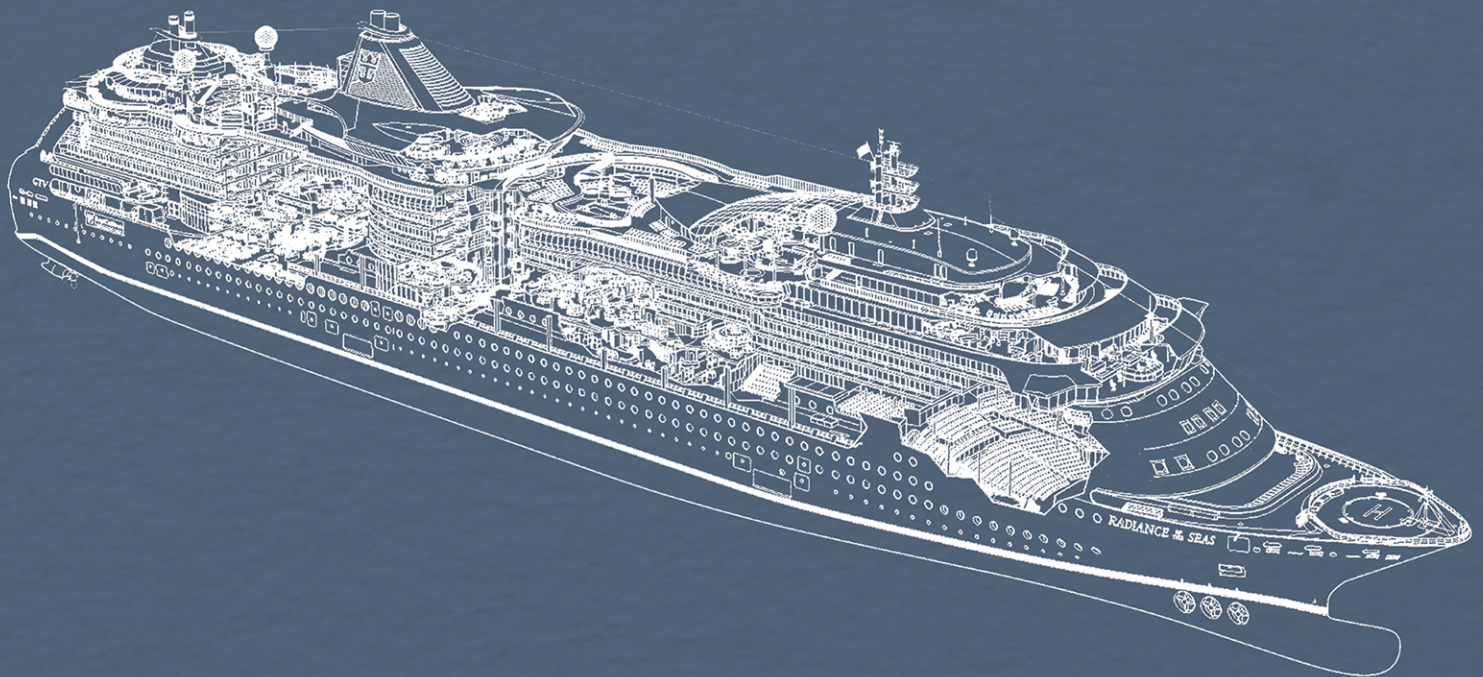

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΠΕΠΟΝΗΣ

Η ΜΕΤΑΛΛΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

Ιστορική Αναδρομή – Ιδιαιτερότητες – Προβλήματα Αντοχής – Νέες Εξελίξεις



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

**Η Μεταλλική Κατασκευή των Κρουαζιερόπλοιων
Ιστορική Αναδρομή – Ιδιαιτερότητες – Προβλήματα Αντοχής – Νέες Εξελίξεις**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
Εμμανουήλ Πεπονή**

Επιβλέπων: Πέτρος Καρύδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την Πέμπτη 23 Ιουνίου του 2016

.....
Π. Καρύδης
Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Μ. Σαμουηλίδης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Τσούβαλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016

.....

ΕΜΜΑΝΟΥΗΛ ΠΕΠΟΝΗΣ

Φοιτητής Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2016 – All rights reserved

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση των ιδιαιτεροτήτων σχεδιασμού της μεταλλικής κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων και η διερεύνηση των προβλημάτων αντοχής που προκύπτουν από αυτή. Η απουσία ενός εξειδικευμένου συγγραμματος για αυτά τα θέματα ανέδειξε την ανάγκη δημιουργίας ενός συγκεντρωτικού εργαλείου, το οποίο μέσα από τη σύνθεση της υπάρχουσας γνώσης, θα συνεισφέρει στην εξέλιξη της ναυπηγικής επιστήμης. Το αποτέλεσμα που προκύπτει μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμο στους φοιτητές αλλά και στους επαγγελματίες που ασχολούνται με τη ναυτιλία και ειδικότερα με αυτόν τον τύπο πλοίου.

Με τη συγκέντρωση των πληροφοριών αναδείχθηκε το γεγονός ότι οι τροποποιήσεις των κανονισμών και οι μεταβολές των αναγκών της αγοράς επιδρούν άμεσα στη σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων. Τα πλοία κρουαζιέρας συνεχώς εξελίσσονται, αποκτούν όλο και περισσότερες ανέσεις και χαρακτηρίζονται από μια ιδιαίτερη και σύνθετη γεωμετρία. Αποτέλεσμα είναι η συμπεριφορά τους να γίνεται πολύπλοκη, η αξιολόγηση της αντοχής τους απαιτητική και η κατασκευαστική σχεδίαση να αποτελεί πρόκληση για τον ναυπηγό. Η τελευταία γίνεται ακόμη πιο αυστηρή στις μέρες μας, με τις πρωτοπόρες ιδέες και τις καινοτόμες διατάξεις προκειμένου τα κρουαζιερόπλοια να γίνονται πιο ανταγωνιστικά και ελκυστικά στους επιβάτες, αλλά και πιο φιλικά προς το περιβάλλον.

Λέξεις-Κλειδιά: Κρουαζιερόπλοια, Ιστορική Αναδρομή, Ιδιαιτερότητες Σχεδίασης, Φορτίσεις, Συνεργασία Γάστρας-Υπερστεγάσματος, Μεθοδολογίες, Κατασκευαστική Σχεδίαση, Κανονισμοί, Νέες Εξελίξεις

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to analyze the concept design of cruise ships giving special attention to structural design. The absence of a specialized writing for that issues highlight the need of creation a cumulative tool, which through the synthesis of existing knowledge, will contribute to the development of naval architecture. The outcome may be useful to students but also to naval architects who ply with shipping and especially with this type of ship.

By gathering information emerged that the amendments to the regulations and the changes in market needs have a direct impact on the design of cruise ships. The cruise ships are continuously evolving, becoming more comfortable and characterized by a particular and complex geometry. The result is that their behavior is complex, the evaluation of their strength demanding and the structural design challenging. The latter is even more strict nowadays, with pioneering ideas and innovative arrangements to ensure that cruise ships become more competitive and attractive to passengers, but also more environmentally friendly.

Keywords: Cruise Ships, Chronology, Concept Design, Loads, Hull-Deckhouse Interaction, Methods, Structural Design, Rules, Innovations

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι αποτέλεσμα των γνώσεων που απέκτησα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου από το έτος 2010 έως το 2016. Με τη διεκπεραίωση και την παρουσίαση αυτής της μελέτης ολοκληρώνεται και η φοίτησή μου στη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Με την αφορμή αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου.

Πρωτίστως, ευχαριστώ τους γονείς μου, Νίκο και Εύη, οι οποίοι στέκονταν πάντα δίπλα μου όλα τα χρόνια της ζωής μου. Δίχως τον δικό τους αγώνα δεν θα ήμουν σήμερα στο σημείο αυτό. Τους ευχαριστώ με την ελπίδα να τους το ανταποδώσω τα επόμενα χρόνια.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Πέτρο Καρύδη για την άψογη συνεργασία μας και τη συνεχή βοήθεια που μου παρείχε σε όλη την περίοδο της εκπόνησης της εργασίας. Στήριξε την προσπάθειά μου, με καθοδήγησε και μου αφιέρωσε πολύ από το χρόνο του για να φτάσουμε έως εδώ.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους καθηγητές της σχολής, οι οποίοι αγωνιστήκανε να μας μεταδώσουν τις γνώσεις τους, μας ενέπνευσαν και μας εκπαίδευσαν στο πώς να σκεπτόμαστε.

Ακόμη, ευχαριστώ τους συμφοιτητές μου για τη συνεργασία μας κατά τη διάρκεια των σπουδών μας. Μέσα από αυτή αντιληφθήκαμε τη σημασία της ομαδικότητας και της επικοινωνίας στην αντιμετώπιση των οποιοδήποτε ζητημάτων. Χωρίς την αλληλοϋποστήριξη και την ανταλλαγή ιδεών θα έμοιαζε αδύνατη η αποπεράτωση μιας σχολής τέτοιας δυσκολίας.

Ευχαριστώ τον ξάδερφό μου καπτα-Μανώλη για τις συμβουλές του και τα σχέδια που μου παρείχε, καθώς και τον θείο μου, Σπύρο Ψιάχα, για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά του. Θα ήθελα ακόμη, να ευχαριστήσω τον καπτα-Νίκο Βαλαβάνη για την χωρίς ενδοιασμούς προσφορά του να με βοηθήσει παρέχοντάς μου σπάνιο βιβλιογραφικό υλικό για τον εμπλουτισμό της εργασίας μου.

Φυσικά, δεν θα μπορούσα να παραβλέψω τους παππούδες μου για την αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια. Τους ευχαριστώ για όλα και θα τους θυμάμαι πάντοτε με θαυμασμό.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες στην κοπέλα μου Ελένη Τσίχλη για την πολύπλευρη στήριξή της, κάθε στιγμή. Ήταν ο άνθρωπος που με την αγάπη του έκανε τις δύσκολες στιγμές να μοιάζουν ευκολότερες, στον μακρύ και δύσβατο δρόμο της περάτωσης των σπουδών μου.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT.....	vii
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ix
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	xi
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	xv
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xvi
1. ΠΛΟΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΠΙΒΑΤΩΝ	1
1.1 Ορισμός του επιβατηγού πλοίου.....	1
1.2 Ιστορική αναδρομή	6
1.3 Κατάσταση στην αγορά της κρουαζιέρας	8
1.4 Ανακεφαλαίωση.....	11
2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	12
2.1 Απαιτήσεις πλοιοκτήτη και αναγωγή σε τεχνικά χαρακτηριστικά	12
2.2 Αρχές σχεδίασης των πλοίων	14
2.2.1 Εισαγωγή	14
2.2.2 Κύριες Διαστάσεις	14
2.2.3 Κρίσιμοι Συντελεστές	20
2.2.4 Άλλοι Σχεδιαστικοί Παράγοντες	22
2.3 Διαδικασία σχεδίασης των κρουαζιερόπλοιων.....	28
2.3.1 Εισαγωγή	28
2.3.2 Μεθοδολογία σχεδίασης της μεταλλικής κατασκευής	29
2.4 Ιδιαιτερότητες της μεταλλικής κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων	38
2.5 Γενική Διάταξη – Η συμβολή του αρχιτέκτονα	44
2.5.1 Εισαγωγή	44
2.5.2 Διάταξη των χώρων.....	47
2.5.3 Χώροι Ενδιαίτησης	51
2.5.4 Χώροι Εστίασης	53
2.5.5 Βοηθητικοί Χώροι.....	56
2.5.6 Άλλοι Χώροι.....	57
2.6 Ανακεφαλαίωση.....	60
3. ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	61

3.1 Εισαγωγή	61
3.2 Θαλάσσιο Περιβάλλον	63
3.2.1 Ήρεμο νερό	63
3.2.2 Μετωπικοί και Ακολουθούντες Κυματισμοί	65
3.2.3 Πλάγιοι Κυματισμοί	70
3.3 Κινήσεις του πλοίου και Επιταχύνσεις	71
3.4 Τοπικοί Παράγοντες	76
3.4.1 Δεξαμενισμός	76
3.4.2 Προσάραξη και Συγκρούσεις	76
3.4.3 Φορτίσεις από μηχανήματα	76
3.5 Κρίσιμες καταστάσεις φόρτισης	80
3.6 Ανακεφαλαίωση	82
4. ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	84
4.1 Εισαγωγή	84
4.2 Ολική απόκριση	88
4.2.1 Διαμήκης Κάμψη	88
4.2.2 Στρέψη	89
4.3 Τοπική απόκριση	91
4.3.1 Λυγισμός	91
4.3.2 Διατμητική παραμόρφωση	94
4.4 Συνεργασία γάστρας-υπερστεγάσματος	95
4.4.1 Ακαμψία κύριου καταστρώματος	95
4.4.2 Επιδράσεις διάτμησης	99
4.4.3 Γεωμετρία υπερστεγάσματος	100
4.4.4 Πλευρικά ανοίγματα	104
4.4.5 Ολίσθηση διεπιφάνειας	108
4.4.6 Θέση του υπερστεγάσματος	108
4.4.7 Αρμοί διαστολής	108
4.4.8 Πτυχωτές πλευρές	110
4.4.9 Κατακόρυφες φορτίσεις στα άκρα του υπερστεγάσματος	111
4.4.10 Μέτρο ελαστικότητας (υλικό)	112
4.4.11 Εγκάρσια κατασκευή	113
4.5 Ανακεφαλαίωση	113

5. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	114
5.1 Εισαγωγή	114
5.2 Απλή θεωρία κάμψης δοκού και πειραματικές μέθοδοι (Στάδιο Προμελέτης)	115
5.3 Αναλυτικές Μέθοδοι	120
5.3.1 Θεωρία δυο δοκών.....	120
5.3.2 Θεωρία επίπεδης εντατικής κατάστασης	138
5.4 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Αριθμητικές Μέθοδοι).....	141
5.5 Οι επικρατέστερες μέθοδοι για τη μελέτη της αντοχής των κρουαζιερόπλοιων	145
5.6 Μέθοδος Συζευγμένης Δοκού (Coupled Beam Method)	145
5.7 Μοντελοποίηση του πλοίου για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.....	154
5.7.1 Τύποι στοιχείων.....	154
5.7.2 Διακριτοποίηση της κατασκευής.....	156
5.7.3 Μοντελοποίηση των φορτίσεων	159
5.7.4 Ολικό Μοντέλο ΠΣ (Global FE Model)	161
5.7.5 Διδιάστατα Μοντέλα ΠΣ Πυκνού Πλέγματος (2-D Fine Mesh FE Models).....	162
5.7.6 Τριδιάστατα Αναλυτικά Μοντέλα ΠΣ (3-D Refined FE Model).....	164
5.7.7 Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)	164
5.8 Ανακεφαλαίωση.....	165
6. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	167
6.1 Εισαγωγή	167
6.2 Η κατασκευή της γάστρας	167
6.2.1 Κατασκευαστικά στοιχεία.....	168
6.2.2 Συστήματα ενίσχυσης	174
6.2.3 Υποδιαίρεση πλοίου	181
6.3 Ναυπηγικά Υλικά.....	182
6.3.1 Συμπεριφορά των υλικών.....	183
6.3.2 Χάλυβας.....	187
6.3.3 Αλουμίνιο.....	189
6.3.4 Σύνθετα υλικά	199
6.4 Χρήση σύνθετων υλικών στα κρουαζιερόπλοια.....	204
6.4.1 Κανονισμοί Πυρασφάλειας	205
6.4.2 Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε κρουαζιερόπλοιο.....	206
6.5 Ανακεφαλαίωση.....	213

7. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	215
7.1 Εισαγωγή	215
7.2 Επιβιωσιμότητα της κατασκευής.....	215
7.2.1 Περίπτωση άθικτης κατάστασης υπό διάφορες γωνίες εγκάρσιας κλίσης	218
7.2.2 Περιπτώσεις βλάβης με μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης	219
7.2.3 Επιδράσεις τοπικών παραγόντων	223
7.3 Ανακεφαλαίωση.....	224
8. ΝΕΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ	226
8.1 Εισαγωγή	226
8.2 Μοντέλο με δύο γάστρες	229
8.3 Μοντέλο Eoseas.....	231
8.4 Μοντέλο ΧρTray	232
8.5 Μοντέλο M2cell.....	233
8.5.1 Μελέτη και σύγκριση της αντοχής της συμβατικής κατασκευής με την παραδοσιακή	235
8.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας	238
8.6 Ανακεφαλαίωση.....	240
9. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ / ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	241
10. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	242
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	243
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Η αγορά της κρουαζιέρας για το 2016	249
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Εφαρμογή της μεθόδου σχεδίασης που προτείνεται από τον Lamb	252
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Γενική διάταξη δυο κρουαζιερόπλοιων	256
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - Απαιτήσεις γερμανικού νηογνώμονα για την πιστοποίηση της άνεσης	258
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε - Κραδασμοί	266
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ - Παραδείγματα συνεργασίας γάστρας-υπερστεγάσματος	268
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ - Φωτογραφίες από πλευρικά ανοίγματα Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος	275
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η - Σύγκριση της μεθόδου ΣΔ και της μεθόδου των ΠΣ	277
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ - Σχέδιο μέσης τομής συμβατικού κρουαζιερόπλοιου	282
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Απαιτήσεις ABS για τη διαστασιολόγηση των κρουαζιερόπλοιων	283
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Κ - Κανονισμοί πυρασφάλειας	306
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Λ - Σχέδια μέσης τομής μοντέλου m2cell	309

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Νέες παραγγελίες κρουαζιερόπλοιων [8]	9
Πίνακας 1.2: Κατανομή Κρουαζιερόπλοιων με βάση το μέγεθός τους [9]	10
Πίνακας 1.3: Τα 10 μεγαλύτερα κρουαζιερόπλοια για το 2015 [8]	10
Πίνακας 2.1: Κάποια από τα μεγαλύτερα ατυχήματα των επιβατηγών πλοίων παγκοσμίως [12]	15
Πίνακας 2.2: Ανάλυση επιφανείας και όγκου εγκαταστάσεων επιβατών ενός κρουαζιερόπλοιου [10] ..	31
Πίνακας 2.3: Ανάλυση επιφανείας και όγκου όλων των εγκαταστάσεων ενός κρουαζιερόπλοιου [10] ..	31
Πίνακας 2.4: Υπολογισμός του Lightship ενός κρουαζιερόπλοιου [10]	33
Πίνακας 2.5: Υπολογισμός του Deadweight ενός κρουαζιερόπλοιου [10]	33
Πίνακας 2.6: Αναλογίες βαρών ανά τύπο πλοίου [11].....	39
Πίνακας 2.7: Αναλογίες διαστάσεων και συντελεστές γάστρας ανά τύπο πλοίου [11]	40
Πίνακας 3.1: Τυπικές μορφές προπέλας [37].....	79
Πίνακας 3.2: Κρίσιμες καταστάσεις φόρτισης	80
Πίνακας 4.1: Σύγκριση ιδιοτήτων αλουμινίου και χάλυβα	112
Πίνακας 6.1: Χημικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων [28].....	188
Πίνακας 6.2: Μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων [28].....	188
Πίνακας 6.3: Κύρια στοιχεία κραμάτων αλουμινίου.....	189
Πίνακας 6.4: Αντιστοιχίες ονοματολογίας κραμάτων αλουμινίου [84]	190
Πίνακας 6.5: Χημική σύσταση των κυριότερων κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγική χρήση [84]	191
Πίνακας 6.6: Θερμοκρασίες τήξης.....	194
Πίνακας 6.7: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες και κόστος διάφορων τύπων πολυστρωτων [84].....	201
Πίνακας 6.8: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες πολυστρωτων από FRP και άλλων υλικών [92].....	202
Πίνακας 6.9: Κατανομή του βάρους των περιοχών πάνω από το κατάστρωμα 11 [94]	208
Πίνακας 6.10: Σύγκριση της κατανομής του βάρους του νέου με του παλιού κρουαζιερόπλοιου [94] .	209
Πίνακας 6.11: Ικανότητα πλοίου να παραλάβει τα φορτία [94]	211
Πίνακας 7.1: Ιδιότητες Μέσων Τομών [95]	218
Πίνακας 7.2: Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ανώτερου Καταστρώματος [95]	218
Πίνακας 8.1: Σύγκριση των κατακόρυφων εκτροπών και των ιδιοτήτων της διατομής [39]	237
Πίνακας A.1: Μερίδιο επιβατών και εσόδων (1/2) [7].....	249
Πίνακας A.2: Μερίδιο επιβατών και εσόδων (2/2) [7].....	250
Πίνακας B.1: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος στέγασης επιβατών	252
Πίνακας B.2: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος δημόσιων χώρων επιβατών.....	252
Πίνακας B.3: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος κλιμακοστασίων και προθαλάμων επιβατών..	253
Πίνακας B.4: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος όλων των χώρων του πλοίου	253
Πίνακας B.5: Υπολογισμός του Lightship.....	254
Πίνακας B.6: Υπολογισμός του Deadweight.....	254
Πίνακας B.7: Κύριες διαστάσεις και συντελεστές μορφής κρουαζιερόπλοιου	255
Πίνακας B.8: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος υπερκατασκευής.....	255
Πίνακας I.1: Κατάταξη των υλικών σύμφωνα με τον ABS [106]	285
Πίνακας I.2: Φορτία σχεδιασμού καταστρώματος [106]	292
Πίνακας I.3: Τιμές του h για δοκούς [107]	303
Πίνακας K.1: Σύνοψη των επηρεασμένων κανονισμών της SOLAS [94]	308

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1: Ιεραρχική κατάταξη των επιβατηγών πλοίων και των υποκατηγοριών τους	1
Σχήμα 1.2: Προτίμηση επιβατών ανά περιοχή κρουαζιέρας	2
Σχήμα 1.3: Κρουαζιερόπλοιο - Allure of the seas [1].....	4
Σχήμα 1.4: Επιβατηγό/Οχηματαγωγό ακτοπλοΐας – Nisos Chios [2]	4
Σχήμα 1.5: Cruise Ferry – Color Magic [3].....	5
Σχήμα 1.6: High Speed Ferry – Normandie Express [4]	5
Σχήμα 1.7: SS Great Britain [5].....	6
Σχήμα 1.8: RMS Titanic [6]	7
Σχήμα 1.9: Προτίμηση επιβατών ανά ημέρες κρουαζιέρας.....	10
Σχήμα 2.1: Διαφοροποίηση του ξενοδοχείου του πλοίου από τη γάστρα του πλοίου [10].....	13
Σχήμα 2.2: Επίδραση του πλάτους στο λόγο εξωτερικών προς εσωτερικών καμπινών [10]	17
Σχήμα 2.3: Ιδέα “Superwide” [13]	18
Σχήμα 2.4: Ιδέα “ΧρTray” [14]	19
Σχήμα 2.5: Συντελεστής οξύτητας και πρισματικός συντελεστής [11]	22
Σχήμα 2.6: Συντελεστής Γάστρας συναρτήσεως του αριθμού Froude (κρουαζιερόπλοια) [10].....	23
Σχήμα 2.7: Σύγκριση νομέων τύπου U και V [11].....	24
Σχήμα 2.8: Μορφή βολβών [11]	26
Σχήμα 2.9: Βολβός “λαιμός χήνας” [11]	26
Σχήμα 2.10: Τυπικό σκαρίφημα βολβού τύπου SV [11].....	27
Σχήμα 2.11: Συνήθεις μορφές πρύμνης [11]	28
Σχήμα 2.12: Ελικοειδής καμπύλη μελέτης πλοίου [15].....	29
Σχήμα 2.13: Επιβάτες και πλήρωμα συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]	32
Σχήμα 2.14: Επιπλωμένη επιφάνεια συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10].....	32
Σχήμα 2.15: Νεκρό βάρος συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]	34
Σχήμα 2.16: Μήκος συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]	35
Σχήμα 2.17: Πλάτος συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10].....	35
Σχήμα 2.18: Βύθισμα συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]	36
Σχήμα 2.19: Ισχύς συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10].....	38
Σχήμα 2.20: Βήματα εκτέλεσης της μεθοδολογίας μελέτης και σχεδίασης κρουαζιερόπλοιων.....	39
Σχήμα 2.21: Ταχύτητα συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10].....	42
Σχήμα 2.22: Λόγος L_{pp}/B συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10].....	43
Σχήμα 2.23: Λόγος B/T συναρτήσεως της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]	43
Σχήμα 2.24: Γραμμές ενός κρουαζιερόπλοιου Panamax [10]	44
Σχήμα 2.25: Τρισδιάστατο μοντέλο του MSC Poesia στο οποίο παρουσιάζεται η γενική διάταξη [16]....	45
Σχήμα 2.26: Κατακόρυφη και οριζόντια διάταξη [10].....	46
Σχήμα 2.27: Seabourn Spirit [17]	46
Σχήμα 2.28: Grandeur of the Seas [18].....	46
Σχήμα 2.29: Κίνηση των επιβατών και του πληρώματος [10].....	48
Σχήμα 2.30: Σωστικές λέμβοι στο ύψος του καταστρώματος σωστικών λέμβων [19].....	48
Σχήμα 2.31: Απαίτηση για το ύψος των σωστικών λέμβων [10].....	49
Σχήμα 2.32: Γεωμετρία εσοχής καταστρώματος σωστικών λέμβων [10]	49
Σχήμα 2.33: Παράδειγμα συσχετισμού κατακόρυφων κινήσεων πλοίου	50

Σχήμα 2.34: Διάδρομος καμπινών του κρουαζιερόπλοιου Sapphire Princess [20]	50
Σχήμα 2.35: Φυσικός φωτισμός σε καμπίνες [21].....	51
Σχήμα 2.36: Καμπίνες επιβατών [10]	52
Σχήμα 2.37: Τρισδιάστατη απεικόνιση διάταξης καμπινών [21]	53
Σχήμα 2.38: Κεντρικός χώρος του κρουαζιερόπλοιου Royal Princess [22]	54
Σχήμα 2.39: Ένα από τα εστιατόρια του Norwegian Dawn [23].....	55
Σχήμα 2.40: Η αίθουσα θεάτρου του κρουαζιερόπλοιου Disney Dream [24]	55
Σχήμα 2.41: Κλιμακοστάσιο του επιβατηγού πλοίου SS Rotterdam [25]	57
Σχήμα 2.42: Μια από τις τέσσερις πισίνες του MV Britannia [26]	58
Σχήμα 2.43: Διάδρομος καταστημάτων ενός κρουαζιερόπλοιου [27].....	59
Σχήμα 3.1: Τυπική αναπαράσταση καμπύλης φόρτισης.....	63
Σχήμα 3.2: Τυπική αναπαράσταση διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών.....	65
Σχήμα 3.3: Κατάσταση Hogging και Sagging [29]	66
Σχήμα 3.4: Συντελεστής κατανομής καμπτικής ροπής κατά το διάμηκες.....	68
Σχήμα 3.5: Συντελεστής κατανομής θετικής διατμητικής δύναμης κατά το διάμηκες.....	68
Σχήμα 3.6: Συντελεστής κατανομής αρνητικής διατμητικής δύναμης κατά το διάμηκες	69
Σχήμα 3.7: Κατάσταση Panting	69
Σχήμα 3.8: Κατάσταση Pounding.....	70
Σχήμα 3.9: Ομοεπίπεδη στρεπτική καταπόνηση [30]	70
Σχήμα 3.10: Οι κινήσεις του πλοίου [31].....	71
Σχήμα 3.11: Συντελεστής κυματισμού CW [32].....	72
Σχήμα 3.12: Παράμετρος επιτάχυνσης [32]	73
Σχήμα 3.13: Συντελεστής κατανομής της κατακόρυφης επιτάχυνσης kv [32].....	75
Σχήμα 3.14: Φόρτιση κατά το δεξαμενισμό [33].....	76
Σχήμα 3.15: Επισκόπηση των κραδασμών του πλοίου [34]	77
Σχήμα 3.16: Εγκατάσταση “Hydraulic Bracing Unit” [35]	78
Σχήμα 3.17: Σκαρίφημα Hydraulic Top Bracing [36].....	78
Σχήμα 3.18: Σύστημα πρόωσης Aziprod [38].....	80
Σχήμα 4.1: Εξέλιξη της μέσης τομής των επιβατηγών πλοίων και διατμητική ροή (Μέρος Α΄) [39]	84
Σχήμα 4.2: Παλιός διαχωρισμός υπερστεγάσματος από την υπερκατασκευή [40]	85
Σχήμα 4.3: Εξέλιξη της μέσης τομής των επιβατηγών πλοίων και διατμητική ροή (Μέρος Β΄) [39]	86
Σχήμα 4.4: Πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες τάσεις [42]	89
Σχήμα 4.5: Στρέψη πλοίου λόγω πλάγιων κυματισμών	90
Σχήμα 4.6: Μοντελοποιημένο πλοίο για την εξέτασή του ως προς τη στρέψη [37]	90
Σχήμα 4.7: Διαμήκης κάμψη δοκού.....	91
Σχήμα 4.8: Λυγισμός δοκού για τις διάφορες στηρίξεις της [43].....	92
Σχήμα 4.9: Σωστή διάταξη και διαστασιολόγηση στύλων [28]	93
Σχήμα 4.10: Διατμητικός λυγισμός στην περιοχή της πλώρης [42]	94
Σχήμα 4.11: Αλληλεπίδραση γάστρας-υπερστεγάσματος [40]	95
Σχήμα 4.12: Παρουσία αποκλειστικά διατμητικών δυνάμεων στη σύνδεση [40].....	96
Σχήμα 4.13: Αλληλεπίδραση γάστρας και απείρωσ ελαφριού υπερστεγάσματος [40].....	96
Σχήμα 4.14: Επιφάνεια ολίσθησης με απείρωσ άκαμπτο κατάστρωμα [40]	97
Σχήμα 4.15: Συγγραμμική κατανομή παραμορφώσεων [40].....	98
Σχήμα 4.16: Ρεαλιστική κατανομή των παραμορφώσεων [40]	98

Σχήμα 4.17: Περαιτέρω αύξηση καμπυλότητας του υπερστεγάσματος [40]	99
Σχήμα 4.18: Υστέρηση διάτμησης [40]	100
Σχήμα 4.19: Επίδραση της διάτμησης στις άμεσες τάσεις [40]	101
Σχήμα 4.20: Επεξήγηση της επίδρασης της διάτμησης στις άμεσες τάσεις [40]	101
Σχήμα 4.21: Σύγκριση κατανομής τάσεων με και χωρίς υπερστεγάσμα [40]	102
Σχήμα 4.22: Επίδραση του μήκους στην αποτελεσματικότητα της υπερκατασκευής [40]	103
Σχήμα 4.23: Ρωγμές σε ανοίγματα υπερστεγάσματος [28]	104
Σχήμα 4.24: Μέθοδοι σύλληψης των ρωγμών [44]	105
Σχήμα 4.25: Μεγάλο μήκος ανοίγματος [28]	106
Σχήμα 4.26: Σωστή θέση ανοιγμάτων [28]	106
Σχήμα 4.27: Μέθοδοι πρόληψης ανάπτυξης ρωγμών [28]	107
Σχήμα 4.28: Άλλη μέθοδος πρόληψης ανάπτυξης ρωγμών [28]	107
Σχήμα 4.29: Θέση υπερστεγάσματος ως προς το διάμηκες	108
Σχήμα 4.30: Αρμοί διαστολής στο υπερστεγάσμα	109
Σχήμα 4.31: Τυπική αναπαράσταση αρμού διαστολής [45]	109
Σχήμα 4.32: Πέλμα και κορμός πτυχωτής πλευράς [28]	110
Σχήμα 4.33: Πλευρά με κατακόρυφες πτυχωσεις [28]	110
Σχήμα 4.34: Ευθυγράμμιση εγκάρσιων φρακτών και στύλων [28]	111
Σχήμα 4.35: Συγκόλληση με τη μέθοδο Explosion bonding [46]	112
Σχήμα 5.1: Οι σημαντικότερες μελετητές της αλληλεπίδρασης γάστρας-υπερκατασκευής [47]	115
Σχήμα 5.2: Περιοχές όπου δεν υπάρχουν αξιόλογες πρωτεύουσες τάσεις κατά τον Bruhn [40]	116
Σχήμα 5.3: Κατανομές παραμορφώσεων και τάσεων στο S.S. PRESIDENT WILSON [54]	120
Σχήμα 5.4: Κατακόρυφη ακαμψία στη θεωρία δύο δοκών [40]	121
Σχήμα 5.5: Στοιχείο γάστρας-υπερστεγάσματος στη θεωρία δυο δοκών [40]	122
Σχήμα 5.6: Εξισώσεις ισορροπίας στη θεωρία δυο δοκών [40]	122
Σχήμα 5.7: Υποδιαίρεση γάστρας σε σταθμούς σύμφωνα με τη μέθοδο του Charpan [40]	132
Σχήμα 5.8: Κατανομή των συντελεστών ϕ_A και ϕ_B [40]	135
Σχήμα 5.9: Πραγματικές καμπτικές ροπές και ανάλυση αυτών με τη μέθοδο του Bleich [40]	137
Σχήμα 5.10: Η έννοια του ισοδύναμου πλάτους ελάσματος υπό κάμψη [28]	140
Σχήμα 5.11: Υστέρηση διάτμησης σε κοίλες δοκούς [28]	141
Σχήμα 5.12: Βασική ιδέα της μεθόδου των συζευγμένων δοκών [47]	146
Σχήμα 5.13: Απλούστερη μορφή συζεύξεων μεταξύ των δοκών [47]	147
Σχήμα 5.14: Περισσότερο εξειδικευμένη μορφή συζεύξεων μεταξύ των δοκών [47]	147
Σχήμα 5.15: Ένα στοιχείο της i-οστής δοκού με τις ασκούμενες δυνάμεις [47]	149
Σχήμα 5.16: Στοιχείο διάτμησης για τον καθορισμό της διατμητικής σύζευξης των δοκών [47]	150
Σχήμα 5.17: Στοιχείο επιμήκυνσης για τον καθορισμό της κατακόρυφης σύζευξης [47]	151
Σχήμα 5.18: Εφαρμογή της CBM σε κρουαζιερόπλοιο [72]	153
Σχήμα 5.19: Συνηθέστεροι τύποι στοιχείων για τη μοντελοποίηση του κρουαζιερόπλοιου	155
Σχήμα 5.20: Διάταξη των κόμβων ανάλογα με το στοιχείο [73]	155
Σχήμα 5.21: Κατάταξη των ενισχυτικών [39]	156
Σχήμα 5.22: Επίδραση της μετακίνησης της φρακτής [76]	157
Σχήμα 5.23: Διακριτοποίηση των ενισχυτικών με τη μέθοδο της έκκεντρης δοκού [39]	158
Σχήμα 5.24: Τυπικό ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων [76]	161
Σχήμα 5.25: Τυπικό τοπικό μοντέλο [76]	162

Σχήμα 6.1: Δυο είδη τρόπιδας [29].....	168
Σχήμα 6.2: Τρία είδη εδρών [29]	169
Σχήμα 6.3: Ενίσχυση του πλευρικού κελύφους [29]	170
Σχήμα 6.4: Διαμήκης ενίσχυση καταστρώματος και πλευρικού κελύφους [29]	170
Σχήμα 6.5: Ενίσχυση του διπύθμενου [29].....	172
Σχήμα 6.6: Διάταξη στεγανής φρακτής [29]	173
Σχήμα 6.7: Μηχανισμός ανοίγματος/κλεισίματος στεγανών θυρών [29]	174
Σχήμα 6.8: Διάμηκες σύστημα ενίσχυσης [80].....	176
Σχήμα 6.9: Εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης [80].....	176
Σχήμα 6.10: Εγκάρσια πλευρική ενίσχυση (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος).....	177
Σχήμα 6.11: Μέση τομή κρουαζιερόπλοιου [10]	178
Σχήμα 6.12: Σύνδεση νομέων με το (άνω) κατάστρωμα (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος)	179
Σχήμα 6.13: Διάταξη ενισχυτικών και σωληνώσεων (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος)	180
Σχήμα 6.14: Σύνδεση νομέων με το (κάτω) κατάστρωμα (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος).....	181
Σχήμα 6.15: Φρακτές πυρκαγιάς και στεγανές φρακτές [10]	182
Σχήμα 6.16: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης [81].....	184
Σχήμα 6.17: Σύγκριση δυσθραυστότητας τριών όλκιμων υλικών [82]	185
Σχήμα 6.18: Κρυσταλλική δομή bcc [83]	185
Σχήμα 6.19: Κρυσταλλική δομή fcc [83]	186
Σχήμα 6.20: Γενική μορφή καμπύλης δυσθραυστότητας-θερμοκρασίας [82]	186
Σχήμα 6.21: Επίδραση της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα ορισμένων μετάλλων [82]	187
Σχήμα 6.22: Λεπτομέρεια σύνδεσης αλουμινένιας υπερκατασκευής με χαλύβδινο κατάστρωμα [84] .	192
Σχήμα 6.23: Μέθοδοι ένωση διαφορετικών υλικών [84]	193
Σχήμα 6.24: Συγκόλληση αλουμινίου με χάλυβα και προστασία έναντι γαλβανικής διάβρωσης [84]...	193
Σχήμα 6.25: Κοπή με τόξο πλάσματος [85]	194
Σχήμα 6.26: Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου [86]	195
Σχήμα 6.27: Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου [87]	196
Σχήμα 6.28: Συγκόλληση τριβής με ανάδευση [88]	196
Σχήμα 6.29: Υδρο-στήλη τριβής [89]	197
Σχήμα 6.30: Επιφανειακός καθαρισμός με τριβή [90]	197
Σχήμα 6.31: Συγκόλληση τριβής [91].....	198
Σχήμα 6.32: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων ειδών σύνθετων υλικών [92].....	199
Σχήμα 6.33: Μηχανική συμπεριφορά ισοτροπικών, ορθοτροπικών και ανισοτροπικών υλικών [92]	203
Σχήμα 6.34: Αντιστοιχία κατασκευής πολλαπλών στρώσεων με πυρήνα με δοκό διατομής I [93]	203
Σχήμα 6.35: Ρυθμός εξάπλωσης θερμότητας (kW/m^2) συναρτήσει του χρόνου (min) [94].....	205
Σχήμα 6.36: Αλλαγές στο Norwegian Gem για τη δημιουργία του Norwegian Future [94]	207
Σχήμα 6.37: Θέση σύνθετων υλικών στην κατασκευή του Norwegian Future [94].....	207
Σχήμα 6.38: Αλλαγές στα ανώτερα καταστρώματα του Norwegian Gem [94]	208
Σχήμα 6.39: Μονάδα υγρού χώρου [94]	209
Σχήμα 6.40: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κρουαζιερόπλοιου [94].....	210
Σχήμα 6.41: Μοντελοποίηση κατάστασης Hogging τριών μοντέλων [94]	211
Σχήμα 6.42: Μοντελοποίηση τμήματος για εξέταση της φυσικής συχνότητας [94]	212
Σχήμα 6.43: Το αποτέλεσμα της μελέτης για τη φυσική συχνότητα [94]	212
Σχήμα 7.1: Καμπύλες κατακλισίμων μηκών επιβατηγού πλοίου SS Canberra [21].....	215

Σχήμα 7.2: Μοντέλο HECSALV [95].....	216
Σχήμα 7.3: Πλήρης Μέση Τομή ενός Επιβατηγού Πλοίου [95].....	217
Σχήμα 7.4: Αποτελεσματική Μέση Τομή ενός Επιβατηγού Πλοίου [95].....	217
Σχήμα 7.5: Μέγιστες Αντοχές σε άθικτη κατάσταση σε διάφορες γωνίες εγκάρσιας κλίσης [95].....	219
Σχήμα 7.6: Βλάβη δυο διαμερισμάτων με μεγάλη έκταση ζημιάς περί τη μέση τομή [95].....	220
Σχήμα 7.7: Βλάβη τεσσάρων διαμερισμάτων λόγω ομοεπίπεδης στρεπτικής φόρτισης [95].....	220
Σχήμα 7.8: Βλάβη τριών διαμερισμάτων περί τη μέση τομή – Περίπτωση SOLAS [95].....	220
Σχήμα 7.9: Έκταση Βλάβης [95].....	221
Σχήμα 7.10: Μέγιστη αντοχή σε τρεις καταστάσεις με μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης [95].....	222
Σχήμα 7.11: Μέγιστη αντοχή σε πέντε καταστάσεις [95].....	222
Σχήμα 8.1: Κρουαζιερόπλοιο τύπου ιδιωτικού σκάφους αναψυχής (yacht) [96].....	226
Σχήμα 8.2: Πλωτό θέρετρο [97].....	227
Σχήμα 8.3: Ισχύουσες και μελλοντικές περιοχές ECA [98].....	227
Σχήμα 8.4: Εφαρμογή scrubber σε κρουαζιερόπλοιο [99].....	228
Σχήμα 8.5: Κρουαζιερόπλοια με μεγάλα πανιά [100].....	228
Σχήμα 8.6: Μορφή γαστρών [101].....	229
Σχήμα 8.7: Κρουαζιερόπλοιο με δυο γάστρες, μεγάλο αετό και τηλεσκοπικά φύλλα ανέμου [101].....	230
Σχήμα 8.8: Γάστρα από χάλυβα και υπερκατασκευή από αλουμίνιο [101].....	230
Σχήμα 8.9: Μοντέλο Eoseas [103].....	231
Σχήμα 8.10: Φωτοβολταϊκά στο πλευρικό κέλυφος [104].....	231
Σχήμα 8.11: Μέση τομή μοντέλου ΧρTray [39].....	232
Σχήμα 8.12: Μοντέλο M2CELL [39].....	234
Σχήμα 8.13: Τμήμα ολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του M2CELL [39].....	234
Σχήμα 8.14: Τμήμα ολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μιας παραδοσιακής κατασκευής [39].....	235
Σχήμα 8.15: Σύγκριση των διατμητικών τάσεων σε απόσταση $x=L/4$ [39].....	236
Σχήμα 8.16: Σύγκριση της διατμητικής ροής σε απόσταση $x=L/4$ [39].....	237
Σχήμα 8.17: Σύγκριση των διατμητικών τάσεων και της διατμητικής ροής (λεπτό έλασμα) [39].....	239
Σχήμα 8.18: Σύγκριση των διατμητικών τάσεων και της διατμητικής ροής (παχύ έλασμα) [39].....	239
Σχήμα Α.1: Μερίδιο αγοράς [7].....	251
Σχήμα Γ.1: Γενική διάταξη κρουαζιερόπλοιου AIDA [37].....	256
Σχήμα Γ.2: Γενική διάταξη κρουαζιερόπλοιου GALAXY.....	257
Σχήμα ΣΤ.1: Στοιχεία τεσσάρων περιπτώσεων συνεργασίας γάστρας-υπερστεγάσματος [40].....	268
Σχήμα ΣΤ.2: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στον πυθμένα της γάστρας [40].....	269
Σχήμα ΣΤ.3: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στο ανώτατο κατάστρωμα της γάστρας [40].....	270
Σχήμα ΣΤ.4: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στην κορυφή του υπερστεγάσματος [40].....	271
Σχήμα ΣΤ.5: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στην κορυφή του υπερστεγάσματος [40].....	272
Σχήμα ΣΤ.6: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (1) [40].....	273
Σχήμα ΣΤ.7: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (2) [40].....	273
Σχήμα ΣΤ.8: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (3) [40].....	274
Σχήμα ΣΤ.9: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (4) [40].....	274
Σχήμα Ζ.1: Κυκλικό άνοιγμα υπερκατασκευής και ενίσχυσή του.....	275
Σχήμα Ζ.2: Ορθογωνικό άνοιγμα υπερκατασκευής και ενίσχυσή του.....	275
Σχήμα Ζ.3: Διάταξη ορθογωνικών ανοιγμάτων υπερκατασκευής και ενίσχυσή τους (1/2).....	276
Σχήμα Ζ.4: Διάταξη ορθογωνικών ανοιγμάτων υπερκατασκευής και ενίσχυσή τους (2/2).....	276

Σχήμα Η.1: Σύγκριση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και συζευγμένων δοκών [72]	278
Σχήμα Η.2: Καμπύλη ροπής-εκτροπής σε κατάσταση Hogging [72]	279
Σχήμα Η.3: Καμπύλη ροπής-εκτροπής σε κατάσταση Sagging [72]	279
Σχήμα Η.4: Μορφές αστοχίας σε κατάσταση Hogging [72]	280
Σχήμα Η.5: Μορφές αστοχίας σε κατάσταση Sagging [72]	281
Σχήμα Θ.1: Σχέδιο μέσης τομής συμβατικού κρουαζιερόπλοιου [39].....	282
Σχήμα Ι.1: Μορφοποίηση του εσωτερικού πυθμένα [106].....	283
Σχήμα Ι.2: Ορισμός ανυποστήρικτου μήκους των διαμήκων ενισχυτικών [106].....	291
Σχήμα Ι.3: Αμπάρι και ενδιάμεσα καταστρώματα [106]	292
Σχήμα Ι.4: Σημείο αναφοράς για πλοία με βολβοειδής πλώρα [106]	299
Σχήμα Λ.1: Μέση τομή μοντέλου m2cell [39]	309
Σχήμα Λ.2: Μέση τομή m2cell_1 [39].....	310
Σχήμα Λ.3: Μέση τομή μοντέλου m2cell_2 [39]	311
Σχήμα Λ.4: Μέση τομή μοντέλου m2cell_3 [39]	312
Σχήμα Λ.5: Μέση τομή μοντέλου m2cell_4 [39]	313

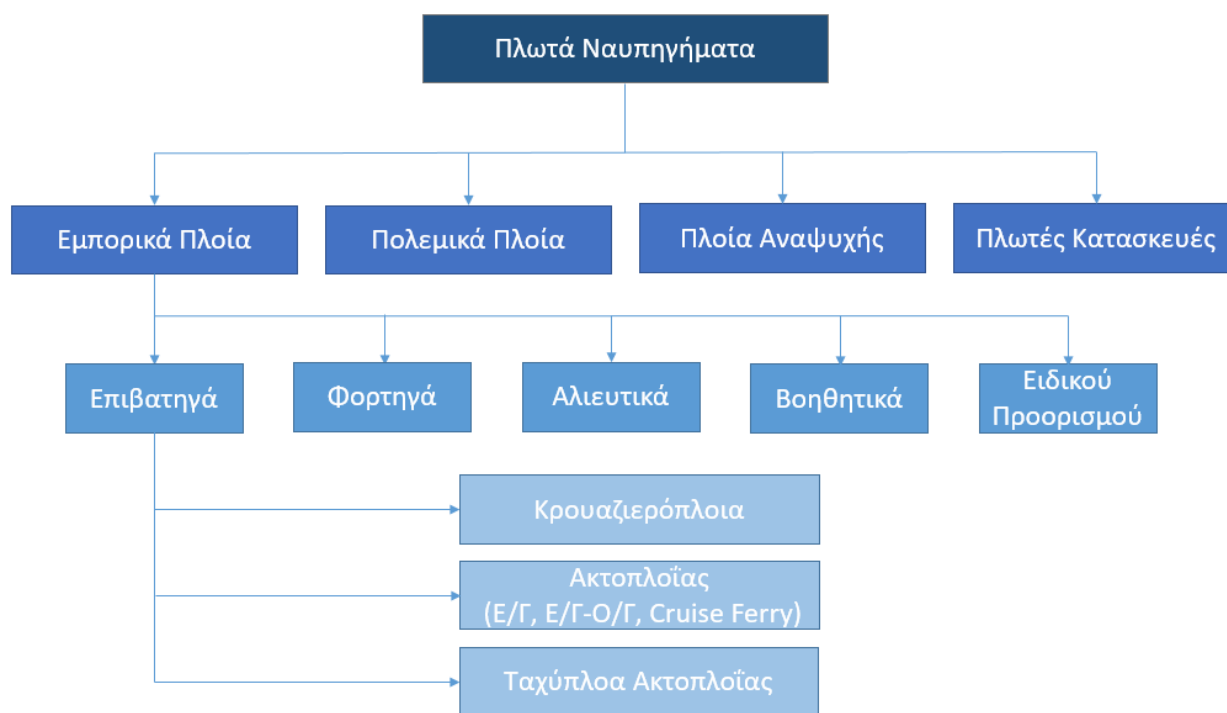
*Αφιερώνεται στους γονείς μου,
Νίκο και Εύη*

1. ΠΛΟΙΑ ΠΟΥ ΠΡΟΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΕΠΙΒΑΤΩΝ

1.1 Ορισμός του επιβατηγού πλοίου

Τα πλωτά ναυπηγήματα κατατάσσονται σε τέσσερις κύριες κατηγορίες: τις πλωτές κατασκευές, τα πολεμικά πλοία, τα πλοία αναψυχής (ιδιωτική χρήση) και τα εμπορικά πλοία. Στην κατηγορία των εμπορικών πλοίων κατατάσσεται οποιοδήποτε πλοίο ναυπηγείται με σκοπό την οικονομική του εκμετάλλευση. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται τα φορτηγά πλοία, τα αλιευτικά, τα βοηθητικά πλοία ναυτιλίας, τα πλοία ειδικού προορισμού και φυσικά τα επιβατηγά πλοία. Ποιο πλοίο, όμως, θεωρείται επιβατηγό;

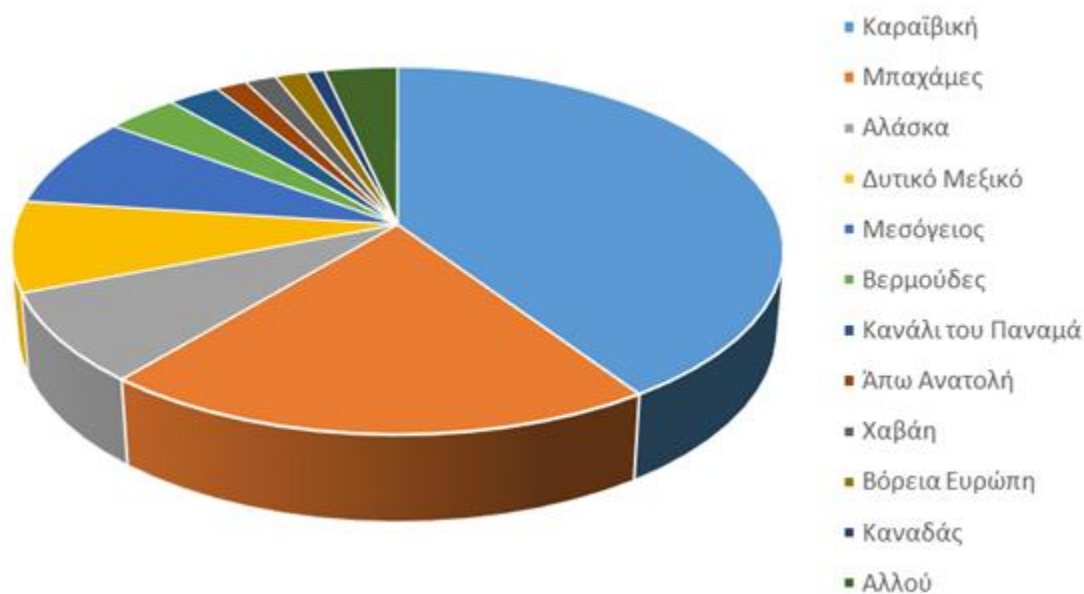
Με τον όρο Επιβατηγό πλοίο (Passenger ship) καλείται το εμπορικό πλοίο το οποίο προορίζεται για τη μεταφορά περισσότερων των 12 επιβατών (εκτός του πληρώματος), σύμφωνα με τους κανονισμούς του Διεθνή Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization – IMO) και της Ασφάλειας Της Ζωής Στη Θάλασσα (Safety Of Life At Sea – SOLAS). Στην κατηγορία των επιβατηγών πλοίων δεν συμπεριλαμβάνονται πια τα φορτηγά πλοία (cargo vessels), τα οποία στο παρελθόν ήταν σύνηθες να μεταφέρουν έναν ορισμένο αριθμό επιβατών (π.χ. πλοία τύπου Liberty).



Σχήμα 1.1: Ιεραρχική κατάταξη των επιβατηγών πλοίων και των υποκατηγοριών τους

Όπως, διαπιστώνεται και από το Σχήμα 1.1 σήμερα, ο διαχωρισμός των επιβατηγών πλοίων γίνεται σε 3 κύριες κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα:

1. Τα Κρουαζιερόπλοια (Cruise ships), τα οποία αποτελούν αμιγή επιβατηγά πλοία (δηλαδή δεν μεταφέρουν οχήματα) και είναι άμεσα συνυφασμένα με την αναψυχή προσφέροντας χαλάρωση και διασκέδαση στους επιβάτες. Τα πλοία αυτά αποτελούν τον κύριο εκπρόσωπο των επιβατηγών πλοίων της τουριστικής ναυτιλίας (βλέπε Σχήμα 1.3). Το ταξίδι με το κρουαζιερόπλοιο διαρκεί συνήθως μερικές μέρες, με το πλοίο στις περισσότερες των περιπτώσεων, να επιστρέφει στο λιμάνι αφητηρίας της κρουαζιέρας (cruise), εκτελώντας κατ' αυτό τον τρόπο τα λεγόμενα κυκλικά ταξίδια (round trips). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι κυριάρχες περιοχές κρουαζιέρας (βλέπε Σχήμα 1.2) είναι τα νησιά της Καραϊβικής και οι Μπαχάμες. Μάλιστα, σε αυτά τα νησιά πραγματοποιούνται κρουαζιέρες όλο το χρόνο, σε αντίθεση για παράδειγμα με την Αλάσκα, τη Δυτική Ακτή του Μεξικού και την περιοχή της Μεσογείου, όπου μπορούν να γίνουν μόνο ένα μέρος του χρόνου. Για παράδειγμα, στη περιοχή της Μεσογείου, οι κρουαζιέρες πραγματοποιούνται κατά κύριο λόγο τους καλοκαιρινούς μήνες. Κρουαζιέρες, επίσης, προγραμματίζονται σε αρκετούς άλλους προορισμούς, όπως ο Αμαζόνιος ή η Ανταρκτική.



Σχήμα 1.2: Προτίμηση επιβατών ανά περιοχή κρουαζιέρας

Φυσικά, τα κρουαζιερόπλοια δεν θα πρέπει να συγχέονται με τα πλοία αναψυχής (yachts), καθώς τα τελευταία δεν προορίζονται για οικονομική εκμετάλλευση άλλα για ιδιωτική χρήση.

2. Τα Επιβατηγά/Οχηματαγωγά της ακτοπλοΐας (Passenger Ferry), τα οποία αποτελούν μέσα θαλάσσιας συγκοινωνίας και μεταφέρουν επιβάτες και οχήματα (βλέπε Σχήμα 1.4). Ένα τέτοιο ταξίδι διαρκεί μερικές ώρες και σε ειδικές περιπτώσεις ενδέχεται να φθάσει τις 48 ώρες, ανάλογα με το λιμάνι (port) αναχώρησης και το λιμάνι προορισμού. Για το λόγο αυτό, τα πλοία αυτά χωρίζονται σε δυο υποκατηγορίες, στα πλοία γραμμών εσωτερικού και στα πλοία γραμμών εξωτερικού. Με γνώμονα το χρόνο ταξιδιού το κάθε πλοίο παρέχει ανάλογες ανέσεις (μεγαλύτερες καμπίνες, πολυτελέστερα σαλόνια, περισσότερα εστιατόρια κλπ.). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές περιπτώσεις, όπου οι παροχές είναι υψηλές (λόγω του αυξημένου χρόνου ταξιδιού), το πλοίο αυτό συχνά καλείται «cruise ferry» (βλέπε Σχήμα 1.5). Σημειώνεται ότι στην ελληνική γλώσσα δεν υπάρχει ακριβής μετάφραση

του όρου αυτού και συνήθως ερμηνεύεται με τη γενική ορολογία «επιβατηγό κρουαζιέρα μικρών αποστάσεων»). Στο σημείο αυτό πρέπει να καταγραφεί ότι τα αμιγή επιβατηγά της ακτοπλοΐας, δηλαδή πλοία για τη μεταφορά αποκλειστικά και μόνο επιβατών για τη μετακίνησή τους και όχι την αναψυχή τους, τείνουν να εκλείψουν. Τη θέση αυτών, έρχεται να καλύψει η τρίτη κατηγορία επιβατηγών πλοίων, τα ταχύπλοα της ακτοπλοΐας.

3. Τα Ταχύπλοα Επιβατηγά/Οχηματαγωγά της ακτοπλοΐας (High Speed Passenger Ferry), τα οποία λειτουργούν ως μέσα θαλάσσιας συγκοινωνίας κοντινών διαδρομών, με κύριο γνώρισμά την υψηλή τους ταχύτητα. Ένα ταξίδι με αυτόν τον τύπο πλοίου διαρκεί μερικές ώρες (συνήθως έως 4 ώρες). Προκειμένου να επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες τα πλοία αυτά είναι ελαφριά και διαθέτουν ισχυρά συστήματα πρόωσης. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται αρκετές υποκατηγορίες, μεταξύ αυτών τα καταμαράν (βλέπε Σχήμα 1.6) και τα υδροπτέρυγα, τα οποία είναι πλοία που μεταφέρουν αποκλειστικά επιβάτες (και όχι οχήματα).

Όπως έγινε κατανοητό, τα επιβατηγά πλοία που μεταφέρουν αποκλειστικά επιβάτες (χωρίς οχήματα) είναι κατά κύριο λόγο, στις μέρες μας, τα κρουαζιερόπλοια και τα ταχύπλοα επιβατηγά της ακτοπλοΐας. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι έχει παρατηρηθεί πως ο όρος επιβατηγό πλοίο (Passenger Ship) στην διεθνή επιστημονική ορολογία συχνά παραπέμπει στο κρουαζιερόπλοιο (Cruise Ship). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ταχύπλοα επιβατηγά της ακτοπλοΐας αποτελούν γρήγορα, ιδιαίτερης μορφολογίας, μικρά πλοία, σε αντίθεση με τα κρουαζιερόπλοια, στα οποία αποδόθηκε ο όρος “Ferry” και όχι “Ship”. Ως εκ τούτου, «Passenger Ships» θεωρούνται τα κρουαζιερόπλοια, ενώ «High Speed Passenger Ferries» τα ταχύπλοα επιβατηγά της ακτοπλοΐας. Παρόλα αυτά, προς αποφυγή σύγχυσης, κρίνεται ορθότερο να μην ταυτιστούν τα επιβατηγά πλοία με τα κρουαζιερόπλοια, καθώς τα πρώτα αποτελούν εξ ορισμού μια πιο ευρεία κατηγορία, τουλάχιστον στην ελληνική επιστημονική ορολογία.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία γίνεται εστίαση στη Μελέτη της Αντοχής της Μεταλλικής Κατασκευής των Κρουαζιερόπλοιων. Για να καταστεί αποδοτική η παρούσα μελέτη, πρώτιστο μέλημα ήταν η αποσαφήνιση του όρου «Κρουαζιερόπλοιο». Παρομοίως, επόμενος στόχος είναι να κατανοήσει ο αναγνώστης το τι νοείται με τον όρο «Μεταλλική Κατασκευή». Το ερώτημα που δημιουργείται είναι το τι περιλαμβάνει αυτή και συγκεκριμένα σε ποια μεταλλικά στοιχεία του πλοίου παραπέμπει;

Με τον όρο «μεταλλική κατασκευή» νοείται το σύνολο των μεταλλικών στοιχείων του πλοίου, που συμμετέχουν ή και όχι στην αντοχή του, εκτός του μηχανολογικού εξοπλισμού (π.χ. αντλίες, σωληνώσεις, μηχανές, καπνοδόχος, κλπ.) και των ενδιαιτήσεων (εφαρμοσμένα/εγκατεστημένα και αποσυνδεδεμένα εξαρτήματα χωρίς τη μηχανολογική εγκατάσταση). Στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου αποτελούν το σύνολο των ελασμάτων και των ενισχυτικών της γάστρας και των υπερκατασκευών-υπερστεγασμάτων, αλλά και άλλα στοιχεία όπως τα στοιχεία έδρασης της κύριας μηχανής, το παραπέτο (δρύφρακτο) κλπ.. Όσον αφορά τα θέματα αντοχής που πραγματεύεται η παρούσα Διπλωματική Εργασία βασικό αντικείμενο μελέτης αποτελεί το σύνολο των ελασμάτων και των ενισχυτικών και φυσικά οι υπερκατασκευές-υπερστεγάσματα του κρουαζιερόπλοιου, καθώς όλα αυτά επηρεάζουν την αντοχή του.

Η μελέτη και ο σχεδιασμός της μεταλλικής κατασκευής του κρουαζιερόπλοιου, αποτελεί τη σύνθετη διαδικασία μέσω της οποίας καθορίζεται η μορφολογία και οι διαστάσεις των μεταλλικών στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε το πλοίο πρωτίστως να είναι ασφαλές, τόσο για τους επιβάτες που μεταφέρει όσο και για το περιβάλλον. Ασφαλές θεωρείται ένα πλοίο όταν είναι ικανό να λειτουργεί υπό τις προβλεπόμενες συνθήκες φόρτισης. Για τις φορτίσεις στις οποίες υποβάλλονται τα πλοία και ειδικώς για τον τρόπο εξέτασης αυτών, θα γίνει λόγος στα επόμενα κεφάλαια.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια ιστορική αναδρομή, προκειμένου να προβληθεί η γέννηση της ιδέας του κρουαζιερόπλοιου, παραθέτοντας τα σημαντικότερα ιστορικά γεγονότα που αποτέλεσαν σταθμούς στην πρόοδο της τεχνολογίας.



Σχήμα 1.3: Κρουαζιερόπλοιο - Allure of the seas [1]



Σχήμα 1.4: Επιβατηγό/Οχηματαγωγό ακτοπλοΐας – Nisos Chios [2]



Σχήμα 1.5: Cruise Ferry – Color Magic [3]



Σχήμα 1.6: High Speed Ferry – Normandie Express [4]

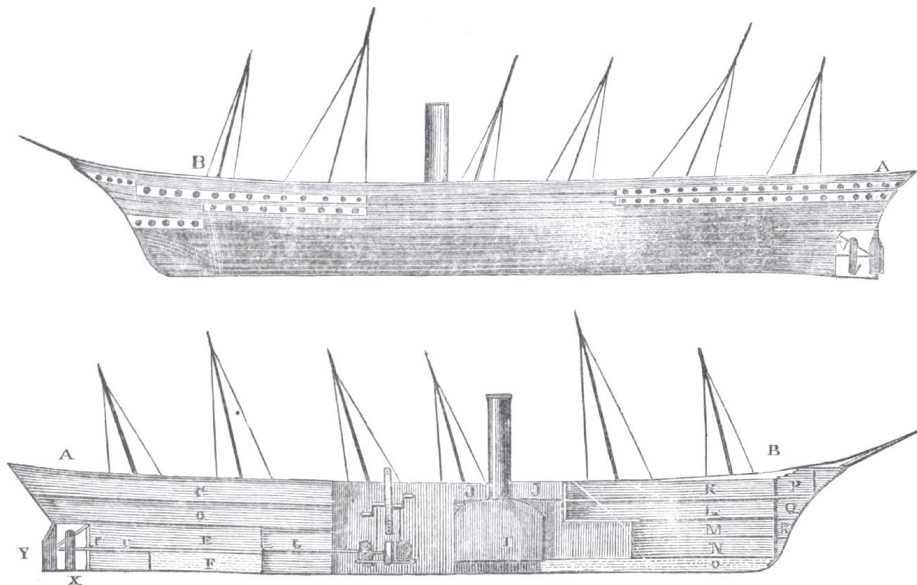
1.2 Ιστορική αναδρομή

Αναμφισβήτητα, τα ταξίδια δια θαλάσσης ξεκινούν από την αρχαιότητα και δεν αποτελούν κάτι το καινοτόμο. Παρόλα αυτά, θα μπορούσε να πει κανείς ότι ο τύπος του επιβατηγού πλοίου έχει μια πρόσφατη ιστορία, η οποία ξεκινά σιγά-σιγά από τις αρχές του 19^{ου} αιώνα.

Τα ταξίδια, τα παλαιότερα χρόνια, ήταν ιδιαίτερα επικίνδυνα και χρονοβόρα, λόγω της σχετικά μη προηγμένης τότε ναυτικής τεχνολογίας και επιστήμης. Συνεπώς αφού η μεταφορά επιβατών ήταν ιδιαίτερα περιορισμένη, δεν υπήρχε άμεση ανάγκη για ανάπτυξη ενός ειδικού τύπου πλοίου. Έτσι, η μεταφορά τους πραγματοποιούνταν με άλλους τύπους πλοίων, όπως για παράδειγμα τα πλοία γενικού φορτίου.

Σημαντικός σταθμός στην ιστορία των επιβατηγών πλοίων αποτελεί το πρώτο μεταλλικό, και συγκεκριμένα σιδερένιο, πλοίο που ναυπηγήθηκε, το «Μεγάλη Βρετανία» εν έτι 1843 (βλέπε Σχήμα 1.7). Το πλοίο αυτό ήταν ατμοκίνητο και εκτελούσε υπερατλαντικά ταξίδια.

Τον επόμενο αιώνα και συγκεκριμένα το 1900 κατασκευάστηκε το πρώτο πλοίο αποκλειστικά για πολυτελή κρουαζιέρα, το οποίο ήταν το «Prinzessin Victoria Luise». Αναμφισβήτητα όμως το πλοίο ορόσημο για την εξέλιξη της σχεδίασης των επιβατηγών πλοίων είναι το υπερωκεάνιο πλοίο γραμμής «RMS Titanic», το οποίο θεωρείται μάλιστα ως ο πρόγονος των σημερινών κρουαζιερόπλοιων (βλέπε Σχήμα 1.8). Ο Τιτανικός ήταν το μεγαλύτερο επιβατηγό πλοίο που είχε ναυπηγηθεί ποτέ, και μάλιστα ένα από τα πρώτα χαλύβδινα πλοία. Παρόλο που δεν ήταν πλοίο κρουαζιέρας (με τη μορφή που τη γνωρίζουμε σήμερα), δεν χωράει αμφιβολία ότι έδωσε νέα κατεύθυνση στη σχεδίαση των επιβατηγών πλοίων αλλά και στην κατασκευή τους, αφού από τότε ο χάλυβας αποτέλεσε το βασικότερο υλικό στη δομή των πλοίων.



Σχήμα 1.7: SS Great Britain [5]



Σχήμα 1.8: RMS Titanic [6]

Ανατρέχοντας στο παρελθόν, σταθμό στη μεταλλική κατασκευή των πλοίων αποτελεί η μετάβαση από την εποχή των ηλώσεων στην εποχή των συγκολλήσεων, περί τα τέλη της δεκαετίας του 1930. Η εξέλιξη αυτή έφερε σημαντικά πλεονεκτήματα στην κατασκευή των πλοίων κυρίως γιατί μείωσε το βάρος της μεταλλικής κατασκευής (περίπου 10-20%), βελτίωσε την αντοχή της σύνδεσης και επέφερε μείωση του συνολικού κόστους κατασκευής.

Τα υπερατλαντικά ταξίδια άκμασαν περί τα τέλη της δεκαετίας του '40, με τα υπερωκεάνια πλοία γραμμής (ocean liners). Παρόλο που τα υπερωκεάνια μετέφεραν επιβάτες, και μάλιστα αρκετούς για την εποχή, δεν μπορούν να θεωρηθούν ως (αμιγή) επιβατηγά καθώς μετέφεραν παράλληλα ποσότητες φορτίου σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους, κάτω από το κύριο κατάστρωμα. Την περίοδο αυτή ο χάλυβας έκανε ολοένα και πιο αισθητή την παρουσία του με τη χρήση του σιδήρου να υποχωρεί ολοένα και περισσότερο. Αυτό δεν είναι καθόλου παράλογο διότι ο χάλυβας χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με το σίδηρο και αυτό είχε φυσικά σαν αποτέλεσμα την παραγωγή πιο αξιόπιστων αλλά και ελαφρύτερων κατασκευών.

Ωστόσο, η ποντοπόρος ναυτιλία (πλοία που εκτελούν υπερπόντιες μεταφορές – σημερινά ωκεανοπόρα) μεταφοράς επιβατών υπέστη γερό πλήγμα περίπου τη δεκαετία του 1950. Σε αυτό συνετέλεσε η τελειοποίηση του αεροπλάνου, η οποία οδήγησε στη δημιουργία αερογραμμών κάτι το οποίο έθεσε ουσιαστικά εκτός αγοράς τα τότε υπερωκεάνια πλοία γραμμής. Οι άνθρωποι πλέον μπορούσαν να ταξιδεύουν στον προορισμό τους με μεγαλύτερη ασφάλεια και πολύ πιο γρήγορα. Αποτέλεσμα αυτού του πλήγματος ήταν η αλλαγή του επιχειρηματικού πλάνου των ναυτιλιακών εταιριών (shipping companies) με εστίαση στον τουρισμό και όχι στη συγκοινωνία (transportation). Τότε, μια διαφορετική βιώσιμη λύση έρχεται να δώσει η κρουαζιέρα.

Η ιστορία της κρουαζιέρας, με τη μορφή που τη γνωρίζουμε σήμερα, αρχίζει στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Έτσι, ξεκινάει η ανάπτυξη της βιομηχανίας της κρουαζιέρας, η οποία άκμασε ιδιαίτερα τη δεκαετία του 1980, καθώς κατασκευάστηκαν πλοία ικανά να μεταφέρουν επιβάτες που ξεπερνούσαν σε αριθμό τους

2000. Έτσι, η κρουαζιέρα καθιερώνεται ως ένας από τους πιο κερδοφόρους παράγοντες της ναυτιλίας και η κατασκευή νεότευκτων πλοίων, ειδικά για το σκοπό αυτό, ανθίζει.

Συνεχίζοντας, ριζικές αλλαγές στο σχεδιασμό των κρουαζιερόπλοιων μπορεί κανείς να παρατηρήσει σε σχεδιάσεις από το 1990 και μετά. Το πρώτο έντονο στοιχείο διαφοροποίησης αποτελεί η έντονη αύξηση του μεγέθους της μεταλλικής κατασκευής τους, με την αύξηση όχι μόνο του μήκους και του πλάτους αλλά και του ολικού ύψους (και όχι του κοίλου το οποίο διαφέρει από το ολικό ύψος του πλοίου) με την προσθήκη πολλαπλών καταστρωμάτων.

Τέλος, στις μέρες μας παρατηρείται η χρήση άλλων υλικών, πέραν του χάλυβα, στην κατασκευή των κρουαζιερόπλοιων, ώστε να ελαττωθεί το βάρος του πλοίου. Αν και ο σημερινός χάλυβας έχει πολύ καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με αυτόν που εφαρμόστηκε αρχικά, αυτό δεν αποτρέπει τους μελετητές να συνεχίσουν την αναζήτησή άλλων μεταλλικών, και μη, υλικών στην κατασκευή των πλοίων. Τέτοια είναι το αλουμίνιο και τα κράματα αυτού, το τιτάνιο αλλά και προηγμένα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, οργανικής μήτρας ή κεραμικής μήτρας (χρήση κυρίως στην αεροδιαστημική).

1.3 Κατάσταση στην αγορά της κρουαζιέρας

Η σχεδίαση και η κατασκευή του επιβατηγού πλοίου αλλά και των υπόλοιπων τύπων πλοίου, εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζονται κυρίως από τις εκάστοτε ανάγκες της αγοράς. Μάλιστα, στις ανάγκες αυτές συνήθως προσαρμόζονται και οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, τις οποίες οι ειδικοί καλούνται να μεταφράσουν σε τεχνικά χαρακτηριστικά.

Σήμερα η κατάσταση της αγοράς στον τομέα της κρουαζιέρας είναι ενθαρρυντική για επενδύσεις, τουλάχιστον όσον αφορά το παγκόσμιο επίπεδο. Σύμφωνα με επίσημα στατιστικά, για το «2014 η παγκόσμια βιομηχανία της κρουαζιέρας υπολογίστηκε στα 39.6 δισεκατομμύρια \$ καθαρά έσοδα (με αύξηση κατά 6.9% μέσα στο 2014) και ένα ετήσιο ποσό της τάξης των 22.2 εκατομμυρίων μεταφερόμενων επιβατών (με αύξηση κατά 3.2% μέσα στο 2014)» [7]. Το ποσοστό αναμένεται να αυξηθούν και να φτάσουν μέσα στο 2018 τους 24 εκατομμύρια μεταφερόμενους επιβάτες ετησίως. Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται μια πλήρης εικόνα της αγοράς της κρουαζιέρας για το 2014. Φυσικά, αυτό είναι κάτι το οποίο ενισχύει την επιθυμία των πλοιοκτητών να παραγγείλουν νέα πλοία. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται διάφορες νέες παραγγελίες κρουαζιερόπλοιων.

Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία, η πλειοψηφία των επιβατών επιλέγουν ταξίδια από έξι έως οκτώ ημέρες, ενώ ελάχιστοι επιβάτες επιλέγουν κρουαζιέρες άνω των δεκαοκτώ ημερών (βλέπε Σχήμα 1.9). Η πληροφορία αυτή οδηγεί τους πλοιοκτήτες προς τη ναυπήγηση μικρομεσαίων κρουαζιερόπλοιων, τα οποία εκτελούν ταξίδια σχετικά μικρής διάρκειας (έως οκτώ ημέρες). Στον Πίνακα 1.2, παρουσιάζεται η κατανομή των κρουαζιερόπλοιων με βάση το μέγεθός τους, σύμφωνα με μελέτη του 2006.

Στον Πίνακα 1.2 διαπιστώνεται ότι τα περισσότερα κρουαζιερόπλοια είναι μικρού και μεσαίου μεγέθους. Βέβαια, δεν θα πρέπει να αμελούνται τα στοιχεία της έκτης στήλης (Μέσος Όρος Ηλικίας), τα οποία υποδηλώνουν ότι ναυπηγούνται σταδιακά μεγάλα και υπερβολικά μεγάλα πλοία, σε αντίθεση με τα μικρότερα, όπου τείνουν να εξαλειφθούν. Έτσι, γίνεται κατανοητό ότι παρά τη στροφή των περισσότερων πλοιοκτητών προς πλοία μικρομεσαίου μεγέθους, αυτό δεν αποτρέπει κάποιους άλλους να στραφούν προς τα μεγάλα και πιο εντυπωσιακά, για τους επιβάτες, κρουαζιερόπλοια. Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζονται 10 από τα μεγαλύτερα κρουαζιερόπλοια παγκοσμίως.

Είναι φυσικό ότι καθώς το μέγεθος ενός πλοίου αυξάνεται, δημιουργούνται αρκετά προβλήματα τα οποία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής και αξιολόγησης. Ενδεικτικά αναφέρονται κάποια από τα προβλήματα που καλείται να επιλύσει ο μελετητής ναυπηγός, τα οποία είναι η ευστάθεια, οι ταλαντώσεις

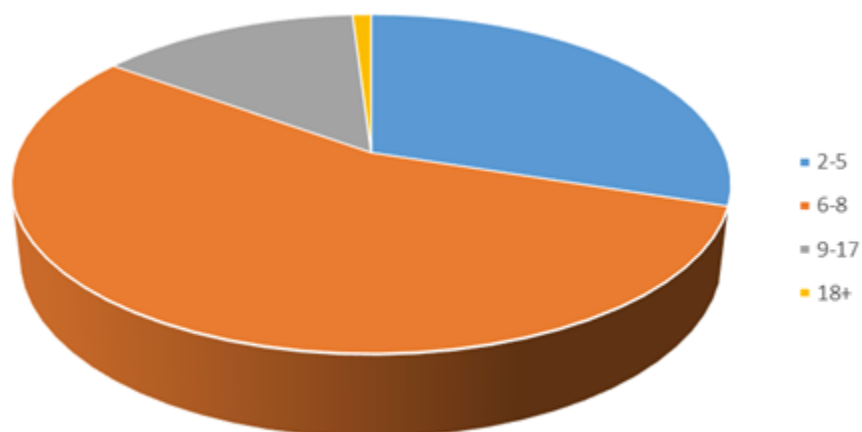
και η αντοχή. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα διάφορα ζητήματα των επιβατηγών πλοίων είναι απαραίτητο να κατανοηθούν οι ιδιαιτερότητες τους. Μάλιστα, οι ιδιαιτερότητες στην κατασκευή των κρουαζιερόπλοιων που προκύπτουν πρέπει να εξεταστούν και να αποφανθεί ο ναυπηγός σε συνεργασία με το Νηογνώμονα αν το πλοίο είναι ασφαλές και αξιόπλοο. Κατά αυτόν τον τρόπο, θα πρέπει σε πρώτη φάση να αποσαφηνιστούν οι στόχοι της σχεδίασης αυτών των πλοίων, οι οποίοι προκύπτουν από τις ανάγκες του φορτίου, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι επιβάτες και οι παρεχόμενες προς αυτούς υπηρεσίες.

Πίνακας 1.1: Νέες παραγγελίες κρουαζιερόπλοιων [8]

2016						
Ναυτιλιακή Εταιρεία	Όνομα Πλοίου	Ναυπηγείο	Χωρητικότητα	Κουκέτες	Παράδοση	Κόστος
Regent Seven Seas Cruises	Seven Seas Explorer	Fincantieri	54.000	738	Winter	\$450m
Viking Cruises	Viking Sky	Fincantieri	47.800	930	Summer	\$308m
Viking Cruises	Viking Sea	Fincantieri	47.800	930	Spring	\$308m
TUI Cruises	Mein Schiff 5	Meyer Turku Yard	99.700	2500	Winter	\$515m
Holland America Line	unnamed	Fincantieri	99.500	2660	February	\$518m
AIDA Cruises	unnamed	Mitsubishi HI	125.000	3250	March	\$650m
Carnival Cruise Lines	Carnival Vista	Fincantieri	135.000	4000	April	\$780m
Royal Caribbean International	Oasis 3	STX France	227.700	5400	June	\$1.3bn
Seabourn	unnamed	Fincantieri	40.350	604	Autumn	270m
Genting HK (Star Cruises)	unnamed	Meyer Werft	150.000	3364	October	\$960m
2017						
Ναυτιλιακή Εταιρεία	Όνομα Πλοίου	Ναυπηγείο	Χωρητικότητα	Κουκέτες	Παράδοση	Κόστος
MSC Cruises	unnamed	STX France	167.600	4500	January	\$1032m
Princess Cruises	unnamed	Fincantieri	143.000	3560	Winter	\$804m
TUI Cruises	Mein Schiff 6	Meyer Turku Yard	99.700	2500	Winter	\$515m
Norwegian Cruise Line	Norwegian Bliss	Meyer Werft	163.000	4200	Spring	\$845m
Genting HK (Star Cruises)	unnamed	Meyer Werft	150.000	3364	October	\$960m
MSC Cruises	unnamed	Fincantieri	154.000	4140	November	\$953m
2018						
Ναυτιλιακή Εταιρεία	Όνομα Πλοίου	Ναυπηγείο	Χωρητικότητα	Κουκέτες	Παράδοση	Κόστος
Royal Caribbean International	Oasis 4	STX France	227.700	5400	Winter	\$1.4m
Norwegian Cruise Line	Breakaway-Plus	Meyer Werft	164.600	4200	Spring	\$1087m
MSC Cruises	unnamed	Fincantieri	154.000	4140	May	\$953m
2019						
Ναυτιλιακή Εταιρεία	Όνομα Πλοίου	Ναυπηγείο	Χωρητικότητα	Κουκέτες	Παράδοση	Κόστος
MSC Cruises	unnamed	STX France	167.600	4500	Spring	\$1032m
Norwegian Cruise Line	Breakaway-Plus	Meyer Werft	164.600	4200	Autumn	\$1087m

Ποιες είναι όμως οι ανάγκες-επιθυμίες των επιβατών και κατ' επέκταση, ποιες είναι οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη και ποιοι, εν τέλει, στόχοι σχεδίασης (design); Τι προβλήματα δημιουργεί η σχεδίαση στην αντοχή του πλοίου; Πώς μελετάμε τα προβλήματα αυτά και πώς τα αντιμετωπίζουμε; Τι προβλέπουν οι Νηογνώμονες για την ενίσχυση της κατασκευής; Τα ερωτήματα αυτά θα απαντηθούν εκτενώς και ο εκάστοτε αναγνώστης θα είναι ικανός σε πρώτη φάση να αναγνωρίζει τις ιδιαιτερότητες των επιβατηγών πλοίων και έπειτα να υποψιάζεται τις κρίσιμες περιοχές της μεταλλικής κατασκευής από τη σκοπιά της αντοχής. Προκειμένου να επιτευχθεί το τελευταίο, έχουν καταγραφεί μεθοδολογίες εκτίμησης της

αντοχής, ώστε να μπορεί ο ενδιαφερόμενος μελετητής να διαστασιολογεί κατάλληλα τη δομή του πλοίου, πραγματοποιώντας τη βέλτιστη κατασκευαστική σχεδίαση (structural design).



Σχήμα 1.9: Προτίμηση επιβατών ανά ημέρες κρουαζιέρας

Πίνακας 1.2: Κατανομή Κρουαζιερόπλοιων με βάση το μέγεθός τους [9]

Μέγεθος Κρουαζιερόπλοιου	Αριθμός Επιβατών	Αριθμός Πλοίων	Αριθμός Κουκετών	% της Συνολικής Χωρητικότητας	Μέσος Όρος Ηλικίας
Πολύ Μικρό	0 - 99	49	3,328	1.0	28.1
Μικρό	100 - 499	91	21,120	6.3	23.2
Μεσαίο	500 - 1,199	71	54,901	16.4	25.2
Μεγάλο	1,200 - 1,999	69	113,078	33.7	11.5
Πολύ Μεγάλο	2,000 - 2,999	49	114,322	34.1	6.3
Υπερβολικά Μεγάλο	3,000 +	9	28,402	8.5	2.8
Συνολικά		338	335,151	100.0	18.9

Πίνακας 1.3: Τα 10 μεγαλύτερα κρουαζιερόπλοια για το 2015 [8]

Κατάταξη	Πλοίο	Έτος Ναυπήγησης	Ολική Χωρητικότητα	Μήκος	Πλάτος Ισάλου	Επιβάτες
1	Allure of the seas	2010	225282	362m	47m	5412
2	Oasis of the seas	2009	225282	362m	47m	5412
3	Quantum of the seas	2014	168666	347m	41m	4180
4	Anthem of the seas	2015	168666	347m	41m	4180
5	Norwegian escape	2015	164600	326m	41m	4248
6	Norwegian epic	2010	155873	330m	41m	4100
7	Freedom of the seas	2006	154407	339m	39m	3634
8	Liberty of the seas	2007	154407	339m	39m	3634
9	Independence of the seas	2008	154407	339m	39m	3634
10	Queen mary II	2004	148528	345m	41m	2592

1.4 Ανακεφαλαίωση

Με το πέρας του 1^{ου} Κεφαλαίου της Διπλωματικής Εργασίας έγινε σαφές ότι Επιβατηγό πλοίο είναι το εμπορικό πλοίο το οποίο προορίζεται για τη αποκλειστικά μεταφορά περισσότερων των 12 επιβατών (εκτός του πληρώματος).

Τα αμιγή επιβατηγά πλοία είναι τα κρουαζιερόπλοια, τα οποία είναι άμεσα συνυφασμένα με την αναψυχή προσφέροντας χαλάρωση και διασκέδαση στους επιβάτες. Τονίζεται ότι τα κρουαζιερόπλοια δεν θα πρέπει να συγχέονται με τα πλοία αναψυχής (yachts), καθώς τα τελευταία δεν προορίζονται για οικονομική εκμετάλλευση άλλα για ιδιωτική χρήση. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι ο όρος επιβατηγό πλοίο (Passenger Ship) στην διεθνή επιστημονική ορολογία συχνά παραπέμπει στο κρουαζιερόπλοιο (Cruise Ship), κάτι το οποίο στην ελληνική ορολογία δεν συμβαίνει απόλυτα. Ωστόσο κρίνεται πιο σωστό να μην ταυτιστούν τα επιβατηγά πλοία με τα κρουαζιερόπλοια, καθώς τα πρώτα αποτελούν εξ ορισμού μια πιο ευρεία κατηγορία.

Όσον αφορά την ιστορία των κρουαζιερόπλοιων, θα πρέπει να καταγραφεί ότι αυτή ξεκίνησε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Παλαιότερα, τα πολυτελή επιβατηγά πλοία (π.χ. Τιτανικός) χρησίμευαν ως μέσα μεταφοράς και όχι ως αναψυχή, πραγματοποιώντας υπερπόντια ταξίδια. Ωστόσο, με την ανάπτυξη των εναέριων μεταφορών το ταξίδι δια θαλάσσης περιορίστηκε και τη θέση του πήρε η κρουαζιέρα. Σταδιακά, η κρουαζιέρα καθιερώθηκε ως ένας από τους πιο κερδοφόρους παράγοντες της ναυτιλίας και η κατασκευή νεότευκτων πλοίων, ειδικά για το σκοπό αυτό, άθισε. Με την πάροδο των ετών πραγματοποιήθηκαν πολλές αλλαγές στα πλοία αυτά, με τη κυριότερη από αυτές η έντονη αύξηση του μεγέθους της μεταλλικής κατασκευής τους. Το υπερστέγασμα αυξήθηκε κατά το μήκος, το πλάτος αλλά και το ύψος, με την προσθήκη πολλαπλών καταστρωμάτων. Ακόμη, παρατηρήθηκαν αλλαγές και στο υλικό της κατασκευής, ώστε να ελαττωθεί το βάρος του πλοίου και να είναι εφικτή η μεταφορά ακόμα περισσότερων επιβατών. Τέτοια υλικά είναι, πέραν του αλουμινίου, τα σύνθετα υλικά.

Σήμερα η κατάσταση της αγοράς στον τομέα της κρουαζιέρας είναι ενθαρρυντική για επενδύσεις, τουλάχιστον όσον αφορά το παγκόσμιο επίπεδο. Μάλιστα, αναμένεται να αυξηθεί ο αριθμός των ενδιαφερόμενων επιβατών και να φτάσει μέσα στο 2018 τους 24 εκατομμύρια μεταφερόμενους επιβάτες ετησίως. Φυσικά, αυτό είναι κάτι το οποίο ενισχύει την επιθυμία των πλοιοκτητών να παραγγείλουν νέα πλοία. Λόγω του ότι η πλειοψηφία των επιβατών επιλέγουν ταξίδια από έξι έως οκτώ ημέρες, η πλειοψηφία των κρουαζιερόπλοιων είναι μικρομεσαίου μεγέθους, τα οποία εκτελούν κοντινά ταξίδια σχετικά μικρής διάρκειας. Ωστόσο, για λόγους ανταγωνιστικότητας αρκετές ναυτιλιακές εταιρείες επιλέγουν τα μεγάλα κρουαζιερόπλοια. Η ναυπήγηση όλο και μεγαλύτερων πλοίων είναι επόμενο να δημιουργεί προβλήματα στους ναυπηγούς μελετητές, όπως είναι η ευστάθεια, οι ταλαντώσεις και η αντοχή. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να εξετάζονται προσεχτικά, τηρώντας τις απαιτήσεις των Νηογνομόνων, ώστε τα πλοία να είναι ασφαλή και αξιόπλοια.

2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

2.1 Απαιτήσεις πλοιοκτῆτη και αναγωγή σε τεχνικά χαρακτηριστικά

Ο μελετητής ναυπηγός καλείται να σχεδιάσει ένα πλοίο σύμφωνα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πλοιοκτῆτη (owner). Δουλειά του είναι να αναγάγει τις απαιτήσεις αυτές σε τεχνικά χαρακτηριστικά με το μικρότερο δυνατό κόστος ναυπήγησης. Ποιες είναι, λοιπόν, οι απαιτήσεις για ένα τέτοιο κρουαζιερόπλοιο;

Οι απαιτήσεις για το συγκεκριμένο τύπο πλοίου συνήθως αναφέρονται:

- Στον Αριθμό των Επιβατών (Μεταφορική Ικανότητα)
- Στην Έκταση και στην Ποιότητα της Ενδιαίτησης και των Κοινόχρηστων Χώρων (Υπηρεσίες)
- Στην Υπηρεσιακή Ταχύτητα και στην Ισχύ των Μηχανών
- Στο Είδος Δρομολογίου

Αξίζει να καταγραφεί ότι στην περίπτωση των επιβατηγών/οχηματαγωγών, προστίθεται ακόμη μια απαίτηση, αυτή του αριθμού των οχημάτων (Ι.Χ., φορτηγά, κλπ.).

Η μεταφορική ικανότητα και οι υπηρεσίες στο πλοίο αποτελούν τις κυριότερες απαιτήσεις σχεδίασης, με τις τελευταίες να ποικίλουν σημαντικά με το μήκος του ταξιδιού. Έτσι, στα μικρά ταξίδια δεν χρειάζονται καμπίνες, παρά μόνο καθιστικά, ενώ όσο ο χρόνος παραμονής στο πλοίο αυξάνεται, οι επιβάτες θέλουν περισσότερο χώρο και καλύτερες υπηρεσίες. Μάλιστα, σε ταξίδια που διαρκούν περισσότερο από 12 ώρες, πρέπει να υπάρχουν, υποχρεωτικά, διαθέσιμες καμπίνες για όλους τους επιβάτες.

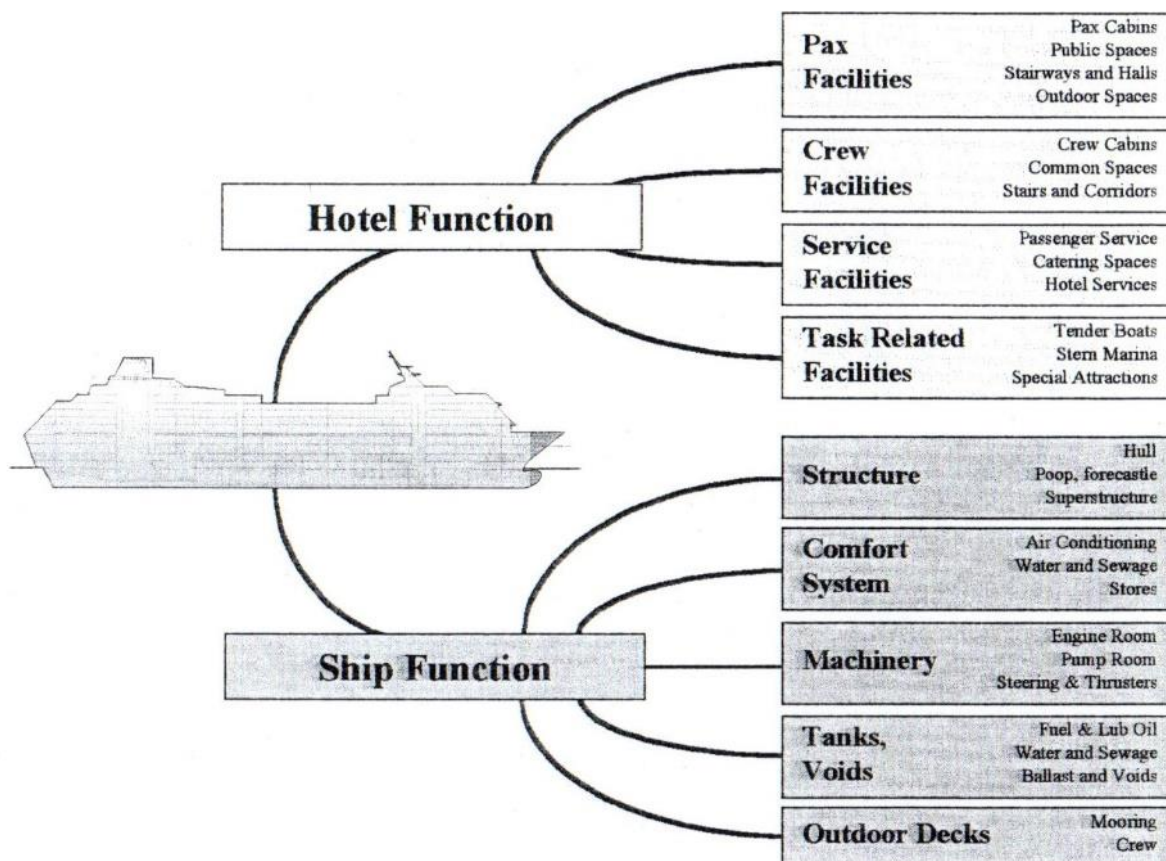
Από την πλευρά της μεταφορικής ικανότητας, στο «νεκρό βάρος» (Deadweight – DWT) σε ένα πλοίο κρουαζιέρας περιλαμβάνεται το βάρος των επιβατών και του πληρώματος, των αποσκευών τους, των εφοδίων, του φρέσκου νερού, των καυσίμων και των λιπαντικών. Ωστόσο, σε αντίθεση με άλλα εμπορικά πλοία, το «νεκρό βάρος» δεν είναι καλός δείκτης της μεταφορικής ικανότητας ενός κρουαζιερόπλοιο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η «Ολική Χωρητικότητα – Gross Tonnage».

Το ωφέλιμο φορτίο (Payload) ενός πλοίου, το φορτίο δηλαδή για το οποίο πληρώνεται η ναυτιλιακή εταιρεία αποτελεί μέρος του «Νεκρού Βάρους». Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, το ωφέλιμο φορτίο είναι οι επιβάτες. Αυτό φυσικά δεν σημαίνει ότι οι πλοιοκτῆτες αποκομίζουν κέρδη μόνο από τα εισιτήρια επιβίβασης, αν και στην περίπτωση των «Passenger Ferries» και των «High Speed Passenger Ferries» τα έσοδα της εταιρείας οφείλονται κυρίως σε αυτά. Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, οι εισπράξεις της πλοιοκτῆτριας εταιρείας αυξάνονται και από τις δραστηριότητές των επιβατών εντός του πλοίου, οι οποίες εξυπηρετούνται μέσω του λεγόμενου «ξενοδοχείου του πλοίου». Οι «λειτουργίες του ξενοδοχείου» αποτελούνται από το σύνολο των χώρων ενδιαίτησης (π.χ. καμπίνες επιβατών), των χώρων εστίασης (π.χ. εστιατόρια, σαλόνια), των βοηθητικών χώρων (π.χ. κλιμακοστάσια, ασανσέρ) και των υπολοίπων χώρων. Προκειμένου οι λειτουργίες του ξενοδοχείου να είναι αρκετές και ποικίλες, απαιτούνται πολλά καταστρώματα και επαρκείς εσωτερικοί χώροι. Μάλιστα, για το λόγο αυτό τα τελευταία αποτελούν δύο από τους κυριότερους παράγοντες για τη σχεδίαση ενός κρουαζιερόπλοιο.

Βέβαια, έναν επιβάτη δεν τον ενδιαφέρουν μονάχα οι παροχές που προσφέρει το εκάστοτε κρουαζιερόπλοιο. Καθοριστικό ρόλο για την προτίμηση του επιβάτη αποτελεί η αξιοπιστία και η

αξιοπλοΐα του εκάστοτε πλοίου. Ωστόσο, αυτό δεν είναι κάτι το οποίο γίνεται εύκολα αντιληπτό από τον επιβάτη. Δεν θα μπορούσε ένας επιβάτης να αναγνωρίσει αν ένα πλοίο είναι σωστά σχεδιασμένο από άποψη ευστάθειας, αν έχει σωστά διαμορφωμένες τις εξόδους διαφυγής, επαρκή συστήματα πυρασφάλειας κλπ.. Όμως, ένας επιβάτης μπορεί να απορρίψει ένα κρουαζιερόπλοιο λόγω της κακής φήμης αυτού ή της εταιρείας που το έχει. Για παράδειγμα, εάν στο στόλο μιας ναυτιλιακής καταγραφούν βλάβες που οδήγησαν σε καθυστερήσεις ή και ματαιώσεις ταξιδιών, προφανώς ένας επιβάτης δεν θα προτιμήσει να ταξιδέψει με κάποιο από τα πλοία αυτής. Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμα πιο έντονο σε περιπτώσεις ατυχημάτων, όπου υπήρξαν και ανθρώπινες απώλειες. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται κάποια από τα μεγαλύτερα ατυχήματα επιβατηγών πλοίων, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει ότι κανένα πλοίο δεν είναι απόλυτα ασφαλές μιας και δεν τίθεται μόνο θέμα καλής κατασκευής αλλά και θέμα ανθρωπίνου παράγοντα (π.χ. προσάραξη). Συνεπώς γίνεται αντιληπτό ότι μέλημα ενός επιβάτη είναι να νιώθει ασφαλής στη διάρκεια της κρουαζιέρας. Την ανάγκη αυτή εξασφαλίζει αρχικά μια σωστή μελέτη και σχεδίαση του πλοίου (πριν τη ναυπήγηση) και έπειτα οι «λειτουργίες του πλοίου» (μετά τη ναυπήγηση). Φυσικά, οι τελευταίες δεν πρέπει να συγχέονται με τις λειτουργίες του ξενοδοχείου (βλέπε και Σχήμα 2.1). Οι «λειτουργίες του πλοίου» σχετίζονται με την ασφαλή και άνετη «μεταφορά του ξενοδοχείου» από λιμάνι σε λιμάνι. Στις λειτουργίες αυτές για παράδειγμα περιλαμβάνονται οι κινητήρες πρόωσης, οι δεξαμενές αποθήκευσης καυσίμου και τα συστήματα κλιματισμού και θέρμανσης.

Τα παραπάνω συνοψίζονται με τη βοήθεια του Σχήμα 2.1, στο οποίο παρουσιάζεται ο διαχωρισμός των «λειτουργιών του ξενοδοχείου» και των «λειτουργιών του πλοίου».



Σχήμα 2.1: Διαφοροποίηση του ξενοδοχείου του πλοίου από τη γάστρα του πλοίου [10]

2.2 Αρχές σχεδίασης των πλοίων

2.2.1 Εισαγωγή

Έχοντας κατανοήσει τους σχεδιαστικούς στόχους των κρουαζιερόπλοιων, τίθεται το εξής ερώτημα: Πώς πρέπει να διαμορφωθεί η δομή του πλοίου, προκειμένου να επιτυγχάνονται οι σχεδιαστικοί στόχοι; Σε απάντηση του ζητήματος αυτού, κρίνεται απαραίτητο να δοθεί μια παρουσίαση των παραμέτρων που συντελούν στη διαμόρφωση της κατασκευής του. Θεωρείται μάλιστα υψίστης σημασίας η γνώση των αιτιών μιας αλλαγής στις παραμέτρους σχεδίασης καθώς καθίσταται εφικτό με κατάλληλες τροποποιήσεις από το μελετητή να προκληθεί για παράδειγμα μείωση των τάσεων της κατασκευής, μείωση του κόστους κατασκευής, αύξηση της μεταφορικής ικανότητας, βελτίωση της ευστάθειας κλπ..

2.2.2 Κύριες Διαστάσεις

Μήκος

Ξεκινώντας από το μήκος του πλοίου, το μήκος επιλέγεται συνήθως με τα εξής δυο βασικά οικονομικά κριτήρια:

- «ελάχιστο κόστος ναυπήγησης»,
- «ελάχιστος απαιτούμενος ναύλος ανά τόνο φορτίου (Required Freight Rate)».

Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει το «μήκος ελάχιστου κόστους ναυπήγησης» [11] είναι:

$$L[m] = \Delta^{0.3}[t] * V^{0.3}[kn] * C \quad (2.1)$$

όπου:

- $C = 3.2$ για $C_B = \frac{0.145}{Fn}$
- $C = 3.2 * \left[(C_B + 0.5) / \left(\frac{0.145}{Fn} + 0.5 \right) \right]$ για $C_B \neq \frac{0.145}{Fn}$
- Δ , το εκτόπισμα του πλοίου
- V , η υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου

Από την άνω σχέση διαπιστώνεται ότι αύξηση της πολυπλοκότητας της γάστρας του πλοίου (δηλαδή μείωση του συντελεστή γάστρας) συνιστά μείωση του ολικού μήκους, προκειμένου η κατασκευή να είναι βέλτιστη από οικονομικής πλευράς. Γενικώς, αύξηση του μήκους (για σταθερό εκτόπισμα) επιφέρει:

- Αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής (κυρίως για λόγους αντοχής) και κατά συνέπεια μείωση του ωφέλιμου φορτίου. Προφανώς προκαλείται και αύξηση του κόστους της μεταλλικής κατασκευής.
- Μείωση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης με συνέπεια τη μείωση του κόστους μηχανολογικού εξοπλισμού αλλά από την άλλη την αύξηση του ωφέλιμου φορτίου.

- Αύξηση του βάρους εξοπλισμού και ως εκ τούτου αύξηση του κόστους εξοπλισμού με παράλληλη μείωση του ωφέλιμου φορτίου.

Πίνακας 2.1: Κάποια από τα μεγαλύτερα ατυχήματα των επιβατηγών πλοίων παγκοσμίως [12]

Όνομα Πλοίου	Τοποθεσία	Έτος	Τύπος Πλοίου	Είδος Ατυχήματος	Θάνατοι
Titanic	Ατλαντικός Ωκεανός	1912	Passenger (liner)	Σύγκρουση	1500
Wahine	Νέα Ζηλανδία	1968	Ferry	Κακοκαιρία	
Don Juan	Φιλιππίνες	1980	Ferry	Σύγκρουση	
Prinsendam	ΗΠΑ	1980	Passenger	Πυρκαγιά	
Mikhail Lermontov	Νέα Ζηλανδία	1986	Cruise	Προσάραξη	
Dona Paz / Victor	Φιλιππίνες	1987	Ferry	Σύγκρουση	4386
Herald of Free Enterprise	Βέλγιο	1987	RO/RO	Κατάκλιση & Ανατροπή	193
Marchioness	Αγγλία	1989	Passenger	Σύγκρουση	
Scandinavian Star	Νορβηγία	1990	Ferry	Πυρκαγιά	158
Starship Majestic	Μπαχάμες	1991	Cruise	Πυρκαγιά	
Eurosun	Κανάρια Νησιά	1991	Cruise	Πυρκαγιά	
Queen Elizabeth II		1992	Cruise	Προσάραξη	
Neptune	Αϊτή	1993	Ferry	Βυθιση	2000
Argo Commodore	Σαν Φρανσίσκο	1994	Passenger	Πυρκαγιά	
Estonia	Βαλτική	1994	RO/RO	Κατάκλιση	852
Achille Lauro	Ινδικός Ωκεανός	1994	Cruise	Σύγκρουση, Πυρκαγιά	
Celebration	Καραϊβική	1995	Cruise	Πυρκαγιά	
Royal Majesty	ΗΠΑ	1995	Cruise	Προσάραξη	
Saint Malo	Τζέρσει	1995	High Speed Ferry	Προσάραξη	
Star Princess	ΗΠΑ	1995	Passenger	Προσάραξη	
Regent Star	ΗΠΑ	1995	Cruise	Πυρκαγιά	
Golden Princess	Καναδάς	1996	Cruise	Πυρκαγιά	
Universe Explorer	ΗΠΑ	1996	Cruise	Πυρκαγιά	
Discovery I	Μπαχάμες	1996	Cruise	Πυρκαγιά	
Vistafjord	Μπαχάμες	1997	Cruise	Πυρκαγιά	
Romantica	Μεσόγειος	1997	Cruise	Πυρκαγιά	
Monarch of the Seas	Καραϊβική	1998	Cruise	Προσάραξη	
Ecstasy	ΗΠΑ	1998	Cruise	Πυρκαγιά	
Princess of the Orient	Φιλιππίνες	1998	Ferry	Κακοκαιρία	
Sally Albatross	Φινλανδία	1999	Ferry	Προσάραξη	
Sea Diamond	Ελλάδα	2007	Cruise	Προσάραξη	
Costa Concordia	Ιταλία	2012	Cruise	Προσάραξη	32
Norman Atlantic	Αδριατική Θάλασσα	2014	RO/RO	Πυρκαγιά	9

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, διαπιστώνεται ότι γενικώς αύξηση του μήκους για σταθερό εκτόπισμα επιφέρει αύξηση του συνολικού κόστους ναυπήγησης και μείωση του ωφέλιμου φορτίου.

Όσον αφορά την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής, η επίδραση της αύξησης του μήκους προσεγγίζεται με τη βοήθεια δυο εξεταζόμενων σεναρίων. Το πρώτο είναι η αύξηση του μήκους (επί έναν

αριθμό λ) με σταθερό το εκτόπισμα Δ , το πλάτος B , το βύθισμα T και την επιφάνεια της μέσης τομής A_M , η οποία οδηγεί σε:

- Αύξηση των αναπτυσσόμενων ροπών M και συνεπώς των τάσεων σ , αφού $L_1 = \lambda * L_0$ και $M_1 = \lambda * M_0$ και συνεπώς ισχύει ότι $\sigma_1 = \frac{M_1}{W_1} = \frac{\lambda * M_0}{W_0} = \lambda * \sigma_0$
- Μείωση του συντελεστή γάστρας C_B , αφού $C_{B1} = \frac{1}{\lambda} * C_{B0}$

Όμως θα πρέπει οι τάσεις να παραμείνουν σταθερές (ίδια αντοχή), δηλαδή:

- $\sigma_1 = \sigma_0 \rightarrow I_1 = \lambda * I_0$, δηλαδή πρέπει να αυξηθεί η ροπή αντίστασης z και αυτό πραγματοποιείται (και) με την αύξηση του πάχους t ,
- $t_1 = \lambda * t_2$, η οποία προκαλεί αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής W_{ST} .

Κατά συνέπεια, αύξηση του μήκους (με σταθερά Δ , B , T και A_M) προκαλεί αύξηση του μοναδιαίου βάρους (ανά μέτρο μήκους) της μεταλλικής κατασκευής ώστε να έχουμε την ίδια αντοχή και ταυτόχρονα μείωση του συντελεστή γάστρας.

Σημειώνεται ότι η αύξηση της ροπής αντίστασης δεν επιτυγχάνεται μόνο με την αύξηση του πάχους των ελασμάτων, αλλά και με άλλους τρόπους. Για παράδειγμα, αύξηση της ροπής αντίστασης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αύξηση της τάσης διαρροής του υλικού αλλά και την κατάλληλη διάταξη και μορφή των ενισχυτικών.

Το δεύτερο σενάριο είναι αύξηση του μήκους L , με σταθερό εκτόπισμα Δ και C_B αλλά μειωμένο γινόμενο $B*T$. Το σενάριο αυτό προκαλεί, κατά τον ίδιο τρόπο με το πρώτο σενάριο, αύξηση των καμπτικών ροπών M και συνεπώς αύξηση των τάσεων σ . Όμως είναι επιθυμητό να προκύπτει σταθερή αντοχή (δηλαδή σταθερές τάσεις) και αυτό οδηγεί στα παρακάτω:

- $\sigma_1 = \sigma_0 \rightarrow I_1 = \lambda^{-3/2} * I_0$, δηλαδή πρέπει να μεταβληθούν οι ροπές αντίστασης, πράγμα το οποίο γίνεται με την αύξηση του πάχους, όπως φαίνεται ακολούθως:
- $t_1 = \lambda^2 * t_0$, το οποίο προφανώς οδηγεί σε αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής

Κατά συνέπεια, αύξηση του μήκους (με σταθερά Δ , C_B και μειωμένο γινόμενο $B*T$) προκαλεί εντονότερη αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής, ώστε να προκύψει η ίδια αντοχή.

Συνεχίζοντας, το μήκος επιδρά στο “καλοθάλασσο” (seakeeping). Το καλοθάλασσο αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα στη σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων μιας και επηρεάζει άμεσα την κατοικησιμότητα (habitability) αλλά και την άνεση (comfort) των επιβατών. Για το λόγο αυτό θα πρέπει το πλοίο να χαρακτηρίζεται από καλό “καλοθάλασσο” (seakeeping). Σε περίπτωση κακού seakeeping αναπτύσσονται κινήσεις και επιταχύνσεις, οι οποίες είναι ιδιαίτερα κουραστικές για τους επιβάτες. Επίσης, αναπτύσσονται και δυναμικές φορτίσεις (οι οποίες προκαλούν ταλαντώσεις της γάστρας), πρόσθετη αντίσταση και απώλεια ταχύτητας λόγω κυματισμών, τα οποία είναι επίπονα για το ίδιο το πλοίο.

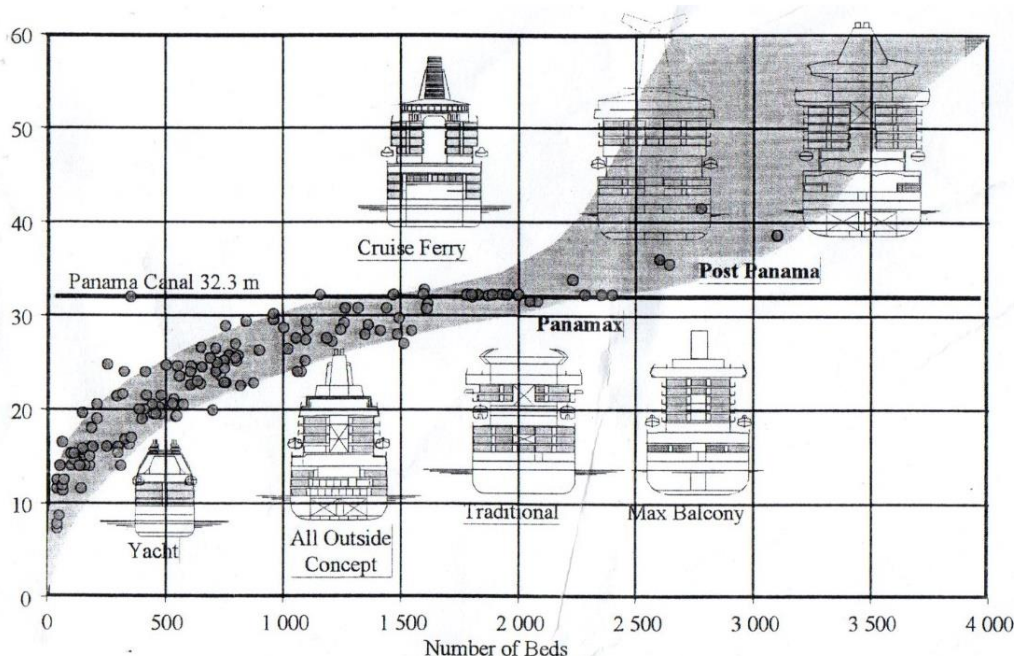
Κατά την επιλογή του μήκους πρέπει να αποφεύγονται δυσμενείς αριθμοί Froude ($Fn = V_s / \sqrt{gL}$) κατά τους οποίους παρουσιάζεται συντονισμός των πρωραίων κυματισμών με τα πρυμναία. Αυτό συμβαίνει όταν η κορυφή (κοίλο) των πρωραίων κυματισμών συμπέσει με την αντίστοιχη κορυφή (κοίλο) των πρυμναίων κυματισμών, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης κυματισμού. Έτσι, θα πρέπει ο λόγος

του μήκους ισάλου προς το μισό του μήκους κύματος να είναι περιττός αριθμός. Αντίθετα, στις δυσμενείς περιοχές του αριθμούς F_n ο ίδιος λόγος είναι άρτιος αριθμός. Αν διαπιστωθεί ότι η σχεδίαση βρίσκεται σε δυσμενή περιοχή του αριθμού F_n τότε είτε αλλάζεται το μήκος, είτε εξομαλύνονται οι παρειές της γάστρας κατά το στάδιο της μελέτης και σχεδίασης του πλοίου, είτε τροποποιείται η ταχύτητα κατά την πλεύση.

Τέλος, υπογραμμίζεται ότι μια αύξηση του μήκους προκαλεί, εν γένει, αύξηση των στρεπτικών καταπονήσεων. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής σε πλοία με ανοικτά καταστρώματα, όπως τα Containerships.

Πλάτος

Εν συνεχεία, το πλάτος επιδρά κυρίως επί της ευστάθειας του πλοίου, είτε στην άθικτη κατάσταση είτε σε κατάσταση βλάβης. Γενικά, αύξηση του πλάτους προκαλεί αύξηση του μετακεντρικού ύψους GM . Το πλάτος επιδρά δραστηκότερα στο BM ($BM \propto B^3$). Εφόσον κατά την αύξηση του πλάτους, μειωθεί παράλληλα το κοίλο (ώστε να παραμείνει σταθερό εκτόπισμα) είναι προφανές ότι η άκρη του καταστρώματος θα βυθίζεται για μικρότερες γωνίες εγκάρσιας κλίσης. Το αρνητικό, όμως, αυτό στοιχείο αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι αύξηση του πλάτους θα έχει σαν αποτέλεσμα αύξηση του GM και άρα μικρότερες γωνίες εγκάρσιας κλίσης για την ίδια εγκάρσια ροπή ($\tan\varphi = \frac{M_T}{\Delta \cdot GM}$). Σημειώνεται ότι αυξημένο GM έχει αρνητικό αποτέλεσμα στην περίοδο διατοιχισμού του πλοίου (δηλαδή η γωνία διατοιχισμού είναι μεγάλη), μιας και ισχύει ότι: $T_R \propto \frac{1}{\sqrt{GM}}$.



Σχήμα 2.2: Επίδραση του πλάτους στο λόγο εξωτερικών προς εσωτερικών καμπινών [10]

Ωστόσο, το πλάτος του κρουαζιερόπλοιου αποτελεί έναν πολύ σημαντικό σχεδιαστικό παράγοντα και για ακόμη ένα λόγο, την αναλογία εξωτερικών καμπινών προς τις εσωτερικές (καμπίνες χωρίς παράθυρα). Οι περισσότεροι των επιβατών επιθυμούν καμπίνα με θέα. Όμως, όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το

Σχήμα 2.2, καθώς το πλάτος αυξάνεται, παρουσιάζονται όλο και περισσότερες εσωτερικές καμπίνες. Σημειώνεται ότι το αριστερό άκρο της σκιασμένης περιοχής δηλώνει την περίπτωση όπου όλες οι καμπίνες είναι οι εξωτερικές. Όσες επιπλέον καμπίνες επιλέγεται να προστεθούν θα είναι εσωτερικές και ο μέγιστος αριθμός καμπινών επιτυγχάνεται στο δεξί άκρο της σκιασμένης περιοχής.

Προς αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος έχουν προταθεί διάφορες καινοτόμες σχεδιάσεις, ώστε να διατηρηθεί ο λόγος αυτός όσο το δυνατόν υψηλότερος. Δυο είναι οι κεντρικές ιδέες για την επίλυση αυτού και παρουσιάζονται στα ακόλουθα σχήματα. Σύμφωνα με την πρώτη ιδέα (Σχήμα 2.3), η υπερκατασκευή είναι διαιρεμένη κατά το διάμηκες και οι εσωτερικές καμπίνες έχουν παράθυρα, όπου αντικρίζουν μια εσωτερική στοά (“Superwide Concept”). Αντίθετα, η άλλη ιδέα (Σχήμα 2.4) έγκειται σε ένα στενό υπερστέγασμα, όπου οι περισσότερες καμπίνες έχουν θέα προς τη θάλασσα (“XpTray Concept”). Αξίζει να σημειωθεί ότι η πρώτη ιδέα έχει ήδη εφαρμοστεί (Allure of the Seas), σε αντίθεση με τη δεύτερη. Ωστόσο, η τελευταία θα μπορούσε να πει κανείς ότι έχει προσεγγιστεί σε ένα βαθμό από το κρουαζιερόπλοιο Royal Princess (μείωση του πλάτους της υπερκατασκευής σε σχέση με το πλάτος του πλοίου).

Κοίλο

Συνεχίζοντας, το κοίλο επηρεάζει άμεσα το διαθέσιμο όγκο και επιφάνεια ενδιαίτησης και εστίασης αλλά και το ύψος εξάλων. Επιπλέον, συνδέεται έμμεσα με το μήκος, όσον αφορά τη διαμήκη αντοχή, αλλά και το πλάτος, όσον αφορά την ευστάθεια. Με την αύξηση του κοίλου αυξάνεται η ολική χωρητικότητα του πλοίου σε περίπτωση ανεπάρκειας (με μικρή αύξηση του Lightship), ενώ σε περίπτωση όπου δεν ικανοποιείται ο κανονισμός της Γραμμής Φόρτωσης, αύξηση του κοίλου οδηγεί σε αύξηση του ύψους εξάλων.



Σχήμα 2.3: Ιδέα “Superwide” [13]



Σχήμα 2.4: Ιδέα “ΧρTray” [14]

Όσον αφορά το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, προφανώς όσο μεγαλώνει το κοίλο χωρίς να μεταβάλλεται τίποτε άλλο, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής αυξάνεται. Όσον αφορά τη διαμήκη αντοχή, με σταθερό το μήκος, όσο το κοίλο αυξάνεται τόσο οι καμπτικές τάσεις μειώνονται (αφού το W_{ST} έχει αυξηθεί). Σύμφωνα με την πηγή [11] ότι ισχύει :

$$W_{ST} \propto D * t * p \text{ και } \sigma \propto \frac{1}{a * t * D + b * t * D^2}$$

Όμως, επειδή το κοίλο και το βάρος της μεταλλικής κατασκευής αυξάνονται, υπάρχει η δυνατότητα να μειωθεί το πάχος t , ώστε να προκύψει ισοδύναμη αντοχή. Αυτό, εν τέλει, έχει ως συνέπεια τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής W_{ST} και συνεπώς τη μείωση του κόστους ναυπήγησης. Από το παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι στη μεταβολή του W_{ST} είναι πιο δραστική η μείωση του πάχους t από ότι η αύξηση του κοίλου D . Τέλος, όσον αφορά την ευστάθεια, διαπιστώνεται ότι αύξηση του κοίλου οδηγεί σε αύξηση του KG και ότι για μικρές γωνίες εγκάρσιας κλίσης ϕ , η αύξηση του D έχει αρνητική επίδραση στην ευστάθεια. Το αντίθετο συμβαίνει για μεγάλες γωνίες εγκάρσιας κλίσης, όπου η αύξηση του D έχει θετική επίδραση στην ευστάθεια.

Τέλος, ένα κρουαζιερόπλοιο θα πρέπει να έχει ένα επαρκές κοίλο, μέχρι το οποίο θα τοποθετούνται όσο το δυνατόν περισσότερα καταστρώματα (περιοχή γάστρας). Αυτό είναι επιθυμητό προκειμένου να αποκτηθούν οι απαιτούμενες επιφάνειες καταστρωμάτων, όπως θα παρουσιαστεί εν συνεχεία.

Βύθισμα

Όσον αφορά το βύθισμα, το βύθισμα επιδρά άμεσα στην επιλογή του προωστήριου μέσου (π.χ. έλικα, azipods) και στο ελικτικό μέσο (π.χ. πηδάλιο), στο απαιτούμενο ύψος εξάλων (μείωση του βυθίσματος συνεπάγεται με αύξηση του ύψους εξάλων) και στην ασφάλεια έναντι κατάκλισης και ανατροπής. Όσον αφορά την ευστάθεια, όσο αυξάνεται το βύθισμα τόσο αυξάνεται η ροπή αδράνειας I_T και ο όγκος

εκτοπίσματος, ο οποίος αυξάνεται ακόμα περισσότερο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται, εν τέλει η μετακεντρική ακτίνα BM με συνέπεια τη μείωση του μετακεντρικού ύψους GM, όπως φαίνεται ακολούθως:

$$\text{όσο } T \uparrow \text{ τόσο } I_T \uparrow \text{ και } \nabla \uparrow \uparrow \text{ και αφού } BM = \frac{I_T}{\nabla} \text{ προκύπτει ότι } BM \downarrow \text{ και } GM \downarrow$$

Όσον αφορά την επίδραση επί της αντοχής, αύξηση του βυθίσματος οδηγεί σε αύξηση των υδροστατικών πιέσεων (αφού $p = \rho \times g \times h$) που συνεπάγεται με ενίσχυση του πυθμένα, ώστε να μπορεί να παραλάβει το φορτίο αυτό. Η αύξηση του ελάσματος του πυθμένα (ή και η ενίσχυσή αυτού), οδηγεί σε αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Σημαντική παρατήρηση αποτελεί το γεγονός ότι με την αύξηση του βυθίσματος T και ταυτόχρονη αύξηση του πλάτους B, δημιουργούνται προβλήματα εγκάρσιας αντοχής και οποία αντιμετωπίζονται με σημαντικές ενισχύσεις των ελασμάτων κάτι που όπως γίνεται αντιληπτό προκαλεί αισθητή αύξηση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Τέλος, υπογραμμίζεται ότι το βύθισμα επηρεάζεται πολύ από τους περιορισμούς ναυσιπλοΐας (π.χ. λιμάνια, διώρυγες, κλπ.) και για το λόγο αυτό η αύξησή του είναι ανεπιθύμητη από τους πλοιοκτήτες. Ωστόσο, στην κατηγορία των κρουαζιερόπλοιων, το βύθισμα κυμαίνεται σε χαμηλά επίπεδα (πλοία κυβισμού) και δεν αποτελεί πρόβλημα ναυσιπλοΐας.

2.2.3 Κρίσιμοι Συντελεστές

Συντελεστές μορφής

Οι συντελεστές μορφής είναι τέσσερις και συγκεκριμένα:

- Ο συντελεστής γάστρας $C_B [= \nabla / (L_{BP} * B * T)]$
- Ο πρισματικός συντελεστής $C_P [= \nabla / (L_{BP} * A_M)]$
- Ο συντελεστής μέσης τομής $C_M [= A_M / (B * T)]$
- Ο συντελεστής ισάλου επιφανείας $C_{wl} [= A_{wl} / (L_{BP} * B)]$

Ως γνωστόν, υψηλός συντελεστής γάστρας οδηγεί σε πλήρης και ογκώδη γάστρα, ενώ χαμηλός συντελεστής γάστρας οδηγεί σε οξείες και λεπτόγραμμες γάστρες. Ακολούθως, υψηλός πρισματικός συντελεστής συνεπάγεται με ισοκατανεμημένο εκτόπισμα ως προς το μήκος και μεγάλο παράλληλο σώμα περί το μέσο, ενώ αντίθετα μικρός πρισματικός συντελεστής δηλώνει μεγάλη επιφάνεια μέσης τομής και εκτόπισμα συγκεντρωμένο στο κέντρο. Κάτι αντίστοιχο με τον πρισματικό συντελεστή συμβαίνει και με το συντελεστή ισάλου επιφανείας, όπου μικρός συντελεστής C_{wl} αντιστοιχεί σε ταχύπλοα και λεπτόγραμμα πλοία. Ο συντελεστής μέσης τομής εκφράζει την πληρότητα του μέσου νομέα και παίρνει συνήθως πολύ μεγάλες τιμές (≈ 0.995) για τα μεγάλα εμπορικά πλοία, ενώ στην περίπτωση των επιβατηγών πλοίων είναι της τάξης του (≈ 0.97).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο πρισματικός συντελεστής περιγράφει καλύτερα τη μορφή της γάστρας από ότι ο συντελεστής γάστρας, διότι ο δεύτερος αναφέρεται στον όγκο υφάλων (δηλαδή μέχρι το βύθισμα) ενώ ο πρισματικός αναφέρεται σε ολόκληρη τη γεωμετρία της γάστρας του πλοίου (δηλαδή μέχρι το Κοίλο).

Ειδικότερα, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, όπου αποτελούν σχετικά γρήγορα σκάφη, επιδιώκουμε χαμηλό συντελεστή γάστρας και πρισματικό συντελεστή διότι κατά αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται η αντίσταση κυματισμού, η οποία είναι και η κύρια συνιστώσα της ολικής αντίστασης των επιβατηγών πλοίων.

Όσον αφορά το κόστος της κατασκευής, γίνεται αντιληπτό ότι όσο ο συντελεστής γάστρας και ο πρισματικός συντελεστής μειώνονται, τόσο η γεωμετρία γίνεται πολυπλοκότερη πράγμα που σημαίνει ότι ανεβαίνει το κόστος ναυπήγησης.

Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει με το συντελεστή μέσης τομής C_M . Όσο αυξημένος είναι ο C_M τόσο περισσότερα επίπεδα ελάσματα χρησιμοποιούνται και γενικότερα τόσο πιο απλοποιημένη είναι η διαμόρφωση, με συνέπεια τη μείωση του κόστους ναυπήγησης. Όσον αφορά το seakeeping, μείωση του C_M οδηγεί σε αύξηση του διατοιχισμού λόγω της μειωμένης απόσβεσης των στροφικών κινήσεων περί το διάμηκες και, αντίστροφα, αύξηση του C_M οδηγεί σε μείωση του διατοιχισμού. Λύση απέναντι στο διατοιχισμό αποτελούν τα παρατροπίδια, τα πτερύγια, οι δεξαμενές αντιδιατοιχισμού και τα stabilizers, με τα τελευταία να χρησιμοποιούνται ευρέως στα κρουαζιερόπλοια.

Στην περίπτωση του συντελεστή ισάλου επιφανείας, με την αύξηση του παρατηρείται αύξηση της αντίστασης λόγω κυματισμών R_w αλλά και αύξηση του μετακεντρικού ύψους GM. Η επίδρασή του επί της ευστάθειας είναι μικρή. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται ο C_{wl} τόσο αυξάνεται η ροπή αδράνειας I_T άρα και η μετακεντρική ακτίνα BM και κατά συνέπεια το μετακεντρικό ύψος GM. Για σταθερό εκτόπισμα Δ , όσο αυξάνεται ο C_{wl} και με νομείς τύπου V, παρατηρείται έντονη αύξηση του KB και ταυτόχρονη μείωση του KG με τελική συνέπεια την αύξηση του GM.

Συντελεστής οξύτητας

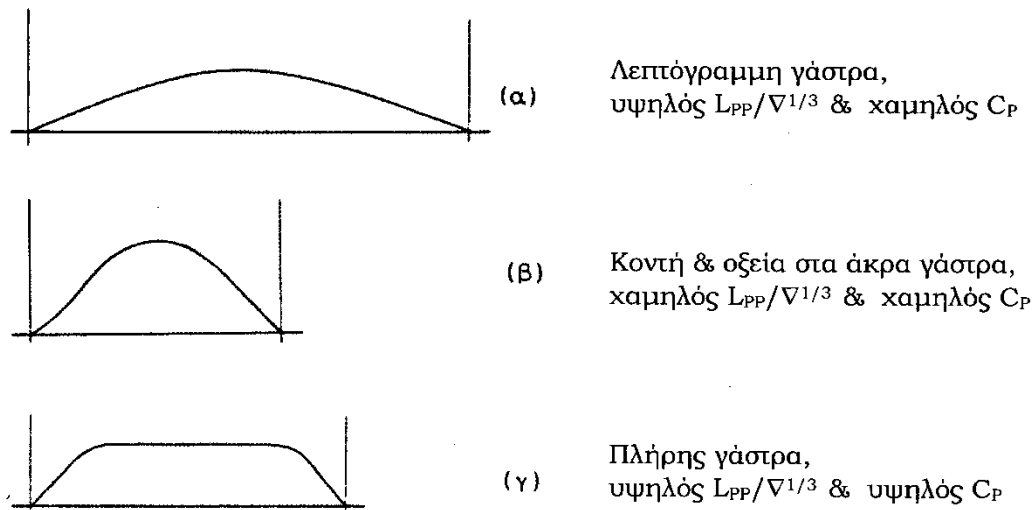
Μια πολύ σημαντική παράμετρος είναι ο συντελεστής οξύτητας, ο οποίος δηλώνει την οξύτητα της γάστρας του σκάφους (ιδιαίτερα σε συνδυασμό με τον πρισματικό συντελεστή C_p). Και εκφράζεται από τη μαθηματική σχέση:

$$L/\nabla^{1/3}$$

όπου:

- L, το μήκος του πλοίου σε m
- ∇ , ο όγκος εκτοπίσματος σε m^3

Υψηλές τιμές του συντελεστή οξύτητας και χαμηλές τιμές του C_p δηλώνουν λεπτόγραμμες γάστρες (περίπτωση κρουαζιερόπλοιων). Επίσης, στην περίπτωση των κοντών και οξείες στα άκρα γάστρες παρατηρείται χαμηλός συντελεστής οξύτητας και χαμηλός πρισματικός συντελεστής. Τέλος, για πλήρεις γάστρες παρατηρείται υψηλός συντελεστής οξύτητας και υψηλός πρισματικός συντελεστής. Τα παραπάνω απεικονίζονται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Συντελεστής οξύτητας και πρισματικός συντελεστής [11]

2.2.4 Άλλοι Σχεδιαστικοί Παράγοντες

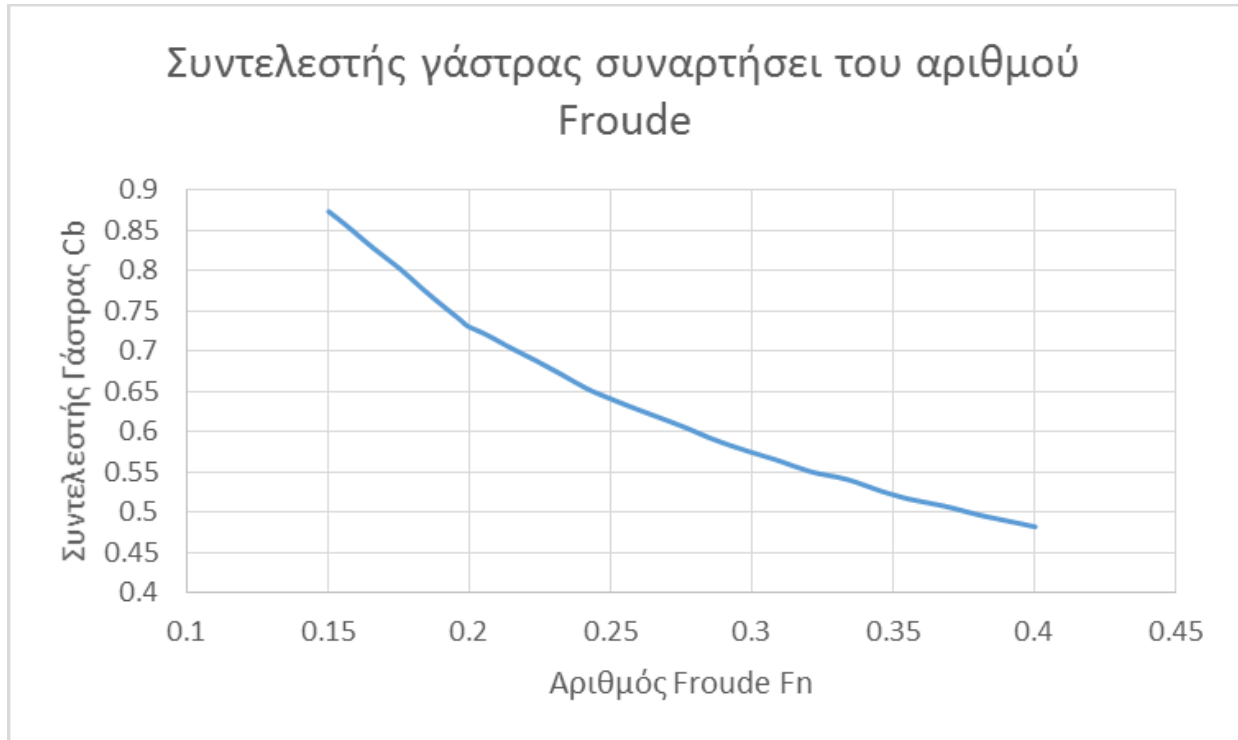
Διαμήκης θέση κέντρου άντωσης

Η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης (LCB) όσο πρώραθεν της μέσης τομής είναι τότε τόσο πιο έντονα κύματα περί την πρωραία παρειά δημιουργούνται, ενώ αντίθετα, όσο πρύμνηθεν της μέσης τομής τότε τόσο μεγαλώνει ο κίνδυνος αποκόλλησης της ροής με αποτέλεσμα να δημιουργούνται δίνες μπροστά από την έλικα. Γενικώς, ισχύει ότι όσο ο συντελεστής γάστρας C_B μειώνεται (ή ο αριθμός Froude μεγαλώνει, βλέπε Σχήμα 2.6), η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης μεταφέρεται προς την πρύμνη και αντίστροφα.

Μήκος εισόδου, Μήκος Παράλληλου τμήματος, Μήκος εξόδου

Συνεχίζοντας, ισχύει ότι για σταθερό εκτόπισμα, αύξηση του παράλληλου τμήματος οδηγεί σε αύξηση του πρισματικού συντελεστή με συνέπεια την αύξηση της αντίστασης κυματισμού. Δεν πρέπει να παραλειφθεί ότι αύξηση του παράλληλου τμήματος επιδιώκεται για σχετικά χαμηλούς αριθμούς Froude ($Fn \leq 0.24$) διότι στα ταχεία σκάφη δεν θέλουμε να έχουμε υψηλή αντίσταση κυματισμού μιας και αυτή είναι η κύρια συνιστώσα της αντίστασης στα γρήγορα πλοία. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραλειφθεί ότι αύξηση του παράλληλου τμήματος οδηγεί σε απλούστερες κατασκευές και ως συνέπεια αυτού μειώνεται το κόστος ναυπήγησης. Επίσης, με την αύξηση του παράλληλου τμήματος παρατηρείται καλύτερη εκμετάλλευση των χώρων.

Επιπλέον, η κατάλληλη διαμόρφωση του μήκους εισόδου L_E (πρωραία παρειά), ώστε να αποφευχθούν οι έντονες προεξοχές, έχει ως στόχο την απόσβεση του συστήματος κυματισμού που δημιουργείται από την πλώρη (αρχίζει με κορυφή) με αυτό που δημιουργείται από την πρωραία παρειά (αρχίζει με κοίλο). Σημειώνεται βέβαια ότι αυτό εξασφαλίζεται σε συγκεκριμένη ταχύτητα, η οποία συνήθως είναι η υπηρεσιακή (ταχύτητα μελέτης).



Σχήμα 2.6: Συντελεστής Γάστρας συναρτήσει του αριθμού Froude (κρουαζιερόπλοια) [10]

Αντίστοιχα, η κατάλληλη διαμόρφωση του μήκους εξόδου L_R (πρυμναία παρειά,,) ώστε να αποφευχθούν οι έντονες αλλαγές τις γεωμετρίας, έχει ως στόχο την αποφυγή της αποκόλλησης της ροής.

Τομές

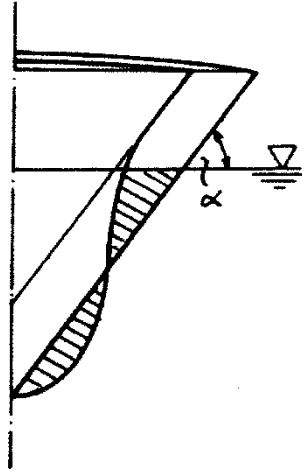
Όσον αφορά τη μορφή των τομών, υπάρχουν διάφοροι τύποι, οι οποίοι παρουσιάζονται εν συνεχεία:

- Τύπος U
- Τύπος V
- Ορθογωνική (Μέση Τομή)
- Κυκλοειδής (Ιστιοπλοϊκά)
- Ακμομειδής (Ταχύπλοα)
- Βολβοειδής (Πρώρα/Πρύμνη)

Συγκρίνοντας τον νομέα V έναντι του U (βλέπε Σχήμα 2.7), διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- + Μεγαλύτερο εκμεταλλεύσιμο όγκο στα έξαλα και επιφάνεια καταστρώματος
- + Μικρότερος λόγος B/D (επιφάνεια περιβλήματος) με συνέπεια τη μείωση του W_{ST}
- + Λιγότερες μορφοποιήσεις ελάσματος με συνέπεια τη μείωση του κόστους ναυπήγησης
- + Μεγαλύτερη εφεδρική πλευστότητα
- + Μεγαλύτερο πλάτος ισάλου επιφανείας με αποτέλεσμα την αύξηση της μετακεντρικής ακτίνας BM και συνεπώς την αύξηση του μετακεντρικού ύψους GM (αρχική ευστάθεια)

- Περιορισμένος εκμεταλλεύσιμος χώρος στα ύφαλα
- Δημιουργία έντονων κυματισμών με αποτέλεσμα την αύξηση της R_w αφού αυξάνεται το B_{WL}
- Αύξηση του κέντρου βάρους KG αφού ο όγκος της μεταλλικής κατασκευής μεταφέρεται άνωθεν της WL
- Προβλήματα σφυρόκρουσης και seakeeping
- Έντονη απώλεια ισάλου επιφανείας κατά την ανάδυση



Σχήμα 2.7: Σύγκριση νομέων τύπου U και V [11]

Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στις πρωραίες και πρυμναίες τομές των υφάλων. Στην περιοχή της πρώρας, για σχετικά βραδέα σκάφη με μεγάλο συντελεστή γάστρας προτείνονται οι πλήρεις τομές U και στην περιοχή της πλώρης. Αντίθετα, για σχετικά ταχεία σκάφη στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της R_w με αποτέλεσμα τη μετάθεση του Δ προς τα κάτω και για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται νομείς τύπου U στην περιοχή της πλώρης. Επιπροσθέτως, στα σκάφη με μέση τομή V (π.χ. επιβατηγά), οι τομές τύπου V και στην περιοχή της πλώρης θα επιφέρουν αύξηση της αντίστασης κυματισμού αλλά μείωση της αντίστασης τριβής (αφού μειώνεται η βρεχόμενη επιφάνεια). Προβλήματα που δημιουργούνται από την πλώρη τύπου U είναι η σφυρόκρουση του πυθμένα (bottom slamming) και η κρούση κυμάτων στη μάσκα του πλοίου (bow flare impact), ενώ από την πλώρη τύπου V η σφυρόκρουση του πλευρικού κελύφους (wave slap). Σημαντικό κριτήριο για την τελική επιλογή είναι η βέλτιστη εκμετάλλευση των χώρων και την απλούστευση της κατασκευής. Τέλος, με κριτήριο την ευστάθεια, όσο το βύθισμα μεγαλώνει προτείνεται η χρήση τομών τύπου V, ώστε να υπάρχει καλύτερη απόσβεση του διατοιχισμού.

Στην περιοχή της πρύμνης ευνοϊκότερη είναι η τομή τύπου V καθώς δεν παρατηρούνται φαινόμενα αποκόλλησης της ροής και περιδίνησης αλλά η τομή τύπου U δίνει πιο ομοιογενή κατανομή του ομόρου. Πρόσφατες εξελίξεις δείχνουν ότι ο πρυμναίος βολβός προσφέρει επιτάχυνση της ροής προς την έλικα και ομοιογενή ομόρου με αποτέλεσμα να παρατηρείται μείωση των ταλαντώσεων, το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, και αύξηση της απόδοσης. Επιπλέον, η ασύμμετρη πρύμνη προσφέρει εκμετάλλευση της πρόσθετης στροφορμής, αφού προκύπτει ασύμμετρη ροή προς την αντίθετα στρεφόμενη έλικα. Τέλος, τα πρυμναία πτερύγια/ημιδακτύλιοι προσφέρουν εξομάλυνση και επιτάχυνση της ροής.

Όσον αφορά τη μορφή των νομέων στα έξαλλα, γενικώς, τα κριτήρια επιλογής της μορφής των τομών στα έξαλλα είναι η βέλτιστη εκμετάλλευση επιφάνειας καταστρώματος και η συμπεριφορά σε κυματισμούς, ενώ ειδικών είναι η δυναμική ευστάθεια και η διαβροχή του καταστρώματος. Ειδικότερα, για τα πρωραία έξαλλα, μεγαλύτερη εφεδρική άντωση δίνει η τομή τύπου V (παρά η τύπου U). Ωστόσο, στα φορτηγά χρησιμοποιείται ο τύπος U, αφού εναρμονίζεται καλύτερα με τα ύφαλα. Επιπλέον, μεγάλες μεταβολές της εγκάρσιας κλίσης (flare) καθιστούν δυσκολότερη τη διαβροχή του καταστρώματος αλλά υφίστανται μεγάλες καταπονήσεις λόγω κρούσης κυμάτων κατά τον προνευτασμό. Ακόμη, τομείς εξάλων με ακμή περιορίζουν τις έντονες εξοχές στο κατάστρωμα αλλά αυξάνουν την πιθανότητα διαβροχής του καταστρώματος λόγω αποκόλλησης της ροής στις ακμές. Τέλος, όσον αφορά τη συμπεριφορά σε κυματισμούς (seakeeping) απαραίτητο είναι το επαρκές ύψος εξάλων καθώς όσο βέλτιστη και να είναι η σχεδίαση των νομέων στα έξαλλα, η συνεισφορά τους περιορίζεται.

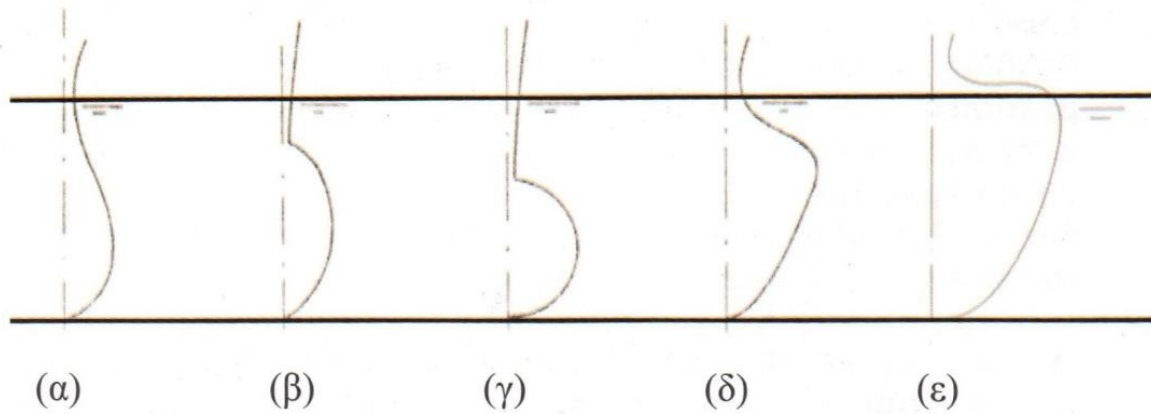
Διαμόρφωση πρώρας

Η χρήση του βολβού είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη στα σύγχρονα επιβατηγά πλοία καθώς παρουσιάζει οφέλη όπως η:

- Μείωση αντίστασης κυματισμού R_w
- Ομαλή ροή νερού στον πυθμένα με συνέπεια τη μείωση της αντίστασης συνεκτικότητας R_{PV}
- Μείωση της αντίστασης θραύσεως κυματισμού – Μειωμένα φαινόμενα σφυρόκρουσης
- Απόσβεση σε προνευτασμό
- Διατήρηση ταχύτητας σε κυματισμούς
- Μείωση της πρυμναίας διαγωγής
- Αύξηση απόδοσης της έλικας λόγω καλύτερης κατανομής του ομόρου
- Μείωση της ολικής αντίστασης με αποτέλεσμα τη μείωση της απαιτούμενης ώσης και της φόρτισης της έλικας

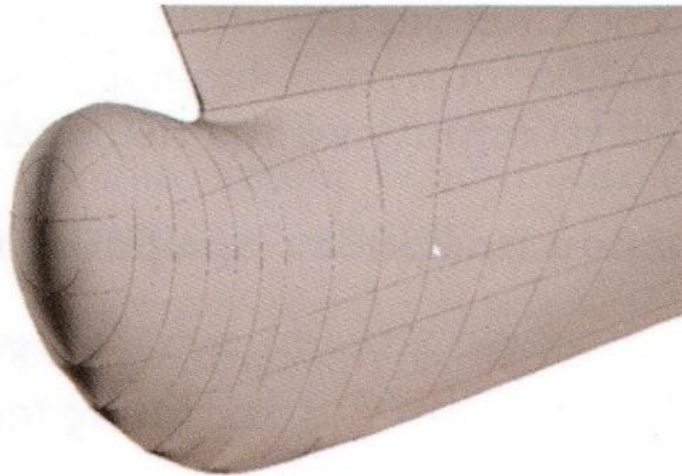
Τα κύρια χαρακτηριστικά του βολβού είναι το μήκος του και το μέγεθός του. Το μήκος του επιδρά στη διαφορά φάσης κυματισμού ενώ το μέγεθός του επιδρά στο πλάτος του κυματισμού. Ωστόσο, δεν θα πρέπει να παραληφθεί το γεγονός ότι με τη χρήση βολβού, λόγω της αύξησης του μήκους του πλοίου, παρατηρείται μικρή αύξηση των καμπτικών ροπών. Σημαντικές, όμως είναι οι δυναμικές φορτίσεις εκτεταμένων/πεπλατυσμένων βολβών (π.χ. φορτηγά πλοία). Υπάρχουν τέσσερις βασικές μορφές βολβού (βλέπε Σχήμα 2.8), οι οποίες είναι:

- Κανονικός τύπος
- Τύπος Ναυπηγείου Blohm & Voss
- Τύπος Εργαστηρίου VWS-Berlin
- Τύπος SV Μελετητικού Οίκου Maier-Form
- Τύπος “λαιμός-χήνας” (goose-neck) (Παραλλαγή του τύπου SV)

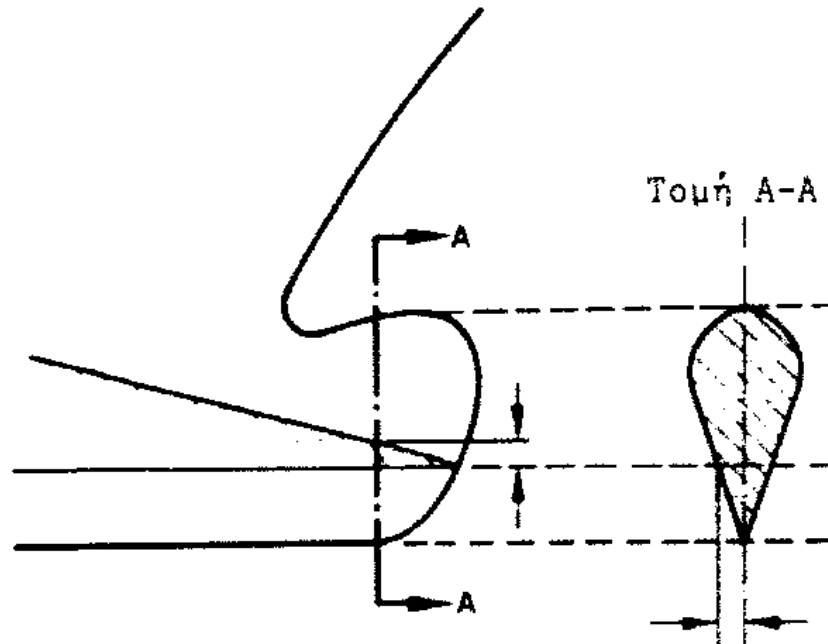


Σχήμα 2.8: Μορφή βολβών [11]

Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων τοποθετείται μια παραλλαγή του τύπου SV που ονομάζεται “goose-neck”. Μια τρισδιάστατη αναπαράσταση του βολβού αυτού δίνεται στο Σχήμα 2.9, ενώ στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα αυτού.



Σχήμα 2.9: Βολβός “λαιμός χήνας” [11]



Σχήμα 2.10: Τυπικό σκαρίφημα βολβού τύπου SV [11]

Διαμόρφωση πρύμνης

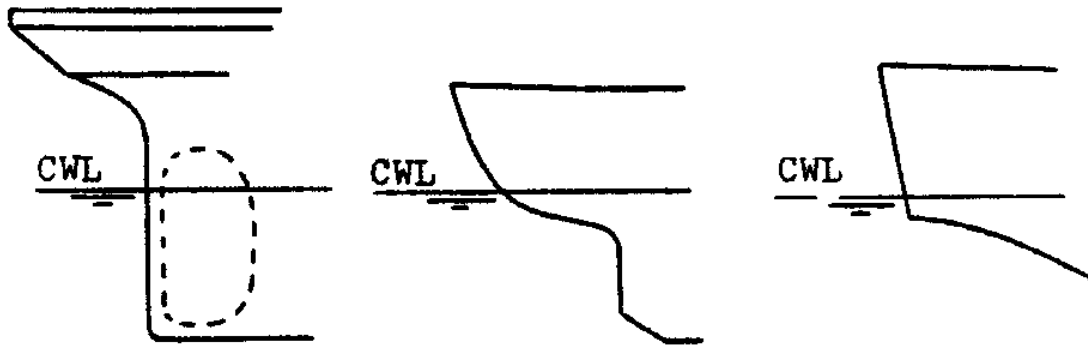
Στην περιοχή της πρύμνης, η διαμόρφωσή της μορφής της επιδρά σε ποικίλους παράγοντες. Συγκεκριμένα, συνεισφέρει στα παρακάτω:

- Μείωση της αντίστασης και αποφυγή αποκόλλησης της ροής
- Βελτίωση της απόδοσης του προωστήριου μηχανισμού
- Περιορισμός των ταλαντώσεων λόγω επαρκών ανοχών
- Αύξηση της ευστάθειας σε κυματισμούς
- Καλύτερη εκμετάλλευση καταστρώματος
- Απλούστευση κατασκευής

Οι συνηθισμένοι τύποι πρύμνης είναι τρεις (βλέπε Σχήμα 2.11) και είναι οι ακόλουθοι:

- Ελλειπτική υπερυψωμένη πρύμνη
- Πρύμνη καταδρομικού (cruiser stern)
- Πρύμνη άβακος (transom stern)

Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων χρησιμοποιείται πλέον η τρίτη μορφή πρύμνης, σε αντίθεση με το παρελθόν, όπου κάποια υπερωκεάνια πλοία γραμμής είχαν πρύμνη καταδρομικού.



