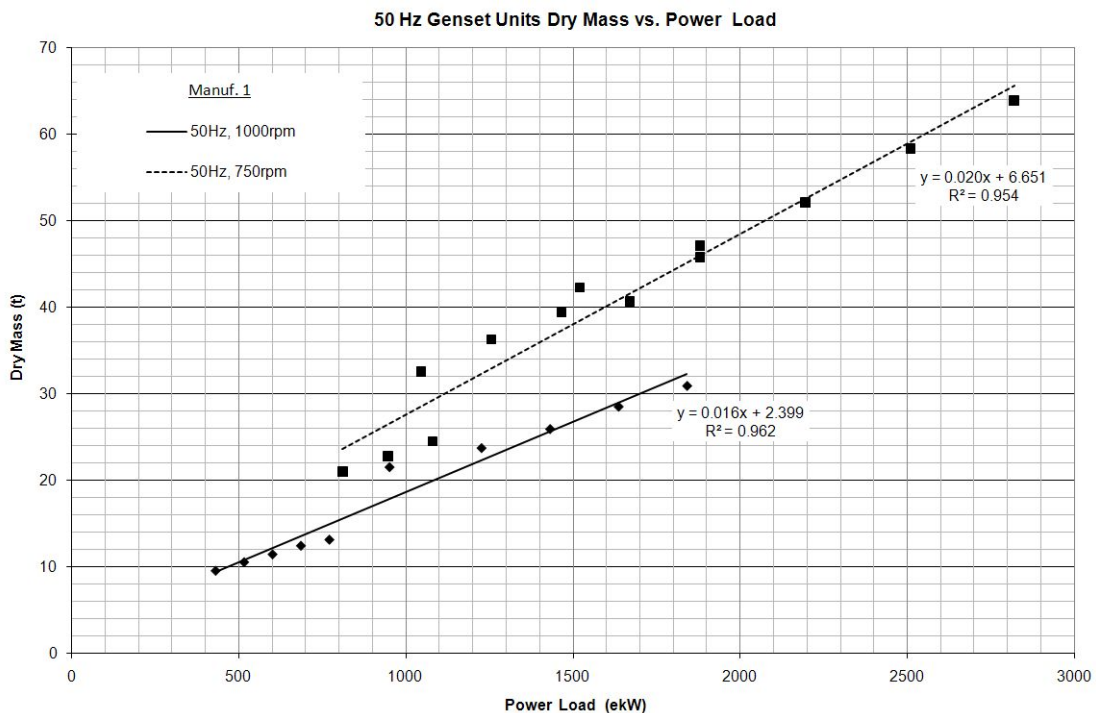
$$P_{EL} = 0.175 (P_{ME})^{0.831} \quad (3.25)$$

όπου P_{EL} σε kW , P_{ME} η συνολική εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης επίσης σε kW .

Το βάρος μιας ηλεκτρογεννήτριας εξαρτάται, εκτός από την ισχύ και, από τη συχνότητα λειτουργίας. Έπειτα από ανάλυση κατάλληλων στοιχείων κατασκευαστών, προέκυψαν τα διαγράμματα που δίνονται στο Σχήμα 3.41 έως και το Σχήμα 3.44, τα οποία δείχνουν τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζεται το βάρος ενός ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους με την ισχύ, τη συχνότητα και τις στροφές λειτουργίας του, για τρεις διαφορετικούς κατασκευαστές.



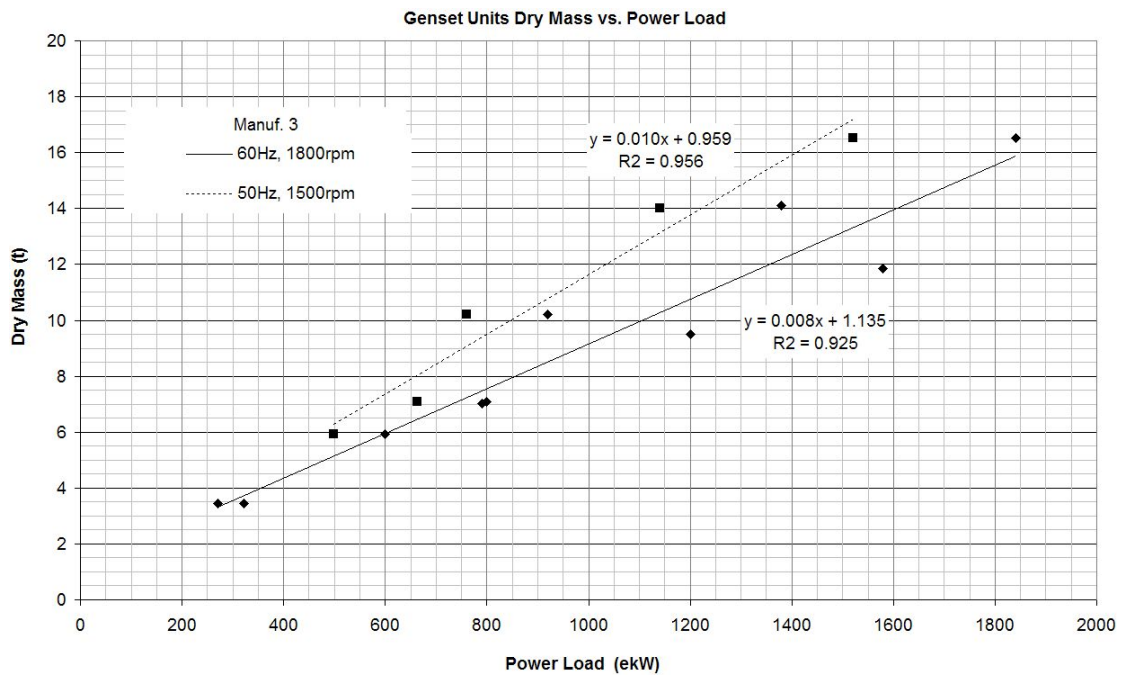
Σχήμα 3.41: Εκτίμηση του βάρους των ηλεκτρογεννητριών συναρτήσει του φορτίου – Κατ/στής 1 (60Hz)



Σχήμα 3.42: Εκτίμηση του βάρους των ηλεκτρογεννητριών συναρτήσει του φορτίου – Κατ/στής 1 (50Hz)



Σχήμα 3.43: Εκτίμηση του βάρους των ηλεκτρογεννητριών συναρτήσει του φορτίου – Κατ/στής 2 (60Hz, 50 Hz)



Σχήμα 3.44: Εκτίμηση του βάρους των ηλεκτρογεννητριών συναρτήσει του φορτίου – Κατ/στής 3 (60Hz, 50 Hz)

Κριτήριο επιλογής είναι, όπως και στην περίπτωση των κυρίων μηχανών, το μικρότερο βάρος. Για το λόγο αυτό η εκτίμηση του βάρους των ηλεκτρογεννητριών, μέσω της παρούσας μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, γίνεται με βάση την παρακάτω εξίσωση, η οποία αντιστοιχεί στις καμπύλες που υπάρχουν στο Σχήμα 3.44.

$$W_{EL} = \begin{cases} 0.010P_{EL} + 0.959, & 50 \text{ Hz} \\ 0.008P_{EL} + 1.135, & 60 \text{ Hz} \end{cases} \quad (t) \quad (3.26)$$

όπου W_{EL} σε t και P_{EL} σε kW .

Η εκτίμηση του βάρους των διάφορων βοηθητικών μηχανημάτων πραγματοποιείται μέσω ενός συντελεστή βάρους επί της συνολικής ισχύος κυρίων μηχανών και ηλεκτρογεννητριών, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$W_{AM} = 0.002 \times (P_{ME} + P_{EL}) \quad (t) \quad (3.27)$$

Τελικά, το βάρος των ηλεκτρογεννητριών και των λοιπών βοηθητικών μηχανημάτων ισούται με:

$$W_{AN} = W_{EL} + W_{AM} \quad (3.28)$$

3.4.4. Βάρος εξοπλισμού

Στην παρούσα μεθοδολογία προμελέτης, θεωρείται ότι στο βάρος εξοπλισμού περιλαμβάνονται, το βάρος των συστημάτων αγκυροβόλησης, πρόσδεσης και ρυμούλκησης, το βάρος του (των) bow thruster(s), της ηλεκτρογεννήτριας εκτάκτου ανάγκης και το βάρος της κύριας μονάδας κλιματισμού. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού, για κάθε μία από τις παραπάνω ομάδες βαρών.

Εξοπλισμός αγκυροβόλησης, πρόσδεσης και ρυμούλκησης (Βάρος εξαρτισμού)

Γενικά, ο καθορισμός των συστημάτων αγκυροβόλησης, πρόσδεσης και ρυμούλκησης, βασίζεται στο δείκτη εξαρτισμού (equipment number – EN), ο οποίος υπολογίζεται με βάση την εξίσωση ⁶:

$$EN = \Delta^{2/3} + 2BH + 0.1A \quad (3.29)$$

όπου H το ενεργό ύψος σε μέτρα από την ίσαλο σχεδίασης έως την οροφή της υψηλότερης υπερκατασκευής, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$H = a + \sum h_i \quad (3.30)$$

όπου a η κατακόρυφη απόσταση σε m^2 από την ίσαλο σχεδίασης έως το ανώτερο κατάστρωμα, μετρώμενη στο μέσο νομέα και στην πλευρά του πλοίου και h_i η κατακόρυφη απόσταση σε m των υπερστεγασμάτων που βρίσκονται πάνω από το ανώτερο κατάστρωμα και έχουν πλάτος μεγαλύτερο από το $\frac{1}{4}$ του μέγιστου πλάτους του πλοίου, μετρώμενη στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Όπου Δ το εκτόπισμα σχεδίασης σε t , B το πλάτος του πλοίου σε m και A η επιφάνεια πάνω από την ίσαλο σχεδίασης σε m^2 της πλευράς του πλοίου προβεβλημένης στο κατακόρυφο επίπεδο.

Από την τιμή του δείκτη εξαρτισμού (βλπ. Παράρτημα - Πίνακας Π1), προκύπτουν άμεσα ο αριθμός και το απαιτούμενο βάρος των αγκυρών, τα μήκη και η διάμετρος των αλυσίδων,

⁶ MSC/Circular 1175

τα μήκη και οι απαιτούμενες τάσεις θραύσης για τα σχοινιά (χαλύβδινα και συνθετικά) των γραμμών πρόσδεσης και ρυμούλκησης. Έπειτα από επεξεργασία κατάλληλων στοιχείων κατασκευαστών και τους κανονισμούς του Νορβηγικού Νηογνώμονα⁷ προκύπτουν διαγράμματα και εξισώσεις από τις οποίες προσδιορίζεται το βάρος των επιμέρους συστημάτων. Ο αναλυτικός υπολογισμός των βαρών αυτών παρουσιάζεται στο Παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της διατριβής. Συνοπτικά αναφέρεται ότι, κάθε μία από τις γραμμές αγκυροβόλησης (anchoring line) θεωρείται ότι αποτελείται από την άγκυρα (anchor), την αλυσίδα (chain), τον «εργάτη» (windlass), τον «οδηγό» (fairleader) και το μηχανισμό ασφάλισης της αλυσίδας (chain cable stopper). Έτσι το συνολικό βάρος του εξοπλισμού αγκυροβόλησης προκύπτει από την παρακάτω ισότητα:

$$W_{anchor\ lines} = N_{anchor} \left(W_{chain} + W_{anc.\ windlass} + W_{anc.\ fairleader} + W_{anc.\ cable\ stopper} \right) \quad (3.31)$$

Αντίστοιχα, κάθε γραμμή πρόσδεσης θεωρείται ότι αποτελείται από ένα σχοινί κατασκευασμένο από ίνες συνθετικών υλικών (fibre rope), μία διπλή (double) και μία σταυροειδή (cruciform) δέστρα (bollard), έναν ειδικό μηχανισμό κατεύθυνσης (universal roller), ένα υδραυλικό βίντσι (hydraulic winch) και μία ειδική ενισχυμένη οπή (closed chock), από την οποία περνά το σχοινί προς την προβλήτα. Έτσι το συνολικό βάρος του εξοπλισμού πρόσδεσης ισούται με:

$$W_{mooring\ lines} = N_{mooring} \left(W_{fibre\ rope} + W_{winch} + W_{c\ bollard} + W_{d\ bollard} + W_{roller} + W_{c\ chock} \right) \quad (3.32)$$

Η γραμμή ρυμούλκησης βρίσκεται στην πλώρη και χρησιμεύει για την έλξη του πλοίου από κάποιο άλλο. Τα σχοινιά που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό έχουν σχετικά μεγάλη αντοχή και μπορεί να είναι κατασκευασμένα από ίνες συνθετικών υλικών (fibre ropes) ή από ίνες χάλυβα σε συνδυασμό με κάποιο σύνθετο υλικό (wire ropes). Πολλές φορές, τοποθετείται μία ακόμη γραμμή ρυμούλκησης στην πρύμνη ενός πλοίου, προκειμένου αυτό να μπορεί, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, να ρυμουλκήσει κάποιο άλλο το οποίο θα βρεθεί σε κατάσταση ανάγκης. Έτσι, στην παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, θεωρείται ότι υπάρχουν δύο γραμμές ρυμούλκησης. Κάθε μία από αυτές, αποτελείται από ένα σχοινί κατασκευασμένο από ίνες χάλυβα σε συνδυασμό με συνθετικά υλικά, έναν ειδικό μηχανισμό κατεύθυνσης (pedestal roller), έναν κύλινδρο αποθήκευσης (store drum), ένα ισχυρό σημείο στήριξης στο κατάστρωμα (towing bracket ή towing strong point) και μία ειδική οπή (fairlead chock), από την οποία περνά το σχοινί προς το άλλο πλοίο. Το συνολικό βάρος των συστημάτων των γραμμών ρυμούλκησης είναι τελικά ίσο με:

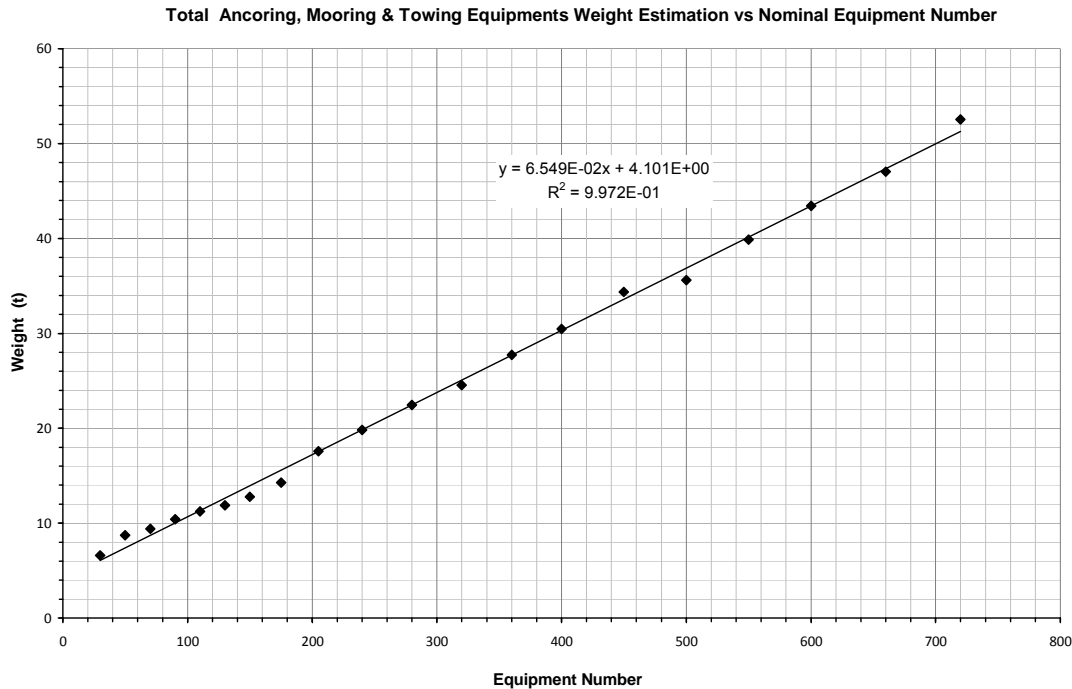
$$W_{towing\ lines} = 2 \times \left(W_{wire\ rope} + W_{p\ roller} + W_{c\ chock} + W_{t\ bracket} + W_{s\ drum} \right) \quad (3.33)$$

Τέλος, το συνολικό βάρος των τριών γραμμών προκύπτει από το άθροισμα:

$$W_{EN} = W_{anchor\ lines} + W_{mooring\ lines} + W_{towing\ lines} \quad (3.34)$$

⁷ DNV, Rules for Ships Pt.3 Ch.3 Sec.3, January 2000

Αξίζει να σημειωθεί ότι, εφαρμόζοντας τις παραπάνω εξισώσεις στις ονομαστικές τιμές του δείκτη εξαρτισμού (Παράρτημα - Πίνακας Π1), προκύπτει τελικά η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.45. Με βάση την καμπύλη αυτή ή την εξίσωση (3.35), ο μελετητής μπορεί να εκτιμήσει αρχικά το συνολικό βάρος εξαρτισμού, χωρίς να καταφύγει σε αναλυτικούς υπολογισμούς. Σημειώνεται ότι στην παρούσα μεθοδολογία προμελέτης χρησιμοποιούνται οι αναλυτικοί υπολογισμοί, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Παράρτημα.



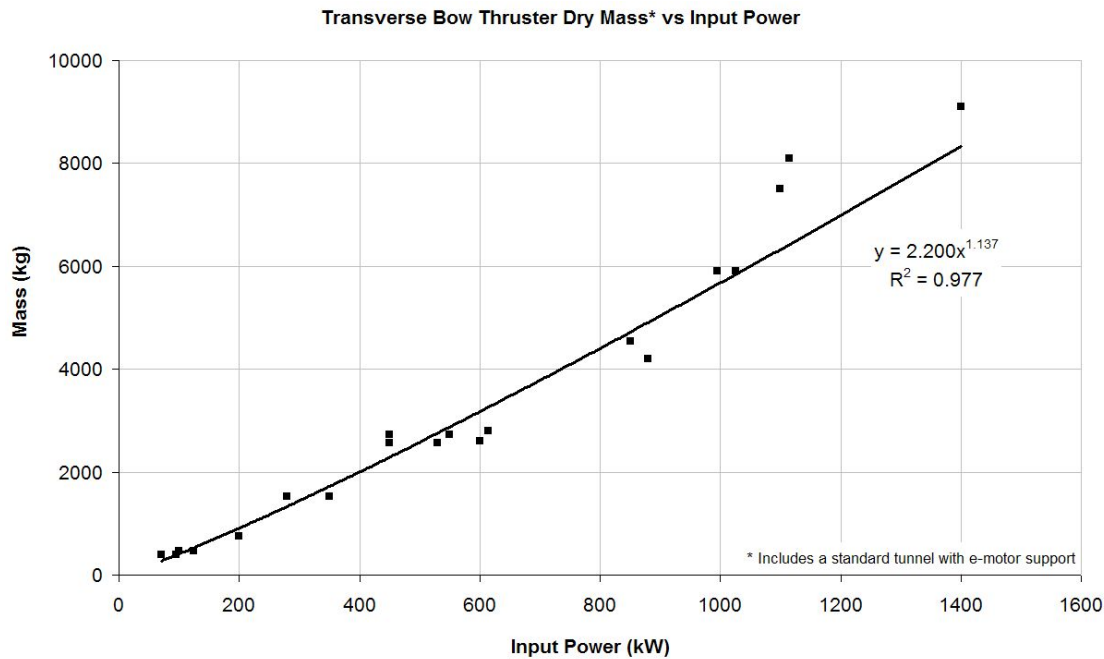
Σχήμα 3.45: Εκτίμηση του συνολικού βάρους εξαρτισμού συναρτήσει του δείκτη εξαρτισμού

$$W_{EN}^* = 6.549 \times 10^{-2} EN + 4.101 \quad (3.35)$$

όπου W_{EN}^* σε t και EN η ονομαστική τιμή του δείκτη εξαρτισμού.

Bow thruster

Ο εξοπλισμός ενός πλοίου με bow thruster εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και προκύπτει έπειτα από λεπτομερείς υπολογισμούς που εξετάζουν τις ελικτικές του ικανότητες. Συνήθως, τα μονόγαστα ταχύπλοα Ε/Γ-Ο/Γ πλοία με μήκη ισάλων από 85m έως 135 m, έχουν ένα ή περισσότερα bow thrusters με συνολική ισχύ από 350kW έως 750 kW. Στη μεθοδολογία παραμετρικής μοντελοποίησης που αναπτύχθηκε, θεωρείται ότι κάθε πλοίο είναι εξοπλισμένο με ένα bow thruster ισχύος 350 kW ή $Lbp/0.2$, όποιο από τα δύο είναι μεγαλύτερο. Γενικά το βάρος ενός bow thruster μπορεί να εκτιμηθεί από την ισχύ λειτουργίας του, με βάση το διάγραμμα που δίνεται στο Σχήμα 3.46, όπως αυτό προέκυψε έπειτα από ανάλυση κατάλληλων στοιχείων κατασκευαστών.



Σχήμα 3.46: Εκτίμηση του βάρους του bow thruster συναρτήσει της ισχύος

Η εξίσωση που αντιστοιχεί στη παραπάνω καμπύλη είναι:

$$W_{BTH} = 2.200 \times 10^{-3} P_{BTH}^{1.131} \quad (3.36)$$

όπου W_{BTH} σε t και P_{BTH} η ισχύς λειτουργίας του bow thruster σε kW :

$$P_{BTH} = \max \{350, L_{BP} / 0.2\} \quad (3.37)$$

Ηλεκτρογεννήτρια εκτάκτου ανάγκης

Η ηλεκτρογεννήτρια εκτάκτου ανάγκης τοποθετείται συνήθως στο ανώτερο κατάστρωμα ενός πλοίου και τίθεται αυτόματα σε λειτουργία όταν, έπειτα από βλάβη, τα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη σταματήσουν να λειτουργούν. Σκοπός της ύπαρξης της ηλεκτρογεννήτριας εκτάκτου ανάγκης είναι να παρέχει αρκετή ηλεκτρική ισχύ, ώστε να λειτουργούν επαρκώς όλα τα συστήματα ασφαλείας του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου και του απαραίτητου φωτισμού για την ασφαλή εκκένωση του σκάφους. Ως εκ τούτου, η ονομαστική ισχύς λειτουργίας της υπολογίζεται έπειτα από ειδική μελέτη. Για λόγους γενίκευσης, στην παρούσα μεθοδολογία προμελέτης θεωρείται ότι η ισχύς της ηλεκτρογεννήτριας εκτάκτου ανάγκης είναι η μισή από αυτή των ηλεκτροπαραγωγών ζευγών, τιμή που αποτελεί μία από τις παραμέτρους σχεδίασης:

$$P_{EG} = \frac{1}{2} P_{EL} \quad (3.38)$$

όπου P_{EL} σε kW , όπως υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (3.25).

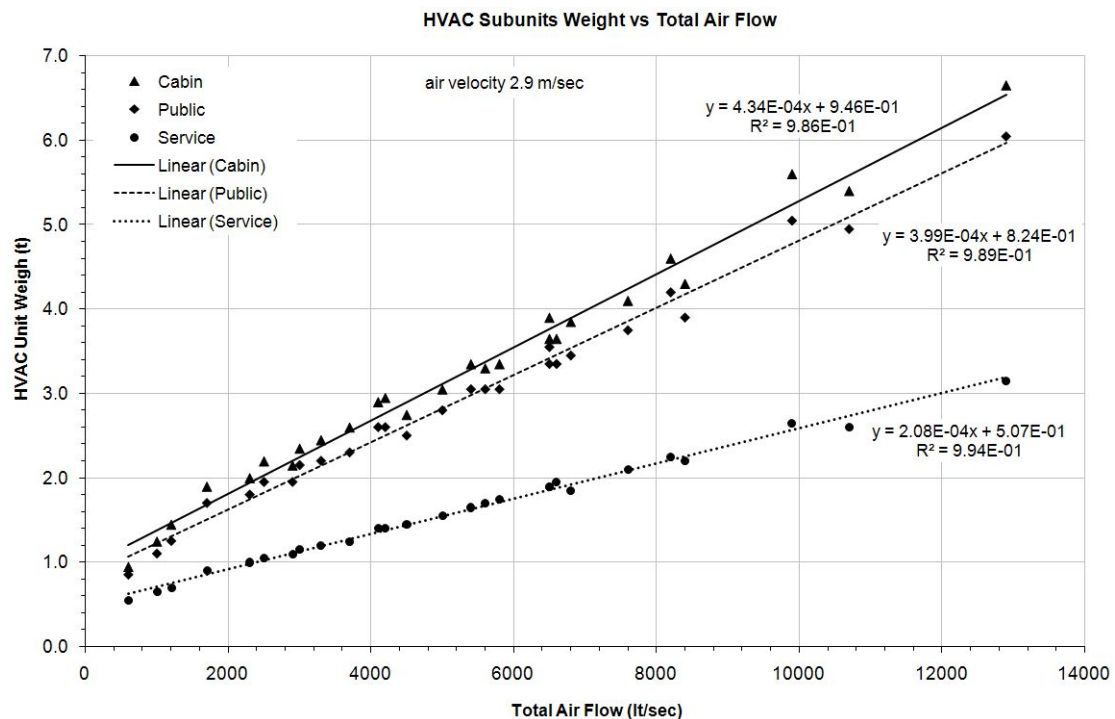
Έτσι, το βάρος W_{EG} συναρτήσει της ισχύος λειτουργίας της, μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της εξίσωσης (3.26).

Κεντρική μονάδα κλιματισμού

Η κεντρική μονάδα κλιματισμού ενός πλοίου, τοποθετείται συνήθως στο ανώτερο κατάστρωμα και αποτελείται από τρεις ανεξάρτητες υπομονάδες: Τη μονάδα κλιματισμού ιδιωτικών χώρων (καμπίνες), κοινόχρηστων χώρων και χώρων όπου εργάζεται το πλήρωμα. Το βάρος κάθε μιας από τις υπομονάδες αυτές, υπολογίζεται με βάση της προδιαγραφές που υπάρχουν στο Νορβηγικό Νηογνώμονα⁸. Βάση αυτών ορίζονται οι εναλλαγές αέρα ανά άτομο σε (lt/s) για κάθε μία περιοχή ενδιαίτησης και επίπεδο άνεσης. Ο κανονισμός προδιαγράφει τρεις μεγάλες κατηγορίες ενδιαίτησης και τρία επίπεδα άνεσης όπως φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 3.5):

Πίνακας 3.5: Εναλλαγές αέρα ανά επιβάτη και επίπεδο άνεσης

Περιοχή		Επίπεδο Άνεσης	Παροχή αέρα ανά άτομο (lt/s)
A	Χώροι καμπινών	1	10
		2	10
		3	7
B	Δημόσιοι χώροι	1	12
		2	10
		3	7
C	Χώροι εργασίας πληρώματος	1	12
		2	10
		3	7



Σχήμα 3.47: Εκτίμηση του βάρους της κύριας μονάδας κλιματισμού συναρτήσει των εναλλαγών αέρα

⁸ DNV, Rules for Ships Pt.5 Ch.12 Sec.3, January 2000

Η συνολική παροχή αέρα, που πρέπει να διατίθεται μέσω κάθε υπομονάδας υπολογίζεται ως εξής:

$$F_i = N_i \cdot f_{ij} \quad (3.39)$$

όπου F_i σε l/s , N_i ο μέγιστος αριθμός ατόμων που μπορεί να υπάρχουν στην περιοχή $i = A, B, C$ και f_{ij} η παροχή αέρα που αντιστοιχεί στην περιοχή i και σε επίπεδο άνεσης $j = 1, 2, 3$ (Πίνακας 3.5).

Έτσι, με γνωστή την τιμή της συνολικής παροχής αέρα, το βάρος κάθε υπομονάδας μπορεί να εκτιμηθεί από τις καμπύλες που υπάρχουν στο Σχήμα 3.47, οι οποίες προέκυψαν έπειτα από τη συγκέντρωση και την επεξεργασία κατάλληλων στοιχείων κατασκευαστών. Το συνολικό βάρος της κεντρικής μονάδας κλιματισμού, προκύπτει στη συνέχεια ως το άθροισμα των τριών επί μέρους βαρών, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εξισώσεις:

$$W_A = 0.000434F_A + 0.946 \quad (3.40)$$

$$W_B = 0.000399F_B + 0.824 \quad (3.41)$$

$$W_C = 0.000208F_C + 0.507 \quad (3.42)$$

$$W_{HVAC} = W_A + W_B + W_C \quad (3.43)$$

όπου τα βάρη μετρώνται σε t .

Συνολικό βάρος εξοπλισμού

Το συνολικό βάρος εξοπλισμού υπολογίζεται με βάση το άθροισμα των βαρών των επιμέρους ομάδων, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εξίσωση:

$$W_{OT} = W_{EN} + W_{BTH} + W_{EG} + W_{HVAC} \quad (3.44)$$

3.4.5. Βάρος ενδιαιτήσεων

Η εύρεση μίας τεχνικής παραμετρικού υπολογισμού του βάρους των ενδιαιτήσεων παρουσίασε ιδιαίτερη δυσκολία, λόγω κυρίως της έλλειψης συγκεντρωτικών στοιχείων από υπαρκτά πλοία. Έτσι, οι υπολογισμοί βασίστηκαν στη λεπτομερή ανάλυση των επιμέρους βαρών, για συγκεκριμένες περιοχές ενδιαίτησης. Στα βάρη αυτά συμπεριλαμβάνονται, εκτός των άλλων, η μόνωση και το υπόστρωμα του καταστρώματος, ο εξοπλισμός των κοινόχρηστων χώρων, τα έπιπλα των καμπινών, τα κατακόρυφα και οριζόντια panels, κ.ά. Μετά από συστηματική επεξεργασία στοιχείων από κατασκευαστές και γενικές διατάξεις σύγχρονων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων προέκυψαν κατάλληλοι συντελεστές, μέσω των οποίων είναι δυνατή η εκτίμηση του βάρους ανά τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας, για διάφορους χώρους ενδιαίτησης (Πίνακας 3.6).

Ο Πίνακας 3.7 παρατίθεται ως υπόδειγμα της μεθόδου η οποία ακολουθήθηκε προκειμένου να προκύψουν οι παραπάνω συντελεστές. Στον πίνακα αυτόν περιλαμβάνονται τα επιμέρους βάρη τα οποία λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό των συντελεστών βάρους που αφορούν τους χώρους όπου υπάρχουν αποκλειστικά καμπίνες επιβατών τεσσάρων κλινών. Η τελευταία στήλη (8) του πίνακα περιέχει μεγέθη που αναφέρονται στη γενική διάταξη ενός υπαρκτού σύγχρονου Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου. Τα δεδομένα της στήλης αυτής, πολλαπλασιάζονται με τα αντίστοιχα δεδομένα των προηγούμενων στηλών (3 έως 7) και στη συνέχεια αθροίζονται προκειμένου να προκύψει το συνολικό βάρος για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαίτησης. Η τιμή αυτή του αθροίσματος διαιρείται κατόπιν με το συνολικό εμβαδόν της επιφάνειας στην οποία υπάρχουν οι καμπίνες των επιβατών, με βάση τη γενική διάταξη και υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής βάρους (kg / m^2).

Πίνακας 3.6: Συντελεστές βάρους για τον προσδιορισμό του βάρους ενδιαίτησεων

Περιοχή που περιλαμβάνει*	Συντελεστής Βάρους (t / m^2)	
	Ελάχιστο	Μέγιστο
Καμπίνες επιβατών τετράκλινες	0.0653	0.0722
Καμπίνες επιβατών δίκλινες	0.0676	0.0747
Καθίσματα αεροπορικού τύπου	0.0686	0.0758
Καμπίνες αξιωματικών	0.0646	0.0714
Καμπίνες κατώτερου πληρώματος	0.0449	0.0496
Κοινόχρηστοι χώροι υγιεινής εσωτερικοί	0.0466	0.0515
Κοινόχρηστοι χώροι υγιεινής εξωτερικοί	0.0315	0.0348
Χώροι αναμονής (σαλόνια)	0.0288	0.0318
Self service	0.0565	0.0624
Χώρος υποδοχής	0.0444	0.0501
Καταστήματα	0.0389	0.0430
Άλλα βάρη		
Κυλιόμενες σκάλες (κλίση 35°, πλάτος 0.8m)	1.18 t/m (κατακόρυφης απόστασης)	
Ασανσέρ επιβατών (καμπίνα 1.8m x 1.3m, βάρος ανύψωσης 680kg), ΠΔ 314/2001	910 kg	
* Νοείται ως ο συνολικός χώρος που φέρει τη συγκεκριμένη ιδιότητα. Για παράδειγμα, η περιοχή καμπινών πληρώματος περιλαμβάνει, εκτός από τις καμπίνες, τους διαδρόμους και την αίθουσα αναψυχής		

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε σε γενικές διατάξεις τριών διαφορετικών πλοίων και ως τελικός συντελεστής βάρους, για τη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαίτησης, ελήφθη ο μέσος όρος. Η ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και για τον προσδιορισμό των υπόλοιπων συντελεστών βάρους (Πίνακας 3.6) οι τιμές των οποίων παρουσιάζονται και σχηματικά στο Σχήμα 3.48. Η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή αντιστοιχούν σε χαμηλότερο ή υψηλότερο επίπεδο εξοπλισμού, αντίστοιχα.

Πίνακας 3.7: Χαρακτηριστικά εξοπλισμού για τον υπολογισμό του βάρους ενδιαίτησης περιοχών που διαθέτουν αποκλειστικά καμπίνες τεσσάρων κλινών

Item	Name / Description	Density kg/m ³	Thickness mm	Distr. Weight Kg/m ²	Distr. Weight Kg/m	Weight kg/item	Items, Length, Area, Volume
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Corridors							
Insulation	A30 – Average *			3.15			16.296
Underlayment	Flame Retardant No 8	160	5	0.8			16.296
Moquette	Oasis **			2.4			16.296
Συνεχίζεται . . .							
Item	Name / Description	Density kg/m ³	Thickness mm	Distr. Weight Kg/m ²	Distr. Weight Kg/m	Weight kg/item	Items, Length, Area, Volume
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Wall Panels	B-15			12.5			56.373
Ceiling Panels	B-15			12.0			16.296
Hand Rails	Steel				2.0		24.510
Fire BHD Doors	A-30 1x2.1 (wxh)			26.0		54.6	2
4 Bed Passenger Cabins							
Insulation	A30 – Average *			3.15			7.971
Moquette	Oasis **			2.4			7.971
Underlayment	Flame Retardant No 8	160	5	0.8			7.971
Cabin door	B-15 0.9x2.1 (wxh)			12.0			1.610
Wall Panels	B-15 (only left and back)			12.5			15.069
Ceiling Panels	B-15			12.0			7.971
Folding Bed						35.0	2
Lower Bed						50.0	2
Upper & Lower set of Beds						70.0	0
Ladder						3.5	1
Wardrobe						32.0	1
Chest of Drawers						9.0	1
Mirror						11.0	1
Toilet Door	B-15 0.6x2.1 (wxh)			12.0			1.26
Wall Panels	B-15			12.5			6.440
Ceiling Panels	B-15			12.0			1.992
Washstand	Corian			65.2			0.286
Vacuum Toilet						21.0	1
Toilet Mirror						9.0	1
Floor Pans						4.3	1
Tiles				15.0			1.992
WC Equipment						3.0	1
<p>* A30 - Marine Batts 45 : thickness 50mm, density 45kg/m³ A30 - Marine Wire Mat 90: thickness 45mm, density 90kg/m³ ** wool 50%, polyester 5%, cotton, jute, polypropylene</p>							

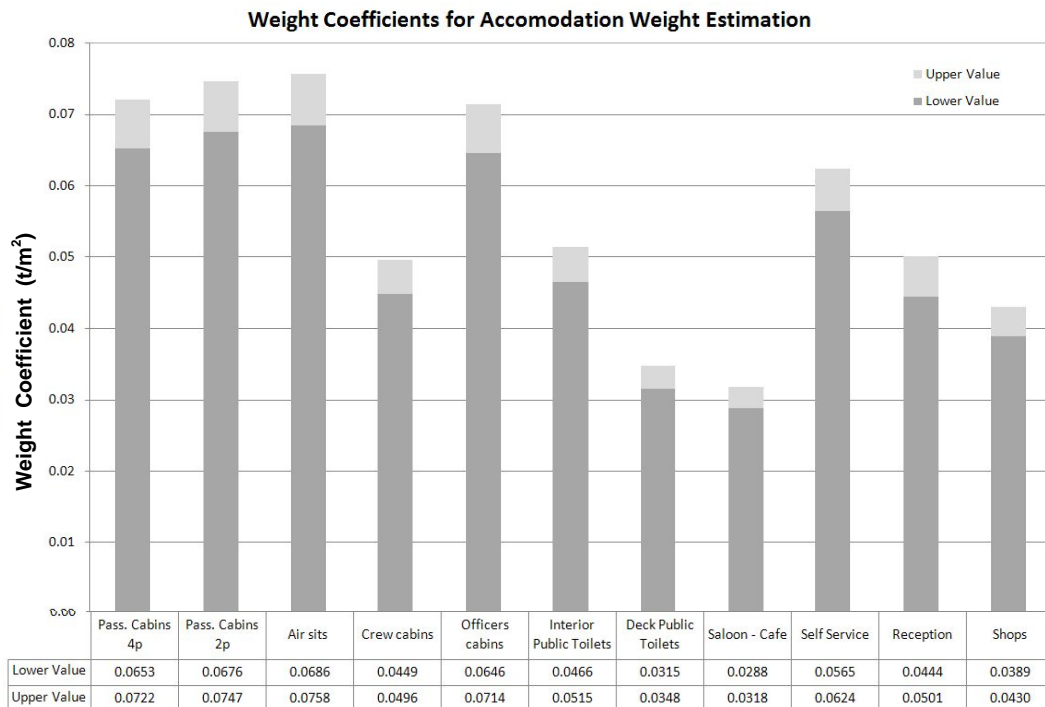
Το συνολικό βάρος ενδειατήσεως W_{AC} προκύπτει από το εσωτερικό γινόμενο των συντελεστών βάρους επί την επιφάνεια της αντίστοιχης περιοχής, όπως αυτή υπολογίστηκε στην Παράγραφο 3.3.3, συν τα υπόλοιπα βάρη του παραπάνω πίνακα.

$$W_{AC} = \sum_i w_i^w A_i + W_{escalator} + W_{elevator} \quad (3.45)$$

όπου w_i ο σταθμισμένος ως προς το επίπεδο εξοπλισμού συντελεστής βάρους της περιοχής i , ο οποίος ισούται με:

$$w_i^w = w_i^{\min} + k(w_i^{\max} - w_i^{\min}), \quad k \in [0,1] \quad (3.46)$$

και A_i το αντίστοιχο εμβαδόν.



Σχήμα 3.48: Συντελεστές για τον υπολογισμό του βάρους ενδειατήσης

3.4.6. Βάρος ηλεκτρολογικού εξοπλισμού

Το βάρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού εκτιμάται προσεγγιστικά μέσω κατάλληλων συντελεστών βάρους επί τη συνολική επιφάνεια των ενδειατήσεων (A_{acc}) και των χώρων μεταφοράς οχημάτων (A_{gar}):

$$W_{EL} = 0.02 A_{acc} + 0.01 A_{gar} \quad (t) \quad (3.47)$$

Η παραπάνω εξίσωση (3.47), όπως και η (3.48), πηγάζουν από τη μεθοδολογία αρχικού υπολογισμού βαρών η οποία εφαρμόζεται από ορισμένα ναυπηγεία, προκειμένου να εκτιμηθεί το βάρος του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού Ε/Γ-Ο/Γ και Ο/Γ πλοίων.

3.4.7. Βάρος δικτύων

Το βάρος δικτύων εξοπλισμού εκτιμάται επίσης προσεγγιστικά μέσω συντελεστών βάρους, επί τη συνολική επιφάνεια των ενδαιτήσεων (A_{acc}) και των χώρων μεταφοράς οχημάτων (A_{gar}):

$$W_{PP} = 0.03 A_{acc} + 0.02 A_{gar} \quad (t) \quad (3.48)$$

3.4.8. Λοιπά βάρη

Ως λοιπά βάρη νοούνται όλα εκείνα τα βάρη τα οποία δεν έχουν προσδιοριστεί μέσω της παραπάνω διαδικασίας. Η συνολική τιμή τους προσδιορίζεται ως ποσοστό της τάξης του 3% επί του αθροίσματος των υπόλοιπων ομάδων βαρών:

$$W_{RV} = 0.03 (W_M + W_{AN} + W_{AC} + W_{EL} + W_{PP}) \quad (t) \quad (3.49)$$

3.5. Υπολογισμός πρόσθετου βάρους

Επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, αποτελεί η ανάλυση του πρόσθετου βάρους (deadweight) και ως εκ τούτου, ο υπολογισμός του ωφέλιμου φορτίου. Για το σκοπό αυτό το πρόσθετο βάρος αναλύεται σε επιμέρους ομάδες βαρών (Πίνακας 3.8). Βασική παράμετρο σχεδίασης στη φάση αυτή, αποτελεί η ακτίνα ενεργείας του πλοίου βάσει της οποίας υπολογίζονται τα βάρη των αναλωσίμων.

Πίνακας 3.8: Ομάδες βαρών που απαρτίζουν το πρόσθετο βάρος του σκάφους

α/α	Συμβολισμός	Επεξήγηση
1	W_{FO}	Βάρος καυσίμων κυρίων μηχανών
2	W_{DO}	Βάρος καυσίμων ηλεκτρογεννητριών
3	W_{LO}	Βάρος λιπαντικών
4	W_{FW}	Βάρος γλυκού νερού
5	W_{LI}	Βάρος υπόλοιπων υγρών
6	W_{PR}	Βάρος εφοδίων
7	W_P	Βάρος επιβατών
8	W_{CR}	Βάρος πληρώματος
9	W_{VH}	Βάρος οχημάτων

Παρακάτω, περιγράφεται ο υπολογισμός κάθε μίας από τις παραπάνω ομάδες βάρους, όπως πραγματοποιείται εντός της παρούσας μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης.

Βάρος καυσίμων κυρίων μηχανών

Το βάρος, των καυσίμων των κυρίων μηχανών υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W_{FO} = c(P_D b_D + P_T b_T) t_s \times 10^{-6} \quad (3.50)$$

όπου W_{FO} σε t , P_D η ισχύς λειτουργίας των κυρίων μηχανών diesel σε kW , $b_D = 210 \text{ gr} / kWh$ η ειδική κατανάλωση καυσίμου των μηχανών Diesel, P_T η ισχύς λειτουργίας των αεριοστρόβιλων σε kW (εάν υπάρχουν), $b_T = 280 \text{ gr} / kWh$ η ειδική κατανάλωση καυσίμου των αεριοστρόβιλων και t_s ο χρόνος λειτουργίας των κυρίων μηχανών, σε ώρες, με βάση την υπηρεσιακή ταχύτητα και την ακτίνα ενεργείας. Ο συντελεστής $c = 1.1$ αφορά την εφεδρεία των δεξαμενών.

Βάρος καυσίμων ηλεκτρογεννητριών

Παρομοίως, το βάρος των καυσίμων των ηλεκτρογεννητριών υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W_{DO} = c b_{DO} (P_{EL} t_s + 0.5 P_{EL} t_p) \times 10^{-6} \quad (3.51)$$

όπου W_{DO} σε t , P_{EL} η ισχύς των ηλεκτρογεννητριών σε kW , $b_{DO} = 197 \text{ gr} / kWh$ η ειδική κατανάλωση καυσίμου, t_s όπως στην Εξίσωση (3.50), t_p ο συνολικός χρόνος παραμονής στα λιμάνια και $c = 1.1$ συντελεστής που αφορά την εφεδρεία των δεξαμενών.

Βάρος λιπαντικών

Το βάρος των λιπαντικών υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W_{LO} = c \{ [(P_D + P_{EL}) b_{LOD} + P_T b_{LOT}] t_s + 0.5 P_{EL} b_{LOD} t_p \} \times 10^{-6} \quad (3.52)$$

όπου W_{LO} σε t , $b_{LOD} = 1.15 \text{ gr} / kWh$ η ειδική κατανάλωση λιπαντικού για τις μηχανές diesel και τους αντίστοιχους μειωτήρες, $b_{LOT} = 0.35 \text{ gr} / kWh$ η ειδική κατανάλωση λιπαντικού για τους αεριοστρόβιλους και τους αντίστοιχους μειωτήρες, t_s και t_p όπως στην Εξίσωση (3.51) και $c = 1.1$ συντελεστής που αφορά την εφεδρεία των δεξαμενών.

Βάρος γλυκού νερού

Η ποσότητα γλυκού νερού που καταναλώνεται από τους επιβάτες και το πλήρωμα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού, υπολογίζεται με βάση τους παρακάτω συντελεστές:

$$c_1 = 0.65 \text{ kg/ανθρωπόωρα, για πλήρωμα και επιβάτες με καμπίνες}$$

$$c_2 = 0.35 \text{ kg/ανθρωπόωρα, για επιβάτες χωρίς καμπίνες}$$

Έτσι, το συνολικό του βάρος ισούται με:

$$W_{FW} = c [c_1 (N_{P1} + N_{CR}) + c_2 N_{P2}] t \times 10^{-3} \quad (3.53)$$

όπου W_{FW} σε t , N_{P1} και N_{P2} αντίστοιχα οι αριθμοί των επιβατών που διαθέτουν ή όχι καμπίνες, N_{CR} ο αριθμός του πληρώματος, $c = 1.1$ συντελεστής που αφορά την εφεδρεία των δεξαμενών και t ο συνολικός χρόνος ταξιδιού που αντιστοιχεί στην ακτίνα αδρανείας.

Βάρος υπόλοιπων υγρών

Το βάρος των υπόλοιπων υγρών περιλαμβάνει υγρά τα οποία δεν έχουν συμπεριληφθεί στους ανωτέρω υπολογισμούς, όπως το νερό ψύξης διαφόρων μηχανών και μηχανημάτων, και λαμβάνεται με:

$$W_{LI} = 0.01(W_{FO} + W_{DO} + W_{LO} + W_{FW}) \quad (3.54)$$

Βάρος εφοδίων

Το βάρος των εφοδίων υπολογίζεται με βάση την κατανάλωση 0.35 kg/ανθρωπόωρα κατά τη διάρκεια του ταξιδιού και ισούται με:

$$W_{PR} = 0.35 c N_p t \times 10^{-3} \quad (3.55)$$

όπου W_{PR} σε t , N_p ο συνολικός αριθμός επιβατών, $c = 1.1$ συντελεστής που αφορά την εφεδρεία και t όπως στην Εξίσωση(3.50).

Βάρος επιβατών και πληρώματος

Το βάρος κάθε επιβάτη μαζί με τις αποσκευές θεωρείται ίσο με 95 kg/άτομο. Αντίστοιχα κάθε μέλος του πληρώματος θεωρείται ότι ζυγίζει (μαζί με τις αποσκευές) 120 kg. Έτσι, τα συνολικά βάρη επιβατών και πληρώματος ισούνται, αντίστοιχα, με:

$$W_p = 0.095 N_p \quad (t) \quad (3.56)$$

$$W_{CR} = 0.120 N_{CR} \quad (t) \quad (3.57)$$

Βάρος οχημάτων

Η μεταφορική ικανότητα ΙΧ αυτοκινήτων έχει ήδη υπολογιστεί με βάση τα μήκη λωρίδων των καταστρωμάτων μεταφοράς οχημάτων. Ενδέχεται όμως, ο επιτρεπόμενος αριθμός μεταφερόμενων ΙΧ αυτοκινήτων στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης, με βάση το βύθισμα σχεδίασης να είναι διαφορετικός. Εάν από το εκτόπισμα σχεδίασης αφαιρεθούν τα βάρη του άφορτους σκάφους, των αναλωσίμων των επιβατών και του πληρώματος, τότε το ωφέλιμο φορτίο των οχημάτων ισούται με:

$$W_{2PC} = \Delta - [W_{LS} + (W_{FP} + W_{DO} + W_{LO} + W_{FW} + W_{LI} + W_{PR} + W_p + W_{CR})] \quad (3.58)$$

Αντίστοιχα, ο αριθμός των επιτρεπόμενων μεταφερόμενων ΙΧ αυτοκινήτων προκύπτει ως:

$$N_{2PC} = \frac{W_{2PC}}{w_{PC}} \quad (3.59)$$

όπου w_{PC} το βάρος ανά όχημα σε τόνους,

Έτσι, ο αριθμός των ΙΧ αυτοκινήτων που μπορεί να μεταφέρει τελικά το πλοίο ισούται με:

$$N_{PC} = \min \{ N_{1PC}, N_{2PC} \} \quad (3.60)$$

όπου N_{1PC} ο αριθμός των ΙΧ αυτοκινήτων με βάση τα μήκη λωρίδων.

Στην ιδανική περίπτωση ο λόγος N_{1PC} / N_{2PC} ισούται με τη μονάδα. Το ωφέλιμο φορτίο οχημάτων, όπως υπολογίζεται στην Εξίσωση (3.58), καθορίζεται ουσιαστικά από την ταχύτητα υπηρεσίας, το μήκος του ταξιδιού και τις ημέρες αυτονομίας (ακτίνα ενεργείας). Όμως, για ένα δεδομένο σενάριο λειτουργίας (απόσταση λιμένων, ταξίδια ανά ημέρα και ταχύτητα υπηρεσίας) η μόνη ελεύθερη μεταβλητή που μπορεί να επαναπροσδιορίσει ο μελετητής, προκειμένου να αυξήσει τη μεταφορική ικανότητα, είναι οι ημέρες αυτονομίας.

Στην περίπτωση κατά την οποία το πλοίο μεταφέρει και ΦΓ αυτοκίνητα, ο αριθμός τους ισούται με:

$$N_{TR} = \min \{ N_{1TR}, N_{2TR} \} \quad (3.61)$$

όπου N_{1TR} ο αριθμός των ΦΓ με βάση τα μήκη λωρίδων του κυρίου καταστρώματος και , N_{2TR} ο αριθμός των ΦΓ αυτοκινήτων με βάση το ωφέλιμο φορτίο οχημάτων, όπως υπολογίζεται στην Εξίσωση (3.58).

3.6. Καταστάσεις φόρτωσης

Προκειμένου να μελετηθεί η ευστάθεια του πλοίου, ενσωματώνεται στην μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης η προσομοίωση ενός αριθμού χαρακτηριστικών καταστάσεων φόρτωσης. Σκοπός είναι να καλυφθεί το τυπικό φάσμα λειτουργίας ενός πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη τους προηγούμενους υπολογισμούς βαρών και κέντρων βαρών (lightship και deadweight). Η μελέτη ευστάθειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση έναν αριθμό από αρχικές καταστάσεις φόρτωσης (loading conditions), οι οποίες ορίζονται μέσω προκαθορισμένων τιμών βυθισμάτων, διαγωγών και κέντρων βάρους. Παρόλα αυτά προτιμήθηκε ο έλεγχος να πραγματοποιηθεί μέσω συγκεκριμένων καταστάσεων φόρτωσης οι οποίες λαμβάνουν υπόψη ποσοστά της μέγιστης μεταφορικής ικανότητας επιβατών και οχημάτων. Η μέθοδος αυτή προσομοιώνει τυπικές καταστάσεις φόρτωσης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων και επιτυγχάνει την καλύτερη αξιολόγηση των εναλλακτικών σχεδιάσεων με βάση τη μελέτη της άθικτης ευστάθειας και της ευστάθειας μετά από βλάβη.

Συνολικά εξετάζονται δέκα καταστάσεις φόρτωσης (Πίνακας 3.9). Για κάθε κατάσταση αναχώρησης υπάρχει αντίστοιχη κατάσταση άφιξης, για την οποία θεωρείται ότι στο πλοίο έχει απομείνει το 10% των αναλωσίμων. Στην περίπτωση όπου το πλοίο μεταφέρει και ΦΓ αυτο-

κίνητα, θεωρείται ότι ο μέγιστος αριθμός τους δεν ξεπερνά τις προδιαγραφές του πλοιοκλήτη, ακόμα και όταν υπάρχει τέτοια δυνατότητα. Επίσης στην ίδια περίπτωση, υπολογίζονται τα ελεύθερα μήκη λωρίδων που δύναται να καλυφθούν από ΙΧ αυτοκίνητα και έτσι προκύπτει μικτή φόρτωση (ΦΓ και ΙΧ) για το κύριο κατάστρωμα μεταφοράς οχημάτων.

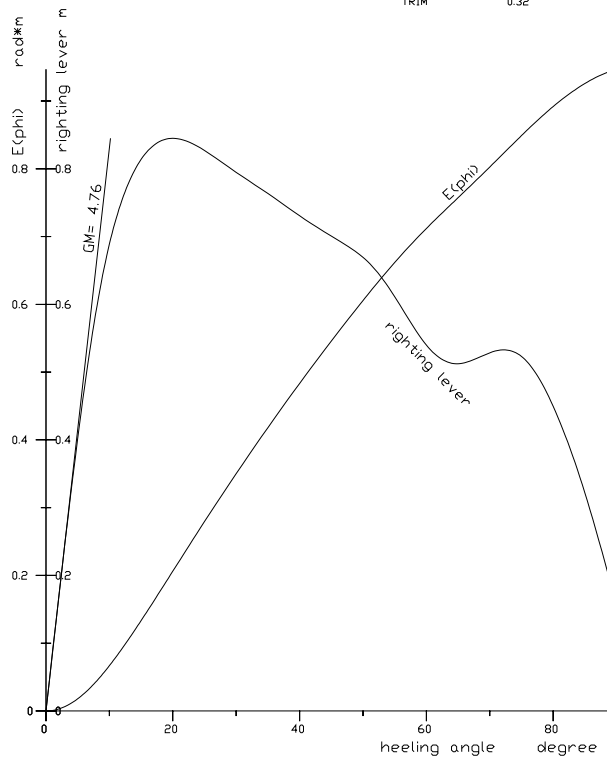
Πίνακας 3.9: Καταστάσεις φόρτωσης που μοντελοποιούνται

α/α	Ονομασία	Φορτία (% κατάστασης αναχώρησης πλήρους φορτίου)			
		Αναλώσιμα	Επιβάτες	ΙΧ	ΦΓ*
1	DWTD00	100%	100%	0%	0%
2	DWTA00	10%	100%	0%	0%
3	DWTD100C	100%	100%	100%	0%
4	DWTA100C	10%	100%	100%	0%
5	DWTD30C	100%	100%	30%	0%
6	DWTA30C	10%	100%	30%	0%
7	DWTD100CT	100%	100%	100% **	100%
8	DWTA100CT	10%	100%	100% **	100%
9	DWTD30CT	100%	100%	30% **	30%
10	DWTA30CT	10%	100%	30% **	30%

* η μικρότερη τιμή με βάση τη μεταφορική ικανότητα (3.61) και την απαίτηση του πλοιοκλήτη
 ** % του μέγιστου αριθμού ΙΧ αυτοκινήτων που μπορεί να μεταφέρει το πλοίο ταυτόχρονα με τον μέγιστο αριθμό ΦΓ αυτοκινήτων

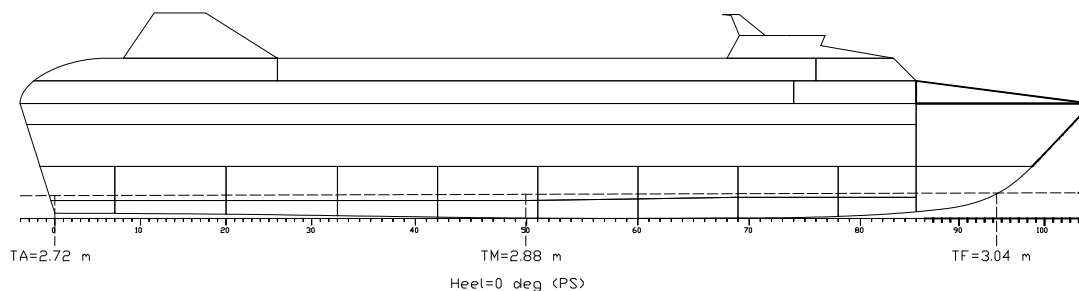
STABILITY CURVES

PROJECT PHD/A
 DATE 2007-12-10
 CONDITION DWTD100C
 DISP 2009 TON
 DRAUGHT 2.88 M
 TRIM 0.32



Σχήμα 3.49: Καμπύλες ευστάθειας μιας τυπικής κατάστασης φόρτωσης

Ως αποτέλεσμα, στην παρούσα φάση της παραμετρικής σχεδίασης, ο μελετητής λαμβάνει μία πληθώρα πληροφοριών που αφορούν κάθε μία από τις καταστάσεις φόρτωσης, όπως τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου στη θέση ισορροπίας, την καμπύλη GZ-φ, το ύψος εξάλων, κ.ά. Στο Σχήμα 3.49 παρουσιάζονται οι καμπύλες ευσταθείας και δυναμικής ευστάθειας που αντιστοιχούν στη θέση ισορροπίας μιας τυπικής κατάστασης φόρτωσης όπως αυτή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.50.



Σχήμα 3.50: Η θέση ισορροπίας για μία τυπική κατάσταση φόρτωσης

3.7. Έλεγχος άθικτης ευστάθειας και ευστάθειας μετά από βλάβη

Επόμενο βήμα της παρούσας μεθοδολογίας προμελέτης αποτελεί ο έλεγχος της ευστάθειας τόσο στην άθικτη κατάσταση όσο και μετά από βλάβη, με σκοπό τον προσδιορισμό του περιθωρίου ευστάθειας. Ως περιθώριο ευστάθειας νοείται η ελάχιστη διαφορά μεταξύ των απαιτούμενων τιμών του μετακεντρικού ύψους GM, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των κανονισμών⁹, από τις αντίστοιχες υπάρχουσες τιμές για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης. Έτσι, το περιθώριο ευστάθειας μίας σχεδίασης λαμβάνεται ίσο με:

$$\Delta GM = \min(\Delta GM^{int}, \Delta GM^{dam}) \quad (3.62)$$

όπου ΔGM^{int} και ΔGM^{dam} τα περιθώρια ευστάθειας που προκύπτουν από τη μελέτη της άθικτης ευστάθειας και της ευστάθειας μετά από βλάβη, αντίστοιχα.

Φυσικά, η τιμή του περιθωρίου ευστάθειας πρέπει να είναι τουλάχιστον θετική, προκειμένου μία σχεδίαση να είναι αποδεκτή.

3.7.1. Άθικτη ευστάθεια

Η μελέτη της ευστάθειας στην άθικτη κατάσταση πραγματοποιείται μέσω μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας κατά την οποία ελέγχεται η ικανοποίηση των κριτηρίων για κάθε κατάσταση φόρτωσης και προσδιορίζονται η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους (KG_{max}) και η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του μετακεντρικού ύψους (GM_{min}). Το περιθώριο ευστάθειας ΔGM^{int} που αφορά την άθικτη κατάσταση πλεύσης του πλοίου προκύπτει ως η ελάχιστη τιμή των διαφορών:

⁹ HSCC - MSC 73/21 Annexes 5 & 8

$$\begin{aligned}\Delta GM_i^{int} &= GM_i - GM_{\min_i}^{int}, \quad i = 1, \dots, N \\ \Delta GM^{int} &= \min(\Delta GM_1^{int}, \dots, \Delta GM_N^{int})\end{aligned}\quad (3.63)$$

όπου GM_i η υπάρχουσα τιμή του μετακεντρικού ύψους για την κατάσταση φόρτωσης i , $GM_{\min_i}^{int}$ η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή αντίστοιχα και $N=10$ ο αριθμός των καταστάσεων φόρτωσης.

Σύμφωνα με τον Κώδικα Ταχυπλών Σκαφών, η πλεύση ενός πλοίου στην άθικτη κατάσταση διακρίνεται σε τρεις φάσεις:

- Φάση εκτοπίσματος (displacement mode)
- Φάση μη-εκτοπίσματος (non-displacement mode)
- Μεταβατική Φάση (transitional mode)

Φάση εκτοπίσματος

Στη φάση αυτή και για κάθε κατάσταση φόρτωσης πρέπει να ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

1. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς (καμπύλη GZ) έως τη γωνία εγκάρσιας κλίσης $\theta=15^\circ$ δεν πρέπει να είναι μικρότερο από $0.07m \cdot rad$, όταν η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς εμφανίζεται για $\theta=15^\circ$ και δεν πρέπει να είναι μικρότερο από $0.055m \cdot rad$ έως $\theta=30^\circ$ όταν η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς εμφανίζεται για $\theta=30^\circ$ ή μεγαλύτερη. Όταν η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς εμφανίζεται για γωνίες κλίσης μεταξύ $\theta=15^\circ$ και $\theta=30^\circ$ το αντίστοιχο εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς δεν πρέπει να είναι μικρότερο από:

$$A = 0.055 + 0.001(30^\circ - \theta_{\max}) \quad (m \cdot rad)$$

όπου θ_{\max} η γωνία εγκάρσιας κλίσης, σε μοίρες, στην οποία εμφανίζεται η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς.

2. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς μεταξύ γωνιών εγκάρσιας κλίσης $\theta=30^\circ$ και $\theta=40^\circ$ ή της γωνίας κατάκλισης θ_f^* (εάν $\theta_f < 40^\circ$), δεν πρέπει να είναι μικρότερο από $0.03m \cdot rad$.

* μικρά ανοίγματα, μέσω των οποίων δεν είναι δυνατόν να προκληθεί προοδευτική κατάκλιση, θεωρούνται στεγανά.

3. Η τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς δεν πρέπει να είναι μικρότερη από $0.20m$, για γωνία εγκάρσιας κλίσης $\theta \geq 30^\circ$.
4. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς πρέπει να επιτυγχάνεται σε γωνία εγκάρσιας κλίσης $\theta \geq 15^\circ$.

