



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**«Έλεγχος αντοχής της μεταλλικής κατασκευής πλοίων μέσω
αριθμητικών προσομοιώσεων Πεπερασμένων Στοιχείων»**

Όνοματεπώνυμο : Σοφράς Δημήτριος

Επιβλέπων Καθηγητής : Κ. Ανυφαντής, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εξεταστική Επιτροπή : Ε. Σαμουηλίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Ν. Τσούβαλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2021

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Ανυφαντή που μου έδωσε την ευκαιρία να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα σχετικά με την αντοχή πλοίου. Επίσης, τον ευχαριστώ πολύ για την άμεση και κατατοπιστική βοήθειά του, κάθε φορά που απευθύνθηκα σε αυτόν, κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Αισθάνομαι ευγνώμων για το χρόνο που μου αφιέρωσε και τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κύριο Ε. Σαμουηλίδη και κύριο Ν. Τσούβαλη για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην παρακολούθηση και αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου έχει δείξει όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους και τους συμφοιτητές μου για τις ωραίες στιγμές που περάσαμε κατά τη διάρκεια των φοιτητικών μου χρόνων. Τα καλύτερα έρχονται...

Abstract

This diploma thesis focuses on the field of strength assessment and more specifically in the yield strength assessment of the structural members located on the cargo hold of a ship in the midship region (Cargo Hold Analysis). Direct strength analysis of the Common Structural Rules along with the use of the Finite Element Method have been applied for the aforementioned goal. The ship used for this study is a Capesize Bulk Carrier with a deadweight capacity 180,000 tones, built on 2016 when CSR Rules were in force. For the purpose of the study, a model of three cargo holds was designed using ABAQUS/CAE software and the region of interest was the middle hold. Rules provide a series of load combinations to be investigated and in this particular study the following two were examined: Alternate ore condition at scantling draft in combination with the dynamic load case HSM-2 that causes hogging of the ship and heavy ballast condition in combination with the dynamic load case HSM-1 that causes sassing of the ship. All of the procedures of the study, such as the calculation and the application of the loads, the enforcement of the constraints as well as the evaluation of the results, were compatible with the CSR methodology. The response of the model, i.e., the diagrams of section forces and bending moments, had to be corrected in order to simulate the response of the real ship. Finally, the analysis revealed that the components in the middle hold display sufficient yielding capacity in the examined study cases.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη αντοχής πλοίου και πιο συγκεκριμένα τον έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής (Yield Strength Assessment) των κατασκευαστικών στοιχείων που βρίσκονται σε ένα κύτος φορτίου (Cargo Hold Analysis). Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται στα πλαίσια του απευθείας υπολογισμού αντοχής (Direct Strength Analysis), όπως προδιαγράφεται στους Κοινούς Κατασκευαστικούς Κανόνες (Common Structural Rules), με τη χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method). Το προς εξέταση πλοίο είναι ένα Bulk Carrier κατηγορίας Capesize, συνολικής χωρητικότητας 180,000 tons DWT και κατασκευής του 2016 όπου οι εν λόγω κανόνες ήταν σε ισχύ. Για την εν λόγω μελέτη, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο έκτασης τριών αμπαριών του υπό εξέταση πλοίου στο υπολογιστικό περιβάλλον ABAQUS/CAE με περιοχή ενδιαφέροντος το μεσαίο αμπάρι από τα τρία. Από τους προβλεπόμενους συνδυασμούς φορτίσεων προς μελέτη, στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι εξής δύο: Εναλλάξ κατάσταση Φόρτωσης στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα σε συνδυασμό με μετωπικό κυματισμό που προκαλεί Hogging της γάστρας πλοίου και Heavy Ballast φόρτωση με μετωπικό κυματισμό που προκαλεί Sagging της γάστρας. Όλες οι διαδικασίες, όπως η μοντελοποίηση, ο υπολογισμός και η άσκηση των φορτίων, η επιβολή περιορισμών στο μοντέλο και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τη μεθοδολογία των κανονισμών. 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 ανάλυση έδειξε πως εν γένει τα κατασκευαστικά στοιχεία, για τους συνδυασμούς φορτίσεων που μελετήθηκαν, παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή έναντι διαρροής.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	1
1.1	Γενικά.....	1
1.2	Έννοια και Στόχος Νηογνομόνων	2
1.3	Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων – International Association of Classification Societies (IACS).....	3
1.4	Common Structural Rules (IACS CSR).....	4
1.4.1	Εναρμόνιση Κοινών Κατασκευαστικών Κανόνων (IACS CSR-H)	5
1.5	Αντικείμενο, στόχοι και μεθοδολογία της διπλωματικής εργασίας.....	5
2	Μελέτη Αντοχής Πλοίου	8
2.1	Αντικείμενο της Αντοχής του Πλοίου.....	8
2.2	Ολική και Τοπική Αντοχή του Πλοίου	10
2.2.1	Απλή Θεωρία Κάμψης.....	11
2.2.2	Διατμητικές Τάσεις Λόγω Κάμψης	12
2.2.3	Κάμψη Ενισχυμένων Ελασμάτων.....	14
2.2.4	Κάμψη Πλακών	17
2.3	Κριτήριο Von Mises.....	21
3	Βασικές Απαιτήσεις των Κανονισμών CSR-H	23
3.1	Φορτίσεις.....	23
3.1.1	Σενάρια Σχεδιαστικών Φορτίσεων	23
3.1.2	Υπολογισμός Επιταχύνσεων του Πλοίου	27
3.1.3	Φορτίσεις του πλοίου ως δοκός	28
3.1.4	Τοπικές Εξωτερικές Φορτίσεις.....	34
3.1.5	Τοπικές Εσωτερικές Φορτίσεις.....	38
3.2	Ανάλυση με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων.....	42
4	Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων – Πρόγραμμα ABAQUS.....	55
4.1	Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων.....	55
4.2	Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ABAQUS.....	59
5	Δεδομένα Μελέτης Αντοχής Έναντι Διαρροής.....	64
5.1	Το υπό μελέτη πλοίο	64
5.2	Οι Εξεταζόμενοι Συνδυασμοί Φορτίσεων.....	64

6	Μοντελοποίηση σε Περιβάλλον ABAQUS/CAE	67
6.1	Γεωμετρία του Μοντέλου	68
6.2	Καθορισμός Ιδιοτήτων	72
6.3	Διακριτοποίηση και Δημιουργία Πλέγματος	75
6.4	Συνοριακές Συνθήκες.....	78
6.5	Τοπικές Πιέσεις (Local Loads)	80
6.6	Διορθώσεις Διατμητικών Δυνάμεων και Καμπτικών Ροπών.....	87
6.7	Αποτελέσματα Ανάλυσης	96
6.7.1	Εναλλάξ Φόρτωση σε δυναμική κατάσταση HSM-2	97
6.7.2	Heavy Ballast Φόρτωση σε δυναμική κατάσταση HSM-1.....	107
7	Συμπεράσματα και προτάσεις για επόμενη εργασία	117
8	Βιβλιογραφία	119

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 3.1: Δομή των κανονισμών CSR	23
Πίνακας 3.2: Κύρια σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων	24
Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά της απόκρισης του πλοίου υπό τη επίδραση των EDWs	26
Πίνακας 3.4: Επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους πλοίου για τις εξεταζόμενες καταστάσεις φόρτωσης.	28
Πίνακας 3.5: Συντελεστές συνδυαστικής φόρτισης LCFs για διαφορετικά ισοδύναμα σχεδιαστικά κύματα EDWs	33
Πίνακας 3.6: Υπολογισμός κατακόρυφων καμπτικών ροπών κυματισμού	33
Πίνακας 3.7: Υπολογισμός κατακόρυφων διατμητικών δυνάμεων κυματισμού	33
Πίνακας 3.8: Σχέσεις υδροστατικής πίεσης	35
Πίνακας 3.9: Σχέσεις πιέσεων κυματισμού για τις εξεταζόμενες δυναμικές καταστάσεις θάλασσας	35
Πίνακας 3.10: Τιμές του συντελεστή k_r κατά μήκος του πλοίου	36
Πίνακας 3.11: Τιμές του συντελεστή χ	38
Πίνακας 3.12: Προδιαγραφές CSR μάζας M και πυκνότητας ρ_c για έλεγχο αντοχής σε άθικτη κατάσταση	41
Πίνακας 3.13: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου	46
Πίνακας 3.14: Υπολογισμός επιθυμητής καμπτικής ροπής	47
Πίνακας 3.15: Υπολογισμός επιθυμητών διατμητικών δυνάμεων	48
Πίνακας 3.16: Καθορισμός φρακτής προς διόρθωση διατμητικής δύναμης	49
Πίνακας 3.17: Τιμές συντελεστή k βάσει υλικού	53
Πίνακας 3.18: Επιτρεπόμενοι συντελεστές διαρροής	53
Πίνακας 5.1: Βασικά μεγέθη του υπό μελέτη πλοίου	64
Πίνακας 5.2: Στοιχεία κατάστασης εναλλάξ φόρτωσης από το trim & stability booklet	64
Πίνακας 5.3: Στοιχεία κατάστασης heavy ballast από το trim & stability booklet	65
Πίνακας 5.4: Εξεταζόμενες καταστάσεις φόρτωσης σε συνδυασμό με δυναμικές καταστάσεις θάλασσας	66
Πίνακας 6.1: Βασικά μεγέθη μοντέλου	67
Πίνακας 6.2: Σύστημα μονάδων SI (mm)	67
Πίνακας 6.3: Ορισμός χρησιμοποιούμενων υλικών	72
Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά στοιχείων πλέγματος	77
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά στοιχείων σχετικά με την ποιότητα πλέγματος	78
Πίνακας 6.6: Τιμές των διατμητικών δυνάμεων (όπως προκύπτουν στο μοντέλο και οι επιθυμητές) για τα εξεταζόμενα σενάρια.	91
Πίνακας 6.7: Τιμή ασκούμενης ροπής στο μοντέλο για τις επιθυμητές τιμές διατμητικών δυνάμεων	91
Πίνακας 6.8: Τιμές ασκούμενων ροπών στα άκρα του μοντέλου για διόρθωση καμπτικών ροπών	94
Πίνακας 6.9: Τιμή ασκούμενης αξονικής δύναμης στα άκρα του μοντέλου	96
Πίνακας 6.10: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τα ελάσματα στην κατάσταση Alternate Ore σε HSM-2 (hogging)	105
Πίνακας 6.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενισχυτικών για την κατάσταση Alternate Ore σε HSM-2 (hogging).	107
Πίνακας 6.12: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τα ελάσματα για την κατάσταση Heavy Ballast σε HSM-1 (sagging).	115
Πίνακας 6.13: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τα ενισχυτικά για την κατάσταση Heavy Ballast σε HSM-1 (Sagging).	116

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1.1: Τρόποι επίλυσης προβλημάτων στη μηχανική	1
Εικόνα 1.2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε	7
Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση ανάλυσης κατασκευών (Μ.Σ. Σαμουηλίδης, Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου, 2011)	8
Εικόνα 2.2: Πρωτεύουσες-δευτερεύουσες-τριτεύουσες τάσεις στη γάστρα του πλοίου	11
Εικόνα 2.3: Έλασμα σε επίπεδη εντατική κατάσταση	13
Εικόνα 2.4: Κατανομή διατμητικών τάσεων σε διατομές πλοίων	14
Εικόνα 2.5: Ενισχυμένο έλασμα	15
Εικόνα 2.6: Επεξηγηματική απεικόνιση της διάτμησης των στοιχείων της διατομής	16
Εικόνα 2.7: Κατανομή Ορθών τάσεων σε ανοιχτή και κλειστή διατομή	16
Εικόνα 2.8: Διάγραμμα Schade	16
Εικόνα 2.9: Μετατροπή προβλήματος από 3D (α) σε 2D (β)	17
Εικόνα 2.10: Ορθογώνιο έλασμα υπό καμπτική φόρτιση	18
Εικόνα 2.11: Ορθογώνιο έλασμα υπό καμπτική φόρτιση	18
Εικόνα 2.12: Συνοριακές συνθήκες ελασμάτων	20
Εικόνα 2.13: Καμπύλη προσδιορισμού τάσης συναρτήσει του λόγου πλευρών για συνθήκες απλής έδρασης και πάκτωσης.	20
Εικόνα 2.14: Καμπύλη προσδιορισμού βέλους κάμψης συναρτήσει του λόγου πλευρών για συνθήκες απλής έδρασης και πάκτωσης	21
Εικόνα 2.15: Καμπύλη πλαστικής διαρροής κατά Von Mises	22
Εικόνα 3.1: Ανάλυση του σεναρίου σχεδιαστικής φόρτισης	25
Εικόνα 3.2: Κατηγορίες Ισοδύναμων Σχεδιαστικών Κυματισμών (EDWs)	25
Εικόνα 3.3: Σύμβαση προσήμων φορτίσεων σύμφωνα με τους CSR	28
Εικόνα 3.4: Κατανομή του συντελεστή f_{sw} κατά μήκος του πλοίου	29
Εικόνα 3.5: Κατανομή του συντελεστή f_m κατά μήκος του πλοίου	30
Εικόνα 3.6: Κατανομή του συντελεστή f_{q-pos} κατά μήκος του πλοίου	31
Εικόνα 3.7: Κατανομή του συντελεστή f_{q-neg} κατά μήκος του πλοίου	31
Εικόνα 3.8: Κατανομή υδροστατικής πίεσης	35
Εικόνα 3.9: Κατανομή πίεσης κυματισμού για τη δυναμική κατάσταση HSM-1 (Sagging)	37
Εικόνα 3.10: Κατανομή πίεσης κυματισμού για τη δυναμική κατάσταση HSM-2 (Hogging)	37
Εικόνα 3.11: Περιοχές πλοίου βάσει του ογκομετρικού κέντρου βάρους του κύτους	43
Εικόνα 4.1: Εισαγωγή πλέγματος τριγωνικών στοιχείων στην ανάλυση ενός 2D προβλήματος	55
Εικόνα 4.2: Τυπικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων	56
Εικόνα 4.3: Στάδια ανάλυσης με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων	60
Εικόνα 4.4: Συνήθεις οικογένειες στοιχείων	61
Εικόνα 4.5: Πεπερασμένα στοιχεία	62
Εικόνα 4.6: S4R Στοιχείο	63
Εικόνα 4.7: B31 Στοιχείο	63
Εικόνα 6.1: Περιοχή τριών αμπαριών για μοντελοποίηση	67
Εικόνα 6.2: Τελική γεωμετρία μοντέλου τριών αμπαριών	68
Εικόνα 6.3: Διαμήκη ελάσματα μοντέλου	69
Εικόνα 6.4: Εγκάρσια κατασκευαστικά στοιχεία μοντέλου	70
Εικόνα 6.5: 3D όψη εγκάρσιας φρακτής	70
Εικόνα 6.6: Πρόσοψη εγκάρσιας φρακτής	71
Εικόνα 6.7: Διαμήκη τομή συναρμολογούμενου μοντέλου	71
Εικόνα 6.8: Διαμήκη τομή συναρμολογούμενου μοντέλου χωρίς το εξωτερικό περίβλημα της γάστρας	72
Εικόνα 6.9: Χρωματική απεικόνιση των διαφορετικών υλικών (διαμήκη τομή)	73

Εικόνα 6.10: Χρωματική απεικόνιση των διαφορετικών υλικών	73
Εικόνα 6.11: Παράδειγμα δημιουργίας διατομής για έλασμα και ενισχυτικό	74
Εικόνα 6.12: Προφίλ ενισχυτικών: T (αριστερά), L (κέντρο), I (δεξιά)	74
Εικόνα 6.13: Προσδιορισμός προσανατολισμού ελάσματος	75
Εικόνα 6.14: Προσδιορισμός προσανατολισμού ενισχυτικών	75
Εικόνα 6.15: Επιλογές διακριτοποίησης	76
Εικόνα 6.16: Εισαγωγή πλέγματος στο μοντέλο (3D όψη)	76
Εικόνα 6.17: Εισαγωγή πλέγματος στο μοντέλο (πρόσοψη)	76
Εικόνα 6.18: Έλεγχος ποιότητας πλέγματος	77
Εικόνα 6.19: Εντολή Coupling	78
Εικόνα 6.20: Ένωση των references points με τα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία στα άκρα του μοντέλου.	79
Εικόνα 6.21: Επιβολή συνοριακών συνθηκών	79
Εικόνα 6.22: End Beam Constraints	80
Εικόνα 6.23: Εξωτερική πίεση θάλασσας (στατική και δυναμική συνιστώσα) στα πλευρικά ελάσματα, σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-2 (Hogging).	81
Εικόνα 6.24: Εξωτερική πίεση θάλασσας στα ελάσματα του πυθμένα, σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-2 (Hogging).	82
Εικόνα 6.25: Εξωτερική πίεση θάλασσας στα πλευρικά ελάσματα (στατική και δυναμική συνιστώσα), σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-1 (Sagging).	82
Εικόνα 6.26: Εξωτερική πίεση θάλασσας στα ελάσματα του πυθμένα (στατική και δυναμική συνιστώσα), σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-1 (Sagging).	82
Εικόνα 6.27: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στον εσωτερικό πυθμένα του Hold No7.	83
Εικόνα 6.28: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στο hopper plate του Hold No7.	83
Εικόνα 6.29: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στο πλευρικό έλασμα του Hold No7.	84
Εικόνα 6.30: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στην εγκάρσια φρακτή στο Fr.131.	84
Εικόνα 6.31: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στην κάτω έδρα της εγκάρσιας φρακτής στο Fr.103.	84
Εικόνα 6.32: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στο πτυχωτό έλασμα της εγκάρσιας φρακτής στο Fr.103.	85
Εικόνα 6.33: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στον εσωτερικό πυθμένα του Hold No.6.	85
Εικόνα 6.34: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στο hopper plate του Hold No.6.	85
Εικόνα 6.35: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στο πλευρικό έλασμα του Hold No.6.	86
Εικόνα 6.36: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στην εγκάρσια φρακτή στο Fr.160.	86
Εικόνα 6.37: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στις δεξαμενές έρματος NO.4 W.B TK (P&S) και NO.5 W.B TK (P&S).	87
Εικόνα 6.38: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στις δεξαμενές έρματος NO.4 W.B TK (P) και NO.5 W.B TK (P).	87
Εικόνα 6.39: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	97
Εικόνα 6.40: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	97
Εικόνα 6.41: Απόκριση του Cargo Hold No.6 για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	98
Εικόνα 6.42: Απόκριση του Cargo Hold No.6, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	98
Εικόνα 6.43: Τάσεις στο έλασμα καταστρώματος για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	99
Εικόνα 6.44: Τάσεις στο πλευρικό έλασμα για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	100
Εικόνα 6.45: Τάσεις στον πυθμένα για Alternate Ore – HSM-2 (Hogging)	100

Εικόνα 6.46: Τάσεις ελάσματος εσωτερικού πυθμένα για Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	101
Εικόνα 6.47: Τάσεις στο έλασμα του hopper plate για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	102
Εικόνα 6.48: Τάσεις στην άνω πλευρική δεξαμενή για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	102
Εικόνα 6.49: Τάσεις στα διαμήκη δοκάρια (girders) για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	103
Εικόνα 6.50: Τάσεις στις έδρες του διπύθμενου για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	104
Εικόνα 6.51: Τάσεις στους νομείς για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	104
Εικόνα 6.52: 3D όψη ενισχυτικών για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	106
Εικόνα 6.53: Πλάγια όψη ενισχυτικών για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).	106
Εικόνα 6.54: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	107
Εικόνα 6.55: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	108
Εικόνα 6.56: Απόκριση του Cargo Hold No.6 για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	108
Εικόνα 6.57: Απόκριση του Cargo Hold No.6, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	109
Εικόνα 6.58: Τάσεις στο έλασμα καταστρώματος για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	109
Εικόνα 6.59: Τάσεις στο πλευρικό έλασμα για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	110
Εικόνα 6.60: Τάσεις ελάσματος πυθμένα για Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	111
Εικόνα 6.61: Τάσεις ελάσματος εσωτερικού πυθμένα για Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	111
Εικόνα 6.62: Τάσεις στο έλασμα του hopper plate για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	112
Εικόνα 6.63: Τάσεις στην άνω πλευρική δεξαμενή για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	113
Εικόνα 6.64: Τάσεις στις έδρες του διπύθμενου για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	114
Εικόνα 6.65: Τάσεις στους νομείς για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	115
Εικόνα 6.66 Αποτελέσματα αξονικών τάσεων των ενισχυτικών για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).	116

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 6-1: Κατανομή των διατμητικών δυνάμεων κατά μήκος του μοντέλου για <i>alternate ore condition</i>	88
Διάγραμμα 6-2: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του μοντέλου για <i>alternate ore condition</i>	88
Διάγραμμα 6-3: Κατανομή των διατμητικών δυνάμεων κατά μήκος του μοντέλου για <i>heavy ballast condition</i>	89
Διάγραμμα 6-4: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του μοντέλου για <i>heavy ballast condition</i>	89
Διάγραμμα 6-5: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για <i>alternate ore condition</i> .	92
Διάγραμμα 6-6: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για <i>alternate ore condition</i> .	92
Διάγραμμα 6-7: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για <i>heavy ballast condition</i> .	93
Διάγραμμα 6-8: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για <i>heavy ballast condition</i> .	93
Διάγραμμα 6-9: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για <i>alternate ore condition</i> .	94
Διάγραμμα 6-10: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για <i>alternate ore condition</i> .	95
Διάγραμμα 6-11: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για <i>heavy ballast condition</i> .	95
Διάγραμμα 6-12: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για <i>heavy ballast condition</i> .	96

1 Εισαγωγή

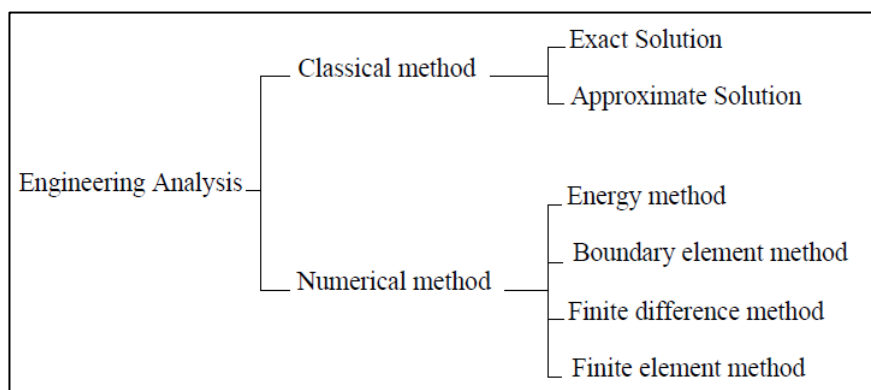
1.1 Γενικά

Εν γένει, τα πλοία και οι θαλάσσιες κατασκευές γενικότερα, λειτουργούν σε δυσμενέστερες συνθήκες σε σχέση με τις επίγειες και αεροπορικές κατασκευές λόγω των απαιτητικών περιβαλλοντικών συνθηκών που αντιμετωπίζουν. Η ορθή αξιολόγηση της αντοχής της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι καίριας σημασίας από τη σκοπιά της ασφαλούς ναυσιπλοΐας. Η μείωση των ναυτικών ατυχημάτων έχει άμεσο οικονομικό αντίκτυπο στους πλοιοκτήτες και ναυλωτές καθώς και, πιο σημαντικό, μειώνει το κόστος για το περιβάλλον και την ανθρώπινη ζωή.

Η αξιοπιστία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου σε θέματα αντοχής εξασφαλίζεται από τους νηογνώμονες, όπου σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο κάθε πλοίο πρέπει να ανήκει σε έναν από αυτούς και να ικανοποιεί τους κανονισμούς που θέτει. Πολλοί από αυτούς τους κανονισμούς στηρίζονται σε απλοποιημένες και εμπειρικές σχέσεις, βασιζόμενες στα δεδομένα των υπαρχόντων πλοίων. Ωστόσο, αυτή η τακτική, από μόνη της, δεν είναι η βέλτιστη και δεν ευνοεί την ανάγκη σχεδίασης νέων καινοτόμων κατασκευών.

Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα, αποτελούμενα από σχέσεις και μεταβλητές, ώστε να αναλύσουν τη συμπεριφορά μιας κατασκευής υπό δεδομένες συνθήκες. Υπάρχουν διάφορα είδη τέτοιων μαθηματικών μοντέλων: Γραμμικά ή μη γραμμικά, στατικά ή δυναμικά, άμεσα (explicit) ή έμμεσα (implicit), διακριτά ή συνεχή κλπ. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης μιας κατασκευής ο μηχανικός συνήθως καθορίζει τη γεωμετρία, τα ασκούμενα φορτία, τις στηρίξεις και τις ιδιότητες των υλικών της κατασκευής. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας ανάλυσης είναι συνήθως οι αντιδράσεις στηρίξεων, οι τάσεις και οι μετατοπίσεις που στη συνέχεια πρέπει να αξιολογηθούν βάσει των κριτηρίων αντοχής.

Οι κύριοι τρόποι επίλυσης των προβλημάτων στη μηχανική φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.1: Τρόποι επίλυσης προβλημάτων στη μηχανική

Η κλασσική μέθοδος περιορίζεται στη λύση απλών προβλημάτων όπου είναι εφικτή η αναλυτική λύση του μαθηματικού προβλήματος ενώ η αριθμητική μέθοδος ενδείκνυται στα υπόλοιπα προβλήματα όπου απαιτείται μια προσεγγιστική λύση. Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) αποτελεί μία από τις καλύτερες διαθέσιμες επιλογές αριθμητικής ανάλυσης συνεχών μέσων και υπάρχει πληθώρα εμπορικών προγραμμάτων για την εφαρμογή της.

Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιήθηκε πρώτα στις επιστήμες της αεροναυπηγικής και του πολιτικού μηχανικού. Γνώρισε ιδιαίτερη ανάπτυξη τη δεκαετία 1960 με 1970 από τους Argyris, Clough, Irons, Zienkiewicz και Gallagher. Στο τέλος της δεκαετίας του 1950, η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων ξεκίνησε να εφαρμόζεται στο ναυπηγικό τομέα έπειτα από μια επιτυχημένη ανάλυση στη μελέτη αντοχής μιας εγκάρσιας φρακτής.

Πλέον, η μελέτη αντοχής του πλοίου στηρίζεται όλο και περισσότερο στον απευθείας υπολογισμό αντοχής μέσω της ανάλυσής του με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Με αυτή τη μέθοδο είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν οι επιδράσεις της αξονικής, στρεπτικής, καμπτικής και διατμητικής παραμόρφωσης στη σύνθετη γεωμετρία του πλοίου σε μία μελέτη.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει τη μεθοδολογία της μελέτης αντοχής έναντι διαρροής που προδιαγράφουν οι κανονισμοί που διέπουν τη σχεδίαση και την κατασκευή των πλοίων τύπου Bulk Carrier, δηλαδή τους Common Structural Rules for Oil Tankers and Bulk Carriers 2019 (CSR). Επιπλέον, γίνεται εφαρμογή των Κανονισμών για ένα δεδομένο πλοίο τύπου Bulk Carrier με τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων, με τελικό στόχο την εκτίμηση της αντοχής έναντι διαρροής των κύριων κατασκευαστικών στοιχείων ενός κύτους φορτίου.

1.2 Έννοια και Στόχος Νηογνώμωνων

Ο όρος νηογνώμων είναι σύνθετος και από τις λέξεις ναυς (πλοίο) και γνώμων, σημαίνει αυτόν που γνωρίζει και ελέγχει πλοία. Οι νηογνώμονες είναι ιδιωτικοί ή μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί, οι οποίοι έχουν σκοπό να πιστοποιούν, επιθεωρούν και κατατάσσουν τα πλοία σε διάφορες κατηγορίες και κλάσεις ανάλογα με το βαθμό της ασφάλειας και της καλής κατάστασης που βρίσκεται το πλοίο. Με τον όρο «κλάση» εκφράζεται η κατασκευαστική και μηχανική καταλληλότητα του πλοίου, σε ποιο βαθμό δηλαδή είναι άξιο και έμπιστο να ταξιδέψει με ασφάλεια.

Οι νηογνώμονες παρακολουθούν τα πλοία κατά την κατασκευή τους, αλλά και μετά από αυτή, καταγράφοντας τα σχέδια ναυπήγησης, τις επισκευές τους, τον εξοπλισμό και τις εγκαταστάσεις φορτοεκφόρτωσης, τα ατυχήματα και τα αποτελέσματα από τις διάφορες επιθεωρήσεις. Με τον τρόπο αυτό παρέχουν στους πλοιοκτήτες τα σχετικά πιστοποιητικά και στους ασφαλιστές ή ναυλωτές τις σχετικές πληροφορίες για την ασφάλεια του εκάστοτε πλοίου.

Ο νηογνώμονας καταφέρει να επιβεβαιώνει την καλή λειτουργία που απαιτείται για τη σωστή πλεύση του πλοίου, παρέχοντας τα πιστοποιητικά του πλοίου, δηλαδή την κλάση. Με αυτό τον

τρόπο, θεωρεί ότι το πλοίο έχει συμμορφωθεί στους τεχνικούς κανονισμούς και κανόνες που ο νηογνώμονας έχει θεσπίσει. Οι κανόνες αυτοί εκπονούνται από εξειδικευμένο προσωπικό και εγκρίνονται από τις αρμόδιες για κάθε αντικείμενο επιτροπές (committees), διεθνείς και εθνικές. Τους κανονισμούς αυτούς, έχει το δικαίωμα να τους διατηρεί και να τους ανανεώνει.

Παρά ταύτα, το πιστοποιητικό της κλάσης δεν θεωρείται ως εγγύηση της ασφάλειας ή αξιοπλοΐας του πλοίου, αλλά αποτελεί μόνο μία επιβεβαίωση ότι το πλοίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς που έχει εκδώσει ο εκάστοτε νηογνώμονας. Το σημαντικότερο κομμάτι της κλάσης είναι η διατήρησή της. Οι κυριότερες επιθεωρήσεις που υφίσταται ένα πλοίο είναι οι εξής:

- Η πρώτη ή αρχική επιθεώρηση (Initial Survey).
- Η ετήσια επιθεώρηση (Annual Survey).
- Η επιθεώρηση επισκευών (Repairs Survey), που γίνεται έπειτα από επισκευές που πραγματοποιούνται στο πλοίο.
- Η περιοδική επιθεώρηση (Periodic Survey).
- Η ειδική επιθεώρηση (Special Survey), που διενεργείται κάθε τέσσερα χρόνια.

Επιπλέον υπάρχουν και οι έκτακτες επιθεωρήσεις που γίνονται στην περίπτωση που υπάρχει πώληση, μετασκευή, ατύχημα ή εντοπισμός από τον πλοιοκτήτη κάποιου ελαττώματος που επηρεάζει την κλάση και χρειάζεται να γίνει επιδιόρθωση. Όταν υπάρχει εντοπισμός ελλείψεων από τις επιθεωρήσεις που πραγματοποιούνται, δημιουργούνται παρατηρήσεις οι οποίες καταγράφονται στα πιστοποιητικά του εκάστοτε πλοίου και μπορεί να προκαλέσουν αναστολή της κλάσης του ή και διαγραφή του, ανάλογα με τη σοβαρότητα των ελλείψεων αυτών.

1.3 Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων – International Association of Classification Societies (IACS)

Η Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων (International Association of Classification Societies – IACS) είναι μία μη κυβερνητική οργάνωση που ιδρύθηκε στις 11 Σεπτεμβρίου 1968. Με έδρα το Λονδίνο, αποτελεί τον κύριο συνεργάτη με συμβουλευτικό χαρακτήρα, σε θέση παρατηρητή, του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO). Μέσω αυτού εκδίδονται οι διάφορες οδηγίες του IMO.

Η Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων είναι ο κυριότερος αντιπρόσωπος των μεγαλύτερων νηογνωμόνων παγκοσμίως. Το βασικό αντικείμενο της ένωσης αυτής αφορά τόσο τα επίπεδα ασφαλείας των πλοίων, κατηγοριοποιώντας τα σε κλάσεις, όσο και τα επίπεδα διατήρησης των καθαρών θαλασσών, από τον κίνδυνο ρύπανσης αυτών από τα πλοία. Περισσότερο του 90% του παγκόσμιου διακινούμενου φορτίου του εμπορικού στόλου σε χωρητικότητα, καλύπτεται από τα μέλη της Ένωσης αυτής, τα οποία ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορίες. Ειδικότερα από αυτά τα μέλη ορίζονται πρότυπα κανόνων σχετικά με την ταξινόμηση του σχεδιασμού των πλοίων, τη ναυπηγική κατασκευή τους και τα μηχανολογικά συστήματα των πλοίων.

Τα μέλη της Διεθνούς Ένωσης Νηογνώμωνων ακολουθούν αυστηρά την ασφάλεια ποιότητας του Διεθνούς Οργανισμού Προτύπων (ISO – International Standard Organization), καθώς η παρουσία τους στην αναζήτηση της βελτίωσης υψηλών προτύπων σε σχέση με τα ποντοπόρα πλοία είναι σημαντική, και η εφαρμογή τους πρέπει να είναι ασφαλής.

Από τη μεριά του ο IACS, εκδίδει μεταξύ άλλων τα Unified Requirements (UR) τα οποία αποτελούν τις ελάχιστες απαιτήσεις βάσει των οποίων πρέπει να διαμορφώνονται οι κανόνες του εκάστοτε Νηογνώμονα (πρακτικά ακόμα και αυτών εκτός της Ένωσης). Ήδη από το 1971 είναι σε ισχύ το UR-S (Strength of Ships) που αφορά την αντοχή της μεταλλικής κατασκευής διαφόρων τύπων πλοίων. Ωστόσο το UR-S συμπληρώνεται από τους επιπλέον κανόνες της κάθε Κλάσης με αποτέλεσμα μεγάλες αποκλίσεις στις τελικές κατασκευές που ως έναν βαθμό παροτρύνει τον ανταγωνισμό.

1.4 Common Structural Rules (IACS CSR)

Ο ανταγωνισμός μεταξύ των Νηογνώμωνων ήταν και παραμένει κινητήρια δύναμη ως προς την καινοτομία. Παρ' όλα αυτά, ο IACS, προσπαθεί να επιτύχει έναν βαθμό συμφωνίας μεταξύ των κανονισμών και της φιλοσοφίας τους καθώς και κοινές ελάχιστες απαιτήσεις που είναι ιδιαίτερα χρήσιμες ειδικά όταν τα πλοία αλλάζουν Νηογνώμονα κατά την διάρκεια της ζωής τους ή για τα ναυπηγεία που κατασκευάζουν πλοία διαφόρων Κλάσεων. Ιδιαίτερα μετά από μια σειρά ατυχημάτων κατά την δεκαετία του '90 έγινε σαφές στην διεθνή ναυτιλιακή κοινότητα ότι έπρεπε να υιοθετηθούν κοινά πρότυπα στη ναυπήγηση πλοίων.

Το 2006 οι Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers (CSR-OT) και Common Structural Rules for Bulk Carriers (CSR-BC) τέθηκαν σε ισχύ από τον IACS, με σκοπό την υιοθέτηση πληρέστερων και ασφαλέστερων κανόνων βασισμένων στις αρχές της μηχανικής. Το πεδίο εφαρμογής τους ήταν όλα τα Bulk Carriers με μήκος μεγαλύτερο των 90 m και όλα τα Double Hull Oil Tankers με μήκος μεγαλύτερο των 150 m. Με τους νέους κανόνες εισήχθησαν αυστηρές απαιτήσεις για τον υπολογισμό του ορίου διάβρωσης (corrosion addition), για την αντοχή σε κόπωση (fatigue assessment) και εκτενείς υπολογισμοί για τον προδιαγεγραμμένο προσδιορισμό των διαστάσεων των κατασκευαστικών στοιχείων (prescriptive scantling requirements) και την ανάλυση της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (strength assessment using finite element analysis). Τέλος, η προκύπτουσα σαφήνεια των βασικών αρχών, που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάπτυξη των κανόνων και που περιέχονται στα αντίστοιχα έγγραφα (Technical Background Documents), θα βοηθούσαν στην αξιολόγηση των απαιτήσεων και θα συνεισφέρον στην ανάπτυξη μελλοντικών κανονισμών.

Πλέον και για πρώτη φορά, η βιομηχανία έπρεπε να προσαρμοσθεί σε μία ριζική αλλαγή στα σχεδιαστικά και κατασκευαστικά πρότυπα. Όλα τα υπάρχοντα σχέδια που είχαν αναπτυχθεί και ήταν η βάση για κάθε νέα κατασκευή έπρεπε να αναθεωρηθούν και διορθωθούν ώστε να συμφωνούν με τους νέους CSR. Επίσης έγινε αναθεώρηση πολλών κανονισμών ώστε να διαπιστωθεί η συμφωνία τους με τους CSR.

1.4.1 Εναρμόνιση Κοινών Κατασκευαστικών Κανόνων (IACS CSR-H)

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:

- Το πρώτο μέρος (Part 1: General Hull Requirements), το οποίο περιλαμβάνει τις κοινές απαιτήσεις τόσο για Bulk Carriers όσο και για Oil Tankers, που ενδεικτικά αφορούν την αντοχή του πλοίου ως δοκός, τη διαστασιολόγηση των ελασμάτων και των ενισχυτικών, την αντοχή σε κόπωση και λυγισμό καθώς 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.

1.5 Αντικείμενο, στόχοι και μεθοδολογία της διπλωματικής εργασίας

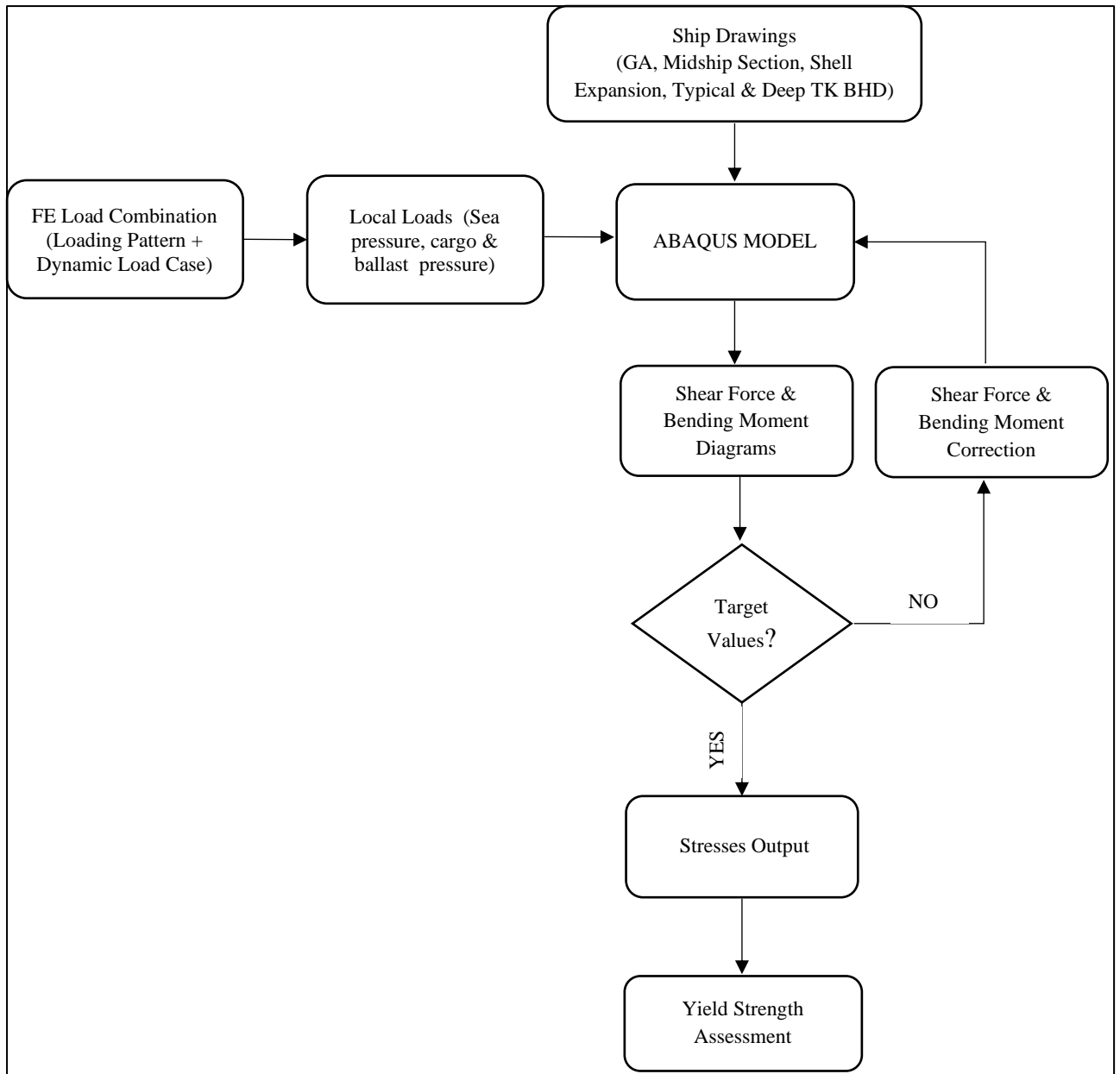
Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μία μελέτη αντοχής έναντι διαρροής στο εσωτερικό ενός κύτους φορτίου (Cargo Hold Analysis) που βρίσκεται στην περιοχή της μέσης τομής με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η συγκεκριμένη μελέτη σε πρώτη φάση έχει ως σκοπό να επαληθεύσει, εφόσον το υπό εξέταση πλοίο έχει κατασκευαστεί σύμφωνα με τους Κοινούς Κατασκευαστικούς Κανόνες, ότι τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου, δηλαδή τα διαμήκη ελάσματα, τα στοιχεία πρωτεύουσας στήριξης, οι εγκάρσιες φρακτές και τα ενισχυτικά ικανοποιούν το προβλεπόμενο κριτήριο διαρροής. Σε δεύτερη φάση, θέλουμε να υπολογίσουμε το περιθώριο ασφαλείας που προκύπτει ανάμεσα στη διαστασιολόγηση των κατασκευαστικών στοιχείων σύμφωνα με σχέσεις της μηχανικής και εμπειρικούς τύπους και τα αποτελέσματα από την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η παρούσα μελέτη πραγματοποιείται σύμφωνα με τους Κοινούς Κατασκευαστικούς Κανόνες (CSR). Μάλιστα, γίνεται κυρίως χρήση του Κεφαλαίου 4 (Loads) και του Κεφαλαίου 7 (Direct Strength Analysis).

Η μελέτη γίνεται για ένα υπάρχον εμπορικό πλοίο τύπου Bulk Carrier του οποίου τα κατασκευαστικά στοιχεία είναι γνωστά. Με δεδομένο το πλοίο, επιλέγονται δύο δυσμενείς καταστάσεις φόρτωσης από το Trim & Stability Booklet οι οποίες συνδυάζονται με συγκεκριμένες δυναμικές καταστάσεις (dynamic load cases) που προβλέπονται από τους κανονισμούς. Με αυτά δεδομένα, και σύμφωνα με το Κεφάλαιο 4 των Κανονισμών CSR (Loads) υπολογίζονται οι εξωτερικές και εσωτερικές πιέσεις της θάλασσας, του φορτίου και του έρματος σε όλα τα σημεία της κατασκευής.

Στη συνέχεια, δημιουργείται το μοντέλο τριών αμπαριών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS / CAE σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου και αφού έχει αφαιρεθεί το απαιτούμενο περιθώριο διάβρωσης. Στο μοντέλο επίσης εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες που προβλέπουν οι κανονισμοί καθώς και τα τοπικά φορτία που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Ακόμα, εισάγεται το πλέγμα και καθορίζονται τα είδη πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Η ανάλυση του μοντέλου πραγματοποιείται κάποιες φορές προσθέτοντας καμπτικές ροπές στα άκρα του με σκοπό να γίνει διόρθωση των καμπτικών ροπών και των διατμητικών δυνάμεων στην υπό εξέταση περιοχή του μεσαίου κύτους.

Από την τελική ανάλυση λαμβάνονται οι τάσεις Von Mises για όσα κατασκευαστικά στοιχεία έχουν μοντελοποιηθεί ως στοιχεία κελύφους και οι αξονικές τάσεις για όσα έχουν προσομοιωθεί με στοιχεία δοκού. Ανά περιοχές, εντοπίζεται ο μέγιστος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής και συγκρίνεται με τον επιτρεπόμενο συντελεστή διαρροής που προδιαγράφουν οι κανονισμοί. Τέλος, υπολογίζεται ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει από τον λόγο αυτών των δύο μεγεθών.

Στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί φαίνεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία, με τελικό σκοπό τον έλεγχο αντοχής έναντι διαρροής σε ένα κύτος φορτίου, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.



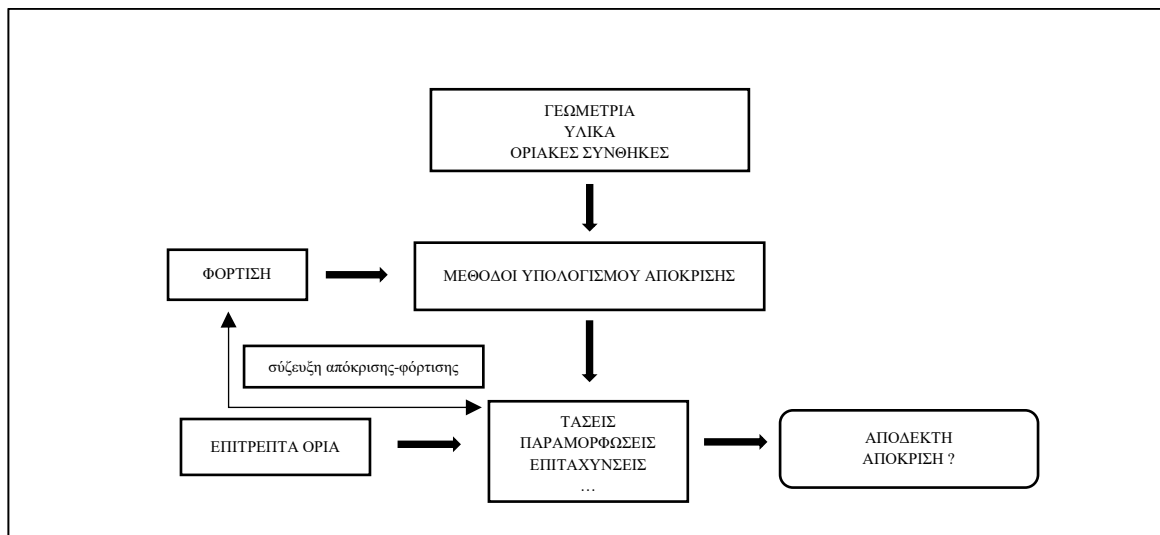
Εικόνα 1.2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε

2 Μελέτη Αντοχής Πλοίου

2.1 Αντικείμενο της Αντοχής του Πλοίου

Ο έλεγχος της αντοχής του πλοίου εξασφαλίζεται μέσω της μελέτης της κατασκευής του πλοίου σε σχέση με την ικανότητά της να φέρει ασφαλώς τις κάθε είδους δράσεις (δυνάμεις, επιταχύνσεις, θερμοκρασιακές μεταβολές), στις οποίες υπόκειται. Αυτές οι δράσεις προκαλούν την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων, από τις οποίες ελέγχεται η μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Στοιχεία λοιπόν της μελέτης είναι:

- Ο υπολογισμός των φορτίσεων που ασκούνται στο πλοίο,
- Ο υπολογισμός των προκαλούμενων τάσεων και παραμορφώσεων,
- Ο προσδιορισμός της μέγιστης αντοχής του πλοίου και
- Ο προσδιορισμός των κριτηρίων ασφαλείας και ο έλεγχος της κατασκευής.



Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση ανάλυσης κατασκευών (Μ.Σ. Σαμουηλίδης, Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου, 2011)

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς, που παρέχει η κατασκευή έναντι των δράσεων στις οποίες υπόκειται στη διάρκεια της ζωής της, το πλοίο ελέγχεται σε οριακές συνθήκες, που αναμένεται να αντιμετωπίσει, θεωρώντας τις δράσεις που ασκούνται σε αυτό α) κατά την υπηρεσιακή λειτουργία του (Serviceability Limit State), β) όταν υπόκειται σε ακραίες καταστάσεις (Ultimate Limit State), γ) λόγω των εναλλασσόμενων φορτίσεων στη διάρκεια της ζωής του (Fatigue Limit State) και δ) κατά την εμπλοκή του σε ατυχήματα (Accidental Limit State). Αυτά, περιγράφονται εκτενέστερα παρακάτω:

- *Serviceability Limit State - SLS*: Για να εκτελεί ικανοποιητικά τις κανονικές λειτουργίες του, ελέγχεται αν το πλοίο μπορεί να ανταπεξέλθει τις δράσεις που αναμένεται να αντιμετωπίσει στη διάρκεια της ζωής του. Τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο είναι:
 - Οι τάσεις, με άνω επιτρεπόμενα όρια το όριο διαρροής και η τάση λυγισμού.

- Οι παραμορφώσεις, με επιτρεπόμενο όριο ένα κλάσμα του ανυποστήρικτου μήκους του δοκαριού ή της πλάκας π.χ. 1/100.
 - Η διάβρωση, η οποία λαμβάνεται υπόψη κατά τη σχεδίαση, επιλέγοντας ελάσματα και ενισχυτικά μεγαλύτερου πάχους από αυτά που προκύπτουν από τη μελέτη της αντοχής.
 - Η ολκιμότητα της κατασκευής, που διασφαλίζεται με την επιλογή υλικών με κατάλληλες ιδιότητες.
- *Ultimate Limit State - ULS*: Κατά τον έλεγχο της μέγιστης αντοχής, εξετάζεται αν η κατασκευή μπορεί να φέρει χωρίς να καταρρεύσει, ακραία φορτία, που είναι δυνατόν να αντιμετωπίσει στη διάρκεια της ζωής του.
 - *Fatigue Limit State - FLS* : Γίνεται έλεγχος για το αν η κατασκευή του πλοίου μπορεί να φέρει ασφαλώς τις εκτιμώμενες εναλλαγές της φόρτισης που πρόκειται να αντιμετωπίσει σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Η διάρκεια της ζωής του πλοίου λαμβάνεται για τους σχετικούς υπολογισμούς ως 25 χρόνια.
 - *Accidental Limit State – ALS*: Στις περισσότερες περιπτώσεις σχεδίασης του πλοίου δεν εξετάζονται δράσεις που ασκούνται κατά την εμπλοκή του σε ατυχήματα όπως συγκρούσεις και προσαράξεις. Μια περίπτωση που οι κανονισμοί CSR απαιτούν μελέτη σε περίπτωση ατυχήματος, είναι η απαίτηση οι φρακτές να αντέχουν την πίεση που ασκείται λόγω της κατάκλισης στα διπλανά αμπάρια.

Η μελέτη αντοχής της κατασκευής του πλοίου, δηλαδή η εύρεση της απόκρισής του υπό την επίδραση των φορτίων στις οποίες υπόκειται, είναι μια σύνθετη διαδικασία και δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί με μία μόνο ανάλυση. Ο όρος «απόκριση» δηλώνει την τρισδιάστατη χωρική και χρονική κατανομή των τάσεων, παραμορφώσεων και επιταχύνσεων της κατασκευής. Ορισμένες δυσκολίες που παρουσιάζονται και κάνουν την μελέτη αντοχής του πλοίου μία διαδικασία που απαιτεί επιμέρους αναλύσεις είναι:

- Η πολύπλοκη γεωμετρία της κατασκευής του πλοίου, με απότομες μεταβολές σε αρκετά σημεία, που δυσχεραίνει την κατασκευή ενός μόνο μοντέλου για την επίλυσή του με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων.
- Η χρονική και χωρική μεταβολή της φόρτισης του βάρους (βάρους πλοίου και φορτίου) και των πιέσεων της θάλασσας.
- Η στήριξη του πλοίου στη θάλασσα και η αλληλεπίδραση της φόρτισης με την απόκριση.
- Η ύπαρξη πολλών μορφών καταπόνησης των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου.