Σχήμα 2.11: Συνήθεις μορφές πρύμνης [11]

2.3 Διαδικασία σχεδίασης των κρουαζιερόπλοιων

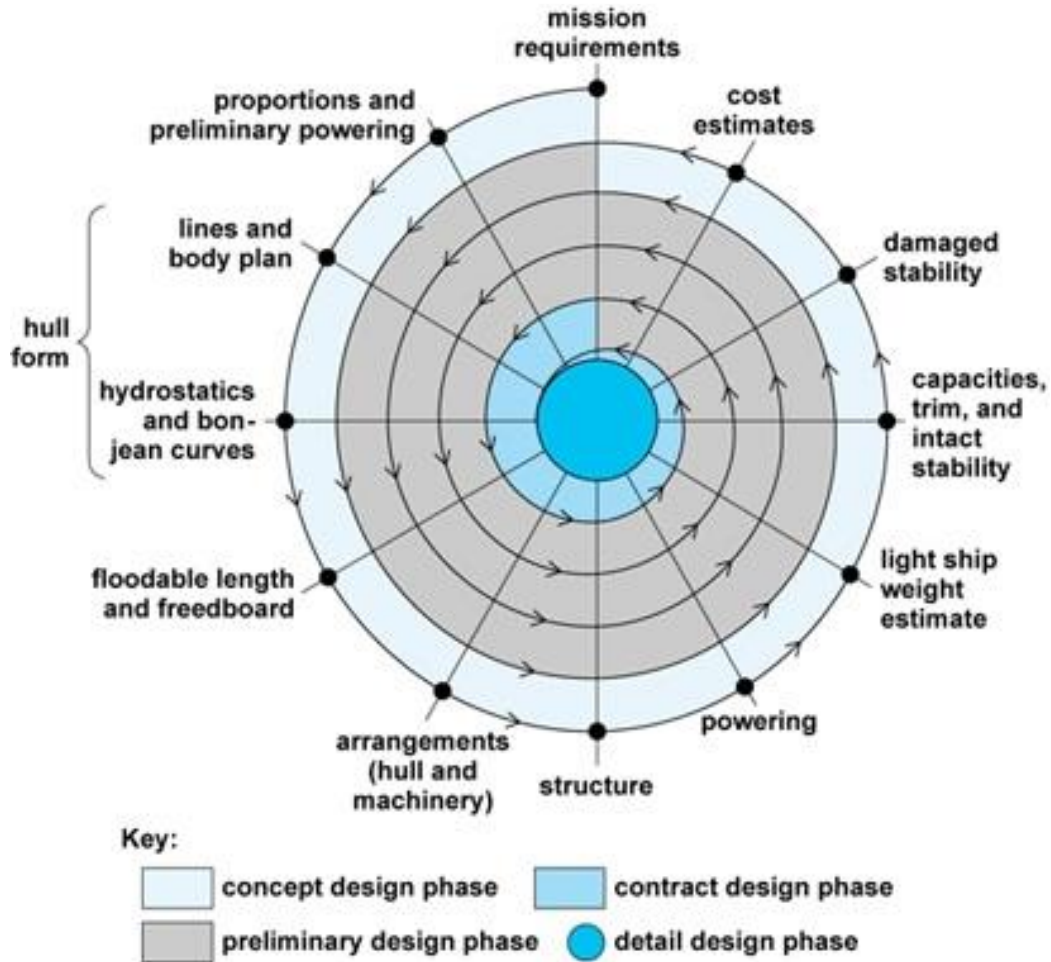
2.3.1 Εισαγωγή

Έχοντας ο ναυπηγός απολύτως ξεκάθαρα όλα τα παραπάνω, μπορεί να ξεκινήσει τη σχεδίαση του κρουαζιερόπλοιου. Έτσι, με βάση ενός απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, η μελέτη και σχεδίαση πραγματοποιείται σε τέσσερα στάδια (βλέπε Σχήμα 2.12). Σε πρώτο στάδιο, σύμφωνα με ενός απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, ο ναυπηγός πραγματοποιεί τη λεγόμενη Μελέτη Εφικτότητας του Αρχικού Σχεδιασμού (Concept Design). Συγκεκριμένα, διατυπώνει τις απαιτήσεις αυτές σε τεχνικά χαρακτηριστικά, υπολογίζοντας τα βασικά χαρακτηριστικά του πλοίου, ενός για παράδειγμα το μήκος L , το πλάτος B , το κοίλο D , το βύθισμα T , ο συντελεστής γάστρας C_B και η ισχύς πρόωσης P_B , πάντα έχοντας υπόψη τη βέλτιστη οικονομική λύση, όσο αυτό είναι φυσικά δυνατόν.

Στο επόμενο στάδιο, ο μελετητής μεταβαίνει στο στάδιο της Προμελέτης (Preliminary Design), στο οποίο πραγματοποιεί ακριβέστερο προσδιορισμό των βασικών χαρακτηριστικών του πλοίου με στόχο και πάλι τη βέλτιστη οικονομική λύση. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η Μελέτη Εφικτότητας του Αρχικού Σχεδιασμού και η Προμελέτη ταυτίζονται με τη Βασική Μελέτη (Basic Design).

Το τρίτο στάδιο ενός μελέτης είναι η Μελέτη Προδιαγραφών Συμβολαίου ή Συμβατική Μελέτη (Contract Design). Στη φάση αυτή πραγματοποιείται ο ακριβής σχεδιασμός των ναυπηγικών γραμμών, ο ακριβής προσδιορισμός ενός ισχύος πρόωσης, ο ακριβής σχεδιασμός των κατασκευαστικών λεπτομερειών ενός μεταλλικής κατασκευής, ο ακριβής υπολογισμός του ολικού βάρους, των επιμέρους βαρών και των κέντρων βαρών.

Στο τελευταίο στάδιο (Μελέτη Λεπτομερούς Σχεδιασμού – Detailed Design), ο ναυπηγός πραγματοποιεί τη λεπτομερή σχεδίαση όλων των κατασκευαστικών στοιχείων και συγγράφει τις προδιαγραφές κατασκευής για τους προμηθευτές και τις προδιαγραφές εφαρμογής και εγκατάστασης για τους τεχνίτες (π.χ. ηλεκτροσυγκολλητές) του ναυπηγείου.



Σχήμα 2.12: Ελικοειδής καμπύλη μελέτης πλοίου [15]

Όπως γίνεται κατανοητό με τη βοήθεια του άνω σχήματος, η μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου αποτελεί μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία. Ως εκ τούτου, με την επαναληπτική διαδικασία, παρατηρείται ότι η μελέτη του αρχίζει και συγκλίνει στη βέλτιστη, από τεχνικοοικονομική σκοπιά, σχεδίαση.

2.3.2 Μεθοδολογία σχεδίασης της μεταλλικής κατασκευής

Η διαμόρφωση των γραμμών της κατασκευής ενός πλοίου (Lines & Body Plan) καθορίζεται από πολλούς παράγοντες. Συγκεκριμένα, επηρεάζεται από την προκαταρκτική μελέτη της ευστάθειας (Υδροστατικές Καμπύλες - Hydrostatics Curves, Καμπύλες Ευστάθειας - Cross Curves, Καμπύλες Εμβαδών Εγκάρσιων Τομών - Bonjean Curves, Καμπύλες Κατακλισίμων Μηκών - Floodable Length Curves), την γενική διάταξη (Γάστρα - Hull, Εσωτερική Σχεδίαση - Interior Design κλπ.), την κινητήρια εγκατάσταση και το μηχανισμό πρόωσης (Machinery & Propulsion), τον υπολογισμό του Πλήρως Εξοπλισμένου αλλά Άφορτου Πλοίου (Lightship - LS), τη μελέτη της άθικτης ευστάθειας (intact stability) και της ευστάθειας μετά από βλάβη (damaged stability) και, τέλος, το κόστος ναυπήγησης (cost estimates).

Για τη σχεδίαση της μεταλλικής τους κατασκευής έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μια αρκετά ενδιαφέρουσα μέθοδος, για το στάδιο της προμελέτης, κατά

την οποία δεν επιλέγονται σε πρώτη φάση οι κύριες διαστάσεις του πλοίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα από προηγούμενες κατασκευές πλοίων. Ως εκ τούτου, οι διάφοροι συντελεστές που παρατηρούνται στους ακόλουθους πίνακες έχουν προκύψει από στοιχεία διαφόρων (ήδη ναυπηγημένων) πλοίων.

Συνεχίζοντας, πρωταρχικός στόχος είναι να υπολογιστεί η απαιτούμενη, από τον πλοιοκτήτη, ολική χωρητικότητα. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να υπολογιστεί η επιφάνεια και ο όγκος που καταλαμβάνει ο κάθε χώρος. Έπειτα, με την άθροιση των μεγεθών αυτών προκύπτει ο συνολικός όγκος και η συνολική επιφάνεια των χώρων των επιβατών. Για παράδειγμα, στον Πίνακα 2.2 παρατίθεται ο υπολογισμός της έκτασης που καταλαμβάνουν οι εγκαταστάσεις των επιβατών.

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται παρόμοια διαδικασία για τους υπόλοιπους χώρους (Πίνακας 2.3). Όπως στον Πίνακα 2.2, έτσι και στην περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούνται τιμές που προέρχονται από στατιστικά δεδομένα. Από τον Πίνακα 2.3 προκύπτει ο συνολικός όγκος από τον οποίο μπορεί να προκύψει η απαιτούμενη ολική χωρητικότητα GT, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$GT = (0.2 + 0.02 \times \log V) \times V \quad (2.2)$$

όπου V είναι ο ολικός όγκος όλων των κλειστών χώρων (m^3).

Στο σημείο αυτό, επιβεβαιώνεται αν η ολική χωρητικότητα που προέκυψε, καλύπτει τη ζητούμενη από τον πλοιοκτήτη. Αν όχι, τότε θα πρέπει να τροποποιηθεί η έκταση κάποιων χώρων (π.χ. καμπίνες) και να γίνει ξανά εκτίμηση και έλεγχος της ολικής χωρητικότητας. Σε περίπτωση που ικανοποιείται η απαίτηση, θα πρέπει η υπολογισμένη Ολική Χωρητικότητα (Gross Tonnage) να συγκριθεί με αυτό των ήδη κατασκευασμένων κρουαζιερόπλοιων. Αυτός είναι ένας καλός τρόπος να ελέγχεται ότι οι χώροι που υπολογίστηκαν είναι ρεαλιστικοί. Στο Σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η επίδραση της ολικής χωρητικότητας στον αριθμό επιβατών και πληρώματος (και αντίστροφα).

Σε επόμενο στάδιο, πραγματοποιείται η πρώτη εκτίμηση του Lightship (Βάρος πλήρως εξοπλισμένο αλλά άφορτου πλοίου). Επίσης, ο υπολογισμός του βάρους βασίζεται σε στατιστικά δεδομένα από κατασκευασμένα πλοία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4. Σημειώνεται ότι η τιμή του εσωτερικού εξοπλισμού βασίστηκε στον επιπλωμένο χώρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14. Επιπλέον, για τον εξοπλισμό του πλοίου χρησιμοποιήθηκε ο ολικός όγκος, ενώ για τα μηχανήματα(κινητήρας) η εγκατεστημένη ισχύς. Ο όγκος της γάστρας και του υπερστεγάσματος προκύπτει κατά προσέγγιση από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$V_{hull} = L * B * D * C_{B,D} \quad (2.3)$$

$$V_{sup} = L_{sup} * B * \Upsilon\psi\sigma_{sup} \quad (2.4)$$

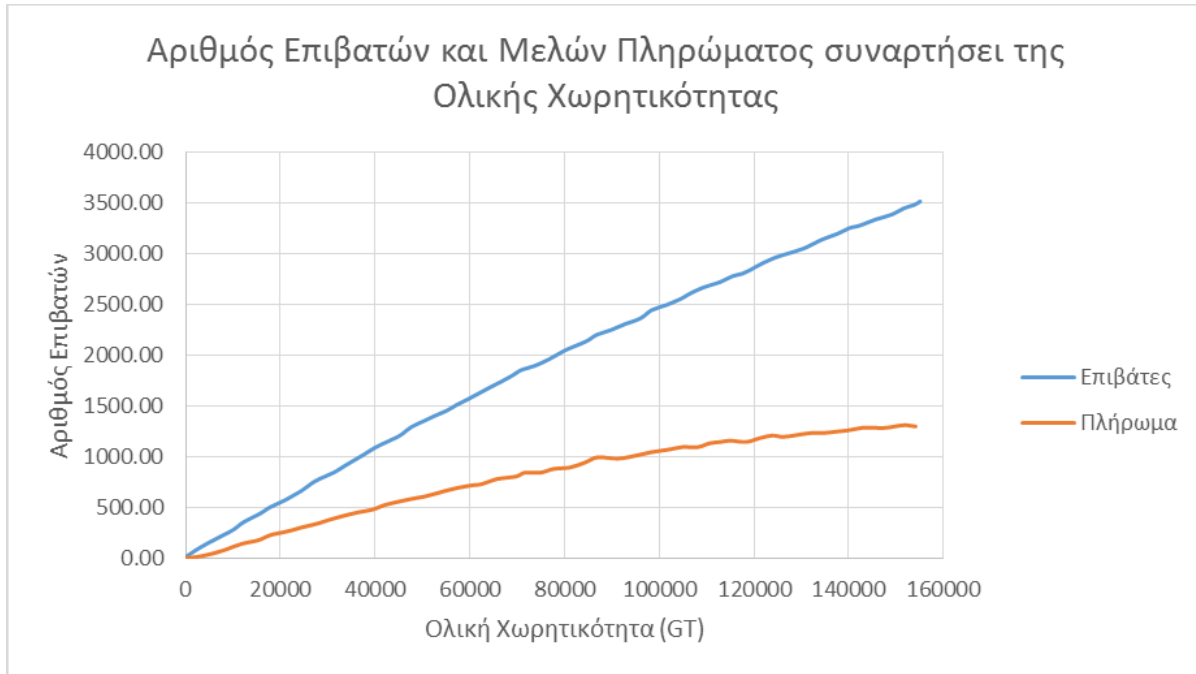
όπου $\Upsilon\psi\sigma_{sup}$ είναι το ύψος της υπερκατασκευής (ή του υπερστεγάσματος γενικότερα).

Πίνακας 2.2: Ανάλυση επιφάνειας και όγκου εγκαταστάσεων επιβατών ενός κρουαζιερόπλοιου [10]

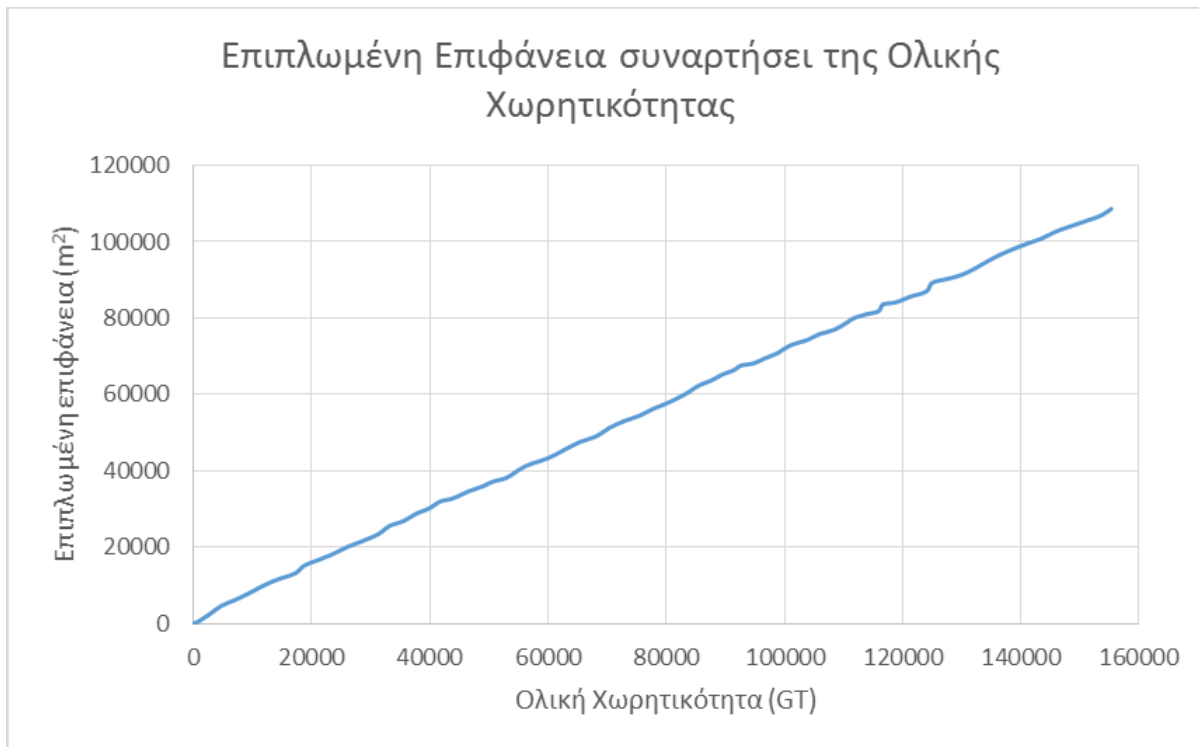
ΚΑΜΠΙΝΕΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					
Κατηγορία Καμπίνας	Αριθμός Καμπίνων	Μέγεθος m ²	Ύψος m	Συνολική Επιφάνεια m ²	Συνολικός Όγκος m ³
Σουίτα Πλοιοκτήτη		40	2.8		
Σουίτες		32	2.8		
Πολυτελής		24	2.8		
Εξωτερικές με μπαλκόνι		16	2.8		
Εξωτερικές		16	2.8		
Εσωτερικές		15	2.8		
Ρεζέρβες		20	2.8		
Διάδρομοι Καμπίνων	25% της συνολικής επιφάνειας καμπίνων		2.8		
Στέγαση Επιβατών					
ΔΗΜΟΣΙΟΙ ΧΩΡΟΙ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					
Όνομα/Χρήση του χώρου	Καθίσματα	Επιφάνεια ανά καθίσμα m ² /κάθισμα	Ύψος m	Συνολική Επιφάνεια m ²	Συνολικός Όγκος m ³
Τραπεζαρίες		2.2	3.4		
Καφετέρια στο ανώτατο ανοικτό κατάστρωμα		1.8	3.0		
Κύρια αίθουσα θεάτρου		1.6	7.0		
Άλλες αίθουσες/μπαρ		2.2	3.6		
Κινηματογράφοι		0.9	3.4		
Καζίνο/Παιχνίδια			3.6	750	
Υγεία και ομορφιά			2.8	600	
Παιδιά και Έφηβοι			3.4	180	
Είσοδος, στοές και μαγαζιά			3.6	1500	
Δημόσιοι Χώροι Επιβατών					
ΚΛΙΜΑΚΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΘΑΛΑΜΟΙ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					
Όνομα/Χρήση του χώρου	Καταστρώματα	Επιφάνεια ανά καθίσμα m ² /κάθισμα	Ύψος m	Συνολική Επιφάνεια m ²	Συνολικός Όγκος m ³
Κύριο κλιμακοστάσιο		175	3.0		
Άλλα κλιμακοστάσια		150	3.0		
Κλιμακοστάσια και Προθάλαμοι Επιβατών					
ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					

Πίνακας 2.3: Ανάλυση επιφάνειας και όγκου όλων των εγκαταστάσεων ενός κρουαζιερόπλοιου [10]

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ	Επιφάνεια ανά κρεβάτι m ² /κάθισμα	Όγκος ανά κρεβάτι m ³ /κάθισμα	Επιφάνεια m ²	Όγκος m ³
Εγκαταστάσεις επιβατών				
Εγκαταστάσεις πληρώματος	5.20	14.70		
Υπηρεσίες πλοίου	0.50	1.40		
Τροφοδοσία	2.70	8.50		
Υπηρεσίες ξενοδοχείου	1.30	3.70		
Συνολικοί Επιπλωμένοι Χώροι				
Μηχανολογικός εξοπλισμός και μηχανοστάσιο	-	10.70	800	
Κλιματισμός	1.80	4.90		
Άλλοι τεχνικοί χώροι του στεγάσματος	2.30	6.60		
Συνολικοί Τεχνικοί Χώροι				
Δεξαμενές και Κενοί Χώροι	-	7.90	-	
Χώροι Εξωτερικών Καταστρωμάτων	6.10	3.50		
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	-	-	-	-
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ	-	-	-	-
ΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	-	-	-	-



Σχήμα 2.13: Επιβάτες και πλήρωμα συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]



Σχήμα 2.14: Επιπλωμένη επιφάνεια συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]

Πίνακας 2.4: Υπολογισμός του Lightship ενός κρουαζιερόπλοιου [10]

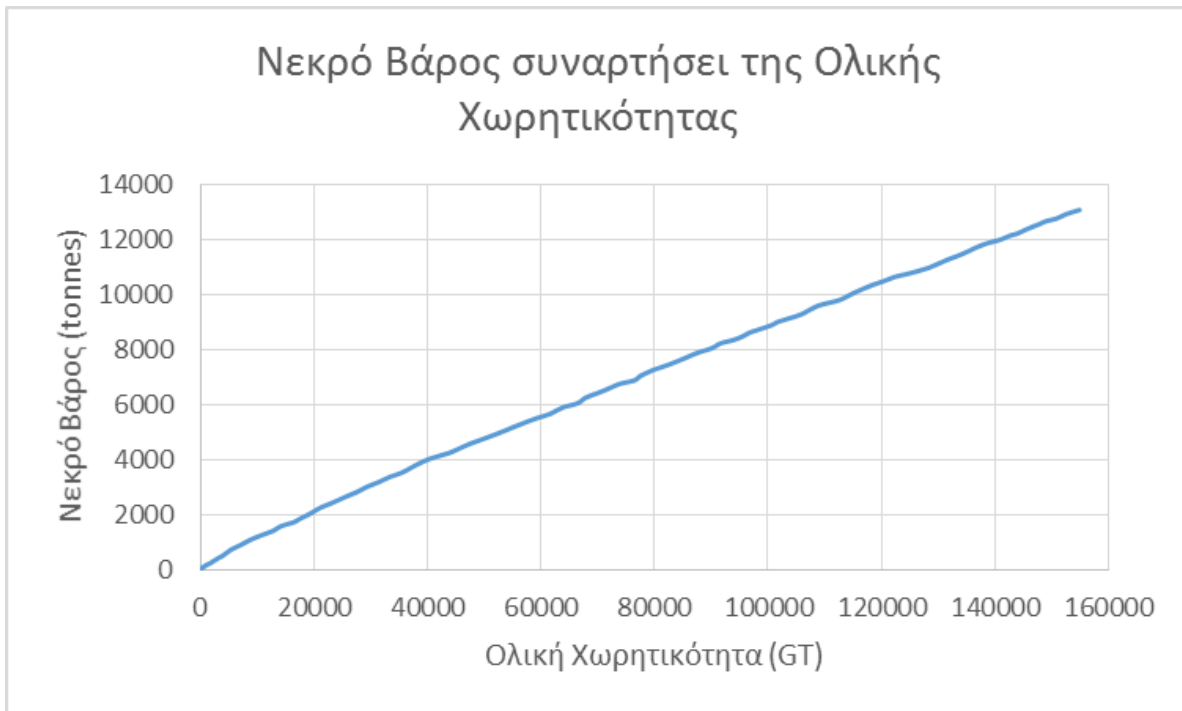
ΒΑΡΟΣ LIGHTSHIP				
Ομάδα βάρους	Μονάδα	Τιμή	Συντελεστής Βάρους/μονάδα tonne/μοναδα	Βάρος tonne
Γάστρα	m ³		0.080	
Υπερκατασκευές	m ³		0.040	
Εσωτερικός Εξοπλισμός	m ³		0.170	
Εξοπλισμός Πλοίου	m ³		0.007	
Μηχανολογικός Εξοπλισμός	kW		0.065	
Συνολικά	-	-	-	
Περιθώριο	%	5.00	-	
ΒΑΡΟΣ LIGHTSHIP	-	-	-	

Ομοίως, υπολογίζεται και το Deadweight (Νεκρό Βάρος) με βάση στατιστικές τιμές, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.5. Εδώ, θα πρέπει να καταγραφεί ότι το βάρος των επιβατών και των πληρωμάτων λαμβάνεται ίσο με 100kg ανά άτομο. Σημειώνεται ότι το βάρος λαμβάνεται σχετικά αυξημένο (π.χ. σε φορτηγά πλοία λαμβάνεται ίσο με 75kg) για λόγους ασφαλείας. Τα εφόδια και οι αποθήκες εξαρτώνται από τον αριθμό των ατόμων και το μήκος της κρουαζιέρας. Το πόσιμο νερό και τα απόβλητα υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο. Σημειώνεται ότι, όπως στα φορτηγά πλοία έτσι και στα κρουαζιερόπλοια, το πόσιμο νερό συχνά παράγεται πάνω στο πλοίο εξατμίζοντας το θαλασσινό νερό. Κατά συνέπεια, το πόσιμο νερό που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια του ταξιδιού και πολλές φορές δεν συμπεριλαμβάνεται στο νεκρό βάρος. Από την άλλη, τα απόβλητα κατεργάζονται και αποβάλλονται από το πλοίο στη θάλασσα, αλλά πρέπει να αποθηκεύονται κατά τις στάσεις του πλοίου στα λιμάνια. Τα αποθηκευμένα καύσιμα και λιπαντικά βασίζονται στο μήκος της διαδρομής, στη μέση ταχύτητα και στην ειδική κατανάλωση των εγκατεστημένων μηχανών και την πολιτική ανεφοδιασμού.

Πίνακας 2.5: Υπολογισμός του Deadweight ενός κρουαζιερόπλοιου [10]

ΒΑΡΟΣ DEADWEIGHT				
Είδος	Μονάδα	Τιμή	Συντελεστής Βάρους/μονάδα tonne/μοναδα	Βάρος tonne
Επιβάτες και πλήρωμα	Άτομα		0.100	
Εφόδια και προμήθειες	Άτομα		0.200	
Καύσιμα	tonne/ταξίδι		2.200	
Λιπαντικά	tonne/ταξίδι		10.000	
Πόσιμο νερό	tonne/ταξίδι		0.500	
Απόβλητα	tonne/ταξίδι		0.250	
Νερό για έλεγχο ευστάθειας	-	-	-	500
Νερό στις πισίνες	-	-	-	200
Διάφορα	-	-	-	200
ΒΑΡΟΣ DEADWEIGHT	-	-	-	
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑ	-	-	-	

Φυσικά, όπως και στην περίπτωση της ολικής χωρητικότητας, το υπολογισμένο νεκρό βάρος πρέπει να συγκρίνεται με τις αντίστοιχες τιμές των κατασκευασμένων πλοίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15: Νεκρό βάρος συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]

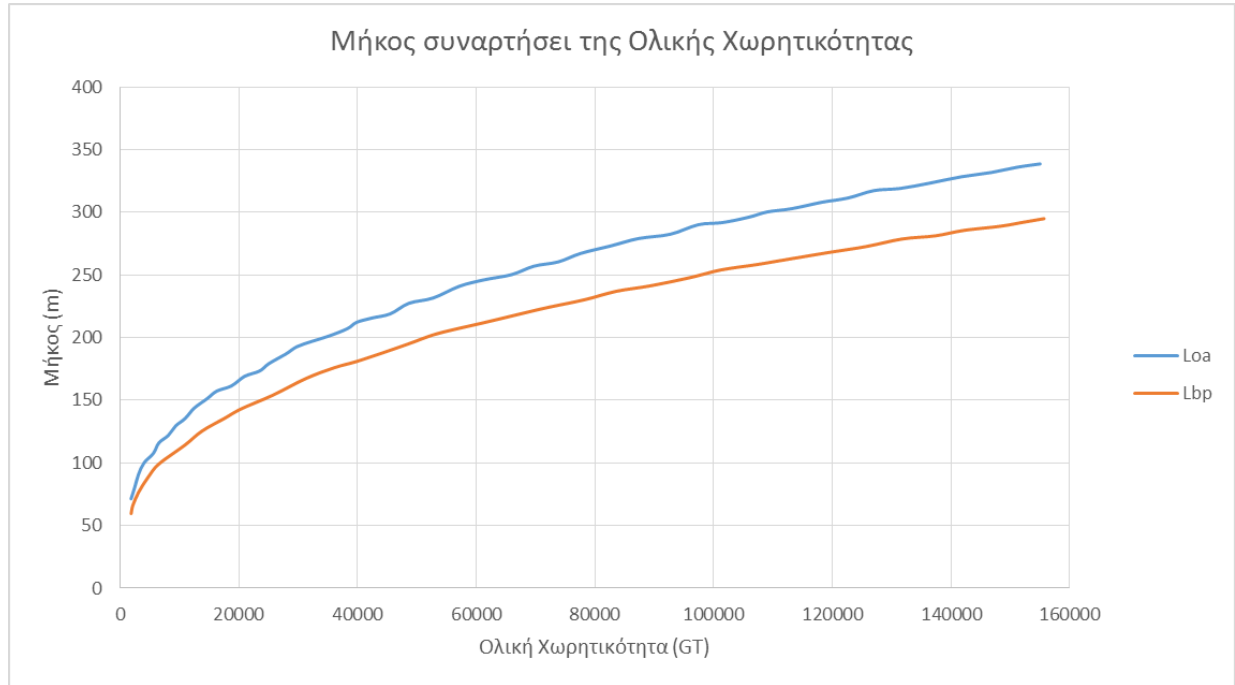
Κατά συνέπεια, σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή το εκτόπισμα που προκύπτει είναι ίσο με:

$$\Delta_{method} = (Lightship + Deadweight)_{method} \quad (2.5)$$

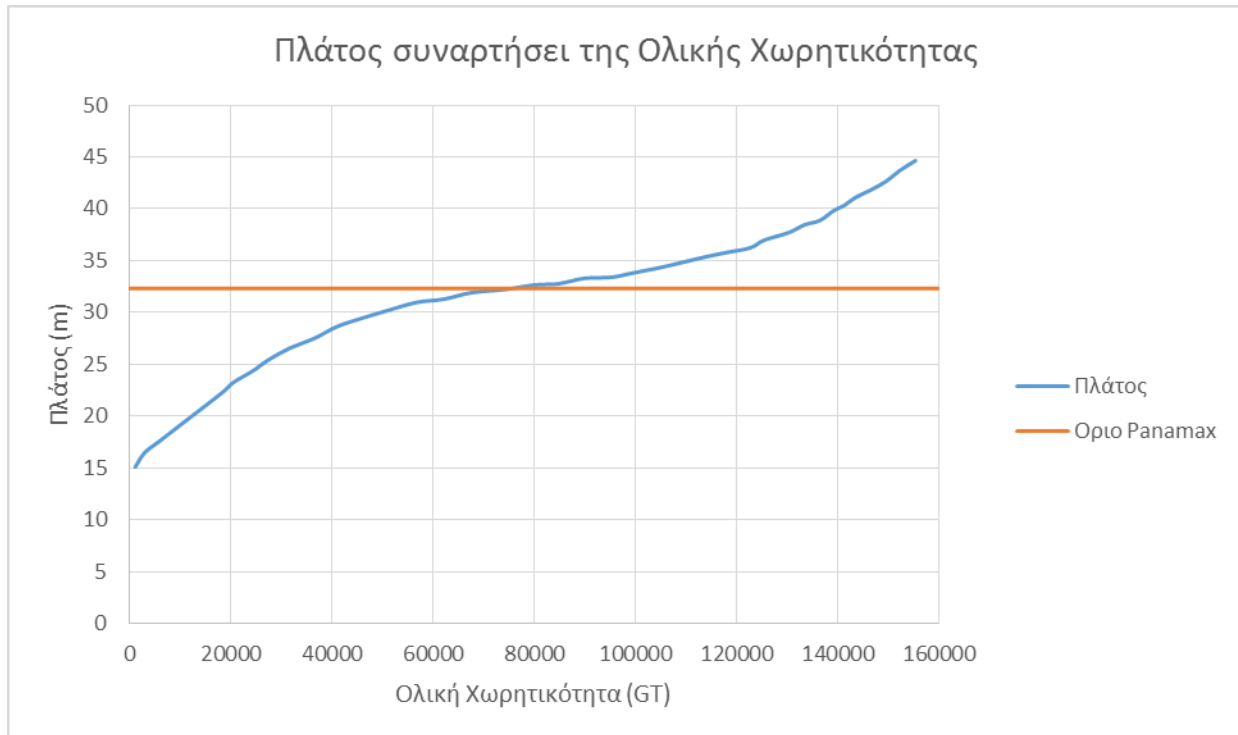
Στο σημείο αυτό, έχοντας εκτίμηση την ολική χωρητικότητα του πλοίου, το Lightship και το Deadweight, πραγματοποιείται η πρώτη εκτίμηση των κύριων διαστάσεων του πλοίου. Ομοίως, οι κύριες διαστάσεις προκύπτουν από στατιστικές τιμές του μήκους (Σχήμα 2.16), του πλάτους (Σχήμα 2.17) και του βυθίσματος (Σχήμα 2.18) συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας.

Έχοντας υπολογίσει το μήκος, το πλάτος και το βύθισμα του κρουαζιερόπλοιου, σε επόμενη φάση προσαρμόζουμε το συντελεστή γάστρας C_B ώστε να ικανοποιείται η σχέση:

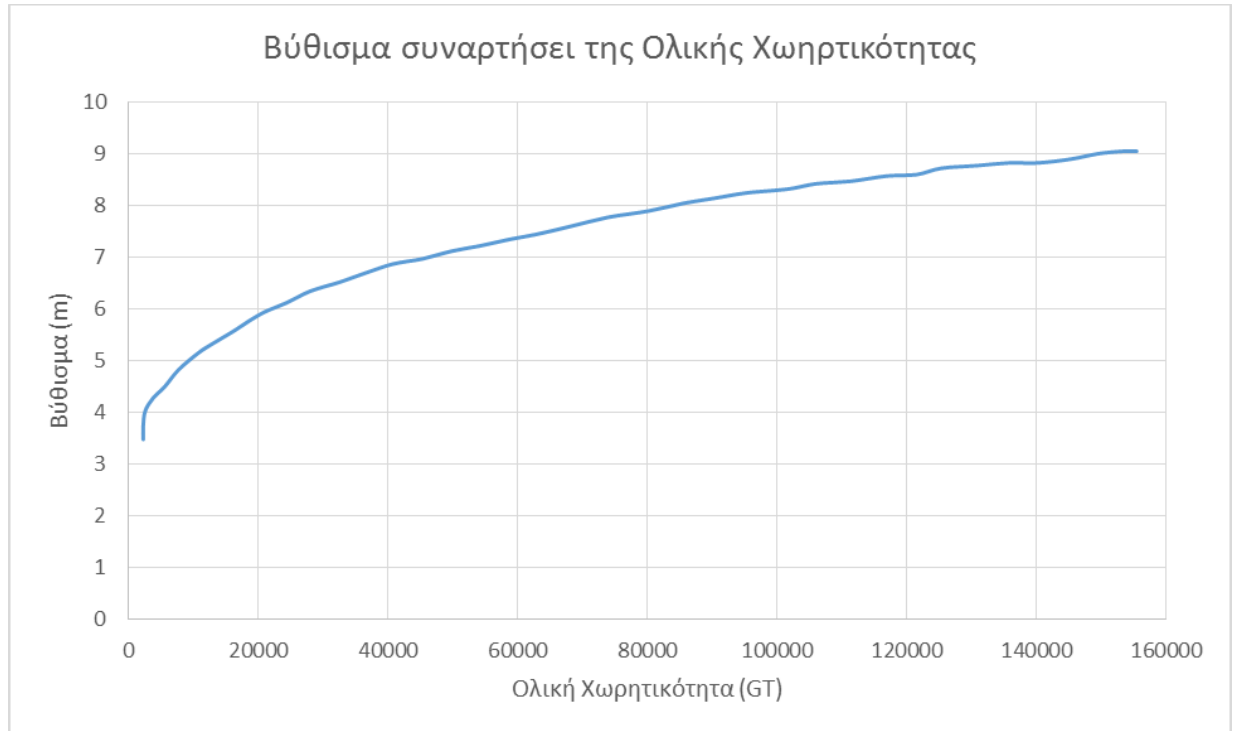
$$\Delta = L \times B \times T \times C_B \times 1.025 \geq (Lightship + Deadweight)_{Method} \quad (2.6)$$



Σχήμα 2.16: Μήκος συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]



Σχήμα 2.17: Πλάτος συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]



Σχήμα 2.18: Βύθισμα συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]

Φυσικά, σημειώνεται ότι οι συνήθεις τιμές του συντελεστή γάστρας για τα κρουαζιερόπλοια είναι συνήθως μεταξύ του 0.55 και του 0.65. Στο σημείο αυτό μπορούν να υπολογιστούν οι συντελεστές μορφής της γάστρας, σύμφωνα με τις ακόλουθες εμπειρικές σχέσεις:

1. Ο συντελεστής ισάλου επιφάνειας C_{WL} υπολογίζεται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο:

$$C_{WL} = \frac{1 + 2 * C_B}{3} \quad (2.7)$$

2. Ο συντελεστής μέσης τομής C_M προέκυψε από το μέσο όρων των τριών παρακάτω σχέσεων:

$$\text{V. Lammeren: } C_{M1} = 0.9 + 0.1 \cdot C_b \quad (2.8)$$

$$\text{H. Kerlen: } C_{M2} = 1.006 - 0.0056 \cdot C_b^{-3.56} \quad (2.9)$$

$$\text{Εργαστήριο HSVA: } C_{M3} = \frac{1}{1 + (1 - C_b)^{3.5}} \quad (2.10)$$

$$\text{Μέσος Όρος: } C_M = (C_{M1} + C_{M2} + C_{M3})/3 \quad (2.11)$$

3. Ο πρισματικός συντελεστής C_P δίνεται από τη σχέση:

$$C_P = \frac{C_B}{C_M} \quad (2.12)$$

Συνεχίζοντας, αφού ικανοποιηθεί η απαίτηση για το εκτόπισμα, τότε θα πρέπει να τηρούνται και οι ακόλουθες:

$$V_{γάστρας} + V_{υπερκατασκευών} \geq \sum V_{\text{συστήματος περιγραφής}} \quad (2.13)$$

$$A_{γάστρας} + A_{υπερκατασκευών} \geq \sum A_{\text{συστήματος περιγραφής}} \quad (2.14)$$

όπου:

- $V_{γάστρας} = L * B * D * C_{B,D}$ (2.15)

- $V_{υπερκατασκευών} = \sum_1^N (L_{sup,i} * B_i * h_{sup,i} * C_{WLSup,i})$ (2.16)

- $A_{γάστρας} = \sum_1^M (B_i * h_{hull,i} * C_{WL,i})$ (2.17)

- $A_{υπερκατασκευών} = \sum_1^N (B_i * h_{sup,i} * C_{WLSup,i})$ (2.18)

Σημειώνεται ότι ο αριθμός N αναπαριστά των αριθμό των καταστρωμάτων της υπερκατασκευής, ο αριθμός M αναπαριστά των αριθμό των καταστρωμάτων της γάστρας. Όπως γίνεται κατανοητό, πραγματοποιούνται δοκιμές ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις όγκου και επιφανείας, τροποποιώντας τους αριθμούς των καταστρωμάτων και τα ύψη μεταξύ των καταστρωμάτων (h_{sup} και h_{hull}). Σε περίπτωση όπου κανένας συνδυασμός δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις, τότε θα πρέπει να επιλεγεί διαφορετικός συντελεστής γάστρας και να επαναληφθεί ξανά η διαδικασία. Ακόμη, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συμβολισμοί $V_{\text{συστήματος περιγραφής}}$ και $A_{\text{συστήματος περιγραφής}}$ παραπέμπουν στο συνολικό όγκο και επιφάνεια, αντίστοιχα, που προκύπτουν στον Πίνακας 2.3.

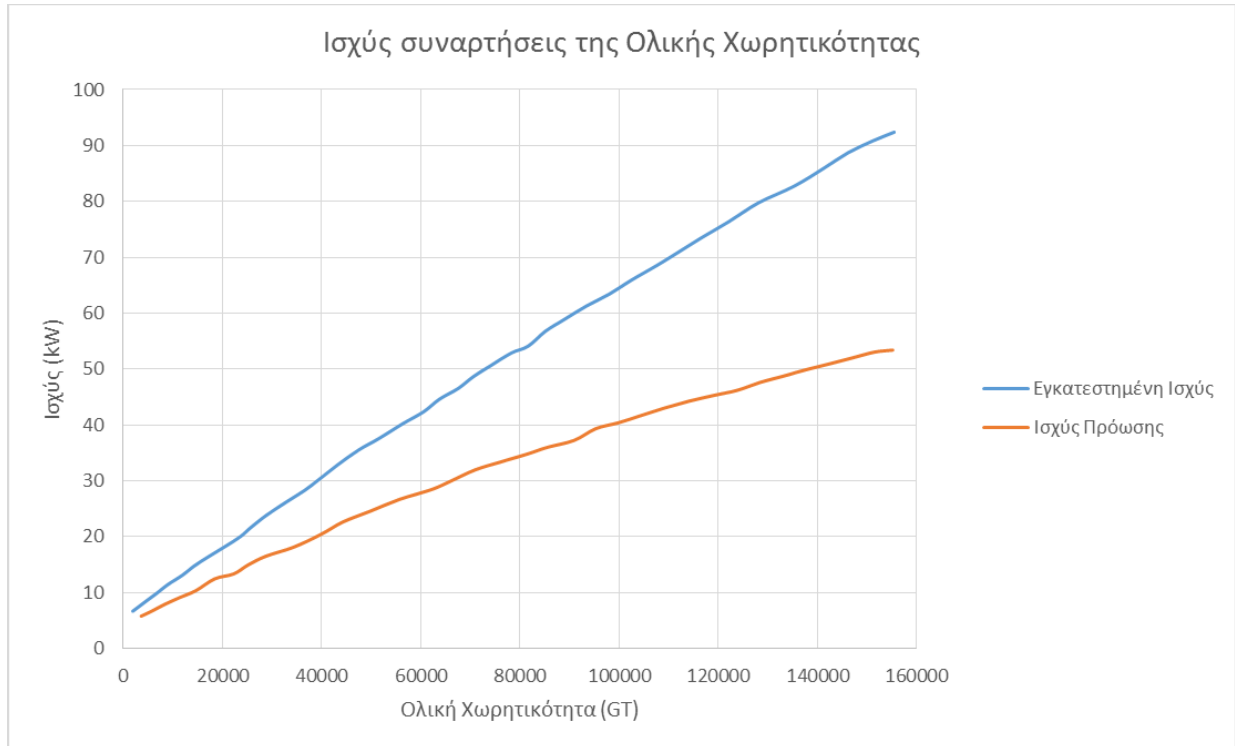
Τέλος, αφού ικανοποιηθούν, τα παραπάνω τότε θα πρέπει να καλύπτονται οι απαιτήσεις της ευστάθειας και της εγκατεστημένης ισχύος. Για την απαίτηση της ευστάθειας θα πρέπει:

$$GM = KM - KG \geq \text{άθικτη ευστάθεια και ευστάθεια σε περίπτωση βλάβης} \quad (2.19)$$

Ενώ για την απαίτηση της ισχύος θα πρέπει:

$$P_{\text{εγκατεστημένη}} \geq P_{\text{πρώσης}} + P_{\text{φορτίσεων ξενοδοχείου}} \quad (2.20)$$

Θα πρέπει η τιμή της εγκατεστημένης ισχύος, που χρησιμοποιήθηκε στον Πίνακας 2.4, να είναι σε συμφωνία με αυτήν που προκύπτει από το Σχήμα 2.19.

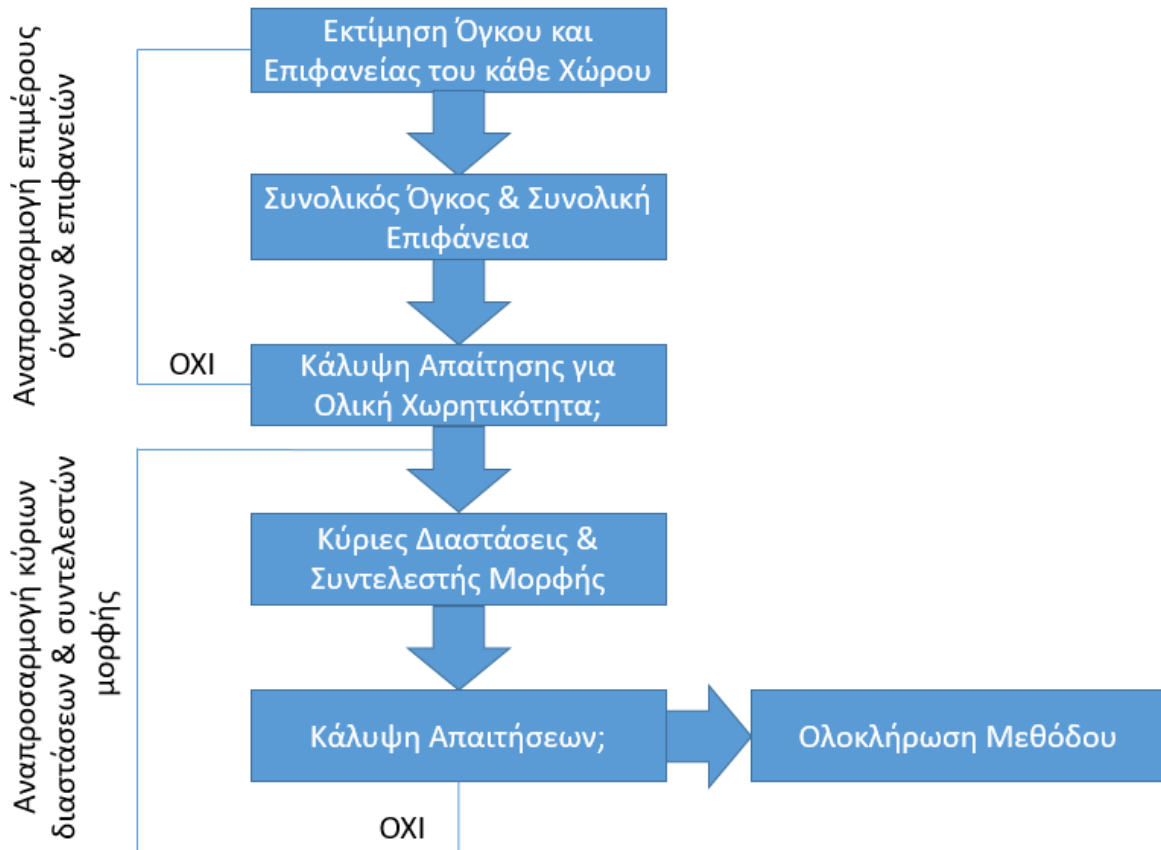


Σχήμα 2.19: Ισχύς συναρτήσεις της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]

Κλείνοντας την ενότητα αυτή, στο Σχήμα 2.20, συνοψίζονται όλα τα παραπάνω ώστε να αποκτηθεί μια εικόνα της επαναληπτικής διαδικασίας που απαιτείται για την εκτίμηση των κύριων διαστάσεων και των συντελεστών μορφής ενός κρουαζιερόπλοιου. Επιπλέον, στο Παράρτημα Β, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της μεθόδου αυτής, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει βαθύτερα τη διαδικασία αυτή.

2.4 Ιδιαιτερότητες της μεταλλικής κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων

Για την παρουσίαση των ιδιαιτεροτήτων της μεταλλικής κατασκευής των επιβατηγών πλοίων επιλέχθηκε σε πρώτη φάση, να παρουσιαστούν δυο συγκεντρωτικοί πίνακες. Αυτοί δείχνουν κυρίως τις αναλογίες μεταξύ των βαρών του πλοίου (Πίνακας 2.6) και τις αναλογίες μεταξύ των κύριων διαστάσεων και των συντελεστών μορφής για τους διάφορους τύπους πλοίων (Πίνακας 2.7). Στόχος μέσα από αυτή τη διαδικασία είναι να αποκτηθεί μια πρώτη αντίληψη των ιδιαιτεροτήτων της δομής των επιβατηγών πλοίων σε σχέση με τα υπόλοιπα. Φυσικά, οι αριθμοί που παρουσιάζονται είναι προσεγγιστικοί και δεν αποτελούν κανόνα.



Σχήμα 2.20: Βήματα εκτέλεσης της μεθοδολογίας μελέτης και σχεδίασης κρουαζιερόπλοιων

Πίνακας 2.6: Αναλογίες βαρών ανά τύπο πλοίου [11]

Τύπος Πλοίου	Όρια		DWT/Δ [%]	Wst/LS [%]	Wot/LS [%]	Wm/LS [%]
	Κάτω	Άνω				
Γενικού Φορτίου (General Cargo)	5000 DWT	15000 DWT	65 - 80	55 - 64	19 - 33	44866
Φ/Γ Χύδην (Bulk Carrier)	20000 DWT	50000 DWT	74 - 80	68 - 79	10 - 17	12 - 16
	50000 DWT	150000 DWT	80 - 87	78 - 85	6 - 13	8 - 14
Δεξαμενόπλοιο (Tanker)	25000 DWT	120000 DWT	68 - 83	73 - 83	5 - 12	11 - 16
	200000 DWT	max	83 - 88	75 - 88	9 - 13	9 - 16
Φ/Γ Εμπορευματοκιβωτίων (Containership)	10000 DWT	15000 DWT	60 - 76	58 - 71	15 - 20	9 - 22
	15000 DWT	50000 DWT	60 - 70	62 - 72	14 - 20	15 - 18
Μικρά Επιβατηγά (Passenger Ferry / Passenger Ship)	L ≈ 50 m	L ≈ 120 m	15 - 25	50 - 52	28 - 31	20 - 29
Μεγάλα Επιβατηγά (Passenger Ship)	L ≈ 200 m	max	23 - 34	52 - 56	30 - 34	15 - 20

Πίνακας 2.7: Αναλογίες διαστάσεων και συντελεστές γάστρας ανά τύπο πλοίου [11]

Τύπος	Λόγοι Κύριων Διαστάσεων				Συντελεστές Γάστρας			
	L/B	B/T	L/D	L/V ^{1/3}	Cb	Cm	Cp	Cw
Γενικού Φορτίου (General Cargo)	6.5 - 7.1	2.2 - 2.6	11.0 - 12.0	5.6 - 5.9	0.56 - 0.64	0.97 - 0.98	0.57 - 0.65	0.68 - 0.74
Φ/Γ Χύδην (Bulk Carrier)	7.2 - 7.6	2.2 - 2.6	11.5 - 13.5	5.3 - 5.5	0.78 - 0.83	0.990 - 0.997	0.79 - 0.84	0.88 - 0.92
Δεξαμενόπλοιο (Tanker)	6.8 - 7.1	2.4 - 2.8	12.7 - 14.0	5.3 - 5.6	0.83 - 0.85	0.992 - 0.996	0.835 - 0.855	0.88 - 0.94
Φ/Γ Εμπορευματοκιβωτίων (Containership)	6.3 - 7.2	2.1 - 2.3	11.0 - 12.0	5.2 - 5.4	0.65 - 0.73	0.97 - 0.995	0.66 - 0.74	0.80 - 0.86
Μικρά Επιβατηγά (Passenger Ferry / Passenger Ship)	8.2 - 9.0	2.8 - 3.2	10.4 - 11.8	7.0 - 7.3	0.54 - 0.56	0.94 - 0.97	0.56 - 0.58	0.67 - 0.70
Μεγάλα Επιβατηγά (Passenger Ship)	6.3 - 7.0	2.8 - 3.4	8.0 - 10.0	6.2 - 6.6	0.56 - 0.59	0.93 - 0.97	0.58 - 0.635	0.71 - 0.76

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε ένα κρουαζιερόπλοιο, η μεταφορική ικανότητα και οι παρεχόμενες ανέσεις αποτελούν τις κυριότερες απαιτήσεις σχεδίασης. Καθοριστικοί παράγοντες για μια επιτυχημένη σχεδίαση είναι η λειτουργική διάταξη των χώρων, η ευχέρεια στις μετακινήσεις, η επιβιωσιμότητα (δηλαδή η εγκατάλειψη του πλοίου σε περίπτωση κινδύνου), αλλά και η αισθητική, η διακόσμηση και οι παρεχόμενες ανέσεις προς τους επιβάτες.

Προς ικανοποίηση των παραπάνω, κύριο μέλημα είναι η επίτευξη της μεγαλύτερης δυνατής συνολικής επιφάνειας καταστρωμάτων και εσωτερικών χώρων (όγκος), σε σχέση πάντα με τις δεδομένες διαστάσεις του πλοίου. Το παραπάνω αποτελεί βασικό σχεδιαστικό παράγοντα προκειμένου να εξασφαλίζεται η μέγιστη μεταφορική ικανότητα επιβατών αλλά και οι υψηλές ανέσεις και υπηρεσίες. Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω απαιτείται η κατασκευή πολλαπλών καταστρωμάτων. Τονίζεται ότι δεν είναι δυνατή η επίτευξη της απαιτούμενης συνολικής επιφάνειας, χωρίς την κατασκευή μιας υπερκατασκευής πολλών επιπέδων (καταστρώματα). Η υπερκατασκευή αυτή (ή σε κάποιες περιπτώσεις το υπερστέγασμα, όπως καταγράφεται σε επόμενο κεφάλαιο) εκτείνεται συνήθως από την περιοχή της πλώρης μέχρι και πριν την περιοχή της πρωραίας καθέτου. Τα μοντέρνα κρουαζιερόπλοια είναι αρκετά ψηλά και εκτείνονται περισσότερο από 30 μέτρα καθ' ύψος, ενώ την ίδια στιγμή, το πλοίο εκτείνεται μόνο περίπου 7 μέτρα κάτω από το νερό. Γεγονός αποτελεί ότι η ύψωση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου επιφέρει σοβαρά προβλήματα ευστάθειας και αντοχής. Τα προβλήματα αυτά καλείται να αντιμετωπίσει ο μελετητής ναυπηγός και, μάλιστα, κατά το στάδιο της προμελέτης με τη χρήση διαφόρων μεθόδων, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια. Τα πολλαπλά καταστρώματα ανεβάζουν αρκετά το κέντρο βάρους του πλοίου και αυξάνουν την πλευρική επιφάνεια του πλοίου κάνοντας το με αυτό τον τρόπο ιδιαίτερα ευαίσθητο σε πλευρικούς ανέμους. Βέβαια, το φαινόμενο μετριάζεται καθώς πολλές φορές τοποθετείται μόνιμο έρμα προκειμένου το κέντρο βάρους να κατέβει σε ένα επιθυμητό επίπεδο. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, οι ισχυροί άνεμοι προκαλούν μεγάλες ροπές ανατροπής κάτι το οποίο επιφέρει αυξημένες εγκάρσιες κλίσεις. Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται συχνά και με την εφαρμογή ελαφρύτερων υλικών (π.χ. αλουμίνιο, προηγμένα σύνθετα υλικά κλπ.), στα άνω μέρη του πλοίου, τα οποία χαμηλώνουν το κέντρο βάρους. Άλλες μέθοδοι για τη βελτίωση της ευστάθειας είναι η αύξηση του πλάτους του πλοίου.

Όπως διαπιστώνεται και από τους προηγούμενους πίνακες, ένα ακόμη χαρακτηριστικό των κρουαζιερόπλοιων είναι το χαμηλό DWT σε σχέση με το εκτόπισμά τους (της τάξης του 30%). Αυτό συμβαίνει διότι το βάρος των επιβατών (φορτίο) σε σχέση με το βάρος της μεταλλικής κατασκευής είναι

κατά πολύ μικρότερο. Άλλωστε για αυτό το λόγο τα κρουαζιερόπλοια ανήκουν στην κατηγορία των πλοίων κυβισμού (και όχι εκτοπίσματος, όπως είναι για παράδειγμα τα δεξαμενόπλοια). Για λόγους πληρότητας αναφέρεται ότι τα πλοία κυβισμού είναι τα πλοία μεταφοράς σχετικά ελαφρών φορτίων (π.χ. βαμβάκι, φρούτα, άνθρωποι, κλπ.), με συντελεστή στοιβασίας $S.F. \geq 2.0 m^3/t$. Συνεχίζοντας, θα μπορούσε να πει κανείς, δηλαδή, ότι το φορτίο (επιβάτες) είναι ελαφρύ, συγκρίνοντας το με τον όγκο που καταλαμβάνει στο πλοίο.

Επιπλέον, ένα από τα προβλήματα που καλείται να αποφανθεί ο μελετητής ναυπηγός είναι το κατά πόσο θα συμμετέχει η υπερκατασκευή στη διαμήκη αντοχή. Πόσο μήκος θα έχει η υπερκατασκευή, ώστε να συμμετέχει ή όχι στη διαμήκη αντοχή; Ποια από τα καταστρώματα του πλοίου θα συνεισφέρουν σε αυτή; Τα ερωτήματα αυτά θα απαντηθούν εκτενώς εν συνεχεία. Επιπλέον, την αντοχή του πλοίου επηρεάζουν και τοπικοί παράγοντες όπως τα μεγάλα πλευρικά ανοίγματα στην πλευρές του πλοίου. Επιπλέον, ένα από τα κυριότερα θέματα που έρχεται αντιμέτωπος ο σχεδιαστής είναι η έλλειψη συνεχόμενων διαμήκων φρακτών ανάμεσα στα καταστρώματα. Επιπρόσθετα, τα εσωτερικά ανοίγματα (π.χ. σκαλοπάτια, ασανσέρ κλπ.) μειώνουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα της κατασκευής.

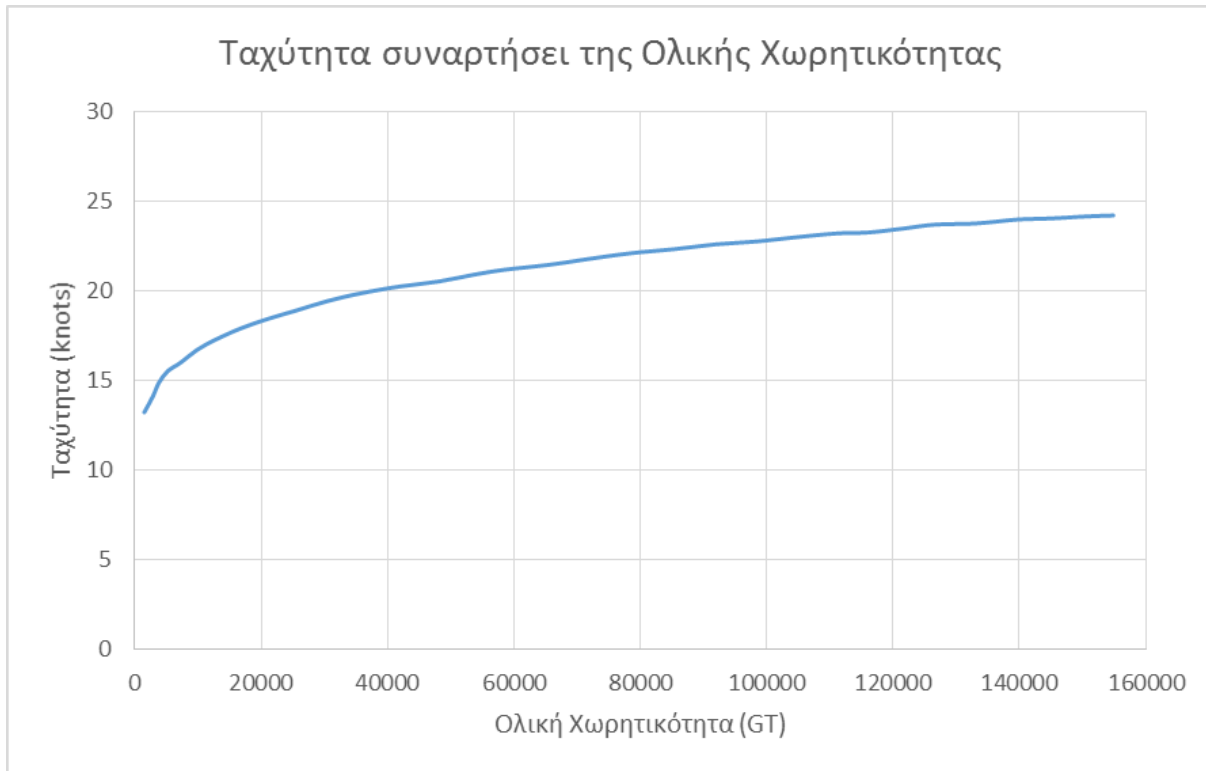
Επόμενο ζήτημα του μελετητή είναι οι τρόποι ενίσχυσης της κατασκευής του πλοίου. Διαπιστώνεται ότι καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την εφαρμογή εγκάρσιων και διαμήκων φρακτών, κολώνων αλλά και άλλων κατασκευαστικών στοιχείων τα οποία πρέπει να εκτείνονται εάν είναι δυνατόν σε όλη την έκταση του πλοίου. Τονίζεται ακόμη ότι οι μεγάλες ανυποστήρικτες επιφάνειες πρέπει να αποφεύγονται για λόγους δονήσεων και λυγισμών. «Τα ανοίγματα των δοκών δεν πρέπει να ξεπερνούν τα 6 με 8 m» [10]. Η διαμόρφωση της γάστρας χαρακτηρίζεται από μεικτό σύστημα ενίσχυσης. Συγκεκριμένα, στα καταστρώματα χρησιμοποιείται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης ενώ στις πλευρές το εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης (πρακτικότερη τοποθέτηση δικτύων και σωληνώσεων). Η διαμήκης απόσταση των νομέων είναι περίπου 600 με 800 mm, ενώ των ενισχυμένων νομέων από 2 έως 3.2 m και στις περισσότερες των περιπτώσεων παρατηρείται να προσαρμόζεται στις διαστάσεις της κάθε καμπίνας.

Σχετικά με τη σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων, ο συντελεστής γάστρας κυμαίνεται μεταξύ 0.55 και 0.65. Αυτό δηλώνει ότι τα πλοία αυτά χαρακτηρίζονται από λεπτόγραμμη γάστρα, η οποία είναι ικανή να αναπτύξει σχετικά υψηλές ταχύτητες. Συγκεκριμένα, η συνηθισμένη ταχύτητα υπηρεσίας των κρουαζιερόπλοιων είναι μεταξύ 15 και 25 κόμβων, ενώ η μέγιστη ταχύτητά τους είναι συνήθως 2 με 3 κόμβους υψηλότερη. Μεγαλύτερες ταχύτητες θεωρούνται περιττές καθώς το ταξίδι αποτελεί μέρος των διακοπών του επιβάτη, σε αντίθεση με άλλους τύπους επιβατηγών πλοίων (π.χ. passenger ferry). Αυτό επιβεβαιώνεται και με τη βοήθεια του ακόλουθου σχήματος, στο οποίο διαπιστώνεται ότι με την αύξηση του μεγέθους του πλοίου (ως επί το πλείστον αύξηση του χρόνου ταξιδιού) δεν αυξάνεται αισθητά η ταχύτητα του κρουαζιερόπλοιου.

Σε περιπτώσεις όπου το ταξίδι δεν αποτελεί αναψυχή αλλά μια μετακίνηση στόχος είναι ο ελάχιστος δυνατός χρόνος ταξιδιού. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ταχύτητες είναι από 27 έως 31 κόμβους (Passenger Ferry), ενώ σε ειδικές περιπτώσεις (μη συμβατικής σχεδίασης σκάφη με $F_n \geq 0.50$) αγγίζουν και τους 40 κόμβους (High Speed Passenger Ferry). Από την άλλη η επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων είναι αντιοικονομική καθώς η απαιτούμενη ισχύς αυξάνεται σημαντικά με συνέπεια την υπέρμετρη αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων. Επιπλέον, μια αύξηση της υποδύναμης έπεται σημαντικής αύξησης του κόστους κατασκευής καθώς απαιτείται μεγαλύτερος μηχανολογικός εξοπλισμός αλλά και μεγαλύτερες δεξαμενές καυσίμων.

Οι τελευταίες τάσεις σχεδίασης των κρουαζιερόπλοιων μπορούν να μελετηθούν παρατηρώντας τις τελευταίες ναυπηγήσεις αλλά και τις νέες παραγγελίες. Στα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια παρατηρείται έντονη αύξηση του μεγέθους τους, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν κατασκευάζονται και μικρότερα

κρουαζιερόπλοια. Παρόλα αυτά το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις πρωτότυπες σχεδιάσεις, οι οποίες δεν είναι άλλες από τις σχεδιάσεις των μεγάλων κρουαζιερόπλοιων. Ένα ερώτημα που δημιουργείται στο σημείο αυτό είναι αν υπάρχει κάποιο όριο στο όλο και αυξανόμενο μέγεθος των πλοίων αυτών.

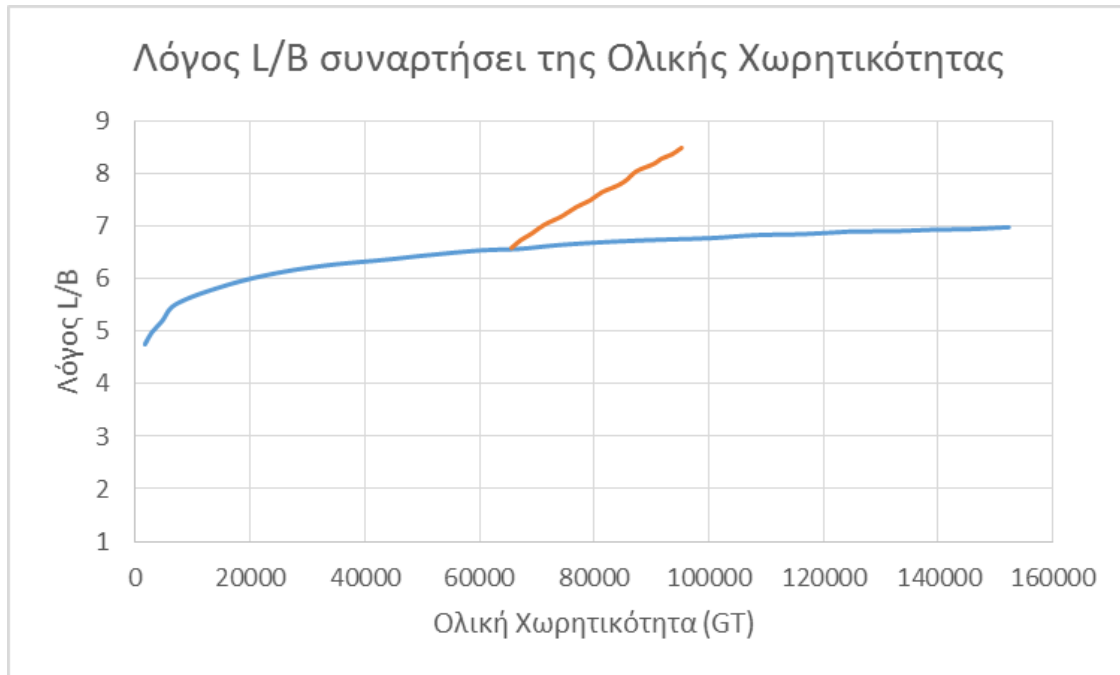


Σχήμα 2.21: Ταχύτητα συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]

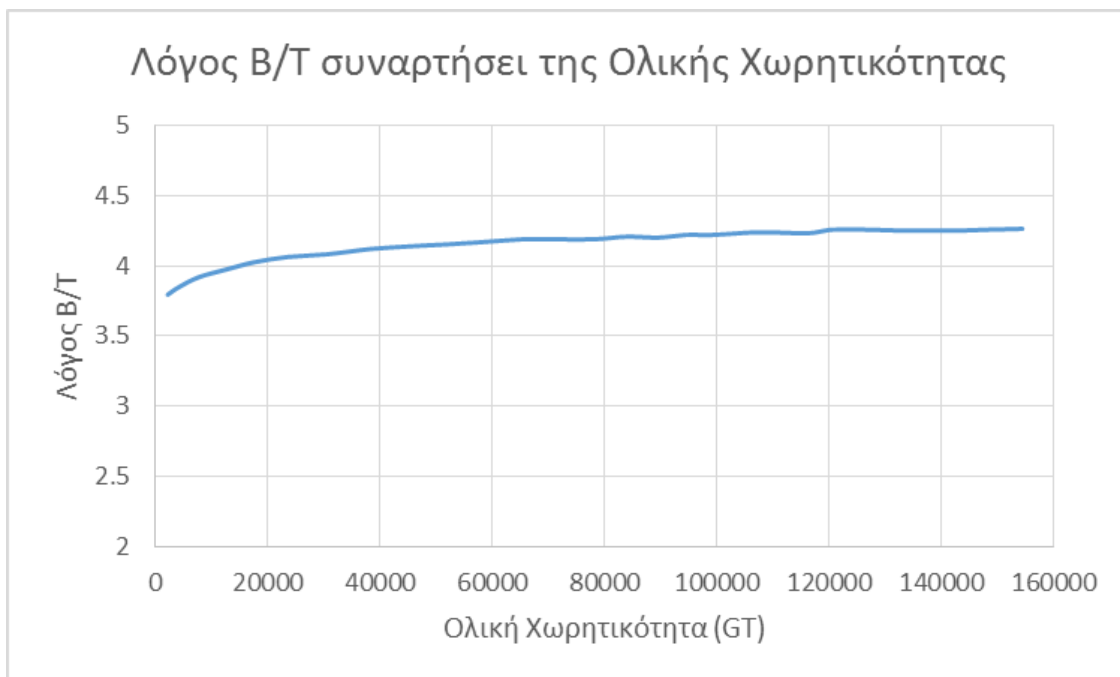
Δεν είναι λίγες οι φορές όπου το μέγεθος ενός πλοίου καθορίζεται από τους περιορισμούς ναυσιπλοΐας, όπως το βύθισμα, το πλάτος και το μήκος. Ο παράγοντας «βύθισμα» δεν είναι κάτι που απασχολεί τη σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων καθώς δεν χαρακτηρίζονται από μεγάλα βυθίσματα, όπως άλλα εμπορικά πλοία (π.χ. bulk carriers, tankers κλπ.). Από την άλλη όμως, το πλάτος και το μήκος αποτελούν παράγοντες που μπορούν να περιοριστούν από τους περιορισμούς ναυσιπλοΐας. Για παράδειγμα, τα κρουαζιερόπλοια που εκτελούν ταξίδια στην περιοχή της Καραϊβικής, λόγω της διώρυγας του Παναμά, καλούνται να αντιμετωπίσουν σημαντικούς περιορισμούς ναυσιπλοΐας. Συγκεκριμένα, το μήκος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 294.13m, το πλάτος τα 32.31m και βύθισμα τα 12.04m. Σημαντικός περιορισμός στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων είναι και το ύψος εξάλων, το οποίο δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 57.91m. Βέβαια, οι παραπάνω περιορισμοί ενδέχεται να αλλάξουν με την ανακατασκευή του καναλιού του Παναμά (New Panamax). Έτσι, το μήκος δεν θα πρέπει να ξεπερνά τα 366m, το πλάτος τα 49m, το βύθισμα τα 15.2m και το ύψος εξάλων τα 57.91m. Τα υπόλοιπα κανάλια έχουν μεγαλύτερες ανοχές και κατά συνέπεια δεν αποτελούν έντονη ανησυχία για το σχεδιαστή ναυπηγό, στην περίπτωση των επιβατηγών πλοίων.

Κλείνοντας, έχει παρατηρηθεί ότι καθώς το μέγεθος του κρουαζιερόπλοιου αυξάνεται το μήκος μεταβάλλεται σημαντικά σε σχέση με το πλάτος. Μάλιστα, το φαινόμενο αυτό είναι πολύ έντονο στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων Panamax (πορτοκαλί γραμμή στο Σχήμα 2.22). Όπως διαπιστώνεται

στο Σχήμα 2.22, ο λόγος L_{PP}/B αυξάνεται καθώς μεγαλώνει το μέγεθος του πλοίου, σε αντίθεση με το λόγο B/T , όπου παραμένει σχεδόν σταθερός (Σχήμα 2.23). Έτσι, το μήκος ενός κρουαζιερόπλοιου είναι ίσο με 5 έως και 7 φορές το πλάτος του, ενώ το πλάτος είναι ίσο περίπου με το τετραπλάσιο του βυθίσματος.



Σχήμα 2.22: Λόγος L_{PP}/B συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]



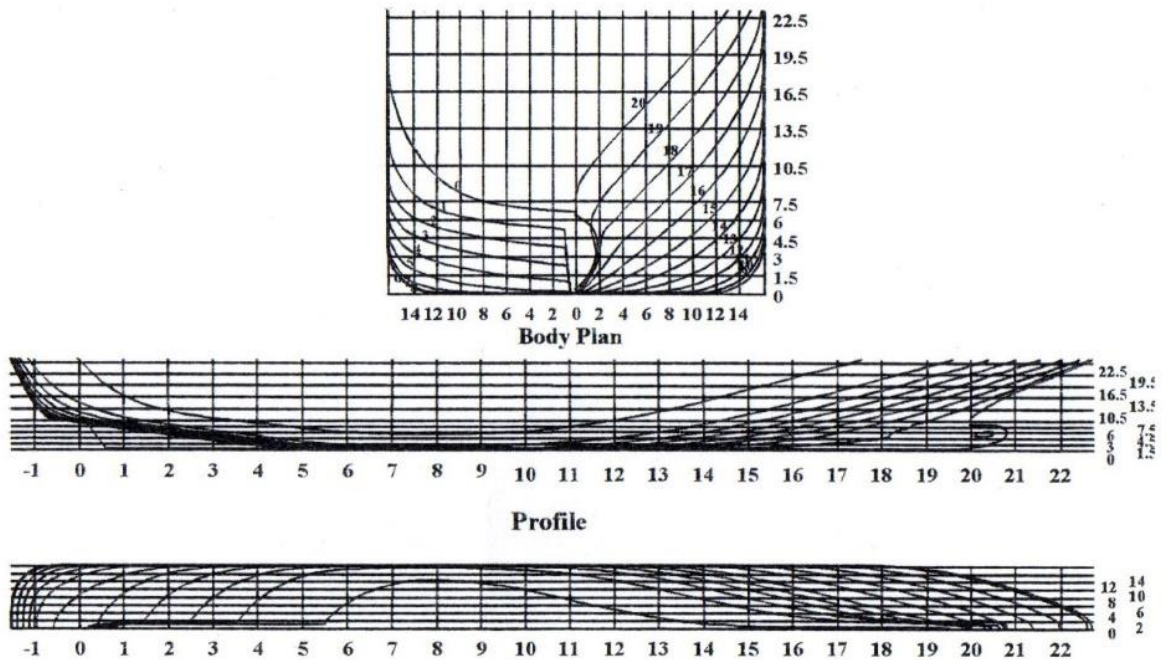
Σχήμα 2.23: Λόγος B/T συναρτήσει της ολικής χωρητικότητας (κρουαζιερόπλοια) [10]

2.5 Γενική Διάταξη – Η συμβολή του αρχιτέκτονα

2.5.1 Εισαγωγή

Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα πλοία, τα κρουαζιερόπλοια χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη Γενική Διάταξη (General Arrangement), κάτι που οφείλεται σε διάφορους παράγοντες, οι οποίοι έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες ενότητες. Λόγω της περίπλοκης δομής και κυρίως του παράγοντα «άνθρωπος», επιβάλλεται η συμμετοχή του αρχιτέκτονα, πέραν του ναυπηγού. Σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Γ μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη γενική διάταξη δυο κρουαζιερόπλοιων.

Ο ναυπηγός από τα πρώτα στάδια της μελέτης καλείται να σχεδιάσει τις γραμμές του κρουαζιερόπλοιου (βλέπε Σχήμα 2.24) με βάση τους ισχύοντες κανονισμούς και περιορισμούς αλλά και τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη. Σύμφωνα με αυτές τις γραμμές, ο αρχιτέκτονας διαμορφώνει την εσωτερική διάταξη του πλοίου. Η ανάγκη της συμβολής του αρχιτέκτονα έγκειται στο γεγονός ότι εκείνος γνωρίζει καλύτερα τις αρχές σχεδίασης των εσωτερικών χώρων, ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή κατοικησιμότητα (habitability) και λειτουργικότητα. Εν συνεχεία, ο ναυπηγός οφείλει να εξετάσει την αντοχή του πλοίου με βάση τη διαμορφωμένη κατασκευή που πρότεινε ο αρχιτέκτονας, προκειμένου το πλοίο να πιστοποιηθεί ότι είναι ασφαλές, από τον νηογνώμονα. Μάλιστα, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων πέραν των θεμάτων αντοχής, ευστάθειας, κλπ..



Σχήμα 2.24: Γραμμές ενός κρουαζιερόπλοιου Panamax [10]

Υπάρχει ακόμη μια πιστοποίηση, αυτή της άνεσης (comfort class). Σύμφωνα με το Γερμανικό Νηογνώμονα, υπάρχουν πέντε κατηγορίες για την άνεση, όπως φαίνονται ακολούθως:

- Κατηγορία E = ***** = άριστη άνεση
- Κατηγορία 1 = **** = πολύ υψηλή άνεση
- Κατηγορία 2 = *** = υψηλή άνεση
- Κατηγορία 3 = ** = μέτρια άνεση
- Κατηγορία 4 = * = αποδεκτή άνεση

Η κατάταξη ενός πλοίου σε μια από αυτές τις πέντε κατηγορίες εξαρτάται από τα επίπεδα θορύβων και δονήσεων που παρατηρούνται. Προκειμένου ο αναγνώστης να ενημερωθεί σχετικά με αυτά τα όρια, τα οποία καθορίζουν τις άνω κατηγορίες, επισυνάπτεται σχετική αναφορά στο Παράρτημα Δ.

Στο σημείο αυτό πρέπει να καταγραφεί ότι η διαδικασία της σχεδίασης των εσωτερικών χώρων και του ελέγχου της αντοχής του πλοίου αποτελεί μια επαναληπτική διαδικασία, καθώς απαιτούνται αρκετές τροποποιήσεις έως ότου επιτευχθεί το καλύτερο αισθητικά αποτέλεσμα, με την ταυτόχρονη τήρηση των κανονισμών.

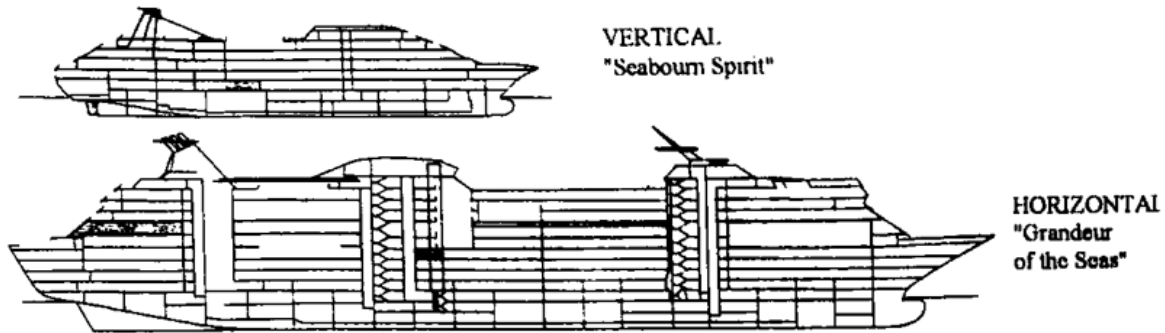
Φυσικά, ένας επιβάτης μπορεί να αναγνωρίσει μέσω της δράσης του τη σωστή συνοχή των χώρων ανάλογα με το πόσο αυτοί διευκολύνουν τις ενέργειές του και την καθημερινότητα του μέσα στο κρουαζιερόπλοιο. Μια κοινώς αποδεκτή συνοχή των χώρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.25 μέσω ενός τρισδιάστατου μοντέλου του κρουαζιερόπλοιο MSC Poesia.



Σχήμα 2.25: Τρισδιάστατο μοντέλο του MSC Poesia στο οποίο παρουσιάζεται η γενική διάταξη [16]

Η παραπάνω γενική διάταξη βασίζεται στην οριζόντια διάταξη των χώρων. Γενικώς, η σχεδίαση της γενικής διάταξης μπορεί να βασιστεί είτε σε μια κατακόρυφη είτε σε μια οριζόντια διάταξη χώρων (βλέπε Σχήμα 2.26). Στην κατακόρυφη διάταξη παρόμοιοι χώροι επιβατών τοποθετούνται ο ένας πάνω από τον άλλο, ενώ στην οριζόντια οι χώροι είναι κατά το διάμηκες κατανεμημένοι, σε όλο το μήκος του πλοίου (βλέπε Σχήμα 2.28). Τα τελευταία χρόνια η οριζόντια διάταξη είναι η πιο κοινή, λόγω των κανονισμών για τα σωστικά μέσα, όπου απαιτούν τα καπόνια (davit) των σωστικών μέσων να μην είναι τοποθετημένα σε ύψος πάνω από 15 μέτρα από την ίσαλο γραμμή. Στα μεγάλα κρουαζιερόπλοια, τοποθετούνται αρκετά καταστρώματα πάνω από το κατάστρωμα των σωστικών λέμβων (boat deck). Θα πρέπει να υπάρχει άμεση πρόσβαση στις σωστικές λέμβους από όλες τις ζώνες πυρός (fire zones) και ως εκ τούτου το κατάστρωμα λέμβων εκτείνεται συχνά από την πλώρη έως την πρύμνη. Αυτό διαιρεί το πλοίο οριζόντια και σχηματίζει μια βάση για την οριζόντια διάταξη και των άλλων χώρων. Η κατακόρυφη διάταξη σήμερα χρησιμοποιείται μόνο στα μικρά κρουαζιερόπλοια (π.χ. yacht style cruise ship), όπως φαίνεται στο Σχήμα

2.27. Πολλά άλλα παραδείγματα σχεδίων γενικής διάταξης επιβατηγών μπορούν να βρεθούν σε διάφορες δημοσιεύσεις.



Σχήμα 2.26: Κατακόρυφη και οριζόντια διάταξη [10]



Σχήμα 2.27: Seabourn Spirit [17]



Σχήμα 2.28: Grandeur of the Seas [18]

Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι στις μέρες μας η ενδιαίτηση των αξιωματικών και του πληρώματος είναι αισθητά βελτιωμένη παρέχοντας περισσότερες ανέσεις. Αυτό βέβαια αυξάνει τον καταλαμβανόμενο όγκο στο πλοίο κάτι το οποίο δεν το επιθυμεί ο πλοιοκτήτης, αφού μειώνεται ο εκμεταλλεύσιμος χώρος (χώροι επιβατών). Ωστόσο, με αμοιβαίες υποχωρήσεις η κατάσταση δείχνει να ισορροπείται προς μια κοινή λύση.

Φυσικά, πρέπει να επισημανθεί ότι το πλοίο, σε αντίθεση με τις δομοστατικές κατασκευές, βρίσκεται σε ένα περιβάλλον το οποίο είναι συνεχώς μεταβαλλόμενο. Αυτό σημαίνει ότι υπόκειται συνεχώς σε στατικές και δυναμικές φορτίσεις. Οι δομοστατικές κατασκευές υποβάλλονται σε στατικές φορτίσεις και σπανιότερα σε δυναμικές (π.χ. σεισμοί, ισχυροί άνεμοι κλπ.), αναλόγως φυσικά και της γεωγραφικής θέσης της κατασκευής. Το γεγονός αυτό επηρεάζει κατά πολύ τις ελευθερίες σχεδίασης του αρχιτέκτονα (π.χ. θέση και έκταση μεγάλων ανυποστήρικτων επιφανειών, όπως οι κινηματογράφοι) καθώς η κατασκευή πρέπει να είναι ικανή να αντέχει σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης (π.χ. έντονη θαλασσοταραχή).

Κλείνοντας, μείζονος σημασίας είναι μεν η καλή εσωτερική κυκλοφορία στο πλοίο αλλά και καθοριστική δε σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης μετά από βλάβη (π.χ. προσάραξη, πυρκαγιά κλπ.). Μάλιστα, η επιβίωση του πλοίου μετά από κατάκλιση αποτελεί διαχρονικά θέμα που απασχολεί τους αρμόδιους φορείς. Οι εθνικοί και διεθνείς οργανισμοί (π.χ. IMO) έχουν θεσπίσει νόμους για τη σωστή διάταξη και σχεδίαση της εσωτερικής κυκλοφορίας. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι η νομοθεσία δεν χρειάζεται βελτίωση καθώς η ύπαρξη ατυχημάτων στις μέρες μας είναι ορατή.

2.5.2 Διάταξη των χώρων

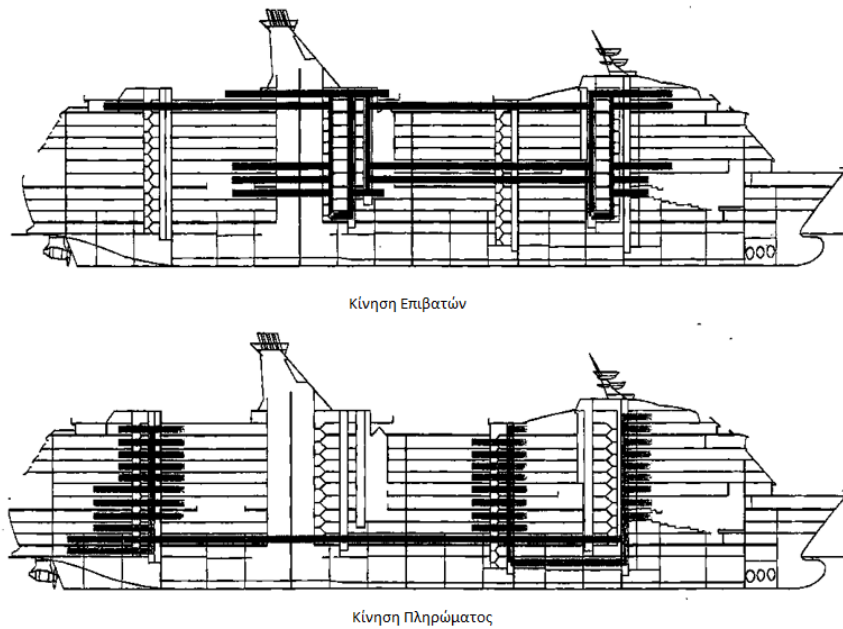
Παρατηρώντας τη γενική διάταξη διαφόρων κρουαζιερόπλοιων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ποιότητα της ενδιαίτησης αυξάνεται από κάτω προς τα πάνω και από την πρύμνη προς την πλώρη (για το ίδιο κατάστρωμα). Σύμφωνα με τους κανονισμούς, δεν επιτρέπεται να τοποθετηθούν καμπίνες μεταξύ της φρακτής σύγκρουσης και του πρωραίου άκρου, όπως επίσης και κάτω από την ίσαλο πλεύσης. Στις περιοχές αυτές αποθηκεύονται συνήθως τα εφόδια και χρησιμοποιούνται ως βοηθητικοί χώροι (π.χ. στρίτσο (chain locker), στορέας της αλυσίδας).

Πιο ειδικά, το μηχανοστάσιο του κρουαζιερόπλοιου, όπως και στα περισσότερα πλοία, είθισται να τοποθετείται κοντά στην πρύμνη. Αυτό σημαίνει ότι οι χώροι ενδιαίτησης των μηχανικών πρέπει να είναι κοντά στο μηχανοστάσιο και κατά συνέπεια κοντά στην πρύμνη. Αυτό προκύπτει διότι το πλήρωμα πρέπει να βρίσκεται κοντά στο χώρο εργασίας του ανά πάσα στιγμή. Ομοίως, οι αξιωματικοί καταστρώματος θα πρέπει να διαμένουν κοντά στη γέφυρα, ενώ το ξενοδοχειακό προσωπικό κοντά στους χώρους εστίασης (π.χ. μαγειρεία, τραπεζαρίες, σαλόνια).

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι το πλήρωμα θα πρέπει άμεσα να μπορεί να πηγαίνει στους χώρους εργασίας του, χωρίς να περνά διαμέσου του χώρου που προορίζεται για τους επιβάτες, όπως για παράδειγμα οι διάδρομοι ή τα ασανσέρ. Ομοίως, οι επιβάτες δεν πρέπει να μετακινούνται από και προς τους κοινόχρηστους χώρους διαμέσου διαδρόμων ή κλιμακοστασίων που χρησιμοποιούνται από το πλήρωμα (βλέπε Σχήμα 2.29).

Όσον αφορά την κίνηση μεταξύ των χώρων ενδιαίτησης και εστίασης θα πρέπει να είναι σωστά ορισμένοι και εύκολα αναγνώσιμοι από τους επιβάτες. Ως αποτέλεσμα οι διάδρομοι κυκλοφορίας οφείλουν να είναι λειτουργικοί και ευρύχωροι. Φυσικά, η διάταξη δεν σχεδιάζεται μόνο για την καθημερινή μετακίνηση των επιβατών αλλά και για τη διακίνηση σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης, όπως

είναι η πυρκαγιά και η κατάκλιση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μετακίνηση προς το κατάστρωμα σωστικών λέμβων οφείλει να γίνεται με τον ασφαλέστερο και ταυτόχρονα γρηγορότερο δυνατό τρόπο.

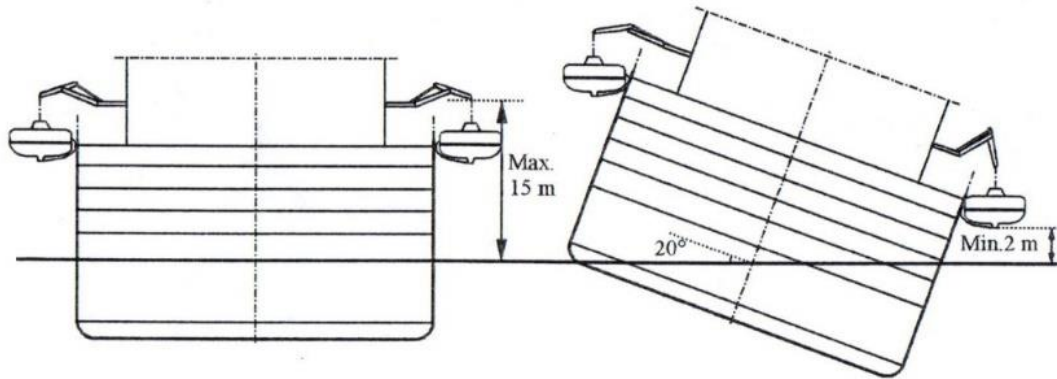


Σχήμα 2.29: Κίνηση των επιβατών και του πληρώματος [10]

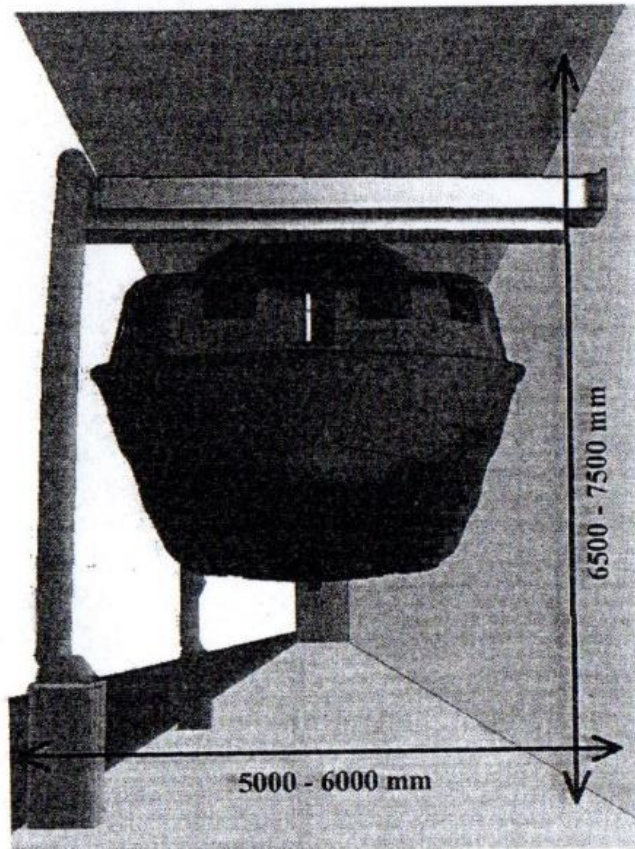
Είναι απαραίτητο να υπάρχει ένα εξωτερικό κατάστρωμα το οποίο χρησιμεύει ως κατάστρωμα επιβίβασης στις σωστικές λέμβους (Σχήμα 2.30), για τις οποίες υπάρχουν σχετικοί περιορισμοί ως προς τη θέση τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.31 και στο Σχήμα 2.32.



Σχήμα 2.30: Σωστικές λέμβοι στο ύψος του καταστρώματος σωστικών λέμβων [19]



Σχήμα 2.31: Απαίτηση για το ύψος των σωστικών λέμβων [10]

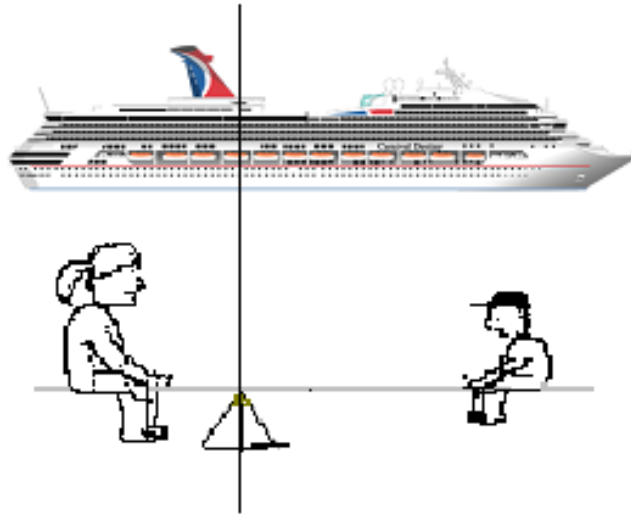


Σχήμα 2.32: Γεωμετρία εσοχής καταστρώματος σωστικών λέμβων [10]

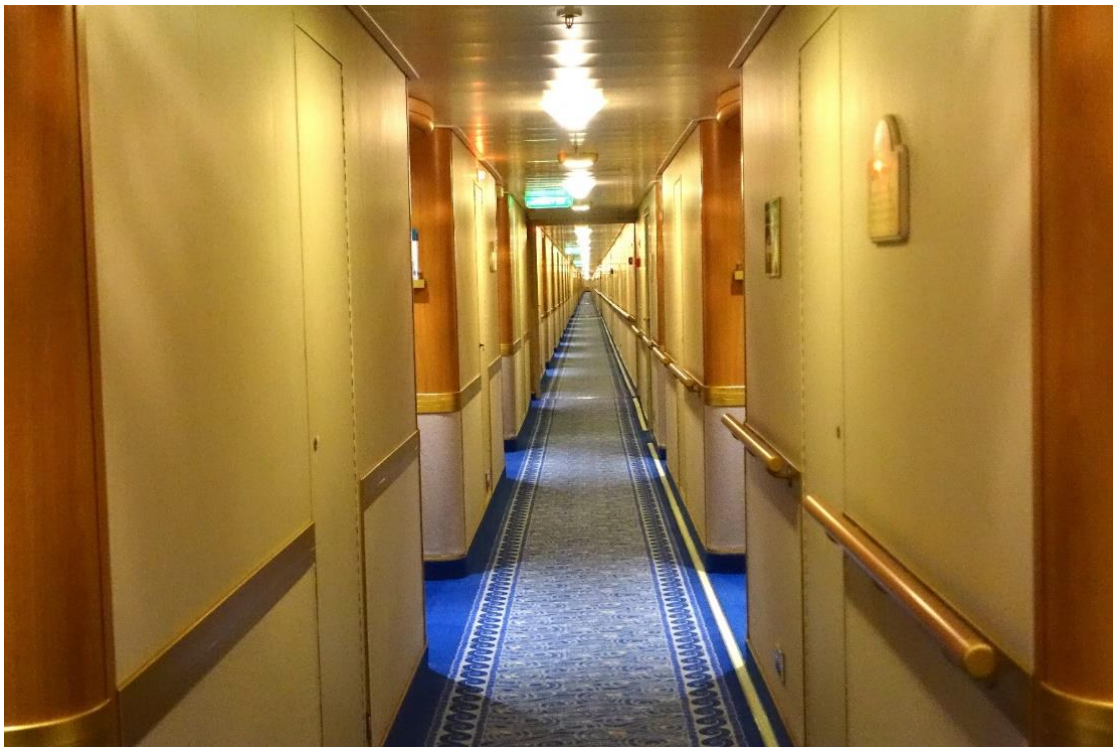
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διάδρομοι πρέπει να ευνοούν την κυκλοφορία τόσο σε καταστρώματα του ίδιου επιπέδου (οριζόντια μετακίνηση) όσο και μεταξύ των καταστρωμάτων (κατακόρυφη μετακίνηση). Συνήθως οι διάδρομοι χαρακτηρίζονται από πλάτος που κυμαίνεται μεταξύ 1.10m και 1.20m (βλέπε Σχήμα 2.34).

Τέλος, είναι επιθυμητό οι χώροι διαμονής (καμπίνες) να τοποθετούνται στο μέσο της κατασκευής ώστε σε περίπτωση κακοκαιρίας η συμπεριφορά του πλοίου να μην επηρεάζει την άνεση και τη διάθεση των

επιβατών. Το σημείο στο οποίο προκαλείται στους επιβάτες έντονη ναυτία είναι η περιοχή της πλώρης και για το λόγο αυτό αποφεύγεται να τοποθετούνται καμπίνες στην περιοχή αυτή. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό αν σκεφτεί κανείς το παράδειγμα της τραμπάλας, όπου το μέσον της είναι ακίνητο ενώ τα άκρα της πραγματοποιούν κατακόρυφες μετατοπίσεις. Μάλιστα, επειδή το κέντρο πλευστότητας (LCF) είναι πρύμνηθεν της μέσης τομής, η περιοχή της πρύμνης θα εκτελεί μικρότερες (κατακόρυφες) κινήσεις από ότι η πλώρη (βλέπε Σχήμα 2.33).



Σχήμα 2.33: Παράδειγμα συσχετισμού κατακόρυφων κινήσεων πλοίου



Σχήμα 2.34: Διάδρομος καμπινών του κρουαζιερόπλοιου Sapphire Princess [20]

2.5.3 Χώροι Ενδιαίτησης

Ενδιαίτηση Επιβατών

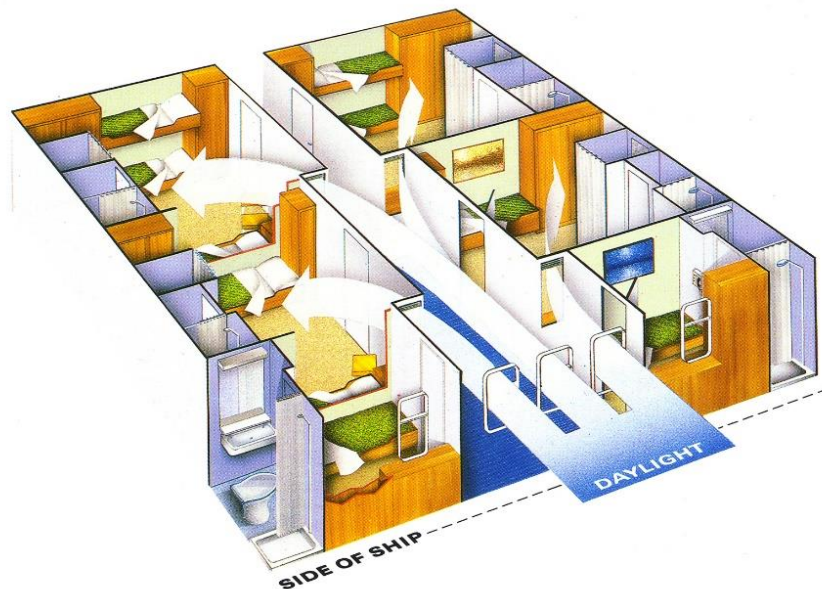
Η ενδιαίτηση των επιβατών εξαρτάται άμεσα από τη διάρκεια της κρουαζιέρας, καθώς όσο αυτή μεγαλώνει τόσο θα πρέπει να αυξάνεται ο αριθμός των καμπινών αλλά και οι παρεχόμενες ανέσεις. Ο αριθμός και η διάταξή τους είναι αλληλένδετα με τον αριθμό των επιβατών και αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς δεσμευτικούς παράγοντες για τη σχεδίαση ενός επιβατηγού πλοίου.

Η ιδανική συνθήκη για τις καμπίνες των επιβατών είναι το να διαθέτουν όλες χωρίς εξαιρέσεις ανοίγματα για φυσικό αερισμό και ηλιασμό, αλλά και ημιυπαίθριο χώρο (μπαλκόνι). Παρόλα αυτά, λόγω διακυμάνσεων της τιμής του εισιτηρίου, οι καμπίνες των πλοίων χωρίζονται σε εσωτερικές (χωρίς φυσικό αερισμό-φωτισμό) και σε εξωτερικές που διαθέτουν τα παραπάνω προνόμια (βλέπε Σχήμα 2.35, Σχήμα 2.36 και Σχήμα 2.37).

Το μέγεθος μια οικονομικής καμπίνας (budget category) κυμαίνεται μεταξύ 10–15m², μια ανώτερης κατηγορίας καμπίνα (premium category) κυμαίνεται μεταξύ 15–20m², οι καμπίνες πολυτελείας (lux category) μεταξύ των 20-25m², ενώ σε ειδικές περιπτώσεις οι τελευταίες μπορεί να φτάσουν και τα 35m². Υπενθυμίζεται ότι κατά κανόνα οι οικονομικές καμπίνες βρίσκονται σε πιο χαμηλά καταστρώματα από ότι οι πολυτελείς.

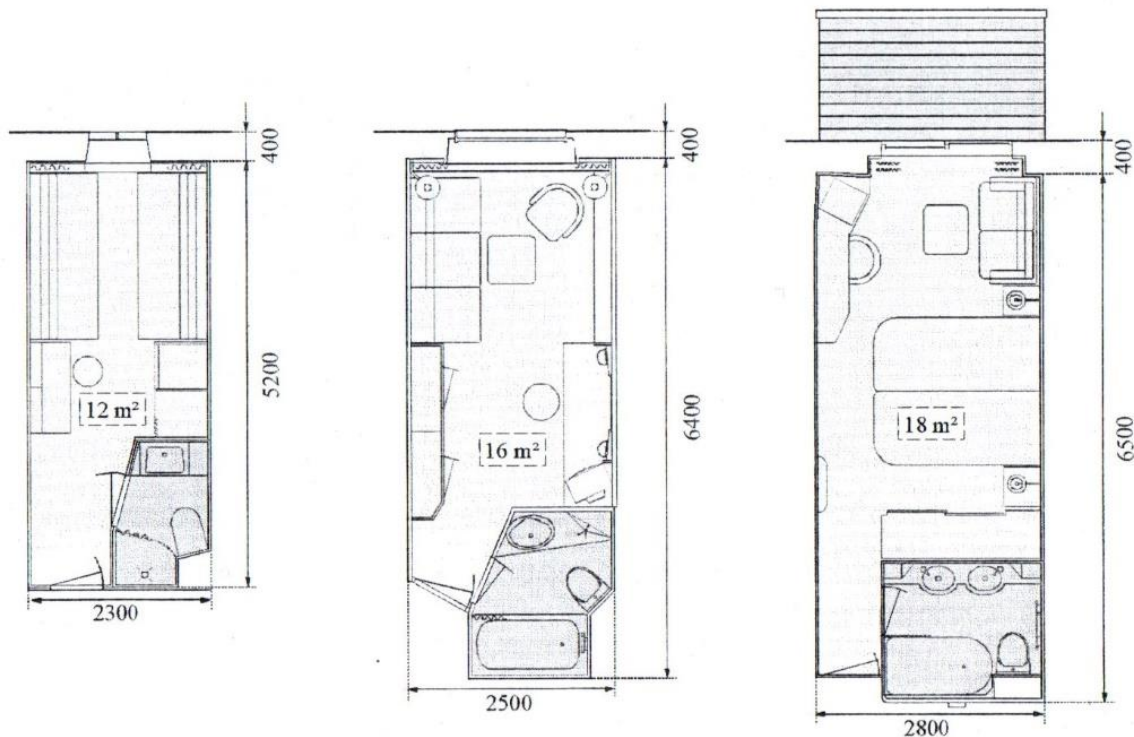
Οι καμπίνες πρέπει να συμμορφώνονται με το περίβλημα του πλοίου και η ορθή διαστασιολόγηση είναι απαραίτητη ώστε να εξασφαλίζεται όχι μόνο η άνεση των επιβατών αλλά και η ασφάλειά τους, το οποίο επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων ενισχυτικών, στύλων και μονώσεων. Συνεπώς, απαιτείται προσεκτική εξέταση των διαστάσεων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.36.

Το κατώτερο τμήμα ενός κρεβατιού στις καμπίνες πρέπει να απέχει τουλάχιστον 0.30m από το δάπεδο, ενώ το λιγότερο που μπορεί να απέχει το πάνω μέρος ενός κρεβατιού από την οροφή της καμπίνες είναι τουλάχιστον 0.80m. Ωστόσο, απαγορεύεται η χρήση περισσότερο των δυο υπερκείμενων κρεβατιών ακόμα και αν υπάρχει ο καθ' ύψος χώρος. Επίσης, δεν επιτρέπεται η παράλληλη τοποθέτηση κρεβατιών εάν δεν υπάρχει τουλάχιστον 0.90m κενός χώρος μεταξύ τους.



Σχήμα 2.35: Φυσικός φωτισμός σε καμπίνες [21]

Επιπλέον, αναφέρεται ότι το ελάχιστο καθαρό ύψος (κάθε καταστρώματος) των χώρων ενδιαίτησης των επιβατών είναι ελαφρά υψηλότερο από αυτό του πληρώματος και είναι, σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, τουλάχιστον ίσο με 2.10m.



Σχήμα 2.36: Καμπίνες επιβατών [10]

Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί ότι για λόγους ασφαλείας οι χώροι ενδιαίτησης των επιβατών δεν πρέπει να έχουν άμεση επικοινωνία με χώρους εύφλεκτου υλικού ή υγιεινής. Θα πρέπει να χαρακτηρίζονται από επαρκή μόνωση, ώστε να παρέχεται προστασία έναντι πυρκαγιάς με την παρεμπόδιση της μεταφοράς της θερμότητας. Οι μέγιστες επιτρεπτές θερμοκρασίες είναι της τάξης των 33°C. Επιπλέον, θα πρέπει «τα διαφράγματα των χώρων ενδιαίτησης, τα οποία ταυτίζονται με τις πλευρές τους πλοίου, να επενδύονται με κατάλληλο μονωτικό υλικό, ώστε να εξασφαλίζεται κατά το δυνατό η προστασία έναντι του κρύου, ζέστης και υγρασίας. Το ίδιο συμβαίνει και με τις οροφές που ταυτίζονται με τα ανοικτά καταστρώματα. Τέλος, κατά κανόνα τα δάπεδα των χώρων ενδιαίτησης πρέπει να καλύπτονται με κατάλληλο υλικό που να εξασφαλίζουν μόνωση και αντοχή στην υγρασία.

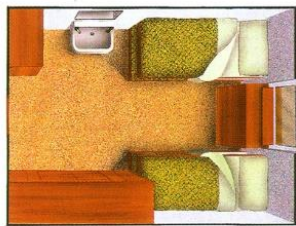
Ενδιαίτηση Πληρώματος

Το πλήρωμα σε ένα κρουαζιερόπλοιο είναι πολυπληθέστερο σε σύγκριση με ένα επιβατηγό ακτοπλοΐας. Σε ένα κρουαζιερόπλοιο αντιστοιχούν δυο έως τρεις επιβάτες ανά μέλος πληρώματος, ενώ σε ένα επιβατηγό ακτοπλοΐας ο αριθμός κυμαίνεται από 10 έως 50. Μάλιστα, στην περίπτωση των ταχύπλων επιβατηγών ακτοπλοΐας ο αριθμός αυτός αγγίζει ακόμη και τα 100 άτομα ανά μέλος πληρώματος.

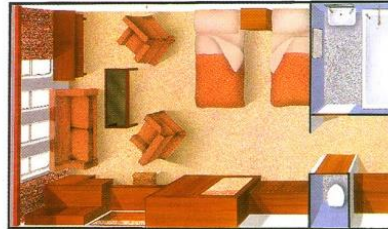
Το πλήρωμα διαμένει σε δίκλινες, τρίκλινες ή και τετράκλινες καμπίνες, οι οποίες είναι ανάγκη να πληρούν ορισμένους περιορισμούς που αφορούν την επιφάνεια που καλύπτουν, οι οποίοι καθορίζονται

από τις κρατικές αρχές. «Το κατώτερο πλήρωμα συνήθως διαθέτει καμπίνες, οι οποίες δεν διαθέτουν ανοίγματα για φυσικό αερισμό και ηλιασμό» [8]. Στους αξιωματικούς παρέχονται συγκριτικά μεγαλύτερες ανέσεις. Τέλος, για λειτουργικούς λόγους, το ελάχιστο καθαρό ύψος (κάθε καταστρώματος) των χώρων ενδιαίτησης του πληρώματος είναι κατά κανόνα πάνω από 2.05m (κρατικές αρχές).

Typical Cabin Layouts



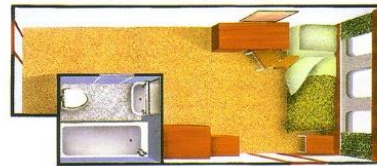
Four Berth Cabin



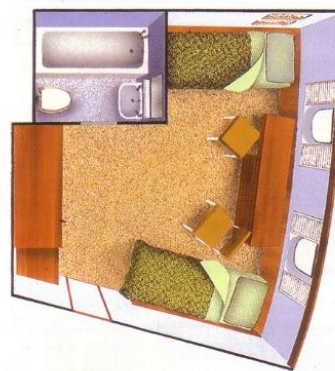
De Luxe Cabin



Outside Two Berth Cabin



Outside Single Cabin



Outside Two Bedded Cabin

Σχήμα 2.37: Τρισδιάστατη απεικόνιση διάταξης καμπινών [21]

2.5.4 Χώροι Εστίασης

Ανάλογα με τη διάρκεια και την ποιότητα της κρουαζιέρας προβλέπονται ποικίλοι κοινόχρηστοι χώροι, όπως τα σαλόνια, τα εστιατόρια, οι αίθουσες ψυχαγωγίας, τα καταστήματα, οι πισίνες κλπ.. Οι χώροι που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο χώρο είναι κυρίως αυτοί της τραπεζαρίας και του κυρίου σαλονιού. Ένα

κρουαζιερόπλοιο πρέπει να διαθέτει ένα κεντρικό, κοινόχρηστο χώρο, ο οποίος εκτείνεται σε περισσότερα από ένα καταστρώματα (βλέπε Σχήμα 2.38).



Σχήμα 2.38: Κεντρικός χώρος του κρουαζιερόπλοιου Royal Princess [22]

Εστιατόρια – Κυλικεία

Σε γενικές γραμμές, τοποθετούνται τραπέζια που εξυπηρετούν από δυο έως και επτά άτομα. Ωστόσο, σε ειδικές περιπτώσεις εξυπηρετούν μέχρι και δέκα άτομα. Οι διατάξεις πρέπει να γίνονται με τέτοιο τρόπο ώστε, να λαμβάνονται υπόψη οι μετακινήσεις τόσο των καθισμάτων προκειμένου να κάτσουν ή να σηκωθούν οι επιβάτες, όσο και των διαδρόμων κυκλοφορίας. Στο Σχήμα 2.39 απεικονίζεται ένα από τα εστιατόρια του Norwegian Dawn.

Αίθουσες παραμονής και ψυχαγωγίας

Είναι ορθό, οι αίθουσες παραμονής και ψυχαγωγίας να είναι ικανές να φιλοξενήσουν όλο τον αριθμό επιβατών. Ωστόσο, σε περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό, τότε είναι απαραίτητη η δημιουργία άλλων μικρότερων χώρων. Σύμφωνα με την Ελληνική νομοθεσία για τις αίθουσες παραμονής και ψυχαγωγίας πρέπει να υπολογίζονται τουλάχιστον 2.50m^2 ανά επιβάτη.

Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει αίθουσα θεάτρου ή/και κινηματογράφου και αίθουσα συνεδριάσεων, και η χωρητικότητά τους είναι επαρκής κατ' ελάχιστον για το 25% περίπου του συνολικού αριθμού των επιβατών (υπολογίζονται 0.85m^2 ανά θεατή, συμπεριλαμβανομένου του χώρου προβολής και σκηνής). Στο Σχήμα 2.40 παρουσιάζεται η αίθουσα θεάτρου του κρουαζιερόπλοιου Disney Dream, η οποία αποτελεί ένα κλασικό παράδειγμα της αλληλεπίδρασης μεταξύ του ναυπηγού και του αρχιτέκτονα, όσον αφορά το κατασκευαστικό αλλά και το λειτουργικό σκέλος, αντίστοιχα. Σε τέτοιους

χώρους, απουσιάζουν τα υποστηρικτικά μέλη (στύλοι) για λειτουργικούς λόγους, μιας και θα δημιουργούσαν τουλάχιστον προβλήματα θέασης και κίνησης. Ως εκ τούτου, η απουσία τους δημιουργεί προβλήματα επαρκούς στήριξης (μεγάλη ανυποστήρικτη επιφάνεια της οροφής) με αντίκτυπο στην τοπική αντοχή της κατασκευής. Περαιτέρω ανάλυση από τη σκοπιά της αντοχής θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.39: Ένα από τα εστιατόρια του Norwegian Dawn [23]



Σχήμα 2.40: Η αίθουσα θεάτρου του κρουαζιερόπλοιου Disney Dream [24]

2.5.5 Βοηθητικοί Χώροι

Κλιμακοστάσια

Ο αριθμός και το μέγεθος των κλιμακοστασίων καθορίζεται ανάλογα με τον αριθμό των επιβατών αλλά και το μέγεθος του πλοίου (βλέπε Σχήμα 2.31). Η θέση των κλιμακοστασίων είναι στενά συνυφασμένη με άλλους λειτουργικούς παράγοντες, όπως η θέση των διαδρόμων, ώστε κάθε στιγμή οι επιβάτες να εξυπηρετούνται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Η κύρια κυκλοφορία πραγματοποιείται κατά τη διάρκεια με τα κλιμακοστάσια να εξυπηρετούν την κατακόρυφη κίνηση (βλέπε Σχήμα 2.41). Το πλάτος τους πρέπει επίσης να ακολουθεί τους κανονισμούς, ώστε να εξασφαλίζεται η άνεση και η ασφάλεια των επιβατών κατά την άνοδο και την κάθοδο.

Κατάλληλες πυροστεγείς θύρες πρέπει να διαχωρίζουν τους διαδρόμους από τα κλιμακοστάσια. Κατά την κανονική λειτουργία του πλοίου αυτές παραμένουν ανοικτές ενώ θα πρέπει να διαθέτουν αισθητήρες έτσι ώστε σε κατάσταση πυρκαγιάς να κλείνουν αυτομάτως προκειμένου να περιορίζεται η φωτιά στο συγκεκριμένο χώρο.

Επίσης, τα κλιμακοστάσια χρησιμεύουν ως μέσα απόδρασης, των οποίων η διαμόρφωσή πρέπει να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις των νηογνυμένων για τους δρόμους διαφυγής. Συνήθως εκτείνονται από το κατάστρωμα φρακτών έως το ανώτατο ανοιχτό κατάστρωμα (sun deck).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κατά περίπτωση το ελάχιστο επιτρεπόμενο καθαρό πλάτος των διαδρόμων και των σκαλών είναι τα 0.90m. Η μέγιστη γωνία κλίσης κάθε σκάλας δεν πρέπει να ξεπερνά τις 45°. Για τυπικές σκάλες συνήθως χρησιμοποιείται 37° με 35° γωνία κλίσης. Το ύψος κάθε σκάλας δεν πρέπει να εκτείνεται πάνω από 3.5m χωρίς ενδιάμεσο «επίπεδο».

Κλείνοντας, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι τα κύρια κλιμακοστάσια τοποθετούνται μέσα σε χαλύβδινο φρεάτιο, κατάλληλα μονωμένο πυροστεγώς και με πυρίμαχα μέσα κλεισίματος, με τρόπο ώστε να είναι ασφαλής η διακίνηση των ατόμων μέσα από το κλιμακοστάσιο.

Πόρτες

Οι πόρτες εσωτερικών χώρων, οι οποίοι δεν χαρακτηρίζονται από μεγάλο συνωστισμό, όπως οι καμπίνες, οι τουαλέτες και οι αποθήκες, πρέπει να ανοίγουν πάντα προς τον χώρο τον οποίο προστατεύουν και όχι προς το διάδρομο. Αντιθέτως, οι πόρτες των κοινόχρηστων χώρων, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από μεγάλο συνωστισμό, όπως τα σαλόνια, τα εστιατόρια και οι αίθουσες ψυχαγωγίας, πρέπει να ανοίγουν πάντα προς τους διαδρόμους για ευκολότερη διαφυγή σε κατάσταση εκτάκτου ανάγκης.

Ανελκυστήρες

Οι ανελκυστήρες εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό με τα κλιμακοστάσια, δηλαδή την κατακόρυφη μετακίνηση των επιβατών. Ωστόσο δεν αποτελούν μέσα διαφυγής καθώς σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης δεν είναι σε λειτουργία λόγω της υψηλής ηλεκτρικής ισχύος που απαιτούν, την οποία η γεννήτρια εκτάκτου ανάγκης δεν μπορεί να υποστηρίξει. Οι ανελκυστήρες πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμα και η πορεία προς αυτά οφείλει να είναι σωστά καθοδηγούμενη (σημάνσεις). Σύμφωνα με τις κρατικές αρχές, για την απαιτούμενη επιφάνεια του ανελκυστήρα, υπολογίζονται συνήθως 0.15m² ανά επιβάτη, από το σύνολο που διαμένουν στην περιοχή, την οποία εξυπηρετεί ο ανελκυστήρας. Τέλος,

ο ανελκυστήρας θα πρέπει να είναι τόσο ευρύχωρος ώστε πέρα από την άνεση, να καλύπτεται η απαίτηση για τη μετακίνηση ατόμων με ειδικές ανάγκες.



Σχήμα 2.41: Κλιμακοστάσιο του επιβατηγού πλοίου SS Rotterdam [25]

2.5.6 Άλλοι Χώροι

Χώροι Υγιεινής

Αναμφισβήτητα οι χώροι υγιεινής είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με τους κοινόχρηστους χώρους του πλοίου. Είναι σύνηθες φαινόμενο να αντιστοιχεί μια τουαλέτα ανά οκτώ επιβάτες. Οι νιπτήρες πρέπει να υπάρχουν σε κάθε χώρο υγιεινής και να καλύπτουν σε αριθμό το μισό του αριθμού των τουαλετών.

Μαγειρεία

Τα μαγειρεία συνήθως βρίσκονται στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου και επικοινωνούν άμεσα με την τραπεζαρία. Οι αποθήκες τροφίμων και οι ψυκτικοί θάλαμοι βρίσκονται κάτω από τα μαγειρεία και πρέπει να υπάρχει καλή διασύνδεση μεταξύ τους. Επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω κλιμακοστασίων ή ανελκυστήρων. Οι χώροι αυτοί πρέπει να είναι σχετικά μεγάλοι καθώς το ταξίδι μπορεί να διαρκέσει μερικές εβδομάδες. Ξεχωριστά κλιμακοστάσια υπηρεσίας (δηλαδή κλιμακοστάσια προς αποκλειστική

χρήση του πληρώματος) κατά το διάμηκες χρησιμεύουν για τη μετακίνηση του πληρώματος. Αυτά τοποθετούνται στο κατάστρωμα των φρακτών.

Αντίθετα, οι περισσότερες αποθήκες τοποθετούνται κάτω από το κατάστρωμα φρακτών. Οι κουζίνες δεν πρέπει να έρχονται σε άμεση επαφή με τα τοιχώματα του πλοίου προς αποφυγή ατυχημάτων. Σημειώνεται ότι τα τοιχώματα στους χώρους αυτούς μονώνονται με άφλεκτα υλικά και επενδύονται με ανοξειδωτή λαμαρίνα, προς συμμόρφωση με τους νέους κανονισμούς.

Κλείνοντας, πρέπει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τη βιβλιογραφία «τα διαφράγματα των μαγειρείων πρέπει να είναι χαλύβδινα με ανοξειδωτή επένδυση και τα δάπεδα από κεραμικό υλικό» [8] και, εν γένει, τα υλικά που χρησιμοποιούνται θα πρέπει να έχουν ανθεκτικότητα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αναρρωτήρια

Συνήθως τα αναρρωτήρια τοποθετούνται στο μέσο του πλοίου καθώς στο σημείο αυτό το πλοίο δεν υποφέρει από έντονες κινήσεις και δεν προκαλείται ναυτία στους ασθενείς. Για κάθε κρεβάτι υπολογίζεται κατά μέσο όρο 6m^2 ενώ θα πρέπει να περιλαμβάνεται και ειδικός χώρος που να καλύπτει ανάγκες ενός μικρού χειρουργείου.

Πισίνες

Οι πισίνες τοποθετούνται συνήθως στα ανοικτά καταστρώματα και γι' αυτό θα πρέπει να προστατεύονται από τον αέρα. Για το λόγο αυτό οι πισίνες καλύπτονται από τις υπερκατασκευές του πλοίου. Στο Σχήμα 2.42 απεικονίζεται η μια από τις τέσσερις πισίνες του MV Britannia, η οποία βρίσκεται στο ανώτατο (ανοικτό) κατάστρωμα.

Γενικώς, τα ελεύθερα καταστρώματα που χρησιμοποιούνται από επιβάτες πρέπει να προστατεύονται στις πλευρές με δύφρακτο ή κάγκελο, το ύψος του οποίου δεν θα είναι μικρότερο από 1.10m. Στην περίπτωση κιγκλιδώματος, οι κιγκλίδες δεν πρέπει να απέχουν μεταξύ τους περισσότερο από 0.20m.



Σχήμα 2.42: Μια από τις τέσσερις πισίνες του MV Britannia [26]

Καταστήματα

Τα καταστήματα είναι συνήθως επιφάνειας 16–20m² και βρίσκονται τις περισσότερες φορές σε διαδρόμους πλάτους 3m (βλέπε Σχήμα 2.43).

Επιμέρους Χώροι

- Ο χώρος της γέφυρας στο ανώτατο κατάστρωμα
- Πλυντήρια – Στεγνωτήρια
- Χώροι κλιματιστικών μονάδων
- Ψυγεία
- Τροφαποθήκες

Έχοντας αποκτήσει πλέον μια εικόνα της διάταξης των χώρων και της μορφολογίας της κατασκευής του πλοίου, κάλλιστα μπορεί να γίνει λόγος για την αντοχή του πλοίου. Έτσι, στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη εισαγωγή στην έννοια της «Αντοχής του πλοίου» και εν συνεχεία καταγράφονται και αναλύονται τα προβλήματα της μεταλλικής κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων.



Σχήμα 2.43: Διάδρομος καταστημάτων ενός κρουαζιερόπλοιου [27]

2.6 Ανακεφαλαίωση

Σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, μπορεί κανείς να εξάγει τα παρακάτω συμπεράσματα όσον αφορά τη σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της ολικής χωρητικότητας του πλοίου αυξάνεται ο λόγος του μήκους προς το πλάτος (ίσος με 7), ενώ ο λόγος πλάτος προς βύθισμα παραμένει σχεδόν σταθερός (ίσος με 4). Κατά αυτόν τον τρόπο διαπιστώνεται ότι το μήκος είναι η διάσταση που αυξάνεται εντονότερα με την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου. Ωστόσο, αυτή η αύξηση περιορίζεται πολλές από τους περιορισμούς ναυσιπλοΐας αλλά και από τα προβλήματα αντοχής που δημιουργούνται, καθώς το μήκος του πλοίου-δοκός αυξάνεται. Η κύρια παράμετρος που επηρεάζεται από τους περιορισμούς αυτούς είναι το πλάτος του πλοίου (μέχρι 32.21 m για πλοία Panamax). Ωστόσο, το πλάτος αποτελεί μια ιδιαίτερη διάσταση καθώς αυξάνει την επιφάνεια των καταστρωμάτων μεν αλλά μειώνει το λόγο εξωτερικών προς εσωτερικών καμπινών δε (συμβατικές σχεδιάσεις). Το βύθισμα δεν αποτελεί ιδιαίτερη ανησυχία για το μελετητή καθώς λόγω του ότι τα κρουαζιερόπλοια είναι πλοία κυβισμού, αυτό κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Το κοίλο του πλοίου είναι και αυτό μια σημαντική παράμετρος καθώς μια αύξησή του επιτρέπει την κατασκευή περισσότερων καταστρωμάτων (περιοχή γάστρας). Ωστόσο, η τιμή του εξαρτάται από διαφόρους περιορισμούς, όπως η γραμμή φόρτωσης και κυρίως η μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση των σωστικών λέμβων από την επιφάνεια της θάλασσας. Αντίστοιχα με το κοίλο, το ύψος της υπερκατασκευής συνεισφέρει καθοριστικά στην επίτευξη καταστρωμάτων μεγάλης επιφάνειας, καθώς μια αύξησή του επιτρέπει την κατασκευή περισσότερων καταστρωμάτων (περιοχή υπερκατασκευής).

Τα κρουαζιερόπλοια είναι λεπτόγραμμα πλοία προκειμένου να επιτυγχάνουν σχετικά υψηλές ταχύτητες (σχετικά υψηλός αριθμός Froude). Για το λόγο αυτό είναι επιθυμητοί οι χαμηλοί συντελεστές γάστρας (της τάξης του 0.60). Ο συντελεστής μέσης τομής επιλέγεται όσο το δυνατόν υψηλότερος για επιτευχθεί μείωση του κόστους ναυπήγησης (απλούστερη κατασκευή) αλλά και για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση των χώρων. Στα πλοία με σχετικά υψηλούς αριθμούς Froude η αντίσταση κυματισμού είναι υψηλότερη της αντίστασης τριβής. Για το λόγο αυτό επιλέγονται τέτοιοι συντελεστές ισάλου επιφανείας, ώστε η αντίσταση αυτή να ελαχιστοποιείται. Όσον αφορά την έκταση του παράλληλου τμήματος, αν και όσο πιο μικρός είναι τόσο μειώνει την αντίσταση κυματισμού, από την άλλη μεγάλο παράλληλο τμήμα επιτυγχάνει μειωμένο κόστος ναυπήγησης (απλούστερη κατασκευή) αλλά και καλύτερη εκμετάλλευση των χώρων, κάτι το οποίο είναι πολύ σημαντικό στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων. Η διαμόρφωση της πλώρας, προκειμένου να αποσβένονται οι κυματισμοί αποφεύγονται οι έντονες προεξοχές και χρησιμοποιείται βολβός τύπου “goose-neck” (παραλλαγή του SV). Όσον αφορά τη διαμόρφωση της πρύμνης, αν και παλαιότερα χρησιμοποιούνταν η πρύμνη καταδρομικού (Queen Mary 2), σήμερα χρησιμοποιείται η πρύμνη άβακος με στόχο των περιορισμό των ταλαντώσεων (comfort class), την καλύτερη εκμετάλλευση του καταστρώματος (στην περιοχή αυτή) αλλά και την αύξηση της ευστάθειας. Οι νομείς των υφάλων ακολουθούν τη μορφή τύπου V. Η σχεδίαση αυτή αυξάνει τον εκμεταλλεύσιμο όγκο στα έξαλα και την επιφάνεια των καταστρωμάτων. Το μειονέκτημα του μειωμένου εκμεταλλεύσιμου όγκου στα ύφαλα εξαλείφεται από το μικρό βύθισμα του πλοίου.

Κλείνοντας, στα επιβατηγά πλοία, λόγω της περίπλοκης δομής και κυρίως του παράγοντα «άνθρωπος», επιβάλλεται η συμμετοχή του αρχιτέκτονα πέραν του ναυπηγού. Μάλιστα, απαιτείται διαρκής συνεργασία αυτών των δυο ώστε να προκύψει το καλύτερο αποτέλεσμα, τόσο από την πλευρά της λειτουργικότητας των χώρων όσο και από την πλευρά της ασφάλειας και της αξιοπιστίας.

3. ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Για να γίνει λόγος για την «Αντοχή του κρουαζιερόπλοιου» θα πρέπει πρώτα κανείς να γνωρίζει πολύ καλά τις φορτίσεις που επενεργούν πάνω σε αυτό. Άλλωστε εξαιτίας αυτών το πλοίο αντιδρά ή με τη ναυπηγική ορολογία αποκρίνεται. Η απόκριση του πλοίου ταυτίζεται με τη δημιουργία εντατικών πεδίων, τα οποία μάλιστα στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων είναι τρισδιάστατα. Με άλλα λόγια, η τιμή των τάσεων ποικίλει ανάλογα με τη θέση του εξεταζόμενου σημείου ως προς το διαμήκη, το εγκάρσιο και το κατακόρυφο επίπεδο. Φυσικά, αυτό είναι κάτι που οφείλεται στην πολύπλοκη γεωμετρία τους και θα αναλυθεί εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια.

Το πλοίο υπόκειται σε φορτίσεις και λόγω της ίδιας του της κατασκευής. Για παράδειγμα, τα πολλαπλά καταστρώματα σε ένα τέτοιο τύπου πλοίου έχουν κάποιο βάρος, το οποίο προφανώς θα πρέπει να το παραλάβει κάποιο κατασκευαστικό μέλος (ή μια ομάδα αυτών) της μεταλλικής κατασκευής, όπως οι φρακτές και οι σύλλοι (κολώνες).

Όπως γίνεται κατανοητό είναι υψίστης σημασίας η κατανόηση των φορτίσεων και ιδιαίτερα η γνώση των κρισιμότερων εξ αυτών. Άλλωστε, για αυτές τις κρίσιμες φορτίσεις οι Νηογνώμονες έχουν θεσπίσει διάφορους περιορισμούς προκειμένου τα πλοία να είναι όσο το δυνατόν πιο ασφαλή και αξιόπλοα. Ποιες είναι, λοιπόν, αυτές οι φορτίσεις; Από που προέρχονται τα φορτία, τα οποία θα πρέπει να αντέξει η κατασκευή;

Οι φορτίσεις που καταπονούν τη μεταλλική κατασκευή του πλοίου προέρχονται από:

- Το θαλάσσιο περιβάλλον (ήρεμο και κυματισμένο νερό)
- Τις κινήσεις και τις επιταχύνσεις του ίδιου του πλοίου (αδρανειακές φορτίσεις)
- Τους τοπικούς παράγοντες (έδραση μηχανημάτων, εξοπλισμός πλοίου κλπ.)
- Το μεταφερόμενο φορτίο

Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων το μεταφερόμενο φορτίο-επιβάτης, δεν προκαλεί κάποια φόρτιση στην κατασκευή, λόγω του ότι το μεμονωμένο βάρος του κάθε ανθρώπου μου είναι ιδιαίτερα μικρό σε σχέση με αυτό για το οποίο έχουν κατασκευαστεί τα στοιχεία της κατασκευής του πλοίου. Αν συλλογιστεί κανείς το βάρος των επιβατών και του πληρώματος σαν σύνολο εκεί η φόρτιση έχει ουσία. Ωστόσο, το συγκεκριμένο βάρος έχει μεγάλη διασπορά στο πλοίο καθώς οι επιβάτες δεν είναι κάπου όλοι μαζί συγκεντρωμένοι, αλλά αντίθετα είναι διασκορπισμένοι. Κατά συνέπεια, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι το φορτίο-επιβάτης επιβαρύνει την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Άλλωστε, για το λόγο αυτό δεν περιλαμβάνεται στις φορτίσεις που θα απασχολήσουν τον μελετητή-ναυπηγό.

Γίνεται αντιληπτό ότι το πλοίο διαφοροποιείται από τις δομοστατικές κατασκευές (π.χ. σπίτι) καθώς υπόκειται σε φορτίσεις οι οποίες είναι συνεχώς μεταβαλλόμενες, κυρίως λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Στο θαλάσσιο περιβάλλον παρατηρούνται ήρεμες και ακραίες καταστάσεις, στις οποίες το πλοίο θα πρέπει πάντοτε να ανταπεξέρχεται. Προκειμένου να εξεταστούν οι επιπτώσεις των διαφόρων φορτίσεων στο πλοίο, θα πρέπει πρώτα να καταταγούν σε κάποιες κατηγορίες. Έτσι, οι φορτίσεις μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη φύση τους, δηλαδή τη διάρκεια τους και τη συχνότητα

εμφάνισής (Κατηγορία 1) τους και ανάλογα με την απόκριση (αντίδραση) της κατασκευής που παραλαμβάνει τις φορτίσεις αυτές (Κατηγορία 2).

Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, υπάρχουν φορτίσεις (σχετικά) σταθερές στο χρόνο, όπως είναι το βάρος του πλήρως εξοπλισμένου αλλά άφορτου πλοίου (Lightship – LS), η άντωση και το ίδιο το μεταφερόμενο φορτίο κ.α.. Από την άλλη υπάρχουν οι μεταβαλλόμενες, ως προς το χρόνο εμφάνισής τους, φορτίσεις, όπως η κρούση κυμάτων στην πλώρη (bow slamming), η σφυρόκρουση του πυθμένα (bottom slamming), οι ταλαντώσεις που προκαλούνται από την έλικα και το μηχανολογικό εξοπλισμό κ.α.

Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία, υπάρχουν φορτίσεις στατικές (static loading) και δυναμικές (dynamic loading). Οι στατικές φορτίσεις κυρίως οφείλονται στις υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται στη γάστρα (εξωτερικό περίβλημα) του πλοίου αλλά και στο βάρος του ίδιου του πλοίου (βάρος υπερκατασκευής). Από την πλευρά τους, οι δυναμικές φορτίσεις μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δυο κατηγορίες: τις χαμηλόσυχνες και τις υψίσυχνες.

Οι χαμηλών συχνοτήτων δυναμικές φορτίσεις είναι αυτές όπου η συχνότητά τους είναι μικρότερη από την ιδιοσυχνότητα της κατασκευής του σκάφους. Αυτές προκαλούνται από θαλάσσιους κυματισμούς με την ανάπτυξη υδροδυναμικών πιέσεων στο κέλυφος του πλοίου ή με την ανάπτυξη αδρανειακών δυνάμεων από τις κινήσεις (και επιταχύνσεις) του ίδιου του πλοίου.

Οι υψηλών συχνοτήτων δυναμικές φορτίσεις οφείλονται κυρίως στη λειτουργία της μηχανής και της έλικας, όπου στο μεγαλύτερο μέρος της ζωής του πλοίου βρίσκονται σε λειτουργία. Οι πρώτες δεν προκαλούν δυναμική απόκριση (dynamic response) της κατασκευής και μπορούν να προσεγγιστούν με την ψευδο-στατική θεώρηση που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επίσης υψίσυχνες φορτίσεις προκαλούνται και από την επίδραση κυματισμών υψηλών συχνοτήτων. Οι υψίσυχνες δυναμικές φορτίσεις είναι και οι πιο επικίνδυνες καθώς ενδέχεται να προκαλέσουν προβλήματα συντονισμού με αποτέλεσμα την έντονη και ανεπιθύμητη ταλαντωτική κίνηση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Αυτή η κίνηση δεν είναι επίπονη μόνο για το πλοίο, αλλά και για τους ίδιους τους επιβάτες. Συγκεκριμένα, οι δυναμικές φορτίσεις υψηλών συχνοτήτων μπορεί να προέρχονται από:

- Υψηλής συχνότητας διαμήκεις ταλαντώσεις της κατασκευής
- Σφυρόκρουση
- Φορτίσεις αδρανείας σε διάφορα τμήματα της κατασκευής
- Τοπικές ταλαντώσεις που οφείλονται στη λειτουργία μηχανολογικών συστημάτων και της έλικας

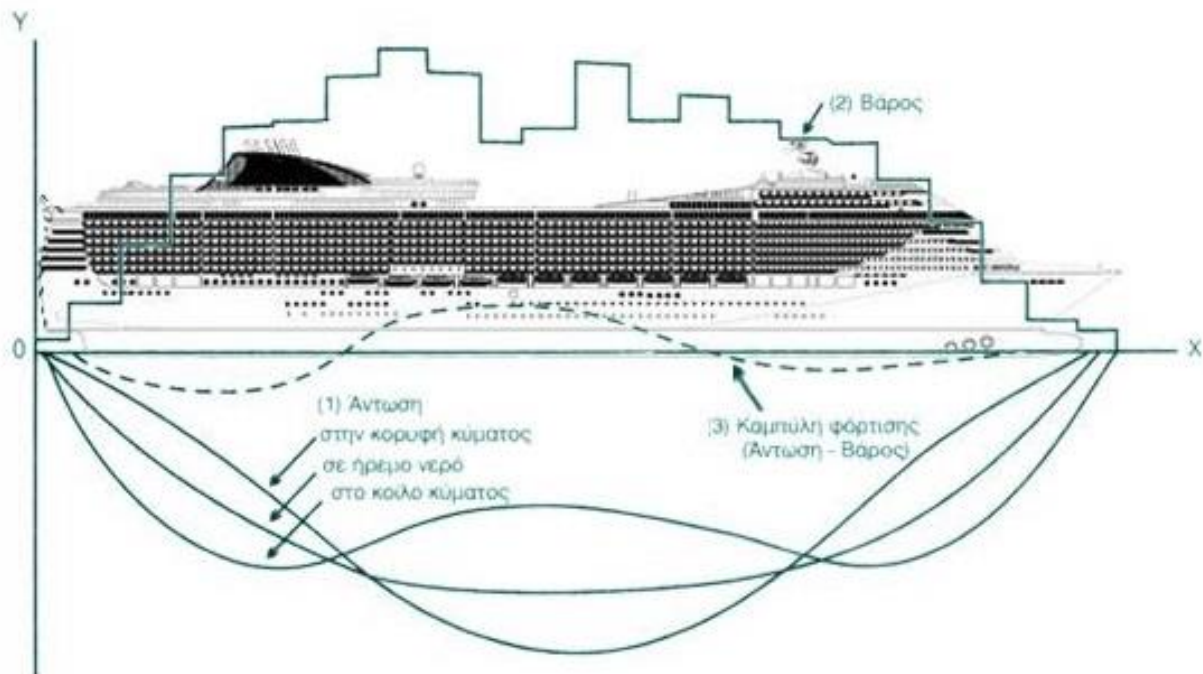
Κλείνοντας την εισαγωγή, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πολλές φορές για να καθίσταται δυνατή η διαστασιολόγηση του πλοίου (design – scantling approach) οι δυναμικές φορτίσεις μεταφράζονται σε ισοδύναμες στατικές ή ψευδο-στατικές (quasi-static) φορτίσεις. Μάλιστα, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, φαίνεται ότι οι ισοδύναμες στατικές φορτίσεις έχουν μέγεθος της τάξης του μισού της αντίστοιχης δυναμικής φόρτισης [28]. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελεί η μελέτη της αντοχής του πλοίου σε κυματισμούς, αν και αυτή η κατάσταση αποτελεί εκ φύσεως μια δυναμική φόρτιση, για λόγους απλότητας εξετάζεται ως στατική, με τη βοήθεια ισοδύναμων στατικών φορτίσεων.

3.2 Θαλάσσιο Περιβάλλον

3.2.1 Ήρεμο νερό

Για τη μελέτη της (διαμήκου) αντοχής ενός πλοίου πραγματοποιείται η θεώρηση ότι αυτό συμπεριφέρεται σαν κοίλη δοκός. Όταν το βάρος της κάθε εγκάρσιας διατομής (transverse section) δεν εξισορροπείται από την άντωση που ασκείται στη διατομή τότε αναπτύσσονται καμπτικές ροπές (bending moments) και τέμνουσες δυνάμεις (shear forces).

Από τη διαφορά της άντωσης (Buoyancy) και της διαμήκου κατανομής του βάρους (Weight) ενός πλοίου προκύπτει η καμπύλη φόρτισης (Load Curve). Σημειώνεται πως η καμπύλη της άντωσης είναι μια συνεχής καμπύλη (καμπύλη 1, Σχήμα 3.1) σε αντίθεση με την καμπύλη του βάρους η οποία είναι τεθλασμένη καμπύλη (καμπύλη 2, Σχήμα 3.1). Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την καμπύλη φόρτισης είναι ότι σε κάποια σημεία προκύπτει έλλειψη ενώ σε άλλα περίσσεια άντωσης κατά το διάμηκες του πλοίου (καμπύλη 3, Σχήμα 3.1). Το Σχήμα 3.1 αποτελεί μια αναπαράσταση της κατανομής του βάρους, της άντωσης και της καμπύλης φόρτισης κατά το διάμηκες. Σημειώνεται ότι η κατανομή του βάρους που απεικονίζεται δεν είναι πραγματική.



Σχήμα 3.1: Τυπική αναπαράσταση καμπύλης φόρτισης

Προφανώς, αφού το πλοίο ισορροπεί, το συνολικό βάρος του ισούται με την (συνολική) άντωση και από τη σκοπιά των μαθηματικών αυτό σημαίνει ότι τα εμβαδά των επιφανειών κάτω από τις δυο αυτές καμπύλες (βάρους και άντωσης) είναι ίσα μεταξύ τους. Άμεση συνέπεια αυτού είναι ότι το εμβαδόν της καμπύλης φόρτισης θα πρέπει να είναι μηδενικό. Εν συνεχεία, με την ολοκλήρωση της καμπύλης φόρτισης κατά το διάμηκες προκύπτει η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων στις οποίες υποβάλλεται

το πλοίο, ενώ με την ολοκλήρωση της καμπύλης των διατμητικών δυνάμεων προκύπτει η κατανομή των καμπτικών ροπών.

Με τη μαθηματική προσέγγιση, αν συμβολιστεί με $b(x)$ η κατανομή της άντωσης και με $w(x)$ η κατανομή του βάρους, τότε η συνολική φόρτιση $p(x)$ στην οποία υποβάλλεται το πλοίο ισούται με:

$$p(x) = w(x) - b(x) \quad (3.1)$$

Επειδή το πλοίο ισορροπεί, θα ισχύει ότι οι συνολικές δυνάμεις και ροπές θα είναι μηδενικές, δηλαδή:

$$\text{Δυνάμεις: } \int_{AP}^{FP} p(x) dx = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Ροπές: } \int_{AP}^{FP} x * p(x) dx = 0 \quad (3.3)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις αποτελούν τις εξισώσεις ισορροπίας του πλοίου, σε ήρεμο νερό.

Λόγω της διαφοράς μεταξύ της καμπύλης της άντωσης και του βάρους, αναπτύσσονται διατμητικές δυνάμεις $Q(x)$ (καμπύλη 4, Σχήμα 3.2) και καμπτικές ροπής $M(x)$ (καμπύλη 5, Σχήμα 3.2).

$$Q(x) = Q_{AE} + \int_{AE}^x p(x) dx \quad (3.4)$$

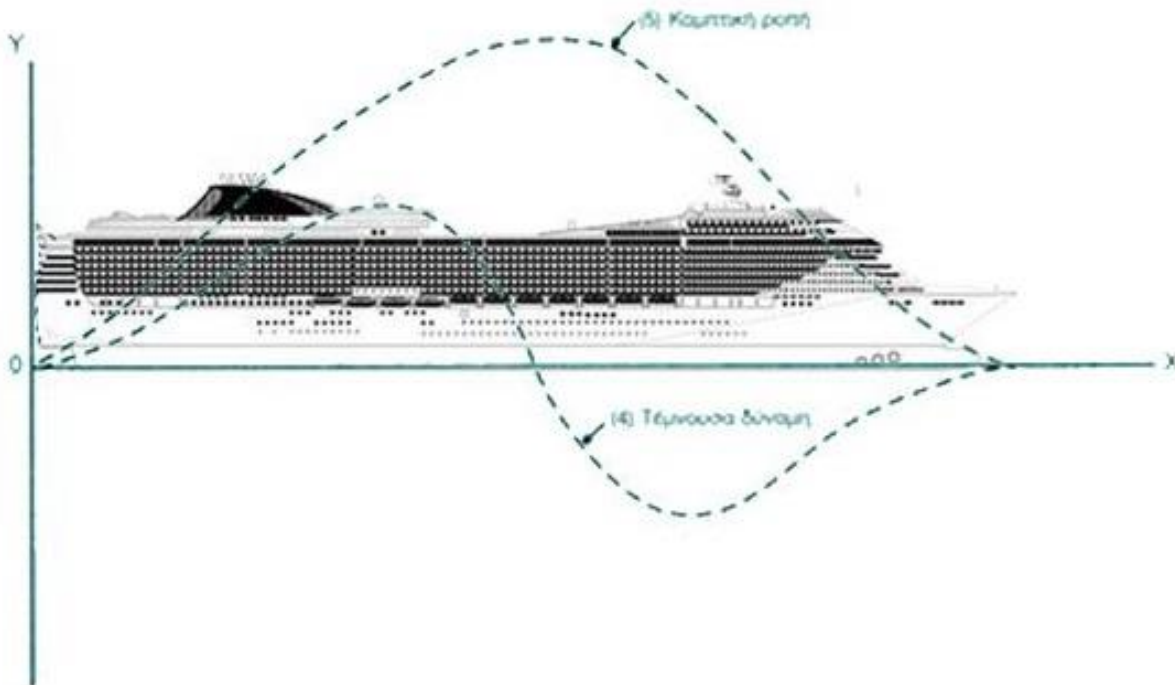
$$M(x) = M_{AE} + \int_{AE}^x Q(x) dx \quad (3.5)$$

Μάλιστα μια αύξηση του μήκους του πλοίου, μεγαλώνει η μέγιστη τιμή της διαμήκους καμπτικής ροπής. Το παραπάνω γίνεται έντονα αντιληπτό αν σκεφτεί κανείς ότι η ροπή κάμψης είναι ανάλογη του τετραγώνου του μήκους, δηλαδή:

$$M \propto L^2$$

όπου, M , η διαμήκης καμπτική ροπή και L , το μήκος του πλοίου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, οι καμπτικές ροπές μεγιστοποιούνται περί το μέσον του πλοίου, σε αντίθεση με τις διατμητικές δυνάμεις, οι οποίες είναι μέγιστες (περίπου) περί το $L/4$ και $3L/4$ από την πρυμναία κάθετο.



Σχήμα 3.2: Τυπική αναπαράσταση διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών

3.2.2 Μετωπικοί και Ακολουθούντες Κυματισμοί

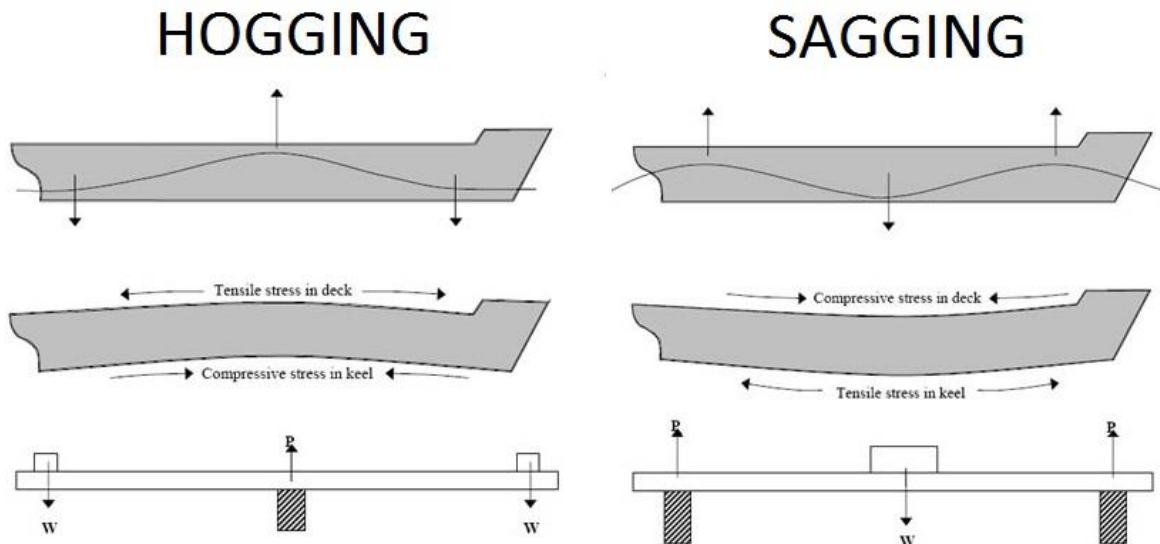
Διαμήκης Κάμψη

Κατά την πλεύση του πλοίου σε μετωπικούς ή ακολουθούντες κυματισμούς (head or following seas), οι διατμητικές δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές αυξάνονται έντονα. Όσον αφορά τη διαμήκη αντοχή, δυο είναι τα σενάρια που εξετάζονται. Το πρώτο αναφέρεται στην περίπτωση όπου η μέση τομή του πλοίου πέφτει σε κοιλάδα κύματος (Sagging Condition), ενώ το δεύτερο όταν η μέση τομή του πλοίου πέσει σε κορυφή κύματος (Hogging Condition). Στο Σχήμα 3.3 αναπαρίσταται η κατάσταση Sagging και Hogging, αντίστοιχα.

Οι υπολογισμοί της καμπτικής ροπής σε ήρεμο νερό και της διατμητικής δύναμης για τη χειρότερη κατάσταση Hogging ή τη χειρότερη κατάσταση Sagging (ή η ελάχιστη κατάσταση Hogging) πρέπει να υποβάλλονται για εξέταση. Μάλιστα, μαζί με τους υπολογισμούς αυτούς, θα πρέπει να παρουσιάζεται η κατανομή του Lightship του σκάφους, οι υδροστατικοί πίνακες, το σχέδιο χωρητικότητας και η προεκτίμηση της διαγωγής και της ευστάθειας που αντιστοιχούν στην υποβαλλόμενη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό και τη διατμητική.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτές οι καταστάσεις φόρτισης είναι οι δυσμενέστερες για το πλοίο. Θεωρώντας το πλοίο ως ένα δοκάρι, εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι καθώς το μήκος μεγαλώνει σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις, το δοκάρι θα κάμπτεται όλο και περισσότερο, τόσο μάλλον στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων όπου το μήκος είναι περίπου 6 με 7 φορές μεγαλύτερο του πλάτους και περίπου 20 φορές μεγαλύτερο του βυθίσματος. Μάλιστα, στα πλοία αυτά η ύπαρξη πολλαπλών καταστρωμάτων (ψηλή υπερκατασκευή) αλλά και η παρουσία μεγάλων ανοιγμάτων στα καταστρώματα (π.χ. σαλόνια,

θέατρα) και τις πλευρές του πλοίου (π.χ. παράθυρα, πόρτες), καθιστά το φαινόμενο ιδιαίτερα ανησυχητικό.