5. Η τιμή του αρχικού μετακεντρικού ύψους GM_0 δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 0.15m.
6. Η γωνία εγκάρσιας κλίσης που προκαλείται λόγω μετακίνησης των επιβατών στην μία πλευρά του πλοίου δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 10° , λαμβάνοντας υπ' όψη ότι:
 - Η κατανομή των επιβατών δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 4 άτομα/m²
 - Το βάρος κάθε επιβάτη ισούται με 75kg
7. Το πλοίο πρέπει να ικανοποιεί το κριτήριο καιρού σύμφωνα με την παράγραφο 3.2 του κανονισμού A.749(18) του IMO, όπως αναθεωρήθηκε από τον κανονισμό MSC.75(69) και μεταβάλλεται από τον HSCC, σύμφωνα με τον οποίο:
 - το πλοίο εκτίθεται σε μία μόνιμη πλευρική πίεση λόγω ανέμου, η οποία ενεργεί κάθετα στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας και έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη ενός μόνιμου μοχλοβραχίονα l_{w1}
 - από την προκύπτουσα γωνία ισορροπίας θ_0^{**} , θεωρείται ότι το πλοίο υπό την επίδραση των κυματισμών περιστρέφεται περί τον διαμήκη άξονα συμμετρίας κατά γωνία θ_1 με φορά προς την προσήνεμη πλευρά
 - τη στιγμή εκείνη ενεργεί στο πλοίο ριπή ανέμου που έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός δεύτερου μοχλοβραχίονα l_{w2}
 - κάτω από αυτές τις συνθήκες το εμβαδόν b πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το εμβαδόν a , όπως αυτά ορίζονται στο Σχήμα 3.51
 - η επίδραση των ελευθέρων επιφανειών πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη

** η γωνία θ_0 πρέπει να έχει μία ανώτερη επιτρεπόμενη τιμή, προτείνεται αυτή να είναι 16° ή το 80% της γωνίας διαβροχής καταστρώματος

Οι μοχλοβραχίονες l_{w1} και l_{w2} υπολογίζονται όπως παρακάτω:

$$l_{w1} = \frac{PAZ}{1000g\Delta} (m) \quad \text{και} \quad l_{w2} = 1.5l_{w1} (m) \quad (3.64)$$

όπου:

$$P(N/m^2) \text{ η πίεση που ασκεί ο άνεμος: } P = 500(V_w / 26)^2,$$

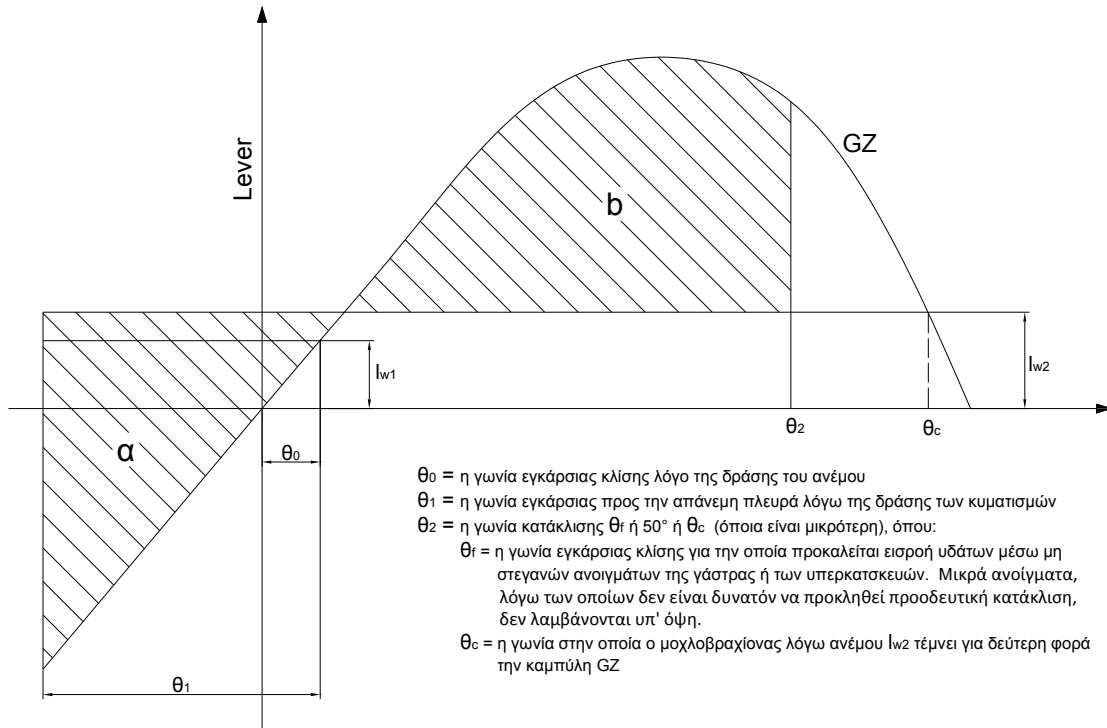
$V_w(m/s)$ η ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη κατάσταση που μπορεί να βρεθεί το πλοίο,

$A(m^2)$ η προβεβλημένη στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας επιφάνεια του πλοίου που εκτίθεται στον άνεμο και βρίσκεται πάνω από την ίσαλο σχεδίασης,

$Z(m)$ η κατακόρυφη απόσταση από το κέντρο της επιφάνειας A έως το κέντρο της προβεβλημένης στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας πλευρικής επιφάνειας

η οποία βρίσκεται κάτω από την ίσαλο σχεδίασης ή εναλλακτικά έως το μισό του βυθίσματος,

$\Delta(t)$ το εκτόπισμα και $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ η επιτάχυνση της βαρύτητας



Σχήμα 3.51: Το κριτήριο καιρού σύμφωνα με τον κανονισμό A.749 του IMO

Για την εύρεση της πίεσης που ασκεί ο άνεμος (3.64), θεωρείται στην παρούσα εργασία ταχύτητα ανέμου $V_w = 12.3 \text{ m/s}$, η οποία αντιστοιχεί σε άνεμο 6 Beaufort. Η πίεση που ασκείται από πλευρικό άνεμο αυτής της ταχύτητας προκύπτει ίση με 112 N/m^2 . Η τιμή αυτή μπορεί να μεταβληθεί, προκειμένου να μελετηθεί το παρόν κριτήριο σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου.

Η γωνία θ_1 υπολογίζεται από την εξίσωση $\theta_1 = 109kX_1X_2\sqrt{rs}$ (deg.) όπου k, X_1, X_2, s, r συντελεστές που εξαρτώνται από γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου και προκύπτουν από πίνακες και σχέσεις του εγχειριδίου των κανονισμών¹⁰.

Φάση μη-εκτοπίσματος

Στη φάση αυτή το πλοίο έχει αναπτύξει τέτοια ταχύτητα ώστε επάνω στη γάστρα του επιδρούν υδροδυναμικές πιέσεις. Για την κατάσταση αυτή οι κανονισμοί απαιτούν τη διεξαγωγή μίας σειράς από δοκιμές¹¹ κατά τις οποίες είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι μέγιστες κινήσεις του πλοίου και τα όρια λειτουργίας αυτού.

¹⁰ IMO – Code on Intact Stability Ch.3 Sec.3.2.2.3

¹¹ MSC73/21 Annex5, Ch.5 18

Μεταβατική φάση

Η φάση αυτή αναφέρεται στη μετάβαση του πλοίου από τη φάση εκτοπίσματος στη βάση μη-εκτοπίσματος και αντίστροφα. Οι κανονισμοί απαιτούν την ελαχιστοποίηση του χρόνου μετάβασης από τη μία κατάσταση στην άλλη εκτός εάν αποδειχθεί μέσω δοκιμών ότι δεν προκύπτουν προβλήματα ευστάθειας κατά τη διάρκεια της φάσης αυτής.

3.7.2. Ευστάθεια μετά από βλάβη

Η μελέτη της ευστάθειας μετά από βλάβη αφορά κάθε κατάσταση φόρτωσης και κάθε πιθανό σενάριο βλάβης, όπως αυτά προδιαγράφονται στον Κώδικα Ταχυπλόων Σκαφών. Μέσω μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας, προσδιορίζεται, για κάθε αρχική κατάσταση φόρτωσης, η μέγιστη επιτρεπόμενη και η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του κέντρου βάρους (KG_{max}) και του μετακεντρικού ύψους (GM_{min}), αντίστοιχα. Το περιθώριο ευστάθειας ΔGM^{dam} που αφορά την κατάσταση πλεύσης του πλοίου μετά από βλάβη προκύπτει ως η ελάχιστη τιμή των διαφορών ΔGM_i^{dam} :

$$\begin{aligned}\Delta GM_i^{dam} &= GM_i - GM_{min_i}^{dam}, \quad i = 1, \dots, N \\ \Delta GM^{dam} &= \min(\Delta GM_1^{dam}, \dots, \Delta GM_N^{dam})\end{aligned}\quad (3.65)$$

όπου GM_i η υπάρχουσα τιμή της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους για την κατάσταση φόρτωσης i , $GM_{min_i}^{dam}$ η ελάχιστη απαιτούμενη τιμή αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα δυνατά σενάρια βλάβης και $N = 10$ ο αριθμός των καταστάσεων φόρτωσης.

Σύμφωνα με τον Κώδικα Ταχυπλόων Σκαφών, τα σενάρια βλαβών που πρέπει να μελετηθούν διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Πλευρική βλάβη (Side Damage)
- Βλάβη στον πυθμένα σε περιοχές ευάλωτες σε Raking Damage
- Βλάβη στον πυθμένα σε περιοχές μη ευάλωτες σε Raking Damage

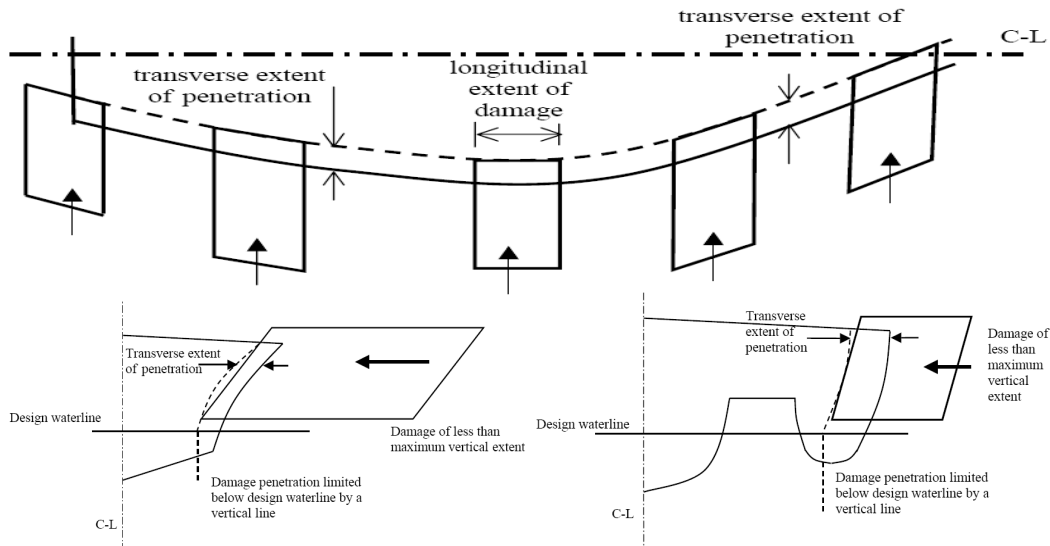
Raking Damage καλείται η βλάβη στην περιοχή του πυθμένα (ύφαλα) η οποία έχει μεγάλη διαμήκη έκταση και μικρή πλευρική εισχώρηση.

Πλευρική βλάβη

Πλευρική βλάβη μπορεί να υποστεί ένα ή περισσότερα στεγανά διαμερίσματα οπουδήποτε εντός της γάστρας του πλοίου. Το «σχήμα» της βλάβης αυτής θεωρείται ως στερεό παραλληλεπίπεδο το οποίο εισχωρεί στην πλευρά του πλοίου (Σχήμα 3.52). Τα όρια της βλάβης προσδιορίζονται ως εξής:

1. η διαμήκης έκταση της βλάβης είναι ίση με $0.75\nabla^{1/3}$ ή $(3 + 0.225\nabla^{1/3})$ ή $11m$, οποιαδήποτε τιμή είναι μικρότερη.

2. η εγκάρσια έκταση της βλάβης είναι ίση με $0.2\nabla^{1/3}$ από την πλευρά του πλοίου. Εάν υπάρχουν πλευρικές κατασκευές οι οποίες όμως δεν προσδίδουν πλευστότητα η παραπάνω τιμή μπορεί να μειωθεί έως το $0.12\nabla^{1/3}$.
3. η κατακόρυφη έκταση της βλάβης είναι ίση με το μέγιστο ύψος του πλοίου όπου $\nabla (m^3)$ ο όγκος του πλοίου που αντιστοιχεί στο βύθισμα σχεδίασης

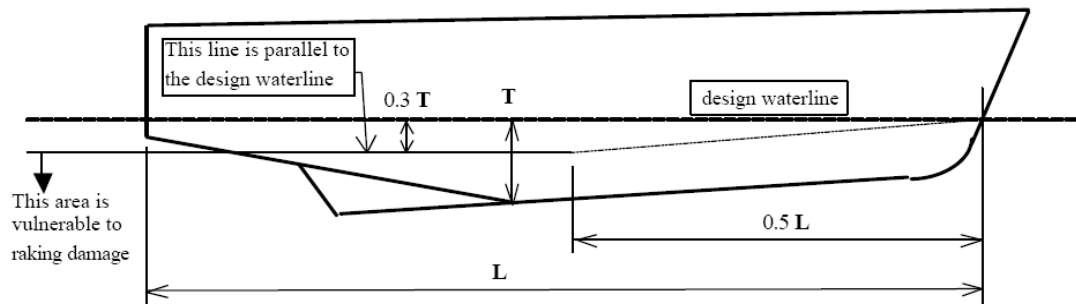


Σχήμα 3.52: Το «σχήμα» της πλευρικής βλάβης θεωρείται ως στερεό παραλληλεπίπεδο

Βλάβη σε περιοχές του πυθμένα ευάλωτες σε Raking Damage

Κάθε περιοχή της επιφάνειας της γάστρας θεωρείται ότι είναι ευπαθής σε αυτού του είδους τη βλάβη εάν:

1. βρίσκεται σε επαφή με το νερό όταν το πλοίο ταξιδεύει με την ταχύτητα υπηρεσίας σε ήρεμο νερό και
2. βρίσκεται κάτω από τα δύο επίπεδα όπως αυτά ορίζονται στο Σχήμα 3.53



όπου T = το βύθισμα που αντιστοιχεί στο εκτόπισμα σχεδίασης εξαιρώντας κάθε κατασκευή που δεν προσδίδει πλευστότητα

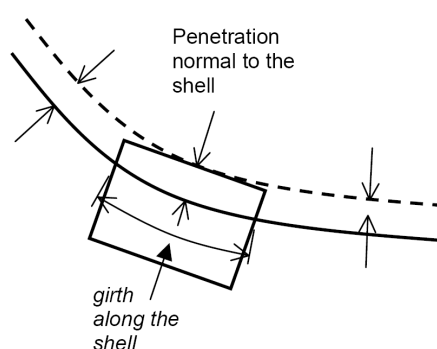
Σχήμα 3.53: Περιοχή του πυθμένα που είναι ευάλωτη σε raking damage

Το «σχήμα» της βλάβης αυτής θεωρείται ως στερεό ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο εισχωρεί στα ύφαλα του πλοίου (Σχήμα 3.54). Τα όρια της βλάβης προσδιορίζονται ως εξής:

1. δύο διαφορετικά διαμήκη όρια βλάβης πρέπει να εξεταστούν ξεχωριστά
 - i. 55% του μήκους L μετρημένο από το πιο πρωραίο σημείο της γάστρας που βρίσκεται κάτω από την ίσαλο σχεδίασης
 - ii. 35% του μήκους L για $L \geq 50m$ ή $(0.5L+10)\%$ για $L < 50m$, εφαρμοζόμενο οπουδήποτε εντός των ορίων του μήκους

όπου L είναι το συνολικό μήκος της περιοχής της γάστρας που βρίσκεται κάτω από το νερό όταν το πλοίο ισορροπεί σε ήρεμο νερό με μηδενική ταχύτητα.

2. η εισχώρηση της βλάβης είναι ίση με $0.04 \nabla^{1/3}$ ή $0.5m$ από τη γάστρα του πλοίου, όποια τιμή είναι μικρότερη
3. η παραπάνω έκταση πρέπει να συνδυάζεται με μία λωρίδα πλάτους $0.1 \nabla^{1/3}$ μετρώμενη κατά μήκος του ελάσματος της γάστρας. Σε καμία περίπτωση η εγκάρσια ή κατακόρυφη έκταση της βλάβης δεν πρέπει να είναι εκτός της περιοχής του πυθμένα που είναι ευάλωτη σε Raking Damage, όπως αυτή ορίζεται στο Σχήμα 3.53. Όπου $\nabla (m^3)$ είναι ο όγκος του πλοίου που αντιστοιχεί στο βύθισμα σχεδίασης



Σχήμα 3.54: Το «σχήμα» της βλάβης στον πυθμένα θεωρείται ως στερεό ορθογώνιο παραλληλόγραμμο

Ειδικά για πλοία Κατηγορίας Β πρέπει να εξεταστεί η ευστάθεια του πλοίου για βλάβη διαμήκους έκτασης έως και το 100% του μήκους L , έχοντας τα παραπάνω εγκάρσια και κατακόρυφα όρια. Υπενθυμίζεται ότι, πλοίο Κατηγορίας Β είναι κάθε ταχύπλοο σκάφος το οποίο μεταφέρει πάνω από 450 επιβάτες και έχει τη δυνατότητα ασφαλούς πλοήγησης, μετά από βλάβη σε συστήματα πρόωσης ή ασφάλειας, που προκαλείται από την κατάκλιση οποιουδήποτε διαμερίσματος.

Βλάβη σε περιοχές του πυθμένα μη ευάλωτες σε Raking Damage

Η μορφή της βλάβης αυτής πρέπει να εξετάζεται σε κάθε περιοχή της επιφάνειας της γάστρας η οποία βρίσκεται κάτω από την ίσαλο σχεδίασης και δεν θεωρείται ότι είναι ευπαθής σε Raking Damage. Το «σχήμα» της βλάβης αυτής θεωρείται ως στερεό ορθογώνιο πα-

ραλληλόγραμμο το οποίο εισχωρεί στην πλευρά του πλοίου (βλ. Σχήμα 3.54). Τα όρια της βλάβης προσδιορίζονται ως εξής:

1. η διαμήκης έκταση της βλάβης είναι ίση με $0.75\nabla^{1/3}$ ή $(3+0.225\nabla^{1/3})$ ή $11m$, οποιαδήποτε τιμή είναι μικρότερη
2. η εισχώρηση της βλάβης είναι ίση με $0.2\nabla^{1/3}$ από την πλευρά του πλοίου.
3. η παραπάνω εγκάρσια έκταση πρέπει να συνδυάζεται με μία κατακόρυφη λωρίδα έκτασης $0.2\nabla^{1/3}$ μετρώμενη κατά μήκος του ελάσματος της γάστρας.

όπου $\nabla (m^3)$ ο όγκος του πλοίου που αντιστοιχεί στο βύθισμα σχεδίασης

Η ευστάθεια του πλοίου πρέπει να εξετάζεται μεμονωμένα για κάθε ένα από τα τρία διαφορετικά είδη βλάβης και για κάθε κατάσταση φόρτωσης. Τα διαμερίσματα του πλοίου, στα οποία θεωρείται ότι εισέρχεται νερό λόγω βλάβης, πρέπει να έχουν τις εξής διαπερατότητες κατά όγκο:

Πίνακας 3.10: Διαπερατότητες κατ' όγκο διαμερισμάτων που υπόκεινται σε βλάβη

Διαμερίσματα που προορίζονται για	Διαπερατότητα (%)
ξηρά φορτία, αποθήκες	60
ενδιαίτηση	95
μηχανές, μηχανήματα	85
υγρά φορτία	0 ή 95*
οχήματα	90
κενοί χώροι	95
* οποιαδήποτε τιμή οδηγεί το πλοίο σε δυσμενέστερη κατάσταση	

Τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται για κάθε τύπο βλάβης, εκτός της περίπτωσης πλοίων Κατηγορίας Β των οποίων η περιοχή που είναι ευάλωτη σε Raking Damage υπόκειται σε βλάβη διαμήκους έκτασης ίση με το 100% του μήκους L , είναι τα ακόλουθα:

Στην τελική θέση ισορροπίας μετά τη βλάβη θα πρέπει:

1. Η ίσαλος επιφάνεια να βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 50% του σημαντικού ύψους κύματος, που αντιστοιχεί στην χειρότερη κατάσταση θάλασσας που μπορεί να βρεθεί το πλοίο, από οποιοδήποτε άνοιγμα μέσω του οποίου μπορεί να υπάρξει εισροή νερού.
2. Να υπάρχει θετικό ύψος εξάλων στις περιοχές που προορίζονται για την εκκένωση του σκάφους, μέσω των σωστικών
3. Το εύρος της εναπομένουσας θετικής ευστάθειας (θετικές τιμές του μοχλοβραχίονα επαναφοράς) θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15° , πέραν της γωνία ισορροπίας. Η τιμή αυτή μπορεί να μειωθεί έως τις 10° , εάν το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από

την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, όπως ορίζεται στο επόμενο κριτήριο, προσαυξηθεί κατά $15/range$, όπου $range$ σε μοίρες

4. Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς να είναι τουλάχιστον $0.015m \cdot rad$ για γωνίες εγκάρσιας κλίσης από τη γωνία ισορροπίας έως τη γωνία για την οποία προκαλείται προοδευτική κατάκλιση ή τις 27° , οποιαδήποτε τιμή είναι μικρότερη (περιοχή θετικής ευστάθειας)
5. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς εντός της περιοχής θετικής ευστάθειας να έχει τιμή τουλάχιστον $0.1m$
6. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, εντός της περιοχής θετικής ευστάθειας, λαμβάνοντας υπ' όψη τη ροπή που προκαλείται λόγω μετακίνησης των επιβατών στη μία πλευρά του πλοίου, να είναι τουλάχιστον ίση με:

$$GZ = \frac{\text{heeling moment}}{\text{displacement}} + 0.04 \text{ (m)} \quad (3.66)$$

7. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, εντός της περιοχής θετικής ευστάθειας, λαμβάνοντας υπ' όψη τη ροπή που προκαλείται λόγω της επίδρασης πλευρικού ανέμου, να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή της Εξίσωσης (3.66). Η πίεση $P(N/m^2)$ που ασκείται από τον άνεμο κάθετα στην πλευρά του πλοίου πρέπει να λαμβάνεται ίση με $P = 120(V_w / 26)^2$, όπου $V_w (m/s)$ η ταχύτητα του ανέμου που αντιστοιχεί στη δυσμενέστερη κατάσταση που μπορεί να βρεθεί το πλοίο. Ο μοχλοβραχίονας της ροπής ισούται με την κατακόρυφη απόσταση από το ένα δεύτερο του βυθίσματος, που αντιστοιχεί στην εκάστοτε αρχική άθικτη κατάσταση (κατάσταση φόρτωσης) έως το κέντρο της προβεβλημένης στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας πλευρικής επιφανείας πάνω από την ίσαλο.
8. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς, εντός της περιοχής θετικής ευστάθειας, λαμβάνοντας υπ' όψη τη ροπή που προκαλείται κατά τη διάρκεια της ταυτόχρονης καθέλκυσης όλων των σωστικών λέμβων, που βρίσκονται στη μία πλευρά του πλοίου, πλήρως επανδρωμένων, να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή της Εξίσωσης (3.66).
9. Η μέγιστη γωνία εγκάρσιας κλίσης που μπορεί να έχει το πλοίο να μην ξεπερνά τις 10° . Εάν αυτό είναι αδύνατον, τότε επιτρέπεται η τιμή αυτή να φτάσει τις 15° με την προϋπόθεση ότι το πλοίο τελικά θα ισορροπήσει στις 10° εντός χρονικού διαστήματος 15 λεπτών

Στα ενδιάμεσα στάδια κατάκλισης και πριν το πλοίο ισορροπήσει θα πρέπει, για κάθε στάδιο:

10. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς να είναι τουλάχιστον $0.05m$
11. Το εύρος της θετικής ευστάθειας να είναι τουλάχιστον 7°
12. Η μέγιστη γωνία εγκάρσιας κλίσης που μπορεί να έχει το πλοίο να μην ξεπερνά τις 15°

Τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούν τα πλοία Κατηγορίας Β, στην περίπτωση που εξετάζεται η ευστάθειά τους έπειτα από βλάβη της περιοχής που είναι ευάλωτη σε Raking Damage διαμήκους έκτασης ίση με το 100% του μήκους L , είναι τα ακόλουθα:

Στην τελική θέση ισορροπίας μετά τη βλάβη θα πρέπει:

1. Η μέγιστη γωνία εγκάρσιας κλίσης που μπορεί να έχει το πλοίο να μην ξεπερνά τις 20°
2. Το εύρος της εναπομένουσας θετικής ευστάθειας (θετικές τιμές του μοχλοβραχίονα επαναφοράς) θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 15° , πέραν της γωνία ισορροπίας.
3. Η επιφάνεια κάτω από την καμπύλη του μοχλοβραχίονα επαναφοράς να είναι τουλάχιστον $0.015m \cdot rad$ για γωνίες εγκάρσιας κλίσης από τη γωνία ισορροπίας έως τη γωνία για την οποία προκαλείται προοδευτική κατάκλιση
4. Να υπάρχει θετικό ύψος εξάλων στις περιοχές που προορίζονται για την εκκένωση του σκάφους, μέσω των σωστικών

Στα ενδιάμεσα στάδια κατάκλισης και πριν το πλοίο ισορροπήσει θα πρέπει, για κάθε στάδιο:

5. Η μέγιστη τιμή του μοχλοβραχίονα επαναφοράς να είναι τουλάχιστον 0.05m
6. Το εύρος της θετικής ευστάθειας να είναι τουλάχιστον 7°

3.8. Οικονομική αξιολόγηση

Τελευταίο βήμα της παρούσας μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης αποτελεί η οικονομική αξιολόγηση του πλοίου, η οποία ανάγεται στον προσδιορισμό των τιμών της Καθαρής Παρούσας Αξίας - ΚΠΑ (Net Present Value – NPV) και του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου - EAN (Required Freight Rate – RFR), για ένα προκαθορισμένο σενάριο λειτουργίας.

Η Καθαρή Παρούσα Αξία εκφράζει την αξία που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των ετήσιων καθαρών χρηματοροών που προβλέπονται σε ολόκληρο το χρονικό ορίζοντα ζωής μίας επένδυσης και ισούται γενικά με:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_F}{(1+r)^t} \quad (3.67)$$

όπου t το έτος στο οποίο μετράται η χρηματοροή, n η συνολική διάρκεια της οικονομικής ζωής της επένδυσης σε έτη, C_F το συνολικό ποσό των χρηματοροών το έτος t (έσοδα – έξοδα), r το επιτόκιο αναγωγής (κόστος κεφαλαίου της παραγωγικής μονάδας).

Η τεχνική της Καθαρής Παρούσας Αξίας μετατρέπει όλα τα κόστη (εκροές) και τα οφέλη (εισροές) της επένδυσης σε σημερινές αξίες, δηλαδή εκφράζει το καθαρό όφελος ή κόστος στη χρονική στιγμή που λαμβάνεται η απόφαση.

Εάν υποθέσουμε ότι ένα πλοίο μεταφέρει X_t φορτίο τη χρονική περίοδο t και ότι ο ναύλος F που εισπράττεται παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του πλοίου τότε η Εξίσωση (3.67) γίνεται:

$$\text{ΚΠΑ} = -C_0 + \frac{C_s}{(1+r)^n} + \sum_{t=1}^n \frac{(FX_t - C_t)}{(1+r)^t} \quad (3.68)$$

όπου C_t τα συνολικά έξοδα της επένδυσης «πλοίο» το έτος t , για $t=0$ $C_t = C_0$ το κόστος ναυπήγησης και C_s η αξία του πλοίου το τελευταίο έτος n της οικονομικής του εκμετάλλευσης.

Ο ναύλος F^* για τον οποίο μηδενίζεται η Εξίσωση (3.68), ονομάζεται Ελάχιστος Απαιτούμενος Ναύλος – EAN (Required Freight Rate – RFR). Ο EAN εκφράζει τον ελάχιστο ναύλο που πρέπει να εξασφαλίσει το πλοίο καθ' όλη τη διάρκεια της οικονομικής του ζωής ώστε αυτό να θεωρείται οριακά κερδοφόρα επένδυση.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η οικονομική αξιολόγηση μίας σχεδίασης, απαιτείται η προδιαγραφή ενός σεναρίου που αφορά την επένδυση (όροι δανεισμού) και ενός δεύτερου που αφορά τη λειτουργία του πλοίου (έσοδα, έξοδα). Ο ορισμός των δύο αυτών σεναρίων πραγματοποιείται μέσω ενός αριθμού παραμέτρων (παραδοχών), όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.11: Παράμετροι για την οικονομική αξιολόγηση της σχεδίασης

α/α	Περιγραφή	
Παράμετροι που αφορούν την απόκτηση του πλοίου		
1	Κόστος κτήσης	Ship price
2	Περίοδος έως την παράδοση	Years to delivery
3	Προεξοφλητικό επιτόκιο	Discount rate
4	Δανειακό κεφάλαιο (% κόστους κτήσης)	Loan (% ship price)
5	Αριθμός δόσεων ανά έτος	Building instalments per year
6	Διάρκεια δανείου	Loan years
7	Επιτόκιο δανείου	Loan interest
8	Έξοδα δανείου (% δανείου)	Loan fees (% loan)
Παράμετροι που αφορούν τη λειτουργία του πλοίου		
9	Περίοδος λειτουργίας ως την απόσυρση	Years in service
10	Μέσος ετήσιος ναύλος ανά επιβάτη Α' θέσης	Passenger Freight A' class
11	Μέσος ετήσιος ναύλος ανά επιβάτη Β' θέσης ή VIP	Passenger Freight B' class or VIP
12	Μέσος ετήσιος ναύλος ανά επιβάτη Γ' θέσης	Passenger Freight C' class
13	Μέσος ετήσιος ναύλος ανά ΙΧ αυτοκίνητο	Private car freight
14	Μέσος ετήσιος ναύλος ανά ΦΓ αυτοκίνητο	Truck freight
15	Αναχωρήσεις ανά έτος	Departures per year
16	Ετήσιο κόστος πληρώματος	Annual crew cost
17	Απόσταση ταξιδιού	Miles per trip
18	Καθαρό κέρδος από υπηρεσίες σε επιβάτες ανά ταξίδι και επιβάτη	Income from services to passengers
19	Ετήσιος μέσος όρος πληρότητας επιβατών	Passengers occupancy
Συνεχίζεται. . .		

α/α	Περιγραφή	
20	Ετήσιος μέσος όρος πληρότητας ΙΧ αυτοκινήτων	Private cars occupancy
21	Ετήσιος μέσος όρος πληρότητας ΦΓ αυτοκινήτων	Trucks occupancy
22	Κρατική επιχορήγηση ανά ταξίδι	State subsidy per trip
23	Τιμή μεταπώλησης (% κτήσης νέας κατασκευής)	Selling price (% of new building cost)
24	Κόστος καυσίμων και λιπαντικών ανά ταξίδι	Fuel cost per trip
25	Κόστος ελλιμενισμού ανά ταξίδι	Port cost per trip
26	Ετήσιο κόστος συντήρησης (% κόστους κτήσης)	Annual maintenance cost (% of building cost)
27	Ποσοστιαία ετήσια αύξηση κόστους συντήρησης	Maintenance cost escalation
28	Ετήσιο κόστος ασφάλισης (% κόστους κτήσης)	Insurance & overhead costs (% of building cost)
29	Ετήσιος φορολογικός συντελεστής κέρδους	Tax rate % of profits

Το σενάριο λειτουργίας έχει ετήσια βάση και θεωρείται ότι παραμένει αμετάβλητο καθ' όλη τη διάρκεια της οικονομικής ζωής του πλοίου. Έτσι μεταξύ άλλων, ορίζονται η απόσταση των λιμένων μεταξύ των οποίων έχει δρομολογηθεί το πλοίο, οι πληρότητες και οι ναύλοι των επιβατών και των οχημάτων κά. Μέσω της παρούσας μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, υπάρχει η δυνατότητα ορισμού πολλών οικονομικών περιόδων ανά έτος (π.χ. χαμηλή, μεσαία, υψηλή), διαφορετικής διάρκειας η κάθε μία, στις οποίες μεταβάλλονται τόσο οι ναύλοι όσο και οι πληρότητες επιβατών και οχημάτων. Επίσης οι πληρότητες μπορεί να ορίζονται είτε ως ποσοστό της μεταφορικής ικανότητας (μέγιστη τιμή) είτε ως απόλυτες τιμές. Με την επιλογή αυτή, αποφεύγεται η υπερεκτίμηση της τιμής της ΚΠΑ των μεγάλων πλοίων, δεδομένου ότι σε πολλές ακτοπλοϊκές γραμμές ο φόρτος επιβατών και οχημάτων είναι λίγο πολύ συγκεκριμένος.

Τα κόστη τα οποία λαμβάνονται υπόψη στους υπολογισμούς της ΚΠΑ και του EAN είναι τα ακόλουθα:

Κόστος κατασκευής

Το κόστος ναυπήγησης μπορεί να εκτιμηθεί μέσω συντελεστών κόστους (Πίνακας 3.12).

Πίνακας 3.12: Συντελεστές κόστους ναυπήγησης

α/α	Item	Reference Value	Work		Material
			α_j	b_j	c_j
1	Hull Structure Aluminium	$W_{ST,A}$ (t)	193.00 h/t	23.0 €/h	5.50 €/kg
2	Hull Structure Steel	$W_{ST,S}$ (t)	64.00 h/t	22.0 €/h	1.10 €/kg
3	Outfitting Public	A_p (m ²)	45.00 h/m ²	23.0 €/h	2.00 €/m ²
4	Outfitting Cabins	A_c (m ²)	20.80 h/m ²	27.0 €/h	1.10 €/m ²
5	Machinery	P_T (kW)	4.25 h/kW	29.0 €/h	0.30 €/kW
6	Technical	$LxBxD$ (m ³)	2.65 h/m ³	24.0 €/h	0.12 €/m ³
7	Other	$LxBxD$ (m ³)	1.02 h/m ³	25.0 €/h	0.08 €/m ³

WST = το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, A_p = η επιφάνεια ενδιαίτησης δημόσιας χρήσης, A_c = η επιφάνεια ενδιαίτησης ιδιωτικής χρήσης, P_T = η εγκατεστημένη ισχύ κυρίων μηχανών και ηλεκτρογεννητριών, $LxBxD$ = (μήκος) x (πλάτος) x (κοίλο), κοίλο = το ύψος του πλοίου έως το πρώτο κατάστρωμα επιβατών

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα προέκυψαν έπειτα από ανάλυση στοιχείων που προέρχονται από την ευρωπαϊκή αγορά ενώ αποτελούν παραμέτρους σχεδίασης και υπάρχει η δυνατότητα να μεταβληθούν από το χρήστη

Το συνολικό κόστος ναυπήγησης σε € , υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$C_0 = (1+i)^{t_D-t_R} \sum_{j=1}^6 r v_j (a_j b_j + c_j), \quad j=1, \dots, 7 \quad (3.69)$$

όπου i είναι ο πληθωρισμός, t_D το έτος παράδοσης της νέας κατασκευής, και $t_R = 2005$ η ημερομηνία στην οποία αναφέρονται οι τιμές του παραπάνω πίνακα.

Κόστος καυσίμων και λιπαντικών

Το κόστος καυσίμων και λιπαντικών ανά ταξίδι μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

- Κόστος καυσίμων κυρίων μηχανών (€):

$$C_{FO} = (P_D b_D + P_T b_T) \frac{R_S}{V_S} c_{FO} \quad (3.70)$$

όπου P_D (kW) και b_D (t/kWh) η ισχύς και η ειδική κατανάλωση καυσίμου των κυρίων μηχανών Diesel, ενώ P_T (kW) και b_T (t/kWh) οι αντίστοιχες τιμές για αεριοστρόβιλο, V_S (kn) η ταχύτητα υπηρεσίας, R_S (SM) η απόσταση του ταξιδιού και c_{FO} ($€/t$) η τιμή αγοράς του καυσίμου.

- Κόστος καυσίμου ηλεκτρογεννητριών (€):

Θεωρείται ότι κατά την παραμονή του στο λιμάνι το πλοίο καταναλώνει τη μισή από τη συνολική ηλεκτρική ισχύ που χρειάζεται εν πλω. Έτσι το κόστος ανά ταξίδι είναι:

$$C_{DO} = P_{EL} b_{DO} \frac{R_S}{V_S} c_{DO} + 0.5 P_{EL} b_{DO} t_p c_{DO} \quad (3.71)$$

όπου P_{EL} (kW) η ηλεκτρική ισχύς, t_p (h) ο χρόνος παραμονής στο λιμάνι, b_{DO} (t/kWh) η ειδική κατανάλωση καυσίμου και c_{DO} ($€/t$) η τιμή αγοράς του.

- Κόστος λιπαντικών (€):

$$C_{LO} = ((P_D + P_{EL}) b_{LOD} c_{LOD} + P_T b_{LOT} c_{LOT}) \frac{R_S}{V_S} + 0.5 P_{EL} b_{LOD} t_p c_{LO} \quad (3.72)$$

όπου b_{LOD} (t/kWh) και b_{LOT} (t/kWh) οι ειδικές καταναλώσεις λιπαντικού και c_{LOD} ($€/t$), c_{LOT} ($€/t$) οι τιμές αγοράς, για μηχανές Diesel και αεριοστρόβιλους, αντίστοιχα.

Το συνολικό κόστος καυσίμων και λιπαντικών ανά ταξίδι προκύπτει από το άθροισμα:

$$CT_F = C_{FO} + C_{LO} + C_{DO} \quad (3.73)$$

Κόστος μισθοδοσίας πληρώματος

Τα ετήσια έξοδα που αφορούν τη μισθοδοσία του πληρώματος υπολογίζονται με βάση τη σύνθεση και τις διατάξεις της Εθνικής Νομοθεσίας¹². Οι μισθοί αναφοράς που υπάρχουν στην Εθνική Σύμβαση Εργασίας αναπροσαρμόζονται στο παρόν έτος με βάση τις νόμιμες αυξήσεις και τον πληθωρισμό.

Λοιπά κόστη

- Κόστος ελλιμενισμού:

Τα έξοδα ελλιμενισμού ανά ταξίδι μπορεί να υπολογιστούν με βάση τις παρακάτω εξισώσεις, όπως αυτές προέκυψαν από στοιχεία της ελληνικής ακτοπλοΐας.

$$C_P = \begin{cases} \text{Τέλη κατάπλου} & = 0.025GRT \quad (\text{€}) \\ + \\ \text{Τέλη πρυμνοδέτησης} & = 0.085L_{OA} \quad (\text{€}) \end{cases} \quad (3.74)$$

- Κόστος συντήρησης:

Τα ετήσια έξοδα συντήρησης υπολογίζονται με τη βοήθεια συντελεστών κόστους, ως εξής:

$$C_M(t) = k_1(1 + k_2t)C_0 \quad (3.75)$$

όπου k_1 ποσοστό του κόστους συντήρησης ως προς το κόστος κατασκευής, k_2 ποσοστιαία ετήσια αύξηση του κόστους συντήρησης το έτος t και C_0 το κόστος κατασκευής.

- Κόστος ασφάλισης:

Τα ετήσια έξοδα ασφάλισης υπολογίζονται επίσης με τη χρήση συντελεστών κόστους, ως εξής:

$$C_I = kC_0 \quad (3.76)$$

όπου k ποσοστό του κόστους ασφάλισης ως προς το κόστος κατασκευής.

3.9. Χαρακτηριστικές Εφαρμογές Παραμετρικής Σχεδίασης

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές εφαρμογές της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, η οποία αναλύεται παραπάνω. Οι εφαρμογές αυτές αφορούν τη σχεδίαση δύο ταχύπλων μονόγαστρων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους,

¹² ΥΑ3525.5/02/2005

λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία από υπαρκτές κατασκευές. Στόχος είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης με τα αντίστοιχα πραγματικά χαρακτηριστικά μεγέθη των πλοίων. Όπως φαίνεται στους αντίστοιχους πίνακες η απόκλιση των τιμών μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική δεδομένου ότι η μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης αφορά το στάδιο της προμελέτης. Η σύγκριση αφορά και τη χρήση διαφορετικής μορφής γάστρας, NTUA και NPL, από την οποία και διαφαίνεται γενικά ότι η επιλογή της δεύτερης οδηγεί σε πιο ογκώδη πλοία με περίσσεια ωφέλιμου όγκου. Φυσικά, αυτό δεν χαρακτηρίζει όλα τα πλοία με μορφή γάστρας βασισμένη στη συστηματική σειρά NPL, αλλά προφανώς οφείλεται στην παρούσα παραμετροποίηση.

3.9.1. Παραμετρική Σχεδίαση Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου μεσαίου μεγέθους

Στην εφαρμογή αυτή παρουσιάζεται η παραμετρική σχεδίαση ενός μεσαίου μεγέθους μονόγαστρου Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με ένα υπαρκτό πλοίο¹³ ίδιου μεγέθους και μεταφορικής ικανότητας.

Το πλοίο αυτό έχει μήκος μεταξύ καθέτων 88.0 m, πλάτος 17.1 m και βύθισμα σχεδίασης 2.6 m. Οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη ως προς τη μεταφορική ικανότητα είναι 710 επιβάτες και 120 ΙΧ αυτοκίνητα σε συνδυασμό με 4 φορτηγά ή λεωφορεία των 15 τόνων. Έτσι, για δεδομένο αριθμό επιβατών υπολογίζονται αυτόματα τα καταστρώματα και οι χώροι ενδιάμεσης. Επίσης για δεδομένο αριθμό ΙΧ αυτοκινήτων υπολογίζονται αυτόματα ο αριθμός και οι χώροι μεταφοράς οχημάτων. Σημειώνεται επίσης ότι, η εφαρμογή αφορά την υλοποίηση δύο σχεδιάσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μορφές γάστρας προερχόμενες από τις συστηματικές σειρές NTUA και NPL, ενώ το υλικό κατασκευής και στις δύο περιπτώσεις είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (AH36) έως το πρώτο κατάστρωμα επιβατών και αλουμίνιο (AL5038) από εκεί και πάνω.



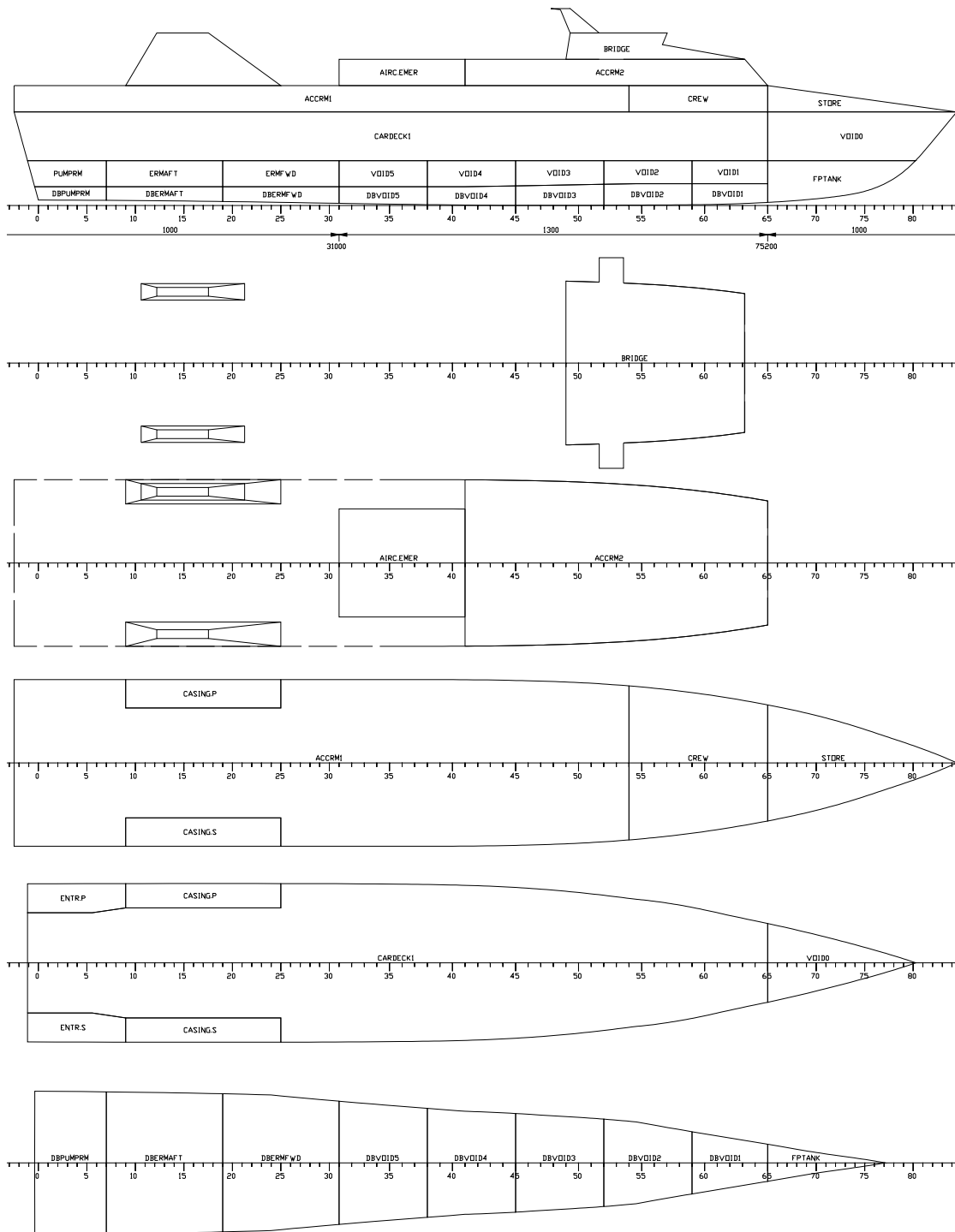
Σχήμα 3.55: Το ταχύπλοο Ε/Γ-Ο/Γ πλοίο «Viking»

¹³ MDV 1200 class fast ferry: "Viking" (ex-"SuperSeaCat Two")

NTUA	HULL.SERIES	(VALUES = NTUA, NPL)
AUTO	TBHDS.CALC.METHOD	(VALUES = AUTO, SEMI, MANUAL)
INPUT	CALC.PASSNUMB.FROM	(VALUES = INPUT, ACCAREA)
INPUT	CALC.CARSNUMB.FROM	(VALUES = INPUT, CARAREA)
AUTO	CALC.CREWNUMB.FROM	(VALUES = INPUT, AUTO)
YES	TRUCKS	(VALUES = YES, NO)
NO	PLATDECK.CRT	(VALUES = YES, NO)
SIDE	CASING	(VALUES = CENTER, SIDE)
88	LWLNEW	(LENGTH BETWEEN PERP.)
17.10	BEAM	(BREADTH MAX)
2.6	TDWLNEW	(DESIGN WATERLINE)
2.0	FREEBOARD	(FREEBOARD TO MAIN DECK)
40	SPEED	(SPEED IN KN)
2.5	HEIGHTCARDK	(MAIN CAR DECK HEIGHT FOR PRIV. CARS LOAD)
2.7	HEIGHTACCDK	(ACCOMMODATION DECKS HEIGHT)
2.1	HEIGHTPLATDK	(PLATFORM DECK HEIGHT)
1	CARDECKSABMAINDK	(IGNORED IF CALC.CARSNUMB.FROM='INPUT')
2	ACCDECKS	(IGNORED IF CALC.PASSNUMB.FROM='INPUT')
2	NUMOFENGINEROOMS	(NUMBER OF ENGINE ROOMS)
4	NUMOFENGINES	(MINIMUM NUMBER OF MAIN ENGINES)
0.7	CASING.LCOEF	(CASING LENGTH = CASING.LCOEF X EN.RMS.LTOT)
0.2	CASING.BCOEF	(CASING BREADTH = CASING.BCOEF X BMAX.MAINDK)
10	STAIRSLENGTH	(PASS ENTRANCE LENGTH)
3	STAIRSBREADTH	(PASS ENTRANCE BREADTH)
120	PRIVCARS.INPUT	(IGNORED IF CALC.CARSNUMB.FROM='CARAREA')
28	CREW.INPUT	(IGNORED IF CALC.CREWNUMB='INPUT')
710	PASS.INPUT	(IGNORED IF CALC.CARSNUMB.FROM='ACCAREA')
2.5	SWH	(SIGNICANT WAVE HEIGHT)
4.2	VHCLLENG.PRIVC	(PRIVATE CARS LENGTH)
1.7	VHCLBEAM.PRIVC	(PRIVATE CARS BEAM)
16.0	VHCLLENG.TRUCK	(TRUCKS LENGTH)
2.5	VHCLBEAM.TRUCK	(TRUCKS BEAM)
1.2	VHCLWGHT.PRIVC	(PRIVATE CARS MEAN WEIGHT)
15	VHCLWGHT.TRUCK	(DESIRABLE MEAN TRUCK WEIGHT)
4	TRUCKS.INPUT	(DESIRABLE TRUCKS CAPACITY)
1	STEPNORM	(WEB STEP BETWEEN ENG.ROOMS FWD BHD & COLBHD)
1	STEPFP	(WEB STEP FWD OF COLLISION BHD)
1	STEPMER	(WEB STEP AFT OF ENG. ROOMS FWD BHD)
1	FRSP1	(FRAME SPACING AFT OF ENG. ROOMS FWD BHD)
1.3	FRSP2	(FRAME BETWEEN ENG.ROOMS FWD BHD & COLBHD)
1	FRSP3	(FRAME SPACING FWD OF COLLISION BHD)
0.6	SPACING.L	(SPACING FOR LONGITUDINAL STIFFENERS)
3	NUMOFGIRDERS	(NUM. OF GIRDERS ON DECKS !min=1 always odd!)
ALUSTEEL	MATERIAL	(VALUES = ALU, STEEL, ALUSTEEL)
ADK	REFMATDK	(VALUES = MDK (MainDeck), ADK(1st Acc. Deck))
0.61	F1A	(MATERIAL FACTOR - ALUMINIUM)
1.08	F1S	(MATERIAL FACTOR - STEEL)
PASSENGER	SERVICE	(VALUES = PASSENGER, CARFERRY, CARGO, PATROL, YACHT)
R1	CLASS	(VALUES = R0, R1, R2, R3, R4, R5R6)
3	OTHER.BHDS	(IF TBHDS.CALC.METHOD='SEMI' DON'T GIVE ER & COL BHD)
###		(IF='MANUAL' GIVE ALL BHDS, IF='AUTO' NOT USED)
55	FR.MAN.BHD1	(FRAME FOR ABOVE BHDS)
65	FR.MAN.BHD2	(FRAME FOR ABOVE BHDS)
75	FR.MAN.BHD3	(FRAME FOR ABOVE BHDS)
NO	SELSERVICE	(VALUES = YES, NO)
NO	GALLEY	(VALUES = YES, NO)
NO	RESTAURANT	(VALUES = YES, NO)
NO	ISFEEDER	(VALUES = YES, NO)
2	CABINOFFICER	(MEAN VALUE OF PERSONS IN OFFISERS CABINS)
4	CABININFERIOR	(MEAN VALUE OF PERSONS IN INFERIOR CABINS)
2	BARSPERDECK	(NUMBER OF BARS PER ACC. DECK)
2010	DELIVERY.DATE	(DELIVERY YEAR OF NEW BUILDING)
0.03	INFLATION.RATE	(INFLATION RATE)
150	RANGE	(RANGE FOR DWT CALCULATIONS)
1.65	USD.EURO.PARITY	(USD-EURO PARITY)

Σχήμα 3.56: Το αρχείο εισόδου «InputVAR.txt» με τις ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης

Το αρχείο εισόδου το οποίο περιέχει όλες τις ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.56, με τη διαφορά ότι η μεταβλητή HULL . SERIES (γραμμή 1) λαμβάνει την τιμή NPL, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η ομώνυμη σειρά για την κατασκευή της γάστρας. Στο Σχήμα 3.57 φαίνεται το σκαρίφημα της γενικής διάταξης της συγκεκριμένης σχεδίασης, όπως εξάγεται αυτόματα σε μορφή DXF, από το λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης. Ο Πίνακας 3.13, περιλαμβάνει ορισμένα χρήσιμα αποτελέσματα όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, τα οποία συγκρίνονται με αντίστοιχα μεγέθη του υπαρκτού πλοίου.



Σχήμα 3.57: Σκαρίφημα γενικής διάταξης του παραμετρικού μοντέλου (NTUA series), όπως εξάγεται από το λογισμικό NAPA®

Πίνακας 3.13: Χαρακτηριστικά σχεδίασης υπαρκτού πλοίου και παραμετρικών μοντέλων

Attribute		Actual Vessel	Parametric Vessel (NTUA series hull)	Parametric Vessel (NPL series hull)
Length BP	(m)	88.0	88.0	88.0
Length OA	(m)	100.3	98.0	95.6
Breadth maximum	(m)	17.1	17.1	17.1
Draft design	(m)	2.6	2.6	2.6
Freeboard	(m)	2.0	2.0	2.0
Speed maximum	(kn)	40	40	40
Passengers		710	710	710
Cars		120	129	134
Trucks		4	4 (15t, 16m)	4 (15t, 16m)
Crew		26	24	28
GRT		4463.0	5029.5	5105.6
Steel weight	(t)		492.5	508.4
Light weight	(t)		1014.4	1109.3
Dead weight	(t)		262.1	275.5
Displacement	(t)		1276.5	1384.8
Installed Power	(kW)	28320 4x7080 diesel	29472 4x7368 diesel	36297 5x7260 diesel
Building Cost		20.0 M\$ (1997)	30.3 M€ (2010)	33.5 M€ (2010)
RFR for a specific route	(€)		36.2	43.4

Αυτό που μπορεί κανείς να παρατηρήσει στον παραπάνω πίνακα είναι ότι η σχεδίαση εκείνη που βασίστηκε στη συστηματική σειρά NTUA προσεγγίζει καλύτερα τα χαρακτηριστικά του υπαρκτού πλοίου. Η σχεδίαση με μορφή γάστρας NPL παρουσιάζει αυξημένη αντίσταση και ως εκ τούτου απαιτεί περισσότερη εγκατεστημένη ισχύ για την ίδια ταχύτητα. Το ελαφρώς μεγαλύτερο βάρος της μεταλλικής κατασκευής οφείλεται εν μέρει στην ύπαρξη περισσότερων κοίλων επιφανειών στη γάστρα του πλοίου, ενώ η τιμή του Lightweight επιβαρύνεται κυρίως από τις απαιτήσεις της προωστήριας εγκατάστασης, στην οποία περιλαμβάνονται οι κύριες μηχανές, οι μειωτήρες, οι άξονες και τα water-jets. Η περίσσια εκτοπίσματος, που παρουσιάζει η σχεδίαση NPL δεν μπορεί να μετατραπεί σε επαρκές ωφέλιμο φορτίο (ΙΧ αυτοκίνητα) λόγω των γεωμετρικών περιορισμών. Έτσι, με ελαφρώς μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο αλλά και μεγαλύτερο κόστος κατασκευής και λειτουργίας, το πλοίο με γάστρα NPL απαιτεί, για ένα προκαθορισμένο σενάριο αγοράς και λειτουργίας, μεγαλύτερο ελάχιστο ναύλο (RFR) προκειμένου να είναι κερδοφόρο.

3.9.2. Παραμετρική Σχεδίαση Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου μεγάλου μεγέθους

Στην εφαρμογή αυτή παρουσιάζεται η παραμετρική σχεδίαση ενός μεγάλου μεγέθους μονόαστρου Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με ένα υπαρκτό πλοίο¹⁴ ίδιου μεγέθους και μεταφορικής ικανότητας. Το πλοίο αυτό έχει μήκος μεταξύ καθέτων 128.6 m, πλάτος 22.0 m και βύθισμα σχεδίασης 3.85 m. Οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη ως προς τη μεταφορική ικανότητα είναι 1800 επιβάτες και 460 ΙΧ αυτοκίνητα, θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα μεταφοράς 30 ΦΓ αυτοκινήτων των 30 τόνων. Έτσι, για δεδομένο αριθ-

¹⁴ MDV 3000 class fast ferries: "Aries" & "Taurus"

μό επιβατών υπολογίζονται αυτόματα τα καταστρώματα και οι χώροι ενδιαίτησης. Επίσης για δεδομένο αριθμό ΙΧ αυτοκινήτων υπολογίζονται αυτόματα ο αριθμός και οι χώροι μεταφοράς οχημάτων. Σημειώνεται επίσης ότι, η εφαρμογή αφορά την υλοποίηση δύο σχεδιάσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μορφές γάστρας προερχόμενες από τις συστηματικές σειρές NTUA και NPL, ενώ το υλικό κατασκευής και στις δύο περιπτώσεις είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (AH46) έως το πρώτο κατάστρωμα επιβατών και αλουμίνιο (AL5038) από εκεί και πάνω.

Το αρχείο εισόδου το οποίο περιέχει όλες τις ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.59, με τη διαφορά ότι η μεταβλητή HULL . SERIES (γραμμή 1) λαμβάνει την τιμή NPL, στην περίπτωση όπου χρησιμοποιείται η ομώνυμη σειρά για την κατασκευή της γάστρας. Ο Πίνακας 3.14, περιλαμβάνει ορισμένα χρήσιμα αποτελέσματα όπως προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης, τα οποία συγκρίνονται με αντίστοιχα μεγέθη του υπαρκτού πλοίου. Στο Σχήμα 3.60 φαίνεται το σκαρίφημα της γενικής διάταξη της συγκεκριμένης σχεδίασης, όπως εξάγεται αυτόματα σε μορφή DXF, από το λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης.

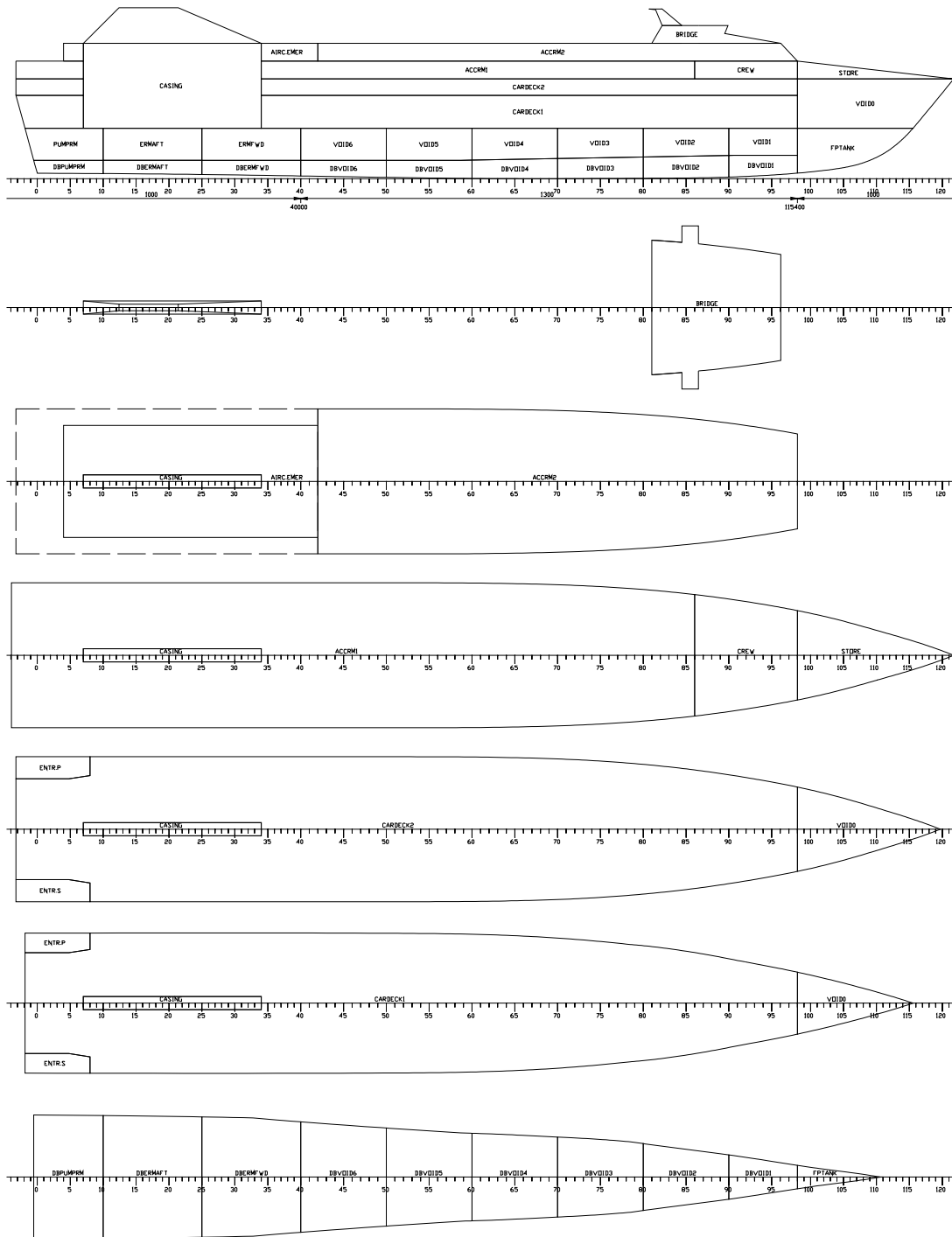
Όπως και στο μικρότερου μεγέθους πλοίο, έτσι και εδώ τα χαρακτηριστικά της σχεδίασης με μορφή γάστρας NTUA βρίσκονται πλησιέστερα σε εκείνα του πραγματικού πλοίου. Όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει, η τιμή της εγκατεστημένης ισχύος, για τη σχεδίαση με μορφή γάστρας NPL, είναι και εδώ αρκετά αυξημένη. Παρόλα αυτά, η ποσοστιαία διαφορά του βάρους και του κόστους της προωστήριας εγκατάστασης, μεταξύ των δύο σχεδιάσεων, δεν είναι τόσο σημαντική καθώς στην περίπτωση του μεσαίου μεγέθους πλοίου, η αυξημένη ισχύς οδήγησε στην προσθήκη μίας επιπλέον κύριας μηχανής, ενός μειωτήρα, ενός άξονα και ενός water-jet. Αν και το αυξημένο εκτόπισμα, που παρουσιάζει η σχεδίαση με μορφή γάστρας NPL, επιτρέπει τη μεταφορά μεγαλύτερου αριθμού οχημάτων, κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό λόγω της μειωμένης επιφάνειας καταστρωμάτων. Έτσι, με ελαφρώς μειωμένα έσοδα αλλά μικρότερο κόστος κατασκευής και λειτουργίας η σχεδίαση με μορφή γάστρας NTUA επιτυγχάνει μικρότερο απαιτούμενο ναύλο, για τα ίδια σενάρια αγοράς και λειτουργίας που χρησιμοποιήθηκαν και στην περίπτωση του πλοίου της προηγούμενης ενότητας.