Επομένως, για να ξεπεραστούν οι ανωτέρω προκλήσεις που καλείται να λύσει ο μηχανικός, η μελέτη αντοχής του πλοίου γίνεται σε περισσότερα από ένα στάδια, εξετάζοντας κάθε φορά συγκεκριμένες μορφές καταπόνησης ολόκληρης ή τμημάτων της κατασκευής. Οι βασικότερες μελέτες που γίνονται στο πλαίσιο αυτό, είναι:

- Μελέτη του πλοίου θεωρούμενου ως λεπτότοιχου δοκαριού.
- Μελέτη τμήματος, περί τον μέσο νομέα, που περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα κύτος.
- Μελέτη κατασκευαστικών συνόλων, ως διπύθμενο, φρακτές, ενισχυμένα ελάσματα.

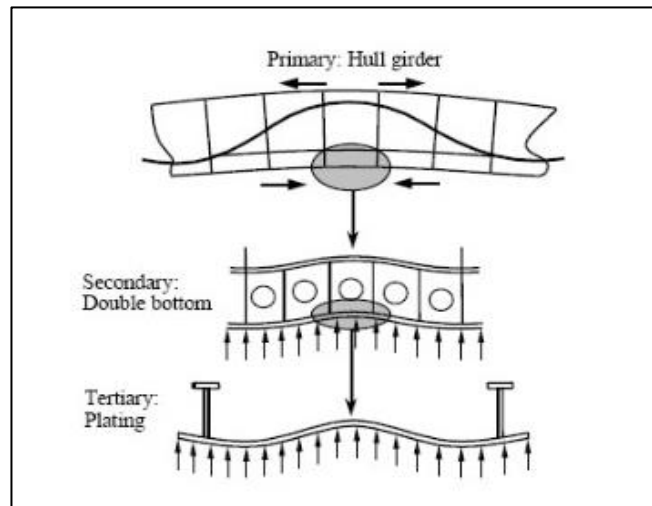
- Μελέτη νομέων και διαδοκίδων.
- Μελέτη πλακών.
- Μελέτη ενισχυτικών.
- Μελέτη κατασκευαστικών λεπτομερειών σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων.

2.2 Ολική και Τοπική Αντοχή του Πλοίου

Ο ναυπηγός θα πρέπει να εξετάσει την απόκριση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου σε ολική και τοπική αντοχή. Η διάκριση αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μελέτη της απόκρισης μιας μορφής καταπόνησης αγνοώντας τις άλλες. Χαρακτηριστικά αυτών των δύο ακολουθούν παρακάτω:

- *Ολική αντοχή του πλοίου:* Η ολική αντοχή του πλοίου αφορά τη μελέτη της απόκρισης του πλοίου θεωρουμένου ως λεπτότοιχου δοκαριού. Οι τάσεις που μελετώνται είναι:
 - Οι ορθές τάσεις από τη διαμήκη κάμψη του πλοίου ως δοκού.
 - Οι συνεπακόλουθες διατμητικές τάσεις της διαμήκου κάμψης του πλοίου.
 - Οι ορθές και διατμητικές τάσεις που προκύπτουν από άλλες μορφές καταπόνησης του πλοίου θεωρουμένου ως δοκαριού δηλαδή στρέψη και οριζόντια κάμψη.Οι ανωτέρω τάσεις αναφέρονται στη βιβλιογραφία ως **πρωτεύουσες τάσεις – primary stresses**.
- *Τοπική αντοχή του πλοίου:* Η τοπική αντοχή του πλοίου αφορά στη μελέτη των διαφόρων επιφανειών του πλοίου (εξωτερικό περίβλημα, κατάστρωμα, φρακτές κλπ.) υπό τη δράση των τοπικών φορτίσεων που ασκούνται κατά κανόνα κάθετα σε αυτές. Οι τάσεις που λαμβάνονται υπόψη είναι:
 - Οι τάσεις λόγω της καταπόνησης των ενισχυμένων ελασμάτων μεταξύ των φρακτών και του περιβλήματος, οι οποίες είναι γνωστές ως **δευτερεύουσες τάσεις – secondary stresses**.
 - Οι τάσεις λόγω της καταπόνησης μη ενισχυμένων πλακών μεταξύ των ενισχυτικών, γνωστές ως **τριτεύουσες τάσεις – tertiary stresses**.

Να σημειωθεί ότι η πρόσθεση των τριών τάσεων που προκύπτουν, όταν έχουν την ίδια διεύθυνση, δεν έχει θεωρητική βάση γιατί αφενός οι κατανομές τους κατά το πάχος των ελασμάτων είναι διαφορετικές και αφετέρου δεν είναι σταθερές στο χρόνο και δεν έχουν την ίδια φάση. Παρόλα αυτά το άθροισμα των τριών μεγίστων των τάσεων χρησιμοποιούνται σε κάποιες περιπτώσεις για τον έλεγχο των τάσεων που αναπτύσσονται στη γάστρα του πλοίου. Για την επιλογή των διαστάσεων των διαφόρων στοιχείων της κατασκευής με βάση τους κανονισμούς των νηογνομόνων, εξετάζονται οι απαιτήσεις τόσο σε ολική όσο και σε τοπική αντοχή και επιλέγεται η μέγιστη απαιτούμενη τιμή.



Εικόνα 2.2: Πρωτεύουσες-δευτερεύουσες-τριτεύουσες τάσεις στη γάστρα του πλοίου

2.2.1 Απλή Θεωρία Κάμψης

Για τον προσδιορισμό των ορθών τάσεων που αναπτύσσονται στη διατομή της γάστρας λόγω κάμψης, χρησιμοποιούνται οι παραδοχές της απλής θεωρίας της κάμψης και οι εξισώσεις ισορροπίας.

Σύμφωνα με την απλή θεωρία της κάμψης οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και η διατομή στρέφεται γύρω από έναν άξονα που ονομάζεται ουδέτερος άξονας. Οι συνισταμένες δύναμη και ροπή που εφαρμόζονται στη διατομή προκύπτουν από τις εξισώσεις ισορροπίας. Θεωρώντας ότι οι εγκάρσιες επίπεδες τομές του πλοίου δεν αλλάζουν μορφή κατά την κάμψη, ότι το υλικό της κατασκευής του πλοίου είναι γραμμικά ελαστικό και ότι η αξονική δύναμη και καμπτική ροπή που εφαρμόζονται στη διατομή ισούνται με μηδέν και M αντίστοιχα, οι ορθές τάσεις δίνονται από την σχέση:

$$\sigma_x = M \cdot \frac{y}{I}$$

Όπου:

- σ : η ορθή τάση σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα της διατομής Oz .
- I : η ροπή αδράνειας της διατομής γύρω από τον ουδέτερο άξονα Oz .

Αν οι ροπές που προκαλούν εφελκυσμό στο κατάστρωμα (κατάσταση hogging) θεωρηθούν θετικές και η απόσταση y είναι θετική για σημεία που βρίσκονται άνω του ουδέτερου άξονα τότε οι εφελκυστικές τάσεις προκύπτουν θετικές και οι θλιπτικές αρνητικές.

Μολονότι σε περιπτώσεις διατομών καμπτόμενων λεπτότοιχων δοκαριών, ως η γάστρα ενός πλοίου, οι παρατηρούμενες τάσεις διαφέρουν από αυτές που προκύπτουν από την παραπάνω σχέση, η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο των ορθών τάσεων λόγω κάμψης της γάστρας θεωρουμένης ως δοκού.

Για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας της διατομής λαμβάνονται όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία της γάστρας με επαρκές μήκος, που τους επιτρέπει να αναπτύξουν στις εγκάρσιες διατομές τους τις τάσεις, που προβλέπονται από την απλή θεωρία κάμψης. Γενικά, για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας λαμβάνονται υπόψη:

- Το κύριο και τα ενδιάμεσα καταστρώματα.
- Τα ελάσματα πυθμένα και εσωτερικού πυθμένα.
- Το πλευρικό περίβλημα.
- Οι διαμήκεις φρακτές.
- Οι διαμήκεις ενισχύσεις.
- Το περίζωμα του στομίου των κυτών (hatch coaming) εφ' όσον είναι στηριγμένο σε διαμήκη φρακτή ή διαδοκίδα, έχει μήκος ίσο με 14% του μήκους του πλοίου και είναι ενισχυμένο σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Ροπή αντίστασης Διατομής

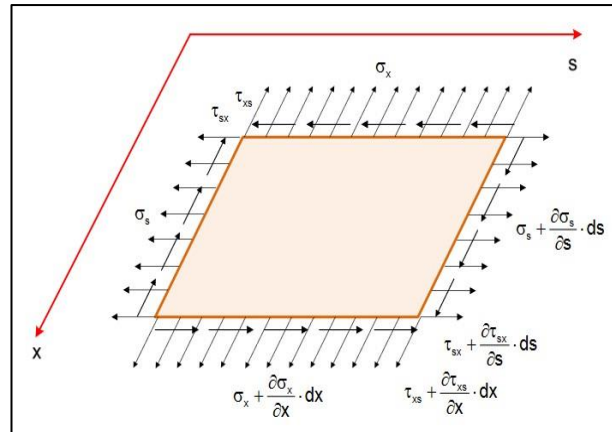
Η ροπή αντίστασης SM (Section Modulus) είναι ένα χρήσιμο γεωμετρικό μέγεθος που ορίζεται σχετικά με κάποιο σημείο της εγκάρσιας διατομής που απέχει απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα. Μας ενδιαφέρει περισσότερο ο υπολογισμός της ελάχιστης ροπής αντίστασης της διατομής αφού εκφράζει την αντίσταση σε κάμψη της διατομής. Στην περίπτωση, που η απόσταση του καταστρώματος y_d από τον ουδέτερο άξονα είναι μεγαλύτερη από την απόσταση του πυθμένα από αυτόν, όπως συμβαίνει συνήθως, ισχύει:

$$SM = \frac{I}{y_d}$$

Εύκολα προκύπτει ότι η ροπή αντίστασης είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέγιστης τάσης που αναπτύσσεται σε μια διατομή λόγω κάμψης. Οι κανονισμοί, στον έλεγχο κάμψης του πλοίου ως δοκού, ορίζουν μια ελάχιστη ροπή αντίστασης που θα πρέπει να υπερβαίνει η προς εξέταση διατομή του πλοίου.

2.2.2 Διατμητικές Τάσεις Λόγω Κάμψης

Το πλοίο, όταν μελετάται ως δοκός, εκτός από τη ροπή κάμψης που δημιουργεί ορθές τάσεις στα δομικά στοιχεία διαμήκους αντοχής, παραλαμβάνει και κατακόρυφες τέμνουσες δυνάμεις. Αυτές παραλαμβάνονται μέσω συνεπίπεδης διάτμησης από τα ελάσματα της πρωτεύουσας δομής της μεταλλικής κατασκευής. Τα ελάσματα της γάστρας του πλοίου θεωρούμενου ως δοκού, υπόκεινται σε ορθές και διατμητικές τάσεις. Ακολουθεί ένα στοιχείο ελάσματος που βρίσκεται σε επίπεδη εντατική κατάσταση.



Εικόνα 2.3: Έλασμα σε επίπεδη εντατική κατάσταση

Οι εξισώσεις ισορροπίας του παραπάνω στοιχείου δίνουν:

$$t \cdot \tau_{xs} = t \cdot \tau_{sx} = t \cdot \tau$$

$$\frac{\partial(t \cdot \sigma_x)}{\partial x} + \frac{\partial(t \cdot \tau)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(t \cdot \sigma_s)}{\partial x} + \frac{\partial(t \cdot \tau)}{\partial x} = 0$$

Όπου t το πάχος του ελάσματος. Το γινόμενο της διατμητικής τάσης επί το πάχος του ελάσματος σε κάποιο σημείο ορίζεται ως «ροή διάτμησης» και εκφράζεται σε δύναμη ανά μονάδα μήκους. Οι πάνω εξισώσεις ισχύουν για κάθε στοιχείο των ελασμάτων $dx \cdot ds$ του πλοίου, που φέρουν ορθές τάσεις κατά την κάμψη τους ως δοκαριού στο κατακόρυφο επίπεδο. Θεωρώντας ως Ox τον διαμήκη άξονα του πλοίου και Os τον εγκάρσιο άξονά του ισχύει από την θεωρία της απλής κάμψης:

$$\sigma_x = M \cdot \frac{y}{I}$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις ισορροπίας με τη σχέση της απλής κάμψης προκύπτει η κατανομή των διατμητικών τάσεων λόγω κάμψης στις διατομές του πλοίου:

$$\frac{\partial(t \cdot \sigma_x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M}{I} \cdot t \cdot y \right) = \frac{\partial M}{\partial x} \cdot \frac{t \cdot y}{I} = Q \cdot \frac{t \cdot y}{I}$$

$$\Delta(t \cdot \tau) = -\frac{Q}{I} \cdot \int_s^{s+\Delta s} t \cdot y \cdot ds' \Rightarrow \Delta(t \cdot \tau) = -\frac{Q}{I} \cdot m(\Delta s)$$

Όπου με $\Delta(t \cdot \tau)$ η διαφορά της ροής διάτμησης μεταξύ των άκρων του τμήματος της ακμής Δs και $m(\Delta s)$ η πρώτη ροπή επιφανείας της ακμής ως προς τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

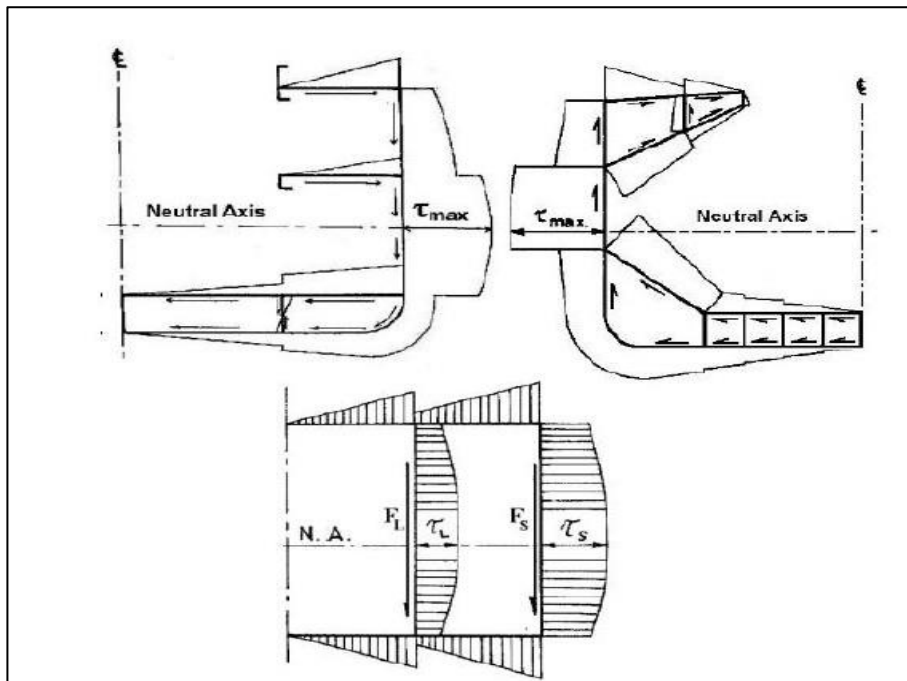
Επομένως, σε μια διατομή που καταπονείται σε διατμητική δύναμη, ξεκινώντας από ένα γνωστό σημείο (π.χ. ελεύθερο άκρο ή σημείο συμμετρίας που η διατμητική τάση μηδενίζεται) μπορούμε να υπολογίζουμε τμηματικά τις διατμητικές ροές και άρα την κατανομή των διατμητικών τάσεων. Στην περίπτωση ύπαρξης κλειστών κυψελών, όπως συμβαίνει στα πλοία,

το πρόβλημα του υπολογισμού των διατμητικών τάσεων είναι υπερστατικό και προκύπτει από την επαλληλία δύο κατανομών μέσω της σχέσης:

$$q = q_s + q_c$$

Η πρώτη εξ' αυτών ικανοποιεί της εξισώσεις ισορροπίας αλλά όπου απαιτείται μια τιμή της ροής για χρήση της εξίσωσης θεωρείται αυθαίρετα και η δεύτερη δίνεται από τη σχέση:

$$q_c = - \frac{\int_{s_1}^{s_2} q_s \cdot \frac{ds}{t(s)}}{\int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{t(s)}}$$

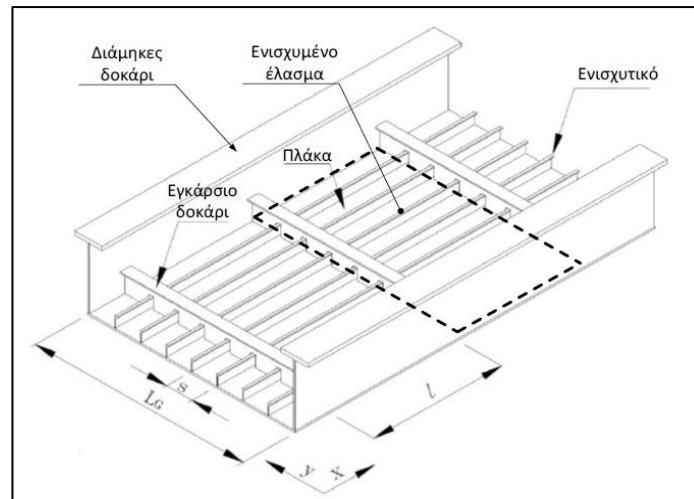


Εικόνα 2.4: Κατανομή διατμητικών τάσεων σε διατομές πλοίων

Όπως φαίνεται, οι διατμητικές τάσεις στον ουδέτερο άξονα είναι μέγιστες και τα κατακόρυφα στοιχεία συμμετέχουν περισσότερο στην παραλαβή της διάτμησης.

2.2.3 Κάμψη Ενισχυμένων Ελασμάτων

Τα ελάσματα του πλοίου, λόγω της μικρής καμπτικής δυσκαμψίας τους, ενισχύονται με διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά. Ως ενισχυμένο έλασμα, θεωρούμε το χωρίο που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο διαδοχικά διαμήκη και εγκάρσια δοκάρια, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Μας ενδιαφέρει η απόκριση των ενισχυμένων ελασμάτων σε κάθετα φορτία, όπως η υδροστατική πίεση και η πίεση του φορτίου.



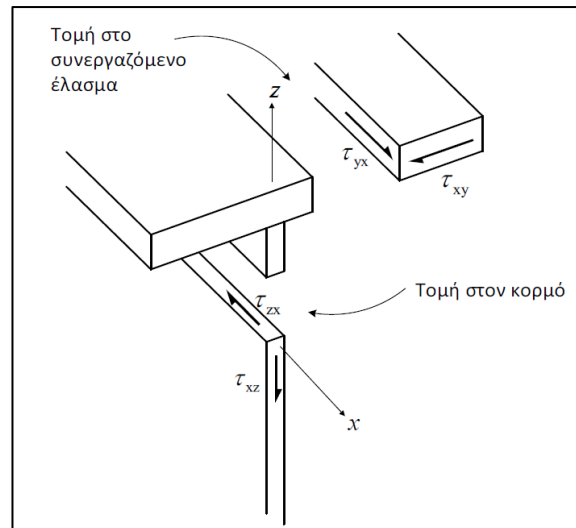
Εικόνα 2.5: Ενισχυμένο έλασμα

Αρχικά, η περιοδικότητα στη γεωμετρία και στο εντατικό πεδίο μας επιτρέπουν να αναγάγουμε το ενισχυμένο έλασμα σε μια δοκό ισοδύναμης διατομής με σκοπό την εφαρμογή της απλής θεωρίας κάμψης δοκών όπως αναλύθηκε προηγουμένως. Ωστόσο, μαθηματικές αναλύσεις, αριθμητικές προσομοιώσεις και πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι η πραγματική κατανομή των ορθών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω της κάμψης του ενισχυμένου ελάσματος εμφανίζεται ως μη-γραμμική κατά το πλάτος του ελάσματος εξαιτίας του φαινομένου της υστέρησης διάτμησης.

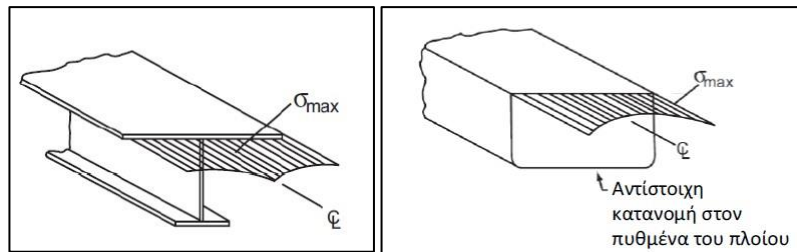
Αυτό συμβαίνει γιατί η σχέση της απλής κάμψης αγνοεί τη στρέβλωση της διατομής λόγω της ύπαρξης διατμητικών παραμορφώσεων καθώς θεωρεί πως τα κάθετα επίπεδα κατά το μήκος της δοκού πριν την εφαρμογή της φόρτισης παραμένουν κάθετα και κατά την εφαρμογή της φόρτισης. Αυτή η στρέβλωση οδηγεί σε αύξηση του μεγέθους των πραγματικών ορθών τάσεων από αυτό που προβλέπει η απλή κάμψη. Επομένως, το υλικό του φορέα έχει να παραλάβει ταυτόχρονα την καταπόνηση που επιφέρει η καμπτική ροπή και η τέμνουσα δύναμη.

Η τέμνουσα δύναμη προκαλεί διατμητικές τάσεις όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Αυτές οι διατμητικές τάσεις οδηγούν στην ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων γ , οι οποίες αφενός οδηγούν στην αλλαγή της γωνίας ενός απειροστού στοιχείου (εξ'ορισμού της διατμητικής παραμόρφωσης) αλλά και στην επιμήκυνση (ή σύντμηση), ϵ , των ινών του πέλματος που βρίσκονται παράλληλα στον άξονα x του φορέα.

Το αποτέλεσμα της υστέρησης σε διάτμηση είναι δηλαδή οι τάσεις λόγω κάμψης να έχουν τη μη γραμμική κατανομή στο πέλμα όπως απεικονίζονται στις εικόνες που ακολουθούν για ανοιχτή και κλειστή διατομή αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις λεπτότοιχες διατομές όπου συνδυάζονται στοιχεία που παραλαμβάνουν τη διάτμηση λόγω τεμνουσών (στοιχεία κορμού) και στοιχεία που παραλαμβάνουν τις ορθές τάσεις λόγω κάμψης (στοιχεία πελμάτων).

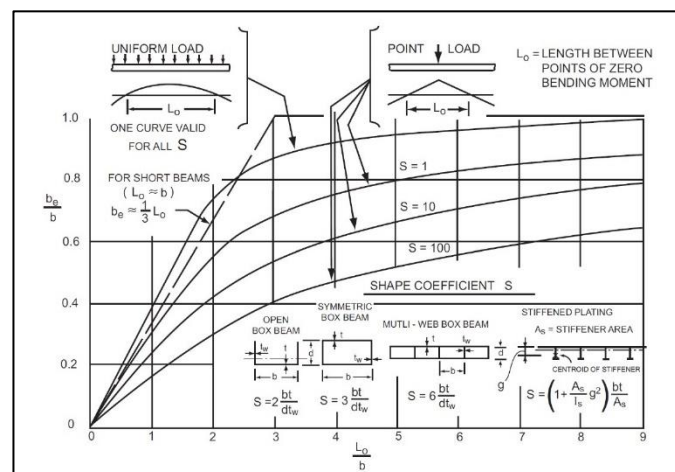


Εικόνα 2.6: Επεξηγηματική απεικόνιση της διάτμησης των στοιχείων της διατομής



Εικόνα 2.7: Κατανομή Ορθών τάσεων σε ανοιχτή και κλειστή διατομή

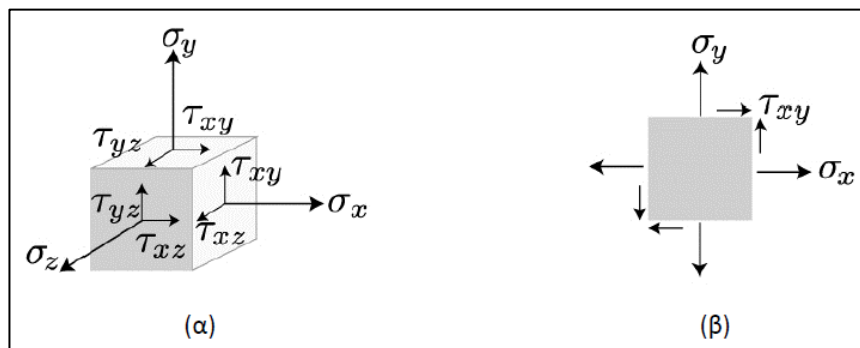
Για την απλοποίηση του προβλήματος της υστέρησης διάτμησης, στο πλαίσιο της πρακτικής σχεδίασης, χρησιμοποιείται η έννοια του «ισοδύναμου πλάτους ελάσματος σε κάμψη» που συμβολίζεται με b_e . Θεωρούμε ένα ισοδύναμο έλασμα ίδιου πάχους με το πραγματικό που φορτίζεται ομοιόμορφα με μέγεθος ίσο με αυτό της πραγματικής μέγιστης τάσης και φέρει το συνολικό φορτίο όπως το πραγματικό έλασμα. Για την εύρεση του πλάτους αυτού του ελάσματος χρησιμοποιείται το διάγραμμα Schade που ακολουθεί παρακάτω.



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα Schade

2.2.4 Κάμψη Πλακών

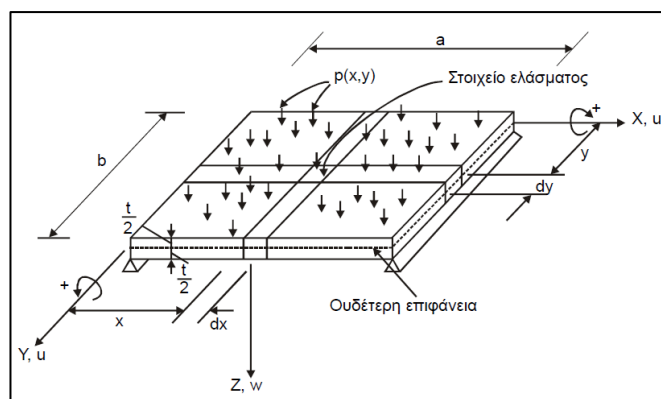
Το μεγαλύτερο μέρος των υλικών σημείων μιας φέρουσας κατασκευής αναπτύσσει τρισδιάστατο εντατικό πεδίο ως αποτέλεσμα των καταπονήσεων που δρουν σε αυτή. Ωστόσο, η μεταλλική κατασκευή του πλοίου είναι από τη φύση της λεπτότοιχη και αυτό μας επιτρέπει την απλούστευση της ανάλυσης του εντατικού πεδίου που αναπτύσσεται στα ελάσματα μεταξύ των ενισχυτικών. Πιο συγκεκριμένα, το πάχος των ελασμάτων, t , είναι μικρό σε σχέση με τη μικρότερη διάσταση των πλακών ($b/t > 25$) και αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται στο επίπεδο x - y της πλάκας να κυριαρχεί στην παραλαβή των εξωτερικών φορτίσεων. Ως εκ τούτου, την απόκριση των πλακών προβλέπει με αρκετά καλή ακρίβεια η κλασική θεωρία πλακών (classical plate theory), όπου αντιμετωπίζει το τρισδιάστατο εντατικό πρόβλημα ως δισδιάστατο.



Εικόνα 2.9: Μετατροπή προβλήματος από 3D (α) σε 2D (β)

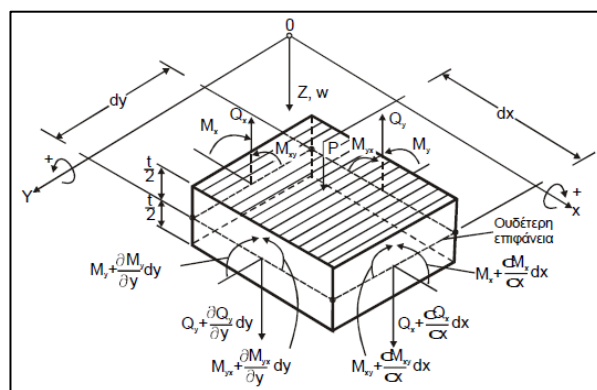
Η παραμόρφωση ενός ελάσματος περιγράφεται επαρκώς με την αναφορά στη γεωμετρία του μέσου επιπέδου (ουδέτερης επιφάνειας) στην οποία δεν αναπτύσσονται τάσεις όταν ασκείται καθαρά καμπτική φόρτιση. Η γραμμική θεωρία απόκρισης λεπτών ορθογωνίων ελασμάτων που αναπτύχθηκε από τους Love και Kirchhoff βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Το υλικό είναι γραμμικά ελαστικό, ομοιογενές και ισότροπο.
- Η πλάκα είναι επίπεδη πριν την εφαρμογή του φορτίου.
- Το πάχος είναι μικρό σε σχέση με τις άλλες διαστάσεις (ως άνω όριο εφαρμογής λαμβάνεται η τιμή $b/50$, όπου b είναι το μήκος της μικρότερης πλευράς).
- Το βέλος κάμψης που αναπτύσσεται είναι μικρό ως προς το πάχος της.
- Οι κάθετες ευθείες στο μέσο επίπεδο παραμένουν κάθετες και μετά την κάμψη της πλάκας (αμελούνται δηλαδή μετατοπίσεις λόγω διάτμησης).
- Η ορθή τάση κάθετα στο επίπεδο είναι αμελητέα.
- Κατά την κάμψη της πλάκας, το μέσο επίπεδο δεν επιμηκύνεται/στρεβλώνει.



Εικόνα 2.10: Ορθογώνιο ελάσμα υπό καμπτική φόρτιση

Θεωρούμε ένα στοιχείο του ελάσματος, όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα. Σε αυτό δείχνονται οι ροπές και οι δυνάμεις που έχουν θετικό πρόσημο.



Εικόνα 2.11: Ορθογώνιο ελάσμα υπό καμπτική φόρτιση

Από τις εξισώσεις στατικής ισορροπίας έχουμε:

$$\sum F_z = 0 \quad \sum M_x = 0 \quad \sum M_y = 0 \quad (1 \alpha-\gamma)$$

Από την πρώτη σχέση ισορροπίας προκύπτει ότι:

$$\left(Q_y + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx\right) dy - Q_x dy + \left(Q_x + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy\right) dx - Q_y dx + p dx dy = 0 \quad (2)$$

Όπου Q_x, Q_y είναι οι εφαπτομενικές δυνάμεις κατά μήκος των πλευρών του στοιχείου του ελάσματος, όπως φαίνεται στο πάνω σχήμα. Διαιρώντας με το εμβαδόν του στοιχείου του ελάσματος, $dx dy$, παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + p = 0 \quad (3)$$

Από τη δεύτερη σχέση ισορροπίας προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} & \left(M_{xy} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} dx \right) dy - M_{xy} dy + M_y dx - \left(M_y + \frac{\partial M_y}{\partial y} dy \right) dx + \\ & + Q_y dx dy - \left(Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \right) dx = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Οι ροπές του φορτίου $Q_x dx$ και της μεταβολής του φορτίου Q_x, Q_y θεωρούνται αμελητέες ποσότητες. Απλοποιώντας, έχουμε:

$$\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} + Q_y = 0 \quad (5)$$

Ομοίως, για τις ροπές ως προς τον άξονα Oy θα έχουμε:

$$\frac{\partial M_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} - Q_x = 0 \quad (6)$$

Από την αρχή της συμπληρωματικής διατμητικής τάσης έχουμε $M_{yx} = -M_{xy}$. Επομένως, η προηγούμενη σχέση γίνεται:

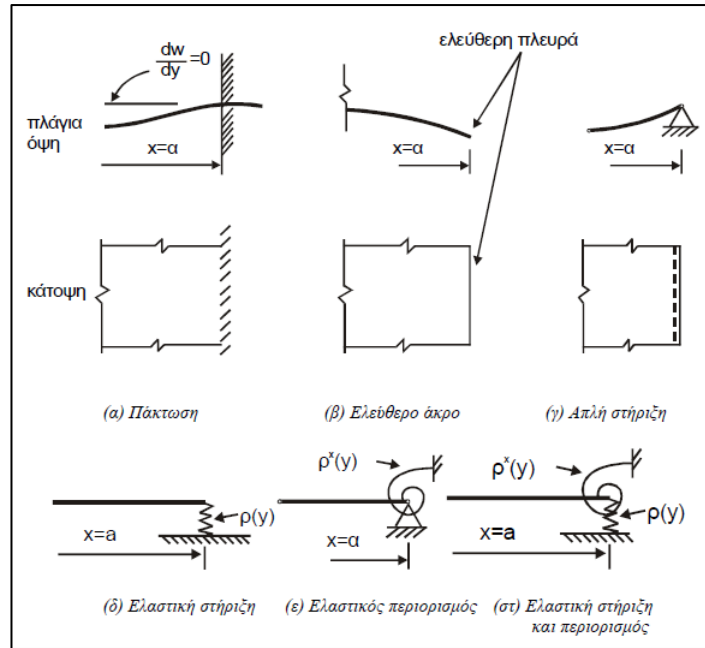
$$-\frac{\partial M_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial M_x}{\partial x} - Q_x = 0 \quad (7)$$

Αντικαθιστώντας τις (5) και (7) στην (3) έχουμε:

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + p = 0 \quad (8)$$

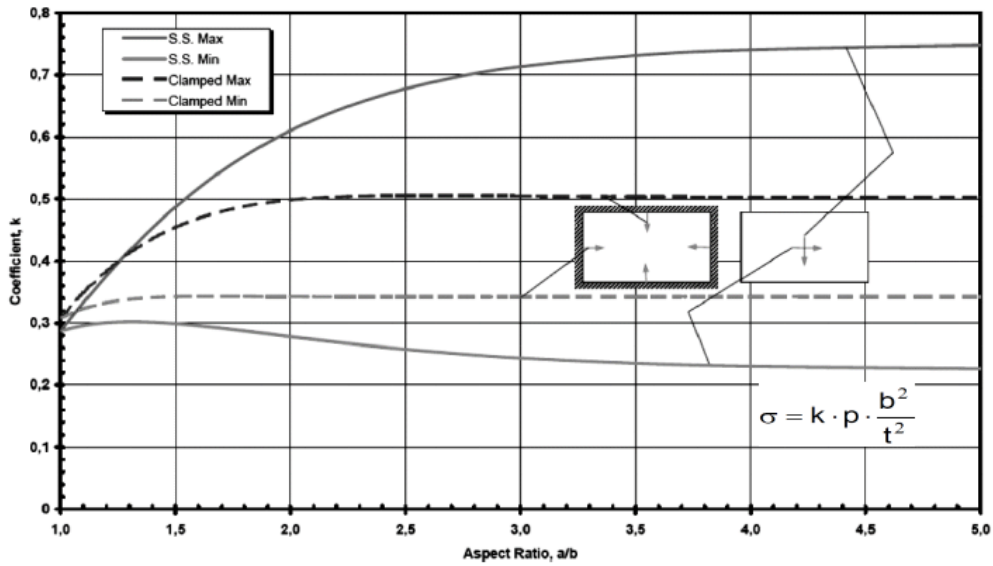
Η σχέση (8) είναι η εξίσωση ισορροπίας ενός λεπτού ορθογώνιου ελάσματος που φέρει φορτίο κάθετα στην επιφάνειά του. Η επίλυσή της θα πρέπει να γίνει σε συνδυασμό με κάποιες οριακές συνθήκες που φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.

Η αναλυτική επίλυση της (8) θα δώσει τιμές για τις μεταβλητές σε όλα τα σημεία που περικλείονται από και που συμπίπτουν με το σύνορο του ελάσματος. Αντίθετα, η αριθμητική επίλυση του προβλήματος, θα δώσει λύσεις σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων, μεταξύ των οποίων η συμπεριφορά θα εξαρτηθεί από τις συναρτήσεις που θα επιλέξουμε για τον τρόπο μεταβολής τους.

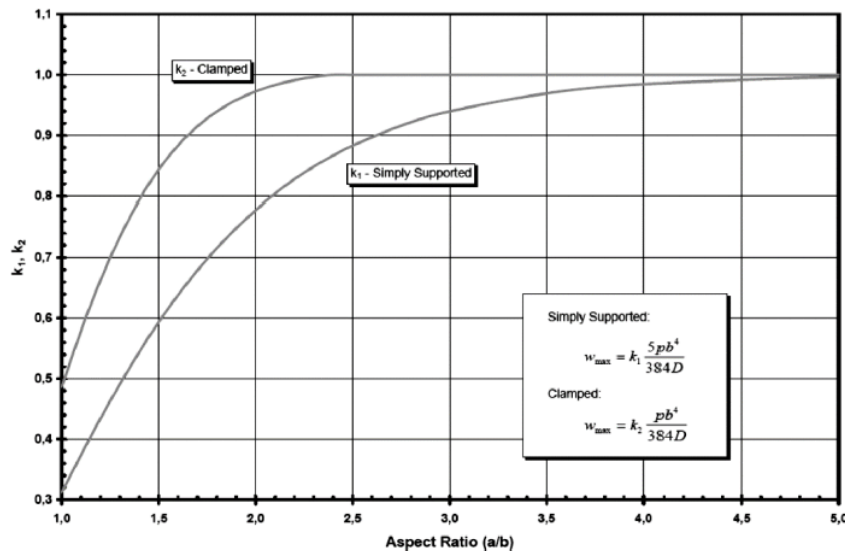


Εικόνα 2.12: Συνοριακές συνθήκες ελασμάτων

Σε πρακτικές εφαρμογές της ναυπηγικής, θεωρούνται συνθήκες απλής έδρασης ή πάκτωσης της περιφέρειας της πλάκας και τα αντίστοιχα στοιχεία απόκρισης δίνονται σύμφωνα με τις καμπύλες που ακολουθούν. Στην περίπτωση που συνυπάρχουν δύο συνιστώσες των τάσεων, τότε χρησιμοποιείται η ισοδύναμη τάση κατά Von Mises.



Εικόνα 2.13: Καμπύλη προσδιορισμού τάσης συναρτήσει του λόγου πλευρών για συνθήκες απλής έδρασης και πάκτωσης.



Εικόνα 2.14: Καμπύλη προσδιορισμού βέλους κάμψης συναρτήσει του λόγου πλευρών για συνθήκες απλής έδρασης και πάκτωσης

2.3 Κριτήριο Von Mises

Δομικά στοιχεία και μηχανολογικά εξαρτήματα που είναι κατασκευασμένα από όλκιμο υλικό συνήθως σχεδιάζονται έτσι ώστε το υλικό να μη διαρρέει υπό τις αναμενόμενες συνθήκες φόρτισης. Όταν το στοιχείο ή εξάρτημα βρίσκεται υπό μονοαξονική φόρτιση είναι εύκολο να προσδιοριστεί η τάση σ_x που προκαλεί διαρροή στο υλικό μέσω ενός πειράματος εφελκυσμού. Αυτό συμβαίνει διότι το δομικό στοιχείο ή το εξάρτημα και το δοκίμιο βρίσκονται στην ίδια εντατική κατάσταση. Στην περίπτωση που το δομικό στοιχείο ή μηχανολογικό εξάρτημα βρίσκεται σε επίπεδη εντατική κατάσταση δεν είναι δυνατόν να προβλέψουμε από ένα πείραμα την τάση αστοχίας. Συνεπώς, πρέπει να καθορίσουμε κάποιο κριτήριο ως προς τον ακριβή μηχανισμό της αστοχίας ενός υλικού που θα μας βοηθήσει στην αξιολόγηση μιας εντατικής κατάστασης. Τα δύο κριτήρια διαρροής που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για τα όλκιμα υλικά είναι τα κριτήρια Tresca και Von Mises. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, θα αναλυθεί το κριτήριο Von Mises εφόσον αυτό είναι που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της αντοχής των ελασμάτων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, όπως απαιτούν οι κανονισμοί.

Το κριτήριο αυτό βασίζεται στον προσδιορισμό της τροπικής ενέργειας στρέβλωσης σε ένα δεδομένο υλικό, η οποία συσχετίζεται με τις μεταβολές του σχήματός του. Ένα δομικό στοιχείο είναι ασφαλές όσο η μέγιστη τιμή της τροπικής ενέργειας στρέβλωσης ανά μονάδα όγκου στο υλικό $U_{d,max}$ παραμένει μικρότερη από την τροπική ενέργεια στρέβλωσης ανά μονάδα όγκου που απαιτείται για να προκαλέσει τη διαρροή σε ένα δοκίμιο πειράματος εφελκυσμού από το ίδιο υλικό $U_{d,y}$, δηλαδή:

$$U_{d,max} \leq U_{d,y}$$

Η ενέργεια στρέβλωσης ανά μονάδα όγκου σε ένα ισότροπο υλικό για την περίπτωση της τρισδιάστατης έντασης είναι:

$$U_d = \frac{1 + \nu}{3E} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3)$$

Όπου $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ είναι οι κύριες τάσεις, E το μέτρο ελαστικότητας και ν ο λόγος Poisson. Όταν ένα δοκίμιο σε πείραμα εφελκυσμού αρχίζει να διαρρέει έχουμε $\sigma_1 = \sigma_y$ και $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, επομένως:

$$U_{d,y} = \frac{1 + \nu}{3E} \sigma_y^2$$

Έτσι, το κριτήριο Von Mises σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις για τρισδιάστατη ένταση δίνει:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3 \leq \sigma_y^2$$

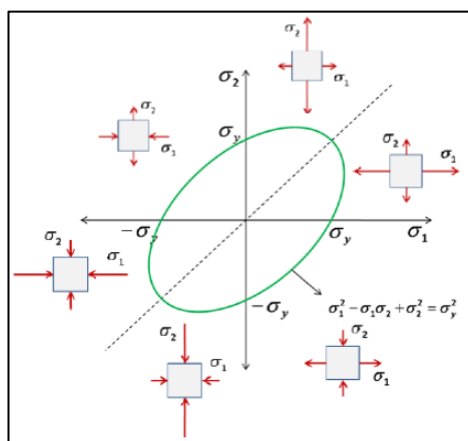
ή

$$\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \leq \sigma_y$$

Η εικόνα που ακολουθεί στη συνέχεια παρουσιάζει την καμπύλη διαρροής του Von Mises για πρόβλημα επίπεδης εντατικής κατάστασης. Ασφαλής είναι η σχεδίαση που η μέγιστη ισοδύναμη τάση βρίσκεται εντός της καμπύλης.

Αντικαθιστώντας με τη σχέση των κύριων τάσεων ως προς τις $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$ ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ για πρόβλημα επίπεδης έντασης) προκύπτει το κριτήριο διαρροής κατά Von Mises για επίπεδη εντατική κατάσταση:

$$\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\sigma_{xy}^2} \leq \sigma_y$$



Εικόνα 2.15: Καμπύλη πλαστικής διαρροής κατά Von Mises

3 Βασικές Απαιτήσεις των Κανονισμών CSR-H

Η δομή των κοινών κατασκευαστικών κανόνων φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Να σημειωθεί πως τα επιμέρους κεφάλαια δεν είναι ανεξάρτητα αλλά γίνονται αναφορές σε άλλα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν κυρίως το Κεφάλαιο 4 που έχει να κάνει με τον υπολογισμό των φορτίσεων και το Κεφάλαιο 7 που σχετίζεται με τον έλεγχο αντοχής πλοίου με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων.

Πίνακας 3.1: Δομή των κανονισμών CSR

Part 1: General Hull Requirements	
Chapter 1	Rule General Principles
Chapter 2	General Arrangement Design
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 Outfitting
Chapter 12	Construction
Chapter 13	Ship in Operation – Renewal Criteria
Part 2: Ship Types	
Chapter 1	Bulk Carriers
Chapter 2	Oil Tankers

3.1 Φορτίσεις

3.1.1 Σενάρια Σχεδιαστικών Φορτίσεων

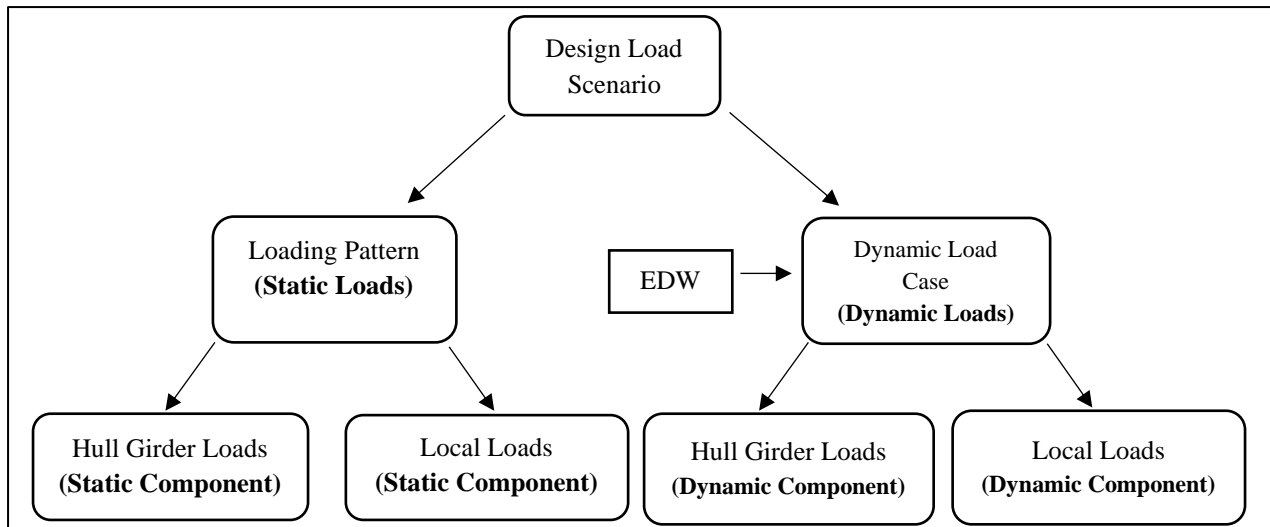
Οι Κοινοί Κατασκευαστικοί Κανόνες (Common Structural Rules) για τη μελέτη της αντοχής του πλοίου με τον έλεγχο των περιγραφικών απαιτήσεων (Prescriptive Requirements) και τη σχεδιαστική επαλήθευση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Direct Strength Analysis) έχουν ορίσει κάποια Σενάρια Σχεδιαστικών Φορτίσεων (Design Load Scenarios), όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.2. Αυτά, καθορίζουν αν το υπό μελέτη πλοίο δέχεται μόνο στατικές (S) ή στατικές και δυναμικές (S+D) φορτίσεις. Στην παρούσα εργασία το εξεταζόμενο σενάριο είναι η κατάσταση εν πλω με ακραίες φορτίσεις θάλασσας (Seagoing conditions with extreme sea loads) που περιλαμβάνει στατικές και δυναμικές φορτίσεις.

Οι στατικές φορτίσεις έχουν να κάνουν με την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου (loading pattern) και διακρίνονται στις φορτίσεις της γάστρας του πλοίου θεωρούμενου ως δοκού σε ήρεμο νερό (Still Water Hull Girder Loads) και τη στατική συνιστώσα των τοπικών εξωτερικών και εσωτερικών φορτίσεων στα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία (Static Local Loads).

Οι δυναμικές φορτίσεις έχουν να κάνουν με την εξεταζόμενη κατάσταση θάλασσας, δηλαδή με τις καταστάσεις δυναμικής φόρτισης (Dynamic Load Cases). Αυτές, για τον υπολογισμό των δυναμικών φορτίσεων στις μελέτες αντοχής, βασίζονται στην έννοια του Ισοδύναμου Σχεδιαστικού Κύματος (Equivalent Design Wave - EDW) κατά την οποία εφαρμόζεται ένα σύνολο δυναμικών φορτίσεων στο πλοίο έτσι ώστε η κυρίαρχη απόκριση να είναι ισοδύναμη με την απαιτούμενη τιμή μακροπρόθεσμης απόκρισης. Οι δυναμικές φορτίσεις διακρίνονται με τη σειρά τους στις δυναμικές φορτίσεις της γάστρας του πλοίου θεωρούμενου ως δοκού (Dynamic Hull Girder Load Components) και στις τοπικές δυναμικές εξωτερικές και εσωτερικές φορτίσεις στα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία (Dynamic Local Loads).

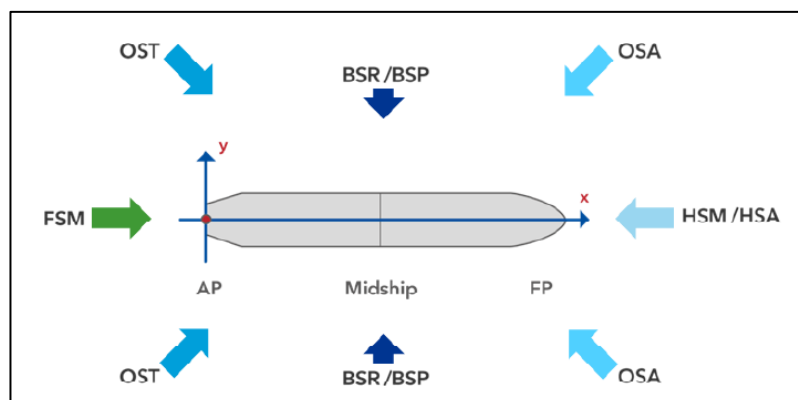
Πίνακας 3.2: Κύρια σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων

Design load scenario		Harbour and sheltered water and testing	Seagoing conditions with extreme sea loads	Ballast water exchange ⁽⁴⁾	Accidental flooded conditions ⁽⁴⁾		
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}	$F_{U-s} + F_{U-d}$	-	-	-
<p>(1) WB cargo hold is considered as ballast tank except for design load scenario 'ballast water exchange'.</p> <p>(2) M_{sw} used for hull local scantling of watertight bulkhead</p> <p>(3) Hull girder strength check is performed according to Ch 5, Sec 1 for bulk carriers having a length L of 150 m or above</p> <p>(4) Applicable to prescriptive assessment only</p>							



Εικόνα 3.1: Ανάλυση του σεναρίου σχεδιαστικής φόρτισης

Οι Ισοδύναμοι Σχεδιαστικοί Κυματισμοί (EDWs) που χρησιμοποιούνται από τους κανονισμούς για την περιγραφή των δυναμικών καταστάσεων, καθορίζοντας έτσι τις ασκούμενες δυναμικές φορτίσεις, καθώς και η απόκριση του πλοίου σε αυτές φαίνονται παρακάτω. Να σημειωθεί πως στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν ο HSM-1, δηλαδή μετωπικός κυματισμός που προκαλεί sagging της γάστρας και ο HSM-2, δηλαδή μετωπικός κυματισμός που προκαλεί hogging της γάστρας.



Εικόνα 3.2: Κατηγορίες Ισοδύναμων Σχεδιαστικών Κυματισμών (EDWs)

HSM

HSM-1 και HSM-2: Μετωπικοί κυματισμοί που ελαχιστοποιούν και μεγιστοποιούν την εγκάρσια καμπτική ροπή κυματισμού στο μέσον του πλοίου.

HSA

HSA-1 και HSA-2: Μετωπικοί κυματισμοί που μεγιστοποιούν και ελαχιστοποιούν την εγκάρσια επιτάχυνση στη FP.

FSM

FSM-1 και FSM-2: Ακολουθούντες κυματισμοί που ελαχιστοποιούν και μεγιστοποιούν την εγκάρσια καμπτική ροπή κυματισμού στο μέσον του πλοίου.

BSR

BSR-1(P&S) και BSR-2(P&S): Κάθετα πλευρικοί κυματισμοί που ελαχιστοποιούν και μεγιστοποιούν την κίνηση του διατοιχισμού (Roll) με κύματα προερχόμενα από την Port ή Starboard πλευρά του πλοίου.