Σχήμα 3.3: Κατάσταση Hogging και Sagging [29]

Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με τους κανονισμούς, οι φορτίσεις λόγω κυματισμού που χρησιμοποιούνται πρέπει να προσδιορίζονται από την ανάλυση της κίνησης του πλοίου, με βάση τις συνθήκες που επικρατούν στο Βόρειο Ατλαντικό Ωκεανό. Η υπολογισμένη μακροπρόθεσμη ακραία κατακόρυφη καμπτική ροπή λόγω κυματισμού και η διατμητική δύναμη πρέπει να βασίζεται στα δεδομένα κυματισμών σε επίπεδο πιθανότητας 10^{-8} εκπροσωπώντας μια περίοδο 20 ετών. Φυσικά οι μέγιστες κατακόρυφες ροπές κάμψης λόγω κυματισμών και οι δυνάμεις διάτμησης που λαμβάνονται από την ανάλυση της μακροπρόθεσμης απόκρισης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερες από την απαίτηση του εκάστοτε Νηογνώμονα.

Για παράδειγμα, σύμφωνα με τον Αμερικάνικο Νηογνώμονα (ABS), για πλοία που βρίσκονται εκτός των παρακάτω αναλογιών $L/B < 5$ και $B/D > 2.5$ λαμβάνεται ειδική μέριμνα. Ειδική προσοχή χρήζουν επίσης κρουαζιερόπλοια όπου χαρακτηρίζονται από υψηλή υπηρεσιακή ταχύτητα αλλά και μεγάλη γωνία κλίσης (flare) στην περιοχή της πλώρης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι αναπτυσσόμενες καμπτικές ροπές προφανώς προσαυξάνονται.

Για πλοία που βρίσκονται εντός των άνω αναλογιών, η μέγιστη επιτρεπόμενη καμπτική ροπή σε κυματισμένο νερό, εκφρασμένη σε $kN * m$, λαμβάνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$Sagging: M_{ws} = -Mk_1C_1L^2B(C_B + 0.7) \times 10^{-3} \quad (3.6)$$

$$Hogging: M_{wh} = +Mk_2C_1L^2BC_B \times 10^{-3} \quad (3.7)$$

όπου:

- $k_1 = 110$
- $k_2 = 190$
- $C_1 = \begin{cases} 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5} & , \text{για } 90 \leq L \leq 300m \\ 10.75 & , \text{για } 300 \leq L \leq 350m \\ 10.75 - \left(\frac{L-350}{100}\right)^{1.5} & , \text{για } 350 \leq L \leq 500m \end{cases}$
- $L =$
μήκος πλοίου σε m, όχι όμως μεγαλύτερο από 500m, στο βύθισμα της γραμμής φόρτωσης
- $B =$ πλάτος πλοίου σε m
- $C_B =$
συντελεστής γάστρας, όχι όμως μικρότερος από 0.6, στο βύθισμα της γραμμής φόρτωσης
- $M =$ συντελεστής κατανομής κατά το διάμηκες, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.4**

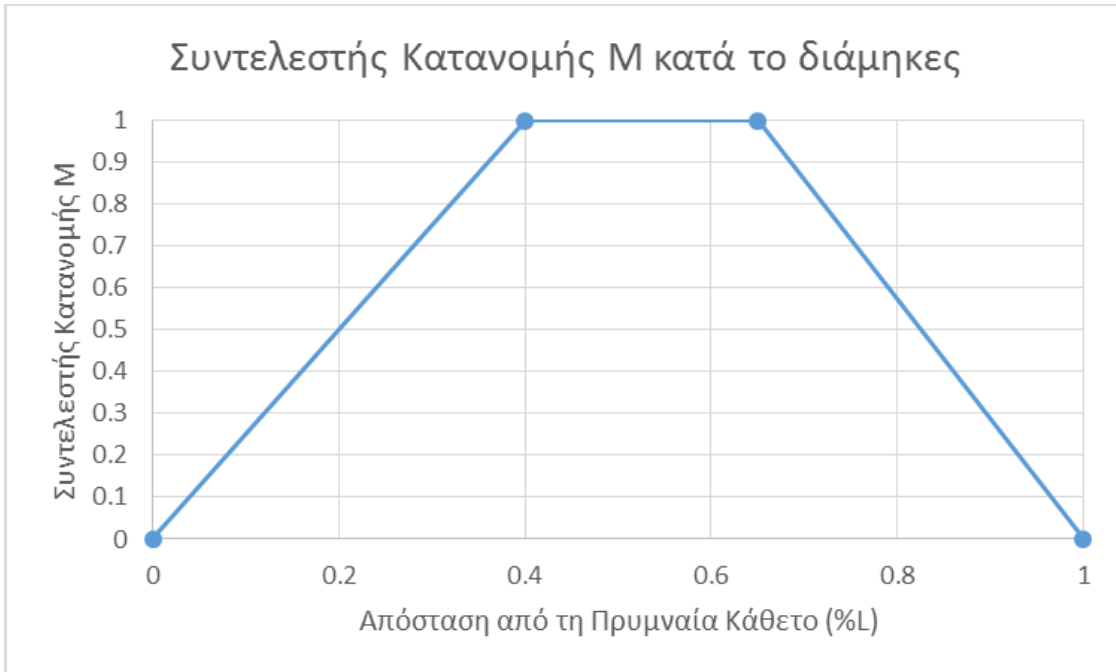
Οι μέγιστες επιτρεπόμενες διατμητικές δυνάμεις σε κυματισμένο νερό, εκφρασμένη σε kN , λαμβάνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\text{Θετική: } F_{wp} = +kF_1C_1LB(C_B + 0.7) \times 10^{-2} \quad (3.8)$$

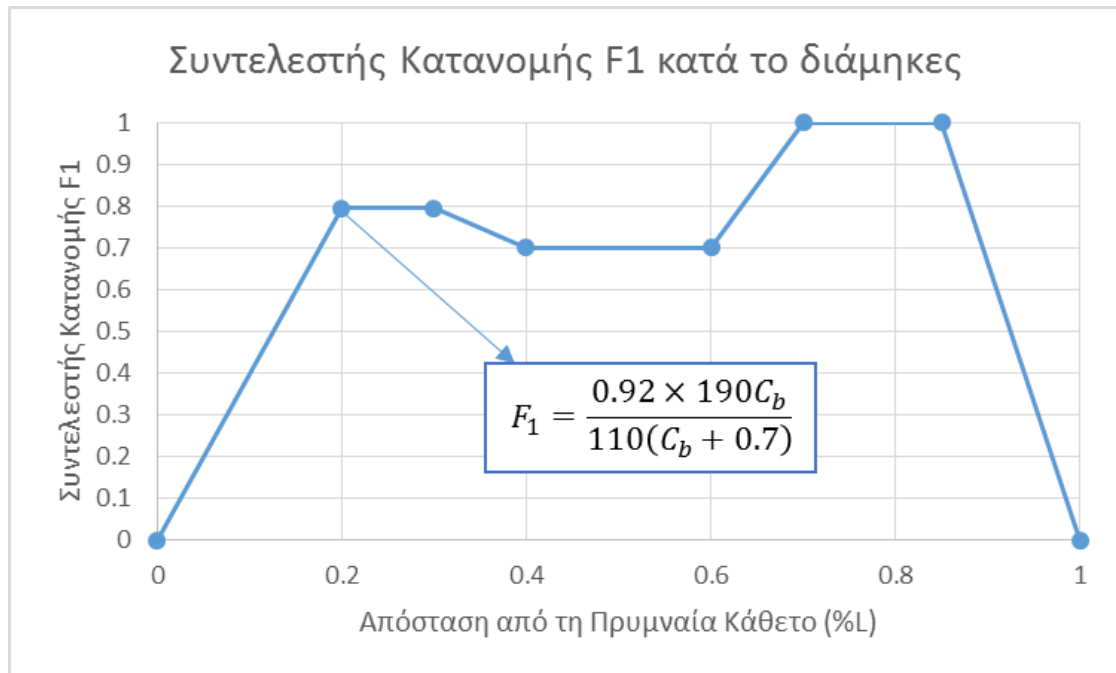
$$\text{Αρνητική: } F_{wn} = -kF_2C_1LB(C_B + 0.7) \times 10^{-2} \quad (3.9)$$

όπου:

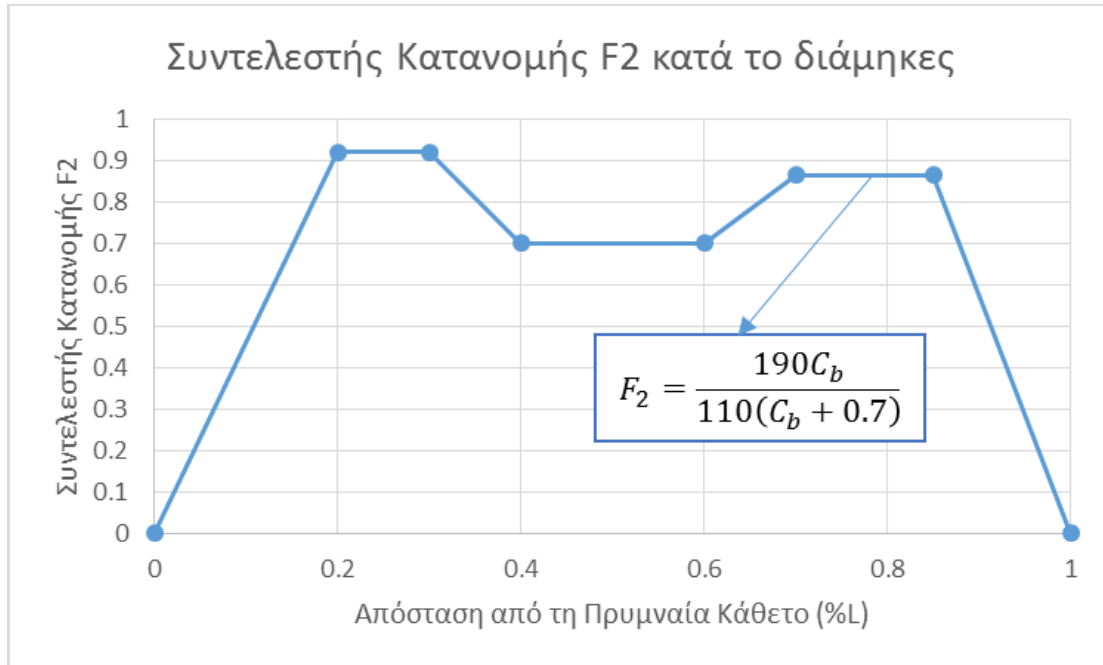
- $k = 30$
- $C_1 = \begin{cases} 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5} & , \text{για } 90 \leq L \leq 300m \\ 10.75 & , \text{για } 300 \leq L \leq 350m \\ 10.75 - \left(\frac{L-350}{100}\right)^{1.5} & , \text{για } 350 \leq L \leq 500m \end{cases}$
- $L =$
μήκος πλοίου σε m, όχι όμως μεγαλύτερο από 500m, στο βύθισμα της γραμμής φόρτωσης
- $B =$ πλάτος πλοίου σε m
- $C_B =$
συντελεστής γάστρας, όχι όμως μικρότερος από 0.6, στο βύθισμα της γραμμής φόρτωσης
- $F_1 =$ συντελεστής κατανομής για τη θετική, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.5**
- $F_2 =$ συντελεστής κατανομής για την αρνητική, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**



Σχήμα 3.4: Συντελεστής κατανομής καμπτικής ροπής κατά το διάμηκες



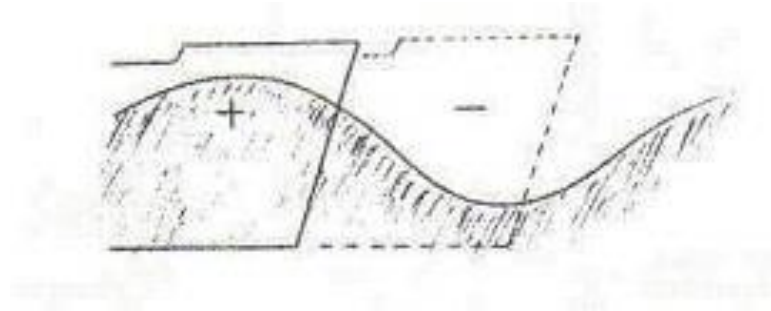
Σχήμα 3.5: Συντελεστής κατανομής θετικής διαμητικής δύναμης κατά το διάμηκες



Σχήμα 3.6: Συντελεστής κατανομής αρνητικής διαμητικής δύναμης κατά το διάμηκες

Panting

Καλείται το φαινόμενο κατά το οποίο οι κυματισμοί χτυπούν τα πλευρικά ελάσματα του πλοίου δημιουργώντας διακυμάνσεις στην πίεση, η οποία τείνει να ωθήσει την περιοχή αυτή μέσα και έξω. Για το λόγο αυτό, η διαμόρφωση στα άκρα του πλοίου πρέπει να ενισχυθεί ώστε να αντιστέκεται στις δυνάμεις που δημιουργούνται. Μια αναπαράσταση της φόρτισης αυτής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

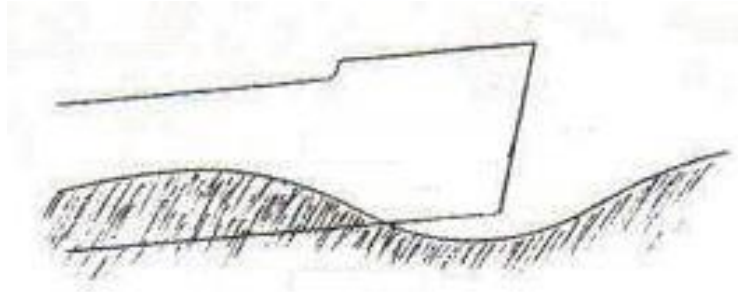


Σχήμα 3.7: Κατάσταση Panting

Σφυρόκρουση

Όταν ένα πλοίο πλέει σε μετωπικούς κυματισμούς, τότε επηρεάζεται έντονα ο προνευτασμός (pitch) και η κατακόρυφη κίνηση (heave). Μπορεί να συμβεί όταν η πλώρη σηκώνεται πάνω από την κορυφή ενός κύματος και αναδύεται πλήρως έξω από το νερό. Όταν η πλώρη επανέρχεται στο νερό, μπορεί να υποβληθεί σε σημαντική επίπτωση, η οποία καλείται σφυρόκρουση (Pounding/Slamming). Για το λόγο

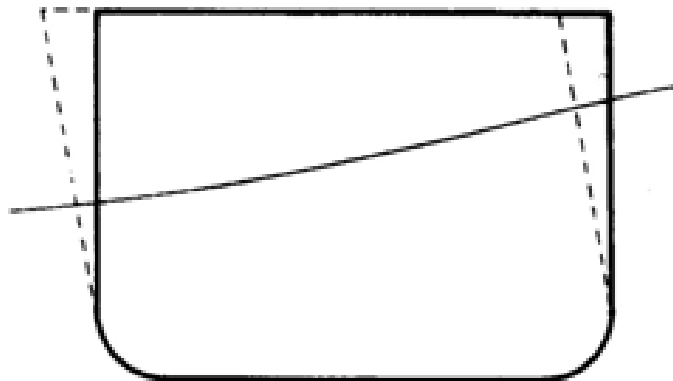
αυτό, κατ' ελάχιστον θα πρέπει το έλασμα της γάστρας στην περιοχή αυτή να ενισχύεται, ώστε να αποφεύγεται η κάμψη του. Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει και στην περιοχή της πρύμνης (stern slamming), αλλά σε μικρότερο βαθμό. Μια αναπαράσταση της φόρτισης αυτής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3.8: Κατάσταση Pounding

3.2.3 Πλάγιοι Κυματισμοί

Η άνιση κατανομή της πίεσης του νερού κατά το εγκάρσιο που προκαλείται από τη δράση των κυμάτων οδηγεί σε στρέβλωση της δομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Αυτή αντισταθμίζεται από τις διατμητικές τάσεις στη δομή, εξαιτίας κυρίως των εγκάρσιων φρακτών και των νομέων. Οι ομοεπίπεδες στρεπτικές τάσεις που προκαλούν παραμόρφωση των εγκάρσιων φρακτών (Racking) είναι υψηλότερες στις γωνίες της εγκάρσιας τομής και έτσι τα μπρακέτα στις περιοχές αυτές θα πρέπει να επιθεωρούνται προσεχτικά.

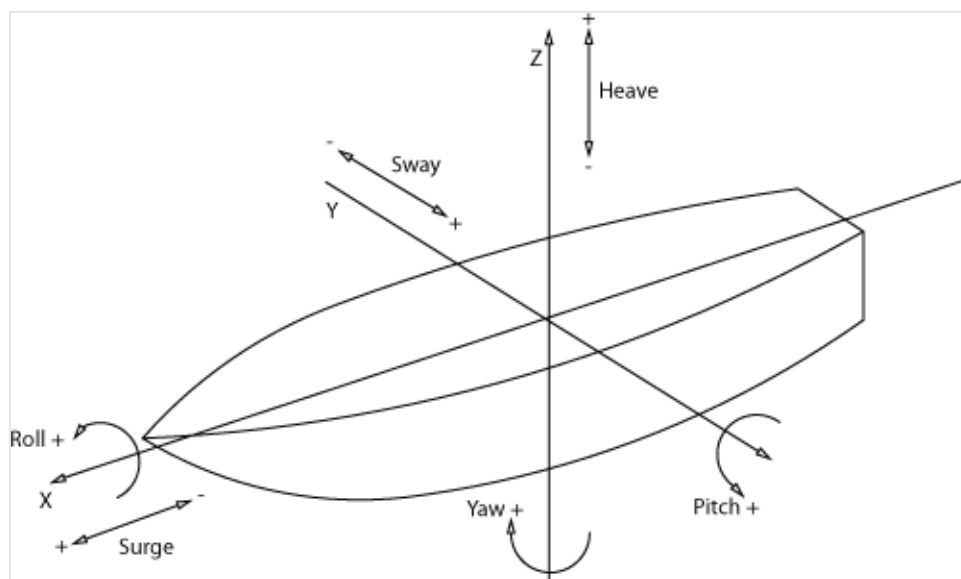


Σχήμα 3.9: Ομοεπίπεδη στρεπτική καταπόνηση [30]

Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο σε πλοία με περιορισμένο αριθμό εγκάρσιων φρακτών, όπως τα επιβατηγά/οχηματαγωγά. Για το λόγο αυτό απαιτείται ειδική εξέταση σε αυτές τις περιπτώσεις.

3.3 Κινήσεις του πλοίου και Επιταχύνσεις

Βέβαια, δεν θα πρέπει να αμεληθεί το γεγονός ότι οι δυναμικές φορτίσεις είναι άμεσα συνυφασμένες με τις κινήσεις του πλοίου, οι οποίες επηρεάζονται κυρίως από το ίδιο το θαλάσσιο περιβάλλον. Οι κινήσεις είναι έξι και παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 3.10: Οι κινήσεις του πλοίου [31]

Από αυτές προκαλούνται επιταχύνσεις στα κατασκευαστικά στοιχεία αυτού. Προκειμένου, λοιπόν, να βρεθούν οι μέγιστες επιτρεπόμενες φορτίσεις σε κάποιες κατασκευαστικές περιοχές, όπως αυτή της πλώρης, θα πρέπει σε πρώτη φάση να υπολογιστούν οι διάφορες επιταχύνσεις που προκύπτουν από τις κινήσεις του πλοίου.

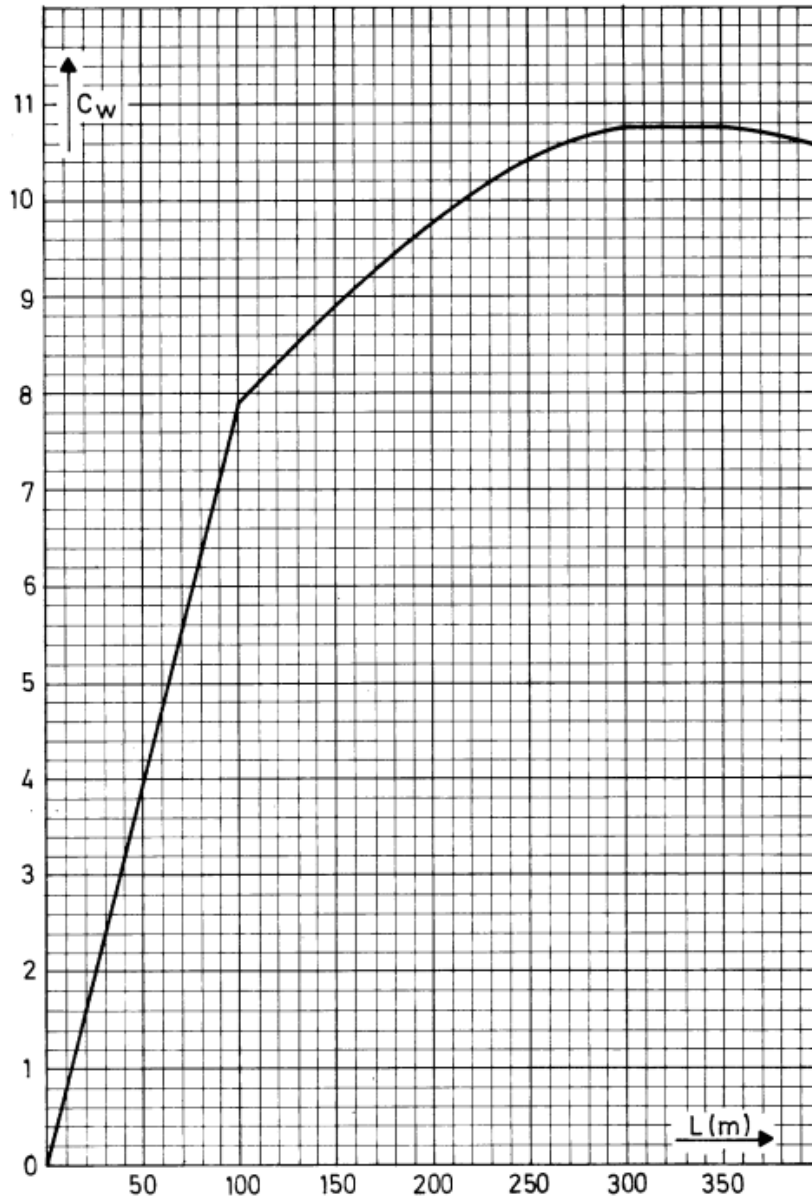
Ο Νορβηγικός-Γερμανικός Νηογνώμονας DNV GL προβλέπει τα παρακάτω για τις επιταχύνσεις. Από το Σχήμα 3.12 προκύπτει η παράμετρος επιτάχυνσης a_0 ως συνάρτηση του μήκους L (m) και της ταχύτητας V (knots). Ωστόσο η παράμετρος επιτάχυνσης a_0 προκύπτει και από την ακόλουθη σχέση:

$$a_0 = \frac{3C_W}{L} + C_V C_{V1} \quad (3.10)$$

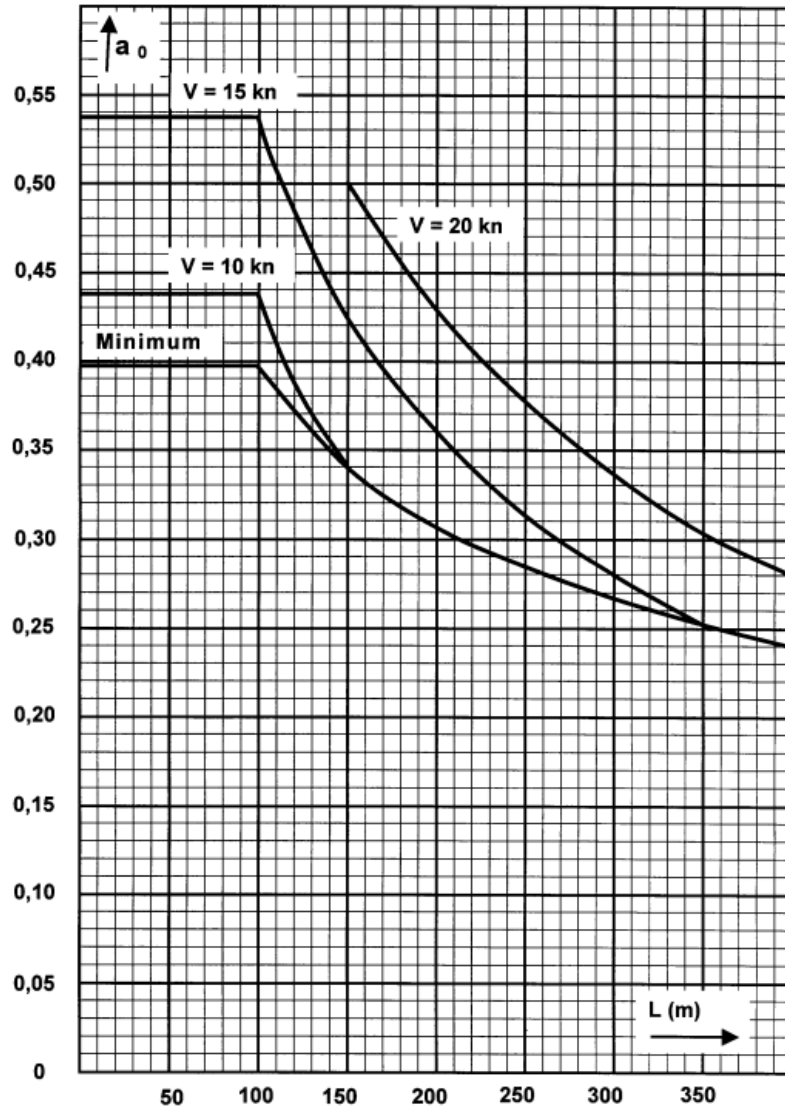
όπου:

- $C_V = \frac{\sqrt{L}}{50}$, με μέγιστη τιμή = 0.2
- $C_{V1} = \frac{V}{\sqrt{L}}$, με μέγιστη τιμή = 0.8
- C_W (συντελεστής κυματισμού) =
$$\begin{cases} 0.0792L & \text{για } L \leq 100 \\ 10.75 - [(300 - L)/100]^{3/2} & \text{για } 100 < L \leq 300 \\ 10.75 & \text{για } 300 < L \leq 350 \\ 10.75 - [(L - 350)/150]^{3/2} & \text{για } 350 < L \end{cases}$$

Επίσης, δίνεται το Σχήμα 3.11 και Σχήμα 3.12, όπου απεικονίζουν τις παραπάνω σχέσεις υπολογισμού του συντελεστή κυματισμού ως συνάρτηση του μήκους.



Σχήμα 3.11: Συντελεστής κυματισμού C_w [32]



Σχήμα 3.12: Παράμετρος επιτάχυνσης [32]

Εν συνεχεία, δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού των επιταχύνσεων surge (a_x), sway/yaw (a_y) και heave (a_z).

$$a_x = 0.2g_0a_0\sqrt{C_B} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (3.11)$$

$$a_y = 0.3g_0a_0 \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (3.12)$$

$$a_z = 0.7g_0 \frac{a_0}{\sqrt{C_B}} \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (3.13)$$

Όπου:

- $g_0 = \eta$ επιτάχυνση της βαρύτητας ($=9.81 \text{ m/s}^2$)
- $C_B =$ συντελεστής γάστρας ($=\Delta/(1.025\text{LBT})$)

Η επιτάχυνση roll (a_r) δίνεται από τη σχέση:

$$a_r = \varphi \left(\frac{2\pi}{T_R} \right)^2 R_R \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (3.14)$$

όπου:

- $\varphi = \frac{50c}{B+75} \text{ (rad)}$
- $c = (1.25 - 0.025T_R)k$
- $k = 1.2$, για πλοία χωρίς υδροσυλλέκτη
 $= 1.0$, για πλοία με υδροσυλλέκτη
 $= 0.8$, για πλοία με εγκαταστάσεις απόσβεσης διατοιχισμού
- $T_R = \frac{2k_r}{\sqrt{GM}} \text{ (sec)}$, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερος από 30
- $k_r =$ ακτίνα περιστροφής $= 0.39B \text{ (m)}$
- $GM =$ μετακεντρικό ύψος $= 0.07B \text{ (m)}$ γενικώς
- $R_R =$ απόσταση καθ' ύψος από το κέντρο μάζας έως τον άξονα περιστροφής (m)
- $z =$ ύψος άξονα περιστροφής (από Baseline) $= \left[\frac{D}{4} + \frac{T}{2} \right]$ ή $\left[\frac{D}{2} \right]$, όποιο είναι μικρότερο

Σημειώνεται ότι η τιμή του k_r και του GM λαμβάνεται συνήθως τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται η περίοδος διατοιχισμού [32].

Τέλος, η επιτάχυνση roll (a_p) δίνεται από τη σχέση:

$$a_p = \theta \left(\frac{2\pi}{T_P} \right)^2 R_P \text{ (m/s}^2\text{)} \quad (3.15)$$

όπου:

- $\theta = 0.25 \frac{a_0}{C_B} \text{ (rad)}$
- $T_P = 1.8 \sqrt{\frac{L}{g_0}} \text{ (sec)}$
- $R_P =$ απόσταση από το κέντρο μάζας έως τον άξονα περιστροφής (ομοίως με το R_R)

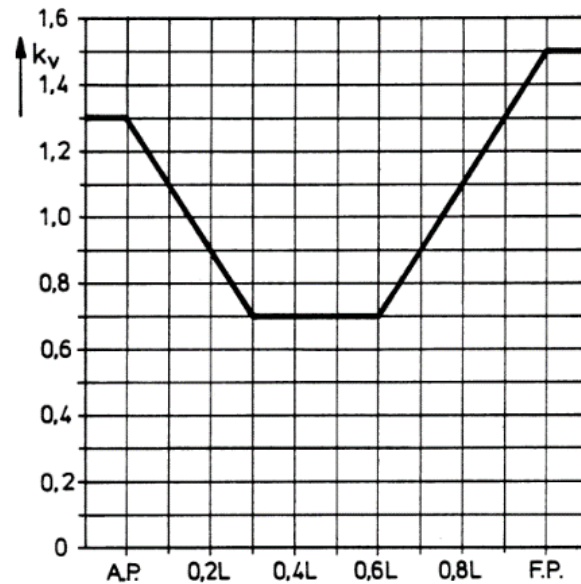
Κατά συνέπεια, όσον αφορά την κατακόρυφη επιτάχυνση a_v , η τιμή της δίνεται από τη σχέση:

$$a_v = \frac{k_v g_0 a_0}{C_B} \quad (3.16)$$

όπου:

- $k_v = 1.3$ πρύμνηθεν της Α.Ρ.
- $= 0.7$ μεταξύ 0.3L και 0.6L από την Α.Ρ.
- $= 1.5$ πρωράθεν της F.P.

Μεταξύ των άνω διαστημάτων η τιμή του συντελεστή κατανομής της επιτάχυνσης k_v λαμβάνεται με γραμμική παρεμβολή (βλέπε Σχήμα 3.13).



Σχήμα 3.13: Συντελεστής κατανομής της κατακόρυφης επιτάχυνσης k_v [32]

Εν συνεχεία, όσον αφορά την εγκάρσια επιτάχυνση a_t , η τιμής της δίνεται από τη σχέση:

$$a_t = \sqrt{a_y^2 + (g_0 \sin \varphi + a_{ry})^2} \quad (3.17)$$

όπου:

- $a_{ry} =$ δίνεται από τη σχέση της a_r αλλά για το σημείο (κατά το εγκάρσιο) του υπό μελέτη στοιχείου

Τέλος, όσον αφορά τη διαμήκη επιτάχυνση a_l , η τιμής της δίνεται από τη σχέση:

$$a_l = \sqrt{a_x^2 + (g_0 \sin \theta + a_{px})^2} \quad (3.18)$$

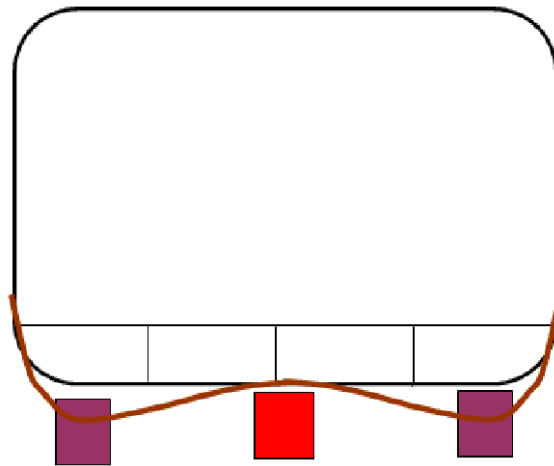
όπου:

- $a_{px} =$ δίνεται από τη σχέση της a_p αλλά για το σημείο κατά το διάμηκες από τη μέση τομή

3.4 Τοπικοί Παράγοντες

3.4.1 Δεξαμενισμός

Όταν ένα πλοίο είναι στη δεξαμενή για κάποια επισκευή τοποθετούνται κάποιοι τάκοι (blocks) στην περιοχή της τρόπιδας και εκατέρωθεν αυτής, ώστε να πλοίο να στηρίζεται επαρκώς. Στην περίπτωση που το πλοίο στηρίζεται μόνο στην περιοχή της τρόπιδας (κόκκινο χρώμα) δημιουργείται κατάσταση Sagging κατά το εγκάρσιο (βλέπε Σχήμα 3.14). Το φαινόμενο αυτό περιορίζεται με την προσθήκη τάκων εκατέρωθεν της τρόπιδας (μωβ χρώμα).



Σχήμα 3.14: Φόρτιση κατά το δεξαμενισμό [33]

3.4.2 Προσάραξη και Συγκρούσεις

Η προσάραξη (Grounding) και η σύγκρουση (Collision) θεωρούνται ως τυχαία και ανεπιθύμητα συμβάντα κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου και δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη της αντοχής του πλοίου. Ωστόσο, σε περίπτωση σύγκρουσης, η παρουσία κάποιου ρήγματος ενέχει το σοβαρό κίνδυνο απελευθέρωσης ρυπογόνων ουσιών για το περιβάλλον, όπως το πετρέλαιο. Για το λόγο αυτό έχει θεσπιστεί η χρήση διπλού τοιχώματος σε πλοία που μεταφέρουν επικίνδυνες ουσίες για το περιβάλλον. Επιπροσθέτως, σε οποιοδήποτε τύπο πλοίου, ακόμη και αν δεν χαρακτηρίζεται από διπλή γάστρα, δεν επιτρέπεται καμιά δεξαμενή πετρελαίου ή παράγωγων αυτού να συνορεύει με τα εξωτερικά τοιχώματα. Κατά συνέπεια, τοποθετούνται τοπικά κενοί χώροι (void spaces) ή φρεάτια (cofferdam). Φυσικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση προσάραξης και «ακινητοποίησης» του πλοίου, δηλαδή χωρίς κάποια επαγόμενη ανατροπή (capsize), η φόρτιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί και στατική.

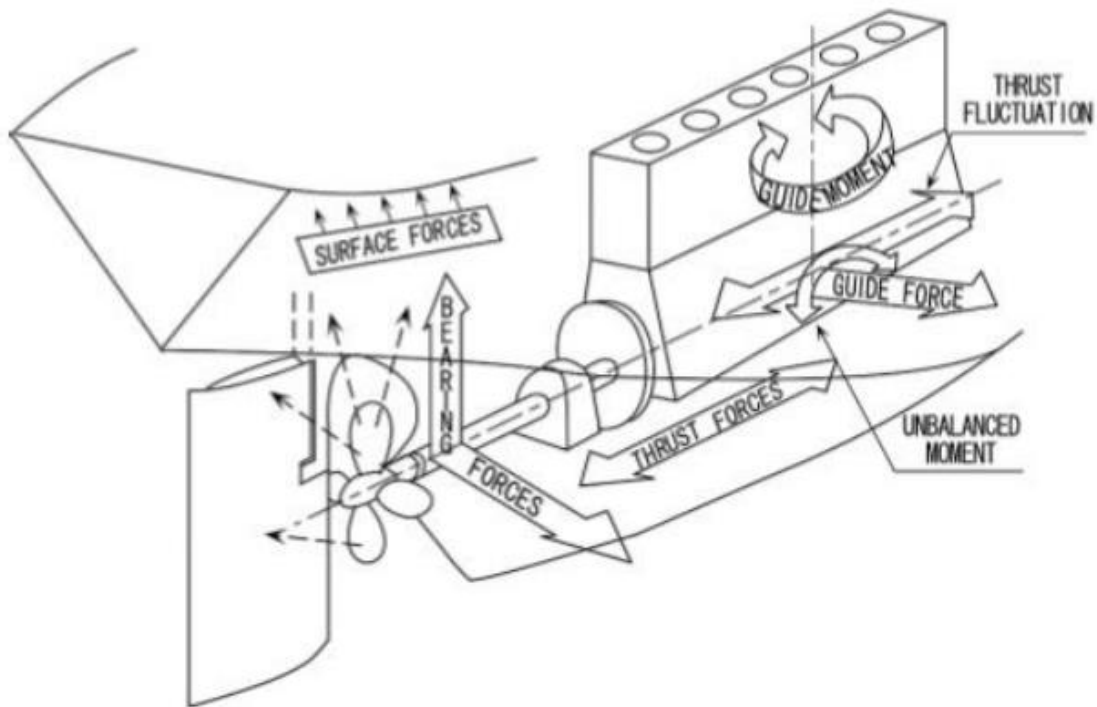
3.4.3 Φορτίσεις από μηχανήματα

Υπάρχουν, επίσης, και δυναμικές φορτίσεις που προκαλούν κραδασμούς και οφείλονται σε δυνάμεις λόγω της λειτουργίας των μηχανημάτων πρόωσης (π.χ. κύρια μηχανή) καθώς και στην περιστροφική κίνηση διαφόρων στοιχείων (π.χ. έλικα), όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15. Στο Παράρτημα Ε παρουσιάζεται

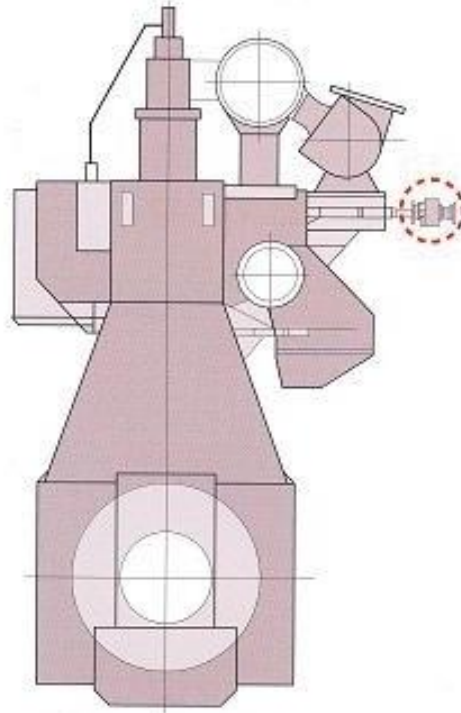
μια ανάλυση σχετικά με τους κραδασμούς που αναπτύσσονται, ώστε ο αναγνώστης να αποκτήσει μια πιο σφαιρική αντίληψη για το ζήτημα αυτό.

Το φαινόμενο αυτό δεν είναι κάτι το παράξενο καθώς η μηχανή αποτελείται από κινούμενα μέρη, τα οποία παράγουν μεγάλη ισχύ κατά την ανάφλεξη του καυσίμου με αποτέλεσμα τη δημιουργία δονήσεων. Ωστόσο, οι κραδασμοί δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν τα κανονικά όρια καθώς δημιουργούνται προβλήματα στο πλοίο, στην ίδια τη μηχανή αλλά και στους ανθρώπους που επιβαίνουν ή εργάζονται στο πλοίο. Μάλιστα, όσον αφορά τους επιβάτες, ο περιορισμός αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντικός προκειμένου ένα πλοίο να πιστοποιηθεί με τον καλύτερο βαθμό άνεσης (Comfort Class).

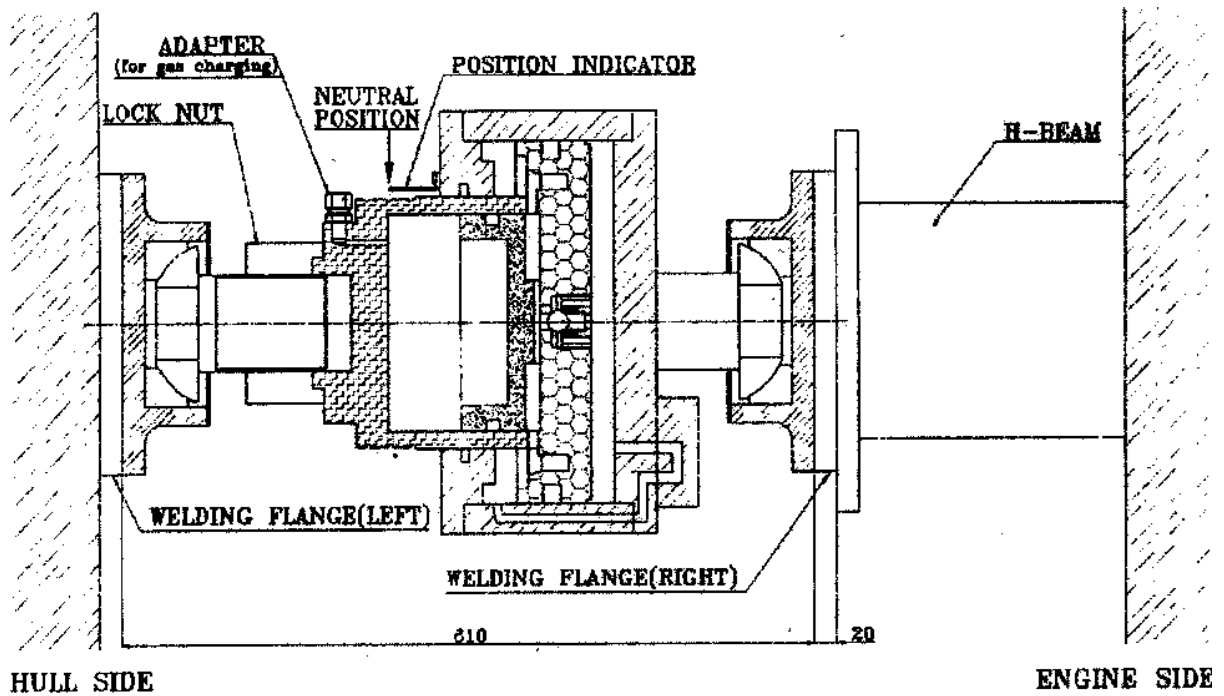
Για τον περιορισμό των δονήσεων έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι και συστήματα. Κάποιες από τις πιο ενδιαφέρουσες μεθόδους είναι οι αποσυντονιστές (de-tuners), τα ωστικά έδρανα (thrust pads) και τα chokes. Βέβαια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντηρίδες (struts) ή στηρίξεις (bracings), τα οποία όμως στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων δεν προτείνονται καθώς η αρχή λειτουργίας τους έγκειται στη μεταφορά των δονήσεων της μηχανής στη γάστρα του πλοίου. Στο Σχήμα 3.16 απεικονίζεται μια τυπική εγκατάσταση μιας υδραυλικής άνω στήριξης (Hydraulic Top Bracing) προκειμένου να αποσβένονται οι κραδασμοί της μηχανής από το πλοίο (ένωση μηχανής με φρακτή πλοίου), ενώ στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται το σκαρίφημα αυτού.



Σχήμα 3.15: Επισκόπηση των κραδασμών του πλοίου [34]



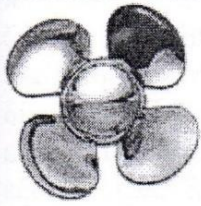
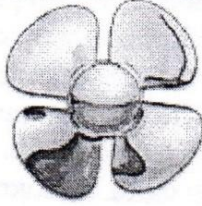
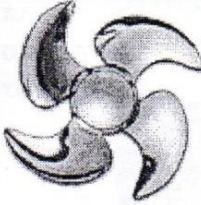

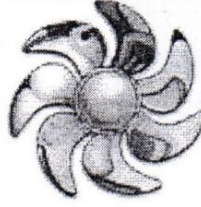

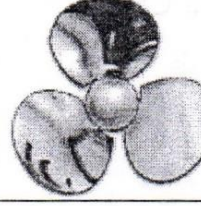
Σχήμα 3.16: Εγκατάσταση “Hydraulic Bracing Unit” [35]



Σχήμα 3.17: Σκαρίφημα Hydraulic Top Bracing [36]

Από τη σκοπιά της έλικας, είναι επιθυμητή η χρήση πολλών πτερυγίων καθώς όσο τα πτερύγια αυξάνονται τόσο μειώνονται οι κραδασμοί του πλοίου. Βέβαια αυτό έχει αντίκτυπο στο βαθμό απόδοσης αυτής, καθώς μειώνεται σε σχέση με μια προπέλα με λιγότερα πτερύγια. Επιπλέον, για υπηρεσία χωρίς θορύβους επιλέγονται πτερύγια με μεγάλη γωνία πλευρικής απόκλισης (skew angle). Έτσι, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων επιλέγονται έλικες με τέσσερα ή πέντε πτερύγια, τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη γωνία πλευρικής απόκλισης. Σημειώνεται ότι η χρήση έλικας με περισσότερα από πέντε πτερύγια θεωρείται ασύμφορη λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσής της. Τέτοιου είδους προπέλες βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε πολεμικά πλοία (φρεγάτες) για αθόρυβη λειτουργία. Στον Πίνακα 3.1: *Τυπικές μορφές προπέλας*, παρουσιάζονται τα βασικότερα είδη ελίκων που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 3.1: Τυπικές μορφές προπέλας [37]

	Propeller for multi-purpose cargo vessel for service in Arctic water, conforming to the highest USSR strength class. 5.6m diameter, 15400 kW, 17 knots		Propeller for car-passenger ferry. 5.0m diameter, 26470 kW, 31 knots
	Propeller for car-passenger ferry. High-skew blade shape for low noise and minimized vibrations. 5.1m diameter, 15640 kW, 23.2 knots		Propeller for cruise ship. High-skew type for low noise and vibration level. 5.2m diameter, 11820 kW, 22.6 knots
	Propeller for frigate. High-skew blades for silent operation. 6.3m diameter, 35660 kW, 32.8 knots		Propeller for patrol vessel. High-skew type for low noise and minimized vibrations. 1.6m diameter, 2030 kW, 24.5 knots
	Super-cavitating propeller for a gunboat. 2.35m diameter, 13250 kW, 31.2 knots		

Τέλος, τονίζεται ότι στα κρουαζιερόπλοια ως μέσο πρόωσης χρησιμοποιούνται κυρίως τα συστήματα Azipods. Ένα τέτοιο σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.18. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το μέσο πρόωσης επιλέγεται γιατί παρέχει καλές ελκτικές ικανότητες. Η κίνησή του γίνεται ηλεκτρικά με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος είναι τοποθετημένος σε κατάλληλο κέλυφος κάτω από τη γάστρα.



Σχήμα 3.18: Σύστημα πρόωσης Azipod [38]

3.5 Κρίσιμες καταστάσεις φόρτισης

Έχοντας αποκτήσει ο αναγνώστης μια αίσθηση των φορτίσεων στις οποίες υποβάλλεται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου, εν συνεχεία θα καταγραφούν οι κρισιμότερες εξ αυτών, σύμφωνα με τους Νηογνώμονες. Όσον αφορά τα κρουαζιερόπλοια, έξι είναι οι πιο κρίσιμες καταστάσεις φόρτισης (Πίνακας 3.2). Μάλιστα, σύμφωνα με τις καταστάσεις αυτές γίνεται και η διαστασιολόγηση πολλών τμημάτων της μεταλλικής κατασκευής.

Πίνακας 3.2: Κρίσιμες καταστάσεις φόρτισης

A/A	Περίπτωση Φόρτισης
LC1	Κατάσταση Hogging (Ήρεμο + Κυματισμένο Νερό)
LC2	Κατάσταση Sagging (Ήρεμο + Κυματισμένο Νερό)
LC3	Ομοεπίπεδη Στρεπτική Τάση (Racking)
LC4	Φόρτιση στους Στύλους
LC5	Σφυρόκρουση της πλώρης
LC6	Φορτίσεις κατά τον ξηρό ελλιμενισμό

Κατάσταση Hogging

Όσον αφορά τη μέγιστη κατάσταση Hogging (LC1), η κατάσταση αυτή περιλαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό και την κατανομή της καμπτικής ροπής σε κυματισμένο νερό (σε κατάσταση Hogging). Η μέγιστη κατάσταση hogging είναι καθοριστική για τη διαστασιολόγηση των παρακάτω περιοχών:

- Των ανώτερων καταστρωμάτων, όσον αφορά τα επίπεδα εφελκυστικών τάσεων
- Της διαμήκου δομής του πυθμένα, όσον αφορά τα επίπεδα θλιπτικών τάσεων (λυγισμός)
- Της διαμήκου δομής γενικότερα, όσον αφορά τις διατμητικές τάσεις (έμφαση στα L/4 και 3L/4)
- Τις κολόνες, λόγω της κατανομής της φόρτισης από την ολική κάμψη
- Τις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων όπως κοψίματα-ανοίγματα στις άνω πλευρές, στα καταστρώματα και στις φρακτές

Κατάσταση Sagging

Επιπροσθέτως, όσον αφορά τη μέγιστη κατάσταση Sagging (LC2), σημειώνεται ότι εάν υποθεθεί ότι το πλοίο δεν θα βρεθεί ποτέ σε κατάσταση Sagging, τότε θεωρείται σαν μέγιστη τιμή Sagging, η ελάχιστη τιμή Hogging. Η μέγιστη κατάσταση Sagging (LC2) περιλαμβάνει τη μέγιστη επιτρεπόμενη καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό και σε κυματισμένο νερό σε κατάσταση. Η μέγιστη κατάσταση Sagging είναι καθοριστική για τη διαστασιολόγηση των παρακάτω περιοχών:

- Των ανώτερων καταστρωμάτων και των διαμήκων φρακτών, όσον αφορά το λυγισμό
- Τις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων όπως κοψίματα-ανοίγματα στις άνω πλευρές, στα καταστρώματα και στις φρακτές

Ομοεπίπεδη στρεπτική τάση

Η τρίτη περίπτωση φόρτισής (LC3), λοιπόν, είναι η ομοεπίπεδη στρεπτική καταπόνηση. Αυτή η φόρτιση οφείλεται σε πλευρικές θάλασσες (beam seas), δηλαδή θάλασσες που σχηματίζουν γωνία 90 μοιρών με την κίνηση του πλοίου. Τα φορτία καταστρώματος λόγω των στατικών δυνάμεων πρέπει να χρησιμοποιούνται σε μια γωνία διατοχισμού (roll angle) 30° και το σκάφος πρέπει να είναι ισορροπημένο στην κατάσταση εγκάρσιας κλίσης (heeled condition) σε ήρεμο νερό. Η εγκάρσια κλίση και η εγκάρσια επιτάχυνση προκαλούν εγκάρσιες δυνάμεις στα ανώτερα κομμάτια της κατασκευής με αποτέλεσμα την εγκάρσια εκτροπή, το οποίο σημαίνει ότι τα πάνω καταστρώματα μετακινούνται σε σχέση με τα κατώτερα κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Για να εξασφαλίζεται επαρκής εγκάρσια αντοχή των εγκαρσίων φρακτών αλλά και της δομής εν γένει, πρέπει να αναλύεται και αυτή η κατάσταση φόρτισης.

Αυτή η κατάσταση φόρτισης είναι καθοριστική για τη διαστασιολόγηση των ακόλουθων περιοχών της κατασκευής:

- Εγκάρσιες φρακτές, όσον αφορά τις διατμητικές τάσεις
- Καταστρώματα λόγω των μεγάλων ανοιγμάτων ή των ασυνεχειών

Φόρτιση των στύλων

Εν συνεχεία, θα πρέπει να εξεταστούν οι φορτίσεις στις οποίες υπόκεινται οι κολώνες. Όσον αφορά την τέταρτη περίπτωση φόρτισης (LC4), ο στόχος της ανάλυσης των κολώνων είναι ο υπολογισμός της μέγιστης αξονικής δύναμης σε θλίψη και/ή εφελκυσμό σε κάθε κολώνα, και η εξακρίβωση ότι η κατασκευαστική αντοχή των κολώνων και της γύρω περιοχής είναι επαρκής.

Σφυρόκρουση πλώρης

Η πέμπτη περίπτωση φόρτισης (LC5) είναι η σφυρόκρουση της μάσκας της πλώρης (bow flare slamming). Με την εξέταση αυτής της κατάστασης φόρτισης πραγματοποιείται η διαστασιολόγηση των καταστρωμάτων και των διαμήκων φρακτών στην περιοχή της πλώρης όσον αφορά της θλιπτικές τάσεις (λυγισμός).

Φορτίσεις κατά τον δεξαμενισμό

Τέλος, δεν θα πρέπει να αμελούνται οι στατικές φορτίσεις στις οποίες υπόκειται το πλοίο κατά τον δεξαμενισμό (dry-docking). Αυτές αποτελούν την έκτη κατάσταση φόρτισης (LC6). Τα μεγάλα κρουαζιερόπλοια έχουν μεγάλο βάρος και πρέπει να λαμβάνεται ειδική πρόνοια για την διάταξη των τάκων που στηρίζουν τον πυθμένα. Μάλιστα, για τα πλοία αυτά, η ανάλυση του δεξαμενισμού πρέπει να περιλαμβάνεται σαν ξεχωριστή περίπτωση φόρτισης αναλυόμενη με πεπερασμένα στοιχεία.

Αν και είναι κάτι που αφορά επόμενα κεφάλαια, αξίζει να καταγραφεί κι εδώ ότι για τη μοντελοποίηση τέτοιων φορτίσεων χρησιμοποιούνται στοιχεία ελατηρίου (spring elements) προς αναπαράσταση των τάκων στήριξης (docking blocks).

Αυτή η κατάσταση φόρτισης συχνά είναι καθοριστική για τη διαστασιολόγηση των ακόλουθων κατασκευαστικών περιοχών:

- Την έκταση της κατασκευής του διπύθμενου και των ενισχύσεων του
- Το διατμητικό λυγισμό (shear buckling) των εδρών (floor) και το λυγισμό των σταθμίδων (girders) στο διπύθμενο

3.6 Ανακεφαλαίωση

Τα κρουαζιερόπλοια λόγω της πολύπλοκης δομής τους χαρακτηρίζονται από τρισδιάστατα εντατικά πεδία. Αυτό σημαίνει ότι η τιμή της τάσης ποικίλει ανάλογα με τη θέση του εξεταζόμενου σημείου ως προς το διαμήκη, το εγκάρσιο και το κατακόρυφο επίπεδο.

Επιπλέον, το πλοίο υπόκειται σε φορτίσεις και λόγω της ίδιας του της κατασκευής. Για παράδειγμα μια υπερκατασκευή πολλών καταστρωμάτων έχει κάποιο βάρος το οποίο μεταφέρεται μέσω των φρακτών και των κολώνων και τελικά το παραλαμβάνει ο πυθμένας.

Ο κάθε άνθρωπος που επιβαίνει στο πλοίο δεν προκαλεί κάποια φόρτιση στην κατασκευή. Αν και το άθροισμα όλων των επιβατών και των μελών πληρώματος είναι ένα σεβαστό ποσό, λόγω της μεγάλης διασποράς του δεν θεωρείται ότι επιβαρύνει την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Για το λόγο αυτό καμιά περίπτωση φόρτισης δεν εξετάζεται για τους επιβάτες, παρά μόνο κάποια ειδικά θέματα που αφορούν την ευστάθεια.

Προκειμένου να εξεταστούν οι επιπτώσεις των διαφόρων φορτίσεων στο πλοίο, οι φορτίσεις κατατάσσονται σε κάποιες κατηγορίες. Για το λόγο αυτό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τη φύση τους, δηλαδή τη διάρκεια τους και τη συχνότητα εμφάνισής (Κατηγορία 1) τους και ανάλογα με την απόκριση (αντίδραση) της κατασκευής που παραλαμβάνει τις φορτίσεις αυτές (Κατηγορία 2).

Όσον αφορά την πρώτη κατηγορία, υπάρχουν φορτίσεις (σχετικά) σταθερές στο χρόνο αλλά και μεταβαλλόμενες. Όσον αφορά τη δεύτερη κατηγορία, υπάρχουν φορτίσεις στατικές (static loading) και δυναμικές (dynamic loading).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πολλές φορές για να καθίσταται δυνατή η διαστασιολόγηση του πλοίου (design – scantling approach) οι δυναμικές φορτίσεις μεταφράζονται σε ισοδύναμες στατικές ή ψευδό-στατικές (quasi-static) φορτίσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη της αντοχής του πλοίου σε κυματισμούς, όπου για λόγους απλότητας εξετάζεται ως στατική, με τη βοήθεια ισοδύναμων στατικών φορτίσεων.

Οι φορτίσεις που αναπτύσσονται στην μεταλλική κατασκευή εξετάστηκαν, σε πρώτο επίπεδο, ανάλογα με τη μορφή του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Για το λόγο αυτό μελετήθηκαν οι φορτίσεις που αναπτύσσονται σε ήρεμο νερό, σε ακολουθούντες και μετωπικούς κυματισμούς αλλά και πλάγιους. Με βάση αυτό παρουσιάστηκαν οι έξι κινήσεις που κάνει το πλοίο και το τι προβλέπουν οι Νηογνώμονες για αυτές.

Σε δεύτερο επίπεδο αναλύθηκαν και φορτίσεις που οφείλονται σε τοπικούς παράγοντες, όπως οι φορτίσεις κατά τον δεξαμενισμό και οι φορτίσεις από τα μηχανήματα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διάφορα μέτρα, μεταξύ αυτών η χρήση ελίκων με πολλά πτερύγια υψηλής πλευρικής απόκλισης αλλά και η χρήση αποσυντονιστών για τα μηχανήματα.

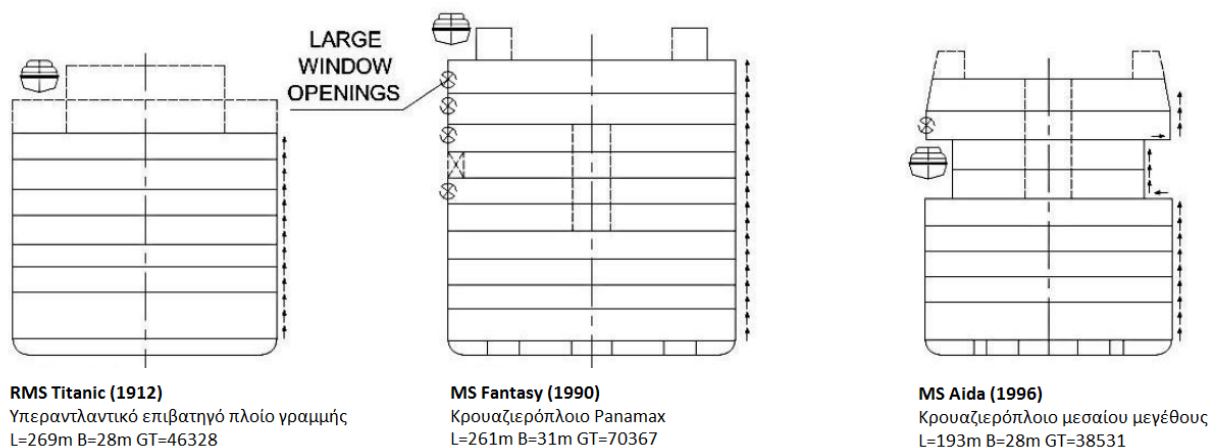
Τέλος, καταγράφηκαν οι κρισιμότερες φορτίσεις για ένα κρουαζιερόπλοιο σύμφωνα με τους Νηογνώμονες. Με βάση κάθε μια από αυτές τις φορτίσεις αναφέρθηκαν ποιες περιοχές της κατασκευής υποφέρει περισσότερο και θα πρέπει να διαστασιολογηθεί κατάλληλα.

4. ΑΠΟΚΡΙΣΕΙΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Έχοντας αποκτήσει αντίληψη των φορτίσεων που επενεργούν σε ένα πλοίο, στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει λόγος για τις αποκρίσεις του. Είναι πλέον κατανοητό ότι το πλοίο αντιδρά στις φορτίσεις και η αντίδραση αυτή καλείται «απόκριση». Η απόκριση του πλοίου έχει ως συνέπεια τη δημιουργία εντατικών πεδίων. Μάλιστα, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων τα πεδία αυτά πεδία είναι τρισδιάστατα καθώς δεν εξαρτώνται μόνο από τη διαμήκη και την κατακόρυφη θέση του υπό εξέταση σημείου, αλλά και από τη μορφολογία της κατασκευής. Πώς, όμως, διαμορφώνονται τα εντατικά πεδία; Πώς επιδρά η γεωμετρία του πλοίου σε αυτό; Παίζει σημαντικό ρόλο η συνεργασία γάστρας-υπερκατασκευής στη διαμόρφωση των εντατικών πεδίων και με ποιο τρόπο;

Αναμφισβήτητα, από την αρχή της κατασκευής χαλύβδινων πλοίων μέχρι σήμερα, η συμπεριφορά των επιβατηγών πλοίων έχει αλλάξει. Αυτό οφείλεται στην διαφοροποίηση των νέων ναυπηγήσεων, όσον αφορά το αυξανόμενο μέγεθος και φυσικά την πολυπλοκότητα της κατασκευής τους. Μια παρουσίαση της εξέλιξης των σχεδιάσεων της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων φαίνεται στο Σχήμα 4.1 και στο Σχήμα 4.3. Σε αυτά παρουσιάζεται η θέση των σωστικών λέμβων στο πλοίο αλλά και τα μεγάλα πλευρικά ανοίγματα (π.χ. παράθυρα, μπαλκόνια), όπου μπορεί κανείς να διακρίνει ποιοτικά την επιρροή τους στη διατμητική ροή (shear flow). Αυτοί οι σχεδιαστικοί παράγοντες είναι κρίσιμοι στις κατασκευές κρουαζιερόπλοιων, καθώς καθορίζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής τόσο σε ολικό όσο και σε τοπικό επίπεδο.



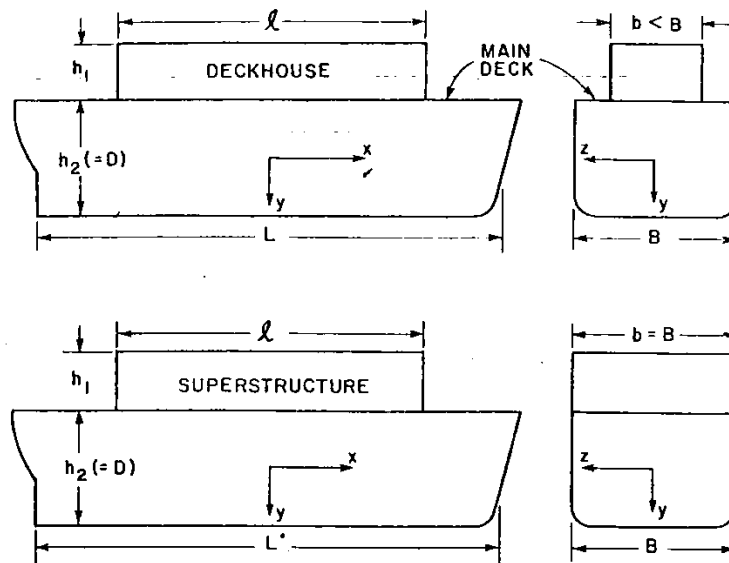
Σχήμα 4.1: Εξέλιξη της μέσης τομής των επιβατηγών πλοίων και διατμητική ροή (Μέρος Α') [39]

Παρατηρείται ότι το σχετικό μέγεθος του υπερστεγάσματος στις παλαιές ναυπηγήσεις επιβατηγών πλοίων (βλέπε RMS Titanic στο Σχήμα 4.1), είναι μικρό και αυτό συχνά δεν λαμβάνεται υπόψιν όταν αξιολογείται η απόκριση του πλοίου, καθώς δεν συμβάλει στην αντοχή. Όμως, καθώς το σχετικό μέγεθος του υπερστεγάσματος αυξάνεται, η αξιολόγηση της επίδρασής του στην ολική αντοχή γίνεται όλο και πιο σημαντική. Όπως θα αναλυθεί εκτενώς εν συνεχεία, η συμβολή της υπερκατασκευής στη διαμήκη αντοχή

εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ αυτών ο τρόπος σύνδεσής της με τη γάστρα και το μήκος της.

Στο πλοίο MS Fantasy παρατηρείται η αύξηση του μεγέθους του υπερστεγάσματος, το οποίο πλέον θεωρείται υπερκατασκευή. Επίσης, παρατηρείται ότι το εξωτερικό κέλυφος της γάστρας είναι συνεχές με μικρά ανοίγματα φινιστρινιών (porthole openings), αλλά και ότι οι σωστικές λέμβοι τοποθετούνται ακόμη στο ανώτατο κατάστρωμα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει σαφής ο διαχωρισμός μεταξύ υπερστεγάσματος και υπερκατασκευής. Η διαφορά τους έγκειται στο ότι στην περίπτωση των υπερκατασκευών, οι διαμήκεις πλευρές της αποτελούν συνέχεια των πλευρών του πλοίου. Από την άλλη, υπερστεγάσμα νοείται η κατασκευή πάνω από τη γάστρα του πλοίου, η οποία έχει πλάτος b μικρότερο από το πλάτος του πλοίου B (βλέπε Σχήμα 4.2). Μάλιστα, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η υπερκατασκευή αποτελεί «υποσύνολο» του υπερστεγάσματος. Με βάση την τελευταία παρατήρηση, πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος υπερστεγάσμα (έναντι της υπερκατασκευής), ο οποίος είναι πιο γενικός. Προκειμένου να καταστεί σαφής ο διαχωρισμός τους, παρατίθεται η ακόλουθη σύγκριση. Τα φορτηγά πλοία έχουν υπερστεγάσμα στην περιοχή του μηχανοστασίου, το οποίο δεν έχει αξιοσημείωτη έκταση κατά το διάμηκες (της τάξης του 5% του μήκους του πλοίου). Αντίθετα, τα επιβατηγά πλοία έχουν υπερκατασκευές, οι οποίες συνήθως εκτείνονται σε ένα σημαντικό ποσοστό του μήκους του πλοίου (πάνω από το 70% του πλοίου).



Σχήμα 4.2: Παλιός διαχωρισμός υπερστεγάσματος από την υπερκατασκευή [40]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μετά την επανάσταση στις αέριες μεταφορές τη δεκαετία του '60, μειώθηκε το διηπειρωτικό ταξίδι με αποτέλεσμα τα μεγάλα υπερωκεάνια γραμμής να εξαλείφονται σιγά-σιγά. Τότε άρχισε σταδιακά να ακμάζει η βιομηχανία της κρουαζιέρας και ως εκ τούτου, η σχεδίαση των μεγάλων επιβατηγών πλοίων άλλαξε. Μια απαίτηση για μεγάλους ανοιχτούς χώρους και μεγαλύτερες καμπίνες με θέα τη θάλασσα συνέβαλε στην αύξηση του μεγέθους των επιβατηγών πλοίων. Τελικά, το υπερστεγάσμα αντικαταστάθηκε από την υπερκατασκευή, της οποίας οι πλευρές αποτελούν προέκταση των πλευρών της γάστρας (βλέπε διαφορά RMS Titanic και MS Fantasy στο Σχήμα 4.1). Την περίοδο αυτή, μάλιστα, τροποποιήθηκε από τους Νηογνώμονες ο διαχωρισμός της υπερκατασκευής από το υπερστεγάσμα.

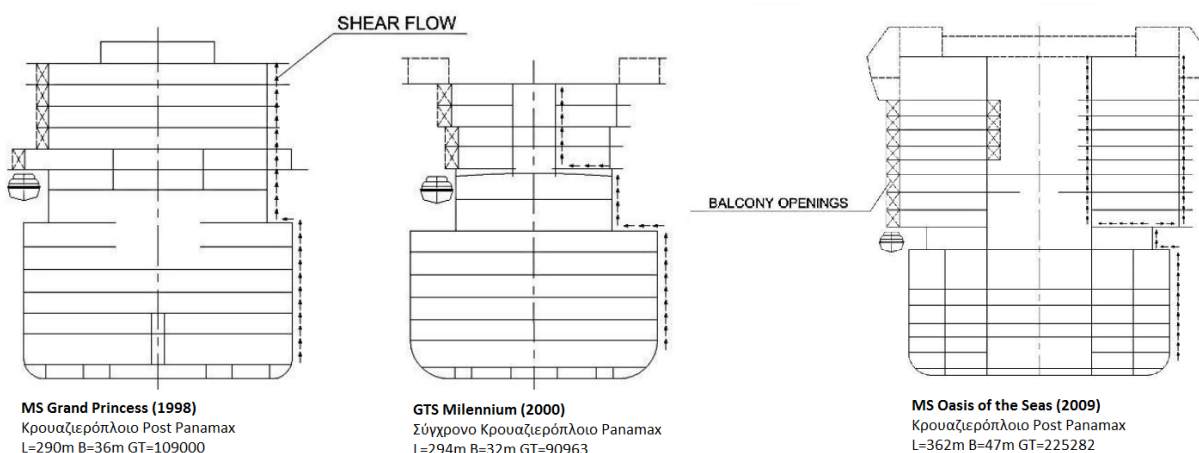
Συγκεκριμένα, ο Νορβηγικός-Γερμανικός νηογνώμονας DNV-GL, όρισε ως υπερκατασκευή κάθε κατασκευή πάνω από το κατάστρωμα εξάλλων, της οποίας οι πλευρές δεν τοποθετούνται (εγκάρσια τομή) από τις πλευρές της γάστρας προς την κεντρική γραμμή (Centerline) περισσότερο από το 4% του πλάτους του πλοίου. Σε περίπτωση που αυτό δεν τηρείται τότε η κατασκευή αυτή ονομάζεται υπερστεγάσμα.

Επιπλέον, καθώς το μέγεθος των κρουαζιερόπλοιων μεγαλώνει, οι σωστικές λέμβοι δεν μπορούν να τοποθετούνται στο ανώτερο κατάστρωμα της υπερκατασκευής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σύμφωνα με το IMO, δεν μπορούν να τοποθετούνται σωστικές λέμβοι σε ύψος μεγαλύτερο από 15 μέτρα από την ίσαλο γραμμή σχεδίασης. Προς επίλυση αυτού, δημιουργήθηκε μια εσοχή στην υπερκατασκευή για την υποδοχή των σωστικών λέμβων και τους σταθμούς συγκέντρωσης (βλέπε MS Aida στο Σχήμα 4.1).

Ταυτόχρονα, αυξήθηκε το σχετικό μέγεθος των ανοιγμάτων στα παράθυρα και τα μπαλκόνια, στις πλευρές της υπερκατασκευής, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο τη διατμητική ακαμψία στο πλευρικό κέλυφος. Γίνεται κατανοητό ότι αυτή η αλλαγή στη σχεδίαση των επιβατηγών πλοίων είχε σημαντική επιρροή στην αλληλεπίδραση γάστρας-υπερκατασκευής. “Η διατμητική παραμόρφωση στις πλευρές της υπερκατασκευής ανακουφίζει τις ορθές τάσεις στα καταστρώματα και προκαλεί διαφοροποίηση στην καμπυλότητα του υπερστεγάσματος και της κύριας γάστρας” [41].

Για τη μεγιστοποίηση του αριθμού των εξωτερικών καμπινών, τα υπερστεγάσματα γίνονται μεγαλύτερα (περισσότερα καταστρώματα) και δεν πλαταίνουν πάνω από το κατάστρωμα των σωστικών λέμβων (βλέπε MS Grand Princess στο Σχήμα 4.3). Ωστόσο, το ανώτατο κατάστρωμα του υπερστεγάσματος θα πρέπει να είναι πλατύ προκειμένου να παρέχει πολύτιμο χώρο στο ανοιχτό κατάστρωμα (sun deck).

Φυσικά, η όλο και αυξανόμενη ζήτηση για καμπίνες με μπαλκόνι σήμαινε ότι το πλευρικό κέλυφος της υπερκατασκευής δεν θα μπορούσε να παραλάβει τις διατμητικές φορτίσεις. Για το λόγο αυτό, προστέθηκαν εσωτερικές διαμήκεις φρακτές, οι οποίες είναι εγκάρσια μετατοπισμένες (offset) ως προς τις πλευρές της γάστρας, για την παραλαβή αυτών των φορτίσεων (βλέπε GTS Millennium στο Σχήμα 4.3). “Μάλιστα, σε κάποιες σχεδιάσεις το πλευρικό κέλυφος του υπερστεγάσματος δεν συμμετέχει στη διατμητική ροή της κατακόρυφης διατμητικής δύναμης” [39], με αποτέλεσμα όλο το φορτίο να το παραλαμβάνει η διαμήκης φρακτή.



Σχήμα 4.3: Εξέλιξη της μέσης τομής των επιβατηγών πλοίων και διατμητική ροή (Μέρος Β΄) [39]

Επιπλέον, οι κατασκευές του κρουαζιερόπλοιου έχουν εξελιχθεί περίτεχνα λόγω του έντονου ανταγωνισμού στην αγορά της κρουαζιέρας. Για το λόγο αυτό, όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιβάλλεται η συμμετοχή του αρχιτέκτονα στη σχεδίαση των πλοίων αυτών. Αυτό φυσικά έχει ως αποτέλεσμα, λόγω της πολύπλοκης κατασκευής του μοντέρνου κρουαζιερόπλοιου να παρατηρείται τρισδιάστατη κατανομή των τάσεων.

Γενικώς, το αυξημένο μέγεθος της υπερκατασκευής στις σύγχρονες σχεδιάσεις, σημαίνει ότι όλο και περισσότερο συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή. “Ωστόσο, το μεγαλύτερο μερίδιο της διατμητικής δύναμης εξακολουθεί να το παραλαμβάνουν τα πλευρικά τοιχώματα της γάστρας” [39]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι διατμητικές τάσεις μεγιστοποιούνται στον ουδέτερο άξονα, ο οποίος βρίσκεται συνήθως στην περιοχή της γάστρας.

Στο σημείο αυτό αξίζει να γίνει μια παρένθεση όσον αφορά το κέντρο βάρους. Στα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια, οι πολύ υψηλές υπερκατασκευές ανεβάζουν το κέντρο βάρους, κάτι το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπίζεται από τα πρώτα στάδια της μελέτης. Για παράδειγμα, εάν υποθέσουμε τη διατομή γάστρας-υπερκατασκευής (βλέπε Σχήμα 4.2), τότε η κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους (KG ή VCG) βρίσκεται στο ύψος (ορθογωνική διατομή):

$$KG_{section} = \frac{A_{hull} * y_{hull} + A_{sup} * y_{sup}}{A_{hull} + A_{sup}} = \frac{h_2 * B * \frac{h_2}{2} + h_1 * B * \left(\frac{h_1}{2} + h_2\right)}{h_2 * B + h_1 * B}$$
$$KG_{section} = \frac{B * \left(\frac{h_2^2}{2} + h_1 * h_2 + \frac{h_1^2}{2}\right)}{B * (h_2 + h_1)}$$
$$KG_{section} = \frac{\frac{h_2^2}{2} + h_1 * h_2 + \frac{h_1^2}{2}}{h_2 + h_1} \quad (4.1)$$

όπου:

- $KG_{section}$ = κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους από baseline (m)
- A_{hull} = επιφάνεια εγκάρσιας τομής της γάστρας (m^2)
- A_{sup} = επιφάνεια εγκάρσιας τομής της υπερκατασκευής (m^2)
- y_{hull} = απόσταση κέντρου επιφανείας εγκάρσιας τομής της γάστρας από baseline (m)
- y_{sup} = απόσταση κέντρου επιφανείας εγκάρσιας τομής της υπερκατασκευής από baseline (m)

Έτσι, αν υποθεθεί ότι $h_2 = 20m$ και $h_1 = 25m$, τότε το κέντρο βάρους βρίσκεται σε ύψος $KG_{section} = 22.5m$, πράγμα που σημαίνει ότι βρίσκεται στην περιοχή της υπερκατασκευής.

Συνεχίζοντας, το 2009 μια επαναστατική σχεδίαση ενός επιβατηγού πλοίου εμφανίστηκε, όπου η υπερκατασκευή έχει διαχωριστεί σε δύο μέρη, δημιουργώντας κατά αυτόν τον τρόπο έναν πλατύ διάδρομο (βλέπε Oasis of the Seas στο Σχήμα 4.3). Οι καμπίνες με μπαλκόνια τοποθετήθηκαν και στις δυο

πλευρές του πλοίου (θέα προς τη θάλασσα) αλλά και στο διάδρομο (περιορισμένη θέα). Φυσικά, προκειμένου να επιτευχθεί ο πλατύς διάδρομος, το πλάτος του πλοίου έπρεπε να αυξηθεί πολύ.

Δεν θα πρέπει να αμεληθεί ότι η σύγχρονη σχεδίαση έχει αναπτύξει αρκετά την εμπειρία της κρουαζιέρας για τους επιβάτες, έχει επίσης κάποια μειονεκτήματα (για τους πλοιοκτήτες), όπως το υψηλό κόστος κτήσης. Επιπλέον, υπάρχει επίσης ένας περιορισμός στους προορισμούς λόγω των περιορισμών ναυσιπλοΐας. Για το λόγο αυτό δεν είναι λίγοι οι πλοιοκτήτες όπου έχουν ενδιαφερθεί για μικρότερα πλοία με καμπίνες αποκλειστικά με μπαλκόνι.

4.2 Ολική απόκριση

Έχοντας αποκτήσει μια πρώτη εικόνα της επίδρασης του μεγέθους και της γεωμετρίας του κρουαζιερόπλοιου στην αντοχή του, στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει ο διαχωρισμός των τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή. Οι τάσεις, λοιπόν, κατατάσσονται σε πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες (βλέπε Σχήμα 4.4).

Ο όρος πρωτεύουσες τάσεις παραπέμπει στο ολικό επίπεδο, δηλαδή στην απόκριση του πλοίου ως σύνολο (δοκός). Αντίθετα, οι δευτερεύουσες και οι τριτεύουσες τάσεις αναφέρονται στο τοπικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, οι δευτερεύουσες τάσεις παραπέμπουν σε μια ευρεία περιοχή της μεταλλικής κατασκευής, όπως αυτή του πυθμένα. Από την πλευρά τους, οι τριτεύουσες τάσεις αναφέρονται στα ελάσματα και την κάμψη τους μεταξύ των σημείων στήριξής τους.

Σε ολικό επίπεδο η κυριότερη απόκριση του πλοίου είναι η διαμήκης κάμψη, χωρίς ωστόσο να αμελείται η στρέψη καθώς σε πλοία με μεγάλα ανοίγματα δημιουργεί αρκετά προβλήματα. Αντίστοιχα, σε τοπικό επίπεδο μπορεί κανείς να μελετήσει για παράδειγμα το λυγισμό των στύλων και τη διατμητική παραμόρφωση στα πλευρικά ανοίγματα αλλά και στην περιοχή της πλώρης. Τα παραπάνω αποτελούν σημαντικά ζητήματα για τον μελετητή ναυπηγό, τα οποία θα πρέπει να γνωρίζει σε ικανοποιητικό βαθμό.

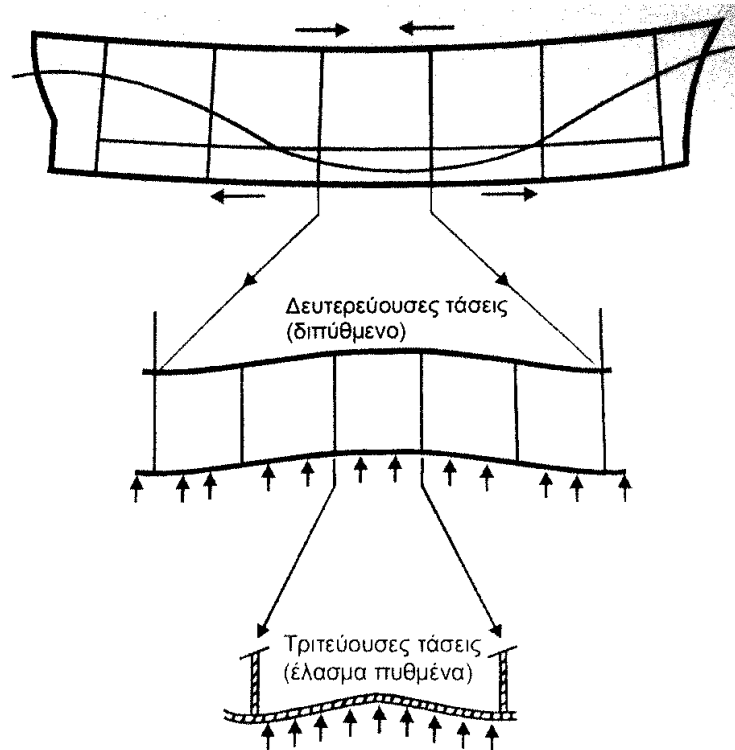
4.2.1 Διαμήκης Κάμψη

Αυτό το είδος απόκρισης μπορεί να είναι το πιο επώδυνο για ένα (μακρύ) πλοίο. Μάλιστα, καθώς το μέγεθος του πλοίου μεγαλώνει γίνεται όλο και εντονότερο το πρόβλημα. Κατά την πλεύση του πλοίου δημιουργούνται κατά το διάμηκες, διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές. Εξαιτίας αυτών των δυνάμεων και ροπών δημιουργείται σε κάθε διατομή του πλοίου ένα εντατικό πεδίο, το οποίο εξαρτάται από τη συνεργασία γάστρας-υπερστεγάσματος. Το πεδίο αυτό περιλαμβάνει τις ορθές και τις διατμητικές τάσεις. Οι πρώτες μεγιστοποιούνται μακριά από τον ουδέτερο άξονα, ενώ οι δεύτερες μεγιστοποιούνται στο σημείο εκείνο.

Θεωρώντας το πλοίο ως μια δοκό, η διαμήκης κάμψη (longitudinal bending) του, προκαλεί θλίψη (compression) και εφελκυσμό (tension) στα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής που βρίσκονται εκατέρωθεν του ουδέτερου άξονα (neutral axis) της διατομής. Για παράδειγμα, εάν πάνω από τον ουδέτερο άξονα η κατασκευή υπόκειται σε εφελκυσμό τότε κάτω από αυτόν υπόκειται σε θλίψη, και αντίστροφα.

Επιπλέον, σε κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία διατάσσονται παράλληλα με τον ουδέτερο άξονα, όπως τα καταστρώματα (decks) και ο πυθμένας (bottom structure), οι ορθές τάσεις λόγω κάμψης θα είναι είτε ορθές είτε εφελκυστικές. Αντίθετα, σε κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία διατάσσονται κάθετα στον ουδέτερο άξονα, όπως οι διαμήκεις φρακτές (longitudinal bulkhead) και οι πλευρές (side shell) του πλοίου, οι ορθές τάσεις λόγω κάμψης θα είναι και θλιπτικές και εφελκυστικές.

Παρατηρώντας την κατανομή των ροπών, διαπιστώνεται ότι οι μέγιστες καμπτικές ροπές εμφανίζονται περί το μέσον του πλοίου (κατά το διάμηκες). Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται κάτω από το μέσον της διατομής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η πιο επικίνδυνη περιοχή της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου είναι το ανώτερο κατάστρωμα της μέσης τομής. Άλλωστε για το λόγο αυτό στα φορτηγά πλοία το ανώτερο κατάστρωμα της μέσης τομής το οποίο είναι κύριο κατάστρωμα (main deck) καλείται και κατάστρωμα αντοχής (strength deck).

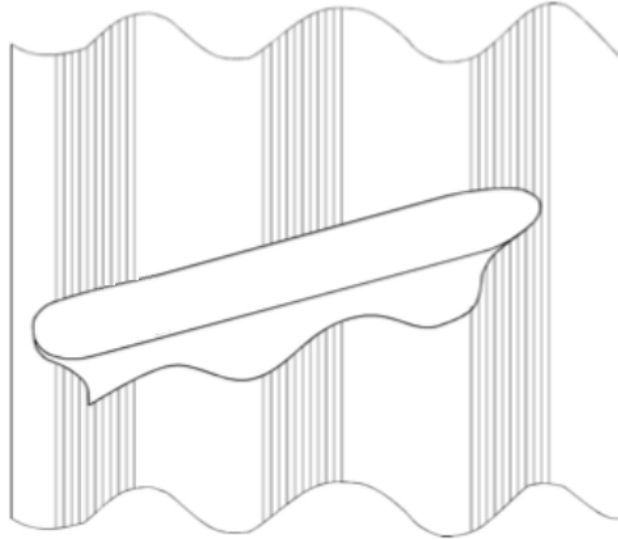


Σχήμα 4.4: Πρωτεύουσες, δευτερεύουσες και τριτεύουσες τάσεις [42]

Ωστόσο, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, η θεώρηση αυτή δεν είναι τόσο απλή καθώς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί και η επιρροή τους στην απόκριση του πλοίου θα αναλυθούν εκτενώς στην παρούσα ενότητα, προκειμένου ο αναγνώστης να αποκτήσει μια εικόνα των εντατικών πεδίων που δημιουργούνται σε αυτό τον ιδιαίτερο τύπο πλοίου.

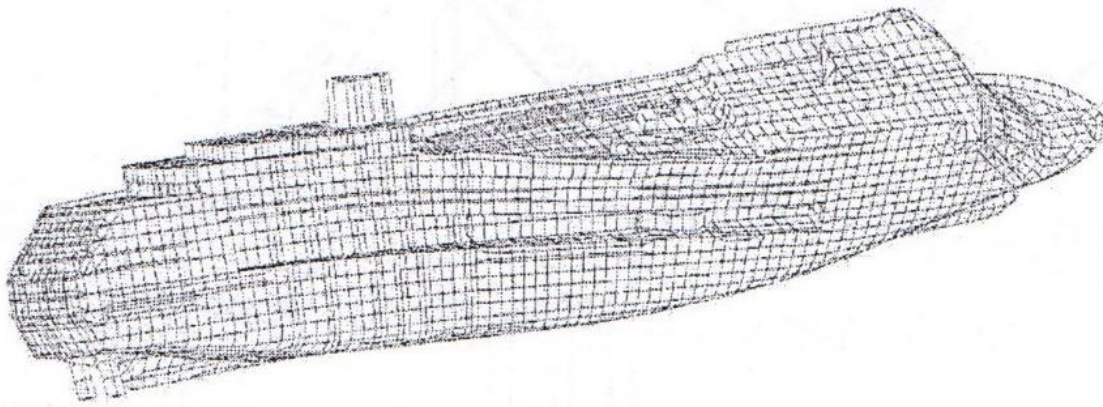
4.2.2 Στρέψη

Το πλοίο υποφέρει, πέρα από τη διαμήκη κάμψη, από στρεπτική καταπόνηση. Το φαινόμενο της στρέψης παρουσιάζεται όταν το πλοίο πλέει σε πλάγιους κυματισμούς (Σχήμα 4.5). Στην περίπτωση της στρέψης παρατηρείται η εμφάνιση υψηλών πιέσεων στην αριστερή πλευρά της πλώρης και την δεξιά πλευρά της πρύμνης, ενώ ταυτόχρονα χαμηλότερες πιέσεις παρατηρούνται στη δεξιά πλευρά της πλώρης και την αριστερή της πρύμνης. Φυσικά, ανάλογα με την κατεύθυνση και το είδος του κύματος το παραπάνω ισχύει και αντίστροφα. Οι πιέσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ορθές και διατμητικές τάσεις αλλά και παραμορφώσεις στη γάστρα.



Σχήμα 4.5: Στρέψη πλοίου λόγω πλάγιων κυματισμών

Ένα πλοίο που χαρακτηρίζεται από μεγάλα ανοίγματα κυτών (π.χ. πλοία μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων) ή πλευρικά ανοίγματα (π.χ. επιβατηγά πλοία), είναι ευαίσθητο στην στρέψη καθώς παρουσιάζει μειωμένη στρεπτική ακαμψία. Τέτοιου είδους προβλήματα αντιμετωπίζονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και παρουσιάζονται υπό έντονη μεγέθυνση προκειμένου να είναι ορατές και κατανοητές (βλέπε Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6: Μοντελοποιημένο πλοίο για την εξέτασή του ως προς τη στρέψη [37]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά για τη στρέψη των κρουαζιερόπλοιων, ωστόσο είναι κάτι το οποίο μπορεί να αποτελέσει μελλοντικό αντικείμενο μελέτης. Η στρέψη είναι μια απόκριση η οποία δύσκολα μπορεί να προσεγγισθεί με θεωρητικές και αναλυτικές μεθόδους. Ωστόσο, για τη μελέτη της χρησιμοποιείται η θεωρία πρισματικών λεπτότοιχων διατομών ή για πιο ακριβή αποτελέσματα η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

4.3 Τοπική απόκριση

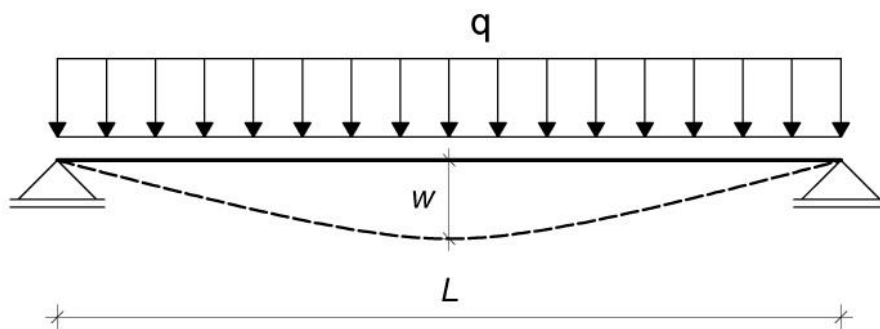
Πέραν από την ολική αντοχή πλοίου υπάρχει και η τοπική, η εξέταση της οποίας είναι απαραίτητη. Μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις η τοπική αντοχή μπορεί να αποβεί κρίσιμότερη της ολικής. Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, κάποιες από τις κρίσιμότερες τοπικές αστοχίες είναι αυτές λόγω του λυγισμού (ελάσματα, στύλοι) και της διατμητικής παραμόρφωσης (πλευρικά ανοίγματα). Για το λόγο αυτό απαιτείται προσεχτική εξέτασή της και τήρηση των κανονισμών των νηογυμνώνων.

4.3.1 Λυγισμός

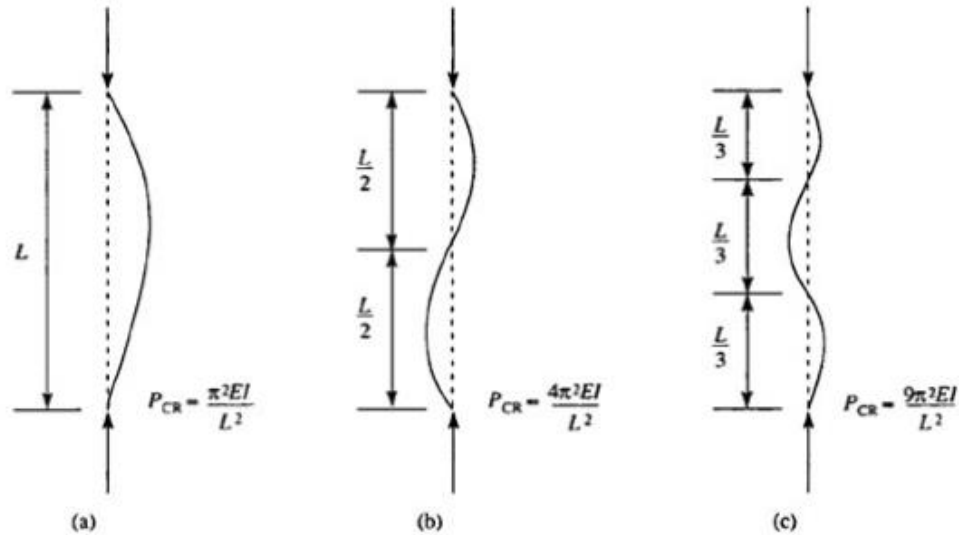
Ο λυγισμός είναι μια συμπεριφορά των κατασκευαστικών μελών, διαφορετική από αυτή της κάμψης. Στην περίπτωση της κάμψης, η φόρτιση ασκείται κάθετα στην επιφάνεια του φορέα (Σχήμα 4.7), ενώ στο λυγισμό η (θλιπτική) φόρτιση είναι κατά την αξονική διεύθυνση (Σχήμα 4.8). Για να συμβεί λυγισμός θα πρέπει το εφαρμοζόμενο φορτίο να υπερβαίνει το φορτίο λυγισμού. Στις πραγματικές κατασκευές το κέντρο εφαρμογής της φόρτισης δεν συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής αλλά και η κατασκευή να έχει αρχικές γεωμετρικές ατέλειες.

Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων με πολλά καταστρώματα, το μεγαλύτερο μέρος της κατασκευής θα πρέπει να ελέγχεται σε λυγισμό (buckling). Για το λόγο αυτό θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλη διαστασιολόγηση των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου (έναντι του λυγισμού) κατά το στάδιο της σχεδίασης (Σχήμα 4.9). Όπως, φαίνεται στο Σχήμα 4.9, η διάμετρος του στύλου αυξάνεται καθώς πλησιάζει προς τον πυθμένα. Αυτό είναι λογικό καθώς ο στύλος αυτός καλείται να παραλάβει το σταδιακά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο. Έτσι, προκειμένου να αντιστέκεται στο λυγισμό θα πρέπει να έχει επαρκές πάχος.

Πολύ μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί κατά τις επιθεωρήσεις και τις συντηρήσεις μιας και θα πρέπει να εξετάζονται οι επικίνδυνες περιοχές σε λυγισμό προκειμένου το πλοίο να είναι ασφαλές. Περιοχές που παραλαμβάνουν θλιπτικά φορτία είναι για παράδειγμα οι στύλοι, οι διαμήκεις φρακτές αλλά και τα καταστρώματα όταν το πλοίο υποβάλλεται σε διαμήκη κάμψη.



Σχήμα 4.7: Διαμήκης κάμψη δοκού



Σχήμα 4.8: Λυγισμός δοκού για τις διάφορες στηρίξεις της [43]

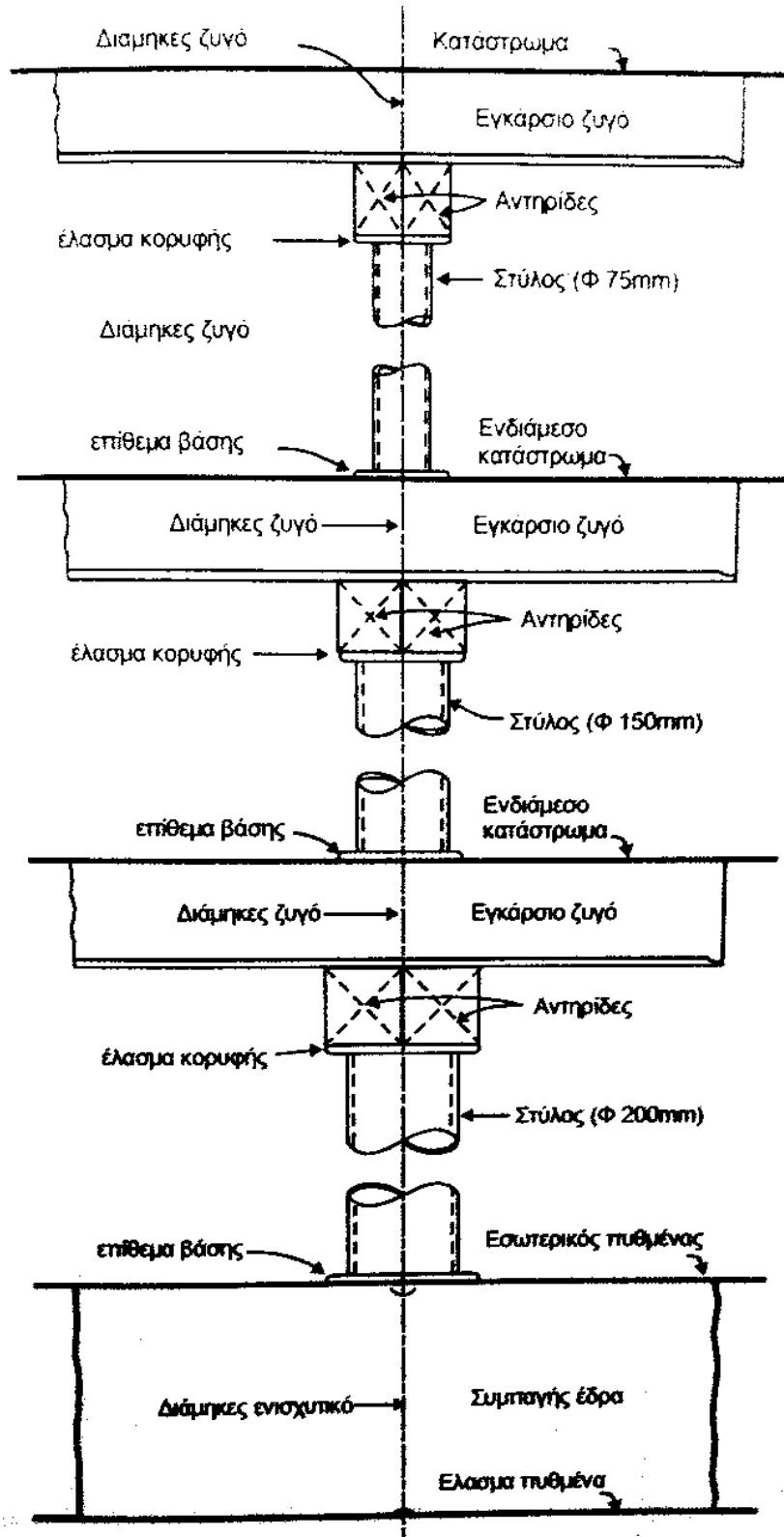
Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο λυγισμό στις περισσότερες των περιπτώσεων δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην μορφή της κατασκευής, μέχρις ότου το μέγεθος του φορτίου φθάσει κάποια κρίσιμη τιμή, το κρίσιμο φορτίο P_{cr} . Όταν, όμως συμβεί αυτό, οι μετατοπίσεις αυξάνουν ραγδαία. Η βασική μορφή αστοχίας προκύπτει από τη σχέση:

$$P_{cr} = C^2 \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (4.2)$$

όπου:

- P_{cr} , το κρίσιμο φορτίο λυγισμού
- E , το μέτρο ελαστικότητας
- I , η ροπή αδράνειας της εγκάρσιας διατομής
- L , το μήκος του φορέα
- C , σταθερά που εξαρτάται από τον τρόπο στήριξης

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πάνω σχέση δίνει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα καθώς το μήκος του φορέα μεγαλώνει, ενώ για μικρότερα μήκη υπερεκτιμά το κρίσιμο φορτίο λυγισμού, με το κατασκευαστικό στοιχείο να αστοχεί λόγω αστάθειας που προκύπτει λόγω πλαστικής διαρροής. Ανάλογα με την τιμή του συντελεστή C προκύπτουν διαφορετικές αποκρίσεις. Για παράδειγμα, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8 η απόκριση της δοκού για $C=1$, $C=2$ και $C=3$.



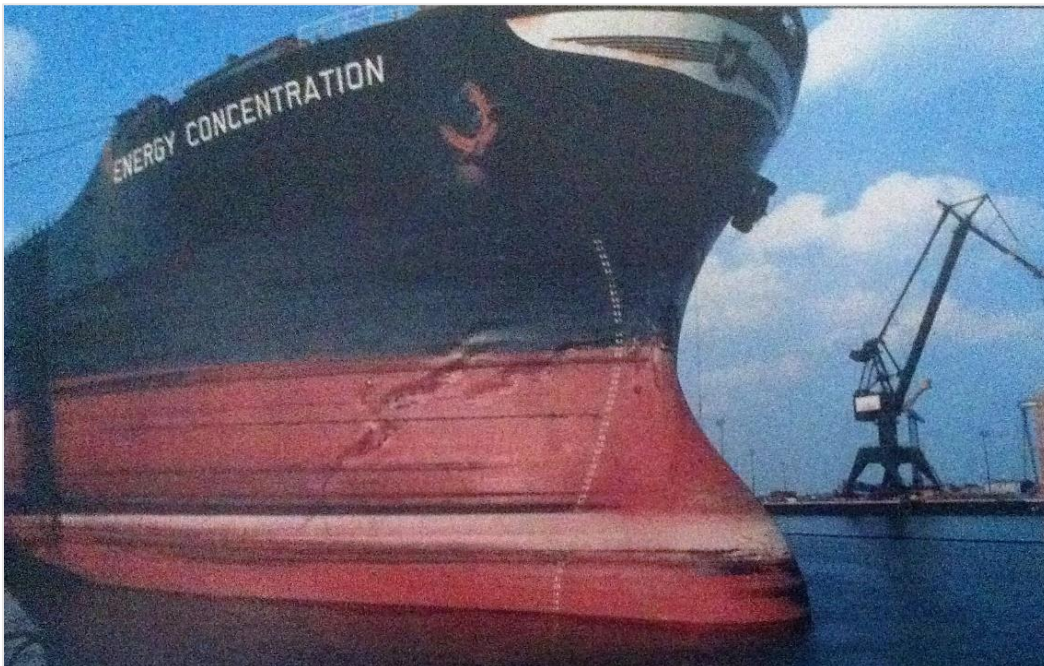
Σχήμα 4.9: Σωστή διάταξη και διαστασιολόγηση στύλων [28]

4.3.2 Διατμητική παραμόρφωση

Σε περιοχές κοντά στα $L/4$ και $3L/4$ του πλοίου (από την πρυμναία κάθετο) αναπτύσσονται οι μέγιστες διατμητικές δυνάμεις. Οι διατμητικές τάσεις που προκύπτουν είναι μέγιστες στον ουδέτερο άξονα, ενώ όσο το υπό εξέταση σημείο απομακρύνεται από αυτόν, μειώνονται.

Οι κρίσιμότερες περιοχές που υποφέρουν λόγω της διατμητικής παραμόρφωσης είναι κυρίως οι περιοχές γύρω από ανοίγματα στις πλευρές του πλοίου, όπως για παράδειγμα τα παράθυρα και οι διάφορες θύρες, αλλά και οι διαμήκεις φρακτές (με ή χωρίς ανοίγματα). Στις περιοχές αυτές θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή και να διαστασιολογηθούν κατάλληλα, καθώς πέραν της αστοχίας λόγω διάτμησης, μπορεί να προκύψει και διατμητικός λυγισμός.

Έτσι, εκτός της μονοαξονικής θλιπτικής φόρτισης που προκαλεί λυγισμό, λυγισμός μπορεί να προκύψει και υπό διατμητικές φορτίσεις. Συγκεκριμένα, η διάτμηση προκαλεί σε κάποιες περιοχές του ελάσματος θλίψη και σε άλλες εφελκυσμό. Η αστοχία εξαιτίας της φόρτισης αυτής επέρχεται μέσα από την ακόλουθη διαδικασία. Στο πρώτο στάδιο, αναπτύσσονται τάσεις (θλιπτικές και εφελκυστικές) στο έλασμα. Έπειτα, αν το φορτίο αυξηθεί, επέρχεται λυγισμός, ο οποίος αν συμβεί στην ελαστο-πλαστική περιοχή προκύπτει κατάρρευση (δηλαδή το έλασμα αστοχεί και δεν μπορεί να παραλάβει το φορτίο). Εάν όμως συμβεί στην ελαστική περιοχή, τότε υπάρχει ακόμη απόθεμα αντοχής. Έτσι, στη μεταλυγισμική περιοχή αναπτύσσεται μια διαγώνια λωρίδα εφελκυστικών τάσεων. Λόγω αυτών των τάσεων υπάρχει απόθεμα αντοχής. Ωστόσο, οι τάσεις αυτές προκαλούν κάμψη των ενισχυτικών του ελάσματος. Κατά συνέπεια, το πόσο θα αντέξει το έλασμα υπό το διατμητικό φορτίο, εξαρτάται πλέον από την αντοχή σε κάμψη των ενισχυτικών του. Φυσικά, αξίζει να σημειωθεί ότι όσο το φορτίο αυξάνεται τόσο περισσότερο το έλασμα παραμορφώνεται, εμφανίζοντας διαγώνιες κοιλότητες (Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.10: Διατμητικός λυγισμός στην περιοχή της πλώρης [42]

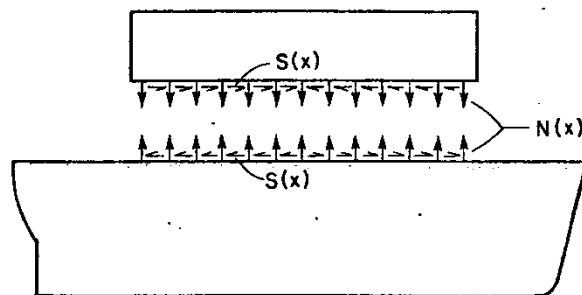
4.4 Συνεργασία γάστρας-υπερστεγάσματος

Τα σύγχρονα κρουαζιερόπλοια χαρακτηρίζονται από μεγάλης έκτασης υπερκατασκευή και η απόκρισή τους εξαρτάται από τη συνεργασία γάστρας-υπερκατασκευής. Η συνεργασία αυτή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και φυσικά, ο εκάστοτε ναυπηγός θα πρέπει να τους έχει πολύ καλά υπόψη του, καθώς οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τη μορφή του αναπτυσσόμενου εντατικού πεδίου. Οι εν λόγω παράγοντες είναι οι ακόλουθοι:

1. Ακαμψία κύριου καταστρώματος (βλέπε Παράρτημα ΣΤ)
2. Επιδράσεις διάτμησης
3. Γεωμετρία υπερστεγάσματος (βλέπε Παράρτημα ΣΤ)
4. Πλευρικά ανοίγματα
5. Ολίσθηση διεπιφάνειας
6. Θέση υπερστεγάσματος
7. Αρμοί διαστολής
8. Πτυχωτές πλευρές
9. Κατακόρυφες φορτίσεις στα άκρα της υπερκατασκευής
10. Υλικό
11. Εγκάρσια κατασκευή

4.4.1 Ακαμψία κύριου καταστρώματος

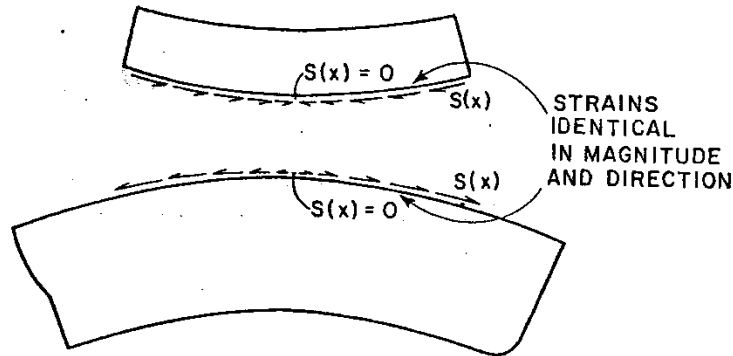
Το κύριο κατάστρωμα είναι το ανώτατο κατάστρωμα της γάστρας, πάνω στο οποίο ενώνεται το υπερστέγασμα. Στη σύνδεση γάστρας-υπερστεγάσματος δρουν δυο τύποι δυνάμεων, οι ορθές δυνάμεις $N(x)$ και οι διατμητικές δυνάμεις $S(x)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11: Αλληλεπίδραση γάστρας-υπερστεγάσματος [40]

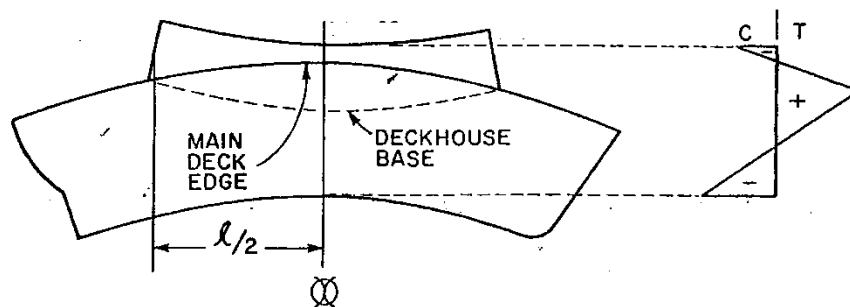
Προκειμένου να αποκτηθεί μια αντίληψη της συμπεριφοράς γάστρας-υπερστεγάσματος, θα εξεταστούν δυο σενάρια. Αρχικά, εξετάζεται το σενάριο κατά το οποίο δεν εφαρμόζονται ορθές δυνάμεις, αλλά μονάχα οι διατμητικές. Όπως γίνεται κατανοητό, το ενδεχόμενο αυτό είναι απίθανο, καθώς κατ'ελάχιστον το βάρος του υπερστεγάσματος είναι ικανό από μόνο του να δημιουργήσει ορθές δυνάμεις μεταξύ γάστρας και υπερστεγάσματος. Παρόλα αυτά, υποτίθεται ότι το υπερστέγασμα, στην περίπτωση αυτή, είναι άπειρα ελαφρύ (ακραία συνθήκη). Όπως διαπιστώνεται στο Σχήμα 4.12, εάν η γάστρα είναι

σε κατάσταση Hogging, τότε το υπερστεγάσμα είναι σε κατάσταση Sagging, δηλαδή κάμπτεται προς της αντίθετη κατεύθυνση, λόγω των αναπτυσσόμενων διατμητικών δυνάμεων $S(x)$. Στο μέσον του υπερστεγάσματος οι διατμητικές δυνάμεις είναι μηδενικές, ενώ προς τα άκρα, οι δυνάμεις αυτές μεγαλώνουν, αλλά με αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 4.12: Παρουσία αποκλειστικά διατμητικών δυνάμεων στη σύνδεση [40]

Το παράδειγμα αυτό, δείχνει ότι η γάστρα και υπερστεγάσμα έχουν αντίθετες καμπυλότητες σε κάμψη. Αυτό αποδίδει μια κατανομή παραμορφώσεων, η οποία μπορεί να είναι γραμμική σε όλο το ύψος της διατομής γάστρας-υπερστεγάσματος, χωρίς όμως να είναι συγγραμμική σε όλη τη διατομή (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13: Αλληλεπίδραση γάστρας και απείρως ελαφριού υπερστεγάσματος [40]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13, η κατανομή των παραμορφώσεων παρουσιάζει μια ασυνέχεια (από εφελκυστικές παραμορφώσεις σε θλιπτικές) στο ύψος του κυρίου καταστρώματος. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί η απλή θεωρία δοκού διότι καταπατάται η πρώτη της προϋπόθεση, όπως θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

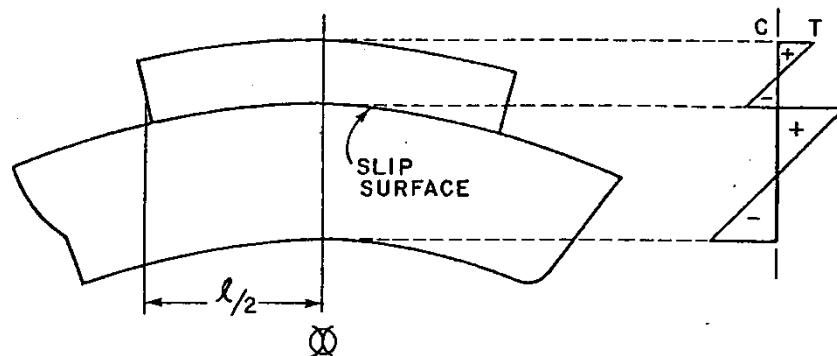
Στο δεύτερο σενάριο υποτίθεται ότι είναι μηδενικές οι διατμητικές δυνάμεις και κατά συνέπεια παρουσιάζονται μόνον ορθές. Σημειώνεται ότι εξυπηρετεί οι ορθές δυνάμεις $N(x)$ να εκφραστούν συναρτήσει της κατακόρυφης ακαμψίας $k(x)$. Πιο συγκεκριμένα, εάν $k(x)$ είναι η δύναμη ανά μονάδα μήκους στην θέση x , είναι απαραίτητο να παράγει μια μοναδιαία κατακόρυφη σχετική εκτροπή $\Delta\gamma(x)$, μεταξύ της πλευράς του κύριου καταστρώματος και της βάσης του υπερστεγάσματος, ώστε να ισχύει ότι:

$$N(x) = k(x) * \Delta y(x) \quad (4.3)$$

Όπου:

- $\Delta y(x)$, είναι η σχετική κατακόρυφη μετατόπιση μεταξύ της πλευράς του υπερστεγάσματος και της ακμής του καταστρώματος στη θέση x .

Η εκτροπή του υπερστεγάσματος μετράται στις βάσεις των πλευρών του, ενώ η εκτροπή της γάστρας μετράται στις ακμές του καταστρώματος. Εάν οι ορθές δυνάμεις είναι μηδενικές, τότε θα πρέπει και η ακαμψία να είναι μηδενική, ή με άλλα λόγια το κατάστρωμα να είναι τόσο μαλακό (μεγάλη ευκαμψία) ώστε να μην μεταφέρεται καμία φόρτιση διά μέσου αυτού και η σχετική μετατόπιση μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή. Από την άλλη, αν το κατάστρωμα είναι πολύ άκαμπτο (μεγάλο μέτρο ελαστικότητας), η κατακόρυφη ακαμψία $k(x)$ θεωρείται άπειρη. Έτσι, το κατάστρωμα λειτουργεί ως πέλμα της γάστρας-δοκού και θα έχει την ίδια καμπυλότητα με τη γάστρα. Εάν την ίδια στιγμή, στη σύνδεση της διεπιφάνειας τοποθετηθεί ολισθαίνουσα σύνδεση (sliding joint), τέτοια ώστε να μην μεταφέρεται καμία διατμητική δύναμη, οι κατανομές της παραμόρφωσης περί το μέσον του πλοίου θα είναι αντίστοιχες ζεύγους απλών δοκών. Στην περίπτωση αυτή εφαρμόζεται η θεωρία απλής δοκού ανεξάρτητα στη γάστρα και στο υπερστέγασμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14.

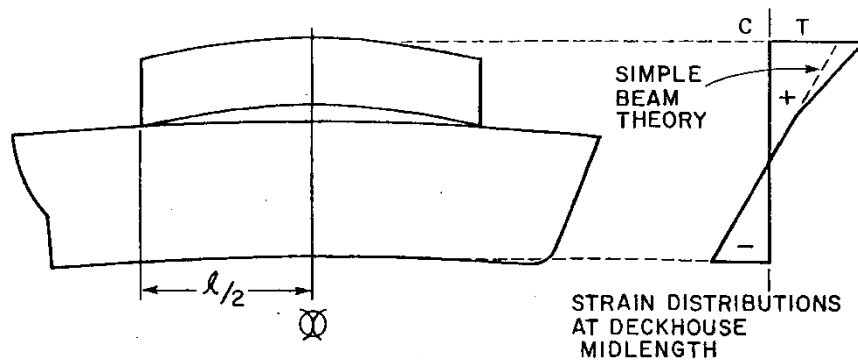


Σχήμα 4.14: Επιφάνεια ολίσθησης με απείρως άκαμπτο κατάστρωμα [40]

Φυσικά, τα παραπάνω δυο ενδεχόμενα αποτελούν ακραίες καταστάσεις. Σε μια πραγματική κατάσταση παρατηρούνται ορθές δυνάμεις αλλά και διατμητικές, οι οποίες μεταφέρονται διαμέσου της σύνδεσης γάστρας-υπερστεγάσματος. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15, στην περιοχή της μέσης τομής οι παραμορφώσεις ακολουθούν συγγραμμική κατανομή, όπως μια απλή δοκός και κατά αυτόν τον τρόπο εφαρμόζεται η απλή θεωρία δοκού στη διατομή γάστρας-υπερστεγάσματος (τηρείται και η πρώτη προϋπόθεση).

5. Η παράταξη των εγκάρσιων φρακτών κάτω από το υπερστεγάσμα
6. Η παράταξη και η έκταση των διαμήκων φρακτών κάτω από το υπερστεγάσμα
7. Τα ανοίγματα, όπως οι θύρες στις φρακτές που στηρίζουν το κύριο κατάστρωμα
8. Οι διατάξεις των στύλων που στηρίζουν το κύριο κατάστρωμα
9. Η ακαμψία των συνδέσεων γάστρας-υπερστεγάσματος
10. Η ακαμψία των συνδέσεων των ενισχυτικών μελών του καταστρώματος

Ο αριθμός και η παράταξη των φρακτών επηρεάζει την κατασκευαστική συμπεριφορά της γάστρας-υπερστεγάσματος. Συγκεκριμένα η τάση στην κορυφή του υπερστεγάσματος μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τιμή που προβλέπει η απλή θεωρία δοκού, σε περιπτώσεις όπου το υπερστεγάσμα εκτρέπεται περεταίρω σε σχέση με τη γάστρα (βλέπε Σχήμα 4.17). Στις περιπτώσεις αυτές η απόκλιση μπορεί να αγγίζει και το 65% της προβλεπόμενης τιμής (αν και αυτό το ποσοστό δεν έχει επιβεβαιωθεί από κάποιο πειραματικό αποτέλεσμα).



Σχήμα 4.17: Περαιτέρω αύξηση καμπυλότητας του υπερστεγάσματος [40]

Αυτή η διαφορά εκτροπής οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις λεπτομέρειες τις σύνδεσης. Πιο συγκεκριμένα, αν υπάρχουν αρκετές φρακτές η ακαμψία του καταστρώματος έχει μικρή επίδραση στα αποτελέσματα, λόγω της μεγαλύτερης σημασίας των άκαμπτων συνδέσεων (φρακτές). Μάλιστα, σε τέτοιες περιπτώσεις χάριν ευκολίας στους διάφορους υπολογισμούς η ακαμψία του καταστρώματος μπορεί να θεωρηθεί μηδενική.

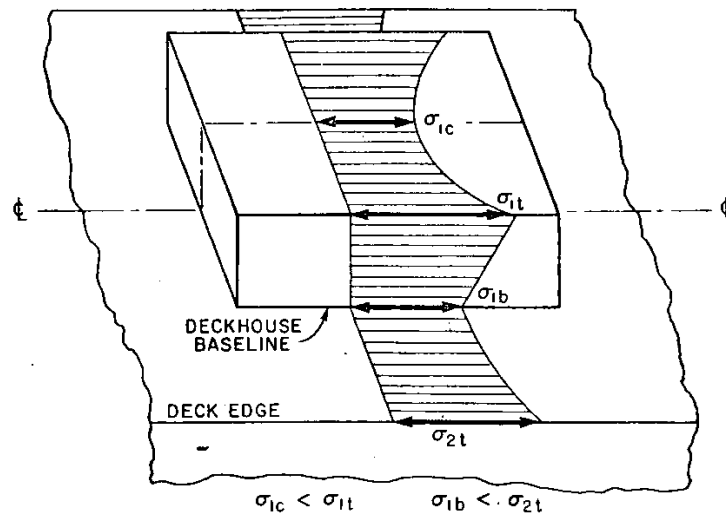
Αντίστοιχη ακαμψία προσφέρουν και οι διαμήκεις φρακτές. Σε διάφορα παλαιότερα παραδείγματα κρουαζιερόπλοιων, η επιθυμητή ακαμψία επιτυγχανόταν με την ενσωμάτωση δυο διαμήκων φρακτών κάτω από το κύριο κατάστρωμα στο ίδιο επίπεδο με αυτό των πλευρών του υπερστεγάσματος. Μάλιστα, θα μπορούσε να πει κανείς ότι αυτές οι διαμήκεις φρακτές αποτελούσαν την προέκταση των πλευρών του υπερστεγάσματος. Η προέκταση αυτή εκτεινόταν σε ένα επίπεδο πιο κάτω από τη βάση του υπερστεγάσματος.

4.4.2 Επιδράσεις διάτμησης

Το πλοίο είναι μια πολύπλοκη τρισδιάστατη κατασκευή. Αυτό σημαίνει ότι στο πλοίο αναπτύσσονται τρισδιάστατα εντατικά πεδία, πόσο μάλλον όταν η γεωμετρία του πλοίου είναι ακόμη πολυπλοκότερη, όπως στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων. Έτσι, οι ορθές και διατμητικές δυνάμεις, αλλά και η

ακαμψία του καταστρώματος, είναι στην πραγματικότητα συναρτήσεις και του μήκους και του πλάτους, δηλαδή είναι $N(x,y)$, $S(x,y)$ και $k(x,y)$ (και όχι $N(x)$, $S(x)$ και $k(x)$).

Οι διατμητικές παραμορφώσεις σε ορθογωνικές κατασκευές συνήθως παίρνουν τη μορφή της υστέρησης διάτμησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.18. Οι ορθές τάσεις κατά την έκταση του καταστρώματος μειώνεται κοντά στις πλευρές του υπερστεγάσματος. Αυτό είναι κάτι το οποίο η θεωρία απλής δοκού δεν το λαμβάνει υπόψη της, μιας και οι κατανομές που προκύπτουν από αυτή είναι γραμμικές. Πιο συγκεκριμένα, αγνοεί το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης. Το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης αναμένεται να είναι εντονότερο στα άκρα του υπερστεγάσματος, όπου οι διατμητικές παραμορφώσεις είναι υψηλότερες, από ότι στο μέσο του υπερστεγάσματος (δεν τηρείται η υπόθεση της επίπεδης τομής).



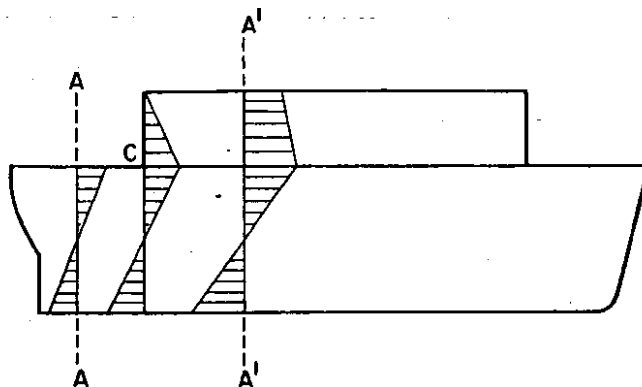
Σχήμα 4.18: Υστέρηση διάτμησης [40]

Όπως γίνεται αντιληπτό, για το λόγο αυτό η εξέταση της αντοχής των πλοίων με πολύπλοκη κατασκευή θα πρέπει να πραγματοποιείται με τη χρήση τρισδιάστατων μοντέλων. Ωστόσο, αυτό είναι κάτι το χρονοβόρο, πόσο μάλλον κατά το στάδιο της προμελέτης που ο μελετητής ναυπηγός θέλει να έχει μια πρώτη γενική εικόνα για τη συμπεριφορά του πλοίου. Ως λύση σε αυτό το πρόβλημα, εκτός της θεωρίας απλής κάμψης, είναι η κατασκευή απλούστερων τετραγωνοποιημένων μοντέλων (π.χ. όσο εκτείνεται η υπερκατασκευή και όχι σε όλο το μήκος του πλοίου) αλλά και η χρήση αναλυτικότερων μεθόδων, όπως η θεωρία δυο δοκών.

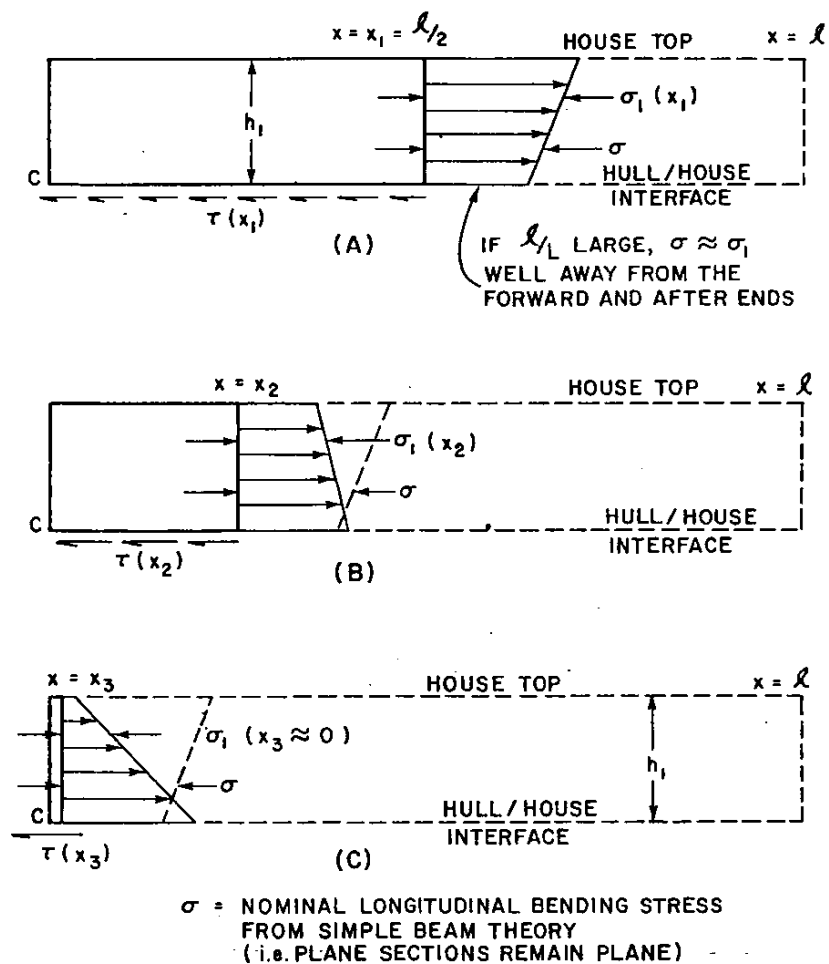
Τέλος, σημειώνεται ότι τα φαινόμενα της υστέρησης διάτμησης είναι εντονότερα σε κοντά υπερστεγάσματα ή σε μακριά τα οποία υποδιαιρούνται από αρμούς διαστολής.

4.4.3 Γεωμετρία υπερστεγάσματος

Η γεωμετρία του υπερστεγάσματος ορίζεται από το μήκος, το πλάτος και το ύψος του. Κατά το διάμηκες οι φορτίσεις δεν είναι σταθερές, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.19, λόγω της διατμητικής φόρτισης (βλέπε Σχήμα 4.20).



Σχήμα 4.19: Επίδραση της διάτμησης στις άμεσες τάσεις [40]



Σχήμα 4.20: Επεξήγηση της επίδρασης της διάτμησης στις άμεσες τάσεις [40]

Το Σχήμα 4.20 αναπαριστά το φαινόμενο κατά το οποίο στα άκρα ενός υπερστεγνάματος, οι διατμητικές δυνάμεις είναι υψηλές σε σχέση με την επιφάνεια που ασκούνται με αποτέλεσμα τη μείωση των ορθών

τάσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πηγαίνοντας προς τα άκρα, η επιφάνεια διάτμησης γίνεται όλο και μικρότερη και προκειμένου να επιτυγχάνεται ισορροπία σε οριζόντιο επίπεδο απαιτείται να γίνουν οι διατμητικές δυνάμεις μεγαλύτερες. Έτσι, οι διατμητικές δυνάμεις αυξάνονται και φτάνουν στο μέγιστο στα άκρα, εκτός αν λαμβάνονται μέτρα μείωσής τους, όπως η αύξηση της διατμητικής επιφάνειας στην περιοχή των άκρων του υπερστεγάσματος (π.χ. να μην τοποθετούνται ανοίγματα στην περιοχή αυτή).

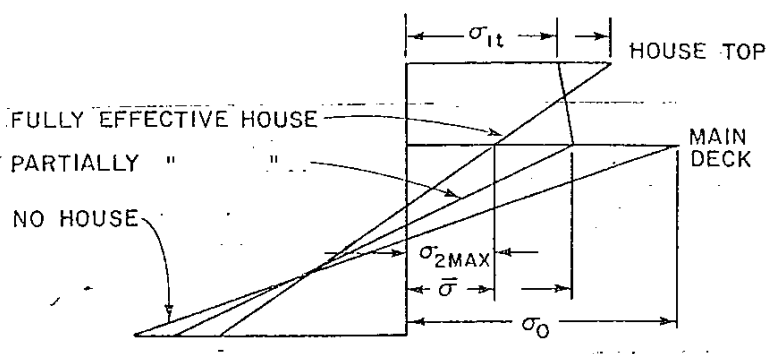
Κατά συνέπεια, οι τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα του υπερστεγάσματος είναι μικρότερες από αυτές που προβλέπονται από την θεωρία απλής δοκού. Ωστόσο, σε μακριά υπερστεγάσματα η θεωρία απλής δοκού δεν επηρεάζεται σε ικανοποιητική απόσταση από τα άκρα του υπερστεγάσματος.

Σε υπερστέγασμα με πλάτος ίσο με το πλάτος του πλοίου (υπερκατασκευή), η γάστρα και το υπερστέγασμα δρουν μαζί και ακολουθούν μακριά από τα άκρα του υπερστεγάσματος γραμμική κατανομή παραμορφώσεων σε όλο το ύψος της διατομής (βλέπε Σχήμα 4.15). Αυτό επίσης έγκειται στο γεγονός ότι όσο το πλάτος του υπερστεγάσματος αυξάνεται τόσο λιγότερη σημασία παίζει η ακαμψία του καταστρώματος στην τελική κατανομή των τάσεων.

Τέλος, όσον αφορά το ύψος, αυτό αποτελεί ένα παράγοντα όπου λίγο-πολύ είναι τυποποιημένος. Αυτό έγκειται στο γεγονός ότι πρώτον το ύψος μεταξύ των καταστρωμάτων είναι περίπου 2m με 3m έτσι, ώστε ένας φυσιολογικός άνθρωπος να μπορεί να κατοικήσει στο πλοίο, ενώ σπάνια υπερβαίνει τα 3m. Δεύτερον, οφείλεται στο ότι ο αριθμός των καταστρωμάτων που θα τοποθετηθούν εξαρτάται από την ολική χωρητικότητα που πρέπει να επιτευχθεί. Για τους λόγους αυτούς το ύψος δεν αποτελεί έναν σχεδιαστικό παράγοντα που τροποποιείται σε σημαντικό βαθμό από τον κατασκευαστικό σχεδιαστή. Ωστόσο, όσον αφορά την επίδρασή του στην αντοχή, θα πρέπει να καταγραφεί ότι όσο ο λόγος του μήκους προς το ύψος μιας δοκού μειώνεται, τόσο οι κατακόρυφες διατμητικές παραμορφώσεις και οι διατμητικές τάσεις γίνονται πιο σημαντικές.

Ως συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι εφόσον ο μελετητής ναυπηγός επιθυμεί το υπερστέγασμα να συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή τότε θα πρέπει να το σχεδιάσει όσο το δυνατόν πιο μακρύ και πιο πλατύ. Για το λόγο αυτό, από πολλούς ερευνητές τέθηκε το ερώτημα κατά πόσο αποτελεσματικό (στη διαμήκη αντοχή) ή όχι επιδιώκεται να είναι ένα υπερστέγασμα (Vasta, Muckle, Caldwell, Terazava, Mitchel). Στο Σχήμα 4.21, παρουσιάζεται μια ποιοτική κατανομή των τάσεων σε τρεις περιπτώσεις:

- Γάστρα χωρίς υπερστέγασμα
- Γάστρα με υπερστέγασμα, το οποίο εν μέρει συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή
- Γάστρα με υπερστέγασμα, το οποίο συμμετέχει πλήρως στη διαμήκη αντοχή

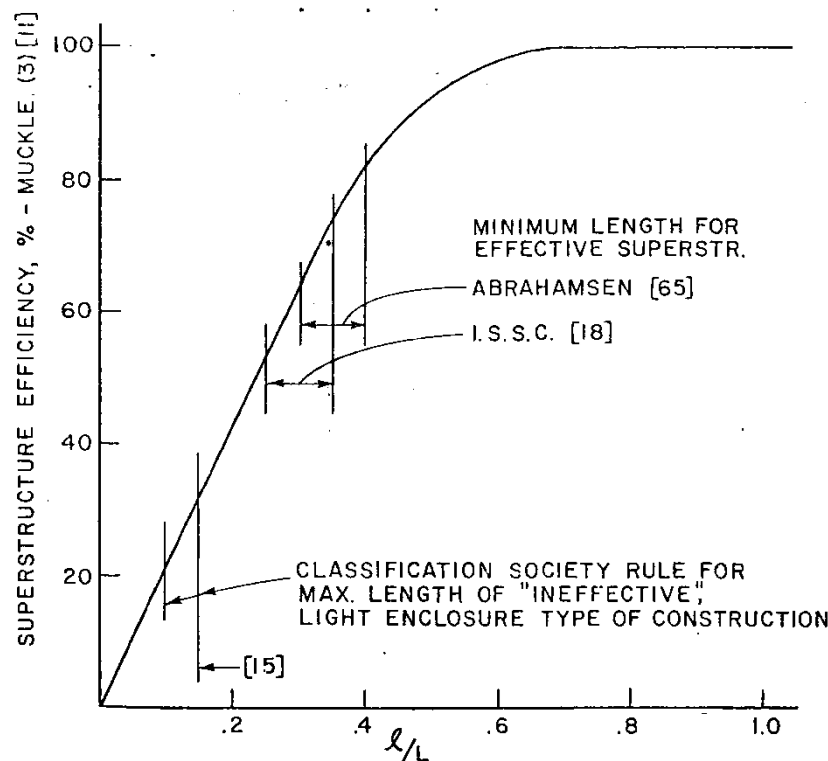


Σχήμα 4.21: Σύγκριση κατανομής τάσεων με και χωρίς υπερστέγασμα [40]

Από το τελευταίο σχήμα, γίνεται κατανοητό ότι όταν ένα υπερστεγάσμα συμβάλλει στη διαμήκη αντοχή, τόσο περισσότερο ανακουφίζει τη γάστρα από τις φορτίσεις. Για παράδειγμα, ο πυθμένας της γάστρας παραλαμβάνει μικρότερο φορτίο όταν η υπερκατασκευή συμμετέχει πλήρως στην αντοχή, σε σχέση με την περίπτωση όπου αυτή δεν συμβάλλει καθόλου.

Υπάρχουν πολλές σχέσεις και τρόποι υπολογισμού της αποτελεσματικότητας του υπερστεγάσματος (βλέπε επόμενο κεφάλαιο). Για παράδειγμα, η αποτελεσματικότητα του υπερστεγάσματος μπορεί να εκφραστεί και ως συνάρτηση του ελάχιστου-απαραίτητου μήκους. Με άλλα λόγια, τι μήκος υπερστεγάσματος χρειάζεται η κατασκευή για δεδομένο μήκος πλοίου, ώστε να συμμετέχει (και κατά πόσο;) στη διαμήκη αντοχή (βλέπε Σχήμα 4.22).

Ένα εύλογο ερώτημα που προκύπτει είναι το κατά πόσο κοντή πρέπει να είναι μια υπερκατασκευή προκειμένου να μην συμμετέχει καθόλου στην διαμήκη αντοχή. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό, δίνεται από Σχήμα 4.22, όπου οι Νηογνώμονες έχουν ορίσει ότι υπερκατασκευή με μήκος μικρότερο του 15% του μήκους του πλοίου δεν συμβάλλει στη διαμήκη αντοχή.



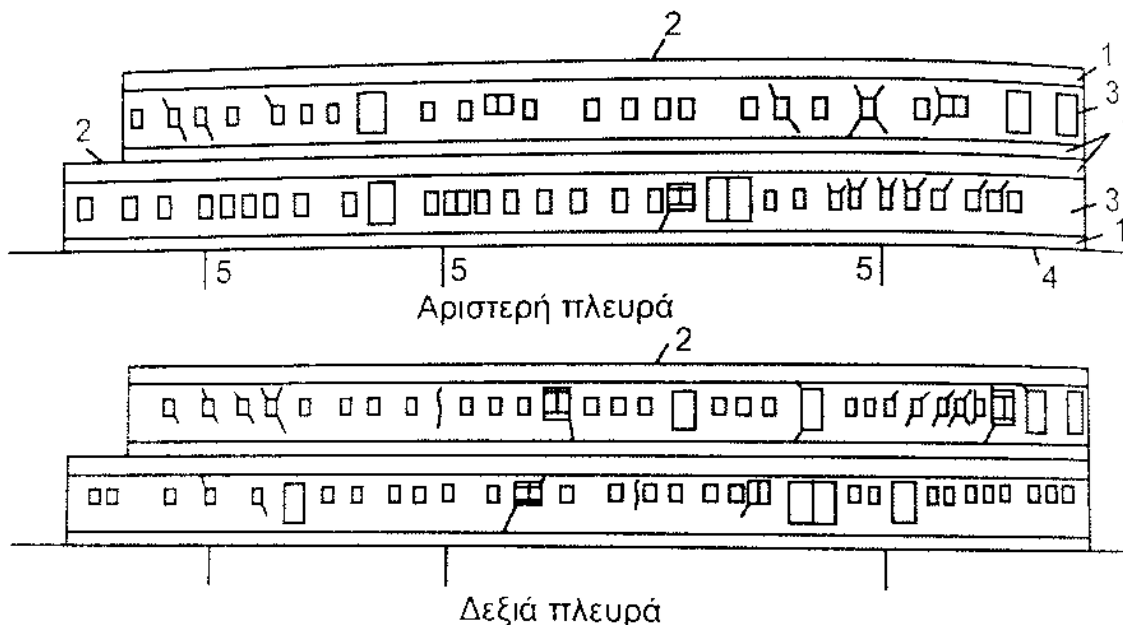
Σχήμα 4.22: Επίδραση του μήκους στην αποτελεσματικότητα της υπερκατασκευής [40]

Ακόμη, μελέτες έδειξαν ότι η αποδοτικότητα του υπερστεγάσματος μειώνεται καθώς ο λόγος πλάτους προς ύψος αυξάνεται. “Επιπλέον, αν το μήκος της υπερκατασκευής υπερβαίνει τις πέντε φορές την εγκάρσια περίμετρό της, τότε στο μέσον της θα είναι τουλάχιστον 90% αποτελεσματική” [40].

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για ένα υπερστεγάσμα το ελάχιστο μήκος του ώστε να συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή θα πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0.25L και 0.35L, όπου L είναι το μήκος του πλοίου, ενώ για μια υπερκατασκευή τουλάχιστον 0.15L. Με αυτή την παρατήρηση μπορεί κανείς να διαπιστώσει την επίδραση του πλάτους του υπερστεγάσματος στη διαμήκη αντοχή του πλοίου.

4.4.4 Πλευρικά ανοίγματα

Εάν το υπερστεγάσμα έχει ανοίγματα, η κατανομή των τάσεων προφανώς επηρεάζεται. Σε περιοχές με σημαντικές διατμητικές δυνάμεις (π.χ. άκρα της υπερκατασκευής), η μεταφορά τους από τις πλευρές στην κορυφή του υπερστεγάσματος δεν θα γίνεται τόσο αποδοτικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της συνεισφοράς του υπερστεγάσματος στην αντοχή. Μάλιστα, αν τα ανοίγματα έχουν έντονες γωνίες, οι συγκεντρώσεις των τάσεων θα είναι αυξημένες και αυτός είναι ένας λόγος εμφάνισης ρωγμών και κατ' επέκταση αστοχίας (Σχήμα 4.23).



Σχήμα 4.23: Ρωγμές σε ανοίγματα υπερστεγάσματος [28]

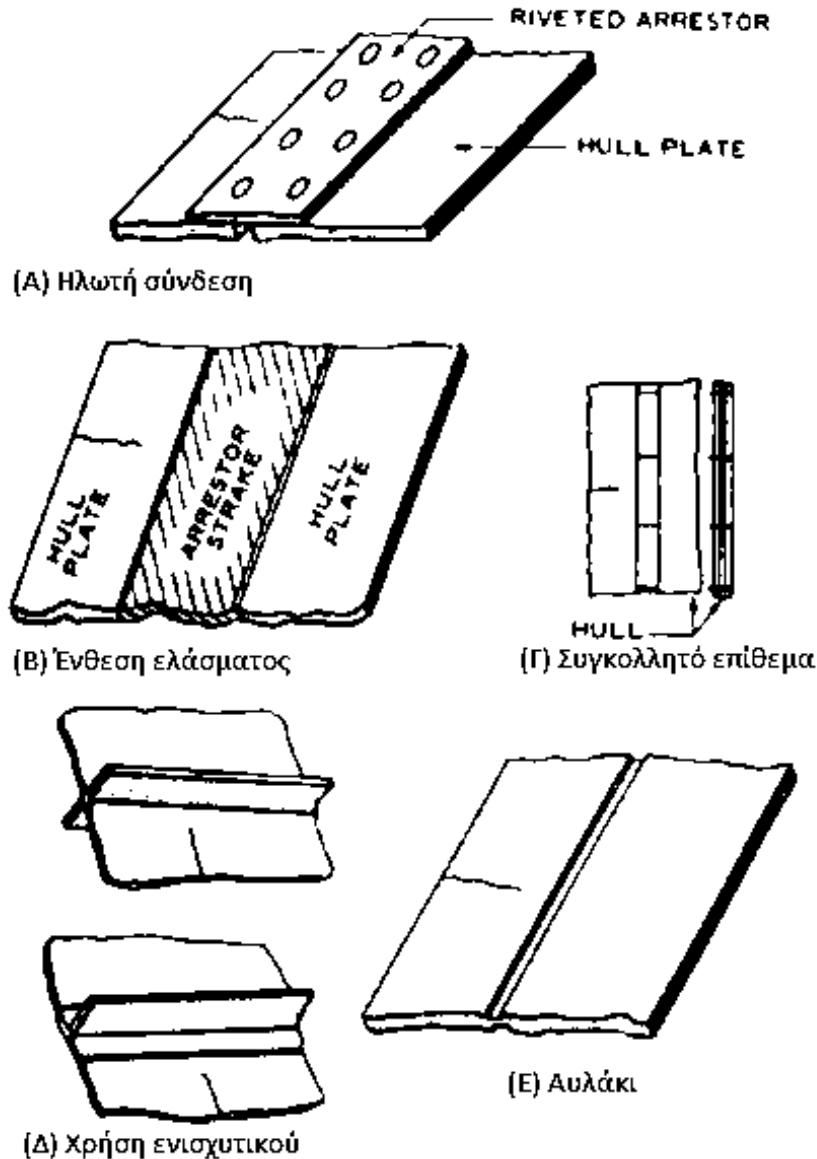
Σημειώνεται ότι στο Σχήμα 4.23, η αρίθμηση 1 αναφέρεται στο πλευρικό έλασμα, η 2 στο κατάστρωμα του υπερστεγάσματος, η 3 στην πλευρική φρακτή, η 4 στο κύριο κατάστρωμα και, τέλος, η 2 στις εγκάρσιες φρακτές.

Φυσικά, υπάρχουν διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης αυτού του φαινομένου, αλλά η καλύτερη μέθοδος αντιμετώπισης των συγκεντρώσεων των τάσεων, είναι η εξάλειψή τους. Ωστόσο, σε περίπτωση κάποιας ρωγμής, η πιο κοινή μέθοδος περιορισμού της έκτασής της είναι κάνοντας χρήση μεθόδων σύλληψης ρωγμών (crack-arrestors) (Σχήμα 4.24).

Ένα υπερστεγάσμα με ανοίγματα στις πλευρές του έχει γενικώς μικρότερη αντίσταση στις διατμητικές δυνάμεις σε σχέση με ένα άλλο ίδιου πάχους αλλά χωρίς ανοίγματα. Ένα έλασμα με μικρό πάχος έχει επίσης μικρότερη αντοχή σε διάτμηση σε σύγκριση με άλλο μεγαλύτερου πάχους. Έτσι, ένα έλασμα με μεγάλα ανοίγματα και πάχος t μπορεί να αντικατασταθεί με ένα άλλο χωρίς ανοίγματα και πάχους \bar{t} , όπου $\bar{t} < t$, έτσι ώστε και στις δυο περιπτώσεις η αντοχή να είναι περίπου ίδια. Σημειώνεται ότι το πάχος \bar{t} αποτελεί το ισοδύναμο πάχος και λαμβάνεται από τη σχέση:

$$\bar{t} = \frac{\text{όγκος του υλικού που χρησιμοποιείται στο έλασμα}}{\text{μήκος του υπερστεγάσματος} \times \text{ύψος του υπερστεγάσματος}} \quad (4.4)$$

Τα μεγάλα πλευρικά ανοίγματα του υπερστεγάσματος μπορούν σε ένα βαθμό να ανακουφίσουν το υπερστέγασμα από τις καμπτικές τάσεις (μειώνεται η συνεισφορά του υπερστεγάσματος στη διαμήκη κάμψη), με τον κίνδυνο ωστόσο εμφάνισης συγκεντρωμένων τάσεων στις γωνίες των ανοιγμάτων. Δεν θα πρέπει τα ανοίγματα να τοποθετούνται σε περιοχές υψηλών διατμητικών τάσεων, όπως για παράδειγμα κοντά στα άκρα το υπερστεγάσματος ή κοντά στις εγκάρσιες φρακτές που στηρίζουν το κύριο κατάστρωμα.



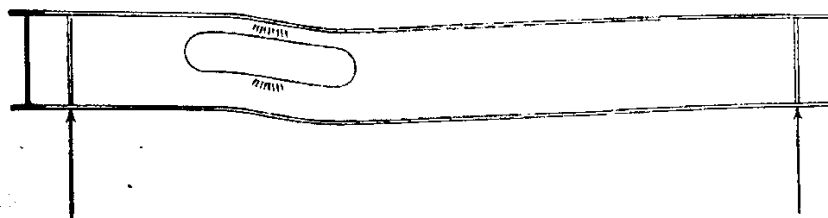
Σχήμα 4.24: Μέθοδοι σύλληψης των ρωγμών [44]

Θα πρέπει οι γωνίες στα ανοίγματα, και ειδικότερα σε περιοχές υψηλών διατμητικών τάσεων, να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλες (σε μοίρες) και ομαλοποιημένες (στρογγυλοποιημένες), ώστε να μειώνονται οι συγκεντρώσεις των τάσεων. Γενικότερα, το σχήμα, οι αναλογίες και η ισαπόσταση των ανοιγμάτων αποτελούν παράγοντες που επηρεάζουν την κατασκευαστική συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [28], όλα τα ανοίγματα θα πρέπει να διαθέτουν καμπύλη μορφή κατά μήκος της περιφέρειάς τους, ενώ η ακτίνα καμπυλότητάς θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το ένα όγδοο της διάστασης του ανοίγματος κάθετα στην κατεύθυνση της τάσης. Μάλιστα, σημαντικό ρόλο παίζει ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων, καθώς ένα άνοιγμα με λόγο πλευρών δυο προς ένα (διπλάσιο μήκος) με την κοντή πλευρά κάθετη στη φορά της εξωτερικής φόρτισης επιφέρει μείωση των τάσεων περίπου 50% που θα είχε αν η μεγαλύτερη πλευρά ήταν κάθετη στη φορά της εξωτερικής φόρτισης (Σχήμα 4.25).

