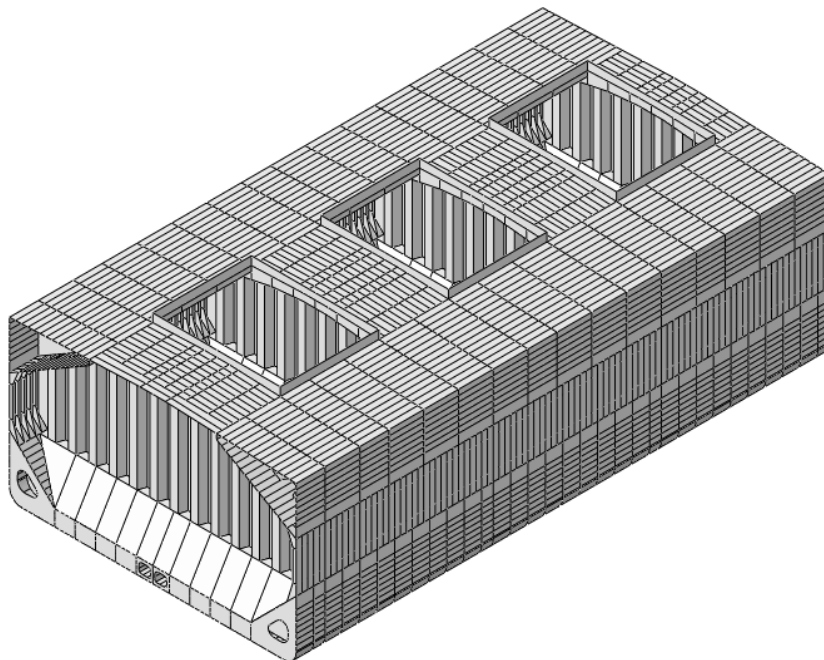




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Έλεγχος αντοχής μεταλλικής κατασκευής Bulk Carrier
σύμφωνα με τους ισχύοντες Κοινούς Κατασκευαστικούς
Κανόνες – CSR 2019



Φωτόπουλος Αλέξανδρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Σαμουηλίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Γ. Ζαραφωνίτης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μέλος Εξεταστικής Επιτροπής: Ν. Τσούβαλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2019

Αφιερώνεται στον πατέρα μου, για τις αξίες που πρόλαβε να μου μεταδώσει και στη μητέρα μου που αποτέλεσε κολώνα στήριξης όλα αυτά τα χρόνια...

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ τον κύριο Μ. Σαμουηλίδη, Καθηγητή του Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π και επιβλέποντα καθηγητή στην παρούσα Διπλωματική μου Εργασία, για την δυνατότητα που μου έδωσε να δουλέψω σε αυτό το ενδιαφέρον και γεμάτο προκλήσεις θέμα, καθώς και για την υπομονή με την οποία με συμβούλεψε κατά τη μελέτη και συγγραφή. Επιπλέον, ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Α. Θεοδουλίδη, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την καθοδήγηση που μου προσέφερε με τις πολύτιμες γνώσεις του πάνω στο θέμα, καθώς και τον χρόνο που αφιέρωσε στην αξιολόγηση της διπλωματικής μου εργασίας. Για την καλή συνεργασία, ευχαριστώ τον Δημήτρη Γεωργιάδη, υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει με τις γνώσεις του και τις συμβουλές του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τους φίλους μου, την κοπέλα μου Δ. και την οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή τους σε κάθε επίπονη μέρα εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Abstract	12
Περίληψη	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή	15
1.1 Γενικά	15
1.2 Κανόνες Νηογνωμόνων (Classification Societies)	16
1.2.1 Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων (IACS)	17
1.3 Κοινός Κατασκευαστικός Κανόνας (CSR).....	17
1.3.1 Εναρμόνιση Κοινών Κατασκευαστικών Κανόνων	18
1.4 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας.....	19
1.5 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Γενικές Αρχές των CSR.....	21
2.1 Εφαρμογή και Διάρθρωση	21
2.2 Χαρακτηρισμοί Κλάσης.....	24
2.3 Βάση Σχεδίασης.....	25
2.4 Σχεδιαστικές Αρχές	26
2.4.1 Σχεδιαστικά Σενάρια Φορτίσεων.....	26
2.4.2 Οριακές καταστάσεις.....	27
2.4.3 Τρόποι Αστοχίας	28
2.5 Μέθοδοι Σχεδίασης.....	29
2.6 Έλεγχος Αντοχής.....	30
2.6.1 Ελάχιστες – Εμπειρικές Απαιτήσεις	30
2.6.2 Απαιτήσεις βασισμένες σε σχεδιαστικές φορτίσεις	31
2.6.3 Σχεδιαστική Επαλήθευση – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων.....	32
2.7 Βασικά Μεγέθη Κανονισμών	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Κατασκευαστικές Αρχές των CSR.....	34
3.1 Η Μεταλλική Κατασκευή Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος.....	34
3.1.1 Κατασκευαστική Ορολογία	37
3.2 Ναυπηγικοί Χάλυβες	38
3.2.1 Γενικές Απαιτήσεις Ποιότητας Χάλυβα	39
3.2.2 Ειδικές Απαιτήσεις Ποιότητας Χάλυβα	40
3.3 Προσέγγιση Καθαρού Πάχους.....	40
3.3.1 Προσαύξηση λόγω διάβρωσης	43
3.3.2 Προσέγγιση Καθαρού Πάχους Συστήματος Ενισχυτικού – Συνεργαζόμενου Ελάσματος.....	44
3.4 Κατασκευαστική Μοντελοποίηση	45
3.4.1 Μοντελοποίηση Διαμήκων Ελασμάτων.....	45

3.4.2	Μοντελοποίηση Διαμήκων Ενισχυτικών	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Φορτίσεις.....		49
4.1	Φορτίσεις Γάστρας	51
4.1.1	Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε Ήρεμο νερό.....	52
4.1.2	Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη σε ήρεμο Νερό	53
4.1.3	Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό.....	53
4.1.4	Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη σε Κυματισμό	54
4.1.5	Οριζόντια Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό.....	55
4.1.6	Στρεπτική Ροπή σε Κυματισμό.....	55
4.2	Δυναμικές Καταστάσεις Φόρτισης.....	56
4.2.1	Ισοδύναμοι Σχεδιαστικοί Κυματισμοί	56
4.2.2	Φορτίσεις Γάστρας για τις Δυναμικές Καταστάσεις Φόρτισης	58
4.2.3	Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων	59
4.3	Κινήσεις και Επιταχύνσεις.....	61
4.4	Τοπικές Εξωτερικές Φορτίσεις.....	63
4.4.1	Υδροστατική Πίεση P_s	63
4.4.2	Πίεση λόγω Κυματισμού P_w	64
4.5	Τοπικές Εσωτερικές Φορτίσεις	73
4.5.1	Πίεση λόγω Ξηρού Φορτίου Χύδην.....	73
4.5.2	Πίεση λόγω Υγρού Φορτίου.....	75
4.5.3	Πίεση λόγω Κατάκλυσης	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Έλεγχος Διαστασιολόγησης Μέσης Τομής.....		77
5.1	Χαρακτηριστικά υπό Εξέταση Πλοίου	78
5.2	Προσέγγιση Καθαρού Πάχους (Net Scantling Approach)	82
5.3	Διαδικασία για τον Έλεγχο Διαμήκους Αντοχής.....	84
5.4	Υπολογισμός Κατακόρυφων Καμπτικών Ροπών.....	85
5.5	Υπολογισμός Απαιτούμενης Ροπής Αντίστασης.....	86
5.5.1	Ελάχιστη Απαιτούμενη Ροπή Αντίστασης και Ροπή Αδράνειας	86
5.5.2	Απαιτούμενη Ροπή Αντίστασης λόγω Επιτρεπόμενης Τάσης.....	86
5.6	Υπολογισμός Πραγματικών Γεωμετρικών Ιδιοτήτων Μέσης Τομής.....	89
5.7	Έλεγχος Γεωμετρικών Ιδιοτήτων και Επιτρεπόμενης Τάσης	90
5.8	Έλεγχος Τοπικής Αντοχής – Περιγραφικές Απαιτήσεις (Load Based).....	91
5.8.1	Κριτήριο Απαιτούμενου Πάχους Ελάσματος	91
5.8.2	Κριτήριο Απαιτούμενης Ροπής Αντίστασης Ενισχυτικού	93
5.8.3	Κριτήριο Απαιτούμενου Πάχους Κορμού Ενισχυτικού	94
5.9	Διαδικασία για τον Έλεγχο Περιγραφικών Απαιτήσεων – Load Based.....	95
5.9.1	Μοντελοποίηση.....	97

5.10	Φορτίσεις και Απαιτήσεις Στοιχείων Εξωτερικού Περιβλήματος.....	99
5.10.1	Υπολογισμός Κινήσεων και Επιταχύνσεων του Πλοίου.....	100
5.10.2	Υπολογισμός Τοπικών Εξωτερικών Φορτίσεων	100
5.10.3	Υπολογισμός Φορτίσεων Γάστρας.....	115
5.10.4	Υπολογισμός Αναπτυσσόμενων Ορθών Τάσεων	116
5.10.5	Απαίτηση Πάχους για Στοιχειώδη Ελάσματα και Κρίσιμες Καταστάσεις	124
5.10.6	Απαίτηση Ροπής Αντίστασης για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις	125
5.10.7	Απαίτηση Πάχους Κορμού για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις	126
5.11	Φορτίσεις και Απαιτήσεις Στοιχείων Χώρου Ξηρού Φορτίου	127
5.11.1	Υπολογισμός Κινήσεων και Επιταχύνσεων του Πλοίου.....	128
5.11.2	Υπολογισμός Επιταχύνσεων Ξηρού Φορτίου.....	129
5.11.3	Υπολογισμός Τοπικών Εσωτερικών Πιέσεων	132
5.11.4	Υπολογισμός Φορτίσεων Γάστρας.....	133
5.11.5	Απαίτηση Πάχους για Στοιχειώδη Ελάσματα και Κρίσιμες Καταστάσεις	135
5.11.6	Απαίτηση Ροπής Αντίστασης για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις	137
5.11.7	Απαίτηση Πάχους Κορμού για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις	139
5.12	Φορτίσεις και Απαιτήσεις Στοιχείων Δεξαμενής Έρματος	141
5.12.1	Υπολογισμός Κινήσεων και Επιταχύνσεων Πλοίου	142
5.12.2	Υπολογισμός Επιταχύνσεων Υγρού Φορτίου	142
5.12.3	Υπολογισμός Φορτίσεων Γάστρας.....	145
5.12.4	Απαίτηση Πάχους για Στοιχειώδη Ελάσματα και Κρίσιμες Καταστάσεις	146
5.12.5	Απαίτηση Ροπής Αντίστασης για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις	147
5.12.6	Απαίτηση Πάχους Κορμού για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις	148
5.13	Έλεγχος Περιγραφικών Απαιτήσεων – Load Based	149
5.14	Ελάχιστες Εμπειρικές Απαιτήσεις.....	151
5.14.1	Έλεγχος Ελάχιστων Εμπειρικών Απαιτήσεων	153
5.15	Απαιτήσεις Λυγηρότητας	154
5.15.1	Έλεγχος Απαιτήσεων Λυγηρότητας.....	155
5.16	Ειδική Απαίτηση Πάχους για Ελάσματα λόγω GRAB [X]	156
5.16.1	Έλεγχος Ειδικής Απαίτησης λόγω GRAB [X].....	157
5.17	Έλεγχος Τοπικής Αντοχής με MARS2000.....	158
5.18	Συγινερωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	– Σχεδιαστική Επαλήθευση με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων... 165	
6.1	Ανάλυση Αντοχής Κύτους Φορτίου (Cargo Hold Analysis)	166
6.2	Κατασκευαστική Μοντελοποίηση	167
6.3	Ανάλυση Πλέγματος.....	168
6.4	Συνοριακές Συνθήκες.....	169

6.5	Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί Φορτίσεων για τα Πεπερασμένα Στοιχεία	170
6.5.1	Επιθυμητές Φορτίσεις Γάστρας.....	171
6.5.2	Διόρθωση Διατμητικής Δύναμης.....	172
6.5.3	Διόρθωση Κατακόρυφης Καμπτικής Ροπής.....	174
6.6	Κριτήρια Ελέγχου – Yield Strength Assessment.....	175
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ανάλυση Μοντέλου Τριών Αρπαριών στο ABAQUS.....		176
7.1	Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	176
7.2	Διαδικασία Ανάλυσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	177
7.3	Προεπεξεργασία – Μοντελοποίηση σε Περιβάλλον ABAQUS/CAE.....	179
7.3.1	Γεωμετρία του Μοντέλου.....	180
7.3.2	Καθορισμός Ιδιοτήτων.....	185
7.3.3	Διακριτοποίηση – Δημιουργία Πλέγματος.....	191
7.3.4	Συνοριακές Συνθήκες	194
7.3.5	Τοπικές Φορτίσεις (Local Loads).....	197
7.3.6	Διορθώσεις Διατμητικών Δυνάμεων και Καμπτικών Ροπών.....	202
7.4	Επίλυση.....	208
7.5	Ανάλυση Αποτελεσμάτων.....	209
7.5.1	Έλεγχος Διαμήκων Κατασκευαστικών Στοιχείων	214
7.5.2	Σχόλια - Συμπεράσματα.....	216
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....		219
8.1	Έλεγχος κριτηρίων διαστασιολόγησης	219
8.2	Σχεδιαστική επαλήθευση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	220
8.3	Μελλοντική Εργασία	221
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		222
Αναλυτικά Δεδομένα Στοιχείων Μέσης Τομής		222
Σχέδιο Μέσης Τομής		230
Βιβλιογραφία		231

Abstract

This work focuses on the strength assessment of structural components of Bulk Carriers based on the methodology presented in the latest Harmonized Common Structural Rules 2019. The study is carried out for an existing Capesize Bulk Carrier with deadweight capacity 190,000 tonnes, built before the period where the first Common Structural Rules for Bulk Carriers were put into action, in order to investigate the scantling requirements. Strength assessment based on the CSR is implemented towards two directions, (i) prescriptive requirements and (ii) design verification based on Finite Element Method.

The first approach (i) consists of requirements with prescriptive format that cover failure modes such as yielding and buckling, through load-based design scenarios and they include minimum requirements and other empirical design requirements. The present study addresses hull local scantlings of longitudinal members (plates and stiffeners) and hull girder strength in terms of yielding capacity. Buckling was not studied in terms of prescriptive requirements, but only in terms of minimum slenderness criteria.

Design verification based on finite element analysis (FEM), which is obligatory for vessels with length greater than 150 m, constitutes the second approach (ii). To further investigate the yielding capacity of the vessel, a stress assessment for a cargo hold in the midship region was implemented, for alternate full load condition, combined with the dynamic load case HSM-1 (sagging). For that purpose, a three-hold analysis was carried out in the complete ABAQUS environment. The parameters included in the Finite Element modelling, as well as the loads and boundary conditions enforced, were compatible with the CSR methodology. The response of the structure was the result of local loads (sea pressure, steel weight and cargo) and global loads (bending moments) applied on both ends of the model, in order to achieve the target shear force at the aft bulkhead of the Midhold and the target maximum bending moment.

The analysis revealed interesting aspects regarding the development of modern ship structure design methodologies for Bulk Carriers. More specifically, it was found that the actual section modulus of the vessel as a hull girder yielding requirement was achieved. As for the hull local scantlings, the latest CSR were found to be more demanding compared to older Class Rules, since the vessel's structure does not comply with various criteria. Finally, the FEM analysis revealed that the structural components in the Midhold display sufficient yielding capacity in the examined study case.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται έλεγχος αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων στην περιοχή της μέσης τομής ενός Bulk Carrier κατηγορίας Capesize και συνολικής χωρητικότητας 190,000 tons DWT, σύμφωνα με τους σύγχρονους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες CSR 2019. Η κατασκευή του συγκεκριμένου πλοίου ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2006, την περίοδο όπου είχαν τεθεί σε εφαρμογή οι πρώτοι κατασκευαστικοί κανόνες CSR – BC. Ωστόσο λόγω της μεταβατικής περιόδου δεν χτίστηκε με βάση τις απαιτήσεις των CSR, αλλά σύμφωνα με τους κανόνες της κλάσης του. Στα πλαίσια λοιπόν της παρούσας μελέτης εξετάζεται κατά πόσο τα κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου ικανοποιούν τις ισχύουσες απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευαστικών κανόνων. Ο έλεγχος πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία έχουν υποστεί διάβρωση και επικεντρώνεται σε δύο επίπεδα: (i) τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων (Prescriptive Requirements) και (ii) τη σχεδιαστική επαλήθευση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method).

Το πρώτο επίπεδο (i) αφορά κριτήρια διαστασιολόγησης που έχουν τη μορφή εξισώσεων και προδιαγράφουν ελάχιστες διαστάσεις και γεωμετρικές ιδιότητες, προκειμένου να ικανοποιούνται οι οριακές καταστάσεις σχεδίασης σε όρους μορφών αστοχίας. Τα κριτήρια αυτά βασίζονται σε σχεδιαστικές φορτίσεις καθώς και σε εμπειρικές σχέσεις και αποτελούν το κατώφλι για τον έλεγχο της διαστασιολόγησης. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται έλεγχος των περιγραφικών απαιτήσεων των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων (ελάσματα & ενισχυτικά) της μέσης τομής του υπό μελέτη Bulk Carrier ως προς τη διαρροή. Επιπλέον, εξετάζονται κριτήρια που αφορούν ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις (Minimum Thicknesses), απαιτήσεις λυγηρότητας (Slenderness Requirements) και ειδικές απαιτήσεις που αφορούν τα Bulk Carriers (Grab Thickness).

Η διαδικασία ελέγχου των περιγραφικών απαιτήσεων πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον MATLAB, μέσω προγράμματος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με στόχο την αυτοματοποίηση της διαδικασίας ελέγχου και την συνοπτική οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα του Γαλλικού Νηογνώμονα MARS2000, για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε. Από την ανάλυση αυτή, διαπιστώθηκε ότι συνολικά η μέση τομή του υπό εξέταση πλοίου διαθέτει επαρκή ροπή αντίστασης για να παραλάβει τις ορθές τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης της γάστρας. Ωστόσο, σε τοπικό επίπεδο, οι απαιτήσεις των σύγχρονων κοινών κατασκευαστικών κανόνων διαπιστώθηκε πως είναι σαφώς αυστηρότερες σε σχέση με προηγούμενους κανόνες Νηογνωμόνων, καθώς σε πολλά σημεία της διατομής οι καθαρές διαστάσεις των τοπικών κατασκευαστικών στοιχείων δεν καλύπτουν τις παραπάνω απαιτήσεις.

Το δεύτερο επίπεδο (ii) αφορά τον απευθείας υπολογισμό της απόκρισης ενός κύτους (Direct Strength Analysis) στην περιοχή της μέσης τομής, υπό δεδομένες φορτίσεις και την επακόλουθη αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας έναντι διαρροής (Stress Assessment), στα πλαίσια σχεδιαστικής επαλήθευσης.

Κατά τη διαδικασία αυτή, αναπτύχθηκε μοντέλο έπτασης τριών αμπαριών (3 Hold Analysis) του υπό εξέταση πλοίου, στο υπολογιστικό περιβάλλον ABAQUS CAE και εξετάστηκε σε συνδυασμό κατάστασης φόρτωσης εναλλάξ και δυναμικής κατάστασης HSM1 (Sagging). Η μοντελοποίηση, καθώς και η επιβολή των φορτίσεων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία των κανόνων. Τέλος, η επιθυμητή εντατική κατάσταση προέκυψε μετά από διορθώσεις των καμπτικών ροπών και των διατμητικών δυνάμεων, που διασφαλίζουν ότι η απόκριση του μοντέλου προσομοιάζει το συγκεκριμένο τμήμα του πλοίου. Η αξιολόγηση της αντοχής πραγματοποιήθηκε για το μεσαίο κύτος του μοντέλου, στο οποίο η απόκριση που προέκυψε από αυτήν την ανάλυση βρέθηκε εντός της επιτρεπόμενης τάσης, διαπιστώνοντας ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή έναντι διαρροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Παραδοσιακά, το ξύλο αποτελούσε το συμβατικό υλικό κατασκευής των περισσότερων πλοίων. Ωστόσο, από τα μέσα του 19^{ου} αιώνα, η εξέλιξη της τεχνολογίας επέτρεψε την αντικατάστασή του από μεταλλικά υλικά, παρέχοντας τη δυνατότητα κατασκευής πλοίων με μεταφορική ικανότητα τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη. Από την άλλη, με τη χρήση πλέον των μεταλλικών υλικών και ειδικότερα του χάλυβα ως συμβατικό υλικό, καθώς και με τη σταδιακή βελτίωση των ιδιοτήτων του, έγινε δυνατή η ελάττωση των διαστάσεων των κατασκευαστικών στοιχείων σε τέτοιο βαθμό, με αποτέλεσμα την ένταξη της σύγχρονης μεταλλικής κατασκευής των πλοίων στην κατηγορία των λεπτότοιχων κατασκευών.

Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου διαφέρει σημαντικά από μια συμβατική δομοστατική μεταλλική κατασκευή, τόσο από πλευράς μορφολογίας, όσο και από πλευράς φορτίσεων. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για μεγάλες κινούμενες κατασκευές που έχουν σύνθετη κελυφοειδή μορφή και σε αντίθεση με τα πλαίσια, τα οποία αποτελούνται από δοκούς, υποστυλώματα και ράβδους, χρησιμοποιούν εκτεταμένες κατασκευές (εξωτερικό περίβλημα, καταστρώματα), οι οποίες αποτελούνται από λεπτότοιχα ενισχυμένα ελάσματα. Επιπλέον, οι φορτίσεις που καταπονούν το πλοίο, οφείλονται τόσο σε στατικά, όσο και σε δυναμικά φορτία. Αυτές οι φορτίσεις, οι οποίες προέρχονται από το θαλάσσιο περιβάλλον και τη λειτουργία της ίδιας της κατασκευής, μεταβάλλονται διαρκώς και έχουν στοχαστικό χαρακτήρα. Επίσης, λόγω του έντονα διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργούν τα πλοία, παρουσιάζονται μεγάλες φθορές στα επιμέρους τμήματα της κατασκευής. Η πολυπλοκότητα λοιπόν της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, αλλά και των φαινομένων που την καταπονούν καθιστά τη μελέτη αντοχής ένα σύνθετο πρόβλημα.

Ένα τέτοιο πρόβλημα, όπως και τα περισσότερα σύνθετα προβλήματα, προκειμένου να μελετηθεί, πρέπει να αναχθεί σε μια σειρά από επιμέρους ανεξάρτητα προβλήματα, τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν μεμονωμένα και να υπερτεθούν. Η προσπάθεια μελέτης αντοχής ξεκίνησε με τη χρήση απλών μοντέλων, ικανά να δώσουν κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα όσον αφορά την πρόβλεψη των καταπονήσεων της κατασκευής. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύχθηκαν και οι πρώτοι κανόνες των Νηογνωμόνων για τη σχεδίαση και τη διαστασιολόγηση της μεταλλικής κατασκευής των πλοίων με σκοπό την εξασφάλιση επαρκούς αντοχής. Έκτοτε αποτελούν την καθιερωμένη μέθοδο για τη μελέτη αντοχής, καθώς και πιστοποίησης της κατασκευαστικής αξιοπιστίας των πλοίων.

Αρχικά, οι κανόνες βασίζονταν στη χρήση απλών συντελεστών ασφαλείας και ημι-εμπειρικών τύπων, οι οποίοι αδυνατούσαν να εκτιμήσουν ικανοποιητικά τόσο την πραγματική φύση των φορτίσεων όσο και την απόκριση της κατασκευής. Με την πάροδο του χρόνου όμως, αναπτύχθηκαν εξελιγμένες διαδικασίες μελέτης βασισμένες σε πειραματικά αποτελέσματα, θεωρητικά εργαλεία και αριθμητικές μεθόδους (τις τελευταίες δεκαετίες) οι οποίες αποβλέπουν στον ορθολογικότερο σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής και τη διαστασιολόγηση της κατασκευής με βάση τις απαιτήσεις των Αρχών της Μηχανικής.

Οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες που αφορούν αφενός τις φορτίσεις και αφετέρου την αντοχή και εισάγουν τη σύγχρονη μέθοδο σχεδιασμού βάσει οριακών καταστάσεων (Limit States), όπως μέγιστης αντοχής, λειτουργικότητας και κόπωσης. Συνεπώς, οι σύγχρονοι κανόνες των Νηογνωμόνων παίζουν σημαντικό ρόλο στην αξιοπιστία της κατασκευής του πλοίου και πιστοποιούν την αξιοπλοΐα και την ασφάλεια του τόσο κατά τη σχεδίαση, όσο και τη διάρκεια ζωής του.

1.2 Κανόνες Νηογνώμωνων (Classification Societies)

Οι Νηογνώμονες (κλάσεις) είναι μη κυβερνητικοί οργανισμοί οι οποίοι αναπτύσσουν και εκδίδουν **κανόνες (rules)** που αφορούν την κατασκευή και τη διατήρηση επαρκούς αντοχής αλλά και την επάρκεια ζωτικών μηχανικών συστημάτων του πλοίου. Πρόκειται για ένα θεσμό στενά συνυφασμένο με τη ναυτιλία και τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), ο οποίος από τη μεριά του υιοθετεί **κανονισμούς (regulations)** με πιο επίσημη ισχύ και κρατική υπόσταση μέσω νομοθεσίας. Σκοπός των δύο αυτών θεσμών είναι να αντιμετωπίσουν την ασφάλεια των πλοίων μέσω επιβολής περιορισμών και η εφαρμογή τους είναι ουσιώδης προϋπόθεση για να αποκτήσει το πλοίο τα απαραίτητα πιστοποιητικά λειτουργίας του. Για το λόγο αυτό, τα πλοία προκειμένου να αποκτήσουν την επιθυμητή πιστοποίηση (classification) που αφορά την κατασκευαστική τους αξιοπιστία, καθώς και την αξιοπιστία των βασικών τους συστημάτων, θα πρέπει να συμμορφώνονται πλήρως στους κανόνες των Νηογνώμωνων, τόσο κατά τη σχεδίαση και τη ναυπήγηση, μέσω της παρακολούθησης της κατασκευής, όσο και κατά τη διάρκεια της ζωής τους, μέσω περιοδικών επιθεωρήσεων.

Οι κανόνες των Νηογνώμωνων εφαρμόζονται σε όλα τα χαλύβδινα πλοία και εμπεριέχουν λεπτομερείς απαιτήσεις που αφορούν τα υλικά κατασκευής, την κατασκευαστική δομή του πλοίου, τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, τα συστήματα ελέγχου και τα κύρια και βοηθητικά μηχανήματα. Πιο συγκεκριμένα για την κατασκευή του πλοίου, τα βασικά ζητήματα που καλύπτουν οι κανόνες είναι τα παρακάτω:

- Η χημική σύνθεση και οι ιδιότητες των υλικών
- Η διαμήκης αντοχή και οι επιτρεπόμενες καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις.
- Το πάχος ελασμάτων των καταστρωμάτων, του περιβλήματος των διπυθμένων και των φρακτών
- Τα λεπτομερή κατασκευαστικά στοιχεία, οι αποστάσεις και οι συνδέσεις των ενισχυτικών
- Η διάταξη και οι διαστάσεις των κυρίων στοιχείων της κατασκευής
- Τα λεπτομερή κατασκευαστικά στοιχεία σε σημεία τομής των δευτερευόντων ενισχυτικών με την κύρια κατασκευή, που αφορούν στην ικανοποιητική συμπεριφορά έναντι κόπωσης
- Τύποι συγκολλήσεων

Οι κανόνες αυτοί εξασφαλίζουν επαρκή ολική και τοπική αντοχή. Στα πλαίσια της ολικής αντοχής, η γάστρα θα πρέπει να αντέχει ως δοκάρι συγκεκριμένες φορτίσεις σε ήρεμο νερό και σε κυματισμό και οι αναπτυσσόμενες τάσεις θα πρέπει να βρίσκονται σε συγκεκριμένα αποδεκτά όρια. Από την άλλη μεριά, στα πλαίσια της τοπικής αντοχής, τα δομικά στοιχεία της κατασκευής θα πρέπει να έχουν επαρκή αντίσταση σε διάφορες πιθανές μορφές αστοχίας (λυγισμός, κόπωση, διαρροή και ψαθυρή θραύση), κάτι που εξασφαλίζεται μέσω των απαιτήσεων των Νηογνώμωνων που αφορούν στην επιλογή των υλικών κατασκευής και στη λεπτομερή τοπική δομή ενισχυτικών και ελασμάτων (Scantlings). Για τα περισσότερα δομικά στοιχεία, οι απαιτήσεις αυτές δίνονται υπό τη μορφή απλών τύπων οι οποίοι όμως βασίζονται στην υπόθεση κάποιας αναμενόμενης φόρτισης. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ο περιορισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων σε κάποια αποδεκτά ασφαλή όρια.

Οι κανόνες των Νηογνώμωνων έχουν αναπτυχθεί πάνω σε θεωρητικές μελέτες, οι οποίες αφενός εξάγουν συναρτησιακές σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων που επηρεάζουν την αντοχή και αφετέρου προσεγγίζουν τις αποκρίσεις του πλοίου και της τοπικής κατασκευής. Ωστόσο, επειδή οι μελέτες αυτές βασίζονται σε εξιδανικευμένες καταστάσεις, διορθώνονται μετά από συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα, αλλά και με τη συλλογή και την ανάλυση εμπειρικών και στατιστικών δεδομένων. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι τα τελευταία χρόνια, στα πλαίσια του ορθολογικού σχεδιασμού, χρησιμοποιούνται όλο ένα και περισσότερο αριθμητικές μέθοδοι (Πεπερασμένα Στοιχεία) που δίνουν ακριβείς προβλέψεις για την απόκριση της μεταλλικής κατασκευής.

1.2.1 Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (IACS)

Στα πλαίσια ανάπτυξης μιας κοινής γραμμής από πρότυπα κανόνων (Classification Standards) για την πιστοποίηση των πλοίων, δημιουργήθηκε η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (International Association of Classification Societies). Τα μέλη του IACS εκδίδουν πιστοποιήσεις που καλύπτουν πάνω από το 90% του παγκόσμιου εμπορικού στόλου. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται από τα παρακάτω 12 μέλη:

- Αγγλικός Νηογνώμονας (LR)
- Αμερικανικός Νηογνώμονας (ABS)
- Γαλλικός Νηογνώμονας (BV)
- Νορβηγικός – Γερμανικός Νηογνώμονας (DNV – GL)
- Ιαπωνικός Νηογνώμονας (NK)
- Ινδικός Νηογνώμονας (IR)
- Ιταλικός Νηογνώμονας (RINA)
- Κινεζικός Νηογνώμονας (CCS)
- Κορεατικός Νηογνώμονας (KR)
- Κροατικός Νηογνώμονας (CRS)
- Πολωνικός Νηογνώμονας (PRS)
- Ρωσικός Νηογνώμονας (RS)

Ο IACS είναι μια μη κυβερνητική οργάνωση που αποτελεί κύριο συνεργάτη του IMO, με συμβουλευτικό χαρακτήρα παρέχοντας τεχνική υποστήριξη στις διαδικασίες θέσπισης κανονισμών και στην επιβολή τους μέσω της συνεργασίας των κλάσεων με τις κρατικές σημείες. Αποτελεί το όργανο μέσω του οποίου εκδίδονται οι διάφορες οδηγίες του IMO που αφορούν την ασφάλεια των πλοίων αλλά και του περιβάλλοντος. Μια από τις χαρακτηριστικότερες αυτές οδηγίες είναι η Διεθνής Σύμβαση που αφορά την ασφάλεια της ζωής στη θάλασσα (SOLAS).

Σκοπός του IACS είναι η επίτευξη ενός βαθμού συμφωνίας μεταξύ των κανόνων που εκδίδονται από τα μέλη του αλλά και η ανάπτυξη μιας κοινής φιλοσοφίας γύρω από τους κανόνες. Σε αυτό το πλαίσιο δημιουργήθηκαν οι ενοποιημένες απαιτήσεις (Unified Requirements) που αποτελούν τις ελάχιστες απαιτήσεις βάσει των οποίων πρέπει να διαμορφώνονται οι κανόνες κάθε μέλους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων απαιτήσεων είναι το UR – S (Strength of Ships) που αφορά την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής διαφόρων πλοίων και συμπληρώνεται από επιπλέον κανόνες της κάθε κλάσης. Ταυτόχρονα, μέσω της συνεργασίας των κλάσεων οι κανόνες αναδιαμορφώνονται διαρκώς σύμφωνα με νέα πάντα δεδομένα και εξελίσσονται μαζί με την τεχνολογία και τις πρακτικές της ναυπηγικής βιομηχανίας.

1.3 Κοινοί Κατασκευαστικοί Κανόνες (CSR)

Παρόλο που οι ενοποιημένες απαιτήσεις (U.R.) αποτέλεσαν μια κοινή αφετηρία, κάθε μέλος εξακολούθησε να εκδίδει τους δικούς του κανόνες. Σε ορισμένα θέματα εξακολούθησε να υπάρχει ασυμφωνία στη φιλοσοφία της προσέγγισης και δυσκολία στη δημιουργία κοινών προτύπων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η **προσέγγιση του περιθωρίου διάβρωσης (Net Scantling Approach)** ιδιαίτερα στα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (Bulk Carriers) και στα δεξαμενόπλοια (Tankers).

Με αφορμή και κάποια σοβαρά ατυχήματα που συνέβησαν τη δεκαετία του '80 και του '90, όπου φορτωμένα εμπορικά πλοία (bulk carriers) χάθηκαν σε καινοκαιρία και δεξαμενόπλοια αστόχησαν και βυθίστηκαν προκαλώντας εκτεταμένη μόλυνση στο θαλάσσιο περιβάλλον και τις ακτές, η διεθνής ναυτιλία θεώρησε σκόπιμη την υιοθέτηση κοινών προτύπων για τη ναυπήγηση τέτοιων πλοίων. Για τον καλύτερο λοιπόν συντονισμό της ναυπηγικής βιομηχανίας, με σκοπό την σχεδίαση ασφαλέστερων πλοίων τόσο ως προς την ίδια την κατασκευή, όσο και ως προς το περιβάλλον δημιουργήθηκαν οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες (**Common Structural Rules**), οι οποίοι εκδόθηκαν το 2004.

Στις 14 Δεκεμβρίου 2005, η Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων (IACS) υιοθέτησε παμφηφεί τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες για δεξαμενόπλοια διπλού τοιχώματος (CSR – OT) και τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες για πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (CSR – BC), με ημερομηνία πρώτης εφαρμογής το 2006. Τα δύο αυτά σετ κανονισμών αναπτύχθηκαν ξεχωριστά για τα τους δύο τύπους πλοίων, χρησιμοποιώντας τα καλύτερα τμήματα των προ – CSR κανονισμών, καθώς και τη συνδυασμένη εμπειρία όπως και τους πόρους όλων των Νηογνομόνων οι οποίοι συμμετείχαν σε αυτήν την πρωτοβουλία με σκοπό μια πιο σαφή μεθοδολογία σχεδίασης της κατασκευής.

Με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες, όλες οι προηγούμενες ενοποιημένες απαιτήσεις αναθεωρήθηκαν και αναδιαμορφώθηκαν προκειμένου να συμφωνούν με τους CSR. Επιπλέον, εισήχθησαν αυστηρές απαιτήσεις για τον υπολογισμό του ορίου διάβρωσης (Corrosion Addition) και την προσέγγιση καθαρού πάχους (Net Scantling Approach), για την αντοχή σε κόπωση (Fatigue Assessment), καθώς και εκτενής μεθοδολογία για τον προδιαγεγραμμένο προσδιορισμό των διαστάσεων των κατασκευαστικών στοιχείων (Prescriptive Scantling Requirements) και την ανάλυση της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (FEA strength assessment). Οι καινοτομίες αυτές αποσκοπούσαν στον ορθολογικότερο σχεδιασμό και στην καλύτερη αξιοπιστία των νέων σχεδιάσεων των εμπορικών πλοίων συνεισφέροντας στην ανθεκτικότητα της μεταλλικής κατασκευής καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Η σαφήνεια των βασικών αρχών που χρησιμοποιούν και περιλαμβάνεται στα έγγραφα τεχνικού υπόβαθρου (Technical Background Documents) βοηθούν στην αξιολόγηση των απαιτήσεων και συνεισφέρουν στην ανάπτυξη μελλοντικών κανονισμών.

1.3.1 Εναρμόνιση Κοινών Κατασκευαστικών Κανόνων

Ήδη από τη στιγμή της υιοθέτησης των κοινών κατασκευαστικών κανόνων, ο IACS στόχευε στην πλήρη εναρμόνιση των κανόνων, προκειμένου να εξαλείψει τις όποιες παρεκκλίσεις και να πετύχει μία κοινή γραμμή σχεδίασης και μελέτης για τους δύο τύπους πλοίων. Για αυτό το λόγο, το 2014 πραγματοποιήθηκε ενοποίηση των κανόνων (Harmonization) και σήμερα πλέον έχει αναπτυχθεί ένα κοινό σετ κανονισμών “Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers” (CSR BC & OT) αποτελούμενο από δύο μέρη (Parts):

- Το πρώτο μέρος (Part 1: General Hull Requirements), το οποίο περιλαμβάνει τις κοινές απαιτήσεις τόσο για Bulk Carriers όσο και για Oil Tankers, που αφορούν τις φορτίσεις λόγω κυματισμών, την κόπωση, τον λυγισμό και την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Το δεύτερο μέρος (Part 2: Ship Type Requirements), το οποίο παρέχει επιπλέον ειδικές απαιτήσεις ανάλογα τον τύπο του πλοίου.

Αυτό το κοινό σετ αποτελεί τους τωρινούς εναρμονισμένους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (CSR – Harmonized) και ισχύουν για πλοία που χτίζονται από το 2016 και μετά, με σκοπό να αυξήσουν τις τεχνικές προδιαγραφές των Bulk Carriers και Oil Tankers στα επόμενα χρόνια.

1.4 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος αντοχής της μεταλλικής κατασκευής πλοίων τύπου Bulk Carrier, με βάση τη μεθοδολογία που εμπεριέχεται στους σύγχρονους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (*Common Structural Rules for Oil Tankers and Bulk Carriers 2019*). Πέραν της εξοικείωσης με το τεχνικό υπόβαθρο των κανόνων, η εργασία αυτή έχει ως σκοπό τόσο την παρουσίαση της μεθοδολογίας για τον έλεγχο αντοχής όσο και την ανάπτυξη εργαλείων και μοντέλων που σχετίζονται με αυτήν την διαδικασία.

Η μεθοδολογία των κανόνων εφαρμόζεται για τον έλεγχο αντοχής της μεταλλικής κατασκευής ενός υπάρχοντος πλοίου Bulk Carrier, κατηγορίας Capesize, με στόχο τον έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής των κατασκευαστικών στοιχείων στην περιοχή της μέσης τομής. Η κατασκευή του συγκεκριμένου πλοίου ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2006, την περίοδο όπου είχαν τεθεί σε εφαρμογή οι πρώτοι κατασκευαστικοί κανόνες CSR – BC. Ωστόσο λόγω της μεταβατικής περιόδου δεν χτίστηκε με βάση τις απαιτήσεις των CSR, αλλά σύμφωνα με τους κανόνες της κλάσης του. Στα πλαίσια λοιπόν της παρούσας μελέτης εξετάζεται κατά πόσο τα κατασκευαστικά στοιχεία (ελάσματα & ενισχυτικά) ικανοποιούν τις ισχύουσες απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευαστικών κανόνων. Ο έλεγχος πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία έχουν υποστεί διάβρωση και επικεντρώνεται σε δύο επίπεδα: (i) τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων (Prescriptive Requirements) και (ii) τη σχεδιαστική επαλήθευση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method).

Το πρώτο επίπεδο (i) αφορά κριτήρια διαστασιολόγησης που έχουν τη μορφή εξισώσεων και προδιαγράφουν ελάχιστες διαστάσεις και γεωμετρικές ιδιότητες, προκειμένου να ικανοποιούνται οι οριακές καταστάσεις σχεδίασης σε όρους μορφών αστοχίας. Τα κριτήρια αυτά βασίζονται σε σχεδιαστικές φορτίσεις καθώς και σε εμπειρικές σχέσεις και αποτελούν το κατώφλι για τον έλεγχο της διαστασιολόγησης. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται έλεγχος των περιγραφικών απαιτήσεων των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων της μέσης τομής του υπό μελέτη Bulk Carrier ως προς τη διαρροή. Επιπλέον, εξετάζονται κριτήρια που αφορούν ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις (Minimum Thicknesses), απαιτήσεις λυγηρότητας (Slenderness Requirements) και ειδικές απαιτήσεις που αφορούν τα Bulk Carriers (Grab Thickness).

Στο πλαίσιο (i) αναπτύχθηκε ένα υπολογιστικό εργαλείο στο περιβάλλον MATLAB ικανό να αυτοματοποιεί τη διαδικασία ελέγχου των περιγραφικών απαιτήσεων για τα διαμήκη στοιχεία (ελάσματα & ενισχυτικά) σε κριτήρια που αφορούν διαρροή και εμπειρικά κριτήρια, καθώς και να επιταχύνει σημαντικά την διαδικασία ελέγχου αντοχής, η οποία περιλαμβάνει την εξέταση πολλών καταστάσεων. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα του Γαλλικού Νηογνώμονα για την επαλήθευση της μεθοδολογίας και των αποτελεσμάτων.

Το δεύτερο επίπεδο (ii) αφορά τον απευθείας υπολογισμό της απόκρισης ενός κύτους (Direct Strength Analysis) στην περιοχή της μέσης τομής, υπό δεδομένες φορτίσεις και την επακόλουθη αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας έναντι διαρροής (Stress Assessment), στα πλαίσια σχεδιαστικής επαλήθευσης.

Κατά τη διαδικασία αυτή, αναπτύχθηκε μοντέλο έκτασης τριών αμπαριών (3 Hold Analysis) του υπό εξέταση πλοίου, στο υπολογιστικό περιβάλλον ABAQUS CAE και εξετάστηκε σε συνδυασμό κατάστασης φόρτωσης εναλλάξ και δυναμικής κατάστασης HSM1 (Sagging). Στόχος ήταν η διερεύνηση της καταλληλότητας του συγκεκριμένου υπολογιστικού πακέτου για την μελέτη τριών αμπαριών σύμφωνα με την μεθοδολογία των CSR2019. Η μοντελοποίηση, καθώς και η επιβολή των φορτίσεων πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη μεθοδολογία των κανόνων, ενώ η αξιολόγηση της αντοχής πραγματοποιήθηκε για το μεσαίο κύτος του μοντέλου.

1.5 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η βασική φιλοσοφία των κοινών κατασκευαστικών κανόνων. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στο πεδίο εφαρμογής των κανόνων και τον τρόπο με τον οποίο διαρθρώνονται, στις υποθέσεις στις οποίες βασίζονται, στις σχεδιαστικές αρχές και στην διαδικασία που ακολουθείται για τον έλεγχο αντοχής. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται βασικές κατασκευαστικές αρχές που αφορούν τη σχεδίαση, την επιλογή υλικών και τον τρόπο μοντελοποίησης των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων για τον υπολογισμό της αντοχής τους. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα είδη των σχεδιαστικών φορτίσεων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας. Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται ο έλεγχος διαστασιολόγησης των διαμήκων στοιχείων της μέσης τομής του υπό μελέτη Bulk Carrier, σύμφωνα με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες. Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρώτο στάδιο για τον έλεγχο αντοχής του πλοίου και περιλαμβάνει τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων (Prescriptive Requirements), οι οποίες προδιαγράφουν ελάχιστα απαιτούμενα πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες για τα κατασκευαστικά στοιχεία της μέσης τομής. Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία ελέγχου αντοχής με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων με έμφαση στην ανάλυση αντοχής ενός κύτους φορτίου (Cargo Hold Analysis) στην περιοχή του φορτίου για τον έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής (Stress Assessment), όπως προδιαγράφεται από τους κανόνες. Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται η ανάλυση ενός μοντέλου τριών αμπαριών (3 Hold Analysis) στο υπολογιστικό περιβάλλον ABAQUS CAE, για την αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας έναντι διαρροής για το μεσαίο κύτος. Τα συμπεράσματα που εξάγονται από το κεφάλαιο 5 και 7 αναλύονται στο Κεφάλαιο 8. Τέλος, στο Παράρτημα παρατίθεται βοηθητικό υλικό σχετικά με τα δεδομένα των στοιχείων της μέσης τομής του υπό μελέτη πλοίου, ενώ η βιβλιογραφία, αποτελεί την κατακλείδα αυτής της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Γενικές Αρχές των CSR

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η βασική φιλοσοφία των κοινών κατασκευαστικών κανόνων. Πιο αναλυτικά, περιγράφονται τα παρακάτω σημεία:

- Το πεδίο εφαρμογής των κανόνων και ο τρόπος με τον οποίο διαρθρώνονται
- Οι κλάσεις των κανόνων με βάση τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του πλοίου
- Οι υποθέσεις σχετικά με τη λειτουργία του πλοίου και οι παράμετροι σχεδίασης
- Οι σχεδιαστικές αρχές και οι σχεδιαστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των κατασκευαστικών απαιτήσεων και τον έλεγχο αντοχής
- Η διαδικασία που ακολουθείται για τον έλεγχο της αντοχής σύμφωνα με τους κανόνες
- Τα βασικά μεγέθη που χρησιμοποιούνται και οι αντίστοιχοι συμβολισμοί

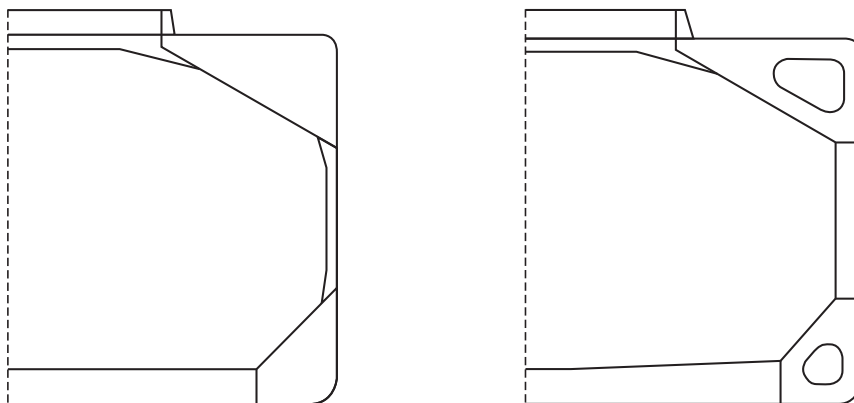
2.1 Εφαρμογή και Διάρθρωση

Οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες έχουν εφαρμογή στους παρακάτω τύπους εμπορικών πλοίων:

- Πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (Bulk Carriers) μονού ή διπλού τοιχώματος με μήκος μεγαλύτερο από 90 m.
- Δεξαμενόπλοια (Oil Tankers) διπλού τοιχώματος, πλήρως συμμορφωμένα με τους κανονισμούς της MARPOL 73/78 (Annex I), με μήκος μεγαλύτερο από 150 m.

Τα πλοία αυτά θεωρείται ότι δεν έχουν κάποιο γεωγραφικό περιορισμό ναυσιπλοΐας (unrestricted navigation) και ταξιδεύουν σε όλες τις θάλασσες, όλες τις εποχές του χρόνου. Ακόμη, οι κανόνες αυτοί βασίζονται στη θεώρηση ότι τα πλοία αυτά είναι σχεδιασμένα ώστε να διαθέτουν διπύθμενο με ύψος το οποίο υπακούει στους θεσπισμένους κανονισμούς του IMO και ότι το μηχανοστάσιο βρίσκεται πρὸ μνηθεν της περιοχής του φορτίου.

Όσον αφορά τη διάταξη της μεταλλικής κατασκευής, για να έχουν εφαρμογή οι κανόνες στους συγκεκριμένους τύπους πλοίων θα πρέπει να συνάδει με τις τυπικές διατάξεις των αντίστοιχων τύπων πλοίου, με τα χαρακτηριστικά στοιχεία που έχει η μέση τομή του καθενός. Συγκεκριμένα για Bulk Carriers, θεωρείται ότι είναι κατασκευασμένα με ένα κατάστρωμα, διπύθμενο, πλευρικές δεξαμενές και μονό ή διπλό τοίχωμα. Επιπλέον, ειδικά τα Bulk Carriers μονού τοιχώματος, θεωρείται ότι διαθέτουν διάμηκες σύστημα ενίσχυση με εγκάρσιους νομείς στα πλευρικά ελάσματα. Τυπικές διατάξεις μέσης τομής Bulk Carrier για τις οποίες έχουν εφαρμογή οι κανονισμοί παρουσιάζονται στο σχήμα (2.1).



Σχήμα 2.1: Τυπική διάταξη μέσης τομής Bulk Carrier μονού τοιχώματος (αριστερά) και διπλού τοιχώματος (δεξιά)

Οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες αποτελούν ένα ιδιαίτερο πλαίσιο κανόνων σε σύγκριση με προγενέστερους κανονισμούς (URS) και ένας από τους λόγους είναι η ενιαία μεθοδολογία για τη μελέτη διαφόρων φαινομένων που παρουσιάζονται στη μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου. Προκειμένου να γίνει σωστή αξιοποίηση των κριτηρίων που προδιαγράφουν πρέπει να πραγματοποιηθεί εκτενής ανάλυση όλων των σχετικών παραμέτρων που καταμερίζονται στα επιμέρους κεφάλαια των κανόνων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι εναρμονισμένοι κανόνες αποτελούνται από δύο μέρη (Parts). Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει τους κοινούς κατασκευαστικούς κανονισμούς για τους δύο τύπους πλοίων, ενώ το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει ειδικές απαιτήσεις για κάθε τύπο πλοίου. Τα μέρη αυτά διαρθρώνονται σε επιμέρους κεφάλαια και υποενότητες, παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες για την εφαρμογή τους, καθώς και τις απαιτήσεις οι οποίες πρέπει να καλυφθούν. Πιο αναλυτικά, η δομή των κατασκευαστικών κανόνων παρουσιάζεται στον πίνακα (2.1).

Πίνακας 2.1: Δομή των εναρμονισμένων κανόνων CSR – H

Part 1: General Hull Requirements	Part 2: Ship Types
→ Chapter 1: Rule General Principles	→ Chapter 1: Bulk Carriers
→ Chapter 2: General Arrangement Design	→ Chapter 2: Oil Tankers
→ Chapter 3: Structural Design Principles	
→ Chapter 4: Loads	
→ Chapter 5: Hull Girder Strength	
→ Chapter 6: Hull Local Scantling	
→ Chapter 7: Direct Strength Analysis	
→ Chapter 8: Buckling	
→ Chapter 9: Fatigue	
→ Chapter 10: Other Structures	
→ Chapter 11: Superstructure, Deckhouses and Hull Outfittig	
→ Chapter 12: Construction	
→ Chapter 13: Ship in Operantion - Renewal Criteria	

Λόγω της μεγάλης έκτασης των κανόνων, χρησιμοποιείται συντομογραφία, η οποία παραπέμπει τον αναγνώστη στο ελάχιστο εδάφιο για την αποδοτική επεξήγηση της μεθοδολογίας. Η ιεραρχία με την οποία διαρθρώνονται οι υποενότητες παρουσιάζεται στον πίνακα (2.2). Στην πορεία της διπλωματικής εργασίας γίνονται πολλές παραπομπές, σχετικά με το που βρίσκεται ο ελάχιστος κανόνας, με την εξής αναφορά: {Pt/Ch/Sec/[...]}.

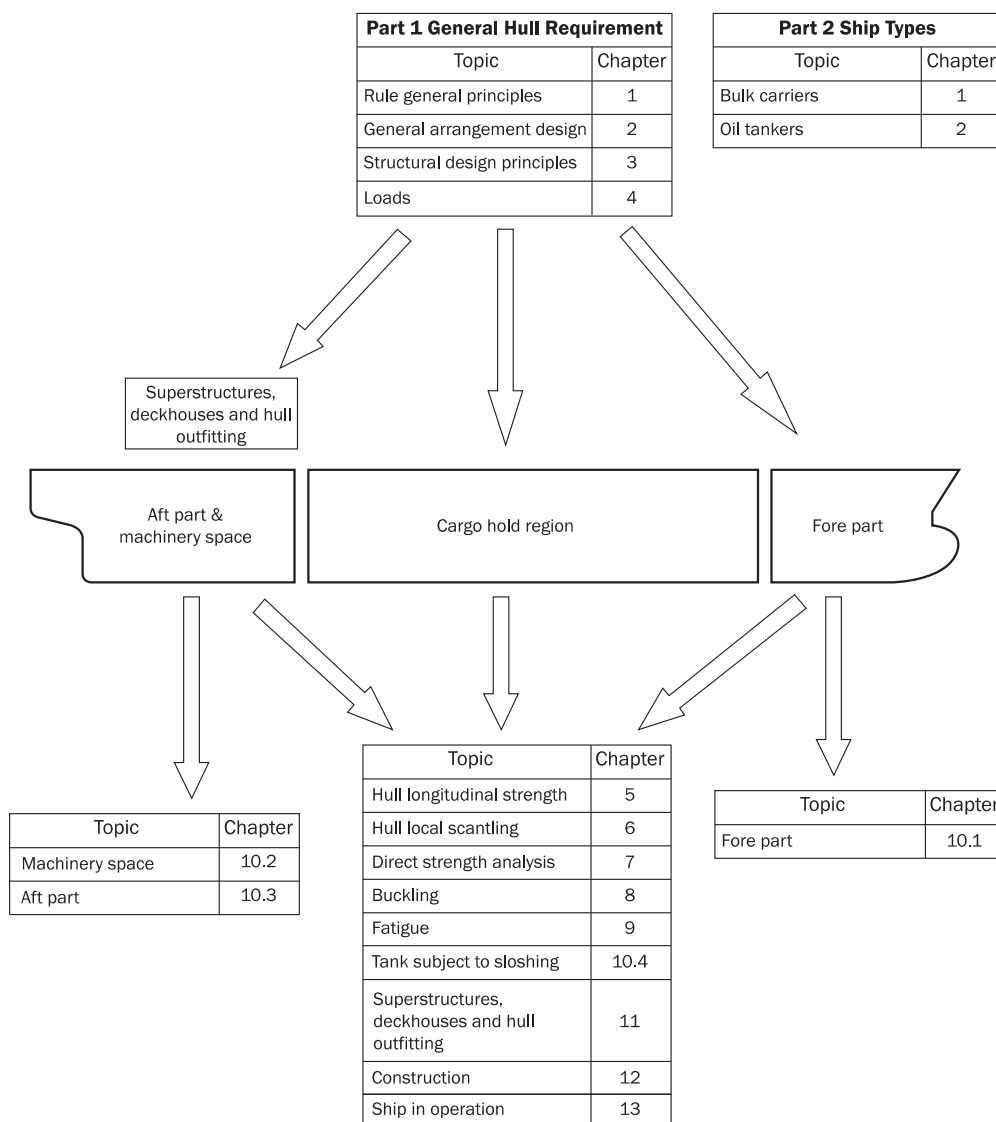
Πίνακας 2.2: Αρίθμηση και Συντομογραφία των ενοτήτων

Order	Levels	Example	Abbreviations
1	Part	Part 1 – General Hull Requirements	Pt 1
2	Chapter	Chapter 1 – Rule General Principle	Ch 1
3	Section	Section 1 – Application	Sec 1
4	Article	1. Scope of Application	[1]
5	Sub-article	1.1 General	[1.1]
6	Requirements	1.1.1 These Rules apply to...	[1.1.1]

Τα παραπάνω κεφάλαια των κανόνων εφαρμόζονται ξεχωριστά σε επιμέρους τμήματα του πλοίου, τα οποία εξετάζονται μεμονωμένα. Συγκεκριμένα, το πλοίο χωρίζεται στα εξής τμήματα:

- Πρωραίο Τμήμα (Fore Part): Η περιοχή πλώραθεν της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης
- Περιοχή Φορτίου (Cargo Hold Region): Η περιοχή μεταξύ της πρωραίας φρακτής σύγκρουσης και της πρυμναίας φρακτής μηχανοστασίου
- Χώρος Μηχανοστασίου (Machinery Space): Η περιοχή μεταξύ της πρυμναίας φρακτής και της φρακτής μηχανοστασίου
- Πρυμναίο Τμήμα (Aft Part): Η περιοχή πρύμνηθεν της πρυμναίας φρακτής
- Υπερκατασκευές & Πυργωτά Υπερκατασκευάσματα (Superstructures and Deckhouses): Οι κλειστές κατασκευές που βρίσκονται πάνω στο κατάστρωμα εξάλων (freeboard deck) και εκτείνονται είτε από πλευρά σε πλευρά του πλοίου, είτε μέχρι 4% του μέγιστου πλάτους

Τα γενικά στοιχεία που εξετάζονται από τους κανόνες για κάθε τμήμα είναι η τυπική διάταξη του πλοίου, οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες και οι διαστάσεις των κατασκευαστικών στοιχείων σε καθαρό και ολικό πάχος που θα πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις που προδιαγράφονται. Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματικά τα επιμέρους τμήματα στα οποία εφαρμόζονται οι κανόνες μαζί με τα αντίστοιχα κεφάλαια τα οποία λαμβάνονται υπόψη.



Σχήμα 2.2: Περιοχές εφαρμογής των κοινών κατασκευαστικών κανόνων και αντίστοιχα κεφάλαια

2.2 Χαρακτηρισμοί Κλάσης

Εκτός από την κλάση που παραχωρείται από έναν Νηογνώμονα, τα πλοία που σχεδιάζονται με βάση τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες, αποκτούν και την κλάση CSR. Ειδικότερα τα Bulk Carriers διαθέτουν επιπρόσθετα χαρακτηριστικά (Service Features) όσον αφορά την κλάση αυτή, καθώς μπορεί να μεταφέρουν διαφορετικά φορτία, με διαφορετικό ειδικό βάρος και καταστάσεις φόρτωσης. Οι επιπρόσθετες αυτές κατηγορίες αφορούν πλοία Bulk Carrier με μήκος μεγαλύτερο από 150 m και είναι οι παρακάτω:

- **BC – C:** Χαρακτηρισμός κλάσης για πλοία Bulk Carrier που είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν ξηρό φορτίο χύδην με ειδικό βάρος μικρότερο από $1 t / m^3$.
- **BC – B:** Χαρακτηρισμός κλάσης για πλοία Bulk Carrier που είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν ξηρό φορτίο χύδην με ειδικό βάρος μεγαλύτερο από $1 t / m^3$ έχοντας όλα τα αμπάρια πλήρως φορτωμένα στο μέγιστο βύθισμα, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της κλάσης BC – C.
- **BC – A:** Χαρακτηρισμός κλάσης για πλοία Bulk Carrier που είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν ξηρό φορτίο χύδην με ειδικό βάρος μεγαλύτερο από $1 t / m^3$ με ορισμένα αμπάρια να έχουν τη δυνατότητα να είναι άδεια στο μέγιστο βύθισμα, σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά της κλάσης BC – B.

Οι παραπάνω χαρακτηρισμοί κλάσης μπορεί να συνοδεύονται από επιπρόσθετα λειτουργικά χαρακτηριστικά, τα οποία παρέχουν λεπτομερή περιγραφή ορισμένων καταστάσεων λειτουργίας του πλοίου όσον αφορά τις καταστάσεις φόρτωσής του. Οι χαρακτηρισμοί αυτοί επηρεάζουν τους συνδυασμούς φορτίσεων που προδιαγράφονται στην πορεία των κανόνων. Ενδεικτικά, τα επιπρόσθετα χαρακτηριστικά που προδιαγράφονται είναι τα παρακάτω:

- {Maximum cargo density in t / m^3 }
- {No MP}
- {Holds a, b, ... may be empty}
- {Block Loading}

Επιπρόσθετος Χαρακτηρισμός Κλάσης GRAB[X]

Η επιπρόσθετη αυτή κατηγορία είναι υποχρεωτική μόνο για πλοία κατηγορίας BC – A και BC – B και σχετίζεται με την απαίτηση πάχους των ελασμάτων που έρχονται σε επαφή με την δαγκάνα φορτοεκφόρτωσης βάρους X tons. Η σχετική απαίτηση t_{GRAB} καθορίζεται από τους CSR και αφορά τα ελάσματα του εσωτερικού περιβλήματος της γάστρας τα οποία απέχουν μέχρι και 3 m από τον εσωτερικό πυθμένα. Οι απαιτήσεις της κατηγορίας GRAB[X] βρίσκονται στο εδάφιο {Pt2/Ch1/Sec6} και εφαρμόζονται για βάρους της αρπάγης X [tons], το οποίο δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από τις παρακάτω τιμές, ανάλογα με το μήκος του πλοίου:

- 35 tons , για πλοία με μήκος $L \geq 250 m$
- 30 tons , για πλοία με μήκος $200 m \leq L < 250 m$
- 20 tons , σε κάθε άλλη περίπτωση

2.3 Βάση Σχεδίασης

Στα πλαίσια των γενικών αρχών, οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες βασίζονται σε συγκεκριμένες σχεδιαστικές παραμέτρους και υποθέσεις που αποτελούν τη βάση σχεδίασης των πλοίων για τα οποία έχουν εφαρμογή. Η βάση σχεδίασης περιλαμβάνει γεωμετρικά όρια της γάστρας, συνθήκες εξωτερικού και εσωτερικού περιβάλλοντος και συνθήκες λειτουργίας μαζί με τα αντίστοιχα βυθίσματα λειτουργίας.

Η γεωμετρία της γάστρας αποτελεί τη βάση για την πρόβλεψη των διαφόρων φορτίσεων από το περιβάλλον. Για το λόγο αυτό οι κανόνες στηρίζονται σε συγκεκριμένο εύρος διαστάσεων και θέτουν τα παρακάτω γεωμετρικά όρια, προκειμένου να έχουν εφαρμογή.

- $L < 500 \text{ m}$
- $C_B > 0.6$
- $L/B > 5$
- $B/D < 2.5$

Σημειώνεται ότι για πλοία με ασυνήθιστη μορφή γάστρας ή κατασκευαστικές ιδιαιτερότητες, όπως μεγάλα ανοίγματα στο κατάστρωμα ή μεγάλη εξοχή του καταστρώματος (Flare), γίνονται ειδικές θεωρήσεις για τον υπολογισμό των φορτίσεων της θάλασσας από την εκάστοτε κλάση.

Αντίστοιχα και οι συνθήκες περιβάλλοντος αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό πολλών παραμέτρων και θεωρούνται ότι είναι κοινές για όλα τα πλοία που εξετάζονται. Όσον αφορά το εξωτερικό περιβάλλον, το πλοίο θεωρείται ότι ταξιδεύει σε θάλασσα του Βόρειο – Ατλαντικού ωκεανού, καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, γεγονός που επάγει τις πιο δυσμενείς φορτίσεις και αποκρίσεις. Φαινόμενα όμως, όπως ο άνεμος, τα θαλάσσια ρεύματα, ο πάγος, τα θερμικά φορτία και τυχόν εναπομένουσες τάσεις δεν λαμβάνονται υπόψη από τους κανόνες.

Όσον αφορά τις συνθήκες εσωτερικού περιβάλλοντος, οι κανόνες καθορίζουν συγκεκριμένες τιμές για την πυκνότητα του πετρελαίου, την πυκνότητα ξηρού φορτίου, καθώς και την πυκνότητα θαλάσσιου έρματος. Οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εσωτερικών φορτίσεων και ορίζονται παρακάτω:

- Πυκνότητα πετρελαίου για έλεγχο αντοχής: 1.025 t/m^3 ή μεγαλύτερη.
- Πυκνότητα πετρελαίου για έλεγχο έναντι ισοπτώσεως: 0.9 t/m^3 ή μεγαλύτερη.
- Πυκνότητα ξηρού φορτίου: καθορίζεται στο κεφάλαιο {Pt1/Ch4/Sec6/[2.3]}.
- Πυκνότητα θαλάσσιου έρματος: 1.025 t/m^3 .

Τέλος, η διαδικασία σχεδίασης με βάση τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες βασίζεται στη μελέτη διαφόρων καταστάσεων φόρτωσης σε διάφορα βυθίσματα λειτουργίας. Οι ελάχιστες καταστάσεις φόρτωσης που απαιτούνται για την αξιολόγηση της κατασκευής καθορίζονται στο εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec8}. Με βάση αυτές τις καταστάσεις, ελέγχεται η ικανοποίηση των απαιτήσεων των κανόνων. Τα βυθίσματα που αφορούν τις καταστάσεις αυτές και χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς που αφορούν τον έλεγχο αντοχής είναι τα παρακάτω:

- Βύθισμα αντοχής (Scantling Draft)
- Ελάχιστο βύθισμα ερματισμού (Minimum Ballast Draft)
- Ελάχιστο βύθισμα βαρέος ερματισμού (Minimum Heavy Ballast Draft)

2.4 Σχεδιαστικές Αρχές

Γενικά, οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες βασίζονται στις παρακάτω σχεδιαστικές αρχές:

- Η ασφάλεια και η αξιοπιστία της κατασκευής μπορεί να εκτιμηθεί αντιμετωπίζοντας τους δυνητικούς τρόπους αστοχίας όταν το πλοίο υπόκειται σε λειτουργικά φορτία και φορτίσεις από το περιβάλλον
- Η σχεδίαση συνάδει με τη βάση σχεδίασης που αναφέρθηκε παραπάνω
- Οι κατασκευαστικές απαιτήσεις βασίζονται σε σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων τα οποία καλύπτουν τις κατάλληλες λειτουργικές καταστάσεις ενός Bulk carrier ή Oil tanker
- Η κατασκευή λειτουργεί με ιεραρχικό τρόπο, από πλευράς κατασκευαστικής επάρκειας και η αστοχία των κατασκευαστικών μελών στη χαμηλή βαθμίδα της ιεραρχίας δεν θα πρέπει να έχει ως αποτέλεσμα την απευθείας αστοχία των στοιχείων που βρίσκονται υψηλότερα στην ιεραρχία.

Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται επαρκής αντοχή τόσο σε άθικτη όσο και σε βεβλαμμένη κατάσταση. Όσον αφορά την άθικτη κατάσταση, θα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να αντέχουν τις φορτίσεις που προκαλούνται από το περιβάλλον, σε συνδυασμό με τις διάφορες καταστάσεις φόρτωσης. Η κατασκευαστική αντοχή εξετάζεται έναντι διαρροής και λυγισμού, αλλά και κατάρρευσης λόγω πλαστικοποίησης (μέγιστη αντοχή). Όσον αφορά τη βεβλαμμένη κατάσταση, πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 150 m, θα πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει επαρκής εναπομένουσα αντοχή (residual strength) σε σενάρια σύγκρουσης και προσάραξης. Οι υπολογισμοί εναπομένουσας αντοχής βασίζονται στη μέγιστη αντοχή του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη μόνιμες παραμορφώσεις και μεταλυγισμική συμπεριφορά. Επιπλέον για πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 150 m, θα πρέπει να γίνεται έλεγχος αντοχής και έναντι κόπωσης με απαιτούμενη σχεδιαστική διάρκεια ζωής 25 χρόνια (ονομαστική περίοδος συνεχούς έκθεσης σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας). Τέλος, οι κανονισμοί κρίνουν σκόπιμη την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) για την επαλήθευση των διαστάσεων των κατασκευαστικών μελών της μεταλλικής κατασκευής εντός της περιοχής του φορτίου για πλοία με μήκος πάνω από 150 m.

2.4.1 Σχεδιαστικά Σενάρια Φορτίσεων

Η εκτίμηση της κατασκευαστικής αντοχής βασίζεται στα σχεδιαστικά σενάρια φορτίσεων που μπορεί να αντιμετωπίσει το πλοίο, τα οποία περιγράφονται στο κεφάλαιο {Pt1/Ch4/Sec7}. Τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων βασίζονται τόσο σε στατικές όσο και σε δυναμικές φορτίσεις και είναι τα παρακάτω:

- **Static Design Load Scenario (S):** Καλύπτει εφαρμογή σε στατικές φορτίσεις σε σενάρια φόρτισης όπου το πλοίο βρίσκεται στο λιμάνι.
- **Static plus Dynamic Load Scenario (S+D):** Καλύπτει εφαρμογή στην ταυτόχρονη επίδραση στατικών και δυναμικών φορτίσεων, τα οποία εξαρτώνται από τα σχεδιαστικά σενάρια κατά τον πλου του πλοίου.
- **Impact Design Load Scenario (I):** Περιλαμβάνει σενάρια κρουστικών φορτίσεων, όπως σφυρόκρουση της πλώρης και του πυθμένα που αντιμετωπίζει το πλοίο όσο ταξιδεύει.
- **Sloshing Design Load Scenario (SL):** Περιλαμβάνει φορτίσεις λόγω συντονισμού των κινήσεων του υγρού φορτίου και του πλοίου κατά τον πλου του πλοίου.
- **Fatigue Design Load Scenario (F):** Περιλαμβάνει κυκλικές δυναμικές φορτίσεις που καταπονούν το πλοίο καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του.
- **Accidental Design Load Scenario (A):** Περιλαμβάνει φορτίσεις που δεν προκύπτουν κατά τη διάρκεια φυσιολογικών επιχειρήσεων του πλοίου, αλλά σε περιπτώσεις ατυχήματος.

2.4.2 Οριακές καταστάσεις

Οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες βασίζονται στις αρχές της σχεδίασης μέσω οριακών καταστάσεων (Limit States). Η σχεδίαση μέσω οριακής κατάστασης αποτελεί μια συστηματική προσέγγιση στην οποία κάθε κατασκευαστικό στοιχείο αξιολογείται με βάση τον πιθανό τρόπο αστοχίας που σχετίζεται με τα σχεδιαστικά σενάρια. Για κάθε τρόπο αστοχίας, μία ή και περισσότερες οριακές καταστάσεις μπορεί να σχετίζονται. Λαμβάνοντας υπόψη όλες τις υπάρχουσες οριακές καταστάσεις, υπολογίζεται η οριακή φόρτιση για το κατασκευαστικό στοιχείο ως το ελάχιστο που προκύπτει από όλες τις πιθανές οριακές καταστάσεις. Οι οριακές καταστάσεις χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

– Οριακή κατάσταση συνθηκών υπηρεσίας (Serviceability Limit State)

Αντιστοιχεί στις συνθήκες πέραν από τις οποίες το πλοίο δεν εκτελεί ικανοποιητικά τις κανονικές λειτουργίες του. Εξετάζεται αν οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στα κατασκευαστικά στοιχεία διατηρούνται σε αποδεκτά επίπεδα.

– Οριακή κατάσταση μέγιστης αντοχής (Ultimate Limit State)

Αντιστοιχεί στη μέγιστη φόρτιση που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή, καθώς και στη μέγιστη παραμόρφωση, σε άθικτη κατάσταση. Εξετάζεται αν η κατασκευή μπορεί να φέρει ακριβή φορτία που είναι δυνατόν να αντιμετωπίσει το πλοίο στη διάρκεια της ζωής του χωρίς να καταρρεύσει.

– Οριακή κατάσταση κόπωσης (Fatigue Limit State)

Αντιστοιχεί στην υποβάθμιση της κατασκευαστικής επάρκειας λόγω της μακροχρόνιας κυκλικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται εκτίμηση των περιοδικών φορτίσεων που θα αντιμετωπίσει το πλοίο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του (25 χρόνια) και ελέγχεται αν η κατασκευή μπορεί να φέρει με ασφάλεια τις εκτιμώμενες εναλλαγές φόρτισης.

– Οριακή κατάσταση ατυχήματος (Accidental Limit State)

Αφορά την ικανότητα της κατασκευής να αντιστέκεται σε καταστάσεις ατυχήματος. Συγκεκριμένα, εξετάζεται αν η κατασκευή μπορεί να ανταπεξέλθει χωρίς να υπάρχουν εκτεταμένες ζημιές, ώστε το πλοίο να μπορεί να συνεχίσει τον πλου του σε ασφαλές μέρος και να αποτραπούν η μόλυνση του περιβάλλοντος, καθώς και απώλειες ζωής.

Στον πίνακα (2.3) συγκεντρώνονται οι τρόποι αστοχίας που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας, καθώς και οι οριακές καταστάσεις με τις οποίες σχετίζονται.

Πίνακας 2.3: Τρόποι Αστοχίας και Οριακές Καταστάσεις στις οποίες καλύπτονται

Possible failure modes to be considered	Limit states ⁽¹⁾			
	SLS	ULS	FLS	ALS
Yielding	Y	Y	-	Y
Plastic collapse	-	Y	-	Y
Buckling	Y	Y	-	Y
Rupture	-	Y	-	Y
Fatigue cracking	-	-	Y	-
Brittle fracture ⁽²⁾	-	-	-	-

(1) "Y" indicates that the structural assessment is to be carried out.
(2) Controlled by the material rule requirement of steel grade.

2.4.3 Τρόποι Αστοχίας

Οι δυνητικοί τρόποι αστοχίας της μεταλλικής κατασκευής που εξετάζονται από τους κανόνες περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω, καθώς και οι οριακές καταστάσεις με τις οποίες σχετίζονται.

– Διαρροή (Yielding)

Η διαρροή είναι μια αστοχία κατά την οποία εμφανίζονται τοπικές πλαστικές παραμορφώσεις στα κατασκευαστικά μέλη τα οποία υπόκεινται σε συνδυασμό επίπεδης και ορθής εντατικής κατάστασης. Η τοπική πλαστική παραμόρφωση ελέγχεται στις οριακές καταστάσεις SLS, ULS και ALS εξασφαλίζοντας ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις στα κατασκευαστικά μέλη διατηρούνται κάτω από μια επιτρεπόμενη τιμή.

– Πλαστική κατάρρευση (Plastic Collapse)

Η πλαστική κατάρρευση εμφανίζεται συνήθως σε τοπικά κατασκευαστικά μέλη που δέχονται πολύ μεγάλες κάθετες (κρουστικές) πιέσεις. Αποτέλεσμα αυτής της μορφής αστοχίας είναι μόνιμη κάθετη παραμόρφωση στα κατασκευαστικά μέλη χωρίς όμως να επηρεάζεται η καθολική αντοχή του πλοίου. Ελέγχεται στις οριακές καταστάσεις ULS και ALS χρησιμοποιώντας συμβατή μέθοδο πλαστικής σχεδίασης.

– Λυγισμός (Buckling)

Ο λυγισμός αποτελεί ένα ασταθές φαινόμενο που εμφανίζεται σε κατασκευαστικά μέλη που δέχονται θλιπτικά φορτία. Όταν η τάση στα μέλη αυτά φτάνει την ελαστική τάση λυγισμού, προκαλείται ελαστικός λυγισμός κατά την άσκηση του θλιπτικού φορτίου. Ο λυγισμός με μικρή ελαστική παραμόρφωση ελέγχεται στην οριακή κατάσταση SLS. Αν το θλιπτικό φορτίο αυξηθεί περαιτέρω, προκαλείται ανακατανομή της τάσης λόγω λυγισμού του ασθενέστερου κατασκευαστικού μέλους και η τάση σε κάποια στοιχεία φτάνει το όριο διαρροής. Ο λυγισμός με μεγάλη ελαστική παραμόρφωση ελέγχεται στις οριακές καταστάσεις ULS και ALS. Όταν το θλιπτικό φορτίο αφαιρείται, δεν προκύπτει κάποια αστοχία λόγω λυγισμού.

Από την άλλη, πλαστικός (μη αναστρέψιμος) λυγισμός προκαλείται όταν η τάση στα κατασκευαστικά μέλη υπερβαίνει την τάση διαρροής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μη αμελητέων (σημαντικών) μόνιμων παραμορφώσεων. Αυτό το μη αντιστρεπτό φαινόμενο ελέγχεται στις οριακές καταστάσεις ULS και ALS για την καθολική αντοχή του πλοίου (Ultimate Hull Girder Strength).

– Όλιμη Θραύση (Rupture)

Η ρωγμάτωση είναι μία μορφή αστοχίας κατά την οποία το κατασκευαστικό μέλος σπάει λόγω μεγάλων εφελκυστικών τάσεων πέρα από το όριο διαρροής του υλικού. Η αστοχία αυτή ελέγχεται στις οριακές καταστάσεις ULS και ALS αλλά η αξιολόγηση όσον αφορά αυτή τη μορφή καλύπτεται ελέγχοντας την αστοχία έναντι διαρροής (Yielding).

– Ψαθυρή Θραύση (Brittle fracture)

Η ψαθυρή θραύση εξαρτάται από το υλικό, τη θερμοκρασία και το πάχος του κατασκευαστικού μέλους. Για αυτό το λόγο, ελέγχεται πρακτικά από τις απαιτήσεις ποιότητας του χρησιμοποιούμενου χάλυβα (Steel Grade).

– Ρωγμάτωση λόγω κόπωσης (Fatigue Cracking)

Πρόκειται για ρωγμάτωση λόγω σταδιακής υποβάθμισης του υλικού. Ελέγχεται στην οριακή κατάσταση FLS.

2.5 Μέθοδοι Σχεδίασης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι κανόνες των Νηογυμνών βασίζονται σε εμπειρικές μεθόδους για την εξαγωγή συναρτησιακών σχέσεων. Από την άλλη μεριά οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες ενσωματώνουν στατιστικές μεθόδους που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της πιθανότητας εμφάνισης αστοχίας, ποσοτικοποιώντας με αυτόν τον τρόπο την ασφάλεια της κατασκευής. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούν τις μεθόδους σχεδίασης που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται στις παρακάτω μεθόδους σχεδίασης:

- ο Τη μέθοδο επιτρεπόμενης τάσης, Working Stress Design (WSD)
- ο Τη μέθοδο τμηματικών συντελεστών ασφαλείας, Partial Safety Factor (PSF)

Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί έναν μόνο συντελεστή ασφαλείας για όλες τις καταστάσεις, προκειμένου να καθορίσει το επιτρεπόμενο όριο της φόρτισης. Πρόκειται για τη μέθοδο που εφαρμόζεται μεμονωμένα από τους Νηογυμνούς και εξασφαλίζει ότι η αναπτυσσόμενη τάση δεν υπερβαίνει το όριο αντοχής της κατασκευής.

Η μέθοδος της επιτρεπόμενης τάσης έχει την ακόλουθη σύσταση:

$$W_{stat} + W_{dyn} \leq \eta R, \text{ για την κατάσταση B.}$$

Όπου:

- W_{stat} , τα ταυτόχρονα στατικά φορτία που ασκούνται.
- W_{dyn} , τα ταυτόχρονα δυναμικά φορτία, τα οποία είναι συνδυασμός τοπικών και καθολικών φορτίσεων.
- R , η χαρακτηριστική κατασκευαστική επάρκεια (όριο διαρροής)
- η , ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης (utilization factor), ή αλλιώς συντελεστής αντίστασης. Ο χρηστικός συντελεστής λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα των φορτίσεων, τυχών ελαττωμάτων στο υλικό και την συνεπαγόμενη αστοχία.

Η δεύτερη μέθοδος αποτελεί μια βελτίωση της πρώτης μεθόδου, καθώς λαμβάνει καλύτερα υπόψη τις αβεβαιότητες που αφορούν αφενός τις φορτίσεις και αφετέρου τις ιδιότητες της μεταλλικής κατασκευής. Αυτό γίνεται με τη χρήση πολλών διαφορετικών συντελεστών ασφαλείας που αφορούν τις φορτίσεις, καθώς τα πιθανά σενάρια φόρτισης έχουν διαφορετική συχνότητα εμφάνισης και επίπτωση στην κατασκευή.

Η μέθοδος PSF έχει την ακόλουθη σύσταση:

$$\gamma_{stat-1} W_{stat} + \gamma_{dyn-1} W_{dyn} \leq \frac{R}{\gamma_R}, \text{ για την κατάσταση A.}$$

Όπου:

- γ_{stat} , ο τμηματικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη αβεβαιότητες σχετικά με τις στατικές φορτίσεις.
- γ_{dyn} , ο τμηματικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη αβεβαιότητες σχετικά με τις δυναμικές φορτίσεις.
- γ_R , ο τμηματικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη αβεβαιότητες σχετικά με την κατασκευαστική επάρκεια.

Γενικά η πρώτη μέθοδος εφαρμόζεται σε όλες τις οριακές καταστάσεις εκτός της μέγιστης αντοχής (ULS), όπου εκεί χρησιμοποιείται η δεύτερη του τμηματικού συντελεστή ασφαλείας (PSF). Η οριακή αυτή κατάσταση είναι πολύ κρίσιμη και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος αυτή, προκειμένου να λάβει καλύτερα υπόψη τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με στατικές φορτίσεις, δυναμικές φορτίσεις και υπολογισμούς επάρκειας.

2.6 Έλεγχος Αντοχής

Η βασική αρχή για τον έλεγχο αντοχής είναι η εφαρμογή των καθορισμένων σχεδιαστικών φορτίσεων, η αναγνώριση των πιθανών τρόπων αστοχίας και στη συνέχεια, ο έλεγχος ικανοποίησης των αντίστοιχων οριακών καταστάσεων. Στον πίνακα (2.4) παρουσιάζεται ο έλεγχος αντοχής των διαφόρων κατασκευαστικών στοιχείων σε όρους των προαναφερθέντων μορφών αστοχίας.

Πίνακας 2.4: Έλεγχος Αντοχής Κατασκευαστικών Μελών

Structural Elements ⁽¹⁾		Yielding check	Buckling check	Ultimate strength check	Fatigue check
Local Structures	Stiffeners	Y	Y	Y ⁽²⁾	Y
	Plating	Y	Y	Y ⁽³⁾	-
Primary supporting members		Y	Y	Y ⁽²⁾	Y
Hull girder		Y	Y ⁽⁴⁾	Y	-

Ο έλεγχος αντοχής έγκειται στη ικανοποίηση ορισμένων απαιτήσεων που προδιαγράφονται από τους κανόνες. Οι απαιτήσεις αυτές αφορούν τις διαστάσεις των διαφόρων κατασκευαστικών μελών και καθορίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτουν τις προαναφερθείσες οριακές καταστάσεις. Έχουν τη μορφή μαθηματικών εξισώσεων (Prescriptive Format) και βασίζονται είτε σε εμπειρικά κριτήρια, είτε στις καθορισμένες σχεδιαστικές φορτίσεις. Εκτός όμως από τις απαιτήσεις αυτές, οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες επιβάλλουν και τη χρήση αριθμητικών μεθόδων (Finite Element Analysis) για τη σχεδιαστική επαλήθευση της κατασκευής, κατά την οποία πραγματοποιείται απευθείας υπολογισμός της απόκρισης της κατασκευής υπό δεδομένες σχεδιαστικές φορτίσεις. Συνολικά λοιπόν ο έλεγχος αντοχής, με βάση τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα:

- Με τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων (Prescriptive Requirements), καθώς και ελάχιστες, εμπειρικές απαιτήσεις.
- Με την επιβεβαίωση του αρχικού σχεδιασμού, μέσω εφαρμογής της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Elements).

Τόσο για τις περιγραφικές απαιτήσεις, όσο και για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, χρησιμοποιούνται ορισμένα κριτήρια αποδοχής (Acceptance Criteria) τα οποία κατηγοριοποιούνται με βάση το είδος του σχεδιαστικού σεναρίου φόρτισης (Design Load Scenario). Συγκεκριμένα τα κριτήρια αυτά συνοψίζονται στον πίνακα (2.5).

2.6.1 Ελάχιστες – Εμπειρικές Απαιτήσεις

Οι απαιτήσεις αυτές καθορίζουν το κατώφλι των διαστάσεων των κατασκευαστικών στοιχείων, ανεξάρτητα από οποιαδήποτε άλλη απαίτηση. Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν:

- Ελάχιστα πάχη, τα οποία είναι ανεξάρτητα από την τάση διαρροής του υλικού, αλλά εξαρτώνται μόνο από το μέγεθος του πλοίου (Minimum Requirements)
- Ελάχιστη αιχμυφία και αναλογία διαστάσεων που αφορούν εμπειρικές απαιτήσεις με σκοπό την αποφυγή αστοχίας λόγω λυγισμού (Slenderness Requirements)

2.6.2 Απαιτήσεις βασισμένες σε σχεδιαστικές φορτίσεις

Οι κανονισμοί παρέχουν περιγραφικές απαιτήσεις με βάση τις σχεδιαστικές φορτίσεις που ασκούνται κατά περίπτωση για όλα τα ελάσματα, τοπικά ενισχυτικά στοιχεία και κύρια στοιχεία ενίσχυσης, καθώς και για το πλοίο συνολικά σαν δοκός (Hull Girder), καλύπτοντας έτσι όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία. Ανάλογα με τα σενάρια φορτίσεων που έχουν αναφερθεί, χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα κριτήρια αποδοχής (πίνακας 2.5).

Πίνακας 2.5: Σενάρια Φορτίσεων και Αντίστοιχα Κριτήρια Αποδοχής

Operation	Load type	Design load scenario	Acceptance criteria
Seagoing operations			
Transit	Static and dynamic loads in heavy weather	S + D	AC-SD
	Impact loads in heavy weather	Impact (I)	AC-I
	Internal sloshing loads	Sloshing (SL)	AC-S
	Cyclic wave loads	Fatigue (F)	-
BWE by flow through or sequential methods	Static and dynamic loads in heavy weather	S + D	AC-SD
Harbour and sheltered operations			
Loading, unloading and ballasting	Typical maximum loads during loading, unloading and ballasting operations	S	AC-S
Tank testing	Typical maximum loads during tank testing operations	S	AC-S
Special conditions in harbour	Typical maximum loads during special operations in harbour, e.g. propeller inspection afloat or dry-docking loading conditions	S	AC-S
Accidental condition			
Flooded conditions	Typically maximum loads on internal watertight subdivision structure in accidental flooded conditions	A	AC-SD AC-S

Τα κριτήρια αποδοχής καθορίζουν τις περιγραφικές απαιτήσεις ανάλογα με το είδος του κατασκευαστικού στοιχείου στα παρακάτω κεφάλαια, όπως φαίνεται στον πίνακα (2.6).

Πίνακας 2.6: Κριτήρια Αποδοχής – Περιγραφικές Απαιτήσεις

Acceptance criteria	Plate panels and local support members ⁽⁴⁾		Primary supporting members ⁽⁴⁾		Hull girder members	
	Yield	Buckling	Yield	Buckling	Yield	Buckling
AC-S AC-SD	Permissible stress: Ch 6, Sec 4 Ch 6, Sec 5	Control of stiffness and proportions: Ch 8, Sec 2	Permissible stress: Ch 6, Sec 6 Pt 2, Ch 1, Sec 4 Pt 2, Ch 2, Sec 3	Control of stiffness and proportions: Ch 8, Sec 1 Ch 8, Sec 2 Pillar buckling	Permissible stress: Ch 5, Sec 1	Allowable buckling utilisation factor: Ch 8, Sec 1, [3]
AC-I	Plastic criteria: Ch 10, Sec 1, [3]	Control of stiffness and proportions: Ch 8, Sec 2 Ch 10, Sec 1, [3]	Plastic criteria: Ch 10, Sec 1, [3]	Control of stiffness and proportions: Ch 8, Sec 2 Ch 10, Sec 1, [3]	N/A	N/A

(4) Refer to Ch 10 for Other structures and to Ch 11 for Superstructure, deckhouses and hull outfitting

2.6.3 Σχεδιαστική επαλήθευση – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και στις σχεδιαστικές αρχές, οι διαστάσεις των κατασκευαστικών μελών της μεταλλικής κατασκευής εντός της περιοχής του φορτίου για πλοία με μήκος πάνω από 150 m, επαληθεύονται με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method). Πιο αναλυτικά, η σχεδιαστική επαλήθευση περιλαμβάνει μια γραμμική ελαστική τρισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο έκτασης 3 αμπαριών, προκειμένου να επαληθευτεί ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπό δεδομένες φορτίσεις βρίσκονται σε αποδεκτά όρια για τα διάφορα σετ σχεδιαστικών φορτίσεων.

Η μοντελοποίηση ολόκληρης της κατασκευής λαμβάνει υπόψη τις περίπλοκες αλληλεπιδράσεις των κατασκευαστικών στοιχείων, καθώς και την τοπική γεωμετρική πολυπλοκότητα της κατασκευής, τις αλλαγές παχών, τις γεωμετρικές ιδιότητες των στοιχείων σε συνδυασμό με τον συνδυασμό των φορτίσεων με επαρκή ακρίβεια. Η επαλήθευση της σχεδίασης αφορά τις κατασκευαστικές διαστάσεις που προκύπτουν από τις περιγραφικές απαιτήσεις, οι οποίες βασίζονται στις διάφορες σχεδιαστικές φορτίσεις (Load based Prescriptive Requirements). Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις που καθορίζονται από τις περιγραφικές απαιτήσεις δεν επιτρέπονται να μειωθούν από οποιαδήποτε FE ανάλυση, αλλά μόνο επαληθεύονται.

Τέλος, στην περίπτωση πλοίων Bulk Carrier με μήκος μεγαλύτερο από 150 m, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για να βοηθήσει και στον καθορισμό των διαστάσεων κύριων στοιχείων (Primary Supporting Members) που βρίσκονται εντός της περιοχής φορτίου (Cargo Hold Region) και για τα οποία δεν υπάρχουν καθορισμένοι κανόνες σχεδίασης, εκτός των ελάχιστων εμπειρικών απαιτήσεων.

Στον πίνακα (2.7) συνοψίζονται τα κεφάλαια που περιλαμβάνουν τις σχετικές απαιτήσεις της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με βάση τα κριτήρια αποδοχής και τις μορφές αστοχίας της διαρροής και του λυγισμού. Σημειώνεται ότι η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και για λεπτομερή ανάλυση έναντι κόπωσης, η οποία βρίσκεται στο κεφάλαιο {Ch9} των κανόνων.

Πίνακας 2.7: Απαιτήσεις και Κριτήρια Αποδοχής – Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Acceptance criteria	Cargo hold analysis		Fine mesh analysis
	Yield	Buckling	Yield
AC-S AC-SD	Permissible stress: Ch 7, Sec 2, [5]	Allowable buckling utilisation factor: Ch 8, Sec 1, [3]	Permissible Von Mises stress: Ch 7, Sec 3, [6] Screening criteria: Ch 7, Sec 3, [3.3]

2.7 Βασικά Μεγέθη Κανονισμών

Στο εδάφιο {Pt1/Ch1/Sec4/[3.1]} των κανόνων, ορίζονται κάποια βασικά γεωμετρικά μεγέθη, τα οποία αφορούν τις κύριες διαστάσεις του πλοίου και αποτελούν την αφετηρία υπολογισμού για τον έλεγχο αντοχής. Ενδεικτικά παρακάτω, περιγράφονται τα βασικότερα γεωμετρικά μεγέθη.

– Βύθισμα Αντοχής T_{SC} (Scantling Draft):

Ορίζεται ως το μέγιστο βύθισμα που μπορεί να έχει το πλοίο προκειμένου να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου. Ο όρος Scantling αναφέρεται στη διαστασιολόγηση των κατασκευαστικών στοιχείων που πραγματοποιείται με βάση το συγκεκριμένο βύθισμα. Το βύθισμα αυτό αντιπροσωπεύει την μέγιστη δυνατή κατάσταση φόρτωσης του πλοίου.

– Βύθισμα Κατάστασης Φόρτωσης T_{LC} (Loading Condition Draft):

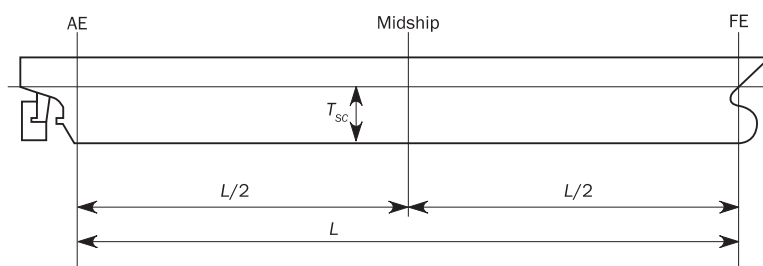
Οι κανόνες εξετάζουν διάφορες καταστάσεις φόρτωσης σε διαφορετικά βυθίσματα, πέραν του βυθίσματος αντοχής. Οι καταστάσεις αυτές εξαρτώνται από τις συνθήκες λειτουργίας (π.χ. Ballast Arrival) στις οποίες το βύθισμα είναι μικρότερο από το μέγιστο. Οι κανονισμοί χρησιμοποιούν ένα λόγο βυθίσματος προκειμένου να συνδέσουν τα δύο αυτά βυθίσματα:

$$f_T = \frac{T_{LC}}{T_{SC}}, \text{ ο οποίος παίρνει τις εξής τιμές: } 0.5 \leq f_T \leq 1$$

Σημειώνεται ότι τα παραπάνω βυθίσματα, υπολογίζονται στη μέση τομή του πλοίου.

– Μήκος Κανονισμών L (Rule Length):

Ορίζεται ως το μήκος της ισάλου στο βύθισμα αντοχής, μετρούμενο από την πρυμναία κάθετο μέχρι το πρωραίο άκρο του πλοίου. Το μήκος αυτό θα πρέπει να επιλέγεται ανάμεσα στο 96% και 97% του συνολικού μήκους ισάλου στο αντίστοιχο βύθισμα. Τελικά, ορίζεται μεταξύ της πρωραίας καθέτου και του πρυμναίου σημείου για το οποίο έχει καλυφθεί η απόσταση αυτή.



Σχήμα 2.3: Ορισμός Μήκους Κανονισμού και Μέσης Τομής

Με βάση αυτό το μήκος, ορίζεται ο λόγος $f_{xL} = \frac{x}{L}$, ο οποίος για τη μέση τομή ισούται με: $f_{xL} = 0.5$

– Συντελεστής Γάστρας C_B (Block Coefficient):

Για όλους τους υπολογισμούς αντοχής, οι κανόνες ορίζουν τον συντελεστή γάστρας του πλοίου με βάση το βύθισμα αντοχής, ανεξάρτητα με την κατάσταση φόρτωσης, ως εξής:

$$C_B = \frac{\Delta}{1.025 L B T_{SC}}$$

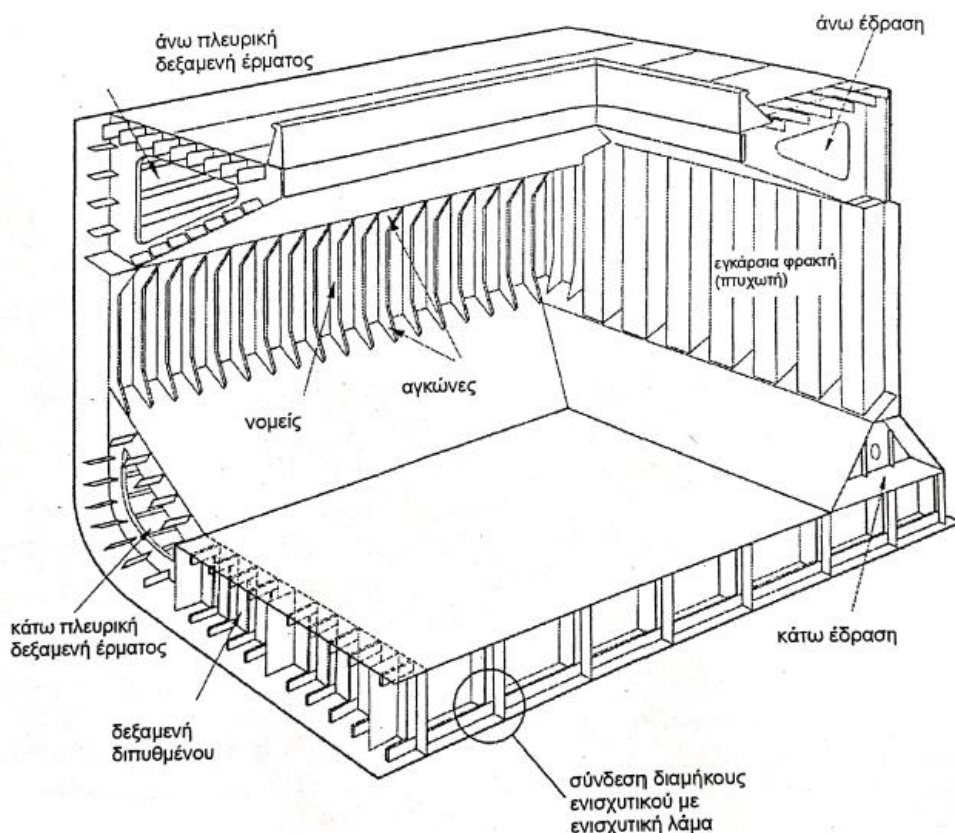
Όπου Δ , το εκτόπισμα στο βύθισμα αντοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Κατασκευαστικές Αρχές των CSR

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται ορισμένες βασικές κατασκευαστικές αρχές που αφορούν τη σχεδίαση, την επιλογή υλικών και τον τρόπο μοντελοποίησης των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων για τον υπολογισμό της αντοχής τους. Σε πρώτο στάδιο, για λόγους εξοικείωσης, γίνεται περιγραφή της τυπικής κατασκευαστικής δομής ενός Bulk Carrier μονού τοιχώματος στην περιοχή του φορτίου, καθώς και των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά για την επιλογή των υλικών σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες, αλλά και τις ποιότητες που θα πρέπει να έχουν τα κατασκευαστικά στοιχεία με βάση τους κανόνες. Ακόμη, για τον έλεγχο της διαστασιολόγησης και την ικανοποίηση των κριτηρίων αντοχής, περιγράφεται ο τρόπος προσέγγισης του καθαρού πάχους (Net scantling Approach), ο οποίος λαμβάνει υπόψη το φαινόμενο της διάβρωσης, παρέχοντας έτσι το καθαρό προσφερόμενο πάχος (Net Offered Thickness) που θα προκύψει κατά τη λειτουργία του πλοίου και αποτελεί τελικά αντικείμενο ελέγχου από πλευράς αντοχής. Τέλος, για την εφαρμογή των σχεδιαστικών φορτίσεων, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούνται τα βασικά δομικά στοιχεία (ελάσματα και ενισχυτικά), τα οποία αποτελούν και αντικείμενο μελέτης.

3.1 Η Μεταλλική Κατασκευή Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος

Κοινό χαρακτηριστικό της εφαρμογής των κατασκευαστικών κανόνων αποτελεί η μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Η κατασκευή αυτή αποτελείται από πολλά διαφορετικά δομικά στοιχεία, καθένα από τα οποία παίζει διαφορετικό ρόλο στην αντοχή της κατασκευής. Στο παρακάτω σχήμα (3.1) παρουσιάζεται η τυπική διάταξη της μεταλλικής κατασκευής ενός αμπαριού Bulk Carrier, με διάμηριες σύστημα ενίσχυσης και ανά διαστήματα ενισχυμένους νομείς.



Σχήμα 3.1: Τυπική κατασκευαστική δομή αμπαριού Bulk Carrier μονού τοιχώματος

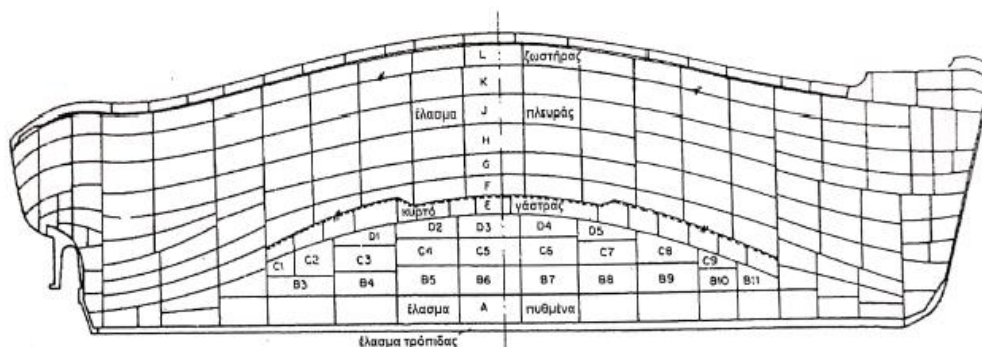
Παρακάτω, η μεταλλική κατασκευή αναλύεται στα επιμέρους βασικά τμήματα:

- **Εξωτερικό περίβλημα της γάστρας**

Πρόκειται για μια μεγάλη επιφάνεια με σχετικά απλή μορφή στην περιοχή της μέσης τομής του πλοίου. Αποτελείται από επιμέρους ελάσματα τα οποία εκτείνονται κατά το διάμηκες σε στρώσεις (Strakes) με κατεύθυνση παράλληλη με το παράλληλο τμήμα του πλοίου και συνδέονται μεταξύ τους με διαμήκεις και εγκάρσιες συγκολλήσεις. Τα ελάσματα από τα οποία αποτελείται το εξωτερικό περίβλημα διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Έλασμα τρόπιδας (Keel Plate)
- Έλασμα εξωτερικού πυθμένα (Bottom Plate)
- Κυρτό έλασμα υδρορροής (Bilge Plate)
- Πλευρικό έλασμα (Side Shell)
- Έλασμα Ζωστήρα (Sheer Strake)

Η διάταξη αυτών των ελασμάτων απεικονίζεται στο σχέδιο του αναπτύγματος της γάστρας (Shell Expansion Plan) του πλοίου. Παρακάτω φαίνεται το ανάπτυγμα εξωτερικού περιβλήματος της γάστρας ενός συμβατικού πλοίου, καθώς και οι θέσεις των ελασμάτων που αναφέρθηκαν:



Σχήμα 3.2: Ανάπτυγμα εξωτερικού περιβλήματος της γάστρας

- **Πλευρικές δεξαμενές (Topside & Hopper Tanks)**

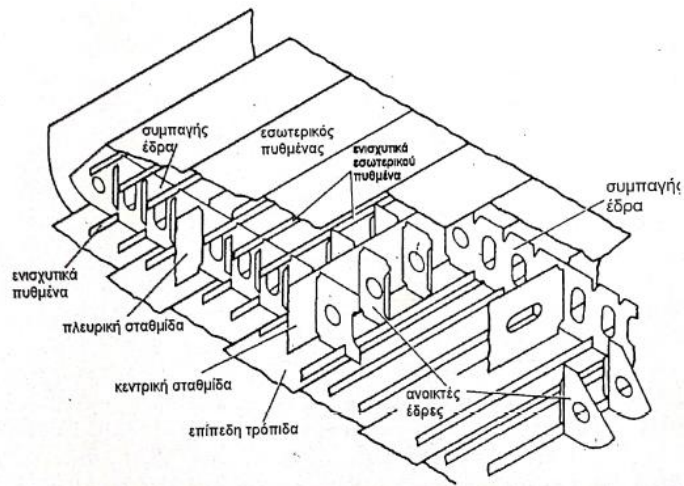
Πρόκειται για χώρους που χρησιμοποιούνται ως δεξαμενές έρματος. Περιλαμβάνουν κεκλιμένα ελάσματα τα οποία ενισχύονται με διάμηκες σύστημα ενίσχυσης. Τα ελάσματα αυτά από τη μία πλευρά δέχονται τις φορτίσεις και τη διαβρωτική επίδραση του θαλάσσιου έρματος και από την άλλη εκείνες του φορτίου.

- **Κατασκευαστικούς νομείς (Frames)**

Πρόκειται για εγκάρσια πλευρικά στοιχεία ενίσχυσης (Side Shell Frames) μεταξύ της άνω και κάτω πλευρικής δεξαμενής ανά διαστήματα απλού κατασκευαστικού νομέα (Frame Spacing). Στα άνω και κάτω άκρα των νομέων γίνεται ειδική διαμόρφωση (κόβεται λοξά) και προστίθεται αγκώνας στήριξης στα κεκλιμένα ελάσματα των πλευρικών δεξαμενών.

- **Διπύθμενο (Double Bottom)**

Πρόκειται για μια στιβαρή κατασκευή η οποία συμβάλλει στην αντοχή του πλοίου παραλαμβάνοντας εσωτερικές φορτίσεις λόγω φορτίου αλλά και εξωτερικές φορτίσεις λόγω θάλασσας. Προστατεύει την ακεραιότητα της κατασκευής σε περίπτωση προσάραξης και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θαλάσσιου έρματος και καυσίμων.



Σχήμα 3.3: Τυπική δομή διπύθμενου με διάμηκες σύστημα ενίσχυσης

Πιο συγκεκριμένα, το διπύθμενο αποτελείται από τα παρακάτω κατασκευαστικά στοιχεία:

- Σταθμίδες διπύθμενου (Girders) και κεντρική σταθμίδα της τρόπιδας (Centerline Girder), τα οποία συμβάλλουν στη διαμήκη ενίσχυση της κατασκευής.
- Έδρες (Floors) που συμβάλλουν στην εγκάρσια αντοχή και ακαμψία της κατασκευής και η ισαπόσταση τους (Floor Spacing) είναι συνήθως τρεις φορές μεγαλύτερη από την ισαπόσταση των κατασκευαστικών νομέων (Frame Spacing).
- Εσωτερικός πυθμένας (Inner bottom) που δέχεται τις εσωτερικές φορτίσεις του φορτίου.

- **Διαφράγματα ενισχυμένων νομέων (Web Frames)**

Πρόκειται για μεγάλα επίπεδα ελάσματα με ανοίγματα στην περιοχή του καταστρώματος και της άνω πλευρικής δεξαμενής, που εξασφαλίζουν την εγκάρσια αντοχή και ακαμψία της κατασκευής και η ισαπόσταση τους είναι συνήθως δύο φορές μεγαλύτερη της ισαπόστασης των εδρών.

- **Κατάστρωμα αντοχής (Strength Deck)**

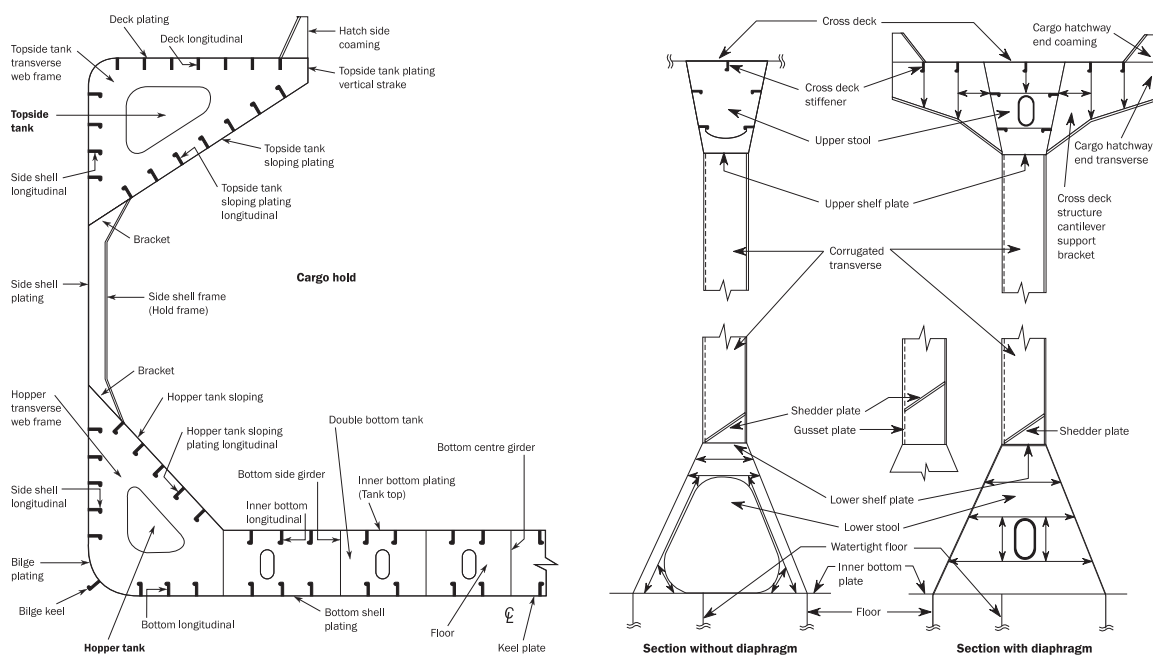
Πρόκειται για το ανώτατο κατάστρωμα το οποίο χαρακτηρίζεται και ως κατάστρωμα εξάλων. Το κατάστρωμα αυτό έχει μεγάλα ανοίγματα που χρησιμοποιούνται για την φορτοεκφόρτωση του φορτίου. Το κατάστρωμα χωρίζεται στο τμήμα που εκτείνεται από το άνοιγμα προς τις πλευρές και συμβάλει στη διαμήκη αντοχή του πλοίου και στο ενδιάμεσο κατάστρωμα μεταξύ των ανοιγμάτων των αμπαριών (Cross Deck), το οποίο ενισχύεται με εγκάρσια ενισχυτικά (deck beams).

- **Πτυχωτές φρακτές (Corrugated Bulkheads)**

Πρόκειται για ελάσματα στα άκρα του αμπαριού με πτυχωσείς ανά διαστήματα συγκολλημένα, για την για τη στήριξη των οποίων εγκαθίστανται ειδικά διαμορφωμένες εδράσεις στα κάτω και άνω άκρα τους (Upper – Lower Stools), οι οποίες ενισχύονται εσωτερικά με απλές λάμες και αγκώνες δημιουργώντας έτσι μια κυβελικής μορφή με υψηλή στρεπτική ακαμψία και ικανοποιητική στήριξη για τη φρακτή. Επίσης, στο κάτω άκρο της φρακτής χρησιμοποιούνται κεκλιμένα ελάσματα (Shedder Plates) για την ομαλή διάχυση της κατακόρυφης φόρτισης σε κάποια έκταση γύρω από το κάτω άκρο της φρακτής, αποφεύγοντας έτσι την συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή αυτή. Στο άνω άκρο της η έδραση χρησιμοποιείται όχι τόσο για τη στήριξη της φρακτής, όσο για τη στήριξη του ελάσματος του κυρίου καταστρώματος μεταξύ των ανοιγμάτων των αμπαριών (Cross deck).

3.1.1 Κατασκευαστική Ορολογία

Στο σχήμα (3.4) παρουσιάζεται η κατασκευαστική ορολογία ενός Bulk Carrier μονού τοιχώματος στην περιοχή φορτίου, η οποία χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστικούς κανόνες.



Σχήμα 3.4: Κατασκευαστική ορολογία εγκάρσιας διατομής και εγκάρσιας φρακτής Bulk Carrier

Σε μια τοπική δομή συνεισφέρουν διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία παραλαμβάνουν διαφορετικές φορτίσεις και παίζουν διαφορετικό ρόλο στην αντοχή. Για το λόγο αυτό οι κανόνες ορίζουν τις παρακάτω βασικές κατασκευαστικές κατηγορίες.

- **Διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία (Longitudinal Members)**

Πρόκειται για όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία εκτείνονται συνεχόμενα κατά το διάμηκες εντός της περιοχής της μέσης τομής του πλοίου σε απόσταση $0.4 L$. Τα στοιχεία αυτά συμμετέχουν στη διαμήκη αντοχή του πλοίου, παραλαμβάνοντας ορθές τάσεις λόγω κάμψης του πλοίου σαν δοκάρι. Πιο αναλυτικά, είναι τα παρακάτω κατασκευαστικά στοιχεία:

- Ελάσματα κυρίου καταστρώματος (εκτός του Cross Deck), περιβλήματος γάστρας, πυθμένα, εσωτερικού πυθμένα και σταθμίδων (Girders).
- Όλα τα διαμήκη ενισχυτικά (stiffeners) των παραπάνω ελασμάτων.

- **Στοιχεία κύριας ενίσχυσης (Primary Supporting Members)**

Πρόκειται για κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία εκτείνονται είτε κατά το εγκάρσιο είτε κατά το διάμηκες του πλοίου και είναι συγκριτικά με τα απλά κατασκευαστικά στοιχεία (**Secondary members**) πολύ πιο άκαμπτα. Συμβάλλουν στην διαμήκη και εγκάρσια αντοχή του πλοίου και αποτελούν σημεία αποφόρτισης των απλών στοιχείων καθώς παρέχουν σημεία στήριξής τους. Πιο αναλυτικά, τα στοιχεία αυτά είναι τα παρακάτω:

- Διαφράγματα ενισχυμένων νομέων (Web Frames) – εγκάρσια ενίσχυση
- Έδρες διπύθμενου (Floors) – εγκάρσια ενίσχυση
- Σταθμίδες διπυθμένου (Girders) – διαμήκης ενίσχυση

3.2 Ναυπηγικοί Χάλυβες

Στο εδάφιο {Pt1/Ch3/Sec1} των κανόνων, προδιαγράφονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου, μαζί με τις μηχανικές τους ιδιότητες. Τα υλικά αυτά είναι ανθρακούχοι χάλυβες, ανοξείδωτοι χάλυβες και κράματα αλουμινίου. Οι κατασκευαστικοί κανόνες επικεντρώνονται στους ανθρακούχους χάλυβες, καθώς αποτελούν το βασικό υλικό της μεταλλικής κατασκευής (ναυπηγικοί χάλυβες). Κοινό χαρακτηριστικό όλων των ναυπηγικών χαλύβων είναι η ελαστική συμπεριφορά, η οποία ορίζεται μέσω του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson. Συγκεκριμένα, αυτές οι παράμετροι έχουν τις εξής σταθερές τιμές:

$$E = 206000 \frac{N}{mm^2} \text{ (μέτρο ελαστικότητας) και } \nu = 0.3 \text{ (λόγος Poisson).}$$

Πέρα από αυτές, ανάλογα με την ποιότητα του ναυπηγικού χάλυβα, προδιαγράφονται οι μηχανικές ιδιότητες όσον αφορά το όριο διαρροής, την μέγιστη εφελκυστική τάση και τον συντελεστή υλικού. Πιο συγκεκριμένα, οι ναυπηγικοί χάλυβες διακρίνονται σε κοινούς χάλυβες και χάλυβες υψηλής αντοχής. Χάλυβες με όριο διαρροής 235 MPa χαρακτηρίζονται ως κοινός (Mild Steel), ενώ χάλυβες με μεγαλύτερη τιμή (πάνω από 315 MPa) χαρακτηρίζονται ως χάλυβες υψηλής αντοχής (High Tensile Steel).

Συγκεκριμένα οι ποιότητες χάλυβα για την κάθε κατηγορία είναι οι παρακάτω και οι μηχανικές τους ιδιότητες συνοψίζονται στον πίνακα (3.1).

- Grade A, B, D, E, για κοινούς ναυπηγικούς χάλυβες (MS)
- Grade AH, DH, EH, για χάλυβες υψηλής αντοχής (HT)

Πίνακας 3.1: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων

Steel grades for plates with $t_{as_built} \leq 100$ mm	R_{eH} , specified minimum yield stress, in N/mm ²	R_m , specified tensile strength, in N/mm ²
A-B-D-E	235	400 – 520
AH32-DH32-EH32-FH32	315	440 – 570
AH36-DH36-EH36-FH36	355	490 – 630
AH40-DH40-EH40-FH40	390	510 – 660

Επιπλέον, τα υλικά αυτά χαρακτηρίζονται από ένα συντελεστή υλικού k , με βάση το όριο διαρροής τους. Ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται στη συνέχεια για μια πιο ασφαλή εκτίμηση της αντοχής στα διάφορα κατασκευαστικά μέρη του πλοίου και σχετίζεται με την επιτρεπόμενη τάση. Ο παρακάτω πίνακας (3.2) ορίζει τον συντελεστή υλικού, σύμφωνα με το όριο διαρροής του.

Πίνακας 3.2: Συντελεστής υλικού k

R_{eH} , specified minimum yield stress, in N/mm ²	k
235	1.00
315	0.78
355	0.72
390	0.68

3.2.1 Γενικές Απαιτήσεις Ποιότητας Χάλυβα

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα διάφορα κατασκευαστικά μέρη του πλοίου δεν θα πρέπει να είναι χαμηλότερης ποιότητας από αυτήν που προδιαγράφουν οι κανόνες. Στον πίνακα (3.3) καθορίζονται οι κλάσεις (Class I, II, III) για τα διάφορα κατασκευαστικά μέλη με βάση τον τύπο τους και τη θέση στην οποία βρίσκονται.

Πίνακας 3.3: Κλάσεις και ποιότητα χάλυβα για τα διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία

Structural member category		Material class/grade
Secondary	A1. Longitudinal bulkhead strakes, other than those belonging to the Primary category	- Class I within 0.4 L amidships - Grade A/AH outside 0.4 L amidships
	A2. Deck plating exposed to weather, other than that belonging to the Primary or Special category	
	A3. Side plating	
Primary	B1. Bottom plating, including keel plate	- Class II within 0.4 L amidships - Grade A/AH outside 0.4 L amidships
	B2. Strength deck plating, excluding that belonging to the Special category	
	B3. Continuous longitudinal plating of strength members above strength deck, excluding hatch coamings	
	B4. Uppermost strake in longitudinal bulkhead	
	B5. Vertical strake (hatch side girder) and uppermost sloped strake in topside tank	
Special	C1. Sheer strake at strength deck ^(A)	- Class III within 0.4 L amidships - Class II outside 0.4 L amidships - Class I outside 0.6 L amidships
	C2. Stringer plate in strength deck ^(A)	
	C3. Deck strake at longitudinal bulkhead, excluding deck plating in way of inner-skin bulkhead of double-hull ships ^(A)	
	C4. Strength deck plating at outboard corners of cargo hatch openings for ships with hatch opening configurations similar to those of container carriers	- Class III within 0.4 L amidships - Class II outside 0.4 L amidships - Class I outside 0.6 L amidships - Min. Class III within cargo hold region
	C5. Strength deck plating at corners of cargo hatch openings	- Class III within 0.6 L amidships - Class II within rest of cargo hold region
	C6. Bilge strake of ships with double bottom over the full breadth and with length less than 150 m	- Class II within 0.6 L amidships - Class I outside 0.6 L amidships
	C7. Bilge strake in other ships ^(A)	- Class III within 0.4 L amidships - Class II outside 0.4 L amidships - Class I outside 0.6 L amidships
	C8. Longitudinal hatch coamings of length greater than 0.15 L including coaming top plate and flange	- Class III within 0.4 L amidships - Class II outside 0.4 L amidships
C9. End brackets and deckhouse transition of longitudinal cargo hatch coamings	- Class I outside 0.6 L amidships - Not to be less than Grade D/DH	
^(A)	Single strakes required to be of class III within 0.4L amidships are to have breadths not less than 800+5L, in mm, need not be greater than 1800 mm, unless limited by the geometry of the ship's design.	

Με βάση την παραπάνω κλάση του κάθε στοιχείου, στον πίνακα (3.4) καθορίζεται το απαιτούμενο κατασκευαστικό πάχος (as – built), σε συνδυασμό με την ποιότητα χάλυβα που θα πρέπει να έχει.

