



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

«Μελέτη Λυγισμού σε πλοίο Bulk Carrier,
βάσει των Common Structural Rules, με τη
Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων»

Διπλωματική Εργασία

Όνοματεπώνυμο : Κωνσταντίνα Μπαλωτή

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

Εξεταστική Επιτροπή : Γ. Ζαραφωνίτης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Α. Θεοδουλίδης, Επίκ. Καθηγητής Παν.
Δυτικής Αττικής

Ιούλιος 2018

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα ευχαριστήσω όλα τα μέλη της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. που συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα σε αυτήν.

Αρχικά, τον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Ε. Σαμουηλίδη, τον ευχαριστώ για την δυνατότητα να εκπονήσω την διπλωματική εργασία υπό την καθοδήγηση του και την υπομονή με την οποία με συμβούλεψε κατά τη μελέτη και τη συγγραφή. Οι γνώσεις και η συνεργασία του ήταν καθοριστικής σημασίας στο αποτέλεσμα.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, κύριο Γ. Ζαραφωνίτη και κύριο Α. Θεοδουλίδη για τον χρόνο που αφιέρωσαν στην αξιολόγηση και την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, για την ουσιαστική του συνεργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Δ. Γεωργιάδη, υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής που παρείχε σημαντική βοήθεια τόσο σε θεωρητικά όσο και σε πρακτικά θέματα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα, για τη συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση τους σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου και κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Πίνακας Περιεχομένων.....	3
Abstract – Περίληψη.....	5
Εισαγωγή.....	6
1 Θεσμικό Πλαίσιο των Common Structural Rules (CSR).....	8
1.1 Ρόλος του Νηογνώμονα.....	8
1.1.1 Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων – IACS.....	8
1.2 Common Structural Rules (IACS CSR).....	9
1.2.1 Harmonised Common Structural Rules (IACS CSR-H).....	10
2 Βασικές απαιτήσεις των CSR-H.....	11
2.1 Εισαγωγικές έννοιες.....	11
2.2 Φορτίσεις.....	13
2.2.1 Κινήσεις και επιταχύνσεις.....	14
2.2.2 Φορτίσεις του πλοίου ως δοκάρι.....	14
2.2.3 Εξωτερικά φορτία.....	18
2.2.4 Εσωτερικά φορτία.....	19
2.2.5 Καταστάσεις φόρτωσης.....	21
2.3 Αντοχή της γάστρας του πλοίου ως δοκάρι.....	22
2.3.1 Αντοχή έναντι κάμψης.....	22
2.4 Τοπική αντοχή κατασκευής.....	23
2.5 Συνοπτική παρουσίαση ελέγχων.....	26
3 Μελέτη με τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων.....	27
3.1 Cargo hold structural strength analysis.....	27
3.1.1 Μοντέλο.....	27
3.1.2 Συνοριακές συνθήκες.....	28
3.1.3 Φορτίσεις.....	28
4 Μελέτη για αντοχή σε λυγισμό.....	33
4.1 Κριτήρια αντοχής.....	33
4.2 Υπολογισμός αντοχής σε λυγισμό (Buckling Capacity).....	34
4.2.1 Κατάρρευση ως ενισχυμένο έλασμα.....	35
4.2.2 Κατάρρευση απλού ελάσματος.....	37
4.2.3 Κατάρρευση ενισχυτικού.....	43
4.2.4 Κατάρρευση Primary Supporting Member.....	44
4.3 Εξίσωση αντοχής απλών ελασμάτων.....	45
4.4 Παραδοχές για τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	49
4.4.1 Υπολογισμός τάσεων από μοντέλο FEM.....	50
5 Δεδομένα εφαρμογής μελέτης λυγισμού.....	52
5.1 Το πλοίο.....	53
5.2 Η κατάσταση φόρτωσης.....	54
5.3 Dynamic load case.....	55
5.4 Υπολογισμός φορτίσεων.....	55
6 Μοντελοποίηση στο ABAQUS/CAE.....	59
6.1 Δημιουργία μοντέλου.....	59

6.1.1	Γεωμετρία	59
6.1.2	Ιδιότητες υλικού	63
6.1.3	Ενισχυτικά.....	65
6.1.4	Mesh	66
6.2	Φορτίσεις.....	68
6.2.1	Τοπικά φορτία.....	68
6.2.2	Συνοριακές Συνθήκες.....	71
6.2.3	Διορθώσεις	72
6.3	Επίλυση	79
7	Ανάλυση αποτελεσμάτων.....	80
7.1	Περιγραφή Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αποτελεσμάτων.....	82
7.2	Κατάστρωμα	88
7.3	Εξωτερικός Πυθμένας.....	92
7.4	Εσωτερικός πυθμένας.....	97
7.5	Πλευρές.....	103
7.6	Σταθμίδες διπύθμενου	107
8	Συμπεράσματα.....	112
8.1	Προτάσεις για επόμενη εργασία	113
	Βιβλιογραφία	114
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	115
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	121
	GENERAL ARRANGEMENT PLAN	122
	MIDSHIP SECTION	123

Abstract – Περίληψη

This diploma thesis studies the buckling capacity of structural components of Bulk Carriers based on the methodology introduced in the *Common Structural Rules for Oil Tankers and Bulk Carriers 2017*. The study is carried out in the middle cargo hold of a modern Bulk Carrier with a total deadweight tonnage of 61,462 t. An extensive description and commentary of the procedures prescribed by the Regulations is given and is followed by the application of the buckling strength check using the finite elements method. The modelling was carried out as a three-hold compartment and for one sagging dynamic load case and an alternate loading condition, using ABAQUS/CAE software. The response of the structure was the result of the sea pressure on the outer shell of the hull and the weight of structural steel and cargo. In addition, bending moments were applied on both ends of the model, in order to achieve the target shear force at the aft bulkhead of the middle hold and the target maximum bending moment. The analysis of the results was based on Regulation procedures by dividing the construction in simple plate panels and checking the panel buckling capacity using the plate limit state interaction formulae. The analysis revealed that the components under consideration display sufficient buckling capacity.

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά την αντοχή σε λυγισμό, κατασκευαστικών στοιχείων πλοίων τύπου Bulk Carrier, με βάση τη μεθοδολογία που εμπεριέχεται στους *Common Structural Rules for Oil Tankers and Bulk Carriers 2017*. Η μελέτη γίνεται στο μεσαίο κύτος ενός σύγχρονου Bulk Carrier συνολικής χωρητικότητας 61,462 t. Δίνεται μία εκτενής περιγραφή και σχολιασμός των διαδικασιών που προδιαγράφονται από τους Κανονισμούς και στη συνέχεια, γίνεται εφαρμογή τους για έλεγχο λυγισμού με χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων. Η εφαρμογή έγινε σε μοντέλο έκτασης τριών κυτών και για κατάσταση Sagging και εναλλάξ φόρτωση, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ABAQUS/CAE. Η εντατική κατάσταση που επιτεύχθηκε προκύπτει από τις πιέσεις της θάλασσας στο εξωτερικό περίβλημα και το βάρος του φορτίου καθώς και το βάρος της κατασκευής. Ακόμα, προστέθηκαν σταθερές ροπές κάμψης στα άκρα του μοντέλου ώστε να προκύψει η επιθυμητή διατμητική δύναμη στην πρυμναία φρακτή του μεσαίου κύτους και η επιθυμητή μέγιστη ροπή κάμψης. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε βάσει των Κανονισμών, χωρίζοντας την κατασκευή σε απλά panel και ελέγχοντας την αντοχή απλού ελάσματος με χρήση των εξισώσεων αλληλεπίδρασης. Η ανάλυση έδειξε πως τα κατασκευαστικά στοιχεία που ελέγχθηκαν παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή έναντι λυγισμού.

Εισαγωγή

Ο λυγισμός αποτελεί ένα από τα πιο περίπλοκα φαινόμενα της μηχανικής που καταπονούν τη μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου, καθώς και έναν από τους πιο επικίνδυνους τρόπους αστοχίας αφού δεν παρουσιάζει κάποια ένδειξη ή προειδοποίηση πριν την κατάρρευση. Για τον λόγο αυτόν η μελέτη της αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων έναντι λυγισμού κρίνεται απαραίτητη από όλους τους Νηογνώμονες και συχνά, αποτελεί το βασικό κριτήριο για την διαστασιολόγηση όλων των ελασμάτων και ενισχυτικών των σύγχρονων πλοίων. Η μελέτη αυτή γίνεται τόσο με καθαρά αναλυτικές μεθόδους (που δεν μελετώνται εκτενώς εδώ) αλλά και σε συνδυασμό με τη χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων και είναι υποχρεωτική για ολόκληρη τη μεταλλική κατασκευή κάθε νεότευκτου πλοίου που υπάγεται στους εν λόγω Κανονισμούς. Είναι φανερό λοιπόν, ότι το ζήτημα του λυγισμού είναι μείζονος σημασίας τόσο για την πιστοποίηση ενός πλοίου από την κλάση αλλά και για την αξιοπλοΐα του και την ασφάλεια εφ' όρου ζωής του.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει τις απαιτήσεις και την μεθοδολογία της μελέτης αντοχής έναντι λυγισμού, στους κανονισμούς που διέπουν τη σχεδίαση και την κατασκευή των πλοίων τύπου Bulk Carrier, δηλαδή τους *Common Structural Rules for Oil Tankers and Bulk Carriers 2017 (CSR)*. Ακόμα, γίνεται εφαρμογή των Κανονισμών για ένα δεδομένο πλοίο τύπου Bulk Carrier με την χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων, με τελικό στόχο την εκτίμηση της αντοχής σε λυγισμό των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων ενός κύτους.

Κατά την διαδικασία αυτή, σημασία δίνεται στην ρεαλιστική προσομοίωση της κατασκευής με τη χρήση ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων. Όλες οι παράμετροι του μοντέλου και οι φορτίσεις ορίστηκαν σύμφωνα με τις απαιτήσεις και την μεθοδολογία των κανονισμών ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή απόκριση που θα είναι συμβατή με τα αντίστοιχα κριτήρια αντοχής. Έτσι εγγυάται η συμφωνία των παραδοχών στη μοντελοποίηση με τις παραδοχές κατά την δημιουργία των κριτηρίων αντοχής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός πως οι καταστάσεις που προδιαγράφονται από τους Κανονισμούς και απαιτείται να ελεγχθούν δεν ανταποκρίνονται πλήρως σε συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτωσης.

Στη συνέχεια, δίνεται μία σύντομη περιγραφή της δομής της εργασίας:

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται μία σύντομη αναφορά στο πλαίσιο δημιουργίας των CSR και στις απαιτήσεις που επέβαλλαν την δημιουργία τους.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνονται οι βασικές έννοιες που εμφανίζονται στους Κανονισμούς και περιγράφεται η δομή των απαιτήσεων τους. Ορίζονται οι συνδυασμοί των φορτίσεων, των φορτίων, και των καταστάσεων θάλασσας που μελετώνται καθώς και τα κριτήρια με τα οποία καθορίζεται η τοπική αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου και η αντοχή του πλοίου μελετώμενου ως δοκός.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται περιγραφή των απαιτήσεων των Κανονισμών για τις παραμέτρους της ανάλυσης, με βάση τη μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Αυτές οι παράμετροι, περιλαμβάνουν την έκταση του μοντέλου, τους τύπους των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν στη μοντελοποίηση, την ποιότητα της διακριτοποίησης κα. Ακόμα δίνονται λεπτομέρειες για τις οριακές συνθήκες και τις επιβαλλόμενες φορτίσεις. Τέλος, αναφέρονται ποιοι είναι οι έλεγχοι που απαιτούνται να γίνουν με τη χρήση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που περιλαμβάνει εκτός των άλλων και τον έλεγχο λυγισμού, και στη συνέχεια, δίνονται κάποιες ειδικές απαιτήσεις για τη μελέτη λυγισμού.

Στο Κεφάλαιο 4 δίνεται η μεθοδολογία για την ανάλυση του λυγισμού. Συμπεριλαμβάνονται τα κριτήρια αστοχίας της κατασκευής, οι μορφές αστοχίας και ο υπολογισμός την αντοχής σε λυγισμό διάφορων κατασκευαστικών στοιχείων. Ακόμα, γίνεται μία διερεύνηση του κριτηρίου αστοχίας απλού ελάσματος. Τέλος, περιγράφεται η μεθοδολογία των κανονισμών για τη χρησιμοποίηση των

αποτελεσμάτων του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, για τη μελέτη λυγισμού (Stress based reference stresses).

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα δεδομένα του προβλήματος. Δίνονται τα στοιχεία του πλοίου που θα μελετηθεί καθώς και τα στοιχεία που περιγράφουν την κατάσταση φόρτωσης. Επιλέγεται η dynamic load case και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των πιέσεων θάλασσας και φορτίου, αλλά και των Hull girder loads.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία της μοντελοποίησης με βάση τα παραπάνω στο πρόγραμμα Πεπερασμένων Στοιχείων ABAQUS/CAE. Δίνονται οι διαδικασίες για την παραγωγή του μοντέλου, για τον ορισμό των φορτίσεων καθώς και της επαναληπτικής διαδικασίας διόρθωσης τους, των συνοριακών συνθηκών και την υλοποίηση της ανάλυσης.

Στο Κεφάλαιο 7 επιχειρείται η μελέτη της αντοχής σε λυγισμό των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων του μεσαίου κύτους. Αρχικά περιγράφεται η μεθοδολογία ελέγχου για κατάρρευση ως απλό έλασμα με παραδείγματα. Στη συνέχεια, δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης για όλα τα απλά ελάσματα του καταστρώματος, του εσωτερικού και εξωτερικού πυθμένα, των πλευρών και των σταθμίδων του διπύθμενου.

Στο Κεφάλαιο 8 εξάγονται συμπεράσματα από τη μελέτη των κανονισμών, τη μεθοδολογία ανάλυσης λυγισμού και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης αντοχής.

Στο Παράρτημα Α δίνεται ένας συνοπτικός πίνακας των απαιτούμενων ελέγχων των Κανονισμών για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο της Μέσης Τομής ενός Bulk Carrier. Στο Παράρτημα Β δίνονται τα σχέδια Γενικής Διάταξης και Μέσης Τομής του πλοίου βάσει το οποίο έγινε η μελέτη λυγισμού.

1 Θεσμικό Πλαίσιο των Common Structural Rules (CSR)

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει μία περιγραφή του ρόλου των Νηογνώμωνων στην κατασκευή των σύγχρονων πλοίων και μία αναδρομή στην εξέλιξη των κατασκευαστικών κανονισμών για δεξαμενόπλοια (Oil Tankers – OT) και πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (Bulk Carriers - BC).

1.1 Ρόλος του Νηογνώμονα

Οι σύγχρονοι Νηογνώμονες (ή απλούστερα «Κλάσεις») είναι μη-κυβερνητικοί οργανισμοί που παρέχουν τεχνικές υπηρεσίες στον χώρο της ναυτιλίας σε θέματα θαλάσσιας ασφάλειας και αποφυγής περιβαλλοντικής ρύπανσης. Βασική τους αρμοδιότητα είναι η παροχή πιστοποιητικών κλάσης στα πλοία ώστε να βεβαιώνεται η κατασκευαστική τους αρτιότητα καθώς και η αξιοπιστία των βασικών τους συστημάτων που θα εξασφαλίσουν την ασφαλή λειτουργία τους καθ' όλη την διάρκεια της ζωής τους. Για τον σκοπό αυτό οι Νηογνώμονες αναπτύσσουν και εκδίδουν Κανόνες με τους οποίους είναι υποχρεωμένα να συμμορφώνονται τα πλοία που επιθυμούν την αντίστοιχη πιστοποίηση. Η Κλάση παρακολουθεί το πλοίο από το στάδιο της αρχικής μελέτης και κατασκευής, κατά την διάρκεια της ζωής του μέχρι τον παροπλισμό και την διάλυση.

Η ανάπτυξη κανόνων και κανονισμών από τους νηογνώμονες συνήθως βασίζεται στη συλλογή και ανάλυση των εμπειρικών και στατιστικών δεδομένων των διαχειριζόμενων πλοίων. Η εμπειρία συμπληρώνεται από την εκτενή έρευνα που διεξάγεται με σκοπό τη βελτίωση τεχνικών προδιαγραφών για την κατασκευή ασφαλέστερων, οικονομικότερων και καθαρότερων πλοίων. Τέλος, σημαντική πηγή στοιχείων και απαιτήσεων είναι η συνεργασία με άλλους Νηογνώμονες καθώς και άλλους φορείς με συμφέροντα στη ναυτιλία: πλοιοκτήτες, ναυπηγεία, λιμενικές αρχές και κράτη, διεθνείς οργανισμούς κα. Αν και υπάρχουν πολλοί διεθνείς οργανισμοί που προσφέρουν τεχνικές συμβουλευτικές υπηρεσίες στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ο χαρακτηρισμός του Νηογνώμονα εμπεριέχει κάποιες προϋποθέσεις κυρίως ως προς την ανεξαρτησία από άλλους κερδοσκοπικούς οργανισμούς και την αντικειμενικότητα τους.

Σήμερα, η συντριπτική πλειοψηφία των πλοίων κατασκευάζονται και επιθεωρούνται σύμφωνα με τα πρότυπα κάποιου Νηογνώμονα μέσω ενός ευρέος δικτύου επιθεωρητών. Η πιστοποίηση ωστόσο δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση εγγύηση της αξιοπλοΐας του πλοίου, καθώς η Κλάση δεν έχει έλεγχο στο τρόπο λειτουργίας και συντήρησης του πλοίου εκτός από τις προδιαγεγραμμένες επιθεωρήσεις¹. Παρ' όλα αυτά, ο θεσμός του Νηογνώμονα είναι – παραδοσιακά- στενά συνυφασμένος με τη ναυτιλία ως ένα ανεξάρτητο και αυτορρυθμιζόμενο σώμα διασφάλισης ποιότητας και καινοτομίας.

1.1.1 Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων – IACS

Η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (International Association of Classification Societies- IACS) ιδρύθηκε το 1968 μετά από συστάσεις του συνεδρίου για την Διεθνή Σύμβαση της Γραμμής Φόρτωσης το 1930 και πολλές προσπάθειες συνεργασίας από κάποιους Νηογνώμονες με σκοπό την ανάπτυξη πιο συμβατών κανονισμών για τη σχεδίαση και κατασκευή των πλοίων.

Σήμερα εδρεύει στο Λονδίνο και αποτελείται από 12 μέλη: American Bureau of Shipping, Korean Register of Shipping, Bureau Veritas, Lloyd's Register, China Classification Society, Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK), Croatian Register of Shipping, Polish Register of Shipping, DNV-GL AS, RINA, Indian Register of Shipping Russian Maritime Register of Shipping. Ο IACS κατέχει συμβουλευτικό ρόλο στον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organisation – IMO) και παρέχει την τεχνική του

¹ (I.A.C.S., "Classification societies - Their key role", 2015)

εξειδίκευση στις διαδικασίες θέσπισης των κανονισμών αλλά και στην επιβολή τους μέσω της συνεργασίας των Κλάσεων με τις κρατικές Σημαίες.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα πλοία παραδοσιακά σχεδιάζονται και διαστασιολογούνται με βάση τους κανόνες και κανονισμούς των Νηογνώμωνων, οι οποίοι είναι προϊόν επιστήμης, μηχανικής και εκτενούς εμπειρίας. Όταν διαπιστώνονται αδυναμίες ή ελλιπής αντοχή σε κάποιο πλοίο ή κλάση πλοίων οι κανόνες προσαρμόζονται σύμφωνα με τα νέα δεδομένα. Ακόμα, οι κανόνες και οι κανονισμοί εξελίσσονται ώστε να συμβαδίζουν με τις εξελίξεις της τεχνολογίας και, γενικά, των πρακτικών της βιομηχανίας.

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.

1.2 Common Structural Rules (IACS CSR)

Ο ανταγωνισμός μεταξύ των Νηογνώμωνων ήταν και παραμένει κινητήριο 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 αυτό έπρεπε να υιοθετηθούν κοινά πρότυπα στη ναυπήγηση πλοίων².

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 90m και όλα τα Double Hull Oil Tankers με μήκος μεγαλύτερο των 150m. 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. Ενδεικτικά, μόνο οι UR-S1, UR-S3 (μόνο OT) UR-S8, UR-S9, UR-S10 (μόνο OT), UR-S15, UR-S16, UR-S19, UR-S22, UR-S23, UR-S30, UR-S31 ισχύουν ακόμα για Bulk Carrier και Oil Tanker.

² (Hughes, 2010)

1.2.1 Harmonised Common Structural Rules (IACS CSR-H)

Ήδη από το 2006, μετά την εισαγωγή των CSR-BC και CSR-OT, ο IACS στόχευσε στην εναρμόνιση των δύο σετ κανονισμών ώστε η σχεδίαση να γίνεται επί κοινών αρχών, μεθοδολογιών και κριτηρίων και για τους δύο τύπους πλοίων. Έτσι ξεκίνησε η ανάπτυξη των Harmonised Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers (CSR-H). Ένας βασικός στόχος του έργου, ήταν η επίτευξη πλήρους συμμόρφωσης των νέων CSR-H με τα Goal Based Standards (GBS) του IMO. Κατά τα άλλα οι νέοι CSR-H προτιμήθηκε να είναι κατά το δυνατόν ισάξιοι με τους παλαιότερους.

Ουσιαστικά, η ιδέα της ανάπτυξης των GBS είχε να κάνει με την επιθυμία του IMO να έχει μεγαλύτερη επιρροή στον τρόπο που διαμορφώνονται οι κανονισμοί και τα πρότυπα σύμφωνα με τα οποία κατασκευάζονται τα νεότευκτα πλοία. Ο IMO δεσμεύθηκε να αναπτύξει πρότυπα που θα ευνοούν την καινοτομία και θα διασφαλίζουν ότι πλοία με την ενδεικνυόμενη συντήρηση θα παραμένουν ασφαλή καθ' όλη την διάρκεια της ζωής τους. Στα τέλη του 2002 η Maritime Safety Committee (MSC) (Horn, 2013) του IMO ξεκίνησε εργασίες για τη σύσταση των GBS που θα αποτελούσαν, πρακτικά, «κανονισμούς για τους κανονισμούς» και θα περιλάμβαναν τις βασικές απαιτήσεις για ένα ασφαλές και καθαρό πλοίο και τους τρόπους με τους οποίους θα γινόταν η εξακρίβωση της συμμόρφωσης των κανονισμών όπως οι CSR-H.³

³ (Horn, 2013)

2 Βασικές απαιτήσεις των CSR-H

Οι Common Structural Rules αποτελούν ένα ιδιαίτερο πλαίσιο κανονισμών σε σύγκριση με προγενέστερους και ένας από τους λόγους είναι η ενιαία μεθοδολογία για τη μελέτη των διάφορων φαινομένων που παρουσιάζονται στη μεταλλική κατασκευή ενός πλοίου. Σε κάθε περίπτωση, φορτίσεις υπολογίζονται από τον συνδυασμό της κατάστασης φόρτωσης και της επίδρασης του θαλάσσιου περιβάλλοντος και η απόκριση της κατασκευής από τις μηχανικές της ιδιότητες. Αυτή η ενιαία μεθοδολογία, καθιστά αδύνατη την αξιοποίηση κάποιου μεμονωμένου κριτηρίου ή εξέτασης χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί μια εκτενής ανάλυση όλων των σχετικών παραμέτρων.

Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, συνεπώς, έγινε εκτενής χρήση των κανονισμών, και όχι μόνο των σχετικών με το λυγισμό κεφαλαίων. Για την επεξήγηση της μεθοδολογίας κρίθηκε απαραίτητη η ανάλυση των CSR, δίνοντας τις βασικές έννοιες που διέπουν όλη τη μετέπειτα μελέτη.

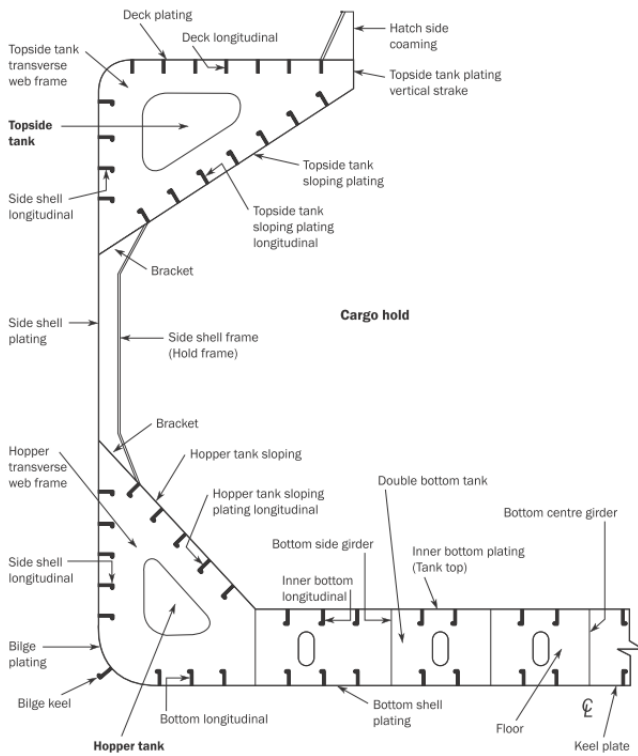
Η δομή των κατασκευαστικών κανόνων δίνεται περιληπτικά στον παρακάτω πίνακα. Στη συνέχεια, θα γίνει περιγραφή των επί μέρους κεφαλαίων που αξιοποιήθηκαν για την παρούσα μελέτη.

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

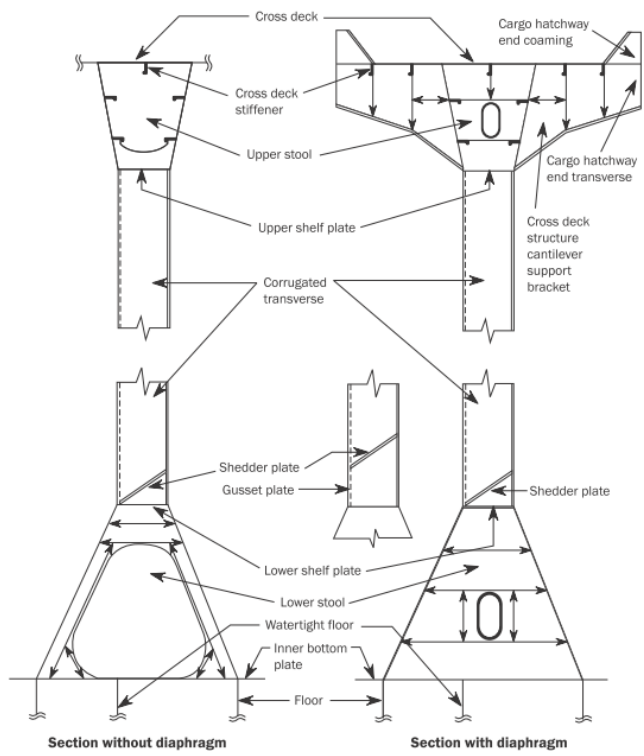
Πίνακας 1 Δομή CSR-H

2.1 Εισαγωγικές έννοιες

Το 1^ο κεφάλαιο [Pt. 1, Ch. 1] ορίζει το εύρος εφαρμογής των κανονισμών, τις γενικές κατασκευαστικές αρχές που προϋποθέτουν και τις μεθόδους πιστοποίησης της συμμόρφωσης με τις επόμενες διατάξεις. Εδώ δίνονται οι ορισμοί των κύριων μεγεθών και εννοιών που θα χρησιμοποιηθούν και σε αυτήν την εργασία καθώς και της βασικής ορολογίας όπως φαίνεται στα σχήματα που ακολουθούν:



Σχήμα 1 Κατασκευαστική ορολογία εγκάρσιας διατομής BC⁴



Σχήμα 2 Κατασκευαστική ορολογία εγκάρσιας φρακτής BC⁵

Στο 3^ο κεφάλαιο [Pt. 1, Ch. 3], δίνονται κάποιες βασικές σχεδιαστικές αρχές οι οποίες σχετίζονται τόσο με την ποιότητα όσο και με την πιστότητα της κατασκευής ώστε να εξασφαλιστεί η επαρκής αντοχή. Τα βασικά χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής του πλοίου (ναυπηγικοί χάλυβες), καθώς και το όριο διαρροής R_{eH} και ο συντελεστής υλικού k , δίνονται στον επόμενο πίνακα .

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

Πίνακας 2 Συντελεστής υλικού, k [Ch. 3, Sec. 1, Table 2]

Στη συνέχεια, αναλύεται η γενική προσέγγιση που ακολουθείται καθ' όλη την εφαρμογή των CSR για τα πάχη των κατασκευαστικών στοιχείων. Από τις σχέσεις των κανονισμών, που προκύπτουν από τη μηχανική, υπολογίζεται ένα ελάχιστο, «καθαρό» πάχος, t_{req} (required net scantling) κάποιου στοιχείου. Το πάχος αυτό εξαρτάται από τα φορτία που καταπονούν το στοιχείο. Για να προστεθεί στην κατασκευή ένα περιθώριο διάβρωσης, το καθαρό πάχος αυξάνεται κατά το απαιτούμενο πάχος διάβρωσης, t_c (corrosion addition). Το πραγματικό πάχος του στοιχείου μετά την κατασκευή, t_{as_built} , υπολογίζεται από τη σχέση $t_{as_built} = t_{req} + t_c + t_{vol_add}$ (προαιρετική αύξηση). Σημαντικό επίσης κρίνεται το κομμάτι του κεφαλαίου που ορίζει το προστιθέμενο πάχος έναντι διάβρωσης, ως συνάρτηση του διαβρωτικού περιβάλλοντος στο οποίο εκτίθεται το εκάστοτε κατασκευαστικό στοιχείο.