Σχήμα 3.58: Το ταχύπλοο Ε/Γ-Ο/Γ πλοίο «taurus»

NTUA	HULL.SERIES	(VALUES = NTUA, NPL)
AUTO	TBHDS.CALC.METHOD	(VALUES = AUTO, SEMI, MANUAL)
INPUT	CALC.PASSNUMB.FROM	(VALUES = INPUT, ACCAREA)
INPUT	CALC.CARSNUMB.FROM	(VALUES = INPUT, CARAREA)
AUTO	CALC.CREWNUMB.FROM	(VALUES = INPUT, AUTO)
YES	TRUCKS	(VALUES = YES, NO)
NO	PLATDECK.CRT	(VALUES = YES, NO)
SIDE	CASING	(VALUES = CENTER, SIDE)
128.6	LWLNEW	(LENGTH BETWEEN PERP.)
22.0	BEAM	(BREADTH MAX)
3.85	TDWLNEW	(DESIGN WATERLINE)
3.80	FREEBOARD	(FREEBOARD TO MAIN DECK)
41	SPEED	(SPEED IN KN)
2.5	HEIGHTCARDK	(MAIN CAR DECK HEIGHT FOR PRIV. CARS LOAD)
2.7	HEIGHTACCDK	(ACCOMMODATION DECKS HEIGHT)
2.1	HEIGHTPLATDK	(PLATFORM DECK HEIGHT)
1	CARDECKSABMAINDK	(IGNORED IF CALC.CARSNUMB.FROM='INPUT')
2	ACCDECKS	(IGNORED IF CALC.PASSNUMB.FROM='INPUT')
2	NUMOFENGINEROOMS	(NUMBER OF ENGINE ROOMS)
4	NUMOFENGINES	(MINIMUM NUMBER OF MAIN ENGINES)
0.9	CASING.LCOEF	(CASING LENGTH = CASING.LCOEF X EN.RMS.LTOT)
0.11	CASING.BCOEF	(CASING BREADTH = CASING.BCOEF X BMAX.MAINDK)
10	STAIRSLENGTH	(PASS ENTRANCE LENGTH)
3	STAIRSBREADTH	(PASS ENTRANCE BREADTH)
460	PRIVCARS.INPUT	(IGNORED IF CALC.CARSNUMB.FROM='CARAREA')
28	CREW.INPUT	(IGNORED IF CALC.CREWNUMB='INPUT')
1800	PASS.INPUT	(IGNORED IF CALC.CARSNUMB.FROM='ACCAREA')
2.5	SWH	(SIGNICANT WAVE HEIGHT)
4.5	VHCLLENG.PRIVC	(PRIVATE CARS LENGTH)
1.8	VHCLBEAM.PRIVC	(PRIVATE CARS BEAM)
16.0	VHCLLENG.TRUCK	(TRUCKS LENGTH)
2.5	VHCLBEAM.TRUCK	(TRUCKS BEAM)
1.2	VHCLWGHT.PRIVC	(PRIVATE CARS MEAN WEIGHT)
30	VHCLWGHT.TRUCK	(DESIRABLE MEAN TRUCK WEIGHT)
30	TRUCKS.INPUT	(DESIRABLE TRUCKS CAPACITY)
1	STEPNORM	(WEB STEP BETWEEN ENG.ROOMS FWD BHD & COLBHD)
1	STEPFP	(WEB STEP FWD OF COLLISION BHD)
1	STEPMER	(WEB STEP AFT OF ENG. ROOMS FWD BHD)
1	FRSP1	(FRAME SPACING AFT OF ENG. ROOMS FWD BHD)
1.3	FRSP2	(FRAME BETWEEN ENG.ROOMS FWD BHD & COLLBHD)
1	FRSP3	(FRAME SPACING FWD OF COLLISION BHD)
0.6	SPACING.L	(SPACING FOR LONGITUDINAL STIFFENERS)
3	NUMOFGIRDERS	(NUM. OF GIRDERS ON DECKS !min=1 always odd!)
ALUSTEEL	MATERIAL	(VALUES = ALU, STEEL, ALUSTEEL)
ADK	REFMATDK	(VALUES = MDK (MainDeck), ADK(1st Acc. Deck))
0.61	F1A	(MATERIAL FACTOR - ALUMINIUM)
1.92	F1S	(MATERIAL FACTOR - STEEL)
PASSENGER	SERVICE	(VALUES = PASSENGER, CARFERRY, CARGO, PATROL, YACHT)
R1	CLASS	(VALUES = R0, R1, R2, R3, R4, R5R6)
3	OTHER.BHDS	(IF TBHDS.CALC.METHOD='SEMI' DON'T GIVE ER & COL BHD)
###		(IF='MANUAL' GIVE ALL BHDS, IF='AUTO' NOT USED)
55	FR.MAN.BHD1	(FRAME FOR ABOVE BHDS)
65	FR.MAN.BHD2	(FRAME FOR ABOVE BHDS)
75	FR.MAN.BHD3	(FRAME FOR ABOVE BHDS)
NO	SELSERVICE	(VALUES = YES, NO)
NO	GALLEY	(VALUES = YES, NO)
NO	RESTAURANT	(VALUES = YES, NO)
NO	ISFEEDER	(VALUES = YES, NO)
2	CABINOFFICER	(MEAN VALUE OF PERSONS IN OFFISERS CABINS)
4	CABININFERIOR	(MEAN VALUE OF PERSONS IN INFERIOR CABINS)
2	BARSPERDECK	(NUMBER OF BARS PER ACC. DECK)
2010	DELIVERY.DATE	(DELIVERY YEAR OF NEW BUILDING)
0.03	INFLATION.RATE	(INFLATION RATE)
600	RANGE	(RANGE FOR DWT CALCULATIONS)
1.65	USD.EURO.PARITY	(USD-EURO PARITY)

Σχήμα 3.59: Το αρχείο εισόδου «InputVAR.txt» με τις ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης



Σχήμα 3.60: Σκαρίφημα γενικής διάταξης του παραμετρικού μοντέλου (NTUA series), όπως εξάγεται από το λογισμικό NAPA®

Πίνακας 3.14: Χαρακτηριστικά σχεδίασης υπαρκτού πλοίου και παραμετρικών μοντέλων

Attribute	Actual Vessel	Parametric Vessel (NTUA series hull)	Parametric Vessel (NPL series hull)
Length BP (m)	128.6	128.6	128.6
Length OA (m)	145.6	143.8	137.8
Breadth max. (m)	22.0	22.0	22.0
Draft design (m)	3.85	3.85	3.85
Freeboard (m)	3.8	3.8	3.8
Speed max. (kn)	41	41	41
Passengers	1800	1800	1800
Cars	460	477	489
Trucks	30 (30t)	28 (30t, 16m)	30 (30t, 16m)
Crew	34	36	36
GRT	11000.0	12271.3	12517.4
Steel weight (t)		1210.4	1227.3
Light weight (t)		2391.4	2457.6
Dead weight (t)		1515.8	1670.3
Displacement (t)	3856.4	3907.2	4127.9
Installed Power (kW)	70400 2 x 22200 gas turb. + 4 x 6500 diesel	71397 2 x 25000 gas turb. + 4 x 5350 diesel	79615 2 x 25000 gas turb. + 4 x 7400 diesel
Building Cost	65.0 M\$ (1998)	74.3 M€ (2010)	78.4 M€ (2010)
RFR for a specific route (€)		35.81	37.49

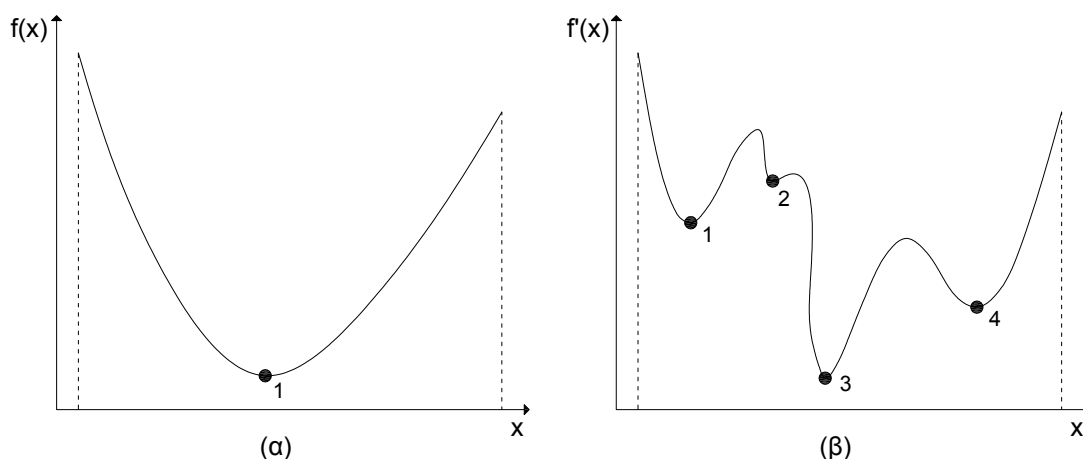
Κεφάλαιο 4: Βελτιστοποίηση

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

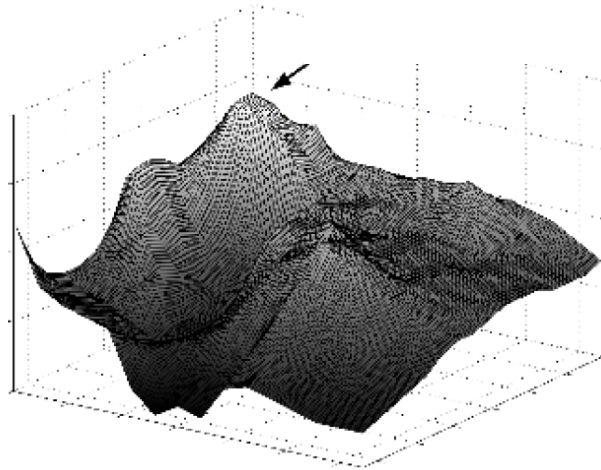
Στα μαθηματικά, ο όρος βελτιστοποίηση αναφέρεται στην επίλυση ενός προβλήματος στο οποίο, για μία συνάρτηση $f(x)$ αναζητείται, με συστηματικό τρόπο, η τιμή εκείνη της μεταβλητής x για την οποία η συνάρτηση f μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται. Γενικά, στην απλή του μορφή, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

Για μία συνάρτηση $f: A \rightarrow R$ βρες το στοιχείο x^* του χώρου A για το οποίο $f(x^*) \leq f(x)$ για κάθε $x \in A$ με $\|x - x^*\| < \delta$, όπου $\delta > 0$.

Χωρίς να χαθεί η γενικότητα, ως βελτιστοποίηση μπορεί να εννοηθεί η ελαχιστοποίηση μιας συνάρτησης, δεδομένου ότι η μεγιστοποίησή της αντιστοιχεί στην ελαχιστοποίηση της αντίθετης αυτής. Συνήθως ο χώρος A είναι υποσύνολο του Ευκλείδειου χώρου R^n , ενώ συχνά στα προβλήματα βελτιστοποίησης πρέπει να ικανοποιείται ένας αριθμός από περιορισμούς ισότητας ή ανισότητας (equality or inequality constraints). Ο χώρος A μπορεί να είναι συνεχής ή διακριτός και ονομάζεται χώρος ή σύνολο αναζήτησης (search space), ενώ τα στοιχεία του καλούνται υποψήφιος λύσεις. Το υποσύνολο του A , στο οποίο περιέχονται εκείνες οι υποψήφιος λύσεις που ικανοποιούν τους περιορισμούς, ονομάζεται σύνολο αποδεκτών λύσεων (feasible space) και τα στοιχεία του αποδεκτές υποψήφιος λύσεις (feasible solutions). Η συνάρτηση f ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ή συνάρτηση κόστους (cost function) ή κριτήριο βελτιστοποίησης (optimization criterion). Η αποδεκτή εκείνη λύση, η οποία μεγιστοποιεί (ή ελαχιστοποιεί) την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης f , ονομάζεται βέλτιστη λύση (optimal solution). Τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί μπορεί να συσχετίζονται γραμμικά ή μη με μερικές ή όλες τις μεταβλητές. Γενικά, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι διάφορες μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, είναι η εύρεση του ολικού βέλτιστου και η αποφυγή εγκλωβισμού σε κάποιο τοπικό ακρότατο. Το πρόβλημα αυτό συναντάται στην περίπτωση όπου το σύνολο λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης δεν είναι κυρτό (convex problems), όπως δείχνει το Σχήμα 4.1(α), αλλά παρουσιάζει περισσότερα από ένα τοπικά βέλτιστα (non-convex problems), όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.1(β) και 4.2.



Σχήμα 4.1: Συνάρτηση μίας μεταβλητής με ένα ολικό (α) και πολλαπλά τοπικά ελάχιστα (β)



Σχήμα 4.2: Συνάρτηση δύο μεταβλητών με πολλαπλά τοπικά βέλτιστα

4.1. Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά ένα και μόνο κριτήριο (αντικειμενική συνάρτηση) μπορεί να ορισθεί ως εξής:

$$\min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) = f_1(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \Omega \quad (4.1)$$

λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς

$$\begin{aligned} h_i(\mathbf{x}) &= 0, & i &= 1, \dots, I \\ g_j(\mathbf{x}) &\geq 0, & j &= 1, \dots, J \end{aligned}$$

όπου $f_1(\mathbf{x})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση, η οποία εξαρτάται από N ελεύθερες μεταβλητές του διανύσματος \mathbf{x} . Η λύση που προκύπτει θα πρέπει να «υπακούει» σε I περιορισμούς ισότητας και J περιορισμούς ανισότητας $h_i(\mathbf{x})$ και $g_j(\mathbf{x})$ αντίστοιχα, οι οποίοι εξαρτώνται και αυτοί από τις ελεύθερες μεταβλητές του διανύσματος \mathbf{x} . Γενικά, για τον μαθηματικό ορισμό χρησιμοποιείται η φόρμουλα της ελαχιστοποίησης μιας και ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μπορεί να επιλυθεί ελαχιστοποιώντας κατά περίπτωση την αντίθετη ή την αντίστροφη ($f(\mathbf{x}) \neq 0, \forall \mathbf{x} \in \Omega$) αντικειμενική συνάρτηση.

4.2. Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης που αφορά $K > 1$ κριτήρια (αντικειμενικές συναρτήσεις) μπορεί να ορισθεί ως εξής:

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_K(\mathbf{x})], \quad \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T \in \Omega \quad (4.2)$$

λαμβάνοντας υπόψη του περιορισμούς

$$\begin{aligned} h_i(\mathbf{x}) &= 0, & i &= 1, \dots, I \\ g_j(\mathbf{x}) &\geq 0, & j &= 1, \dots, J \end{aligned}$$

όπου $f_1(\mathbf{x})$ έως $f_K(\mathbf{x})$ είναι K αντικειμενικές συναρτήσεις κάθε μία από τις οποίες εξαρτάται από τις N ελεύθερες μεταβλητές του διανύσματος \mathbf{x} . Η ολική αντικειμενική συνάρτηση $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ είναι τώρα διάνυσμα.

Η λύση των προβλημάτων αυτού του τύπου, όπως έχει είδη αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, δεν είναι μονοσήμαντη αλλά ένα σύνολο πιθανών βέλτιστων λύσεων. Η τελική λύση θα προκύψει έπειτα από μία ορθολογική αξιολόγηση των λύσεων αυτών με βάση τόσο μαθηματικές μεθόδους όσο και την εμπειρία του μελετητή. Για τον προσδιορισμό του συνόλου των πιθανών βέλτιστων λύσεων έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται διάφορες μέθοδοι με πιο γνωστή τη βελτιστότητα Pareto [Pareto, 1906]. Η θεωρία αυτή βασίζεται στον ανταγωνισμό ή το συναγωνισμό μεταξύ των κριτηρίων βελτιστοποίησης και εφαρμόζεται ευρέως στην επίλυση προβλημάτων σχεδίασης. Μία από τις τεχνικές βελτιστοποίησης στην οποία χρησιμοποιείται η βελτιστότητα Pareto είναι και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι.

4.3. Γενετικοί αλγόριθμοι

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) ή αλλιώς Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (EA), είναι μαθηματικές διαδικασίες οι οποίες μιμούνται τη φυσική διαδικασία της εξέλιξης των ειδών. Βάση των μεθόδων αυτών βελτιστοποίησης αποτελεί η αρχή της θεωρίας του Δαρβίνου σύμφωνα με την οποία:

Σε κάθε είδος, τα άτομα εκείνα τα οποία εξελίσσονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να προσαρμόζονται καλύτερα στις αλλαγές του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο ζουν, υπερέχουν έναντι των υπολοίπων ατόμων του ίδιου είδους και έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιζήσουν.

Οι πρώτες εργασίες που αναφέρονται στους ΓΑ χρησίμευαν ως εξομοιωτές της φυσικής διαδικασίας της εξέλιξης και όχι ως μέθοδοι βελτιστοποίησης. Τις βάσεις για τη χρήση των ΓΑ ως μηχανές αναζήτησης και βελτιστοποίησης έθεσε ο καθηγητής John Holland [Holland, 1975] του πανεπιστημίου του Michigan το 1975, με την εργασία του «*Adaptation in Natural and Artificial Systems*». Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να ερμηνεύσει τις διαδικασίες προσαρμογής που ακολουθούν οι φυσικοί οργανισμοί και να προσομοιώσει τις διαδικασίες αυτές σε ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο είναι γνωστό και ως ο Βασικός Γενετικός Αλγόριθμος. Από τότε έως σήμερα, οι ΓΑ έχουν παρουσιάσει ραγδαία εξέλιξη, καθώς από νωρίς φάνηκαν τα πλεονεκτήματά τους ως μέθοδο βελτιστοποίησης. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει αναπτυχθεί μία πλειάδα ΓΑ, η βασική δομή των οποίων όμως, δεν διαφέρει από τον Βασικό ΓΑ του Holland.

4.3.1. Βασική Ορολογία

Μεγάλο μέρος της ορολογίας που χρησιμοποιείται στους ΓΑ προέρχεται από την επιστήμη της Γενετικής. Η τεράστια πρόοδος της επιστήμης αυτής τις τελευταίες δεκαετίες, επέτρεψε τη διείσδυση στα πιο κρυφά μυστικά της ζωής. Όλες οι πληροφορίες που αφορούν την εμφάνιση και τη συμπεριφορά των ζωντανών οργανισμών εμπεριέχονται στα χρωμοσώματα. Όταν γεννιέται ένας ζωντανός οργανισμός κληρονομεί φυσικά χαρακτηριστικά από τους γονείς του μέσω της διασταύρωσης των χρωμοσωμάτων. Οι ΓΑ προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν την ιδιότητα αυτή της διαδοχής προκειμένου να επιλύσουν μία σειρά από μαθη-

ματικά προβλήματα. Οι ΓΑ χρησιμοποιούν έναν αρχικό πληθυσμό (initial population), προκειμένου να διασταυρώσουν τα άτομα μεταξύ τους και να παράγουν ένα πλήθος γενεών (generations). Κάθε άτομο (individual) του πληθυσμού (population), αναπαρίσταται από ένα χρωμόσωμα (chromosome, string), το οποίο αποτελείται από γονίδια (genes) και βαθμολογείται ανάλογα με την προσαρμοστικότητα/καταλληλότητά του (fitness). Ο υπολογισμός της προσαρμοστικότητας εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή (π.χ. την τιμή μίας αντικειμενικής συνάρτησης). Από κάθε γενιά επιλέγονται με μία πιθανότητα (selection) τα ζεύγη των ατόμων που θα αναπαραχθούν, τα οποία ονομάζονται γονείς (parents). Τα άτομα αυτά διασταυρώνονται (crossover) μεταξύ τους με μία διαφορετική πιθανότητα και δημιουργούν νέα άτομα τα οποία ονομάζονται απόγονοι (offspring). Οι απόγονοι κατά τη διαδικασία της διασταύρωσης μπορεί να υποστούν μετάλλαξη (mutation) με μία μικρή πιθανότητα. Αφού η επιλογή των γονέων βασίζεται στην προσαρμοστικότητα των ατόμων, η μέση προσαρμοστικότητα του πληθυσμού τείνει να αυξάνει από γενιά σε γενιά. Επίσης, η προσαρμοστικότητα του καλύτερου ατόμου αυξάνει κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου και είναι πολύ πιθανόν το άτομο αυτό να επιλεγεί τελικά ως η βέλτιστη λύση, έπειτα από μερικές γενιές.

4.3.2. Πλεονεκτήματα, μειονεκτήματα και πεδία εφαρμογής

Γενικά οι ΓΑ χρησιμοποιούν δύο βασικές λειτουργίες της φυσικής εξέλιξης των ειδών: την κληρονομικότητα και την προσαρμοστικότητα. Τα βασικά πλεονεκτήματα των ΓΑ είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε προβλήματα βελτιστοποίησης στα οποία:

- ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων ή/και των περιορισμών ή/και των ελεύθερων μεταβλητών είναι πολύ μεγάλος
- οι μονάδες μέτρησης των μεγεθών διαφέρουν μεταξύ τους (δεν είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση του προβλήματος)
- δεν υπάρχει κάποια μαθηματική συνάρτηση ή η συνάρτηση αυτή δεν είναι γνωστή
- μερικές ή όλες οι συναρτήσεις δεν είναι διαφορίσιμες
- τα πεδία ορισμού των συναρτήσεων δεν είναι συνεχή
- τα πεδία τιμών των συναρτήσεων δεν είναι κυρτά
- οι αντικειμενικές συναρτήσεις παρουσιάζουν πολλαπλά τοπικά ακρότατα

Επειδή οι ΓΑ επενεργούν σε ένα πλήθος πιθανών λύσεων, δηλαδή σε ένα υποσύνολο του χώρου διερεύνησης και όχι σε ένα στοιχείο αυτού, δεν εγκλωβίζονται εύκολα σε κάποιο τοπικό βέλτιστο, όπως συμβαίνει σε αρκετές από τις κλασικές μεθόδους βελτιστοποίησης. Επίσης η χρήση πιθανοθεωρητικών συσχετίσεων, δίνει τη δυνατότητα στους ΓΑ να διερευνήσουν περισσότερες περιοχές του χώρου των πιθανών λύσεων, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα να προσδιορίσουν τη βέλτιστη λύση. Σε προβλήματα όπου μπορούν να εφαρμοστούν κλασικές μέθοδοι βελτιστοποίησης, οι ΓΑ γενικά μειονεκτούν ως προς την ταχύτητα σύγκλισης, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μέγεθος του πληθυσμού κάθε γενιάς και τον συνολικό αριθμό των γενεών.

Τα πεδία εφαρμογής των ΓΑ καλύπτουν σχεδόν όλους τους τομείς των επιστημών και μπορούν να επιλύσουν με επιτυχία ένα ευρύ σύνολο προβλημάτων βελτιστοποίησης. Σήμερα οι ΓΑ χρησιμοποιούνται σε οικονομικά και επιχειρησιακά προβλήματα, σε προβλήματα οργάν-

νωσης παραγωγής, μηχανικής και σχεδιασμού βιομηχανικών προϊόντων. Επίσης, ευρεία είναι η χρήση τους στις τηλεπικοινωνίες και γενικά τη σχεδίαση και λειτουργία δικτύων, στη ναυπηγική και αεροναυπηγική, την πρόβλεψη συμπεριφορών κ.ά.

4.3.3. Κατηγορίες γενετικών αλγορίθμων

Οι ΓΑ αποτελούν σήμερα την πιο διαδεδομένη εφαρμογή για την επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Από την εμφάνισή τους έως σήμερα, έχουν αναπτυχθεί αρκετοί τύποι ΓΑ που μπορούν να επιλύσουν τέτοιου είδους προβλήματα και οι οποίοι ανήκουν στην ομάδα των εξελικτικών αλγορίθμων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης (multi-objective evolutionary algorithms – MOEAs). Γενικά, οι ΓΑ αυτοί μπορούν να διαχωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες. Τους αλγόριθμους που χρησιμοποιούν τη θεωρία Pareto προκειμένου να αναζητήσουν τις βέλτιστες λύσεις και σε αυτούς που χρησιμοποιούν διαφορετικούς μηχανισμούς επιλογής [Coello Coello, 2003]. Αναλογικά, στις δύο παραπάνω κατηγορίες ανήκουν οι ΓΑ πρώτης και δεύτερης γενιάς, όπως αλλιώς συναντώνται στη βιβλιογραφία.

Οι κυριότεροι από τους ΓΑ πρώτης γενιάς είναι ονομαστικά:

- VEGA (Vector Evaluated Genetic Algorithm), Schaffer (1984,1985)
- MOGA (Muti-Objective Genetic Algorithm), Fonseca & Fleming (1993)
- NPGA (Niched-Pareto Genetic Algorithm), Horn et al. (1993,1994)
- NSGA (Nondominated Sorting Genetic Algorithm), Srinivas & Deb (1994)
- MOGA-II (Muti-Objective Genetic Algorithm II), Poloni et al. (1997,1998)

Οι κυριότεροι από τους ΓΑ δεύτερης γενιάς είναι ονομαστικά:

- SPEA (The Strength Pareto Evolutionary Algorithm), Zitzler and Thiele (1999)
- PAES (Pareto Archived Evolution Strategy), Knowles & Corne (2000)
- PESA (The Pareto Envelope-based Selection Algorithm), Corne et al. (2000)
- MOMGA (The Multi-Objective Messy Genetic Algorithm), Van Veldhuizen & Lamont (2000)
- SPEA2 (The Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2), Zitzler (2001)
- PESA-II (The Pareto Envelope-based Selection Algorithm-II), Corne et al. (2001)
- MOMGA-II (The Multi-Objective Messy Genetic Algorithm-II), Zydallis et al. (2001)
- microGA (The Micro GA for Multi-objective Optimization), Coelo & Pulido (2001)
- NSGA-II (Nondominated Sorting Genetic Algorithm II), Deb et al. (2000,2002)

4.3.4. Εφαρμογή γενετικών αλγορίθμων

Προκειμένου να εφαρμοστούν οι ΓΑ σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης χρειάζεται να πραγματοποιηθούν μία σειρά από διεργασίες, οι οποίες και περιγράφονται παρακάτω:

Διακριτοποίηση του χώρου διερεύνησης

Σε πολλές από τις μεθόδους βελτιστοποίησης, το πρώτο βήμα για τη χρήση των ΓΑ είναι ο ορισμός του χώρου διερεύνησης των λύσεων. Αν και σε ορισμένους από τους ΓΑ δεύτερης γενιάς, η διακριτοποίηση του χώρου αυτού δεν είναι απαραίτητη, στους περισσότερους ΓΑ χρειάζεται να πραγματοποιηθεί διακριτοποίηση του πεδίου τιμών των ελευθέρων μεταβλη-

τών, εάν αυτό είναι συνεχές. Έτσι, για κάθε μεταβλητή του προβλήματος βελτιστοποίησης x_i θα πρέπει να οριστεί ένα σύνολο $A_i = [x_i^{\min}, x_i^{\max}]$ οι τιμές του οποίου διακριτοποιούνται με ένα δεδομένο βήμα δx_i . Ο συνολικός χώρος διερεύνησης προκύπτει από το συνδυασμό όλων των χώρων A_i και έχει τάξη ίση με τον αριθμό των ελεύθερων μεταβλητών.

Κωδικοποίηση

Όπως προαναφέρθηκε, στους ΓΑ δεν είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση του πεδίου ορισμού των συναρτήσεων που λαμβάνουν χώρα σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Γενικά, η κανονικοποίηση βοηθάει στο να απαλειφθούν τα προβλήματα που προκύπτουν από τις διαφορετικές μονάδες μέτρησης και τις διαφορές στην τάξη μεγέθους των διάφορων μεταβλητών. Αντί αυτού, οι ΓΑ χρησιμοποιούν ένα σύστημα κωδικοποίησης (coding) των μεταβλητών του προβλήματος, το οποίο δεν είναι τίποτε άλλο από μία αμφιμονοσήμαντη απεικόνιση του συνόλου τιμών A_i κάθε μεταβλητής x_i σε ένα σύνολο C_i . Για την κωδικοποίηση χρησιμοποιούνται χαρακτήρες οι οποίοι ανήκουν σε κάποιο «αλφάβητο» S . Προκειμένου για πραγματικές μεταβλητές, τα συνηθέστερα «αλφάβητα» που χρησιμοποιούν οι ΓΑ είναι:

- το δυαδικό, $S_2 = \{0,1\}$, οπότε η κωδικοποίηση ονομάζεται δυαδική,
- το δεκαδικό, $S_{10} = \{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$, οπότε η κωδικοποίηση ονομάζεται δεκαδική
- κάποιο σύνολο γραμμάτων, π.χ. $S_A = \{a,b,c,d,e,f,g,h\}$.

Σχεδόν πάντα, για όλες τις μεταβλητές ενός προβλήματος χρησιμοποιείται το ίδιο αλφάβητο, ενώ το πλήθος των χαρακτήρων για κάθε κωδικοποιημένη τιμή είναι σταθερό για όλες τις μεταβλητές και εξαρτάται από τη διακριτοποίηση του χώρου διερεύνησης. Κάθε μεταβλητή, η οποία κωδικοποιείται με βάση ένα «αλφάβητο» S_L , μπορεί να λάβει το πολύ L^k διαφορετικές τιμές, όπου k το πλήθος των χαρακτήρων για την κωδικοποιημένη τιμή. Εάν μία μεταβλητή λαμβάνει τιμές από το σύνολο $[x_l, x_u]$ με βήμα (ακρίβεια) Δx και κωδικοποιηθεί με βάση το δυαδικό «αλφάβητο» το απαιτούμενο πλήθος k των χαρακτήρων της κωδικοποιημένης μορφής μπορεί να υπολογιστεί από την παρακάτω εξίσωση:

$$2^k = \frac{x_u - x_l}{\Delta x} + 1 \quad (4.3)$$

Όπως γίνεται κατανοητό, όταν χρησιμοποιείται η δυαδική κωδικοποίηση, μία συνεχής μεταβλητή x με πεδίο ορισμού $[x_l, x_u]$ μπορεί να λάβει μόνο διακριτές τιμές, ανάλογα με την επιθυμητή ακρίβεια. Αναφορικά με τους Γενετικούς Αλγόριθμους, κάθε χρωμόσωμα περιέχει στη σειρά τις κωδικοποιημένες τιμές όλων των μεταβλητών του προβλήματος βελτιστοποίησης (Σχήμα 4.3).

$$chromosome = \left[\underbrace{11110010010011011111}_{gene_1} \dots \underbrace{0000101001}_{gene_{N_{var}}} \right]$$

Σχήμα 4.3: Χρωμόσωμα που περιέχει διαδοχικά κωδικοποιημένες τιμές μεταβλητών [Haupt et al., 2004]

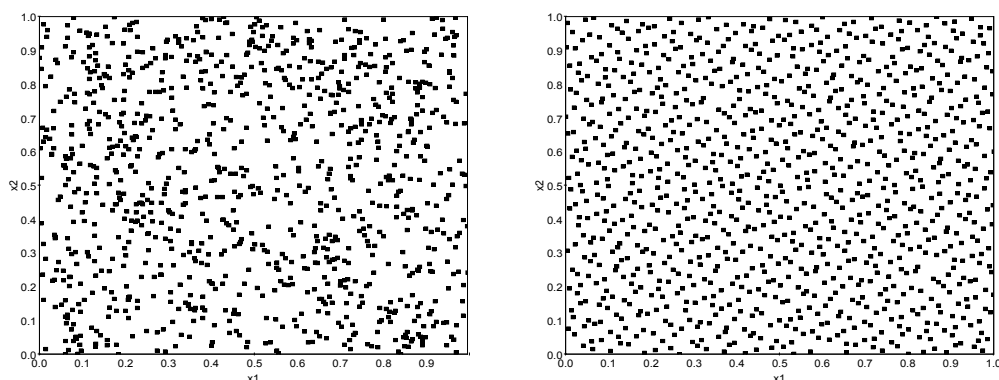
Ορισμός των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών

Επόμενο βήμα για τη χρήση των ΓΑ αποτελεί ο ορισμός των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών. Όπως αναφέρθηκε, η κανονικοποίηση των εξισώσεων δεν είναι απαραίτητη, γεγονός που επιτρέπει την χρήση των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών, μέσω απλών μαθηματικών εξισώσεων. Επιπλέον, οι περιορισμοί εκτός από τις αντικειμενικές συναρτήσεις, μπορεί να εφαρμοστούν σε οποιοδήποτε μέγεθος, το οποίο συμπεριλαμβάνεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Επιλογή του αρχικού πληθυσμού

Τον αρχικό πληθυσμό αποτελούν τα άτομα εκείνα από τα οποία θα προκύψουν, κατά την εφαρμογή του ΓΑ, τα άτομα των υπολοίπων γενιών. Η ικανότητα εύρεσης της βέλτιστης λύσης δεν επηρεάζεται από τον αρχικό πληθυσμό, παρόλα αυτά θα πρέπει αυτός να αντιπροσωπεύει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο το σύνολο αναζήτησης. Γενικά, ο αριθμός των ατόμων του αρχικού πληθυσμού πρέπει να είναι ανάλογος του αριθμού των μεταβλητών και των αντικειμενικών συναρτήσεων και αντιστρόφως ανάλογος της γραμμικότητας του προβλήματος. Το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού καθορίζει επίσης και το μέγεθος της κάθε γενιάς, αλλά και το μέγεθος του τελικού πληθυσμού. Τα άτομα του αρχικού πληθυσμού, εάν δεν είναι γνωστά, συνήθως παράγονται με τυχαίο τρόπο, μέσω κάποιας ακολουθίας (SOBOL, Kriging) ή μέσω στοχαστικών διαδικασιών (full factorial, reduced factorial, latin square, κ.).

Μία συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή του αρχικού πληθυσμού, είναι μέσω της ψευδο-τυχαίας ακολουθίας SOBOL [Sobol, 1967]. Η ακολουθία SOBOL ανήκει στην οικογένεια των ψευδο-τυχαίων ή εν μέρει τυχαίων (quasi-random) ακολουθιών. Σε σχέση με μία τυχαία ακολουθία, καταφέρνει να καλύψει ολόκληρο το χώρο των πιθανών λύσεων με έναν ομοιόμορφο τρόπο, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4: 1000 σημεία προερχόμενα από τυχαία ακολουθία (αριστερά) και την ακολουθία SOBOL (δεξιά)

Συνάρτηση Αξιολόγησης ή Συνάρτηση Καταλληλότητας (Evaluation or Fitness Function)

Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η προσαρμοστικότητα (fitness) κάθε ατόμου του πληθυσμού (κάθε υποψήφιας λύσης), με βάση τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η συνάρτηση καταλληλότητας δεν απαιτείται να είναι συνεχής, πρέπει όμως να ορίζεται σε όλα τα σημεία του πεδίου τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Εάν υπάρχει μόνο μία αντικειμενική συνάρτηση, τότε η συνάρτηση καταλληλότητας είναι, είτε η

ίδια η αντικειμενική συνάρτηση ή κάποιος μετασχηματισμός αυτής. Πολλές φορές η συνάρτηση καταλληλότητας ορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να έχει πάντοτε θετικές τιμές, κάτι που διευκολύνει τη λειτουργία των γενετικών πράξεων της επιλογής και της αναπαραγωγής. Παρόλα αυτά, η ποιότητα του ΓΑ δεν εξαρτάται από το πρόσημο ή τις αλλαγές προσήμου της συνάρτησης καταλληλότητας. Επίσης, ορισμένοι ΓΑ χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές κλιμάκωσης καθώς εξελίσσονται, προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο πρόωρης σύγκλισης και πιθανού εγκλωβισμού σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Γενικά, οι πολλές παραλλαγές των ΓΑ που υπάρχουν σήμερα οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στον τρόπο με τον οποίο ορίζεται η συνάρτηση αξιολόγησης.

Ελιτισμός (Elitism)

Όταν ολοκληρωθούν οι γενετικές πράξεις, όπως αυτές περιγράφονται στην επόμενη ενότητα, ακολουθεί η επιλογή των ατόμων τα οποία θα αποτελέσουν τον πληθυσμό της επόμενης γενιάς. Όταν τα άτομα αυτά αποτελούνται μόνο από τους απογόνους, χωρίς να αξιολογείται η προσαρμοστικότητα τους (σε σχέση με τους γονείς τους), τότε υπάρχει ο κίνδυνος να μην εμπεριέχονται στον πληθυσμό της νέα γενιάς κάποιοι γονείς, οι οποίοι έχουν μεγάλες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας, αλλά μετά τις γενετικές πράξεις παρήγαγαν χειρότερους ή πολύ χειρότερους απογόνους. Ο τρόπος αυτός επιλογής καλείται μη ελιτισμός (non-elitism). Αντίθετα ελιτισμός (elitism) ονομάζεται ο τρόπος επιλογής κατά τον οποίο ανάμεσα στους δύο γονείς και τους δυο απογόνους, επιλέγονται για να μεταβούν στην επόμενη γενιά, τα δύο εκείνα άτομα με τις υψηλότερες τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας.

Διαχείριση των περιορισμών (constraints handling)

Σημαντικός παράγοντας στην εφαρμογή ενός ΓΑ αποτελεί επίσης ο τρόπος με τον οποίο ο αλγόριθμος χειρίζεται τους περιορισμούς που υπάρχουν σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Συνήθως, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι μία αποδεκτή λύση (δηλ. μία λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς) είναι πάντοτε καλύτερη από μία μη-αποδεκτή λύση, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τεχνικές ποινής (penalize methods) προκειμένου να μειώσει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας ενός ατόμου του πληθυσμού που ανήκει στο σύνολο των μη αποδεκτών λύσεων [Coelo, 1999], [Michalewicz, 1995]. Όταν ο αριθμός των μη αποδεκτών λύσεων είναι πάρα πολύ μεγάλος σε σχέση με τις αποδεκτές ή δεν υπάρχουν καθόλου αποδεκτές λύσεις στον πληθυσμό, τότε μία εναλλακτική μέθοδος είναι η μετατροπή των περιορισμών σε αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

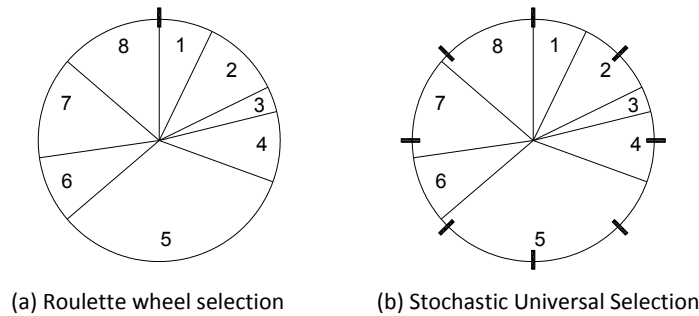
4.3.5. Γενετικές πράξεις ή γενετικοί τελεστές

Οι γενετικές πράξεις αφορούν τη λειτουργία των ΓΑ και συναντώνται με διάφορες παραλλαγές στη λειτουργία τους.

Επιλογή (Selection)

Επιλογή είναι η λειτουργία κατά την οποία άτομα του πληθυσμού επιλέγονται, ανά ζεύγη, για αναπαραγωγή με βάση την προσαρμογή τους (δηλ. την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας). Τα άτομα κάθε ζεύγους, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ονομάζονται γονείς (parents), και διασταυρώνονται προκειμένου να προκύψουν τα άτομα της επό-

μενης γενιάς. Η επιλογή στηρίζεται σε ένα μεγάλο βαθμό στην τυχαιότητα, δεδομένου ότι τα ζεύγη των γονέων πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά του υπάρχοντος πληθυσμού. Η κατάλληλη επιλογή αποτελεί σημαντική λειτουργία των ΓΑ, η οποία διασφαλίζει την κυριαρχία του ισχυρότερου ατόμου. Πολλές τεχνικές επιλογής έχουν προταθεί, όπως ο τροχός της τύχης (roulette wheel selection), η στοχαστική ολική επιλογή (stochastic universal selection) και η επιλογή με διαγωνισμό (tournament selection).



Σχήμα 4.5: Τεχνικές επιλογής ατόμων

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5a στη μέθοδο του τροχού της τύχης, κάθε άτομο καταλαμβάνει επιφάνεια ανάλογη της τιμής της συνάρτησης καταλληλότητας. Όταν ο τροχός περιστρέφεται, μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής έχει το άτομο με τη μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$P_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^N F_i} \quad (4.4)$$

όπου F_i η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας του ατόμου i και N το σύνολο του πληθυσμού κάθε γενιάς.

Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει η κλασική αυτή μέθοδο επιλογής, είναι ότι σε πληθυσμούς με λίγα άτομα υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να επιλεγούν πάρα πολλές φορές άτομα με μικρή τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας, δυσχεραίνοντας τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Προκειμένου να εξαλειφθεί το πρόβλημα αυτό έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι με τους οποίους επιχειρείται να ελεγχθεί ο αριθμός των επιλογών κάθε ατόμου για αναπαραγωγή, χωρίς να χαθεί η αντιπροσωπευτικότητα της γενιάς και χωρίς να επιβαρυνθεί η ταχύτητα σύγκλισης. Μία τέτοια πρόταση ορίζει το μέγιστο αριθμό επιλογών κάθε ατόμου σε:

$$\frac{F_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i} + 1 \quad (4.5)$$

Η μέθοδος της στοχαστικής επιλογής αποτελεί μία λιγότερο «θορυβώδη» παραλλαγή της μεθόδου του τροχού της τύχης, κατά την οποία αντί του ενός υπάρχουν τόσα σημεία ελέγχου όσα και τα άτομα του πληθυσμού, τοποθετημένα σε ισαποστάσεις στην περίμετρο του τροχού (Σχήμα 4.5b). Το άτομο στην περιοχή του οποίου θα υπάρχουν τα περισσότερα σημεία ελέγχου, όταν σταματήσει να γυρίζει ο τροχός, είναι αυτό που τελικά επιλέγεται. Κατά την επιλογή με διαγωνισμό επιλέγονται τυχαία δύο άτομα του πληθυσμού και αυτό με τη

μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας τελικά επικρατεί. Ενώ η εφαρμογή της μεθόδου του τροχού της τύχης είναι καταλληλότερη στις πρώτες γενιές, όπου κατά κανόνα λίγα άτομα έχουν υψηλές τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας, η επιλογή με διαγωνισμό ενδείκνυται στις τελευταίες γενιές του πληθυσμού.

Διασταύρωση (Crossover)

Η διασταύρωση είναι η κύρια λειτουργία αναπαραγωγής. Διασταυρώνει τα χρωμοσώματα των δύο γονέων προκειμένου να παράγει δύο νέα άτομα, τα οποία ονομάζονται απόγονοι (offspring) και έχουν ουσιαστικά κληρονομήσει χαρακτηριστικά και από τους δύο γονείς. Η διασταύρωση μπορεί να γίνει σε ένα (one-point) ή σε περισσότερα (multi-point) σημεία του μήκους των χρωμοσωμάτων των γονέων. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η διασταύρωση δύο γονέων σε ένα σημείο και οι απόγονοί που προκύπτουν από αυτή.

Για κάθε ζεύγος γονέων, η διασταύρωση πραγματοποιείται με μία μεγάλη πιθανότητα P_c , η οποία ονομάζεται πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability). Για τις τιμές της πιθανότητας αυτής έχουν προταθεί διάφορες τιμές, όπως $P_c = 0.6$ ή $P_c \in [0.75, 0.95]$. Εάν η πιθανότητα διασταύρωσης πάρει τιμή ίση με τη μονάδα, τότε όλα τα άτομα του πληθυσμού εκτελούν την γενετική αυτή πράξη.

Parent 1:	101101101	111001100
Parent 2:	001101100	100101000
Offspring 1:	101101101	100101000
Offspring 2:	001101100	111001100

Σχήμα 4.6: Διασταύρωση σε ένα σημείο

Με πιθανότητα $1 - P_c$ η διασταύρωση δεν πραγματοποιείται και το ζεύγος των απογόνων είναι το ίδιο με το ζεύγος των γονέων. Μεγάλη πιθανότητα διασταύρωσης επιτρέπει ευρύτερη διερεύνηση του συνόλου των δυνατών λύσεων και μειώνει τις πιθανότητες ο αλγόριθμος να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Από την άλλη, μικρή πιθανότητα διασταύρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γνωστό πληθυσμό, τα άτομα του οποίου έχουν ήδη υψηλές τιμές συνάρτησης καταλληλότητας. Η διασταύρωση σε ένα σημείο παρουσιάζει το βασικό μειονέκτημα ότι τα γονίδια που βρίσκονται στο τέλος του χρωμοσώματος (ατόμου), έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να ανταλλαχθούν σε σχέση με αυτά που βρίσκονται στην αρχή. Για το λόγο αυτό πολλοί ΓΑ χρησιμοποιούν τη διασταύρωση σε περισσότερα σημεία. Όταν ο αριθμός των σημείων είναι άρτιος η παραπάνω πιθανότητα μειώνεται ακόμη περισσότερο. Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η διασταύρωση δύο γονέων σε περισσότερα του ενός σημείου και οι απόγονοί που προκύπτουν από αυτή.

Parent 1:	101	1001	01	11100	1100
Parent 2:	001	1011	00	10010	1000
Offspring 1:	101	1011	01	10010	1100
Offspring 2:	001	1001	00	11100	1000

Σχήμα 4.7: Διασταύρωση σε πολλαπλά σημεία

Ένας εναλλακτικός τρόπος διασταύρωσης είναι η κατευθυντήρια διασταύρωση (directional or evolutionary direction crossover), η οποία διαφέρει από την κλασική πράξη της διασταύρωσης δύο σημείων (two points crossover) και έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την αποδοτικότητα του αλγορίθμου [Yamamoto et al., 1995]. Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να ευρεθεί μία κατεύθυνση, κατά την οποία αυξάνει η προσαρμοστικότητα δύο ατόμων του πληθυσμού. Η κατεύθυνση αυτή προσδιορίζεται συγκρίνοντας την προσαρμοστικότητα (δηλ. την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας) του ατόμου i της γενιάς j με την προσαρμοστικότητα των γονέων του που ανήκουν στη γενιά $j-1$.

Οι θέσεις στις οποίες θα λάβει χώρα ακολούθως η διασταύρωση του νέου ατόμου, εξατομικεύονται σε μία κατεύθυνση που συνδέει το άτομο αυτό με τους γονείς του. Παρόμοια θεωρία μπορεί να γίνει εάν στη θέση των δύο γονέων τοποθετηθούν δύο άλλα άτομα από την ίδια γενιά. Τότε από ολόκληρο τον πληθυσμό της εκάστοτε γενιάς επιλέγονται δύο άτομα i_1 και i_2 με υψηλή προσαρμοστικότητα. Το νέο άτομο δημιουργείται ως εξής:

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_i + s \cdot \text{sng}(F_i - F_{i1}) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i1}) + t \cdot \text{sng}(F_i - F_{i2}) \cdot (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i2}) \quad (4.6)$$

όπου s, t είναι δύο τυχαίοι αριθμοί που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και F η τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Η πιθανότητα κατευθυντήριας διασταύρωσης (Probability of directional crossover) πρέπει να έχει μεγάλη τιμή σε προβλήματα που πλησιάζουν τη γραμμικότητα και μικρή στην αντίθετη περίπτωση.

Κατά καιρούς και παράλληλα με την προσπάθεια επίλυσης διαφορετικών προβλημάτων βελτιστοποίησης με τη χρήση των ΓΑ, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι διασταύρωσης. Επιγραμματικά αναφέρονται η ομοιόμορφη διασταύρωση (uniform crossover) [Syswerda, 1989], η οποία είναι μία ακραία περίπτωση της διασταύρωσης πολλαπλών σημείων, η τμηματική διασταύρωση (segment crossover) [Eshelman et al., 1989], η οποία βασίζεται στη διασταύρωση πολλαπλών σημείων με τη διαφορά ότι το άτομο έχει διαφορετική πιθανότητα να υποστεί διασταύρωση σε κάθε σημείο. Επίσης, η διασταύρωση αναμίξεως (shuffling crossover) [Eshelman et al., 1989], κατά την οποία αφού τα γονίδια των δύο γονέων αλλάζουν θέση μεταξύ τους με τον ίδιο τυχαίο τρόπο, εφαρμόζεται η διασταύρωση πολλαπλών σημείων και στη συνέχεια τα γονίδια τοποθετούνται στην αρχική τους θέση. Τέλος, η διακοπτόμενη διασταύρωση (punctuated crossover) [Schaffer et al., 1987], η οποία βασίζεται στην διασταύρωση πολλαπλών σημείων, με τη διαφορά ότι τόσο ο αριθμός όσο και η θέση των σημείων διασταύρωσης αποτελούν παραμέτρους οι οποίες βελτιστοποιούνται κατά την εξέλιξη του ΓΑ.

Μετάλλαξη (Mutation)

Η μετάλλαξη είναι η διαδικασία κατά την οποία τα γονίδια ενός ατόμου μεταλλάσσονται, προκειμένου να προκύψει ένα νέο άτομο που αντικαθιστά το υπάρχον. Κάθε νέος απογόνος μεταβάλλει τα γονίδιά του με μία μικρή πιθανότητα. Σε ΓΑ όπου χρησιμοποιείται δυαδική κωδικοποίηση αυτό μπορεί αν συμβεί με αντιστροφή ενός bit (π.χ. το 0 σε 1), ενώ σε ΓΑ όπου η κωδικοποίηση βασίζεται σε χαρακτήρες με τυχαία αντικατάσταση ενός χαρακτήρα από κάποιον άλλον (Σχήμα 4.8). Η μετάλλαξη προκαλεί τυχαία αλλαγή στα χαρακτηριστικά κάθε απογόνου και όταν χρησιμοποιείται χωρίς τη λειτουργία της διασταύρωσης ισο-

δυναμεί με τυχαία αναζήτηση του χώρου των λύσεων. Ο ρόλος της μετάλλαξης στον ΓΑ είναι αρκετά σημαντικός καθώς ο βασικός της στόχος είναι να επαναφέρει χαρακτηριστικά (χρωμοσώματα) του πληθυσμού τα οποία χάθηκαν κατά τη διαδικασία της διασταύρωσης, ώστε αυτά να επαναξιολογηθούν σε νέους συνδυασμούς ή να εφοδιάσει αυτόν με χαρακτηριστικά τα οποία δεν υπήρχαν στον αρχικό πληθυσμό.

```
Before Mutation: 110100010011
After Mutation: 110000010011

Before Mutation: dcaffgekefcd
After Mutation: dcaffgdkefcd
```

Σχήμα 4.8: Μετάλλαξη

Πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability) P_M , είναι η πιθανότητα να μεταλλαχθεί κάθε χρωμόσωμα ενός ατόμου. Η πιθανότητα αυτή ελέγχει το ρυθμό με τον οποίο νέα χαρακτηριστικά (χρωμοσώματα) παρουσιάζονται στον εκάστοτε πληθυσμό. Εάν είναι πολύ μικρή, πολλά χαρακτηριστικά, τα οποία πιθανώς να ήταν ωφέλιμα για την εξέλιξη του πληθυσμού, δεν αξιολογούνται. Εάν είναι πολύ μεγάλη, υπάρχει ο κίνδυνος να εμφανιστεί μεγάλος θόρυβος (παραμόρφωση) και οι απόγονοι να χάσουν τους γενετικούς δεσμούς με τους γονείς τους, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να χάσει τη δυνατότητα μιας αύξουσας εξελικτικής πορείας. Γενικά, η πιθανότητα μετάλλαξης είναι της τάξης του 5% με 15%. Μία ακόμη παράμετρος που συχνά ορίζεται και αφορά την πράξη της μετάλλαξης είναι το εύρος μετάλλαξης (string mutation ratio). Με την παράμετρο αυτή καθορίζεται το ποσοστό του μήκους χρωμοσώματος το οποίο μπορεί να μεταλλαχθεί. Έτσι, εάν εύρος μετάλλαξης έχει την τιμή 0.5, η μετάλλαξη μπορεί να λάβει χώρα μόνο στο 50% του μήκους του χρωμοσώματος.

Αντιστροφή (Inversion)

Όταν ο J. Holland [Holland, 1975] πρότεινε το βασικό ΓΑ, παρουσίασε τέσσερις γενετικές πράξεις: την επιλογή (selection), τη διασταύρωση σε ένα σημείο (one-point crossover), την μετάλλαξη (mutation) και την αντιστροφή (inversion). Η τελευταία γενετική πράξη χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να αυξήσει την πιθανότητα επιβίωσης μίας διάταξης/σχηματοποίησης γονιδίων (*schemata*), εντός του χρωμοσώματος, με ισχυρή προσαρμοστικότητα. Ο Holland κατάφερε να μειώσει την επίδραση της διασταύρωσης σε ένα σημείο στη διάσπαση μίας ομάδας γονιδίων με μεγάλη προσαρμοστικότητα. Γενικά, η αντιστροφή είναι μία τυχαία επιλογή δύο σημείων εντός του χρωμοσώματος και η αντιστροφή του τμήματος μεταξύ αυτών των δύο σημείων. Για παράδειγμα εάν το χρωμόσωμα 1 0 0 1 0 1 0 1 κωδικοποιηθεί ως εξής:

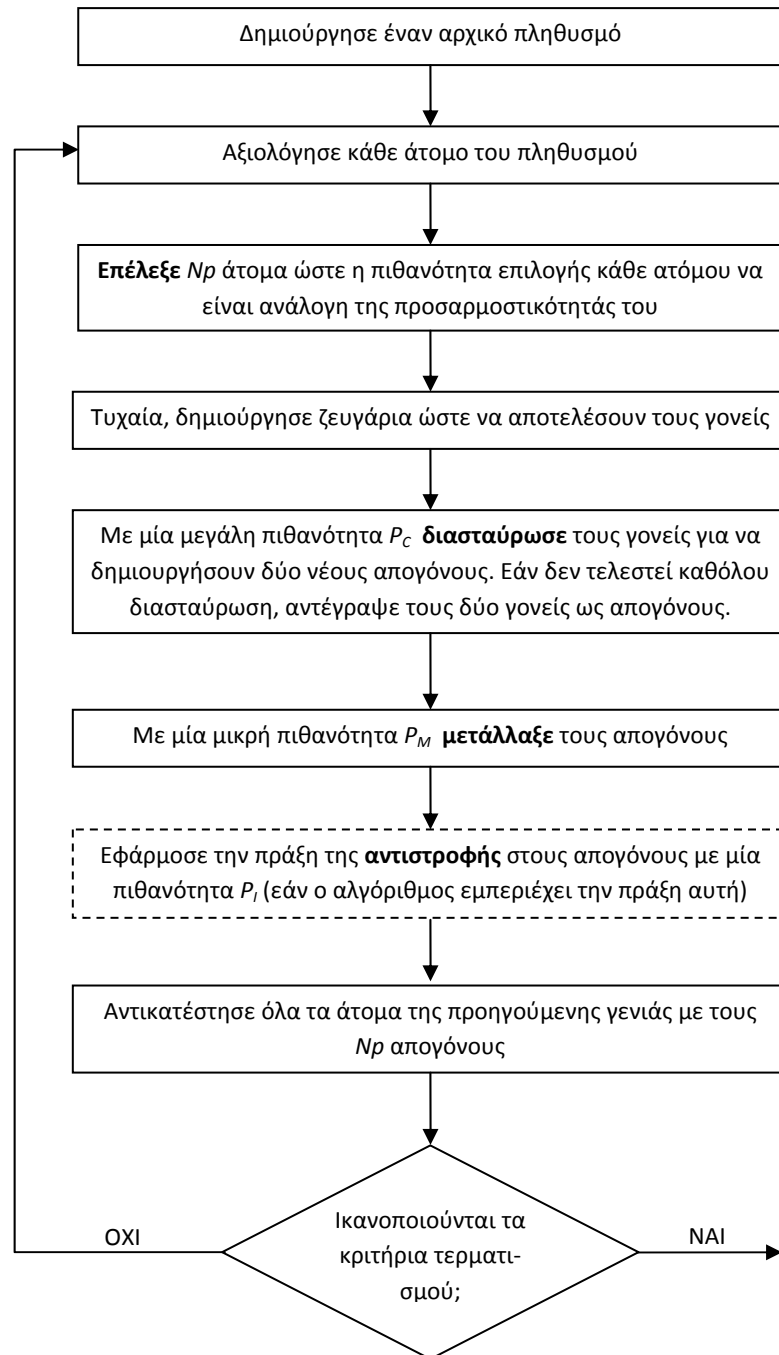
(1 , 1) (2 , 0) (3 , 0) (4 , 1) (5 , 0) (6 , 1) (7 , 0) (8 , 1)

τότε, εάν εφαρμοστεί η αντιστροφή μεταξύ του τρίτου και του έκτου γονιδίου γίνεται:

(1 , 1) (2 , 0) (6 , 1) (5 , 0) (4 , 1) (3 , 0) (7 , 0) (8 , 1)

Η αντιστροφή δεν μεταβάλλει την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας του χρωμοσώματος, γιατί η αύξουσα σειρά των γονιδίων βασίζεται στους δείκτες (1,2,...,8). Εάν υποθέσουμε

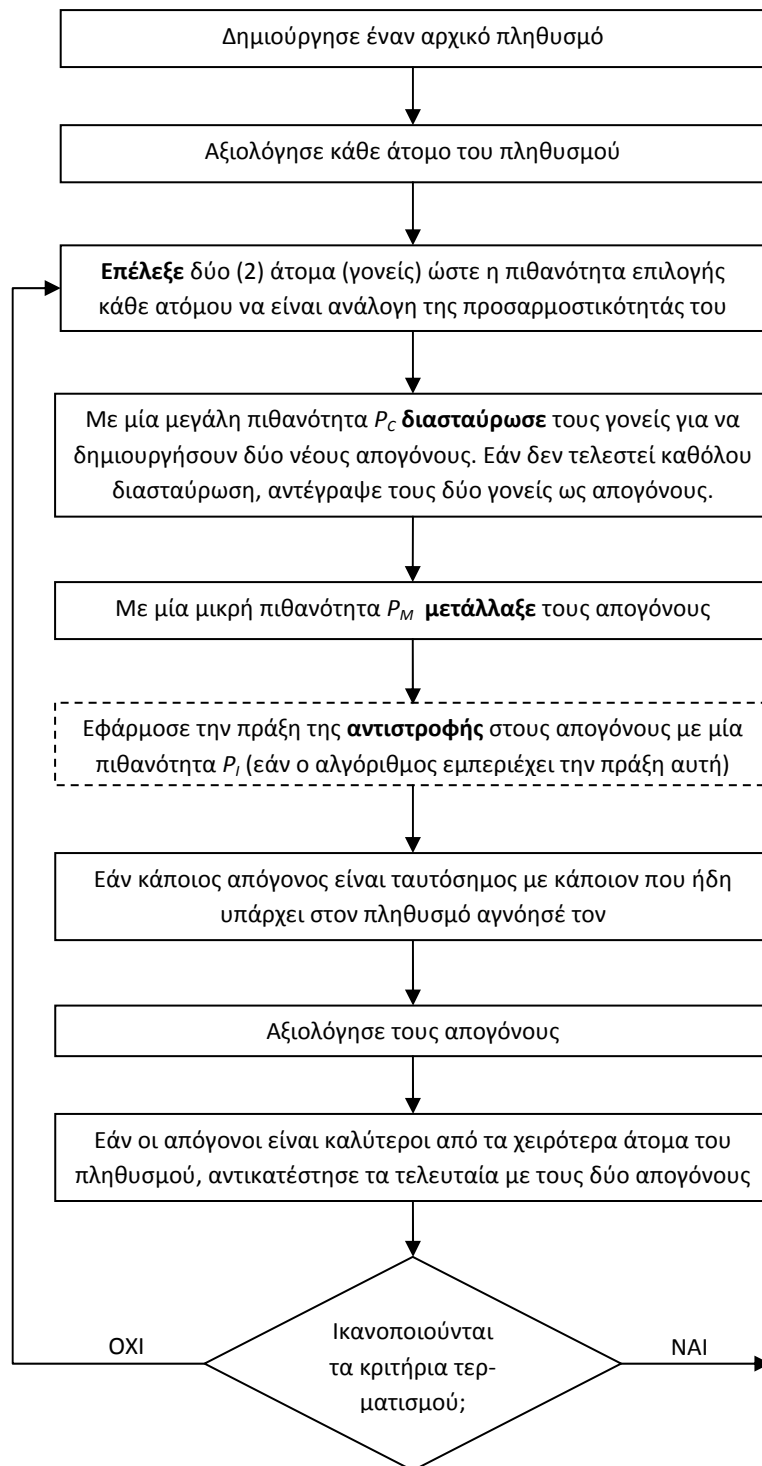
τώρα ότι η αρχική σχηματοποίηση $10^{**}01^{**}$ παρουσιάζει μεγάλη προσαρμοστικότητα, μετά την εφαρμογή της αντιστροφής η νέα σχηματοποίηση είναι 1010^{***} . Αυτή η σχηματοποίηση έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να μείνει αδιάσπαστη υπό την επίδραση της διασταύρωσης σε ένα σημείο. Παρόλα αυτά, οι ερευνητές, τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν διαφορούμενες απόψεις σχετικά με την αποδοτικότητα της πράξης της αντιστροφής στους ΓΑ. Έτσι πολλές παραλλαγές του βασικού ΓΑ του Holland δεν περιέχουν την αντιστροφή στις κύριες γενετικές πράξεις.