BSP

BSP-1(P&S) και BSP-2(P&S): Κάθετα πλευρικοί κυματισμοί που μεγιστοποιούν και ελαχιστοποιούν την υδροδυναμική πίεση στο μέσον του πλοίου στην Port και Starboard πλευρά του πλοίου.

OST



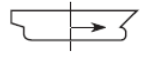
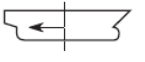












OST-1(P&S) και OST-2(P&S): Πλευρικοί κυματισμοί υπό γωνία που μεγιστοποιούν και ελαχιστοποιούν την στρεπτική ροπή στο 1/4 του μήκους του πλοίου στην Port και Starboard πλευρά του πλοίου.

OSA

OSA-1(P&S) και OSA-2(P&S): Πλευρικοί κυματισμοί υπό γωνία που μεγιστοποιούν την επιτάχυνση του προνευτασμού με κύματα προερχόμενα από την Port ή Starboard πλευρά του πλοίου.

Ενδεικτικά, οι επιδράσεις στο πλοίο κάποιων Ισοδύναμων Σχεδιαστικών Κυματισμών φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά της απόκρισης του πλοίου υπό τη επίδραση των EDWs

Loadcase	HSM-1	HSM-2	HSA-1	HSA-2	FSM-1	FSM-2
EDW	HSM		HSA		FSM	
Heading	Head		Head		Following	
Effect	Max. bending moment		Max. vertical acceleration		Max. bending moment	
VWBM	Sagging	Hogging	Sagging	Hogging	Sagging	Hogging
VWSF	Negative-aft Positive-fore	Positive-aft Negative-fore	Negative-aft Positive-fore	Positive-aft Negative-fore	Negative-aft Positive-fore	Positive-aft Negative-fore
HWBM	-	-	-	-	-	-
TM	-	-	-	-	-	-
Surge	To stern	To bow	To stern	To bow	To bow	To stern
a_{surge}						
Sway	-	-	-	-	-	-
a_{sway}	-	-	-	-	-	-
Heave	Down	Up	Down	Up	-	-
a_{heave}					-	-
Roll	-	-	-	-	-	-
a_{roll}	-	-	-	-	-	-
Pitch	Bow down	Bow up	Bow down	Bow up	Bow up	Bow down
a_{pitch}						

3.1.2 Υπολογισμός Επιταχύνσεων του Πλοίου

Για τον υπολογισμό των αδρανειακών φορτίσεων του πλοίου, δηλαδή τη δυναμική συνιστώσα των φορτίσεων, είναι απαραίτητη η πρόβλεψη των τοπικών επιταχύνσεων a_x , a_y , a_z σε κάθε σημείο της κατασκευής που βρίσκεται σε θέση x , y , z . Αυτό προϋποθέτει τον υπολογισμό των επιταχύνσεων στο κέντρο βάρους του πλοίου a_{surge} , a_{sway} , a_{heave} , a_{roll} , a_{pitch} .

$$\begin{aligned} a_x &= -C_{xG} g \sin\varphi + C_{Xs} a_{surge} + C_{XP} a_{pitch}(z - R) \\ a_y &= C_{YG} g \sin\theta + C_{Ys} a_{sway} - C_{YR} a_{roll}(z - R) \\ a_z &= C_{ZH} a_{heave} + C_{ZR} a_{roll} y - C_{ZP} a_{pitch}(x - 0.45L) \\ a_{surge} &= 0.2 f_p a_0 g \\ a_{sway} &= 0.3 f_p a_0 g \\ a_{heave} &= f_p a_0 g \\ a_{roll} &= f_p \theta \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\theta}\right)^2 \\ a_{pitch} &= f_p \left(\frac{3.1}{\sqrt{gL}} + 1.0\right) \varphi \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\varphi}\right)^2 \end{aligned}$$

Οι επιταχύνσεις αυτές θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των τοπικών δυναμικών καταπονήσεων του πλοίου από το ξηρό φορτίο και το έρμα στις καταστάσεις δυναμικής φόρτισης HSM-1 και HSM-2. Πρόκειται για μετωπικούς κυματισμούς επομένως μας ενδιαφέρουν μόνο οι a_{surge} , a_{heave} , a_{pitch} και άρα μόνο οι επιταχύνσεις a_x και a_z . Ακολουθούν οι παράμετροι υπολογισμού αυτών.

Παράμετροι υπολογισμού

- $f_p = f_{ps} = 1$: συντελεστής για έλεγχο αντοχής για καταστάσεις εν πλω.
- a_0 : παράμετρος επιτάχυνσης, με σχέση:

$$a_0 = (1.58 - 0.47C_B) \left(\frac{2.4}{\sqrt{L}} + \frac{34}{L} - \frac{600}{L^2}\right)$$

- φ : η γωνία προνευτασμού με σχέση:

$$\varphi = 1350 f_p L^{-0.94} \left\{ 1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}}\right)^{1.2} \right\}$$

- C_{xG} , C_{Xs} , C_{XP} , C_{ZH} , C_{ZR} , C_{ZP} : Συντελεστές συνδυασμών φορτίσεων (Load Combination Factors) για τον έλεγχο αντοχής.
- R : η κατακόρυφη συντεταγμένη του κέντρου περιστροφής του πλοίου με σχέση:

$$R = \min\left(\frac{D}{4} + \frac{T_{LC}}{2}, \frac{D}{2}\right)$$

- T_φ : η περίοδος προνευτασμού, σε sec, με σχέση:

$$T_\varphi = \sqrt{\frac{2\pi\lambda_\varphi}{g}}$$

Όπου λ_φ δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_\varphi = 0.6(1 + f_T)L$$

Πίνακας 3.4: Επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους πλοίου για τις εξεταζόμενες καταστάσεις φόρτωσης.

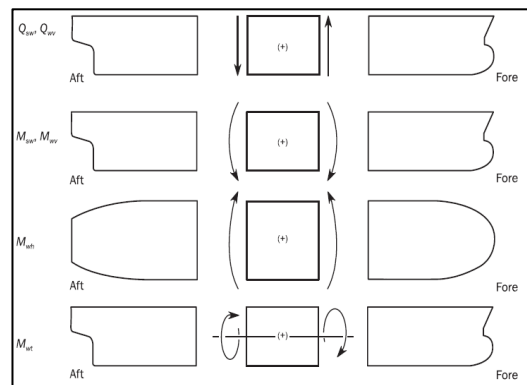
	Alternate Ore	Heavy Ballast
a surge	0.587 m/s ²	0.597 m/s ²
a pitch	0.023 rad/s ²	0.030 rad/s ²
a heave	2.936 m/s ²	2.989 m/s ²

3.1.3 Φορτίσεις του πλοίου ως δοκός

Στον παρόν εδάφιο περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των φορτίσεων που δέχεται το πλοίο ως δοκάρι από τα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων, τα οποία περιλαμβάνουν στατικά (S) ή στατικά και δυναμικά φορτία (S+D). Το εξεταζόμενο σενάριο στην παρούσα εργασία περιλαμβάνει στατικά και δυναμικά φορτία (Κατάσταση εν πλω με ακραίες φορτίσεις θάλασσας).

Οι εξωτερικές φορτίσεις που καταπονούν το πλοίο ως δοκάρι καθώς και η σύμβαση των προσήμων τους φαίνονται παρακάτω.

- 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)



Εικόνα 3.3: Σύμβαση προσήμων φορτίσεων σύμφωνα με τους CSR

Ελάχιστη Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε Ήρεμο νερό

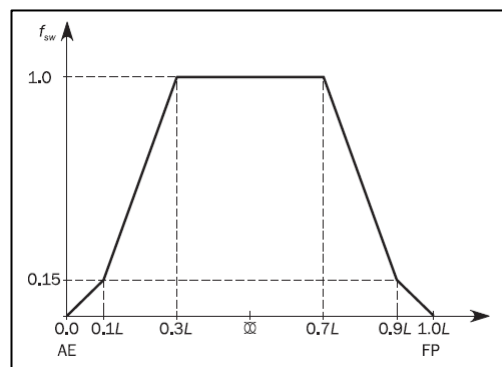
Οι κανονισμοί προδιαγράφουν την ελάχιστη κατακόρυφη ροπή κάμψης που δέχεται το πλοίο σε ήρεμο νερό ως αποτέλεσμα της φόρτωσής του. Οι ροπές αυτές, $M_{sw-h-min}$ και $M_{sw-s-min}$, για καταστάσεις hogging και sagging αντίστοιχα, σε kNm, δίνονται από τις σχέσεις που ακολουθούν:

$$M_{sw-h-min} = f_{sw} (171 C_w L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{wv-h-mid}) \quad \text{για κατάσταση hogging}$$

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw} (171 C_w L^2 B (C_B + 0.7) 10^{-3} + M_{wv-s-mid}) \quad \text{για κατάσταση sagging}$$

Όπου:

- $M_{wv-h-mid}, M_{wv-s-mid}$: Οι κατακόρυφες ροπές κάμψης λόγω κυματισμού, σε καταστάσεις hogging και sagging, στο μέσον του πλοίου με συντελεστές $f_p=1$ και $f_m=1$. Ο υπολογισμός τους περιγράφεται στη συνέχεια.
- f_{sw} : Συντελεστής κατανομής της ροπής κάμψης κατά μήκος του πλοίου με τιμές που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.4: Κατανομή του συντελεστή f_{sw} κατά μήκος του πλοίου

Επιτρεπόμενη κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό σε καταστάσεις πλεύσης (Permissible vertical still water bending moment)

Η επιτρεπόμενη κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό σε μια συγκεκριμένη διαμήκη θέση του πλοίου σε καταστάσεις πλεύσης, για καταστάσεις hogging και sagging, M_{sw-h} και M_{sw-s} αντίστοιχα, λαμβάνεται ως η δυσμενέστερη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό από όλες τις καταστάσεις εν πλω που αναφέρονται στο Loading Manual. Σε περίπτωση που είναι μικρότερη από την ελάχιστη επιτρεπόμενη, όπως αυτή περιγράφηκε προηγουμένως, λαμβάνεται ως δυσμενέστερη η τελευταία.

Επιτρεπόμενη κατακόρυφη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό σε καταστάσεις πλεύσης (Permissible vertical still water shear force)

Η κατακόρυφη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό Q_{sw} 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 φόρτωσής που αναγράφονται στο Loading Manual, έπειτα από διόρθωση της διατμητικής δύναμης στις φρακτές. Να σημειωθεί πως οι κανονισμοί προδιαγράφουν ελάχιστες τιμές διατμητικής δύναμης μόνο για δεξαμενόπλοια.

Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό

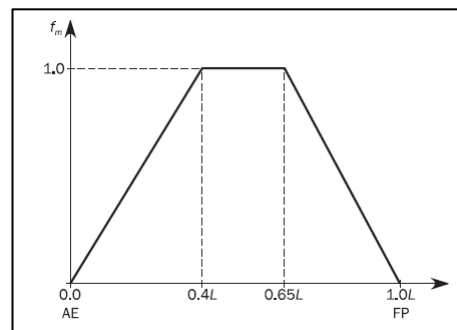
Οι κανόνες προδιαγράφουν τη σχεδιαστική κατακόρυφη ροπή κάμψης λόγω κυματισμού που αναμένεται να συναντήσει το πλοίο στη διάρκεια της ζωής του. Αυτή, σε οποιοδήποτε σημείο του πλοίου, σε kNm, δίνεται από τις σχέσεις που ακολουθούν.

$$M_{wv-h} = 0.19 f_{nl-vh} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad \text{για hogging}$$

$$M_{wv-s} = -0.19 f_{nl-vs} f_m f_p C_w L^2 B C_B \quad \text{για sagging}$$

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.
- $f_p = f_{ps}$: Συντελεστής που εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων.
- f_m : Συντελεστής κατανομής της ροπής κάμψης κατά μήκος του πλοίου σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.5: Κατανομή του συντελεστή f_m κατά μήκος του πλοίου

Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη σε Κυματισμό

Η σχεδιαστική κατακόρυφη διατμητική δύναμη λόγω κυματισμού σε οποιαδήποτε διαμήκη θέση του πλοίου, σε kN, δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις:

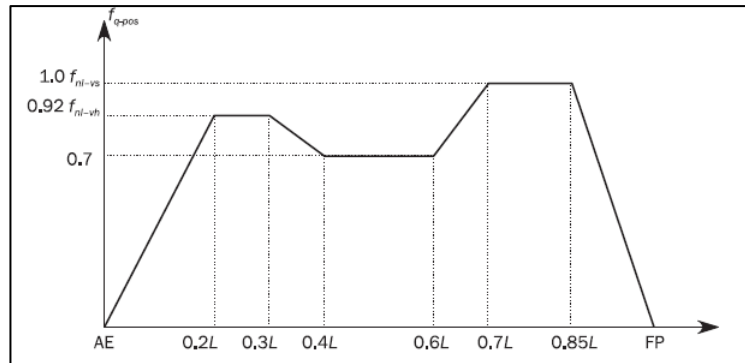
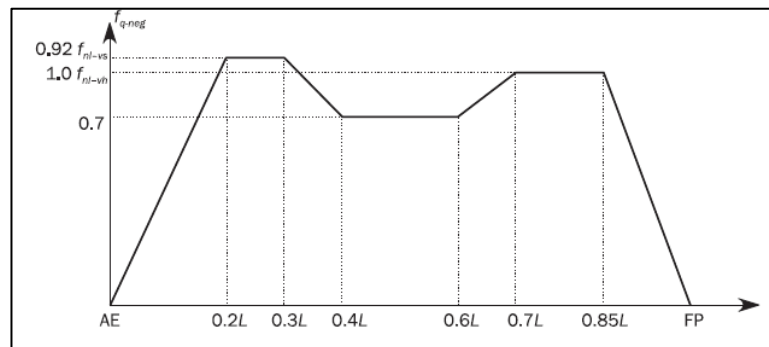
$$Q_{wv-pos} = 0.52 f_{q-pos} f_p C_w L B C_B$$

$$Q_{wv-neg} = -0.52 f_{q-neg} f_p C_w L B C_B$$

Όπου:

- $f_p = f_{ps}$: Συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων.

- f_{q-pos} : Συντελεστής διαμήκους κατανομής της θετικής διατμητικής δύναμης, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.
- f_{q-neg} : Συντελεστής διαμήκους κατανομής της αρνητικής διατμητικής δύναμης, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

Εικόνα 3.6: Κατανομή του συντελεστή f_{q-pos} κατά μήκος του πλοίουΕικόνα 3.7: Κατανομή του συντελεστή f_{q-neg} κατά μήκος του πλοίου

Οριζόντια Καμπτική Ροπή Κυματισμού

Η οριζόντια καμπτική ροπή κυματισμού σε οποιοδήποτε σημείο κατά το μήκος του πλοίου, σε kNm, δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί. Να σημειωθεί πως δεν χρειάστηκε να υπολογιστεί στην παρούσα εργασία για τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων.

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

Όπου:

- $f_{nlh} = 0.9$ συντελεστής μη γραμμικών φαινομένων για τον έλεγχο αντοχής.
- $f_p = f_{ps}$: Συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων.
- f_m : Συντελεστής κατανομής της ροπής κάμψης κατά μήκος του πλοίου.

Στρεπτική Ροπή Κυματισμού

Η στρεπτική ροπή κυματισμού σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος του πλοίου, σε kNm, υπολογίζεται από την σχέση που ακολουθεί. Να σημειωθεί πως δεν χρειάστηκε να υπολογιστεί στην παρούσα εργασία για τα εξεταζόμενα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων.

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

Όπου:

- $f_p = f_{ps}$ για μελέτη αντοχής.
- $M_{wt1} = 0.4 f_{t1} C_w \sqrt{\frac{L}{T_{LC}}} B^2 D C_B$
- $M_{wt2} = 0.22 f_{t2} C_w L B^2 C_B$
- f_{t1}, f_{t2} : Συντελεστές κατανομής με τιμές όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\begin{aligned} f_{t1} &= 0 && \text{for } x < 0 \\ f_{t1} &= \left| \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right| && \text{for } 0 \leq x \leq L \\ f_{t1} &= 0 && \text{for } x > L \\ f_{t2} &= 0 && \text{for } x < 0 \\ f_{t2} &= \sin^2\left(\frac{\pi x}{L}\right) && \text{for } 0 \leq x \leq L \\ f_{t2} &= 0 && \text{for } x > L \end{aligned}$$

Φορτίσεις του πλοίου ως δοκός για δεδομένη δυναμική φόρτιση

Οι κανονισμοί σε αυτό το εδάφιο προδιαγράφουν τις φορτίσεις που πρέπει να ασκηθούν στις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης που χρησιμοποιούνται κατά τη μελέτη αντοχής.

Κάθε δυναμική κατάσταση προκαλεί διαφορετική απόκριση κινήσεων και επιταχύνσεων καθώς και διαφορετική φόρτιση στη γάστρα. Για αυτόν τον λόγο οι κανονισμοί χρησιμοποιούν τους συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων (Load Combination Factors – LCFs) έτσι ώστε να καθοριστεί η συνεισφορά της κάθε δυναμικής απόκρισης σε μια δεδομένη δυναμική κατάσταση. Ακολουθεί ο πίνακας με τους συντελεστές συνδυαστικών φορτίσεων που αφορούν τον έλεγχο αντοχής. Για τον υπολογισμό των συντελεστών γίνεται χρήση των εξής παραμέτρων:

- f_T : ο λόγος του βυθίσματος σε μια κατάσταση λειτουργίας προς το μέγιστο βύθισμα αντοχής.
- f_{ip} : συντελεστής με βάση τη διαμήκη θέση της διατομής με τιμή:
 $f_{ip} = 1$ για $x/L \leq 0.5$
 $f_{ip} = -1$ για $x/L > 0.5$

Πίνακας 3.5: Συντελεστές συνδυαστικής φόρτισης LCFs για διαφορετικά ισοδύναμα σχεδιαστικά κύματα EDWs

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}	$-1.0f_{ip}$	$1.0f_{ip}$	$-0.6f_{ip}$	$0.6f_{ip}$	$-1.0f_{ip}$	$1.0f_{ip}$
	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

Κατακόρυφη Καμπτική Ροπή Κυματισμού

Οι κατακόρυφες καμπτικές ροπές κυματισμού M_{WV-LC} , σε kNm, για τις δυναμικές καταστάσεις που μελετώνται, ορίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.6: Υπολογισμός κατακόρυφων καμπτικών ροπών κυματισμού

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} $

Όπου:

- $f_\beta = 1.05$, διορθωτικός συντελεστής κυματισμού για τις δυναμικές καταστάσεις HSM.
- C_{WV} : Συντελεστής φόρτισης για μελέτη αντοχής, όπως περιγράφηκε παραπάνω.
- M_{WV-h} , M_{WV-s} : Κατακόρυφες ροπές κάμψης κυματισμού σε hogging και sagging για το εξεταζόμενο σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων όπως υπολογίστηκαν προηγουμένως.

Κατακόρυφη Διατμητική Δύναμη Κυματισμού

Η διατμητική δύναμη κυματισμού, Q_{WV-LC} , σε kN, που χρησιμοποιείται για κάθε κατάσταση δυναμικής φόρτισης ορίζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.7: Υπολογισμός κατακόρυφων διατμητικών δυνάμεων κυματισμού

Load combination factor	Q_{WV-LC}
$C_{QW} \geq 0$	$f_\beta C_{QW} Q_{WV-pos}$
$C_{QW} < 0$	$f_\beta C_{QW} Q_{WV-neg} $

Όπου:

- C_{QW} : Συντελεστής συνδυασμού φόρτισης για μελέτη αντοχής, όπως περιγράφηκε παραπάνω.
- Q_{WV-pos} , Q_{WV-neg} : Θετική και αρνητική κατακόρυφη διατμητική δύναμη κυματισμού για το εξεταζόμενο σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

Οριζόντια Καμπτική Ροπή Κυματισμού

Η οριζόντια καμπτική ροπή κυματισμού M_{wh-LC} , σε kNm, που χρησιμοποιείται ανάλογα το εξεταζόμενο σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων δίνεται από την παρακάτω σχέση

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

Όπου:

- C_{WH} : Συντελεστής φόρτισης για μελέτη αντοχής.
- M_{wh} : Οριζόντια ροπή κυματισμού για το εξεταζόμενο σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

Στρεπτική Ροπή Κυματισμού

Η στρεπτική ροπή κυματισμού M_{wt-LC} , σε kNm, που χρησιμοποιείται ανάλογα το εξεταζόμενο σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων δίνεται από την παρακάτω σχέση

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

Όπου:

- C_{WT} : Συντελεστής φόρτισης για μελέτη αντοχής.
- M_{wt} : Στρεπτική ροπή κυματισμού για το εξεταζόμενο σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων όπως υπολογίστηκε προηγουμένως.

3.1.4 Τοπικές Εξωτερικές Φορτίσεις

Οι τοπικές εξωτερικές φορτίσεις αναφέρονται στις κάθετες πιέσεις που ασκεί το θαλάσσιο περιβάλλον στο εξωτερικό περίβλημα της γάστρας και επηρεάζουν την τοπική αντοχή των ελασμάτων και των ενισχυτικών.

Η εξωτερική πίεση της θάλασσας P_{ex} που ασκείται στη γάστρα, σε kN/m², για τα σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων που περιέχουν στατικό και δυναμικό μέρος (S+D) δίνεται από τη σχέση:

$$P_{ex} = P_s + P_w$$

Όπου:

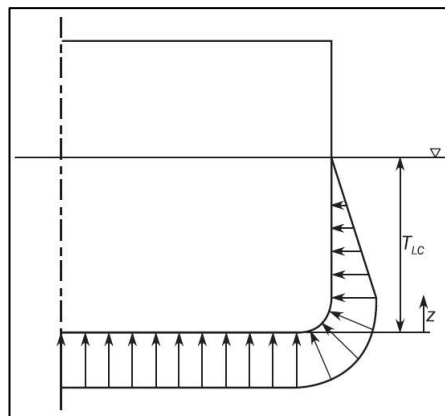
- P_s η υδροστατική πίεση, σε kN/m^2
- P_w η πίεση κυματισμού, σε kN/m^2

Υδροστατική Πίεση

Η υδροστατική πίεση, P_s , σε οποιοδήποτε σημείο της γάστρας, σε kN/m^2 , δίνεται από τις σχέσεις στον παρακάτω πίνακα και η κατανομή της φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.8: Σχέσεις υδροστατικής πίεσης

Θέση	Υδροστατική Πίεση, P_s , σε kN/m^2
$z \leq T_{LC}$	$\rho g (T_{LC} - z)$
$z > T_{LC}$	0



Εικόνα 3.8: Κατανομή υδροστατικής πίεσης

Υδροδυναμική Πίεση

Η υδροδυναμική πίεση, P_w , δίνεται από τους κανονισμούς για κάθε δυναμική κατάσταση που μελετάται. Για τις καταστάσεις HSM-1 και HSM-2 που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία η υδροδυναμική πίεση, P_w , σε kN/m^2 , δίνεται από τις σχέσεις στον παρακάτω πίνακα. Επίσης, η κατανομή της φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.

Πίνακας 3.9: Σχέσεις πιέσεων κυματισμού για τις εξεταζόμενες δυναμικές καταστάσεις θάλασσας

Πίεση Κυματισμού, σε kN/m^2			
Δυναμική Κατάσταση	$z \leq T_{LC}$	$T_{LC} < z \leq h_w + T_{LC}$	$z > h_w + T_{LC}$
HSM-1	$P_w = \max (-P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$	$P_w = P_{w,WL} - \rho g(z - T_{LC})$	0
HSM-2	$P_w = \max (P_{HS}, \rho g(z - T_{LC}))$		

Όπου:

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

Ακολουθούν οι παράμετροι της παραπάνω σχέσης για τις δυναμικές καταστάσεις HSM (Head Sea Motion) που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

- $f_{\beta} = 1.05$, διορθωτικός συντελεστής κυματισμού για τις δυναμικές καταστάσεις HSM.
- $f_{ps} = 1$, συντελεστής για μελέτη αντοχής σε κατάσταση εν πλω (Seagoing with Extreme Sea Loads).
- f_{nl} συντελεστής μη γραμμικών φαινομένων που λαμβάνεται για καταστάσεις εν πλω ως:
 - $f_{nl} = 0.7$ για $f_{xL} = 0$
 - $f_{nl} = 0.9$ για $f_{xL} = 0.3$
 - $f_{nl} = 0.9$ για $f_{xL} = 0.7$
 - $f_{nl} = 0.6$ για $f_{xL} = 1$
 Οι ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή.
- $f_h = 3.0(1.21 - 0.66f_T)$, συντελεστής κοινός για όλες τις δυναμικές καταστάσεις.
- k_a συντελεστής ύψους κύματος κατά τη διαμήκη κατεύθυνση του πλοίου, που λαμβάνεται ως:
 - $k_a = (0.5 + f_T) \left\{ (3 - 2\sqrt{f_{yB}}) - \frac{20}{9} f_{xL} (7 - 6\sqrt{f_{yB}}) \right\} + \frac{2}{3} (1 - f_T)$, για $f_{xL} < 0.15$
 - $k_a = 1$, για $0.15 \leq f_{xL} < 0.7$
 - $k_a = 1 + (f_{xL} - 0.7) \left\{ \left(\frac{40}{3} f_T - 0.5 \right) + 2(1 - f_{yB}) \left[\frac{18}{C_B} f_T (f_{xL} - 0.7) - 0.25(2 - f_T) \right] \right\}$, για $f_{xL} \geq 0.7$
- k_p συντελεστής φάσης με τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.10: Τιμές του συντελεστή k_p κατά μήκος του πλοίου

f_{xL}	0	$0.3 - 0.1f_T$	$0.35 - 0.1f_T$	$0.8 - 0.2f_T$	$0.9 - 0.2f_T$	1
k_p	$1.5 - f_T - 0.5f_{yB}$	-1	1	1	-1	-1

- f_{yz} συντελεστής εγκάρσιας κατανομής υδροδυναμικής πίεσης που υπολογίζεται από τη σχέση:

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

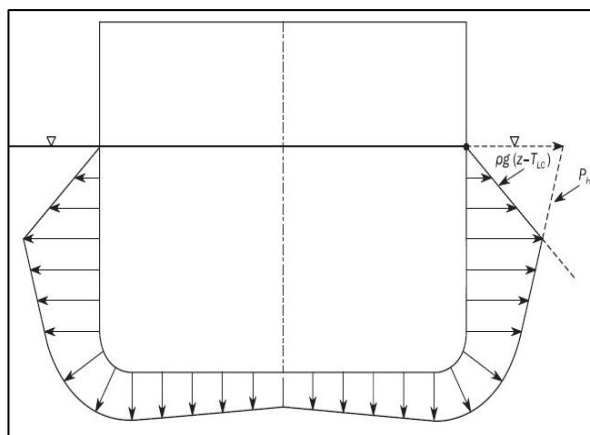
Αυτός ο συντελεστής αλλάζει την κατανομή της πίεσης κυματισμού κατά το ύψος (z) και κατά το πλάτος (f_{yB}) των κατασκευαστικών στοιχείων.

- C_w συντελεστής κυματισμού, που λαμβάνεται ως:

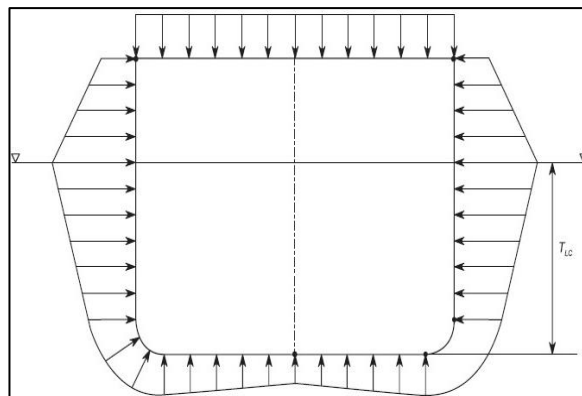
- $C_w = 10.75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1.5}$ για $90m \leq L \leq 300m$
- $C_w = 10.75$ για $300m \leq L \leq 350m$
- $C_w = 10.75 - \left(\frac{L-350}{150}\right)^{1.5}$ για $350m \leq L \leq 500m$

- λ , το μήκος κύματος της δυναμικής κατάστασης, σε m, που δίνεται από τη σχέση:

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



Εικόνα 3.9: Κατανομή πίεσης κυματισμού για τη δυναμική κατάσταση HSM-1 (Sagging)



Εικόνα 3.10: Κατανομή πίεσης κυματισμού για τη δυναμική κατάσταση HSM-2 (Hogging)

Πίεση Θάλασσας σε Εκτεθειμένα Καταστρώματα (Green Sea Loads)

Τα εκτεθειμένα καταστρώματα του πλοίου, σε δυναμικές καταστάσεις, δέχονται την εξωτερική πίεση του κυματισμού της θάλασσας που φθάνει μέχρι αυτά (green sea loading). Οι κανονισμοί προδιαγράφουν αυτήν την πίεση, P_D , σε οποιοδήποτε σημείο του εκτεθειμένου καταστρώματος, σε kN/m^2 , για κάθε περίπτωση δυναμικής φόρτισης που μελετάται. Για την

κατάσταση δυναμικής φόρτισης HSM που μας ενδιαφέρει στην παρούσα εργασία, η εξωτερική πίεση P_D δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_D = \chi P_w$$

Όπου:

- $P_w = P_{wD}$, αλλά μεγαλύτερη της τιμής $P_{D-\min}=0$ για τις μελέτες cargo hold analysis.
- P_{wD} : Πίεση κυματισμού, σε kN/m^2 , στο ύψος του καταστρώματος όπως υπολογίστηκε στην παράγραφο υπολογισμού των εξωτερικών πιέσεων.
- χ : Συντελεστής με τιμές που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.11: Τιμές του συντελεστή χ

Exposed deck location	χ
Freeboard deck	1.00
Superstructure deck including forecastle deck	0.75
1 st tier of deckhouse	0.56
2 nd tier of deckhouse	0.42
3 rd tier of deckhouse	0.32
4 th tier of deckhouse	0.25
5 th tier of deckhouse	0.20
6 th tier of deckhouse	0.15
7 th tier of deckhouse and above	0.10

3.1.5 Τοπικές Εσωτερικές Φορτίσεις

Οι τοπικές εσωτερικές φορτίσεις αναφέρονται στις κάθετες πιέσεις που ασκεί το φορτίο και το έρμα στα κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου επηρεάζοντας την τοπική τους αντοχή.

Πιέσεις λόγω υγρού φορτίου

Οι εσωτερικές πιέσεις λόγω του υγρού φορτίου στους χώρους των δεξαμενών του φορτίου και του έρματος, σε kN/m^2 , για σενάρια σχεδιαστικών φορτίσεων που αποτελούνται από στατικές και δυναμικές φορτίσεις (S+D), δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{in} = P_{Is} + P_{Id}$$

Όπου:

- P_{Is} : Η στατική συνιστώσα της εσωτερικής πίεσης λόγω υγρού φορτίου σε δεξαμενές έρματος που δίνεται από τη σχέση:

$$P_{Is} = \rho_L g (Z_{top} - Z + 0.5 h_{air}) \text{ για δεξαμενές έρματος.}$$

- P_{ld} : Η δυναμική συνιστώσα της εσωτερικής πίεσης λόγω υγρού φορτίου για δεξαμενές φορτίου και έρματος, με σχέση:

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

Παράμετροι υπολογισμών

- a_x, a_y, a_z : Συνιστώσες επιτάχυνσης του κέντρου βάρους X_G, Y_G, Z_G της δεξαμενής.

	Hold No 6	No 5 WB TK	No 4 WB TK
a_x	-0.64 m/s ²	-0.4 m/s ²	-0.4 m/s ²
a_y	0 m/s ²	0 m/s ²	0 m/s ²
a_z	0.39 m/s ²	0.11 m/s ²	1.21 m/s ²

- x_0, y_0, z_0 : οι συντεταγμένες του σημείου αναφοράς που ορίζεται ως το ανώτερο όριο της δεξαμενής που μεγιστοποιεί την ποσότητα:

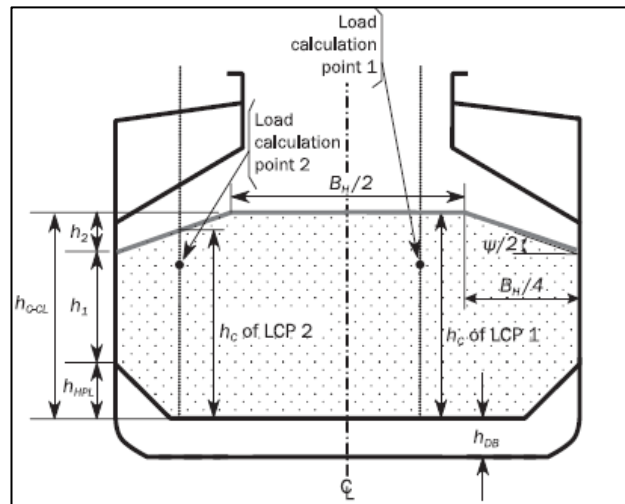
$$V_j = a_x (x_j - X_G) + a_y (y_j - Y_G) + (a_z + g)(z_j - Z_G)$$

- Z_{top} , η κατακόρυφη θέση του ανώτερου ορίου της δεξαμενής.
- Z , η κατακόρυφη θέση του σημείου εύρεσης πίεσης.
- f_{cd} , συντελεστής πιθανότητας ταυτόχρονης εμφάνισης υγρού φορτίου και κρίσιμης κατάστασης θάλασσας κατά τη σχεδιαστική διάρκεια του πλοίου στα 25 χρόνια, ο οποίος λαμβάνει τις εξής τιμές:
 - $f_{cd} = 0.88$ για $\rho_L = 1.025 \text{ t/m}^3$ για μελέτη αντοχής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.
 - $f_{cd} = 1$ για $\rho_L > 1.025 \text{ t/m}^3$ για μελέτη αντοχής με χρήση πεπερασμένων στοιχείων.
 - $f_{cd} = 1$ για τις άλλες περιπτώσεις.
- $f_{ull-l} = 1$, συντελεστής διόρθωσης της διαμήκου 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.

Πιέσεις λόγω του ξηρού φορτίου χύδην

Στην παρούσα μελέτη εξετάζεται η κατάσταση της εναλλάξ φόρτωσης στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα. Σε αυτήν, οι δεξαμενές του φορτίου είναι μερικώς γεμάτες λόγω της υψηλής πυκνότητας του φορτίου.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς η ανώτερη επιφάνεια του φορτίου της μερικώς γεμάτης δεξαμενής, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, περιγράφεται από τις εξής σχέσεις:



Εικόνα 3.11: Ορισμός ανώτερης επιφάνειας φορτίου σε μερικούς γεμάτη δεξαμενή

$$\begin{aligned} \text{Για } |y| \leq \frac{B_H}{4} & : h_c = h_{c-CL} \\ \text{Για } \frac{B_H}{4} < |y| \leq \frac{B_2}{2} & : h_c = h_{c-CL} - \left(|y| - \frac{B_H}{4} \right) \tan \frac{\Psi}{2} \\ \text{Για } |y| > \frac{B_2}{2} & : h_c = 0 \end{aligned}$$

Όπου:

- h_c : ύψος ανώτερης επιφάνειας φορτίου, μετρούμενη από τον εσωτερικό πυθμένα.
- h_1 : Ύψος που δίνεται από την σχέση:

$$h_1 = \frac{M}{\rho_c \cdot B_H \ell_H} - \left(\frac{B_H + B_{IB}}{2B_H} \right) h_{HPL} - \frac{3}{16} B_H \tan \frac{\psi}{2} + \frac{V_{TS}}{B_H \ell_H}$$

- B_H : το πλάτος του κύτους μετρημένο στο μέσον του μήκους και του ύψους του.
- ℓ_H : το μήκος του κύτους μετρημένο στη centerline ανάμεσα στις πτυχώσεις των δύο εγκάρσιων φρακτών.
- B_{IB} : το πλάτος του εσωτερικού πυθμένα μετρούμενο στο μέσον του μήκους του κύτους.
- V_{TS} : ο όγκος της κάτω έδρασης της εγκάρσιας φρακτής που βρίσκεται εσωτερικά του μήκους κύτους ℓ_H .

Για $h_1 \geq 0$ όπως δείχνει η πάνω εικόνα :

$$\begin{aligned} h_{c-CL} &= h_{HPL} + h_1 + h_2 \\ h_2 &= \frac{B_H}{4} \tan \frac{\psi}{2} \\ B_2 &= B_H \end{aligned}$$

- h_{C-CL} : Ύψος της επιφάνειας φορτίου στην centerline.
- B_2 : Μέγιστο πλάτος του φορτίου.

Το βάρος του φορτίου καθώς και η πυκνότητά του, για την κατάσταση την εναλλάξ φόρτωσης, επιλέχθηκαν σύμφωνα με τον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.12: Προδιαγραφές CSR μάζας M και πυκνότητας ρ_c 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.

Όπου M_{HD} το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος φορτίου, σε t, σε ένα κύτος για εναλλάξ φόρτωση σύμφωνα με το loading manual και M_H το βάρος σε ένα κύτος φορτίου, σε t, που αντιστοιχεί στην ομοιογενή κατάσταση φόρτωσης στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα.

Η συνολική εσωτερική πίεση λόγω ξηρού φορτίου για το σενάριο σχεδιαστικών φορτίσεων που περιέχει στατικές και δυναμικές φορτίσεις (S+D) δίνεται από την σχέση:

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

Όπου:

- P_{bs} : Η στατική συνιστώσα της πίεσης λόγω του ξηρού φορτίου
- P_{bd} : Η δυναμική συνιστώσα της πίεσης λόγω του ξηρού φορτίου

Η στατική συνιστώσα της πίεσης φορτίου, P_{bs} , δίνεται από τη σχέση:

$$P_{bs} = \rho_c g K_c (z_c - z)$$

Η δυναμική συνιστώσα της πίεσης ξηρού φορτίου P_{bd} για κάθε κατάσταση φόρτισης δίνεται από τις σχέσεις:

$$P_{bd} = f_{\beta} \rho_c [0.25 a_x (x_G - x) + 0.25 a_y (y_G - y) + f_{dc} K_c a_z (z_c - z)] \text{ για } z \leq z_c$$

$$P_{bd} = 0 \text{ για } z > z_c$$

Παράμετροι υπολογισμών

- ρ_c : Η πυκνότητα του ξηρού φορτίου όπου για μελέτη αντοχής σε εναλλάξ φόρτωση για πλοία κατηγορίας BC-A λαμβάνεται ίση με $\rho_c = 3 \text{ t/m}^3$.
- K_C : συντελεστής ίσος με:
Για εσωτερικό πυθμένα, κάτω πλευρικό έλασμα: $K_C = \cos^2 \alpha + (1 - \sin \Psi) \sin^2 \alpha$.
Για κατάστρωμα και άνω πλευρικό έλασμα: $K_C = 0$.
- z : το εξεταζόμενο σημείο εύρεσης πίεσης.
- $z_C = h_{DB} + h_C$: το ύψος της άνω επιφάνειας του φορτίου, μετρημένο στη base line, που περνά από το εξεταζόμενο σημείο εύρεσης της πίεσης.
- ψ : η γωνία ανάπαυσης (angle of repose) του ξηρού φορτίου με τιμές:

$\psi = 30 \text{ deg}$ γενικά

$\psi = 35 \text{ deg}$ για σιδηρομέταλλευμα

$\psi = 25 \text{ deg}$ για τσιμέντο

- α : η γωνία σε μοίρες μεταξύ του εξεταζόμενου στοιχείου και του οριζώντιου επιπέδου.
- $f_{\beta} = 1.05$, διορθωτικός συντελεστής κυματισμού για δυναμικές καταστάσεις HSM.
- a_x, a_y, a_z : Συνιστώσες επιτάχυνσης του κέντρου βάρους x_G, y_G, z_G της δεξαμενής.

	Hold No 7	Hold No 5
a_x	0.6 m/s ²	0.6 m/s ²
a_y	0 m/s ²	0 m/s ²
a_z	-0.63 m/s ²	-1.49 m/s ²

- x_G, y_G, z_G : X, Y, Z συντεταγμένες του ογκομετρικού κέντρου βάρους της προς μελέτη δεξαμενής. Για δεξαμενές φορτίου μερικώς γεμάτες οι τιμές αυτές λαμβάνονται ως:
 x_G, y_G : Ογκομετρικό κέντρο βάρους του κύτους φορτίου.
 $z_G = h_{DB} + h_{c-cl} / 2$
- x, y, z : Συντεταγμένες του σημείου εύρεσης πίεσης.
- $f_{dc} = 1$, συντελεστής ξηρού φορτίου για μελέτη αντοχής.

3.2 Ανάλυση με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

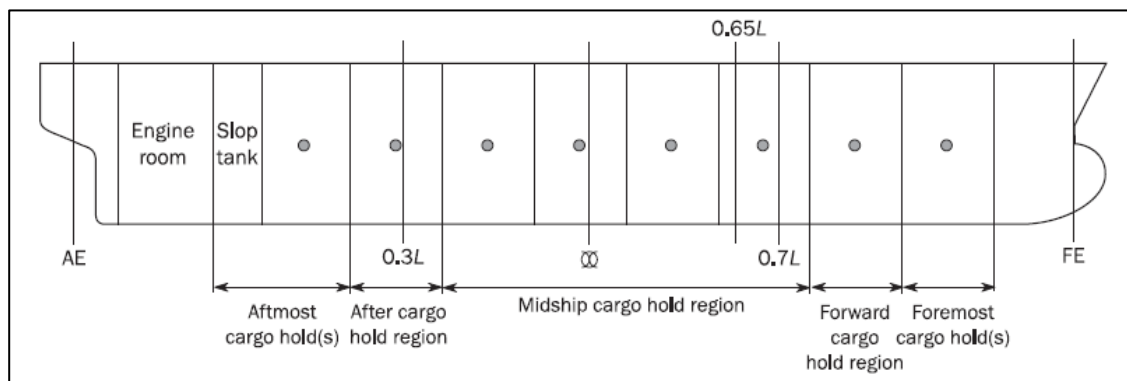
Η ανάλυση με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis) έχει ως σκοπό να αξιολογήσει την αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, όπως αυτή έχει σχεδιαστεί βάσει Περιγραφικών Κανόνων

(Prescriptive Methods). Η χρήση της μεθόδου είναι υποχρεωτική για τα πλοία με μήκη μεγαλύτερα από 150 m και αποτελείται από τα εξής τρία μέρη:

1. **Cargo Hold Analysis:** Ανάλυση των χώρων φορτίου με χρήση αραιού πλέγματος ώστε να αξιολογηθεί η αντοχή των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων, των κύριων εγκάρσιων στοιχείων ενίσχυσης (PSM) και των εγκάρσιων φρακτών. Η συγκεκριμένη ανάλυση περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7 των κανονισμών CSR.
2. **Fine Mesh Analysis:** Η χρήση πυκνότερου πλέγματος για τον έλεγχο αντοχής κατασκευαστικών λεπτομερειών, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 7 των κανονισμών CSR.
3. **Very Fine Mesh Analysis:** Η χρήση ακόμα πυκνότερου πλέγματος για τον έλεγχο αντοχής έναντι κόπωσης κατασκευαστικών λεπτομερειών. Η μέθοδος αυτή περιγράφεται στο Κεφάλαιο 9 των κανονισμών CSR.

Με τη μέθοδο αυτή θέλουμε να επιβεβαιώσουμε ότι:

1. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις έχουν αποδεκτές τιμές συγκρίσει του κριτηρίου διαρροής.
2. Τα απλά και ενισχυμένα ελάσματα έχουν επαρκή αντοχή σε λυγισμό, σύμφωνα με τα αποδεκτά κριτήρια λυγισμού.
3. Η ικανότητα αντοχής έναντι κόπωσης των κατασκευαστικών λεπτομερειών βρίσκεται σε αποδεκτά όρια βάσει των αποδεκτών κριτηρίων κόπωσης.



Εικόνα 3.111: Περιοχές πλοίου βάσει του ογκομετρικού κέντρου βάρους του κύτους

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, οι χώροι φορτίου, ανάλογα με τη διαμήκη θέση του κέντρου βάρους τους, βρίσκονται στις ακόλουθες περιοχές:

- Περιοχή της μέσης τομής (Midship cargo hold region)
- Περιοχή πλώραθεν της μέσης τομής (Forward cargo hold region)
- Περιοχή πρύμνηθεν της μέσης τομής (After cargo hold region)
- Περιοχή πιο πλώραθεν (Foremost cargo hold region)
- Περιοχή πιο πρύμνηθεν (Aftmost cargo hold region)

Μια ολοκληρωμένη μελέτη περιλαμβάνει τον έλεγχο αντοχής όλων των κυτών, από την δεξαμενή φορτίου που βρίσκεται πιο απομακρυσμένη πρύμνηθεν μέχρι και αυτήν πίσω από τη προωαία φρακτή σύγκρουσης. Στην παρούσα εργασία περιοριζόμαστε στον έλεγχο αντοχής κύτους που βρίσκεται στην περιοχή της μέσης τομής.

Περιγραφή Διαδικασίας

Το μοντέλο αποτελείται από τρία κύτη φορτίου. Το προς εξέταση αντοχής κύτος είναι το μεσαίο από τα τρία. Για τον έλεγχο αντοχής της εγκάρσιας φρακτής, πρέπει να πραγματοποιηθούν δύο έλεγχοι, ένας για το κύτος πλώραθεν και ένας για το κύτος πρύμνηθεν της εγκάρσιας φρακτής. Οι προδιαγραφές για μια αποδεκτή ανάλυση αντοχής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί ανά κατηγορίες στη συνέχεια.

Κατασκευαστικά Στοιχεία Μοντέλου

Εν γένει, όλα τα κύρια διαμήκη και εγκάρσια ελάσματα και ενισχυτικά θα πρέπει να μοντελοποιηθούν. Ακόμα, μπρακέτα που συνεισφέρουν στην διαμήκη αντοχή και έχουν μέγεθος μεγαλύτερο της τυπικής διάστασης του πλέγματος (s by s) θα πρέπει να μοντελοποιηθούν. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο πρέπει να περιλαμβάνει:

- Εξωτερικά και εσωτερικά ελάσματα της γάστρας.
- Έλασμα του καταστρώματος.
- Έδρες (Floors) και σταθμίδες (Girders) του διπύθμενου.
- Εγκάρσια στοιχεία των ενισχυμένων νομέων (Webs).
- Στόμια ανοίγματος κυτών (Hatch Coamings).
- Stringers.
- Διαμήκεις και Εγκάρσιες φρακτές με τα επιμέρους κατασκευαστικά τους στοιχεία.
- Άλλα κύρια στοιχεία ενίσχυσης (PSM).
- Άλλα κατασκευαστικά στοιχεία που συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή του πλοίου.

Έκταση Μοντέλου

Εκτός από τα κύτη που βρίσκονται πιο απομακρυσμένα πλώραθεν και πρύμνηθεν, το μήκος του μοντέλου θα είναι ίσο με το μήκος τριών αμπαριών. Στα δύο άκρα του, σχεδιάζονται και οι εγκάρσιες φρακτές. Στη περίπτωση πτυχωτών φρακτών, όπως συμβαίνει στην περίπτωση μας, οι εγκάρσιες φρακτές θα έχουν έκταση έως και το πέρας των κάτω εδράσεων.

Είδη Πεπερασμένων Στοιχείων

Στη μελέτη αντοχής κυτών τα ελάσματα μοντελοποιούνται με τη χρήση **Shell Elements**, ενώ η μοντελοποίηση των ενισχυτικών και των φλαντζών των PSM με τη χρήση **Beam Elements**.

Διακριτοποίηση Μοντέλου

Σχετικά με τη διακριτοποίηση του μοντέλου θα πρέπει να ικανοποιούνται οι παρακάτω απαιτήσεις:

- Γενικά, ο λόγος επιμήκους (aspect ratio) των **Shell Elements** δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 3.
- Σε σημεία που παρατηρούνται αυξημένες τάσεις ο λόγος επιμήκους θα πρέπει να βρίσκεται κοντά στη τιμή 1.
- Η χρήση τριγωνικών στοιχείων στο μοντέλο θα πρέπει να είναι περιορισμένη.
- Το πλέγμα των Shell Elements πρέπει να είναι σύμφωνο με το σύστημα ενίσχυσης ώστε να αναπαριστά όσο το δυνατόν καλύτερα τα πραγματικά ελάσματα μεταξύ των ενισχυτικών.
- Τουλάχιστον ένα στοιχείο ανάμεσα σε δύο διαμήκη ενισχυτικά και τουλάχιστον τρία στοιχεία κατά μήκος μεταξύ των PSM.
- Τουλάχιστον τρία στοιχεία κατά το ύψος των σταθμίδων, των εδρών και των webs.
- Τα μικρά ανοίγματα των εδρών δεν είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθούν.

Συνοριακές Συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Πιο συγκεκριμένα, στις ακραίες εγκάρσιες διατομές του μοντέλου εφαρμόζονται άκαμπτες συνδέσεις της κάθε διατομής με ένα ανεξάρτητο σημείο. Για να γίνει αυτό, όλα τα διαμήκη στοιχεία της κάθε διατομής (και του cross deck) συνδέονται με ένα ανεξάρτητο σημείο στην τομή του ουδέτερου άξονα με την centerline. Σε αυτό το ανεξάρτητο σημείο εφαρμόζονται οι περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας.

Επιπλέον, σε κάθε ακραία εγκάρσια διατομή όλοι οι κόμβοι των διαμήκων στοιχείων (και του cross deck) ενώνονται μεταξύ τους με ράβδους μεγάλης δυσκαμψίας. Με αυτόν τον τρόπο θέλουμε να πετύχουμε οι ακραίες διατομές να μην παραμορφωθούν σημαντικά. Οι ράβδοι αυτοί, έχουν τις παρακάτω ιδιότητες :

- Δεύτερες Ροπές Αδράνειας: $I_{yy-n50}=I_{zz-n50}=I_{xx-n50}=1/25 I_{yy-hull_girder-n50}$
- Εμβαδό διατομής: $A_{y-n50}=A_{z-n50}=1/80 A_{hull_girder-n50}$

Πίνακας 3.13: Συνοριακές συνθήκες μοντέλου

Location	Translation			Rotation		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Aft End						
Independent point	-	Fix	Fix	M_{Tend}	-	-
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]					
Note 1: [-] means no constraint applied (free).						
Note 2: See Figure 17.						

Συνδυασμοί Φορτίσεων για τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (FE Load Combinations).

Για τον έλεγχο αντοχής ενός χώρου φορτίου με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων στο πλαίσιο των κανονισμών CSR έχει δημιουργηθεί ένα σύνολο συνδυασμών φορτίσεων που πρέπει να εξεταστεί στο υπό μελέτη μοντέλο. Να σημειωθούν πως η συγκεκριμένη εξέταση αφορά πλοία με μήκος μεγαλύτερο των 150 m και ότι οι συνδυασμοί φορτίσεων διαφέρουν βάσει του τύπου πλοίου (bulk ή tanker), της θέσης του εξεταζόμενου χώρου φορτίου και της περαιτέρω κατηγοριοποίησης του πλοίου (πχ κατηγοριοποίηση BC- στην περίπτωση των bulk carriers).

Ένας σχεδιαστικός συνδυασμός φόρτισης για τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από μία κατάσταση φόρτωσης σε κάποιο βύθισμα, με συγκεκριμένες τιμές καμπτικής ροπής και διατμητικής δύναμης υπό μια δυναμική κατάσταση φόρτισης. Γενικά, τα τοπικά φορτία που πρέπει να εφαρμοστούν είναι:

- Βάρος της μεταλλικής κατασκευής, έπειτα από μείωση του 50% της προβλεπόμενης διάβρωσης σε κάθε στοιχείο (στατική φόρτιση).
- Εξωτερικές υδροστατικές πιέσεις λόγω θάλασσας (στατική φόρτιση).
- Εξωτερικές υδροδυναμικές πιέσεις λόγω θάλασσας (δυναμική φόρτιση).
- Εξωτερικές πιέσεις στο κατάστρωμα – Green Seas (δυναμική φόρτιση).
- Εσωτερικές πιέσεις φορτίου και έρματος (στατική φόρτιση).
- Εσωτερικές δυναμικές πιέσεις λόγω επιτάχυνσης φορτίου και έρματος (δυναμική φόρτιση).