⁴ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, 3.7]

⁵ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 3, 3.7]

Στη συνέχεια, του Κεφαλαίου 3 γίνεται αναφορά στη μεθοδολογία ελέγχου της αντοχής της κατασκευής περιγράφοντας τους τρόπους πιθανής αστοχίας ενός στοιχείου και τα κριτήρια ελέγχου στις τις οριακές καταστάσεις για τις οποίες υπολογίζονται οι εκάστοτε φορτίσεις.

2.2 Φορτίσεις

Στο κεφάλαιο 4 [Pt. 1, Ch. 4] περιγράφονται οι μέθοδοι υπολογισμού των φορτίσεων που επιδρούν τόσο στο πλοίο ως δοκός αλλά και τοπικές φορτίσεις σε ελάσματα. Γενικά, η απαίτηση αντοχής ενός στοιχείου προκύπτει από τη φόρτιση κατά το χειρότερο συνδυασμό κατάστασης φόρτωσης του πλοίου και κατάστασης θάλασσας. Οι φορτίσεις αυτές υπολογίζονται για κάθε περίπτωση δυναμικής φόρτισης (Dynamic Load Case) οι οποίες προκαλούν διαφορετικό συνδυασμό καταπόνησης σε κάθε έλασμα και στοιχείο της κατασκευής ανάλογα με την κυρίαρχη επίδραση του θαλάσσιου περιβάλλοντος. Οι περιπτώσεις δυναμικής φόρτισης βασίζονται στην έννοια του Equivalent Design Wave (Ισοδύναμο Σχεδιαστικό Κύμα - EDW) κατά την οποία εφαρμόζεται ένα σύνολο δυναμικών φορτίων στο πλοίο έτσι ώστε η κυρίαρχη απόκριση να είναι ισοδύναμη με την απαιτούμενη τιμή μακροπρόθεσμης απόκρισης. Στον επόμενο πίνακα ορίζονται οι Dynamic Load Cases που χρησιμοποιούνται στους CSR-H μαζί με τα αντίστοιχα EDWs και την κυρίαρχη επίδραση στην κατασκευή. Για κάθε Dynamic Load Case, επίσης δίνονται οι συντελεστές συνδυασμού των φορτίσεων. Οι *συντελεστές συνδυασμού φόρτισης - load combination factors C_{xx}* λαμβάνουν τιμές στο διάστημα $[-1,1]$ και περιγράφουν τη συνεισφορά κάθε φορτίου στην καταπόνηση της γάστρας λόγω της επίδραση της κατάστασης της θάλασσας.

Load Case	Heading	Effect	VWBM	VWSF	HWBM
HSM-1	Head	Max. bending moment	Sagging	Negative aft - Positive fore	-
HSM-2			Hogging	Positive aft - Negative fore	-
HSA-1	Head	Max. vertical acceleration	Sagging	Negative aft - Positive fore	-
HSA-2			Hogging	Positive aft - Negative fore	-
FSM-1	Following	Max. bending moment	Sagging	Negative aft - Positive fore	-
FSM-2			Hogging	Positive aft - Negative fore	-
BSR-1P	Beam	Max. roll	Sagging	Negative aft - Positive fore	Stbd tensile
BSR-2P			Hogging	Positive aft - Negative fore	Port tensile
BSR-1S			Sagging	Negative aft - Positive fore	Port tensile
BSR-2S			Hogging	Positive aft - Negative fore	Stbd tensile
BSP-1P	Beam	Max. pressure at waterline	Sagging	Negative aft - Positive fore	Stbd tensile
BSP-2P			Hogging	Positive aft - Negative fore	Port tensile
BSP-1S			Sagging	Negative aft - Positive fore	Port tensile
BSP-2S			Hogging	Positive aft - Negative fore	Stbd tensile
OST-1P	Oblique	Max. torsional moment	Sagging	Negative aft - Positive fore	Port tensile
OST-2P			Hogging	Positive aft - Negative fore	Stbd tensile
OST-1S			Sagging	Negative aft - Positive fore	Stbd tensile
OST-2S			Hogging	Positive aft - Negative fore	Port tensile
OSA-1P	Oblique	Max. pitch acceleration	Sagging	Negative aft - Positive fore	Stbd tensile
OSA-2P			Hogging	Positive aft - Negative fore	Port tensile
OSA-1S			Sagging	Negative aft - Positive fore	Port tensile
OSA-2S			Hogging	Positive aft - Negative fore	Stbd tensile

Πίνακας 3 *Dynamic Load Cases* και η επίδραση τους επί των κινήσεων και φορτίσεων του πλοίου⁶

2.2.1 Κινήσεις και επιταχύνσεις

Για τον υπολογισμό των αδρανειακών φορτίσεων του πλοίου, είναι απαραίτητη η πρόβλεψη της συνολικής επιτάχυνσης της κατασκευής και επί πλέον των τοπικών επιταχύνσεων, a_x, a_y, a_z , σε κάθε θέση x, y, z .

Η διαδικασία αυτή περιέχει τον υπολογισμό των 5 επιταχύνσεων του κέντρου βάρους του πλοίου ($a_{surge}, a_{sway}, a_{heave}, a_{roll}, a_{pitch}$). Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι τοπικές επιταχύνσεις στη θέση που μελετάται με τη χρήση κάποιων *συντελεστών συνδυασμού φόρτισης - load combination factors*. Οι σχέσεις δίνονται παρακάτω:⁷

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

$$a_y = C_{YG} g \sin\theta + C_{YS} a_{sway} - C_{YR} a_{roll}(z - R)$$

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

Οι επιταχύνσεις θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα ώστε να υπολογιστούν οι τοπικές δυναμικές καταπονήσεις της γάστρας από το ξηρό φορτίο στην επιλεγμένη κατάσταση δυναμικής φόρτισης.

2.2.2 Φορτίσεις του πλοίου ως δοκάρη

Κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό

Για τον υπολογισμό της απαιτούμενης αντοχής της μέσης τομής του πλοίου οι κανονισμοί προδιαγράφουν την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό και κυματισμό. Η επιτρεπόμενη ροπή κάμψης της γάστρας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τιμή αυτή αλλά και από οποιαδήποτε άλλη προκύψει από τις καταστάσεις φόρτωσης που θα μελετηθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης του πλοίου.

Η ελάχιστη κατακόρυφη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό (SWBM) υπολογίζεται όπως παρακάτω:⁸

Σε κατάσταση hogging:

$$M_{sw-h-min} = f_{sw}(1.71 C_w L^2 B (C_B + 0.7)10^{-3} - M_{wv-h-mid})$$

Σε κατάσταση sagging:

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw}(1.71 C_w L^2 B (C_B + 0.7)10^{-3} - M_{wv-s-mid})$$

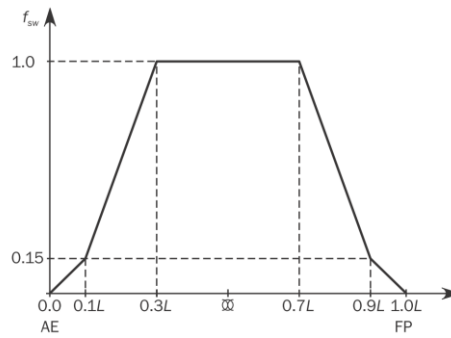
Όπου:

f_{sw} : Distribution factor, όπως στο παρακάτω σχήμα

⁶ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 4, Sec. 2, 2.1.1]

⁷ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 4, Sec. 3, 3.2]

⁸ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 2.1.1]



Σχήμα 3 Distribution factor f_{sw}

C_w : Wave coefficient [m]

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

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

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

L : Rule length [m] όπως ορίζεται στο [Pt. 1, Ch. 1, Sec. 4, 3.1.1]

$M_{wv-h-mid}$

$M_{wv-s-mid}$: Ροπή κάμψης λόγω κυματισμού (VWBM) υπολογισμένη από τη σχέση [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 3.1.1] για strength assessment και την περιοχή περί τον μέσο νομέα.

Κατακόρυφη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό

Η επιτρεπόμενη κατακόρυφη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό (SWSF) σε κάθε διαμήκη θέση, για bulk carrier θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από όλες τις προκύπτουσες από τις καταστάσεις φόρτωσης που θα μελετηθούν κατά τη διάρκεια της σχεδίασης του πλοίου.⁹

Κατακόρυφη ροπή κάμψης σε κυματισμό

Η κατακόρυφη ροπή κάμψης λόγω κυματισμού που αναμένεται να συναντήσει το πλοίο και που προδιαγράφουν οι κανονισμοί για τη μελέτη της αντοχής υπολογίζεται ως εξής:¹⁰

Σε κατάσταση hogging:

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

Σε κατάσταση sagging:

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

⁹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 2.3.3]

¹⁰ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 3.1.1]

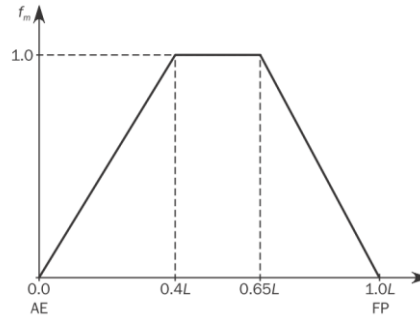
Όπου:

f_{nl-vh} : Coefficient considering nonlinear effects applied to hogging
 $f_{nl-vh} = 1.0$

f_{nl-vs} : Coefficient considering nonlinear effects applied to sagging
 $f_{nl-vs} = 0.58 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B} \right)$ for strength assessment
 $f_{nl-vs} = 1.0$ for fatigue assessment

f_p :
 $f_p = 1.0$ for extreme sea loads design load scenario.
 $f_p = 0.8$ for the ballast water exchange design load scenario.
 $f_p = 0.8$ for the accidental flooded design load scenario at sea.
 $f_p = 0.4$ for the harbour/sheltered water design load scenario
 $f_p = 0.9 \left[0.27 - \left(6 + 4 \frac{T_{LC}}{T_{SC}} \right) L 10^{-5} \right]$ for fatigue assessment

f_m : Distribution factor, όπως στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 4 Distribution factor f_m

Κατακόρυφη διατμητική δύναμη σε κυματισμό

Η κατακόρυφη διατμητική δύναμη λόγω κυματισμών (VWSF) υπολογίζεται από τις σχέσεις: ¹¹

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

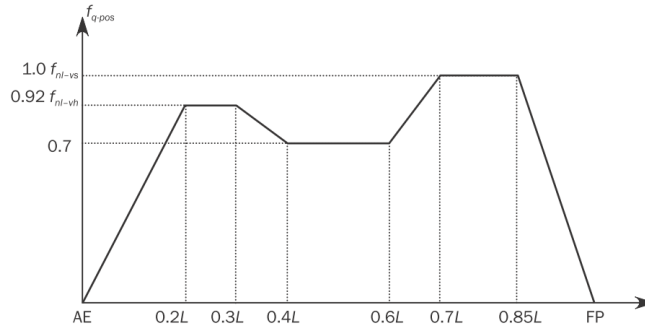
$$Q_{wv-neg} = -0.52 f_{q-neg} f_p C_w L B C_B$$

Όπου:

f_p :
 $f_p = 1.0$ for extreme sea loads design load scenario.
 $f_p = 0.8$ for the ballast water exchange design load scenario.
 $f_p = 0.8$ for the accidental flooded design load scenario at sea.
 $f_p = 0.4$ for the harbour/sheltered water design load scenario
 $f_p = 0.9 \left[0.27 - \left(17 - 8 \frac{T_{LC}}{T_{SC}} \right) L 10^{-5} \right]$ for fatigue assessment

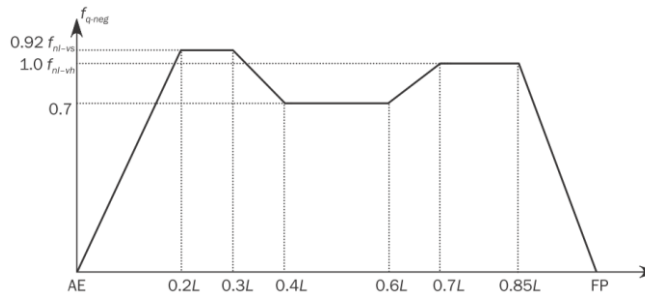
f_{q-pos} : Distribution factor, όπως στο παρακάτω σχήμα

¹¹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
 [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 3.2.1]



Σχήμα 5 Distribution factor f_{q-pos}

f_{q-neg} : Distribution factor, όπως στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 6 Distribution factor f_{q-neg}

Οριζόντια ροπή κάμψης σε κυματισμό

Η οριζόντια ροπή κάμψης σε κυματισμό για κάθε διαμήκη θέση υπολογίζεται ως εξής: ¹²

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

Όπου:

f_{nlh} : Coefficient considering nonlinear effects applied
 $f_{nlh} = 0.9$ for strength assessment
 $f_{nlh} = 1.0$ for fatigue assessment

f_p :
 $f_p = 1.0$ for extreme sea loads design load scenario.
 $f_p = 0.8$ for the ballast water exchange design load scenario.
 $f_p = 0.8$ for the accidental flooded design load scenario at sea.
 $f_p = 0.4$ for the harbour/sheltered water design load scenario
 $f_p = 0.9 \left[\left(0.2 + 0.04 \frac{T_{LC}}{T_{SC}} \right) + \left(11 - 8 \frac{T_{LC}}{T_{SC}} \right) L 10^{-5} \right]$ for fatigue assessment

¹² (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 3.3.1]

Στρεπτική ροπή σε κυματισμό

Η στρεπτική ροπή σε κυματισμό σε κάθε διαμήκη θέση σε σχέση με τη βασική γραμμή αναφοράς του πλοίου υπολογίζεται με τον παρακάτω τρόπο: ¹³

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

Όπου:

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

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

f_{t1} : Distribution factor

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

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

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

f_{t2} : Distribution factor

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

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

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

f_p :

$f_p = 1.0$ for extreme sea loads design load scenario.

$f_p = 0.8$ for the ballast water exchange design load scenario.

$f_p = 0.8$ for the accidental flooded design load scenario at sea.

$f_p = 0.4$ for the harbour/sheltered water design load scenario

$f_p = 0.9 [0.2 + (5 \frac{T_{LC}}{T_{SC}} - 4.25) b 10^{-4}]$ for fatigue assessment

Φορτίσεις για τις Dynamic Load Cases

Για τον υπολογισμό της φόρτισης σε κάθε διαφορετική dynamic load case γίνεται προσαρμογή της τιμής της ροπής κάμψη ή της διαμητικής δύναμης που υπολογίστηκε προηγουμένως με τη χρήση των συντελεστών συνδυασμού φόρτισης - load combination factor και του συντελεστή διόρθωσης - heading correction factor (f_β , που παίρνει την τιμή 1.05 για προσπίπτοντες κυματισμούς).¹⁴

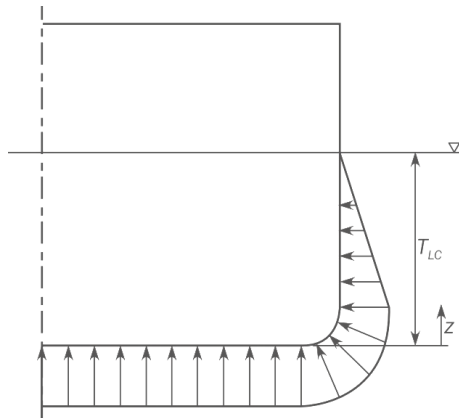
2.2.3 Εξωτερικά φορτία

Τα εξωτερικά φορτία συνίστανται κυρίως από τις υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις στο εξωτερικό περίβλημα της γάστρας του πλοίου αλλά και στις υπερκατασκευές.

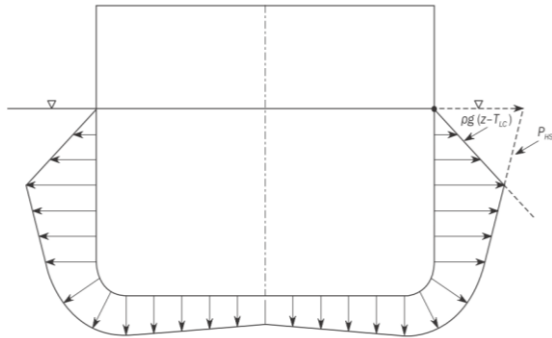
Στο εξωτερικό περίβλημα ασκείται μία σταθερή υδροστατική πίεση εξαρτώμενη από το βύθισμα του πλοίου με την παρακάτω κατανομή:

¹³ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 4, 3.4.1]

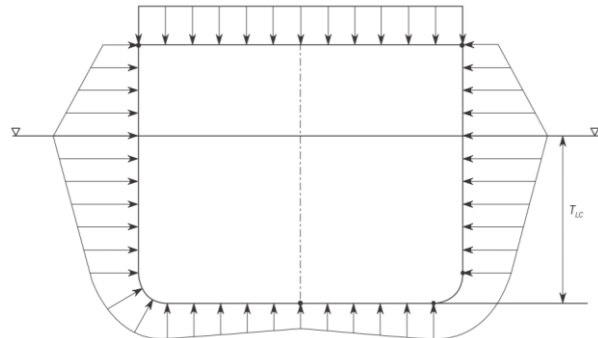
¹⁴ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4]

Σχήμα 7 Κατανομή υδροστατικής πίεσης στη γάστρα¹⁵

Η κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων που προστίθεται αλγεβρικά στην υδροστατική εξαρτάται από τις dynamic load cases που μελετώνται και συγκεκριμένα από τη γωνία πρόσπτωσης του κυματισμού στο πλοίο και από το αν αυτό βρίσκεται στην κορυφή ή στην κοιλάδα του EDW. Παράδειγμα της κατανομής υδροδυναμικής πίεσης για μετωπικό κυματισμό φαίνεται στη συνέχεια:



Σχήμα 8 Κατανομή υδροδυναμικής πίεσης σε μετωπικό κυματισμό και sagging

Σχήμα 9 Κατανομή υδροδυναμικής πίεσης σε μετωπικό κυματισμό και hogging¹⁶

Τέλος, ενδιαφέρον παρουσιάζει και ο τρόπος υπολογισμού των πιέσεων της θάλασσας στα εκτεθειμένα καταστρώματα (όπως το κύριο κατάστρωμα) καθώς και στα καλύμματα των κυτών. Ο υπολογισμός γίνεται και πάλι βάσει της dynamic load case αλλά και του ύψους της κατασκευής.

2.2.4 Εσωτερικά φορτία

Τα εσωτερικά φορτία που καταπονούν την κατασκευή πρόκειται για τις πιέσεις που ασκεί το στερεό ή υγρό φορτίο (ή θαλάσσιο έρμα) τόσο στατικά όσο και σε εξάρτηση και από την δυναμική κατάσταση που μελετάται.

Πιέσεις υγρού φορτίου

Η υδροστατική πίεση του υγρού φορτίου εξαρτάται κυρίως από την πλήρωση και την κατασκευή της εκάστοτε δεξαμενής στην οποία ανήκει το στοιχείο που αναλύεται. Η γενική μορφή της σχέσης υπολογισμού είναι:

¹⁵ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 5, 1.2.1 Figure 1]

¹⁶ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 5, 1.3.2 Figure 3 & Figure 3]

$$P_{ls} = f_{cd} \rho_L g (z_{top} - z) + P_{PV} \quad \text{για δεξαμενές υγρού φορτίου}$$

$$P_{ls} = \rho_L g (z_{top} - z + 0.5 h_{air}) \quad \text{για τις υπόλοιπες δεξαμενές}^{17}$$

Όπου:

f_{cd}	: Συντελεστής συνδυασμένης πιθανότητας πυκνότητας φορτίου και κατάστασης θάλασσας. Ο f_{cd} λαμβάνει τιμές $f_{cd} = 0.88$ για υγρό φορτίο με πυκνότητα $\rho \leq 1.025 \text{ t/m}^3$ αποδίδοντας έτσι πίεση που αντιστοιχεί σε φορτίο πυκνότητας 0.9 t/m^3 (αφού $\rho_L \geq 1.025 \text{ t/m}^3$) το οποίο είναι και το σύννηθες για ένα πετρελαιοφόρο πλοίο. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις η τιμή του είναι $f_{cd} = 1.0$. ¹⁸
ρ_L	: Πυκνότητα του υγρού φορτίου αλλά όχι μικρότερη από 1.025 t/m^3
z_{top}	: Η κατακόρυφη θέση του υψηλότερου σημείου της δεξαμενής
z	: Η κατακόρυφη θέση του στοιχείου που εξετάζεται
P_{PV}	: Η πίεση της ασφαλιστικής βαλβίδας
h_{air}	: Το ύψος του αγωγού εξαερισμού πάνω από την δεξαμενή

Η υδροδυναμική συνιστώσα της πίεσης υγρού φορτίου εξαρτάται από την επιτάχυνση που έχει υπολογιστεί για το σημείο που εξετάζεται σε κάθε dynamic load case.¹⁹

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

Όπως φαίνεται εδώ, η πίεση υπολογίζεται συναρτήσει ενός σημείου αναφοράς (x_0, y_0, z_0) το οποίο πρόκειται ουσιαστικά για το σημείο της ελεγχόμενης δεξαμενής που κατέχει τη θέση μέγιστης δυναμικής ενέργειας κατά την διάρκεια της περιοδικής κίνησης του πλοίου, η οποία προσδιορίζεται από τα dynamic load cases.

Πιέσεις ξηρού φορτίου

Οι πιέσεις του ξηρού φορτίου έχουν επίσης μία στατική και μία δυναμική συνιστώσα καταπόνησης με την διαφορά ότι θεωρούνται πάντα μη αρνητικές, δηλαδή ασκούν πίεση προς το έλασμα, κάμπτοντας το στην εξωτερική επιφάνεια του κύτους. Επίσης η πίεση που ασκεί το ξηρό φορτίο εξαρτάται και από τη γωνία που σχηματίζει το εκάστοτε έλασμα με την οριζόντια διεύθυνση. Η σχέση που δίνει τη στατική και δυναμική πίεση βρίσκεται παρακάτω:

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

¹⁷ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)

[Pt. 1, Ch. 4, Sec. 6, 1.2.1]

¹⁸ (I.A.C.S., CSR Technical Backround Documents, 2016)

[Pt. 1, Ch. 4, Sec. 6]

¹⁹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)

[Pt. 1, Ch. 4, Sec. 6, 1.3.1]

$$P_{bd} = f_{\beta} \rho_c [0.25 a_x (x_G - x) + 0.25 a_y (y_G - y) + f_{dc} K_c a_z (z_c - z)]^{20}$$

Όπου:

ρ_c : Πυκνότητα του ξηρού φορτίου σε [t/m³] αλλά όχι μικρότερο του 1.0 [t/m³]

K_c : Για τα στοιχεία: inner bottom, hopper tank, transverse and longitudinal bulkheads, lower stool, vertical upper stool, inner side and side shell:

$$K_c = \cos^2 \alpha + (1 - \sin \Psi) \sin^2 \alpha$$

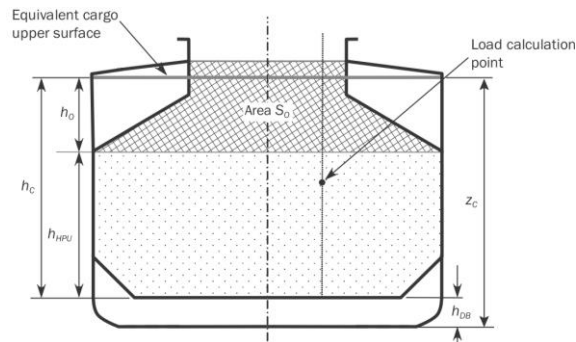
Για τα στοιχεία: topside tank, main deck, and sloped upper stool

$$K_c = 0$$

Όπου α η γωνία του ελάσματος με το οριζόντιο επίπεδο

z_c : $z_c = h_{DB} + h_c$ όπου h_c ορίζεται ως εξής:

$$h_c = h_{HPU} + h_0 \quad h_0 = \frac{SA}{BH} \quad SA = S_0 + \frac{V_{HC}}{l_H}$$



Σχήμα 10 Στοιχεία υπολογισμού πίεσης ξηρού φορτίου²²

x_G, y_G, z_G : Συντεταγμένες κέντρου βάρους φορτίου στο κύτος που μελετάται

f_{dc} : Συντελεστής ξηρού φορτίου
 $f_{dc} = 1.0$ για μελέτη αντοχής
 $f_{dc} = 0.5$ για μελέτη κόπωσης

2.2.5 Καταστάσεις φόρτωσης

Στη συνέχεια, του κεφαλαίου, γίνεται αναφορά στις καταστάσεις φόρτωσης για τις οποίες πρέπει να γίνει όλη η ανάλυση που προδιαγράφεται στους Κανονισμούς. Δίνεται ένας αριθμός καταστάσεων φόρτωσης οι οποίες απαιτείται να μελετηθούν από άποψη αντοχής και αυτές συμπληρώνονται με όλες τις καταστάσεις φόρτωσης που υπάρχουν στο loading manual του πλοίου και προκύπτουν από τις απαιτήσεις λειτουργίας του. Ακόμα δίνονται πίνακες με έναν αριθμό πρόσθετων καταστάσεων φόρτωσης για κάθε τύπο πλοίου που πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη της αντοχής με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

²⁰ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
 [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 6, 2.4.2 & 2.4.3]

²¹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
 [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 6, 2.3.1, Figure 2]

2.3 Αντοχή της γάστρας του πλοίου ως δοκάρη

Στο κεφάλαιο 5 [Pt. 1 Ch. 5] περιγράφονται οι τρόποι εξακρίβωσης της αντοχής του πλοίου μελετώμενου ως λεπτότοιχο δοκάρη. Στα επόμενα κεφάλαια γίνεται διαχωρισμός των «τύπων αντοχής» της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου όπως θα φανεί παρακάτω.

2.3.1 Αντοχή έναντι κάμψης

Αυτός ο τύπος αστοχίας της κατασκευής περιλαμβάνει την οριακή υπέρβαση της επιτρεπόμενης τάσης σε κάποιο σημείο (μακριά από τον ουδέτερο άξονα της διατομής), γεγονός που συνεπάγεται την αρχή της πλαστικοποίησης. Το κριτήριο της μελέτης της αντοχής έναντι τοπικής διαρροής είναι να εξακριβωθεί κατά πόσο η υπό σχεδίαση μέση τομή μπορεί να φέρει με ασφάλεια τις φορτίσεις που υπολογίστηκαν προηγουμένως (καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις) χωρίς να επέλθει διαρροή υλικού.

Για κάθε σημείο της κατασκευής (με πιο κρίσιμα αυτά του κυρίου καταστρώματος και του πυθμένα) θα πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση για την τάση, σ_L , που του ασκείται:

$$\sigma_L \leq \sigma_{perm}$$

Όπου:

σ_L : Ορθή τάση που ασκείται σε σημείο της κατασκευής και δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

Operation	Normal stress, σ_L		
	At any point located below $Z_{\nu D}$	At bottom ⁽⁴⁾	At deck ⁽⁴⁾
Seagoing	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wy}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wy}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wy}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
Harbour/sheltered water	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
Flooded condition at sea for bulk carriers having a length L of 150 m or above	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wy}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wy}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wy}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
(4)	The σ_L values at bottom and deck, correspond to the application of formula given for any point, calculated at equivalent deck line and at baseline.		

Πίνακας 4 Ορθή τάση λόγω κάμψης ²²

σ_{perm} : Επιτρεπόμενη ορθή τάση που εξαρτάται από το υλικό και την διαμήκη θέση του εξεταζόμενου στοιχείου. Δίνεται από τον πίνακα:

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

Πίνακας 5 Επιτρεπόμενη ορθή τάση κατά το μήκος του πλοίου ²³

²² (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 5, Sec. 1, 2.2.2, Table 2]

²³ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 5, Sec. 1, 2.2.1, Table 1]

Για τον υπολογισμό της αντοχής της μέσης τομής σε διάτμηση υπολογίζεται μία ελάχιστη απαίτηση αντοχής ώστε η διατμητική τάση να παραμένει μικρότερη από την επιτρεπόμενη σε κάθε στοιχείο της διατομής. Αυτό γίνεται υπολογίζοντας τον συντελεστή διατμητική ροής για κάθε στοιχείο και εντοπίζοντας το πιο αδύναμο σημείο της κατασκευής (μικρό πάχος-μεγάλος συντελεστής διατμητικής ροής) και λαμβάνοντας την τιμή Q_R που θα προκαλέσει διαρροή στο σημείο αυτό. Έτσι υπάρχει πλέον ένα κριτήριο αντοχής σε διάτμηση:

$$|Q_{sw}| \leq Q_R - |Q_{wv}|$$

Όπου:

Q_R : Ελάχιστη απαιτούμενη αντοχή σε διάτμηση της μέσης τομής

$$Q_R = \min \left(\frac{\tau_{i-perm} \cdot t_{i-n50}}{q_{vi}} \cdot 10^{-3} \right)$$

2.4 Τοπική αντοχή κατασκευής

Σημαντικό επίσης για την κατανόηση, είναι και ο τρόπος που μελετάται η τοπική αντοχή κάθε ελάσματος ή ενισχυτικού έναντι διαρροής, προδιαγράφοντας το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος με τις παρακάτω μεθόδους. Αρχικά δίνονται πίνακες ελάχιστου πάχους συναρτήσει του τύπου του κατασκευαστικού στοιχείου και των κυρίων διαστάσεων του πλοίου. Στη συνέχεια, γίνεται έλεγχος έναντι διαρροής.