Σχήμα 4.9: Ο απλός γενετικός αλγόριθμος (simple GA) [Mazumder et al., 1998]

Γενικά, υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις ΓΑ: ο απλός ΓΑ (*simple or generational or total replacement evolution GA*) και ο ευσταθής ΓΑ (*steady-state evolution GA*) τα διάγραμμα ροής των οποίων φαίνονται στο Σχήμα 4.9 και στο Σχήμα 4.10, αντίστοιχα. Στην πρώτη, ολό-

κληρος ο πληθυσμός κάθε γενιάς αντικαθίσταται από τα άτομα της επόμενης, ενώ στη δεύτερη η αντικατάσταση βασίζεται στη σύγκριση των ατόμων των δύο γενεών ως προς την προσαρμοστικότητα τους. Κάθε μία από τις δύο αυτές προσεγγίσεις έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, η επιλογή δε μίας από τις δύο εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή.



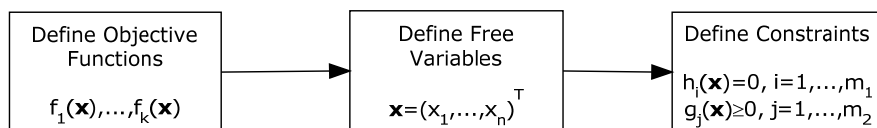
Σχήμα 4.10: Ο ευσταθής γενετικός αλγόριθμος (steady-state GA) [Mazumder et al., 1998]

Αξίζει να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία συναντάται επίσης ο όρος adaptive evolution GA (προσαρμοζόμενος ή εναρμονιζόμενος GA). Στους GA αυτούς, η πιθανότητα διασταύρωσης

και η πιθανότητα μετάλλαξης αποτελούν παραμέτρους οι οποίες υπολογίζονται από τον ίδιο τον αλγόριθμο και μεταβάλλονται κατά την εξέλιξή του, ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητά τους. Η δυνατότητα αυτή είναι αρκετά χρήσιμη όταν δεν είναι ξεκάθαρο ποιες πρέπει να είναι οι τιμές της πιθανότητας για κάθε μία από τις δύο παραπάνω γενετικές πράξεις.

4.4. Ανάπτυξη Εφαρμογών Βελτιστοποίησης

Γενικά, η ανάπτυξη μίας εφαρμογής βελτιστοποίησης μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριες φάσεις. Η πρώτη από αυτές αφορά τον ορισμό και τη διατύπωση του προβλήματος, ενώ η δεύτερη την επίλυσή του. Όπως έχει αναφερθεί, η διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης έγκειται στον ορισμό των ελεύθερων μεταβλητών, των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών (Σχήμα 4.11). Στις εφαρμογές βελτιστοποίησης που αφορούν την παραμετρική σχεδίαση πλοίων, το σύνολο των ελεύθερων μεταβλητών αποτελεί ουσιαστικά υποσύνολο των μεταβλητών σχεδίασης. Για παράδειγμα, ως ελεύθερες μεταβλητές μπορεί να οριστούν το μήκος, το πλάτος και ο αριθμός επιβατών, ενώ οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων παραμένουν σταθερές για κάθε εναλλακτική σχεδίαση, που προκύπτει μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Έτσι, και προκειμένου να υπάρξει σαφής διαχωρισμός, ονομάζουμε τα μεγέθη αυτά «σταθερές σχεδίασης» (design constants). Ως αντικειμενική συνάρτηση ή περιορισμός μπορεί να οριστεί οποιοδήποτε από τα μεγέθη τα οποία προκύπτουν μέσω της παραμετρικής σχεδίασης, όπως για παράδειγμα η μεγιστοποίηση της ΚΠΑ ή του αριθμού των ΙΧ αυτοκινήτων.

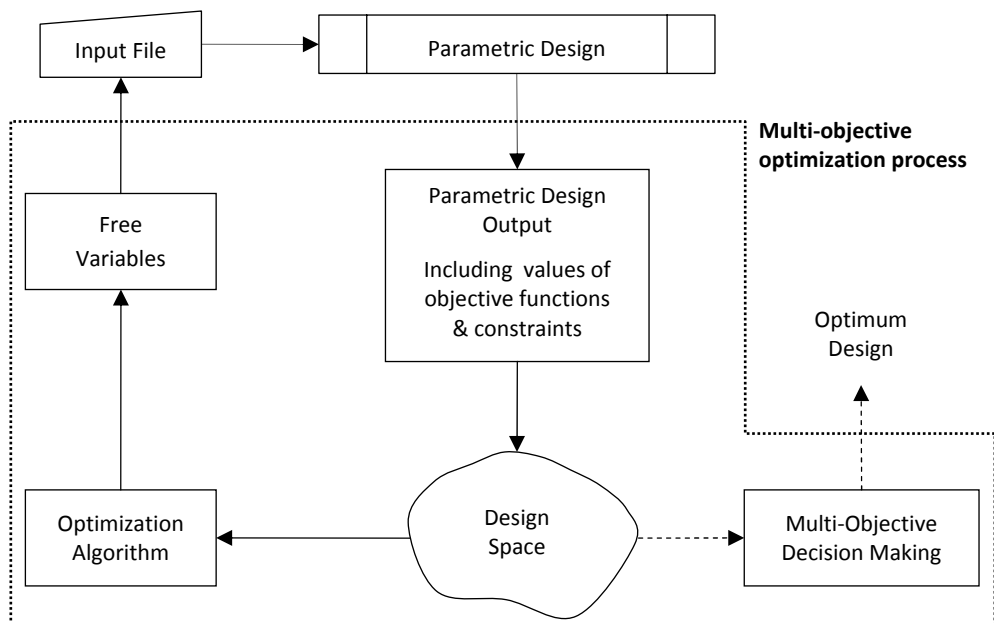


Σχήμα 4.11: Ο ορισμός ενός προβλήματος βελτιστοποίησης

Η επίλυση του προβλήματος αποτελεί τη δεύτερη φάση μιας εφαρμογής βελτιστοποίησης. Στη γενική περίπτωση, ο μελετητής καλείται να επιλύσει ένα πολυ-παραμετρικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα, με ύπαρξη περιορισμών. Πρώτο βήμα της φάσης αυτής είναι η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου. Η επιλογή αυτή είναι μία αρκετά δύσκολη διαδικασία που προϋποθέτει ικανό θεωρητικό υπόβαθρο και σχετική εμπειρία. Ο αριθμός των ελεύθερων μεταβλητών, η γραμμικότητα, η συνέχεια ή/και η κυρτότητα του πεδίου τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, ακόμα και ο χρόνος εκτέλεσης είναι μερικές μόνο από τις παραμέτρους που πρέπει να λάβει υπόψη ο μελετητής πριν επιλέξει τον κατάλληλο αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Συχνά, για τη λύση ενός προβλήματος, χρησιμοποιούνται περισσότεροι από έναν αλγόριθμοι και η τελική επιλογή γίνεται εκ του αποτελέσματος. Οι πιο δεδομένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, σε προβλήματα που αφορούν τη σχεδίαση πλοίων, είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ), (MOGA, MOGAII, κ.ά.) ενώ μικρή εφαρμογή παρουσιάζουν τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ). Πολλές φορές σε έναν δεδομένο αλγόριθμο επίλυσης, χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση των παραμέτρων έτσι ώστε αυτός να εντοπίσει ή να προσεγγίσει όσο το δυνατόν πλησιέστερα τη βέλτιστη λύση. Προκειμένου για ΓΑ η διε-

ρεύνηση αυτή αφορά συνήθως τις πιθανότητες των γενετικών πράξεων, ενώ στα ΤΝΔ αφορά τον αριθμό των νευρώνων, των κόμβων και των επιπέδων.

Το δεύτερο βήμα της φάσης αυτής περιλαμβάνει τη σύνδεση της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτό μπορεί να γίνει είτε με την ανάπτυξη νέων εφαρμογών είτε με τη χρήση εμπορικών λογισμικών (π.χ. modeFRONTIER, MATLAB, κ.ά.). Το Σχήμα 4.12 δείχνει το απλοποιημένο διάγραμμα σύνδεσης μεταξύ της εφαρμογής παραμετρικής σχεδίασης και του περιβάλλοντος βελτιστοποίησης. Σύμφωνα με αυτό, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μεταβάλλει, τις τιμές των ελεύθερων μεταβλητών στο αρχείο εισόδου της εφαρμογής παραμετρικής σχεδίασης. Στη συνέχεια η εφαρμογή παραμετρικής σχεδίασης «διαβάζει» το νέο αρχείο και δημιουργεί μία νέα σχεδίαση. Σε ένα αρχείο εξόδου καταγράφονται διάφορα χαρακτηριστικά του πλοίου, που ενδιαφέρουν το μελετητή. Τα δεδομένα του αρχείου αυτού στη συνέχεια εισάγονται στην εφαρμογή βελτιστοποίησης προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην ορθολογική αξιολόγηση των σχεδιάσεων και την επιλογή της βέλτιστης λύσης. Κάθε εναλλακτική σχεδίαση που δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύεται σε μία βάση δεδομένων, το μέγεθος της οποίας εξαρτάται τις παραμέτρους του αλγορίθμου βελτιστοποίησης (π.χ. αριθμός γενεών, πλήθος ατόμων ανά γενεά). Σημειώνεται ότι, προκειμένου για πρόβλημα με περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις, είναι συχνά αναγκαία η χρήση κατάλληλης μεθόδου λήψης αποφάσεων προκειμένου να προσδιοριστεί η βέλτιστη λύση.



Σχήμα 4.12: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Στα πλαίσια της παρούσας Διατριβής, ως περιβάλλον βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό modeFRONTIER®. Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα ολοκληρωμένο βοήθημα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης και λήψης αποφάσεων, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στη βιομηχανία όσο και την εκπαίδευση. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται μία χαρακτηριστική εφαρμογή βελτιστοποίησης, μέσω της οποίας αναλύεται τόσο η χρήση όσο και η χρησιμότητα του παραπάνω λογισμικού στην επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης στη σχεδίαση πλοίων.

Κεφάλαιο 5:
Εφαρμογή Προμελέτης -
Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΜΕΛΕΤΗΣ – ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η παρούσα εφαρμογή προμελέτης αφορά τη σχεδίαση ενός ταχύπλοου Ε/Γ-ΟΓ πλοίου μονής γάστρας. Για ένα δεδομένο σύνολο παραμέτρων σχεδίασης ζητείται εκείνος ο συνδυασμός ελεύθερων μεταβλητών για τον οποίο προκύπτει το βέλτιστο πλοίο, με βάση έναν αριθμό κριτηρίων και περιορισμών. Το πρόβλημα αυτό ανήκει στην κατηγορία των πολυπαραμετρικών, πολυκριτηριακών προβλημάτων με περιορισμούς, στα οποία γενικά η λύση δεν είναι μονοσήμαντη λόγω των αντικρουόμενων μεταξύ τους αντικειμενικών συναρτήσεων. Ως γνωστό, η λύση ενός τέτοιου προβλήματος αποτελείται από ένα σύνολο υποψήφιων βέλτιστων λύσεων οι οποίες ικανοποιούν τη βελτιστότητα Pareto. Για το λόγο αυτό, μετά τη σύγκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση του συνόλου αυτού προκειμένου να επιλεγεί ως βέλτιστη, η λύση εκείνη η οποία ικανοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό μια σειρά από κριτήρια επιλογής. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια σύνθεσης και επίλυσης ενός συγκεκριμένου προβλήματος σχεδίασης ως παράδειγμα εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας προμελέτης.

5.1. Σύνθεση του προβλήματος

Στο παρόν πρόβλημα σχεδίασης αναζητούνται οι τιμές των κυρίων διαστάσεων (μήκος, πλάτος, βύθισμα και κοίλο) ενός μεσαίου μεγέθους πλοίου, για τις οποίες ελαχιστοποιούνται το κόστος κατασκευής και η εγκατεστημένη ισχύς πρόωσης, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται η μεταφορική ικανότητα επιβατών και ΙΧ αυτοκινήτων. Βασικό περιορισμό αποτελεί, όπως περιγράφεται και παρακάτω, η ικανοποίηση των κριτηρίων ευστάθειας τόσο στην άθικτη κατάσταση όσο και στην κατάσταση μετά από βλάβη. Η μορφή της γάστρας προέρχεται από τη συστηματική σειρά NTUA, ενώ το πλοίο διαθέτει διψύθμενα, ένα κύριο κατάστρωμα οχημάτων με δυνατότητα μεταφοράς τεσσάρων ΦΓ αυτοκινήτων και μία πλατφόρμα φόρτωσης ΙΧ αυτοκινήτων. Επιπλέον, υπάρχουν δύο καταστρώματα για την ενδιαίτηση των επιβατών και του πληρώματος. Η μέγιστη ταχύτητα ανέρχεται στους 38kn και το πλοίο θεωρείται ότι πρόκειται να νηολογηθεί σε μία γραμμή 75m. Για δεδομένα σενάρια δανεισμού και ετήσιας λειτουργίας ζητείται επίσης να προσδιοριστεί η σχεδίαση εκείνη για την οποία ελαχιστοποιείται ο απαιτούμενος ναύλος.

5.1.1. Αντικειμενικές συναρτήσεις

Όπως προαναφέρθηκε, αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος αποτελούν η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής, η ελαχιστοποίηση της ισχύος πρόωσης, η μεγιστοποίηση του αριθμού αυτοκινήτων ιδιωτικής χρήσης και η μεγιστοποίηση του αριθμού των επιβατών. Τα κριτήρια αυτά είναι τεχνικο-οικονομικής φύσεως και θα μπορούσαν ενδεχομένως να ενσωματωθούν σε ένα και μόνο, όπως για παράδειγμα την ελαχιστοποίηση του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου. Όπως γίνεται άμεσα αντιληπτό, οι παραπάνω αντικειμενικές συναρτήσεις αντικρούονται μεταξύ τους. Όσο μεγαλύτερο είναι ένα πλοίο, τόσο περισσότερους επιβάτες και ΙΧ αυτοκίνητα μπορεί να μεταφέρει. Αντίθετα, ένα μεγάλο πλοίο

είναι πιο ακριβό από ένα μικρότερο, με περισσότερα λειτουργικά έξοδα κυρίως λόγω της αυξημένης κατανάλωσης καυσίμων, για την ίδια ταχύτητα υπηρεσίας.

5.1.2. Ελεύθερες μεταβλητές

Ελεύθερες μεταβλητές του προβλήματος αποτελούν το μήκος μεταξύ καθέτων (L_{bp}), το μέγιστο πλάτος (B_{max}), το βύθισμα σχεδίασης (T_d) και το ύψος εξάλων (F_b). Το μέγεθος του πεδίου τιμών των ελεύθερων μεταβλητών, το οποίο αποτελεί ουσιαστικά το σύνολο αναζήτησης (search space) του προβλήματος βελτιστοποίησης, καθορίζεται τόσο από το εύρος όσο και από τη διακριτοποίηση (βήμα) των τιμών κάθε μεταβλητής. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή καθώς και το βήμα κάθε ελεύθερης μεταβλητής. Η επιλογή των παρακάτω τιμών βασίζεται στις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη αλλά και σε υπάρχουσες σχεδιάσεις.

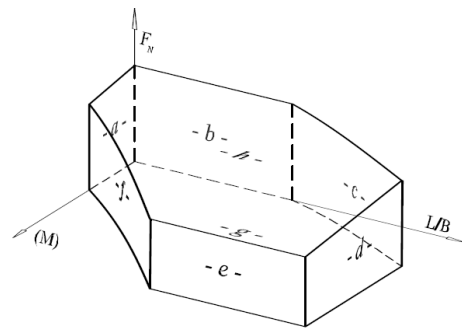
Πίνακας 5.1: Εύρος και βήμα τιμών των ελεύθερων μεταβλητών σχεδίασης

α/α	Μεταβλητή	Μονάδες	Επεξήγηση	Εύρος Τιμών		Βήμα Τιμών	Πλήθος Τιμών
				min	max		
1	L_{bp}	m	Μήκος μεταξύ καθέτων	90.0	110.0	0.20	101
2	B_{max}	m	Μέγιστο πλάτος	16.5	19.5	0.05	61
3	T_d	m	Βύθισμα σχεδίασης	2.3	3.5	0.02	61
4	F_b	m	Ύψος εξάλων	2.0	3.0	0.05	21

5.1.3. Περιορισμοί

Οι περιορισμοί του προβλήματος αφορούν την ευστάθεια του πλοίου και τον υπολογισμό της αντίστασης πρόωσης. Προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι το βέλτιστο πλοίο θα ικανοποιεί τους κανονισμούς ευστάθειας, περιορισμό του προβλήματος αποτελεί επίσης η απαίτηση για περιθώριο ευστάθειας (ΔGM) μεγαλύτερο από 30 cm . Υπενθυμίζεται ότι ως περιθώριο ευστάθειας νοείται η μικρότερη διαφορά μεταξύ του υπάρχοντος και του απαιτούμενου μετακεντρικού ύψους, ώστε να ικανοποιούνται τα κριτήρια ευστάθειας στην άθικτη κατάσταση και στην κατάσταση μετά από βλάβη για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης.

Επιπλέον, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό να απορρίπτονται οι σχεδιάσεις εκείνες για τις οποίες η μέθοδος υπολογισμού της αντίστασης είναι εκτός των ορίων εφαρμογής. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα για την παραγωγή της γάστρας χρησιμοποιείται η συστηματική σειρά γαστρών διπλής ακμής NTUA. Έτσι στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ενσωματώνονται οκτώ περιορισμοί, όπως αυτοί φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 5.1.



$$(M) = L_{WL} / \nabla^{1/3}$$

- a- $L/B \geq 4.2935$
- b- $(M) \geq 6.183$
- c- $(M) \geq 0.070288 \cdot (L/B)^2 - 0.477113 \cdot (L/B) + 6.544157$
- d- $L/B \leq 7.525$
- e- $(M) \leq 8.532$
- f- $(M) \leq 0.115364 \cdot (L/B)^2 - 0.195794 \cdot (L/B) + 5.648$
- g- $F_N \geq 0.23$
- h- $(M) \leq 12.7 \cdot F_N^2 - 34.75 \cdot F_N + 29.05$

Σχήμα 5.1: Περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό της αντίστασης

5.1.4. Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

Η μαθηματική διατύπωση του παραπάνω προβλήματος είναι η εξής:

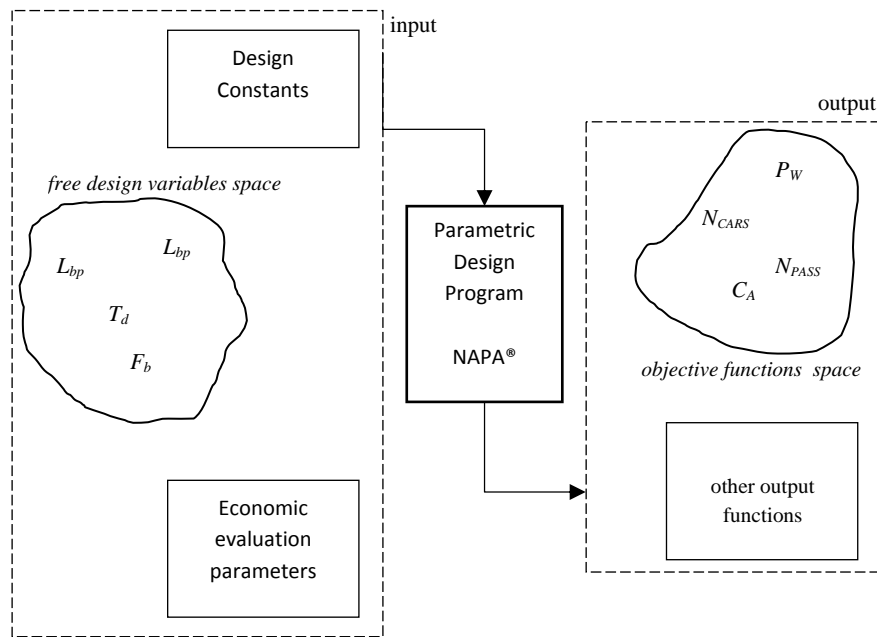
$$\left. \begin{array}{l} \underset{\mathbf{x}}{\text{minimize}} \{C_A(\mathbf{x}), P_w(\mathbf{x})\} \\ \wedge \\ \underset{\mathbf{x}}{\text{maximize}} \{N_{PASS.}(\mathbf{x}), N_{CARS}(\mathbf{x})\} \end{array} \right\}, \quad \mathbf{x} = [L_{bp}, B_{max}, T_d, F_b]^T$$

$$\text{subject to } \left\{ \begin{array}{l} \Delta GM \geq 0.3m \\ (M) - 6.183 \geq 0, \quad L/B - 4.2935 \geq 0 \\ (M) - 0.070288 \cdot (L/B)^2 + 0.477113 \cdot (L/B) - 6.544157 \geq 0 \\ L/B - 7.525 \leq 0, \quad (M) - 8.532 \leq 0 \\ (M) - 0.115364 \cdot (L/B)^2 + 0.195794 \cdot (L/B) + 5.648 \leq 0 \\ F_N - 0.23 \geq 0 \\ (M) - 12.7 \cdot F_N^2 + 34.75 \cdot F_N - 29.05 \leq 0 \end{array} \right. \quad (5.1)$$

where $(M) = L_{WL} / \nabla^{1/3}$

5.2. Παραμετρική Σχεδίαση

Εκτός από τις παραπάνω ελεύθερες μεταβλητές, απαιτείται ο καθορισμός των τιμών των παραμέτρων εκείνων οι οποίες παραμένουν σταθερές (design constants) και είναι απαραίτητες για την παραγωγή της γεωμετρίας αλλά και τη διεξαγωγή απαραίτητων υπολογισμών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2 ξεχωριστή ομάδα αποτελούν οι παράμετροι εκείνες οι οποίες σχετίζονται με την οικονομική αξιολόγηση κάθε σχεδίασης (economic evaluation parameters).



Σχήμα 5.2: Μεταβλητές εισόδου και εξόδου της παραμετρικής σχεδίασης

5.2.1. Σχεδιαστικές παράμετροι

Οι σχεδιαστικές παράμετροι ορίζονται σε ένα αντίστοιχο αρχείο εισόδου και για την παρούσα εφαρμογή λαμβάνουν τις τιμές που φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα. Γενικά κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης σε κάθε εναλλακτική σχεδίαση υλοποιούνται τα παρακάτω:

- Ο αριθμός και η θέση των εγκάρσιων στεγανών φρακτών υπολογίζονται αυτόματα.
- Ο αριθμός των επιβατών υπολογίζεται αυτόματα για δεδομένο αριθμό καταστρωμάτων ενδιαίτησης.
- Ο αριθμός των μελών του πληρώματος υπολογίζεται αυτόματα.
- Ο αριθμός των ΙΧ αυτοκινήτων υπολογίζεται αυτόματα ενώ ο αριθμός των ΦΓ αυτοκινήτων παραμένει σταθερός και είναι ίσος με 4. Υπάρχει ένα κύριο κατάστρωμα οχημάτων καθώς και ένα ανώτερο (πλατφόρμα) το μήκος του οποίου είναι τέτοιο ώστε να επιτρέπεται η τοποθέτηση των ΦΓ αυτοκινήτων στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου.

Η εισαγωγή των μεταβλητών στο λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης (NAPA®), πραγματοποιείται μέσω ενός ASCII αρχείου εισόδου. Ο παρακάτω Πίνακας 5.2 περιέχει την κωδικοποίηση και τις τιμές όλων των σταθερών σχεδίασης της παρούσας εφαρμογής.

Πίνακας 5.2: Σχεδιαστικές σταθερές για την υλοποίηση του παραμετρικού μοντέλου

α/α	Ονομασία	Τιμή	Επεξήγηση
1	HULL.SERIES	NTUA	Συστηματική Σειρά για την παραγωγή της γάστρας
2	TBHDS.CALC.METHOD	AUTO	Μέθοδος υπολογισμού της θέσης εγκάρσιων στεγανών φρακτών
3	CALC.PASSNUMB.FROM	ACCAREA	Μέθοδος υπολογισμού του αριθμού και των χώρων ενδιαίτησης επιβατών
4	CALC.CARSNUMB.FROM	CARAREA	Μέθοδος υπολογισμού του αριθμού και των χώρων φόρτωσης ΙΧ αυτοκινήτων

Συνεχίζεται . . .

α/α	Ονομασία	Τιμή	Επεξήγηση
5	CALC.CREWNUMB.FROM	AUTO	Μέθοδος υπολογισμού του αριθμού και των χώρων ενδίαιτησης των μελών πληρώματος
6	TRUCKS	YES	Δυνατότητα ή μη μεταφοράς φορητών αυτοκινήτων
7	PLATDECK.CRT	YES	Ύπαρξη ή όχι πλατφόρμας στο κύριο κατάστρωμα μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων
8	CASING	CENTER	Θέση του (των) engine casing(s)
9	SPEED	38 (kn)	Μέγιστη Ταχύτητα
10	HEIGHTCARDK	2.5 (m)	Ύψος των χώρων μεταφοράς οχημάτων
11	HEIGHTACCDK	2.7 (m)	Ύψος χώρων ενδίαιτησης
12	HEIGHTPLATDK	2.1 (m)	Ύψος χώρου πλατφόρμας κυρίου καταστρώματος μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων
13	CARDECKSABMAINDK	1	Αριθμός καταστρωμάτων μεταφοράς ΙΧ αυτοκινήτων πάνω από το κατάστρωμα στεγανών φρακτών
14	ACCDECKS	2	Αριθμός καταστρωμάτων ενδίαιτησης
15	NUMOFENGINEROOMS	2	Ελάχιστος αριθμός μηχανοστασίων
16	NUMOFENGINES	4	Ελάχιστος αριθμός κυρίων μηχανών
17	CASING.LCOEF	0.9	Συντελεστής για τον υπολογισμό του μήκους των casings σαν ποσοστό του συνολικού μήκους μηχανοστασίων
18	CASING.BCOEF	0.11	Συντελεστής για τον υπολογισμό του πλάτους των casings σαν ποσοστό του πλάτους του κυρίου καταστρώματος οχημάτων
19	STAIRSLENGTH	10 (m)	Αρχικό μήκος κυρίων κλιμακοστασίων εισόδου επιβατών
20	STAIRSBREADTH	3 (m)	Αρχικό πλάτος κυρίων κλιμακοστασίων εισόδου επιβατών
21	PRIVCARS.INPUT	-- Δ/Χ ⁽¹⁾ --	Αριθμός ΙΧ αυτοκινήτων
22	CREW.INPUT	-- Δ/Χ ⁽²⁾ --	Αριθμός μελών πληρώματος
23	PASS.INPUT	-- Δ/Χ ⁽³⁾ --	Αριθμός επιβατών
24	SWH	2.5 (m)	Σημαντικό ύψος κύματος
25	VHCLLENG.PRIVC	4.2 (m)	Μέσο μήκος ΙΧ αυτοκινήτων
26	VHCLBEAM.PRIVC	1.8 (m)	Μέσο πλάτος ΙΧ αυτοκινήτων
27	VHCLLENG.TRUCK	16.0 (m)	Μέσο μήκος ΦΓ αυτοκινήτων
28	VHCLBEAM.TRUCK	2.5 (m)	Μέσο πλάτος ΦΓ αυτοκινήτων
29	VHCLWGHT.PRIVC	1.8 (t)	Μέσο βάρος ανά ΙΧ αυτοκινήτων
30	VHCLWGHT.TRUCK	20 (t)	Μέσο βάρος ανά ΦΓ αυτοκινήτων
31	TRUCKS.INPUT	4	Ελάχιστος αριθμός ΦΓ αυτοκινήτων
34	STEPMER	1	Βήμα επί του frame spacing για την ύπαρξη ενισχυμένων νομέων στην πρυμναία περιοχή
32	STEPNORM	1	Βήμα επί του frame spacing για την ύπαρξη ενισχυμένων νομέων στην ενδιάμεση περιοχή
33	STEPFP	1	Βήμα επί του frame spacing για την ύπαρξη ενισχυμένων νομέων στην πρυμναία περιοχή
35	FRSP1	1 (m)	Ισαπόσταση κανονικών νομέων (frame Spacing) στην πρυμναία περιοχή
36	FRSP2	1.3 (m)	Ισαπόσταση κανονικών νομέων (frame Spacing) στην ενδιάμεση περιοχή
37	FRSP3	1 (m)	Ισαπόσταση κανονικών νομέων (frame Spacing) στην πρυμναία περιοχή
38	SPACING.L	0.6 (m)	Ισαπόσταση διαμήκων ενισχυτικών
39	NUMOFGIRDERS	3	Αριθμός διαμήκων σταθμίδων καταστρωμάτων
40	MATERIAL	ALUSTEEL	Υλικό κατασκευής (ALUSTEEL = Steel and Aluminium)
41	REFMATDK	ADK	Περιοχή αλλαγής υλικού κατασκευής (ADK = Accommodation Deck)
42	F1A	0.61	Συντελεστής υλικού, αλουμίνιο
43	F1S	1.92	Συντελεστής υλικού, χάλυβας
44	SERVICE	PASSENGER	Τύπος πλοίου
45	CLASS	R1	Κλάση
46	OTHER.BHDS	-- Δ/Χ ⁽⁴⁾ --	Αριθμός εγκαρσίων φρακτών εκτός των αυτόματα υπολογισθέντων
47	FR.MAN.BHD _i	-- Δ/Χ ⁽⁴⁾ --	Θέση εγκαρσίων φρακτών εκτός των αυτόματα υπολογισθέντων (ανάλογα με τη μεταβλητή OTHER.BHDS), $i=1, \dots, OTHER.BHDS$
48	SELSERVICE	NO	Ύπαρξη ή μη χώρου αυτοεξυπηρέτησης εστίασης
49	GALLEY	NO	Ύπαρξη ή μη κουζίνας

Συνεχίζεται . . .

α/α	Ονομασία	Τιμή	Επεξήγηση
50	RESTAURANT	NO	Ύπαρξη ή μη εστιατορίου
51	ISFEEDER	NO	Το πλοίο εκτελεί ή όχι πλόες τροφοδοτικών γραμμών
52	CABINOFFICER	2	Μέσος αριθμός αξιωματικών πληρώματος ανά καμπίνα
53	CABININFERIOR	4	Μέσος αριθμός ατόμων κατώτερου πληρώματος ανά καμπίνα
54	BARSPERDECK	2	Αριθμός bars ανά κατάστρωμα ενδιαίτησης επιβατών
55	DELIVERY.DATE	2010	Ημερομηνία παράδοσης νέας κατασκευής
56	INFLATION.RATE	0.03	Πληθωρισμός
57	RANGE	500 (sm)	Ακτίνα ενεργείας
59	USD.EURO.PARITY	1.65	Ισοτιμία δολαρίου - ευρώ
-- Δ/Χ -- η τιμή της συγκεκριμένης μεταβλητής δε λαμβάνεται υπόψη:			
⁽¹⁾ Η τιμή της μεταβλητής δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί η μεταβλητή CALC.CARSNUMB.FROM='CARAREA' και ως εκ τούτου ο αριθμός των ΙΧ αυτοκινήτων υπολογίζεται αυτόματα.			
⁽²⁾ Η τιμή της μεταβλητής δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί η μεταβλητή CALC.CREWNUMB.FROM='AUTO' και ως εκ τούτου ο αριθμός των μελών του πληρώματος υπολογίζεται αυτόματα.			
⁽³⁾ Η τιμή της μεταβλητής δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί η μεταβλητή CALC.PASSNUMB.FROM='ACCAREA' και ως εκ τούτου ο αριθμός των επιβατών υπολογίζεται αυτόματα.			
⁽⁴⁾ Η τιμές των μεταβλητών δεν λαμβάνονται υπόψη γιατί η μεταβλητή TBHDS.CALC.METHOD='AUTO' και ως εκ τούτου ο αριθμός και η θέση των εγκαρσίων φρακτών υπολογίζονται αυτόματα.			

5.2.2. Οικονομικοτεχνικές παράμετροι

Οι οικονομικοτεχνικές παράμετροι αφορούν την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης «πλοίο» μέσω του υπολογισμού των οικονομικών δεικτών της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value, NPV) και του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου (Required Freight Rate, RFR). Για τον προσδιορισμό των δεικτών αυτών απαιτείται η θεώρηση ενός σεναρίου απόκτησης (δανεισμού) και ενός σεναρίου λειτουργίας. Στην παρούσα εφαρμογή ορίζονται συνολικά 49 παράμετροι όπως αυτές παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα. Αν και στο συγκεκριμένο παράδειγμα οι παραπάνω οικονομικοί δείκτες δεν αποτελούν αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, μπορούν να χρησιμεύσουν στην επιλογή της βέλτιστης λύσης ως ένα από τα κριτήρια λήψης απόφασης. Για παράδειγμα, θα μπορούσε κανείς να αναζητήσει, ανάμεσα στις λύσεις εκείνες που ικανοποιούν τη βελτιστότητα Pareto, και για τη συγκεκριμένη γραμμή νηολόγησης εκείνη με τη μικρότερη τιμή EAN.

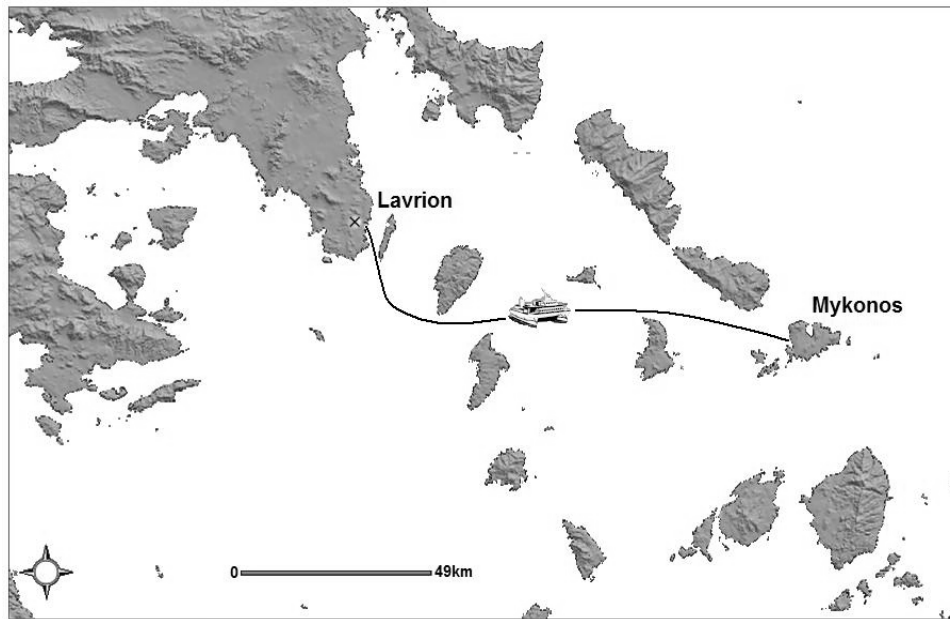
Το σενάριο λειτουργίας προβλέπει ότι το πλοίο πρόκειται να δρομολογηθεί στη γραμμή Λαύριο-Μύκονος διανύοντας 75 ναυτικά μίλια σε κάθε ταξίδι (Σχήμα 5.3). Στη διάρκεια ενός έτους λαμβάνονται υπόψη τρεις περίοδοι οικονομικής εκμετάλλευσης (χαμηλή, μεσαία και υψηλή) με διαφορετική διάρκεια, διαφορετική πληρότητα επιβατών και οχημάτων και διαφορετική συχνότητα ταξιδιών. Προκειμένου να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί θεωρείται μία μόνο θέση επιβατών με ενιαίο σταθερό ναύλο και σταθεροί ναύλοι των ΙΧ και ΦΓ αυτοκινήτων καθ' όλη τη διάρκεια ενός έτους.

Πίνακας 5.3: Οικονομικοτεχνικές παράμετροι

α/α	Ονομασία	Τιμή	Επεξήγηση
1	NPV.PPY	3	Χρονικές περίοδοι λειτουργίας ανά έτος
2	NPV.MPP1	2	Διάρκεια 1 ^{ης} περιόδου (υψηλή) σε μήνες

Συνεχίζεται . . .

α/α	Ονομασία	Τιμή	Επεξήγηση
3	NPV.MPP2	3	Διάρκεια 2 ^{ης} περιόδου (μeseαία) σε μήνες
4	NPV.MPP3	1	Διάρκεια 3 ^{ης} περιόδου (χαμηλή) σε μήνες
5	NPV.DPD1	4	Αναχωρήσεις ανά ημέρα (1 ^η περίοδος)
6	NPV.DPD2	2	Αναχωρήσεις ανά ημέρα (2 ^η περίοδος)
7	NPV.DPD3	2	Αναχωρήσεις ανά ημέρα (3 ^η περίοδος)
8	NPV.MPT1	75 (sm)	Απόσταση ταξιδιού προς μία κατεύθυνση (1 ^η περίοδος)
9	NPV.MPT2	75 (sm)	Απόσταση ταξιδιού προς μία κατεύθυνση (2 ^η περίοδος)
10	NPV.MPT3	75 (sm)	Απόσταση ταξιδιού προς μία κατεύθυνση (3 ^η περίοδος)
11	NPV.POP1	0.9	Ποσοστιαία πληρότητα επιβατών (1 ^η περίοδος)
12	NPV.POP2	0.6	Ποσοστιαία πληρότητα επιβατών (2 ^η περίοδος)
13	NPV.POP3	0.3	Ποσοστιαία πληρότητα επιβατών (3 ^η περίοδος)
14	NPV.VOP1	0.9	Ποσοστιαία πληρότητα ΙΧ αυτοκινήτων (1 ^η περίοδος)
15	NPV.VOP2	0.5	Ποσοστιαία πληρότητα ΙΧ αυτοκινήτων (2 ^η περίοδος)
16	NPV.VOP3	0.2	Ποσοστιαία πληρότητα ΙΧ αυτοκινήτων (3 ^η περίοδος)
17	NPV.TOP1	4	Αριθμός μεταφερόμενων ΦΓ αυτοκινήτων (1 ^η περίοδος)
18	NPV.TOP2	4	Αριθμός μεταφερόμενων ΦΓ αυτοκινήτων (2 ^η περίοδος)
19	NPV.TOP3	4	Αριθμός μεταφερόμενων ΦΓ αυτοκινήτων (3 ^η περίοδος)
20	NPV.AFR1	45 (€)	Ναύλος επιβατών 1 ^{ης} θέσης (1 ^η περίοδος)
21	NPV.AFR2	45 (€)	Ναύλος επιβατών 1 ^{ης} θέσης (2 ^η περίοδος)
22	NPV.AFR3	45 (€)	Ναύλος επιβατών 1 ^{ης} θέσης (3 ^η περίοδος)
23	NPV.BFR1	45 (€)	Ναύλος επιβατών οικονομικής θέσης (1 ^η περίοδος)
24	NPV.BFR2	45 (€)	Ναύλος επιβατών οικονομικής θέσης (2 ^η περίοδος)
25	NPV.BFR3	45 (€)	Ναύλος επιβατών οικονομικής θέσης (3 ^η περίοδος)
26	NPV.VFR1	67.5 (€)	Ναύλος ΙΧ αυτοκινήτων (1 ^η περίοδος)
27	NPV.VFR2	67.5 (€)	Ναύλος ΙΧ αυτοκινήτων (3 ^η περίοδος)
28	NPV.VFR3	67.5 (€)	Ναύλος ΙΧ αυτοκινήτων (3 ^η περίοδος)
29	NPV.TFR1	168.7 (€)	Ναύλος ΦΓ αυτοκινήτων (1 ^η περίοδος)
30	NPV.TFR2	168.7 (€)	Ναύλος ΦΓ αυτοκινήτων (2 ^η περίοδος)
31	NPV.TFR3	168.7 (€)	Ναύλος ΦΓ αυτοκινήτων (3 ^η περίοδος)
32	NPV.FOP	500 (€/t)	Τιμή καυσίμου κυρίων μηχανών
33	NPV.DOP	500 (€/t)	Τιμή καυσίμου λοιπών μηχανών και μηχανημάτων
34	NPV.YDELI	2	Διάρκεια έως την παράδοση σε έτη
35	NPV.DRATE	8%	Προεξοφλητικό επιτόκιο
36	NPV.LOANP	50%	Δανειστικό κεφάλαιο (% κόστους κατασκευής)
37	NPV.BINST	1	Αριθμός δόσεων ανά έτος
38	NPV.LOANY	10 (έτη)	Διάρκεια δανείου
39	NPV.LOANI	7%	Επιτόκιο δανεισμού
40	NPV.LOANF	1%	Έξοδα δανεισμού σαν ποσοστό του δανείου
41	NPV.YSERV	12 (έτη)	Χρονική περίοδος λειτουργίας ως την απόσυρση
42	NPV.PSIN	5 (€)	Καθαρό κέρδος από υπηρεσίες σε επιβάτες ανά ταξίδι και επιβάτη
43	NPV.SSUB	1%	Κρατική επιχορήγηση ανά ταξίδι
44	NPV.SPR	33%	Τιμή μεταπώλησης (% κόστους κατασκευής)
45	NPV.BPG	5%	Ετήσια αύξηση κόστους κτήσης νέας κατασκευής
46	NPV.AMCC	0.6%	Ετήσιο κόστος συντήρησης (% κόστους κτήσης)
47	NPV.MCOSTE	3%	Ετησία ποσοστιαία αύξηση κόστους συντήρησης
48	NPV.IOCC	0.3 %	Ετήσιο κόστος ασφάλισης
49	NPV.TAXR	30%	Ετήσιος φορολογικός συντελεστής κέρδους



Σχήμα 5.3: Η γραμμή νηολόγησης Λαύριο-Μύκονος

5.3. Επίλυση του προβλήματος

Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής της παρούσας μεθοδολογίας προμελέτης.

5.3.1. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος MOGA (Fonseca et al., 1993), οι παράμετροι του οποίου ορίστηκαν ως εξής:

Αρχικός πληθυσμός (Initial Population)	: 50 άτομα
Αριθμός γενεών (Number of generations)	: 500
Πιθανότητα επιλογής (Probability of selection)	: 5%
Πιθανότητα κατευθυντήριας διασταύρωσης (Probability of directional crossover)	: 50%
Πιθανότητα μετάλλαξης (Probability of mutation)	: 10%
Εύρος μετάλλαξης (DNA string mutation ratio)	: 50%
Τύπος αλγορίθμου (Algorithm type)	: Ευσταθής (Steady-state GA)
Διαχείριση περιορισμών (Treat constraints)	: Ποινή στις αντικειμ. συναρτήσεις (Penalizing Objectives)
Ελιτισμός (Elitism)	: Ναι

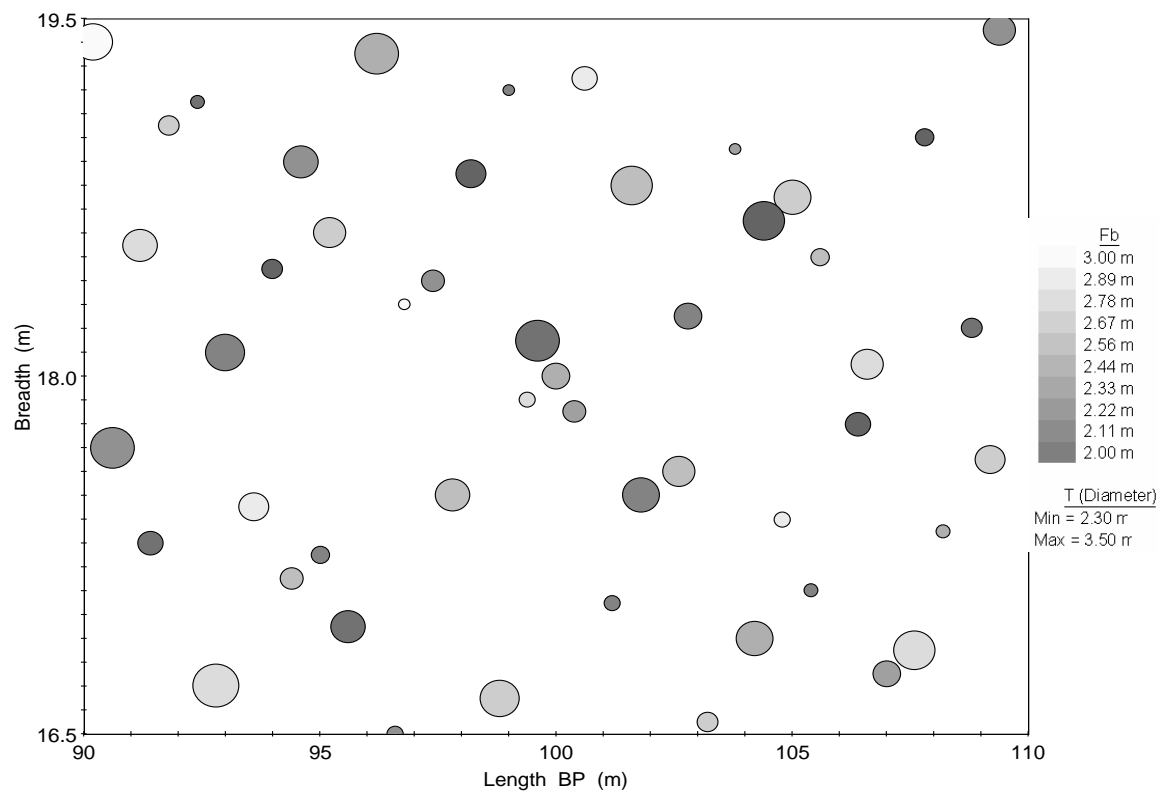
5.3.2. Αρχικός Πληθυσμός

Ο αρχικός πληθυσμός αποτελείται από 50 άτομα, τα οποία προέκυψαν μέσω της ψευδο-τυχαίας ακολουθίας SOBOL εφαρμοζόμενης σε ολόκληρο το σύνολο των πιθανών λύσεων, όπως προκύπτει από το δεδομένο εύρος και βήμα μεταβολής των ελεύθερων μεταβλητών. Γενικά προκειμένου να μειωθεί η πιθανότητα ο Γενετικός Αλγόριθμος MOGA να εγκλωβιστεί σε κάποιο τοπικό βέλτιστο, προτείνεται ο αρχικός πληθυσμός να μην περιέχει λιγότερα από $2 \cdot N_V \cdot N_F$ άτομα, όπου N_V είναι ο αριθμός των ελεύθερων μεταβλητών και N_F ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα ο αρχικός πληθυσμός δεν θα πρέπει να περιέχει λιγότερα από 32 άτομα.

Τα άτομα του αρχικού πληθυσμού φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα, ενώ στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται μία 4-διάστατη απεικόνιση του συνόλου του αρχικού πληθυσμού όπου διακρίνεται πως με την εφαρμογή του αλγορίθμου SOBOL κάθε ελεύθερη μεταβλητή λαμβάνει τιμές σχεδόν από ολόκληρο το εύρος του συνόλου αναζήτησης. Σημειώνεται ότι, όσο πιο σκούρα γίνεται η σκίαση των δίσκων του διαγράμματος, τόσο μειώνεται η τιμή του λόγου μήκος προς πλάτος, ενώ όσο μεγαλώνει η διάμετρος των δίσκων, τόσο αυξάνει η τιμή του λόγου πλάτος προς βύθισμα.

Πίνακας 5.4: Τιμές των ελεύθερων μεταβλητών, μέσω της ακολουθίας SOBOL (αρχικός πληθυσμός)

Design ID	L_{bp}	L_{bp}/B_{max}	B_{max}/T_d	F_b	Design ID	L_{bp}	L_{bp}/B_{max}	B_{max}/T_d	F_b
0	100.00	18.00	2.90	2.50	25	98.20	18.85	3.02	2.00
1	95.00	17.25	2.60	2.25	26	108.20	17.35	2.40	2.55
2	105.00	18.75	3.20	2.75	27	95.60	16.95	3.16	2.15
3	97.40	18.40	2.74	2.35	28	105.60	18.50	2.56	2.65
4	107.60	16.85	3.36	2.90	29	90.60	17.70	3.48	2.40
5	92.40	19.15	2.44	2.10	30	100.60	19.25	2.86	2.95
6	102.60	17.60	3.06	2.65	31	95.20	18.60	3.04	2.70
7	96.20	19.35	3.44	2.55	32	105.40	17.10	2.42	2.20
8	106.40	17.80	2.82	2.05	33	90.20	19.40	3.34	3.00
9	91.20	18.55	3.12	2.85	34	100.40	17.85	2.72	2.45
10	101.20	17.05	2.52	2.30	35	92.80	16.70	3.50	2.85
11	93.60	17.45	2.98	2.95	36	102.80	18.25	2.88	2.30
12	103.80	18.95	2.36	2.45	37	97.80	17.50	3.18	2.60
13	98.80	16.65	3.28	2.70	38	107.80	19.00	2.58	2.05
14	108.80	18.20	2.68	2.15	39	91.40	17.30	2.80	2.10
15	99.40	17.90	2.48	2.85	40	101.60	18.80	3.42	2.65
16	109.40	19.45	3.10	2.35	41	96.60	16.50	2.50	2.40
17	94.40	17.15	2.78	2.60	42	106.60	18.05	3.10	2.90
18	104.40	18.65	3.40	2.05	43	99.00	19.20	2.34	2.25
19	91.80	19.05	2.64	2.75	44	109.20	17.65	2.96	2.80
20	101.80	17.50	3.24	2.20	45	94.00	18.45	2.66	2.00
21	96.80	18.30	2.32	3.00	46	104.20	16.90	3.26	2.50
22	107.00	16.75	2.94	2.45	47	94.60	18.90	3.14	2.40
23	93.00	18.10	3.32	2.25	48	104.80	17.40	2.54	2.95
24	103.20	16.55	2.70	2.80	49	99.60	18.15	3.46	2.15



Σχήμα 5.4: Απεικόνιση των τιμών του αρχικού πληθυσμού

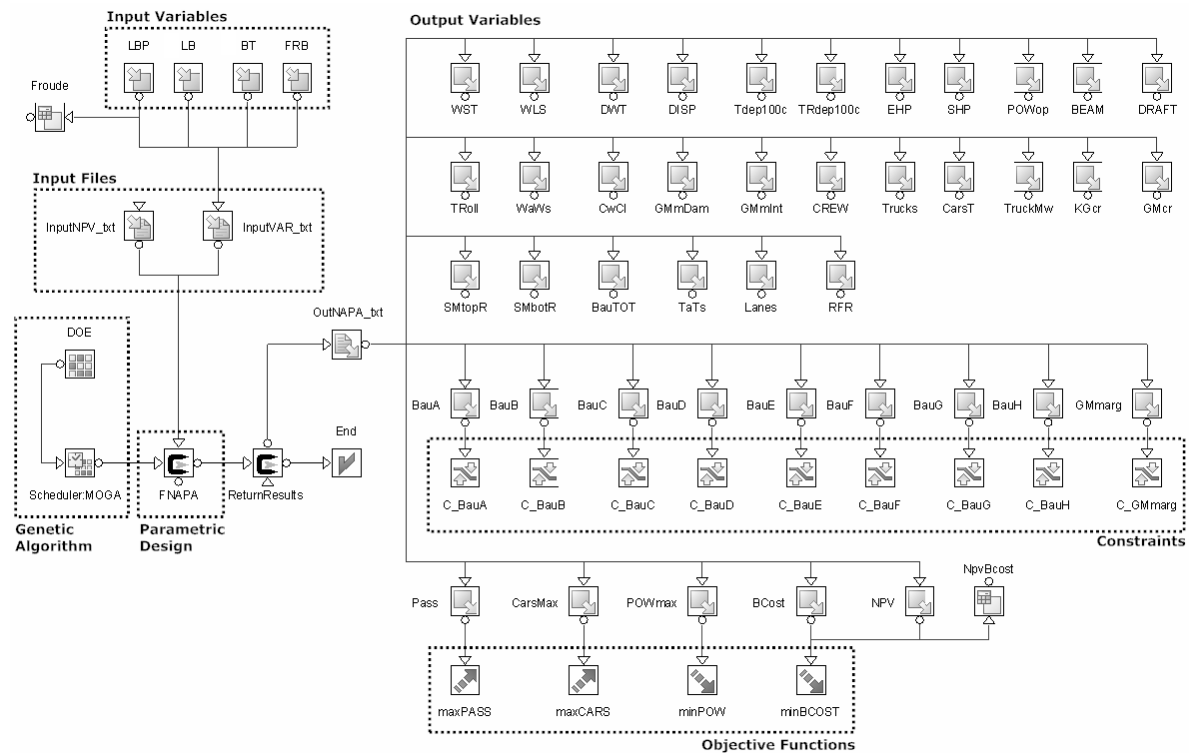
5.3.3. Περιβάλλον βελτιστοποίησης

Για την υλοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό mode-FRONTIER® της εταιρίας ESTECO. Το λογισμικό αυτό αποτελεί ένα ολοκληρωμένο εργαλείο επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης και λήψης αποφάσεων, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στη βιομηχανία όσο και στην εκπαίδευση. Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της παρούσας εφαρμογής, όπως αυτό αναπτύχθηκε στο λογισμικό mode-FRONTIER®.

Γενικά, για την επίλυση ενός προβλήματος, ακολουθείται μία σειρά από βήματα όπως αυτά περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

Προεργασία (βήματα που εκτελούνται από το χρήστη)

1. Ορίζονται οι ελεύθερες μεταβλητές και το εύρος τιμών τους.
2. Ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός
3. Ορίζονται ο αλγόριθμος και οι παράμετροι βελτιστοποίησης.
4. Συνδέεται το λογισμικό βελτιστοποίησης με το λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης.
5. Ορίζονται οι μεταβλητές εξόδου.
6. Ορίζονται οι περιορισμοί.
7. Ορίζονται οι αντικειμενικές συναρτήσεις.



Σχήμα 5.5: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης στο περιβάλλον modeFRONTIER®

Εκτέλεση (βήματα που εκτελούνται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης)

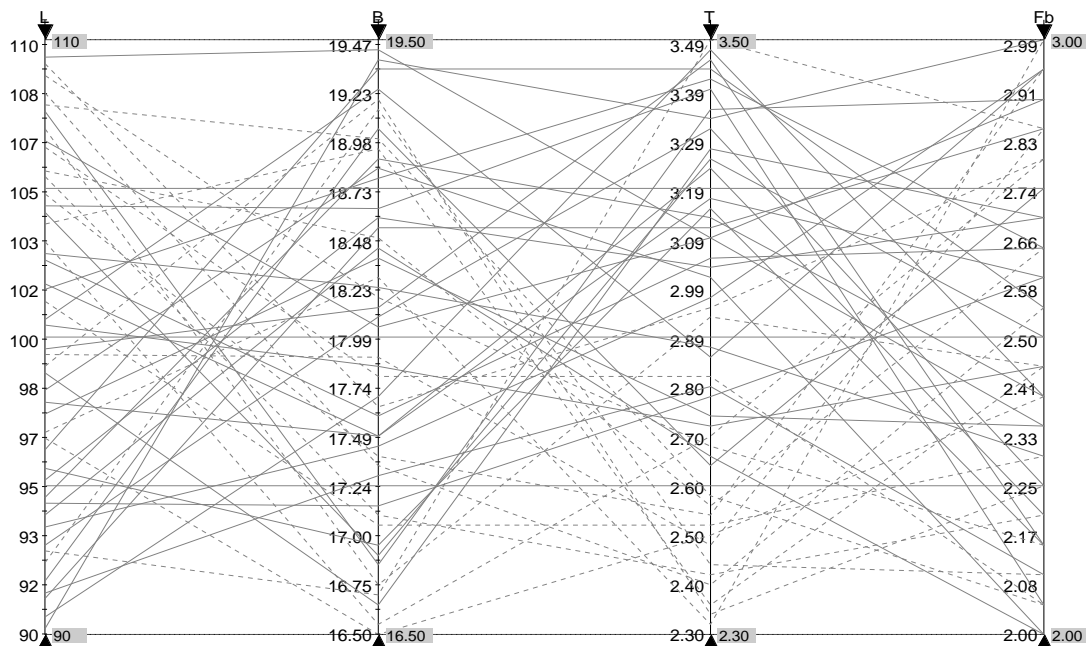
8. Κατασκευάζεται κατάλληλο αρχείο εισόδου για το λειτουργικό παραμετρικής σχεδίασης (NAPA®). Οι τιμές των ελεύθερων μεταβλητών ορίζονται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, για κάθε εναλλακτική σχεδίαση.
9. Το αρχείο εισόδου αντιγράφεται σε κατάλληλη θέση ώστε να είναι προσβάσιμο από το λογισμικό παραμετρικής σχεδίασης (NAPA®).
10. Εκτελείται και ολοκληρώνεται η διαδικασία παραμετρικής σχεδίασης.
11. Τα αρχεία εξόδου της διαδικασίας παραμετρικής σχεδίασης αντιγράφονται σε κατάλληλη θέση, διαφορετική για κάθε εναλλακτική σχεδίαση, ώστε να είναι προσβάσιμα από το λογισμικό βελτιστοποίησης (modeFRONTIER®).
12. Από σχετικό αρχείο εξόδου, καταγράφονται οι μεταβλητές εξόδου και αποθηκεύονται σε μία βάση δεδομένων, η οποία αποτελεί το σύνολο των σχεδιάσεων.
13. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξεκινώντας από το βήμα 8.
14. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν το πλήθος του ολικού πληθυσμού φτάσει τη μέγιστη τιμή του, όπως αυτή προκύπτει από τις παραμέτρους βελτιστοποίησης (βήμα 3). Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή ο ολικός πληθυσμός θα αποτελείται από $50 \times 500 = 25000$ άτομα (αρχικός πληθυσμός \times αριθμός γενεών). Σημειώνεται ότι, όταν ο αλγόριθμος συγκλίνει ο τελευταίος πληθυσμός επαναλαμβάνεται σε κάθε επόμενη γενιά χωρίς περαιτέρω υπολογιστικό κόστος. Για τον λόγο αυτό πρέπει να επιλέγεται αρκετά μεγάλος αριθμός γενεών, ώστε να διασφαλίζεται η σύγκλιση του αλγορίθμου.

5.4. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

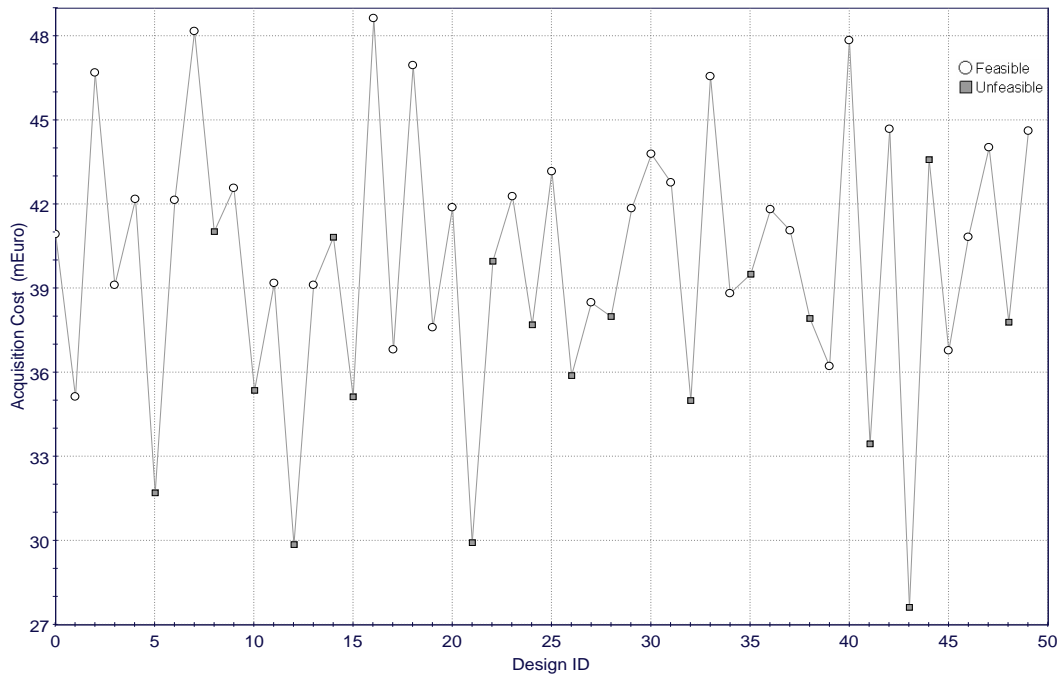
5.4.1. Αρχικός πληθυσμός

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να παραχθεί ο αρχικός πληθυσμός χρησιμοποιήθηκε η ψευδο-τυχαία ακολουθία SOBOLE. Το Σχήμα 5.6 απεικονίζει τη συσχέτιση μεταξύ των ελεύθερων μεταβλητών του προβλήματος για κάθε άτομο του αρχικού πληθυσμού. Αυτό που μπορεί κανείς να παρατηρήσει από το σχήμα αυτό είναι η διασπορά των τιμών καθ' όλη την έκταση του πεδίου τιμών των ελεύθερων μεταβλητών. Από το Σχήμα 5.7 έως το Σχήμα 5.10 παρουσιάζονται τα ιστορικά διαγράμματα των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων της πρώτης γενιάς. Από το Σχήμα 5.11 έως και το Σχήμα 5.16 παρατίθενται τα καρτεσιανά διαγράμματα των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αν και πρόκειται για τον αρχικό πληθυσμό, μπορεί κανείς να παρατηρήσει την τάση αλλά και το εύρος στο οποίο θα κινηθεί ο ολικός πληθυσμός κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, δεδομένου ότι το σύνολο του αρχικού πληθυσμού είναι αντιπροσωπευτικό του πεδίου αναζήτησης.