Όλες οι φορτίσεις υπολογίζονται με βάση τις αντίστοιχες σχέσεις που περιγράφονται στο κεφάλαιο των Φορτίσεων.

Η εφαρμογή των τοπικών πιέσεων (Local Loads) οδηγεί για το μοντέλο σε διαγράμματα κατανομής καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων, αποτέλεσμα της φόρτισης του

μοντέλου ως δοκάρι. Το σύνολο των φορτίσεων που δέχεται το μοντέλο δεν ισοδυναμεί με τις πραγματικές φορτίσεις που δέχεται ολόκληρο το πλοίο ως δοκάρι (hull girder loads). Επομένως οι προκύπτουσες τιμές καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων πρέπει να τροποποιηθούν.

Οι κανονισμοί, για κάθε κατάσταση φόρτωσης ορίζουν επιθυμητές τιμές (Target Values) των φορτίσεων της γάστρας σε συγκεκριμένες θέσεις που αντιστοιχούν στις πραγματικές με σκοπό να διορθώσουν αυτές που προκύπτουν στο μοντέλο τριών αμπαριών. Μετά την ολοκλήρωση των διορθώσεων, οι παρακάτω φορτίσεις της γάστρας θα πρέπει να ταυτίζονται σε πλοίο και μοντέλο, ενώ αν προκύψει αξονική δύναμη θα πρέπει να μηδενιστεί.

- Κατακόρυφη καμπτική ροπή
- Διατμητική δύναμη
- Οριζόντια καμπτική ροπή
- Στρεπτική ροπή

Επιθυμητή Καμπτική Ροπή

Η επιθυμητή καμπτική ροπή, για τη μελέτη αντοχής κύτους που βρίσκεται στην περιοχή της μέσης τομής, εντοπίζεται στο μεσαίο κύτος και συγκεκριμένα στο σημείο όπου μεγιστοποιείται. Για δεδομένο συνδυασμό φορτίσεων υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_{v-targ} = C_{BM-LC} M_{sw} + M_{wv-LC}$$

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.
- M_{wv-LC} : η ροπή κάμψης λόγω κυματισμού για τη δεδομένη δυναμική κατάσταση φόρτισης.

Πίνακας 3.14: Υπολογισμός επιθυμητής καμπτικής ροπής

	Alternate Ore Departure	Heavy Ballast Departure
C_{BM-LC}	100 %	100 %
M_{sw}	510,000 tn·m	-410,000 tn·m
M_{wv-LC}	679,506 tn·m	-693,795 tn·m
M_{v-targ}	1,189,506 tn·m	-1,103,759 tn·m

Επιθυμητή Διατμητική Δύναμη

Οι επιθυμητές τιμές των διατμητικών δυνάμεων $Q_{targ-aft}$, $Q_{targ-fwd}$ βρίσκονται στην πρυμναία και πρωραία φρακτή του μεσαίου κύτους και για το δεδομένο συνδυασμό σχεδιαστικής φόρτισης υπολογίζονται σε kN ως εξής:

- Αν $Q_{fwd} \geq Q_{aft}$:

$$Q_{targ-aft} = C_{SF-LC} \times Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swa} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} \times Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swf} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

- Αν $Q_{fwd} < Q_{aft}$:

$$Q_{targ-aft} = C_{SF-LC} \times Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swa} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} \times Q_{sw-neg} - \Delta Q_{swf} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-neg}$$

Όπου:

- Q_{aft} , Q_{fwd} : οι διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην πρυμναία και προωραία φρακτή του μεσαίου κύτους, σε kN, λόγω της εφαρμογής μόνο των τοπικών φορτίσεων (Local Loads).
- C_{SF-LC} : το ποσοστό της επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης σε ήρεμο νερό, για τον εξεταζόμενο συνδυασμό φορτίσεων.
- Q_{sw-pos} , Q_{sw-neg} : οι επιτρεπόμενες διατμητικές δυνάμεις σε ήρεμο νερό σε kN.
- ΔQ_{swa} , ΔQ_{swf} : διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων στην πρυμναία και προωραία φρακτή του μεσαίου κύτους για Bulk Carriers.
- f_{β} : συντελεστής κυματισμού.
- C_{QW} : συντελεστής συνδυαστικής φόρτισης για διατμητική δύναμη λόγω κυματισμού.
- Q_{wv-pos} , Q_{wv-neg} : οι διατμητικές δυνάμεις λόγω κυματισμών για τη δεδομένη δυναμική κατάσταση φόρτισης.

Πίνακας 3.15: Υπολογισμός επιθυμητών διατμητικών δυνάμεων

	Alternate Ore Departure	Heavy Ballast Departure
C_{SF-LC}	100%	100%
Q_{sw-neg}	-106,137 kN	-137,824 kN
Q_{sw-pos}	123,599 kN	120,460 kN
ΔQ_{swa}	23,552 kN	9,228 kN
ΔQ_{swf}	23,920 kN	8,918 kN
f_{β}	1.05	1.05
$ C_{QW} $	1	1
Q_{wv-neg}	-42,826 kN	-40,589 kN
Q_{wv-pos}	42,826 kN	40,589 kN
$Q_{targ-aft}$	192,117 kN	-189,670 kN
$Q_{targ-fwd}$	-175,024 kN	171,996 kN

Διόρθωση Διατμητικής Δύναμης

Οι κανονισμοί προβλέπουν δύο μεθόδους για τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων από αυτές που προκύπτουν μέσω της εφαρμογής των τοπικών φορτίων (Local Loads) στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σε αυτές που πραγματικά αντιστοιχούν στο πλοίο συνολικά ως δοκάρι (Global Loads). Να σημειωθεί πως στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά η Μέθοδος 1.

- Μέθοδος 1: Για τη διόρθωση της διατμητικής δύναμης σε μία από τις δύο εγκάρσιες φρακτές του μεσαίου κύτους.
- Μέθοδος 2: Για τη διόρθωση της διατμητικής δύναμης και στις δύο εγκάρσιες φρακτές του μεσαίου κύτους.

Τα κριτήρια για το ποια μέθοδος πρέπει να εφαρμοστεί στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρατίθενται παρακάτω:

- Αν ο εξεταζόμενος συνδυασμός φορτίσεων αντιστοιχεί σε μέγιστη διατμητική δύναμη (Max SFLC) τότε η Μέθοδος 1 εφαρμόζεται στην εγκάρσια φρακτή που αναφέρεται στον πίνακα που ακολουθεί. Αν ωστόσο η διορθωμένη τιμή που προκύπτει στην άλλη εγκάρσια φρακτή είναι μεγαλύτερη της επιθυμητής τιμής, τότε θα πρέπει να εφαρμοστεί η Μέθοδος 2.

Πίνακας 3.16: Καθορισμός φρακτής προς διόρθωση διατμητικής δύναμης

Design loading conditions	Bulkhead location	M_{w-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	
	$x_{b-aft} \leq 0.5 L$ and $x_{b-fwd} \geq 0.5 L$	-	-	(1)
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 τους συνδυασμούς φορτίσεων που δεν αντιστοιχούν σε μέγιστη διατμητική δύναμη (Max SFLC) θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα παρακάτω:
 - Αν οι τιμές των διατμητικών δυνάμεων στις εγκάρσιες φρακτές είναι μικρότερες των επιθυμητών τιμών δεν χρειάζεται κάποια διόρθωση.

- Η Μέθοδος 1 εφαρμόζεται όταν η μία από τις δύο εγκάρσιες φρακτές έχει διατμητική δύναμη μεγαλύτερη της επιθυμητής και μετά την διόρθωση η τιμή της άλλης φρακτής παραμένει χαμηλότερη της επιθυμητής. Σε αντίθετη περίπτωση, εφαρμόζεται η Μέθοδος 2.
- Η Μέθοδος 2 εφαρμόζεται όταν οι τιμές των διατμητικών δυνάμεων και στις δύο εγκάρσιες φρακτές είναι μεγαλύτερες των επιθυμητών.

Μέθοδος 1 : Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε μία εγκάρσια φρακτή

Οι φορτίσεις που πρέπει να ασκηθούν για τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων είναι οι παρακάτω:

- Για την πρυμναία εγκάρσια φρακτή:

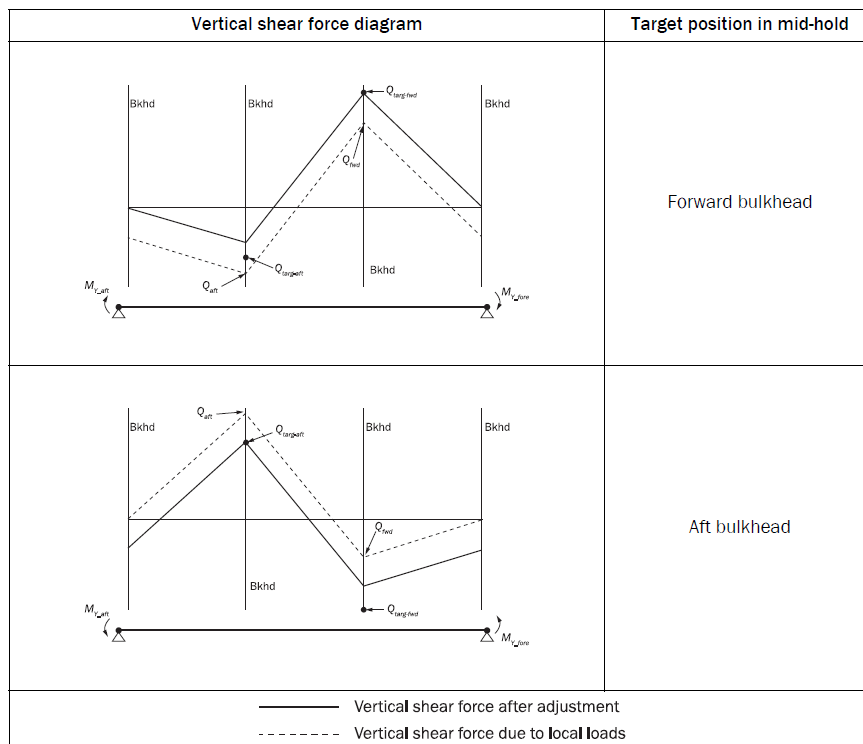
$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} (Q_{targ-aft} - Q_{aft})$$

- Για την πρωαία εγκάρσια φρακτή:

$$M_{Y_aft} = M_{Y_fore} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} (Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})$$

Όπου:

- $M_{Y_aft} = M_{Y_fore}$: κατακόρυφη καμπτική ροπή , σε kNm, που πρέπει να ασκηθεί στα άκρα του μοντέλου όπως δείχνει η παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.13: Διόρθωση διατμητικής δύναμης στο μοντέλο ασκώντας κατακόρυφες ροπές

- Q_{aft} : κατακόρυφη διατμητική δύναμη, σε kN, εξαιτίας των τοπικών φορτίων στην πρυμναία φρακτή. Αυτή λαμβάνεται ως η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή των τιμών στην περιοχή πριν και μετά τη θέση της πρυμναίας φρακτής.
- Q_{fwd} : κατακόρυφη διατμητική δύναμη, σε kN, εξαιτίας των τοπικών φορτίων στην προωαία φρακτή. Αυτή λαμβάνεται ως η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή των τιμών στην περιοχή πριν και μετά τη θέσης της προωαίας φρακτής.

Μέθοδος 2 : Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε δύο εγκάρσιες φρακτές

Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν εφαρμόστηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και αναφέρεται για λόγους πληρότητας. Οι φορτίσεις που πρέπει να ασκηθούν για τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων είναι οι παρακάτω:

- Κατακόρυφες καμπτικές ροπές M_{Y_aft} , M_{Y_fore} στα άκρα του μοντέλου.
- Κατακόρυφα φορτία στις θέσεις που δείχνει ο πίνακας ώστε να δημιουργηθούν οι διατμητικές δυνάμεις ΔQ_{aft} και ΔQ_{fwd} στις θέσεις των εγκαρσίων φρακτών. Στη περίπτωση των bulk carriers, οι θέσεις αυτές αντιστοιχούν στις θέσεις των εδρών.

Τα παραπάνω δίνονται από τους τύπους που ακολουθούν:

$$M_{Y_aft} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} \left(\frac{Q_{targ-fwd} - Q_{fwd} + Q_{targ-aft} - Q_{aft}}{2} \right)$$

$$M_{Y_fore} = M_{Y_aft}$$

$$\Delta Q_{fwd} = \frac{Q_{targ-fwd} - Q_{fwd} - (Q_{targ-aft} - Q_{aft})}{2}$$

$$\Delta Q_{aft} = -\Delta Q_{fwd}$$

Διόρθωση Εγκάρσιας Καμπτικής Ροπής

Για τη διόρθωση της εγκάρσιας καμπτικής ροπής θα πρέπει να ασκηθεί στο μοντέλο μια επιπλέον εγκάρσια καμπτική ροπή στα δύο άκρα του μοντέλου. Η ζητούμενη ροπή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

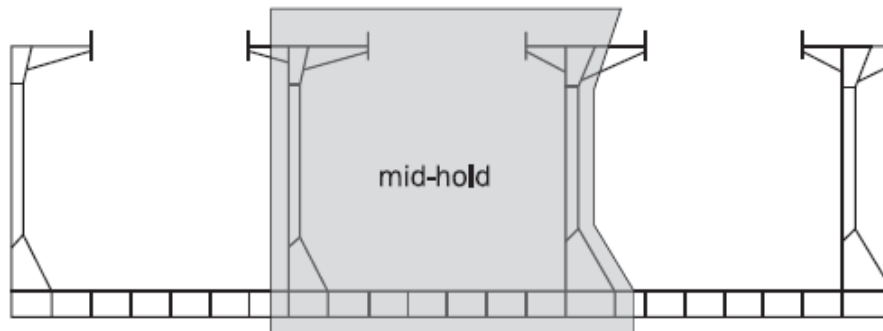
$$M_{v-end} = M_{v-targ} - M_{v-peak}$$

Όπου:

- M_{v-end} : Η επιπλέον εγκάρσια ροπή που πρέπει να ασκηθεί, σε kNm, στα δύο άκρα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.
- M_{v-targ} : Η επιθυμητή εγκάρσια καμπτική ροπή, σε kNm.
- M_{v-peak} : Η μέγιστη (hogging) ή ελάχιστη (sagging) καμπτική ροπή, σε kNm, που προκύπτει στο μεσαίο κύτους του μοντέλου με την άσκηση των τοπικών φορτίων (local loads) και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων.

Κριτήρια Αξιολόγησης

Η περιοχή αξιολόγησης στο μοντέλο μας είναι το μεσαίο από τα τρία αμπάρια σχεδίασης, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.14: Περιοχή αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της μελέτης αντοχής

Τα κατασκευαστικά στοιχεία που βρίσκονται στην περιοχή αξιολόγησης και θα πρέπει να ελεγχθούν βάσει των ζητούμενων κριτηρίων είναι:

- Όλα τα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία.
- Τα κύρια στοιχεία ενίσχυσης (PSM).
- Οι εγκάρσιες φρακτές με τα στοιχεία ενίσχυσής τους
- Τα κατασκευαστικά της προραίας φρακτής συγκρούσεως, αν ανήκει στην περιοχή αξιολόγησης.
- Τα κατασκευαστικά στοιχεία της προραίας φρακτής του μηχανοστασίου και των διαμήκων στοιχείων πρύμνηθεν αυτής που ανήκουν στην περιοχή με μήκος 15% του πιο πρύμνηθεν κύτους (aftmost cargo hold).

Τάσεις Von Mises στα shell elements

Για όλα τα ελάσματα των κατασκευαστικών στοιχείων υπολογίζεται η τάση Von Mises, σε N/mm^2 , βάσει των καθέτων και διατμητικών τάσεων στο εκάστοτε shell element. Αυτές οι τάσεις υπολογίζονται στο κέντρο του μέσου επιπέδου στο κάθε στοιχείο και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Όπου:

- σ_x, σ_y : κάθετες τάσεις στο εκάστοτε στοιχείο, σε N/mm^2 .
- τ_{xy} : διατμητική τάση στο στοιχείο, σε N/mm^2 .

Αξονικές Τάσεις στα beam elements

Για τα beam elements, υπολογίζονται οι αξονικές τάσεις σ_{axial} , σε N/mm^2 , που προκύπτουν από τις αξονικές δυνάμεις.

Υπολογισμός συντελεστών διαρροής και επιτρεπόμενων τιμών

Οι τιμές των συντελεστών διαρροής υπολογίζονται για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$$\lambda_y = \frac{\sigma_{vm}}{R_y}, \text{ για shell elements.}$$

$$\lambda_y = \frac{|\sigma_{axial}|}{R_y}, \text{ για beam elements.}$$

Όπου:

- σ_{vm} : τάση Von Mises, σε N/mm².
- σ_{axial} : αξονική τάση για beam element, σε N/mm².
- R_y : 235/k όπου k τιμή ανάλογα το όριο διαρροής του υλικού σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.17: Τιμές συντελεστή k βάσει υλικού

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

Οι επιτρεπόμενες τιμές των συντελεστών διαρροής, λ_{yperm} , ορίζονται στον παρακάτω πίνακα για το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο.

Πίνακας 3.18: Επιτρεπόμενοι συντελεστές διαρροής

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)

Κριτήριο έναντι διαρροής

Βάσει των παραπάνω, το κριτήριο έναντι διαρροής που εξετάζεται για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο είναι:

$$\lambda_y \leq \lambda_{yperm}$$

Όπου:

- λ_y : Τιμή συντελεστή διαρροής.
- λ_{yperm} : Επιτρεπόμενη τιμή του συντελεστή διαρροής.

4 Η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων – Πρόγραμμα ABAQUS

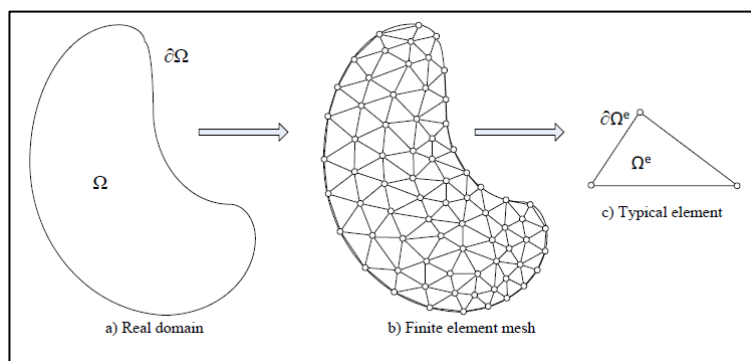
4.1 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων αποτελεί σήμερα μία αξιόπιστη μέθοδο υπολογιστικής μηχανικής για την επίλυση πολλών προβλημάτων της μηχανικής. Είναι ουσιαστικά μία αριθμητική μέθοδος επίλυσης διαφορικών εξισώσεων που διέπουν μία υπαρκτή συνεχή κατασκευή. Η βασική της έννοια είναι η υποδιαίρεση της συνεχής κατασκευής σε επιμέρους διακριτά τμήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (elements) και συνδέονται κατάλληλα στα άκρα τους με κόμβους (nodes) ώστε να αναπαρίσταται σωστά η συμπεριφορά ολόκληρου του μοντέλου. Για την καλύτερη κατανόηση του υπολογισμού ενός προβλήματος με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, αναλύεται στη συνέχεια η μέθοδος σε επιμέρους βήματα.

Βήμα 1: Διακριτοποίηση της κατασκευής και επιλογή στοιχείων.

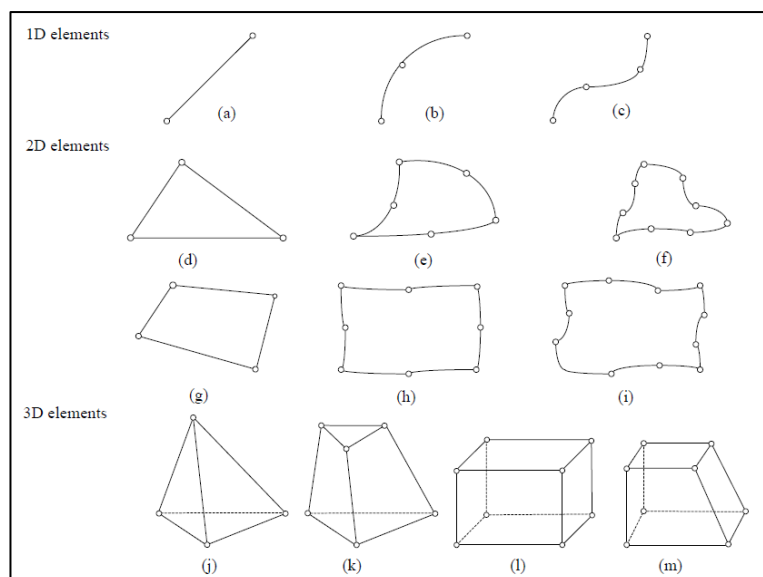
Το πρώτο βήμα περιέχει τη διαίρεση της κατασκευής σε ένα ισοδύναμο σύστημα επιμέρους στοιχείων που συνδέονται στα άκρα τους με κόμβους και την επιλογή των στοιχείων με κατάλληλες ιδιότητες που να μπορούν να προσομοιώσουν με επαρκή ακρίβεια την πραγματική απόκριση της κατασκευής υπό μια δεδομένη κατάσταση φόρτισης.

Σχετικά με τα στοιχεία, το είδος και το μέγεθός τους είναι πρωτεύουσας σημασίας και η επιλογή τους είναι καθοριστική για την επίλυση του προβλήματος. Η γενική αρχή είναι πως τα μικρότερα σε μέγεθος στοιχεία δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα αλλά απαιτούν και περισσότερη υπολογιστική ισχύ. Επιπλέον, σε σημεία με απότομη αλλαγή της γεωμετρίας, που είναι πιθανή η αλλαγή των τάσεων, ενδείκνυται η ύπαρξη μικρών στοιχείων.



Εικόνα 4.1: Εισαγωγή πλέγματος τριγωνικών στοιχείων στην ανάλυση ενός 2D προβλήματος

Όσον αφορά την επιλογή του είδους των στοιχείων, αυτή εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της απόκρισης της κατασκευής υπό τις δεδομένες φορτίσεις που μελετώνται καθώς και από την ακρίβεια που θέλει να επιτύχει ο μελετητής. Τα στοιχεία που συναντώνται συνήθως στην πράξη φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.2: Τυπικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η πρώτη γραμμή αποτελείται από στοιχεία ράβδους (bar elements) και στοιχεία δοκούς (beam elements). Το πρώτο στοιχείο μπορεί να παραλάβει μόνο αξονικές δυνάμεις ενώ το δεύτερο έχει τα πλήρη χαρακτηριστικά απόκρισης μιας δοκού (καμπτική και στρεπτική καταπόνηση). Αυτά τα στοιχεία χρησιμοποιούνται συχνά για την προσομοίωση δικτυωμάτων και πλαισίων. Το απλούστερο στοιχείο έχει δύο κόμβους στα άκρα του (γραμμικό στοιχείο) και τα υπόλοιπα περισσότερους (3 κόμβοι που καλείται στοιχείο 2^{ου} βαθμού, 4 κόμβοι που καλείται 3^{ου} βαθμού κ.ο.κ.).

Τα 2D στοιχεία παραλαμβάνουν δυνάμεις στο επίπεδο τους (επίπεδη εντατική κατάσταση ή επίπεδη παραμόρφωση) και είναι τριγωνικά ή ορθογωνικά. Τα πιο απλά στοιχεία έχουν κόμβους μόνο στα άκρα τους (γραμμικά στοιχεία) με ευθείες πλευρές αλλά υπάρχουν και στοιχεία με ενδιάμεσους κόμβους (τετραγωνικά στοιχεία) και με καμπύλες πλευρές.

Τα πιο συχνά 3D στοιχεία είναι τα τετράεδρα και τα εξαέδρα στοιχεία και χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται η τρισδιάστατη ανάλυση των τάσεων. Τα βασικά 3D στοιχεία έχουν κόμβους μόνο στις γωνίες και ευθείες πλευρές ενώ τα στοιχεία μεγαλύτερου βαθμού έχουν επιπλέον κόμβους στα μέσα των πλευρών ή/και των επιφανειών και καμπύλες επιφάνειες.

Βήμα 2: Επιλογή συνάρτησης παρεμβολής.

Το δεύτερο βήμα περιέχει την επιλογή της συνάρτησης παρεμβολής εσωτερικά του κάθε στοιχείου. Αυτή η συνάρτηση λαμβάνεται σύμφωνα με τις τιμές των μεταβλητών στους κόμβους και έχει ως σκοπό τον υπολογισμό μιας μεταβλητής σε όλη την έκταση του στοιχείου. Στην εικόνα 4.2 η επιλογή πολωνύμου πρώτου (a,d,g,j), δεύτερου (b,e,h) και τρίτου (c,f,i) βαθμού είναι μια συνηθισμένη τακτική.

Βήμα 3: Καθορισμός σχέσεων Παραμόρφωσης - Μετατόπισης και Τάσης-Παραμόρφωσης.

Σε αυτό το βήμα πρέπει να καθοριστούν οι σχέσεις παραμόρφωσης-μετατόπισης και τάσης-παραμόρφωσης. Κατά κανόνα, οι παραμορφώσεις στο εσωτερικό του στοιχείου ορίζονται ως οι παράγωγοι των μετατοπίσεων. Στην περίπτωση των δισδιάστατων στοιχείων το διάνυσμα των παραμορφώσεων ορίζεται ως εξής:

$$\varepsilon(x, y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Όπου u , v οι συναρτήσεις μετατοπίσεων κατά τους άξονες x και y αντίστοιχα.

Σε δισδιάστατα ελαστικά συνεχή μέσα το διάνυσμα των τάσεων είναι:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Για επίπεδες εντατικές καταστάσεις οι σχέσεις παραμορφώσεων-τάσεων είναι:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\sigma_{xx}}{E} - \frac{\nu \sigma_{yy}}{E} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\sigma_{yy}}{E} - \frac{\nu \sigma_{xx}}{E} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} \end{aligned}$$

Όπου E = μέτρο ελαστικότητας, G = μέτρο διάτμησης και ν = λόγος του Poisson. Η μητρική μορφή της παραπάνω σχέσης είναι:

$$\varepsilon(x, y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & 0 \\ -\nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Το αντίστροφο του παραπάνω μητρώου είναι:

$$\sigma(x, y) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$

Βήμα 4: Αντικατάσταση των τάσεων πεδίου με στατικά ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους. Εξίσωση δυνάμεων στους κόμβους με μετατοπίσεις στους κόμβους. Σύνταξη μητρώου ακαμψίας στοιχείου.

Η δημιουργία της σχέσης δυνάμεων – μετατοπίσεων στους κόμβους ενός στοιχείου και ο υπολογισμός του μητρώου ακαμψίας του προκύπτουν από τρεις γενικές κατηγορίες μεθόδων: Η μέθοδος ακαμψίας (direct stiffness method) που είναι και η πιο γνωστή, οι ενεργειακές μέθοδοι-μέθοδοι των έργων και οι μέθοδοι των σταθμισμένων υπολοίπων. Η μέθοδος ακαμψίας είναι πιο εύκολα εφαρμόσιμη στα στοιχεία ράβδους. Οι μέθοδοι των έργων ή της ενέργειας εφαρμόζονται κυρίως για την παραγωγή των ζητούμενων εξισώσεων στα δισδιάστατα και τρισδιάστατα στοιχεία. Αυτές βασίζονται στις αρχές των δυνατών έργων (virtual work), της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και το θεώρημα Castigliano. Να σημειωθεί πως και οι τρεις (αρχή των δυνατών έργων, ελάχιστη δυναμική ενέργεια και θεώρημα Castigliano) παράγουν τις ίδιες εξισώσεις για στοιχεία με γραμμικά-ελαστικά υλικά. Τέλος, από τις μεθόδους των σταθμισμένων υπολοίπων η πιο γνωστή είναι η μέθοδος Galerkin που έχει τα ίδια αποτελέσματα με τις ενεργειακές μεθόδους.

Βήμα 5: Εξίσωση ισορροπίας της κατασκευής και επιβολή συνοριακών συνθηκών.

Σε αυτό το βήμα γίνεται υπέρθεση των εξισώσεων ισορροπίας των στοιχείων μέσω της εφαρμογής της μεθόδου ακαμψίας (direct stiffness method) η οποία βασίζεται στη συνέχεια που απαιτεί την κατασκευή να παραμένει μαζί ως ένα σώμα. Η τελική ολική εξίσωση ισορροπίας για δυναμικά προβλήματα γράφεται σε μητρική μορφή παρακάτω:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F$$

Όπου:

F: δiάνυσμα δύναμης

K: μητρώο ακαμψίας

u: δiάνυσμα μετατοπίσεων

C: μητρώο απόσβεσης

M: μητρώο μάζας

Για τα περισσότερα προβλήματα, τα ολικά χαρακτηριστικά μητρώα (ακαμψίας, απόσβεσης, μάζας) είναι τετραγωνικά και συμμετρικά. Αποδεικνύεται ότι το μητρώο ακαμψίας είναι μη αντιστρέψιμο αφού έχει ορίζουσα μηδέν. Για να γίνει αντιστρέψιμο πρέπει να επιβληθούν οι συνοριακές συνθήκες δηλαδή οι στηρίξεις της κατασκευής.

Βήμα 6: Επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας για τους άγνωστους βαθμούς ελευθερίας.

Η πιο πάνω εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί για μια στατική μελέτη αντοχής αφαιρώντας τους όρους των αδρανειακών δυνάμεων και των δυνάμεων απόσβεσης. Η απλοποιημένη σχέση, ύστερα από την επιβολή των συνοριακών συνθηκών (περιορισμός κάποιων μετατοπίσεων), γράφεται σε ανηγμένη μορφή παρακάτω:

$$\begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix}$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση είναι ουσιαστικά ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων. Σύμφωνα με αυτήν, η κατασκευή έχει n βαθμούς ελευθερίας. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να λυθούν ως προς τους αγνώστους u_i με τη χρήση μιας μεθόδου απαλοιφής (όπως η μέθοδος Gauss) είτε με κάποια επαναληπτική μέθοδο (όπως η μέθοδος Gauss-Siedel). Οι μεταβλητές u_i καλούνται πρωτεύουσες μεταβλητές εφόσον υπολογίζονται πρώτες με τη μέθοδο της ακαμψίας (μετατοπίσεων) πεπερασμένων στοιχείων.

Βήμα 7: Εύρεση των παραμορφώσεων και των τάσεων.

Για το πρόβλημα της ανάλυσης τάσεων, εφόσον είναι γνωστές οι μετατοπίσεις, μπορούν πλέον να υπολογιστούν οι δευτερεύουσες μεταβλητές, δηλαδή οι παραμορφώσεις και οι τάσεις (ή οι ροπές και οι διατμητικές δυνάμεις). Ενδεικτικά, οι σχέσεις παραμορφώσεων-μετατοπίσεων και τάσεων-παραμορφώσεων για 2D στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης παρουσιάστηκαν στο βήμα 3.

Βήμα 8: Ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

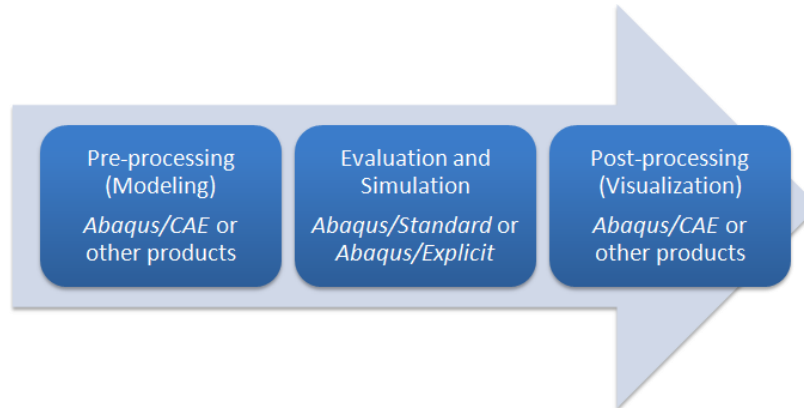
Το τελευταίο βήμα είναι η ανάλυση και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Συνήθως, σε μελέτες σχεδίασης, ενδιαφέρουν τα σημεία της κατασκευής που παρουσιάζουν υψηλές τάσεις και παραμορφώσεις. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων βοηθούν στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων παρουσιάζοντας γραφικές αναπαραστάσεις.

4.2 Πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ABAQUS

Το Abaqus FEA (παλαιότερα ABAQUS) είναι ένα σετ προγραμμάτων για την ανάλυση προβλημάτων της μηχανικής με τη χρήση υπολογιστή (CAE – computer-aided engineering). Ανήκει στη γαλλική εταιρεία λογισμικού Dassault Systemes και η πρώτη έκδοσή του κυκλοφόρησε το 1978. Το σετ προγραμμάτων αποτελείται από τα κάτωθι:

1. **Abaqus/CAE** το οποίο χρησιμοποιείται για την προεπεξεργασία και μετέπειτα επεξεργασία της ανάλυσης με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
2. **Abaqus/Standard** για την επεξεργασία (Processing) με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων κυρίως γραμμικών προβλημάτων.
3. **Abaqus/Explicit** για την επεξεργασία (Processing) με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων κυρίως μη γραμμικών προβλημάτων.

4. **Abaqus/CFD** (Computational Fluid Dynamics), το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων υπολογιστικής υδροδυναμικής.
5. **Abaqus/Electromagnetic**, το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων ηλεκτρομαγνητισμού.



Εικόνα 4.3: Στάδια ανάλυσης με τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων

Μία ολοκληρωμένη ανάλυση με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από τρία ξεχωριστά στάδια:

- *Προεπεξεργασία (Pre-processing)* που περιλαμβάνει τα εξής:
 - Σχεδίαση της γεωμετρίας του μοντέλου.
 - Καθορισμός του είδους των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν.
 - Καθορισμός των χρησιμοποιούμενων υλικών με τις ιδιότητές τους.
 - Καθορισμός των γεωμετρικών ιδιοτήτων των στοιχείων (επιθυμητό μέγεθος, μέγιστος λόγος πλευρών κλπ.).
 - Δημιουργία πλέγματος του μοντέλου.
 - Καθορισμός των φυσικών περιορισμών (Συνοριακές Συνθήκες).
 - Καθορισμός των φορτίσεων.
- *Επεξεργασία-Επίλυση (Processing or Finite Element Analysis)* που περιλαμβάνει τα εξής:
 - Υπολογισμός των τιμών των πρωτεύουσών μεταβλητών (primary field variables) δηλαδή των μετατοπίσεων.
 - Υπολογισμός των τιμών, με την πίσω αντικατάσταση, των δευτερευουσών μεταβλητών δηλαδή τις δυνάμεις αντίδρασης, τις παραμορφώσεις και τις τάσεις.
- *Μετέπειτα Επεξεργασία (Post-processing)* που περιλαμβάνει τα εξής:
 - Γραφικά και αριθμητικά αποτελέσματα των μεταβλητών που έχουν υπολογιστεί κατά την επεξεργασία.

Το Abaqus/CAE μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προεπεξεργασία, μετέπειτα επεξεργασία καθώς και την παρακολούθηση της διαδικασίας της επεξεργασίας. Για την επεξεργασία

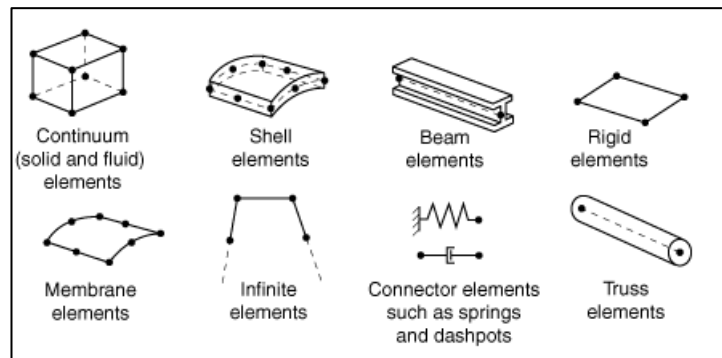
υπάρχουν τα προγράμματα Abaqus/Standard, το οποίο είναι γενικού σκοπού, και το Abaqus/Explicit που χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το Abaqus/Standard καθώς το πρόβλημα που μελετάται είναι γραμμικό.

Στοιχεία του Προγράμματος ABAQUS

Το πρόγραμμα Abaqus, όπως και τα άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, διαθέτει μια πληθώρα στοιχείων για την επίλυση πολλών διαφορετικών προβλημάτων. Η συμπεριφορά ενός στοιχείου χαρακτηρίζεται από τις εξής παραμέτρους:

- Οικογένεια

Τα στοιχεία χωρίζονται σε οικογένειες βάσει της γεωμετρίας που αναπαριστούν. Οι συχνότερες οικογένειες στοιχείων που χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις τάσεων φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.4: Συνήθεις οικογένειες στοιχείων

- Βαθμοί Ελευθερίας

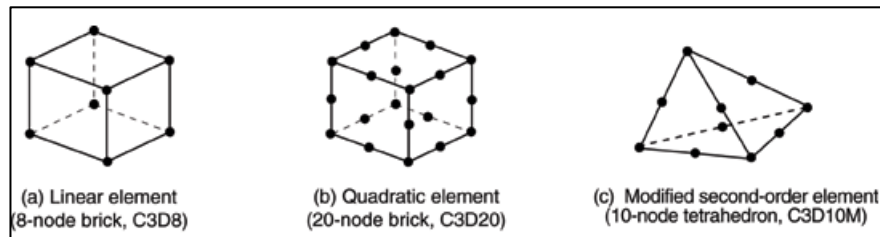
Οι βαθμοί ελευθερίας που έχει ένα στοιχείο αντιστοιχούν στις θεμελιώδεις μεταβλητές που υπολογίζονται κατά την επεξεργασία του προβλήματος. Για μια ανάλυση τάσεων, οι βαθμοί ελευθερίας για τα στοιχεία-κελύφη (shell elements) και τα στοιχεία-δοκούς (beam elements) είναι οι μετατοπίσεις και οι στροφές σε κάθε κόμβο.

- Συνάρτηση Παρεμβολής

Οι βαθμοί ελευθερίας (μετατοπίσεις και στροφές) υπολογίζονται αρχικά στους κόμβους ενός στοιχείου. Στη συνέχεια, υπολογίζονται σε όλα τα άλλα σημεία του στοιχείου μέσω των συναρτήσεων παρεμβολής. Συνήθως, η τάξη των συναρτήσεων παρεμβολής καθορίζεται από τον αριθμό των κόμβων ενός στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα στοιχεία που έχουν κόμβους μόνο στις γωνίες, όπως ο 8-κομβικός κύβος της Εικόνας 4.5, χρησιμοποιούν γραμμικές παρεμβολές σε όλες τις κατευθύνσεις και καλούνται γραμμικά στοιχεία ή στοιχεία πρώτου βαθμού.

- Τα στοιχεία που φέρουν και ενδιάμεσους κόμβους, όπως ο 20-κομβικός κύβος της Εικόνας 4.5, χρησιμοποιούν πολυώνυμο παρεμβολής δευτέρου βαθμού και καλούνται τετραγωνικά στοιχεία ή στοιχεία δευτέρου βαθμού.
- Τέλος, τα στοιχεία με τροποποιημένες γεωμετρίες που φέρουν και ενδιάμεσους κόμβους, όπως το 10-κομβικό τετράεδρο της Εικόνας 4.5, χρησιμοποιούν τροποποιημένο πολυώνυμο παρεμβολής δευτέρου βαθμού και καλούνται τροποποιημένα ή τροποποιημένα δευτέρου βαθμού στοιχεία.



Εικόνα 4.5: Πεπερασμένα στοιχεία

- Μαθηματική Περιγραφή (Mathematical Formulation)

Κάθε στοιχείο έχει μια μαθηματική περιγραφή που καθορίζει τη συμπεριφορά του. Για την ικανοποίηση διαφόρων τύπων συμπεριφορών το Abaqus, όπως και άλλα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, διαθέτει ποικίλα στοιχεία σε κάθε οικογένεια με διαφορετικές συμπεριφορές. Για παράδειγμα, τα κελύφη αποτελούνται από τρία επιμέρους στοιχεία με διαφορετική συμπεριφορά το καθένα: το γενικού σκοπού, το λεπτό κέλυφος και το παχύ κέλυφος.

- Ολοκλήρωση (Integration)

Το Abaqus χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους για να υπολογίσει την ακαμψία της διατομής του στοιχείου. Συνήθως χρησιμοποιείται ο κανόνας τετραγωνισμού για αυτόν τον σκοπό.

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο S4R για την μοντελοποίηση των ελασμάτων του πλοίου και το B31 για την μοντελοποίηση των ενισχυτικών. Βασικά χαρακτηριστικά αυτών ακολουθούν παρακάτω:

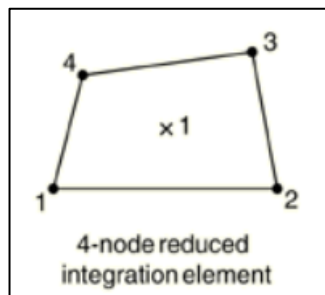
1. Στοιχείο S4R

Το στοιχείο S4R ανήκει στην οικογένεια των στοιχείων πλακών (S) γενικού σκοπού. Σε αυτά, εφαρμόζεται αυτόματα η θεωρία των παχών πλακών όταν η διάσταση του πάχους είναι της τάξεως 1/15 ή μεγαλύτερη συγκριτικά με τη διάσταση του μήκους του κελύφους και η θεωρία του Kirchhoff για λεπτά ελάσματα.

Αποτελείται από τέσσερις κόμβους (4) με έξι βαθμούς ελευθερίας έκαστος, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές, και πραγματοποιείται ολοκλήρωση χαμηλότερης τάξης για τον υπολογισμό της ακαμψίας του (reduced integration - R). Οι μετατοπίσεις υπολογίζονται μόνο στους

κόμβους του στοιχείου και στη συνέχεια γίνεται γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των ίδιων μεγεθών στα ενδιάμεσα σημεία του.

Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης υποδιαίρεσης του στοιχείου S4R σε τριγωνικά στοιχεία κελύφους τριών κόμβων S3. Τα δύο αυτά στοιχεία είναι συμβατά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για τη διακριτοποίηση της κατασκευής.



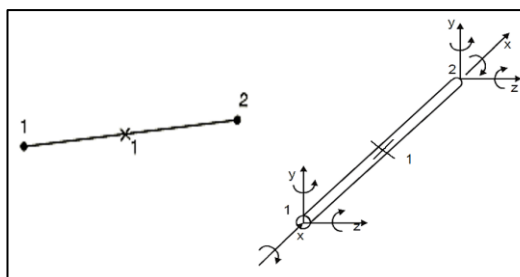
Εικόνα 4.6: S4R Στοιχείο

2. Στοιχείο B31

Σύμφωνα με τη θεωρία δοκών, ένα τρισδιάστατο σώμα μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα μονοδιάστατο σώμα-ευθεία στην περίπτωση που οι διαστάσεις της διατομής του είναι πολύ μικρότερες σε σύγκριση με την απόσταση των στηρίξεων στις οποίες ισορροπεί. Έτσι, στο Abaqus, το στοιχείο δοκός μοντελοποιείται ως μια γραμμή στο χώρο όπου η ακαμψία του σχετίζεται με την παραμόρφωση αυτής της γραμμής κατά το μήκος της.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το στοιχείο B31, όπου ο αριθμός 3 δηλώνει ότι δύναται να παραμορφωθεί στο χώρο, ενώ ο αριθμός 1 ότι πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των βαθμών ελευθερίας στα ενδιάμεσα των κόμβων σημεία. Φέρει δύο κόμβους στα άκρα του που έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας έκαστος, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές.

Τέλος, το συγκεκριμένο στοιχείο επιτρέπει και την εγκάρσια διατμητική παραμόρφωση υποθέτοντας πως ισχύει η θεωρία δοκών Timoshenko. Η συγκεκριμένη θεωρία δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για διατομές με διαστάσεις μέχρι και το 1/8 του μήκους των στηρίξεών τους.



Εικόνα 4.7: B31 Στοιχείο

5 Δεδομένα Μελέτης Αντοχής Έναντι Διαρροής

5.1 Το υπό μελέτη πλοίο

Το πλοίο το οποίο μελετήθηκε ως προς την αντοχή του πρόκειται για ένα εμπορικό πλοίο μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην εννέα κυτών με τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.1: Βασικά μεγέθη του υπό μελέτη πλοίου

Ship Type	Capesize Bulk Carrier
Date of Built	2016
Builder	DMHI
Classification	ABS
Notation	CSR, GRAB[25], BC-A (holds 2,4,6 and 8 may be empty with max. cargo dens.:3.0 tn/m ³)
Length (B.P)	284 m
Length (O.A)	292 m
Breadth (Molded)	45 m
Depth (Molded)	24.7 m
Designed draft (Molded)	16.5 m
Scantling Draft (Molded)	18.2 m
DWT	179,358.7 tn
Displacement Δ	205,796.4 tn
L.S.	26,437.7 tn
C_B	0.8615
Frame Spacing (Cargo Area)	925 mm
Main Engine Type	B&W 6G70ME-C.9.2 (Derated)
Engine MCR	15,330 kW x 69.5 rpm

5.2 Οι Εξεταζόμενοι Συνδυασμοί Φορτίσεων

Καταστάσεις Φόρτωσης

Για τη μελέτη αντοχής επιλέχθηκαν δύο καταστάσεις φόρτωσης από αυτές που σύμφωνα με τους κανονισμούς πρέπει να ελεγχθούν και υπάρχουν στο Trim & Stability Booklet του πλοίου. Στη συνέχεια δίνονται τα βασικά στοιχεία των φορτώσεων που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Πίνακας 5.2: Στοιχεία κατάστασης εναλλάξ φόρτωσης από το trim & stability booklet

LOADING TYPE	ALTERNATE ORE DEPARTURE		
T _{LC}		18.2	m
ρ _c		3	t / m ³
DISPLACEMENT		205,796.4	t
NO. 1 CARGO HOLD	53.6 %	30,765.3	t
NO. 3 CARGO HOLD	53.6 %	36,371.1	t

NO. 5 CARGO HOLD	53.6 %	37,349.6	t
NO. 7 CARGO HOLD	53.6 %	36,374.6	t
NO. 9 CARGO HOLD	53.6 %	32,853.6	t
LONGITUDINAL STRENGTH			
MAX. BENDING MOMENT	FR 148.33 (131.333 m)	323,099.3	t*m
MAX. SHEAR FORCE	FR 75 (63.5 m)	13,606.6	t

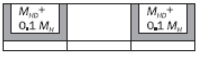

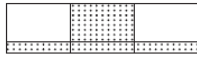
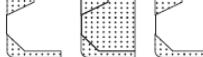
Πίνακας 5.3: Στοιχεία κατάστασης heavy ballast από το trim & stability booklet

LOADING TYPE	HEAVY BALLAST DEPARTURE		
T_{LC}		10.5	m
ρ_L		1.025	t / m ³
DISPLACEMENT		113,318.8	t
NO. 6 CARGO HOLD	100 %	23,809	t
F.P TK	100 %	3,906.4	t
NO. 1 W.B. TK (C)	100 %	5,243.9	t
NO. 2 W.B. TK (P)	100 %	3,071.9	t
NO. 2 W.B. TK (S)	100 %	3,071.9	t
NO. 3 W.B. TK (P)	100 %	3,116.6	t
NO. 3 W.B. TK (S)	100 %	3,116.6	t
NO. 4 W.B. TK (P)	100 %	6,344.1	t
NO. 4 W.B. TK (S)	100 %	6,344.1	t
NO. 5 W.B. TK (P)	100 %	6,329.7	t
NO. 5 W.B. TK (S)	100 %	6,329.7	t
NO. 6 W.B. TK (P)	100 %	4,288.7	t
NO. 6 W.B. TK (S)	100 %	4,288.7	t
A.P. TK	100 %	1,974.6	t
LONGITUDINAL STRENGTH			
MAX. BENDING MOMENT	FR 77.24 (65.57 m)	208,199.7	t*m
MAX. SHEAR FORCE	FR 131 (115.3 m)	-10,525.9	t

Δυναμικές καταστάσεις θάλασσας

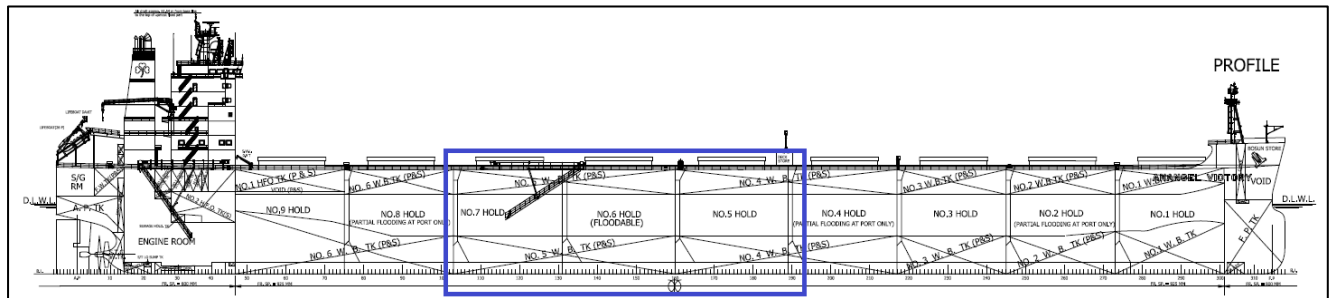
Η κάθε κατάσταση φόρτωσης συνδυάζεται με κατάλληλες δυναμικές καταστάσεις θάλασσας ώστε να προκύπτουν δυσμενείς καταστάσεις για το πλοίο. Αυτές λήφθηκαν από πίνακα των κανονισμών [Pt.1, Ch.4, Sec.8, Table 12] και συγκεκριμένα οι περιπτώσεις 11 και 14 που ακολουθούν παρακάτω.

Πίνακας 5.4: Εξεταζόμενες καταστάσεις φόρτωσης σε συνδυασμό με δυναμικές καταστάσεις θάλασσας

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
			Aft	Mid	Fore				
11	Alternate load full [4.2.3] items a and c			T_{SC}	100% (hog.)	100% ⁽⁸⁾ Max SFLC	FSM-2 HSM-2		
						100% ⁽⁹⁾ Max SFLC	FSM-2 HSM-2		
						100%	OST-2P/S		
						0%	100% Max SFLC	BSP-1P/S HSM-1	
						0%	100% ⁽¹⁰⁾ Max SFLC	HSM-1	
14 ⁽⁷⁾	Heavy ballast [4.2.4]			T_{BAL-H}	100% (sag.)	0%	100% ⁽¹⁰⁾ Max SFLC	FSM-2 HSM-2	
						100%	BSR-1P/S		
						100% ⁽⁸⁾ Max SFLC	HSM-1		
						100% ⁽⁹⁾ Max SFLC	HSM-1		
						100%	BSR-1P/S		

6 Μοντελοποίηση σε Περιβάλλον ABAQUS/CAE

Σύμφωνα με τους κανονισμούς δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS ένα μοντέλο τριών αμπαριών. Συγκεκριμένα, στο μέσον βρίσκεται το υπό εξέταση Cargo Hold No. 6 και πρὸνθηθεν και πρῶραθεν αυτού τα Cargo Hold No. 7 και Cargo Hold No. 5 αντίστοιχα όπως φαίνονται και στην εικόνα που ακολουθεί. Στη συνέχεια, θα περιγραφεί η διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου.