Σε κάθε κατασκευαστικό στοιχείο δρουν ορθές τάσεις και μία συνισταμένη πίεσεων (εσωτερικών και εξωτερικών). Οι ορθές τάσεις λόγω κατακόρυφης και οριζόντιας κάμψης είναι: ²⁴

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

Οι πιέσεις που υπολογίζονται από τα προηγούμενα διαφέρουν τόσο για κάθε dynamic load case όσο και για τις καταστάσεις φόρτωσης. Γενικά ισχύει η εξής μεθοδολογία για τον συνδυασμό των πιέσεων: Αν το διαμέρισμα που μελετάται βρίσκεται στο εξωτερικό περίβλημα του πλοίου και είναι σχεδιασμένο να μεταφέρει υγρό φορτίο τότε συνυπολογίζονται η εσωτερική και η εξωτερική πίεση. Σε κάθε άλλη περίπτωση λαμβάνεται η χειρότερη πίεση για τους υπολογισμούς. ²⁵

Έλεγχος διαρροής για ελάσματα

Το καθαρό πάχος (net thickness) ελάσματος που καταπονείται από ορθές τάσεις λόγω κάμψης και πλευρική πίεση P δεν πρέπει να είναι μικρότερη από την τιμή που προκύπτει από τα παρακάτω: ²⁶

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

Όπου:

²⁴ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 6, Sec. 2, 1.1.1]

²⁵ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 6, Sec. 2, 1.3]

²⁶ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 6, Sec. 4, 1.1.1]

- a_p : Συντελεστής διόρθωσης λόγου πλευρών

$$a_p = 1.2 - \frac{\beta}{2.1 \alpha}$$
- a : Μήκος εξεταζόμενου τμήματος (μεταξύ ενισχυτικών)
- b : Πλάτος εξεταζόμενου τμήματος (μεταξύ ενισχυτικών)
- χ : Σε άθικτη κατάσταση:
 $\chi = 0.7$ για inner bottom και hopper σε bulk carriers,
 $\chi = 1.0$ υπόλοιπες περιπτώσεις.
- C_a : Συντελεστής επιτρεπόμενης τάσης λόγω κάμψης

$$C_a = \beta - \alpha \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}$$
 αλλά όχι μεγαλύτερος από C_{a-max}
 (C_{a-max} , α , β δίνονται από πίνακα [Pt. 1, Ch. 6, Sec. 4, 1.1.1 Table 1])

Έλεγχος διαρροής για απλά ενισχυτικά

Για ενισχυτικά που υπόκεινται σε ορθές τάσεις λόγω κάμψης και σε πλευρικές πιέσεις γίνεται έλεγχος ελάχιστου απαιτούμενου πάχους κορμού και ροπής αντίστασης: Το πάχος κορμού πρέπει να είναι τουλάχιστον:²⁷

$$t_w = \frac{f_{shr} |P| s l_{shr}}{d_{shr} \chi C_t \tau_{eH}}$$

Όπου:

- l_{shr} : Ενεργό μήκος σε διάτμηση [Pt. 1, Ch. 3, Sec. 7, 1.1.3]
- d_{shr} : Ενεργό ύψος σε διάτμηση [Pt. 1, Ch. 3, Sec. 7, 1.4.3]
- s : Ισαπόσταση ενισχυτικών
- f_{shr} : Συντελεστής κατανομής διατμητικής δύναμης
 $f_{shr} = 0.5$ για οριζόντια ενισχυτικά και το πάνω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών
 $f_{shr} = 0.7$ για το κάτω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών
- χ : Σε άθικτη κατάσταση:
 $\chi = 0.9$ για inner bottom και hopper σε bulk carriers,
 $\chi = 1.0$ υπόλοιπες περιπτώσεις.

²⁷ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 6, Sec. 5, 1.1.1 & 1.1.2]

C_t : Συντελεστής επιτρεπόμενης διατμητικής τάσης
 $C_t = 0.75$ για στατικές φορτίσεις
 $C_t = 0.90$ για στατικές και δυναμικές φορτίσεις

τ_{eH} : Τάση διαρροής λόγω διάτμησης
 $\tau_{eH} = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$ [Pt. 1, Ch. 1, Sec. 4, 2.2.1]

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

Όπου:

l_{bdg} : Ενεργό μήκος σε κάμψη [Pt. 1, Ch. 3, Sec. 7, 1.1.2]

f_{bdg} : Συντελεστής κατανομής καμπτικής ροπής. Για συνεχή ενισχυτικά με πακτωμένες άκρες να μην ξεπερνά:

$f_{bdg} = 12$ για οριζόντια ενισχυτικά και το πάνω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών

$f_{bdg} = 10$ για το κάτω μέρος κατακόρυφων ενισχυτικών

C_s : Συντελεστής επιτρεπόμενης καμπτικής τάσης. Οι τιμές δίνονται από τον πίνακα:

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

Πίνακας 6 Ορισμός C_s [Pt. 1, Ch. 6, Sec. 5, 1.1.2, Table 1]

($\beta_s, \alpha_s, C_{s-max}$ δίνονται [Pt. 1, Ch. 6, Sec. 5, 1.1.2, Table 2])

Έλεγχος Primary Supporting Members

Τέλος γίνεται έλεγχος της αντοχής των κύριων ενισχυτικών (εκτός των χώρων φορτίου) με τη χρήση σχέσεων για την ελάχιστη ροπή αντίστασης και την ελάχιστη επιφάνεια διάτμησης (net shear area)²⁸

$$Z_{n50} = 1000 \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} \chi C_s R_{eH}}$$

Όπου:

C_s : Συντελεστής επιτρεπόμενης καμπτικής τάσης.

f_{bdg} : Συντελεστής κατανομής καμπτικής ροπής.

²⁸ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 6, Sec. 6]

$$A_{shr-n50} = 10 \frac{f_{shr} |P| s l_{shr}}{\chi C_t \tau_{eH}}$$

Όπου:

C_t : Συντελεστής επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης.

f_{shr} : Συντελεστής κατανομής διατμητικής δύναμης.

2.5 Συνοπτική παρουσίαση ελέγχων

Μέχρι στιγμής έχουν παρουσιαστεί διάφοροι έλεγχοι που προδιαγράφονται στους κανονισμούς CSR με βάση τον τρόπο αστοχίας για τον οποίο έχουν αναπτυχθεί. Οι τρόποι αστοχίας της κατασκευής που ελέγχονται από τους παρόντες Κανονισμούς περιλαμβάνουν την διαρροή του υλικού, την πλαστικοποίηση, τη θραύση, την αστοχία λόγω κόπωσης και τέλος την αστοχία λόγω λυγισμού. Στους πίνακες του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ Α γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των ελέγχων που απαιτούνται από τους κανονισμούς, με βάση το κατασκευαστικό στοιχείο.

Δίνονται συνοπτικά οι απαιτήσεις των κανονισμών με σκοπό την επαρκή αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων της Μέσης Τομής ενός σύγχρονου Bulk Carrier με μήκος μεγαλύτερο των 150m σε άθικτη κατάσταση. Οι απαιτήσεις χωρίζονται σε αυτές που ορίζουν τις ελάχιστες διαστάσεις του κατασκευαστικού στοιχείου και σε αυτές που ορίζουν μια μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που αναπτύσσεται λόγω των ολικών φορτίσεων του πλοίου. Τέλος, ειδικά αναφέρονται οι έλεγχοι που γίνονται για τη μέγιστη αντοχή των στοιχείων σε λυγισμό, με απαιτήσεις την ελάχιστη λυγηρότητα των στοιχείων και την αποφυγή οριακών φορτίσεων (που θα περιγραφούν και στη συνέχεια).

3 Μελέτη με τη μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων

Στο Κεφάλαιο 7 των Κανονισμών γίνεται περιγραφή των απαιτήσεων και της μεθοδολογίας για την δημιουργία του μοντέλου και τη μελέτη της αντοχής με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε 3 στάδια (στην παρούσα εργασία η κατασκευή ελέγχεται με τη μέθοδο a.):

- a. Cargo hold analysis: Για την εκτίμηση της αντοχής σε διαρροή και λυγισμό όλων των διαμήκων κατασκευαστικών στοιχείων, των PSM και των φρακτών
- b. Fine mesh analysis: Για την εκτίμηση των τάσεων σε κατασκευαστικές λεπτομέρειες.
- c. Very fine mesh analysis: Για την εκτίμηση της αντοχής σε κόπωση των κατασκευαστικών λεπτομερειών.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων στη συνέχεια, για κάθε στάδιο ελέγχου γίνεται με βάση τα κριτήρια αντοχής για κάθε τρόπο αστοχίας. Τα κριτήρια δίνονται: για διαρροή Ch. 5 (Hull Girder Strength) και Ch. 6 (Hull Local Scantling), για λυγισμό στο Ch. 8 (Buckling) που θα αναλυθεί εκτενώς στη συνέχεια, και για κόπωση στο Κεφ. 9 (Fatigue).

3.1 Cargo hold structural strength analysis

Στην παρούσα εργασία θα εφαρμοστεί η ανάλυση στους χώρους φορτίου για τη μελέτη της αντοχής σε λυγισμό των διαμήκων στοιχείων. Στη συνέχεια, δίνονται οι βασικές απαιτήσεις της ανάλυσης.

3.1.1 Μοντέλο

Τα πιθανά μοντέλα εκτείνονται σε μήκος τριών κυτών, σε κάθε συνδυασμό από τα οποία η εκτίμηση των αποτελεσμάτων γίνεται μόνο για το μεσαίο. Αποτελείται από όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία με μέγεθος συγκρίσιμο με το μέγεθος τους πλέγματος διακριτοποίησης. Στο μοντέλο περιλαμβάνονται και οι ακραίες φρακτές μέχρι τον εγκάρσιο νομέα των stool, οι κατασκευές επί του καταστρώματος όπως ενισχυτικά ή στόμια κυτών.²⁹

Όλα τα ελάσματα μοντελοποιούνται ως shell elements (στοιχεία με in-plane ακαμψία σε διάτμηση και out-of-plane καμπτική ακαμψία και σταθερό πάχος). Τα ενισχυτικά μοντελοποιούνται ως beam elements (γραμμικά στοιχεία με αξονική, στρεπτική και καμπτική ακαμψία και σταθερές ιδιότητες κατά το μήκος). Τα πέλματα των PSM μοντελοποιούνται ως truss elements (γραμμικά στοιχεία με αξονική ακαμψία μόνο και σταθερές ιδιότητες κατά το μήκος). Οι ιδιότητες των στοιχείων λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τα net scantlings³⁰.

Η διακριτοποίηση του μοντέλου πρέπει να περιλαμβάνει το πολύ 1 στοιχείο μεταξύ των απλών ενισχυτικών και τουλάχιστον 3 κατά το ύψος του διπύθμενου και μεταξύ PSM. Ο λόγος επιμήκους να μην ξεπερνά το 3. Η διακριτοποίηση των topside και hopper webs πρέπει να είναι επαρκής ώστε να αντιπροσωπεύει τη γεωμετρία του web ring. Μικρότερες οπές και manholes μοντελοποιούνται βάσει του [Ch.7, Sec. 2, 2.4.9]

²⁹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Ch.7, Sec. 2, 2.2]

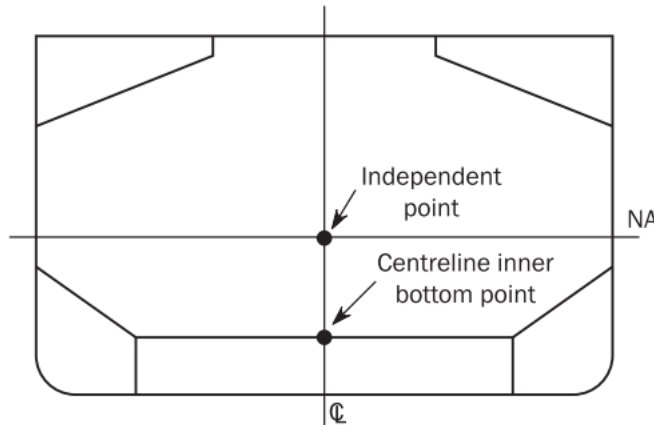
³⁰ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Ch.7, Sec. 1, 2]

3.1.2 Συνοριακές συνθήκες

Οι συνοριακές συνθήκες στις ακραίες εγκάρσιες διατομές του μοντέλου αποτελούνται από άκαμπτη σύνδεση της διατομής με ένα ανεξάρτητο σημείο και επιβολή περιορισμών σε αυτό το σημείο. Όλα τα διαμήκη στοιχεία της διατομής (και του cross deck) συνδέονται με το independent point στην τομή της centerline με τον ουδέτερο άξονα. Οι συνοριακές συνθήκες παρουσιάζονται τον παρακάτω πίνακα και στο σχήμα.

Location	Translation			Rotation		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Aft End						
Independent Point	-	Fix	Fix	M_{T-end}	-	-
Cross Section	-	Rigid Link	Rigid Link	Rigid Link	-	-
Fore End						
Independent Point	-	Fix	Fix	Fix	-	-
Intersection of inner bottom and centerline	Fix	-	-	-	-	-
Cross Section	-	Rigid Link	Rigid Link	Rigid Link	-	-

Πίνακας 7 Συνοριακές συνθήκες μοντέλου τριών αμπαριών



Σχήμα 11 Εφαρμογή συνοριακών συνθηκών σε διατομή bulk carrier

3.1.3 Φορτίσεις

Τα τοπικά φορτία που επιβάλλονται στο μοντέλο είναι το βάρος της κατασκευής, τα εξωτερικά στατικά και δυναμικά φορτία (sea pressure, green sea pressure) και τα εσωτερικά στατικά και δυναμικά φορτία (dry cargo, liquid cargo, ballast pressures) όπως αυτά υπολογίζονται σε κάθε θέση της κατασκευής από τα dynamic load cases. Από αυτά προκύπτει για το μοντέλο ένα διάγραμμα κατανομής καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.

Για κάθε κατάσταση φόρτωσης ορίζονται οι επιθυμητές (target) ροπές κάμψης και διατμητικές δυνάμεις του πλοίου-δοκού και εφαρμόζονται στο μοντέλο διορθώνοντας αυτές που προκύπτουν από τα τοπικά φορτία. Στη συνέχεια, δίνεται ο υπολογισμός τους και η μέθοδος εφαρμογής τους.³¹

Καμπτικές ροπές:

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

³¹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 7, Sec. 2, 4.3]

Όπου:

M_{v-targ} : Η μέγιστη καμπτική ροπή που πρέπει να εφαρμοσθεί στο μεσαίο κύτος.

C_{BM-LC} : Ποσοστό επιτρεπόμενης ροπής κάμψης για τον θεωρούμενο συνδυασμό φορτίων όπως δίνεται στο [Ch.4, Sec. 8]

M_{sw} : Επιτρεπόμενη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό. Η επιτρεπόμενη ροπή κάμψης της γάστρας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή [Ch. 4, Sec. 4, 2.2.1] αλλά και από οποιαδήποτε άλλη προκύψει από τις καταστάσεις φόρτωσης που θα μελετηθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης του πλοίου

M_{wv-LC} : Ροπή κάμψης σε κυματισμό για κάθε dynamic load case, όπως δίνεται στα [Ch. 4, Sec. 4, 3.1.1] και [Ch. 4, Sec. 4, 3.5.2]

Διατμητικές δυνάμεις:

- $Q_{fwd} \geq Q_{aft}$:

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

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

- $Q_{fwd} < Q_{aft}$:

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

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

Όπου:

$Q_{targ-aft}$,
 $Q_{targ-fwd}$: Η επιθυμητή διατμητική δύναμη στην πρυμναία και πρωραία φρακτή του μεσαίου κύτους

Q_{aft} ,
 Q_{fwd} : Η διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στην πρυμναία και πρωραία φρακτή του μεσαίου κύτους εφαρμόζοντας μόνο τα τοπικά φορτία

Q_{sw-pos} ,
 Q_{sw-neg} : Επιτρεπόμενη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό. Η επιτρεπόμενη διατμητική δύναμη της γάστρας θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από οποιαδήποτε προκύψει από τις καταστάσεις φόρτωσης που θα μελετηθούν κατά την διάρκεια της σχεδίασης του πλοίου. [Ch. 4, Sec. 4, 2.3.3]

Q_{wv-pos} ,
 Q_{wv-neg} : Διατμητική δύναμη λόγω κυματισμού για κάθε dynamic load case, όπως δίνεται στα [Ch. 4, Sec. 4, 3.2.1]

- ΔQ_{swf} : Διόρθωση διατμητικών δυνάμεων της πρωραίας φρακτής του μεσαίου κύτους. Η ελάχιστη από τις διορθώσεις στις δύο πρωραίες φρακτές του μοντέλου σύμφωνα με την παράγραφο [Ch.5, Sec. 1, 3.6.1] (Μόνο για bulk carrier)
- ΔQ_{swa} : Διόρθωση διατμητικών δυνάμεων της πρωραίας φρακτής του μεσαίου κύτους. Η ελάχιστη από τις διορθώσεις στις δύο πρυμναίες φρακτές του μοντέλου σύμφωνα με την παράγραφο [Ch.5, Sec. 1, 3.6.1] (Μόνο για bulk carrier)
- C_{SF-LC} : Ποσοστό επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης σε ήρεμο νερό για τον θεωρούμενο συνδυασμό φορτίων όπως δίνεται στο [Ch.4, Sec. 8]

Για να επιτευχθούν αυτές οι τιμές στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία για την διόρθωση τους με την εφαρμογή καμπτικών ροπών και πιέσεων στο μοντέλο.

A. Διόρθωση διατμητική δύναμης

Για την διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων εφαρμόζονται δύο μέθοδοι ανάλογα με τις περιπτώσεις που ορίζονται στους κανονισμούς³². Η πρώτη μέθοδος προσαρμόζει την διατμητική δύναμη σε μία από τις δύο φρακτές ενώ η δεύτερη προσαρμόζει την διατμητική δύναμη και στις δύο ταυτόχρονα. Στη συνέχεια, δίνονται αναλυτικά οι διορθώσεις.

a. Μέθοδος για διόρθωση σε μία φρακτή

Εδώ εφαρμόζονται δύο ίσες και αντίθετες ροπές στα άκρα του μοντέλου που αυξάνουν (ή μειώνουν) τις διατμητικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πλοίου κατά $Q_{targ} - Q_{local\ loads}$ (Q_{aft} ή Q_{fwd}).

- Διόρθωση στην πρυμναία φρακτή:

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

- Διόρθωση στην πρωραία φρακτή:

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

b. Μέθοδος για διόρθωση σε δύο φρακτές

Εδώ εφαρμόζονται δύο ίσες και αντίθετες ροπές στα άκρα του μοντέλου που αυξάνουν (ή μειώνουν) τις διατμητικές δυνάμεις σε όλο το μήκος του πλοίου κατά $(Q_{targ-aft} - Q_{aft} + Q_{targ-fwd} - Q_{fwd})$ ώστε η διαφορά της διατμητικής δύναμης από την επιθυμητή και στις δύο φρακτές να είναι η ίδια. Στη συνέχεια, εφαρμόζονται τα καταναμεμένα φορτία $\delta w_1, \delta w_2, \delta w_3$ τα οποία επιτυγχάνουν τη σχετική αύξηση (ή μείωση) της διαφοράς μεταξύ των φρακτών κατά $\Delta Q_{aft} =$

³² (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Ch.4, Sec. 8 Tables 12-31 & Ch 7, 4.4.5]

$-\Delta Q_{fwd}$. Τέλος εφαρμόζεται η δύναμη F στα άκρα του μοντέλο για εξισορρόπηση της ροπής που επάγουν τα φορτία $\delta w_1, \delta w_2, \delta w_3$. Τα $\delta w_1, \delta w_2, \delta w_3$ είναι γραμμικά κατανομημένα φορτία κατά το πλάτος του πλοίου και εφαρμόζονται στις έδρες του διπύθμενου για bulk carriers.

$$M_{Y-aft} = -M_{Y-fore} = \frac{x_{fore} - x_{aft}}{2} \cdot \frac{Q_{targ-aft} - Q_{aft} + Q_{targ-fwd} - Q_{fwd}}{2}$$

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

$$\delta w_1 = \frac{-\Delta Q_{aft} (2l - l_2 - l_3) + \Delta Q_{fwd} (l_2 + l_3)}{(n_1 - 1)(2l - l_1 - 2l_2 - l_3)}$$

$$\delta w_1 = \frac{\Delta Q_{aft} - \Delta Q_{fwd}}{(n_2 - 1)}$$

$$\delta w_1 = \frac{-\Delta Q_{fwd} (2l - l_1 - l_2) + \Delta Q_{aft} (l_1 + l_2)}{(n_3 - 1)(2l - l_1 - 2l_2 - l_3)}$$

Όπου:

$Q_{targ-aft}, Q_{targ-fwd}$: Η επιθυμητή διατμητική δύναμη στην πρυμναία και πρωραία φρακτή του μεσαίου κύτους

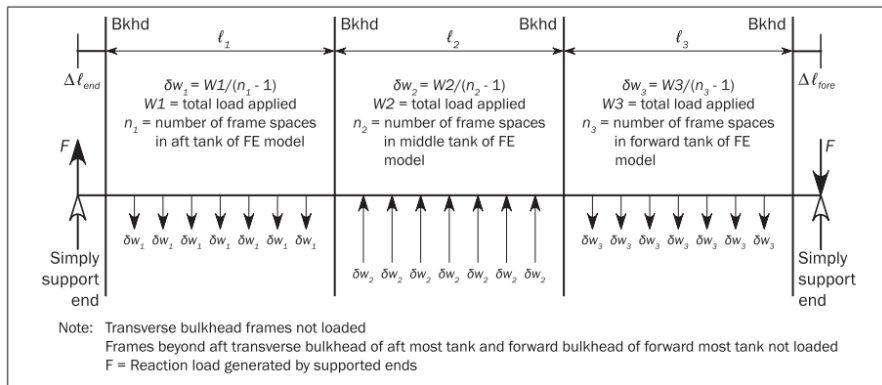
Q_{aft}, Q_{fwd} : Η διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στην πρυμναία και πρωραία φρακτή του μεσαίου κύτους εφαρμόζοντας μόνο τα τοπικά φορτία

x_{fore}, x_{aft} : Η διαμήκης θέση της πρωραίας και πρυμναίας φρακτής του μεσαίου κύτους.

n_1, n_2, n_3 : Αριθμός εδρών στο πρυμναίο, μεσαίο και πρωραίο κύτος αντίστοιχα

l_1, l_2, l_3 : Μήκος πρυμναίου, μεσαίου και πρωραίου κύτους αντίστοιχα

l : $l = l_1 + l_2 + l_3$



Σχήμα 12 Εφαρμογή καταναμημένων φορτίων για διόρθωση διατμητικών δυνάμεων [Ch.7 Sec. 2 Table 7]

Vertical shear force diagram	Aft Bhd	Fore Bhd
	SF target	SF target
	$Q_{targ-aft} (-ve)$	$Q_{targ-fwd} (+ve)$
	$Q_{targ-aft} (+ve)$	$Q_{targ-fwd} (-ve)$
<p>— Vertical shear force after both adjustments - - - Vertical shear force after adjustment by use of $M_{y,aft}$ and $M_{y,fore}$ ····· Vertical shear force due to local loads</p> <p>Note 1: -ve means negative. Note 2: +ve means positive.</p>		

Σχήμα 13 Υπάρχουσες και διορθωμένες διατμητικές δυνάμεις μετά την εφαρμογή των καταναμημένων φορτίων [Ch. 7, Sec. 2, Table 6]

B. Διόρθωση καμπτικής ροπής

Για την επίτευξη της M_{v-targ} , στη διαμήκη θέση x του μεσαίου κύτους εφαρμόζεται μία ροπή κάμψης, M_{v-end} , σε ολόκληρο το μοντέλο που υπολογίζεται ως εξής:

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

Όπου:

M_{v-peak} : Πρόκειται για τη μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής στο μεσαίο κύτος μετά την διόρθωση διατμητικής δύναμης (Μέθοδος 1 ή Μέθοδος 2) αν η $M_{v-targ} > 0$ (hogging) ή την ελάχιστη τιμή της αν η $M_{v-targ} < 0$ (sagging).

x : Η διαμήκης θέση που παρουσιάζεται η M_{v-peak}

4 Μελέτη για αντοχή σε λυγισμό

Στο κεφάλαιο 8 των Κανονισμών γίνεται μια εκτενής περιγραφή του τρόπου μελέτης της κατασκευής έναντι του λυγισμού. Το κεφάλαιο περιλαμβάνει τα κριτήρια τοπικής αντοχής για όλα τα δομικά στοιχεία που υπόκεινται σε θλιπτικά ή/και διατμητικά φορτία. Η μελέτη αυτή λαμβάνει υπόψη τη μεταλυγισμική αντοχή των ελασμάτων και την εσωτερική ανακατανομή των τάσεων ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης, τη λυγηρότητα και το τύπο της κατασκευής. Αυτή η προσέγγιση δίνει μία ασφαλή προσέγγιση της αντοχής ή το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει πριν υποστεί σημαντικές μόνιμες παραμορφώσεις. Σημειώνεται ότι σε όλα τα εδάφια σχετικά με τον λυγισμό, οι θλιπτικές και διατμητικές δυνάμεις λαμβάνονται θετικές ενώ οι εφελκυστικές αρνητικές.

4.1 Κριτήρια αντοχής

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της κατασκευής έναντι λυγισμού είναι η σύγκριση ενός utilisation factor, η_{act} , (συντελεστή χρησιμότητας της κατασκευής) με τις επιτρεπόμενες τιμές του για κάθε δομικό στοιχείο, η_{all} .

$$\eta_{act} \leq \eta_{all}$$

Ο συντελεστής χρησιμότητας ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ των εφαρμοζόμενων φορτίων προς τη συνολική αντοχή σε λυγισμό του στοιχείου που μελετάται.

$$\eta_{act} = \frac{W_{act}}{W_U} = \frac{1}{\gamma_c}$$

Όπου:

W_{act} : Ισοδύναμη εφαρμοζόμενη τάση. Υπολογίζεται:

$$W_{act} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \tau^2}, \text{ για ελάσματα, με}$$

σ_x : εφαρμοζόμενη τάση στη μακριά πλευρά

σ_y : εφαρμοζόμενη τάση στην κοντή πλευρά

τ : εφαρμοζόμενη διατμητική τάση

$W_{act} = \sigma_a + \sigma_b + \sigma_w$, για ενισχυτικά, με

σ_a : εφαρμοζόμενη αξονική τάση

σ_b : εφαρμοζόμενη καμπτική τάση

σ_w : εφαρμοζόμενη τάση λόγω στρέψης

W_U : Ισοδύναμη αντοχή σε λυγισμό. Υπολογίζεται:

$$W_U = \sqrt{\sigma_{cx}^2 + \sigma_{cy}^2 + \tau_c^2}, \text{ για ελάσματα}$$

σ_{cx} : Κρίσιμη αντοχή σε λυγισμό παράλληλη στη μακριά πλευρά

σ_{cy} : Κρίσιμη αντοχή σε λυγισμό παράλληλη στην κοντή πλευρά

τ_c : Κρίσιμη αντοχή λυγισμού από διάτμηση

$$W_U = \frac{R_e H}{s}, \text{ για ενισχυτικά}$$

γ_c : Stress multiplier factor (συντελεστής αναλογίας τάσεων) τη στιγμή της κατάρρευσης.

Οι εφαρμοζόμενες τάσεις υπολογίζονται αναλυτικά ή άμεσα μέσω της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων. Οι συντελεστές επιτρεπόμενης χρησιμότητας σε λυγισμό δίνονται από τον παρακάτω πίνακα.