Πίνακας 3.4: Απαιτήσεις ποιότητας και πάχους για κλάσεις I, II και III

Class	I		II		III	
	MS	HT	MS	HT	MS	HT
As-built thickness, in mm						
$t \leq 15$	A	AH	A	AH	A	AH
$15 < t \leq 20$	A	AH	A	AH	B	AH
$20 < t \leq 25$	A	AH	B	AH	D	DH
$25 < t \leq 30$	A	AH	D	DH	D	DH
$30 < t \leq 35$	B	AH	D	DH	E	EH
$35 < t \leq 40$	B	AH	D	DH	E	EH
$40 < t \leq 50$	D	DH	E	EH	E	EH

3.2.2 Ειδικές Απαιτήσεις Ποιότητας Χάλυβα

Εκτός από τις προηγούμενες απαιτήσεις, οι κανόνες προδιαγράφουν επιπρόσθετες ειδικές απαιτήσεις. Συγκεκριμένα, στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι απαιτήσεις σε ποιότητα χάλυβα για πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 150 m (πίνακας 3.5) και 250 m (πίνακας 3.6) αλλά και για Bulk Carriers μονού τοιχώματος με μήκος μεγαλύτερο από 150 m (πίνακας 3.7).

Πίνακας 3.5: Ειδικές απαιτήσεις ποιότητας χάλυβα για πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 150 m

Structural member category	Material grade
Longitudinal plating of strength deck where contributing to the longitudinal strength	Grade B/AH within 0.4 L amidships
Continuous longitudinal plating of strength members above strength deck	Grade B/AH within 0.4 L amidships
Single side strakes for ships without inner continuous longitudinal bulkhead(s) between bottom and the strength deck	Grade B/AH within cargo hold region

Πίνακας 3.6: Ειδικές απαιτήσεις ποιότητας χάλυβα για πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 250 m

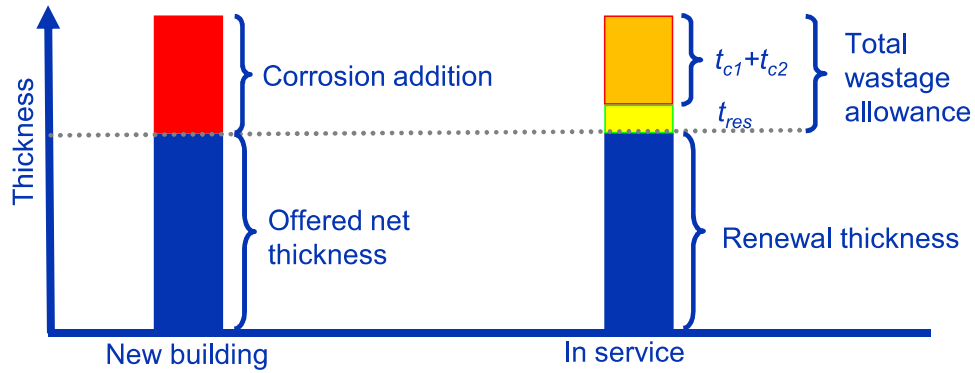
Structural member category ⁽¹⁾	Material grade
Shear strake at strength deck	Grade E/EH within 0.4 L amidships
Stringer plate in strength deck	Grade E/EH within 0.4 L amidships
Bilge strake	Grade D/DH within 0.4 L amidships
(1) Single strakes required to be of Grade E/EH and within 0.4 L amidships are to have breadths not less than 800+5 L (mm), need not be greater than 1800 (mm), unless limited by the geometry of the ship's design.	

Πίνακας 3.7: Ειδικές απαιτήσεις ποιότητας χάλυβα για Bulk Carriers μονού τοιχώματος με μήκος μεγαλύτερο από 150 m

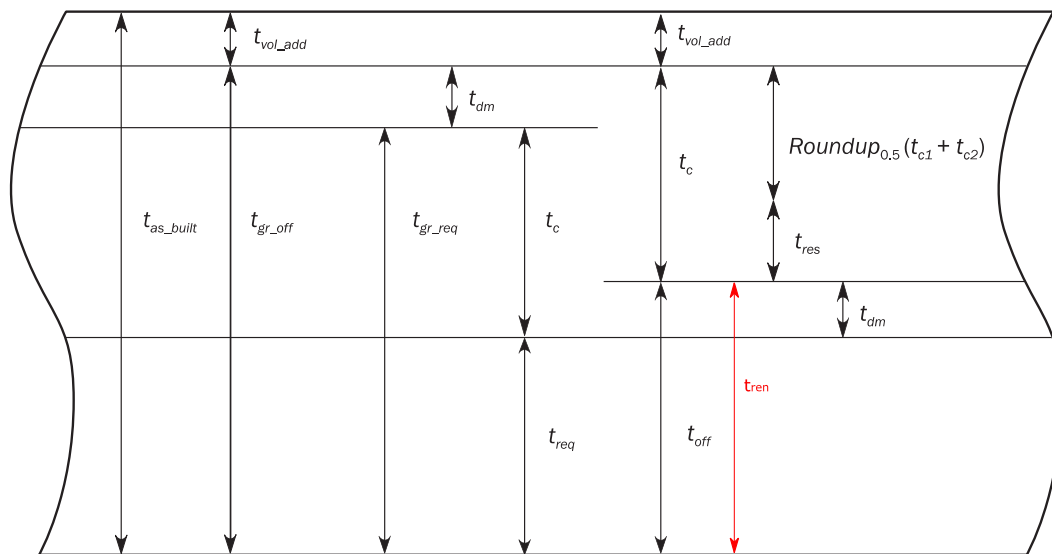
Structural member category	Material grade
Lower bracket of ordinary side frame ^{(1), (2)}	Grade D/DH
Side shell strakes included totally or partially between the two points located to 0.125ℓ above and below the intersection of side shell and bilge hopper sloping plate or inner bottom plate ⁽²⁾	Grade D/DH
(1) The term 'lower bracket' means webs of lower brackets and webs of the lower part of side frames up to the point of 0.125ℓ above the intersection of side shell and bilge hopper sloping plate or inner bottom plate.	
(2) The span of the side frame, ℓ, is defined as the distance between the supporting structures (see Pt 2, Ch 1, Sec 2, Figure 2).	

3.3 Προσέγγιση Καθαρού Πάχους

Η προσέγγιση του καθαρού πάχους ενός κατασκευαστικού στοιχείου αποτελεί μια διαδικασία απαραίτητη για τον έλεγχο αντοχής του. Σκοπός της είναι να λάβει υπόψη ένα κατάλληλο περιθώριο διάβρωσης (corrosion addition) και να συνδέσει το ολικό πάχος κατασκευής (as built) με το προσδοκώμενο καθαρό πάχος που θα προκύψει στην πορεία λειτουργίας του πλοίου, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.5). Με αυτόν τον τρόπο επιτρέπει τη σύνδεση του φαινομένου της διάβρωσης με τη μελέτη αντοχής και παρέχει μια σχέση μεταξύ του πάχους κατασκευής των κατασκευαστικών μελών με το ελάχιστο αποδεκτό πάχος που προδιαγράφουν οι κανόνες. Στο σχήμα (3.6) ορίζονται τα επιμέρους πάχη τα οποία συνθέτουν το πάχος κατασκευής (as built) και ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται το καθαρό πάχος μέσω της μεθόδου αυτής, για τον έλεγχο αντοχής.



Σχήμα 3.5: Περιθώριο διάβρωσης κατά την προσέγγιση καθαρού πάχους



Σχήμα 3.6: Ορισμός επιμέρους παχών κατά την προσέγγιση καθαρού πάχους

- Ολικό πάχος κατασκευής t_{as_built}
- Προσαύξηση πάχους από τον πλοιοικτή t_{vol_add}
- Ολικό προσφερόμενο πάχος $t_{gross_off} = t_{as_built} - t_{vol_add}$
- Προσαύξηση πάχους λόγω διάβρωσης t_c
- Καθαρό προσφερόμενο πάχος $t_{off} = t_{gross_off} - t_c$
- **Καθαρό απαιτούμενο πάχος t_{req}**
- Ολικό απαιτούμενο πάχος $t_{gross_req} = t_{req} + t_c$
- Κατασκευαστικό περιθώριο τυποποίησης t_{dm}
- Πάχος αντικατάστασης $t_{ren} = t_{as_built} - t_c - t_{vol_add} = t_{off}$

Το καθαρό απαιτούμενο πάχος t_{req} αποτελεί το αντικείμενο της μελέτης αντοχής και προκύπτει από τους υπολογισμούς των απαιτήσεων που προδιαγράφουν οι κανόνες για το καθαρό πάχος, στρογγυλοποιώντας στο πλησιέστερο μισό του χιλιοστού. Τελικά, αφού εξακριβωθεί ότι το προσφερόμενο καθαρό πάχος καλύπτει το απαιτούμενο, οι κανόνες το προδιαγράφουν και ως το πάχος αντικατάστασης (renewal), όταν κατά τη λειτουργία του θα έχει υποστεί το προσδοκώμενο περιθώριο διάβρωσης.

Σύμφωνα με τον πίνακα (3.8), οι κανόνες καθορίζουν το μέγεθος της διάβρωσης που πρέπει να ληφθεί υπόψη και να αφαιρεθεί από το ολικό πάχος, για τον υπολογισμό των διαφόρων απαιτούμενων ιδιοτήτων, ανάλογα το είδος των κατασκευαστικών στοιχείων και τη μέθοδο της ανάλυσης.

Πίνακας 3.8: Εφαρμογή μεγέθους διάβρωσης στα ολικά πάχη ανάλογα τη μέθοδο ανάλυσης και τις αντίστοιχες απαιτήσεις

Structural requirement	Property/analysis type	Applied corrosion addition
Minimum thickness (all members including PSM)	Thickness	t_c
Local strength (plates, stiffeners, and hold frames)	Thickness/sectional properties	t_c
	Stiffness / proportions / Buckling capacity	t_c
Primary supporting members (prescriptive)	Sectional properties	$0.5 t_c$
	Stiffness/proportions of web and flange Buckling capacity	t_c
Strength assessment by FEM	Cargo tank/cargo hold	$0.5 t_c$
	Buckling capacity	t_c
	Local fine mesh	$0.5 t_c$
	Specified fine mesh areas	$0.5 t_c$
Hull girder strength	Sectional properties	$0.5 t_c$
	Buckling capacity	t_c
Hull girder ultimate strength	Sectional properties	$0.5 t_c$
Hull girder residual strength	Buckling/collapse capacity	$0.5 t_c$
Fatigue assessment (simplified stress analysis)	Hull girder section properties	$0.5 t_c$
	Local support member	
Fatigue assessment (FE Stress analysis)	Coarse mesh FE model	$0.5 t_c$
	Very fine mesh portion	

Πιο αναλυτικά, επισημαίνονται τα εξής:

- Ο υπολογισμός των γεωμετρικών ιδιοτήτων (Sectional Properties) των κατασκευαστικών στοιχείων της μέσης τομής για τον καθολικό έλεγχο αντοχής του πλοίου, μέσω της απαιτούμενης ροπής αντίστασης, πραγματοποιείται με εφαρμογή περιθωρίου διάβρωσης $0.5 t_c$
- Για τον έλεγχο αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων του μοντέλου τριών αμπαριών εφαρμόζεται περιθώριο διάβρωσης $0.5 t_c$
- Για τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων και των ελάχιστων απαιτήσεων των ελασμάτων και των ενισχυτικών (τοπική αντοχή), εφαρμόζεται περιθώριο διάβρωσης t_c

Οι CSR εκτιμούν ότι στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατόν να συμβεί ταυτόχρονα η μέγιστη διάβρωση σε όλα τα δομικά στοιχεία. Για αυτό και κατά τον υπολογισμό της διαμήκου αντοχής και την ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, για τον έλεγχο της διαρροής, αφαιρείται το 50% της μέγιστης διάβρωσης από όλα τα δομικά στοιχεία, το οποίο ισούται με το περιθώριο διάβρωσης για το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών επιθεωρήσεων του πλοίου (2.5 έτη).

3.3.1 Προσαύξηση λόγω διάβρωσης

Παρακάτω περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού των προσαυξήσεων λόγω διάβρωσης για τα διάφορα κατασκευαστικά μέρη του πλοίου. Η προσαύξηση λόγω διάβρωσης t_c ενός κατασκευαστικού στοιχείου αντλείται ανεξάρτητα των απαιτήσεων καθαρού πάχους και εξασφαλίζει ένα επαρκές περιθώριο ανάλογα τον τύπο του κατασκευαστικού μέλους και το χώρο στον οποίο βρίσκεται. Για τον υπολογισμό της συνολικής προσαύξησης λόγω διάβρωσης υπολογίζεται η προσαύξηση διάβρωσης σε κάθε πλευρά του στοιχείου, η οποία ενδέχεται να βρίσκεται σε διαφορετικό διαβρωτικό περιβάλλον, ανάλογα με το διαμέρισμα που «βλέπει» η κάθε πλευρά. Η συνολική προσαύξηση λόγω διάβρωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$t_c = \text{Roundup}_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + 0.5$$

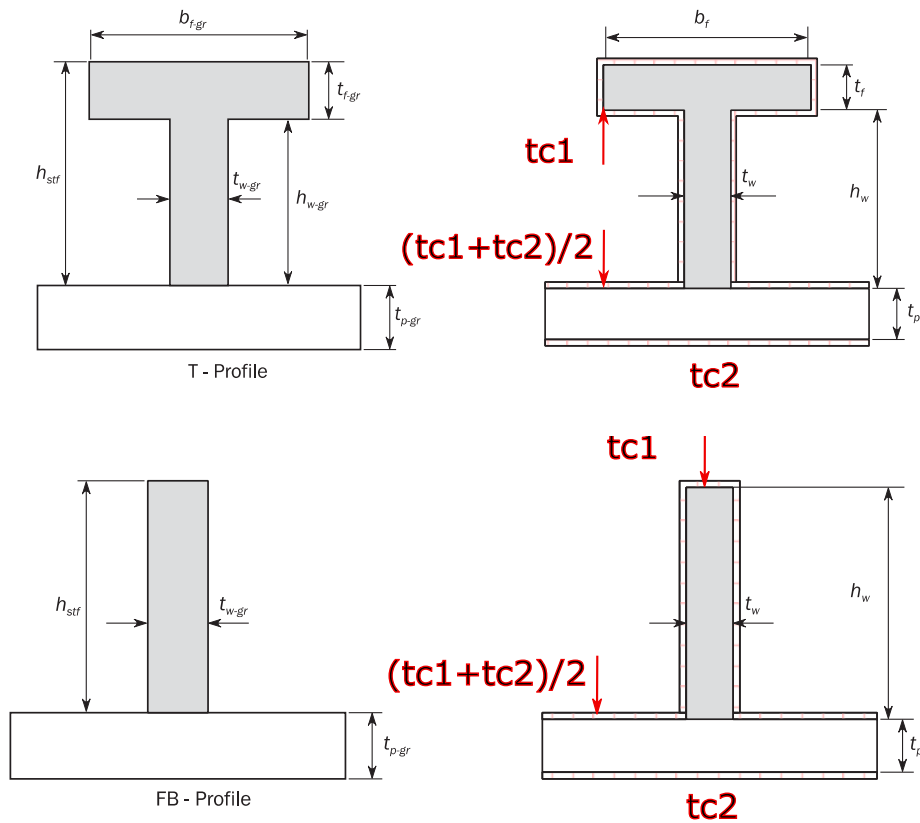
Σημειώνεται ότι η συνολική τιμή του περιθωρίου διάβρωσης t_c δεν θα πρέπει να λαμβάνει τιμή μικρότερη των 2 mm, εκτός και αν το κατασκευαστικό στοιχείο βρίσκεται σε εσωτερικούς ξηρούς χώρους (dry spaces). Στον παρακάτω πίνακα (3.9) του εδαφίου {Pt1/Ch3/Sec3} των κανόνων, προδιαγράφονται οι προσαυξήσεις t_{c1} και t_{c2} για τις δύο πλευρές του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου, ανάλογα το είδος, την τοποθεσία του και το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται.

Πίνακας 3.9: Προσαύξηση λόγω διάβρωσης για κάθε πλευρά του κατασκευαστικού στοιχείου

Compartment type	Structural member		t_{c1} or t_{c2}			
			Oil tankers	BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other BC ships	
Ballast water tank, bilge tank, drain storage tank, chain locker ⁽¹⁾	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	2.0			
		Elsewhere	1.5			
	Other members ⁽²⁾ ⁽³⁾	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	1.7			
		Elsewhere	1.2			
Cargo oil tank, slop tank	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	1.7	N/A		
		Elsewhere	1.4			
	Inner-bottom plating/bottom of tank		2.1			
	Other members	Within 3m below top of tank ⁽⁴⁾	1.7			
		Elsewhere	1.0			
Dry bulk cargo hold ⁽⁵⁾	Transverse bulkhead	Upper part ⁽⁶⁾	N/A	2.4	1.0	
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate ⁽⁷⁾		5.2	2.6	
		Other parts		3.0	1.5	
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating			3.7	2.4	
	Other members	Upper part ⁽⁶⁾		N/A	1.8	1.0
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers				
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers				
Other parts		2.2	1.2			
Exposed to atmosphere	Weather deck plating		1.7			
	Other members		1.0			

3.3.2 Προσέγγιση Καθαρού Πάχους Συστήματος Ενισχυτικού – Συνεργαζόμενου Ελάσματος

Όσον αφορά τα ενισχυτικά, αξίζει να δοθεί έμφαση στον τρόπο προσέγγισης του καθαρού πάχους του συνεργαζόμενου ελάσματος και των καθαρών γεωμετρικών ιδιοτήτων του ενισχυτικού. Παρακάτω καθορίζεται γεωμετρικά ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η διάβρωση σε κάθε πλευρά, η οποία μπορεί να είναι διαφορετική, καθώς και οι τελικές γεωμετρικές ιδιότητες των στοιχείων μετά από αφαίρεση της διάβρωσης. Στο σχήμα (3.7) παρουσιάζονται οι κυριότερες διατομές ενισχυτικών και ορίζονται τα αντίστοιχα γεωμετρικά μεγέθη τους ύστερα από διάβρωση.



Σχήμα 3.7: Ορισμός καθαρών γεωμετρικών μεγεθών διατομών I και T μετά από διάβρωση

Οι σχέσεις των καθαρών γεωμετρικών ιδιοτήτων δίνονται αναλυτικά παρακάτω:

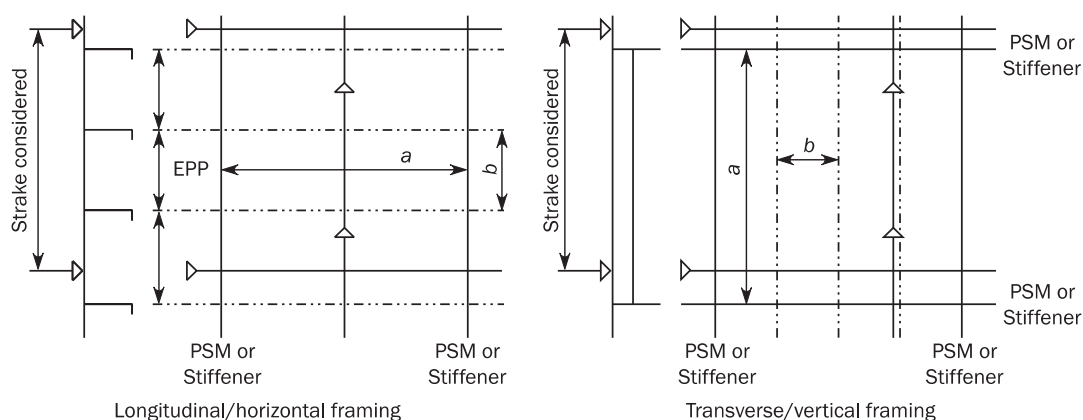
- Καθαρό πάχος συνεργαζόμενου ελάσματος $t_p = t_{p_gross} - t_{c1} - t_{c2}$
- Καθαρό πάχος κορμού $t_w = t_{w_gross} - 2t_{c1}$
- Για ενισχυτικά τύπου T
 - Καθαρό ύψος κορμού $h_w = h_{w_gross} + t_{c1} + \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2}$ (αυξάνεται)
 - Καθαρό πλάτος φλάντζας $b_f = b_{f_gross} - 2t_{c1}$
 - Καθαρό πάχος φλάντζας $t_f = t_{f_gross} - 2t_{c1}$
- Για ενισχυτικά τύπου I
 - Καθαρό ύψος κορμού $h_w = h_{w_gross} + \left| t_{c1} - \frac{t_{c1} + t_{c2}}{2} \right|$ (αυξάνεται εάν οι επιμέρους προσαιξήσεις είναι διαφορετικές)

3.4 Κατασκευαστική Μοντελοποίηση

Στο εδάφιο {Pt1/Ch3/Sec7} των κανόνων περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο μοντελοποιούνται τα βασικά δομικά στοιχεία και πιο συγκεκριμένα τα ελάσματα και τα ενισχυτικά τους. Η μοντελοποίηση αποτελεί σημαντικό στάδιο για τον υπολογισμό αντοχής των στοιχείων αυτών, καθώς αποτελεί την βάση για την εφαρμογή των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων λόγω κάμψης του πλοίου ως δοκάρη, καθώς και των τοπικών πιέσεων, για τον έλεγχο τοπικής αντοχής.

3.4.1 Μοντελοποίηση Διαμήκων Ελασμάτων

Σύμφωνα με τους κανόνες, στοιχειώδης πλάκα ελάσματος (**Elementary Plate Panel**) ορίζεται ως το ελάχιστο ανυποστήρικτο τμήμα μεταξύ δύο διαμήκων και δύο εγκάρσιων ενισχυτικών με **a** τη μεγαλύτερη διάσταση και **b** τη μικρότερη. Τα στοιχειώδη ελάσματα αποτελούν δομικά στοιχεία ενός μεγαλύτερου ενιαίου ελάσματος (Strake), το οποίο έχει σταθερό πάχος. Η διακριτοποίηση αυτή πραγματοποιείται για την εξέταση των επιμέρους σημείων του ενιαίου ελάσματος, με τον υπολογισμό των φορτίσεων στα σημεία που ορίζουν οι στοιχειώδεις πλάκες και τελικά τον έλεγχο του απαιτούμενου πάχους σε κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Τελικά, το απαιτούμενο πάχος του συνολικού ελάσματος λαμβάνεται ίσο με το μέγιστο απαιτούμενο πάχος μεταξύ των στοιχειωδών ελασμάτων που το συνθέτουν. Στο σχήμα (3.8) ορίζεται σχηματικά ένα στοιχειώδες έλασμα ενισχυμένο κατά το διάμηκες (με την μεγαλύτερη πλευρά **a** να εκτείνεται κατά το διάμηκες) και κατά το εγκάρσιο (με την μεγαλύτερη πλευρά **a** να εκτείνεται κατά το εγκάρσιο).

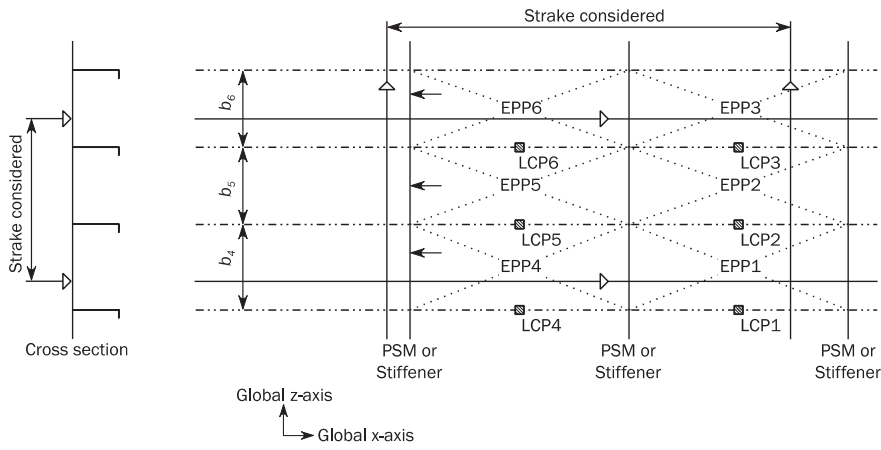


Σχήμα 3.8: Ορισμός Στοιχειώδους Πλάκας Ελάσματος (Elementary Plate Panel)

Για κάθε στοιχειώδες έλασμα, ορίζονται σημεία υπολογισμού φορτίσεων (Load Calculation Points) και συγκεκριμένα τοπικών πιέσεων και ορθών τάσεων. Τα σημεία αυτά συμπίπτουν για τις φορτίσεις αυτές στην περίπτωση ελέγχου έναντι διαρροής και ορίζονται από τον πίνακα (3.10) και το σχήμα (3.9).

Πίνακας 3.10: Συντεταγμένες σημείου υπολογισμού πιέσεων & ορθών τάσεων για έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής

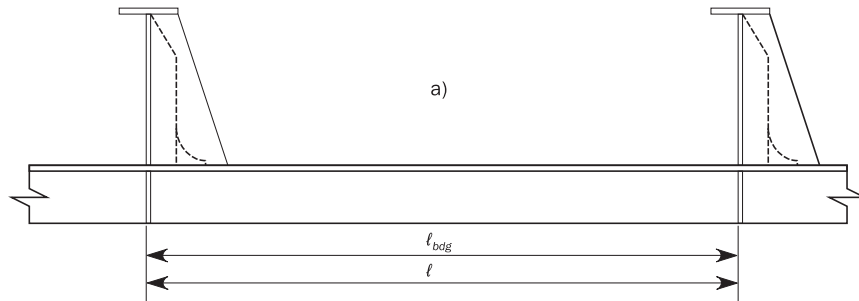
LCP coordinates	General ⁽⁴⁾		Horizontal plating		Vertical transverse structure and transverse stool plating	
	Longitudinal framing (Figure 18)	Transverse framing (Figure 19)	Longitudinal framing	Transverse framing	Horizontal framing (Figure 20)	Vertical framing (Figure 21)
x coordinate	Mid-length of the EPP		Mid-length of the EPP		Corresponding to y and z values	
y coordinate	Corresponding to x and z coordinates		Outboard y value of the EPP		Outboard y value of the EPP, taken at z level ⁽²⁾	
z coordinate	Lower edge of the EPP	The greater of lower edge of the EPP or lower edge of the strake	Corresponding to x and y values		Lower edge of the EPP	The greater of lower edge of the EPP or lower edge of the strake



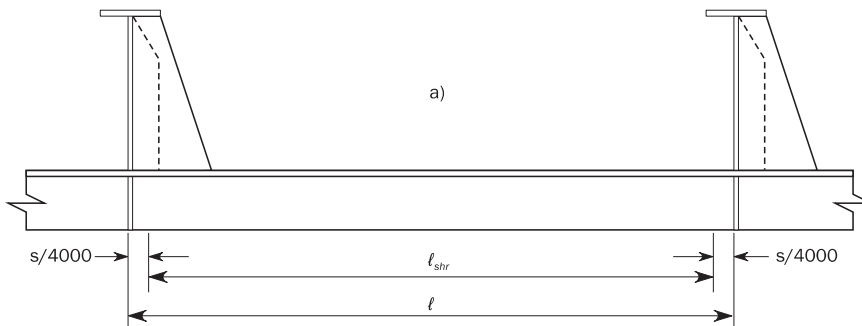
Σχήμα 3.9: Σημείο υπολογισμού Φορτίσεων EPP για διάμηκες σύστημα ενίσχυσης

3.4.2 Μοντελοποίηση Διαμήκων Ενισχυτικών

Όπως και τα στοιχειώδη ελάσματα, έτσι και τα διαμήκη ενισχυτικά μοντελοποιούνται τμηματικά, με στοιχειώδες μήκος l , το ελάχιστο ανυποστήρικτο μήκος μεταξύ δύο διαδοχικών εγκάρσιων στοιχείων ενίσχυσης (PSM ή απλά εγκάρσια ενισχυτικά). Επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο στήριξης των ενισχυτικών στα στοιχεία εγκάρσιας ενίσχυσης, ορίζεται το ενεργό μήκος κάμψης l_{bdg} [m] και το ενεργό μήκος διάτμησης l_{shr} [m]. Το ενεργό μήκος κάμψης λαμβάνεται όσο το ανυποστήρικτο μήκος του ενισχυτικού, αλλά μπορεί να μειωθεί με τη χρήση αγκώνων (Brackets) και ενισχυτικών (Web Stiffeners), αρκεί να τοποθετηθούν προς τις δύο κατευθύνσεις. Στην απλούστερη περίπτωση, όπου χρησιμοποιούνται αγκώνες ή απλά ενισχυτικά προς τη μία μόνο κατεύθυνση, το ενεργό μήκος κάμψης ορίζεται στο σχήμα (3.10). Αντίστοιχα στο σχήμα (3.11) ορίζεται και το ενεργό μήκος διάτμησης.

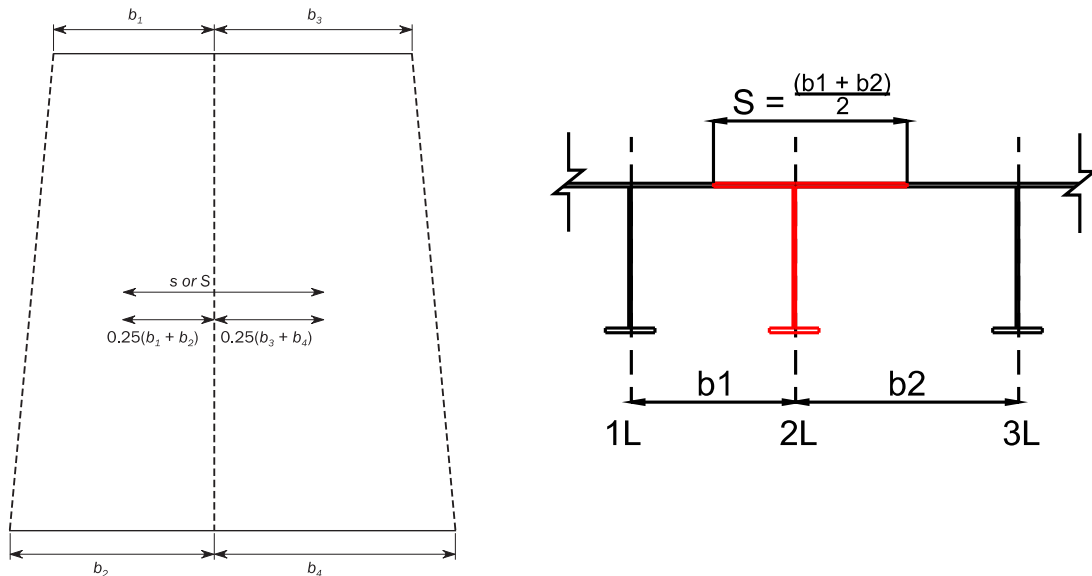


Σχήμα 3.10: Ενεργό μήκος κάμψης l_{bdg} ενισχυτικού απλής στήριξης μεταξύ δύο διαδοχικών PSM με χρήση brackets ή web stiffeners προς τη μία μόνο κατεύθυνση



Σχήμα 3.11: Ενεργό μήκος διάτμησης l_{shr} ενισχυτικού απλής στήριξης μεταξύ δύο διαδοχικών PSM με χρήση brackets ή web stiffeners προς τη μία μόνο κατεύθυνση

Το ενισχυτικό ορίζει ένα τοπικό σύστημα μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα. Το σύστημα αυτό χαρακτηρίζεται από ένα μέγεθος ισαπόστασης (**spacing**) s [mm], το οποίο ορίζεται από το πλάτος b των δύο στοιχειωδών ελασμάτων που καθορίζουν τα διαδοχικά ενισχυτικά. Το μέγεθος αυτό καθορίζει και το πλάτος του ελάσματος για κάθε τοπικό σύστημα ενισχυτικού, όπως φαίνεται στο σχήμα (3.12).



Σχήμα 3.12: Ορισμός ισαπόστασης (spacing) S για σύστημα ενισχυτικού – συνεργαζόμενου ελάσματος

Επιπλέον οι κανόνες ορίζουν τις καθαρές ελαστικές ιδιότητες των ενισχυτικών, που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια στα κριτήρια αντοχής.

- Καθαρή ελαστική επιφάνεια διάτμησης A_{shr} [cm²]

$$A_{shr} = d_{shr} t_w 10^{-2}$$

και d_{shr} [mm], το ενεργό βάθος διάτμησης που ορίζεται παρακάτω:

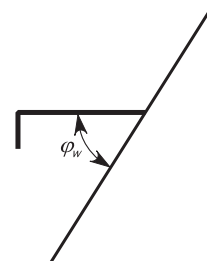
$$d_{shr} = (h_{stf} + t_p) \sin \varphi_w$$

- Καθαρή ελαστική ροπή αντίστασης Z [cm³]

$$Z = Z_{stf} \sin \varphi_w$$

Όπου:

- Z_{stf} , η ροπή αντίστασης του ενισχυτικού κάθετα προσκολλημένο με το συνεργαζόμενο έλασμα
- $h_{stf} = h_w + t_f$, το συνολικό ύψος του ενισχυτικού
- t_p , το πάχος του συνεργαζόμενου ελάσματος
- φ_w , η γωνία μεταξύ του κορμού του ενισχυτικού και του συνεργαζόμενου ελάσματος, η οποία για γωνία μεγαλύτερη των 75° λαμβάνεται ίση με 90°. Για ενισχυτικό κάθετα προσκολλημένο στο συνεργαζόμενο έλασμα ισχύει $\sin \varphi_w = 90^\circ \Rightarrow Z = Z_{stf}$.



Σχήμα 3.13: Γωνία μεταξύ ενισχυτικού και προσκολλημένου ελάσματος.

Για τον υπολογισμό της προσφερόμενης ροπής αντίστασης του συστήματος χρησιμοποιείται το **ενεργό πλάτος** του συνεργαζόμενου ελάσματος b_{eff} [mm], προκειμένου να ληφθεί υπόψη το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης και προκύπτει από το ελεύθερο ανυποστήρικτο μήκος του ενισχυτικού και την ισαπόσταση του συστήματος ως εξής:

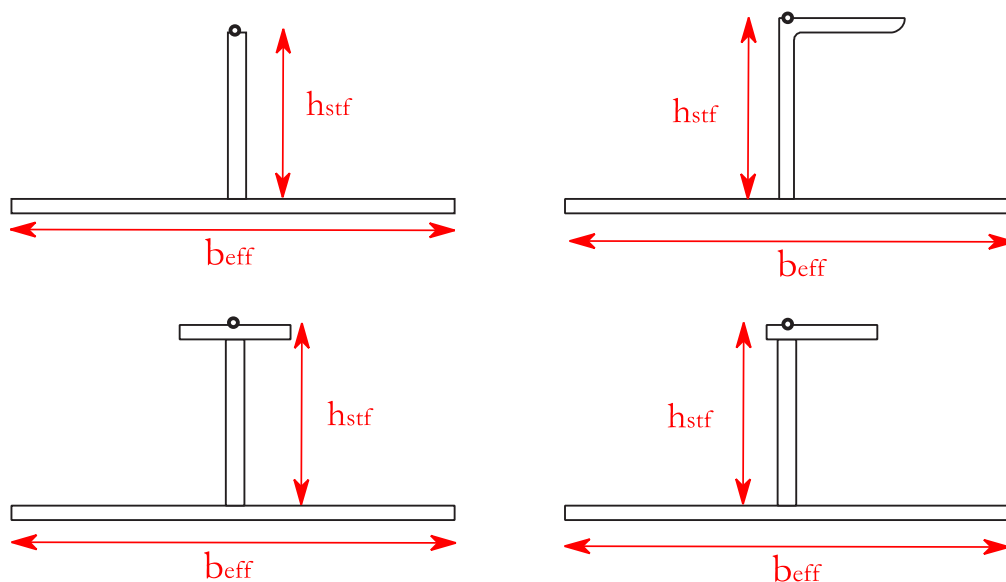
$$b_{eff} = \min(200 l, s)$$

Ωστόσο το ενεργό πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος όταν το καθαρό πάχος του ελάσματος t_p είναι μικρότερο από 8 mm, δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 600 mm. Στο σχήμα (3.14) φαίνεται το σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης.

Σημείο Υπολογισμού Φορτίσεων (Load Calculation Point)

Αντίστοιχα με τα EPP's, για κάθε στοιχειώδες ενισχυτικό ορίζεται ένα σημείο υπολογισμού φορτίσεων για τον υπολογισμό των τάσεων και των κάθετων πιέσεων. Σημειώνεται ότι το σημείο υπολογισμού της κάθετης πίεσης και ορθής τάσης είναι διαφορετικά.

Για τον υπολογισμό των κάθετων πιέσεων, το σημείο υπολογισμού ορίζεται στο μέσο του ολικού μήκους l και συγκεκριμένα στο σημείο τομής με το προσκολλημένο έλασμα. Ισοδύναμα, το σημείο αυτό συμπίπτει με το σημείο υπολογισμού των πιέσεων των στοιχειωδών ελασμάτων. Ωστόσο για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω κάμψης του πλοίου, το σημείο υπολογισμού ορίζεται στο μέσο του ολικού μήκους l και συγκεκριμένα μέσω της κατακόρυφης απόστασης (offset) $h_{stf} = h_w + t_f$ του ενισχυτικού από το συνεργαζόμενο έλασμα. Στο σχήμα (3.14) ορίζεται το σημείο υπολογισμού των ορθών τάσεων για τις κυριότερες διατομές.



Σχήμα 3.14: Σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό της ορθής αναπτυσσόμενης τάσης και της προσφερόμενης ροπής αντίστασης Z_{stf} συστήματος ενισχυτικού – συνεργαζόμενου ελάσματος πλάτους b_{eff}

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Φορτίσεις

Για την αξιολόγηση της κατασκευαστικής επάρκειας, οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες προδιαγράφουν διάφορα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων (Design Load Scenarios), τα οποία μπορεί να είναι μόνο στατικά (S) ή συνδυασμός στατικής με δυναμική συνιστώσα (S+D). Τα σενάρια αυτά περιλαμβάνουν τις σχεδιαστικές φορτίσεις (Design Loads) που αναφέρθηκαν ονομαστικά στο Κεφάλαιο 2 (2.4.1) και περιγράφονται αναλυτικά από τους κανονισμούς στο εδάφιο {Pt1/Ch4}. Οι φορτίσεις αυτές διακρίνονται σε φορτίσεις γάστρας (Hull Girder Loads), οι οποίες επιδρούν στο πλοίο ως δοκάρι και σε τοπικές (Local Loads), οι οποίες επιδρούν στα επιμέρους κατασκευαστικά του μέλη. Τα βασικά σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων, τα οποία καλύπτουν τις δυσμενέστερες πιθανές συνθήκες λειτουργίας του πλοίου είναι τα παρακάτω:

- Συνθήκες λιμανιού (Harbour & sheltered water and testing)
- Συνθήκες κανονικής πλεύσης σε κακοκαιρία (Seagoing conditions with extreme sea loads)
- Συνθήκες προσθαφίρεσης έρματος (Ballast water exchange)
- Συνθήκες κατάκλυσης τόσο στο λιμάνι όσο και εν πλω (Accidental Flooded conditions)

Στον πίνακα (4.1) συνοψίζονται τα επιμέρους είδη των φορτίσεων (Load Components) που επάγονται, ανάλογα το σενάριο λειτουργίας.

Πίνακας 4.1: Βασικά Σενάρια Σχεδιαστικών Φορτίσεων

Design load scenario		Harbour and sheltered water and testing	Seagoing conditions with extreme sea loads	Ballast water exchange ⁽⁴⁾	Accidental flooded conditions ⁽⁴⁾		
					Static (A: S)	Static + dynamic (A: S+D)	
Load components		Static (S)	Static + Dynamic (S+D)	Static + dynamic (S+D)	Static (A: S)	Static + dynamic (A: S+D)	
Hull Girder	VBM	M_{sw-p}	$M_{sw} + M_{wv-LC}$	$M_{sw} + M_{wv-LC}$	M_{sw-f} ⁽²⁾	$M_{sw-f} + M_{wv-LC}$ ⁽³⁾	
	HBM	-	M_{wh-LC}	M_{wh-LC}	-	M_{wh-LC} ⁽³⁾	
	VSF	Q_{sw-p}	$Q_{sw} + Q_{wv-LC}$	$Q_{sw} + Q_{wv-LC}$	-	$Q_{sw-f} + Q_{wv-LC}$ ⁽³⁾	
	TM	-	M_{wt-LC}	M_{wt-LC}	-	-	
Local Loads	P_{ex}	External deck for green sea	-	P_D	-	-	
		Hull envelope	P_S	$P_S + P_W$	$P_S + P_W$	-	-
	P_{in}	Ballast tanks ⁽⁴⁾	$Max(P_{Is}, P_{ST})$	$P_{Is} + P_{Id}$	$P_{Is} + P_{Id}$	-	-
		Liquid cargo tanks			-	-	
		Other tanks			-	-	
		Watertight boundaries			-	-	
	Cargo holds	P_{bs}	$P_{bs} + P_{bd}$	-			
	P_{dk}	Internal decks for dry spaces	P_{dl-s}	$P_{dl-s} + P_{dl-d}$	-	-	-
		External deck for distributed loads	P_{dl-s}	$P_{dl-s} + P_{dl-d}$	-	-	-
External deck for heavy units		F_{U-s}	$F_{U-s} + F_{U-d}$	-	-	-	

Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με τον πίνακα (4.1), οι φορτίσεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

➤ **Φορτίσεις της γάστρας (Hull Girder Loads)**, οι οποίες χωρίζονται γενικά στις εξής κατηγορίες:

- Κατακόρυφη Ροπή (VBM)
- Οριζόντια Ροπή (HBM)
- Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη (VSF)
- Στρεπτική Ροπή (TM)

➤ **Τοπικές φορτίσεις (Local Loads)**, οι οποίες χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες, ανάλογα με τη θέση του κατασκευαστικού στοιχείου:

- Εξωτερικές Φορτίσεις P_{ex} , οι οποίες καταπονούν το εξωτερικό περίβλημα της γάστρας και το κατάστρωμα αντοχής, λόγω επαφής με το θαλάσσιο περιβάλλον
- Εσωτερικές Φορτίσεις P_{in} , οι οποίες καταπονούν τα κατασκευαστικά στοιχεία που βρίσκονται εντός χώρων μεταφοράς ξηρού φορτίου και δεξαμενών μεταφοράς υγρού φορτίου
- Άλλες φορτίσεις που αφορούν την καταπόνηση του καταστρώματος P_{dk}

Οι επιμέρους φορτίσεις μπορεί να αποτελούνται τόσο από στατικά (S), όσο από και δυναμικά φορτία, ως συνδυασμός (S+D), ανάλογα με το σενάριο λειτουργίας.

Τα στατικά φορτία (S) χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Φορτίσεις γάστρας σε ήρεμο νερό και συγκεκριμένα κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό M_{sw} και διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό Q_{sw} , για τις επιμέρους καταστάσεις λειτουργίας
- Εξωτερικές φορτίσεις, λόγω υδροστατικής πίεσης P_s
- Εσωτερικές φορτίσεις είτε λόγω στατικής πίεσης ξηρού φορτίου P_{bs} , είτε λόγω στατικής πίεσης υγρού φορτίου P_{ls} , είτε λόγω κατάκλυσης P_{fs}

Τα δυναμικά φορτία χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Δυναμικές φορτίσεις γάστρας και συγκεκριμένα κατακόρυφη ροπή λόγω κυματισμού M_{wv-LC} , κατακόρυφη διατμητική δύναμη λόγω κυματισμού Q_{wv-LC} , οριζόντια ροπή λόγω κυματισμού M_{wh-LC} και στρεπτική ροπή λόγω κυματισμού M_{wt-LC}
- Δυναμικές εξωτερικές φορτίσεις P_w λόγω υδροδυναμικών πιέσεων της θάλασσας
- Δυναμικές εσωτερικές φορτίσεις είτε λόγω αδρανειακών φορτίσεων ξηρού φορτίου P_{bd} , είτε λόγω αδρανειακών φορτίσεων υγρού φορτίου P_{ld} , είτε λόγω κατάκλυσης P_{fd}

Το εξεταζόμενο σενάριο λειτουργίας καθορίζει ποιες από τις παραπάνω συνιστώσες λαμβάνονται, καθώς και τον τρόπο υπολογισμού τους σε κάθε περίπτωση. Με βάση τα παραπάνω σενάρια καθορίζεται και ο συντελεστής f_{ps} ο οποίος χρησιμοποιείται στον έλεγχο αντοχής για τον υπολογισμό των επιμέρους φορτίσεων και λαμβάνει τις παρακάτω τιμές:

$$f_{ps} = 1.0 \text{ for extreme sea loads design load scenario}$$

$$f_{ps} = 0.8 \text{ for the ballast water exchange design load scenario}$$

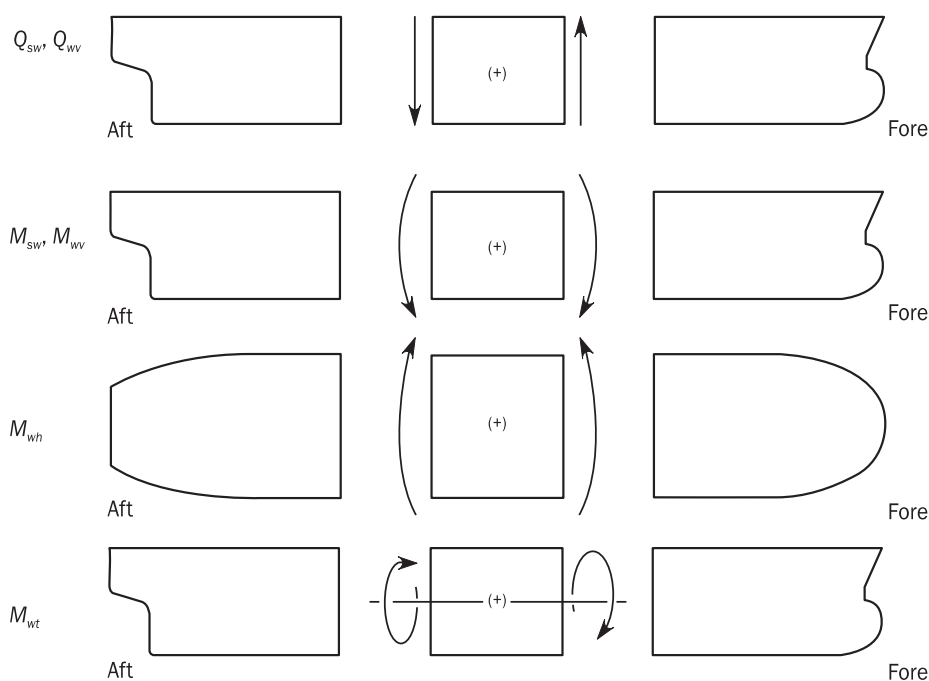
$$f_{ps} = 0.8 \text{ for the accidental flooded design load scenario at sea}$$

$$f_{ps} = 0.4 \text{ for the harbour/sheltered water design load scenario}$$

4.1 Φορτίσεις Γάστρας

Στο παρόν εδάφιο περιγράφονται οι φορτίσεις που δέχεται το πλοίο ως δοκάρι από τα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων, τα οποία περιλαμβάνουν στατικά (S) και δυναμικά φορτία (S+D). Συγκεκριμένα περιγράφεται ο υπολογισμός των σχεδιαστικών φορτίσεων που δέχεται το πλοίο ως αποτέλεσμα της κατάστασης φόρτωσής του αλλά και των κυματισμών. Οι εξωτερικές φορτίσεις που καταπονούν το πλοίο παρουσιάζονται παρακάτω, καθώς και η σύμβαση των προσήμων (Σχήμα 4.1).

- Κατακόρυφη Ροπή σε ήρεμο νερό (Vertical Still Water Bending Moment)
- Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη σε ήρεμο νερό (Vertical Still Water Shear Force)
- Κατακόρυφη Ροπή λόγω κυματισμού (Vertical Wave Bending Moment)
- Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη λόγω κυματισμού (Vertical Wave Shear Force)
- Οριζόντια Ροπή λόγω κυματισμού (Horizontal Wave Bending Moment)
- Στρεπτική Ροπή λόγω κυματισμού (Wave Torsional Moment)



Σχήμα 4.1: Σύμβαση προσήμων για τις φορτίσεις της γάστρας

Απαραίτητη παράμετρος υπολογισμών είναι ο συντελεστής κύματος (Wave Coefficient) που ορίζεται παρακάτω, με βάση το μήκος κανονισμού (Rule Length).

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{1.5} \quad \text{for } 90 \leq L \leq 300$$

$$C_w = 10.75 \quad \text{for } 300 < L \leq 350$$

$$C_w = 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150} \right)^{1.5} \quad \text{for } 350 < L \leq 500$$

4.1.1 Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε Ήρεμο νερό

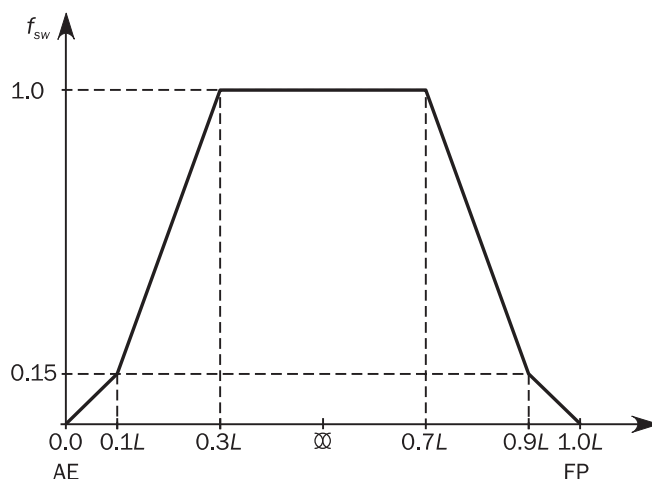
Οι κανόνες προδιαγράφουν την ελάχιστη κατακόρυφη ροπή κάμψης που θα πρέπει να δέχεται το πλοίο σε ήρεμο νερό ως αποτέλεσμα της κατάστασης φόρτωσής του. Η ροπή αυτή καθορίζεται τόσο για κατάσταση Hogging, όσο και για Sagging, όπως φαίνεται παρακάτω.

$$M_{SW-hog-min} = f_{SW} (171 C_W L^2 B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{WV-hog-mid}) \quad \text{for hogging conditions}$$

$$M_{SW-sag-min} = -0.85 f_{SW} (171 C_W L^2 B(C_B + 0.7)10^{-3} + M_{WV-sag-mid}) \quad \text{for sagging conditions}$$

Όπου:

- f_{SW} , συντελεστής κατανομής της ροπής κάμψης κατά μήκος του πλοίου (Σχήμα 4.2)
- $M_{WV-h-mid}$, $M_{WV-s-mid}$ οι κατακόρυφες ροπές κάμψης λόγω κυματισμού για κατάσταση hogging και sagging αντίστοιχα, υπολογισμένες στο μέσο του πλοίου ($x/L=0.5$) χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους συντελεστές $f_p = f_m = 1$. Ο υπολογισμός της ροπή κάμψης λόγω κυματισμού M_{WV-h} , M_{WV-s} περιγράφεται παρακάτω (4.1.3).



Σχήμα 4.2: Συντελεστής διαμήκους κατανομής ροπής κάμψης σε ήρεμο νερό

Με βάση την ελάχιστη επιτρεπόμενη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό, καθορίζονται οι επιμέρους ροπές κάμψης σε ήρεμο νερό για τις παρακάτω καταστάσεις που αφορούν τα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων.

– Κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό σε συνθήκες πλεύσης (Seagoing Condition)

Η κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό, σε συνθήκες πλεύσης, τόσο για κατάσταση Hogging M_{sw-h} όσο και για Sagging M_{sw-s} λαμβάνεται ως η δυσμενέστερη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό από όλες τις αντίστοιχες καταστάσεις εν πλω που αναγράφονται στο Loading Manual. Σε περίπτωση που είναι μικρότερες από την ελάχιστη επιτρεπόμενη, λαμβάνεται η παραπάνω ως η δυσμενέστερη.

– Κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό σε συνθήκες λιμανιού (Harbour / Sheltered water Condition)

Η κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό, σε συνθήκες λιμανιού, τόσο για κατάσταση Hogging M_{sw-p-h} όσο και για Sagging M_{sw-p-s} λαμβάνεται ως η δυσμενέστερη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό από όλες τις αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης σε συνθήκες λιμανιού που αναγράφονται στο Loading Manual. Διαφορετικά, λαμβάνεται ως η ελάχιστη επιτρεπόμενη ροπή κάμψης αυξημένη κατά **25%**.

– Κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό σε συνθήκες κατάκλυσης (Flooded Condition)

Η κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό, σε συνθήκες κατάκλυσης, τόσο για Hogging M_{sw-f-h} , όσο και για Sagging M_{sw-f-s} λαμβάνεται ως η δυσμενέστερη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό από όλες τις αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης σε συνθήκες κατάκλυσης που αναγράφονται στο Loading Manual. Διαφορετικά, λαμβάνεται ως η ελάχιστη επιτρεπόμενη ροπή κάμψης αυξημένη κατά **10%**.

4.1.2 Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη σε ήρεμο Νερό

Η κατακόρυφη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό σε οποιαδήποτε διαμήκη θέση του πλοίου κατά τον πλου του (seagoing condition) για Bulk Carrier προκύπτει ως η δυσμενέστερη των διατμητικών δυνάμεων που προκύπτουν από όλες τις καταστάσεις φόρτωσης που αναγράφονται στο Loading Manual, έπειτα από διόρθωση της διατμητικής δύναμης στις φρακτές.

4.1.3 Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό

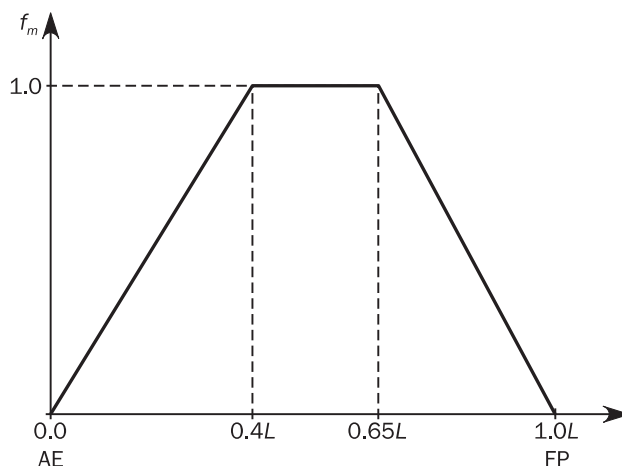
Οι κανόνες προδιαγράφουν την σχεδιαστική κατακόρυφη ροπή κάμψης λόγω κυματισμού που αναμένεται να συναντήσει το πλοίο κατά τη διάρκεια της ζωής του. Η ροπή αυτή καθορίζεται τόσο για κατάσταση Hogging, όσο και για Sagging και για τη μελέτη αντοχής (strength assessment), σύμφωνα με τα παρακάτω.

$$M_{WV-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_W L^2 B C_B \quad \text{for hogging conditions}$$

$$M_{WV-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_W L^2 B C_B \quad \text{for sagging conditions}$$

Όπου:

- $f_{nl-vh} = 1$, συντελεστής μη γραμμικών φαινομένων για κατάσταση Hogging.
- $f_{nl-vs} = 0.58 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B} \right)$, συντελεστής μη γραμμικών φαινομένων για κατάσταση Sagging.
- $f_p = f_{ps}$, ο οποίος εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων.
- f_m , συντελεστής κατανομής της ροπής κάμψης κατά μήκος του πλοίου (Σχήμα 4.3)



Σχήμα 4.3: Συντελεστής κατανομής κατακόρυφης και οριζόντιας ροπής κάμψης σε κυματισμό

4.1.4 Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη σε Κυματισμό

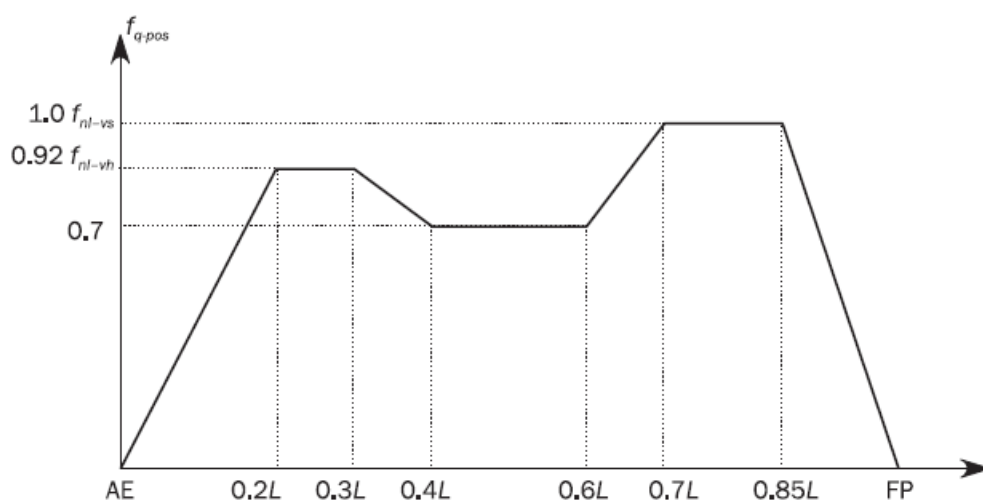
Η σχεδιαστική κατακόρυφη διατμητική δύναμη λόγω κυματισμού σε οποιαδήποτε διαμήκη θέση του πλοίου προδιαγράφεται από τους κανόνες σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$Q_{WV-pos} = 0.52 f_{q-pos} f_p C_W L B C_B$$

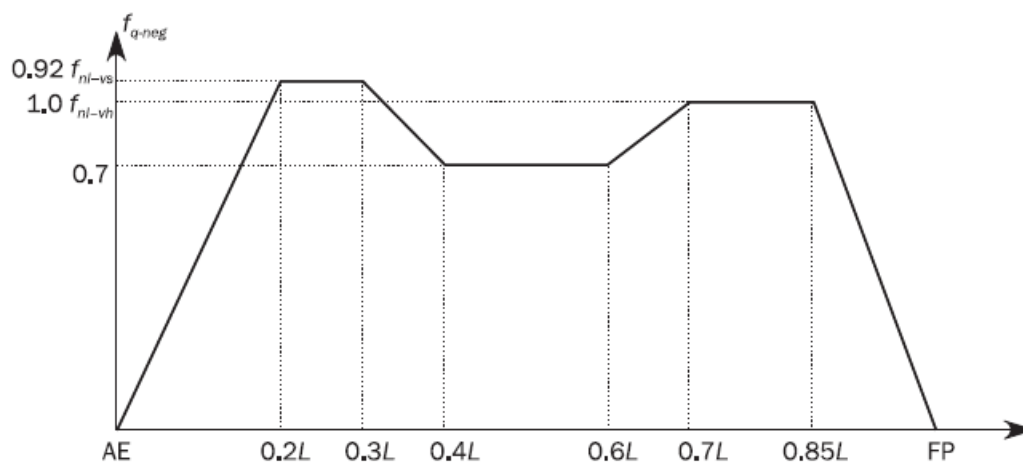
$$Q_{WV-neg} = -0.52 f_{q-neg} f_p C_W L B C_B$$

Όπου:

- $f_p = f_{ps}$, ο οποίος εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων
- f_{q-pos} συντελεστής διαμήκους κατανομής της θετικής διατμητικής δύναμης (Σχήμα 4.4)
- f_{q-neg} συντελεστής διαμήκους κατανομής της αρνητικής διατμητικής δύναμης (Σχήμα 4.5)



Σχήμα 4.4: Συντελεστής Κατανομής Θετικής Διατμητικής Δύναμης κατά μήκος του πλοίου



Σχήμα 4.5: Συντελεστής Κατανομής Αρνητικής Διατμητικής Δύναμης κατά μήκος του πλοίου

4.1.5 Οριζόντια Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό

Η σχεδιαστική οριζόντια ροπή κάμψης λόγω κυματισμού σε οποιαδήποτε διαμήκη θέση του πλοίου προδιαγράφεται από τους κανόνες σύμφωνα με την παρακάτω σχέση. Σημειώνεται ότι σε αντίθεση με τις υπόλοιπες σχεδιαστικές φορτίσεις γάστρας, η οριζόντια καμπτική ροπή εξαρτάται από το βύθισμα λειτουργίας T_{LC} , ανάλογα την κατάσταση φόρτωσης.

$$M_{wh} = f_{nh} f_p \left(0.31 + \frac{L}{2800} \right) f_m C_w L^2 T_{LC} C_B$$

Όπου:

- $f_p = f_{ps}$, ο οποίος εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων
- $f_{nh} = 0.9$ συντελεστής μη γραμμικών φαινομένων για μελέτη αντοχής
- f_m συντελεστής διαμήκους κατανομής της καμπτικής ροπής, όπως περιγράφεται παραπάνω στο Σχήμα (4.3)

4.1.6 Στρεπτική Ροπή σε Κυματισμό

Η σχεδιαστική στρεπτική ροπή λόγω κυματισμού σε οποιαδήποτε διαμήκη θέση του πλοίου προδιαγράφεται από τους κανόνες σύμφωνα με την παρακάτω σχέση. Η σχέση αυτή αναγράφεται μόνο για λόγους πληρότητας, καθώς στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δεν χρησιμοποιείται.

$$M_{wt} = f_p (M_{wt1} + M_{wt2})$$

Όπου:

- $f_p = f_{ps}$, συντελεστής για μελέτη αντοχής
- M_{wt1} , M_{wt2} , συνιστώσες στρεπτικής ροπής που ορίζονται ως εξής:

$$M_{wt1} = 0.4 f_{t1} C_w \sqrt{\frac{L}{T_{LC}}} B^2 D C_B$$

$$M_{wt2} = 0.22 f_{t2} C_w L B^2 C_B$$

- f_{t1} , f_{t2} συντελεστές διαμήκους κατανομής της στρεπτικής ροπής που ορίζονται ως εξής:

$$f_{t1} = 0 \quad \text{for } x < 0$$

$$f_{t1} = \left| \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right| \quad \text{for } 0 \leq x \leq L$$

$$f_{t1} = 0 \quad \text{for } x > L$$

$$f_{t2} = 0 \quad \text{for } x < L$$

$$f_{t2} = \sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) \quad \text{for } 0 \leq x \leq L$$

$$f_{t2} = 0 \quad \text{for } x > L$$

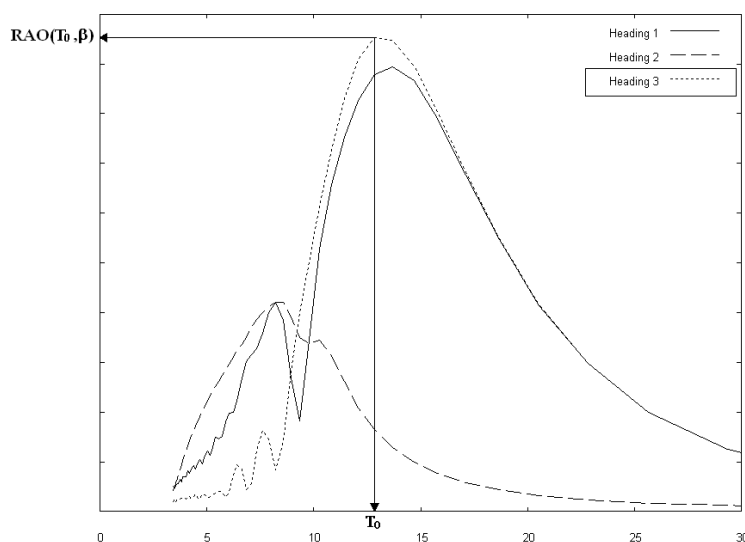
4.2 Δυναμικές Καταστάσεις Φόρτισης

Ο IACS έχει αναπτύξει μια πρακτική μέθοδο για την εκτίμηση των δυναμικών φορτίσεων που αφορούν τόσο τις τοπικές πιέσεις, όσο και τις φορτίσεις της γάστρας. Πιο συγκεκριμένα, οι περιπτώσεις δυναμικής φόρτισης βασίζονται στην έννοια του **Ισοδύναμου Σχεδιαστικού Κύματος** (Equivalent Design Wave). Πρόκειται για απλούς αρμονικούς κυματισμούς (Regular Waves) που παράγουν αποκρίσεις ισοδύναμες με τις απαιτούμενες τιμές μακροπρόθεσμης απόκρισης (Long Term). Με αυτήν τη φιλοσοφία, οι δυναμικές καταστάσεις φόρτισης μετατρέπονται σε ισοδύναμες στατικές (ψευδοστατικές). Σε κάθε δυναμική κατάσταση (Dynamic Load Case) προκαλείται διαφορετικός συνδυασμός καταπόνησης για κάθε στοιχείο της κατασκευής, που καθορίζεται από τους συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων (Load Combination Factors). Οι συντελεστές αυτοί λαμβάνουν τιμές στο διάστημα [-1,1] και περιγράφουν την συνεισφορά κάθε δυναμικής κατάστασης στην καταπόνηση της γάστρας, αλλά και στην απόκρισή της γενικότερα.

4.2.1 Ισοδύναμοι Σχεδιαστικοί Κυματισμοί

Απλό αρμονικό κύμα με πλάτος A_0 , περίοδο T_0 και κατεύθυνση κυματισμού β_0 από το οποίο παράγεται η ίδια φόρτιση με την προβλεπόμενη μέγιστη από τους κανόνες με πιθανότητα εμφάνισης 10^{-8} υπό την επίδραση τυχαίων κυματισμών.

- Από υδροδυναμικές εξισώσεις που συνδέουν τις φορτίσεις του πλοίου με τη διέγερση της θάλασσας βρίσκεται η συνάρτηση $RAO(T, \beta)$, το πλάτος απόκρισης σε διέγερση μοναδιαίου πλάτους και συχνότητας ω . Επιλέγεται το ζεύγος (T_0, β_0) το οποίο μεγιστοποιεί τη συνάρτηση $RAO(T, \beta)$.
- Από φασματική ανάλυση προσδιορίζεται το πλάτος της απόκρισης (π.χ. ροπή κυματισμού) σε διέγερση συχνότητας ω_0 με πιθανότητα εμφάνισης 10^{-8} : X. Τα φάσματα (Pierson – Moskowitz) προκύπτουν από καταστάσεις θάλασσας που παρατηρούνται στο Βόρειο Ατλαντικό.

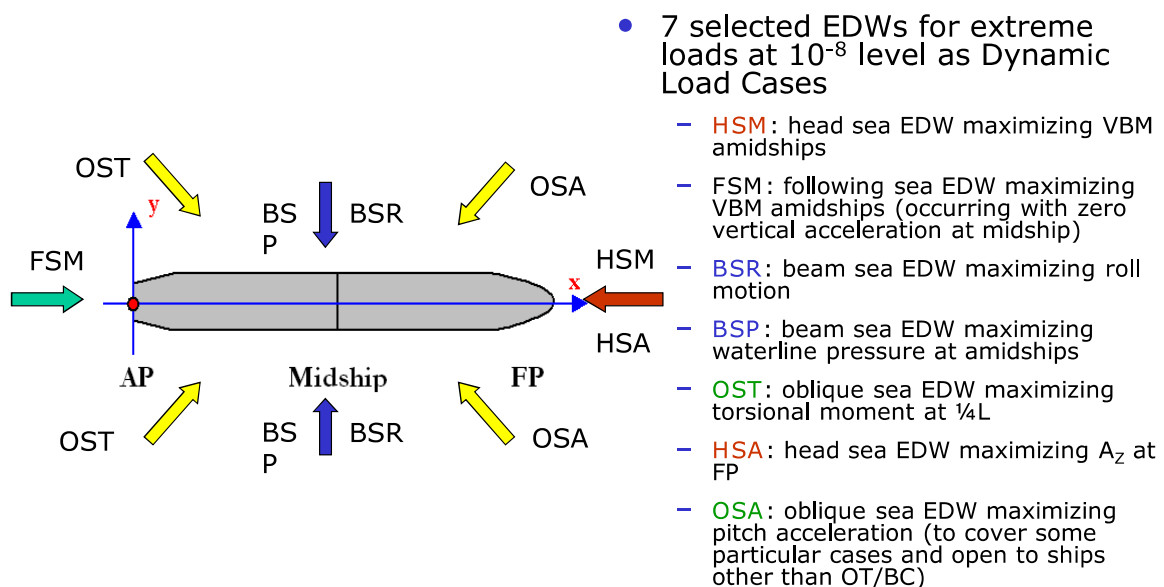


Σχήμα 4.6: Συναρτήσεις $RAO(T, \beta)$

Τελικά : $A_{EDW} = A_0 = \frac{X}{RAO(T_0, \beta_0)}$, το πλάτος διέγερσης του αρμονικού κύματος. Αφού βρεθούν οι παράμετροι αυτοί, ορίζεται το εκάστοτε EDW.

Οι ισοδύναμοι σχεδιαστικοί κυματισμοί (EDWs) που μοντελοποιούνται από τους κανόνες για την περιγραφή των δυναμικών καταστάσεων, αντιστοιχούν στα 7 παρακάτω είδη κυματισμών:

- **HSM 1 – 2:** Μετωπικοί (**Head**) κυματισμοί, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την κατακόρυφη καμπτική ροπή στο μέσο του πλοίου.
- **HSA 1 – 2:** Μετωπικοί (**Head**) κυματισμοί, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης στην πρωραία κάθετο.
- **FSM 1 – 2:** Ακολουθούντες (**Following**) κυματισμοί, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την κατακόρυφη καμπτική ροπή, μηδενίζοντας την κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης, στο μέσο του πλοίου.
- **BSR 1 – 2 (P&S):** Κάθετα πλευρικοί (**Beam**) κυματισμοί, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την κίνηση του διατοιχισμού (Roll).
- **BSP 1 – 2 (P&S):** Κάθετα πλευρικοί (**Beam**) κυματισμοί, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την υδροδυναμική πίεση στο μέσο του πλοίου.
- **OST 1 – 2 (P&S):** Πλευρικοί κυματισμοί (**Oblique**) υπό γωνία, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την στρεπτική ροπή στο 1/4 του μήκους του πλοίου.
- **OSA 1 – 2 (P&S):** Πλευρικοί κυματισμοί (**Oblique**) υπό γωνία, οι οποίοι μεγιστοποιούν (1) / ελαχιστοποιούν (2) την επιτάχυνση του προνευτασμού (Pitch).



Σχήμα 4.7: Ισοδύναμοι Σχεδιαστικοί Κυματισμοί που περιγράφουν τις Δυναμικές Καταστάσεις Φόρτισης

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη κάθε ισοδύναμου σχεδιαστικού κυματισμού είναι το μήκος και το ύψος κύματος και ορίζονται σαν συνάρτηση του μήκους του πλοίου και του βυθίσματος. Επιπλέον, οι κανόνες ορίζουν ένα συντελεστή διόρθωσης (Heading Correction Factor) για κάθε EDW, ο οποίος χρησιμοποιείται εκτενώς στον υπολογισμό των φορτίσεων και λαμβάνει τις παρακάτω τιμές:

$$f_{\beta} = 1.05 \quad \text{for HSM \& FSM Load Cases for extreme sea loads design scenario}$$

$$f_{\beta} = 0.8 \quad \text{for BSR \& BSP Load Cases for extreme sea loads design scenario}$$

$$f_{\beta} = 1.0 \quad \text{for HSA, OST \& OSA Load Cases for extreme sea loads design scenario}$$

$$f_{\beta} = 1.0 \quad \text{for All Dynamic Load Cases for Accidental Flooded design scenario}$$

4.2.2 Φορτίσεις Γάστρας για τις Δυναμικές Καταστάσεις Φόρτισης

Στον πίνακα (4.2) παρουσιάζεται η επίδραση που έχουν οι ισοδύναμοι σχεδιαστικοί κυματισμοί στις δυναμικές φορτίσεις της γάστρας και συγκεκριμένα στην φορά των αντίστοιχων κατακόρυφων καμπτικών ροπών (Vertical Wave Bending Moments), κατακόρυφων διατμητικών δυνάμεων (Vertical Wave Shear Forces), οριζόντιων καμπτικών ροπών (Horizontal Wave Bending Moments) και στρεπτικών ροπών (Torsional Moments). Σημειώνεται ότι από τους 7 βασικούς κυματισμούς, προκύπτουν τελικά 22, καθώς για κάθε έναν από τους προαναφερθέντες κυματισμούς, αντιστοιχεί ένας ο οποίος μεγιστοποιεί (1) και ένας που ελαχιστοποιεί (2) το αντίστοιχο μέγεθος (effect), ενώ στην περίπτωση των πλευρικών κυματισμών (Beam & Oblique) αντιστοιχεί ένα ζευγάρι με κατεύθυνση Port και ένα με κατεύθυνση Starboard.

Πίνακας 4.2: Επίδραση Σχεδιαστικών Κυματισμών στις Δυναμικές Φορτίσεις της Γάστρας

EDW	Heading	Effect	VWBM	VWSF	HWBM	TM
HSM – 1	Head	Max. Bending Moment	Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	-	-
HSM – 2			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	-	-
HSA – 1	Head	Max. Vertical Acceleration	Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	-	-
HSA – 2			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	-	-
FSM – 1	Following	Max. Bending Moment	Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	-	-
FSM – 2			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	-	-
BSR – 1P	Beam	Max. Roll	Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	Stbd. Tensile	-
BSR – 2P			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	Port Tensile	-
BSR – 1S			Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	Port Tensile	-
BSR – 2S			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	Stbd. Tensile	-
BSP – 1P	Beam	Max. Pressure at Waterline	Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	Stbd. Tensile	-
BSP – 2P			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	Port Tensile	-
BSP – 1S			Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	Port Tensile	-
BSP – 2S			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	Stbd. Tensile	-
OST – 1P	Oblique	Max. Torsional Moment	Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	Port Tensile	Neg.
OST – 2P			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	Stbd. Tensile	Pos.
OST – 1S			Sagging	Neg. Aft – Pos. Fore	Stbd. Tensile	Pos.
OST – 2S			Hogging	Pos. Aft – Neg. Fore	Port Tensile	Neg.
OSA – 1P	Oblique	Max. Pitch Acceleration	Hogging	Neg. Aft – Pos. Fore	Stbd. Tensile	Pos.
OSA – 2P			Sagging	Pos. Aft – Neg. Fore	Port Tensile	Neg.
OSA – 1S			Hogging	Neg. Aft – Pos. Fore	Port Tensile	Neg.
OSA – 2S			Sagging	Pos. Aft – Neg. Fore	Stbd. Tensile	Pos.

Για τον υπολογισμό των φορτίσεων σε κάθε δυναμική κατάσταση φόρτισης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων LCF και ο διορθωτικός συντελεστής κύματος f_{β} . Με αυτόν τον τρόπο γίνεται προσαρμογή των ροπών και διατμητικών δυνάμεων που αναφέρθηκαν προηγουμένως προκειμένου να περιγράψουν την εκάστοτε δυναμική κατάσταση. Παρακάτω ορίζονται οι δυναμικές φορτίσεις προσαρμοσμένες με την εκάστοτε δυναμική κατάσταση.

$$M_{WV-LC} = f_{\beta} C_{WV} M_{WV-h} \quad \text{if } C_{WV} \geq 0$$

$$M_{WV-LC} = f_{\beta} C_{WV} |M_{WV-s}| \quad \text{if } C_{WV} < 0$$

$$Q_{WV-LC} = f_{\beta} C_{QW} Q_{WV-pos} \quad \text{if } C_{QW} \geq 0$$

$$Q_{WV-LC} = f_{\beta} C_{QW} |Q_{WV-neg}| \quad \text{if } C_{QW} < 0$$

$$M_{wh-LC} = f_{\beta} C_{WH} M_{wh}$$

$$M_{wt-LC} = f_{\beta} C_{WT} M_{wt}$$

4.2.3 Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων

Κάθε δυναμική κατάσταση προκαλεί διαφορετική απόκριση κινήσεων και επιταχύνσεων, καθώς και διαφορετική φόρτιση στη γάστρα. Προκειμένου να καθοριστεί η συνεισφορά της κάθε δυναμικής κατάστασης στις αποκρίσεις του πλοίου, χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων (Load Combination Factors), οι οποίοι καθορίζονται από τους κανόνες στο εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec2}. Στους παρακάτω πίνακες (4.3 έως 4.7) ορίζονται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τον έλεγχο αντοχής (**strength assessment**). Για τον υπολογισμό των συντελεστών χρησιμοποιούνται οι παρακάτω παράμετροι:

- Ο λόγος βυθίσματος f_T , ο οποίος συνδέεται με το βύθισμα στην ελάχιστη κατάσταση λειτουργίας.
- Οι συντελεστές f_{lp} , f_{lp-OST} και f_{lp-OSA} , οι οποίοι συνδέονται με τη διαμήκη θέση της διατομής μέσω του λόγου f_{xL} .

Πίνακας 4.3: Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων για τις δυναμικές καταστάσεις HSM – HSA – FSM (Strength Assessment)

Load component	LCF	HSM-1	HSM-2	HSA-1	HSA-2	FSM-1	FSM-2
Hull girder loads	M_{WV} C_{WV}	-1	1	-0.7	0.7	$-0.4f_T - 0.6$	$0.4f_T + 0.6$
	Q_{WV} C_{QW}	$-1.0f_{lp}$	$1.0f_{lp}$	$-0.6f_{lp}$	$0.6f_{lp}$	$-1.0f_{lp}$	$1.0f_{lp}$
	M_{WH} C_{WH}	0	0	0	0	0	0
	M_{WT} C_{WT}	0	0	0	0	0	0
Longitudinal accelerations	a_{surge} C_{XS}	$0.3 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.3$	0.2	-0.2	$0.2 - 0.4f_T$	$0.4f_T - 0.2$
	$a_{pitch-x}$ C_{XP}	-0.7	0.7	$-0.4f_T - 0.4$	$0.4f_T + 0.4$	0.15	-0.15
	$g\sin\phi$ C_{XG}	0.6	-0.6	$0.4f_T + 0.4$	$-0.4f_T - 0.4$	-0.2	0.2
Transverse accelerations	a_{sway} C_{YS}	0	0	0	0	0	0
	a_{roll-y} C_{YR}	0	0	0	0	0	0
	$g\sin\theta$ C_{YG}	0	0	0	0	0	0
Vertical accelerations	a_{heave} C_{ZH}	$0.5f_T - 0.15$	$0.15 - 0.5f_T$	$0.4f_T - 0.1$	$0.1 - 0.4f_T$	0	0
	a_{roll-z} C_{ZR}	0	0	0	0	0	0
	$a_{pitch-z}$ C_{ZP}	-0.7	0.7	$-0.4f_T - 0.4$	$0.4f_T + 0.4$	0.15	-0.15

Πίνακας 4.4: Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων για τη δυναμική κατάσταση BSR (Strength Assessment)

Load component	LCF	BSR-1P	BSR-2P	BSR-1S	BSR-2S
Hull girder loads	M_{WV} C_{WV}	$0.1 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.1$	$0.1 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.1$
	Q_{WV} C_{QW}	$(0.1 - 0.2f_T) f_{lp}$	$(0.2f_T - 0.1) f_{lp}$	$(0.1 - 0.2f_T) f_{lp}$	$(0.2f_T - 0.1) f_{lp}$
	M_{WH} C_{WH}	$1.2 - 1.1f_T$	$1.1f_T - 1.2$	$1.1f_T - 1.2$	$1.2 - 1.1f_T$
	M_{WT} C_{WT}	0	0	0	0
Longitudinal accelerations	a_{surge} C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$ C_{XP}	0	0	0	0
	$g\sin\phi$ C_{XG}	0	0	0	0
Transverse accelerations	a_{sway} C_{YS}	$0.2 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.2$	$0.2f_T - 0.2$	$0.2 - 0.2f_T$
	a_{roll-y} C_{YR}	1	-1	-1	1
	$g\sin\theta$ C_{YG}	-1	1	1	-1
Vertical accelerations	a_{heave} C_{ZH}	$0.7 - 0.4f_T$	$0.4f_T - 0.7$	$0.7 - 0.4f_T$	$0.4f_T - 0.7$
	a_{roll-z} C_{ZR}	1	-1	-1	1
	$a_{pitch-z}$ C_{ZP}	0	0	0	0

Πίνακας 4.5: Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων για τη δυναμική κατάσταση BSP (Strength Assessment)

Load component	LCF	BSP-1P	BSP-2P	BSP-1S	BSP-2S	
Hull girder loads	M_{WV}	C_{WV}	$0.3 - 0.8f_T$	$0.8f_T - 0.3$	$0.3 - 0.8f_T$	$0.8f_T - 0.3$
	Q_{WV}	C_{QW}	$(0.3 - 0.8f_T) f_{ip}$	$(0.8f_T - 0.3) f_{ip}$	$(0.3 - 0.8f_T) f_{ip}$	$(0.8f_T - 0.3) f_{ip}$
	M_{WH}	C_{WH}	$0.7 - 0.7f_T$	$0.7f_T - 0.7$	$0.7f_T - 0.7$	$0.7 - 0.7f_T$
	M_{WT}	C_{WT}	0	0	0	0
Longitudinal accelerations	a_{surge}	C_{XS}	0	0	0	0
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	$0.1 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.1$	$0.1 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.1$
	$g\sin\phi$	C_{XG}	$0.3f_T - 0.1$	$0.1 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.1$	$0.1 - 0.3f_T$
Transverse accelerations	a_{sway}	C_{YS}	-0.9	0.9	0.9	-0.9
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.3	-0.3	-0.3	0.3
	$g\sin\theta$	C_{YG}	-0.2	0.2	0.2	-0.2
Vertical accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	1	-1	1	-1
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.3	-0.3	-0.3	0.3
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	$0.1 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.1$	$0.1 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.1$

Πίνακας 4.6: Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων για τη δυναμική κατάσταση OST (Strength Assessment)

Load component	LCF	OST-1P	OST-2P	OST-1S	OST-2S	
Hull girder loads	M_{WV}	C_{WV}	$-0.3 - 0.2f_T$	$0.3 + 0.2f_T$	$-0.3 - 0.2f_T$	$0.3 + 0.2f_T$
	Q_{WV}	C_{QW}	$(-0.35 - 0.2f_T) f_{ip}$	$(0.35 + 0.2f_T) f_{ip}$	$(-0.35 - 0.2f_T) f_{ip}$	$(0.35 + 0.2f_T) f_{ip}$
	M_{WH}	C_{WH}	-0.9	0.9	0.9	-0.9
	M_{WT}	C_{WT}	$-f_{ip-OST}$	f_{ip-OST}	f_{ip-OST}	$-f_{ip-OST}$
Longitudinal accelerations	a_{surge}	C_{XS}	$0.1f_T - 0.15$	$0.15 - 0.1f_T$	$0.1f_T - 0.15$	$0.15 - 0.1f_T$
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	$0.7 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.7$	$0.7 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.7$
	$g\sin\phi$	C_{XG}	$0.2f_T - 0.45$	$0.45 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.45$	$0.45 - 0.2f_T$
Transverse accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0	0	0	0
	a_{roll-y}	C_{YR}	$0.4f_T - 0.25$	$0.25 - 0.4f_T$	$0.25 - 0.4f_T$	$0.4f_T - 0.25$
	$g\sin\theta$	C_{YG}	$0.1 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.1$	$0.2f_T - 0.1$	$0.1 - 0.2f_T$
Vertical accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	$0.2f_T - 0.05$	$0.05 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.05$	$0.05 - 0.2f_T$
	a_{roll-z}	C_{ZR}	$0.4f_T - 0.25$	$0.25 - 0.4f_T$	$0.25 - 0.4f_T$	$0.4f_T - 0.25$
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	$0.7 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.7$	$0.7 - 0.3f_T$	$0.3f_T - 0.7$

Πίνακας 4.7: Συντελεστές Συνδυαστικών Φορτίσεων για τη δυναμική κατάσταση OSA (Strength Assessment)

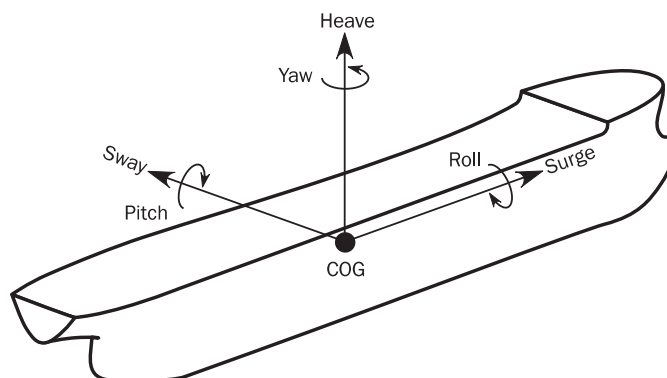
Load component	LCF	OSA-1P	OSA-2P	OSA-1S	OSA-2S	
Hull girder loads	M_{WV}	C_{WV}	$0.75 - 0.5f_T$	$-0.75 + 0.5f_T$	$0.75 - 0.5f_T$	$-0.75 + 0.5f_T$
	Q_{WV}	C_{QW}	$(0.6 - 0.4f_T) f_{ip}$	$(-0.6 + 0.4f_T) f_{ip}$	$(0.6 - 0.4f_T) f_{ip}$	$(-0.6 + 0.4f_T) f_{ip}$
	M_{WH}	C_{WH}	$0.55 + 0.2f_T$	$-0.55 - 0.2f_T$	$-0.55 - 0.2f_T$	$0.55 + 0.2f_T$
	M_{WT}	C_{WT}	$-f_{ip-OSA}$	f_{ip-OSA}	f_{ip-OSA}	$-f_{ip-OSA}$
Longitudinal accelerations	a_{surge}	C_{XS}	$0.1f_T - 0.45$	$0.45 - 0.1f_T$	$-0.45 + 0.1f_T$	$0.45 - 0.1f_T$
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	1.0	-1.0	1.0	-1.0
	$g\sin\phi$	C_{XG}	-1.0	1.0	-1.0	1.0
Transverse accelerations	a_{sway}	C_{YS}	$-0.2 - 0.1f_T$	$0.2 + 0.1f_T$	$0.2 + 0.1f_T$	$-0.2 - 0.1f_T$
	a_{roll-y}	C_{YR}	$0.3 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.3$	$0.2f_T - 0.3$	$0.3 - 0.2f_T$
	$g\sin\theta$	C_{YG}	$0.1f_T - 0.2$	$0.2 - 0.1f_T$	$0.2 - 0.1f_T$	$0.1f_T - 0.2$
Vertical accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	$-0.2f_T$	$0.2f_T$	$-0.2f_T$	$0.2f_T$
	a_{roll-z}	C_{ZR}	$0.3 - 0.2f_T$	$0.2f_T - 0.3$	$0.2f_T - 0.3$	$0.3 - 0.2f_T$
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	1.0	-1.0	1.0	-1.0

4.3 Κινήσεις και Επιταχύνσεις

Για τον υπολογισμό των δυναμικών φορτίσεων που ασκούνται στο πλοίο, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των κινήσεων και των επιταχύνσεων που εκτελεί. Έτσι μπορούν να υπολογιστούν οι υδροδυναμικές πιέσεις και τα αδρανειακά φορτία που ασκούνται στην κατασκευή, η οποία έρχεται σε επαφή είτε με το φορτίο (ξηρό ή υγρό), είτε με το θαλάσσιο περιβάλλον. Ο υπολογισμός των κινήσεων και επιταχύνσεων του κέντρου βάρους του πλοίου γίνεται με βάση το εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec3} των κανόνων και αφορά τις παρακάτω κινήσεις:

- Διαμήκης μετατόπιση (Surge)
- Εγκάρσια μετατόπιση (Sway)
- Κατακόρυφη μετατόπιση (Heave)
- Διατοιχισμός (Roll)
- Προνευτασμός (Pitch)

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται για την περιγραφή των κινήσεων του πλοίου είναι το σωματοπαγές, με το σύστημα των αξόνων να βρίσκεται πάνω στο κέντρο βάρους του πλοίου και θετικές φορές όπως φαίνονται στο σχήμα (4.8).



Σχήμα 4.8: Ορισμός Συστήματος Συντεταγμένων για τις κινήσεις του κέντρου βάρους του πλοίου

Με βάση τον υπολογισμό των επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του πλοίου, οι τοπικές επιταχύνσεις σε οποιοδήποτε σημείο του πλοίου υπολογίζονται μέσω των παρακάτω εξισώσεων:

$$\text{Longitudinal Acceleration: } a_x = -C_{xG} g \sin \varphi + C_{xS} a_{surge} + C_{xP} a_{pitch} (z - R)$$

$$\text{Transverse Acceleration: } a_y = C_{yG} g \sin \theta + C_{yS} a_{sway} - C_{yP} a_{roll} (z - R)$$

$$\text{Vertical Acceleration: } a_z = C_{zH} a_{heave} + C_{zR} a_{roll} y - C_{zP} a_{pitch} (x - 0.45L)$$

Οι συντεταγμένες x, y, z των παραπάνω εξισώσεων αναφέρονται στο κέντρο βάρους του εκάστοτε φορτίου. Άρα θέτοντας τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους του φορτίου X_G, Y_G, Z_G , λαμβάνονται οι επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του κύτους (ή της δεξαμενής). Οι επιταχύνσεις αυτές χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τον υπολογισμό των τοπικών αδρανειακών φορτίσεων που καταπονούν την κατασκευή από το φορτίο στην επιλεγμένη δυναμική κατάσταση φόρτισης. Οι συντελεστές C_i είναι οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων (LCF) που ορίστηκαν προηγουμένως.

Παρακάτω ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού των κινήσεων και επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του πλοίου (για **Bulk Carrier**), καθώς και οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό αυτό.

○ **Κινήσεις (Motions)**

- Roll Period: $T_\theta = \frac{2.3 \pi k_r}{\sqrt{g GM}}$ • Roll Angle: $\theta = \frac{9000(1.25 - 0.025 T_\theta) f_p f_{BK}}{(B + 75) \pi}$
- Pitch Period: $T_\theta = \sqrt{\frac{2\pi \lambda_\varphi}{g}}$ • Pitch Angle: $\varphi = 1350 f_p L^{-0.94} \left[1 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{g L}} \right)^{1.2} \right]$

○ **Επιταχύνσεις (Accelerations)**

- Surge Acceleration: $a_{surge} = 0.2 f_p a_0 g$ • Roll Acceleration: $a_{roll} = f_p \theta \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\theta} \right)^2$
- Sway Acceleration: $a_{sway} = 0.3 f_p a_0 g$ • Pitch Acceleration: $a_{pitch} = f_p \left(\frac{3.1}{\sqrt{g L}} + 1 \right) \varphi \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\varphi} \right)^2$
- Heave Acceleration: $a_{heave} = f_p a_0 g$

Παράμετροι Υπολογισμών

- Παράμετρος επιτάχυνσης: $a_0 = (1.58 - 0.47 C_B) \left(\frac{2.4}{\sqrt{L}} + \frac{34}{L} - \frac{600}{L^2} \right)$
- Κατακόρυφη συντεταγμένη κέντρου στροφής του πλοίου: $R = \min \left(\frac{D}{4} + \frac{T_{LC}}{2}, \frac{D}{2} \right)$
- Ο συντελεστής $f_p = f_{ps}$, ο οποίος εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων
- Ο λόγος βυθίσματος f_T , ο οποίος συνδέεται με το βύθισμα στην εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας
- Ο συντελεστής: $f_{BK} = \begin{cases} 1.2 & \text{for ships without bilge keel} \\ 1 & \text{for ships with bilge keel} \end{cases}$
- Οι συντελεστές k_r , GM οι οποίοι λαμβάνονται από τον πίνακα (4.8) και εξαρτώνται από την κατάσταση φόρτωσης

Πίνακας 4.8: Ακτίνα Διατοιχισμού k_r και Μετακεντρικό ύψος GM για Bulk Carrier. Σημειώνεται ότι οι συντελεστές αυτοί για την κατάσταση Flooded είναι ίδιοι με την κατάσταση Full Load.

Loading condition ⁽²⁾ ⁽⁴⁾		Application	T_{LC}	k_r	GM
Full load condition	Homogeneous loading	All bulk carriers	T_{SC}	0.35B	0.12B
	Alternate heavy cargo	BC-A		0.40B	0.20B
	Alternate light cargo	BC-A		0.35B	0.12B
	Homogeneous heavy cargo	BC-B, BC-A		0.42B	0.25B
Steel coil loading ⁽³⁾		All bulk carriers designated for the carriage of steel products		0.42B	0.25B
Heavy ballast condition		All bulk carriers	T_{BAL-H}	0.40B	0.25B
Normal ballast condition		All bulk carriers	T_{BAL}	0.45B	0.33B
(2) For flooded loading conditions, the values of k_r and GM , unless provided in the loading manual, are to be taken as those for the full load condition.					

4.4 Τοπικές Εξωτερικές Φορτίσεις

Ο υπολογισμός των τοπικών εξωτερικών φορτίσεων γίνεται σύμφωνα με το εδάφιο των κανόνων {Pt1/Ch4/Sec5}. Πρόκειται για κάθετες πιέσεις που ασκεί το θαλάσσιο περιβάλλον στο εξωτερικό περίβλημα της γάστρας και επηρεάζουν την τοπική αντοχή των ελασμάτων και ενισχυτικών που έρχονται σε επαφή με εκείνο. Η συνολική εξωτερική φόρτιση μπορεί να περιλαμβάνει είτε μόνο στατική συνιστώσα (S), είτε συνδυασμό στατικής και δυναμικής (S+D), ανάλογα με το σχεδιαστικό σενάριο φορτίσεων.

$$P_{ex} = P_S \text{ for Design Load (S)}$$

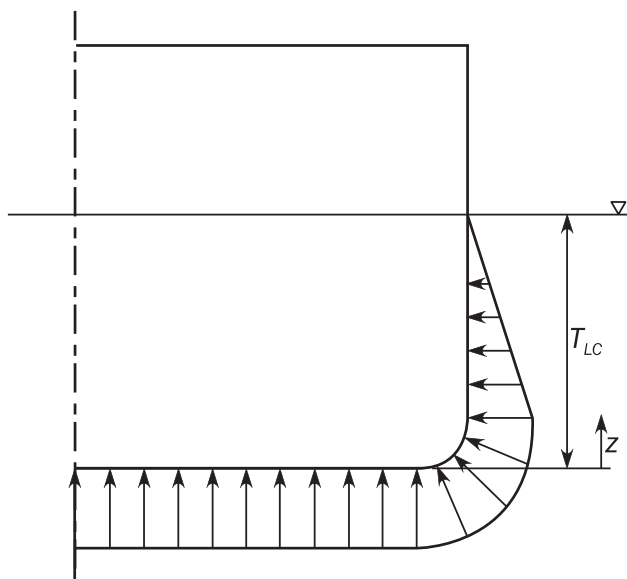
$$P_{ex} = P_S + P_W \text{ for Design Load (S+D)}$$

Η στατική συνιστώσα P_S αφορά την υδροστατική πίεση και η δυναμική P_W τις υδροδυναμικές πιέσεις λόγω κυματισμών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η φιλοσοφία των κανονισμών βασίζεται στο ότι οι δυναμικές καταστάσεις φόρτισης μετατρέπονται σε ισοδύναμες στατικές, μέσω των ισοδύναμων σχεδιαστικών κυματισμών EDW (Equivalent Design Waves). Οι αντίστοιχες κατανομές των «ψευδοστατικών» πιέσεων αθροίζονται αλγεβρικά κάθε φορά με την κατανομή της υδροστατικής πίεσης, για να δώσουν τη συνολική κατανομή της εξωτερικής πίεσης λόγω θάλασσας. Με βάση αυτές τις κατανομές προκύπτει η δυσμενέστερη φόρτιση για κάθε στοιχείο, βάσει της οποίας προδιαγράφεται τελικά το απαιτούμενο πάχος ελάσματος από τους κανόνες.

4.4.1 Υδροστατική Πίεση P_S

Η υδροστατική πίεση σε κάθε σημείο υπολογίζεται με βάση την κατακόρυφη απόσταση z , από την επιφάνεια της θάλασσας, για το δεδομένο βύθισμα της κατάστασης φόρτωσης T_{LC} . Στο σχήμα (4.9) φαίνεται μια τυπική εγγραφή κατανομή της υδροστατικής πίεσης.

$$P_S \left[\text{kN} / \text{m}^2 \right] = \rho g (T_{LC} - z)$$



Σχήμα 4.9: Εγγραφή κατανομή υδροστατικής πίεσης

4.4.2 Πίεση λόγω Κυματισμού P_w

Ο υπολογισμός της πίεσης λόγω κυματισμού P_w εξαρτάται από τον ισοδύναμο σχεδιαστικό κυματισμό (EDW) που περιγράφει την εκάστοτε δυναμική κατάσταση. Κάθε EDW παράγει μια κατανομή πιέσεων P_{EDW} , με βάση την οποία προκύπτει η τελική πίεση κυματισμού. Ο υπολογισμός της τελικής πίεσης κυματισμού P_w περιγράφεται στον Πίνακα (4.9). Οι δυναμικές αυτές πιέσεις χαρακτηρίζονται ως ψευδοστατικές.

Πίνακας 4.9: Υπολογισμός Πίεσης λόγω Κυματισμού μέσω των EDW

Load Case	Wave Pressure P_w [kN / m^2]		
	$z \leq T_{LC}$	$T_{LC} < z \leq h_w + T_{LC}$	$z > h_w + T_{LC}$
EDW - 1	$P_w = \max(-P_{EDW}, \rho g (z - T_{LC}))$	$P_w = P_{w,WL} - \rho g (z - T_{LC})$	$P_w = 0$
EDW - 2	$P_w = \max(P_{EDW}, \rho g (z - T_{LC}))$		

$P_{w,WL}$, ορίζεται ως η πίεση κυματισμού στην ίσαλο επιφάνεια, δηλαδή $P_w(z = T_{LC})$ και h_w το ισοδύναμο ύψος κύματος το οποίο υπολογίζεται από την πίεση κυματισμού στην ίσαλο ως εξής:

$$h_w = \frac{P_{w,WL}}{\rho g}$$

Σε περιπτώσεις όπου ο κυματισμός φτάνει στο κατάστρωμα, δηλαδή $h_w + T_{LC} > D$, οι κανόνες προδιαγράφουν ξεχωριστά τον υπολογισμό της πίεσης αυτής P_D ο οποίος παρουσιάζεται παρακάτω (4.4.2.6). Για τον υπολογισμό των επιμέρους πιέσεων P_{EDW} ορίζονται σε πρώτο στάδιο κάποιες βασικές παράμετροι που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια.

Παράμετροι υπολογισμού

- $f_{ps} = 1$, συντελεστής για μελέτη αντοχής για κατάσταση εν πλω (Seagoing with Extreme Loads)
- f_{nl} , συντελεστής μη γραμμικών φαινομένων
- f_{yz} , συντελεστής εγκάρσιας κατανομής υδροδυναμικής πίεσης
- $f_{yB} = \frac{|2y|}{B}$, λόγος εγκάρσιας θέσης
- k_a , συντελεστής πλάτους κατά τη διαμήκη κατεύθυνση
- k_p , συντελεστής φάσης κυματισμού
- λ , το μήκος κύματος του EDW
- $f_T = \frac{T_{LC}}{T_{SC}}$, ο λόγος βυθίσματος
- f_β , διορθωτικός συντελεστής κυματισμού
- C_w , συντελεστής κυματισμού

Παρακάτω ακολουθεί η διαδικασία υπολογισμού των υδροδυναμικών πιέσεων των επιμέρους EDW για τον τελικό υπολογισμό της πίεσης λόγω κυματισμού.

4.4.2.1 Υδροδυναμική Πίεση για δυναμικές καταστάσεις HSM – HSA – FSM

ο Για τις δυναμικές καταστάσεις HSM & HSA

$$P_{HS} = f_{\beta} f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_W \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

Όπου:

$$f_{\beta} = 1.05 \quad \text{for HSM Load Case}$$

$$f_{\beta} = 1.0 \quad \text{for HSA Load Case}$$

$$f_{nl} = 0.7 \quad \text{at } f_{xL} = 0$$

$$f_{nl} = 0.9 \quad \text{at } f_{xL} = 0.3$$

$$f_{nl} = 0.9 \quad \text{at } f_{xL} = 0.7$$

$$f_{nl} = 0.6 \quad \text{at } f_{xL} = 1$$

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

$$f_h = 3.0(1.21 - 0.66 f_T) \quad \text{for HSM Load Case}$$

$$f_h = 2.4(1.21 - 0.66 f_T) \quad \text{for HSA Load Case}$$

For HSM - HSA Load Cases

$$k_a = (0.5 + f_T) \left\{ \left(3 - 2\sqrt{f_{yB}} \right) - \frac{20}{9} f_{xL} (7 - 6\sqrt{f_{yB}}) \right\} + \frac{2}{3} (1 - f_T) \quad \text{for } f_{xL} < 0.15$$

$$k_a = 1 \quad \text{for } 0.15 \leq f_{xL} < 0.7$$

$$k_a = 1 + (f_{xL} - 0.7) \left\{ \left(\frac{40}{3} f_T - 5 \right) + 2(1 - f_{yB}) \left[\frac{18}{C_B} f_T (f_{xL} - 0.7) - 0.25(2 - f_T) \right] \right\} \quad \text{for } f_{xL} \geq 0.7$$

$$\lambda = 0.6(1 + f_T)L$$

Ο συντελεστής φάσης k_p προκύπτει από τους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 4.10: Συντελεστής φάσης για δυναμική κατάσταση HSM. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

f_{xL}	0	$0.3 - 0.1 f_T$	$0.35 - 0.1 f_T$	$0.8 - 0.2 f_T$	$0.9 - 0.2 f_T$	1.0
k_p	$-0.25 f_T (1 + f_{yB})$	-1	1	1	-1	-1

Πίνακας 4.11: Συντελεστής φάσης για δυναμική κατάσταση HSA. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

f_{xL}	0	$0.3 - 0.1 f_T$	$0.5 - 0.2 f_T$	$0.8 - 0.2 f_T$	$0.9 - 0.2 f_T$	1.0
k_p	$1.5 - f_T - 0.5 f_{yB}$	-1	1	1	-1	-1

ο Για τη δυναμική κατάσταση FSM

$$P_{FS} = f_{\beta} f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_W \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

Όπου:

$$f_{\beta} = 1.05$$

$$f_{nl} = 0.9$$

$$f_h = 2.6$$

$$f_{yz} = \frac{z}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

For FSM Load Case

$$k_a = 1 + (3.75 - 2f_T)(1 - 5f_{xL})(1 - f_{yB}) \quad \text{for } f_{xL} < 0.2$$

$$k_a = 1 \quad \text{for } 0.2 \leq f_{xL} < 0.9$$

$$k_a = 1 + 20(1 - f_{yB})(f_{xL} - 0.9) \quad \text{for } f_{xL} \geq 0.9$$

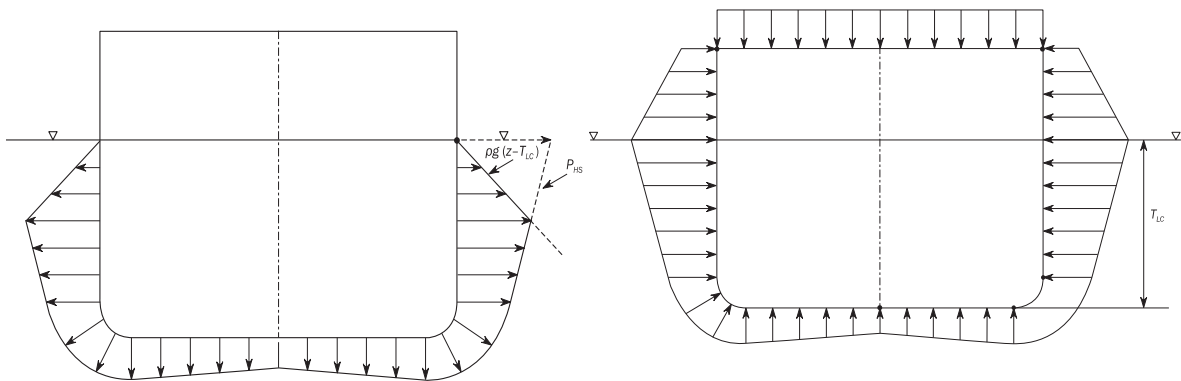
$$\lambda = 0.6 \left(1 + \frac{2}{3} f_T\right) L$$

Ο συντελεστής φάσης k_p προκύπτει από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.12: Συντελεστής φάσης για δυναμική κατάσταση FSM. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

f_{xL}	0	$0.35 - 0.1 f_T$	$0.5 - 0.2 f_T$	0.75	0.8	1.0
k_p	$-0.75 - 0.25 f_{yB}$	-1	1	1	-1	$-0.75 - 0.25 f_{yB}$

Στο σχήμα (4.10) παρουσιάζεται μια τυπική εγγάρσια κατανομή των πιέσεων που προκαλούν τα συγκεκριμένα EDWs.



Σχήμα 4.10: Τυπικές εγγάρσιες κατανομές των πιέσεων HSM 1, HSA, FSM 1 (αριστερά) και HSM 2, HSA, FSM 2 (δεξιά)

4.4.2.2 Υδροδυναμική Πίεση για δυναμική κατάσταση BSR

$$P_{BSR} = f_{\beta} f_{nl} \left(10y \sin \theta + 0.88 f_{ps} C_W \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} (f_{yB1} + 1) \right) \quad \text{for BSR-1P and BSR-2P Load Cases}$$

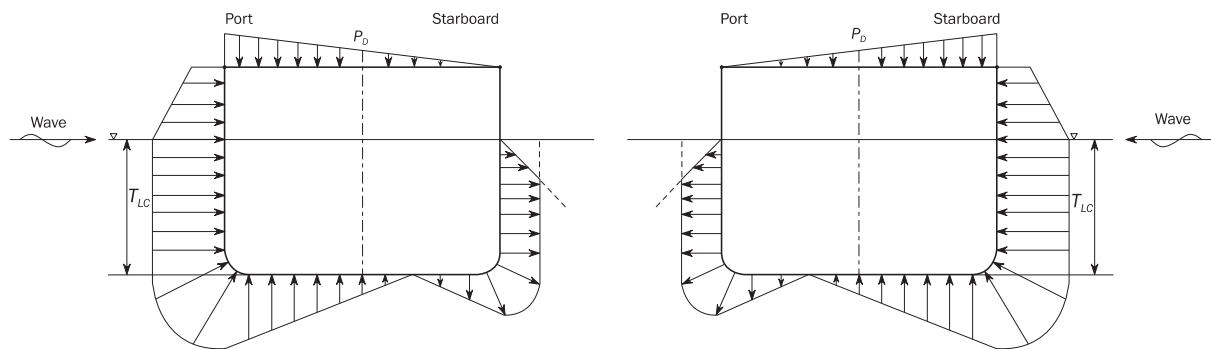
$$P_{BSR} = f_{\beta} f_{nl} \left(-10y \sin \theta + 0.88 f_{ps} C_W \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} (f_{yB1} + 1) \right) \quad \text{for BSR-1S and BSR-2S Load Cases}$$

Όπου:

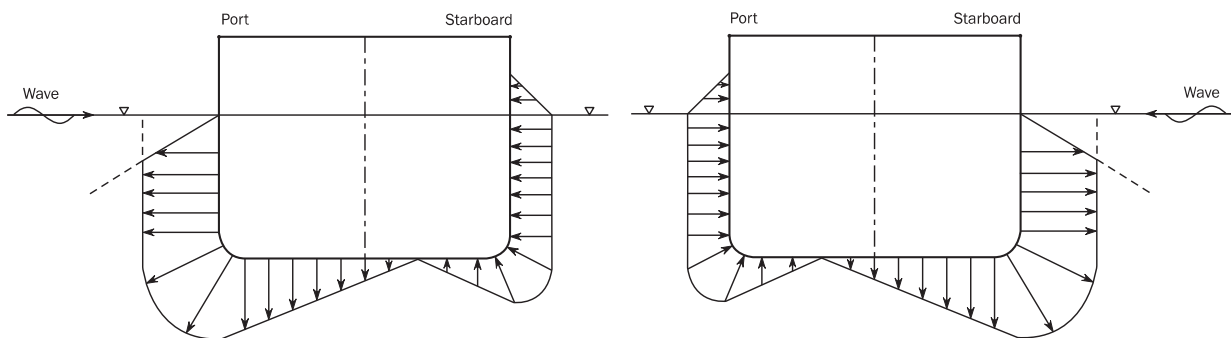
$$f_{nl} = 1$$

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T_{\theta}^2$$

Στα σχήματα (4.11) & (4.12) παρουσιάζονται οι τυπικές εγκάρσιες κατανομές των υδροδυναμικών πιέσεων που προκαλούν τα συγκεκριμένα EDWs.



Σχήμα 4.11: Τυπικές εγκάρσιες κατανομές των πιέσεων BSR 1P (αριστερά) και BSR 1S (δεξιά)



Σχήμα 4.12: Τυπικές εγκάρσιες κατανομές των πιέσεων BSR 2P (αριστερά) και BSR 2S (δεξιά)

4.4.2.3 Υδροδυναμική Πίεση για δυναμική κατάσταση BSP

$$P_{BSP} = 4.5 f_{\beta} f_{ps} f_{nl} f_{yz} C_W \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

Όπου:

$$f_{nl} = 0.6 \quad \text{at } f_{xL} = 0$$

$$f_{nl} = 0.8 \quad \text{at } f_{xL} = 0.3$$

$$f_{nl} = 0.8 \quad \text{at } f_{xL} = 0.7$$

$$f_{nl} = 0.6 \quad \text{at } f_{xL} = 1$$

$$\lambda = 0.2(1 + 2f_T)L$$

For BSP1-P & BSP-2P Load Cases

$$f_{yz} = 2 \frac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB1} + 0.5 \quad \text{for } y \geq 0$$

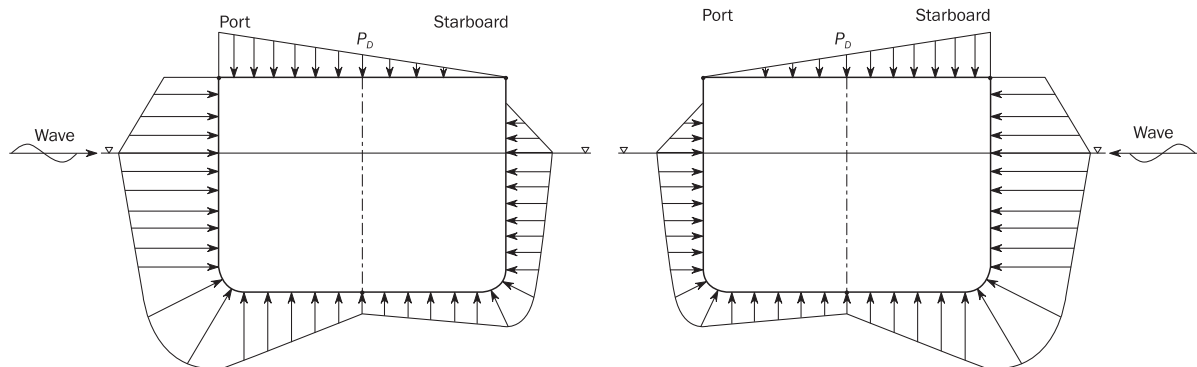
$$f_{yz} = \frac{2}{3} \frac{z}{T_{LC}} + 0.5 f_{yB1} + 0.5 \quad \text{for } y < 0$$

For BSP1-S & BSP-2S Load Cases

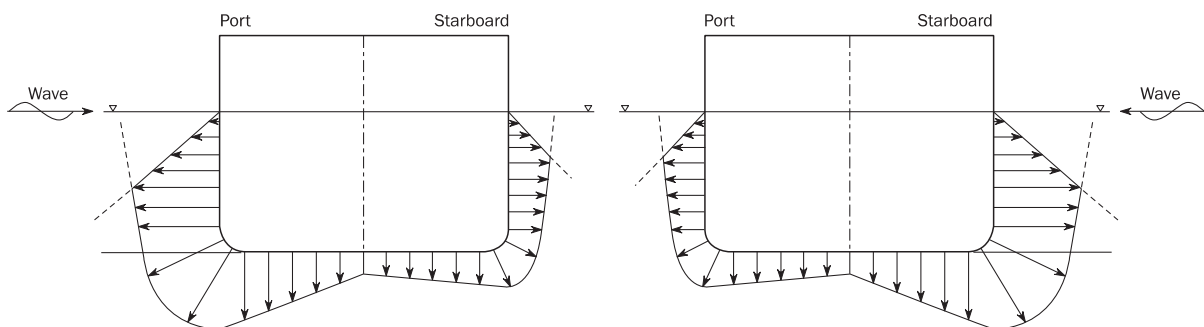
$$f_{yz} = \frac{2}{3} \frac{z}{T_{LC}} + 0.5 f_{yB1} + 0.5 \quad \text{for } y \geq 0$$

$$f_{yz} = 2 \frac{z}{T_{LC}} + 2.5 f_{yB1} + 0.5 \quad \text{for } y < 0$$

Στα σχήματα (4.13) & (4.14) παρουσιάζονται οι τυπικές εγκάρσιες κατανομές των υδροδυναμικών πιέσεων που προκαλούν τα συγκεκριμένα EDWs.



Σχήμα 4.13: Τυπικές εγκάρσιες κατανομές των πιέσεων BSP 1P (αριστερά) και BSP 1S (δεξιά)



Σχήμα 4.14: Τυπικές εγκάρσιες κατανομές των πιέσεων BSP 2P (αριστερά) και BSP 2S (δεξιά)

4.4.2.4 Υδροδυναμική Πίεση για δυναμική κατάσταση OST

$$P_{OST} = 1.38 f_{ps} f_{nl} k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$$

Όπου:

$$f_{nl} = 0.8$$

$$\lambda = 0.45L$$

For OST1-P & OST-2P Load Cases

For OST-1S & OST-2S Load Cases

$$f_{yz} = 5 \frac{z}{T_{LC}} + 3.5 f_{yB} + 1.5 \quad \text{for } y \geq 0$$

$$f_{yz} = 1.5 \frac{z}{T_{LC}} + 1.5 \quad \text{for } y \geq 0$$

$$f_{yz} = 1.5 \frac{z}{T_{LC}} + 1.5 \quad \text{for } y < 0$$

$$f_{yz} = 5 \frac{z}{T_{LC}} + 3.5 f_{yB} + 1.5 \quad \text{for } y < 0$$

Ο συντελεστής πλάτους k_a και ο συντελεστής φάσης k_p προκύπτουν από τους πίνακες (4.13) & (4.14):

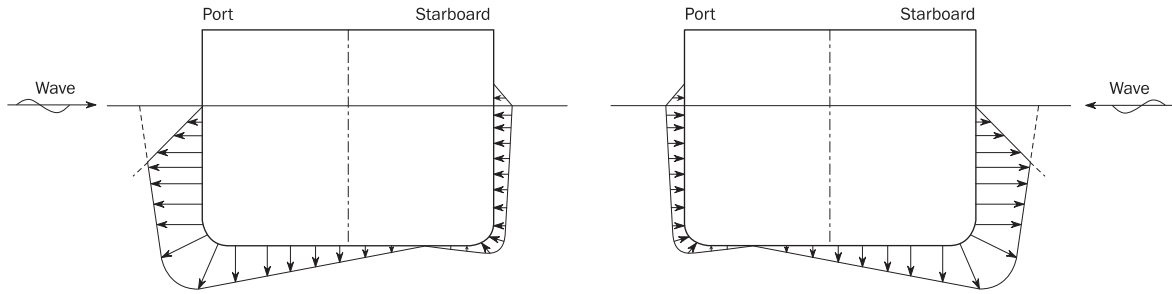
Πίνακας 4.13: Συντελεστής πλάτους για δυναμική κατάσταση OST. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

Transverse position	Longitudinal Position	OST-1P - OST-2P	OST-1S - OST-2S
$y \geq 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0 + 3.5(1 - f_{yB})(1 - 5 f_{xL})$	$1.0 + [3.5 - (4f_T - 0.5)f_{yB}](1 - 5 f_{xL})$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	1.0	$1.0 + 4(1 - f_T)(5 f_{xL} - 4) f_{yB}$
$y < 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0 + [3.5 - (4 f_T - 0.5) f_{yB}](1 - 5 f_{xL})$	$1.0 + 3.5(1 - f_{yB})(1 - 5 f_{xL})$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.8$	1.0	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	$1.0 + 4(1 - f_T)(5 f_{xL} - 4) f_{yB}$	1.0

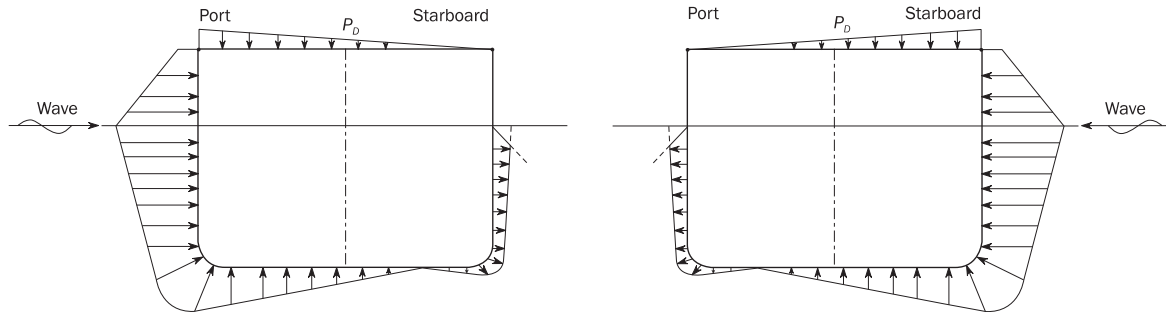
Πίνακας 4.14: Συντελεστής φάσης για δυναμική κατάσταση OST. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

Transverse position	f_{xL}	OST-1P - OST-2P	OST-1S - OST-2S
$y \geq 0$	0.0	1.0	1.0
	0.2	1.0	$1.0 + (0.75 - 1.5 f_T) f_{yB}$
	0.4	-1.0	$-1.0 + (1.75 - 0.5 f_T) f_{yB}$
	0.5	-1.0	$-1.0 + (1.75 - 0.5 f_T) f_{yB}$
	0.7	$-0.1 + (1.6 f_T - 1.5) f_{yB}$	$-0.1 + (0.25 - 0.3 f_T) f_{yB}$
	0.9	$0.8 + 0.2 f_{yB}$	$0.8 - (0.9 f_T + 0.85) f_{yB}$
	1.0	$-1.0 + f_{yB}$	$-1.0 + (0.5 - 0.5 f_T) f_{yB}$
$y < 0$	0.0	1.0	1.0
	0.2	$1.0 + (0.75 - 1.5 f_T) f_{yB}$	1.0
	0.4	$-1.0 + (1.75 - 0.5 f_T) f_{yB}$	-1.0
	0.5	$-1.0 + (1.75 - 0.5 f_T) f_{yB}$	-1.0
	0.7	$-0.1 + (0.25 - 0.3 f_T) f_{yB}$	$-0.1 + (1.6f_T - 1.5)f_{yB}$
	0.9	$0.8 - (0.9 f_T + 0.85) f_{yB}$	$0.8 + 0.2 f_{yB}$
	1.0	$-1.0 + (0.5 - 0.5 f_T) f_{yB}$	$-1.0 + f_{yB}$

Στα σχήματα (4.15) & (4.16) παρουσιάζονται οι τυπικές εγκάρσιες κατανομές των υδροδυναμικών πιέσεων που προκαλούν τα συγκεκριμένα EDWs.