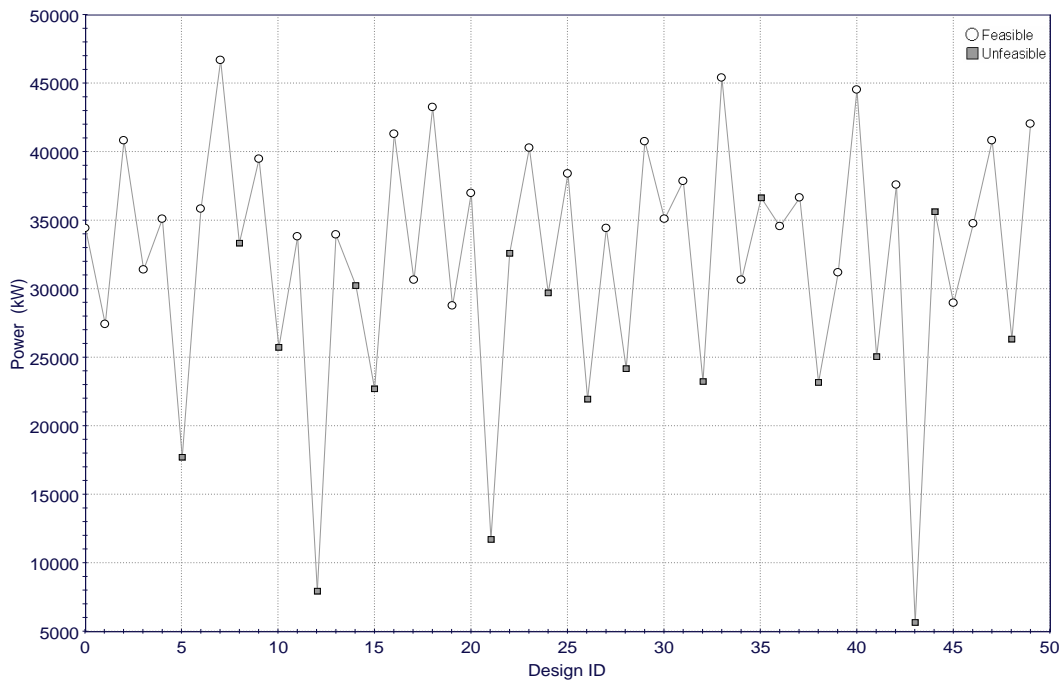
Γενικά, από τις 50 σχεδιάσεις του αρχικού πληθυσμού 32 ανήκουν στο χώρο των αποδεκτών λύσεων (64%), ενώ 18 δεν ικανοποιούν τα όρια εφαρμογής της μεθόδου υπολογισμού της αντίστασης και αποτελούν μη αποδεκτές λύσεις (36%). Σημειώνεται ότι ανάμεσα σε αυτές υπάρχουν και δύο σχεδιάσεις οι οποίες έχουν περιθώριο ευστάθειας μικρότερο από το επιτρεπόμενο. Το ποσοστό των μη αποδεκτών λύσεων, ενδέχεται να είναι υψηλό στους αρχικούς πληθυσμούς και κυρίως σε εκείνους τα άτομα των οποίων έχουν επιλεγεί με τεχνικές που βασίζονται στην τυχαιότητα. Όπως θα φανεί και παρακάτω, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των γενεών, η συχνότητα εμφάνισης μη αποδεκτών λύσεων μειώνεται σημαντικά.



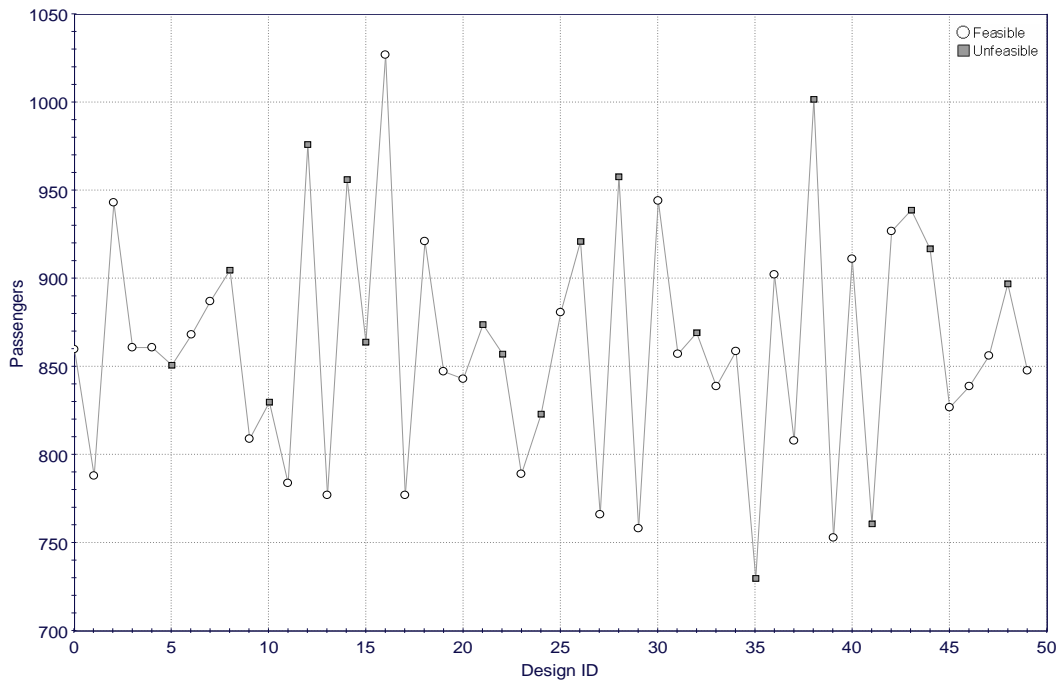
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα παράλληλων τιμών των ελεύθερων μεταβλητών, αρχικός πληθυσμός



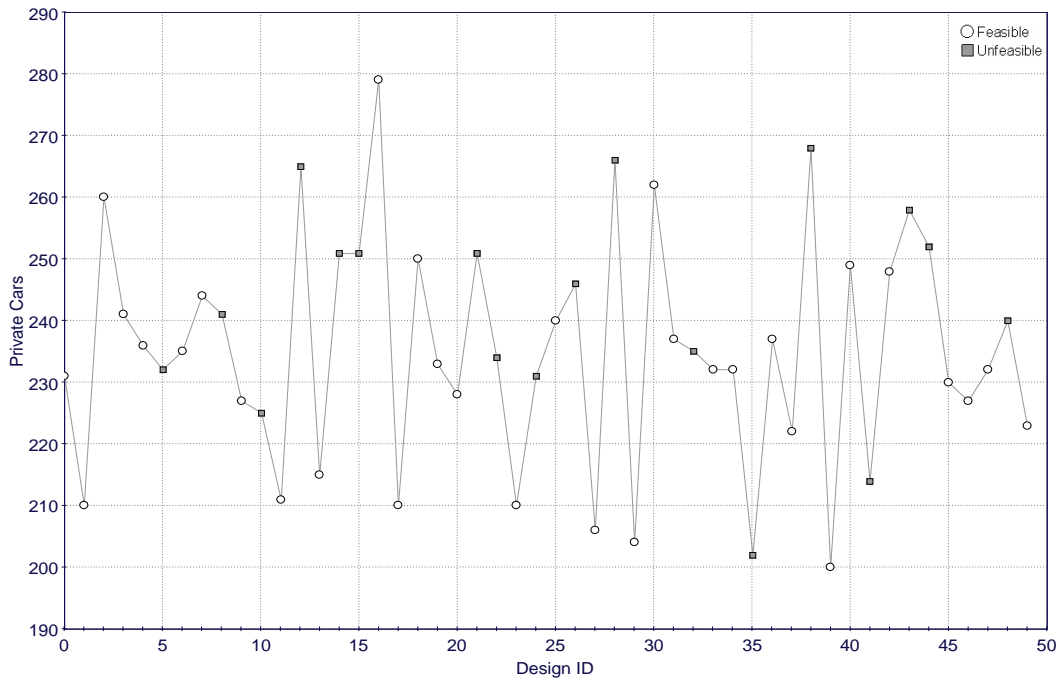
Σχήμα 5.7: Ιστορικό διάγραμμα τιμών του κόστους κατασκευής, αρχικός πληθυσμός



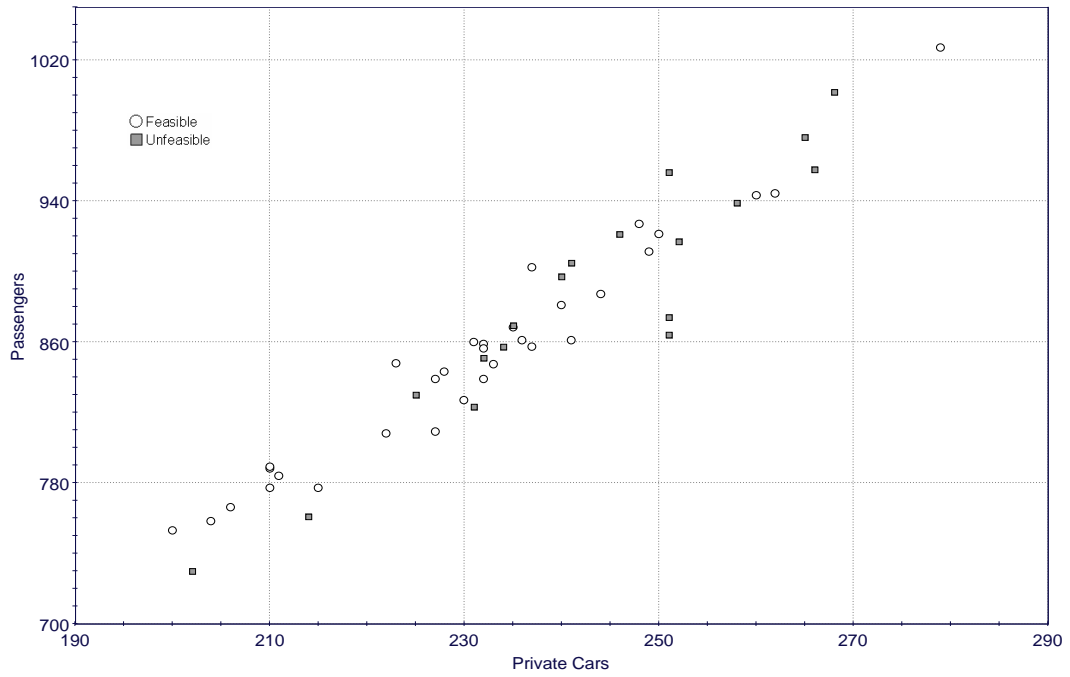
Σχήμα 5.8: Ιστορικό διάγραμμα τιμών της ισχύος πρόωσης, αρχικός πληθυσμός



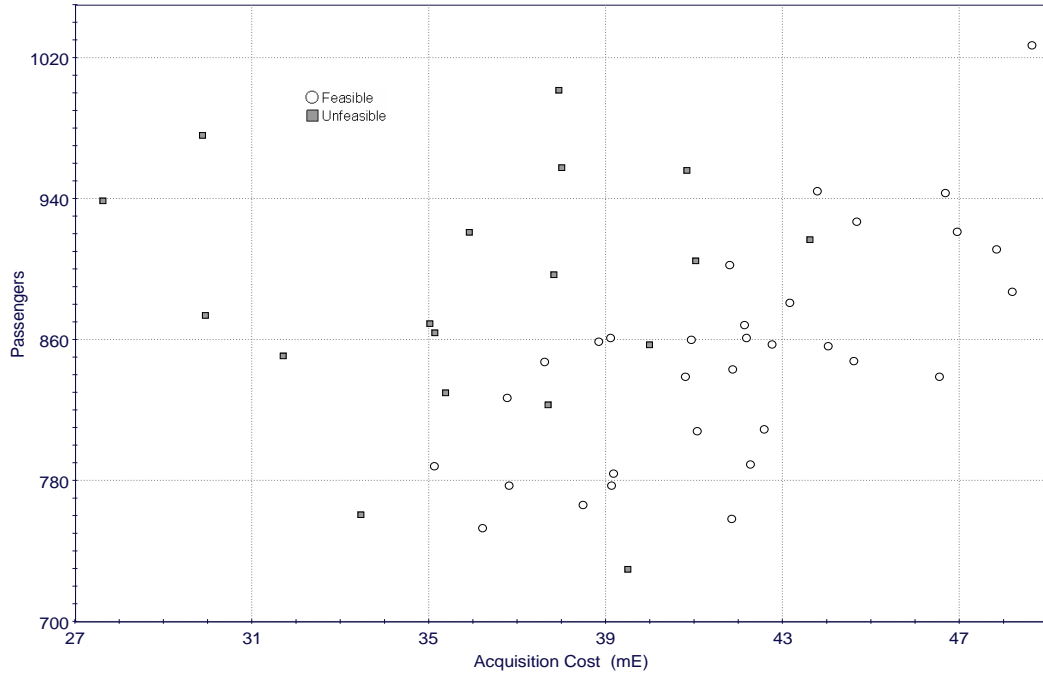
Σχήμα 5.9: Ιστορικό διάγραμμα τιμών του αριθμού επιβατών, αρχικός πληθυσμός



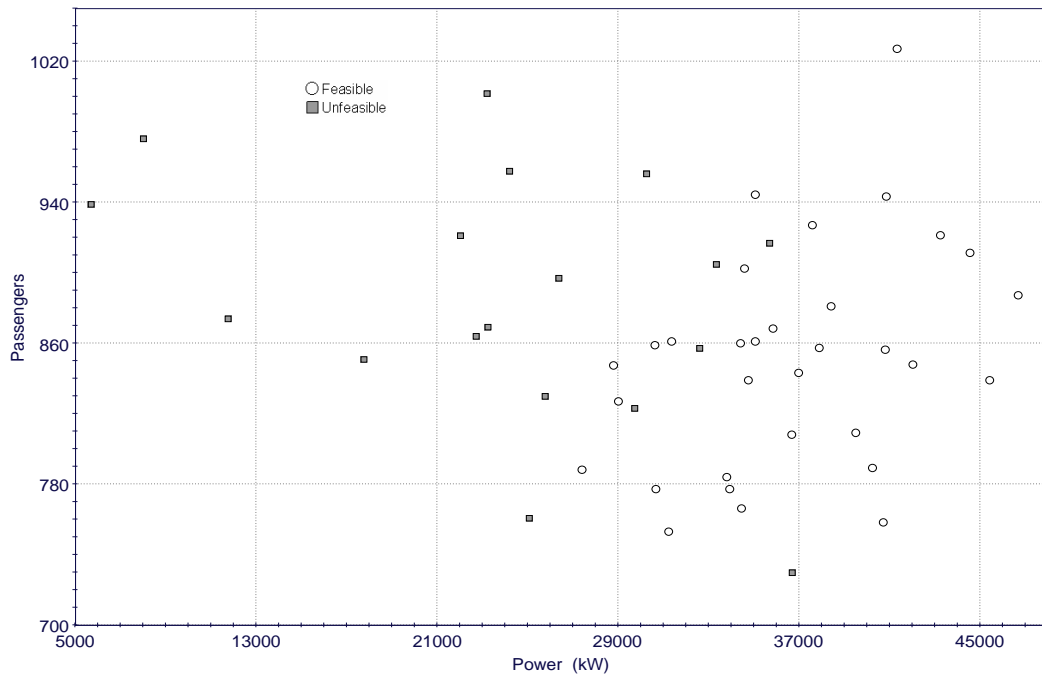
Σχήμα 5.10: Ιστορικό διάγραμμα τιμών του αριθμού ΙΧ αυτοκινήτων, αρχικός πληθυσμός



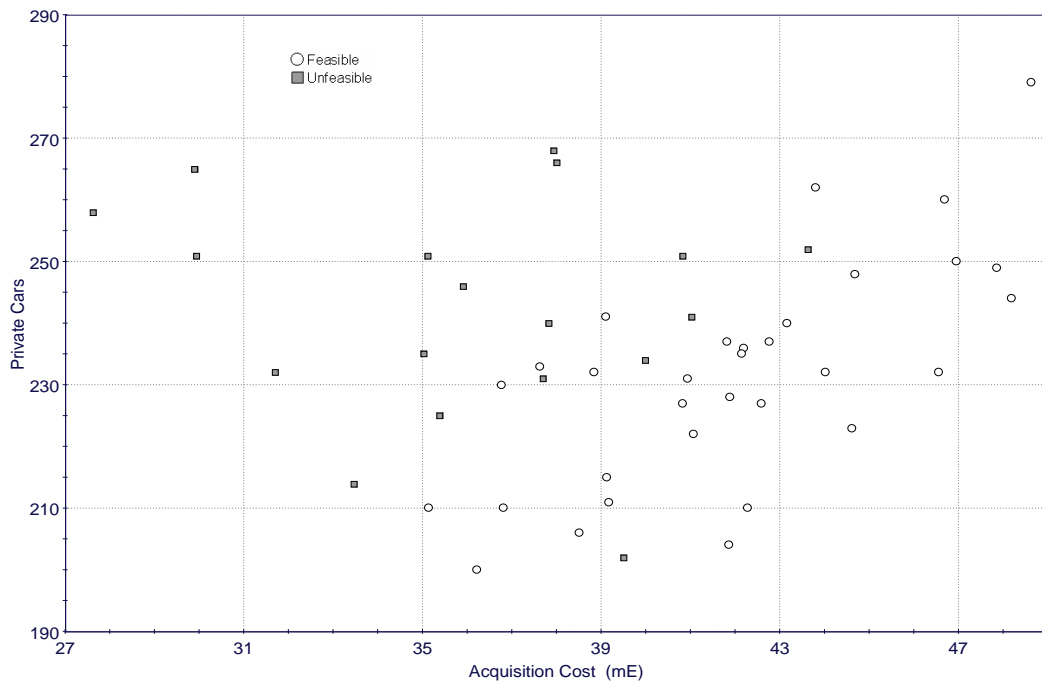
Σχήμα 5.11: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού επιβατών και οχημάτων, αρχικός πληθυσμός



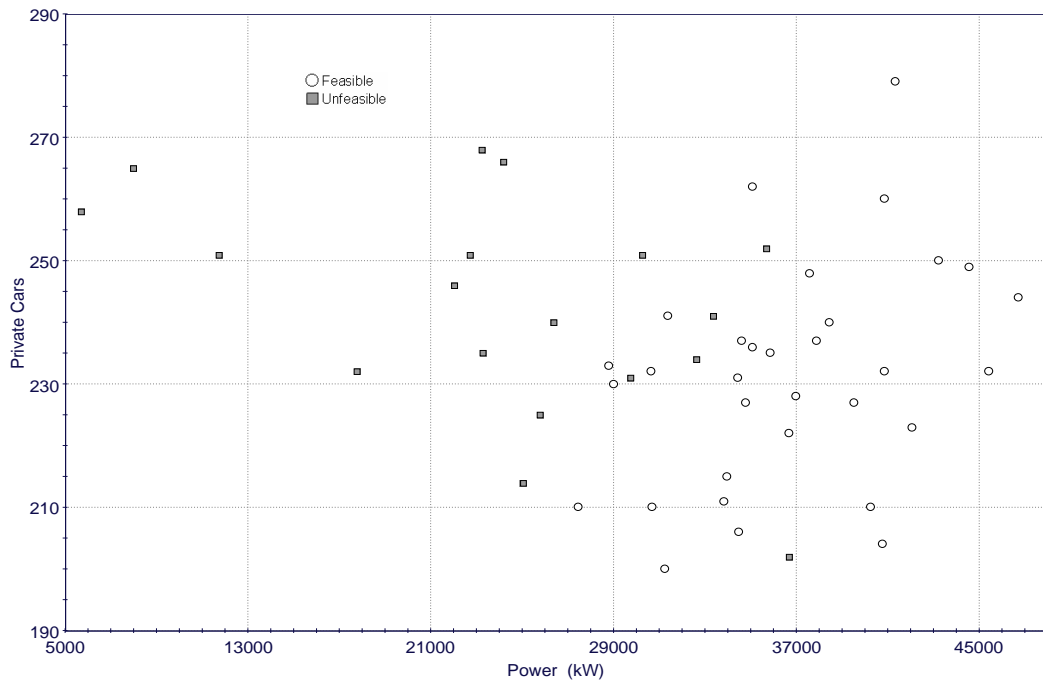
Σχήμα 5.12: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού επιβατών και κόστους κτήσης, αρχικός πληθυσμός



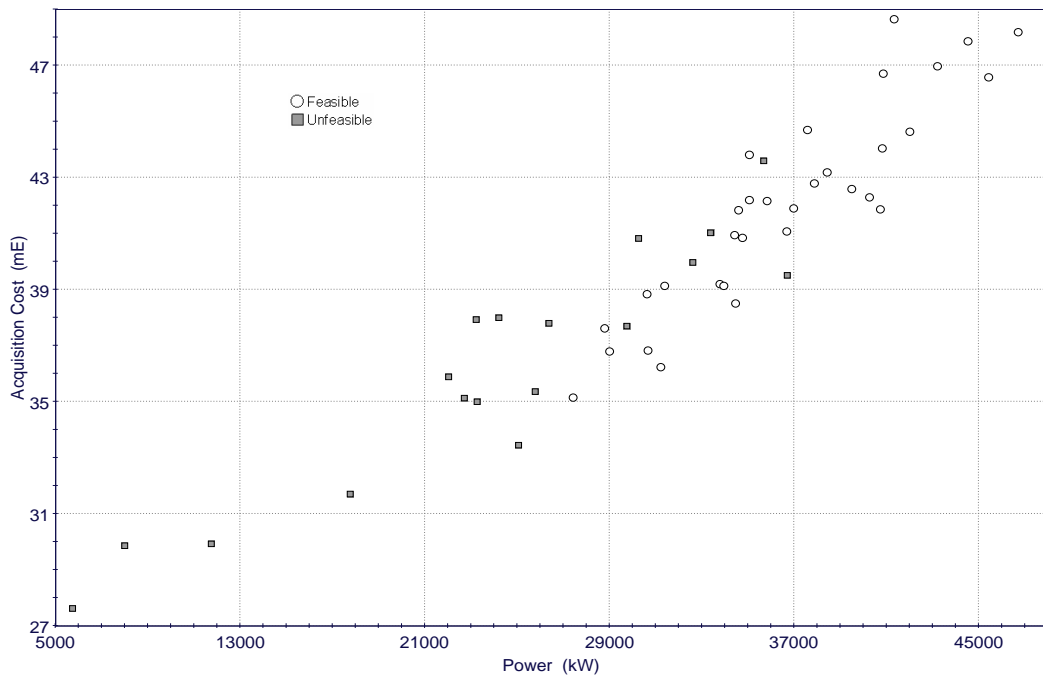
Σχήμα 5.13: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού επιβατών και ισχύος πρόωσης, αρχικός πληθυσμός



Σχήμα 5.14: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού οχημάτων και κόστους κτήσης, αρχικός πληθυσμός



Σχήμα 5.15: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού οχημάτων και ισχύος πρόωσης, αρχικός πληθυσμός

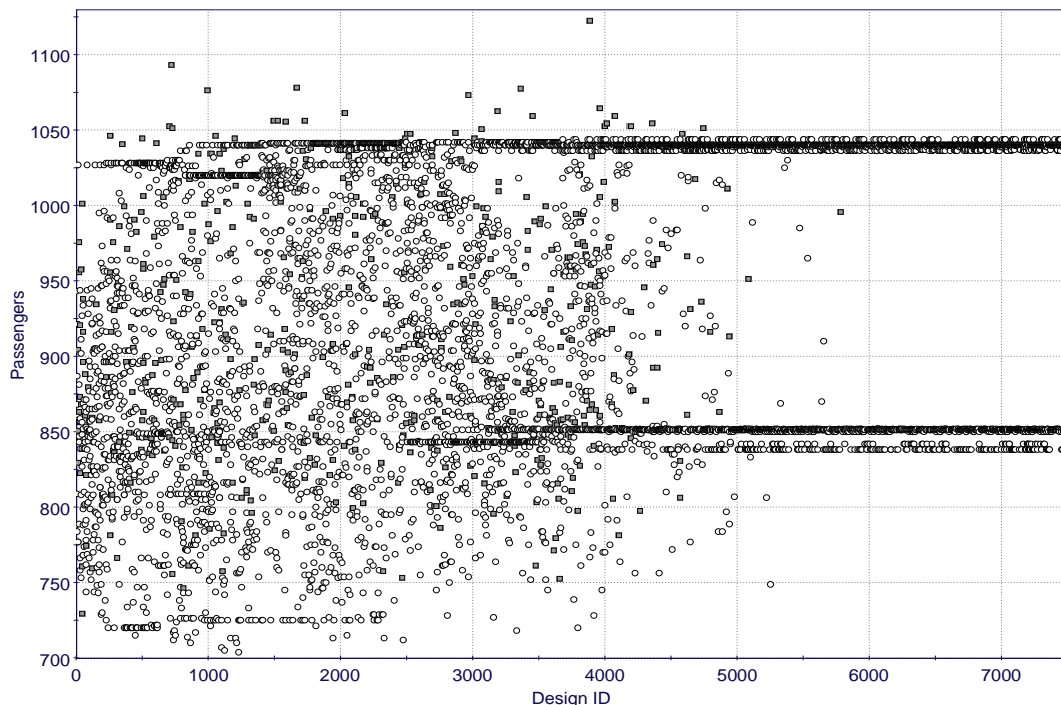


Σχήμα 5.16: Καρτεσιανό διάγραμμα κόστους κτήσης και ισχύος πρόωσης, αρχικός πληθυσμός

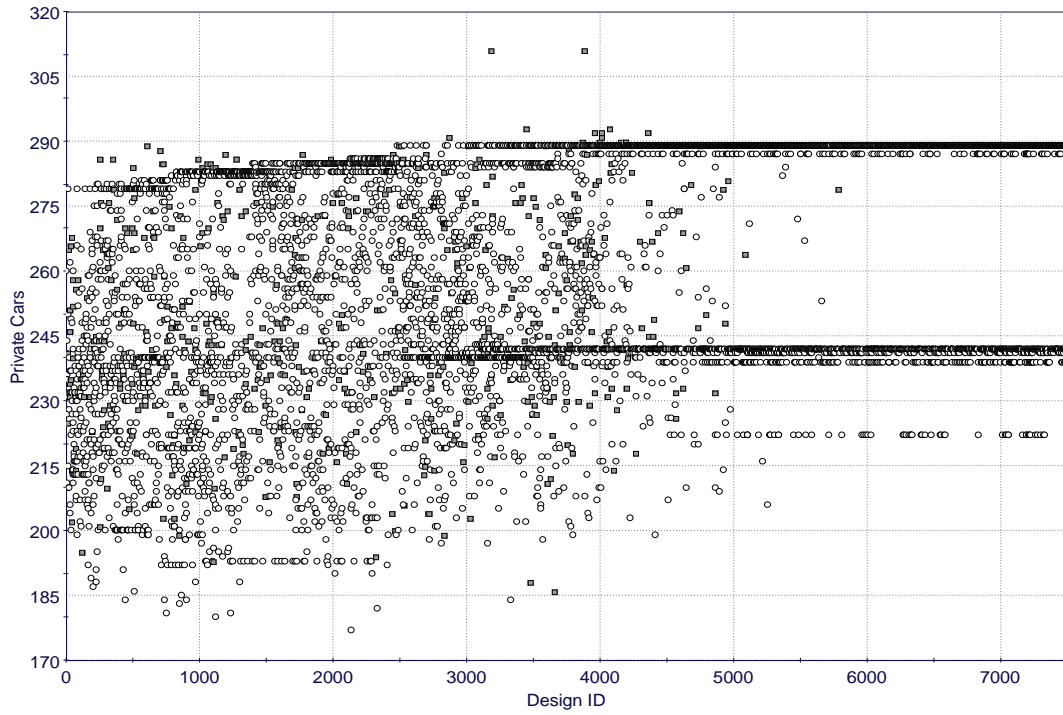
5.4.2. Ολικός πληθυσμός

Όπως προαναφέρθηκε, ο τελικός πληθυσμός περιλαμβάνει συνολικά 25000 άτομα. Τα περισσότερα από τα άτομα αυτά είναι ταυτόσημα, λόγω της σύγκλισης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Έτσι, ο αριθμός των εναλλακτικών σχεδιάσεων ανέρχεται συνολικά στις 2842, από τις οποίες 517 δεν ικανοποιούν έναν ή περισσότερους από τους περιορισμούς του προβλήματος. Σημειώνεται ότι, κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου, άτομα από παλαιότερες γενιές τα οποία αξιολογούνται ως «ικανά» είναι πιθανόν να εμφανιστούν και σε επόμενες γενιές αμετάβλητα. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμογή παραμετρικής σχεδίασης (NAPA®) δεν καλείται δεδομένου ότι οι σχεδιάσεις που αντιστοιχούν στα άτομα αυτά είναι ταυτόσημες. Έτσι μειώνεται ο υπολογιστικός χρόνος, ο οποίος για τη συγκεκριμένη εφαρμογή βελτιστοποίησης ήταν περίπου 48 ώρες, ενώ για την υλοποίηση κάθε εναλλακτικής σχεδίασης χρειάστηκε κατά μέσο όρο περίπου 1 λεπτό (Intel® Core™ 2 CPU 6600 at 2.4GHz + 2.4GHz, 2GB of RAM, Windows XP® 5.1 x86).

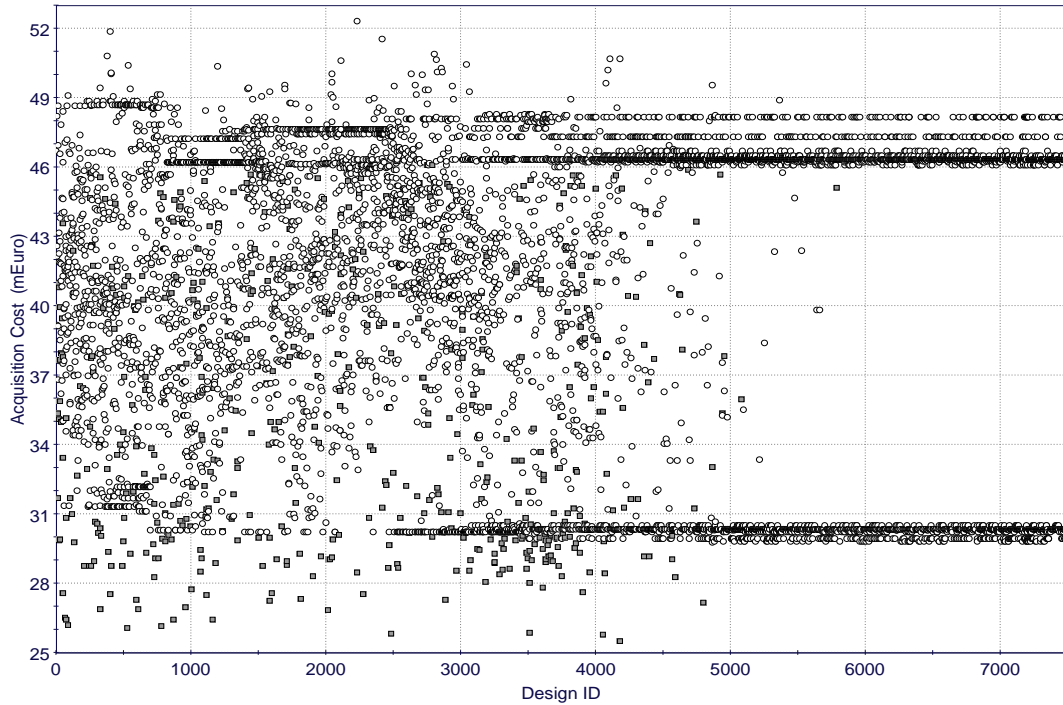
Στα επόμενα σχήματα (Σχήμα 5.17 έως και Σχήμα 5.20) φαίνονται τα ιστορικά διαγράμματα των τιμών των τεσσάρων αντικειμενικών συναρτήσεων για τις πρώτες 150 γενιές (7500 άτομα). Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αρχίζει να συγκλίνει από τις πρώτες 90 γενιές (4500 πρώτες σχεδιάσεις) περίπου, αφού προηγουμένως έχει «ξεφύγει» από ορισμένα τοπικά βέλτιστα. Σε ό,τι αφορά τους περιορισμούς, η εμφάνιση μη αποδεκτών λύσεων, όπως και αναμενόταν, μειώνεται καθώς εξελίσσεται ο αλγόριθμος (Σχήμα 5.21).



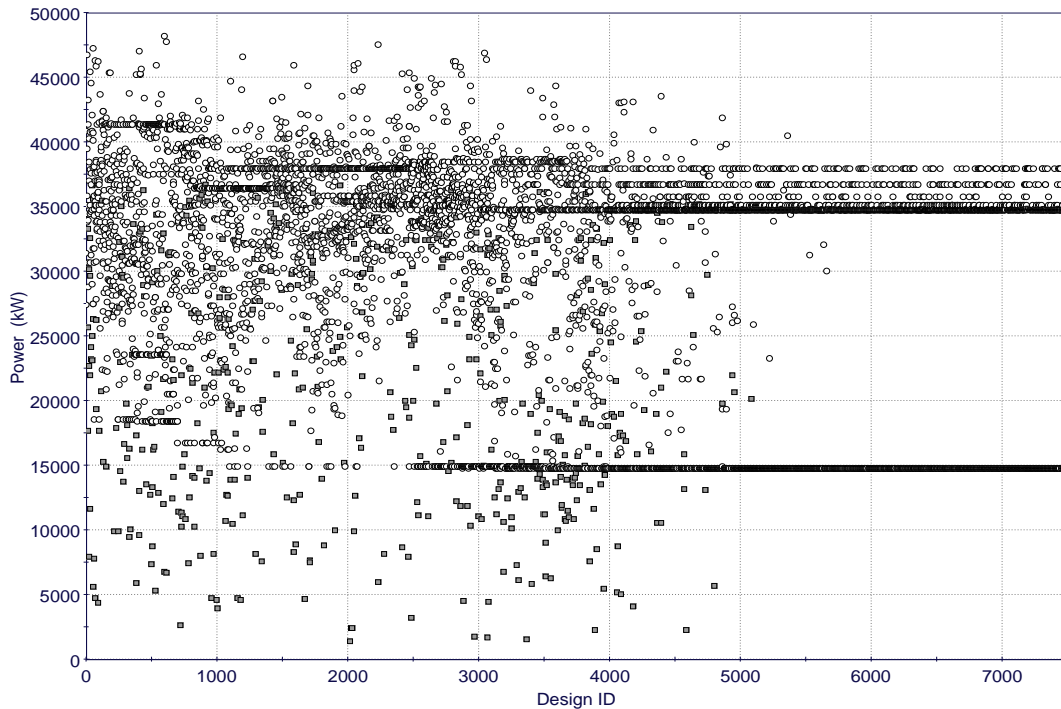
Σχήμα 5.17: Ιστορικό διάγραμμα τιμών του αριθμού επιβατών, 150 πρώτες γενιές



Σχήμα 5.18: Ιστορικό διάγραμμα τιμών του αριθμού ΙΧ αυτ/ων, 150 πρώτες γενιές

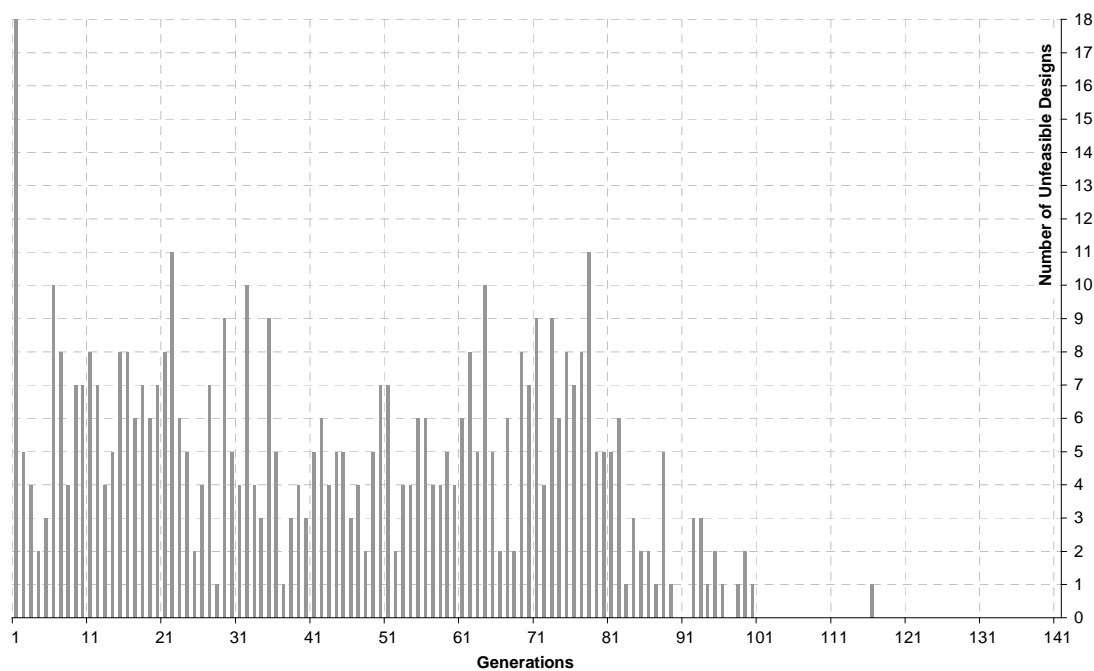


Σχήμα 5.19: Ιστορικό διάγραμμα τιμών του κόστους κατασκευής, 150 πρώτες γενιές



Σχήμα 5.20: Ιστορικό διάγραμμα τιμών της εγκατεστημένης ισχύος, 150 πρώτες γενιές

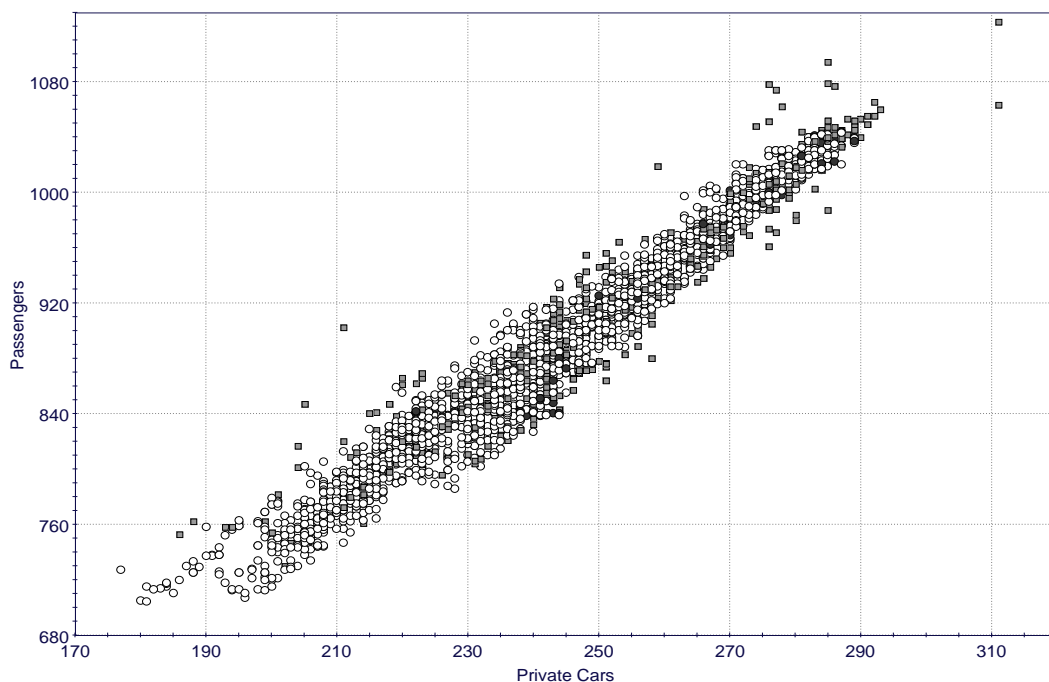
Στο Σχήμα 5.21 παρουσιάζεται ο αριθμός των μη αποδεκτών σχεδιάσεων κάθε γενιάς. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, καθώς ο αλγόριθμος εξελίσσεται οι γενιές περιέχουν όλο και λιγότερα άτομα τα οποία δεν ικανοποιούν κάποιον περιορισμό. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο καθώς οι τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας των ατόμων αυτών είναι πάντοτε μικρότερες από τις τιμές των υπόλοιπων ατόμων της ίδιας γενιάς (Penalizing Objectives). Τα άτομα αυτά έχουν επομένως μικρές πιθανότητες να επιλεγούν για να συμμετάσχουν στην γενετική πράξη της διασταύρωσης, με αποτέλεσμα να τείνουν να εκλείψουν. Εντούτοις, ανάλογα με την τιμή της πιθανότητας μετάλλαξης ενδέχεται ο αριθμός τους να αυξομειώνεται καθώς ο αλγόριθμος εξελίσσεται και προσπαθεί να αποφύγει πιθανά τοπικά βέλτιστα.



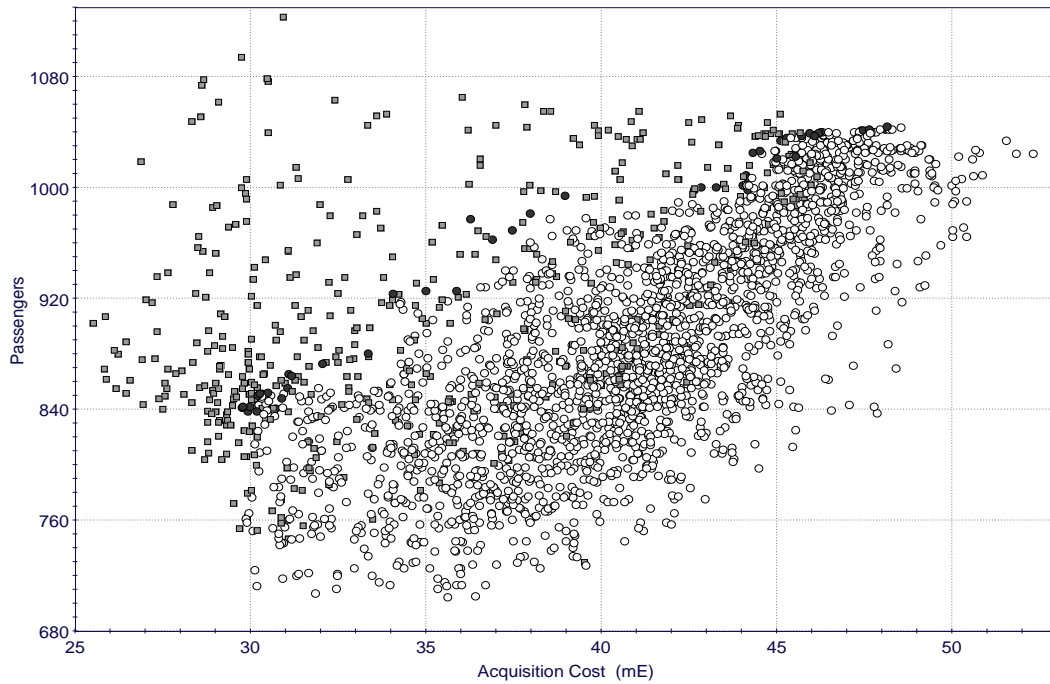
Σχήμα 5.21: Πλήθος μη αποδεκτών λύσεων του ολικού πληθυσμού

Προκειμένου να φανεί η συσχέτιση μεταξύ των αντικειμενικών συναρτήσεων, ακολουθούν τα καρτεσιανά διαγράμματα των τιμών για ολόκληρο το σύνολο των εναλλακτικών σχεδιάσεων (Designs Space), συμπεριλαμβανομένων και την μη αποδεκτών λύσεων. Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται επίσης και το σύνολο των βέλτιστων λύσεων (Pareto Designs), οι οποίες και απεικονίζονται με μαύρη σκίαση. Σημειώνεται ότι το σύνολο Pareto δεν μπορεί να απεικονιστεί σε ένα μόνο διάγραμμα καθώς ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων είναι περισσότερος από τρεις, αριθμός που αντιστοιχεί στον τρισδιάστατο υλικό χώρο.

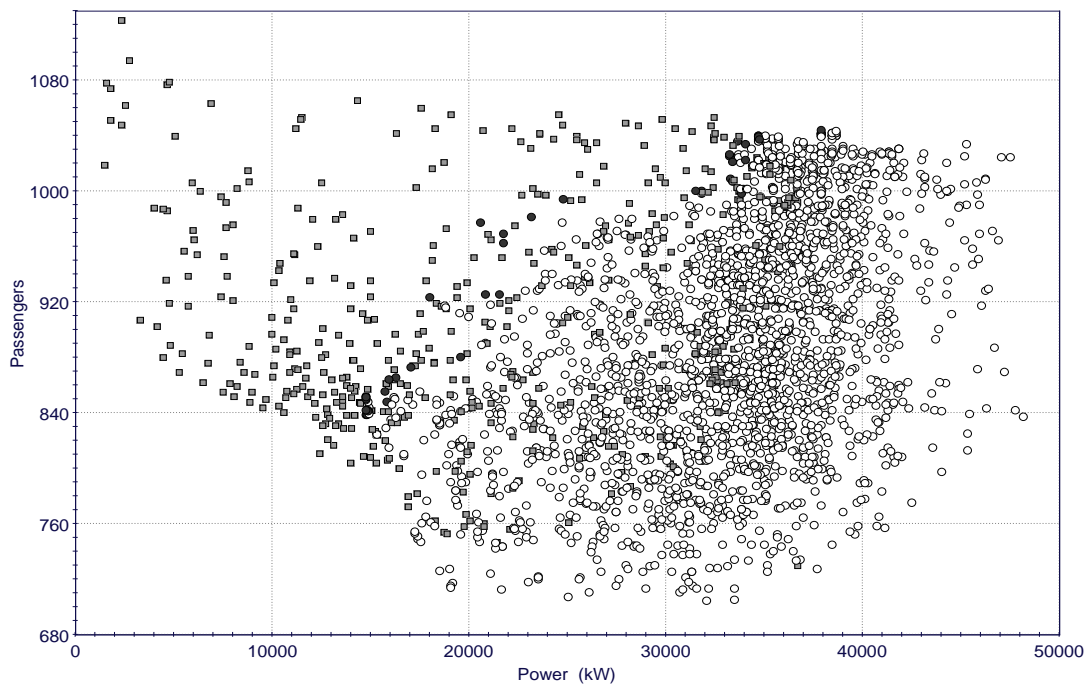
Στο Σχήμα 5.22 φαίνεται ότι ο αριθμός των ΙΧ αυτοκινήτων αυξάνει καθώς αυξάνει ο αριθμός των επιβατών. Στο Σχήμα 5.23 παρουσιάζονται οι τιμές του αριθμού των επιβατών σε σχέση με το κόστος κατασκευής. Καθώς η μεταφορική ικανότητα σε επιβάτες αυξάνει απαιτούνται μεγαλύτερα πλοία και ως εκ τούτου πιο ακριβά πλοία με μεγαλύτερη ισχύ πρόωσης (Σχήμα 5.24) για την ίδια ταχύτητα. Την ίδια λογική ακολουθούν και τα επόμενα δύο διαγράμματα, όπου φαίνεται ότι όσο περισσότερα ΙΧ αυτοκίνητα σχεδιάζεται να μεταφέρει ένα πλοίο τόσο περισσότερο κοστίζει ως επένδυση (Σχήμα 5.25) αλλά και για να λειτουργήσει αφού απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς πρόωσης (Σχήμα 5.26). Τέλος στο Σχήμα 5.27 φαίνεται η σχέση μεταξύ του κόστους κατασκευής και της ισχύος πρόωσης.



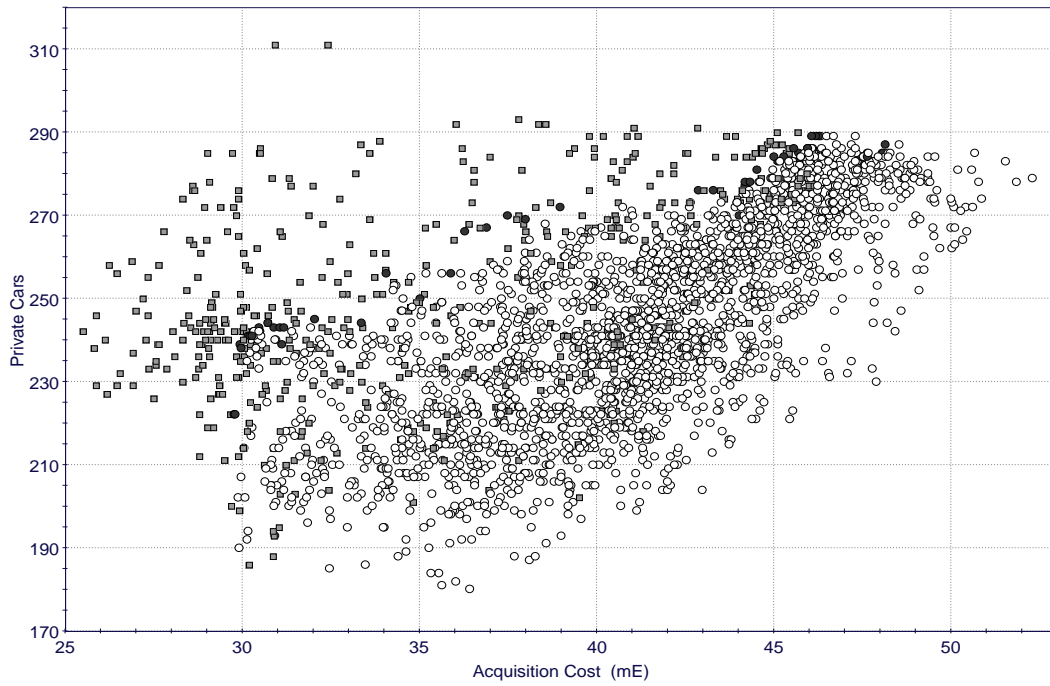
Σχήμα 5.22: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού επιβατών και οχημάτων, ολικός πληθυσμός



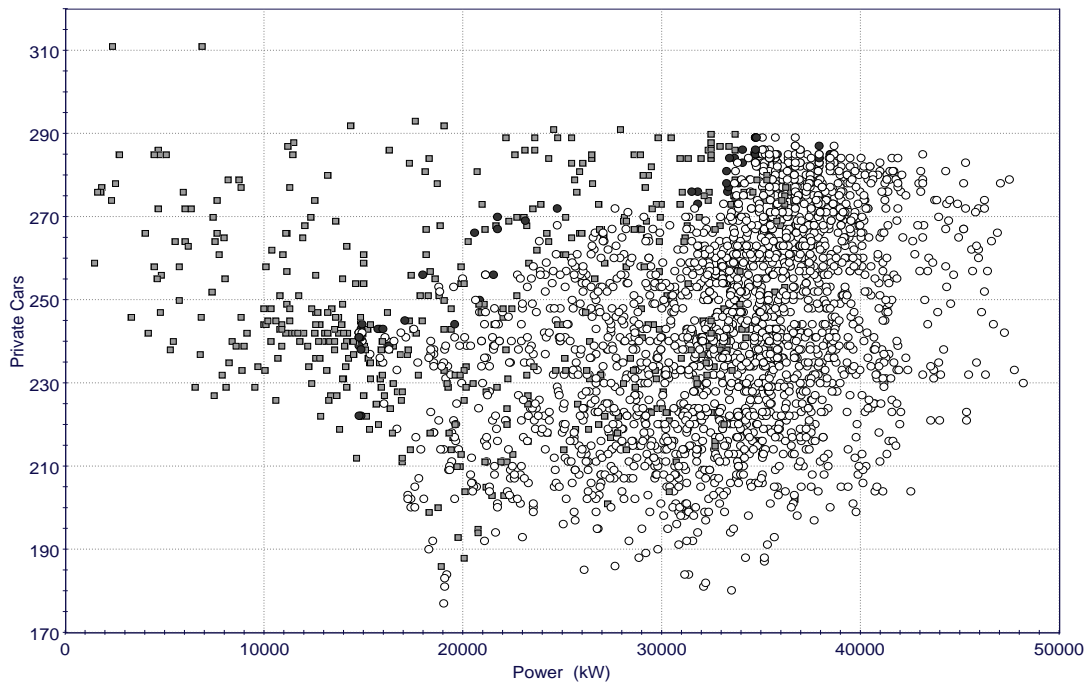
Σχήμα 5.23: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθ. επιβατών και κόστους κατασκευής, ολικός πληθυσμός



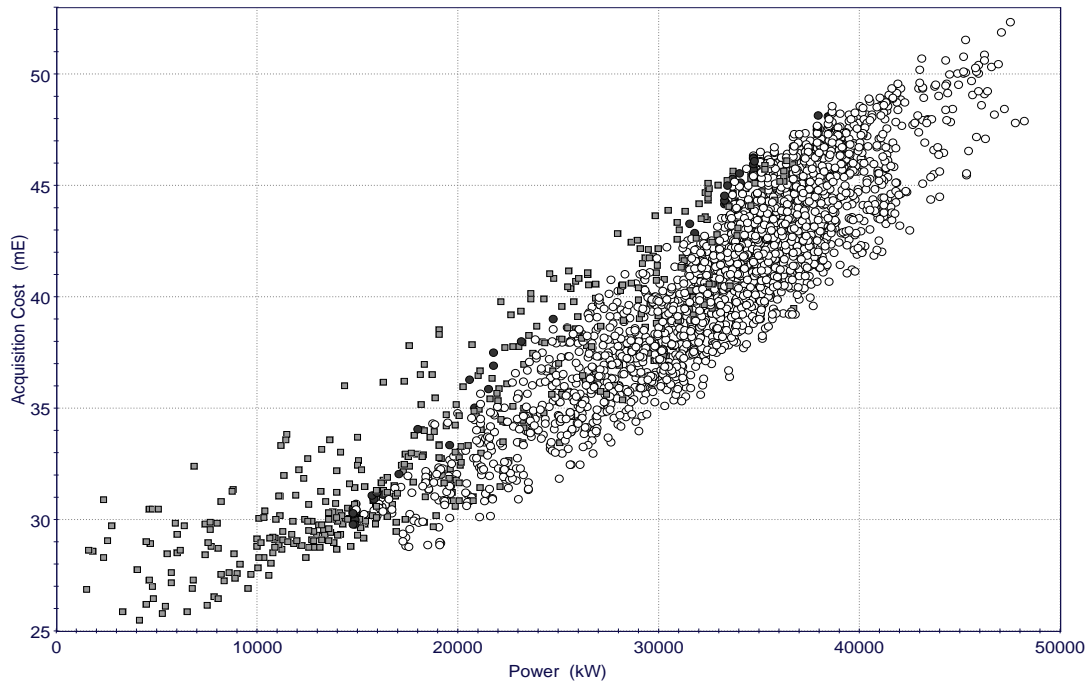
Σχήμα 5.24: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού επιβατών και ισχύος πρόωσης, ολικός πληθυσμός



Σχήμα 5.25: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού οχημάτων και κόστους κτήσης, ολικός πληθυσμός



Σχήμα 5.26: Καρτεσιανό διάγραμμα αριθμού οχημάτων και ισχύος πρόωσης, ολικός πληθυσμός



Σχήμα 5.27: Καρτεσιανό διάγραμμα κόστους κτήσης και ισχύος πρόωσης, ολικός πληθυσμός

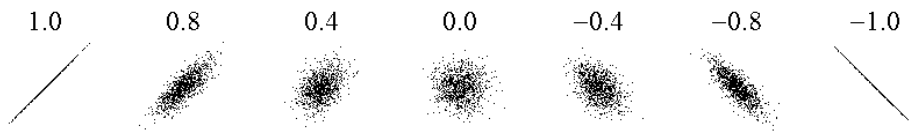
Ακολουθούν ορισμένα βασικά στατιστικά στοιχεία που αφορούν τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Σημειώνεται ότι ο σχετικός πίνακας αναφέρεται στο σύνολο των αποδεκτών λύσεων (Feasible Space), δεν περιλαμβάνει δηλαδή τις σχεδιάσεις εκείνες οι οποίες αδυνατούν να ικανοποιήσουν έναν ή περισσότερους από τους περιορισμούς του προβλήματος.

Πίνακας 5.5: Στατιστικά στοιχεία των αποδεκτών τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων

	Passengers	Private Cars	Acquisition Cost	Power
Ελάχιστη Τιμή	704	180	29.77 m€	14767 kW
Μέγιστη τιμή	1044	289	52.31 m€	48191 kW
Εύρος Τιμών	340	109	22.54 m€	33424 kW
Μέσος όρος	889	243	41.01 m€	33224 kW

Ένα ενδιαφέρον συμπέρασμα που μπορεί να εξαγάγει κανείς μελετώντας το σύνολο των λύσεων, αφορά τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζονται μεταξύ τους οι ελεύθερες μεταβλητές και οι αντικειμενικές συναρτήσεις. Μία μέθοδος για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι μέσω του συντελεστή συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης (sample correlation or Pearson product-moment correlation coefficient) [Pearson, 1920] [Rodgers et al., 1988], είναι ένας πραγματικός αριθμός, ο οποίος λαμβάνει τιμές μεταξύ -1 και 1 και μετρά τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ δύο μεγεθών. Εάν ο συντελεστής μεταξύ δύο μεγεθών ισούται με 1, τότε αυτά συσχετίζονται γραμμικά μεταξύ τους κατά απόλυτο τρόπο και όλες οι τιμές τους ανήκουν σε μία ευθεία γραμμή με θετική κλίση (όταν αυξάνει η τιμή του ενός αυξάνει και η τιμή του άλλου). Τα αντίθετα νοούνται εάν ο συντελεστής συσχέτισης λάβει την τιμή -1, ενώ

εάν η τιμή του ισούται με 0, τότε δεν υπάρχει καθόλου γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών (Σχήμα 5.28) .

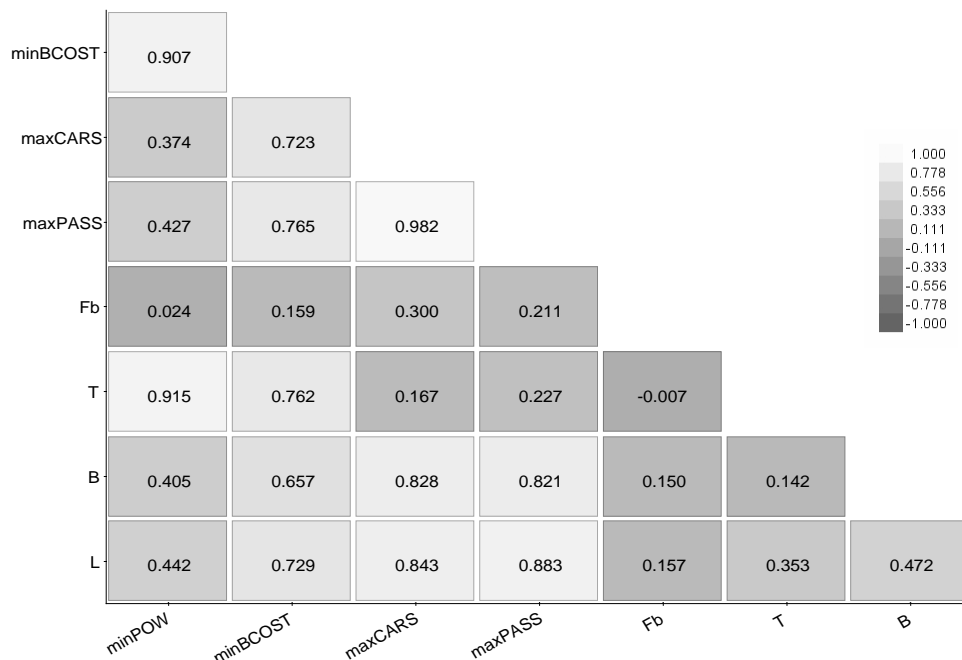


Σχήμα 5.28: Παράδειγμα τιμών του συντελεστή συσχέτισης

Γενικά, ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ δύο μεγεθών x και y με τιμές x_i και y_i αντίστοιχα ($i = 1, \dots, n$) υπολογίζεται με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \sqrt{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (5.2)$$

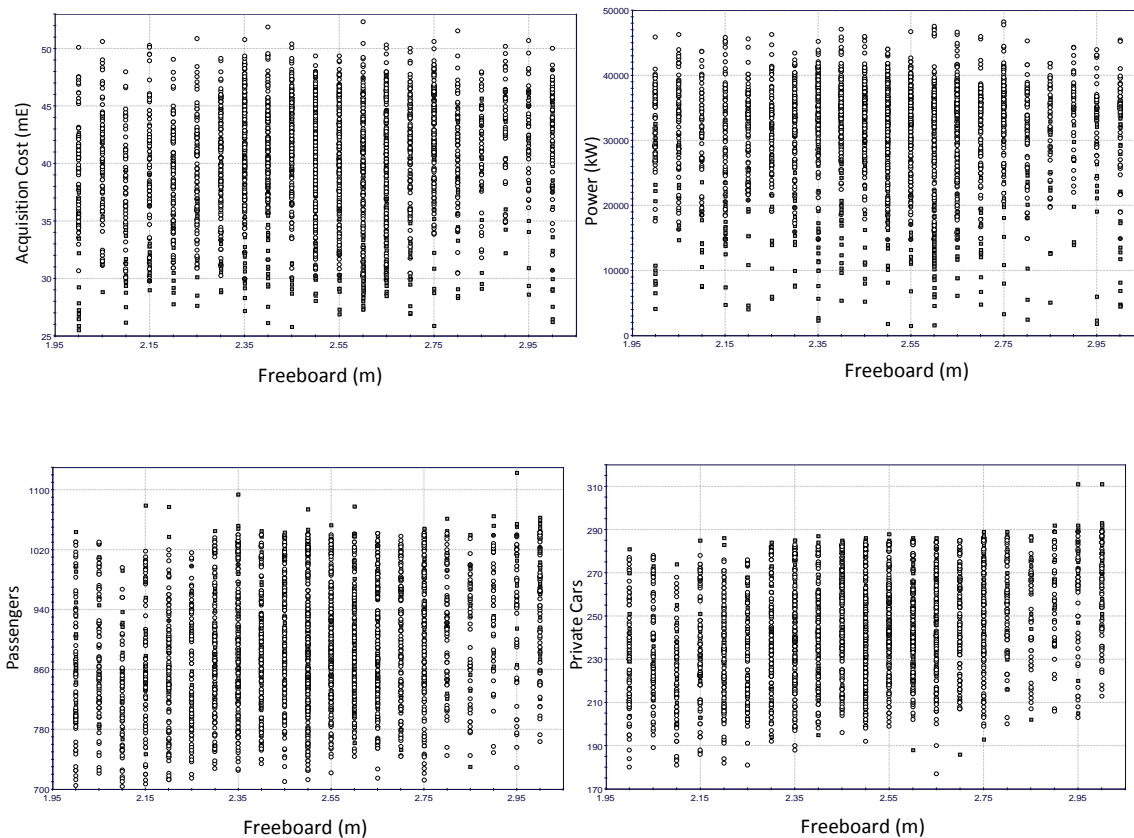
Στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης θα μελετηθεί η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των κυρίων διαστάσεων του πλοίου και των αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι συντελεστές συσχέτισης αφορούν το σύνολο των εφικτών λύσεων, όπως αυτό προέκυψε από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, και παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 5.29.