Structural component	η_{all} , Allowable buckling utilisation factor
Plates and stiffeners Stiffened and unstiffened panels Vertically stiffened side shell plating of single side skin bulk carrier Web plate in ways of openings	1.00 for load combination: S+D 0.80 for load combination: S
Struts, pillars and cross ties	0.75 for load combination: S+D 0.65 for load combination: S
Corrugation of vertically corrugated bulkheads with lower stool and horizontally corrugated bulkhead, under lateral pressure from liquid loads, for shell elements only. Supporting structure in way of lower end of corrugated bulkheads without lower stool.	0.90 for load combination: S+D 0.72 for load combination: S
Corrugation of vertically corrugated bulkheads without lower stool under lateral pressure from liquid loads, for shell elements only.	0.81 for load combination: S+D 0.65 for load combination: S
<small>Note 1: Supporting structure for a transverse corrugated bulkhead refers to the structure in longitudinal direction within half a web frame space forward and aft of the bulkhead, and within a vertical extent equal to the corrugation depth. Note 2: Supporting structure for a longitudinal corrugated bulkhead refers to the structure in transverse direction within three longitudinal stiffener spacings from each side of the bulkhead, and within a vertical extent equal to the corrugation depth.</small>	

Πίνακας 8 Επιτρεπόμενος συντελεστής χρησιμότητας σε λυγισμό [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 1, 3.3.1, Table 1]

Εκτός από την παραπάνω ανάλυση, στο κεφάλαιο 8 δίνονται κάποιες απαιτήσεις λυγηρότητας για τα στοιχεία της κατασκευής δίνοντας έτσι ένα κατώτατο όριο στην διαστασιολόγηση των ελασμάτων, των ενισχυτικών, των PSM και των λοιπών κατασκευαστικών στοιχείων.

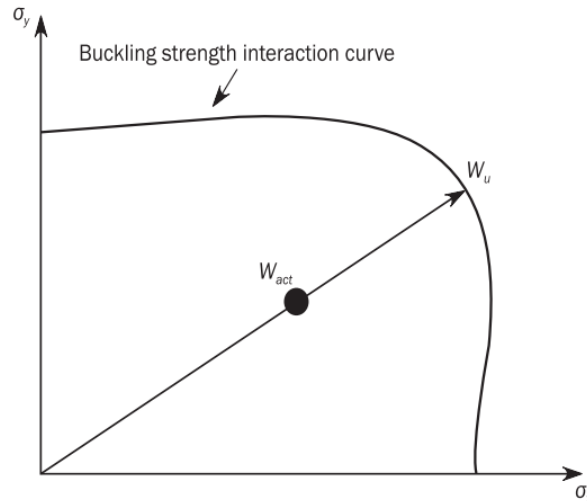
4.2 Υπολογισμός αντοχής σε λυγισμό (Buckling Capacity)

Στο παρόν κεφάλαιο των Κανονισμών γίνεται εκτενής ανάλυση του τρόπου υπολογισμού της αντοχής των στοιχείων σε λυγισμό, W_U . Οι μορφές κατάρρευσης που μελετώνται είναι αυτές του λυγισμού ενισχυμένου ελάσματος, λυγισμού απλού ελάσματος και του λυγισμού ενισχυτικού.

Γενικά, όταν ασκούνται περισσότερες από μία εξωτερικές φορτίσεις που προκαλούν λυγισμό το βέλος κάμψης δεν μπορεί να αποκτηθεί με απλή υπέρθεση. Για να ευρεθεί το κρίσιμο φορτίο αστοχίας από τους Κανονισμούς, υπό την ταυτόχρονη επίδραση διαφόρων εξωτερικών φορτίσεων, καταφεύγουν στη μέθοδο της *καμπύλης (εξίσωσης) αλληλεπίδρασης*. Η καμπύλη αλληλεπίδρασης επιτρέπει να υπολογιστεί ο ζητούμενος κρίσιμος συνδυασμός φορτίων για κάθε περίπτωση πραγματικών φορτίσεων.

Για κάθε μία από τις μορφές κατάρρευσης η αντίστοιχη αντοχή σε λυγισμό (ισοδύναμα ο κρίσιμος συνδυασμός φορτίσεων) υπολογίζεται ξεκινώντας με τα πραγματικά επιβαλλόμενα φορτία και μεταβάλλοντας τις τιμές τους, κάνοντας την παραδοχή ότι η αναλογία των φορτίων παραμένει σταθερή, έως ότου επιτευχθεί τομή με τις συμβατές καμπύλες αλληλεπίδρασης, που δίνονται από τους Κανονισμούς.

Παράδειγμα της μορφής των καμπύλων για δύο συνιστώσες φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 14 Παράδειγμα καμπύλης αλληλεπίδρασης φορτίων λυγισμού [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 1, 3.2.2, Figure 1]

Στο διάγραμμα, οι συντεταγμένες του σημείου W_{act} είναι οι πραγματικές τάσεις που ασκούνται στο στοιχείο. Διατηρώντας σταθερή την αναλογία τους, όπως θα περιγραφεί παρακάτω, ευρίσκεται το σημείο W_U , στο σημείο τομής της ευθείας με την καμπύλη αλληλεπίδρασης. Ο συντελεστής χρησιμότητας μπορεί τότε να υπολογιστεί ως το περιθώριο ασφαλείας (στην περίπτωση, φυσικά, που ο συνδυασμός των πραγματικών φορτίσεων δεν ξεπερνά την ολική αντοχή). Ο μέγιστος συντελεστής χρησιμότητας από αυτούς που θα υπολογιστούν για κάθε μορφή αστοχίας είναι και ο κρίσιμος.

Όπως είναι γνωστό και από τη θεωρία³³, οι καμπύλες αλληλεπίδρασης εξαρτώνται από τη μορφή της κατασκευής, δηλαδή τη γεωμετρία, την ισαπόσταση των ενισχυτικών και τις οριακές συνθήκες αλλά και από τους τρόπους φόρτισης.

4.2.1 Κατάρρευση ως ενισχυμένο έλασμα

Η οριακή αντοχή του ελαστικού ενισχυμένου ελάσματος βασίζεται στην παρακάτω εξίσωση αλληλεπίδρασης³⁴:

$$\frac{P_z}{C_f} = 1$$

Όπου:

P_z : Ονομαστικό πλευρικό φορτίο που ασκείται στο μέσο του ανοίγματος του ενισχυτικού (mid span - $\ell/2$) λόγω των μεμβρανικών τάσεων σ_x, σ_y, τ του συγκολλημένου ελάσματος.

$$P_z = \frac{t_p}{s} \left(\sigma_{xl} \left(\frac{\pi s}{\ell} \right)^2 + 2 c \gamma \sigma_y + \sqrt{2} \tau_1 \right)$$

σ_{xl} : $\sigma_{xl} = \gamma \sigma_x \left(1 + \frac{A_s}{s t_p} \right)$ but not less than 0

τ_1 : $\tau_1 = \gamma |\tau| - t_p \sqrt{R_{eH-p} E \left(\frac{m_1}{a^2} + \frac{m_2}{b^2} \right)}$ but not less than 0

³³ (Καρύδης, 2000)

³⁴ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.1.1]

R_{eH-p} : Τάση διαρροής του στοιχειώδους ελάσματος που ορίζεται ως η ελάχιστη τάση διαρροής των στοιχείων που το αποτελούν.

t_p : Net thickness του ελάσματος

c : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τα φορτία του ελάσματος που δρουν κάθετα στον άξονα του ενισχυτικού.

$$c = 0.5(1 + \psi) \text{ for } 0 \leq \psi \leq 1$$

$$c = \frac{0.5}{1-\psi} \text{ for } \psi < 0$$

$\psi = \frac{\sigma_{edge1}}{\sigma_{edge2}}$: λόγος των τάσεων στα άκρα του ελάσματος

m_1, m_2 :

$$m_1 = 1.47, m_2 = 0.49 \text{ for } \alpha \geq 2$$

$$m_1 = 1.96, m_2 = 0.37 \text{ for } \alpha < 2$$

A_s : Επιφάνεια διατομής του ενισχυτικού χωρίς το έλασμα

c_f : Ελαστική στήριξη που προσδίδεται από το ενισχυτικό.

$$c_f = F_E \left(\frac{\pi}{\ell} \right)^2 (1 + c_p)$$

c_p :

$$c_p = \frac{1}{1 + \frac{0.91}{c_{xa}} \left(\frac{12 I}{s t_p^3} 10^4 - 1 \right)}$$

c_{xa} :

$$c_{xa} = \left(\frac{\ell}{2s} + \frac{2s}{\ell} \right)^2 \text{ for } \ell \geq 2s$$

$$c_{xa} = \left(1 + \left(\frac{\ell}{2s} \right)^2 \right)^2 \text{ for } \ell < 2s$$

F_E : Ελαστικό φορτίο λυγισμού αμφιέριστου ενισχυτικού κατά Euler

$$F_E = \left(\frac{\pi}{\ell} \right)^2 E I 10^4$$

γ : Stress multiplier factor (συντελεστής αναλογίας τάσεων)

Όπως φαίνεται στις παραπάνω σχέσεις, το φορτίο P_z περιλαμβάνει τον συντελεστή αναλογίας τάσεων (stress multiplier factor), γ , πολλαπλασιασμένο με τα επί μέρους φορτία που ασκούνται στο ενισχυτικό $\sigma_{xl}, \sigma_y, \tau_1$. Αυξάνοντας (ή μειώνοντας) τον συντελεστή, αυξάνεται (ή μειώνεται) το φορτίο P_z διατηρώντας σταθερή τη σχέση μεταξύ των $\sigma_{xl}, \sigma_y, \tau_1$. Όταν η εξίσωση αλληλεπίδρασης γίνει ίση με

1 τότε το φορτίο P_z θα είναι το κρίσιμο και ο συντελεστής αναλογίας θα είναι ο γ_c για αυτήν τη μορφή κατάρρευσης.

Η μεθοδολογία αυτή υιοθετήθηκε από τους κανονισμούς ώστε η εύρεση της αντοχής στοιχείου σε λυγισμό να γίνεται άμεσα και χωρίς την ανάγκη χρονοβόρων επαναληπτικών διαδικασιών.³⁵

4.2.2 Κατάρρευση απλού ελάσματος

Η οριακή αντοχή του ελαστικού ενισχυμένου ελάσματος βασίζεται στις παρακάτω εξισώσεις αλληλεπίδρασης. Για την εύρεση των κρίσιμων φορτίων κατάρρευσης η διαδικασία ξεκινά θέτοντας τις επιβαλλόμενες τάσεις, σ_x, σ_y, τ , στις αντίστοιχες εξισώσεις αλληλεπίδρασης. Στη συνέχεια, αυξάνοντας (ή μειώνοντας) τους συντελεστές αναλογίας, $\gamma_{c1}, \gamma_{c2}, \gamma_{c3}, \gamma_{c4}$, βρίσκεται η κρίσιμη τιμή τους όταν επιτευχθεί η ισότητα. Ο ολικός κρίσιμος συντελεστής αναλογίας θα βρεθεί από τη σχέση $\gamma_c = \min(\gamma_{c1}, \gamma_{c2}, \gamma_{c3}, \gamma_{c4})$ και από την αντίστοιχη σχέση θα βρεθεί επίσης και ο κρίσιμος συνδυασμός φορτίων, $\sigma_{cx}, \sigma_{cy}, \tau_c$.

Συνδυασμός φορτίσεων		Εξίσωση αλληλεπίδρασης
1.	Διαξονική θλίψη/εφελκυσμός και διάτμηση	$\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0} - B \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0/2} \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0/2} + \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c1} \tau S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$
2.	Θλίψη κατά x, εφελκυσμός κατά y και διάτμηση, $\sigma_x \geq 0$	$\left(\frac{\gamma_{c2}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c2} \tau S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$
3.	Θλίψη κατά y, εφελκυσμός κατά x και διάτμηση, $\sigma_y \geq 0$	$\left(\frac{\gamma_{c3}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c3} \tau S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$
4.	Καθαρή διάτμηση	$\frac{\gamma_{c4} \tau S}{\tau'_c} = 1$

Πίνακας 9 Σχέσεις αλληλεπίδρασης τάσεων κατάρρευσης ως απλό έλασμα³⁶

Όπου:

σ'_{cx} : Μέγιστη αντοχή σε λυγισμό σε διεύθυνση παράλληλη με τη μακριά πλευρά του ελάσματος³⁷
 $\sigma'_{cx} = C_x R_{eH.p}$

σ'_{cy} : Μέγιστη αντοχή σε λυγισμό σε διεύθυνση παράλληλη με την κοντή πλευρά του ελάσματος
 $\sigma'_{cy} = C_y R_{eH.p}$

τ'_c : Μέγιστη αντοχή σε λυγισμό λόγω διάτμησης
 $\tau'_c = C_\tau \frac{R_{eH.p}}{\sqrt{3}}$

B, e_0 :

³⁵ (I.A.C.S., CSR Technical Backround Documents, 2016)

³⁶ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
 [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.2.1]

³⁷ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
 [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.2.3]

Τάσεις	B	e_0
$\sigma_x \geq 0$ και $\sigma_y \geq 0$	$0.7 - 0.3\beta_p \left(\frac{a}{b}\right)^{-2}$	$2/\beta_p^{0.25}$
$\sigma_x < 0$ ή $\sigma_y < 0$	1	2.0

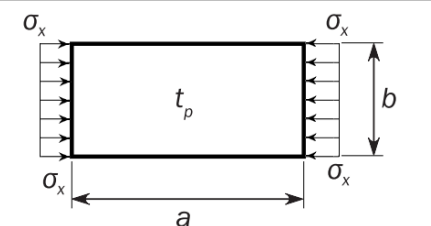
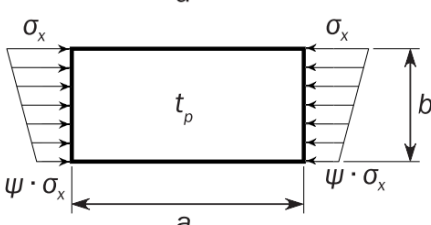
β_p : Παράμετρος λυγηρότητας ελάσματος

$$\beta_p = \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{Re_{H,p}}{E}}$$

$\gamma_{c1}, \gamma_{c2}, \gamma_{c3}, \gamma_{c4}$: Stress multiplier factors (συντελεστές αναλογίας τάσεων)

S : Συντελεστής ασφάλειας

Στις εξισώσεις αλληλεπίδρασης εμφανίζονται επίσης οι όροι $\sigma'_{cx}, \sigma'_{cy}, \tau'_c$ που ορίστηκαν ως η τάση κατάρρευσης του ελάσματος σε μεμονωμένα φορτία (τάση διαρροής για εφελκυστικά φορτία, τάση λυγισμού για θλιπτικά και διατμητικά φορτία). Η τάση λυγισμού υπολογίζεται, χρήσει ενός συντελεστή μείωσης (C_x, C_y, C_τ), αναλυτικά από τους κανονισμούς για διάφορους βαθμούς λυγηρότητας ελάσματος, είδη φόρτισης, ενίσχυσης και τρόπων έδρασης των ελασμάτων αν και τονίζεται ότι στη γενική περίπτωση όλα τα ελάσματα της κατασκευής θεωρούνται απλά εδρασμένα (εκτός από την περίπτωση εγκάρσια ενισχυμένων πλευρών bulk carrier όπου εξετάζεται η περίπτωση με δύο πλευρές πακτωμένες). Παρακάτω δίνονται οι δυνατές περιπτώσεις φόρτισης ελάσματος που μελετώνται στους Κανονισμούς και οι συνδυασμοί με τις περιπτώσεις έδρασης του. Σημειώνεται ότι οι εν λόγω φορτίσεις ορίζονται και για διευθύνσεις παράλληλες στην κοντή πλευρά του ελάσματος αλλά παραλείπονται από τον πίνακα.

Περιπτώσεις φόρτισης ελάσματος	
A. $\sigma_x > 0, \psi = 1$ Ομοιόμορφη θλίψη	
B. $\sigma_x > 0, 1 > \psi \geq 0$ Συνδυασμός: Διαμήκης θλίψη & Εγκάρσια επίπεδη κάμψη	

Περιπτώσεις φόρτισης ελάσματος		
C.	$\sigma_x > 0, 0 > \psi \geq -1$ Συνδυασμός: Διαμήκης θλίψη & Εγκάρσια επίπεδη κάμψη	
D.	$\sigma_x < 0, \psi = 1$ Ομοιόμορφος εφελκυσμός	
E.	$\sigma_x < 0, 1 > \psi \geq 0$ Συνδυασμός: Διαμήκης εφελκυσμός & Εγκάρσια επίπεδη κάμψη	
F.	$\sigma_x < 0, 0 > \psi \geq -1$ Συνδυασμός: Διαμήκης εφελκυσμός & Εγκάρσια επίπεδη κάμψη	

Πίνακας 10 Περιπτώσεις φόρτισης απλού ελάσματος

Περιπτώσεις στήριξης ελάσματος		
1.	Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	
2.	Φόρτιση παράλληλη στην κοντή πλευρά. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	

Περιπτώσεις στήριξης ελάσματος		
3.	<p>Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Ελεύθερη η ευνοϊκότερα φορτισμένη μακριά πλευρά.</p>	
4.	<p>Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Ελεύθερη η δυσμενέστερα φορτισμένη μακριά πλευρά.</p>	
5.	<p>Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Μία ελεύθερη και μία πακτωμένη πλευρά.</p>	
6.	<p>Φόρτιση παράλληλη στην κοντή πλευρά. Ελεύθερη η ευνοϊκότερα φορτισμένη κοντή πλευρά.</p>	
7.	<p>Φόρτιση παράλληλα στην κοντή πλευρά. Ελεύθερη η δυσμενέστερα φορτισμένη κοντή πλευρά.</p>	
8.	<p>Φόρτιση παράλληλη στην κοντή πλευρά. Μία ελεύθερη και μία πακτωμένη πλευρά.</p>	

Περιπτώσεις στήριξης ελάσματος		
9.	Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Μακριές πλευρές πακτωμένες.	
10.	Φόρτιση παράλληλη στην κοντή πλευρά. Μακριές πλευρές πακτωμένες.	
11.	Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Κοντές πλευρές πακτωμένες.	
12.	Φόρτιση παράλληλη στην κοντή πλευρά. Κοντές πλευρές πακτωμένες.	
13.	Φόρτιση παράλληλη στη μακριά πλευρά. Όλες οι πλευρές πακτωμένες.	
14.	Φόρτιση παράλληλη στην κοντή πλευρά. Όλες οι πλευρές πακτωμένες.	

Περιπτώσεις στήριξης ελάσματος		
15.	Διατμητική φόρτιση. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	
16.	Διατμητική φόρτιση. Δύο πλευρές πακτωμένες.	
17.	Διατμητική φόρτιση σε έλασμα με οπή. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	
18.	Διατμητική φόρτιση. Ελεύθερη μία μακριά πλευρά.	
19.	Διατμητική φόρτιση. Ελεύθερη μία κοντή πλευρά.	

Πίνακας 11 Περιπτώσεις στήριξης απλού ελάσματος

Στην περίπτωση καμπύλων ελασμάτων δίνεται ειδική εξίσωση αλληλεπίδρασης που δίνει την αντοχή του ελάσματος με την ίδια μεθοδολογία των ορθογωνικών ελασμάτων. Η διαφορά εντοπίζεται στις τάσεις που επιδρούν στο καμπύλο έλασμα οι οποίες είναι είτε αξονικές (σ_{ax}) ως προς την κυλινδρική γεωμετρία ή εφαπτομενικές (σ_{tg}). Οι τυχούσες εφελκυστικές τάσεις αγνοούνται. Παρακάτω δίνεται η εξίσωση αλληλεπίδρασης³⁸ και οι περιπτώσεις για τις οποίες υπολογίζονται οι συντελεστές μείωσης αντοχής (C_{ax} , C_{tg} , C_{τ}).

$$\left(\frac{\gamma_c \sigma_{ax} S}{C_{ax} R_{eH_p}}\right)^{1.25} - 0.5 \left(\frac{\gamma_c \sigma_{ax} S}{C_{ax} R_{eH_p}}\right) \left(\frac{\gamma_c \sigma_{tg} S}{C_{tg} R_{eH_p}}\right) + \left(\frac{\gamma_c \sigma_{tg} S}{C_{tg} R_{eH_p}}\right)^{1.25} + \left(\frac{\gamma_c |\tau| \sqrt{3} S}{C_{\tau} R_{eH_p}}\right)^2 = 1$$

³⁸ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.2.6]

Περιπτώσεις φόρτισης καμπύλου ελάσματος		
1.	Αξονική φόρτιση. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	
2.	Εφαπτομενική φόρτιση. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	
3.	Εφαπτομενική φόρτιση λόγω πλευρικής πίεσης. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	
4.	Αξονική φόρτιση. Μία ελεύθερη και μία πακτωμένη πλευρά	
5.	Διατμητική φόρτιση. Όλες οι πλευρές απλά εδρασμένες.	

Πίνακας 12 Περιπτώσεις φόρτισης καμπύλου ελάσματος

4.2.3 Κατάρρευση ενισχυτικού

Η εξίσωση αλληλεπίδρασης για την εύρεση της μέγιστης αντοχής του ενισχυτικού σε λυγισμό δίνεται παρακάτω για $\sigma_a + \sigma_b + \sigma_w > 0$:³⁹

³⁹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.3.4]

$$\frac{\gamma_c \sigma_a + \sigma_b + \sigma_w}{R_{eH}} s = 1$$

Όπου:

σ_a : Ισοδύναμη αξονική τάση που δρα στο ενισχυτικό και το συνεργαζόμενο έλασμα

$$\sigma_a = \sigma_x \frac{s t_p + A_s}{b_{eff1} t_p + A_s}$$

b_{eff1} : Ισοδύναμο πλάτος ελάσματος

A_s : επιφάνεια διατομής ενισχυτικού

σ_b : Τάση λόγω κάμψης ενισχυτικού

$$\sigma_b = \frac{M_1 + M_2}{1000 Z}$$

M_1 : Ροπή κάμψης λόγω πλευρικής φόρτισης

M_2 : Ροπή κάμψης λόγω παραμόρφωσης

Z : Ροπή αντίστασης διατομής ενισχυτικού

σ_w : Τάση λόγω στρεπτικής παραμόρφωσης ενισχυτικού

4.2.4 Κατάρρευση Primary Supporting Member

Για τον υπολογισμό της αντοχής του κορμού primary supporting member με σπές χρησιμοποιούνται οι σχέσεις αλληλεπίδρασης κατάρρευσης ελάσματος για συνδυασμό θλιπτικού και διατμητικού φορτίου. Οι εξισώσεις χρησιμοποιούνται με τους τους συντελεστές μείωσης που δίνονται παρακάτω για συνδυασμό φορτίου : $\sigma_x = \sigma_{av}$, $\sigma_y = 0$, $\tau = \tau_{av}$

Configuration	C_x, C_y	C_z	
		Opening modelled in PSM	Opening not modelled in PSM
<p>(a) Without edge reinforcements:</p>	<p>Separate reduction factors are to be applied to areas P1 and P2 using case 3 or case 6 in Table 3, with edge stress ratio: $\psi = 1.0$</p>	<p>Separate reduction factors are to be applied to areas P1 and P2 using case 18 or case 19 in Table 3.</p>	<p>When case 17 of Table 3 is applicable: A common reduction factor is to be applied to areas P1 and P2 using case 17 in Table 3 with: $\tau_{av} = \tau_{av}(web)$</p> <p>When case 17 of Table 3 is not applicable: Separate reduction factors are to be applied to areas P1 and P2 using case 18 or case 19 in Table 3 with: $\tau_{av} = \tau_{av}(web) h/(h - h_o)$</p>
<p>(b) With edge reinforcements:</p>	<p>Separate reduction factors are to be applied for areas P1 and P2 using C_x for case 1 or C_y for case 2 in Table 3 with stress ratio: $\psi = 1.0$</p>	<p>Separate reduction factors are to be applied for areas P1 and P2 using case 15 in Table 3.</p>	<p>Separate reduction factors are to be applied to areas P1 and P2 using case 15 in Table 3 with: $\tau_{av} = \tau_{av}(web) h/(h - h_o)$</p>

Πίνακας 13 Συντελεστές μείωσης για PSM⁴⁰

⁴⁰ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.4.3 Table 6]

4.3 Εξίσωση αντοχής απλών ελασμάτων

Στη συνέχεια, θα γίνει μία προσπάθεια διερεύνησης της εξίσωσης αλληλεπίδρασης, που δόθηκε προηγουμένως, σε σχέση με τη γεωμετρία του μελετώμενου ελάσματος.

$$\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0} - B \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0/2} \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0/2} + \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c1}|\tau|S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$$

Η σχέση αυτή, παραλείποντας τους συντελεστές S και γ_c μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$(R_x)^{e_0} - B (R_x)^{e_0/2} (R_y)^{e_0/2} + (R_y)^{e_0} + (R_\tau)^{e_0} = 1$$

Όπου:

R_x, R_y, R_τ : Ο λόγος της επιβαλλόμενης τάσης προς την αντοχή του ελάσματος στις διευθύνσεις x, y και σε διάτμηση.

e_0 :

$$e_0 = \frac{2}{\beta_p^{0.25}}$$

B :

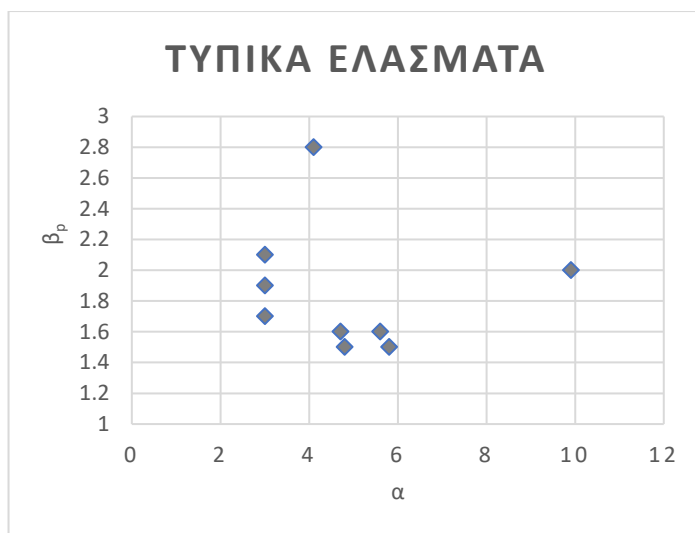
$$B = 0.7 - 0.3 \frac{\beta_p}{\alpha^2}$$

Οι συντελεστές e_0, B εξαρτώνται από τη γεωμετρία του μελετώμενου ελάσματος και συγκεκριμένα από τον λόγο των πλευρών α και την παράμετρο λυγηρότητας β_p . Αυτά τα μεγέθη θα χρησιμοποιηθούν ως παράμετροι για τον έλεγχο της εξίσωσης αλληλεπίδρασης.

$$\beta_p = \frac{b}{t_p} \sqrt{\frac{R_{eHp}}{E}}$$

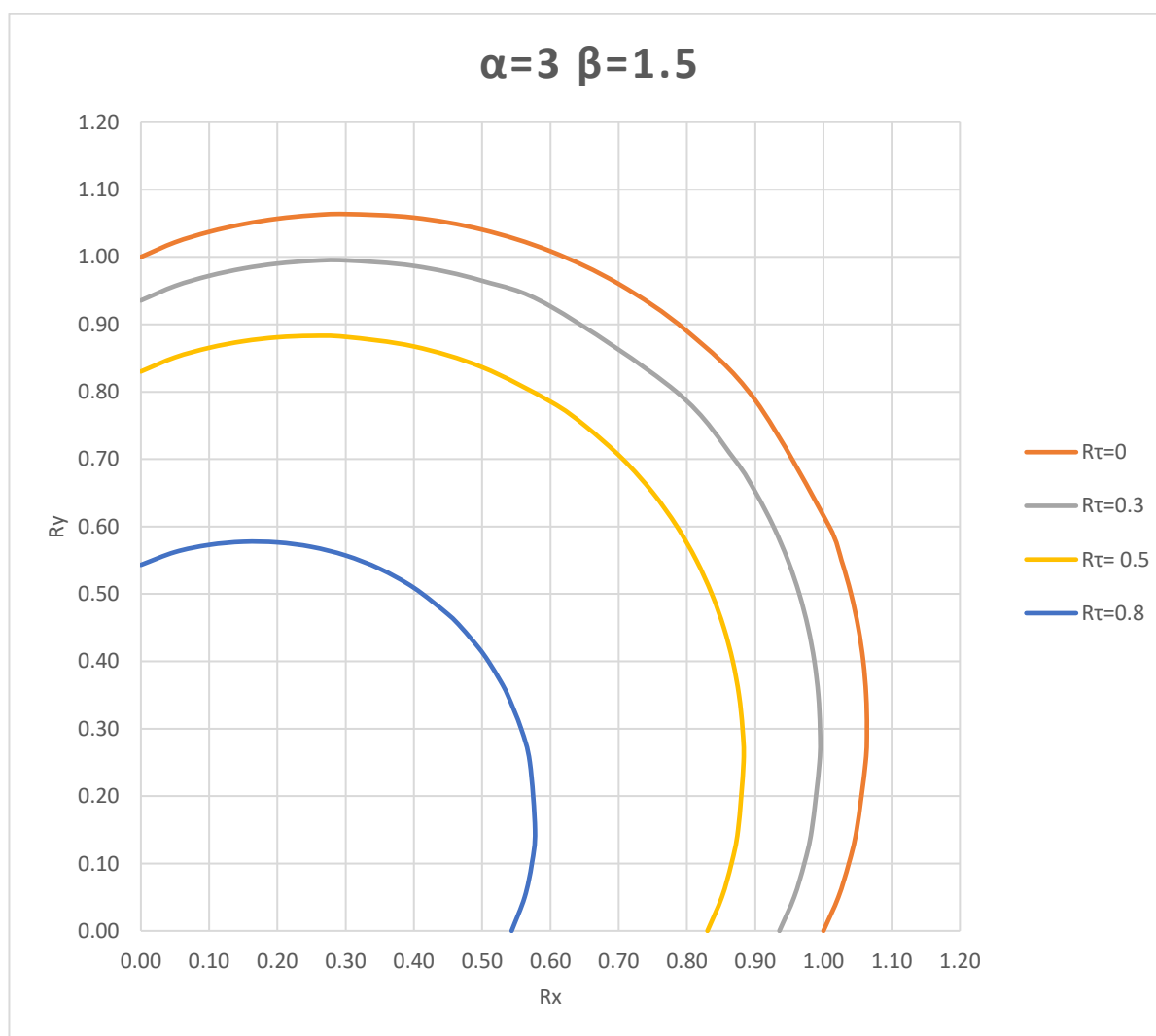
$$\alpha = \frac{a}{b}$$

Αρχικά, με βάση το μοντέλο του πλοίου που θα μελετηθεί στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι τυπικές τιμές αυτών των παραμέτρων και παρουσιάζονται παρακάτω. Στη συνέχεια, διερευνήθηκαν τα αποτελέσματα της εξίσωσης μεταβάλλοντας τις παραμέτρους σε διαγράμματα δύο διαστάσεων με άξονες τους λόγους τάσεων R_x, R_y . Ο λόγος R_τ χρησιμοποιήθηκε, επίσης, ως παράμετρος σε ένα από τα διαγράμματα για να παρουσιαστεί η επίδραση της διατμητικής δύναμης στη συνολική αντοχή του ελάσματος.