Σχήμα 4.15: Τυπικές εγκάρσιες κατανομές των πιέσεων OST 1P (αριστερά) και OST 1S (δεξιά)



Σχήμα 4.16: Τυπικές εγκάρσιες κατανομές των πιέσεων OST 2P (αριστερά) και OST 2S (δεξιά)

4.4.2.5 Υδροδυναμική Πίεση για δυναμική κατάσταση OSA

$$P_{OSA} = 0.81 f_{ps} f_{nl} k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}} (1 + 0.5 f_T)$$

Όπου:

$$f_{nl} = 0.5 \quad \text{at } f_{xL} = 0$$

$$f_{nl} = 0.8 \quad \text{at } f_{xL} = 0.3$$

$$f_{nl} = 0.8 \quad \text{at } f_{xL} = 0.7$$

$$f_{nl} = 0.6 \quad \text{at } f_{xL} = 1$$

$$\lambda = 0.7L$$

For OSA-1P & OSA-2P Load Cases

$$f_{yz} = 5.5 \frac{z}{T_{LC}} + 5.3 f_{yB} + 2.2 \quad \text{for } y \geq 0$$

$$f_{yz} = 0.9 \frac{z}{T_{LC}} + 0.4 f_{yB} + 2.2 \quad \text{for } y < 0$$

For OSA-1S & OSA-2S Load Cases

$$f_{yz} = 0.9 \frac{z}{T_{LC}} + 0.4 f_{yB} + 2.2 \quad \text{for } y \geq 0$$

$$f_{yz} = 5.5 \frac{z}{T_{LC}} + 5.3 f_{yB} + 2.2 \quad \text{for } y < 0$$

Ο συντελεστής πλάτους k_a και ο συντελεστής φάσης k_p προκύπτουν από τους πίνακες (4.15) & (4.16).

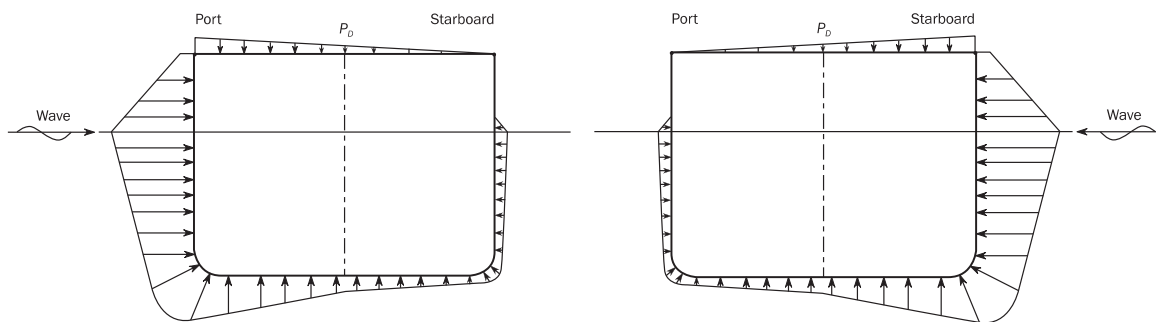
Πίνακας 4.15: Συντελεστής πλάτους για δυναμική κατάσταση OSA. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

Transverse position	Longitudinal position	OSA-1P - OSA-2P	OSA-1S - OSA-2S
$y \geq 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0 + 3(2 - f_T)(1 - 5f_{xL})(1 - f_{yB})$	$1.0 + 3(2 - f_T)(1 - 5f_{xL}) + \{(28f_{xL} - 5) + 3f_T(1 - 5f_{xL})\}f_{yB}$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.5$	1.0	$1.0 + (1 - 2f_{xL})f_{yB}$
	$0.5 < f_{xL} \leq 0.8$	1.0	$1.0 + 1.5(2f_{xL} - 1)f_{yB}$
	$f_{xL} > 0.8$	$1.0 + (f_{xL} - 0.8)(1 - f_{yB})A$	$1.0 + \{1.5(2f_{xL} - 1) - (f_{xL} - 0.8)A\}f_{yB} + (f_{xL} - 0.8)A$
$y < 0$	$f_{xL} \leq 0.2$	$1.0 + 3(2 - f_T)(1 - 5f_{xL}) + \{(28f_{xL} - 5) + 3f_T(1 - 5f_{xL})\}f_{yB}$	$1.0 + 3(2 - f_T)(1 - 5f_{xL})(1 - f_{yB})$
	$0.2 < f_{xL} \leq 0.5$	$1.0 + (1 - 2f_{xL})f_{yB}$	1.0
	$0.5 < f_{xL} \leq 0.8$	$1.0 + 1.5(2f_{xL} - 1)f_{yB}$	1.0
	$f_{xL} > 0.8$	$1.0 + \{1.5(2f_{xL} - 1) - (f_{xL} - 0.8)A\}f_{yB} + (f_{xL} - 0.8)A$	$1.0 + (f_{xL} - 0.8)(1 - f_{yB})A$
where: $A = 22 - 15f_T + 3[22(f_{xL} - 0.8) - 0.25(2 - f_T)]$			

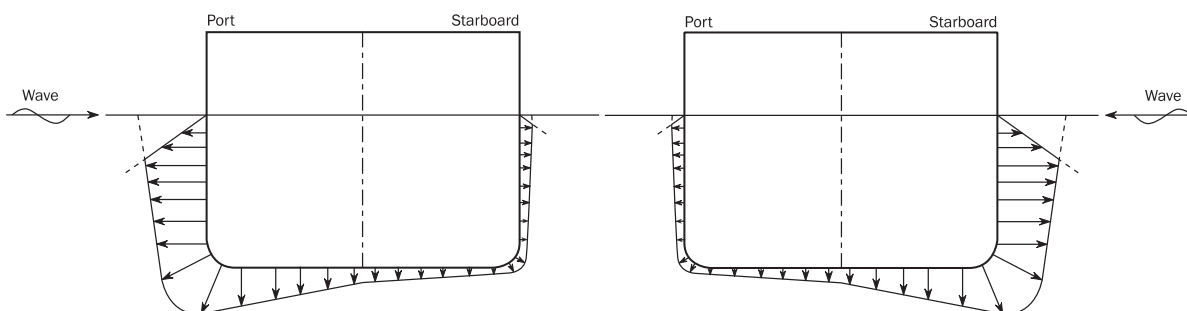
Πίνακας 4.16: Συντελεστής φάσης για δυναμική κατάσταση OSA. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν με γραμμική παρεμβολή

Transverse position	f_{xL}	OSA-1P; OSA-2P	OSA-1S; OSA-2S
$y \geq 0$	0.0	$0.75 - 0.5f_{yB}$	0.75
	0.2	$f_T - 0.25 + (1.25 - f_T)f_{yB}$	$f_T - 0.25 + (0.35f_T - 0.47)f_{yB}$
	0.4	1.0	$1.0 + (2.7f_T - 3.2)f_{yB}$
	0.5	$1.25 - 0.5f_T + (0.5f_T - 0.25)f_{yB}$	$1.25 - 0.5f_T + (2.7f_T - 3.2)f_{yB}$
	0.6	$1.5 - f_T + (f_T - 1.07)f_{yB}$	$1.5 - f_T + (2.68f_T - 3.19)f_{yB}$
	0.85	$0.5f_T - 1.25 + (0.25 - 0.5f_T)f_{yB}$	$0.5f_T - 1.25 + (0.2 - 0.1f_T)f_{yB}$
	1.0	$0.5f_T - 1.25 + (0.25 - 0.5f_T)f_{yB}$	$0.5f_T - 1.25 + (0.2 - 0.1f_T)f_{yB}$
$y < 0$	0.0	0.75	$0.75 - 0.5f_{yB}$
	0.2	$f_T - 0.25 + (0.35f_T - 0.47)f_{yB}$	$f_T - 0.25 + (1.25 - f_T)f_{yB}$
	0.4	$1.0 + (2.7f_T - 3.2)f_{yB}$	1.0
	0.5	$1.25 - 0.5f_T + (2.7f_T - 3.2)f_{yB}$	$1.25 - 0.5f_T + (0.5f_T - 0.25)f_{yB}$
	0.6	$1.5 - f_T + (2.68f_T - 3.19)f_{yB}$	$1.5 - f_T + (f_T - 1.07)f_{yB}$
	0.85	$0.5f_T - 1.25 + (0.2 - 0.1f_T)f_{yB}$	$0.5f_T - 1.25 + (0.25 - 0.5f_T)f_{yB}$
	1.0	$0.5f_T - 1.25 + (0.2 - 0.1f_T)f_{yB}$	$0.5f_T - 1.25 + (0.25 - 0.5f_T)f_{yB}$

Στα σχήματα (4.17) & (4.18) παρουσιάζονται οι τυπικές εγκάρσιες κατανομές των υδροδυναμικών πιέσεων που προκαλούν τα συγκεκριμένα EDWs.



Σχήμα 4.17: Τυπικές εγγράψεις κατανομής των πιέσεων OSA 1P (αριστερά) και OSA 1S (δεξιά)



Σχήμα 4.18: Τυπικές εγγράψεις κατανομής των πιέσεων OSA 2P (αριστερά) και OSA 2S (δεξιά)

4.4.2.6 Υδροδυναμική Πίεση στο ανώτερο κατάστρωμα

Ειδικά για τα εικτεθειμένα καταστρώματα και τις υπερκατασκευές, οι κανονισμοί προδιαγράφουν ξεχωριστά τον υπολογισμό της πίεσης λόγω κυματισμού P_D στο εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec5/[2]}. Συγκεκριμένα, η πίεση αυτή υπολογίζεται ως εξής:

$P_D = \chi P_W$, όπου $\chi = 1$ για τον υπολογισμό της πίεσης στο ανώτερο κατάστρωμα (freeboard deck)

και

$P_W = P_{W,z=D}$ όπως προκύπτει από την εκάστοτε δυναμική κατάσταση αλλά ειδικά για τις δυναμικές καταστάσεις **HSM**, **HSA**, **FSM** δεν θα πρέπει να λαμβάνεται τιμή μικρότερη από την ελάχιστη P_{D-min} η οποία προκύπτει απ' τον πίνακα (4.17).

Πίνακας 4.17: Ελάχιστη Πίεση λόγω κυματισμού στο κατάστρωμα για δυναμικές καταστάσεις HSM, HSA, FSM

Location	Minimum pressure on exposed deck, P_{D-min} , in kN/m ²	
	$L_{LL} \geq 100\text{m}$	$L_{LL} < 100\text{m}$
$x_{LL}/L_{LL} \leq 0.75$	34.3	$14.9 + 0.195 L_{LL}$
$x_{LL}/L_{LL} > 0.75$	$34.3 + (14.8 + a(L_{LL} - 100)) \left(4 \frac{x_{LL}}{L_{LL}} - 3 \right)$	$12.2 + \frac{L_{LL}}{9} \left(5 \frac{x_{LL}}{L_{LL}} - 2 \right) + 3.6 \frac{x_{LL}}{L_{LL}}$
<p>a : Coefficient taken equal to: $a = 0.356$ for Type A, Type B-60 and Type B-100 freeboard ships $a = 0.0726$ for Type B freeboard ships.</p> <p>x_{LL} : X-coordinate of the load point measured from the aft end of the freeboard length L_{LL}.</p>		

Σημειώνεται ότι για τον έλεγχο με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, λαμβάνεται $P_{D-min} = 0$.

4.5 Τοπικές Εσωτερικές Φορτίσεις

Ο υπολογισμός των τοπικών εσωτερικών φορτίσεων γίνεται σύμφωνα με το εδάφιο των κανόνων {Pt1/Ch4/Sec6}. Πρόκειται για κάθετες πιέσεις που ασκεί το φορτίο, το οποίο μπορεί να είναι είτε υγρό, είτε ξηρό χύδην και καταπονεί το εσωτερικό περιβλήμα που έρχεται σε επαφή με εκείνο. Η συνολική εσωτερική φόρτιση μπορεί να περιλαμβάνει είτε μόνο στατική συνιστώσα (S), είτε συνδυασμό στατικής και δυναμικής (S+D), ανάλογα με το σχεδιαστικό σενάριο φορτίσεων.

$$P_{in} = P_s \text{ for Design Load (S)}$$

$$P_{in} = P_s + P_d \text{ for Design Load (S+D)}$$

Η στατική συνιστώσα P_s αφορά την στατική πίεση που ασκεί το φορτίο και η δυναμική P_d τις αδρανειακές φορτίσεις λόγω των επιταχύνσεων του φορτίου. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού της εσωτερικής πίεσης, ανάλογα με το είδος προέλευσής της.

4.5.1 Πίεση λόγω Ξηρού Φορτίου Χύδην

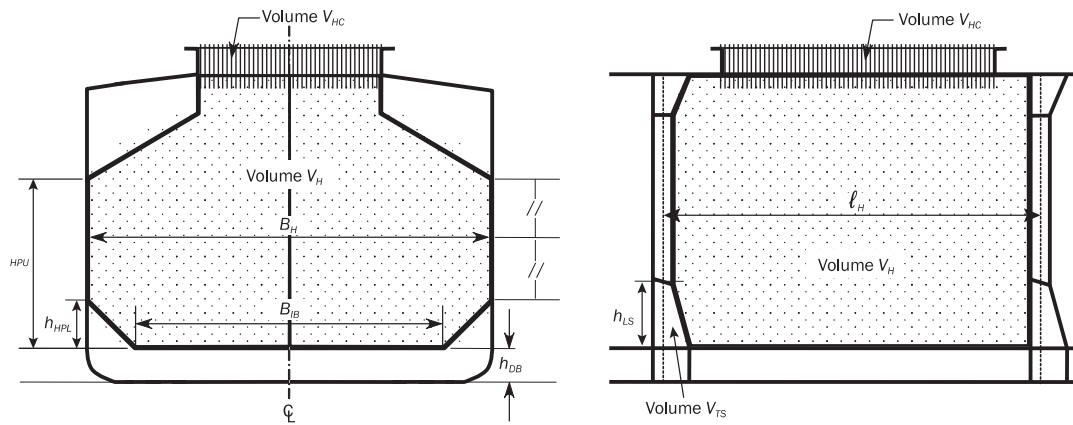
Η εσωτερική πίεση λόγω ξηρού φορτίου για το σενάριο (S+D) δίνεται από το άθροισμα της στατικής και δυναμικής συνιστώσας και αφορά τα ελάσματα του χώρου φορτίου.

$$P_{in} = P_{bs} + P_{bd}$$

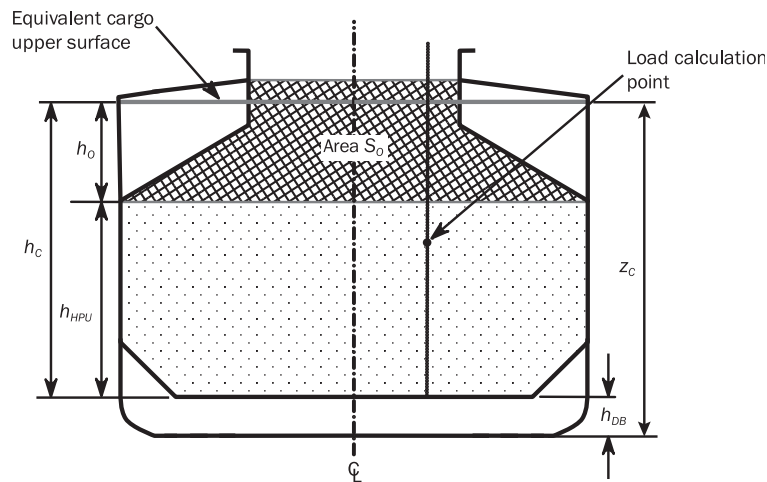
Για τον υπολογισμό των επιμέρους πιέσεων ορίζονται σε πρώτο στάδιο κάποιες βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία του αμπαριού.

Παράμετροι υπολογισμών

- Ψ , η γενική γωνία ανάπαυσης (angle of repose) του ξηρού φορτίου
- α , η γωνία σε μοίρες μεταξύ του εξεταζόμενου στοιχείου και του οριζώντιου επιπέδου
- K_C , συντελεστής για τα παρακάτω στοιχεία:
 - Για εσωτερικό πυθμένα, κάτω πλευρικό έλασμα: $K_C = \cos^2 a + (1 - \sin \Psi) \sin^2 a$
 - Για κατάστρωμα και άνω πλευρικό έλασμα: $K_C = 0$
- h_{DB} , το ύψος του διπύθμενου
- h_{HPU} , η απόσταση του κάτω άκρου της άνω πλευρικής δεξαμενής από τον εσωτερικό πυθμένα
- S_0 , η επιφάνεια της μέσης τομής του χώρου φορτίου από το κάτω άκρο της άνω πλευρικής δεξαμενής μέχρι το κατάστρωμα
- V_{HC} , ο όγκος του στομίου του κύτους (Hatch volume)
- l_H , το μήκος του αμπαριού (μεταξύ δύο διαδοχικών εγκάρσιων φρακτών)
- B_H , το μέγιστο πλάτος του αμπαριού
- $S_A = S_0 + \frac{V_{HC}}{l_H}$
- $h_0 = \frac{S_A}{B_H}$
- $h_C = h_{HPU} + h_0$, το ισοδύναμο ύψος φορτίου
- $z_C = h_{DB} + h_C$, η ισοδύναμη ελεύθερη επιφάνεια του ξηρού φορτίου που θα προέκυπτε χωρίς την παρουσία των άνω πλευρικών δεξαμενών.



Σχήμα 4.19: Ορισμός βασικών γεωμετρικών παραμέτρων ενός αμπαριού



Σχήμα 4.20: Ορισμός ισοδύναμης ελεύθερης επιφάνειας χώρου φορτίου

- ρ_c , η πυκνότητα του ξηρού φορτίου, η οποία λαμβάνεται από τον πίνακα (4.18), ανάλογα την κατάσταση φόρτωσης.

Πίνακας 4.18: Ορισμός πυκνότητας ξηρού φορτίου για έλεγχο αντοχής σε άθικτη κατάσταση

Ship type	Cargo mass Cargo density	Homogeneous loading condition		Alternate loading condition	
		Fully filled hold	Partially filled hold	Fully filled hold	Partially filled hold
No BC notation	M	$M = M_{Full}$	N/A	N/A	
	ρ_c	Maximum value specified in the loading manual			
BC-C	M	$M = M_{Full}$	N/A	N/A	
	ρ_c	$\rho_c = \frac{M_{Full}}{V_{Full}}$ but not less than 1.0			
BC-B	M	$M = M_{Full}$	$M = M_H$	N/A	
	ρ_c	$\rho_c = \frac{M_{Full}}{V_{Full}}$ but not less than 1.0	$\rho_c = 3.0^{(1)}$		
BC-A	M	$M = M_{Full}$	$M = M_H$	$M = M_{HD} + 0.1M_H$	$M = M_{HD} + 0.1M_H$
	ρ_c	$\rho_c = \frac{M_{Full}}{V_{Full}}$ but not less than 1.0	$\rho_c = 3.0^{(1)}$	$\rho_c = \frac{M_{HD} + 0.1 M_H}{V_{Full}}$	$\rho_c = 3.0^{(1)}$

(1) To be taken as 3.0 unless an alternative maximum cargo density is specified in the loading manual.

- Η στατική συνιστώσα της πίεσης ξηρού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{bs} = \rho_C g K_C (z_C - z)$$

- Η δυναμική συνιστώσα της πίεσης ξηρού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{bd} = f_\beta \rho_C \left[0.25 a_x (x_G - x) + 0.25 a_y (y_G - y) + f_{dc} K_C a_z (z_C - z) \right] \text{ for } z \leq z_C$$

$$P_{bd} = 0 \text{ for } z > z_C$$

Όπου:

$f_{dc} = 1$ συντελεστής ξηρού φορτίου για τον έλεγχο αντοχής (Strength Assessment) και a_x, a_y, a_z συνιστώσες επιτάχυνσης του κέντρου βάρους X_G, Y_G, Z_G του φορτίου.

4.5.2 Πίεση λόγω Υγρού Φορτίου

Η εσωτερική πίεση λόγω υγρού φορτίου για το σενάριο (S+D) δίνεται από το άθροισμα της στατικής και δυναμικής συνιστώσας και αφορά τα ελάσματα των δεξαμενών έρματος.

$$P_{in} = P_{ls} + P_{ld}$$

- Η στατική συνιστώσα της πίεσης υγρού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{ls} = \rho_L g (z_{top} - z + 0.5 h_{air})$$

- Η δυναμική συνιστώσα της πίεσης υγρού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{ld} = f_\beta f_{cd} \rho_L \left[a_z (z_0 - z) + f_{ull-t} a_x (x_0 - x) + f_{ull-t} a_y (y_0 - y) \right]$$

Παράμετροι υπολογισμών

- a_x, a_y, a_z συνιστώσες επιτάχυνσης του κέντρου βάρους X_G, Y_G, Z_G της δεξαμενής
- x_0, y_0, z_0 οι συντεταγμένες του σημείου αναφοράς που ορίζεται στο ανώτερο όριο της δεξαμενής το σημείο που μεγιστοποιεί την ποσότητα:

$$V_j = a_x (x_j - X_G) + a_y (y_j - Y_G) + (a_z + g)(z_j - Z_G)$$

- z_{top} , η κατακόρυφη θέση του ανώτερου ορίου της δεξαμενής
- f_{cd} , συντελεστής πιθανότητας ταυτόχρονης εμφάνισης υγρού φορτίου και κρίσιμης κατάστασης θάλασσας κατά τη σχεδιαστική διάρκεια του πλοίου (25 χρόνια), ο οποίος λαμβάνει τις εξής τιμές:
 - $f_{cd} = 1$ for $\rho_L > 1.025 \text{ t/m}^3$ for Strength Assessment with FEM
 - $f_{cd} = 0.88$ for $\rho_L = 1.025 \text{ t/m}^3$ for Strength Assessment with FEM
 - $f_{cd} = 1$ for other cases

- $f_{ull-t} = 1$, συντελεστής διόρθωσης της διαμήκους επιτάχυνσης σε δεξαμενές έρματος
- $f_{ull-t} = 1$, συντελεστής διόρθωσης της εγκάρσιας επιτάχυνσης σε δεξαμενές έρματος
- $\rho_L = 1.025 \text{ t/m}^3$, η πυκνότητα του υγρού φορτίου (θαλάσσιο έρμα)
- h_{air} , το ύψος του εξαεριστικού σε m

4.5.3 Πίεση λόγω Κατάκλυσης

Η εσωτερική πίεση λόγω κατάκλυσης για το σενάριο (S+D) δίνεται από το άθροισμα της στατικής και δυναμικής συνιστώσας και αφορά τα ελάσματα του εσωτερικού περιβλήματος που έρχονται σε επαφή με ξηρό φορτίο.

$$P_{in} = P_{fs} + P_{fd}$$

- Η στατική συνιστώσα της πίεσης κατάκλυσης δίνεται από τη σχέση:

$$P_{fs} = \rho_L g (z_{FD} - z + 0.5 h_{air})$$

- Η δυναμική συνιστώσα της πίεσης υγρού φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P_{fd} = f_{\beta} \rho_L \left[a_z (z_{OFD} - z) + f_{ull-i} a_x (x_0 - x) + f_{ull-i} a_y (y_0 - y) \right]$$

Παράμετροι υπολογισμών

- a_x, a_y, a_z συνιστώσες επιτάχυνσης του κέντρου βάρους X_G, Y_G, Z_G του χώρου ξηρού φορτίου
- x_0, y_0, z_0 οι συντεταγμένες του σημείου αναφοράς που ορίζεται στο ανώτερο όριο του αμπαριού το σημείο που μεγιστοποιεί την ποσότητα:

$$V_j = a_x (x_j - X_G) + a_y (y_j - Y_G) + (a_z + g)(z_j - Z_G)$$

- $z_{FD} = D$, η κατακόρυφη απόσταση του καταστρώματος εξάλλων
- z_{OFD} , η κατακόρυφη συντεταγμένη του ενεργού σημείου αναφοράς για το χώρο που έχει κατακλυστεί και ορίζεται ως εξής:
 - $z_{OFD} = z_0$ for $z_{FD} > z_0$
 - $z_{OFD} = z_{FD}$ for $z_{FD} \leq z_0$
- $f_{ull-i} = 1$, συντελεστής διόρθωσης της διαμήκους επιτάχυνσης
- $f_{ull-i} = 1$, συντελεστής διόρθωσης της εγκάρσιας επιτάχυνσης
- $\rho_L = 1.025 \text{ t/m}^3$, η πυκνότητα του νερού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – Έλεγχος Διαστασιολόγησης Μέσης Τομής

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται ο έλεγχος διαστασιολόγησης της μέσης τομής ενός Bulk Carrier, σύμφωνα με τους σύγχρονους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (CSR 2019). Η διαδικασία αυτή αποτελεί το πρώτο στάδιο για τον έλεγχο αντοχής του πλοίου και περιλαμβάνει τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων (**Prescriptive Requirements**), οι οποίες προδιαγράφουν ελάχιστα απαιτούμενα πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες για τα κατασκευαστικά στοιχεία της μέσης τομής. Οι απαιτήσεις που εξετάζονται αφορούν την ομαλή λειτουργικότητα του πλοίου, εξασφαλίζοντας επαρκή αντοχή έναντι διαρροής (**Serviceability Limit State – Yielding**).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το εν λόγω πλοίο ξεκίνησε να κατασκευάζεται τον Ιούνιο του 2006, την περίοδο όπου είχαν τεθεί σε εφαρμογή οι πρώτοι κατασκευαστικοί κανόνες CSR – BC. Ωστόσο λόγω της μεταβατικής περιόδου δεν χτίστηκε με βάση τις απαιτήσεις των CSR, αλλά σύμφωνα με τους κανόνες της κλάσης. Στα πλαίσια λοιπόν της παρούσας μελέτης εξετάζεται κατά πόσο η υπάρχουσα μέση τομή του πλοίου ικανοποιεί τις ισχύουσες απαιτήσεις διαστασιολόγησης των σύγχρονων κατασκευαστικών κανόνων. Ο έλεγχος πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη ότι τα κατασκευαστικά στοιχεία έχουν υποστεί διάβρωση (σύμφωνα με το Κεφάλαιο 3) και επικεντρώνεται στα δύο παρακάτω επίπεδα:

- **Έλεγχος Διαμήκους Αντοχής** που αφορά τον έλεγχο επάρκειας της ροπής αντίστασης της διατομής για την αποφυγή διαρροής λόγω διαμήκους κάμψης της γάστρας, σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch5/Sec1} των κανόνων.
- **Έλεγχος Τοπικής Αντοχής** που αφορά τον έλεγχο διαστασιολόγησης των τοπικών διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων (ελάσματα και ενισχυτικά) μέσω των παρακάτω επιμέρους απαιτήσεων:
 - Απαιτήσεις που βασίζονται σε καθορισμένες σχεδιαστικές φορτίσεις (Load Based) και συνδέουν συναρτησιακά τη φόρτιση με την ελάχιστη απαίτηση σε πάχος ή άλλη γεωμετρική και κατασκευαστική ιδιότητα για την αποφυγή διαρροής, σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch6/Sec4 & Sec5} των κανόνων.
 - Ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις (Minimum Thicknesses), οι οποίες εξαρτώνται μόνο από το μέγεθος του πλοίου, σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch6/Sec3} των κανόνων.
 - Εμπειρικές απαιτήσεις λυγρότητας (Slenderness Requirements) για την αποφυγή λυγισμού κατά τη σχεδίαση, σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch8/Sec2} των κανόνων.
 - Ειδικές απαιτήσεις που αφορούν τα Bulk Carriers (Grab Thickness), σύμφωνα με το εδάφιο {Pt2/Ch1/Sec6} των κανόνων.

Σημειώνεται ότι στην παρούσα εργασία, στα πλαίσια ελέγχου αντοχής σε συνθήκες υπηρεσίας (SLS), δεν πραγματοποιείται έλεγχος περιγραφικών απαιτήσεων (Load Based) έναντι λυγισμού, οι οποίες προδιαγράφονται ξεχωριστά στο εδάφιο {Pt1/Ch8/Sec3} των κανόνων.

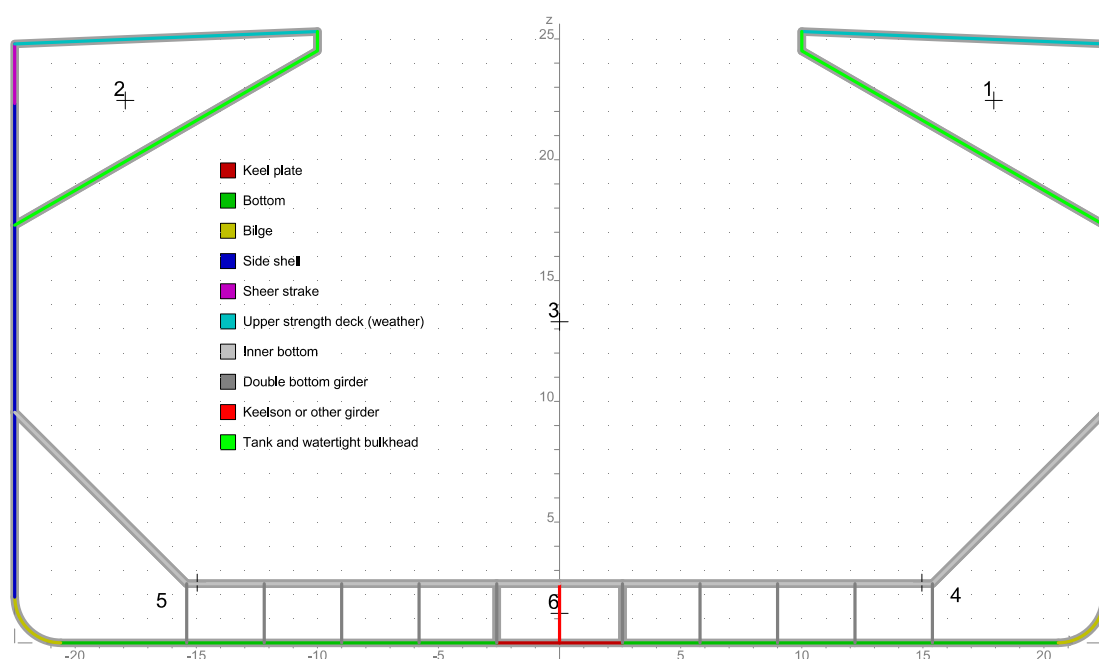
Οι παραπάνω έλεγχοι πραγματοποιούνται με τη χρήση του λογισμικού **MARS2000**, καθώς και με λογισμικό που αναπτύχθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον **MATLAB** με δυνατότητα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων.

5.1 Χαρακτηριστικά υπό Εξέταση Πλοίου

Το υπό εξέταση πλοίο είναι Bulk Carrier μονού τοιχώματος, κατασκευασμένο σύμφωνα με τα τυπικά πρότυπα σχεδίασης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του πλοίου συνοψίζονται στον πίνακα (5.1), ενώ το σχέδιο της μέσης τομής βρίσκεται στο Παράρτημα. Στο σχήμα (5.1) απεικονίζεται η διάταξη της μέσης τομής μαζί με την ονοματολογία των ελασμάτων και τα διαμερίσματα που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά φορτίου και θαλάσσιου έρματος. Συγκεκριμένα, διαθέτει διπύθμενο με κάτω πλευρικές δεξαμενές έρματος (διαμερίσματα 4 & 5), καθώς και άνω πλευρικές δεξαμενές έρματος (διαμερίσματα 1 & 2). Ο κεντρικός χώρος (διαμέρισμα 3) αποτελεί το αμπάρι ξηρού φορτίου χύδην, ενώ ο χώρος στην κεντρική σταθμίδα του διπυθμένου (διαμέρισμα 6) είναι κενός (Dry Space).

Πίνακας 5.1: Κύριες διαστάσεις και γενικά χαρακτηριστικά υπό εξέταση πλοίου

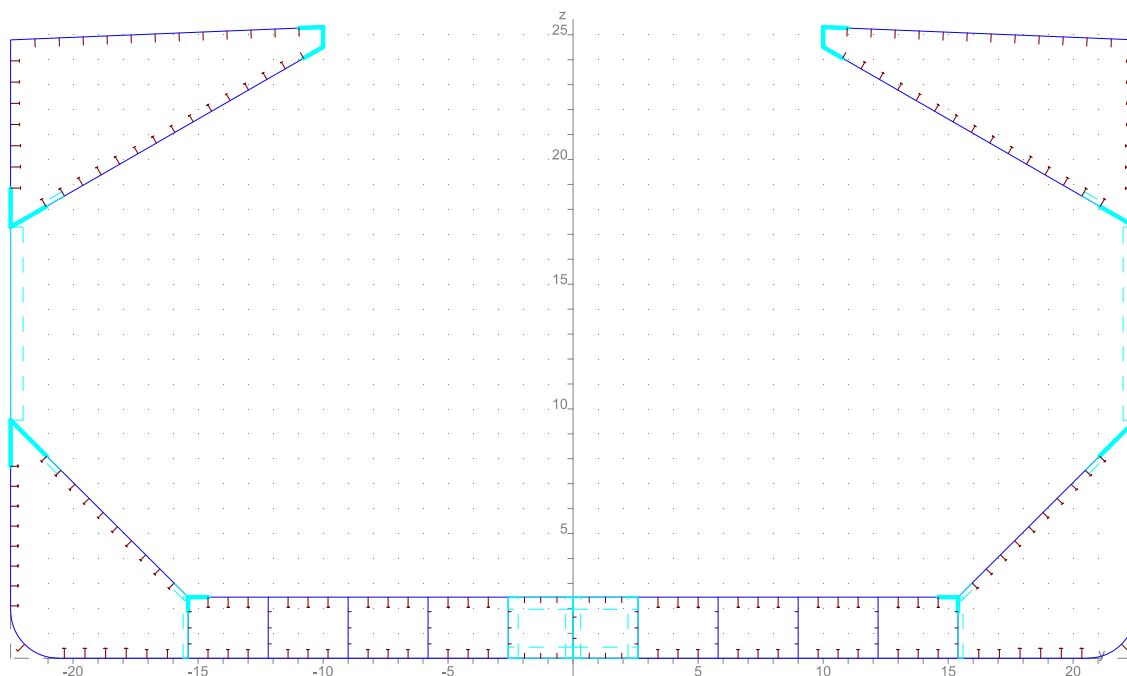
PRINCIPAL DIMENSIONS	
Length O.A.	abt. 292 m
Length B.P.	282 m
Breadth (MLD)	45 m
Design Draft (MLD)	16.5 m
Depth (MLD)	24.8 m
Rule Length	278 m
Scantling Draft (MLD)	18.3 m
Minimum Ballast Draft (MLD)	7.7 m
Block Coefficient at Scantling Draft	0.847
DWT	177000 tons
Type of Vessel	Capesize, single – skin, Bulk Carrier
Date of Keel Laid	June 2006
Classification	B.V.
Class Notation	BC – A, GRAB [25]



Σχήμα 5.1: Διάταξη μέσης τομής, ονοματολογία ελασμάτων και διαμερίσματα του εξεταζόμενου Bulk Carrier όπως δημιουργήθηκε στο Mars2000

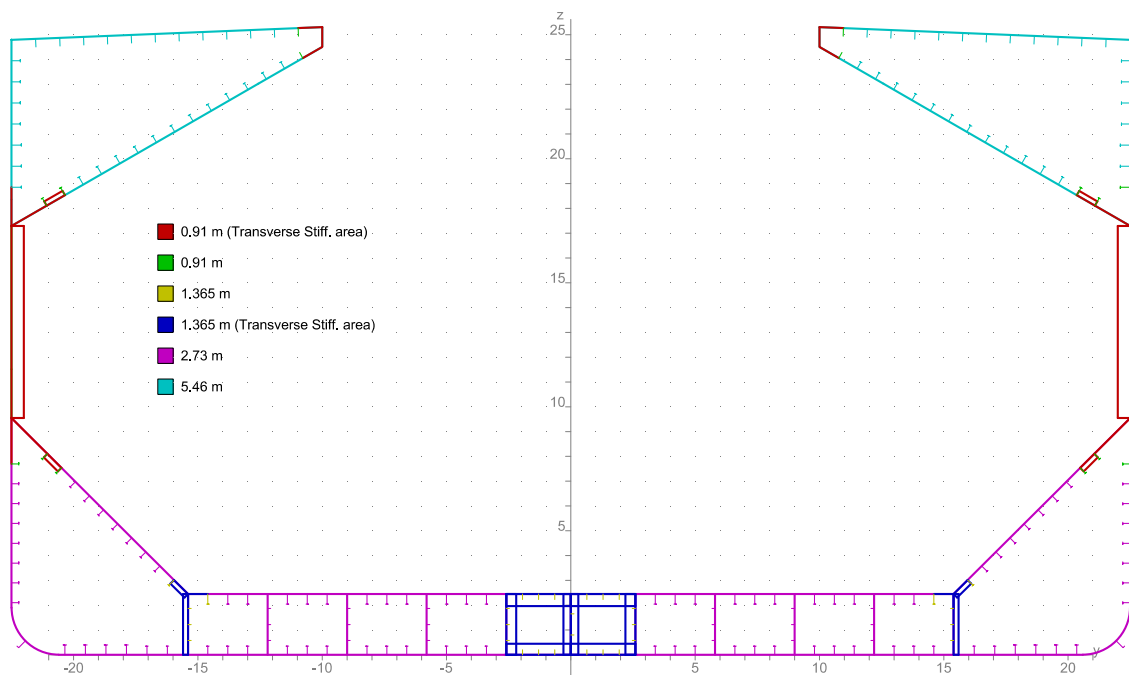
Επιπλέον, το υπό μελέτη πλοίο είναι κατασκευασμένο με διάμηκες σύστημα ενίσχυσης και κατά τμήματα εγκάρσιες ενισχύσεις. Στο σχήμα (5.2) παρουσιάζεται ένας απλός κατασκευαστικός νομέας (Ordinary Frame) του πλοίου στην περιοχή της μέσης τομής. Στην περιοχή της μέσης τομής καθώς και σε όλη την περιοχή του φορτίου, οι κατασκευαστικοί νομείς είναι τοποθετημένοι σε ισαπόσταση ίση με 910 mm (Frame Spacing) και παρέχουν εγκάρσια στήριξη στο πλευρικό έλασμα μεταξύ των άνω και κάτω πλευρικών δεξαμενών. Όλα τα υπόλοιπα διαμήκη στοιχεία ενισχύονται εγκάρσια είτε μέσω διαφραγμάτων ενισχυμένων νομέων (Web Frames), είτε μέσω εδρών (Floors) που αποτελούν και τα κύρια στοιχεία εγκάρσιας στήριξης (Primary Supporting Members) και είναι τοποθετημένα σε ισαπόσταση ανάλογη της ισαπόστασης των κατασκευαστικών νομέων.

Συγκεκριμένα, η περιοχή της άνω πλευρικής δεξαμενής ενισχύεται εγκάρσια μέσω ενισχυμένων νομέων (Web Frames) που είναι τοποθετημένοι ανά 6 κατασκευαστικούς νομείς, δηλαδή 5460 mm. Αντίστοιχα, η περιοχή του διπύθμενου ενισχύεται εγκάρσια μέσω εδρών (Floors) οι οποίες είναι τοποθετημένες ανά 3 κατασκευαστικούς νομείς, δηλαδή 2730 mm.



Σχήμα 5.2: Απλός κατασκευαστικός νομέας στην περιοχή της μέσης τομής (Mars2000)

Τέλος, σε ορισμένα σημεία, η κατασκευή ενισχύεται εγκάρσια σε μικρότερη ισαπόσταση προκειμένου να μειωθεί το ανυποστήρικτο μήκος των ελασμάτων και των ενισχυτικών. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή του διπύθμενου στην κεντρική σταθμίδα διαθέτει εγκάρσια ενίσχυση με ισαπόσταση τη μισή της ισαπόστασης των εδρών, δηλαδή 1365 mm, ενώ τα ανώτερα ανυποστήρικτα ελάσματα των πλευρικών δεξαμενών ενισχύονται εγκάρσια με τη μορφή αγκώνων (brackets) που τοποθετούνται σε ισαπόσταση όση των κατασκευαστικών νομέων. Στο σχήμα (5.3) παρουσιάζονται οι περιοχές κύριες εγκάρσιας ενίσχυσης, καθώς και οι περιοχές πυκνότερης εγκάρσιας ενίσχυσης, μαζί με τις αντίστοιχες ισαποστάσεις.



Σχήμα 5.3: Το σύστημα εγκάρσιας ενίσχυσης του υπό μελέτη πλοίου (Mars2000). Με τον όρο (Transverse Stiff. Area) συμβολίζονται τα απλά εγκάρσια ενισχυτικά, ενώ η υπόλοιπη περιοχή ενισχύεται μέσω στοιχείων κύριας εγκάρσιας ενίσχυσης (PSM).

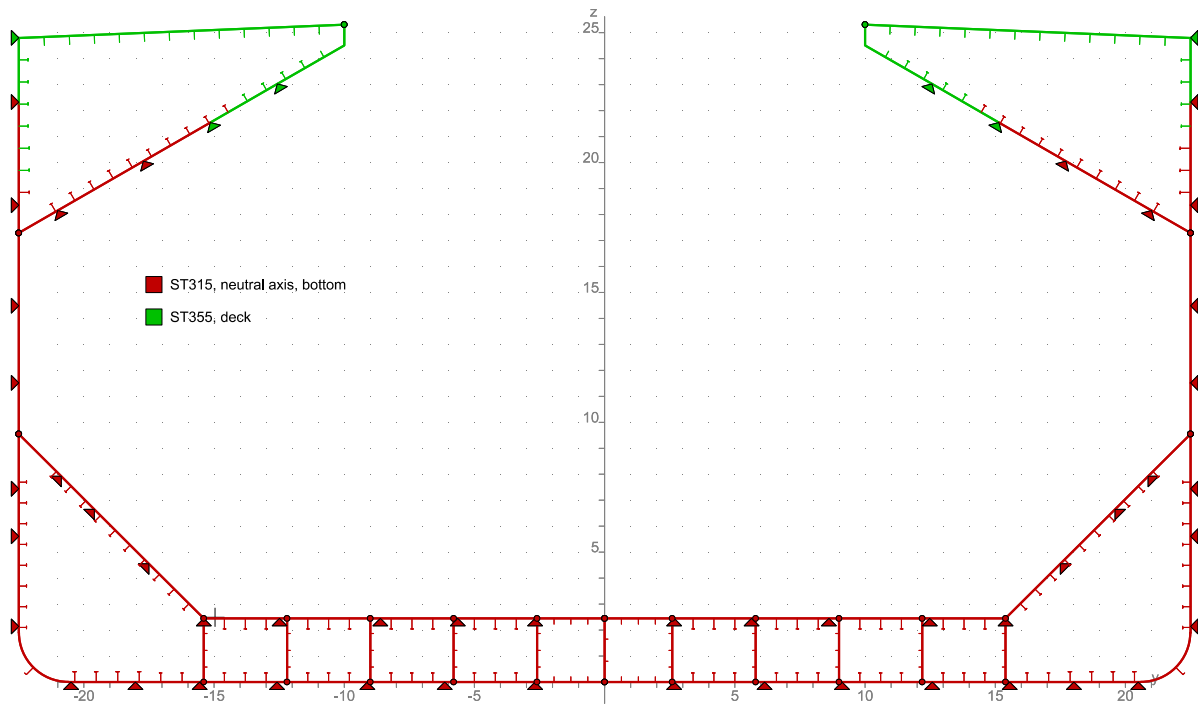
Όσον αφορά τα υλικά, χρησιμοποιείται εν γένει χάλυβας υψηλής αντοχής (HTS) με υψηλό μέτρο ελαστικότητας και υψηλή τάση διαρροής, η οποία αποτελεί το όριο μετάβασης από την ελαστική στην πλαστική περιοχή. Η χρήση του χάλυβα υψηλής αντοχής επιτρέπει τη μείωση του πάχους των ελασμάτων και ενισχυτικών, λόγω της υψηλότερης τάσης διαρροής που διαθέτει σε σχέση με τον κοινό ναυπηγικό χάλυβα (Grade A).

Πιο συγκεκριμένα, το υπό μελέτη πλοίο χρησιμοποιεί κυρίως χάλυβα AH32 (ST315) με τον οποίο είναι κατασκευασμένα τα ελάσματα στην περιοχή του πυθμένα και στην περιοχή του ουδέτερου άξονα της διατομής. Στην περιοχή του καταστρώματος που αποτελεί απομακρυσμένη περιοχή από τον ουδέτερο άξονα της διατομής και οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι υψηλές χρησιμοποιούνται χάλυβες AH36 και EH36 με υψηλότερο όριο διαρροής (ST355). Ο χάλυβας AH36 χρησιμοποιείται για ελάσματα της άνω πλευρικής δεξαμενής, ενώ ο χάλυβας EH36 χρησιμοποιείται για τα ελάσματα του ζωστήρα (Sheer Strake) και τα ελάσματα του καταστρώματος, καθώς είναι πολύ ανθεκτικός και χρησιμοποιείται για την κατασκευή ελασμάτων άνω των 30 mm.

Στον πίνακα (5.2) συνοψίζονται οι χρησιμοποιούμενοι χάλυβες με τον αντίστοιχο συντελεστή υλικού που ορίζεται από τους κανόνες, ενώ στο σχήμα (5.4) απεικονίζεται η μέση τομή με το όριο διαρροής που χρησιμοποιείται σε κάθε περιοχή, καθώς και τα σημεία συγκόλλησης των ελασμάτων.

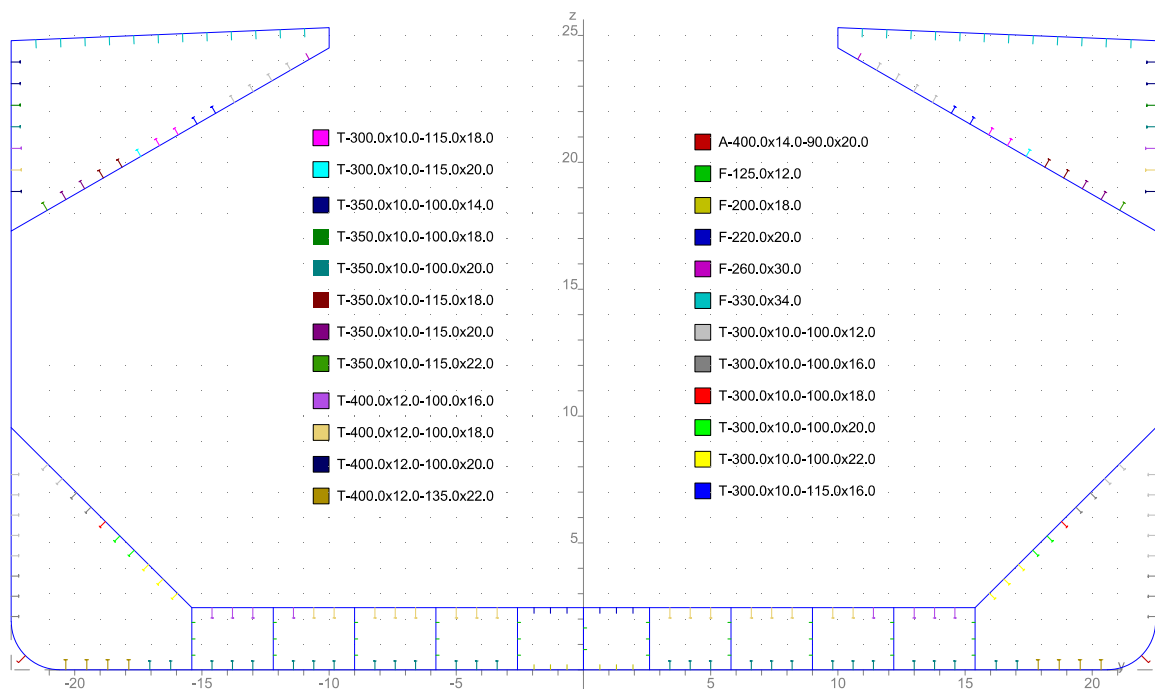
Πίνακας 5.2: Χάλυβες Μέσης Τομής υπό μελέτη Bulk Carrier

Υλικά	Όριο Διαρροής σ_Y [MPa]	Συντελεστής Υλικού k
Χάλυβας υψηλής αντοχής «Grade AH32»	315	0.78
Χάλυβας υψηλής αντοχής «Grade AH36»	355	0.72
Χάλυβας υψηλής αντοχής «Grade EH36»	355	0.72

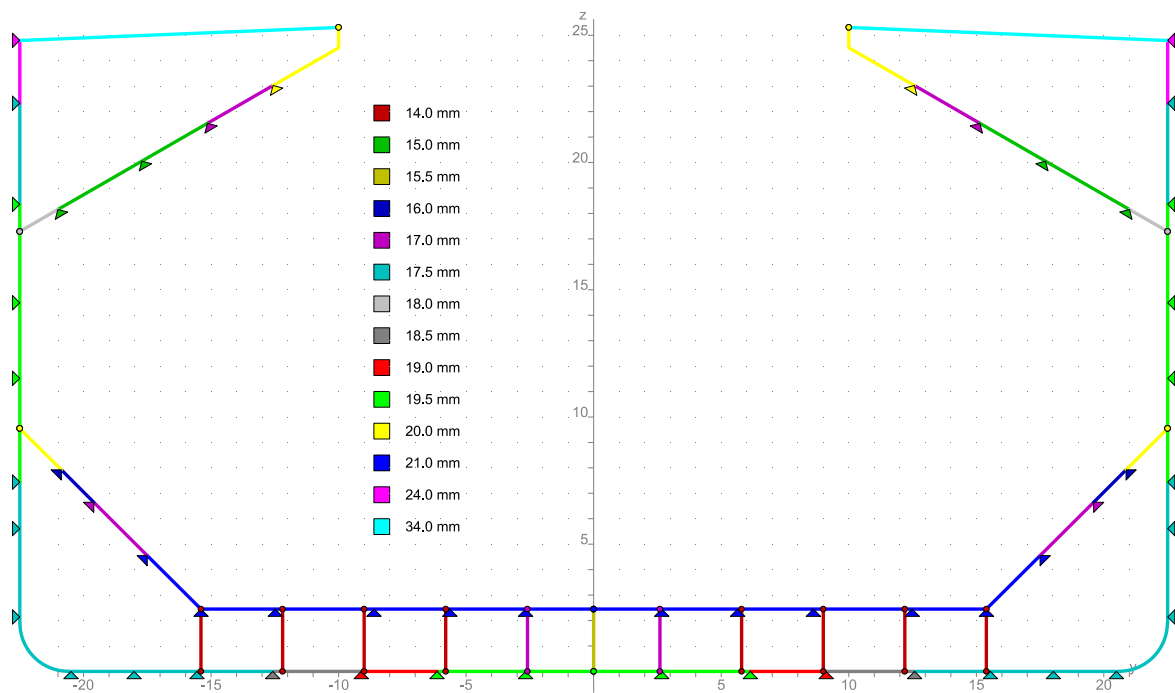


Σχήμα 5.4: Χρησιμοποιούμενα ολικά μέσης τομής του υπό εξέταση Bulk Carrier (Mars2000). Τα βέλη κάτω από τα ελάσματα υποδηλώνουν τις συγκολλήσεις μεταξύ τους.

Τέλος, στα σχήματα (5.5) & (5.6) παρουσιάζονται οι αναλυτικές διαστάσεις (Scantlings) των διαμήκων ενισχυτικών και ελασμάτων που χρησιμοποιεί το υπό εξέταση πλοίο. Σημειώνεται ότι οι διαστάσεις αυτές είναι οι κατασκευαστικές (as – built) και περιλαμβάνουν τα ολικά πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες (**Gross**) των στοιχείων, χωρίς να έχει συμπεριληφθεί κάποια μείωση λόγω διάβρωσης.



Σχήμα 5.5: Ολικές διαστάσεις (Gross Scantlings) των ενισχυτικών μέσης τομής του υπό εξέταση Bulk Carrier (Mars2000)



Σχήμα 5.6: Ολικό πάχος (Gross Thickness) των ελασμάτων της μέσης τομής του υπό εξέταση Bulk Carrier (Mars2000)

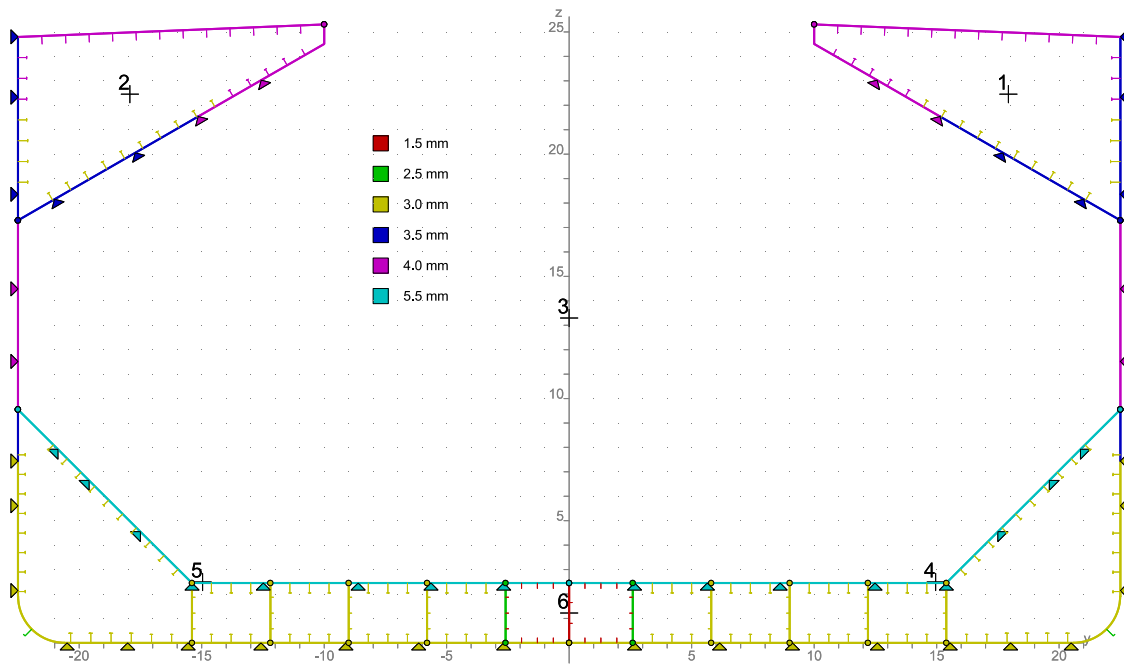
5.2 Προσέγγιση Καθαρού Πάχους (Net Scantling Approach)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα κατασκευαστικά στοιχεία της μέσης τομής είναι διαστασιολογημένα με βάση τις ολικές διαστάσεις τους (Gross Scantlings). Σύμφωνα με τους κατασκευαστικούς κανόνες που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3, προδιαγράφεται ένα περιθώριο διάβρωσης t_c που συνυπολογίζει την ενδεχόμενη απώλεια υλικού λόγω διάβρωσης και καθορίζεται ανάλογα τη θέση του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου και το περιβάλλον με το οποίο επικοινωνεί. Συγκεκριμένα ο υπολογισμός του συνολικού περιθωρίου διάβρωσης προκύπτει από τον υπολογισμό επιμέρους απωλειών λόγω διάβρωσης t_{c1} & t_{c2} σε κάθε πλευρά του στοιχείου, η οποία ενδέχεται να βρίσκεται σε διαφορετικό περιβάλλον, ανάλογα με το διαμέρισμα που «βλέπει». Η συνολική απώλεια λόγω διάβρωσης υπολογίζεται ως εξής:

$$t_c = \text{Roundup}_{0,5}(t_{c1} + t_{c2}) + 0.5$$

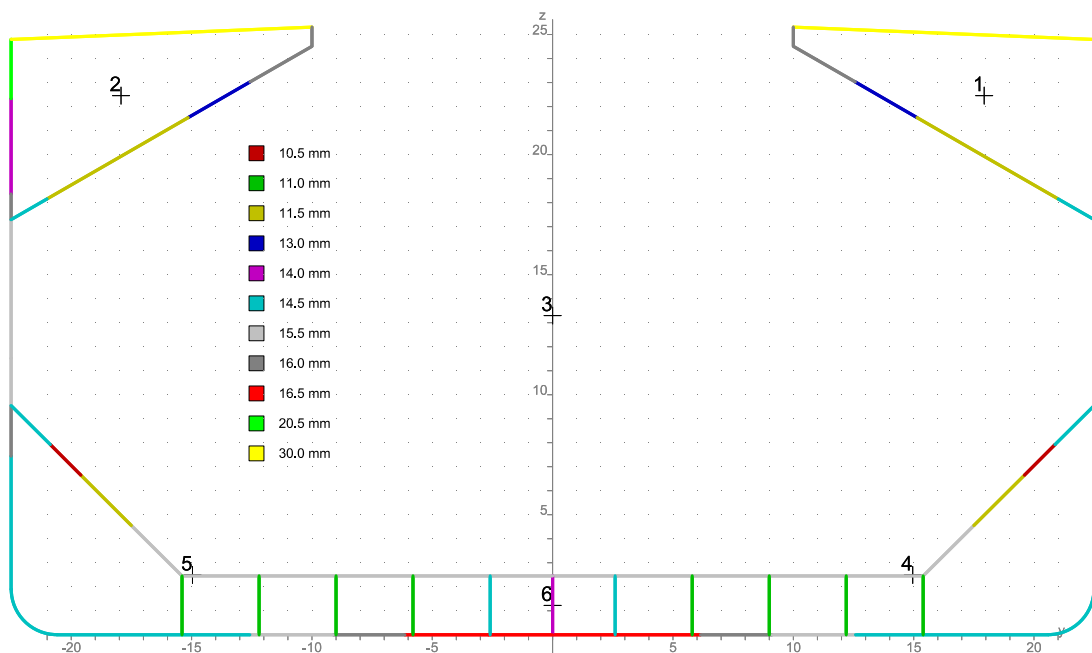
Οι επιμέρους απώλειες t_{c1} & t_{c2} λαμβάνονται από τον πίνακα (3.9) του κεφαλαίου 3. Σημειώνεται ότι τα διαμερίσματα 1, 2, 4 & 5 είναι δεξαμενές έρματος, το διαμέρισμα 3 είναι ο χώρος ξηρού φορτίου, ενώ το διαμέρισμα 6 είναι κενός χώρος. Ο υπολογισμός του περιθωρίου διάβρωσης αποτελεί μια απαραίτητη διαδικασία για τον καθορισμό των καθαρών διαστάσεων (Net Scantlings) των ελασμάτων και των ενισχυτικών, για τον έλεγχο της τοπικής αντοχής. Συγκεκριμένα οι καθαρές ιδιότητες των τοπικών στοιχείων προκύπτουν ύστερα από εφαρμογή όλου του ποσοστού διάβρωσης, σε αντίθεση με τις καθαρές ιδιότητες της μέσης τομής, οι οποίες προκύπτουν με εφαρμογή του μισού ποσοστού διάβρωσης ($0.5 t_c$).

Στο σχήμα (5.7) παρουσιάζεται συνοπτικά η συνολική προσαύξηση λόγω διάβρωσης t_c για τα διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως προέκυψαν από το πρόγραμμα του Mars2000.



Σχήμα 5.7: Συνολική προσάυξη λόγω διάβρωσης των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων (Mars2000)

Με βάση τη συνολική διάβρωση που προκύπτει από το πρόγραμμα του Mars2000, πραγματοποιείται η προσέγγιση καθαρού πάχους και καθαρών γεωμετρικών ιδιοτήτων για τα επιμέρους ελάσματα και τα ενισχυτικά. Η αναλυτική διαδικασία προσέγγισης καθαρού πάχους και γεωμετρικών ιδιοτήτων για κάθε στοιχείο βρίσκεται στο Παράρτημα. Στο σχήμα (5.8) απεικονίζεται η μέση τομή με τα καθαρά προσφερόμενα πάχη των ελασμάτων που προκύπτουν ύστερα από την αφαίρεση του περιθωρίου διάβρωσης.

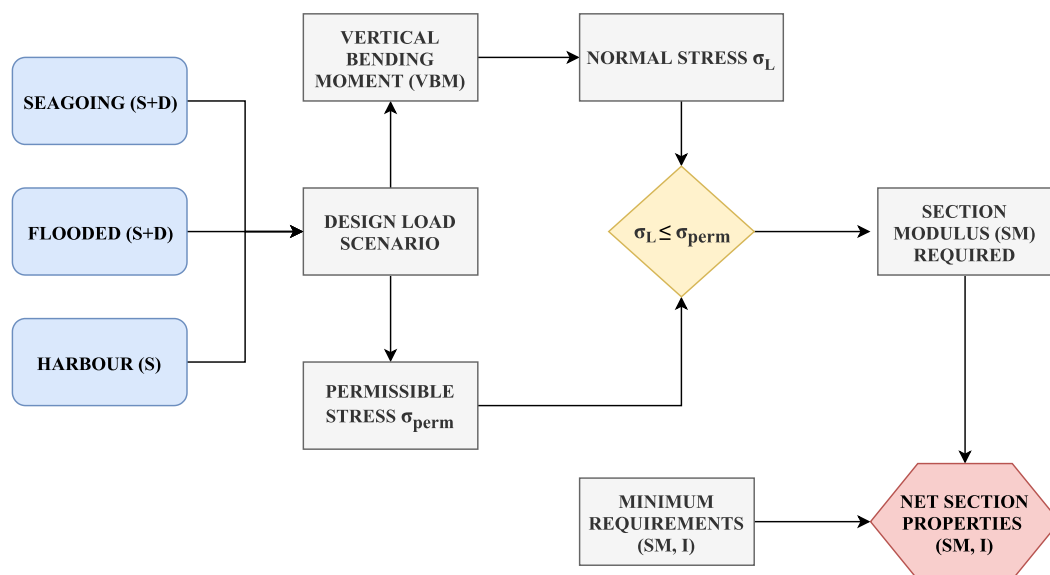


Σχήμα 5.8: Καθαρά προσφερόμενα πάχη $t_{net-offered}$ ελασμάτων ύστερα από διάβρωση (Mars2000)

5.3 Διαδικασία για τον Έλεγχο Διαμήκους Αντοχής

Η ανάλυση αυτή αφορά την καταπόνηση του πλοίου ως δοκάρη από κατακόρυφες καμπτικές ροπές και κατά συνέπεια τον έλεγχο έναντι διαρροής σε επίπεδο πρωτεύουσών τάσεων. Συγκεκριμένα, σκοπός αυτού του ελέγχου είναι να διαπιστωθεί εάν η διαμορφωμένη μέση τομή διαθέτει επαρκή ροπή αντίστασης προκειμένου να είναι σε θέση να παραλάβει τις ορθές τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης, στο κατάστρωμα και στον πυθμένα (ακραίες ίνες) και κατά συνέπεια σε οποιοδήποτε ενδιάμεσο σημείο.

Για την ικανοποίηση αυτού του κριτηρίου, οι κανόνες προδιαγράφουν απαιτήσεις που βασίζονται στον έλεγχο της αναπτυσσόμενης τάσης σ_L , η οποία δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την επιτρεπόμενη σ_{perm} καθώς και στον έλεγχο ελάχιστων απαιτήσεων που αφορούν τις γεωμετρικές ιδιότητες της μέσης τομής. Ο έλεγχος αυτός γίνεται για την αντοχή της μέσης τομής με το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο να έχει υποστεί διάβρωση ίση με το μισό του περιθωρίου διάβρωσης ($0.5 t_c$), που υπολογίζεται κατά την προσέγγιση του καθαρού πάχους (Net Scantling Approach). Επίσης οι κανόνες προδιαγράφουν ελάχιστες απαιτήσεις (Minimum Requirements) για τον έλεγχο της ροπής αντίστασης και της ροπής αδράνειας. Στο σχήμα (5.9) παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδικασία ελέγχου των απαιτούμενων καθαρών γεωμετρικών ιδιοτήτων (SM, I) της μέσης τομής για τον έλεγχο της διαμήκους αντοχής.



Σχήμα 5.9: Διαδικασία υπολογισμού απαιτούμενης ροπής αντίστασης και ροπής αδράνειας για τον έλεγχο διαμήκους αντοχής της μέσης τομής

Οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές (VBM), όπως και όλες οι φορτίσεις που καταπονούν τη γάστρα καθορίζονται από το εκάστοτε σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων (Design Load Scenario) και υπολογίζονται τόσο για κατάσταση Hogging όσο και για Sagging. Τα εξεταζόμενα σενάρια που προδιαγράφουν οι κανόνες για τον έλεγχο διαμήκους αντοχής είναι τα εξής:

- Συνθήκες κανονικής πλεύσης (Seagoing Operation)
- Συνθήκες λιμανιού (Harbour Operation)
- Συνθήκες κατάκλυσης (Flooded Operation)

Σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις υπολογίζεται η απαιτούμενη ροπή αντίστασης (SM), σύμφωνα με τη θεωρία απλής κάμψης του Euler προκειμένου να ισχύει $\sigma_L \leq \sigma_{perm}$. Τελικά η απαιτούμενη ροπή αντίστασης λόγω επιτρεπόμενης τάσης προκύπτει ως η ελάχιστη όλων των περιπτώσεων.

5.4 Υπολογισμός Κατακόρυφων Καμπτικών Ροπών

Σε πρώτο στάδιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των κατακόρυφων καμπτικών ροπών (VBM) της γάστρας και συγκεκριμένα οι κατακόρυφες ροπές σε ήρεμο νερό (S.W.B.M), καθώς και σε κυματισμό (W.V.B.M) για τα τρία προαναφερθέντα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιεγράφηκε στο Κεφάλαιο 4, για την περιοχή της μέσης τομή, στη θέση $f_{xL} = 0.5$. Σημειώνεται ότι στα πλαίσια της διαμήκουσ αντοχής, δεν απαιτείται υπολογισμός της οριζόντιας καμπτικής ροπής (HBM), καθώς οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις σ_L είναι αποτέλεσμα μόνο κατακόρυφης κάμψης.

Όσον αφορά την κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό σε συνθήκες κανονικής πλεύσης (Seagoing), λαμβάνεται ως η ελάχιστη επιτρεπόμενη από τους κανόνες, τόσο για Hogging όσο και για Sagging, δεδομένου ότι προκύπτει μεγαλύτερη από εκείνη των καταστάσεων του Loading Manual. Συγκεκριμένα, η δυσμενέστερη κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό για Hogging και Sagging, όπως προέκυψε από το Loading Manual παρουσιάζεται στον πίνακα (5.3) – (S.W.B.M Builder's proposal in Basic Ship Data). Επιπλέον, για τις συνθήκες λιμανιού (Harbour) και κατάκλυσης (Flooded), η κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό λαμβάνεται ως η ελάχιστη επιτρεπόμενη προσαυξημένη κατά 25% και 10% αντίστοιχα. Στον πίνακα (5.3) παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των κατακόρυφων καμπτικών ροπών σε ήρεμο νερό, όπως εξήχθησαν και από το πρόγραμμα Mars2000, ενώ στον πίνακα (5.4) συνοψίζονται όλες οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές για τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων.

Πίνακας 5.3: Κατακόρυφες καμπτικές ροπές σε ήρεμο νερό υπό μελέτη πλοίου (Mars2000)

Vertical Bending Moment		
	Hogging (kNm)	Sagging (kNm)
S.W.B.M. Builder's proposal in Basic Ship Data	3 494 263.	-1 950 257.
S.W.B.M. Builder's proposal at X = 139 m	-	-
S.W.B.M. minimum value at midship	3 836 284.	-2 960 291.
S.W.B.M. minimum value at X = 139 m	3 836 284.	-2 960 291.
Rule Vertical Wave Bending Moment at X = 139 m . . .	5 958 798.	-6 312 386.
Design Hull Girder Loads at X = 139 m		
	Hogging (kNm)	Sagging (kNm)
S.W.B.M.	3 836 284.	-2 960 291.
S.W.B.M. Har	4 795 355.	-3 700 364.
S.W.B.M. Flood	4 219 912.	-3 256 321.
Wave bending moment (Rule)	5 958 798.	-6 312 386.

Πίνακας 5.4: Κατακόρυφες Καμπτικές Ροπές (VBM) υπό μελέτη πλοίου για τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων στη θέση της μέσης τομής ($f_{xL} = 0.5$)

Vertical Bending Moments	Design Load Scenario	Hogging [kN m]	Sagging [kN m]
Still Water Bending Moment	S.W.B.M. Seagoing Condition M_{sw}	3.8363e+06	-2.9603e+06
	S.W.B.M. Harbour Condition M_{sw-p}	4.7954e+06	-3.7004e+06
	S.W.B.M. Flooded Condition M_{sw-f}	4.2199e+06	-3.2563e+06
Wave Vertical Bending Moment	W.V.B.M. Seagoing Condition M_{wv}	5.9588e+06	-6.3124e+06
	W.V.B.M. Harbour Condition	-	-
	W.V.B.M. Flooded Condition M_{wv-f}	4.767e+06	-5.0499e+06

5.5 Υπολογισμός Απαιτούμενης Ροπής Αντίστασης

Η απαιτούμενη ροπή αντίστασης και γενικότερα οι απαιτούμενες γεωμετρικές ιδιότητες της μέσης τομής προκύπτουν από την ικανοποίηση της ελάχιστης επιτρεπόμενης τάσης, καθώς και από ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις.

5.5.1 Ελάχιστη Απαιτούμενη Ροπή Αντίστασης και Ροπή Αδράνειας

Οι κανόνες προδιαγράφουν ελάχιστες απαιτήσεις για τις καθαρές γεωμετρικές ιδιότητες της μέσης τομής και συγκεκριμένα:

- **Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αδράνειας** $I_{yR} [m^4] = 2.7 C_W L^3 B (C_B + 0.7) 10^{-8}$
όπου και προκύπτει $I_{yR} = 429.95 m^4$.
- **Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης** $Z_R [m^3] = 0.9 k C_W L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-6}$

Η παραπάνω σχέση εξαρτάται από το συντελεστή υλικού, δηλαδή από το υλικό που χρησιμοποιείται σε κάθε περιοχή. Συγκεκριμένα ο χάλυβας Grade AH32 (ST315) χρησιμοποιείται στον πυθμένα, ενώ ο χάλυβας Grade EH36 (ST355) χρησιμοποιείται στο κατάστρωμα. Κατά συνέπεια, η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης θα είναι διαφορετική στον πυθμένα απ' ό τι στο κατάστρωμα, λόγω διαφορετικών συντελεστών υλικού k . Συγκεκριμένα:

- Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης πυθμένα: $k_B = 0.78 \Rightarrow Z_{RB} = 40.21 m^3$
- Ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης καταστρώματος: $k_D = 0.72 \Rightarrow Z_{RD} = 37.12 m^3$

5.5.2 Απαιτούμενη Ροπή Αντίστασης λόγω Επιτρεπόμενης Τάσης

Η διαμήκης κάμψη της γάστρας είναι αποτέλεσμα των κατακόρυφων καμπτικών ροπών και διακρίνεται σε Sagging και Hogging ανάλογα με το είδος καταπόνησης των ακραίων ιών. Οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές συνδέονται με τη ροπή αντίστασης της διατομής μέσω των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων σ_L , σύμφωνα με τον πίνακα (5.5).

Πίνακας 5.5: Ορθές αναπτυσσόμενες τάσεις για τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων, που αφορούν τον πυθμένα, το κατάστρωμα, καθώς και οποιοδήποτε ενδιάμεσο σημείο της διατομής.

Operation	Normal stress, σ_L		
	At any point located below Z_{VD}	At bottom ⁽¹⁾	At deck ⁽¹⁾
Seagoing	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + f_B M_{wv}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + f_B M_{wv}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + f_B M_{wv}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
Harbour/sheltered water	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
Flooded condition at sea for bulk carriers having a length L of 150 m or above	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wv}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wv}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wv}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$

Στους παραπάνω τύπους υπεισέρχεται και ο διορθωτικός συντελεστής κυματισμού f_B , ο οποίος αναφέρεται σε διάφορες δυναμικές καταστάσεις που αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.2. Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει μέγιστη τιμή $f_B = 1.05$ (για κυματισμούς HSM1-2 & FSM1-2), οπότε αυτή είναι και η δυσμενέστερη κατάσταση στην οποία πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί.

Η επιτρεπόμενη ορθή τάση σ_{perm} προδιαγράφεται από τους κανόνες στον πίνακα (5.6) και εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας, το υλικό (συντελεστής k) και την διαμήκη θέση. Σύμφωνα με τους κανόνες, σε κάθε σημείο της μέσης τομής ($x/L = 0.5$), θα πρέπει να ισχύει $\sigma_L \leq \sigma_{perm}$.

Πίνακας 5.6: Μέγιστη επιτρεπόμενη ορθή τάση καθ' όλο το μήκος του πλοίου για τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων

Operation	Design load	Permissible hull girder bending stress, σ_{perm}				
		$\frac{x}{L} \leq 0.1$	$0.1 < \frac{x}{L} < 0.3$	$0.3 \leq \frac{x}{L} \leq 0.7$	$0.7 < \frac{x}{L} < 0.9$	$\frac{x}{L} \geq 0.9$
Seagoing	(S+D)	140/k	Linear interpolation	190/k	Linear interpolation	140/k
Harbour/sheltered water	(S)	105/k	Linear interpolation	143/k	Linear interpolation	105/k
Flooded condition at sea for bulk carriers having a length L of 150 m or above	(A:S+D)	140/k	Linear interpolation	190/k	Linear interpolation	140/k

Με βάση τα παραπάνω πραγματοποιείται υπολογισμός της απαιτούμενης ροπής αντίστασης της μέσης τομής μέσω ικανοποίησης της συνθήκης $\sigma_L \leq \sigma_{perm}$, τόσο σε κατάσταση Hogging, όσο και για Sagging και για τις δύο ακραίες ίνες (κατάστρωμα, πυθμένας), οι οποίες χρησιμοποιούν διαφορετικά υλικά. Συγκεκριμένα, $k_D = 0.72$ για το κατάστρωμα και $k_B = 0.78$ για τον πυθμένα.

- **Για συνθήκες κανονικής πλεύσης (Seagoing Operation)**

- Για το κατάστρωμα σε κατάσταση Hogging:

$$\frac{M_{sw-h} + 1.05M_{wv-h}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_D} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq \frac{k_D (M_{sw-h} + 1.05M_{wv-h})}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq 38.25 \text{ m}^3$$

- Για το κατάστρωμα σε κατάσταση Sagging:

$$\frac{|M_{sw-s} + 1.05M_{wv-s}|}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_D} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq \frac{k_D |M_{sw-s} + 1.05M_{wv-s}|}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq 36.33 \text{ m}^3$$

- Για τον πυθμένα σε κατάσταση Hogging:

$$\frac{M_{sw-h} + 1.05M_{wv-h}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_B} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq \frac{k_B (M_{sw-h} + 1.05M_{wv-h})}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq 41.44 \text{ m}^3$$

- Για τον πυθμένα σε κατάσταση Sagging:

$$\frac{|M_{sw-s} + 1.05M_{wv-s}|}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_B} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq \frac{k_B |M_{sw-s} + 1.05M_{wv-s}|}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq 39.36 \text{ m}^3$$

- **Για συνθήκες λιμανιού (Harbour Operation)**

– Για το κατάστρωμα σε κατάσταση Hogging:

$$\frac{M_{sw-p-h}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k_D} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq \frac{k_D M_{sw-p-h}}{143} 10^{-3} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq 24.14 \text{ m}^3$$

– Για το κατάστρωμα σε κατάσταση Sagging:

$$\frac{|M_{sw-p-s}|}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k_D} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq \frac{k_D |M_{sw-p-s}|}{143} 10^{-3} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq 18.63 \text{ m}^3$$

– Για τον πυθμένα σε κατάσταση Hogging:

$$\frac{M_{sw-p-h}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k_B} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq \frac{k_B M_{sw-p-h}}{143} 10^{-3} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq 26.15 \text{ m}^3$$

– Για τον πυθμένα σε κατάσταση Sagging:

$$\frac{|M_{sw-p-s}|}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k_B} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq \frac{k_B |M_{sw-p-s}|}{143} 10^{-3} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq 20.18 \text{ m}^3$$

- **Για συνθήκες κατάκλυσης (Flooded Operation)**

– Για το κατάστρωμα σε κατάσταση Hogging:

$$\frac{M_{sw-f-h} + M_{wv-f-h}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_D} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq \frac{k_D (M_{sw-f-h} + M_{wv-f-h})}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq 34.06 \text{ m}^3$$

– Για το κατάστρωμα σε κατάσταση Sagging:

$$\frac{|M_{sw-f-s} + M_{wv-f-s}|}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_D} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq \frac{k_D |M_{sw-f-s} + M_{wv-f-s}|}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{D-n50} \geq 31.48 \text{ m}^3$$

– Για τον πυθμένα σε κατάσταση Hogging:

$$\frac{M_{sw-f-h} + M_{wv-f-h}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_B} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq \frac{k_B (M_{sw-f-h} + M_{wv-f-h})}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq 36.90 \text{ m}^3$$

– Για τον πυθμένα σε κατάσταση Sagging:

$$\frac{|M_{sw-f-s} + M_{wv-f-s}|}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k_B} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq \frac{k_B |M_{sw-f-s} + M_{wv-f-s}|}{190} 10^{-3} \Rightarrow Z_{B-n50} \geq 34.10 \text{ m}^3$$

Τελικά, σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς, η ελάχιστη **καθαρή (n50)** απαιτούμενη ροπή αντίστασης για το κατάστρωμα και τον πυθμένα προκύπτει:

$$Z_{D-n50}^{\min} = 38.25 \text{ m}^3 \text{ και } Z_{B-n50}^{\min} = 41.44 \text{ m}^3$$

Οι απαιτήσεις αυτές προκύπτουν ως αποτέλεσμα δυσμενέστερης κατάστασης για **συνθήκες κανονικής πλεύσης** τόσο για το κατάστρωμα, όσο και για τον πυθμένα, σε κατάσταση **Hogging**. Στον πίνακα (5.7) συνοψίζονται οι υπολογισμοί απαιτούμενης ροπής αντίστασης, όπως εξάγονται από το πρόγραμμα Mars2000.

Πίνακας 5.7: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης (Mars2000)

Rule section moduli		
	Deck (m ³)	Bottom (m ³)
Minimum section modulus	37.1182	40.2114
Modulus based on design BM, Hog. (10 093 020.0 kNm)	38.2472	41.4345
Modulus based on design BM, Sag. (-9 588 296.0 kNm)	36.3346	39.3625
<i>Flooded conditions</i>		
Modulus based on damaged BM, Hog. (8 986 950.0 kNm)	34.0558	36.8938
Modulus based on damaged BM, Sag. (-8 306 229.0 kNm)	31.4762	34.0993
<i>Harbour</i>		
Modulus based on harbour SWBM, Hog. (4 795 355.0 kNm)	24.1445	26.1565
Modulus based on harbour SWBM, Sag. (-3 700 364.0 kNm)	18.6312	20.1838
Rule Modulus	38.2472	41.4345

5.6 Υπολογισμός Πραγματικών Γεωμετρικών Ιδιοτήτων Μέσης Τομής

Με βάση τα κατασκευαστικά στοιχεία της μέσης τομής του υπό μελέτη Bulk Carrier μπορεί να υπολογιστούν οι γεωμετρικές ιδιότητες της μέσης τομής και συγκεκριμένα η επιφάνεια της διατομής, η κατακόρυφη και οριζόντια ροπή αδράνειας ως προς το κέντρο βάρους της διατομής, η κατακόρυφη θέση του ουδέτερου άξονα, καθώς και η ροπή αντίστασης της διατομής στις ακραίες ίνες (κατάστρωμα/πυθμένας). Στους πίνακες (5.8) και (5.9) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του Mars2000 για τη μέση τομή με ολικό πάχος κατασκευαστικών στοιχείων (Gross Scantlings), αλλά και τα αποτελέσματα με το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο να έχει υποστεί διάβρωση όση το μισό περιθωρίου διάβρωσης (n50). Σημειώνεται ότι ο έλεγχος της ροπής αντίστασης αφορά τη ροπή αντίστασης για διάβρωση **n50**.

Πίνακας 5.8: Ολικές γεωμετρικές ιδιότητες (Gross Scantling) ακέραιας μέσης τομής (Mars2000)

Gross Section Characteristics		
Gross scantling		
Gross area of cross-section	5.684566	m ²
Effective area	5.684566	m ²
Result in reference axes centered at G' (0.,Z_g)		
Single moment above neutral axis	(/ neutral axis) ..	27.583890 m ³
Moment of inertia / G' _y axis	(IG' _y) ..	601.952000 m ⁴
Moment of inertia / G' _z axis	(IG' _z) ..	1481.145000 m ⁴
Position of neutral axis	(above base line) (N) ...	10.87457 m
Modulus at deck	(24.800 m) .. (Z _{AD}) ..	43.226820 m ³
Modulus at bottom	(0.000 m) ... (Z _{AB}) ..	55.354100 m ³

Πίνακας 5.9: Καθαρές Γεωμετρικές ιδιότητες (Net Scantling) μέσης τομής ελαττωμένης κατά 50% του περιθωρίου διάβρωσης (Mars2000)

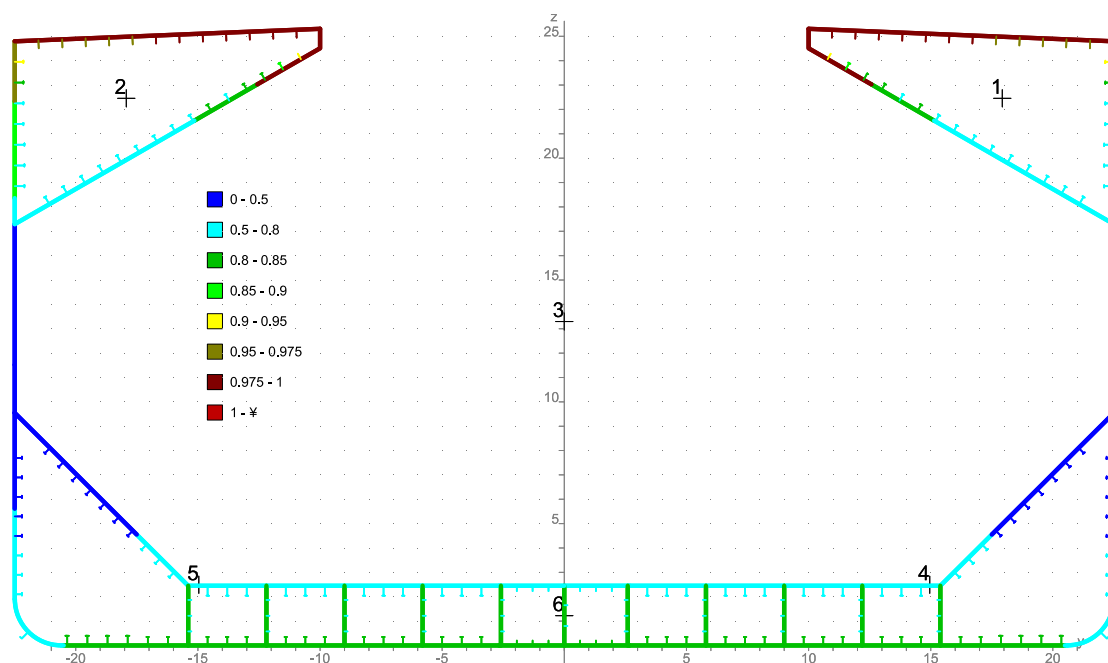
Cross Section Characteristics Net scantling		
Gross area of cross-section	5.127606	m ²
Effective area	5.127606	m ²
Result in reference axes centered at G' (0.,Z_g)		
Single moment above neutral axis	(/ neutral axis) ..	25.096760 m ³
Moment of inertia / G' _y axis	(IG' _y) ..	549.711500 m ⁴
Moment of inertia / G' _z axis	(IG' _z) ..	1336.005000 m ⁴
Position of neutral axis	(above base line) (N) ...	11.00252 m
Modulus at deck	(24.800 m) .. (Z _{AD}) ..	39.841430 m ³
Modulus at bottom	(0.000 m) ... (Z _{AB}) ..	49.962350 m ³

5.7 Έλεγχος Γεωμετρικών Ιδιοτήτων και Επιτρεπόμενης Τάσης

Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα (5.9) διαπιστώνεται ότι η ροπή αντίστασης της μέσης τομής του υπό μελέτη πλοίου είναι **επαρκής** σε κατάστρωμα και πυθμένα. Επίσης η κατακόρυφη ροπή αδράνειας ικανοποιεί την ελάχιστη απαιτούμενη. Στον πίνακα (5.10) συνοψίζεται ο έλεγχος των απαιτήσεων και στο σχήμα (5.10) διακρίνεται η γραμμική μεταβολή του σ_L / σ_{perm} καθ' ύψος του πλοίου, η οποία δεν υπερβαίνει την μονάδα.

Πίνακας 5.10: Έλεγχος απαιτούμενης ροπής αντίστασης και ροπής αδράνειας

		Rule	Actual
Deck	(24.800 m k = 0.72)	38.2472	39.8414
Bottom	(0.000 m k = 0.78)	41.4345	49.9624
Inertia		429.9525	549.7115



Σχήμα 5.10: Έλεγχος επιτρεπόμενης τάσης στη μέση τομή. Στην περιοχή του ουδέτερου άξονα το κλάσμα σ_L / σ_{perm} παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 0.5, στην περιοχή του πυθμένα τιμές μεταξύ 0.5 και 0.8, ενώ στην περιοχή του καταστρώματος παίρνει μέγιστες τιμές μεταξύ 0.95 και 0.975 λόγω της μεγαλύτερης απόστασης από τον Ο.Α.

5.8 Έλεγχος Τοπικής Αντοχής – Περιγραφικές Απαιτήσεις (Load Based)

Η ανάλυση αυτή αφορά την καταπόνηση των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων από συνδυασμό καμπτικών φορτίσεων της γάστρας και τοπικών πιέσεων και κατά συνέπεια τον έλεγχο τοπικής αντοχής σε επίπεδο δευτερευουσών και τριτευουσών τάσεων, με κριτήριο την αποφυγή διαρροής. Για το σκοπό αυτό, οι κανόνες προδιαγράφουν κριτήρια διαστασιολόγησης, τα οποία βασίζονται σε καθορισμένες σχεδιαστικές φορτίσεις και προδιαγράφουν ελάχιστα απαιτούμενα καθαρά πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες για τα διαμήκη ενισχυτικά και ελάσματα.

5.8.1 Κριτήριο Απαιτούμενου Πάχους Ελάσματος

Σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec4}, οι κανονισμοί προδιαγράφουν ένα ελάχιστο καθαρό πάχος t_{req} [mm] για ελάσματα που υπόκεινται σε κάθετες πιέσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής αντοχή έναντι διαρροής. Το πάχος αυτό αναφέρεται από τους κανονισμούς ως **Load Thickness**, καθώς προκύπτει με βάση τις φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή και αφορά τα στοιχειώδη ελάσματα (Elementary Plate Panels), τα οποία συνθέτουν ένα ενιαίο έλασμα (Strake). Η συνολική απαίτηση για καθαρό πάχος σε ένα ενιαίο έλασμα, προκύπτει από την δυσμενέστερη απαίτηση για καθαρό πάχος των επιμέρους EPPs. Πιο αναλυτικά, για κάθε στοιχειώδες έλασμα, το απαιτούμενο καθαρό πάχος προκύπτει:

$$t_{req} = 0.0158 a_p b \sqrt{\frac{|P|}{\chi C_a R_{eH}}}$$

Όπου:

- $a_p = 1.2 - \frac{b}{2.1 a}$, διορθωτικός παράγων για το λόγο των διαστάσεων, με μέγιστη τιμή $a_{p-max} = 1$
- C_a , συντελεστής επιτρεπόμενης καμπτικής καταπόνησης, ο οποίος σχετίζεται με την ορθή

αναπτυσσόμενη τάση στο έλασμα. Δίνεται από τη σχέση: $C_a = \beta - \alpha \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}$ και λαμβάνει μέγιστη

τιμή C_{a-max} . Οι συντελεστές αυτοί προκύπτουν από τον πίνακα (5.11), ανάλογα το είδος του σχεδιαστικού σεναρίου (S ή S+D) και το είδος ενίσχυσης (διαμήκης ή εγκάρσια).

Πίνακας 5.11: Ορισμός Συντελεστών α , β , C_{a-max} για κριτήρια αποδοχής AC – S και AC – SD

Acceptance criteria set	Structural member		β	α	C_{a-max}
AC-S	Longitudinal strength members	Longitudinally stiffened plating	0.9	0.5	0.8
		Transversely stiffened plating	0.9	1.0	0.8
	Other members		0.8	0	0.8
AC-SD	Longitudinal strength members	Longitudinally stiffened plating	1.05	0.5	0.95
		Transversely stiffened plating	1.05	1.0	0.95
	Other members		1.0	0	1.0

- χ , συντελεστής που παίρνει τις εξής τιμές:
 - $\chi = 0.7$, για ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα σε άθικτη κατάσταση
 - $\chi = 1$, για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία σε άθικτη κατάσταση (Intact)
 - $\chi = 1.15$, για όλα τα στοιχεία σε κατάσταση κατάκλυσης (Flooded)

- $R_{eH} [N / mm^2]$, το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα
- $P [kN / m^2]$, η συνολική κάθετη τοπική πίεση, υπολογισμένη στο σημείο υπολογισμού που προδιαγράφεται από τους κανόνες (βλ. Κεφάλαιο 3.4.1)
- $\sigma_{hg} [N / mm^2]$, η ορθή αναπτυσσόμενη τάση που ασκείται στο έλασμα λόγω κατακόρυφης και οριζόντιας κάμψης της γάστρας και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{hg} = \left(\frac{M_{sw} + M_{wv-LC}}{I_{y-n50}} (z - z_n) - \frac{M_{wh-LC}}{I_{z-n50}} y \right) 10^{-3}, \text{ όπου}$$

- $M_{sw} [kN m]$, η κατακόρυφη καμπτική ροπή σε ήρεμο για κατάσταση Sagging ή Hogging
- $M_{wv-LC} [kN m]$, η δυναμική κατακόρυφη καμπτική ροπή (dynamic hull girder load), η οποία προκύπτει σε συνδυασμό με τις κατακόρυφες σχεδιαστικές καμπτικές ροπές κυματισμού M_{wv-h} , M_{wv-s} και τους συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων σύμφωνα με τον πίνακα (5.12).

Πίνακας 5.12: Δυναμικές φορτίσεις γάστρας για τον υπολογισμό της ορθής τάσης

Load combination factor	M_{wv-LC}
$C_{wv} \geq 0$	$f_{\beta} C_{wv} M_{wv-h}$
$C_{wv} < 0$	$f_{\beta} C_{wv} M_{wv-s} $

- $M_{wh-LC} [kN m]$, η δυναμική οριζόντια καμπτική ροπή κυματισμού (dynamic hull girder load), η οποία προκύπτει σε συνδυασμό με την οριζόντια σχεδιαστική ροπή κυματισμού και τους συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων ως εξής:

$$M_{wh-LC} = f_{\beta} C_{WH} M_{wh}$$

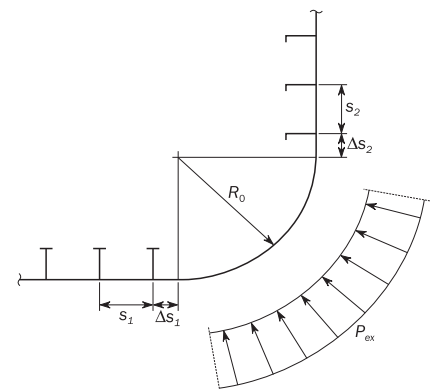
5.8.1.1 Ειδική Απαιτήση Πάχους για το Bilge Plate

Σύμφωνα με τις ειδικές απαιτήσεις των κανόνων στο εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec4/[2.2]}, το εν λόγω έλασμα διαστασιολογείται με βάση τα παρακάτω:

- Το καθαρό πάχος του ελάσματος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το καθαρό πάχος των παρακείμενων ελασμάτων
- Το καθαρό πάχος θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πάχος που δίνεται από τη σχέση:

$$t_{req} = 6.45 \times 10^{-4} (P_{ex} s_b)^{0.4} R^{0.6}, \text{ όπου:}$$

- P_{ex} , η εξωτερική πίεση
- s_b , η απόσταση μεταξύ δύο εγκάρσιων ενισχύσεων (Floors)
- $R = R_0 + 0.5(\Delta s_1 + \Delta s_2)$
- $R_0 [mm]$, η ακτίνα του ελάσματος και $\Delta s_1, \Delta s_2 [mm]$ όπως ορίζονται στο σχήμα (5.9)



Σχήμα 5.11: Ασκούμενη φόρτιση στο Bilge Plate

5.8.2 Κριτήριο Απαιτούμενης Ροπής Αντίστασης Ενισχυτικού

Σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch6/Sec5}, οι κανόνες προδιαγράφουν την απαιτούμενη καθαρή ροπή αντίστασης $Z_{req} [cm^3]$ για το σύστημα ενισχυτικού – συνεργαζόμενου ελάσματος πλάτους b_{eff} που υπόκειται σε κάθετες πιέσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί επαρκής αντοχή έναντι διαρροής.

$$Z_{req} = \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} \chi C_s R_{eH}}$$

Όπου:

- $s [mm]$, η ισαπόσταση όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3.4
- f_{bdg} , συντελεστής καμπτικής ροπής. Για συνεχή ενισχυτικά με πακτωμένες άκρες λαμβάνει τις τιμές:
 - $f_{bdg} = 12$, για οριζόντια ενισχυτικά και το άνω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών
 - $f_{bdg} = 10$, για το κάτω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών
- $l_{bdg} [m]$, το ενεργό μήκος κάμψης όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3.4
- C_s , ο συντελεστής επιτρεπόμενης καμπτικής καταπόνησης για τα ενισχυτικά, ο οποίος εξαρτάται από το πρόσημο της αναπτυσσόμενης ορθής τάσης, καθώς και τον προσανατολισμό της εφαρμοζόμενης κάθετης πίεσης σε σχέση με το ενισχυτικό ή το έλασμα (πίνακας 5.13).

Πίνακας 5.13: Ορισμός συντελεστή C_s

Sign of hull girder bending stress, σ_{hg}	Lateral pressure acting on	Coefficient C_s
Tension (positive)	Stiffener side	$C_s = \beta_s - \alpha_s \frac{ \sigma_{hg} }{R_{eH}}$ but not to be taken greater than C_{s-max}
Compression (negative)	Plate side	
Tension (positive)	Plate side	$C_s = C_{s-max}$
Compression (negative)	Stiffener side	

Οι συντελεστές α_s , β_s , καθώς και η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του C_s , ορίζονται στον πίνακα (5.14), ανάλογα το είδος του σχεδιαστικού σεναρίου (S ή S+D).

Πίνακας 5.14: Ορισμός συντελεστών α , β , C_{s-max}

Acceptance criteria set	Structural member	β_s	α_s	C_{s-max}
AC-S	Longitudinal strength member	0.85	1.0	0.75
	Transverse or vertical member	0.75	0	0.75
AC-SD	Longitudinal strength member	1.0	1.0	0.9
	Transverse or vertical member	0.9	0	0.9

- χ , συντελεστής που παίρνει τις εξής τιμές:
 - $\chi = 0.9$, για ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα σε άθικτη κατάσταση
 - $\chi = 1$, για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία σε άθικτη κατάσταση (Intact)
 - $\chi = 1.15$, για όλα τα στοιχεία σε κατάσταση κατάκλυσης (Flooded)

- $R_{eH} \left[N / mm^2 \right]$, το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα
- $P \left[kN / m^2 \right]$, η συνολική κάθετη τοπική πίεση, υπολογισμένη στο σημείο υπολογισμού που προδιαγράφεται από τους κανόνες (βλ. Κεφάλαιο 3.4.2)
- $\sigma_{hg} \left[N / mm^2 \right]$, η ορθή αναπτυσσόμενη τάση που ασκείται στο ενισχυτικό λόγω κατακόρυφης και οριζόντιας κάμψης της γάστρας. Σημειώνεται ότι το σημείο αυτό διαφέρει από το σημείο υπολογισμού του ελάσματος και ορίζεται από Κεφάλαιο 3.4.2

5.8.3 Κριτήριο Απαιτούμενου Πάχους Κορμού Ενισχυτικού

Αντίστοιχα στο εδάφιο {Pt1/Ch6/Sec5} προδιαγράφεται και ένα απαιτούμενο καθαρό πάχος κορμού $t_{w-req} \left[mm \right]$ για ενισχυτικό που υπόκειται σε κάθετες πιέσεις, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση και αφού τον έλεγχο έναντι διαρροής σε διάτμηση.

$$t_{w-req} = \frac{f_{shr} |P| s l_{shr}}{d_{shr} \chi C_t \tau_{eH}}$$

Όπου:

- $s \left[mm \right]$, η ισαπόσταση όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3.4
- f_{shr} , συντελεστής διατμητικής δύναμης. Για συνεχή ενισχυτικά με πακτωμένες άκρες λαμβάνει τις τιμές:
 - $f_{shr} = 0.5$, για οριζόντια ενισχυτικά και το άνω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών.
 - $f_{shr} = 0.7$, για το κάτω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών.
- C_t , συντελεστής επιτρεπόμενης διατμητικής καταπόνησης, ο οποίος λαμβάνει τις εξής τιμές, ανάλογα το είδος του σχεδιαστικού σεναρίου (S ή S+D):
 - $C_t = 0.75$, για κριτήρια αποδοχής AC – S
 - $C_t = 0.90$, για κριτήρια αποδοχής AC – SD
- χ , συντελεστής που παίρνει τις εξής τιμές:
 - $\chi = 0.9$, για ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα σε άθικτη κατάσταση
 - $\chi = 1$, για όλα τα υπόλοιπα στοιχεία σε άθικτη κατάσταση (Intact)
 - $\chi = 1.15$, για όλα τα στοιχεία σε κατάσταση κατάκλυσης (Flooded)
- $\tau_{eH} \left[N / mm^2 \right]$, το όριο διάτμησης του χρησιμοποιούμενου χάλυβα, το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$\tau_{eH} = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$$

- $P \left[kN / m^2 \right]$, η συνολική κάθετη τοπική πίεση, υπολογισμένη στο σημείο υπολογισμού που προδιαγράφεται από τους κανόνες (βλ. Κεφάλαιο 3.4.2)

5.9 Διαδικασία για τον Έλεγχο Περιγραφικών Απαιτήσεων – Load Based

Για τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων που αφορούν τα ελάσματα και τα ενισχυτικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως, υπολογίζονται αρχικά οι σχεδιαστικές φορτίσεις που τα καταπονούν. Οι φορτίσεις αυτές είναι ορθές τάσεις και τοπικές κάθετες πιέσεις, που περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω. Η απαίτηση αντοχής ενός στοιχείου τελικά προκύπτει από τον δυσμενέστερο συνδυασμό των δύο αυτών φορτίσεων.

ο Ορθές τάσεις

Σε κάθε κατασκευαστικό στοιχείο αναπτύσσονται ορθές τάσεις που οφείλονται αφενός στην κάμψη της γάστρας σαν δοκάρι (πρωτεύουσες τάσεις) και αφετέρου στην τοπική κάμψη του στοιχείου λόγω των τοπικών κάθετων πιέσεων (τριτεύουσες τάσεις). Η αναπτυσσόμενη ορθή τάση, λόγω κάμψης της γάστρας σ_{hg} είναι αποτέλεσμα των κατακόρυφων καμπτικών ροπών M_{sw} και M_{wv-LC} , καθώς και της οριζόντιας καμπτικής ροπής M_{wh-LC} (διαξονική κάμψη). Από την άλλη μεριά, οι τριτεύουσες τάσεις υπεισέρχονται στα κριτήρια διαστασιολόγησης μέσω των συντελεστών καμπτικής καταπόνησης C_a , C_s , οι οποίοι συνδέουν τις πρωτεύουσες με τις τριτεύουσες τάσεις και τις υπερθέτουν.

ο Τοπικές κάθετες πιέσεις

Σε κάθε στοιχείο, ανάλογα με τη θέση στην οποία βρίσκεται, εφαρμόζονται τοπικές σχεδιαστικές πιέσεις P , οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε εξωτερικές πιέσεις της θάλασσας, αλλά και σε εσωτερικές πιέσεις του φορτίου. Για τον υπολογισμό τους οι κανόνες προδιαγράφουν καταστάσεις φόρτωσης σε συγκεκριμένο βύθισμα, μαζί με το αντίστοιχο σενάριο λειτουργίας, το οποίο καθορίζει αν οι πιέσεις αυτές περιλαμβάνουν μόνο στατική συνιστώσα (S) ή είναι αποτέλεσμα στατικής και δυναμικής συνιστώσας (S+D).

Για την εφαρμογή των διαφόρων σχεδιαστικών πιέσεων, η κατασκευή χωρίζεται σε επιμέρους τμήματα τα οποία έρχονται σε επαφή με ένα συγκεκριμένο περιβάλλον (θάλασσα, ξηρό φορτίο, έρμα) και το καθένα εξετάζεται σε διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης. Συγκεκριμένα το υπό μελέτη Bulk Carrier στην περιοχή της μέσης τομής χωρίζεται στα παρακάτω τμήματα:

- Εξωτερικό περίβλημα και εκτεθειμένο κατάστρωμα (External Shell & Exposed Deck)
- Δεξαμενές έρματος (Water Ballast Tanks)
- Χώρος ξηρού φορτίου (Bulk Cargo Hold)

Σημειώνεται ότι στην περιοχή αυτή δεν διαθέτει κάποια δεξαμενή μεταφοράς πετρελαίου και ότι το συγκεκριμένο αμπάρι δεν προορίζεται για φόρτωση έρματος σε κατάσταση βαρέος ερματισμού.

Τα κατασκευαστικά στοιχεία που ανήκουν σε κάθε ένα από τα παραπάνω τμήματα υπόκεινται σε διαφορετικές πιέσεις, οι οποίες καθορίζονται από διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης και συνοδεύονται από αντίστοιχες φορτίσεις γάστρας. Οι βασικές καταστάσεις φόρτωσης που αφορούν τα Bulk Carriers είναι πλήρης ομογενής φόρτωση στο μέγιστο βύθισμα, κατάσταση ερματισμού στο βύθισμα ερματισμού, ενώ στην περίπτωση που έχει χαρακτηρισμό κλάσης BC – A, εξετάζεται και η κατάσταση πλήρους φόρτωσης εναλλάξ στο μέγιστο βύθισμα. Επιπλέον, στην περίπτωση των Bulk Carriers, εξετάζεται και η κατάσταση κατάκλυσης του χώρου ξηρού φορτίου.

Στον πίνακα (5.15) συνοψίζονται οι καταστάσεις φόρτωσης που εξετάζονται στην παρούσα εργασία με το αντίστοιχο βύθισμα και τα αντίστοιχα σενάρια λειτουργίας που εξετάζονται για τον έλεγχο των επιμέρους τμημάτων της μέσης τομής, μαζί με τις επαγόμενες συνιστώσες των φορτίσεων για κάθε περίπτωση. Ο συνδυασμός της κατάστασης φόρτωσης με το σενάριο λειτουργίας, καθορίζουν και το σχεδιαστικό σετ φορτίσεων (Design Load Set), όπως προδιαγράφεται και από τους κανόνες στο εδάφιο {Pt1/Ch6/Sec2}.

Πίνακας 5.15: Εξεταζόμενες καταστάσεις για τον έλεγχο των επιμέρους τμημάτων

Item	Design Load Set	Load Components	Draft	Design Load	Loading Condition
External Shell & Exposed Deck	SEA – 1	$P_{ex} [P_S + P_W], P_D,$ $M_{sw}, M_{wv-LC},$ M_{wh-LC}	T_{SC}	S + D	Full Load
	SEA – 2	$P_{ex} [P_S], M_{sw-p}$	T_{SC}	S	
Water Ballast Tank	WB – 1	$P_{in} [P_{ls} + P_{ld}], M_{sw},$ M_{wv-LC}, M_{wh-LC}	T_{BAL}	S + D	Normal Ballast
	WB – 3	$P_{in} [P_{ls}], M_{sw-p}$	$0.25T_{SC}$	S	
Bulk Cargo Hold	BC – 1	$P_{in} [P_{bs} + P_{bd}], M_{sw},$ M_{wv-LC}, M_{wh-LC}	T_{SC}	S + D	Full Load Homogeneous
	BC – 2	$P_{in} [P_{bs}], M_{sw-p}$	-	S	
	BC – 5	$P_{in} [P_{bs} + P_{bd}], M_{sw},$ M_{wv-LC}, M_{wh-LC}	T_{SC}	S + D	Full Load Alternate
	BC – 6	$P_{in} [P_{bs}], M_{sw-p}$	-	S	
	FD – 1	$P_{in} [P_{fs} + P_{fd}],$ $M_{sw-f}, M_{wv-f-LC},$ $M_{wh-f-LC}$	T_{SC}	S + D	Flooded
	FD – 2	$P_{in} [P_{fs}], M_{sw-f}$	-	S	

Οι παραπάνω καταστάσεις φόρτωσης είναι αντιπροσωπευτικές των βασιικών λειτουργιών του υπό μελέτη Bulk Carrier. Εκτός από τις παραπάνω όμως, σημειώνεται ότι για Bulk Carriers με χαρακτηρισμό κλάσης BC – A οι κανόνες προδιαγράφουν επιπλέον και την εφαρμογή σχεδιαστικών φορτίσεων μέσω καταστάσεων μερικής φόρτωσης (Partially Filled) για το τμήμα του χώρου ξηρού φορτίου. Μια πλήρης μελέτης σαφώς θα πρέπει να περιλαμβάνει και αυτές τις καταστάσεις, που στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δεν εξετάστηκαν. Ωστόσο για το συγκεκριμένο Case study οι καταστάσεις αυτές που δεν μοντελοποιήθηκαν, δεν κρίνονται δυσμενέστερες από άποψη διαστασιολόγησης από το πρόγραμμα του Γαλλικού Νηογνώμονα Mars2000.

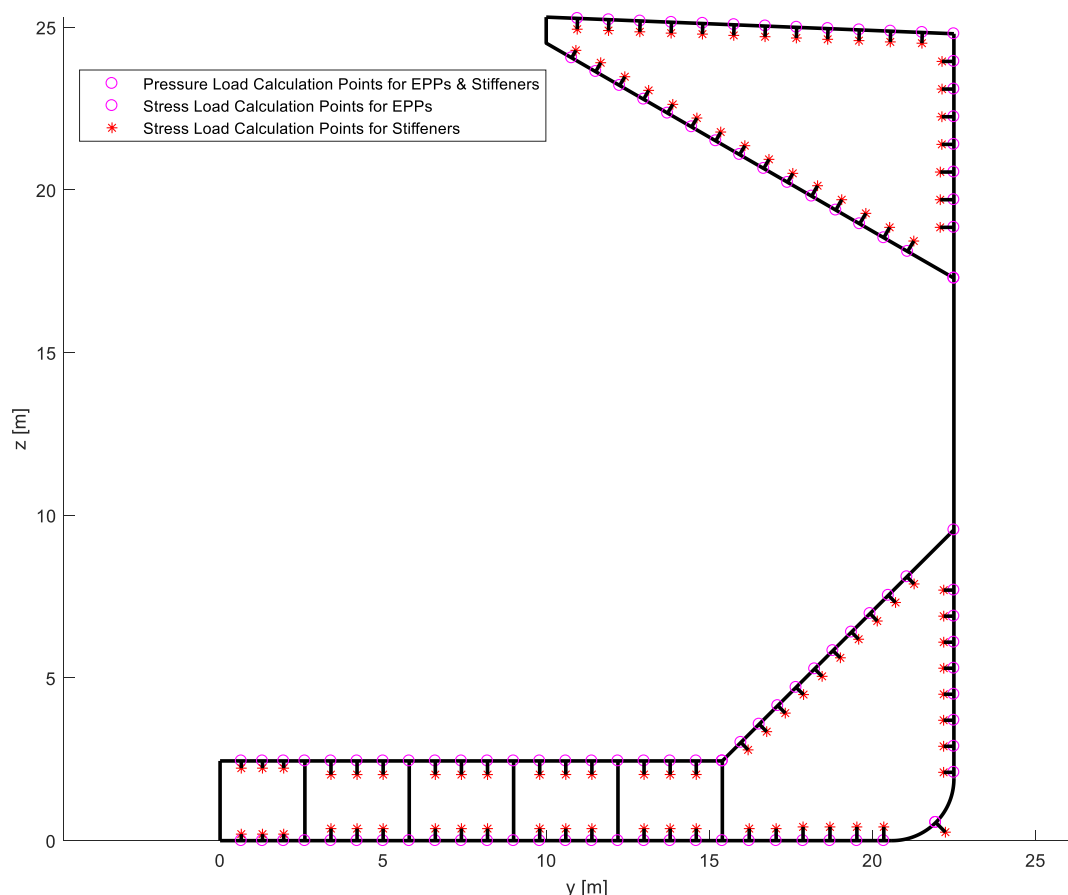
Για κάθε κατάσταση φόρτωσης του πίνακα (5.15) μοντελοποιούνται τόσο τα στατικά σενάρια (S), όσο και τα δυναμικά (S+D). Όσον αφορά τα δυναμικά σενάρια, οι δυναμικές συνιστώσες υπολογίζονται για κάθε περίπτωση δυναμικής κατάστασης (Dynamic Load Case) που αντιστοιχεί σε διαφορετικό συνδυασμό καταπόνησης (πίεσεις & ορθές τάσεις) για κάθε στοιχείο της κατασκευής και τελικά ελέγχονται τα κριτήρια αποδοχής AC – SD. Τα στατικά σενάρια συμπεριλαμβάνονται προκειμένου να διαπιστωθεί εάν οι απαιτήσεις των αντίστοιχων κριτηρίων αποδοχής AC – S είναι αυστηρότερες, παρόλο που οι επαγόμενες φορτίσεις είναι εν γένει πιο ευνοϊκές.

Όλες οι παραπάνω καταστάσεις που εξετάζονται απαιτούν μεγάλο όγκο υπολογισμών, καθώς και συγκρίσεων, προκειμένου να προκύψει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο. Για το σκοπό αυτό κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη κώδικα σε περιβάλλον MATLAB, που αποσκοπεί στην αυτοματοποίηση όλης της διαδικασίας ελέγχου, μέσω της κατασκευαστικής μοντελοποίησης τυπικών Bulk Carriers μονού τοιχώματος. Η ανάπτυξη του κώδικα έγινε με οδηγό το πρόγραμμα του Γαλλικού Νηογνώμονα MARS2000 για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων και την επιβεβαίωση της μεθοδολογίας που ακολουθείται.

5.9.1 Μοντελοποίηση

Στο σχήμα (5.11) απεικονίζεται η μοντελοποίηση της μέσης τομής στο περιβάλλον του MATLAB, η οποία πραγματοποιείται με παραμέτρους τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής και συγκεκριμένα το πλάτος, το κοίλο, το ύψος του διπυθμένου, την ακτίνα του Bilge, την κυρτότητα του καταστρώματος και τα ίχνη των πλευρικών δεξαμενών. Επιπλέον, απεικονίζεται και η διακριτοποίηση της μέσης τομής σε στοιχειώδη ελάσματα (Elementary Plate Panels) μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών και σταθμίδων, με βάση τις θέσεις και τις ισαποστάσεις τους.

Όλα τα απαραίτητα δεδομένα των στοιχειωδών ελασμάτων και των ενισχυτικών εισάγονται στο περιβάλλον του MATLAB, μέσω αρχείου Excel το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες όπως το υλικό, το πάχος (ολικό και καθαρό) και τις διάφορες γεωμετρικές ιδιότητες. Επιπλέον, περιλαμβάνει και τα σημεία υπολογισμού των πιέσεων και των ορθών τάσεων σε κάθε στοιχείο. Συγκεκριμένα, στο σχήμα (5.11) με «o» συμβολίζονται τα σημεία υπολογισμού των πιέσεων τόσο για τα ελάσματα, όσο και για τα ενισχυτικά, ενώ επίσης αποτελούν και σημεία υπολογισμού των ορθών τάσεων για τα ελάσματα. Από την άλλη, με «*» συμβολίζονται τα σημεία υπολογισμού των ορθών τάσεων μόνο για τα ενισχυτικά, τα οποία εξαρτώνται από το ύψος του ενισχυτικού ως προς το συνεργαζόμενο έλασμα (βλ. Κεφάλαιο 3). Οι πίνακες με όλα τα δεδομένα των στοιχείων που εισάγονται στο MATLAB βρίσκονται αναλυτικά στο Παράρτημα.



Σχήμα 5.11: Μοντελοποίηση μέσης τομής του υπό μελέτη πλοίου στο περιβάλλον MATLAB και διακριτοποίηση της διατομής σε στοιχειώδη ελάσματα και ενισχυτικά

Στη συνέχεια, εξετάζονται ξεχωριστά όλα τα Load Sets που αναφέρονται στον πίνακα (5.15) για τα επιμέρους τμήματα και με βάση αυτά υπολογίζονται οι σχεδιαστικές φορτίσεις των κατασκευαστικών στοιχείων που ανήκουν σε κάθε τμήμα.

Για την μείωση της περιπλοκότητας και των επιμέρους συγκρίσεων, κάθε κατασκευαστικό στοιχείο τοποθετήθηκε σε ένα μόνο τμήμα, το οποίο αποτελεί και το αντιπροσωπευτικό τμήμα για τον έλεγχο της αντοχής του. Για παράδειγμα, το έλασμα του εσωτερικού πυθμένα αποτελεί επίσης όριο δεξαμενής έρματος του διπυθμένου, ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να τοποθετηθεί απευθείας μόνο στην κατηγορία του χώρου ξηρού φορτίου. Αυτή η επιλογή επιβεβαιώθηκε και με τη χρήση του προγράμματος Mars2000, το οποίο ανέδειξε τα επιλεχθέντα τμήματα για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο ως δυσμενέστερα με τον έλεγχο των αντίστοιχων καταστάσεων φόρτωσης. Με βάση αυτή την θεώρηση αυτή λοιπόν, τα κατασκευαστικά στοιχεία καταχωρούνται στα επιμέρους τμήματα όπως παρουσιάζεται παρακάτω και ελέγχονται τα αντίστοιχα σχεδιαστικά σετ φορτίσεων (Load Sets).

- Τμήμα Εξωτερικού Περιβλήματος – Load Sets SEA – 1 & SEA – 2
 - Εξωτερικός πυθμένας
 - Έλασμα Bilge
 - Εξωτερικά πλευρικά τοιχώματα
 - Ανώτατο κατάστρωμα
- Τμήμα Χώρου Ξηρού Φορτίου – Load Sets BC – 1, BC – 2, BC – 5, BC – 6, FD – 1, FD – 2
 - Εσωτερικός πυθμένας
 - Έλασμα κάτω πλευρικής δεξαμενής (Hopper plate)
- Τμήμα Δεξαμενής Έρματος – Load Sets WB – 1 & WB – 3
 - Έλασμα άνω πλευρικής δεξαμενής (Topside plate)

Διαδικασία

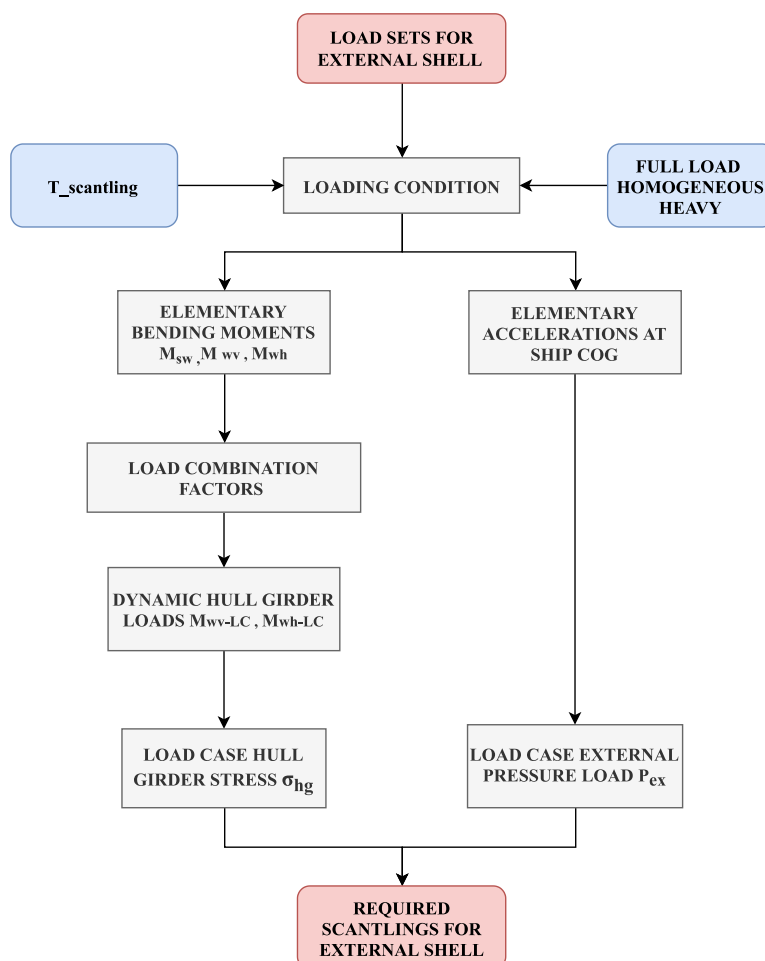
Για τον υπολογισμό των παραπάνω Load Sets, ακολουθείται η εξής διαδικασία:

1. Υπολογισμός κινήσεων και επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του πλοίου
2. Υπολογισμός κατακόρυφων και οριζόντιων σχεδιαστικών καμπτικών ροπών (Elementary Bending Moments)
3. Υπολογισμός συντελεστών συνδυαστικών φορτίσεων (Load Combination Factors), για τον έλεγχο των δυναμικών καταστάσεων φόρτισης
4. Υπολογισμός δυναμικών καμπτικών ροπών (Dynamic Hull Girder Loads) για κάθε δυναμική κατάσταση
5. Υπολογισμός τοπικών επιταχύνσεων του φορτίου για τις διάφορες δυναμικές καταστάσεις, σύμφωνα με τους συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που υπολογίστηκαν.
6. Υπολογισμός εσωτερικών πιέσεων, με βάση τις επιταχύνσεις του κέντρου βάρους του φορτίου
7. Υπολογισμός εξωτερικών πιέσεων για κάθε δυναμική κατάσταση
8. Υπολογισμός αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων λόγω κάμψης της γάστρας, για τις διάφορες δυναμικές καταστάσεις
9. Έλεγχος περιγραφικών απαιτήσεων για τα ελάσματα και τα ενισχυτικά και προσδιορισμός της δυσμενέστερης καταστάσεις φόρτωσης και δυναμικής κατάστασης για την οποία επικρατεί η μεγαλύτερη απαίτηση.