Εικόνα 6.1: Περιοχή τριών αμπαριών για μοντελοποίηση

Κατά τη μοντελοποίηση των τριών αμπαριών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής σχέδια του πλοίου: General Arrangement, Midship Section, Shell Expansion, Double Bottom, Deck & Frames, Transverse BHD (Typical Transverse BHD & Deep Tank BHD). Γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.1: Βασικά μεγέθη μοντέλου

Frame Spacing	925 mm	1 Frame
Web Spacing	5550 mm (Max)	6 Frames (Max)
Floor Spacing	3700 mm	4 Frames
Μήκος Cargo Hold No.7	25900 mm	28 Frames
Μήκος Cargo Hold No.6	26825 mm	29 Frames
Μήκος Cargo Hold No.5	26825 mm	29 Frames
Μήκος Τμήματος Cargo Hold No.4	3700 mm	4 Frames
Συνολικό Μήκος Μοντέλου	83250 mm	90 Frames
Πλάτος Μοντέλου	45000 mm	
Ύψος Καταστρώματος	24700 mm	

Σημειώνεται πως το ABAQUS δεν χρησιμοποιεί καθορισμένες μονάδες μέτρησης αλλά η επιλογή τους έγκειται στον χρήστη. Στη παρούσα εργασία οι μονάδες μέτρησης επιλέχθηκαν να είναι σύμφωνες με το σύστημα μονάδων **SI (mm)** και συνεπώς τα παράγωγα μεγέθη έχουν τις μονάδες του πίνακα.

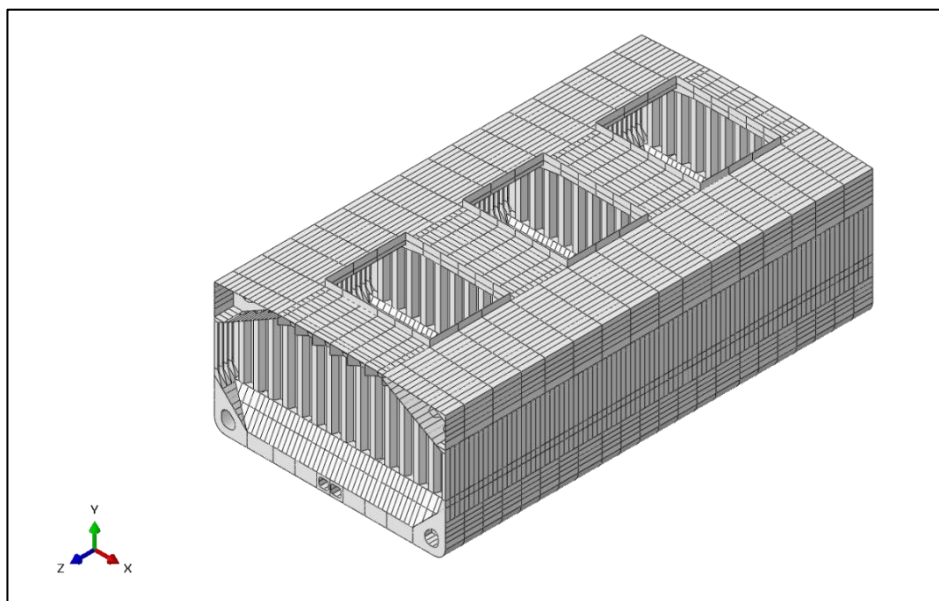
Πίνακας 6.2: Σύστημα μονάδων SI (mm)

Μέγεθος	Μονάδα Μέτρησης
---------	-----------------

Μήκος	mm
Μάζα	Ton
Δύναμη	N
Τάση	MPa
Πυκνότητα	Ton/mm ³
Χρόνος	Sec

6.1 Γεωμετρία του Μοντέλου

Η συνολική γεωμετρία του μοντέλου, έτσι όπως κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα ABAQUS, φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 6.2: Τελική γεωμετρία μοντέλου τριών αμπαριών

Η βασική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή της γεωμετρίας του μοντέλου στο πρόγραμμα ABAQUS είναι η παρακάτω:

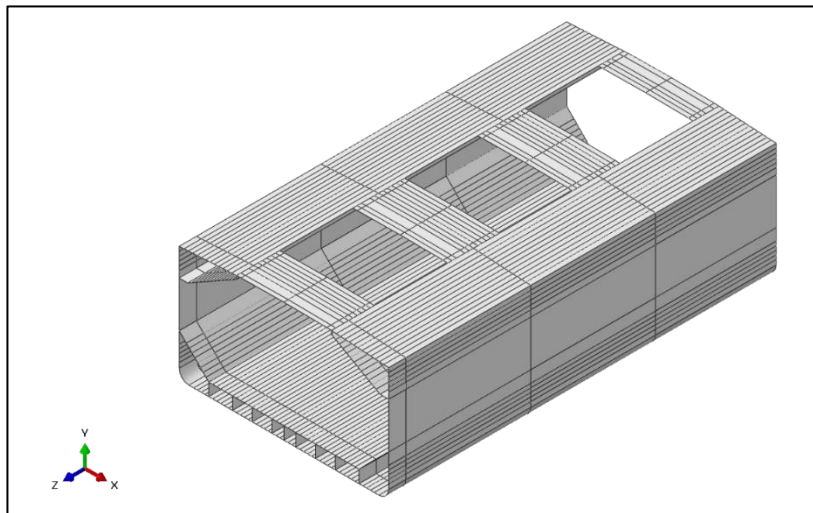
1. Δημιουργία επιμέρους γεωμετρικών στοιχείων (Parts) στο Module Part.
2. Δημιουργία γεωμετρικών υποδιαιρέσεων (Partitions) πάνω στις επιφάνειες για τον καθορισμό των ενισχυτικών.
3. Δημιουργία γεωμετρικών υποομάδων (Sets) για ελάσματα και ενισχυτικά που έχουν τα ίδια πάχος και υλικό. Η ομαδοποίηση βοηθάει στην ταχύτερη εισαγωγή των ιδιοτήτων αργότερα.
4. Συναρμολόγηση των επιμέρους στοιχείων στο Assembly Module και δημιουργία του τελικού γεωμετρικού μοντέλου που έχει τα Sets των επιμέρους στοιχείων.

Σημείωση: Για την ευκολότερη διαχείριση του μοντέλου, το συνολικό μοντέλο χωρίστηκε σε δύο επιμέρους στοιχεία: Το πρώτο αφορά την ένωση όλων των κατασκευαστικών στοιχείων εκτός των εγκάρσιων φρακτών και το δεύτερο τις εγκάρσιες φρακτές. Η συναρμολόγηση αυτών των δύο μας έδωσε το ολοκληρωμένο μοντέλο.

Ακολουθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής των επιμέρους στοιχείων καθώς και της συναρμολόγησης αυτών.

Διαμήκη ελάσματα

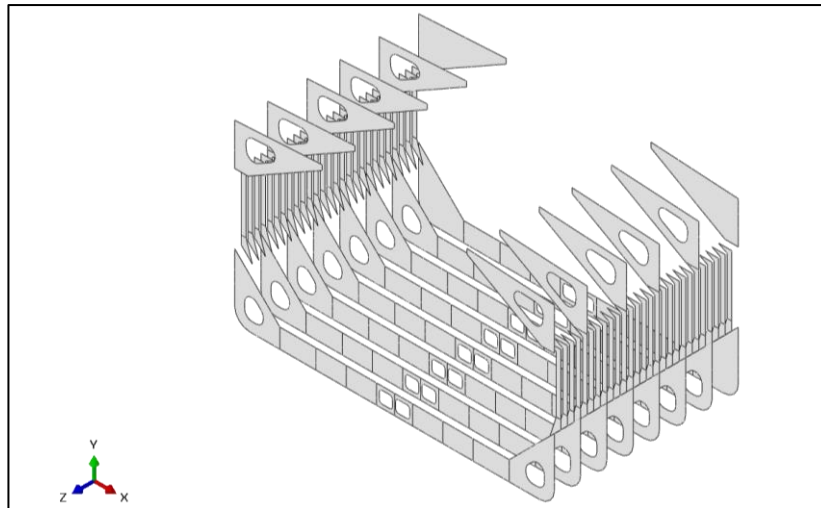
Τα διαμήκη ελάσματα περιλαμβάνουν τα ελάσματα του καταστρώματος, των πλευρών, του εσωτερικού και εξωτερικού πυθμένα, τα κεκλιμένα ελάσματα hopper και topside και τις σταθμίδες (girders) του διπύθμενου. Για την κατασκευή των διαμήκη ελασμάτων αρχικά σχεδιάστηκε η μισή μέση τομή τους σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα (AUTOCAD) το οποίο μετά εισήχθη στο ABAQUS ως Sketch. Με τη χρήση του Sketch τα διαμήκη στοιχεία έγιναν Extrude σε μήκος 83250 mm, όσο δηλαδή και το συνολικό μήκος του μοντέλου μας. Έπειτα, αφαιρέθηκαν τα περιττά Faces που αντιστοιχούν στα στόμια κυτών και δημιουργήθηκαν partitions στις θέσεις που θα τοποθετηθούν τα διαμήκη ενισχυτικά. Τέλος, με την επιλογή Mirror σχεδιάστηκε το μοντέλο καθ' όλο το πλάτος.



Εικόνα 6.3: Διαμήκη ελάσματα μοντέλου

Στοιχεία εγκάρσιας ενίσχυσης

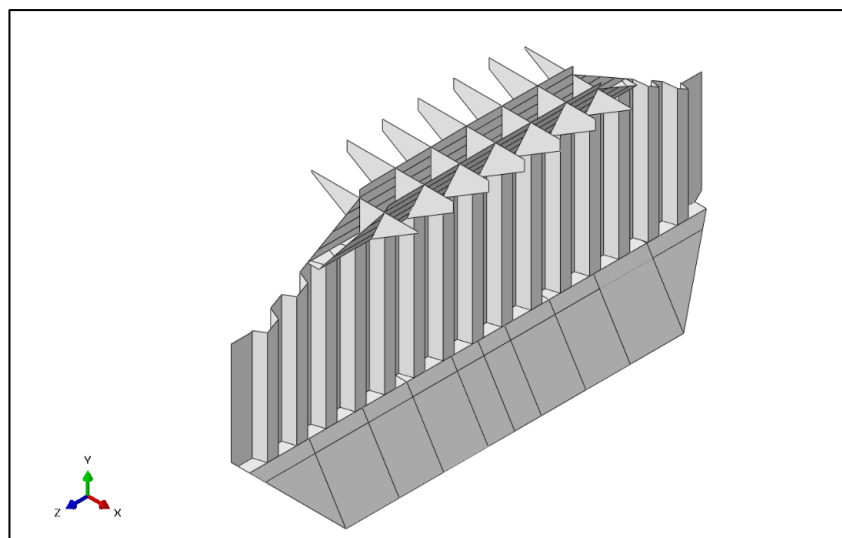
Τα στοιχεία εγκάρσιας ενίσχυσης αποτελούνται από τα εγκάρσια ενισχυτικά των απλών κατασκευαστικών νομέων (Side Frames), τις έδρες του διπύθμενου (Floors) και τα διαφράγματα των ενισχυμένων νομέων (Webs). Αυτά τα ελάσματα είναι αποτέλεσμα Shell Planar των αντίστοιχων στοιχείων της μέσης τομής. Να σημειωθεί πως οι φλάντζες των κατασκευαστικών νομέων και των μεγάλων ανοιγμάτων (Ring Openings) μοντελοποιούνται ως στοιχεία δοκοί από τις ακμές των ελευθέρων άκρων.



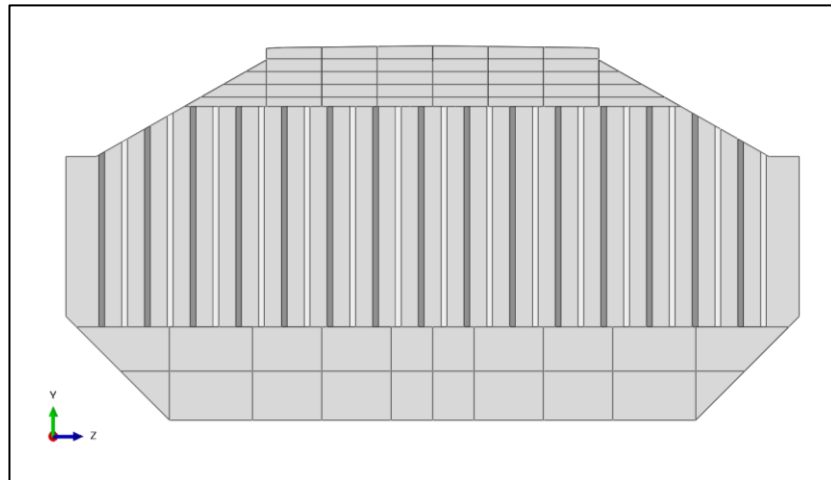
Εικόνα 6.4: Εγκάρσια κατασκευαστικά στοιχεία μοντέλου

Εγκάρσιες Πτυχωτές Φρακτές

Οι εγκάρσιες πτυχωτές φρακτές, ως μια πιο σύνθετη γεωμετρία, κατασκευάστηκαν από την ένωση των τριών επιμέρους στοιχείων: Τα ελάσματα των άνω και κάτω εδράσεων (Lower-Upper Stool) ως Shell Extrusion μαζί με τα ελάσματα ενίσχυσής τους ως Shell Planar και τα πτυχωτά ελάσματα (Corrugation). Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν partitions για τη μοντελοποίηση των ενισχυτικών της άνω και κάτω έδρας. Τέλος, αποκόπηκε το περιττό τμήμα με την εντολή Cut Extrude ώστε να μείνει η γεωμετρία εντός του αμπαριού. Να σημειωθεί πως κατασκευάστηκαν δύο ειδών εγκάρσιες φρακτές: Οι απλές εγκάρσιες φρακτές (Typical Transverse BHD) στους νομείς 103 και 189 και οι ενισχυμένες (Deep Tank BHD) στους νομείς 131 και 160.



Εικόνα 6.5: 3D όψη εγκάρσιας φρακτής



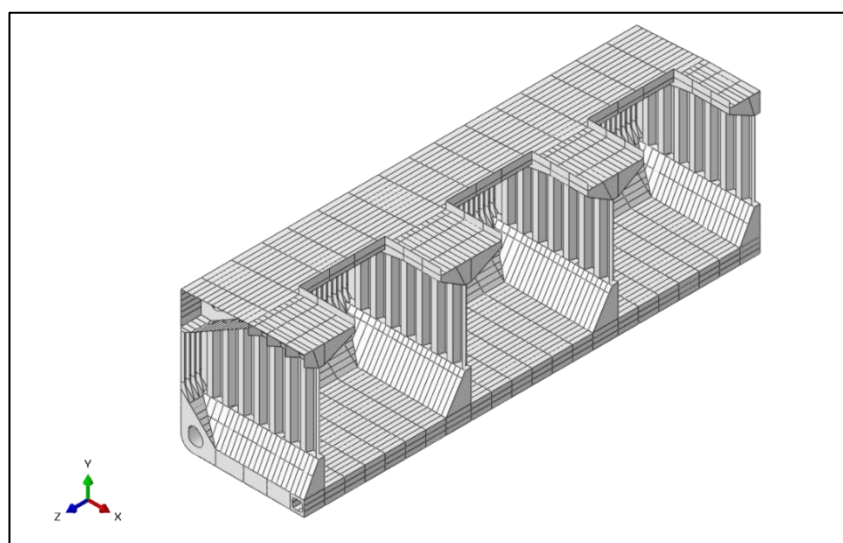
Εικόνα 6.6: Πρόσωση εγκάρσιας φρακτής

Συναρμολόγηση

Τα παραπάνω Parts εισάγονται στο Assembly Module ως ομοιώματα (Instances), τοποθετούνται στις κατάλληλες θέσεις και έπειτα γίνεται η συναρμολόγηση με την εντολή Merge. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει ένα νέο Part με το πλήρες μοντέλο.

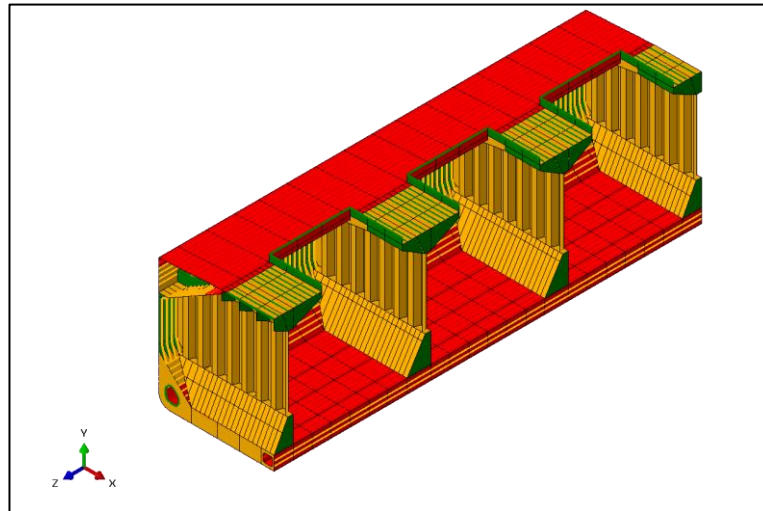
Σημειώνεται πως το σύστημα αναφοράς του ABAQUS διαφέρει από το συμβατικό και πλέον θα χρησιμοποιείται αυτό. Συγκεκριμένα, ο διαμήκης άξονας είναι ο άξονας Z, ο εγκάρσιος άξονας είναι ο X και ο κάθετος είναι ο Y.

Σημείωση: Στο συγκεκριμένο μοντέλο έγιναν κάποιες γεωμετρικές απλοποιήσεις. Για παράδειγμα, η οριοθέτηση των περιοχών ίδιου πάχους και υλικού έγινε σύμφωνα με τα partitions που έχουν ήδη δημιουργηθεί και αποφεύχθηκε εν γένει η δημιουργία πολλών νέων partitions. Αυτή η πρακτική βοηθάει στη δημιουργία ενός καλύτερου πλέγματος στη συνέχεια.

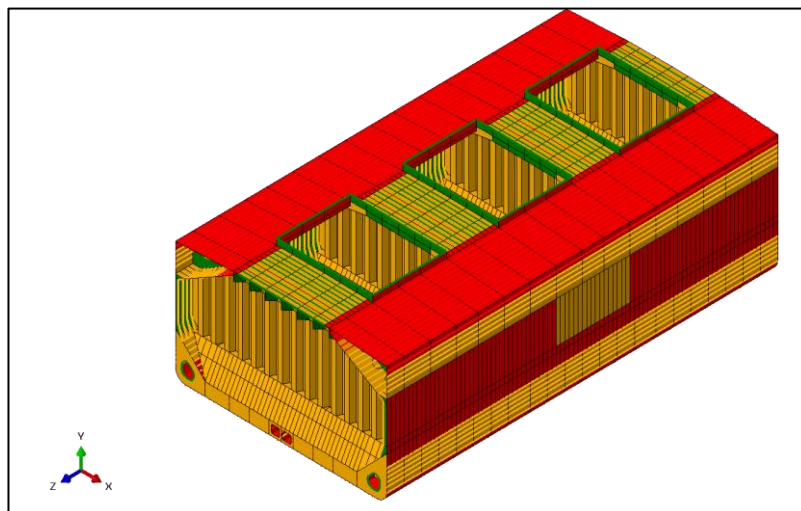


Εικόνα 6.7: Διαμήκη τομή συναρμολογούμενου μοντέλου

Όριο Διαρροής	MPa	235	235	315	315	355	355	355
Χρωματική Απεικόνιση		Green		Yellow		Red		



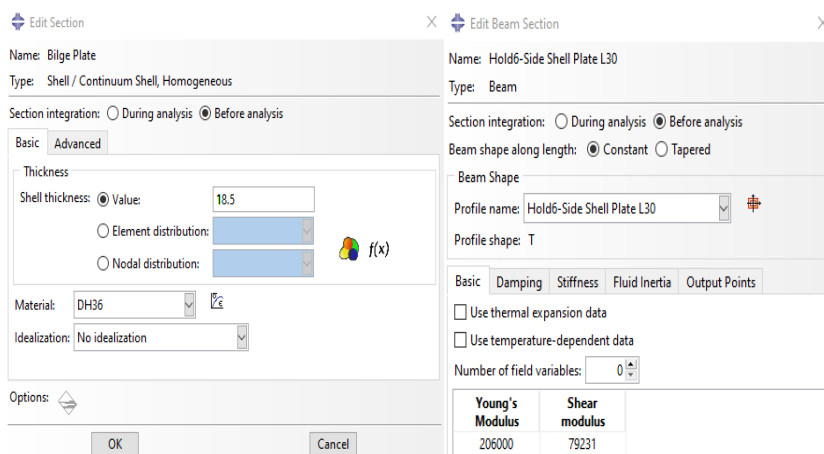
Εικόνα 6.9: Χρωματική απεικόνιση των διαφορετικών υλικών (διαμήκη τομή)



Εικόνα 6.10: Χρωματική απεικόνιση των διαφορετικών υλικών

Δημιουργία Διατομών

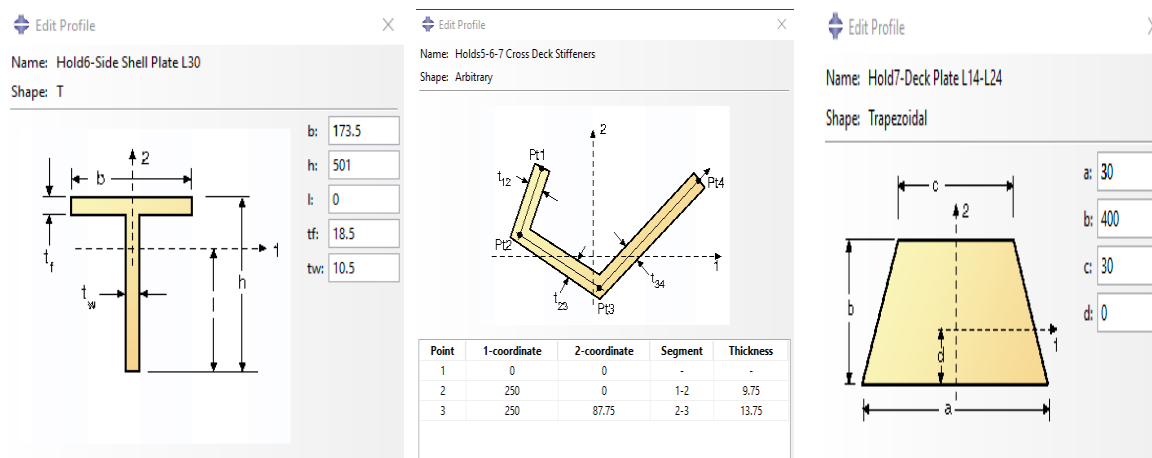
Σε αυτό το σημείο δημιουργούνται όλες οι χρησιμοποιούμενες διατομές των ελασμάτων και των ενισχυτικών. Για τα ελάσματα, που μοντελοποιούνται ως shell elements, απαιτείται η εισαγωγή του πάχους και του υλικού της κάθε διατομής. Για τα ενισχυτικά, που μοντελοποιούνται ως beam elements, απαιτείται να προσδιοριστεί το προφίλ του κάθε ενισχυτικού και το υλικό. Να σημειωθεί πως η διαστασιολόγηση των ελασμάτων και των ενισχυτικών έγινε αφαιρώντας το μισό περιθώριο διάβρωσης (corrosion addition) από τις δοθέντες κατασκευαστικές διαστάσεις (as-built thicknesses), όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο των κανονισμών CSR “Net Scantling Approach”.



Εικόνα 6.11: Παράδειγμα δημιουργίας διατομής για έλασμα και ενισχυτικό

Σχετικά με τα προφίλ των ενισχυτικών, για το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν οι εξής διατομές:

- Απλή διατομή τύπου I (Trapezoidal Shape)
- Διατομή τύπου T (T Shape)
- Διατομή τύπου L (Arbitrary Shape)



Εικόνα 6.12: Προφίλ ενισχυτικών: T (αριστερά), L (κέντρο), I (δεξιά)

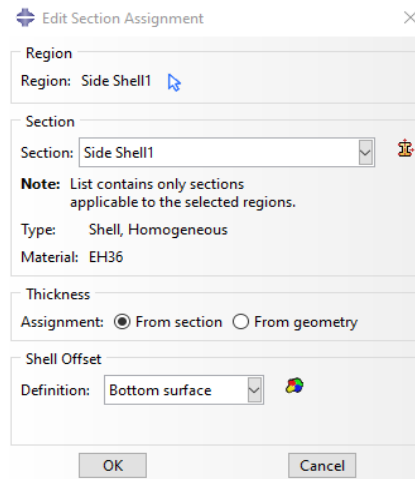
Ανάθεση Διατομών

Πλέον, μπορούμε να αναθέσουμε τις διατομές που έχουμε δημιουργήσει στα αντίστοιχα ελάσματα και ενισχυτικά βάσει των sets που έχουν οριστεί.

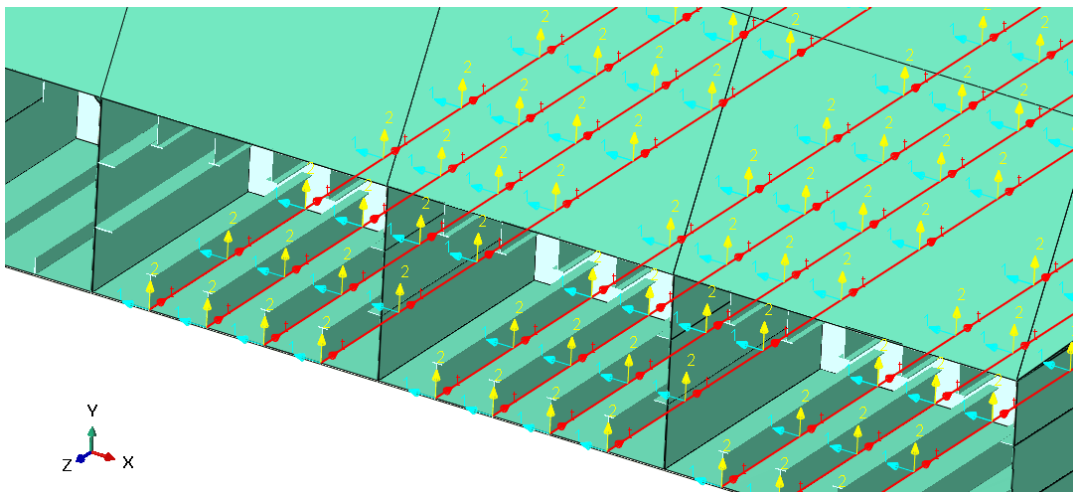
Προσδιορισμός προσανατολισμού

Για την ολοκληρωμένη ανάθεση των διατομών στα ελάσματα και τα ενισχυτικά θα πρέπει να δοθεί ο κατάλληλος προσανατολισμός. Για τα ελάσματα, επιλέγεται η πλευρά κατανομής του πάχους σε σχέση με την επιφάνεια έτσι ώστε να μην προκύψει επικάλυψη με άλλο

κατασκευαστικό στοιχείο. Αυτό γίνεται με τον ορισμό της επιλογής Shell Offset. Για τα ενισχυτικά, ορίζεται η κατεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος ώστε το κάθε ενισχυτικό να έχει τον επιθυμητό προσανατολισμό. Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες.



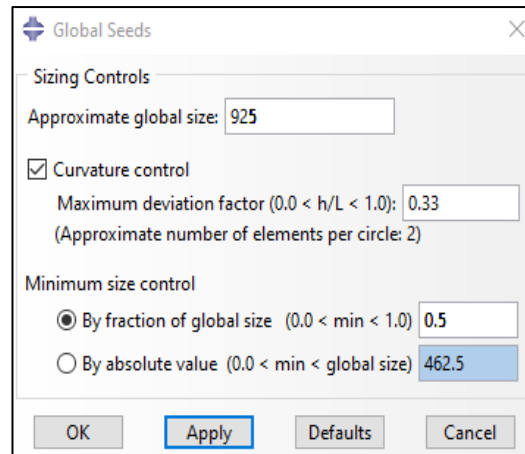
Εικόνα 6.13: Προσδιορισμός προσανατολισμού ελάσματος



Εικόνα 6.14: Προσδιορισμός προσανατολισμού ενισχυτικών

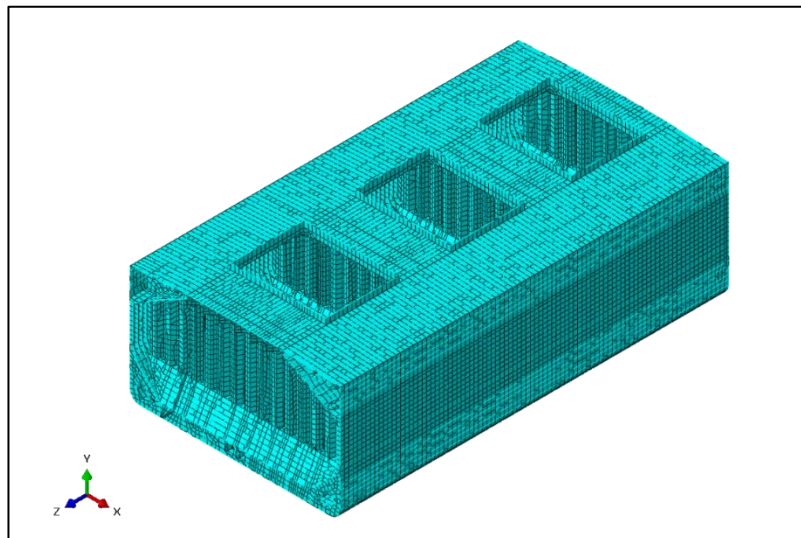
6.3 Διακριτοποίηση και Δημιουργία Πλέγματος

Το επόμενο βήμα είναι να πραγματοποιηθεί η διακριτοποίηση της γεωμετρίας και η εισαγωγή του πλέγματος. Αυτά γίνονται στο Mesh Module. Ξεκινώντας από την διακριτοποίηση, αυτή καθορίζει την θέση και τον αριθμό των στοιχείων στο μοντέλο μας. Για να εξασφαλιστεί ο αριθμός στοιχείων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί, εισάγουμε το προσεγγιστικό μέγεθος των στοιχείων ίσο με την ισαπόσταση των απλών κατασκευαστικών νομέων (Frame Spacing). Ακόμα, για τον καθορισμό της ποιότητας του πλέγματος εισάγουμε τιμές για τον μέγιστο λόγο πλευρών και το ελάχιστο μέγεθος στοιχείων όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.

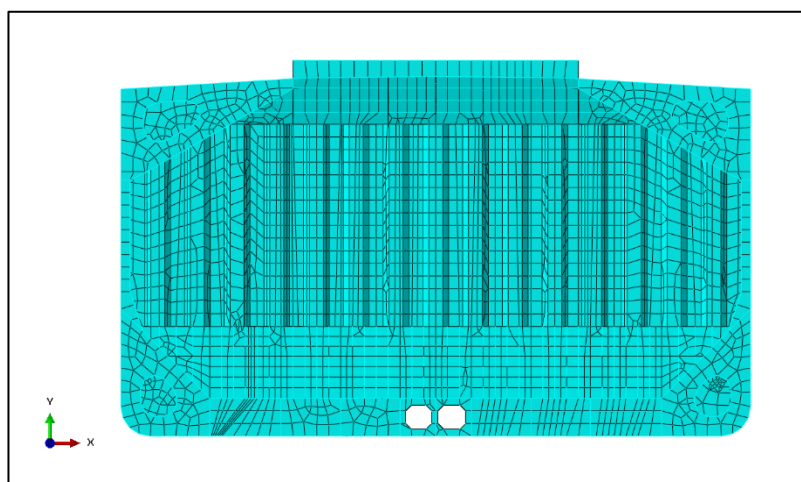


Εικόνα 6.15: Επιλογές διακριτοποίησης

Με την εντολή Mesh Part πραγματοποιείται η αυτόματη δημιουργία του πλέγματος στο μοντέλο μας σύμφωνα με τη διακριτοποίηση που έγινε προηγουμένως.



Εικόνα 6.16: Εισαγωγή πλέγματος στο μοντέλο (3D όψη)



Εικόνα 6.17: Εισαγωγή πλέγματος στο μοντέλο (πρόσωση)

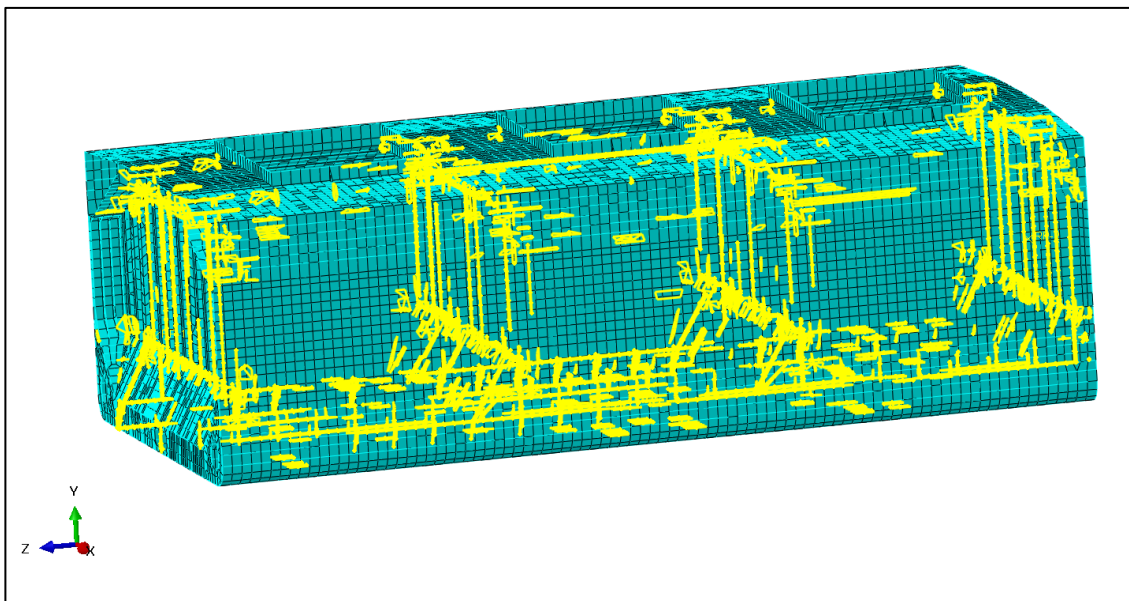
Στη συνέχεια, επιλέγονται οι τύποι των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στο πλέγμα. Για τα Shell Elements επιλέχθηκαν οι τύποι S4R για τετράπλευρα στοιχεία (linear, 6DOF, reduced integration) και S3 για τριγωνικά στοιχεία (linear, 6DOF, reduced integration). Για τα Beam Elements επιλέχθηκε ο τύπος B31 (linear, shear-deformable). Τα είδη και ο αριθμός στοιχείων που αποτελούν το πλέγμα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.4: Χαρακτηριστικά στοιχείων πλέγματος

Element Type	Element Shape	Geometric Order	Num. of Elements	
B31	Line	Linear	23332	28.7 %
S4R	quadrilateral	Linear	54852	67.6 %
S3	triangular	Linear	3008	3.7 %
		Total Elements	81192	
		Total Nodes	98844	

Έλεγχος Ποιότητας Πλέγματος

Στο σημείο αυτό γίνεται έλεγχος της ποιότητας του πλέγματος, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν είναι σύμφωνη με αυτή που προδιαγράφουν οι κανονισμοί. Συγκεκριμένα, ελέγχεται ο λόγος επιμήκους (Aspect Ratio), ο οποίος δεν πρέπει γενικά να ξεπερνά την τιμή 3. Ο έλεγχος φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 6.18: Έλεγχος ποιότητας πλέγματος

Τα στοιχεία με λόγο επιμήκους (Aspect Ratio) μεγαλύτερο του 3 εντοπίζονται σε σημεία με περίπλοκη γεωμετρία. Τα περισσότερα από αυτά βρίσκονται στις εγκάρσιες φρακτές και συγκεκριμένα στην ένωση των φρακτών με το topside plate και hopper plate και στις ενώσεις των άνω και κάτω εδράσεων με το πτυχωτό έλασμα.

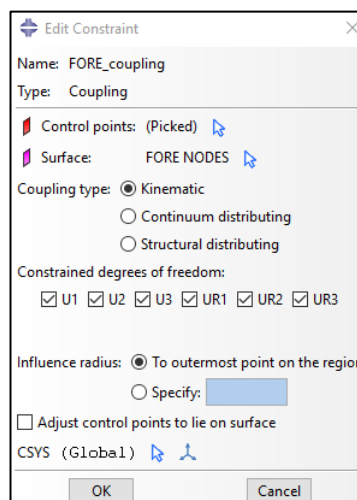
Πίνακας 6.5: Χαρακτηριστικά στοιχείων σχετικά με την ποιότητα πλέγματος

Element Type	Elements	Aspect Ratio>3	Average Aspect Ratio	Worst Aspect Ratio
Quad Elements	54852	4418 (8.1%)	1.86	170
Tri Elements	3008	271 (9%)	2.63	144.7

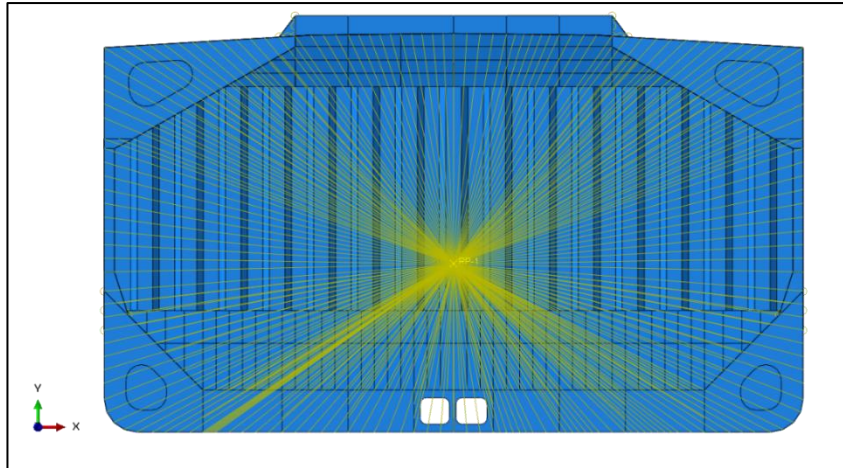
Τα συγκεκριμένα στοιχεία δεν αποτελούν σημαντικό σφάλμα εφόσον ο συνολικός αριθμός των προειδοποιήσεων (Analysis Warnings) είναι της τάξης του 0.36%. Για την περαιτέρω μείωση των προειδοποιήσεων θα έπρεπε το μοντέλο μας να έχει μια πιο απλουστευμένη γεωμετρία.

6.4 Συνοριακές Συνθήκες

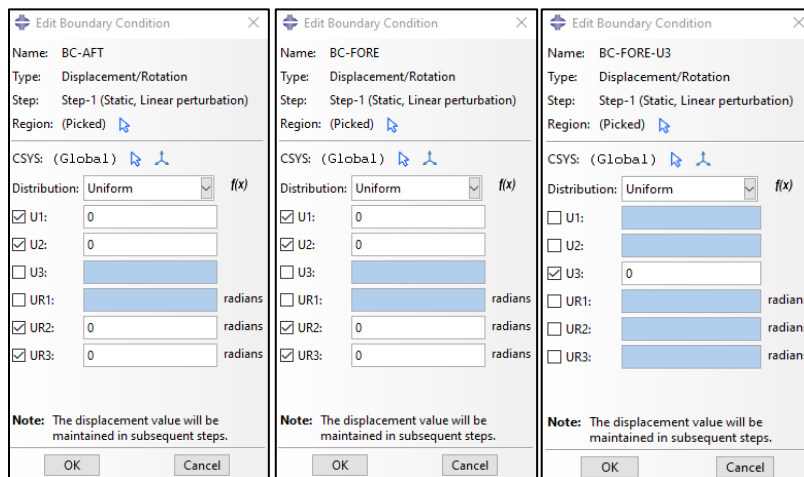
Αρχικά, δημιουργούνται δύο σημεία αναφοράς (Reference Points), ένα για κάθε ακραία διατομή του μοντέλου, στα σημεία τομής του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας (Center Line) με τον Ουδέτερο Άξονα. Στη συνέχεια, σύμφωνα με τους κανονισμούς, δημιουργείται άκαμπτη σύνδεση (Rigid Link) μεταξύ όλων των ακραίων σημείων των διαμήκων στοιχείων (και του Cross Deck) με τα σημεία αναφοράς μέσω του περιορισμού Coupling στο Abaqus. Σημειώνεται πως από αυτά τα σημεία εξαιρείται το σημείο τομής του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας με το διπύθμενο στην πωραία ακραία διατομή. Οι συνοριακές συνθήκες απλής έδρασης εφαρμόζονται στη συνέχεια σε αυτά τα Reference Points. Υπενθυμίζεται πως ισχύει ο μετασχηματισμός ($\delta_x \rightarrow U3$, $\delta_y \rightarrow U1$, $\delta_z \rightarrow U2$, $\theta_x \rightarrow UR3$, $\theta_y \rightarrow UR1$, $\theta_z \rightarrow UR2$) μεταξύ του συμβατικού συστήματος συντεταγμένων και του προγράμματος.



Εικόνα 6.19: Εντολή Coupling



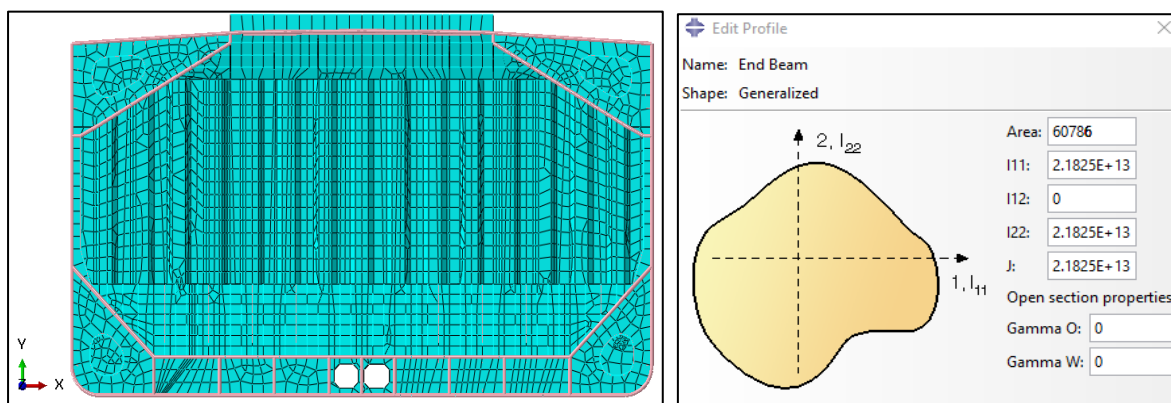
Εικόνα 6.20: Ένωση των reference points με τα διαμήκη κατασκευαστικά στοιχεία στα άκρα του μοντέλου.



Εικόνα 6.21: Επιβολή συνοριακών συνθηκών

End Beam Constraints

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, προκειμένου οι ακραίες διατομές του μοντέλου να μην παραμορφωθούν σημαντικά, δημιουργείται μια ελαστική σύνδεση μεταξύ των κόμβων των δύο ακραίων διατομών με τη χρήση στοιχείων δοκών (End Beam Constraints). Αυτοί οι δοκοί έχουν συγκεκριμένες γεωμετρικές ιδιότητες που προβλέπονται από τους κανονισμούς και δημιουργούνται με γενικευμένο προφίλ διατομής.



Εικόνα 6.22: End Beam Constraints

6.5 Τοπικές Πιέσεις (Local Loads)

Σε αυτό το σημείο, μπορούμε να ασκήσουμε τα προβλεπόμενα τοπικά φορτία στο μοντέλο. Αυτά, περιλαμβάνουν το βάρος της μεταλλικής κατασκευής και τις πιέσεις της θάλασσας, του ξηρού φορτίου και του έρματος. Οι πιέσεις περιλαμβάνουν στατικό και δυναμικό μέρος. Υπενθυμίζεται πως στην παρούσα εργασία εξετάζονται δύο συνδυασμοί φορτίσεων: η εναλλάξ φόρτωση στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα στη δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-2 που πρόκειται για κατάσταση Hogging και η φόρτωση Heavy Ballast στη δυναμική κατάσταση HSM-1 που πρόκειται για κατάσταση Sagging.

Βάρος μεταλλικής κατασκευής

Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής υπολογίζεται από το Abaqus μέσω του φορτίου Gravity και θέτοντας στην κατακόρυφη διεύθυνση την τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας $g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 9810 \text{ mm/s}^2$. Ακόμα, για τον υπολογισμό του, θα πρέπει να έχει δοθεί η πυκνότητα του κάθε υλικού $\rho_{st} = 7.8 \text{ tn/m}^3 = 7.8 \times 10^{-9} \text{ tn/mm}^3$ κατά τον ορισμό τους.

ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ

Πιέσεις Θάλασσας

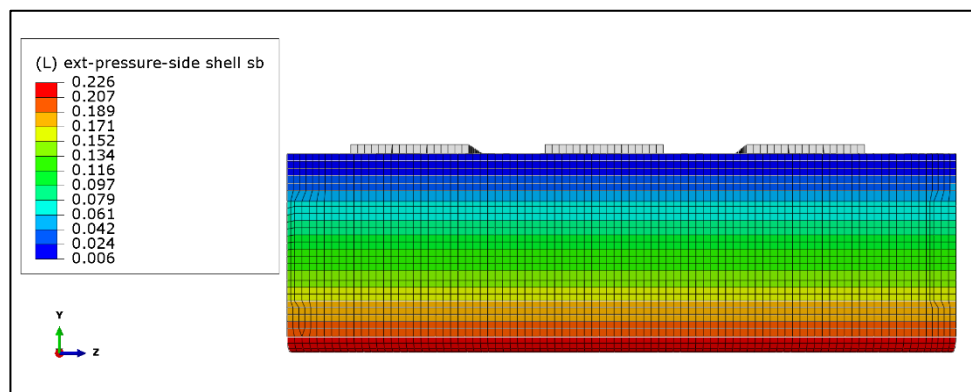
Οι πιέσεις της θάλασσας προκύπτουν από το άθροισμα των υδροστατικών και υδροδυναμικών πιέσεων και ο υπολογισμός τους περιγράφεται στην παράγραφο «Φορτίσεις». Το Abaqus δε δίνει τη δυνατότητα της αυτόματης εισαγωγής της πίεσης στον άξονα που επιθυμούμε με γραμμική μεταβολή. Επομένως, αυτές υπολογίστηκαν για το εξωτερικό περίβλημα της γάστρας σε ένα Φύλλο Υπολογισμών και στη συνέχεια εισήχθησαν στο Abaqus με τη μορφή πινάκων [X Y Z P] ως Mapped Analytical Fields που περιγράφουν την κατανομή των τοπικών εξωτερικών πιέσεων.

Σημειώνεται πως, εν προκειμένω, χρησιμοποιείται το σύστημα αναφοράς του ABAQUS/CAE όπως έχει οριστεί. Η στήλη Z αναφέρεται στον διαμήκη άξονα και οι άξονες X και Y στους εγκάρσιο και κατακόρυφο άξονα αντίστοιχα. Η στήλη P περιέχει την υπολογισμένη πίεση σε

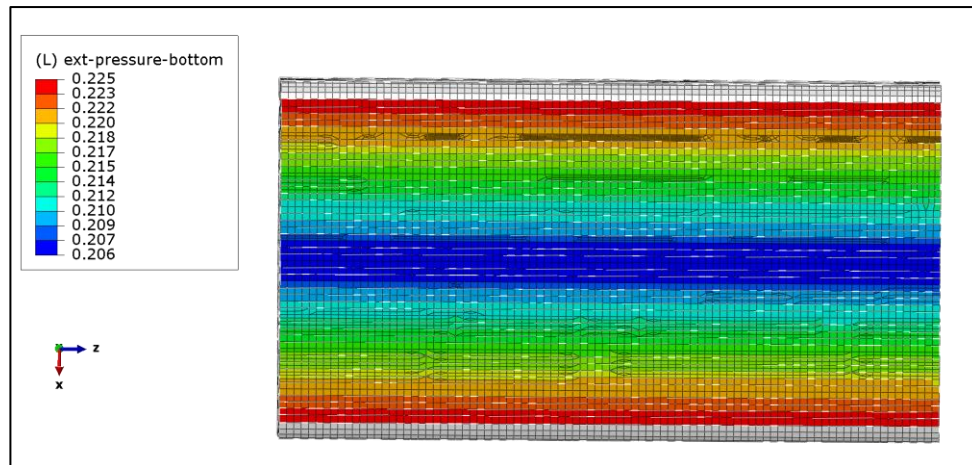
N/mm^2 . Το ABAQUS/CAE βάσει των δεδομένων, υπολογίζει τις πιέσεις στους κόμβους της κατασκευής χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων του Mapped Analytical Field.

Οι πιέσεις της θάλασσας ακολουθούν γραμμικές κατανομές. Στη δυναμική κατάσταση HSM2 (Hogging) η υδροδυναμική πίεση στην περιοχή της μέσης τομής έχει ίδια κατεύθυνση με την υδροστατική αυξάνοντάς την. Αντίθετα, στη δυναμική κατάσταση HSM1 (Sagging) η υδροδυναμική πίεση έχει αντίθετη κατεύθυνση από την υδροστατική μειώνοντας τη συνολική πίεση. Να σημειωθεί πως επειδή το μοντέλο μας βρίσκεται στην περιοχή της μέσης τομής, οι πιέσεις είναι σταθερές κατά το μήκος του. Ακολουθούν εικόνες με τις πιέσεις της θάλασσας στο μοντέλο για τις δύο εξεταζόμενες καταστάσεις.

Alternate Ore Departure – HSM2 (Hogging)

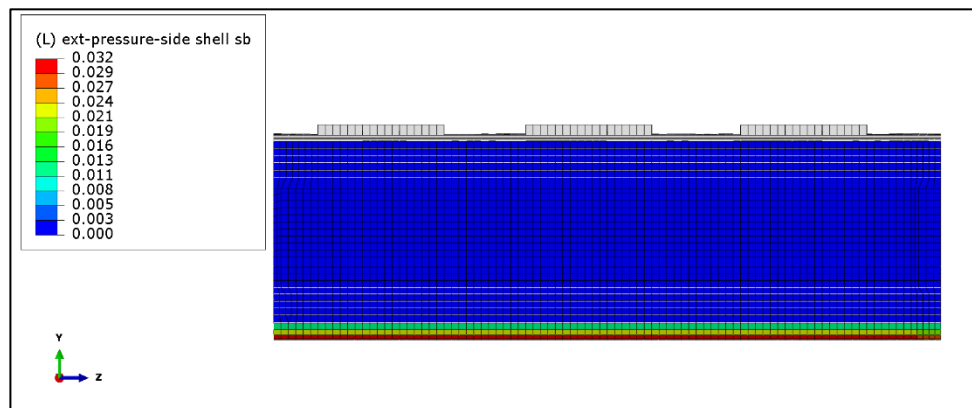


Εικόνα 6.23: Εξωτερική πίεση θάλασσας (στατική και δυναμική συνιστώσα) στα πλευρικά ελάσματα, σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-2 (Hogging).