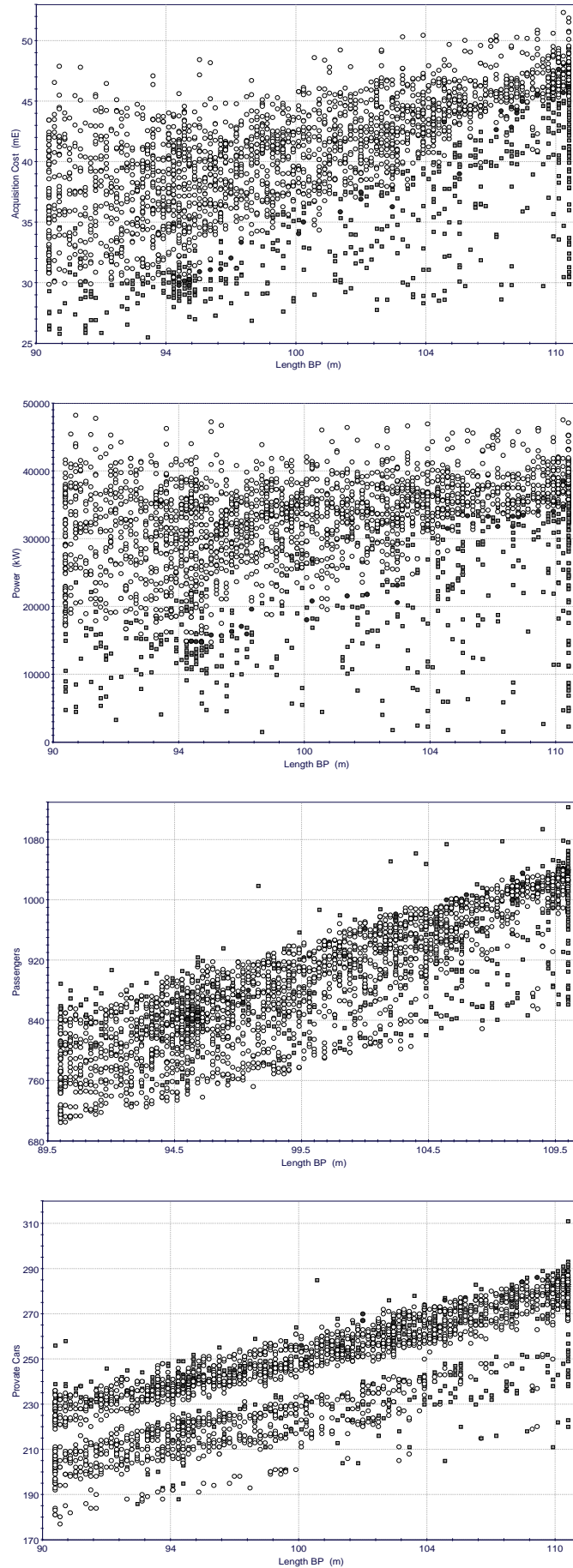
Σχήμα 5.29: Συντελεστές συσχέτισης κυρίων διαστάσεων και αντικειμενικών συναρτήσεων

Μελετώντας το παραπάνω σχήμα μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι οι τιμές των επιβατών και των οχημάτων συσχετίζονται περισσότερο με το μήκος και το πλάτος του πλοίου και λιγότερο με το βύθισμα σχεδίασης. Από την άλλη το βύθισμα επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό ($r > 0.915$) τις τιμές της εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστά-

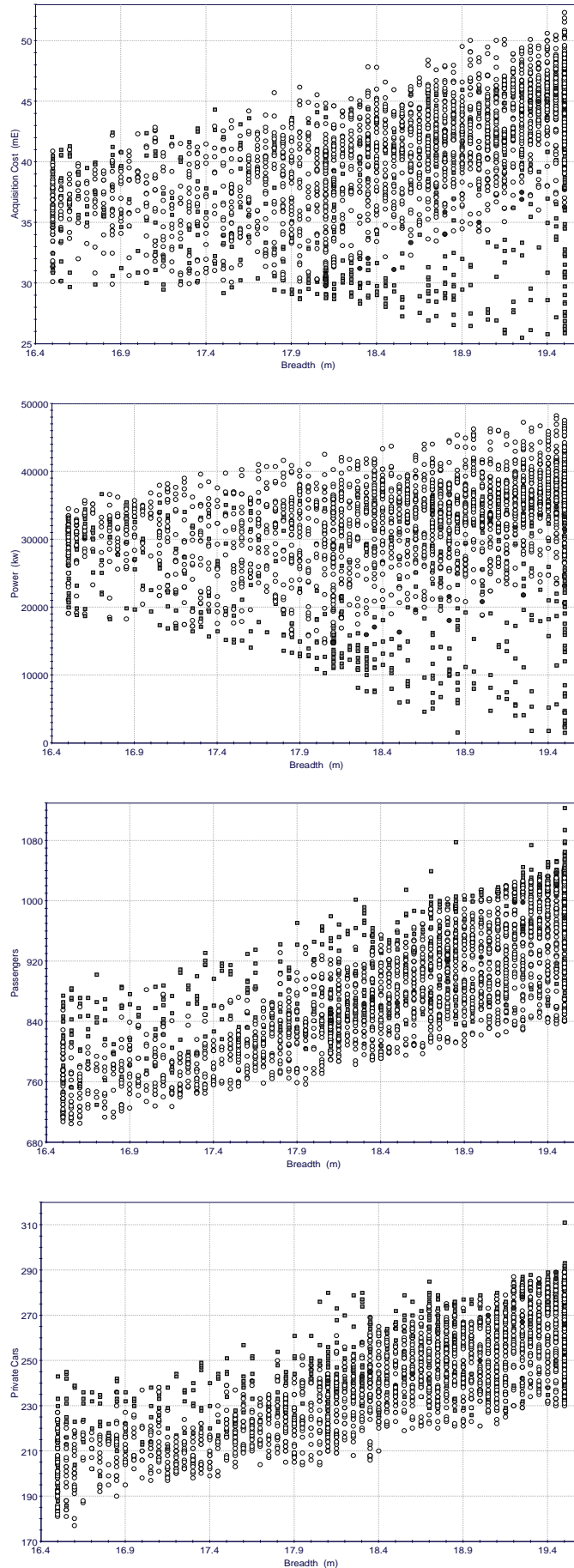
σεις του πλοίου. Επιπλέον, το κόστος κατασκευής φαίνεται ότι επηρεάζεται περισσότερο από το μήκος και το βύθισμα σχεδίασης του πλοίου και λιγότερο από το πλάτος. Οι γενικά μεγάλοι συντελεστές συσχέτισης που παρατηρούνται μεταξύ των ελεύθερων μεταβλητών, εκτός από το ύψος εξάλων, και των αντικειμενικών συναρτήσεων φανερώνουν, κάτι που είναι ήδη γνωστό, ότι οι κύριες διαστάσεις είναι ανάλογες και επιδρούν κατά μείζονα τρόπο στις τιμές της μεταφορικής ικανότητας, της αντίστασης και του κόστους κατασκευής ενός πλοίου. Σε ό,τι αφορά το ύψος εξάλων, για τις σχεδιάσεις του συνόλου των εφικτών λύσεων, η συσχέτιση με τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων αν και θετική, είναι αρκετά μικρή ($r < 0.3$). Αυτό ουσιαστικά συμβαίνει γιατί τόσο η ισχύς πρόωσης, όσο και η μεταφορική ικανότητα αλλά και το κόστος κατασκευής, στο συγκεκριμένο πρόβλημα σχεδίασης, δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τη μεταβολή του ύψους εξάλων, το οποίο σε μία επαναδιατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης θα μπορούσε να μην περιλαμβάνεται στις ελεύθερες μεταβλητές σχεδίασης. Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται τα καρτεσιανά διαγράμματα των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων σε σχέση με τις κύριες διαστάσεις (Σχήμα 5.31 έως και Σχήμα 5.30).



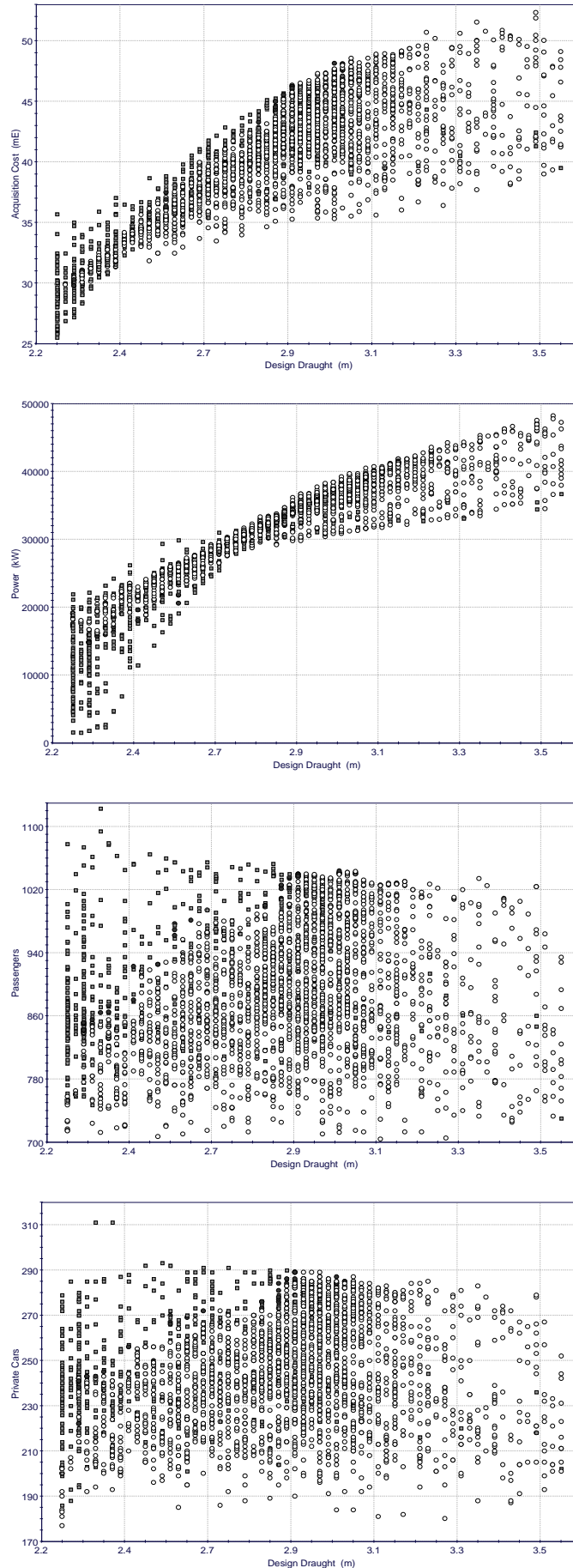
Σχήμα 5.30: Καρτεσιανά διαγράμματα αντικειμενικών συναρτήσεων σε σχέση με το ύψος εξάλων



Σχήμα 5.31: Καρτεσιανά διαγράμματα αντικειμενικών συναρτήσεων σε σχέση με το μήκος

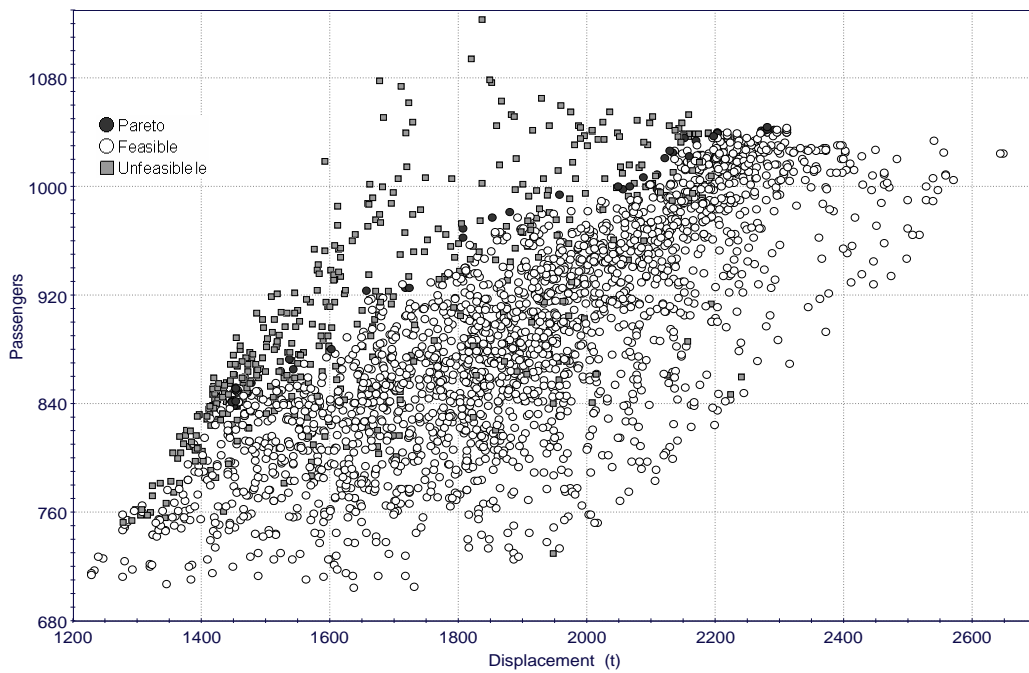


Σχήμα 5.32: Καρτεσιανά διαγράμματα αντικειμενικών συναρτήσεων σε σχέση με το πλάτος

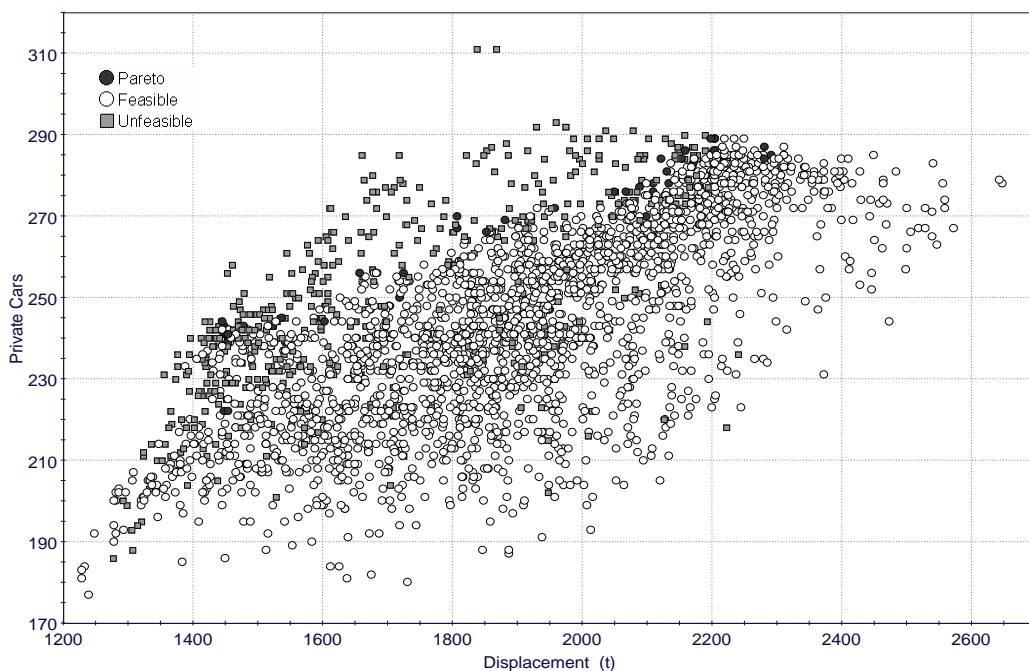


Σχήμα 5.33: Καρτεσιανά διαγράμματα αντικειμενικών συναρτήσεων σε σχέση με το βύθισμα

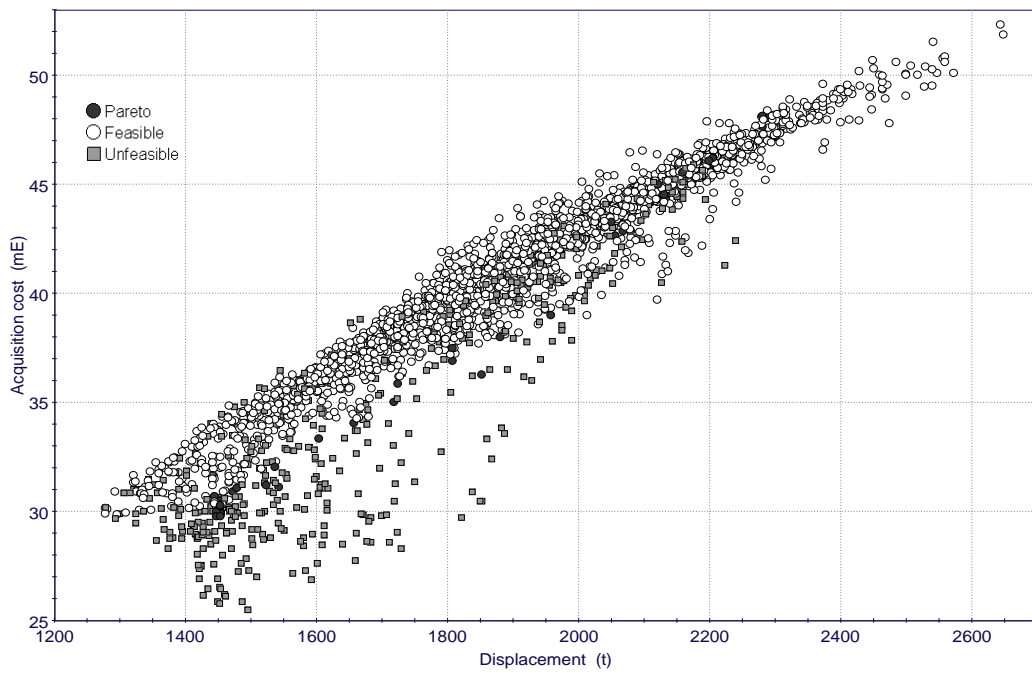
Στην παρούσα φάση επίλυσης, που είναι η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, ο μελετητής έχει στη διάθεσή του μία πληθώρα πληροφοριών οι οποίες σχετίζονται με διάφορα χαρακτηριστικά του πλοίου. Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 5.34 έως Σχήμα 5.37) παρουσιάζονται οι τιμές του εκτοπίσματος σχεδίασης ως προς τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, για ολόκληρο τον πληθυσμό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το Σχήμα 5.38 όπου γίνονται ευδιάκριτα τα όρια εφαρμογής της αριθμητικής μεθόδου υπολογισμού της αντίστασης σε σχέση με τον αδιάστατο λόγο μήκους προς πλάτος (B/T).



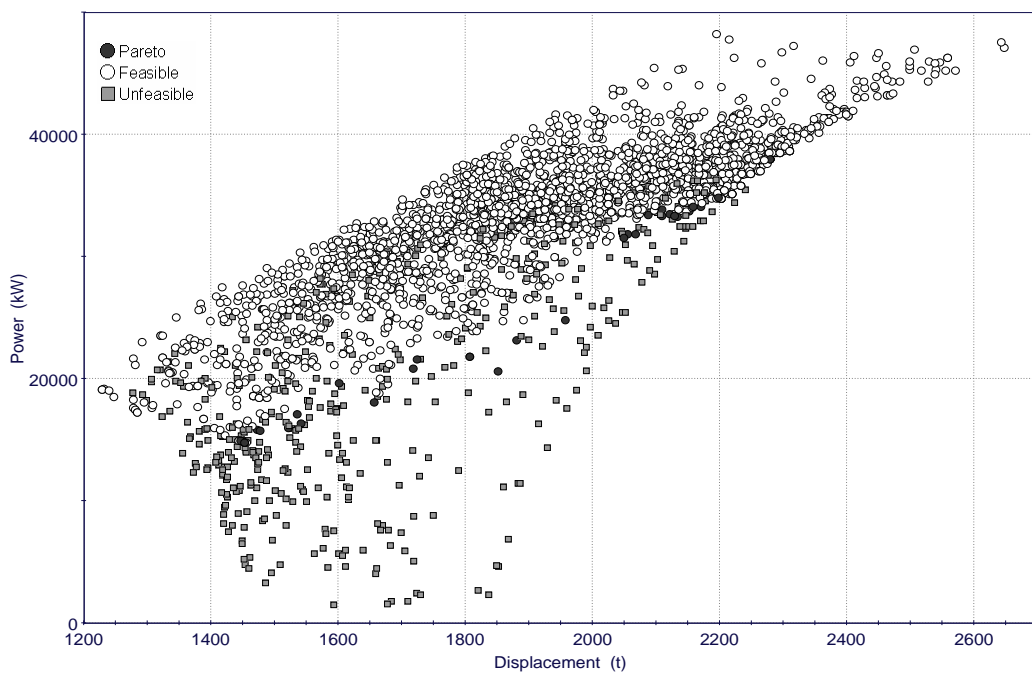
Σχήμα 5.34: Καρτεσιανό διάγραμμα εκτοπίσματος – αριθμού επιβατών



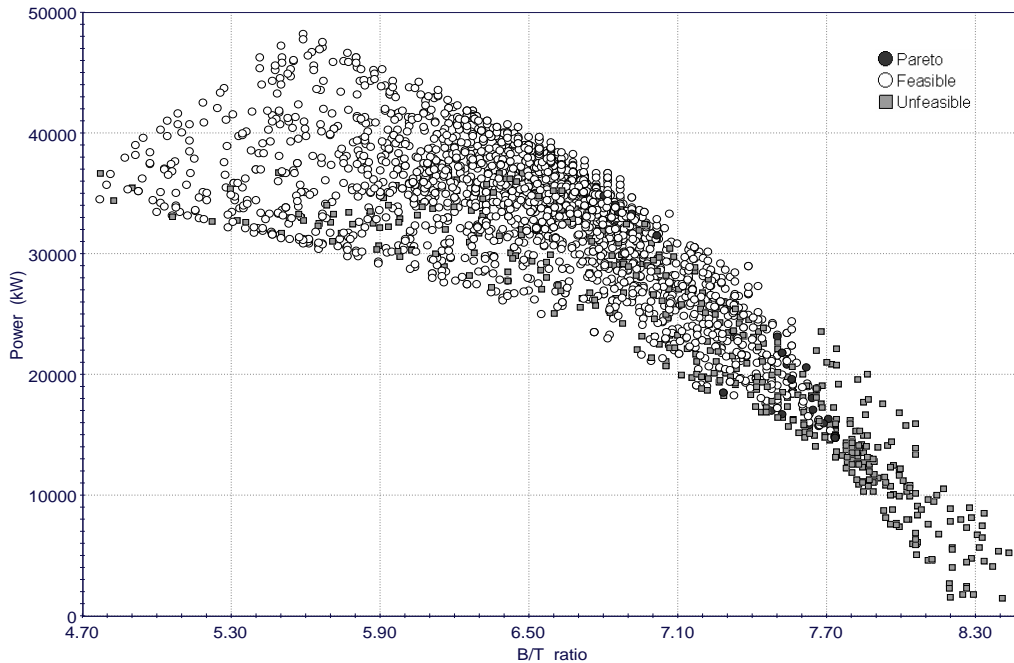
Σχήμα 5.35 Καρτεσιανό διάγραμμα εκτοπίσματος – αριθμού ΙΧ αυτοκινήτων



Σχήμα 5.36 Καρτεσιανό διάγραμμα εκτοπίσματος – κόστους κατασκευής



Σχήμα 5.37 Καρτεσιανό διάγραμμα εκτοπίσματος – εγκατεστημένης ισχύος



Σχήμα 5.38: Καρτεσιανό διάγραμμα αδιάστατου λόγου B/T – εγκατεστημένης ισχύος

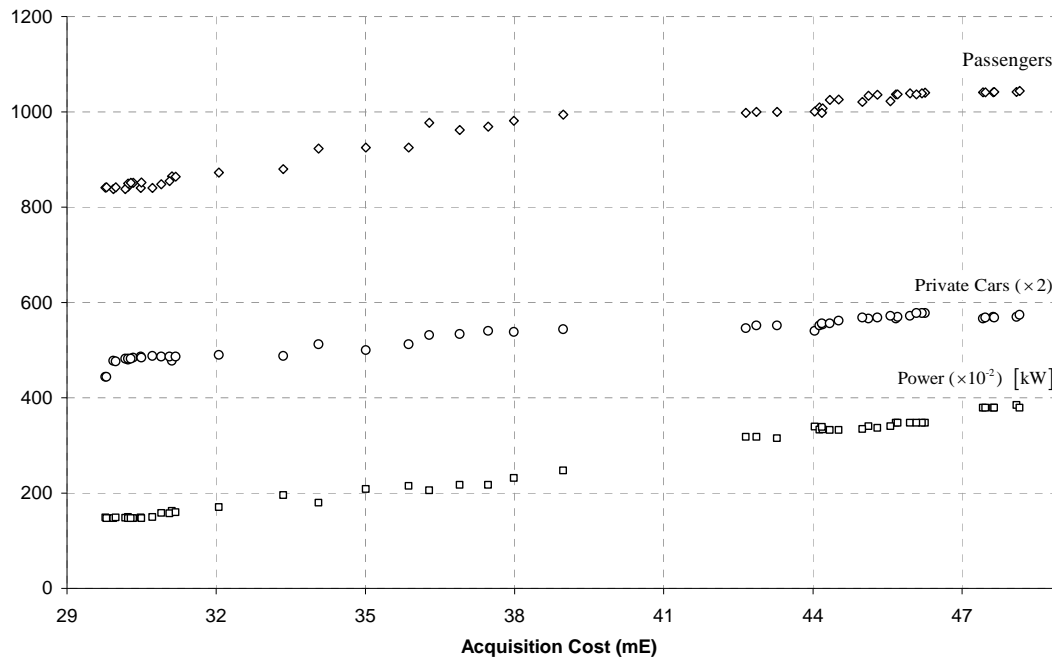
5.4.3. Το όριο Pareto

Όπως σε κάθε πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με αντικρουόμενες μεταξύ τους αντικειμενικές συναρτήσεις, έτσι και εδώ ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δε συγκλίνει σε μία μόνο λύση, αλλά προσδιορίζει ένα σύνολο υποψήφιων βέλτιστων σχεδιάσεων (λύσεις Pareto). Συνολικά οι λύσεις εκείνες που ικανοποιούν τη βελτιστότητα Pareto είναι 51 από τις οποίες ζητείται να επιλεγεί μία ως βέλτιστη. Ο Πίνακας 5.6 περιέχει ορισμένα πολύ βασικά στατιστικά στοιχεία που αφορούν τις κύριες διαστάσεις και τις αντικειμενικές συναρτήσεις των σχεδιάσεων που ανήκουν στο όριο Pareto.

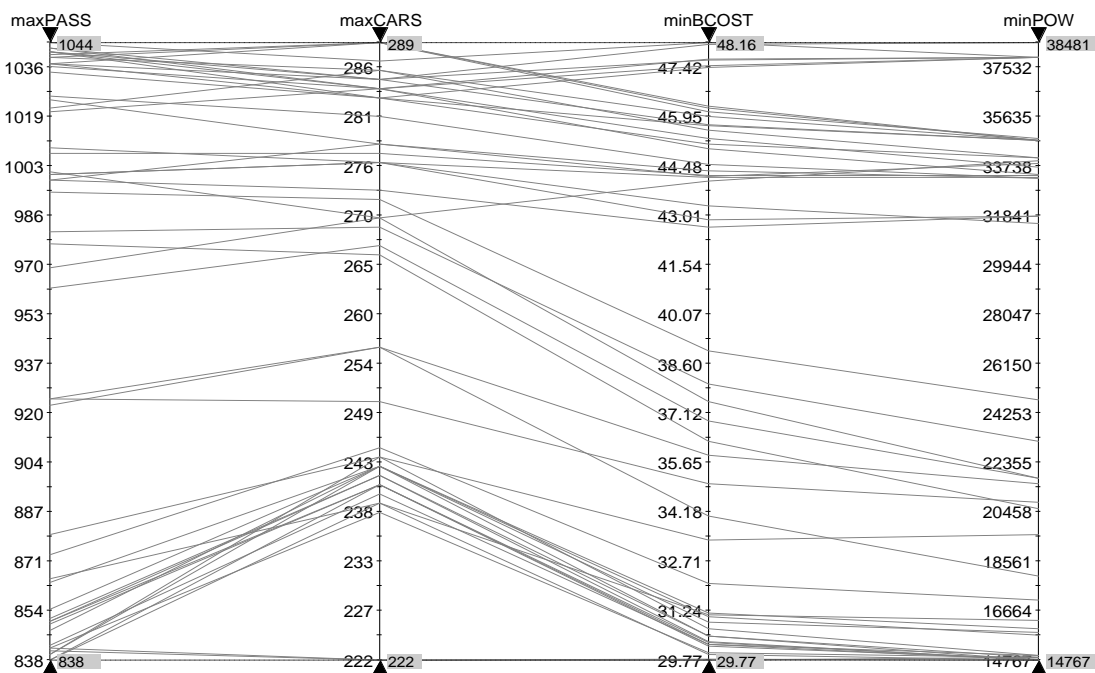
Πίνακας 5.6: Στατιστικά στοιχεία των λύσεων Pareto

	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Εύρος Τιμών	Μέσος Όρος
Κύριες διαστάσεις				
Length BP (m)	94.80	110.00	15.20	103.08
Beam Max (m)	18.10	19.50	1.40	18.95
Design Draft (m)	2.34	2.98	0.64	2.64
Freeboard (m)	2.05	3.0	0.95	2.59
Αντικειμενικές συναρτήσεις				
Passengers	838	1044	206	953
Private Cars	222	289	67	264
Acquisition Cost (m€)	29.77	48.16	18.39	38.86
Power (kW)	14767	38481	23714	25859

Προκειμένου οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων των λύσεων Pareto να τοποθετηθούν στο ίδιο γράφημα, για καλύτερη ποιοτική απεικόνιση, κατασκευάστηκε το διάγραμμα που περιλαμβάνεται στο Σχήμα 5.39. Εδώ ο οριζόντιος άξονας αντιστοιχεί στο κόστος κατασκευής ενώ ο κατακόρυφος είναι κοινός για τις τιμές και των τριών κριτηρίων. Στο Σχήμα 5.40 παρουσιάζεται ένας εναλλακτικός τρόπος της παραπάνω απεικόνισης μέσω του διαγράμματος παράλληλων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων.

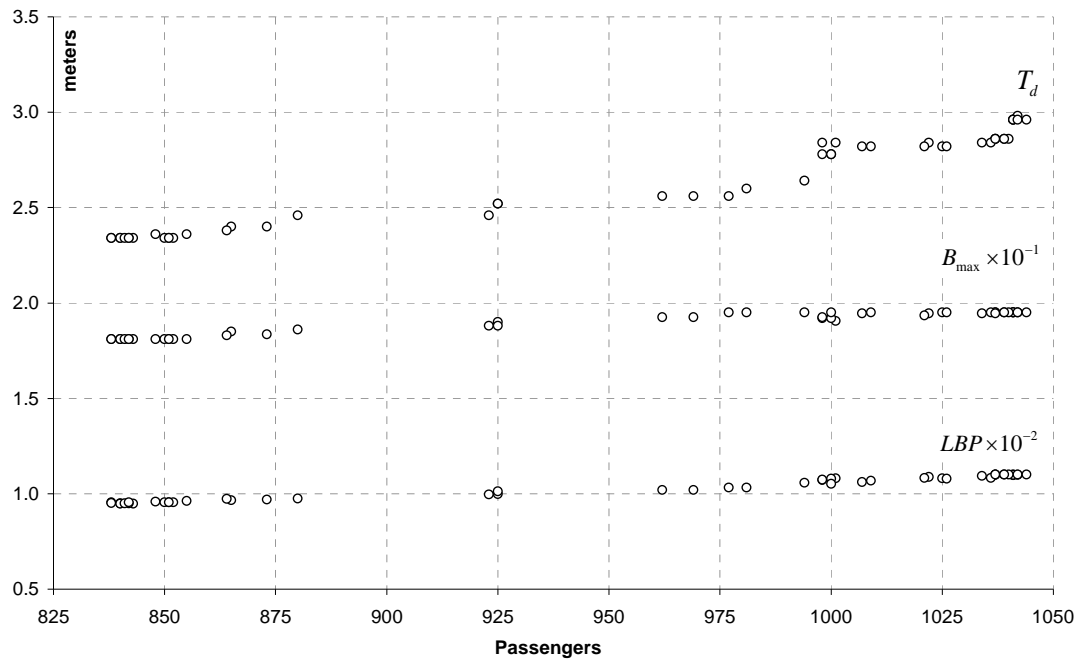


Σχήμα 5.39: Τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων των λύσεων Pareto

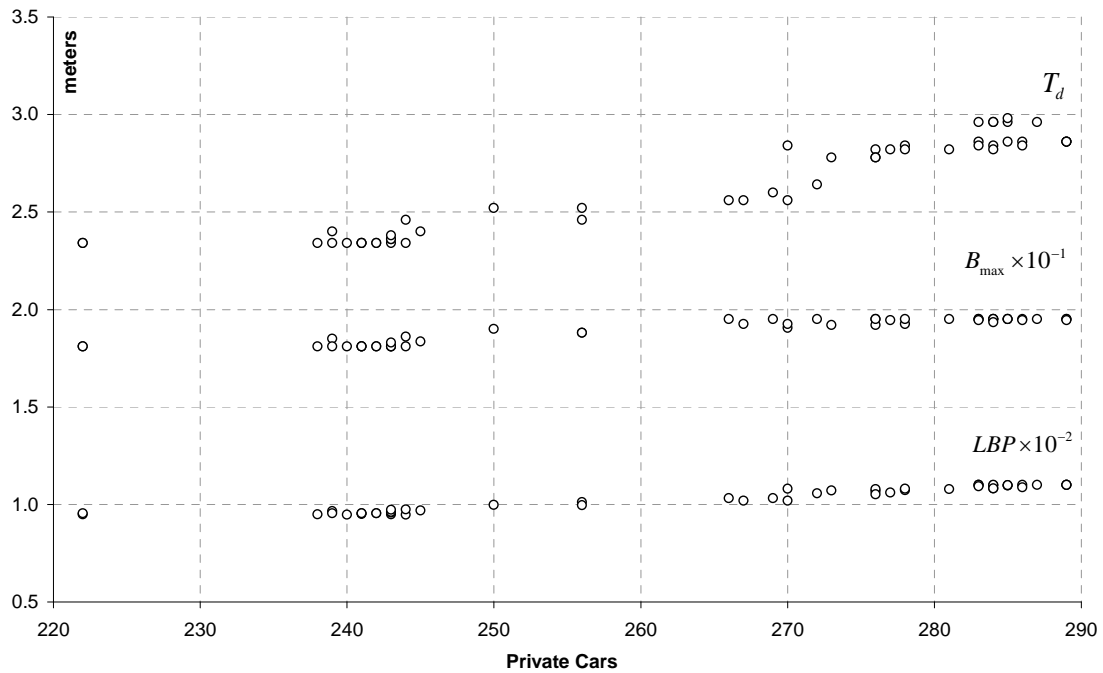


Σχήμα 5.40: Διάγραμμα παράλληλων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, όριο Pareto

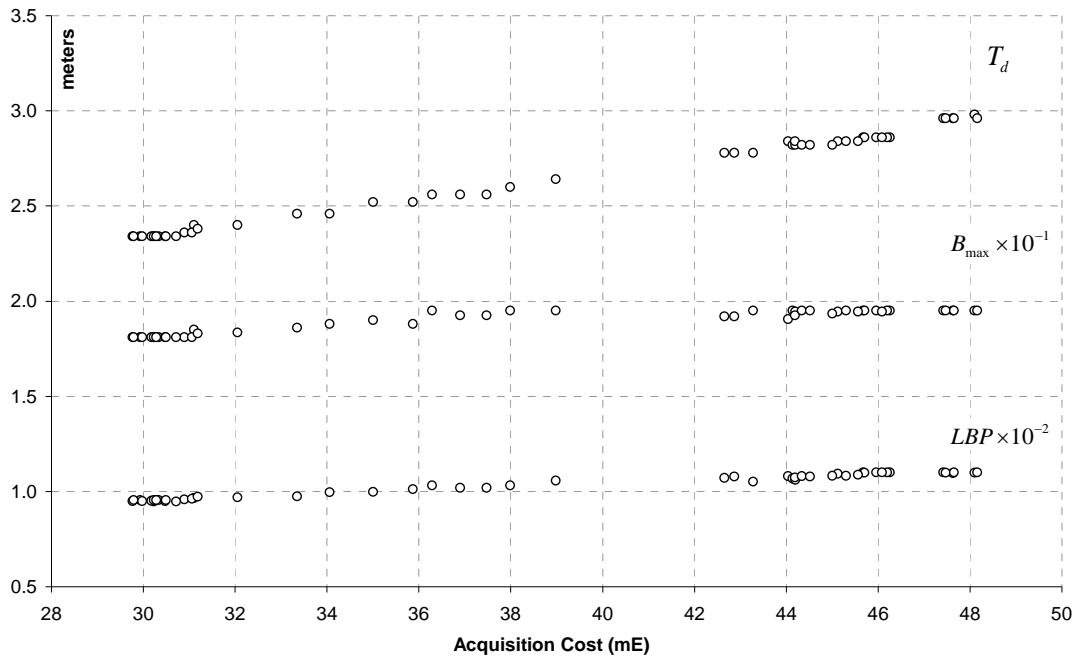
Ακολουθώντας την ίδια λογική, ακολουθούν κατάλληλα καρτεσιανά διαγράμματα που αφορούν τις λύσεις Pareto (Σχήμα 5.41 έως Σχήμα 5.44) στα οποία φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων και των κύριων διαστάσεων .



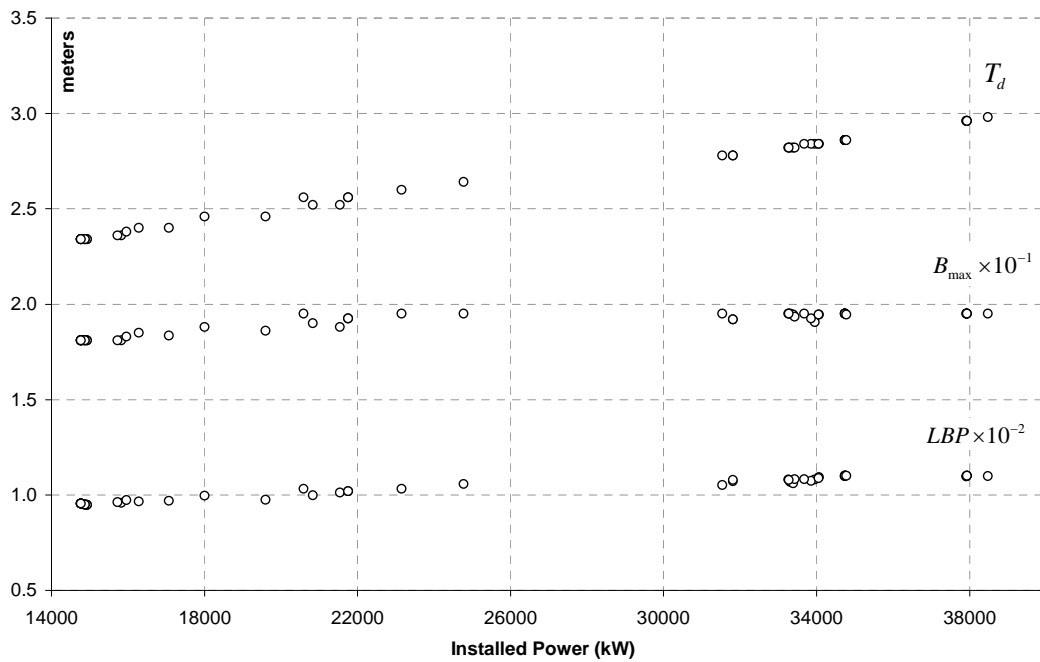
Σχήμα 5.41: Διαγράμματα αριθμού επιβατών – κυρίων διαστάσεων, όριο Pareto



Σχήμα 5.42: Διάγραμμα αριθμού ΙΧ αυτοκινήτων – κυρίων διαστάσεων, όριο Pareto

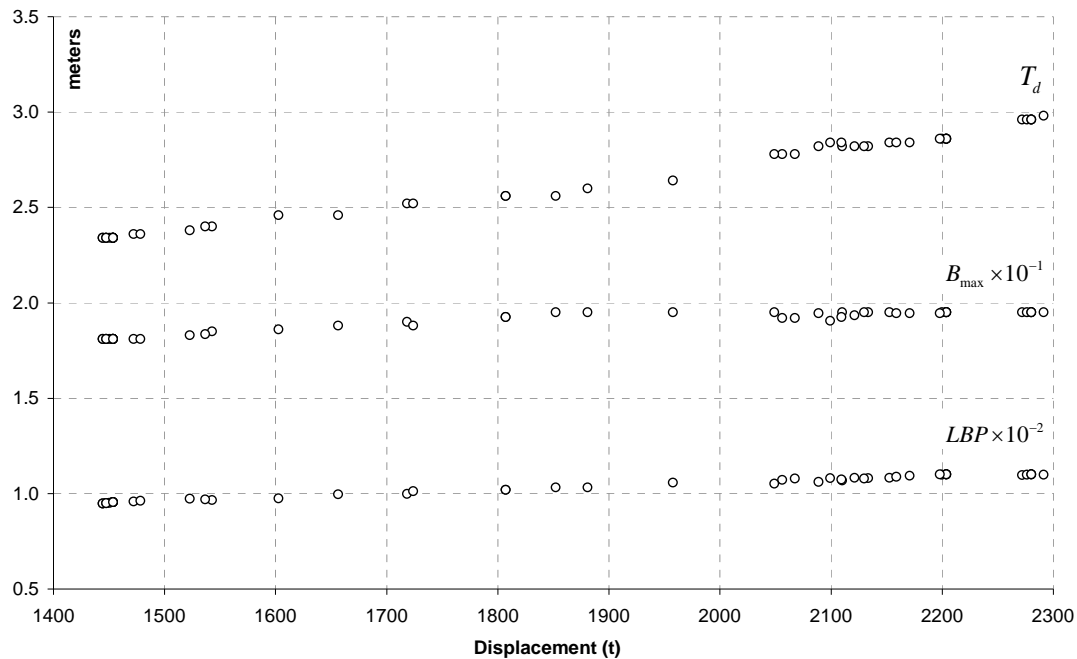


Σχήμα 5.43: Διαγράμματα κόστους κατασκευής – κυρίων διαστάσεων, όριο Pareto



Σχήμα 5.44: Διαγράμματα εγκατεστημένης ισχύος – κυρίων διαστάσεων, όριο Pareto

Στο επόμενο διάγραμμα (Σχήμα 5.45) παρουσιάζονται οι τιμές του εκποτίσματος σχεδίασης σε σχέση με τις κύριες διαστάσεις για τις λύσεις εκείνες που ανήκουν στο σύνολο Pareto.



Σχήμα 5.45: Διαγράμματα εκτοπίσματος σχεδίασης – κυρίων διαστάσεων, όριο Pareto

5.5. Επιλογή της βέλτιστης λύσης

Το πρόβλημα της επιλογής μίας και μόνο λύσης ως βέλτιστη, από το σύνολο των σχεδιάσεων που ανήκουν στο όριο Pareto, δεν έχει μονοσήμαντη λύση ενώ ορισμένες φορές η λύση αυτή εξαρτάται από τη μεθοδολογία λήψης απόφασης που θα ακολουθήσει ο μελετητής. Στην παρούσα εφαρμογή θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές μεταξύ τους μέθοδοι επιλογής προκειμένου να διερευνηθεί εάν και κατά πόσο η εφαρμογή τους μπορεί να οδηγήσει σε μία ορθολογική επιλογή της βέλτιστης λύσης.

5.5.1. 1^ο Πρόβλημα Επιλογής

Στο πρόβλημα αυτό αναζητείται η βέλτιστη σχεδίαση, δεδομένου ότι όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν την ίδια σπουδαιότητα.

Α' Μέθοδος επιλογής: Πλησιέστερη στην ουτοπική λύση

Υπενθυμίζεται ότι η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εύρεση της λύσης εκείνης η οποία απέχει τη μικρότερη απόσταση από την ουτοπική, με βάση την παρακάτω εξίσωση:

$$|d(\mathbf{x})| = \left\{ \sum_{i=1}^4 \left[w_i (f_i(\mathbf{x}) - f_i^*) / f_i^* \right]^2 \right\}^{1/2}, \quad \mathbf{x} \in \Omega_0, \quad \sum_{i=1}^4 w_i = 1 \quad (5.3)$$

όπου $f_1(\mathbf{x}) = N_{PASS}(\mathbf{x})$, $f_2(\mathbf{x}) = N_{CARS}(\mathbf{x})$, $f_3(\mathbf{x}) = C_A(\mathbf{x})$, $f_4(\mathbf{x}) = P_W(\mathbf{x})$, w_i οι ζητούμενοι συντελεστές βαρύτητας των αντικειμενικών συναρτήσεων και Ω_0 το σύνολο των λύσεων Pareto.

Λόγω του γεγονότος ότι τα κριτήρια επιλογής έχουν την ίδια σπουδαιότητα, οι τιμές της προτίμησης που αντιστοιχούν στα κριτήρια αυτά θα είναι:

$$p_i = 0.25, \quad \forall \quad i = 1, \dots, 4 \quad (5.4)$$

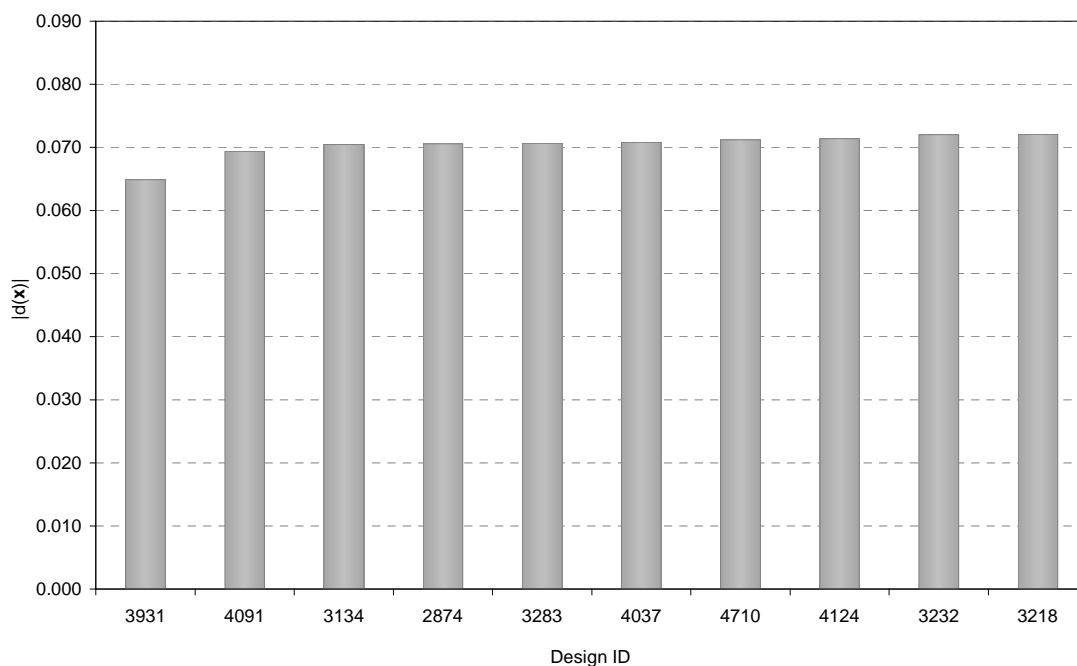
Με βάση την Εξίσωση (2.10) οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας προκύπτουν:

$$w_1 = 0.28987, \quad w_2 = 0.28124, \quad w_3 = 0.24375, \quad w_4 = 0.18514 \quad (5.5)$$

Με βάση την τιμή της απόστασης $|d(x_i)|$ που παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.7 η βέλτιστη λύση αντιστοιχεί στη σχεδίαση 3931. Στο Σχήμα 5.46 διακρίνονται οι οριακές διαφορές στην τιμή της Εξίσωσης (5.3) για τις δέκα καλύτερες σχεδιάσεις, όπως αυτές αξιολογήθηκαν με βάση το κριτήριο της μικρότερης απόστασης.

Πίνακας 5.7: Χαρακτηριστικά 10 καλύτερων σχεδιάσεων, nearest to the utopian

Rank	Design ID	L_{bp} (m)	B_{max} (m)	T_d (m)	F_b (m)	N_{PASS}	N_{CARS}	C_A (m€)	P_w (kW)	RFR (€)	$ d(x) $
1	3931	99.6	18.80	2.46	2.80	923	256	34	18005	19.41	0.06489
2	4091	97.2	18.30	2.38	2.30	864	243	31	15960	18.67	0.06939
3	3134	95.4	18.10	2.34	2.65	852	242	30	14767	18.00	0.07048
4	2874	95.4	18.10	2.34	2.60	851	242	30	14767	17.97	0.07060
5	3283	96.2	18.10	2.36	2.65	855	243	31	15733	18.71	0.07064
6	4037	97.0	18.35	2.4	2.55	873	245	32	17069	19.37	0.07080
7	4710	95.4	18.10	2.34	2.55	851	241	30	14767	17.95	0.07121
8	4124	95.4	18.10	2.34	2.50	850	241	30	14767	17.95	0.07139
9	3232	94.8	18.10	2.34	3.00	840	244	31	14930	18.36	0.07202
10	3218	95.8	18.10	2.36	2.65	848	243	31	15826	18.78	0.07210



Σχήμα 5.46: Οι 10 πρώτες σε κατάταξη λύσεις, nearest to the utopian

Β' Μέθοδος επιλογής: Γενετικοί Αλγόριθμοι

Όπως έχει αναφερθεί, η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ιεράρχηση από το μελετητή της σπουδαιότητας μεταξύ των κριτηρίων βελτιστοποίησης ή/και των υποψήφιων βέλτιστων λύσεων. Ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι συντελεστές βαρύτητας για κάθε κριτήριο επιλογής υπολογίζονται από τον αλγόριθμο με βάση τη σπουδαιότητα του κάθε κριτηρίου ή/και της υποψήφιας βέλτιστης λύσης. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, το πρόβλημα επιλογής έγκειται στον προσδιορισμό της παρακάτω μη γραμμικής συνάρτησης χρησιμότητας (local or optimal utility function):

$$u(\mathbf{f}(\mathbf{x})) = \sum_{i=1}^4 w_i u(f_i(\mathbf{x})), \quad \mathbf{x} \in \Omega_0, \quad \sum_{i=1}^4 w_i = 1 \quad (5.6)$$

όπου $f_1(\mathbf{x}) = N_{PASS}(\mathbf{x})$, $f_2(\mathbf{x}) = N_{CARS}(\mathbf{x})$, $f_3(\mathbf{x}) = C_A(\mathbf{x})$, $f_4(\mathbf{x}) = P_W(\mathbf{x})$, w_i οι ζητούμενοι συντελεστές βαρύτητας των αντικειμενικών συναρτήσεων και Ω_0 το σύνολο των λύσεων Pareto.

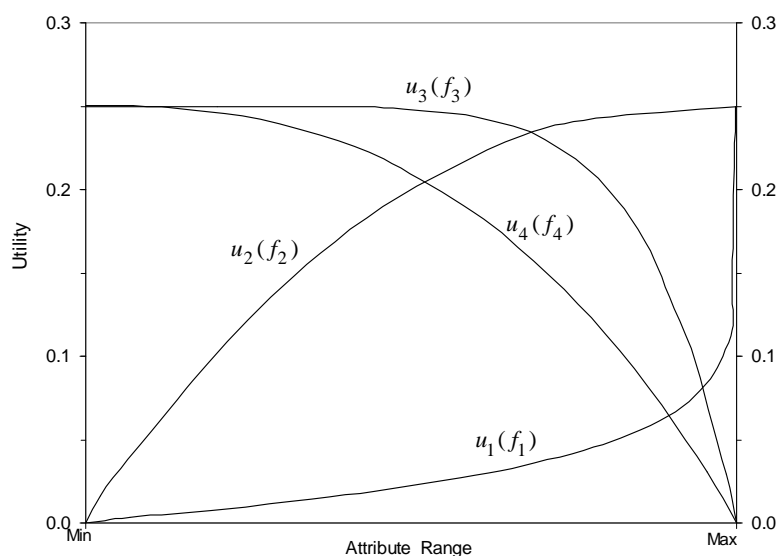
Δεδομένου ότι τα κριτήρια επιλογής αφορούν μόνο τις αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης και ότι αυτές έχουν την ίδια σπουδαιότητα για το μελετητή τότε, οι συσχετίσεις του προβλήματος επιλογής ορίζονται ως εξής:

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 \quad (5.7)$$

όπου p_i η προτίμηση του μελετητή ως προς το κριτήριο επιλογής i , δηλαδή ως προς τη σπουδαιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης $f_i(\mathbf{x})$.

Οι μη γραμμικές συναρτήσεις χρησιμότητας (marginal utility functions) για κάθε κριτήριο επιλογής παρουσιάζονται στο παρακάτω Σχήμα 5.47. Όπως φαίνεται σε αυτό, οι συντελεστές βαρύτητας των αντικειμενικών συναρτήσεων λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

$$w_1 = 0.24998, \quad w_2 = 0.25005, \quad w_3 = 0.24967, \quad w_4 = 0.25030 \quad (5.8)$$

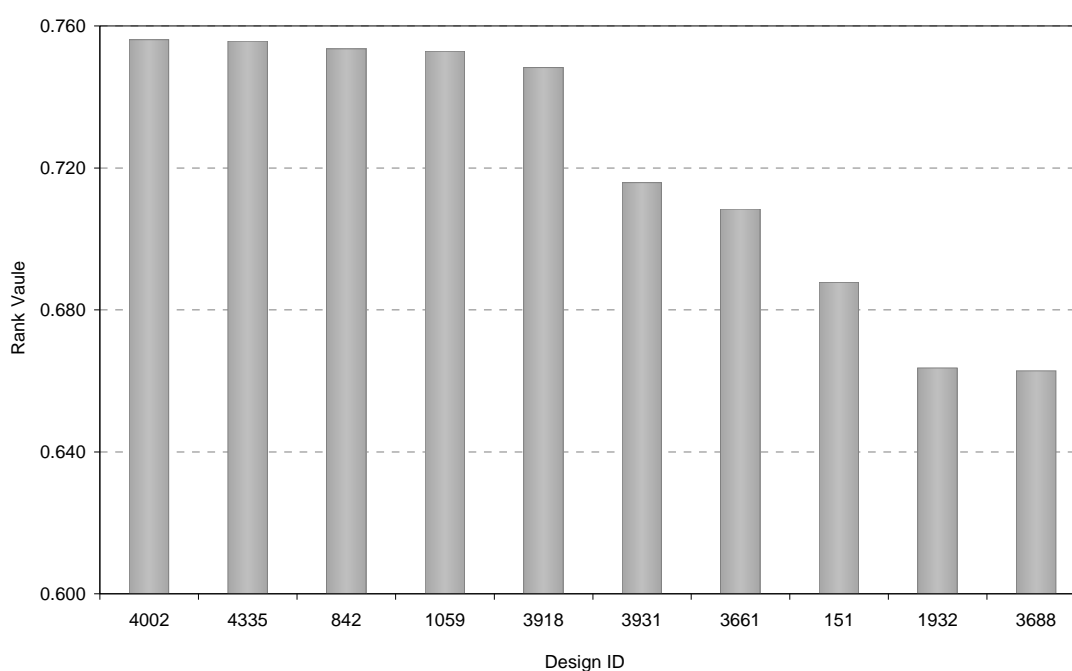


Σχήμα 5.47: Συναρτήσεις χρησιμότητας, GA-MCDM

Κάθε σχεδίαση αξιολογείται με βάση το βαθμό ιεράρχησης (rank value), η τιμή του οποίου (Σχήμα 5.48) υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση (2.13). Ως βέλτιστη λύση προκύπτει τελικά η σχεδίαση με αύξοντα αριθμό 4002, τα χαρακτηριστικά της οποίας, όπως και των υπόλοιπων εννέα πρώτων σε κατάταξη σχεδιάσεων περιέχει ο Πίνακας 5.8.

Πίνακας 5.8: Χαρακτηριστικά 10 καλύτερων σχεδιάσεων, GA-MCDM

Rank	Design ID	L_{bp} (m)	B_{max} (m)	T_d (m)	F_b (m)	N_{PASS}	N_{CARS}	C_A (m€)	P_w (kW)	RFR (€)	Rank Value
1	4002	102.0	19.25	2.56	3.00	969	270	37.47	21759	21.28	0.75614
2	4335	103.2	19.50	2.56	2.15	977	266	36.29	20594	20.23	0.75573
3	842	105.8	19.50	2.64	2.15	994	272	38.98	24773	22.69	0.75361
4	1059	103.2	19.50	2.60	2.45	981	269	37.99	23155	21.91	0.75288
5	3918	102.0	19.25	2.56	2.65	962	267	36.90	21759	21.27	0.74823
6	3931	99.6	18.80	2.46	2.80	923	256	34.06	18005	19.41	0.71582
7	3661	101.2	18.80	2.52	2.55	925	256	35.87	21541	21.83	0.70844
8	151	99.8	19.00	2.52	2.20	925	250	35.01	20836	21.24	0.68776
9	1932	107.8	19.20	2.78	2.35	1000	276	42.87	31812	26.91	0.66365
10	3688	105.2	19.50	2.78	2.85	1000	276	43.28	31532	26.94	0.66283



Σχήμα 5.48: Οι 10 πρώτες σε κατάταξη λύσεις, GA-MCDM

5.5.2. 2^ο Πρόβλημα Επιλογής

Εάν κανείς θεωρήσει ότι τα κριτήρια βελτιστοποίησης δεν έχουν την ίδια σπουδαιότητα για το μελετητή, τότε φυσικά θα προκύψει μία διαφορετική βέλτιστη λύση. Στο παρόν πρόβλημα επιλογής αναζητείται η βέλτιστη λύση δεδομένου ότι τα κριτήρια των επιβατών και των ΙΧ αυτοκινήτων έχουν την ίδια σπουδαιότητα μεταξύ τους. Επιπλέον θεωρείται ότι το κριτήριο του κόστους κατασκευής είναι περίπου δύο φορές πιο σημαντικό και το κριτήριο της ισχύος περίπου δυόμισι φορές πιο σημαντικό από τον αριθμό επιβατών και οχημάτων.