5.10 Φορτίσεις και Απαιτήσεις Στοιχείων Εξωτερικού Περιβλήματος

Για τον έλεγχο των στοιχείων του εξωτερικού περιβλήματος, εξετάζονται τα Load Sets: **SEA – 1** και **SEA – 2** του πίνακα (5.15). Στο σχήμα (5.12) περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των φορτίσεων σε κάθε κατάσταση. Συγκεκριμένα, για την κατάσταση SEA – 1, η οποία αποτελεί σενάριο δυναμικών φορτίσεων (S+D), υπολογίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- Σχεδιαστικές κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{sw-h} , M_{sw-s} και M_{wv-h} , M_{wv-s} για συνθήκες κανονικής πλεύσης (Seagoing)
- Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων για λόγο βυθίσματος $f_T = 1$
- Δυναμικές φορτίσεις γάστρας M_{wv-LC} και M_{wh-LC} για τις επιμέρους δυναμικές καταστάσεις φόρτισης
- Κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για την κατάσταση Full Load Homogeneous Heavy
- Εξωτερικές πιέσεις $P_{ex} = P_S + P_W$ και P_D , για τις επιμέρους δυναμικές καταστάσεις φόρτισης



Σχήμα 5.12: Διαδικασία υπολογισμού των φορτίσεων για τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων – Load Based του εξωτερικού περιβλήματος

Για την κατάσταση SEA – 2, η οποία αποτελεί σενάριο στατικής φόρτισης (S) υπολογίζονται μόνο οι εξής παράμετροι:

- Σχεδιαστικές κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{sw-p-h} και M_{sw-p-s} , για συνθήκες Harbour
- Εξωτερικές υδροστατικές πιέσεις $P_{ex} = P_S$

5.10.1 Υπολογισμός Κινήσεων και Επιταχύνσεων του Πλοίου

Σε πρώτο στάδιο υπολογίζονται οι κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η διαδικασία αυτή, στην προκειμένη περίπτωση δεν πραγματοποιείται για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων κάποιου φορτίου, αλλά για τον υπολογισμό των πιέσεων λόγω κυματισμού για τη δυναμική κατάσταση BSR, μέσω της απόκρισης του πλοίου σε διατοιχισμό. Στον πίνακα (5.16) συνοψίζονται τα αποτελέσματα για την κατάσταση φόρτωσης Full Load Homogeneous Heavy, στο βύθισμα αντοχής $T_{sc} = 18.3 \text{ m}$.

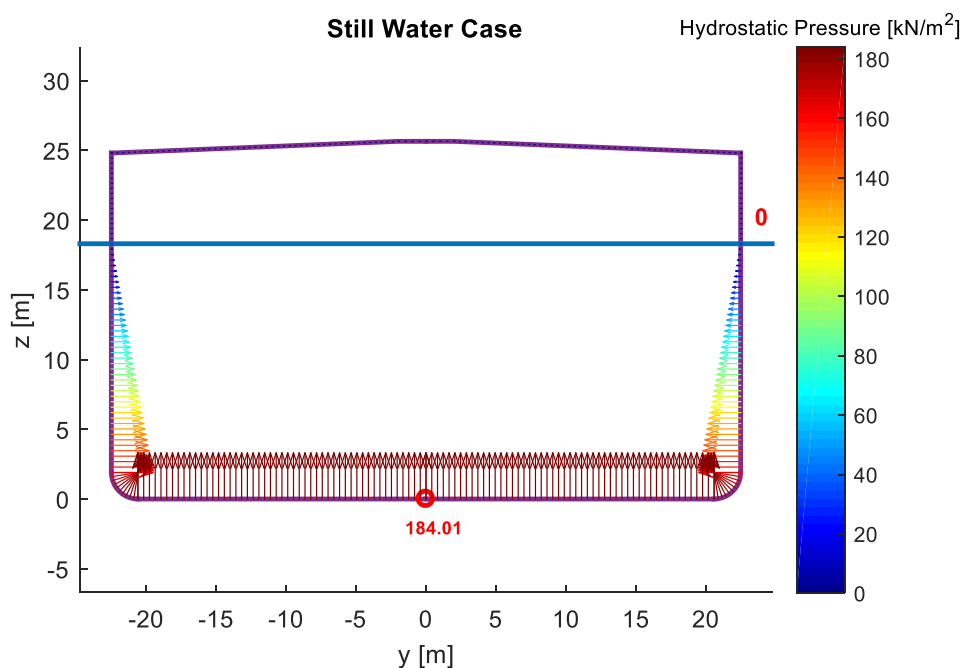
Πίνακας 5.16: Κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του υπό μελέτη πλοίου για την κατάσταση SEA – 1

Homogeneous Heavy cargo 18.300	
Surge acceleration	0.599 m/s ²
Sway acceleration	0.899 m/s ²
Heave acceleration	2.997 m/s ²
Roll acceleration	0.090 m/s ²
Roll amplitude	22.083 deg
Roll period	13.000 s
Pitch acceleration	0.024 m/s ²
Pitch amplitude	6.990 deg
Pitch period	14.617 s

5.10.2 Υπολογισμός Τοπικών Εξωτερικών Φορτίσεων

Παρακάτω υπολογίζονται οι κατανομές της υδροστατικής πίεσης P_s και της (ψευδοστατική) πίεσης λόγω κυματισμού P_w , για όλες τις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4 στο βύθισμα αντοχής $T_{sc} = 18.3 \text{ m}$ και στη διαμήκη θέση $f_{xl} = 0.5$. Υπενθυμίζεται ότι η δεξιά πλευρά ($x > 0$) είναι η Starboard, ενώ η αριστερή πλευρά ($x < 0$) είναι η Port.

5.10.2.1 Κατανομή Υδροστατικής Πίεσης P_s

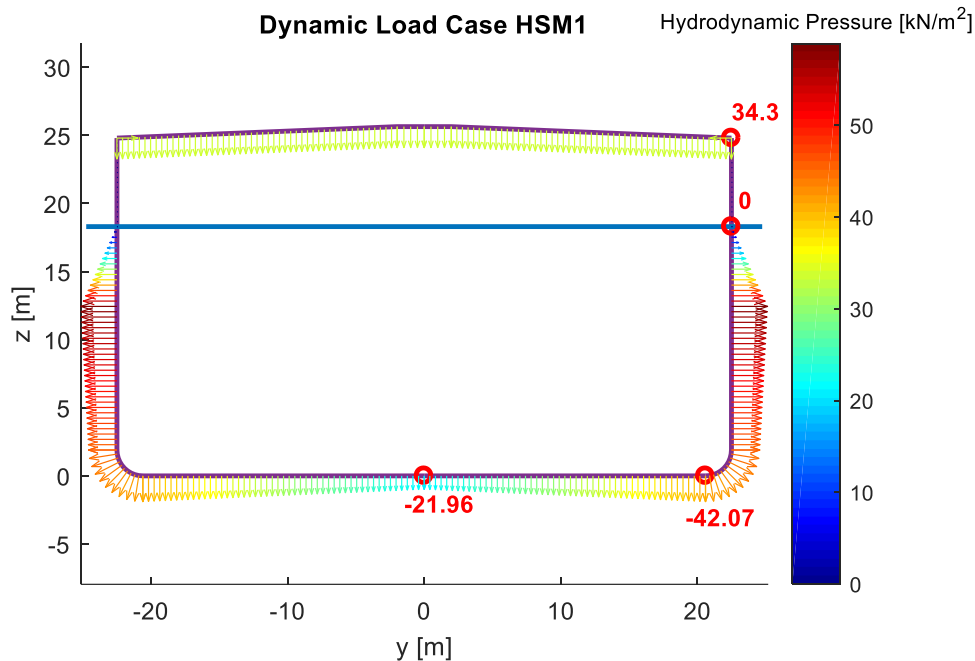


Σχήμα 5.13: Κατανομή υδροστατικής πίεσης στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3 \text{ m}$

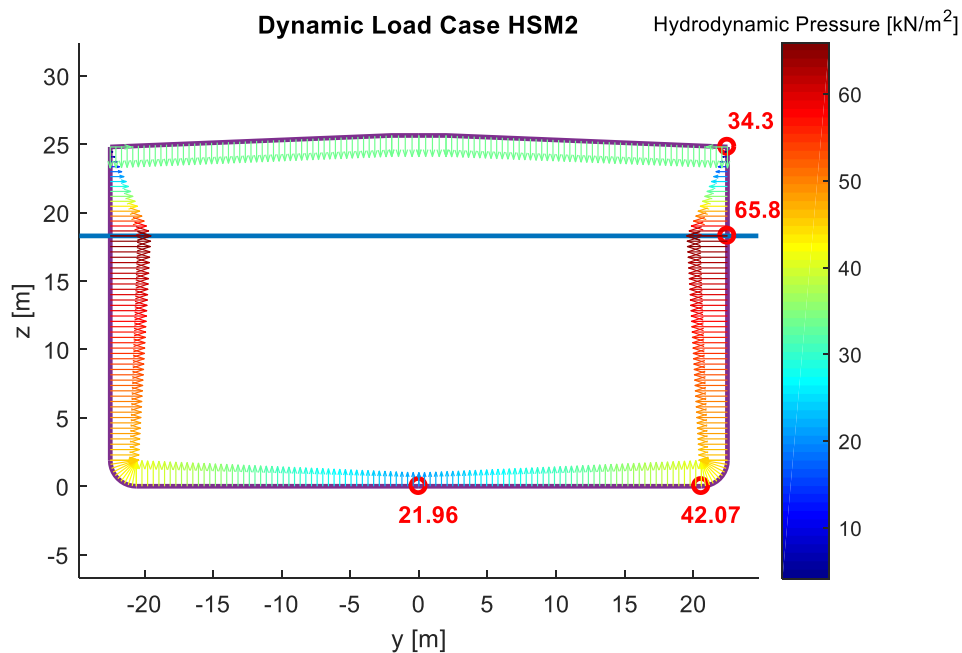
5.10.2.2 Κατανομή Πίεσης λόγω Κυματισμού P_w

Πίνακας 5.17: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών πίεσης λόγω κυματισμού για την δυναμική κατάσταση HSM

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	f_h	λ [m]	k_a	k_p
HSM	0.5	1.05	1.00	0.9	1.65	333.6	1	1



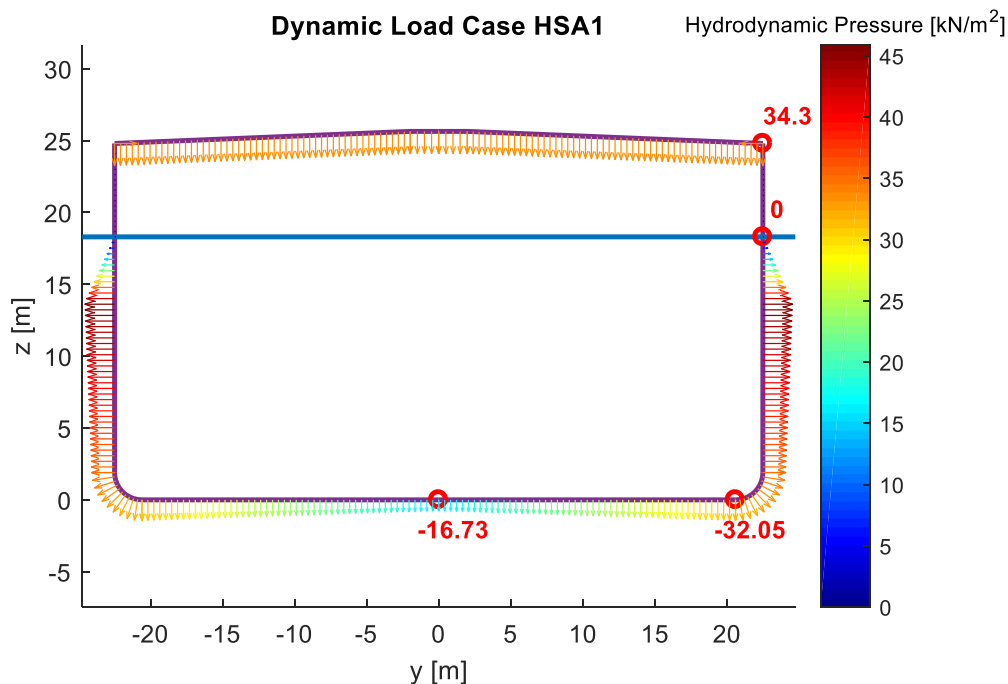
Σχήμα 5.14: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού HSM – 1 στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m. Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται ξεχωριστά, με βάση την ελάχιστη τιμή $P_{D-\min} = 34.3$ kN/m²



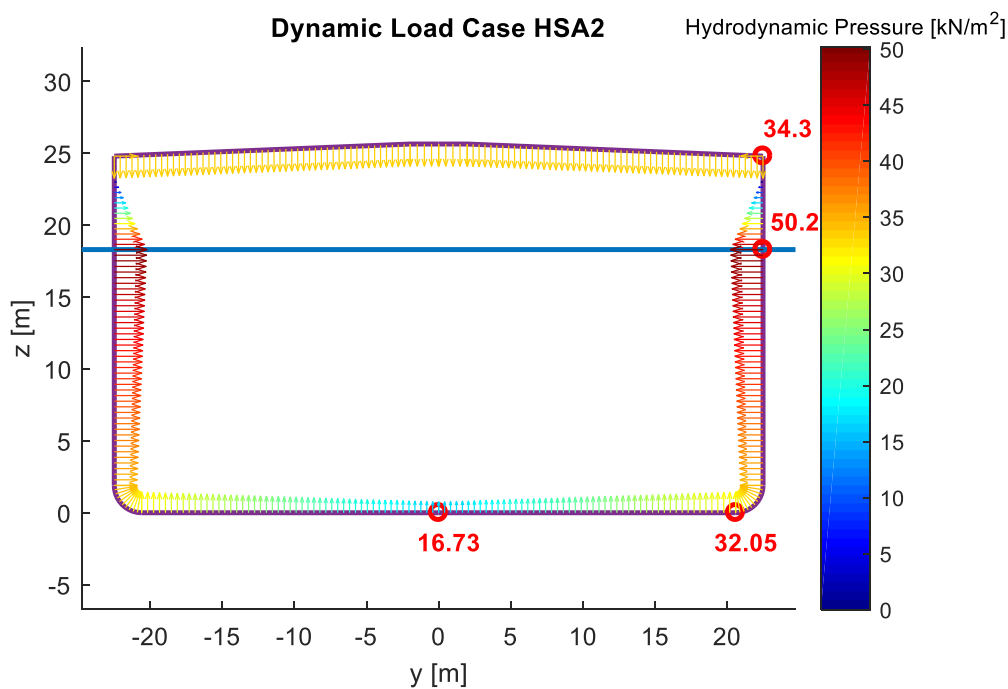
Σχήμα 5.15: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού HSM – 2 στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m. Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται ξεχωριστά, με βάση την ελάχιστη τιμή $P_{D-\min} = 34.3$ kN/m²

Πίνακας 5.18: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών υδροδυναμικής πίεσης για την δυναμική κατάσταση HSA

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	f_h	λ [m]	k_a	k_p
HSA	0.5	1.00	1.00	0.9	1.32	333.6	1	1



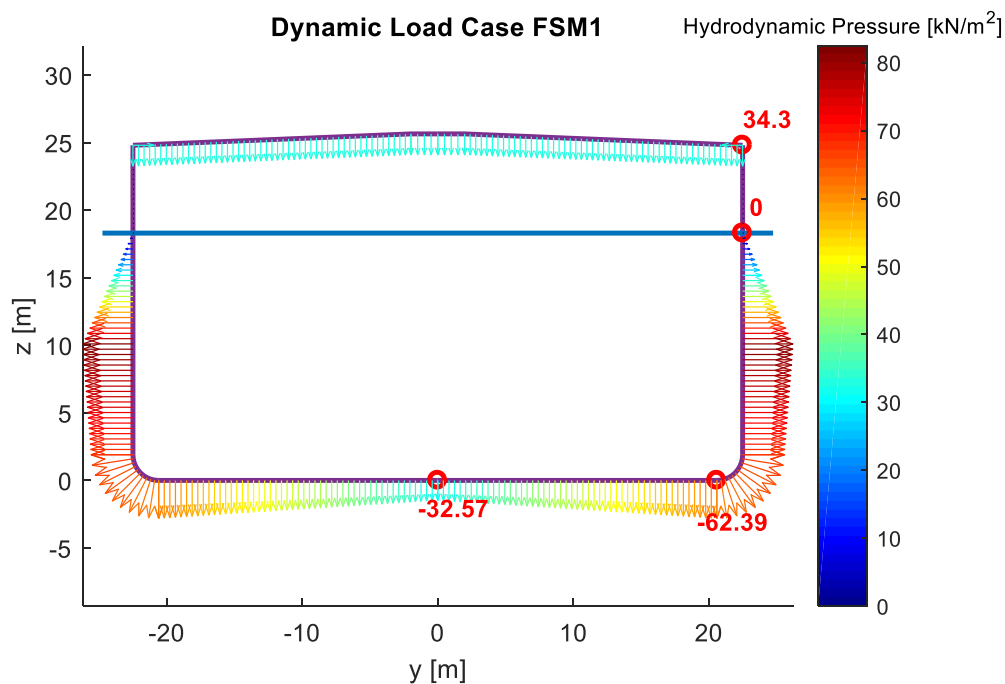
Σχήμα 5.16: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού HSA – 1 στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m . Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβρογή του (Green Seas) και υπολογίζεται ξεχωριστά, με βάση την ελάχιστη τιμή $P_{D-\min} = 34.3$ kN/m²



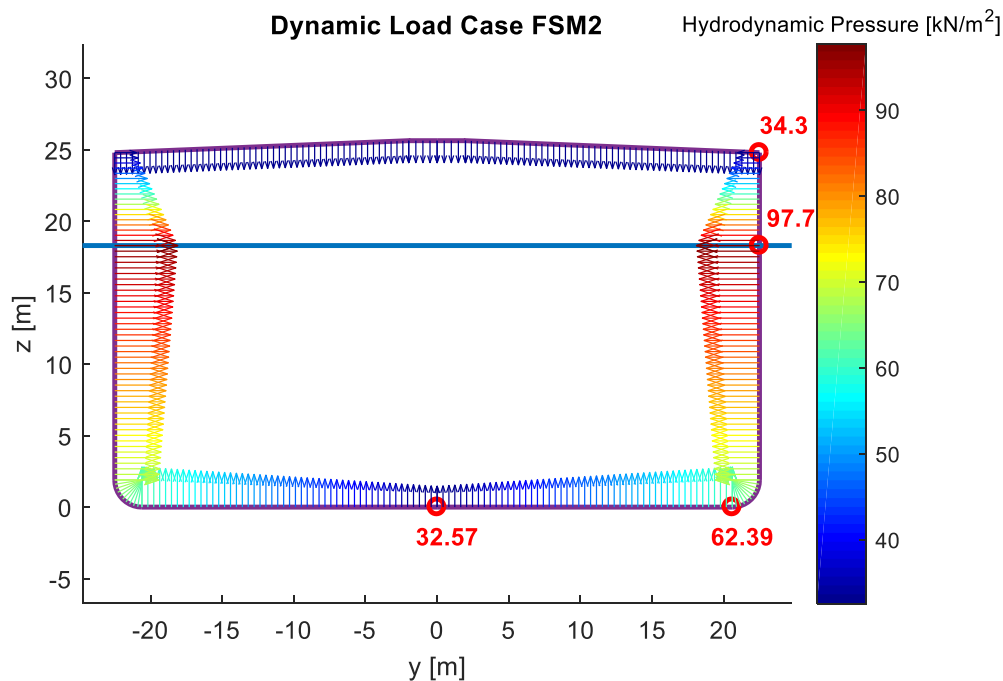
Σχήμα 5.17: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού HSA – 2 στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m . Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβρογή του (Green Seas) και υπολογίζεται ξεχωριστά, με βάση την ελάχιστη τιμή $P_{D-\min} = 34.3$ kN/m²

Πίνακας 5.19: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών υδροδυναμικής πίεσης για την δυναμική κατάσταση FSM

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	f_h	λ [m]	k_a	k_p
FSM	0.5	1.05	1.00	0.9	2.6	278	1	1



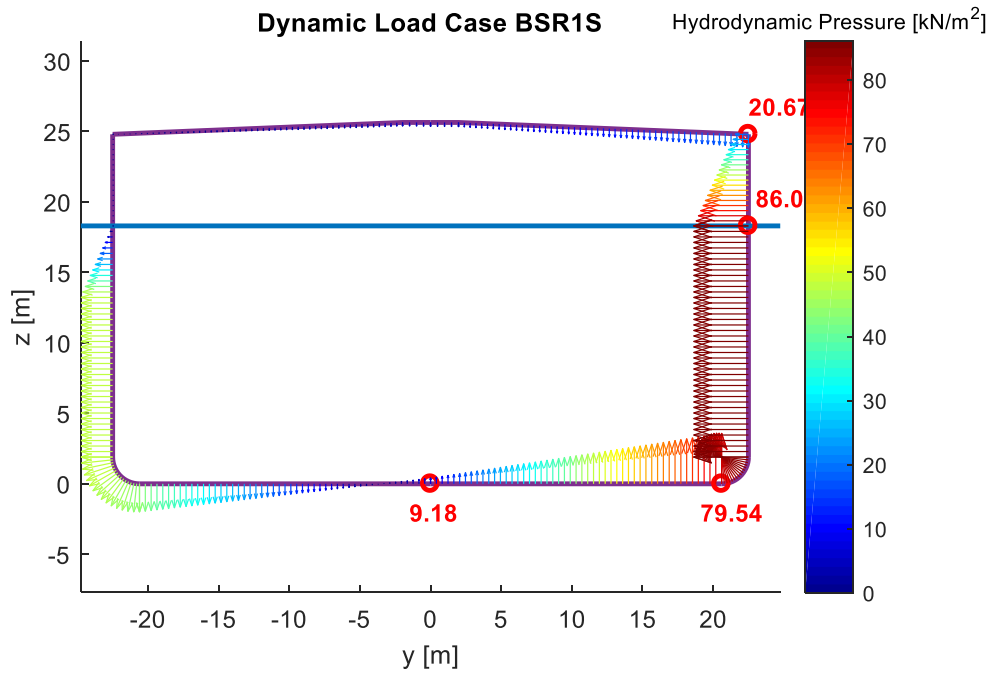
Σχήμα 5.18: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού FSM – 1 στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m. Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται ξεχωριστά, με βάση την ελάχιστη τιμή $P_{D-\min} = 34.3$ kN/m²



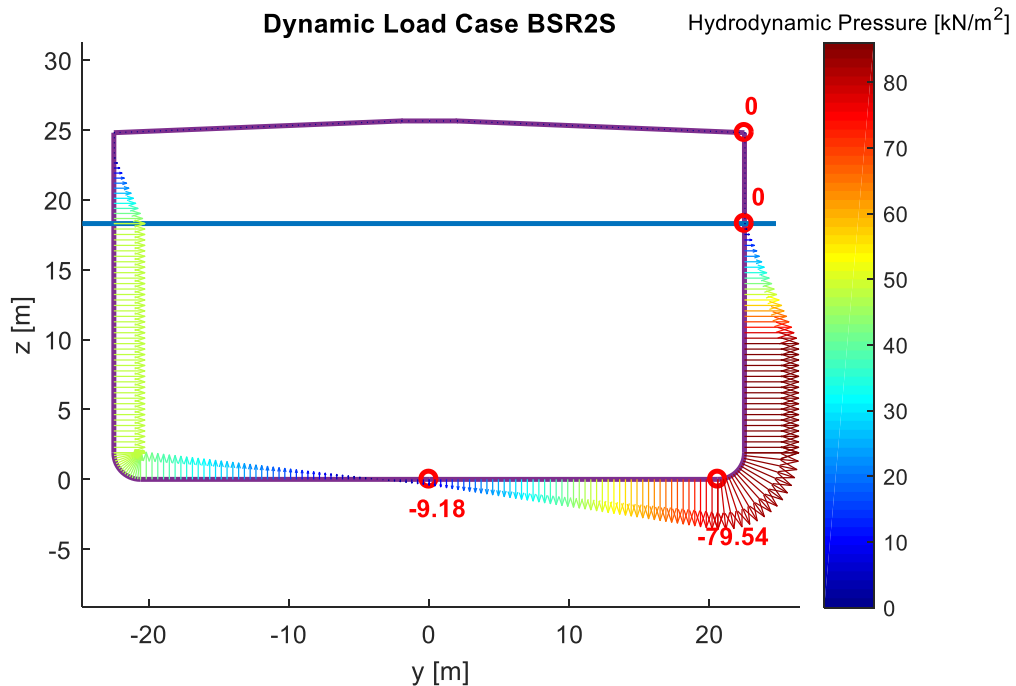
Σχήμα 5.19: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού FSM – 2 στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m. Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται ξεχωριστά, με βάση την ελάχιστη τιμή $P_{D-\min} = 34.3$ kN/m²

Πίνακας 5.20: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών υδροδυναμικής πίεσης για την δυναμική κατάσταση BSR

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	Roll Period [sec]	Roll Angle [deg]	λ [m]
BSR	0.5	0.80	1.00	1	13.0	22.083	263.84



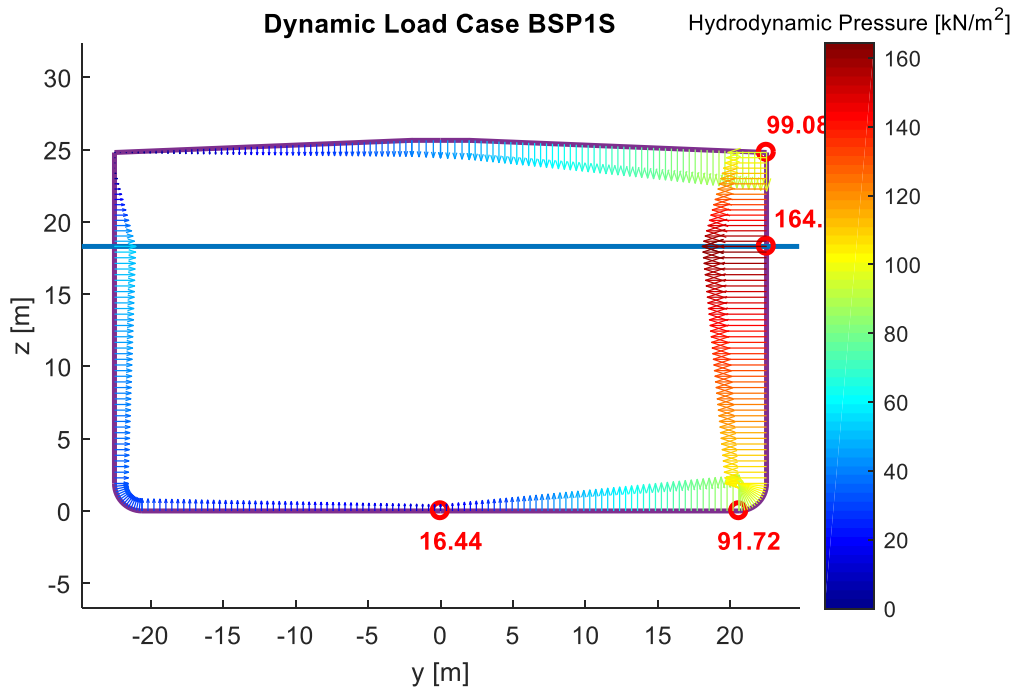
Σχήμα 5.20: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού BSR – 1S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m . Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατώστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται με βάση την πίεση κυματισμού στην άκρη του καταστρώματος



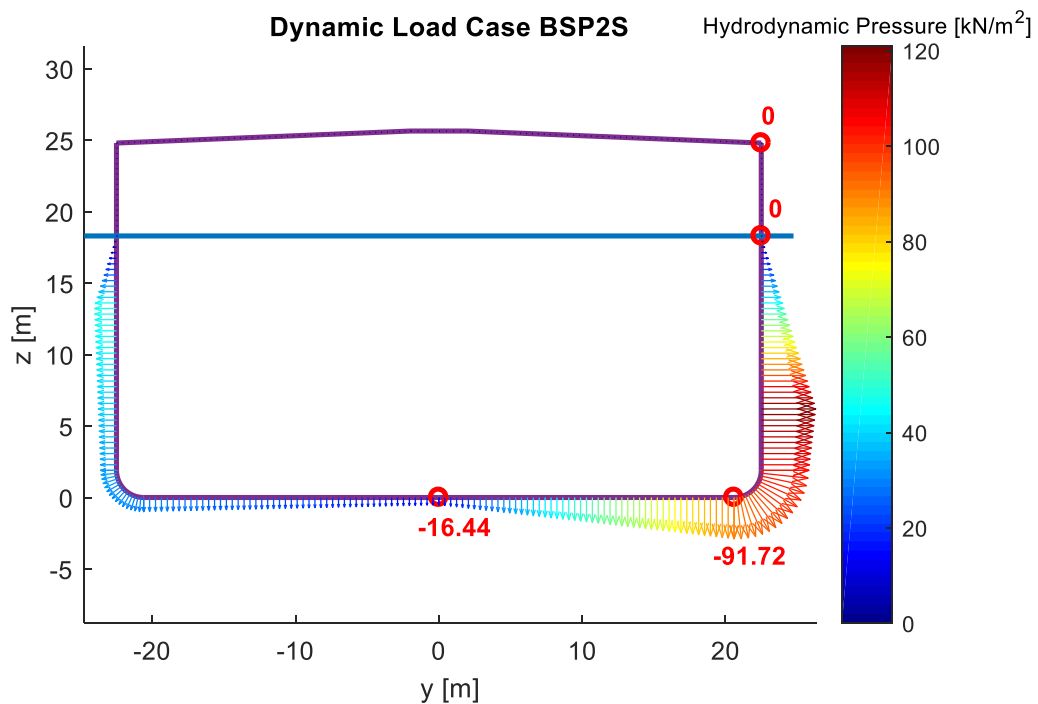
Σχήμα 5.21: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού BSR – 2S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m

Πίνακας 5.21: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών υδροδυναμικής πίεσης για την δυναμική κατάσταση BSP

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	λ [m]
BSP	0.5	0.80	1.00	0.8	166.8



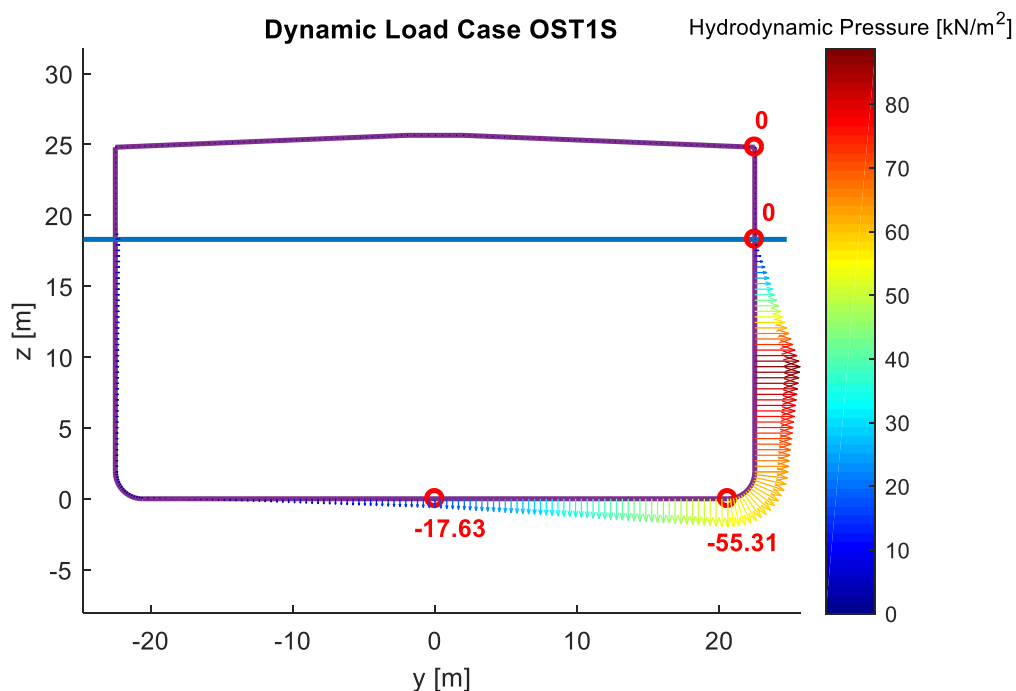
Σχήμα 5.22: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού BSP – 1S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m. Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται με βάση την πίεση κυματισμού στην άκρη του καταστρώματος



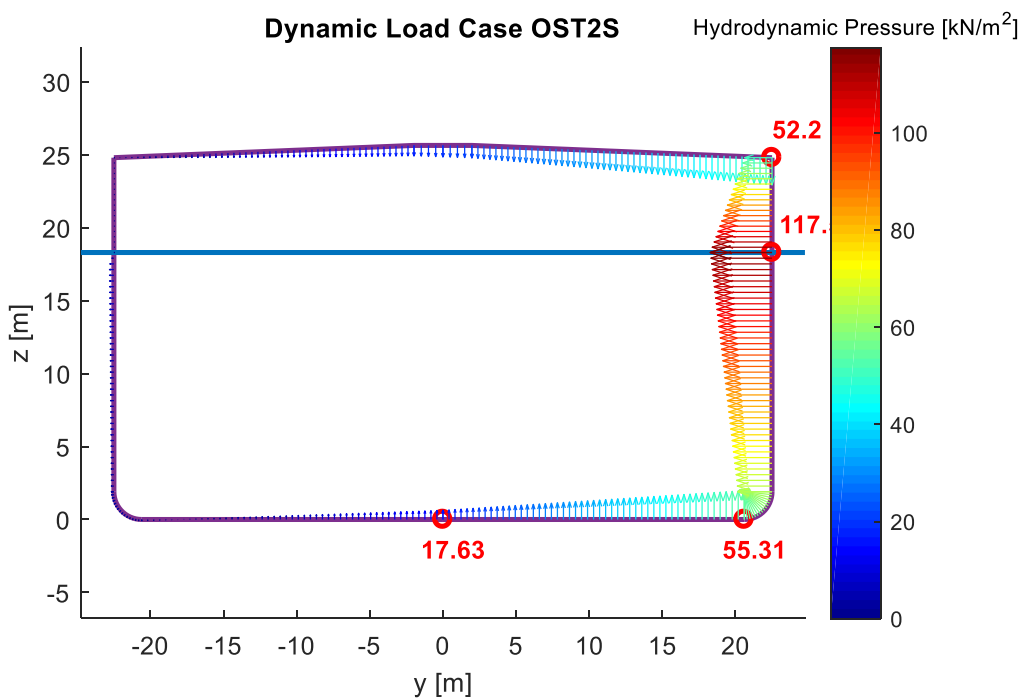
Σχήμα 5.23: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού BSP – 2S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m

Πίνακας 5.22: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών υδροδυναμικής πίεσης για την δυναμική κατάσταση OST

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	λ [m]	k_a	k_p
OST	0.5	1.00	1.00	0.8	125.1	1	$f(y)$



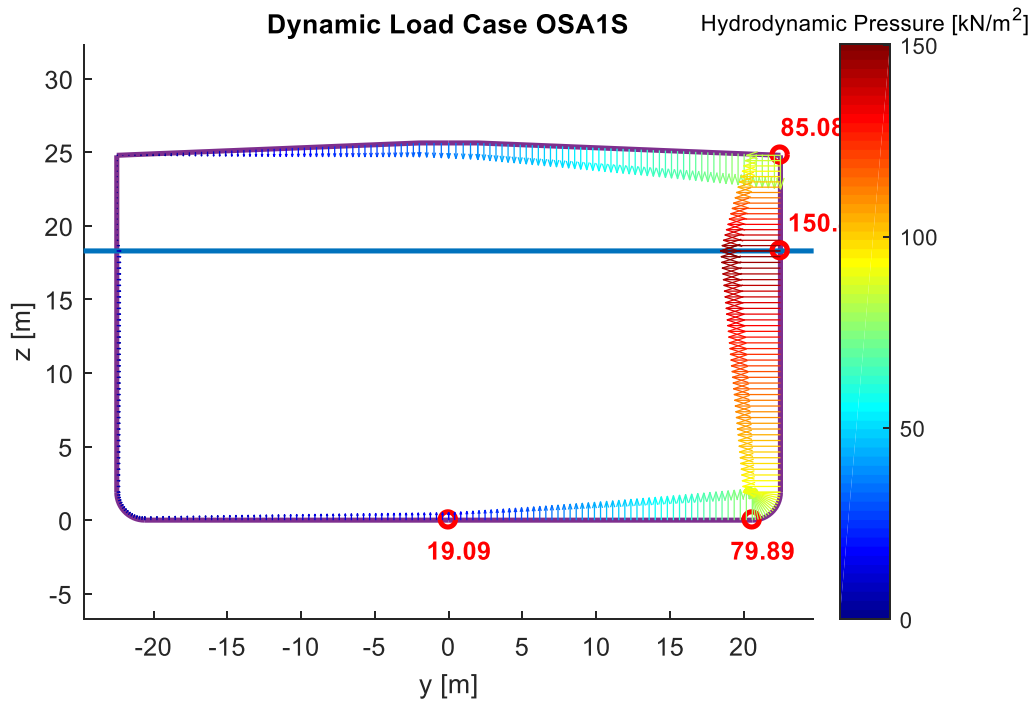
Σχήμα 5.24: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού OST – 1S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m



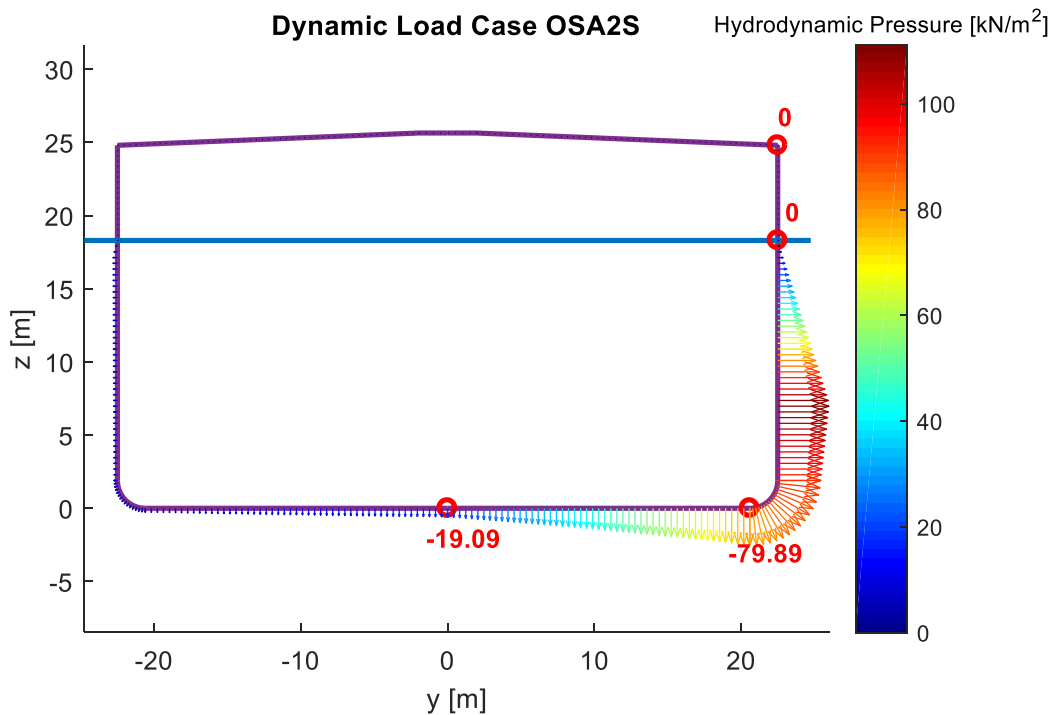
Σχήμα 5.25: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού OST – 2S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m . Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται με βάση την πίεση κυματισμού στην άκρη του καταστρώματος

Πίνακας 5.23: Παράμετροι υπολογισμού κατανομών υδροδυναμικής πίεσης για την δυναμική κατάσταση OSA

EDW	f_{xL}	f_{β}	f_p	f_{nl}	λ [m]	k_a	k_p
OSA	0.5	1.00	1.00	0.8	194.6	$f(y)$	$f(y)$



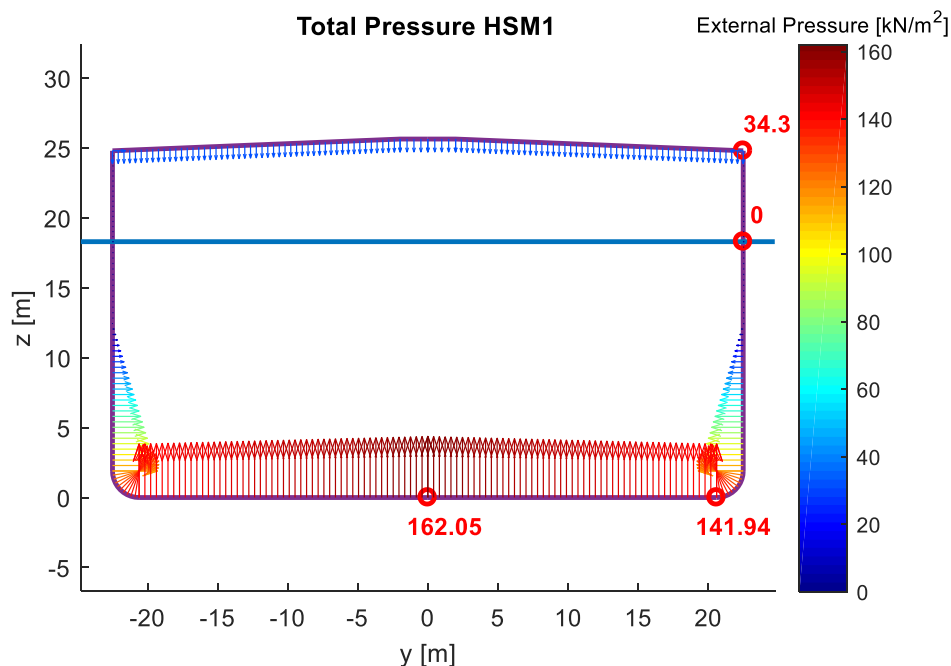
Σχήμα 5.26: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού OSA – 1S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m. Η προκύπτουσα δυναμική πίεση στο κατάστρωμα P_D οφείλεται στη διαβροχή του (Green Seas) και υπολογίζεται με βάση την πίεση κυματισμού στην άκρη του καταστρώματος



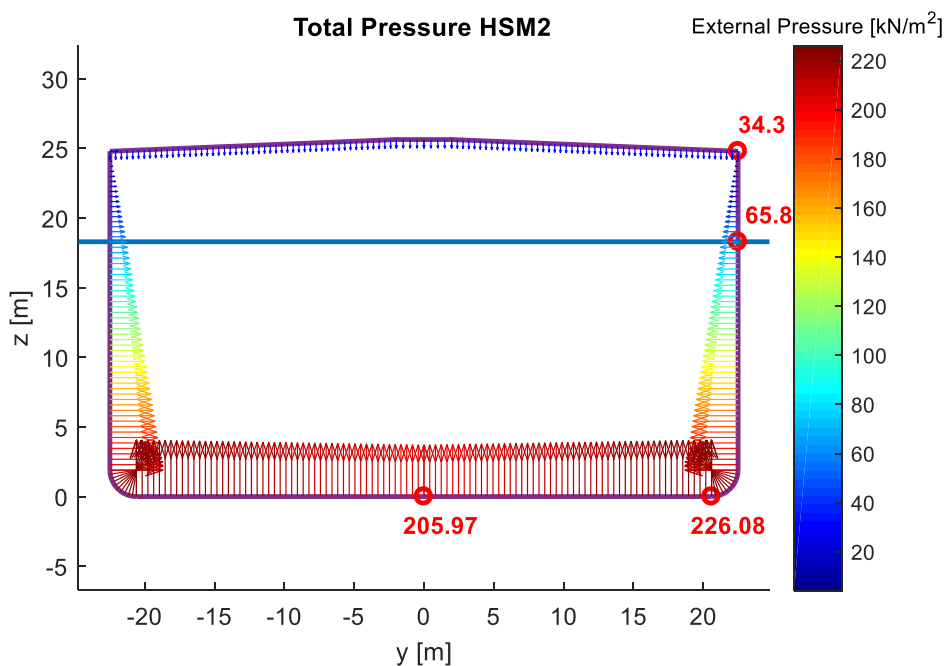
Σχήμα 5.27: Κατανομή πίεσης λόγω κυματισμού OSA – 2S στο βύθισμα $T_{sc} = 18.3$ m

5.10.2.3 Κατανομή Συνολικής Εξωτερικής Πίεσης P_{ex}

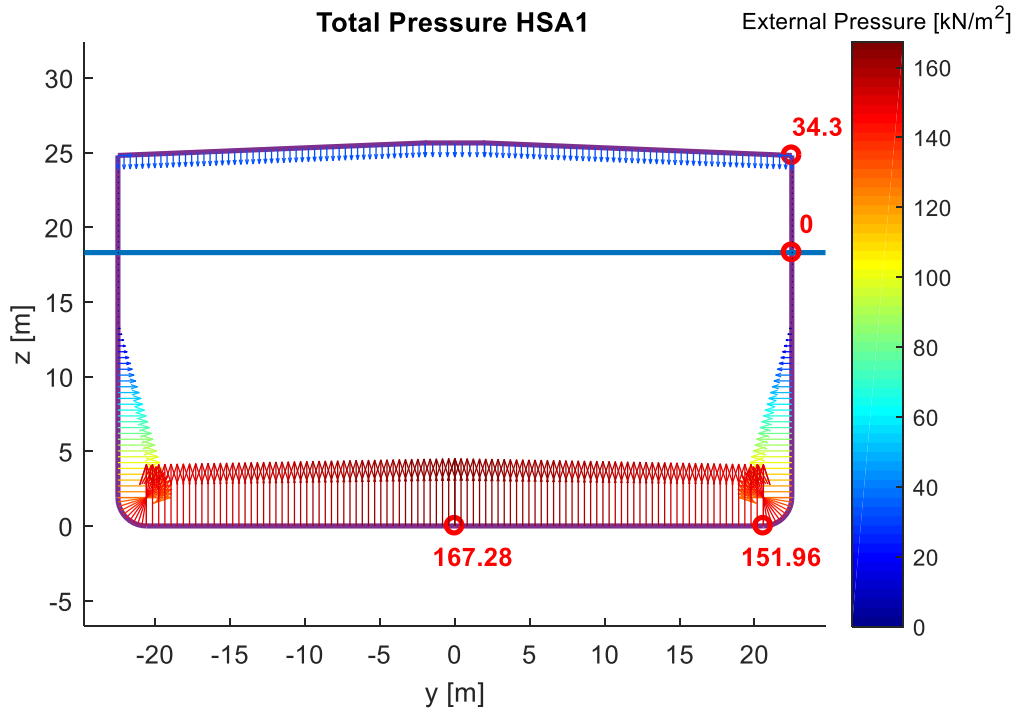
Αθροίζοντας αλγεβρικά την κατανομή της υδροστατικής πίεσης με την κατανομή της ελάχιστης δυναμικής (ψευδοστατικής) πίεσης λόγω κυματισμού, προκύπτουν οι κατανομές συνολικής εξωτερικής πίεσης λόγω θάλασσας, όπως παρουσιάζονται στα σχήματα (5.28) έως (5.41).



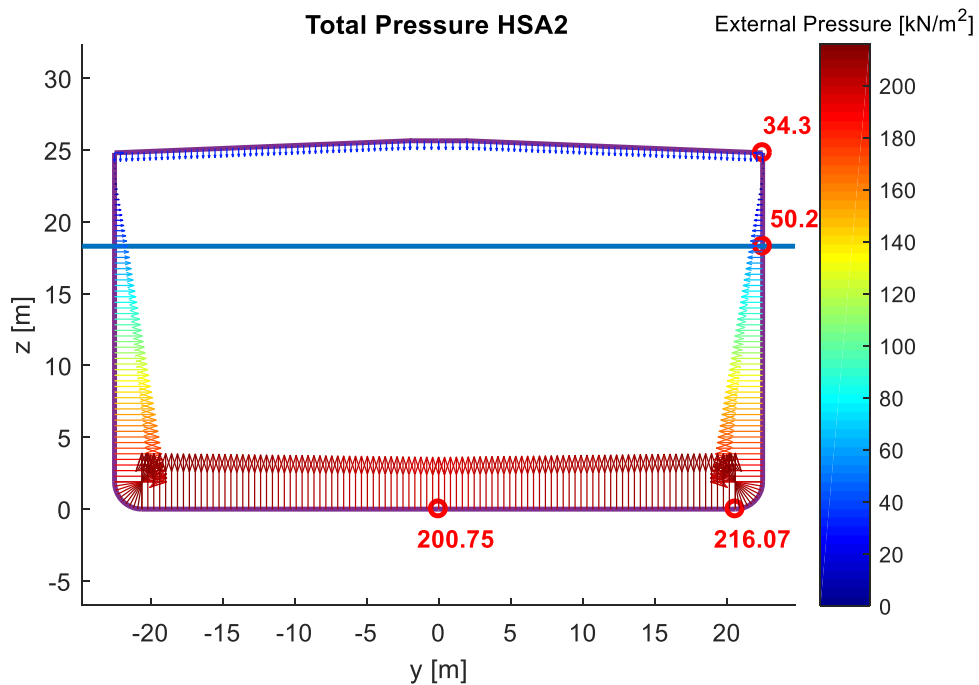
Σχήμα 5.28: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση HSM – 1. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_w| = 13.6 \% P_{Total}$ με $|P_w| = 11.9 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $|P_w| = 29.6 \% P_{Total}$ με $|P_w| = 22.8 \% P_S$ στο άκρο του



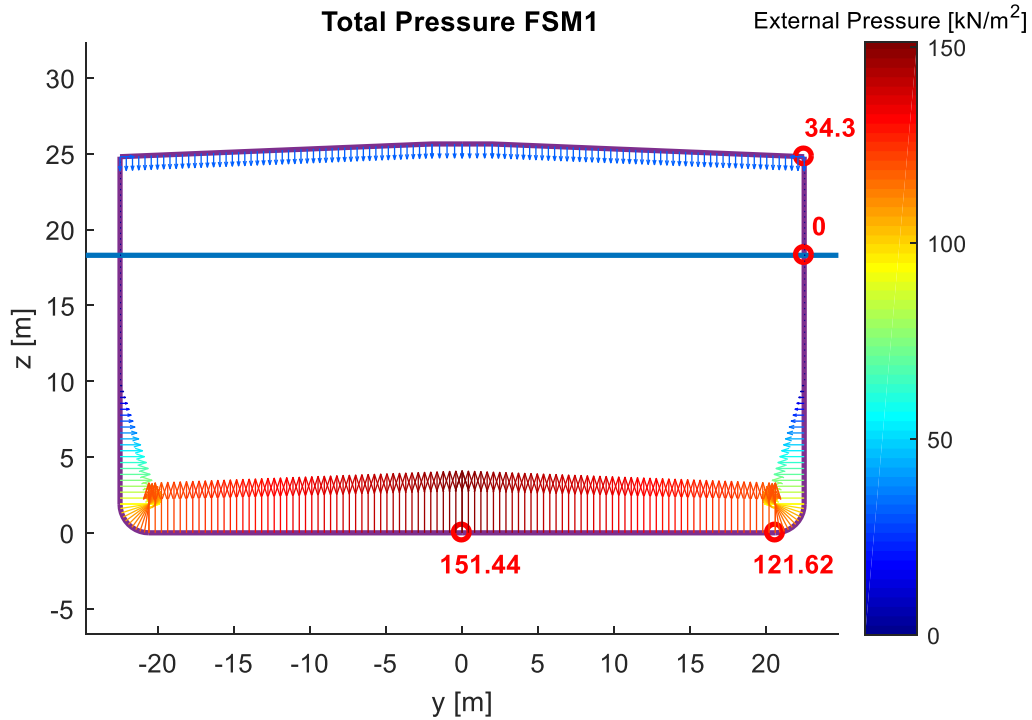
Σχήμα 5.29: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση HSM – 2. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_w = 10.7 \% P_{Total}$ με $P_w = 11.9 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_w = 18.6 \% P_{Total}$ με $P_w = 22.8 \% P_S$ στο άκρο του



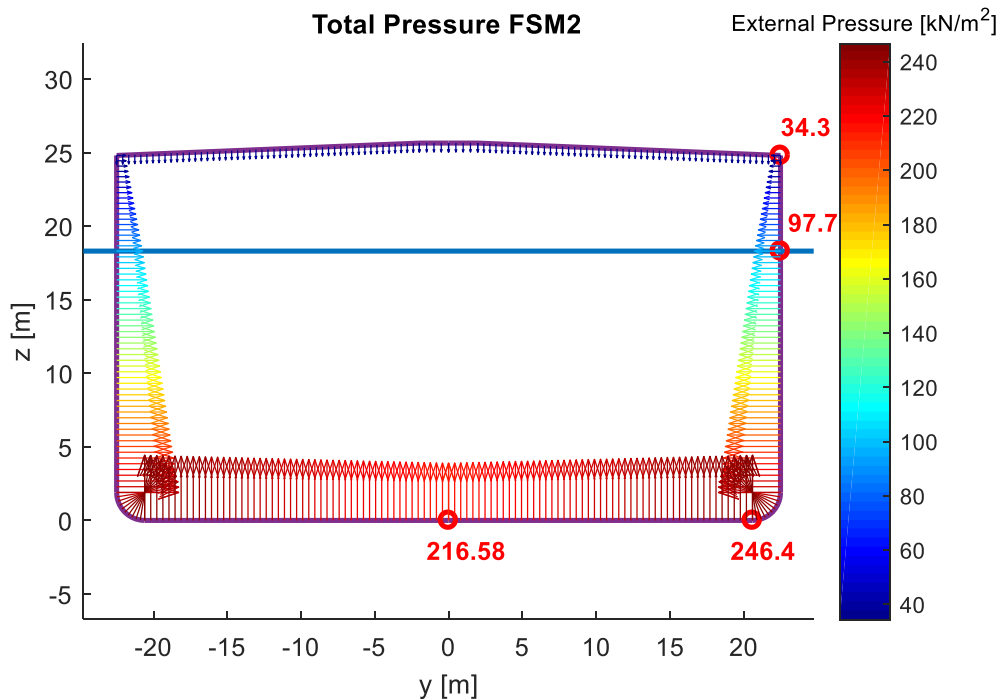
Σχήμα 5.30: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση HSA – 1. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_W| = 10.0 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 9.1 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $|P_W| = 21.1 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 17.4 \% P_S$ στο άκρο του



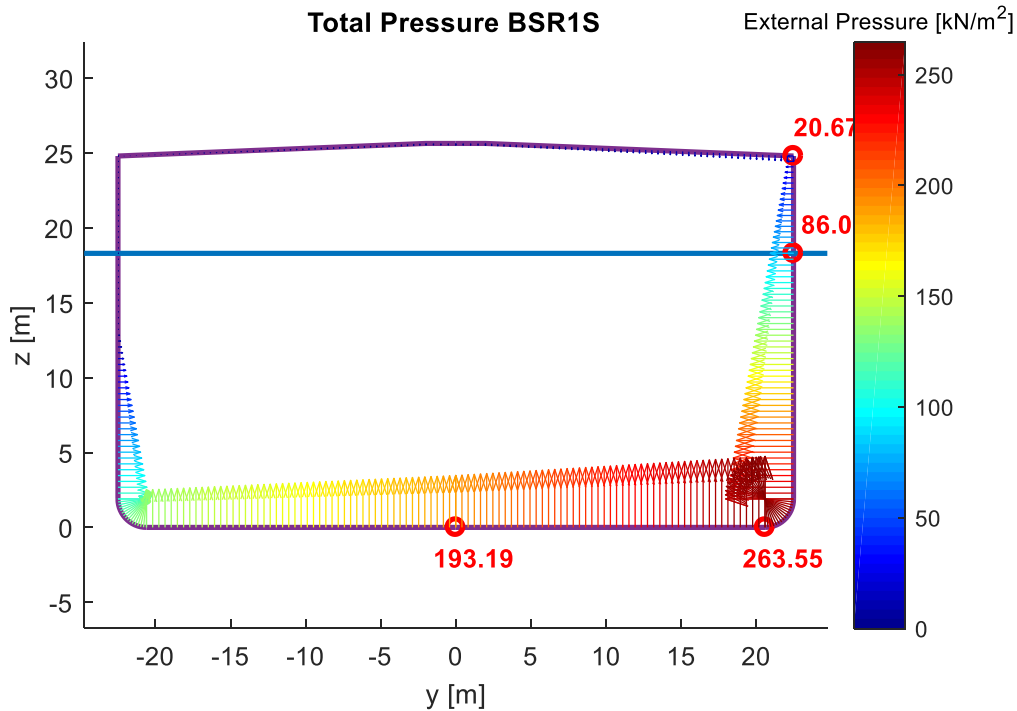
Σχήμα 5.31: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση HSA – 2. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_W = 8.3 \% P_{Total}$ με $P_W = 9.1 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_W = 14.8 \% P_{Total}$ με $P_W = 17.4 \% P_S$ στο άκρο του



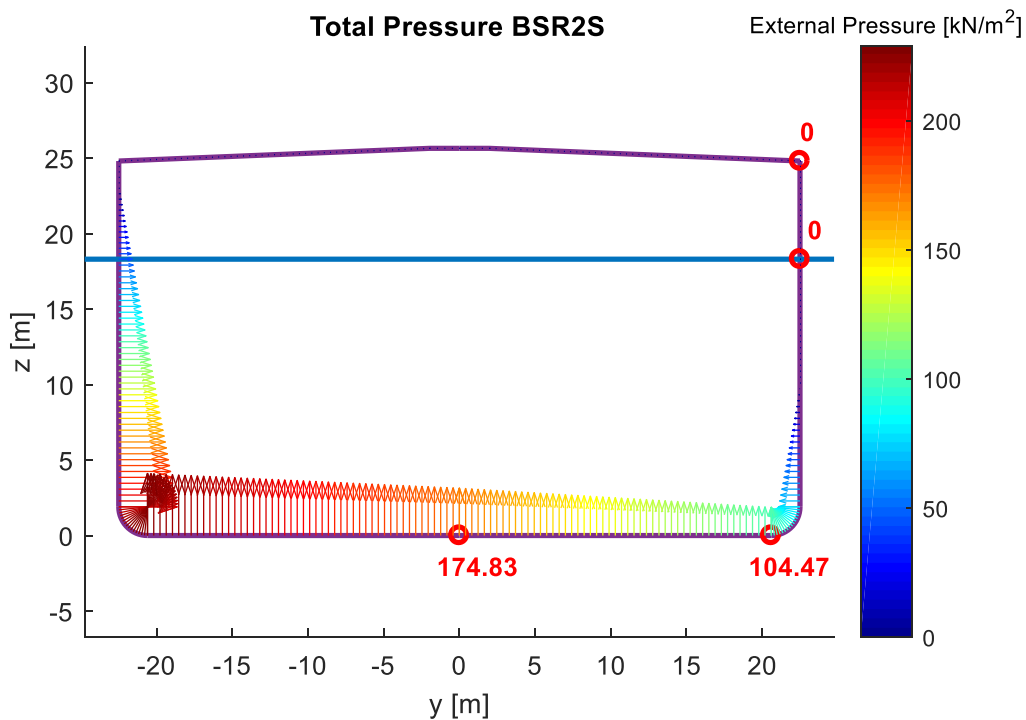
Σχήμα 5.32: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση FSM – 1. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_W| = 21.5 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 17.7 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $|P_W| = 51.3 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 33.9 \% P_S$ στο άκρο του



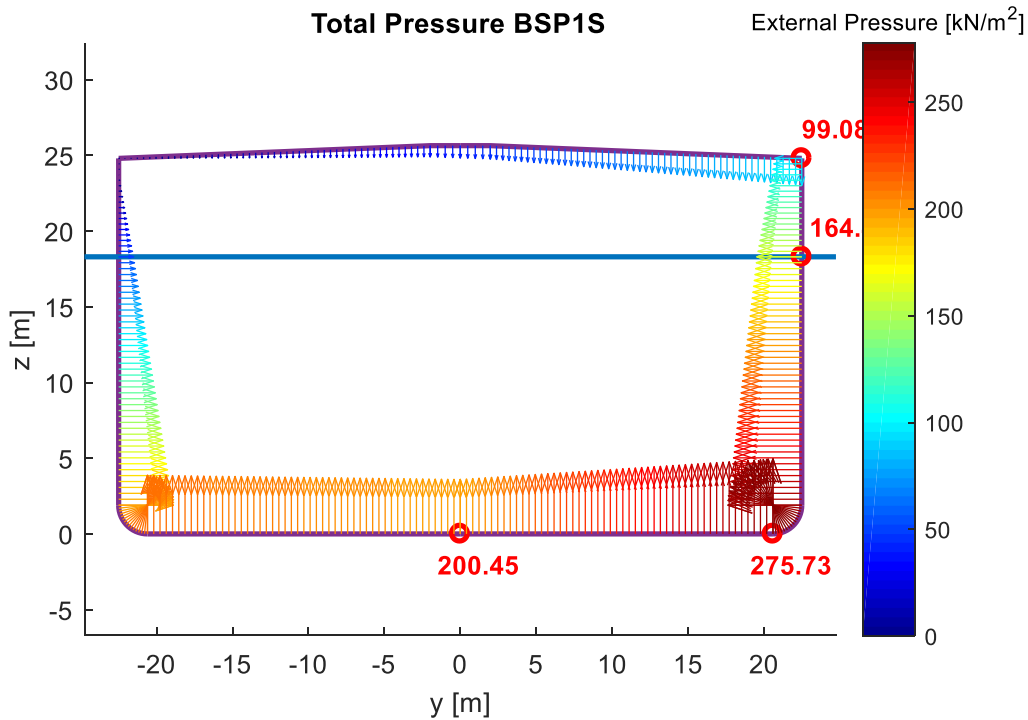
Σχήμα 5.33: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση FSM – 2. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_W = 15.0 \% P_{Total}$ με $P_W = 17.7 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_W = 25.3 \% P_{Total}$ με $P_W = 33.9 \% P_S$ στο άκρο του



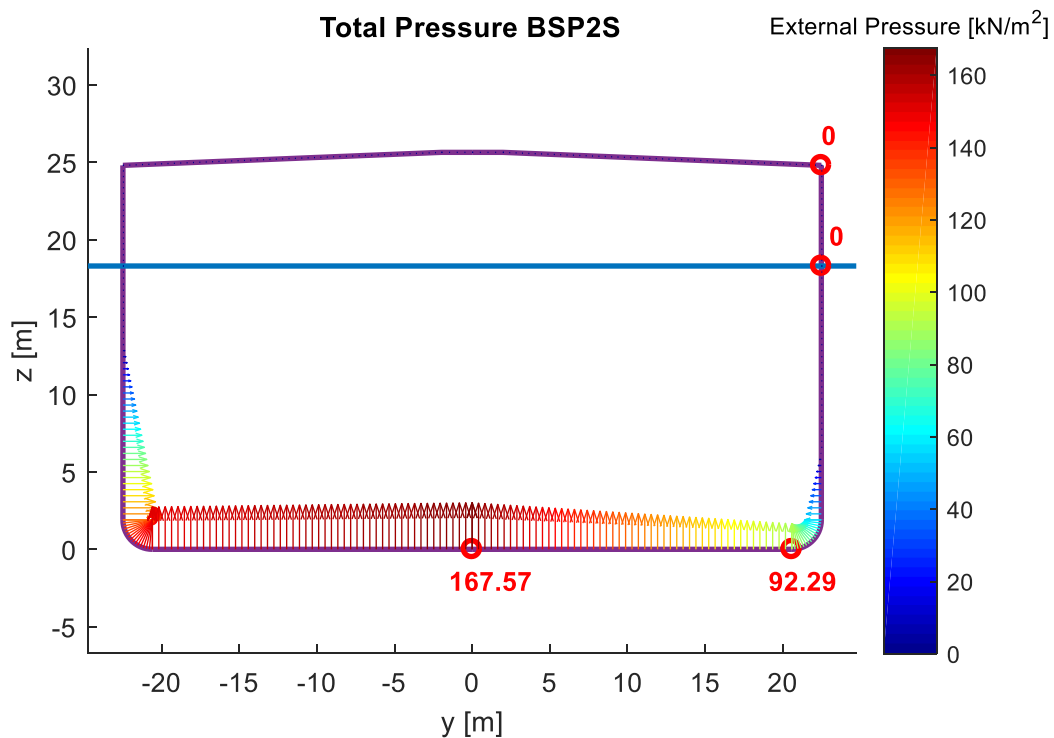
Σχήμα 5.34: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση BSR – 1S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική στην Starboard πλευρά και αρνητική στην Port. Ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_W = 4.8 \% P_{Total}$ με $P_W = 5.0 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_W = 30.2 \% P_{Total}$ με $P_W = 43.2 \% P_S$ στο άκρο του (Starboard side)



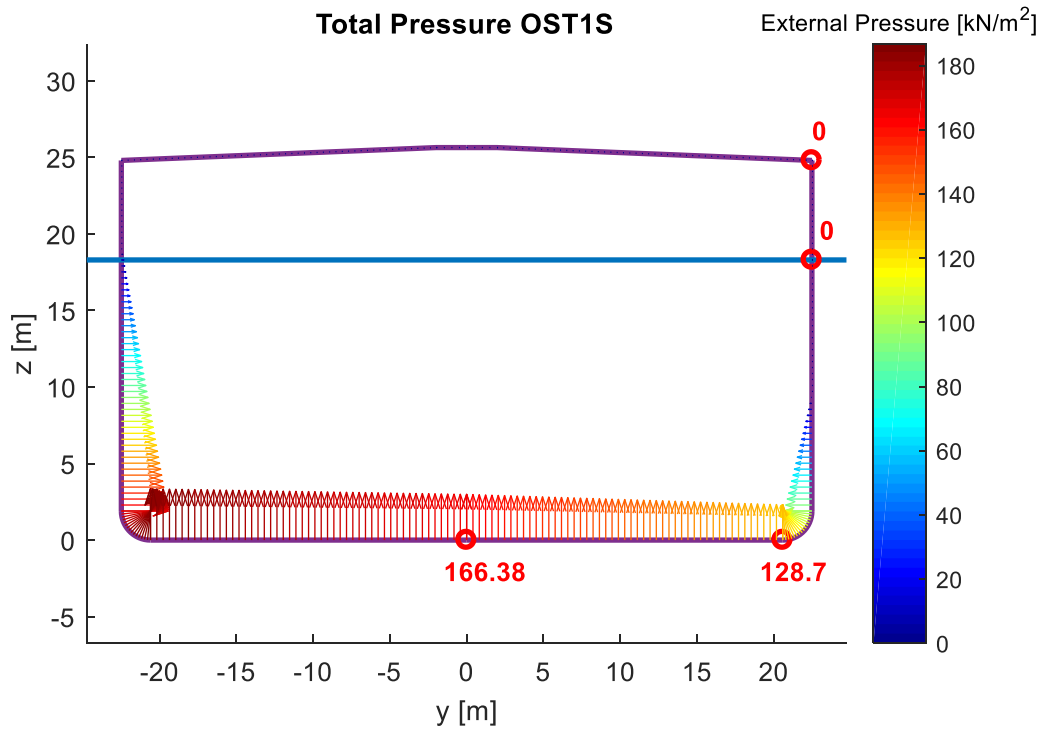
Σχήμα 5.35: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση BSR – 2S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική στην Starboard πλευρά και θετική στην Port. Ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_W| = 5.3 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 5.0 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $|P_W| = 76.1 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 43.2 \% P_S$ στο άκρο του (Starboard side)



Σχήμα 5.36: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση BSP – 1S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_W = 8.2 \% P_{Total}$ με $P_W = 8.9 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_W = 33.3 \% P_{Total}$ με $P_W = 49.8 \% P_S$ στο άκρο (Starboard side)

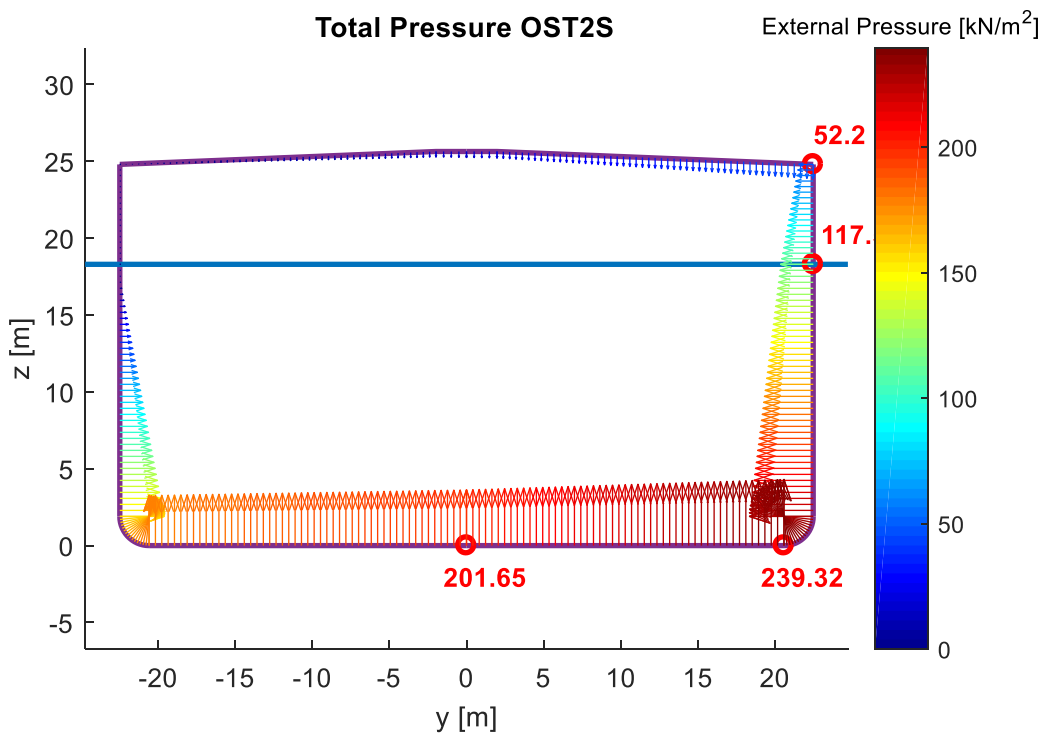


Σχήμα 5.37: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση BSP – 2S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_W| = 9.8 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 8.9 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $|P_W| = 99.4 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 49.8 \% P_S$ στο άκρο (Starboard side)



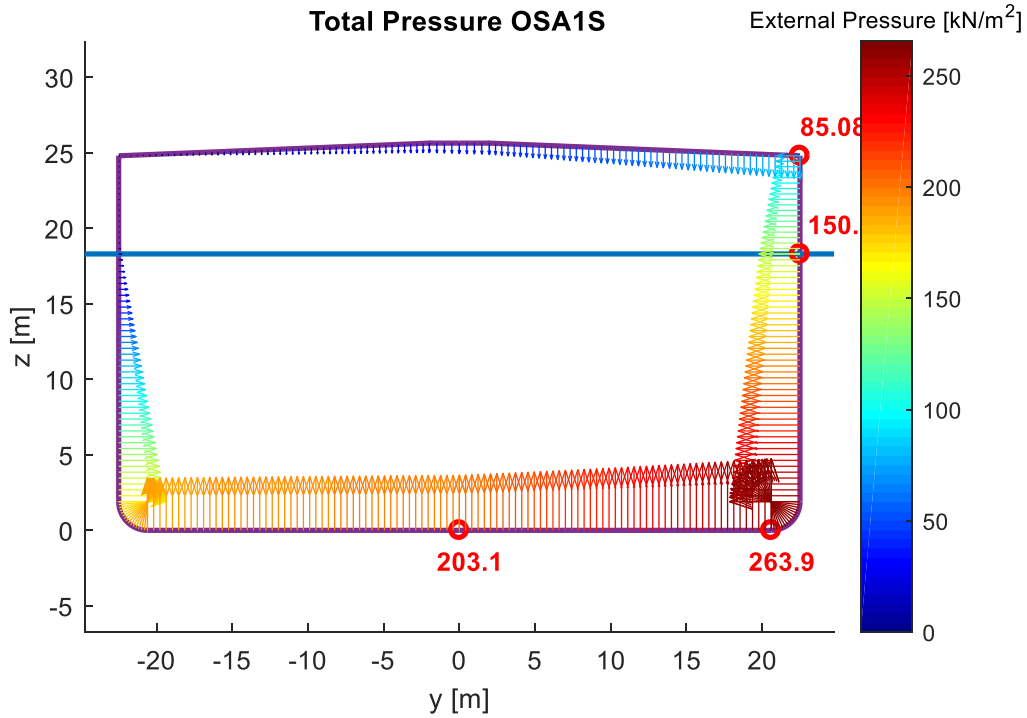
Σχήμα 5.38: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση OST – 1S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική στην Starboard πλευρά και θετική στην Port. Ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_W| = 10.6 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 9.6 \% P_S$ στην Centerline, ενώ

$$|P_W| = 43.0 \% P_{Total} \text{ με } |P_W| = 30.1 \% P_S \text{ στο άκρο του (Starboard side)}$$

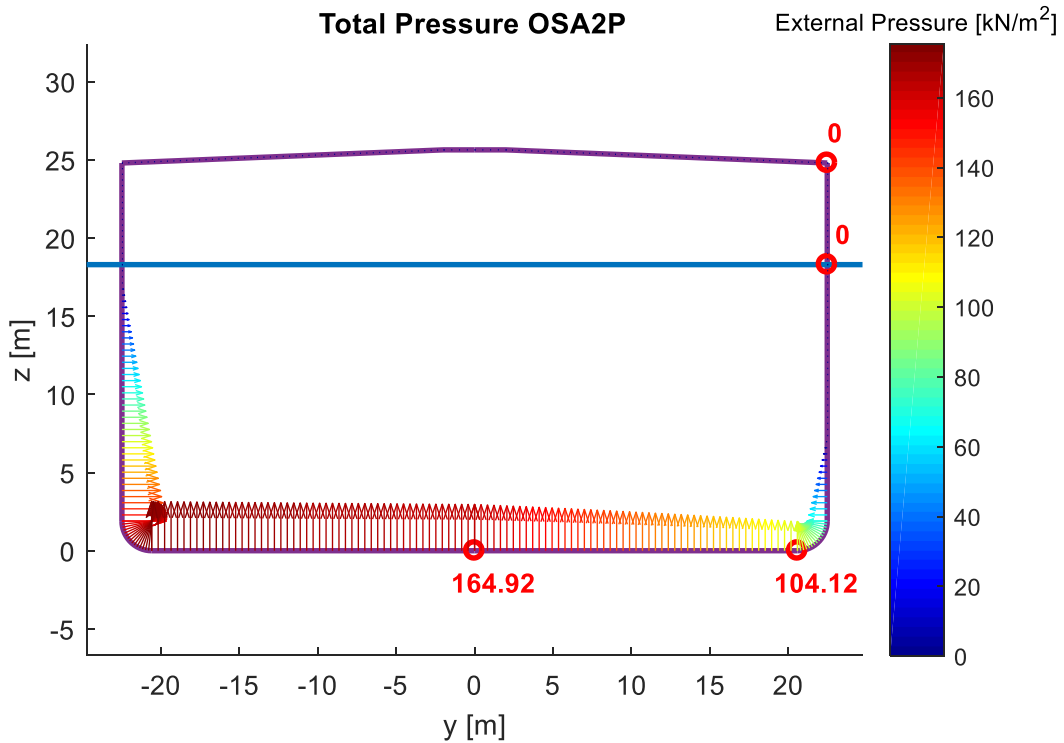


Σχήμα 5.39: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση OST – 2S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική στην Starboard πλευρά και αρνητική στην Port. Ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_W = 8.7 \% P_{Total}$ με $P_W = 9.6 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_W = 23.1 \% P_{Total}$

$$\text{με } P_W = 30.1 \% P_S \text{ στο άκρο του (Starboard side)}$$



Σχήμα 5.40: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση OSA – 1S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι θετική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $P_W = 9.4 \% P_{Total}$ με $P_W = 10.4 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $P_W = 30.3 \% P_{Total}$ με $P_W = 43.4 \% P_S$ στο άκρο του (Starboard side)



Σχήμα 5.41: Κατανομή συνολικής εξωτερικής φόρτισης για την δυναμική κατάσταση OSA – 2S. Η συνεισφορά της δυναμικής πίεσης στη συνολική φόρτιση είναι αρνητική και ενδεικτικά στον εξωτερικό πυθμένα έχει ποσοστό $|P_W| = 11.6 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 10.4 \% P_S$ στην Centerline, ενώ $|P_W| = 76.7 \% P_{Total}$ με $|P_W| = 43.4 \% P_S$ στο άκρο του (Starboard side)

5.10.3 Υπολογισμός Φορτίσεων Γάστρας

Στο σημείο αυτό υπολογίζονται οι σχεδιαστικές φορτίσεις γάστρας που αφορούν την κατακόρυφη και οριζόντια κάμψη. Συγκεκριμένα στον πίνακα (5.24) συνοψίζονται οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές για το σενάριο δυναμικής κατάστασης SEA – 1 (Seagoing Condition), καθώς και για το στατικό σενάριο SEA – 2 (Harbour Condition), οι οποίες υπολογίστηκαν προηγουμένως (βλ. Κεφ. 5.4).

Πίνακας 5.24: Σχεδιαστικές Καμπτικές Ροπές για τις καταστάσεις SEA – 1 και SEA – 2

Vertical Bending Moments	Design Load Scenario	Hogging [kN m]	Sagging [kN m]
Still Water	S.W.B.M. Seagoing Condition	3.8363e+06	-2.9603e+06
Bending Moment	S.W.B.M. Harbour Condition	4.7954e+06	-3.7004e+06
Wave Vertical	W.V.B.M. Seagoing Condition	5.9588e+06	-6.3124e+06
Bending Moment	W.V.B.M. Harbour Condition	-	-
Wave Horizontal	W.H.B.M. Seagoing Condition	4.6980e+06	
Bending Moment	W.H.B.M. Harbour Condition	-	

Για τον υπολογισμό των καμπτικών φορτίσεων της γάστρας σε κάθε δυναμική κατάσταση φόρτισης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων και ο διορθωτικός συντελεστής κύματος. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται προσαρμογή των καμπτικών ροπών που υπολογίστηκαν προηγουμένως προκειμένου να περιγράφουν την ελάχιστη δυναμική κατάσταση. Στον πίνακα (5.25) υπολογίζονται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων για λόγο βύθισης $f_T = 1$, καθώς και οι προκύπτουσες δυναμικές φορτίσεις της καμπτικής και οριζόντιας ροπής, σύμφωνα με το Κεφάλαιο (5.8) ως εξής:

$$M_{wv-LC} = f_{\beta} C_{wv} M_{wv-h} \quad \text{if } C_{wv} \geq 0$$

$$M_{wv-LC} = f_{\beta} C_{wv} |M_{wv-s}| \quad \text{if } C_{wv} < 0$$

$$M_{wh-LC} = f_{\beta} C_{wh} M_{wh}$$

Η κατάσταση STATIC στον εν λόγω πίνακα και περιλαμβάνει μόνο την κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό για κατάσταση Harbour. Οι υπόλοιπες φορτίσεις σε ήρεμο νερό (Hogging ή Sagging) αποτελούν τις δυσμενέστερες που προκύπτουν σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες δυναμικές.

Πίνακας 5.25: Δυναμικές φορτίσεις γάστρας στο βύθισμα ανοχής για τις εξεταζόμενες καταστάσεις SEA – 1 & 2

EDW	f_{β}	C_{wv}	M_{wv-LC} [kN m]	M_{sw} [kN m]	C_{wh}	M_{wh-LC} [kN m]
STATIC	0	0	0	4.7954e+06	0	0
HSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
HSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
HSA – 1	1.00	-0.70	-4.4187e+06	-2.9603e+06	0	0
HSA – 2	1.00	0.70	4.1712e+06	3.8363e+06	0	0
FSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
FSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
BSR – 1S	0.80	-0.10	-5.0499e+05	-2.9603e+06	0.10	-3.7584e+05
BSR – 2S	0.80	0.10	4.7670e+05	3.8363e+06	-0.10	3.7584e+05
BSP – 1S	0.80	-0.50	-2.5250e+06	-2.9603e+06	0	0
BSP – 2S	0.80	0.50	2.3835e+06	3.8363e+06	0	0
OST – 1S	1.00	-0.50	-3.1562e+06	-2.9603e+06	-0.90	4.2282e+06
OST – 2S	1.00	0.50	2.9794e+06	3.8363e+06	0.90	-4.2282e+06
OSA – 1S	1.00	0.25	1.4897e+06	3.8363e+06	0.75	-3.5235e+06
OSA – 2S	1.00	-0.25	-1.5781e+06	-2.9603e+06	-0.75	3.5235e+06

5.10.4 Υπολογισμός Αναπτυσσόμενων Ορθών Τάσεων

Οι οριζόντιες και κατακόρυφες καμπτικές ροπές έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ορθών τάσεων λόγω **διαξονικής κάμψης** στη διατομή της μέσης τομής. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο (5.8), η κατανομή της ορθής τάσης υπολογίζεται παρακάτω ως εξής:

$$\sigma_{hg} = \left(\frac{M_{sw} + M_{wv-LC}}{I_{y-n50}} (z - z_n) - \frac{M_{wh-LC}}{I_{z-n50}} y \right) 10^{-3}$$

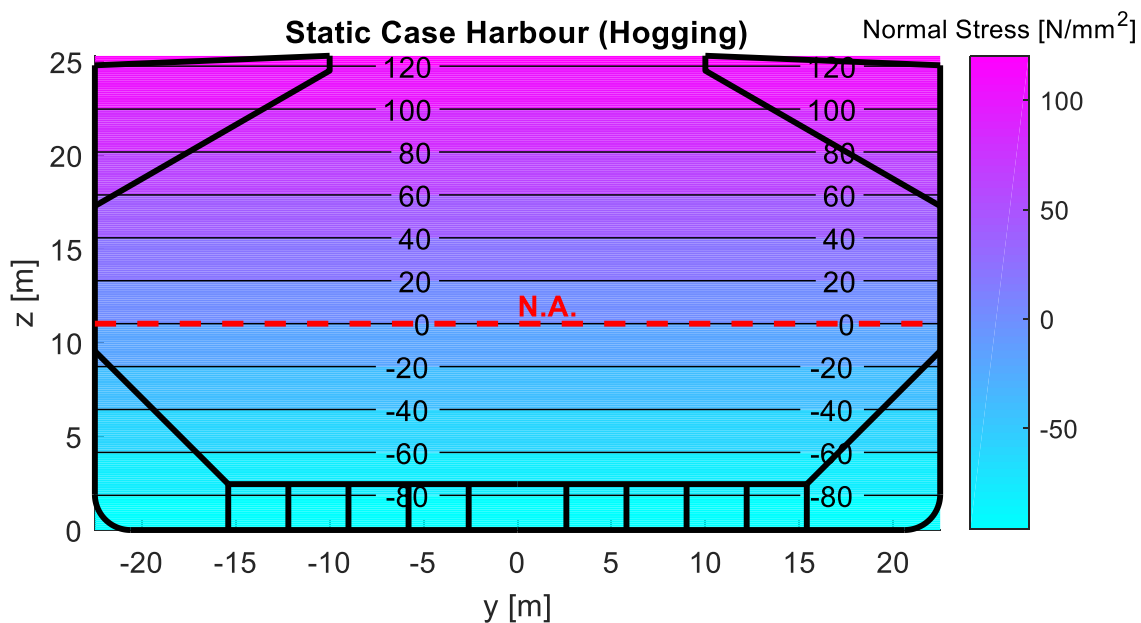
Με δεδομένες τις δυναμικές φορτίσεις της γάστρας M_{wv-LC} και M_{wh-LC} , καθώς και την κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό για κατάσταση Hogging ή Sagging, μπορούν να υπολογιστούν οι κατανομές των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων που επάγονται σε κάθε δυναμική κατάσταση. Για τον υπολογισμό αυτόν, χρησιμοποιούνται οι καθαρές γεωμετρικές ιδιότητες της μέσης τομής που υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο (5.6), οι οποίες είναι οι παρακάτω:

- $z_n = 11.003$ m
- $I_{y-n50} = 549.712$ m⁴
- $I_{z-n50} = 1336.005$ m⁴

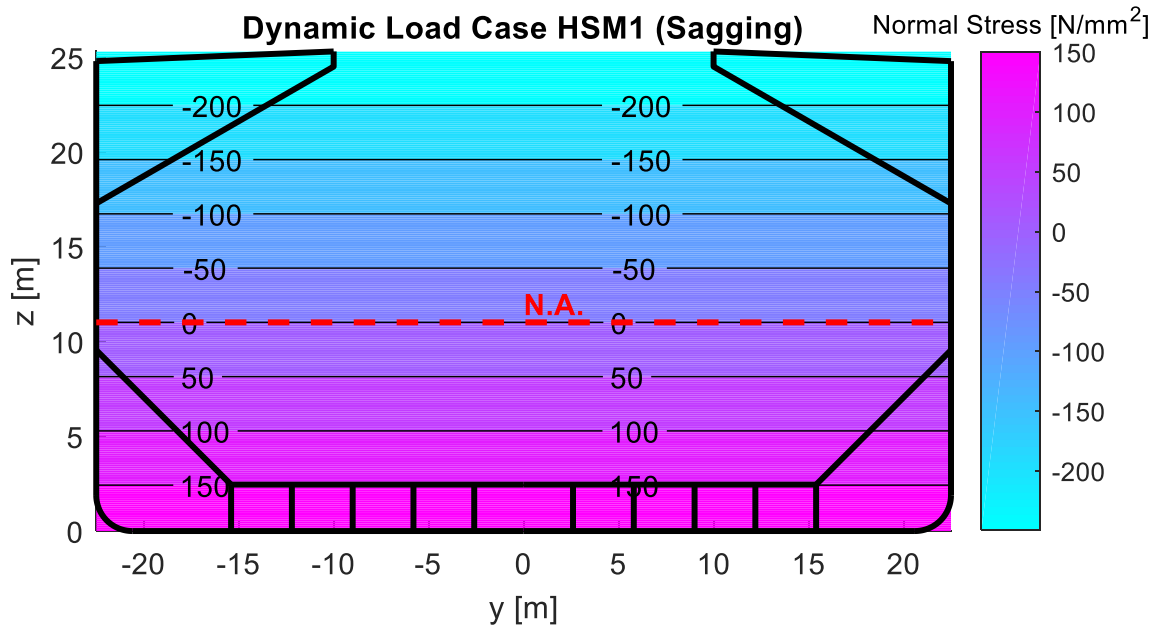
Από τις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης, όπως φαίνεται και στον πίνακα (5.25), μόνο οι BSR, OST και OSA, προκαλούν διαξονική κάμψη. Στις περιπτώσεις αυτές ο ουδέτερος άξονας έχει κλίση ίση με:

$$\lambda = \frac{M_z I_y}{M_y I_z}, \text{ όπου } M_y = M_{sw} + M_{wv-LC} \text{ και } M_z = M_{wh-LC}$$

Παρακάτω, στα σχήματα (5.42) έως (5.56) παρουσιάζονται ενδεικτικά οι κατανομές των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για όλες τις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης, καθώς και για την στατική μόνο, με τις αντίστοιχες φορτίσεις γάστρας που αναγράφονται στον πίνακα (5.25).

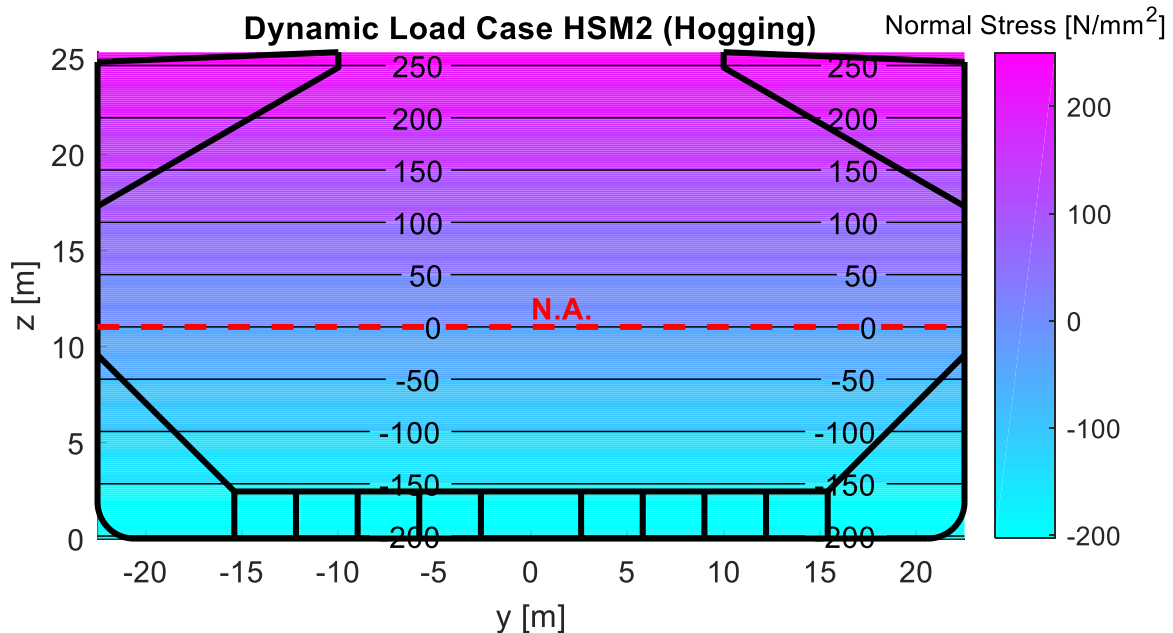


Σχήμα 5.42: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για το στατικό σενάριο (Harbour) με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 4.7954e + 06$ kN m, $M_{wv-LC} = 0$, $M_{wh-LC} = 0$



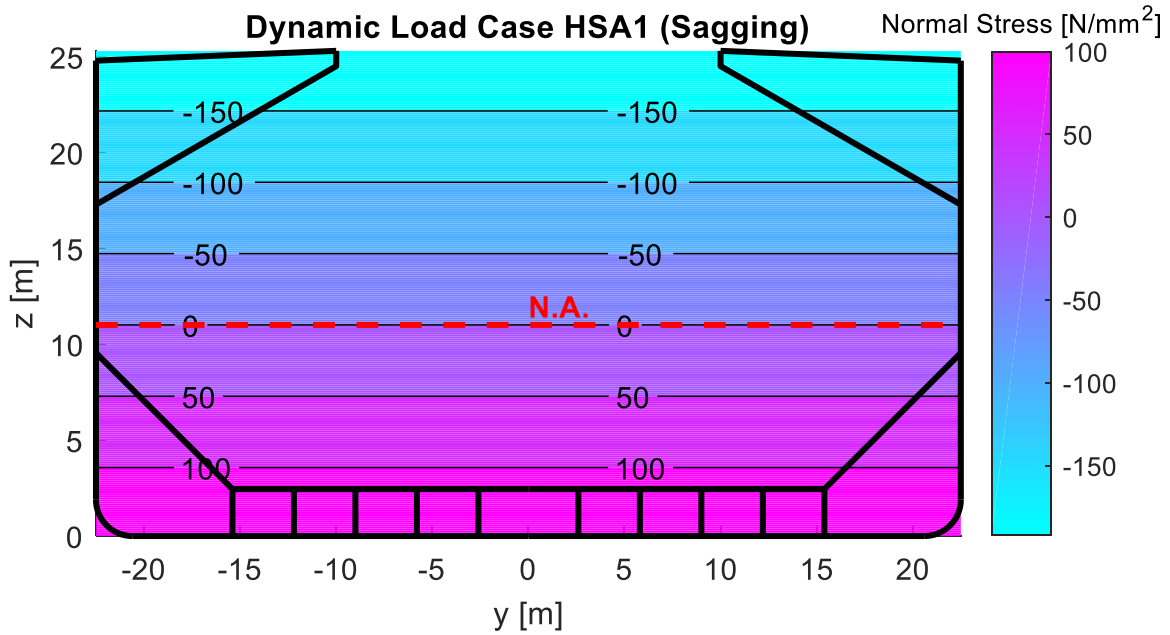
Σχήμα 5.43: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση HSM – 1 με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m ,

$$M_{wv-LC} = -6.628e+06 \text{ kN m} , M_{wh-LC} = 0$$

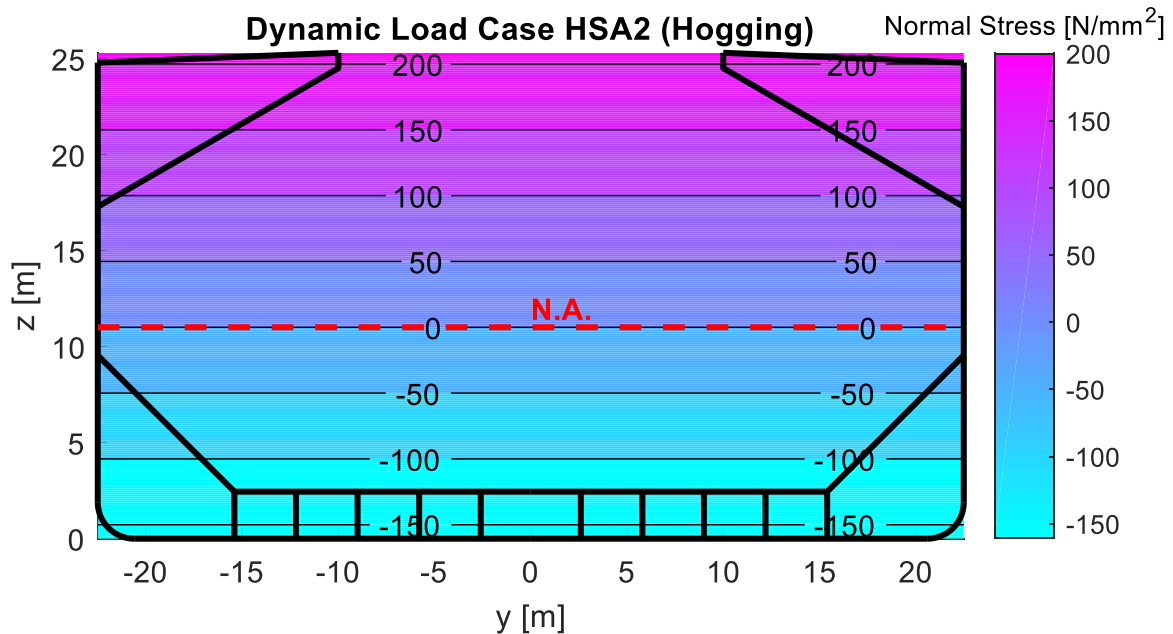


Σχήμα 5.44: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση HSM – 2 με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m ,

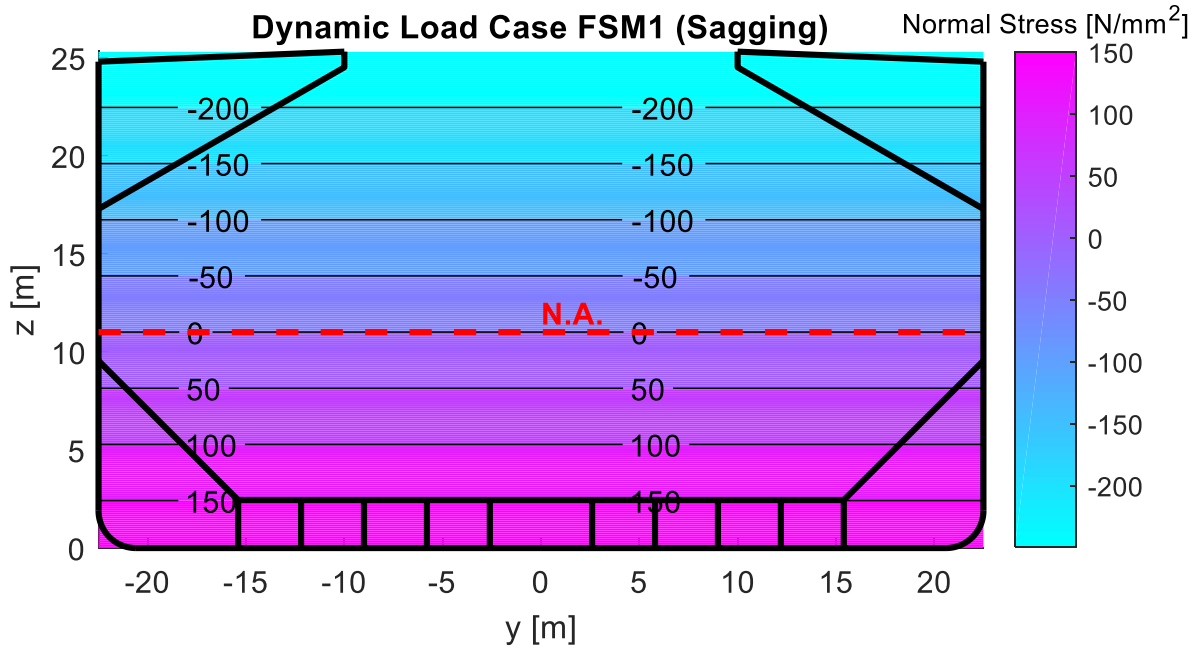
$$M_{wv-LC} = 6.2567e+06 \text{ kN m} , M_{wh-LC} = 0$$



Σχήμα 5.45: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση HSA – 1 με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m, $M_{wv-LC} = -4.4187e+06$ kN m, $M_{wh-LC} = 0$

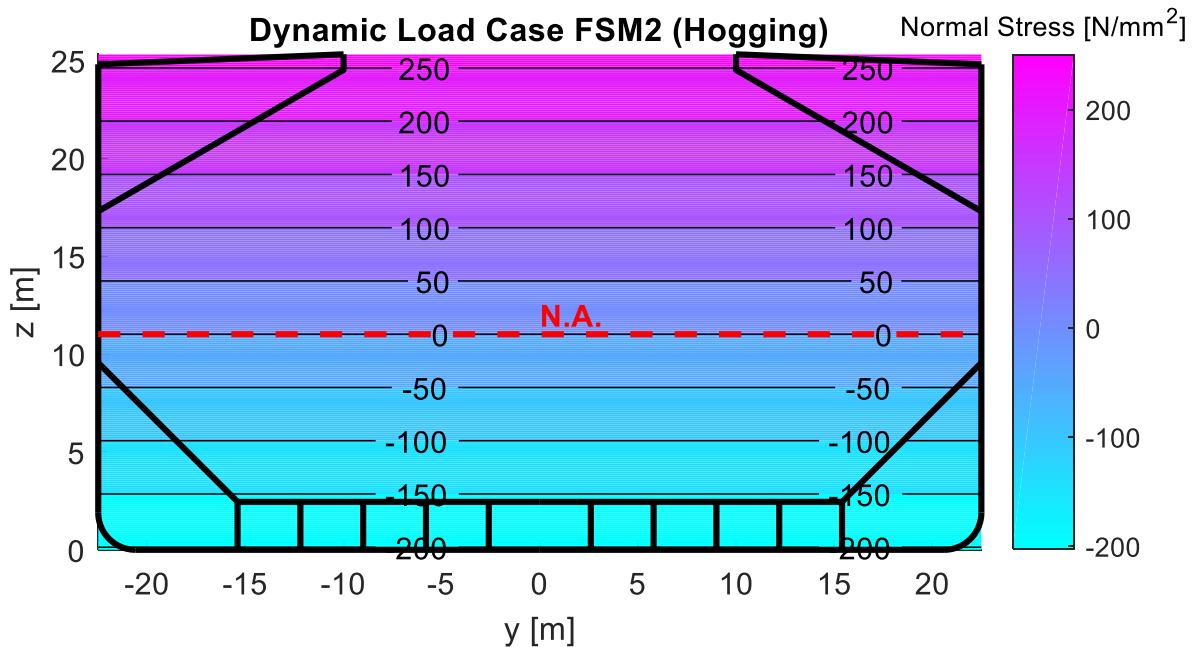


Σχήμα 5.46: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση HSA – 2 με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m, $M_{wv-LC} = 4.1712e+06$ kN m, $M_{wh-LC} = 0$



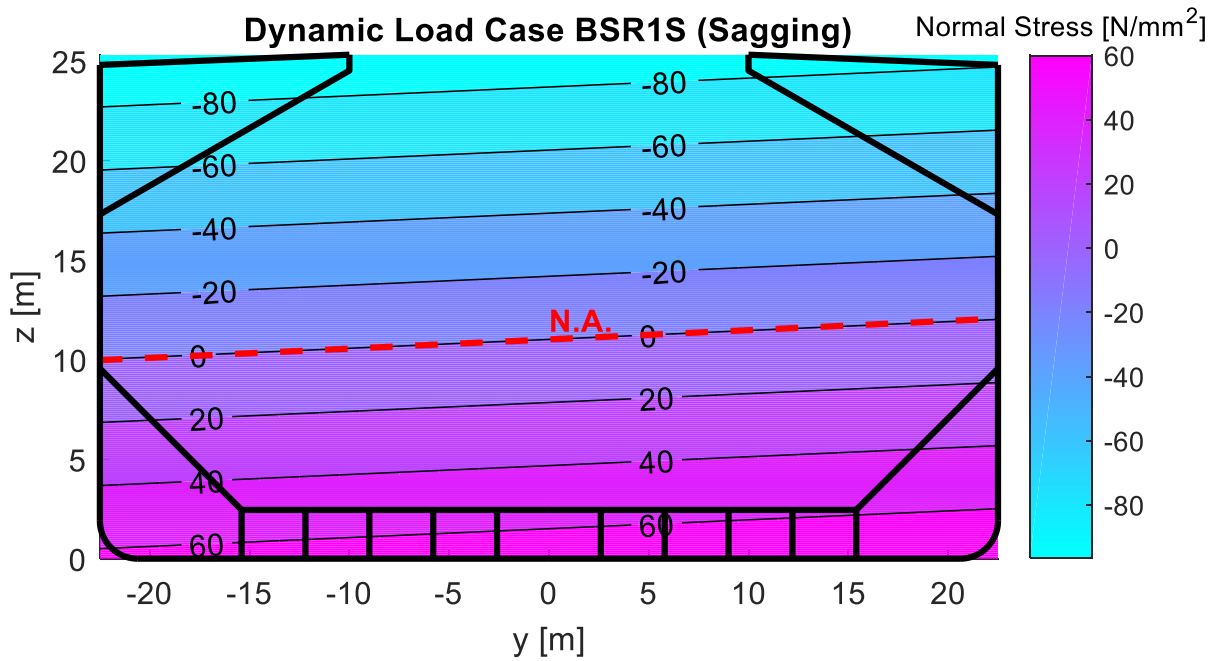
Σχήμα 5.47: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση FSM – 1 με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m ,

$$M_{wv-LC} = -6.628e+06 \text{ kN m} , M_{wh-LC} = 0$$

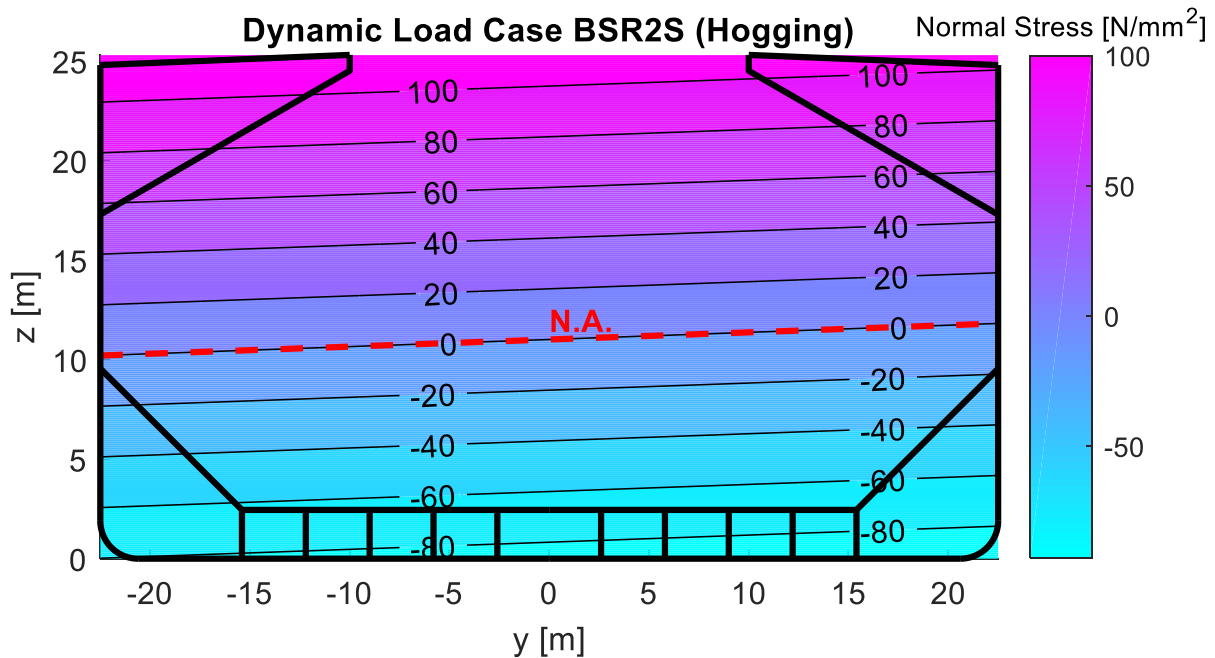


Σχήμα 5.48: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση FSM – 2 με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m ,

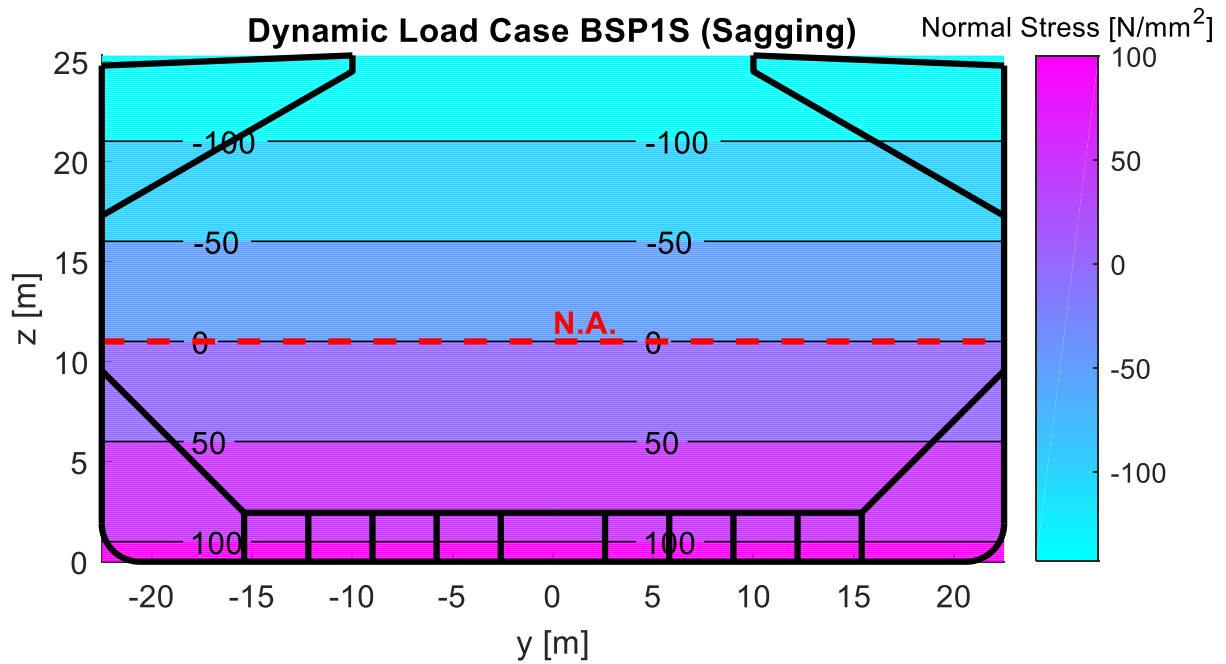
$$M_{wv-LC} = 6.2567e+06 \text{ kN m} , M_{wh-LC} = 0$$



Σχήμα 5.49: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση BSR – 1S με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m , $M_{wv-LC} = -5.0499e+05$ kN m , $M_{wh-LC} = -3.7584e+05$ kN m (διαξονική κάμψη)

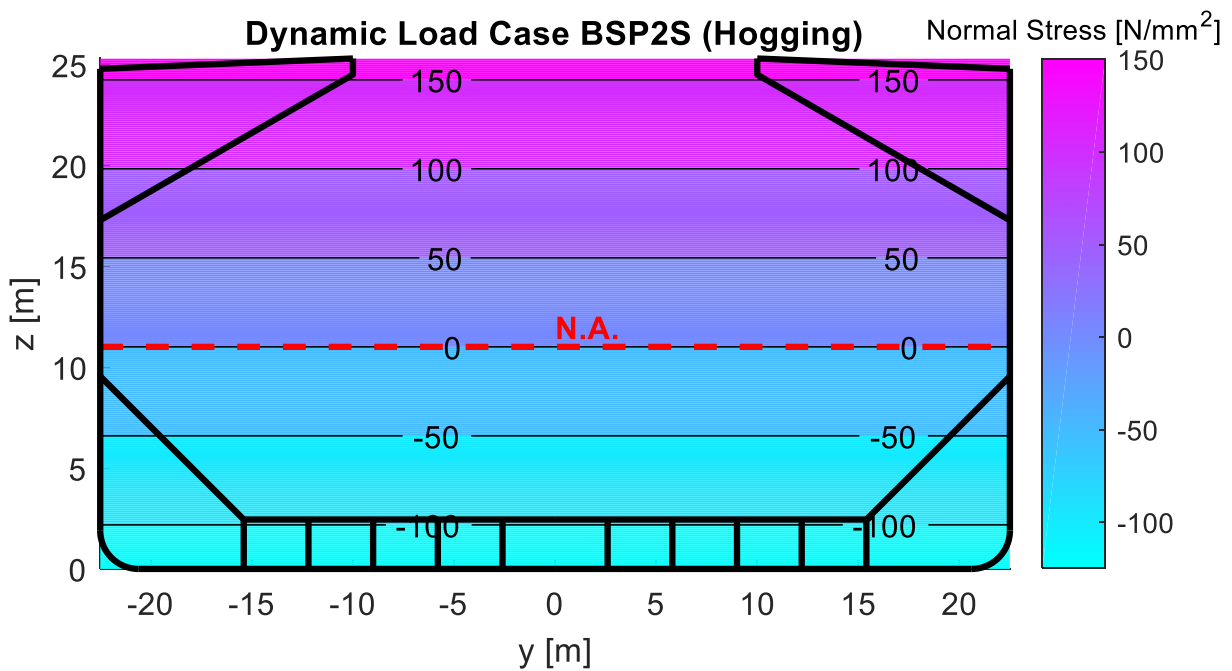


Σχήμα 5.50: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση BSR – 2S με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m , $M_{wv-LC} = 4.767e+05$ kN m , $M_{wh-LC} = 3.7584e+05$ kN m (διαξονική κάμψη)



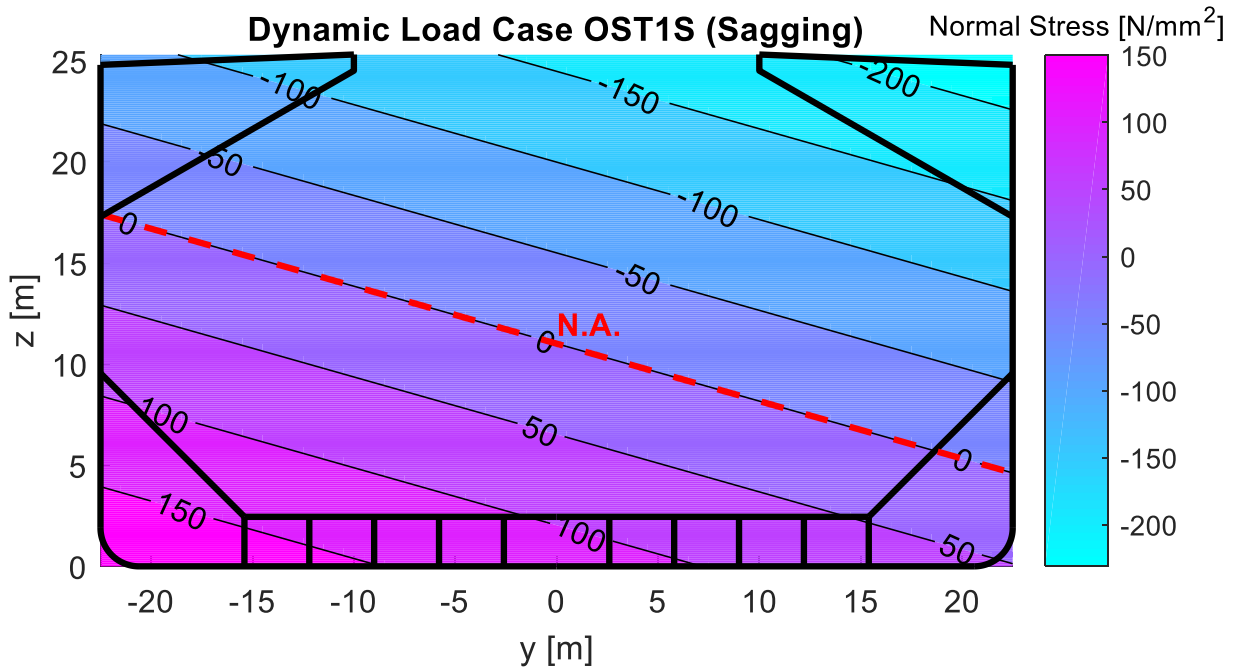
Σχήμα 5.51: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση BSP – 1S με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m ,

$$M_{wv-LC} = -2.525e+06 \text{ kN m}, M_{wh-LC} = 0$$

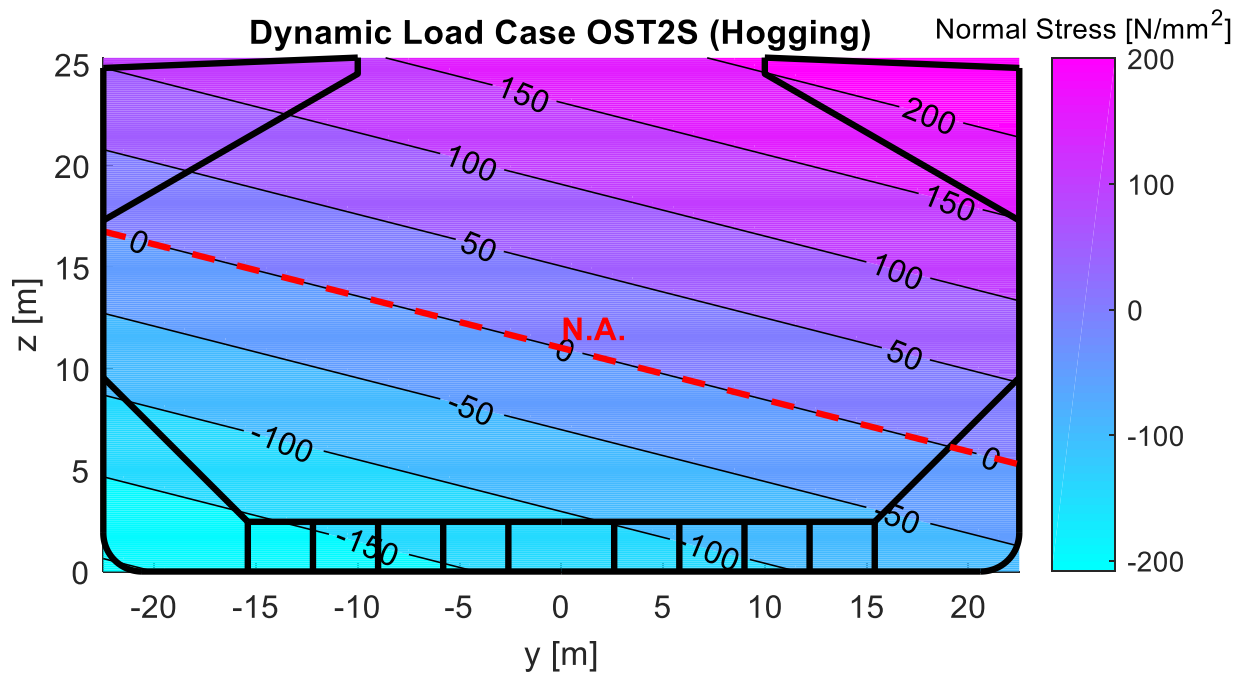


Σχήμα 5.52: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση BSP – 2S με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m ,

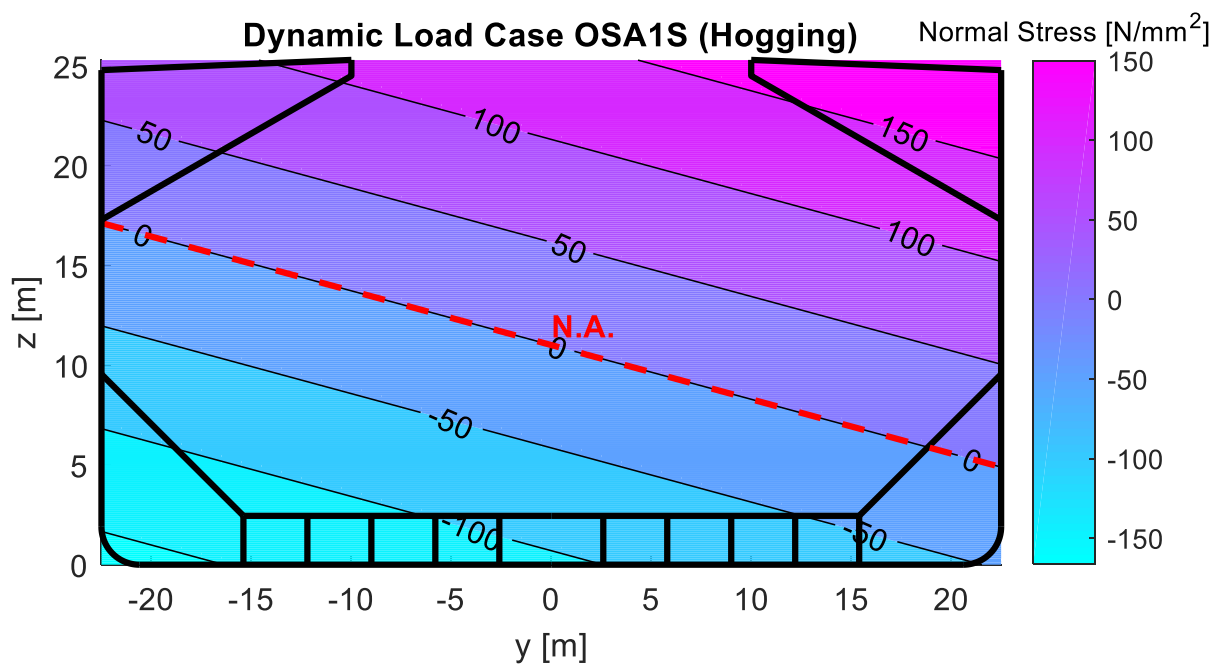
$$M_{wv-LC} = 2.3835e+06 \text{ kN m}, M_{wh-LC} = 0$$



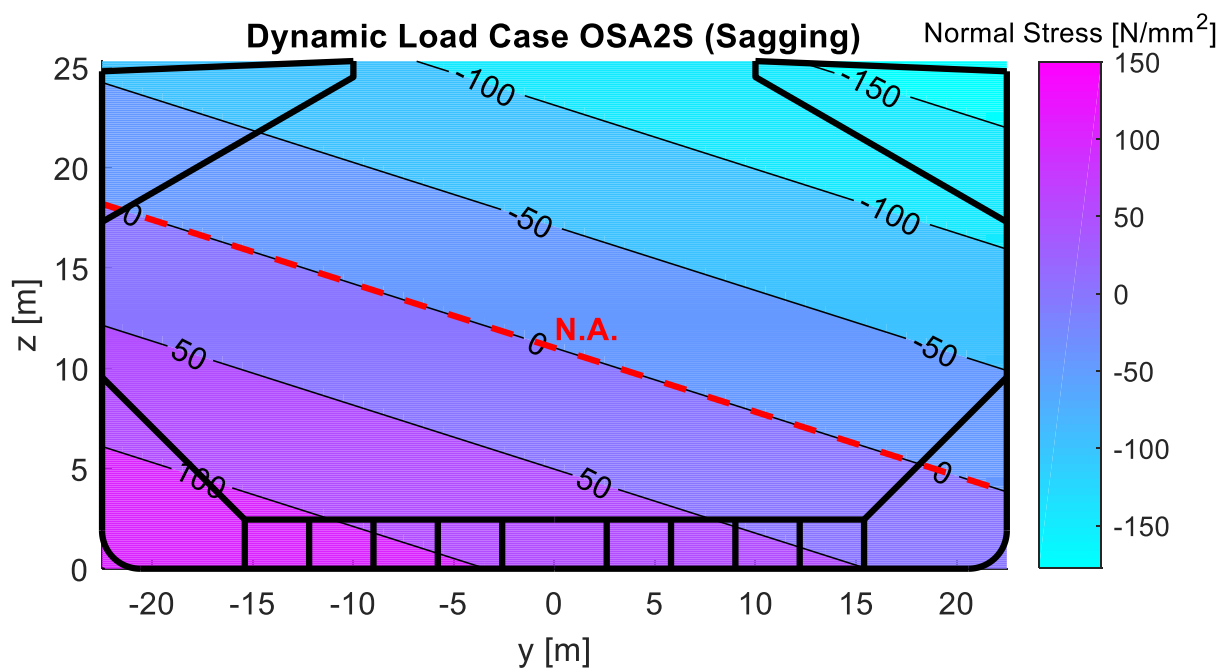
Σχήμα 5.53: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση OST – 1S με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m , $M_{wv-LC} = -3.1562e+06$ kN m , $M_{wh-LC} = 4.2282e+06$ kN m (διαξονική κάμψη)



Σχήμα 5.54: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση OST – 2S με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m , $M_{wv-LC} = 2.9794e+06$ kN m , $M_{wh-LC} = -4.2282e+06$ kN m (διαξονική κάμψη)



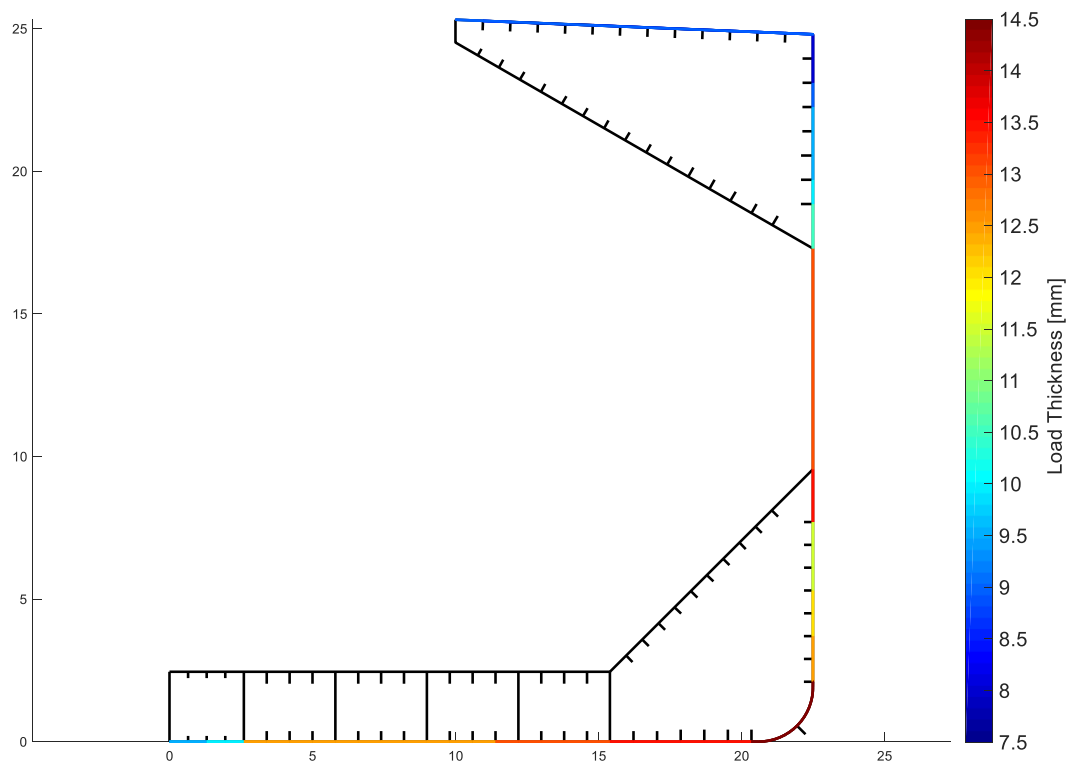
Σχήμα 5.55: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση OSA – 1S με δυσμενέστερη την κατάσταση Hogging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = 3.8363e+06$ kN m , $M_{wv-LC} = 1.4897e+06$ kN m , $M_{wh-LC} = -3.5235e+06$ kN m (διαξονική κάμψη)



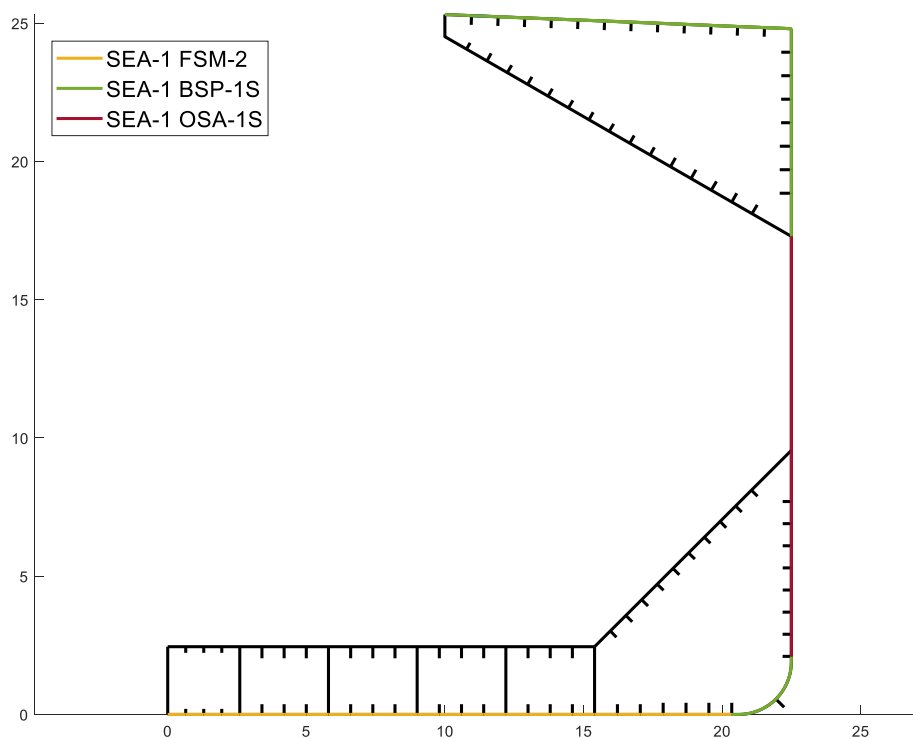
Σχήμα 5.56: Κατανομή αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων για τη δυναμική κατάσταση OSA – 2S με δυσμενέστερη την κατάσταση Sagging και παραμέτρους υπολογισμών $M_{sw} = -2.9603e+06$ kN m , $M_{wv-LC} = -1.5781e+06$ kN m , $M_{wh-LC} = 3.5235e+06$ kN m (διαξονική κάμψη)

5.10.5 Απαίτηση Πάχους για Στοιχειώδη Ελάσματα και Κρίσιμες Καταστάσεις

Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε πάχος (Σχήμα 5.57) για κάθε στοιχειώδες έλασμα (EPP) και η αντίστοιχη κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.58).