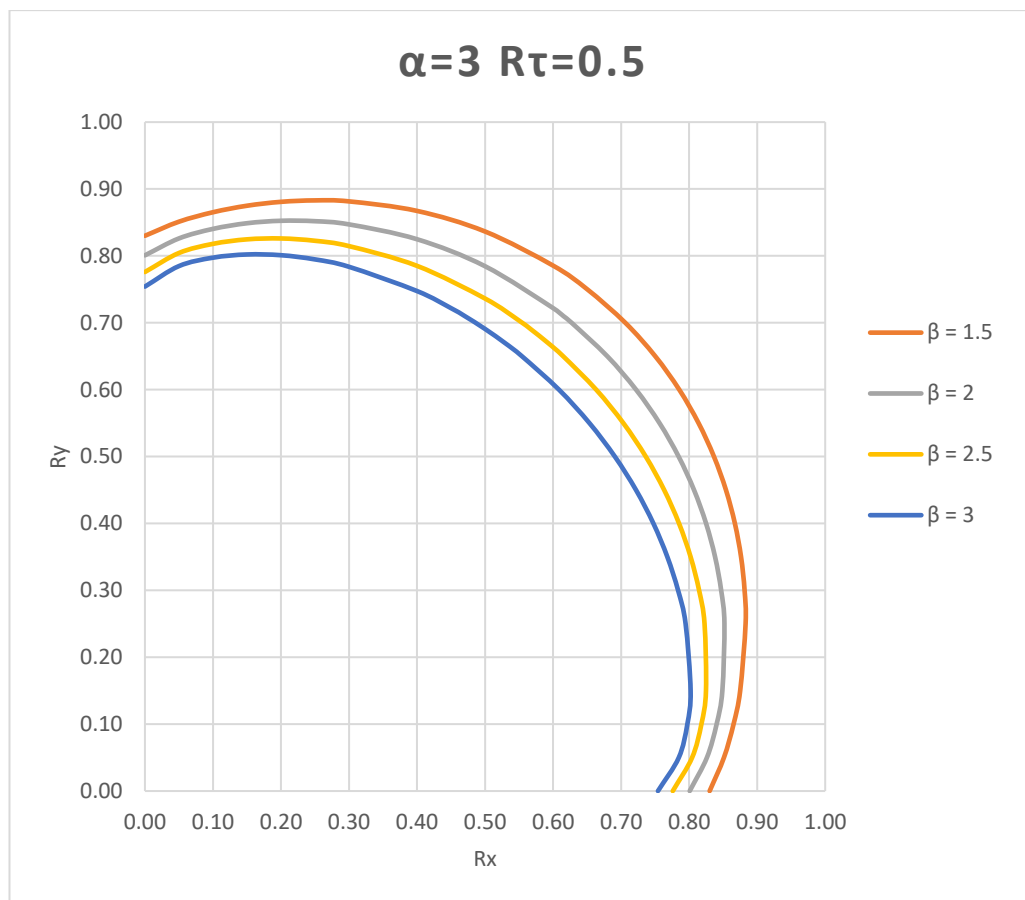
Σχήμα 15 Τυπικές διαστάσεις ελασμάτων στο μοντέλο που μελετήθηκε

Για τις τιμές $\alpha = 3, \beta_p = 1.5$ δίνεται η επίδραση του λόγου διατμητικής τάσης προς την αντοχή σε διάτμηση στη συνολική αντοχή του ελάσματος. Όπως είναι αναμενόμενο, η σταδιακή αύξηση της διατμητικής φόρτισης μειώνει τη συνολική αντοχή σε λυγισμό. Η μείωση της αντοχής, με την αύξηση της διάτμησης είναι εκθετικής μορφής.



Σχήμα 16 Επίδραση της R_τ στη συνολική αντοχή του ελάσματος

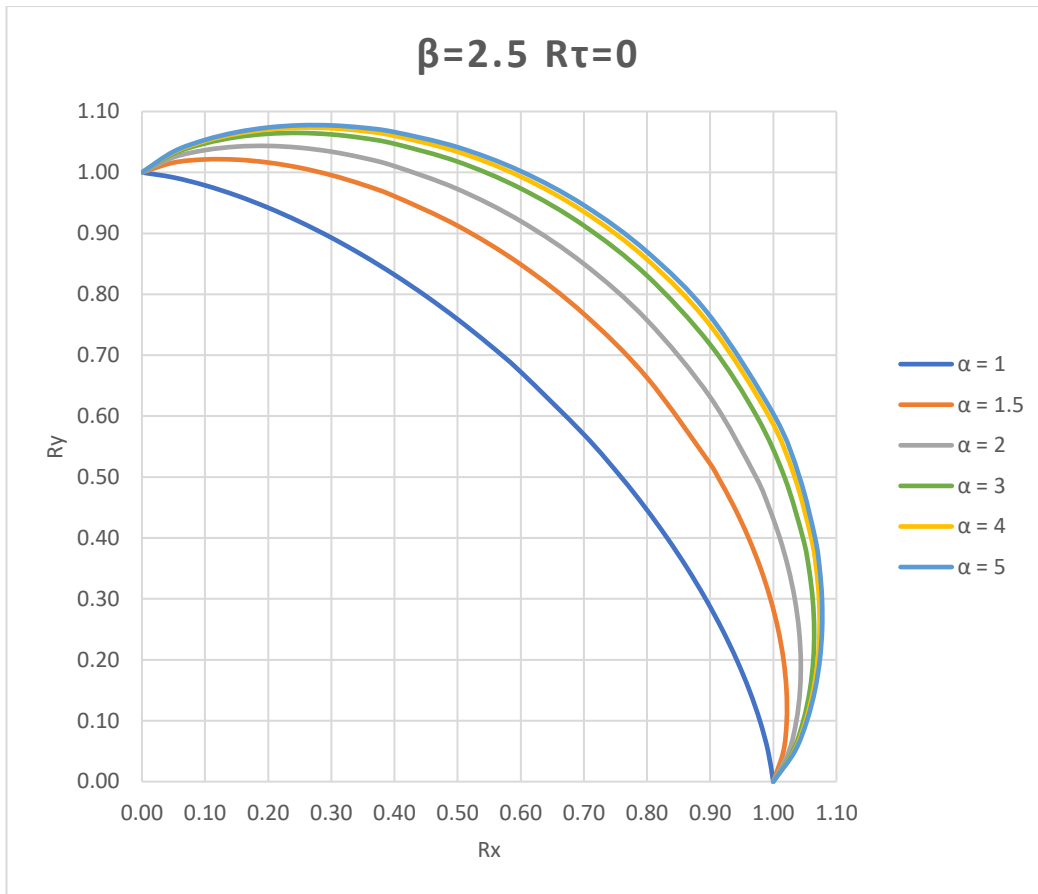
Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η αντοχή του ελάσματος μειώνεται με την αύξηση της παραμέτρου λυγηρότητας. Αυτό είναι αναμενόμενο αφού αύξηση του β_p συνεπάγεται αύξηση του λόγου b/t_p .



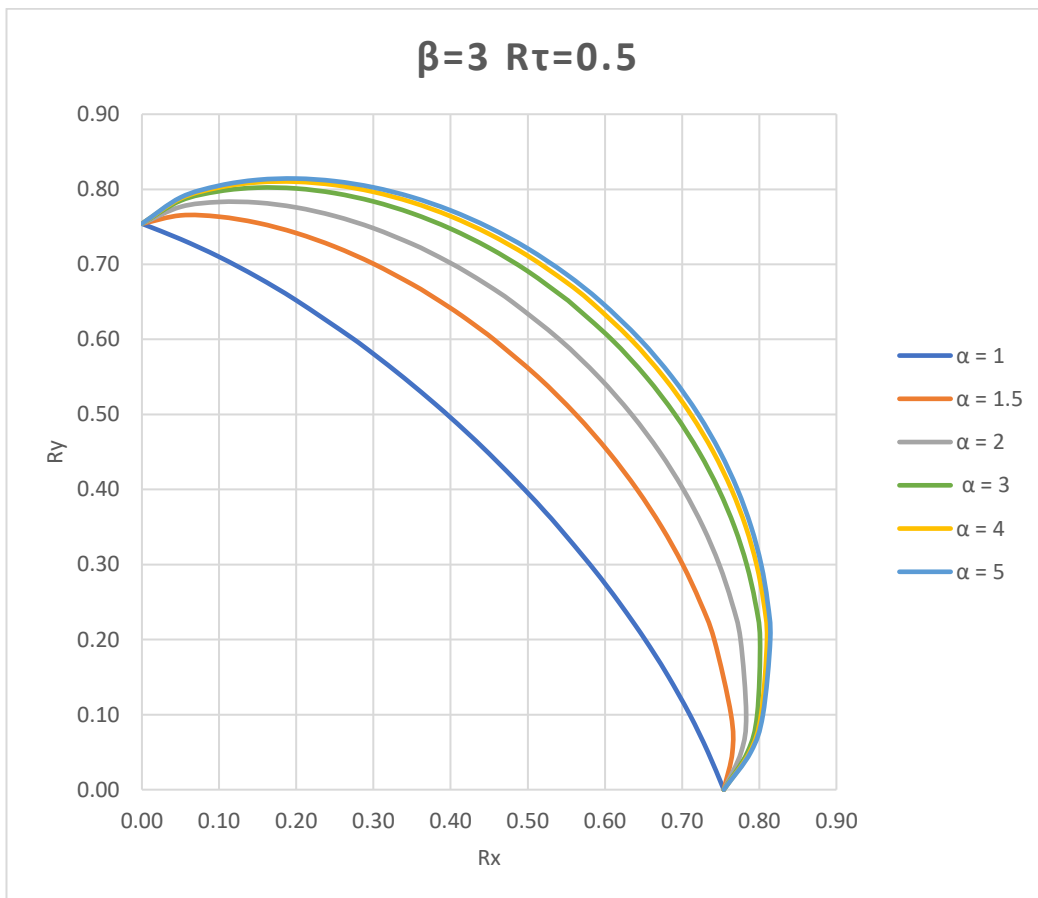
Σχήμα 17 Επίδραση του β_p στην αντοχή του ελάσματος

Στη συνέχεια, μελετάται η επίδραση του λόγου των πλευρών του ελάσματος σε δύο περιπτώσεις. Όπως φαίνεται στα δύο σχήματα που ακολουθούν, η συμπεριφορά είναι παρόμοια. Η αντοχή του ελάσματος σε συνδυασμένη φόρτιση αυξάνεται με την αύξηση του λόγου των πλευρών α . Ωστόσο, για λόγους πλευρών μεγαλύτερους του 3 η αντοχή φαίνεται να μην αυξάνεται περαιτέρω.

Η συμπεριφορά αυτή, ίσως εξηγείται από το γεγονός ότι τα ελάσματα της μεταλλικής κατασκευής ενός πλοίου παρουσιάζουν σχεδόν πάντα αρχικές παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις αυτές αναγκάζουν τα ελάσματα με μεγάλους λόγους πλευρών να λυγίσουν σε ιδιομορφές μεγαλύτερης απαιτούμενης ενέργειας δίνοντάς τους μεγαλύτερη αντοχή.



Σχήμα 18 Επίδραση του a/b στην αντοχή του ελάσματος χωρίς διάτμηση



Σχήμα 19 Επίδραση του a/b στην αντοχή του ελάσματος με διάτμηση

4.4 Παραδοχές για τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

Για την αναλυτική μελέτη του λυγισμού χρησιμοποιούνται οι τάσεις που προκύπτουν από τα φορτία που περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.

Για την περίπτωση της μελέτης της αντοχής σε λυγισμό με χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων χρησιμοποιούνται οι παρακάτω παραδοχές και μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των ιδιοτήτων των υλικών και των επιβαλλόμενων τάσεων.

Το πάχος του απλού ελάσματος υπολογίζεται⁴¹:

$$t_{avr} = \frac{\sum_1^n A_i t_i}{\sum_1^n A_i}$$

Όπου:

- A_i : Επιφάνεια του i-οστού στοιχείου
- t_i : Πάχος του i-οστού στοιχείου
- n : Αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που αποτελούν το απλό έλασμα που μελετάται

Η τάση διαρροής του απλού ελάσματος υπολογίζεται⁴²:

$$R_{eH_p} = \min(R_{eH_p})_i$$

Η επιβαλλόμενη πλευρική πίεση υπολογίζεται⁴³:

$$P_{avr} = \frac{\sum_1^n A_i P_i}{\sum_1^n A_i}$$

Όπου:

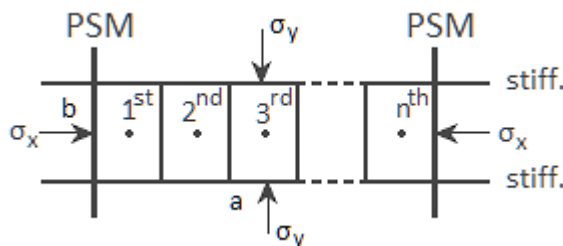
- A_i : Επιφάνεια του i-οστού στοιχείου
- P_i : Πλευρική πίεση στο i-οστό στοιχείο
- n : Αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που αποτελούν το απλό έλασμα που μελετάται

⁴¹ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 4, 2.1.2]

⁴² (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 4, 2.1.3]

⁴³ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 4, 2.5.2]

4.4.1 Υπολογισμός τάσεων από μοντέλο FEM



Σχήμα 20 Απλό πάνελ αποτελούμενο από n στοιχεία

Έστω το απλό πάνελ του σχήματος που ορίζεται μεταξύ των απλών ενισχυτικών και PSM και αποτελείται από n πεπερασμένα στοιχεία. Οι τάσεις, σ_{ix} , σ_{yi} , τ_i για $i = 1, \dots, n$ που λαμβάνονται από τους υπολογισμούς στο μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων βρίσκονται στο κέντρο του κάθε στοιχείου, (x_i, y_i) , και είναι παράλληλες στις κύριες διαστάσεις του (a : η μακριά πλευρά, b : η κοντή πλευρά). Για τον υπολογισμό της αντοχής, ωστόσο, η μεθοδολογία απαιτεί τις τάσεις αναφοράς στα άκρα του, σ_x, σ_y, τ . Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιείται το Appendix 1 του κεφαλαίου 8 “Stress based reference stresses”.

Η μέθοδος επιτρέπει τον προσδιορισμό των κατανομών τάσεων στα άκρα του θλιβόμενου ελάσματος παρεμβάλλοντας καμπύλη δευτέρου βαθμού ή ευθεία χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και με τη χρήση σταθμισμένου μέσου.

Προσδιορισμός σ_x

Η κατανομή των τάσεων στην διεύθυνση της μεγάλης πλευράς θεωρείται πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού ως εξής:

$$\sigma_x(x) = C x^2 + D x + E$$

Η καλύτερη προσέγγιση της $\sigma_x(x)$ βρίσκεται ελαχιστοποιώντας το τετραγωνικό σφάλμα, Π , θεωρώντας την επιφάνεια του κάθε στοιχείου, A_i , ως συντελεστή στάθμισης. Οι συντελεστές του πολυωνύμου βρίσκονται μηδενίζοντας τις παραγώγους του σφάλματος.

$$\Pi = \sum_{i=1}^n A_i [\sigma_{ix} - (C x_i^2 + D x_i + E)]^2$$

$$\left[\begin{array}{l} \frac{\partial \Pi}{\partial C} = 2 \sum_{i=1}^n A_i x_i^2 [\sigma_{ix} - (C x_i^2 + D x_i + E)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial D} = 2 \sum_{i=1}^n A_i x_i [\sigma_{ix} - (C x_i^2 + D x_i + E)] = 0 \\ \frac{\partial \Pi}{\partial E} = 2 \sum_{i=1}^n A_i [\sigma_{ix} - (C x_i^2 + D x_i + E)] = 0 \end{array} \right.$$

Αφού προσεγγισθεί η κατανομή των τάσεων, η τάση αναφοράς λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη από τις τρεις παρακάτω τιμές.

- σ_{x1} : Μέση τιμή της $\sigma_x(x)$ για $x \in (0, b)$
- σ_{x2} : Μέση τιμή της $\sigma_x(x)$ για $x \in (a - b, a)$

σ_{x3} : Μέση τιμή της $\sigma_x(x)$ για $x \in (x_{min}, x_{max})$, $x_{min} = -\frac{b}{2} - \frac{D}{2C}$, $x_{max} = \frac{b}{2} - \frac{D}{2C}$, δηλαδή σε απόσταση $\frac{b}{2}$ γύρω από το σημείο μεγιστοποίησης της $\sigma_x(x)$. Αν το διάστημα (x_{min}, x_{max}) βρίσκεται σε μία από τις προηγούμενες περιοχές τότε η σ_{x3} αγνοείται.

Η τάση αναφοράς σ_x , θεωρείται εν γένει ομοιόμορφη δηλαδή ο λόγος τάσεων πλευρών είναι $\psi = 1$.

Προσδιορισμός σ_y

Για τον προσδιορισμό της σ_y , ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με την διαφορά ότι η τάση προσεγγίζεται με την ευθεία $\sigma_y(x) = Bx + A$, ελαχιστοποιώντας το τετραγωνικό σφάλμα $\Pi = \sum_{i=1}^n A_i [\sigma_{iy} - (Bx_i + A)]^2$. Μετά την επίλυση του συστήματος και την εύρεση της ευθείας $\sigma_y(x)$, η τάση αναφοράς λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη από τις τιμές της στα άκρα του ελάσματος:

$$\sigma_y = \max(A, A + Ba)$$

Για τον λόγο τάσεων πλευρών έχουμε:

$$\psi = \frac{\min(A, A+Ba)}{\max(A, A+Ba)}, \quad \text{για } \sigma_y \geq 0$$

$$\psi = 1, \quad \text{για } \sigma_y < 0$$

Προσδιορισμός τ

Η διατμητική τάση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την επιφάνεια του κάθε στοιχείου ως συντελεστή βαρύτητας στην εύρεση του σταθμισμένου μέσου όπως παρακάτω:

$$\tau = \frac{\sum_1^n A_i \tau_i}{\sum_1^n A_i}$$

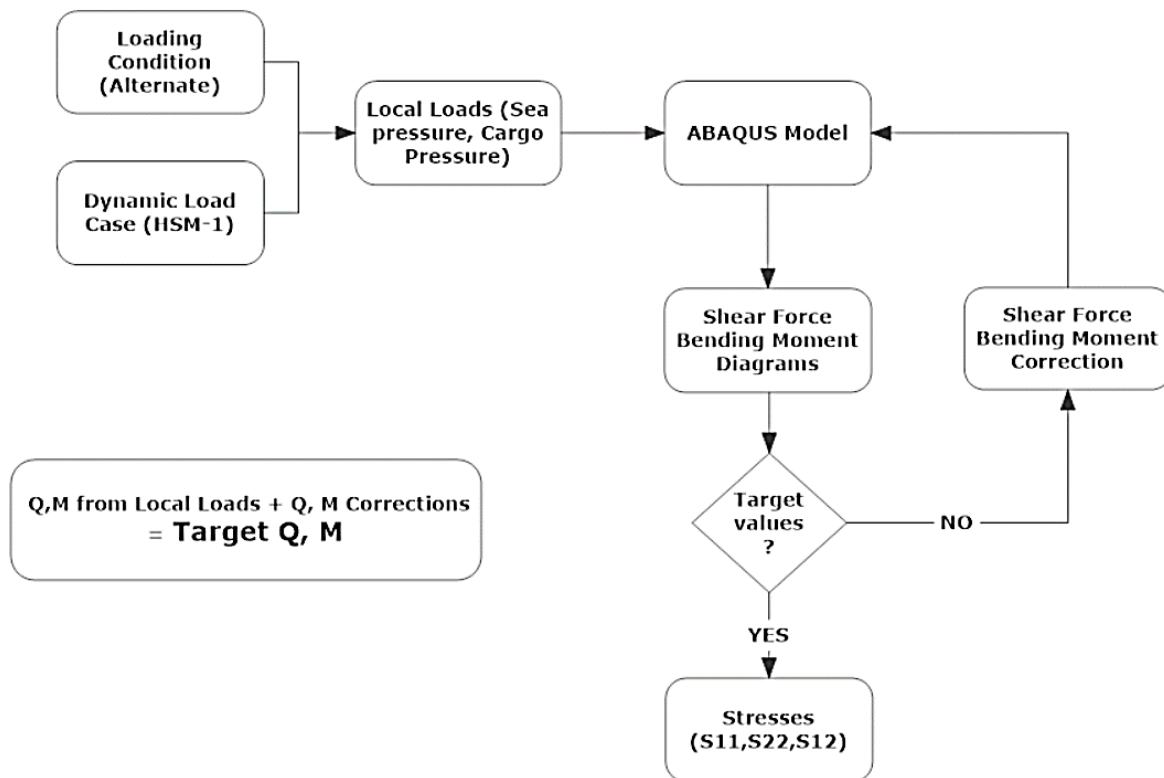
5 Δεδομένα εφαρμογής μελέτης λυγισμού

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου που περιγράφουν οι κανονισμοί για τη μελέτη του λυγισμού με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε βασίστηκε κυρίως στις απαιτήσεις των κεφαλαίων 7 (Direct Strength Analysis) και 8 (Buckling).

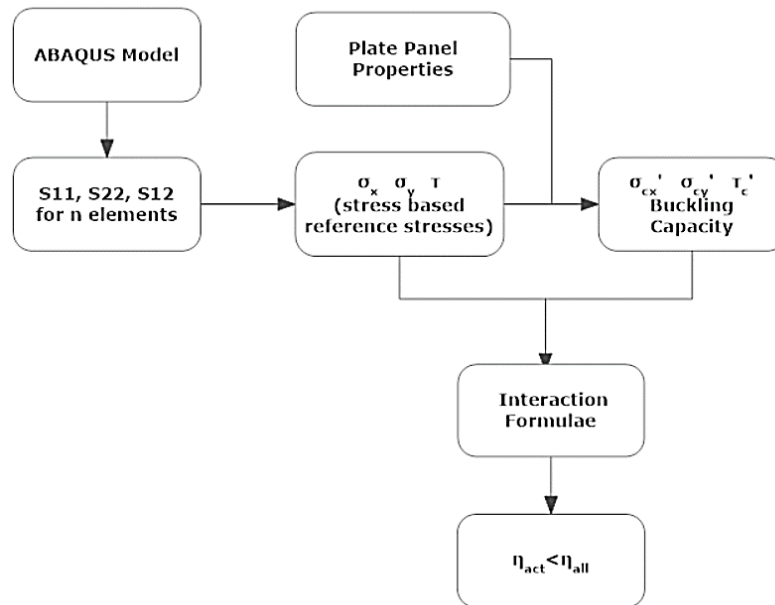
Το πρόβλημα μελετάται για ένα υπάρχον εμπορικό πλοίο τύπου bulk carrier, για το οποίο είναι γνωστά τα κύρια κατασκευαστικά στοιχεία των τριών μεσαίων κυτών. Με δεδομένο το πλοίο, επιλέγεται η φόρτωση του από το stability booklet και από τους κανονισμούς επιλέγεται μία απαιτούμενη dynamic load case για αυτήν τη φόρτωση. Έπειτα υπολογίζονται εξωτερικές (θάλασσα) και εσωτερικές (ξηρό φορτίο) πιέσεις σε όλα τα σημεία της κατασκευής καθώς και καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις κατά το μήκος του πλοίου.

Στη συνέχεια, δημιουργείται ακριβές μοντέλο έκτασης τριών κυτών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/CAE με τις ιδιότητες των υλικών αφού έχει αφαιρεθεί το περιθώριο διάβρωσης. Στο μοντέλο επίσης εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες που ορίζονται από τους κανονισμούς και οι τοπικές φορτίσεις που υπολογίστηκαν προηγουμένως. Ακόμα, δημιουργείται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση του μοντέλου επαναλαμβάνεται κάποιες φορές, προσθέτοντας σταθερές ροπές στα άκρα για την διόρθωση των κατανομών καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.

Από την τελική ανάλυση λαμβάνονται οι τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στοιχείο ενός απλού panel και ακολουθείται η διαδικασία εύρεσης των τάσεων αναφοράς για κάθε panel. Από αυτές τις τάσεις, τη θέση και γεωμετρία του κάθε panel υπολογίζονται η αντοχή του σε λυγισμό και ο συντελεστής χρησιμότητας του. Τέλος, ο συντελεστής χρησιμότητας συγκρίνεται με την επιτρεπόμενη τιμή για να εξακριβωθεί η αντοχή όλης της κατασκευής σε λυγισμό.



Σχήμα 21 Διαδικασία καθορισμού φορτίσεων



Σχήμα 22 Διαδικασία ελέγχου αντοχής σε λυγισμό κάθε panel

5.1 Το πλοίο

Το πλοίο για το οποίο έγινε η παρακάτω μελέτη πρόκειται για ένα πλοίο μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην 5 κυτών με τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

Ship Name	<i>Star Challenger</i>
Ship Type	<i>Bulk Carrier</i>
Date of Built	2012
Builder	IMABARI SHIPBUILDING
Class	NK
Notation	CSR, BC-A, GRAB 20
Length (B.P.) [m]	195.00
Length (O.A.) [m]	199.98
Length (W.L.) [m]	198.45
Beam (MLD.) [m]	32.24
Depth (MLD.) [m]	18.60
Scantling Draught (MLD.) [m]	13.00
Ballast Draught (MLD.) [m]	5.50
DWT [t]	61 462
Displacement Δ [t]	72 322
L.S. [t]	10 860
C_B	0.859
Frame Spacing (Cargo area) [mm]	800
Double bottom depth [m]	1.74

Πίνακας 14 Κύρια χαρακτηριστικά Star Challenger

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β, δίνονται το σχέδιο γενικής διάταξης των χώρων φορτίου και το σχέδιο μέσης τομής βάσει των οποίων έγινε η μοντελοποίηση.

5.2 Η κατάσταση φόρτωσης

Για τη μελέτη επιλέχθηκε μία κατάσταση φόρτωσης από το stability manual του Star Challenger. Αυτή πρόκειται για εναλλάξ φόρτιση που επιτυγχάνει το βύθισμα σχεδίασης. Στη συνέχεια, δίνονται τα βασικά στοιχεία της φόρτωσης που θα χρησιμοποιηθούν στον υπολογισμό των φορτίσεων.

LOADING TYPE	ALTERNATE HEAVY		
T_{LC}		13.00	[m]
ρ_c		1.32	[t/m ³]
DISPLACEMENT		72322.00	[t]
CARGO HOLD NO. 1	100%	18623.30	[t]
CARGO HOLD NO. 2	0%	0.00	[t]
CARGO HOLD NO. 3	100%	21103.10	[t]
CARGO HOLD NO. 4	0%	0.00	[t]
CARGO HOLD NO. 5	100%	20397.90	[t]
LONGITUDINAL STRENGTH			
MAX. BENDING MOMENT	FR. 170.88	1,421,124	[kNm]
MIN. BENDING MOMENT	FR. 84.83	-234,004	[kNm]
MAX. SHEAR FORCE	FR. 74.00	61,886	[kN]
MIN. SHEAR FORCE	FR. 195.25	-60,198	[kN]

Πίνακας 15 Κατάσταση φόρτωσης υπό μελέτη

Σημειώνεται ότι οι δεξαμενές έρματος στην περιοχή των κυτών φορτίου είναι κενές. Επίσης, η μέγιστη διατμητική δύναμη εμφανίζεται στην πρωραία φρακτή του Cargo Hold No. 2 και η ελάχιστη στην πρυμναία φρακτή του Cargo Hold No. 4. Ακόμα, όπως φαίνεται στον πίνακα, η πυκνότητα του φορτίου είναι 1.32 [t/m³]. Ωστόσο, σύμφωνα με του κανονισμού⁴⁴, για πλοία τύπου bulk carrier με notation BC-A σε alternate loading condition με πλήρως γεμάτα αμπάρια, η πυκνότητα φορτίου για τους υπολογισμούς λαμβάνεται ως εξής:

$$\rho_c = \frac{M_{HD} + 0.1M_H}{V_{Full}}$$

Όπου:

M_{HD} : Μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο για ένα κύτος.