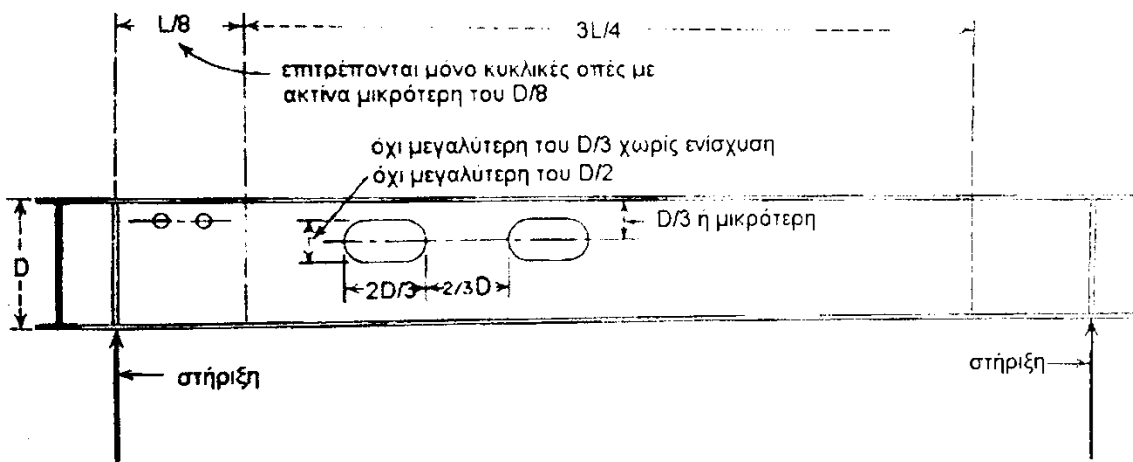
Επιπλέον, δεν θα πρέπει να υπάρχουν ανοίγματα στα άκρα σε μικρότερη απόσταση από το $1/8$ του ανυποστήρικτου μήκους, καθώς εκεί αναπτύσσονται υψηλές διατμητικές δυνάμεις (Σχήμα 4.26). Επίσης, λόγω των υψηλών διατμητικών δυνάμεων που εμφανίζονται στο ύψος του ουδέτερου άξονα, δεν θα πρέπει να τοποθετούνται στην περιοχή αυτή. Φυσικά, εάν αυτά είναι αναπόφευκτα για κάποιους σχεδιαστικούς λόγους, τότε θα πρέπει να ενισχύονται κατάλληλα. Κάποια από τα μέτρα για την αύξηση της αντοχής στις περιοχές αυτές είναι:

- Χρήση επιθεμάτων (Σχήμα 4.27α)
- Πρόσθεση ελασμάτων αυξημένων διαστάσεων (Σχήμα 4.27β)
- Τοποθέτηση δακτυλίων κατά μήκος της περιφέρειας του ανοίγματος (Σχήμα 4.28)

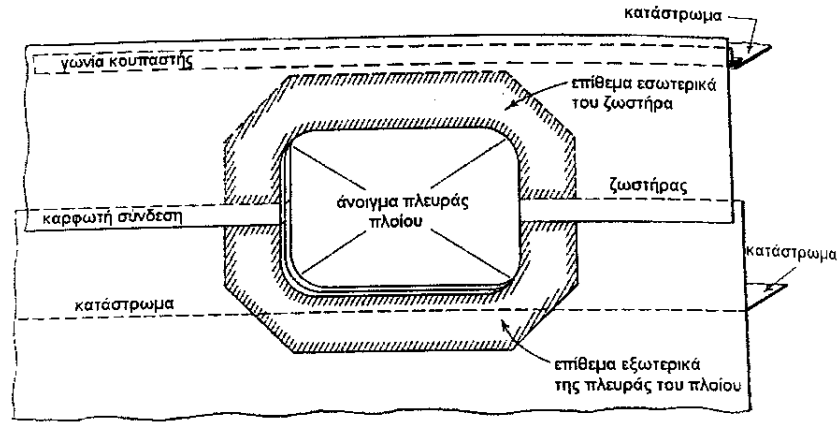


Σχήμα 4.25: Μεγάλο μήκος ανοίγματος [28]

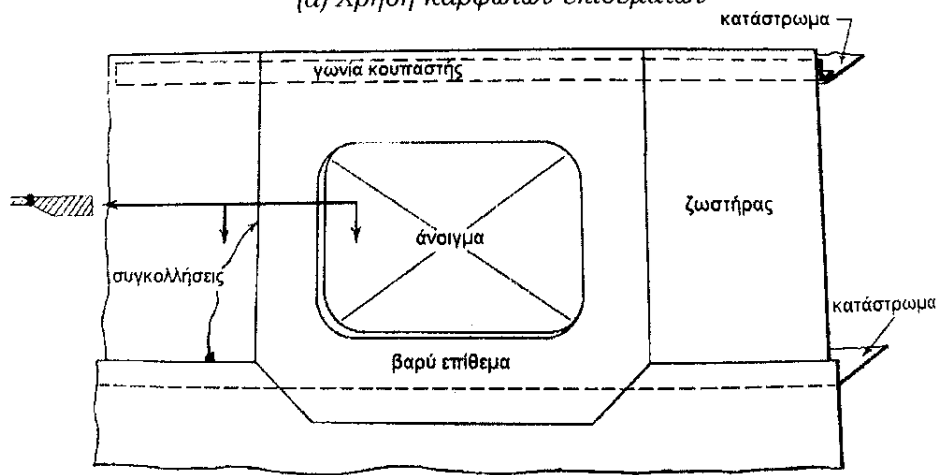
Στο Παράρτημα Z παρουσιάζονται φωτογραφίες από πλευρικά ανοίγματα της υπερκατασκευής του επιβατηγού πλοίου «Ελυρος». Στα σχήματα αυτά διαπιστώνεται ο τρόπος ενίσχυσής τους, ώστε ακόμα και σε περίπτωση εμφάνισης ρωγμής, να περιοριστεί από τη χρήση των ενισχυτικών.



Σχήμα 4.26: Σωστή θέση ανοιγμάτων [28]

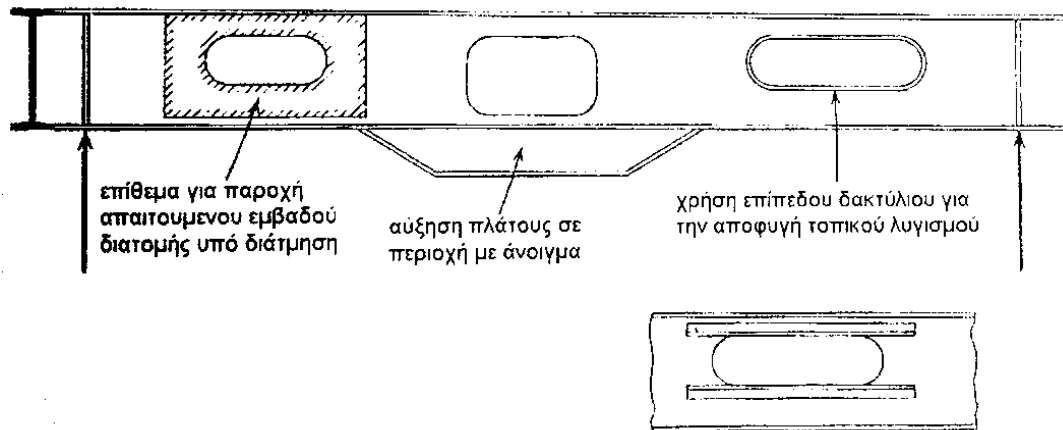


(α) Χρήση καρφωτών επιθεμάτων



(β) Χρήση πρόσθετων ελασμάτων

Σχήμα 4.27: Μέθοδοι πρόληψης ανάπτυξης ρωγμών [28]



Σχήμα 4.28: Άλλη μέθοδος πρόληψης ανάπτυξης ρωγμών [28]

4.4.5 Ολίσθηση διεπιφάνειας

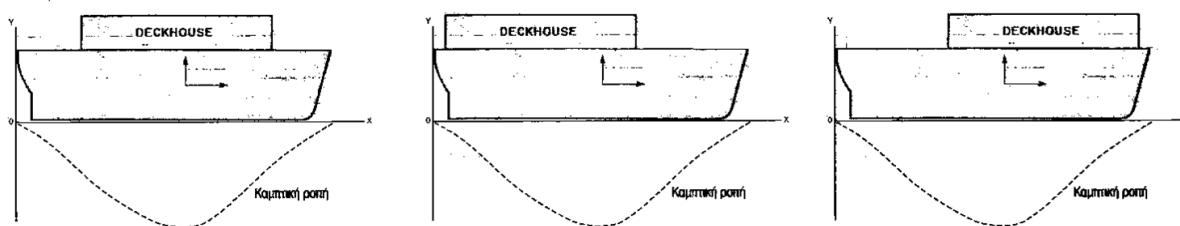
Το υπερστεγάσμα πρέπει να είναι επαρκώς συνδεδεμένο με το κύριο κατάστρωμα, ώστε οι διατμητικές δυνάμεις να μπορούν να μεταφέρονται από τη γάστρα στο υπερστεγάσμα. Αν αυτές οι συνδέσεις δεν είναι πλήρως αποτελεσματικές, θα υπάρχει σχετική ολίσθηση μεταξύ της γάστρας και του υπερστεγάσματος, με αποτέλεσμα τη μείωση των διατμητικών δυνάμεων. Αυτό άλλωστε αποτελεί και ένα σχεδιαστικό στόχο για το μελετητή ναυπηγό, τον οποίο μπορεί να επιτύχει με τη χρήση μπρακέτων αποφόρτισης (eliminating brackets) ή με τις ολισθαίνουσες συνδέσεις (sliding joints).

Αν επιτραπεί η ολίσθηση μεταξύ γάστρας και υπερστεγάσματος, πρακτικά δεν θα μεταφέρονται διατμητικές δυνάμεις από τη γάστρα στο υπερστεγάσμα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, για την ανακούφιση του υπερστεγάσματος από τις τάσεις, τα μπρακέτα αποφόρτισης αποτελούν πιο αποτελεσματικό μέσο απ' ό,τι οι αρμοί διαστολής.

Η πρακτική δυσκολία στη σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος είναι το πώς θα επιτρέψει στο υπερστεγάσμα να ολισθήσει σχετικά με τη γάστρα και διατηρηθεί αυτή η λειτουργία με τη πάροδο των χρόνων, χωρίς να δημιουργούνται άλλα προβλήματα (διαρροές). Ωστόσο, γύρω από αυτό το θέμα δεν υπάρχει ακόμη σχετική εμπειρία.

4.4.6 Θέση του υπερστεγάσματος

Φυσικά για τη συνεισφορά του υπερστεγάσματος στη διαμήκη αντοχή, σημαντικό ρόλο παίζει η θέση ως προς το μέσον του πλοίου, αλλά και ως προς τη κεντρική γραμμή. Στο Σχήμα 4.29 παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές θέσεις του υπερστεγάσματος ως προς το διάμηκες. Όσον αφορά τη διαμήκη αντοχή, ποιοτικά μπορεί να διαπιστωθεί ότι εφόσον η καμπτική ροπή μεγιστοποιείται περί το μέσον του πλοίου, το υπερστεγάσμα που τοποθετείται στην περιοχή αυτή συνεισφέρει περισσότερο στην αντοχή από ότι στις άλλες. Στις άλλες θέσεις το υπερστεγάσμα δεν παραλαμβάνει το μέγιστο φορτίο και συνεπώς δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι συμμετέχει πλήρως στη διαμήκη αντοχή, ακόμη και αν το μήκος του είναι σχετικά μεγάλο.



Σχήμα 4.29: Θέση υπερστεγάσματος ως προς το διάμηκες

4.4.7 Αρμοί διαστολής

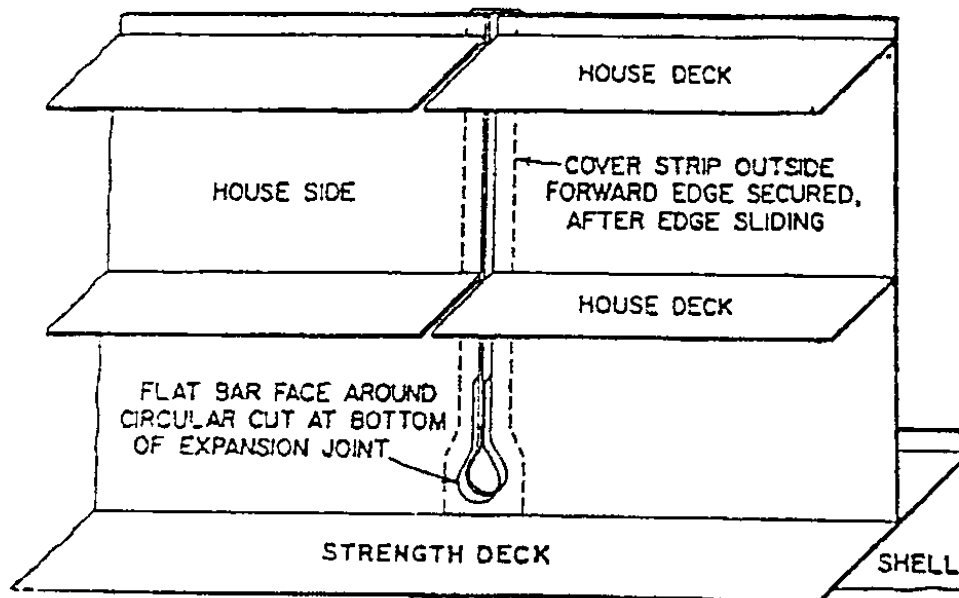
Οι αρμοί διαστολής υποδιαιρούν το μήκος του υπερστεγάσματος, με αποτέλεσμα τη μείωση των διαμήκων τάσεων στο υπερστεγάσμα, αλλά από την άλλη τη δημιουργία συγκεντρωμένων τάσεων τοπικά. Ωστόσο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, θα πρέπει να αποφεύγονται όσο το δυνατόν, διότι μπορεί να αποτελέσουν πηγές ρωγμών, όχι μόνο στην περιοχή τους, αλλά και στις γειτονικές περιοχές.

Επιπλέον, οι αρμοί διαστολής προκαλούν ένα τρίξιμο καθώς το πλοίο κινείται, κάτι το οποίο είναι γενικώς ανεπιθύμητο, πόσο μάλλον στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων. Επίσης, σημειώνεται ότι σε περίπτωση εφαρμογής τέτοιας διάταξης, δεν θα πρέπει να τοποθετούνται ο ένας πολύ κοντά με τον άλλο. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι μια πιθανή κατάσταση όπου ίσως να ήταν αποδεκτή η χρήση αρμών διαστολής είναι οι περιπτώσεις όπου υπάρχει μεγάλη ανάγκη για μείωση του βάρους στην κορυφή του υπερστεγάσματος. Στα ακόλουθα δυο σχήματα, παρουσιάζεται η τοποθεσία των αρμών διαστολής σε ένα υπερστεγάσμα.

Αρμοί Διαστολής



Σχήμα 4.30: Αρμοί διαστολής στο υπερστεγάσμα

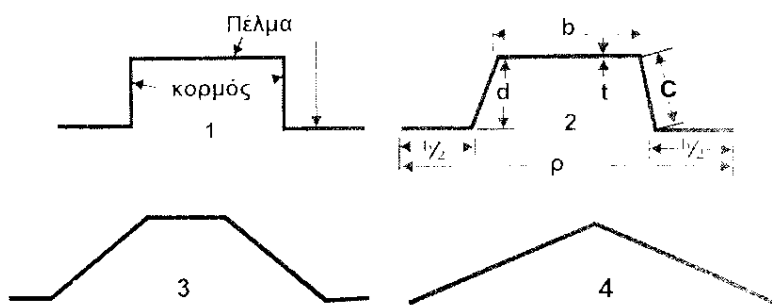


Σχήμα 4.31: Τυπική αναπαράσταση αρμού διαστολής [45]

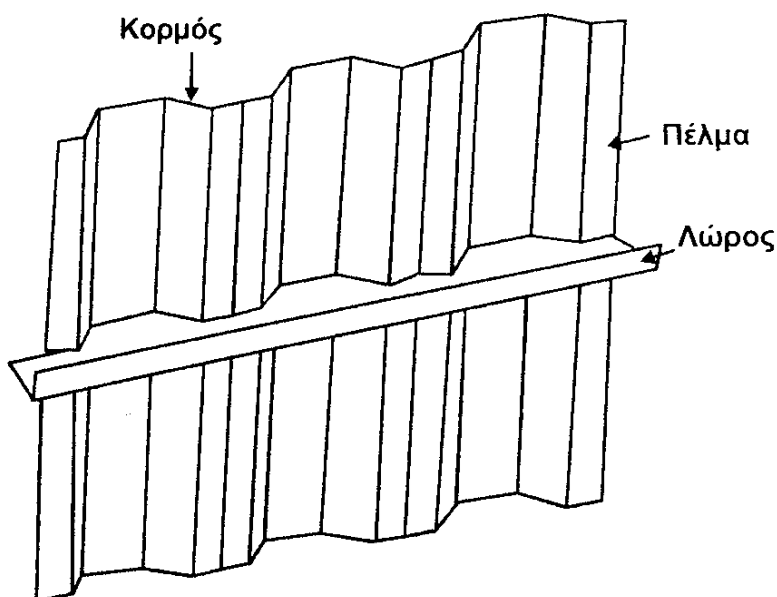
4.4.8 Πτυχωτές πλευρές

Ένας άλλος τρόπος μείωσης των τάσεων στο υπερστεγάσμα είναι η χρήση κατακόρυφων ή οριζόντιων πτυχώσεων στις πλευρές του υπερστεγάσματος. Οι κατακόρυφες πτυχώσεις θα ανακουφίσουν τις διατμητικές τάσεις που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια ή στην περίπτωση των οριζόντιων πτυχώσεων δρουν ως αρμοί διαστολής ανακουφίζοντας τις κατακόρυφες δυνάμεις στις πλευρές του υπερστεγάσματος λόγω της διαφοράς της κάμψης μεταξύ των δυο δοκών.

Σε πτυχωτές πλευρές δεν παρατηρούνται ενισχυτικά. Το ρόλο των τελευταίων παίζουν οι αυλακώσεις. Η απουσία των ενισχυτικών έχει ως συνέπεια την ελάττωση του βάρους της κατασκευής. Μάλιστα, λόγω αυτού μειώνεται το κόστος ανέγερσης, εφόσον απαιτείται λιγότερο υλικό αλλά και συγκολλήσεις. Φυσικά, θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε περίπτωση που απαιτείται περαιτέρω ενίσχυση, αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση λώρων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.32. Από την πλευρά των νηογνωμόνων, εκείνοι απαιτούν η πτυχωτή πλευρά (Σχήμα 4.33) να είναι ισοδύναμη καμπτικής αντοχής με μια παραδοσιακή-επίπεδη πλευρά, συγκρίνοντας τη ροπή αντίστασης της κάθε μιας.



Σχήμα 4.32: Πέγμα και κορμός πτυχωτής πλευράς [28]



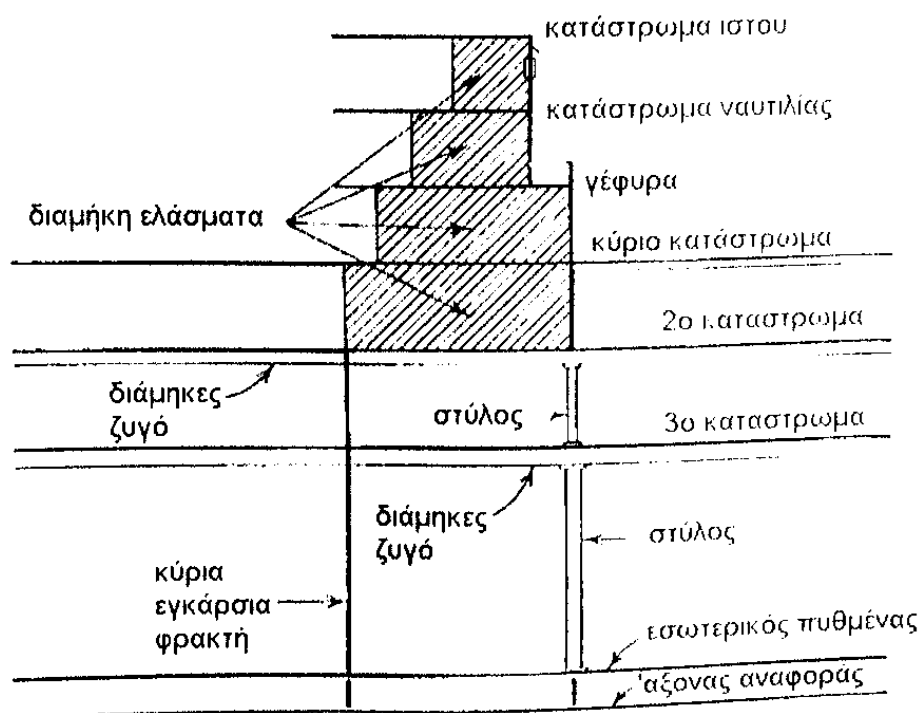
Σχήμα 4.33: Πλευρά με κατακόρυφες πτυχώσεις [28]

4.4.9 Κατακόρυφες φορτίσεις στα άκρα του υπερστεγάσματος

Γενικώς, στα άκρα του υπερστεγάσματος παρατηρούνται αρκετές ζημιές. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι ζημιές προκύπτουν λόγω των υψηλών κατακόρυφων δυνάμεων, οι οποίες αυξάνονται με την αύξηση της ακαμψίας του καταστρώματος. Υπάρχουν αρκετοί τρόποι να μειωθούν οι κατακόρυφες δυνάμεις μεταξύ αυτών:

- Στις υπερκατασκευές η ασυνέχεια στο άκρο του πλευρικού ελάσματος θα πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν πιο βαθμιαία, ώστε να περιορισθεί η συγκέντρωση τάσεων. Μάλιστα, ο ABS υπογραμμίζει ότι οι ασυνέχειες των υπερκατασκευών πρέπει να ενισχύονται κατάλληλα, ώστε να αποφεύγονται τέτοια φαινόμενα.
- Οι γωνίες στο υπερστέγασμα πρέπει να είναι εξομαλυμένες, ώστε να παρέχουν ομαλή μεταφορά των τάσεων από το κύριο κατάστρωμα στο υπερστέγασμα.
- Οι συνδέσεις του υπερστεγάσματος με τη φρακτή στο άκρο του θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αντιστέκονται τις μεγάλες κατακόρυφες και διατμητικές φορτίσεις.

Μια εγκάρσια φρακτή κάνει το κύριο κατάστρωμα άκαμπτο τοπικά, και προκαλεί το υπερστέγασμα να ακολουθήσει την ίδια καμπυλότητα με αυτή της γάστρας. Σε τέτοιες περιπτώσεις παρατηρούνται παρόμοιες κατακόρυφες αντιδράσεις. Η σοβαρότητα αυτών των επιδράσεων μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την ευθυγράμμιση της εγκάρσιας και διαμήκου κατασκευής πάνω και κάτω από το κύριο κατάστρωμα (Σχήμα 4.34), προκειμένου να παρέχεται επαρκής επιφάνεια έδρασης των υλικών ώστε να αντιστέκονται τις μεγάλες συγκεντρώσεις φορτίου και να τις κατανέμουν καλά στη γειτονική κατασκευή.



Σχήμα 4.34: Ευθυγράμμιση εγκάρσιων φρακτών και στύλων [28]

4.4.10 Μέτρο ελαστικότητας (υλικό)

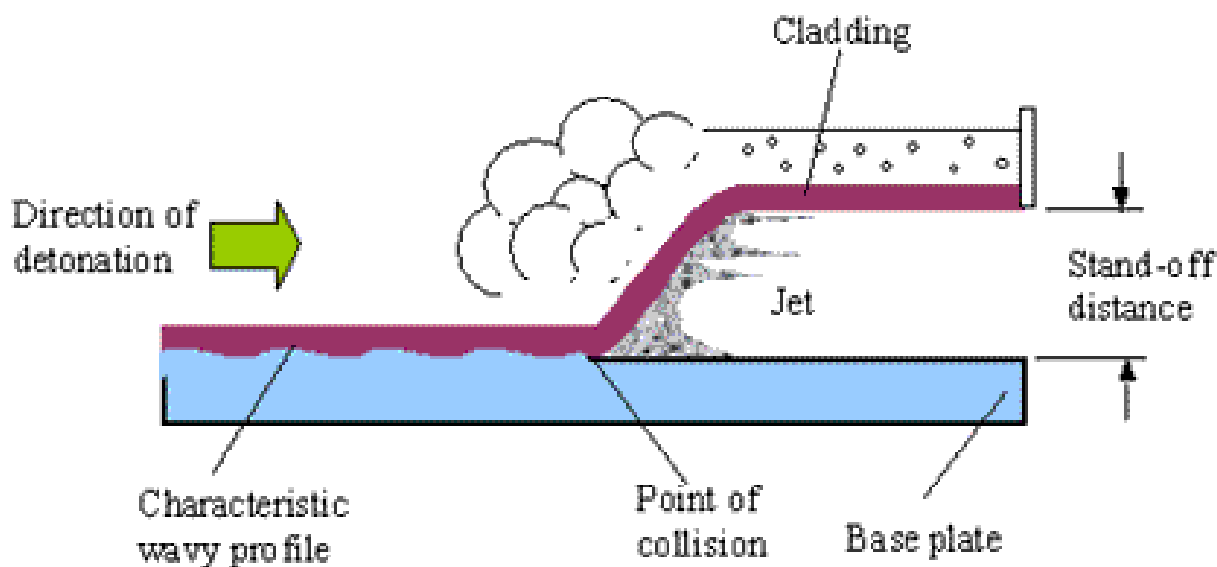
Ένας τρόπος ανακούφισης των τάσεων στο υπερστέγασμα είναι η αυξημένη κατακόρυφη ευκαμψία με χρήση υλικών με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, όπως το αλουμίνιο (Πίνακας 4.1). Στις μέρες μας αυτό αποτελεί μια κοινή πρακτική, με το επιπρόσθετο πλεονέκτημα της εξοικονόμησης βάρους.

Από την άλλη, η χρήση του αλουμινίου έχει και κάποια μειονεκτήματα, όπως η μειωμένη αντοχή σε περίπτωση πυρκαγιάς αλλά και τα προβλήματα διάβρωσης που μπορούν να εμφανιστούν στις συνδέσεις του με άλλα υλικά (γαλβανική διάβρωση).

Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά μπορούν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη μόνωση και σχεδίαση. Για παράδειγμα, οι συνδέσεις μπορούν να γίνονται με τη μέθοδο της εκρηκτικής σύνδεσης (explosion bonding), η οποία εφαρμόζεται ικανοποιητικά αρκετά χρόνια (βλέπε Σχήμα 4.35). Εκτενέστερη καταγραφή για τα ναυπηγικά υλικά που χρησιμοποιούνται και τις συγκολλήσεις που πραγματοποιούνται στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων θα πραγματοποιηθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 4.1: Σύγκριση ιδιοτήτων αλουμινίου και χάλυβα

Ιδιότητα	Αλουμίνιο	Χάλυβας
Μέτρο ελαστικότητας E [N/mm ²]	70000	210000
Αριθμός Poisson ν [-]	0,3	0,3
Συντελεστής θερμικής μήκυνσης αΤ [1/°]	23x10 ⁽⁻⁶⁾	12x10 ⁽⁻⁶⁾
Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λ [W/mK]	160	60
Θερμοκρασία τήξης [°C]	660	1500
Ειδικό βάρος ρ [kg/m ³]	2700	8100



Σχήμα 4.35: Συγκόλληση με τη μέθοδο Explosion bonding [46]

4.4.11 Εγκάρσια κατασκευή

Λόγω των υψηλών εγκάρσιων φορτίσεων (π.χ. Racking), ο ABS πρότεινε να τοποθετούνται εγκάρσιες φρακτές που δεν εκτείνονται σε όλο το πλάτος του πλοίου (partial bulkheads), νομείς με μεγάλο πλάτος κορμού (deer webs) κλπ. στα άκρα και σε όλο το μήκος των μεγάλων υπερστεγασμάτων προκειμένου να παρέχεται επαρκής αντίσταση έναντι της ομοεπίπεδης στρεπτικής καταπόνησης (Racking). Και τα δυο άκρα των κορμών (webs) των κατώτερων επιπέδων των ενισχυτικών της φρακτής πρέπει να συνδέονται αποτελεσματικά.

4.5 Ανακεφαλαίωση

Στον Κεφάλαιο 4 της διπλωματικής εργασίας αναλύθηκαν οι αποκρίσεις της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων συναρτήσει των διαφόρων γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους. Διαπιστώθηκε ότι με την πάροδο των χρόνων και την αλλαγή των κανονισμών, η μορφολογία των πλοίων αυτών έχει αλλάξει αρκετά.

Παλαιότερα τα πολυτελή επιβατηγά πλοία διέθεταν υπερστεγάσμα, το οποίο δεν συνέβαλε στην αντοχή και όλο το φορτίο έπρεπε να το παραλάβει η γάστρα. Όμως, με τα χρόνια το πλάτος του υπερστεγάσματος αυξήθηκε και έγινε υπερκατασκευή, η οποία συνέβαλε στην αντοχή.

Αργότερα η απαίτηση για εσοχή στον κατάστρωμα λέμβων έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην κατανομή των διατμητικών τάσεων καθώς το κατάστρωμα αυτό έπρεπε να παραλάβει διατμητικές τάσεις. Επίσης, η ανάγκη για καμπίνες με θέα προς τη θάλασσα και μπαλκόνι δημιούργησε προβλήματα αντοχής. Για το λόγο αυτό προστέθηκαν εσωτερικές διαμήκεις φρακτές ώστε να μεταφέρουν αυτές το διατμητικό φορτίο και όχι οι πλευρές της υπερκατασκευής. Στις τελευταίες σχεδιάσεις παρατηρείται ότι και οι πλευρές της υπερκατασκευής κατασκευάζονται έτσι ώστε να συμβάλλουν στην αντοχή, προκειμένου να ανακουφίζουν τις εσωτερικές διαμήκεις φρακτές αλλά και το κατάστρωμα λέμβων.

Εν συνεχεία, παρουσιάστηκαν οι αποκρίσεις του πλοίου. Οι πιο ανησυχητικές είναι η διαμήκης κάμψη σε ολικό επίπεδο, ενώ σε τοπικό οι διατμητικές παραμορφώσεις και ο λυγισμός. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη διαστασιολόγηση περιοχών όπως η μέση τομή, οι κολώνες και τα πλευρικά ανοίγματα.

Τέλος, κατέστη σαφής ο καθοριστικός ρόλος της συνεργασίας γάστρας-υπερκατασκευής στη διαμόρφωση των τρισδιάστατων εντατικών πεδίων. Η συνεργασία αυτή εξαρτάται από την ακαμψία του κύριου καταστρώματος, τις επιδράσεις διάτμησης, τη γεωμετρία του υπερστεγάσματος, τα πλευρικά ανοίγματα, την ολίσθηση της διεπιφάνειας, τη θέση του υπερστεγάσματος, την παρουσία αρμών διαστολής, την παρουσία πτυχωτών πλευρών, τις κατακόρυφες φορτίσεις στα άκρα του υπερστεγάσματος, το υλικό (μέτρο ελαστικότητας) και την εγκάρσια κατασκευή. Ο κάθε ένας από τους παραπάνω παράγοντες επιδρά στη συνεργασία γάστρας-υπερκατασκευής και ο μελετητής ναυπηγός θα πρέπει να γνωρίζει ικανοποιητικά την επιρροή τους.

5. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Έχοντας αποκτήσει μια εικόνα των φορτίσεων στις οποίες υπόκειται το πλοίο και των αποκρίσεων αυτού, επόμενο μέλημα είναι να μπορεί κανείς να τις μελετήσει. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι μέθοδοι μελέτης της αντοχής της μεταλλικής κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων. Προτού γίνει όμως η ανάλυση αυτή, κρίνεται απαραίτητο να αποσαφηνιστεί ο όρος «Αντοχή Πλοίου». Τι νοείται, λοιπόν, με τον όρο αντοχή πλοίου;

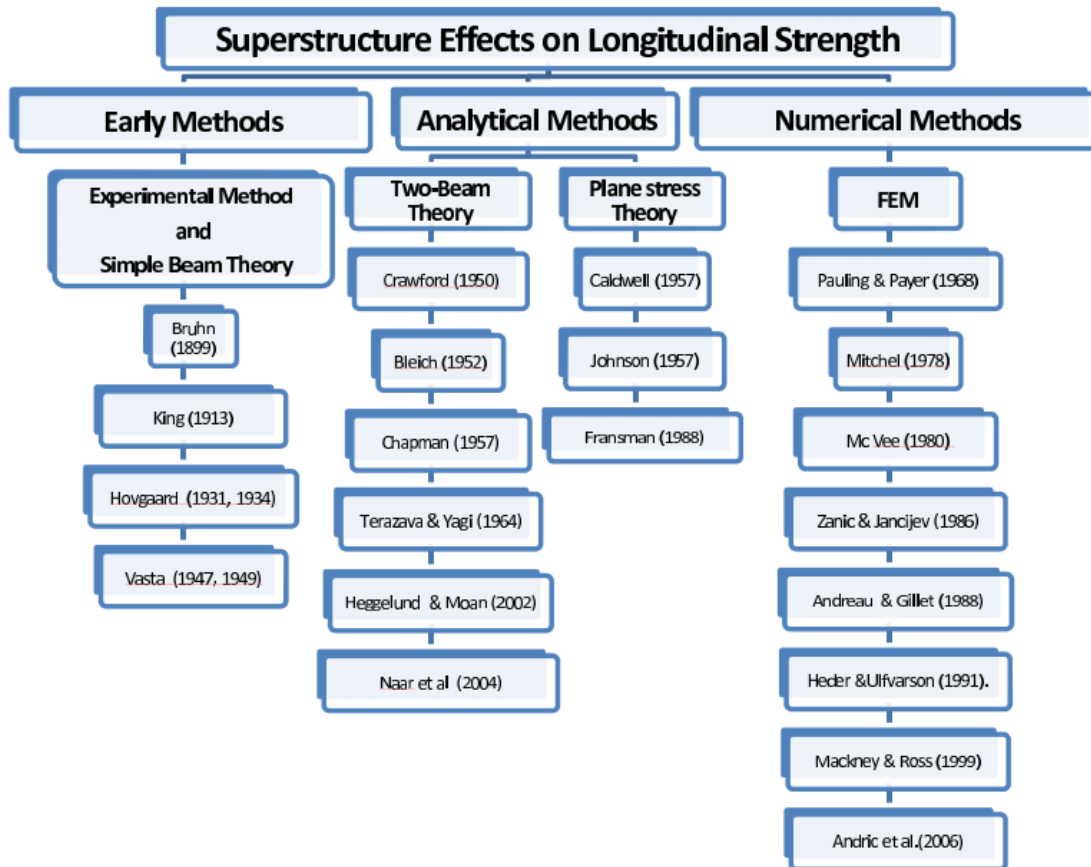
Με τον όρο «Αντοχή Πλοίου» νοείται η μελέτη της δομής του πλοίου όσον αφορά την ικανότητά της να παραλάβει τις διάφορες εξωτερικές φορτίσεις (π.χ. κυματισμοί, σφυρόκρουση κλπ.) στις οποίες υποβάλλεται και οι οποίες προκαλούν την εμφάνιση των τάσεων και των παραμορφώσεων. Ως συνήθως, η μελέτη της αντοχής πραγματοποιείται σύμφωνα με την παρακάτω ακολουθία:

1. Εύρεση ελάχιστης ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης του πλοίου σύμφωνα με τους κανονισμούς των Νηογνωμόνων
2. Εξέταση όλων των πιθανών φορτίσεων που ασκούνται στη γάστρα του πλοίου
3. Υπολογισμός των παχών και των διαστάσεων των ενισχυτικών και των ελασμάτων βάση των φορτίσεων που αναπτύσσονται
4. Επιλογή ελαχίστων παχών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κανονισμών
5. Σύγκριση παχών που προκύπτουν από το βήμα 3 και 4 και επιλογή των μεγαλύτερων (εκ των δυο)
6. Προσθήκη κατάλληλου περιθωρίου διάβρωσης ανάλογα με την υπό εξέταση περιοχή
7. Υπολογισμός της προκύπτουσας, με βάση τα ελάσματα και ενισχυτικά που τοποθετήθηκαν, ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης και σύγκριση με την ελάχιστη των κανονισμών
8. Ανάπτυξη κατασκευαστικού σχεδίου της Μέσης Τομής του υπό μελέτη και σχεδίαση πλοίου

Μετά από κάποιες ένα εισαγωγικές παρατηρήσεις σχετικά με το θεωρητικό υπόβαθρο της «Αντοχής του Πλοίου», θα γίνει ειδική αναφορά στη μελέτη της αντοχής των κρουαζιερόπλοιων. Φυσικά, υπάρχουν πολλές φορτίσεις που δρουν και επηρεάζουν τη συνεργασία γάστρας-υπερστεγάσματος και εν τέλει την (ολική) απόκριση του πλοίου. Ωστόσο, το κύριο μέλημα του ναυπηγού μελετητή στο στάδιο της προμελέτης είναι οι πρωτεύουσες τάσεις, οι οποίες παραπέμπουν στην ολική αντοχή του πλοίου. Αυτές οι τάσεις αναφέρονται στη διαμήκη κάμψη του πλοίου. Ως εκ τούτου, θα δοθεί έμφαση στη μελέτη της διαμήκους κάμψης καθώς αυτή είναι και η πιο σημαντική απόκριση του πλοίου από πλευράς (ολικής) αντοχής. Μάλιστα, όπως έγινε σαφές στο προηγούμενο κεφάλαιο, η διαμήκης κάμψη στα κρουαζιερόπλοια είναι κάτι το σύνθετο και αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτού του τύπου πλοίου. Για το λόγο αυτό θα παρουσιασθούν οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αλληλεπίδραση γάστρας-υπερκατασκευής υπό διαμήκη κάμψη.

Όπως έχει ήδη καταγραφεί, το μέγεθος και η θέση των υπερκατασκευών που τοποθετούνται στο κατάστρωμα της γάστρας του πλοίου εξαρτάται από τον τύπο του πλοίου. Τα φορτηγά πλοία έχουν γενικά μικρές υπερκατασκευές (και υπερστεγάσματα), οι οποίες μπορούν να τοποθετηθούν σε όλους τις

περιοχές κατά μήκος του πλοίου. Αντίθετα, στα επιβατηγά πλοία παρατηρούνται μακριές και φαρδιές υπερκατασκευές. Η έκταση της συμβολής μιας υπερκατασκευής στην συνολική αντοχή του πλοίου αποτελεί ένα θέμα ενδιαφέροντος και έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές. Στο Σχήμα 5.1 συνοψίζονται οι βασικότερες μέθοδοι που έχουν χρησιμοποιηθεί για τη εξέταση της συνεργασίας γάστρας-υπερτεγάσματος στη διαμήκη αντοχή του πλοίου, αλλά και οι διάφοροι μελετητές που συνέβαλαν σε αυτή.



Σχήμα 5.1: Οι σημαντικότερες μελετητές της αλληλεπίδρασης γάστρας-υπερκατασκευής [47]

5.2 Απλή θεωρία κάμψης δοκού και πειραματικές μέθοδοι (Στάδιο Προμελέτης)

Η θεωρία της απλής κάμψης των δοκών (Bernoulli – Euler Beam Theory) προϋποθέτει:

- Οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες μετά την κάμψη
- Η δοκός είναι πρισματική (σταθερή διατομή κατά το διάμηκες)
- Το φαινόμενο Poisson (εγκάρσιες παραμορφώσεις) αμελείται
- Το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά
- Οι διατμητικές δυνάμεις δεν επηρεάζουν τις καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις

Σύμφωνα με τη θεωρία της απλής κάμψης, η κατανομή των ορθών τάσεων δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma(x, y) = M(x) \frac{y}{I(x)} = \frac{M(x)}{W(x, y)} \quad (5.1)$$

όπου:

- $\sigma(x, y)$, η ορθή τάση (θλιπτική ή εφελκυστική) σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα της διατομής
- $M(x)$, η καμπτική ροπή που ασκείται στη δεδομένη διατομή
- y , η (κατακόρυφη) απόσταση του υπό εξέταση στοιχείου της διατομής από τον ουδέτερο άξονα
- $I(x)$, η ροπή αδράνειας της διατομής γύρω από τον ουδέτερο άξονα

Η απλή θεωρία κάμψης είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται κατά κόρον για το στάδιο της προμελέτης. Ωστόσο, λόγω των επιδράσεων της διάτμησης είναι έγκυρη μόνο για μακριές υπερκατασκευές και μακριά από τα άκρα τους. Για το λόγο αυτό η εν λόγω μέθοδος χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των αναπτυσσόμενων τάσεων στην περιοχή της μέσης τομής, προκειμένου ο μελετητής γρήγορα να αποκτήσει μια αίσθηση των αναπτυσσόμενων τάσεων στην κρίσιμότερη περιοχή του πλοίου.

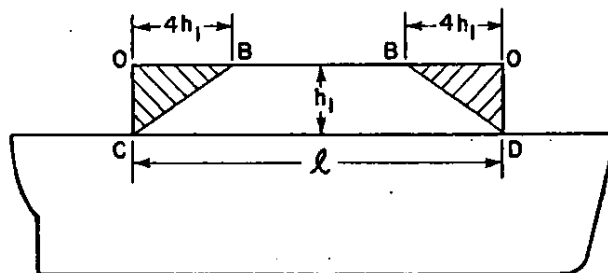
Bruhn

Ο Bruhn [48] φαίνεται ότι ήταν ο πρώτος που μελέτησε με λεπτομέρεια την επίδραση των ασυνεχειών (π.χ. άκρα υπερκατασκευής) στην κατανομή των τάσεων. Κατανόησε τη σημασία του μήκους της υπερκατασκευής στην κατανομή των τάσεων πάνω από το κύριο κατάστρωμα. Η μελέτη του βασίστηκε σε δοκιμές πάνω σε μοντέλα από καουτσούκ (sheet rubber models).

Βρήκε ότι η κατανομή των τάσεων κατά την έκταση μιας υπερκατασκευής και το μέγιστο επίπεδο των τάσεων που λαμβάνεται (στο μέσο της υπερκατασκευής), εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος, το ύψος και το πλάτος της υπερκατασκευής. Μάλιστα, πρότεινε το μήκος της υπερκατασκευής να είναι οκτώ φορές μεγαλύτερο από το άθροισμα του ύψους της συν το μισό του πλάτους της, όπως περιγράφει η κάτω ανισότητα:

$$l = 8 * \left(h_1 + \frac{b}{2} \right) \quad (5.2)$$

Τέλος, διαπίστωσε ότι όπου η απόσταση OB είναι ίση με τέσσερις φορές το ύψος της υπερκατασκευής, h_1 , σύμφωνα με τον Bruhn, δεν υπάρχουν αξιόλογες πρωτεύουσες τάσεις στις περιοχές OBC (Σχήμα 5.2) και θα πρέπει να παραλείπονται από τους υπολογισμούς της διαμήκους αντοχής.



Σχήμα 5.2: Περιοχές όπου δεν υπάρχουν αξιόλογες πρωτεύουσες τάσεις κατά τον Bruhn [40]

Biles

Ο Biles μελέτησε την πιθανότητα να συμπεριφέρονται ανεξάρτητα γάστρα και υπερστεγάσμα. Αυτό θα μπορούσε να γίνει αν δεν μεταφέρονται διατμητικές τάσεις από το ανώτερο κατάστρωμα του υπερστεγάσματος (π.χ. γέφυρα) μέχρι το ζωστήρα (sheerstrake). Στην περίπτωση αυτή το υπερστεγάσμα θα καμπτόταν σε σχέση με το ύψος του, δηλαδή ανεξάρτητα της γάστρας, και όχι σε σχέση με το ύψος της διατομής. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί εφόσον οι δυο κατασκευές ολισθάνουν μεταξύ τους κατά το διάμηκες.

King

Ο King [49] εξέτασε την επίδραση στις διαμήκεις τάσεις, της προσθήκης υλικού σε διάφορα ύψη πάνω από τη γάστρα σε μονά και πολλαπλά επίπεδα (tiers), σε μια προσπάθεια να εξηγήσει την αντοχή των μεγάλων υπερστεγασμάτων. Τα συμπεράσματα της μελέτης του ήταν ότι μπορεί να σχεδιαστεί ένα υπερστεγάσμα ικανό να συμμετέχει πλήρως στην ολική (διαμήκη) αντοχή του πλοίου με την προϋπόθεση ότι η απόσβεση των τάσεων στα άκρα του υπερστεγάσματος ήταν ικανοποιητική. Για τα μεγάλα πλοία υποστήριξε ότι θα πρέπει τα πλευρικά τοιχώματα του υπερστεγάσματος να συμπίπτουν με τις πλευρές τις γάστρας.

Επίσης, μελέτησε την ανακούφιση του υπερστεγάσματος από τις τάσεις μέσα από την υιοθέτηση αντοχών τόσων μικρών ώστε να προσφέρουν ευελιξία ή τη χρήση αρμών διαστολής ή και τα δυο. Ωστόσο, όπως ο ίδιος υποστήριξε, αυτό είναι κάτι ιδιαίτερο δύσκολο, αν όχι απίθανο, να προβλεφθεί (π.χ. θέση και αριθμός αρμών διαστολής) από την εμπειρία ή την εφαρμογή θεωρητικών μεθόδων. Άλλωστε, σε πρακτικό επίπεδο, το υπερστεγάσμα κατασκευάζεται, ώστε να αντιστέκεται στις φορτίσεις που υποβάλλεται από τα βάρη αλλά και στις εξωτερικές φορτίσεις λόγω του προνευτασμού (pitch) και του διατοιχισμού (roll).

Τέλος, σημείωσε ότι σε περιπτώσεις μακρών υπερστεγασμάτων με μικρή ή καθόλου ενίσχυση καταστρώματος, παρατηρήθηκαν υψηλές τάσεις με συχνά εμφανιζόμενες ρωγμές σε κάθε γωνία τετραγωνικών παραθύρων και άλλων ασυνεχειών.

Montgomerie

Ο Montgomerie [50] έθεσε δυο σενάρια στην κατασκευαστική σχεδίαση των μακρών υπερστεγασμάτων. Το πρώτο ήταν να γίνει το υπερστεγάσμα τόσο ευέλικτο ώστε να μη συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή. Το άλλο ήταν να γίνει το υπερστεγάσμα αρκετά άκαμπτο ώστε να μοιράζεται τις φορτίσεις χωρίς να προκαλείται ζημιά. Ομοίως με τον King, απέκλεισε την πρώτη περίπτωση και εστίασε στη δεύτερη. Έπρεπε, λοιπόν, να κατασκευαστεί μια άκαμπτη κατασκευή ώστε να αντιστέκεται στις διάφορες φορτίσεις που αναφέρθηκαν και ταυτόχρονα να είναι όσο το δυνατόν ευέλικτη για τους σκοπούς της ολικής αντοχής. Η μόνη λύση για να πραγματοποιηθεί αυτό ήταν να κοπεί η υπερκατασκευή σε πολλά μέρη και το τοποθετηθούν αρμοί διαστολής. Ωστόσο, αν χρησιμοποιούνται αρμοί διαστολής, είναι αναγκαίο να καθοριστεί η ισαπόσταση τους, κάτι το οποίο είναι προφανώς σχετικό με το πρόβλημα του καθορισμού του «ισοδύναμου μήκους» τέτοιων κατασκευών και επίσης το πώς θα επηρεάσουν την κατανομή των τάσεων που συγκεντρώνονται στη βάση των ασυνεχειών. Έτσι, όρισε την απόσταση της τάξης του $4(h_1 + b/2)$, θεωρώντας υπερβολική τη σχέση που είχε προβλέψει ο Bruhn (βλέπε Σχέση (5.2)).

Όμως, λόγω της έλλειψης κατάλληλου θεωρητικού υπόβαθρου για την μελέτη των παραπάνω, ο Montgomerie στράφηκε προς τη στατιστική προσέγγιση, δηλαδή σε καταγραφές εμπειριών από βλάβες. Στις καταγραφές αυτές, διαπίστωσε ότι παρατηρήθηκαν βλάβες ακόμη και με τη χρήση αρμών διαστολής. Συγκεκριμένα, η πρακτική του να τοποθετούνται αρμοί διαστολής σε μια συγκεκριμένη έκταση του ύψους της υπερκατασκευής φάνηκε να είναι μη ικανοποιητική, γιατί η ασυνέχεια στους αρμούς διαστολής προκάλεσε σοβαρές τάσεις στο υπερστεγάσμα από κάτω. Αυτό σήμαινε ότι οι τάσεις εξωτερικά μιας κατασκευής μεταφέρονται στο υλικό της γάστρας πολύ πιο άμεσα από ότι αναμενόταν. Άλλωστε, οι αρμοί διαστολής δεν ανακουφίζουν αισθητά το υπερστεγάσμα από τις τάσεις ή δεν εξαλείφουν την πιθανότητα ζημιάς. Έτσι, κατέληξε στο ότι η σχεδίαση της υπερκατασκευής θα πρέπει να γίνεται ώστε να συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή, ενώ θα πρέπει να αποφεύγονται όλες οι ασυνέχειες στα διαμήκη υλικά.

Τότε ο Montgomerie προσπάθησε να καθορίσει τις αντοχές στα υπερστεγάσματα έτσι ώστε να είναι ικανά να υποστηρίξουν την διαμήκη κάμψη του πλοίου. Αυτό βασίστηκε στην αρχή ότι οι διαμήκεις καμπτικές τάσεις για τις οποίες το πλοίο σχεδιάστηκε, δεν θα πρέπει να υπερβαίνονται καθ' όλη την έκταση του υπερστεγάσματος. Η επιφάνεια της επιμετάλλωσης που απαιτείται στα καταστρώματα, για ένα, δυο και τρία επίπεδα των υπερστεγασμάτων, σταθερά και κυμαινόμενα ύψη καταστρωμάτων, καθορίζεται από τη θεωρία απλής δοκού και είναι συνάρτηση του μήκους του πλοίου. Η θεμελιώδης παραδοχή ήταν ότι ένα υπερστεγάσμα ύψους h_1 (με μη αποτελεσματικές πλευρές) επιβλήθηκε σε μια ικανοποιητική γάστρα με επιφάνεια διατομής A , ώστε να παράγει τη ίδια ροπή αντίστασης όπως πρώτα (χωρίς να επέλθει μεταβολή του πάχους του κύριου καταστρώματος), η επιφάνεια της τομής του καταστρώματος της υπερκατασκευής A_D πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$A_D \geq A \frac{h_1}{c} \frac{I}{I + A(c + h_1)^2} \quad (5.3)$$

Όπου:

- I , η ροπή αδράνειας της αρχικής διατομής
- C , η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα των πιο απομακρυσμένων ινών της αρχικής διατομής

Τέλος, ο Montgomerie, όσον αφορά τα εγκάρσια στοιχεία της κατασκευής, πρότεινε ότι οι δυναμικές φορτίσεις θα πρέπει να λαμβάνονται από τους ενισχυμένους νομείς (deep webs), ενώ όσον αφορά τα ενισχυτικά, θα πρέπει να σχεδιάζονται ειδικώς για τις τοπικές πλευρικές φορτίσεις (local lateral loads).

Peterson and Hansen

Οι Peterson και Hansen [51] τόνισαν ότι θα πρέπει να δίνεται ειδική προσοχή στην εξασφάλιση ομαλής συνέχειας στα υλικά του υπερστεγάσματος και θα πρέπει να παρέχεται ικανοποιητική ενίσχυση σε όλα τα ανοίγματα (βλέπε Παράρτημα Ζ). Συγκεκριμένα, όλες οι γωνίες των θυρών και των παραθύρων θα πρέπει να εξαλειφθούν και να γίνουν καμπύλες, ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις τάσεων και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμής.

Hovgaard

Ο Hovgaard [52] συνέβαλε συστατικά στο πρόβλημα της αλληλεπίδρασης γάστρας-υπερστεγάσματος καθώς ήταν (ίσως) ο πρώτος που αναγνώρισε πλήρως τον σημαντικό ρόλο που παίζουν οι διατμητικές τάσεις στη σύνδεση της γάστρας-υπερστεγάσματος. Ανάπτυξε μια θεωρία διατμητικών τάσεων και την εφάρμοσε στις ασυνέχειες που παρατηρούνται στις κατασκευές των πλοίων. Διαπίστωσε ότι στο μέσον του υπερστεγάσματος, οι διατμητικές τάσεις λόγω συμμετρίας είναι μηδενικές αλλά αυξάνονται σταδιακά σε ένα μέγιστο στα άκρα του υπερστεγάσματος. Έτσι, οι καμπτικές παραμορφώσεις είναι σημαντικές μόνο στην κορυφή του υπερστεγάσματος, ενώ στα άκρα της σύνδεσης των διεπιφανειών οι αστοχίες οφείλονται κυρίως στις διατμητικές τάσεις.

Αναγνώρισε ότι οι τάσεις σε ένα υπερστεγάσμα μπορεί να θεωρηθεί ότι οφείλονται στην υπέρθεση δυο καταστάσεων τάσης:

- Μια λόγω της διάτμησης που προκαλείται από το γεγονός ότι το υπερστεγάσμα είναι ενωμένο σε μια διαμήκως παραμορφωμένη κατασκευή, και
- Μια άλλη λόγω της ανεξάρτητης κάμψης του υπερστεγάσματος, το οποίο σε ένα βαθμό αναγκάζεται να λάβει την ίδια καμπυλότητα με το κατάστρωμα κάτω από αυτό.

Υποστήριξε ότι οι αρμοί διαστολής αυξάνουν τις ασυνέχειες καθώς και ότι η αντοχή της σύνδεσης γάστρας-υπερστεγάσματος στα άκρα της υπερκατασκευής πρέπει να είναι αυξημένη. Για το λόγο αυτό, το κύριο κατάστρωμα αλλά και το υπερστεγάσμα θα πρέπει να ενισχύονται στις περιοχές αυτές.

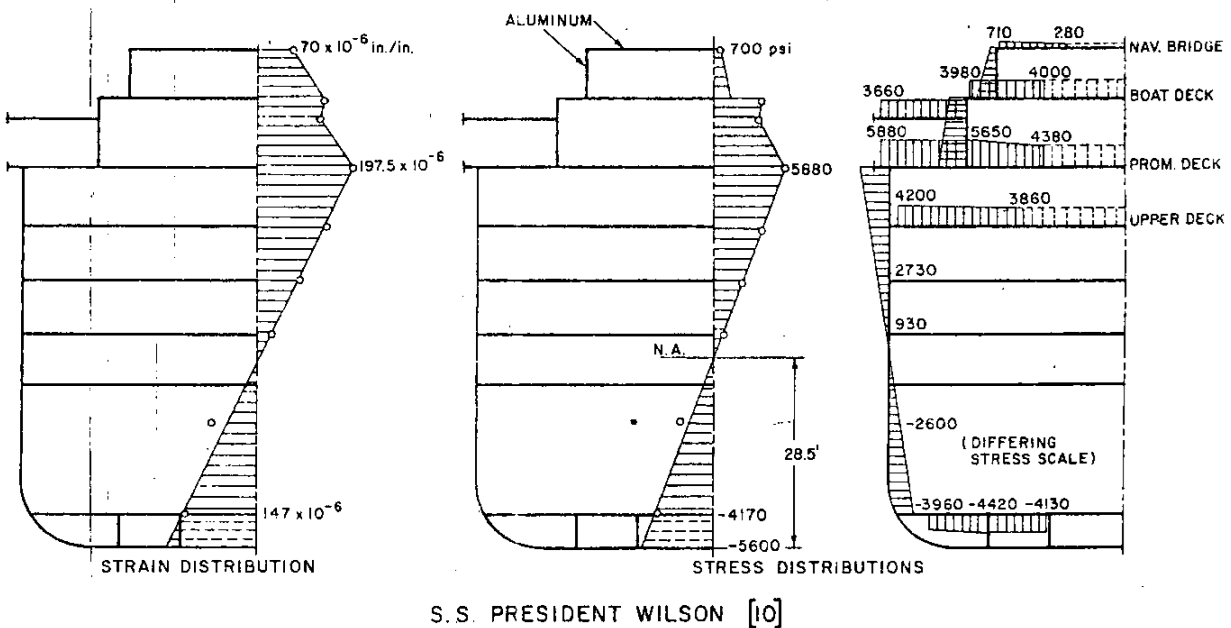
Vasta

Ο Vasta [53] φαίνεται ότι ήταν ο πρώτος που μέτρησε την αποτελεσματικότητα για να χαρακτηρίσει τη συμπεριφορά του υπερστεγάσματος. Αξιολόγησε τη συνεισφορά του υπερστεγάσματος ως τη διαφορά μεταξύ της υπολογισμένης εφελκυστικής τάσης στο κύριο κατάστρωμα εάν δεν υπήρχε υπερστεγάσμα, σ_0 , και της πραγματικής τάσης, $\bar{\sigma}$, στο ίδιο σημείο αλλά με την παρουσία υπερστεγάσματος, όπως εκφράζεται από την κάτω σχέση:

$$\text{μείωση τάσεων(\%)} = 100 * \left(1 - \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0}\right) \quad (5.4)$$

Επίσης, επισήμανε τη σημασία της επίδρασης του μήκους σημειώνοντας ότι αν το υπερστεγάσμα είναι ικανοποιητικά μακρύ μειώνει τις τάσεις στο κύριο κατάστρωμα με την παροχή μιας αυξημένης αποτελεσματικής επιφάνειας η οποία αντιστέκεται στη δύναμη που μεταφέρεται από τη γάστρα.

Πραγματοποίησε κάποια πειράματα σε επιβατηγά πλοία, με μικρό υπερστεγάσμα (βλέπε Σχήμα 5.3). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3, στο ανώτερο κατάστρωμα το οποίο είναι από αλουμίνιο, οι παραμορφώσεις είναι συνεχείς σε αντίθεση με τις τάσεις, όπου παρατηρείται μια ασυνέχεια στο ανώτατο κατάστρωμα. Επίσης, διαπιστώνεται ότι μετά το κύριο κατάστρωμα μειώνονται οι παραμορφώσεις και οι τάσεις, πράγμα που σημαίνει ότι δεν τηρείται η θεωρία απλής δοκού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υπερστεγάσμα είναι μικρό και οι διατμητικές δυνάμεις επιδρούν στην κατανομή των ορθών τάσεων φαινόμενο άκρων (end-effect).



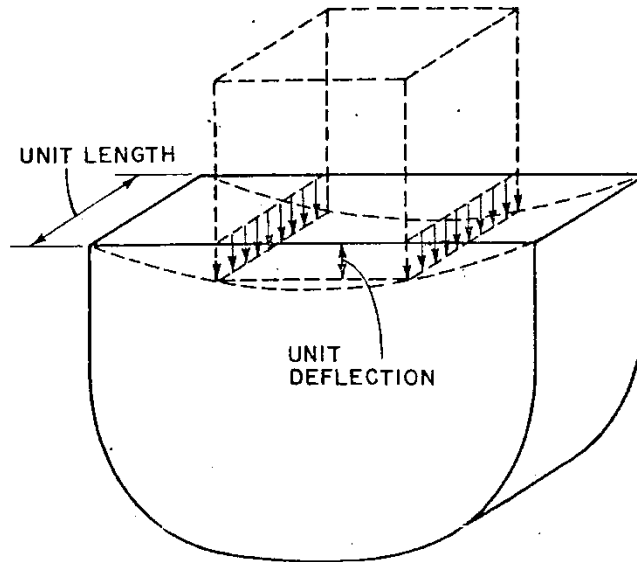
Σχήμα 5.3: Κατανομές παραμορφώσεων και τάσεων στο S.S. PRESIDENT WILSON [54]

5.3 Αναλυτικές Μέθοδοι

5.3.1 Θεωρία δυο δοκών

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην θεωρία απλής δοκού, ο λόγος που δεν λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης οφείλεται στο γεγονός ότι η παραμόρφωση κοντά στα άκρα του υπερστεγάσματος και στις πλευρές της γάστρας λαμβάνεται ίδια. «Αυτό όμως δεν συμβαίνει στη θεωρία δυο δοκών διότι η μέθοδος αυτή απαιτεί την αξιολόγηση της κατακόρυφης ακαμψίας του καταστρώματος στήριξης» [40].

Η κατακόρυφη ακαμψία ορίζεται ως η συνολική κατακόρυφη ορθή δύναμη ανά μονάδα μήκους η οποία πρέπει να εφαρμόζεται κατά το μήκος των γραμμών της ένωσης του υπερστεγάσματος με το κύριο κατάστρωμα ώστε να παράγεται μια μονάδα εκτροπής στις πλευρές του υπερστεγάσματος σχετική με τις πλευρές του πλοίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4. Σημειώνεται ότι η κατακόρυφη ακαμψία αναφέρεται αποκλειστικά στο κατάστρωμα και δεν λαμβάνει υπόψη τις φρακτές που το στηρίζουν και εκφράζεται σε μονάδες δύναμης ανά μονάδα επιφανείας.

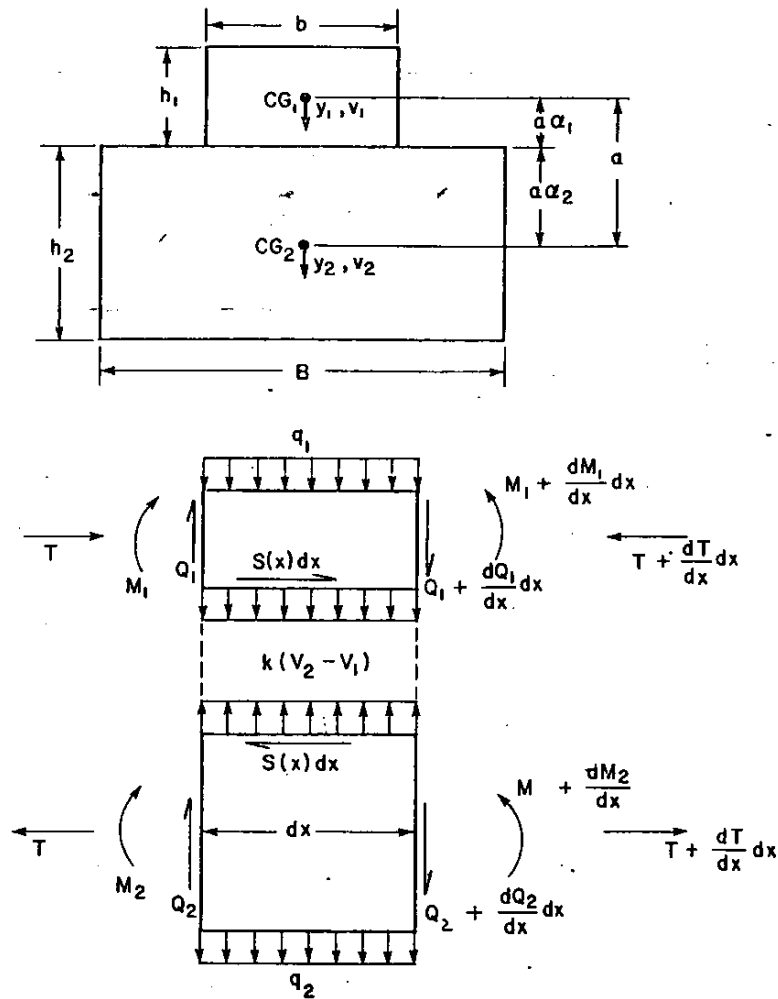


Σχήμα 5.4: Κατακόρυφη ακαμψία στη θεωρία δύο δοκών [40]

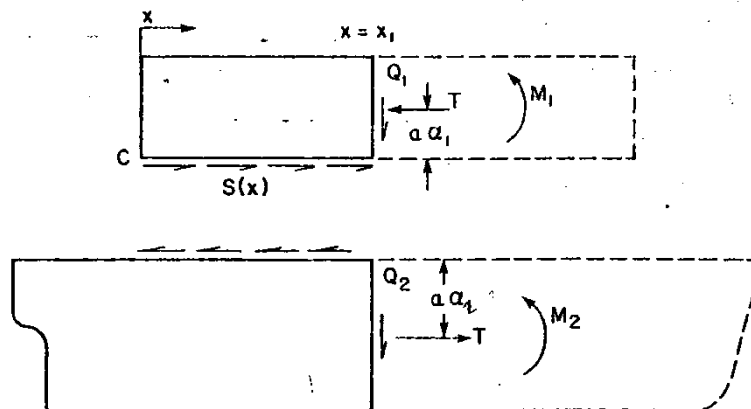
Το υπερστέγασμα και η γάστρα θεωρούνται ότι είναι δοκοί που συμπεριφέρονται γραμμικά ελαστικά. Σε κάθε δοκό ασκείται μια εξωτερική δύναμη, για το υπερστέγασμα η q_1 , ενώ για τη γάστρα η q_2 . Θεωρείται ένα στοιχείο της γάστρας με μήκος dx και το υπερστέγασμα αμέσως ενώνεται με αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Σημειώνεται ότι ο αριθμός 1 δηλώνει ότι αναφερόμαστε στο υπερστέγασμα, ενώ ο αριθμός 2 στη γάστρα.

Ο ουδέτερος άξονας του υπερστεγάσματος βρίσκεται σε απόσταση aa_1 πάνω από το κύριο κατάστρωμα, ενώ ο ουδέτερος άξονας της γάστρας σε απόσταση aa_2 κάτω από το κύριο κατάστρωμα. Οι συντελεστές α_1 και α_2 είναι αδιάστατοι, για τους οποίους ισχύει ότι: $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. Η κατακόρυφη εκτροπή του υπερστεγάσματος στο κέντρο βαρύτητας συμβολίζεται με v_1 , ενώ της γάστρας με v_2 . Λόγω της ακαμψίας του καταστρώματος, οι κατανεμημένες δυνάμεις μεγέθους $k(v_2 - v_1)$ ανά μονάδα μήκους δρουν και στο υπερστέγασμα και στη γάστρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5. Οι οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις που δρουν στο στοιχείο είναι οι $S(x)dx$, όπου όπως έχει ήδη αναφερθεί, $S(x)$ είναι η διατμητική δύναμη ανά μονάδα μήκους που δρα στη σύνδεση γάστρας-υπερστεγάσματος.

Οι εξισώσεις ισορροπίας στην αξονική διεύθυνση x , δηλώνουν ότι σε οποιαδήποτε τομή της γάστρας-υπερστεγάσματος σε απόσταση x_1 , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6, η συνολική αξονική δύναμη είναι μηδενική, εφόσον δεν εφαρμόζεται εξωτερική δύναμη κατά τη διεύθυνση x .



Σχήμα 5.5: Στοιχείο γάστρας-υπερτεγνάματος στη θεωρία δυο δοκών [40]



Σχήμα 5.6: Εξισώσεις ισορροπίας στη θεωρία δυο δοκών [40]

Ως εκ τούτου, όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 5.6, εάν σε απόσταση x_1 από το άκρο του υπερστεγάσματος υπάρχει θλιπτική δύναμη, T , στη γάστρα θα υπάρχει εφελκυστική δύναμη, ίδιου μεγέθους και αντίθετης φοράς, T . Ως επί το πλείστον, σε κάθε τομή x_1 η αξονική δύναμη πρέπει να ισούται με το άθροισμα όλων των διατμητικών δυνάμεων που δρουν στη σύνδεση γάστρας-υπερστεγάσματος μεταξύ του άκρου του υπερστεγάσματος και της θέσης x_1 , όπως εκφράζεται και από τη σχέση:

$$T(x_1) = \int_C^{x_1} S(x) dx \quad (5.5)$$

ή, ισοδύναμα από το Σχήμα 5.5,

$$\frac{dT}{dx} = S(x) \quad (5.6)$$

Η ισορροπία στο κατακόρυφο (Σχήμα 5.5) για το υπερστεγάσμα, εκφράζεται από τη σχέση:

$$Q_1 - q_1 dx - k(v_2 - v_1) dx - \left(Q_1 + \frac{dQ_1}{dx} dx \right) = 0 \quad (5.7)$$

$$\frac{dQ_1}{dx} = -k(v_2 - v_1) - q_1$$

Παρομοίως, η ισορροπία στο κατακόρυφο για τη γάστρα, εκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{dQ_2}{dx} = k(v_2 - v_1) - q_2 \quad (5.8)$$

Η ισορροπία ροπών στο υπερστεγάσμα οδηγεί στην ακόλουθη σχέση:

$$M_1 + Q_1 \frac{dx}{2} + \left(Q_1 + \frac{dQ_1}{dx} dx \right) \frac{dx}{2} - \left(M_1 + \frac{dM_1}{dx} dx \right) - S(x) dx a\alpha_1 = 0 \quad (5.9)$$

Αμελώντας τους μεγαλύτερης τάξης όρους ($\frac{dQ_1}{2dx} dx^2$) και χρησιμοποιώντας τη Σχέση (5.6), για το υπερστεγάσμα ισχύει ότι:

$$\frac{dM_1}{dx} = Q_1 - a\alpha_1 \frac{dT}{dx} \quad (5.10)$$

ενώ, αντίστοιχα, για τη γάστρα, ισχύει ότι:

$$\frac{dM_2}{dx} = Q_2 - a\alpha_2 \frac{dT}{dx} \quad (5.11)$$

Παραγωγίζοντας ως προς x και αντικαθιστώντας με τη Σχέση (5.7) λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση για το υπερστεγάσμα:

$$\frac{d^2M_1}{dx^2} = -k(v_2 - v_1) - q_1 - a\alpha_1 \frac{d^2T}{dx^2} \quad (5.12)$$

ενώ, αντίστοιχα, για τη γάστρα, ισχύει ότι:

$$\frac{d^2M_2}{dx^2} = k(v_2 - v_1) - q_2 - a\alpha_2 \frac{d^2T}{dx^2} \quad (5.13)$$

Στη σύνδεση γάστρας-υπερστεγάσματος οι πρωραίες και οι πρυμναίες παραμορφώσεις πρέπει να ίδιες για λόγους συμβατότητας, έτσι ώστε σε κάθε θέση x_1 να ισχύει ότι:

$$\frac{\sigma_{1b}}{E_1} = \frac{\sigma_{2t}}{E_2} \quad (5.14)$$

όπου:

- σ_{1b} , η τάση στη βάση του υπερστεγάσματος
- σ_{2t} , η τάση στην κορυφή της γάστρας
- E_1 , το μέτρο ελαστικότητας του υπερστεγάσματος
- E_2 , το μέτρο ελαστικότητας της γάστρας

Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί εναλλακτικά (διαφορά ορθών τάσεων λόγω κάμψης και ορθών τάσεων) όπως φαίνεται ακολούθως:

$$\frac{1}{E_1} \left[\frac{M_1 a \alpha_1}{I_1} - \frac{T}{A_1} \right] = \frac{1}{E_2} \left[\frac{M_2 a \alpha_2}{I_2} - \frac{T}{A_2} \right] \quad (5.15)$$

όπου:

- T , η συνολική διατμητική δύναμη που ασκείται μεταξύ γάστρας και υπερστεγάσματος στη διατομή στη θέση x_1
- I_1 , η ροπή αδράνειας της διατομής του υπερστεγάσματος στη θέση x_1
- I_2 , η ροπή αδράνειας της διατομής της γάστρας στη θέση x_2
- A_1 , η επιφάνεια της διατομής του υπερστεγάσματος στη θέση x_1
- A_2 , η επιφάνεια της διατομής της γάστρας στη θέση x_2

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τη συνολική διατμητική δύναμη T , προκύπτει ότι:

$$T = \frac{I_A}{a^2} \left[\frac{a\alpha_1}{\rho I_1} M_1 + \frac{a\alpha_2}{I_2} M_2 \right] \quad (5.16)$$

όπου:

$$I_A = \frac{a^2 \rho A_1 A_2}{A_2 + \rho A_1} \quad (5.17)$$

$$\rho = E_1/E_2 \quad (5.18)$$

Θεωρώντας ότι η γεωμετρία της γάστρας και του υπερστεγάσματος είναι σταθερή κατά την έκταση του υπερστεγάσματος, έτσι ώστε τα A_1 , A_2 , I_1 , I_2 και a παραμένουν σταθερά. Ο λόγος ρ , όπως διαπιστώνεται, είναι ανεξάρτητος του μήκους x . Παραγωγίζοντας δυο φορές προκύπτει ότι:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{I_A}{a^2} \left[\frac{a\alpha_1}{\rho I_1} \frac{d^2 M_1}{dx^2} + \frac{a\alpha_2}{I_2} \frac{d^2 M_2}{dx^2} \right] \quad (5.19)$$

Σε συμφωνία προς τη θεωρία απλής κάμψης, οι καμπτικές ροπές M_1 και M_2 δίνονται από:

$$M_1 = -E_1 I_1 v_1'' = -E_1 I_1 \frac{d^2 v_1}{dx^2} \quad (5.20)$$

$$M_2 = -E_2 I_2 v_2'' = -E_2 I_2 \frac{d^2 v_2}{dx^2} \quad (5.21)$$

Αντικαθιστώντας, τις Σχέσεις (5.19), (5.20), (5.21) στις Σχέσεις (5.12) και (5.13), προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$(\rho I_1 + a_1^2 I_A) v_1'''' - \frac{k}{E_2} (v_2 - v_1) - \frac{q_1}{E_2} + \alpha_1 \alpha_2 I_A v_2'''' = 0 \quad (5.22)$$

$$(I_2 + a_2^2 I_A) v_2'''' + \frac{k}{E_2} (v_2 - v_1) - \frac{q_2}{E_2} + \alpha_1 \alpha_2 I_A v_1'''' = 0 \quad (5.23)$$

Για να βρεθεί λύση σε αυτό το σύστημα εξισώσεων, απαιτούνται οριακές συνθήκες. Μέχρι το σημείο αυτό τηρείται η θεωρία απλής δοκού σε όλο το μήκος του υπερστεγάσματος, αλλά στα άκρα θα υπάρχει κάποια μη μηδενική τιμή των διαμήκων τάσεων. Αυτά θα πρέπει να εξισορροπούνται από μια διαμήκη διατμητική δύναμη συγκεντρωμένη στις συνδέσεις μεταξύ της γάστρας και του υπερστεγάσματος. Η ισορροπία στις ροπές στο σημείο C (Σχήμα 5.6) οδηγεί στις κάτω σχέσεις:

$$M_{1C} = -T_C a \alpha_1 \quad (5.24)$$

$$M_{2C} = M_C - T_C a \alpha_2 \quad (5.25)$$

όπου M_C είναι η εξωτερικά εφαρμοζόμενη καμπτική ροπή στο άκρο αυτό. Η συνύπαρξη των παραμορφώσεων στο άκρο C του υπερστεγάσματος οδηγεί ξανά στις Σχέσεις (5.14) και (5.15). Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (5.19), (5.20) και (5.21), οι δυο οριακές συνθήκες μπορούν τελικά να γραφτούν στην ακόλουθη μορφή:

$$(\rho I_1 + \alpha_1^2 I_A) v_{1C}'' + \alpha_1 \alpha_2 I_A v_{2C}'' = 0 \quad (5.26)$$

$$\alpha_1 \alpha_2 E_2 I_A v_{1C}'' + E_2 (I_2 + \alpha_2^2 I_A) v_{2C}'' = -M_C \quad (5.27)$$

Στο σημείο C η κατακόρυφη διατμητική δύναμη στο υπερστεγάσμα είναι μηδενική, και συνεπώς η Σχέση (5.10) μπορεί να γραφτεί:

$$Q_{1C} = \frac{dM_{1C}}{dx} + a \alpha_1 \frac{dT_C}{dx} = 0 \quad (5.28)$$

Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (5.16), (5.20) και (5.21), η πάνω σχέση οδηγεί στην ακόλουθη:

$$(\rho I_1 + \alpha_1^2 I_A) v_{1C}''' + \alpha_1 \alpha_2 I_A v_{2C}''' = 0 \quad (5.29)$$

Τελικά, στο σημείο C η εκτροπή της γάστρας μπορεί να ληφθεί ως μηδενική εάν η εκτροπή (βέλος κάμψης) μετράται σε σχέση με μια ευθεία γραμμή C-D που συνδέεται στη γάστρα. Ως εκ τούτου,

$$v_{2C} = 0 \quad (5.30)$$

Οι Σχέσεις (5.26), (5.27), (5.29) και (5.30) παρέχουν τέσσερις οριακές συνθήκες, οι οποίες εφαρμόζονται στο άκρο C του υπερστεγάσματος. Παρόμοιες εξισώσεις μπορούσαν να προκύψουν για το άκρο D, έτσι ώστε να είναι οκτώ διαθέσιμες οριακές συνθήκες για τη λύση των (5.22) και (5.23).

Λαμβάνοντας υπόψη τις λύσεις για τα v_1 και v_2 , προκύπτει μια κατανομή των τάσεων κατά την έκταση της γάστρας και του υπερστεγάσματος. Στην κορυφή του υπερστεγάσματος η τάση σ_{1t} δίνεται από:

$$\sigma_{1t} = -\frac{M_1 (h_1 - a \alpha_1)}{I_1} - \frac{I}{A_1} \quad (5.31)$$

ή,

$$\sigma_{1t} = E_1 (h_1 - a \alpha_1) v_1'' - \frac{I}{A_1} \quad (5.32)$$

,ενώ στη βάση του υπερστεγάσματος η τάση σ_{1b} θα είναι:

$$\sigma_{1b} = -\frac{M_1 a \alpha_1}{I_1} - \frac{T}{A_1} \quad (5.33)$$

ή,

$$\sigma_{1b} = -E_1 a \alpha_1 v_1'' - \frac{T}{A_1} \quad (5.34)$$

Στην κορυφή της γάστρας, η τάση σ_{2t} δίνεται από:

$$\sigma_{2t} = -\frac{M_2 a \alpha_2}{I_2} + \frac{T}{A_2} \quad (5.35)$$

ή,

$$\sigma_{2t} = \frac{1}{\rho} \sigma_{1b} \quad (5.36)$$

Στον πυθμένα της γάστρας, η τάση σ_{2b} δίνεται από:

$$\sigma_{2b} = -\frac{M_2 (h_2 - a \alpha_2)}{I_2} + \frac{T}{A_2} \quad (5.37)$$

ή,

$$\sigma_{2b} = -E_2 (h_2 - a \alpha_2) v_2'' + \frac{T}{A_2} \quad (5.38)$$

όπου:

- h_1 , είναι το ύψος του υπερστεγάσματος
- h_2 , είναι το κοίλο της γάστρας

Κατά συνέπεια, με δεδομένα τα v_1'' και v_2'' , η αξονική φόρτιση T μπορεί να υπολογισθεί από τη Σχέση (5.16) χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (5.20) και (5.21), και εν τέλει μπορεί να προκύψει η κατανομή των τάσεων σε όλο το υπερστεγάσμα και τη γάστρα.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι εάν χρησιμοποιούνται μπρακέτα εξάλειψης της διάτμησης, οι μόνες δυνάμεις αλληλεπίδρασης που δρουν μεταξύ της γάστρας και του υπερστεγάσματος είναι οι κατακόρυφες δυνάμεις, έτσι ώστε οι κύριες Σχέσεις (5.22) και (5.23) παίρνουν την ακόλουθη μορφή:

$$E_1 I_1 v_1'''' - k(v_2 - v_1) - q_1 = 0 \quad (5.39)$$

$$E_2 I_2 v_2'''' - k(v_2 - v_1) - q_2 = 0 \quad (5.40)$$

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι οριακές συνθήκες που προκύπτουν από τις πάνω εξισώσεις δεν ερμηνεύουν με ακρίβεια την κατασκευαστική συμπεριφορά στα άκρα του υπερστεγάσματος C και D. Στην πράξη, οι συγκεντρωμένες οριζόντιες διατμητικές δυνάμεις T_C και T_D δεν υπάρχουν, και κατά αυτό τον τρόπο η θεωρία είναι καθαρά προσεγγιστική. Εάν ένα υπερστεγάσμα δεν είναι πολύ κοντό (σε μήκος),

τότε μακριά από τα άκρα αυτά τα τοπικά φαινόμενα δεν αναμένεται να επηρεάσουν την λύση του συστήματος. Έτσι, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη θεωρία αυτή για κάθε θέση κοντά στο μέσο του υπερστεγάσματος είναι επαρκώς ακριβή, για ένα υπερστέγασμα μεσαίου ή μεγάλου μήκους (κρουαζιερόπλοια).

Terazawa

Ο Terazawa [55] δίνει διάφορους ορισμούς της αποτελεσματικότητας του υπερστεγάσματος, όπως φαίνεται ακολούθως:

$$\text{αποτελεσματικότητα} = \frac{\sigma_{2max}}{\bar{\sigma}} \quad (5.41)$$

ή, εναλλακτικά,

$$\text{αποτελεσματικότητα} = \frac{\sigma_{1t}}{\sigma_0} \quad (5.42)$$

όπου:

- σ_{2max} , η τάση στο κύριο κατάστρωμα με την παρουσία μιας πλήρως αποτελεσματικής υπερκατασκευής
- $\bar{\sigma}$, η πραγματική τάση στο ίδιο σημείο αλλά με την παρουσία υπερστεγάσματος
- σ_{1t} , η πραγματική διαμήκης τάση στην κορυφή του υπερστεγάσματος
- σ_0 , η εφελκυστική τάση στο κύριο κατάστρωμα εάν δεν υπήρχε υπερστέγασμα

Επίσης, ο Terazawa έχει υπογραμμίσει τη σχέση μεταξύ του μήκους της αποτελεσματικής υπερκατασκευής και του λόγου του μήκους προς το πλάτος της. Από τη μελέτη αυτή εξήγαγε το συμπέρασμα ότι μια υπερκατασκευή με μήκος πάνω από το 70% του μήκους του πλοίου είναι πλήρως αποτελεσματική με αποτέλεσμα η διαμήκης κατανομή των τάσεων να ακολουθεί την απλή θεωρία δοκού.

Τέλος, σε συνεργασία με τον Yagi, παρουσίασε τη διόρθωση της υστέρησης διάτμησης στη θεωρία των δύο-δοκών. Οι τάσεις υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την ενεργειακή προσέγγιση και υποθέτοντας προκαθορισμένα μοτίβα τάσεων για την κατασκευή. Θεώρησαν επίσης την επίδραση των πλευρικών οπών στη συμπεριφορά της δομής.

Chapman

Ο Chapman [56] πραγματοποίησε και αυτός διάφορα πειράματα σε ενισχυμένες και μη δοκούς, με ή χωρίς υπερστέγασμα, προκειμένου να εξετάσει τη συνεισφορά του υπερστεγάσματος στη διαμήκη αντοχή. Διαπίστωσε ότι η εκτροπή (βέλος κάμψης) του υπερστεγάσματος γινόταν ίδια με αυτή της γάστρας καθώς το πλάτος του αυξανόταν (περίπτωση υπερκατασκευής). Παρατήρησε ότι καθώς το μήκος του υπερστεγάσματος μειωνόταν, μειώνονταν και οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο υπερστέγασμα ενώ ταυτόχρονα, προκειμένου να επιτευχθεί ισορροπία, οι τάσεις στο κύριο κατάστρωμα αυξάνονταν. Συμπέρανε επίσης, ότι οι αρμοί διαστολής ενώ μειώνουν τις των τάσεις στο υπερστέγασμα, το αναγκάζουν ταυτόχρονα να πάρει μια καμπυλότητα αντίθετη από αυτή της γάστρας.

Επίσης, διαπίστωσε ότι εάν τοποθετηθούν αρκετές εγκάρσιες φρακτές (τέσσερις ή περισσότερες), η ακαμψία έχει μικρή επίδραση στα αποτελέσματα. Αυτό δείχνει και την αυξημένη σημασία των άκαμπτων συνδέσεων (φρακτές) στη συνεργασία γάστρας-υπερστεγάσματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ακαμψία k δεν έχει πρακτική επίδραση στα αποτελέσματα και μπορεί να θεωρηθεί μηδενική. Από την άλλη, η ισαπόσταση και ο αριθμός των φρακτών είναι πολύ σημαντικός. Εάν υπάρχουν πολύ λίγες, η τάση στην κορυφή του υπερστεγάσματος μπορεί να υπερβεί αυτήν που προβλέπεται από την απλή θεωρία κάμψης (βλέπε Σχήμα 4.17).

Ο Charman χρησιμοποίησε πεπερασμένες διαφορές για να επιλύσει τις Σχέσεις (5.22) και (5.23). Αυτή η μέθοδος είναι πιο γενική καθώς δεν έχει περιορισμούς για τις γεωμετρίες της γάστρας και του υπερστεγάσματος με την έννοια ότι τους επιτρέπει να μεταβάλλονται κατά το μήκος του υπερστεγάσματος. Από την άλλη, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών απαιτεί τη χρήση υπολογιστή.

Το πλεονέκτημα της μεθόδου του Charman (σε σχέση με του Bleich που παρουσιάζεται εν συνεχεία) είναι ότι επιτρέπει στις εγκάρσιες φορτίσεις και στη γεωμετρία της διατομής να ποικίλλουν κατά το διάμηκες, παρέχοντας έτσι μεγαλύτερη ευελιξία. Ωστόσο, το πλεονέκτημα αυτό εξισορροπείται με το γεγονός ότι απαιτούνται πολύπλοκοι υπολογισμοί, οι οποίοι δεν μπορούν να γίνουν με το χέρι.

Όπως αναφέρθηκε, ο Charman έλυσε τις Σχέσεις (5.22) και (5.23) με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών. Είναι εξυπηρετικό να προηγηθεί μετασχηματισμός των μεταβλητών και να ξαναγραφτούν οι εξισώσεις στην παρακάτω μορφή:

$$\bar{v}'''' + \frac{k}{E_2}(\beta_1 + \beta_2)\bar{v} + \frac{q_1\beta_1}{E_2} - \frac{q_2\beta_2}{E_2} = 0 \quad (5.43)$$

$$\hat{v}'''' - \frac{\beta_1(1 - \lambda_1\lambda_2)}{(1 + \lambda_1)(1 + \lambda_2)}\left(\frac{q_1}{E_2} + \frac{q_2}{E_2}\right) = 0 \quad (5.44)$$

όπου:

- $\bar{v} = v_2 - v_1$
- $\bar{v} = v_1 + \frac{\beta_1}{\beta_2}v_2$
- $\beta_1 = \frac{1+\lambda_2}{(\rho I_1 + \alpha_1^2 I_A)(1-\lambda_1\lambda_2)}$
- $\beta_2 = \frac{1+\lambda_1}{(I_2 + \alpha_2^2 I_A)(1-\lambda_1\lambda_2)}$
- $\lambda_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 I_A}{\rho I_1 + \alpha_1^2 I_A}$
- $\lambda_2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 I_A}{I_2 + \alpha_2^2 I_A}$

Σημειώνεται ότι η Σχέση (5.44) είναι ανεξάρτητη της ακαμψίας του καταστρώματος k .

Συνεχίζοντας, σημειώνεται ότι η Σχέση (5.16) είναι έγκυρη σε κάθε διαμήκης θέση του υπερστεγάσματος. Για το άκρο C (είτε και για το άκρο D είτε και για οποιοδήποτε άλλο σημείο) ισχύει ότι:

$$M_C = \frac{1 + \lambda_1 a \alpha_1}{\lambda_1 \beta_1} \rho I_1 T_C \quad (5.45)$$

Αντικαθιστώντας την πάνω σχέση στις Σχέσεις (5.24) και (5.25) λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα για τις ροπές M_{1C} και M_{2C} :

$$M_{1C} = -\rho I_1 \frac{\lambda_1 \beta_2}{1 + \lambda_1} M_C \quad (5.46)$$

$$M_{2C} = I_2 \frac{\beta_2}{1 + \lambda_1} M_C \quad (5.47)$$

Χρησιμοποιώντας τις Σχέσεις (5.20) και (5.21) στις πάνω εξισώσεις, λαμβάνονται τα ακόλουθα αποτελέσματα:

$$v_{1C}'' = \frac{1}{E_2} \frac{\lambda_1 \beta_2}{1 + \lambda_1} M_C \quad (5.48)$$

$$v_{2C}'' = -\frac{1}{E_2} \frac{\beta_2}{1 + \lambda_1} M_C \quad (5.49)$$

Και επειδή $Q_C = dM_C/dx$, προκύπτει ότι:

$$v_{1C}''' = \frac{1}{E_2} \frac{\lambda_1 \beta_2}{1 + \lambda_1} Q_C \quad (5.50)$$

$$v_{2C}''' = -\frac{1}{E_2} \frac{\beta_2}{1 + \lambda_1} Q_C \quad (5.51)$$

Οι παραπάνω οριακές συνθήκες, Σχέσεις (5.48)-(5.51), μπορούν να γραφτούν αφού προηγουμένως γίνει μετασχηματισμός των μεταβλητών. Προκύπτει ότι:

$$\bar{v}_C'' = -\frac{1}{E_2} \beta_2 M_C \quad (5.52)$$

$$\hat{v}_C'' = \frac{1}{E_2} \frac{\lambda_1 \beta_2 - \beta_1}{1 + \lambda_1} M_C \quad (5.53)$$

$$\bar{v}_C''' = -\frac{1}{E_2} \beta_2 Q_C \quad (5.54)$$

$$\hat{v}_C''' = \frac{1}{E_2} \frac{\lambda_1 \beta_2 - \beta_1}{1 + \lambda_1} Q_C \quad (5.55)$$

Εάν τα άκρα του υπερστεγάσματος συγκρατούνται από τις φρακτές τότε οι δυο τελευταίες σχέσεις αντικαθίστανται από:

$$\bar{v}_C = 0 \quad (5.56)$$

$$\hat{v}_C = 0 \quad (5.57)$$

Στο άλλο άκρο του υπερστεγάσματος D, παρόμοιες οριακές συνθήκες με τις Σχέσεις (5.52)-(5.57), μπορούν να προκύψουν.

Προκειμένου να εφαρμοστεί η λύση των πεπερασμένων διαφορών, η γάστρα υποδιαιρείται σε πεπερασμένη μήκη Δx , όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, έτσι ώστε η ακαμψία k , οι ιδιότητες της γεωμετρίας και η φόρτιση να παραμένουν σταθερά σε όλο το μήκος Δx . Σε κάθε θέση i κατά το μήκος της γάστρας, οι τιμές των παραγώγων του \bar{v} δίνονται από:

$$\bar{v}_i' \cong \frac{\bar{v}_{i+1} - \bar{v}_{i-1}}{2\Delta x} \quad (5.58)$$

$$\bar{v}_i'' \cong \frac{\bar{v}_{i-1} + \bar{v}_{i+1} - 2\bar{v}_i}{\Delta x^2} \quad (5.59)$$

$$\bar{v}_i''' \cong \frac{\bar{v}_{i+2} - \bar{v}_{i-2} - 2\bar{v}_{i+1} + 2\bar{v}_{i-1}}{2\Delta x^3} \quad (5.60)$$

$$\bar{v}_i'''' \cong \frac{6\bar{v}_i + \bar{v}_{i+1} + \bar{v}_{i-2} - 4\bar{v}_{i+1} - 4\bar{v}_{i-1}}{\Delta x^4} \quad (5.61)$$

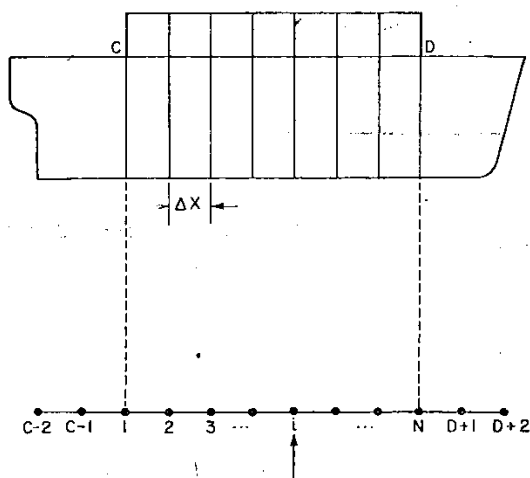
Παρόμοιες εκφράσεις ισχύουν για τις παραγώγους του \hat{v} . Όσο το μήκος Δx μειώνεται τόσο τα αποτελέσματα γίνονται πιο ακριβή.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις προσεγγίσεις των πεπερασμένων διαφορών για τις παραγώγους των μεταβλητών \bar{v} και \hat{v} , οι Σχέσεις (5.43) και (5.44) μπορούν να γραφτούν με την ακόλουθη μορφή:

$$6\hat{v}_i + \hat{v}_{i+2} + \hat{v}_{i-2} - 4\hat{v}_{i+1} - 4\hat{v}_{i-1} - \frac{\Delta x^4 \beta_{1i}(1 - \lambda_{1i}\lambda_{2i})}{(1 + \lambda_{1i})(1 + \lambda_{2i})} \left[\frac{q_{1i}}{E_{2i}} + \frac{q_{2i}}{E_{2i}} \right] = 0 \quad (5.62)$$

$$6\bar{v}_i + \bar{v}_{i+2} + \bar{v}_{i-2} - 4\bar{v}_{i+1} - 4\bar{v}_{i-1} + \frac{k_i}{E_2} \Delta x^4 (\beta_{1i} + \beta_{2i}) \bar{v}_i - \frac{\beta_{2i} q_{2i}}{E_{2i}} + \frac{\beta_{1i} q_{1i}}{E_{2i}} = 0 \quad (5.63)$$

όπου ο όρος i στα k_i , q_{1i} , q_{2i} , β_{1i} , β_{2i} , λ_{1i} , λ_{2i} , E_{1i} και E_{2i} υποδεικνύει ότι οι ποσότητες αυτές αναφέρονται στο σταθμό i .



Σχήμα 5.7: Υποδιαίρεση γάστρας σε σταθμούς σύμφωνα με τη μέθοδο του Charpan [40]

Οι δυο τελευταίες εξισώσεις εφαρμόζονται σε όλους τους σταθμούς (1 έως N), όπου N-1 είναι ο συνολικός αριθμός των διαστημάτων στα οποία το υπερστέγασμα διαιρείται (βλέπε Σχήμα 5.7). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7, πέρα από τα άκρα C και D δυο επιπλέον «φανταστικά» διαστήματα πρέπει να ορισθούν. Στα διαστήματα αυτά, οι τιμές των μεταβλητών \bar{v} και \hat{v} , επεξηγούνται εν συνεχεία.

Στο αριστερό άκρο του υπερστεγάσματος, σταθμός 1, οι οριακές συνθήκες, Σχέσεις (5.52)-(5.55), οδηγούν στις ακόλουθες εξισώσεις, θεωρώντας ότι τα άκρα των φρακτών δεν υπάρχουν:

$$\hat{v}_2 + \hat{v}_{C-1} - 2\hat{v}_1 = \Delta x^2 \frac{M_C}{E_{21}} \frac{\lambda_{11}\beta_{21} - \beta_{11}}{1 + \lambda_{11}} \quad (5.64)$$

$$\bar{v}_2 + \bar{v}_{C-1} - 2\bar{v}_1 = -\Delta x^2 \frac{M_C}{E_{21}} \beta_{21} \quad (5.65)$$

$$\hat{v}_3 - \hat{v}_{C-2} - 2\hat{v}_2 + 2\hat{v}_{C-1} = 2\Delta x^3 \frac{Q_C}{E_{21}} \frac{\lambda_{11}\beta_{21} - \beta_{11}}{1 + \lambda_1} \quad (5.66)$$

$$\bar{v}_3 - \bar{v}_{C-2} - 2\bar{v}_2 + 2\bar{v}_{C-1} = -2\Delta x^3 \frac{Q_C}{E_{21}} \beta_{21} \quad (5.67)$$

Αυτές οι εξισώσεις μπορούν αν επιλυθούν για τις τιμές των μεταβλητών \bar{v} και \hat{v} στους «φανταστικούς» σταθμούς C-1 και C-2:

$$\hat{v}_{C-1} = -\hat{v}_2 + 2\hat{v}_1 + \Delta x^2 \frac{M_C}{E_{21}} \frac{\lambda_{11}\beta_{21} - \beta_{11}}{1 + \lambda_{11}} \quad (5.68)$$

$$\bar{v}_{C-1} = -\bar{v}_2 + 2\bar{v}_1 - \Delta x^2 \frac{M_C}{E_{21}} \beta_{21} \quad (5.69)$$

$$\hat{v}_{C-2} = \hat{v}_3 - 4\hat{v}_2 + 4\hat{v}_1 + 2\Delta x^2 \frac{M_C}{E_{21}} \frac{\lambda_{11}\beta_{21} - \beta_{11}}{1 + \lambda_{11}} - \Delta x^3 \frac{Q_C}{E_{21}} \frac{\lambda_{11}\beta_{21} - \beta_{11}}{1 + \lambda_1} \quad (5.70)$$

$$\bar{v}_{C-2} = \bar{v}_3 - 4\bar{v}_2 + 4\bar{v}_1 - 2\Delta x^2 \frac{M_C}{E_{21}} \beta_{21} + \Delta x^3 \frac{Q_C}{E_{21}} \beta_{21} \quad (5.71)$$

Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να αποκτηθούν για τα \hat{v}_{D+1} , \hat{v}_{D+2} , \bar{v}_{D+1} και \bar{v}_{D+2} . Ως εκ τούτου, υπάρχουν $2(N+4)$ άγνωστοι που εντάσσονται στο πρόβλημα, οι τιμές των μεταβλητών \bar{v} και \hat{v} στους σταθμούς C-2, C-1, D+1, D+2 και 1 μέχρι N. Σε κάθε σταθμό 1 έως N οι Σχέσεις (5.62) και (5.63) εφαρμόζονται και επιπροσθέτως υπάρχουν τέσσερις Σχέσεις (5.68)-(5.71) για τις τιμές των \bar{v} και \hat{v} στα C-1 και C-2, και τέσσερις παρόμοιες εξισώσεις οι οποίες ορίζουν τις μεταβλητές στα D+1 και D+2. Ως εκ τούτου, οι άγνωστοι είναι $2(N+4)$ και οι εξισώσεις είναι επίσης $2(N+4)$, με αποτέλεσμα το σύστημα να μπορεί να επιλυθεί. Ως αποτέλεσμα, σε κάθε θέση κατά το μήκος του υπερστεγάσματος οι τάσεις μπορούν να ληφθούν από τις Σχέσεις (5.31)-(5.38), σημειώνοντας ότι:

$$v_2 = \frac{\hat{v} + \bar{v}}{1 + \beta_1/\beta_2} \quad (5.72)$$

$$v_1 = v_2 - \bar{v} \quad (5.73)$$

Εάν το άκρο του υπερστεγάσματος C περιορίζεται από μια φρακτή, τότε οι μεταβλητές \bar{v} και \hat{v} είναι μηδενικές στο σταθμό 1, όπως δίνεται από τις Σχέσεις (5.56) και (5.57), στις οποίες θεωρείται ότι $\hat{v}_1 = \bar{v}_1 = 0$. Επιπροσθέτως, οι οριακές συνθήκες (5.52) και (5.53) εφαρμόζονται, έτσι ώστε στο C-1 οι μεταβλητές \bar{v} και \hat{v} δίνονται από τις (5.68) και (5.69). Στο C-2, οι \bar{v} και \hat{v} είναι μηδενικές. Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν όταν το άκρο του υπερστεγάσματος D περιορίζεται από μια φρακτή.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών έχει τη σημαντική ικανότητα να κάνει εφικτή την ανάλυση περιπτώσεων στις οποίες εγκάρσιες φρακτές στηρίζουν το κύριο κατάστρωμα σε αρκετές θέσεις κατά το μήκος του υπερστεγάσματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι λύσεις πρέπει να λαμβάνονται για κάθε διάστημα μεταξύ των συνεχών φρακτών, και επιπλέον οι συνθήκες στις (5.52)-(5.57) αποκτώνται θεωρώντας συνεχή την κλίση και την καμπυλότητα σε κάθε ενδιάμεση φρακτή. Όταν $\bar{v} = 0$, θεωρείται ότι οι φρακτές μπορούν αποτελεσματικά να αποτρέψουν τη σχετική μετακίνηση της γάστρας ως προς το υπερστεγάσμα. Έτσι, για να ανταποκρίνεται στην παρούσα υπόθεση, οι συνδέσεις θα πρέπει να είναι επαρκούς αντοχής.

Crawford

Ο Crawford [57], [58] φαίνεται ότι ήταν ο πρώτος ερευνητής που ανέπτυξε μια θεωρία για την ανάλυση μακρών υπερκατασκευών με βάση την θεωρία απλής δοκού. Αναγνώρισε ότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στις συνδέσεις γάστρας-υπερστεγάσματος είναι στην ουσία διαμήκη διατμητικά φορτία και κατακόρυφα φορτία. Θεωρώντας ως δυο ανεξάρτητες απλές δοκούς τη γάστρα και το υπερστεγάσμα, οι σχετικές εκτροπές μπορούν να βρεθούν από τις κατανομές των καμπτικών ροπών.

Η θεωρία του λαμβάνει υπόψη την ακαμψία του καταστρώματος και του συστήματος στήριξης, ένας παράγοντας που αμελείται από τη θεωρία απλής δοκού. Η μέθοδος του Crawford επιβεβαίωσε την ύπαρξη των υψηλών διαμήκων διατμητικών τάσεων στα άκρα των μακρών υπερστεγαμάτων. Ωστόσο, οι σχέσεις που χρησιμοποιεί ο Crawford είναι αρκετά μακροσκελής και λίγο ευέλικτη και κατά συνέπεια δεν έχουν εφαρμοστεί σε πραγματική κατασκευαστική σχεδίαση πλοίου.

Bleich

Ο Bleich [59], [60], μετά από την ανάπτυξη της μεθόδου του Crawford, δημιούργησε τη δική του, η οποία βασίζεται στην θεωρία απλής δοκού. Η μεθοδός του οδηγεί σε απλοποιημένα αποτελέσματα και αποτελεί μια άμεση μέθοδο υπολογισμού των τάσεων.

Πρότεινε διαφορετικές μεθόδους για την επίλυση των σχέσεων (5.22) και (5.23). Η μέθοδος που πρότεινε είναι καθαρά αναλυτική και πολύ απλή στην εφαρμογή και ως εκ τούτου είναι πολύ χρήσιμη για μια γρήγορη εκτίμηση των τάσεων στο μέσον του μήκους του υπερστεγάσματος.

Έλυσε, λοιπόν, τις εξισώσεις (5.22) και (5.23) εφαρμόζοντας το θεώρημα της στάσιμης δυναμικής ενέργειας και αυτό τον οδήγησε στις οριακές συνθήκες (5.26), (5.27), (5.29) και (5.30). Το υπερστεγάσμα και η γάστρα θεωρείται ότι έχουν κατασκευαστεί από το ίδιο υλικό, έτσι ώστε $\rho=1$. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί και στην περίπτωση που δεν είναι από ίδια υλικά, αντικαθιστώντας το A_1 και το I_1 με τα ρA_1 και ρI_1 , αντίστοιχα. Εν συνεχεία, έλυσε το σύστημα των σχέσεων (5.22) και (5.23) για δυο διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης A και B, θεωρώντας ότι οι ιδιότητες της γεωμετρίας του υπερστεγάσματος και της γάστρας παραμένουν σταθερές κατά το μήκος του υπερστεγάσματος l .

Στην κατάσταση φόρτισης A, οι εξωτερικές φορτίσεις q_1 και q_2 και η εγκάρσια διάτμηση στα άκρα του υπερστεγάσματος (Q_C και Q_D) είναι μηδενικές, και η μόνη εξωτερική φόρτιση που εφαρμόζεται είναι μια σταθερή καμπτική ροπή κατά το μήκος του υπερστεγάσματος, τέτοια ώστε να ισχύει ότι:

$$M_C = M_D = M \quad (5.74)$$

Στην κατάσταση φόρτισης B, οι εξωτερικές φορτίσεις q_1 και q_2 είναι σταθερές κατά το μήκος του υπερστεγάσματος, ενώ οι ροπές στα άκρα του είναι μηδενικές ($M_C=M_D=0$). Στην περίπτωση αυτή, η ισορροπία απαιτεί τις εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις Q_C και Q_D να είναι ίσες, έτσι ώστε να ισχύει ότι:

$$Q_C = -Q_D = l \frac{q_1 + q_2}{2} \quad (5.75)$$

Έτσι, η καμπτική ροπή στη μέση τομή ($x=0$), λόγω των φορτίσεων q_1 και q_2 , θα είναι ίση με:

$$M = l^2 \frac{q_1 + q_2}{8} \quad (5.76)$$

Επίσης, θεώρησε ότι η ακαμψία του κυρίου καταστρώματος k είναι επίσης σταθερή και έχει τιμή ίση με τη μέση τιμή της ακαμψίας κατά το μήκος του υπερστεγάσματος. Τέλος, η θεωρία του Bleich υποθέτει ότι το μέσον του υπερστεγάσματος ταυτίζεται με το μέσον του πλοίου, όπου $x=0$, και περί του σημείου αυτού υπάρχει συμμετρία.

Για την εφαρμογή της θεωρίας του Bleich, με δεδομένες τις πραγματικές ροπές M_C και M_D που ασκούνται στα άκρα του υπερστεγάσματος αλλά και δεδομένη την πραγματική ροπή που ασκείται στο μέσον του πλοίου M_{midship} ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία για την εύρεση της κατανομής των τάσεων στη διατομή γάστρας-υπερστεγάσματος (βλέπε Σχήμα 5.9):

- Σε πρώτη φάση ο υπολογισμός των παραμέτρων I_A , σχέση (5.17), μ και u , γίνεται χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες σχέσεις:

$$\mu = \frac{I_1 + \alpha_1 I_A}{I_2 + \alpha_2 I_A} \quad (5.77)$$

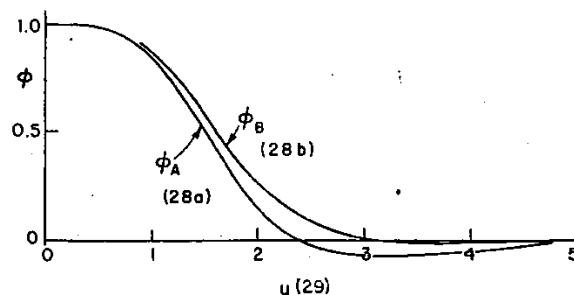
$$u = \left[\frac{k}{4E} \frac{1 + \mu}{\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2} \right]^{1/4} * l/2 \quad (5.78)$$

Σε περίπτωση όπου τα υλικά γάστρας και υπερστεγάσματος διαφέρουν, τότε $E_1 \neq E_2$. Στην περίπτωση αυτή, προκύπτουν δυο διαφορετικά u , u_1 και u_2 . Υπογραμμίζεται ξανά ότι στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να αντικατασταθεί το A_1 και το I_1 με τα ρA_1 και ρI_1 , αντίστοιχα.

- Σε δεύτερη φάση υπολογίζονται οι συντελεστές ϕ_A και ϕ_B , από τις κάτω εξισώσεις (με ακρίβεια) ή το ακόλουθο σχήμα (κατά προσέγγιση):

$$\phi_A = \frac{\sin u \cosh u + \cos u \sinh u}{\sin u \cos u + \cosh u \sinh u} \quad (5.79)$$

$$\phi_B = \frac{2 \sin u \sinh u}{u(\sin u \cos u + \cosh u \sinh u)} \quad (5.80)$$



Σχήμα 5.8: Κατανομή των συντελεστών ϕ_A και ϕ_B [40]

Σε περίπτωση όπου το υλικό διαφέρει, τότε για τα διαφορετικά u_1 και u_2 , που έχουν προκύψει, βρίσκω τους αντίστοιχους συντελεστές, δηλαδή τα ϕ_{A1} , ϕ_{A2} , ϕ_{B1} και ϕ_{B2} .

- Σε τρίτη φάση υπολογίζονται οι τάσεις για τις δυο καταστάσεις φόρτισης, αλλά και με βάση τις κάτω σχέσεις:

- Για σημείο της γάστρας, σε περίπτωση όπου γάστρα-υπερστεγάσμα είναι από ίδιο υλικό:

$$\sigma_{A2} = \sigma_{NA} + \phi_A \Delta \sigma_{A2} \quad \text{και} \quad \sigma_{B2} = \sigma_{NB} + \phi_B \Delta \sigma_{B2} \quad (5.81)$$

- Για σημείο της γάστρας, σε περίπτωση όπου γάστρα-υπερστεγάσμα δεν είναι από ίδιο υλικό:

$$\sigma_{A2} = \sigma_{NA} + \varphi_{A2}\Delta\sigma_{A2} \text{ και } \sigma_{B2} = \sigma_{NB} + \varphi_{B2}\Delta\sigma_{B2} \quad (5.82)$$

- Για σημείο του υπερστεγάσματος, σε περίπτωση όπου γάστρα-υπερστεγάσμα είναι από ίδιο υλικό:

$$\sigma_{A1} = \sigma_{NA} + \varphi_A\Delta\sigma_{A1} \text{ και } \sigma_{B1} = \sigma_{NB} + \varphi_B\Delta\sigma_{B1} \quad (5.83)$$

- Για σημείο του υπερστεγάσματος, σε περίπτωση όπου γάστρα-υπερστεγάσμα δεν είναι από ίδιο υλικό:

$$\sigma_{A1} = \sigma_{NA} + \varphi_{A1}\Delta\sigma_{A1} \text{ και } \sigma_{B1} = \sigma_{NB} + \varphi_{B1}\Delta\sigma_{B1} \quad (5.84)$$

με:

$$\sigma_{NA} = \frac{M_A y}{I} \quad (5.85)$$

$$\sigma_{NB} = \frac{M_B y}{I} \quad (5.86)$$

$$\Delta\sigma_{A1} = \frac{\mu M_A}{(1 + \mu)(\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2)} \left[\frac{I_A}{a A_2} (\alpha_1 - \mu \alpha_2) - y_1 \right] \quad (5.87)$$

$$\Delta\sigma_{A2} = \frac{\mu M_A}{(1 + \mu)(\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2)} \left[\frac{I_A}{a A_2} (\alpha_1 - \mu \alpha_2) - y_2 \right] \quad (5.88)$$

$$\Delta\sigma_{B1} = \frac{\mu M_B}{(1 + \mu)(\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2)} \left[\frac{I_A}{a A_2} (\alpha_1 - \mu \alpha_2) - y_1 \right] \quad (5.89)$$

$$\Delta\sigma_{B2} = \frac{\mu M_B}{(1 + \mu)(\alpha_2 I_1 + \mu \alpha_1 I_2)} \left[\frac{I_A}{a A_2} (\alpha_1 - \mu \alpha_2) - y_2 \right] \quad (5.90)$$

Όπου:

- $I = I_1 + I_2 + I_A$, η ροπή αδράνειας
- y , η κατακόρυφη απόσταση του υπό εξέταση σημείου από τον ουδέτερο άξονα όλης της διατομής
- $M_A = \frac{M_C + M_D}{2}$, η καμπτική ροπή στην περίπτωση φόρτισης A στο μέσον του πλοίου
- $M_B = M_{midship} - \frac{M_C + M_D}{2}$, η καμπτική ροπή στην περίπτωση φόρτισης B στο μέσον του πλοίου

- Σε τέταρτη και τελευταία φάση υπολογίζονται οι τελικές τάσεις στη γάστρα και στο υπερστέγασμα, με το άθροισμα αυτών που προκύπτουν για τις καταστάσεις φόρτισης A και B, όπως φαίνεται ακολούθως:

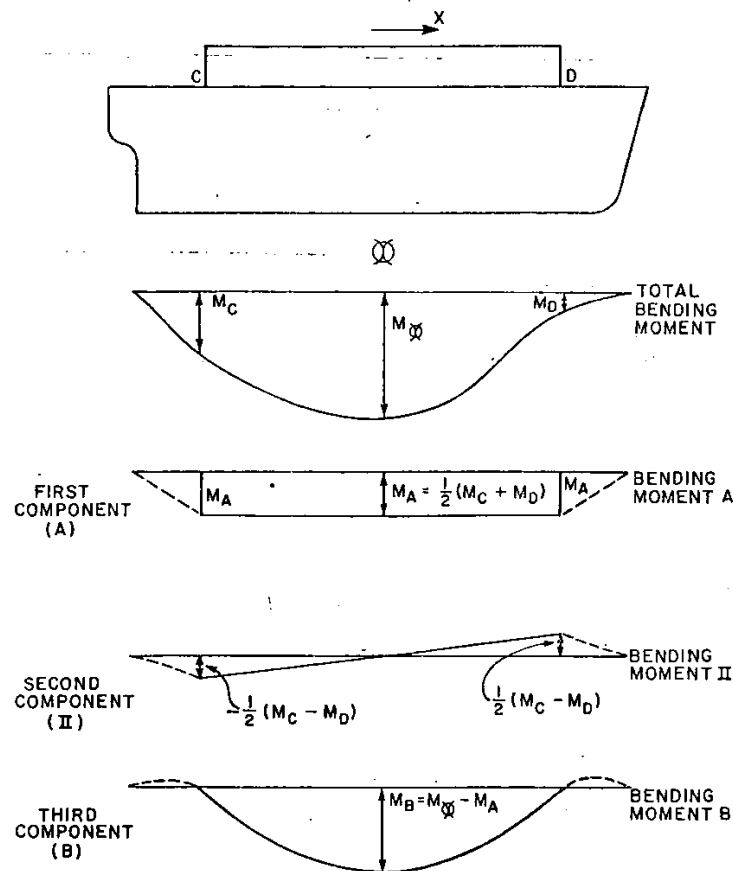
- Για τη γάστρα:

$$\sigma_2 = \sigma_{A2} + \sigma_{B2} \quad (5.91)$$

- Για το υπερστέγασμα:

$$\sigma_1 = \sigma_{A1} + \sigma_{B1} \quad (5.92)$$

Στο Σχήμα 5.9, παρουσιάζονται τέσσερις κατανομές των καμπτικών ροπών. Η πρώτη κατανομή αναφέρεται στις πραγματικές ροπές (τις οποίες μπορούμε να υποθέσουμε), η δεύτερη κατανομή αναφέρεται στην πρώτη περίπτωση φόρτισης του Bleich, η Τρίτη κατανομή παρουσιάζει τις ροπές με μια ευθεία γραμμή μεταξύ των σημείων C και D, και τέλος, η τέταρτη κατανομή αναφέρεται στην περίπτωση φόρτισης B.



Σχήμα 5.9: Πραγματικές καμπτικές ροπές και ανάλυση αυτών με τη μέθοδο του Bleich [40]

Muckle

Η μόνη προσπάθεια να επεκταθεί η θεωρία του Crawford πραγματοποιήθηκε από τον Muckle. Έτσι, κατάφερε να συμπεριλάβει στη μέθοδό του, την υστέρηση διάτμησης σε υπερκατασκευές. Ωστόσο, και αυτή η μέθοδος δεν έχει εφαρμοστεί αρκετά σε πρακτική σχεδίαση.

Ο Muckle [61], επίσης, πρότεινε την ακόλουθη σχέση υπολογισμού της αποτελεσματικότητας μιας υπερκατασκευής:

$$\text{αποτελεσματικότητα} = \frac{\text{φορτίο που μεταφέρεται από ένα τμήμα της υπερκατασκευής στο μέσον της}}{\text{φορτίο που μεταφέρεται από μια υπερκατασκευή στο 100\% του μήκους της}} \quad (5.93)$$

Μάλιστα, διαπίστωσε και εκείνος ότι καθώς το μήκος της υπερκατασκευής μειώνεται, η διατμητική τάση αυξάνεται στα άκρα της με αποτέλεσμα να μειώνεται η αποδοτικότητα της.

Ακόμη, πραγματοποιώντας δοκιμές σε μοντέλα με υπερκατασκευή αλουμινίου, αναπαριστώντας μια μακριά γέφυρα (bridge), διαπίστωσε ότι η επίδραση των άκρων ήταν έντονη και προκαλούσε μεγάλη μείωση των τάσεων σε σχέση με αυτό που προβλέπει η θεωρία απλής δοκού. Για το λόγο αυτό συνέστησε ότι το ελάχιστο μήκος για μια γέφυρα, προκειμένου να συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή, πρέπει να είναι τρεις έως τέσσερις φορές μεγαλύτερο του πλάτους της. Επιπλέον, επισήμανε την επίδραση της υστέρησης διάτμησης κατά την έκταση των πλατιών καταστρωμάτων, αφού οι τάσεις μειώνονταν από την ακμή του καταστρώματος προς την κεντρική γραμμή. Τέλος, παρατήρησε επίσης ότι οι ορθές τάσεις μειώνονται από την μέση τομή προς τα άκρα της υπερκατασκευής.

5.3.2 Θεωρία επίπεδης εντατικής κατάστασης

Σε αντίθεση με τη θεωρία δοκών (θεωρία αντοχής των υλικών), η προσέγγιση της θεωρίας επίπεδης εντατικής κατάστασης είναι μια άμεση εφαρμογή της θεωρίας της ελαστικότητας [62]. Η κατασκευή θεωρείται ότι αποτελείται από μια συνάθροιση επίπεδων μελών (μηδενικό πάχος) στα οποία παρατηρείται η επίπεδη εντατική κατάσταση.

Η θεωρία αυτή λαμβάνει υπόψη της το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης. Οι συναρτήσεις των τάσεων οι οποίες ικανοποιούν τις εξισώσεις επίπεδης τάσης λαμβάνονται για την κορυφή και τις πλευρές του υπερστεγάσματος.

Caldwell

Ο Caldwell [63] παρουσίασε μια μέθοδο που βασίζεται στη θεωρία επίπεδης εντατικής κατάστασης (plane stress theory) προκειμένου να καθοριστεί πως ποικίλει η αποτελεσματικότητα της υπερκατασκευής στην αντοχή της γάστρας σε κάμψη, ανάλογα με την αναλογία του μήκους του με τις εγκάρσιες διαστάσεις, με την ευκαμψία του άνω καταστρώματος και με την κατανομή της καμπτικής ροπής που εφαρμόζεται στο πλοίο.

Όρισε ως αποτελεσματικότητα την έκταση στην οποία το μήκος του υπερστεγάσματος ανακουφίζει το κύριο κατάστρωμα από τις διαμήκειες τάσεις, προτείνοντας την παρακάτω σχέση:

$$\text{αποτελεσματικότητα} = \frac{\sigma_0 - \bar{\sigma}}{\sigma_0 - \sigma_{2max}} \quad (5.94)$$

όπου:

- σ_0 , η εφελκυστική τάση στο κύριο κατάστρωμα εάν δεν υπήρχε υπερστεγασμα
- $\bar{\sigma}$, η πραγματική τάση στο ίδιο σημείο αλλά με την παρουσία υπερστεγάσματος
- σ_{2max} , η τάση στο κύριο κατάστρωμα με την παρουσία μιας πλήρως αποτελεσματικής υπερκατασκευής

Η σχέση αυτή μετρά τη μείωση των τάσεων του κύριου καταστρώματος λόγω του υπερστεγάσματος, σε σύγκριση με την περίπτωση ύπαρξης υπερκατασκευής (πλήρως αποτελεσματική).

Επίσης, ο Caldwell πρότεινε μια προσέγγιση με τη μέθοδο της επίπεδης εντατικής κατάστασης για να μελετηθεί η επίδραση των υπερκατασκευών στη διαμήκη αντοχή των πλοίων. Η γάστρα και το υπερστεγασμα θεωρήθηκαν ότι είναι σταθερής διατομής κατά το μήκος της υπερκατασκευής. Επίσης, το υπερστεγασμα είναι ενωμένο με το κύριο κατάστρωμα μέσω μια σύνδεσης στην οποία μπορεί να παρατηρείται κάποια ολίσθηση (slip) ή διατμητική παραμόρφωση. Οι εφαρμοσμένες καμπτικές ροπές θεωρήθηκαν ότι κατανέμονται συμμετρικά γύρω από τη μέση τομή του υπερστεγάσματος και ότι λαμβάνουν τη μορφή μιας συνημιτοειδούς συνάρτησης.

Η θεωρία του Caldwell απαιτεί τον καθορισμό της ευκαμψίας του καταστρώματος η οποία προκαλεί την κατακόρυφη μετατόπιση ανά μονάδα μήκους του κύριου καταστρώματος υπό μοναδιαίες κατακόρυφες φορτίσεις που εφαρμόζονται στο επίπεδο των πλευρών του υπερστεγάσματος. Είναι στην ουσία το αντίστροφο της ακαμψίας k , που χρησιμοποιείται στην θεωρία δοκού (βλέπε Bleich και Charman).

Η εφαρμογή της μεθόδου του Caldwell έδειξε ότι η αποδοτικότητα του υπερστεγάσματος, σχέση (5.94), επηρεάζεται από τη διατμητική παραμόρφωση στη σύνδεση του κύριου καταστρώματος. Επίσης, έδειξε ότι η μέγιστη αποδοτικότητα του υπερστεγάσματος δεν επηρεάζεται έντονα από την ακριβή κατανομή των τάσεων. Επιπλέον προέκυψε ότι η αποδοτικότητα μειώνεται γρήγορα με την αύξηση της ευκαμψίας του καταστρώματος. Μάλιστα, η μέγιστη αποδοτικότητα επιτυγχάνεται όταν η ευκαμψία είναι μηδενική, όπως στην περίπτωση των υπερκατασκευών (υπερστεγασμα με πλάτος ίδιο με αυτό του πλοίου). Στη θεωρία του υποτίθεται ότι η ευκαμψία του καταστρώματος παραμένει σταθερή σε όλο το μήκος του υπερστεγάσματος.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ο Fransman ανέπτυξε μεθόδους που βασίζονται στη θεωρία επίπεδης εντατικής κατάστασης και έκανε μια βελτίωση σε σχέση με την προσέγγιση του Caldwell.

Johnson

Ο Johnson [64] εκτέλεσε με τη σειρά του αρκετά πειράματα για να εξετάσει την αλληλεπίδραση γάστρας-υπερστεγάσματος. Διαπίστωσε ότι στα επιβατηγά πλοία με συνεχή υπερστεγάσματα, είτε ήταν από χάλυβα είτε από αλουμίνιο, ακολουθούσαν με ακρίβεια την παραμόρφωση που προέβλεπε η θεωρία απλής δοκού, αφού τα υπερστεγάσματα συνέβαλλαν πλήρως στη διαμήκη αντοχή. Επίσης, κατανόησε ότι το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης είναι εντονότερο σε κοντά (σε μήκος) υπερστεγάσματα αλλά και σε μακριά υπερστεγάσματα τα οποία υποδιαιρούνται με αρμούς διαστολεις.

Επίσης, ο Johnson [65] ανέπτυξε τη θεωρία επίπεδης τάσης για να μελετήσει τις τάσεις στα υπερστεγάσματα και στις υπερκατασκευές. Στην προσέγγιση του η κατανομή των διατμητικών τάσεων κατά τις ακμές των πλευρών του υπερστεγάσματος θεωρήθηκαν γραμμικές. Επίσης, η θεωρία του λαμβάνει υπόψη το ενδεχόμενο το υπερστεγάσμα να αποτελείται από πολλαπλά καταστρώματα. Η μέθοδός του αποτελείται από την εύρεση μιας λύσης για την κατανομή των διαμήκων τάσεων στο μέσο ενός τετράγωνου ελάσματος που φορτίζεται κατά το μήκος μιας πλευράς. Αυτό το έλασμα αναπαριστά την πλευρά του υπερστεγάσματος, και οι συνθήκες φόρτισης αναφέρονται κατά το μήκος της ακμής στην οποία συνδέεται με τη γάστρα. Οι κατακόρυφες και διαμήκεις μετατοπίσεις τη βάση του ελάσματος, όπως προκύπτουν από τη θεωρία επίπεδης τάσης, έχουν καταστεί συμβατές με αυτές των γειτονικών μελών, όπως δίνονται από τη θεωρία απλής δοκού. Οι κατανομές των τάσεων στα καταστρώματα διορθώνονται για την υστέρηση διάτμησης με τη χρήση του «ισοδύναμου πλάτους» (βλέπε Schade).

Τέλος, η μέθοδος που προτάθηκε από τον Johnson επεκτάθηκε ώστε να προβλέπει την επίδραση των υπερστεγασμάτων στις συχνότητες των κατακόρυφες δονήσεων. Η μέθοδος προτάθηκε προκειμένου να υπολογισθεί μια «αποτελεσματική» ροπή αδρανείας η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των φυσικών συχνοτήτων της γάστρας.

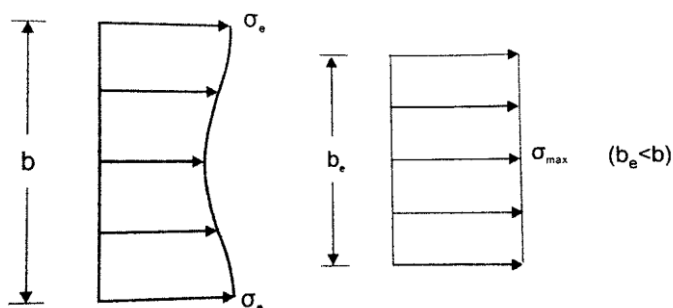
Schade

Για να μελετήσει την αλληλεπίδραση γάστρας-υπερστεγάσματος ο Schade πρότεινε την έννοια του «ισοδύναμου (ενεργού) πλάτους» (Σχήμα 5.10). Αυτή η έννοια επιτρέπει στο σχεδιαστή να υποθέσει μια ισοδύναμη ομοιόμορφη τάση κατά το πλάτος ενός μέλος υπό κάμψη, στη θέση της μη-γραμμικής κατανομής της τάσης λόγω της υστέρησης διάτμησης (Σχήμα 5.11). Πιο συγκεκριμένα, η (απλοποιημένη) μαθηματική διατύπωση του ορισμού αυτού είναι:

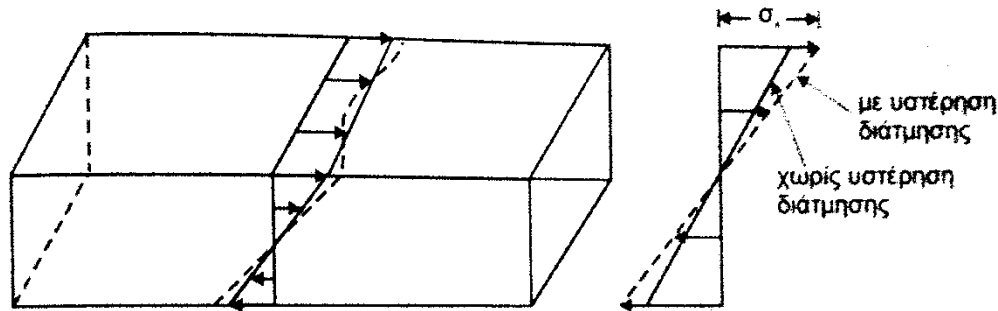
$$\frac{b_e}{b} = \frac{\sigma_a}{\sigma_e} \quad (5.95)$$

όπου:

- b , πραγματικό πλάτος ελάσματος
- b_e , ισοδύναμο πλάτος ελάσματος
- σ_e , πραγματική μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση (στα άκρα)
- σ_a , πραγματική μέση αναπτυσσόμενη τάση



Σχήμα 5.10: Η έννοια του ισοδύναμου πλάτους ελάσματος υπό κάμψη [28]



Σχήμα 5.11: Υστέρηση διάτμησης σε κοίλες δοκούς [28]

Τέλος, υπέθεσε ότι η πραγματική καμπυλότητα του υπερστεγάσματος είναι μηδενική, το οποίο είναι ισοδύναμο με το να υπέθετε ότι οι κατακόρυφες πλευρές του υπερστεγάσματος φορτίζονται από διατμητικά φορτία που μεταφέρονται από το κύριο κατάστρωμα και από κατακόρυφες δυνάμεις οι οποίες είναι απαραίτητες για να διατηρείται το υπερστεγάσμα ευθυγραμμισμένο.

5.4 Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Αριθμητικές Μέθοδοι)

Η κύρια διαφορά αυτής της μεθόδου με τις υπόλοιπες είναι η χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή, μιας και είναι ανέφικτο να χρησιμοποιηθεί χωρίς τη βοήθεια αυτού. Η μέθοδος αυτή μπορεί να παρέχει ακριβή αποτελέσματα στην ελαστική περιοχή, σε οποιαδήποτε γεωμετρία, χωρίς να κάνει οποιαδήποτε απλοποίηση ή παράλειψη. Αυτή η μέθοδος είναι η μόνη όπου μπορεί πραγματικά να προσφέρει μια ολοκληρωμένη ανάλυση μιας σύνθετης τρισδιάστατης κατασκευής, προβλέποντας με απόλυτη ακρίβεια όλες τις τάσεις που αναπτύσσονται τόσο σε ολικό όσο και σε τοπικό επίπεδο.

Ωστόσο, είναι μια οικονομικά ακριβή μέθοδος και απαιτεί αρκετό χρόνο προκειμένου να προετοιμαστεί το μοντέλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέθοδος αυτή δεν μπορεί να γενικευτεί μιας και η μοντελοποίηση για το κάθε πλοίο είναι ανεξάρτητη. Έτσι, αυτή η μέθοδος δεν προτείνεται για το στάδιο της προμελέτης, όπου ο μελετητής ναυπηγός επιθυμεί σε σύντομο χρονικό διάστημα να αποκτήσει μια εικόνα της κατανομής των τάσεων.

Επιπροσθέτως, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για την ανάλυση των ταλαντώσεων της γάστρας και του υπερστεγάσματος, ώστε να εκτιμηθεί ο βέλτιστος αριθμός πτερυγίων της έλικας. Φυσικά, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, όσο ο αριθμός πτερυγίων της μειώνεται τόσο λιγότερες ταλαντώσεις προκαλούνται με το κόστος όμως του μειωμένου βαθμού απόδοσης της.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δεν είναι η μόνη αριθμητική μέθοδος που έχει εφαρμοστεί για την αξιολόγηση της αντοχής των πλοίων. Μια ακόμη αριθμητική μέθοδος, η οποία εφαρμόζεται για την ανάλυση της αλληλεπίδρασης γάστρας-υπερστεγάσματος είναι η μέθοδος πεπερασμένης λωρίδας (finite strip method). Ωστόσο, στην παρούσα εργασία δεν θα γίνει κάποια σχετική αναφορά.

Η κεντρική ιδέα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι να διαχωρίσει το συνεχές (ολικό τμήμα) με άπειρους βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom – DOF) σε διακριτές υποπεριοχές με έναν περιορισμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας [66]. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, όπου το υλικό της κατασκευής του πλοίου είναι ο χάλυβας, είναι κατάλληλο ο μελετητής να επεξεργαστεί τη μέθοδο των

πεπερασμένων στοιχείων με την προσέγγιση της μετατόπισης για ένα ελαστικό συνεχές (elastic continuum) [66].

“Το ελαστικό συνεχές (elastic continuum) της κατασκευής μπορεί να διαχωριστεί σε κατασκευαστικά στοιχεία διασυνδεδεμένα με ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων στα οποία η συνισταμένη δύναμη εισάγεται από την πραγματική τάση στα όρια (boundaries) των στοιχείων” [39]. Οι μετατοπίσεις στα σημεία της σύνδεσης των στοιχείων, επίσης γνωστές ως κομβικές μετατοπίσεις (nodal displacements), είναι οι άγνωστοι για τους οποίους το σύστημα πρέπει να λυθεί. Ένα τυπικό στοιχείο καθορίζεται από ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων και συνόρων. Ας υποθεθεί ότι υπάρχει ένα στοιχείο με n κόμβους που καταλαμβάνουν όγκο Ω . Οι μετατοπίσεις σε κάθε σημείο εντός του στοιχείου μπορούν να καθοριστούν από τις μετατοπίσεις στους κόμβους κάνοντας χρήση κατάλληλων συναρτήσεων:

$$\begin{Bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{Bmatrix} = [N]\{\alpha\} = [N_1(x, y, z), \dots, N_n(x, y, z)] \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \dots \\ \alpha_n \end{Bmatrix} \quad (5.96)$$

όπου $[N]$ είναι μια συνάρτηση μορφής (shape function) που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση των μετατοπίσεων στο εσωτερικό του στοιχείου από τις κομβικές μετατοπίσεις $\{\alpha\}$ όπου:

$$\alpha_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix}, \quad i \in [1, n] \quad (5.97)$$

«Όταν οι μετατοπίσεις είναι γνωστές σε κάθε σημείο εντός του στοιχείου, οι παραμορφώσεις μπορούν να καθοριστούν για κάθε σημείο εντός του στοιχείου. Αυτό μπορεί πάντα να παρουσιάζεται από την ακόλουθη σχέση» [66]:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{\alpha\} \quad (5.98)$$

όπου $\{\varepsilon\}$ είναι ένα διάνυσμα παραμόρφωσης και $[B]$ είναι γνωστό ως μητρώο παραμορφώσεων (deformation matrix). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συναρτήσεις μορφής $[N]$ έχουν ήδη ενσωματωθεί στο μητρώο παραμορφώσεων $[B]$.

Υποθέτοντας ότι η ελαστική συμπεριφορά είναι συναρτήσεις μορφής, η σχέση μεταξύ των παραμορφώσεων και των τάσεων θα είναι γραμμική:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (5.99)$$

όπου $[D]$ είναι γνωστό ως μητρώο ελαστικότητας (elasticity matrix) και καθορίζεται από φυσικές παραμέτρους του υλικού. Γνωρίζοντας τις τάσεις εντός του υλικού, οι δυνάμεις στους κόμβους των στοιχείων μπορούν να αποκτηθούν. Τάσεις εντός του υλικού καθορίζονται στατικά από τις οριακές καταπονήσεις όπως:

$$\{F_{\varepsilon\sigma}\} = \left(\iiint_{\Omega} [B]^T [D] [B] dx dy dz \right) \{\alpha\} \quad (5.100)$$

όπου το ολοκλήρωμα είναι γνωστό ως μητρώο ακαμψίας του στοιχείου [66].

$$[k] = \iiint_{\Omega} [B]^T [D] [B] dx dy dz \quad (5.101)$$

Γνωρίζοντας όλες τις εξωτερικές δυνάμεις στους κόμβους του στοιχείου, οι μετατοπίσεις μπορούν να υπολογισθούν από την απαίτηση ισορροπίας των δυνάμεων στους κόμβους:

$$\{F_{εξ.}\} = \{F_{εσ.}\} = [k]\{\alpha\} \quad (5.102)$$

Οι μετατοπίσεις μπορούν επίσης να υπολογισθούν με τη χρήση της αρχής των δυνατών έργων και απαιτώντας ότι το δυνατό έργο που εκτελείται από εξωτερικές δυνάμεις είναι ίσο με αυτό των εσωτερικών δυνάμεων. Μια άλλη δυνατότητα θα ήταν να ελαχιστοποιηθεί η δυναμική ενέργεια (potential energy) του όλου συστήματος. Ωστόσο, αυτά οδηγούν στην επίλυση του ίδιου του συστήματος των γραμμικών εξισώσεων και είναι διαφορετικές μαθηματικές προσεγγίσεις για την ερμηνεία του ίδιου φυσικού φαινομένου.

Οι αρχές που εφαρμόζονται για ένα μόνο στοιχείο μπορεί να επεκταθούν σε ολόκληρη την κατασκευή έτσι ώστε το συνολικό σύστημα των εξισώσεων που απαιτείται για να επιλυθούν είναι στην ίδια μορφή, όπως στη Σχέση (5.102) [66].

Paulling και Payer

Οι Paulling και Payer [67] ήταν οι πρώτοι που έδειξαν πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τάσεων και των δυνάμεων στη σύνδεση του υπερστεγάσματος με τη γάστρα, κοντά στα άκρα του υπερστεγάσματος.

Mitchell

Ο Mitchell [68] κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων κατέληξε στην ακόλουθη σχέση εκτίμησης της αποτελεσματικότητας του υπερστεγάσματος:

$$\text{αποτελεσματικότητα} = \frac{\text{εκτροπή κύριου καταστρώματος με υπερστέγασμα}}{\text{εκτροπή κύριου καταστρώματος χωρίς υπερστέγασμα}} \quad (5.103)$$

Βασισμένος, λοιπόν, σε αριθμητικές μεθόδους, υπονόησε ότι τα κριτήρια της αποτελεσματικότητας με βάση τις τάσεις του καταστρώματος μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα, διότι η αποτελεσματικότητα του υπερστεγάσματος ποικίλει με την εφαρμοσμένη συνολική καμπτική ροπή. Έτσι, κατέληξε στο ότι το κριτήριο της αποτελεσματικότητας είναι ανεπαρκές για την πρόβλεψη της ακαμψίας.

Ο Mitchel χρησιμοποίησε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και επισήμανε ότι λόγω της σημασίας των δυνάμεων που ασκούνται στη βάση του υπερστεγάσματος, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν αυτές με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια. Στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να αναπαρίσταται σωστά η κατακόρυφη διατμητική ακαμψία στις πλευρές του υπερστεγάσματος, η διαμήκης ακαμψία σε όλη την έκταση της γάστρας, η εγκάρσια ακαμψία των

εγκάρσιων και διαμήκων φρακτών που συνδέονται με το κύριο κατάστρωμα και η ακαμψία στις περιοχές με υψηλή συγκέντρωση τάσεων.

Επίσης, παρατήρησε την ύπαρξη συγκεντρωμένων δυνάμεων στα άκρα του υπερστεγάσματος. Αυτό εγκυμονεί τον κίνδυνο της εμφάνισης ρωγμών λόγω κόπωσης και έτσι πρότεινε να μειωθεί η μεμβρανική ακαμψία του υπερστεγάσματος κοντά στα άκρα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση πλευρικών ελασμάτων με πτυχώσεις (side plates with corrugations) στην κατακόρυφη διεύθυνση ή χρησιμοποιώντας επιθέματα αλουμινίου.

McVee

Πέραν των προβλημάτων της συνεργασίας γάστρας-υπερκατασκευής στα κρουαζιερόπλοια, παρόμοια ζητήματα παρουσιάζονται στα πολεμικά πλοία. Ο McVee ασχολήθηκε με αυτό το ζήτημα και διαπίστωσε ότι η αλληλεπίδραση γάστρας-υπερστεγάσματος είναι ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα.

Zanic και Jancijev

Στη μελέτη αυτή ένας κάπως πιο απλός συνδυασμός 2D μεμβρανικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του πλοίου προβάλλεται στο επίπεδο του κεντρικού άξονα (centerline plane) και το τμηματικό 3D μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων γύρο από τη μέση τομή εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της ολικής κατασκευαστικής απόκρισης ενός επιβατηγού και εκτελέστηκε κατασκευαστική βελτιστοποίηση του τμήματος στο μέσο του πλοίου

Andreau και Gillet

Οι Andreau και Gillet δίνουν μια σύντομη επισκόπηση των κύριων κατασκευαστικών παραμέτρων που επηρέασαν τη διαμήκη αντοχή των επιβατηγών πλοίων με εκτεταμένη υπερκατασκευή.

Heder και Ulfarson

Μια άλλη μελέτη, η οποία επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη της απλοποιημένης προσέγγισης των πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση της απόκρισης της δοκού-γάστρας, έχει πραγματοποιηθεί από τους Heder και Ulfarson [69]. Αριθμητική προσέγγιση που βασίζεται σε ορθοτροπικά ελάσματα και βαθμονομείται με μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων πυκνού πλέγματος προτάθηκε για την παραγωγή της ισοδύναμης διατμητικής δυσκαμψίας των μεγάλων πλευρικών ανοιγμάτων.

Mackney και Ross

Οι Mackney και Ross έχουν διερευνήσει την επίδραση της γεωμετρίας του υπερστεγάσματος (κυρίως του μήκους του) στη συμμετοχή του στη διαμήκη κάμψη, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων 2D και 3D. Η μελέτη εστιάστηκε σε διατάξεις που συναντώνται σε πολεμικά πλοία και οι καμπύλες σχεδίασης για το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού έχουν θεσπιστεί για την κατασκευαστική απόδοση του υπερστεγάσματος (σε σχέση με το μήκος και τον αριθμό των υπερστεγασμάτων).

Andric κ.α.

Διαφορετικά σενάρια των υπερκατασκευών πλοίων μεταφοράς ζώων (livestock carrier) ερευνήθηκαν από τον Andric κ.ά. [70], ο οποίος βασίστηκε στην ολική μοντελοποίηση του πλοίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η αποτελεσματικότητα του καταστρώματος της υπερκατασκευής διερευνήθηκε σε σχέση με διαφορετικές κατασκευαστικές τροποποιήσεις των άκρων της υπερκατασκευής και των συνδέσεων της με το κατώτερο τμήμα της γάστρας.

5.5 Οι επικρατέστερες μέθοδοι για τη μελέτη της αντοχής των κρουαζιερόπλοιων

Τα επιβατηγά πλοία αποτελούν έναν τύπο πλοίου που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής καθώς χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη μορφολογία. Τα επιβατηγά πλοία έχουν υπερκατασκευή που εκτείνεται στο μεγαλύτερο μήκος του πλοίου, έχοντας κατασκευές με ασυνέχειες και οι πλευρές κόβονται από τα μεγάλα πλευρικά ανοίγματα, αλλά και πολλά καταστρώματα και διαμήκεις φρακτές. Κατά συνέπεια χρειάζονται ειδική ανάλυση αντοχής και δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η θεωρία απλής δοκού για την τελική μελέτη της αντοχής.

Από την άλλη, όμως, είναι αρκετά χρήσιμο τα ζητήματα της κατασκευαστικής σχεδίασης να διευθύνονται κατά τη φάση της σύνθεσης, δηλαδή της σύλληψης της κεντρικής ιδέας της σχεδίασης (στάδιο της προμελέτης) των καινοτόμων κρουαζιερόπλοιων, με τον γρηγορότερο δυνατό και αξιόπιστο τρόπο. Αυτή την πρώτη εκτίμηση της αντοχής, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη θεωρία απλής κάμψης.

Οστόσο, για την εκτίμηση της απόκρισης του πλοίου όταν η υπερκατασκευή συμμετέχει στη διαμήκη κάμψη του πλοίου, εφαρμόζονται δύο βασικές προσεγγίσεις. Αυτές περιλαμβάνουν την τρισδιάστατη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων από τη μία πλευρά και τις απλοποιημένες μεθόδους από την άλλη.

Όμως, το να εφαρμοστεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων στην επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού είναι κάτι ιδιαίτερα χρονοβόρο. Για το λόγο αυτό είναι δύσκολο να επιτευχθεί μια απλή κατανόηση της συμπεριφοράς της κατασκευής στην αρχική φάση σχεδίασης και ως εκ τούτου, οι απλοποιημένες μέθοδοι είναι καταλληλότερες για το στάδιο αυτό. Μια τέτοια μέθοδος είναι η μέθοδος συζευγμένης δοκού.

Θα μπορούσε, λοιπόν, να πει κανείς ότι ο μελετητής ναυπηγός μπορεί σε πρώτη φάση να χρησιμοποιήσει τη θεωρία απλής κάμψης προκειμένου να εκτιμήσει τις τάσεις που αναπτύσσονται στην περιοχή της μέσης τομής. Έπειτα, να εφαρμόσει τη μέθοδο συζευγμένης δοκού ώστε να αποκτήσει περαιτέρω πληροφορίες για την κατατομή των τάσεων. Τέλος, με τη μοντελοποίηση του πλοίου και τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων θα προκύψουν τα εντατικά πεδία σε ολόκληρο το πλοίο.

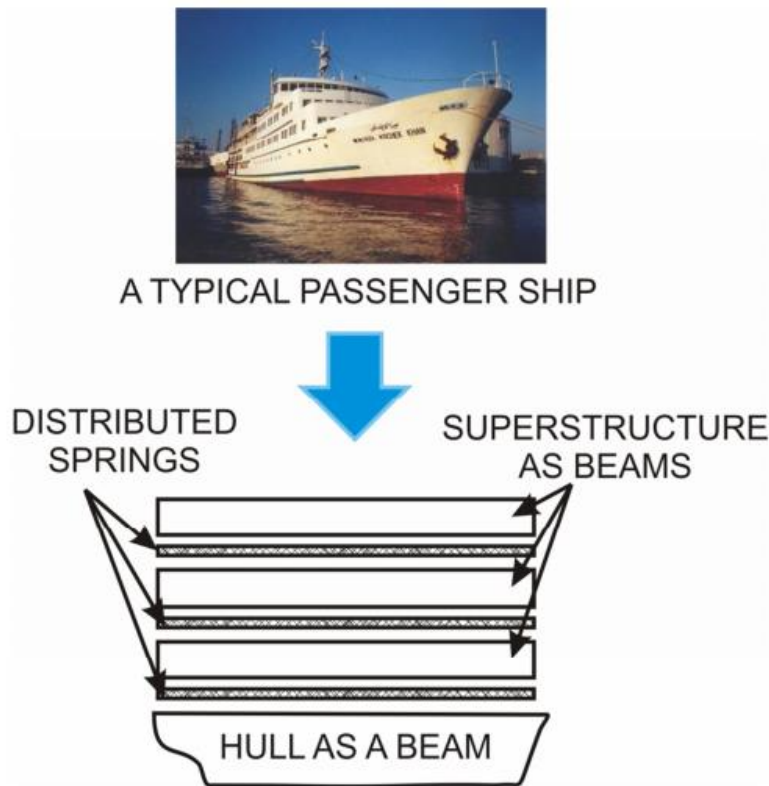
Μάλιστα, η Κλάση απαιτεί την ανάπτυξη μοντέλων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να πιστοποιήσει το εκάστοτε πλοίο. Συγκεκριμένα, οι αντοχές των διαφόρων διατάξεων θα πρέπει να επιβεβαιωθούν από ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων όλου του πλοίου, συμπεριλαμβανομένης της υπερκατασκευής και του υπερστεγάσματος. Εξετάζεται η συνολική απόκριση της κατασκευής σε ήρεμο νερό ακόμα αλλά και σε συνθήκες κυματισμού.

5.6 Μέθοδος Συζευγμένης Δοκού (Coupled Beam Method)

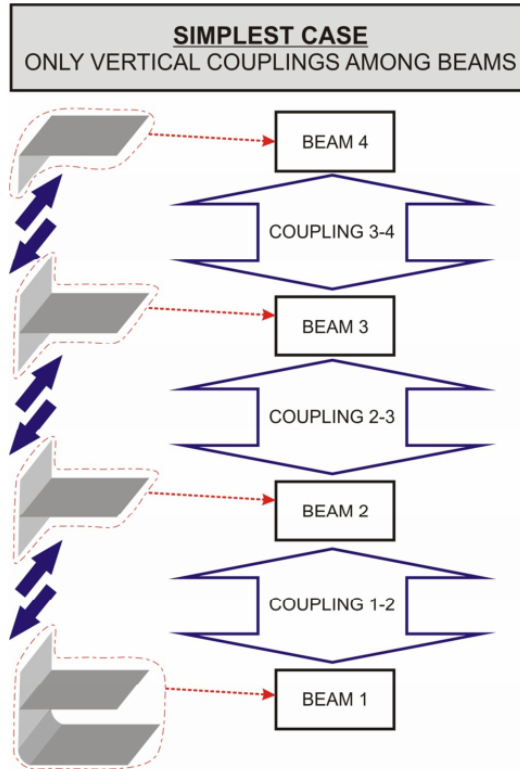
Ο Naar [71], σε συνεργασία με την επιστημονική του ομάδα, πρότεινε μια μέθοδο συζευγμένης δοκού (CBM) για την ανάλυση της διαμήκους κάμψης των επιβατηγών πλοίων με μεγάλες υπερκατασκευές

πολλαπλών καταστρωμάτων, άνωθεν του (κύριου) καταστρώματος. Σημειώνεται ότι θεωρήθηκαν υπερκατασκευές με μήκος ίσο με το μήκος του πλοίου, όπως παρατηρείται στις παραδοσιακές δομές των επιβατηγών πλοίων. Αυτό σημαίνει ότι σε περιπτώσεις όπου το πλοίο έχει μια μικρή υπερκατασκευή, τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι ακριβή. Για το λόγο αυτό επινοήθηκε η Εκτεταμένη Μέθοδος Σύζευξης Δοκού, για την οποία μπορεί κανείς να ενημερωθεί από το [47].

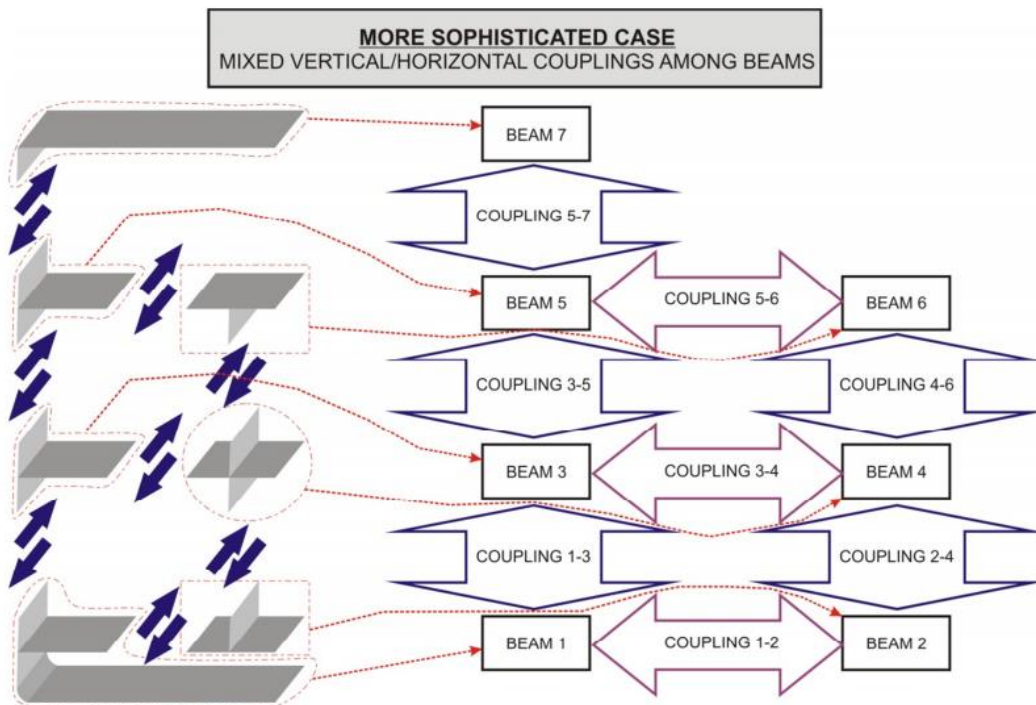
Στην προσέγγιση που παρουσιάζεται εν συνεχεία, η γάστρα του πλοίου μαζί με τη μεγάλη υπερκατασκευή μοντελοποιήθηκαν ως ένα σύνολο από διαμήκεις δοκούς, όπου η κάθε μία έχει και καμπτική ακαμψία και αξονική ακαμψία. Η βασική ιδέα της διακριτοποίησης του πλοίου πολλαπλών καταστρωμάτων σε ένα σύνολο συνδεδεμένων δοκών φαίνεται στο Σχήμα 5.12. Οι δοκοί συνδέονται μεταξύ τους χρησιμοποιώντας κατανεμημένα ελατήρια (springs). Το Σχήμα 5.13 αναπαριστά μία απλή περίπτωση διακριτοποίησης, στην οποία υπάρχουν μόνο κατακόρυφες συνδέσεις μεταξύ των δοκών. Μια πιο εξελιγμένη περίπτωση, όπου υπάρχουν και κάθετες και οριζόντιες συνδέσεις μεταξύ των δοκών, φαίνεται στο Σχήμα 5.14.