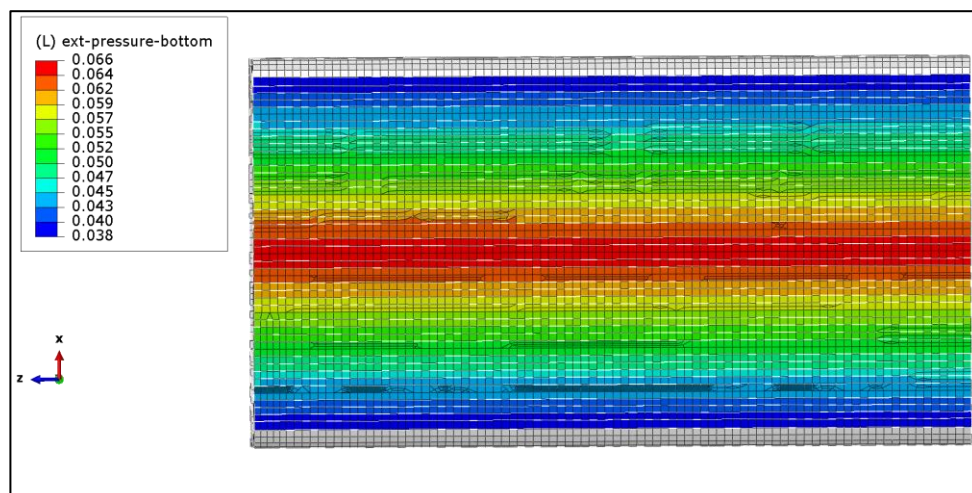


Εικόνα 6.24: Εξωτερική πίεση θάλασσας στα ελάσματα του πυθμένα, σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-2 (Hogging).

Heavy Ballast Condition – HSM1 (Sagging)



Εικόνα 6.25: Εξωτερική πίεση θάλασσας στα πλευρικά ελάσματα (στατική και δυναμική συνιστώσα), σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-1 (Sagging).



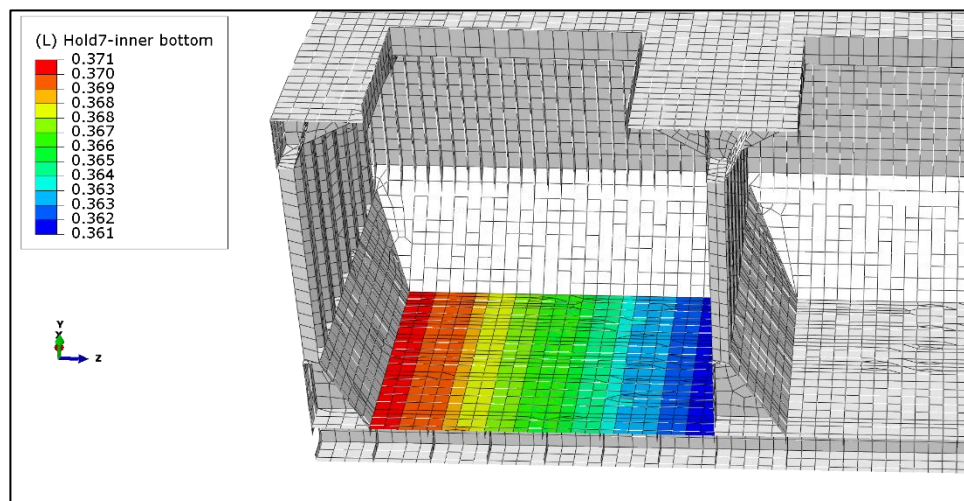
Εικόνα 6.26: Εξωτερική πίεση θάλασσας στα ελάσματα του πυθμένα (στατική και δυναμική συνιστώσα), σε MPa, για δυναμική κατάσταση θάλασσας HSM-1 (Sagging).

ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΠΙΕΣΕΙΣ

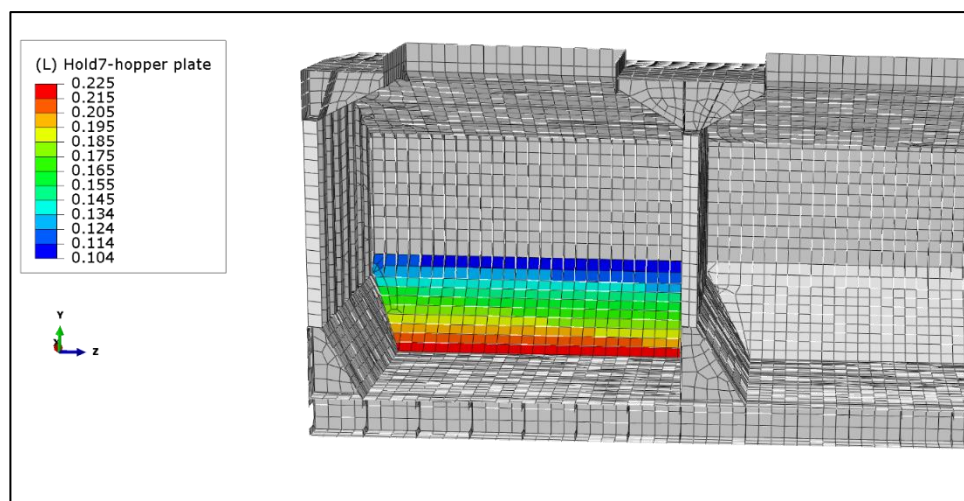
Πιέσεις Φορτίου

Για το σενάριο Alternate Ore Departure υπολογίστηκαν οι πιέσεις του ξηρού φορτίου στα Cargo Hold No.7 και Cargo Hold No.5 σύμφωνα με την παράγραφο «Τοπικές Εσωτερικές Φορτίσεις». Για το σενάριο Heavy Ballast Departure υπολογίστηκαν οι πιέσεις του θαλάσσιου έρματος στο Cargo Hold No. 6 και στις δεξαμενές έρματος No.5 W.B TK (P&S) και No.4 W.B TK (P&S). Στη συνέχεια, οι πιέσεις αυτές ασκήθηκαν στο μοντέλο με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε για τις πιέσεις της θάλασσας. Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες των φορτίσεων στα διάφορα κατασκευαστικά στοιχεία.

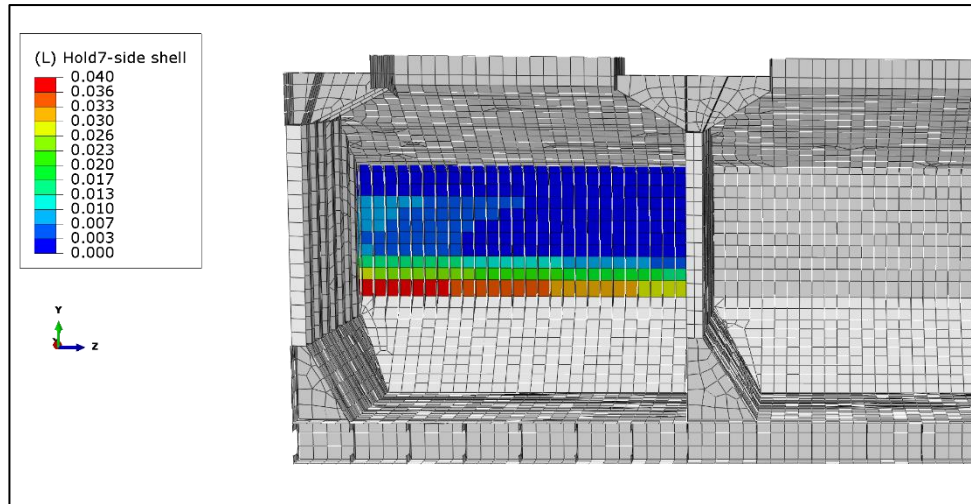
Alternate Ore Condition



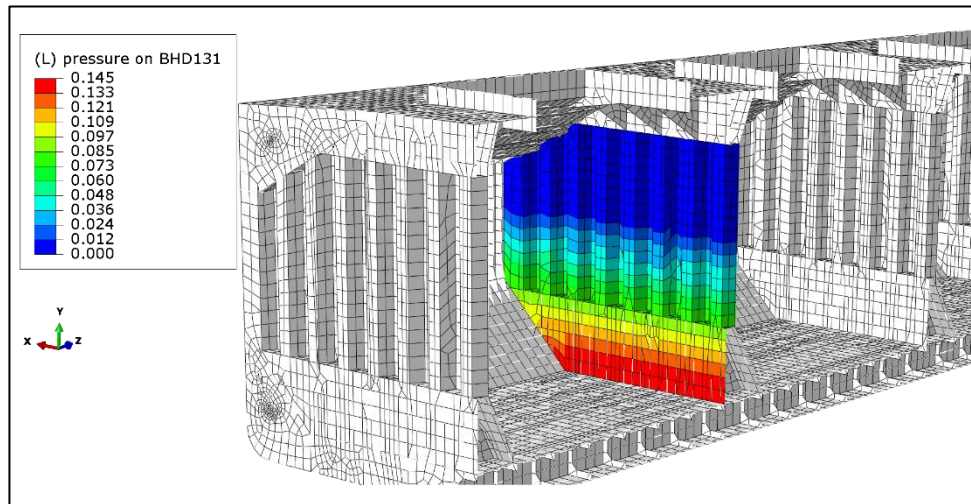
Εικόνα 6.27: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στον εσωτερικό πυθμένα του Hold No7.



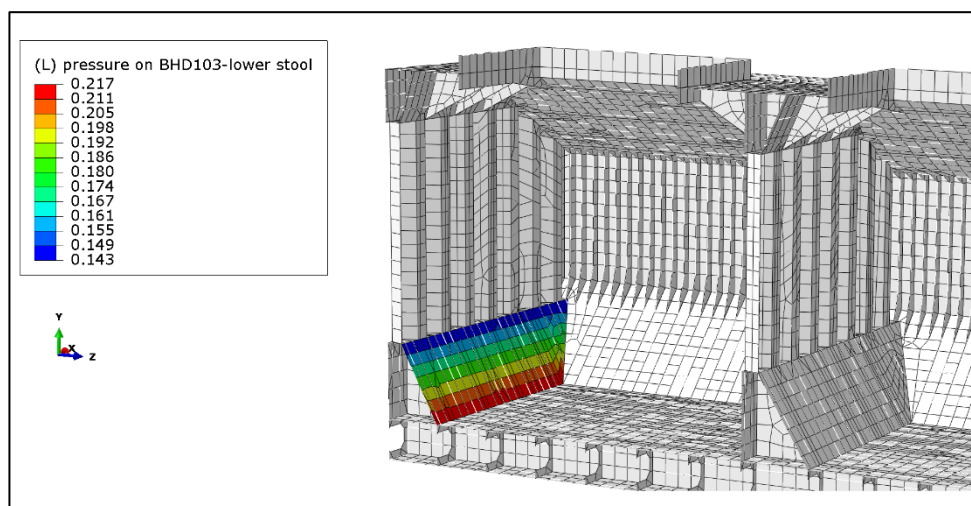
Εικόνα 6.28: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στο hopper plate του Hold No7.



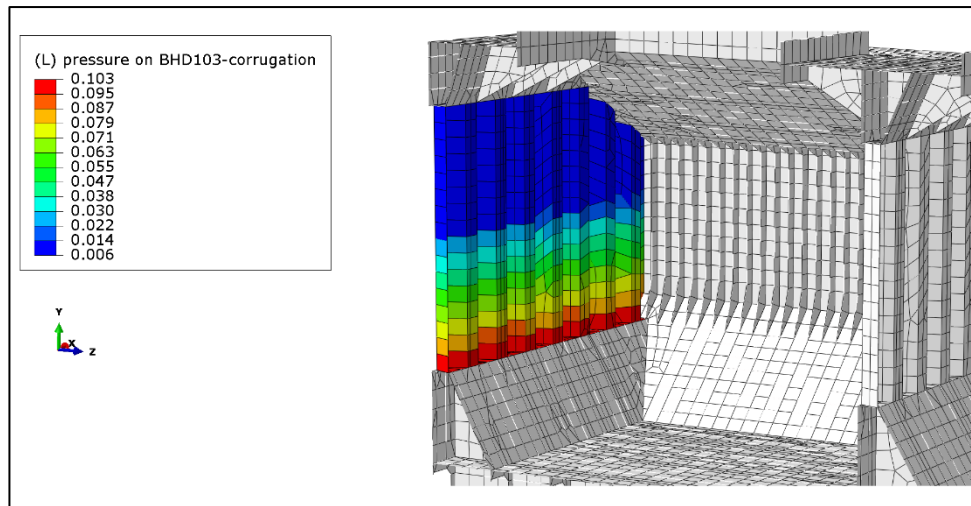
Εικόνα 6.29: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στο πλευρικό έλασμα του Hold Νο7.



Εικόνα 6.30: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στην εγκάρσια φρακτή στο Fr.131.

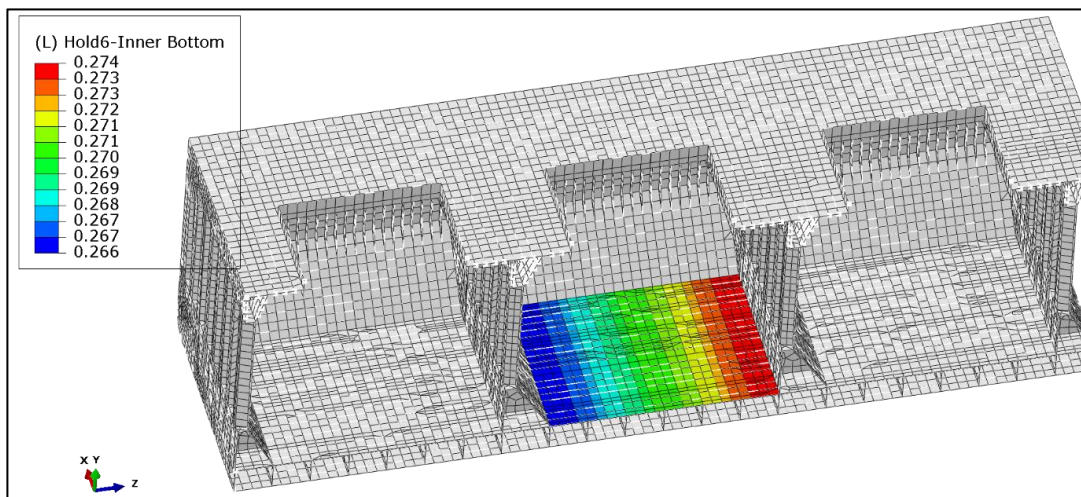


Εικόνα 6.31: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στην κάτω έδρα της εγκάρσιας φρακτής στο Fr.103.

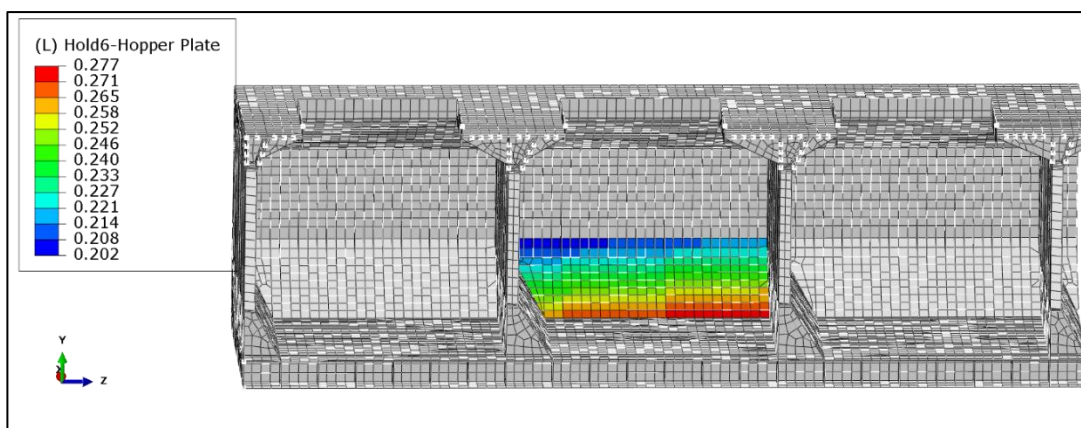


Εικόνα 6.32: Εσωτερική πίεση ξηρού φορτίου, σε MPa, στο πτυχωτό έλασμα της εγκάρσιας φρακτής στο Fr.103.

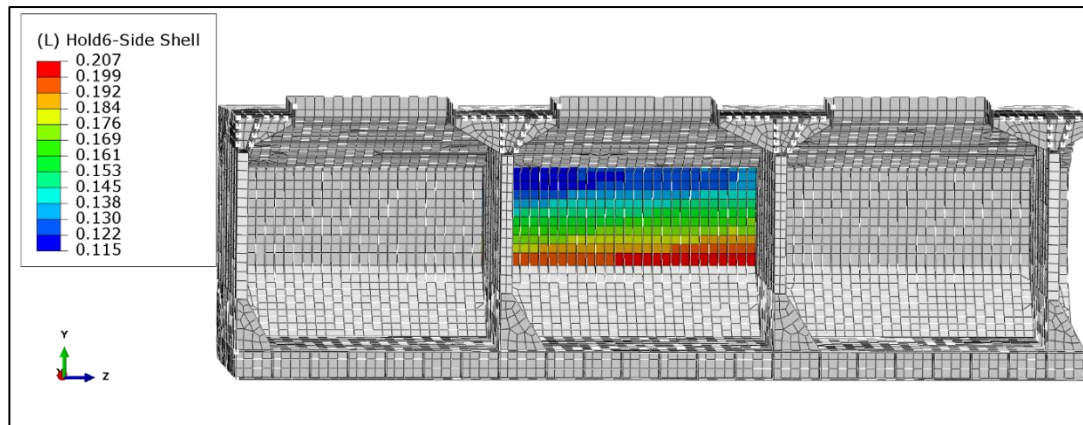
Heavy Ballast Condition



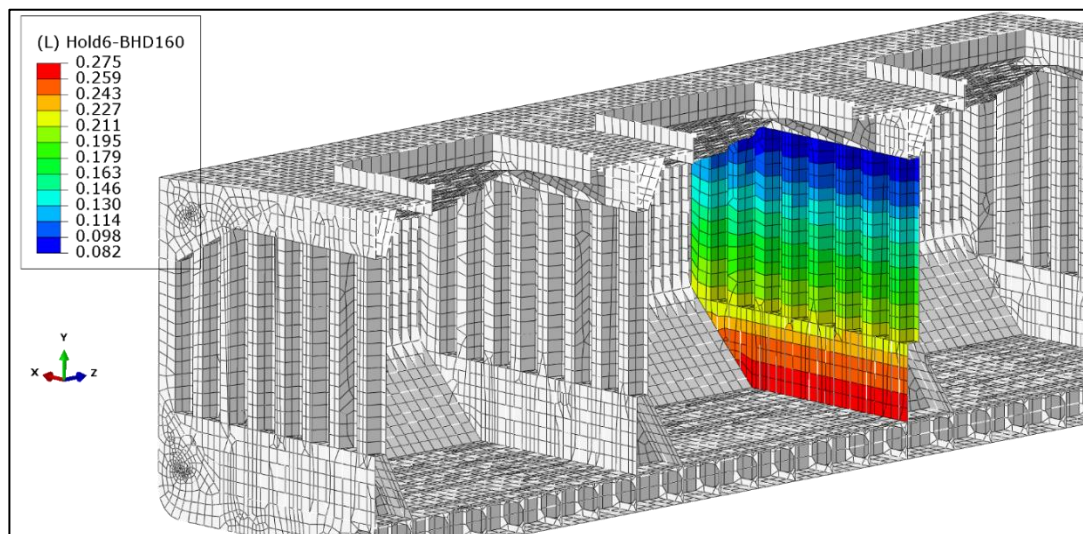
Εικόνα 6.33: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στον εσωτερικό πυθμένα του Hold No.6.



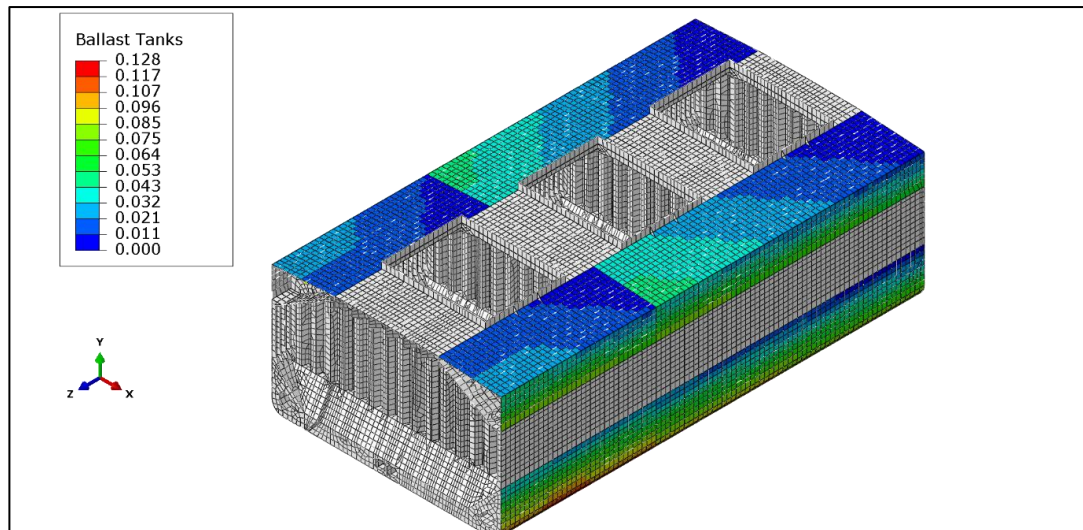
Εικόνα 6.34: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στο hopper plate του Hold No.6.



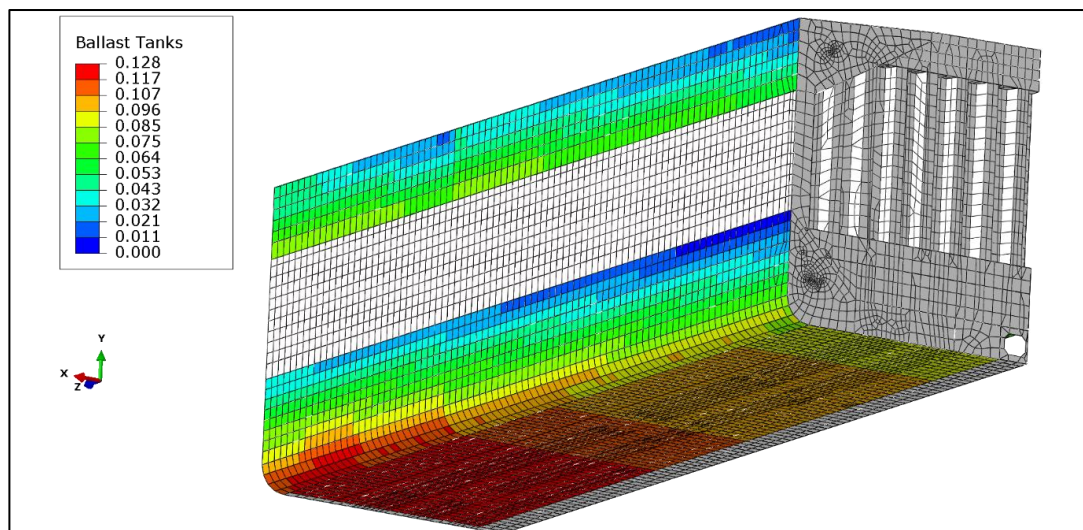
Εικόνα 6.35: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στο πλευρικό έλασμα του Hold No.6.



Εικόνα 6.36: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στην εγκάρσια φρακτή στο Fr.160.



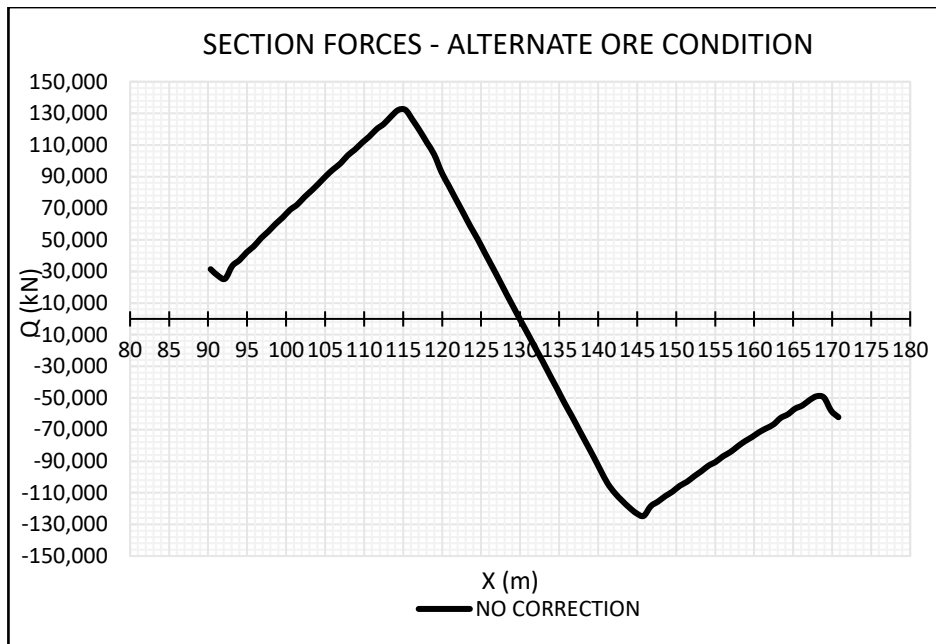
Εικόνα 6.37: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στις δεξαμενές έρματος NO.4 W.B TK (P&S) και NO.5 W.B TK (P&S).



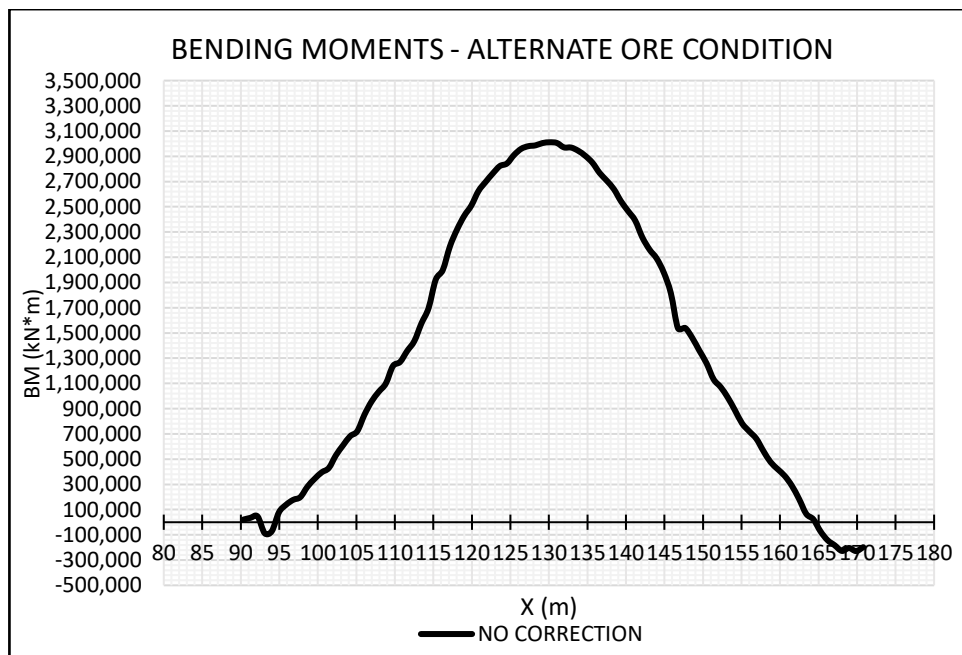
Εικόνα 6.38: Εσωτερική πίεση θαλάσσιου έρματος, σε MPa, στις δεξαμενές έρματος NO.4 W.B TK (P) και NO.5 W.B TK (P).

6.6 Διορθώσεις Διατμητικών Δυνάμεων και Καμπτικών Ροπών

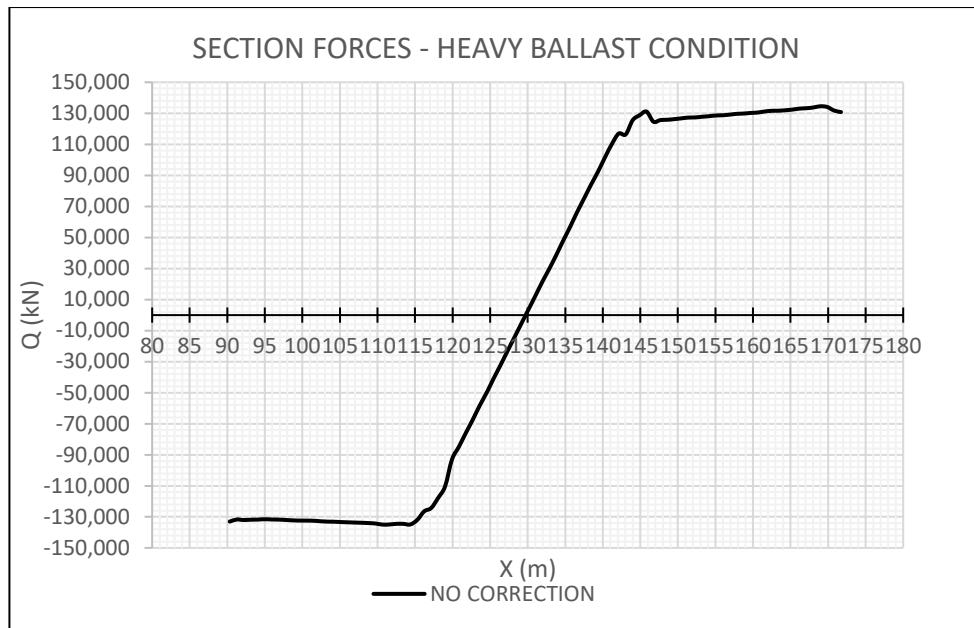
Εφόσον σε προηγούμενα βήματα έχουμε θέσει τις κατάλληλες οριακές συνθήκες και ασκήσει τις προδιαγραφόμενες φορτίσεις στο μοντέλο μας, είμαστε σε θέση να πραγματοποιήσουμε την πρώτη επίλυση. Όταν αυτή ολοκληρωθεί, μας ενδιαφέρει να σχεδιάσουμε τα διαγράμματα των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών του μοντέλου μας. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργούνται εγκάρσιες τομές κατά το μήκος του μοντέλου (Free Body Cut) συνοδευόμενες με τις τιμές διατμητικής δύναμης και καμπτικής ροπής για την κάθε τομή. Αυτές, στη συνέχεια εξάγονται σε αρχείο κειμένου για περαιτέρω επεξεργασία (Report > Free Body Cut). Ακολουθούν τα διαγράμματα βάσει αυτών των δεδομένων.



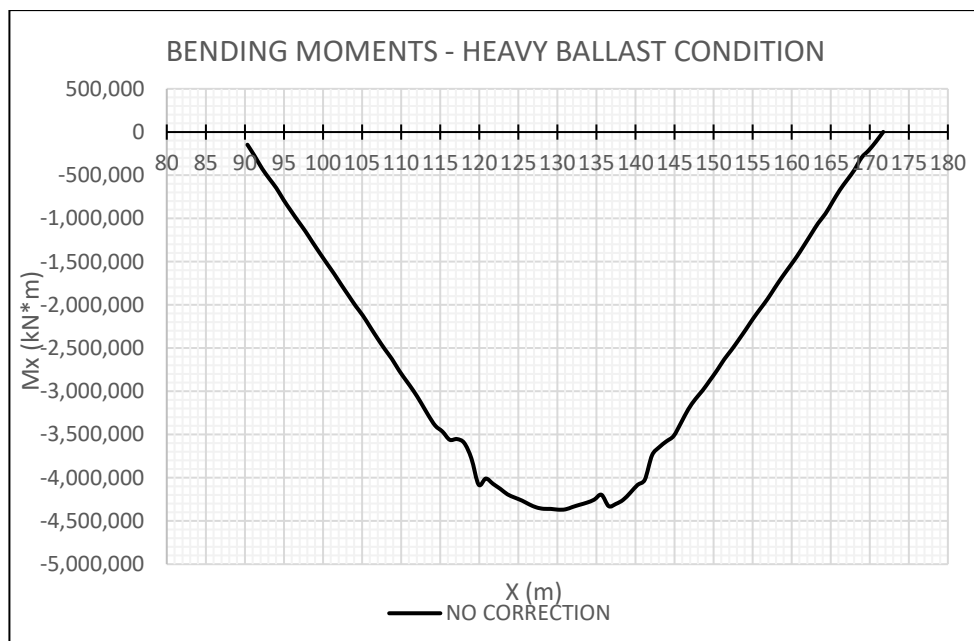
Διάγραμμα 6-1: Κατανομή των διατμητικών δυνάμεων κατά μήκος του μοντέλου για alternate ore condition



Διάγραμμα 6-2: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του μοντέλου για alternate ore condition



Διάγραμμα 6-3: Κατανομή των διατμητικών δυνάμεων κατά μήκος του μοντέλου για heavy ballast condition



Διάγραμμα 6-4: Κατανομή των καμπτικών ροπών κατά μήκος του μοντέλου για heavy ballast condition

Διόρθωση Διατμητικής Δύναμης

Για τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων στο μοντέλο, οι κανονισμοί προβλέπουν δύο μεθόδους:

- Μέθοδος 1 (M1) : Διόρθωση διατμητικής δύναμης σε μία φρακτή του μεσαίου κύτους.
- Μέθοδος 2 (M2) : Διόρθωση διατμητικών δυνάμεων και στις δύο φρακτές του μεσαίου κύτους.

Για τους συνδυασμούς της εναλλάξ φόρτωσης σε δυναμική κατάσταση HSM-2 και του heavy ballast σε δυναμική κατάσταση HSM-1 που μελετώνται, προκύπτει μέγιστο ποσοστό διατμητικής δύναμης $C_{SF-LC}=1$. Για το συνδυασμό φορτίσεων όπου ισχύει $C_{SF-LC}=1$ (Max SFLC), χρησιμοποιείται η Μέθοδος 1 με την προϋπόθεση ότι η τελική τιμή της διατμητικής δύναμης που προκύπτει στην άλλη φρακτή μετά την διόρθωση να μην υπερβαίνει την αντίστοιχη επιθυμητή τιμή. Σύμφωνα με τον πίνακα των συνδυασμών φορτίσεων και δεδομένου ότι στην περίπτωση μας ισχύει $x_{b-aft} \leq 0.5L$ και $x_{b-fwd} \geq 0.5L$ επιλέγεται η διόρθωση της πρυμναίας φρακτής.

Για το σενάριο **Alternate Ore Departure** οι τύποι υπολογισμού των επιθυμητών τιμών (target values) για την πρυμναία και πρωραία φρακτή, εφόσον ισχύει $Q_{fwd} < Q_{aft}$ δίνονται παρακάτω:

$$Q_{\text{targ-aft}} = C_{SF-LC} \times Q_{\text{sw-pos}} + \Delta Q_{\text{swa}} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{\text{wv-pos}}$$

$$Q_{\text{targ-fwd}} = C_{SF-LC} \times Q_{\text{sw-neg}} - \Delta Q_{\text{swf}} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{\text{wv-neg}}$$

Όπου:

- C_{SF-LC} : το ποσοστό της επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης σε ήρεμο νερό, για την εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης.
- $Q_{\text{sw-pos}}$, $Q_{\text{sw-neg}}$: οι επιτρεπόμενες διατμητικές δυνάμεις σε ήρεμο νερό. Αυτές λαμβάνονται από το loading manual ως οι μέγιστες επιτρεπόμενες, θετική και αρνητική αντίστοιχα, για τις διαμήκεις θέσεις των δύο εγκαρσίων φρακτών που μας ενδιαφέρουν. Οι τελικές τιμές προκύπτουν αφαιρώντας τις διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων στις φρακτές που προβλέπουν οι κανονισμοί.
- ΔQ_{swa} , ΔQ_{swf} : διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων στην πρυμναία και πρωραία φρακτή αντίστοιχα του μεσαίου κύτους.
- f_{β} : συντελεστής μετωπικού κυματισμού.
- C_{QW} : συντελεστής συνδυαστικής φόρτισης για διατμητική δύναμη λόγω κυματισμού.
- $Q_{\text{wv-pos}}$, $Q_{\text{wv-neg}}$: οι διατμητικές δυνάμεις λόγω κυματισμών για τη δεδομένη δυναμική κατάσταση φόρτισης.

Για το σενάριο **Heavy Ballast Departure** εφόσον ισχύει $Q_{fwd} > Q_{aft}$ οι αντίστοιχες σχέσεις είναι:

$$Q_{\text{targ-aft}} = C_{SF-LC} \times Q_{\text{sw-neg}} - \Delta Q_{\text{swa}} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{\text{wv-neg}}$$

$$Q_{\text{targ-fwd}} = C_{SF-LC} \times Q_{\text{sw-pos}} + \Delta Q_{\text{swf}} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{\text{wv-pos}}$$

Τα αποτελέσματα των τιμών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.6: Τιμές των διατμητικών δυνάμεων (όπως προκύπτουν στο μοντέλο και οι επιθυμητές) για τα εξεταζόμενα σενάρια.

	Alternate Ore Departure	Heavy Ballast Departure
Q_{aft}	132,167 kN	-134,885 kN
$Q_{targ-aft}$	192,117 kN	-189,670 kN
Q_{fwd}	-122,938 kN	131,116 kN
$Q_{targ-fwd}$	-175,024 kN	171,996 kN

Η διόρθωση της διατμητικής δύναμης στην πρυμναία φρακτή ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή τιμή (target value) πραγματοποιείται ασκώντας μια ροπή στα δύο άκρα του μοντέλου. Αυτή η ροπή προκύπτει από τον παρακάτω τύπο:

$$M_{Y_{aft}} = M_{Y_{fore}} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} (Q_{targ-aft} - Q_{aft})$$

Όπου:

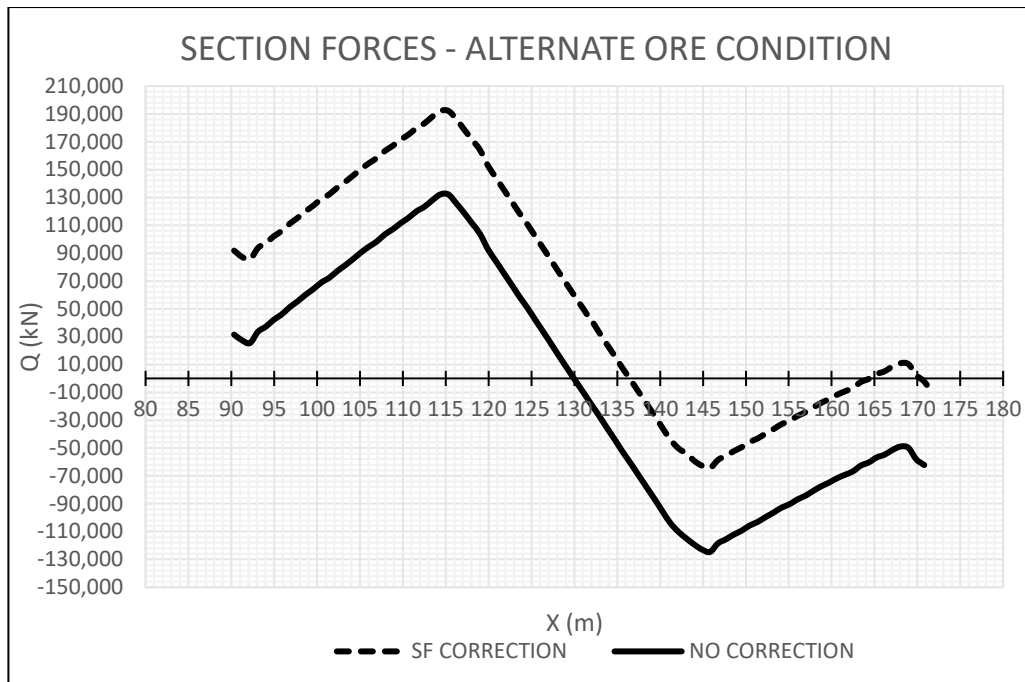
- $M_{Y_{aft}} = M_{Y_{fore}}$: κατακόρυφη καμπτική ροπή , σε kNm, που πρέπει να ασκηθεί στα άκρα του μοντέλου.
- Q_{aft} : κατακόρυφη διατμητική δύναμη, σε kN, εξαιτίας των τοπικών φορτίων στην πρυμναία φρακτή. Αυτή λαμβάνεται ως η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή των τιμών στην περιοχή πριν και μετά της θέσης της πρυμναίας φρακτής.
- Q_{fwd} : κατακόρυφη διατμητική δύναμη, σε kN, εξαιτίας των τοπικών φορτίων στην πρυμναία φρακτή. Αυτή λαμβάνεται ως η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή των τιμών στην περιοχή πριν και μετά της θέσης της πρυμναίας φρακτής.
- x_{fore}, x_{aft} : διαμήκεις θέσεις του πρυμναίου και πρυμναίου άκρου του μοντέλου.

Οι τιμές τους φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί:

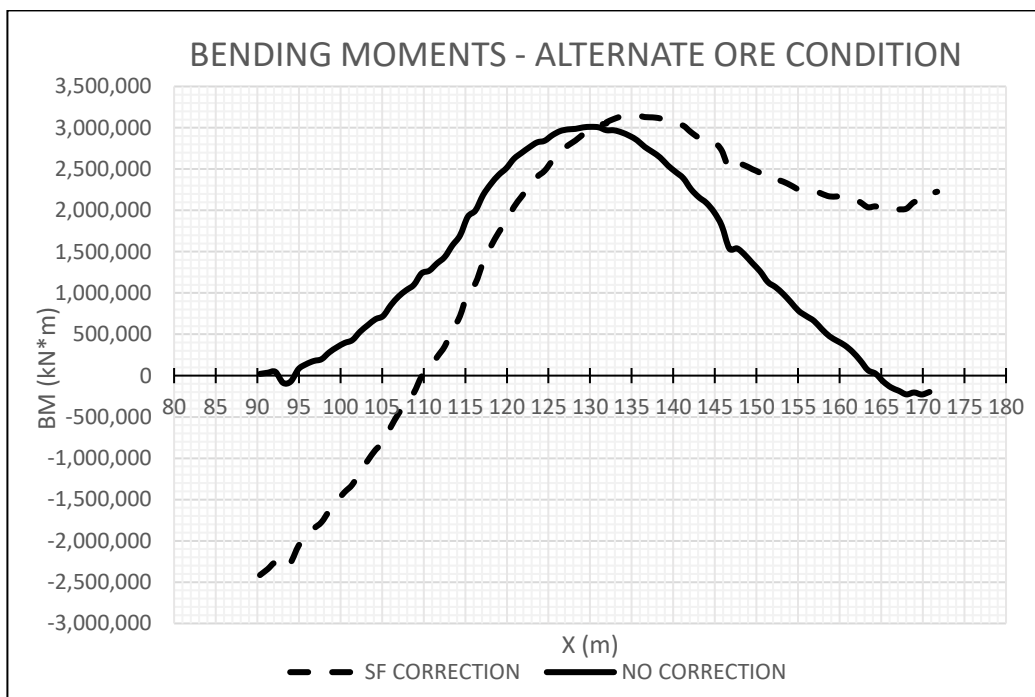
Πίνακας 6.7: Τιμή ασκούμενης ροπής στο μοντέλο για τις επιθυμητές τιμές διατμητικών δυνάμεων

	Alternate Ore Departure	Heavy Ballast Departure
$M_{y_{aft}} = M_{y_{fore}}$	2,495,409 kNm	-2,280,430 kNm

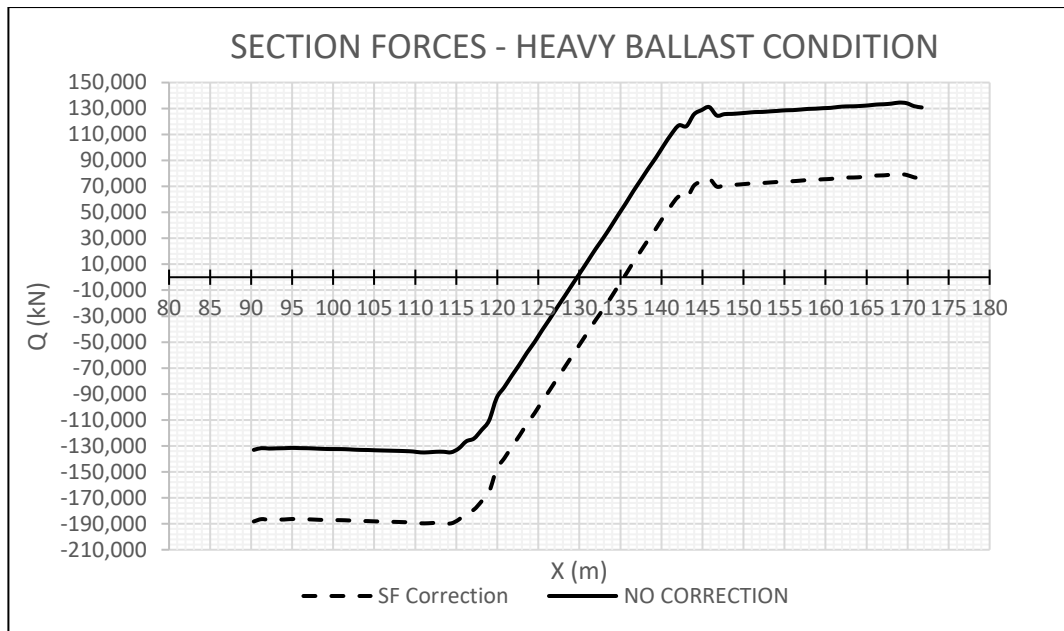
Οι ροπές αυτές εφαρμόζονται στα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία των ακραίων διατομών και μέσω της αλληλεπίδρασης (Coupling) Ur1 μεταφέρονται στους κόμβους των διαμήκων στοιχείων. Στη συνέχεια, το μοντέλο επιλύεται ξανά και τα αποτελέσματα ακολουθούν παρακάτω.



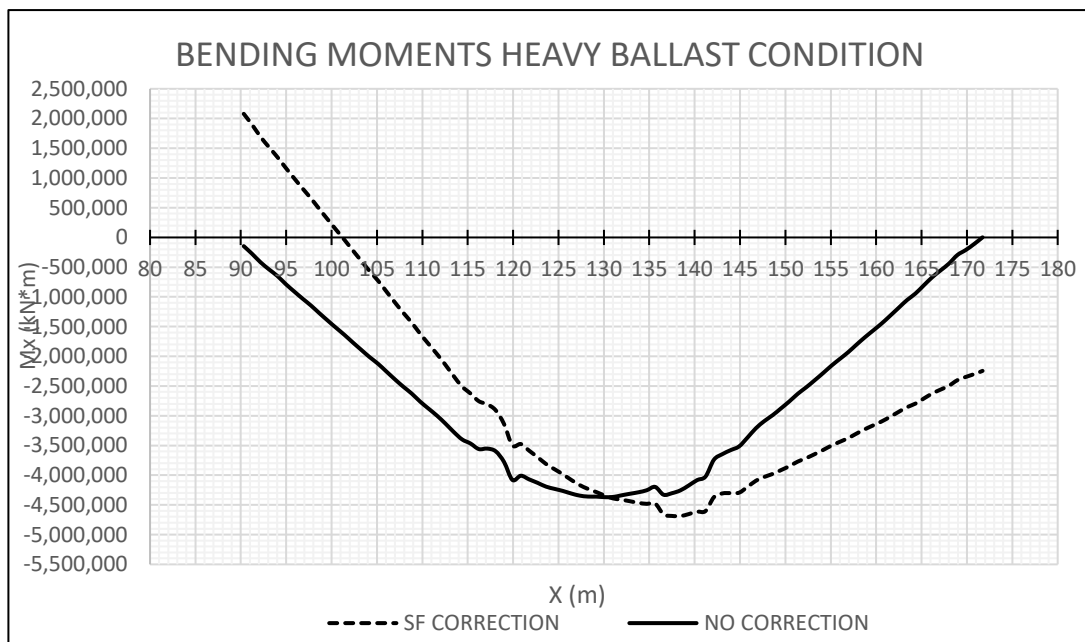
Διάγραμμα 6-5: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για alternate ore condition.



Διάγραμμα 6-6: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για alternate ore condition.



Διάγραμμα 6-7: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για heavy ballast condition.



Διάγραμμα 6-8: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων, για heavy ballast condition.

Διόρθωση Καμπτικής Ροπής

Έχοντας πλέον διορθώσει τη διατμητική δύναμη στην πυρμαία φρακτή απομένει να διορθώσουμε την καμπτική ροπή στο σημείο του μεσαίου κύτους όπου εντοπίζεται η μέγιστη καμπτική ροπή. Αυτό επιτυγχάνεται με την άσκηση μιας επιπλέον ροπής στα δύο άκρα του μοντέλου, η οποία έχει τον τύπο που ακολουθεί:

$$M_{v-end} = M_{v-targ} - M_{v-peak}$$

Όπου:

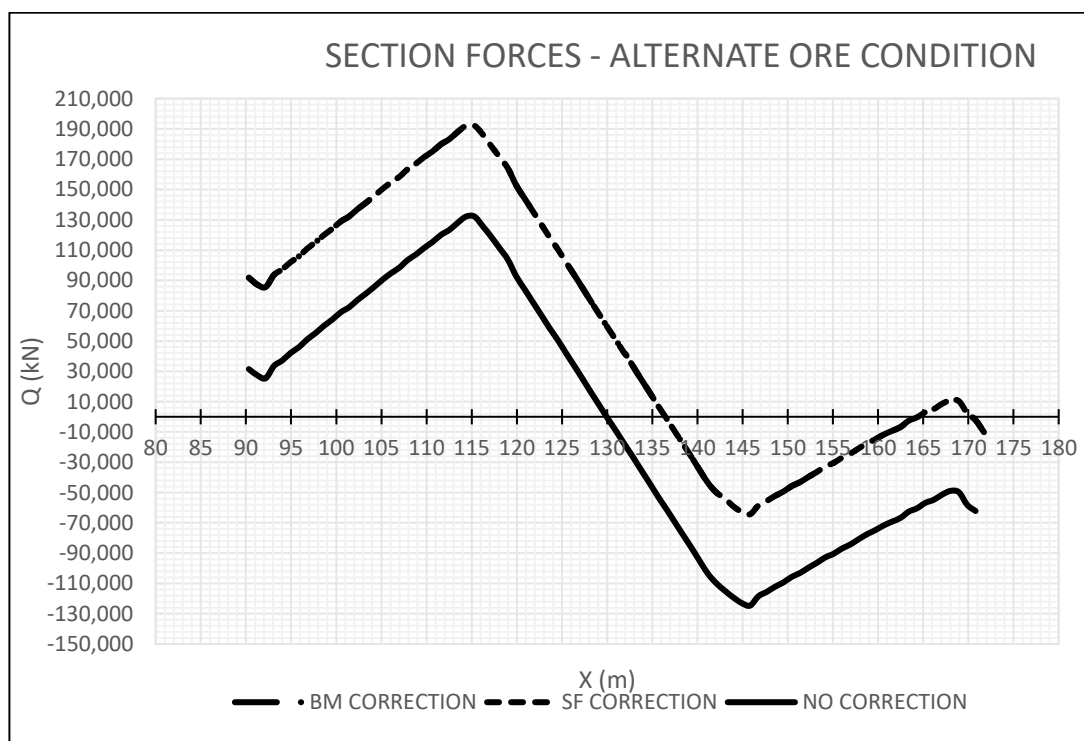
- M_{v-end} : Η επιπλέον εγκάρσια ροπή που πρέπει να ασκηθεί, σε kNm, στα δύο άκρα του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.
- M_{v-targ} : Η επιθυμητή εγκάρσια καμπτική ροπή, σε kNm.
- M_{v-peak} : Η μέγιστη (hogging) ή ελάχιστη (sagging) καμπτική ροπή, σε kNm, που προκύπτει στο μεσαίο κύτους του μοντέλου με την άσκηση των τοπικών φορτίων (local loads) και μετά την διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων.