M_H : Φορτίο κύτους που αντιστοιχεί σε ομογενή φόρτωση με το μέγιστο βύθισμα.

V_{Full} : Χωρητικότητα κύτους συμπεριλαμβανομένου του όγκου του στομίου.

ρ_c	1.39	[t/m ³]
M_{HD}	21103.10	[t]
M_H	12253.90	[t]
V_{full}	16010.98	[m ³]

Πίνακας 16 Πυκνότητα φορτίου για τους υπολογισμούς

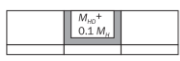



⁴⁴ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch.4, Sec. 6, Table 1]

Τέλος για κάθε φρακτή υπολογίζεται η διόρθωση διατμητικής δύναμης που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια.⁴⁵

Bulkhead	Correction	
$\Delta Q_{\text{mdf},54}$	1700	[kN]
$\Delta Q_{\text{mdf},43}$	-1902	[kN]
$\Delta Q_{\text{mdf},32}$	1921	[kN]
$\Delta Q_{\text{mdf},21}$	-1421	[kN]

5.3 Dynamic load case

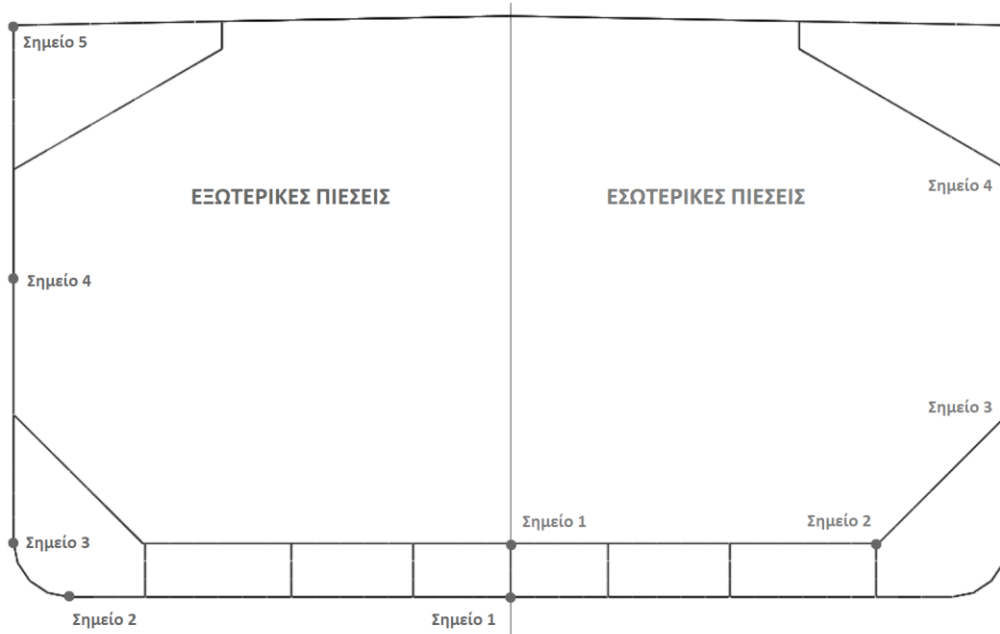
Για την επιλογή της dynamic load case λήφθηκε υπόψη ο πίνακας [Pt. 1, Ch. 4, Sec. 8, Table 13] και συγκεκριμένα η περίπτωση 11. Ο πίνακας αυτός δίνει τους απαιτούμενους συνδυασμούς φορτίσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη μελέτη με πεπερασμένα στοιχεία στην περίπτωση bulk carrier σε εναλλάξ φόρτωση και με το μελετώμενο αμπάρι γεμάτο. Η dynamic load case που επιλέχθηκε φαίνεται στη συνέχεια:

No.	Description	Loading pattern	Aft	Mid	Fore	Draught	$C_{\text{BM-LC}}$	$C_{\text{SF-LC}}$	Dynamic Load Case
11	Alternate load full					T_{SC}	0%	100% ^(*) max SF-LC	HSM-1
(*)	For the mid-hold where $x_{\text{b-aft}} \leq 0.5L$ and $x_{\text{b-fwd}} \geq 0.5L$, the shear force is to be adjusted to target value at aft bulkhead of the mid-hold.								

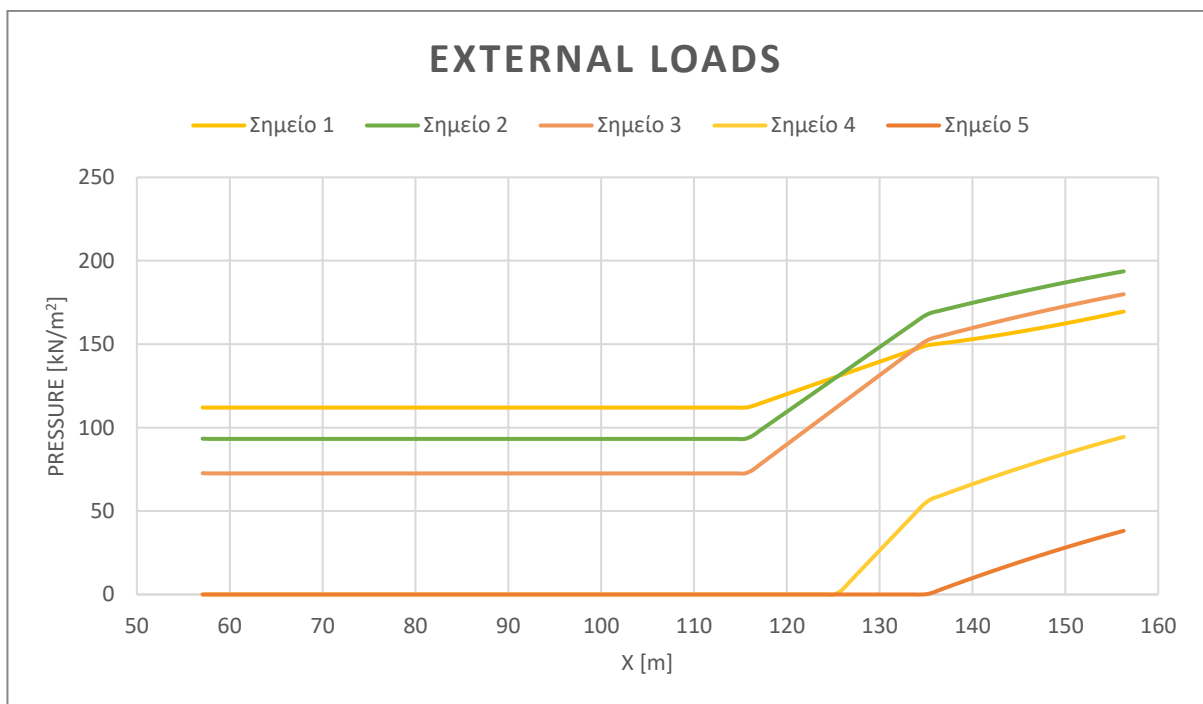
5.4 Υπολογισμός φορτίσεων

Η HSM-1 πρόκειται για κατάσταση sagging. Τα εσωτερικά και εξωτερικά φορτία της κατασκευής υπολογίζονται σύμφωνα με το Ch.4, σύμφωνα με την παραπάνω κατάσταση εναλλάξ φόρτωσης στα σημεία που φαίνονται αριθμημένα στο παρακάτω σχήμα. Μεταξύ των σημείων αυτών οι κατανομές της πίεσης είναι, εξ ορισμού, γραμμικές όπως φαίνεται από τον τρόπο υπολογισμού τους, για κάθε εγκάρσια διατομή του πλοίου. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι καμπτικές ροπές που ορίζονται από τους κανονισμούς. Η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό είναι πιο δυσμενής από τις προκύπτουσες στο stability manual του πλοίου οπότε αυτή θα ληφθεί ως η επιτρεπόμενη. Τέλος, υπολογίζονται οι διατμητικές δυνάμεις σε κυματισμό. Η επιτρεπόμενη διατμητική δύναμη σε ήρεμο νερό λαμβάνεται ως η δυσμενέστερη όλων των καταστάσεων φόρτωσης. Παρακάτω δίνονται οι αντίστοιχες κατανομές σε όλο το μήκος του μοντέλου τριών αμπαριών.

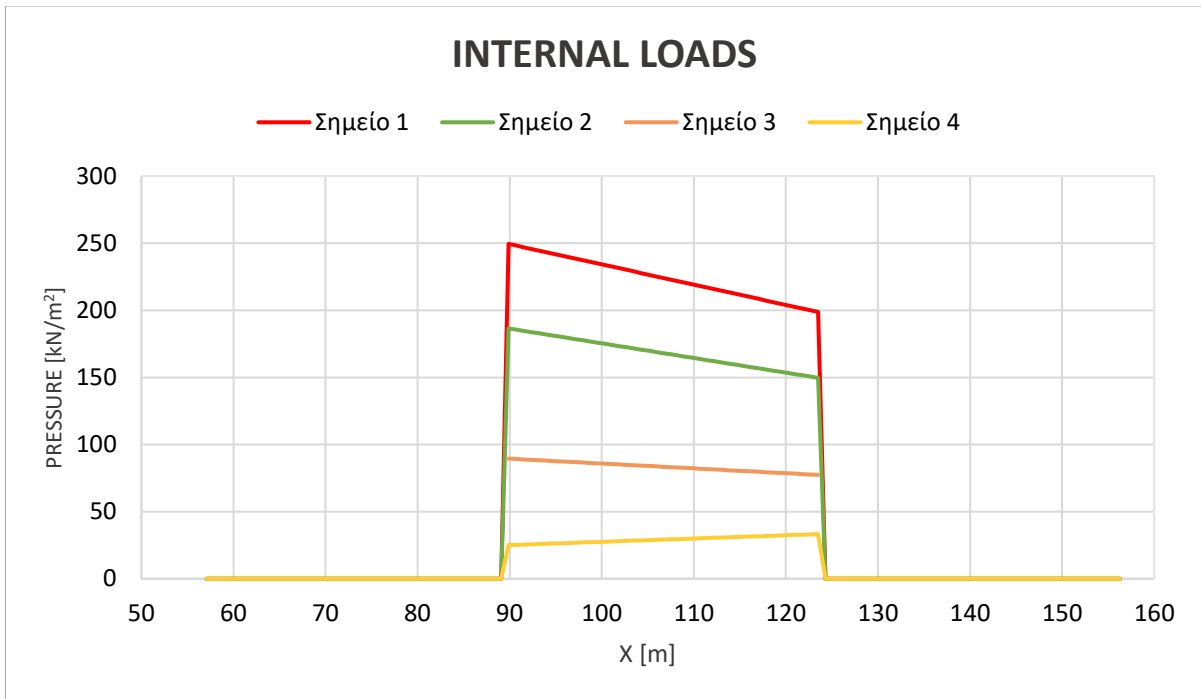
⁴⁵ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017) [Pt. 1, Ch.5, Sec. 1, 3.6.1]



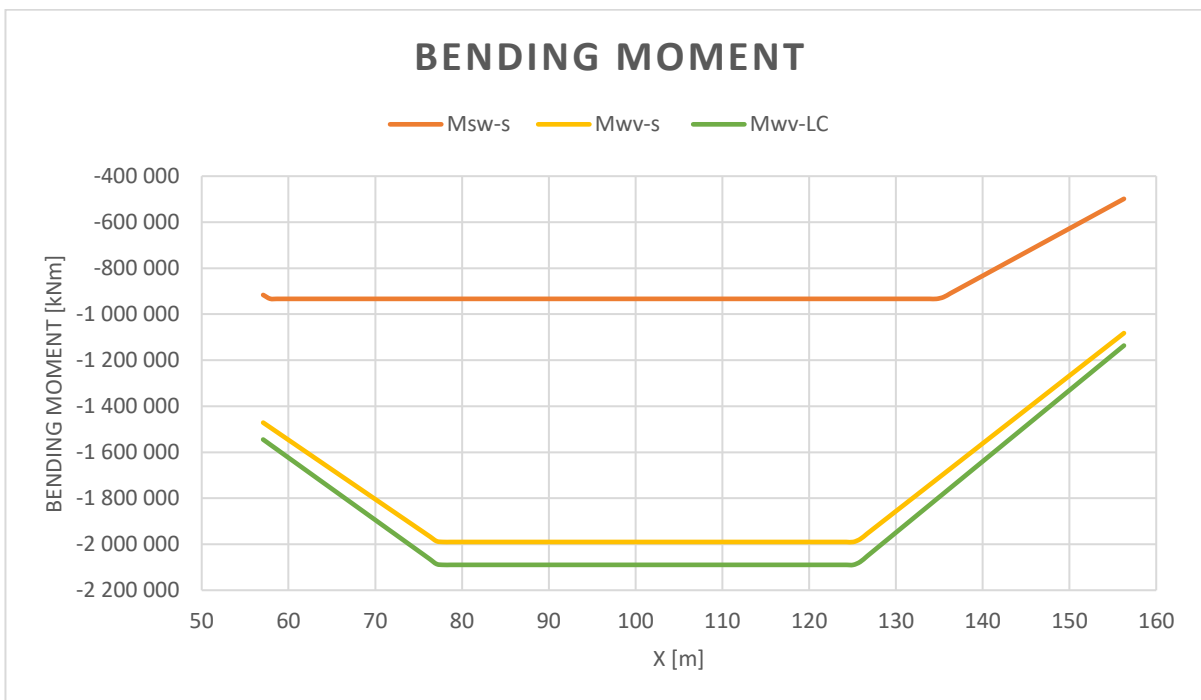
Σχήμα 23 Σημεία υπολογισμού εσωτερικών και εξωτερικών τοπικών πιέσεων



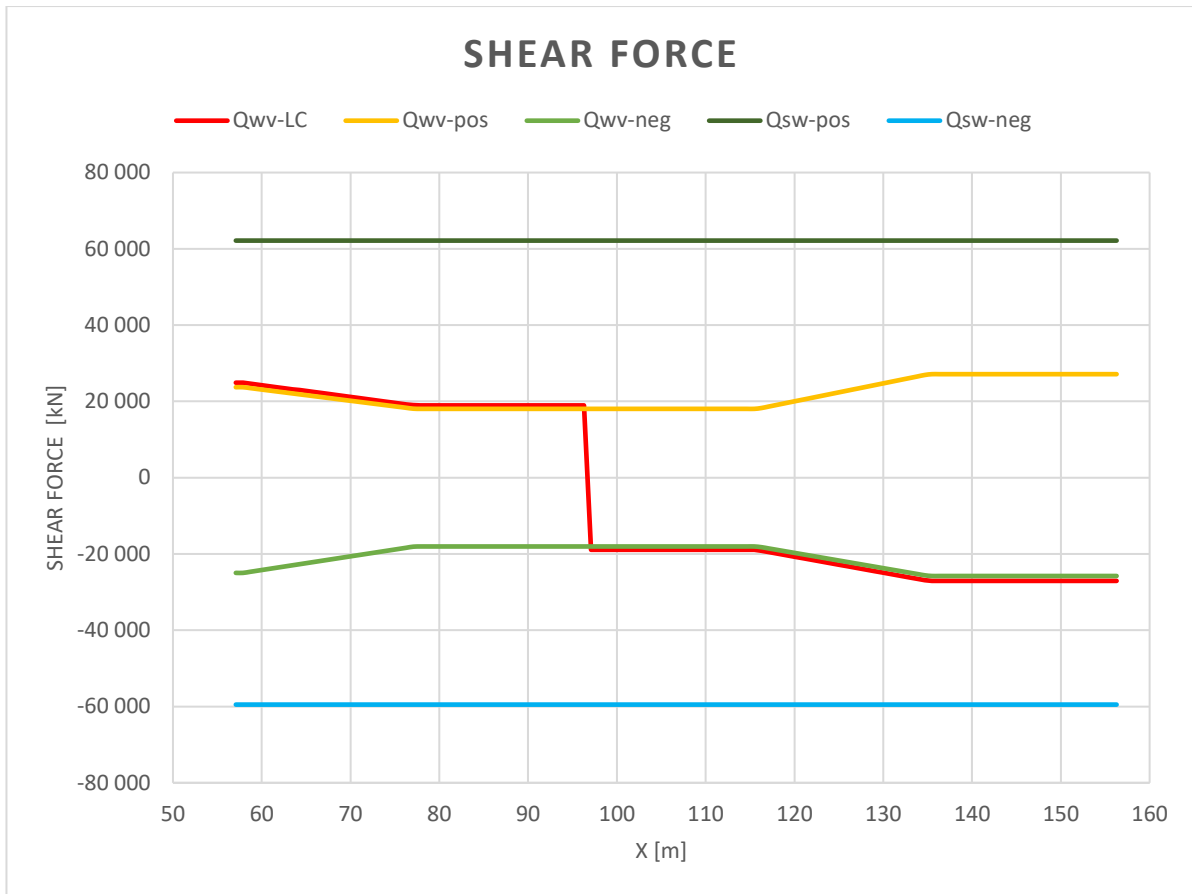
Σχήμα 24 Κατανομή εξωτερικών πιέσεων θάλασσας



Σχήμα 25 Κατανομή εσωτερικών πιέσεων ξηρού φορτίου



Σχήμα 26 Κατανομή καμπτικών ροπών σε ήρεμο νερό και κυματισμό



Σχήμα 27 Κατανομή διατμητικών δυνάμεων σε ήρεμο νερό και κυματισμό

6 Μοντελοποίηση στο ABAQUS/CAE

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη του λυγισμού στα διαμήκη στοιχεία του μεσαίου αμπαριού (Cargo Hold No. 3) του πλοίου των προηγούμενων κεφαλαίων. Για το λόγο αυτό και σύμφωνα με τους κανονισμούς δημιουργήθηκε πλήρες μοντέλο τριών κυτών στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS/CAE. Στη συνέχεια, θα περιγράψει η διαδικασία της δημιουργίας και της μεθόδου ανάλυσης.

Σημειώνεται ότι το σύστημα μονάδων που θα ακολουθηθεί σε αυτήν την παράγραφο συμφωνεί με το λογισμικό όπως στη συνέχεια:

Μέγεθος	Μονάδα μέτρησης
Μήκος	mm
Μάζα	tonne
Δύναμη	N
Τάση	MPa
Πυκνότητα	Tonne/mm ³
Χρόνος	s

Πίνακας 17 Μονάδες μέτρησης στο πρόγραμμα ABAQUS/CAE

6.1 Δημιουργία μοντέλου

Το μοντέλο περιλαμβάνει τα 3 κεντρικά κύτη του προαναφερθέντος Bulk Carrier. Συγκεκριμένα, το πρυμναίο κύτος του μοντέλου είναι το Cargo Hold No. 4, το μεσαίο πρόκειται για το Cargo Hold No. 3 και το πρωραίο, το Cargo Hold No. 2. Και τα τρία εκτείνονται στο παράλληλο τμήμα της γάστρας και η κατασκευή τους είναι παρόμοια πράγμα που διευκολύνει την αναπαράσταση. Γενικά χαρακτηριστικά του μοντέλου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Αριθμός κυτών	3	
Αριθμός φρακτών	4	
Μήκος μοντέλου (συνολικό)	99200 [mm]	124 [fr.]
Μήκος Cargo Hold No. 4	32000 [mm]	40 [fr.]
Μήκος Cargo Hold No. 3	32000 [mm]	40 [fr.]
Μήκος Cargo Hold No. 2	32000 [mm]	40 [fr.]
Πλάτος μοντέλου	32240 [mm]	
Ύψος μοντέλου (κύριο κατάστρωμα)	18600 [mm]	
Ύψος μοντέλου (συνολικό)	20000 [mm]	

Πίνακας 18 Χαρακτηριστικά μοντέλου στο πρόγραμμα ABAQUS/CAE

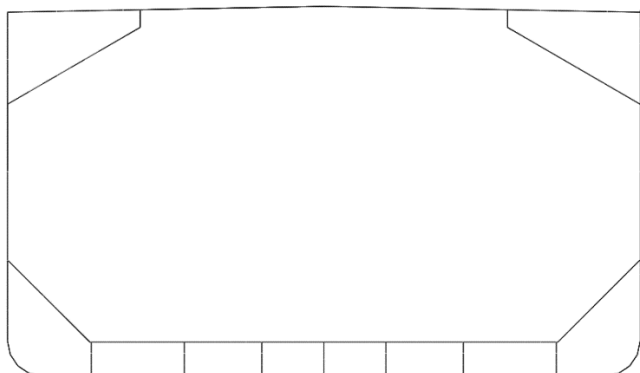
6.1.1 Γεωμετρία

Η γεωμετρία του μοντέλου δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα ABAQUS/CAE. Αρχικά δημιουργήθηκε μία σειρά ανεξάρτητων *Parts* για τον κάθε τύπο κατασκευαστικού στοιχείου και στη συνέχεια, τα *Parts* τοποθετήθηκαν ως *Instances* στις κατάλληλες θέσεις δημιουργώντας ένα *Assembly*. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η εντολή *Merge* ώστε όλα τα στοιχεία να δημιουργήσουν ένα μόνο νέο *Part* με όνομα *Full_Model*. Στη συνέχεια, δίνεται μια αναλυτικότερη περιγραφή της μεθόδου δημιουργίας του μοντέλου.

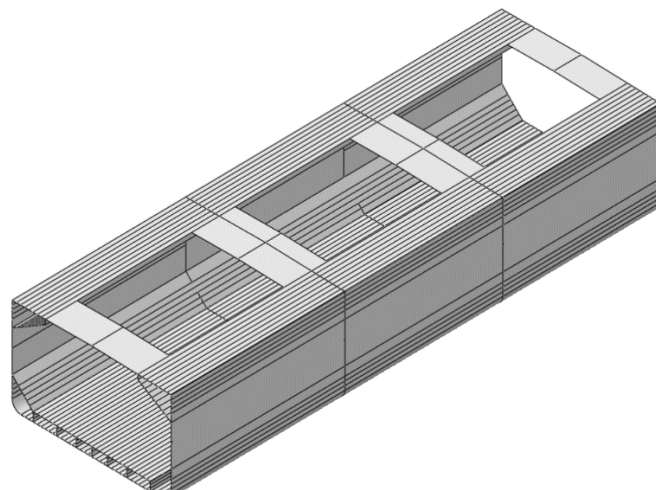
Διαμήκη ελάσματα

Τα διαμήκη ελάσματα (*Type: Shell*) δημιουργήθηκαν με τη χρήση ενός 2D σχεδίου μέσης τομής του πλοίου το οποίο δημιουργήθηκε στο AutoCAD και εισήχθη στο ABAQUS/CAE ως *Sketch* τύπου *.sat. Με

τη χρήση του *Sketch* τα διαμήκη στοιχεία έγιναν *Extrude* σε μήκος 99200 mm. Με τον τρόπο αυτό δημιουργήθηκαν τα ελάσματα του καταστρώματος, των πλευρών, του εσωτερικού και εξωτερικού πυθμένα, τα κεκλιμένα ελάσματα hopper και topside και τα girders του διπύθμενου. Στη συνέχεια, έγιναν 3 ορθογωνικά *partitions* διαστάσεων 23200 x 18720 mm στις θέσεις των στομιών κυτών και αφαιρέθηκαν τα περιττά *Faces* για να δημιουργηθούν τα στόμια. Τέλος δημιουργήθηκαν εγκάρσια *partitions* που χωρίζουν τα τρία κύτη και διαμήκη *partitions* στις θέσεις που θα τοποθετηθούν στη συνέχεια, τα διαμήκη ενισχυτικά. Το *Part* φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



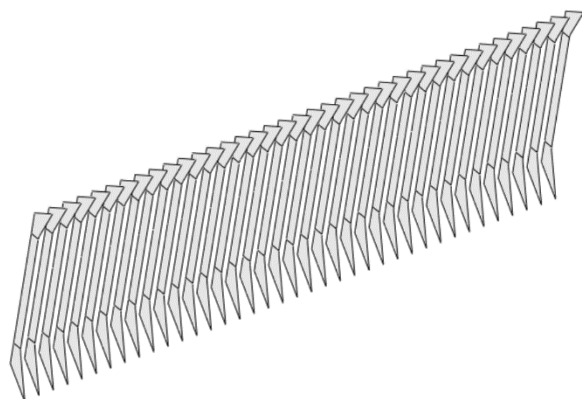
Εικόνα 1 Part - Longitudinal Plates



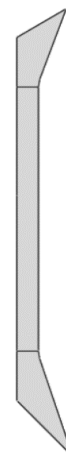
Εικόνα 2 Part - Longitudinal Plates

Εγκάρσια frames

Τα εγκάρσια frames δημιουργήθηκαν ως *Planar Shells* ξανά με τη χρήση του 2D Sketch. Δημιουργήθηκαν *Partitions* στη βάση των brackets για τη βελτίωση της ποιότητας του *mesh* στη συνέχεια. Τέλος χρησιμοποιήθηκαν οι εντολές *Array* και *Mirror* για την τελική τοποθέτηση των frames στις προδιαγεγραμμένες θέσεις τους.



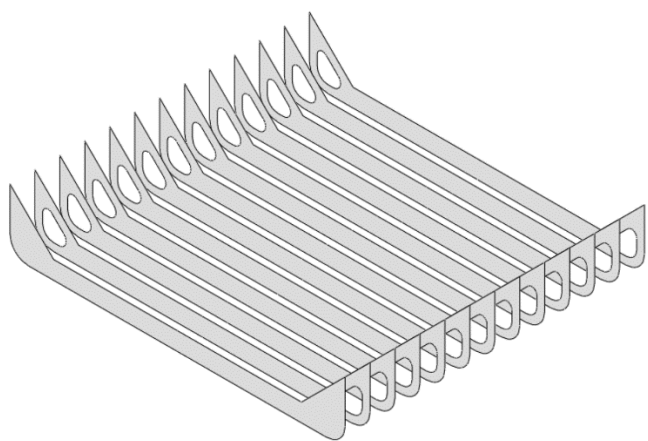
Εικόνα 3 Part - Frames



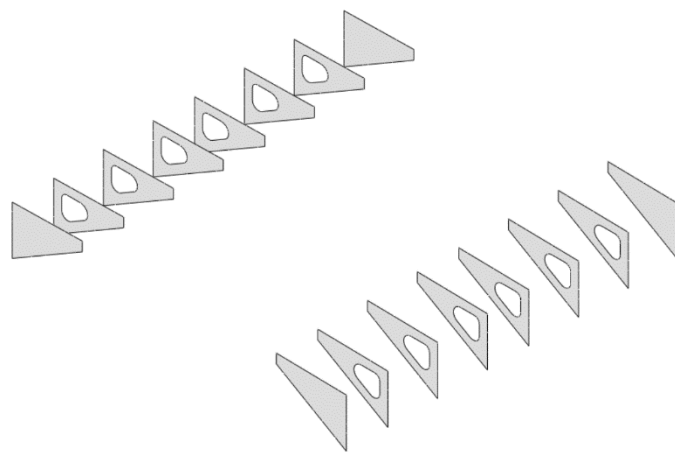
Εικόνα 4 Part - Frames

Webs και floors

Η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των webs και floors είναι παρόμοια με την προηγούμενη. Εν προκειμένω, δημιουργήθηκαν οι απαραίτητες σπές στα μη υδατοστεγή στοιχεία.