Α' Μέθοδος επιλογής: Πλησιέστερη στην ουτοπική λύση

Κατά αντιστοιχία με το πρώτο πρόβλημα επιλογής, οι τιμές της προτίμησης για κάθε κριτήριο λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

$$p_1 = 0.15, \quad p_2 = 0.15, \quad p_3 = 0.3, \quad p_4 = 0.4 \quad (5.9)$$

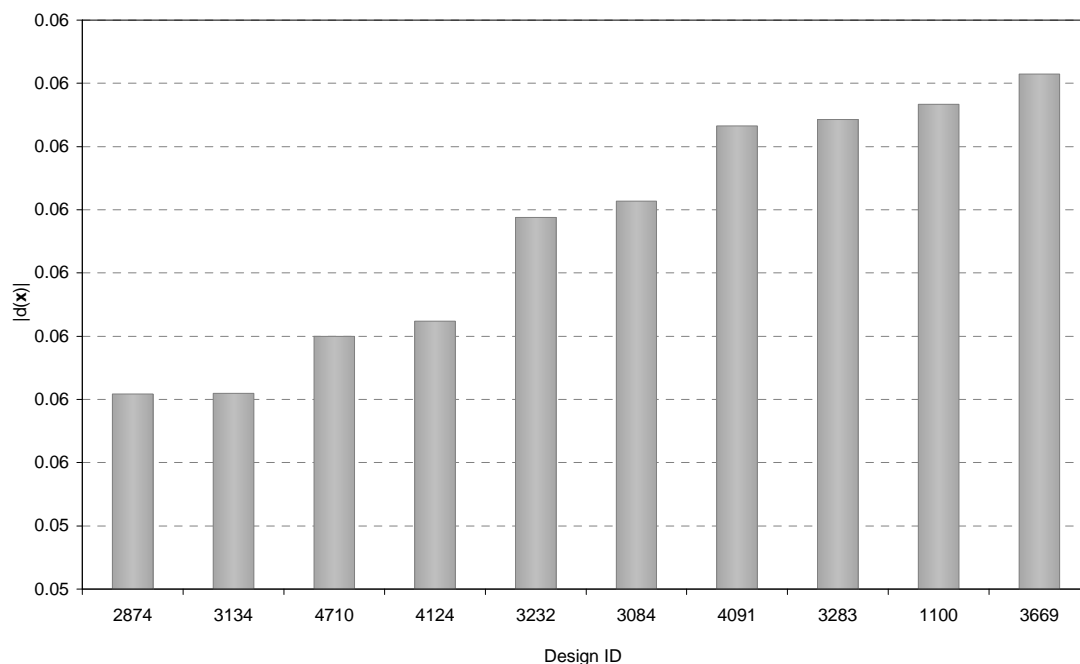
Με βάση την Εξίσωση (2.10) οι τιμές των συντελεστών βάρους προκύπτουν:

$$w_1 = 0.22676, \quad w_2 = 0.22158, \quad w_3 = 0.29181, \quad w_4 = 0.25985 \quad (5.10)$$

Ο Πίνακας 5.9 περιέχει ορισμένα βασικά χαρακτηριστικά των δέκα πρώτων σε κατάταξη σχεδιάσεων, ενώ στο Σχήμα 5.49 απεικονίζεται η τιμή της Εξίσωσης (5.3). Ως βέλτιστη λύση προκύπτει η σχεδίαση 2874 λόγω κυρίως της μειωμένης ισχύος και του κόστους κατασκευής τους, κριτήρια τα οποία έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα στην επιλογή της τελικής λύσης.

Πίνακας 5.9: Χαρακτηριστικά 10 καλύτερων σχεδιάσεων, nearest to the utopian (weighted)

Rank	Design ID	L_{bp} (m)	B_{max} (m)	T_d (m)	F_b (m)	N_{PASS}	N_{CARS}	C_A (m€)	P_W (kW)	RFR (€)	$ d(x) $
1	2874	95.4	18.10	2.34	2.60	851	242	30	14767	17.97	0.05554
2	3134	95.4	18.10	2.34	2.65	852	242	30	14767	18.00	0.05555
3	4710	95.4	18.10	2.34	2.55	851	241	30	14767	17.95	0.05600
4	4124	95.4	18.10	2.34	2.50	850	241	30	14767	17.95	0.05612
5	3232	94.8	18.10	2.34	3.00	840	244	31	14930	18.36	0.05694
6	3084	95.0	18.10	2.34	2.80	840	243	30	14874	18.27	0.05707
7	4091	97.2	18.30	2.38	2.30	864	243	31	15960	18.67	0.05766
8	3283	96.2	18.10	2.36	2.65	855	243	31	15733	18.71	0.05771
9	1100	94.8	18.10	2.34	2.60	843	240	30	14930	18.20	0.05783
10	3669	95.2	18.10	2.34	2.60	838	241	30	14820	18.18	0.05807



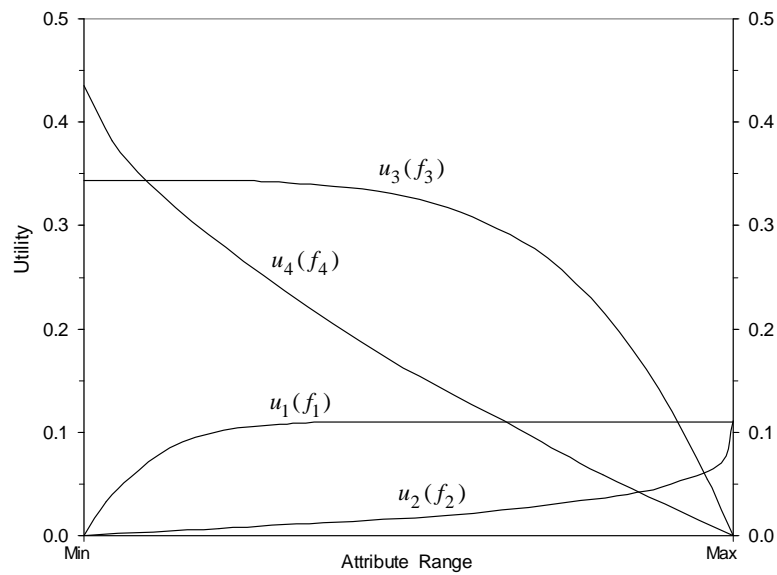
Σχήμα 5.49: Οι 10 πρώτες σε κατάταξη λύσεις, nearest to the utopian (weighted)

Β' Μέθοδος επιλογής: Γενετικοί Αλγόριθμοι

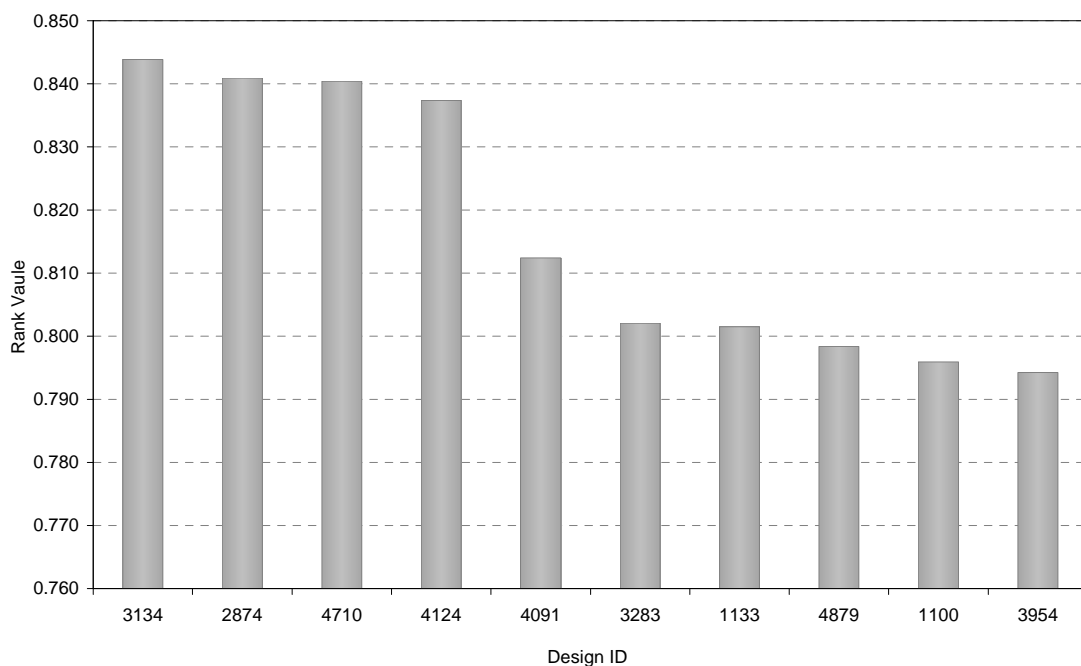
Κατά αντιστοιχία με το πρώτο πρόβλημα επιλογής, οι συσχετίσεις μεταξύ των κριτηρίων επιλογής μπορεί να οριστούν ως εξής:

$$p_1 = p_2, \quad p_3 > 1.9p_1, \quad p_4 > 2.4p_1 \quad (5.11)$$

όπου p_i η προτίμηση του μελετητή ως προς το κριτήριο επιλογής i , δηλαδή ως προς τη σπουδαιότητα της αντικειμενικής συνάρτησης $f_i(\mathbf{x})$.



Σχήμα 5.50: Συναρτήσεις χρησιμότητας, GA-MCDM (weighted)



Σχήμα 5.51: Οι 10 πρώτες σε κατάταξη λύσεις, GA-MCDM (weighted)

Οι συναρτήσεις χρησιμότητας (marginal utility functions) για κάθε κριτήριο επιλογής παρουσιάζονται στο παραπάνω Σχήμα 5.50. Όπως φαίνεται σε αυτό, οι συντελεστές βαρύτητας των αντικειμενικών συναρτήσεων λαμβάνουν τις παρακάτω τιμές:

$$w_1 = 0.11037, \quad w_2 = 0.11089, \quad w_3 = 0.34332, \quad w_4 = 0.43543 \quad (5.12)$$

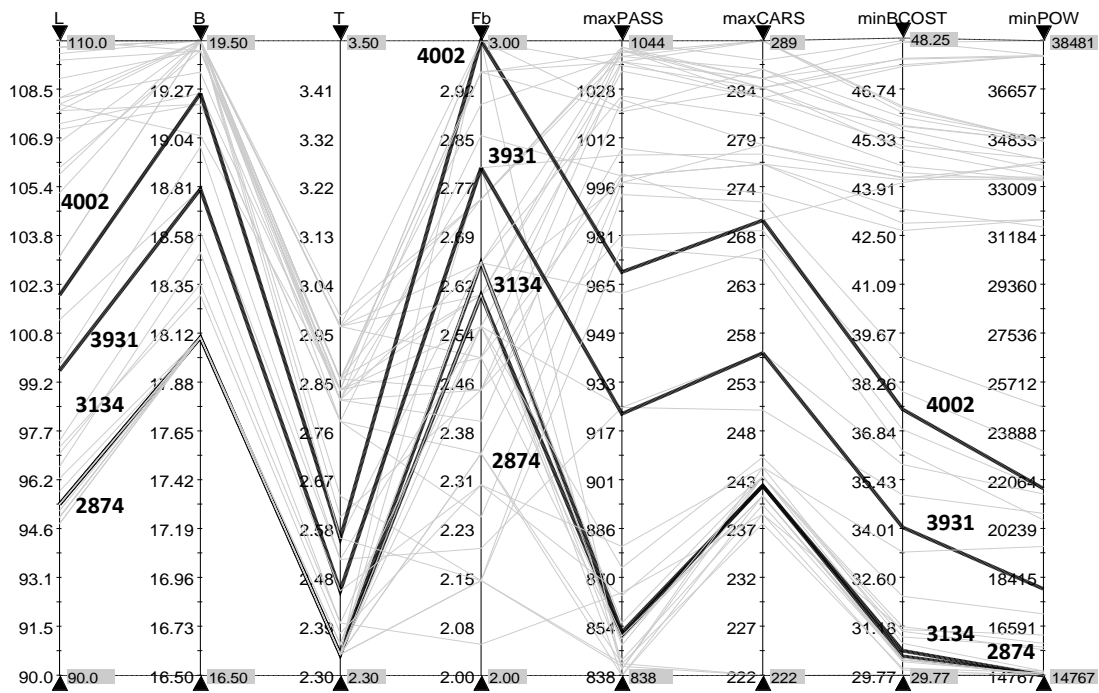
Πίνακας 5.10: Χαρακτηριστικά 10 καλύτερων σχεδιάσεων, GA-MCDM (weighted)

Rank	Design ID	L_{bp} (m)	B_{max} (m)	T_d (m)	F_b (m)	N_{PASS}	N_{CARS}	C_A (m€)	P_w (kW)	RFR (€)	Rank Value
1	3134	95.4	18.10	2.34	2.65	852	242	30.50	14767	18.00	0.84384
2	2874	95.4	18.10	2.34	2.60	851	242	30.33	14767	17.97	0.84093
3	4710	95.4	18.10	2.34	2.55	851	241	30.28	14767	17.95	0.84040
4	4124	95.4	18.10	2.34	2.50	850	241	30.23	14767	17.95	0.83735
5	4091	97.2	18.30	2.38	2.30	864	243	31.19	15960	18.67	0.81239
6	3283	96.2	18.10	2.36	2.65	855	243	31.06	15733	18.71	0.80207
7	1133	96.6	18.50	2.40	2.05	865	239	31.11	16288	18.87	0.80151
8	4879	95.4	18.10	2.34	2.15	842	222	29.79	14767	18.31	0.79839
9	1100	94.8	18.10	2.34	2.60	843	240	30.23	14930	18.20	0.79593
10	3954	95.0	18.10	2.34	2.35	842	238	29.98	14874	18.12	0.79425

Κάθε σχεδίαση που ανήκει στο όριο Pareto, αξιολογείται με βάση το βαθμό ιεράρχησης (Σχήμα 5.51). Ο παραπάνω Πίνακας 5.10 περιέχει τα χαρακτηριστικά των δέκα πρώτων σε κατάταξη λύσεων, όπου η σχεδίαση 3134 βρίσκεται στην πρώτη θέση της κατάταξης.

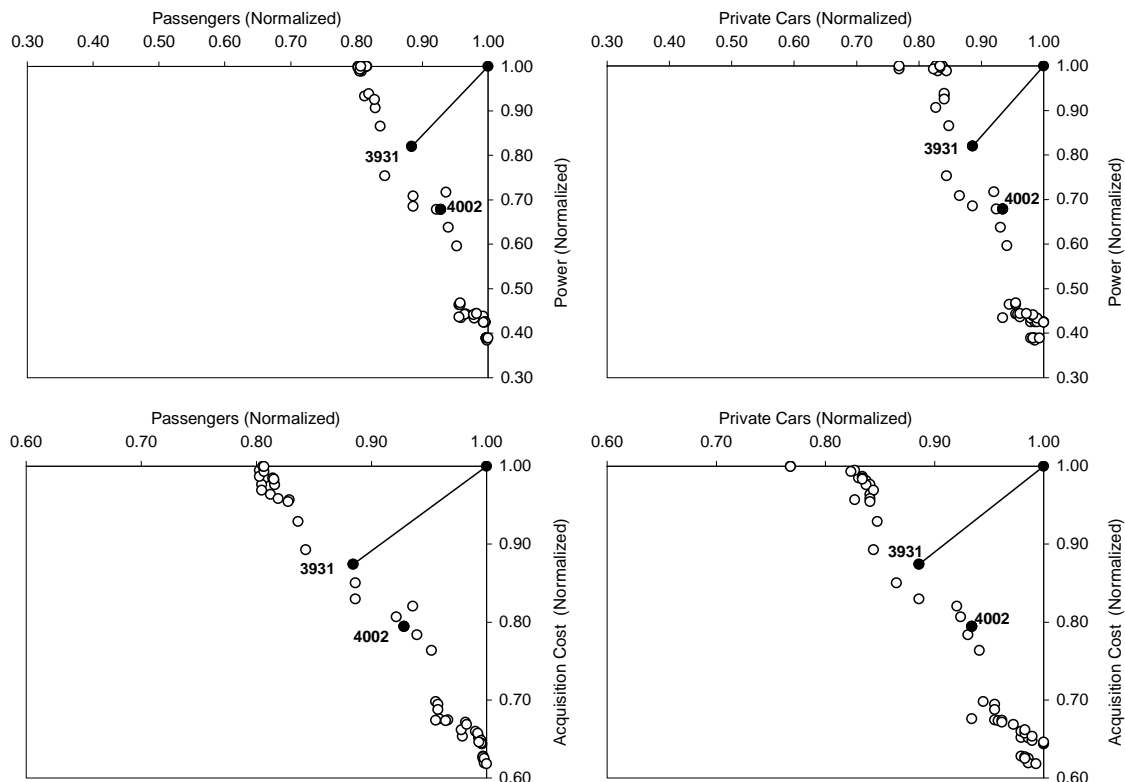
Συμπεράσματα

Στο παρακάτω γραμμικό διάγραμμα (Σχήμα 5.52) παρουσιάζονται οι τιμές των κυρίων διαστάσεων και των αντικειμενικών συναρτήσεων των βέλτιστων λύσεων, όπως αυτές προέκυψαν από τις δύο παραπάνω μεθόδους επιλογής.



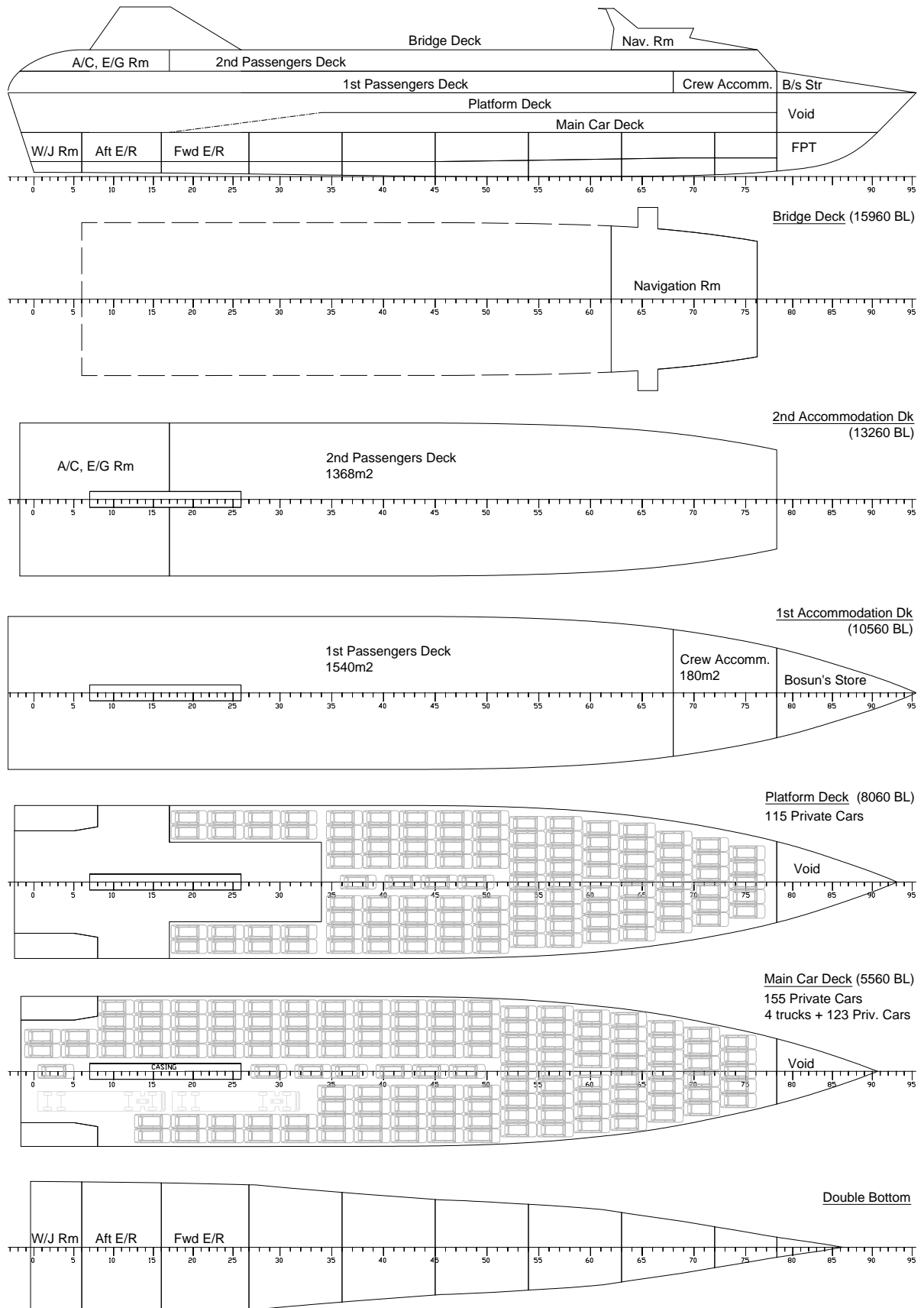
Σχήμα 5.52: Γραμμικό διάγραμμα τιμών κυρίων ελεύθερων μεταβλητών και αντικειμενικών συναρτήσεων, όριο Pareto

Τόσο στο πρώτο όσο και στο δεύτερο πρόβλημα επιλογής, οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν δεν καταλήγουν στις ίδιες βέλτιστες λύσεις. Στο πρώτο πρόβλημα, όπου όλα τα κριτήρια επιλογής έχουν την ίδια σπουδαιότητα, ως βέλτιστη λύση προκύπτει η σχεδίαση 3931, έπειτα από εφαρμογή του κριτηρίου της μικρότερης απόστασης και η σχεδίαση 4002, σαν αποτέλεσμα εφαρμογής της μεθόδου επιλογής GA-MCDM. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα, η σχεδίαση 4002 αντιστοιχεί σε πλοίο ελαφρώς μεγαλύτερων διαστάσεων, από ότι η σχεδίαση 3931. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρουσιάζει από τη μία αυξημένο πρόσθετο βάρος (DWT=670.5t) και από την άλλη αυξημένο βάρος μεταλλικής κατασκευής (WST=383.1t) και βάρος άφορτου σκάφους (WLS=997.3t) συγκριτικά με τη σχεδίαση 3931, όπου τα αντίστοιχα μεγέθη είναι DWT=625.9t, WLS=917.8t και WST=355.3t. Στο Σχήμα 5.53 παρουσιάζονται καρτεσιανά διαγράμματα στα οποία περιέχονται οι κανονικοποιημένες τιμές των αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων των λύσεων Pareto όπου φαίνονται οι δύο βέλτιστες λύσεις σε σχέση με την ουτοπική λύση η οποία αντιστοιχεί στο σημείο (1,1). Συμπερασματικά, η λύση 4002 ικανοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα κριτήρια επιλογής καθώς οι τιμές των αντικειμενικών της συναρτήσεων βρίσκονται κοντά στους αντίστοιχους μέσους όρους προς τη βέλτιστη κατεύθυνση, σε αντίθεση με τη λύση 3931 όπου τα κριτήρια της ισχύος και του κόστους κατασκευής υπερیشύουν ελαφρώς των υπολοίπων. Στο Σχήμα 5.54 παρουσιάζεται το σκαρίφημα της γενικής διάταξης του βέλτιστου πλοίου (σχεδίαση 4002), όπως αυτή παράγεται αυτόματα κατά τη διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης.



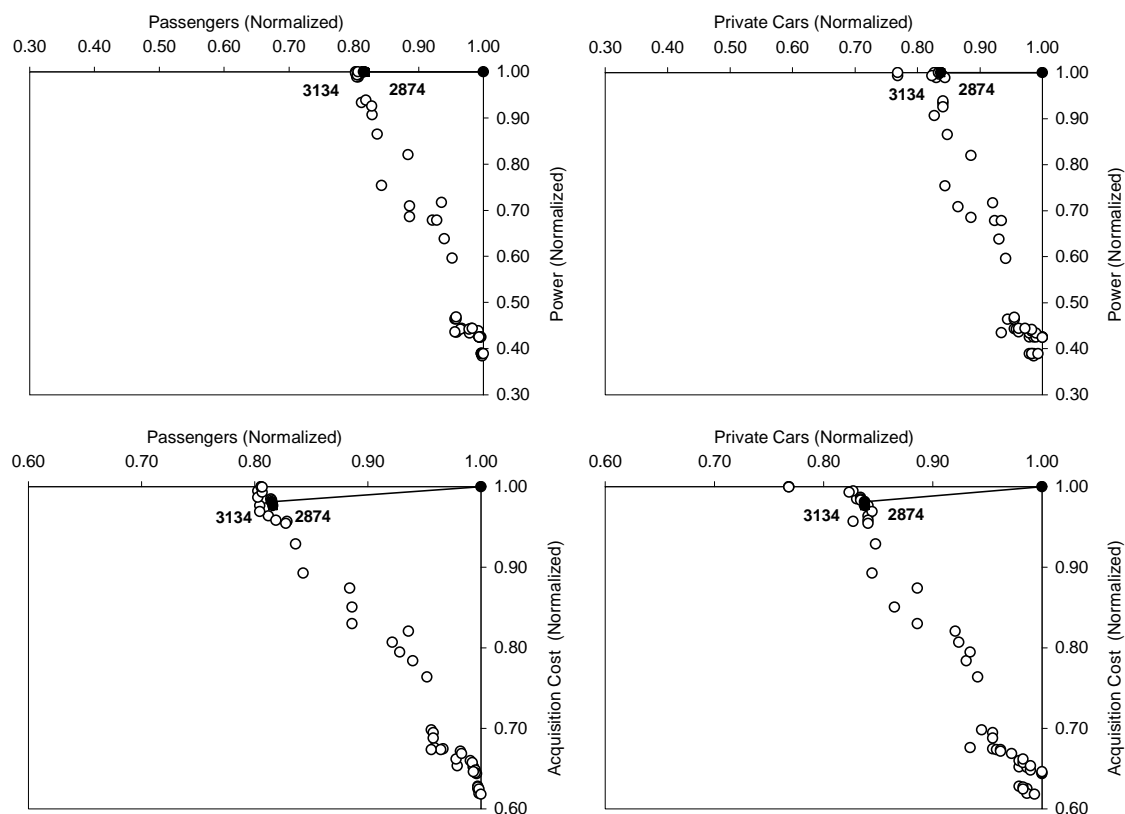
Σχήμα 5.53: Σύνορο Pareto, κανονικοποιημένες τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων – ισοδύναμα κριτήρια

Στο δεύτερο πρόβλημα επιλογής, όπου οι αντικειμενικές συναρτήσεις έχουν διαφορετική βαρύτητα, ως βέλτιστη λύση προέκυψε η σχεδίαση 2874 σαν αποτέλεσμα εφαρμογής του κριτηρίου της μικρότερης απόστασης και η σχεδίαση 3134, με εφαρμογή της μεθόδου GA-MCDM.



Σχήμα 5.54: Σκαρίφημα Γενικής Διάταξης της βέλτιστης σχεδίασης 4002

Όπως φαίνεται στους αντίστοιχους πίνακες αλλά και στο Σχήμα 5.52, οι δύο αυτές σχεδιάσεις είναι σχεδόν ταυτόσημες και αντιστοιχούν σε δύο μικρού μεγέθους πλοία τα οποία έχουν το μικρότερο δυνατό βύθισμα, γεγονός που είναι αναμενόμενο δεδομένου του πολύ υψηλού συντελεστή συσχέτισης μεταξύ βυθίσματος και ισχύος πρόωσης (Σχήμα 5.29). Η επιλογή αυτή είναι επίσης απόρροια της πολύ μικρής σπουδαιότητας που είχαν τα κριτήρια του αριθμού των επιβατών και των ΙΧ αυτοκινήτων σε σχέση με τα κριτήρια της ισχύος πρόωσης και του κόστους κατασκευής. Με ισχυρότερο κριτήριο εκείνο της μικρότερης ισχύος, οι δύο βέλτιστες λύσεις παρουσιάζουν την ελάχιστη (βέλτιστη) τιμή της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης και στις δύο μεθόδους επιλογής. Με μοναδική διαφορά την τιμή του ύψους εξάλων οι δύο εναλλακτικές σχεδιάσεις παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές στις αντίστοιχες ομάδες βαρών. Έτσι, στη σχεδίαση 2874 το πρόσθετο βάρος ισούται με 582.6t, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής με 324.6t και βάρος άφορτου σκάφους με 836.3t, ενώ για τη σχεδίαση 3134 οι αντίστοιχες τιμές είναι DWT=584.5t, WST=326.0t και WLS=838.3t. Όπως και παραπάνω, στο Σχήμα 5.55 παρουσιάζονται οι κανονικοποιημένες τιμές των αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων των λύσεων Pareto, όπου η σχεδίαση 2874 συμβολίζεται με το σκιαγραφημένο τετράγωνο.



Σχήμα 5.55: Σύνορο Pareto, κανονικοποιημένες τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων

Αξίζει τέλος να σημειωθεί ότι με βάση το κριτήριο του Ελάχιστου Απαιτούμενου Ναύλου και για τα δεδομένα σενάρια αγοράς και λειτουργίας η βέλτιστη λύση αντιστοιχεί στη σχεδίαση 4124 ή στη σχεδίαση 4710. Η τιμή του EAN για τα πλοία αυτά είναι €17.95. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς στον παρακάτω Πίνακα, στον οποίο περιλαμβάνονται οι δέκα καλύτερες σχεδιάσεις με βάση το κριτήριο του EAN, οι βέλτιστες λύσεις αντιστοιχούν σε μικρά σχετικά πλοία. Η επιλογή αυτή προκύπτει λόγω του γεγονότος ότι για τα δεδομένα σενάρια

απόκτησης και λειτουργίας, τα επενδυτικά και λειτουργικά έξοδα της επένδυσης αυξάνονται με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι τα έσοδα καθώς αυξάνει το μέγεθος του πλοίου. Σημαντικό παράγοντα αποτελεί η θεώρηση ότι ο αριθμός των μεταφερόμενων ΦΓ αυτοκινήτων παραμένει σταθερός για κάθε εναλλακτική σχεδίαση και δε μεταβάλλεται με το μέγεθος του πλοίου. Επιπλέον, το υψηλότερο λειτουργικό κόστος που παρουσιάζουν τα μεγαλύτερου μεγέθους πλοία, λόγω κυρίως της τιμής των καυσίμων, τα καθιστά λιγότερο ανταγωνιστικά στην συγκεκριμένη γραμμή νηολόγησης. Επιπλέον, ο αριθμός των μεταφερόμενων ΦΓ αυτοκινήτων παραμένει σταθερός και ανεξάρτητος από την πληρότητα των ΙΧ αυτοκινήτων καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με αποτέλεσμα να ευνοούνται τα μικρότερα σε μέγεθος πλοία.

Πίνακας 5.11: Χαρακτηριστικά 10 καλύτερων σχεδιάσεων, RFR

Rank	Design ID	L_{bp} (m)	B_{max} (m)	T_d (m)	F_b (m)	N_{PASS}	N_{CARS}	C_A (m€)	P_w (kW)	RFR (€)
1	4124	95.40	18.10	2.34	2.50	241	850	30.23	14767	17.95
2	4710	95.40	18.10	2.34	2.55	241	851	30.28	14767	17.95
3	2874	95.40	18.10	2.34	2.60	242	851	30.33	14767	17.97
4	3134	95.40	18.10	2.34	2.65	242	852	30.50	14767	18.00
5	3506	95.40	18.10	2.34	2.35	239	838	29.93	14767	18.09
6	3954	95.00	18.10	2.34	2.35	238	842	29.98	14874	18.12
7	3669	95.20	18.10	2.34	2.60	241	838	30.18	14820	18.18
8	1100	94.80	18.10	2.34	2.60	240	843	30.23	14930	18.20
9	3084	95.00	18.10	2.34	2.80	243	840	30.48	14874	18.27
10	4879	95.40	18.10	2.34	2.15	222	842	29.79	14767	18.31

Όπως λοιπόν γίνεται κατανοητό, σε προβλήματα με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες αντικρούονται ή ανταγωνίζονται μεταξύ τους, η τελικά επιλεγείσα ως βέλτιστη λύση εξαρτάται τόσο από τα κριτήρια όσο και από τη μέθοδο επιλογής. Ως εκ τούτου η λύση ενός τέτοιου προβλήματος βελτιστοποίησης δεν μπορεί να θεωρηθεί μονοσήμαντη, και σε ό,τι αφορά την προμελέτη πλοίου, αυτή πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ικανοποιεί στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη και τις ιδιαιτερότητες της εκάστοτε σχεδίασης.

Σύνοψη - Συμπεράσματα - Προτάσεις

ΣΥΝΟΨΗ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες και παράλληλα με την εξέλιξη των συναφών προς τη ναυπηγική επιστημών, η μελέτη και η σχεδίαση πλοίων παρουσιάζει συνεχή και σημαντική πρόοδο. Με στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας αλλά και τη διεύρυνση της δημιουργικότητας, οι σύγχρονες μέθοδοι σχεδίασης βασίζονται όλο και περισσότερο στην τεχνολογία των υπολογιστών, οι οποίοι σήμερα αποτελούν ένα σημαντικό βοήθημα για το μελετητή. Στην παρούσα διατριβή αναπτύσσεται μία ολοκληρωμένη μεθοδολογία μελέτης και σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας στη φάση του αρχικού σχεδιασμού. Σε αντίθεση με τα καθιερωμένα μοντέλα μελέτης πλοίου, το μοντέλο που παρουσιάζεται εδώ δεν είναι ούτε επαναληπτικό, ούτε παλινδρομικό. Η επίλυση του προβλήματος της σχεδίασης ενός πλοίου βασίζεται στην αυτοματοποιημένη παραγωγή εναλλακτικών σχεδιάσεων και στην αναζήτηση της βέλτιστης σχεδίασης μέσω της ορθολογικής διερεύνησης του πεδίου των πιθανών λύσεων. Εδώ, δεν απαιτείται η ύπαρξη ενός δεδομένου σημείου εκκίνησης της διαδικασίας, ενώ εξασφαλίζεται ότι η τελική σχεδίαση θα προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση του προβλήματος, δηλαδή τη λύση εκείνη η οποία θα ικανοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό τις απαιτήσεις που έχει θέσει ο μελετητής.

Η άμεση παραγωγή και η αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιάσεων στη φάση της προμελέτης, αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα της παρούσας προσέγγισης, σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές μελέτης και σχεδίασης πλοίου. Για κάθε εναλλακτική σχεδίαση ο μελετητής έχει στη διάθεσή του, εκτός από το γεωμετρικό μοντέλο, μία πληθώρα πληροφοριών οι οποίες αφορούν τη γεωμετρία του πλοίου, την αντίσταση, τα βάρη, τον τύπο της προωστήριας εγκατάστασης, τη μεταλλική κατασκευή, την ευστάθεια, το κόστος κατασκευής, κ.ά. Οι πληροφορίες αυτές παράγονται μέσω της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων η οποία αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής και αποτελεί το βασικό της πυρήνα. Ως παραμετρική σχεδίαση νοείται η διαδικασία εκείνη κατά την οποία, με βάση ένα σύνολο ελεύθερων μεταβλητών και παραμέτρων, αναπαράγεται η γεωμετρία του πλοίου και ολοκληρώνεται η διεξαγωγή ενός πλήθους υπολογισμών, απαραίτητων για την αξιολόγηση κάθε σχεδίασης.

Συνοψίζοντας τις κύριες φάσεις ολοκλήρωσης μιας σχεδίασης, αρχικά παράγεται η γεωμετρία της επιφάνειας της γάστρας και εκτιμάται η απαιτούμενη ισχύς πρόωσης. Στη συνέχεια παράγεται η γεωμετρία των εσωτερικών χώρων συμπεριλαμβανομένης της στεγανής υποδιαίρεσης και των υπερκατασκευών του πλοίου. Εάν η μεταφορική ικανότητα δεν είναι απαίτηση του πλοιοκτήτη, τότε ο αριθμός επιβατών και οχημάτων που μπορούν να μεταφερθούν, υπολογίζεται μέσω της αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραμετρικής σχεδίασης. Στην αντίθετη περίπτωση, η γενική διάταξη του πλοίου, όπως αυτή παράγεται αυτόματα, είναι τέτοια ώστε οι χώροι που προκύπτουν να είναι κατάλληλοι για τη φιλοξενία ενός δεδομένου αριθμού επιβατών ή/και τη μεταφορά ενός επίσης δεδομένου αριθμού οχημάτων. Σημειώνεται ότι, οι πληροφορίες που απαιτούνται για την εκπόνηση των υπολογισμών βασίζονται, εκτός από τη γεωμετρία του πλοίου, στη διεθνή και στην εθνική νομοθεσία, σε κανονισμούς νηογνωμόνων και σε στοιχεία κατασκευαστών.

Με βάση την επιφάνεια της γάστρας και την εσωτερική διάταξη των χώρων, παράγεται στη συνέχεια η γεωμετρική αναπαράσταση της μεταλλικής κατασκευής, τα στοιχεία της οποίας διαστασιολογούνται με βάση κατάλληλους κανονισμούς του Νορβηγικού νηογνώμονα, οι οποίοι αφορούν την κατασκευή ταχύπλων Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων από κράματα χάλυβα ή αλουμινίου. Μετά τον αναλυτικό υπολογισμό του βάρους και του κέντρου βάρους της μεταλλικής κατασκευής προσδιορίζονται αναλυτικά οι υπόλοιπες ομάδες που απαρτίζουν το βάρος του άφορτου σκάφους. Ο υπολογισμός των επιμέρους βαρών βασίζεται σε κατάλληλες πρωτότυπες μαθηματικές εκφράσεις, οι οποίες διατυπώθηκαν έπειτα από τη συγκέντρωση και την ανάλυση στοιχείων από κατασκευαστές, ναυπηγεία και υπαρκτά πλοία. Επόμενο στάδιο της μεθοδολογίας προμελέτης αποτελεί ο αναλυτικός προσδιορισμός του βάρους του άφορτου σκάφους και ο έλεγχος της χωρητικότητας επιβατών και οχημάτων στο βύθισμα σχεδίασης. Ακολουθεί η μελέτη δέκα τυπικών καταστάσεων φόρτωσης, η οποία περιλαμβάνει, εκτός των άλλων, υπολογισμούς άθικτης ευστάθειας και ευστάθειας μετά από βλάβη. Τέλος, εκτιμάται το κόστος κατασκευής και εκπονείται μελέτη οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης μέσω του προσδιορισμού κατάλληλων οικονομικών δεικτών για δεδομένα σενάρια αγοράς και λειτουργίας του πλοίου.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση της παραμετρικής σχεδίασης αναπτύχθηκε στο ναυπηγικό σχεδιαστικό περιβάλλον NAPA® χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες της γλώσσας προγραμματισμού NAPA® Basic. Αποτελείται από σχεδόν 13000 γραμμές κώδικα, ενώ ο χρόνος που απαιτείται για την υλοποίηση μίας σχεδίασης δεν ξεπερνάει το ένα λεπτό σε έναν σύγχρονο τυπικό προσωπικό υπολογιστή. Ο αριθμός των ελεύθερων μεταβλητών σχεδίασης ανέρχεται στις 30 από τις οποίες 5 αφορούν τη γεωμετρία της γάστρας, 1 την ισχύ πρόωσης, 11 την εσωτερική διαμέριση (στεγανή υποδιαίρεση και υπερκατασκευές) και 13 τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Επιπλέον, οι παράμετροι σχεδίασης ανέρχονται σε 58 από τις οποίες οι 31 αφορούν την οικονομική αξιολόγηση κάθε εναλλακτικής σχεδίασης.

Προκειμένου να οδηγηθεί ο μελετητής στη σχεδίαση εκείνη η οποία ικανοποιεί στο μέγιστο δυνατό βαθμό έναν αριθμό από κριτήρια, δεδομένης της ύπαρξης ορισμένων περιορισμών, είναι απαραίτητη η ορθολογική διερεύνηση ολόκληρου του πεδίου των πιθανών λύσεων. Έτσι, η προτεινόμενη μεθοδολογία προμελέτης περιλαμβάνει τη διασύνδεση της παραμετρικής σχεδίασης με ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον βελτιστοποίησης. Κάθε πρόβλημα σχεδίασης αντιμετωπίζεται τώρα ως ένα πολυπαραμετρικό, πολυκριτηριακό πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών αναζήτησης δύναται να ξεπεραστούν μία σειρά από δυσκολίες, όπως η ύπαρξη μη-γραμμικών αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων, αλλά και περίπλοκων μη-γραμμικών περιορισμών. Στο κείμενο της διατριβής παρατίθενται στοιχεία από τη θεωρία βελτιστοποίησης, με έμφαση στους Γενετικούς Αλγόριθμους, καθώς και στοιχεία από τη θεωρία Λήψης Αποφάσεων. Ως ολοκληρωμένο περιβάλλον βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται το λογισμικό modeFRONTIER®, με τη βοήθεια του οποίου είναι δυνατή η εύκολη σύνθεση αλλά και η επίλυση περίπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης που αφορούν, εκτός των άλλων, και τη μελέτη και σχεδίαση πλοίων. Η διατύπωση και η επίλυση ενός χαρακτηριστικού προβλήματος σχεδίασης, το οποίο αφορά την επιλογή των κυρίων διαστάσεων ενός ταχύπλου Ε/Γ-Ο/Γ πλοίου, παρουσιάζεται αναλυτικά στο τελευταίο κεφάλαιο της διατριβής.

Στην ενότητα αυτή παρατίθενται βιβλιογραφικές αναφορές εργασιών, οι οποίες εκπονήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και έχουν παρουσιαστεί σε σχετικά επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια. Όπως μπορεί να φανεί από αυτές, εκτός από τη σχεδίαση πλοίων Νέας Τεχνολογίας (Monohull, SemiSwath), το παρόν μοντέλο μελέτης έχει εφαρμοστεί και σε συμβατικά Ε/Γ-Ο/Γ πλοία εκτοπίσματος. Εκτός από ορισμένες διαφοροποιήσεις, κυρίως λόγω των διαφορετικών σχεδιαστικών απαιτήσεων, ο βασικός κορμός της μεθοδολογίας παραμετρικής σχεδίασης παραμένει ουσιαστικά αμετάβλητος και για τους τρεις τύπους πλοίων.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή επιστ. περιοδικά με κρίση πλήρους κειμένου

- Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Skoupas, S. and Boulougouris, E., *An Integrated Methodology for the Design of Ro-Ro Passenger Ships*, Schiffstechnik Bd.56 - 2009/Ship Technology Research, Vol.56, 2009

Δημοσιεύσεις σε διεθνή και εθνικά συνέδρια με κρίση πλήρους κειμένου

- Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A., Loukakis, T., Tsouvalis, N., Skoupas, S., Mitsotakis, K. and Antoniou, A., *Development and Demonstration of an Integrated Methodology for the Design of RoRo-Passenger Ships for the Needs of Short Sea Shipping in Greece*, Proc. 12th IMAM Congress, 2-6 Sep. 2007, Varna, Bulgaria
- Ζαραφωνίτης Γ., Σκούπας Σ., Κατσαούνης Γ., Παπανικολάου, Α., *Ανάπτυξη και Εφαρμογή Ολοκληρωμένης Μεθοδολογίας για την Μελέτη και Σχεδίαση Ε/Γ-Ο/Γ Πλοίων*, Πρακτικά Συνεδρίου ΕΛΙΝΤ, Νοέμβριος 2008, Πειραιάς
- Skoupas, S., Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A., *Parametric Design and Optimization of High-Speed, Twin-Hull RoRo-Passenger Vessels*, Proc. 10th International Marine Design Conference (IMDC 2009), May 2009, Trondheim, Norway
- Skoupas, S., Zaraphonitis, G., *Parametric Design and Optimization of High-Speed ROPAX Vessel*, Proc. 10th Int. Conference on Fast Sea Transportation (FAST 2009), Oct. 2009, Athens, Greece.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή συνέδρια με κρίση περίληψης

- Skoupas, S., Zaraphonitis, G., *An optimization Procedure for the Preliminary Design of High-Speed RoRo-Passenger Ships*, Proc. Int. Conf. on High-Performance Marine Vehicles, HIPER'08, Sept. 2008, Naples, Italy

Το πεδίο έρευνας που αφορά τη μελέτη και σχεδίαση πλοίων είναι σχεδόν ανεξάντλητο, ενώ σε αυτό ενσωματώνονται συνεχώς στοιχεία τα οποία προέρχονται, τόσο από την πρόοδο της τεχνολογίας όσο και από τις τάσεις της παγκόσμιας αγοράς. Στην παρούσα διατριβή προτείνεται μία μεθοδολογία μελέτης και σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ πλοίων Νέας Τεχνολογίας η οποία, αν και καλύπτει ένα μεγάλο μέρος της φάσης του αρχικού σχεδιασμού, δεν είναι δυνατόν να ενσωματώσει το σύνολο των στοιχείων εκείνων που συνθέτουν τη σχεδίαση ενός πλοίου. Ορισμένα σημεία τα οποία μπορούν να τροφοδοτήσουν περαιτέρω επιστημονικό έργο και αποτελούν προτάσεις για μελλοντική εργασία και επέκταση της παρούσας μεθοδολογίας προμελέτης παρουσιάζονται παρακάτω:

- Ενσωμάτωση επιπλέον συστηματικών σειρών για την παραγωγή της γεωμετρίας της γάστρας ή/και η χρήση ελεύθερης μορφής η οποία θα καθορίζεται από έναν αριθμό κατάλληλων ελεύθερων μεταβλητών σχεδίασης.
- Ενσωμάτωση υπολογισμών που σχετίζονται με την υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου (π.χ. seakeeping, manuevering). Για το σκοπό αυτό είναι ήδη δυνατή η χρήση λογισμικών CFD, δεδομένου ότι οι σχετικές ρουτίνες δημιουργίας κατάλληλου πλέγματος της γάστρας έχουν ήδη δημιουργηθεί εντός του περιβάλλοντος παραμετρικής σχεδίασης. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να προσδιοριστεί, εκτός των άλλων, η αντίσταση κυματισμού και η δυναμική διαγωγή σε πλοία για τα οποία δεν είναι δυνατή η χρήση αριθμητικών μεθόδων που βασίζονται σε πειραματικά δεδομένα.
- Ενσωμάτωση δευτερευόντων στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής στη γεωμετρική αναπαράσταση του κατασκευαστικού μοντέλου του πλοίου, για τον καλύτερο προσδιορισμό των βαρών και του κόστους. Επιπλέον, διερεύνηση της δυνατότητας αναπαράστασης τμημάτων της κατασκευής σε μορφή κατάλληλη για περαιτέρω μελέτη αντοχής μέσω σύγχρονων λογισμικών FEM.
- Ενσωμάτωση κανονισμών και άλλων αναγνωρισμένων νηογνομόνων και δυνατότητα επιλογής από το μελετητή, ανάλογα με την απαίτηση του πλοιοκτήτη. Ενσωμάτωση κανονισμών οι οποίοι περιλαμβάνουν και άλλες διατάξεις, όπως θέματα πυρασφάλειας ή/και εκκένωσης του σκάφους, κ.ά.
- Διερεύνηση της χρήσης εναλλακτικών μεθόδων βελτιστοποίησης στη μελέτη και σχεδίαση πλοίων όπως τα Νευρωνικά Δίκτυα, οι εξελιγμένοι Γενετικοί Αλγόριθμοι, ο αλγόριθμος Tabu Search ή άλλες υβριδικές μέθοδοι (Harmony Search, Bees Algorithm, κ.ά.) καθώς και η διερεύνηση της χρήσης επιφανειών απόκρισης (responce surfaces) ως εναλλακτική μέθοδο αναζήτησης του χώρου των λύσεων.
- Ενσωμάτωση εναλλακτικών μεθόδων σχεδίασης οι οποίες πραγματεύονται την αβεβαιότητα που υπάρχει στα διάφορα στάδια του αρχικού σχεδιασμού (design under uncertainty) ή τη μείωση του ρίσκου έναντι πιθανών κινδύνων (risk-based design).
- Επέκταση της παρούσας μεθοδολογίας προμελέτης ώστε να περιλαμβάνει στοιχεία τα οποία αφορούν τη συνολική διάρκεια ζωής του πλοίου συμπεριλαμβανομένης και της απόσυρσης (life cycle design), όπως για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση του life cycle cost, ή/και στοιχεία τα οποία σχετίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος (environmental design), όπως για παράδειγμα η ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων που έχουν για το θαλάσσιο περιβάλλον αλλά και στις ανθρώπινες δραστηριότητες οι παράγοντες από το πλοίο κυματισμοί (wash waves), κ.ά.

Βιβλιογραφία

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Andersson, J., (2000), *A Survey of Multiobjective Optimization in Engineering Design*, Technical Report No. LiTH-IKP-R-1097, Department of Mechanical Engineering, Linköping University
2. Akagi, S., (1991), *Synthetic Aspects of Transport Economy and Transport Vehicle Performance with Reference to High Speed Marine Vehicles*, Proc. of the 1st International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '91), vol.1, pp.277-292, Trondheim, Norway
3. Akagi, S., (1993), *A Study of Transport Economy and Market Research for High Speed Marine Passenger Vehicles*, Proc. of the 2nd International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '93), vol.2, pp.1129-1142, Yokohama, Japan
4. Andersson, J., (2001), *Multiobjective Optimization in Engineering Design*, PhD Thesis, Linköpings University, Div. of Fluid and Mechanical Engineering Systems – Dep. of Mechanical Engineering, Linköping, Sweden
5. Andrews, D., (1981), *Creative Ship Design*, Transactions of Royal Institute of Naval Architects, Vol.123, pp.447-471
6. Andrews, D., (1998), *A comprehensive methodology for the design of ships (and other complex systems)*, Proceedings of the Royal Society, vol.454, no.1968
7. Artana, K.B., Ishida, K., (2003), *Spreadsheet Modeling to Determine Optimum Ship Main Dimensions and Power Requirements at Basic Design Stage*, Marine Technology, vol.40, no.1
8. Bailey, D., (1976), *The NPL High Speed Round Bilge Displacement Hull Series*, National Maritime Institute, Ship Division, National Physical Laboratory, Royal Institution of Naval Architects, UK
9. Bardsley, P., (1993), *Local Utility Functions*, Theory and Decision vol.34, pp.109-118
10. Bellman, R., (1957), *Dynamic Programming*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA
11. Bertram, V., (2003), *Optimization in Ship Design*, OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design, 30th WEGEMT Summer School, pp.29-55, Berlin, Germany
12. Bertram, V., Mesbahi, E., (2004), *Simple Design Formulae for Fast Monohulls*, Ship Technology Research, vol.51 no.3, pp.146-148
13. Birk, L., (2003), *Introduction to Nonlinear Programming*, OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design, 30th WEGEMT Summer School, pp.57-86, , Berlin, Germany
14. Blount, D.L., (1993), *Prospects for Hard Chine, Monohull Vessels*, Proc. of the 2nd International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '93), vol.2, pp.1641-1656, Yokohama, Japan
15. Boulougouris, E.K., Papanikolaou, A.D., Zaraphonitis, G., (2004), *Optimization of Arrangements of Ro-Ro Passenger Ships with Genetic Algorithms*, Ship Technology Research, vol.47, no.4
16. Boulougouris, E., Papanikolaou, A., (2006), *Hullform Optimization of a High Speed Wave Piercing Monohull*, Proc. of the 9th International Marine Design Conference (IMDC '06), Ann Arbor

17. Buxton, I.L., (1972), *Engineering Economics Applied to Ship Design*, Transactions of Royal Institute of Naval Architects, vol.114, pp.409-428
18. Carroll, C.W., (1961), *The Created Response Surface Technique for Optimizing Nonlinear Restrained Systems*, Operations Research, vol. 9, pp.169-185
19. Charnes, A., Cooper, W.W, (1959), *Chance-Constraint Programming*, Management Science Vol.6, pp.73-79
20. Charnes, A., Cooper, W.W., (1961), *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming*, John Wiley & Sons, New York
21. Chrysostomidis, Ch., (1967), *Optimization Methods Applied to Containership Design*, MSc Thesis Massachusetts Institute of Technology, US
22. Chi, H., Beerli, P., Evans, W.D., Mascagni, M., (2005), *On the Scrambled Sobol Sequence*, 5th International Conference on Computational Science (ICCS 2005), LNCS 3516, pp. 775–782, Atlanta, USA
23. Coello Coello C.A., (1998), *An Updated Survey of GA-Based Multiobjective Optimization Techniques*, Technical Report Lania-RD-98-08, Laboratorio Nacional de Informática Avanzada (LANIA), Xalapa, Veracruz, México
24. Coello Coello C.A., (1999), *A Survey of Constraint Handling Techniques used with Evolutionary Algorithms*, Technical Report Lania-RI-9904, Laboratorio Nacional de Informatica Avanzada, Mexico
25. Coello Coello C.A., (2001), *A Short Tutorial on Evolutionary Multiobjective Optimization*, Proc. of the 1st International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO '01), pp.21-40, Zurich, Switzerland
26. Coello Coello, C.A., (2003), *Evolutionary Multiobjective Optimization: Current and Future Challenges*, Proc. of the 5th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS 2005), pp.243-256, Rio de Janeiro, Brazil
27. Chrysostomidis, C., (1967), *Optimization methods applied to containership design*, M.S. Thesis, Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, USA
28. Dantzig, G.B., Orden, A., Wolf, P., (1955), *The generalized simplex method for minimizing a linear form under linear inequality constraints*, Pacific J., Math, vol.5, no.2
29. Dantzig, G.B., (1955), *Linear Programming Under Uncertainty*, Management Science, vol.1, pp.197-206
30. Dantzig, G.B., (1963), *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, USA
31. Dlesk, C.D., Liebman, S.J., (1983), *Multiple Objective Engineering Design*, Engineering Optimization, vol. 6, pp.161-175
32. DNV (2002), *Rules for the Classification of High-Speed, Light Craft and Naval Surface Craft, Part 3, 4 & 5*, Det Norske Veritas
33. Duffin, R.J., Peterson, E.L., Zener, C., (1967), *Geometric Programming: Theory and Applications*, John Wiley & Sons, New York, USA
34. Duffy, A.H.B., MacCallum, K.J., (1989), *Computer Representation of Numerical Expertise for Preliminary Ship Design*, Marine Technology, vol.26, no.4
35. Eshelman, L.J., Caruna, R.A., Schaffer, J.D., (1989), *Biases in the crossover landscape*, Proc. of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, Morgan Kaufmann publ., San Mateo, California, US

36. Evans, J.H., (1959), Basic design concepts, *Naval Engineers Journal*, vol.71, pp.671-678.
37. Fiacco, A.V., McCormick, G.P., (1964), *Computational Algorithms for the Sequential Unconstrained Minimization Technique for Nonlinear Programming*, *Management Science*, vol.10, pp.601-617
38. Fogel, L., Owens, A., Walsh, M., (1966), *Artificial Intelligence Through Simulated Evolution*, John Wiley & Sons, New York, USA, ASIN: B005HAX616
39. Fonseca, C.,M., Fleming, P.,J., (1993), *Genetic algorithm for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization*, In Forrest, S., ed., *Genetic Algorithms: Proceedings of the 5th International Conference*, CA, pp.416-423
40. Gee, N.I., Dudson, E., (1993), *Fast Sea Transportation-The Effect of Present and Future Technical Developments on Operating Economics*, *Proc. of the 2nd International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '93)*, vol.2, pp.1155-1166
41. Gen, M., Cheng, R., (2000), *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, USA, ISBN: 978-0-471-31531-5
42. Gomory, R.E., (1963), *An Algorithm for Integer Solutions to Linear Programs*, *Recent Advances in Mathematical Programming*, R.L. Graves & P. Wolfe, eds., McGraw-Hill, New York, pp. 269-302
43. Grigoropoulos, G.J., Loukakis T.A., (2002), *Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition (Part I)*, *Trans. of SNAME*, vol. 110, pp. 77-113
44. Gudenschwager, H., (2003), *Application of Optimization in Basic Ship Design*, OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design, 30th WEGEMT Summer School, pp.177-193, Berlin, Germany
45. Harries, S., Abt, C., Hochkirch, K., (2004), *Modeling meets Simulation – Process Integration to Improve Design*, Honorary colloquium for Prof. Hagen, Prof. Schlüter and Prof. Thiel), 23 July, FutureShip
46. Haupt, R., L., Haupt, S., E., (2004), *Practical Genetic Algorithms*, Second Edition, John Wiley & Sons, ISBN: 0-471-45565-2
47. He, J., Zhang, G., Vlahopoulos, N., (2008), *Uncertainty propagation in Multi-Disciplinary Design Optimization of Undersea Vehicles*, SAE Paper: 2008-01-0218
48. Hill, S., Newell, J., O' Riordan, C., (2004), *Analysing the effects of Combining Fitness Scaling and Inversion in Genetic Algorithms*, *Proc. of the 16th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2004)*, pp.380-387, Florida, USA
49. Holland, J.H., (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, University of Michigan Press, MI, US
50. Holzer, M., Knerr, B., Rupp, M., (2007), *Design Space Exploration with Evolutionary Multi-Objective Optimisation*, *Proc. of 2nd International Symposium on Industrial Embedded Systems (SIES'2007)*, pp.125-133, Lisbon, Portugal
51. Hutchinson, K., Mackie, G. and Sen, P., (1998), *Multiple criteria Optimization and Selection of High Speed Roll-on/Roll-off Ferries at Concept Design Stage*, *Proc. of the Fast Freight Transportation by Sea 98 (FAST '98)*, London, UK
52. Hwang, C.L. and Yoon, K., (1981), *Multiple Attribute Decision Making – Methods and Applications: A State of the Art Survey*, Springer-Verlag, ISBN 0387105581

53. Jaquet-Lagrèze, E., Meziani, R., Slowinski, R., (1987), *MOLP with an interactive assessment, of a piecewise linear utility function*, European Journal of Operational Research, vol.31, no.3, pp.350-357
54. Jewell, D. A., (1973), *Hybrid fluid-borne vehicles*, The Senior Engineer 23/9, pp.7-11
55. Karayannis, T., Mollasnd A.F., Williams, S., (1999), *Design Data for High-Speed Vessels*, 5th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '99), pp. 605-615, Seattle, USA
56. Karayiannis, T., Papanikolaou, A.D., Molland, A.F., (2000), *The introduction of high-speed ferries into the Eastern Mediterranean*, Proc. of the 9th International Congress of International Maritime Association of Mediterranean (IMAM 2000), Ischia, Italy
57. Keane, A.J., Price, W.G., Schachter, R.D., (1991), *Optimization Techniques in Ship Concept Design*, Trans. of the Royal Institute of Naval Architects, vol.133, pt.A, pp.123-139
58. Knox, J., (2004), *Ship Design and Construction*, vol.2, ch.38 (Ferries), SNAME
59. Koza, J.R., (1992), *Genetic Programming*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA
60. Kuhn, H.W., Tucker, A.W., (1951), *Nonlinear programming*, Proc. of the 2nd Berkeley Symposium, University of California Press, Berkeley, pp. 481-492
61. Lee, K.-Y., Roh, M.I, (2000), *A Hybrid Optimization Method for Multidisciplinary Ship Design*, Ship Technology Research, vol.47 no.4
62. Lorentz, J.D., (1973), *Crude Carriers with Segregated Ballast Tanks*, J STG vol.67
63. Lowe, T.W., Steel, J., (2003), *Conceptual Hull Design Using a Genetic Algorithm*, Journal of Ship Research, vol.47, no.3
64. Lyon, T.D., (1982), *A Calculator-Based Preliminary Ship Design Procedure*, Marine Technology, vol. 19, no.2, pp.140-158
65. Lyon, T.D., Mistree F., (1985), *A Computer-Based Method for the Preliminary Design of Ships*, Journal of Ship Research, vol.29, no.4
66. Maisonneuve, J.J., (2003a), *Advanced Topics and Methodologies*, OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design, 30th WEGEMT Summer School, pp.139-153, Berlin, Germany
67. Maisonneuve, J.J., (2003b), *Application Examples From Industry*, OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design, 30th WEGEMT Summer School, pp.155-176, Berlin, Germany
68. Mandel, P., Leopold, R., (1966), *Optimization Methods Applied to Ship Design*, Trans. of SNAME, vol.74
69. Mandel, P., Chrysostomidis, C., (1972), *A design Methodology for Ship and Other Complex Systems*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, vol.273, pp.85-98
70. Marwood, W.J., Bailey, D., (1969), *Design data for high speed displacement hulls of round bilge form*, NPL Ship report 99, Royal Institution of Naval Architects, UK
71. Mazumder, P., Rudnick, E.M., (1998), *Genetic Algorithms for VLSI Design, Layout & Test Automation*, Prentice Hall PTR, New Jersey, USA, ISBN:0-13-011566-5
72. Michalewicz, Z., (1995), *A Survey of Constraint Handling Techniques in Evolutionary Computation Methods*, Proc. of the 4th Annual Conference on Evolutionary Programming, pp.135-155, San Diego, USA

73. Mistree, F., W.F. Smith, B.A. Bras, J.K. Allen, and D. Muster, (1990), *Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design*, Transactions of Society of Naval Architects and Marine Engineers, vol.98, pp.565-597
74. modeFRONTIER™ v2.5, v.3 and v.4 User Manuals, ESTECO s.r.l., <http://www.esteco.com>
75. Murphy, R.D., Sabat, D.J., Taylor, R.J., (1963), *Least cost ship characteristics by computer techniques*, Marine Technology, vol.2, no.2, pp.174-202
76. NAPA® v. 2004.x to v.2010.x Online Manuals., Napa Ltd., <http://www.napa.fi>
77. Nowacki, H., Brousis, F., Swift, P.M., (1970), *Tanker Preliminary Design – An Optimization Problem with Constraints*, Trans. of SNAME, vol.78
78. Nowacki, H., (1970), *Optimization in Pre-Contract Ship Design*, Proc. of ICCAS, Tokyo
79. Nowacki, H., (2003), *Design Synthesis and Optimization – An Historical Perspective*, OPTIMISTIC – Optimization in Marine Design, 30th WEGEMT Summer School, pp.1-27, Berlin, Germany
80. Nowacki, H., (2009), *Developments in Marine Design Methodology: Roots, Results and Future Trends*, Proc. of the 10th International Marine Design Conference (IMDC '09), Trondheim, Norway
81. Neumann, J.V., (1928), *Zur Theorie der Gesellschaftsspiele*, Mathematische Annalen, 100(1), pp.295-320, English translation: *On the Theory of Games of Strategy*, A. W. Tucker and R. D. Luce, ed. (1959), Contributions to the Theory of Games, v.4, pp.13-42
82. Palesi, M., Givargis, T., (2002), *Multi-Objective Design Space Exploration Using Genetic Algorithms*, Proc. of the 10th International Symposium on Hardware/Software Codesign, pp.67-72, Colorado, USA
83. Papanikolaou, A., Nowacki, H., Zaraphonitis, G., Kraus, A., and Androulakakis, M., (1989) *Concept design and optimization of a SWATH passenger/car ferry*, Proc. of IMAS 89, Marine Management (Holdings) Ltd., London
84. Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Androulakakis, M., (1991), *Preliminary Design of a High-Speed SWATH Passenger/Car Ferry*, Marine Technology, vol.28, no.3
85. Papanikolaou, A., Kariampas, E., (1994), *Optimization of the Preliminary Design and Cost Evaluation of Fishing Vessels*, Ship Technology Research, vol.41 no.1
86. Papanikolaou, A., Tuzcu, O., Tsihchlis, P., Eliopoulou, E., (2007), *Risk-Based Optimization of Tanker Design*, Proc. of the 3rd International Conference on Design for Safety
87. Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Skoupas, S., Boulougouris, E., (2009), *An integrated methodology for the design of Ro-Ro Passenger ships*, Schiffstechnik / Ship Technology Research
88. Papanikolaou, A., (2009), *Risk-Based Ship Design – Methods, Tools and Applications*, Springer publ., ISBN: 978-3-540-89041-6
89. Pareto, V., (1906) *Manuale di Economica Politica*, Societa Editrice Libreria, Milan. Translated into English as *Manual of Political Economy* by Schwier, A., S., Kelley, A., N., New York, 1971
90. Parsons, M.G., Scott, R.L., (2004), *Formulation of Multicriterion Design Optimization Problems for Solution With Scalar Numerical Optimization Methods*, Journal of Ship Research, vol.48, no.1
91. Parsons, M.G., Singer, D.J., Gaal, C.M., (2006), *Multicriterion Optimization of Stern Flap Design*, Marine Technology, vol.43, no.1, pp.42-54