Σχήμα 5.12: Βασική ιδέα της μεθόδου των συζευγμένων δοκών [47]



Σχήμα 5.13: Απλούστερη μορφή συζεύξεων μεταξύ των δοκών [47]



Σχήμα 5.14: Περισσότερο εξειδικευμένη μορφή συζεύξεων μεταξύ των δοκών [47]

Κάθε δοκός χαρακτηρίζεται καταρχήν από μια διάταξη που αποτελείται από οριζόντιες και κάθετα στοιχεία. Ένα στοιχείο της i -οστού δοκού, με δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό, φαίνεται στο Σχήμα 5.15. Οι εσωτερικές δυνάμεις που είναι γνωστές από τη θεωρία απλής κάμψης περιλαμβάνουν την αξονική δύναμη N_i , τη διατμητική δύναμη Q_i και τη ροπή κάμψης M_i . Από την άλλη πλευρά, οι δυνάμεις σύζευξης αποτελούνται από εγκάρσιες (κάθετες) κατανεμημένες δυνάμεις p_{ij} και διαμήκως κατανεμημένες διατμητικές δυνάμεις s_{ij} . Ο δείκτης ij αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα της i -οστής δοκού στη j -οστή δοκό. Η μόνη εξωτερική δύναμη που ενεργεί στο τμήμα είναι η q_i η οποία είναι αποτέλεσμα της διαφοράς του βάρους και της άντωσης. Οποιαδήποτε από τις φορτίσεις, όπου καθορίστηκαν παραπάνω, αλλάζει μέσω μιας αντίστοιχης διαφορικής τιμής κατά το πέρασμα σε μια άλλη τομή του i -οστού τμήματος της δοκού, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.15.

Με βάση την διατύπωση που προτείνεται, η γραμμή αναφοράς είναι σταθερή στη θέση του καταστρώματος και μπορεί να διαφέρουν από τη θέση του κέντρου βάρους της διατομής. Οι d_{ik} και e_{ij} αντίστοιχα αντιπροσωπεύουν τις αποστάσεις των άνω και κάτω ινών της δοκού από τη γραμμή αναφοράς.

Οι εξισώσεις ισορροπίας για τις δυνάμεις που δρουν στην i -οστή δοκό είναι:

$$\frac{\partial N_i}{\partial x} + \sum_{j=1}^n s_{ij} = 0 \quad (\text{διαμήκης κατεύθυνση}) \quad (5.104)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial x} + \sum_{j=1}^n p_{ij} = q_i \quad (\text{εγκάρσια κατεύθυνση}) \quad (5.105)$$

Το μητρώο των διατμητικών δυνάμεων s_{ij} και το μητρώο των κατακόρυφων δυνάμεων p_{ij} είναι:

$$s_{ij} = \begin{cases} s_{ij}, & j > i \\ 0, & j = i \\ -s_{ij}, & j < i \end{cases} \quad (5.106)$$

Και

$$p_{ij} = \begin{cases} p_{ij}, & j > i \\ 0, & j = i \\ -p_{ij}, & j < i \end{cases} \quad (5.107)$$

Η σχέση ισορροπίας για τις ροπές ως προς τον z -άξονα δίνει:

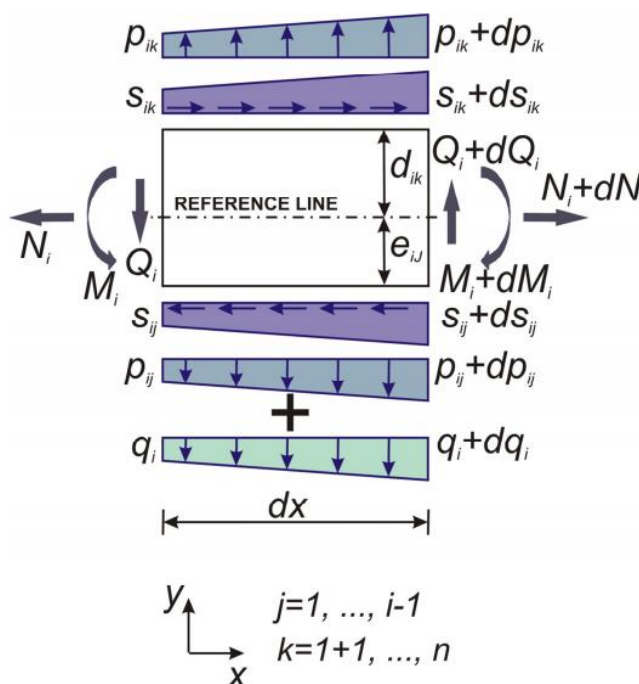
$$\frac{\partial M_i}{\partial x} - Q_i + \sum_{i=1}^n C_{ij} s_{ij} = 0 \quad (5.108)$$

Με παραγωγή αυτής και αντικατάσταση με τη Σχέση (5.105) προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial^2 M_i}{\partial x^2} + \sum_{i=1}^n p_{ij} + \frac{\partial(\sum C_{ij}s_{ij})}{\partial x} = q_i \quad (5.109)$$

όπου το μητρώο C είναι:

$$C_{ij} = \begin{cases} d_{ij}, & j > i \\ 0, & j = i \\ -e_{ij}, & j < i \end{cases} \quad (5.110)$$



Σχήμα 5.15: Ένα στοιχείο της i-οστής δοκού με τις ασκούμενες δυνάμεις [47]

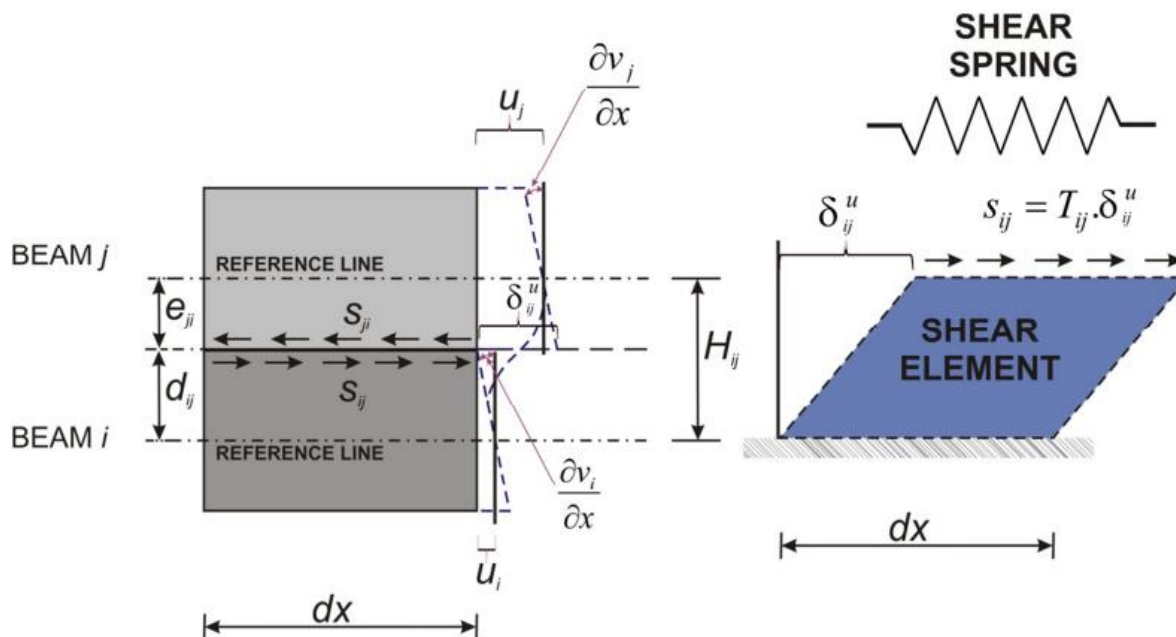
Διατμητική σύζευξη

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δοκών ορίζεται με βάση τις εξισώσεις σύζευξης (coupling equations). Οι εξισώσεις σύζευξης πρέπει να γραφτούν για τις διατμητικές δυνάμεις και τις κατακόρυφες δυνάμεις. Η διατμητική σύζευξη μεταξύ δύο γειτονικών δοκών απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 5.16. Λόγω του διατμητικού στοιχείου με τη διατμητική δυσκαμψία T_{ij} , η ασυνέχεια μετατόπισης δ_{ij}^u προκαλεί διατμητικές δυνάμεις s_{ij} ανάμεσα στα δοκάκια. Υποτίθεται ότι αυτή η διατμητική δύναμη είναι σταθερή σε όλο το μήκος dx . Έτσι, αυτή η δύναμη μπορεί να θεωρηθεί ως η απόκριση του κατανεμημένου οριζώντιου ελατηρίου μεταξύ των δύο γειτονικών δοκών. Η διατμητική ακαμψία εξαρτάται από το ισοδύναμο ύψος H_{ij} του διατμητικού στοιχείου και επίσης από την ισοδύναμη επιφάνεια (effective area). Σε αυτήν την περίπτωση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16, το αποτελεσματικό ύψος είναι ίσο με την

ισαπόσταση των καταστρωμάτων. Ως εκ τούτου, η κατά προσέγγιση διατμητική δύναμη στο πλευρικό κέλυφος ή στη διαμήκης φρακτή είναι ίση με:

$$s_{ij}(x) = T_{ij}(x)\delta_{ij}^u(x) \quad (5.111)$$

Η σχετική μετατόπιση μπορεί να προκύψει ως συνάρτηση με τη βοήθεια της αξονικής μετατόπισης u και της παραμόρφωσης u^M των δοκών ως ακολούθως:



Σχήμα 5.16: Στοιχείο διάτμησης για τον καθορισμό της διατμητικής σύζευξης των δοκών [47]

$$\delta_{ij}^u(x) = u_j + e_{ji} \frac{\partial u_j^M}{\partial x} - u_i + d_{ij} \frac{\partial u_i^M}{\partial x} \quad (5.112)$$

όπου u_i^M είναι η παραμόρφωση της δοκού i που προκαλείται από κάμψη. Αν ληφθεί υπόψη η Σχέση (5.110), η Σχέση (5.112) γίνεται:

$$\delta_{ij}^u(x) = u_j - C_{ji} \frac{\partial u_j^M}{\partial x} - u_i + C_{ij} \frac{\partial u_i^M}{\partial x} \quad (5.113)$$

Αντικαθιστώντας την Σχέση (5.113) στην Σχέση (5.111) προκύπτει η παρακάτω σχέση για τη διατμητική δύναμη:

$$s_{ij} = T_{ij} \left(u_j - C_{ji} \frac{\partial u_j^M}{\partial x} - u_i + C_{ij} \frac{\partial u_i^M}{\partial x} \right) \quad (5.114)$$

όπου το μητρώο της διαμήκους διατμητικής ακαμψίας είναι:

$$T_{ij} = \begin{cases} T_{ij} & j \neq i \\ 0 & j = i \end{cases} \quad (5.115)$$

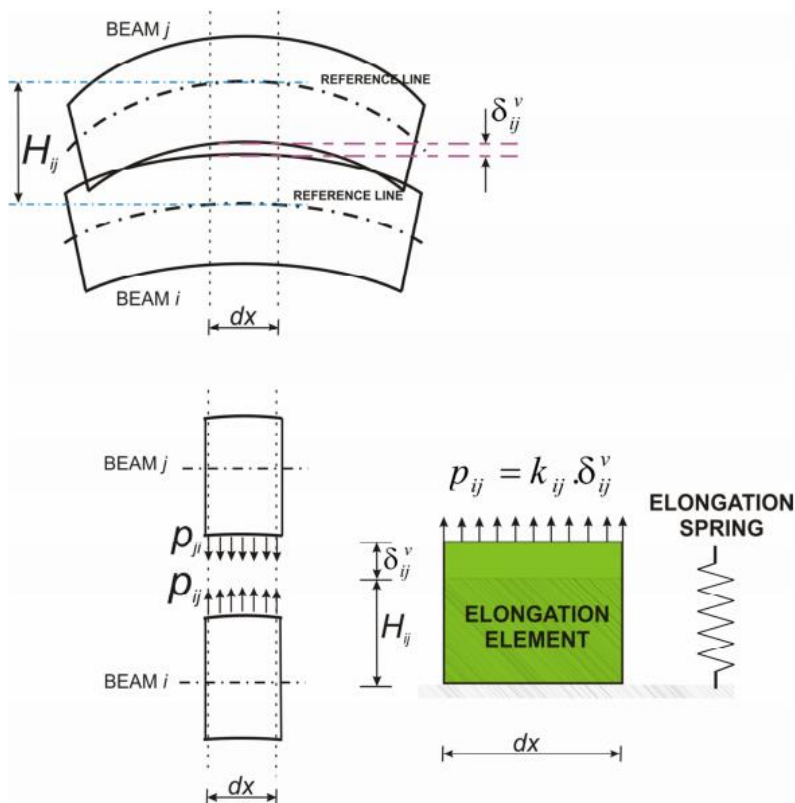
Κατακόρυφη σύζευξη

Ο επόμενος τύπος σύζευξης είναι η κατακόρυφη σύζευξη. Αυτό το είδος της σύζευξης είναι μεγάλης σημασίας όταν η υπερκατασκευή είναι ασθενώς στηριγμένη. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των δοκών i και j περιγράφεται με κατανεμημένα κατακόρυφα ελατήρια στο Σχήμα 5.17. Η κατακόρυφη δύναμη σύζευξης p_{ij} εξαρτάται από την κατακόρυφη ακαμψία ζεύξης K_{ij} και τη σχετική εκτροπή δ_{ij}^v , που είναι η διαφορά μεταξύ των εκτροπών της δοκού u_i και u_j . Ως εκ τούτου,

$$P_{ij}(x) = k_{ij}(x)\delta_{ij}^v(x) = k_{ij}(x)(u_j(x) - u_i(x)) \quad (5.116)$$

Όπου

$$k_{ij} = \begin{cases} k_{ij} & j \neq i \\ 0 & j = i \end{cases} \quad (5.117)$$



Σχήμα 5.17: Στοιχείο επιμήκυνσης για τον καθορισμό της κατακόρυφης σύζευξης [47]

Κάμψη και αξονική φόρτιση λόγω μετατοπίσεων

Χρησιμοποιώντας τη θεωρία δοκών, οι σχέσεις μεταξύ των εσωτερικών δυνάμεων και των μετατοπίσεων καθορίζονται υποθέτοντας ότι το υλικό ακολουθεί το νόμο του Hooke. Εάν η αξονική μετατόπιση u_i και η εκτροπή u_i^M είναι γνωστές για τη δοκό i , τότε η καμπτική ροπή M_i και οι αξονικές δυνάμεις N_i είναι:

$$M_i = -EI_i \frac{\partial^2 u_i^M}{\partial x^2} + EX_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \quad (5.118)$$

$$N_i = EA_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - EX_i \frac{\partial^2 u_i^M}{\partial x^2} \quad (5.119)$$

όπου οι παράμετροι EA_i και EI_i είναι η αξονική δυσκαμψία και η καμπτική δυσκαμψία της δοκού i ως προς τον άξονα αναφοράς και EX_i είναι η τιμή η οποία τροποποιεί τις εσωτερικές δυνάμεις εάν η γραμμή αναφοράς διαφέρει από το κέντρο βάρους της διατομής. Οι μήτρες EA_i , EI_i και EX_i είναι διαγώνιες.

Σύνοψη εξισώσεων προς επίλυση

Συνοψίζοντας, οι ακόλουθες εξισώσεις πρέπει να επιλυθούν προκειμένου να αξιολογηθεί η απόκριση σε κάμψη ενός πλοίου για το οποίο χρησιμοποιείται η μέθοδος ζεύξης δοκών:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial N_i}{\partial x} + \sum_{j=1}^n s_{ij} = 0 \\ \frac{\partial^2 M_i}{\partial x^2} + \sum_{j=1}^n p_{ij} + \frac{\partial(\sum C_{ij} s_{ij})}{\partial x} = q_i \\ M_i = -EI_i \frac{\partial^2 u_i^M}{\partial x^2} + EX_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \\ N_i = EA_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - EX_i \frac{\partial^2 u_i^M}{\partial x^2} \end{array} \right. \quad (5.120)$$

Απαλείφοντας τα M_i και N_i από τις παραπάνω εξισώσεις, το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω:

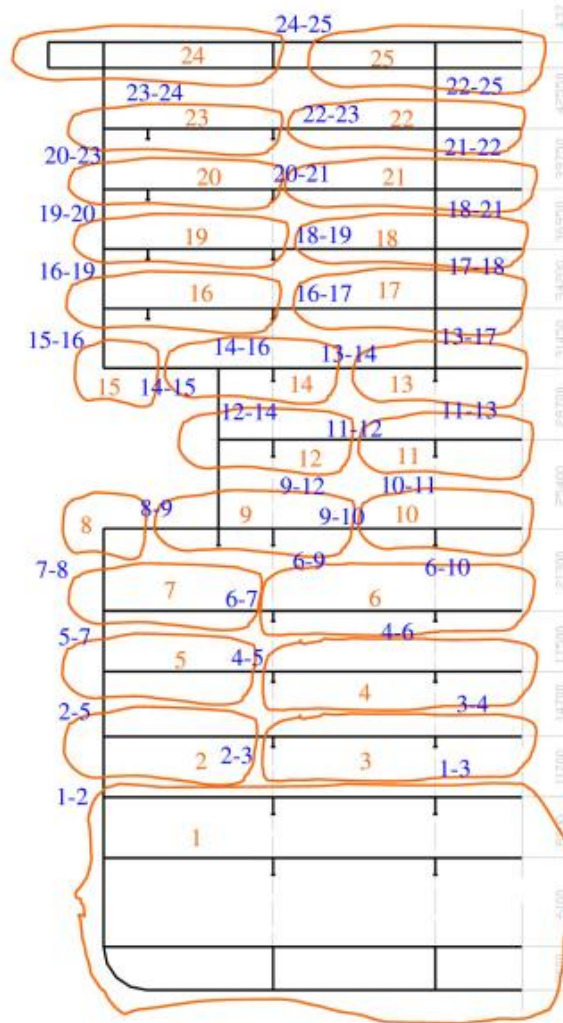
$$-\sum_{j=1}^n s_{ij} = \frac{\partial}{\partial x} \left(EA_i \frac{\partial u_i}{\partial x} - EX_i \frac{\partial^2 u_i^M}{\partial x^2} \right) \quad (5.121)$$

$$q_i - \sum_{j=1}^n s_{ij} - \frac{\partial(\sum C_{ij} s_{ij})}{\partial x} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(-EI_i \frac{\partial^2 u_i^M}{\partial x^2} + EX_i \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) \quad (5.122)$$

Οι άγνωστοι στις άνω δύο εξισώσεις είναι οι αξονική εκτροπή u_i και η εγκάρσια εκτροπή που προκαλείται από την κάμψη u_i^M .

Έχοντας κατανοήσει, λοιπόν, σε ένα βαθμό τις αρχές της μεθόδου αυτής, στη συνέχεια παρουσιάζεται η μέση τομή ενός κρουαζιερόπλοιου post-Panamax με την υποδιαίρεσή του σε δοκούς (βλέπε Σχήμα 5.18). Λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας των πλοίων αυτών χρησιμοποιήθηκε μεικτή σύζευξη (κατακόρυφη και διατμητική). Ο συνολικός αριθμός των δοκών που υποδιαιρέθηκε η μέση τομή ήταν 25, και η αρίθμηση ξεκινά από τον πυθμένα. Συγκεκριμένα, η δοκός που αριθμήθηκε με τον αριθμό 1 περιλαμβάνει το διπύθμενο και τα δυο κατώτερα καταστρώματα, επειδή το πλευρικό έλασμα είναι τόσο παχύ ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η επίδραση της διάτμησης. Έτσι, μια πιο αναλυτική υποδιαίρεση δεν θα έδινε ουσιαστικά καλύτερα αποτελέσματα. Το υπόλοιπο του πλοίου υποδιαιρείται σε δυο ή τρεις δοκούς ανά κατάστρωμα, καθώς εκεί η διατμητική ροή ακολουθεί δυο διαφορετικά μονοπάτια. Κανονικά, οι κολώνες έχουν τόσο μικρή διατμητική ακαμψία όπου η επίδρασή τους στη διατμητική ροή μπορεί να αγνοηθεί.

Τέλος, σημειώνεται ότι στο Παράρτημα Η πραγματοποιείται μια σύγκριση αυτής της μεθόδου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, αναδεικνύοντας την επιρροή των μορφών αστοχίας στην τελική αντοχή.



Σχήμα 5.18: Εφαρμογή της CBM σε κρουαζιερόπλοιο [72]

5.7 Μοντελοποίηση του πλοίου για τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση της κατασκευής του πλοίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται σε δύο στάδια. «Πρώτα ερευνάται η ολική απόκριση μέσω ενός πεπερασμένων στοιχείων μοντέλου με αραιό πλέγμα και έπειτα αξιολογείται η τοπική απόκριση με τον διαχωρισμό των περιοχών ενδιαφέροντος, αναδιαμορφώνοντας το υπάρχον πλέγμα με ένα πυκνότερο πλέγμα, χρησιμοποιώντας τις οριακές συνθήκες από την ολική απόκριση» [39]. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιείται ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση της απόκρισης της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων. Για τη δημιουργία και επεξεργασία αυτών των μοντέλων υπάρχουν διάφορα εξειδικευμένα λογισμικά, όπως το ABAQUS, το ANSYS και το MAESTRO.

Θα πρέπει να ακολουθούνται οι αποδεδειγμένες πρακτικές κατά την υποδιαίρεση της κατασκευής σε στοιχεία και, μάλιστα, να επιλέγονται τα κατάλληλα είδη των στοιχείων για τη μοντελοποίηση. Ποια, όμως, είναι τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των κρουαζιερόπλοιων; Με βάση ποιες αρχές γίνεται η μοντελοποίηση της κατασκευής και των φορτίσεων; Τα ερωτήματα αυτά θα απαντηθούν εκτενώς εν συνεχεία, προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει τον τρόπο μοντελοποίησης ενός κρουαζιερόπλοιου.

5.7.1 Τύποι στοιχείων

Η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τη χρήση των κατάλληλων τύπων στοιχείων. Για την επίτευξη της επιθυμητής ακαμψίας, χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι στοιχείων στο ολικό μοντέλο. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι στοιχείων (βλέπε Σχήμα 5.19) που χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε ένα πλοίο είναι οι παρακάτω :

- Γραμμικά στοιχεία (1D elements)
 - Στοιχείο-ράβδος (Rod element)
 - Στοιχείο-δοκός (Beam element)
- Επιφανειακά στοιχεία (2D elements)
 - Στοιχείο-έλασμα (Plate element)
 - Στοιχείο-μεμβρανικό (Membrane element)
 - Στοιχεία-κέλυφος (Shell element)

Φυσικά υπάρχουν και στοιχεία όγκου (3D elements), των οποίων όμως η χρήση δεν είναι τόσο συχνή στη μοντελοποίηση των ναυπηγικών κατασκευών γενικά. Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων χρησιμοποιούνται κυρίως τα στοιχεία-δοκοί, τα στοιχεία-ελάσματα, τα μεμβρανικά στοιχεία και τα στοιχεία-κελύφη.

Τα στοιχεία-ράβδοι έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν μόνο αξονικά φορτία, σε αντίθεση με τα στοιχεία-δοκοί, τα οποία επιδεικνύουν και αξονική και καμπτική συμπεριφορά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το στοιχείο-δοκός έχει περισσότερους βαθμούς ελευθερίας σε σχέση με το στοιχείο-ράβδος και κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η συμπεριφορά των πραγματικών κατασκευών. Τα γραμμικά στοιχεία αυτά περιέχουν δυο ή τρεις κόμβους.

Το μεμβρανικό στοιχείο αναπαριστά τη συμπεριφορά του ελάσματος στο επίπεδό του, εξαιρείται δηλαδή η καμπτική συμπεριφορά και συνεπώς το στοιχείο δεν μπορεί να παραλάβει κάθετη

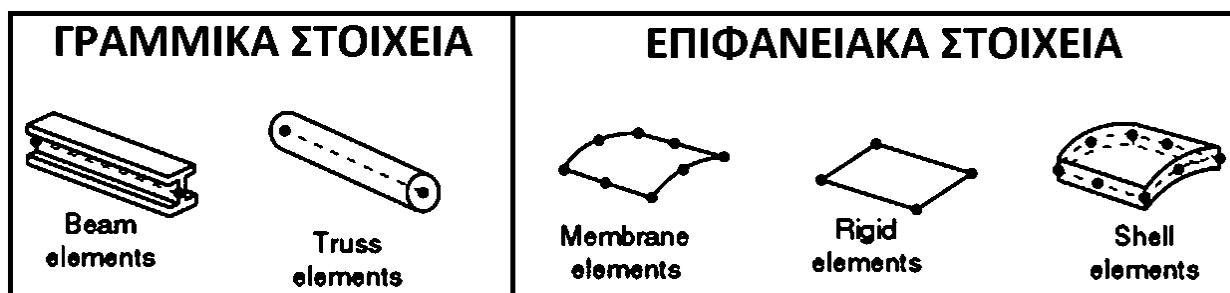
(υδροστατική) φόρτιση. Κατά κανόνα έχει δύο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, στις κατευθύνσεις x και y στο επίπεδό του.

Αντιθέτως, το στοιχείο έλασμα αναπαριστά την καμπτική συμπεριφορά του ελάσματος, χωρίς όμως να μπορεί να παραλάβει ομοεπίπεδες φορτίσεις. Έτσι, χρησιμεύει σε περιπτώσεις που ασκείται μόνο κάθετη (υδροστατική) φόρτιση στην επιφάνεια της κατασκευής. Έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, (κλίσεις σε δύο ορθογώνιες κατευθύνσεις και κάθετη μετατόπιση).

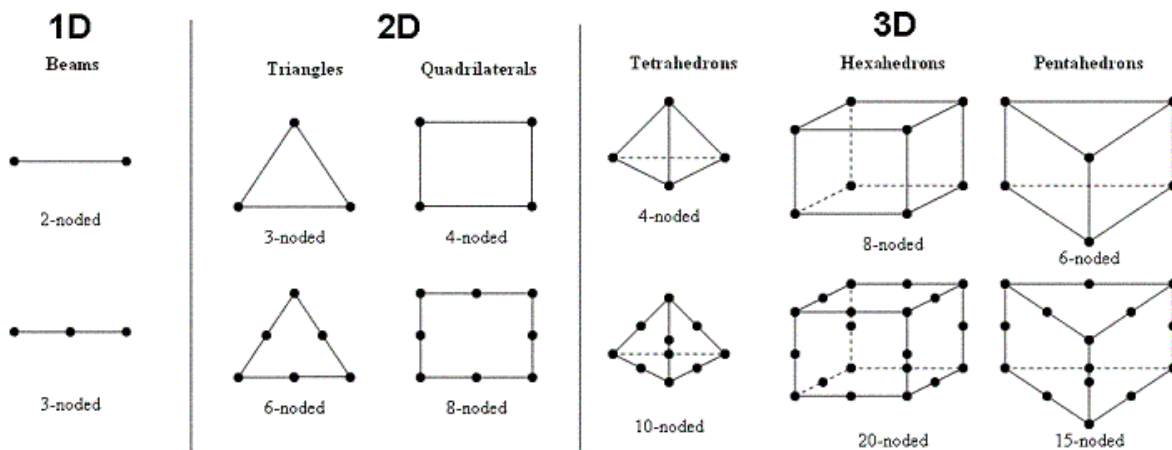
Τα στοιχεία-κελύφη είναι στοιχεία ελάσματα που είναι σε θέση να επιδείξουν καμπτική και μεμβρανική συμπεριφορά. Θα μπορούσε, λοιπόν, να πει κανείς ότι είναι ένας συνδυασμός των στοιχείων μεμβράνης και ελάσματος. Ο κάθε κόμβος τους διαθέτει πέντε βαθμούς ελευθερίας (δύο μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα στοιχεία-κελύφη απαιτούν μεγαλύτερη υπολογιστική δυνατότητα συγκριτικά με τα στοιχεία-ελάσματα και τα μεμβρανικά στοιχεία. Για το λόγο αυτό, όπου είναι εφικτό, είναι προτιμότερη η χρήση των τελευταίων (π.χ. περίπτωση καμπύλων επιφανειών).

Σημειώνεται ότι τα επιφανειακά στοιχεία μπορούν να έχουν τριγωνικό ή τετράπλευρο σχήμα και αποτελούνται από τρεις, τέσσερις, έξι ή οκτώ κόμβους, ανάλογα με το σχήμα και τη χρήση τους. Φυσικά, τα γραμμικά στοιχεία έχουν μία μόνο διάσταση και περιέχουν δυο ή τρεις κόμβους (βλέπε Σχήμα 5.20).



Σχήμα 5.19: Συνηθέστεροι τύποι στοιχείων για τη μοντελοποίηση του κρουαζιερόπλοιου



Σχήμα 5.20: Διάταξη των κόμβων ανάλογα με το στοιχείο [73]

Γενικώς, το μέγεθος και ο τύπος των στοιχείων πρέπει να παρέχει ικανοποιητική αναπαράσταση των παραμορφώσεων και της κατανομής των τάσεων στην κατασκευή του πλοίου. Κατά προτίμηση θα πρέπει

να χρησιμοποιούνται στοιχεία οκτώ ή έξι κόμβων. Η χρήση στοιχείων με τέσσερις ή τρεις κόμβους θα απαιτεί μισό μέγεθος πλέγματος. Δέουσα προσοχή πρέπει να δίνεται στο σχήμα του στοιχείου και ειδικότερα στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται στοιχεία με τέσσερις ή τρεις κόμβους. Στις αιχμηρές γωνίες, τα λοξά στοιχεία και η εκτεταμένη χρήση τριγωνικών στοιχείων (έξι ή τρεις κόμβοι) μπορούν να προκαλέσουν σφάλματα στις παραμορφώσεις που διαμορφώνονται στο μοντέλο.

Τέλος, πέραν του τύπου και του μεγέθους των στοιχείων που επιλέγονται, καθοριστικό ρόλο παίζει η πυκνότητα του πλέγματος. Γενικά, το πλέγμα του στοιχείου-ελάσματος πρέπει να ακολουθεί την κύρια κατασκευαστική διάταξη. Τυπικά αποδεκτά τμήματα πλέγματος:

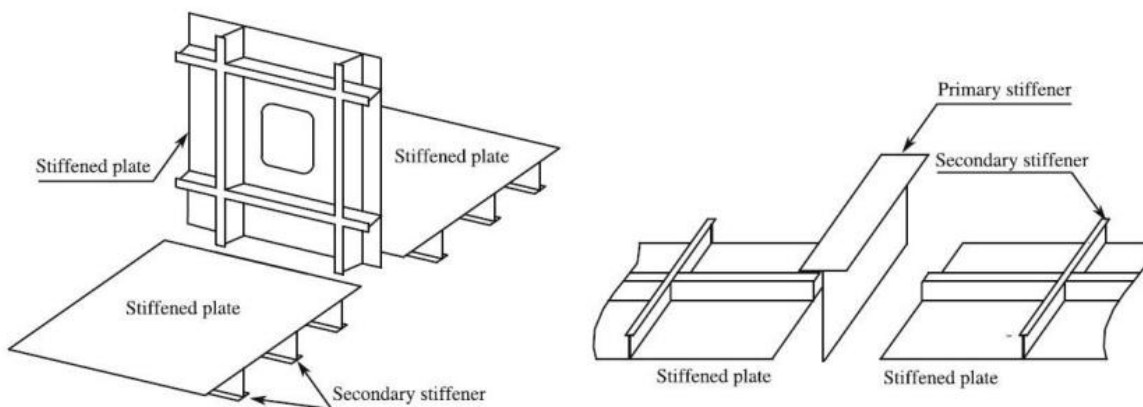
- Διάμηκες : 3-4m, το λιγότερο ένα στοιχείο ανάμεσα σε δυο ενισχυμένων νομέων
- Εγκάρσιο : 3-3.5m
- Κατακόρυφο : 1-2 στοιχεία ανάμεσα στα καταστρώματα
- Σταθμίδες Διπύθμενου : 1 στοιχείο κατά το ύψος
- Υδροσυλλέκτης : 2 στοιχεία γύρω από την επικαμπύλια περιοχή

5.7.2 Διακριτοποίηση της κατασκευής

Η κατασκευή του πλοίου μοντελοποιείται με τη συναρμολόγηση των δομικών του στοιχείων, ενώ το επίπεδο της διακριτοποίησης του μοντέλου του εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και το μέγεθος του. Για περισσότερες κατευθύνσεις για τη μοντελοποίηση της κατασκευής μπορεί κανείς να ανατρέξει στο [74].

Ενισχυτικά

“Το κύριο δομικό στοιχείο του πλοίου είναι το ενισχυμένο έλασμα, το οποίο αποτελείται από το έλασμα και τα ενισχυτικά του. Σύμφωνα με τους Νηογνώμονες, τα ενισχυτικά αυτά θεωρούνται ως δευτερεύοντα ενισχυτικά, ενώ ως κύρια θεωρούνται οι ενισχυμένοι νομείς και οι σταθμίδες” [39]. Αυτή η ταξινόμηση των ενισχυτικών απεικονίζεται στο Σχήμα 5.21.



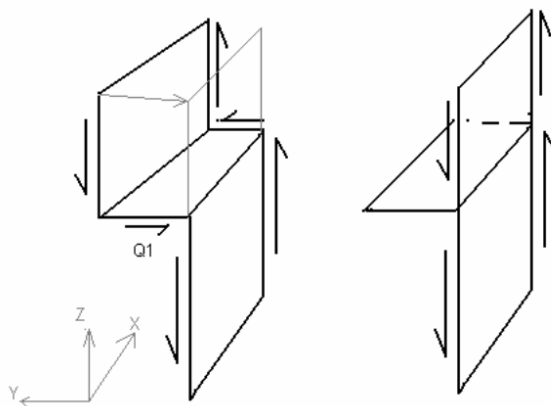
Σχήμα 5.21: Κατάταξη των ενισχυτικών [39]

Κύρια ενισχυτικά

Προφανώς, τα κύρια ενισχυτικά θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να μοντελοποιούνται ρητά λόγω της σημαντικής επιρροής τους στην απόκριση της κατασκευής. “Τα ενισχυμένα πλαίσια μπορούν να μοντελοποιηθούν με στοιχεία ισοδύναμης ακαμψίας, όπου η συμπεριφορά του ελάσματος και των δευτερευόντων ενισχυτικών έχει ομογενοποιηθεί σε ένα στοιχείο” [75].

Ωστόσο, για τη μοντελοποίηση του ενισχυμένου πλαισίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ένας συνδυασμός στοιχείων δοκού και κελύφους 4 κόμβων. «Ένα παράδειγμα αυτού είναι η συγκέντρωση-συσσώρευση μαζών (lumping), όπου η ακαμψία και η μάζα όλων των δευτερευόντων ενισχυτικών στο πλαίσιο αντιπροσωπεύονται από στοιχεία δοκού που βρίσκονται στην άκρη των στοιχείων κελύφους» [75]. Αυτή η μέθοδος είναι αποδεκτή από τους νηογνώμονες, όταν η δομή του κρουαζιερόπλοιου έχει ερευνηθεί σε ολικό επίπεδο [76].

Όσον αφορά τη τεχνική συγκέντρωσης μαζών, πολλές φορές μπορεί να μην είναι πρακτικό να συμπεριληφθούν όλες οι φρακτές και οι αυλακώσεις-βαθμίδες (steps) στη σωστή θέση τους. Οι φρακτές μπορούν να συσσωρευτούν στην πλησιέστερη γραμμή πλέγματος στο ολικό μοντέλο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να τεκμηριώνονται οι συνέπειες αυτής της συσσώρευσης. Το Σχήμα 5.22 δείχνει πώς οι διατμητικές τάσεις στο έλασμα του καταστρώματος θα επηρεαστούν, εάν οι φρακτές συσσωρευτούν σε ένα σημείο.

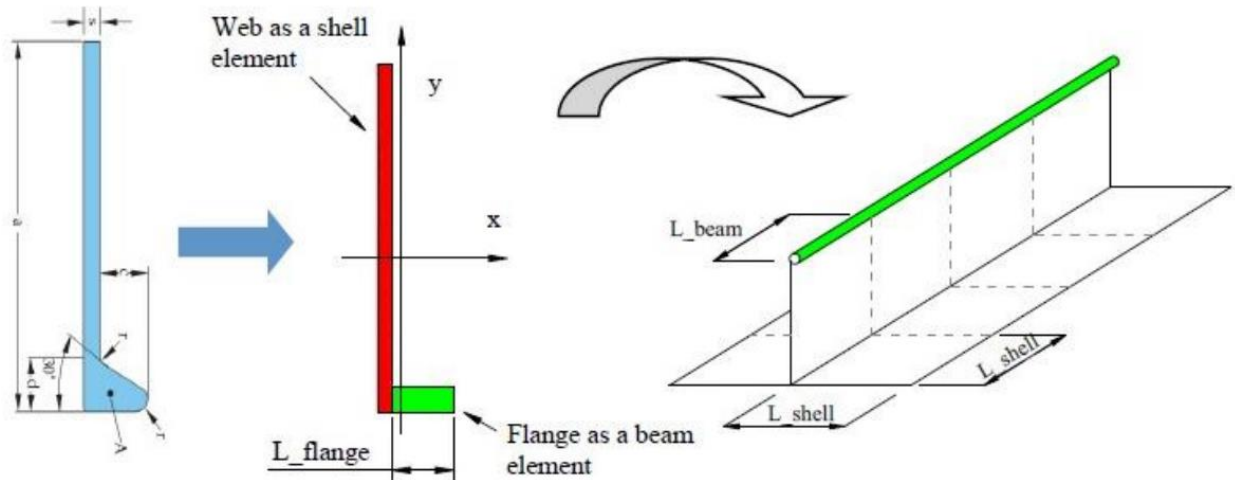


Σχήμα 5.22: Επίδραση της μετακίνησης της φρακτής [76]

Δευτερεύοντα ενισχυτικά

“Όσον αφορά τα δευτερεύοντα ενισχυτικά, μια κοινή πρακτική για τη διακριτοποίησή τους είναι η χρήση της έννοιας της έκκεντρης δοκού” [77]. Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 5.23, ορθογώνια στοιχεία-κελύφη τεσσάρων κόμβων (4-noded rectangular S4 shell elements) χρησιμοποιούνται για την μοντελοποίηση του κορμού και στοιχεία-δοκοί δύο κόμβων (2-noded B31 beam elements) χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση του πέλματος του ενισχυτικού. Αξίζει να σημειωθεί ότι ένας λόγος πλευρών (aspect ratio) για τον κορμό των δευτερευόντων ενισχυτικών που κυμαίνεται μεταξύ 0.0176 και 0.0733 μπορεί να θεωρηθεί ως κακός, με την έννοια ότι είναι επιρρεπής σε σφάλμα πρόσθετης διάτμησης (shear locking) όταν εκτίθενται σε κάμψη στο επίπεδό τους (in-plane bending). Ωστόσο, αντίθετα με την περίπτωση των δευτερευουσών ενισχυτικών, ο λόγος πλευρών του κορμού των

διαμήκων σταθμίδων (κύριο ενισχυτικό) είναι σε αποδεκτά πλαίσια καθώς κυμαίνεται σε τιμές μικρότερες του 1/3.



Σχήμα 5.23: Διακριτοποίηση των ενισχυτικών με τη μέθοδο της έκκεντρης δοκού [39]

Σε περίπτωση χρήσης της μεθόδου που περιεγράφηκε προηγουμένως, θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη ότι «η ροπή αδράνειας και η επιφάνεια των συνδυασμένων στοιχείων κελύφους και ράβδου πρέπει να είναι ίσες με τις αντίστοιχες ενός μοντελοποιημένου ενισχυτικού» [77].

Καμπύλες επιφάνειες

Εν συνεχεία, όσον αφορά τις «καμπύλες επιφάνειες της γάστρας, συνήθως διακριτοποιούνται με πεπερασμένα στοιχεία ελάσματος λόγω της περιπλοκότητας της διαχείρισης των στοιχείων κελύφους» [39]. Μια καμπύλη επιφάνεια της κατασκευής των πλοίων είναι το έλασμα του υδροσυλλέκτη (bilge), και όπως έχει αναφερθεί, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, οι νηογνώμονες απαιτούν τη χρήση τουλάχιστον δύο στοιχείων ελάσματος για τη μοντελοποίηση του [76].

Ελάσματα

Για τη μοντελοποίηση των ελασμάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν τετράπλευρα (4-κόμβων) και τριγωνικά (3-κόμβων) στοιχεία-κελύφη S4 για τη μοντελοποίηση των ελασμάτων. «Το μήκος των στοιχείων αυτών συνήθως ισούται με το ήμισυ της ισαπόστασης των νομέων (frame spacing), ενώ το πλάτος τους είναι ίσο με την ισαπόσταση των ενισχυτικών, κάτι το οποίο είναι επαρκές, σύμφωνα με τις κατευθυντήριες γραμμές των νηογνωμόνων όταν μελετάται η ολική απόκριση» [76]. Γενικότερα, ισχύει ότι όλα τα κύρια ελάσματα της κατασκευής, όπως τα ελάσματα του καταστρώματος, του πυθμένα και του πλευρικού κελύφους, τα ελάσματα των διαμήκων και εγκάρσιων φρακτών, οι έδρες (floors) και οι διαμήκεις σταθμίδες στον πυθμένα, τα πλευρικά ελάσματα της υπερκατασκευής και του υπερστεγάσματος πρέπει να μοντελοποιούνται με στοιχεία-ελάσματα ή μεμβρανικά, ανάλογα με την περίπτωση.

Κολώνες

Οι κολώνες πρέπει να μοντελοποιούνται με γραμμικά στοιχεία που έχουν αξονική και καμπτική δυσκαμψία και για το λόγο αυτό μοντελοποιούνται συνήθως ως στοιχεία-δοκοί 2 κόμβων. Πιο συγκεκριμένα, οι κολώνες μπορούν να καθοριστούν ως στοιχεία-δοκοί 3 κόμβων, ή στοιχεία-δοκοί 2 κόμβων όταν χρησιμοποιούνται στοιχεία-ελάσματα 4/3 κόμβων.

Ανοίγματα

Όλα τα ανοίγματα των παραθύρων, τα ανοίγματα των θυρών, τα ανοίγματα των καταστρωμάτων και τα ανοίγματα του κελύφους σημαντικού μεγέθους πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Τα ανοίγματα πρέπει να μοντελοποιούνται έτσι ώστε οι παραμορφώσεις της γάστρας, υπό τις διατμητικές και καμπτικές φορτίσεις, να παρουσιάζονται επαρκώς. Κάθε εξιδανίκευση που υιοθετήθηκε πρέπει να πιστοποιείται με τη βοήθεια μοντέλων ελέγχου (check models) και να συγκρίνεται με τα αποτελέσματα κατάλληλων μοντέλων πυκνού πλέγματος.

5.7.3 Μοντελοποίηση των φορτίσεων

Κατά κανόνα, δεν απαιτείται επιβολή οριακών συνθηκών στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων ολικής κλίμακας. Το μοντέλο φορτίζεται έτσι ώστε το σύστημα να βρίσκεται σε ισορροπία και ένας μικρός αριθμός κόμβων είναι αμετάθετος, ώστε να αποφευχθούν οι άκαμπτες κινήσεις του σώματος. «Οι συνθήκες συμμετρίας με οριακές συνθήκες δυνάμεων (force boundary conditions) χρησιμοποιούνται πιο συχνά στα τοπικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων» [76].

Ένας βασικός στόχος είναι η διερεύνηση του μηχανισμού της μεταφοράς των φορτίων. Για το λόγο αυτό διεξάγεται στατική ανάλυση με ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων τριών διαστάσεων. Συνήθως, το μοντέλο είναι απλοποιημένο (δεν περιλαμβάνονται οι κατασκευές της πλώρης και της πρύμνης του πλοίου) και έχοντας μια διατομή σταθερών διαστάσεων. Μάλιστα, πολλές φορές λόγω της συμμετρίας περί το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο, μόνο το ένα τέταρτο του πλοίου μοντελοποιείται, με τη χρήση, φυσικά, κατάλληλων οριακών συνθηκών. Αυτή η απλοποιημένη κατασκευή δεν μπορεί να θεωρηθεί ως πρισματική δοκός καθώς οι εγκάρσιες φρακτές (transverse bulkheads) και οι κολώνες (pillars) έχουν επίσης μοντελοποιηθεί. Αξίζει να σημειωθεί, επίσης, ότι η δυναμική ανάλυση (π.χ. ταλαντώσεις) διαφέρει σημαντικά από τη στατική ανάλυση, κυρίως λόγω των φορτίσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, συνήθως διάφορα απαιτούνται ολικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων με ακριβή ορισμό της κατανομής της μάζας.

Καθοριστικός παράγοντας για μια επιτυχημένη ανάλυση του μοντέλου είναι η αναπαράσταση της πραγματικής κατανομής της μάζας της κατασκευής της γάστρας όπως επίσης και τη μάζα των άλλων συστατικών με ικανοποιητική ακρίβεια. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να ελέγχονται με την εξέταση των τάσεων σε διάφορες διατομές, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η εφαρμοσμένη φόρτιση δίνει σωστά (σε ολικό επίπεδο) την καμπτική ροπή και τη διατμητική δύναμη.

Μοντελοποίηση του Lightship

Το βάρος της κατασκευής υπολογίζεται εισάγοντας την πυκνότητα του χάλυβα. Προκειμένου να είναι εφικτό να ορισθεί η θέση του κέντρου βάρους και να επαληθευτεί η κατανομή του βάρους με ένα απλό τρόπο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές πυκνότητες υλικού κατά το μήκος της γάστρας. Όλο το μοντέλο ανάλυσης θα πρέπει να είναι σε συμφωνία με την πραγματική κατανομή του βάρους του άφορτου αλλά πλήρως εξοπλισμένου πλοίου (Lighthship). Αυτό συχνά απαιτεί μια επαναληπτική διαδικασία για το συντονισμό της κατανομής της μάζας.

Σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να αμελείται το βάρος του μηχανολογικού εξοπλισμού. Έτσι, όλα τα κύρια στοιχεία (όπως η κύρια μηχανή πρόωσης, το πηδάλιο, οι κύριες γεννήτριες κλπ.) θα πρέπει να μοντελοποιούνται σαν σημειακές μάζες συνδεδεμένες με τη γύρω κατασκευή στη σωστή τους θέση. Σημειώνεται ότι το βάρος ενός στοιχείου μπορεί να διαχωριστεί σε πολλά μικρά σημεία εάν το στοιχείο είναι πολύ μεγάλο (όπως η κύρια μηχανή).

Το υπόλοιπο βάρος του Lighthship (π.χ. βάρος εξοπλισμού - Outfit) θα πρέπει να αναπαρίσταται από στοιχεία συγκεντρωμένης μάζας (concentrated mass components) στο κέντρο βάρους του κάθε στοιχείου. Όλες οι μάζες πρέπει να συνδέονται με την περιβάλλουσα κατασκευή.

Μοντελοποίηση του Deadweight

Επιπλέον, το νεκρό βάρος και οι φορτίσεις που οφείλονται στους επιβάτες μπορούν να αναπαρασταθούν από στοιχεία συγκεντρωμένης μάζας στο κέντρο βάρους κάθε στοιχείου ή σαν κατανεμημένη πίεση στις σχετικές περιοχές καταστροφμάτων.

Εσωτερικές Φορτίσεις

Σε φορτίσεις υπόκειται το πλοίο, φυσικά, και από τις διάφορες δεξαμενές (π.χ. δεξαμενές καυσίμου). Στις δεξαμενές, η υγρή μάζα θα πρέπει να αναπαρίσταται από φορτίσεις πίεσης ή στοιχεία σημειακής μάζας, τα οποία είναι κατανεμημένα στα σημεία των κόμβων στη βάση της δεξαμενής ή στα σύνορα. Βέβαια, υπογραμμίζεται ότι δεν είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί η τοπική κατανομή πίεσης της πίεσης των δεξαμενών στην ανάλυση του ολικού μοντέλο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Εξωτερικές φορτίσεις

Όσον αφορά τη φόρτιση της άντωσης, η δύναμη της υδροστατικής πίεσης σε ήρεμο νερό πρέπει να εφαρμόζεται στο βρεχόμενο μέρος (ύφαλα) της γάστρας. Αντίστοιχα, σε κυματισμένο νερό, η καμπτική ροπή και η διατμητική δύναμη μοντελοποιούνται ως ημιτονοειδώς κατανεμημένα φορτία (πίεσης) στους κόμβους του ελάσματος του πυθμένα. Όταν επιβληθεί σε όλο το μήκος του πλοίου, η φόρτιση θα πρέπει να παράγει τη καμπτική ροπή σε κυματισμένο νερό.

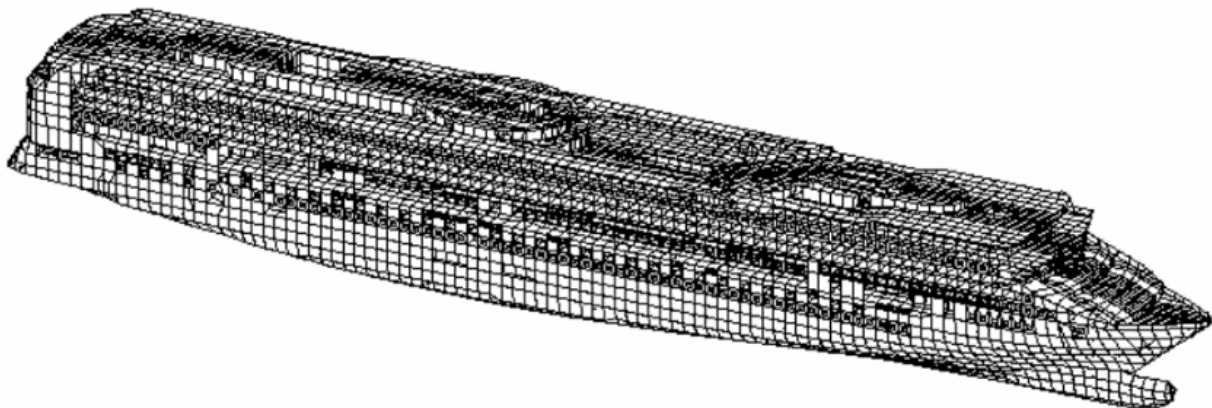
Βέβαια, υπάρχουν και εναλλακτικές μέθοδοι για την εφαρμογή της φόρτισης, οι οποίες και θα πρέπει να εξετάζονται. Μια εναλλακτική μέθοδος είναι να εφαρμόζεται η ολική φόρτιση, συμπεριλαμβάνοντας την καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό και κυματισμένο νερό, σαν μια γραμμική φόρτιση. Για να καθοριστούν οι φορτίσεις που εφαρμόζονται στο ολικό μοντέλο, η ολική καμπτική ροπή $[M_S + M_W]$ παραγωγίζεται δυο φορές. Η πρώτη δίνει την κατανομή της διατμητικής δύναμης $[Q = d(M_S + M_W)/dx]$, ενώ μια δεύτερη παραγωγή δίνει τη γραμμή φόρτισης $[q = dQ/dx]$.

5.7.4 Ολικό Μοντέλο ΠΣ (Global FE Model)

Για την τελική αξιολόγηση της αντοχής του πλοίου και την πιστοποίησή του από την κλάση, πρέπει να αναπτυχθεί ένα 3D μοντέλο στοιχείου ελάσματος (3D plate element model) για ολόκληρο το μήκος, το πλάτος και το ύψος του πλοίου, καλύπτοντας και το ανώτερο ύψος της υπερκατασκευής ή του υπερστεγάσματος, συμπεριλαμβανομένων όλων των διαμήκων υλικών που συμμετέχουν στην (διαμήκη) αντοχή και όλη την εγκάρσια πρωτεύουσα κατασκευή, συμπεριλαμβανομένων των στεγανών φρακτών και των φρακτών υποδιαίρεσης πυρκαγιάς (fire subdivision bulkheads). Συνοπτικά, θα μπορούσε κανείς να πει ότι, οι στόχοι της ανάλυσης της απόκρισης του πλοίου σε ολικό επίπεδο είναι να:

- 1) Καθοριστούν οι διαμήκεις τάσεις στη γάστρα
- 2) Καθοριστούν οι τάσεις στις εγκάρσιες κατασκευές (λόγω του racking)
- 3) Αποκτηθούν οι δυνάμεις στις κολώνες
- 4) Αποκτηθούν οι συνωριακές συνθήκες για την τοπική ανάλυση

Αναμφισβήτητα, ο κύριος σκοπός για το ολικό μοντέλο είναι να μοντελοποιείται ικανοποιητικά την ολική ακαμψία. Όσον αφορά την υπερκατασκευή, είναι γνωστό ότι η αποτελεσματικότητα της εξαρτάται από το μήκος, την ευκαμψία των στηρίξεών της, την αποτελεσματική σύνδεση της με τη γάστρα στα άκρα της και το μέγεθος και τον αριθμό των ανοιγμάτων στις πλευρικές φρακτές και τα εσωτερικά καταστρώματα. Για το λόγο αυτό όλα τα παραπάνω πρέπει να μοντελοποιούνται προσεχτικά. Επίσης, θα πρέπει να περιλαμβάνονται όλα τα διαμήκη στοιχεία που συμβάλλουν στη διαμήκη αντοχή. Ακόμη, όλες οι κύριες εγκάρσιες στηρίξεις όπως οι στεγανές φρακτές (watertight bulkheads) και οι φρακτές πυρκαγιάς (fire bulkheads), και οι εγκάρσιοι ενισχυμένοι νομείς (transverse webs) πρέπει να περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Ωστόσο, οι τοπικές λεπτομέρειες δεν περιλαμβάνονται στο μοντέλο. Ένα τυπικό ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 5.24: Τυπικό ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων [76]

Το μέγεθος και το είδος των στοιχείων που επιλέχθηκαν πρέπει να παρέχουν ικανοποιητική αναπαράσταση και κατανομή των τάσεων εντός της δομής του πλοίου. Το πλέγμα των στοιχείων-ελάσματα πρέπει να ακολουθήσει το ανυποστήρικο μήκος (span) και τη διάταξη των δομικών στοιχείων. Κατά το διάμηκες, πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ένα στοιχείο μεταξύ των κύριων εγκάρσιων μελών και ένα στοιχείο μεταξύ των καταστρωμάτων και επαρκή στοιχεία εγκάρσιως για να διατηρηθεί ικανοποιητικός λόγος πλευρών (περίπου ίσος με τη μονάδα).

Όλα τα ανοίγματα του καταστρώματος και όλα τα ανοίγματα του κελύφους, συμπεριλαμβανομένων εκείνων για τα παράθυρα, τις πόρτες κ.λπ., ενός σημαντικού μεγέθους, θα πρέπει να εκπροσωπούνται και να μοντελοποιούνται στο ολικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε το παραμορφωμένο σχήμα (deformation shape) και το μέγιστο βέλος κάμψης (deflection) της γάστρας, υπό την επίδραση των διατμητικής δύναμης και της καμπτικής ροπής, να εκπροσωπούνται επαρκώς. Κάθε εξιδανίκευση αυτών των μεγάλων ανοιγμάτων θα πρέπει να επαληθεύεται μέσω του ελέγχου μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και να συγκρίνεται με τα μοντέλα πυκνού πλέγματος. Οποιαδήποτε άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά, όπως καμπυλόμορφα πλευρικά ελάσματα, δίοδοι (trunks) και περιβλήματα (casings) πρέπει να μοντελοποιηθούν και για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται τα μοντέλα πυκνού πλέγματος (fine mesh models).

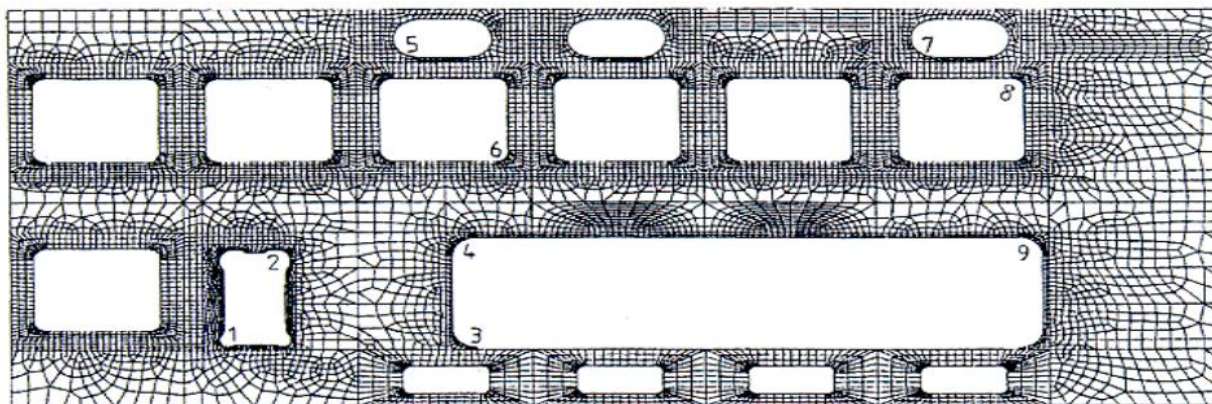
5.7.5 Διδιάστατα Μοντέλα ΠΣ Πυκνού Πλέγματος (2-D Fine Mesh FE Models)

Εκτός από το ολικό μοντέλο, είναι συνήθης η απαίτηση ανάπτυξης και χρήσης τοπικών μοντέλων, στις περιοχές με σημαντικά ανοίγματα, ασυνέχειες ή άλλες περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων. Η θέση και ο αριθμός των μοντέλων που απαιτούνται εκτιμάται με βάση τα αποτελέσματα από το ολικό μοντέλο.

Έτσι, με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης του τρισδιάστατου ολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, επιπλέον μοντέλα πυκνού πλέγματος (fine mesh models) θα πρέπει να αναπτυχθούν σε περιοχές όπου αυτά απαιτούνται. Στις αναλύσεις πυκνού πλέγματος, οι συνοριακές δυνάμεις ή οι οριακές μετατοπίσεις που λαμβάνονται από τη χρήση αραιού πλέγματος (3D coarse mesh global analysis) θα χρησιμοποιηθούν ως συνοριακές συνθήκες. Εκτός από τους άνω περιορισμούς, όλες οι τοπικές φορτίσεις θα εφαρμοστούν στα μοντέλα πυκνού πλέγματος.

Γίνεται αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα από το τοπικό μοντέλο πρέπει να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα από το ολικό μοντέλο, μιας και οι περιπτώσεις φόρτισης που εφαρμόζονται στο τοπικό μοντέλο θα πρέπει να είναι οι ίδιες με αυτές του ολικού. Οι παραμορφώσεις ή οι δυνάμεις που λαμβάνονται από την ολική ανάλυση εφαρμόζονται στους σχετικούς κόμβους στα όρια του τοπικού μοντέλου. Στη συνέχεια, επιτυγχάνεται το ίδιο επίπεδο ονομαστικών τάσεων (same nominal stress level), όπως λαμβάνεται και στο ολικό μοντέλο.

Θα πρέπει να μοντελοποιούνται (τοπικά μοντέλα), λοιπόν, τα στοιχεία ή οι κατασκευαστικές περιοχές με υψηλές τάσεις. Οι στόχοι της τοπικής ανάλυσης είναι να διαπιστωθεί ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μέσα στα αποδεκτά όρια. Το Σχήμα 5.25 δείχνει ένα τυπικό τοπικό μοντέλο.



Σχήμα 5.25: Τυπικό τοπικό μοντέλο [76]

Ο μελετητής ναυπηγός θα πρέπει να υποψιάζεται, φυσικά, τις περιοχές οι οποίες είναι κρίσιμες, ώστε να είναι σε θέση να αξιολογεί τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το εκάστοτε εξειδικευμένο λογισμικό. Για το λόγο αυτό, καταγράφονται κάποιες τυπικές περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, όπως φαίνεται ακολούθως.

- Τα ανοίγματα των παραθύρων στις πλευρές του πλοίου λόγω των υψηλών διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται στη γάστρα
- Τα πλαίσια στις πλευρές του πλοίου (shipside panels) που συνδέουν την υπερκατασκευή με το πλευρικό κέλυφος στα άκρα της υπερκατασκευής
- Οι διαμήκεις φρακτές με μεγάλα ανοίγματα
- Οι μεγάλες πόρτες στις πλευρές του πλοίου
- Οι ασυνέχειες (steps/knuckles) στα ανώτερα καταστρώματα
- Οι εγκάρσιες φρακτές με μεγάλα ανοίγματα

Φυσικά ως ελάχιστο, εκτός από τα τοπικά μοντέλα για τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων, και τα ακόλουθα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων πυκνού πλέγματος πρέπει να αναπτυχθούν και να αναλυθούν προκειμένου να καθορισθεί η έκταση της ενίσχυσης, εάν αυτή είναι απαραίτητη:

- Περίβλημα Μηχανοστασίου (Engine room casing)
- Μεγάλα ανοίγματα στο ανώτερο κατάστρωμα (Large upper deck openings)
- Διαμήκεις φρακτές πάνω από τα θέατρα και τις αίθουσες φαγητού (Longitudinal bulkheads above theaters and dining halls)
- Αίθρια πολλαπλών καταστρωμάτων (Multi-deck atriums)
- Ανοίγματα σε κορμούς των διαμήκων σταθμίδων και σε κορμούς εγκάρσιων ζυγών και σταθμίδων καταστρώματος (Openings in webs of longitudinal girders and in webs of transverse deck beams and girders)
- Καμπυλόμορφα ελάσματα γενικά (Side screens/fashion plates)

Σημειώνεται ότι τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων πυκνού πλέγματος πρέπει να περιλαμβάνουν το παράθυρο και τα πλαίσια θυρών εάν είναι συγκολλημένα στα ελάσματα, και τα ενισχυτικά του ελάσματος ως γραμμικά στοιχεία δοκούς (line beam elements).

Όπως γίνεται κατανοητό, ξεχωριστά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων πυκνού πλέγματος, που καλύπτουν τα δομικά στοιχεία που έχουν επιλεγεί, θα πρέπει να ετοιμάζονται και να φορτίζονται με επιβαλλόμενες μετατοπίσεις (enforced displacements) ή δυνάμεις, που λαμβάνονται από την ολική ανάλυση ολόκληρου του πλοίου.

Η επέκταση του μοντέλου πυκνού πλέγματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε η εφαρμογή των μετατοπίσεων, που λαμβάνονται από την ανάλυση του ολικού μοντέλου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, να μην ακυρώνει την απόκριση στα σχετικά σημεία του τοπικού μοντέλου πυκνού πλέγματος. Κατά συνέπεια, τα ενισχυτικά, τα μπρακέτα, όλα τα ανοίγματα, οι οπές (cut-outs) και άλλες τοπικές λεπτομέρειες που επηρεάζουν τις τάσεις στα σχετικά σημεία, πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στο τοπικό μοντέλο. Θα πρέπει, επομένως, το επίπεδο της λεπτομέρειας να είναι τέτοιο ώστε να καθίσταται εφικτό να εντοπιστούν οι συγκεντρώσεις τάσεων.

Το μέγεθος του πλέγματος θα έχει μια άμεση επίδραση στα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την τοπική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Είναι επομένως υψίστης σημασίας το μέγεθος του στοιχείου να επιλέγεται έτσι ώστε να δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Από προηγούμενη εμπειρία, όπου τα

αποτελέσματα της ανάλυσης των μοντέλων έχουν συγκριθεί με την πραγματική κλίμακα, φαίνεται ότι προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα όταν το μέγεθος του πλέγματος είναι συγκρίσιμο με εκείνο του πάχους του ελάσματος.

Όσον αφορά τις γωνίες στα ανοίγματα, όπου μόνο η μέγιστη τάση (peak stress) χρήζει ενδιαφέροντος, η πυκνότητα του πλέγματος δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από $0.2R$, όπου R είναι η ακτίνα της καμπυλότητας της γωνίας. Φυσικά αυτό είναι εφαρμόσιμο μόνο για συνεπίπεδες τάσεις.

Όσο για την κύρια κατασκευή, στο τοπικό μοντέλο πρέπει να αναπαρίσταται από στοιχεία-ελάσματα που έχουν μεμβρανική και καμπτική ικανότητα, ενώ τα δευτερεύοντα ενισχυτικά μακριά από τις περιοχές συγκέντρωσης τάσεων μπορούν να αναπαρασταθούν από στοιχεία-δοκοί.

5.7.6 Τριδιάστατα Αναλυτικά Μοντέλα ΠΣ (3-D Refined FE Model)

Πρέπει να υποβάλλονται για εξέταση, επίσης, τριδιάστατα αναλυτικά μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (3-D refined FE models) των κύριων μελών στήριξης του καταστρώματος (π.χ., σταθμίδες και εγκάρσια ενισχυτικά), συμπεριλαμβανομένων των συνδεδεμένων ελασμάτων του καταστρώματος και των δευτερευόντων μελών μεταξύ των γειτονικών κύριων μελών. Πρέπει να μοντελοποιείται το μέγεθος και η γεωμετρία όλων των ανοιγμάτων στα ελάσματα κορμών (web plating), συμπεριλαμβανομένων των ανοιγμάτων για τη διέλευση των διαμήκων ενισχυτικών. Η πυκνότητα του πλέγματος (mesh density) πρέπει να παρέχει ένα ελάχιστο των 12 στοιχείων στο ύψος του κορμού (web depth). Το φορτίο του καταστρώματος σύμφωνα με τους Κανονισμούς ή το φορτίο σχεδίασης του καταστρώματος (design deck load) πρέπει να εφαρμοστεί ως μια πίεση ομοιόμορφα κατανεμημένη στο κατάστρωμα. Για την ανάλυση των σταθμίδων του καταστρώματος, η κατάλληλη τάση (direct stress) της γάστρας λόγω της ολικής κάμψης πρέπει να περιλαμβάνεται μαζί με το δευτερεύον φορτίο.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στην μοντελοποίηση των φορτίων και της στήριξης από τις κολώνες (pillars), με την έννοια των υψηλά φορτισμένων στύλων στήριξης.

5.7.7 Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)

Τέλος, ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο της μελέτης της συμπεριφοράς ενός πλοίου γενικότερα αποτελεί η ανάλυση ευαισθησίας. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι μια διερεύνηση των αποτελεσμάτων από μαθηματικά μοντέλα για να αξιολογήσει πόσο αυτά εξαρτώνται από τις τιμές που επιλέγονται για τις παραμέτρους" [78]. "Η ανάλυση ευαισθησίας συνήθως εφαρμόζεται στη βελτιστοποίηση των δομών για τον προσδιορισμό της επιρροής των παραμέτρων σχεδιασμού στην κατεύθυνση και το ρυθμό μεταβολής της συνάρτησης απόδοσης (performance function)" [79]. Για παράδειγμα, στο πλαίσιο της κατασκευής του πλοίου, η απόδοση μπορεί να μετρηθεί με την ακαμψία και το βάρος, όπου τα πάχη ελάσματος ή η ισαπόσταση των ενισχυτικών μπορεί να θεωρηθεί ως σχεδιαστική παράμετρος. Ο στόχος της ανάλυσης ευαισθησίας στο παρόν πλαίσιο είναι να εμβαθύνει τη γνώση σχετικά με το μηχανισμό μεταφοράς φορτίου της προτεινόμενης δομής με στόχο να βελτιωθεί η επίδοσή της.

Η εστίαση είναι στην διερεύνηση της επιρροής της αλλαγής του πάχους του περιβλήματος στο επίπεδο του καταστρώματος σωστικών λέμβων (boat deck) και στην πλευρά του υπερστεγάσματος για την απόδοση και το μηχανισμό μεταφοράς φορτίου της προτεινόμενης δομής. Λεπτότερα ελάσματα στο κύριο κατάστρωμα, θα μειώσουν το μέγεθος των διατμητικών δυνάμεων που μεταδίδονται στο πλευρό της υπερκατασκευής, ανακουφίζοντας τις ορθές τάσεις στα καταστρώματα. Η μείωση του πάχους των πλευρικών ελασμάτων του υπερστεγάσματος έχει παρόμοια επίδραση. Ωστόσο, αυτές οι αλλαγές θα μειώσουν επίσης την ακαμψία της όλης δομής. Από την άλλη πλευρά, με την αύξηση του πάχους του

ελάσματος σε αυτές τις κρίσιμες περιοχές, η ακαμψία της δομής θα βελτιωθεί: ωστόσο, οι ορθές τάσεις στην κορυφή του υπερστεγάσματος θα αυξηθούν. Παρ' όλα αυτά, η βελτίωση της απόδοσης της προτεινόμενης δομής μπορεί να εξαρτάται από αυτές τις παραμέτρους.

5.8 Ανακεφαλαίωση

Από το κεφάλαιο αυτό προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία είναι χρήσιμο να αναφερθούν συγκεντρωτικά. Από τη μελέτη της αντοχής των κρουαζιερόπλοιων προέκυψε ότι στα άκρα της υπερκατασκευής τους, μια τριγωνική περιοχή δεν συμβάλλει στη διαμήκη αντοχή καθώς δεν παραλαμβάνει σημαντικές πρωτεύουσες τάσεις. Ωστόσο, κατά το διάμηκες στα άκρα των υπερκατασκευών οι οριζόντιες διατμητικές τάσεις μεγιστοποιούνται, σε αντίθεση με το μέσον του πλοίου, όπου είναι μηδενικές. Επιπλέον, στα άκρα του υπερστεγάσματος η κατακόρυφη διατμητική δύναμη είναι μηδενική. Κατά το εγκάρσιο, στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του υπερστεγάσματος, οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές (λόγω συμμετρίας), αλλά αυξάνονται σταδιακά σε ένα μέγιστο στα άκρα του υπερστεγάσματος. Μάλιστα, πολλές αστοχίες στα άκρα της σύνδεσης των διεπιφανειών οφείλονται κυρίως στις διατμητικές τάσεις. Μειωμένη αντοχή της κατασκευής σε διάτμηση διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή του πλοίου, και ειδικά όταν το πλοίο βρίσκεται σε κατάσταση Hogging.

Γίνεται, λοιπόν, εμφανές ότι οι διατμητικές τάσεις στη σύνδεση της γάστρας-υπερστεγάσματος παίζουν σημαντικό ρόλο. Φάνηκε, επίσης, ότι συνδέονται άμεσα με το μήκος της υπερκατασκευής καθώς όσο αυτό μειώνεται τόσο το φαινόμενο της αύξησης της διατμητικής τάσης στα άκρα της αυξάνεται. Φυσικά, αυτό συνεπάγεται με τη μείωση της αποδοτικότητάς της. Για το λόγους αυτούς, θα πρέπει η αντοχή της σύνδεσης γάστρας-υπερκατασκευής στα άκρα της υπερκατασκευής να είναι αυξημένη αλλά και το ίδιο το κύριο κατάστρωμα και η υπερκατασκευή θα πρέπει να ενισχύονται στις περιοχές αυτές.

Δεν θα πρέπει να παραληφθεί ότι όσο οι διαστάσεις του πλοίου αυξάνονται, καλό είναι οι πλευρές της υπερκατασκευής να συμπίπτουν με τις πλευρές της γάστρας. Με τον τρόπο αυτό, η υπερκατασκευή συμβάλει περισσότερο στη διαμήκη αντοχή και φυσικά σε τέτοιες περιπτώσεις, η εκτροπή (βέλος κάμψης) του υπερστεγάσματος γίνεται ίδια με αυτή της γάστρας. Με άλλα λόγια, η μέγιστη αποτελεσματικότητα επιτυγχάνεται όταν η ευκαμψία είναι μηδενική (άπειρη ακαμψία), όπως στην περίπτωση των υπερκατασκευών (υπερστεγάσμα με πλάτος ίδιο με αυτό του πλοίου).

Η επίδραση του μήκους του υπερστεγάσματος είναι ιδιαίτερα σημαντική. Πιο συγκεκριμένα, μια υπερκατασκευή με μήκος πάνω από το 70% του μήκους του πλοίου είναι πλήρως αποτελεσματική με αποτέλεσμα η διαμήκης κατανομή των τάσεων να προσεγγίζεται από την απλή θεωρία κάμψης (μακριά από τα άκρα). Σε μακριά υπερστεγάσματα, χωρίς ενισχύσεις, παρατηρήθηκαν υψηλές τάσεις, τις οποίες δεν μπορούσε το υπερστεγάσμα να τις παραλάβει. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ρωγμών στα τετραγωνικά πλευρικά ανοίγματα (π.χ. παράθυρα). Για το λόγο αυτό θα πρέπει τα μακριά υπερστεγάσματα να είναι στιβαρά, ώστε να μπορούν να αντιστέκονται στις φορτίσεις. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε η λύση είναι η χρήση αρμών διαστολής. Από την άλλη, όμως, οι αρμοί διαστολής προκαλούν συγκεντρώσεις τάσεων επηρεάζοντας τις γύρω περιοχές. Είναι ορθό η χρήση τους να μελετάται ιδιαίτερα προσεχτικά ή ακόμη και να αποφεύγεται.

Γενικότερα, εστίες ρωγμών αποτελούν τα ανοίγματα στην πλευρική κατασκευή του πλοίου. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να παρέχεται ικανοποιητική ενίσχυση σε όλα τα ανοίγματα. Επιπλέον, όλες οι γωνίες των θυρών και των παραθύρων θα πρέπει να εξαλειφθούν και να γίνουν καμπύλες, ώστε να μειωθούν οι συγκεντρώσεις τάσεων και να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος εμφάνισης ρωγμής προκαλώντας ψαθυρή

θραύση (brittle fracture). Ακόμη, προτείνεται να μειώνεται η μεμβρανική ακαμψία του υπερστεγάσματος κοντά στα άκρα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση πλευρικών ελασμάτων με πτυχωσείς (side plates with corrugations) στην κατακόρυφη διεύθυνση ή χρησιμοποιώντας επιθέματα αλουμινίου.

Για την τελική μελέτη και την αντιμετώπιση των ζητημάτων αντοχής κατά τη διαμήκη κάμψη, η οποία είναι και η σημαντικότερη απόκριση του πλοίου από πλευράς αντοχής, δύο κυρίως βασικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται. Από τη μία πλευρά είναι η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (αριθμητική μέθοδος) και από την άλλη πλευρά, η αναλυτική μέθοδος των συζευγμένων δοκών.

Τα πλεονεκτήματα στην τεχνολογία των υπολογιστών αλλά και των εξελιγμένων λογισμικών διευκολύνουν την αξιολόγηση της απόκρισης της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων. Σύμφωνα με τους Νηογνώμονες, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method – FEM) είναι επαρκώς αξιόπιστη για μελέτη της αντοχής των μοντέρνων κατασκευών των κρουαζιερόπλοιων (ISSC, 1997). Μάλιστα, απαιτούν για την τελική αξιολόγηση της κατασκευής, να τους προσκομίσουν οι ναυπηγοί τα απαραίτητα μοντέλα πεπερασμένων (ολικά και τοπικά).

Αναμφισβήτητα, οι απαιτήσεις της λειτουργικότητας της δομής ενός επιβατηγού πλοίου έχουν αυξηθεί, σκεπτόμενοι τις κατασκευές των τελευταίων δεκαετιών. Συνεπώς, τα βασικά ζητήματα της κατασκευαστικής σχεδίασης θα πρέπει να διευθύνονται κατά τη φάση της κεντρικής ιδέας σχεδίασης των καινοτόμων κρουαζιερόπλοιων, με τον γρηγορότερο δυνατό και αξιόπιστο τρόπο. Το να εφαρμοστεί η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων στην επαναληπτική διαδικασία σχεδιασμού είναι κάτι ιδιαίτερα χρονοβόρο και κατ' επέκταση όχι κατάλληλο για χρήση στην αρχική φάση σχεδίασης.

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου CB είναι ότι εξοικονομεί χρόνο. Το μοντέλο για το πρισματικό πλοίο έγινε για τη μέθοδο CB μέσα σε μία ημέρα, όταν για το 3D FE-μέθοδο, ο χρόνος μοντελοποίησης ήταν μέχρι και ένας μήνας. Επίσης, ο χρόνος υπολογισμού είναι πολύ μικρότερος για τη μέθοδο CB. Αντί για 12 ημέρες, χρησιμοποιώντας έναν υψηλών δυνατοτήτων υπολογιστή, η ανάλυση με τη μέθοδο CB πραγματοποιήθηκε μέσα σε 10-15 λεπτά, χρησιμοποιώντας έναν κοινό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

6. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Η κατασκευή του κρουαζιερόπλοιου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη. Για το λόγο αυτό οι περιοχές της μεταλλικής τους κατασκευής θα πρέπει να σχεδιάζονται με ιδιαίτερη προσοχή, είτε συμβάλλουν στη διαμήκη αντοχή είτε όχι. Έτσι, για αυτή την περίπτωση πλοίων, οι Νηογνώμονες απαιτούν να τηρούνται οι ειδικοί κανόνες που προβλέπονται για τα ακόλουθα τμήματα της κατασκευής:

1. Εσωτερικός Πυθμένας & Διπύθμενο (Inner Bottom & Double Bottom)
2. Πλευρική Κατασκευή (Side Shell)
3. Καταστρώματα (Decks)
4. Στεγανές Φρακτές και Θύρες (Watertight Bulkheads & Doors)
5. Φρακτές Δεξαμενών (Tank Bulkheads)
6. Υπερκατασκευές και Υπερστεγάσματα (Superstructures & Deckhouses)

Η κάθε μια από τις περιοχές αυτές έχει τις δικές της ιδιαιτερότητες και θα πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά. Φυσικά, οι αναφερθείσες κατασκευαστικές περιοχές θα πρέπει να είναι, πρωτίστως, σε συμφωνία τους «Γενικούς Κανονισμούς». Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων σε σύγκριση με άλλους τύπους πλοίων (π.χ. δεξαμενόπλοια, φορτηγά), παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις απαιτήσεις των κανονισμών, όσον αφορά τη διαστασιολόγηση των ελασμάτων και των ενισχυτικών.

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία δεν κρίνεται σκόπιμο να καταγραφούν οι «Γενικές Απαιτήσεις» των κανονισμών. Ωστόσο, θεωρείται απαραίτητη η αναφορά στις ειδικές απαιτήσεις για πλοία που προορίζονται για τη μεταφορά επιβατών.

Είναι προφανές ότι οι κανονισμοί συνδέονται άμεσα με το εκάστοτε υλικό που χρησιμοποιείται στο υπό μελέτη κατασκευαστικό μέλος αλλά και με τον τρόπο ενίσχυσης. Αυτά δεν είναι τα μοναδικά κριτήρια για τη διαστασιολόγηση, ωστόσο είναι υψίστης σημασίας να γνωρίζει ο μελετητής ναυπηγός τι υλικά παρατηρούνται και ποιο σύστημα ενίσχυσης χρησιμοποιείται στις διάφορες περιοχές της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων.

Ποια είναι, λοιπόν, αυτά τα υλικά και τι προβλήματα δημιουργούνται από τη χρήση τους; Πώς πρέπει να αντιμετωπίζονται; Ποιο σύστημα ενίσχυσης εφαρμόζεται και για ποιο λόγο; Τι προβλέπουν οι κανονισμοί για τα διάφορα κατασκευαστικά τμήματα; Στο κεφάλαιο αυτό θα δοθούν απαντήσεις σε όλα τα παραπάνω ζητήματα, προκειμένου να αναγνώστης να διακρίνει τις κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες των κρουαζιερόπλοιων σε σχέση με τους άλλους τύπους πλοίων.

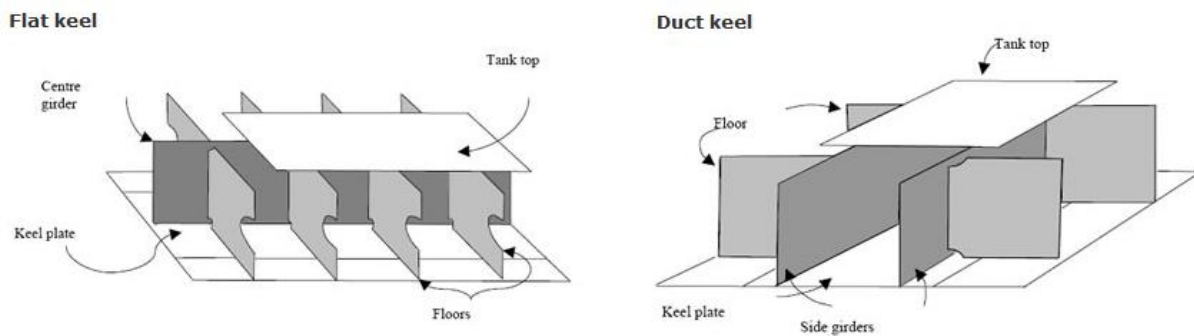
6.2 Η κατασκευή της γάστρας

Έχοντας γνωρίσει τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των κρουαζιερόπλοιων, κρίνεται αναγκαίο να αναφερθούν τα κατασκευαστικά μέλη από τα οποία αποτελείται η γάστρα. Μάλιστα, για αυτά τα μέλη οι νηογνώμονες έχουν απαιτήσεις, οι οποίες πρέπει να τηρούνται ρητά.

6.2.1 Κατασκευαστικά στοιχεία

Τρόπιδα

Η τρόπιδα (Keel) είναι ένα μέλος, ή μια σειρά από μέλη, που εκτείνονται κατά το διάμηκες. Η τρόπιδα αντιστοιχεί πάντα στον κεντρικό άξονα (centerline) του πλοίου. Είναι ένα σημαντικό συστατικό για την παροχή διαμήκους αντοχής, το οποίο μάλιστα διανέμει αποτελεσματικά τις τοπικές τάσεις, όταν το πλοίο είναι σε ελλιμενισμό (dry-docking). Υπάρχουν δύο τύποι τρόπιδας που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πλοίων ενός ορισμένου μεγέθους, η επίπεδη τρόπιδα (flat keel) και η τρόπιδα αγωγού (duct keel), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1.



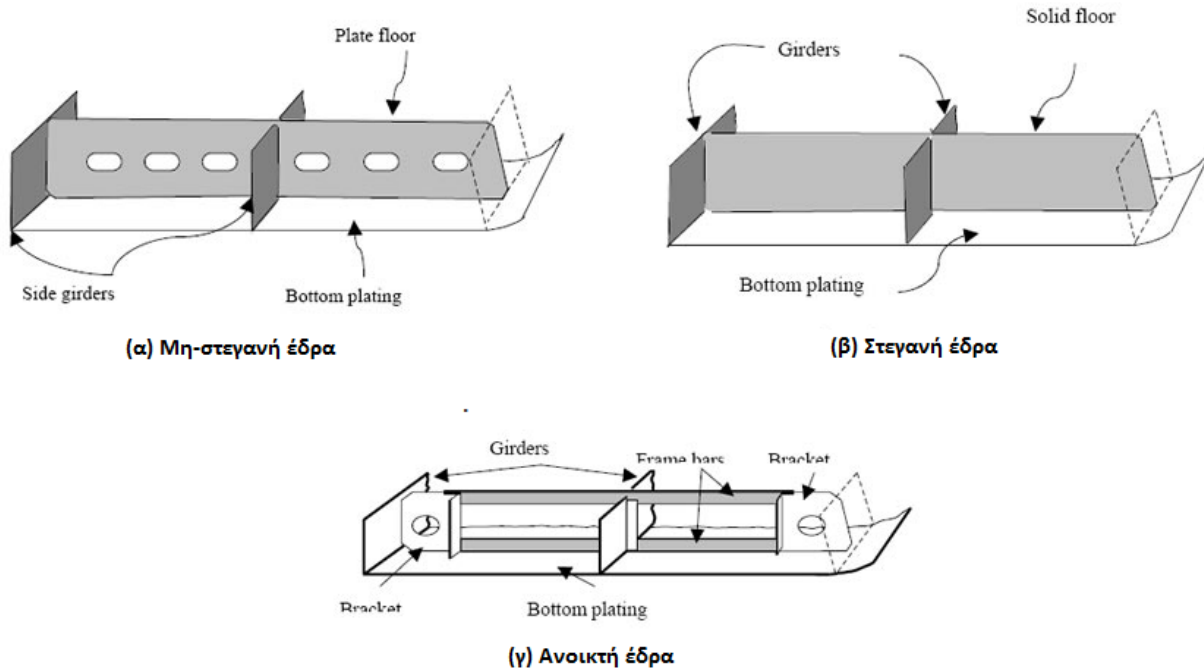
Σχήμα 6.1: Δυο είδη τρόπιδας [29]

Σταθμίδα

Η σταθμίδα (girder) είναι ένα διάμηκες μέλος που χρησιμοποιείται στην κατασκευή του πυθμένα του πλοίου. Μπορούν να είναι στερεές (solid) ή όχι και μπορούν να τοποθετούνται πάνω από την τρόπιδα (κεντρική σταθμίδα) ή να απέχουν σε ίσες αποστάσεις από αυτήν (πλευρικές σταθμίδες). Μπορούν να είναι συνεχείς ή να υποδιαιρούνται από τις έδρες νομέων. Η κεντρική σταθμίδα είναι πάντα ένα συνεχές στοιχείο και πρέπει να στερεώνεται στην τρόπιδα με μια συνεχή συγκόλληση. Οι σταθμίδες πρέπει να εκτείνονται όσο το δυνατόν περισσότερο από την πλώρη προς την πρύμνη του πλοίου.

Έδρες

Οι έδρες (floors) αποτελούνται από εγκάρσια στοιχεία (cross members) που είναι τοποθετημένα κάθετα στην τρόπιδα και στις σταθμίδες. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι εδρών: η συμπαγής (στεγανή) έδρα (solid floor), η μη-στεγανή έδρα (plate floor) και η ανοιχτή έδρα (bracket or open floor), όπως μπορεί κανείς να διαπιστώσει με τη βοήθεια του Σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Τρία είδη εδρών [29]

Νομείς

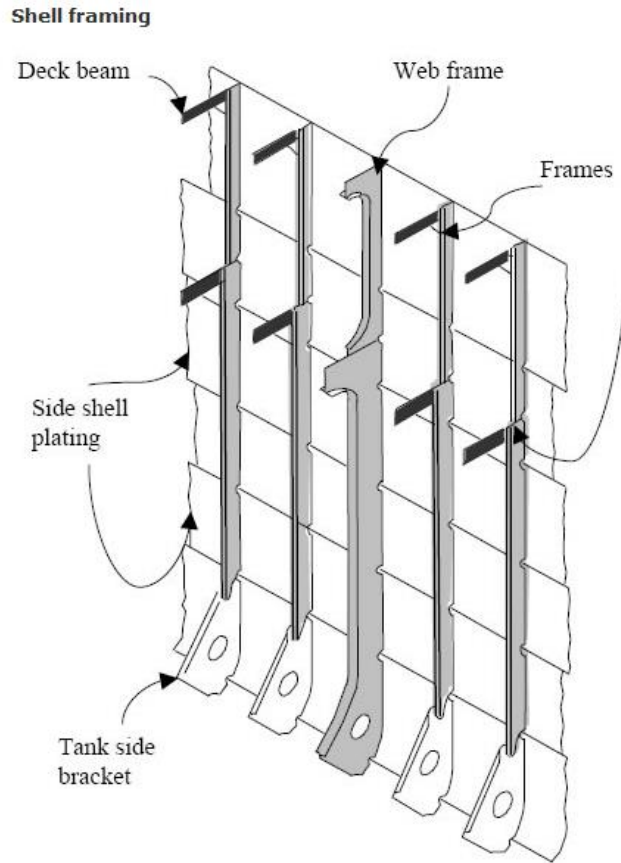
Οι νομείς (frames) είναι κατακόρυφα μέλη (βλέπε Σχήμα 6.3) τα οποία συνθέτουν την εγκάρσια ενίσχυση (framing) της πλευρικής κατασκευής της γάστρας. Το είδος του συστήματος ενίσχυσης (frame type) και η ισαπόσταση ποικίλλει ανάλογα με την κατασκευή του πλοίου (π.χ. αναλογία μήκους προς πλάτος πλοίου).

Ζυγά καταστρώματος

Τα ζυγά καταστρώματος (deck beams) είναι εγκάρσια μέλη (βλέπε Σχήμα 6.3) που συνδέουν τα άνω άκρα των νομέων, σχηματίζοντας έτσι την εγκάρσια ενίσχυση του καταστρώματος.

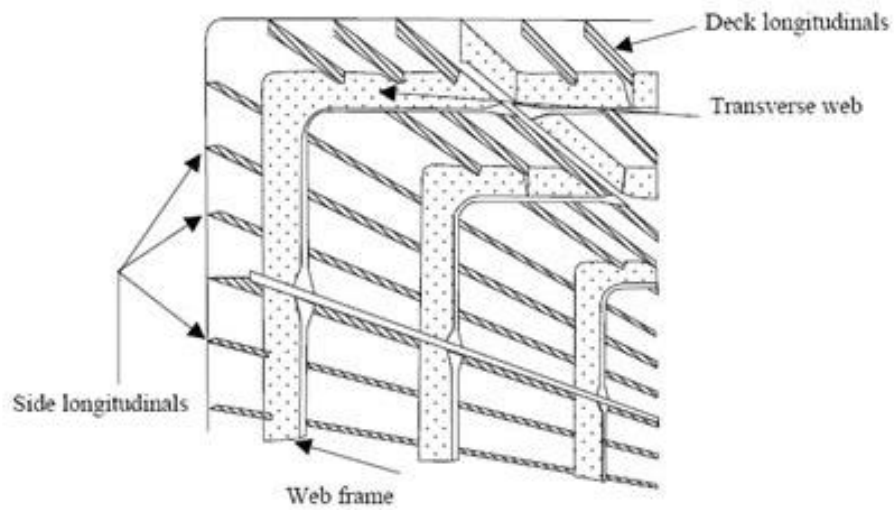
Σταθμίδες καταστρώματος

Οι σταθμίδες καταστρώματος (deck girders) είναι διαμήκη μέλη που σε συνδυασμό με τα ζυγά (του καταστρώματος) συνιστούν το ορθογώνιο πλαίσιο ενίσχυσης του καταστρώματος.



Σχήμα 6.3: Ενίσχυση του πλευρικού κελύφους [29]

Longitudinal framing, deck and shell



Σχήμα 6.4: Διαμήκης ενίσχυση καταστρώματος και πλευρικού κελύφους [29]

Διαμήκη ενισχυτικά

Τα διαμήκη ενισχυτικά (longitudinals) εφόσον χρησιμοποιούνται είναι το κύριο στοιχείο ενίσχυσης της πρωτεύουσας κατασκευής και συμβάλλουν στην παραλαβή της ολικής διαμήκης φόρτισης της κατασκευής (Σχήμα 6.4).

Ενισχυμένοι νομείς

Οι ενισχυμένοι νομείς (web frames) είναι μεγάλου (σχετικά) μεγέθους κατασκευαστικά μέλη που αντικαθιστούν έναν νομέα σε συγκεκριμένες θέσεις (συνήθως ανά τακτά διαστήματα).

Αγκώνας

Ο αγκώνας (bracket), με τη γενική έννοια του όρου, είναι κάθε κατασκευαστικό μέλος το οποίο συνδέει δύο γειτνιάζοντα κατασκευαστικά μέλη που είναι σε ορθή γωνία μεταξύ τους. Μάλιστα, στην ειδική περίπτωση όπου βρίσκεται στο άκρο των ζυγών του καταστρώματος και συνδέει το ζυγό και το νομέα στο εξωτερικό περίβλημα, ονομάζεται “beam knee”. «Οι αγκώνες μειώνουν τις καμπτικές τάσεις στα άκρα και διασφαλίζουν τη μεταφορά της φόρτισης από το ένα στοιχείο στο άλλο χωρίς να δημιουργηθούν συγκεντρώσεις τάσεων» [28].

Κολώνα

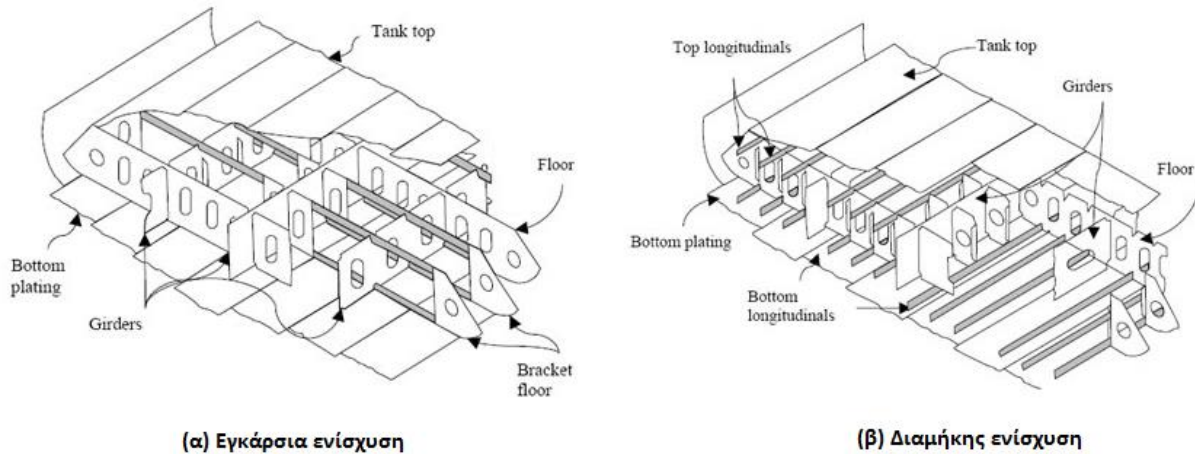
Η κολώνα (pillar) είναι το κατακόρυφο κατασκευαστικό μέλος εντός του πλοίου που συνδέει τα καταστρώματα μεταξύ τους αλλά και αυτά με τον πυθμένα του πλοίου. Με τον τρόπο αυτό μεταφέρονται τα φορτία των άνωθεν καταστρώματα προς τον πυθμένα, ο οποίος θα πρέπει να αποτελεί το πιο στιβαρό κατασκευαστικό τμήμα του πλοίου. Επίσης, οι κολώνες αυξάνουν την ακαμψία της κατασκευής στο επίπεδο της εγκάρσιας διατομής. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κύρια αστοχία των κολώνων είναι ο λυγισμός. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να σχεδιάζονται κατάλληλα, ώστε να μην προκύψει λυγισμός.

Εξωτερικό κέλυφος

Το εξωτερικό κέλυφος (outer shell plating) της γάστρας είναι το σύνολο των ελασμάτων που σχηματίζει το υδατοστεγές κέλυφος της γάστρας. Έτσι, υπάρχουν τα ελάσματα του πυθμένα (bottom plating), του καταστρώματος (deck plating), της πλευράς (shell plating) αλλά και του υδροσυλλέκτη (bilge plating).

Διπύθμενο

Το διπύθμενο (double bottom) είναι ο στεγανός χώρος μεταξύ του ελάσματος του εξωτερικού και του εσωτερικού πυθμένα. Το ύψος του ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος (όσον αφορά πλάτος) και τον τύπο του πλοίου (όσον αφορά το βύθισμα). Ένα διπύθμενο χωρίζεται σε πολλά στεγανά διαμερίσματα μέσω συμπαγών εδρών και των σταθμίδων (βλέπε Σχήμα 6.5). Πλέον τα διαμερίσματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την αποθήκευση θαλασσινού έρματος, ενώ παλαιότερα χρησίμευαν και για την αποθήκευση καυσίμων και λιπαντικών.



Σχήμα 6.5: Ενίσχυση του διύθμενου [29]

Στεγανές φρακτές

Η στεγανή φρακτή είναι μια εγκάρσια φρακτή (Σχήμα 6.6) που ενώνεται με τον εσωτερικό πυθμένα και πρέπει να εκτείνεται μέχρι το ανώτατο συνεχές κατάστρωμα. Οι στεγανές φρακτές εγκαθίστανται για:

- Την υποδιαίρεση του πλοίου σε στεγανά διαμερίσματα με στόχο τον περιορισμό της κατάκλισης σε περίπτωση βλάβης
- Τη βελτίωση της εγκάρσιας αντοχής της κατασκευής
- Την πρόληψη εκτροπής της γάστρας
- Την στήριξη των σταθμίδων του καταστρώματος και των διαμήκων ενισχύσεων
- Την άκαμπτη ένωση του εσωτερικού πυθμένα με το άνω κατάστρωμα
- Τη μείωση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς

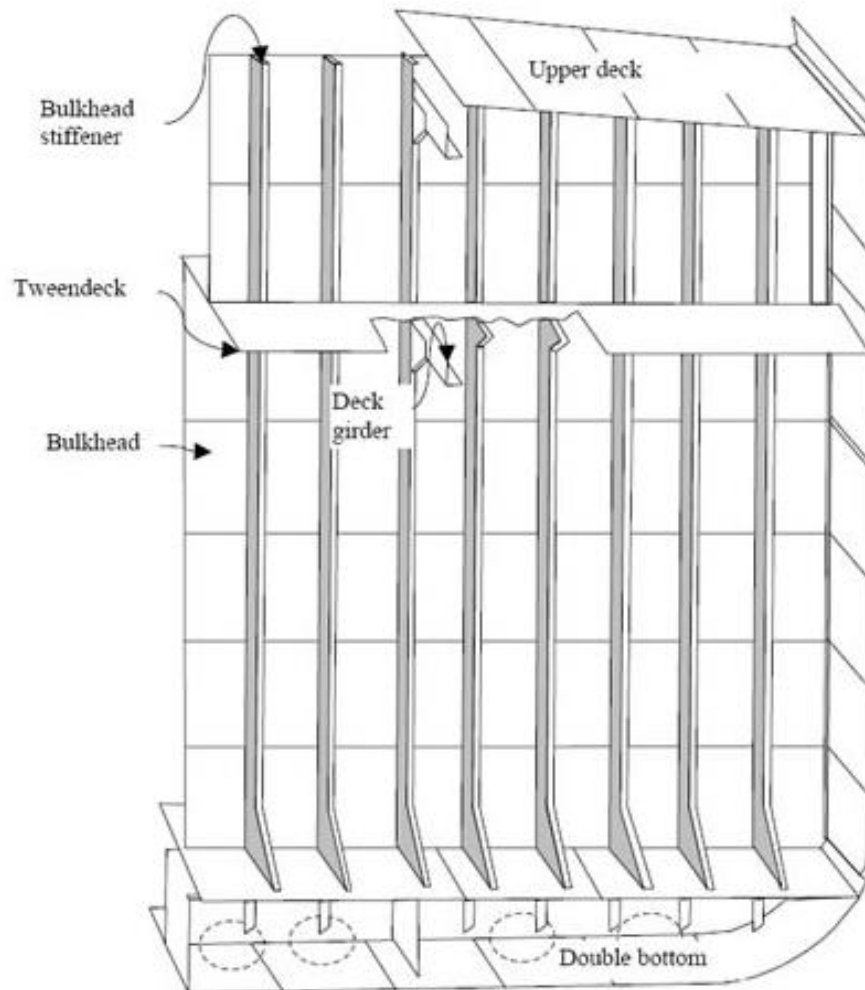
Ο αριθμός και η θέση των στεγανών φρακτών σε ένα πλοίο εξαρτάται από το μήκος και τον τύπο του πλοίου αλλά και τη θέση του μηχανοστασίου και καθορίζεται από τη διεθνή σύμβαση της SOLAS. Σε γενικές γραμμές, πρέπει να υπάρχει μια στεγανή φρακτή στην πλώρη (φρακτή σύγκρουσης), μια στην πρύμνη, η οποία θα πρέπει να δημιουργεί ένα στεγανό πρυμναίο διαμέρισμα (πρωράθεν της πρυμναίας καθέτου) που περικλείει του άξονα της έλικας, και μια σε κάθε άκρο του μηχανοστασίου. Σε κάποιες περιπτώσεις η πρυμναία στεγανή φρακτή μπορεί να ταυτίζεται με τη φρακτή στο πρυμναίο άκρο του μηχανοστασίου.

Όλα τα κατασκευαστικά μέλη που περνούν μέσα από μια στεγανή φρακτή, όπως οι αγωγοί εξαερισμού (ventilator ducts), οι σωληνώσεις (ripping) και τα ηλεκτρικά καλώδια (electric wiring), πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να διατηρείται η στεγανή ακεραιότητα των φρακτών.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι απαραίτητο να υπάρχουν ανοίγματα στις φρακτές ώστε να επιτρέπεται η κίνηση του πληρώματος ή των επιβατών μέσω αυτών. Σε αυτήν την περίπτωση εγκαθίσταται μια ολισθαίνουσα στεγανή θύρα. Ένα παράδειγμα αυτής της κατάστασης είναι η στεγανή θύρα που βρίσκεται σε ορισμένα πλοία μεταξύ του μηχανοστασίου και της σήραγγας του ελικοφόρου άξονα. Επίσης, τα κρουαζιερόπλοια έχουν πολλές από αυτές τις πόρτες που επιτρέπουν

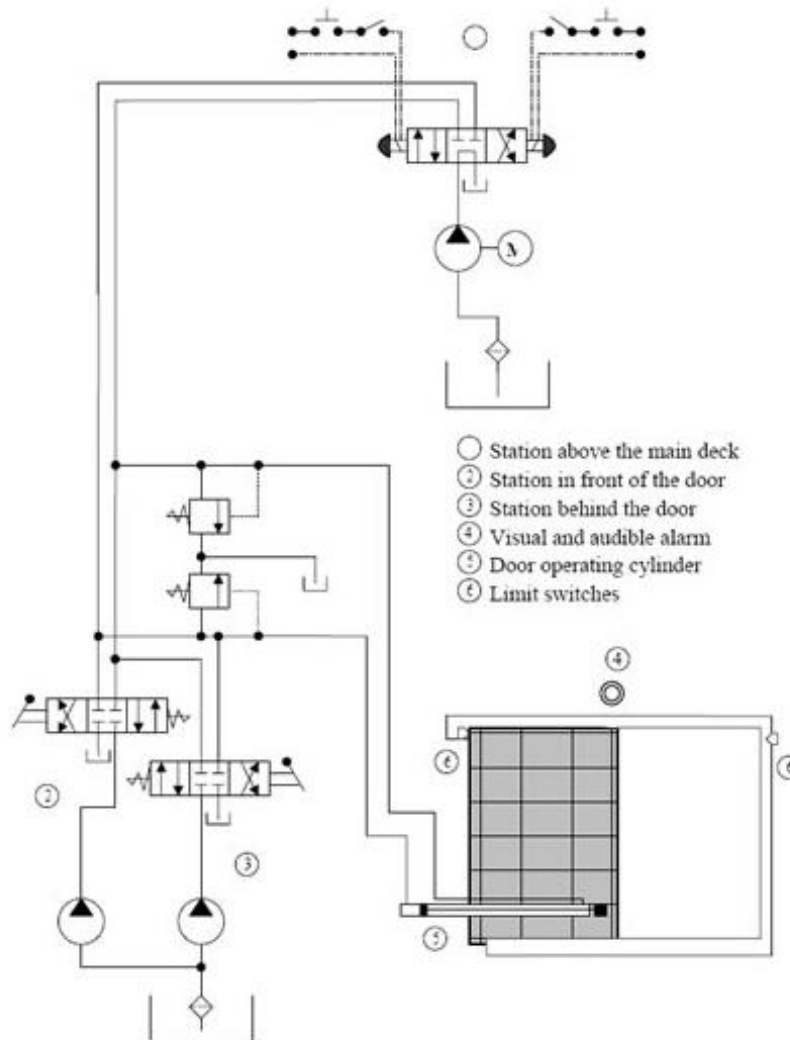
στους επιβάτες να κινούνται μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του πλοίου. Αυτές οι υδατοστεγείς πόρτες ενεργοποιούνται συνήθως υδραυλικά (Σχήμα 6.7). Τοπικοί σταθμοί ελέγχου πρέπει να βρίσκονται σε κάθε πλευρά της πόρτας. Επιπλέον, ένας απομακρυσμένος σταθμός ελέγχου (remote control station) πρέπει να τοποθετείται έξω από τα διαμερίσματα που διαχωρίζονται από τη στεγανή φρακτή.

Watertight bulkhead



Σχήμα 6.6: Διάταξη στεγανής φρακτής [29]

Watertight door operating mechanism



Σχήμα 6.7: Μηχανισμός ανοίγματος/κλεισίματος στεγανών θυρών [29]

6.2.2 Συστήματα ενίσχυσης

Για ένα οποιοδήποτε τύπο πλοίου κύριο μέλημα είναι η ασφάλεια του. Στον τομέα της ασφάλειας συνεισφέρουν διάφοροι τομείς της ναυπηγικής, εκ των οποίων ένας είναι η αντοχή του πλοίου. Θα πρέπει, λοιπόν, η μεταλλική κατασκευή να διαθέτει την απαιτούμενη αντοχή ώστε να μπορέσει να ανταπεξέλθει σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης με ασφάλεια, ανάλογα πάντα με τον τύπο και το μέγεθος του πλοίου αλλά και την περιοχή λειτουργίας του. Έτσι, για να είναι ένα πλοίο επαρκούς αντοχής θα πρέπει να είναι κατάλληλα ενισχυμένο και για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα ενίσχυσης. Ποιο, όμως, σύστημα ενίσχυσης υπάρχουν και ποιο ή ποια χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση;

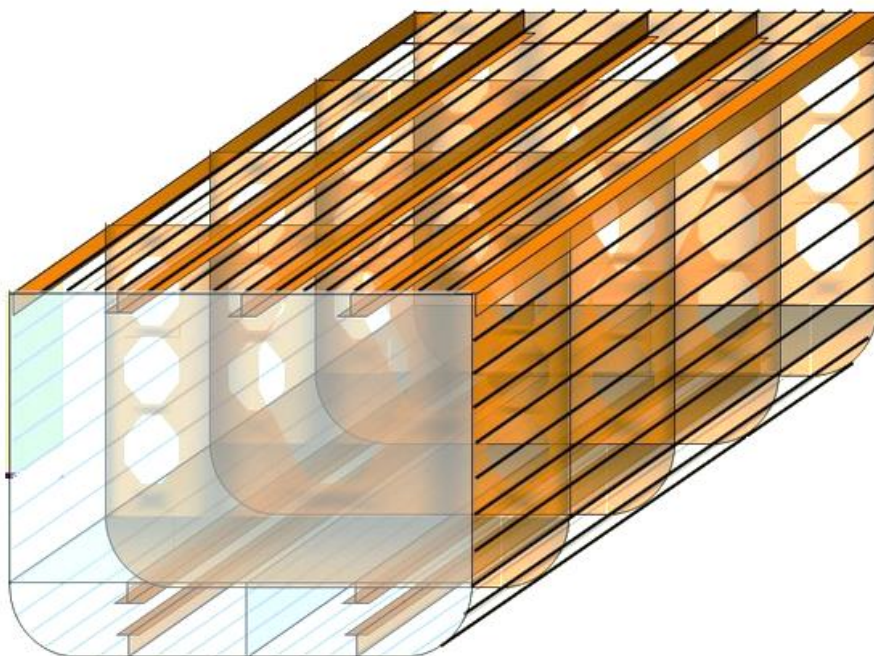
Τα συστήματα ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται είναι τρία:

- a) Διάμηκες σύστημα ενίσχυσης (Σχήμα 6.8)
- b) Εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης (Σχήμα 6.9)
- c) Μεικτό σύστημα ενίσχυσης (Σχήμα 6.10)

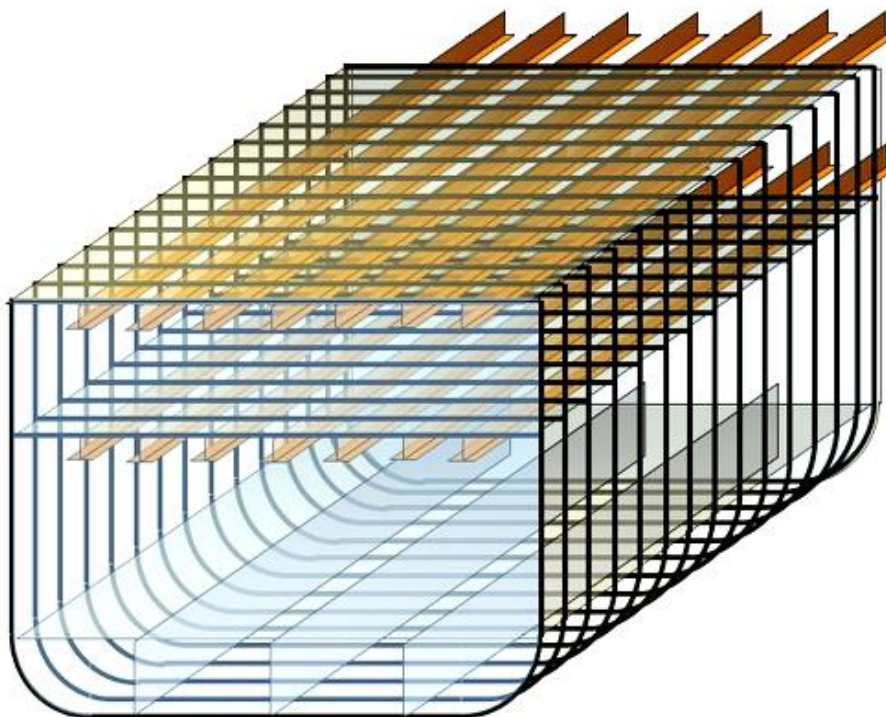
Στα μικρά πλοία (μικρότερα από 120 m) προτιμάται το εγκάρσιο σύστημα ναυπήγησης. Στο εγκάρσιο σύστημα ναυπήγησης, σε τακτές αποστάσεις κατά μήκος του πλοίου, τοποθετούνται απλοί εγκάρσιοι νομείς. Οι νομείς αυτοί αποτελούν ενισχυτικά τα οποία διατρέχουν την τομή του πλοίου από τον πυθμένα ή/και το διπύθμενο μέχρι τις πλευρές, τα καταστρώματα και τις διαμήκεις φρακτές του πλοίου, σχηματίζοντας κατά μια έννοια ένα κλειστό δακτύλιο. Ακολουθώντας, σε επίσης τακτές αλλά μεγαλύτερες αποστάσεις, τοποθετούνται ενισχυμένοι εγκάρσιοι νομείς. Προκειμένου να μειωθεί το ανυποστήρικτο μήκος των νομέων τοποθετούνται διαμήκεις πλευρικές σταθμίδες σε ισαποστάσεις. Έτσι, η διαμήκης ενίσχυση εξασφαλίζεται από την τρόπιδα, την κεντρική σταθμίδα, τις πλευρικές σταθμίδες, τις σταθμίδες καταστρώματος αλλά και τα ίδια τα ελάσματα του εξωτερικού και του εσωτερικού πυθμένα, του καταστρώματος, του πλευρικού κελύφους. Πρέπει, επίσης, να καταγραφεί ότι το εγκάρσιο σύστημα προσφέρει οικονομία βάρους (στα μικρά πλοία), καθώς σε αυτά τα πλοία η απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων φρακτών είναι μεγαλύτερη από το κούλο του πλοίου. Η εγκάρσια ενίσχυση εξασφαλίζει καλή αντοχή των διατομών ώστε να αντιστέκονται τις αναπτυσσόμενες τάσεις, τις κατακόρυφες φορτίσεις, το διατοιχισμό και το δεξαμενισμό. Ωστόσο, για μεγάλο μήκους πλοία, οι διαμητικές τάσεις (shear stresses) μπορούν να προκαλέσουν παραμορφώσεις μεταξύ των δακτυλίων.

Στα μεγάλα πλοία, όπου το μήκος υπερβαίνει τα 100 μέτρα, προτιμάται το διάμηκες σύστημα ναυπήγησης. Στο σύστημα αυτό παραλείπονται οι απλοί νομείς και παρατηρούνται στη θέση τους ενισχυμένοι νομείς ανά τακτά διαστήματα. Έτσι, οι δακτύλιοι σχηματίζονται πλέον από τους ενισχυμένους νομείς, τις έδρες και τα ζυγά καταστρώματος, οι οποίοι είναι σε μεγαλύτερες αποστάσεις από ότι στην περίπτωση του εγκάρσιου συστήματος ενίσχυσης. Για την υποστήριξη των ελασμάτων ως εκ τούτου χρησιμοποιούνται πυκνά διατεταγμένα διαμήκη ενισχυτικά, τα οποία στηρίζονται στους ενισχυμένους εγκάρσιους νομείς. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα ενισχυτικά αυτά είναι πολλά μεν αλλά σχετικά λεπτά δε. Άλλωστε, για το λόγο αυτό οι κανονισμοί επιβάλλουν και περαιτέρω ελέγχους, όπως αυτός του λυγισμού. Επίσης, χρησιμοποιούνται οι σταθμίδες καταστρώματος, οι σταθμίδες (πυθμένας) αλλά και η τρόπιδα. Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου ναυπήγησης είναι ότι παρέχεται καλύτερη αντοχή σε διαμήκη κάμψη, η οποία μειώνεται με την αύξηση του μήκους. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται καλύτερη εκμετάλλευση των υλικών με συνέπεια τη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και συνεπώς την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας αλλά και τη μείωση του κόστους ναυπήγησης. Ωστόσο, υπογραμμίζεται ότι στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων το διάμηκες σύστημα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις συνδέσεις των εγκάρσιων φρακτών, στα οποία η εσωτερική διάταξη είναι πολύπλοκη αλλά και προβλήματα στα δίκτυα σωληνώσεων, καλωδιώσεων και εξαερισμού.

Προκειμένου να αυξηθεί η στιβαρότητα της κατασκευής, τα κατακόρυφα ενισχυτικά της φρακτής ευθυγραμμίζονται, με τη βοήθεια των μπρακέτων (αγκώνων), με τα διαμήκη ενισχυτικά του πυθμένα και του καταστρώματος. Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για κατασκευαστικούς λόγους, ακόμα και σε διαμήκως ενισχυμένα πλοία, στην περιοχή της πλώρης και της πρύμνης, προτιμάται το εγκάρσιο σύστημα ναυπήγησης. Αυτό συμβαίνει γιατί είναι δύσκολη η τοποθέτηση διαμήκων ενισχυτικών σε περιοχή που παρουσιάζουν περίπλοκη γεωμετρία (π.χ. μεγάλη καμπυλότητα ελασμάτων). Επίσης δε, η κύρια φόρτιση είναι εγκάρσια και όχι διαμήκης.



Σχήμα 6.8: Διάμηκες σύστημα ενίσχυσης [80]



Σχήμα 6.9: Εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης [80]

Τέλος, το μεικτό σύστημα ναυπήγησης συνδυάζει το εγκάρσιο σύστημα ναυπήγησης με το διάμηκες. Συγκεκριμένα, στα οριζόντια ελάσματα, όπως τα καταστρώματα, ο πυθμένας και το διπύθμενο, χρησιμοποιείται διαμήκης ενίσχυση, ενώ στις πλευρές χρησιμοποιείται εγκάρσια ενίσχυση. Τα παραπάνω συμβαίνουν διότι οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις αναπτύσσονται μακριά από τον ουδέτερο άξονα (κατάστρωμα, πυθμένας, διπύθμενο) και όχι κοντά στον ουδέτερο άξονα (πλευρές). Για την αύξηση της καμπτικής ακαμψίας απαιτείται ενίσχυση κυρίως των κατασκευαστικών στοιχείων που βρίσκονται μακριά από τον ουδέτερο άξονα. Έτσι, επειδή τα καταστρώματα, ο πυθμένας και το διπύθμενο υποφέρουν περισσότερο σε διαμήκη κάμψη, προτιμάται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης. Μάλιστα, ο πυθμένας και τα καταστρώματα ανάλογα με τη μορφή της διαμήκουσ απόκρισης (hogging ή sagging) υποβάλλονται σε ομοεπίπεδη φόρτιση, όπου το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης αποτελεί μια πρώτη επιλογή (για τις περιοχές αυτές). Αντίστοιχα, για λόγους απλότητας κατασκευής, προτιμάται το εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης στις πλευρές, οι οποίες δεν συνεισφέρουν στην αύξηση της καμπτικής ακαμψίας στον ίδιο βαθμό. Ωστόσο, συνεισφέρουν στην αύξηση της διατμητικής ακαμψίας, η οποία μεγιστοποιείται στο ύψος του ουδέτερου άξονα (πλευρές πλοίου).



Σχήμα 6.10: Εγκάρσια πλευρική ενίσχυση (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος)

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, προκύπτει ότι το ιδανικό σύστημα ενίσχυσης των κρουαζιερόπλοιων είναι το μεικτό σύστημα ενίσχυσης. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του εγκάρσιου συστήματος ενίσχυσης της πλευρικής κατασκευής στα κρουαζιερόπλοια είναι η δυνατότητα χρήσης κατακόρυφης διάταξης δικτύων και σωληνώσεων χωρίς απώλεια ωφέλιμου φορτίου (βλέπε Σχήμα 6.12).

Όπως μπορεί να διαπιστώσει κανείς από το Σχήμα 6.12, η πλευρική κατασκευή του πλοίου διαθέτει εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης. Στο μεγαλύτερό της μέρος παρατηρείται η χρήση ενισχυμένων νομέων ανά τέσσερις απλούς νομείς. Η χρήση του εγκάρσιου συστήματος ενίσχυσης για την περιοχή αυτή είναι πρακτικότερη της διαμήκου ενίσχυσης, λόγω των αγωγών που υπάρχουν. Εάν χρησιμοποιούνταν το διάμηκες σύστημα τότε θα έπρεπε οι αγωγοί να βρίσκονται «πάνω» από τα ενισχυτικά και αυτό θα είχε ως συνέπεια την κακή (συγκριτικά) εκμετάλλευση του χώρου. Έτσι, στο εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης οι αγωγοί διατάσσονται παράλληλα με τους νομείς.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι όπου γίνεται χρήση ενισχυμένων νομέων δεν παρατηρείται η χρήση αγκώνων για τη σύνδεσή τους με το κατάστρωμα, σε αντίθεση με τους απλούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.13. Σημειώνεται ότι κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με τη σύνδεση των νομέων με το κάτω κατάστρωμα (car-deck), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.14.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ίδια διάταξη υπάρχει και στον χώρο του διπύθμενου, όπου στις πλευρές υπάρχουν απλοί και ενισχυμένοι νομείς, όπου στην περίπτωση των τελευταίων δημιουργούνται δακτύλιοι, ενώ στο κατάστρωμα και στον πυθμένα υπάρχουν σταθμίδες και διαμήκη ενισχυτικά.

Μάλιστα, στην περίπτωση του άνω καταστρώματος, διαπιστώνεται ότι ο αγκώνας δεν συνδέει το νομέα με τα ζυγά καταστρώματος, αλλά με τα διαμήκη ενισχυτικά καταστρώματος. Από το Σχήμα 6.12 και το Σχήμα 6.13 γίνεται εμφανές ότι για το κατάστρωμα χρησιμοποιείται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης, το οποίο είναι και το αποδοτικότερο για μεγάλου μήκους πλοίου.



Σχήμα 6.12: Σύνδεση νομέων με το (άνω) κατάστρωμα (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος)

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.13 φαίνεται η διάταξη των ζυγών καταστρώματος και των διαμήκων ενισχυτικών, αλλά και των σωληνώσεων. Όπου οι σωληνώσεις εκτείνονται κατά το διάμηκες, διατάσσονται παράλληλα με τα ενισχυτικά, διαπερνώντας τα ζυγά του καταστρώματος. Όμως, όπου εκτείνονται κατά το εγκάρσιο, «αναγκάζονται» να τοποθετούνται πιο «πάνω» από το ύψος διαμήκων ενισχυτικών, διαπερνώντας στην περίπτωση αυτή τις σταθμίδες του καταστρώματος. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι οι σταθμίδες του καταστρώματος με τα ζυγά του καταστρώματος και πάντα σε συνεργασία με το έλασμα του καταστρώματος, δημιουργούν τα γνωστά ενισχυμένα πλαίσια.



Σχήμα 6.13: Διάταξη ενισχυτικών και σωληνώσεων (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος)

Με το πέρας αυτής της ενότητας, αναφέρεται ότι στο Παράρτημα Ι έχουν καταγραφεί οι απαιτήσεις του αμερικάνικου νηογνώμονα ABS που αφορούν αποκλειστικά τη μεταλλική κατασκευή των κρουαζιερόπλοιων. Στο παράρτημα αυτό μπορεί ο ενδιαφερόμενος να ενημερωθεί σχετικά με τη διαστασιολόγηση της κατασκευής του πυθμένα, της πλευρικής κατασκευής, της κατασκευής του καταστρώματος, των στεγανών φρακτών, των φρακτών των δεξαμενών και της υπερκατασκευής.



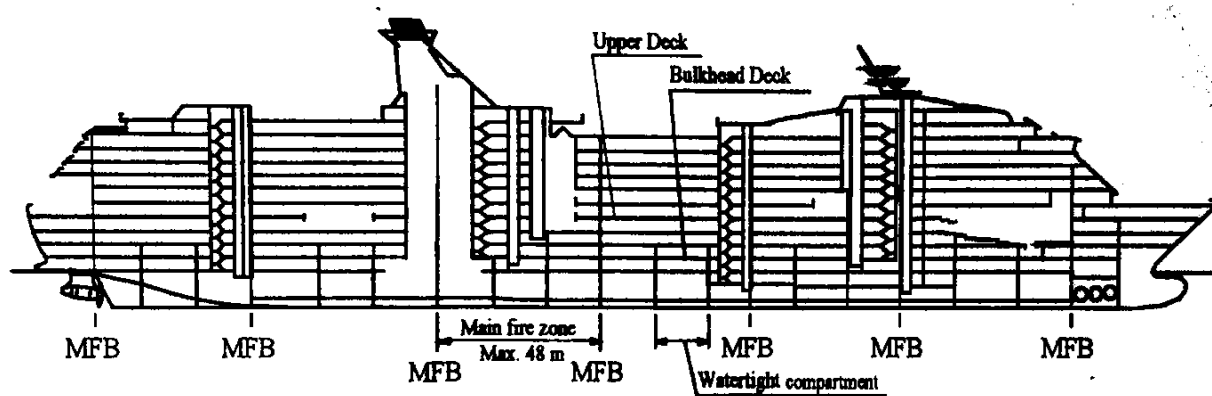
Σχήμα 6.14: Σύνδεση νομέων με το (κάτω) κατάστρωμα (Φωτογραφία από το Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος)

6.2.3 Υποδιαίρεση πλοίου

Αναμφισβήτητα, ένα κρουαζιερόπλοιο με πολλές ανέσεις και υπηρεσίες είναι ψηλά στην λίστα των επιβατών. Αλλά η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι ίσως το πιο δύσκολο και απαιτητικό έργο για τους ναυπηγούς. Καθοριστικός παράγοντας για την ασφάλεια ενός πλοίου είναι η επαρκής ευστάθεια μετά από βλάβη, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την κατάλληλη διάταξη των στεγανών φρακτών.

Η γάστρα κάτω από το κατάστρωμα φρακτών είναι υποδιαιρεμένη σε στεγανά τμήματα ώστε να εξασφαλίζεται επαρκές εκτόπισμα και ευστάθεια ακόμα και σε περίπτωση πλημμύρας. Μια τυπική υποδιαίρεση ενός επιβατηγού πλοίου φαίνεται στο Σχήμα 6.15. Τα περισσότερα επιβατηγά πλοία έχουν το πρότυπο ασφαλείας δυο τμημάτων, κάτι που σημαίνει ότι το πλοίο επιβιώνει χωρίς ανατροπή μετά από κατάκλιση οποιοδήποτε δυο γειτονικών στεγανών τμημάτων. Τα μικρά σκάφη που μεταφέρουν ένα περιορισμένο αριθμό επιβατών επιτρέπεται να έχουν πρότυπο ασφαλείας ενός τμήματος (μήκος λιγότερο από 100 m και αριθμός επιβατών λιγότερο από 500). Γενικώς, οι κανονισμοί άθικτης ευστάθειας και της ευστάθειας μετά από βλάβη για τα κρουαζιερόπλοια είναι πολύ λεπτομερείς και χρειάζονται εκτενείς υπολογισμούς.

Κάποιοι κανόνες για τη σχεδίαση και τη λειτουργία των κρουαζιερόπλοιων παρουσιάζονται ακολούθως. Κατά κανόνα, οι στεγανές θύρες των στεγανών φρακτών πρέπει να είναι κλειστές εν πλω. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει ένας υπηρεσιακός διάδρομος στο κατάστρωμα φρακτών, από την πλώρη στην πρύμνη, ο οποίος ενώνει όλα τα κλιμακοστάσια. Τέλος, η αίθουσα ελέγχου των μηχανημάτων (engine control room), η οποία έχει σημαντικές λειτουργίες ασφαλείας, θα πρέπει να είναι τοποθετημένη πάνω από το κατάστρωμα φρακτών.



Σχήμα 6.15: Φρακτές πυρκαγιάς και στεγανές φρακτές [10]

Στο άνω σχήμα παρουσιάζονται και οι φρακτές πυρκαγιάς (MFB). Ένα κρουαζιερόπλοιο που μεταφέρει περισσότερους από 36 επιβάτες πρέπει να είναι υποδιαιρεμένο κατά το διάμηκες σε κατακόρυφες ζώνες με φρακτές A κλάσης (A Class Bulkheads). Το μήκος μεταξύ των κύριων κάθετων ζωνών είναι συνήθως 40m. Ωστόσο, το μέγιστο μήκος των 48m μπορεί να επιτραπεί υπό ορισμένες συνθήκες (π.χ. εάν η φρακτή πυρός ταυτίζεται με μια στεγανή φρακτή). Τέλος, σε κάθε περίπτωση η περιοχή της κύριας κατακόρυφης ζώνης δεν πρέπει να ξεπερνά τα 1600 m² (επιφάνεια καταστρώματος) ανά κατάστρωμα.

6.3 Ναυπηγικά Υλικά

Αναμφισβήτητα, ο ρόλος των υλικών στις ναυπηγικές κατασκευές είναι καθοριστικός, πόσο μάλλον αν σκεφτεί κανείς ότι σε αρκετά ατυχήματα και απώλειες στην ιστορία της ναυτιλίας, συνέβαλε η αστοχία του υλικού. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να επιλέγονται υλικά, των οποίων η απόκριση σε ακραίες καταστάσεις, όπως η πυρκαγιά, θα πρέπει κατ' ελάχιστον να ανταποκρίνεται στις ισχύουσες απαιτήσεις των Κανονισμών.

Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι πολύ λίγες καταστροφές κρουαζιερόπλοιων μπορούν να αποδοθούν στα υλικά. Παρόλα αυτά, μια τέτοια περίπτωση αποτελεί το Scandinavian Star. Η πυρκαγιά στο πλοίο αυτό στις 7 Απριλίου 1990, η οποία πιστεύεται ότι ξεκίνησε από εμπρησμό, έδωσε μια εικόνα της σημασίας που παίζουν τα υλικά σε επικίνδυνες καταστάσεις. Μάλιστα από αυτή την περίπτωση προέκυψαν διάφορα χρήσιμα διδάγματα, μεταξύ αυτών ότι οι δηλητηριώδεις αναθυμιάσεις από τα διακοσμητικά υλικά συνείσφεραν σε ένα μεγάλο αριθμό θανάτων.

Θα πρέπει, λοιπόν, η εμπειρία από τέτοια ατυχήματα να αξιοποιείται και να εδραιώνονται νέοι κανόνες και κανονισμοί από τους διεθνείς οργανισμούς. Για παράδειγμα, ο IMO έχει εισάγει πολύ αυστηρές απαιτήσεις για την παθητική πυρασφάλεια για σκάφη που κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά. Αντίστοιχα, οι κανόνες της SOLAS απαιτούν όλα τα πλοία να συμμορφώνονται στις διατάξεις που αφορούν τους ανιχνευτές καπνού, τους συναγερμούς, τους φωτισμούς, τις θύρες πυρκαγιάς και τους υπόλοιπους κανονισμούς ασφαλείας.

Θα μπορούσε να πει κανείς ότι μέχρι το 1970, θα ήταν αδιανόητο ένα πλοίο να κατασκευαστεί από οτιδήποτε άλλο, πέραν του χάλυβα. Αυτό πλέον δεν ισχύει. Η ανάγκη του περιορισμού του βάρους της μεταλλικής κατασκευής οδήγησε στη ναυπήγηση σκαφών από αλουμίνιο, το οποίο σταδιακά έγινε το κυρίαρχο υλικό στη κατασκευή των ταχύπλων σκαφών.

Ωστόσο, οι ισχύοντες κανονισμοί αποτελούν ανασταλτικό παράγοντα για την εφαρμογή (των περισσότερων) υλικών πέρα του χάλυβα στις ναυπηγικές κατασκευές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι απαιτήσεις στις περισσότερες των περιπτώσεων είναι πιο υψηλές σε πλοία που δεν χρησιμοποιούν συμβατικά υλικά. Πολλές φορές, μάλιστα, το επιπλέον βάρος και το κόστος που προστίθεται για να επιτευχθεί το απαιτούμενο επίπεδο πυροπροστασίας, για παράδειγμα σε πλοία από σύνθετα υλικά, ελαχιστοποιεί τα όποια πλεονεκτήματά τους. Σε ένα μικρότερο βαθμό ισχύει το ίδιο και για κατασκευές από αλουμίνιο.

Ειδικά για την περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Παλαιότερα, ολόκληρο το πλοίο κατασκευαζόταν από χάλυβα. Όμως, με τα χρόνια ο χάλυβας χρησιμοποιείται για την κατασκευή της γάστρας αλλά και ένα τμήμα της υπερκατασκευής, ενώ το αλουμίνιο εφαρμόζεται στα ανώτερα τμήματα της υπερκατασκευής. Ένα από τα βασικά οφέλη του τελευταίου είναι η χαλάρωση των τάσεων με στόχο την μείωση του κινδύνου εμφάνισης ψαθυρών ρωγμών λόγω κόπωσης. Πέραν του αλουμινίου, στις μέρες μας παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον εισαγωγής των σύνθετων υλικών στα ανώτερα καταστρώματα της υπερκατασκευής των κρουαζιερόπλοιων (βλέπε Κεφάλαιο 8).

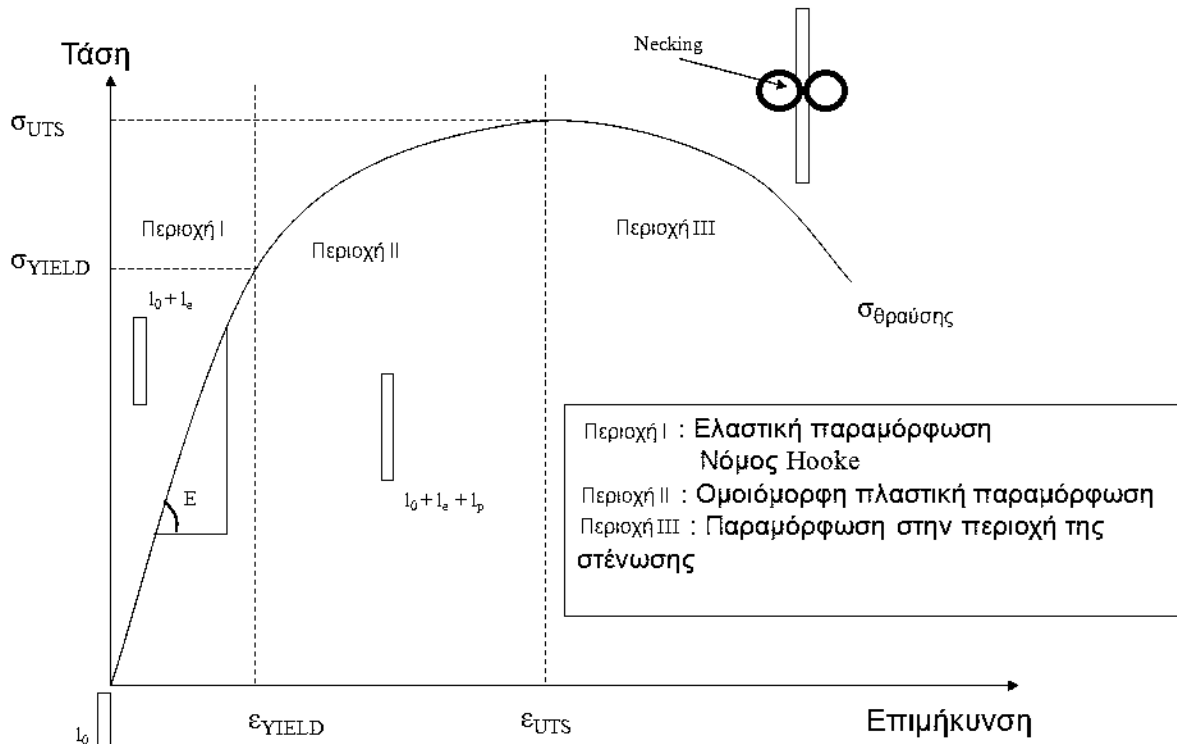
Τέλος, υλικά όπως το τιτάνιο, λόγω του υψηλού τους κόστους, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στην μεταλλική κατασκευή τέτοιων πλοίων, παρά μόνο σε μεμονωμένες περιπτώσεις όπως τα υδραυλικά δίκτυα και οι αντλίες. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη, δεν κρίνεται ωφέλιμο να πραγματοποιηθεί περαιτέρω αναφορά σε αυτό το υλικό. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι η χρήση τους περιορίζεται σε ειδικές εφαρμογές, όπως τα καταδυτικά σκάφη (Deep Submergence Rescue Vehicles, DSRVs), τα πηδάλια και οι έλικες πολεμικών πλοίων, οι ελικοφόροι άξονες και τα δίκτυα σωληνώσεων.

6.3.1 Συμπεριφορά των υλικών

Οι κύριες παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά ενός υλικού από πλευράς αντοχής είναι:

- Η ακαμψία, δηλαδή η επιμήκυνση ανά μονάδα φορτίου, της οποίας μέτρο είναι το μέτρο ελαστικότητας (E)
- Η τάση διαρροής (σ_{YIELD}), η οποία εκφράζει το όριο μετάβασης της δομής από την ελαστική στην πλαστική περιοχή
- Η μέγιστη τάση εφελκυσμού (σ_{UTS}), η οποία εκφράζει τη μέγιστη φόρτιση όπου μπορεί να παραλάβει το υλικό

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω παράμετροι προκύπτουν από διάφορα πειράματα δοκιμών που υποβάλλονται σε εφελκυσμό (βλέπε Σχήμα 6.16). Σημειώνεται ότι οι τιμές που προκύπτουν χρησιμοποιούνται ακόμη και όταν η κατασκευή υποβάλλεται σε θλίψη, προς διευκόλυνση του μελετητή μηχανικού.



Σχήμα 6.16: Διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης [81]

Στις ναυπηγικές κατασκευές είναι επιθυμητό να υπάρχει «προειδοποίηση» του υλικού πριν από τη θραύση του. Αυτό σημαίνει ότι το υλικό είναι επιθυμητό να είναι όλκιμο (ευρύ πεδίο πλαστικής απόκρισης) και όχι ψαθυρό.

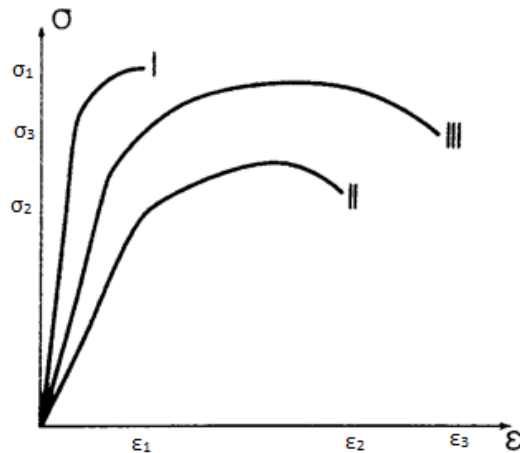
Για το λόγο αυτό τα περισσότερα υλικά ανήκουν στην κατηγορία που επιδεικνύουν ελαστική-απόλυτα πλαστική συμπεριφορά, αφού η εμπειρία μέχρι σήμερα έχει δείξει ότι αυτού του είδους η απόκριση είναι επαρκής για να αποφευχθεί η έναρξη ψαθυρής θραύσης. Σημειώνεται ότι υλικά που συμπεριφέρονται ελαστοπλαστικά (συμπεριφορά επίπεδης εντατικής κατάστασης) διαρρέονται πλαστικά αρκετά πριν από τη θραύση τους.

Τα υλικά με ελαστική συμπεριφορά (συμπεριφορά επίπεδης παραμόρφωσης) είναι υλικά με «απρόβλεπτη» συμπεριφορά, καθώς μπορεί να επέλθει ψαθυρή θραύση (π.χ. λόγω κόπωσης) χωρίς καμιά προειδοποίηση. Για το λόγο αυτό τέτοια υλικά θα πρέπει να αποφεύγονται στα πλωτά ναυπηγήματα και άλλωστε δεν είναι τυχαίο ότι τα περισσότερα υλικά δεν ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Ένα σημαντικό κριτήριο κατά την επιλογή των υλικών, πέραν της όλκιμότητας, είναι η δυσθραυστότητα. Με τον όρο δυσθραυστότητα νοείται η ικανότητα του υλικού να απορροφά ενέργεια πριν από τη θραύση του. Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η έννοια της δυσθραυστότητας στο Σχήμα 6.17 απεικονίζεται η καμπύλη (εφελκυστικής) τάσης-παραμόρφωσης τριών όλκιμων δοκιμών, όπου:

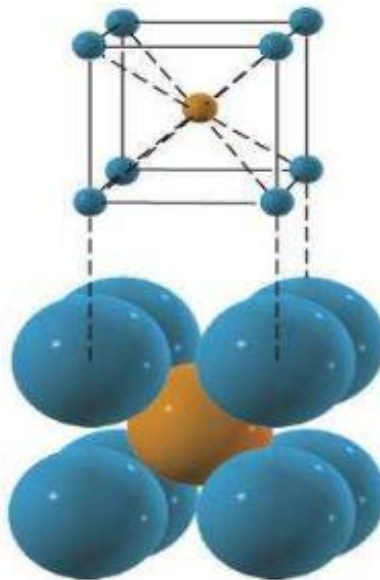
- Το υλικό I, παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά είναι το πιο εύθραυστο (μικρή δυσθραυστότητα)

- Το υλικό II, παρουσιάζει μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό και το μικρότερο όριο διαρροής, παρουσιάζοντας από την άλλη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από το υλικό I
- Το υλικό III, παρουσιάζει ενδιάμεση αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά είναι το λιγότερο εύθραυστο (μεγάλη δυσθραυστότητα)

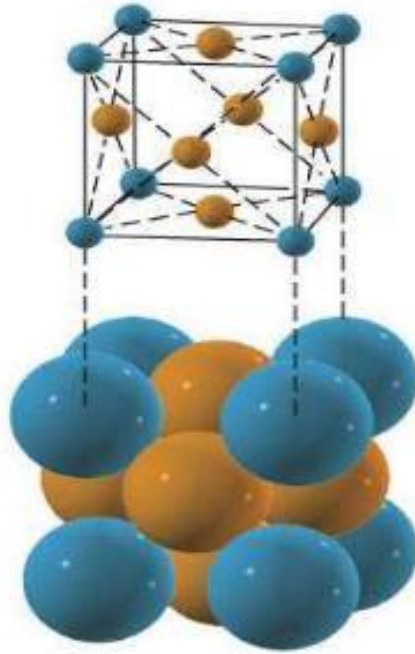


Σχήμα 6.17: Σύγκριση δυσθραυστότητας τριών όλκιμων υλικών [82]

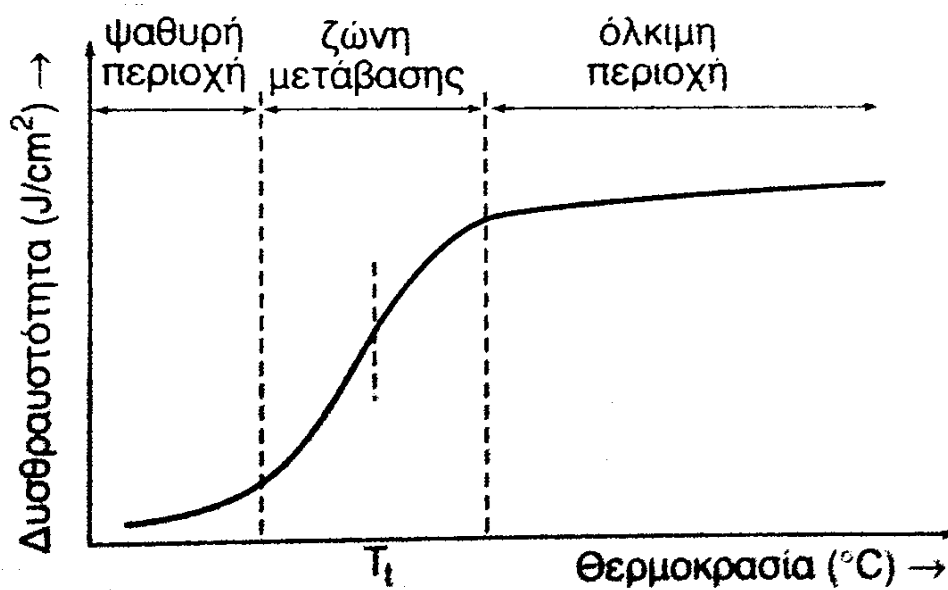
Παραδοσιακά η δυσθραυστότητα εξετάζεται με τη βοήθεια της καμπύλης μετάβασης της δυσθραυστότητας (Σχήμα 6.20). Αυτή η καμπύλη παρουσιάζει τη ζώνη μετάβασης από την ψαθυρή περιοχή στην όλκιμη, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η ζώνη αυτή ποικίλλει ανάλογα με το υλικό. Για παράδειγμα στον κοινό χάλυβα (κρυσταλλική δομή bcc – Σχήμα 6.18) η μετάβαση είναι έντονη, ενώ σε κράματα αλουμινίου (κρυσταλλική δομή fcc – Σχήμα 6.19) η μετάβαση είναι ομαλή.



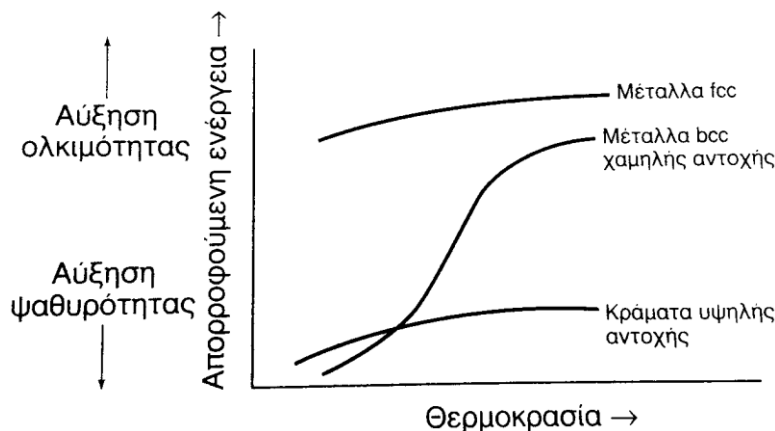
Σχήμα 6.18: Κρυσταλλική δομή bcc [83]



Σχήμα 6.19: Κρυσταλλική δομή fcc [83]



Σχήμα 6.20: Γενική μορφή καμπύλης δυσθραυστότητας-θερμοκρασίας [82]



Σχήμα 6.21: Επίδραση της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα ορισμένων μετάλλων [82]

Γίνεται κατανοητό ότι καθώς η θερμοκρασία ελαττώνεται τα μεταλλικά υλικά γίνονται ψαθυρά (Σχήμα 6.20 και Σχήμα 6.21) και αυτό είναι κάτι πολύ σημαντικό, το οποίο ο μελετητής ναυπηγός θα πρέπει να λάβει υπόψη του. Η κατασκευή ενός πλοίου που επιδεικνύει άριστη συμπεριφορά σε μια θερμή περιοχή (π.χ. Μεσόγειος) μπορεί σε μια ψυχρή (π.χ. Βαλτική) να αστοχήσει ακαριαία. Για παράδειγμα, στο ατύχημα του επιβατηγού πλοίου «Τιτανικός» το 1912, λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας του νερού, ο (τότε) χάλυβας έγινε ψαθυρός με αποτέλεσμα η ρωγμή από τη σύγκρουση, να εξαπλωθεί ραγδαία προς την πρύμνη.

6.3.2 Χάλυβας

Το πιο δημοφιλές υλικό που χρησιμοποιείται στη ναυπηγική βιομηχανία είναι ο χάλυβας (ατσάλι). Έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί διαφορετικοί χάλυβες και κράματά αυτών στις κατασκευές των πλοίων (Πίνακας 6.1), κάποιιοι με επιτυχία και κάποιιοι χωρίς. Η πλειοψηφία των ναυπηγήσεων χρησιμοποιεί χαμηλής ποιότητας κοινό χάλυβα (low grade mild steel) καθώς είναι οικονομικός καλύπτοντας, ωστόσο, τις περισσότερες ανάγκες της σχεδίασης.

Οι ναυπηγικοί χάλυβες κατατάσσονται συνήθως με βάση την τάση διαρροής τους (Πίνακας 6.2). Σύμφωνα με αυτή την παράμετρο, οι ναυπηγικοί χάλυβες χωρίζονται κατά κανόνα σε δυο κατηγορίες:

- Κοινοί χάλυβες, με $200 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{YIELD}} < 300 \text{ N/mm}^2$. Αυτή η κατηγορία χαλύβων αποτελεί και την πιο διαδεδομένη. Οι ιδιότητες τους εξαρτώνται από τη χημική σύσταση και τη μικροδομή τους, η οποία συνήθως είναι περλιτική (σεμεντίτης και φερρίτης). Πρέπει να αναφερθεί ότι πέραν του άνθρακα (της τάξης του 0.20%), περιέχουν διάφορα άλλα στοιχεία (π.χ. μαγγάνιο, θείο), τα οποία ανάλογα με την ποσότητά τους προσφέρουν τις επιθυμητές ιδιότητες στο τελικό υλικό.
- Χάλυβες υψηλής αντοχής, με $300 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{\text{YIELD}}$. Η χρήση των χαλύβων υψηλής αντοχής επιτρέπει τη μείωση του πάχους των κατασκευαστικών μελών και κατά συνέπεια του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Η κύρια διαφορά τους με τους κοινούς είναι η προσθήκη ειδικών στοιχείων (π.χ. αλουμίνιο), τα οποία βελτιώνουν τις μηχανικές ιδιότητες.

Αναμφισβήτητα, στις χαλύβδινες κατασκευές οι πιο κοινές αιτίες αστοχίας είναι η κόπωση και η διάβρωση. Παρόλα αυτά, η σχεδίαση του πλοίου περιλαμβάνει υψηλού πάχους ελάσματα, καθώς σε

αυτό περιλαμβάνεται το περιθώριο λόγω διάβρωσης. Ακόμη, εθνικοί και διεθνής κανονισμοί είναι διαθέσιμοι για τη σχεδίαση και την αξιολόγηση των κατασκευών ώστε να αντιστέκονται στην κόπωση. Το προσδόκιμο ζωής μπορεί να προβλεφθεί και να επεκταθεί με την εισαγωγή οικονομικά βιώσιμων σχεδιάσεων των ενώσεων, οι οποίες ενισχύουν την αντίσταση σε κόπωση. Επίσης, μπορούν να εφαρμοστούν επιφανειακές επεξεργασίες για να αυξηθεί η αντίσταση σε διάβρωση και κόπωση.

Από την άλλη, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η χρήση υλικών εκτός των κοινών ναυπηγικών χαλύβων για συγκεκριμένες εφαρμογές είχαν ως συνέπεια την εμφάνιση αστοχιών από άλλους μηχανισμούς, όπως για παράδειγμα οι ρωγμές λόγω διάβρωσης από μηχανική καταπόνηση (stress corrosion cracking) σε ανοξειδωτους χάλυβες.

Ακόμη, όσον αφορά τους χάλυβες υψηλής αντοχής, η εισαγωγή τους στη ναυπηγική βιομηχανία, ενώ έφερε αρκετό ενθουσιασμό λόγω του προκύπτοντα ελαφρύτερου πλοίου (υψηλότερων επιτρεπόμενες τάσεις), δημιούργησε ανησυχίες σχετικά με την κόπωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά της κόπωσης των χαλύβων υψηλής αντοχής είναι χειρότερα από αυτή των συμβατικών χαλύβων. Για το λόγο αυτό πρέπει να εφαρμόζονται μηχανοποιημένες ή ρομποτικές μέθοδοι για τη μείωση της ευαισθησίας τους στην κόπωση.

Τέλος, από τη χρήση χαλύβων ολοένα και υψηλότερης αντοχής δημιουργούνται προβλήματα που αφορούν τη δυσθραυστότητα, το λυγισμό αλλά και το υψηλό τους κόστος. Δεν θα πρέπει να αμεληθεί το γεγονός ότι καταβάλλονται προσπάθειες να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που δημιουργούνται τέτοια υλικά. Μια τέτοια προσπάθεια πραγματοποιήθηκε από τους Ιάπωνες και συνίσταται στη μέθοδο εξέλασης με θερμομηχανική διαδικασία (thermomechanical control process, TMPC).