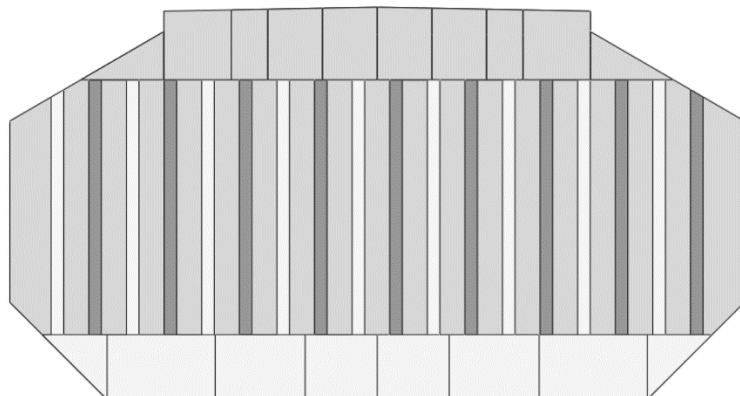
Εικόνα 5 Part - Floors



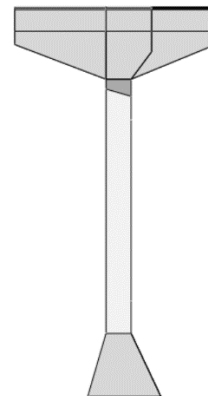
Εικόνα 6 Part - Webs

Πτυχωτές φρακτές

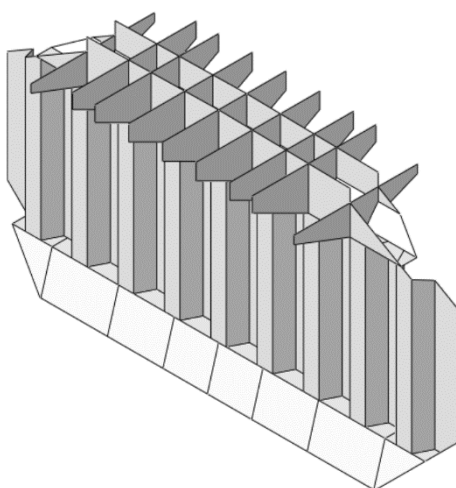
Για την κατασκευή των πτυχωτών φρακτών δημιουργήθηκαν επιπλέον 2D Sketches στο AutoCAD για τη γεωμετρία των stools και των πτυχώσεων και συνδυάστηκαν για την δημιουργία του Part που φαίνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 7 Part - Corrugated Bulkhead



Εικόνα 8 Part - Corrugated Bulkhead



Εικόνα 9 Part - Corrugated Bulkhead

Assembly

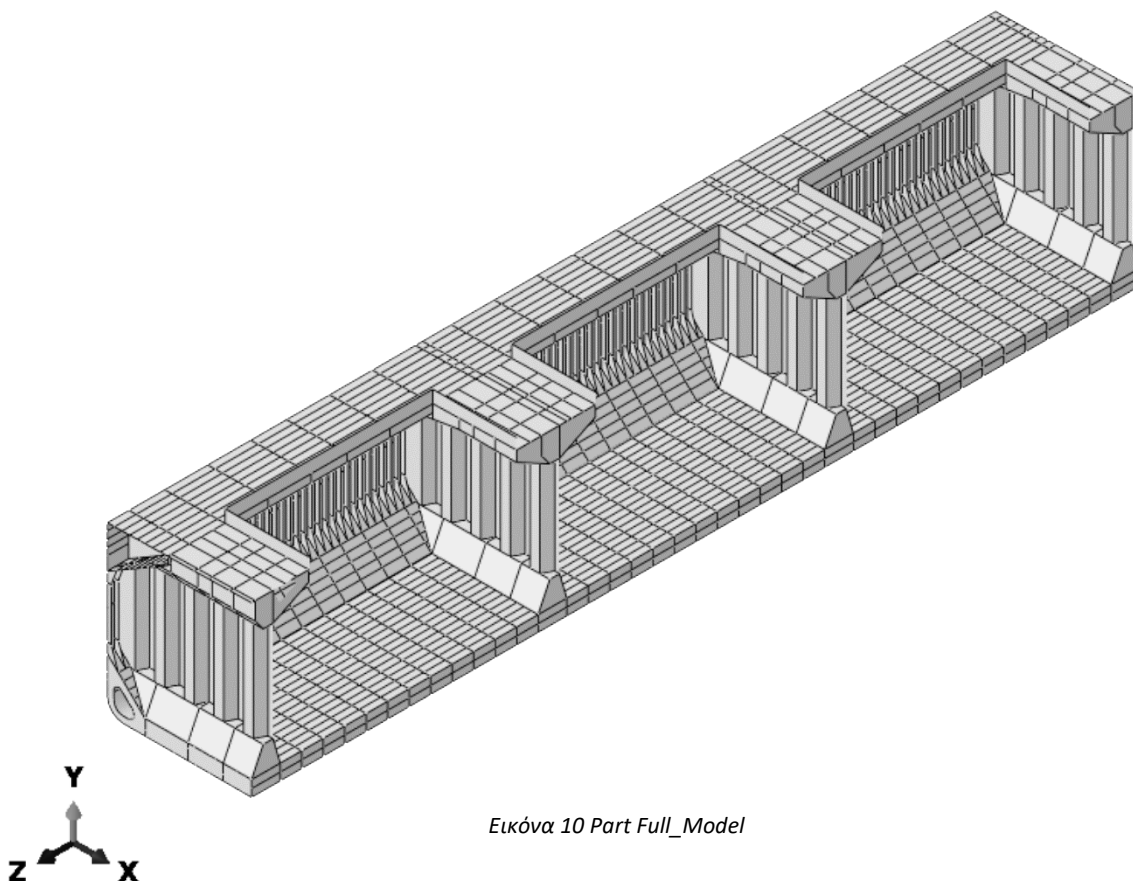
Τα *Parts* χρησιμοποιήθηκαν στο *Module Assembly* για να δημιουργήσουν το πλήρες μοντέλο. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε ένα μοναδικό *Part* ώστε να υπάρχει συσχέτιση της γεωμετρίας κατά την διακριτοποίηση. Τέλος, έγινε διόρθωση της γεωμετρίας σε αρκετά σημεία ώστε να μην υπάρχουν ακμές με μήκος μικρότερο των 10 mm και επιφάνειες με εμβαδόν μικρότερο των 10,000 mm². Σημειώνεται πως το σύστημα συντεταγμένων του ABAQUS/CAE διαφέρει από το συμβατικό και στο εξής θα προσδιορίζεται και το σύστημα αναφοράς. Γενικά, στο νέο σύστημα αναφοράς ο διαμήκης άξονας (πρώην x) είναι ο άξονας Z, ο εγκάρσιος άξονας (πρώην y) είναι ο X και ο κάθετος άξονας (πρώην z) είναι ο Y.

$$x \rightarrow Z$$

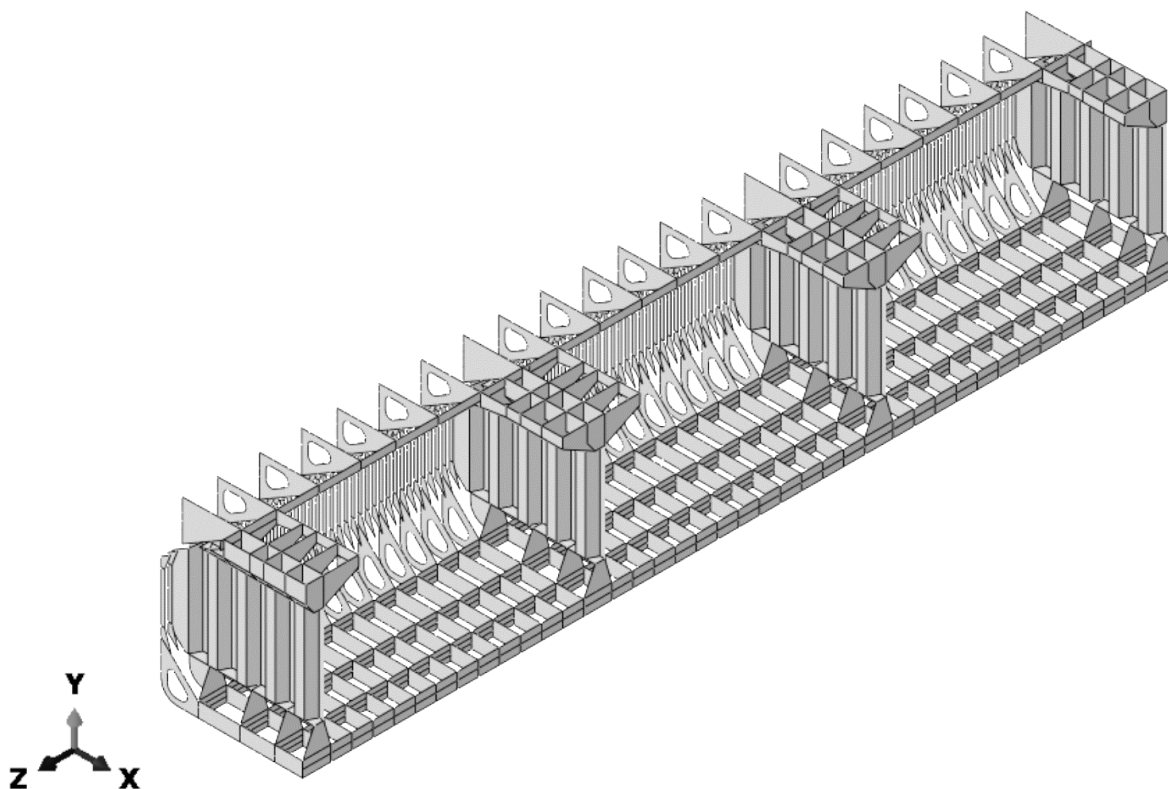
$$y \rightarrow X$$

$$z \rightarrow Y$$

Στις επόμενες εικόνες φαίνεται το τελικό μοντέλο.



Εικόνα 10 Part Full_Model



Εικόνα 11 Part Full_Model

6.1.2 Ιδιότητες υλικού

Για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων των κατασκευαστικών στοιχείων, κατ' αρχάς, υπολογίστηκε το net thickness για όλα τα ελάσματα του μοντέλου, σύμφωνα με τα corrosion additions⁴⁶ των κανονισμών. Οι υπολογισμοί φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

STRUCTURAL MEMBER		t_c [mm]	t_{c1} [mm]	t_{c2} [mm]
BOTTOM PLATES		3.0	1.2	1.0
INNER BOTTOM PLATES		5.5	1.2	3.7
SIDE PLATES	TOPSIDE TANK	3.5	1.7	1.0
	CARGO HOLD	4.0	2.0	1.5
	HOPPER TANK	3.5	1.7	1.0
DECK PLATES	TOPSIDE TANK	4.0	1.7	1.7
	CARGO HOLD	4.0	1.8	1.7
TOPSIDE SLOPING PLATES		4.0	1.8	1.7
HOPPER SLOPING PLATES		6.0	1.7	3.7
SIDE FRAMES	UPPER BRACKET	4.5	1.8	1.8
	FRAME	4.5	2.0	2.0
	LOWER BRACKET	5.0	2.2	2.2
GIRDERS		3.0	1.2	1.2
INNER BOTTOM WEB PLATES		3.0	1.2	1.2
TOPSIDE WEB PLATES		4.0	1.7	1.7

Πίνακας 19 Corrosion additions για BC-A

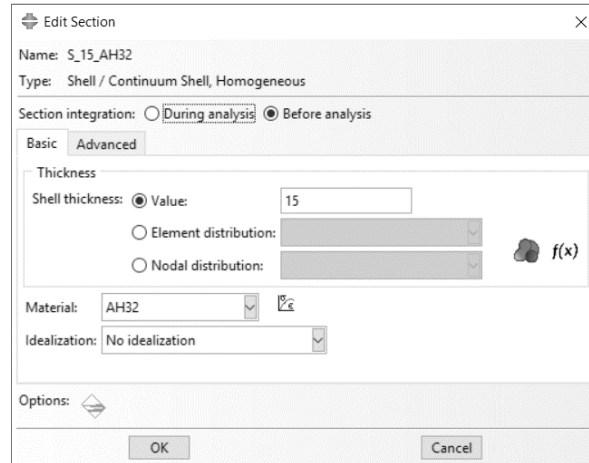
Στο πρόγραμμα ABAQUS/CAE δημιουργήθηκαν οι δύο τύποι *Materials*, που εμφανίζονται στην κατασκευή όπως στον επόμενο πίνακα και μετά όλα τα απαιτούμενα *Sections* τύπου *Shell* που

⁴⁶ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 3, Sec. 3]

περιέχουν τις ιδιότητες των ελασμάτων όπως το παράδειγμα της ακόλουθης εικόνας. Σημειώνεται πως τα *Materials* θεωρούνται γραμμικά και ο υπολογισμός του πίνακα ακαμψίας γίνεται, σε κάθε περίπτωση, μία φορά κατά την έναρξη της ανάλυσης.

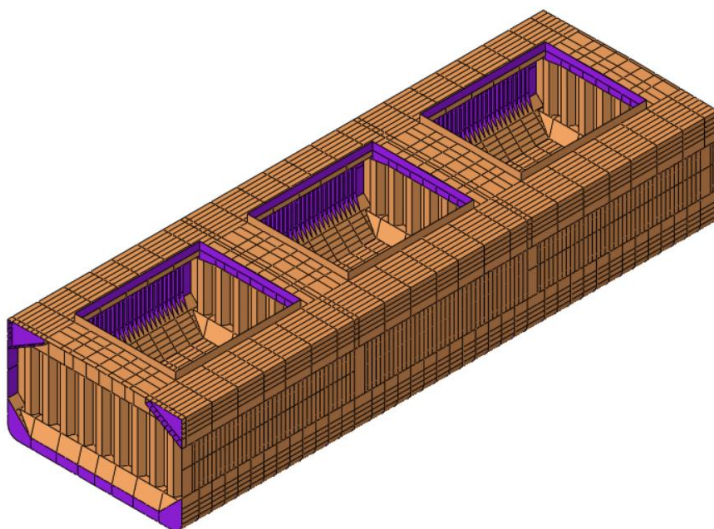
Ιδιότητα	AH32 Steel	AH36 Steel
Mass density [t/mm ³]	7.8E-09	7.8E-09
Young's Modulus [MPa]	2.06E+06	2.06E+06
Poisson's Ratio	0.3	0.3
Yield Stress [MPa]	315	355

Πίνακας 20 Materials

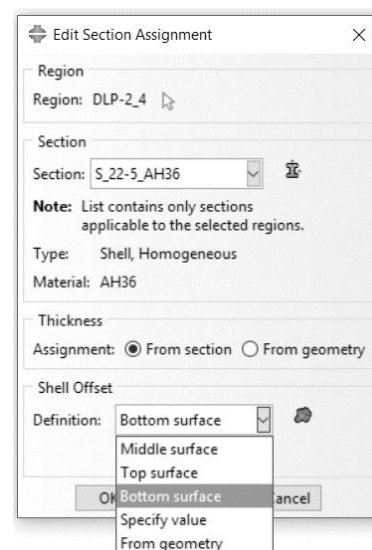


Εικόνα 12 Δημιουργία Shell Section

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκαν τα κατάλληλα *Partitions*, στο μοντέλο του ABAQUS/CAE, στα όρια των ελασμάτων και κατάλληλα *Sets* στοιχείων ίδιου τύπου. Τέλος, πριν το *Section Assignment* στα αντίστοιχα *Sets*, γίνεται έλεγχος του προσανατολισμού του κάθε ελάσματος ώστε να υπάρχει ομοιογένεια στο μοντέλο και να επιλεγθεί σωστά η πλευρά κατανομής του πάχους σε σχέση με την επιφάνεια του *Shell*. Στο παρακάτω σχήμα, οι πλευρές που εμφανίζονται με καφέ χρώμα είναι η πλευρές *Bottom* του ελάσματος. Κατά το *Section Assignment* επιλέγεται η πλευρά *Bottom* ώστε να μην υπάρχει αλληλοκάλυψη με την διατομή των ενισχυτικών.



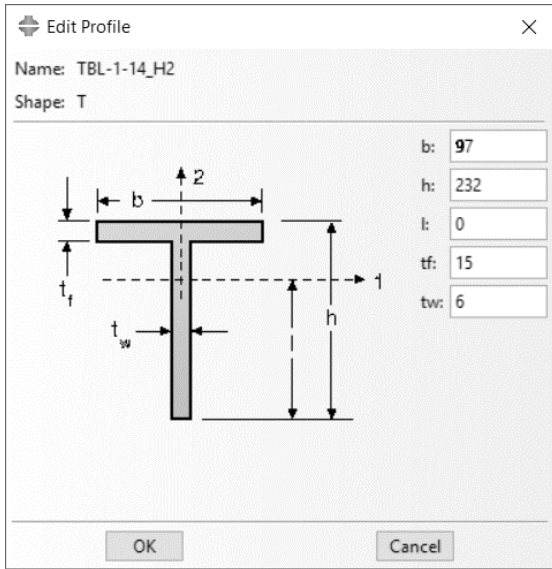
Εικόνα 13 Shell Orientation (Brown/Purple)



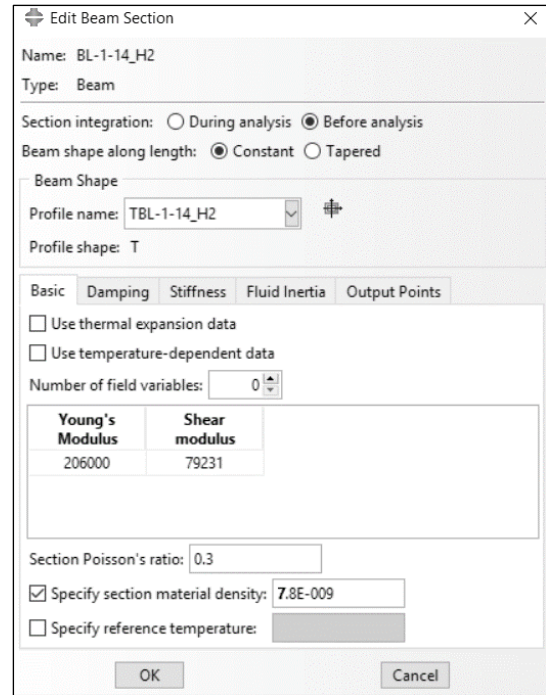
Εικόνα 14 Section Assignment

6.1.3 Ενισχυτικά

Τα ενισχυτικά μοντελοποιήθηκαν σύμφωνα με τους Κανονισμούς ως beam elements. Αυτό σημαίνει ότι για τον ορισμό τους χρειάζεται η διατομή τους, ο διαμήκης άξονας τους και ο προσανατολισμός του ενισχυτικού σε σχέση με τη φορά του άξονα. Τα *Beam Sections* δημιουργούνται αφού δημιουργηθεί το αντίστοιχο *Profile* της διατομής. Η διαδικασία περιγράφεται στις παρακάτω εικόνες.

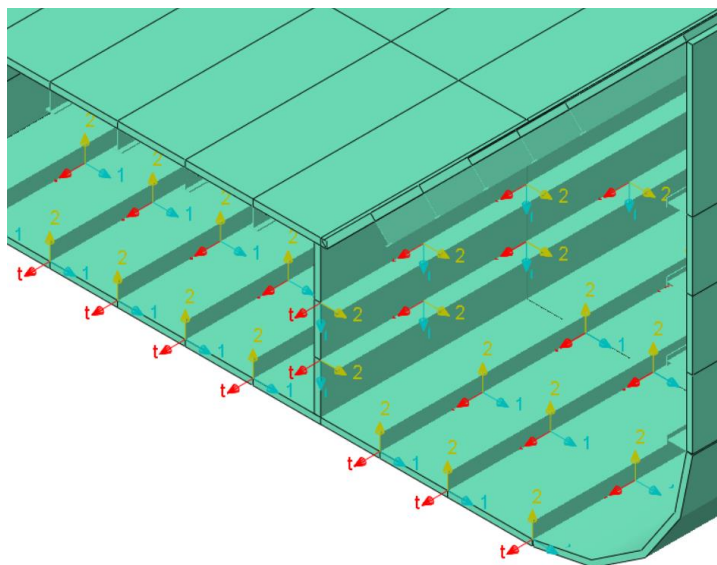


Εικόνα 15 Δημιουργία Profile ενισχυτικού διατομής T

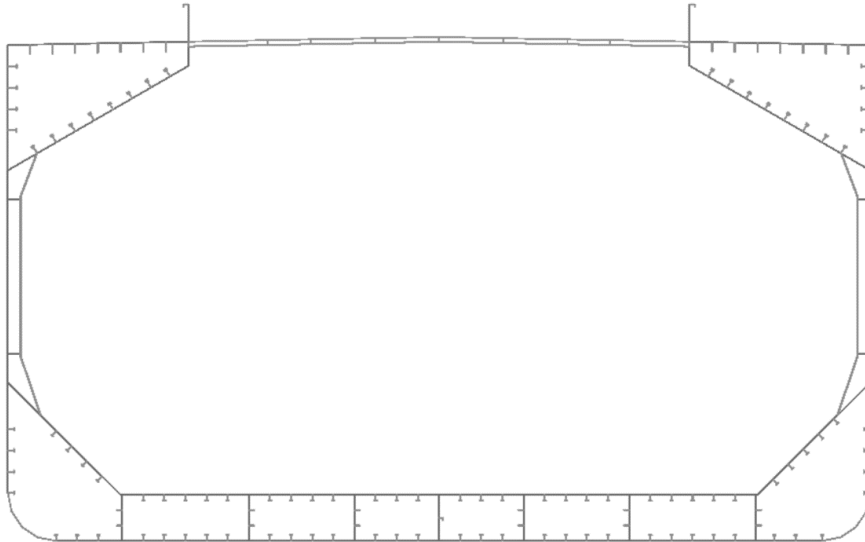


Εικόνα 16 Δημιουργία Beam Section ενισχυτικού διατομής T

Οι θέσεις των διαμήκων ενισχυτικών είχαν ορισθεί προηγουμένως δημιουργώντας *Partitions* στις αντίστοιχες θέσεις συγκόλλησης των ενισχυτικών. Ο καθορισμός του προσανατολισμού και τελικά το *Section Assignment* γίνεται ξεχωριστά για κάθε ενισχυτικό αναλόγως τη θέση του στην κατασκευή.



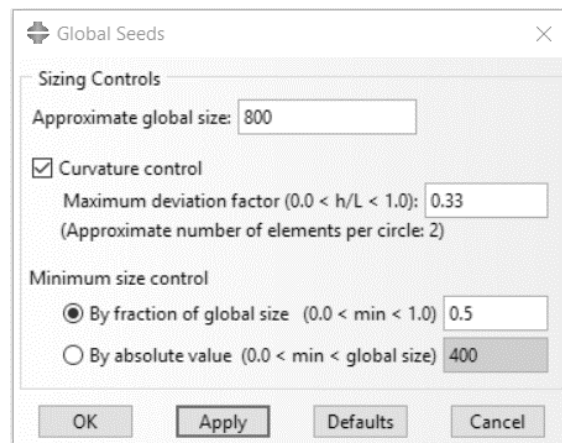
Εικόνα 17 Orientation και Section Assignment διαμήκων ενισχυτικών



Εικόνα 18 Τελική μέση τομή μοντέλου

6.1.4 Mesh

Οι βασικές παράμετροι της διακριτοποίησης δόθηκαν κατά τον ορισμό των *Global Seeds*, δηλαδή της επιθυμητής πυκνότητας πλέγματος. Αυτή επιλέχθηκε ίση με το Frame Spacing του μοντέλου. Η επιθυμητή ποιότητα του πλέγματος δίνεται στις δύο επόμενες επιλογές για τον λόγο των πλευρών των στοιχείων και το ελάχιστο μέγεθος στοιχείων, όπως φαίνεται παρακάτω.



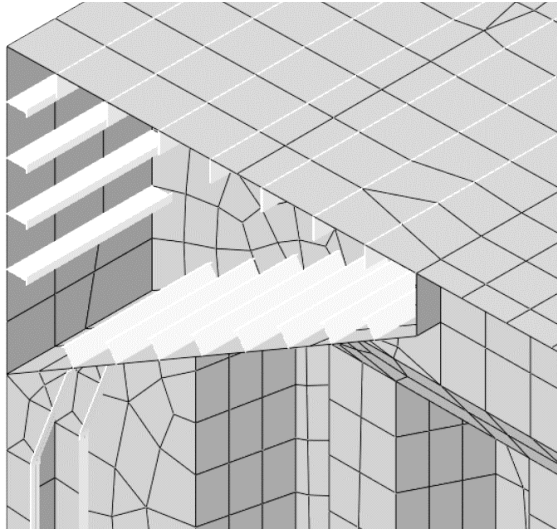
Εικόνα 19 Ορισμός πυκνότητας πλέγματος διακριτοποίησης

Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν οι τύποι Elements που θα αποδοθούν κατά τη δημιουργία του πλέγματος. 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). Το τελικό μοντέλο παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά διακριτοποίησης.

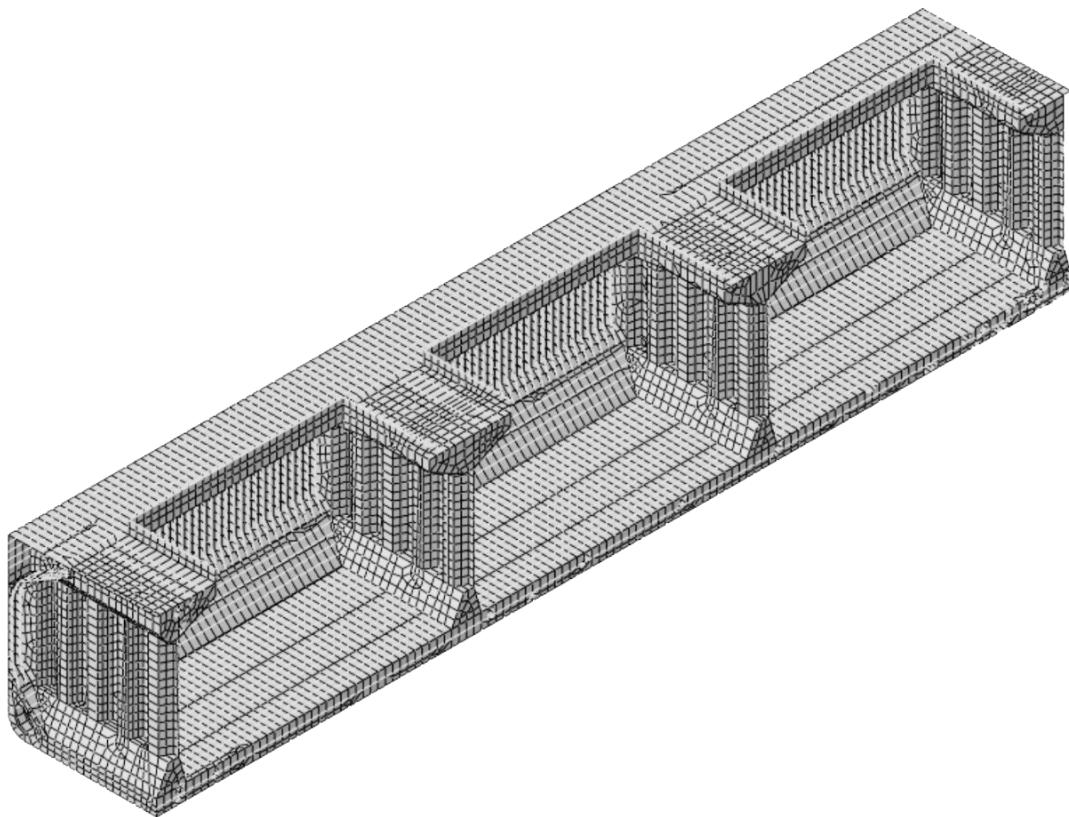
Element Type	Element Shape	Geometric order	Elements	
B31	line	linear	18993	27.94%
S4R	quadrilateral	linear	46617	68.57%
S3	triangular	linear	2372	3.49%
Total Nodes	43328			
Total Elements	67982			

Πίνακας 21 Τύποι στοιχείων διακριτοποίησης

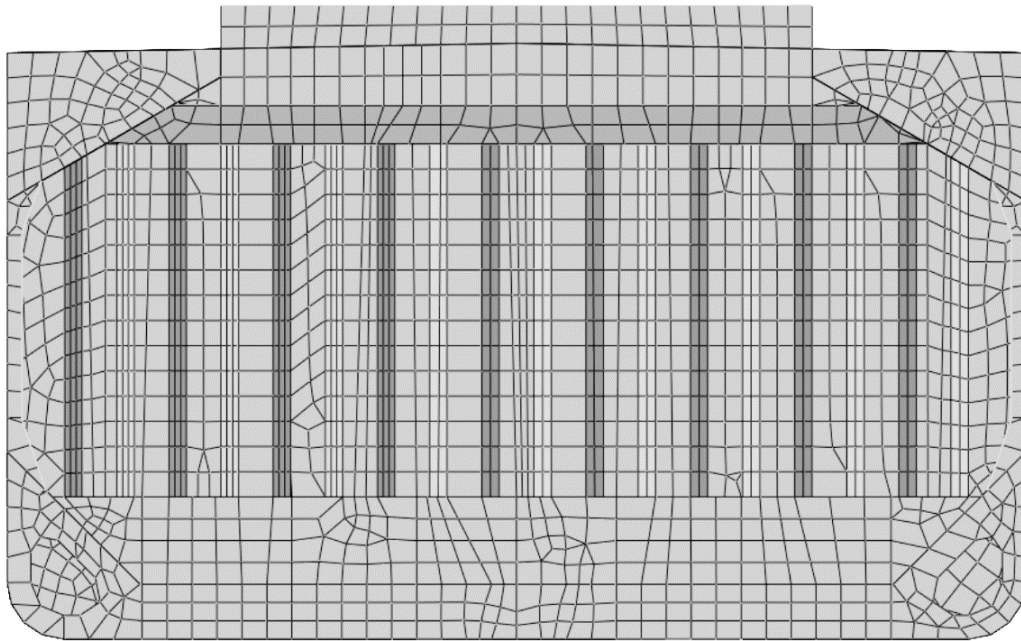
Στις εικόνες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διακριτοποίησης σε λεπτομέρειες του μοντέλου.



Εικόνα 20 Λεπτομέρεια Mesh



Εικόνα 21 Mesh μοντέλου



Εικόνα 22 Mesh μοντέλου

6.2 Φορτίσεις

Στις παραγράφους που ακολουθούν, περιγράφεται η διαδικασία ορισμού των φορτίσεων στο μοντέλο. Οι φορτίσεις αυτές περιλαμβάνουν το βάρος της κατασκευής, τις πιέσεις του φορτίου και της θάλασσας αλλά και τα διορθωτικά φορτία που προβλέπουν οι κανονισμοί στο Κεφάλαιο 7.