92. Pearson, K., (1920), *Notes on History of Correlation*, Biometrika, vol.13, no.1, pp.25-45
93. Phillips, S., (1996), *Review of recent Developments in Fast Sea Transportation and Future Potential*, WEGEMT Workshop on Conceptual Designs of Fast Sea Transportation, Glasgow, UK
94. Poloni, C., Pediroda, (2003), V., *Genetic Algorithms – Basics, Multi-criteria Optimization and Constraints Handling*, 30th WEGEMT Summer School, pp.87-114, , Berlin, Germany
95. Pouchstein, K. (1969), *Automatic Project Design of Optimal Ships*, (in German), Seewirtschaft vol.1
96. Radojicic, D., Grigoropoulos, G.J., Rodic, T., Kuvelic, T., Damala D.P., (2001), *The Resistance and Trim of Semi-Displacement, Double-Chine, Transom-Stern Hull Series*, Proc. of the 6th International Conference on Fast Sea Transportation (FAST 2001), vol.3 pp.187-196, Southampton, UK
97. Radojicic, D., Rodic, T., Kostic, N., (1997), *Resistance and Trim Predictions for the NPL High Speed Round Bilge Displacement Hull Series, Power, Performance & Operability of Small Craft* International Conference, Southampton, UK
98. Rosen, J.B., (1960), *The Gradient-Projection Methods for Nonlinear Programming, Part 1, Linear Constraints*, SIAM Journal on Applied Mathematics, vol.8, no. 1
99. Rao, S.S., (1996), *Engineering Optimization - Theory and Practice*, 3rd ed., John Wiley & Sons, USA, ISBN: 978-0-471-55034-1
100. Ray, T., Sha, O.P., (1994), *Multicriteria Optimization Model for a Containership Design*, Marine Technology, vol.31, no.4
101. Ray, T., Gokam R.P., Sha O.P., (1995), *A Global Optimization Model for Ship Design*, Computers in Industry, vol.26, pp.175-192
102. Rechenberg, I., (1973), *Evolutionstrategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, Germany
103. Rodgers, L.J., (1988), *Thirteen Ways to Look at the Correlation Coefficient*, The American Statistician, vol.42, no.1, pp.59-66.
104. Schaffer, J.D., Morishima, A., (1987), *An adaptive crossover distributed mechanism for Genetic Algorithm*, Proc. of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, Lawrence Erlbaum Assoc., Hillsdale, New Jersey, USA
105. Schwefel, H., (1995), *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley & Sons, New York, USA, ISBN:0471571482
106. Sen, P., (1992), *Marine Design: The Multiple Criteria Approach*, Trans. of the Royal Institution of Naval Architect, vol.134, pt.B, pp.261-272
107. Sen, P., Yang J.-B, (1994), *Combining objective and subjective factors in multiple criteria marine design*, Proc. of 5th International Marine Design Conference & Summer Meeting (IMDC '94), pp.505-519, Delft, Netherlands
108. Sen, P., Yang, J.-B., (1994), *Design Decision Making Based upon Multiple Attribute Evaluations and Minimal Preference Information*, Mathematical and Computer Modelling, vol.20, no.3, pp.107-124
109. Sen, P., Yang, J.-B., (1998), *Multiple Criteria decision Support in Engineering Design*, Springer-Verlag London, ISBN:3540199322
110. Skoupas, S., Zaraphonitis, G., (2008), *An optimization procedure for the preliminary design of high-speed RoRo-Passenger Ships*, Proc. of the 6th International Conference on High-Performance Marine Vehicles (HIPER '08), Naples, Italy

111. Skoupas, S., Zaraphonitis, G., (2009), *Parametric Deign and Optimization of High-Speed RoPax Vessels*, 10th International Conference on Fast Sea Transportation, (FAST2009), Athens, Greece
112. Skoupas, S., Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A., (2009), *Parametric design and optimization of high-speed, twin-hull RoRo-Passenger vessels*, Proc. of the 10th International Marie Design Conference (IMDC '09), 26-29 May, Trondheim, Norway
113. Smith, W.F., Kamal, S., Mistree, F., (1987), *The Influence of Hierarchical Decisions on Ship Design*, Marine Technology, vol.19, no.2
114. Sobol, I.M., (1967), *The distribution of points in a cube and the approximate evaluation of integrals*, Jurnal of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vol.7(4), pp.86-112
115. Sobol, I.M., (1976), *Uniformly distributed sequences with additional uniformity properties*, Jurnal of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Vol.16: pp.236–242
116. Spanos, D., Papanikolaou, A., Papatzanakis, G., (2008), *Risk-Based Onboard Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Seaways*, 6th Osaka Colloquium on Seakeeping and Stability of Ships, 26-29 March, Osaka, Japan
117. Syswerda, G., (1989), *Uniform crossover in Genetic Algorithms*, Proc. of the 3rd International Conference on Genetic Algorithms and their Applications, Morgan Kaufmann Publ., San Mateo, California
118. Takarada, N. Obokata, J., Wichio, T., Wasaharu, K., Shigenatsu, K., (1993a), *R&D of a Displacement-Type High-Speed Ship, Part1: A Conceptual Design Study*, Proc. of the 2nd International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '93), vol.1, pp.317-326
119. Takarada, N., Ikehata, M., Suzuki, K., Takai, M., Sasaki, N., Shigematsu, K., (1993b), *R&D of a Displacement-Type High-Speed Ship, Part 3, Resistance and Propulsion* Proc. of the 2nd International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '93), vol.1, pp.329-340
120. Trillo, R., (1991), *High Speed over Water, Ideas from the Past, the Present and for the Future* Proc. of the 1st International Conference on Fast Sea Transportation (FAST '91), vol.1, pp.18-34
121. Van Veldhuizen, D.A., Lamont, G.B., (2000), *Multiobjective Optimization with Messy Genetic Algorithms*, Proc. of the 2000 ACM Symposium on Applied Computing, pp.470-476, Como, Italy
122. Winner, R.I., Pennell, J.P., Bertrand, H.E., Slusarczuk, M.M., (1988), *The Role of Concurrent Engineering in Weapons System Acquisition*, IDA Report, Institute for Defense Analyses, Alexandria, Virginia, USA
123. Wolf, A.R., (2005), *Multiobjective Collaborative Optimization of Systems of Systems*, PhD Thesis, United States Naval Academy - Department of Ocean Engineering
124. Wright, C., *Operation and Cost of High Speed Craft*, (1990), Marine Technology Society Journal, vol.27, no.2, pp.104-113
125. Yamamoto, K., Inoue, O., (1995), *New evolutionary direction operator for genetic algorithms*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, vol.33, no.10, pp.1990-1993
126. Yang, J.-B., Sen, P., (1996), *Preference modeling by estimating local utility functions for multiobjective optimization*, European Journal of Operational Research vol.95, pp.115-138

127. Yang, Y.-S., Park C.-K., Lee, K.-H., Suh, J.-C., (2007), *A study on the preliminary ship design method using deterministic approach and probabilistic approach including hull form*, Structural and Multidisciplinary Optimization, vol.33, no.6, pp.529-539
128. Yoon, K. P., Hwang, C.L., (1995), *Multiattribute Decision Making: An Introduction*, Sage University Paper series on Quantitative Applications in Social Sciences, 07-104, Thousand Oaks, CA: Sage
129. Zanic, V., Andric, J., Prebeg, P., Stipcevic, M., Piric, K., (2010), *RoPax Structural Design – Multi-Level Decision Support Methodology*, Trans. of 11th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, Rio de Janeiro, Brazil
130. Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A.D., Loukakis, T., Tsouvalis, N., Skoupas, S., Mitsotakis, K., Antoniou, A., (2007a), *Development and demonstration of an integrated methodology for the design of RoRo-Passenger Ships*, accepted for publication: Journal of Engineering for the Maritime Environment).
131. Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A.D., Loukakis, T., Tsouvalis, N., Skoupas, S., Mitsotakis, K., Antoniou, A., (2007b), *Development and demonstration of an integrated methodology for the design of RoRo-Passenger Ships for the needs of short sea shipping in Greece*, Proc. of the 12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2007), Varna, Bulgaria
132. Zaraphonitis, G., (2005), *A Statistical Analysis of Technical Characteristics of Fast Marine Vehicles*, Proc. of the 1st International Conference on Marine Research and Transportation (ICMRT '05), Ischia, Italy
133. Zoutendijk, G., *Methods of Feasible Directions*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands
134. Βιργίλιος, Π., (19 π.Χ.), Αινειάδα , Βιβλίο Ι, στίχοι 367/368
135. Δαμάλα, Δ., Γρηγορόπουλος, Γ., Λουκάκης, Θ., (2002), *Πειραματική και αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς ταχυπλόων γαστρών με διπλή ακμή σε αρμονικούς και τυχαίους κυματισμούς*, Τεχνική έκθεση No. NAL-255-F-2002, ΕΝΘΥ, ΕΜΠ, Αθήνα
136. ΕΠΑΝ ΜΕΤΡΟ 4.5.1, (2004-2006), *Ανάπτυξη Ολοκληρωμένης Μεθοδολογίας Σχεδίασης Ε/Γ-Ο/Γ Πλοίων και Εφαρμογή στη Σχεδίαση Ε/Γ-Ο/Γ Πλοίου Τροφοδοτικών Γραμμών για τις Ανάγκες της Ελληνικής Ακτοπλοΐας*, Γ' ΚΠΣ, Ανάδοχος: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Επ. Υπεύθυνος Παπανικολάου Α.
137. Ζαραφωνίτης, Γ., (2007), *Πλοία Νέας Τεχνολογίας*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, ΕΜΠ, Αθήνα
138. Παπανικολάου, Α., (1994), *Μελέτη Πλοίου, Τόμος Α: Μεθοδολογία Προμελέτης*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, ISBN: 960-7346-37-8
139. Παπανικολάου, Α., (2002), *Μελέτη & Εξοπλισμός Πλοίου II (Γενική Διάταξη, Ενδιαίτηση και Εξοπλισμός)*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, ΕΜΠ, Αθήνα
140. Παπανικολάου, Α., (2009), *Μελέτη Πλοίου - Μεθοδολογίες Προμελέτης*, 2 τόμοι, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, ISBN (set): 978-960-9400-09-01
141. Wikipedia - The Free Encyclopedia, www.wikipedia.org
142. <http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/> , Evolutionary Multiple Objective Optimization web page developed by Dr. Carlos A. Coello Coello, Depto. de Ingeniería Eléctrica, Sección de Computación, Mexico

Παράρτημα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ - Αναλυτικός Προσδιορισμός του Βάρους Εξαρτισμού

Δείκτης εξαρτισμού

Γενικά, στην παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, θεωρείται ότι στο βάρος εξαρτισμού συμπεριλαμβάνονται, το βάρος των συστημάτων αγκυροβόλησης, πρόσδεσης και ρυμούλκησης. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού, για κάθε μία από τις παραπάνω ομάδες βαρών.

Ο καθορισμός των συστημάτων αγκυροβόλησης, πρόσδεσης και ρυμούλκησης, βασίζεται στο δείκτη εξαρτισμού (equipment number – EN), ο οποίος υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$EN = \Delta^{2/3} + 2BH + 0.1A \quad (\text{Π1})$$

όπου H το ενεργό μήκος σε μέτρα από την ίσαλο σχεδίασης έως την οροφή της υψηλότερης υπερκατασκευής, το οποίο υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$H = a + \sum h_i \quad (\text{Π2})$$

όπου a η κατακόρυφη απόσταση σε m^2 από την ίσαλο σχεδίασης έως το ανώτερο κατάστρωμα, μετρώμενη στο μέσο νομέα και στην πλευρά του πλοίου και h_i η κατακόρυφη απόσταση σε m των υπερστεγασμάτων που βρίσκονται πάνω από το ανώτερο κατάστρωμα και έχουν πλάτος μεγαλύτερο από το $\frac{1}{4}$ του μέγιστου πλάτους του πλοίου, μετρώμενη στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Όπου Δ το εκτόπισμα σχεδίασης σε t , B το πλάτος του πλοίου σε m και A η επιφάνεια πάνω από την ίσαλο σχεδίασης σε m^2 της πλευράς του πλοίου προβεβλημένης στο κατακόρυφο επίπεδο.

Από την τιμή του δείκτη εξαρτισμού (Πίνακας Π1), προκύπτουν άμεσα ο αριθμός και το απαιτούμενο βάρος των αγκυρών, τα μήκη και η διάμετρος των αλυσίδων, τα μήκη και οι απαιτούμενες τάσεις θραύσης για τα σχοινιά (χαλύβδινα και συνθετικά) των γραμμών πρόσδεσης και ρυμούλκησης. Από τα στοιχεία αυτά, κανονισμούς του Νορβηγικού Νοσηγνώμονα¹ και από συγκέντρωση και κατάλληλη επεξεργασία στοιχείων κατασκευαστών προκύπτουν τα παρακάτω πρωτότυπα διαγράμματα και εξισώσεις από τις οποίες προσδιορίζεται το βάρος των επιμέρους συστημάτων εξαρτισμού.

Γραμμές αγκυροβόλησης (anchoring lines)

Γενικά, κάθε γραμμή αγκυροβόλησης θεωρείται ότι αποτελείται από την άγκυρα (anchor), την αλυσίδα (chain), τον «εργάτη» (windlass), τον «οδηγό» (fairleader) και το μηχανισμό ασφάλισης της αλυσίδας (chain cable stopper). Ο αριθμός των γραμμών (N_{anchor}), το βάρος

¹ DNV, Rules for Ships Pt.3 Ch.3 Sec.3, January 2000

κάθε άγκυρας (W_{anchor}), η διάμετρος (D_{chain}) και το μήκος (L_{chain}) της αλυσίδας, προσδιορίζονται απευθείας με βάση την τιμή του δείκτη εξαρτισμού (Πίνακας Π1):

$$EN \rightarrow N_{anchor}, W_{anchor}, D_{chain}, L_{chain} \quad (Π3)$$

Το βάρος κάθε αλυσίδας συναρτήσει της διαμέτρου, μπορεί να προσδιοριστεί με βάση το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα Π1 ή την παρακάτω εξίσωση:

$$W_{chain} = 0.0227 (D_{chain})^{1.9903} L_{chain} (1 / N_{anchor}) \quad (kg) \quad (Π4)$$

Πίνακας Π1: Πίνακας δείκτη εξαρτισμού ¹

Equipment number	Equipment letter	Stockless bower anchors		Stud-link chain cables				Towline (guidance)		Mooring lines ¹⁾ (guidance)		
		Number	Mass per anchor kg	Total length m	Diameter and steel grade			Steel or fibre ropes		Steel or fibre ropes		
					NV K1	NV K2	NV K3	Minimum length m	Minimum breaking strength kN	Number	Length of each m	Minimum breaking strength kN
30-49	a ₀	2	120	192,5	12,5			170	88,5	2	80	32
50-69	a	2	180	220	14			180	98,0	3	80	34
70-89	b	2	240	220	16	14		180	98,0	3	100	37
90-109	c	2	300	247,5	17,5	16		180	98,0	3	110	39
110-129	d	2	360	247,5	19	17,5		180	98	3	110	44
130-149	e	2	420	275	20,5	17,5		180	98	3	120	49
150-174	f	2	480	275	22	19		180	98	3	120	54
175-204	g	2	570	302,5	24	20,5		180	112	3	120	59
205-239	h	2	660	302,5	26	22	20,5	180	129	4	120	64
240-279	i	2	780	330	28	24	22	180	150	4	120	69
280-319	j	2	900	357,5	30	26	24	180	174	4	140	74
320-359	k	2	1020	57,5	32	28	24	180	207	4	140	78
360-399	l	2	1140	385	34	30	26	180	224	4	140	88
400-449	m	2	1290	385	36	32	28	180	250	4	140	98
450-499	n	2	1440	412,5	38	34	30	180	277	4	40	108
500-549	o	2	1590	412,5	40	34	30	190	306	4	160	123
550-599	p	2	1740	440	42	36	32	190	338	4	160	132
600-659	q	2	1920	440	44	38	34	190	371	4	160	147
660-719	r	2	2100	440	46	40	36	190	406	4	160	157
720-779	s	2	2280	467,5	48	42	36	190	441	4	170	172
780-839	t	2	2460	467,5	50	44	38	190	480	4	170	186
840-909	u	2	2640	467,5	52	46	40	190	518	4	170	201
910-979	v	2	2850	495	54	48	42	190	559	4	170	216
980-1059	w	2	3060	495	56	50	44	200	603	4	180	230
1060-1139	x	2	3300	495	58	50	46	200	647	4	180	250
1140-1219	y	2	3540	522,5	60	52	46	200	691	4	180	270
1220-1299	z	2	3780	522,5	62	54	48	200	738	4	180	284
1300-1389	A	2	4050	522,5	64	56	50	200	786	4	180	309
1390-1479	B	2	4320	550	66	58	50	200	836	4	180	324
1480-1569	C	2	4590	550	68	60	52	220	888	5	190	324
1570-1669	D	2	4890	550	70	62	54	220	941	5	190	333
1670-1789	E	2	5250	577,5	73	64	56	220	1024	5	190	353
1790-1929	F	2	5610	577,5	76	66	58	220	1109	5	190	378
1930-2079	G	2	6000	577,5	78	68	60	220	1168	5	190	402
2080-2229	H	2	6450	605	81	70	62	240	1259	5	200	422
2230-2379	I	2	6900	605	84	73	64	240	1356	5	200	451
2380-2529	J	2	7350	605	87	76	66	240	1453	5	200	480
2530-2699	K	2	7800	632,5	90	78	68	260	1471	6	200	480
2700-2869	L	2	8300	632,5	92	81	70	260	1471	6	200	490
2870-3039	M	2	8700	632,5	95	84	73	260	1471	6	200	500

1) For individual mooring lines with breaking force above 490 kN according to the table, the strength may be reduced by the corresponding increase of the number of mooring lines and vice versa. The total breaking force of all mooring lines on board should not be less than according to the table. However, the number of mooring should not be less than 6, and no line should have a breaking force less than 490 kN.

Το βάρος κάθε «εργάτη» συναρτήσει του φορτίου, μπορεί να υπολογιστεί μέσω της καμπύλης που απεικονίζεται στο Σχήμα Π2 ή μέσω της εξίσωσης:

$$W_{anc.windlass} = 527 (W_{anchor} + W_{chain}) + 264 \quad (kg) \quad (Π5)$$

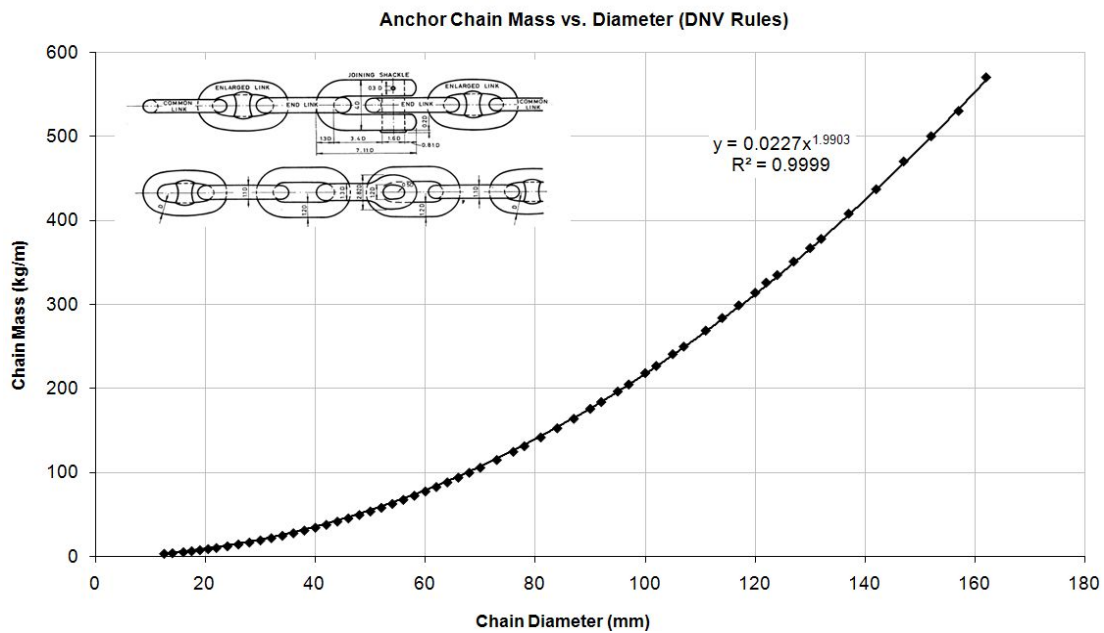
Τα βάρη του «οδηγού» και του μηχανισμού ασφάλισης της αλυσίδας (chain cable stopper), μπορούν να προσδιοριστούν από τις αντίστοιχες καμπύλες που απεικονίζονται στο Σχήμα Π3 ή από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$W_{anc.fairleader} = 0.0385 (D_{chain})^{2.672} \quad (kg) \quad (\text{Π6})$$

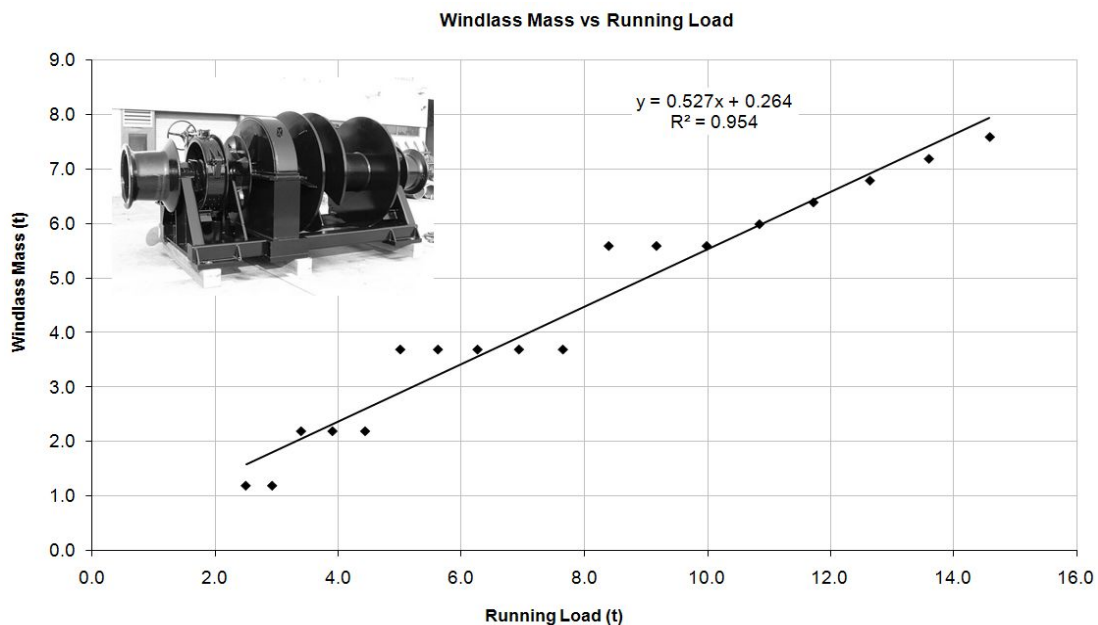
$$W_{anc.cable stopper} = 0.0125 (D_{chain})^{2.709} \quad (kg) \quad (\text{Π7})$$

Το συνολικό βάρος των συστημάτων των γραμμών αγκυροβόλησης είναι τελικά ίσο με:

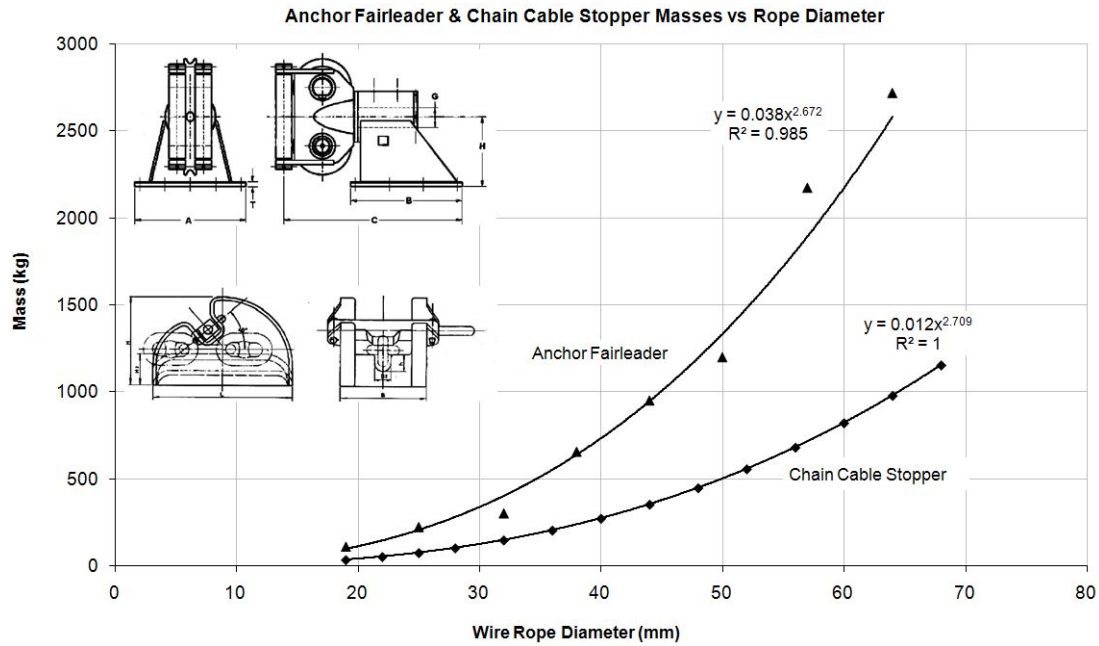
$$W_{anchor lines} = N_{anchor} (W_{chain} + W_{anc.windlass} + W_{anc.fairleader} + W_{anc.cable stopper}) \times 10^{-3} \quad (t) \quad (\text{Π8})$$



Σχήμα Π1: Εκτίμηση του βάρους της αλυσίδας της άγκυρας συναρτήσει της διαμέτρου



Σχήμα Π2: Εκτίμηση του βάρους του εργατή άγκυρας συναρτήσει του φορτίου



Σχήμα Π3: Εκτίμηση του βάρους του «οδηγού» και του μηχανισμού ασφάλισης της αλυσίδας συναρτήσει της διαμέτρου της αλυσίδας

Γραμμές πρόσδεσης (mooring lines)

Γενικά, κάθε γραμμή πρόσδεσης θεωρείται ότι αποτελείται από ένα σχοινί κατασκευασμένο από ίνες συνθετικών υλικών (fibre rope), μία διπλή (double) και μία σταυροειδή (cruciform) δέστρα (bollard), έναν ειδικό μηχανισμό κατεύθυνσης (universal roller), ένα υδραυλικό βίντσι (hydraulic winch) και μία ειδική ενισχυμένη οπή (closed chock), από την οποία περνά το σχοινί προς την προβλήτα. Ο αριθμός των γραμμών ($N_{mooring}$), η ελάχιστη επιτρεπόμενη δύναμη θραύσης ($S_{fibre\ rope}$) και το μήκος ($L_{fibre\ rope}$) κάθε σχοινιού, προσδιορίζονται απευθείας με βάση την τιμή του δείκτη εξαρτισμού (Πίνακας Π1):

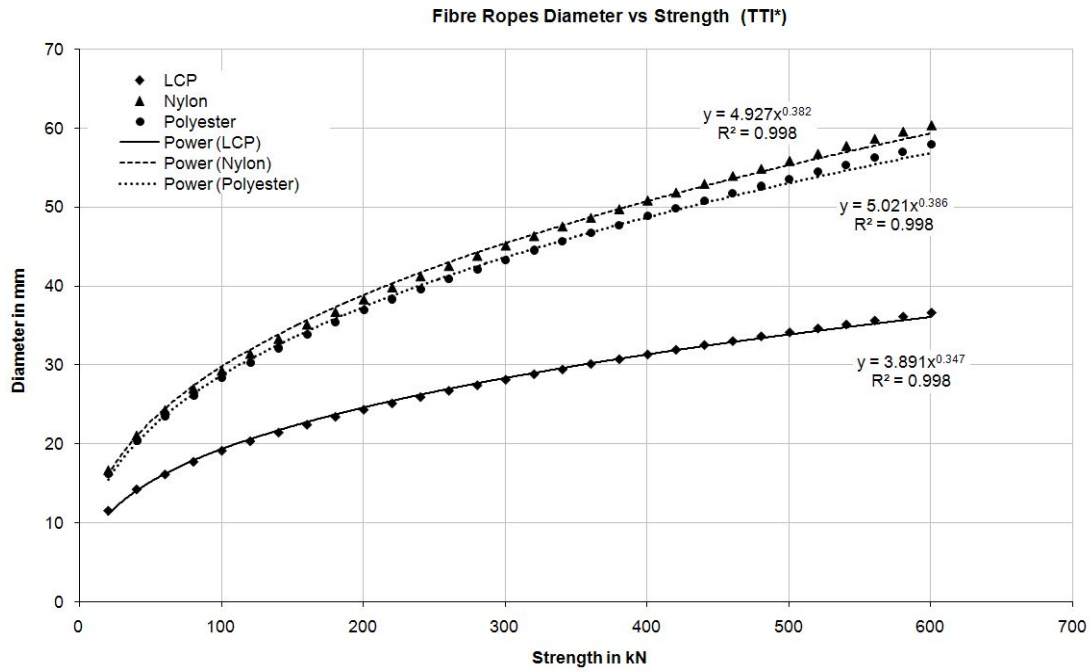
$$EN \rightarrow N_{mooring}, S_{fibre\ rope}, L_{fibre\ rope} \quad (\text{Π9})$$

Η διάμετρος κάθε σχοινιού συναρτήσει της δύναμης θραύσης, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω των καμπυλών που παρουσιάζονται στο Σχήμα Π4. Στην παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, θεωρείται ότι τα πλοία χρησιμοποιούν σχοινιά από πολυεστερικές ίνες και ως εκ τούτου η διάμετρός τους υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$D_{fibre\ rope} = 5.021(S_{fibre\ rope})^{0.386} \quad (mm) \quad (\text{Π10})$$

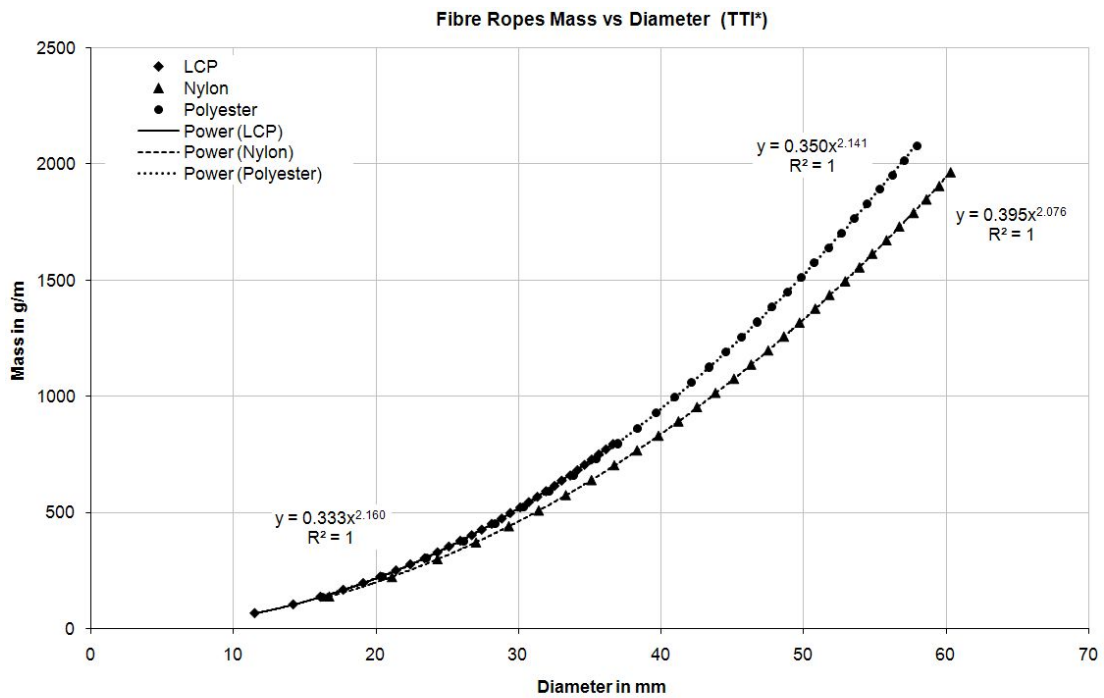
Το βάρος κάθε σχοινιού σαν συνάρτηση της διαμέτρου ή της δύναμης θραύσης, μπορεί να υπολογιστεί από τις καμπύλες που βρίσκονται στο Σχήμα Π6 ή το Σχήμα Π5, αντίστοιχα. Έτσι, δεδομένου ότι συνήθως υπάρχει εφεδρεία, το βάρος των πολυεστερικών σχοινιών, για κάθε γραμμή, μπορεί να υπολογιστεί με βάση την εξίσωση:

$$W_{fibre\ rope} = 2 \times 0.350(D_{fibre\ rope})^{2.141} L_{fibre\ rope} \times 10^{-3} \quad (kg) \quad (\text{Π11})$$



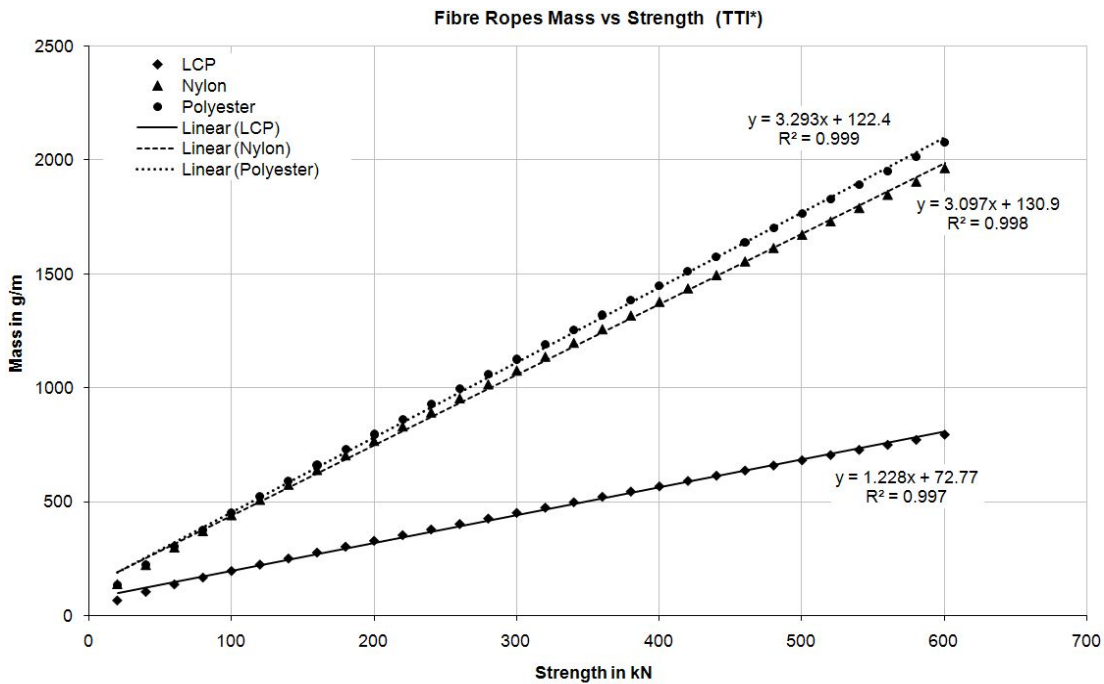
* Tension Technology International (TTI)

Σχήμα Π4: Εκτίμηση της διαμέτρου των σχοινιών πρόσδεσης συναρτήσει της δύναμης θραύσης



* Tension Technology International (TTI)

Σχήμα Π5: Εκτίμηση του βάρους των σχοινιών πρόσδεσης συναρτήσει της διαμέτρου



* Tension Technology International (TTI)

Σχήμα Π6: Εκτίμηση του βάρους των σχοινιών πρόσδεσης συναρτήσει της δύναμη θραύσης

Το βάρος του υδραυλικού βαρούλκου κάθε γραμμής, χωρίς τον κινητήρα, σαν συνάρτηση της δύναμης έλξης μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της καμπύλης που απεικονίζεται στο Σχήμα Π7. Παρόλα αυτά, στην παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, το βάρος μαζί με τον κινητήρα, εκτιμάται γύρω στον έναν τόνο. Δηλαδή:

$$W_{winch} = 1000 \quad (kg) \quad (\text{Π12})$$

Τα βάρη των υπόλοιπων συστημάτων πρόσδεσης, όπως αυτά αναφέρονται παραπάνω, συναρτήσει της διαμέτρου των σχοινιών, εκτιμώνται μέσω των καμπυλών που φαίνονται στο Σχήμα Π8. Συγκεκριμένα το βάρος κάθε σταυροειδούς δέστρας υπολογίζεται με βάση την εξίσωση:

$$W_{cbollard} = 0.116(D_{fibre\ rope})^{2.032} \quad (kg) \quad (\text{Π13})$$

Το βάρος κάθε διπλής δέστρας, μπορεί να προσδιοριστεί με βάση την εξίσωση:

$$W_{dbollard} = 3.658(D_{fibre\ rope})^{1.356} \quad (kg) \quad (\text{Π14})$$

Το βάρος του ειδικού μηχανισμού κατεύθυνσης, μπορεί να εκτιμηθεί μέσω της εξίσωσης:

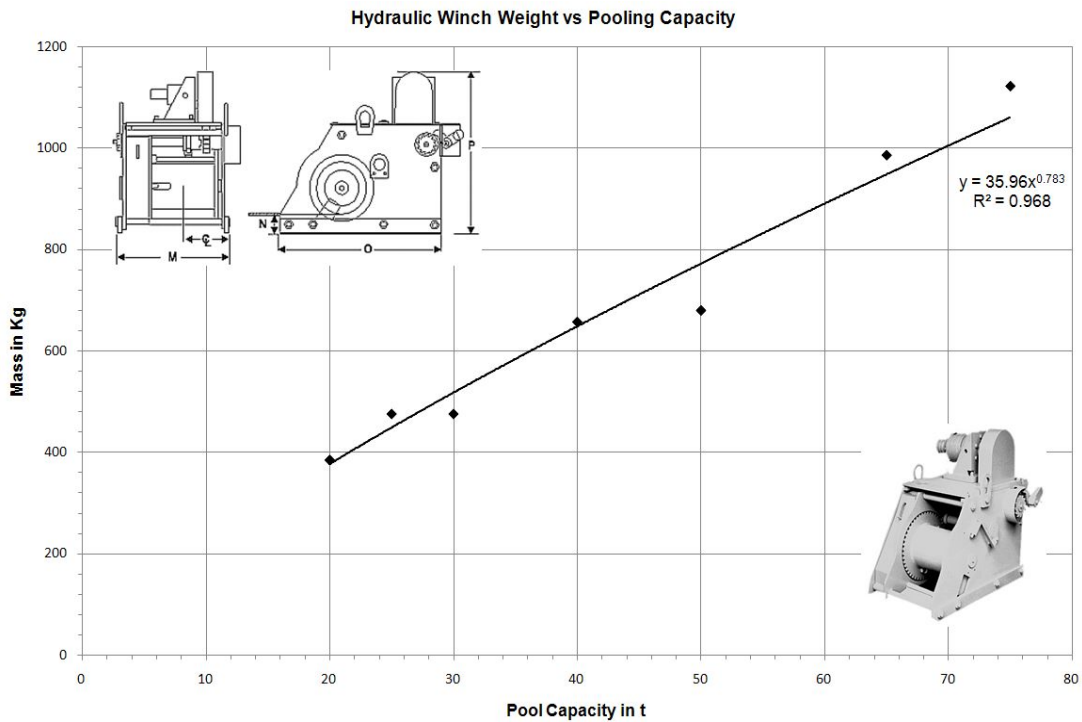
$$W_{roller} = 8.935(D_{fibre\ rope})^{1.246} \quad (kg) \quad (\text{Π15})$$

Τέλος, το βάρος της ειδικής οπής που τοποθετείται στην πλευρά του πλοίου, προκειμένου να ενισχυθεί η τοπική αντοχή και να περιοριστεί η φθορά των ελασμάτων, υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

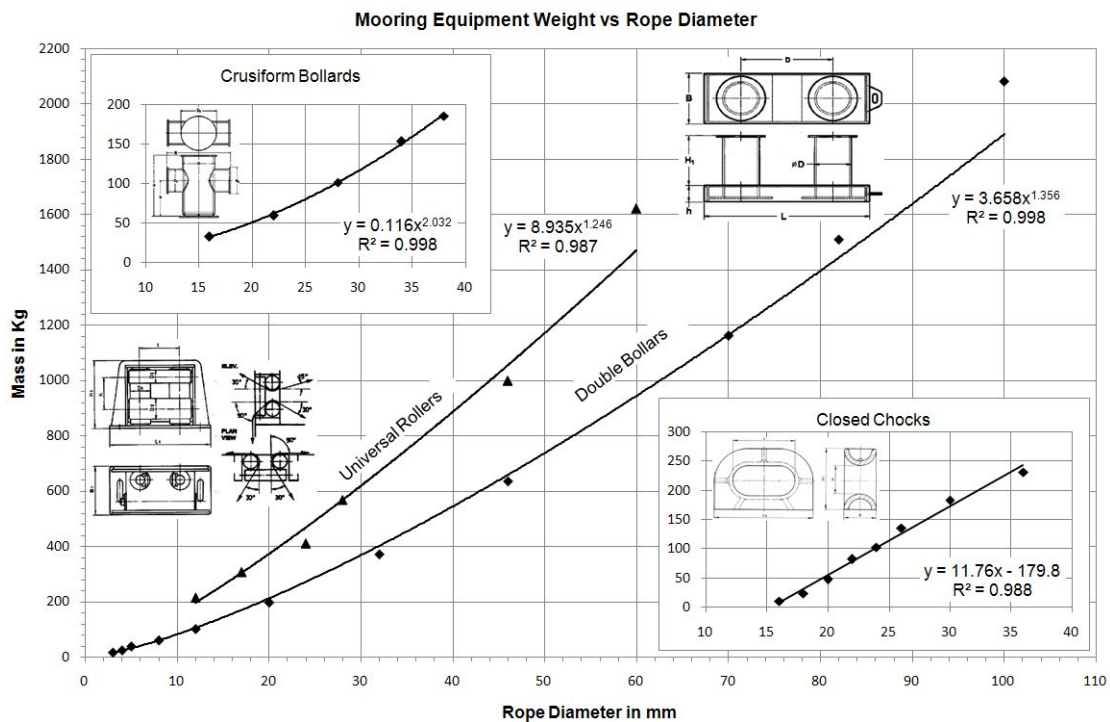
$$W_{chock} = 11.76(D_{fibre\ rope}) - 179.8 \quad (kg) \quad (\text{Π16})$$

Το συνολικό βάρος των συστημάτων των γραμμών πρόσδεσης είναι τελικά ίσο με:

$$W_{mooring\ lines} = N_{mooring} (W_{fibre\ rope} + W_{winch} + W_{cbollard} + W_{dbollard} + W_{roller} + W_{cchock}) \times 10^{-3} \quad (t) \quad (\Pi 17)$$



Σχήμα Π7: Εκτίμηση του βάρους των βιντσιών των σχοινιών πρόσδεσης συναρτήσει του φορτίου



Σχήμα Π8: Εκτίμηση του βάρους λοιπών εξαρτημάτων πρόσδεσης συναρτήσει της διαμέτρου των σχοινιών

Γραμμές ρυμούλκησης (towing lines)

Η γραμμή ρυμούλκησης βρίσκεται στην πλώρη και χρησιμεύει για την έλξη του πλοίου από κάποιο άλλο. Τα σχοινιά που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό έχουν σχετικά μεγάλη αντοχή και μπορεί να είναι κατασκευασμένα από ίνες συνθετικών υλικών (fibre ropes) ή από ίνες χάλυβα σε συνδυασμό με κάποιο σύνθετο υλικό (wire ropes). Πολλές φορές, τοποθετείται μία ακόμη γραμμή ρυμούλκησης στην πρύμνη ενός πλοίου, προκειμένου αυτό να μπορεί, κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις, να ρυμουλκήσει κάποιο άλλο το οποίο θα βρεθεί σε κατάσταση ανάγκης. Έτσι, στην παρούσα μεθοδολογία παραμετρικής σχεδίασης, θεωρείται ότι υπάρχουν δύο γραμμές ρυμούλκησης. Κάθε μία από αυτές, αποτελείται από ένα σχοινί κατασκευασμένο από ίνες χάλυβα σε συνδυασμό με συνθετικά υλικά, έναν ειδικό μηχανισμό κατεύθυνσης (pedestal roller), έναν κύλινδρο αποθήκευσης (store drum), ένα ισχυρό σημείο στήριξης στο κατάστρωμα (towing bracket ή towing strong point) και μία ειδική οπή (fairlead chock), από την οποία περνά το σχοινί προς το άλλο πλοίο. Η ελάχιστη επιτρεπόμενη δύναμη θραύσης ($S_{wire\ rope}$) και το μήκος ($L_{wire\ rope}$) κάθε σχοινιού, προσδιορίζονται απευθείας με βάση την τιμή του δείκτη εξαρτισμού (Πίνακας Π1):

$$EN \rightarrow S_{wire\ rope}, L_{wire\ rope} \quad (\text{Π18})$$

Η διάμετρος του σχοινιού κάθε γραμμής συναρτήσεται της ελάχιστης απαιτούμενης δύναμης θραύσης, για σχοινιά τύπου IWRC² διαφορετικής αντοχής, μπορεί να υπολογιστεί με βάση τις καμπύλες που παρουσιάζονται στο Σχήμα Π9. Για αντοχή εφελκυσμού 1750 N/mm² η αντίστοιχη εξίσωση είναι:

$$D_{wire\ rope} = 1.254(S_{wire\ rope})^{0.500} \quad (mm) \quad (\text{Π19})$$

Το βάρος ανά τρέχον μέτρο των συναρτήσεται της ελάχιστης δύναμης θραύσης για σχοινιά τύπου IWRC διαφορετικής αντοχής, προσδιορίζεται με βάση τις καμπύλες που υπάρχουν στο Σχήμα Π10. Έτσι το βάρος των σχοινιών κάθε γραμμής, δεδομένης και της εφεδρείας, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W_{wire\ rope} = 2 \times 0.663(S_{wire\ rope} - 0.344)L_{wire\ rope} \times 10^{-2} \quad (kg) \quad (\text{Π20})$$

Τα βάρη των υπόλοιπων συστημάτων ρυμούλκησης, όπως αυτά αναφέρονται παραπάνω, συναρτήσεται της διαμέτρου των σχοινιών, μπορούν να εκτιμηθούν μέσω των καμπυλών που απεικονίζονται στο Σχήμα Π11. Συγκεκριμένα, το βάρος του ειδικού μηχανισμού κατεύθυνσης συναρτήσεται της διαμέτρου του σχοινιού, υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$W_{p\ roller} = 0.044(D_{wire\ ropes})^{2.363} \quad (kg) \quad (\text{Π21})$$

Το βάρος της ειδικής οπής συναρτήσεται της διαμέτρου του σχοινιού, από την οποία περνά το σχοινί προς το άλλο πλοίο προσδιορίζεται με βάση την εξίσωση:

$$W_{c\ chock} = 0.006(D_{wire\ ropes})^{2.810} \quad (kg) \quad (\text{Π22})$$

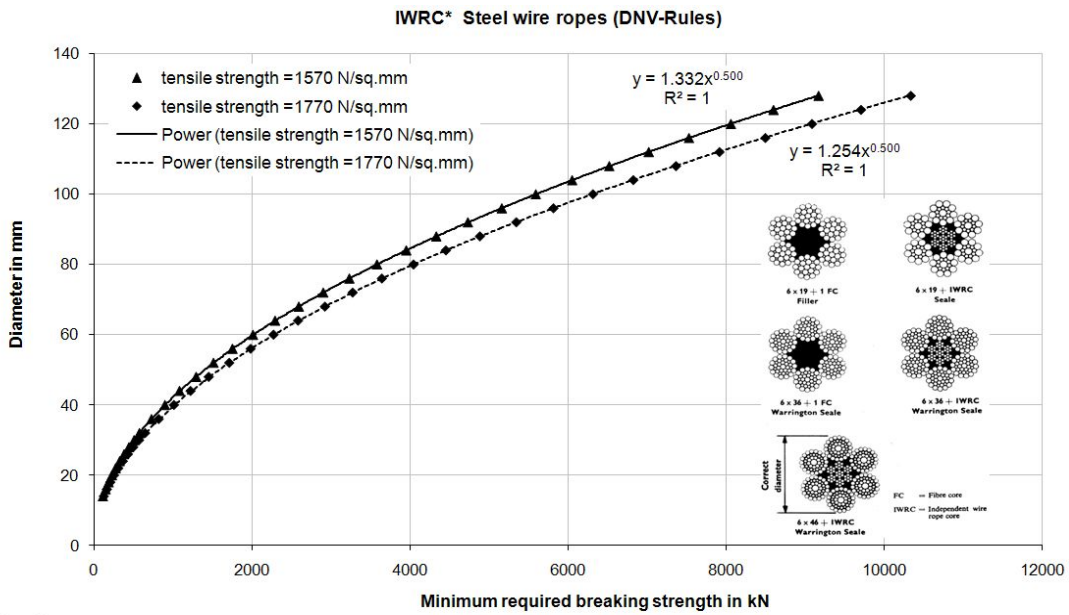
² IWRC = Independent Wire Rope Core

Τέλος, το βάρος κάθε ισχυρού σημείου στήριξης στο κατάστρωμα λαμβάνεται ίσο με:

$$W_{t\text{bracket}} = 300 \quad (\text{kg}) \quad (\text{Π23})$$

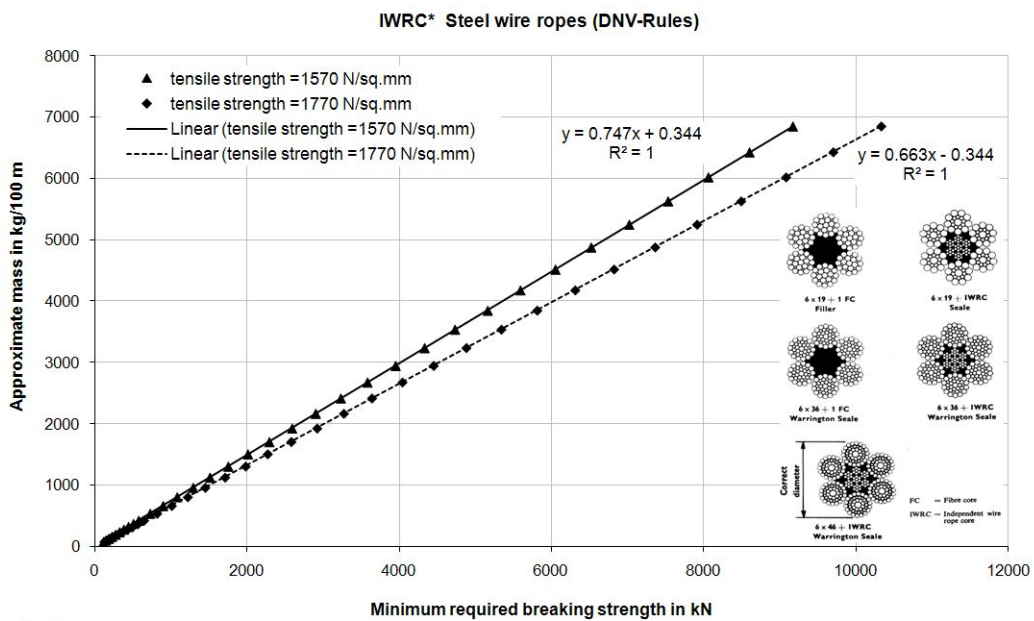
ενώ το βάρος κάθε ειδικού κυλίνδρου αποθήκευσης θεωρείται ότι είναι ίσο με:

$$W_{s\text{drum}} = 100 \quad (\text{kg}) \quad (\text{Π24})$$



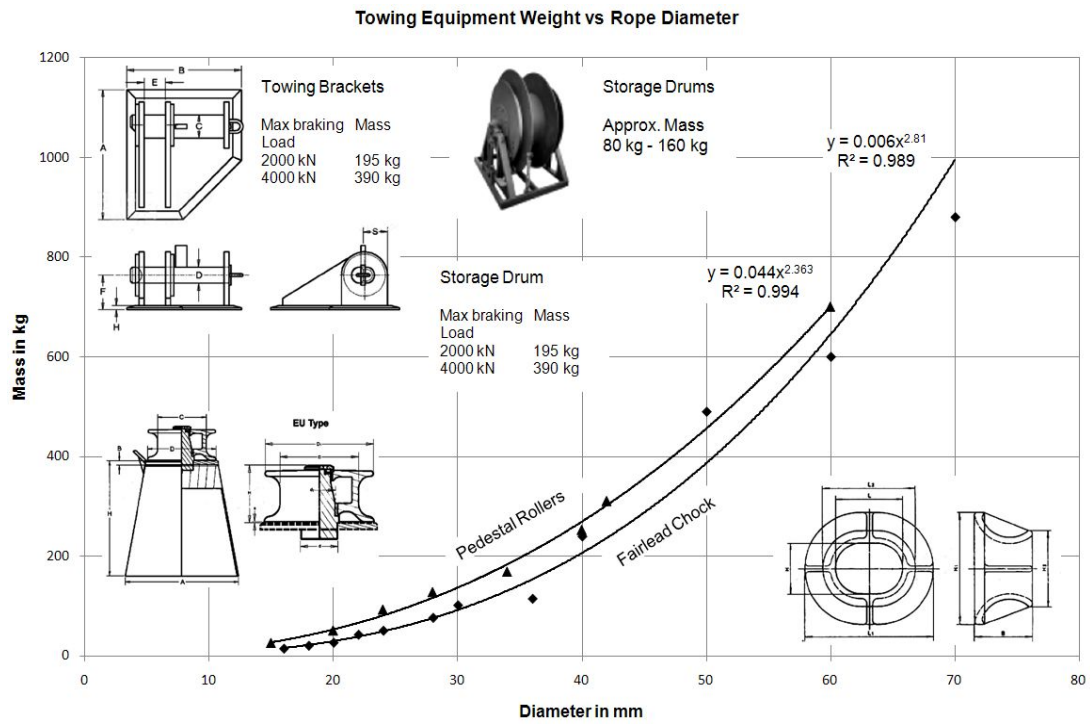
* Independant Wire Rope Core

Σχήμα Π9: Εκτίμηση της διαμέτρου των σχοινιών ρυμούλκησης συναρτήσει της δύναμης θραύσης



* Independant Wire Rope Core

Σχήμα Π10: Εκτίμηση του βάρους των σχοινιών ρυμούλκησης συναρτήσει της δύναμης θραύσης



Σχήμα Π11: Εκτίμηση του βάρους λοιπών εξαρτημάτων ρυμούλκησης συναρτήσει της διαμέτρου των σχοινιών

Το συνολικό βάρος των συστημάτων των γραμμών ρυμούλκησης είναι τελικά ίσο με:

$$W_{\text{towing lines}} = 2 \times (W_{\text{wire rope}} + W_{\text{p roller}} + W_{\text{c chock}} + W_{\text{t bracket}} + W_{\text{s drum}}) \times 10^{-3} \quad (t) \quad (\Pi 25)$$

ΣΥΝΟΠΤΙΚΟ ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ (στην Αγγλική γλώσσα)

Skoupas, Sotiris

Chartered Naval Architect & Marine Engineer

Hellenic Lloyd's S.A. - 87, Akti Miaouli – 185 38 Piraeus, Greece

tel.: +30 210 4580925, e-mail: sotiris.skoupas@lr.org

Summary

I am a Chartered Naval Architect and Marine Engineer since 2001, graduating from the School of Ship Design and Marine Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) with the degree of MSc-Ing. I gained my doctorate in Naval Architecture from NTUA in 2011. From 2002 up to 2008, I was employed in the Ship Design Laboratory of NTUA as Fellow-scientist. My professional and academic activities was including; research development as part of European & National projects, assisting in teaching School lessons related to Ship Design, compiling academic scripts and tutorials regarding the usage of state-of-the-art CAD tools in marine engineering as well as writing technical articles and reports. Since the 1st of September 2008, I am employing as Marine Surveyor at the Design Support Office of the Hellenic Lloyd's S.A (A Member of the Lloyd's Register Group - LR). My major responsibilities are to review and approve Trim & Stability booklets as well as Loading Instruments for existing vessels to ensure compliance with the rules and regulations. I am also participating in various internal and external LR projects which are related with the areas of Multi-objective Optimization (MOP) and Decision Making (MCDM) in ship design and operation as well as areas of the regulations for the stability of the ships. My professional objectives are mostly on statutory (intact and damage stability) and strength aspects as well as on optimization in technical investigation. From the 1st of November 2003 to the 31st of October 2007, I was scholar of the Greek State Scholarships Foundation (IKY), in a three (3) years programme. From May 2001 to December 2002 I was served in the Greek Navy Dockyard at Salamis as well as in the Greek Navy Echelon in Elefsis Shipyard.

Academic Qualification

- 2011 : PhD Thesis: "*Development of an Integrated Methodology for the Holistic Design and Optimization of High Speed RoRo-Passenger Vessels*", School of Naval Architecture & Marine Engineering, National Technical University of Athens (NTUA), Greece
- 2001 : MSc Thesis: "*Design of a displacement RoRo-Passenger Vessel using Advanced Marine Computer Design Tools*", Ship Design Laboratory, School of Naval Architecture & Marine Engineering, National Technical University of Athens(NTUA), Greece
- 2000 : *Diploma of Naval Architect & Marine Engineer*, School of Naval Architecture & Marine Engineering, National Technical University of Athens(NTUA), Greece

Professional Experience

- 2008 - : Marine Design Support Surveyor (Stat-Comp) Hellenic Lloyd's S.A., Piraeus, Greece
- 2001 - Researcher at Ship Design Laboratory, School of Naval Architecture & Marine
2008 : Engineering, Technical University of Athens (NTUA), Greece.

Publications

Publications in international magazines based on full paper review

- 1) Papanikolaou, A., Zaraphonitis, G., Skoupas, S. and Boulougouris, E., *An Integrated Methodology for the Design of Ro-Ro Passenger Ships*, Schiffstechnik Bd.56 - 2009/Ship Technology Research, Vol.56, 2009

Publications in national and international conferences based on full paper review

- 2) Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A., Loukakis, T., Tsouvalis, N., Skoupas, S., Mitsotakis, K. and Antoniou, A., *Development and Demonstration of an Integrated Methodology for the Design of RoRo-Passenger Ships for the Needs of Short Sea Shipping in Greece*, Proc. 12th IMAM Congress, 2-6 Sep. 2007, Varna, Bulgaria
- 3) Zaraphonitis, G., Skoupas, S., Katsaounis G., Papanikolaou, A., *Development and Application of a global methodology for the design of RoRo – Passenger vessels*, Proc. conference of Hellenic Institute of Marine Technology (EAINT), November 2008, Piraeus
- 4) Skoupas, S., Zaraphonitis, G., Papanikolaou, A., *Parametric Design and Optimization of High-Speed, Twin-Hull RoRo-Passenger Vessels*, Proc. 10th International Marine Design Conference (IMDC 2009), May 2009, Trondheim, Norway
- 5) Skoupas, S., Zaraphonitis, G., *Parametric Design and Optimization of High-Speed ROPAX Vessel*, Proc. 10th Int. Conference on Fast Sea Transportation (FAST 2009), Oct. 2009, Athens, Greece.

Publications in international conferences based on abstract review

- 6) Skoupas, S., Zaraphonitis, G., *An optimization Procedure for the Preliminary Design of High-Speed RoRo-Passenger Ships*, Proc. Int. Conf. on High-Performance Marine Vehicles, HIPER'08, Sept. 2008, Naples, Italy

Other Publications (technical papers)

- 1) S. Skoupas, Th. Bastounis, M. Athinaios, N. Violaris, *“Ultra Large Mega Containership Design”*, Visionary Concepts for Ship and Floating Structures (VISIONS) 2005, EU Student Competition*, WEGEMT, CESA, May 2005.
- 2) Final and Intermediate Technical Reports for the local Research Program *EPAN MET-4* in Greek language.

Membership Organizations

- Technical Chamber of Greece (TCG)
- Greek National Union of Naval Architects and Marine Engineers
- The Royal Institution of Naval Architects (MRINA)
- Engineering Council (CEng)