Πίνακας 6.1: Χημικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων [28]

Κατηγορία Χάλυβα	Ποσοστιαίες περιεκτικότητες (μέγιστες τιμές)					
	C	Mn	Si	S	P	Al
A	0.23	2.5xC	0.5	0.04	0.04	-
D	0.21	0.7-1.5	0.1-0.5	0.04	0.04	0.015
E	0.18	0.7-1.5	0.1-0.5	0.04	0.04	0.015
AH32	0.18	0.9-1.6	0.5	0.04	0.04	0.015
AH36	0.18	0.9-1.6	0.5	0.04	0.04	0.015
EH36	0.18	0.9-1.6	0.1-0.5	0.04	0.04	-

Πίνακας 6.2: Μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων [28]

Κατηγορία Χάλυβα	Μηχανικές ιδιότητες		
	Τάση Διαρροής	Μέγιστη Τάση	Charpy
A	235	395-480	-
D	235	395-480	4.8/0°C
E	235	395-480	2.8/-40°C
AH32	314	435-575	2.8/0°C
AH36	353	480-605	3.5/0°C
EH36	353	480-605	3.5/-40°C

6.3.3 Αλουμίνιο

Αν και τα κράματα αλουμινίου χρησιμοποιούνται κυρίως σε ταχύπλοα σκάφη, δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται το αλουμίνιο στα ανώτερα τμήματά της υπερκατασκευής. Η επιλογή του αλουμινίου από τον μελετητή οφείλεται κυρίως στη χαλάρωση των τάσεων και στη μείωση του βάρους της κατασκευής.

Ωστόσο το θαλάσσιο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα επίπονο για κάθε υλικό και ένα σημαντικό μειονέκτημα του αλουμινίου είναι η χαμηλή του αντοχή σε κόπωση. Το γεγονός αυτό έχει ήδη προκαλέσει προβλήματα σε ένα αριθμό πλοίων από περιπολικά σκάφη (patrol craft) και ταχύπλοα επιβατηγά έως τις υπερκατασκευές μεγάλων πλοίων γραμμής. Το πρόβλημα δημιουργείται διότι ενώ στον ατμοσφαιρικό αέρα (έξαλα) τα κράματα αλουμινίου επιδεικνύουν τον ίδιο λόγο κοπωτικής αντοχής προς όριο διαρροής όπως τα περισσότερα μέταλλα, σε συγκολλητές κατασκευές και σε θαλασσινό νερό η κοπωτική αντοχή είναι μειωμένη και οι σχεδιαστές πρέπει να περιορίσουν τις τάσεις στο (αρκετά) χαμηλό επίπεδο των 30-40MPa. Για παράδειγμα, στην περιοχή της πρύμνης των ταχύπλων επιβατηγών με υδροεκτόξευση (waterjet) και κατασκευή πυθμένα από αλουμίνιο έχουν παρατηρηθεί εκτενείς ρωγμές λόγω της κόπωσης.

Μάλιστα, οι αστοχίες λόγω της κόπωσης είναι οι πιο επικίνδυνες όσον αφορά την επιβιωσιμότητα και την εκκένωση των επιβαινόντων, κάτι το οποίο είναι υψίστης σημασίας στα κρουαζιερόπλοια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχει πολύ μικρή ή και καθόλου ορατή ένδειξη, ώστε να προειδοποιήσει της επικείμενης αστοχίας, σε αντίθεση με τη διάβρωση. Έτσι, η αστοχία από κόπωση μπορεί να οδηγήσει σε μια καταστροφική αστοχία.

Επιπλέον, το καθαρό αλουμίνιο έχει χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (ευκαμψία) και είναι όλκιμο. Αυτό σημαίνει ότι παραμορφώνεται περισσότερο σε σχέση με το χάλυβα και αυτό είναι κάτι που απασχολεί έντονα τον σχεδιαστή της κατασκευής. Μπορεί, βέβαια, η όλκιμότητα να παρέχει το όφελος της προειδοποίησης του υλικού πριν από τη θραύση του, ωστόσο οδηγεί σε ταχύτερη διείσδυση του νερού. Μάλιστα, το ατύχημα του St Malo απεικονίζει ότι τα ταχύπλοα σκάφη (στα οποία επικρατεί το αλουμίνιο) μπορούν να υποφέρουν από τέτοιες ζημιές, όπου ο λιγότερο όλκιμος χάλυβας μπορεί να έχει περιορισμένη τη διείσδυση.

Για το λόγο αυτό πολλές φορές απαιτείται τροποποίηση των ιδιοτήτων του αλουμινίου, κάτι το οποίο επιτυγχάνεται με την προσθήκη διαφόρων κραμάτων αλλά και με διάφορες κατεργασίες. Ανάλογα με το κύριο στοιχείο του κράματος του αλουμινίου, προκύπτουν διάφορες σειρές (κατηγορίες), όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Κύρια στοιχεία κραμάτων αλουμινίου

Σειρά	Κύριο Στοιχείο Κράματος	Μηχανικές Ιδιότητες	Αντίσταση σε Διάβρωση
1000	Τουλάχιστον 99% Αλουμίνιο (Al)	Χαμηλές	Εξαιρετική
2000	Χαλκός	Υψηλές	Κακή
3000	Μαγγάνιο	Μέτριες	Καλή
4000	Πυρίτιο	Μέτριες	Καλή
5000	Μαγνήσιο	Υψηλές	Εξαιρετική
6000	Μαγνήσιο και Πυρίτιο	Υψηλές	Πολύ Καλή
7000	Ψευδάργυρος	Υψηλές	Φτωχή

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρώτο από τα τέσσερα ψηφία της σειράς παραπέμπει στο κύριο συστατικό του κράματος, το δεύτερο στο χαρακτηριστικό παραλλαγής, ενώ το τρίτο και το τέταρτο στο διακριτικό του συγκεκριμένου κράματος, σύμφωνα με την Aluminum Association. Στον Πίνακας 6.4 παρουσιάζονται κάποια σχετικά παραδείγματα.

Τα κράματα αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική βιομηχανία είναι αυτά της σειράς 5000 και της σειράς 6000. Ωστόσο, και σε αυτές τις κατηγορίες παρουσιάζονται διάφορα προβλήματα κατά περίπτωση. Για παράδειγμα, το κράμα 5052 ενώ χρησιμοποιείται στα μικρά σκάφη αναψυχής, λόγω της μικρής του αντοχής δεν χρησιμοποιείται στα μεγαλύτερα εμπορικά πλοία (π.χ. κρουαζιερόπλοια). Από την άλλη, τα κράματα της σειράς 6000 λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε μαγνήσιο είναι επιρρεπή στη διάβρωση με μηχανική καταπόνηση που οδηγεί σε ρωγμάτωση (stress corrosion cracking).

Πίνακας 6.4: Αντιστοιχίες ονοματολογίας κραμάτων αλουμινίου [84]

<u>AA</u>	<u>ISO</u>
5052	AlMg2.5Mn
5083	AlMg4.5Mn
5086	AlMg4
5454	AlMg3Mn
6061	AlMg1SiCu

Έτσι, τα κράματα που χρησιμοποιούνται κυρίως σε ναυπηγικές κατασκευές είναι τα 5083, 5086, 5456 και 6061. Το κράμα 5086 βρίσκει εφαρμογή στην κατασκευή της γάστρας του πλοίου, όπου απαιτούνται μέσα επίπεδα αντοχής, καλή συγκολλητικότητα και αντοχή σε διάβρωση. Τυπικές εφαρμογές αυτού είναι η πλευρική κατασκευή, τα καταστρώματα, οι φρακτές και οι δεξαμενές. Τα κράματα 5083 και 5456 χρησιμοποιούνται κυρίως σε περιοχές όπου απαιτούνται υψηλές αντοχές. Για το λόγο αυτό εφαρμόζονται σε κατασκευές όπου καλούνται να παραλάβουν πολύ υψηλό φορτίο, όπως οι γάστρες των υδροπτερυγων (hydrofoils). Τέλος, τα κράματα 6061 χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενισχυτικά των ελασμάτων. Στον Πίνακας 6.5 παρουσιάζονται οι συστάσεις των κραμάτων που αναφέρθηκαν.

Φυσικά, ο εκάστοτε μηχανικός θα πρέπει να γνωρίζει τις ιδιότητες των υλικών αυτών αλλά και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του ενός σε σχέση με το άλλο. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του αλουμινίου σε σχέση με το χάλυβα, που προορίζονται τις ναυπηγικές κατασκευές είναι τα παρακάτω:

- + Ελαφρύτερη κατασκευή για τις ίδιες απαιτήσεις (περίπου 3 φορές μικρότερη πυκνότητα από χάλυβα)
- + Μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση χωρίς προστασία
- + Μακρύτερος χρόνος (κοπωτικής) ζωής
- + Ευχέρεια διαμόρφωσης
- + Ευχάριστη όψη
- + Μικρότερο ολικό κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου (μικρότερο κόστος συντήρησης)

Αντίστοιχα, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα του είναι:

- Μεγαλύτερο κόστος ανέγερσης

- Μικρό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα από πλευράς κρούσης αλλά μειονέκτημα από πλευράς παραμορφώσεων
- Χαμηλότερο σημείο τήξης, που σημαίνει ότι υποβαθμίζονται οι μηχανικές του ιδιότητες σε θερμοκρασίες άνω των 93°C περίπου
- Γαλβανική διάβρωση
- Ιδιαιτερότητες στην κοπή και στη συγκόλληση

Πίνακας 6.5: Χημική σύσταση των κυριότερων κραμάτων αλουμινίου για ναυπηγική χρήση [84]

Alloy	(Κράμα)									
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2-2.8	0.15-0.35	0.10	—	0.05-0.15	Remainder
5083	0.40	0.40	0.10	0.40-1.0	4.0-4.9	0.05-0.25	0.25	0.15	0.05-0.15	Remainder
5086	0.40	0.50	0.10	0.20-0.7	3.5-4.5	0.05-0.25	0.25	0.15	0.05-0.15	Remainder
5454	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	2.4-3.0	0.05-0.20	0.25	0.20	0.05-0.15	Remainder
5456	0.25	0.40	0.10	0.50-1.0	4.7-5.5	0.05-0.20	0.25	0.20	0.05-0.15	Remainder
6061	0.40-0.8	0.7	0.15-0.40	0.15	0.8-1.2	0.04-0.35	0.25	0.15	0.05-0.15	Remainder
6063	0.20-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9	0.10	0.10	0.10	0.05-0.15	Remainder
6351	0.7-1.3	0.50	0.10	0.40-0.8	0.40-0.8	—	0.20	0.20	0.05-0.15	Remainder
356.0	6.5-7.5	0.6	0.25	0.35	0.20-0.40	—	0.35	0.25	0.05-0.15	Remainder
A356.0	6.5-7.5	0.20	0.20	0.10	0.20-0.40	—	0.10	0.20	0.05-0.15	Remainder
514.0	0.35	0.50	0.15	0.35	3.5-4.5	—	0.15	0.25	0.05-0.15	Remainder
520.0	0.25	0.30	0.25	0.15	9.5-10.6	—	0.15	0.25	0.05-0.15	Remainder
535.0	0.15	0.15	0.05	0.10-0.25	6.2-7.5	—	—	0.10-0.25	0.05-0.15	Remainder

Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, στην περίπτωση των κραμάτων αλουμινίου είναι ίσο περίπου με το 1/3 του χάλυβα. Από τη μια πλευρά αυτό είναι θετικό, καθώς συμβάλλει στην αποφυγή αρμών διαστολής στη σύνδεση υπερκατασκευών με τη γάστρα (χαλάρωση των τάσεων). Από την άλλη, η μεγαλύτερη παραμόρφωση είναι κάτι το αρνητικό σε περιπτώσεις, όπως η έδραση της κύριας μηχανής (στιβαρή κατασκευή).

Ωστόσο, στις περισσότερες των περιπτώσεων, η κατασκευή πρέπει να είναι άκαμπτη. Έτσι, θα πρέπει να περιορίζεται όσο το δυνατόν η (ελαστική) παραμόρφωση του αλουμινίου. Μάλιστα, επικρατεί η αντίληψη ότι θα πρέπει η παραμόρφωση του αλουμινίου να μην υπερβαίνει το 50% του χάλυβα.

Ακόμη, αποδεικνύεται ότι για την ίδια ελαστική παραμόρφωση το αλουμίνιο απαιτεί τριπλάσιο ροπή αδράνειας σε σχέση με το χάλυβα (ίδια στήριξη και φόρτιση).

$$I_A = (I_S E_S) / E_A \rightarrow I_A = 3I_S \quad (6.1)$$

όπου:

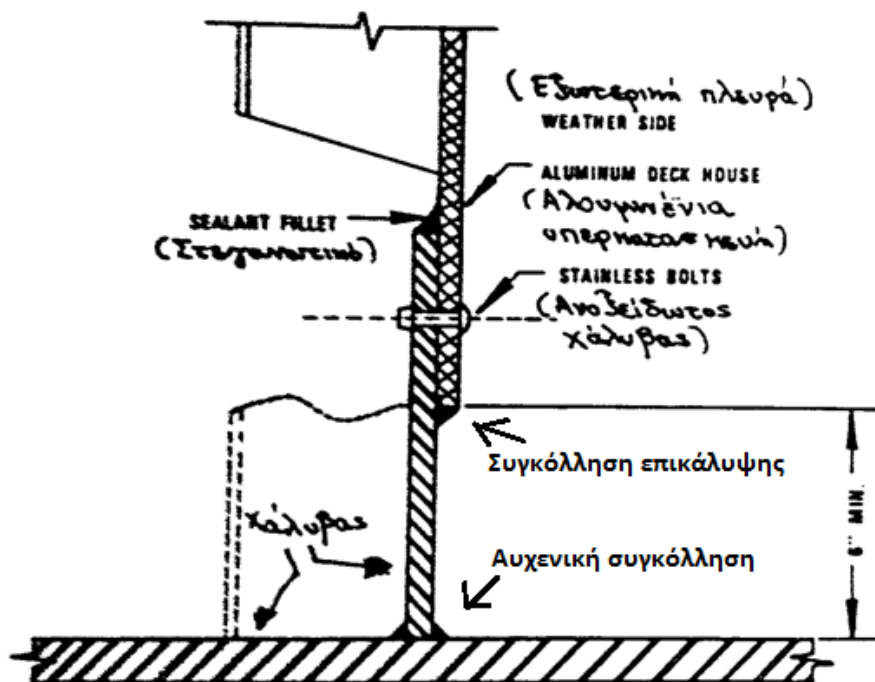
- I_A , ροπή αδράνειας αλουμινίου (m^4)
- I_S , ροπή αδράνειας χάλυβα (m^4)
- E_A , μέτρο ελαστικότητας αλουμινίου (MPa)
- E_S , μέτρο ελαστικότητας χάλυβα (MPa)

Για το λόγο αυτό, «σε κατασκευές από αλουμίνιο προτιμάται το διάμηκες σύστημα ενίσχυσης, προκειμένου να περιορίζεται η διαμήκης κάμψη τους» [84].

Φυσικά, δεν θα πρέπει να αμεληθεί το γεγονός ότι η σύνδεση αλουμινίου και χάλυβα μπορεί να προκαλέσει προβλήματα γαλβανικής διάβρωσης. Συγκεκριμένα, το αλουμίνιο σε συνδυασμό με άλλα μέταλλα, παρουσία ηλεκτρολύτη, μπορεί να διαβρωθεί λόγω δημιουργίας γαλβανικού κελιού. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρουσιαστεί σε επιφανειακές ενώσεις, όπως για παράδειγμα στη σύνδεση αλουμινένιας υπερκατασκευής με χαλύβδινο κατάστρωμα, αλλά και σε περιοχές όπου σωληνώσεις άλλων μετάλλων διαπερνούν αλουμινένιες φρακτές, καταστρώματα κλπ..

Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό ότι αν και η χρήση του αλουμινίου παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, δημιουργεί παράλληλα διάφορα προβλήματα τα οποία θα πρέπει να αντιμετωπιστούν. Έτσι, η χρήση του αλουμινίου σε μεγάλες χαλύβδινες κατασκευές απαιτεί πολλή προσοχή. Για το λόγο αυτό έχουν επινοηθεί διάφορες διατάξεις προς αντιμετώπιση των διαφόρων ζητημάτων. Για παράδειγμα, όσον αφορά το χαμηλό σημείο τήξης, η λύση είναι η κατάλληλη μόνωση, με τη χρήση πυρομονωτικών υλικών, αλλά και η εγκατάσταση συστημάτων πυρασφάλειας (π.χ. ανίχνευση και κατάσβεση πυρκαγιάς).

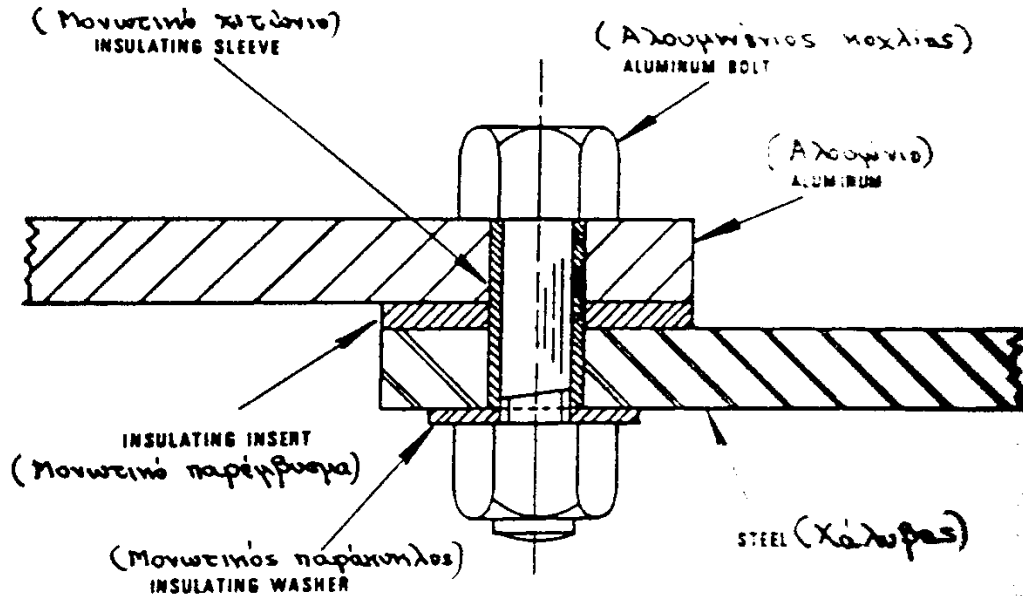
Όσον αφορά τη γαλβανική διάβρωση, η προστασία του αλουμινίου επιτυγχάνεται με τον διαχωρισμό του από τα γειτονικά μέταλλα με χρήση παρεμβυσμάτων και δακτυλίων από μονωτικά υλικά. Στο Σχήμα 6.22 και στο Σχήμα 6.23, παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες τέτοιων συνδέσεων.



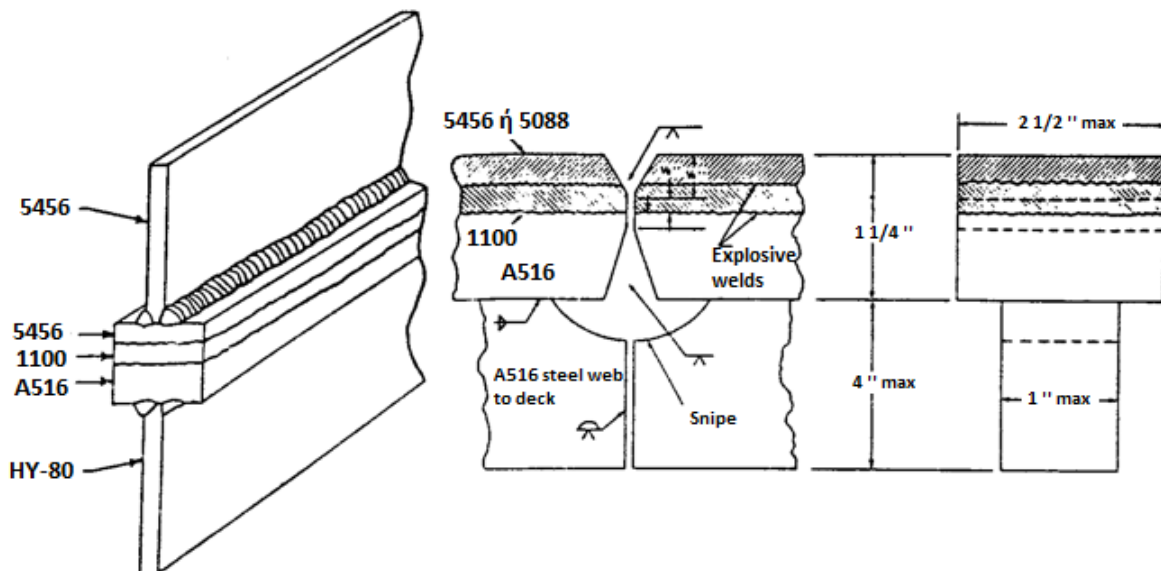
Σχήμα 6.22: Λεπτομέρεια σύνδεσης αλουμινένιας υπερκατασκευής με χαλύβδινο κατάστρωμα [84]

Μια άλλη μέθοδος αντιμετώπισης της γαλβανικής διάβρωσης είναι η συγκόλληση με εκρηκτικά (βλέπε Σχήμα 6.24), μιας σειράς στρώσεων από διαφορετικά υλικά. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται βαθμιαία μετάβαση από το κράμα αλουμινίου προς τον χάλυβα, με τη βοήθεια ενδιάμεσων στρώσεων αλουμινίου και χάλυβα. Για παράδειγμα, για τη συγκόλληση κράματος αλουμινίου 5456 με χάλυβα HY-80, τοποθετήθηκαν ενδιάμεσα οι παρακάτω στρώσεις:

- Μια στρώση από κράμα αλουμινίου 5456/5068, ενωμένη με
- Μια στρώση από κράμα αλουμινίου 1100, ενωμένη με
- Μια, πιο παχιά στρώση, από χάλυβα τύπου A516



Σχήμα 6.23: Μέθοδοι ένωση διαφορετικών υλικών [84]

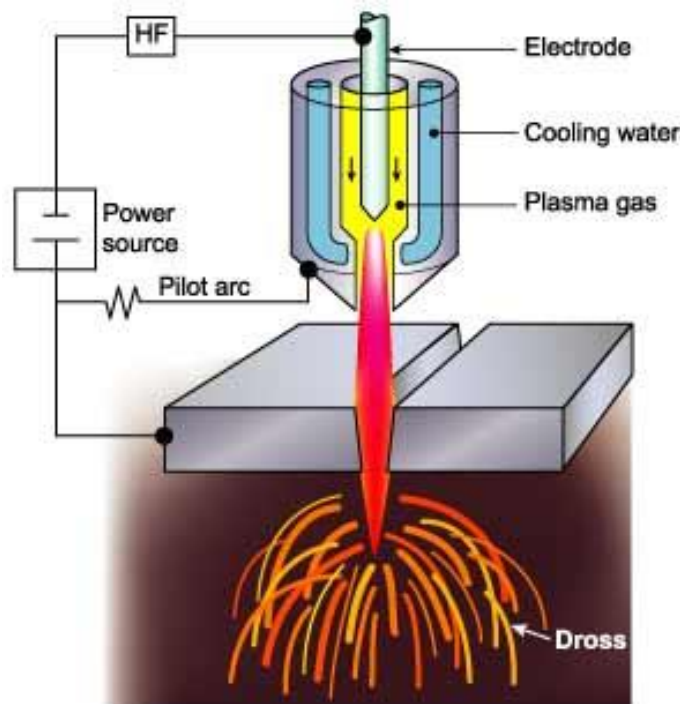


Σχήμα 6.24: Συγκόλληση αλουμινίου με χάλυβα και προστασία έναντι γαλβανικής διάβρωσης [84]

Εν συνεχεία, δεν θα πρέπει να αμεληθούν οι ιδιαιτερότητες του αλουμινίου σε θέματα κοπής και συγκόλλησης του. Όσον αφορά την κοπή, η πιο κοινή μέθοδος κοπής χαλύβδινων κατασκευών είναι η φλόγα οξυγόνου-ακετυλενίου. Ωστόσο, στην περίπτωση του αλουμινίου δεν μπορεί να εφαρμοστεί, λόγω της δημιουργίας οξειδίων με θερμοκρασίας τήξης πολύ μεγαλύτερης εκείνης του αλουμινίου (Πίνακας 6.6). Για το λόγο αυτό, οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι κοπής του αλουμινίου χρησιμοποιούν τόξο πλάσματος (plasma arc), βλέπε Σχήμα 6.25, ή τόξο βολφραμίου (tungsten arc). Σε περιπτώσεις μικρού πάχους χρησιμοποιείται ακόμη και μηχανικό πριόνι (saw).

Πίνακας 6.6: Θερμοκρασίες τήξης

Μέταλλο	Θερμοκρασία (°C)	Οξείδιο	Θερμοκρασία (°C)
Fe	1537	FeO	1366
Al	660	Al ₂ O ₃	2038
Cr	1799	Cr ₂ O ₃	2260
Ni	1566	NiO	1949



Σχήμα 6.25: Κοπή με τόξο πλάσματος [85]

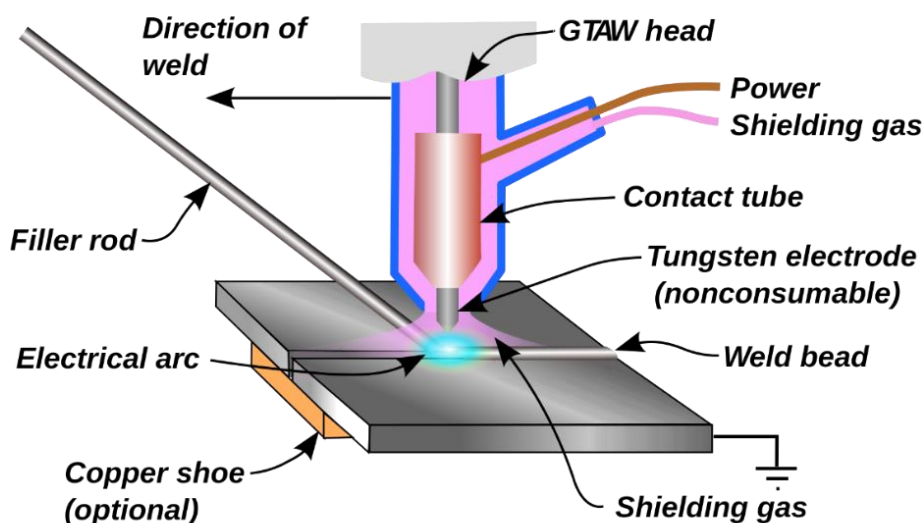
Ως γνωστό, τα πλοία κατασκευάζονται σε τμήματα (modules) τα οποία συν αρμολογούνται στη ναυπηγική κλίνη. Η ένωση μεταξύ αυτών των τμημάτων είναι ζωτικής σημασίας. Έχει διαφανεί ότι οι ρωγμές που παρουσιάζονται στις ραφές (seams) μπορούν να προχωρήσουν κατά την έκταση των αδιάκοπων περασμάτων των συγκολλήσεων σε έναν ανησυχητικό βαθμό. Είναι, επίσης, γνωστό ότι τα τμήματα αυτά μπορούν να αστοχήσουν σε κακές καιρικές συνθήκες. Άλλωστε δεν είναι λίγα τα

περιστατικά που υπήρξε ολική απώλεια πλοίου εξαιτίας κακής συγκόλλησης. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να δίνεται πολλή προσοχή στη συγκόλληση, πόσο μάλλον στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, λόγω της χρήσης υπερκατασκευών από αλουμίνιο σε χαλύβδινες γάστρες. Μάλιστα, σε τέτοιες περιπτώσεις οι αρθρώσεις μετάβασης (transition joints) είναι ένα συνηθισμένο χαρακτηριστικό των πλοίων αυτών (βλέπε Κεφάλαιο 5).

Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι συγκόλλησης είναι με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas tungsten arc welding, GTAW) και με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (gas metal arc welding, GMAW ή MIG).

Για τη συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (βλέπε Σχήμα 6.26), θα πρέπει να αναφερθεί ότι είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί αδρανές αέριο για την προστασία της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα. Η βασική διαφορά της από τη μέθοδο συγκόλλησης με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου έγκειται στο γεγονός ότι το χρησιμοποιούμενο ηλεκτρόδιο είναι από μη τηκόμενο βολφράμιο.

Αντίστοιχα, «η συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (βλέπε Σχήμα 6.27) είναι η μέθοδος που χρησιμοποιείται προστασία αερίου και όπου η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από το ηλεκτρικό τόξο που σχηματίζεται μεταξύ ενός τηκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων» [84]. Πρέπει να αναφερθεί ότι ο βασικός σκοπός δημιουργίας αυτής της συγκόλλησης ήταν η συγκόλληση κραμάτων αλουμινίου.

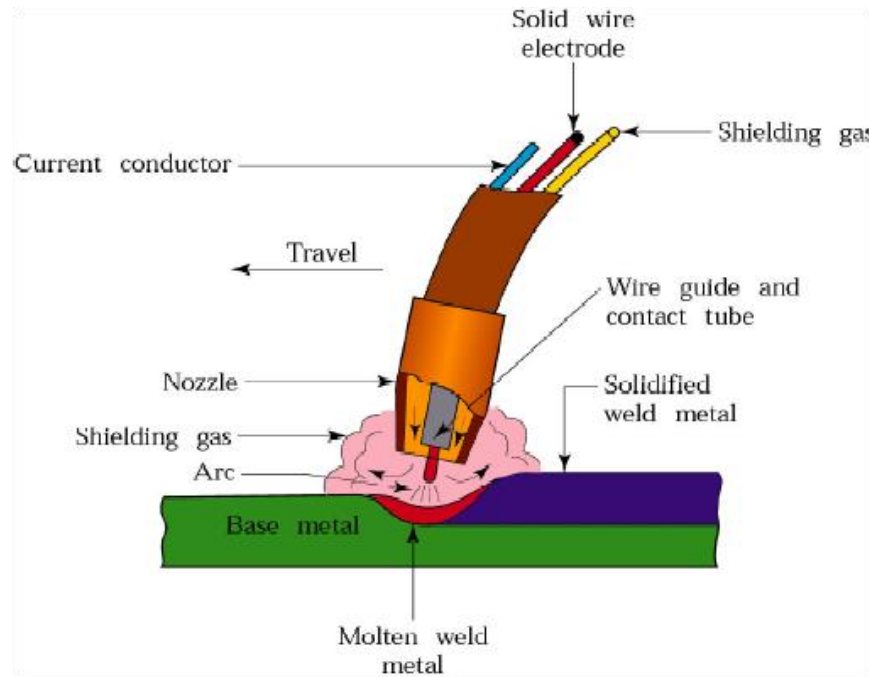


Σχήμα 6.26: Συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου [86]

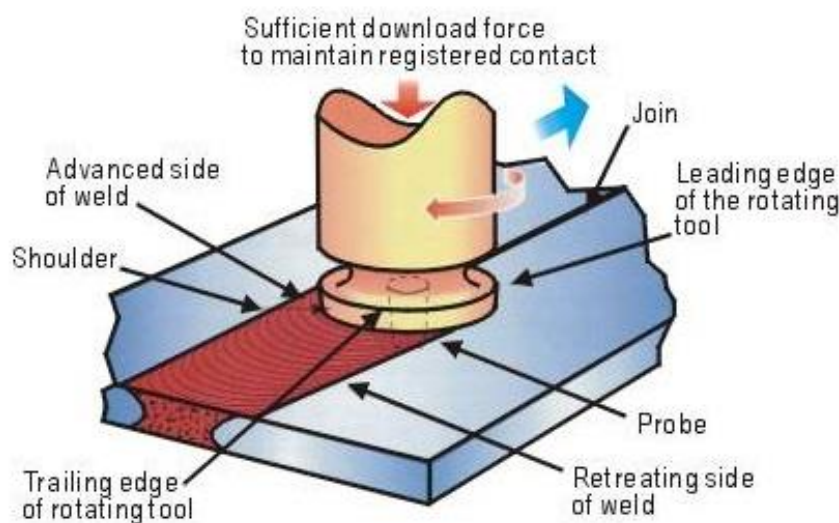
Φυσικά, δεν θα πρέπει να παραλειφθεί η συγκόλληση τριβής, η οποία ήδη έχει παίξει σημαντικό ρόλο στη ναυπηγική. Το κυριότερο πλεονέκτημα της είναι η μικρή στρέβλωση και θερμική διαστολή (thermal disruption) που προκαλεί αλλά και η ικανότητα σύνδεσης διαφορετικών υλικών (π.χ. αλουμίνιο με χάλυβα). Οι τεχνικές που ενδιαφέρουν τους ναυπηγούς και τους πλοιοκτίτες περιλαμβάνουν:

- Συγκόλληση τριβής με ανάδευση (Friction stir welding) για συγκολλήσεις χωρίς στρεβλώσεις σε ελάσματα αλουμινίου και τομείς (Σχήμα 6.28)

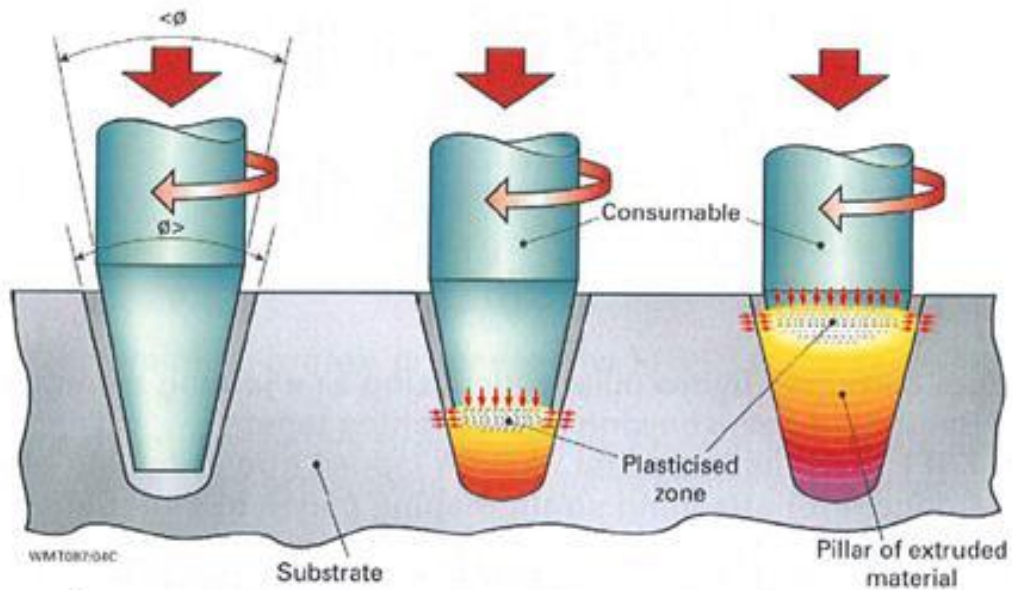
- Υδρο-στήλη τριβής (Friction hydro-pillar) για την επισκευή ελαττωμάτων σε παχιές τομές (Σχήμα 6.29)
- Επιφανειακός καθαρισμός με τριβή (Friction surfacing) για την απομάκρυνση της διάβρωσης ή για υλικά ανθεκτικά στη φθορά σε νέα ή φθαρμένα εξαρτήματα (Σχήμα 6.30)
- Συγκόλληση τριβής (Friction welding) για υψηλής ποιότητας σύνδεσης καρφιών (studs) (Σχήμα 6.31)



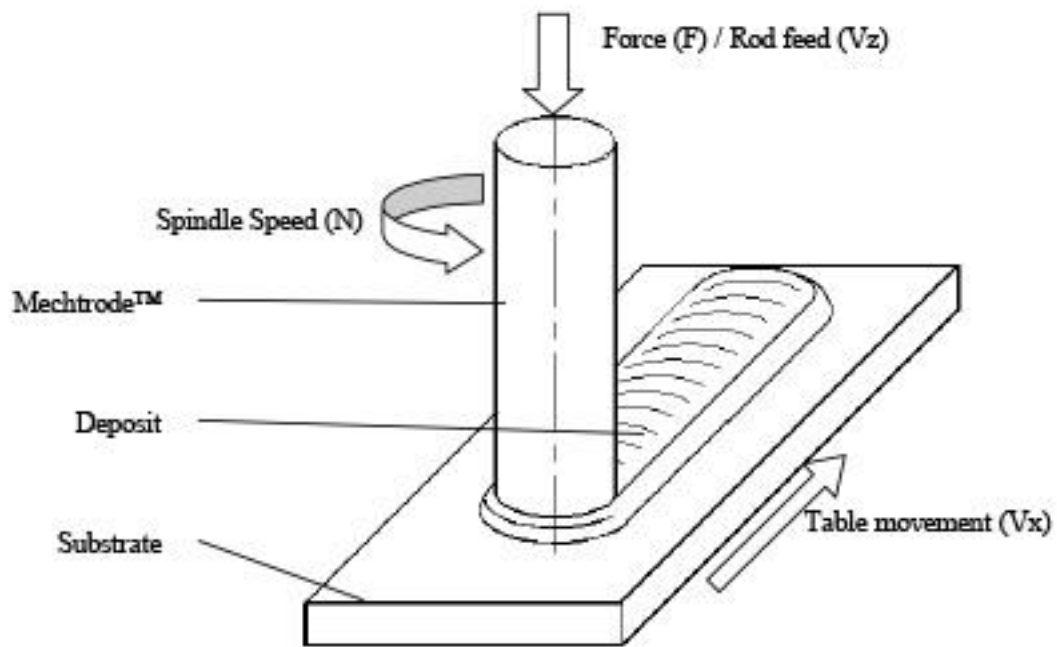
Σχήμα 6.27: Συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου [87]



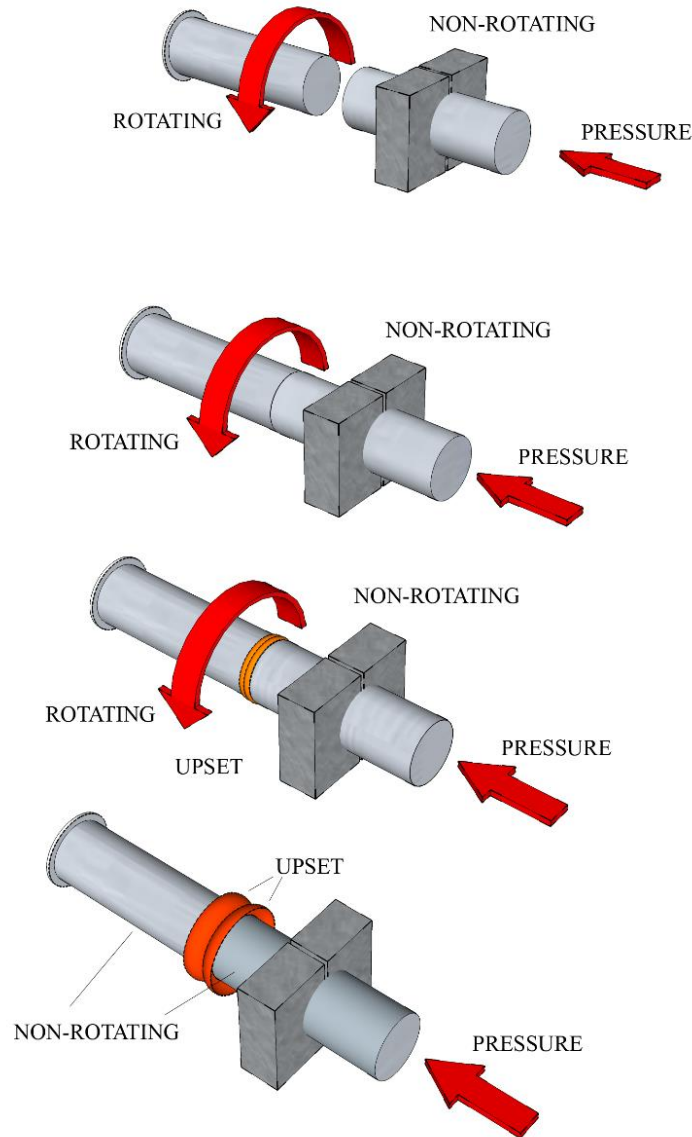
Σχήμα 6.28: Συγκόλληση τριβής με ανάδευση [88]



Σχήμα 6.29: Υδρο-στήλη τριβής [89]



Σχήμα 6.30: Επιφανειακός καθαρισμός με τριβή [90]



Σχήμα 6.31: Συγκόλληση τριβής [91]

Κλείνοντας, θα πρέπει να τονισθεί ότι στις συγκολλήσεις του αλουμινίου παρατηρούνται διάφορα προβλήματα, τα οποία θα πρέπει να γνωρίζει ο μελετητής ναυπηγός. Για παράδειγμα, το αλουμίνιο έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να εγκλωβίσει αέρια (πιο ενεργά θερμοδυναμικά υλικά), δημιουργώντας πόρους στη συγκόλληση. Ακόμη, λόγω του μεγαλύτερου συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από το χάλυβα), του μεγαλύτερου γραμμικού συντελεστή διαστολής (περίπου δυο φορές μεγαλύτερο από αυτόν του χάλυβα) και του μικρότερου μέτρου ελαστικότητας (περίπου τρεις φορές μικρότερο από αυτόν του χάλυβα), προκαλούνται μεγαλύτερες συστολές και παραμορφώσεις. Τελευταίο αλλά όχι λιγότερο σημαντικό αποτελεί το γεγονός της μείωσης της αντοχής στη θερμικά επηρεασμένη ζώνη (ΘΕΖ) και κυρίως στα κράματα της σειράς 6000. Για παράδειγμα, το κράμα 6061 ενώ εμφανίζει ονομαστική αντοχή 289MPa, στην περιοχή της συγκόλλησης αυτή μειώνεται στα 165MPa.

6.3.4 Σύνθετα υλικά

Με τον όρο «σύνθετο υλικό» νοείται το υλικό εκείνο το οποίο αποτελείται από δύο τουλάχιστον διαφορετικά μεταξύ τους υλικά. «Ειδικότερα, ως σύνθετα υλικά αναγνωρίζονται σήμερα εκείνα τα υλικά, των οποίων τα συνιστώντα μέρη έχουν σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, έτσι ώστε και το ίδιο το σύνθετο υλικό να έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συνιστώντων μερών.» [92]. Δεν θα πρέπει τα υλικά αυτά να συγχέονται με τα κράματα, καθώς το προκύπτοντα υλικό δεν είναι ένα ομοιογενές υλικό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ένωση των υλικών συμβαίνει σε μακροσκοπική κλίμακα. Ένα παράδειγμα σύνθετου υλικού είναι το οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτό το γνωστό σύνθετο υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον στις οικοδομικές εργασίες, αποτελείται από δυο διακριτά υλικά, το καθαρό σκυρόδεμα (μπετόν) και από τον οπλισμό (μπετόβεργες).

Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τρεις υποκατηγορίες (βλέπε Σχήμα 6.32):

- Τα ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composite materials, fiber reinforced plastics, FRP)
- Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composite materials)
- Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composite materials)



Σχήμα 6.32: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων ειδών σύνθετων υλικών [92]

Στη ναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιούνται μόνο οι δυο πρώτοι τύποι σύνθετων υλικών και για το λόγο αυτό γίνεται ανάλυση μονάχα αυτών των περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από τη μήτρα (matrix), μέσα στην οποία βρίσκονται οι ίνες. Οι ίνες αυτές μπορεί να είναι σε συγκεκριμένη διάταξη (πλέξη και προσανατολισμός) αλλά και άτακτα κατανεμημένες. Οι τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού καθορίζονται κυρίως από τις ίνες, ενώ η μήτρα έχει το ρόλο του προστατευτικού και συνδετικού υλικού των ινών.

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά αποτελούνται από το λιγότερο δυο στρώσεις ινωδών σύνθετων υλικών. Μάλιστα, ο προσανατολισμός αυτών των στρώσεων είναι τέτοιος ώστε να αποδίδονται στο τελικό πολύστρωτο (laminated) οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες.

Η χρήση τέτοιων υλικών στην κατασκευή των πλοίων παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα. Αναμφισβήτητα, τα κυριότερα από αυτά είναι το μικρό τους ειδικό βάρος, το οποίο οδηγεί σε υψηλές ειδικές ιδιότητες (π.χ. υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος τους), και η αντοχή τους σε διάβρωση. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα τους καταγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω:

- + Μικρό βάρος: Ένα σκάφος από σύνθετα υλικά είναι περίπου ίσο με το μισό του βάρους ενός χαλύβδινου.
- + Υψηλή αντοχή: Η αντοχή των σύνθετων υλικών σε σχέση με το βάρος τους είναι πολύ υψηλότερη από αυτή των χαλύβδινων.

- + Αντίσταση στο θαλάσσιο περιβάλλον: Τα σύνθετα υλικά δεν διαβρώνονται ούτε αλλοιώνονται. Η επιφάνειά τους όμως γεμίζει με όστρακα και φύκια όταν είναι πολύ καιρό στάσιμα, όπως άλλωστε και στις άλλες κατασκευές. Η απουσία διάβρωσης έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη απαιτούμενη συντήρηση, εφόσον δεν απαιτείται συχνός καθαρισμός και βαφή τους.
- + Αντοχή σε κρουστικά φορτία και κόπωση: Η αντοχή τους σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις και σε κρουστικά φορτία είναι εξαιρετική.
- + Χημική αδράνεια: Τα σύνθετα υλικά δεν υπόκεινται σε ηλεκτρόλυση (π.χ. γαλβανική διάβρωση).
- + Απουσία συγκολλήσεων: Συνήθως κατασκευάζονται ως αυτόνομα τμήματα (καλούπι) και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν ραφές συγκόλλησης. Φυσικά, η απουσία ραφών αποδίδει και ένα καλύτερο αισθητικά αποτέλεσμα.
- + Προσανατολισμός των κύριων διευθύνσεων αντοχής: Είναι εφικτό ο κατασκευαστικός σχεδιαστής να τοποθετήσει με τέτοιο τρόπο το σύνθετο υλικό ώστε ο προσανατολισμός των ινών να είναι παράλληλος με τη διεύθυνση των μεγίστων τάσεων, εξοικονομώντας υλικό και βάρος (π.χ. λόγω ενισχυτικών).
- + Απόσβεση: Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα και ιδιαίτερα για την περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων είναι τα πολύ καλά χαρακτηριστικά που επιδεικνύουν τα σύνθετα υλικά σε απόσβεση (damping), περιορίζοντας κατά αυτό τον τρόπο τους θορύβους και τους κραδασμούς (π.χ. κύρια μηχανή).
- + Επισκευασιμότητα: Τα σύνθετα υλικά επισκευάζονται αρκετά πιο εύκολα από ότι τα υπόλοιπα υλικά.
- + Διάρκεια ζωής: Σε γενικές γραμμές στα σύνθετα υλικά δεν μειώνονται οι μηχανικές ιδιότητες εντός 15 ετών.
- + Ευκαμψία: Το πλεονέκτημα της ευκαμψίας έγκειται σε περιοχές όπου είναι επιθυμητή η απορρόφηση ενέργειας (π.χ. περιοχή πλήρωσης λόγω σφυρόκρουσης).

Από την άλλη, τα σύνθετα υλικά έχουν και κάποια μειονεκτήματα, τα οποία περιορίζουν τη χρήση τους σε μεγάλες ναυπηγικές κατασκευές, όπως φαίνονται ακολούθως:

- Ευκαμψία: Το μειονέκτημα της ευκαμψίας ανακύπτει όταν δεν είναι επιθυμητή η απορρόφηση ενέργειας, καθώς επιδιώκεται μεγάλη ακαμψία-μικρά βέλη κάμψης (π.χ. έδραση κύριας μηχανής).
- Ερπυσμός: Κάτω από υψηλή συνεχή φόρτιση τα σύνθετα υλικά υπόκεινται σε ερπυσμό, το οποίο εκδηλώνεται σαν αργή και συνεχής παραμόρφωση. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να περιορίζονται τα μόνιμα φορτία.
- Φθορά λόγω τριβής: Τα σύνθετα υλικά δεν χαρακτηρίζονται από καλή αντίσταση σε τριβή και για αυτό δεν θα πρέπει να τοποθετούνται σε τέτοιες περιοχές, όπως για παράδειγμα στα αμπάρια των φορτηγών πλοίων, όπου παρατηρούνται τριβές λόγω του ίδιου του φορτίου αλλά και του γερανού φόρτωσης-εκφόρτωσης (grab).
- Δεξαμενές πετρελαίου: Το πετρέλαιο μπορεί να διείσδυση κάτω από κάποιες συνθήκες στο σύνθετο, εμποτίζοντας το.
- Ευπάθεια σε φωτιά: Γενικώς, τα σύνθετα υλικά δεν χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή σε πυρκαγιά, εκτός κάποιων περιπτώσεων όπου συντηρούν την καύση αλλά μετά χάνουν τις ιδιότητές τους.

- Κόστος υλικού: Πολλές φορές το κόστος τους είναι ο κύριος ανασταλτικός παράγοντας εφαρμογής του σε ναυπηγικές κατασκευές. Για παράδειγμα, το κόστος του χάλυβα είναι της τάξης του 0.8\$/kg (τιμή για το έτος 2014), ενώ ενός σύνθετου κυμαίνεται από 1.6\$/kg έως και 35.6\$/kg (Πίνακας 6.7).

Πίνακας 6.7: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες και κόστος διάφορων τύπων πολύστρωτων [84]

Material	Fibre Ratio	Density (gm/cc)	UTS (MPa)	Tensile Mod. (GPa)	UCS (MPa)	Cost (€/kg)
E-Glass CSM	0.33	1.44	80-130	7.3-9.3	140-150	1.6
E-Glass WR	0.50	1.63	210-300	12-21	150-270	1.8
S-Glass WR	0.50	1.64	440	20	210	5.5
KEVLAR 49 WR	0.44	1.31	430	26	115	17.1
Carbon WR	0.40	1.40	460	30	-	35.6

Στον Πίνακα 6.8 πραγματοποιείται σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων κάποιων πολύστρωτων FRP με το χάλυβα και το αλουμίνιο. Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών γίνονται κατανοητά, συγκρίνοντας το όριο διαρροής τους με αυτό του χάλυβα. Σημειώνεται ότι η σύγκριση πρέπει να πραγματοποιείται στις διευθύνσεις των ενισχυτικών ινών καθώς κατά τα διάμηκες παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, από ότι κατά το εγκάρσιο (ανισοτροπικότητα ή ορθοτροπικότητα). Φυσικά, δεν ισχύει το ίδιο για το χάλυβα και το αλουμίνιο, τα οποία είναι ιστροπικά υλικά, έχουν δηλαδή ίδιες ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις. Στο Σχήμα 6.33, παρουσιάζεται η μηχανική συμπεριφορά των ιστροπικών, ορθοτροπικών και ανισοτροπικών υλικών.

Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες προσπάθειες εισαγωγής σύνθετων υλικών στη ναυπηγική βιομηχανία, όπως για παράδειγμα, τα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πλαστικά (Glass Fibre Reinforced Plastics – GRP) γίνονται ανταγωνιστικά σε σχέση με το χάλυβα στην κατασκευή των μικρών, αργών εμπορικών πλοίων όπου δέκα ή περισσότερες γάστρες ή σκάφη πρόκειται να κατασκευασθούν. Ένα GRP είναι πολύστρωτο χαμηλής τεχνολογίας πολύστρωτο (low-tech laminate) όπως η πολυεστερική ρητίνη με ενίσχυση γυαλιού, ίσως σε μια κατασκευή sandwich με ξύλο balsa ή κλειστού κελύφους αφρό. Ωστόσο, λίγα σκάφη με μήκος πάνω από 25m έχουν κατασκευαστεί από GRP.

Ακόμη, πλαίσια πολλαπλών στρώσεων με πυρήνα (βλέπε Σχήμα 6.34) αφρού από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες (foam sandwich panels of fibre reinforced composites - FRC) μπορούν να αντικαταστήσουν το αλουμίνιο σε περιοχές μακριά από τα σαλόνια των επιβατών και τα καταστρώματα αυτοκινήτων (περίπτωση E/Γ-O/Γ) σε περιοχές δηλαδή, οι οποίες δεν υποβάλλονται σε αυστηρούς κανονισμούς πυρασφάλειας. Ένα FRC είναι ένα υψηλότερης απόδοσης υλικό από ότι ένα GRP, όπως μια εποξική ρητίνη με σκληρή ενίσχυση, για παράδειγμα ένα μείγμα από Kevlar, άνθρακα (carbon) και/ή γυαλί.

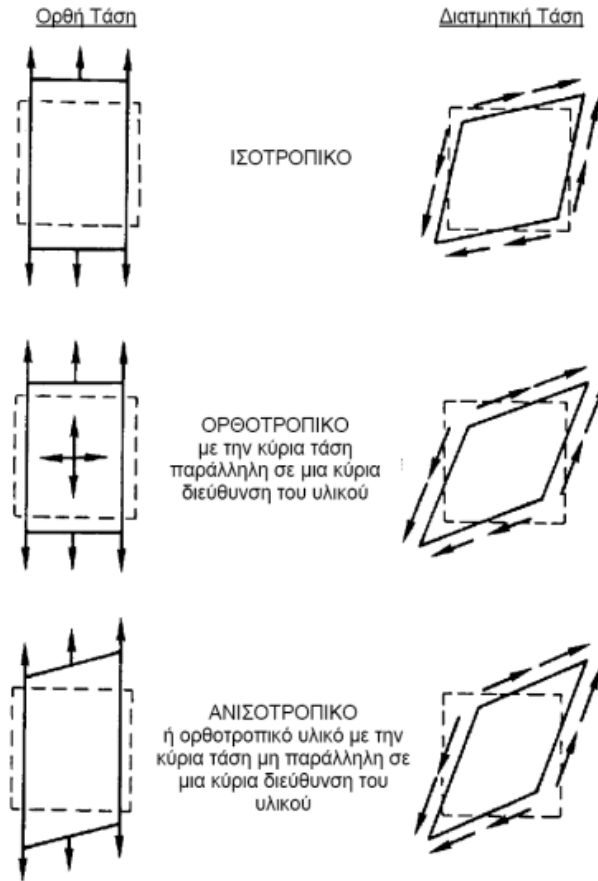
Αξίζει να καταγραφεί ακόμη ότι οι κυψελικές διατάξεις αλουμινίου (aluminium honeycomb), οι οποίες περιλαμβάνουν καλύμματα αλουμινίου που επικαλύπτονται από μια λεπτή διακοσμητική στρώση πλαστικού, είναι ένα άλλο είδος σύνθετο που χρησιμοποιείται ευρέως στα ταχύπλοα.

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή θα πρέπει να σημειωθεί ότι μια άκαμπτη υπερκατασκευή έχει ως αποτέλεσμα υψηλές τάσεις στα ανώτερα επίπεδά της, οι οποίες κοντά στα άκρα της προκαλούν αστοχίες λόγω κόπωσης. Για το λόγο αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή του υλικού και μάλιστα πολλές φορές ενδείκνυται η χρήση υλικών με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (π.χ. σύνθετα υλικά).

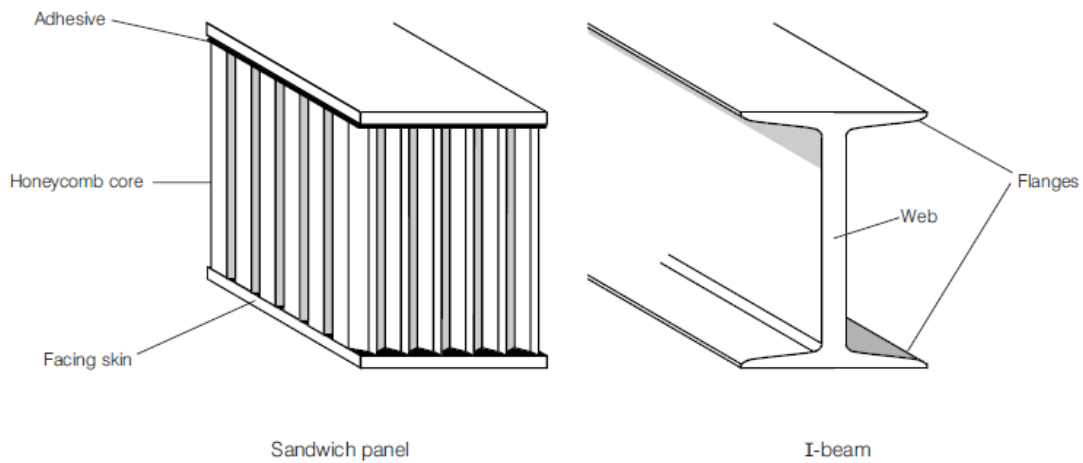
Πίνακας 6.8: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες πολυστρωτων από FRP και άλλων υλικών [92]

Υλικό	V_f	σ_{1T} (MPa)	σ_{2T} (MPa)	σ_{1C} (MPa)	σ_{2C} (MPa)	τ_{12} (MPa)
E-glass/polyester (CSM)	0.19	108	108	148	148	85
E-glass/polyester (ισοσταθμισμένο WR)	0.34	250	250	210	210	100
E-glass/polyester (UD)	0.43	750	-	600	-	-
E-glass/epoxy (0°/90° WR)	0.33	360	360	240	205	98
E-glass/epoxy (±45° WR)	0.33	185	185	122	122	137
E-glass/epoxy (UD)	0.53	1190	73	1001	159	67
Carbon/epoxy (0°/90° WR)	0.50	625	625	500	500	130
Carbon/epoxy (±45° WR)	0.50	240	240	200	200	-
Carbon/epoxy (UD)	0.57	2040	90	1000	148	49
Aramid/epoxy (0°/90° WR)	0.50	517	517	172	172	110
Aramid/epoxy (UD)	0.60	1379	30	276	138	60
Steel (B-quality)	-	325 ^a	325 ^a	340 ^a	340 ^a	190 ^a
Aluminium (5083 alloy)	-	150 ^a	150 ^a	150 ^a	150 ^a	87 ^a
Marine plywood (mahogany)	-	40	40	25	25	8

Υλικό	γ (g/cm ³)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ILSS (MPa)	ν_{12}
E-glass/polyester (CSM)	1.45	8	8	2.75	-	0.32
E-glass/polyester (ισοσταθμισμένο WR)	1.70	15	15	3.5	-	-
E-glass/polyester (UD)	1.80	30	-	3.5	-	-
E-glass/epoxy (0°/90° WR)	1.92	17	17	5	60	0.24
E-glass/epoxy (±45° WR)	1.92	10	10	8	48	0.70
E-glass/epoxy (UD)	1.92	39	15	4	90	-
Carbon/epoxy (0°/90° WR)	1.53	70	70	5	57	-
Carbon/epoxy (±45° WR)	1.53	18	18	27	57	-
Carbon/epoxy (UD)	1.57	134	11	5	94	0.26
Aramid/epoxy (0°/90° WR)	1.33	31	31	2	70	-
Aramid/epoxy (UD)	1.38	76	5	2	83	0.34
Steel (B-quality)	7.80	207	207	80	-	0.33
Aluminium (5083 alloy)	2.80	70	70	26	-	0.33
Marine plywood (mahogany)	0.60	7	7	1	-	-



Σχήμα 6.33: Μηχανική συμπεριφορά ιστροπικών, ορθοτροπικών και ανισοτροπικών υλικών [92]



Σχήμα 6.34: Αντιστοιχία κατασκευής πολλαπλών στρώσεων με πυρήνα με δοκό διατομής I [93]

6.4 Χρήση σύνθετων υλικών στα κρουαζιερόπλοια

Η αύξηση του κόστους των καυσίμων και η μεγαλύτερη έμφαση τόσο την ενεργειακή απόδοση και την περιβαλλοντική ανταγωνιστικότητα έχει δημιουργήσει ένα μεγάλο ενδιαφέρον σε παγκόσμιο επίπεδο για τη χρήση ελαφρών υλικών για τη ναυπηγική βιομηχανία. Οποιαδήποτε τεχνική που επιτρέπει την αύξηση του λόγου του ωφέλιμου φορτίου προς το εκτόπισμα είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο πιο ελαφρύ είναι το πλοίο, τόσο περισσότερους ανθρώπους μπορεί να μεταφέρει ή διαφορετικά τόσο λιγότερη ενέργεια χρειάζεται για την πρόωση.

Ως λύση σε αυτό είναι η χρήση των σύνθετων υλικών στα κρουαζιερόπλοια. Μέχρι σήμερα τα κρουαζιερόπλοια που έχουν στην κατασκευή τους σύνθετα υλικά, σχεδιάζονται έτσι ώστε να εμποδίζεται η πυρκαγιά να φτάσει στην περιοχή αυτή. Αυτό επιτυγχάνεται με την επικάλυψη όλων των εσωτερικών επιφανειών με άφλεκτα υλικά, όπως ο πετροβάμβακας (rockwool). Το κόστος αυτής της εγκατάστασης δεν αυξάνεται αρκετά καθώς όλες οι επιφάνειες των χώρων ενδιαίτησης (accommodation) του πλοίου πρέπει να είναι θερμομονωμένες έτσι κι αλλιώς, και κατά αυτόν τον τρόπο ο πετροβάμβακας (rockwool) έχει διπλή λειτουργία.

Μερικά από τα σύνθετα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι τα GRP και τα FRP. Όσον αφορά τα πρώτα, μια κατασκευή GRP μπορεί να αντιστέκεται σε μια πυρκαγιά, αλλά ο καπνός και οι τοξικές αναθυμιάσεις που δημιουργούνται, μπορούν να είναι θανατηφόρες για τον άνθρωπο. Για παράδειγμα, ο μεγάλος αριθμός ζώων που χάθηκαν στο Scandinavian Star έχει αποδοθεί σε κακή χρήση της επένδυσης της φρακτής, η οποία έκπεμπε δηλητηριώδεις αναθυμιάσεις όταν θερμάνθηκε. Μάλιστα, μόλις σε 30 με 45 λεπτά μετά την ανάφλεξη οι συνθήκες ήταν απειλητικές για τη ζωή, λόγω της μειωμένης απόδοσης του συστήματος εξαερισμού.

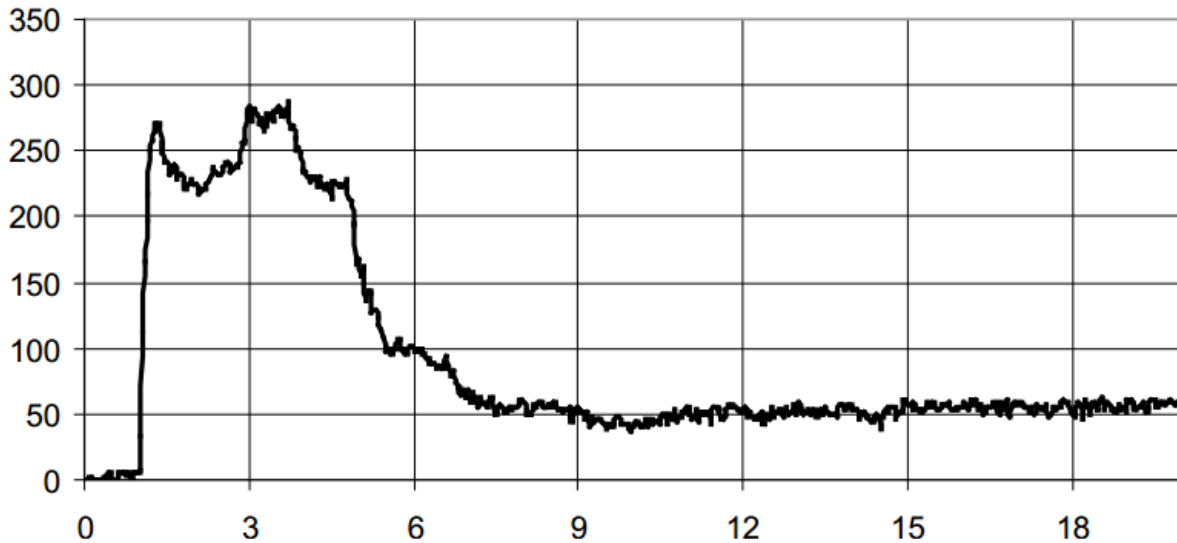
Από την άλλη τα σύνθετα υλικά FRP, παρόλο που έχουν το μειονέκτημα, σε σύγκριση με χάλυβα, ότι είναι εύφλεκτα, από την άλλη αποτελούν πολύ καλύτερο θερμικό φράγμα (thermal barrier). Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα από άποψη πυρασφάλειας, αφού το υλικό θα συγκεντρώνει τη θερμότητα πολύ καλύτερα από μια μεταλλική κατασκευή, στην οποία μεταδίδεται πιο εύκολα η θερμότητα και κατ' επέκταση η φωτιά σε ένα γειτονικό διαμέρισμα.

Σε περιπτώσεις όπου ο χάλυβας αντικαθίσταται, το υλικό αντικατάστασης του είναι συνήθως μια κατασκευή sandwich με ένα ελαφρύ πυρήνα που περιβάλλεται από δύο φύλλα FRP (ενισχυμένο με ίνες πολυμερούς). Φυσικά, όσο ο πυρήνας είναι άθικτος και καλά προσκολλημένος στα δύο φύλλα, η δομική αντοχή του υλικού δεν επηρεάζεται από τη θερμότητα.

Για το λόγο αυτό ένα κρίσιμο μέρος της κατασκευής σχετικά με την αντίσταση στη φωτιά είναι ο σύνδεσμος μεταξύ του υλικού του πυρήνα και των φύλλων. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται η σύνδεση μαλακώνει και η δομική απόδοση χειροτερεύει. "Αυτό συμβαίνει συνήθως στους 130-140°C για μήτρα από πολυεστερική ρητίνη και στους 200-210°C για μήτρα από φαινολική ρητίνη [94]. Στο σημείο αυτό πρέπει να καταγραφεί ότι οι μηχανικές ιδιότητες της φαινολικής ρητίνης σε υψηλές θερμοκρασίες είναι γενικά καλύτερες από παρόμοιες ιδιότητες του πολυεστέρα/βινυλεστέρα FRP, αλλά σε θερμοκρασίες δωματίου συνήθως συμβαίνει το αντίθετο. Αξίζει ακόμη να αναφερθεί ότι αυτή η ρητίνη μπορεί να είναι ενδιαφέρουσα τόσο για τους εκτιθέμενες σύνθετες επιφάνειες επί του σκάφους, π.χ. οι εξωτερικές επιφάνειες, αλλά επίσης και για ενισχυτικά όπου έχει τη δυνατότητα της μείωσης της ανάγκης για μόνωση.

Για την εξέταση της συμπεριφοράς του υλικού σε υψηλές θερμοκρασίας πραγματοποιούνται διάφορες δοκιμές. Από τις δοκιμές μικρής κλίμακας έχει φανεί ότι μια τέτοια κρίσιμη θερμοκρασία θα μπορούσε να επιτευχθεί συνήθως εντός ενός λεπτού, εάν το υλικό είναι άμεσα εκτεθειμένο στη φωτιά. Αυτό

παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.35 όπου με τη χρήση ενός απλός πολυεστέρας / βινυλεστέρας (simple polyester/vinyl ester) η ανάφλεξη γίνεται πολύ γρήγορα. Γίνεται κατανοητό ότι ένα τόσο σύντομο χρονικό διάστημα μπορεί να είναι κρίσιμο για τα απροστάτευτα σύνθετα υλικά FRP, τόσο από τη σκοπιά της δομικής αντοχής, καθώς και από την άποψη της εξάπλωσης της πυρκαγιάς.



Σχήμα 6.35: Ρυθμός εξάπλωσης θερμότητας (kW/m²) συναρτήσει του χρόνου (min) [94]

6.4.1 Κανονισμοί Πυρασφάλειας

Παλαιότερα οι κανονισμοί επέτρεπαν αποκλειστικά τη χρήση μη εύφλεκτων υλικών. Πλέον επιτρέπουν τη χρήση και άλλων υλικών εφόσον τηρούν κάποια κριτήρια. Τέτοια κριτήρια είναι για παράδειγμα η ποσότητα του καπνού που εκπέμπεται κατά την πυρκαγιά, η τοξικότητα του αλλά και ο χρόνος που μπορεί το υλικό να αντισταθεί στην υψηλή θερμοκρασία.

Η SOLAS καθιστά δυνατή τη χρήση σύνθετων υλικών αντί του χάλυβα, με την προϋπόθεση ότι επιτυγχάνεται αντίστοιχο επίπεδο ασφάλειας. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιούνται δοκιμές πυρκαγιάς σε διάφορες κλίμακες, από δοκιμές μικρής κλίμακας, για τη διερεύνηση των θερμικών ιδιοτήτων του εκάστοτε υλικού, έως και δοκιμές πλήρους κλίμακας σε ειδικούς φούρνους, για τα καταστρώματα και τις φρακτές.

Ωστόσο, οι απαιτήσεις των κανονισμών είναι αυστηρές και πολλές φορές δύσκολο να επιτευχθούν για τα περισσότερα από τα σύνθετα υλικά. Μάλιστα, επικρατεί η αντίληψη ότι το επιπλέον βάρος και κόστος που απαιτείται για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο πυροπροστασίας για πλοία που χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά ελαχιστοποιεί το πλεονέκτημα τους έναντι των κατασκευών από αλουμίνιο. Ωστόσο, παρόλο που κάποια σύνθετα υλικά καλύπτουν τις απαιτήσεις των κανονισμών, η εφαρμοσιμότητά τους περιορίζεται στον εσωτερικό εξοπλισμό, όπως οι επικαλύψεις (linings) και οι οροφές (ceilings).

Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο Παράρτημα Κ, ώστε να ενημερωθεί περαιτέρω για τους κανονισμούς πυρασφάλειας αλλά και τους κανονισμούς που επηρεάζονται από την εφαρμογή των σύνθετων υλικών.

6.4.2 Η εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε κρουαζιερόπλοιο

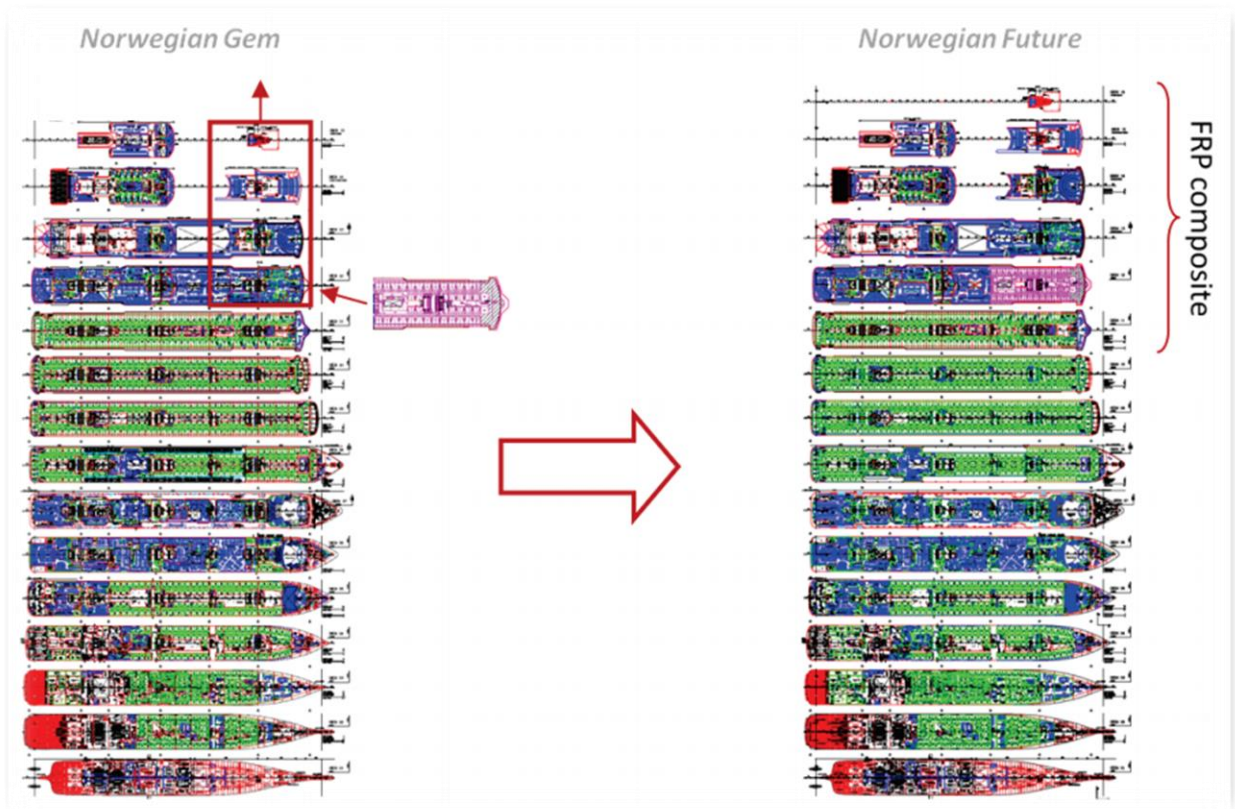
Το M/S Norwegian Gem ήταν ένα συνηθισμένο πλοίο κρουαζιέρας, που αποτελούνταν κυρίως από χάλυβα. Διέθετε 15 καταστρώματα και παρείχε υπηρεσίες για περίπου 2400 επιβάτες και 1100 μέλη πληρώματος. Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου αυτού ήταν:

- Ολική χωρητικότητα: 93530 GT
- Συνολικό μήκος: 294 m
- Μέγιστο πλάτος: 32 m
- Βύθισμα: 8.5 m
- Κινητήρες: Ηλεκτρικοί ντίζελ
- Ταχύτητα κρουαζιέρας: 25 κόμβοι

Το Norwegian Gem χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τη σχεδίαση ενός νέου πλοίου, του Norwegian Future. Η κεντρική ιδέα της νέας σχεδίασης ήταν να αποκτηθούν νέες θέσεις με την κατασκευή των άνω δομών από σύνθετο υλικό FRP, αλλά με την προϋπόθεση να διατηρηθεί το ίδιο κέντρο βάρους στο ίδιο ύψος (τα κριτήρια ευστάθειας θα πρέπει να πληρούνται). Το αποτέλεσμα ήταν μια σχεδίαση όπου τα καταστρώματα 1 έως 10 είναι πανομοιότυπα με εκείνα του Norwegian Gem. Ωστόσο, η διάταξη των υπολοίπων άνω καταστρωμάτων άλλαξε με την προσθήκη ενός τρίτου πλήρους καταστρώματος με 86 καμπίνες. Αυτό εισήχθη στη θέση που προγενέστερα υπήρχε το πρωραίο ένα τρίτο του καταστρώματος Νο 12. Αυτό σημαίνει ότι το πρωραίο ένα τρίτο όλων των προηγούμενων καταστρωμάτων πάνω από το κατάστρωμα 11 μετατοπίστηκε προς τα πάνω, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.36.

Η επέκταση του σχεδιασμού είναι δυνατή, δεδομένου ότι όλες οι φέρουσες κατασκευές των άνω καταστρωμάτων, θα είναι από ελαφρύ συνθετικό υλικό FRP αντί του χάλυβα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η κύρια ανησυχία προέκυψε στον τομέα της πυρασφάλειας, αφού το νέο υλικό είναι εύφλεκτο, σε αντίθεση με το χάλυβα. Το Σχήμα 6.37 σηματοδοτεί το μέρος της υπερκατασκευής στο Norwegian Gem που έχει επανασχεδιαστεί με FRP σύνθετο υλικό και, ως εκ τούτου, παρουσιάζει τις αναλογίες της ανοικοδόμησης του Norwegian Future.

Ως αποτέλεσμα των ανωτέρω αλλαγών σχεδιασμού, έγιναν ορισμένες περαιτέρω τροποποιήσεις, κυρίως για να υλοποιηθεί η αύξηση του αριθμού των επιβατών. Η επανατοποθέτηση της πισίνας στο κατάστρωμα 12 θα επιτρέψει την προσθήκη λίγων ακόμα καμπινών στο υποκείμενο κατάστρωμα 11, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.38. Επιπλέον, το νέο πρωραίο ένα τρίτο του καταστρώματος 12 σημαίνει ότι οι καμπίνες θα βρίσκονται γειτονικά του κύριου χώρου της πισίνας. Επίσης, το νέο πρωραίο ένα τρίτο θα περιλαμβάνει ένα νέο σαλόνι στο πρωραίο μέρος του καταστρώματος 12. Η μετακίνηση του προηγούμενου καταστρώματος 12 προς τα πάνω θα προκαλέσει επίσης ένα ελαφρώς μικρότερο άνοιγμα πάνω από τον κύριο χώρο της πισίνας (βλέπε Σχήμα 6.38). Πέρα από αυτές τις αλλαγές τα ανώτερα καταστρώματα θα μετατοπιστούν απλώς προς τα πάνω.

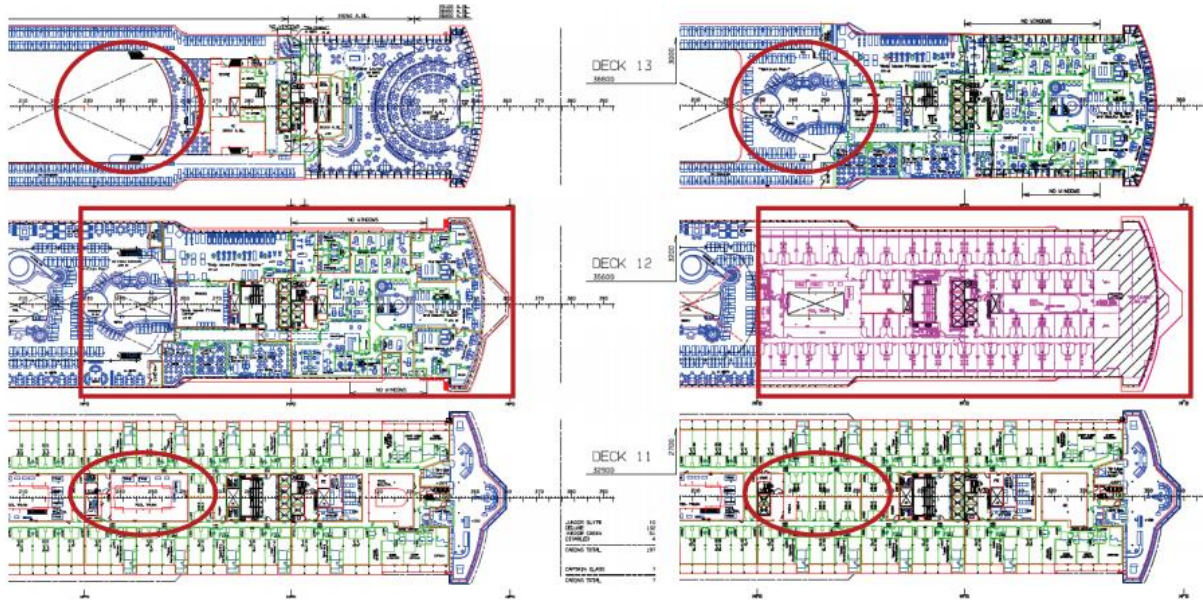


Σχήμα 6.36: Αλλαγές στο Norwegian Gem για τη δημιουργία του Norwegian Future [94]



Σχήμα 6.37: Θέση σύνθετων υλικών στην κατασκευή του Norwegian Future [94]

Με την προσθήκη ενός επιπλέον τρίτου ενός καταστρώματος, η χωρητικότητα θα αυξηθεί από 93500 GT σε 96500 GT. Το Norwegian Future θα έχει, ως εκ τούτου αυξημένο ωφέλιμο φορτίο, προσαρμόζοντας επιπλέον 200 επιβάτες και 20 μέλη πληρώματος σε σχεδόν 100 επιπλέον καμπίνες.



Σχήμα 6.38: Αλλαγές στα ανώτερα καταστρώματα του Norwegian Gem [94]

Υπολογισμοί βάρους

Αρχικά η κατανομή του βάρους των περιοχών πάνω από το κατάστρωμα 11 του Norwegian Gem υπολογίστηκε, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.9. Από αυτή την εκτίμηση του βάρους είναι προφανές ότι η σχέση μεταξύ των δομών που θα αντικατασταθούν από σύνθετο υλικό FRP (χαλύβδινες και αλουμινένιες κατασκευές) και των υπόλοιπων (εξοπλισμός) είναι περίπου 1:1. Το βάρος της κατασκευής από σύνθετα υλικά FRP είναι το μισό βάρος της αρχικής δομής, ενώ το βάρος του εξοπλισμού και της στέγασης (accommodation) θα παραμείνει το ίδιο. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση δομής/εξοπλισμού θα είναι 1:2 στο νέο σχεδιασμό για τα άνω πέντε καταστρώματα.

Πίνακας 6.9: Κατανομή του βάρους των περιοχών πάνω από το κατάστρωμα 11 [94]

<i>Structure</i>	<i>Weight [tons]</i>	
Steel structures	2050	} Steel and Aluminium 2360 t
Aluminium structures	310	
Cabins	410	} Outfitting 2840 t
Balconies (floor)	60	
AC rooms	290	
Galleys/Pantries	200	
Public spaces inside	1090	
Public spaces outside	580	
Technical spaces	110	
The rest	100	
Total	5200	

Όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 6.10, οι FRP σύνθετες δομές θα μειώσουν το βάρος κατά περίπου 1200 τόνους. Ωστόσο, εκτιμάται ότι θα απαιτηθούν 400 τόνοι χάλυβα προκειμένου να ενισχυθεί η γάστρα. Οι υπόλοιποι 800 τόνοι βάρους θα χρησιμοποιηθούν για την προσθήκη ενός πρόσθετου τρίτου του ενός καταστρώματος (κατασκευές από FRP - 265 τόνους) και του εξοπλισμού του (86 καμπίνες, 350 m² δημόσιοι χώροι, τεχνικοί χώροι - 535 τόνους). Συνολικά, το νέο πλοίο θα έχει βάρος 43130 τόνους, ίδιο με αυτό του παλιού (43150 tons). Η κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους θα είναι ίδια για τα δύο πλοία, αλλά το διάμηκες κέντρο βάρους θα είναι ελαφρώς διαφορετικό, το οποίο, ωστόσο, μπορεί να ρυθμίζεται με τροποποιημένες περιπτώσεις φόρτισης (π.χ. προσθήκη έρματος).

Πίνακας 6.10: Σύγκριση της κατανομής του βάρους του νέου με του παλιού κρουαζιερόπλοιου [94]

<i>Structure</i>	<i>The Norwegian Gem</i>	<i>The Norwegian Future</i>
Structures	2360	1200
Outfitting	2840	2840
FRP composite structures for additional 1/3 of a deck	0	265
Outfitting for additional 1/3 of a deck	0	535
Additional strengthening	0	400
Total weight of areas above deck 11	5200	5240
Total weight of the ship	43150	43130

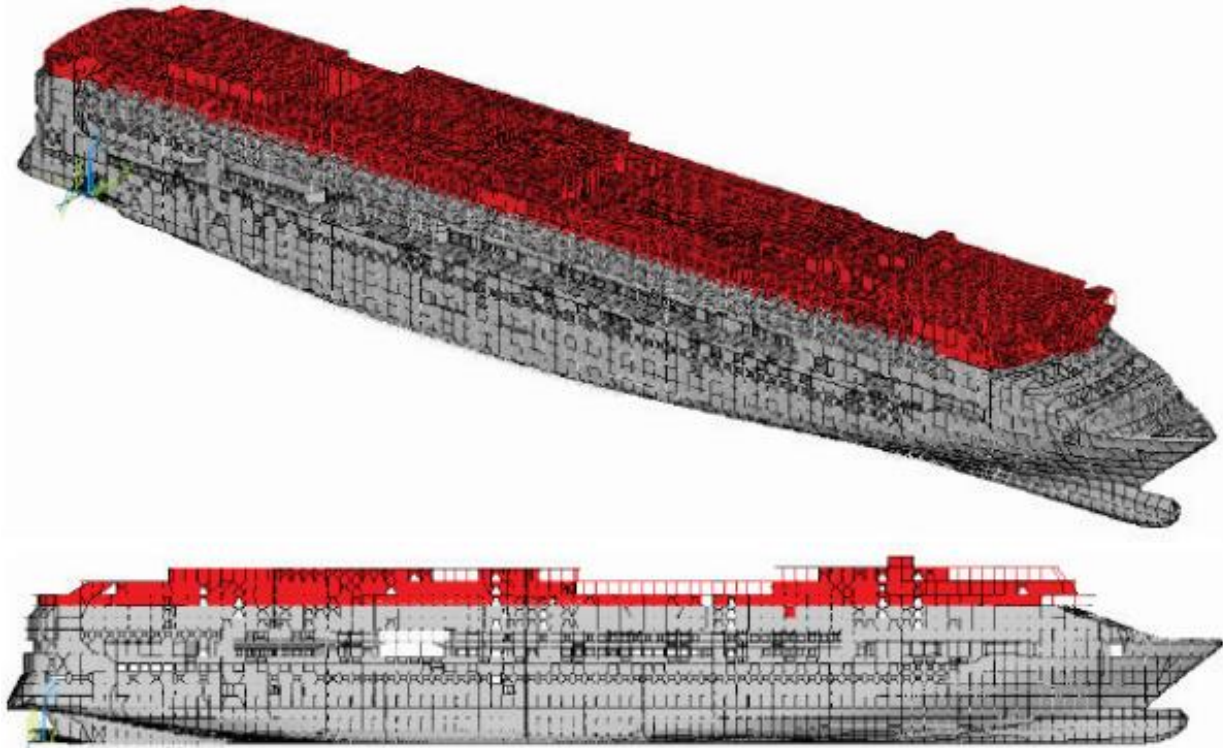
Προτού προχωρήσουμε στη μελέτη της αντοχής αυτού του πλοίου, αξίζει να καταγραφεί ότι σημαντικές μειώσεις βάρους μπορούν να επέλθουν χρησιμοποιώντας σύνθετα υλικά στις τουαλέτες των καμπινών (βλέπε Σχήμα 6.39). Σε ένα πλοίο που αποτελείται από χιλιάδες καμπίνες η συνολική μείωση του βάρους από μια τέτοια εφαρμογή είναι αισθητή.



Σχήμα 6.39: Μονάδα υγρού χώρου [94]

Μελέτη της αντοχής

Προκειμένου να αξιολογηθεί η ικανότητα του νέου σχεδιασμού για τη παραλαβή των τάσεων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πλοίο διαμορφώθηκε όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.40, όπου οι κόκκινες περιοχές πάνω από το κατάστρωμα 11 μοντελοποιήθηκαν ως σύνθετο FRP (γραμμικά ιστροπικό υλικό με ιδιότητες: $E=10000\text{N/mm}^2$, $\nu=0.34$) και η μάζα μοντελοποιήθηκε με γκρι στοιχεία από χάλυβα. Σημειώνεται ότι «τα σύνθετα υλικά δεν είχαν καμία μάζα στο μοντέλο» [94].

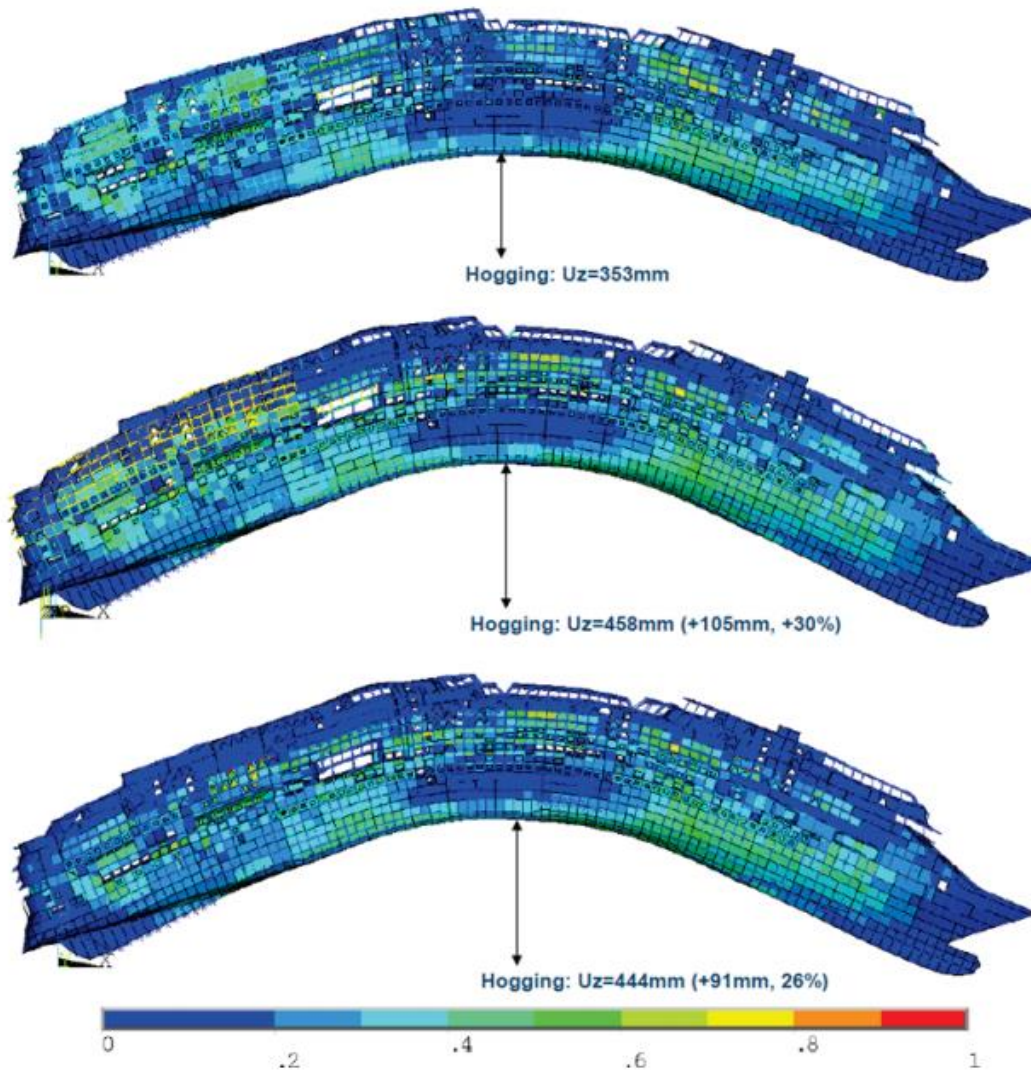


Σχήμα 6.40: Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων κρουαζιερόπλοιου [94]

Για την απλούστευση της διαδικασίας και των συνθήκων φόρτισης στις οποίες ελέγχθηκε το μοντέλο, επιλέχθηκε μόνο μια κατάσταση φόρτισης, αυτής σε ήρεμο νερό. Το μοντέλο κλιμακώθηκε ώστε να εκπληρώνει το μέγιστο και το ελάχιστο της καμπύλης ήρεμου νερού. Η ίδια διαδικασία χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση σε κυματισμό: μία περίπτωση φόρτισης σε κυματισμό κλιμακώθηκε για να επιτευχθούν οι μέγιστες καμπτικές ροπές σε Hogging και Sagging. Μετά την επίλυση τους, δημιουργήθηκαν οι περιπτώσεις φόρτισης με την προσθήκη των κλιμακούμενων μερών στο ήρεμο νερό και στο κυματισμένο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.41 και στον Πίνακα 6.11.

Τα καταστρώματα του Norwegian Future ενισχύθηκαν για να εκπληρώσουν τις απαιτήσεις των τάσεων και του λυγισμού. Η αύξηση των 91 mm ή το 26% στην κατακόρυφη εκτροπή στο ύψος της τρόπιδας στη μέγιστη φόρτιση Hogging είναι, ωστόσο, υψηλή. Η κάμψη των φρακτών θα μπορούσε να αντιμετωπισθεί με τη χρήση πρόσθετων ενισχυτικών. Μια αύξηση της εκτροπής της τάξης του 26% οδηγεί αναγκαστικά σε εκ νέου διαστασιολόγηση όλων των τοπικών λεπτομερειών που είναι κρίσιμα όσον αφορά την κόπωση. Θα υπάρχουν επίσης περιοχές στις οποίες θα πρέπει η διάταξη και το μέγεθος των θυρών και

των ανοιγμάτων να επανασχεδιαστεί πλήρως. Η μείωση της καμπτικής ακαμψίας οφείλεται κυρίως στην μείωση του «αποτελεσματικού» ύψους του κρουαζιερόπλοιου, από τη χρήση των εύκαμπτων σύνθετων υλικών στα ανώτατα καταστρώματα. Ενδιαφέρον σε αυτό το στάδιο έχει το ερώτημα αν το σύνθετο υλικό θα μπορούσε να χειριστεί εν γένει τη φόρτιση που προκαλείται από τη μεγάλη εκτροπή ή εάν χρειάζεται μεγαλύτερη ενίσχυση στα χαλύβδινα καταστρώματα για να μειωθεί η κατακόρυφη εκτροπή. Μια κεντρική παρατήρηση είναι ότι η ενισχυμένη χαλύβδινη δομή φαίνεται ότι εξακολουθεί να παρέχει επαρκή εξοικονόμηση βάρους, κάτι το οποίο είναι οικονομικά ενδιαφέρον.



Σχήμα 6.41: Μοντελοποίηση κατάστασης Hogging τριών μοντέλων [94]

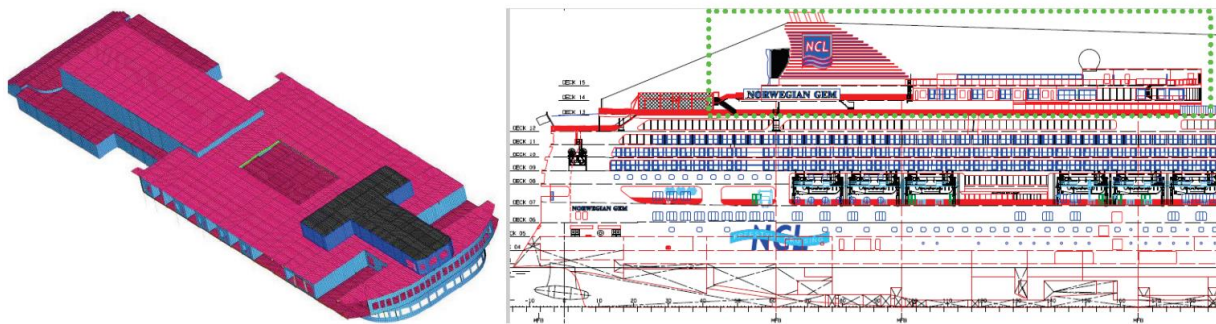
Πίνακας 6.11: Ικανότητα πλοίου να παραλάβει τα φορτία [94]

Structure	Norwegian Gem	Norwegian Future	Norwegian Future + ³
Steel mass in tons	16981	15109	15196
Max usage eqv. stress	0.96	1.31	1.26
Hogging	353	458	444

Φυσική ιδιοσυχνότητα

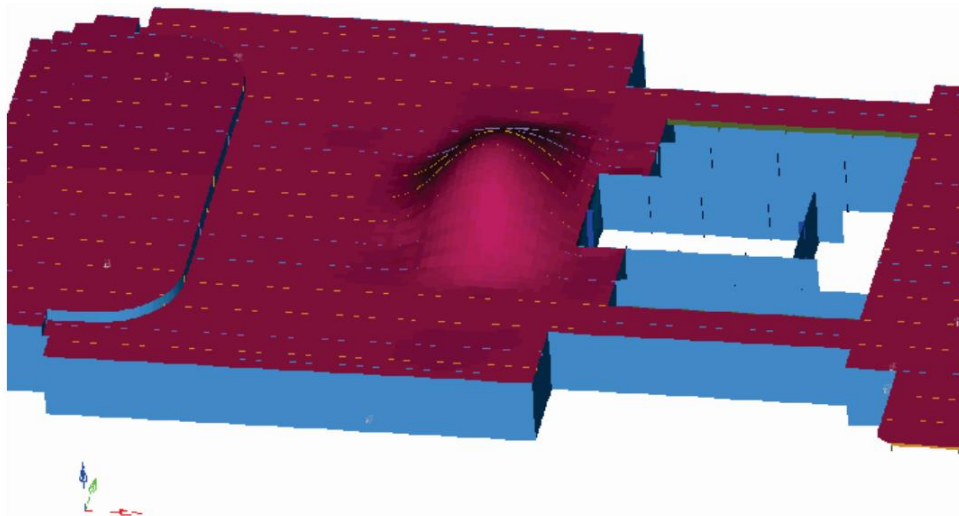
Για τη μελέτη της δυναμικής απόκρισης μιας κατασκευής απαιτείται η γνώση της φυσικής της ιδιοσυχνότητας. Για την εξέταση αυτής, πραγματοποιούνται αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Από αυτές τις αναλύσεις για παράδειγμα μπορεί να προκύψει η βέλτιστη απόσταση μεταξύ των καταστρώματων προκειμένου να επιτυγχάνεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη άνεση (κατάλληλη φυσική συχνότητα).

Πιο συγκεκριμένα, μια ανάλυση FEM διεξήχθη με σκοπό να αξιολογηθεί εάν θα ήταν δυνατόν τα καταστρώματα από σύνθετα υλικά FRP να απέχουν μεταξύ τους 2.7 μέτρα, ενώ η ελάχιστη φυσική συχνότητα ήταν 13 Hz. Έτσι, μια εφαρμογή της FEM συστάθηκε για το πρυμναίο μέρος της υπερκατασκευής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.42.



Σχήμα 6.42: Μοντελοποίηση τμήματος για εξέταση της φυσικής συχνότητας [94]

Η ανάλυση έδειξε ότι φαίνεται να είναι δύσκολο να επιτευχθούν οι απαιτήσεις για ύψος καταστρώματος 2,700 mm και μια φυσική συχνότητα χαμηλότερη των 13 Hz (βλέπε Σχήμα 6.43) ή τουλάχιστον να επιτευχθεί με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, χωρίς να αλλάξει σημαντικά ο σχεδιασμός. Μια πιθανή λύση σε αυτό ίσως να είναι η κατάλληλη μετακίνηση των στηλών.



Σχήμα 6.43: Το αποτέλεσμα της μελέτης για τη φυσική συχνότητα [94]

6.5 Ανακεφαλαίωση

Τα κρουαζιερόπλοια αποτελούν έναν ιδιαίτερο τύπο πλοίου μιας και μεταφέρουν ένα πολύ σημαντικό φορτίο, το οποίο δεν είναι άλλο από τον ίδιο τον άνθρωπο. Για το λόγο αυτό κύριο μέλημα είναι η επίτευξη της απαραίτητης ασφάλειας.

Εξετάζοντας την ασφάλεια του πλοίου από την πλευρά της αντοχής των υλικών, έγινε αντιληπτό ότι θα πρέπει να υπάρχουν ενδείξεις συμπεριφοράς του υλικού πριν από τη θραύση του. Για το λόγο αυτό τα υλικά που χρησιμοποιούνται επιδεικνύουν ελαστοπλαστική συμπεριφορά. Η ανάγκη χρήσης τέτοιων υλικών γίνεται ακόμη πιο κατανοητή αν σκεφτεί κανείς ότι στα μεγάλα εμπορικά πλοία, πέραν της διάβρωσης, η πιο κοινή αιτία αστοχίας είναι η κόπωση.

Ακόμη, ένα σημαντικό κριτήριο κατά την επιλογή των υλικών, πέραν της ολκιμότητας, είναι η δυσθραυστότητα. Καθώς η θερμοκρασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος ελαττώνεται, τα μεταλλικά υλικά γίνονται ψαθυρά. Έτσι, για παράδειγμα, ο ναυπηγός που καλείται να σχεδιάσει ένα κρουαζιερόπλοιο που πραγματοποιεί κρουαζιέρες στις περιοχές της Καραϊβικής και του Καναδά, θα πρέπει να επιλέξει υλικό τέτοιο που να χαρακτηρίζεται από την κατάλληλη δυσθραυστότητα.

Φυσικά, σε ένα βαθμό τα παραπάνω ζητήματα έχουν επιλυθεί, αφού η εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης έχει βελτιώσει σε ικανοποιητικό βαθμό της ιδιότητες των συμβατικών υλικών. Τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ο χάλυβας και το αλουμίνιο, ενώ τα πρώτα σημάδια εφαρμογής τους σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια κάνουν τα σύνθετα υλικά.

Το πιο δημοφιλές υλικό που χρησιμοποιείται στη ναυπηγική βιομηχανία είναι ο χάλυβας (ατσάλι) και μάλιστα ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας. Ο χάλυβας χρησιμοποιείται για την κατασκευή της γάστρας αλλά και ένα τμήμα της υπερκατασκευής, ενώ το αλουμίνιο εφαρμόζεται στα ανώτερα τμήματα της υπερκατασκευής για τη χαλάρωση των τάσεων. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την επιλογή του υλικού και μάλιστα πολλές φορές ενδείκνυται η χρήση υλικών με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας στα ανώτατα καταστρώματα, όπως το αλουμίνιο και τα σύνθετα υλικά. Μάλιστα, με τη χρήση τέτοιων υλικών αποφεύγεται η χρήση αρμών διαστολής στις υπερκατασκευές.

Όσον αφορά τα θέματα πυρασφάλειας (χαμηλό σημείο τήξης), η κατασκευή θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από κατάλληλη μόνωση, με τη χρήση πυρομονωτικών υλικών. Επίσης, θα πρέπει να είναι εφοδιασμένη με εγκατάσταση συστημάτων πυρασφάλειας (π.χ. ανίχνευση και κατάσβεση πυρκαγιάς).

Επιπλέον, η ένωση των τμημάτων των πλοίων είναι μια πολύ σοβαρή εργασία και απαιτεί πολύ προσοχή. Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων η συγκόλληση του αλουμινίου με τη χαλύβδινη γάστρα αποτελεί μια ιδιαιτερότητα των πλοίων αυτών, μιας και δεν μπορούν να εφαρμοστούν όλες οι μέθοδοι συγκόλλησης. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι που εφαρμόζονται είναι η συγκόλληση με ηλεκτρόδιο βολφραμίου και προστασία αερίου (Gas tungsten arc welding, GTAW), η συγκόλληση με τηκόμενο ηλεκτρόδιο και προστασία αερίου (gas metal arc welding, GMAW ή MIG) και οι συγκολλήσεις τριβής.

Η παρουσία του αλουμινίου δίπλα στο χάλυβα, είναι ικανή να δημιουργήσει τις συνθήκες ανάπτυξης γαλβανικού κελιού. Το φαινόμενο γίνεται ακόμη εντονότερο όταν τα δυο μέταλλα είναι ενωμένα μεταξύ τους. Αυτό το πρόβλημα της γαλβανικής διάβρωσης που δημιουργείται αποτελεί ακόμη μια από τις έντονες ανησυχίες του ναυπηγού. Φυσικά προς αντιμετώπιση αυτού έχουν επινοηθεί διάφορα μέτρα όπως ο διαχωρισμός του από τα γειτονικά μέταλλα με χρήση παρεμβυσμάτων και δακτυλίων από μονωτικά υλικά αλλά και η συγκόλληση του με εκρηκτικά και χρήση επιθεμάτων.

Τα μη συμβατικά σύνθετα υλικά αποτελούν νεοεμφανιζόμενα υλικά στα κρουαζιερόπλοια. Γενικότερα, στη ναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιούνται τα ινώδη σύνθετα υλικά και τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα αυτών των υλικών είναι το μικρό τους βάρος, το οποίο οδηγεί σε υψηλές ειδικές ιδιότητες (π.χ. υψηλή αντοχή σε σχέση με το βάρος τους) αλλά και η αντοχή τους σε διάβρωση.

Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες προσπάθειες εισαγωγής σύνθετων υλικών στα κρουαζιερόπλοια, όπως για παράδειγμα, τα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού πλαστικά (GRP). Επίσης, πλαίσια από sandwich αφρού από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες (foam sandwich panels of fibre reinforced composites - FRC) μπορούν να αντικαταστήσουν το αλουμίνιο σε περιοχές οι οποίες δεν υποβάλλονται σε αυστηρούς κανονισμούς πυρασφάλειας (π.χ. περιοχές μακριά από τα σαλόνια).

Όσον αφορά την κατασκευαστική διάταξη το ιδανικό σύστημα ενίσχυσης των κρουαζιερόπλοιων είναι το μεικτό σύστημα ενίσχυσης. Έτσι, στα καταστρώματα, στον πυθμένα και στο διπύθμενο χρησιμοποιείται διαμήκης ενίσχυση, ενώ στις πλευρές χρησιμοποιείται εγκάρσια ενίσχυση. Παρατηρώντας διάφορα κατασκευαστικά σχέδια, διαπιστώθηκε ότι η εφαρμογή του μεικτού συστήματος ενίσχυσης δεν αποτελεί κανόνα, καθώς έχουν παρατηρηθεί και περιπτώσεις όπου προτιμήθηκε το διάμηκες σύστημα. Αναμφισβήτητα, όμως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης δεν εφαρμόζεται σε κρουαζιερόπλοια με μήκος πάνω από 100m.

Όσον αφορά την πυρασφάλεια, αυτή αποτελεί ένα από τα κύρια ζητήματα, που απασχολεί το ναυπηγό κρουαζιερόπλοιων. Στην κατασκευή των πλοίων αυτών χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά, είτε συμμετέχουν στην αντοχή είτε όχι. Κάποια υλικά χαρακτηρίζονται από μικρότερη αντίσταση σε πυρκαγιά και άλλα μεγαλύτερη. Για το λόγο αυτό, ανάλογα με την περίπτωση, πολλές φορές λαμβάνονται επιπρόσθετα μέτρα πυροπροστασίας.

Αν και παλαιότερα οι κανονισμοί επέτρεπαν αποκλειστικά τη χρήση μη εύφλεκτων υλικών, πλέον επιτρέπουν τη χρήση και άλλων υλικών εφόσον όμως τηρούν κάποια κριτήρια. Έτσι, τα σύνθετα υλικά έχουν αρκετές προϋποθέσεις για να εφαρμοστούν στην κατασκευή των σύγχρονων κρουαζιερόπλοιων. Μάλιστα, παρόλο που έχουν το μειονέκτημα, σε σύγκριση με χάλυβα, ότι είναι εύφλεκτα, από την άλλη αποτελούν πολύ καλύτερο θερμικό φράγμα. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα από άποψη πυρασφάλειας, αφού το υλικό θα «συγκεντρώνει» τη θερμότητα στο περίβλημα του πολύ καλύτερα από μια μεταλλική κατασκευή, η οποία απλώνει πιο εύκολα τη θερμότητα και κατ' επέκταση τη φωτιά σε ένα γειτονικό διαμέρισμα. Από την άλλη, τα σύνθετα υλικά ακόμη και αν αντιστέκονται σε μια πυρκαγιά, ο καπνός και οι τοξικές αναθυμιάσεις που δημιουργούν, μπορούν να είναι θανατηφόρες για τον άνθρωπο (τραγωδία Scandinavian Star).

Παρά ταύτα, θα μπορούσε να πει κανείς ότι οι απαιτήσεις των κανονισμών είναι αυστηρές και πολλές φορές δύσκολο να επιτευχθούν για τα περισσότερα από τα σύνθετα υλικά. Μάλιστα, επικρατεί η αντίληψη ότι το επιπλέον βάρος και κόστος που απαιτείται για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο πυροπροστασίας για πλοία που χρησιμοποιούν σύνθετα υλικά ελαχιστοποιεί το πλεονέκτημα τους έναντι των άλλων υλικών.

Κλείνοντας κατά κανόνα οι Νηογνώμονες επιβάλλουν κανονισμούς, τους οποίους ο ναυπηγός θα πρέπει να έχει πάντοτε κατά νου. Η κατασκευαστική διάταξη θα πρέπει να ακολουθεί πάντοτε τις Γενικές απαιτήσεις, οι οποίες ανά περίπτωση πλοίου τροποποιούνται σε ένα βαθμό, όπου κρίνεται αναγκαίο. Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων παρουσιάζονται κάποιες διαφοροποιήσεις όσον αφορά τη διάταξη του διπύθμενου, την πλευρική κατασκευή, τα καταστρώματα, τις στεγανές φρακτές και θύρες, τις φρακτές δεξαμενών, τις υπερκατασκευές και τα υπερστεγάσματα, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Ι.

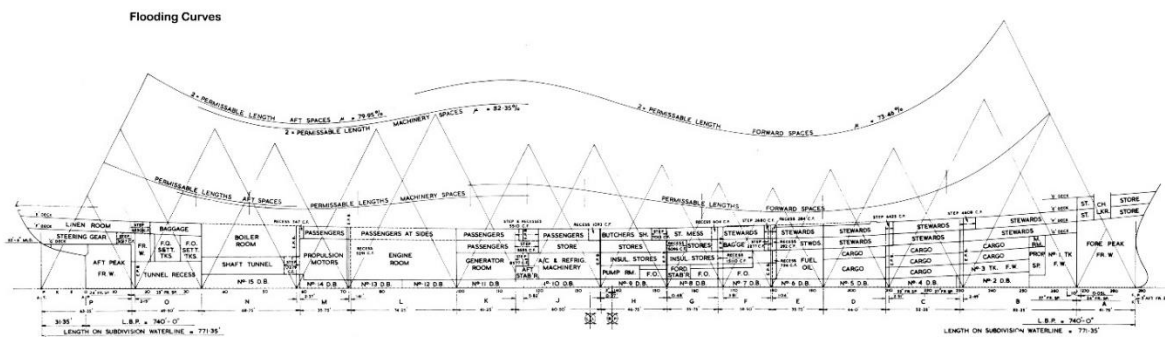
7. ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Έχοντας ήδη καταγράψει τις λεπτομέρειες που διαφοροποιούν τα κρουαζιερόπλοια από τα υπόλοιπα πλοία, τόσο σε σχεδιαστικό όσο και σε κατασκευαστικό επίπεδο, είναι ενδιαφέρον να παρουσιασθούν και διάφορα άλλα, ειδικότερα θέματα για τη δομή τους.

Αρχικώς, γίνεται μια αναφορά για τη υποβάθμιση της αντοχής τους ανάλογα με την εκάστοτε γωνία εγκάρσιας κλίσης. Αυτό είναι ένα θέμα το οποίο δεν έχει εξεταστεί σε βάθος, καθώς η εγκάρσια κλίση που παίρνει ένα πλοίο αφορά κυρίως την ευστάθειά του και λιγότερο την αντοχή. Ωστόσο, με την ανάπτυξη μεγάλων γωνιών εγκάρσιας κλίσης αλλάζει η κατανομή των καμπτικών ροπών με αποτέλεσμα κάποια κατασκευαστικά στοιχεία να αστοχούν πρόωρα, σε σχέση με το προβλεπόμενο. Έτσι, ενώ το πλοίο μπορεί σε μια γωνία εγκάρσιας κλίσης να επιβιώσει όσον αφορά την ευστάθεια, ενδέχεται από την άλλη να αστοχήσει κατασκευαστικά. Μάλιστα, όπως θα διαπιστωθεί εν συνεχεία, για σχετικά μεγάλες γωνίες εγκάρσιας κλίσης (από 10° και πάνω) η αντοχή του πλοίου μειώνεται κατά ένα σεβαστό ποσό.

Εν συνεχεία πραγματοποιείται μελέτη της αντοχής της κατασκευής σε κατάσταση βλάβης. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν τρία ενδεχόμενα βλάβης, των οποίων μελετήθηκε η αντοχή πριν το πλοίο αποκτήσει κάποια εγκάρσια κλίση. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν, επίσης, αρκετό ενδιαφέρον, συγκρίνοντάς τα μεταξύ τους αλλά και με την άθικτη κατάσταση. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι, όπως και στην πρώτη περίπτωση, έτσι και σε αυτή, μιλώντας για εγκάρσια κλίση, το κύριο θέμα είναι η επιβίωση του πλοίου από τη σκοπιά της ευστάθειας. Άλλωστε, για το λόγο αυτό κατασκευάζονται και οι καμπύλες κατακλισίμων μηκών (floodable lengths), τις οποίες ο ναυπηγός θα πρέπει να εξετάζει με ιδιαίτερη προσοχή (βλέπε Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Καμπύλες κατακλισίμων μηκών επιβατηγού πλοίου SS Canberra [21]

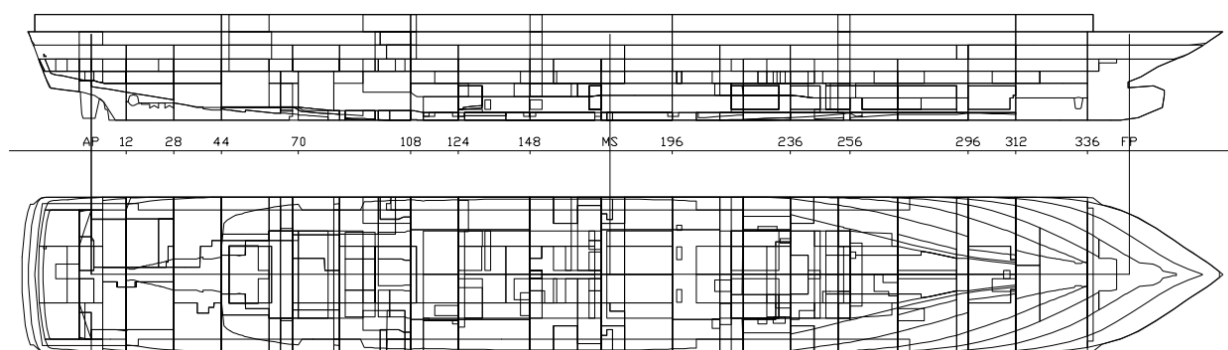
7.2 Επιβιωσιμότητα της κατασκευής

Ιστορικά ατυχήματα έχουν δείξει ότι ενώ ένα κρουαζιερόπλοιο μπορεί να επιβιώσει από μια κατάσταση κατάκλισης από πλευράς ευστάθειας, ενδέχεται να αστοχήσει κατασκευαστικά. Τα κρουαζιερόπλοια το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας τους υποβάλλονται σε καμπτική ροπή τύπου Hogging, με συνέπεια το

κατάστρωμα αντοχής αλλά και τα ανώτερα (από αυτό) καταστρώματα της υπερκατασκευής (η οποία συμμετέχει στη διαμήκη αντοχή), να υποβάλλονται σε εφελκυσμό ενώ το έλασμα του πυθμένα σε θλίψη.

Βέβαια πρέπει να τονιστεί ότι σε περίπτωση εκτεταμένης κατάκλισης στην περιοχή της μέσης τομής, το πρόσθετο βάρος του νερού θα μπορούσε να μεταβάλει ουσιαστικά τη ροπή κάμψης, υποβάλλοντας το κατάστρωμα αντοχής σε θλίψη. Η διαφορετική απόκριση του πλοίου μεταβάλλει σημαντικά την αντοχή του και θα πρέπει να ανησυχεί τον εκάστοτε μελετητή.

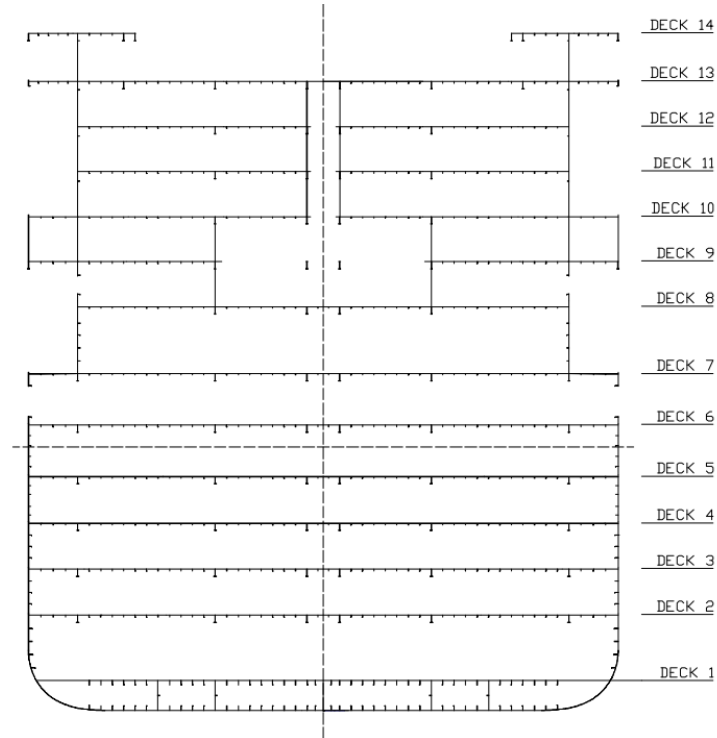
Ωστόσο, τέτοιου είδους ζητήματα δεν έχουν αξιολογηθεί εκτενώς στο παρελθόν. Προκειμένου, λοιπόν, ο μηχανικός να μπορεί να εξετάσει την ικανότητα της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων να ανταπεξέρχεται σε τέτοιες καταστάσεις, έχουν αναπτυχθεί διάφορα λογισμικά, μεταξύ των οποίων το HECSALV από την εταιρεία Herbert Engineering Corporation. Στο Σχήμα 7.2 παρουσιάζεται ένα τυπικό μοντέλο κρουαζιερόπλοιου. Σημειώνεται ότι μοντελοποιήθηκαν οκτώ από τα δεκαπέντε καταστρώματα.



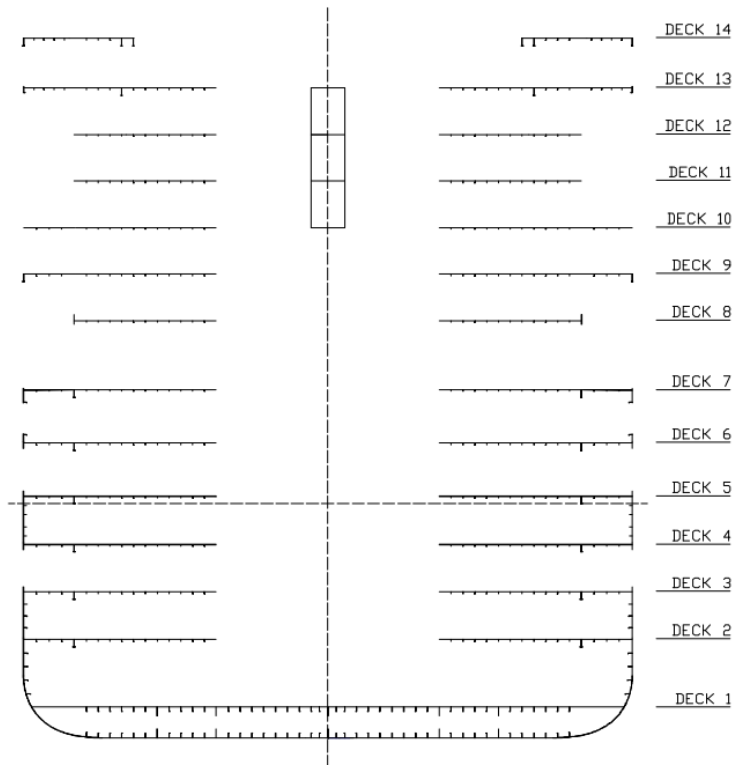
Σχήμα 7.2: Μοντέλο HECSALV [95]

Φυσικά, κατά τη μελέτη της αντοχής μιας κατασκευής θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη μόνο τα δομικά στοιχεία που συμβάλλουν σε αυτή. Για παράδειγμα, σε περίπτωση όπου υπάρχει ένα μεγάλο άνοιγμα στο μέσον του πλοίου (π.χ. για χρήση κλιμακοστασίου), από τον εσωτερικό πυθμένα έως το ανώτερο κατάστρωμα ή όπου υπάρχουν πολλά πλευρικά ανοίγματα (π.χ. θύρες και παράθυρα), θα πρέπει να αφαιρούνται (οι πλευρές σε αυτό το ύψος) από την «πλήρη» μέση τομή. Έτσι, η εναπομένουσα «αποτελεσματική» τομή θα πρέπει να χρησιμοποιείται στις διάφορες αναλύσεις αντοχής. Προκειμένου ο αναγνώστης να κατανοήσει καλύτερα το παραπάνω, παρουσιάζεται μια πλήρης και μια αποτελεσματική τομή στο Σχήμα 7.3 και Σχήμα 7.4, αντίστοιχα.

Είναι επόμενο ότι οι ιδιότητες (που αφορούν την αντοχή) της πλήρους τομής σε σχέση με την «αποτελεσματική» τομή είναι υψηλότερες (περισσότερο υλικό μακριά από τον ουδέτερο άξονα), κάτι το οποίο επιβεβαιώνεται και με τη βοήθεια του Πίνακα 7.1. Από την άλλη, ο Πίνακας 7.2 παραθέτει μερικά από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της "αποτελεσματικής" τομής που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση.



Σχήμα 7.3: Πλήρης Μέση Τομή ενός Επιβατηγού Πλοίου [95]



Σχήμα 7.4: Αποτελεσματική Μέση Τομή ενός Επιβατηγού Πλοίου [95]

Πίνακας 7.1: Ιδιότητες Μέσων Τομών [95]

	"Reduced" section	Full Section
Inertia (m4)	806	1085
Neutral axis ABL (m)	13.82	16.09
SM at Deck 15 (m3)	29.32	42.65
SM at BL (m3)	58.28	66.85

Πίνακας 7.2: Κατασκευαστικά Χαρακτηριστικά Ανώτερου Καταστρώματος [95]

Frame spacing	2860 mm
Typical longitudinal spacing	700 mm
Deck plate thickness	5-8 mm
Deck stiffener scantling	100x8 BP

7.2.1 Περίπτωση άθικτης κατάστασης υπό διάφορες γωνίες εγκάρσιας κλίσης

Μια υπό εγκάρσια κλίση τομή θα έχει ως αποτέλεσμα δύο γωνίες της κατασκευής του πλοίου να είναι πιο μακριά από τον ουδέτερο άξονα, και ως εκ τούτου θα υποβάλλονται σε υψηλότερες τάσεις. Αυτό έχει ως συνέπεια το να είναι πιο επιρρεπής σε λυγισμό, όταν οι τάσεις είναι θλιπτικές.

Σημειώστε ότι ένα πλοίο υπό εγκάρσια κλίση με την ίδια διαμήκη κατανομή βάρους όπως ένα «όρθιο» πλοίο θα έχει διαφορετικά αποτελέσματα καμπτικών ροπών λόγω της διαφορετικής κατανομής της διαμήκουσ άντωσης.

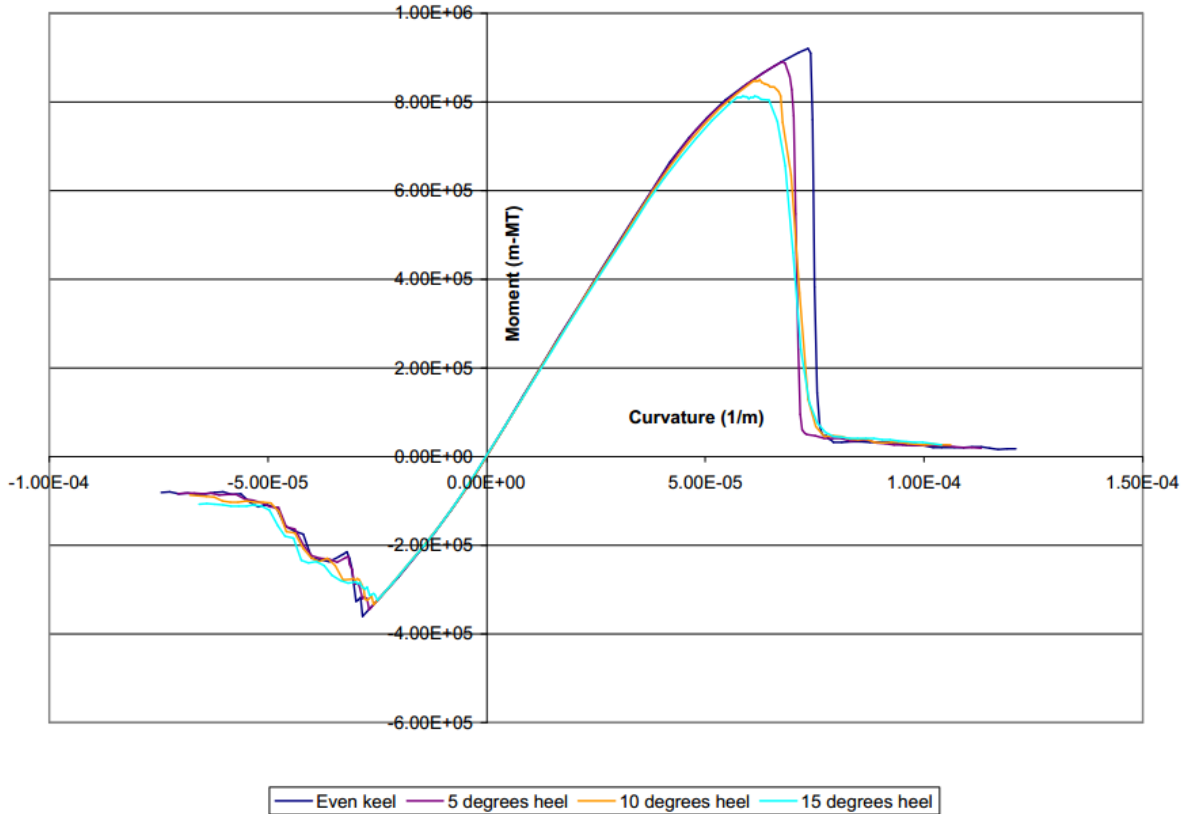
Τα αποτελέσματα της ανάλυσης της μέγιστης αντοχής της άθικτης κατασκευής παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5 υπό τη μορφή ροπής-καμπυλότητας. Διαπιστώνεται ότι η καμπύλη είναι ασύμμετρη, παρουσιάζοντας μειωμένες ροπές σε κατάσταση Sagging (σε σύγκριση με την κατάσταση Hogging). Διαπιστώνεται έτσι ότι η κατασκευή των υψηλότερων καταστρωμάτων υποφέρει από λυγισμό, καθώς δεν μπορεί να παραλάβει τη θλιπτική φόρτιση.

Η μέγιστη αντίσταση της κατασκευής σε κατάσταση Hogging παρουσιάζεται τη στιγμή όπου όλα τα πλαίσια του πυθμένα (bottom panels) φτάσουν την τάση στρεπτο-καμπτικού λυγισμού (tripping buckling capacity) και καταρρεύσουν.

Η μέγιστη ικανότητα της κατασκευής σε κατάσταση Sagging, η οποία είναι μικρότερη σε σχέση με την Hogging (περίπου 3 φορές), παρουσιάζεται όταν η άνω υπερκατασκευή αρχίζει και καταρρέει, και αυτό συμβαίνει πριν κάποια διαρροή κάνει εμφανή την παρουσία της στη δομή και συγκεκριμένα περίπου στο 34% του φορτίου διαρροής της ανώτερης υπερκατασκευής (upper flange yield point).

Επίσης αυτά που περιλαμβάνονται στο Σχήμα 7.5 είναι καμπύλες της μέγιστης αντοχής της άθικτης δομής σε διαφορετικές γωνίες εγκάρσιας κλίσης. Διαπιστώνεται ότι η ικανότητα της δομής μειώνεται με αυξημένες γωνίες εγκάρσιας κλίσης, αλλά όχι δραματικά. Ωστόσο, μετά από της 15° γωνία εγκάρσιας κλίσης παρατηρήθηκε αισθητή μείωση, της τάξης του 12% σε Hogging και 10% σε Sagging.

Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η καμπύλη μέγιστης αντοχής γίνεται λίγο πιο επίπεδη στο σημείο αστοχίας ως αποτέλεσμα του γεγονότος ότι στην κατάσταση εγκάρσιας κλίσης τα καταστρώματα είναι σε μία γωνία σε σχέση με το επίπεδο κάμψης (bending plane) της δομής και δεν καταρρέουν ταυτόχρονα. Αυτό συμβαίνει διότι η τάση που αναπτύσσεται διαφέρει ανάλογα με την απόσταση από τον ουδέτερο άξονα κάμψης. Στην ορθή θέση, ολόκληρο το κατάστρωμα είναι στην ίδια απόσταση από τον ουδέτερο άξονα.

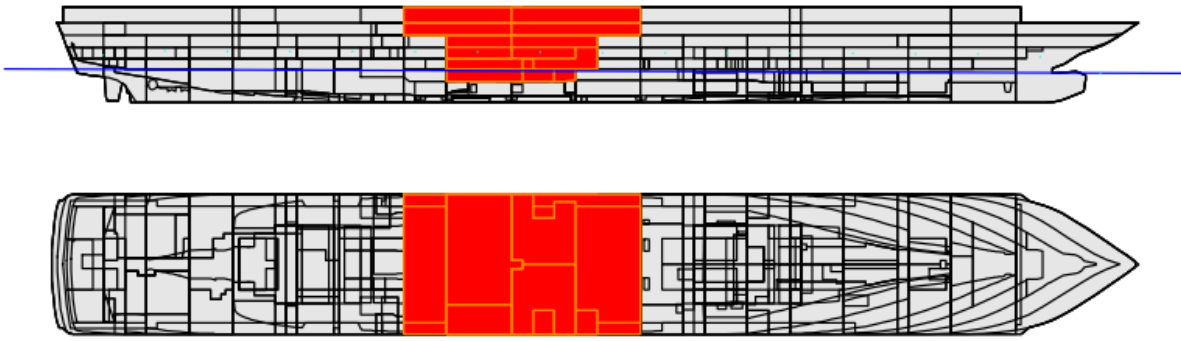


Σχήμα 7.5: Μέγιστες Αντοχές σε άθικτη κατάσταση σε διάφορες γωνίες εγκάρσιας κλίσης [95]

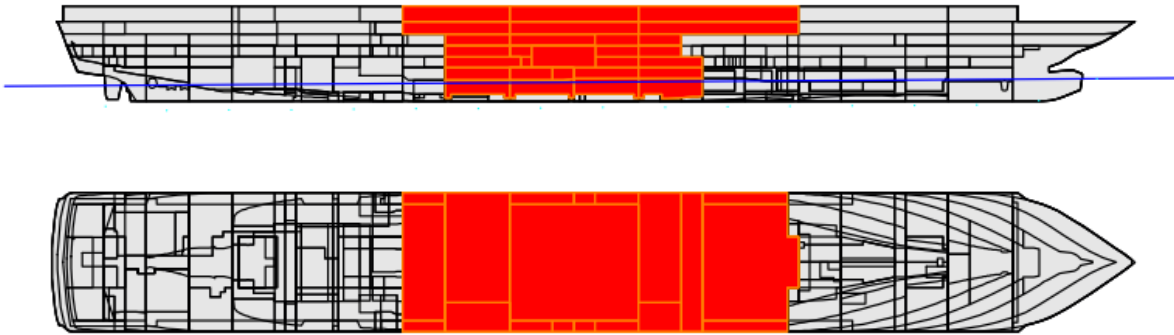
7.2.2 Περιπτώσεις βλάβης με μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης

Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις βλάβης εξετάστηκαν για τη μελέτη της αντοχής σε μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης:

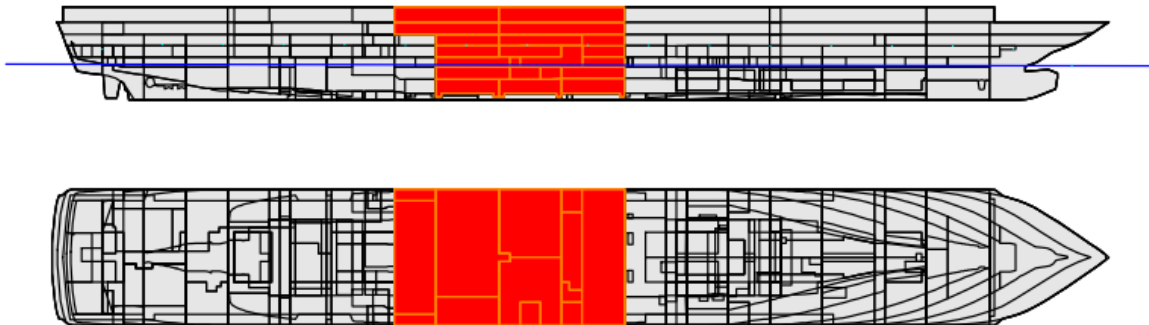
- Βλάβη δυο διαμερισμάτων με μεγάλη έκταση ζημιάς περί τη μέση τομή (Σχήμα 7.6)
- Βλάβη τεσσάρων διαμερισμάτων λόγω ομοεπίπεδης στρεπτικής φόρτισης (Σχήμα 7.7)
- Βλάβη τριών διαμερισμάτων περί τη μέση τομή – Περίπτωση SOLAS (Σχήμα 7.8)



Σχήμα 7.6: Βλάβη δυο διαμερισμάτων με μεγάλη έκταση ζημιάς περί τη μέση τομή [95]



Σχήμα 7.7: Βλάβη τεσσάρων διαμερισμάτων λόγω ομοεπίπεδης στρεπτικής φόρτισης [95]

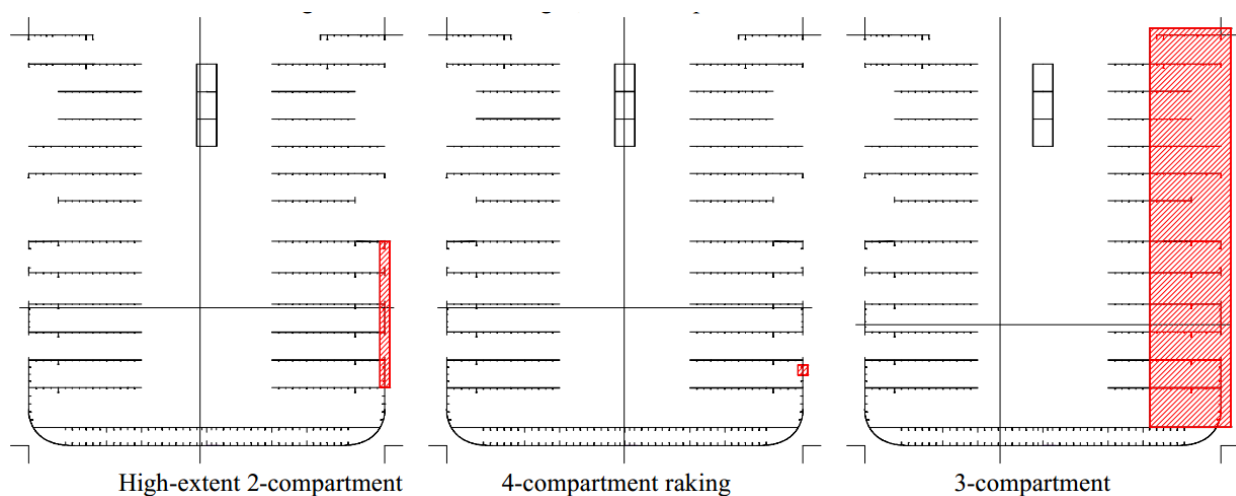


Σχήμα 7.8: Βλάβη τριών διαμερισμάτων περί τη μέση τομή – Περίπτωση SOLAS [95]

Αυτές οι περιπτώσεις βλάβης οδηγούν σε υψηλά φορτία τύπου Sagging, τα οποία προβληματίζουν ιδιαίτερα τον μελετητή ενός κρουαζιερόπλοιου λόγω της χαμηλής ικανότητας των άνω καταστρωμάτων του έναντι λυγισμού. Παρόλο που οι βλάβες στα άκρα του πλοίου (end damages) μπορεί να οδηγήσουν σε σχετικά υψηλά φορτία τύπου Hogging, μελέτες έχουν δείξει ότι τα φορτία αυτά εξακολουθούν να είναι πολύ χαμηλότερα σε σχέση με το μέγιστο που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή.

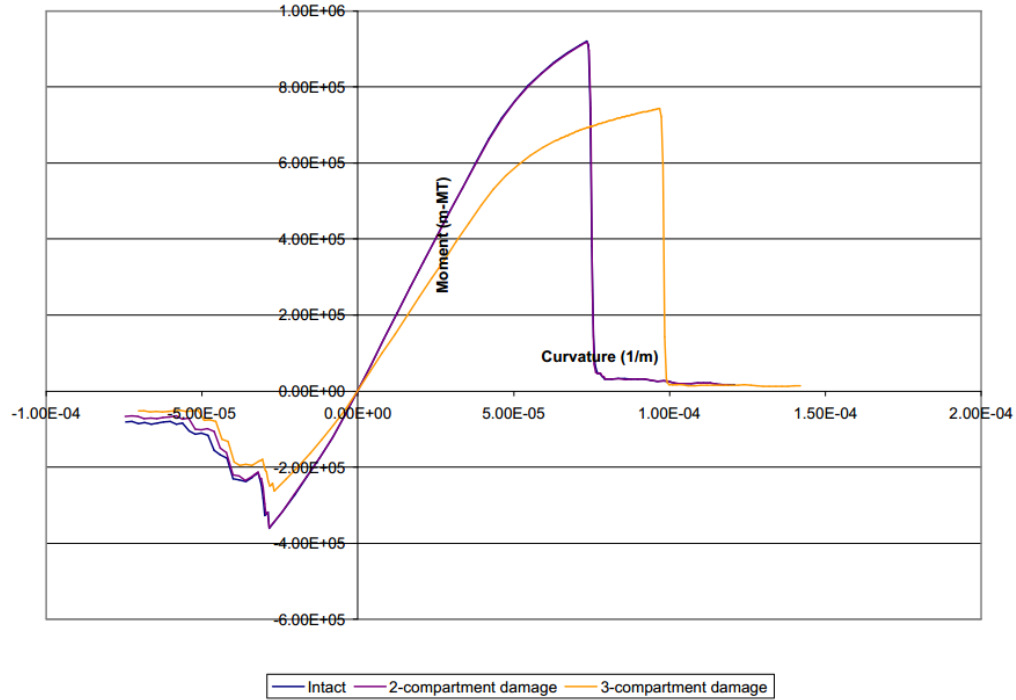
Όπως γίνεται κατανοητό, η ροπή κάμψης για ένα άθικτο πλοίο είναι πάντοτε υψηλότερη σε σχέση με τις περιπτώσεις όπου υπάρχει βλάβη, καθώς τα κατεστραμμένα τμήματα δεν συνεισφέρουν στην (διαμήκη) αντοχή. Κατά συνέπεια, στους υπολογισμούς της αντοχής μετά από βλάβη, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται η ροπή κάμψης σε άθικτη κατάσταση, αλλά σε κατάσταση βλάβης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την κατάσταση με μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης σε κατάσταση βλάβης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.10 και στο Σχήμα 7.11. Υπογραμμίζεται ότι ο διατμητικός λυγισμός των εγκάρσιων φρακτών (raking) σε 4-διαμερισματα παραλείπεται από την ανάλυση επειδή είναι πολύ μικρή η επίδρασή της στην αντοχή, σε σχέση με την άθικτη. Παρόμοια επίδραση παρατηρείται και στην περίπτωση βλάβης των 2-διαμερισμάτων, η οποία έχει επίσης μικρή επιρροή στην υπολογισμένη μέγιστη αντοχή. Η πιο σημαντική κατασκευαστική βλάβη είναι αυτή της τρίτης περίπτωσης (SOLAS), η οποία και οδηγεί σε μία σημαντική μείωση της υπολογισμένης μέγιστης ροπής.

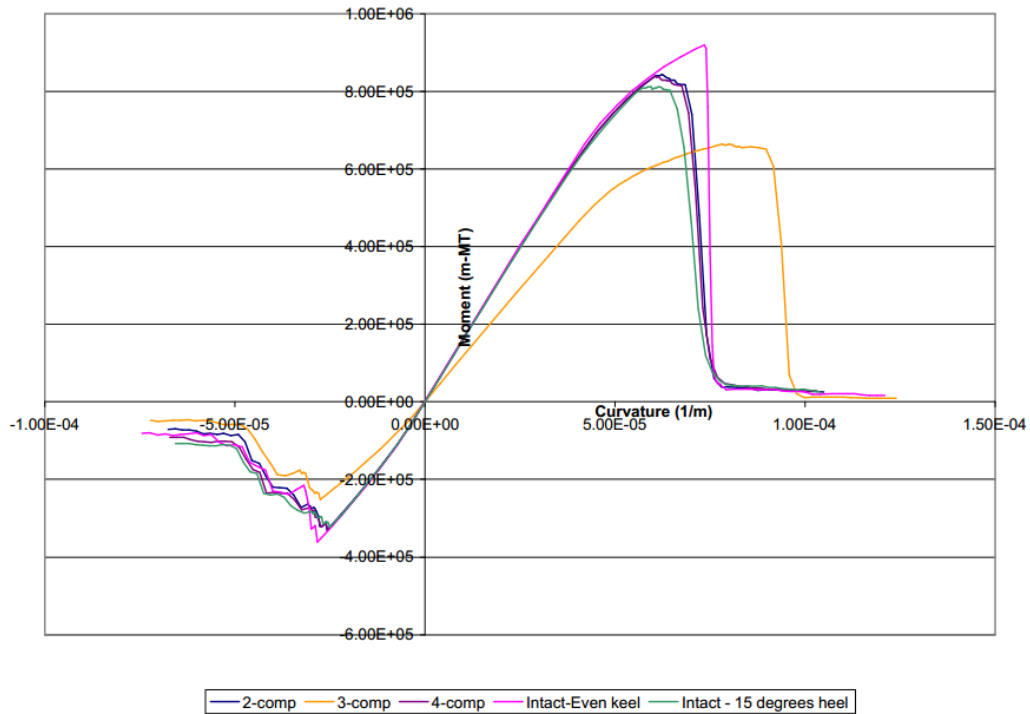


Σχήμα 7.9: Έκταση βλάβης [95]

Όπως διαπιστώνεται, παρόλο που οι εκτάσεις της ζημίας περιγράφουν ποια τμήματα του πλοίου έχουν καταστραφεί (βλέπε Σχήμα 7.9), οι πλημμυρισμένες περιοχές είναι πολύ μεγαλύτερες (βλέπε Σχήμα 7.6, Σχήμα 7.7 και Σχήμα 7.8) λόγω της προοδευτικής κατάκλισης (downflooding) των διαμερισμάτων.



Σχήμα 7.10: Μέγιστη αντοχή σε τρεις καταστάσεις με μηδενική γωνία εγκάρσιας κλίσης [95]



Σχήμα 7.11: Μέγιστη αντοχή σε πέντε καταστάσεις [95]

7.2.3 Επιδράσεις τοπικών παραγόντων

Γενικώς, αρκετοί παράγοντες θα μπορούσαν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα της υπόλοιπης δομής. Σε πρώτη φάση, αν σκεφτεί κανείς ότι η αντοχή του πλοίου σε Sagging είναι μικρότερη από αυτής σε Hogging, τότε μπορεί να προκύψει το συμπέρασμα ότι τα κατώτερα τμήματα της κατασκευής της γάστρας έχουν μικρό αντίκτυπο στη μέγιστη αντοχή της, σε αντίθεση με τα άνω καταστρώματα, όπου μια βλάβη τους οδηγεί σε σημαντική μείωση της μέγιστης αντοχής.

Ακόμη, οι πλευρικές φορτίσεις λόγω υδροστατικής πίεσης (lateral pressure loads) δεν είναι συνήθως παράγοντας λυγισμού των ενισχυτικών κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τις περισσότερες περιπτώσεις, ο λυγισμός του ενισχυτικού θα συμβεί με εκτροπές (deflections) στις εναλλασσόμενες πλευρές μεταξύ των ενισχυμένων νομέων (web frames), και η πίεση στη συνέχεια θα εναλλάσσεται μεταξύ περιορισμού και συμβολής του λυγισμού του ενισχυτικού. Για υψηλές πλευρικές φορτίσεις λόγω υδροστατικής πίεσης μπορεί να προκύψει διαφορετικός μηχανισμός λυγισμού. Ωστόσο, συνήθως για τα κρουαζιερόπλοια τα κρίσιμα στοιχεία που καθορίζουν τη μέγιστη αντοχή σε κατάσταση Sagging είναι τα ανώτερα καταστρώματα, τα οποία δεν υπόκεινται σε φορτία πίεσης.

Εν συνεχεία, η επίδραση του αρχικού βέλους κάμψης στο λυγισμό και στη μέγιστη αντοχή των ενισχυτικών και των ελασμάτων είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Οι αρχικές παραμορφώσεις μπορούν να αυξήσουν και να μειώσουν τη αντοχή σε λυγισμό των δομικών μελών, ανάλογα με το τι μορφή έχει το αρχικό βέλος κάμψης. Η μείωση της μέγιστης αντοχής ενός ελάσματος με βάση την αρχικώς παραμορφωμένη μορφή του εξαρτάται από την αποκαλούμενη λυγηρότητα (slenderness ratio) του ελάσματος. Σημειώνεται ότι μεγαλύτερη μείωση της μέγιστης αντοχής συναντάται στις πιο λεπτές πλάκες (slender plates). Μάλιστα, σε μια λεπτού πάχους υπερκατασκευή, η μείωση αυτή μπορεί να είναι σημαντική.

Επιπροσθέτως, σε μια κατασκευή πλοίου, οι παραμένουσες τάσεις λόγω συγκολλήσεων (Welding induced residual stress) είναι πάντα παρούσες. Για ένα έλασμα (plate panel) μεταξύ των ενισχυτικών, τμήματα του ελάσματος θα είναι σε θλίψη και άλλα σε εφελκυσμό. Γενικώς οι παραμένουσες τάσεις μπορεί να μειώσουν σημαντικά τη μέγιστη αντοχή των ελασμάτων, αλλά το μέγεθος της μείωσης αυτής εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το σχήμα της αρχικής εκτροπής του ελάσματος.

Ακόμη, οι συνδέσεις των άκρων των ενισχυτικών της διαμήκου δομής μπορεί να εξυπηρετήσει διάφορους σκοπούς για την αντοχή της δομής. Κατ' αρχάς, κάθε είδους απλή λάμα (flat bar) ή μπρακέτο θα μειώσει το αποτελεσματικό μήκος του ενισχυτικού και έτσι θα αυξηθεί η ικανότητα του ενισχυτικού να αντιστέκεται στο λυγισμό. Η αποτελεσματικότητα του κάθε τριγωνικού ή κυκλικού μπρακέτου εξαρτάται από το μέγεθος του σε σχέση με το μέγεθος του ενισχυτικού. Για παράδειγμα, ένα μικρό μπρακέτο με ένα μεγάλο ενισχυτικό θα έχει μικρή ή και καθόλου επίδραση και αντίστροφα. Επιπλέον, τα μπρακέτα ή οι απλές λάμες βοηθούν τη μεταφορά του φορτίου διάτμησης εντός του κορμού νομέων (web plating) στα άκρα του ενισχυτικού. Αντίθετα, χωρίς καθόλου μπρακέτα ή απλές λάμες στα άκρα, ολόκληρο αυτό το φορτίο θα πρέπει να μεταφέρεται μέσω της συγκόλλησης μεταξύ του ενισχυτικού και του κορμού νομέα (web plate). Επίσης, κάθε εύκαμπτο άκρο (soft toe) των μπρακέτων θα αυξήσει τη διάρκεια ζωής του άκρου του ενισχυτικού (stiffener end connection) σε κόπωση. Ωστόσο, σε μια ανάλυση μέγιστης αντοχής αυτό δεν θα έχει καμία επίδραση στα αποτελέσματα.

Φυσικά, πέραν όλων αυτών, οι υποθέσεις σχετικά με το αν τα άκρα του ενισχυτικού (stiffener ends) θεωρούνται σταθερά (fixed) ή απλά εδρασμένα (pinned) θα έχει μεγάλη επίπτωση στην αντοχή σε λυγισμό. Στην πραγματικότητα, η συμπεριφορά του ενισχυτικού και των συνδέσεων των άκρων του εξαρτάται από το τι είδη φορτίων υπάρχουν. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος λυγισμού θα είναι με το λυγισμό

του ενισχυτικού σε εναλλασσόμενες πλευρές μεταξύ των ενισχυμένων νομέων (βλέπε Σχήμα 4.8β). Το ενισχυτικό τότε θα συμπεριφέρεται σαν να είναι απλά εδρασμένο (rinned) στα άκρα, και αυτή είναι η φυσιολογική υπόθεση για τους υπολογισμούς της αντοχής σε λυγισμό του ενισχυτικού. Μια άλλη πιθανότητα είναι ότι το ενισχυτικό πάντοτε λυγίζει προς τη μία πλευρά με πακτωμένα άκρα (effective clamped end connections). Αυτός ο μηχανισμός αστοχίας (failure mode) είναι περισσότερο ένας πλαστικός περιορισμός αντοχής (plastic strength limitation) παρά περιορισμός αντοχής λόγω λυγισμού και πιθανότατα δεν θα συμβεί εάν δεν ασκείται μεγάλη υδροστατική πίεση (large pressure head) στη μία πλευρά του ελάσματος.

Τέλος, καθοριστικό ρόλο παίζουν οι διατμητικές δυνάμεις. Για ένα πλοίο σε μια άθικτη κατάσταση (even keel intact condition), οι διατμητικές δυνάμεις θα είναι κατακόρυφες με τις περισσότερες από αυτές να αντιστέκονται από τα κατακόρυφα ελάσματα του πλοίου, όπως το πλευρικό κέλυφος και οι διαμήκεις φρακτές. Για τα κρουαζιερόπλοια, μια ζημιά στη δομή του πλοίου τείνει να αυξήσει αυτές τις διατμητικές δυνάμεις. Μάλιστα, όταν υπάρχουν διαμερίσματα κατακλισμένα, με βλάβη στη δομή, η ικανότητα παραλαβής διατμητικού φορτίου μπορεί να μειωθεί, ενώ ταυτόχρονα στα υπόλοιπα τμήματα της δομής οι διατμητικές τάσεις θα είναι αυξημένες. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη αντίσταση σε λυγισμό του ελάσματος του πλευρικού κελύφους και των διαμήκων φρακτών. Παρά το γεγονός ότι το έλασμα θα μπορούσε να λυγίσει νωρίτερα από την περίπτωση όπου η δομή θα ήταν άθικτη, δύο παράγοντες μειώνουν σημαντικά τη σημασία αυτού του αποτελέσματος. Πρώτον, το πλευρικό κέλυφος και οι διαμήκεις φρακτές, που είναι ιδιαίτερα φορτισμένες περιοχές υπό διάτμηση, δεν είναι τα κύρια κατασκευαστικά μέλη της δομής που αντιστέκονται στη διαμήκη κάμψη. Ως εκ τούτου, ο λυγισμός των τμημάτων του πλευρικού κελύφους δεν θα μειώσει σημαντικά την συνολική αντοχή σε κάμψη της κατασκευής. Επίσης, η κατανομή των διατμητικών τάσεων είναι τέτοια ώστε οι υψηλότερες διατμητικές τάσεις θα παρουσιαστούν κοντά στον ουδέτερο άξονα του πλοίου, όπου οι τάσεις λυγισμού είναι χαμηλές (μηδενική θλιπτική τάση λόγω κάμψης). Δεύτερον, ο λυγισμός των απλών ελασμάτων μεταξύ των ενισχυτικών, δεν σημαίνει κατ' ανάγκη ότι η περιβάλλουσα κατασκευή θα αστοχήσει, αν και σίγουρα θα μειωθεί η ακαμψία σε λυγισμό (buckling stiffness) των συνημμένων ενισχυτικών (μειωμένο αποτελεσματικό πλάτος).