Οι τιμές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

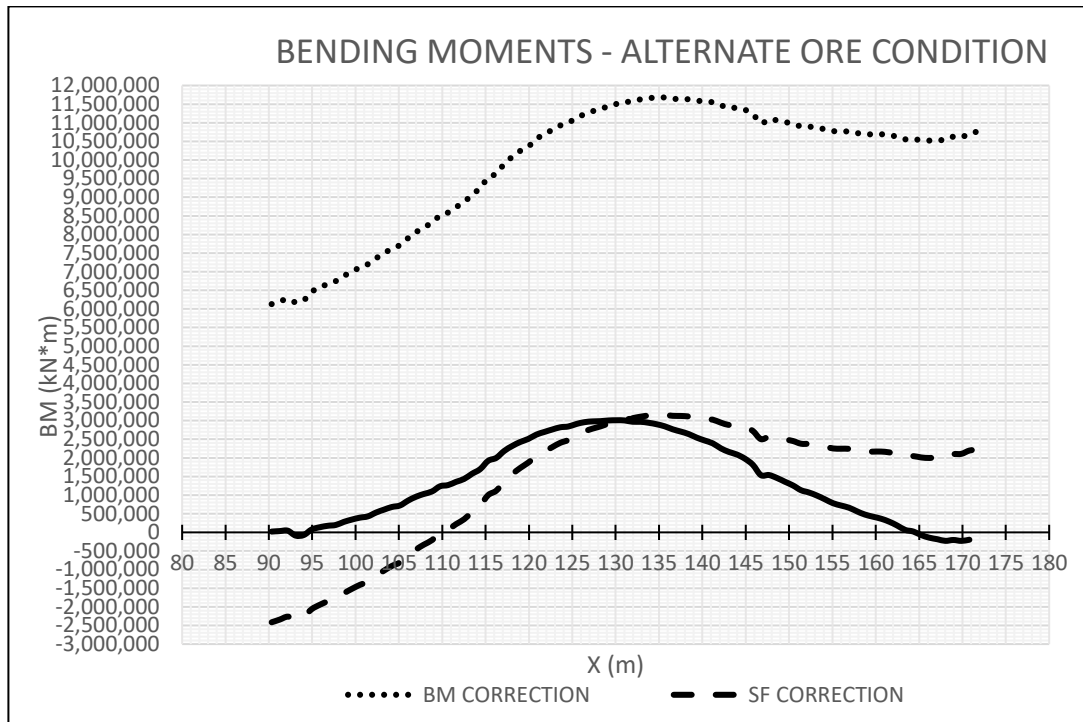
Πίνακας 6.8: Τιμές ασκούμενων ρομών στα άκρα του μοντέλου για διόρθωση καμπτικών ρομών

	Alternate Ore Departure	Heavy Ballast Departure
Mv_targ	11,669,058 kNm	-10,827,876 kNm
Mv_peak	3,154,014 kNm	-4,687,458 kNm
Mv_end	8,515,044 kNm	-6,140,419 kNm

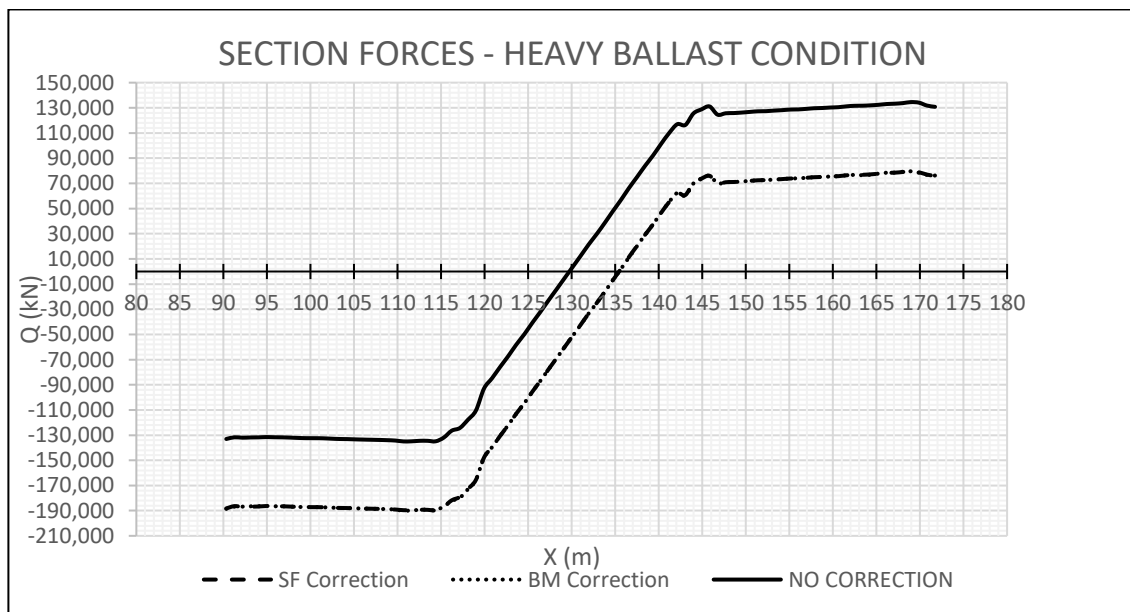
Οι ροπές αυτές εφαρμόζονται στα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία των ακραίων διατομών και μέσω της αλληλεπίδρασης (Coupling) Ur1 μεταφέρονται στους κόμβους των διαμήκων στοιχείων. Στη συνέχεια, το μοντέλο επιλύεται για τρίτη φορά όπου και προκύπτουν τα νέα διορθωμένα διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ρομών.



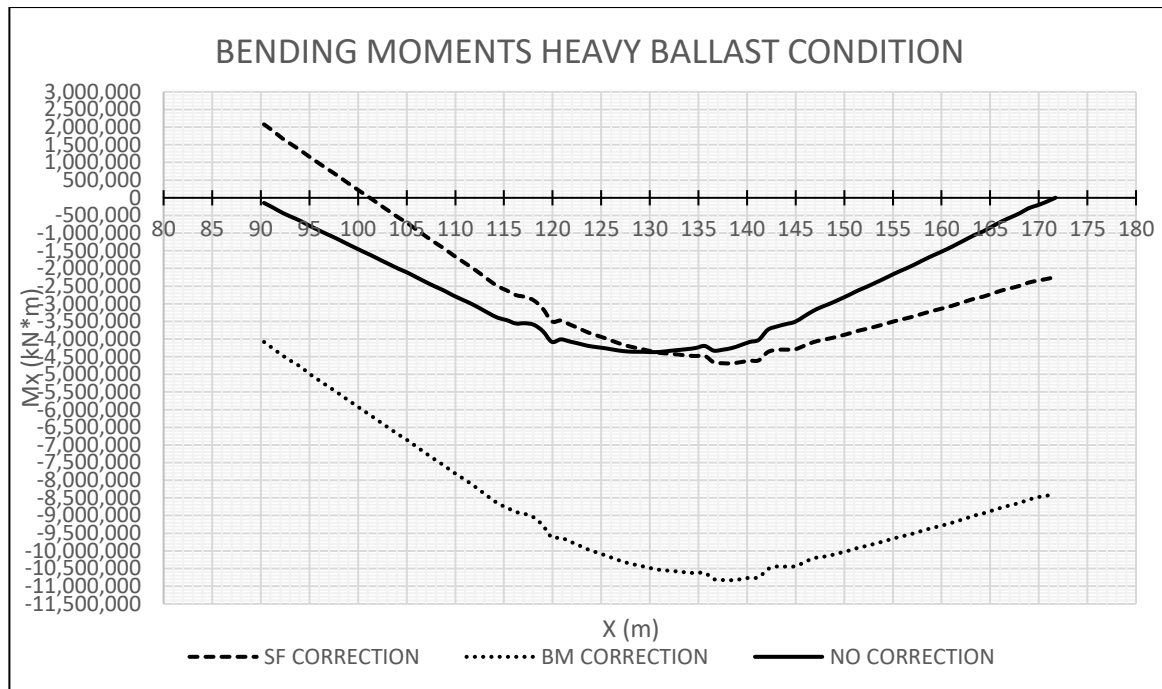
Διάγραμμα 6-9: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ρομών, για alternate ore condition.



Διάγραμμα 6-10: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για alternate ore condition.



Διάγραμμα 6-11: Κατανομή διατμητικών δυνάμεων, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για heavy ballast condition.



Διάγραμμα 6-12: Κατανομή καμπτικών ροπών, πριν και μετά τη διόρθωση των καμπτικών ροπών, για heavy ballast condition.

Διόρθωση Αξονικής Δύναμης

Τέλος, για τη διόρθωση των αξονικών δυνάμεων, με σκοπό να μηδενιστούν οι αξονικές δυνάμεις στο μοντέλο, ασκείται μια συγκεντρωτική δύναμη κατά τον διαμήκη άξονα.

Πίνακας 6.9: Τιμή ασκούμενης αξονικής δύναμης στα άκρα του μοντέλου

	Alternate Ore Departure	Heavy Ballast Departure
F_long	36,895 kN	-12,847 kN

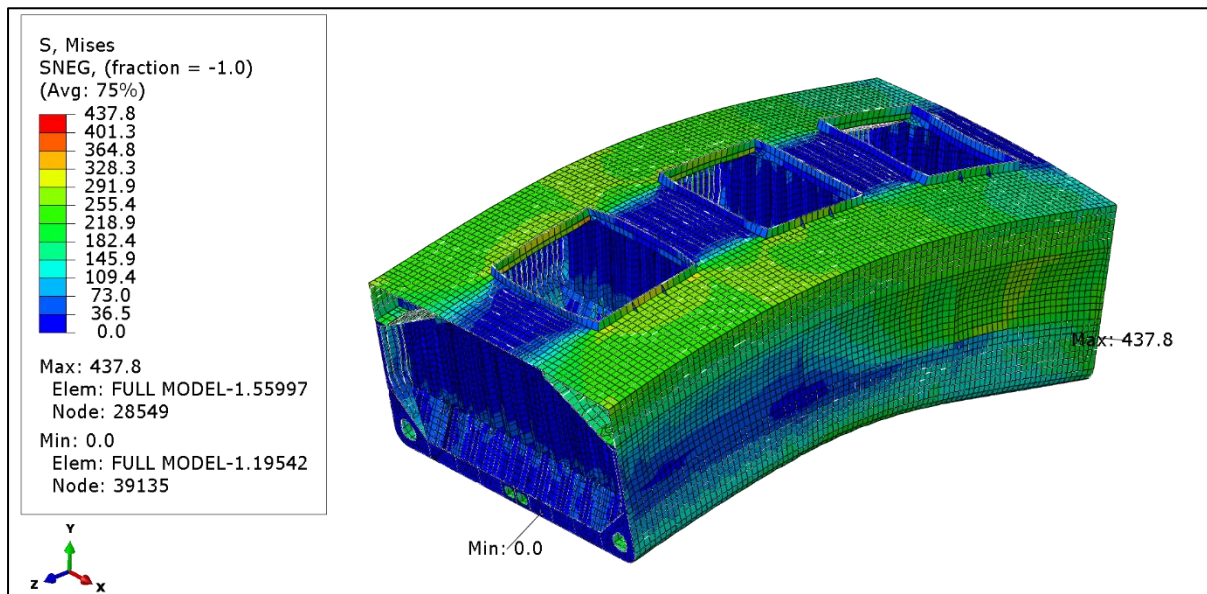
6.7 Αποτελέσματα Ανάλυσης

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζεται η απόκριση του μοντέλου των τριών αμπαριών σε επίπεδο αναπτυσσόμενων τάσεων. Υπενθυμίζεται ότι η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση σύμφωνα με τους κανονισμούς είναι $R_y = 235/k$ (nominal yield stress) όπου το k παίρνει τιμή ανάλογα το είδος του χάλυβα. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αφορά μόνο το μεσαίο κύτος Cargo Hold No.6. Για τα ελάσματα (Shell Elements) ελέγχεται η ισοδύναμη τάση Von Mises, ενώ για τα ενισχυτικά (Beam Elements), ελέγχεται η αξονική τάση (Beam Axial Stress). Ακολουθεί η ανάλυση των αποτελεσμάτων συνολικά και ανά κατασκευαστικό στοιχείο του Cargo Hold No.6.

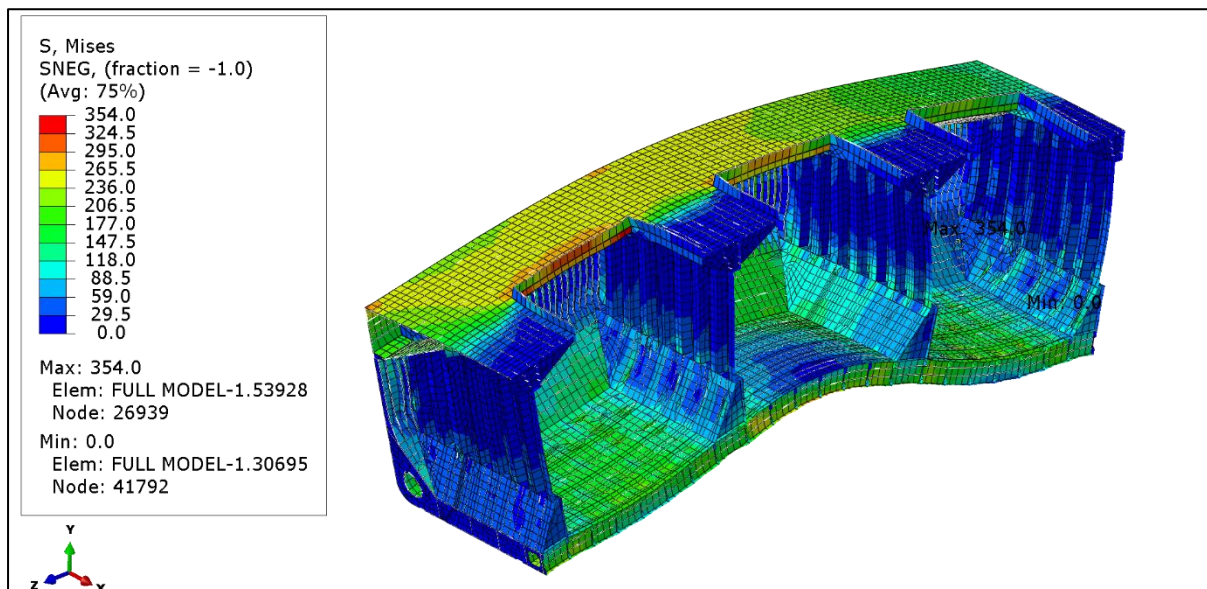
6.7.1 Εναλλάξ Φόρτωση σε δυναμική κατάσταση HSM-2

Αρχικά, φαίνεται η απόκριση ολόκληρου του μοντέλου και στη συνέχεια η περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή το μεσαίο αμπάρι (Cargo Hold No.6).

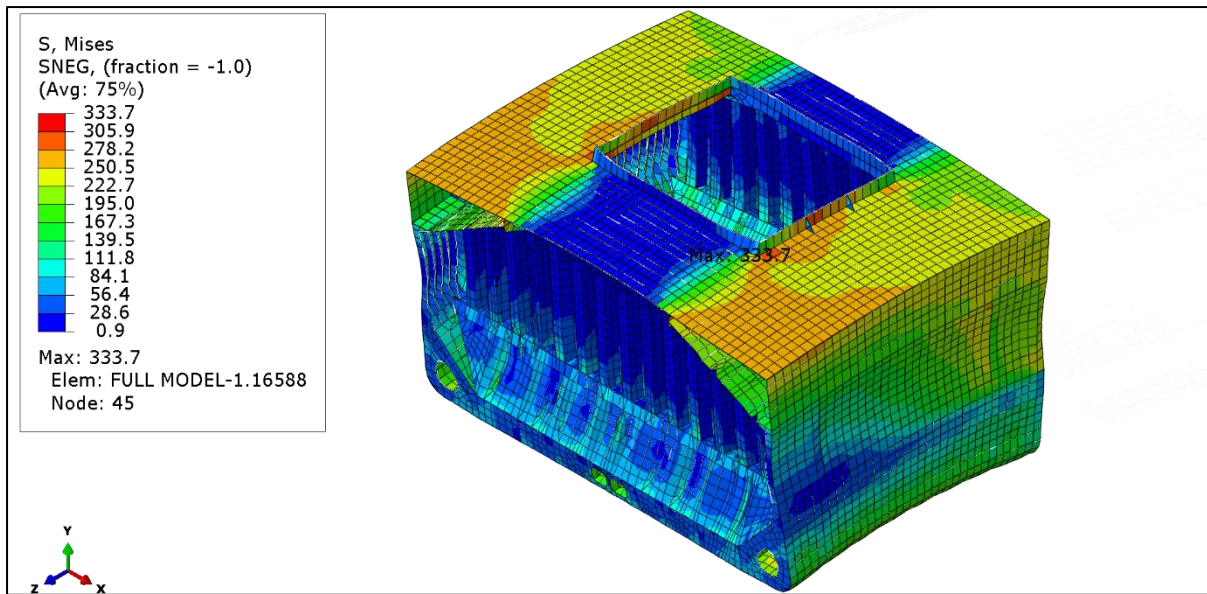
Παρατηρούμε πως η μέγιστη τάση σε ολόκληρο το μοντέλο (437.8 MPa) είναι μεγαλύτερη της μέγιστης επιτρεπόμενης (326 MPa). Ωστόσο, αυτή παρατηρείται σε σημείο εκτός της περιοχής ενδιαφέροντος.



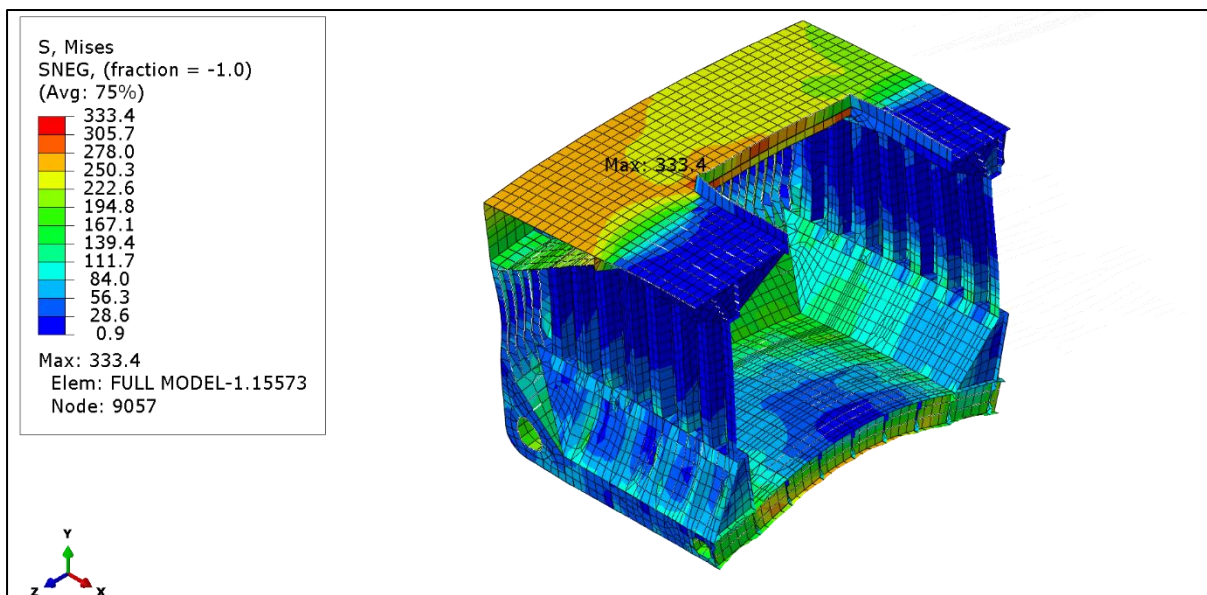
Εικόνα 6.39: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).



Εικόνα 6.40: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

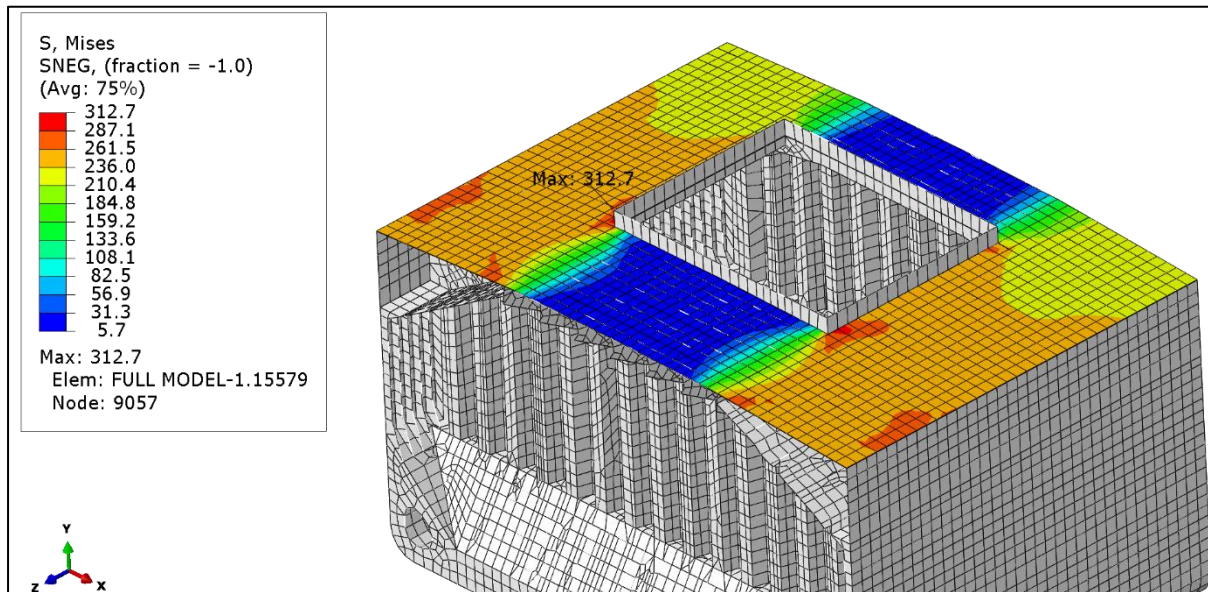


Εικόνα 6.41: Απόκριση του Cargo Hold No.6 για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).



Εικόνα 6.42: Απόκριση του Cargo Hold No.6, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

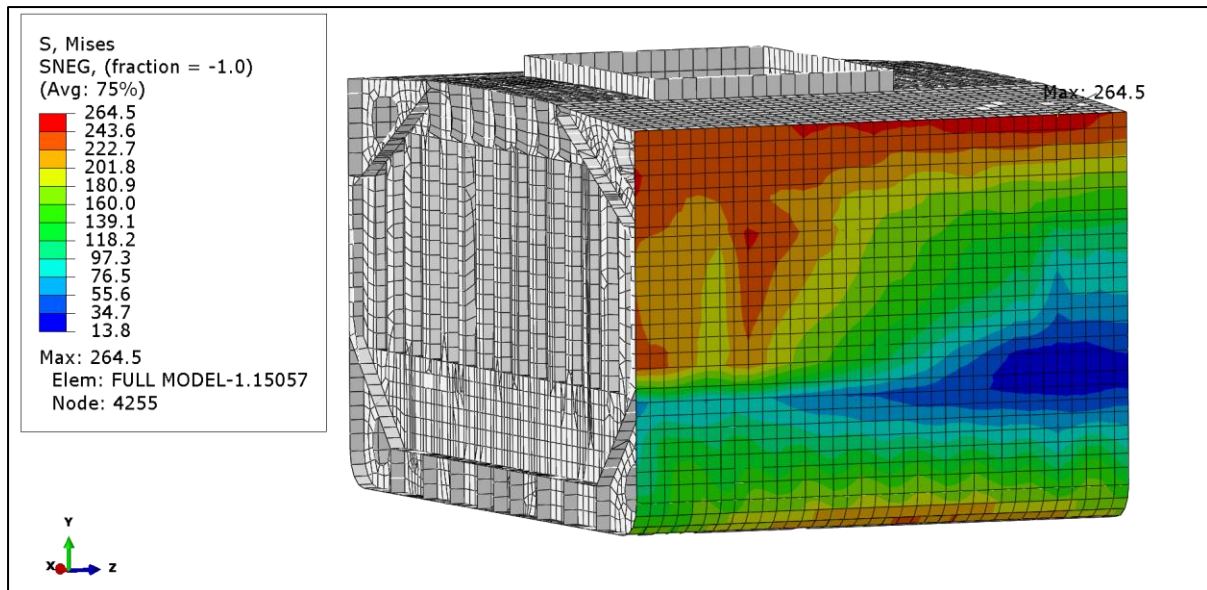
Ελάσματα στην περιοχή ενδιαφέροντος (Cargo Hold No. 6)



Εικόνα 6.43: Τάσεις στο έλασμα καταστρώματος για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Έλασμα Καταστρώματος (Deck)

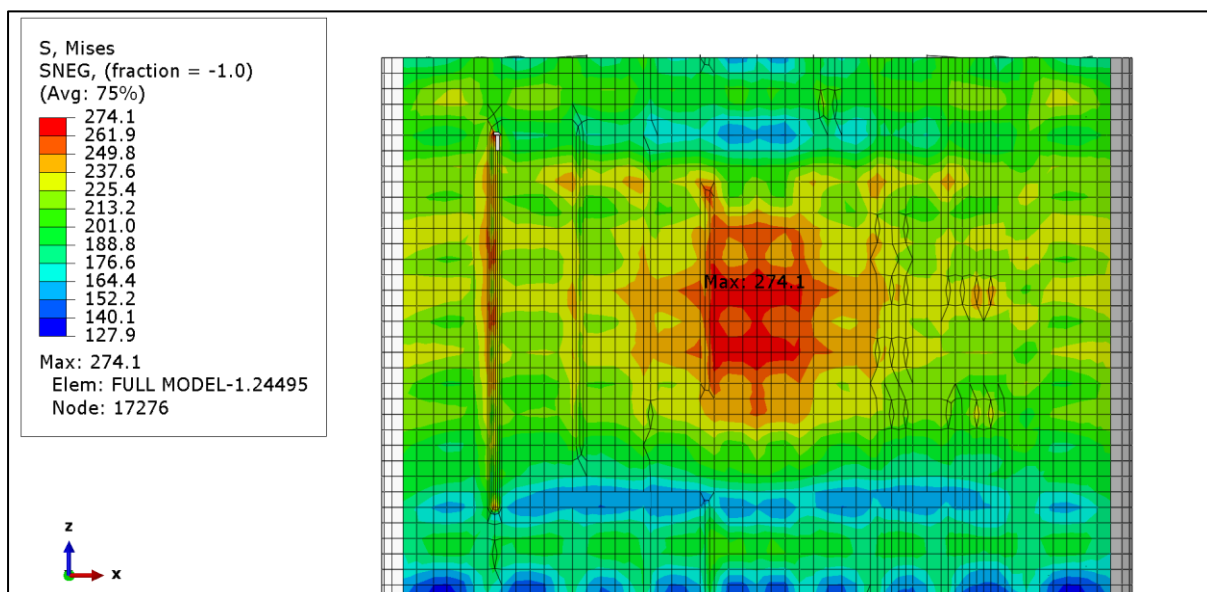
Το κατάστρωμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα AH32 στην περιοχή του cross deck και χάλυβα EH36 στο υπόλοιπο κατάστρωμα. Όπως φαίνεται στην εικόνα, η περιοχή του cross deck συνεισφέρει ελάχιστα στην παραλαβή των τάσεων. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{deck}=312.7$ MPa και παρατηρείται στη γωνία του ανοίγματος του κύτους (hatch corner). Η συγκεκριμένη περιοχή έχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Για αυτήν την περιοχή προκύπτει συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής $\lambda=0.96$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{perm}=1$ και άρα ο συντελεστής ασφαλείας έχει τιμή $SF=1.04$.



Εικόνα 6.44: Τάσεις στο πλευρικό έλασμα για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Πλευρικό Έλασμα (Side Shell)

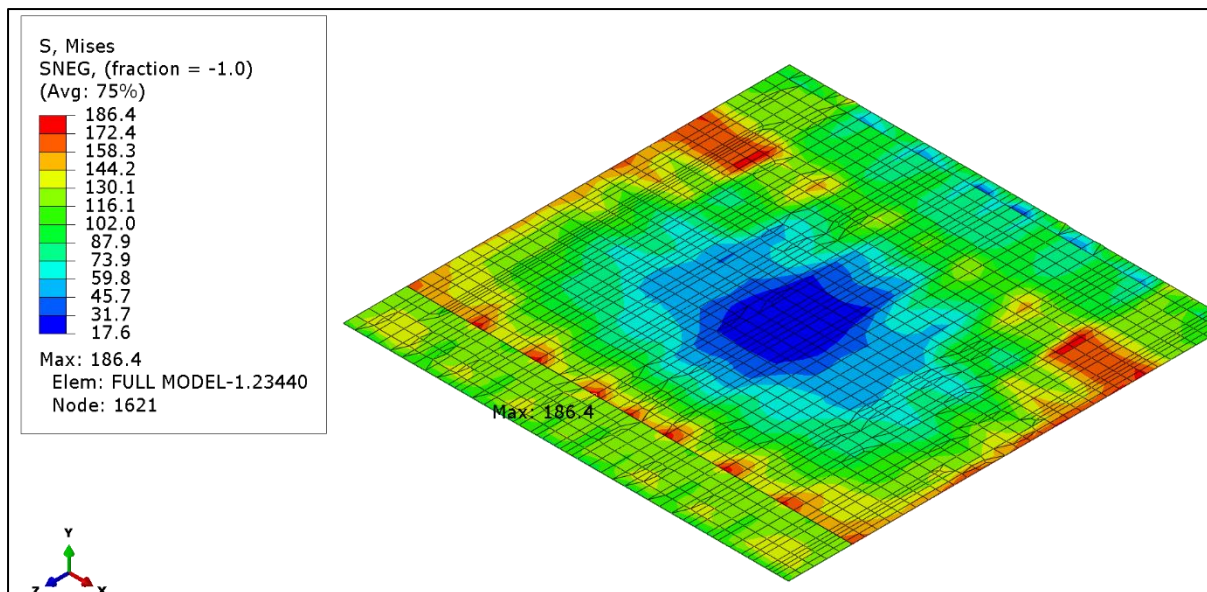
Στο πλευρικό έλασμα του Cargo Hold No.6 η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{side_shell}=264.5$ MPa και εμφανίζεται στο ανώτερο ύψος του πλευρικού ελάσματος. Σε εκείνη την περιοχή, η τάση λόγω κάμψης μεγιστοποιείται. Εκεί, το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade AH32) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.81$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{yperm}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.23$.



Εικόνα 6.45: Τάσεις στον πυθμένα για Alternate Ore – HSM-2 (Hogging)

Έλασμα Πυθμένα (Bottom)

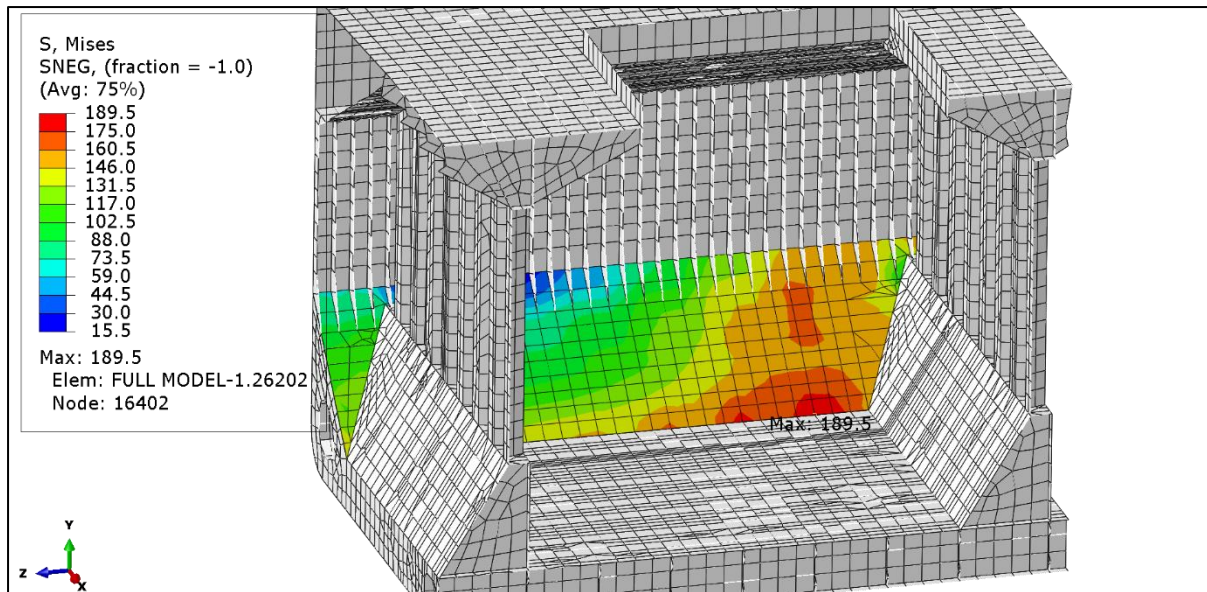
Στον πυθμένα η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{bottom}}=274.1$ MPa και εμφανίζεται στην περιοχή του κέντρου του. Το έλασμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.84$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.19$.



Εικόνα 6.46: Τάσεις ελάσματος εσωτερικού πυθμένα για Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Έλασμα Εσωτερικού Πυθμένα (Inner Bottom)

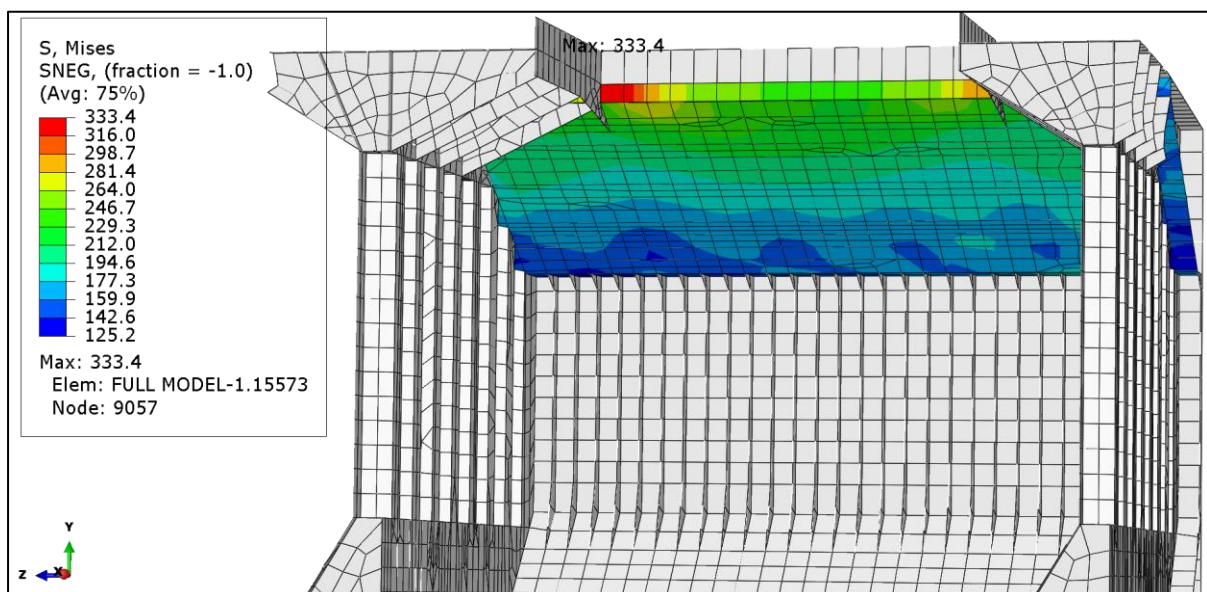
Στο έλασμα εσωτερικού πυθμένα η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{bottom}}=186.4$ MPa και εμφανίζεται στην περιοχή έδρασης της εγκάρσιας φρακτής. Σε εκείνη την περιοχή, η ύπαρξη της φρακτής δημιουργεί μεγάλη αλλαγή στη δυσκαμψία της κατασκευής. Το έλασμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.57$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.75$.



Εικόνα 6.47: Τάσεις στο έλασμα του hopper plate για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Hopper Plate

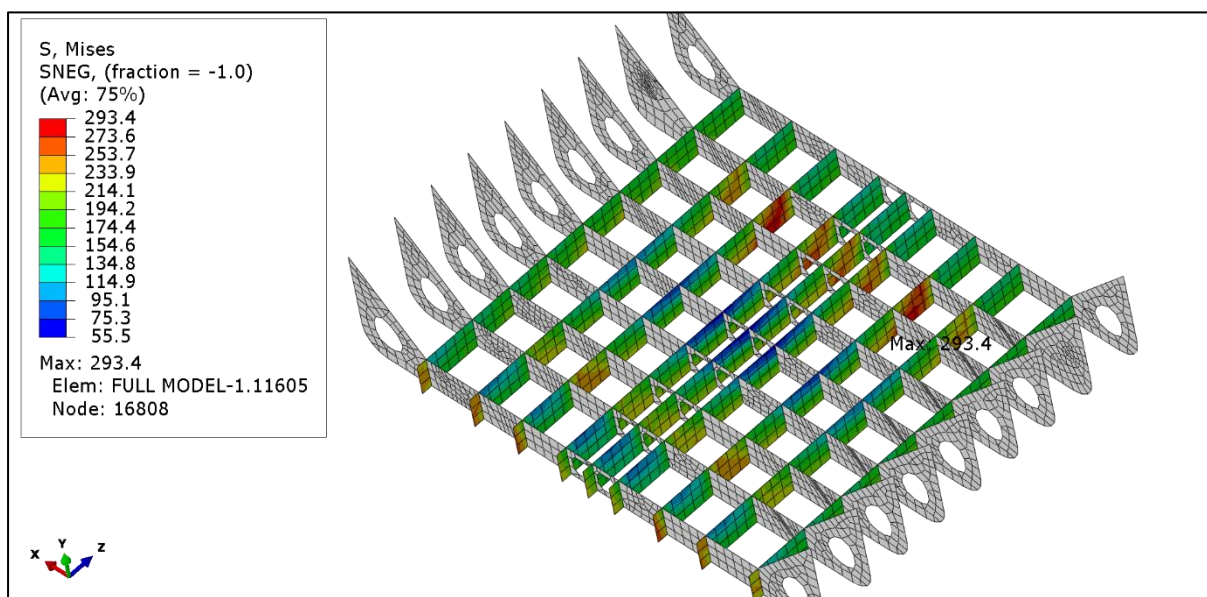
Το hopper plate εμφανίζει υψηλές τάσεις στο κάτω μέρος του και κυρίως στις περιοχές τομής του με τον εσωτερικό πυθμένα και τις έδρες του διπυθμένου. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{hopper_plate}}=189.5$ MPa. Το έλασμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (Grade AH32) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.58$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.72$.



Εικόνα 6.48: Τάσεις στην άνω πλευρική δεξαμενή για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Έλασμα άνω πλευρικής δεξαμενής (Topside tank plating)

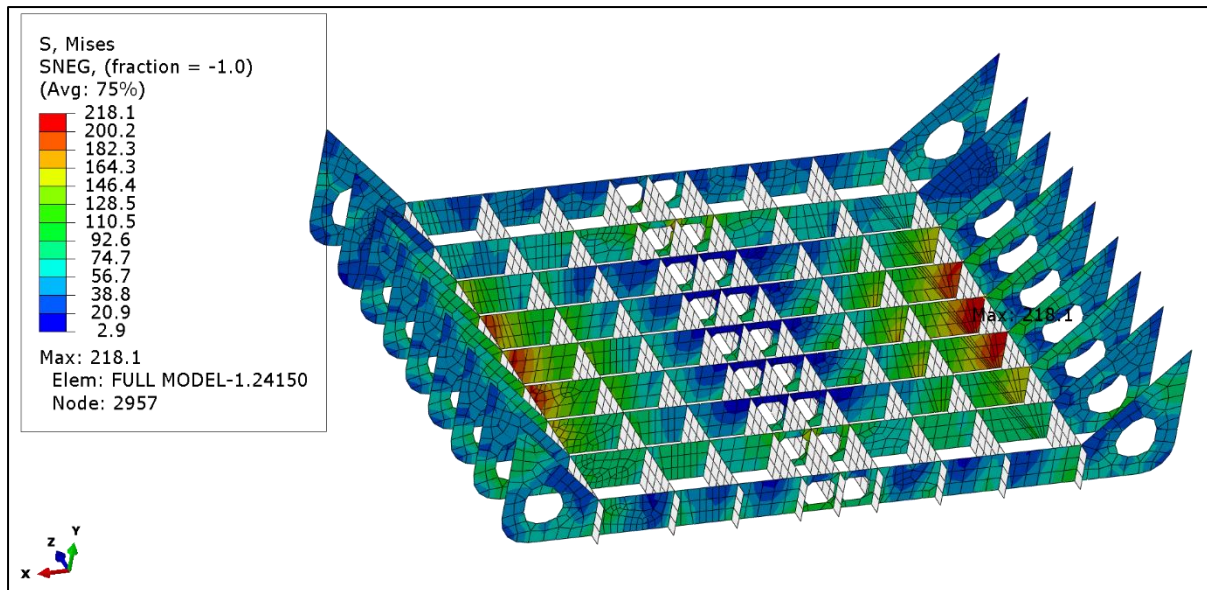
Στην άνω πλευρική δεξαμενή η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{topside_plate}}=333.4$ MPa, η οποία είναι οριακά μεγαλύτερη της επιτρεπόμενης και εμφανίζεται στο κάθετο έλασμα (vertical strake) στην περιοχή τομής του με το εγκάρσιο δοκάρι του ανοίγματος κύτους (hatchend beam). Η συγκεκριμένη περιοχή έχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Το υλικό κατασκευής εκεί είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade DH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=1.02$, οριακά μεγαλύτερος του επιτρεπόμενου συντελεστή χρήσης έναντι διαρροής $\lambda_{\text{yperm}}=1$. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί ως αποτέλεσμα της κατασκευαστικής απλοποίησης που έχει πραγματοποιηθεί στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, στη συγκεκριμένη περιοχή δεν έχουν μοντελοποιηθεί όλα τα μπρακέτα που υπάρχουν στην πραγματική κατασκευή, τα οποία συμμετέχουν στην παραλαβή των τάσεων.



Εικόνα 6.49: Τάσεις στα διαμήκη δοκάρια (girders) για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Σταθμίδες (Girders)

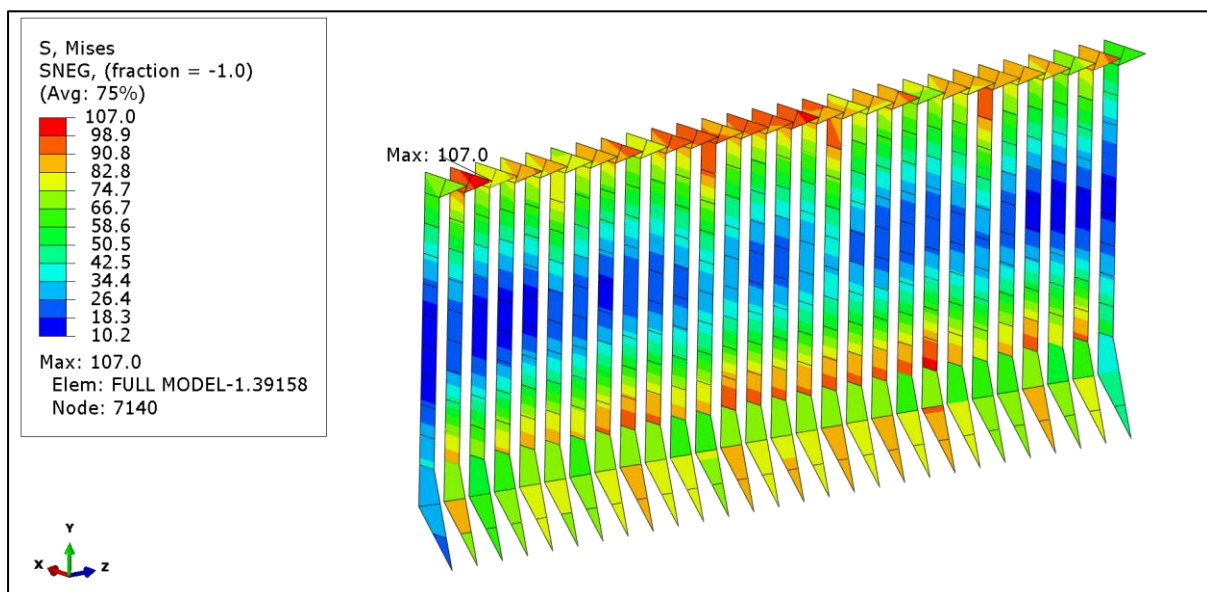
Οι σταθμίδες παρουσιάζουν υψηλές τάσεις στην περιοχή της κάτω έδρασης των εγκαρσίων φρακτών και η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{girder}}=293.4$ MPa. Σε εκείνη την περιοχή το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.90$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.11$.



Εικόνα 6.50: Τάσεις στις έδρες του διπύθμενου για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Έδρες (Floors)

Οι έδρες εμφανίζουν τις υψηλότερες τάσεις στις περιοχές τομής τους με τα εγκάρσια διαφράγματα (webs) όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{floor}}=218.1$ MPa και σε εκείνη την περιοχή το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade AH32) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.72$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.38$.



Εικόνα 6.51: Τάσεις στους νομείς για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Νομείς (Frames)

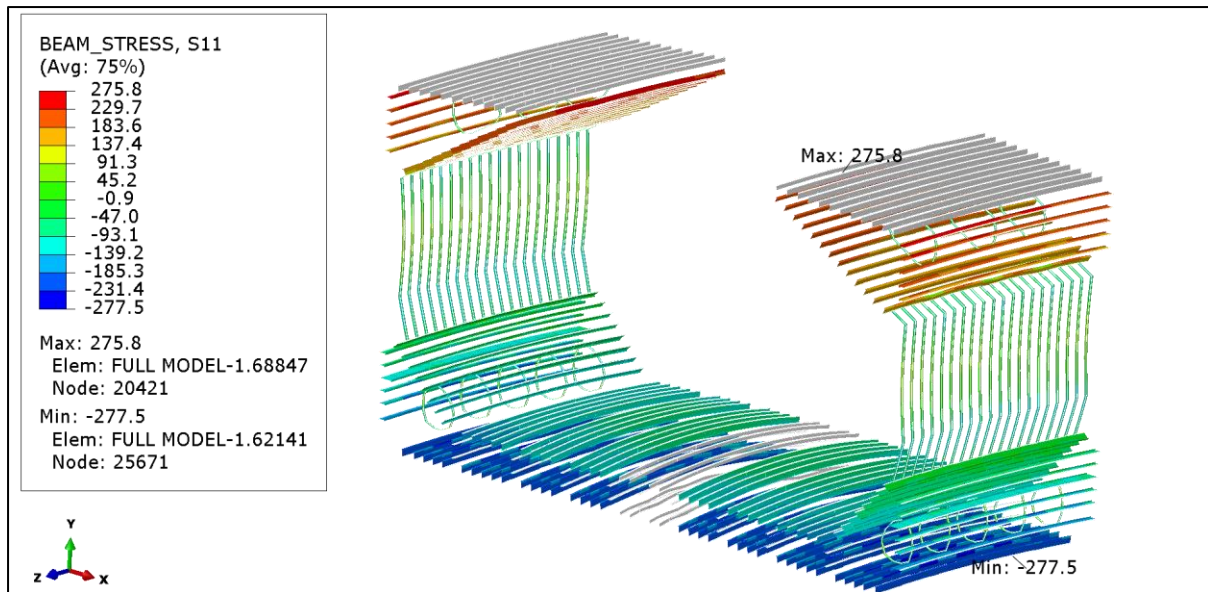
Στους νομείς, η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{frames}=107 \text{ MP}_a$ και εμφανίζεται στο άνω μπρακέτο του νομέα. Οι νομείς είναι κατασκευασμένοι από κοινό ναυπηγικό χάλυβα (Grade A) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.46$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{yperm}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=2.20$.

Πίνακας 6.10: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τα ελάσματα στην κατάσταση Alternate Ore σε HSM-2 (hogging)

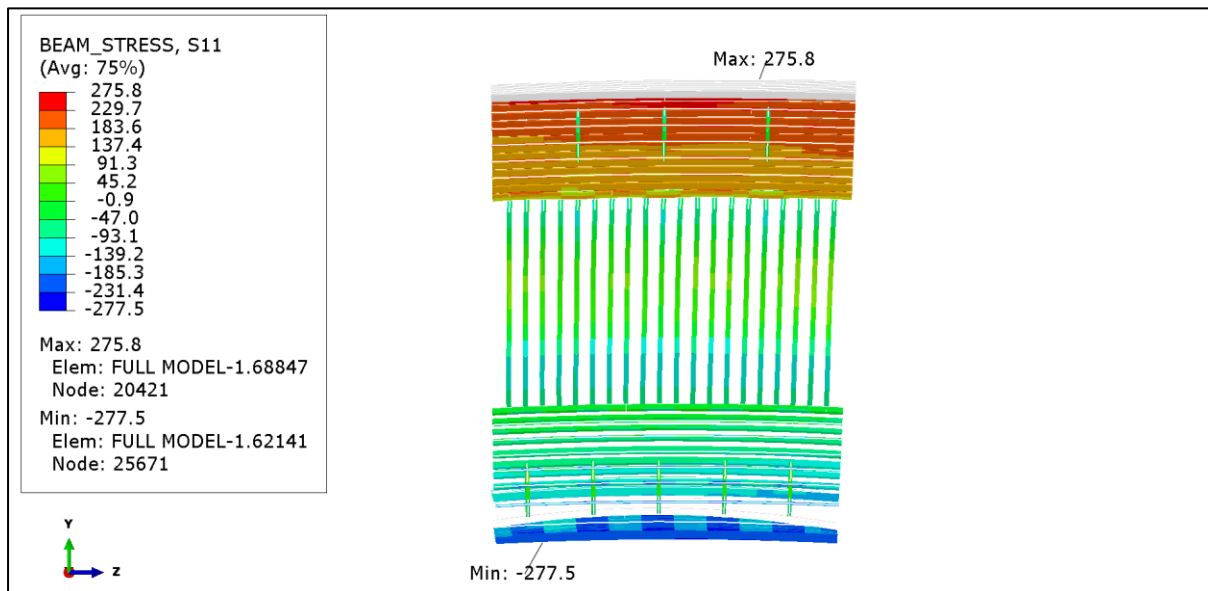
PLATES				
Structural Member	Material	Max Stress (Mpa)	Max yield factor	SF
Deck	EH36-AH32	312.7	0.96	1.04
Side Shell	AH32-AH36-DH36-EH36	264.5	0.81	1.23
Bottom	AH36	274.1	0.84	1.19
Inner Bottom	AH36	186.4	0.57	1.75
Hopper Plate	AH32-AH36	189.5	0.58	1.72
Topside Plate	DH36-AH32	333.4	1.02	-
Girders	AH36	293.4	0.90	1.11
Floors	AH32	218.1	0.72	1.38
frames	A	107	0.46	2.20

Ενισχυτικά στην περιοχή ενδιαφέροντος (Cargo Hold No. 6)

Η προς εξέταση περιοχή των ενισχυτικών είναι το μεσαίο κύτος, ανάμεσα στις δύο εγκάρσιες φρακτές. Τα αποτελέσματα των αξονικών τάσεων των ενισχυτικών σε εκείνη την περιοχή φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν. Οι μέγιστες τάσεις, και άρα οι μέγιστοι συντελεστές χρήσης διαρροής, παρατηρούνται στις περιοχές του πυθμένα και του καταστρώματος οι οποίες βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της διατομής.



Εικόνα 6.52: 3D όψη ενισχυτικών για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).



Εικόνα 6.53: Πλάγια όψη ενισχυτικών για το συνδυασμό φόρτισης Alternate Ore Departure – HSM-2 (Hogging).

Σημείωση: Το πρόγραμμα ABAQUS δε δίνει απευθείας τα αποτελέσματα των αξονικών τάσεων για ενισχυτικά που έχουν δημιουργηθεί ως τραπεζοειδή προφίλ. Τα ενισχυτικά του καταστρώματος εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία. Επομένως, ο υπολογισμός των τάσεων τους έγινε υπολογιστικά βάσει της αξονικής δύναμης και της καμπτικής ροπής που δέχονται στη διατομή τους.