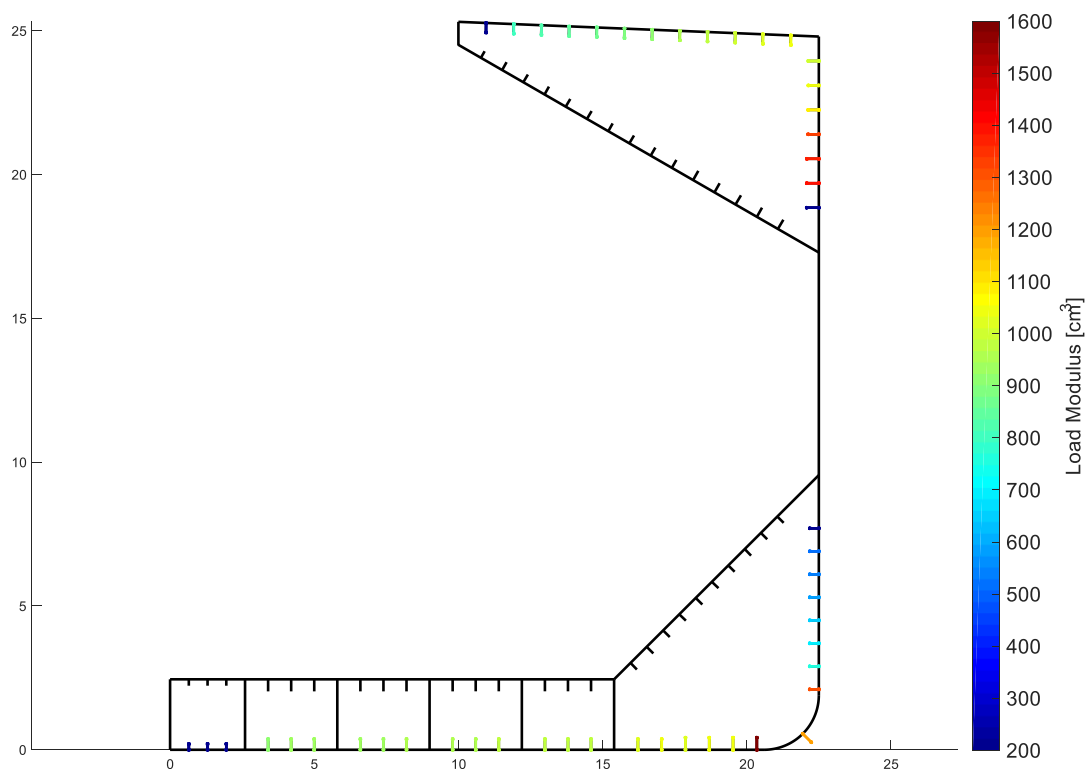
Σχήμα 5.57: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος ελάσματος βασισμένο στις καταστάσεις SEA – 1 (S+D) και SEA – 2 (S) για το εξωτερικό περίβλημα. Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται ολόκληρη η διατομή, ενώ χρωματικά απεικονίζονται εστιασμένα τα ελάσματα του εξωτερικού περιβλήματος



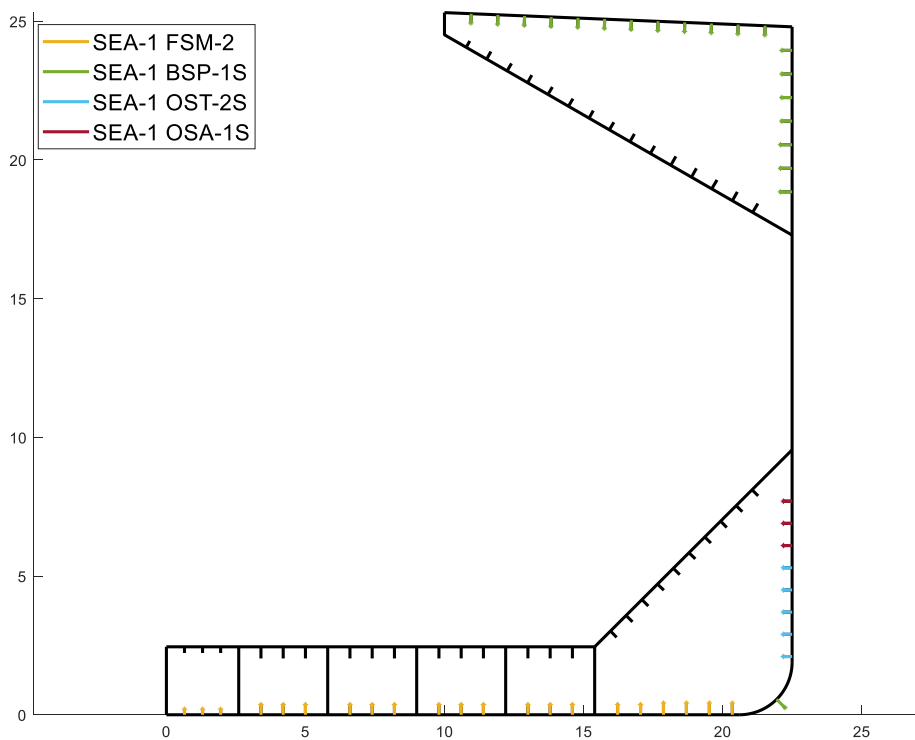
Σχήμα 5.58: Κρίσιμες δυναμικές καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση πάχους ελάσματος για το εξωτερικό περίβλημα

5.10.6 Απαίτηση Ροπής Αντίστασης για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις

Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε ροπή αντίστασης (Σχήμα 5.59) για κάθε ενισχυτικό και η αντίστοιχη κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.60).



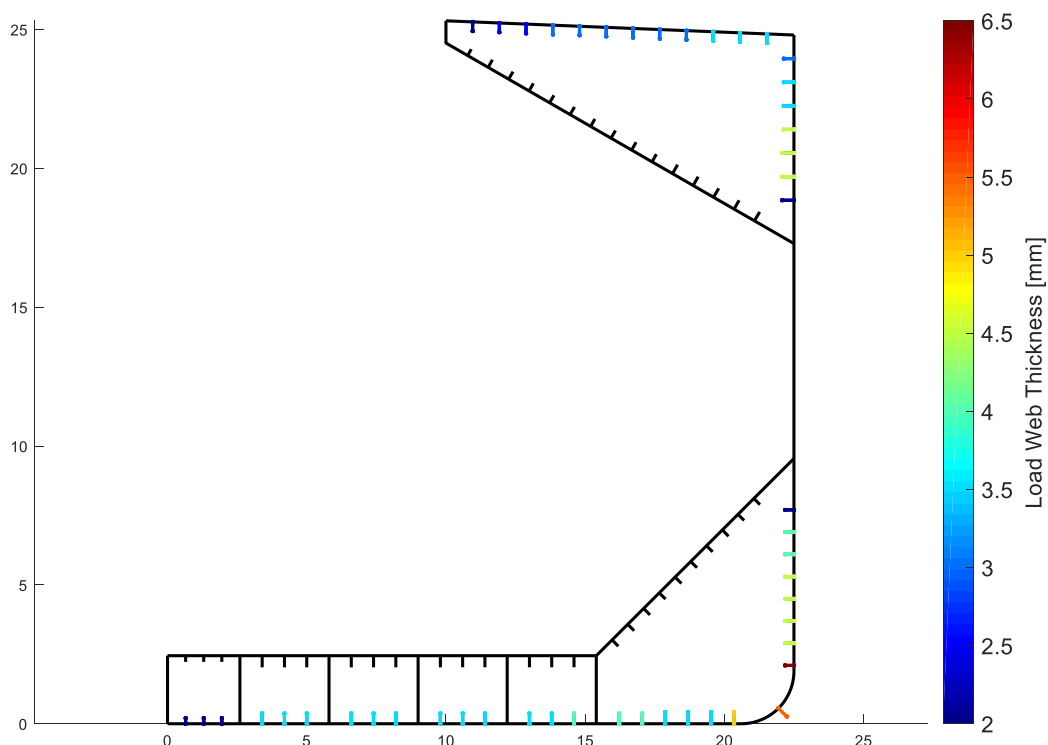
Σχήμα 5.59: Μέγιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης ενισχυτικού βασισμένη στις καταστάσεις SEA – 1 (S+D) και SEA – 2 (S) για το εξωτερικό περιβλήμα. Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται ολόκληρη η διατομή, ενώ χρωματικά απεικονίζονται εστιασμένα τα ενισχυτικά του εξωτερικού περιβλήματος



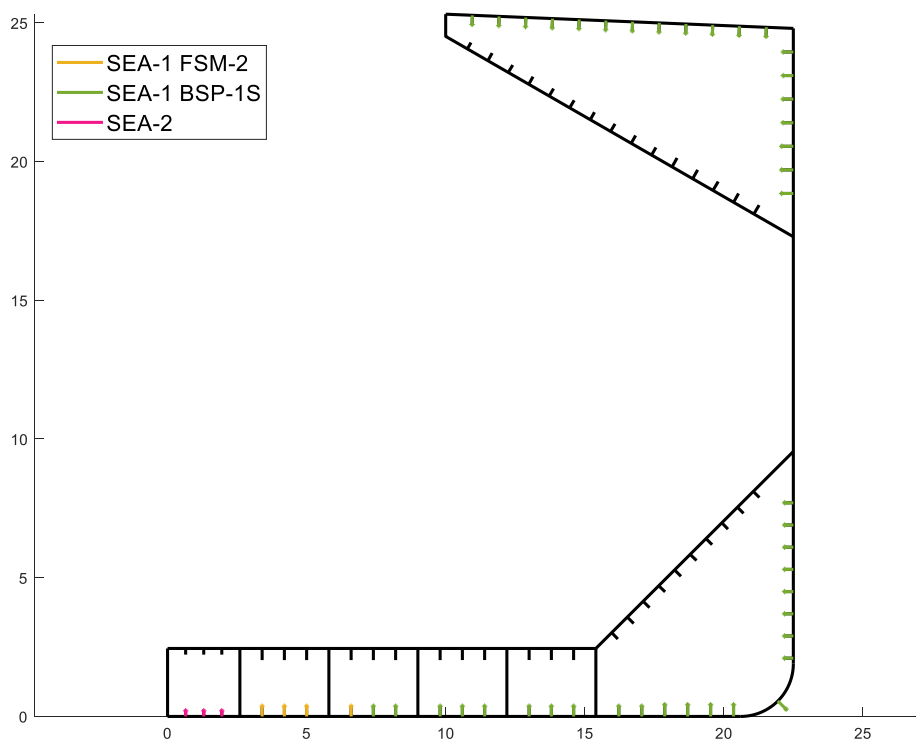
Σχήμα 5.60: Κρίσιμες δυναμικές καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση ροπής αντίστασης ενισχυτικού για το εξωτερικό περιβλήμα

5.10.7 Απαίτηση Πάχους Κορμού για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις

Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε πάχος κορμού (Σχήμα 5.61) για κάθε ενισχυτικό και η αντίστοιχη κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.62).



Σχήμα 5.61: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ενισχυτικό βασισμένο στις καταστάσεις SEA – 1 (S+D) και SEA – 2 (S) για το εξωτερικό περίβλημα. Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται ολόκληρη η διατομή, ενώ χρωματικά απεικονίζονται εστιασμένα τα ενισχυτικά του εξωτερικού περιβλήματος

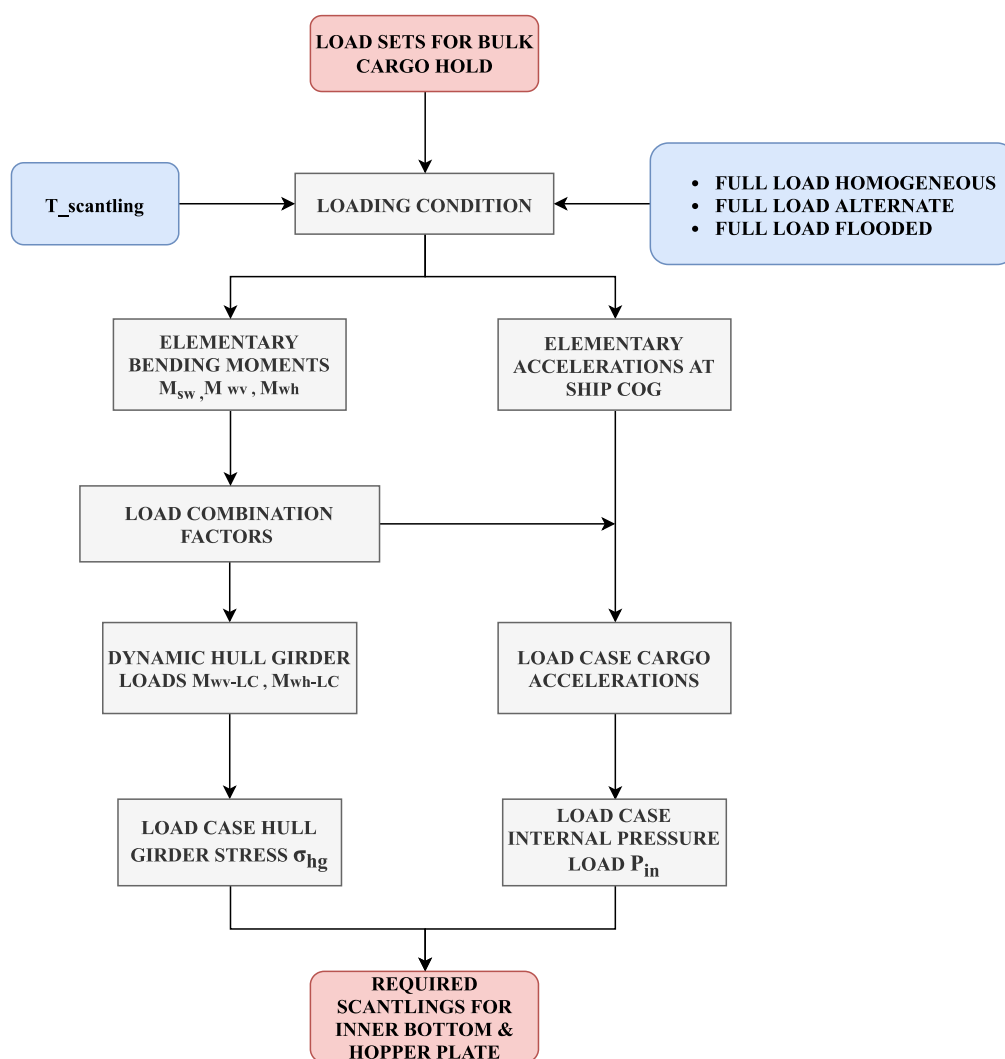


Σχήμα 5.62: Κρίσιμες καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση πάχους κορμού ενισχυτικού για το εξωτερικό περίβλημα. Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται η ύπαρξη του δυναμικού σεναρίου SEA – 1, αλλά και του στατικού SEA – 2, με μικρές απαιτήσεις

5.11 Φορτίσεις και Απαιτήσεις Στοιχείων Χώρου Ξηρού Φορτίου

Για τον έλεγχο των στοιχείων του εσωτερικού πυθμένα (Inner Bottom) και του ορίου της κάτω πλευρικής δεξαμενής (Hopper Tank) εξετάζονται οι καταστάσεις **BC – 1, BC – 2, BC – 5, BC – 6, FD – 1 και FD – 2** του πίνακα (5.15). Στο σχήμα (5.63) περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των φορτίσεων σε κάθε κατάσταση. Συγκεκριμένα, για τις καταστάσεις BC – 1, BC – 5 και FD – 1, οι οποίες αποτελούν σενάρια δυναμικών φορτίσεων (S+D), υπολογίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- Σχεδιαστικές κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{sw-h} , M_{sw-s} και M_{wv-h} , M_{wv-s} για συνθήκες κανονικής πλεύσης (Seagoing) αλλά και συνθήκες κατάκλυσης (Flooded)
- Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων για λόγο βυθίσματος $f_T = 1$
- Φορτίσεις γάστρας M_{wv-LC} και M_{wh-LC} για τις επιμέρους δυναμικές καταστάσεις φόρτισης
- Κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για τις καταστάσεις Full Load Homogeneous, Full Load Alternate και Flooded Condition
- Εσωτερικές πιέσεις P_{in} λόγω ξηρού φορτίου ($P_{bs} + P_{bd}$) ή κατάκλυσης ($P_{fs} + P_{fd}$), για τις επιμέρους δυναμικές καταστάσεις φόρτισης



Σχήμα 5.63: Διαδικασία υπολογισμού των φορτίσεων για τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων – Load Based του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate

Για τις καταστάσεις BC – 2, BC – 6 και FD – 2, οι οποίες αποτελούν σενάρια στατικών φορτίσεων (S), υπολογίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- Σχεδιαστικές κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{sw-p-h} και M_{sw-p-s} , για συνθήκες λιμανιού (Harbour) και M_{sw-f-h} , M_{sw-f-s} για συνθήκες κατάκλυσης (Flooded)
- Εσωτερικές στατικές πιέσεις P_{in} λόγω ξηρού φορτίου (P_{bs}) ή κατάκλυσης (P_{fs})

5.11.1 Υπολογισμός Κινήσεων και Επιταχύνσεων του Πλοίου

Σε πρώτο στάδιο υπολογίζονται οι κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για κάθε κατάσταση φόρτωσης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων του ξηρού φορτίου σε κάθε κατάσταση φόρτωσης σε συνδυασμό με τις επιμέρους δυναμικές καταστάσεις. Στον πίνακα (5.26) συνοψίζονται τα αποτελέσματα για τις καταστάσεις φόρτωσης Full Load Homogeneous, Full Load Alternate και Flooded Condition στο βύθισμα ανοχής $T_{SC} = 18.3$ m .

Αξίζει να σημειωθεί ότι για ομογενή και εναλλάξ κατάσταση φόρτωσης, οι κινήσεις και επιταχύνσεις λαμβάνουν τις ίδιες τιμές, καθώς οι παράμετροι υπολογισμού (βλ. Κεφάλαιο 4) για αυτές τις καταστάσεις είναι ίδιες.

Πίνακας 5.26: Κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για τις εξεταζόμενες καταστάσεις BC – 1, BC – 5 & FD – 1

Homogeneous Loading	18.300	
Surge acceleration	0.599	m/s ²
Sway acceleration	0.899	m/s ²
Heave acceleration	2.997	m/s ²
Roll acceleration	0.058	m/s ²
Roll amplitude	20.509	deg
Roll period	15.636	s
Pitch acceleration	0.024	m/s ²
Pitch amplitude	6.990	deg
Pitch period	14.617	s
Alternate Light cargo	18.300	
Surge acceleration	0.599	m/s ²
Sway acceleration	0.899	m/s ²
Heave acceleration	2.997	m/s ²
Roll acceleration	0.058	m/s ²
Roll amplitude	20.509	deg
Roll period	15.636	s
Pitch acceleration	0.024	m/s ²
Pitch amplitude	6.990	deg
Pitch period	14.617	s
Accidental flooding	18.300	
Surge acceleration	0.480	m/s ²
Sway acceleration	0.719	m/s ²
Heave acceleration	2.398	m/s ²
Roll acceleration	0.046	m/s ²
Roll amplitude	16.408	deg
Roll period	15.636	s
Pitch acceleration	0.019	m/s ²
Pitch amplitude	5.592	deg
Pitch period	14.617	s

5.11.2 Υπολογισμός Επιταχύνσεων Ξηρού Φορτίου

Με βάση τον υπολογισμό των επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του πλοίου, οι τοπικές επιταχύνσεις του φορτίου υπολογίζονται μέσω των παρακάτω εξισώσεων (βλ. Κεφάλαιο 4.3).

$$\text{Longitudinal Acceleration: } a_x = -C_{XG} g \sin \varphi + C_{XS} a_{surge} + C_{XP} a_{pitch} (z - R)$$

$$\text{Transverse Acceleration: } a_y = C_{YG} g \sin \theta + C_{YS} a_{sway} - C_{YP} a_{roll} (z - R)$$

$$\text{Vertical Acceleration: } a_z = C_{ZH} a_{heave} + C_{ZR} a_{roll} y - C_{ZP} a_{pitch} (x - 0.45L)$$

όπου x, y, z οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους του αμπαριού, οι οποίες για το αμπάρι της μέσης τομής (Cargo Hold No.5) υπολογίστηκε:

$$X_{G_cargo} = 152.195 \text{ m}$$

$$Y_{G_cargo} = 0$$

$$Z_{G_cargo} = 13.298 \text{ m}$$

Για τον προσδιορισμό των τοπικών επιταχύνσεων του φορτίου σε κάθε δυναμική κατάσταση, υπολογίζονται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις συνιστώσες των επιταχύνσεων του υπό μελέτη πλοίου. Στους πίνακες (5.27) έως (5.29) συνοψίζονται οι υπολογισμοί για $f_T = 1$, κοινοί για κάθε κατάσταση φόρτωσης καθώς όλες έχουν σαν βύθισμα λειτουργίας το βύθισμα αντοχής.

Πίνακας 5.27: Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις επιταχύνσεις για τις δυναμικές καταστάσεις HSM – HSA – FSM στο βύθισμα $T_{LC} = T_{SC}$

Load Component		LCF	HSM-1	HSM-2	HSA-1	HSA-2	FSM-1	FSM-2
Longitudinal Accelerations	a_{surge}	C_{XS}	0.100	-0.100	0.200	-0.200	-0.200	0.200
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	-0.700	0.700	-0.800	0.800	0.150	-0.150
	$g \sin \varphi$	C_{XG}	0.600	-0.600	0.800	-0.800	-0.200	0.200
Transverse Accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$g \sin \theta$	C_{YG}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Vertical Accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	0.350	-0.350	0.300	-0.300	0.000	0.000
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	-0.700	0.700	-0.800	0.800	0.150	-0.150

Πίνακας 5.28: Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις επιταχύνσεις για τις δυναμικές καταστάσεις
BSR – BSP στο βύθισμα $T_{LC} = T_{SC}$

Load Component		LCF	BSR1P	BSR2P	BSR1S	BSR2S	BSP1P	BSP2P	BSP1S	BSP2S
Longitudinal Accelerations	a_{surge}	C_{XS}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.200	0.200	-0.200	0.200
	$g\sin\varphi$	C_{XG}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.200	-0.200	0.200	-0.200
Transverse Accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.900	0.900	0.900	-0.900
	a_{roll-y}	C_{YR}	1.000	-1.000	-1.000	1.000	0.300	-0.300	-0.300	0.300
	$g\sin\theta$	C_{YG}	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-0.200	0.200	0.200	-0.200
Vertical Accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	0.300	-0.300	0.300	-0.300	1.000	-1.000	1.000	-1.000
	a_{roll-z}	C_{ZR}	1.000	-1.000	-1.000	1.000	0.300	-0.300	-0.300	0.300
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.200	0.200	-0.200	0.200

Πίνακας 5.29 Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις επιταχύνσεις για τις δυναμικές καταστάσεις
OST – OSA στο βύθισμα $T_{LC} = T_{SC}$

Load Component		LCF	OST1P	OST2P	OST1S	OST2S	OSA1P	OSA2P	OSA1S	OSA2S
Longitudinal Accelerations	a_{surge}	C_{XS}	-0.050	0.050	-0.050	0.050	-0.350	0.350	-0.350	0.350
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.400	-0.400	0.400	-0.400	1.000	-1.000	1.000	-1.000
	$g\sin\varphi$	C_{XG}	-0.250	0.250	-0.250	0.250	-1.000	1.000	-1.000	1.000
Transverse Accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.300	0.300	0.300	-0.300
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.150	-0.150	-0.150	0.150	0.100	-0.100	-0.100	0.100
	$g\sin\theta$	C_{YG}	-0.100	0.100	0.100	-0.100	-0.100	0.100	0.100	-0.100
Vertical Accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	0.150	-0.150	0.150	-0.150	-0.200	0.200	-0.200	0.200
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.150	-0.150	-0.150	0.150	0.100	-0.100	-0.100	0.100
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.400	-0.400	0.400	-0.400	1.000	-1.000	1.000	-1.000

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, στους πίνακες (5.30) έως (5.32) συνοψίζονται οι τοπικές επιταχύνσεις του φορτίου σε κάθε δυναμική κατάσταση (dynamic load case), για την ελάχιστη κατάσταση φόρτωσης.

Πίνακας 5.30: Επιταχύνσεις ξηρού φορτίου σε κατάσταση ομογενούς φόρτωσης BC – 1

EDW	f_{β}	a_x [m/sec ²]	a_y [m/sec ²]	a_z [m/sec ²]	EDW	f_{β}	a_x [m/sec ²]	a_x [m/sec ²]	a_x [m/sec ²]
HSM-1	1.05	-0.671	0.000	1.502	BSP-2P	1.05	0.243	1.512	-3.126
HSM-2	1.05	0.671	0.000	-1.502	BSP-1S	1.05	-0.243	1.512	3.126
HSA-1	1.00	-0.852	0.000	1.417	BSP-2S	1.00	0.243	-1.512	-3.126
HSA-2	1.00	0.852	0.000	-1.417	OST-1P	1.00	0.277	-0.351	0.191
FSM-1	1.05	0.122	0.000	-0.097	OST-2P	1.05	-0.277	0.351	-0.191
FSM-2	1.05	-0.122	0.000	0.097	OST-1S	1.05	0.277	0.351	0.191
BSR-1P	0.8	0.000	-3.489	0.899	OST-2S	0.8	-0.277	-0.351	-0.191
BSR-2P	0.8	0.000	3.489	-0.899	OSA-1P	0.8	1.006	-0.619	-1.246
BSR-1S	0.8	0.000	3.489	0.899	OSA-2P	0.8	-1.006	0.619	1.246
BSR-2S	0.8	0.000	-3.489	-0.899	OSA-1S	0.8	1.006	0.619	-1.246
BSP-1P	0.8	-0.243	-1.512	3.126	OSA-2S	0.8	-1.006	-0.619	1.246

Πίνακας 5.31: Επιταχύνσεις ξηρού φορτίου σε κατάσταση εναλλάξ φόρτωσης BC – 5

EDW	f_{β}	a_x [m/sec ²]	a_y [m/sec ²]	a_z [m/sec ²]	EDW	f_{β}	a_x [m/sec ²]	a_x [m/sec ²]	a_x [m/sec ²]
HSM-1	1.05	-0.671	0.000	1.502	BSP-2P	1.05	0.243	1.512	-3.126
HSM-2	1.05	0.671	0.000	-1.502	BSP-1S	1.05	-0.243	1.512	3.126
HSA-1	1.00	-0.852	0.000	1.417	BSP-2S	1.00	0.243	-1.512	-3.126
HSA-2	1.00	0.852	0.000	-1.417	OST-1P	1.00	0.277	-0.351	0.191
FSM-1	1.05	0.122	0.000	-0.097	OST-2P	1.05	-0.277	0.351	-0.191
FSM-2	1.05	-0.122	0.000	0.097	OST-1S	1.05	0.277	0.351	0.191
BSR-1P	0.8	0.000	-3.489	0.899	OST-2S	0.8	-0.277	-0.351	-0.191
BSR-2P	0.8	0.000	3.489	-0.899	OSA-1P	0.8	1.006	-0.619	-1.246
BSR-1S	0.8	0.000	3.489	0.899	OSA-2P	0.8	-1.006	0.619	1.246
BSR-2S	0.8	0.000	-3.489	-0.899	OSA-1S	0.8	1.006	0.619	-1.246
BSP-1P	0.8	-0.243	-1.512	3.126	OSA-2S	0.8	-1.006	-0.619	1.246

Πίνακας 5.32: Επιταχύνσεις ξηρού φορτίου σε κατάσταση κατάκλισης FD – 1

EDW	f_{β}	a_x [m/sec ²]	a_y [m/sec ²]	a_z [m/sec ²]	EDW	f_{β}	a_x [m/sec ²]	a_x [m/sec ²]	a_x [m/sec ²]
HSM-1	1.00	-0.538	0.000	1.201	BSP-2P	1.00	0.195	1.214	-2.501
HSM-2	1.00	0.538	0.000	-1.201	BSP-1S	1.00	-0.195	1.214	2.501
HSA-1	1.00	-0.683	0.000	1.133	BSP-2S	1.00	0.195	-1.214	-2.501
HSA-2	1.00	0.683	0.000	-1.133	OST-1P	1.00	0.222	-0.283	0.153
FSM-1	1.00	0.098	0.000	-0.078	OST-2P	1.00	-0.222	0.283	-0.153
FSM-2	1.00	-0.098	0.000	0.078	OST-1S	1.00	0.222	0.283	0.153
BSR-1P	1.00	0.000	-2.813	0.719	OST-2S	1.00	-0.222	-0.283	-0.153
BSR-2P	1.00	0.000	2.813	-0.719	OSA-1P	1.00	0.805	-0.497	-0.997
BSR-1S	1.00	0.000	2.813	0.719	OSA-2P	1.00	-0.805	0.497	0.997
BSR-2S	1.00	0.000	-2.813	-0.719	OSA-1S	1.00	0.805	0.497	-0.997
BSP-1P	1.00	-0.195	-1.214	2.501	OSA-2S	1.00	-0.805	-0.497	0.997

5.11.3 Υπολογισμός Τοπικών Εσωτερικών Πιέσεων

Ο υπολογισμός των τοπικών εσωτερικών πιέσεων για τα εν λόγω στοιχεία γίνεται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4.5 και αφορά πιέσεις λόγω ξηρού φορτίου χύδην, καθώς και πιέσεις λόγω κατάκλισης, ανάλογα με την κατάσταση φόρτωσης. Για τον υπολογισμό της πίεσης λόγω ξηρού φορτίου είτε σε κατάσταση ομογενούς είτε εναλλάξ φόρτωσης χρησιμοποιούνται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αμπαριού, τα οποία ορίζουν την ισοδύναμη ελεύθερη επιφάνεια του ξηρού φορτίου χύδην και ανάλογα με την κατάσταση φόρτωσης χρησιμοποιείται η αντίστοιχη πυκνότητα φορτίου ρ_C .

Πίνακας 5.33: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά αμπαριού για τον υπολογισμό των εσωτερικών πιέσεων λόγω ξηρού φορτίου χύδην

Dry Cargo Characteristics – Cargo Hold No. 5		
Απόσταση από το ίχνος του Topside Tank	h_{HPU}	14.84 m
Εμβαδό άνωθεν του ίχνους του Topside Tank	S_0	250.715 m ²
Ισοδύναμο Ύψους άνωθεν του ίχνους του Topside Tank	h_0	5.858 m
Πλάτος Αμπαριού	B_H	45 m
Μήκος Αμπαριού	l_H	26.39 m
Όγκος στομίου του αμπαριού	V_{HC}	340.34 m ³
Συνολικός Όγκος Αμπαριού μαζί με το στόμιο	V_{Full}	23703 m ³
Βάρος φορτίου Αμπαριού σε κατάσταση ομογενούς φόρτωσης	M_{HD}	37400 tons
Βάρος φορτίου Αμπαριού σε κατάσταση εναλλάξ φόρτωσης	M_H	19900 tons
Ύψος διπυθμένου	h_{DB}	2.45 m
Ισοδύναμο Ύψος Φορτίου	z_C	23.148 m
Πραγματική Πυκνότητα Φορτίου σε ομογενή φόρτωση	$\rho_{C-Homo-actual}$	0.840 ton/m ³
Ελάχιστη Πυκνότητα Φορτίου σε ομογενή φόρτωση	ρ_C	1.00 ton/m ³
Πυκνότητα Φορτίου σε φόρτωση εναλλάξ	ρ_C	1.6618 ton/m ³
Γωνία Ανάπαυσης Φορτίου	Ψ	30 deg
Κέντρο Βάρους Αμπαριού		
Διαμήκης Συνιστώσα	X_{G_cargo}	152.195 m
Εγκάρσια Συνιστώσα	Y_{G_cargo}	0 m
Κατακόρυφη Συνιστώσα	Z_{G_cargo}	13.298 m

Σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4.5, οι πυκνότητες για τις καταστάσεις φόρτωσης ομογενούς και εναλλάξ υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

- Για ομογενή φόρτωση: $\rho_C = \frac{M_H}{V_{Full}}$, με ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή $\rho_C = 1.00 \text{ t/m}^3$
- Για φόρτωση εναλλάξ: $\rho_C = \frac{M_{HD} + 0.1 M_H}{V_{Full}}$

5.11.4 Υπολογισμός Φορτίσεων Γάστρας

Στο σημείο αυτό υπολογίζονται οι σχεδιαστικές φορτίσεις γάστρας που αφορούν την κατακόρυφη και οριζόντια κάμψη. Συγκεκριμένα στον πίνακα (5.34) συνοψίζονται οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές για τα δυναμικά σενάρια BC – 1, BC – 5 (Seagoing Condition), τα αντίστοιχα στατικά σενάρια BC – 2, BC – 6 (Harbour Condition) και τα σενάρια κατάκλυσης FD – 1, FD – 2 (Flooded Condition).

Πίνακας 5.34: Σχεδιαστικές Καμπτικές Ροπές για τις εξεταζόμενες καταστάσεις

Vertical Bending Moments	Design Load Scenario	Hogging [kN m]	Sagging [kN m]
Still Water Bending Moment	S.W.B.M. Seagoing Condition	3.8363e+06	-2.9603e+06
	S.W.B.M. Harbour Condition	4.7954e+06	-3.7004e+06
	S.W.B.M. Flooded Condition	4.2199e+06	-3.2563e+06
Wave Vertical Bending Moment	W.V.B.M. Seagoing Condition	5.9588e+06	-6.3124e+06
	W.V.B.M. Harbour Condition	-	-
	W.V.B.M. Flooded Condition	4.767e+06	-5.0499e+06
Wave Horizontal Bending Moment	W.H.B.M. Seagoing Condition	4.6980e+06	
	W.H.B.M. Harbour Condition	-	
	W.H.B.M. Flooded Condition	3.7584e+06	

Για τον υπολογισμό των καμπτικών φορτίσεων της γάστρας σε κάθε δυναμική κατάσταση φόρτισης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων και ο διορθωτικός συντελεστής κύματος. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται προσαρμογή των καμπτικών ροπών που υπολογίστηκαν προηγουμένως προκειμένου να περιγράψουν την εκάστοτε δυναμική κατάσταση. Στους πίνακες (5.35) έως (5.37), υπολογίζονται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων για λόγο βυθίσματος $f_T = 1$, καθώς και οι προκύπτουσες δυναμικές φορτίσεις της καμπτικής και οριζόντιας ροπής, για κάθε κατάσταση.

Οι στατικές καταστάσεις BC – 2, BC – 6 & FD – 2 περιγράφονται ως καταστάσεις STATIC στους αντίστοιχους πίνακες. Οι πίνακες αυτοί περιλαμβάνουν τις δυσμενέστερες φορτίσεις σε ήρεμο νερό (Hogging ή Sagging) που προκύπτουν σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες δυναμικές.

Πίνακας 5.35: Δυναμικές φορτίσεις γάστρας στο βύθισμα αντοχής για τις εξεταζόμενες καταστάσεις BC – 1 & 2

EDW	f_β	C_{wv}	M_{wv-LC} [kNm]	M_{sw} [kNm]	C_{wh}	M_{wh-LC} [kNm]
STATIC	0	0	0	4.7954e+06	0	0
HSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
HSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
HSA – 1	1.00	-0.70	-4.4187e+06	-2.9603e+06	0	0
HSA – 2	1.00	0.70	4.1712e+06	3.8363e+06	0	0
FSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
FSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
BSR – 1P	0.80	-0.10	-5.0499e+05	-2.9603e+06	0.10	3.7584e+05
BSR – 2P	0.80	0.10	4.7670e+05	3.8363e+06	-0.10	-3.7584e+05
BSP – 1P	0.80	-0.50	-2.5250e+06	-2.9603e+06	0	0
BSP – 2P	0.80	0.50	2.3835e+06	3.8363e+06	0	0
OST – 1P	1.00	-0.50	-3.1562e+06	-2.9603e+06	-0.90	-4.2282e+06
OST – 2P	1.00	0.50	2.9794e+06	3.8363e+06	0.90	4.2282e+06
OSA – 1P	1.00	0.25	1.4897e+06	3.8363e+06	0.75	3.5235e+06
OSA – 2P	1.00	-0.25	-1.5781e+06	-2.9603e+06	-0.75	-3.5235e+06

Πίνακας 5.36: Δυναμικές φορτίσεις γάστρας στο βύθισμα αντοχής για τις εξεταζόμενες καταστάσεις BC – 5 & 6

EDW	f_{β}	C_{wv}	M_{wv-LC} [kNm]	M_{sw} [kNm]	C_{WH}	M_{wh-LC} [kNm]
STATIC	0	0	0	4.7954e+06	0	0
HSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
HSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
HSA – 1	1.00	-0.70	-4.4187e+06	-2.9603e+06	0	0
HSA – 2	1.00	0.70	4.1712e+06	3.8363e+06	0	0
FSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
FSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
BSR – 1P	0.80	-0.10	-5.0499e+05	-2.9603e+06	0.10	3.7584e+05
BSR – 2P	0.80	0.10	4.7670e+05	3.8363e+06	-0.10	-3.7584e+05
BSP – 1P	0.80	-0.50	-2.5250e+06	-2.9603e+06	0	0
BSP – 2P	0.80	0.50	2.3835e+06	3.8363e+06	0	0
OST – 1P	1.00	-0.50	-3.1562e+06	-2.9603e+06	-0.90	-4.2282e+06
OST – 2P	1.00	0.50	2.9794e+06	3.8363e+06	0.90	4.2282e+06
OSA – 1P	1.00	0.25	1.4897e+06	3.8363e+06	0.75	3.5235e+06
OSA – 2P	1.00	-0.25	-1.5781e+06	-2.9603e+06	-0.75	-3.5235e+06

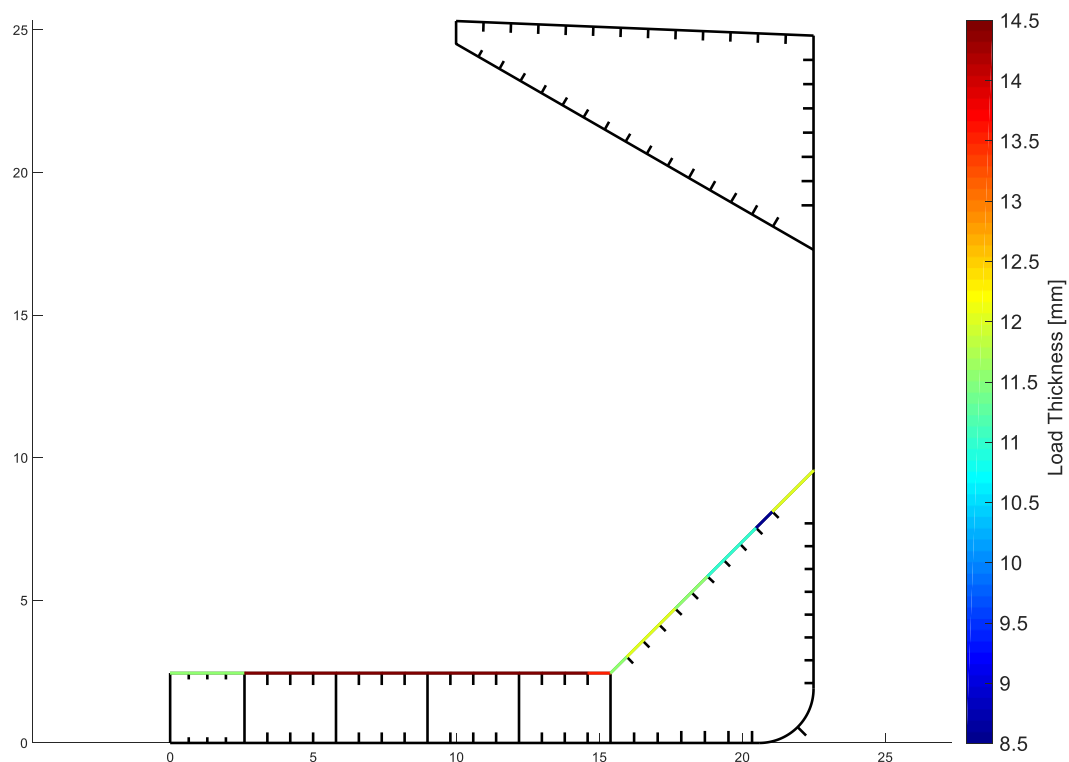
Πίνακας 5.37 Δυναμικές φορτίσεις γάστρας στο βύθισμα αντοχής για τις εξεταζόμενες καταστάσεις FD – 1 & 2

EDW	f_{β}	C_{wv}	M_{wv-LC} [kNm]	M_{sw} [kNm]	C_{WH}	M_{wh-LC} [kNm]
STATIC	0	0	0	4.2199e+06	0	0
HSM – 1	1.00	-1.00	-5.0499e+06	-3.2563e+06	0	0
HSM – 2	1.00	1.00	4.767e+06	4.2199e+06	0	0
HSA – 1	1.00	-0.70	-3.5349e+06	-3.2563e+06	0	0
HSA – 2	1.00	0.70	3.3369e+06	4.2199e+06	0	0
FSM – 1	1.00	-1.00	-5.0499e+06	-3.2563e+06	0	0
FSM – 2	1.00	1.00	4.767e+06	4.2199e+06	0	0
BSR – 1P	1.00	-0.10	-5.0499e+05	-3.2563e+06	0.10	3.7584e+05
BSR – 2P	1.00	0.10	4.767e+05	4.2199e+06	-0.10	-3.7584e+05
BSP – 1P	1.00	-0.50	-2.525e+06	-3.2563e+06	0	0
BSP – 2P	1.00	0.50	2.3835e+06	4.2199e+06	0	0
OST – 1P	1.00	-0.50	-2.525e+06	-3.2563e+06	-0.90	-3.3826e+06
OST – 2P	1.00	0.50	2.3835e+06	4.2199e+06	0.90	3.3826e+06
OSA – 1P	1.00	0.25	1.1918e+06	4.2199e+06	0.75	2.8188e+06
OSA – 2P	1.00	-0.25	-1.2625e+06	-3.2563e+06	-0.75	-2.8188e+06

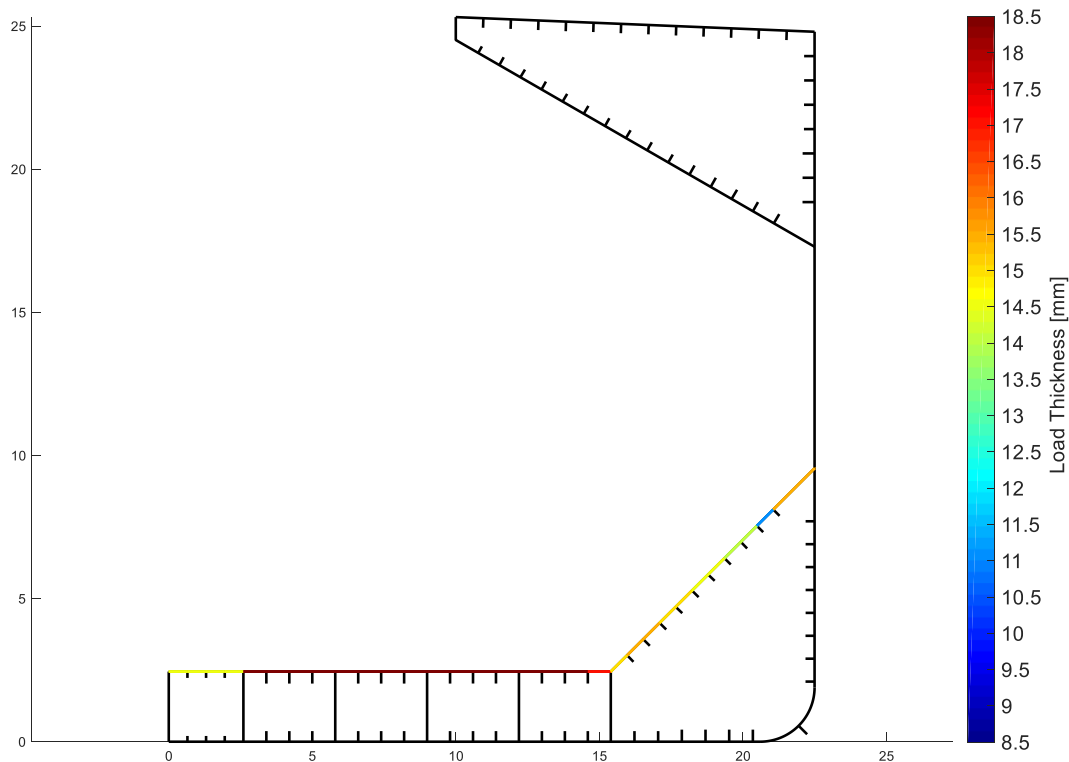
Με δεδομένες τις δυναμικές φορτίσεις της γάστρας M_{wv-LC} και M_{wh-LC} , καθώς και την κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό για κατάσταση Hogging ή Sagging, μπορούν να υπολογιστούν οι κατανομές των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων που επάγονται σε κάθε δυναμική κατάσταση, όπως υπολογίστηκαν αναλυτικά προηγουμένως στο εδάφιο (5.10.4).

5.11.5 Απαιτήση Πάχους για Στοιχειώδη Ελάσματα και Κρίσιμες Καταστάσεις

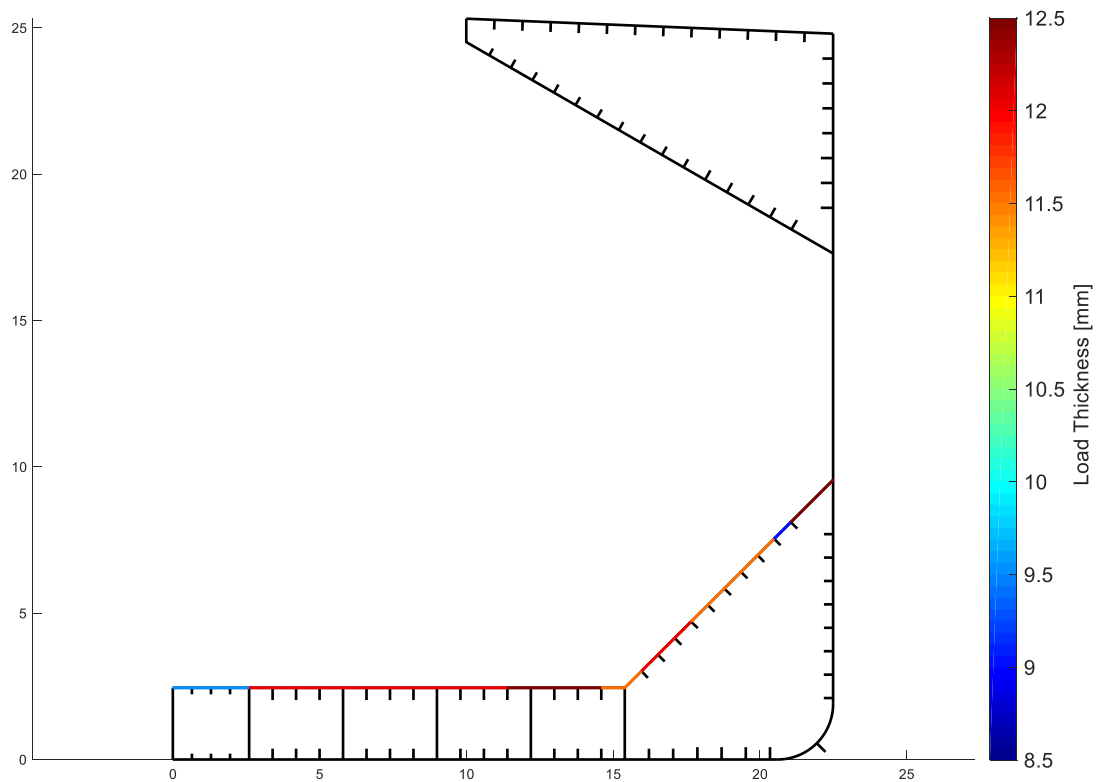
Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων για κάθε κατάσταση φόρτωσης προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε πάχος σε κάθε περίπτωση (Σχήμα 5.64 έως 5.66) για κάθε στοιχειώδες έλασμα και η αντίστοιχη κρίσιμη τελική κατάσταση (Σχήμα 5.67).



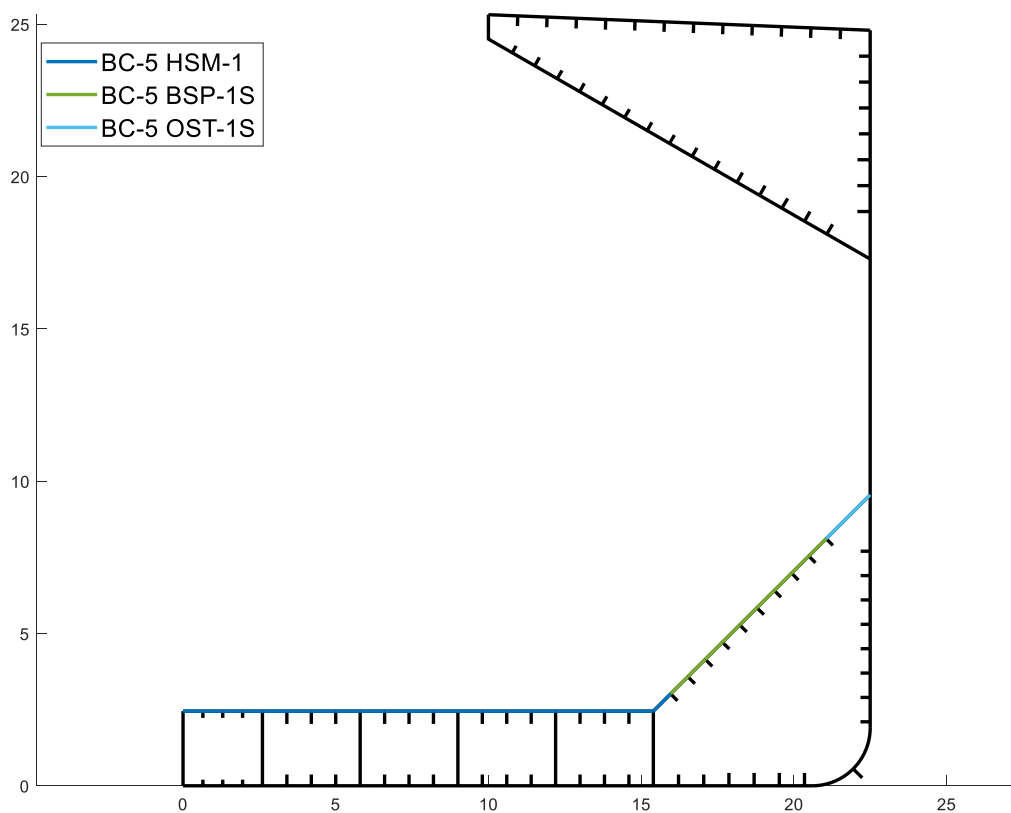
Σχήμα 5.64: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος ελάσματος βασισμένο στις καταστάσεις BC – 1 (S+D) και BC – 2 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate. Τα υπόλοιπα στοιχεία που δεν εξετάζονται στο εδάφιο αυτό απεικονίζονται με μαύρο χρώμα



Σχήμα 5.65: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος ελάσματος βασισμένο στις καταστάσεις BC – 5 (S+D) και BC – 6 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate



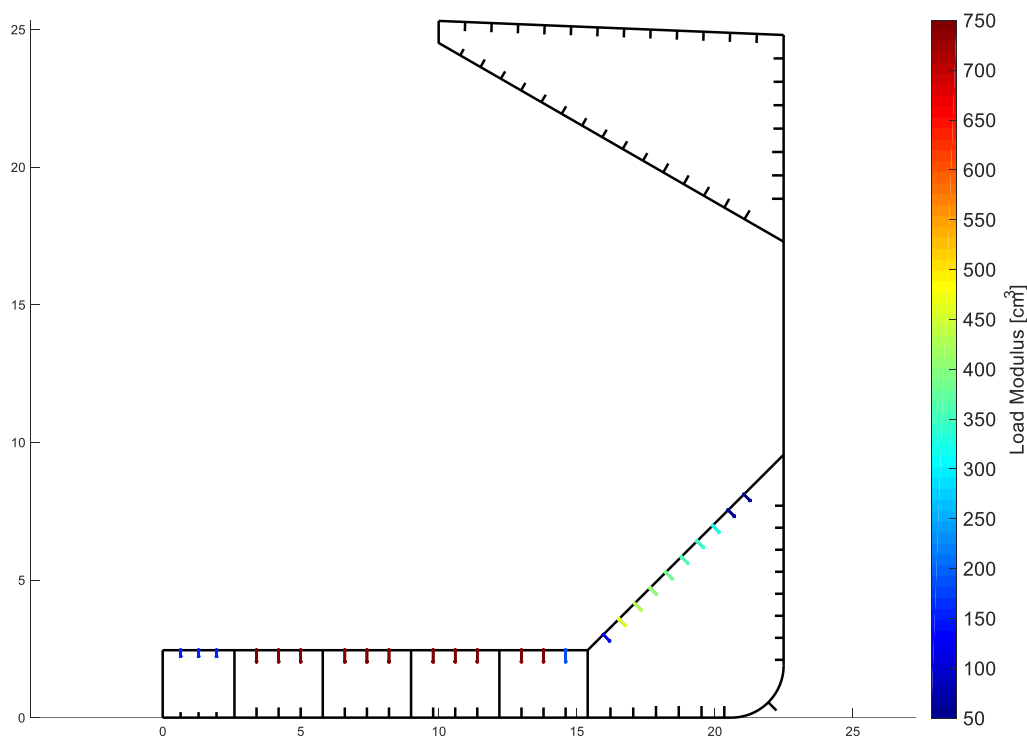
Σχήμα 5.66: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος ελάσματος βασισμένο στις καταστάσεις FD – 1 (S+D) και FD – 2 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate



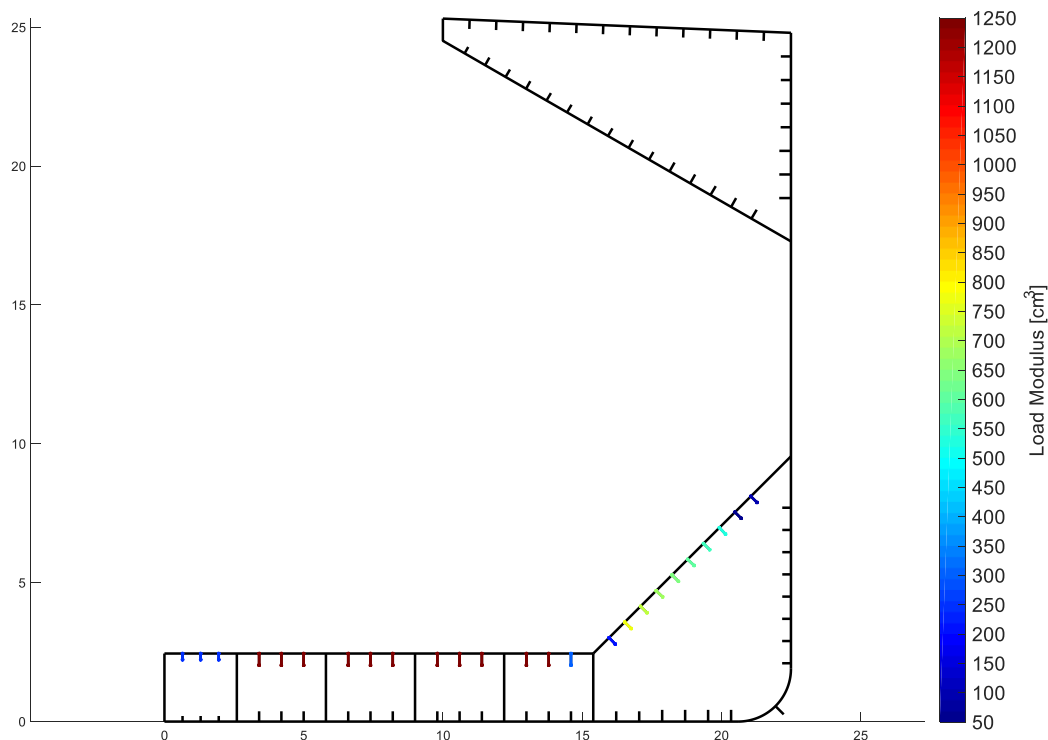
Σχήμα 5.67: Κρίσιμες δυναμικές καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση πάχους ελάσματος για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate. Σε όλα τα στοιχεία, η δυναμική κατάσταση φόρτωσης BC – 5 (φόρτωση εναλλάξ) επικρατεί έναντι των υπολοίπων

5.11.6 Απαίτηση Ροπής Αντίστασης για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις

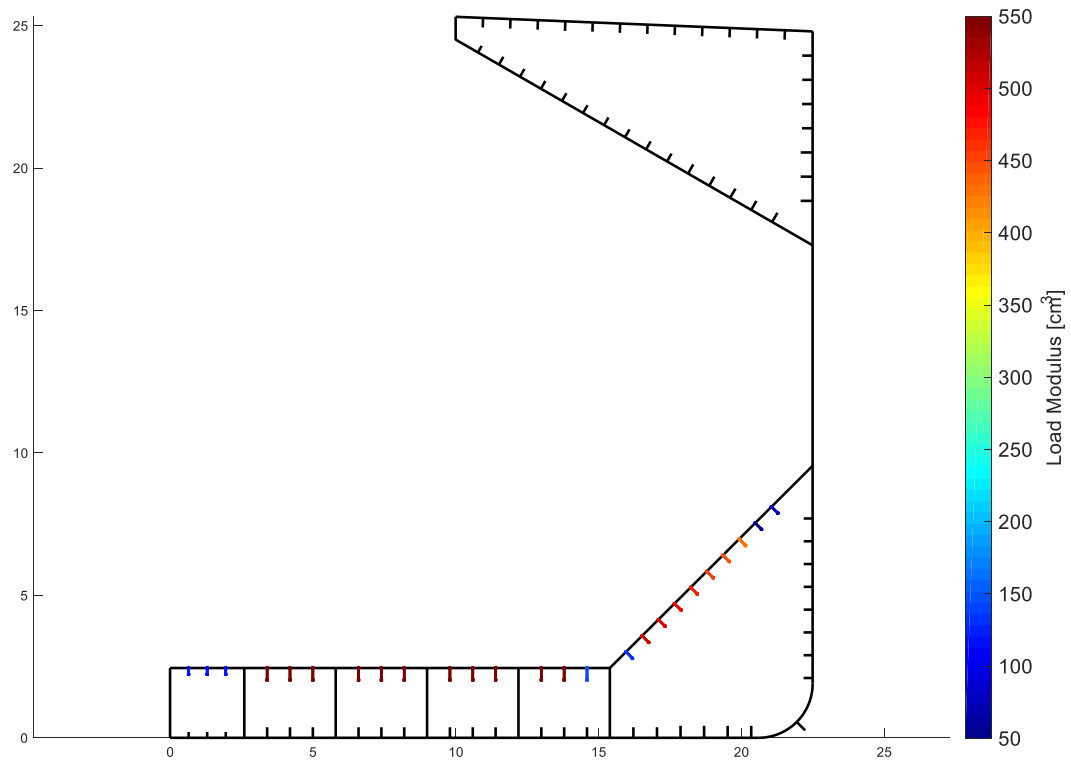
Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων για κάθε κατάσταση φόρτωσης προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε ροπή αντίστασης σε κάθε περίπτωση (Σχήμα 5.68 έως 5.70) για κάθε στοιχειώδες έλασμα και η αντίστοιχη τελική κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.71).



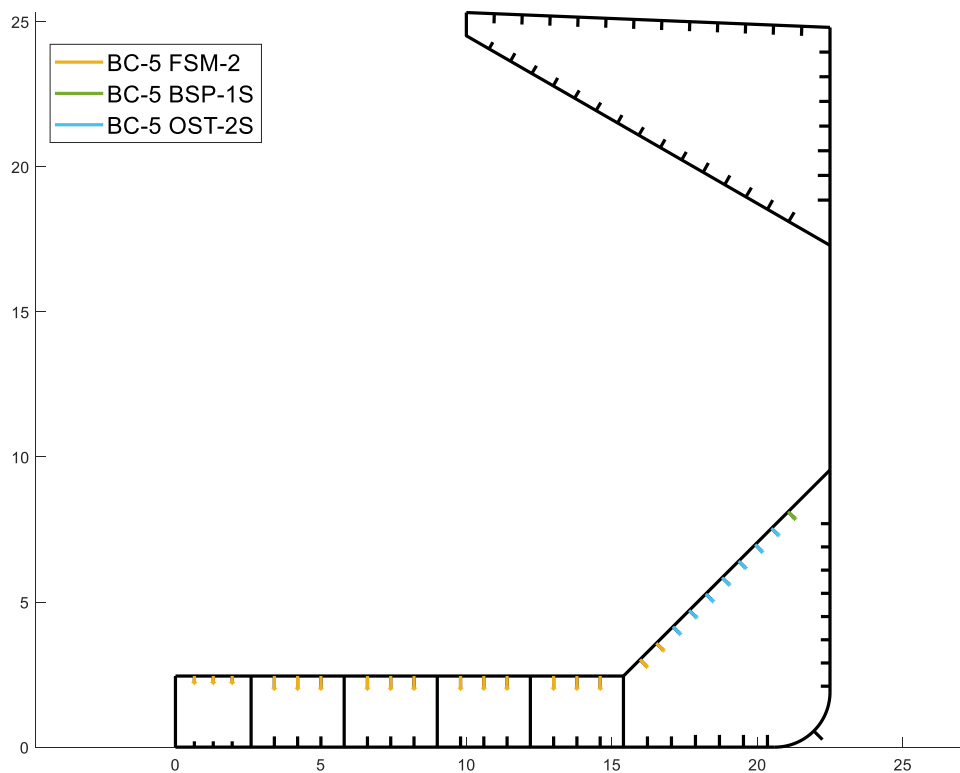
Σχήμα 5.68: Μέγιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης βασισμένη στις καταστάσεις BC – 1 (S+D) και BC – 2 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate. Τα υπόλοιπα στοιχεία που δεν εξετάζονται στο εδάφιο αυτό απεικονίζονται με μαύρο χρώμα



Σχήμα 5.69: Μέγιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης βασισμένη στις καταστάσεις BC – 5 (S+D) και BC – 6 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate



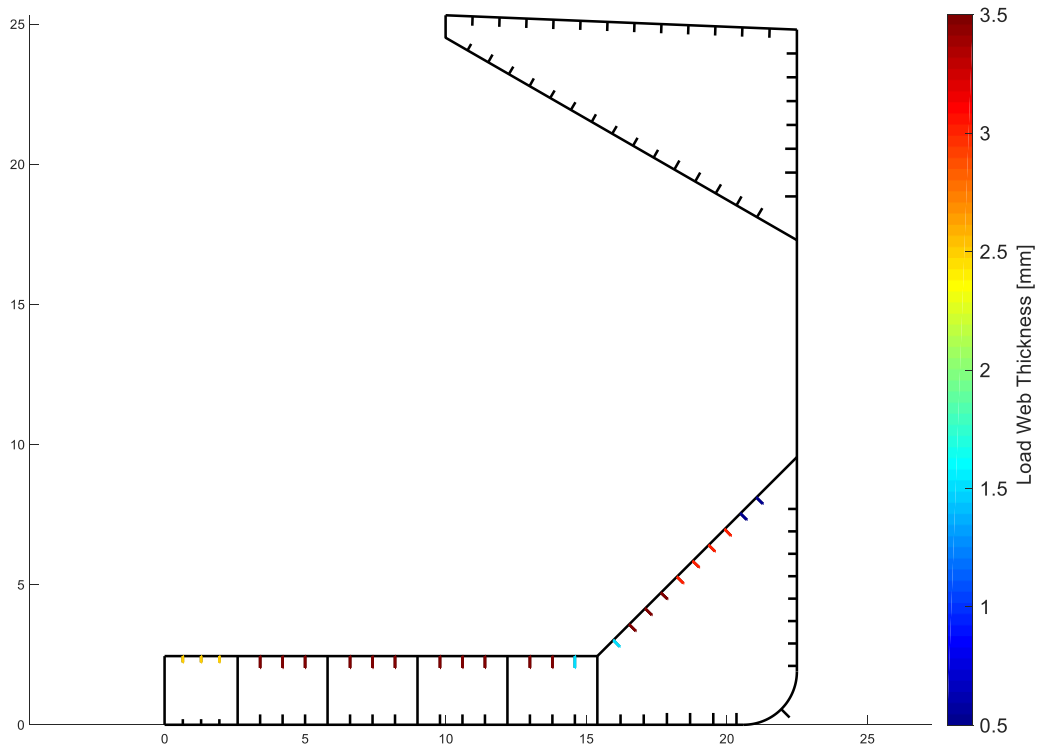
Σχήμα 5.70: Μέγιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης βασισμένη στις καταστάσεις FD – 1 (S) και FD – 2 (S+D) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate



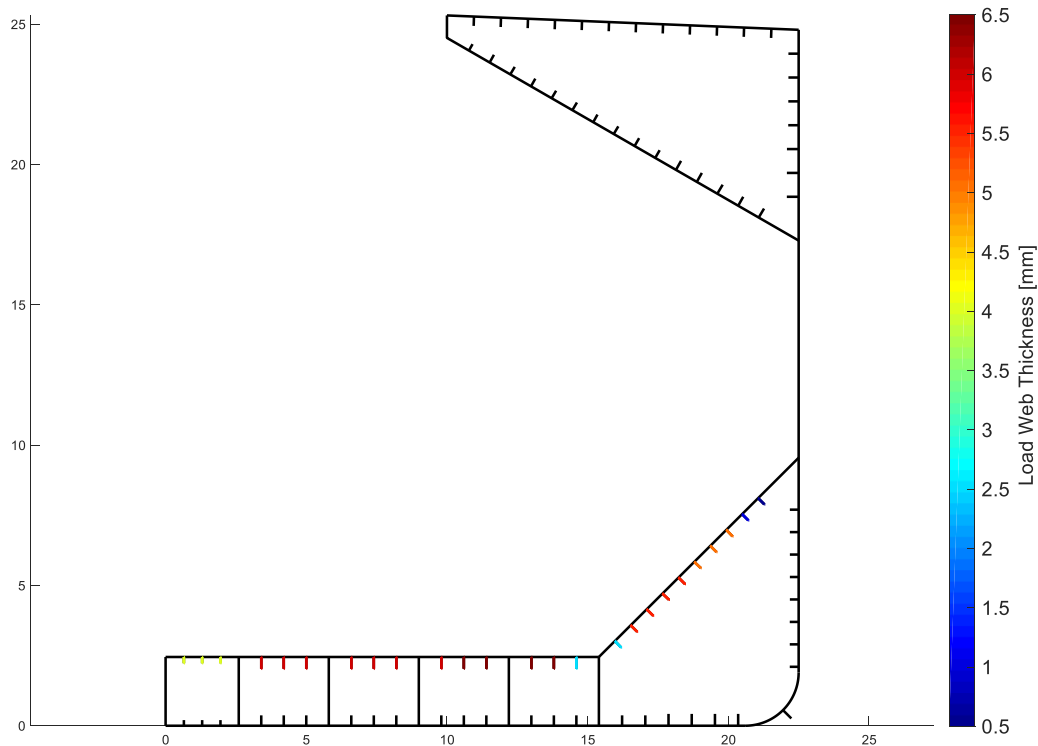
Σχήμα 5.71: Κρίσιμες δυναμικές καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση ροπής αντίστασης. Σε όλα τα στοιχεία, η δυναμική κατάσταση φόρτωσης BC – 5 (φόρτωση εναλλάξ) επικρατεί έναντι των υπολοίπων.

5.11.7 Απαιτηση Πάχους Κορμού για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις

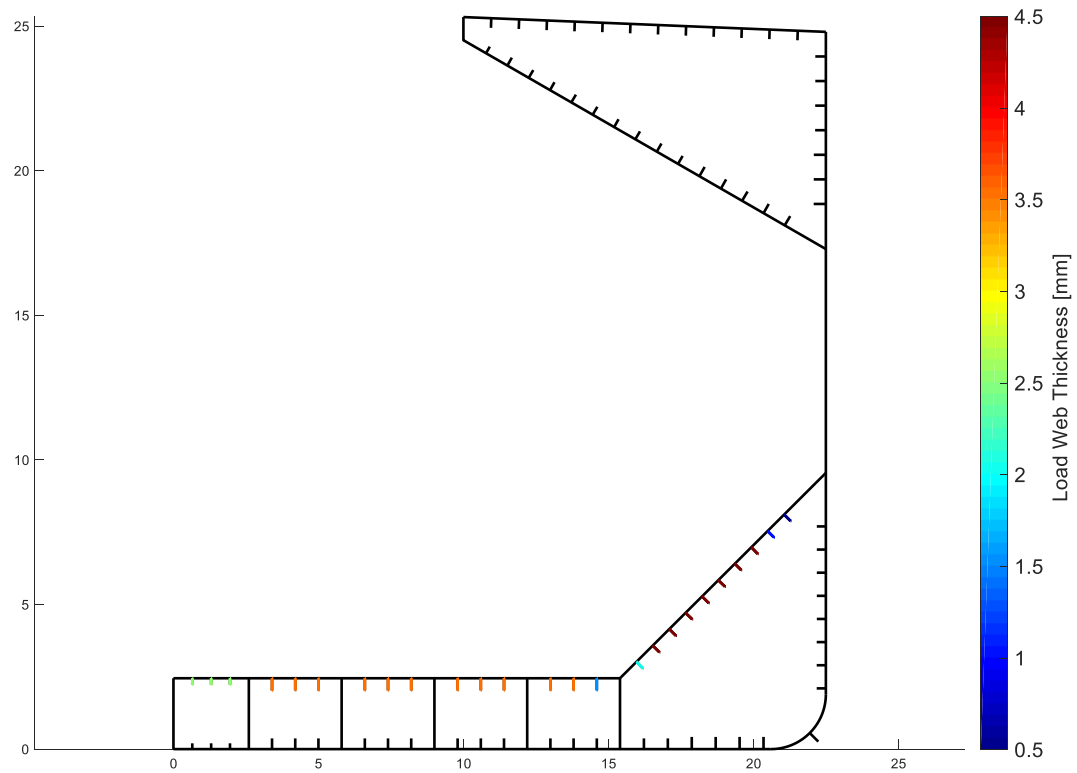
Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων για κάθε κατάσταση φόρτωσης προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε πάχος κορμού σε κάθε περίπτωση (Σχήμα 5.72 έως 5.74) για κάθε ενισχυτικό και η αντίστοιχη τελική κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.75).



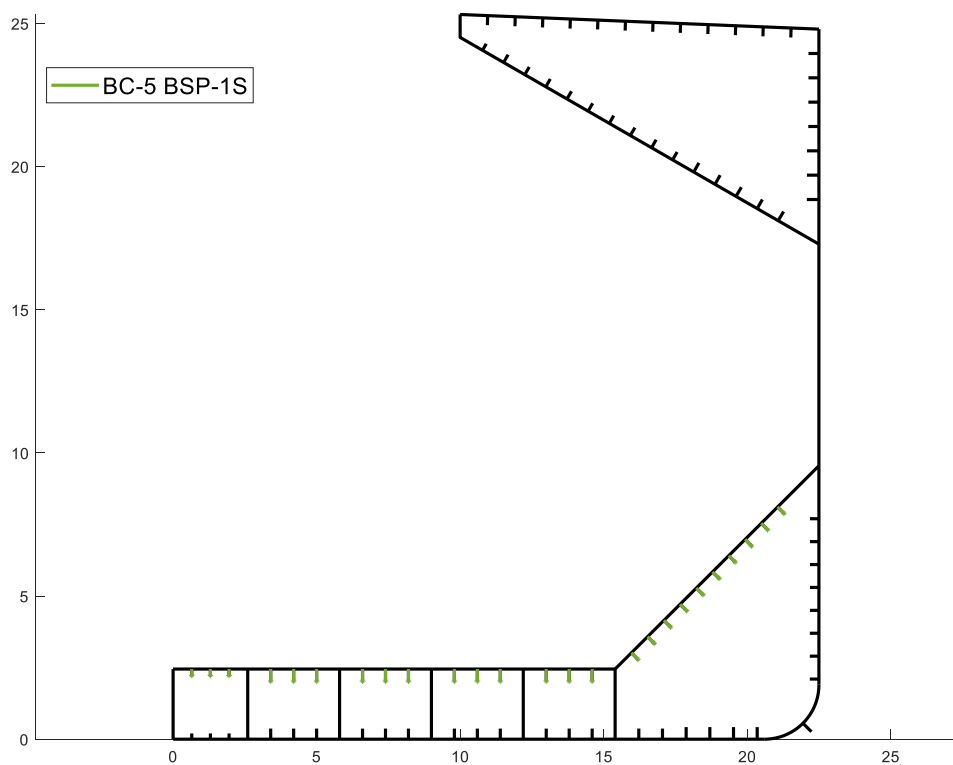
Σχήμα 5.72: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ενισχυτικών βασισμένο στις καταστάσεις BC – 1 (S+D) και BC – 2 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate. Τα υπόλοιπα στοιχεία που δεν εξετάζονται στο εδάφιο αυτό απεικονίζονται με μαύρο χρώμα



Σχήμα 5.73: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ενισχυτικών βασισμένο στις καταστάσεις BC – 5 (S+D) και BC – 6 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate



Σχήμα 5.74: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ενισχυτικών βασισμένο στις καταστάσεις FD – 1 (S+D) και FD – 2 (S) για τον εσωτερικό πυθμένα και το hopper plate

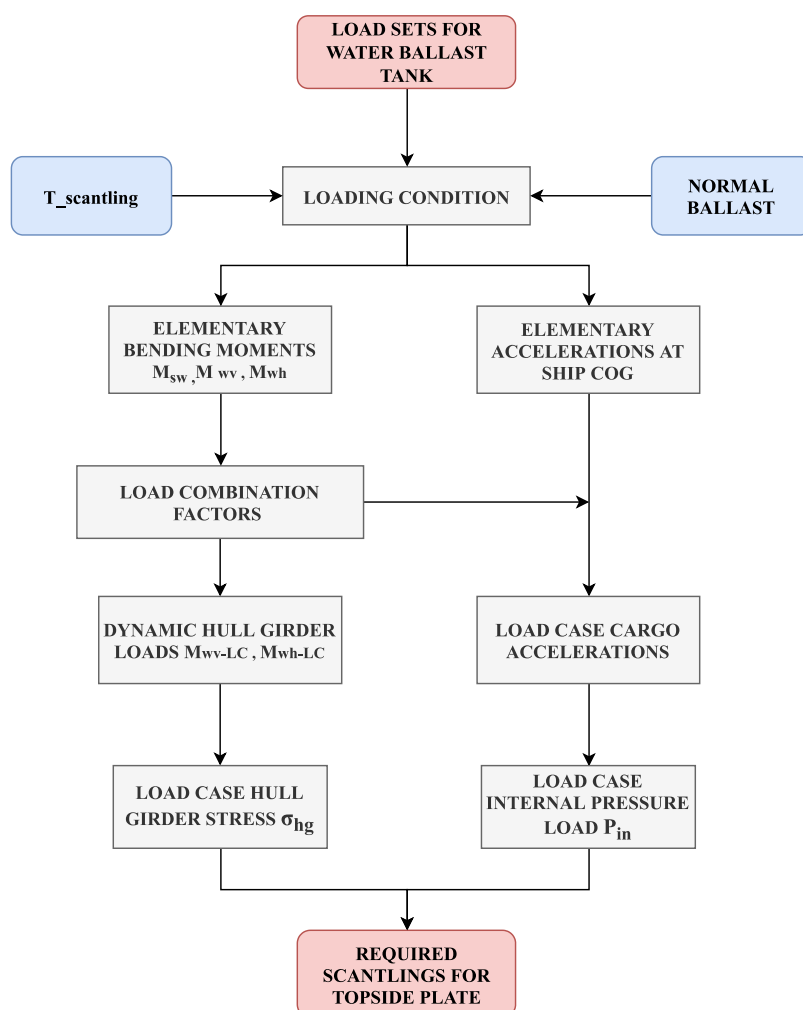


Σχήμα 5.75: Κρίσιμη δυναμική κατάσταση με την δυσμενέστερη απαίτηση πάχους κορμού . Σε όλα τα στοιχεία, η δυναμική κατάσταση φόρτωσης BC – 5 (φόρτωση εναλλάξ) επικρατεί έναντι των υπολοίπων.

5.12 Φορτίσεις και Απαιτήσεις Στοιχείων Δεξαμενής Έρματος

Για τον έλεγχο των στοιχείων του ελάσματος της άνω πλευρικής δεξαμενής (Topside Tank) εξετάζονται οι καταστάσεις **WB – 1** και **WB – 3** του πίνακα (5.15). Στο σχήμα (5.76) περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό των φορτίσεων σε κάθε κατάσταση. Συγκεκριμένα για την κατάσταση WB – 1, η οποία αποτελεί σενάριο δυναμικών φορτίσεων (S+D), υπολογίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- Σχεδιαστικές κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{sw-h} , M_{sw-s} και M_{wv-h} , M_{wv-s} για συνθήκες κανονικής πλεύσης (Seagoing)
- Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων για λόγο βυθίσματος $f_T = 0.5$
- Φορτίσεις γάστρας M_{wv-LC} και M_{wh-LC} για τις επιμέρους δυναμικές καταστάσεις φόρτισης
- Κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για την κατάσταση Normal Ballast
- Εσωτερικές πιέσεις P_{in} λόγω υγρού φορτίου ($P_{ls} + P_{ld}$) για τις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης



Σχήμα 5.76: Διαδικασία υπολογισμού των φορτίσεων για τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων – Load Based του ελάσματος του topside tank

Για την κατάσταση WB – 3, η οποία αποτελεί σενάριο στατικής φόρτισης (S) υπολογίζονται οι εξής παράμετροι:

- Σχεδιαστικές κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{sw-p-h} και M_{sw-p-s} για συνθήκες Harbour
- Εσωτερικές πιέσεις P_{in} λόγω υγρού φορτίου (P_{ls})

5.12.1 Υπολογισμός Κινήσεων και Επιταχύνσεων Πλοίου

Σε πρώτο στάδιο υπολογίζονται οι κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για κάθε κατάσταση φόρτωσης, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται για τον υπολογισμό των επιταχύνσεων του υγρού φορτίου (έρμα) για την κατάσταση φόρτωσης Normal Ballast σε συνδυασμό με τις δυναμικές καταστάσεις. Στον πίνακα (5.38) συνοψίζονται τα αποτελέσματα για την εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης στο βύθισμα ερματισμού $T_{BAL} = 7.7$ m

Πίνακας 5.38: Κινήσεις και επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του πλοίου για την κατάσταση WB – 1

Normal Ballast	7.700	
Surge acceleration		0.599 m/s ²
Sway acceleration		0.899 m/s ²
Heave acceleration		2.997 m/s ²
Roll acceleration		0.106 m/s ²
Roll amplitude		22.606 deg
Roll period		12.123 s
Pitch acceleration		0.032 m/s ²
Pitch amplitude		6.990 deg
Pitch period		12.659 s

5.12.2 Υπολογισμός Επιταχύνσεων Υγρού Φορτίου

Για τον προσδιορισμό των τοπικών επιταχύνσεων του φορτίου σε κάθε δυναμική κατάσταση, υπολογίζονται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις συνιστώσες των επιταχύνσεων του υπό μελέτη πλοίου. Στους πίνακες (5.39) έως (5.41) συνοψίζονται οι υπολογισμοί, για $f_T = 0.5$.

Πίνακας 5.39: Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις επιταχύνσεις για τις δυναμικές καταστάσεις HSM – HSA – FSM στο βύθισμα $T_{LC} = T_{BAL}$

Load Component		LCF	HSM-1	HSM-2	HSA-1	HSA-2	FSM-1	FSM-2
Longitudinal Accelerations	a_{surge}	C_{XS}	0.100	-0.100	0.200	-0.200	-0.200	0.200
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	-0.700	0.700	-0.800	0.800	0.150	-0.150
	$g\sin\varphi$	C_{XG}	0.600	-0.600	0.800	-0.800	-0.200	0.200
Transverse Accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	a_{roll-y}	C_{YR}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$g\sin\theta$	C_{YG}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Vertical Accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	0.350	-0.350	0.300	-0.300	0.000	0.000
	a_{roll-z}	C_{ZR}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	-0.700	0.700	-0.800	0.800	0.150	-0.150

Πίνακας 5.40: Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις επιταχύνσεις για τις δυναμικές καταστάσεις
BSR – BSP στο βύθισμα $T_{LC} = T_{BAL}$

Load Component		LCF	BSR1P	BSR2P	BSR1S	BSR2S	BSP1P	BSP2P	BSP1S	BSP2S
Longitudinal Accelerations	a_{surge}	C_{XS}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.050	0.050	-0.050	0.050
	$g\sin\varphi$	C_{XG}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.050	-0.050	0.050	-0.050
Transverse Accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0.100	-0.100	-0.100	0.100	-0.900	0.900	0.900	-0.900
	a_{roll-y}	C_{YR}	1.000	-1.000	-1.000	1.000	0.300	-0.300	-0.300	0.300
	$g\sin\theta$	C_{YG}	-1.000	1.000	1.000	-1.000	-0.200	0.200	0.200	-0.200
Vertical Accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	0.500	-0.500	0.500	-0.500	1.000	-1.000	1.000	-1.000
	a_{roll-z}	C_{ZR}	1.000	-1.000	-1.000	1.000	0.300	-0.300	-0.300	0.300
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.050	0.050	-0.050	0.050

Πίνακας 5.41: Συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τις επιταχύνσεις για τις δυναμικές καταστάσεις
OST – OSA στο βύθισμα $T_{LC} = T_{BAL}$

Load Component		LCF	OST1P	OST2P	OST1S	OST2S	OSA1P	OSA2P	OSA1S	OSA2S
Longitudinal Accelerations	a_{surge}	C_{XS}	-0.100	0.100	-0.100	0.100	-0.400	0.400	-0.400	0.400
	$a_{pitch-x}$	C_{XP}	0.550	-0.550	0.550	-0.550	1.000	-1.000	1.000	-1.000
	$g\sin\varphi$	C_{XG}	-0.3500	0.3500	-0.3500	0.3500	-1.000	1.000	-1.000	1.000
Transverse Accelerations	a_{sway}	C_{YS}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.250	0.250	0.250	-0.250
	a_{roll-y}	C_{YR}	-0.050	0.050	0.050	-0.050	0.200	-0.200	-0.200	0.200
	$g\sin\theta$	C_{YG}	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.150	0.150	0.150	-0.150
Vertical Accelerations	a_{heave}	C_{ZH}	0.050	-0.050	0.050	-0.050	-0.100	0.100	-0.100	0.100
	a_{roll-z}	C_{ZR}	-0.050	0.050	0.050	-0.050	0.200	-0.200	-0.200	0.200
	$a_{pitch-z}$	C_{ZP}	0.550	-0.550	0.550	-0.550	1.000	-1.000	1.000	-1.000

Με βάση τον υπολογισμό των επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του πλοίου, οι τοπικές επιταχύνσεις του φορτίου υπολογίζονται μέσω των παρακάτω εξισώσεων (βλ. Κεφάλαιο 4.3).

$$\text{Longitudinal Acceleration: } a_x = -C_{xG} g \sin \varphi + C_{xS} a_{surge} + C_{xP} a_{pitch} (z - R)$$

$$\text{Transverse Acceleration: } a_y = C_{yG} g \sin \theta + C_{yS} a_{sway} - C_{yP} a_{roll} (z - R)$$

$$\text{Vertical Acceleration: } a_z = C_{zH} a_{heave} + C_{zR} a_{roll} y - C_{zP} a_{pitch} (x - 0.45L)$$

όπου x, y, z οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους της άνω πλευρικής δεξαμενής (Wing Tank), οι οποίες για το αμπάρι της μέσης τομής (Cargo Hold No.5) υπολογίστηκαν:

$$X_{G_cargo} = 152.195 \text{ m}$$

$$Y_{G_cargo} = 17.932 \text{ m}$$

$$Z_{G_cargo} = 22.458 \text{ m}$$

Στον πίνακα (5.42) συνοψίζονται οι τοπικές επιταχύνσεις του υγρού φορτίου σε κάθε δυναμική κατάσταση (dynamic load case), για την εξεταζόμενη κατάσταση WB - 1.

Πίνακας 5.42: Επιταχύνσεις υγρού φορτίου σε κατάσταση φόρτωσης WB - 1

EDW	f_β	a_x [m/sec ²]	a_y [m/sec ²]	a_z [m/sec ²]
HSM-1	1.05	-0.873	0.000	0.904
HSM-2	1.05	0.873	0.000	-0.904
HSA-1	1.00	-0.833	0.000	0.817
HSA-2	1.00	0.833	0.000	-0.817
FSM-1	1.05	0.298	0.000	-0.129
FSM-2	1.05	-0.298	0.000	0.129
BSR-1P	0.8	0.000	-4.996	3.399
BSR-2P	0.8	0.000	4.996	-3.399
BSR-1S	0.8	0.000	4.996	-0.402
BSR-2S	0.8	0.000	-4.996	0.402
BSP-1P	0.8	-0.079	-1.958	3.610
BSP-2P	1.05	0.079	1.958	-3.610
BSP-1S	1.05	-0.079	1.958	2.470
BSP-2S	1.00	0.079	-1.958	-2.470
OST-1P	1.00	0.575	-0.066	-0.420
OST-2P	1.05	-0.575	0.066	0.420
OST-1S	1.05	0.575	0.066	-0.230
OST-2S	0.8	-0.575	-0.066	0.230
OSA-1P	0.8	1.349	-1.053	-0.782
OSA-2P	0.8	-1.349	1.053	0.782
OSA-1S	0.8	1.349	1.053	-1.543
OSA-2S	0.8	-1.349	-1.053	1.543

5.12.3 Υπολογισμός Φορτίσεων Γάστρας

Στο σημείο αυτό υπολογίζονται οι σχεδιαστικές φορτίσεις γάστρας που αφορούν την κατακόρυφη και οριζόντια κάμψη. Συγκεκριμένα στον πίνακα (5.43) συνοψίζονται οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές για σενάριο δυναμικής κατάστασης WB – 1 (Seagoing Condition), καθώς και για το στατικό σενάριο WB – 3 (Harbour Condition).

Πίνακας 5.43: Σχεδιαστικές Καμπτικές Ροπές για τις καταστάσεις WB – 1 και WB – 3

Vertical Bending Moments	Design Load Scenario	Hogging [kN m]	Sagging [kN m]
Still Water Bending Moment	S.W.B.M. Seagoing Condition	3.8363e+06	-2.9603e+06
	S.W.B.M. Harbour Condition	4.7954e+06	-3.7004e+06
Wave Vertical Bending Moment	W.V.B.M. Seagoing Condition	5.9588e+06	-6.3124e+06
	W.V.B.M. Harbour Condition	-	-
Wave Horizontal Bending Moment	W.H.B.M. Seagoing Condition	4.6980e+06	
	W.H.B.M. Harbour Condition	-	

Για τον υπολογισμό των καμπτικών φορτίσεων της γάστρας σε κάθε δυναμική κατάσταση φόρτισης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων και ο διορθωτικός συντελεστής κύματος. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται προσαρμογή των καμπτικών ροπών που υπολογίστηκαν προηγουμένως προκειμένου να περιγράφουν την εκάστοτε δυναμική κατάσταση. Στον πίνακα (5.44) υπολογίζονται οι συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων για λόγο βυθίσματος $f_T = 0.5$, καθώς και οι προκύπτουσες δυναμικές φορτίσεις της καμπτικής και οριζόντιας ροπής. Η κατάσταση WB – 3 περιγράφεται στην κατάσταση STATIC του εν λόγω πίνακα. Ο πίνακας περιλαμβάνει τις δυσμενέστερες φορτίσεις σε ήρεμο νερό (Hogging ή Sagging) που προκύπτουν σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες δυναμικές.

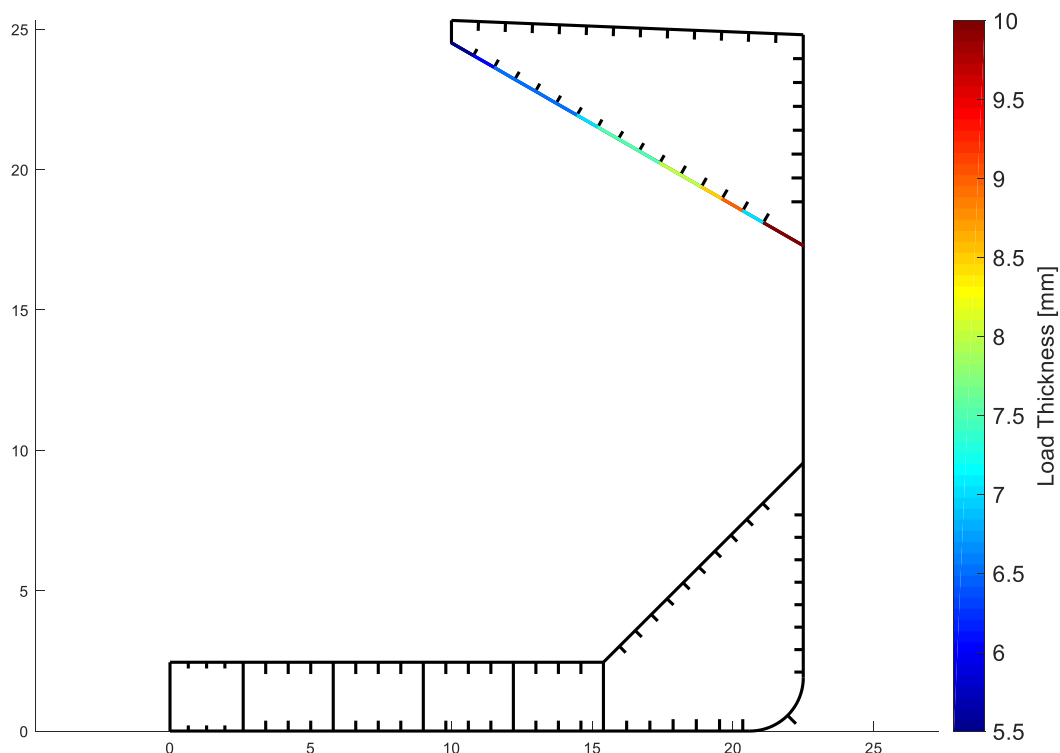
Πίνακας 5.44: Δυναμικές φορτίσεις γάστρας στο βύθισμα ανοχής για τις εξεταζόμενες καταστάσεις WB – 1 & 3

EDW	f_β	C_{wv}	M_{wv-LC} [kNm]	M_{sw} [kNm]	C_{wh}	M_{wh-LC} [kNm]
STATIC	0	0	0	4.7954e+06	0	0
HSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
HSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
HSA – 1	1.00	-0.70	-4.4187e+06	-2.9603e+06	0	0
HSA – 2	1.00	0.70	4.1712e+06	3.8363e+06	0	0
FSM – 1	1.05	-1.00	-6.6280e+06	-2.9603e+06	0	0
FSM – 2	1.05	1.00	6.2567e+06	3.8363e+06	0	0
BSR – 1P	0.80	-0.10	-5.0499e+05	-2.9603e+06	0.10	3.7584e+05
BSR – 2P	0.80	0.10	4.7670e+05	3.8363e+06	-0.10	-3.7584e+05
BSP – 1P	0.80	-0.50	-2.5250e+06	-2.9603e+06	0	0
BSP – 2P	0.80	0.50	2.3835e+06	3.8363e+06	0	0
OST – 1P	1.00	-0.50	-3.1562e+06	-2.9603e+06	-0.90	-4.2282e+06
OST – 2P	1.00	0.50	2.9794e+06	3.8363e+06	0.90	4.2282e+06
OSA – 1P	1.00	0.25	1.4897e+06	3.8363e+06	0.75	3.5235e+06
OSA – 2P	1.00	-0.25	-1.5781e+06	-2.9603e+06	-0.75	-3.5235e+06

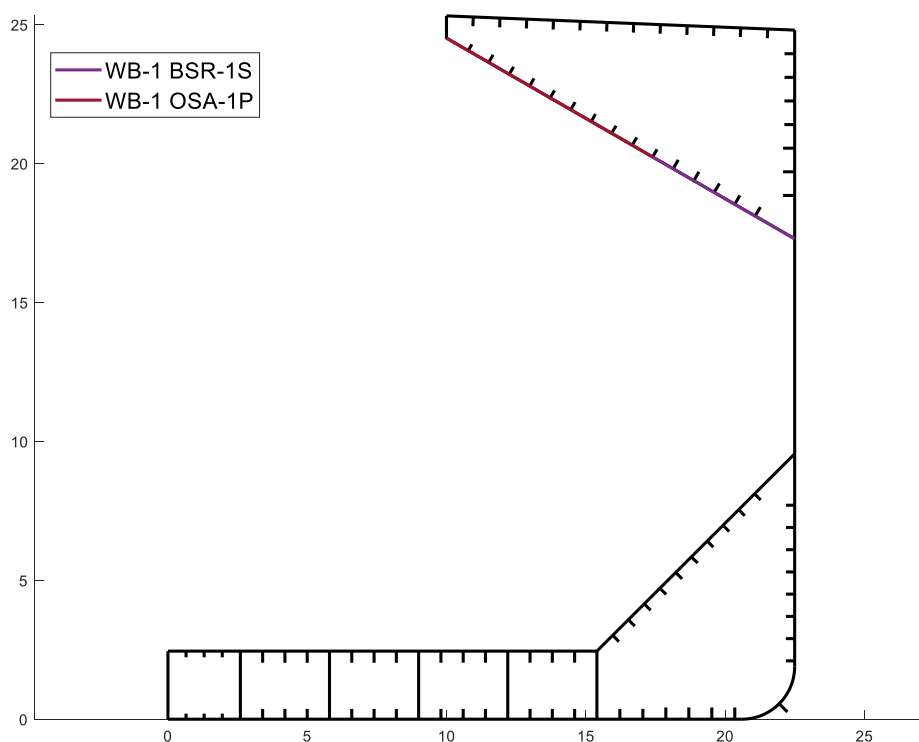
Με δεδομένες τις δυναμικές φορτίσεις της γάστρας M_{wv-LC} και M_{wh-LC} , καθώς και την κατακόρυφη ροπή σε ήρεμο νερό για κατάσταση Hogging ή Sagging, μπορούν να υπολογιστούν οι κατανομές των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων που επάγονται σε κάθε δυναμική κατάσταση, όπως υπολογίστηκαν αναλυτικά προηγουμένως στο εδάφιο (5.10.4).

5.12.4 Απαίτηση Πάχους για Στοιχειώδη Ελάσματα και Κρίσιμες Καταστάσεις

Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε πάχος (Σχήμα 5.77) για κάθε στοιχειώδες έλασμα και η αντίστοιχη κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.78).



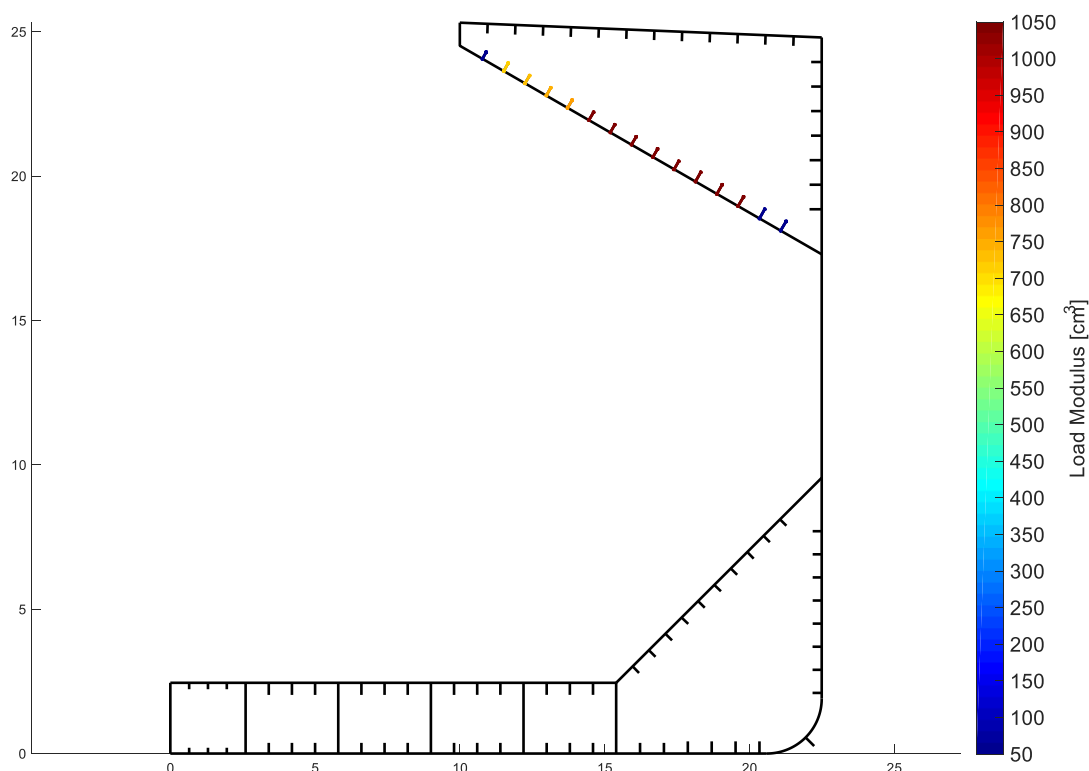
Σχήμα 5.77: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος ελάσματος βασισμένο στις καταστάσεις WB – 1 (S+D) και WB – 3 (S) για το άνω πλευρικό έλασμα. Τα υπόλοιπα στοιχεία που δεν εξετάζονται στο εδάφιο αυτό απεικονίζονται με μαύρο χρώμα



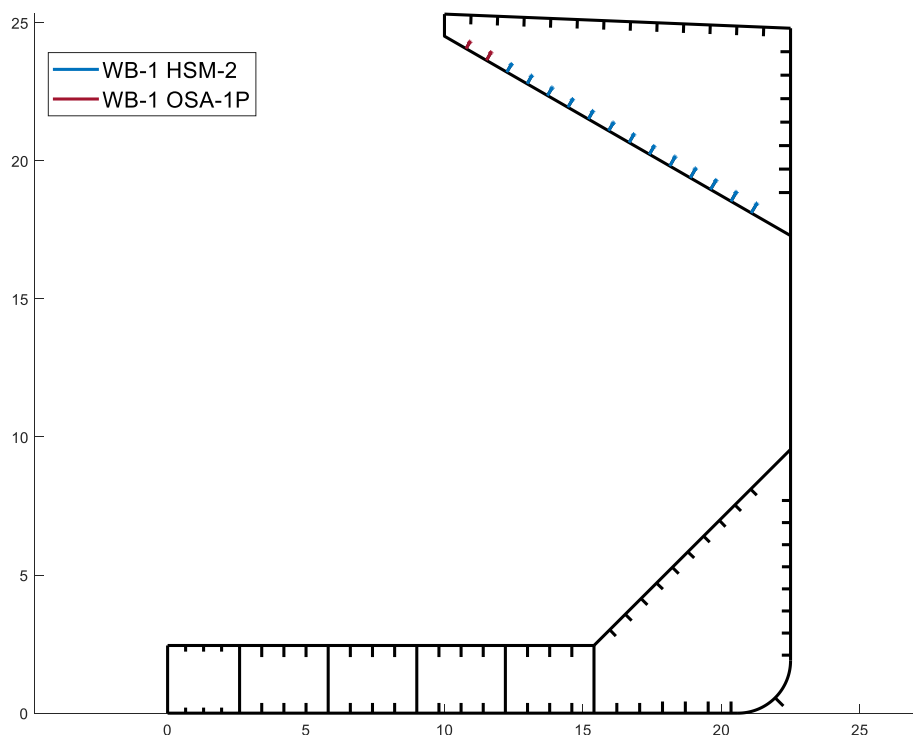
Σχήμα 5.78: Κρίσιμες δυναμικές καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση πάχους ελάσματος για το άνω πλευρικό έλασμα. Σε όλα τα στοιχεία, το δυναμικό σενάριο WB – 1 επικρατεί έναντι του στατικού WB – 3

5.12.5 Απαίτηση Ροπής Αντίστασης για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις

Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε ροπή αντίστασης (Σχήμα 5.79) για κάθε ενισχυτικό και η αντίστοιχη κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.80).



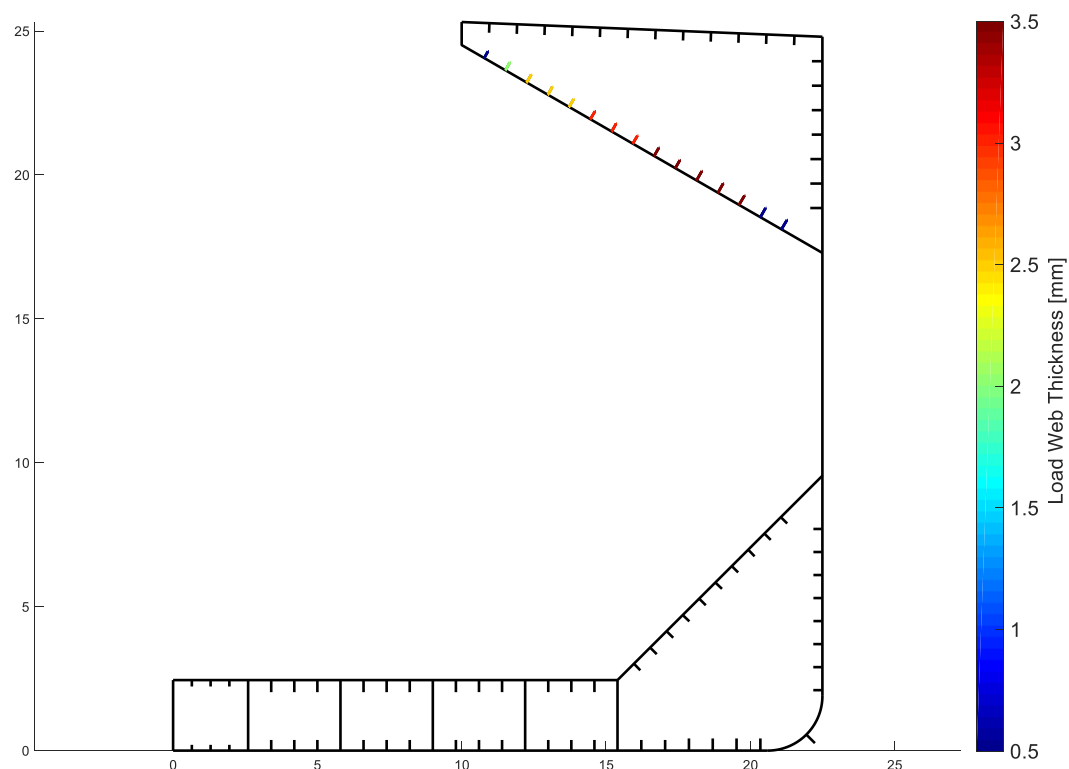
Σχήμα 5.79: Μέγιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης βασισμένη στις καταστάσεις WB – 1 (S+D) και WB – 3 (S) για το άνω πλευρικό έλασμα. Τα υπόλοιπα στοιχεία που δεν εξετάζονται στο εδάφιο αυτό απεικονίζονται με μαύρο χρώμα



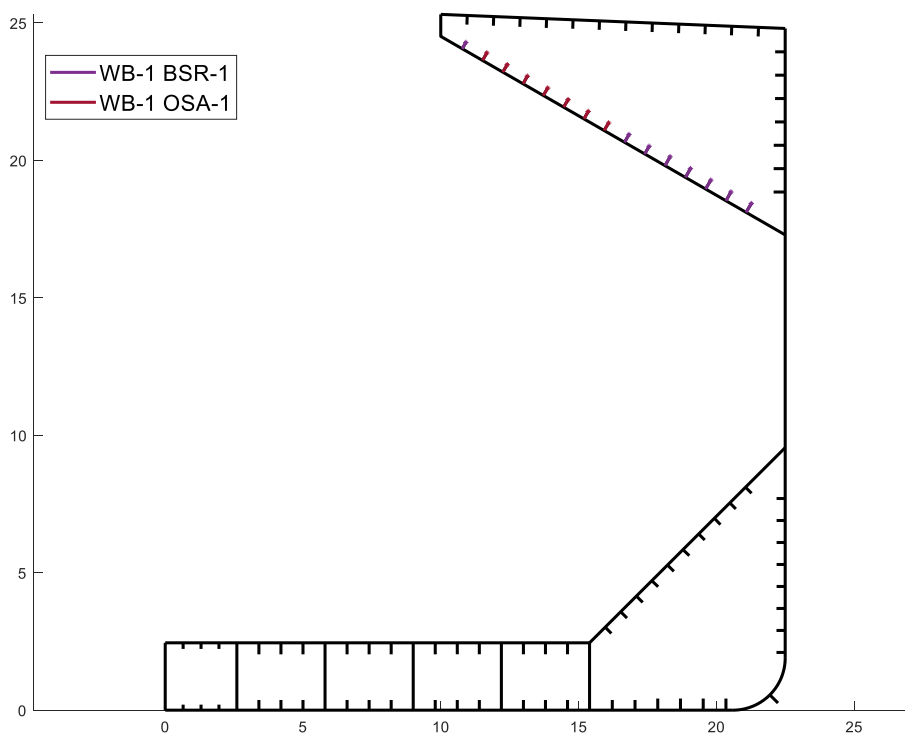
Σχήμα 5.80: Κρίσιμες δυναμικές καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση ροπής αντίστασης για το άνω πλευρικό έλασμα. Σε όλα τα στοιχεία, το δυναμικό σενάριο WB – 1 επικρατεί έναντι του στατικού WB – 3

5.12.6 Απαίτηση Πάχους Κορμού για Ενισχυτικά και Κρίσιμες Καταστάσεις

Με βάση τον υπολογισμό των στατικών και των επιμέρους δυναμικών φορτίσεων προκύπτει τελικά η δυσμενέστερη απαίτηση σε πάχος κορμού (Σχήμα 5.81) για κάθε ενισχυτικό και η αντίστοιχη κρίσιμη κατάσταση (Σχήμα 5.82).



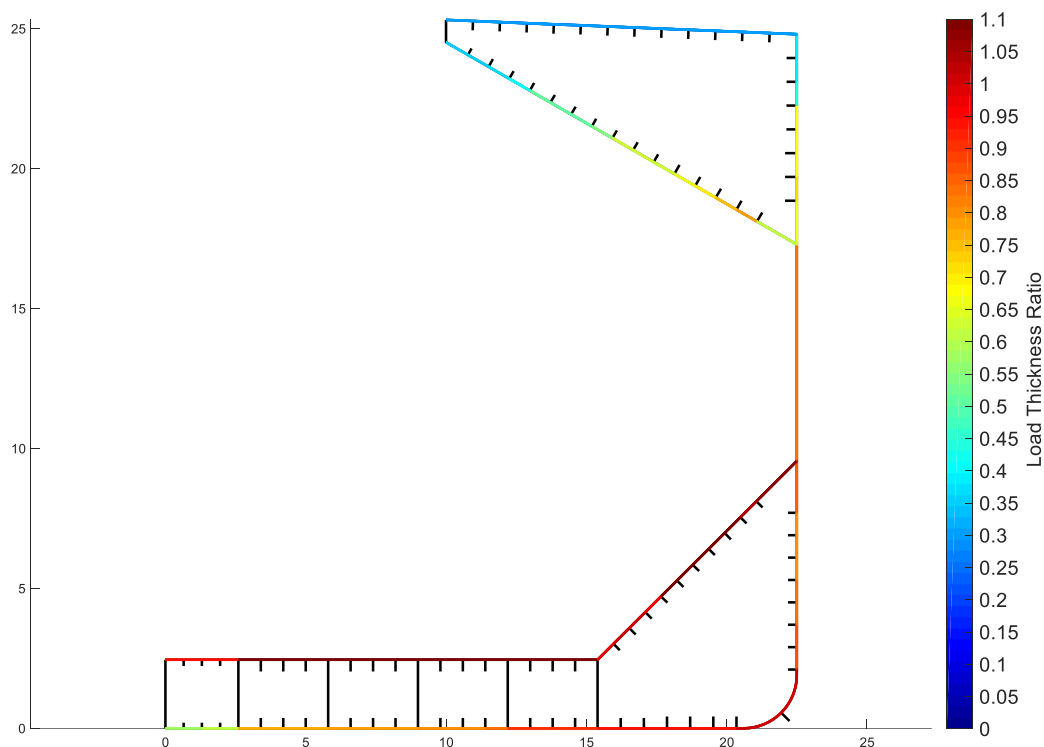
Σχήμα 5.81: Μέγιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ενισχυτικών βασισμένο στις καταστάσεις WB – 1 (S+D) και WB – 3 (S) για το άνω πλευρικό έλασμα. Τα υπόλοιπα στοιχεία που δεν εξετάζονται στο εδάφιο αυτό απεικονίζονται με μαύρο χρώμα



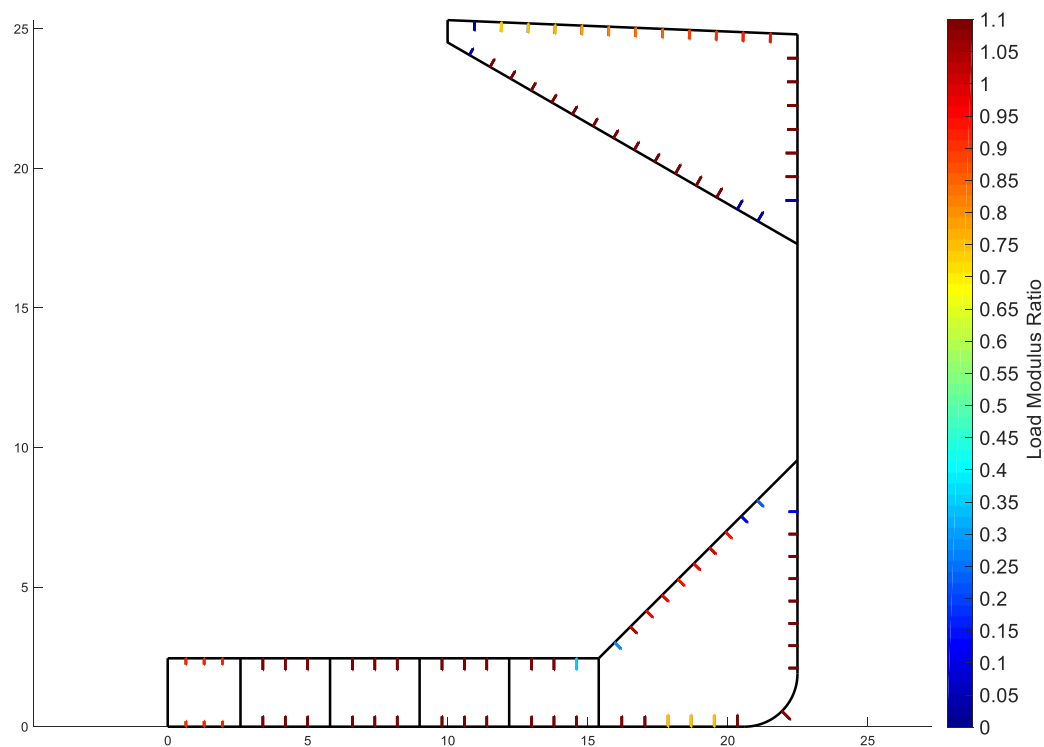
Σχήμα 5.82: Κρίσιμες καταστάσεις με την δυσμενέστερη απαίτηση πάχους κορμού για το άνω πλευρικό έλασμα. Σε όλα τα στοιχεία, το δυναμικό σενάριο WB – 1 επικρατεί έναντι του στατικού WB – 3

5.13 Έλεγχος Περιγραφικών Απαιτήσεων – Load Based

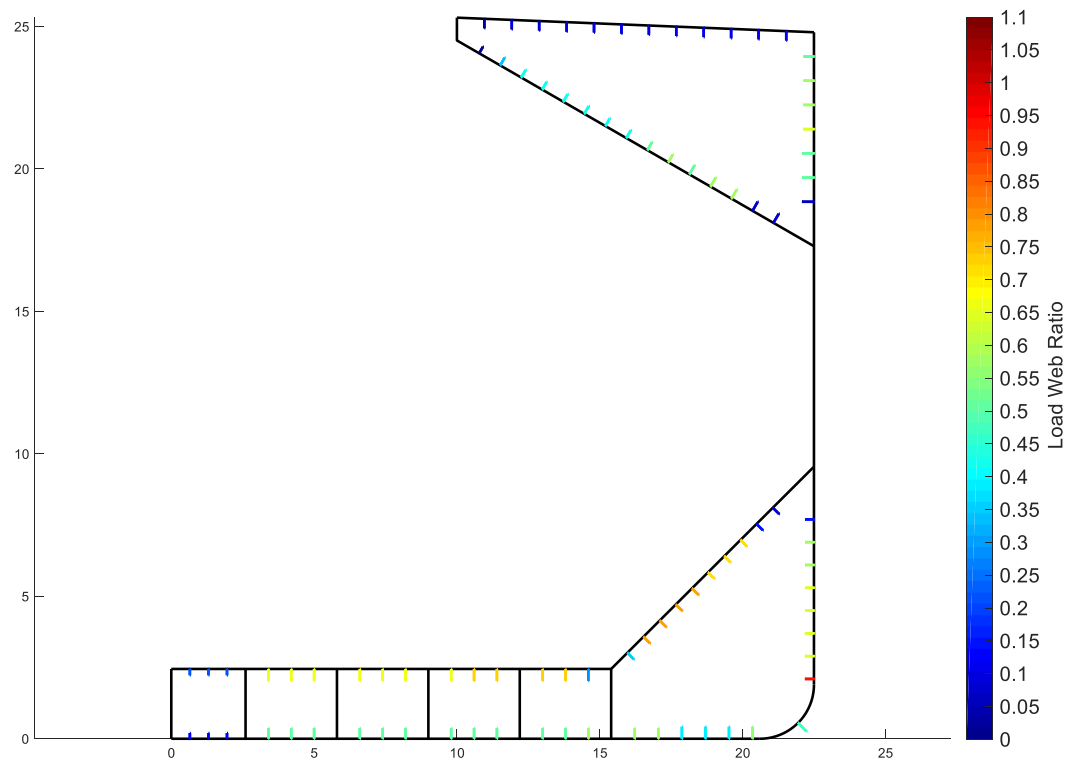
Με βάση τις δυσμενέστερες απαιτήσεις που εξετάζονται στα εδάφια (5.10), (5.11) και (5.12), για τα επιμέρους τμήματα της μέσης τομής πραγματοποιείται έλεγχος με τα αντίστοιχα καθαρά προσφερόμενα πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες των ελασμάτων και των ενισχυτικών.