7.3 Ανακεφαλαίωση

Με το πέρας του Κεφαλαίου 7 προέκυψαν διάφορα ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Αρχικά, λόγω του ότι τα κρουαζιερόπλοια χαρακτηρίζονται από πολύπλοκη δομή με ασυνέχειες, κατά τη μελέτη της αντοχής τους, πρέπει λαμβάνονται υπόψη μόνο τα δομικά στοιχεία που συμβάλλουν σε αυτή. Ως εκ τούτου θα πρέπει να αφαιρούνται από την «πλήρη» μέση τομή, τα όποια τμήματα δεν εκτείνονται σε ένα αποδεκτό μήκος περί τη μέση τομή.

Επιπλέον, διαπιστώθηκε μια υποβάθμιση της αντοχής των κρουαζιερόπλοιων ανάλογα με την εκάστοτε γωνία εγκάρσιας κλίσης. Συγκεκριμένα, για γωνία εγκάρσιας κλίσης πάνω από 15° η αντοχή μειώνεται κατά περίπου 10%. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για κάποια κατασκευαστικά στοιχεία (αυτά που απέχουν μακριά από τον ουδέτερο άξονα) να εγκυμονεί ο κίνδυνος να αστοχήσουν πιο νωρίς από το προβλεπόμενο.

Η μέγιστη φόρτιση της κατασκευής σε κατάσταση Hogging παρουσιάζεται τη στιγμή όπου όλα τα ελάσματα του πυθμένα (bottom panels) φτάσουν το φορτίο στρεπτο-καμπτικού λυγισμού και καταρρεύσουν. Αντίστοιχα, η μέγιστη αντοχή της κατασκευής σε κατάσταση Sagging, η οποία είναι μικρότερη σε σχέση με την Hogging (περίπου 3 φορές), παρουσιάζεται όταν η άνω υπερκατασκευή

αρχίζει και καταρρέει, και αυτό συμβαίνει πριν κάποια διαρροή κάνει εμφανή την παρουσία της στη δομή και συγκεκριμένα περίπου στο 34% του σημείου διαρροής του άνω καταστρώματος.

Οι μειωμένες ροπές σε κατάσταση Saggging καθιστά την κατασκευή των υψηλότερων καταστρωμάτων επιρρεπή στο λυγισμό, καθώς δεν μπορεί να παραλάβει τη θλιπτική φόρτιση. Κατά αυτό τον τρόπο, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι τα κατώτερα τμήματα της κατασκευής της γάστρας έχουν μικρό αντίκτυπο στη μέγιστη αντοχή της, σε αντίθεση με τα άνω καταστρώματα, όπου μια βλάβη τους οδηγεί σε σημαντική μείωση της μέγιστης αντοχής. Έτσι, για τα κρουαζιερόπλοια τα κρίσιμα στοιχεία που καθορίζουν τη μέγιστη αντοχή σε κατάσταση Saggging είναι τα ανώτερα καταστρώματα.

Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε μελέτη της αντοχής της κατασκευής σε κατάσταση βλάβης. Για το σκοπό αυτό εξετάστηκαν τρία σενάρια βλάβης, των οποίων μελετήθηκε η αντοχή προτού το πλοίο αποκτήσει κάποια εγκάρσια κλίση. Η πιο επικίνδυνη κατάσταση ήταν αυτή που προβλέπει η SOLAS και συγκεκριμένα η βλάβη τριών διαμερισμάτων περί τη μέση τομή. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι το πρόσθετο βάρος του νερού μεταβάλλει ουσιαστικά τη ροπή κάμψης υποβάλλοντας το κατάστρωμα αντοχής σε θλίψη.

Ακόμη, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά τους τοπικούς παράγοντες που επιδρούν στη μέγιστη αντοχή. Πρώτον, οι αρχικές παραμορφώσεις μπορούν να αυξήσουν αλλά και να μειώσουν τη αντοχή σε λυγισμό των δομικών μελών, ανάλογα με το τι μορφή έχει η αρχική παραμόρφωση (λυγηρότητα). Φυσικά, μεγαλύτερη μείωση της μέγιστης αντοχής συναντάται στις πιο λεπτές πλάκες (μεγάλος λόγος b/t). Δεύτερον, προέκυψε ότι οι παραμένουσες τάσεις από τις συγκολλήσεις μπορεί να μειώσουν σημαντικά τη μέγιστη αντοχή των ελασμάτων. Τρίτον, διαπιστώθηκε ο βασικός ρόλος των συνδέσεων των άκρων. Για παράδειγμα, η αποτελεσματικότητα του κάθε μπρακέτου εξαρτάται από το μέγεθος του σε σχέση με το μέγεθος του ενισχυτικού. Έτσι, ένα μικρό μπρακέτο με ένα μεγάλο ενισχυτικό θα έχει μικρή ή και καθόλου επίδραση. Τέλος, καθοριστικό ρόλο παίζουν οι διατμητικές δυνάμεις. Ειδικότερα, όταν υπάρχουν διαμερίσματα κατακλισμένα, με βλάβη στη δομή, η ικανότητα παραλαβής διατμητικού φορτίου μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα στα υπόλοιπα τμήματα της δομής οι διατμητικές τάσεις αυξάνονται.

8. ΝΕΕΣ ΕΞΕΛΙΞΕΙΣ ΣΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΤΩΝ ΚΡΟΥΑΖΙΕΡΟΠΛΟΙΩΝ

8.1 Εισαγωγή

Οι διάφορες πλοιοκτήτριες εταιρείες κρουαζιερόπλοιων έχουν αρκετά όμοια μεταξύ τους κρουαζιερόπλοια, όσον αφορά τη σχεδίαση και τη διάταξη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ακολουθούν την ίδια λογική ναυπήγησης κρουαζιερόπλοιων, η οποία μέχρι σήμερα τους αποφέρει έσοδα.

Ωστόσο, αυτό δεν είναι κάτι το σταθερό. Οι εταιρείες κρουαζιέρας δεν μπορεί να έχουν όμοια πλοία. Τόσο τα πλοία όσο και η δραστηριότητά τους πρέπει να είναι αναγνωρίσιμη και να διαφέρει από τους ανταγωνιστές. Είναι ώρα για νέες ιδέες, νέες σχεδιάσεις, νέες διακοσμήσεις και νέες τεχνολογικές λύσεις. Κάποιες πρωτότυπες σχεδιάσεις παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα (βλέπε Σχήμα 8.1, Σχήμα 8.2, Σχήμα 8.5).



Σχήμα 8.1: Κρουαζιερόπλοιο τύπου ιδιωτικού σκάφους αναψυχής (yacht) [96]

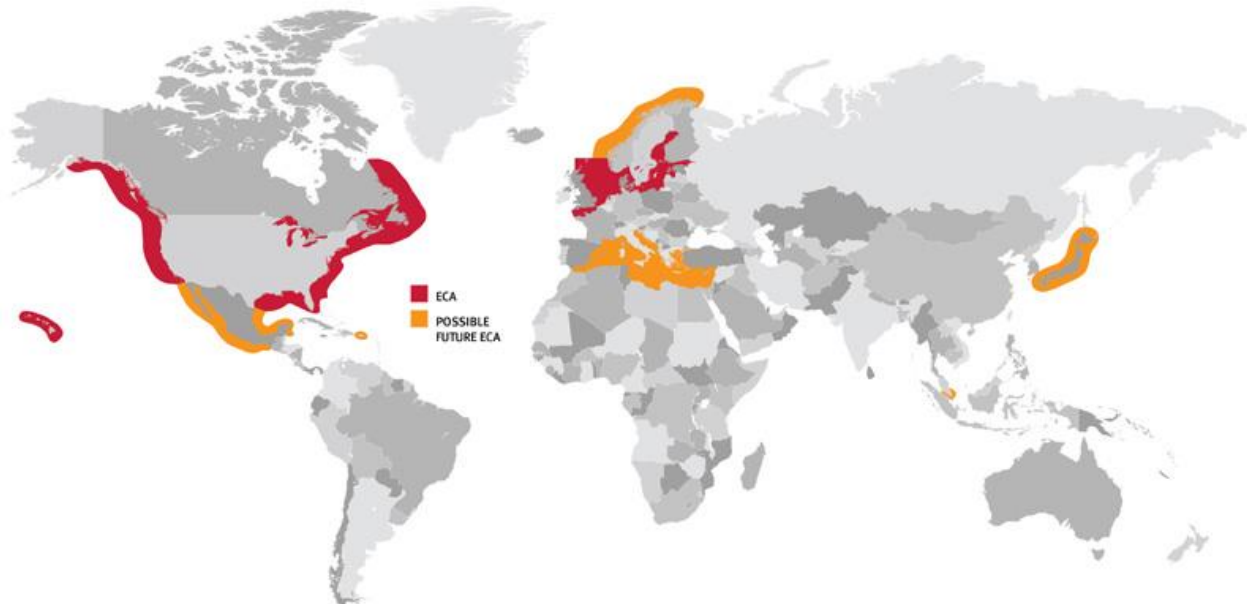
Ταυτόχρονα, οι πλοιοκτήτες κρουαζιερόπλοιων έχουν να αντιμετωπίσουν όλο και πιο σφιχτούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, από ότι οι άλλοι τύποι πλοίων. Οι τερματικοί σταθμοί επιβατηγών πλοίων είναι κοντά στο κέντρο της πόλης με τοπικούς κανόνες όσον αφορά τις εκπομπές καυσαερίων και τις εκκενώσεις λυμάτων. Οι διαδρομές κρουαζιέρας συχνά οδηγούν τα πλοία σε περιοχές με φυσική ομορφιά και μοναδικότητα, όπως η περιοχή της Καραϊβικής. Μόνο τα λύματα και το θαλασσινό έρμα που είναι επεξεργασμένα μπορούν να αποβάλλονται και κανένα στερεό απόβλητο δεν πετιέται εκτός του πλοίου.

Οι εκπομπές αερίων από τις μηχανές πρέπει να είναι εντός των ορίων που έχουν θεσπιστεί από τον IMO. Τα παραπάνω είναι ακόμη εντονότερα με τους νέους κανονισμούς όπου στις περιοχές ελέγχου των καυσαερίων, γνωστές ως περιοχές ECA (Emissions Control Area) απαγορεύεται η είσοδος πλοίων που εκπέμπουν καυσαέρια περιεκτικότητας πάνω από 0.1% σε θείο. Μάλιστα, οι περιοχές ECA αναμένεται να αυξηθούν, ενσωματώνοντας σχεδόν όλες τις περιοχές κρουαζιέρας (βλέπε Σχήμα 8.3). Προς

αντιμετώπιση αυτού τα κρουαζιερόπλοια θα πρέπει να είτε να χρησιμοποιήσουν LNG ως καύσιμο είτε συσκευές Scrubber (βλέπε Σχήμα 8.4) για φιλτράρισμα των καυσαερίων είτε πετρέλαιο χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.



Σχήμα 8.2: Πλωτό θέρετρο [97]



Σχήμα 8.3: Ισχύουσες και μελλοντικές περιοχές ECA [98]

Καινοτομίες φιλικές προς το περιβάλλον γενικότερα, αποτελούν και τα ιστιοπλοϊκά κρουαζιερόπλοια (βλέπε Σχήμα 8.5). Η χρήση πανιών μειώνει μέρος της απαίτησης ισχύος. Η ισχύς πρόωσης μειώνεται αλλά η απαίτηση ισχύος για τις ανάγκες των υπηρεσιών του κρουαζιερόπλοιου δεν επηρεάζεται. Ωστόσο, για να είναι ικανό να κρατηθεί μια σταθερή πορεία σε ένα ιστιοπλοϊκό κρουαζιερόπλοιο θα πρέπει να υπάρχουν και κινητήρες. Κατά αυτό τον τρόπο τα μεγάλα πανιά λειτουργούν περισσότερο ως πόλο έλξης για τους επιβάτες, όντας ταυτόχρονα φιλικά προς το περιβάλλον.



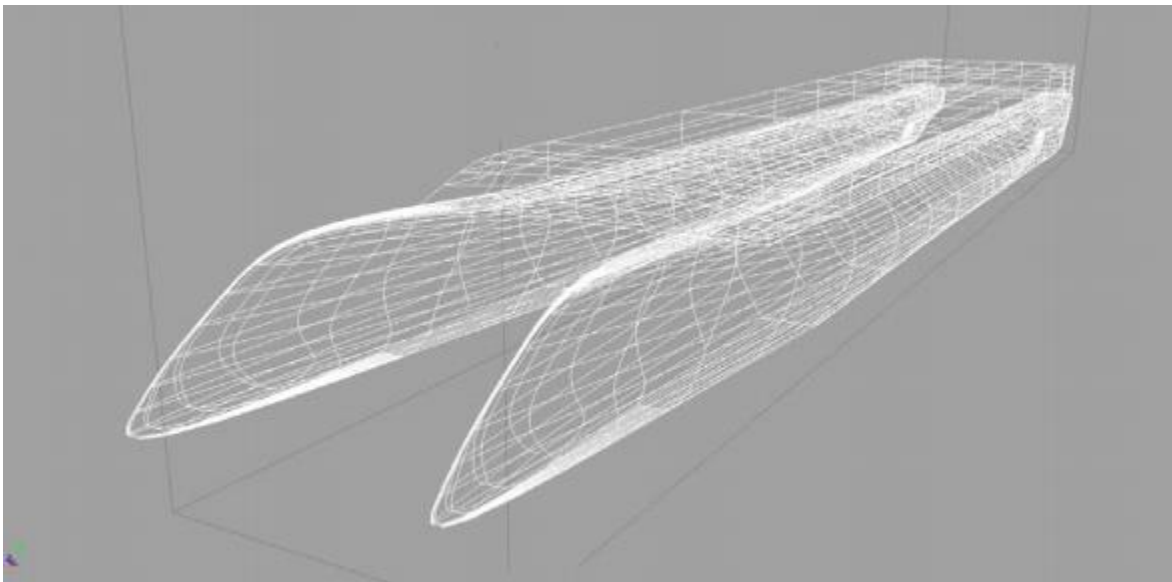
Σχήμα 8.4: Εφαρμογή scrubber σε κρουαζιερόπλοιο [99]



Σχήμα 8.5: Κρουαζιερόπλοια με μεγάλα πανιά [100]

8.2 Μοντέλο με δύο γάστρες

Η προτεινόμενη ιδέα είναι ένα εκτενές πλοίο τύπου καταμαράν με δύο γάστρες τύπου wave-piercing (βλέπε Σχήμα 8.6). Το συνολικό μήκος του είναι 366m και το συνολικό πλάτος είναι 70m. Υπάρχουν δύο αυτόνομες υπερκατασκευές, οι οποίες φιλοξενούν περισσότερες από δύο χιλιάδες καμπίνες επιβατών και διαθέτουν μπαλκόνια με θέα τη θάλασσα. Υπάρχει επίσης εκτεταμένος εξωτερικός χώρος καταστρώματος σε αρκετά επίπεδα. Ο σχεδιασμός των δύο πανομοιότυπων γαστρών εξασφαλίζει καλή ευστάθεια και αξιοπλοΐα. Ωστόσο, το κατάστρωμα που συνδέει τις δύο γάστρες, εκτίθεται σε ακραίες δυνάμεις σε κακές καιρικές συνθήκες. Ιδίως οι δυνάμεις στρέβλωσης (warping forces) στις δυο γάστρες αντιπροσωπεύουν μια τεράστια πρόκληση. Για το σκοπό αυτό επινοείται μια υπερκατασκευή κατάλληλη για την ενίσχυση της αντοχής και της ακαμψίας.



Σχήμα 8.6: Μορφή γαστρών [101]

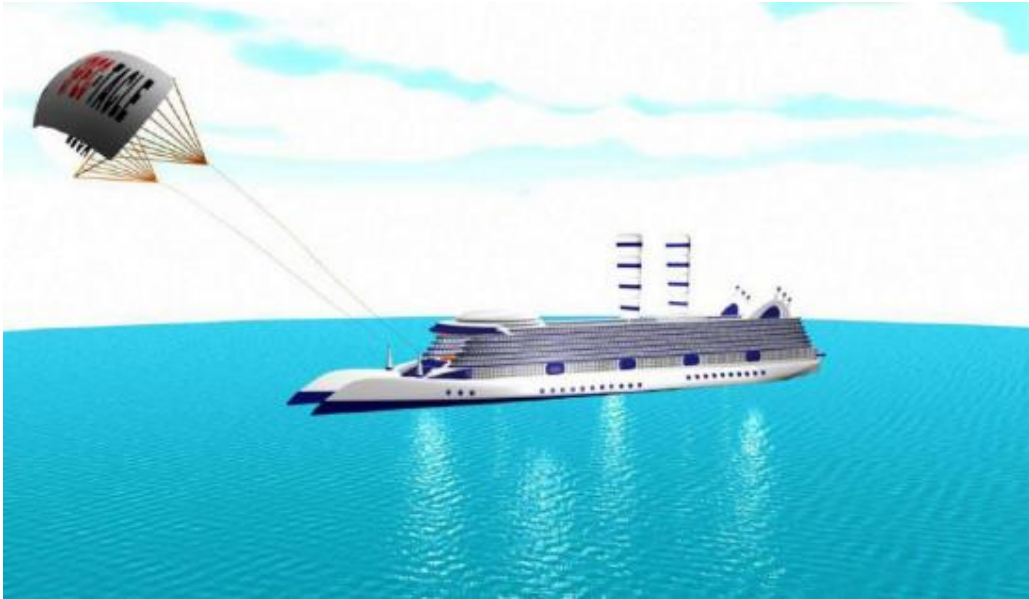
Σε αυτή τη ιδέα σχεδίασης μπορεί να προστεθεί και ένας μεγάλης κλίμακας αετός, καθώς και ένα ζευγάρι τηλεσκοπικών αεροτομών για βοηθητική ισχύ (βλέπε Σχήμα 8.7). Για την προσαρμογή του αετού είναι αρχικά απαραίτητη η ανύψωση των αεροτομών. Στη συνέχεια ένας μεγάλος αετός τετράγωνου σχήματος ανοίγεται πάνω από το σκάφος για να αξιοποιήσει την αιολική ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο, και μαζί με τις αεροτομές μπορεί να είναι δυνατή η μείωση κατά 60% των καυσίμων που απαιτούνται για την πρόωση [102].

Ο αετός μπορεί να ανυψωθεί σε ύψος άνω των 300 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας, και έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί μέσω της γέφυρας του πλοίου. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί κανείς να αλλάξει εύκολα την κατεύθυνση του αετού όταν η κατεύθυνση του ανέμου αλλάζει, πράγμα που οδηγεί σε σταθερή παροχή της αιολικής ενέργειας. Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας μπορεί να είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για να ξεπεραστεί η έλλειψη ενέργειας αλλά και για να δημιουργηθούν πλοία πιο φιλικά προς το περιβάλλον.

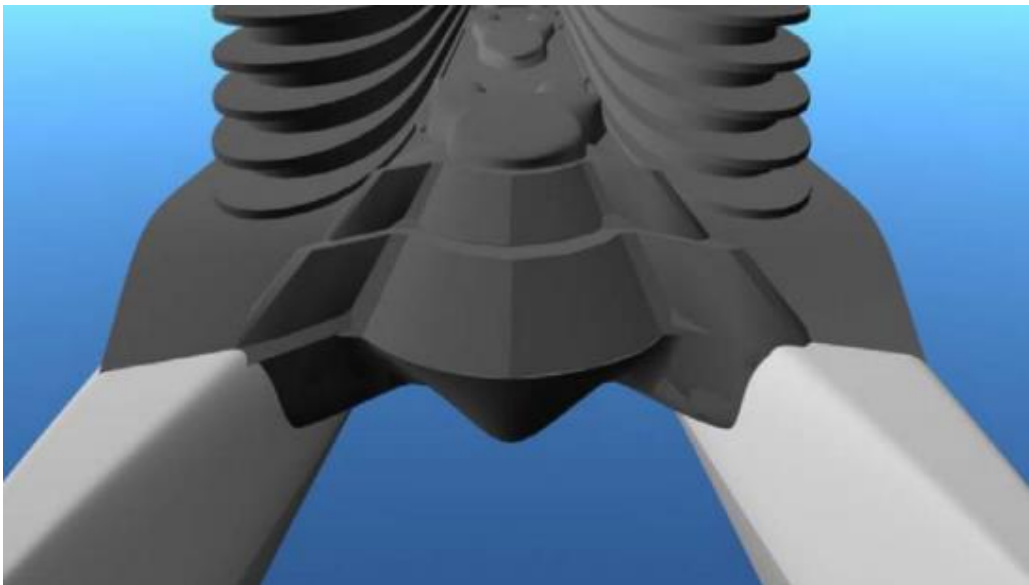
Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη μείωση του βάρους της γάστρας και για την πρόληψη της διάβρωσης, η υπερκατασκευή θα πρέπει κατασκευάζεται από κράμα αλουμινίου. Αυτό είναι αναγκαίο για την αύξηση του DWT (νεκρό βάρος) αλλά και για την μείωση του βάρους της γάστρας. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί κράμα αλουμινίου, μπορούν να οικοδομηθούν δομές από αλουμίνιο που είναι τόσο

ισχυρές όσο οι χαλύβδινες κατασκευές. Οι κατασκευές από αλουμίνιο ζυγίζουν περίπου το 1/3 του βάρους των χαλύβδινων κατασκευών. Αυτός είναι ο κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει όχι μόνο την βελτίωση της ασφάλειας, αλλά και την κατανάλωση καυσίμων.

Ωστόσο, το αλουμίνιο δεν μπορεί να συγκολληθεί με τον κοινό χάλυβα απευθείας. Μια κοινή μέθοδος ένωσής τους είναι η μεταβατική συγκόλληση (transition welding) (βλέπε Κεφάλαιο 6). Αυτή είναι μια τεχνολογία που έχει χρησιμοποιηθεί και είναι αποδεκτή στα κρουαζιερόπλοια.



Σχήμα 8.7: Κρουαζιερόπλοιο με δυο γάστρες, μεγάλο αετό και τηλεσκοπικά φύλλα ανέμου [101]



Σχήμα 8.8: Γάστρα από χάλυβα και υπερκατασκευή από αλουμίνιο [101]

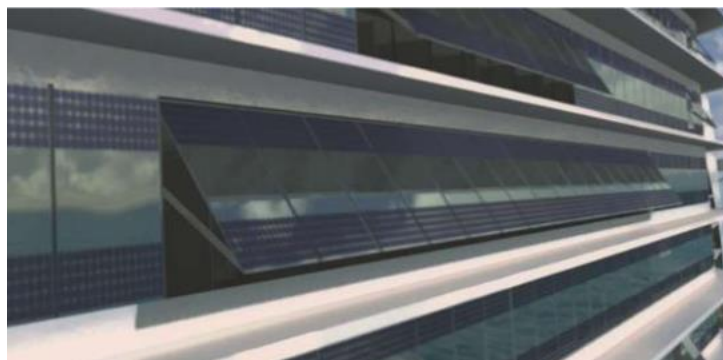
8.3 Μοντέλο Eoseas

Το μοντέλο Eoseas αποτελεί μια σχεδίαση *rentamaraan* (πέντε γάστρες), όπως φαίνεται στο Σχήμα 8.9. Η ολική χωρητικότητα του πλοίου θα είναι ίση με 105000GT, ενώ το μήκος του θα ξεπερνά τα 300m. Αυτό το πλοίο θα είναι ικανό να φιλοξενήσει 3311 επιβάτες σε 1403 καμπίνες και 1089 μέλη πληρώματος σε 555 καμπίνες. Όλες οι καμπίνες είναι σχεδιασμένες να χρησιμοποιούν φυσικό φωτισμό, μειώνοντας έτσι τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος της σχεδίασης ήταν ένα κρουαζιερόπλοιο φιλικό προς το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό έχουν επινοηθεί καινοτόμες διατάξεις και κάποιες από αυτές είναι χρήσιμο να αναφερθούν.



Σχήμα 8.9: Μοντέλο Eoseas [103]

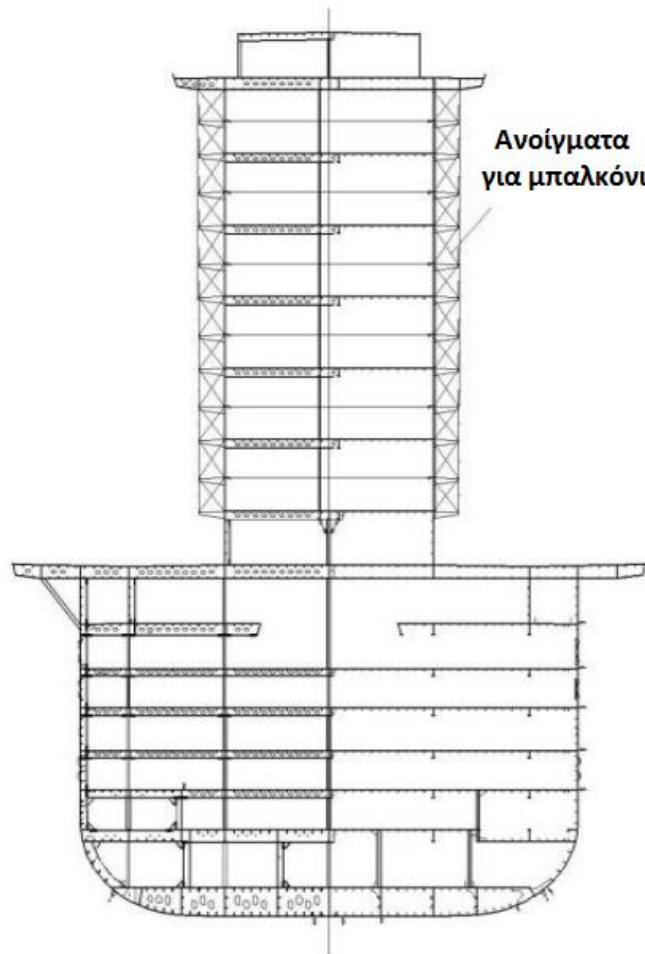
Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται από πέντε μεγάλα πανιά συνολικής επιφάνειας 12400m², που συνεισφέρουν στην ισχύ πρόωσης, εκμεταλλεύοντας την αιολική ενέργεια. Επίσης, «η αεροδυναμική του σχεδίαση έχει αποδειχθεί ότι εξοικονομεί 10% σε καύσιμα» [104]. Ακόμη, από την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών (βλέπε Σχήμα 8.10) συνολικής επιφάνειας 8300m² στο πλευρικό κέλυφος και στο ανώτερο κατάστρωμα είναι δυνατή η παραγωγή σημαντικής ποσότητας ενέργειας. Τέλος, σύμφωνα με την πηγή [104] μέσα από μια τέτοια καινοτομία καθίσταται δυνατή η μείωση της κατανάλωσης ισχύος κατά 50% αλλά και των εκπομπών του CO₂ κατά 50%, του SO₂ κατά 100%, του NO_x κατά 90% και των σωματιδίων PM κατά 100%.



Σχήμα 8.10: Φωτοβολταϊκά στο πλευρικό κέλυφος [104]

8.4 Μοντέλο ΧρTray

Το ολοένα και αυξανόμενο μέγεθος των κρουαζιερόπλοιων κάνει το κόστος κτήσης του πολύ υψηλό. Υπάρχει επίσης ένας περιορισμός στον αριθμό των προορισμών, κάνοντας έτσι την εμπειρία της κρουαζιέρας λιγότερο μοναδική. Συνεπώς, κάποιοι πλοιοκτήτες έχουν ενδιαφερθεί για μικρότερα πλοία αποκλειστικά με καμπίνες με μπαλκόνι για τους επιβάτες. Σαν απάντηση σε αυτό προτάθηκε ένα νέο σενάριο σχεδίασης κρουαζιερόπλοιου, το ΧρTray. Η μέση τομή αυτού του πλοίου απεικονίζεται στο Σχήμα 8.11. Όπως διαπιστώνεται, το μοντέλο ΧρTray έχει ένα πολύ στενό υπερστέγασμα όταν συγκρίνεται με τις συμβατικές κατασκευές των κρουαζιερόπλοιων.



Σχήμα 8.11: Μέση τομή μοντέλου ΧρTray [39]

Στην περίπτωση του ΧρTray, η κατασκευή είναι πιο απλή από τις συμβατικές σχεδιάσεις. Τα πλατιά καταστρώματα στέγασης (accommodation decks) έχουν αφαιρεθεί από την υπερκατασκευή, η οποία είναι πλέον ένα στενό υπερστέγασμα. Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 8.11, η εσοχή λόγω των σωστικών λέμβων είναι απύσασ, που σημαίνει ότι μόνο το κατάστρωμα των σωστικών λέμβων συμμετέχει στη ροή της διατμητικής δύναμης. Βέβαια, λόγω της πρωτοτυπίας της σχεδίασης αυτής, η γνώση για την επιρροή αυτών των αλλαγών στην αλληλεπίδραση γάστρας-υπερστεγάσματος και στην επιρροή της παραλαβής της φόρτισης είναι περιορισμένη.

Κλείνοντας, ο Bergström [105] κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα μεγάλα ανοίγματα στην πλευρά του κελύφους του υπερστεγάσματος «ανακούφισαν» τις ορθές τάσεις στα καταστρώματα του υπερστεγάσματος. Διαφορετικά, θα μπορούσε να πει κανείς ότι το υπερστέγασμα δεν είναι αποτελεσματικό και δεν συμβάλλει στη διαμήκη αντοχή. Η ασυνέχεια πλευράς και υπερστεγάσματος συμβάλλει σε αυτό. Ωστόσο, παρουσιάστηκαν υψηλά επίπεδα διατμητικών τάσεων στις πλευρές του υπερστεγάσματος. Ειδικά στη σύνδεση του πλευρικού κελύφους του υπερστεγάσματος και του καταστρώματος των σωστικών λέμβων, οι διατμητικές τάσεις είναι αρκετά υψηλές, κάτι το οποίο απαιτεί τη χρήση πολύ παχιών ελασμάτων χάλυβα.

8.5 Μοντέλο M2cell

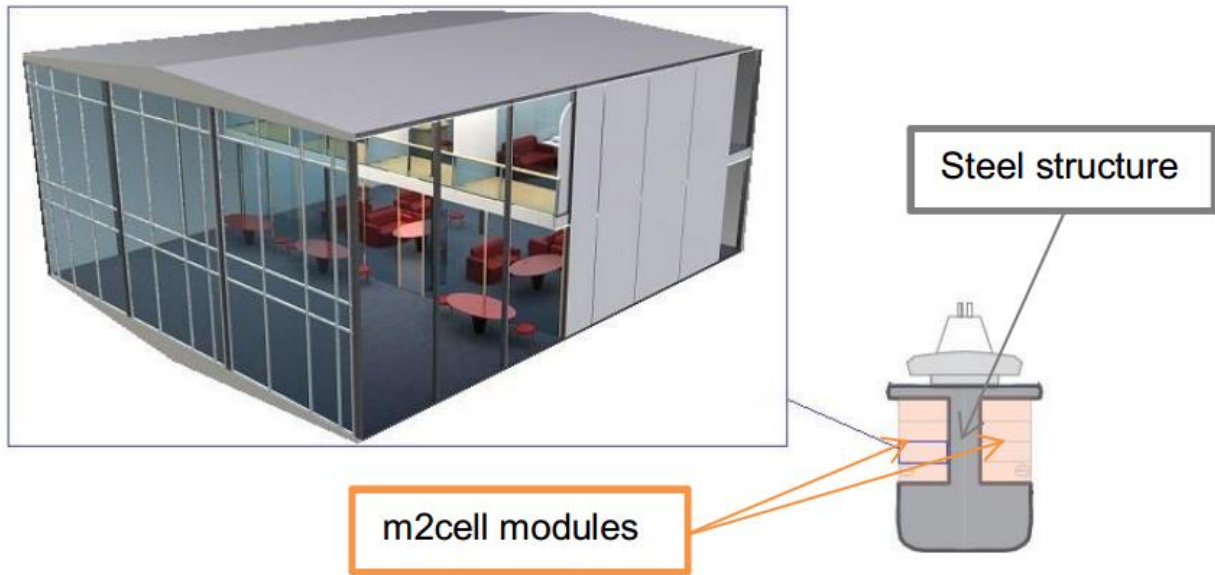
Ο εσωτερικός εξοπλισμός και η γενική διάταξη των επιβατηγών πλοίων δεν μπορεί να αλλαχθεί σε εύλογο διάστημα και προσιτό κόστος επειδή ο εξοπλισμός είναι ενσωματωμένος στην χαλύβδινη κατασκευή του πλοίου. Για παράδειγμα, οι περιοχές των καμπινών είναι κατασκευασμένες από μονάδες που είναι συγκολλημένες στα καταστρώματα, μεταξύ των ενισχυμένων νομέων. Το νερό, η θέρμανση, ο εξαερισμός, ο κλιματισμός, ο ηλεκτρισμός και τα άλλα συστήματα πρέπει να είναι συνδεδεμένα. Τα πατώματα κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας διαφόρους τύπους κονιαμάτων (screeds), τα οποία εν συνεχεία καλύπτονται από χαλιά ή άλλα υλικά. Μετά την ολοκλήρωση των εργασιών, οι μονάδες καμπινών δεν μπορούν να αφαιρεθούν εύκολα, καθιστώντας τις εργασίες μετατροπής και επανατοποθέτησης χρονοβόρες.

Επίσης, η μετατροπή των δημόσιων χώρων είναι ακόμα πιο προκλητική αφού, εκτός από την αφαίρεση του παλιού εσωτερικού χώρου, ο εξοπλισμός είναι ολοκληρωτικά εγκατεστημένος στο πλοίο. Ως αποτέλεσμα, το εσωτερικό των επιβατηγών πλοίων είναι στατικό και δεν μπορεί να προσαρμοστεί αποτελεσματικά για τις διάφορες ανάγκες των μεταβαλλόμενων αγορών.

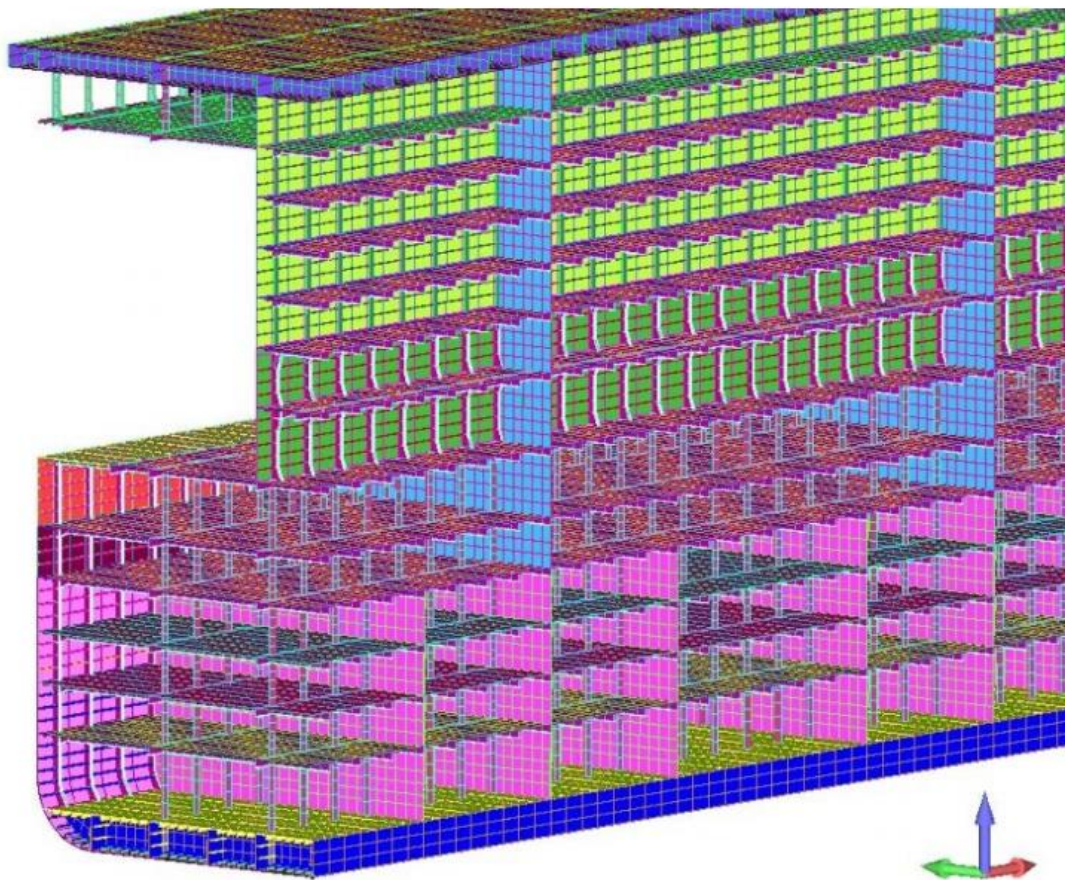
Η μεγάλη ζωή λειτουργίας ενός κρουαζιερόπλοιου σημαίνει ότι αρκετές διορθώσεις χρειάζονται ώστε να διατηρείται το πλοίο ανταγωνιστικό στην αγορά της κρουαζιέρας. Συνεπώς, έχει γίνει ανταγωνιστικό να αναζητάει κανείς νέες μεθόδους για τη μετατροπή του εσωτερικού των κρουαζιερόπλοιων.

Ένα νέο σενάριο που καλείται m2cell έχει προταθεί για γρήγορη εξόπλιση και μετατροπή της δομής των επιβατηγών πλοίων. Η ιδέα αυτή προέκυψε με αφορμή το μοντέλο ΧρTray. Ένα παράδειγμα του μοντέλου m2cell δίνεται στο Σχήμα 8.12 μαζί με την απεικόνιση της τοποθέτησής του στην κατασκευή του πλοίου.

Ωστόσο, το προτεινόμενο μοντέλο φέρνει έναν αριθμό προκλήσεων στην κατασκευαστική σχεδίαση του πλοίου, οι οποίες αξίζει να μελετηθούν. Ένα τμήμα του μοντέλου της προτεινόμενης κατασκευής απεικονίζεται στο Σχήμα 8.13. Όπως παρατηρείται, η πλευρά του υπερστεγάσματος στην εσοχή των σωστικών λέμβων είναι αρκετά κοντά στην κεντρική γραμμή αναφοράς και συμπίπτει με τη διαμήκη φρακτή. Επίσης, παρατηρείται ότι οι κύριες φρακτές πυρκαγιάς (main fire bulkheads) είναι πλατιές προκειμένου να επεκτείνονται σε όλο το πλάτος της γάστρας.

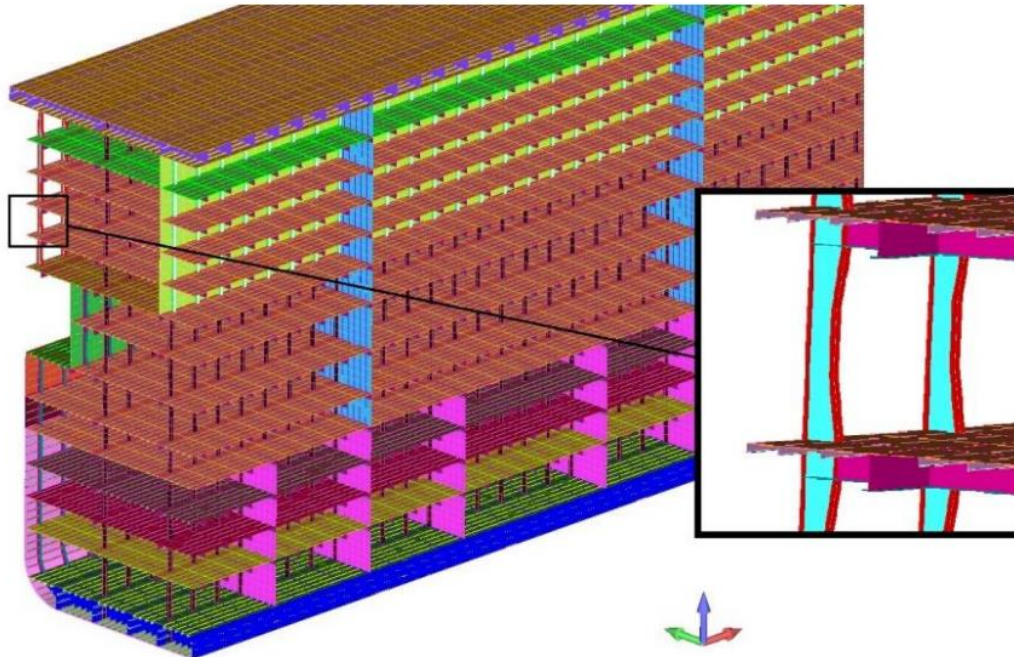


Σχήμα 8.12: Μοντέλο M2CELL [39]



Σχήμα 8.13: Τμήμα ολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων του M2CELL [39]

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση της αντοχής μεταξύ της πρωτότυπης δομής και μιας συμβατικής, απεικονίζεται στο Σχήμα 8.14 ένα τμήμα του μοντέλου μιας παραδοσιακής κατασκευής. Στη δομή αυτή μπορεί να φανεί ότι είναι μοντελοποιημένες οι εγκάρσιες φρακτές στην «κύρια» γάστρα και εκπροσωπούν τις στεγανές φρακτές και τις φρακτές της κύριας ζώνης πυρκαγιάς που εκτείνονται καθ' ύψος ολόκληρης της κατασκευής. Μια πιο προσεκτική εστίαση πρέπει να γίνει στο πλευρικό κέλυφος της υπερκατασκευής. Στη συμβατική δομή το πλευρικό κέλυφος της υπερκατασκευής δεν συμμετέχει στην διατμητική ροή, με αποτέλεσμα οι διατμητικές δυνάμεις να μεταφέρονται μέσω της εσωτερικής διαμήκουσ φρακτής.

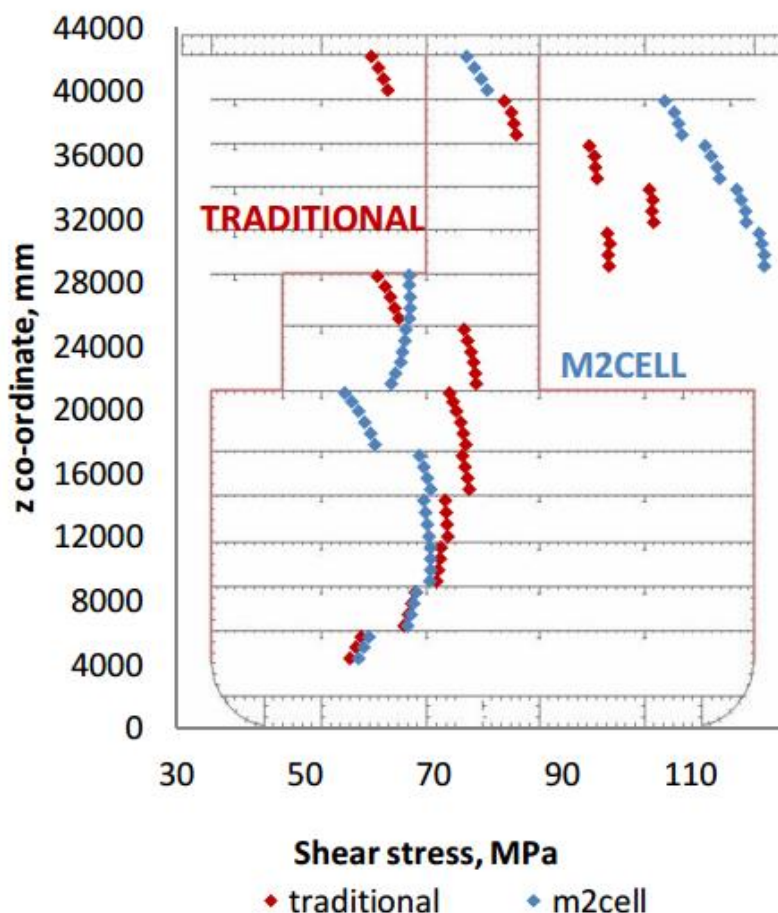


Σχήμα 8.14: Τμήμα ολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μιας παραδοσιακής κατασκευής [39]

8.5.1 Μελέτη και σύγκριση της αντοχής της συμβατικής κατασκευής με την παραδοσιακή

Σε πρώτη φάση, μελετάται η προτεινόμενη δομή σε κατάσταση Hogging. Όσον αφορά τις ορθές τάσεις, εφόσον τηρούνται οι υποθέσεις της θεωρίας απλής κάμψης των Euler-Bernoulli, η κατανομή των ορθών, αλλά και των διατμητικών τάσεων, θα είναι ομοιόμορφη σε όλο το πλάτος των δοκών. Ωστόσο στην πράξη αυτό δεν συμβαίνει στα καταστρώματα των κρουαζιερόπλοιων, λόγω της υστέρησης διάτμησης. Με αυτόν τον τρόπο, στην περίπτωση της προτεινόμενης δομής το κατάστρωμα είναι υπό θλίψη κοντά στην πλευρά του υπερστεγάσματος και υπό εφελκυσμό κοντά στην πλευρά του γάστρας. Σημειώνεται ότι αυτό εξαρτάται από το αν το πλοίο είναι σε κατάσταση hogging ή sagging.

Στο Σχήμα 8.15 πραγματοποιείται σύγκριση των διατμητικών τάσεων στις πλευρές της γάστρας και του υπερστεγάσματος της παραδοσιακής και της προτεινόμενης δομής, σε απόσταση $x=L/4$.



Σχήμα 8.15: Σύγκριση των διατμητικών τάσεων σε απόσταση $x=L/4$ [39]

Η κατάργηση των καταστρωμάτων στην προτεινόμενη δομή έχει αυξήσει τις διατμητικές τάσεις στην πλευρά του υπερστεγάσματος κατά περίπου 25%. Στην προτεινόμενη δομή, η μετατόπιση στην εγκάρσια κατεύθυνση της πλευράς του υπερστεγάσματος έχει μειώσει τις διατμητικές τάσεις στην πλευρά του υπερστεγάσματος κοντά στο κατάστρωμα λέμβων ($z=21300\text{mm}$). Επίσης, οι διατμητικές τάσεις έχουν μειωθεί και στην πλευρά της γάστρας κοντά στην κατάστρωμα λέμβων, λόγω της υστέρησης διάτμησης.

Στην περίπτωση της παραδοσιακής δομής, όπου η εγκάρσια μετατόπιση της πλευράς του υπερστεγάσματος είναι σημαντικά μικρότερη, η μείωση των διατμητικών τάσεων δεν είναι τόσο έντονη πάνω από το κατάστρωμα λέμβων, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της προτεινόμενης δομής. Η συμμετοχή των καταστρωμάτων στη διατμητική ροή στην παραδοσιακή δομή μπορεί να φανεί καθώς μειώνουν τις διατμητικές τάσεις στις διαμήκεις φρακτές.

Σημειώνεται ότι η απότομη αύξηση των διατμητικών τάσεων στο ύψος $z=29000\text{mm}$ και στις δύο δομές οφείλεται στη χρήση διαφορετικού πάχους ελάσματος, στην πλευρά του υπερστεγάσματος στην προτεινόμενη δομή και στις διαμήκεις φρακτές στην παραδοσιακή δομή, αντίστοιχα.

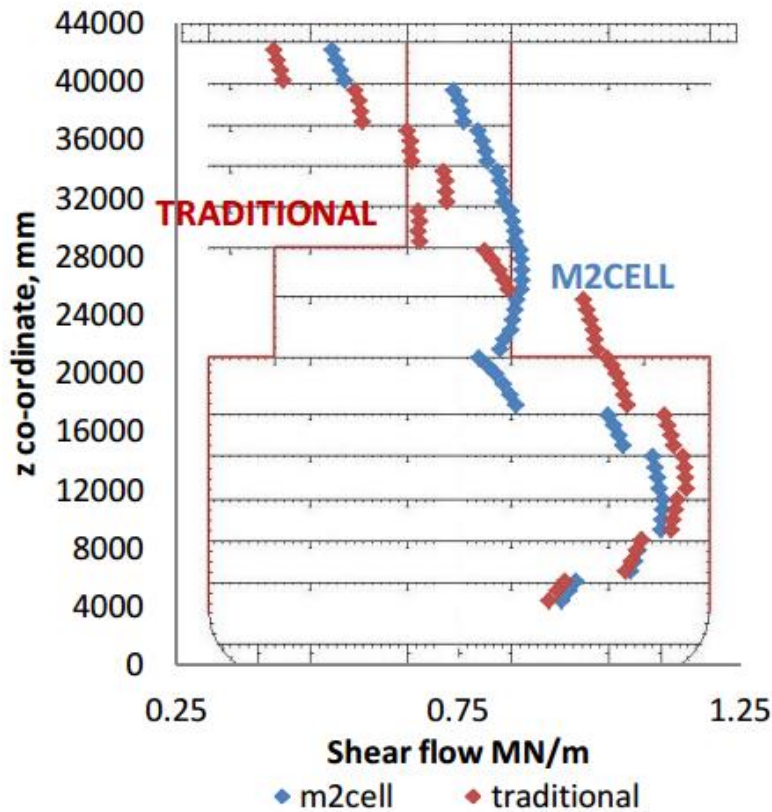
Οι συνέπειες της απομάκρυνσης των καταστρωμάτων από το υπερστεγάσμα στην ακαμψία της δομής δίνεται στον Πίνακα 8.1, μαζί με τη μάζα ανά τρέχον μήκος των διαμήκων μελών της χαλύβδινης δομής και μαζί με τη θέση του κατακόρυφου κέντρου βάρους σε σχέση με το έλασμα του πυθμένα.

Πίνακας 8.1: Σύγκριση των κατακόρυφων εκτροπών και των ιδιοτήτων της διατομής [39]

model	Total deflection, mm	VCOG, m	mass, t/m
m2cell	310 (+11.8%)	16.3 (-12.2 %)	48.3 (-14.7 %)
traditional	277	18.5	56.6

Η ολική εκτροπή της προτεινόμενης δομής είναι 11.8% μεγαλύτερη σε σχέση με την περίπτωση της παραδοσιακής δομής. Ωστόσο, στην περίπτωση της προτεινόμενης δομής, η μάζα και το ύψος της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους είναι μικρότερα κατά 14.7% και 12.1% αντίστοιχα. Αυτά σημαίνουν ότι λόγω της μικρότερης επιφάνειας της προτεινόμενης κατασκευής προκύπτουν μεγαλύτερα βέλη κάμψης και τάσεις. Επίσης, λόγω της μείωσης της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους αυξάνεται το μετακεντρικό ύψος GM και συνεπώς βελτιώνεται η αρχική ευστάθεια.

Για να ληφθεί μια καλύτερη κατανόηση της διαφοράς του μηχανισμού μεταφοράς του διατμητικού φορτίου των υπό εξέταση δομών, η διατμητική ροή στις πλευρές της γάστρας και των υπερστεγασμάτων δίδονται και για τις δύο δομές σε $x=L/4$ στο Σχήμα 8.16.



Σχήμα 8.16: Σύγκριση της διατμητικής ροής σε απόσταση $x=L/4$ [39]

Μπορεί να φανεί ότι η αφαίρεση των καταστρωμάτων και η εγκάρσια μετατόπιση της πλευράς του υπερστεγάσματος έχει μειώσει τη συμβολή της πλευράς της γάστρας στη μεταφορά του φορτίου διάτμησης. Ως εκ τούτου, η σημασία της πλευράς του υπερστεγάσματος έχει αυξηθεί. Όπως και στην περίπτωση των διατμητικών τάσεων, η συμμετοχή των καταστρωμάτων στη διατμητική ροή είναι επίσης εμφανής. «Στην περίπτωση της παραδοσιακής κατασκευής, οι μειώσεις της διατμητικής ροής λόγω της υστέρησης διάτμησης εμφανίζονται στην άνω διαμήκη φρακτή, ενώ στην προτεινόμενη δομή στην πλευρά του υπερστεγάσματος» [39].

8.5.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Τέλος, ερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων σχεδιαστικών παραμέτρων στο μηχανισμό μεταφοράς του φορτίου της προτεινόμενης δομής με στόχο να βελτιωθεί η απόδοση της. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκαν τρία μοντέλα, όπως φαίνονται παρακάτω:

- Μοντέλο No.1: Μοντέλο της προτεινόμενης δομής (m2cell)
- Μοντέλο No.2: Λεπτή επιμετάλλωση (5 mm) στην πλευρά του υπερστεγάσματος (m2cell_1)
- Μοντέλο No.3: Παχιά επιμετάλλωση (13 mm) στην πλευρά του υπερστεγάσματος (m2cell_2)

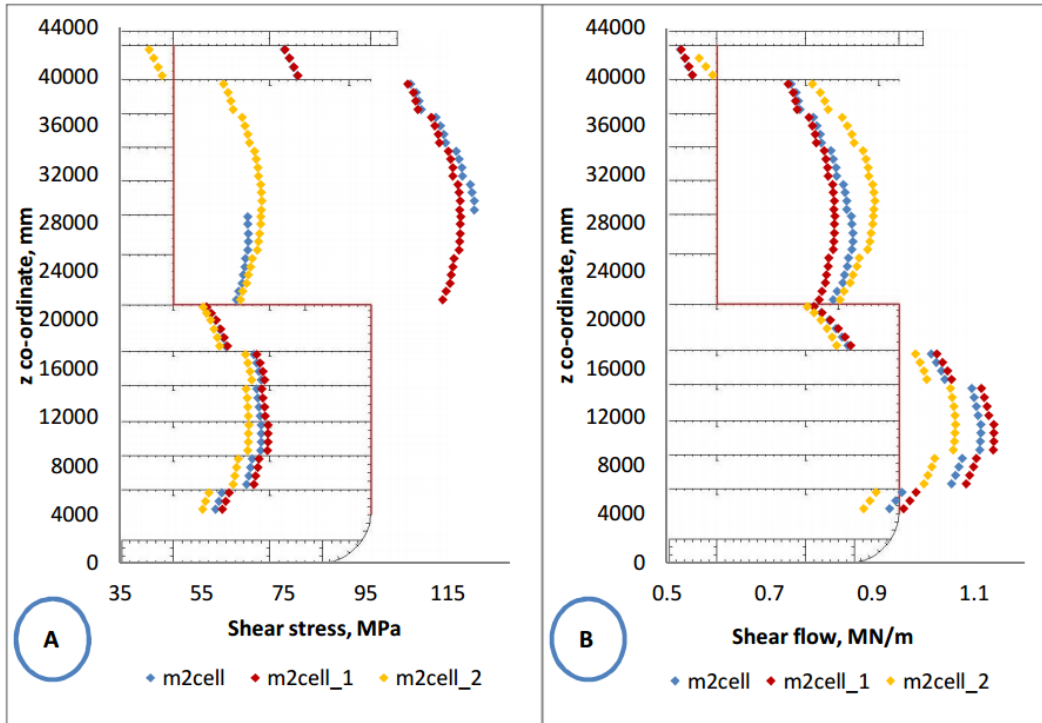
Σημειώνεται ότι τα σχέδια αυτών των μοντέλων δίνονται στο Παράρτημα Α. Τα τρία μοντέλα εξετάστηκαν για δυο περιπτώσεις, αυτή του λεπτού ελάσματος καταστρώματος λέμβων και αυτή του παχιού. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έχουν αρκετό ενδιαφέρον και παρουσιάζονται εν συνεχεία.

Λεπτό έλασμα καταστρώματος σωστικών λέμβων

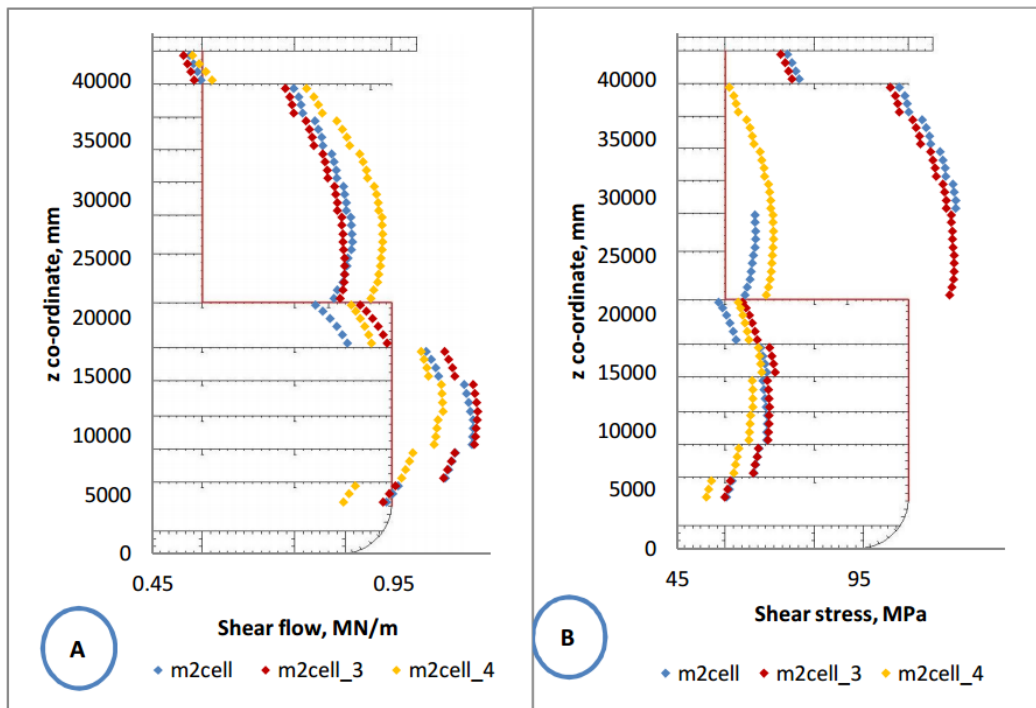
Η σύγκριση της διατμητικής ροής και των τάσεων δίνεται στο Σχήμα 8.17. Όπως είναι αναμενόμενο, μια παχύτερη διαμήκης φρακτή μεταφέρει περισσότερη διατμητική δύναμη από ότι μια λεπτότερη. Ως αποτέλεσμα, η τέμνουσα δύναμη που μεταφέρεται από την πλευρά της γάστρας έχει μειωθεί στην περίπτωση της παχιάς πλευράς του υπερστεγάσματος και αντίστροφα στην περίπτωση της λεπτής πλευράς του υπερστεγάσματος.

Παχύ έλασμα καταστρώματος σωστικών λέμβων

Σε δεύτερη φάση, μελετώνται τα τρία μοντέλα σε παχύ έλασμα καταστρώματος λέμβων. Η σύγκριση των διατμητικών τάσεων και της διατμητικής ροής δίδεται στο Σχήμα 8.18. Όταν συγκρίνονται τα αποτελέσματα με την προηγούμενη κατανομή της διατμητικής τάσης, αποκαλύπτεται ότι το παχύτερο κατάστρωμα λέμβων θα αυξήσει τις διατμητικές τάσεις στη σύνδεση της πλευράς του υπερστεγάσματος. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού η παχύτερη επένδυση του καταστρώματος λέμβων είναι σε θέση να μεταφέρει περισσότερες φορτίσεις με μικρότερη παραμόρφωση.



Σχήμα 8.17: Σύγκριση των διατμητικών τάσεων και της διατμητική ροής (λεπτό έλασμα) [39]



Σχήμα 8.18: Σύγκριση των διατμητικών τάσεων και της διατμητική ροής (παχύ έλασμα) [39]

8.6 Ανακεφαλαίωση

Στο τελευταίο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας έγινε αναφορά σε ορισμένες από τις τελευταίες προτάσεις που έχουν καταγραφεί στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Οι περισσότερες από τις προτάσεις που αναφέρθηκαν αποτελούν ιδέες καθώς ακόμη δεν έχουν εφαρμοστεί στην πράξη.

Οι τροποποιήσεις των κανονισμών και οι όλο και μεταβαλλόμενες ανάγκες της αγοράς οδηγούν σε νέες σχεδιάσεις. Πλέον οι κανονισμοί είναι ιδιαίτερα αυστηροί σε ότι αφορά το περιβάλλον και αυτό έχει ως συνέπεια την στροφή προς τις «πράσινες» καινοτομίες, που χρησιμοποιούν ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, όπως είναι η αιολική. Έτσι, τα συμβατικά κρουαζιερόπλοια τείνουν να πάρουν μια διαφορετική μορφή, όπως αυτής της περίπτωσης του δίγαστρου μοντέλου με τον μεγάλο αετό και τα τηλεσκοπικές αεροτομές.

Οι καινοτομίες όμως δεν εστιάζουν μόνο προς το περιβάλλον, αλλά και στην ανταγωνιστικότητα. Αυτό σημαίνει ότι το κάθε κρουαζιερόπλοιο θα πρέπει να είναι ιδιαίτερο, ώστε να ξεχωρίζει από τα υπόλοιπα, προκειμένου να γίνεται πιο ελκυστικό στους επιβάτες.

Ωστόσο, όλες αυτές οι καινοτομίες εμφανίζουν έντονες προκλήσεις όσον αφορά την αντοχή. Για το λόγο αυτό βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, έως ότου τα προβλήματα αυτά αντιμετωπισθούν. Παρόλα αυτά δεν είναι πάντοτε η επίλυση των τεχνικών θεμάτων το απόλυτο κριτήριο για την εισαγωγή τους στη ναυπηγική βιομηχανία. Δεν είναι λίγες οι φορές όπου λόγω του ασύμφορου κόστους ή των περιορισμών από τους κανονισμούς, πολλές ιδέες παραμένουν στάσιμες. Αναμφισβήτητα, η ιστορία θα δείξει το ποιες από αυτές τις ιδέες θα υλοποιηθούν και ποιες θα παραμείνουν απλώς ιδέες.

9. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ / ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Κάνοντας μια ανασκόπηση της παρούσας διπλωματικής αναδεικνύεται ότι τα θέματα που αφορούν τη μεταλλική κατασκευή των κρουαζιερόπλοιων είναι ποικίλα και χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής. Αρχικώς, έγινε σαφές ότι με την πάροδο των ετών, οι τροποποιήσεις των κανονισμών και οι μεταβολές των αναγκών της αγοράς επιφέρουν αλλαγές στη σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων. Όμως, σε κάθε περίπτωση οι στόχοι μιας επιτυχημένης σχεδίασης είναι η μεγιστοποίηση της μεταφορικής ικανότητας και των παρεχόμενων ανέσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την εξασφάλιση της μέγιστης δυνατής συνολικής επιφάνειας καταστρωμάτων και όγκου εσωτερικών χώρων. Αποτέλεσμα είναι η ανέγερση μιας μεγάλου μήκους και πολλαπλών καταστρωμάτων υπερκατασκευής. Αυτό καθίσταται δυνατό λόγω των υψηλών λόγων μήκους προς πλάτος και πλάτους προς βύθισμα, που χαρακτηρίζουν τα κρουαζιερόπλοια. Αρμόδιος για τη διαμόρφωση των εσωτερικών χώρων του πλοίου είναι ο αρχιτέκτονας. Η συμμετοχή του στη διαμόρφωση της γενικής διάταξης του κρουαζιερόπλοιου είναι απαραίτητη. Μέσα από τη διαρκή συνεργασία τους προκύπτει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, τόσο από την πλευρά της λειτουργικότητας των χώρων όσο και από την πλευρά της ασφάλειας και της αξιοπιστίας.

Τα πιο ιδιαίτερα γνωρίσματα της σχεδίασης των κρουαζιερόπλοιων είναι τα μεγάλα ανοίγματα στις πλευρές της υπερκατασκευής για καμπίνες με μπαλκόνι, οι εσωτερικοί αστήρικτοι χώροι για τα σαλόνια και η έλλειψη ευθυγράμμισης των πλευρών της υπερκατασκευής με τις πλευρές της γάστρας, λόγω της εσοχής του καταστρώματος λέμβων. Αποτέλεσμα είναι να προκαλείται μη-γραμμική κατανομή της τάσης στις διατομές με την κατασκευαστική σχεδίαση των κρουαζιερόπλοιων να αποτελεί μεγάλη πρόκληση για τον μελετητή. Λόγω των κατασκευαστικών ασυνεχειών και της χρήσης διαφορετικών παχών και υλικών, απαίτηση των Νηογνωμόνων είναι η ανάλυση της αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, η μοντελοποίηση είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που δεν μπορεί να αυτοματοποιηθεί και ως εκ τούτου δεν είναι κατάλληλη για το στάδιο της προμελέτης, παρά μόνο για την τελική πιστοποίηση του πλοίου. Για το λόγο αυτό θα πρέπει ο μελετητής να γνωρίζει, τους παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό στον οποίο η υπερκατασκευή συμμετέχει στην κάμψη της γάστρας, ώστε από τα πρώτα στάδια της σχεδίασης να μπορεί να εκτιμά τη συμπεριφορά του κρουαζιερόπλοιου.

Αξίζει να σημειωθεί ακόμη ότι σε αντίθεση με την πλειοψηφία των εμπορικών πλοίων, η αντοχή της κατασκευής των κρουαζιερόπλοιων δεν επηρεάζεται από το μεταφερόμενο φορτίο, το οποίο είναι οι επιβάτες. Οι κρισιμότερες φορτίσεις στις οποίες υποβάλλεται προέρχονται κυρίως από το θαλάσσιο περιβάλλον αλλά και από το ίδιο το βάρος του πλοίου και είναι καθοριστικές για τη διαστασιολόγηση της μεταλλικής κατασκευής. Όμως, στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων δεν αρκεί μόνο αυτό. Οι φορτίσεις που προκαλούν κραδασμούς και θορύβους είναι καθοριστικές για την κατάταξη του κρουαζιερόπλοιου ως προς τα επίπεδα της άνεσης (Comfort Class), κάτι το οποίο είναι καταλυτικό για την προσέλκυση των επιβατών.

Τέλος, όσον αφορά τις μελλοντικές σχεδιάσεις, αυτές επικεντρώνονται κυρίως στην ανάπτυξη εναλλακτικών σχεδιαστικών μοντέλων, καθώς το μέγεθος αυτών των πλοίων φαίνεται να μην μεγαλώνει στο εξής. Είναι γεγονός ότι οι πλοιοκτήτριες εταιρείες κρουαζιερόπλοιων έχουν να αντιμετωπίσουν όλο και πιο σφιχτούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς από ότι οι άλλες που κατέχουν διαφορετικούς τύπους πλοίων, ενώ παράλληλα τα κρουαζιερόπλοια θα πρέπει να διαφοροποιούνται μεταξύ τους, τόσο στη σχεδίαση όσο και στις δραστηριότητες τους. Όμως, οι επιβάτες αναμένουν μοναδικές εμπειρίες. Εκτιμούν την εσωτερική διακόσμηση, την εξωτερική σχεδίαση και τις παρεχόμενες υπηρεσίες και μόνο οι ικανοποιημένοι επιβάτες γίνονται τακτικοί πελάτες και πάνω από όλα οι καλύτεροι διαφημιστές του πλοίου και της εταιρείας. Είναι ώρα, λοιπόν, για νέες ιδέες, νέες σχεδιάσεις και νέες τεχνολογικές λύσεις.

10. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία καλύφθηκε μεγάλο κομμάτι της σχεδίασης των κρουαζιερόπλοιων, των προβλημάτων αντοχής που απορρέουν από αυτή και των μεθόδων μελέτης αυτών. Φυσικά το θέμα αυτής της εργασίας είναι ανοικτό σε βελτιώσεις αλλά και σε περαιτέρω μελέτη και επέκταση. Κάποια από τα ζητήματα που προτείνεται να εξεταστούν προς αυτή την κατεύθυνση παρουσιάζονται ακολούθως:

- Μοντελοποίηση ενός κρουαζιερόπλοιου με κατάλληλο λογισμικό για τη μελέτη της αντοχής του, τόσο σε ολικό όσο και σε τοπικό επίπεδο.
- Εξέταση των επιπτώσεων της κόπωσης στα διάφορα πλευρικά ανοίγματα και στα ανοίγματα των καταστρωμάτων.
- Μελέτη των προβλημάτων αντοχής των κρουαζιερόπλοιων υπό στρέψη
- Χρήση πεπερασμένων στοιχείων με κατάλληλο λογισμικό για την εξέταση της φυσικής συχνότητας της κατασκευής για την επίτευξη του μεγίστου επιπέδου άνεσης.
- Αναλυτικότερος υπολογισμός των διαφόρων ομάδων βαρών του Lightship, με έμφαση στο βάρος της μεταλλικής κατασκευής.
- Αύξηση του ωφέλιμου φορτίου (επιβάτες) και της ποιότητας της ενδιαίτησης μέσω της βελτιστοποίησης των χώρων του πλοίου, σε συνεργασία πάντα με τον Αρχιτέκτονα Μηχανικό.
- Μελέτη για την βέλτιστη επιλογή υλικών για την κατασκευή των διαφόρων τμημάτων του πλοίου, με γνώμονα την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας, την ασφάλεια και το βέλτιστο κόστος.
- Αναλυτική σχεδίαση των χώρων του μηχανοστασίου καθώς και επιλογή των αναγκαίων μηχανημάτων για τις ανάγκες του πλοίου και του ξενοδοχείου.
- Περαιτέρω εξέταση των κανονισμών πυρασφάλειας (fire plan).
- Περαιτέρω εξέταση της αντοχής σε κατάσταση βλάβης (structural survivability).
- Σχεδίαση νέων πρωτότυπων κρουαζιερόπλοιων και εξέταση της αντοχής τους με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://luxuryretail.co.uk/allure-of-the-seas-de-royal-caribbean/>
- [2] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.aripelagos.com/forum/showthread.php?t=96&page=3>
- [3] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <https://summershipswintertears.wordpress.com/2011/08/27/color-magic-in-oslo/>
- [4] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.brittany-ferries.co.uk/fleet/high-speed/normandie-express>
- [5] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: https://en.wikipedia.org/wiki/SS_Great_Britain
- [6] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://lostinreviews.com>
- [7] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.cruisemarketwatch.com/market-share/>
- [8] Α. Κουτσουκώστα και Μ. Φιλιππίδη, «Σύγχρονες τάσεις στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και την εσωτερική διακόσμηση των επιβατηγών πλοίων», Βίβλος Ναυτικής Τεχνολογίας, Πειραιάς, 2014
- [9] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://v-cruises.com/cruiseindustry/currentcruisefleet.html>
- [10] T. Lamb, «Passenger Ships», Ship Design and Construction, SNAME, 2003, pp. 1 - 39
- [11] Α. Παπανικολάου, «Μελέτη Πλοίου - Μεθοδολογίες Προμελέτης - Τεύχος 1», Αθήνα: Συμεών, 2009
- [12] R. R. S. Reay, «Passenger Survivability and Evacuation - Marine Mode», AEA Technology Enviroment, 1999
- [13] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: http://www.travelserver.net/travelpage/ubb-bin/ultimatebb.cgi?ubb=get_topic&f=1&t=008320
- [14] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.nauticexpo.com/prod/meyer-turku/product-30725-448269.html>
- [15] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]:
http://www.marinewiki.org/index.php?title=File:Ship_design_spiral.jpg
- [16] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.cruiseshipdeckplan.com/msc-magnifica/>
- [17] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]:
http://www.crowncruise.com/WEB%20SITE/CRUISELINES/SEABOURN/SITE%20PAGES/SEABOURN_CRUISES.htm

- [18] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: https://de.wikipedia.org/wiki/Grandeur_of_the_Seas
- [19] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <https://www.ozcruising.com.au/blog/how-cruise-ships-test-their-lifeboats-to-the-max>
- [20] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <https://kathrynwarmstrong.wordpress.com/tag/the-sapphire-princess-cruise-deals-pictures-of-singapore-and-thailand-review-of-princess-southeast-asia-grand-tour/>
- [21] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.sscanberra.com/plansdetailed.htm>
- [22] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.extravaganzi.com/two-preview-cruises-onboard-royal-princess-ahead-of-launch/>
- [23] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.agents.ncl.eu/image-library.php?g=16&show=1>
- [24] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://blogs.disney.com/insider/2015/12/22/almost-everything-you-can-do-aboard-a-disney-cruise-ship/>
- [25] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: [https://www.diyoe.co.nz/reviews/hotel/sleeping-on-amazing-piece-of-history-in-rotterdam/#lightbox\[gallery-2\]/10/](https://www.diyoe.co.nz/reviews/hotel/sleeping-on-amazing-piece-of-history-in-rotterdam/#lightbox[gallery-2]/10/)
- [26] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://maninlondon.com/2015/03/17/onboard-po-britannia-first-look-inside/>
- [27] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.dreamstime.com/stock-photo-shops-corridor-inside-cruise-ship-image36732150>
- [28] Π. Καρύδης, «Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου - Θέματα Τοπικής Αντοχής», Αθήνα: Γ. Αργυρόπουλος Ε.Π.Ε., 2000
- [29] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <https://www.tc.gc.ca/eng/marinesafety/tp-tp14609-4-construction-150.htm>
- [30] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://ilmumarine.blogspot.gr/2014/03/ship-stress.html>
- [31] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.shipmotion.se/imu.html>
- [32] DNV, «Hull Structural Design - Ships with length 100 meters and above», Norway: DNV, 2015
- [33] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.marineengineering.org.uk/page82.html>
- [34] Μουλκιώτη, «Η μεταλλική κατασκευή των πλοίων μεταφοράς υγροποιημένων αερίων (Gas Carriers)», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2014
- [35] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://marinersdigest.blogspot.gr/2015/07/engine-rocking-and-use-of-bracing-units.html>

- [36] I. BY Controls, «HYDRAULIC TOP BRACING - USER MANUAL», Korea: BY Controls, INC., 2010
- [37] Γ. Ζαραφωνίτης, «Εισαγωγή στη Ναυπηγική και τη Θαλάσσια Τεχνολογία», Αθήνα: Σημειώσεις, 2005
- [38] Πολίτης, «Σύγχρονα Συστήματα Πρόωσης», Υδροδυναμική Σύγχρονων Συστημάτων Πρόωσης Πλοίου, Αθήνα, Ε.Μ.Π., 2004
- [39] O. Parmasto, «Mechanics of the passenger ship structure with non-longitudinal load-carrying accommodation decks», Aalto University, Espoo, 2012
- [40] H. Evans, «Ship Structural Design Concepts», U.S.A.: Cornell Maritime Press, 1983
- [41] Fransman, «The Influence of Passenger Ship Superstructures on the Response of the Hull Girder», Trans. Rina, 1988
- [42] Π. Καρύδης, «Επιθεώρηση, Συντήρηση και Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου», Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2002
- [43] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://slideplayer.gr/slide/5248935/>
- [44] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://slideplayer.gr/slide/4870653/>
- [45] Ε. Σαμουηλίδης, «Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου», Αθήνα: Σημειώσεις Ε.Μ.Π., 2011
- [46] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/process-faqs/faq-what-is-explosive-cladding/>
- [47] F. Morshedsolouk, «An extension of coupled beam method and its application to study ship's hull-superstructure interaction problems», Latin American Journal of Solids and Structures, 2011
- [48] Bruhn, «The stresses at the discontinuities in a ship's structure», Trans. RINA, p. 57, 1899.
- [49] King, «On large deckhouses», Trans. RINA, p. 148, 1913
- [50] Montgomerie, «The scantlings of light superstructures», Trans. RINA, p. 52, 1915
- [51] Peterson και Hansen, «The design of superstructures for large passenger ships», Trans. RINA, p. 25, 1927
- [52] Hovgaard, «A new theory of the distribution of shearing stresses in riveted and welded connections and its application to discontinuities in the structure of a ship», Trans. RINA, p. 108, 1931
- [53] Vasta, «Lessons learned from full-scale ship structural tests», Trans. SNAME, p. 165, 1958.
- [54] Vasta, «Structural tests on the passenger ship S.S. President Wilson - Interaction between superstructure and main hull girder», Trans. SNAME, p. 253, 1949

- [55] Terazawa, «Stress distribution in deckhouse and superstructure», The society of naval architects of Japan, 1964
- [56] Chapman και Sparkes, «Experiments on box girders: Some contributions to the theory of ship's structures», Trans. IESS, p. 115, 1956
- [57] Crawford, «Theory of long ship's superstructures», Trans. SNAME, p. 693, 1950
- [58] Crawford και Ruby, «Model tests on hull-deckhouse interaction», Ship Structure Committee, 1955
- [59] Bleich, «A study in the structural action of superstructures on ships», Ship Structure Committee, 1951
- [60] Bleich, «Nonlinear distribution of bending stresses due to distortion of the cross section», J. Applied mechanics, p. 95, 1953
- [61] Muckle, «The influence of partial superstructures constructed of aluminium alloy», Trans. RINA, p. 453, 1955
- [62] Timoshenko και Goodier, «Theory of elasticity», McGraw-Hill, 1970
- [63] Caldwell, «The effect of superstructures on the longitudinal strength of ships», Trans. RINA, p. 664, 1957
- [64] Johnson και Ayling, «Measurements and predictions of the influence of deckhouse on the strength of ships», Trans. NECIES, p. 161, 1961
- [65] Johnson, «Stresses in deckhouse and superstructures», Trans. RINA, p. 634, 1957
- [66] Zienkiewicz, «The Finite Element in Engineering Science», USA: McGraw Hill, 1971
- [67] Paulling και Payer, «Hull-deckhouse interaction by finite element calculations», ISD/ISSC Proceedings of the symposium on finite element techniques, p. 101, 1969
- [68] Mitchell, «Analysis of structural interaction between a ship's hull and deckhouse», Trans. RINA, p. 121, 1978
- [69] Heder και Ulfvarson, «Hull beam behaviour of passenger ships», Marine Structures, 1991
- [70] Andric και Zanic, «The Global Structural Response Model for Multi-Deck Ships in Concept», Ocean Engineering, 2010
- [71] Naar, «A theory of coupled beams for strength assessment of passenger ships», Marine structures, 2004
- [72] H. Naar, «Ultimate Strength of Hull Girder for Passenger Ships», Helsinki University of Technology Department of Mechanical Engineering Ship Laboratory, Helsinki, 2006

- [73] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://stochasticandlagrangian.blogspot.gr/2011/07/what-does-shape-function-mean-in-finite.html>
- [74] Καρύδης, «Υπολογιστικές μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές», Αθήνα: Ε.Μ.Π., 2010
- [75] Hughes, «Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach», John Wiley & Sons inc, 1983
- [76] DNV, «DIRECT STRENGTH ANALYSIS OF HULL STRUCTURES IN PASSENGER SHIPS», 2007
- [77] Ehlers, «Large Complex Structures», Espoo: Aalto University School of Engineering, Department of mechanical Engineering, Ship Laboratory, 2011
- [78] Rardin, «Optimization in operations research», Prentice Hall, 1998
- [79] Choi, «Structural sensitivity analysis and optimization», Germany: Springer Science Business Media, 2005
- [80] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://slideplayer.com/slide/7235702/>
- [81] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://slideplayer.gr/slide/1990473/>
- [82] Γ. Χρυσουλάκης και Δ. Παντελής, «Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών», Αθήνα: Παπασωτηρίου, 2008
- [83] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]:
https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY248/notes/2011/lecture_4.pdf
- [84] Β. Παπάζογλου, «Ναυπηγική Τεχνολογία», Αθήνα: Σημειώσεις Ε.Μ.Π., 1995
- [85] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/cutting-processes-plasma-arc-cutting-process-and-equipment-considerations-051/>
- [86] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_tungsten_arc_welding
- [87] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://mechanicalinventions.blogspot.gr/2012/11/gas-metal-arc-welding-gmaw-or-mig.html>
- [88] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1170>
- [89] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: https://www.hera.org.nz/Story?Action=View&Story_id=1397
- [90] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.nordseetaucher.de/research-and-development/hyperbaric-welding/friction-surfacing-for-multi-sectorial-applications/>
- [91] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.gatwicktechnologies.com/products/friction-welding-machines>

- [92] Τσουβάλης, «Ανάλυση και σχεδίαση σκαφών από σύνθετα υλικά (Σημειώσεις)», Αθήνα: Ε.Μ.Π., 1998
- [93] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.stressebook.com/solid-metal-versus-sandwich-panels/>
- [94] F. Evergren, T. Hertzberg και M. Rahm, «LASS-C; Lightweight construction of a cruise vessel», SP Technical Research Institute of Sweden, Sweden, 2011
- [95] ShipStructureCommittee, «STRUCTURAL SURVIVABILITY OF MODERN LINERS», ShipStructureCommittee, 2015
- [96] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.windstarcruises.com/>
- [97] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <https://cruiseline.com/advice/cruising-101/all-about-cruising/cruise-ships-of-the-future>
- [98] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://ft-maritime.com/index.php?story=17>
- [99] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.21stcentech.com/transportation-update-marine-technologies-coming-tanker-cruise-fleets/>
- [100] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://criuse736.blog.fc2.com/page-7.html>
- [101] J. Chanwook, «TWIN HULL CRUISE SHIP For the future cruise ship market», School of Mechanical, Aerospace and Systems Engineering, KAIST, 2011
- [102] K. Chul και P. Chul, «Wind power generation with a parawing on ships», ENERGY, 2010
- [103] [Ηλεκτρονικός Ιστότοπος]: <http://www.ship-technology.com/projects/eoseas-concept-cruise-ship/>
- [104] E. Pélerin και T. Tincelin, «EOSEAS Green Cruise Ship Concept», 7th Annual Green Ship Technology conference
- [105] M. Bergström, «Longitudinal strength analysis of a cruise ship with a narrow superstructure», Aalto university school of science and technology, Espoo, 2010
- [106] ABS, «Steel Vessels-Specific Vessel Types», ABS, Houston, 2015
- [107] ABS, «Steel Vessels-Hull Construction and Equipment», ABS, Houston, 2015

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - Η αγορά της κρουαζιέρας για το 2016

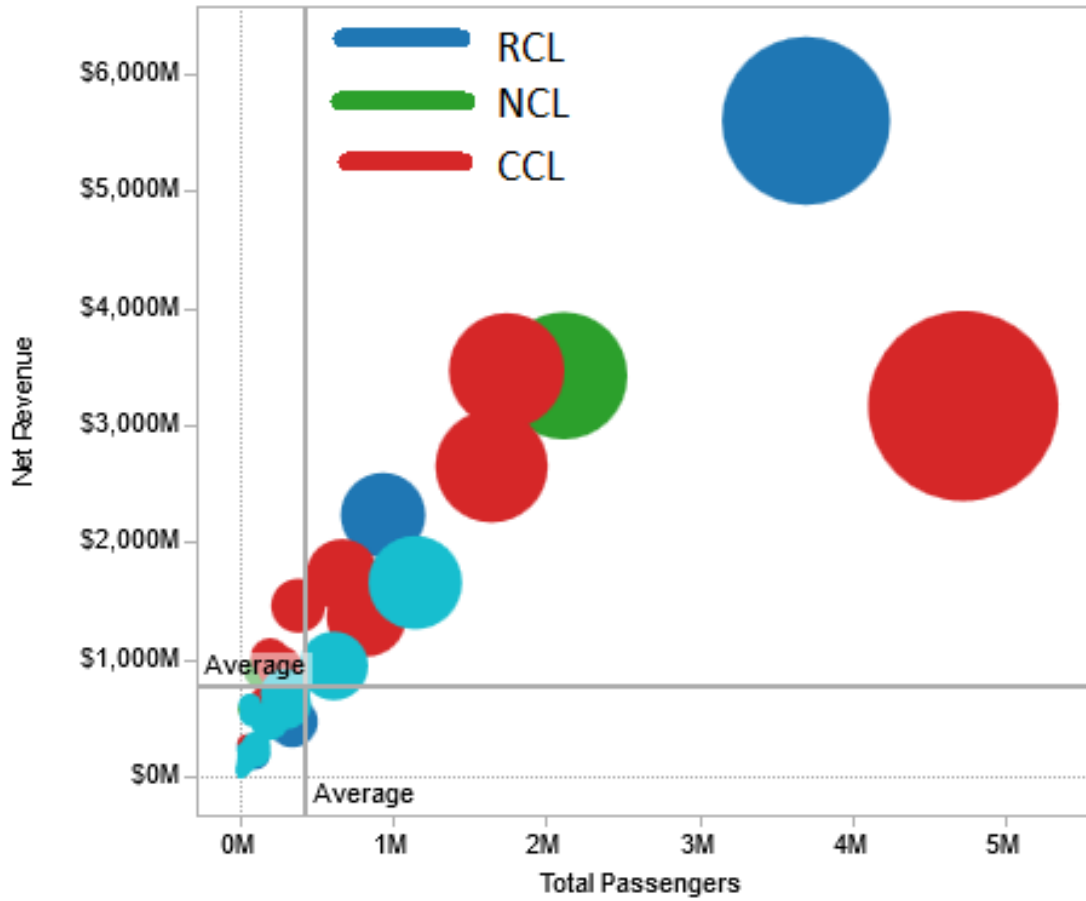
Σύμφωνα με την πηγή [7], στο Σχήμα Α.1 παρουσιάζονται τα καθαρά έσοδα των διαφόρων ναυτιλιακών εταιρειών στην αγορά αλλά και ο αριθμός των επιβατών που τις προτιμά. Αντίστοιχα, στον Πίνακα Α.1 και στον Πίνακα Α.2 καταγράφονται ποσοστιαία η προτίμηση των επιβατών και τα καθαρά έσοδα.

Πίνακας Α.1: Μερίδιο επιβατών και εσόδων (1/2) [7]

Όμιλος	Εταιρεία	% των Επιβατών	% των Εσόδων
CCL	Carnival	21.30%	8.00%
	Costa Cruises	7.40%	6.70%
	Princess	7.90%	8.70%
	AIDA	3.70%	3.40%
	Holland America	3.00%	4.40%
	P&O Cruises	1.70%	3.70%
	P&O Cruises Australia	1.20%	2.30%
	Ibero Cruises	0.80%	1.60%
	Cunard	0.90%	2.60%
	Seabourn	0.20%	0.70%
	Συνολικά	48.10%	42.10%
RCL	Royal Caribbean	16.70%	14.20%
	Pullmantur	1.60%	1.20%
	Azamara	0.20%	0.70%
	Celebrity	4.20%	5.70%
	Croisieres de France	0.50%	0.40%
	Συνολικά	23.20%	22.20%
NCL	Norwegian	9.50%	8.70%
	Oceania Cruises	0.60%	2.30%
	Regent Seven Seas	0.30%	1.50%
	Συνολικά	10.40%	12.50%

Πίνακας Α.2: Μερίδιο επιβατών και εσόδων (2/2) [7]

Όμιλος	Εταιρεία	% των Επιβατών	% των Εσόδων
Άλλα	MSC Cruises	5.20%	4.20%
	Disney	2.80%	2.40%
	Thomson Cruises	1.30%	1.80%
	Hurtigruten	1.40%	1.50%
	Lous Cruises	0.90%	1.20%
	Phoenix Reisen	0.50%	0.70%
	Fred Oslen	0.00%	0.10%
	Classic International Cruises	0.40%	0.50%
	Saga Cruises & Spirit of Adventure	0.40%	0.50%
	Silversea	0.40%	1.30%
	All Leisure Holidays	0.30%	0.40%
	Cruise & Maritime Voyages	0.50%	0.50%
	Crystal	0.30%	1.50%
	Ocean Star Cruises	0.20%	0.30%
	Hapag-Lloyd	0.20%	0.40%
	Celebration Cruise Line	0.20%	0.20%
	Ponant Yacht Cruises	0.10%	0.60%
	Star Clippers Cruises	0.10%	0.10%
	Discovery World Cruises	0.00%	0.10%
	American Cruise Lines	0.00%	0.00%
	Lindblad Expeditions	0.10%	0.20%
	Paul Gauguin	0.10%	0.30%
	SeaDream Yacht Club	0.00%	0.20%
	Orion Expedition Cruises	0.00%	0.00%
	Pearl Seas Cruises	0.20%	0.10%
	Swan Hellenic	0.00%	0.10%
	Blount Small Ship Adventures	0.00%	0.00%
	Hebridean Island Cruises	0.00%	0.00%
	Star Cruises	1.30%	1.80%
	Quark Expeditions	0.00%	0.20%
	Travel Dynamics	0.00%	0.00%
	TUI Cruises	1.30%	1.80%
	Viking	0.10%	0.20%
Συνολικά	18.30%	23.20%	
	ΣΥΝΟΛΙΚΑ	100.00%	100.00%



Σχήμα Α.1: Μερίδιο αγοράς [7]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - Εφαρμογή της μεθόδου σχεδίασης που προτείνεται από τον Lamb

Έστω ότι η απαίτηση του πλοιοκτήτη είναι η ναυπήγηση εντός κρουαζιερόπλοιου ικανό να μεταφέρει 1500 επιβάτες. Η πιο απλή μορφή σχεδίασης είναι να εξασφαλισθούν 750 δίκλινες καμπίνες. Για το σκοπό αυτό συμπληρώνεται ο Πίνακας Β.1 και προκύπτει η συνολική επιφάνεια και ο συνολικός όγκος για τη στέγαση των επιβατών. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η μεθοδολογία που ακολουθεί είναι ενδεικτική και ότι μπορεί να τροποποιηθεί ανάλογα με την έκταση και την ποιότητα της ενδιαίτησης.

Πίνακας Β.1: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος στέγασης επιβατών

ΚΑΜΠΙΝΕΣ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					
Κατηγορία Καμπίνας	Αριθμός Καμπίνων	Μέγεθος m ²	Ύψος m	Συνολική Επιφάνεια m ²	Συνολικός Όγκος m ³
Σουίτα Πλοιοκτήτη	2	40	2.8	80	224
Σουίτες	10	32	2.8	320	896
Πολυτελής	30	24	2.8	720	2016
Εξωτερικές με μπαλκόνι	200	16	2.8	3200	8960
Εξωτερικές	250	16	2.8	4000	11200
Εσωτερικές	250	15	2.8	3750	10500
Ρεζέρβες	8	20	2.8	160	448
Διάδρομοι Καμπίνων	25% της συνολικής επιφάνειας καμπίνων		2.8	3058	8561
Στέγαση Επιβατών	750			15288	42805

Σε επόμενο στάδιο προσαρμόζονται τα καθίσματα (θέσεις) για τους δημόσιους χώρους. Έτσι, θα πρέπει να εισαχθεί ο αριθμός των καθισμάτων στις τραπεζαρίες, στην καφετέρια του ανώτατου καταστρώματος, στις διάφορες αίθουσες (θέατρο, μπαρ κλπ.) και στους κινηματογράφους, όπως φαίνεται στον Πίνακα Β.2.

Πίνακας Β.2: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος δημόσιων χώρων επιβατών

ΔΗΜΟΣΙΟΙ ΧΩΡΟΙ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					
Όνομα/Χρήση του χώρου	Καθίσματα	Επιφάνεια ανά κάθισμα m ² /κάθισμα	Ύψος m	Συνολική Επιφάνεια m ²	Συνολικός Όγκος m ³
Τραπεζαρίες	900	2.2	3.4	1980	6732
Καφετέρια στο ανώτατο ανοικτό κατάστρωμα	600	1.8	3.0	1080	3240
Κύρια αίθουσα θεάτρου	800	1.6	7.0	1280	8960
Άλλες αίθουσες/μπαρ	1200	2.2	3.6	2640	9504
Κινηματογράφοι	200	0.9	3.4	180	612
Καζίνο/Παιχνίδια			3.6	750	2700
Υγεία και ομορφιά			2.8	600	1680
Παιδιά και Έφηβοι			3.4	180	612
Είσοδος, στοές και μαγαζιά			3.6	1500	5400
Δημόσιοι Χώροι Επιβατών				10190	39440

Τέλος, θα πρέπει να εκτιμηθεί η συνολική επιφάνεια και ο συνολικός όγκος που καταλαμβάνουν τα κλιμακοστάσια και οι προθάλαμοι των επιβατών. Για το σκοπό αυτό εισάγεται ο αριθμός των καταστρωμάτων που εκτείνονται (καθ' ύψος) τα κλιμακοστάσια, όπως φαίνεται στον Πίνακα Β.3.

Κατά συνέπεια, αθροίζοντας τις επιφάνειες και τους όγκους, προκύπτουν τα συνολικά για τις εγκαταστάσεις των επιβατών. Όπως προκύπτει κατά την άθροιση, η συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος των εγκαταστάσεων των επιβατών είναι ίσα με 28578 m² και 91545 m³, αντίστοιχα.

Το τελευταίο βήμα για την απόκτηση της ολικής χωρητικότητας είναι ο υπολογισμός της συνολικής επιφάνειας και του συνολικού όγκου των υπολοίπων χώρων, όπως φαίνονται στον Πίνακας Β.4. Με βάση τον αριθμό των επιβατών (δίκλινες καμπίνες), προκύπτουν τα διάφορα στοιχεία του πίνακα.

Πίνακας Β.3: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος κλιμακοστασίων και προθαλάμων επιβατών

ΚΛΙΜΑΚΟΣΤΑΣΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΘΑΛΑΜΟΙ ΕΠΙΒΑΤΩΝ					
Όνομα/Χρήση του χώρου	Καταστρώματα	Επιφάνεια ανά κάθισμα m ² /κάθισμα	Ύψος m	Συνολική Επιφάνεια m ²	Συνολικός Όγκος m ³
Κύριο κλιμακοστάσιο	10	175	3.0	1750	5250
Άλλα κλιμακοστάσια	9	150	3.0	1350	4050
Κλιμακοστάσια και Προθάλαμοι Επιβατών				3100	9300

Πίνακας Β.4: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος όλων των χώρων του πλοίου

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ	Επιφάνεια ανά κρεβάτι	Όγκος ανά κρεβάτι	Επιφάνεια m ²	Όγκος m ³
	m ² /κάθισμα	m ³ /κάθισμα		
Εγκαταστάσεις επιβατών	19.05	61.03	28578	91545
Εγκαταστάσεις πληρώματος	5.20	14.70	7800	22050
Υπηρεσίες πλοίου	0.50	1.40	750	2100
Τροφοδοσία	2.70	8.50	4050	12750
Υπηρεσίες ξενοδοχείου	1.30	3.70	1950	5550
Συνολικοί Επιπλωμένοι Χώροι	28.75	89.33	43128	133995
Μηχανολογικός εξοπλισμός και μηχανοστάσιο	-	10.70	800	16050
Κλιματισμός	1.80	4.90	2700	7350
Άλλοι τεχνικοί χώροι του στεγάσματος	2.30	6.60	3450	9900
Συνολικοί Τεχνικοί Χώροι	-	22.20	6950	33300
Δεξαμενές και Κενοί Χώροι	-	7.90	-	11850
Χώροι Εξωτερικών Καταστρωμάτων	6.10	3.50	9150	5250
ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ	-	-	59228	-
ΣΥΝΟΛΙΚΟΣ ΟΓΚΟΣ	-	-	-	184395
ΟΛΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ	-	37.53	-	56299

Έχοντας αποκτήσεις το συνολικό όγκο όλων των χώρων, μπορεί να προκύψει εύκολα η ολική χωρητικότητα του πλοίου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$GT = (0.2 + 0.02 \times \log V) \times V$$

$$GT = 56299$$

Μάλιστα, με την τιμή της ολικής χωρητικότητας που προέκυψε, μπορεί να συγκριθεί αν ο αριθμός των επιβατών και οι συνολικοί επιπλωμένοι χώροι προσεγγίζουν βρίσκεται σε αποδεκτά όρια. Αυτά τα όρια έχουν προκύψει από τη μέση τιμή αυτών των τιμών για ένα μεγάλο αριθμό κρουαζιερόπλοιων.

Σε επόμενο στάδιο εκτιμάται το βάρος του Lightship, όπως φαίνεται στον Πίνακας Β.5. Για αυτό το σκοπό θα πρέπει σε πρώτο στάδιο να εκτιμηθεί ο όγκος της γάστρας και της υπερκατασκευής. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να είναι γνωστά το μήκος, το πλάτος, το κοίλο και το ύψος της υπερκατασκευής αλλά και ο συντελεστής γάστρας. Ο συντελεστής γάστρας για τα κρουαζιερόπλοια κυμαίνεται από 0.47 έως 0.87. Ωστόσο, το πιο σύνηθες εύρος είναι από 0.55 έως 0.65. Έτσι, εκτιμάται μια τιμή του εντός αυτού του εύρους. Έστω ότι επιλέγεται η τιμή $C_b=0.65$.

Από τα σχήματα που παρουσιάζονται στην Ενότητα 2.3.2, προκύπτουν με βάση την ολική χωρητικότητα το μήκος ($L=210m$), το πλάτος ($B=33m$) και το βύθισμα ($T=7.5m$) του πλοίου. Η τιμή της ισχύος του μηχανολογικού προέκυψε με τη βοήθεια κατάλληλου σχήματος και είναι ίση με $P_b=40000kW$.

Πίνακας Β.5: Υπολογισμός του Lightship

BAPOΣ LIGHTSHIP				
Ομάδα βάρους	Μονάδα	Τιμή	Συντελεστής Βάρους/μονάδα tonne/μοναδα	Βάρος tonne
Γάστρα	Όγκος	100000.00	0.080	8000
Υπερκατασκευές	Όγκος	155232.00	0.040	6209
Εσωτερικός Εξοπλισμός	Όγκος	42400.00	0.170	7208
Εξοπλισμός Πλοίου	Όγκος	255232.00	0.007	1787
Μηχανολογικός Εξοπλισμός	Ισχύς	40000.00	0.065	2600
Συνολικά	-	-	-	25804
Περιθώριο	%	5.00	-	1290
BAPOΣ LIGHTSHIP	-	-	-	27094

Εν συνεχεία, συμπληρώνεται ο Πίνακας Β.6, ο οποίος υπολογίζει το βάρος Deadweight. Συνολικά ο αριθμός των επιβατών και των μελών πληρώματος ανέρχεται στα 2250 άτομα. Η κατανάλωση καυσίμων και λιπαντικών εκτιμήθηκε ίση με 544t/ταξίδι και 4t/ταξίδι, αντίστοιχα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια υπόθεση για το μέγεθος του πόσιμου νερού και των αποβλήτων.

Πίνακας Β.6: Υπολογισμός του Deadweight

BAPOΣ DEADWEIGHT				
Είδος	Μονάδα	Τιμή	Συντελεστής Βάρους/μονάδα tonne/μοναδα	Βάρος tonne
Επιβάτες και πλήρωμα	Άτομα	2250.00	0.100	225
Εφόδια και προμήθειες	Άτομα	2250.00	0.200	450
Καύσιμα	Κατανάλωση/ταξίδι	544.00	2.200	1197
Λιπαντικά	Κατανάλωση/ταξίδι	4.00	10.000	40
Πόσιμο νερό	Κατανάλωση/ταξίδι	3850.00	0.500	1925
Απόβλητα	Παραγωγή	1155.00	0.250	289
Νερό για έλεγχο ευστάθειας	-	-	-	500
Νερό στις πισίνες	-	-	-	200
Διάφορα	-	-	-	200
BAPOΣ DEADWEIGHT	-	-	-	5026

Αθροίζοντας τα δυο βάρη προκύπτει το εκτόπισμα του κρουαζιερόπλοιου, το οποίο είναι ίσο με $\Delta_{method}=32120t$. Μάλιστα, μπορεί να γίνει μια σύγκριση του εκτοπίσματος με αυτό των άλλων πλοίων ολικής χωρητικότητας 56299 GT.

Στο σημείο αυτό συνοψίζονται στον Πίνακα Β.7 οι κύριες διαστάσεις του πλοίου που έχουν προκύψει. Σημειώνεται ότι όσον αφορά το κοίλο, αυτό επηρεάζεται άμεσα από την απαίτηση για το μέγιστο ύψος τοποθέτησης των σωστικών λέμβων ($=15m$). Για το λόγο αυτό εκτιμήθηκε ότι το κοίλο του πλοίου είναι ίσο με 12m συν το βύθισμα. Επιπλέον, οι υπόλοιποι συντελεστές μορφής του κρουαζιερόπλοιου προέκυψαν με βάση τον συντελεστή γάστρας.

Θα πρέπει να καταγραφεί ότι το μέγιστο ύψος του πλοίου προέκυψε ύστερα από δοκιμές. Είναι κατανοητό ότι το μέγιστο ύψος του πλοίου εξαρτάται από το κοίλο αλλά και το ύψος της

υπερκατασκευής. Το εν λόγω ύψος εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των καταστρωμάτων της υπερκατασκευής αλλά και το μεταξύ τους ύψος. Κατά συνέπεια, θεωρώντας ότι η υπερκατασκευή έχει 6 καταστρώματα και το κάθε ένα έχει απόσταση από το άλλο 2.8m, τότε προκύπτει ότι το ύψος της υπερκατασκευής είναι ίσο με 19.6m. Για τα καταστρώματα της γάστρας θεωρήθηκε ότι 6 σε αριθμό και η μεταξύ τους απόσταση 3.25m. Ακόμη, εκτιμήθηκε ότι το μήκος της υπερκατασκευής είναι το 80% του μήκους του πλοίου (συμμετοχή στη διαμήκη αντοχή).

Πίνακας Β.7: Κύριες διαστάσεις και συντελεστές μορφής κρουαζιερόπλοιου

ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΥΡΙΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ		
L	210	(m)
B	33	(m)
T	7.5	(m)
D	19.5	(m)
Μέγιστο Ύψος	39.1	(m)
Cb	0.65	(-)
Cm	0.973	(-)
Cwl	0.767	(-)
Cp	0.668	(-)
Δ	34628.34	(t)

Στη συνέχεια, με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται η συνολική επιφάνεια και ο συνολικός όγκος που καλύπτει η γάστρα και η υπερκατασκευή (Πίνακας Β.8). Οι τιμές που προκύπτουν θα πρέπει να ικανοποιούν τις συνθήκες που αναφέρθηκαν στην Ενότητα 2.3.2. Σε περίπτωση, που αυτό δεν πραγματοποιείται θα πρέπει να αλλάξει ο αριθμός των καταστρωμάτων, η μεταξύ τους απόσταση ή το μήκος της υπερκατασκευής.

Αθροίζοντας τον όγκο και την επιφάνεια της γάστρας και της υπερκατασκευής, αντίστοιχα, προκύπτει ότι:

$$V_{total} = 196,478.8 \text{ m}^3 \text{ και } A_{total} = 64,809.4 \text{ m}^2$$

τα οποία συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα που εκτιμήθηκαν από τη μέθοδο προκύπτει ότι καλύπτουν την απαίτηση.

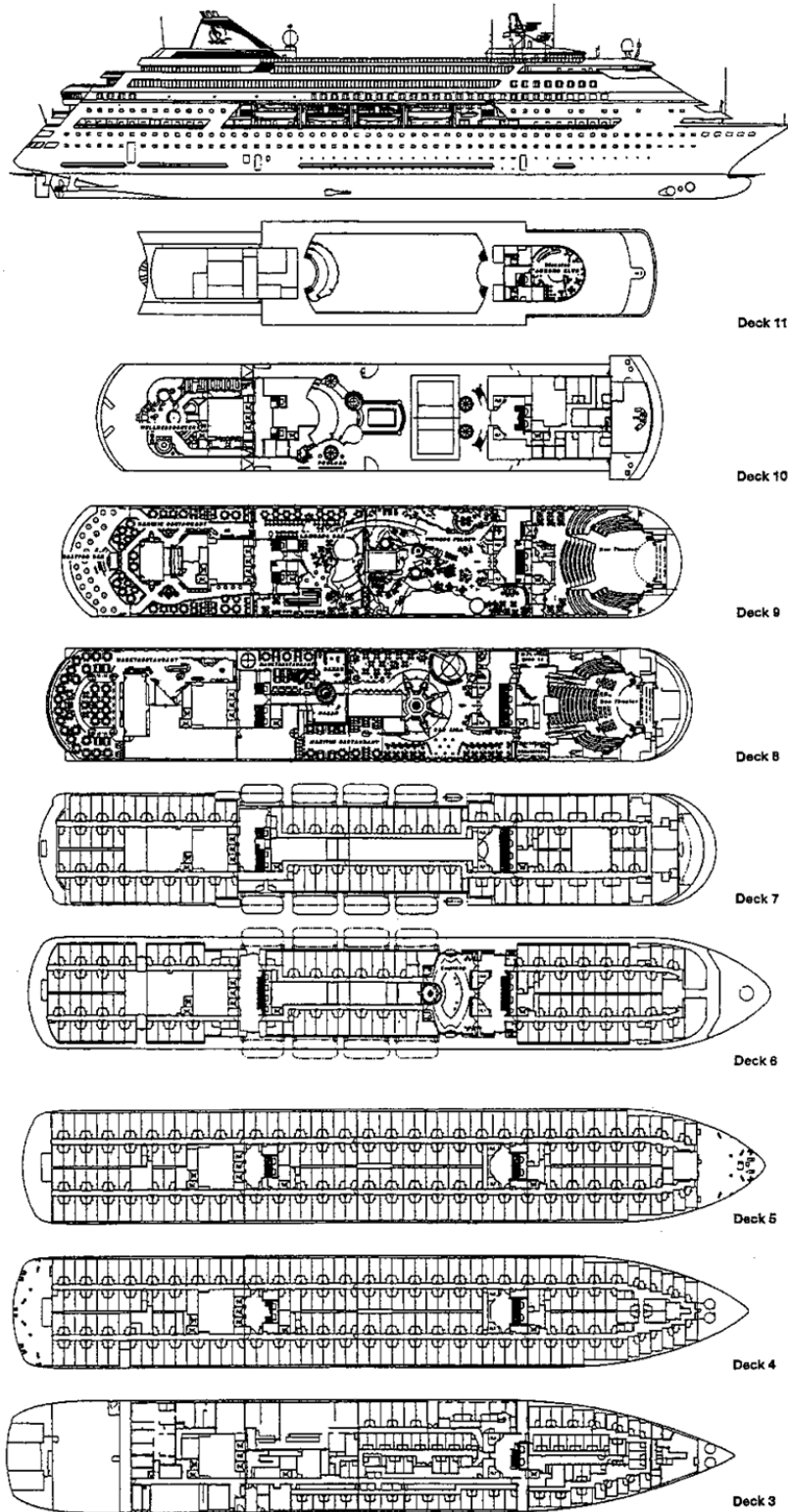
$$V_{method} = 184,395.0 \text{ m}^3 < 196,478.8 \text{ m}^3 = V_{total}$$

$$A_{method} = 59,227.5 \text{ m}^2 < 64,809.4 \text{ m}^2 = A_{total}$$

Πίνακας Β.8: Συνολική επιφάνεια και συνολικός όγκος υπερκατασκευής

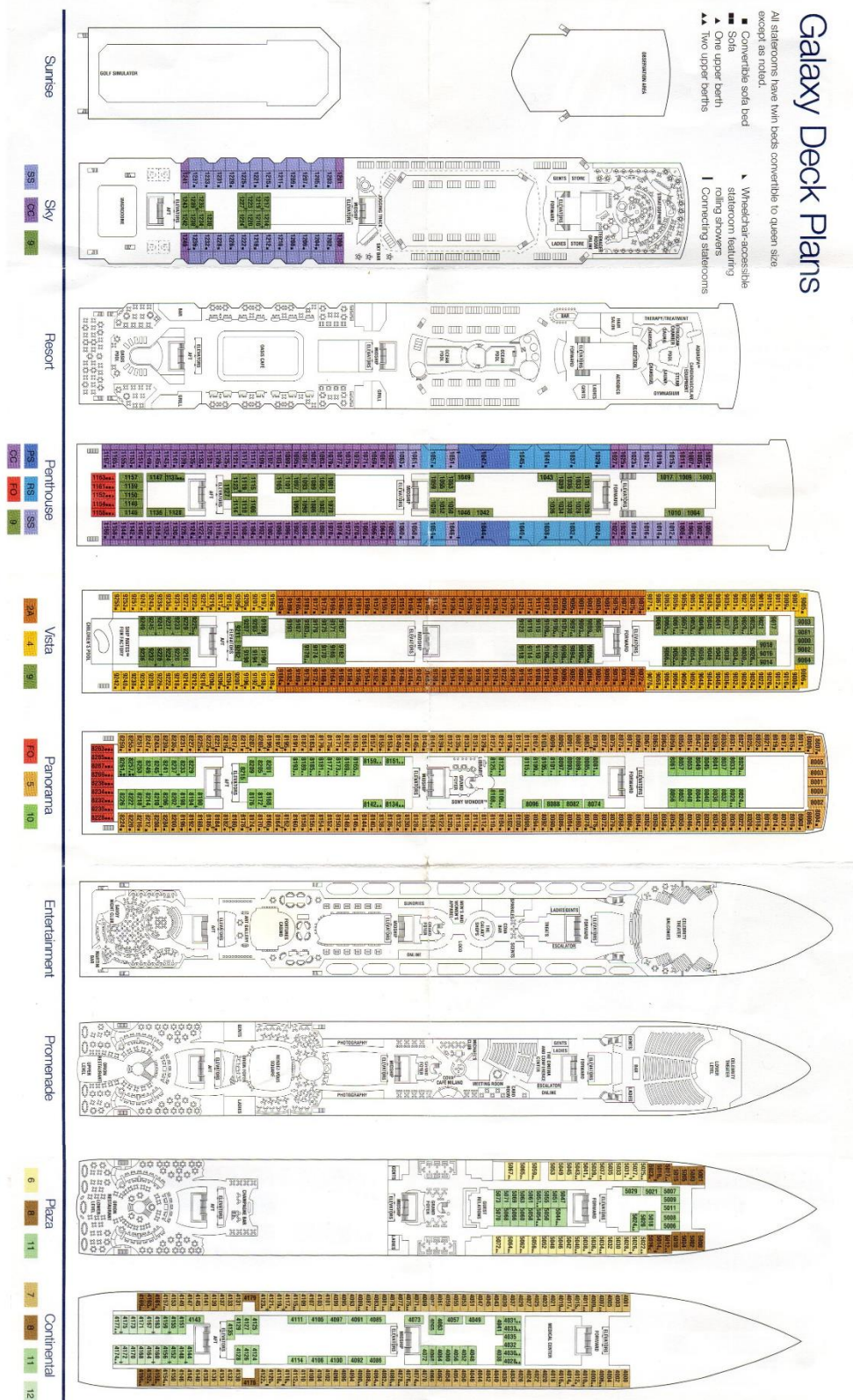
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΑΙ ΟΓΚΟΣ		
V _{hull}	104271.01	(m ³)
V _{sup}	92207.81	(m ³)
A _{hull}	31878.00	(m ²)
A _{sup}	32931.36	(m ²)
Καταστρώματα Γάστρας	6.00	(-)
Καταστρώματα Υπερκατ.	6.00	(-)
Ύψος μεταξύ κατ. Γαστρας	3.25	(m)
Ύψος μεταξύ κατ. Υπερκατ.	2.80	(m)
Μήκος Υπερκατ	168.00	(m)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - Γενική διάταξη δυο κρουαζιερόπλοιων



Σχήμα Γ.1: Γενική διάταξη κρουαζιερόπλοιου AIDA [37]

Η Μεταλλική Κατασκευή των Κρουαζιερόπλοιων
 Ιστορική Αναδρομή, Ιδιαιτερότητες, Προβλήματα Αντοχής, Νέες Εξελίξεις



Σχήμα Γ.2: Γενική διάταξη κρουαζιερόπλοιου GALAXY

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - Απαιτήσεις γερμανικού νηογνώμονα για την πιστοποίηση της άνεσης

I- Part I Section 2 C Required Noise and Vibration Limits
GL 2003

Chapter 16
Page 2-1

Section 2

Required Noise and Vibration Limits

A. General

1. Requirements given in these Rules refer to human wellbeing only. However, to achieve a certain level of noise and vibration comfort, it must be ensured that main and auxiliary machinery do not vibrate heavily. Therefore, limit values given in corresponding standards or classification rules, for instance GL Rules, I-Ship Technology, Part 1- Seagoing Ships, Chapter 2- Machinery Installations, Section 2, Fig. 2.1, shall be observed, too.

2. Requirements regarding acoustic privacy are given in addition to those for noise and vibration.

3. Requirements for noise and vibration are presented for three operating conditions:

- Sea Mode
- Harbour Operation
- Thruster Operation

The noise and vibration limits given for Sea Mode Operation form an upper bound for any operation mode at typical ship speeds.

4. Requirements regarding measurements for three operating conditions are given in Section 3, B.

5. Limits are given separately for passenger and crew spaces.

6. Requirements are related to different immission zones as defined by Frame A, B, C and D. The principal arrangement of these zones is shown

in Fig. 2.1 for a typical seagoing passenger vessel, see also Annex B.

B. Noise Requirements

1. Most relevant standards are ISO 2923, ISO 717/1 and ISO 717/2.

2. Required noise limit values depending on the harmony category number (hc) are listed in Tables 2.1 to 2.4.

3. The measurement procedure and the calculation of the hc achieved by noise measurements are described in Section 3, C. and Section 4, respectively.

C. Vibration Requirements

1. The most relevant vibration standard is ISO 6954, edition 2000-12-15. The limit values refer, consequently, to the overall frequency-weighted rms value in the range of 1 to 80 Hz. The vibration velocities are given in mm/s.

2. Required vibration limit values depending on the harmony category (hc) are listed in Tables 2.5 and 2.6.

3. The measurement procedure and the calculation of the hc achieved by vibration measurements are described in Section 3, C. and Section 4, respectively.

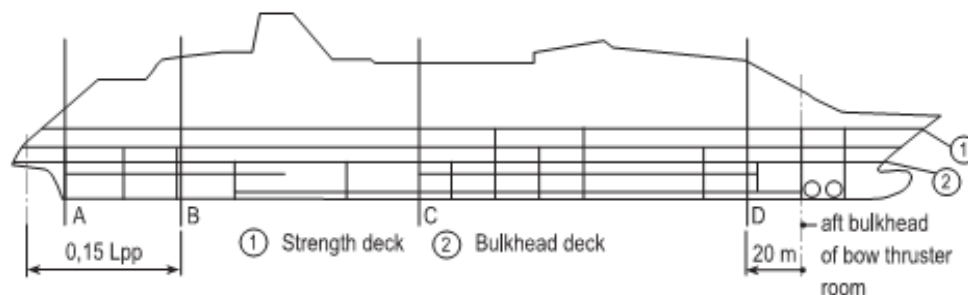


Fig. 2.1 Immission Zones

Table 2.1 Noise Limits, Passenger Spaces

Noise Level Limits in dB(A)	Sea Mode ^{1,2}					Harbour Operation ^{1,2}					Thruster Operation ^{2,3,4}				
	hc					hc					hc				
	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4
Indoor Spaces Aft of Frame A															
First-class cabins	48	50	52	54	56	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	52	54	56	58	60	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
Public spaces, type 1 and 2	56	58	60	62	64	52	54	56	58	60	60	62	64	66	68
Corridors, staircases	56	58	60	62	64	54	56	58	60	62	—	—	—	—	—
Indoor Spaces Between Frame A and C															
First-class cabins	46	48	50	52	54	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	48	50	52	54	56	46	48	50	52	54	54	56	58	60	62
Public spaces, type 1 and 2	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	58	60	62	64	66
Corridors, staircases	54	56	58	60	62	54	56	58	60	62	—	—	—	—	—
Indoor Spaces Between Frame C and D															
First-class cabins	44	46	48	50	52	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	46	48	50	52	54	46	48	50	52	54	54	56	58	60	62
Public spaces, type 1 and 2	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	58	60	62	64	66
Corridors, staircases	54	56	58	60	62	54	56	58	60	62	—	—	—	—	—
Indoor Spaces Forward of Frame D															
First-class cabins	44	46	48	50	52	44	46	48	50	52	52	54	56	58	60
Standard cabins	46	48	50	52	54	46	48	50	52	54	56	58	60	62	64
Public spaces, type 1 and 2	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	60	62	64	66	68
Corridors, staircases	54	56	58	60	62	54	56	58	60	62	—	—	—	—	—
Outdoor Spaces															
Open deck recreation areas	64	66	68	70	75	64	66	68	70	72	64	66	68	70	72
Exhaust/supply air openings in open deck recreation areas ⁵	68	70	72	75	80	68	70	72	75	80	68	70	72	75	80
¹ In each space the noise level generated only by air-conditioning and mechanical ventilation systems must be at least 4 dB(A) below the required noise limit value for harbour operation. ² In each sanitary cell the noise level generated only by air-conditioning exhaust air systems at full capacity must not be more than 5 dB(A) above the required noise limit value for harbour operation. ³ To be verified by measurements in the vicinity of thrusters only. Passenger indoor spaces aft of Frame A shall be considered during stern thruster operation only. All thrusters running at not less than 70 % of full load. The noise limits shall be maintained also in standby operation of thrusters. ⁴ Limit values valid, provided that thrusters are in operation for a maximum of 4 hours out of 24 hours. ⁵ At a distance of 1,5 m.															

I - Part 1 Section 2 C Required Noise and Vibration Limits
GL 2003

Table 2.2 Noise Limits for Acoustic Privacy, Passenger Spaces

On board Acoustic Privacy – Sound Insulation <i>(minimum required weighted apparent sound insulation index in dB according to ISO 717/1 and ISO 140/4)</i>					
Arrangements:	hc				
	E	1	2	3	4
First-class cabins to first-class cabins (incl. bath to bath)	42	40	38	36	34
First-class cabins to standard cabins (incl. bath to bath)	42	40	38	36	34
Standard cabins to standard cabins (incl. bath to bath)	40	38	36	34	32
First-class cabins to corridors	40	38	36	34	32
Standard cabins to corridors	38	36	34	32	30
Pax cabins to crew spaces	50	48	46	44	42
Pax cabins to public spaces type 1 ¹	64	62	60	58	56
Pax cabins to public spaces type 2	58	56	54	52	50
Pax cabins to staircases ²	58	56	54	52	50
Pax cabins to engine room casings, elevator casings etc. ³	60	58	56	54	52
Pax cabins to HVAC rooms ⁴	58	56	54	52	50
Pax cabins to engine rooms ⁵	64	62	60	58	56

¹ The sound pressure levels (SPL) for the 1/1 octave band mid frequencies that should not be exceeded in public spaces type 1 (when in use) are listed as follow:

Frequency in Hz	31,5	63	125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
SPL in dB(A)	65	72	78	85	88	91	94	94	94

² In general, the number of passenger cabins located adjacent to staircases have to be minimized.

³ Number of passenger cabins located adjacent to engine rooms and elevator casings etc. should be minimized. If possible, acoustic buffer zones (e.g., service stores, lockers etc.) should be arranged between cabins and casings. The average sound pressure level in engine room casings must be limited to max. 100 dB(A).

⁴ Average sound pressure level in HVAC rooms located adjacent to passenger cabins must be limited to max. 80 dB(A).

⁵ Arrangement of passenger cabins adjacent to engine rooms should be avoided. Otherwise specific provisions are required to achieve limit values.

Table 2.2 Noise Limits for Acoustic Privacy, Passenger Spaces (cont'd.)

On board Acoustic Privacy – Impact Sound Insulation <i>(maximum permissible normalized sound pressure level index in dB according to ISO 717/2 and ISO 140/7)</i>					
Arrangements:	hc				
	E	1	2	3	4
Pax cabins adjacent to pax cabins (soft floor)	46	48	50	52	54
Pax cabins adjacent to corridors (soft floor)	46	48	50	52	54
Pax cabins adjacent to crew spaces	46	48	50	52	54
Pax cabins adjacent to public spaces type 1	46	48	50	52	54
Pax cabins adjacent to public spaces type 1a	maximum 46 dB				
Pax cabins adjacent to public spaces type 2 (hard floor)	48	50	52	54	56
Pax cabins adjacent to public spaces type 2 (soft floor)	46	48	50	52	54
Pax cabins adjacent to service spaces (galley, pantries etc.)	46	48	50	52	54
Pax cabins adjacent to open deck recreation areas ⁶	maximum 60 dB				
Pax cabins adjacent to jogging paths, sport courts etc.	?	?	?	?	?

⁶ Arrangement of passenger and crew cabins below open deck recreation areas should be avoided. However, if so arranged the limit of the normalised impact sound pressure level for cabins below those spaces must be agreed upon between owner, yard and Germanischer Lloyd but must not exceed 60 dB in any case.

⁷ Arrangement of passenger and crew cabins below jogging paths, sport courts etc. should be avoided. However, if so arranged the limit of the normalised impact sound pressure level for cabins adjacent to those spaces must be agreed upon between owner, yard and Germanischer Lloyd.

Table 2.3 Noise Limits, Crew Spaces

Noise Level Limits in dB(A)	Sea Mode ¹					Harbour Operation ¹					Thruster Operation ^{2, 3}				
	hc					hc					hc				
	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4
Work Spaces															
Machinery spaces (not continuously manned) ⁵	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
Engine control rooms	67	69	71	73	75	64	66	68	70	72	67	69	71	73	75
Workshops	80	80	85	85	85	80	80	80	80	80	—	—	—	—	—
Open deck working areas ⁴	75	75	80	80	85	75	75	80	80	85	75	75	80	80	85
Stores ⁵	80	80	85	90	90	75	75	80	85	85	—	—	—	—	—
Indoor spaces not specified ³	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	—	—	—	—	—
Service Spaces															
Galleys ⁶	68	70	72	75	75	66	68	70	75	75	68	70	72	75	75
Serveries, pantries ⁶	66	68	70	75	75	66	68	70	75	75	66	68	70	75	75
Navigation Spaces															
Navigation bridge and chart rooms	55	55	60	60	65	55	55	60	60	65	58	58	60	60	65
Radio rooms	55	55	60	60	60	55	55	60	60	60	55	55	60	60	60
Listing posts, including outdoor bridge wings ⁷	65	65	70	70	70	65	65	65	70	70	65	65	70	70	70
Accommodation Spaces															
Day and sleeping rooms / officers	50	52	54	56	58	50	52	54	56	58	62	64	66	68	70
Day and sleeping rooms / others	52	54	56	58	60	52	54	56	58	60	64	66	68	70	72
Mess rooms, offices, recreation rooms	57	59	61	63	65	57	59	61	63	65	66	68	70	72	74
Hospitals	54	56	58	60	60	54	56	58	60	60	64	66	68	70	72
Gymnasiums, treatment rooms	57	59	61	63	65	57	59	61	63	65	—	—	—	—	—
Corridors adjacent to cabins	58	60	62	64	66	56	58	60	62	64	—	—	—	—	—
Open deck recreation areas	68	70	72	75	75	68	70	72	75	75	—	—	—	—	—
¹ In each space the noise level generated only by air-conditioning and mechanical ventilation systems must be limited to at least 4 dB(A) below the required noise limit value for harbour operation (excluding work spaces and open recreation areas). ² To be verified by measurements in the vicinity of thrusters only. All thrusters running at not less than 70 % of full load. The noise limits are also to be maintained in standby operation of the thrusters. ³ Limit values valid provided that thrusters are in operation for a maximum of 4 hours out of 24 hours. ⁴ Spaces requiring verbal communication when berthing the ship (maximum 4 hours out of 24 hours). ⁵ Reference is made to IMO Resolution A.468 (XII) – ear protectors should be worn when the noise level is above 85 dB(A). ⁶ With mechanical ventilation in normal operation. ⁷ Reference is made to IMO Resolution A.468 (XII) – which also requires that the noise level at 1/3 speed does not exceed 68 dB in the 1/1 octave band at 250 Hz and does not exceed 63 dB in the 1/1 octave band at 500 Hz.															

Table 2.4 Noise Limits for Acoustic Privacy, Crew Spaces

On board Acoustic Privacy – Sound Insulation <i>(minimum required weighted apparent sound insulation index in dB according to ISO 717/1 and ISO 140/4)</i>					
Arrangements:	hc				
	E	1	2	3	4
Cabins to cabins	40	38	36	34	32
Cabins to corridors	38	36	34	32	30
Cabins to stairways	56	54	52	50	48
Cabins to engine room casings, elevator casings etc. ¹	58	56	54	52	50
Cabins to mess rooms, hospitals, gymnasiums, service spaces etc.	58	56	54	52	50
Cabins to engine rooms ²	60	58	56	54	52
¹ The number of cabins located adjacent to engine rooms and elevator casings etc. should be minimized. If possible, acoustic buffer zones (e.g. corridors, service stores, lockers etc.) should be arranged between cabins and casings. The average sound pressure level in engine room casings shall be limited to max. 100 dB(A). ² The arrangement of cabins adjacent to engine rooms should be avoided. Otherwise specific provisions are required to achieve limit values.					
On board Acoustic Privacy – Impact Sound Insulation <i>(maximum permissible normalized sound pressure level in dB according to ISO 717/2 and ISO 140/7)</i>					
Arrangements:	hc				
	E	1	2	3	4
Cabins adjacent to cabins	52	54	56	58	60
Cabins adjacent to dance floors, stages etc.	50	52	54	56	58
Cabins adjacent to gymnasiums	52	54	56	58	60
Cabins adjacent to service spaces (e.g. galleys, pantries etc.)	52	54	56	58	60

Table 2.5 Vibration Limits, Passenger Spaces

Vibration Limits in mm/s (overall frequency weighted rms value 1 to 80 Hz)	Sea Mode					Harbour Operation					Thruster Operation ¹				
	hc					hc					hc				
	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4
Indoor Spaces Aft of Frame B															
First-class cabins	1.1	1.5	1.9	2.3	2.6	—	—	—	—	—	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2
Standard cabins	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	—	—	—	—	—	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6
Public spaces, <u>short</u> exposure time	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Public spaces, <u>long</u> exposure time	1.8	2.2	2.6	3.0	3.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Corridors, staircases	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Indoor Spaces Forward of Frame B															
First-class cabins	0.8	1.2	1.6	2.0	2.4	—	—	—	—	—	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2
Standard cabins	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	—	—	—	—	—	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6
Public spaces, <u>short</u> exposure time	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Public spaces, <u>long</u> exposure time	1.4	1.9	2.4	2.9	3.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Corridors, staircases	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Outdoor Spaces Aft of Frame B															
Open deck recreation areas	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Open deck recreation areas of overhangs	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Outdoor Spaces Forward of Frame B															
Open deck recreation areas	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Open deck recreation areas of overhangs	2.2	2.6	3.0	3.4	3.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

¹ Thrusters operating at not less than 70 % of full load.

Table 2.6 Vibration Limits, Crew Spaces

Vibration Level Limits in mm/s (overall frequency weighted rms value 1 to 80 Hz)	Sea Mode					Harbour Operation					Thruster Operation ¹				
	hc					hc					hc				
	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4	E	1	2	3	4
Work Spaces															
Machinery spaces (not continuously manned)	4.4	4.8	5.2	5.6	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Engine control rooms	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Workshops	3.2	3.6	4.0	4.4	4.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Stores	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Indoor spaces not specified	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Service Spaces															
Galleys	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Serveries and pantries	2.4	2.8	3.2	3.6	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Navigation Spaces															
Navigation bridges and chart rooms	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Radio rooms	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Listing posts including navigation bridge wings	2.8	3.2	3.6	4.0	4.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Accommodation Spaces															
Day and sleeping rooms / officers	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	—	—	—	—	—	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
Day and sleeping rooms / others	1.6	2.0	2.4	2.8	3.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Mess rooms, offices, recreation rooms	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Hospitals	1.2	1.7	2.2	2.7	3.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Gymnasiums, treatment rooms	2.0	2.4	2.8	3.2	3.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Corridors adjacent to cabins	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Open deck recreation areas	2.6	3.0	3.4	3.8	4.2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

¹ Thrusters operating at not less than 70 % of full load

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε - Κραδασμοί

Είναι σημαντικό για τον μηχανικό της κατασκευής να προλάβει τα προβλήματα των κραδασμών γιατί οι επαναληπτικές δυνάμεις λόγω της έλικας ή της κύριας μηχανής, μπορούν να προκαλέσουν σημαντικούς κραδασμούς στους χώρους ενδιαίτησης, ή μπορεί να προκαλέσουν αστοχίες των κατασκευαστικών τμημάτων λόγω των κραδασμών. Για να μην υπάρχουν προβλήματα κραδασμών, είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζονται τα χαρακτηριστικά των κραδασμών στις κατασκευές με υψηλή ακρίβεια, ειδικά στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού.

Ενώ υπάρχουν πολλές πηγές διέγερσης, τα σοβαρότερα προβλήματα κραδασμών οφείλονται κυρίως στην έλικα και στην κύρια μηχανή. Ένα μέρος από τη δύναμη διέγερσης λόγω της έλικας λαμβάνει χώρα ως μία κυμαινόμενη πίεση που δρα στα εξωτερικά ελάσματα του κελύφους του πρυμναίου τμήματος του πλοίου μπροστά από την έλικα και καλείται δύναμη επιφάνειας. Ένα άλλο μέρος, μεταδίδεται στο διπύθμενο του μηχανοστασίου μέσω του άξονα μετάδοσης, και οδηγεί σε δυνάμεις των εδράνων και ώσης. Αυτές οι δυνάμεις διέγερσης που εισάγονται από την έλικα προκαλούν κραδασμούς στη γάστρα, στις υπερκατασκευές, όπως επίσης και τοπικούς κραδασμούς στην κατασκευή. Αντίστοιχα, οι δυνάμεις διέγερσης της κύριας μηχανής, μεταφέρονται από τη βάση της κύριας μηχανής στο διπύθμενο του μηχανοστασίου και τελικά προκαλούν κραδασμούς στη γάστρα και τις υπερκατασκευές. Ένα μέτρο αντιμετώπισης των κραδασμών της κύριας μηχανής είναι η κατάλληλη προσαρμογή του μεγέθους του σφονδύλου (flywheel) και της διαμέτρου του ελικοφόρου άξονα, ώστε να μειωθούν οι κραδασμοί που προκαλούνται από την στρεπτική κίνηση.

Οι δυο κραδασμοί που αναφέρθηκαν είναι μόνιμοι. Ωστόσο, άλλοι τύποι κραδασμών όπως το whipping και το springing στη γάστρα εισάγονται σταδιακά από τις δυνάμεις των κυματισμών. Ο κραδασμός από το whipping είναι μία παροδική απόκριση της γάστρας που προκαλείται από τη δύναμη κρούσης της σφυρόκρουσης που ενδυναμώνει τις καμπτικές τάσεις υψηλής συχνότητας της γάστρας (αυξημένη καμπτική ροπή σε κυματισμό sagging και hogging και αυξημένη φόρτιση κόπωσης). Γενικά, προκύπτει σε μετωπικούς κυματισμούς, όταν η πλεύση γίνεται σε άσχημες συνθήκες θάλασσας. Ο κύριος τύπος του κραδασμού είναι η κάθετη κάμψη. Η συνεισφορά του whipping στην ολική κάθετη καμπτική ροπή δεν είναι μόνο σημαντική, αλλά διαρκεί και για αρκετό χρονικό διάστημα λόγω της χαμηλής υγρασίας της κατασκευής. Ένα γεγονός κρούσης, αυξάνει πολλαπλώς τα άκρα της καμπτικής ροπής κάτι που κάνει το whipping να σχετίζεται με ακραίες φορτίσεις αλλά και με φορτίσεις κόπωσης στην κατασκευή του πλοίου. Παρ' όλα αυτά, η υδροελαστική επιρροή του whipping δε λαμβάνεται υπόψη επαρκώς στο σχεδιασμό του πλοίου. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των δυσκολιών της σωστής μοντελοποίησης του whipping και του χρόνου υπολογισμού του. Οι συνέπειες του whipping μπορεί να είναι πολύ σημαντικές και σε μερικές περιπτώσεις μπορούν να διπλασιάσουν την ροπή κάμψης της μέσης τομής.

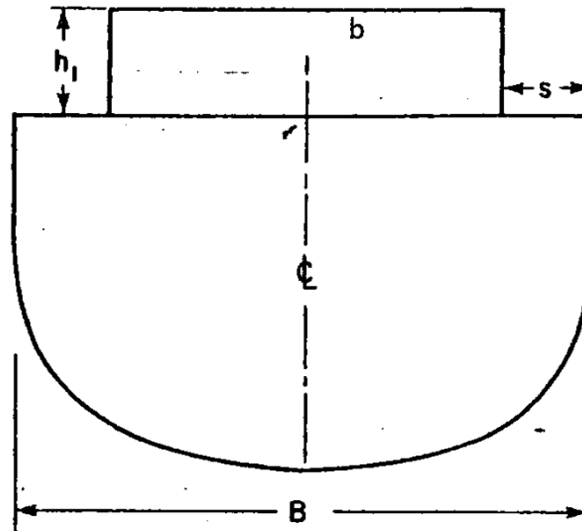
Θα πρέπει να καταγραφεί ότι ο περιορισμός βυθίσματος σε πολλά λιμάνια σημαίνει ότι οι αυξήσεις μεγέθους των κρουαζιερόπλοιων οδηγεί σε αυξημένο μήκος και πλάτος. Το περιορισμένο βύθισμα και η ανάγκη επίτευξης της ταχύτητας σχεδίασης μπορεί να οδηγήσει στη χρήση διπλής έλικας. Αυτές οι αλλαγές κάνουν τη γάστρα πιο εύκαμπτη (πιο χαμηλή φυσική συχνότητα της γάστρας), με μεγάλη γωνία κλίσης (flare) στην πλώρη και πιο επίπεδο πυθμένα στην πρύμνη (υψηλότερες φορτίσεις σφυρόκρουσης). Αυτές οι αλλαγές κάνουν τη γάστρα πιο ευάλωτη σε σφυρόκρουση πλώρης και πρύμνης και κατ' επέκταση στην επίδραση του whipping.

Ο κραδασμός από το springing είναι ένας σταθερός κραδασμός της γάστρας σε ήρεμο νερό, που προκαλείται από την αντήρηση μεταξύ της φυσικής συχνότητας της γάστρας και τις υψηλότερες συχνότητες των κυματισμών. Χαρακτηρίζεται ως υψηλής συχνότητας καμπτικές τάσεις μικρού εύρους που προστίθενται στις καμπτικές τάσεις συχνότητας του κύματος, μεγάλου εύρους. Προκύπτει κυρίως όταν γίνεται πλεύση σε ήπιες καταστάσεις θάλασσας (τα κύματα μικρής περιόδου έχουν περιορισμένο ύψος). Οι κύριοι τύποι κραδασμών είναι η στρεπτική κάμψη, η κάθετη κάμψη και η οριζόντια κάμψη. Ο

λόγος της αυξημένης σημασίας του springing είναι το γεγονός ότι οι ελαστικές κατασκευαστικές συχνότητες είναι μικρότερες για τα μεγάλα πλοία και είναι πιο πιθανό να βρίσκονται στο εύρος συχνοτήτων των συνηθισμένων καταστάσεων θάλασσας. Αυστηρά, το springing μπορεί επίσης να διεγερθεί με μη γραμμικό τρόπο λόγω της υψηλότερης τάξης των υδροδυναμικών επιπτώσεων αλλά στην προκειμένη περίπτωση όπου η συχνότητα που υπολογίζεται μπορεί να είναι ίση με τη φυσική συχνότητα, το γραμμικό κομμάτι της διέγερσης είναι κυρίαρχο. Γενικά, η ανάλυση του springing απαιτεί το τέλειο συνταίριασμα μεταξύ του υδροδυναμικού και κατασκευαστικού κώδικα και σε αυτή την περίπτωση η υδροδυναμική πίεση πρέπει να μεταφερθεί στο κατασκευαστικό μοντέλο αλλά και οι κατασκευαστικές παραμορφώσεις πρέπει να μεταφερθούν στο υδροδυναμικό μοντέλο ώστε να συσχετιστεί σωστά η επιπρόσθετη υδροδυναμική μάζα στις φυσικές ελαστικές καταστάσεις.

Τέλος, οι υπερκατασκευές και τα υπερστεγάσματα μπορούν επίσης να εκτεθούν σε υψηλά επίπεδα αποκρίσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις εγκαθίστανται μηχανισμοί όπως η δυναμική απόσβεση (dynamic damper), αλλά και λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα ενίσχυσης. Ο βαθμός της απόκρισής τους, εξαρτάται μεταξύ άλλων από το πόσο κοντά στις φυσικές συχνότητες της κατασκευής του πλοίου βρίσκονται αυτές των δυναμικών φορτίσεων. Τα χαρακτηριστικά των κραδασμών ενός πλοίου, πρέπει να εξετάζονται νωρίς στο σχεδιασμό, αφού οι μετέπειτα μετατροπές στην κατασκευή του πλοίου κοστίζουν περισσότερο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ - Παραδείγματα συνεργασίας γάστρας-υπερστεγάσματος



$$L = 415'$$

$$B = 46.5'$$

$$D = 30'$$

$$h_1 = 8.5'$$

$$I_2 = 133,645 \text{ in}^2 \times \text{ft}^2$$

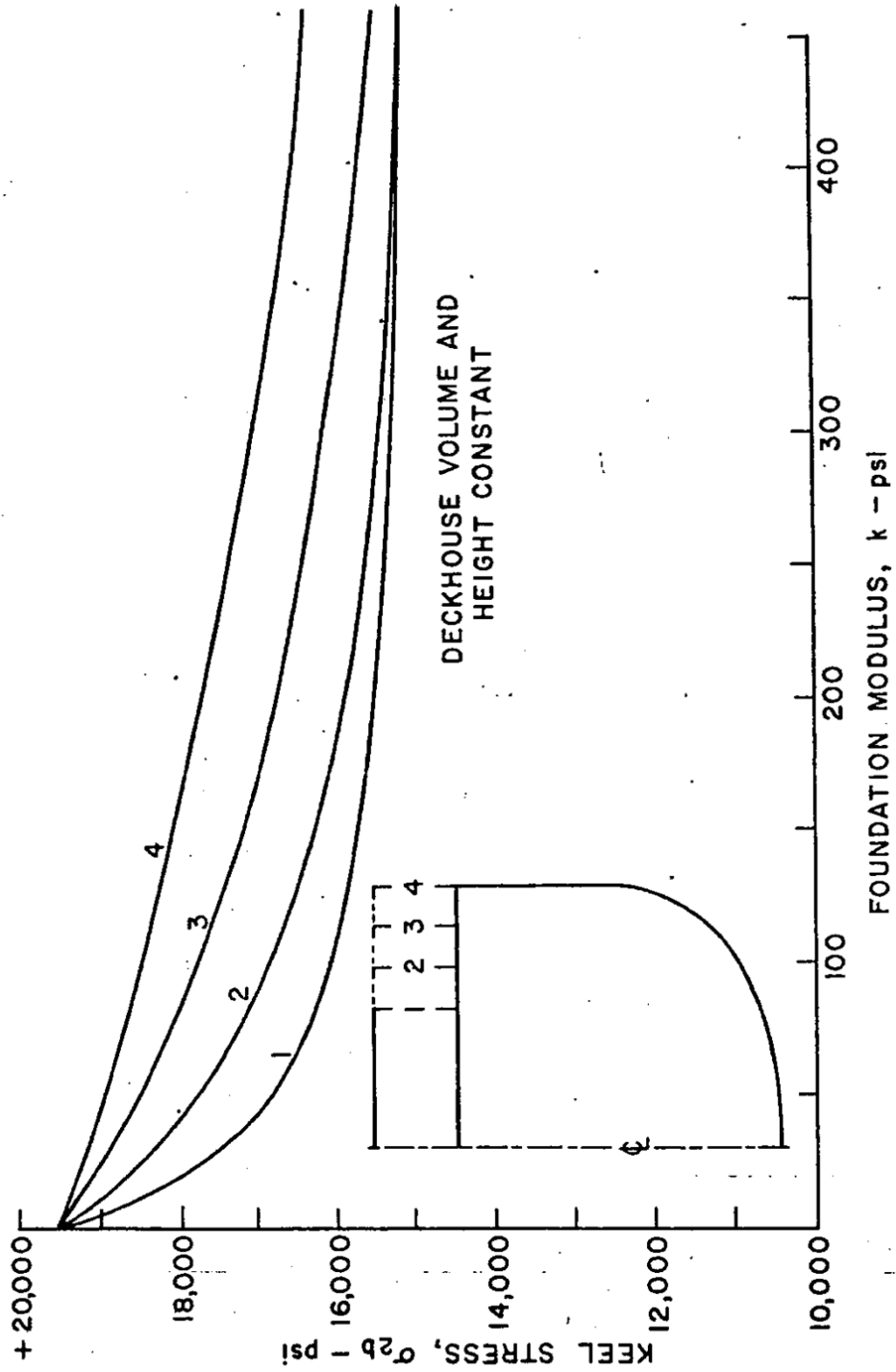
Case	Deckhouse Breadth, <i>b</i> (feet)	Setback, <i>s</i> (feet)	Deckhouse Length, <i>l</i> (feet)	Deckhouse Moment of Inertia, <i>I</i> ₁ (in ² x ft ²)
1	25.5	10.5	385	1897
2	32.5	7.0	300	2006
3	39.5	3.5	250	2090
4	46.5	0	210	2159

(Superstructure)

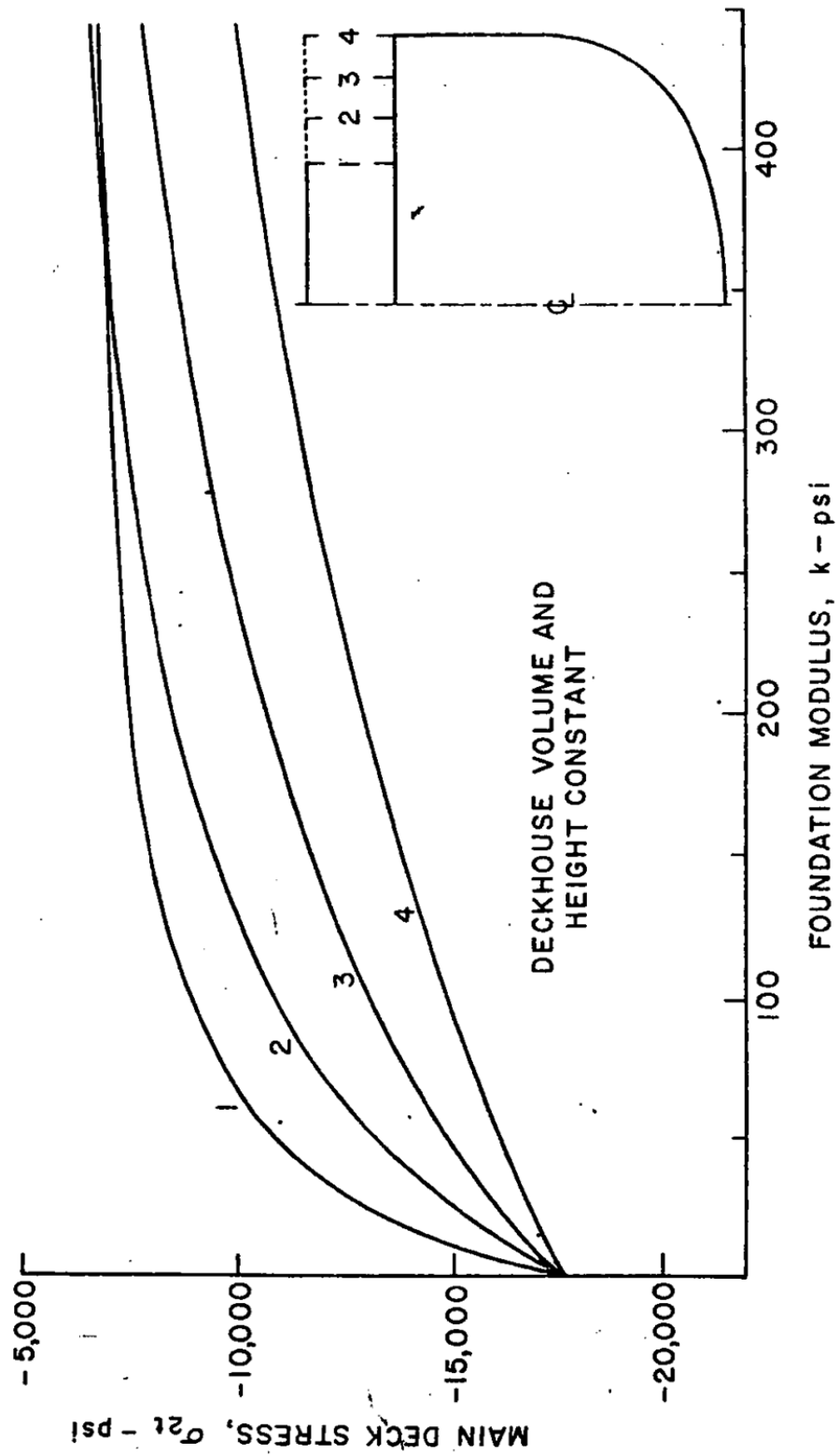
Case	<i>b</i> / <i>B</i>	<i>l</i> / <i>L</i>	Main Deck Support Stiffness, <i>k</i> (psi.)
1	.55	.93	260
2	.70	.72	520
3	.85	.60	1800
4	1.00	.51	∞

(Superstructure)

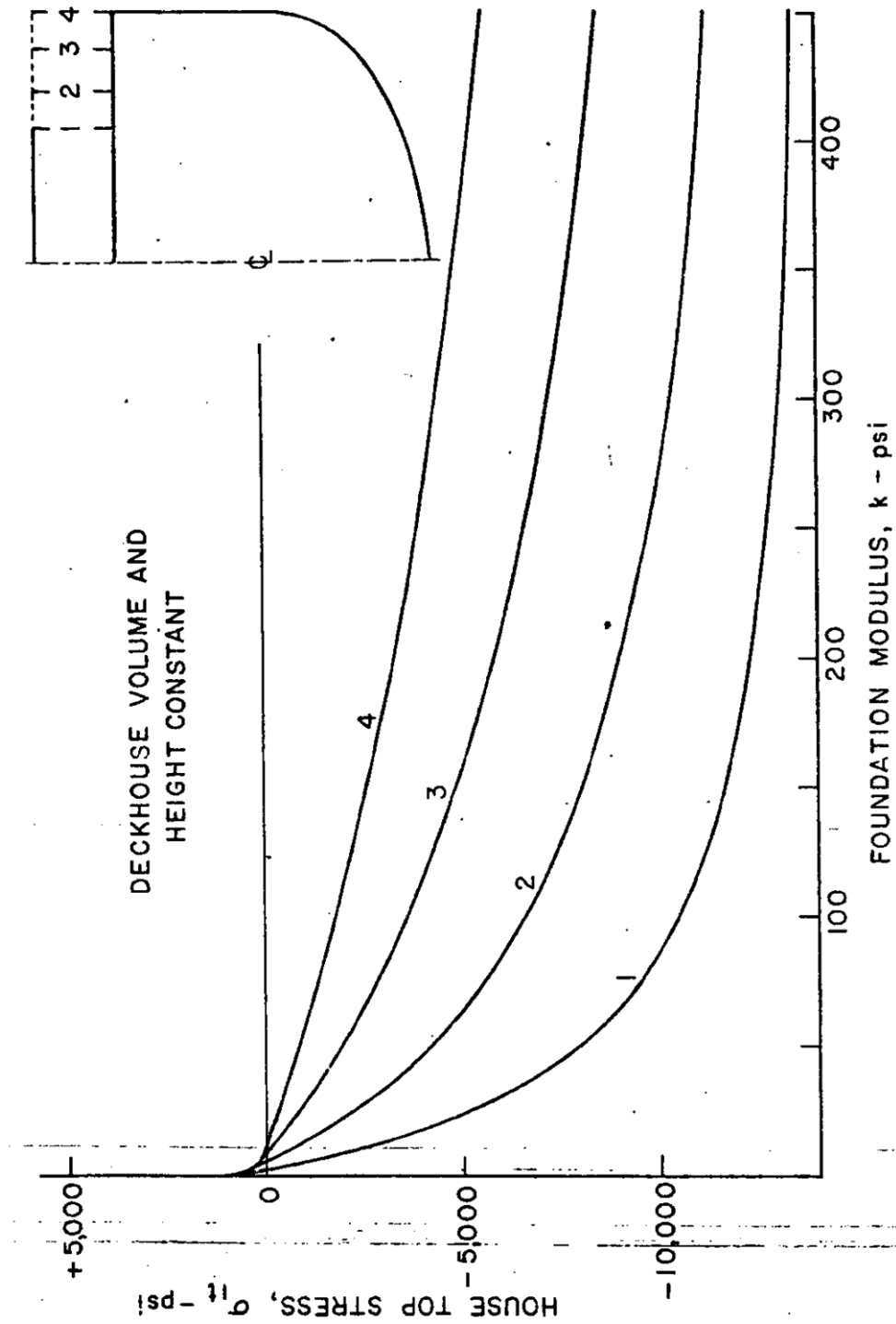
Σχήμα ΣΤ.1: Στοιχεία τεσσάρων περιπτώσεων συνεργασίας γάστρας-υπερστεγάσματος [40]



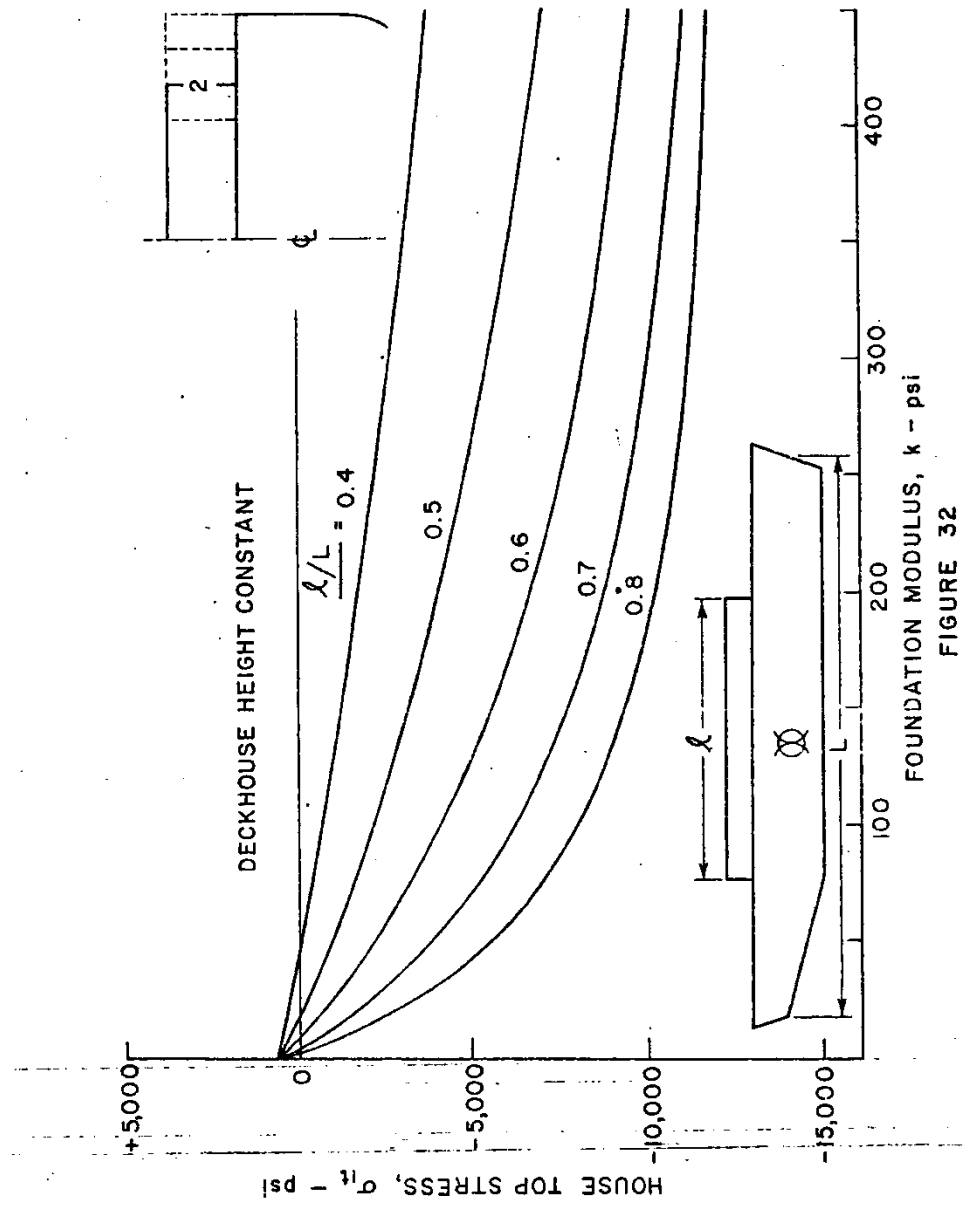
Σχήμα ΣΤ.2: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στον πυθμένα της γάστρας [40]



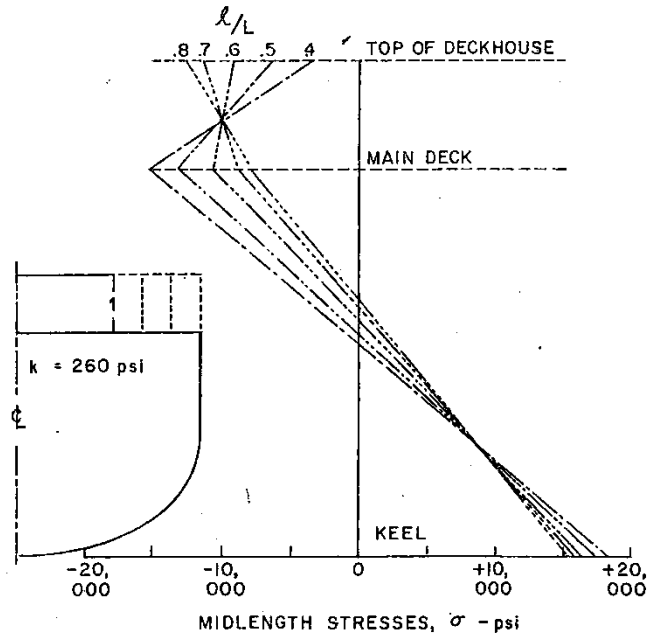
Σχήμα ΣΤ.3: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στο ανώτατο κατάστρωμα της γάστρας [40]



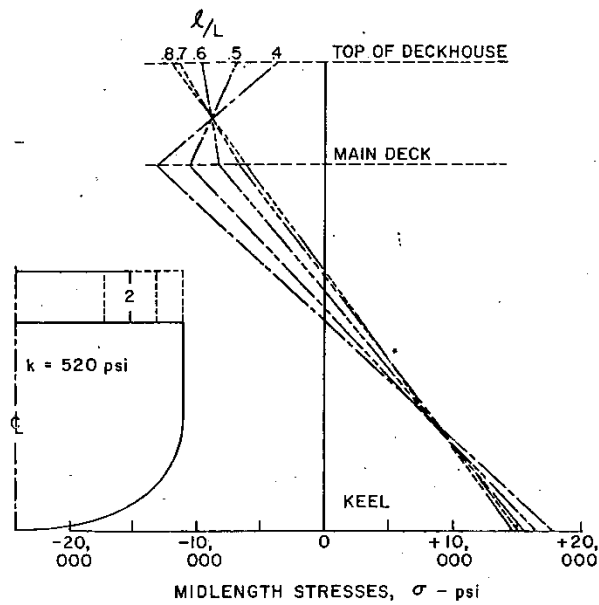
Σχήμα ΣΤ.4: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στην κορυφή του υπερστεγάσματος [40]



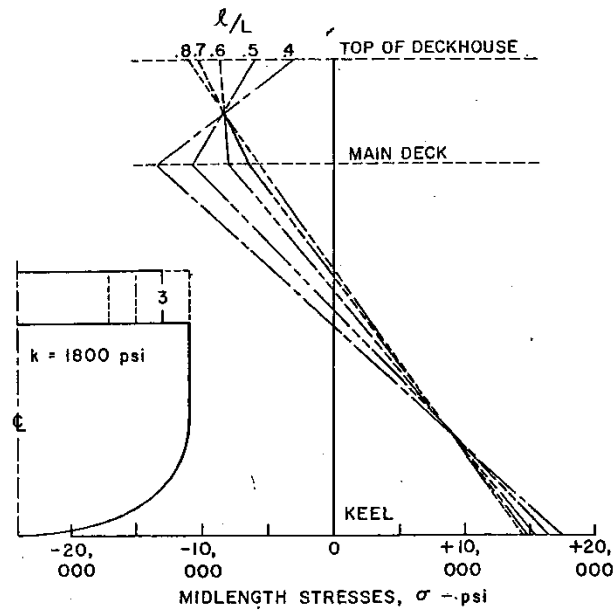
Σχήμα ΣΤ.5: Καμπύλες τάσεων-ακαμψίας στην κορυφή του υπερστεγάσματος [40]



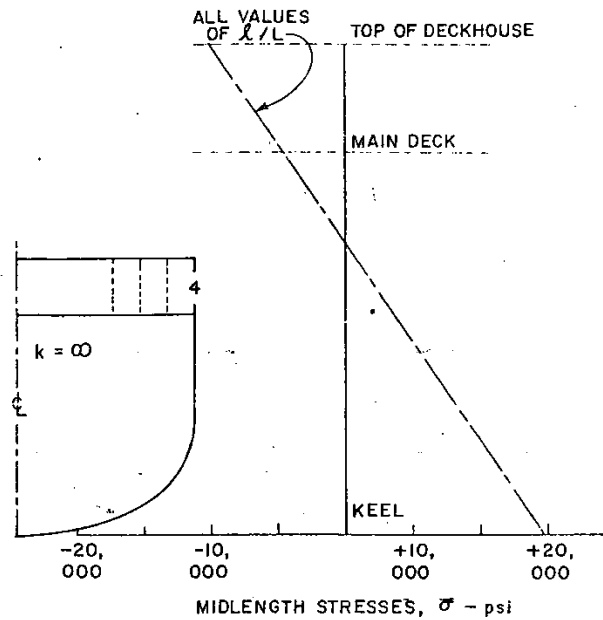
Σχήμα ΣΤ.6: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (1) [40]



Σχήμα ΣΤ.7: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (2) [40]



Σχήμα ΣΤ.8: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (3) [40]



Σχήμα ΣΤ.9: Κατανομές τάσεων ανάλογα με το λόγο μήκους υπερστεγάσματος προς πλοίου (4) [40]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ - Φωτογραφίες από πλευρικά ανοίγματα Ε/Γ-Ο/Γ Έλυρος



Σχήμα Ζ.1: Κυκλικό άνοιγμα υπερκατασκευής και ενίσχυσή του



Σχήμα Ζ.2: Ορθογωνικό άνοιγμα υπερκατασκευής και ενίσχυσή του



Σχήμα Ζ.3: Διάταξη ορθογωνικών ανοιγμάτων υπερκατασκευής και ενίσχυσή τους (1/2)



Σχήμα Ζ.4: Διάταξη ορθογωνικών ανοιγμάτων υπερκατασκευής και ενίσχυσή τους (2/2)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η - Σύγκριση της μεθόδου ΣΔ και της μεθόδου των ΠΣ

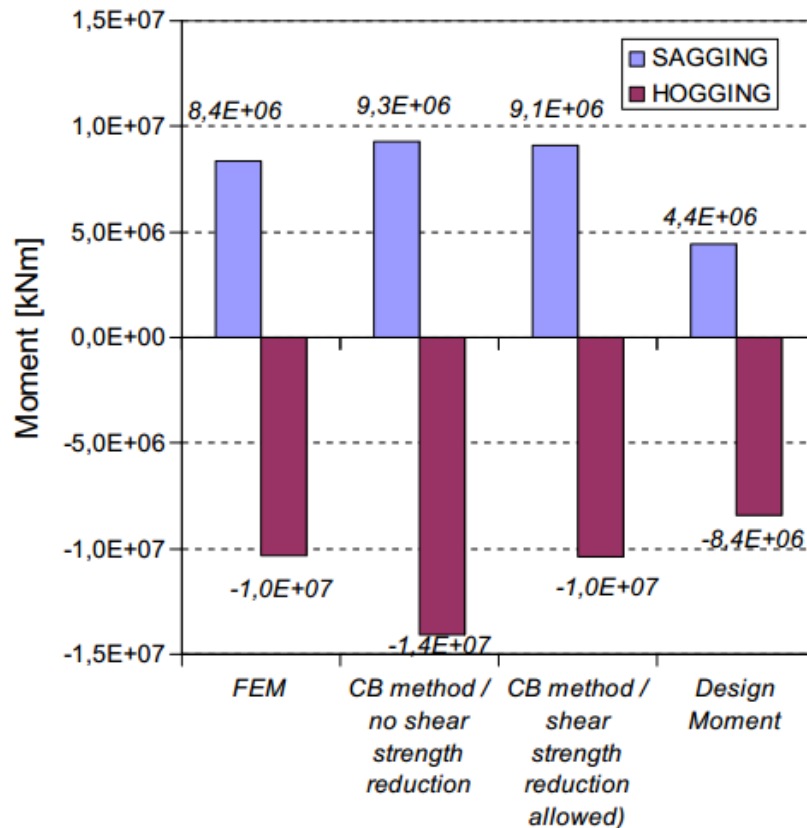
Για το πλοίο που φαίνεται στο Σχήμα 5.18, εφαρμόστηκαν η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και η μέθοδος σύζευξης δοκών. Οι τιμές της μέγιστης ροπής σε sagging και hogging που προέκυψαν παρουσιάζονται στο Σχήμα Η.1. Με τη σύγκριση των μεγίστων ροπών προκύπτουν πολλά ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Πρώτα από όλα, η συσχέτιση των αποτελεσμάτων είναι υψηλή, αποδεικνύοντας ότι η μέθοδος σύζευξης δοκών εφαρμόζεται για την ανάλυση της μέγιστης αντοχής των κρουαζιερόπλοιων, όταν η γάστρα θεωρείται ότι είναι πρισματική. Στην περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, η μέγιστη αντοχή στη φόρτιση Hogging είναι περίπου 25% υψηλότερη από εκείνη σε Sagging (Σχήμα Η.1).