Πίνακας 6.11: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα ενισχυτικών για την κατάσταση Alternate Ore σε HSM-2 (hogging).

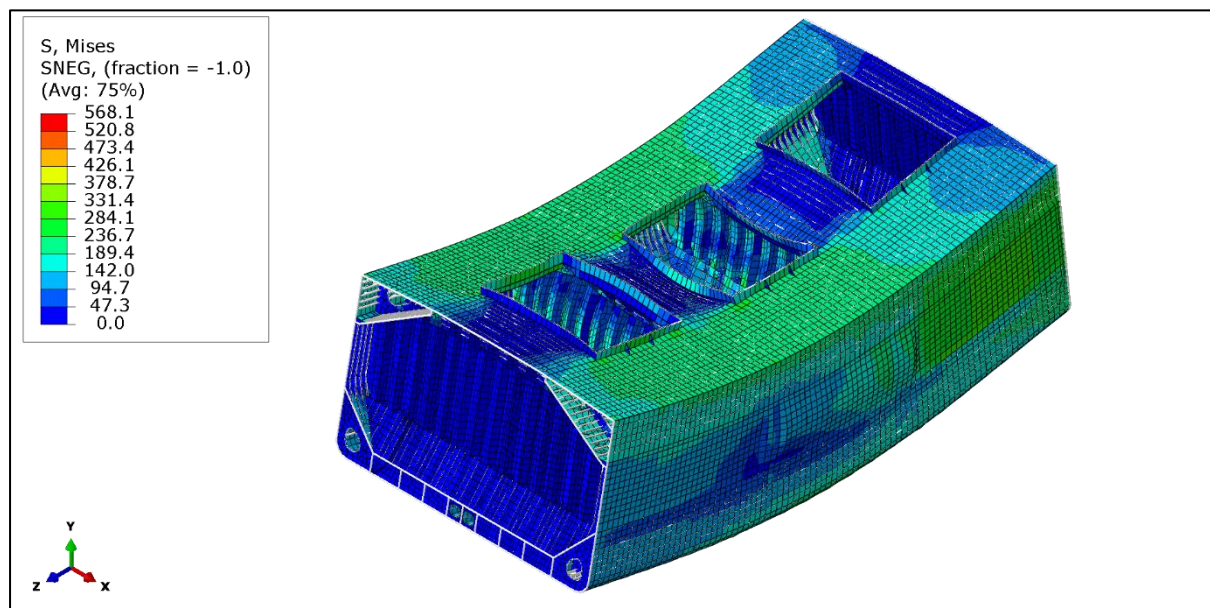
STIFFENERS				
structural member	Material	Max Stress (Mpa)	Max yield factor	SF
Deck	AH36	272.3	0.84	1.20
Side Shell	AH32-AH36	255.2	0.80	1.25
Topside Plate	AH32-AH36	275.8	0.85	1.18
Bottom	AH36	-277.5	0.85	1.17
Inner Bottom	AH36	-179.1	0.55	1.82
Hopper Plate	AH32	-145.2	0.48	2.07

Να σημειωθεί πως, για τα ενισχυτικά του πλευρικού ελάσματος, ενώ η μέγιστη τάση παρατηρείται στο υψηλότερο ενισχυτικό (L37), ο μέγιστος συντελεστής διαρροής εντοπίζεται στο κάτω ενισχυτικό (L36).

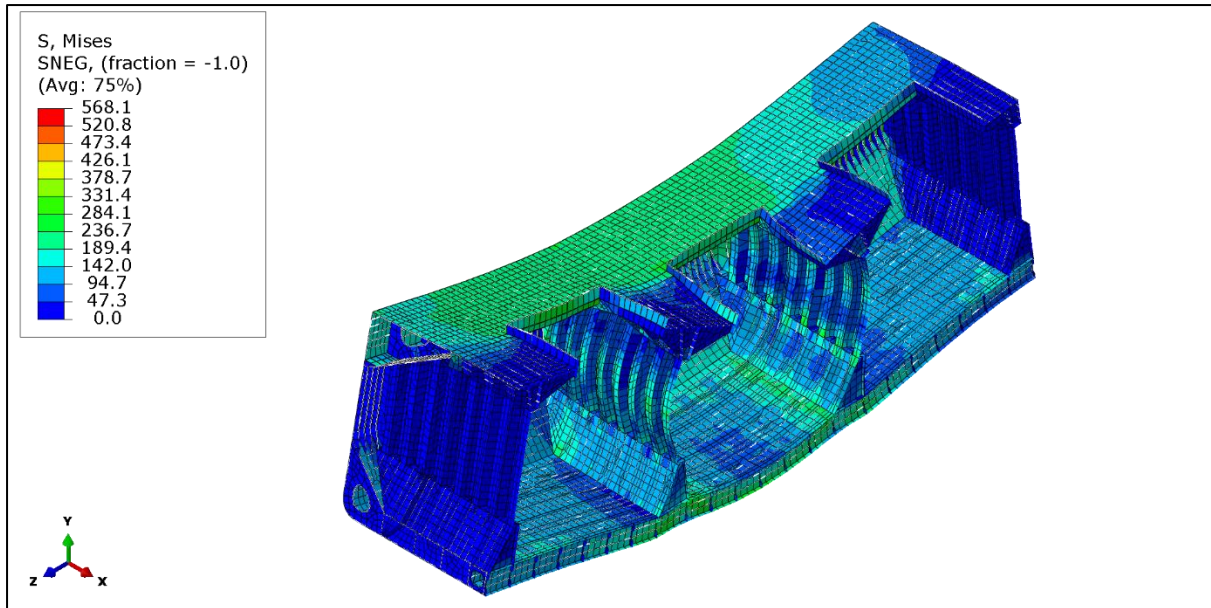
6.7.2 Heavy Ballast Φόρτωση σε δυναμική κατάσταση HSM-1

Αρχικά, φαίνεται η απόκριση ολόκληρου του μοντέλου και στη συνέχεια η περιοχή ενδιαφέροντος, δηλαδή το μεσαίο αμπάρι (Cargo Hold No.6).

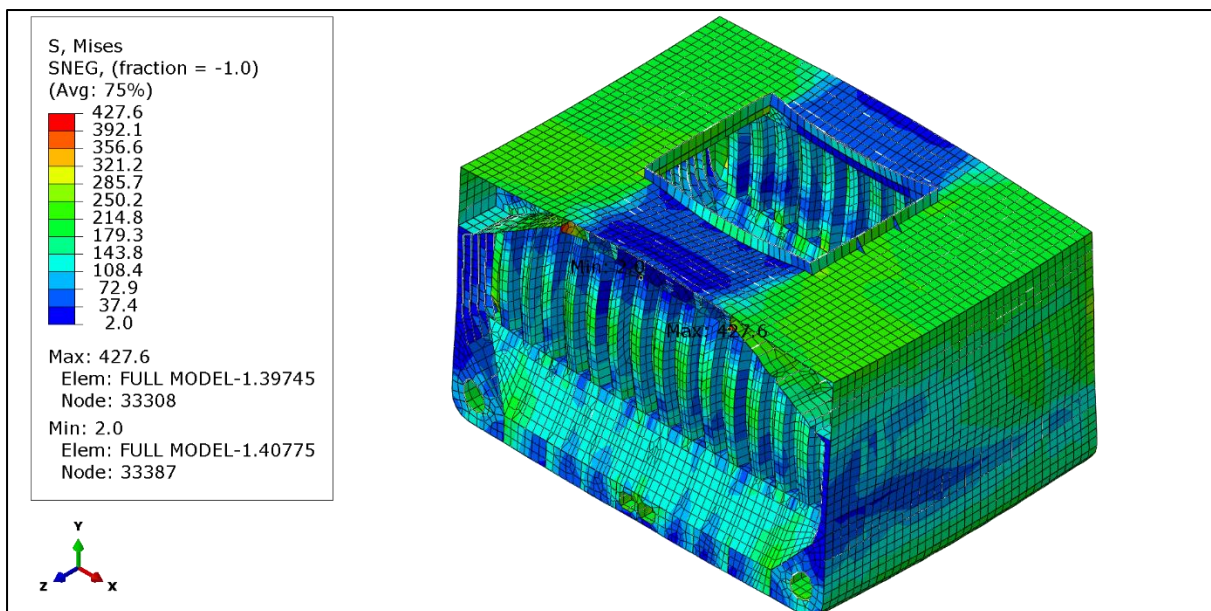
Παρατηρούμε πως η μέγιστη τάση σε ολόκληρο το μοντέλο (568.1 MPa) είναι μεγαλύτερη της μέγιστης επιτρεπόμενης (326 MPa). Αυτό το φαινόμενο εντοπίστηκε σε μεμονωμένα στοιχεία κακής ποιότητας όπου η τάση απέκλινε αρκετά σε σχέση με την τάση των γειτονικών στοιχείων. Τα αποτελέσματα αυτών των στοιχείων θεωρήθηκαν αναξιόπιστα και δεν συμπεριλήφθηκαν στα τελικά αποτελέσματα που ακολουθούν για τα ελάσματα και τα ενισχυτικά ανά περιοχές.



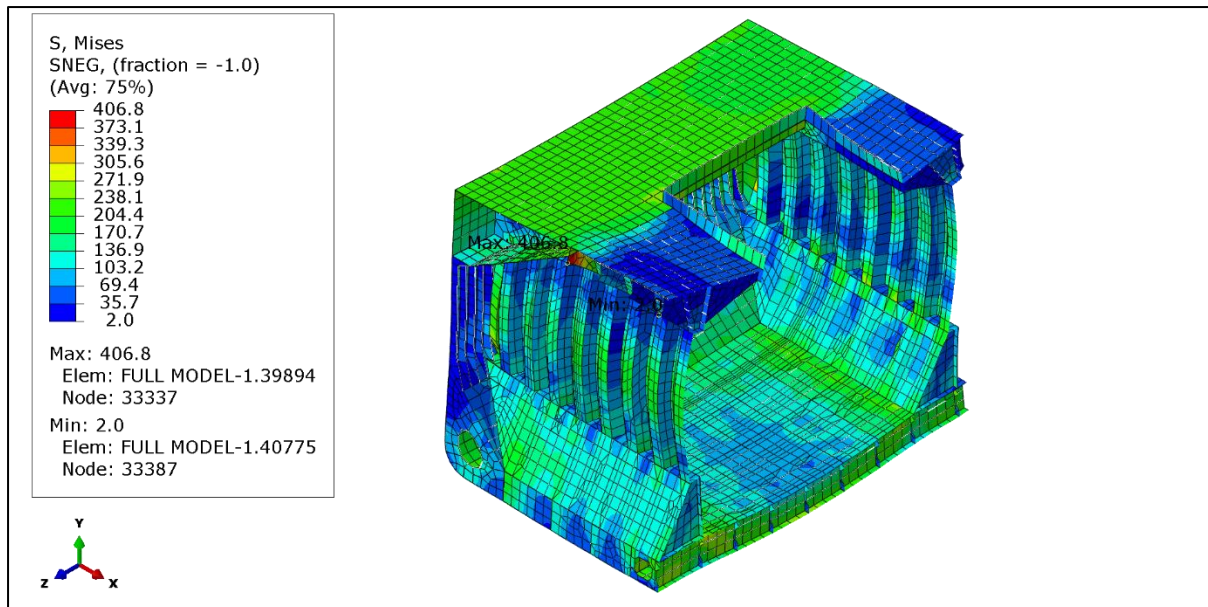
Εικόνα 6.54: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).



Εικόνα 6.55: Απόκριση ολόκληρου του μοντέλου, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

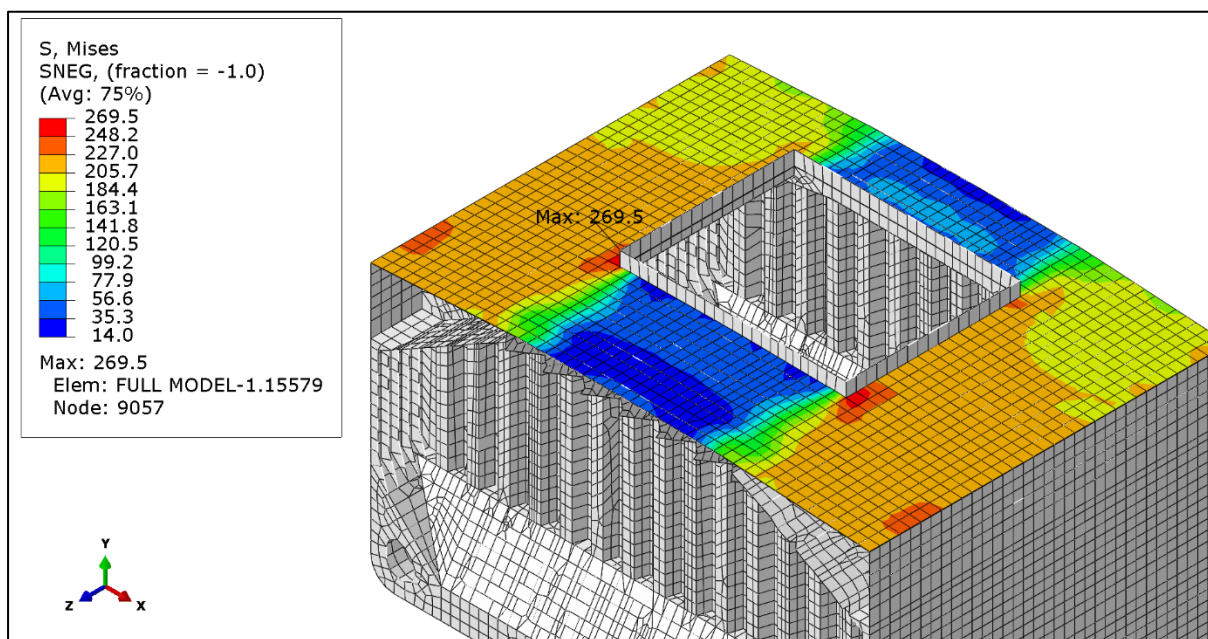


Εικόνα 6.56: Απόκριση του Cargo Hold No.6 για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).



Εικόνα 6.57: Απόκριση του Cargo Hold No.6, σε τομή κατά το διαμήκη άξονα, για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Ελάσματα στην περιοχή ενδιαφέροντος (Cargo Hold No. 6)

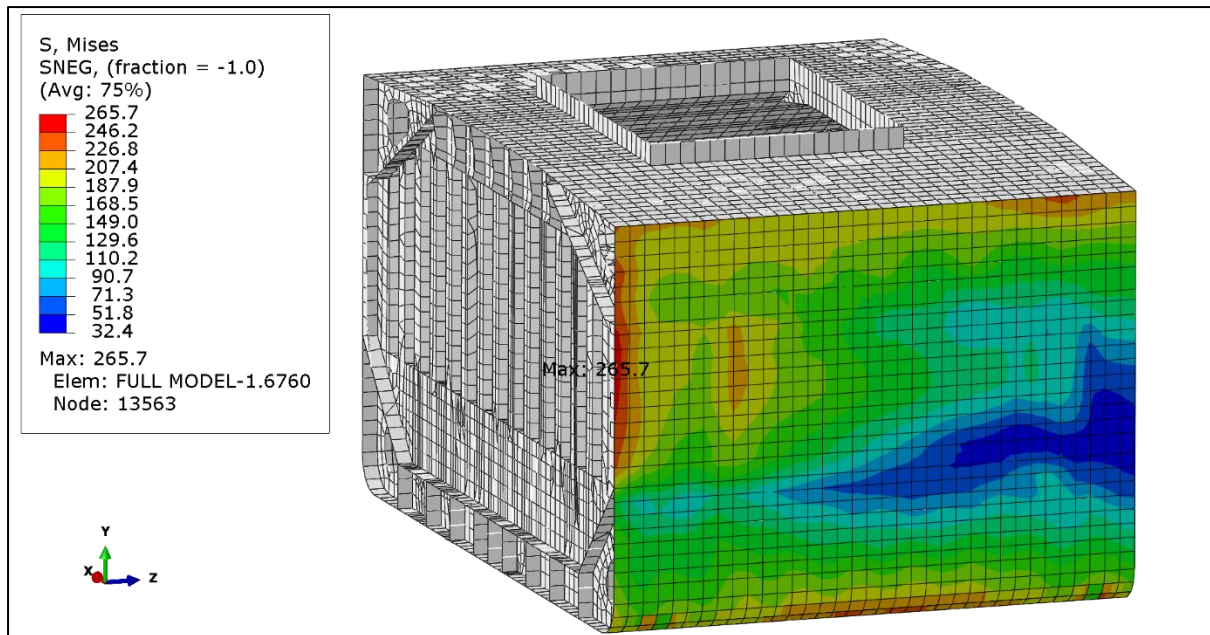


Εικόνα 6.58: Τάσεις στο έλασμα καταστρώματος για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Έλασμα Καταστρώματος (Deck)

Το κατάστρωμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα AH32 στην περιοχή του cross deck και χάλυβα EH36 στο υπόλοιπο κατάστρωμα. Όπως φαίνεται στην εικόνα, η περιοχή του cross deck συνεισφέρει ελάχιστα στην παραλαβή των τάσεων. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{deck}=269.5$ MPa και παρατηρείται στη γωνία του ανοίγματος του κύτους (hatch corner), η οποία αποτελεί περιοχή συγκέντρωσης τάσεων. Λόγω υλικού, προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής

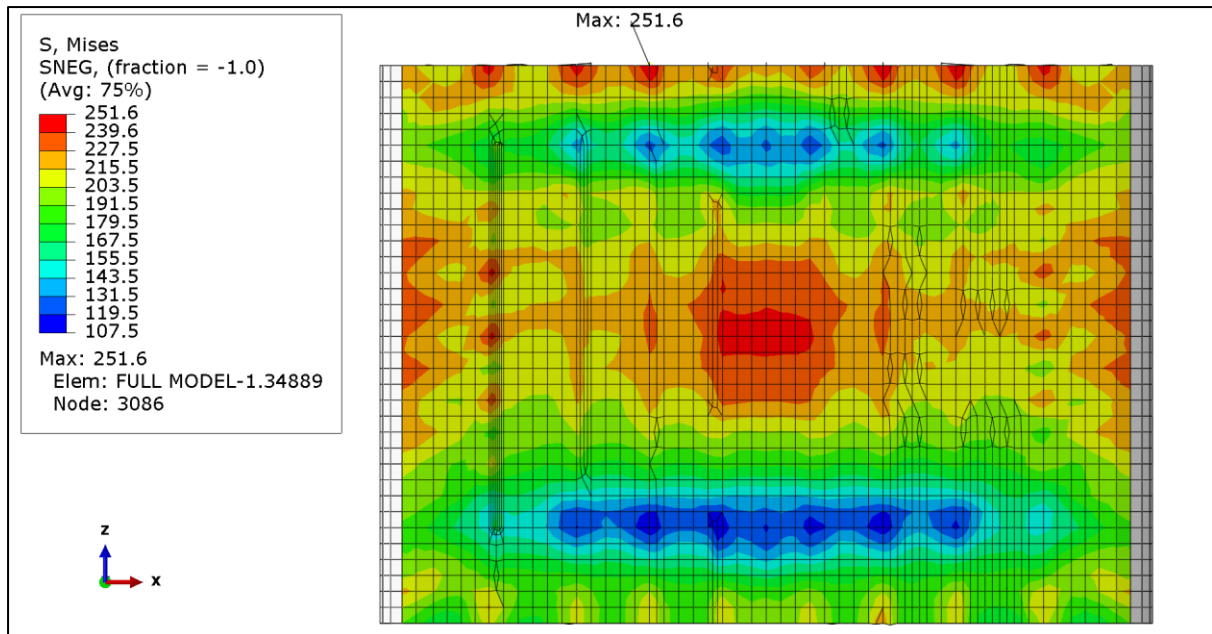
$\lambda=0.83$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{yperm}=1$ και άρα ο συντελεστής ασφαλείας έχει τιμή $SF=1.21$.



Εικόνα 6.59: Τάσεις στο πλευρικό έλασμα για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Πλευρικό Έλασμα (Side Shell)

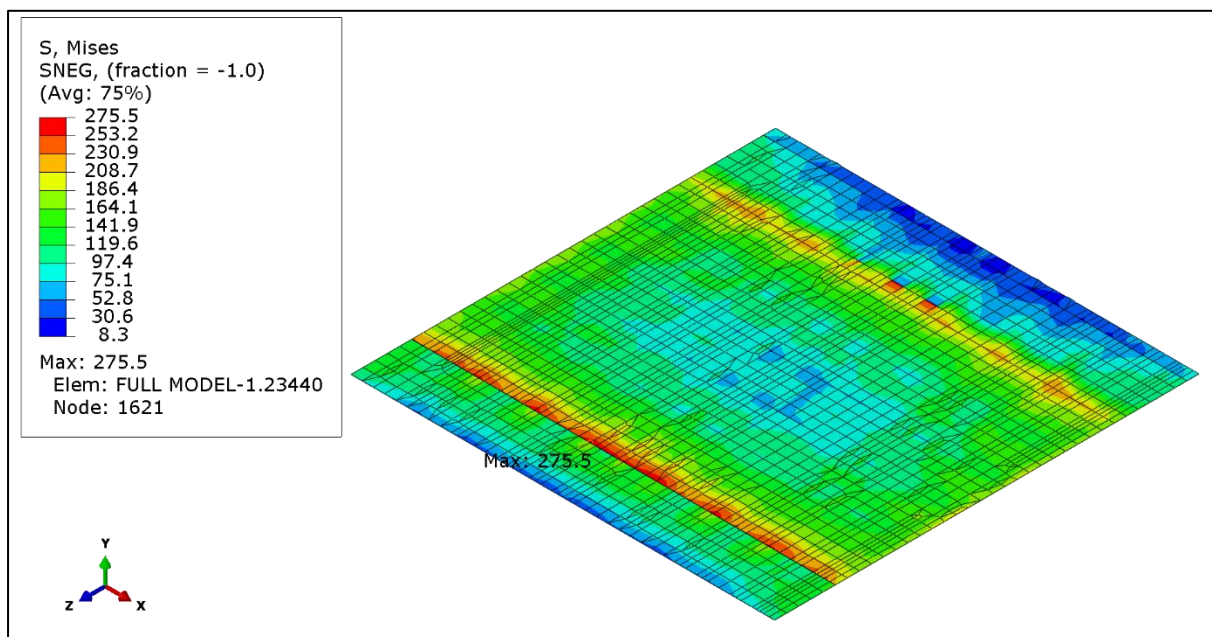
Στο πλευρικό έλασμα του Cargo Hold No.6 η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{side_shell}=265.7$ MPa και εμφανίζεται στη διαμήκη θέση της εγκάρσιας φρακτής όπου μεγιστοποιείται η διαμητική τάση. Εκεί το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.82$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{yperm}=1$ και άρα προκύπτει συντελεστής ασφαλείας $SF=1.23$.



Εικόνα 6.60: Τάσεις ελάσματος πυθμένα για Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging)

Έλασμα Πυθμένα (Bottom)

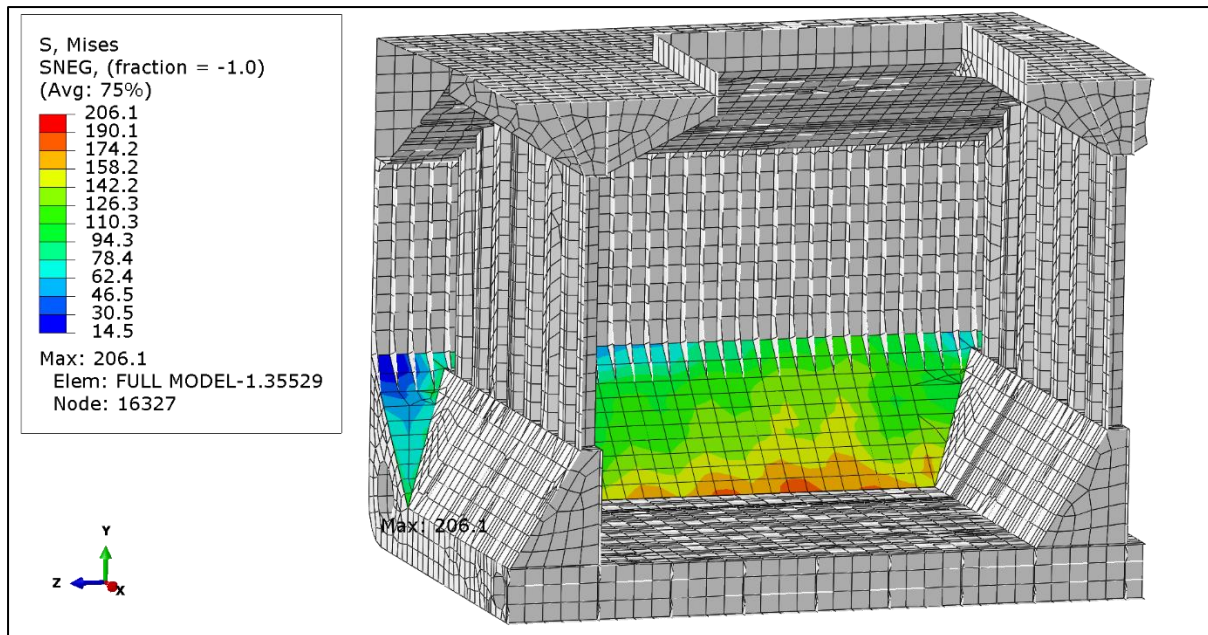
Στον πυθμένα εμφανίζονται υψηλές τάσεις στις περιοχές του κέντρου του και της κάτω έδρασης της εγκάρσιας φρακτής. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{bottom}}=251.6$ MPa και δεδομένου ότι το έλασμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (Grade AH36) προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.77$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{perm}}=1$ και άρα ο συντελεστής ασφαλείας είναι $SF=1.30$.



Εικόνα 6.61: Τάσεις ελάσματος εσωτερικού πυθμένα για Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging)

Έλασμα Εσωτερικού Πυθμένα (Inner Bottom)

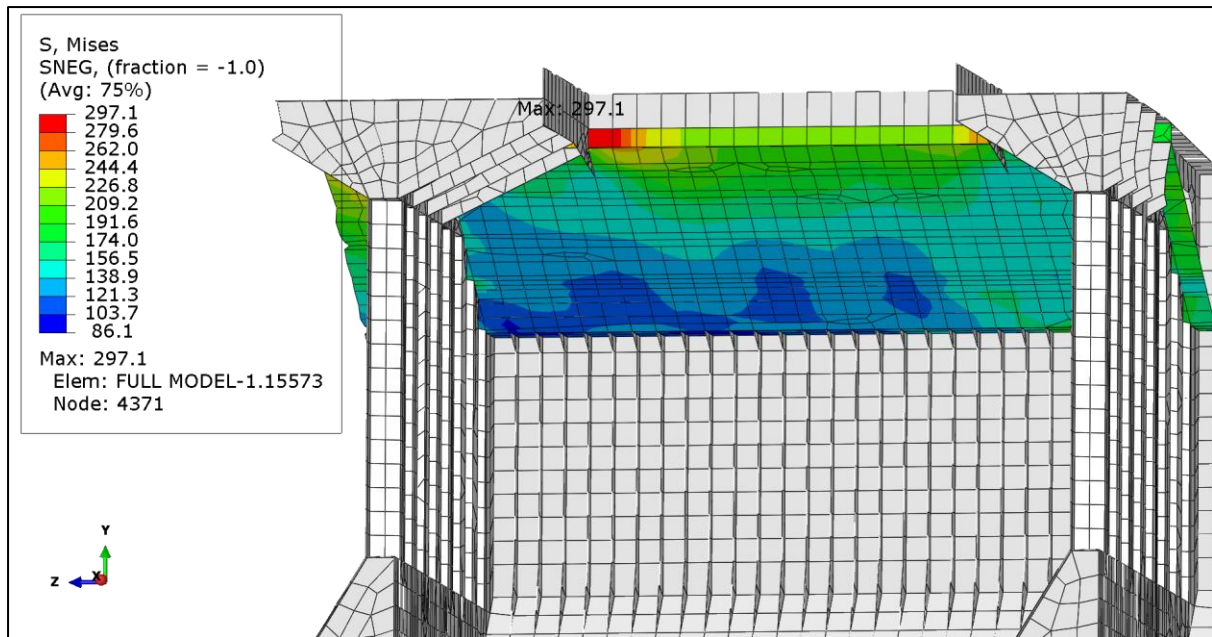
Στο έλασμα εσωτερικού πυθμένα η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{bottom}}=275.5$ MPa και εμφανίζεται στην περιοχή έδρασης της εγκάρσιας φρακτής. Σε εκείνη την περιοχή, η ύπαρξη της φρακτής δημιουργεί μεγάλη αλλαγή στη δυσκαμψία της κατασκευής. Το έλασμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.85$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.18$.



Εικόνα 6.62: Τάσεις στο έλασμα του hopper plate για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Hopper Plate

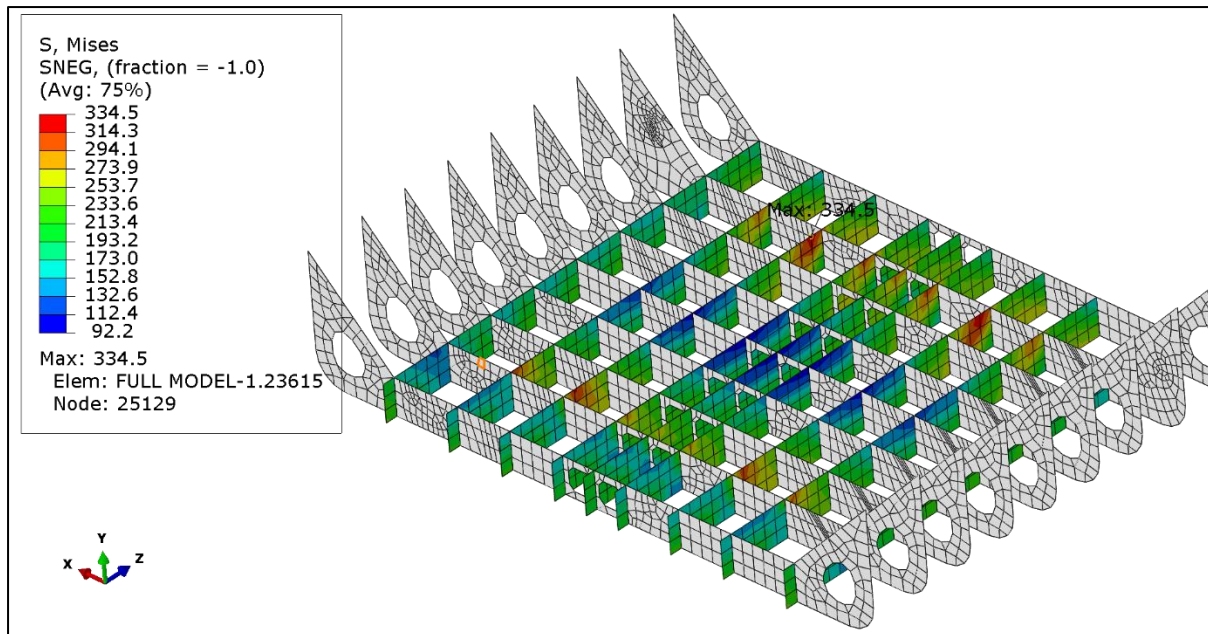
Στο hopper plate εμφανίζονται υψηλές τάσεις στο κάτω μέρος του και κυρίως στις περιοχές τομής του με τον εσωτερικό πυθμένα και τις έδρες του διπυθμένου. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{hopper_plate}}=206.1$ MPa στην περιοχή έδρασης της εγκάρσιας φρακτής. Το έλασμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα υψηλής αντοχής (Grade AH32 και Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.63$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.58$.



Εικόνα 6.63: Τάσεις στην άνω πλευρική δεξαμενή για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging)

Έλασμα άνω πλευρικής δεξαμενής (Topside tank plating)

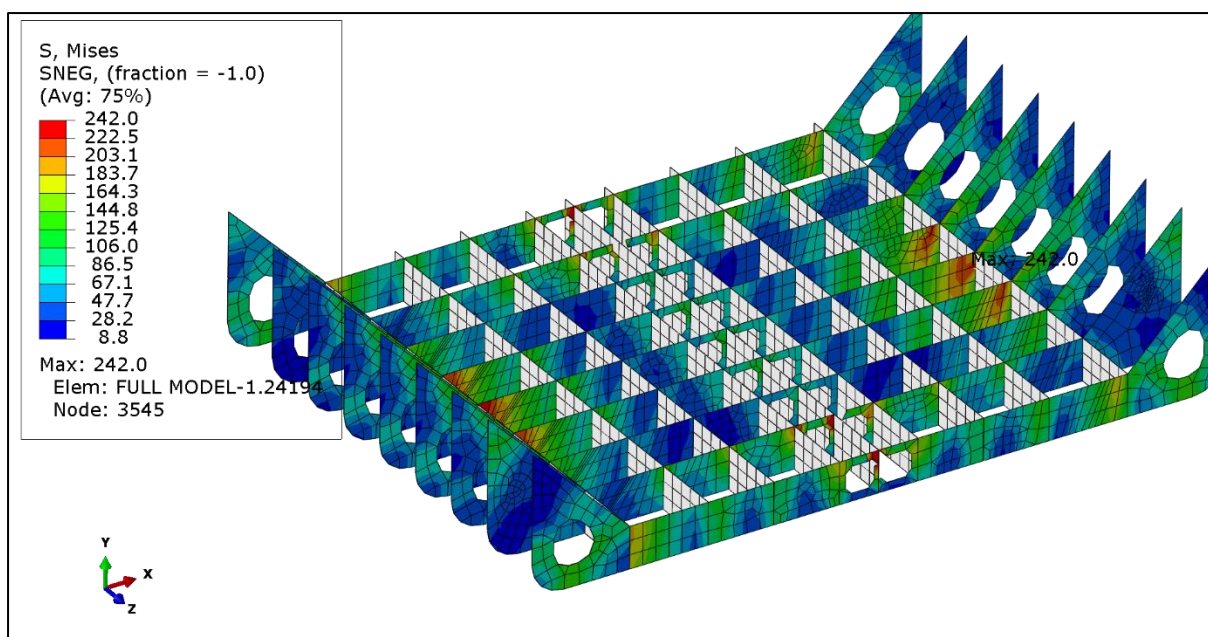
Στην άνω πλευρική δεξαμενή η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{topside_plate}}=297.1$ MPa και εμφανίζεται στο κάθετο έλασμα (vertical strake) στην περιοχή τομής του με το εγκάρσιο δοκάρι του ανοίγματος κύτους (hatchend beam). Η συγκεκριμένη περιοχή έχει υψηλή συγκέντρωση τάσεων. Το υλικό κατασκευής εκεί είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade DH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.91$ και άρα ο συντελεστής ασφαλείας είναι $SF=1.10$.



Εικόνα 6.64 : Τάσεις στα διαμήκη δοκάρια (girders) για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Σταθμίδες (Girders)

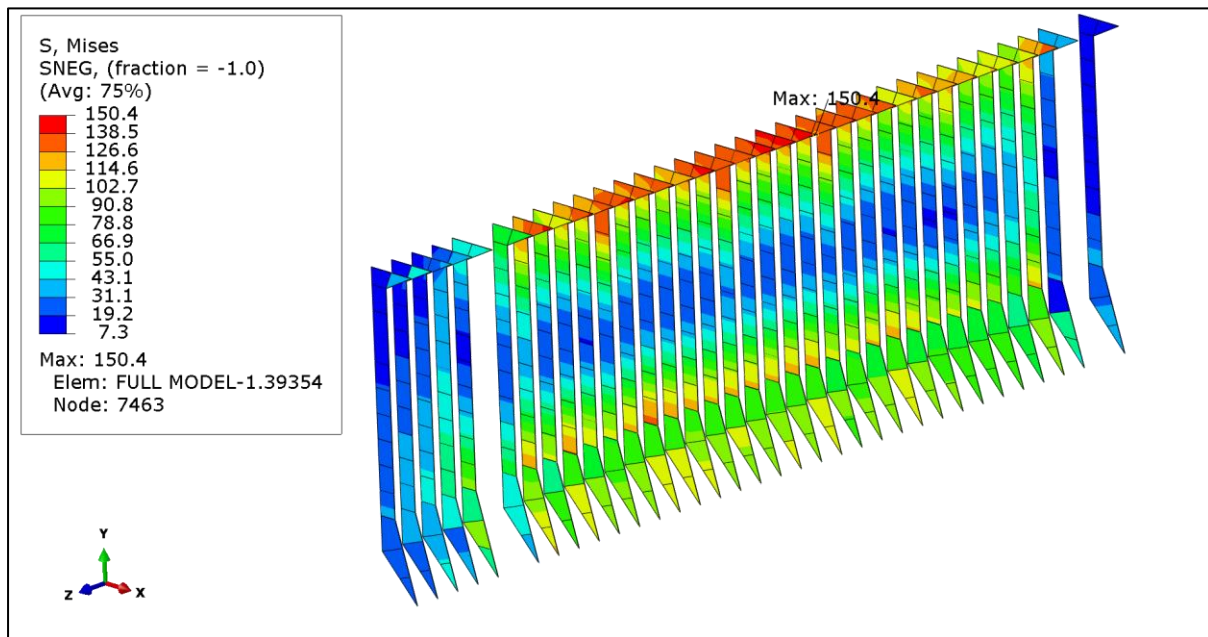
Οι σταθμίδες παρουσιάζουν υψηλές τάσεις στην περιοχή της κάτω έδρασης των εγκαρσίων φρακτών και η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{girder}=334.5$ MPa. Σε εκείνη την περιοχή το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade AH36) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=1.03$, ο οποίος είναι οριακά μεγαλύτερος από τον επιτρεπόμενο $\lambda_{perm}=1$. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί ως αποτέλεσμα της κατασκευαστικής απλοποίησης που έχει πραγματοποιηθεί στο μοντέλο. Συγκεκριμένα, σε εκείνη την περιοχή, το έλασμα της σταθμίδας έχει τοπικά μεγαλύτερο πάχος από αυτό που μοντελοποιήθηκε.



Εικόνα 6.64: Τάσεις στις έδρες του διπύθμενου για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Έδρες (Floors)

Οι έδρες εμφανίζουν τις υψηλότερες τάσεις στις περιοχές τομής τους με τα εγκάρσια διαφράγματα (webs) όπου υπάρχει συγκέντρωση τάσεων. Η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{floor}}=242$ MPa και σε εκείνη την περιοχή το υλικό κατασκευής είναι χάλυβας υψηλής αντοχής (Grade AH32) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.80$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.24$.



Εικόνα 6.65: Τάσεις στους νομείς για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Νομείς (Frames)

Στους νομείς, η μέγιστη τάση έχει τιμή $\sigma_{\text{frames}}=150.4$ MPa και εμφανίζεται στο άνω μπρακέτο του νομέα. Οι νομείς είναι κατασκευασμένοι από κοινό ναυπηγικό χάλυβα (Grade A) και επομένως προκύπτει συντελεστής χρήσης διαρροής $\lambda=0.64$. Ο επιτρεπόμενος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής είναι $\lambda_{\text{yperm}}=1$ και άρα προκύπτει ένας συντελεστής ασφαλείας $SF=1.56$.

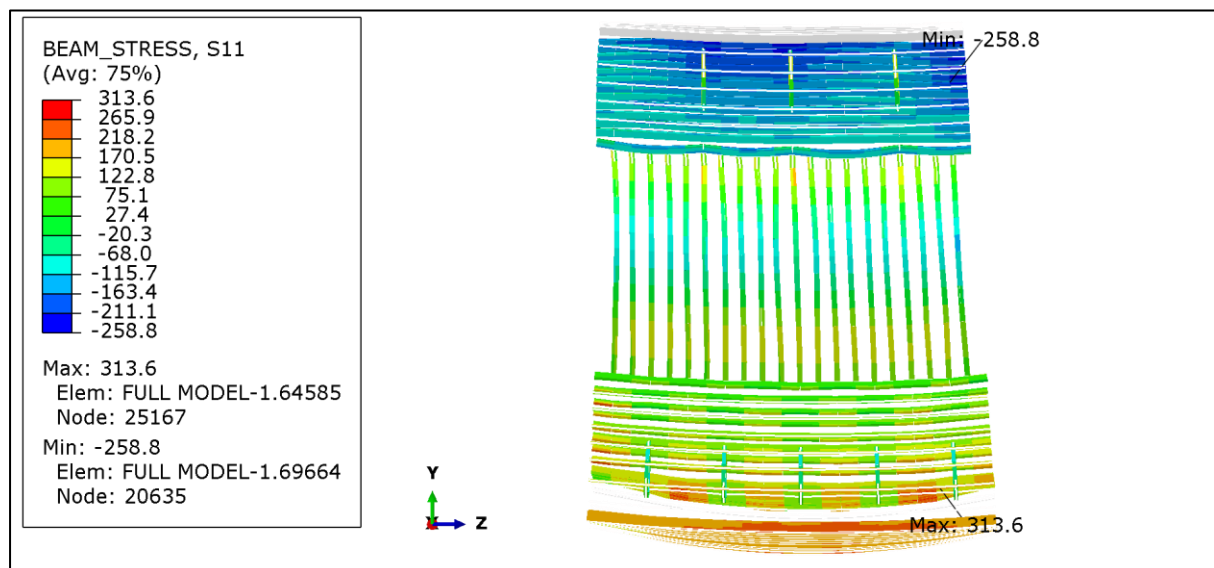
Πίνακας 6.12: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τα ελάσματα για την κατάσταση Heavy Ballast σε HSM-1 (sagging).

PLATES				
Structural Member	Material	Max Stress (MPa)	Max yield factor	SF
Deck	EH36-AH32	269.5	0.83	1.21
Side Shell	AH32-AH36-DH36-EH36	265.7	0.82	1.23
Bottom	AH36	251.6	0.77	1.30

Inner Bottom	AH36	275.5	0.85	1.18
Hopper Plate	AH32-AH36	206.1	0.63	1.58
Topside Plate	DH36-AH32	297.1	0.91	1.10
Girders	AH36	334.5	1.03	-
Floors	AH32	242	0.80	1.24
Frames	A	150.4	0.64	1.56

Ενισχυτικά στην περιοχή ενδιαφέροντος (Cargo Hold No. 6)

Η προς εξέταση περιοχή των ενισχυτικών είναι το μεσαίο κύτος, ανάμεσα στις δύο εγκάρσιες φρακτές. Τα αποτελέσματα των αξονικών τάσεων των ενισχυτικών σε εκείνη την περιοχή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Ο μέγιστος συντελεστής χρήσης έναντι διαρροής εντοπίζεται στα ενισχυτικά του εσωτερικού πυθμένα λόγω της αυξημένης πίεσης του έρματος.



Εικόνα 6.66 Αποτελέσματα αξονικών τάσεων των ενισχυτικών για το συνδυασμό φόρτισης Heavy Ballast – HSM-1 (Sagging).

Πίνακας 6.13: Συγκεντρωτικός πίνακας των αποτελεσμάτων για τα ενισχυτικά για την κατάσταση Heavy Ballast σε HSM-1 (Sagging).

STIFFENERS				
structural member	Material	Max Stress (Mpa)	Max yield factor	SF
Deck	AH36	-245.3	0.75	1.33
Side Shell	AH32-AH36	-231	0.74	1.35
Topside Plate	AH32-AH36	-258.8	0.79	1.26
Bottom	AH36	236.9	0.73	1.38
Inner Bottom	AH36	313.6	0.96	1.04
Hopper Plate	AH32	244.3	0.81	1.23

Να σημειωθεί πως, για τα ενισχυτικά του πλευρικού ελάσματος, ενώ η μέγιστη τάση παρατηρείται στο υψηλότερο ενισχυτικό (L37), ο μέγιστος συντελεστής διαρροής εντοπίζεται στο κάτω ενισχυτικό (L36).

7 Συμπεράσματα και προτάσεις για επόμενη εργασία

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη αντοχής έναντι διαρροής στην περιοχή ενός κύτους φορτίου με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, σύμφωνα με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες, κρίνεται αναγκαίο να γίνει μια ανασκόπηση της διαδικασίας που ακολουθήθηκε και των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από αυτήν.

Η μελέτη πραγματοποιήθηκε σε ένα αμπάρι στην περιοχή της μέσης τομής (Cargo Hold No. 6) ενός Bulk Carrier (179,359 t DWT) χρησιμοποιώντας ένα λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, έκτασης τριών αμπαριών. Από τους πιθανούς συνδυασμούς φορτίσεων που προβλέπουν οι κανονισμοί, η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε σε δύο από αυτούς. Η πρώτη, είναι η εναλλάξ φόρτωση στο μέγιστο επιτρεπόμενο βύθισμα σε συνδυασμό με δυναμική κατάσταση HSM2 η οποία προκαλεί στο υπό μελέτη πλοίο μέγιστη ροπή κάμψης Hogging και μέγιστη διατμητική δύναμη. Η δεύτερη, πρόκειται για κατάσταση ερματισμού (Heavy Ballast) σε συνδυασμό με δυναμική κατάσταση HSM1 η οποία μεγιστοποιεί τη ροπή κάμψης σε Sagging και τη διατμητική δύναμη.

Αρχικά, το μοντέλο των τριών αμπαριών κατασκευάστηκε σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου αφαιρώντας το μισό περιθώριο πάχους λόγω διάβρωσης, όπως προβλέπεται από τους κανονισμούς. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των ελασμάτων ήταν Shell Element, ενώ για τα διαμήκη ενισχυτικά χρησιμοποιήθηκαν Beam Element. Το μέγεθος των στοιχείων διακριτοποίησης ήταν περίπου όσο η ισαπόσταση των κατασκευαστικών νομέων. Σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες, οι κόμβοι στις ακραίες διατομές συνδέθηκαν με σταθερό σημείο στον ουδέτερο άξονα και ορίστηκαν συνθήκες απλής έδρασης.

Στο μοντέλο εφαρμόστηκαν τα φορτία που υπολογίζονται αναλυτικά από τους κανονισμούς. Συγκεκριμένα, επιβλήθηκαν οι πιέσεις τις θάλασσας, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου και οι πιέσεις του φορτίου και του έρματος για τις δύο περιπτώσεις που μελετήθηκαν. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν κάποιες επιπλέον ροπές κάμψης στα άκρα του μοντέλου ώστε να διορθωθούν οι κατανομές των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών που προέκυψαν από τις παραπάνω φορτίσεις και να επιτευχθούν κάποιες επιθυμητές - target τιμές.

Τελικά, από την εντατική κατάσταση που προέκυψε από την επίλυση του προβλήματος εξάχθηκαν οι τιμές των τάσεων Von Mises για τα ελάσματα και των αξονικών τάσεων για τα ενισχυτικά. Έπειτα, ανά περιοχές κατασκευαστικών στοιχείων στο μεσαίο αμπάρι, εντοπίστηκε για κάθε περιοχή η μέγιστη τάση και υπολογίστηκε ο μέγιστος συντελεστής διαρροής ως ο λόγος της μέγιστης τάσης στο υπό μελέτη κατασκευαστικό στοιχείο προς την επιτρεπόμενη τάση διαρροής. Αυτός ο συντελεστής συγκρίθηκε με τον επιτρεπόμενο συντελεστή διαρροής που προδιαγράφεται στους κανονισμούς. Ο λόγος αυτών των δύο μας

δίνει τον συντελεστή ασφαλείας έναντι διαρροής των κατασκευαστικών στοιχείων για τις δύο περιπτώσεις φόρτισης που μελετήθηκαν.

Σχετικά με τα αποτελέσματα, και στις δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις τα περισσότερα κατασκευαστικά στοιχεία εμφανίζουν επαρκή αντοχή έναντι διαρροής. Στην περίπτωση της εναλλάξ φόρτωσης με δυναμική κατάσταση HSM2 εξαίρεση αποτελεί το άνω πλευρικό έλασμα, όπου στο σημείο τομής του κάθετου ελάσματος (vertical strake) με το εγκάρσιο δοκάρι στήριξης του ανοίγματος κύτους (hatchend beam) (Εικόνα 6.48) η τάση έχει τιμή 333.4 MPa, οριακά μεγαλύτερη της επιτρεπόμενης (326 MPa). Ωστόσο, αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι στη συγκεκριμένη περιοχή υπάρχουν μπρακέτα τα οποία δεν μοντελοποιήθηκαν στα πλαίσια της προκαταρκτικής σχεδίασης και τα οποία συμμετέχουν στην παραλαβή των τάσεων. Επιπλέον, στην κατάσταση ερματισμού Heavy Ballast, στις σταθμίδες κοντά στην περιοχή έδρασης της εγκάρσιας φρακτής εντοπίστηκε τάση με τιμή 334.5 MPa, οριακά μεγαλύτερη της επιτρεπόμενης (326 MPa). Ωστόσο, σε εκείνη την περιοχή, το έλασμα έχει στη πραγματικότητα τοπικά μεγαλύτερο πάχος, το οποίο στα πλαίσια της κατασκευαστικής απλοποίησης δε μοντελοποιήθηκε.

Όσον αφορά τις προτάσεις για επόμενες εργασίες, θα είχε ενδιαφέρον να μελετηθούν, σε πρώτη φάση ως έλεγχος αντοχής έναντι διαρροής, όλοι οι συνδυασμοί φόρτισης που προδιαγράφονται στους κανονισμούς CSR. Επιπλέον, για μια ολοκληρωμένη μελέτη αντοχής, πρέπει να εξακριβωθεί και η αντοχή ως προς λυγισμό και κόπωση, όπως αναφέρονται σε αντίστοιχα κεφάλαια στους κανονισμούς. Μάλιστα, για την εξαγωγή πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων θα ήταν χρήσιμο η περιοχή ενδιαφέροντος του μοντέλου να κατασκευασθεί με περισσότερη κατασκευαστική λεπτομέρεια σύμφωνα με τα σχέδια του πλοίου. Τέλος, η ανάλυση θα μπορούσε να γίνει με χρήση κάποιου εξειδικευμένου ναυπηγικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, όπως κάποιο από αυτά που διαθέτουν αρκετοί νηογνώμονες, ώστε να γίνει σύγκριση με ένα πιο γενικό υπολογιστικό πακέτο όπως είναι το ABAQUS.

8 Βιβλιογραφία

1. Beer, Johnston, DeWolf, & Mazurek. (2012). Μηχανική των Υλικών. Τζιόλα.
2. Do Van Doan, Adam Szelezinski, Lech Murawski, & Adam Muc. (2017). Finite Element Method in Modeling of Ship Structures Part 1 - Theoretical Background.
3. IACS. (2019). Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers.
4. Javid Iqbal, & Zhu Shifan. (2018). Modeling and Simulation of Ship Structures Using Finite Element Method.
5. Jorg Rorup, Bartosz Maciolowski, & Ionel Darie. (2016). FE-based strength analysis of ship structures for a more advanced class approval.
6. Κ. Ανυφαντής. (2020). Στατική Ναυπηγικών Κατασκευών (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις). Αθήνα: Ε.Μ.Π.
7. Κ. Μπαλωτή. (2018). Μελέτη Λυγισμού σε πλοίο Bulk Carrier, βάσει των Common Structural Rules, με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Αθήνα.
8. Μ.Σ. Σαμουηλίδης. (2011). Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου. Αθήνα: ΕΜΠ.
9. Μ.Σ. Σαμουηλίδης. (2019). Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων στη Στατική & Δυναμική Ανάλυση Κατασκευών.
10. Π.Α. Καρύδης. (2000). Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου. Αθήνα.
11. Π.Α. Καρύδης. Υπολογιστικές Μέθοδοι και Εφαρμογές σε Λεπτότοιχες Κατασκευές.
12. Φωτόπουλος, Α. (2019). Έλεγχος Αντοχής Μεταλλικής Κατασκευής Bulk Carrier σύμφωνα με τους ισχύοντες Κοινούς Κατασκευαστικούς Κανόνες - CSR 2019. Αθήνα.