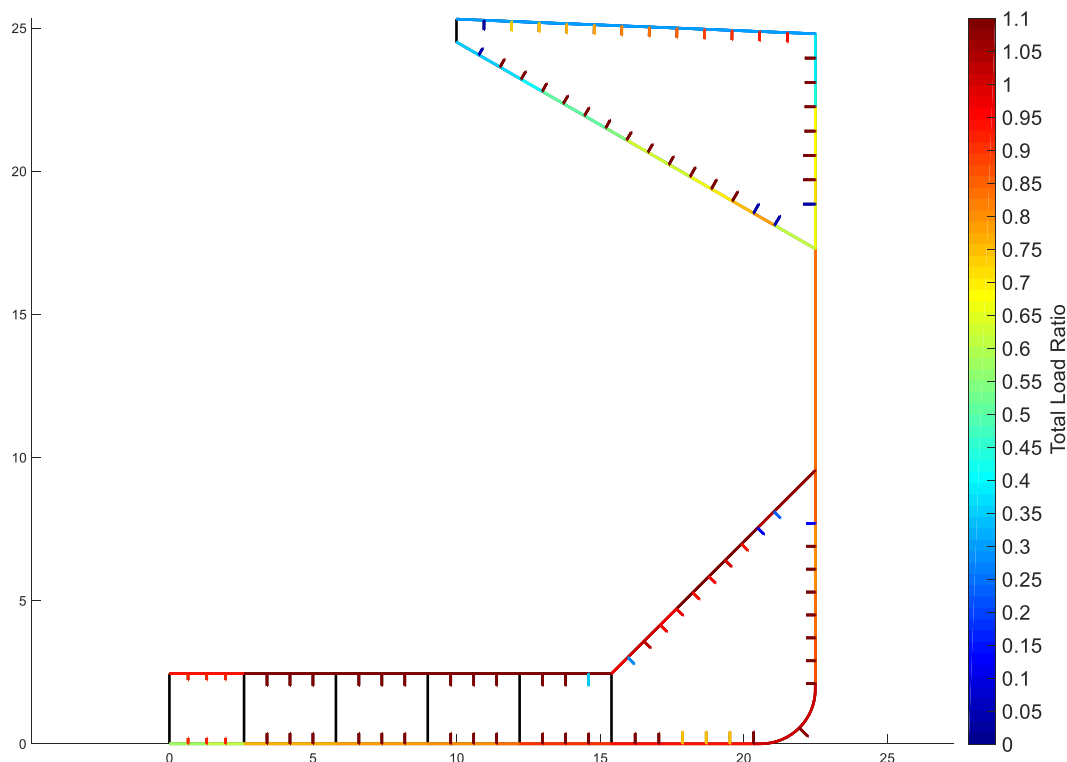
Σχήμα 5.83: Έλεγχος απαιτούμενου πάχους ελάσματος βασισμένο στις φορτίσεις, μέσω του λόγου $t_{required} / t_{net-offered}$. Τιμές $t_{required} / t_{net-offered} > 1$ υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαίτησης



Σχήμα 5.84: Έλεγχος απαιτούμενης ροπής αντίστασης ενισχυτικού – συνεργαζόμενου ελάσματος βασισμένη στις φορτίσεις, μέσω του λόγου $Z_{required} / Z_{net-offered}$. Τιμές $Z_{required} / Z_{net-offered} > 1$ υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαίτησης



Σχήμα 5.85: Έλεγχος απαιτούμενου πάχους κορμού ενισχυτικού βασισμένο στις φορτίσεις, μέσω του λόγου $t_{w_required} / t_{w_net-offered}$. Τιμές $t_{w_required} / t_{w_net-offered} > 1$ υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαίτησης. Όσον αφορά τον έλεγχο αυτό, δεν παρατηρείται μη ικανοποίηση σε κάποιο στοιχείο



Σχήμα 5.86: Συγκριτικά αποτελέσματα ελέγχου περιγραφικών απαιτήσεων. Οι κόκκινες περιοχές στα ελάσματα με λόγο μεγαλύτερο από 1, υποδηλώνουν μη ικανοποίηση του απαιτούμενου πάχους, ενώ οι κίτρινες περιοχές στα ενισχυτικά με λόγο μεγαλύτερο από 1, υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαιτούμενης ροπής αντίστασης

5.14 Ελάχιστες Εμπειρικές Απαιτήσεις

Οι κανόνες, εκτός από τις περιγραφικές απαιτήσεις, προδιαγράφουν ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις που αποτελούν το κατώφλι των διαστάσεων των κατασκευαστικών στοιχείων. Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν ελάχιστα πάχη, τα οποία είναι ανεξάρτητα από την τάση διαρροής του υλικού και εξαρτώνται αποκλειστικά από το μέγεθος του πλοίου. Σύμφωνα με το εδάφιο {Pt2/Ch1/Sec3} των κανόνων, ανάλογα με το μήκος του πλοίου και την περιοχή στην οποία βρίσκεται το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο, στον πίνακα (5.45) προκύπτει η ελάχιστη εμπειρική απαίτηση σε καθαρό πάχος ελάσματος.

Πίνακας 5.45: Ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις για ελάσματα

Element	Location	Area	Net thickness
Shell	Keel	-	$7.5 + 0.03 L_2$
	Bottom Side shell Bilge	Fore Part	$6.5 + 0.03 L_2$
		Machinery space Aft part	$7.0 + 0.03 L_2$
		Elsewhere	$5.5 + 0.03 L_2$
Breasthook		Fore part	6.5
Deck	Weather deck, strength deck, internal tank boundary	-	$4.5 + 0.02 L_2$
		Machinery space	$2.8 + 0.0067 s$
	Platform deck	Elsewhere	6.5
Inner bottom ⁽⁴⁾	-	Machinery space	$6.6 + 0.024 L_2$
		Elsewhere	$5.5 + 0.03 L_2$
Longitudinal bulkheads of bulk carriers	Inner side, hopper tank top, top wing tank longitudinal bulkhead	Cargo hold region	$0.7 L_2^{1/2}$
Bulkheads	Internal tank boundary, Transverse/longitudinal watertight bulkhead	-	$4.5 + 0.02 L_2$
		-	$4.5 + 0.01 L_2$
	Non-tight bulkhead, Wash bulkhead, Bulkheads between dry spaces. Pillar bulkheads in fore and aft peaks	-	7.5
Other members	Diaphragms in lower/upper stool	-	$5.0 + 0.015 L_2$
	Engine casing (in the cargo hold region)	Cargo hold region	5.5
	Engine casing (in way of accommodation)	Accommodation	4.0
	Other plates in general	-	$4.5 + 0.01 L_2$

(4) Applicable for both tight and non tight members

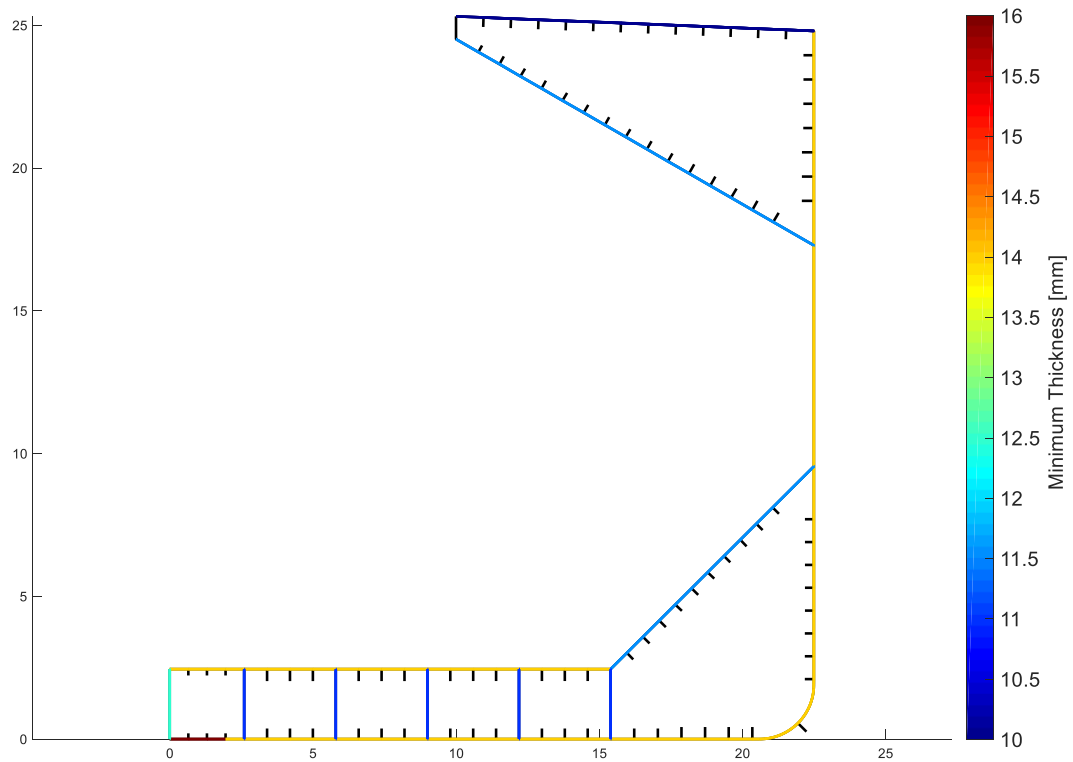
Αντίστοιχα για τα ενισχυτικά, στον πίνακα (5.46) προδιαγράφεται η ελάχιστη απαίτηση σε καθαρό πάχος κορμού και φλάντζας, ανάλογα το μήκος του πλοίου και την περιοχή στην οποία βρίσκονται. Επιπλέον για τα ενισχυτικά, το πάχος κορμού και φλάντζας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το 40% του καθαρού απαιτούμενου πάχους ελάσματος t_{req} στο οποίο εφαρμόζεται και προδιαγράφεται στις περιγραφικές απαιτήσεις και μικρότερο από το διπλάσιο προσφερόμενο καθαρό πάχος του ελάσματος αυτού $t_{net-off}$.

Πίνακας 5.46: Ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις για ενισχυτικά

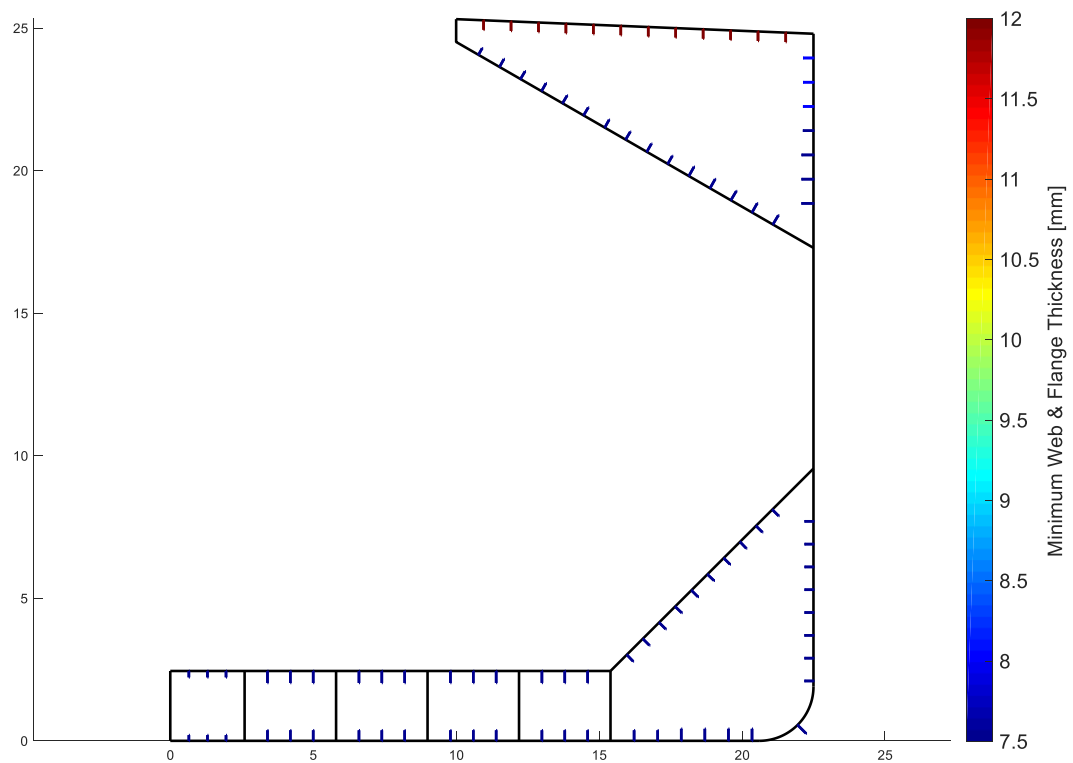
Element	Location	Net thickness
Stiffeners and attached end brackets	Watertight boundary	$3.5 + 0.015 L_2$
	Other structure	$3.0 + 0.015 L_2$
Cargo hold side frames webs of single side bulk carriers	Foremost hold ⁽⁴⁾	$6.0 + 0.026 L$
	Other holds ⁽⁴⁾	$5.2 + 0.023 L$
Tripping brackets		$5.0 + 0.015 L_2$

(4) L needs not to be taken greater than 200 m

Στα σχήματα (5.87) και (5.88) απεικονίζεται η απαίτηση ελάχιστου καθαρού πάχους για όλα τα ελάσματα και τα ενισχυτικά.



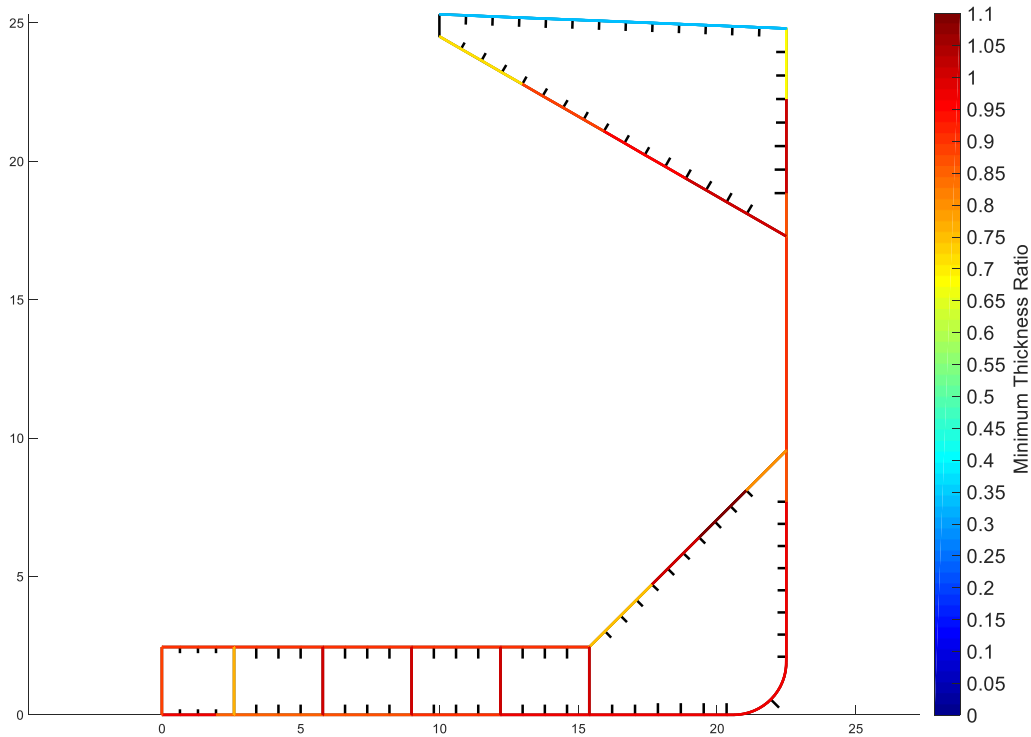
Σχήμα 5.87: Ελάχιστο απαιτούμενο πάχος ελάσματος t_{min} βασισμένο στις ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις



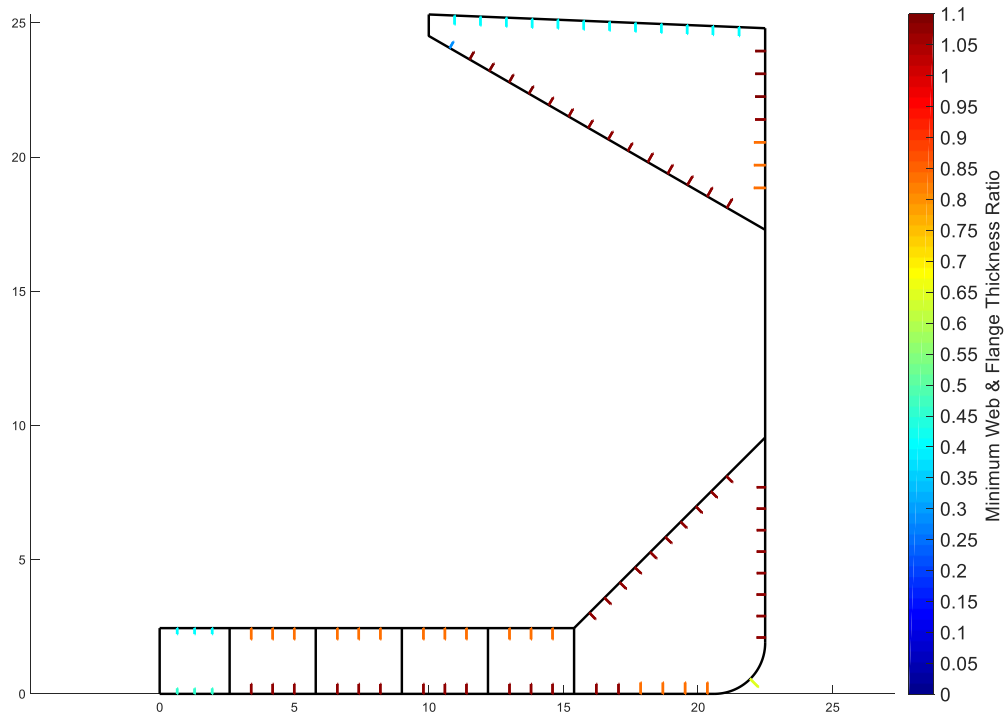
Σχήμα 5.88: Ελάχιστο απαιτούμενο πάχος t_{min} κορμού και φλάντζας ενισχυτικού βασισμένο στις ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις

5.14.1 Έλεγχος Ελάχιστων Εμπειρικών Απαιτήσεων

Με βάση τις απαιτήσεις που υπολογίστηκαν παραπάνω, πραγματοποιείται έλεγχος με τα αντίστοιχα καθαρά προσφερόμενα πάχη των ελασμάτων και ενισχυτικών.



Σχήμα 5.89: Έλεγχος ελάχιστου απαιτούμενου πάχους ελάσματος, μέσω του λόγου $t_{\min} / t_{net-offered}$. Τιμές $t_{\min} / t_{net-offered} > 1$ υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαίτησης



Σχήμα 5.90: Έλεγχος ελάχιστου απαιτούμενου πάχους ενισχυτικού, μέσω του λόγου $t_{w_min} / t_{w_net-offered}$. Τιμές $t_{w_min} / t_{w_net-offered} > 1$ υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαίτησης

5.15 Απαιτήσεις Λυγηρότητας

Οι σχετικές απαιτήσεις βρίσκονται στο εδάφιο {Pt2/Ch8/Sec2} και αναφέρονται στην αποφυγή τοπικού λυγισμού του ελάσματος και του ενισχυτικού στο στάδιο της σχεδίασης (**Proportional Criteria**).

Συγκεκριμένα για τα ενισχυτικά, το ελάχιστο καθαρό απαιτούμενο πάχος του ελάσματος υπολογίζεται ως εξής:

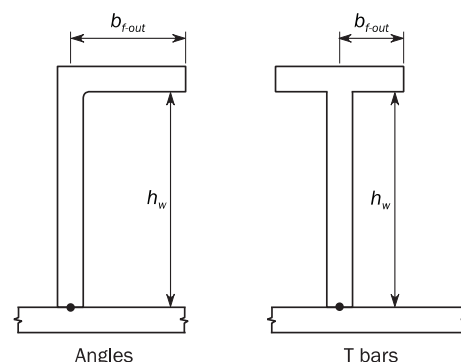
$$t_{prop} = \frac{b}{C} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}, \text{ όπου:}$$

- R_{eH} [N/mm^2], το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα.
- b [mm], το πλάτος του ελάσματος μεταξύ δύο διαδοχικών ενισχυτικών
- $C = 100$ για όρια δεξαμενών, αλλιώς $C = 120$

Όσον αφορά τα ενισχυτικά, προδιαγράφονται τα παρακάτω ελάχιστα απαιτούμενα πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες:

- a) Απαιτούμενο πάχος κορμού: $t_{w-prop} \geq \frac{h_w}{C_w} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$
- b) Απαιτούμενο πάχος φλάντζας: $t_{f-prop} \geq \frac{b_{f-out}}{C_f} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$

Στο σχήμα (5.91) και στον πίνακα (5.47) δίνονται οι παράμετροι υπολογισμού των (a) και (b).



Σχήμα 5.91: Γεωμετρικές παράμετροι κριτηρίων (a) & (b) Λυγηρότητας

Πίνακας 5.47: Συντελεστές Λυγηρότητας για τα κριτήρια (a) & (b)

Type of Stiffener	C_w	C_f
Angle, L2 and L3 bars	75	12
T-bars	75	12
Bulb bars	45	-
Flat bars	22	-

- c) Απαιτούμενο πλάτος φλάντζας: $b_{f-prop} \geq 0.25 h_w$
- d) Απαιτούμενη καθαρή ροπή αδράνειας ενισχυτικού και συνεργαζόμενου ελάσματος πλάτους b_{eff} γύρω από τον ουδέτερο άξονα παράλληλα στο συνεργαζόμενο έλασμα:

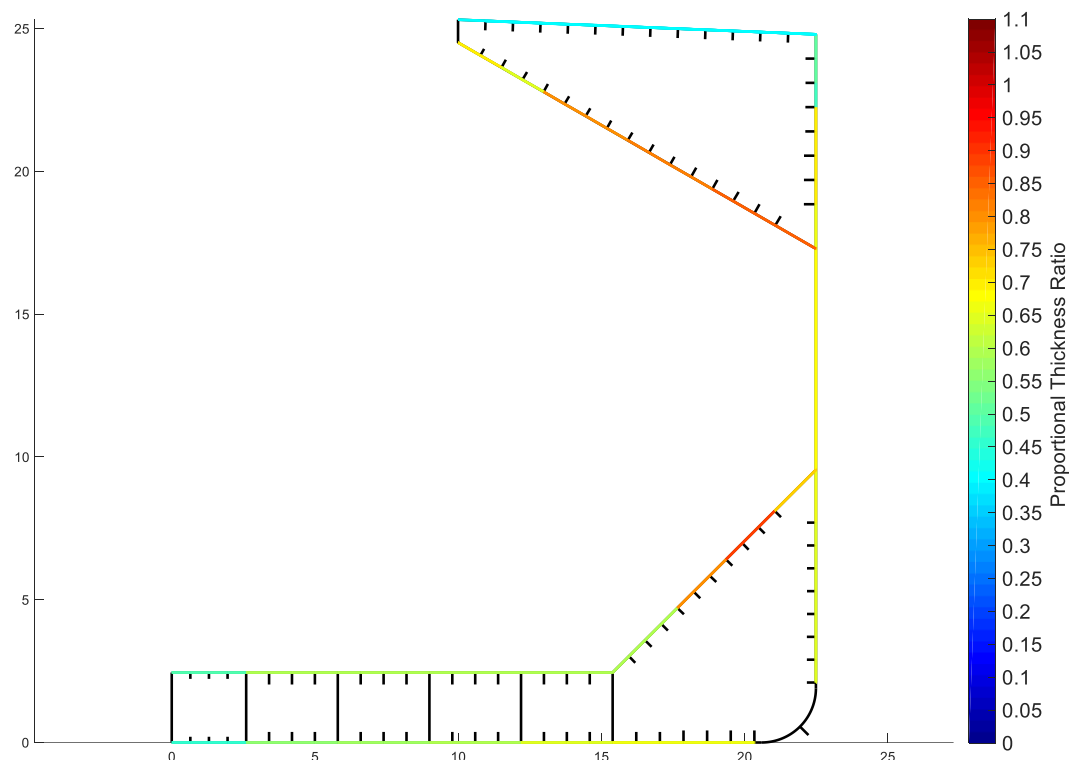
$$I_{stiff-prop} \geq C l^2 A_{eff} \frac{R_{eH}}{235}$$

Όπου:

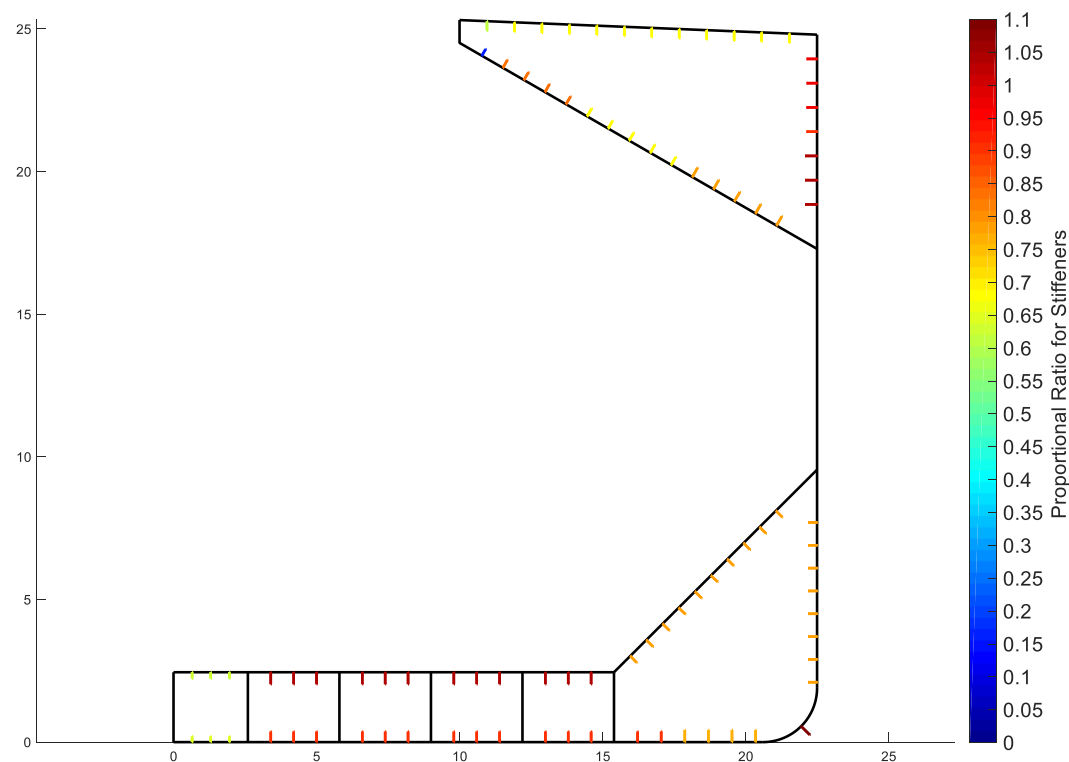
- A_{eff} [cm^2], η ενεργή επιφάνεια του ενισχυτικού με το συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους $s_{eff} = 0.8 s$
- $C = 1.43$, για διαμήκη ενισχυτικά

5.15.1 Έλεγχος Απαιτήσεων Λυγηρότητας

Με βάση τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, πραγματοποιείται έλεγχος με τα αντίστοιχα καθαρά προσφερόμενα πάχη και γεωμετρικές ιδιότητες των στοιχείων.



Σχήμα 5.92: Έλεγχος απαίτησης λυγηρότητας ελάσματος, μέσω του λόγου $t_{prop} / t_{net-offered}$. Τιμές $t_{prop} / t_{net-offered} > 1$ υποδηλώνουν μη ικανοποίηση της απαίτησης. Όσον αφορά τον έλεγχο αυτό, δεν παρατηρείται μη ικανοποίηση σε κάποιο στοιχείο



Σχήμα 5.93: Έλεγχος απαίτησης λυγηρότητας ενισχυτικού, μέσω των δυσμενέστερων από τους λόγους $t_{w_prop} / t_{w_net-offered}$, $t_{f_prop} / t_{f_net-offered}$, $b_{f_prop} / b_{f_net-offered}$, $I_{stiff_prop} / I_{stiff_net-offered}$

5.16 Ειδική Απαιτήση Πάχους για Ελάσματα λόγω GRAB [X]

Ο σχετικός κανόνας βρίσκεται στο εδάφιο {Pt2/Ch1/Sec6} και αφορά ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα (inner bottom) και του ελάσματος κάτω πλευρικής δεξαμενής (hopper plate) που βρίσκονται εντός 3 m άνω του εσωτερικού πυθμένα. Αναφέρεται στο απαιτούμενο πάχος που θα πρέπει να έχουν τα εν λόγω ελάσματα λόγω επαφής με την δαγκάνα φορτοεκφόρτωσης βάρους X tons. Συγκεκριμένα το απαιτούμενο καθαρό πάχος t_{GRAB} δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

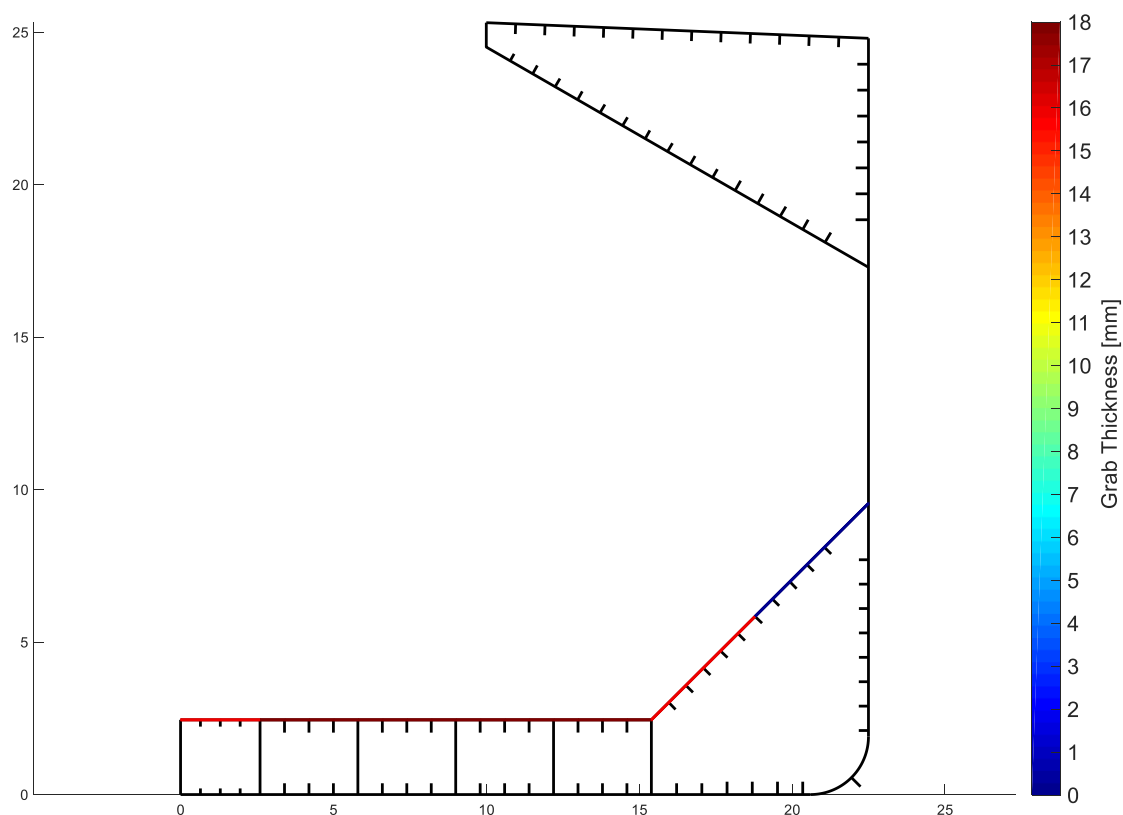
$$- t_{GRAB} = 0.62\sqrt{bk} \left(\frac{M_{GR}}{20} \right)^{0.25}, \text{ για τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα}$$

$$- t_{GRAB} = 0.55\sqrt{bk} \left(\frac{M_{GR}}{20} \right)^{0.25}, \text{ για τα ελάσματα της κάτω πλευρικής δεξαμενής}$$

Όπου:

- b [mm], το πλάτος του ελάσματος μεταξύ δύο διαδοχικών ενισχυτικών
- k , ο συντελεστής υλικού του χρησιμοποιούμενου χάλυβα
- $M_{GR} = X$, το βάρος της δαγκάνας το οποίο καθορίζεται από τους κανόνες ανάλογα το μήκος του πλοίου (βλ. Κεφάλαιο 2.2). Το υπό μελέτη πλοίο έχει χαρακτηρισμό κλάσης GRAB [25], ωστόσο με βάση το μήκος που προδιαγράφεται από τους κανόνες προκύπτει $X = 35$ tons.

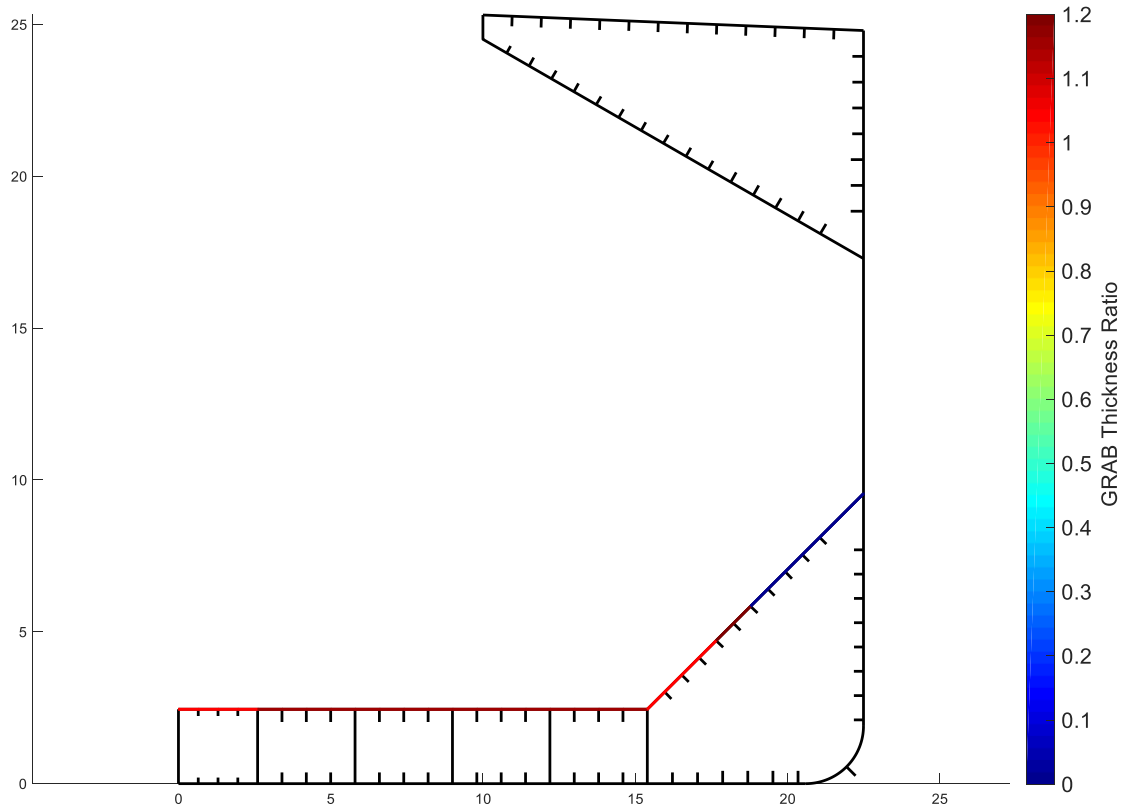
Στο σχήμα (5.94), απεικονίζεται η απαιτήση πάχους σύμφωνα με αυτό το κριτήριο για τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα και του hopper plate.



Σχήμα 5.94: Απαιτήση καθαρού πάχους ελάσματος t_{GRAB} λόγω επαφής με την δαγκάνα φορτοεκφόρτωσης βάρους X tons

5.16.1 Έλεγχος Ειδικής Απαίτησης λόγω GRAB [X]

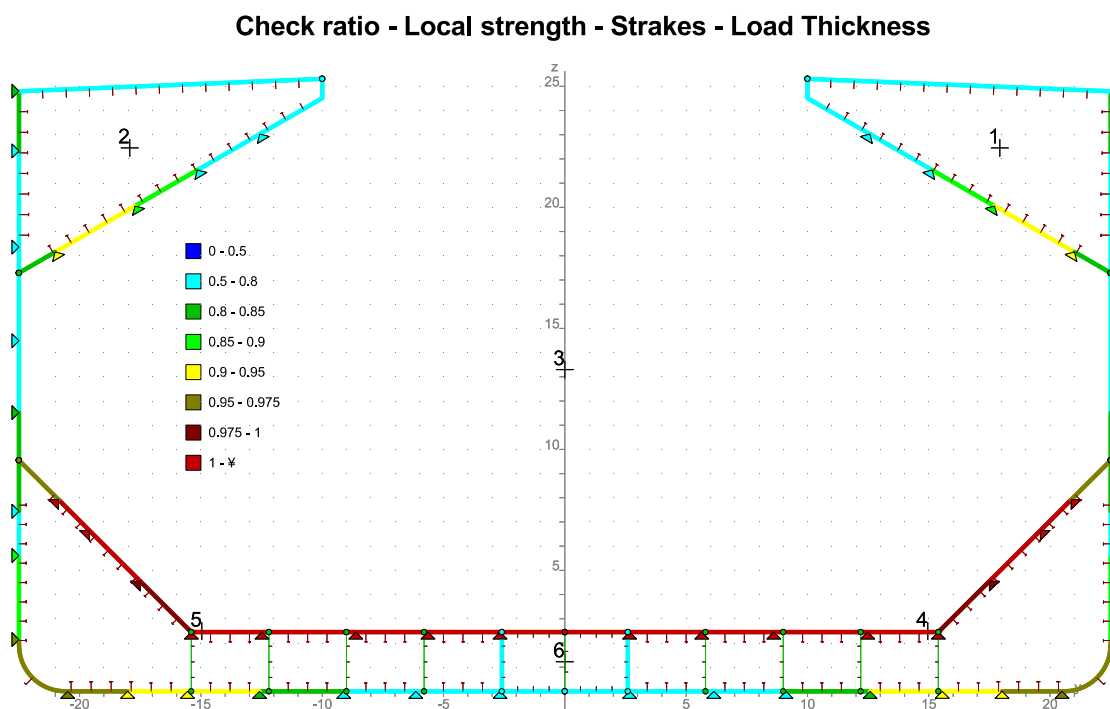
Με βάση την παραπάνω απαίτηση πραγματοποιείται έλεγχος με τα αντίστοιχα καθαρά προσφερόμενα πάχη των ελασμάτων του εσωτερικού πυθμένα και του ελάσματος κάτω πλευρικής δεξαμενής. Η απαίτηση αυτή παρατηρείται ότι παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς κανένα από τα ελάσματα που αφορά δεν την ικανοποιεί.



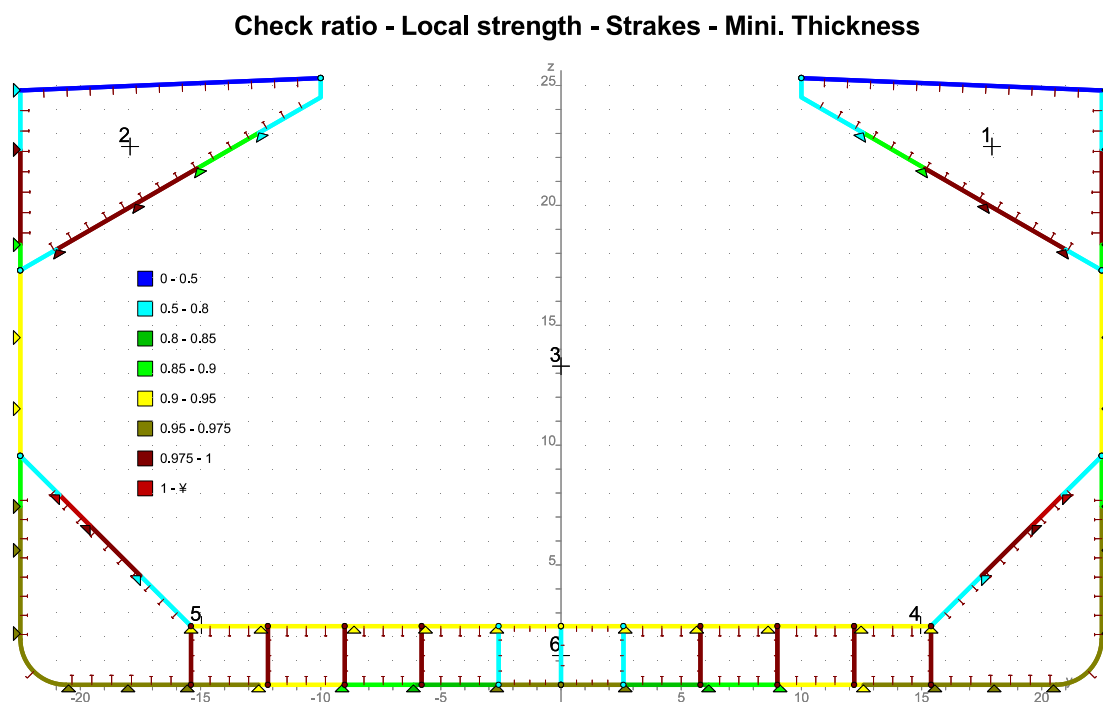
Σχήμα 5.95: Έλεγχος απαιτούμενου πάχους ελάσματος, μέσω του λόγου $t_{GRAB} / t_{net-offered}$. Οι κόκκινες περιοχές στα ελάσματα με λόγο μεγαλύτερο από 1, υποδηλώνουν μη ικανοποίηση απαιτούμενου πάχους

5.17 Έλεγχος Τοπικής Αντοχής με MARS2000

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιείται μοντελοποίηση της μέσης τομής του υπό μελέτη πλοίου και στο Mars2000 για την επαλήθευση της μεθοδολογίας και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα που αφορούν τα ελάσματα και τα ενισχυτικά, ειδικά για τις απαιτήσεις στις οποίες παρουσιάζεται μη ικανοποίηση. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται από το Mars2000 έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τα αποτελέσματα του κώδικα στο MATLAB.

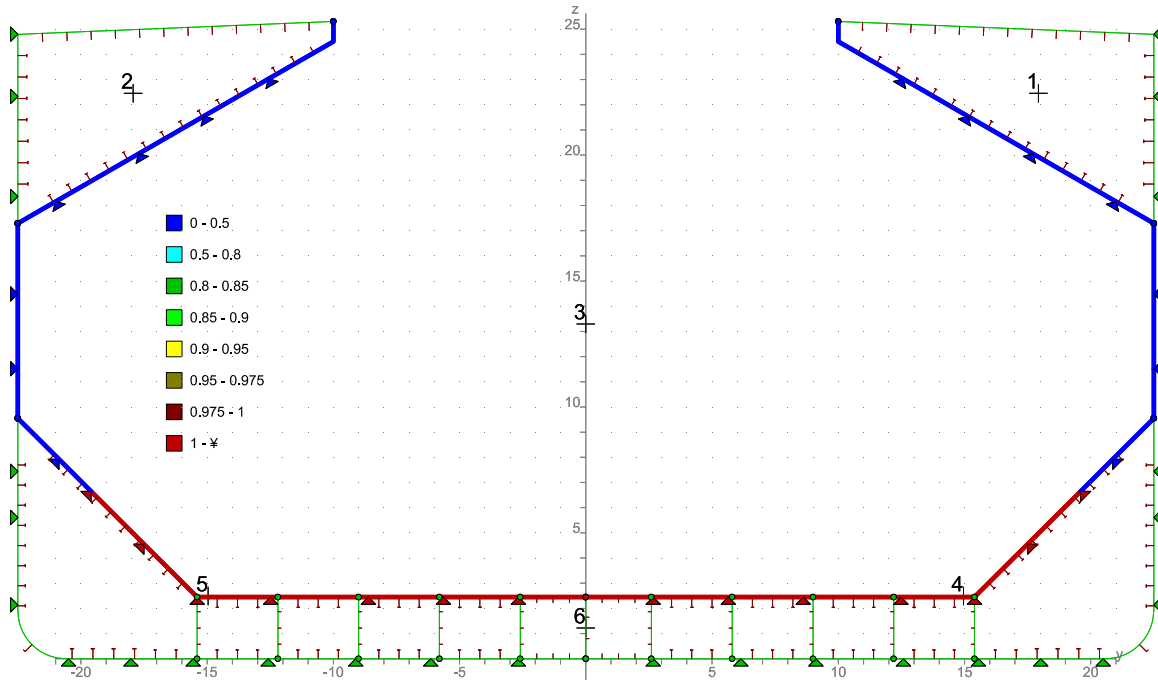


Σχήμα 5.96: Έλεγχος απαιτούμενου πάχους ελάσματος βασισμένο στις φορτίσεις (Mars2000)



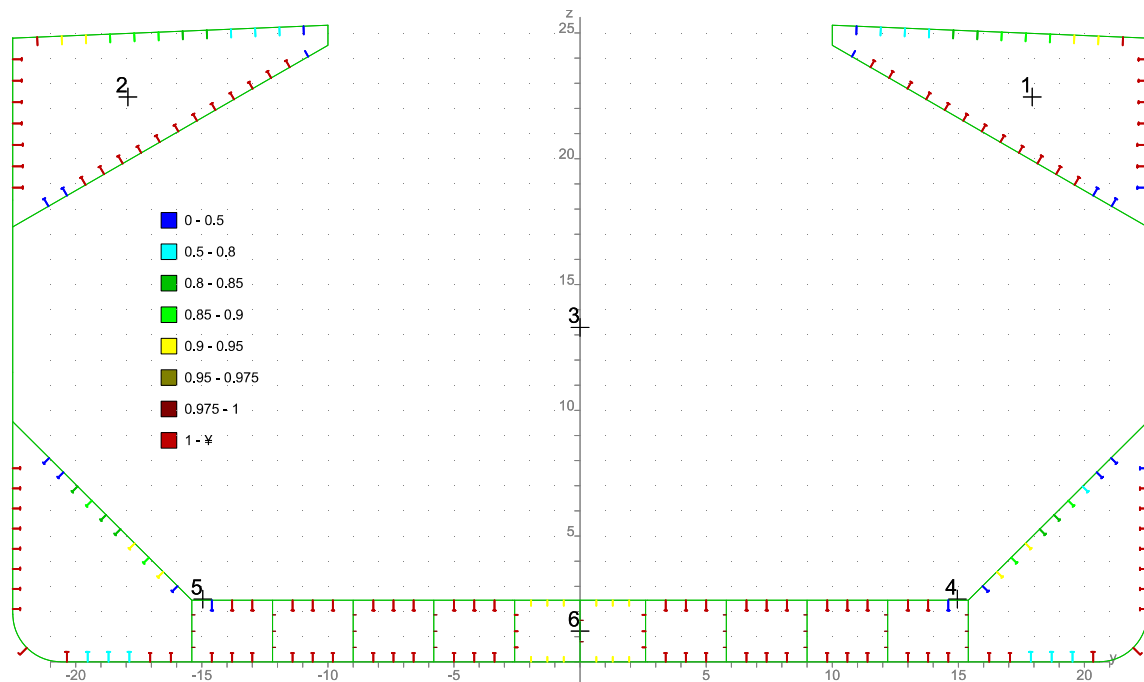
Σχήμα 5.97: Έλεγχος ελάχιστου απαιτούμενου πάχους ελάσματος, βασισμένο στις εμπειρικές απαιτήσεις (Mars2000)

Check ratio - Local strength - Strakes - Grab Thickness



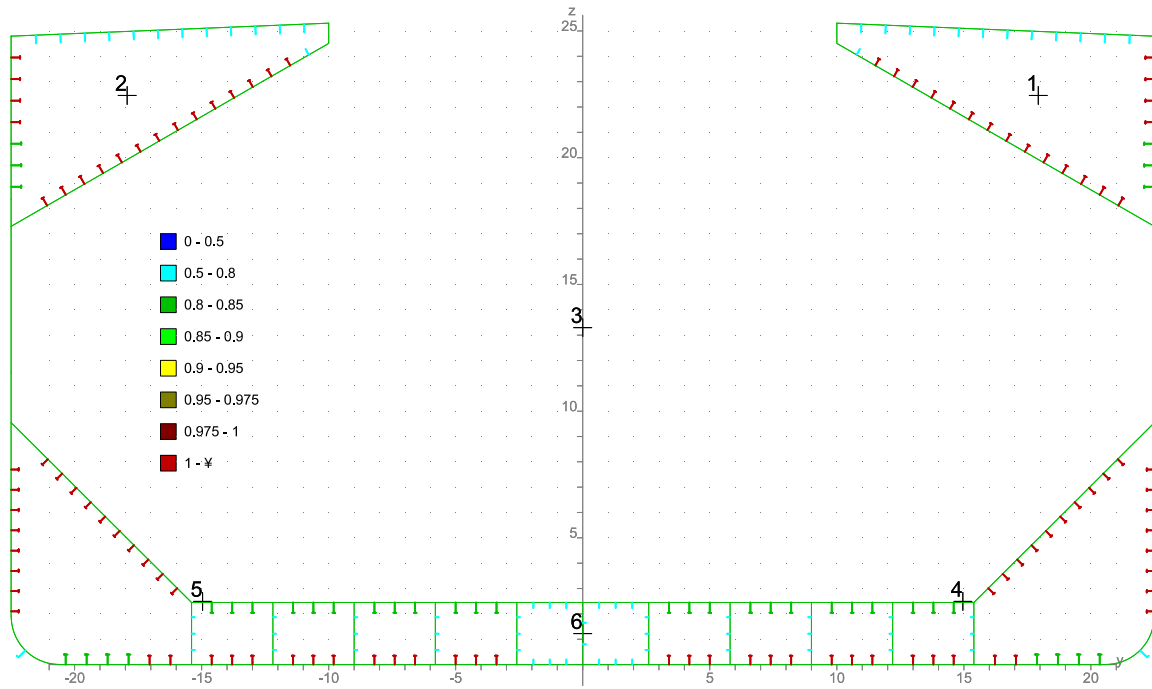
Σχήμα 5.98: Έλεγχος απαιτούμενου πάχους ελάσματος λόγω GRAB [X] (Mars2000)

Check ratio - Local strength - Stiffeners - Load Modulus



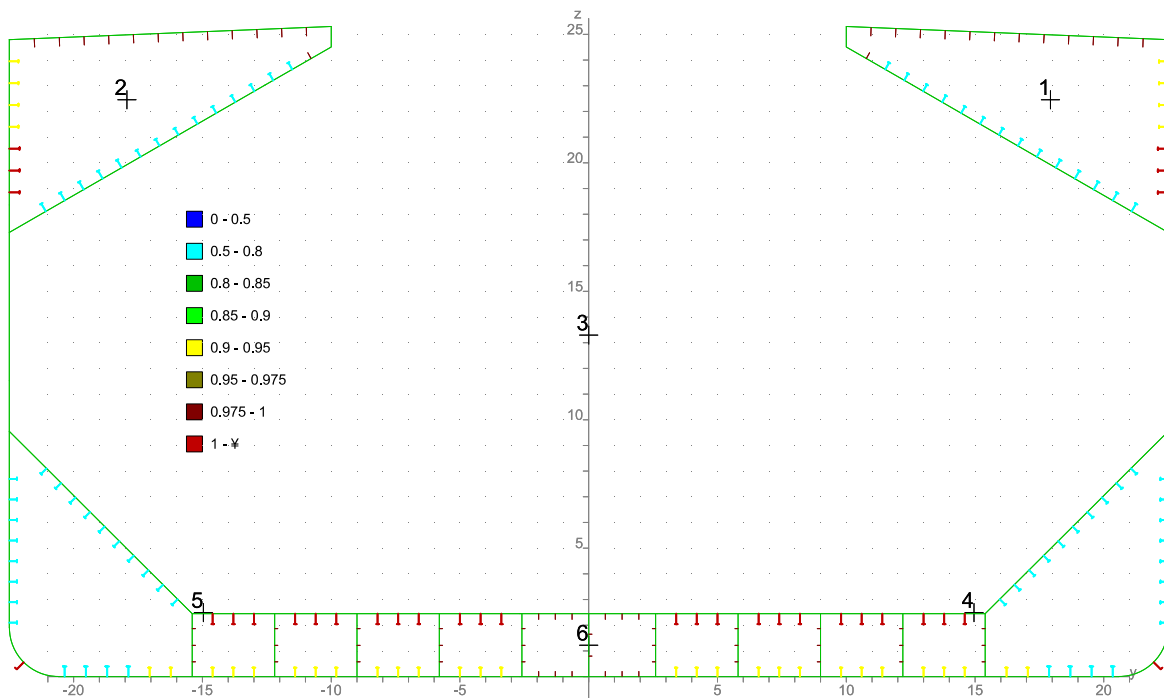
Σχήμα 5.99: Έλεγχος απαιτούμενης ροπής αντίστασης ενισχυτικού βασισμένη στις φορτίσεις (Mars2000)

Check ratio - Local strength - Stiffeners - Mini. Web Thickness



Σχήμα 5.100: Έλεγχος ελάχιστου απαιτούμενου πάχους κορμού ενισχυτικού, βασισμένο στις εμπειρικές απαιτήσεις (Mars2000)

Check ratio - Local strength - Stiffeners - Mini. Flange Breadth



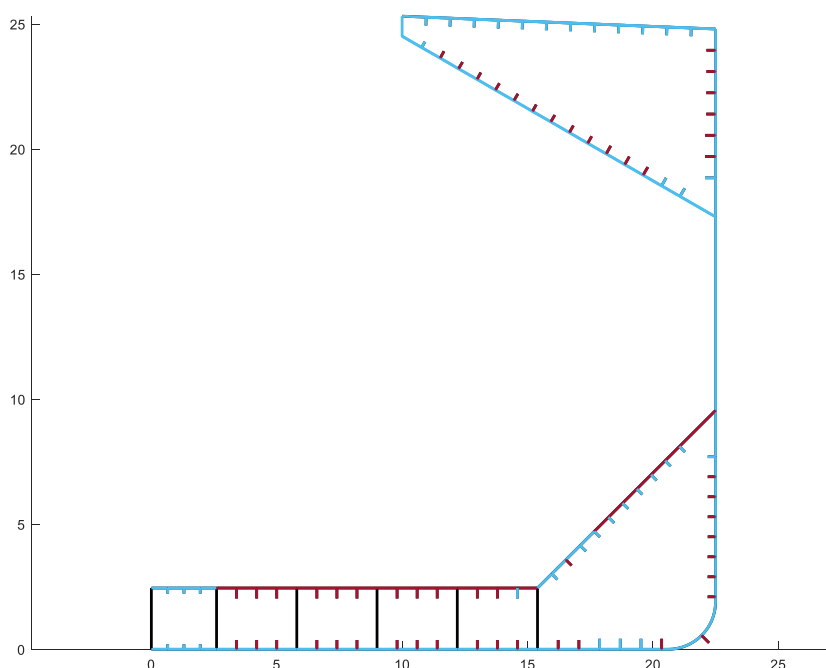
Σχήμα 5.101: Έλεγχος απαιτούμενου πλάτους φλάντζας ενισχυτικού, βασισμένο στις απαιτήσεις λυγηρότητας (Mars2000)

5.18 Συγκεντρωτικά Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα συνολικά αποτελέσματα, καθώς και συμπεράσματα που προέκυψαν μετά τον έλεγχο διαστασιολόγησης της μέσης τομής του υπό μελέτη Bulk Carrier. Όσον αφορά τη διαμήκη αντοχή, η διατομή διαθέτει επαρκή ροπή αντίστασης για να παραλάβει τις ορθές τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης της γάστρας. Ωστόσο, όσον αφορά την τοπική αντοχή, διαπιστώθηκε ότι οι απαιτήσεις των σύγχρονων κοινών κατασκευαστικών κανόνων είναι πιο αυστηρές από προηγούμενους κανόνες νηογνωμόνων, καθώς σε αρκετά σημεία της διατομής τα στοιχεία (ελάσματα και ενισχυτικά) φαίνεται να μην ικανοποιούν τις απαιτήσεις που εξετάστηκαν. Στα σχήματα που ακολουθούν συνοψίζονται τα αποτελέσματα ελέγχου των επιμέρους απαιτήσεων, με έμφαση τα στοιχεία που δεν τις ικανοποιούν.

Όσον αφορά τις **περιγραφικές απαιτήσεις – Load Based** (σχήμα 5.102), τα πάχη των ελασμάτων του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate κρίθηκαν ανεπαρκή, ενώ για τα περισσότερα ενισχυτικά, η ροπή αντίστασης κρίθηκε επίσης ανεπαρκής, σε αντίθεση με την απαίτηση για πάχος κορμού η οποία καλύπτεται σε κάθε περίπτωση. Η μη ικανοποίηση της απαίτησης σε ροπή αντίστασης του ενισχυτικού σε αρκετά σημεία μπορεί να δικαιολογηθεί μέσω της μοντελοποίησης που πραγματοποιήθηκε, η οποία σχολιάζεται παρακάτω.

Για τον έλεγχο αυτών των απαιτήσεων εξετάστηκαν διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρίσκεται το κάθε στοιχείο, τόσο για στατικό (S) όσο και για δυναμικό (S+D) σενάριο φόρτισης. Συγκεκριμένα, για τα στοιχεία του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate εξετάστηκαν καταστάσεις ομογενούς φόρτωσης, φόρτωσης εναλλάξ και κατάσταση κατάκλυσης, από τις οποίες δυσμενέστερη προέκυψε τελικά η κατάσταση φόρτωσης εναλλάξ. Για τα στοιχεία του εξωτερικού περιβλήματος εξετάστηκε κατάσταση ομογενούς φόρτωσης, ενώ για τα στοιχεία του ελάσματος της άνω πλευρικής δεξαμενής έρματος, εξετάστηκε η κατάσταση ερματισμού. Τέλος, από την ανάλυση αυτή διαπιστώθηκε ότι για κάθε κατάσταση φόρτωσης που εξετάστηκε, δυσμενέστερο σενάριο ήταν το δυναμικό με διαφορετική κρίσιμη δυναμική κατάσταση ανά περίπτωση, ενώ το στατικό σενάριο δεν κρίθηκε δυσμενές, έτσι ώστε να επηρεάσει τη διαστασιολόγηση.



Σχήμα 5.102: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ελέγχου περιγραφικών απαιτήσεων βασισμένες στις σχεδιαστικές φορτίσεις (Load Based). Τα ελάσματα με κόκκινο δεν ικανοποιούν την απαίτηση πάχους, ενώ τα ενισχυτικά με κόκκινο δεν ικανοποιούν την απαίτηση σε ροπή αντίστασης

Σχετικά με την ροπή αντίστασης ενισχυτικού, η μοντελοποίηση του ενεργού μήκους κάμψης l_{bdg} επηρεάζει έντονα και την απαίτηση Z_{req} , όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο (βλ. Κεφάλαιο 5.8.2), καθώς εμφανίζεται υψωμένο στο τετράγωνο.

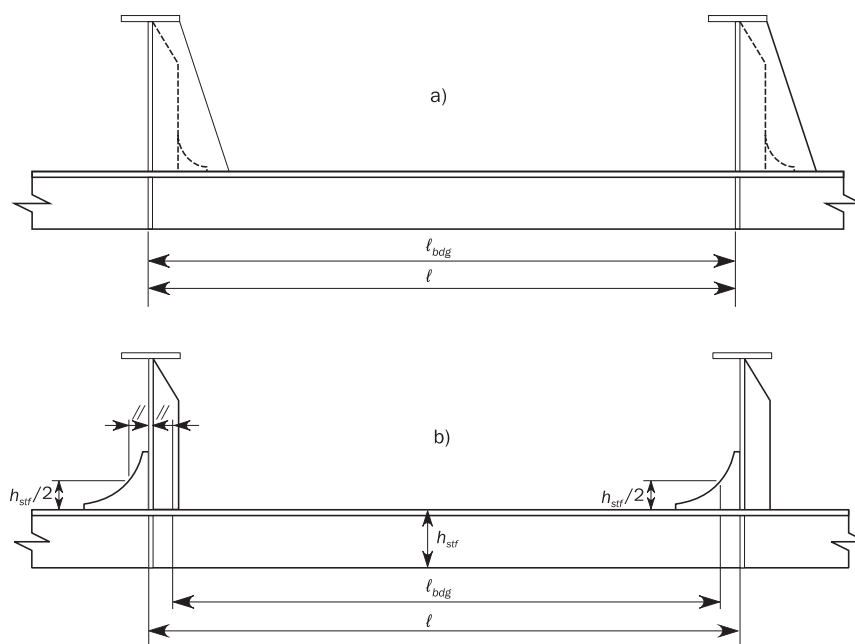
$$Z_{req} = \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} \chi C_s R_{eH}}$$

Το μήκος αυτό καθορίζεται από τον τρόπο στήριξης του ενισχυτικού στα κύρια στοιχεία εγκάρσιας ενίσχυσης (PSM). Στην παρούσα μελέτη, λόγω έλλειψης πληροφοριών σχετικά με την ύπαρξη αγκώνων (Brackets) ή άλλων στηρίξεων (Web Stiffeners) στα στοιχεία αυτά, το ενεργό μήκος κάμψης θεωρήθηκε «συντηρητικά» ως ολόκληρη η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κύριων στοιχείων εγκάρσιας ενίσχυσης, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.103 – a), οδηγώντας σε αυστηρότερες απαιτήσεις.

Στην περίπτωση όμως όπου υπάρχουν τέτοιες στηρίξεις προς τις δύο κατευθύνσεις του ενισχυτικού, το ανυποστήρικτο μήκος μειώνεται με βάση το ύψος του $h_{stf} = h_w + t_f$, όπως φαίνεται στο σχήμα (5.103 – b). Σύμφωνα με αυτόν τον τρόπο στήριξης, το ενεργό μήκος κάμψης μπορεί να μειωθεί κατά $h_{stf} / 2$ σε κάθε κατεύθυνση και τελικά να προκύψει $l_{bdg} = l - h_{stf}$. Η σχέση λοιπόν που συνδέει την απαίτηση σε ροπή αντίστασης με απλή στήριξη προς τη μία κατεύθυνση (a) και με στήριξη μέσω αγκώνων προς τις δύο κατευθύνσεις (b) προκύπτει ως εξής:

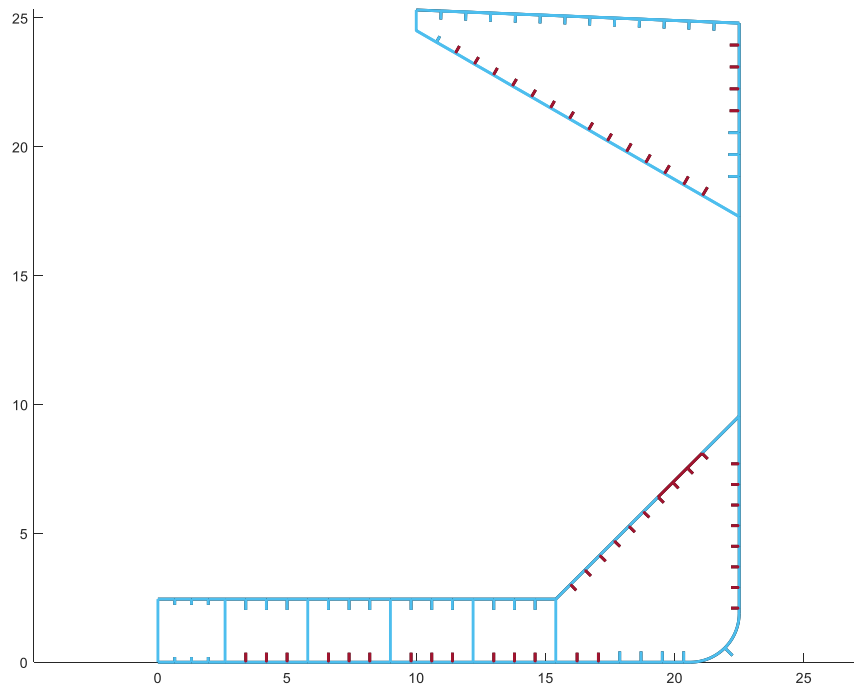
$$\frac{Z_{req-a}}{Z_{req-b}} = \frac{l_{bdg-a}^2}{l_{bdg-b}^2} \Rightarrow \frac{Z_{req-a}}{Z_{req-b}} = \frac{l^2}{(l - h_{stf})^2}$$

Πιο συγκεκριμένα, εξετάζοντας ένα ενισχυτικό του εξωτερικού πυθμένα με ελάχιστο ανυποστήρικτο μήκος $l = 2730 \text{ mm}$ (Floor Spacing) και ύψος ενισχυτικού $h_{stf} = 370 \text{ mm}$ με την στήριξη (b), η απαίτηση ροπής αντίστασης προκύπτει **μικρότερη κατά 25%** σε σχέση με τη στήριξη (a), οδηγώντας τελικά σε ικανοποίηση του κριτηρίου.



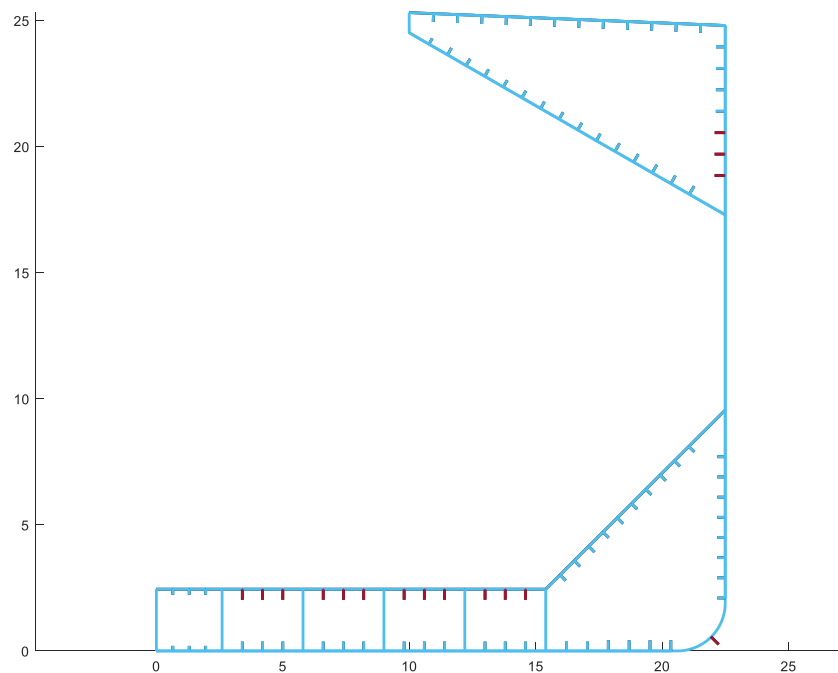
Σχήμα 5.103: Ενεργό μήκος κάμψης l_{bdg} ενισχυτικού απλής στήριξης μεταξύ δύο διαδοχικών PSM με χρήση brackets ή web stiffeners προς τη μία μόνο κατεύθυνση (a) και με χρήση brackets ή web stiffeners προς τις δύο κατευθύνσεις (b)

Όσον αφορά τις **ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις** (σχήμα 5.104), διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα ενισχυτικά δεν καλύπτουν το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ή/και φλάντζας, σε αντίθεση με τα ελάσματα τα οποία με εξαίρεση μόνο σε μια περιοχή του Hopper Plate καλύπτουν το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος.



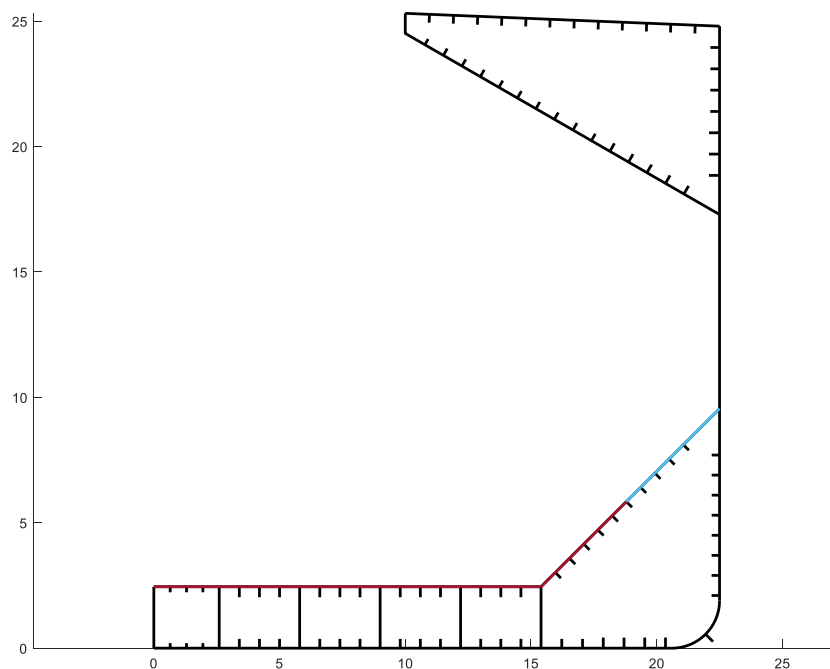
Σχήμα 5.104: Συγκενρωτικά αποτελέσματα ελέγχου ελάχιστων εμπειρικών απαιτήσεων. Τα στοιχεία με κόκκινο χρώμα δεν ικανοποιούν τις σχετικές απαιτήσεις

Όσον αφορά τις **απαιτήσεις λυγηρότητας** (σχήμα 5.105), διαπιστώθηκε ότι όλα τα ελάσματα καλύπτουν τις σχετικές απαιτήσεις, ωστόσο ορισμένα ενισχυτικά παρουσιάζουν ανεπάρκειες σχετικά με το πάχος κορμού και το πλάτος φλάντζας.



Σχήμα 5.105: Συγκενρωτικά αποτελέσματα ελέγχου απαιτήσεων λυγηρότητας. Τα στοιχεία με κόκκινο χρώμα δεν ικανοποιούν τις σχετικές απαιτήσεις

Τέλος, το **κριτήριο αρπάγης GRAB [X]** (σχήμα 5.106) που αφορά τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate διαπιστώθηκε ότι αποτελεί αυστηρή απαίτηση, καθώς τα εν λόγω στοιχεία δεν ικανοποιούν τη σχετική απαίτηση σε πάχος.



Σχήμα 5.106: Συγκριτικά αποτελέσματα ελέγχου κριτηρίου αρπάγης GRAB [X] που αφορά τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate. Όλα τα εν λόγω στοιχεία που βρίσκονται έως και 3 m άνωθεν του εσωτερικού πυθμένα δεν καλύπτουν τη σχετική απαίτηση

Συγκριτικά εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. **Οι περιγραφικές απαιτήσεις** που βασίζονται στις σχεδιαστικές φορτίσεις (**Load Based**) κρίθηκαν αυστηρές για τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate, καθώς και για τα περισσότερα ενισχυτικά, λόγω απαίτησης σε ροπή αντίστασης.
2. **Οι ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις** κρίθηκαν πιο αυστηρές σε σχέση με τις απαιτήσεις που βασίζονται στις σχεδιαστικές φορτίσεις για το συγκεκριμένο πλοίο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί λόγω του ότι οι ελάχιστες απαιτήσεις είναι άμεσα εξαρτώμενες από το μήκος του πλοίου, που στην περίπτωση μας είναι μεγάλο (Capesize) και οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις. Από την άλλη, οι απαιτήσεις που βασίζονται στις φορτίσεις λαμβάνουν υπόψη το όριο διαρροής του υλικού και η χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής οδηγεί σε μικρότερες απαιτήσεις. Συνεπώς για πλοία μεγάλου μήκους που κατασκευάζονται με χάλυβα υψηλής αντοχής, επικρατούν οι ελάχιστες απαιτήσεις.
3. **Οι απαιτήσεις λυγηρότητας** κρίθηκαν λιγότερο αυστηρές σε σχέση με τις υπόλοιπες απαιτήσεις.
4. **Το κριτήριο αρπάγης** κρίθηκε επίσης αυστηρό, ωστόσο για τα ελάσματα που αφορά, οι περιγραφικές απαιτήσεις που βασίζονται στις φορτίσεις κρίθηκαν πιο αυστηρές.

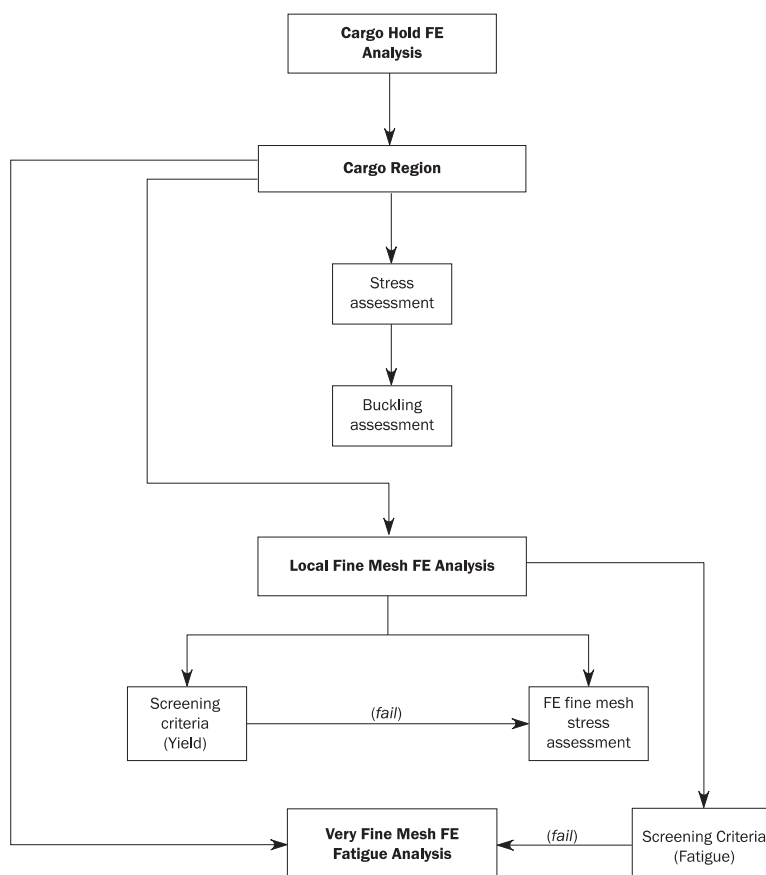
Τέλος, οι σύγχρονοι κατασκευαστικοί κανόνες φαίνονται αυστηρότεροι στο καθαρό προσφερόμενο πάχος που προκύπτει, καθώς οι προσαυξήσεις διάβρωσης είναι μεγαλύτερες σε σχέση με αντίστοιχες προσαυξήσεις των Νηογνωμόνων. Ενδεικτικά για τον εσωτερικό πυθμένα, η προσαύξηση λόγω διάβρωσης σύμφωνα με τους CSR προέκυψε 5.5 mm, ενώ σύμφωνα με τους αντίστοιχους κανόνες του B.V. με τους οποίους κατασκευάστηκε, προδιαγράφεται 3.5 mm [1]. Συνεπώς, το προσδοκώμενο προσφερόμενο πάχος με βάση τους CSR είναι μικρότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – Σχεδιαστική Επαλήθευση με την Μέθοδο των

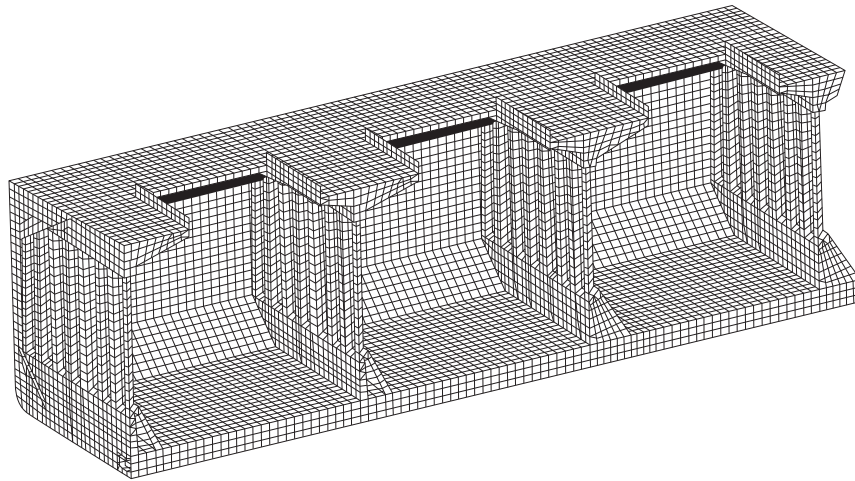
Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της αντοχής των κατασκευαστικών μερών του πλοίου, στα πλαίσια σχεδιαστικής επαλήθευσης, με τον απευθείας υπολογισμό της απόκρισης της κατασκευής (Direct Strength Analysis) υπό δεδομένες σχεδιαστικές φορτίσεις. Η χρήση της μεθόδου προδιαγράφεται στα Κεφάλαια {Ch7, Ch8, Ch9} των κανόνων για τον έλεγχο της μεταλλικής κατασκευής έναντι διαρροής, λυγισμού και κόπωσης, ενώ καθίσταται υποχρεωτική για πλοία με μήκος μεγαλύτερο από 150 m. Πιο αναλυτικά, πραγματοποιείται στα 3 παρακάτω επίπεδα, όπως φαίνεται και στο σχήμα (6.1).

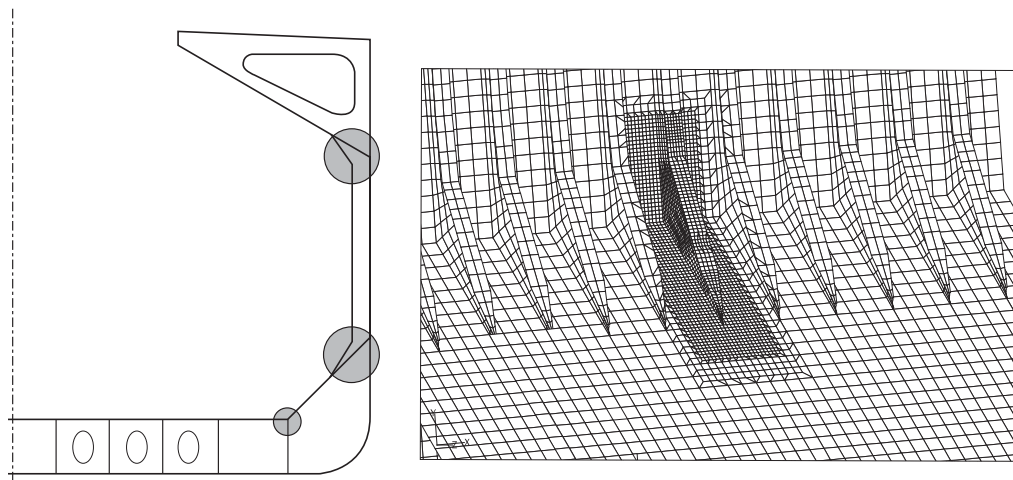
1. **Cargo Hold Analysis:** Ανάλυση ενός κύτους φορτίου για την αξιολόγηση της αντοχής σε διαρροή και λυγισμό, των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων, των κύριων εγκάρσιων στοιχείων ενίσχυσης (PSM) και των φρακτών. Πραγματοποιείται με την μοντελοποίηση τριών αμπαριών και τη χρήση ενός αραιού πλέγματος (Coarse Model), με μέγεθος ανάλογο του Frame Spacing και της ισαπόστασης των ενισχυτικών, όπως φαίνεται στο σχήμα (6.2).
2. **Local Fine Mesh Analysis:** Λεπτομερής (τοπική) ανάλυση με χρήση πυκνότερου πλέγματος (Fine Mesh), με μέγεθος μικρότερο των 50mm, για τον έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής κατασκευαστικών λεπτομερειών, όπως φαίνεται στο σχήμα (6.3).
3. **Very Fine Mesh Fatigue Analysis:** Πολύ λεπτομερής ανάλυση με χρήση πολύ πυκνού πλέγματος, με μέγεθος της τάξης των 10mm, σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες που προδιαγράφονται από τους κανόνες για τον έλεγχο αντοχής σε κόπωση.



Σχήμα 6.1: Διαδικασία ελέγχου αντοχής με χρήση των Πεπερασμένων Στοιχείων



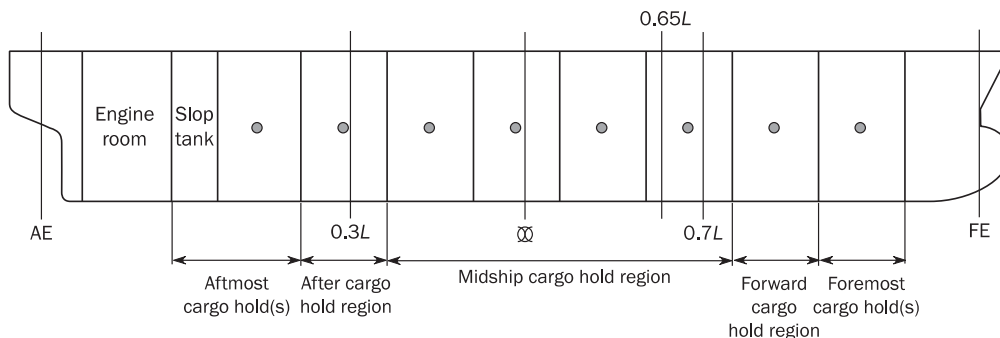
Σχήμα 6.2: Ανάλυση μοντέλου τριών αμπαριών (Cargo Hold Analysis)



Σχήμα 6.3: Λεπτομερής τοπική ανάλυση σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες (Local Fine Mesh Analysis)

6.1 Ανάλυση Αντοχής Κύτους Φορτίου (Cargo Hold Analysis)

Η ανάλυση που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία, αφορά τον έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής των κατασκευαστικών στοιχείων στην περιοχή του φορτίου (**Stress Assessment**) και περιορίζεται στην περιοχή της μέσης τομής (**Midship Cargo Hold Region**). Στην πραγματικότητα μια πλήρης ανάλυση περιλαμβάνει υποχρεωτικά όλα τα κύτη μεταξύ της προωραίας φρακτής σύγκρουσης και της πρυμναίας φρακτής μηχανοστασίου. Οι επιμέρους περιοχές στις οποίες χωρίζεται ο χώρος φορτίου φαίνονται στο σχήμα (6.4) και μπορεί να ποικίλλουν ανάλογα με το μήκος του πλοίου και τη διάταξη των κυτών.



Σχήμα 6.4: Ορισμός περιοχών φορτίων για την ανάλυση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

6.2 Κατασκευαστική Μοντελοποίηση

Για τον έλεγχο αντοχής ενός κύτους απαιτείται η δημιουργία μοντέλου τριών αμπαριών, με το μεσαίο να αφορά σε κάθε περίπτωση το υπό εξέταση κύτος. Η μοντελοποίηση περιλαμβάνει όλα τα ελάσματα και τα ενισχυτικά της κατασκευής με εφαρμογή περιθωρίου διάβρωσης $0.5 t_c$ (βλ. Κεφάλαιο 3). Αναλυτικά, τα κατασκευαστικά στοιχεία που πρέπει να μοντελοποιηθούν είναι τα εξής:

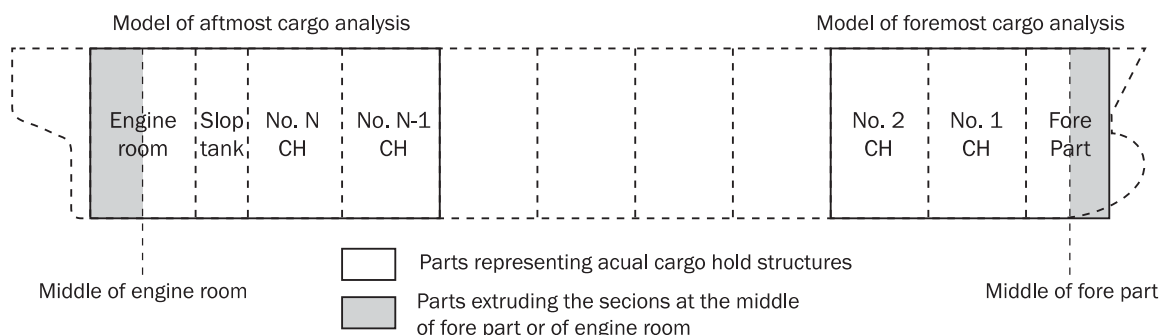
- Εσωτερικό και εξωτερικό περίβλημα της γάστρας
- Κύριο κατάστρωμα
- Έδρες και σταθμίδες (Girders) του διπύθμενου
- Ενισχυμένοι νομείς (Webs)
- Στόμια ανοίγματος κυτών (Hatch Coamings)
- Stringers
- Κατασκευαστικά μέλη εγκάρσιων και διαμήκων φρακτών
- Άλλα κύρια στοιχεία ενίσχυσης (PSM)
- Άλλα κατασκευαστικά μέλη που συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή του πλοίου

Τα στοιχεία αυτά μοντελοποιούνται με βάση τους τύπους πεπερασμένων στοιχείων αναφέρονται στον πίνακα (6.1). Συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση όλων των ελασμάτων πραγματοποιείται με τη χρήση **Shell Elements**, ενώ η μοντελοποίηση των ενισχυτικών και των φλαντζών των PSM με τη χρήση **Beam Elements**.

Πίνακας 6.1: Τύποι Πεπερασμένων Στοιχείων

Type of finite element	Description
Rod (or truss) element	Line element with axial stiffness only and constant cross sectional area along the length of the element.
Beam element	Line element with axial, torsional and bi-directional shear and bending stiffness and with constant properties along the length of the element.
Shell (or plate) element	Shell element with in-plane stiffness and out-of-plane bending stiffness with constant thickness.

Με εξαίρεση τα ακραία προμναία και προωραία μοντέλα κυτών φορτίου, όλα τα μοντέλα εκτείνονται κατά το διάμηκες σε μήκος τριών αμπαριών, συμπεριλαμβανομένων των ακραίων φρακτών, όπως φαίνεται στο σχήμα (6.5). Για τη δημιουργία όλων των πιθανών μοντέλων, λαμβάνεται υπόψη ότι το κάθε αμπάρι πρέπει να αποτελεί το κεντρικό αμπάρι σε κάποιο από τα μοντέλα. Σε περίπτωση ύπαρξης πτυχωτών φρακτών (Corrugated BHD), η έκταση του μοντέλου είναι τέτοια ώστε να περιλαμβάνει συνολικά όλες τις εδράσεις από το ένα άκρο στο άλλο, μαζί με όποιο άλλο κατασκευαστικό στοιχείο εκτείνεται μέχρι τα σημεία αυτά. Κατακόρυφα, το μοντέλο εκτείνεται μέχρι το κύριο κατάστρωμα συμπεριλαμβανομένων των κυρίων κατασκευαστικών στοιχείων που βρίσκονται σε αυτό (Hatch Coaming).

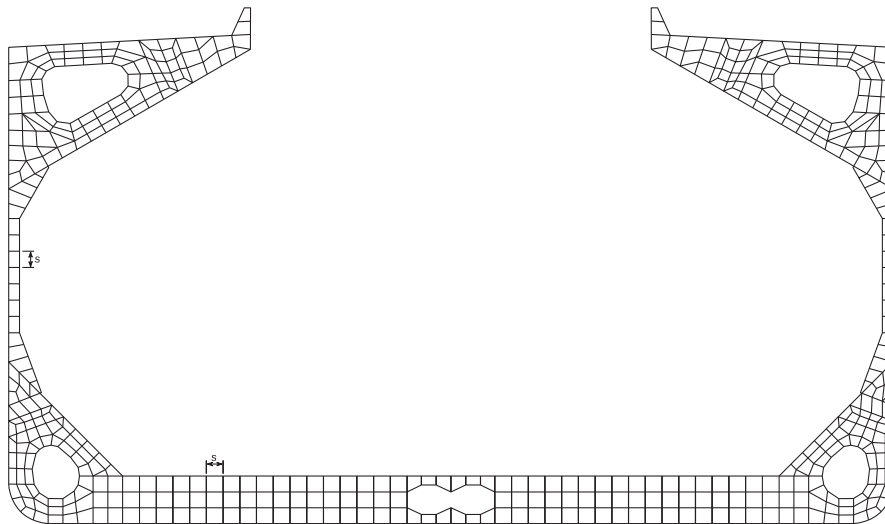


Σχήμα 6.5: Έκταση πιθανών μοντέλων τριών αμπαριών

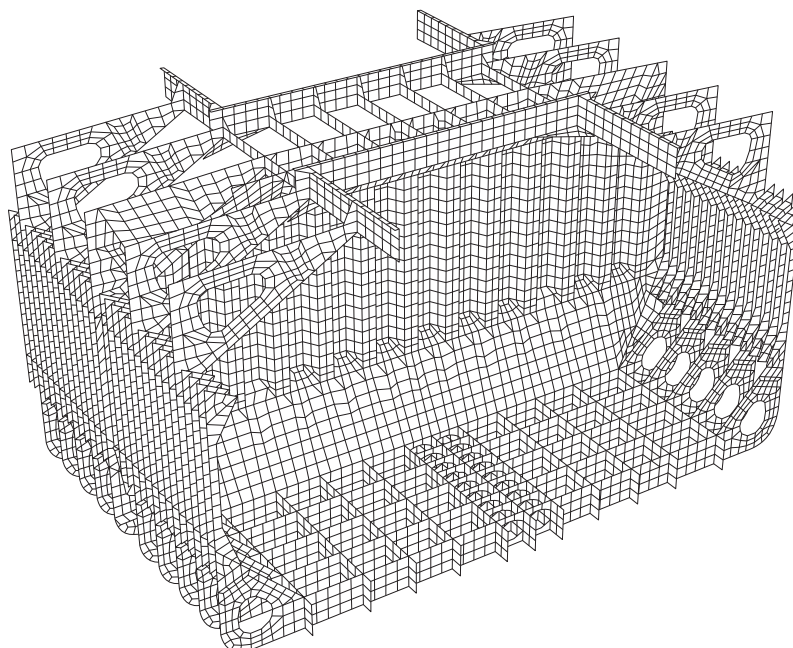
6.3 Ανάλυση Πλέγματος

Όσον αφορά το πλέγμα διακριτοποίησης (Mesh), θα πρέπει να ικανοποιεί τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Ο λόγος επιμήκους (Aspect Ratio) για τα shell elements δεν θα πρέπει να ξεπερνάει το 3
- Οι διαστάσεις των στοιχείων (Shell Elements) κατά το εγκάρσιο δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες από την ισαπόσταση των διαμήκων ενισχυτικών (βλ. σχήμα 6.6, Spacing)
- Η χρήση των τριγωνικών στοιχείων θα πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατόν
- Σε περιοχές όπου αναμένονται υψηλές τάσεις ο λόγος των πλευρών θα πρέπει να είναι κοντά στη μονάδα, ενώ η χρήση τριγωνικών στοιχείων θα πρέπει να αποφεύγεται
- Καθ' ύψος των σταθμίδων και των εδρών του διπυθμένου θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον τρία στοιχεία
- Στα ανοίγματα των διαφραγμάτων και των εδρών το πλέγμα θα πρέπει να είναι αρκετά πυκνό έτσι ώστε να προσεγγίζεται επαρκώς η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του ανοίγματος
- Τα μικρότερα ανοίγματα των εδρών (ανθρωποθυρίδες) δεν είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν



Σχήμα 6.6: Τυπικό πλέγμα εγκάρσιας δομής σε Bulk Carrier



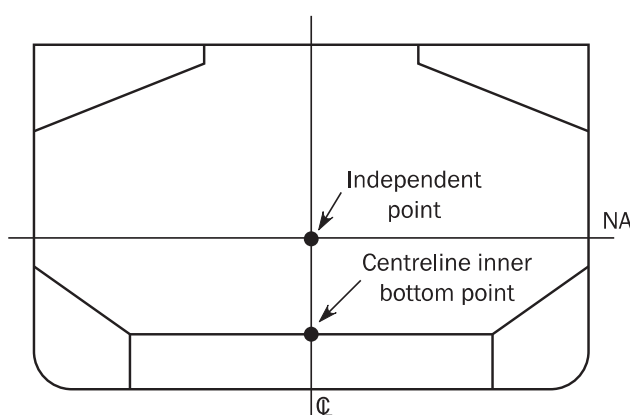
Σχήμα 6.7: Τυπική διακριτοποιημένη δομή μοντέλου Bulk Carrier

6.4 Συνοριακές Συνθήκες

Για την επίλυση του μοντέλου επιβάλλονται συνοριακές συνθήκες στις ακραίες διατομές του. Σκοπός των συνθηκών αυτών είναι να περιορίσουν ορισμένους βαθμούς ελευθερίας (στροφές και μετατοπίσεις), αλλά και να εξασφαλίσουν ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των κόμβων στις ακραίες διατομές προσομοιάζει τη συμπεριφορά ενός δοκαριού υπό συνδυασμένη φόρτιση. Οι συνοριακές συνθήκες συγκεντρώνονται στον πίνακα (6.2) και αφορούν όλα τα πιθανά μοντέλα εκτός από το πρωραίο (Foremost). Οι συνθήκες αυτές αποτελούνται από τη δημιουργία άκαμπτης σύνδεσης (Rigid Link) των κόμβων των ακραίων διατομών με ανεξάρτητα σημεία (Independent Point), την επιβολή περιορισμών στα σημεία αυτά και τη σύνδεση των κόμβων κάθε ακραίας διατομής με ράβδους κατά το περίγραμμα (End Beam Constraints).

Πίνακας 6.2: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου τριών αμπαριών (εκτός του πρωραίου μοντέλου)

Location	Translation			Rotation		
	$\bar{\alpha}_x$	$\bar{\alpha}_y$	$\bar{\alpha}_z$	θ_x	θ_y	θ_z
Aft End						
Independent point	-	Fix	Fix	M_{T-end}	-	-
Cross section	-	Rigid link	Rigid link	Rigid link	-	-
End beam, see [2.5.4]						
Fore End						
Independent point	-	Fix	Fix	Fix	-	-
Intersection of centreline and inner bottom	Fix	-	-	-	-	-
Cross section	-	Rigid link	Rigid link	Rigid link	-	-
End beam, see [2.5.4]						



Σχήμα 6.8: Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σε ακραία διατομή Bulk Carrier

Η άκαμπτη σύνδεση (rigid link) ενώνει όλους τους κόμβους των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων (και του Cross Deck) με ένα ανεξάρτητο σημείο (independent point), το οποίο βρίσκεται πάνω στον ουδέτερο άξονα της αντιστοιχίας διατομής. Η δημιουργία άκαμπτης σύνδεσης μεταξύ των κόμβων και το σημείο στον ουδέτερο άξονα, έχει ως σκοπό να διατηρήσει σταθερές τις αποστάσεις ανάμεσα σε κάθε κόμβο με το σημείο του ουδέτερο άξονα. Με αυτόν τον τρόπο, οι μετατοπίσεις της διατομής είναι αποτέλεσμα μόνο στρώσης γύρω από το σημείο αυτό με ακτίνα την αρχική απόσταση του κόμβου από το σημείο. Στο ανεξάρτητο σημείο εφαρμόζονται περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας που αφορούν την κατακόρυφη και εγκάρσια μετατόπιση (δy , δz), καθώς και την στρέψη (θx) του μοντέλου.

Ο περιορισμός της αξονικής (δx) μετατόπισης, εφαρμόζεται σε έναν μόνο κόμβο, ο οποίος βρίσκεται στην τομή της Center Line με τον εσωτερικό πυθμένα, στην προωραία ακραία διατομή. Ο περιορισμός αυτός δεν απαιτεί κάποια περαιτέρω σύνδεση με τα υπόλοιπα στοιχεία.

Τέλος, όλοι οι κόμβοι των διαμήκων στοιχείων των ακραίων διατομών, ενώνονται μεταξύ τους με ράβδους οι οποίες δεν είναι άκαμπτες, αλλά δεν επιτρέπουν και μεγάλες παραμορφώσεις. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει, ότι οι κόμβοι της διατομής δεν θα πλησιάσουν σε υπερβολικό βαθμό ο ένας τον άλλο με αποτέλεσμα να χαλάει η μορφή της διατομής. Οι γεωμετρικές ιδιότητες των ράβδων αυτών υπολογίζονται από τις αντίστοιχες γεωμετρικές ιδιότητες των ακραίων διατομών. Σε κάθε ακραία διατομή οι ράβδοι που ενώνουν τους κόμβους θα πρέπει να έχουν τις ίδιες ιδιότητες, οι οποίες καθορίζονται ως εξής:

- Δεύτερες Ροπές Αδράνειας: $I_{yy-n50} = I_{zz-n50} = I_{xx-n50} (J) = \frac{1}{25} I_{hull\ girder\ yy-n50}$
- Εμβαδό διατομής: $A_{y-n50} = A_{z-n50} = \frac{1}{80} A_{hull\ girder-n50}$

Σημειώνεται ότι οι ράβδοι αυτοί είναι γενικευμένες και δεν έχουν κάποια συγκεκριμένη διατομή.

6.5 Σχεδιαστικοί Συνδυασμοί Φορτίσεων για τα Πεπερασμένα Στοιχεία

Για την ανάλυση της κατασκευαστικής αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται οι συνδυασμοί των σχεδιαστικών φορτίσεων που περιγράφονται στο εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec8} των κανόνων, ανάλογα με τον τύπο του πλοίου και την περιοχή στην οποία βρίσκεται το μοντέλο των τριών αμπαριών. Κάθε συνδυασμός σχεδιαστικών φορτίσεων είναι αποτέλεσμα της κατάστασης φόρτωσης που εξετάζεται σε συνδυασμό με κάποια δυναμική κατάσταση φόρτισης (dynamic load case). Με αυτόν τον τρόπο καθορίζονται οι τοπικές φορτίσεις (**Local Loads**) που εφαρμόζονται ταυτόχρονα στο μοντέλο, οι οποίες κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Βάρος της μεταλλικής κατασκευής, έπειτα από μείωση του 50% της προβλεπόμενης διάβρωσης σε κάθε στοιχείο (στατική φόρτιση)
- Εσωτερικές πιέσεις φορτίου και έρματος (στατική φόρτιση)
- Εξωτερικές υδροστατικές πιέσεις λόγω θάλασσας (στατική φόρτιση)
- Εξωτερικές υδροδυναμικές πιέσεις λόγω κυματισμών (δυναμική φόρτιση)
- Εξωτερικές υδροδυναμικές πιέσεις στο κατάστρωμα – Green Seas (δυναμική φόρτιση)
- Εσωτερικές δυναμικές πιέσεις λόγω επιτάχυνσης φορτίου (δυναμική φόρτιση)
- Εσωτερικές δυναμικές πιέσεις λόγω επιτάχυνσης έρματος (δυναμική φόρτιση)

Όλες οι παραπάνω φορτίσεις υπολογίζονται με βάση τις αντίστοιχες σχέσεις που συμπεριλαμβάνονται στους κανόνες και περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4. Από την επίδραση όλων των παραπάνω τοπικών φορτίσεων προκύπτουν για το μοντέλο τα διαγράμματα κατανομής των φορτίσεων του μοντέλου ως δοκάρι (**Global Loads**).

Επειδή το σύνολο των φορτίσεων που ασκούνται στο μοντέλο δεν ισοδυναμεί απολύτως με τις πραγματικές φορτίσεις που δέχεται το πλοίο ως δοκός (**hull girder loads**), οι ανωτέρω φορτίσεις που ασκούνται στο μοντέλο πρέπει να τροποποιηθούν έτσι ώστε να συμπίπτουν με τις φορτίσεις που θα δεχόταν το πλοίο ως δοκάρι.

Για κάθε κατάσταση φόρτωσης ορίζονται οι **επιθυμητές τιμές (Target Values)** των φορτίσεων της γάστρας σε συγκεκριμένες θέσεις που προδιαγράφουν οι κανόνες και εφαρμόζονται στο μοντέλο διορθώνοντας εκείνες που προκύπτουν μόνο από την εφαρμογή των τοπικών φορτίων. Μετά την ολοκλήρωση των διορθώσεων, οι παρακάτω φορτίσεις της γάστρας θα πρέπει να ταυτίζονται σε πλοίο και μοντέλο, ενώ οι τυχόν προκύπτουσες αξονικές δυνάμεις θα πρέπει να είναι μηδενικές.

- Κατακόρυφη καμπτική ροπή
- Διατμητική δύναμη
- Οριζόντια καμπτική ροπή
- Στρεπτική ροπή

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυναμική κατάσταση (HSM-1), η οποία έχει μηδενική συνεισφορά σε οριζόντια καμπτική και στρεπτική ροπή, συνεπώς εξετάζονται η επιθυμητή κατακόρυφη καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη.

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, οι βασικές παράμετροι που ορίζουν μια εξεταζόμενη εντατική κατάσταση στο μοντέλο είναι οι εξής:

- **Πιέσεις εσωτερικές και εξωτερικές (Local Loads)** σαν συνάρτηση του βυθίσματος λειτουργίας, της κατάστασης φόρτωσης και της δυναμική κατάσταση φόρτωσης.
- **Επιθυμητές φορτίσεις γάστρας (Global Loads)** οι οποίες καθορίζονται από την κατάσταση φόρτωσης και τις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης.
- Οι δυναμικές καταστάσεις φόρτισης καθορίζονται από 7 σχεδιαστικούς κυματισμούς (EDWs), σε 8 συνολικά κατευθύνσεις, οι οποίοι προκαλούν κατάσταση sagging ή hogging.

6.5.1 Επιθυμητές Φορτίσεις Γάστρας

Παρακάτω ακολουθεί ο υπολογισμός των επιθυμητών (**target**) καμπτικών ρομών και διατμητικών δυνάμεων, για την επίτευξη της ελάχιστης εξεταζόμενης κατάστασης φόρτωσης σε συνδυασμό με τη δυναμική κατάσταση φόρτισης.

6.5.1.1 Επιθυμητή Καμπτική Ροπή

Η επιθυμητή τιμή της κατακόρυφης καμπτικής ροπής M_{v-targ} βρίσκεται στο μεσαίο κύτος εκεί όπου εμφανίζεται η μέγιστη τιμή της (για Hogging) ή η ελάχιστη (για Sagging) και για το δεδομένο συνδυασμό σχεδιαστικής φόρτισης υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{v-targ} = C_{BM-LC} M_{SW} + M_{WV-LC}$$

Όπου:

- C_{BM-LC} το ποσοστό της επιτρεπόμενης ροπής κάμψης σε ήρεμο νερό, για την εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης
- M_{SW} η επιτρεπόμενη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 4
- M_{WV-LC} η ροπή κάμψης λόγω κυματισμού για τη δεδομένη δυναμική κατάσταση φόρτισης (βλ. Κεφάλαιο 4)

6.5.1.2 Επιθυμητή Διατμητική Δύναμη

Οι επιθυμητές τιμές των διατμητικών δυνάμεων $Q_{\text{targ-aft}}$, $Q_{\text{targ-fwd}}$ βρίσκονται στην πρυμναία και προωραία φρακτή του μεσαίου κύτους και για το δεδομένο συνδυασμό σχεδιαστικής φόρτισης υπολογίζονται ως εξής:

if $Q_{fwd} \geq Q_{aft}$

$$Q_{\text{targ-aft}} = C_{SF-LC} Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swa} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

$$Q_{\text{targ-fwd}} = C_{SF-LC} Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swf} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

if $Q_{fwd} < Q_{aft}$

$$Q_{\text{targ-aft}} = C_{SF-LC} Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swa} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

$$Q_{\text{targ-fwd}} = C_{SF-LC} Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swf} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

Όπου:

- Q_{aft} , Q_{fwd} οι διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην πρυμναία και προωραία φρακτή του μεσαίου κύτους, λόγω της εφαρμογής μόνο των τοπικών φορτίσεων (Local Loads). Οι συγκεκριμένες διατμητικές δυνάμεις δεν αντιστοιχούν στις πραγματικές τιμές που καταπονούν το τμήμα του πλοίου
- C_{SF-LC} το ποσοστό της επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης σε ήρεμο νερό, για την εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης
- Q_{sw-pos} , Q_{sw-neg} οι επιτρεπόμενες διατμητικές δυνάμεις σε ήρεμο νερό (βλ. Κεφάλαιο 4)
- Q_{wv-pos} , Q_{wv-neg} οι διατμητικές δυνάμεις λόγω κυματισμών για τη δεδομένη δυναμική κατάσταση φόρτισης
- ΔQ_{swa} , ΔQ_{swf} διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων στην πρυμναία και προωραία φρακτή του μεσαίου κύτους για Bulk Carriers.

6.5.2 Διόρθωση Διατμητικής Δύναμης

Για την προσαρμογή της διατμητικής δύναμης στο μοντέλο, εφαρμόζονται δύο μέθοδοι:

- **Μέθοδος 1 (M1):** Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε μία φρακτή του μεσαίου κύτους.
- **Μέθοδος 2 (M2):** Διόρθωση διατμητικής δύναμης και στις δύο φρακτές του μεσαίου κύτους.

Για δεδομένο συνδυασμό φορτίσεων, η μέθοδος που χρησιμοποιείται επιλέγεται ανάλογα το ποσοστό μέγιστης επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης C_{SF-LC} . Πιο συγκεκριμένα, για συνδυασμούς φορτίσεων όπου $C_{SF-LC} = 1$ (**Max SF-LC**) χρησιμοποιείται η μέθοδος 1. Η μέθοδος 2 εφαρμόζεται σε περίπτωση που η τελική τιμή της διορθωμένης διατμητικής δύναμης από τη μέθοδο 1 στην άλλη φρακτή υπερβαίνει την αντίστοιχη απαίτηση. Περισσότερες πληροφορίες βρίσκονται στο εδάφιο {Pt1/Ch7/Sec2/[4.4]} των κανόνων. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε μόνο η μέθοδος 1, ωστόσο για λόγους πληρότητας περιγράφεται και η μέθοδος 2.

Μέθοδος 1: Διόρθωση σε μία Φρακτή

Με βάση τον παρακάτω πίνακα, προδιαγράφεται σε ποια φρακτή θα γίνει η διόρθωση της διατμητικής δύναμης:

Πίνακας 6.3: Μέθοδος 1 – Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε μία φρακτή

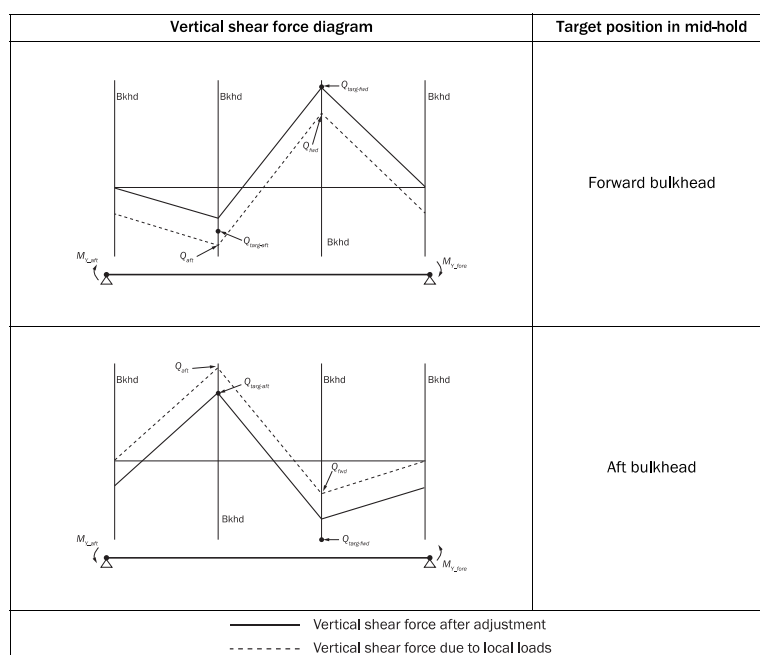
Design loading conditions	Bulkhead location	M_{wv-LC}	Condition on Q_{fwd}	Mid-hold bulkhead for SF adjustment
Seagoing conditions	$x_{b-aft} > 0.5 L$	< 0 (sagging)	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Fwd
			$Q_{fwd} \leq Q_{aft}$	Aft
	> 0 (hogging)	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Aft	
		$Q_{fwd} \leq Q_{aft}$	Fwd	
	$x_{b-fwd} < 0.5 L$	< 0 (sagging)	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Aft
			$Q_{fwd} \leq Q_{aft}$	Fwd
	> 0 (hogging)	$Q_{fwd} > Q_{aft}$	Fwd	
		$Q_{fwd} \leq Q_{aft}$	Aft	
Harbour and testing conditions	whatever the location	-	-	(1)

(1) For the FE load combinations covered by the load combination tables of Ch 4, Sec 8, the bulkhead where the shear force adjustment is to be done is indicated in those tables.

Για τη διόρθωση της διατμητικής δύναμης εφαρμόζονται στα άκρα του μοντέλου δύο ίσες ροπές, ίδιας φοράς που αυξάνουν (ή μειώνουν) τις διατμητικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του μοντέλου κατά τη διαφορά $Q_{targ-aft} - Q_{local}$.

- Διόρθωση στην πρυμναία φρακτή: $M_{Y-aft} = M_{Y-fore} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} (Q_{targ-aft} - Q_{aft})$
- Διόρθωση στην πρωραία φρακτή: $M_{Y-aft} = M_{Y-fore} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} (Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})$

Με τη μέθοδο αυτή ουσιαστικά η καμπύλη της διατμητικής δύναμης μετατοπίζεται ολόκληρη προς τα πάνω ή προς τα κάτω ανάλογα με τη διόρθωση και ελέγχεται μετά αν ικανοποιεί τη συνθήκη και για τη δεύτερη φρακτή (σχήμα 6.9).



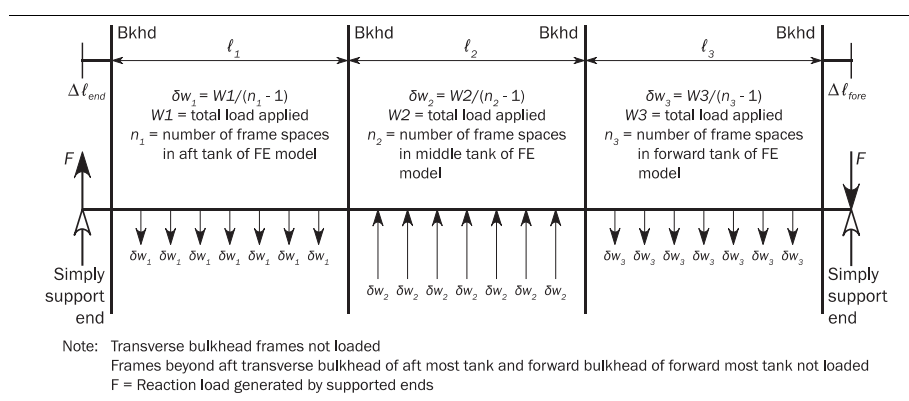
Σχήμα 6.9: Μέθοδος 1 – Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε μία φρακτή

Μέθοδος 2: Διόρθωση σε δύο Φρακτές

Στη μέθοδο αυτή εφαρμόζονται αρχικά δύο ίσες ροπές, ίδιας φοράς, στα άκρα του μοντέλου που αυξάνουν ή μειώνουν τις διατμητικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πλοίου κατά $(Q_{\text{targ-aft}} - Q_{\text{aft}} + Q_{\text{targ-fwd}} - Q_{\text{fwd}})$, ώστε η διαφορά της διατμητικής δύναμης από την επιθυμητή και στις δύο φρακτές να είναι ίδια:

$$M_{y\text{-aft}} = M_{y\text{-fore}} = \frac{(x_{\text{fore}} - x_{\text{aft}})}{2} \frac{(Q_{\text{targ-aft}} - Q_{\text{aft}} + Q_{\text{targ-fwd}} - Q_{\text{fwd}})}{2}$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζονται καταναμημένα φορτία δw_1 , δw_2 , δw_3 τα οποία επιτυγχάνουν τη σχετική αύξηση ή μείωση της διαφοράς μεταξύ των φρακτών κατά $(\Delta Q_{\text{aft}} = -\Delta Q_{\text{fwd}})$. Τα φορτία αυτά εφαρμόζονται κατά το διάμηκες στα κύρια εγκάρσια στοιχεία, που στην περίπτωση των Bulk Carriers είναι οι έδρες του διπύθμενου. Τέλος εφαρμόζονται δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις μέτρου F στα άκρα του μοντέλου για την εξισορρόπηση της ροπής που επάγουν τα καταναμημένα φορτία.