Η μείωση της διατμητικής αντοχής των ενισχυμένων πλαισίων μετά το διατμητικό λυγισμό είναι ένα σημαντικό ζήτημα, δεδομένου ότι έχει μια σημαντική επίδραση στη μέγιστη αντοχή του πλοίου. Τα αποτελέσματα από τη CBM δείχνουν ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή της γάστρας σε Hogging μειώνεται δραστικά, σχεδόν 30%, όταν λαμβάνεται υπόψη η μείωση της διατμητικής αντοχής. Αυτό προκαλεί ισχυρό διαχωρισμό της υπερκατασκευής από τη γάστρα, ιδιαίτερα στη φόρτιση Hogging. Κατά τη φάση της αρχικής φόρτισης, η γάστρα-υπερκατασκευή συμπεριφέρεται λίγο πολύ σαν μια ενιαία δομή, αλλά καθώς προσεγγίζεται η μέγιστη, οι δύο δομικές μονάδες τείνουν να καμφθούν ως μεμονωμένα δοκάρια.

Είναι σημαντικό να συγκριθούν τα αποτελέσματα με τα φορτία σχεδιασμού που δόθηκαν από τους Νηογνώμονες. Για τη σύγκριση αυτή, χρησιμοποιήθηκαν οι κανονισμοί του DNV. Σύμφωνα με τους κανόνες, η ροπή σχεδίασης αποτελείται από το άθροισμα των ροπών κάμψης σε ήρεμο νερό και κυματισμένο. Τα κρουαζιερόπλοια είναι πάντα σε συνθήκη Hogging σε ήρεμο νερό, όπου η δύναμη άνωσης είναι συγκεντρωμένη στην περιοχή της μέσης τομής του πλοίου, λόγω του χαμηλού συντελεστή γάστρας και του βάρους του πλοίου που είναι πιο ισομερώς κατανομημένο. Ωστόσο, πρέπει να αναγνωριστεί ότι το Lightship του πλοίου παίζει πιο σημαντικό ρόλο από ότι το νεκρό βάρος. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής, υπάρχει η ανάγκη για μεγάλες εγκοπές κοντά στο μέσο του πλοίου, προκαλώντας την εξουδετέρωση των τάσεων που προκαλούνται από τη φόρτιση σε ήρεμο νερό. Έτσι, η συνολική ροπή κάμψης σε κατάσταση Sagging υπολογίζεται υποθέτοντας μηδενική τιμή για την ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό. Φυσικά, στην κατάσταση Hogging, συμπεριλαμβάνεται η μέγιστη τιμή της ροπής κάμψης σε ήρεμο νερό. Με βάση αυτό, οι καμπτικές ροπές σχεδίασης σε hogging και sagging παρουσιάζονται στο Σχήμα Η.1. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η αναλογία μεταξύ της μέγιστης ροπής και της ροπής σχεδίασης είναι περίπου 1.75 για την κατάσταση Sagging και 1.2 για την κατάσταση Hogging.

Η σύγκριση της ροπής σχεδίασης σε Hogging στην καμπύλη ροπής-εκτροπής στο Σχήμα Η.2, αποκαλύπτει ότι η διαδικασία λυγισμού είχε ξεκινήσει πριν η ροπή φτάσει τη ροπή σχεδίασης. Αυτό το εξαιρετικό αποτέλεσμα οφείλεται στην επιλεγμένη προσέγγιση της ανάλυσης που βασίζεται στην υπόθεση της πρισματικής δοκού. Έτσι, αποκλείστηκε η τοπική ενίσχυση της δομής για παράδειγμα στις περιοχές που έχουν υψηλές διατμητικές τάσεις. Πιο συγκεκριμένα, σε φόρτιση Hogging, η πρώτη αστοχία εισάγεται λόγω του διατμητικού λυγισμού στην περιοχή της εσοχής του καταστρώματος λέμβων (recess area) που λαμβάνει χώρα στο ένα τέταρτο του μήκους των δυο άκρων. Έπειτα, διατμητική κατάρρευση εξελίσσεται προς τη μέση τομή, προκαλώντας το διαχωρισμό της γάστρας από την υπερκατασκευή. Έπειτα, η διαμήκης φρακτική θα καταρρεύσει λόγω του συνδυασμού των ορθών και διατμητικών τάσεων. Τελικά, η μέγιστη αντοχή φθάνεται όταν η κατασκευή του πυθμένα αστοχήσει (Σχήμα Η.4).



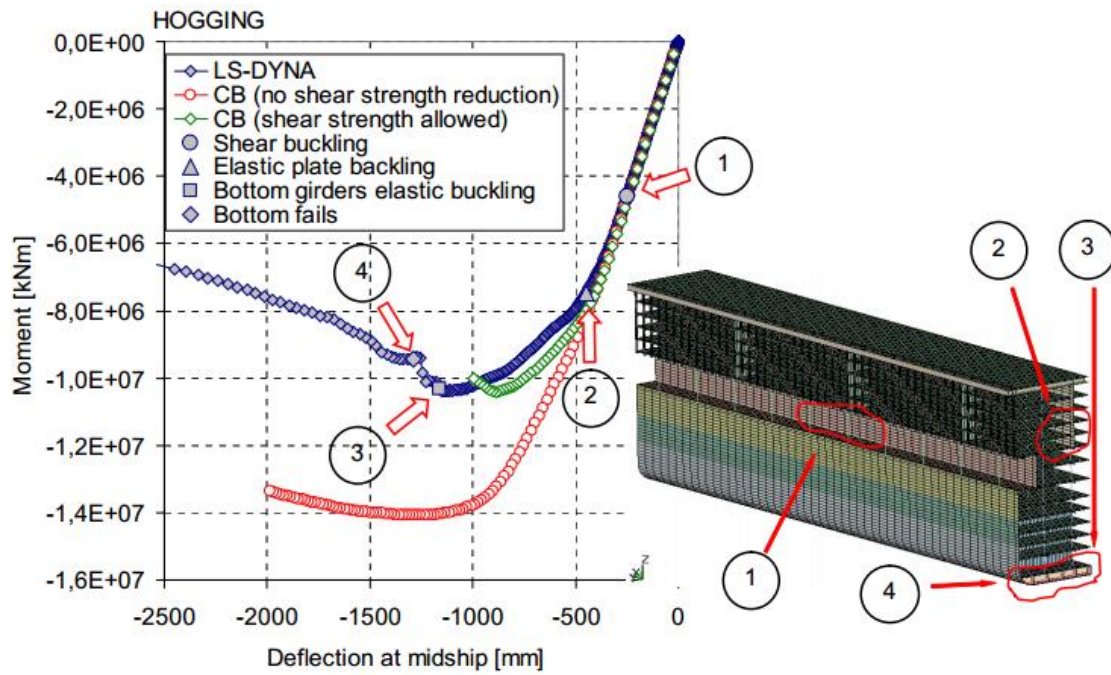
Σχήμα Η.1: Σύγκριση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και συζευγμένων δοκών [72]

Αντίστοιχα, σε φόρτιση Sagging, η κατασκευαστική αστοχία ξεκινά με την κατάρρευση λόγω διάτμησης (shear collapse) στην εσοχή του καταστρώματος λέμβων και την ίδια στιγμή λαμβάνει χώρα ο ελαστικός λυγισμός των ανώτερων καταστρωμάτων. Η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν η αστοχία εξελίσσεται στα κατώτερα καταστρώματα (βλέπε Σχήμα Η.3 και Σχήμα Η.5).

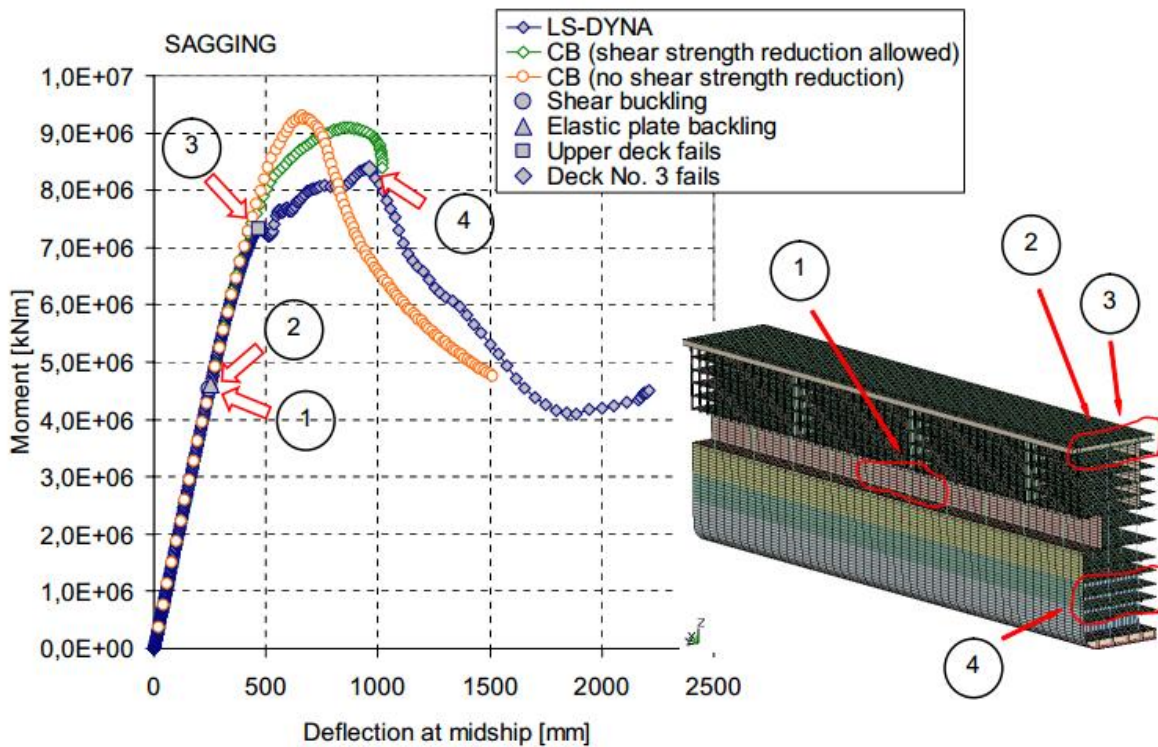
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η διατμητική αντοχή των διαμήκων φρακτών και των πλευρικών κατασκευών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο. Επίσης η επίδραση των εγκάρσιων φρακτών στην αύξηση της αντοχής του πλοίου είναι μικρή. Ωστόσο, οι εγκάρσιες φρακτές μπορεί να ξεκινήσουν μια αστοχία στην ένωση μεταξύ της φρακτής και της γάστρας. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να φανεί καθαρά στην κατάσταση hogging όπου η κατάρρευση ξεκίνησε στην εγκάρσια φρακτή.

Θα πρέπει να τονισθεί το γεγονός ότι από τη μέθοδο CB προέκυψε 9% υψηλότερο καμπτική ροπή σε κατάσταση Sagging από ότι στη μέθοδο FE, ενώ σε Hogging μόλις 1%. Έτσι, διαπιστώνεται ότι είναι μια αξιόπιστη μέθοδος, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στα αρχικά στάδια της σχεδίασης.

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα ζητήματα που παρουσιάστηκαν στο παράρτημα αυτό μπορεί κανείς να ανατρέξει στο [72].



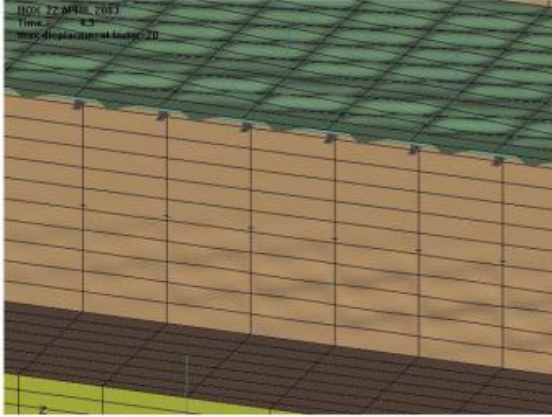
Σχήμα Η.2: Καμπύλη ροπής-εκτροπής σε κατάσταση Hogging [72]



Σχήμα Η.3: Καμπύλη ροπής-εκτροπής σε κατάσταση Sagging [72]

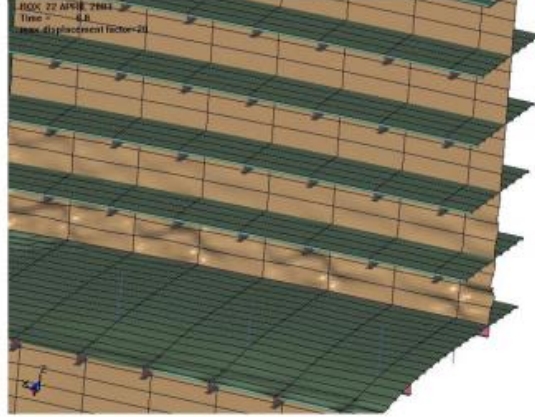
① Διαμητικός λυγισμός

$$M=4.53 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



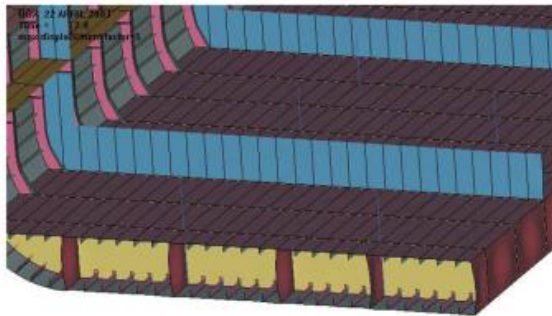
② Ελαστικός λυγισμός ελάσματος

$$M=4.60 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



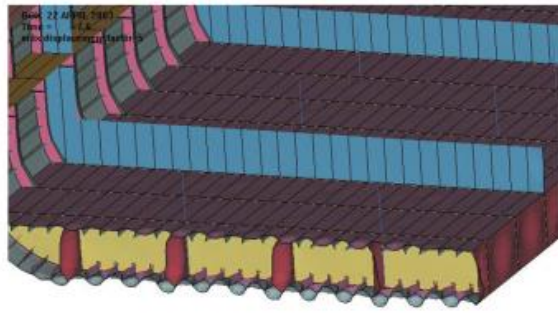
③ Ελαστικός λυγισμός σταθμίδων πυθμένα

$$M=10.30 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



④ Αστοχία πυθμένα

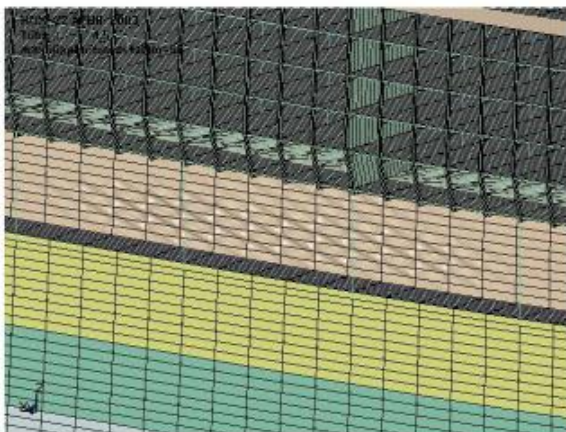
$$M=9.43 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



Σχήμα Η.4: Μορφές αστοχίας σε κατάσταση Hogging [72]

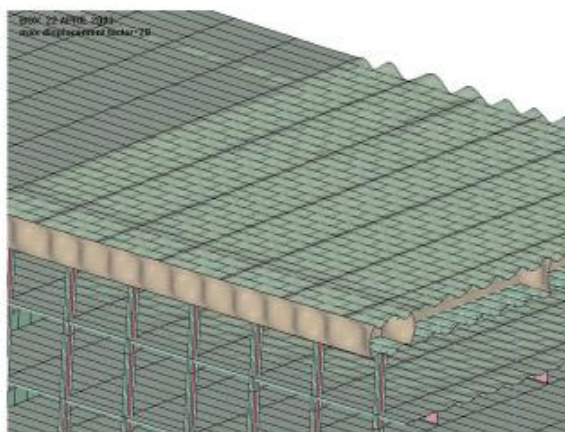
① Διατμητικός λυγισμός

$$M=4.53 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



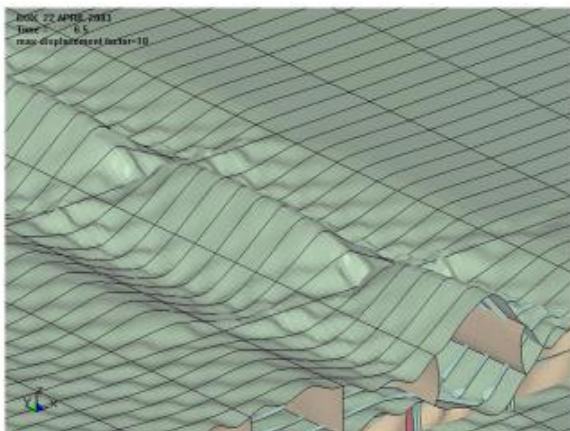
② Ελαστικός λυγισμός άνω καταστρώματος

$$M=4.60 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



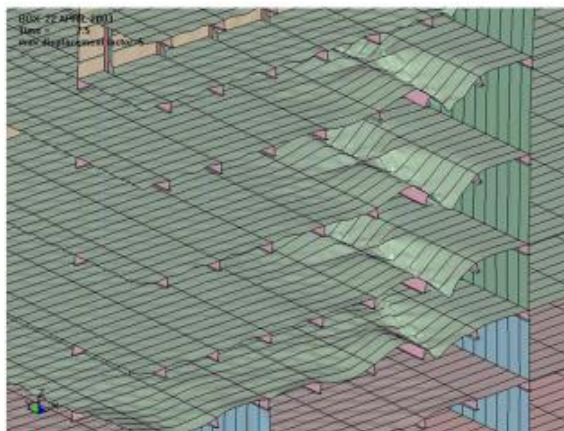
③ Αστοχία άνω καταστρώματος

$$M=7.32 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



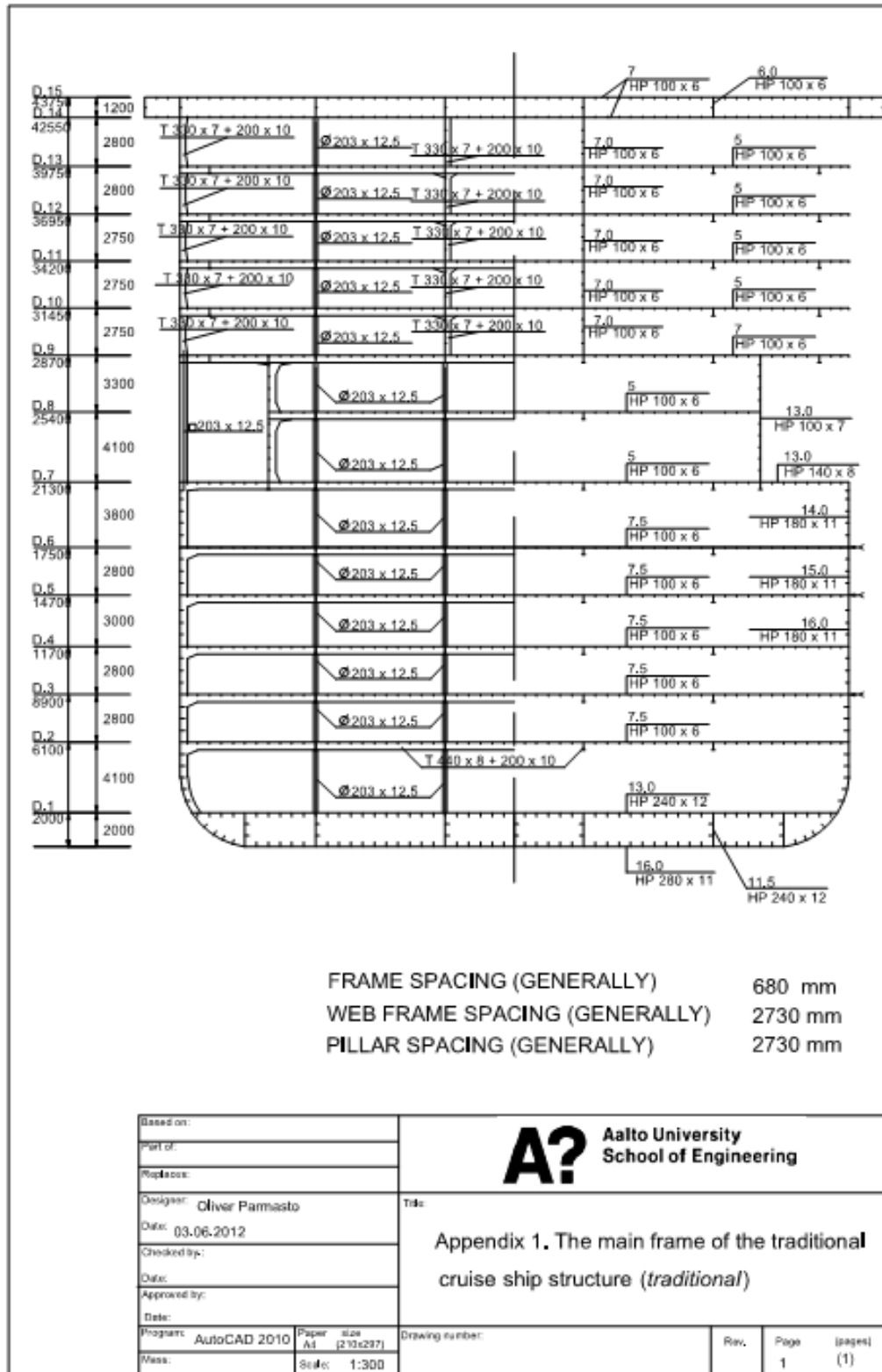
④ Αστοχία 3ου καταστρώματος

$$M=8.37 \cdot 10^6 \text{ kNm}$$



Σχήμα Η.5: Μορφές αστοχίας σε κατάσταση Sagging [72]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ - Σχέδιο μέσης τομής συμβατικού κρουαζιερόπλοιου



Σχήμα Θ.1: Σχέδιο μέσης τομής συμβατικού κρουαζιερόπλοιου [39]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Απαιτήσεις ABS για τη διαστασιολόγηση των κρουαζιερόπλοιων

Πυθμένας

Ένα διτύθμενο πρέπει να ενσωματώνεται στην κατασκευή και να εκτείνεται από την προωαία φρακτή έως την πρυμναία φρακτή, ή όσα πλησιέστερα προς αυτές είναι εφικτό. Για πλοία μεταξύ 61m (200ft) και 76m (250ft) σε μήκος, ο διπλός πυθμένας μπορεί να παραληφθεί από το χώρο του μηχανοστασίου. Επιπλέον, δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί διτύθμενο στην περίπτωση των ενδιάμεσων δεξαμενών (deer tanks) μετρίου όγκου, με την προϋπόθεση ότι η ασφάλεια του πλοίου δεν θα επηρεαστεί σε περίπτωση βλάβης του πυθμένα ή της πλευράς στην περιοχή αυτή.

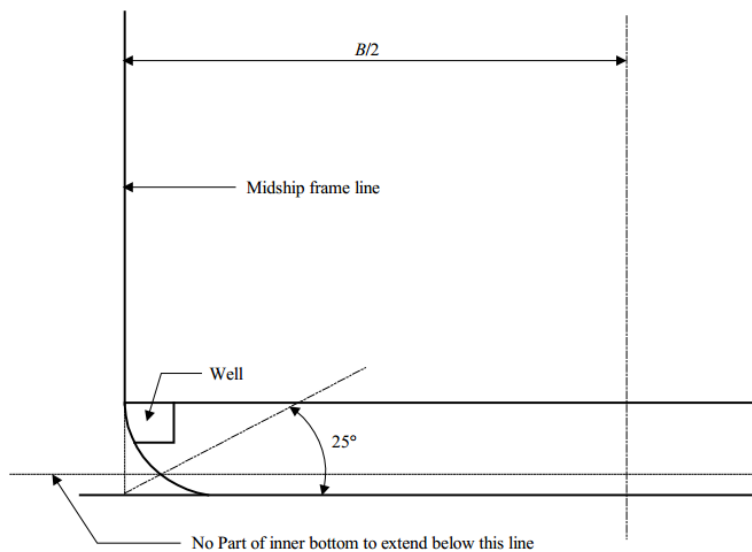
Ενδεικτικά αναφέρεται ότι σύμφωνα με τον αμερικανικό Νηογνώμονα (ABS), για πλοία με μήκος μικρότερο από 427m (1400ft), το ύψος του διτύθμενου σε m (ft) δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το ακόλουθο:

$$d_{DB} = 32B \times 10^{-3} + c\sqrt{d} \quad (1.1)$$

όπου:

- d_{DB} = ύψος του διτύθμενου, σε m (ft)
- B = πλάτος πλοίου, σε m (ft)
- c = 0.19 (0.344)
- d = βύθισμα γάστρας (molded) πλοίου, σε m (ft)

Ο εσωτερικός πυθμένας πρέπει να εκτείνεται μέχρι τις πλευρές του πλοίου με τέτοιο τρόπο ώστε να προστατεύεται ο πυθμένας στην καμπύλη του υδροσυλλέκτη. Τέτοια προστασία θεωρείται ικανοποιητική εάν περιγράφεται από τη γεωμετρία όπου παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα Ι.1: Μορφοποίηση του εσωτερικού πυθμένα [106]

Για λόγους πληρότητας, καταγράφεται ότι τα φρεάτια αποστράγγισης (drain wells) που κατασκευάζονται στο διπύθμενο σε συνδυασμό με τις διατάξεις αποστράγγισης στα αμπάρια κλπ., δεν πρέπει να εκτείνονται κατακόρυφα περισσότερο από το αναγκαίο. Συγκεκριμένα το ύψος των φρεατίων δεν πρέπει να εκτείνεται προς την βασική γραμμή αναφοράς λιγότερο από 460mm (18in.), από το ύψος του διπύθμενο, αλλά και να μην εκτείνεται κάτω από το οριζόντιο επίπεδο που φαίνεται στο Σχήμα Ι.1. Η μόνη εξαίρεση στο τελευταίο είναι ένα φρεάτιο αποστράγγισης που εκτείνεται κάτω από το οριζόντιο επίπεδο στο πρυμναίο άκρο της σήραγγας του ελικοφόρου άξονα (shaft tunnel). Τέλος, άλλου είδους διατάξεις φρεατίων (π.χ. για το λιπαντικό της κύριας μηχανής κάτω από την κύρια μηχανή) θα πρέπει να εξεταστούν υπό την προϋπόθεση ότι παρέχουν ισοδύναμη προστασία με εκείνη που παρέχεται από το διπύθμενο.

Πλευρική Κατασκευή

Το έλασμα και οι νομείς της πλευρικής κατασκευής πρέπει να είναι σε συμφωνία με τους Γενικούς Κανονισμούς. Ωστόσο, θα πρέπει να είναι σε συμφωνία και με τις ακόλουθες, ειδικές διατάξεις που αφορούν τα κρουαζιερόπλοια.

Όσον αφορά το πλευρικό έλασμα που τοποθετείται σε απόσταση μεγαλύτερη από 2.3m (7.5 ft) πάνω από το κατάστρωμα εξάλων δεν πρέπει να είναι μικρότερο (σε πάχος) από αυτό που δίνεται από την ακόλουθη σχέση, εκτός των περιπτώσεων: α)πρώραθεν του 0.25L από την πωραία κάθετο και, β)πρύμνηθεν του 0.25L από την πρυμναία κάθετο.

$$t = 15.5 s \times 10^{-4} \sqrt{(L - 15.24) \left(\frac{d}{D_s} \right)} + 1.5 \text{ mm} , \text{ για } L \leq 305m \quad (1.2)$$

$$t = 12.1 s \times 10^{-4} \sqrt{(L + 175) \left(\frac{d}{D_s} \right)} + 1.5 \text{ mm} , \text{ για } 305 < L \leq 427m \quad (1.3)$$

$$t = 85.6 s \times 10^{-5} \sqrt{(L - 50) \left(\frac{d}{D_s} \right)} + 0.06 \text{ in} , \text{ για } L \leq 1000ft \quad (1.4)$$

$$t = 66.8 s \times 10^{-5} \sqrt{(L + 574) \left(\frac{d}{D_s} \right)} + 0.06 \text{ in} , \text{ για } 1000 < L \leq 1400ft \quad (1.5)$$

όπου:

- s = ισαπόσταση των εγκάρσιων νομέων ή των διαμήκων ενισχύσεων, σε mm (in.)
- L = μήκος αντοχής του πλοίου, σε m (ft.)
- d = βύθισμα χωρίς το πάχος των ελασμάτων, σε m (ft.)
- D_s = κοίλο χωρίς το πάχος των ελασμάτων μετρούμενο στο κατάστρωμα αντοχής, σε m (ft.)

Σημειώνεται ότι ο λόγος d/D_s που χρησιμοποιείται στις παραπάνω εξισώσεις δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερος από:

$$\left(\frac{d}{D_s}\right)_{min} \geq 43L \times \frac{10^{-3}}{D_s} \quad (1.6)$$

Όπου υπάρχουν μεγάλα ανοίγματα στο πλευρικό κέλυφος για την πρόσβαση των επιβατών στο πλοίο, την εισαγωγή των αποσκευών κλπ., θα πρέπει να αποφεύγονται οι ασυνέχειες στη γάστρα και στις υπερκατασκευές. Εν γένει, θα πρέπει οι πόρτες και τα ανοίγματα να συμμορφώνονται με τους Γενικούς Κανονισμούς.

Όπου τα μεγάλα ανοίγματα βρίσκονται σε περιοχές υψηλών διατμητικών δυνάμεων, όπως συμβαίνει στις περιοχές μεταξύ 0.2L – 0.3L και 0.7L – 0.85L από την πρυμναία κάθετο, θα πρέπει να παρέχονται επιθέματα (insert plates). Τα επιθέματα πρέπει να είναι υλικού Class III, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.1. Επίσης, θα πρέπει να έχουν γωνίες με μεγάλη ακτίνα. Σύμφωνα με τον ABS, η ακτίνα αυτή πρέπει να είναι ίση με το 10% του πλάτους του ανοίγματος, αλλά δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 460mm (18 in.).

Πίνακας 1.1: Κατάταξη των υλικών σύμφωνα με τον ABS [106]

Thickness <i>t</i> mm (in.)	Material Class		
	I	II	III
$t \leq 15$ ($t \leq 0.60$)	A ⁽²⁾ , AH	A, AH	A, AH
$15 < t \leq 20$ ($0.60 < t \leq 0.79$)	A, AH	A, AH	B, AH
$20 < t \leq 25$ ($0.79 < t \leq 0.98$)	A, AH	B, AH	D, DH
$25 < t \leq 30$ ($0.98 < t \leq 1.18$)	A, AH	D, DH	D ⁽¹⁾ , DH
$30 < t \leq 35$ ($1.18 < t \leq 1.38$)	B, AH	D, DH	E, EH
$35 < t \leq 40$ ($1.38 < t \leq 1.57$)	B, AH	D, DH	E, EH
$40 < t \leq 100$ ($1.57 < t \leq 4.00$)	D, DH	E, EH	E, EH

Όταν τοποθετούνται φινιστρίνια (port-lights) στο πλευρικό έλασμα, οι θέσεις και τα μεγέθη τους πρέπει να αναφέρονται ξεκάθαρα στο σχέδιο της Μέσης Τομής, όταν υποβληθεί πρώτη φορά για έγκριση (approval). Τέλος, οι λεπτομέρειες των πλασιών των θυρών (doorframes) και των σχετικών συγκολλήσεων πρέπει να υποβάλλονται και αυτές για εξέταση.

Για το ζωστήρα (Sheerstrake) το ελάχιστο πλάτος, *b*, σε m (ft), στην περιοχή των 0.4L περί τη μέση τομή πρέπει να λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$b = c + 5L \times 10^{-3} \quad , \text{όπου } b \leq 1.8\text{m (5.9 ft)} \quad (1.7)$$

όπου:

- *b* = το πλάτος του ζωστήρα, σε m (ft)
- *c* = 0.8 (2.625)
- *L* = μήκος (αντοχής) του πλοίου, σε m (ft)

Το πάχος του ζωστήρα δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος του ελάσματος του λώρου του καταστρώματος αντοχής (strength deck stringer plate), αλλά ούτε και πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος του γειτονικού πλευρικού ελάσματος. Ακόμη, στην περιοχή ασυνεχειών των υπερκατασκευών, το πάχος του ζωστήρα πρέπει να προσαυξηθεί κατά 25%, αλλά η αύξηση αυτή δεν πρέπει να ξεπερνά τα 6.5mm (0.25 in.). Βέβαια, η απαίτηση αυτή μπορεί να τροποποιηθεί, όπου οι ασυνέχειες στο πρόσθεγο ή

στο επίστεγο είναι αισθητά πέρα την έκταση των 0.5L από τη μέση τομή. Η ανώτερη άκρη του ζωστήρα πρέπει να είναι ομαλή και απαλλαγμένη από εγκοπές.

Επίσης, για τους νομείς (frames), είτε διαμήκεις είτε εγκάρσιοι, η κατασκευή τους πρέπει γενικώς να είναι σε συμφωνία με τους «Γενικούς Κανονισμούς». Ειδικότερα, για διαμήκεις ενισχύσεις κάτω από το Κατάστρωμα Εξάλων ή το Κατάστρωμα Υποδιαίρεσης, οποιοδήποτε είναι υψηλότερο, η ροπή αντίστασης (SM) πρέπει να λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kchs\ell^2Q \text{ cm}^3 (\text{in}^3) \quad (1.8)$$

όπου:

- $k = 7.8 (4.1 \times 10^{-3})$
- $c = 0.95$
- $s =$ ισαπόσταση των διαμήκων ενισχύσεων του πλευρικού κελύφους, σε m (ft)
- $h = 0.75(D_{fd} - z)$ m (ft) ,για $z \leq 0.5D_{fd}$ αλλά το h δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο του $0.5D_{fd}$ m (ft)
- $h = D_{fd} - z$ m (ft) ,για $z > 0.5D_{fd}$ αλλά το h δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από:
 - 2.13 m (7 ft) ,για $L \leq 176$ m (580 ft)
 - $h_1 + 5L \times 10^{-3}$ m (ft) ,για $L > 176$ m (580 ft)
- $h_1 = 1.25 (4.1)$
- $\ell =$ ανυποστήρικτο μήκος ενισχύσεων μεταξύ των ενεργών σημείων στήριξης (effective supports), σε m (ft), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2
- $D_{fd} =$ κατακόρυφη απόσταση από τη Βασική Γραμμή Αναφοράς μέχρι το κατάστρωμα εξάλων/στεγανών στη Μέση Τομή, σε m (ft)
- $z =$ κατακόρυφη απόσταση από τη Βασική Γραμμή Αναφοράς μέχρι το υπό μελέτη διάμηκες ενισχυτικό του πλευρικού κελύφους, σε m (ft)
- $L =$ μήκος αντοχής του πλοίου, σε m (ft)
- $Q =$ συντελεστής υλικού
 - = 1.0 ,για αντοχή κοινού χάλυβα
 - = 0.78 ,για αντοχή H32 χάλυβα
 - = 0.72 ,για αντοχή H36 χάλυβα
 - = 0.68 ,για αντοχή H40 χάλυβα

Η ροπή αντίστασης του κάθε διαμήκους ενισχυτικού του πλευρικού κελύφους κάτω από το κατάστρωμα εξάλων/στεγανών δεν πρέπει να είναι επίσης μικρότερη από αυτή που απαιτείται για το πρώτο διάμηκες ενισχυτικό του πλευρικού κελύφους πάνω από το κατάστρωμα εξάλων/στεγανών.

Αντίστοιχα, για τις διαμήκεις ενισχύσεις πάνω από το Κατάστρωμα Εξάλων ή το Κατάστρωμα Στεγανών (Υποδιαίρεσης), οποιοδήποτε είναι υψηλότερο, η ροπή αντίστασης SM πρέπει να λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kchs\ell^2Q \text{ cm}^3 (\text{in}^3) \quad (1.9)$$

όπου:

- $k = 7.8 (4.1 \times 10^{-3})$
- $c = 0.95$
- $s =$ ισαπόσταση των διαμήκων ενισχύσεων του πλευρικού κελύφους, σε m (ft)
- $\ell =$ ανυποστήρικτο μήκος ενισχύσεων μεταξύ των ενεργών σημείων στήριξης (effective

supports), σε m (ft), όπως φαίνεται στο Σχήμα Ι.2

- $h = 0.5 \alpha [(b f) - \gamma] \text{ m (ft)}$
 = το h δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από $1.25 + 5L \times 10^{-3} \text{ m}$ ($4.1 + 5L \times 10^{-3} \text{ ft}$),
 Ενώ το L δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 250 m (820 ft).
- $\alpha = 0.5 + 6.67L \times 10^{-3}$ ($0.5 + 2.03L \times 10^{-3}$), ενώ το L δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 300 (984 ft)
- $b = 1.0 + \left[\frac{(x/L) - 0.45}{c_b + 0.2} \right]^2$, για $x/L \leq 0.45$
 $= 1.0 + 1.5 \left[\frac{(x/L) - 0.45}{c_b + 0.2} \right]^2$, για $x/L > 0.45$
- c_b = συντελεστής γάστρας πλοίου, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερος από 0.6 και μεγαλύτερος από 0.8
- x = απόσταση από την πρυμναία κάθετο μέχρι το μέσο του ανυποστήρικτου μήκους της υπό μελέτη διαμήκου ενίσχυσης του πλευρικού κελύφους, σε m (ft)
- L = μήκος αντοχής του πλοίου, σε m (ft)
- $f = \left(3.52 - 929/L^{1.5} \right)^2$ σε m, αλλά το μήκος L όχι μεγαλύτερο από 275 m
 $= \left(6.375 - 10000/L^{1.5} \right)^2$ σε ft, αλλά το μήκος L όχι μεγαλύτερο από 900 ft
- γ = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από την θερινή ίσαλο πλεύσης (Summer Load Waterline) μέχρι την υπό μελέτη διαμήκη ενίσχυση του πλευρικού κελύφους
- Q = συντελεστής υλικού
 $= 1.0$, για αντοχή κοινού χάλυβα
 $= 0.78$, για αντοχή H32 χάλυβα
 $= 0.72$, για αντοχή H36 χάλυβα
 $= 0.68$, για αντοχή H40 χάλυβα

Όσον αφορά τους νομείς (transverse frames), κάτω από το κατώτερο κατάστρωμα, η ροπή αντίστασης (SM) λαμβάνεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$SM = cs\ell^2(h + kb h_1/30)(7 + 45/\ell^3)Q \text{ σε } cm^3, \text{ για } l \leq 3.83 \text{ m} \quad (I.10)$$

$$SM = 4.74cs\ell^2(h + b h_1/45 k_1)Q \text{ σε } cm^3, \text{ για } l > 3.83 \text{ m} \quad (I.11)$$

$$SM = cs\ell^2(h + kb h_1/100)(3.7 \times 10^{-3} + 0.8/\ell^3)Q \text{ σε } in^3, \text{ για } l \leq 12.57 \text{ ft} \quad (I.12)$$

$$SM = 2.5cs\ell^2 10^{-3}(h + b h_1/150 k_1)Q \text{ σε } in^3, \text{ για } l > 12.57 \text{ ft} \quad (I.13)$$

όπου:

- $c = 1.0$ για $l \leq 3.81 \text{ m}$ (12.5 ft)
 $= 1.5$ για $l > 3.81 \text{ m}$ (12.5 ft)
- s = ισαπόσταση νομέων, σε m (ft)
- ℓ = ανυποστήριστο μήκος νομέα, σε m (ft), όπως φαίνεται στο Σχήμα Ι.3, αλλά το ℓ που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 2.13 m (7 ft)
- h = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το μέσο του ℓ μέχρι τη γραμμή φόρτωσης, ή 0.5 l , οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο
- b = οριζόντια απόσταση, σε m (ft), από το εξωτερικό τμήμα του νομέα μέχρι την πρώτη σειρά των

στηρίξεων του καταστρώματος όπως για παράδειγμα οι διαμήκεις σταθμίδες του καταστρώματος.

- h_1 = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το κατάστρωμα στην κορυφή του νομέα μέχρι το κατάστρωμα εξάλων ή στεγανών, όποιο είναι μεγαλύτερο, συν το ύψος όλων των χώρων των ενδιάμεσων καταστρωμάτων (tween-deck spaces), ή συν 2.44m (8 ft) εφόσον είναι μεγαλύτερο. Όπου η προβλεπόμενη φόρτιση του καταστρώματος ρ είναι γνωστή, το ύψος των ενδιάμεσων καταστρωμάτων μπορεί να ληφθεί ίσο με ρ/ω για τον υπολογισμό του h_1 .
- ρ = προβλεπόμενη φόρτιση καταστρώματος, σε kN/m^2 (kgf/m^2 , lbf/ft^2), αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερη από την ελάχιστη φόρτιση καταστρώματος που δίνεται στον Πίνακα I.2
- $\omega = 7.06$ (720, 45)
- $k = 0.0$ όπου το κατάστρωμα είναι διαμήκως ενισχυμένο
= ο αριθμός των ισαποστάσεων των νομέων μεταξύ των ενισχυμένων, όπου το κατάστρωμα είναι εγκαρσίως ενισχυμένο
- $k_1 = 1.0$ όπου το κατάστρωμα είναι διαμήκως ενισχυμένο
= ο αριθμός των ισαποστάσεων των νομέων μεταξύ των ενισχυμένων, όπου το κατάστρωμα είναι εγκαρσίως ενισχυμένο
- Q = συντελεστής υλικού
= 1.00 ,για αντοχή κοινού χάλυβα
= 0.78 ,για αντοχή H32 χάλυβα
= 0.72 ,για αντοχή H36 χάλυβα
= 0.68 ,για αντοχή H40 χάλυβα

Τέλος, για εγκάρσιους νομείς ανάμεσα στο κατώτερο κατάστρωμα και το κατάστρωμα αντοχής, η ροπή αντίστασης (SM) πρέπει να λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = cs\ell^2(7 + 45/\ell^3)KQ \text{ σε } \text{cm}^3 \quad (\text{I.14})$$

$$SM = cs\ell^2(3.7 \times 10^{-3} + 0.8/\ell^3)KQ \text{ σε } \text{in}^3 \quad (\text{I.15})$$

όπου:

- $c = 1.2$ για το ανώτατο ενδιάμεσο κατάστρωμα, αυτό που βρίσκεται ακριβώς κάτω από το κατάστρωμα αντοχής
= 1.0 για όλα τα άλλα ενδιάμεσα καταστρώματα
- s = ισαπόσταση εγκάρσιων νομέων, σε m (ft)
- ℓ = ύψος ενδιάμεσου καταστρώματος ή ανυποστήρικτου μήκους κατά το μήκος του νομέα, οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο, σε m (ft)
- k = συντελεστής αρμόδιος για το μήκος του πλοίου και τον τύπο του ενδιάμεσου καταστρώματος, A, B, C ή D, όπως φαίνεται στο Σχήμα I.3. Σημειώνεται ότι όλοι οι νομείς των ενδιάμεσων καταστρωμάτων πάνω από το κατάστρωμα εξάλων/στεγανών είναι τύπου A
- L = μήκος αντοχής του πλοίου, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 305 m (1000 ft)
- Q = συντελεστής υλικού
= 1.00 για αντοχή κοινού χάλυβα
= 0.78 για αντοχή H32 χάλυβα
= 0.72 για αντοχή H36 χάλυβα
= 0.68 για αντοχή H40 χάλυβα

Ομοίως, και οι ενισχυμένοι νομείς και οι λώροι (stringers) του πλευρικού κελύφους πρέπει εν γένει να σχεδιάζονται σε συμφωνία με τους Κανονισμούς. Ειδικά, για τους ενισχυμένους νομείς και λώρους (stringers) του πλευρικού κελύφους κάτω από το κατώτερο κατάστρωμα, πέρα από την ικανοποίηση των γενικών απαιτήσεων των Κανονισμών, θα πρέπει να έχουν ροπή αντίστασης SM όχι μικρότερη από αυτή που προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kcs(h + 0.025L)\ell^2Q \quad cm^3 (in^3) \quad (I.16)$$

όπου:

- $k = 4.74 (2.5 \times 10^{-3})$
- $c = 1.5$
- s = το άθροισμα των μισών μηκών (σε κάθε πλευρά του ενισχυμένου νομέα ή του λώρου) των στηριζόμενων νομέων, σε m (ft)
- h = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το μέσο του ℓ στην περίπτωση των ενισχυμένων νομέων και από το μέσο του s στην περίπτωση των λώρων, μέχρι το βύθισμα της θερινής γραμμής φόρτωσης (summer load line)
- L = μήκος αντοχής του πλοίου, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 247 m (810 ft)
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος (span) μετρούμενο μεταξύ των άκρων των στοιχείων στα άκρα, σε m (ft). Όταν τοποθετούνται αποτελεσματικοί αγκώνες, το μήκος ℓ μπορεί να τροποποιηθεί σύμφωνα με τα παρακάτω:
 - i) Όπου το εμβαδόν του πέλματος στο μπρακέτο δεν είναι μικρότερο από το μισό εκείνου που είναι στη σταθμίδα ή στον κορμό και το πέλμα της σταθμίδας ή στον κορμό φέρεται προς τη φρακτή ή τη βάση, το μήκος ℓ μπορεί να μετρηθεί σε ένα σημείο σε απόσταση 150 mm (6 in.) πάνω στο στήριγμα.
 - ii) Όπου το εμβαδόν του πέλματος στο μπρακέτο είναι μικρότερο από το μισό εκείνου που είναι στη σταθμίδα ή στον κορμό και το πέλμα της σταθμίδας ή στον κορμό φέρεται προς τη φρακτή ή τη βάση, το μήκος ℓ μπορεί να μετρηθεί σε ένα σημείο όπου η επιφάνεια του μπρακέτου και της φλάντζας του, έξω από τη γραμμή της σταθμίδας ή του κορμού, είναι ισοδύναμο με την επιφάνεια της φλάντζας πάνω στη σταθμίδα.
 - iii) Όπου η επιφάνεια του πέλματος της σταθμίδας ή του κορμού μεταφέρεται κατά το πέλμα του μπρακέτου, το οποίο μπορεί να είναι καμπύλο για το σκοπό αυτό, το ℓ μπορεί να μετρηθεί στο σημείο του μπρακέτου.
 - iv) Τα μπρακέτα δεν πρέπει να θεωρούνται αποτελεσματικά πέρα από το σημείο όπου το “arm” της σταθμίδας ή του κορμού είναι 1.5 φορές το μήκος του “arm” πάνω στη φρακτή ή στη βάση: και σε καμία περίπτωση δεν είναι η ανοχή σε ℓ σε κάθε άκρο να υπερβαίνει το ένα τέταρτο του ολικού μήκους της σταθμίδας ή του κορμού.
- Q = συντελεστής υλικού
 - = 1.0 ,για αντοχή κοινού χάλυβα
 - = 0.78 ,για αντοχή H32 χάλυβα
 - = 0.72 ,για αντοχή H36 χάλυβα
 - = 0.68 ,για αντοχή H40 χάλυβα

Επιπλέον, υπάρχουν περιορισμοί και ως προς την επιφάνεια διάτμησης των ενισχυμένων νομέων και λώρων. Συγκεκριμένα, μακριά από τα ανοίγματα για τα ενισχυτικά, η επιφάνεια διάτμησης A_s των ενισχυμένων νομέων και των πλευρικών λώρων κάτω από το κατώτερο κατάστρωμα, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$A_s = cs(h + 0.025L) \ell / f_y \quad cm^2 (in^2) \quad (I.17)$$

όπου:

- $c = 125.5 (12.8, 80)$
- s = το άθροισμα των μισών μηκών (σε κάθε πλευρά του ενισχυμένου νομέα και του πλευρικού λώρου) των υποστηριζόμενων νομέων, σε m (ft)
- h = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το μέσο του ℓ στην περίπτωση των ενισχυμένων νομέων και από το μέσο του s στην περίπτωση των λώρων, μέχρι το βύθισμα της θερινής γραμμής φόρτωσης (summer load line)
- L = μήκος αντοχής του πλοίου, που δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 247 m (810 ft)
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος (span) του ενισχυμένου νομέα ή του πλευρικού λώρου μετρούμενο ανάμεσα στα άκρα των στοιχείων στήριξης, σε m (ft). Όπου είναι τοποθετημένα ενεργά μπρακέτα, το ℓ μπορεί να τροποποιηθεί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.
- f_y = ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε $N/mm^2 (kgf/mm^2, lbf/in^2)$

Θα πρέπει, ωστόσο, να τηρείται και μια σχετική αναλογία μεταξύ του πάχους και του ύψους του κορμού. Συγκεκριμένα, οι κορμοί πρέπει να έχουν έκταση όχι μικρότερη από 0.125 l συν το ένα τέταρτο του ύψους των ανοιγμάτων διέλευσης (slots) για τους νομείς. Γενικά, το ύψος δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το τριπλάσιο του ύψους των ανοιγμάτων διέλευσης (slots), ενώ το πάχος δεν πρέπει να είναι μικρότερο του 1% του ύψους του κορμού σε mm (in.) συν 3mm (0.12 in.) αλλά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 11.5 mm (0.46 in.).

Αντίστοιχα, η επιφάνεια διάτμησης A_s των ενισχυμένων νομέων και των πλευρικών λώρων των ενδιάμεσων καταστρώματων, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

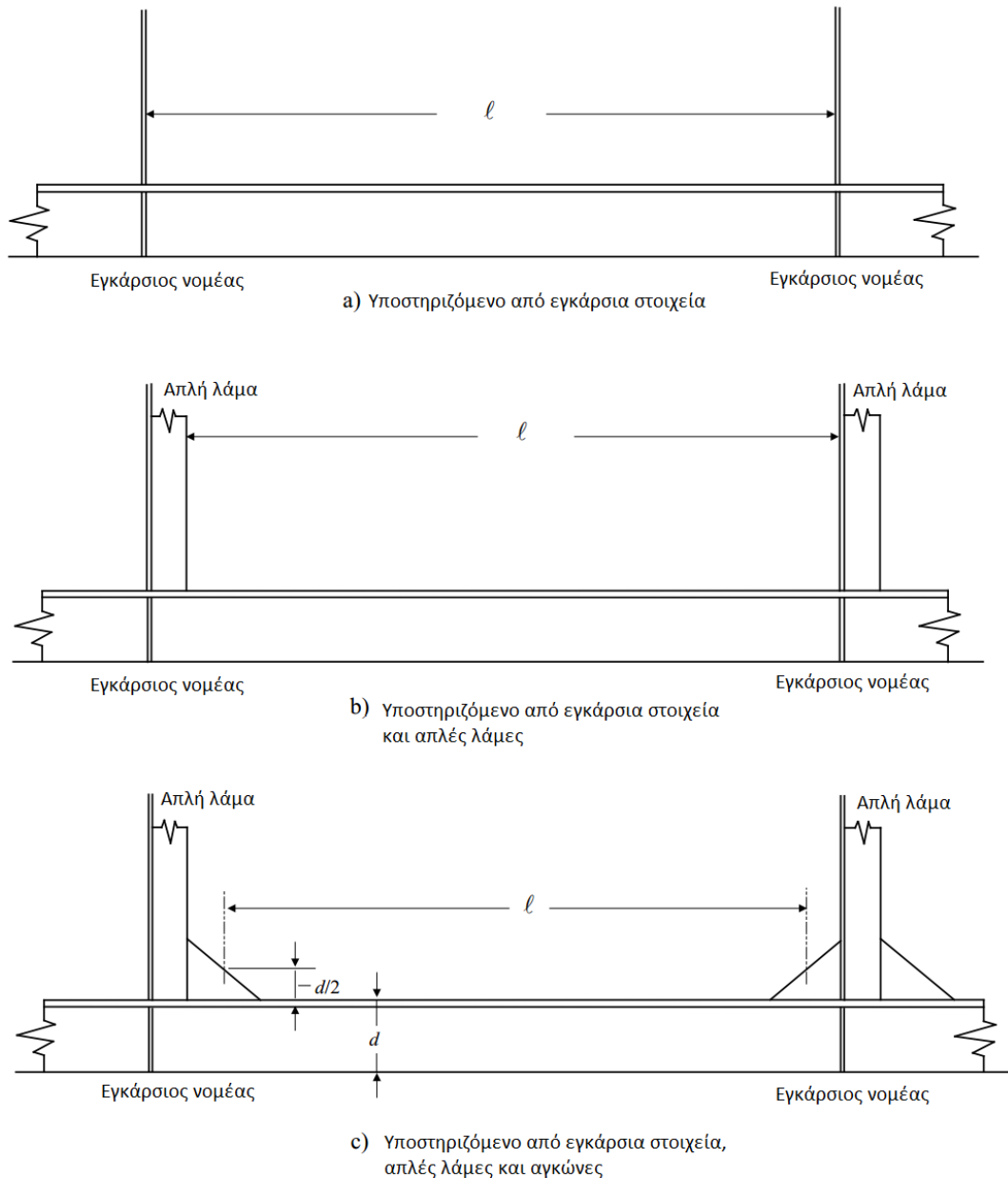
$$A_s = cs_w h_t l / f_y \quad cm^2 (in^2) \quad (I.18)$$

όπου:

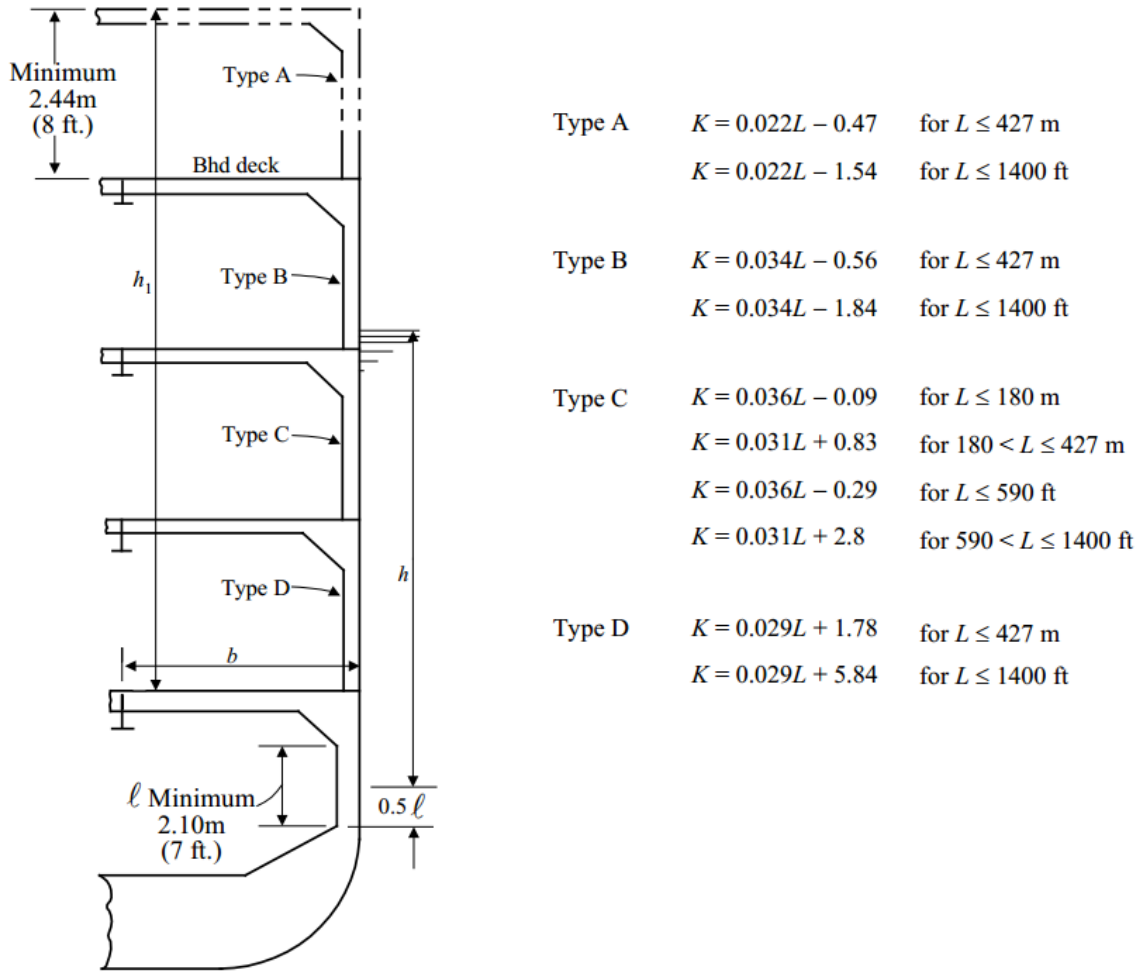
- $c = 125.5 (12.8, 80)$
- s_w = η ισαπόσταση των νομέων, σε m (ft)
- $h_t = h + b h_1 / 45 k$ σε m
 $= h + b h_1 / 150 k$ σε ft
- h = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το μέσον του ℓ μέχρι τη γραμμή φόρτωσης, ή 0.5 l , οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο
- b = οριζόντια απόσταση, σε m (ft), από το εξωτερικό τμήμα του ενισχυμένου νομέα μέχρι την πρώτη σειρά των στηρίξεων του καταστρώματος όπως για παράδειγμα οι διαμήκεις σταθμίδες του καταστρώματος.
- h_1 = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το κατάστρωμα στην κορυφή του νομέα μέχρι το κατάστρωμα εξάλων ή στεγανών, όποιο είναι μεγαλύτερο, συν το ύψος όλων των χώρων των ενδιάμεσων καταστρώματων (tween-deck spaces), ή συν 2.44m (8 ft) εφόσον είναι μεγαλύτερο. Όπου η προβλεπόμενη φόρτιση του καταστρώματος ρ είναι γνωστή, το ύψος των ενδιάμεσων καταστρώματων μπορεί να ληφθεί ίσο με ρ / ω για τον υπολογισμό του h_1 .
- ρ = προβλεπόμενη φόρτιση καταστρώματος, σε $kN/m^2 (kgf/m^2, lbf/ft^2)$, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερη από την ελάχιστη φόρτιση καταστρώματος που δίνεται στον Πίνακα

1.2

- $\omega = 7.06 (720, 45)$
- $k = 1.0$ όταν το κατάστρωμα είναι διαμήκως ενισχυμένο
= αριθμός ισαποστάσεων νομέων μεταξύ ενισχυμένων νομέων όταν το κατάστρωμα έχει εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος του ενισχυμένου νομέα, σε m (ft)
- f_y = ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε N/mm^2 (kgf/mm^2 , lbf/in^2)



Σχήμα 1.2: Ορισμός ανυποστήρικτου μήκους των διαμήκων ενισχυτικών [106]



Σχήμα 1.3: Αμπάρι και ενδιάμεσα καταστρώματα [106]

Πίνακας 1.2: Φορτία σχεδιασμού καταστρώματος [106]

Deck	Minimum Deck Loading ρ		
	kN/m^2	kgf/m^2	lbf/ft^2
Tween-decks used solely for passenger accommodation	3.53	360	74
Tween-decks in way of public spaces	6.464	659	135
Tween-decks in way of baggage spaces	$3.53h_{tw}$	$360h_{tw}$	$22.5h_{tw}$
Decks in way of stores and refrigerated spaces	14.364	1465	300
Decks in way of machinery spaces and workshops	18.434	1880	385
Strength and lower decks in way of accommodation	5.745	586	120
Note: h_{tw} is the tween deck height in m (ft)			

Θα πρέπει, και σε αυτήν την περίπτωση, να τηρείται και μια σχετική αναλογία πάχους και ύψους του κορμού. Συγκεκριμένα, οι κορμοί πρέπει να έχουν ύψος όχι λιγότερο από 0.125l συν το ένα τέταρτο του ύψους των ανοιγμάτων διέλευσης για τα ενισχυτικά (cutout slots for the longitudinals). Το πάχος του κορμού δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 10 mm ανά 1.0 m (0.12 in. per ft) ύψους.

Φυσικά, από την περιοχή του πλευρικού κελύφους δεν θα πρέπει να παραλείπονται οι θύρες επιβίβασης/αποβίβασης (Gangway Ports) και οι θύρες φορτίου (Cargo Ports). Τα συστήματα ασφάλισης (closing appliances) των θυρών επιβίβασης/αποβίβασης και των θυρών φορτίου που τοποθετούνται κάτω από τη γραμμή του ορίου βύθισης πρέπει να είναι επαρκώς αντοχής. Πρέπει να είναι ικανά να κλείνουν και να ασφαλίσουν, αποδοτικά, στεγανά. Οι αντοχές των συστημάτων ασφάλισης πρέπει να είναι ισοδύναμες με τις αντοχές που απαιτούνται για την κατασκευή της γάστρας στην περιοχή αυτή. Τα συστήματα ασφάλισης θα πρέπει κανονικά να ανοίγουν προς τα έξω. Αν ανοίγουν προς τα μέσα, θα πρέπει να στηρίζονται και να ενισχύονται επαρκώς. Οι θύρες επιβίβασης/αποβίβασης και οι θύρες του φορτίου πρέπει να έχουν το κατώτερο σημείο τους πάνω από την ανώτερη γραμμή φόρτωσης (deepest subdivision load line).

Τέλος, όσον αφορά τα φινιστρίνια (portlights) και τα σκίαστρα (deadlights), η τοποθεσία και η κατασκευή τους θα πρέπει να είναι σε συμφωνία με τους Κανονισμούς. Ειδικότερα, για τα σκίαστρα, αποτελεσματικά εσωτερικά σκίαστρα πρέπει να παρέχονται σε όλα τα πλευρικά στόμια (sidescuttles) στους χώρους κάτω από το πρώτο κατάστρωμα πάνω από το κατάστρωμα στεγανών και διαταγμένα έτσι ώστε εύκολα και αποδοτικά να μπορούν να κλείνουν και να ασφαλίζουν στεγανά.

Κατασκευή Καταστρώματος

Εν γένει, τα καταστρώματα και τα μέλη στήριξής τους πρέπει γενικώς να είναι σε συμφωνία με τους Γενικούς Κανονισμούς. Συγκεκριμένα, λαμβάνεται μέριμνα για τα ελάσματα, τα ζυγά (beams), τις κολώνες (pillars), τις σταθμίδες και τους εγκάρσιους νομείς (transverses).

Ξεκινώντας από το κατάστρωμα αντοχής, το πάχος t του ελάσματος του πρέπει, γενικά, να είναι σε συμφωνία με την ακόλουθη σχέση:

$$t = ks\mu \times 10^{-3} + a \text{ mm (in.)} \quad (I.19)$$

όπου:

- k = για εγκαρσίως ενισχυμένο κατάστρωμα αντοχής
= 10.0 όπου $s \leq 760 \text{ mm (30 in.)}$
= 6.6 όπου $s > 760 \text{ mm (30 in.)}$
- k = για διαμήκως ενισχυμένο κατάστρωμα αντοχής
= 9.0 όπου $s \leq 760 \text{ mm (30 in.)}$
= 6.0 όπου $s > 760 \text{ mm (30 in.)}$
- s = ισαπόσταση ζυγών, σε mm (in.)
- μ = συντελεστής μετατροπής υλικού
= 1.0 για αντοχή κοινού χάλυβα
= 0.866 για αντοχή χάλυβα H32
= 0.8165 για αντοχή χάλυβα H36
= 0.8 για αντοχή χάλυβα H40
- a = για εκτιθέμενο εγκαρσίως ενισχυμένο κατάστρωμα αντοχής
= 2.3 mm (0.09 in.) όπου $s \leq 760 \text{ mm (30 in.)}$
= 4.9 mm (0.193 in.) όπου $s > 760 \text{ mm (30 in.)}$

- α = για εκτιθέμενο διαμήκως ενισχυμένο κατάστρωμα αντοχής
= 2.4 mm (0.095 in.) όπου $s \leq 760$ mm (30 in.)
= 4.7 mm (0.185 in.) όπου $s > 760$ mm (30 in.)
- α = για εγκαρσίως ενισχυμένο κατάστρωμα αντοχής εντός των υπερκατασκευών ή των υπερστεγασμάτων
= 1.3 mm (0.09 in.) όπου $s \leq 760$ mm (30 in.)
= 3.9 mm (0.193 in.) όπου $s > 760$ mm (30 in.)
- α = για διαμήκως ενισχυμένο κατάστρωμα αντοχής εντός των υπερκατασκευών ή των υπερστεγασμάτων
= 1.4 mm (0.095 in.) όπου $s \leq 760$ mm (30 in.)
= 3.7 mm (0.185 in.) όπου $s > 760$ mm (30 in.)

Στη συνέχεια, θα πρέπει ο μελετητής ναυπηγός να αποφασίσει για το ποια καταστρώματα θα συμμετέχουν στη διαμήκη αντοχή και ποια όχι. Στην πρώτη περίπτωση, αυτά που συμμετέχουν στη διαμήκη αντοχή, καλούνται ενεργά καταστρώματα (Effective Decks), ενώ στην περίπτωση όπου δεν συμμετέχουν, καλούνται πλατφόρμες (Platform Decks). Πιο αναλυτικά, για τα κατώτερα ενεργά καταστρώματα οι απαιτήσεις για το πάχος του ελάσματός τους λαμβάνονται από τους «Γενικούς Κανονισμούς». Όμως, για τις πλατφόρμες, στην περίπτωση των επιβατηγών πλοίων θα πρέπει το πάχος t του ελάσματος τους να μην λαμβάνεται μικρότερο από τη μεγαλύτερη τιμή εκ των δυο ακόλουθων σχέσεων:

$$t_1 = ks\mu\sqrt{h} + \alpha \text{ mm (in.)} \quad (I.20)$$

$$t_2 = 5.8s\mu \times 10^{-3} + b \text{ mm (in.)} , \text{ αλλά το πάχος } t_2 \text{ όχι μικρότερο από } 4.5 \text{ mm (0.18 in.)} \quad (I.21)$$

όπου:

- $k = 3.94 \times 10^{-3}$ (2.18×10^{-3})
- s = ισαπόσταση των ζυγών, σε mm (in.)
- μ = συντελεστής υλικού
= 1.0 για αντοχή κοινού χάλυβα
= 0.866 για αντοχή χάλυβα H32
= 0.8165 για αντοχή χάλυβα H36
= 0.8 για αντοχή χάλυβα H40
- $h = \rho/\omega$ m (ft)
- ρ = προβλεπόμενη φόρτιση καταστρώματος, σε kN/m^2 (kgf/m^2 , lbf/ft^2), αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερη από την ελάχιστη φόρτιση καταστρώματος που δίνεται στον Πίνακα I.2
- $\omega = 7.06$ (720, 45)
- $\alpha = 1.5$ (0.06)
- $b = 1.0$ (0.04)

Τέλος, ειδική εξέταση στην περίπτωση των επιβατηγών πλοίων χρήςουν τα ζυγά. Κάθε ζυγό, σε συνεργασία με το έλασμα στο οποίο είναι συνδεδεμένο, πρέπει να έχει ροπή αντίστασης SM όπως λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kchs\ell^2 Q \text{ cm}^3 (\text{in}^3) \quad (1.22)$$

όπου:

- $k = 7.8 (4.1 \times 10^{-3})$
- $c =$ για εγκάρσια ζυγά
 $= 0.54$ για μισά ζυγά, για ζυγά με κεντρική στήριξη μόνο, για ζυγά ανάμεσα σε διαμήκεις φρακτές, και για ζυγά επί σπυράγγων ή εσοχών σπυράγγων
 $= 0.585$ για ζυγά ανάμεσα σε διαμήκεις σταθμίδες καταστρώματος
 $= 0.9$ για ζυγά στις κορυφές των ενδιάμεσων δεξαμενών υποστηριζόμενες στο ένα ή και στα δύο άκρα στο κέλυφος ή στις διαμήκεις φρακτές
 $= 1.0$ για ζυγά στις κορυφές των ενδιάμεσων δεξαμενών ανάμεσα στις διαμήκεις σταθμίδες
- $c =$ για διαμήκη ζυγά
 $= 1/(1.709 - 0.651k_1)$ για διαμήκη ζυγά του καταστρώματος αντοχής και των κατώτερων ενεργών καταστρωμάτων
 $= 0.585$ για διαμήκη ζυγά των μη ενεργών καταστρωμάτων (platform decks)
 $= 1.0$ για ζυγά στις κορυφές των ενδιάμεσων
- $k_1 = SM_R Y / I_A$
- $SM_R =$ απαιτούμενη ροπή αντίστασης γάστρας στην περιοχή της Μέσης Τομής σε $\text{cm}^2\text{-m}$ ($\text{in}^2\text{-ft}$), όπως αυτή προβλέπεται από τους Γενικούς Κανονισμούς
- $Y =$ απόσταση, σε m (ft), από τον ουδέτερο άξονα της ροπής αδράνειας I_A της γάστρας, μέχρι το υπό μελέτη κατάστρωμα, πάντα να λαμβάνεται θετική
- $I_A =$ πραγματική ροπή αδράνειας γάστρας στην περιοχή της Μέσης Τομής του πλοίου, σε $\text{cm}^2 \text{ m}$ ($\text{in}^2\text{-ft}$)
- $s =$ ισαπόσταση των ζυγών, σε m (ft)
- $\ell =$ για εγκάρσια ζυγά = απόσταση, σε m (ft), από την εσωτερική ακμή του “beam knee” μέχρι την πλησιέστερη γραμμή της στήριξης της σταθμίδας ή μεταξύ των στηρίξεων των σταθμίδων οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο.
- $\ell =$ για διαμήκη ζυγά = ανυποστήρικτο μήκος των διαμήκων ενισχύσεων ανάμεσα στις ενεργές στηρίξεις, σε m (ft), όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2
- $B =$ πλάτος του πλοίου, σε m (ft)
- $h =$ για εκτιθέμενα καταστρώματα αντοχής
 $= 2.43\sqrt{L} + 2.92 \times 10^4 / L^{1.5} - 1.64 \times 10^5 / L^2 - 35.78$ σε m
 $= 4.4\sqrt{L} + 5.7 \times 10^5 / L^{1.5} - 5.8 \times 10^6 / L^2 - 117.4$ σε m
- $h =$ για άλλα καταστρώματα = είναι κανονικά το ύψος των ενδιάμεσων καταστρωμάτων, σε m (ft), αλλά όπου η προβλεπόμενη φόρτιση του καταστρώματος ρ είναι γνωστή, το h μπορεί να ληφθεί ίσο με ρ/ω m (ft)
- $h =$ για εσοχές φρακτών και διαμερίσματα σπυράγγων
 $=$ το ύψος, σε m (ft), μέχρι τη γραμμή του ορίου βύθισης, όπου το ύψος αυτό είναι μικρότερο από 6.10 m (20 ft), η τιμή του h πρέπει να λαμβάνεται 0.8 φορές το πραγματικό ύψος συν 1.22 m (4 ft)
- $h =$ για τους πυθμένες των ενδιάμεσων δεξαμενών (deep tank tops)
 $=$ το μεγαλύτερο από τα παρακάτω:
 - τα 2/3 της απόστασης σε m (ft) από την κορυφή της δεξαμενής μέχρι την κορυφή της υπερχειλίσσης (overflow)

Όσον αφορά τα ενισχυτικά, κάθε ενισχυτικό, σε συνεργασία με το έλασμα στο οποίο είναι συνδεδεμένο, πρέπει να έχει ροπή αντίστασης SM όχι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kchsl^2Q \quad cm^3(in^3) \quad (I.25)$$

όπου:

- $k = 7.8 (4.1 \times 10^{-3})$
- $c = 0.52$ για οριζόντια ή κατακόρυφα ενισχυτικά στις εγκάρσιες φρακτές και κατακόρυφα ενισχυτικά στις διαμήκειες φρακτές
 $= 0.58$ για οριζόντια ενισχυτικά στις διαμήκειες φρακτές
 $= 0.60$ για ενισχυτικά χωρίς στήριξη στα άκρα
- s = ισαπόσταση των ενισχυτικών, σε m (ft)
- h = απόσταση, σε m (ft), από το μέσο του ℓ έως τη γραμμή του ορίου βύθισης, εκτός όπου αυτή η απόσταση είναι μικρότερη από 6.10 m (20 ft), το h πρέπει να λαμβάνεται ως 0.8 φορές της απόστασης συν 1.22 m (4 ft).
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος του ενισχυτικού, σε m (ft), όπου τα μπρακέτα παρέχονται το ανυποστήρικτο μήκος ℓ μπορεί να μετρηθεί με τρόπο όμοιο με αυτό που φαίνεται στο Σχήμα I.2. Όταν καθορίζεται το ℓ , το μήκος του μπρακέτου στο ενισχυτικό δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερο από 1.5 φορές του μήκους του μπρακέτου στην κατασκευή στήριξης (supporting structure). Τα μπρακέτα πρέπει να έχουν αντοχές όχι μικρότερες από αυτές που δίνονται στη συνέχεια.
- Q = συντελεστής μετατροπής υλικού
 $= 1.0$ για αντοχή κοινού χάλυβα
 $= 0.78$ για αντοχή H32 χάλυβα
 $= 0.72$ για αντοχή H36 χάλυβα
 $= 0.68$ για αντοχή H40 χάλυβα

Υπογραμμίζεται ότι η τιμή της ροπής αντίστασης για τα ενισχυτικά στη φρακτή σύγκρουσης πρέπει να είναι το λιγότερο 25% μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για τα ενισχυτικά στις στεγανές φρακτές.

Τα κατώτερα μπρακέτα στον εσωτερικό πυθμένα πρέπει να εκτείνονται πάνω από την έδρα δίπλα στη φρακτή και πρέπει να συνδέονται αποτελεσματικά, όπου τα ενισχυτικά διασχίζουν οριζόντια τους λώρους. Επιπλέον, τα μπρακέτα στήριξης ενισχυτικών (stiffener brackets) πρέπει να έχουν αντοχές όχι μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από τις παρακάτω σχέσεις.

Αρχικά, για μπρακέτα που φέρουν πέλματα (flanged brackets), το πάχος του κορμού του μπρακέτου t_w δεν πρέπει να είναι μικρότερο από:

$$t_w = 6.5l_a \times 10^{-3} + a \quad mm \text{ (in.)} \quad (I.26)$$

,ενώ το πλάτος του πέλματος f_w δεν πρέπει να είναι μικρότερο από:

$$f_w = 0.08l_a + b \quad mm \text{ (in.)} \quad (I.27)$$

Στην περίπτωση των απλών (χωρίς πέλμα) μπρακέτων (Plain (Un-Flanged) Brackets) μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου $l_a \leq 760 \text{ mm (30 in.)}$. Το πάχος του μπρακέτου t_b δεν πρέπει να είναι μικρότερο από:

$$t_b = l_a/75 + c \quad \text{mm (in.)} \quad (1.28)$$

όπου:

- l_a = το μήκος του μεγαλύτερου μέλους (διάστασης) του μπρακέτου σε mm (in.)
- $\alpha = 5.2$ (0.205)
- $b = 14$ (0.55)
- $c = 4.5$ (17.7×10^{-3})

Τέλος, όσον αφορά τις απαιτήσεις αντοχής για τους νομείς ή τους λώρους όπου στηρίζουν τα ενισχυτικά της φρακτής, θα πρέπει να έχουν μια ροπή αντίστασης SM όχι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kchs\ell^2Q \quad \text{cm}^3 \text{ (in}^3\text{)} \quad (1.29)$$

όπου:

- $k = 4.74$ (2.5×10^{-3})
- $c = 1.0$
- h = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το μέσο του s στην περίπτωση των λώρων και από το μέσο του ℓ στην περίπτωση των κορμών, μέχρι τη γραμμή του ορίου βύθισης, εκτός όπου αυτή η απόσταση είναι μικρότερη από 6.10 m (20 ft), το h πρέπει να λαμβάνεται 0.8 φορές της απόστασης συν 1.22 m (4 ft)
- s = το άθροισμα των μισών μηκών (σε κάθε πλευρά του λώρου ή του κορμού) των ενισχυτικών που στηρίζονται, σε m (ft)
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος μετρούμενο από τις γωνίες των συνδεδεμένων άκρων, σε m (ft). Όπου τα ενεργά μπρακέτα είναι τοποθετημένα, το ℓ μπορεί να τροποποιηθεί όπως αναφέρθηκε προηγουμένως
- Q = συντελεστής υλικού
= 1.0 για αντοχή κοινού χάλυβα
= 0.78 για αντοχή H32 χάλυβα
= 0.72 για αντοχή H36 χάλυβα
= 0.68 για αντοχή H40 χάλυβα

Σημειώνεται ότι η επιφάνεια της τομής των κατακόρυφων κορμών των νομέων (vertical webs) θα πρέπει να προσαυξάνεται κατά $6.35 \text{ cm}^2/10 \text{ tonnes}$ ($1.0 \text{ in}^2/10 \text{ Ltf}$) της φόρτισης του καταστρώματος, όπου οι κορμοί στηρίζουν τις φορτίσεις του καταστρώματος που μεταφέρονται από τις σταθμίδες του (καταστρώματος). Στον υπολογισμό της επιφάνειας της τομής του κατακόρυφου κορμού του νομέα, η επιφάνεια του συνδεδεμένου ελάσματος πρέπει εν γένει να μην συμπεριλαμβάνεται.

Η ροπή αντίστασης SM του κάθε νομέα και λώρου στις φρακτές σύγκρουσης πρέπει να είναι το λιγότερο 25% μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για παρόμοια μέλη στήριξης στις στεγανές φρακτές. Επιπλέον, οι λώροι και οι κορμοί πρέπει να έχουν ύψος όχι λιγότερο από $0.0832l$ (1 inch per foot of span ℓ) συν $\frac{1}{4}$ του ύψους των ανοιγμάτων διέλευσης (slots) για τα ενισχυτικά. Το πάχος δεν πρέπει να είναι μικρότερο του 1% του ύψους του κορμού σε mm (in.) συν 3 mm (0.12 in.) αλλά δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 11.5 mm (0.46 in.).

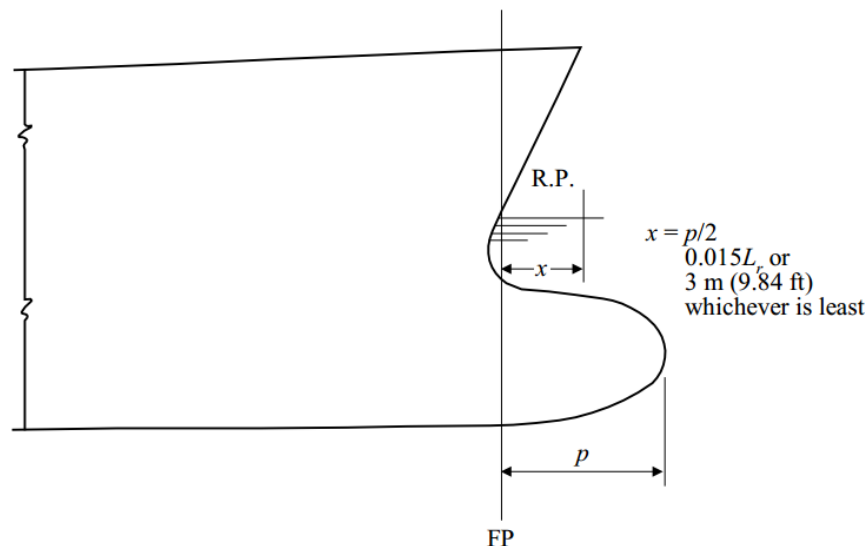
Επιπλέον, τα αντιστρεπτικά μπρακέτα (tripping brackets) πρέπει να τοποθετούνται στο εσωτερικό περίπου 3 m (10 ft), και κοντά σε κάθε αλλαγή της τομής (section). Όπου το πλάτος του πέλματος

υπερβαίνει τα 200 mm (8 in.) σε κάθε πλευρά της σταθμίδας ή του κορμού, τα αντιστρεπτικά μπρακέτα πρέπει να διατάσσονται ώστε να στηρίζουν το πέλμα.

Φυσικά, δεν θα πρέπει να αμεληθεί η φρακτή σύγκρουσης, η οποία υποχρεωτικά πρέπει να υπάρχει. Μάλιστα, θα πρέπει να είναι άθικτη, δηλαδή, χωρίς ανοίγματα εκτός ειδικής μέριμνας, η οποία και θα πρέπει να εγκριθεί από τον Νηογνώμονα. Η φρακτή πρέπει να εκτείνεται, κατά προτίμηση σε ένα επίπεδο, μέχρι το κατάστρωμα στεγανών. Στη συνέχεια πρέπει να εκτείνεται προστατευόμενη από τη βροχή και τον αέρα (weathertight) μέχρι το πρόστεγο (forecastle) ή το εκτιθέμενο πρωραίο κατάστρωμα (exposed forward deck).

Πληροφοριακά αναφέρεται ότι στα πλοία Ro-Ro, αυτό το μέρος των καταπελτών (sloping loading ramps) που αποτελούν μέρος της επέκτασης της φρακτής σύγκρουσης, και είναι περισσότερο από 2.3 m (7.5 ft) πάνω από το κατάστρωμα στεγανών, μπορεί να εκτείνεται πρωραία της οριακής θέσης, εφόσον όμως πληροί κάποιες προδιαγραφές.

Πολλή προσοχή πρέπει να δίνεται στο γεγονός ότι η στέγαση των επιβατών και του πληρώματος δεν πρέπει να τοποθετείται πρώραθεν της φρακτής σύγκρουσης.



Σχήμα Ι.4: Σημείο αναφοράς για πλοία με βολβοειδής πλώρα [106]

Πιο αναλυτικά, η φρακτή σύγκρουσης πρέπει να τοποθετείται σε οποιοδήποτε σημείο όχι λιγότερο από $0.05L_r$, ούτε περισσότερο από $0.05L_r$ συν 3 m (9.84 ft) πρύμνηθεν του σημείου αναφοράς R.P. *(Reference Point).

*R.P. = το σημείο αναφοράς, το οποίο πρέπει να τοποθετείται στο πρωραίο άκρο του L_r εκτός της περίπτωσης όπου ένα πλοίο έχει κάθε μέρος του στα ύφαλα, όπως ο βολβός, που εκτείνονται πρώραθεν του πρωραίου άκρου του L_r , οι απαιτούμενες αποστάσεις πρέπει να μετρούνται από ένα σημείο αναφοράς που τοποθετείται σε απόσταση x πρώραθεν του πρωραίου άκρου του L_r . Η απόσταση x είναι η μικρότερη από τις ακόλουθες:

- το μισό της απόστασης ανάμεσα στο πρωραίο άκρο του L_r και του πιο ακραίου άκρου της επέκτασης (π.χ., $p/2$)
- $0.015L_r$
- 3 m (9.84 ft). Βλέπε Σχήμα Ι.4.

Σημειώνεται ότι το L_r είναι το μήκος μεταξύ των καθέτων στο χαμηλότερη στεγανή γραμμή υποδιαίρεσης (deepest subdivision line). Το πρωραίο άκρο του L_r πρέπει να συμπέσει με την πρωραία πλευρά της πλήρης στην ίσαλο γραμμή στην οποία το L_r μετράται.

Για λόγους πληρότητας, καταγράφεται ότι η φρακτή σύγκρουσης μπορεί να διαπερνάται κάτω από τη γραμμή του ορίου βύθισης όχι από περισσότερους από ένα σωλήνες που τροφοδοτεί με ρευστό την πρωραία δεξαμενή (έρματος-ζυγοσταθμίσεως), υπό την προϋπόθεση ότι ο σωλήνας είναι εφοδιασμένος με μια βαλβίδα με δυνατότητα χειρισμού πάνω από το κατάστρωμα στεγανών, το σώμα της βαλβίδας στερεώνεται στη φρακτή σύγκρουσης μέσα στην πρωραία δεξαμενή. Σε περίπτωση όπου η πρωραία δεξαμενή διαιρείται σε δυο δεξαμενές, ώστε να φορτώνεται με δυο είδη ρευστών, η φρακτή σύγκρουσης μπορεί να διαπεραστεί κάτω από τη γραμμή του ορίου βύθισης από δυο αγωγούς, ο κάθε ένας από αυτούς πρέπει να είναι εφοδιασμένος σύμφωνα με αυτά που απαιτούνται από τους Κανονισμούς. Το παραπάνω ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική, πέραν της εγκατάστασης του δεύτερου σωλήνα και ότι, λαμβανομένη υπόψη της προβλεπόμενης πρόσθετης υποδιαίρεσεως στην πρωραία δεξαμενή ζυγοσταθμίσεως, η ασφάλεια του πλοίου διατηρείται.

Ακολουθως, θα πρέπει να τοποθετούνται και άλλες φρακτές στην περιοχή της πρύμνης. Συγκεκριμένα, μια πρυμναία φρακτή, και (δυο) φρακτές που διαχωρίζουν το χώρο του μηχανοστασίου, από το φορτίο και τους χώρους των επιβατών πώραθεν και πρύμνηθεν, πρέπει να είναι τοποθετημένα και κατασκευασμένα υδατοστεγή μέχρι το κατάστρωμα στεγανών. Η πρυμναία φρακτή μπορεί, ωστόσο, να σχηματίζει βαθμίδα κάτω από το κατάστρωμα στεγανών, με την προϋπόθεση ότι ο βαθμός ασφαλείας του πλοίου σχετικά με την υποδιαίρεση δεν μειώνεται.

Ο χώρος του μηχανοστασίου πρέπει να λαμβάνεται όπως εκτείνεται από τη βασική γραμμή αναφοράς (molded base line) μέχρι τη γραμμή του ορίου βύθισης και μεταξύ των κύριων εγκάρσιων στεγανών φρακτών (extreme main transverse watertight bulkheads), οριοθετώντας τους χώρους που περιλαμβάνουν την κύρια μηχανή και τις βοηθητικές μηχανές, και τους καυστήρες (boilers) που υπηρετούν τις ανάγκες της πρόωσης. Στην περίπτωση των ασυνήθιστων διατάξεων, τα όρια των χώρων του μηχανοστασίου υπόκεινται σε ειδική εξέταση.

Στην περιοχή της πρύμνης, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στους τελικούς άξονες (Stern Tubes). Θα πρέπει ο στυθιοθλίπτης (stern gland) να είναι εγκατεστημένο σε μια υδατοστεγή σήραγγα του ελικοφόρου άξονα ή άλλους υδατοστεγείς χώρους χωριστούς από το τμήμα του τελικού άξονα και πρέπει να είναι τέτοιου όγκου ώστε, εάν πλημμυρίσει από διαρροές διαμέσου του στυθιοθλίπτη, η γραμμή του ορίου βύθισης να μην βυθίζεται.

Επιπλέον, ο αριθμός των ανοιγμάτων στις στεγανές φρακτές πρέπει να είναι ο ελάχιστος συμβατός με τη σχεδίαση και την καλή λειτουργία του πλοίου. Για το σκοπό αυτό πρέπει να παρέχονται ικανοποιητικά μέσα για το κλείσιμο αυτών των ανοιγμάτων. Συγκεκριμένα, οι οπές διαμέσου των στεγανών φρακτών υποδιαίρεσης για τις σταθερές υπηρεσίες όπως οι αγωγοί, οι υδρορροές (μπούνια) ή τα ηλεκτρικά καλώδια πρέπει να ελέγχονται πειραματικά (πρωτότυπο) για μια περίοδο το λιγότερο 30 λεπτών υπό υδροστατική πίεση που αντιστοιχεί στην πραγματική εγκατάσταση. Δεν πρέπει να υπάρχει καμιά διαρροή στο πρότυπο κατά τη διάρκεια του ελέγχου. Οι οπές που μπορούν να συγκολληθούν περιμετρικά (seal welded), δεν απαιτούν τον παραπάνω έλεγχο. Τονίζεται ότι ο μόλυβδος ή άλλα θερμοευαίσθητα υλικά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συστήματα που διαπερνούν στεγανές φρακτές υποδιαίρεσεως με σκοπό την προστασία της στεγανής ακεραιότητας των φρακτών σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Σε καμιά περίπτωση δεν επιτρέπονται στεγανές θύρες, ανθρωποθυρίδες και ανοίγματα πρόσβασης στη φρακτή σύγκρουσης κάτω από τη γραμμή του ορίου βύθισης, ενώ σε ειδικές περιπτώσεις επιτρέπονται στην εγκάρσια στεγανή φρακτή που χωρίζει ένα χώρο φορτίου από ένα παρακείμενο (γειτονικό) χώρο φορτίου.

Ακόμη, οι στεγανές θύρες θα πρέπει να είναι μηχανοκίνητες ολισθαίνουσες θύρες (power-operated sliding doors). Οι στεγανές θύρες πρέπει να είναι επαρκούς αντοχής για την πίεση του νερού στην οποία

μπορεί να υποβληθούν. Ειδική προσοχή πρέπει να δοθεί στην εγκατάσταση των πλαισίων των θυρών (doorframes) στις φρακτές, όπου απαιτείται ελαστική μόνωση (liners), το υλικό δεν πρέπει να τραυματίζεται εύκολα από τη θερμότητα ή τη φθορά. Ειδική προσοχή πρέπει επίσης να δίνεται ώστε να βεβαιώνεται ότι οι ολισθαίνουσες θύρες είναι σωστά τοποθετημένες στα πλαίσιά τους (frames).

Όπου τα ενισχυτικά τέμνονται από τις στεγανές θύρες, τα ανοίγματα πρέπει να ενισχύονται, ώστε να διασφαλίζεται η συνολική αντοχή των φρακτών χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η αντοχή των πλαισίων των θυρών.

Οι στεγανές θύρες της κατασκευής μπορούν να τοποθετηθούν στις στεγανές φρακτές υποδιαίρωντας τους χώρους φορτίου των ενδιάμεσων καταστρωμάτων. Τέτοιες θύρες μπορούν να αρθρώνονται (hinged), να είναι κυλιόμενες (rolling) ή συρόμενες (sliding) και δεν πρέπει να χειρίζονται εξ αποστάσεως (remotely controlled). Πρέπει να τοποθετούνται στο υψηλότερο επίπεδο και όσο μακριά από το πλευρικό κέλυφος γίνεται. Σε καμία περίπτωση το εξωλέμβιο κατακόρυφο άκρο της πόρτας δεν πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση μικρότερη από $0.2B^*$ από το πλευρικό κέλυφος.

* B είναι το μεγαλύτερο καθαρό πλάτος (molded breadth) σε μέτρα (πόδια) στη χαμηλότερη γραμμή φόρτωσης υποδιαίρεσης ή κάτω από αυτή. Η απόσταση $0.2B$ πρέπει να μετράται σε ορθή γωνία προς το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο (centerline) του πλοίου στο ύψος της χαμηλότερης γραμμής φόρτωσης υποδιαίρεσης.

Όλες οι στεγανές θύρες στους χώρους φορτίου πρέπει να διατηρούνται κλειστές κατά την πλοήγηση και οποίες από τις θύρες πρέπει να διατηρούνται ανοικτές κατά το ταξίδι πρέπει να εφοδιάζονται με μια μονάδα που εμποδίζει το ανεξέλεγκτο άνοιγμα. Όταν προτείνεται η τοποθέτηση τέτοιων θυρών, ο αριθμός και η διάταξή τους πρέπει να εξετάζονται ειδικώς.

Μέσα στους χώρους που περιλαμβάνουν την κύρια μηχανή και τις βοηθητικές μηχανές πρόωσης συμπεριλαμβανομένου των καυστήρων που υπηρετούν τις ανάγκες πρόωσης, δεν πρέπει να τοποθετείται περισσότερο από μια στεγανή θύρα, πέραν των στεγανών θυρών στις σήραγγες του ελικοφόρου άξονα, σε κάθε μια κύρια εγκάρσια φρακτή. Όπου δυο ή περισσότεροι (ελικοφόροι) άξονες τοποθετούνται, οι σήραγγες πρέπει να διασυνδέονται με ένα πέρασμα. Πρέπει να υπάρχει μόνο μια στεγανή θύρα ανάμεσα στο χώρο του μηχανοστασίου και τους χώρους των σηράγγων, όπου οι δυο αγωγοί τοποθετούνται και μόνο δυο στεγανές θύρες όπου υπάρχουν περισσότεροι από δυο άξονες. Όλες αυτές οι στεγανές θύρες πρέπει να είναι συρόμενου τύπου (sliding type) και θα πρέπει να τοποθετούνται έτσι ώστε να έχουν τα περβάζια (sills) όσο το δυνατόν πιο ψηλά. Ο χειροκίνητος μοχλός για το χειρισμό των θυρών αυτών άνωθεν του καταστρώματος στεγανών πρέπει να τοποθετείται εκτός των χώρων που περιλαμβάνουν τα μηχανήματα (machinery).

Τα μετακινούμενα ελάσματα (portable plates) στις φρακτές δεν επιτρέπονται παρά μόνο στους χώρους του μηχανοστασίου. Όταν αυτά τα ελάσματα απομακρύνονται ενώ το πλοίο είναι στο λιμάνι, οι αναγκαίες προφυλάξεις πρέπει να ληφθούν στην αντικατάστασή τους, ώστε οι συνδέσεις να είναι στεγανές προτού το πλοίο αφήσει το λιμάνι και ώστε τα ελάσματα να μην απομακρυνθούν κατά τη διάρκεια της πλοήγησης.

Σύμφωνα με τον ABS δεν θα ληφθούν υπόψη περισσότερες από μια μηχανοκίνητες συρόμενες στεγανές θύρες μεγαλύτερες από 1.2 m (3.94 ft) σε (καθαρό) πλάτος, σε κάθε κύρια εγκάρσια φρακτή, που αντί των προαναφερθέντων μετακινούμενων ελασμάτων, εφόσον αυτές οι πόρτες είναι κλειστές κατά την πλοήγηση εκτός μπορούν να ανοιχτούν κατά την κρίση του Πλοιάρχου (Master), σε περίπτωση της επιτακτικής ανάγκης,

Φρακτές Δεξαμεμών

Σε πολλές περιπτώσεις, τα τμήματα των στεγανών φρακτών συμπίπτουν με τα όρια των ενδιάμεσων δεξαμεμών (deer tanks). Στις περιπτώσεις αυτές, τα όρια αυτά θα πρέπει να κατασκευάζονται σύμφωνα με τις ειδικές απαιτήσεις για τα κρουαζιερόπλοια.

Συγκεκριμένα, η διάταξη όλων των ενδιάμεσων δεξαμεμών πρέπει να αναγράφονται ευκρινώς επί των σχεδίων που υποβάλλονται για έγκριση, μαζί με την προοριζόμενη χρήση τους και το ύψος των σωλήνων υπερχειλίσσης (overflow pipes). Οι δεξαμενές για φρέσκο νερό ή καύσιμο ή εκείνων που δεν προορίζονται να είναι πλήρεις κατά τη συνήθη χρήση, πρέπει να φέρουν διάτρητες φρακτές (swash bulkheads), όπως μπορεί να απαιτείται για να ελαχιστοποιηθεί η δυναμική πίεση στην κατασκευή. Το πετρέλαιο ή άλλες υγρές ουσίες που είναι εύφλεκτες, δεν πρέπει να μεταφέρονται σε δεξαμενές πλώραθεν της φρακτής σύγκρουσης.

Οι συνοριακές φρακτές όλων των ενδιάμεσων δεξαμεμών πρέπει να κατασκευάζονται σε συμφωνία με τους ειδικούς κανονισμούς. Για το λόγο αυτό, τα διαμήκη στεγανά τμήματα (longitudinal tight divisions) που τοποθετούνται σε δεξαμενές οι οποίες πρέπει να είναι πλήρη κατά τη συνήθη χρήση, πρέπει να είναι αντοχής που απαιτείται για τις στεγανές φρακτές. Αυτές οι δεξαμενές πρέπει να εφοδιάζονται με τις δεξαμενές τροφοδοσίας (feed tanks), εφοδιασμένες με βύσματα επιθεώρησης (inspection plugs), ώστε να βεβαιώνεται ότι οι δεξαμενές και στις δυο πλευρές της φρακτής διατηρούνται είτε γεμάτες είτε άδειες κατά την υπηρεσία.

Επιπλέον, οι μικρές τρύπες στα κατασκευαστικά μέλη που επιτρέπουν την αποστράγγιση του υγρού (Limber holes) και οι τρύπες αέρα (air holes) πρέπει να υπάρχουν σε όλα τα τμήματα της κατασκευής όπως απαιτείται ώστε να παρέχεται ελεύθερη ροή στους σωλήνες αναρρόφησης (suction pipes) και στη διαφυγή του αέρα στους αεραγωγούς (vents).

Όσον αφορά την κατασκευαστική σχεδίαση, το πάχος του ελάσματος δεν πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό που λαμβάνεται από την παρακάτω σχέση:

$$t = (sk\sqrt{qh}/254) + 1.5 \text{ mm} ,\text{αλλά όχι μικρότερο από } 6.5 \text{ mm} ,\text{ ή } s/150 + 1.5 \text{ mm} \quad (I.30)$$

,οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο

$$t = (sk\sqrt{qh}/460) + 0.06 \text{ in.} ,\text{αλλά όχι μικρότερο από } 0.25 \text{ in.} ,\text{ ή } s/150 + 0.06 \text{ in.} \quad (I.31)$$

,οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο

όπου:

- t = πάχος, σε mm (in.)
- s = ισαπόσταση ενισχυτικών, σε mm (in.)
- $k = (3.075\sqrt{\alpha} - 2.077)/(a + 0.272)$ όπου $1 \leq \alpha \leq 2$
 $= 1.0$ όπου $\alpha > 2$
- α = αναλογία του πλαισίου (μακριά ακμή/κοντή ακμή)
- $q = 235/Y$ N/mm² (24/Y kgf/mm², 34/Y ksi)
- Y = ελάχιστο όριο διαρροής ή όριο διαρροής (yield strength) του υλικού σε N/mm² (kgf/mm², ksi), ή το 72% της ορισμένης ελάχιστης αντοχής σε εφελκυσμό (specified minimum tensile strength), οποιοδήποτε είναι μικρότερο
- h = η μεγαλύτερη από τις ακόλουθες αποστάσεις, σε m (ft), από τη χαμηλότερη ακμή του ελάσματος μέχρι:

- ένα σημείο που βρίσκεται στα 2/3 της απόστασης από την κορυφή της δεξαμενής μέχρι την κορυφή της υπερχειλίσης
- ένα σημείο τοποθετημένο πάνω από την κορυφή της δεξαμενής σε μια απόσταση όχι μικρότερη από αυτή που δίνεται στην κολώνα (e) του Πίνακα 1.3, κατάλληλη για το μήκος του πλοίου
- τη γραμμή φόρτωσης
- ένα σημείο που βρίσκεται στα 2/3 της απόστασης από τη φρακτή μέχρι το κατάστρωμα εξάλων

Όπου η εκάστοτε βαρύτητα του μεταφερόμενου υγρού υπερβαίνει το 1.05, το ύψος σχεδίασης, h, πρέπει να προσαυξάνεται από το λόγο βαρύτητας του υγρού, προς 1.05.

Πίνακας 1.3: Τιμές του h για δοκούς [107]

Meters

L	a	b	c	d	e	f	g
90	2.56	2.26	1.51	1.20	1.05	0.90	0.46
100	2.76	2.29	1.69	1.30	1.15	0.91	0.46
110	2.90	2.29	1.90	1.44	1.15	0.91	0.46
120	2.90	2.29	1.98	1.64	1.27	0.91	0.46
122 and above	2.90	2.29	1.98	1.68	1.30	0.91	0.46

Feet

L	a	b	c	d	e	f	g
300	8.50	7.50	5.00	4.00	3.50	3.00	1.50
325	9.00	7.50	5.50	4.25	3.75	3.00	1.50
350	9.50	7.50	6.00	4.50	3.75	3.00	1.50
375	9.50	7.50	6.50	5.00	4.00	3.00	1.50
400 and above	9.50	7.50	6.50	5.50	4.25	3.00	1.50

Όσον αφορά τα ενισχυτικά, κάθε ενισχυτικό πρέπει να έχει ροπή αντίστασης SM όχι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$SM = kchs\ell^2 Q \text{ cm}^3 (\text{in}^3) \quad (1.32)$$

όπου:

- k = 7.8 (4.1×10^{-3})
- c = 0.69 για οριζόντια ή κατακόρυφα ενισχυτικά στις εγκάρσιες φρακτές και κατακόρυφα ενισχυτικά στις διαμήκεις φρακτές
 = 0.78 για οριζόντια ενισχυτικά στις διαμήκεις φρακτές
- s = ισαπόσταση των ενισχυτικών, σε m (ft)
- h = η μεγαλύτερη από τις ακόλουθες αποστάσεις, σε m (ft), από το μέσο του ℓ μέχρι:
 - ένα σημείο που βρίσκεται στα 2/3 της απόστασης από την κορυφή της δεξαμενής μέχρι την κορυφή της υπερχειλίσης

- ένα σημείο τοποθετημένο πάνω από την κορυφή της δεξαμενής σε μια απόσταση όχι μικρότερη από αυτή που δίνεται στην κολώνα (e) του Πίνακα Ι.3, κατάλληλη για το μήκος του πλοίου
 - τη γραμμή φόρτωσης
 - ένα σημείο που βρίσκεται στα 2/3 της απόστασης από τη φρακτή μέχρι το κατάστρωμα εξάλων
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος του ενισχυτικού, σε m (ft): όπου τα μπρακέτα παρέχονται το ανυποστήρικτο μήκος ℓ μπορεί να μετρηθεί με τρόπο όμοιο με αυτό που φαίνεται στο Σχήμα Ι.2. Τα μπρακέτα πρέπει να έχουν αντοχές όχι μικρότερες από αυτές που δίνονται για τα ενισχυτικά των στεγανών φρακτών.
 - Q = συντελεστής υλικού
 - = 1.0 για αντοχή κοινού χάλυβα
 - = 0.78 για αντοχή H32 χάλυβα
 - = 0.72 για αντοχή H36 χάλυβα
 - = 0.68 για αντοχή H40 χάλυβα

Επίσης, κάθε σταθμίδα και κορμός (web) που στηρίζει τους νομείς ή τα ζυγά στις ενδιάμεσες δεξαμενές πρέπει να έχει ροπή αντίστασης SM, όπως απαιτείται στους «Γενικούς Κανονισμούς» ή όπως απαιτείται παρακάτω, οποιοδήποτε είναι μεγαλύτερο. Ωστόσο, αυτά που στηρίζουν τα ενισχυτικά των φρακτών πρέπει να είναι όπως απαιτείται από αυτή την παράγραφο. Η ροπή αντίστασης SM δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που λαμβάνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$SM = kchs\ell^2Q \text{ cm}^3 (\text{in}^3) \quad (I.33)$$

όπου:

- $k = 4.74 (2.5 \times 10^{-3})$
- $c = 1.50$
- h = κατακόρυφη απόσταση, σε m (ft), από το μέσο του s στην περίπτωση των σταθμίδων και από το μέσο του ℓ στην περίπτωση των κορμών, μέχρι τα ίδια ύψη στα οποία το h μετράται για τα ενισχυτικά
- s = το άθροισμα των μισών μηκών (σε κάθε πλευρά της σταθμίδας ή του κορμού) των νομέων ή των ενισχυτικών που στηρίζονται, σε m (ft)
- ℓ = ανυποστήρικτο μήκος μετρούμενο από τις γωνίες των συνδεδεμένων άκρων, σε m (ft). Όπου τα ενεργά μπρακέτα είναι τοποθετημένα, το ℓ μπορεί να τροποποιηθεί όπως αναφέρεται στα ενισχυτικά των στεγανών φρακτών
- Q = συντελεστής υλικού
 - = 1.0 για αντοχή κοινού χάλυβα
 - = 0.78 για αντοχή H32 χάλυβα
 - = 0.72 για αντοχή H36 χάλυβα
 - = 0.68 για αντοχή H40 χάλυβα

Φυσικά θα πρέπει να τηρούνται κάποιες αναλογίες, δηλαδή οι σταθμίδες, εκτός των σταθμίδων του καταστρώματος, και οι κορμοί πρέπει να έχουν ύψη όχι μικρότερα από $l/7$ όπου δεν χρησιμοποιούνται στηρίγματα, και $l/12$ όπου τοποθετούνται στηρίξεις, συν $1/4$ του ύψους των ανοιγμάτων διέλευσης (slots) για τους νομείς ή τα ενισχυτικά. Γενικά, το ύψος δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 3 φορές του

ύψους των ανοιγμάτων διέλευσης, ενώ το πάχος δεν πρέπει να είναι λιγότερο από το 1% του ύψους συν 3 mm (0.12 in.) αλλά να μην υπερβαίνει τα 11.5 mm (0.46 in.).

Επιπλέον, οι αντιστρεπτικοί αγκώνες πρέπει να τοποθετούνται σε διάστημα της τάξης των 3 m (10 ft) και κοντά σε κάθε αλλαγή της τομής. Όπου το πλάτος των πελμάτων υπερβαίνει τα 200 mm σε κάθε πλευρά της σταθμίδας ή του κορμού, οι αντιστρεπτοί αγκώνες πρέπει να διατάσσονται ώστε να στηρίζουν το πέλμα.

Τέλος, οι κορυφές των δεξαμενών πρέπει να έχουν έλασμα 1 mm (0.04 in.) πιο παχύ από το πάχος που απαιτείται για το κατακόρυφο έλασμα στο ίδιο επίπεδο, ενώ το πάχος δεν πρέπει να είναι λιγότερο από το απαιτούμενο για το έλασμα του καταστρώματος. Τα ζυγά, οι σταθμίδες και οι κολώνες πρέπει να είναι όπως απαιτείται στα αντίστοιχα για την κατασκευή του καταστρώματος.

Όπου αποτελεσματικές στηρίξεις (effective struts) τοποθετούνται δια μέσου δεξαμενών που συνδέουν σταθμίδες κατά μήκος των πλευρών των δεξαμενών και σε ισάποσταση όχι μεγαλύτερη από τέσσερις φορές του ύψους της σταθμίδας, η ροπή αντίστασης SM για κάθε σταθμίδα μπορεί να είναι το μισό της δοθείσας παραπάνω.

Υπερκατασκευή και Υπερστέγασμα

Τα καταστρώματα και οι υπερκατασκευές αλλά και οι κατασκευές στήριξης τους (supporting structures) πρέπει να είναι σε συμφωνία με τους «Γενικούς Κανονισμούς». Ωστόσο, για την περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων θα πρέπει να υπακούσουν και σε κάποιους ειδικούς κανονισμούς.

Πιο συγκεκριμένα, τα στεγανά καταστρώματα, οι κατακόρυφοι διάδρομοι, οι σήραγγες και οι ανεμοδόχοι πρέπει να είναι ίδιας αντοχής όπως και οι στεγανές φρακτές στα αντίστοιχα επίπεδα. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για να γίνουν στεγανά, και οι διατάξεις που υιοθετούνται για το κλείσιμο των ανοιγμάτων σε αυτά πρέπει να υποβάλλονται για έγκριση, ενώ οι στεγανοί ανεμοδόχοι και οι κατακόρυφοι διάδρομοι πρέπει να μεταφέρονται το λιγότερο μέχρι το κατάστρωμα στεγανών.

Επιπλέον, τα ζυγά του καταστρώματος, τα διαμήκη ενισχυτικά, οι σταθμίδες, οι νομείς και οι κολώνες πρέπει να είναι σε συμφωνία με τους «Γενικούς Κανονισμούς» αλλά και με τις ακόλουθες τροποποιήσεις. Ειδικά για την περίπτωση των κρουαζιερόπλοιων, το ύψος “h” των 0.50 m (1.64 ft) μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους κλειστούς χώρους της στέγασης (enclosed accommodation spaces) εκτός αυτών των δωματίων αποσκευών, τα δωμάτια κλιματισμού, κλπ. όπου οι φορτίσεις του καταστρώματος ξεπερνούν τα 3.59 kN/m² (366 kgf/m², 75 lbf/ft²), το “h” πρέπει να αυξάνεται αναλογικά. Επίσης, θα πρέπει να ερευνάζεται η ευστάθεια (stability) των μελών στήριξης των καταστρωμάτων, κάτι που αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κεφάλαιο στον τομέα της αντοχής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Κ - Κανονισμοί πυρασφάλειας

Μια κατασκευή από σύνθετα υλικά προκειμένου να χαρακτηριστεί ως Πυρίμαχο Στοιχείο (Fire Resisting Division - FRD), θα πρέπει να είναι ικανή να αντισταθεί στην πυρκαγιά για 60 λεπτά (FRD-60), σύμφωνα με τον Διεθνή Κώδικα Ασφαλείας για Σκάφη Υψηλής Ταχύτητας (IMO, 2000). Το τεστ πυρκαγιάς που απαιτείται για τα πυρίμαχα τμήματα σε Ταχύπλοα Σκάφη (HSC) είναι ισοδύναμο με τις δοκιμές που απαιτούνται για τμήματα Α-κλάσης σε πλοία SOLAS, εκτός από μια πρόσθετη απαίτηση φόρτισης. Προτού αναφερθεί η απαίτηση αυτή, θα πρέπει να καταγραφεί ότι σύμφωνα με τον IMO ο όρος Α-κλάση παραπέμπει σε μια "μη εύφλεκτη" κατασκευή που θα μπορεί να αντισταθεί σε μια φωτιά 60 λεπτών χωρίς να αφήσει τα θερμά αέρια ή τις φλόγες να περάσουν προς την πλευρά που δεν έχει εκτεθεί στη φωτιά.

Συνεχίζοντας, η εν λόγω πρόσθετη απαίτηση αναφέρει ότι τα καταστρώματα και φρακτές (από σύνθετα υλικά) πρέπει να αντέχουν την πρότυπη δοκιμή πυρός, ενώ ταυτόχρονα υπόκεινται σε εγκάρσια (transverse) και σε επίπεδη (in-plane) φόρτιση, αντίστοιχα. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η απαίτηση φόρτισης τέθηκε σε εφαρμογή κατά τη θέσπιση κατασκευών αλουμινίου. Με την επίδειξη αντοχής, ενώ αντιστέκονται στις τυποποιημένες δοκιμές πυρός, οι κατασκευές αλουμινίου θεωρούνται ισοδύναμες με αυτές του χάλυβα.

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις της SOLAS, πρέπει να εφαρμόζεται μόνωση στην πλευρά του τμήματος, με το μεγαλύτερο κίνδυνο πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, μια "Α" κλάσης (χαλύβδινη) κατασκευή έχει μόνωση μόνο στη μία πλευρά της φρακτής. Από την άλλη, οι κατασκευές από FRP σχεδιάζονται με μόνωση και στις δύο πλευρές της δομής. Αντίστοιχα, εάν οι κατασκευαστικές ζώνες πυρός (structural fire zones) κατασκευάζονται από αλουμίνιο, η κατασκευή μονώνεται και στις δύο πλευρές της φρακτής, διότι το αλουμίνιο λιώνει σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Επιπλέον, όσον αφορά τη χαλάρωση της διεπιφάνειας πυρήνα-φύλλου του σύνθετου υλικού (FRP laminate-core interface), είναι σαφές ότι τέτοια μόνωση πρέπει να διατηρεί τη θερμοκρασία στη διεπιφάνεια στην πλευρά που εκτίθεται στη φωτιά κάτω από 130-200°C (ανάλογα με χρησιμοποιημένο υλικό) στη δοκιμή πυρός FRD-60. Η θερμοκρασία στην μη εκτιθέμενη πλευρά λόγω της υψηλής ικανότητας μόνωσης του σύνθετου, θα είναι ουσιαστικά σε θερμοκρασία δωματίου, ακόμη και μετά από 60 λεπτά υπό πυρκαγιά. Επομένως, η θερμότητα από μια φωτιά, σε ένα μεγαλύτερο βαθμό, παραμένει στο θάλαμο φωτιάς και δεν είναι τόσο εύκολο να μεταδοθεί σε παρακείμενες θέσεις.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι FRD-60 δομές θα πρέπει να χρησιμοποιούνται παντού. Αυτό περιλαμβάνει χώρους χαμηλού κινδύνου αλλά και περιοχές όπου ο παρακείμενος χώρος είναι ένα ανοιχτό κατάστρωμα, όπως τα ανώτερα ανοικτά καταστρώματα (sun decks) και οι στέγες μπαλκονιών. Φυσικά, σε ορισμένες περιοχές αυτό θα παρέχει ένα υψηλότερο επίπεδο πυρασφάλειας από ό, τι απαιτείται από τη SOLAS.

Όσον αφορά την πυροπροστασία, οι εξωτερικές εύφλεκτες επιφάνειες δεν μπορούν να προστατευθούν από το ορυκτό σε τριχοειδή μορφή (mineral wool), και πρέπει να αντιμετωπίζονται με διαφορετικό τρόπο, π.χ. με τη χρήση ενεργητικών μέτρων για την καταπολέμηση της πυρκαγιάς ή φινιρίσμα επιφάνειας ώστε να μειώνεται η εξάπλωσή της.

Η οργάνωση της πυρασφάλειας και οι διαδικασίες πυρόσβεσης στο πλοίο θα πρέπει να ακολουθούν τις απαιτήσεις SOLAS II-2. Τα συστήματα και ο εξοπλισμός της πυροπροστασίας θα πρέπει να είναι επίσης σε συμφωνία με τις απαιτήσεις αυτές.

Σημειώνεται ότι εκτός από την επίτευξη των απαιτήσεων πυροπροστασίας, όλα τα τμήματα της κατασκευής από FRP θα είναι φέρουσες κατασκευές και θα πρέπει να πληρούν τις ισχύουσες αντίστοιχες

απαιτήσεις. Η κατάρρευση λόγω της πυρκαγιάς πρέπει να είναι πάντα κατά νου όταν πρόκειται για την ασφάλεια των πυροσβεστών (μέλη πληρώματος) και των επιβατών μέσα και γύρω από ένα περίχωρο φωτιάς. Ωστόσο, τα προβλήματα με την προοδευτική κατάρρευση είναι δύσκολο να εκτιμηθούν.

Κανονισμοί πυρασφάλειας που επηρεάζονται από τη χρήση σύνθετων υλικών

Το σημείο εκκίνησης για οποιαδήποτε αξιολόγηση εναλλακτικής σχεδίασης είναι να εντοπιστούν οι επηρεασμένοι κανονισμοί πυρασφάλειας. Οι πιθανώς αμφισβητούμενοι κανονισμοί και οι ειδικές παρεκκλίσεις συνοψίζονται στον Πίνακα Κ.1. Σε αυτόν συνοψίζονται διάφορες παρατηρήσεις σχετικά με τη συμμόρφωση με τους στόχους των κανονισμών, λειτουργικών απαιτήσεων (regulation functional requirements) και τις ακόλουθες απαιτήσεις συμμόρφωσης (prescriptive requirements) της κάθε ρύθμισης.

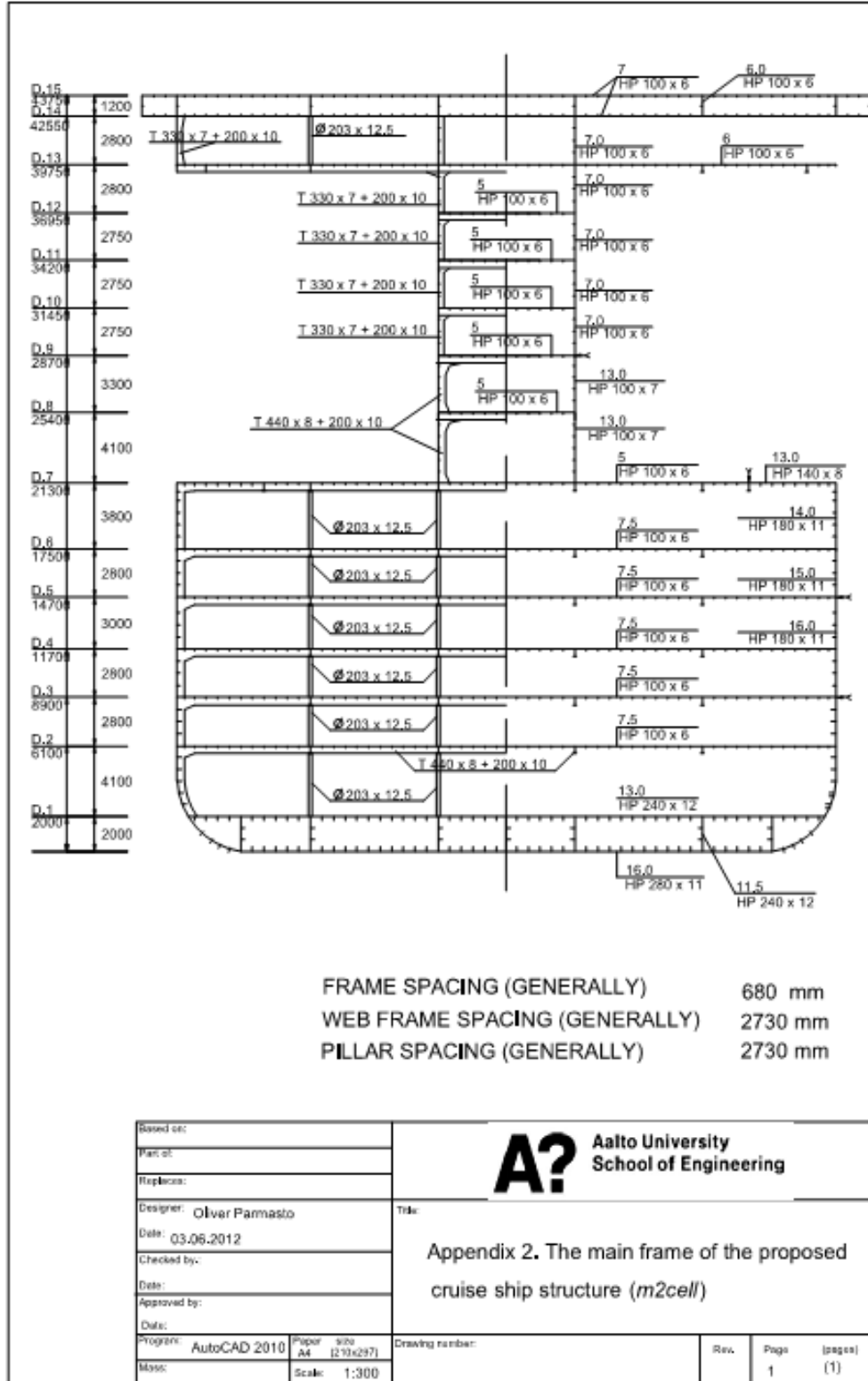
Οι κανονισμοί στο Μέρος Β της SOLAS II-2, όπου η σχεδίαση πιθανώς αμφισβητείται, είναι οι Κανονισμοί 4, 5 και 6. Η σχεδίαση θα πετύχει τους στόχους των κανονισμών και των λειτουργικών απαιτήσεων του κανονισμού 4, εάν η αναφλεξιμότητα των επιφανειών μπορεί να θεωρηθεί περιορισμένη, και ιδιαίτερα εκείνων των εξωτερικών και απροστάτευτων. Αυτό μπορεί να απαιτήσει την εφαρμογή μέτρων ελέγχου των κινδύνων. Όλες οι απαιτήσεις συμμόρφωσης του κανονισμού 5 σχετικά με τις περιφράξεις τηρούνται αλλά οι λειτουργικές απαιτήσεις των κανονισμών δυνητικά αμφισβητούνται, καθώς αναφέρει ότι η χρήση εύφλεκτων υλικών πρέπει να περιοριστεί. Δεδομένου ότι η σχεδίαση δεν θα αυξήσει το φορτίο λόγω πυράς (fire load) σε ένα εσωτερικό χώρο, η συμμόρφωση θα μπορούσε να υπονοείται. Ωστόσο, αν το ανοικτό κατάστρωμα θεωρείται ως ένας χώρος, οι απροστάτευτες εύφλεκτες εξωτερικές επιφάνειες θα δώσουν λόγο για την παραβίαση λειτουργικών απαιτήσεων κανονισμών. Παρόμοια με τον κανονισμό 5, το πεδίο εφαρμογής του κανονισμού 6 περιλαμβάνει επίσης και τα πρώτα στάδια της πυρκαγιάς, τα οποία αναφέρονται στην κατάσταση όπου οι άνθρωποι μπορούν να εκτεθούν σε τοξικούς καπνούς. Ακόμα και αν όλες οι απαιτήσεις συμμόρφωσης και οι στόχοι του κανονισμού τηρούνται πολλές φορές η παραγωγή καπνού και των τοξικών προϊόντων ίσως να μην μπορεί να περιοριστεί σε μια επιθυμητή έκταση όπως επιτυγχάνεται με σχεδίαση υπό κανονισμούς συμμόρφωσης. Αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη σύγκριση των επιπέδων ασφαλείας, ακόμη και αν ο κανονισμός μπορεί να θεωρηθεί ως τηρούμενος.

Στο μέρος Γ της SOLAS II-2 οι κύριες προκλήσεις αφορούν τους κανονισμούς 9 και 11. Ο Κανονισμός 9 προβλέπει ότι οι κύριες κατακόρυφες και οριζόντιες ζώνες καθώς και οι εσωτερικές φρακτές, πρέπει να αποτελούνται από τμήματα Α-Χ, από χάλυβα ή ισοδύναμο υλικό. Σημειώνεται ότι με τον όρο Α-Χ νοείται ότι μια απαίτηση θερμοκρασίας πρέπει να πληρείται μετά από Χ λεπτά στην πλευρά της κατασκευής, που εκτίθεται στη φωτιά. Οι κανονισμοί ορίζουν ως χάλυβα ή ισοδύναμο υλικό ένα άκαυστο υλικό το οποίο, από μόνο του ή υπό παρεχόμενη μόνωση, παρουσιάζει ιδιότητες δομής και δομικές ακεραιότητας ισοδύναμες με εκείνες του χάλυβα. Η σχεδίαση με σύνθετα υλικά επιτυγχάνει ίδιες δομικές ιδιότητες και η προστιθέμενη θερμομόνωση σε τμήματα και διεισδύσεις (penetrations) υπερβαίνει τις απαιτήσεις για την ακεραιότητα με όλα τα μέσα. Ωστόσο, ακόμη και αν επιτευχθούν οι ιδιότητες της κατασκευής και η ακεραιότητα στα τμήματα, το σύνθετο υλικό FRP είναι εύφλεκτο. Αυτή είναι και η μόνη παρέκκλιση από τον κανονισμό 11, ο οποίος ορίζει ότι η γάστρα, οι υπερκατασκευές, οι κατασκευαστικές φρακτές, τα καταστρώματα και τα υπερστεγάσματα πρέπει να κατασκευάζονται από χάλυβα ή άλλο ισοδύναμο υλικό. Ο κίνδυνος της κατάρρευσης και το γεγονός ότι ένα (προστατευμένο) άφλεκτο υλικό αντικαθιστά το χάλυβα δίνει λόγο να αξιολογηθεί περαιτέρω μια ισοδύναμη ασφάλεια.

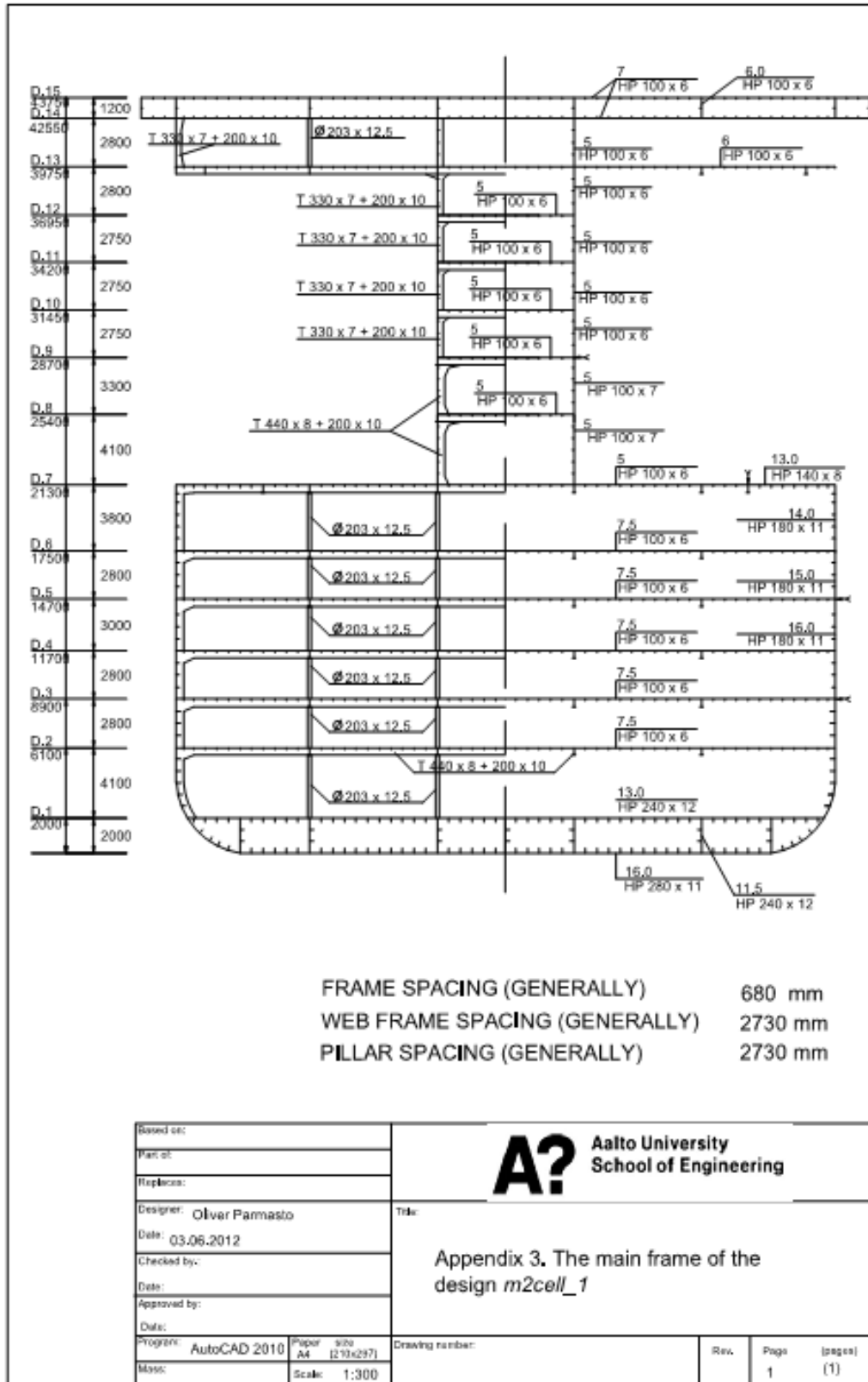
Πίνακας Κ.1: Σύνοψη των επηρεασμένων κανονισμών της SOLAS [94]

<i>SOLAS II-2</i>	<i>Regulation Objective (RO)</i>	<i>Regulation Functional Requirements (RFR)</i>	<i>Comment on how the base design affects the regulation</i>
Part B	Prevention of fire and explosion		
Reg. 4 Probability of ignition	Prevent the ignition of combustible materials or flammable liquids	(1) Control leaks of flammable liquids; (2) Limit the accumulation of flammable vapours; (3) Restrict ignitability of combustible materials; (4) Restrict ignition sources; (5) Separate ignition sources from combustible materials and flammable liquids; (6) The atmosphere in cargo tanks shall be maintained out of the explosive range.	The base design complies with prescriptive requirements in enclosures. However, unprotected external surfaces are not fully in line with RFR 3.
Reg. 5 Fire growth potential	Limit the fire growth potential in every space of the ship.	(1) Control the air supply to the space; (2) Control flammable liquids in the space; (3) Restrict the use of combustible materials.	Compliance with RFR in enclosures. However, if open deck is considered a space, unprotected external surfaces challenge RFR 3.
Reg. 6 Smoke generation potential and toxicity	Reduce the hazard to life from smoke and toxic products generated during a fire in spaces where persons normally work or live.	Limit the quantity of smoke and toxic products released from combustible materials, including surface finishes, during fire.	Compliance with prescriptive requirements and with RFR. It is relevant to address the possibility of an increased smoke production, even if outside the scope of this regulation.
Part C	Suppression of fire		
Reg. 9 Containment of fire	Contain a fire in the space of origin	(1) Subdivide the ship by thermal and structural boundaries; (2) Boundaries shall have thermal insulation of due regard to the fire risk of the space and adjacent spaces; (3) The fire integrity of the divisions shall be maintained at openings and penetrations.	Compliance with RFR but load-bearing bulkheads, decks and, where necessary, also internal bulkheads made in combustible material deviates from the definition of "A-X" class division ² (see Reg. 9.2.2.1.1.1 and tables 9.1 and 9.2).
Reg. 11 Structural integrity	Maintain structural integrity of the ship, preventing partial or whole collapse of the ship structures due to strength deterioration by heat.	Materials used in the ships' structure shall ensure that the structural integrity is not degraded due to fire.	Compliance with RFR but not with Reg. 11.2 as it states structures to be constructed in "steel or other equivalent material", which is defined as non-combustible (Reg. 3.43).

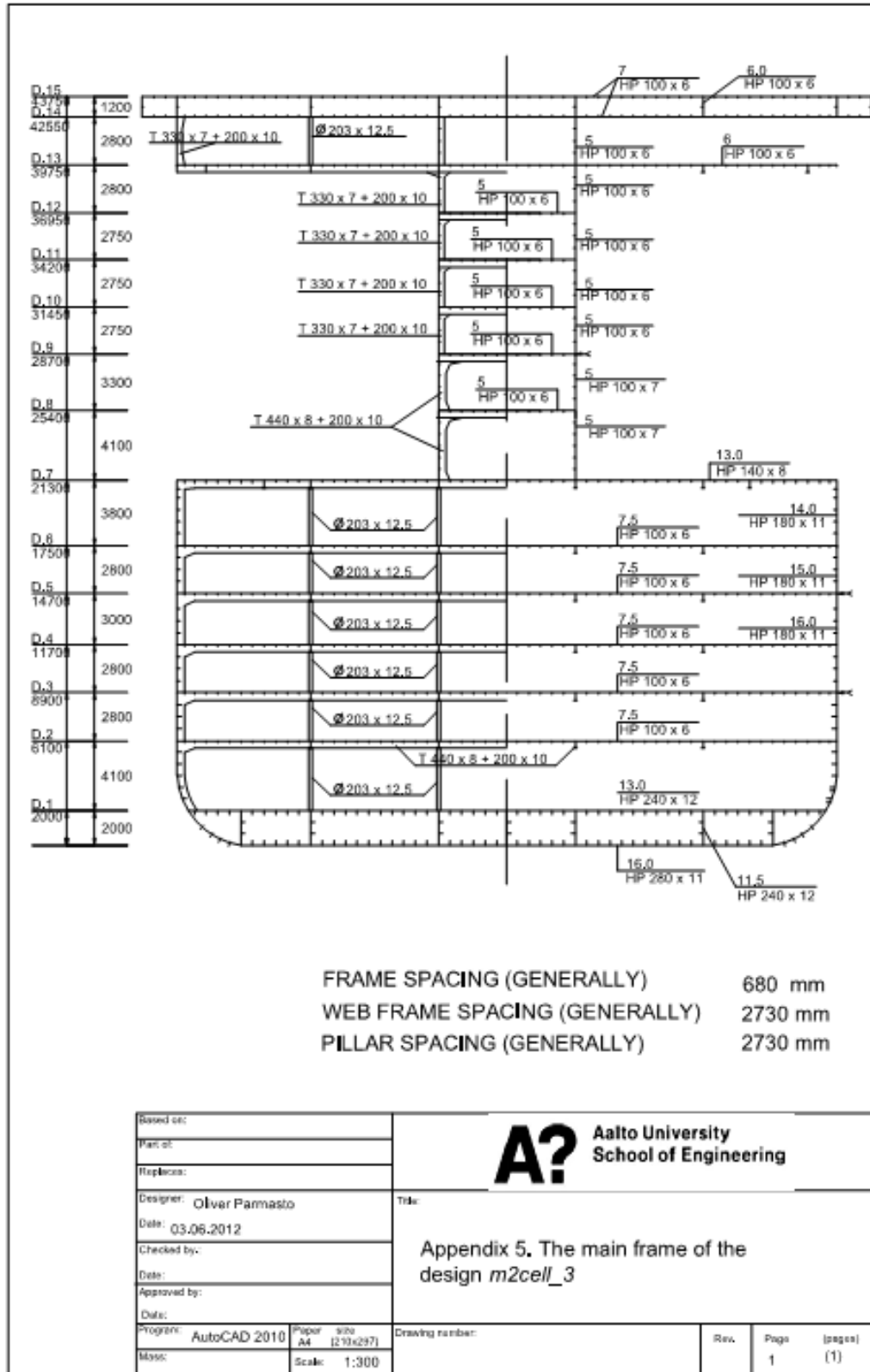
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Λ - Σχέδια μέσης τομής μοντέλου m2cell



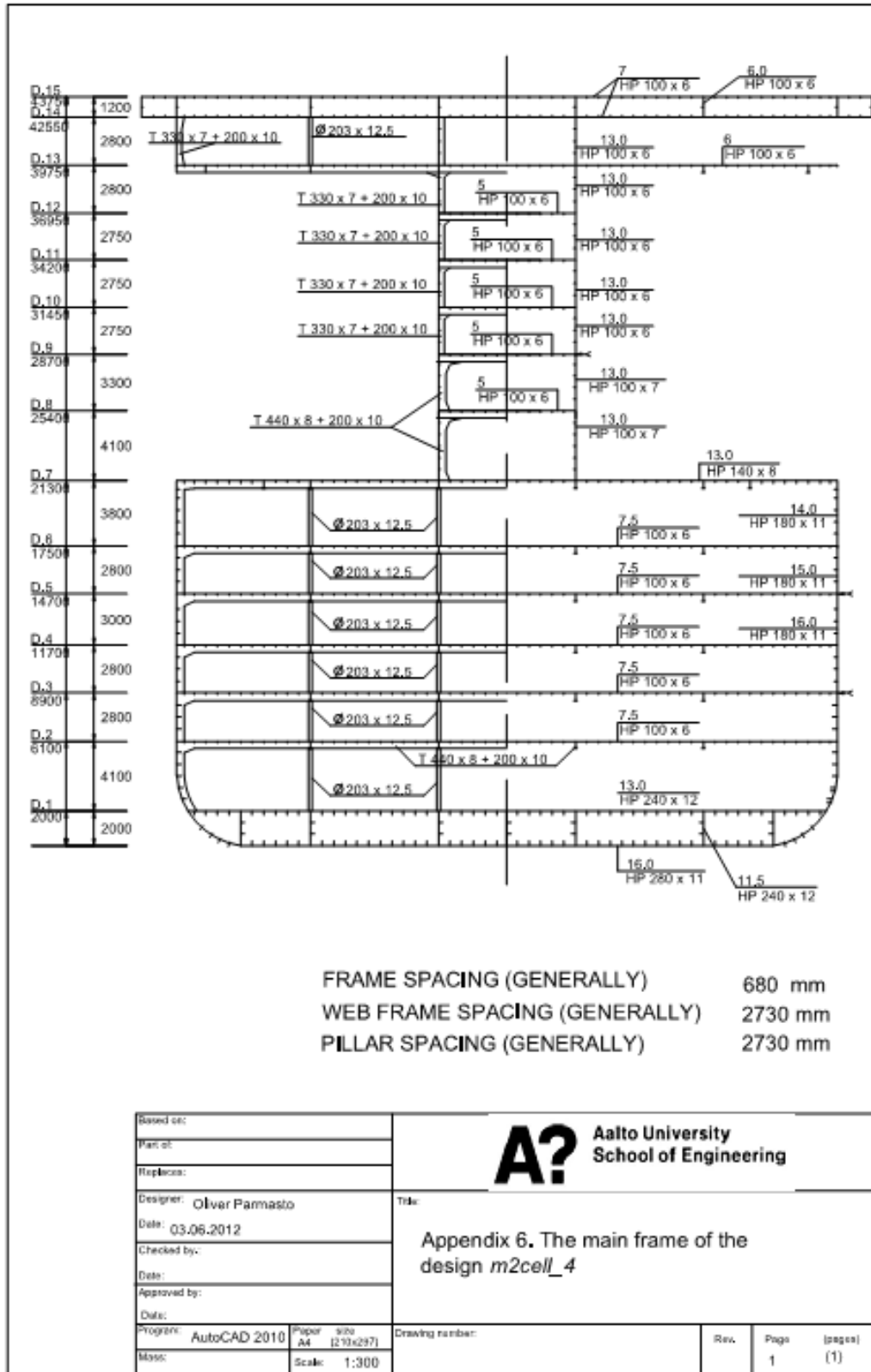
Σχήμα Λ.1: Μέση τομή μοντέλου m2cell [39]



Σχήμα Λ.2: Μέση τομή m2cell_1 [39]



Σχήμα Λ.4: Μέση τομή μοντέλου m2cell_3 [39]



Σχήμα Λ.5: Μέση τομή μοντέλου m2cell_4 [39]

“ Μη φοβάσαι την αποτυχία. Όχι η αποτυχία, αλλά ο χαμηλός στόχος είναι έγκλημα. Στις μεγαλειώδεις προσπάθειες ακόμα και η αποτυχία είναι ένδοξη.”

(ένας μεγάλος δάσκαλος...)