Σχήμα 6.10: Μέθοδος 2 – Κατανομή φορτίων για τη διόρθωση διατμητικής δύναμης στις δύο φρακτές

6.5.3 Διόρθωση Κατακόρυφης Καμπτικής Ροπής

Για την επίτευξη της επιθυμητής ροπής $M_{v\text{-targ}}$ στη διαμήκη θέση x του μεσαίου κύτους, εφαρμόζονται δύο ίσες και αντίθετες ροπές κάμψης $M_{v\text{-end}}$, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$M_{v\text{-end}} = M_{v\text{-targ}} - M_{v\text{-peak}}$$

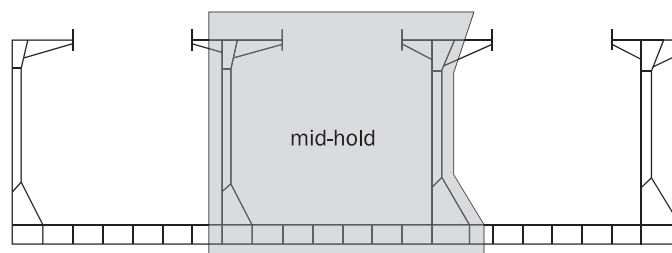
Όπου:

$M_{v\text{-peak}}$: Πρόκειται για τη μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής στο μεσαίο κύτος μετά από διόρθωση της διατμητικής δύναμης (Μέθοδος 1 ή Μέθοδος 2) αν $M_{v\text{-targ}} > 0$ (Hogging) ή την ελάχιστη τιμή της αν $M_{v\text{-targ}} < 0$ (Sagging).

x, η διαμήκης θέση όπου παρουσιάζεται η $M_{v\text{-peak}}$

6.6 Κριτήρια Ελέγχου – Yield Strength Assessment

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έναντι των κριτηρίων αποδοχής που αφορούν τη διαρροή πραγματοποιείται μόνο στην έκταση του μεσαίου κύτους για το μοντέλο που κατασκευάστηκε, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 6.11: Διαμήκης έκταση μεσαίου κύτους προς αξιολόγηση

Σε αυτήν την περιοχή αξιολόγησης, ελέγχονται τα παρακάτω κατασκευαστικά στοιχεία:

- Όλα τα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία
- Όλα τα κύρια στοιχεία ενίσχυσης (PSM)
- Οι εγκάρσιες φρακτές στα άκρα του μεσαίου κύτους
- Τα κατασκευαστικά στοιχεία των φρακτών, άνω και κάτω εδράσεις μαζί με τα ενισχυτικά τους

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιολογούνται σε πρώτο επίπεδο έναντι **διαρροής**, μέσω του συντελεστή χρήσης έναντι διαρροής (**Yield Usage Factor**), ο οποίος ορίζεται ως εξής:

- $\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y}$, για τα shell elements, όπου σ_{vm} η ισοδύναμη τάση Von Mises σε κάθε στοιχείο
- $\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y}$, για τα beam elements, όπου σ_{axial} η αξονική τάση σε κάθε στοιχείο

Σημειώνεται ότι ο συντελεστής αυτός ορίζεται μέσω του ονομαστικού ορίου διαρροής: $R_y = 235 / k$

Το κριτήριο που θα πρέπει να ικανοποιούν όλα τα στοιχεία είναι: $\lambda_y \leq \lambda_{yperm}$, όπου

λ_{yperm} είναι ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης για το μοντέλο της ανάλυσης (αραιό πλέγμα) και λαμβάνεται από τον πίνακα (6.5), ανάλογα το κατασκευαστικό στοιχείο και το συνδυασμό φορτίσεων:

Πίνακας 6.4: Επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής για μοντέλο με αραιό πλέγμα

Structural component	Coarse mesh permissible yield utilisation factor, λ_{yperm}
Plating of all longitudinal hull girder structural members, primary supporting structural members and bulkheads.	1.0 (load combination S+D)
Face plate of primary supporting members modelled using shell or rod elements.	0.8 (load combination S)
Dummy rod of corrugated bulkhead	
Corrugation of vertically corrugated bulkheads with lower stool and horizontally corrugated bulkhead, under lateral pressure from liquid loads, for shell elements only.	0.90 (load combination S+D)
Supporting structure in way of lower end of corrugated bulkheads without lower stool ^(A) .	0.72 (load combination S)
Corrugation of vertically corrugated bulkheads without lower stool under lateral pressure from liquid loads and without lower stool, for shell elements only.	0.81 (load combination S+D) 0.65 (load combination S)

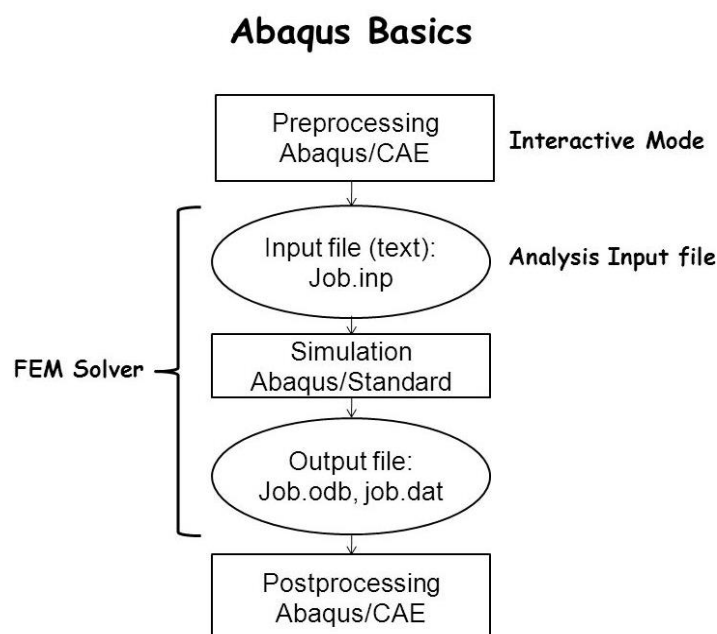
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – Ανάλυση Μοντέλου Τριών Αμπαριών στο ABAQUS

7.1 Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Ένα φυσικό – μηχανικό φαινόμενο συχνά εκφράζεται από ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων (PDEs). Η αναλυτική λύση των εξισώσεων με τις οποίες περιγράφονται τέτοια μηχανικά προβλήματα είναι δυνατή σε ειδικές μόνο περιπτώσεις, στις οποίες οι φορτίσεις και η γεωμετρία είναι απλοποιημένες. Η ανάγκη επίλυσης πιο σύνθετων προβλημάτων, οδήγησε στην ανάπτυξη αριθμητικών μεθόδων, όπως αυτή των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method). Τέτοια μέθοδος είναι μεν προσεγγιστική, αλλά παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα και έχει εφαρμογή σε πληθώρα μηχανικών προβλημάτων, με μεγάλο εύρος πολυπλοκότητας. Η θεμελιώδης αρχή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η θεώρηση ότι ο φορέας αποτελείται από «πεπερασμένο» αριθμό στοιχείων που συνδέονται μεταξύ τους με κόμβους. Ξεινώνοντας λοιπόν από μία πολύπλοκη γεωμετρία, ο φορέας χωρίζεται σε πολλά επιμέρους τμήματα απλούστερης γεωμετρίας, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καταλήγει σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, το μέγεθος του οποίου αυξάνεται με το πλήθος των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Η ευκολία που επιφέρει η μέθοδος αυτή είναι ότι πολύπλοκες γεωμετρίες, με πλήθος δυνάμεων και φορτίσεων μπορούν να μοντελοποιηθούν στατικά σε μεγάλα γραμμικά συστήματα με την βοήθεια Η/Υ. Με τη μέθοδο αυτή λοιπόν δημιουργείται ένα μαθηματικό μοντέλο σε μορφή κατάλληλη για επεξεργασία σε Η/Υ, μέσω διακριτοποίησης (discretization), μετατροπής δηλαδή σε ένα προσεγγιστικό διακριτό πρόβλημα.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας επιλέχθηκε το υπολογιστικό πακέτο **ABAQUS/CAE** (Complete Abaqus Environment), που περιλαμβάνει μια ομάδα προγραμμάτων για την μοντελοποίηση, την επίλυση αλλά και την ανάλυση προβλημάτων μηχανικής, βασισμένα στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Μια ολοκληρωμένη ανάλυση με το συγκεκριμένο υπολογιστικό πακέτο περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια, όπως φαίνονται και στο (Σχ. 7.1) που ακολουθεί.



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα ροής των επιμέρους σταδίων που χρησιμοποιεί το ABAQUS/CAE

1) Προεπεξεργασία (Preprocessing Phase) ABAQUS/CAE

Το πρώτο στάδιο αφορά τη δημιουργία του μοντέλου και τον καθορισμό της φύσης του προβλήματος. Βασικά βήματα για τη δημιουργία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων είναι:

1. Δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου μέσω κάποιου σχεδιαστικού προγράμματος
2. Ορισμός ιδιοτήτων (υλικό, διατομή)
3. Διακριτοποίηση του μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία (δημιουργία πλέγματος)
4. Ορισμός φορτίσεων και οριακών συνθηκών
5. Επιλογή είδους επίλυσης

Το μοντέλο συνήθως δημιουργείται χρησιμοποιώντας το γραφικό περιβάλλον του προγράμματος αυτού ή κάποιου άλλου προ επεξεργαστή. Ωστόσο, υπάρχει δυνατότητα δημιουργίας του μοντέλου χρησιμοποιώντας και εξωτερικό αρχείο με εντολές (Script). Αποτέλεσμα αυτής της φάσης είναι η δημιουργία ενός αρχείου εισόδου <<Job.inp>>. Αφού λοιπόν ετοιμαστούν τα δεδομένα για επίλυση, εισάγονται υπό τη μορφή ενός μεγάλου μητρώου σε ένα πρόγραμμα το οποίο εκτελεί την επίλυση.

2) Προσομοίωση – Επίλυση (Simulation) Abaqus/Standard

Η προσομοίωση εκτελείται ως ανεξάρτητη διαδικασία μέσω διαφορετικού προγράμματος του πακέτου ABAQUS (FEM Solver), το οποίο επιλύει το αριθμητικό πρόβλημα που ορίστηκε από το αρχείο εισόδου. Η επίλυση μπορεί να διαρκέσει από δευτερόλεπτα μέχρι μέρες, ανάλογα το είδος της ανάλυσης, την πολυπλοκότητα του προβλήματος, αλλά και τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Αποτέλεσμα αυτής της φάσης είναι η δημιουργία ενός αρχείου εξόδου <<Job.odb>> το οποίο περιλαμβάνει παραμορφώσεις, τάσεις και άλλες επιθυμητές μεταβλητές οι οποίες υπολογίστηκαν, σε αρχεία binary για μετέπειτα επεξεργασία.

3) Μετέπειτα επεξεργασία (Postprocessing Phase)

Αφού ολοκληρωθεί η προσομοίωση, παρουσιάζονται γραφικά και αριθμητικά αποτελέσματα των μεταβλητών που έχουν υπολογιστεί. Αυτό γίνεται μέσω μιας ενότητας οπτικοποίησης (Visualization module) του ABAQUS/CAE ή κάποιου άλλου μετέπειτα επεξεργαστή. Το module visualization διαβάζει το αρχείο εξόδου binary και παρουσιάζει με ποικιλία επιλογών τα διάφορα αποτελέσματα σε μορφή διαγραμμάτων και παραμορφωμένων σχημάτων.

7.2 Διαδικασία Ανάλυσης με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται εφαρμογή της μεθόδου που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, για την ανάλυση αντοχής ενός αμπαριού, η οποία αφορά τον έλεγχο έναντι διαρροής των κατασκευαστικών στοιχείων στην περιοχή του φορτίου (**Stress Assessment**). Η διαδικασία που ακολουθείται βασίζεται στις απαιτήσεις του εδαφίου {Pt1/Ch7: Direct Strength Analysis} των κατασκευαστικών κανόνων.

Το πρόβλημα μελετάται για το εμπορικό πλοίο τύπου Bulk Carrier που εξετάστηκε στο Κεφάλαιο 5, για το οποίο είναι γνωστά τα βασικά κατασκευαστικά στοιχεία των κυτών φορτίου. Με δεδομένο το πλοίο, επιλέγεται η κατάσταση φόρτωσης (Loading Condition) σύμφωνα με το εδάφιο {Pt1/Ch4/Sec8} και επιλέγεται η απαιτούμενη δυναμική κατάσταση φόρτισης (Dynamic Load Case). Ο συνδυασμός των δύο αυτών καταστάσεων καθορίζει τις τοπικές φορτίσεις, εξωτερικές (θάλασσα) και εσωτερικές (φορτίο) σε όλα τα σημεία της κατασκευής, καθώς και τις επιθυμητές φορτίσεις της γάστρας (κατακόρυφη καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη). Στην παρούσα εργασία επιλέγεται ως κατάσταση φόρτωσης η εναλλάξ στο μέγιστο βύθισμα (Alternate Full Load) σε συνδυασμό με τη δυναμική κατάσταση φόρτισης HSM – 1 (Sagging). Στον πίνακα (7.1) συνοψίζονται οι επιμέρους παράμετροι για αυτόν τον συνδυασμό, ενώ στον πίνακα (7.2) τα βασικά στοιχεία της κατάστασης φόρτωσης.

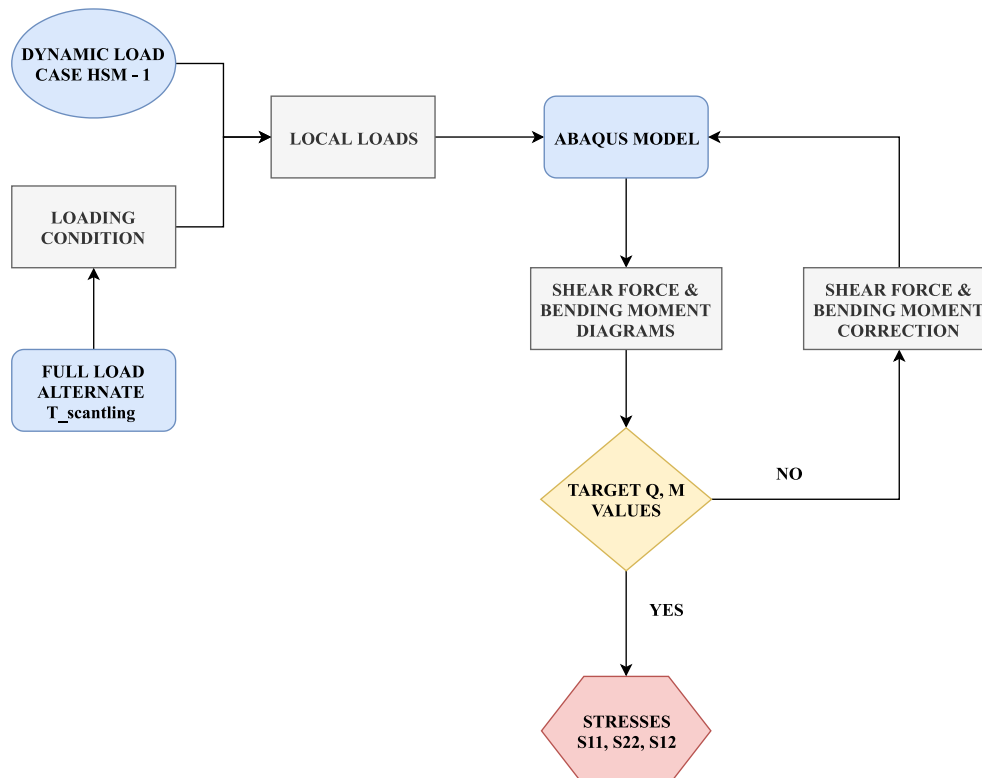
Πίνακας 7.1: Εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης σε συνδυασμό με τη δυναμική κατάσταση φόρτισης

No.	Description Req ^t ref	Loading pattern	Aft	Mid	Fore	Draught	C_{BM-LC} : % of perm. SWBM	C_{SF-LC} : % of perm. SWSF	Dynamic load case
11	Alternate load full					T_{sc}	0%	100% Max SFLC	HSM-1

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά Αμπαριού και πυκνότητα φορτίου για τους υπολογισμούς

Όγκος στομίου του αμπαριού	V_{HC}	340.34 m ³
Συνολικός Όγκος Αμπαριού μαζί με το στόμιο	V_{Full}	23703 m ³
Βάρος φορτίου Αμπαριού σε κατάσταση ομογενούς φόρτωσης	M_{HD}	37400 tons
Βάρος φορτίου Αμπαριού σε κατάσταση εναλλάξ φόρτωσης	M_H	19900 tons
Πυκνότητα Φορτίου σε φόρτωση εναλλάξ για FEM	ρ_C	1.841 ton/m ³

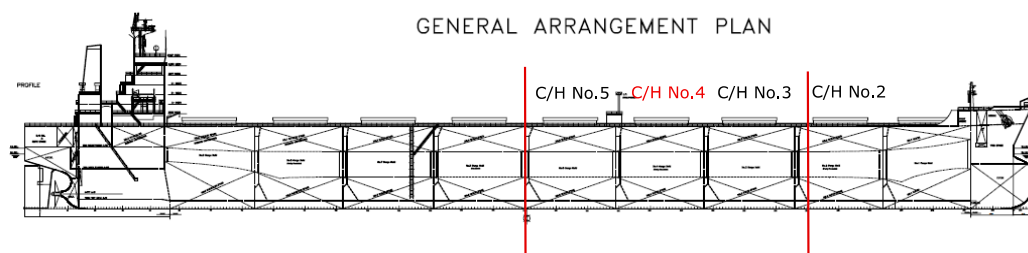
Στη συνέχεια, δημιουργείται ακριβές μοντέλο έκτασης τριών αμπαριών στο πρόγραμμα ABAQUS/CAE με τις ιδιότητες των υλικών αφού έχει αφαιρεθεί το κατάλληλο περιθώριο διάβρωσης (Net Scantling Approach). Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζονται οι τοπικές φορτίσεις που έχουν καθοριστεί από τους κανόνες, καθώς και οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες. Ύστερα από την διακριτοποίηση του μοντέλου, μέσω της δημιουργίας κατάλληλου πλέγματος, πραγματοποιείται επίλυση του προβλήματος. Αποτέλεσμα της πρώτης επίλυσης είναι τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων τα οποία έχουν προκύψει αποκλειστικά και μόνο από τις τοπικές φορτίσεις. Προκειμένου όμως οι φορτίσεις αυτές να προσομοιάζουν τις επιθυμητές φορτίσεις γάστρας που καθορίστηκαν από την κατάσταση φόρτωσης, η ανάλυση του μοντέλου επαναλαμβάνεται εφαρμόζοντας σταθερές ροπές στα άκρα για την διόρθωση των καμπτικών ροπών και των διατμητικών δυνάμεων. Από την τελική ανάλυση λαμβάνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στοιχείο και συγκρίνονται με τις επιτρεπόμενες.



Σχήμα 7.2: Διαδικασία Ανάλυσης (Stress Assessment)

7.3 Προεπεξεργασία – Μοντελοποίηση σε Περιβάλλον ABAQUS/CAE

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6, δημιουργείται πλήρες μοντέλο στο περιβάλλον του ABAQUS/CAE. Το υπό εξέταση μοντέλο, είναι ένα τμήμα του προαναφερθέντος Bulk Carrier, με έκταση τριών αμπαριών, στην περιοχή της μέσης τομής (Midship Cargo Hold Region) που απεικονίζεται στο σχήμα (7.3). Συγκεκριμένα, το μεσαίο κύτος που επιλέγεται για ανάλυση είναι το αμπάρι Νο.4 με προωαίο το αμπάρι Νο.3 και πρυμναίο το αμπάρι Νο.5. Το τελικό μοντέλο εκτείνεται κατά 5 κατασκευαστικούς νομείς πλώραθεν του κύτους Νο.3, προκειμένου να περιλαμβάνει την κάτω έδραση της προωαίας ακραίας φρακτής. Τα γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου δίνονται στον πίνακα (7.3).



Σχήμα 7.3: Το επιλεγθέν μοντέλο τριών αμπαριών για το υπό εξέταση Bulk Carrier

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά μοντέλου τριών αμπαριών

Frame Spacing	910 mm	1 Frame
Web Spacing	5460 mm	6 Frames
Floor Spacing	2730 mm	3 Frames
Μήκος Cargo Hold No.5	26390 mm	29 Frames
Μήκος Cargo Hold No.4	26390 mm	29 Frames
Μήκος Cargo Hold No.3	26390 mm	29 Frames
Μήκος τμήματος Cargo Hold No.2	4550 mm	5 Frames
Συνολικό Μήκος Μοντέλου	83720 mm	92 Frames
Πλάτος Μοντέλου	45000 mm	

Για τη διαδικασία της μοντελοποίησης στο περιβάλλον του ABAQUS/CAE χρησιμοποιούνται επιμέρους ενότητες (**Modules**), κάθε μία από τις οποίες αποτελεί και ένα στάδιο της διαδικασίας της μοντελοποίησης. Η σειρά με την οποία χρησιμοποιούνται οι μονάδες αυτές έχει λογική με βάση τη σειρά με την οποία εκτελούνται τα βήματα κατά την μοντελοποίηση.

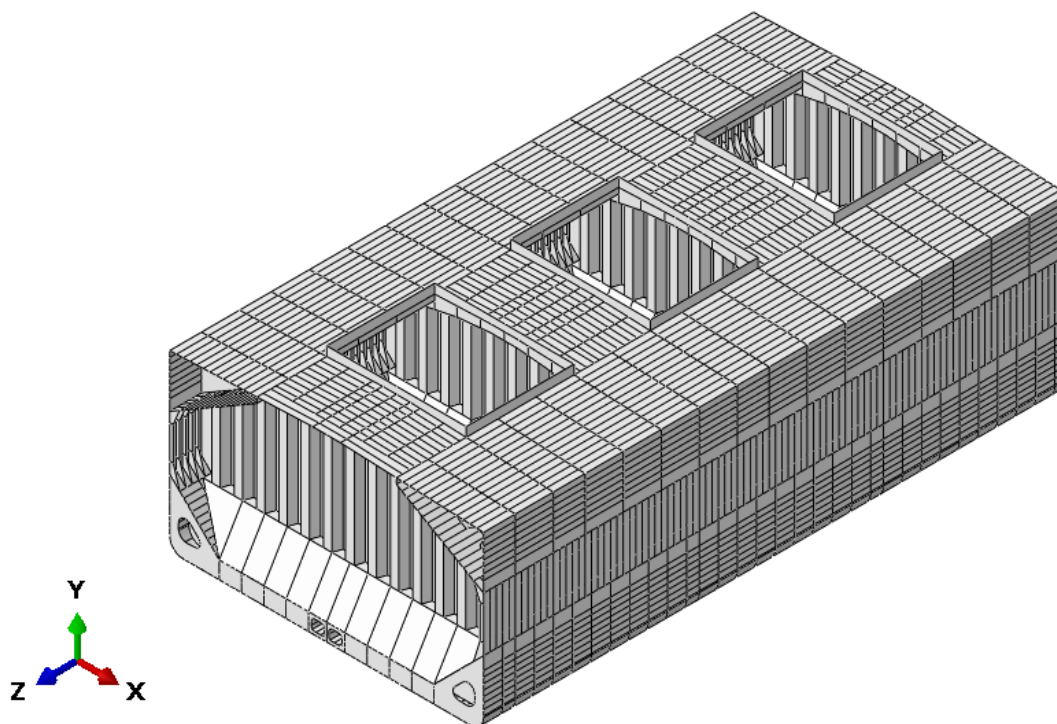
Σημειώνεται ότι το ABAQUS δεν χρησιμοποιεί καθορισμένες μονάδες, αλλά τις προσαρμόζει στα διάφορα μεγέθη, ανάλογα με το σύστημα το οποίο επιλέγει ο χρήστης για τη δημιουργία του μοντέλου. Το σύστημα μονάδων που ακολουθείται στην πορεία είναι το **SI (mm)** και όλα τα παράγωγα μεγέθη έχουν αντίστοιχες μονάδες σύμφωνα με τον πίνακα (7.4).

Πίνακας 7.4: Μονάδες μέτρησης για την ανάλυση στο ABAQUS

Length	mm
Force	N
Mass	Ton
Time	Sec
Stress	MPa
Density	Ton/mm ³

7.3.1 Γεωμετρία του Μοντέλου

Παρακάτω απεικονίζεται η γεωμετρία του συνολικού μοντέλου, όπως δημιουργήθηκε στο ABAQUS/CAE. Τα δομικά στοιχεία των κατασκευαστικών μελών είναι ελάσματα (plates) και ενισχυτικά (stiffeners).



Σχήμα 7.4: Πλήρες μοντέλο (Full Model) στο περιβάλλον ABAQUS/CAE

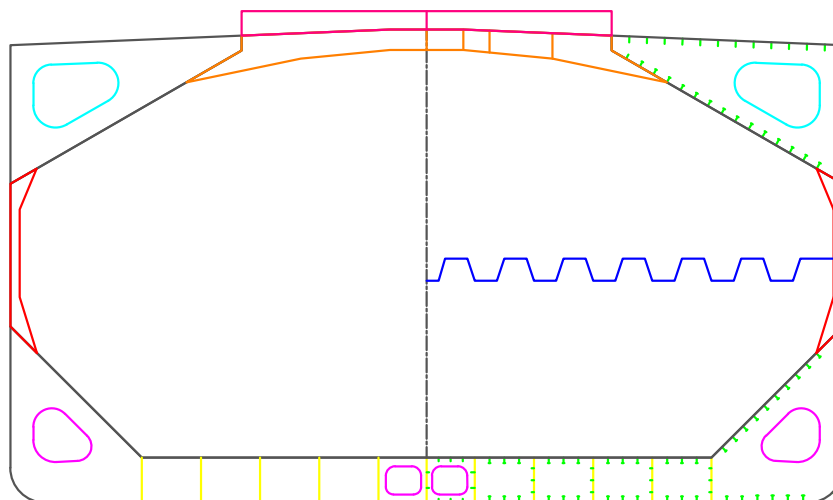
Αξίζει να σημειωθεί ότι η γεωμετρική αναπαράσταση του κάθε στοιχείου αποτελεί τη βάση για την διακριτοποίηση (δημιουργία πλέγματος) και τον καθορισμό των ιδιοτήτων. Για το λόγο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη και τους κανόνες, η βάση της γεωμετρίας που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των ελασμάτων είναι η γεωμετρία κελύφους (Shell Body), η οποία είναι ουσιαστικά επιφάνεια είτε σε επίπεδο (Planar), είτε στο χώρο (Shell Extrusion) και το πάχος της καθορίζεται σαν ιδιότητα στη συνέχεια (Property Module). Όσον αφορά τα ενισχυτικά, μοντελοποιούνται ως δοκοί (Stringer), η αναπαράσταση των οποίων γίνεται μέσω ακμών (edges) πάνω στις επιφάνειες των ελασμάτων που δημιουργούνται μέσω γεωμετρικής υποδιαίρεσης της επιφάνειας (Partition). Η διατομή των ενισχυτικών αποτελεί ιδιότητα η οποία καθορίζεται και αυτή στη συνέχεια στο Property Module.

Προκειμένου να είναι πιο εύκολη η ανάθεση των διαφόρων ιδιοτήτων στη συνέχεια, δομικά στοιχεία με κοινές ιδιότητες (πάχος, υλικό, διατομή) ομαδοποιούνται σε κοινά Sets, μειώνοντας τον αριθμό των ξεχωριστών αναθέσεων. Επιπλέον, εξασφαλίζεται ότι στην ένωση των διαφόρων στοιχείων στη συνέχεια, Sets με κοινή ονομασία ομαδοποιούνται σε κοινό Set στο τέλος της συνένωσης. Για τη γεωμετρική κατασκευή του μοντέλου, ακολουθείται η παρακάτω αλληλουχία ενεργειών:

1. Δημιουργία ανεξάρτητων γεωμετρικών στοιχείων (Parts) στο Part Module.
2. Δημιουργία γεωμετρικής υποδιαίρεσης (Partition) των επιφανειών για τον καθορισμό των ενισχυτικών.
3. Δημιουργία γεωμετρικών υποομάδων (Sets) για ενισχυτικά και ελάσματα με κοινές ιδιότητες.
4. Τοποθέτηση των επιμέρους στοιχείων ως ομοιώματα (Instances) στο Assembly Module.
5. Συναρμολόγηση των στοιχείων και δημιουργία τελικού γεωμετρικού μοντέλου, ως ενιαίο στοιχείο (Part), το οποίο διαθέτει τα Sets των επιμέρους στοιχείων.

7.3.1.1 Δημιουργία των Επιμέρους Κατασκευαστικών Στοιχείων (Part Module)

Σε πρώτο στάδιο εισάγεται η γεωμετρία της μέσης τομής από κάποιο άλλο σχεδιαστικό πρόγραμμα (AutoCAD) σε κατάλληλη μορφή αρχείου <<*.sat>>. Η γεωμετρία αυτή εισάγεται σε μορφή σκαριφήματος (Sketch) και αποτελεί τη βάση για την δημιουργία των επιμέρους στοιχείων.

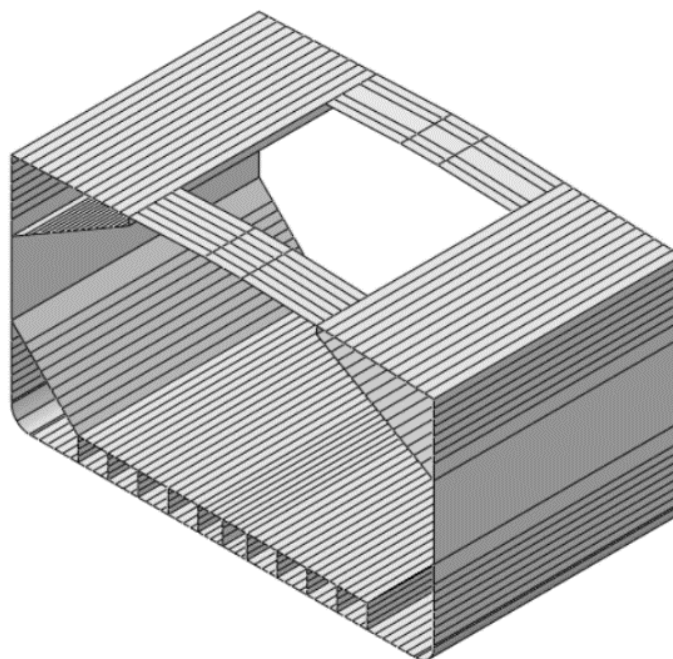


Σχήμα 7.5: Σχέδιο μέσης τομής στο AutoCAD, το οποίο αποτελεί τη βάση για τη δημιουργία όλων των επιμέρους Parts

Παρακάτω παρουσιάζονται τα επιμέρους ανεξάρτητα γεωμετρικά στοιχεία που δημιουργήθηκαν για τη συναρμολόγηση του μοντέλου.

➤ Εσωτερικό και Εξωτερικό Περιβλήμα

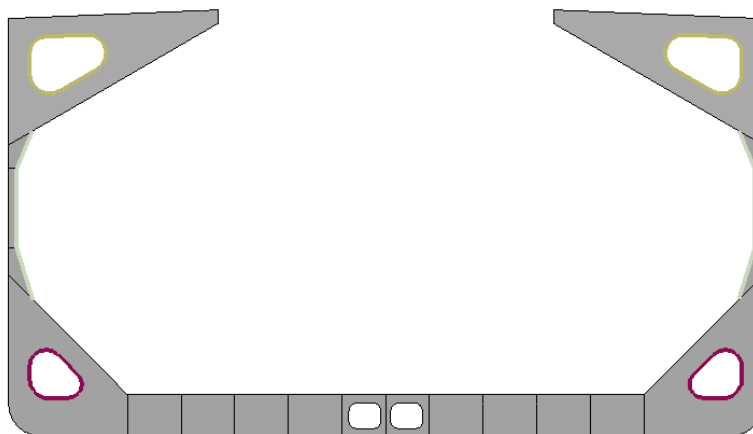
Το συγκεκριμένο στοιχείο περιλαμβάνει όλα τα διαμήκη ελάσματα και ενισχυτικά ενός αμπαριού. Τα ελάσματα είναι αποτέλεσμα Shell Extrusion της μέσης τομής και τα ενισχυτικά έχουν καθοριστεί από γεωμετρική υποδιαίρεση (Partition) πάνω στις επιφάνειες. Ακόμη, περιλαμβάνει το άνοιγμα του κύτους, μαζί με το υπόλοιπο κατάστρωμα (Cross Deck) και τα εγκάρσια ενισχυτικά του.



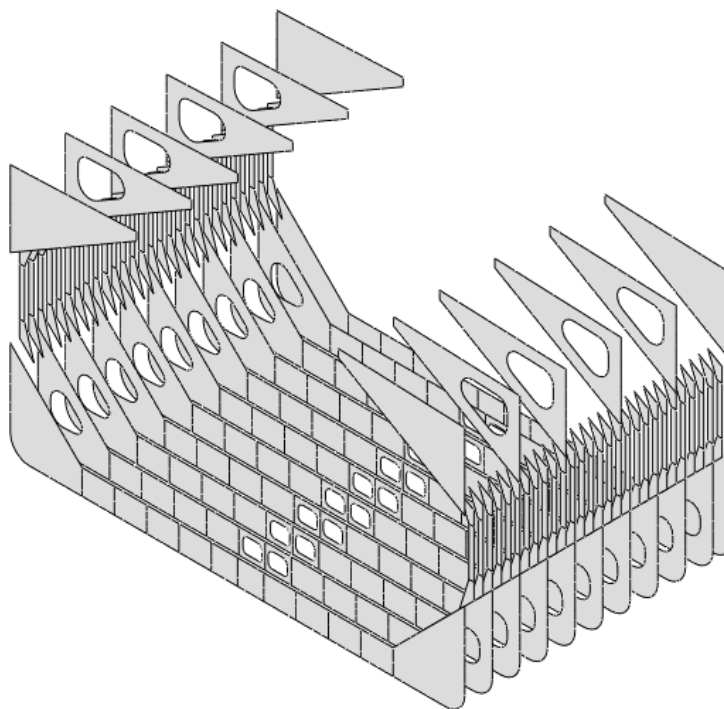
Σχήμα 7.6: Part – Longitudinal Members & Cross Deck

➤ Στοιχεία εγκάρσιας ενίσχυσης

Τα στοιχεία εγκάρσιας ενίσχυσης αποτελούνται από τις έδρες του διπύθμενου (Floors), τα διαφράγματα των ενισχυμένων νομέων (Webs) και τα πλευρικά εγκάρσια ενισχυτικά των απλών κατασκευαστικών νομέων (Side Frames). Τα ελάσματα των στοιχείων αυτών είναι αποτέλεσμα Shell Plagar των αντίστοιχων στοιχείων της μέσης τομής. Ακόμη δημιουργούνται γεωμετρικές υποδιαιρέσεις για τον καθορισμό του άνω και κάτω αγκώνα (Bracket) στα πλευρικά ενισχυτικά, καθώς και ενδιάμεσα ελάσματα μεταξύ των σταθμίδων στις έδρες. Αυτό γίνεται για τον καθορισμό διαφορετικού πάχους σε κάθε προκύπτουσα επιφάνεια. Τα ανοίγματα των εδρών και των διαφραγμάτων μοντελοποιούνται κανονικά, όπως προδιαγράφουν οι κανόνες, αμελώντας μικρότερα ανοίγματα. Επίσης οι φλάντζες των μεγάλων ανοιγμάτων (Ring Openings) και των πλευρικών ενισχυτικών μοντελοποιούνται από τις ακμές των ελεύθερων άκρων.



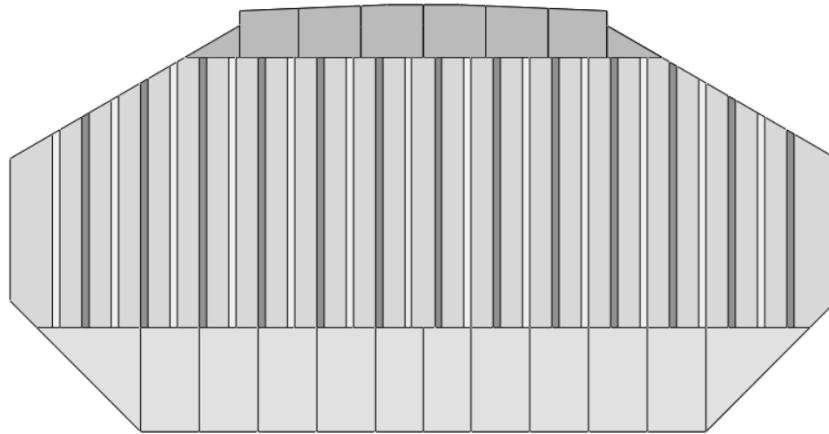
Σχήμα 7.7: Parts – Floors, Webs & Side Frames



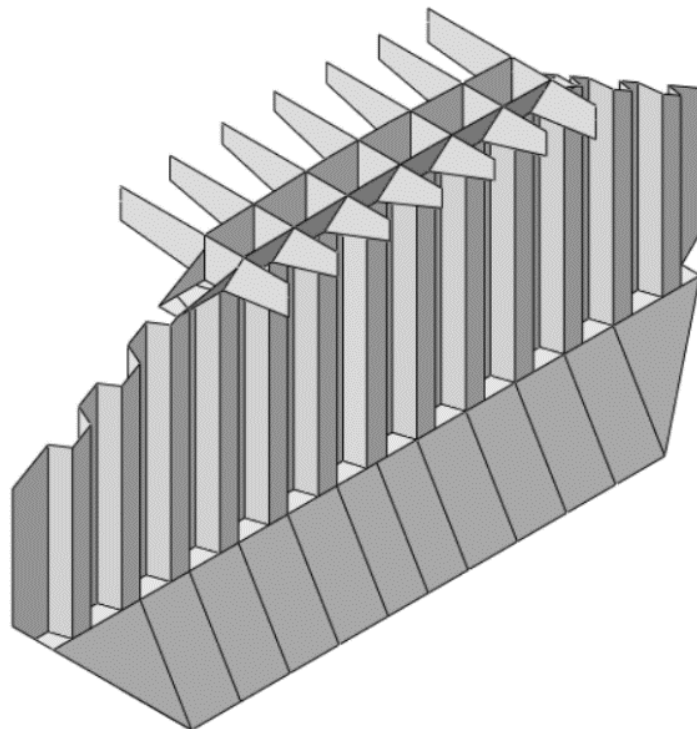
Σχήμα 7.8: Τοποθέτηση των εγκάρσιων στοιχείων ενίσχυσης. Οι έδρες τοποθετούνται ανά 3 κατασκευαστικούς νομείς, τα διαφράγματα ανά 6 κατασκευαστικούς νομείς, ενώ τα πλευρικά ενισχυτικά, ανά απόσταση ενός κατασκευαστικού νομέα (Frame Spacing)

➤ Πτυχωτές Φρακτές

Οι φρακτές αποτελούν μια πιο περίπλοκη γεωμετρία, η οποία μοντελοποιείται απευθείας στο περιβάλλον του Abaqus/CAE. Η μοντελοποίηση τους περιλαμβάνει τα πτυχωτά ελάσματα (Corrugation), καθώς και τα ελάσματα των άνω και κάτω εδράσεων (Lower – Upper Stool), τα οποία είναι όλα αποτέλεσμα Shell Extrusion. Στη συνέχεια, με βάση τη γεωμετρία των πλευρικών άνω και κάτω δεξαμενών, αποκόπτεται το περιττό τμήμα (Cut Extrude) ώστε να μείνει η γεωμετρία εντός του αμπαριού. Ακόμη μοντελοποιούνται τα βασικά στοιχεία ενίσχυσης των εδράσεων και του ενδιάμεσου καταστρώματος (cross deck), που είναι ελάσματα που προκύπτουν από Shell Planar, ενώ στα πλαίσια της κατασκευαστικής απλοποίησης παραλείπονται αγνώστες, απλά ενισχυτικά και τα ελάσματα διάχυσης. Τέλος, οι φρακτές τοποθετούνται στα όρια του κάθε κύτους.



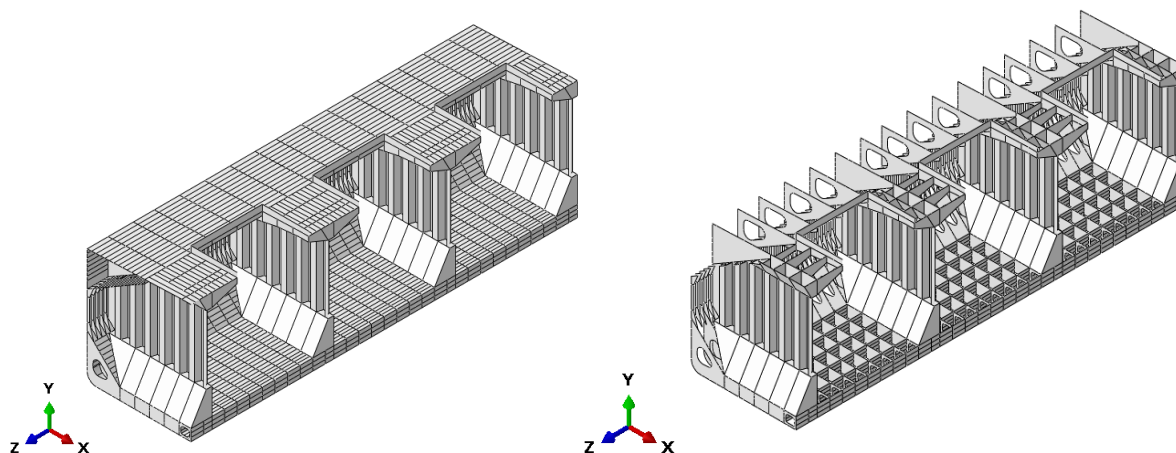
Σχήμα 7.9: Part – Corrugated Bulkhead (1)



Σχήμα 7.10: Part – Corrugated Bulkhead (2)

7.3.1.2 Συναρμολόγηση (Assembly Module)

Τα παραπάνω στοιχεία εισάγονται στο Assembly Module και τοποθετούνται σε κατάλληλες θέσεις για να δημιουργήσουν το πλήρες μοντέλο. Αποτέλεσμα της συναρμολόγησης είναι η δημιουργία ενός αυτοτελούς γεωμετρικού στοιχείου (Part) με συνεχή γεωμετρία. Παρακάτω (Σχήμα 7.11) παρουσιάζεται τομή του πλήρους μοντέλου με τα διαμήκη ελάσματα και χωρίς.



Σχήμα 7.11: Part – Full Model (Cut View)

Σημείωση: Το παρόν μοντέλο περιλαμβάνει κάποιες γεωμετρικές απλοποιήσεις, οι οποίες έχουν ως σκοπό την δημιουργία ενός απλούστερου πλέγματος. Τέτοιες απλοποιήσεις αφορούν τη σύνδεση κάποιων στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται πολλές γεωμετρικές υποδιαίρεσεις σε μια επιφάνεια. Για παράδειγμα τα σημεία συγκόλλησης ελασμάτων διαφορετικού πάχους θεωρούνται πάνω στα σημεία των ενισχυτικών και οι εδράσεις και τα πλευρικά εγκάρσια στοιχεία ενίσχυσης καταλήγουν σε ακμή ενισχυτικού. Επίσης μοντελοποιούνται μόνο τα ανοίγματα των εδρών και των διαφραγμάτων (Ring Openings), ενώ άλλα μικρότερα ανοίγματα αμελούνται.

Μετασχηματισμοί συντεταγμένων

Όπως φαίνεται στο σχήμα (7.11), το σύστημα συντεταγμένων με το οποίο δημιουργείται το μοντέλο στο ABAQUS/CAE διαφέρει απ' το συμβατικό. Οι άξονες αυτοί αναφέρονται ως εξής:

- 1^η κατεύθυνση (άξονας X)
- 2^η κατεύθυνση (άξονας Y)
- 3^η κατεύθυνση (άξονας Z)

Παρακάτω λοιπόν ακολουθεί ο μετασχηματισμός του συμβατικού συστήματος συντεταγμένων, αλλά και των βαθμών ελευθερίας ως προς αυτούς με βάση το καινούριο σύστημα συντεταγμένων του ABAQUS:

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} Z \\ X \\ Y \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} U3 \\ U1 \\ U2 \end{Bmatrix}, \begin{Bmatrix} \theta x \\ \theta y \\ \theta z \end{Bmatrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} UR3 \\ UR1 \\ UR2 \end{Bmatrix}$$

Στη συνέχεια, η ανάλυση και η εφαρμογή φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών βασίζονται στο καινούριο σύστημα αναφοράς.

7.3.2 Καθορισμός Ιδιοτήτων

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας του μοντέλου, πραγματοποιείται ο καθορισμός των ιδιοτήτων των επιμέρους στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο Property Module. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται, τα πάχη των ελασμάτων, οι διατομές των ενισχυτικών και ο προσανατολισμός τους. Παρακάτω περιγράφεται η διαδικασία για τον καθορισμό των ιδιοτήτων του μοντέλου.

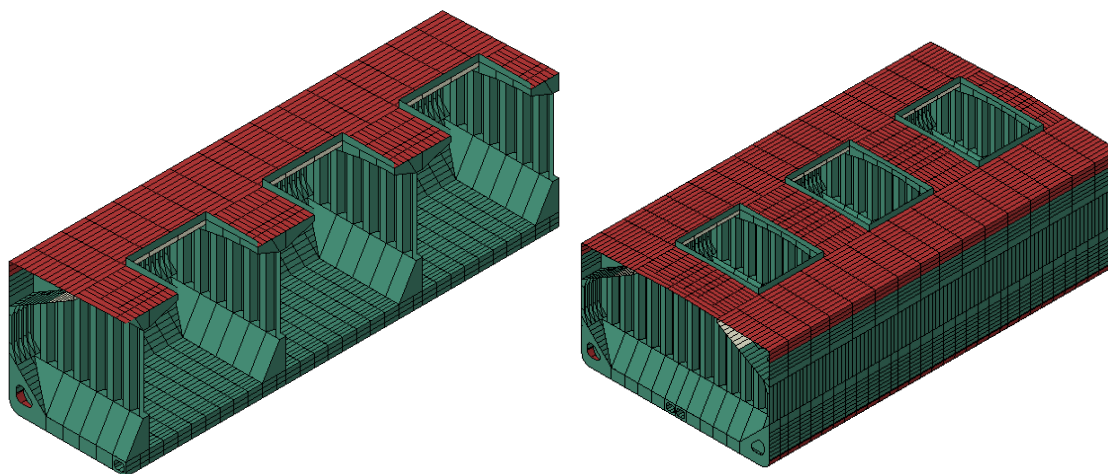
1. Ορισμός υλικού και μηχανικών ιδιοτήτων.
2. Δημιουργία δοκού (Stringer) για κάθε Set που αφορά ενισχυτικό.
3. Δημιουργία προφίλ Beam Element για κάθε δοκό (Stringer).
4. Δημιουργία διατομών ελασμάτων (Shell Sections).
5. Δημιουργία διατομών ενισχυτικών (Beam Sections).
6. Ανάθεση διατομών στα διάφορα Set ανάλογα τον τύπο (Shell, Stringer).
7. Έλεγχος προσανατολισμού για κάθε Stringer.

7.3.2.1 Ορισμός Υλικού

Αρχικά δημιουργούνται τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Συγκεκριμένα, καθορίζεται η πυκνότητα και η ελαστική συμπεριφορά τους, μέσω του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson που τα χαρακτηρίζουν. Οι ναυπηγικοί χάλυβες που χρησιμοποιούνται είναι κατηγορίας AH32, AH36 και EH36, πρόκειται δηλαδή για χάλυβες υψηλής αντοχής, των οποίων το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson προδιαγράφεται από τους κανόνες (βλ. Κεφάλαιο 3) και αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό. Τέλος, σημειώνεται ότι τα υλικά που ορίζονται θεωρούνται **γραμμικά**, καθώς και η ανάλυση είναι **γραμμική** και ο υπολογισμός του πίνακα ακαμψίας γίνεται μια φορά κατά την έναρξη της ανάλυσης.

Πίνακας 7.5: Χρησιμοποιούμενα Υλικά Μοντέλου

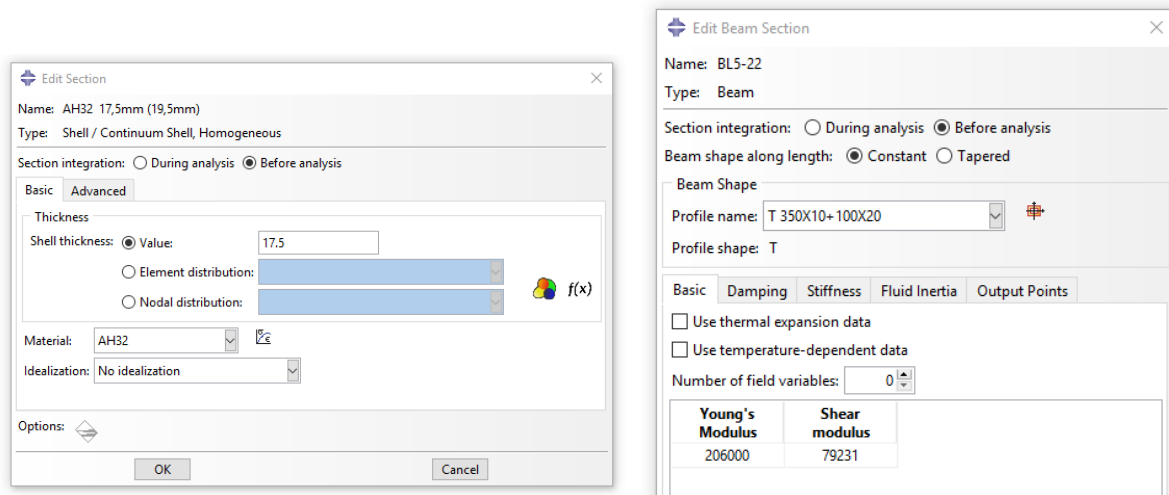
Ιδιότητα		AH32	AH36	EH36
Πυκνότητα	Ton/mm ³	7.8E-09	7.8E-09	7.8E-09
Μέτρο Ελαστικότητας	GPa	2.06E+06	2.06E+06	2.06E+06
Λόγος Poisson	-	0.3	0.3	0.3
Όριο διαρροής	MPa	315	355	355
Χρωματική Κωδικοποίηση				



Σχήμα 7.12: Materials – Property Module

7.3.2.2 Δημιουργία Διατομών (Section Creation)

Στη συνέχεια, δημιουργούνται όλες οι πιθανές διατομές (Sections) των ελασμάτων και των ενισχυτικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο. Η μοντελοποίηση των διατομών των ελασμάτων διαφέρει από εκείνη των ενισχυτικών, καθώς έχουν μοντελοποιηθεί με διαφορετική βάση. Οι διατομές των ελασμάτων είναι τύπου Shell Section, στις οποίες ορίζεται το πάχος και το υλικό, ενώ οι διατομές των ενισχυτικών είναι τύπου Beam Section, στις οποίες ορίζεται το προφίλ της διατομής και το υλικό.

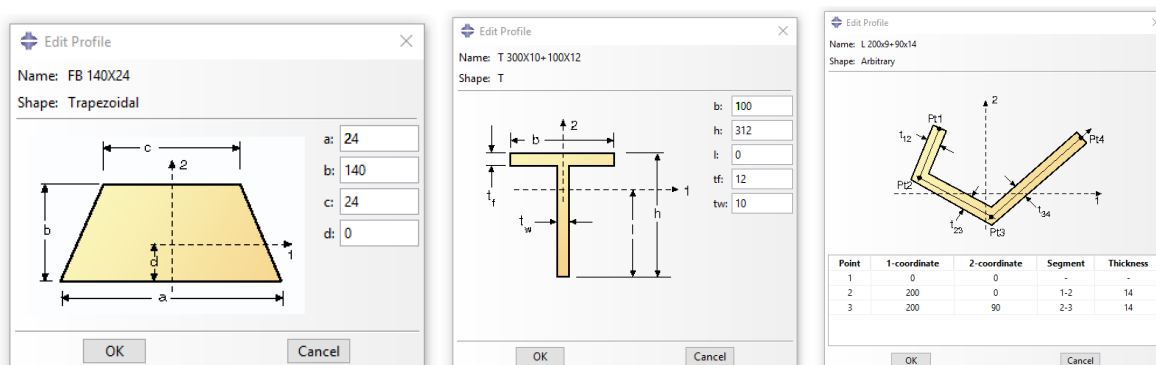


Σχήμα 7.13: Δημιουργία διατομής ελάσματος (αριστερά) και διατομής ενισχυτικού (δεξιά)

Σημειώνεται ότι για τα ενισχυτικά, προκειμένου να θεωρηθούν ως δοκοί, θα πρέπει πρώτα τα αντίστοιχα γεωμετρικά Sets που έχουν οριστεί από τις αντίστοιχες γεωμετρικές υποδιαίρεσεις (Partitions) να οριστούν ως **Stringers**. Τα προφίλ των διατομών των δοκών δημιουργούνται ξεχωριστά και ανατίθενται κατά τη δημιουργία διατομής όπως φαίνεται στο σχήμα (7.14). Στο συγκεκριμένο μοντέλο τα ενισχυτικά μπορεί να έχουν τις ακόλουθες διατομές, οι οποίες μοντελοποιούνται στο περιβάλλον του ABAQUS με διαφορετικό τρόπο:

- Απλή διατομή τύπου I (Trapezoidal Shape)
- Διατομή τύπου T (T Shape)
- Διατομή τύπου L (Arbitrary Shape)

Παρακάτω ακολουθεί η διαδικασία της δημιουργίας των προφίλ αυτών στο ABAQUS:

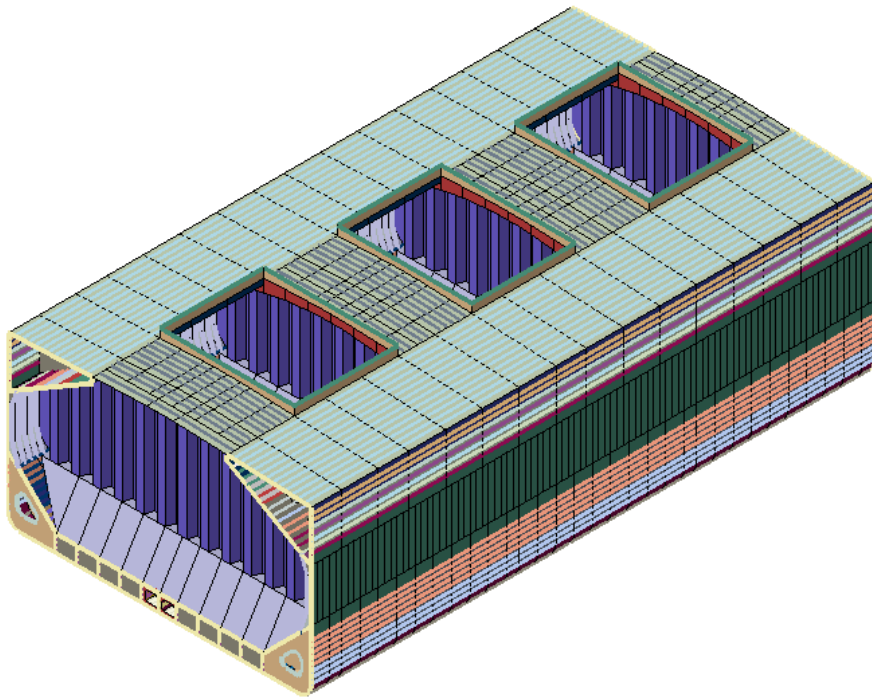


Σχήμα 7.14: Δημιουργία προφίλ διατομών (Profile) για τα ενισχυτικά

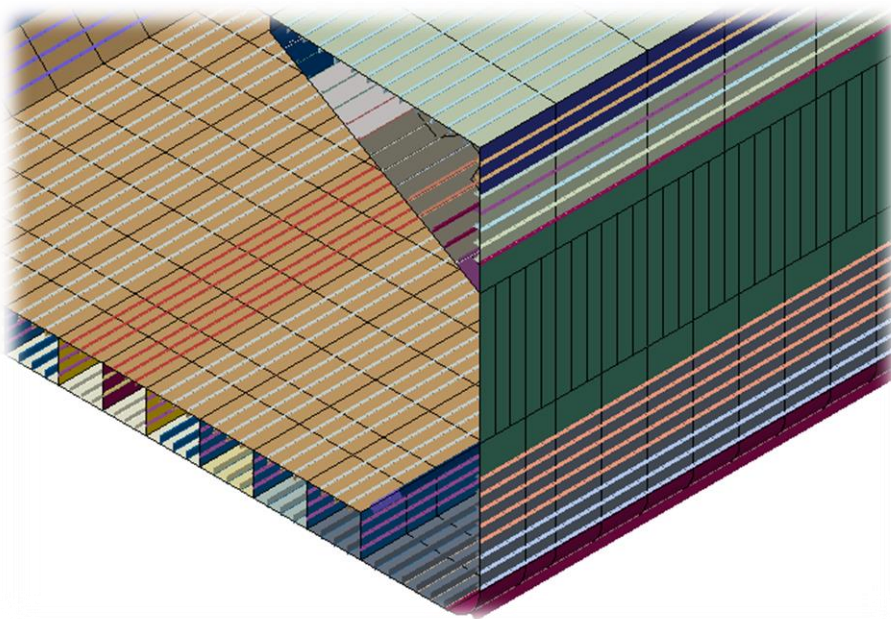
Σημειώνεται ότι η τιμή d για τα τραπεζοειδή προφίλ και αντίστοιχα η τιμή l για τα προφίλ τύπου T, καθορίζουν το κοινό σημείο του ενισχυτικού με το έλασμα (Offset). Οι τιμές αυτές ορίζονται μηδενικές προκειμένου να ξεκινάνε πάνω στο έλασμα και όχι ενδιάμεσα.

7.3.2.3 Ανάθεση Διατομών (Section Assignment)

Έχοντας ορίσει όλες τις πιθανές διατομές για τα ενισχυτικά και τα ελάσματα, ακολουθεί ανάθεση αυτών μέσω των Sets για τα ελάσματα και των Stringers για τα ενισχυτικά, καθώς έχουν ομαδοποιηθεί τα αντίστοιχα στοιχεία με τις κοινές ιδιότητες διατομής. Οι θέσεις των ενισχυτικών έχουν οριστεί γεωμετρικά μέσω των υποδιαιρέσεων πάνω στις επιφάνειες των ελασμάτων. Στα σχήματα (7.15) & (7.16) απεικονίζονται οι συνολικές αναθέσεις όλων των στοιχείων για το μοντέλο. Ο χρωματικός κώδικας περιγράφει τις διαφορετικές διατομές στο μοντέλο.



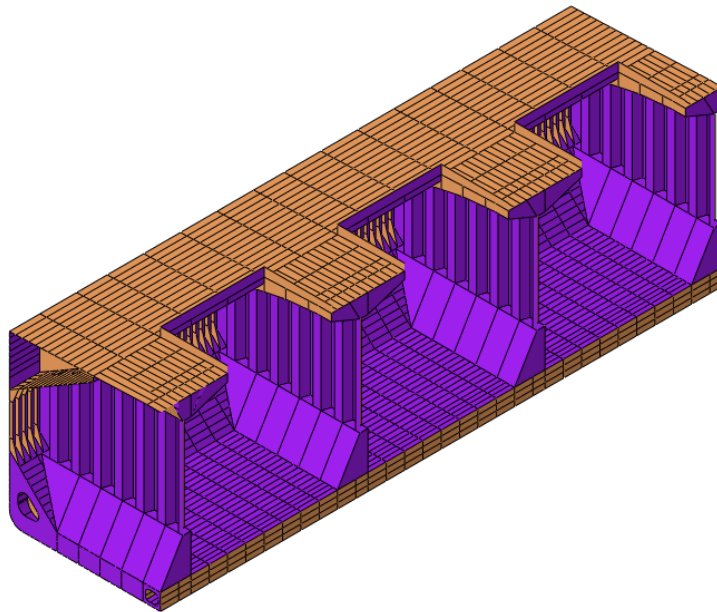
Σχήμα 7.15: Full Model Section Assignment – Property Module



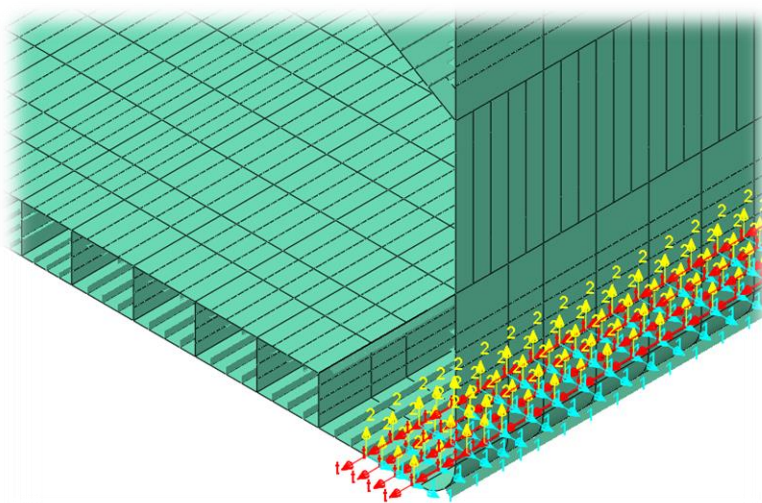
Σχήμα 7.16: Ανάθεση διατομών στα διαμήκη στοιχεία και τα ενισχυτικά. Ο χρωματικός κώδικας περιγράφει τις διαφορετικές διατομές στο μοντέλο (rendered model)

7.3.2.4 Έλεγχος Προσανατολισμού

Για την ολοκληρωμένη ανάθεση της διατομής θα πρέπει να γίνει ξεχωριστός καθορισμός προσανατολισμού για κάθε ενισχυτικό με κοινό προσανατολισμό, ανάλογα τη θέση του στην κατασκευή. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή των εκάστοτε Stringer και την ανάθεση προσανατολισμού, ορίζοντας την κατεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος. Τέλος, προκειμένου να υπάρχει ομοιογένεια στο μοντέλο και να επιλεγθεί σωστά η πλευρά κατανομής του πάχους σε σχέση με την επιφάνεια (Shell), πραγματοποιείται έλεγχος προσανατολισμού του κάθε ελάσματος. Επίσης στον προσανατολισμό των ελασμάτων ελέγχεται τυχόν επικάλυψη ελάσματος και ενισχυτικού και αν χρειαστεί αντιστρέφεται το κάθετο διάνυσμα. Στο σχήμα (7.17) απεικονίζεται ο έλεγχος προσανατολισμού του μοντέλου για τις επιφάνειες των ελασμάτων, ενώ στο σχήμα (7.18) απεικονίζεται η ανάθεση προσανατολισμού για τα ενισχυτικά του πυθμένα, με κατεύθυνση διανύσματος στην περίπτωση αυτή $n = (1, 0, 0)$.



Σχήμα 7.17: Προσανατολισμός ελασμάτων (Shell). Με πορτοκαλί θεωρείται θετική η κατεύθυνση του κάθετου διανύσματος, ενώ με μωβ αρνητική



Σχήμα 7.18: Ανάθεση προσανατολισμού για τα ενισχυτικά (Stringer) στον πυθμένα με κατεύθυνση διανύσματος $n = (1, 0, 0)$

7.3.2.5 Προσέγγιση Καθαρού Πάχους (Net Scantling Approach)

Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης, οι κανόνες προδιαγράφουν συγκεκριμένες ιδιότητες για τα στοιχεία του μοντέλου. Συγκεκριμένα, για κάθε στοιχείο λαμβάνονται οι καθαρές διαστάσεις (Net Scantlings) που προκύπτουν λόγω διάβρωσης κατά 50% (**n50**) δημιουργώντας έτσι το τελικό καθαρό μοντέλο (Net FEM Model). Οι προσαυξήσεις διάβρωσης (corrosion additions) υπολογίζονται με βάση τον πίνακα (3.9) που αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3, από τις οποίες λαμβάνεται η μισή προσαύξηση. Παρακάτω ακολουθούν οι αναλυτικοί πίνακες των κατασκευαστικών στοιχείων με τις αναλυτικές μειωμένες ιδιότητες, οι οποίες ανατίθενται στα αντίστοιχα στοιχεία του μοντέλου.

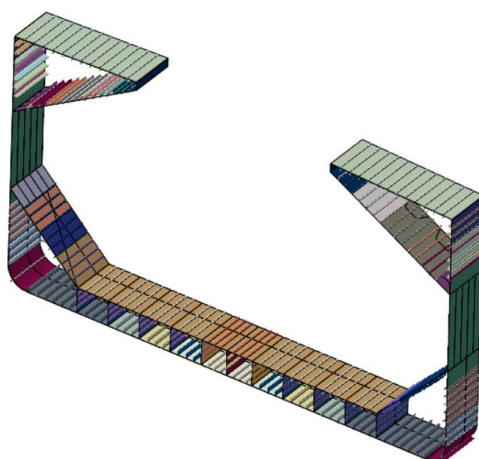
Πίνακας 7.6: Καθαρές διαστάσεις n50 για όλα τα ελάσματα (Shell)

PLATE CORROSION							
Plate	t _{gross} (mm)	t _c (mm)	t _{n50} (mm)	Plate	t _{gross} (mm)	t _c (mm)	t _{n50} (mm)
EXTERNAL BOTTOM				DOUBLE BOTTOM GIRDERS			
Plate 1	19.5	3	18	CL Girder	15.5	3	1.5
Plate 2	19	3	17.5	Girder 1	17	3	1.5
Plate 3	18.5	3	17	Girder 2	14	3	1.5
Plate 4	17.5	3	16	Girder 3	14	3	1.5
INNER BOTTOM				Girder 4	14	3	1.5
Plate 1	21	5.5	18.25	Girder 5	14	3	1.5
HOPPER PLATE				SIDE FRAME			
Plate 1	21	5.5	18.25	Web	15	3.6	2
Plate 2	17	5.5	14.25	Upper	15	4	2
Plate 3	16	5.5	13.25	Lower	15	4.4	2.5
Plate 4	20	5.5	17.25	FLOORS			
SIDE SHELL				F	15	4	2
Plate 1	17.5	3	16	E	14	4	2
Plate 2	19.5	3.5	17.75	D	14	4	2
Plate 3	19.5	4	17.5	C	16.5	4	2
Plate 4	19.5	3.5	17.75	B	17	4	2
Plate 5	17.5	3.5	15.75	A	17	4	2
Plate 6	24	3.5	22.25				
TOPSIDE PLATE							
Plate 1	20	4	18				
Plate 2	17	4	15				
Plate 3	15.5	3.5	13.75				
Plate 4	15	3.5	13.25				
Plate 5	18	3.5	16.25				
DECK							
Plate 1	34	4	32				

Πίνακας 7.7: Καθαρές διαστάσεις n50 για όλα τα ενισχυτικά (Stringer)

Stiffener	code name	tc (mm)	hwn50 (mm)	twn50 (mm)	bfm50 (mm)	tfm50 (mm)
BL 1-3	F.B. 220x20	3	220	18.5	-	-
BL 5-22	350x10+100x20	3	351.5	8.5	98.5	18.5
BL 23-26	400x12+135x22	3	401.5	10.5	133.5	20.5
Bilge Keel	400x14+90x20	2.5	381.5	13	89	19
SL 1-3	300x10+100x16	3	301.5	8.5	98.5	14.5
SL 4-8	300x10+100x12	3	301.5	8.5	98.5	10.5
SL 9	400x12+100x20	3	402	10.5	98.5	18.5
SL 10	400x12+100x18	3	402	10.5	98.5	16.5
SL 11	400x12+100x16	3	402	10.5	98.5	14.5
SL 12	350x10+100x20	3	352	8.5	98.5	18.5
SL 13	350x10+100x18	4	352	8	98	16
SL 14-15	350x10+100x14	4	352	8	98	12
DL 1-12	F.B. 330x34	4	330	32	-	-
TL 1	F.B. 260x30	4	260	28	-	-
TL 2-5	300x10+100x12	4	302	8	98	10
TL 6-7	300x10+115x16	3	302	8.5	113.5	14.5
TL 8-9	300x10+115x18	3	302	8.5	113.5	16.5
TL 10	300x10+115x20	3	302	8.5	113.5	18.5
TL 11-12	350x10+115x18	3	352	8.5	113.5	16.5
TL 13-14	350x10+115x20	3	352	8.5	113.5	18.5
TL 15	350x10+115x22	3	352	8.5	113.5	20.5
IL 1-3	F.B. 200x16	3	200	14.5	-	-
IL 5-19	300x10+100x18	3	302.5	8.5	98.5	16.5
HL 1-3	300x10+100x14	3	302.5	8.5	98.5	12.5
HL 4-10	300x10+100x12	3	302.5	8.5	98.5	10.5
Girder's 1	F.B. 200x19.5	3	200	18	-	-
Rest Girder's	F.B. 125x12	3	125	10.5	-	-

Στη συνέχεια δίνεται έμφαση στα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία του καθαρού μοντέλου, με βάση τα οποία υπολογίζεται ο ουδέτερος άξονας της διατομής. Ο υπολογισμός αυτός απαιτείται για την εισαγωγή ανεξάρτητων σημείων στις ακραίες διατομές, στις οποίες θα εφαρμοστούν οι συνοριακές συνθήκες. Στα πλαίσια της μοντελοποίησης σημειώνεται ότι η ανάθεση διατομών είναι ίδια στα ακραία αμπάρια, με αποτέλεσμα η θέση του ουδέτερου άξονα να είναι ίδια και στα δύο άκρα. Ο υπολογισμός του ουδέτερου άξονα πραγματοποιείται από το ABAQUS με την εντολή Query>Mass Properties.

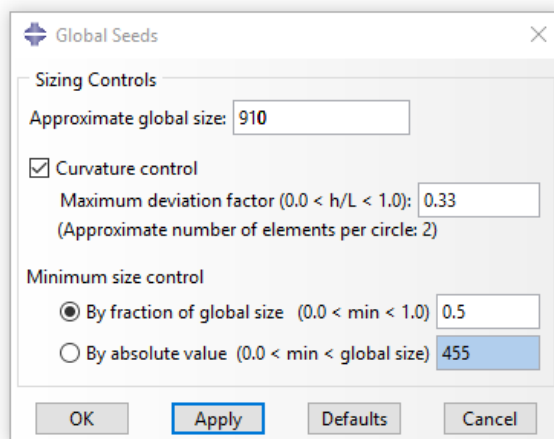


Σχήμα 7.19: Ακραία διατομή για τον υπολογισμό του ουδέτερου άξονα

7.3.3 Διακριτοποίηση – Δημιουργία Πλέγματος

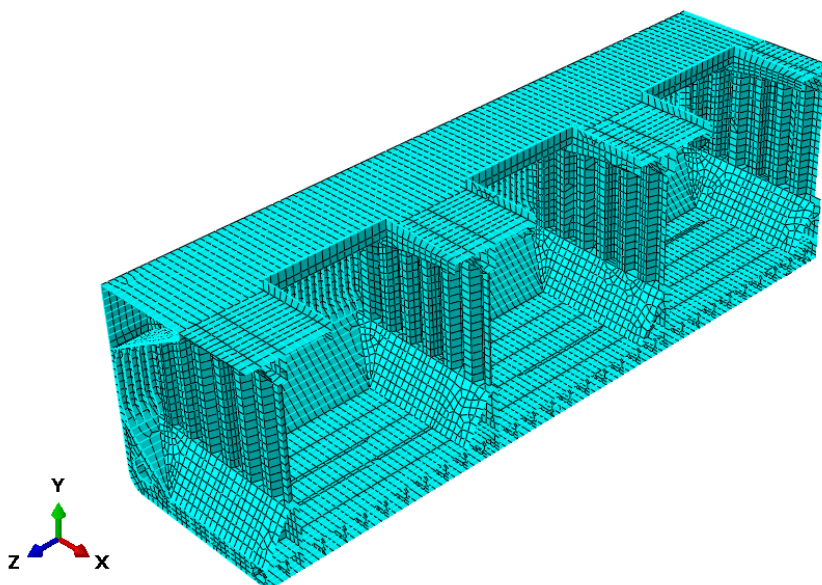
Επόμενο βήμα της προ επεξεργασίας αποτελεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου, μέσω της δημιουργίας πλέγματος (Mesh), το οποίο περιέχει όλη την πληροφορία για την ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο Mesh Module. Η διακριτοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνει 1 στοιχείο μεταξύ των απλών ενισχυτικών και τουλάχιστον 3 κατά το ύψος του διπύθμενου και μεταξύ PSM. Επιπλέον, η διακριτοποίηση των ανοιγμάτων των διαφραγμάτων και των εδρών είναι επαρκής ώστε να αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία του Web Ring.

Βασική παράμετρος της δημιουργίας του πλέγματος στο ABAQUS, είναι ο ορισμός της επιθυμητής πυκνότητας πλέγματος (Global Seeds), η οποία επιλέγεται ίση με την ισαπόσταση των απλών κατασκευαστικών νομέων (**Frame Spacing**), προκειμένου να υπάρχει ικανοποιητικός αριθμός στοιχείων, όπως προδιαγράφουν οι κανόνες. Ακόμη, με την γεωμετρική υποδιαίρεση (Partition) έχει εξασφαλιστεί η ύπαρξη στοιχείων μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών, τα οποία μπορεί να έχουν μικρότερη απόσταση από αυτή που ορίστηκε. Η ποιότητα του πλέγματος καθορίζεται από την επιλογή του λόγου των πλευρών και το ελάχιστο μέγεθος στοιχείων, όπως φαίνεται παρακάτω:

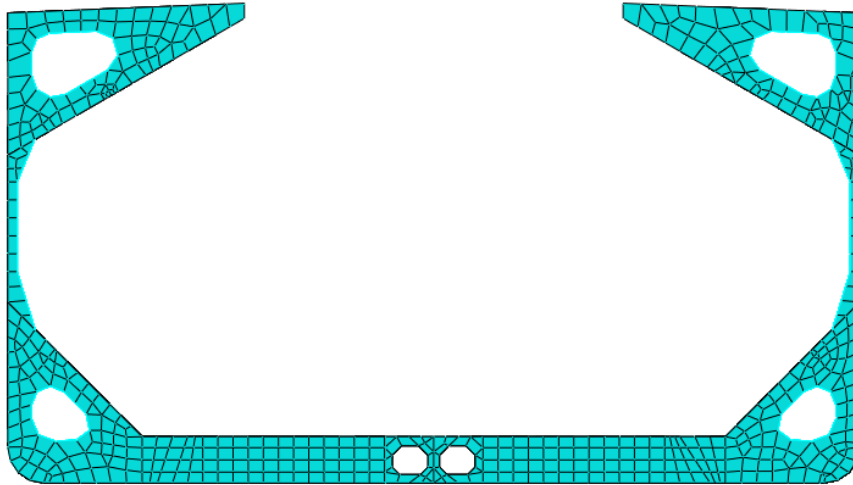


Σχήμα 7.20: Ορισμός πυκνότητας και ποιότητας πλέγματος

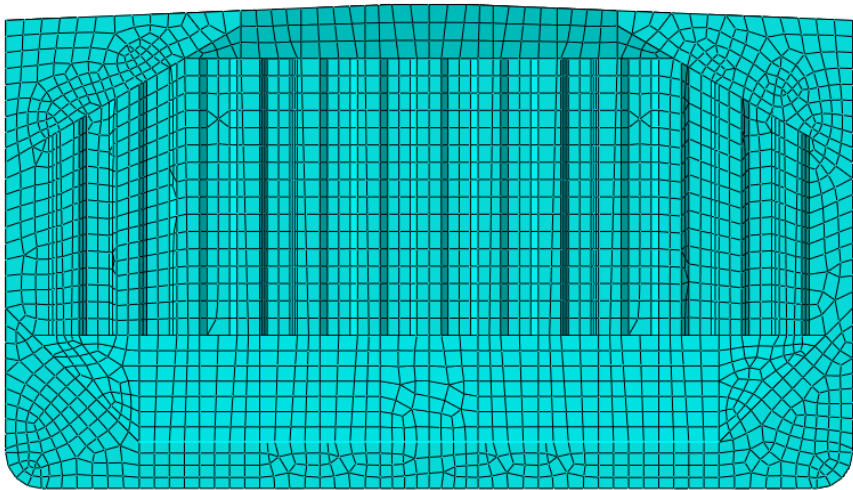
Με βάση τα παραπάνω, η γεωμετρία του μοντέλου διακριτοποιείται με την αυτόματη δημιουργία πλέγματος (Mesh Part), το οποίο παρουσιάζεται στα σχήματα (7.21) έως (7.23).



Σχήμα 7.21: Πλέγμα (Mesh) Μοντέλου (Cut View)



Σχήμα 7.22: Πλέγμα εγκάρσιων στοιχείων



Σχήμα 7.23: Πλέγμα Φρακτής

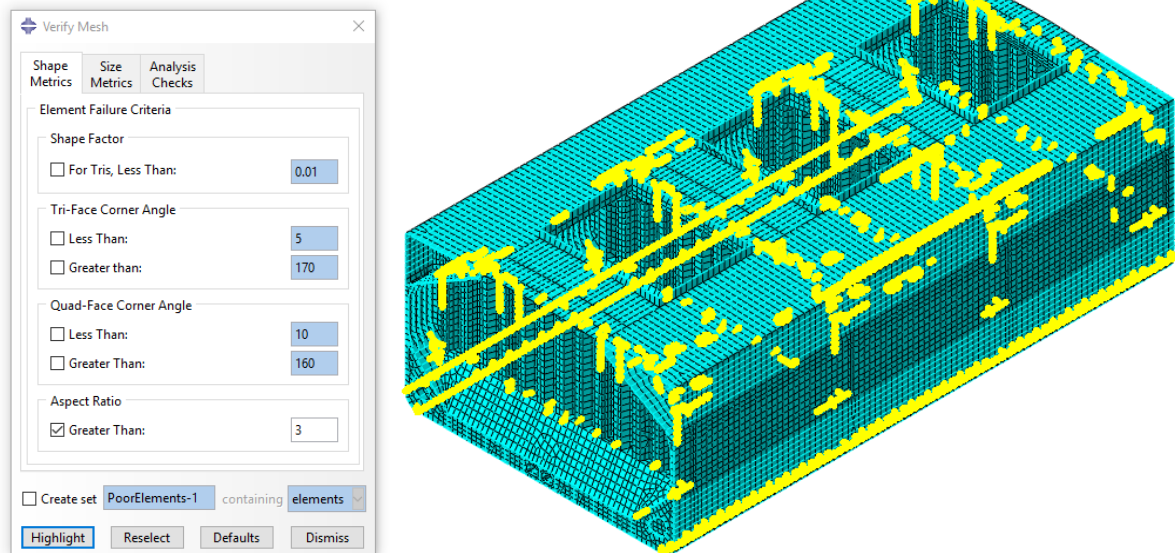
Το πλέγμα βασίζεται στη γεωμετρία που έχει δημιουργηθεί και ο τύπος των στοιχείων του εξαρτάται από την επιλογή του τρόπου γεωμετρικής αναπαράστασης των κατασκευαστικών στοιχείων, μαζί με την ανάθεση ιδιοτήτων τους που έχει προηγηθεί στο Property Module. Οπότε τα ελάσματα, τα οποία έχουν μοντελοποιηθεί ως κελύφη, διακριτοποιούνται από Shell Elements, ενώ τα ενισχυτικά τα οποία έχουν μοντελοποιηθεί ως δοκοί (Stringers), διακριτοποιούνται από Beam Elements. Συγκεκριμένα για τα Shell Elements χρησιμοποιείται ο τύπος S4R (linear, 6 DOF, reduced integration) για τετραπλευρικά στοιχεία και S3 για τριγωνικά στοιχεία. Για τα Beam Elements επιλέγεται ο τύπος B31 (linear, shear – deformable). Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος όσον αφορά τα στοιχεία του λαμβάνονται από το πρόγραμμα (Query>Mesh στο Mesh Module) και παρουσιάζονται στον πίνακα (7.8).

Πίνακας 7.8: Μέγεθος πλέγματος και τύποι στοιχείων διακριτοποίησης

Element Type	Element Shape	Geometric Order	# Elements	
B31	Line	Linear	24390	29.64%
S4R	Quadrilateral	Linear	55647	67.62%
S3	Triangular	Linear	2260	2.74%
Total Elements			82297	
Total Nodes			50780	

7.3.3.1 Έλεγχος Ποιότητας Πλέγματος

Στο σημείο αυτό, ελέγχεται η ποιότητα του πλέγματος, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο συμβαδίζει με εκείνη που προδιαγράφεται από τους κανόνες. Συγκεκριμένα ελέγχεται ο λόγος επιμήκους (Aspect Ratio), ο οποίος δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 3. Στο σχήμα (7.24) απεικονίζονται τα στοιχεία που υπερβαίνουν την απαιτούμενη τιμή.



Σχήμα 7.24: Mesh Verification

Τα στοιχεία αυτά βρίσκονται κυρίως στις πυκνωτές φρακτές και στα σημεία ένωσης των φρακτών με το έλασμα της άνω πλευρικής δεξαμενής (Topside Tank). Αυτό είναι αναμενόμενο, λόγω της περίπλοκης γεωμετρίας των φρακτών και της δυσκολία που υπάρχει στη σύνδεση του πλέγματος των φρακτών με το υπόλοιπο μοντέλο. Επιπλέον, στο έλασμα υδρορροής μοντελοποιήθηκαν τα τμήματα Δs_1 και Δs_2 (βλ. Κεφάλαιο 5.7.1.1) μεταξύ του ενισχυτικού και του σημείου όπου ξεκινάει το τεταρτοκύκλιο. Τα τμήματα αυτά έχουν πολύ μικρό πλάτος σε σχέση με το μήκος που δημιουργείται από το πλέγμα, οπότε είναι λογικό ο λόγος επιμήκους σε αυτά τα στοιχεία να ξεπερνάει την τιμή 3. Στον πίνακα (7.9) συνοψίζεται η πληροφορία που αφορά το λόγο επιμήκους για όλα τα στοιχεία (Shell).

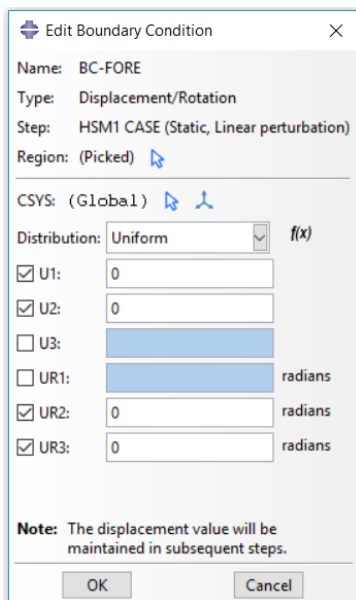
Πίνακας 7.9: Έλεγχος λόγου επιμήκους (Aspect Ratio)

Element Type	Elements	Aspect Ratio > 3	Average Aspect Ratio	Worst Aspect Ratio
Quad Elements	55647	1310 2.35%	1.46	18.34
Tri Elements	2260	47 2.08%	1.72	6.84

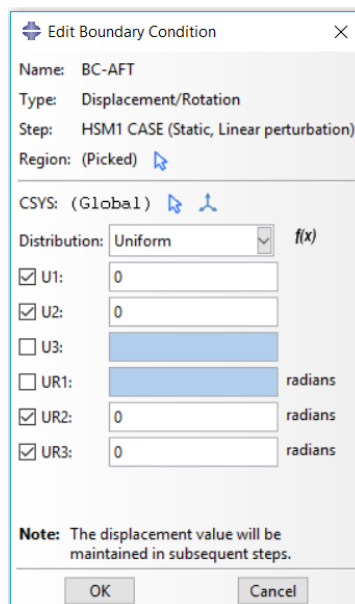
Τα συγκεκριμένα επισημασμένα στοιχεία δεν αποτελούν σημαντικό σφάλμα για ολόκληρη την ανάλυση, αλλά είναι αποτέλεσμα σχεδιαστικών λεπτομερειών, οι οποίες εν δυνάμει θα μπορούσαν να αποφευχθούν. Ο συνολικός αριθμός προειδοποιήσεων (Analysis Warnings) είναι της τάξης του 0.0826%, οπότε δεν δίνεται παραπάνω προσοχή, καθώς δεν προκύπτουν σφάλματα (Analysis Errors).

7.3.4 Συνοριακές Συνθήκες

Η εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών πραγματοποιείται στο Load Module. Σύμφωνα με τους κανονισμούς, δημιουργούνται σε πρώτο στάδιο τα ανεξάρτητα σημεία στις ακραίες διατομές πάνω στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Center Line) με κατακόρυφη συντεταγμένη τη θέση του Ουδέτερου άξονα της διατομής, όπως υπολογίστηκε προηγουμένως από την ανάθεση ιδιοτήτων. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή σημείων αναφοράς (Reference Points) στο μοντέλο κατά τη διαδικασία της συναρμολόγησης (Assembly Module). Τα σημεία αυτά αποτελούν και τα σημεία εφαρμογής των παρακάτω συνοριακών συνθηκών:

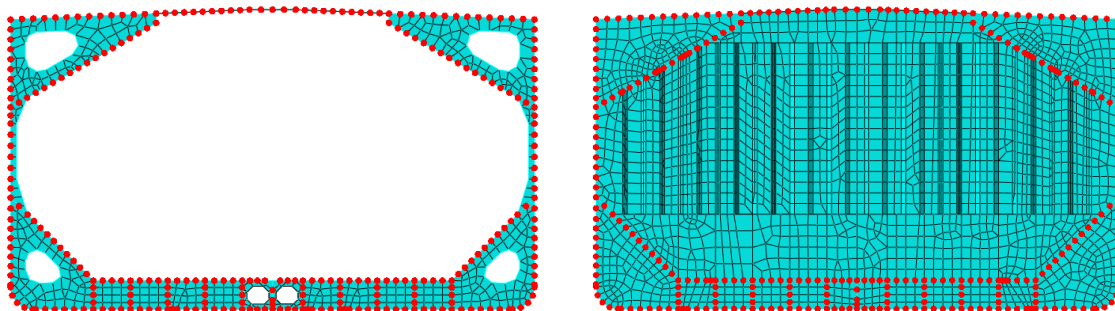


Σχήμα 7.25: Συνοριακές συνθήκες πρωραίας ακραίας διατομής

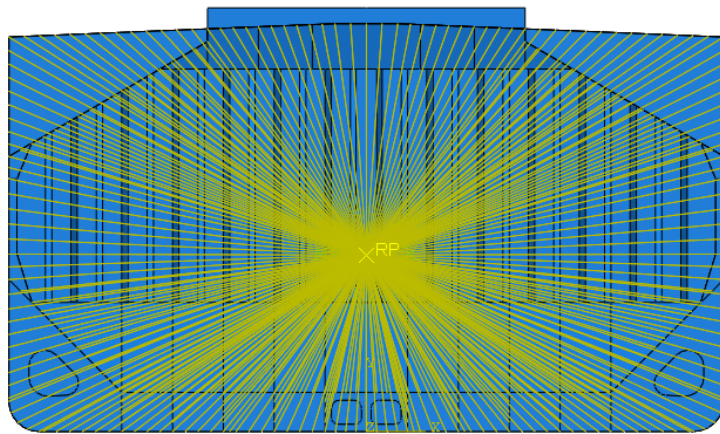


Σχήμα 7.26: Συνοριακές συνθήκες πρυμναίας ακραίας διατομής

Αυτές οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να μεταφερθούν από τα ανεξάρτητα σημεία στους κόμβους των διαμήκων στοιχείων (εξαιρούνται δηλαδή οι κόμβοι των side frames, floors, webs και φρακτών) των αντίστοιχων ακραίων διατομών μέσω κατάλληλων αλληλεπιδράσεων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται στο Interaction Module. Πιο αναλυτικά, σε κάθε ακραία διατομή δημιουργείται άκαμπτη σύνδεση (**rigid link**) μεταξύ των κόμβων των διαμήκων στοιχείων (και του Cross Deck) και των αντίστοιχων ανεξάρτητων σημείων. Σημειώνεται ότι για την πρωραία ακραία διατομή, από τους προαναφερθέντες κόμβους εξαιρείται εκείνος που βρίσκεται την τομή του εσωτερικού πυθμένα με την κεντρική σταθμίδα. Η αλληλεπίδραση αυτή επιτυγχάνεται μέσω του περιορισμού MPC (Multiple Point Constraint) Link, ο οποίος δημιουργεί περιορισμό σταθερής απόστασης των κόμβων αυτών με το σημείο στον ουδέτερο άξονα.

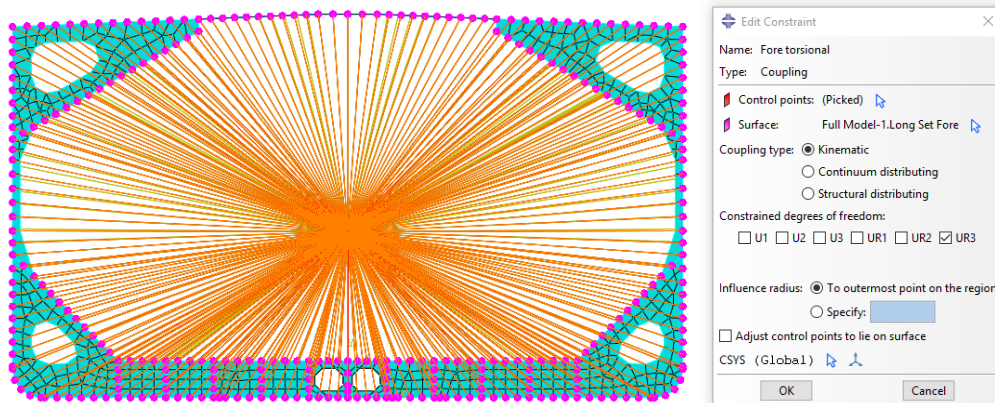


Σχήμα 7.27: Κόμβοι ακραίας πρωραίας διατομής (αριστερά) και ακραίας πρυμναίας διατομής (δεξιά) που συνδέονται με τα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία

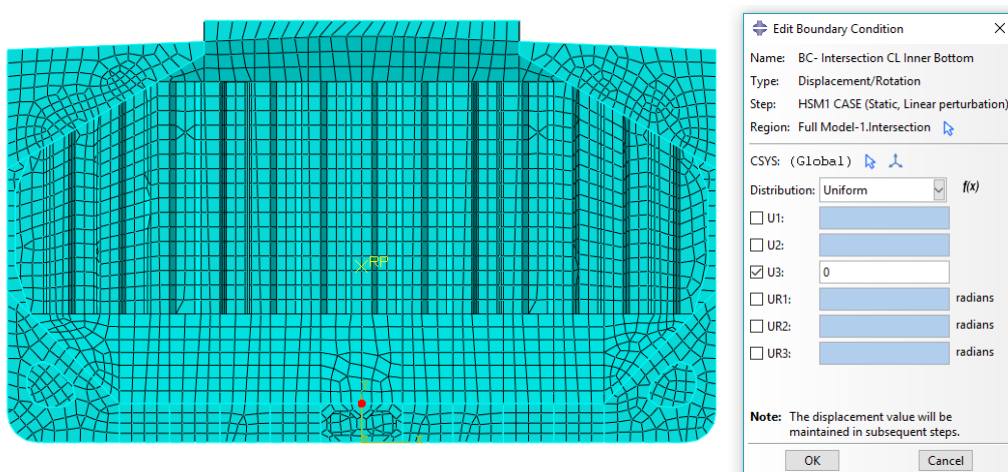


Σχήμα 7.28: Δημιουργία άκαμπτης σύνδεσης των ακραίων διατομών με το αντίστοιχο ανεξάρτητο σημείο μέσω περιορισμού MPC Link

Στη συνέχεια, προκειμένου να μεταφερθεί η στρεπτική συνοριακή συνθήκη U_{r3} η οποία επιβάλλεται στο μοντέλο, από το ανεξάρτητο σημείο σε ολόκληρη τη διατομή, δημιουργείται σύνδεση (Coupling) του συγκεκριμένου βαθμού ελευθερίας μεταξύ των προαναφερθέντων κόμβων (σε αυτή την περίπτωση μαζί με τον κόμβο της τομής στο πρωραίο άκρο) και των αντίστοιχων ανεξάρτητων σημείων. Τέλος, στο πρωραίο άκρο εφαρμόζεται η συνοριακή συνθήκη αξονικής μετατόπισης U_3 στον κόμβο της τομής του εσωτερικού πυθμένα με την Center line, που εξαιρέθηκε παραπάνω.



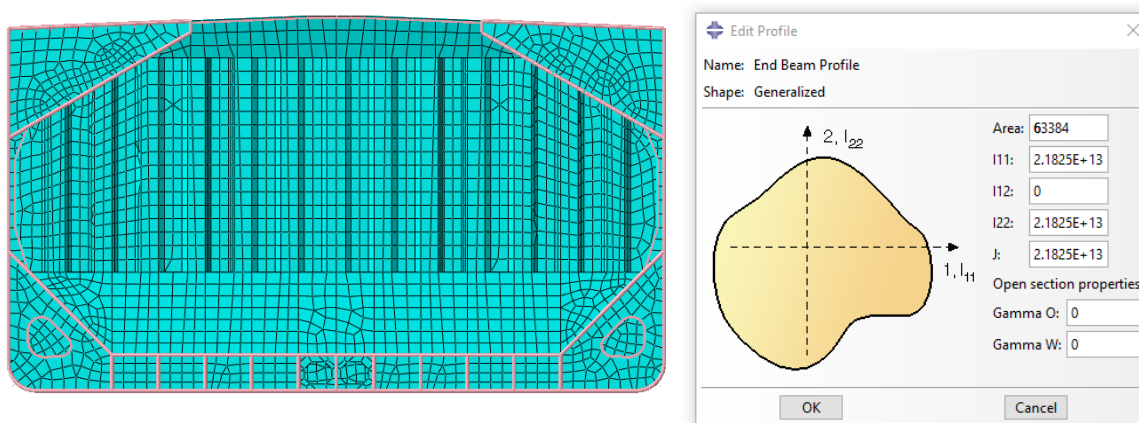
Σχήμα 7.29: Εφαρμογή Coupling του βαθμού ελευθερίας U_{r3} του ανεξάρτητου σημείου με τη διατομή



Σχήμα 7.30: Περιορισμός βαθμού ελευθερίας U_3 στο σημείο τομής του εσωτερικού πυθμένα με την Centerline

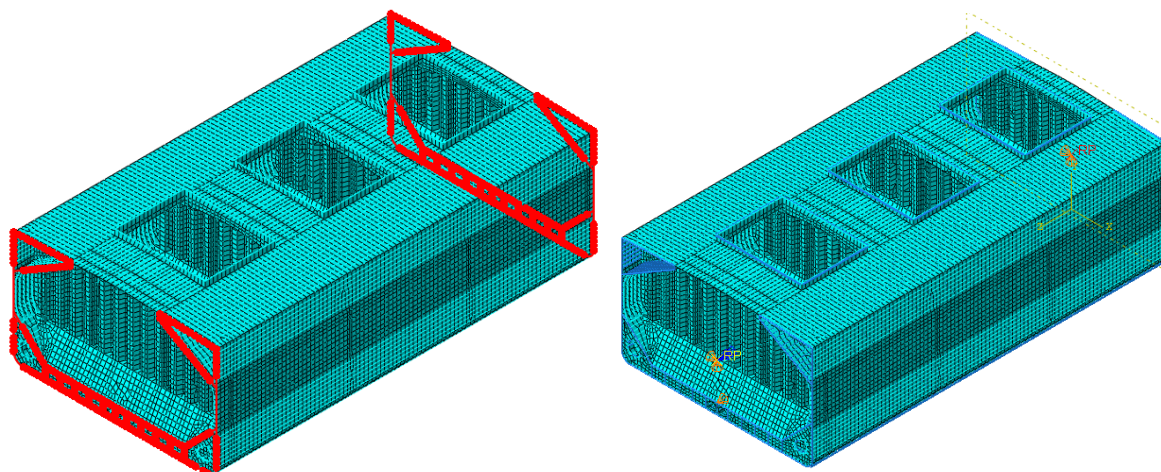
End Beam Constraints

Προκειμένου να υπάρχει μια ελεγχόμενη σχετική μετατόπιση μεταξύ των κόμβων στις ακραίες διατομές και να μην πλησιάζει υπερβολικά ο ένας τον άλλο, δημιουργείται μια ελαστική σύνδεση μεταξύ τους, με χρήση στοιχείων δοκών (End Beam Constraints) με δεδομένη ακαμψία, τα οποία συνδέουν όλους τους κόμβους των διαμήκων στοιχείων των ακραίων διατομών, αλλά και τους κόμβους του καταστρώματος Cross Deck. Οι δοκοί αυτοί ορίζονται όπως και όλες οι προηγούμενες στο Property Module, αλλά στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν έχουν συγκεκριμένη διατομή, αλλά συγκεκριμένες γεωμετρικές ιδιότητες, οι οποίες προδιαγράφονται από τους κανόνες. Για το λόγο αυτό δημιουργούνται δοκοί (Stringers) με γενικευμένο προφίλ διατομής των οποίων οι γεωμετρικές ιδιότητες καθορίζονται σύμφωνα με τους κανόνες όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.



Σχήμα 7.31: End Beam Constraints

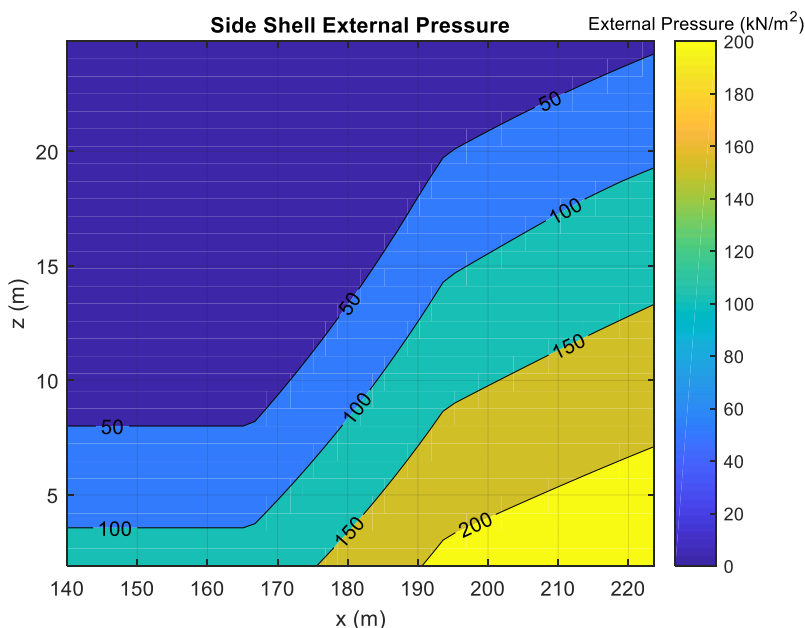
Στο σχήμα (7.32) παρουσιάζονται συνολικά οι συνοριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν για ολόκληρο το μοντέλο, στις ακραίες διατομές.



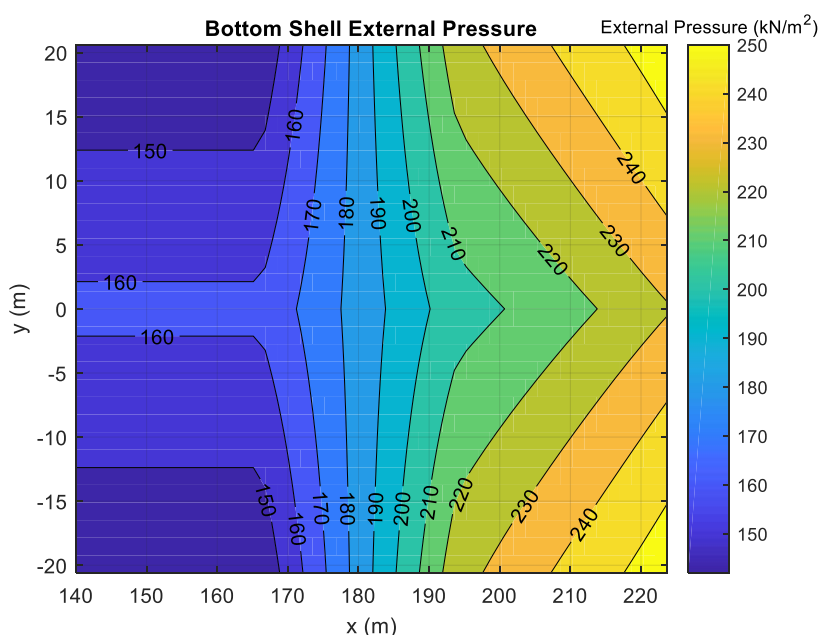
Σχήμα 7.32: Συνοριακές συνθήκες του μοντέλου στις ακραίες διατομές

7.3.5 Τοπικές Φορτίσεις (Local Loads)

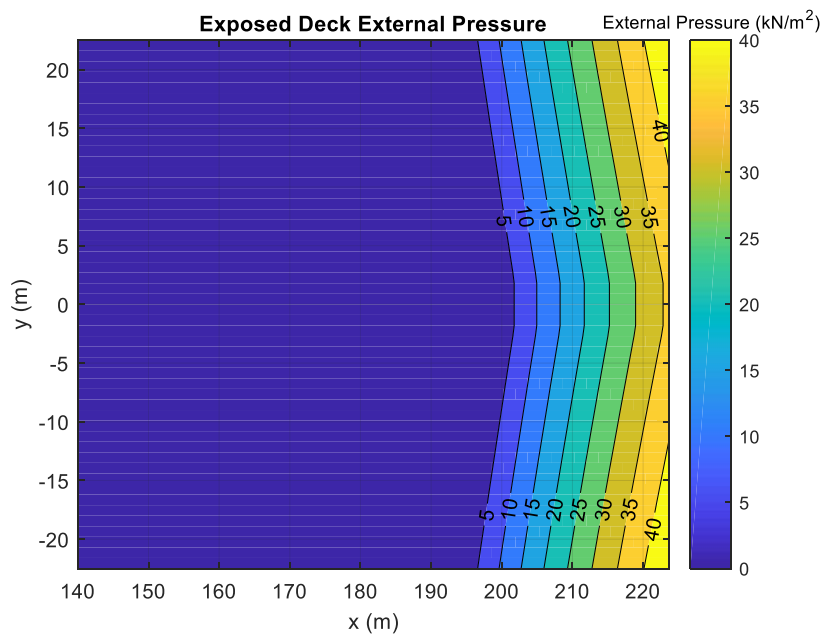
Στο σημείο αυτό περιγράφεται η διαδικασία υπολογισμού και επιβολής των τοπικών φορτίσεων στο μοντέλο. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 6, οι φορτίσεις αυτές περιλαμβάνουν το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, ύστερα από προσέγγιση καθαρού πάχους **n50**, τις τοπικές πιέσεις του φορτίου και τις τοπικές εξωτερικές πιέσεις της θάλασσας. Οι πιέσεις αυτές έχουν στατική και δυναμική συνιστώσα. Συγκεκριμένα η δυναμική συνιστώσα εξαρτάται από την επιλογή της δυναμικής κατάστασης φόρτισης. Η δυναμική κατάσταση HSM – 1 πρόκειται για κατάσταση Sagging. Οι εσωτερικές και εξωτερικές πιέσεις υπολογίζονται σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4. Στα σχήματα (7.33) έως (7.35) απεικονίζονται οι κατανομές των συνολικών εξωτερικών τοπικών πιέσεων που ασκούνται στο εξωτερικό περίβλημα, σε όλο το μήκος του μοντέλου, όπως εξάγονται από τον κώδικα σε περιβάλλον MATLAB.



Σχήμα 7.33: Κατανομή συνολικής εξωτερικής πίεσης (S+D) στις πλευρές λόγω θάλασσας για δυναμική κατάσταση HSM – 1 (βλ. Κεφ. 4.4.2.1). Σημειώνεται ότι οι πιέσεις είναι ίδιες σε Port και Starboard Side

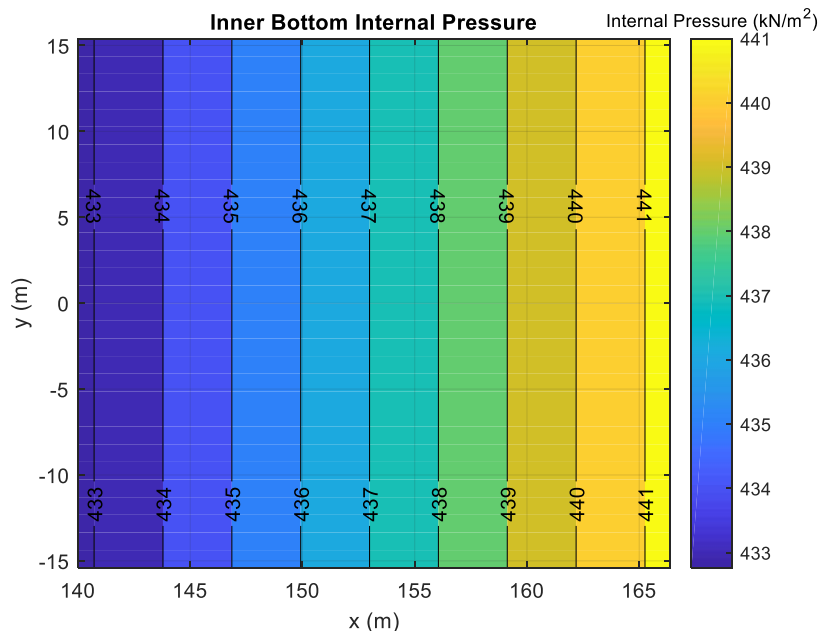


Σχήμα 7.34: Κατανομή συνολικής εξωτερικής πίεσης (S+D) στον εξωτερικό πυθμένα λόγω θάλασσας για δυναμική κατάσταση HSM – 1 (βλ. Κεφ. 4.4.2.1)

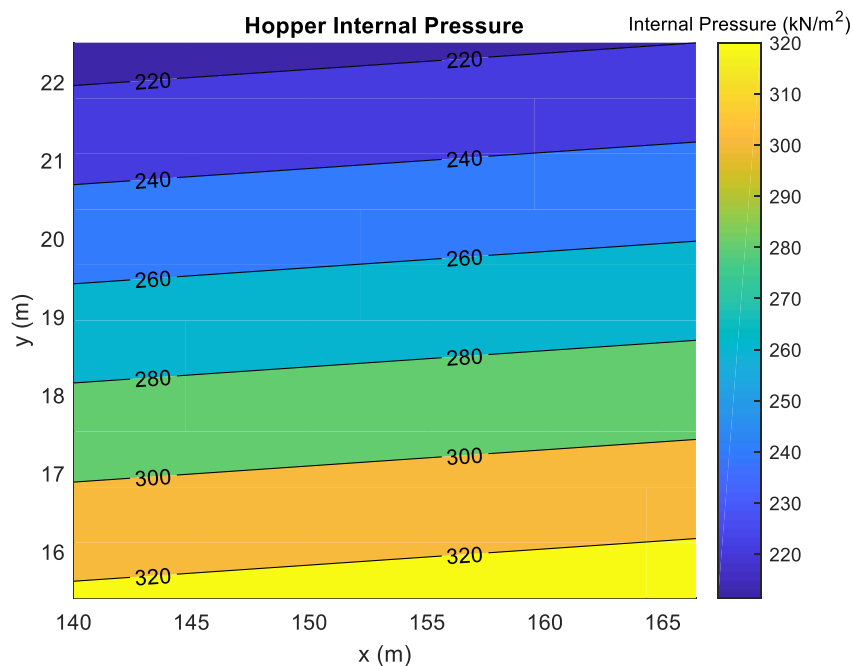


Σχήμα 7.35: Κατανομή εξωτερικής πίεσης στο κατάστρωμα λόγω θάλασσας (Green – Seas) για δυναμική κατάσταση HSM – 1 (βλ. Κεφ. 4.4.2.6)

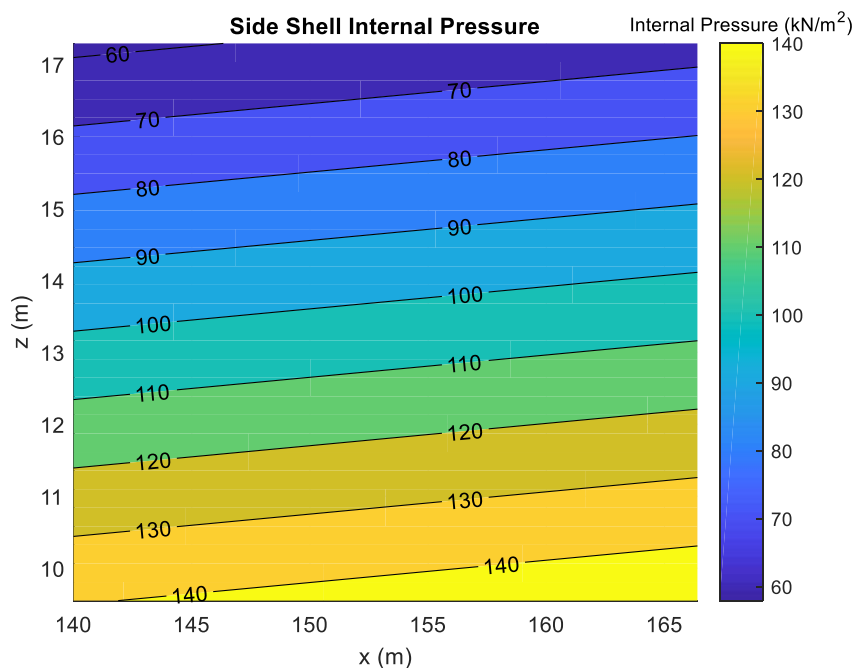
Αντίστοιχα, υπολογίζονται οι συνολικές εσωτερικές πιέσεις λόγω ξηρού φορτίου, για τα κύτη No. 5 και No.3, τα οποία είναι έμφορτα στην προκειμένη κατάσταση φόρτωσης που εξετάζεται. Στα σχήματα (7.36) έως (7.38) απεικονίζονται οι κατανομές των εσωτερικών τοπικών πιέσεων που ασκούνται στον εσωτερικό πυθμένα, το έλασμα της κάτω πλευρικής δεξαμενής και στο πλευρικό έλασμα, που αφορούν το αμπάρι No. 5, όπως εξάγονται από τον κώδικα σε περιβάλλον MATLAB. Με αντίστοιχο τρόπο υπολογίζονται και οι κατανομές για το αμπάρι No.3.



Σχήμα 7.36: Κατανομή συνολικής εσωτερικής πίεσης (S+D) λόγω φορτίου στον εσωτερικό πυθμένα του αμπαριού No.5, για δυναμική κατάσταση HSM – 1 (βλ. Κεφ. 4.5.1)



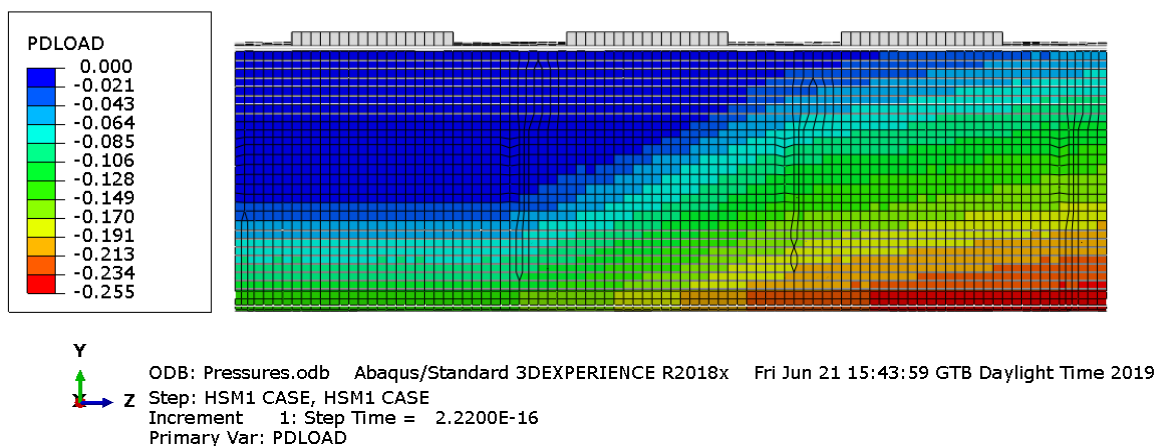
Σχήμα 7.37: Κατανομή συνολικής εσωτερικής πίεσης (S+D) λόγω φορτίου στο έλασμα της κάτω πλευρικής δεξαμενής του αμπαριού No.5, για δυναμική κατάσταση HSM – 1 (βλ. Κεφ. 4.5.1). Σημειώνεται ότι οι πιέσεις είναι ίδιες για Port και Starboard Side



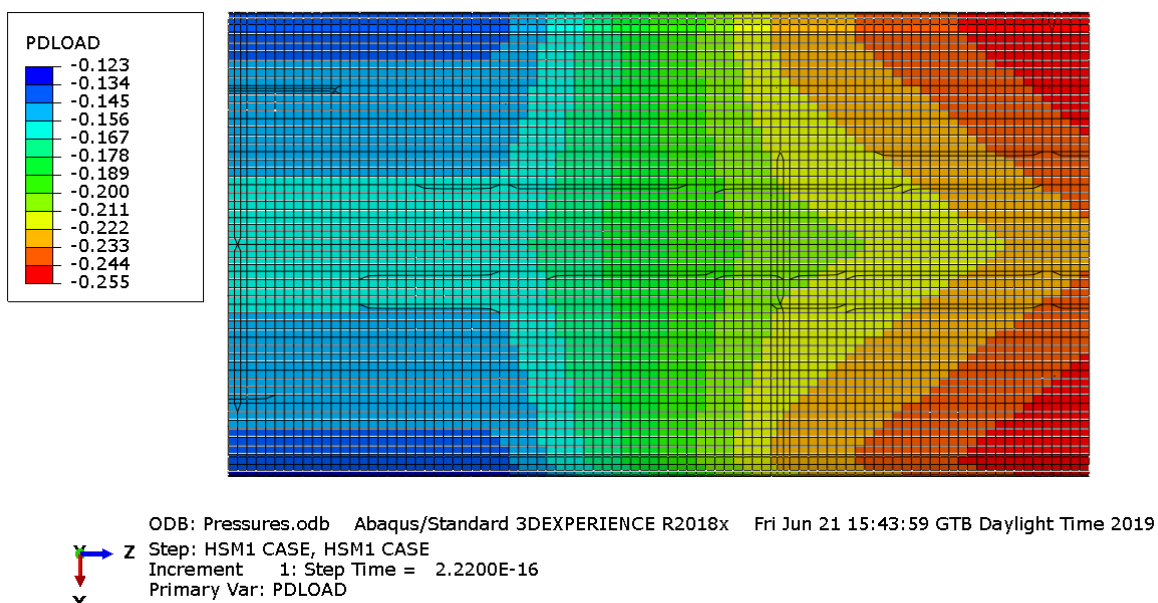
Σχήμα 7.38: Κατανομή συνολικής εσωτερικής πίεσης (S+D) λόγω φορτίου στο πλευρικό έλασμα του αμπαριού No.5, για δυναμική κατάσταση HSM – 1 (βλ. Κεφ. 4.5.1). Σημειώνεται ότι οι πιέσεις είναι ίδιες για Port και Starboard Side

Τέλος, όσον αφορά την κατανομή του βάρους της κατασκευής, υπολογίζεται αυτόματα από το ABAQUS έχοντας αναθέσει τις ιδιότητες (υλικό και διατομή) σε όλα τα στοιχεία με δεδομένη την πυκνότητα που έχει οριστεί ως αυτή του χάλυβα: $\rho = 7.8 \cdot 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$.

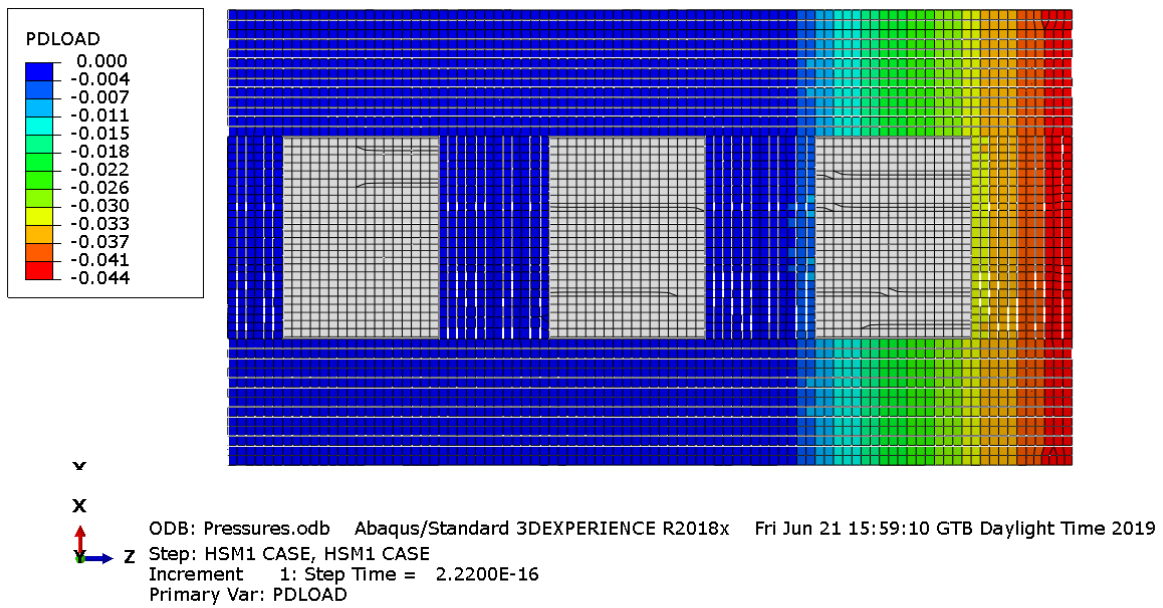
Οι παραπάνω κατανομές εισάγονται στο περιβάλλον του ABAQUS/CAE μέσω της δημιουργίας πεδίου φορτίσεων **“Mapped Analytical Field”**. Πρόκειται για πίνακες $[X Y Z P]$ που περιέχουν την τιμή της υπολογισμένης πίεσης σε κάθε σημείο $(X Y Z)$. Σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται το σύστημα αναφοράς που ορίστηκε στο Κεφ. (7.3.1.2). Συγκεκριμένα, η στήλη Z περιέχει τη διαμήκη θέση κάθε εγκάρσιου νομέα, η στήλη X περιέχει τις εγκάρσιες θέσεις και η στήλη Y τις κατακόρυφες θέσεις των σημείων υπολογισμού των φορτίσεων. Τέλος η στήλη P περιέχει την υπολογισμένη πίεση σε N/mm^2 . Το ABAQUS υπολογίζει τις πιέσεις σε κάθε κόμβο της κατασκευής με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων του πεδίου Mapped Analytical Field που ορίζεται, παράγοντας έτσι την πραγματική φόρτιση σε όλα τα σημεία του πλέγματος, όπως φαίνεται και στα σχήματα (7.39) έως (7.43). Σημειώνεται ότι για την σωστή εφαρμογή των πιέσεων, θα πρέπει να έχει οριστεί ομοιόμορφα ο προσανατολισμός των επιφανειών στο μοντέλο, όπως έγινε στο Κεφ. (7.3.2.4).



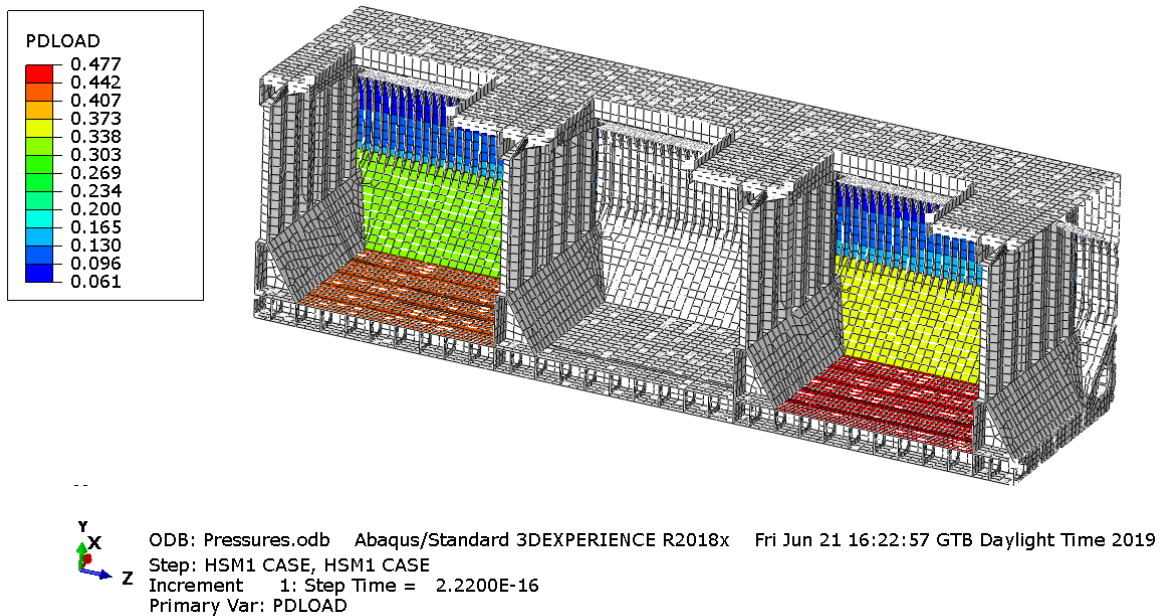
Σχήμα 7.39: Κατανομή συνολικής εξωτερικής πίεσης (S+D) λόγω θάλασσας σε N/mm^2 στις πλευρές του μοντέλου (ABAQUS)



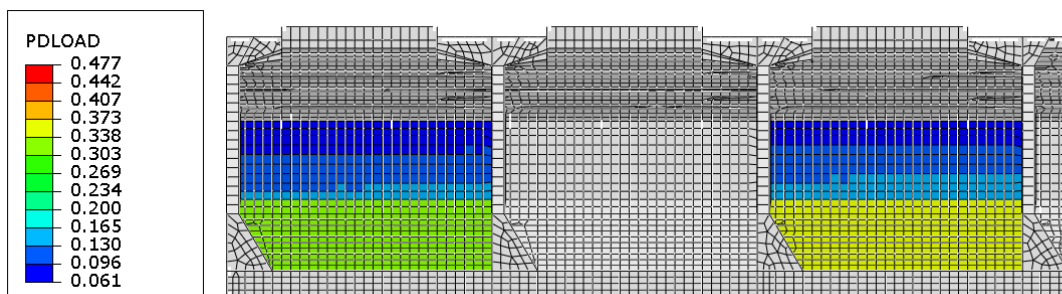
Σχήμα 7.40: Κατανομή συνολικής εξωτερικής πίεσης (S+D) λόγω θάλασσας σε N/mm^2 στον εξωτερικό πυθμένα του μοντέλου (ABAQUS)



Σχήμα 7.41: Κατανομή εξωτερικής πίεσης λόγω θάλασσας (Green – Seas) σε N/mm^2 στο κατάστρωμα του μοντέλου (ABAQUS)



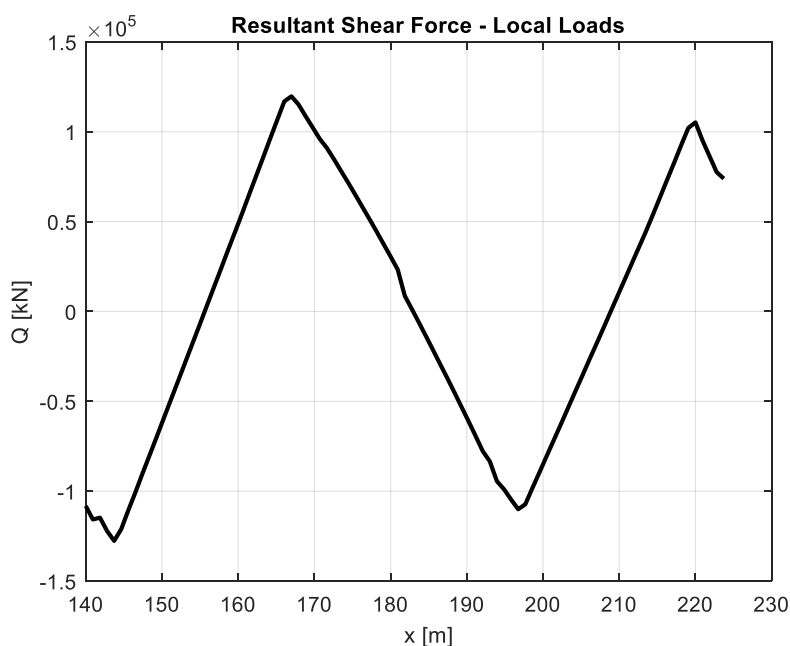
Σχήμα 7.42: Κατανομή συνολικής εσωτερικής πίεσης (S+D) λόγω φορτίου σε N/mm^2 στον εσωτερικό πυθμένα και τα πλευρικά τοιχώματα του μοντέλου (ABAQUS)



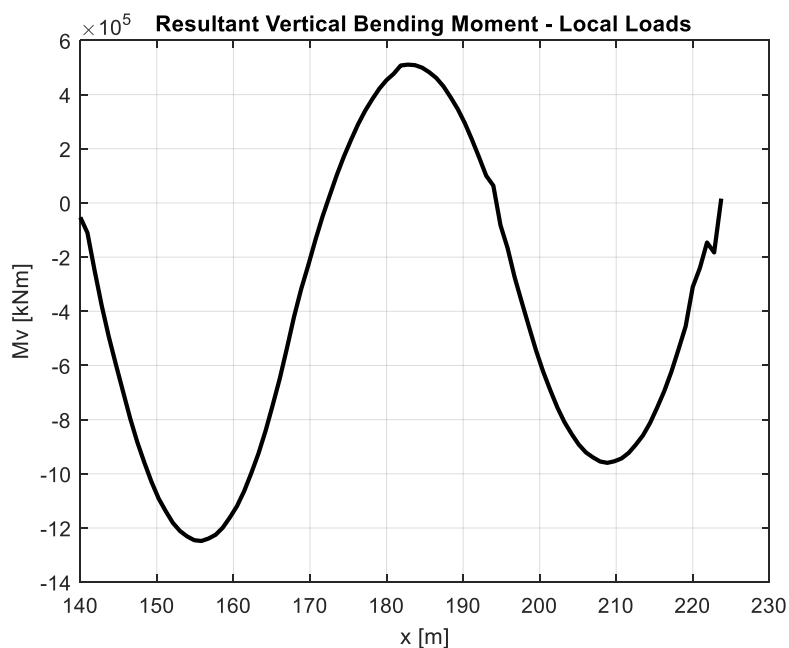
Σχήμα 7.43: Κατανομή συνολικής εσωτερικής πίεσης (S+D) λόγω φορτίου σε N/mm^2 στα αμπάρια Νο.5 & Νο.3 (ABAQUS)

7.3.6 Διορθώσεις Διατμητικών Δυνάμεων και Καμπτικών Ροπών

Έχοντας μοντελοποιήσει όλες τις τοπικές φορτίσεις, πραγματοποιείται μια πρώτη επίλυση του μοντέλου ώστε να προκύψουν τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών M_v και διατμητικών δυνάμεων Q (Global Loads). Για την εξαγωγή των διαγραμμάτων δημιουργούνται εγκάρσιες τομές (Free Body Cuts) και συγκεκριμένα 92 τομές, προκειμένου να ακολουθούν το πλέγμα του μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιεί ως βασικό μέγεθος το Frame Spacing και η συνολική έκταση του μοντέλου είναι 92 Frames. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές των καμπτικών ροπών και των διατμητικών δυνάμεων στο κέντρο της κάθε διατομής και καταγράφονται σε αρχείο για περαιτέρω επεξεργασία (Report>Free Body Cuts). Στα σχήματα (7.44) και (7.45) παρουσιάζονται τα εν λόγω διαγράμματα, όπως προέκυψαν από τα τοπικά φορτία (Local Loads) και μόνο.



Σχήμα 7.44: Διάγραμμα διατμητικών δυνάμεων μετά από την εφαρμογή των τοπικών φορτίσεων (Local Loads)



Σχήμα 7.45: Διάγραμμα καμπτικών ροπών μετά από την εφαρμογή των τοπικών φορτίσεων (Local Loads)

7.3.6.1 Διόρθωση Διατμητικής Δύναμης

Για την προσαρμογή της διατμητικής δύναμης στο μοντέλο, εφαρμόζονται δύο μέθοδοι:

- **Μέθοδος 1 (M1):** Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε μία φρακτή του μεσαίου κύτους.
- **Μέθοδος 2 (M2):** Διόρθωση διατμητικής δύναμης και στις δύο φρακτές του μεσαίου κύτους.

Για τον συνδυασμό της εναλλάξ φόρτωσης και της δυναμικής κατάστασης HSM – 1 που έχουν επιλεχθεί, προκύπτει μέγιστη ποσοστό διατμητικής δύναμης $C_{SF-LC}=1$. Για συνδυασμό φορτίσεων όπου $C_{SF-LC}=1$ (**Max SFLC**), χρησιμοποιείται η **μέθοδος 1**, για διόρθωση διατμητικής δύναμης στη μία φρακτή, με την προϋπόθεση ότι η τελική τιμή της διατμητικής δύναμης που προκύπτει στην άλλη μετά τη διόρθωση να μην υπερβαίνει την αντίστοιχη επιθυμητή τιμή.

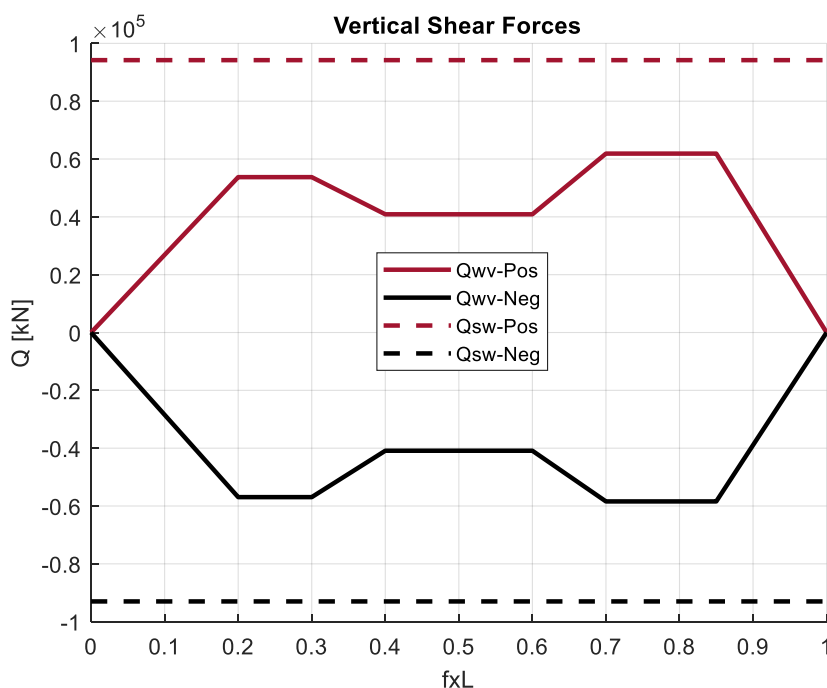
Σύμφωνα με τον πίνακα (6.3) του Κεφαλαίου 6, προδιαγράφεται σε ποια φρακτή πραγματοποιείται διόρθωση της διατμητικής δύναμης. Πιο συγκεκριμένα, η πρυμναία φρακτή του μεσαίου κύτους x_{b-aft} βρίσκεται πρῶραθεν του $0.5L$ και η δυναμική κατάσταση HSM – 1 είναι κατάσταση Sagging ($M_{wv-LC} < 0$). Οπότε εφόσον από το αρχικό διάγραμμα των διατμητικών δυνάμεων (σχήμα 7.44) προκύπτει ότι $Q_{fwd} \leq Q_{aft}$, η διόρθωση της διατμητικής δύναμης πραγματοποιείται στην **πρυμναία φρακτή**.

Οι επιθυμητές (**target values**) της διατμητικής δύναμης για τον παραπάνω συνδυασμό φορτίσεων με $Q_{fwd} \leq Q_{aft}$, προκύπτουν ως εξής:

$$Q_{\text{targ-aft}} = C_{SF-LC} Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swa} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

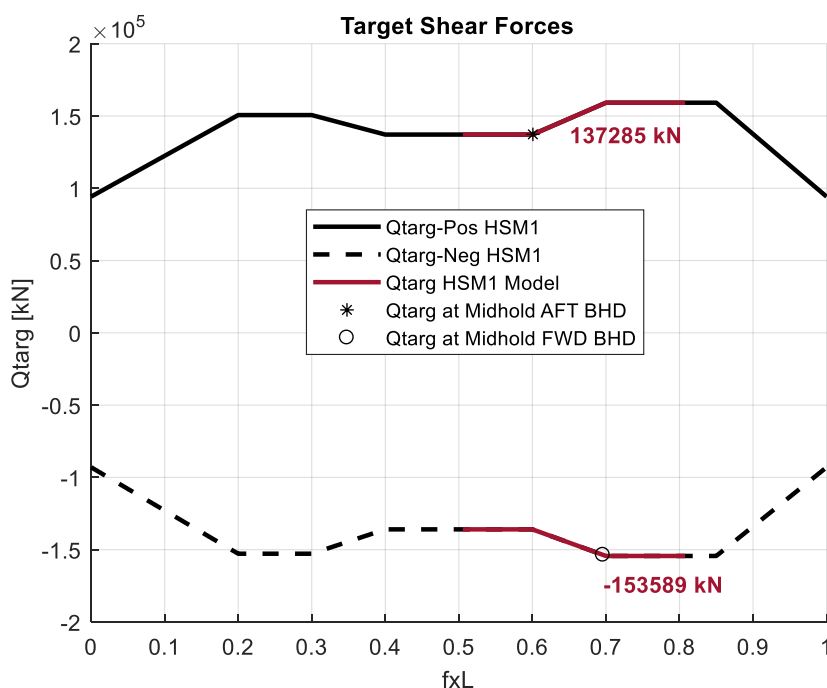
$$Q_{\text{targ-fwd}} = C_{SF-LC} Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swf} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

Οι επιμέρους διατμητικές δυνάμεις σε κυματισμό υπολογίζονται σύμφωνα με τους κανόνες που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4 και απεικονίζονται στο σχήμα (7.46). Επιπλέον απεικονίζονται και οι διατμητικές δυνάμεις σε ήρεμο νερό, οι οποίες λήφθηκαν ως οι μέγιστες από το Loading Manual αφαιρώντας τις διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων στις φρακτές.



Σχήμα 7.46: Κατανομή των επιμέρους διατμητικών δυνάμεων

Με βάση τον υπολογισμό των επιμέρους διατμητικών δυνάμεων, στο σχήμα (7.47) προκύπτουν οι επιθυμητές τιμές των διατμητικών δυνάμεων στην πρυμναία και πρωραία φρακτή του μεσαίου αμπαριού.



Σχήμα 7.47: Επιθυμητή διατμητική δύναμη στις φρακτές του μεσαίου κύτους

Με βάση λοιπόν το αρχικό διάγραμμα διατμητικών δυνάμεων (Σχ. 7.44) και το διάγραμμα των επιθυμητών διατμητικών δυνάμεων στις φρακτές (Σχ. 7.47), στον πίνακα (7.10) συνοψίζονται οι αρχικές τιμές της ανάλυσης και οι αντίστοιχες επιθυμητές τιμές για τις φρακτές του μεσαίου κύτους.

Πίνακας 7.10: Τιμές διατμητικής δύναμης από την πρώτη ανάλυση (Local Loads) και επιθυμητές τιμές (Target Values)

Shear Forces		FEM – Local Loads	Target Values
Shear Force at Midhold AFT BHD	Q_{aft} [kN]	119700	137285
Shear Force at Midhold FWD BHD	Q_{fwd} [kN]	-110000	-153589

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η διόρθωση πραγματοποιείται στην πρυμναία φρακτή, κατά την οποία εφαρμόζονται στα άκρα του μοντέλου δύο ίσες ροπές με την ίδια φορά, οι οποίες αυξάνουν τις διατμητικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του μοντέλου κατά τη διαφορά $Q_{\text{targ-aft}} - Q_{\text{local-aft}}$. Συγκεκριμένα η ροπή αυτή υπολογίζεται ως εξής:

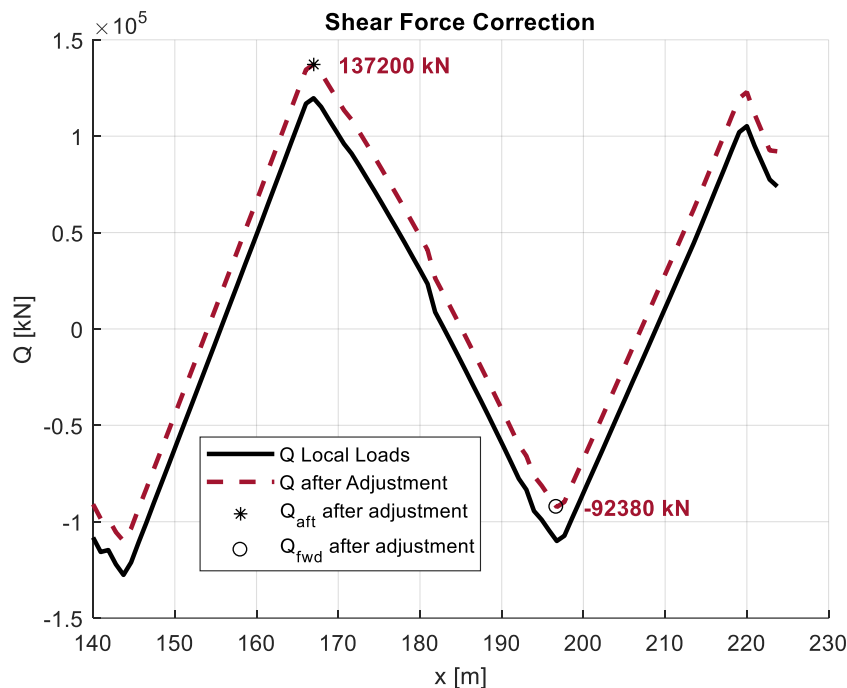
$$M_{Y-aft} = M_{Y-fore} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} (Q_{\text{targ-aft}} - Q_{\text{aft}}), \text{ όπου } x_{fore} - x_{aft}, \text{ το μήκος του μοντέλου.}$$

Με τη μέθοδο αυτή ουσιαστικά η καμπύλη της διατμητικής δύναμης μετατοπίζεται ολόκληρη προς τα πάνω και στη συνέχεια ελέγχεται αν ικανοποιείται η συνθήκη και για την πρωραία φρακτή, η οποία δεν υπερβαίνει την αντίστοιχη επιθυμητή, οπότε δεν χρειάζεται διόρθωση με τη μέθοδο 2.

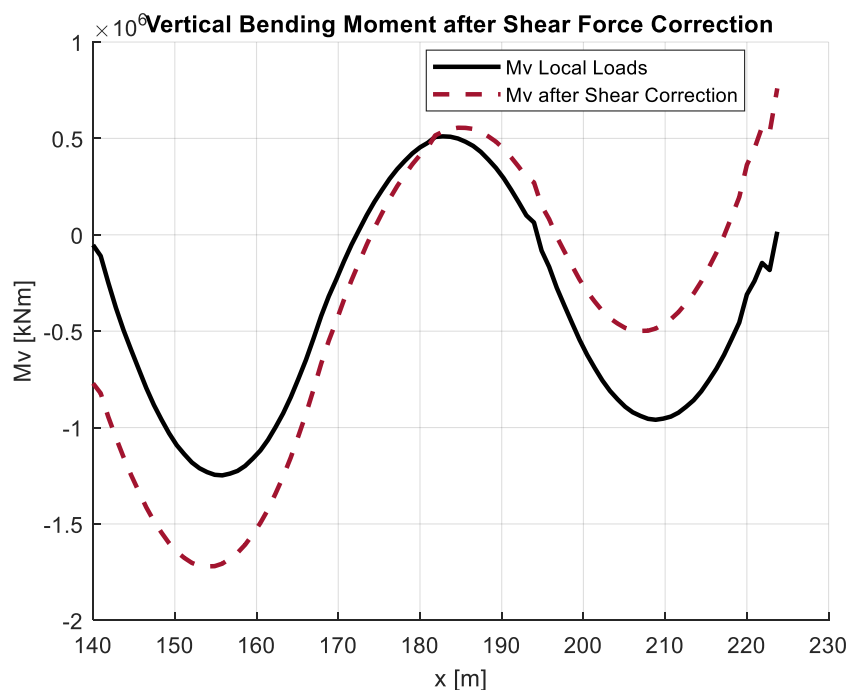
Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, εφαρμόζονται στα άκρα του μοντέλου οι παρακάτω καμπτικές ροπές:

$$M_{Y\text{-aft}} = M_{Y\text{-fore}} = 7.3609 \times 10^5 \text{ kNm} \rightarrow CM_1 = 7.3609 \times 10^{11} \text{ Nmm}$$

Οι ροπές αυτές εφαρμόζονται στα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία των ακραίων διατομών και μεταφέρονται στους κόμβους των διαμήκων στοιχείων μέσω της αλληλεπίδρασης (Coupling) **Ur1**. Το μοντέλο επιλύεται ξανά και έτσι προκύπτει το διορθωμένο διάγραμμα των διατμητικών δυνάμεων (Σχ. 7.48) και το καινούριο διάγραμμα καμπτικών ροπών (Σχ. 7.49).



Σχήμα 7.48: Διάγραμμα διατμητικών δυνάμεων ύστερα από διόρθωση στην πρυμναία φρακτική



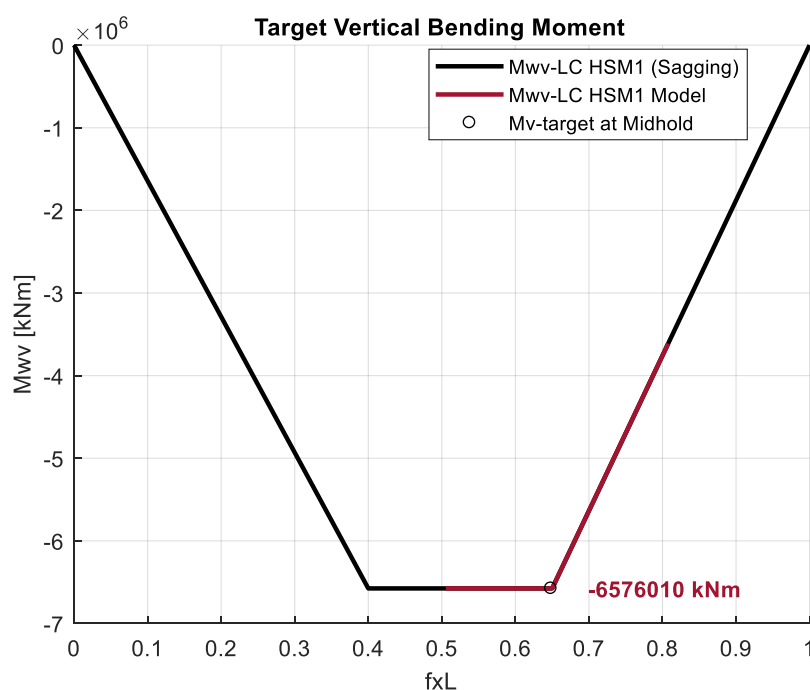
Σχήμα 7.49: Διάγραμμα καμπτικών ροπών ύστερα από διόρθωση διατμητικής δύναμης

7.3.6.2 Διόρθωση Καμπτικής Ροπής

Έχοντας πετύχει την επιθυμητή διατμητική δύναμη στην πρυμναία φρακτή, μένει να προσαρμοστεί η καμπτική ροπή στο μοντέλο. Η επιθυμητή καμπτική ροπή αφορά τη μέγιστη (για Hogging) ή ελάχιστη (για Sagging) καμπτική ροπή που εφαρμόζεται στο μεσαίο κύτος και προκύπτει ως εξής:

$$M_{v\text{-targ}} = C_{BM-LC} M_{SW} + M_{wv-LC}$$

Για τον συνδυασμό της εναλλάξ φόρτωσης και της HSM – 1 δυναμικής κατάστασης (Sagging) που έχει επιλεγθεί, προκύπτει μηδενική συνεισφορά της συνιστώσας σε ήρεμο νερό στη συνολική ροπή κάμψης, δηλαδή $C_{BM-LC} = 0$. Αυτό προκαλεί μια πιο δυσμενή κατάσταση, αφού λαμβάνεται υπόψη μόνο η ροπή σε κυματισμό (Sagging) και όχι η ροπή σε ήρεμο νερό (Hogging). Είναι κατανοητό ότι η κατάσταση που επιτυγχάνεται δεν αποτελεί μια πραγματική κατάσταση αλλά μια πιο δυσμενή από την πραγματική. Η επιθυμητή καμπτική ροπή για την δεδομένη περίπτωση υπολογίζεται στο σχήμα (7.50).



Σχήμα 7.50: Επιθυμητή καμπτική ροπή (Sagging)

Για την επίτευξη της επιθυμητής ροπής $M_{v\text{-targ}}$ στη διαμήκη θέση x του μεσαίου κύτους, εφαρμόζονται στα άκρα του μοντέλου δύο ίσες ροπές $M_{v\text{-end}}$ αντίθετης φοράς, οι οποίες δεν μεταβάλλουν το διορθωμένο διάγραμμα των διατμητικών δυνάμεων. Οι ροπές αυτές υπολογίζονται ως εξής:

$$M_{v\text{-end}} = M_{v\text{-targ}} - M_{v\text{-peak}}$$

Η $M_{v\text{-peak}}$ λαμβάνεται ως η ελάχιστη (για Sagging) καμπτική ροπή εντός του μεσαίου κύτους λόγω των τοπικών φορτίων και οποία λαμβάνει υπόψη τις πρόσθετες καμπτικές ροπές που προκαλεί η διόρθωση της διατμητικής δύναμης.

Με βάση τα παραπάνω, η ελάχιστη τιμή της καμπτικής ροπής στο μεσαίο κύτος προκύπτει:

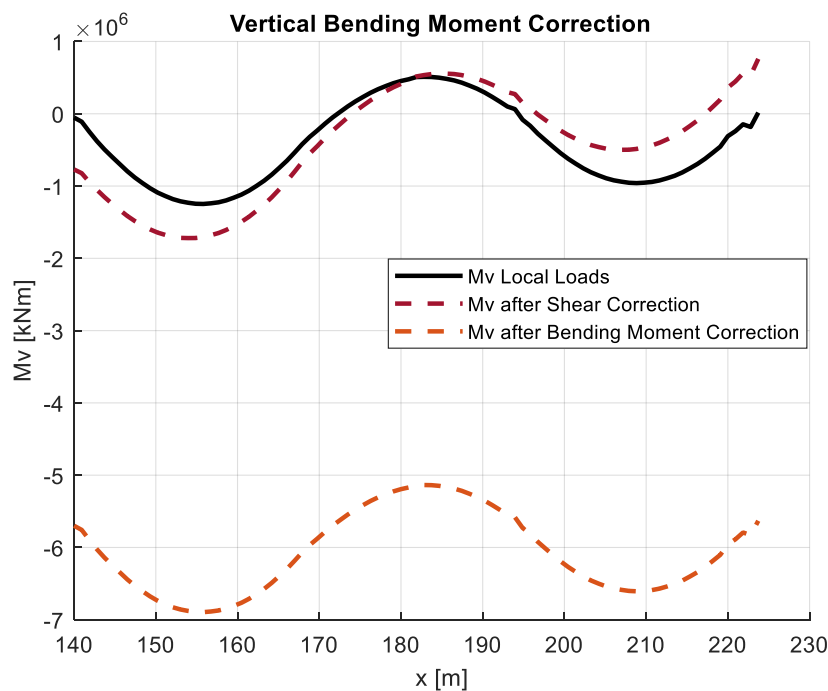
$$M_{v-peak} = -9.293e+05 \text{ kNm}$$

Οπότε οι καμπτικές ροπές που πρέπει να ασκηθούν στα δύο άκρα του μοντέλου είναι:

$$M_{v-aft-end} = 5646710 \text{ kNm} \rightarrow CM_1 = 5.64671e+11 \text{ Nmm}$$

$$M_{v-fore-end} = -5646710 \text{ kNm} \rightarrow CM_1 = -5.64671e+11 \text{ Nmm}$$

Οι ροπές αυτές εφαρμόζονται στα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία των ακραίων διατομών και μεταφέρονται στους κόμβους των διαμήκων στοιχείων μέσω της αλληλεπίδρασης (Coupling) **Ur1**. Με τη μέθοδο αυτή ουσιαστικά η καμπύλη της καμπτικής ροπής (ύστερα από την διόρθωση της διατμητικής δύναμης) μετατοπίζεται ολόκληρη προς τα κάτω, προκειμένου να φτάσει την επιθυμητή τιμή M_{v-targ} . Το μοντέλο λοιπόν επιλύεται για τρίτη φορά και έτσι προκύπτει το τελικό διορθωμένο διάγραμμα των καμπτικών ροπών (Σχ. 7.51).



Σχήμα 7.51: Συνοπτική παρουσίαση διόρθωσης καμπτικών ροπών μετά από τη διόρθωση διατμητικής δύναμης και τη διόρθωση της καμπτικής ροπής

7.4 Επίλυση

Κατά την μοντελοποίηση που πραγματοποιήθηκε στο γραφικό περιβάλλον του ABAQUS/CAE (Preprocessing Phase), ορίστηκε το αριθμητικό πρόβλημα, μέσω της δημιουργίας της γεωμετρίας του μοντέλου, της διακριτοποίησης του σε πεπερασμένα στοιχεία και της επιβολής φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών. Αποτέλεσμα αυτής της φάσης είναι η δημιουργία ενός αρχείου εισόδου, το οποίο έχει τη μορφή ενός μεγάλου μητρώου. Για την επίλυση του, χρησιμοποιείται το πρόγραμμα ABAQUS/Standard και η προσομοίωση εκτελείται ως ανεξάρτητη διαδικασία. Απαραίτητο στάδιο για την επίλυση αποτελεί ο ορισμός του είδους της ανάλυσης στο **Step Module**.

Στην προκειμένη περίπτωση, η ανάλυση είναι στατική (Static) και συγκεκριμένα γραμμική (Linear), καθώς και η συμπεριφορά του υλικού ορίζεται ως γραμμικά ελαστική (Linear Elastic). Με αυτήν την ανάλυση (Static, Linear Perturbation) προσεγγίζεται υπολογιστικά η μακροπρόθεσμη απόκριση της κατασκευής λόγω επιβολής φορτίσεων (Local & Global) σε συνδυασμό με τις επιλεχθείσες συνοριακές συνθήκες.

Πριν τη δημιουργία της προς εκτέλεσης εργασίας στο **Job Module**, ορίζεται το σύνολο των μεταβλητών που θα υπολογιστούν κατά την επίλυση. Οι μεταβλητές αυτές δηλώνονται μέσα στην επιλογή Field Output Requests και περιλαμβάνουν τα παρακάτω μεγέθη, που αποθηκεύονται για περαιτέρω ανάλυση.

- Stresses: Principal Stress, Mises Equivalent Stress, Maximum Mises Equivalent Stress
- Axial Beam Stress
- Total Strain: E
- Translations and Rotations: U & Ur
- Reaction Forces and Moments: Concentrated Forces & Moments, Section Forces & Moments

Το μέγεθος του προβλήματος συνοψίζεται στον πίνακα (7.11).

Πίνακας 7.11: Μέγεθος του προβλήματος

Number of Elements	82297
Number of Nodes	98,556
Number of Nodes defined by the User	50,782
Number of Internal Nodes defined by the Program	47,774
Total Number of Variables in the Model	305,314

Η επίλυση πραγματοποιήθηκε σε φορητό υπολογιστή (Laptop), του οποίου τα χαρακτηριστικά δίνονται στον πίνακα (7.12).

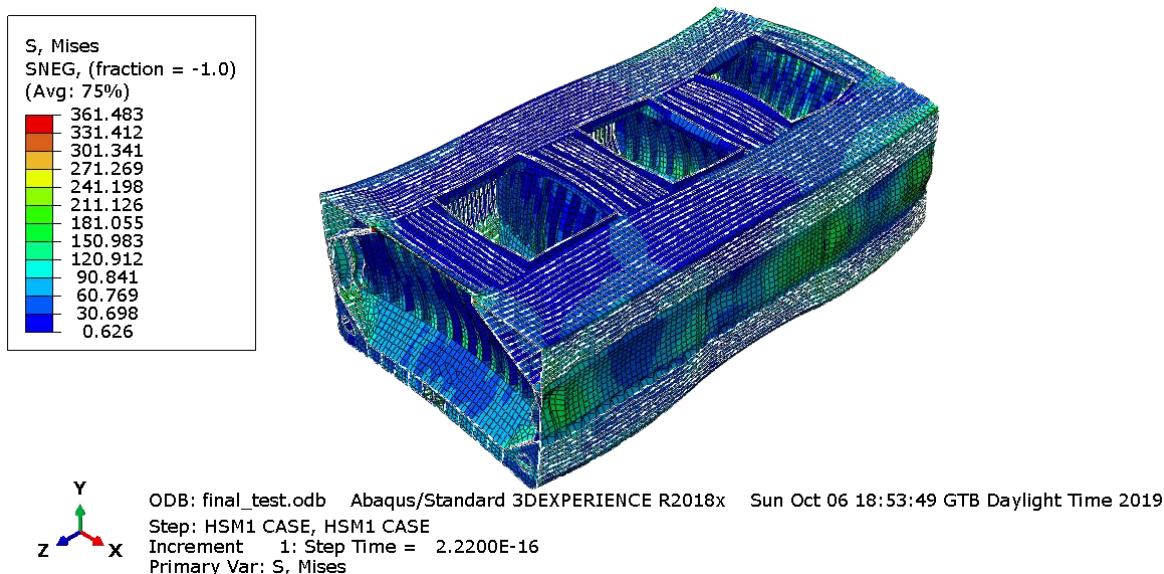
Πίνακας 7.12: Χαρακτηριστικά υπολογιστή επίλυσης του αριθμητικού προβλήματος

Processor	Intel® Core™ i5 – 7300HQ CPU @ 2.50GHz
Installed Memory (RAM)	8.00 GB
System Type	64 – bit Operating System, x64 – based processor

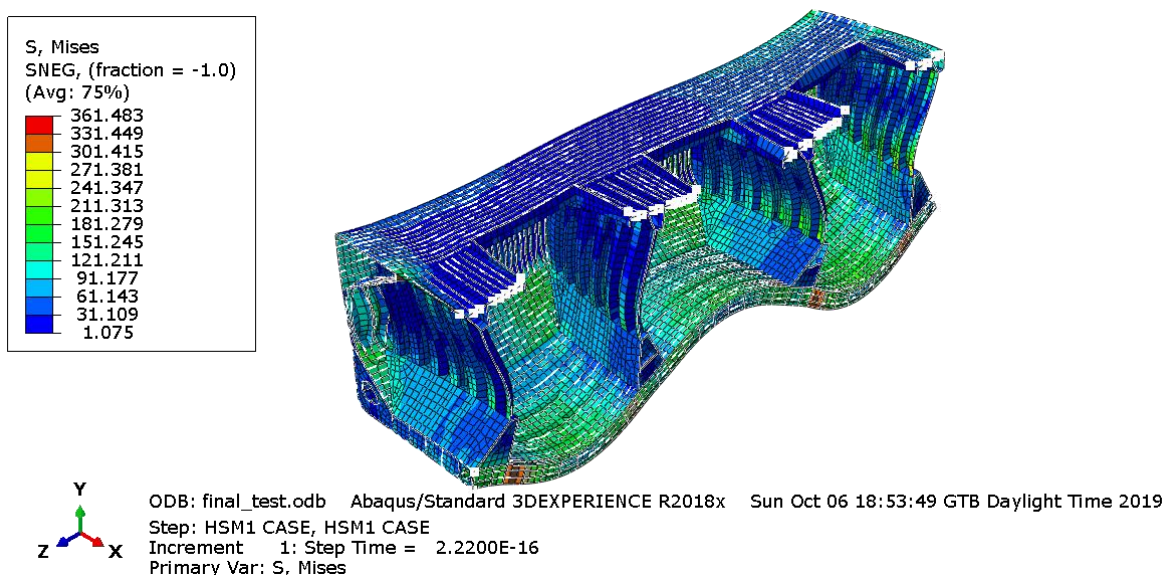
Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την επεξεργασία του αρχείου εισαγωγής (Input Processing) ήταν 10.4 Sec, ενώ ο χρόνος που απαιτήθηκε για την αριθμητική επίλυση ήταν 18.6 Sec. Συνολικά λοιπόν η διαδικασία επίλυσης διήρκεσε 29 Sec, ενώ η απαίτηση μνήμης ήταν 201 MB.

7.5 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

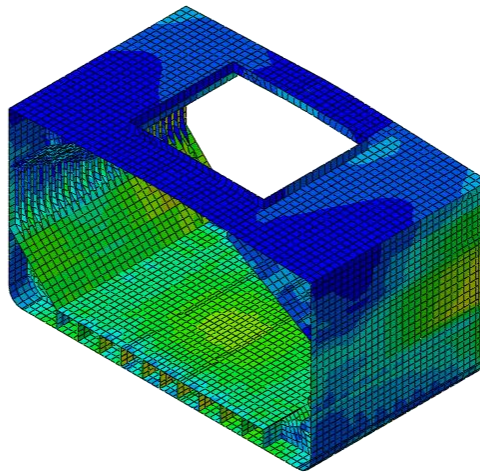
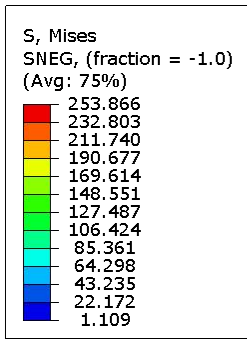
Στο σημείο αυτό παρουσιάζεται η απόκριση του μοντέλου τριών αμπαριών σε επίπεδο αναπτυσσόμενων τάσεων. Σημειώνεται ότι η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται μόνο για το μεσαίο κύτος. Ωστόσο στα σχήματα (7.52) και (7.53) παρουσιάζεται η ανάλυση του πλήρους μοντέλου με την παρουσίαση της ισοδύναμης τάσης Von Mises. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση είναι $R_y = 235/k$ (nominal yield stress), η οποία για χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής (ST315), λαμβάνει την τιμή $R_y = 301 \text{ MPa}$. Πιο αναλυτικά, στα σχήματα (7.54) έως (7.65) παρουσιάζεται η απόκριση αποκλειστικά για την κατασκευή του μεσαίου κύτους. Σε αυτήν την περιοχή αξιολόγησης, ελέγχονται τα όλα τα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία και τα κύρια στοιχεία ενίσχυσης (PSM). Για τα ελάσματα (Shell Elements) ελέγχεται η ισοδύναμη τάση Von Mises, ενώ για τα ενισχυτικά (Beam Elements), ελέγχεται η αξονική τάση (Beam Axial Stress).



Σχήμα 7.52: Συνολική απόκριση μοντέλου (deformed) – ισοδύναμη τάση Mises

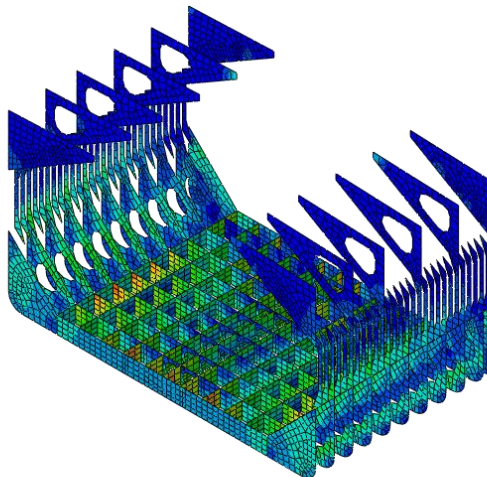
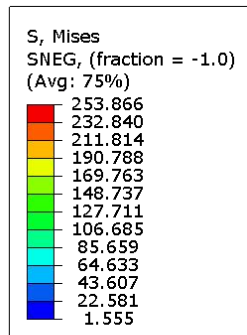


Σχήμα 7.53: Συνολική απόκριση μοντέλου (deformed) – ισοδύναμη τάση Mises (Cut View)



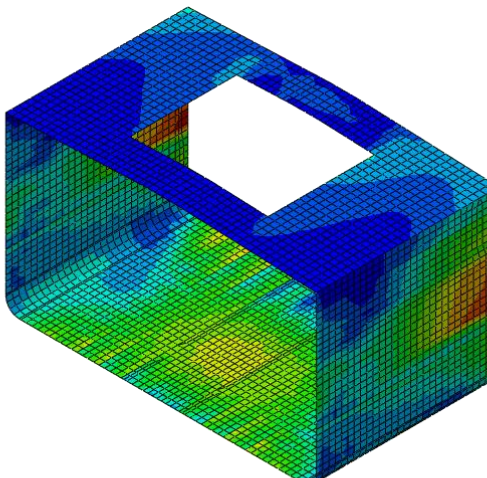
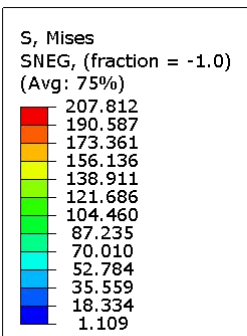
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.54: Απόκριση μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises, με μέγιστη τιμή 254 MPa



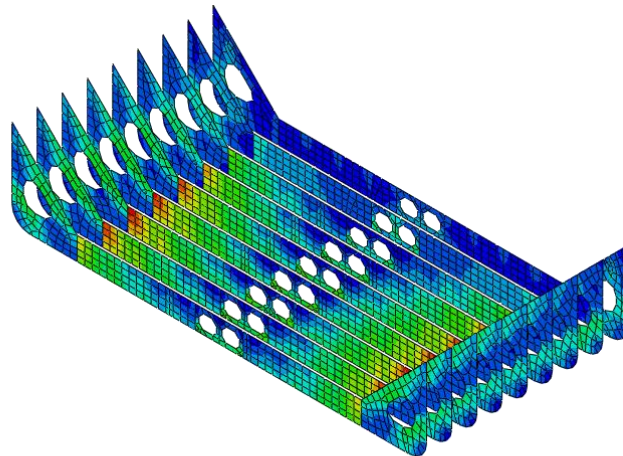
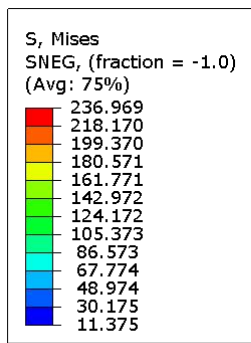
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.55: Απόκριση εσωτερικής κατασκευής μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



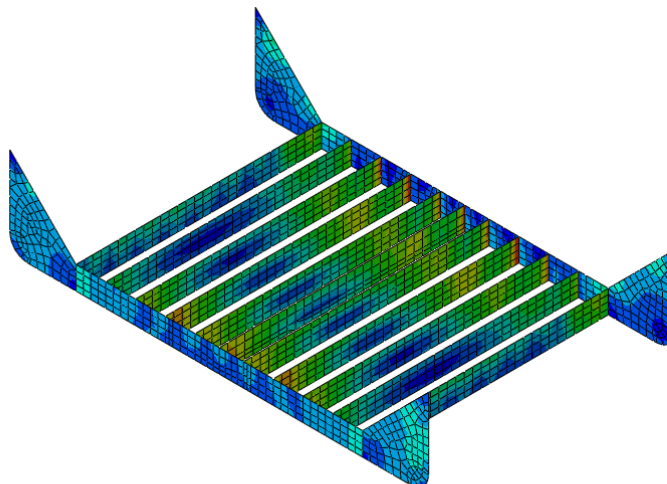
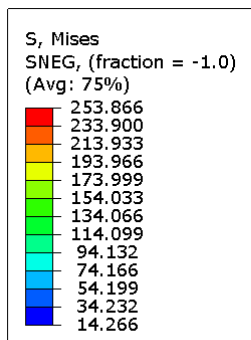
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.56: Απόκριση εξωτερικού περιβλήματος μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



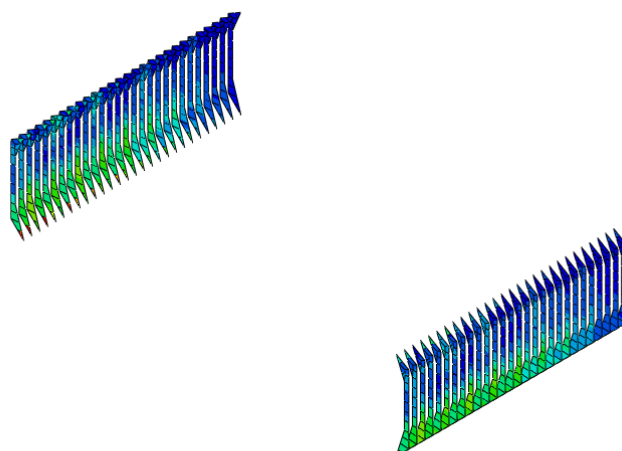
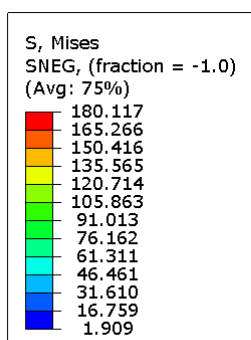
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.57: Απόκριση εδρών (floors) μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



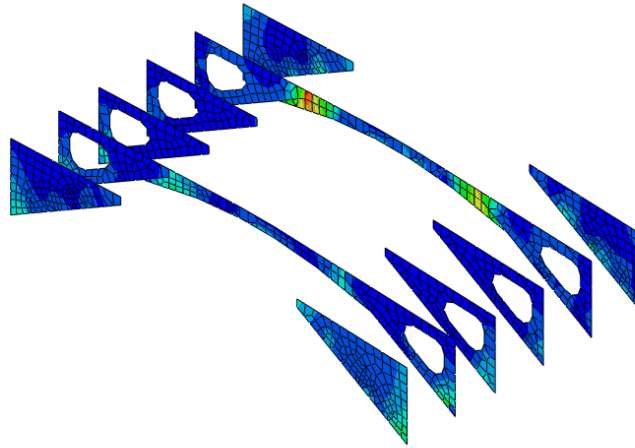
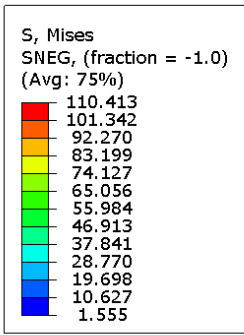
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.58: Απόκριση σταθμίδων (girders) μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



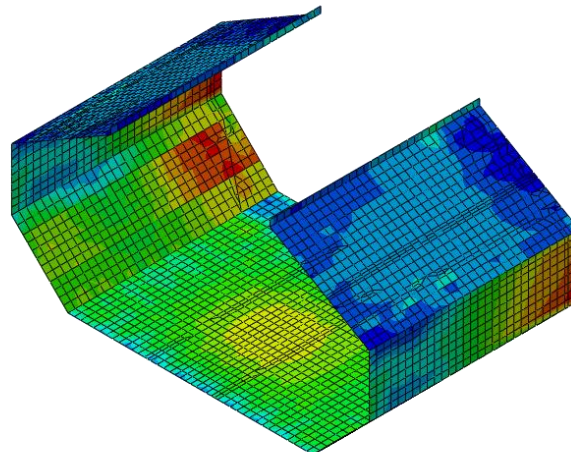
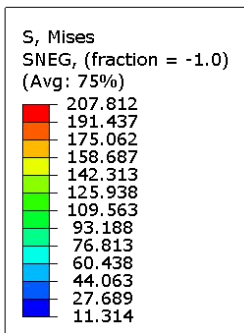
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.59: Απόκριση Side Frames μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



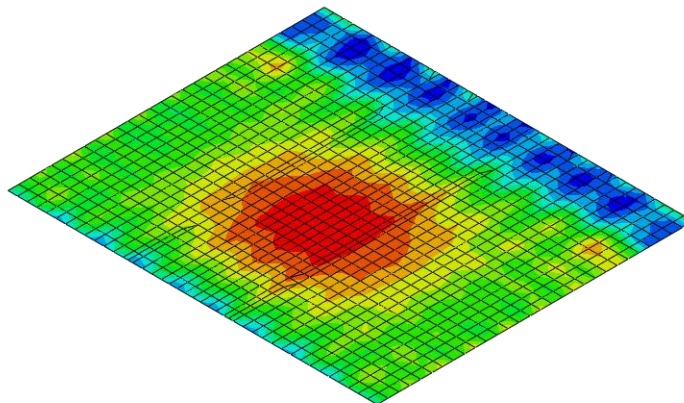
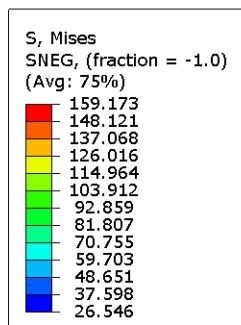
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.60: Απόκριση διαφραγμάτων (Webs) μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



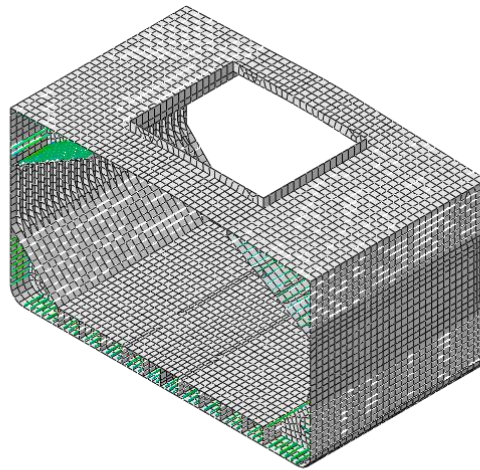
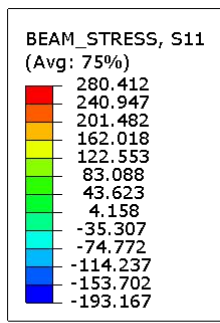
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.61: Απόκριση εσωτερικού περιβλήματος χώρου φορτίου μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



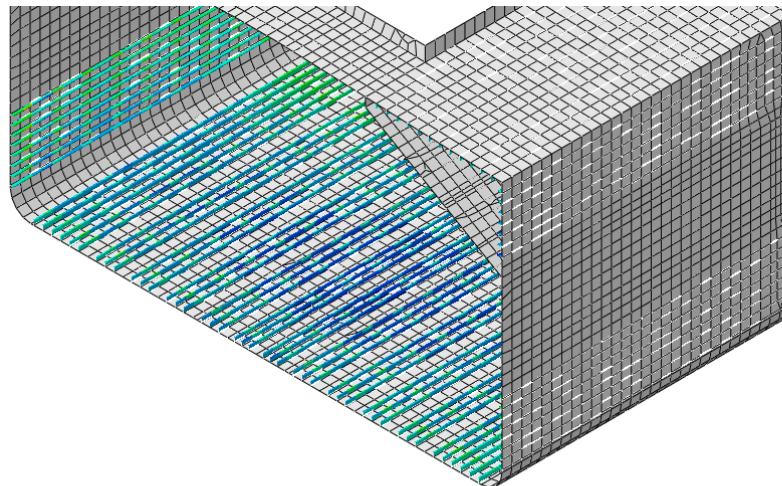
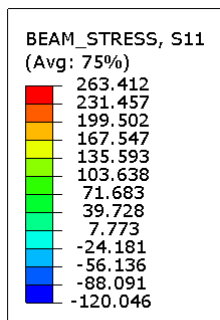
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
Primary Var: S, Mises

Σχήμα 7.62: Απόκριση εσωτερικού πυθμένα μεσαίου κύτους (undeformed) - ισοδύναμη τάση Mises



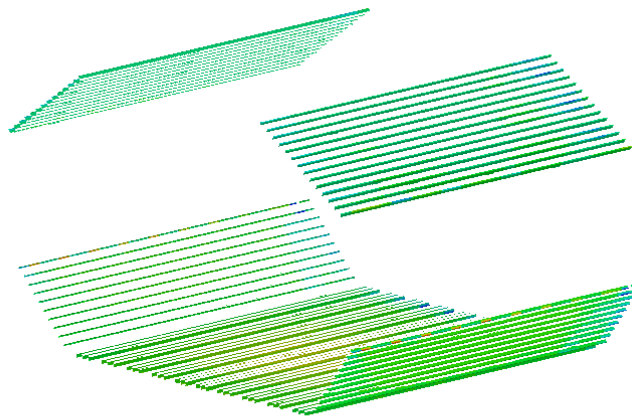
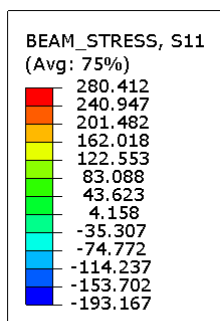
ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
 Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
 Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
 Primary Var: BEAM_STRESS, S11

Σχήμα 7.63: Απόκριση ενισχυτικών μεσαίου κύτους (undeformed) – Αξονική Τάση με μέγιστη τιμή 280 MPa



ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
 Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
 Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
 Primary Var: BEAM_STRESS, S11

Σχήμα 7.64: Απόκριση ενισχυτικών εξωτερικού περιβλήματος (undeformed) – Αξονική Τάση Axial Stress

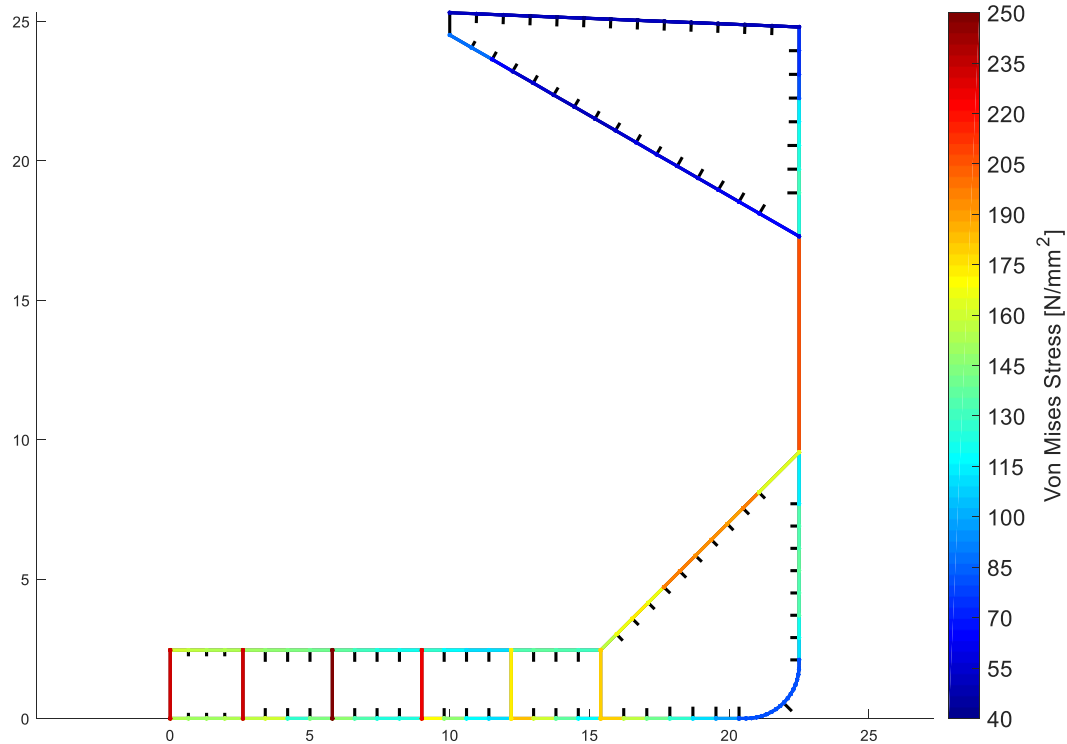


ODB: final_test.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2018x Sun Oct 06 18:53:49 GTB Daylight Time 2019
 Step: HSM1 CASE, HSM1 CASE
 Increment 1: Step Time = 2.2200E-16
 Primary Var: BEAM_STRESS, S11

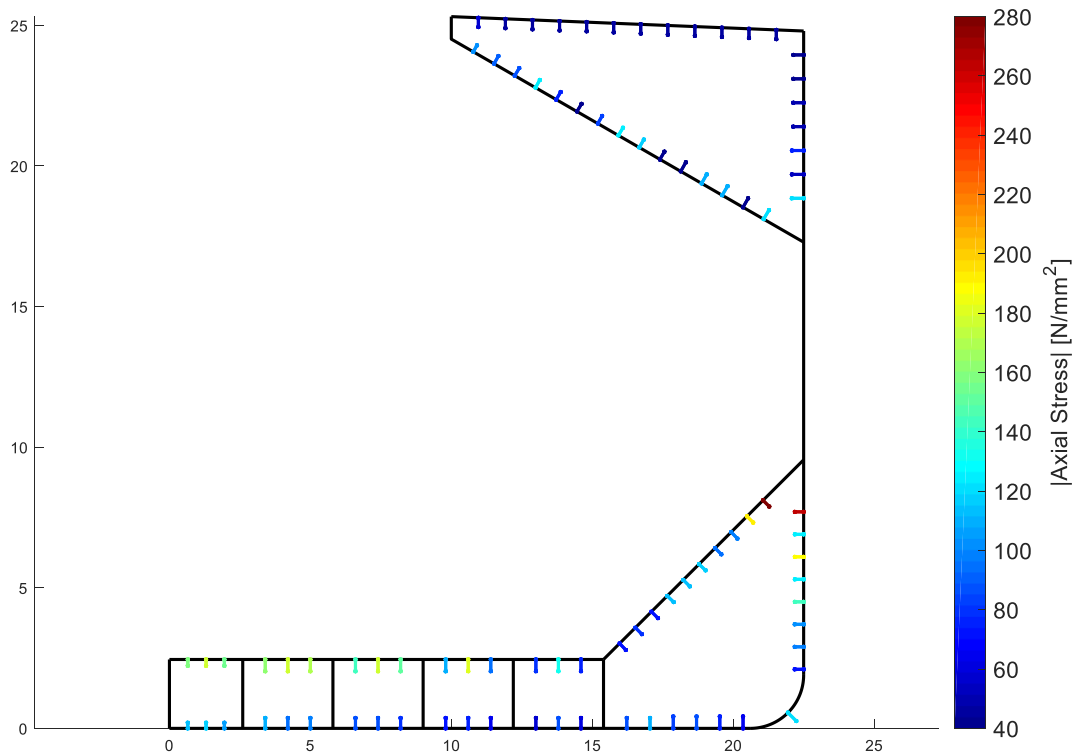
Σχήμα 7.65: Απόκριση ενισχυτικών εσωτερικού περιβλήματος (undeformed) – Αξονική Τάση Axial Stress

7.5.1 Έλεγχος Διαμήκων Κατασκευαστικών Στοιχείων

Με βάση την απόκριση του μεσαίου κύτους, ο έλεγχος επικεντρώνεται στα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία και συνοψίζονται οι δυσμενέστερες τιμές που προέκυψαν κατά το μήκος του. Συγκεκριμένα στα παρακάτω σχήματα συνοψίζεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση Von Mises για τα ελάσματα και η μέγιστη αξονική τάση για τα ενισχυτικά (σε απόλυτη τιμή) σε περιβάλλον MATLAB.

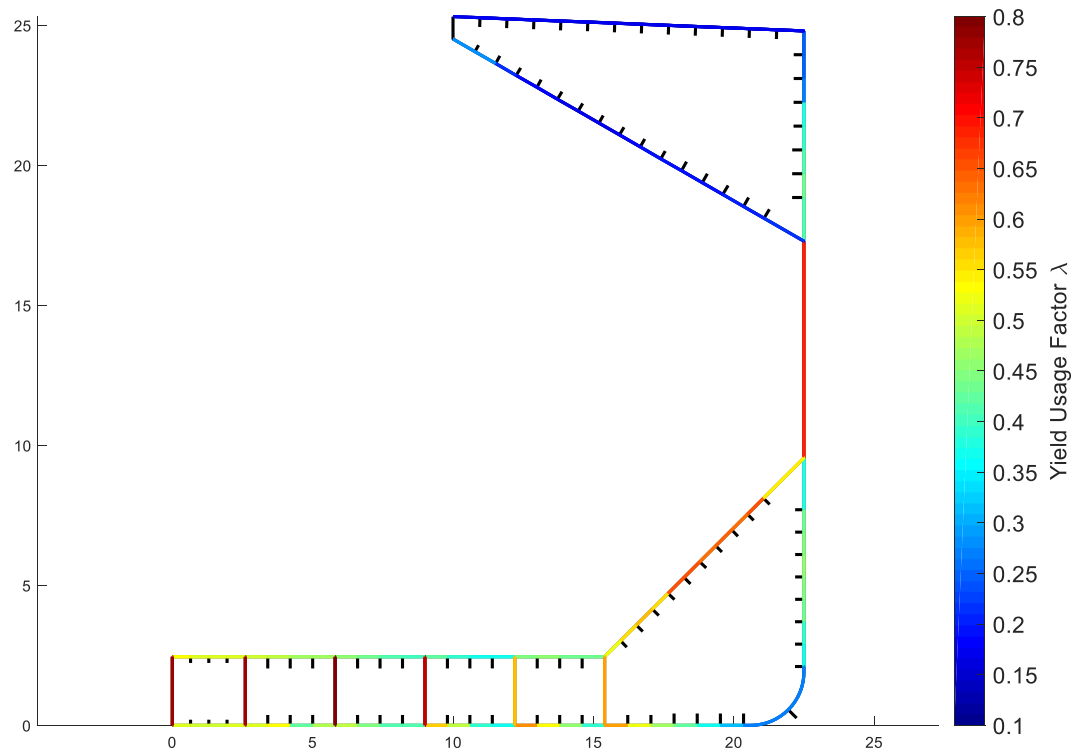


Σχήμα 7.66: Μέγιστη Ισοδύναμη τάση Von Mises για τα διαμήκη ελάσματα κατά μήκος του μεσαίου κύτους



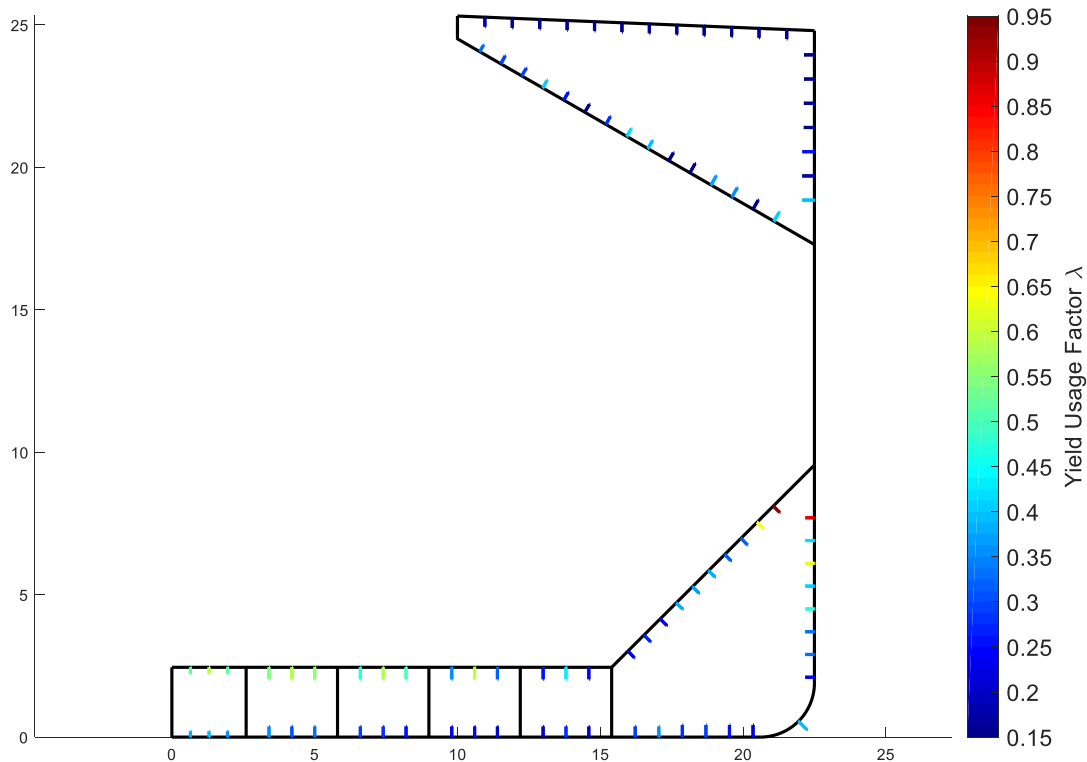
Σχήμα 7.67: Μέγιστη Αξονική τάση για τα διαμήκη ενισχυτικά κατά μήκος του μεσαίου κύτους

Με βάση τα παραπάνω και την ονομαστική τάση διαρροής $R_y = 301 \text{ MPa}$, προκύπτει ο συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής (Yield Usage Factor) λ για τα ελάσματα και τα ενισχυτικά.



Σχήμα 7.68: Συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής για τα ελάσματα $\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y}$ με μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή

$\lambda_{perm} = 1$. Παρατηρείται ότι όλα τα στοιχεία έχουν τιμή $\lambda_y < 1$



Σχήμα 7.69: Συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής για τα ενισχυτικά $\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y}$ με μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή

$\lambda_{perm} = 1$. Παρατηρείται ότι όλα τα στοιχεία έχουν τιμή $\lambda_y < 1$

7.5.2 Σχόλια - Συμπεράσματα

Η απόκριση του μεσαίου κύτους, σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, βρίσκεται εντός της επιτρεπόμενης ονομαστικής τάσης που είναι ίση με 301 MPa. Συγκεκριμένα για τα ελάσματα, η μέγιστη ισοδύναμη αναπτυσσόμενη τάση Von Mises προέκυψε 254 MPa στις σταθμίδες του διπυθμένου, ενώ για τα ενισχυτικά, η μέγιστη αξονική τάση προέκυψε 280 MPa. Όλα τα στοιχεία συνεπώς έχουν επαρκή αντοχή έναντι διαρροής.

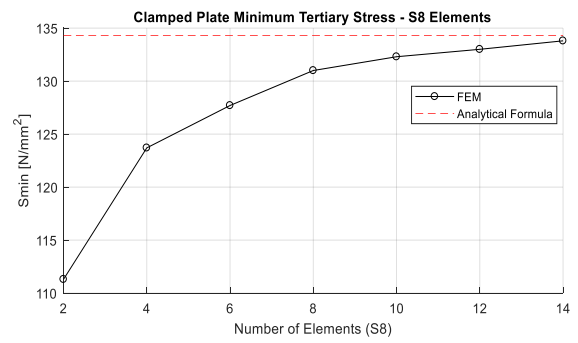
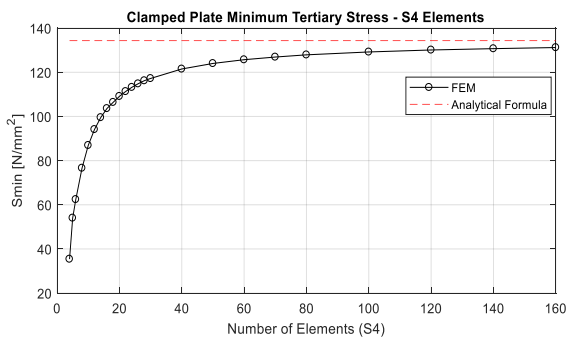
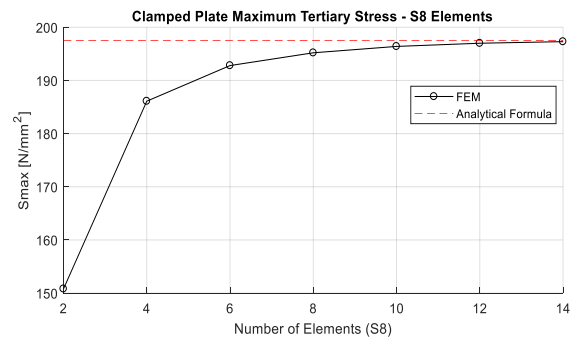
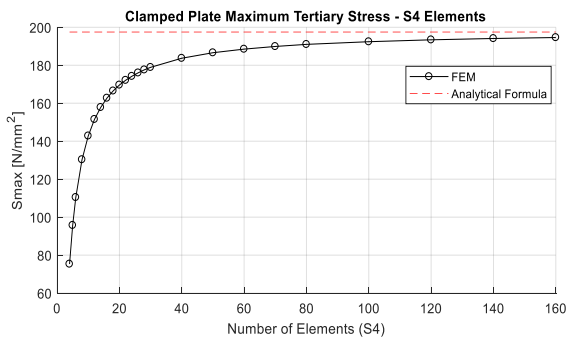
Η ανάλυση αυτή δείχνει ότι το συγκεκριμένο κύτος για την εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης, σε συνδυασμό με την επιλεχθείσα δυναμική κατάσταση φόρτισης, δεν παρουσιάζει κρίσιμα σημεία από πλευράς κατασκευαστικής σχεδίασης έναντι διαρροής. Σημειώνεται ότι το μεσαίο κύτος δεν είναι έμφορτο στην κατάσταση φόρτωσης που εξετάστηκε, ωστόσο οι καμπτικές ροπές που προέκυψαν μετά τις διορθώσεις (7.3.6) οδηγούν σε μεγάλη καταπόνηση λόγω κάμψης του μοντέλου. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την εκτενή χρήση χάλυβας υψηλής αντοχής (315 & 355 MPa) σε πλοία τύπου Capesize, σε σχέση με τον απλό ναυπηγικό χάλυβα (235 MPa).

Η παρούσα μελέτη περιορίστηκε στην ανάλυση με χρήση αραιού πλέγματος (coarse mesh), όπως προδιαγράφεται από τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (CSR2019) στο πρώτο στάδιο ελέγχου με τη χρήση Πεπερασμένων Στοιχείων. Χαρακτηριστικό αυτού του πλέγματος είναι η διακριτοποιημένη μορφή ενός στοιχειώδους ελάσματος (EPP) που ορίζεται μεταξύ δύο διαμήκων ενισχυτικών και δύο στοιχείων εγκάρσιας ενίσχυσης. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται ένα στοιχείο (shell element) ανάμεσα στα ενισχυτικά και συνολικά τρία στοιχεία μεταξύ των κυρίων εγκάρσιων στηρίξεων. Το πλέγμα αυτό ενδείκνυται για την αριθμητική εκτίμηση των πρωτεύουσών τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή ως αποτέλεσμα της κάμψης του μοντέλου ως δοκάρι.

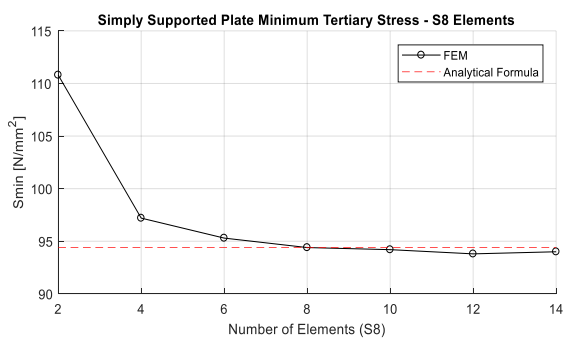
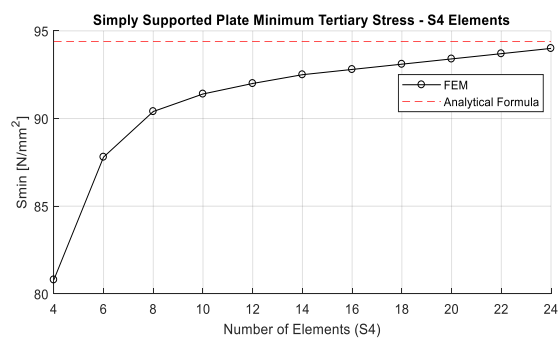
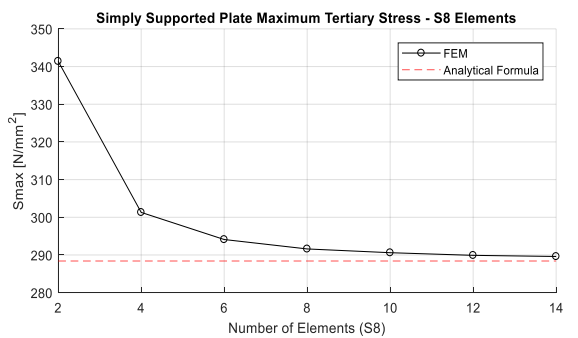
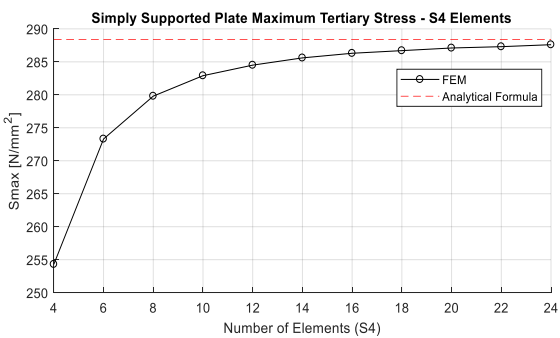
Ωστόσο, η αριθμητική προσέγγιση των τριτευσών τάσεων, ως αποτέλεσμα της τοπικής φόρτισης των στοιχειωδών ελασμάτων, απαιτεί τη χρήση πυκνότερου πλέγματος. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι απαιτούνται τουλάχιστον 8 στοιχεία (shell elements) κατά το πλάτος του στοιχειώδους ελάσματος μεταξύ δύο ενισχυτικών [2]. Μια τέτοια ανάλυση προδιαγράφεται και από τους κανόνες CSR στο εδάφιο {Pt1/Ch7/Sec3: Local Structural Strength Analysis}, με μέγεθος στοιχείων μικρότερο από 50 mm, σε συγκεκριμένες περιοχές όπου αναμένονται συγκεντρώσεις τάσεων (βλ. Κεφάλαιο 6).

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται παρακάτω διαγράμματα σύγκλισης για την περίπτωση ενός στοιχειώδους ελάσματος με συνοριακές συνθήκες (α) απλής έδρασης και (β) πάκτωσης. Η αναλυτική λύση βασίζεται στην μέθοδο του Navier και αφορά τη μέγιστη και ελάχιστη αναπτυσσόμενη τάση για τις εξεταζόμενες συνοριακές συνθήκες υπό ομοιόμορφα κατανεμημένη φόρτιση [3], [4] & [5]. Τα θεωρητικά αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αριθμητικά (ABAQUS) τόσο για τετρακομβικά S4 όσο και οκτακομβικά S8 στοιχεία.

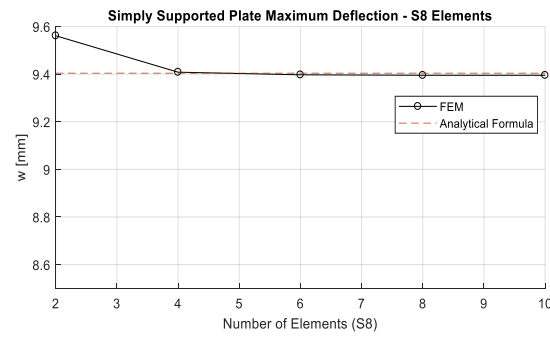
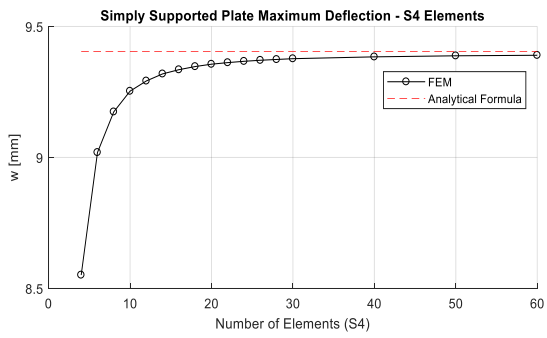
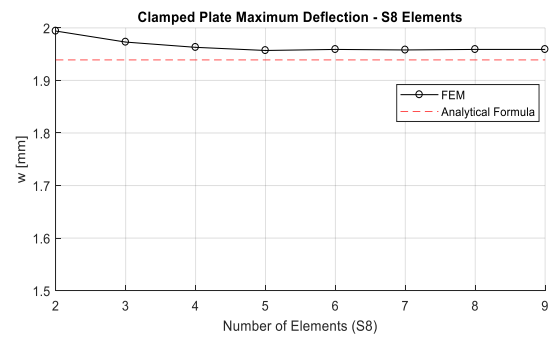
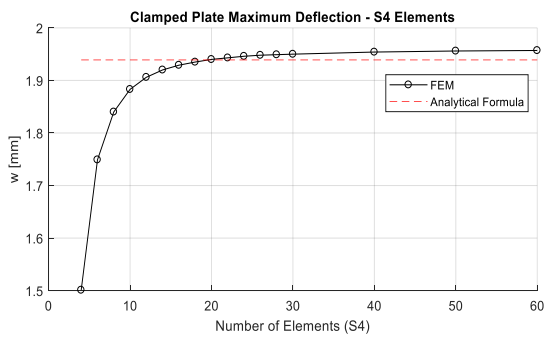
Στα διαγράμματα (7.70) & (7.71) παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων προσεγγίζονται καλύτερα οι θεωρητικές τιμές των τριτευσών τάσεων και του βέλους κάμψης. Στην περίπτωση πακτωμένης πλάκας (clamped) απαιτούνται σε γενικές γραμμές 120 τετρακομβικά στοιχεία και 14 οκτακομβικά για προσεγγίσεις με σφάλμα της τάξης του 2%, ενώ στην περίπτωση της απλής έδρασης (simply supported) απαιτούνται 22 τετρακομβικά στοιχεία και 12 οκτακομβικά. Για το βέλος κάμψης που φαίνεται στο διάγραμμα (7.72), η σύγκλιση επιτυγχάνεται σε μικρότερο αριθμό στοιχείων κατά το πλάτος, όπως θα αναμέναμε με βάση τη θεωρία της ελαστικότητας.



Σχήμα 7.70: Διαγράμματα σύγκλισης τριτευουσών τάσεων για κακτωμένο έλασμα με μήκος $\alpha = 2730 \text{ mm}$, πλάτος $b = 800 \text{ mm}$, πάχος $t = 18 \text{ mm}$ και ομοιόμορφη πίεση $P = 200 \text{ kN} / \text{m}^2$



Σχήμα 7.71: Διαγράμματα σύγκλισης τριτευουσών τάσεων για απλά εδρασημένο έλασμα με μήκος $\alpha = 2730 \text{ mm}$, πλάτος $b = 800 \text{ mm}$, πάχος $t = 18 \text{ mm}$ και ομοιόμορφη πίεση $P = 200 \text{ kN} / \text{m}^2$



Σχήμα 7.72: Διαγράμματα σύγκλισης μέγιστου βέλους κάμψη για έλασμα με μήκος $\alpha = 2730 \text{ mm}$, πλάτος $b = 800 \text{ mm}$, πάχος $t = 18 \text{ mm}$ και ομοιόμορφη πίεση $P = 200 \text{ kN} / \text{m}^2$ σε περίπτωση απλής έδρασης (α) και πάκτωσης (β)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε έλεγχος αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων της μέσης τομής για υπάρχον πλοίο τύπου Bulk Carrier 190,000 DWT, το οποίο κατασκευάστηκε προτού τεθούν σε ισχύ οι πρώτοι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες. Η μεθοδολογία ελέγχου αντοχής πραγματοποιήθηκε σε δύο επίπεδα:

1. Έλεγχος κριτηρίων διαστασιολόγησης (Prescriptive Requirements) διαμήκων ελασμάτων και ενισχυτικών ως προς τις γεωμετρικές ιδιότητες και τα απαιτούμενα πάχη σύμφωνα με τις παρακάτω απαιτήσεις:
 - ο περιγραφικές απαιτήσεις (Load-Based) για τον έλεγχο έναντι διαρροής
 - ο ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις (Minimum Requirements)
 - ο απαιτήσεις λυγερότητας (Slenderness Requirements)
 - ο ειδική απαίτηση ελάσματος λόγω αρπάγης (GRAB)
2. Σχεδιαστική επαλήθευση των κατασκευαστικών στοιχείων ενός κύτους (μοντέλο τριών αμπαριών) στην περιοχή της μέσης τομής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (**Direct Strength Analysis**), υπό δεδομένη φόρτιση (φόρτωση εναλλάξ σε συνδυασμό με δυναμική κατάσταση φόρτισης HSM-1).

8.1 Έλεγχος κριτηρίων διαστασιολόγησης

Τα κύρια συμπεράσματα που αντλήθηκαν από την ανάλυση που παρουσιάστηκαν στο **Κεφάλαιο 5** σχετικά με τα κριτήρια διαστασιολόγησης, είναι τα παρακάτω. Διαπιστώθηκε ότι η διατομή διαθέτει επαρκή ροπή αντίστασης για να παραλάβει τις ορθές τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης της γάστρας. Ωστόσο, όσον αφορά την τοπική αντοχή, διαπιστώθηκε ότι οι απαιτήσεις των CSR 2019 είναι πιο αυστηρές από τις απαιτήσεις της κλάσης με την οποία κατασκευάστηκε το υπό μελέτη πλοίο, καθώς σε πολλά σημεία της κατασκευής οι καθαρές προσφερόμενες διαστάσεις (με βάση το ποσοστό διάβρωσης που προδιαγράφει ο CSR) δεν καλύπτουν τις περιγραφικές απαιτήσεις.

Για τον έλεγχο των κριτηρίων διαστασιολόγησης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MARS2000 του Γαλλικού Νηογνώμονα, ενώ αναπτύχθηκε κώδικας σε περιβάλλον MATLAB για τον παραμετρικό έλεγχο διαστασιολόγησης διαμήκων ελασμάτων και ενισχυτικών μέσης τομής για τυπικές σχεδιάσεις Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης είναι σε θέση να λάβει γρήγορα συγκριτικά αποτελέσματα σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων με χρωματική κωδικοποίηση (βλ. Κεφάλαιο 5). Η ανάπτυξη του κώδικα μπορεί να βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, καθώς επικεντρώνεται στο back-end developing λογισμικού που λειτουργεί όπως το MARS200, αλλά παρουσιάζει επιτυχία σε επίπεδο επαλήθευσης υπολογισμών.

Όσον αφορά τις **περιγραφικές απαιτήσεις – Load Based** (σχήμα 5.102), τα πάχη των ελασμάτων του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate κρίθηκαν ανεπαρκή, ενώ για τα περισσότερα ενισχυτικά, η ροπή αντίστασης κρίθηκε επίσης ανεπαρκής, σε αντίθεση με την απαίτηση για πάχος κορμού η οποία καλύπτεται σε κάθε περίπτωση. Για τον έλεγχο αυτών των απαιτήσεων εξετάστηκαν διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης ανάλογα με την περιοχή στην οποία βρίσκεται το κάθε στοιχείο, τόσο για στατικό (S) όσο και για δυναμικό (S+D) σενάριο φόρτισης.

Συγκεκριμένα, για τα στοιχεία του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate εξετάστηκαν καταστάσεις ομογενούς φόρτωσης, φόρτωσης εναλλάξ και κατάσταση κατάκλυσης, από τις οποίες δυσμενέστερη προέκυψε τελικά η κατάσταση φόρτωσης εναλλάξ. Για τα στοιχεία του εξωτερικού περιβλήματος εξετάστηκε κατάσταση ομογενούς φόρτωσης, ενώ για τα στοιχεία του ελάσματος της άνω πλευρικής δεξαμενής έρματος, εξετάστηκε η κατάσταση ερματισμού.

Από την ανάλυση αυτή διαπιστώθηκε ότι για κάθε κατάσταση φόρτωσης που εξετάστηκε, δυσμενέστερο σενάριο ήταν το δυναμικό με διαφορετική κρίσιμη δυναμική κατάσταση ανά περίπτωση, ενώ το στατικό σενάριο δεν κρίθηκε δυσμενές, έτσι ώστε να επηρεάσει τη διαστασιολόγηση.

Όσον αφορά τις **ελάχιστες εμπειρικές απαιτήσεις** (σχήμα 5.104), διαπιστώθηκε ότι τα περισσότερα ενισχυτικά δεν καλύπτουν το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος κορμού ή/και φλάντζας, σε αντίθεση με τα ελάσματα τα οποία με εξαίρεση μόνο σε μια περιοχή του Hopper Plate καλύπτουν το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος. Όσον αφορά τις **απαιτήσεις λυγηρότητας** (σχήμα 5.105), διαπιστώθηκε ότι όλα τα ελάσματα καλύπτουν τις σχετικές απαιτήσεις, ωστόσο ορισμένα ενισχυτικά παρουσιάζουν ανεπάρκειες σχετικά με το πάχος κορμού και το πλάτος φλάντζας. Τέλος, το **κριτήριο αρπάγης GRAB [X]** (σχήμα 5.106) που αφορά τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα και του Hopper Plate διαπιστώθηκε ότι αποτελεί αυστηρή απαίτηση, καθώς τα εν λόγω στοιχεία δεν ικανοποιούν τη σχετική απαίτηση σε πάχος.

8.2 Σχεδιαστική επαλήθευση με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Μια πλήρης μελέτη για τον έλεγχο αντοχής, σύμφωνα με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες, περιλαμβάνει υποχρεωτικά την σχεδιαστική επαλήθευση από πλευράς κατασκευαστικής επάρκειας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Άλλωστε στην περίπτωση πλοίων Bulk Carrier με μήκος μεγαλύτερο από 150 m, η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των διαστάσεων κύριων στοιχείων (σταθμίδες, έδρες, διαφράγματα νομέων) που βρίσκονται εντός της περιοχής φορτίου (Cargo Hold Region) για τα οποία δεν υπάρχουν καθορισμένοι κανόνες σχεδίασης, πέραν των ελάχιστων εμπειρικών απαιτήσεων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, η μελέτη επικεντρώθηκε στον υπολογισμό απόκρισης (**stress assessment**) μοντέλου τριών αμπαριών στην περιοχή της μέσης τομής. Η μοντελοποίηση αφορούσε το No. 4 Cargo Hold του ιδίου Bulk Carrier και πραγματοποιήθηκε στο υπολογιστικό περιβάλλον ABAQUS/CAE. Η ανάλυση αυτή αποτελεί πρωταρχικό στάδιο ελέγχου αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η διπλωματική εργασία της Κ. Μπαλωτή [6] για τον έλεγχο αντοχής έναντι λυγισμού αποτέλεσε αναφορά για την παρούσα μελέτη.

Πιο συγκεκριμένα ανάλυση αφορούσε τη μελέτη κατάστασης φόρτωσης εναλλάξ στο μέγιστο βύθισμα αντοχής με το υπό εξέταση αμπάρι να είναι άδειο, σε συνδυασμό με τη δυναμική κατάσταση φόρτωσης HSM-1 (sagging). Ο συνδυασμός των δύο αυτών καταστάσεων καθορίζει τις τοπικές φορτίσεις, εξωτερικές (θάλασσα) και εσωτερικές (φορτίο) σε όλα τα σημεία της κατασκευής, καθώς και τις επιθυμητές φορτίσεις της γάστρας (κατακόρυφη καμπτική ροπή και διατμητική δύναμη).

Η απόκριση του μεσαίου κύτους βρέθηκε εντός της επιτρεπόμενης τάσης (301 MPa), με μέγιστη αναπτυσσόμενη ισοδύναμη τάση Von Mises της τάξης των 254 MPa. Παρόλο που το συγκεκριμένο κύτος δεν είναι έμφροτο όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εντούτοις παρουσιάζει υψηλές τιμές τάσης, κυρίως στην κατασκευή του διπυθμένου. Όσον αφορά τα ενισχυτικά, η αξονική τάση σε όλα τα στοιχεία προκύπτει μικρότερη από την επιτρεπόμενη, με μέγιστη τάση 280 MPa στον εσωτερικό πυθμένα.

Ας σημειωθεί, ότι η διαδικασία ελέγχου αντοχής με Πεπερασμένα Στοιχεία βάσει των CSR, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα, καθώς απαιτεί εξοικείωση με το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται. Η επίλυση του στατικού μοντέλου στο εμπορικό πακέτο ABAQUS CAE πραγματοποιείται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα. Ωστόσο το κομμάτι της προ-επεξεργασίας, με την εισαγωγή των φορτίσεων και τις διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών, καθώς και το κομμάτι της μετέπειτα επεξεργασίας με την ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι ιδιαίτερα επίπονη για τον μελετητή.

8.3 Μελλοντική Εργασία

Η μελέτη αντοχής που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αφορά τον έλεγχο διαστασιολόγησης της μέσης τομής μέσω κριτηρίων αλλά και την σχεδιαστική επαλήθευση με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων για Bulk Carrier τύπου Capesize με μεταφορική 190,000 DWT. Μια άμεση επέκταση της εργασίας αυτής μπορεί να αποτελέσει η χρήση των εργαλείων που αναπτύχθηκαν **για άλλα μεγέθη πλοίων** Bulk Carrier είτε μονού είτε διπλού τοιχώματος. Μια τέτοια επέκταση θα μπορούσε να επιπλέον να περιλαμβάνει και τον έλεγχο αντοχής **δεξαμενόπλοιων** που καλύπτονται από τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες. Αυτό απαιτεί την μοντελοποίηση σχεδιαστικών φορτίσεων που προδιαγράφουν οι κανόνες ειδικά για τα πλοία αυτά που υπάγονται σε πρόσθετες απαιτήσεις.

Ο έλεγχος αντοχής επικεντρώθηκε στη μορφή αστοχία που αφορά τη διαρροή τόσο τοπικών στοιχείων, όσο και τη διαρροή του πλοίου ως δοκάρι. Ωστόσο, οι κανονισμοί περιλαμβάνουν πληθώρα κριτηρίων ελέγχου τοπικών στοιχείων **έναντι λυγισμού και κόπωσης**, ενώ για τη γάστρα τον έλεγχο μέγιστης αντοχής (Ultimate Strength). Προτείνεται λοιπόν, η προσθήκη των κριτηρίων διαστασιολόγησης έναντι λυγισμού και κόπωσης στον ήδη ανεπτυγμένο κώδικα MATLAB. Για τον έλεγχο μέγιστης αντοχής θα μπορούσε να δημιουργηθεί επίσης ένα ειδικό module.

Μία άλλη πορεία έρευνας, μπορεί να αποτελέσει η προσαρμογή του λογισμικού αυτού, που θα αναπτύσσεται από το Εργαστήριο του Τομέα Θαλασίων Κατασκευών, με στόχο τη **σχεδίαση μέσης τομής** σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κοινών κατασκευαστικών κανόνων.

Όσον αφορά τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, ενδιαφέρον παρουσιάζει τόσο η μελέτη περισσότερων καταστάσεων φόρτωσης στα πλαίσια αστοχίας έναντι διαρροής, λυγισμού και κόπωσης. Τέλος, για μελλοντική εργασία προτείνεται η ανάλυση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων σύμφωνα με τους CSR με τη χρήση εξειδικευμένων ναυπηγικών προγραμμάτων όπως το MAESTRO, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν είναι πιο εύχρηστο για τέτοιες μελέτες, σε σχέση με ένα πιο γενικό υπολογιστικό πακέτο όπως το ABAQUS.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Αναλυτικά Δεδομένα Στοιχείων Μέσης Τομής

Πίνακας 1: Στοιχειώδη Ελάσματα Εξωτερικού Πυθμένα

	a_panel	b_panel	tp_gross	tc	tp_net	ReH	γ_LCP	z_LCP	TRNSV
EPP_1	1.365	0.65	19.5	3	16.5	315	0.65	0	0
EPP_2	1.365	0.65	19.5	3	16.5	315	1.3	0	0
EPP_3	1.365	0.65	19.5	3	16.5	315	1.95	0	0
EPP_4	1.365	0.65	19.5	3	16.5	315	2.6	0	0
EPP_5	2.73	0.8	19.5	3	16.5	315	3.4	0	0
EPP_6	2.73	0.8	19.5	3	16.5	315	4.2	0	0
EPP_7	2.73	0.8	19.5	3	16.5	315	5	0	0
EPP_8	2.73	0.8	19.5	3	16.5	315	5.8	0	0
EPP_9	2.73	0.8	19	3	16	315	6.6	0	0
EPP_10	2.73	0.8	19	3	16	315	7.4	0	0
EPP_11	2.73	0.8	19	3	16	315	8.2	0	0
EPP_12	2.73	0.8	19	3	16	315	9	0	0
EPP_13	2.73	0.8	18.5	3	15.5	315	9.8	0	0
EPP_14	2.73	0.8	18.5	3	15.5	315	10.6	0	0
EPP_15	2.73	0.8	18.5	3	15.5	315	11.4	0	0
EPP_16	2.73	0.8	18.5	3	15.5	315	12.2	0	0
EPP_17	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	13	0	0
EPP_18	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	13.8	0	0
EPP_19	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	14.6	0	0
EPP_20	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	15.4	0	0
EPP_21	2.73	0.825	17.5	3	14.5	315	16.225	0	0
EPP_22	2.73	0.825	17.5	3	14.5	315	17.05	0	0
EPP_23	2.73	0.825	17.5	3	14.5	315	17.875	0	0
EPP_24	2.73	0.825	17.5	3	14.5	315	18.7	0	0
EPP_25	2.73	0.825	17.5	3	14.5	315	19.525	0	0
EPP_26	2.73	0.825	17.5	3	14.5	315	20.35	0	0

Πίνακας 2: Στοιχειώδη Ελάσματα Πλευρικού Τοιχώματος

	a_panel	b_panel	tp_gross	tc	tp_net	ReH	y_LCP	z_LCP	TRNSV
EPP_1	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	2.1	0
EPP_2	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	2.9	0
EPP_3	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	3.7	0
EPP_4	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	4.5	0
EPP_5	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	5.3	0
EPP_6	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	6.1	0
EPP_7	2.73	0.8	17.5	3	14.5	315	22.5	6.9	0
EPP_8	1.85	0.91	19.5	3.5	16	315	22.5	7.7	1
EPP_9	7.74	0.91	19.5	4	15.5	315	22.5	9.55	1
EPP_10	1.56	0.91	19.5	3.5	16	315	22.5	17.29	1
EPP_11	5.46	0.85	17.5	3.5	14	315	22.5	18.85	0
EPP_12	5.46	0.85	17.5	3.5	14	315	22.5	19.7	0
EPP_13	5.46	0.85	17.5	3.5	14	315	22.5	20.55	0
EPP_14	5.46	0.85	17.5	3.5	14	315	22.5	21.4	0
EPP_15	5.46	0.85	24	3.5	20.5	315	22.5	22.25	0
EPP_16	5.46	0.85	24	3.5	20.5	355	22.5	23.1	0
EPP_17	5.46	0.85	24	3.5	20.5	355	22.5	23.95	0

Πίνακας 3: Στοιχειώδη Ελάσματα Καταστρώματος

	a_panel	b_panel	tp_gross	tc	tp_net	ReH	y_LCP	z_LCP	TRNSV
EPP_1	5.46	0.96	34	4	30	355	10.96	25.27	1
EPP_2	5.46	0.96	34	4	30	355	11.92	25.23	0
EPP_3	5.46	0.96	34	4	30	355	12.88	25.19	0
EPP_4	5.46	0.96	34	4	30	355	13.84	25.15	0
EPP_5	5.46	0.96	34	4	30	355	14.8	25.12	0
EPP_6	5.46	0.96	34	4	30	355	15.76	25.08	0
EPP_7	5.46	0.96	34	4	30	355	16.72	25.04	0
EPP_8	5.46	0.96	34	4	30	355	17.68	25	0
EPP_9	5.46	0.96	34	4	30	355	18.64	24.96	0
EPP_10	5.46	0.96	34	4	30	355	19.6	24.92	0
EPP_11	5.46	0.96	34	4	30	355	20.56	24.88	0
EPP_12	5.46	0.97	34	4	30	355	21.53	24.84	0
EPP_13	5.46	0.97	34	4	30	355	22.5	24.8	0

Πίνακας 4: Στοιχειώδη Ελάσματα Κάτω Πλευρικής Δεξαμενής

	a_panel	b_panel	tp_gross	tc	tp_net	ReH	y_LCP	z_LCP	TRNSV
EPP_1	1.365	0.8	21	5.5	15.5	315	15.4	2.45	0
EPP_2	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	15.97	3.02	0
EPP_3	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	16.53	3.58	0
EPP_4	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	17.1	4.15	0
EPP_5	2.73	0.8	17	5.5	11.5	315	17.66	4.71	0
EPP_6	2.73	0.8	17	5.5	11.5	315	18.23	5.28	0
EPP_7	2.73	0.8	17	5.5	11.5	315	18.79	5.84	0
EPP_8	2.73	0.8	16	5.5	10.5	315	19.36	6.41	0
EPP_9	2.73	0.8	16	5.5	10.5	315	19.93	6.98	0
EPP_10	0.91	0.8	16	5.5	10.5	315	20.49	7.54	0
EPP_11	2.041	0.91	20	5.5	14.5	315	21.06	8.11	1

Πίνακας 5: Στοιχειώδη Ελάσματα Εσωτερικού Πυθμένα

	a_panel	b_panel	tp_gross	tc	tp_net	ReH	y_LCP	z_LCP	TRNSV
EPP_1	1.365	0.65	21	5.5	15.5	315	0.65	2.45	0
EPP_2	1.365	0.65	21	5.5	15.5	315	1.3	2.45	0
EPP_3	1.365	0.65	21	5.5	15.5	315	1.95	2.45	0
EPP_4	1.365	0.65	21	5.5	15.5	315	2.6	2.45	0
EPP_5	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	3.4	2.45	0
EPP_6	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	4.2	2.45	0
EPP_7	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	5	2.45	0
EPP_8	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	5.8	2.45	0
EPP_9	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	6.6	2.45	0
EPP_10	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	7.4	2.45	0
EPP_11	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	8.2	2.45	0
EPP_12	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	9	2.45	0
EPP_13	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	9.8	2.45	0
EPP_14	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	10.6	2.45	0
EPP_15	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	11.4	2.45	0
EPP_16	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	12.2	2.45	0
EPP_17	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	13	2.45	0
EPP_18	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	13.8	2.45	0
EPP_19	2.73	0.8	21	5.5	15.5	315	14.6	2.45	0
EPP_20	1.365	0.8	21	5.5	15.5	315	15.4	2.45	0

Πίνακας 6: Στοιχειώδη Ελάσματα Άνω Πλευρικής Δεξαμενής

	a_panel	b_panel	tp_gross	tc	tp_net	ReH	y_LCP	z_LCP	TRNSV
EPP_1	0.91	0.9	20	4	16	355	10.78	24.06	1
EPP_2	5.46	0.85	20	4	16	355	11.52	23.64	0
EPP_3	5.46	0.85	20	4	16	355	12.25	23.21	0
EPP_4	5.46	0.85	17	4	13	355	12.99	22.79	0
EPP_5	5.46	0.85	17	4	13	355	13.72	22.36	0
EPP_6	5.46	0.85	17	4	13	355	14.46	21.94	0
EPP_7	5.46	0.85	17	4	13	355	15.2	21.51	0
EPP_8	5.46	0.85	15.5	3.5	12	315	15.93	21.09	0
EPP_9	5.46	0.85	15.5	3.5	12	315	16.67	20.66	0
EPP_10	5.46	0.85	15.5	3.5	12	315	17.4	20.23	0
EPP_11	5.46	0.85	15.5	3.5	12	315	18.14	19.81	0
EPP_12	5.46	0.85	15	3.5	11.5	315	18.88	19.38	0
EPP_13	5.46	0.85	15	3.5	11.5	315	19.61	18.96	0
EPP_14	5.46	0.85	15	3.5	11.5	315	20.35	18.53	0
EPP_15	0.91	0.85	15	3.5	11.5	315	21.08	18.11	1
EPP_16	1.636	0.91	18	3.5	14.5	315	22.5	17.29	1

Πίνακας 7: Ενταχιστικά Εξωτερικού Πυθμένα

	spacing	hw_net	tw_net	bf_net	tf_net	tp_net	lbdg	lshr	dshr	b_eff	ReH	Z_net	y_LCP	z_LCP	y_STRESS	z_STRESS
STIFF_1	0.65	200.75	16.5	0	0	16.5	1.365	1.04	0.22	0.273	315	207.08	0.65	0	0.65	0.201
STIFF_2	0.65	200.75	16.5	0	0	16.5	1.365	1.04	0.22	0.273	315	207.08	1.3	0	1.30	0.201
STIFF_3	0.65	200.75	16.5	0	0	16.5	1.365	1.04	0.22	0.273	315	207.08	1.95	0	1.95	0.201
STIFF_4	0.8	353	7	97	17	16.5	2.73	2.33	0.39	0.546	315	838.6	3.4	0	3.40	0.370
STIFF_5	0.8	353	7	97	17	16.5	2.73	2.33	0.39	0.546	315	838.6	4.2	0	4.20	0.370
STIFF_6	0.8	353	7	97	17	16.5	2.73	2.33	0.39	0.546	315	838.6	5	0	5.00	0.370
STIFF_7	0.8	353	7	97	17	16	2.73	2.33	0.39	0.546	315	836.47	6.6	0	6.60	0.370
STIFF_8	0.8	353	7	97	17	16	2.73	2.33	0.39	0.546	315	836.47	7.4	0	7.40	0.370
STIFF_9	0.8	353	7	97	17	16	2.73	2.33	0.39	0.546	315	836.47	8.2	0	8.20	0.370
STIFF_10	0.8	353	7	97	17	15.5	2.73	2.33	0.39	0.546	315	834.27	9.8	0	9.80	0.370
STIFF_11	0.8	353	7	97	17	15.5	2.73	2.33	0.39	0.546	315	834.27	10.6	0	10.60	0.370
STIFF_12	0.8	353	7	97	17	15.5	2.73	2.33	0.39	0.546	315	834.27	11.4	0	11.40	0.370
STIFF_13	0.8	353	7	97	17	14.5	2.73	2.33	0.38	0.546	315	829.64	13	0	13.00	0.370
STIFF_14	0.8	353	7	97	17	14.5	2.73	2.33	0.38	0.546	315	829.64	13.8	0	13.80	0.370
STIFF_15	0.8	353	7	97	17	14.5	2.73	2.33	0.38	0.546	315	829.64	14.6	0	14.60	0.370
STIFF_16	0.825	353	7	97	17	14.5	2.73	2.32	0.38	0.546	315	829.64	16.225	0	16.23	0.370
STIFF_17	0.825	353	7	97	17	14.5	2.73	2.32	0.38	0.546	315	829.64	17.05	0	17.05	0.370
STIFF_18	0.825	403	9	132	19	14.5	2.73	2.32	0.44	0.546	315	1385.02	17.875	0	17.88	0.422
STIFF_19	0.825	403	9	132	19	14.5	2.73	2.32	0.44	0.546	315	1385.02	18.7	0	18.70	0.422
STIFF_20	0.825	403	9	132	19	14.5	2.73	2.32	0.44	0.546	315	1385.02	19.525	0	19.53	0.422
STIFF_21	1.283	403	9	132	19	14.5	2.73	2.09	0.44	0.546	315	1385.02	20.35	0	20.35	0.422

Πίνακας 8: Ενισχυτικά Πλευρικού Τοιχώματος

	spacing	hw_net	tw_net	bf_net	tf_net	tp_net	lbdg	lshr	dshr	b_eff	ReH	Z_net	y_LCP	z_LCP	y_STRESS	z_STRESS
STIFF_1	1.246	303.00	7	97	13	14.5	2.73	2.11	0.331	0.546	315	574.95	22.5	2.1	22.18	2.1
STIFF_2	0.8	303.00	7	97	13	14.5	2.73	2.33	0.331	0.546	315	574.95	22.5	2.9	22.18	2.9
STIFF_3	0.8	303.00	7	97	13	14.5	2.73	2.33	0.331	0.546	315	574.95	22.5	3.7	22.18	3.7
STIFF_4	0.8	303.00	7	97	9	14.5	2.73	2.33	0.327	0.546	315	463.67	22.5	4.5	22.19	4.5
STIFF_5	0.8	303.00	7	97	9	14.5	2.73	2.33	0.327	0.546	315	463.67	22.5	5.3	22.19	5.3
STIFF_6	0.8	303.00	7	97	9	14.5	2.73	2.33	0.327	0.546	315	463.67	22.5	6.1	22.19	6.1
STIFF_7	0.8	303.00	7	97	9	14.5	2.73	2.33	0.327	0.546	315	463.67	22.5	6.9	22.19	6.9
STIFF_8	0.8	303.25	7	97	9	16	0.91	0.51	0.328	0.182	315	432.6	22.5	7.7	22.19	7.7
STIFF_9	0.85	403.25	9	97	17	14	0.91	0.49	0.434	0.182	315	943.53	22.5	18.85	22.08	18.85
STIFF_10	0.85	403.25	9	97	15	14	5.46	5.04	0.432	1.092	315	1019.42	22.5	19.7	22.08	19.7
STIFF_11	0.85	403.25	9	97	13	14	5.46	5.04	0.430	1.092	315	946.72	22.5	20.55	22.08	20.55
STIFF_12	0.85	353.25	7	97	17	14	5.46	5.04	0.384	1.092	315	846.22	22.5	21.4	22.13	21.4
STIFF_13	0.85	353.75	6	96	14	20.5	5.46	5.04	0.388	1.092	355	727.1	22.5	22.25	22.13	22.25
STIFF_14	0.85	353.75	6	96	10	20.5	5.46	5.04	0.384	1.092	355	593.6	22.5	23.1	22.14	23.1
STIFF_15	0.85	353.75	6	96	10	20.5	5.46	5.04	0.384	1.092	355	593.6	22.5	23.95	22.14	23.95

Πίνακας 9: Ενισχυτικά Καταστρώματος

	spacing	hw_net	tw_net	bf_net	tf_net	tp_net	lbdg	lshr	dshr	b_eff	ReH	Z_net	y_LCP	z_LCP	y_STRESS	z_STRESS
STIFF_1	0.97	330.000	30	0	0	30	0.91	0.43	0.36	0.182	355	892.08	10.96	25.27	10.95	24.94
STIFF_2	0.965	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.66	11.92	25.23	11.91	24.9
STIFF_3	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	12.88	25.19	12.87	24.86
STIFF_4	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	13.84	25.15	13.83	24.82
STIFF_5	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	14.8	25.12	14.79	24.79
STIFF_6	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	15.76	25.08	15.75	24.75
STIFF_7	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	16.72	25.04	16.71	24.71
STIFF_8	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	17.68	25	17.67	24.67
STIFF_9	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	18.64	24.96	18.63	24.63
STIFF_10	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	19.6	24.92	19.59	24.59
STIFF_11	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	20.56	24.88	20.55	24.55
STIFF_12	0.96	330.000	30	0	0	30	5.46	4.98	0.36	1.092	355	1106.22	21.53	24.84	21.52	24.51

Πίνακας 10: Ενισχυτικά Κάτω Πλευρικής Δεξαμενής

	spacing	hw_net	tw_net	bf_net	tf_net	tp_net	lbdg	lshr	dshr	b_eff	ReH	Z_net	y_LCP	z_LCP	y_STRESS	z_STRESS
STIFF_1	0.8	304.25	7	97	19	15.5	1.365	0.965	0.34	0.273	315	715.2	15.97	3.02	16.19	2.79
STIFF_2	0.8	304.25	7	97	19	15.5	2.73	2.33	0.34	0.546	315	748.46	16.53	3.58	16.76	3.35
STIFF_3	0.8	304.25	7	97	19	15.5	2.73	2.33	0.34	0.546	315	748.46	17.1	4.15	17.33	3.92
STIFF_4	0.8	304.25	7	97	17	15.5	2.73	2.33	0.34	0.546	315	692.88	17.66	4.71	17.89	4.49
STIFF_5	0.8	304.25	7	97	17	11.5	2.73	2.33	0.33	0.546	315	675.85	18.23	5.28	18.46	5.05
STIFF_6	0.8	304.25	7	97	15	11.5	2.73	2.33	0.33	0.546	315	621.48	18.79	5.84	19.02	5.62
STIFF_7	0.8	304.25	7	97	13	11.5	2.73	2.33	0.33	0.546	315	566.89	19.36	6.41	19.58	6.19
STIFF_8	0.8	304.25	7	97	13	10.5	2.73	2.33	0.33	0.546	315	562.49	19.93	6.98	20.15	6.75
STIFF_9	0.8	304.25	7	97	9	10.5	0.91	0.51	0.32	0.182	315	409.88	20.49	7.54	20.71	7.32
STIFF_10	1.42	304.25	7	97	9	10.5	0.91	0.2	0.32	0.182	315	409.88	21.06	8.11	21.28	7.89

Πίνακας 11: Ενισχυτικά Εσωτερικού Πυθμένα

	spacing	hw_net	tw_net	bf_net	tf_net	tp_net	lbdg	lshr	dshr	b_eff	ReH	Z_net	y_LCP	z_LCP	y_STRESS	z_STRESS
STIFF_1	0.65	222	18.5	0	0	15.5	1.365	1.04	0.2375	0.273	315	270.59	0.65	2.45	0.65	2.23
STIFF_2	0.65	222	18.5	0	0	15.5	1.365	1.04	0.2375	0.273	315	270.59	1.3	2.45	1.3	2.23
STIFF_3	0.65	222	18.5	0	0	15.5	1.365	1.04	0.2375	0.273	315	270.59	1.95	2.45	1.95	2.23
STIFF_4	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	3.4	2.45	3.4	2.03
STIFF_5	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	4.2	2.45	4.2	2.03
STIFF_6	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	5	2.45	5	2.03
STIFF_7	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	6.6	2.45	6.6	2.03
STIFF_8	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	7.4	2.45	7.4	2.03
STIFF_9	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	8.2	2.45	8.2	2.03
STIFF_10	0.8	404.25	9	97	15	15.5	2.73	2.33	0.43475	0.546	315	1003.53	9.8	2.45	9.8	2.03
STIFF_11	0.8	404.25	9	97	13	15.5	2.73	2.33	0.43275	0.546	315	932.06	10.6	2.45	10.6	2.03
STIFF_12	0.8	404.25	9	97	13	15.5	2.73	2.33	0.43275	0.546	315	932.06	11.4	2.45	11.4	2.03
STIFF_13	0.8	404.25	9	97	13	15.5	2.73	2.33	0.43275	0.546	315	932.06	13	2.45	13	2.03
STIFF_14	0.8	404.25	9	97	13	15.5	2.73	2.33	0.43275	0.546	315	932.06	13.8	2.45	13.8	2.03
STIFF_15	0.8	404.25	9	97	13	15.5	1.365	0.965	0.43275	0.273	315	875.03	14.6	2.45	14.6	2.03

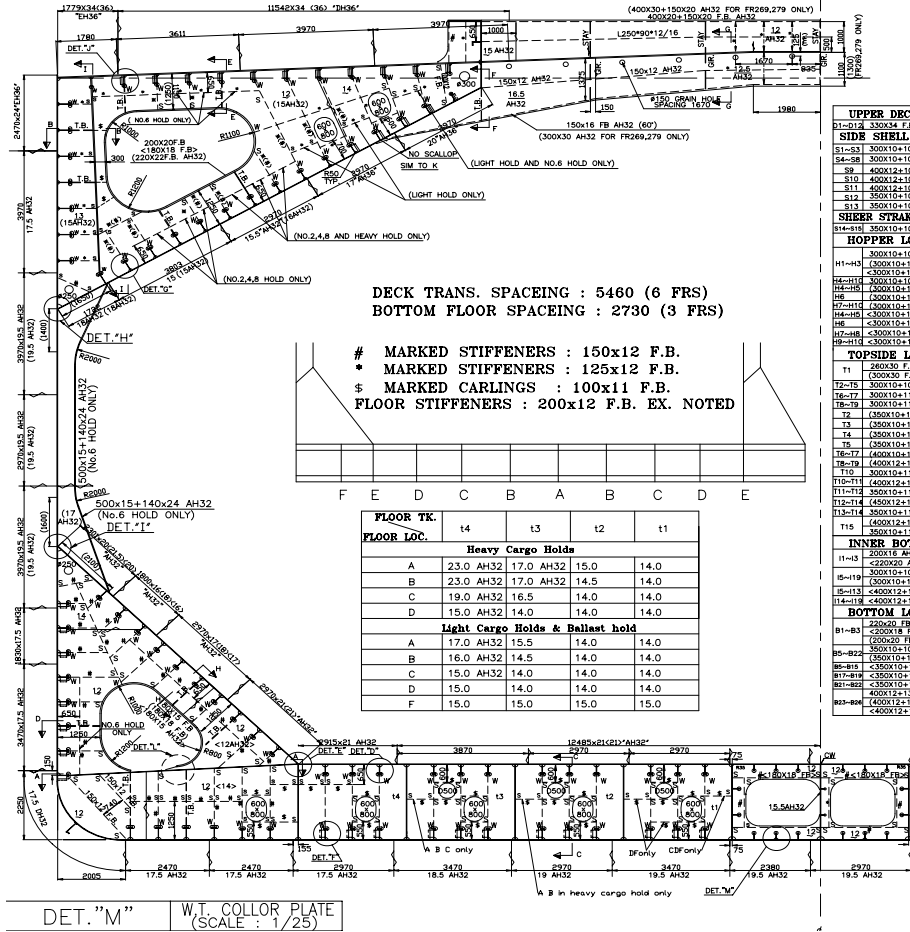
Πίνακας 12: Ενισχυτικά Άνω Πλευρικής Δεξαμενής

	spacing	hw_net	tw_net	bf_net	tf_net	tp_net	lbdg	lshr	dshr	b_eff	ReH	Z_net	y_LCP	z_LCP	y_STRESS	z_STRESS
STIFF_1	0.875	260.00	26	0	0	16	0.91	0.473	0.276	0.182	355	448.29	10.78	24.06	10.91	24.29
STIFF_2	0.85	304.00	6	96	8	16	5.46	5.035	0.328	1.092	355	418.41	11.52	23.64	11.67	23.91
STIFF_3	0.85	304.00	6	96	8	16	5.46	5.035	0.328	1.092	355	418.41	12.25	23.21	12.41	23.48
STIFF_4	0.85	304.00	6	96	8	13	5.46	5.035	0.325	1.092	355	412.56	12.99	22.79	13.14	23.06
STIFF_5	0.85	304.00	6	96	8	13	5.46	5.035	0.325	1.092	355	412.56	13.72	22.36	13.88	22.63
STIFF_6	0.85	303.50	7	112	13	13	5.46	5.035	0.3295	1.092	315	640.98	14.46	21.94	14.62	22.21
STIFF_7	0.85	303.50	7	112	13	13	5.46	5.035	0.3295	1.092	315	640.98	15.2	21.51	15.35	21.78
STIFF_8	0.85	303.25	7	112	15	12	5.46	5.035	0.33025	1.092	315	701.61	15.93	21.09	16.09	21.36
STIFF_9	0.85	303.25	7	112	15	12	5.46	5.035	0.33025	1.092	315	701.61	16.67	20.66	16.83	20.94
STIFF_10	0.85	303.25	7	112	17	12	5.46	5.035	0.33225	1.092	315	766.16	17.4	20.23	17.56	20.51
STIFF_11	0.85	353.25	7	112	15	12	5.46	5.035	0.38025	1.092	315	849.99	18.14	19.81	18.32	20.13
STIFF_12	0.85	353.25	7	112	15	11.5	5.46	5.035	0.37975	1.092	315	847.53	18.88	19.38	19.06	19.7
STIFF_13	0.85	353.25	7	112	17	11.5	5.46	5.035	0.38175	1.092	315	921.98	19.61	18.96	19.8	19.28
STIFF_14	0.85	353.25	7	112	17	11.5	0.91	0.485	0.38175	0.182	315	810.11	20.35	18.53	20.53	18.85
STIFF_15	1.243	353.25	7	112	19	11.5	0.91	0.288	0.38375	0.182	315	874.01	21.08	18.11	21.27	18.43

Σχέδιο Μέσης Τομής

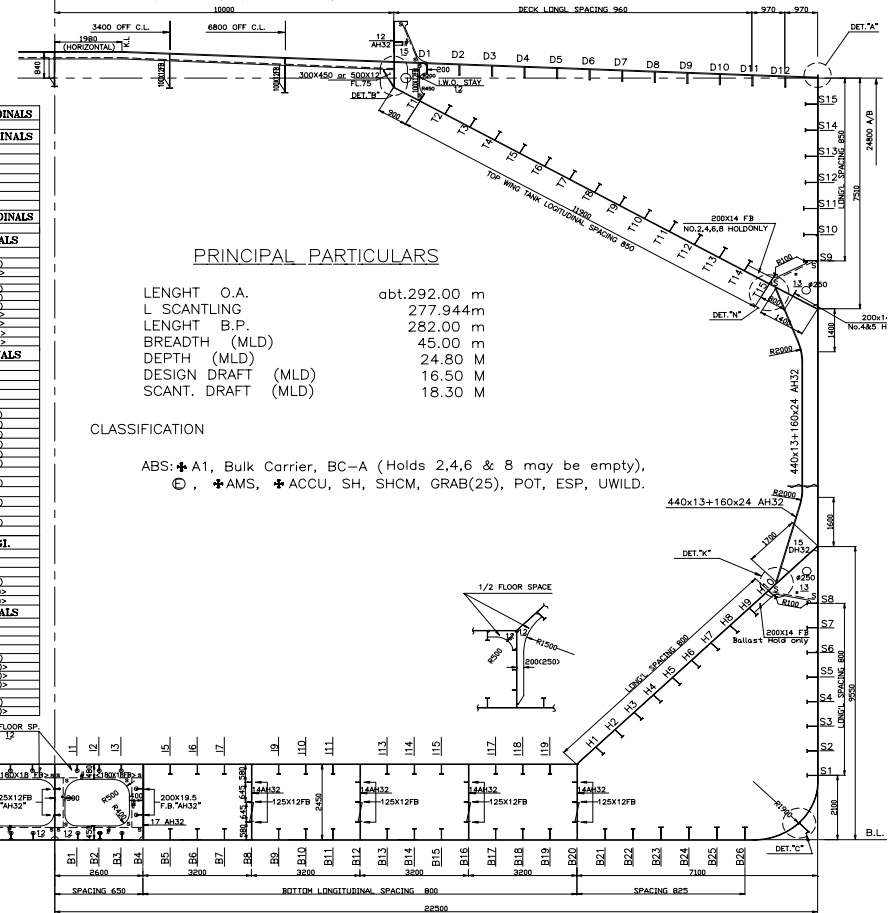
WEB FRAME SECTION

FRAME SPACE: 910 mm
 < > MARK: HEAVY CARGO HOLD ONLY
 () MARK: NO.6 BALLAST HOLD ONLY



ORDINARY FRAME SECTION

CROSS DECK BEAM
 L200X90X14 (L260X90X12/16) & L260X90X12/16 FORWARD OF FR.289



Βιβλιογραφία

- [1] B.V., Rules for the Classification of Steel Ships - Part A: Classification and Surveys, 2018.
- [2] D. Servis, G. Voudouris, M. Samuelides και A. Papanikolaou, «Finite Element Modelling and Strength Analysis of Hold No. 1 of Bulk Carriers,» *Marine Structures*, 2004.
- [3] Κ. Ανυφαντής, Α. Θεοδουλίδης και Μ. Σαμουηλίδης, Στατική Ναυπηγικών Κατασκευών - Σημειώσεις μαθήματος, Αθήνα: Ε.Μ.Π, 2018.
- [4] S. P. Timoshenko και S. Woinowsky-Krieger, Theory of plates and shells, Tokyo, Japan: McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1983.
- [5] S. P. Timoshenko και J. N. Goodier, Theory of Elasticity, Japan: McGraw-Hill, 1970.
- [6] Κ. Μπαλωτή, Μελέτη Λυγισμού σε πλοίο Bulk Carrier, βάσει των Common Structural Rules, με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, Αθήνα: Ε.Μ.Π, 2018.
- [7] K. Hughes, Ship Structural Analysis and Design, New Jersey : SNAME, 2010.
- [8] Π. Καρύδης, Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου, Αθήνα, 2000.
- [9] Μ. Σαμουηλίδης, Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου, Αθήνα: Ε.Μ.Π, 2010.
- [10] Δ. Ιωαννίδης, Μέγιστη Αντοχή Bulk Carrier σε Άθικτη και Βεβλαμμένη Κατάσταση, Αθήνα: Ε.Μ.Π, Οκτώβριος 2017.
- [11] Γ. Τσαμασφύρος, Μηχανική Παραμορφώσιμων Σωμάτων ΙΙ, Αθήνα, 1991.
- [12] Κ. Σπύρου, Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου ΙΙ, Αθήνα: Ε.Μ.Π, Ιανουάριος 2017.
- [13] E. Karvounis, Design of Bulk Carriers on IACS Common Structural Rules, Athens: NTUA, July 2009.
- [14] I.A.C.S, «Technical Background Rule Reference for CSR 01 January 2019 Rules,» 2019.
- [15] I.A.C.S., Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers 01 January 2019, 2019.
- [16] G. E. Horn, «IACS Summary of the IMO GBS and the Harmonised Common Structural Rules,» TSCF Shipbuilders Meeting, 2013.
- [17] I.A.C.S, «Classification Societies - Their Key Role,» 2015.
- [18] T. Kang Jing, Preliminary Hull Strength Assessment with MAESTRO Linear Finite Element Modelling, Newcastle University, 2016.
- [19] G. Puri, Python Scripts for ABAQUS - Learn by Example, 2011.
- [20] B.V., CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers Assessment within MARS, 2015.
- [21] B.V., MARS2000 User's Guide, Paris, 2000.

- [22] A. Khennane, Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB and ABAQUS, CRC Press, 2013.
- [23] E. Onate, Structural Analysis with the Finite Element Method, Springer, 2009.
- [24] J. Reddy, Theory and Analysis of Elastic Plates and Shells, CRC Press, 2007.