6.2.1 Τοπικά φορτία

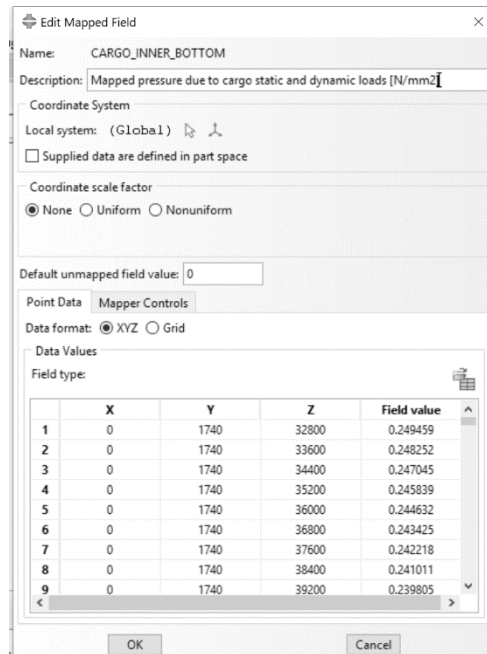
Βάρος κατασκευής

Το ίδιο βάρος της κατασκευής υπολογίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα έχοντας θέσει σε όλα τα στοιχεία την πυκνότητα του υλικού ίση με αυτή του χάλυβα $\rho_{st} = 7.8 \frac{t}{m^3} = 7.8 \cdot 10^{-9} t/mm^3$. Επίσης ορίζονται ξεχωριστά το βάρος των γερανών ως κατανεμημένο φορτίο στην επιφάνεια της έδρασης τους ($W_{crane} = 63 t$). Τέλος, το βάρος των καλυμμάτων των στομιών ορίστηκε ως γραμμικά κατανεμημένο φορτίο στα ελάσματα των στομιών ($W_{cover} = 100 t$).

Πιέσεις θάλασσας

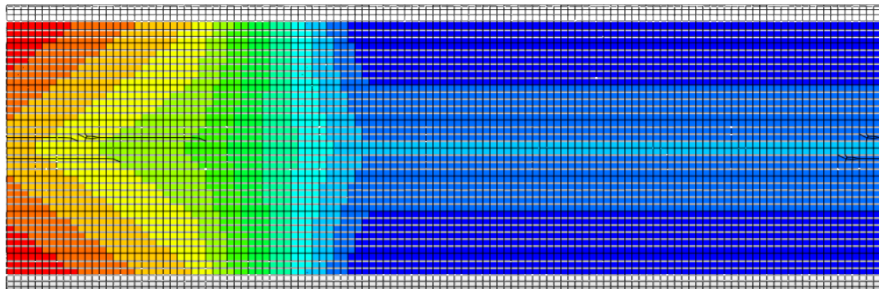
Όπως είχε αναφερθεί και προηγουμένως, οι θαλάσσιες πιέσεις από τους κανονισμούς υπολογίστηκαν σε κάποια χαρακτηριστικά σημεία της εγκάρσιας διατομής για όλο το μήκος του πλοίου. Η κατανομή μεταξύ αυτών των σημείων είναι γραμμική.

Για τον ορισμό των φορτίων δημιουργήθηκαν ορισμένα *Mapped Analytical Fields* στο ABAQUS/CAE, που πρόκειται για πίνακες $[X \ Y \ Z \ P]$ που περιέχουν την τιμή της υπολογισμένης πίεσης P σε κάθε σημείο (X, Y, Z) . Σημειώνεται ότι, εν προκειμένω, χρησιμοποιείται το σύστημα αναφοράς του ABAQUS/CAE όπως ορίστηκε προηγουμένως. Η στήλη Z περιέχει την διαμήκη θέση κάθε εγκάρσιου νομέα, ενώ οι στήλες X και Y τις συντεταγμένες των σημείων υπολογισμού των φορτίσεων σε κάθε εγκάρσια διατομή. Η στήλη P περιέχει την υπολογισμένη πίεση σε N/mm^2 .

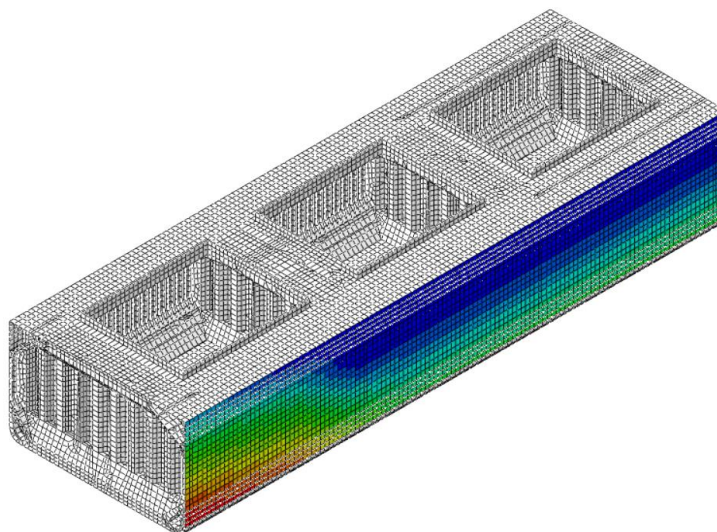


Εικόνα 23 Δημιουργία Mapped Analytical Field

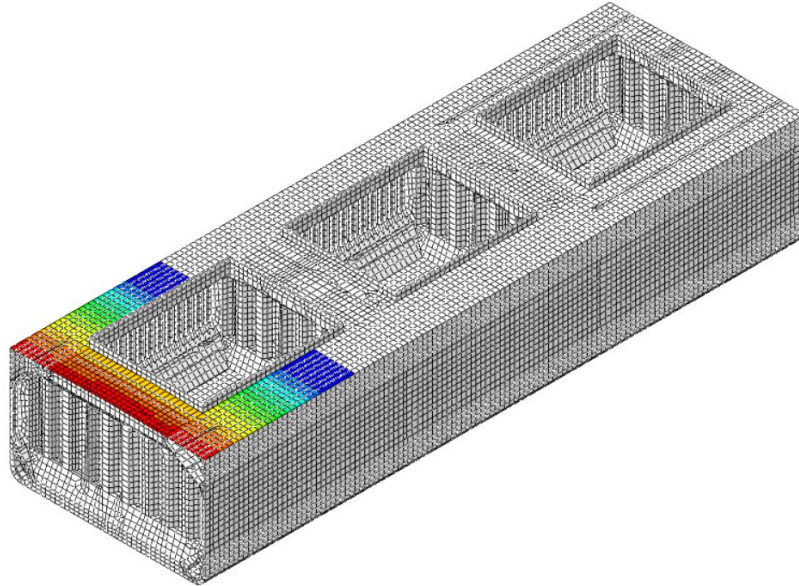
Πριν την έναρξη της επίλυσης, το ABAQUS/CAE υπολογίζει τις πιέσεις σε κάθε κόμβο της κατασκευής πραγματοποιώντας γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων του *Mapped Analytical Field*, παράγοντας έτσι την πραγματική φόρτιση σε όλα τα σημεία. Στη συνέχεια, δίνονται γραφικά οι φορτίσεις της θάλασσας που παράχθηκαν με αυτόν τον τρόπο. Σύμφωνα με την κατάσταση HSM-1 οι πιέσεις της θάλασσας αυξάνονται προς την πλώρη η οποία βρίσκεται στην κορυφή του κύματος.



Εικόνα 24 Πιέσεις θάλασσας στον πυθμένα



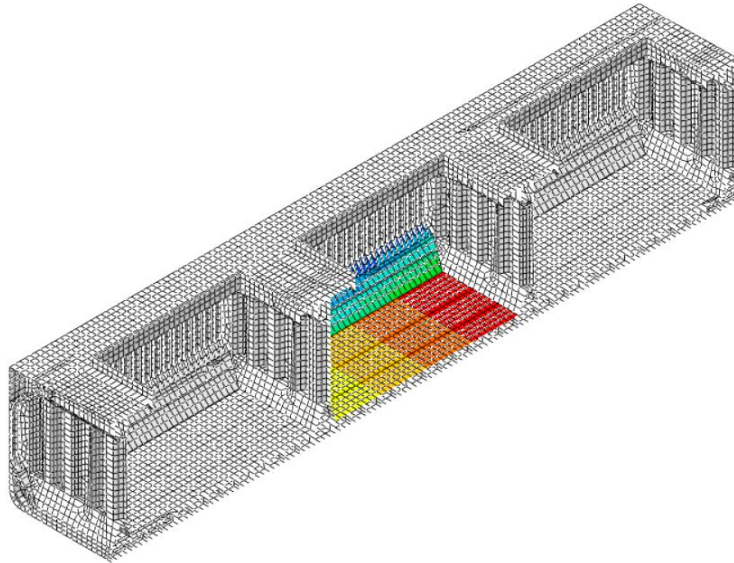
Εικόνα 25 Πιέσεις θάλασσας στις πλευρές



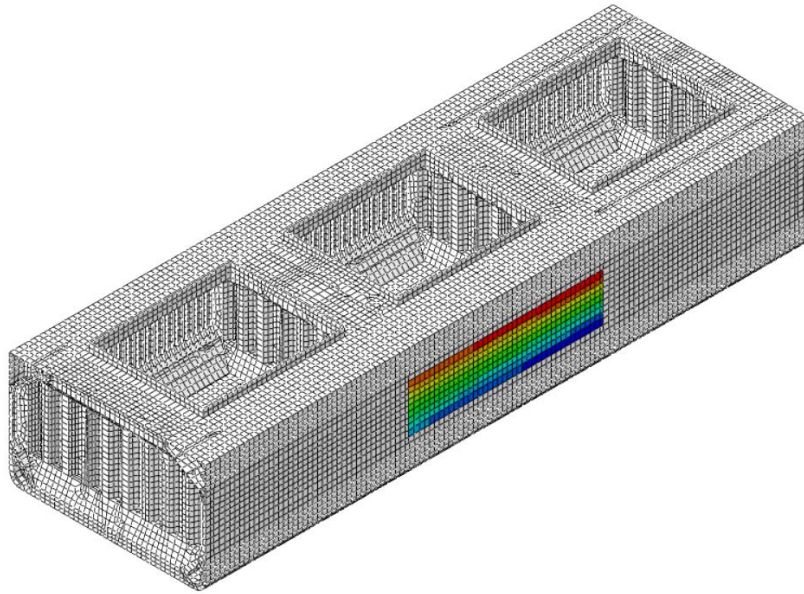
Εικόνα 26 Πιέσεις θάλασσας στο κατάστρωμα (Green Seas)

Πιέσεις φορτίου

Για τις πιέσεις φορτίου χρησιμοποιήθηκε η ίδια μεθοδολογία αλλά μόνο για το Cargo Hold No. 3 που είναι έμφορτο. Στη συνέχεια, δίνεται η γραφική αναπαράσταση του φορτίου στον εσωτερικό πυθμένα και στις πλευρές του κύτους.



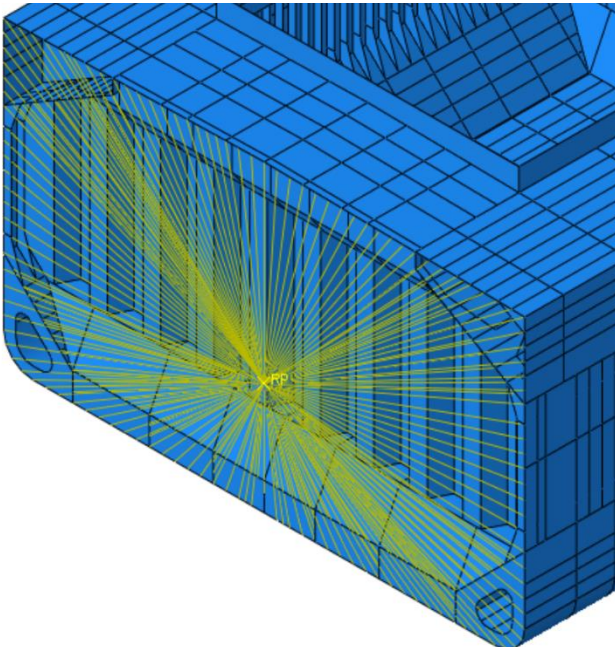
Εικόνα 27 Πιέσεις φορτίου στον εσωτερικό πυθμένα



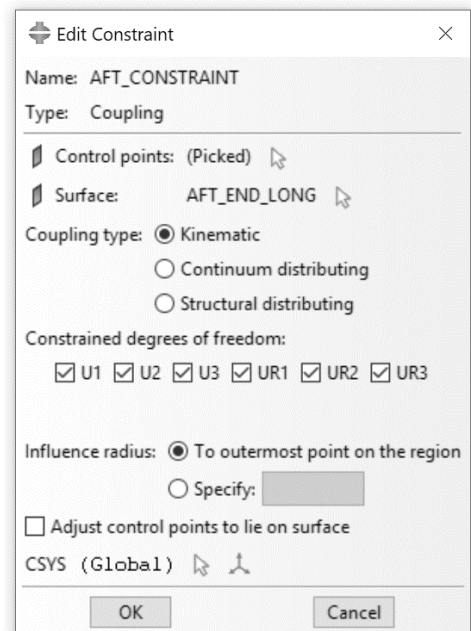
Εικόνα 28 Πιέσεις φορτίου στις πλευρές

6.2.2 Συνοριακές Συνθήκες

Για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Κανονισμών δημιουργήθηκαν δύο σημειακά αντικείμενα (*Point Part*) στον ουδέτερο άξονα του μοντέλου, στο πρυμναίο και πρωραίο άκρο του (ο Ο.Α. υπολογίζεται από το πρόγραμμα, *Query>Mass Properties*). Τα σημεία αυτά προστέθηκαν στο *Assembly* ως *Reference Points*. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε σύνδεση, *Coupling*, μεταξύ όλων των ακραίων σημείων των διαμήκων στοιχείων (εξαιρέθηκαν, δηλαδή, οι κόμβοι των *side frames*, *floors*, *webs* και *φρακτών*).



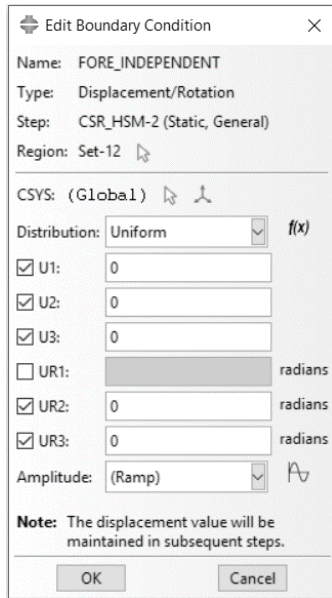
Εικόνα 29 Σύνδεση όλων των ακραίων κόμβων με το σημείο αναφοράς



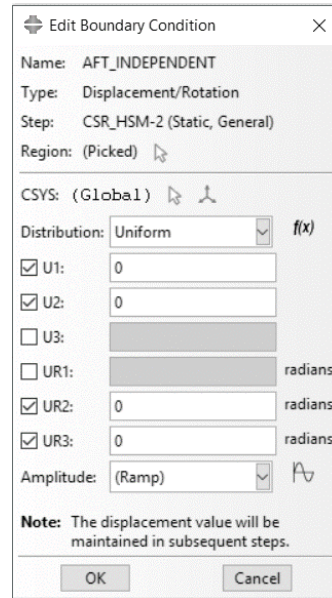
Εικόνα 30 Εφαρμογή Coupling

Στη συνέχεια, οι συνοριακές συνθήκες που περιγράφονται στο αντίστοιχο κεφάλαιο εφαρμόστηκαν μόνο στα *Reference Points*. Έτσι, προκύπτει συνθήκη απλής άρθρωσης στην πλήρη και κύλισης με άρθρωση στην πρύμνη του μοντέλου όπως φαίνεται και στη συνέχεια. Σημειώνεται 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.



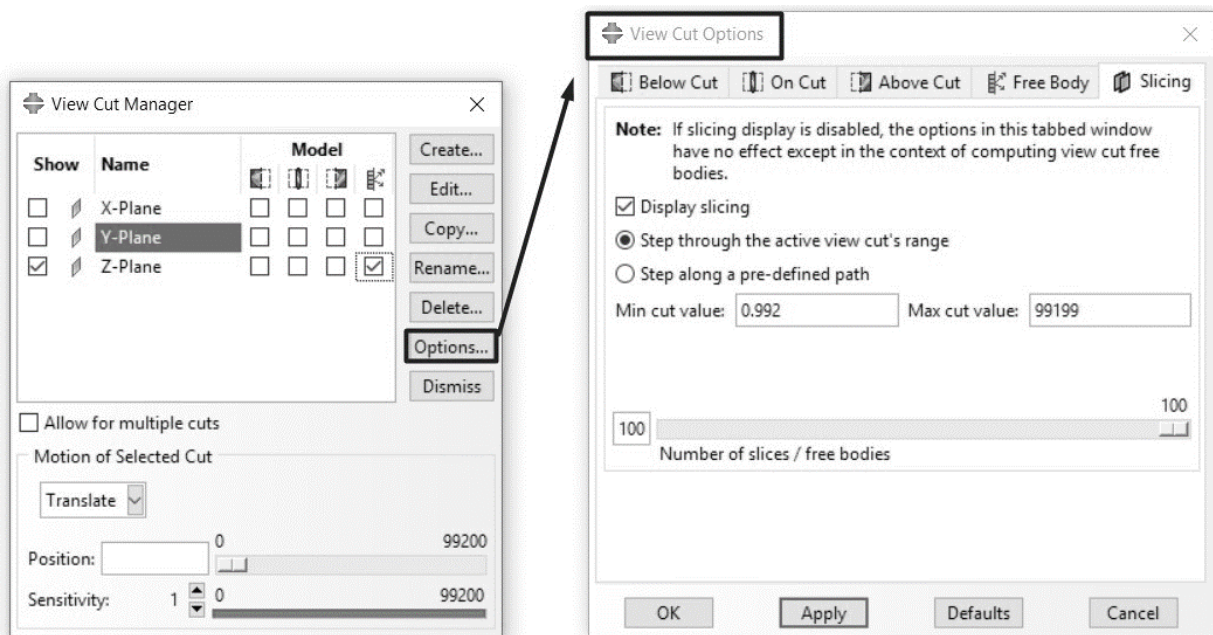
Εικόνα 31 Συνοριακή συνθήκη πλήρης



Εικόνα 32 Συνοριακή συνθήκη πρύμνης

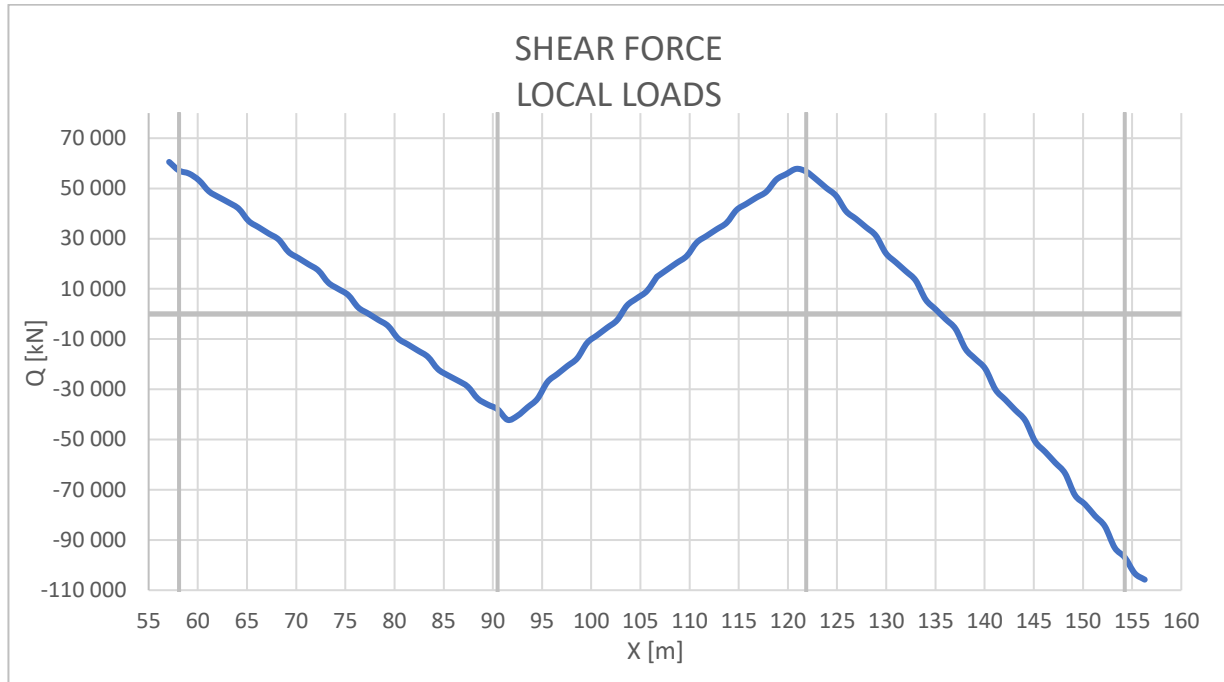
6.2.3 Διορθώσεις

Έχοντας μοντελοποιήσει όλα τα τοπικά φορτία του μοντέλου γίνεται επίλυση του προβλήματος σε πρώτο στάδιο ώστε να γίνει η διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών που περιεγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για την παραγωγή των διαγραμμάτων δημιουργούνται 100 εγκάρσια *Slices* στο *Visualization Module*. Σε κάθε ένα από τα *Slices* υπολογίζονται τα Q και M (*Free Body Cuts*), στο κέντρο κάθε διατομής, τα οποία γράφονται σε αρχείο κειμένου για περαιτέρω επεξεργασία (*Report>Free Body Cuts*).

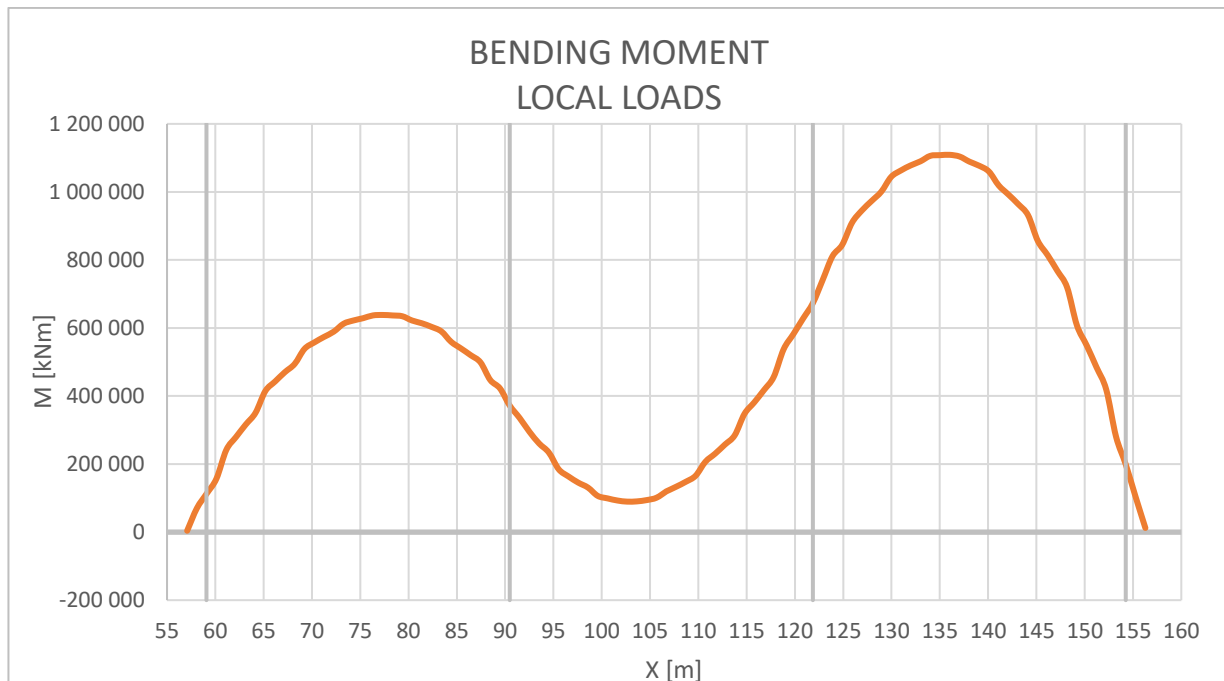


Εικόνα 33 Δημιουργία *Free Body Cuts*

Η ανάλυση, με τα τοπικά φορτία μόνο, δίνει τα παρακάτω διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Η κατάσταση που προκύπτει πρόκειται για κατάσταση Hogging.



Σχήμα 28 Διατμητικές δυνάμεις μετά από εφαρμογή των τοπικών φορτίων



Σχήμα 29 Καμπτικές ροπές μετά από εφαρμογή των τοπικών φορτίων

Οι επιθυμητές, target, τιμές της διατμητικής δύναμης και της καμπτικής ροπής υπολογίζονται από τους κανονισμούς στη συνέχεια. Για τον συνδυασμό της εναλλάξ φόρτωσης και της HSM-1 φόρτισης, δίνεται από τους κανονισμούς ότι $C_{BM-LC} = 0$ δηλαδή, έχουμε μηδενική συνεισφορά της συνιστώσας σε ήρεμο νερό στη συνολική ροπή κάμψης, [Ch. 4, Sec.8]. Αυτό προκαλεί μία πιο δυσμενή κατάσταση αφού λαμβάνεται υπόψη μόνο η ροπή σε κυματισμό (sagging) και όχι η ροπή σε ήρεμο νερό (hogging).

Όπως γίνεται κατανοητό, η κατάσταση που επιτυγχάνεται δεν είναι μία πραγματική κατάσταση, αλλά μία πιο δυσμενής από την πραγματική.

Όσον αφορά τις διατμητικές δυνάμεις σε ήρεμο νερό λήφθηκαν ως οι μέγιστες από το loading manual αφαιρώντας τις διορθώσεις των διατμητικών δυνάμεων στις φρακτές.

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

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

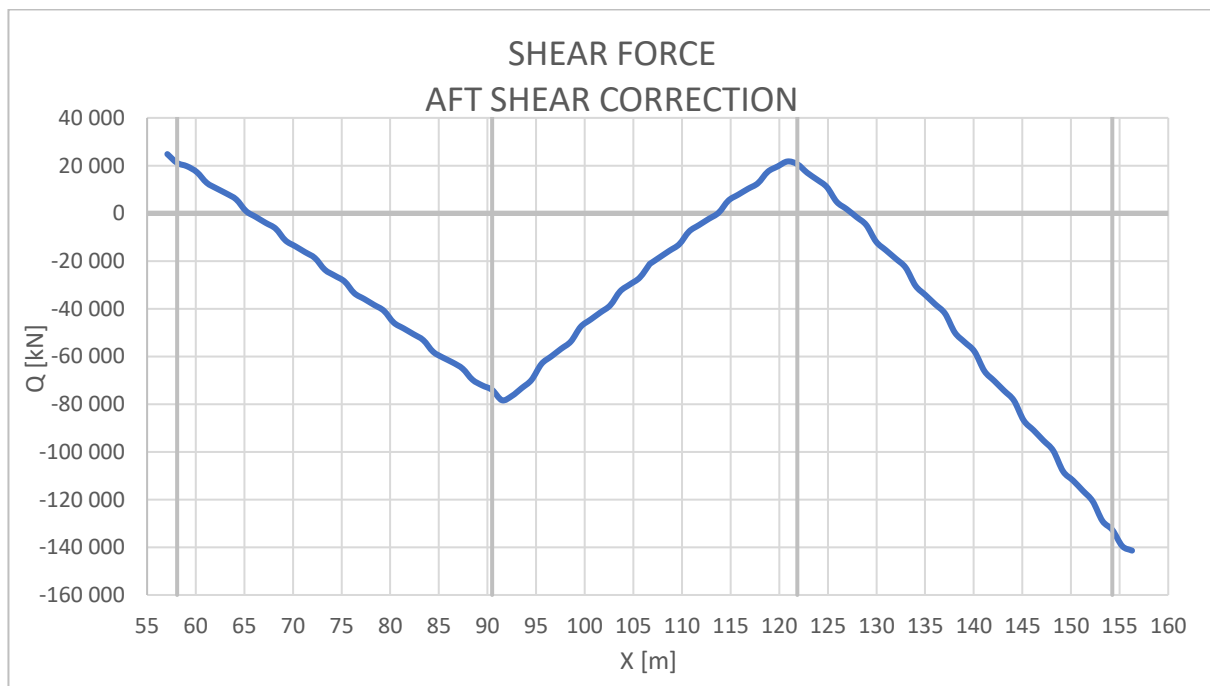
$$Q_{targ-fwd} = C_{SF-LC} Q_{sw-pos} + \Delta Q_{swf} + f_{\beta} |C_{QW}| Q_{wv-pos}$$

	Target	FEM
M [kNm]	-2.09E+06	8.97E+04
Q_{aft} [kN]	-78 239	-42 170
Q_{fore} [kN]	83 598	55 730

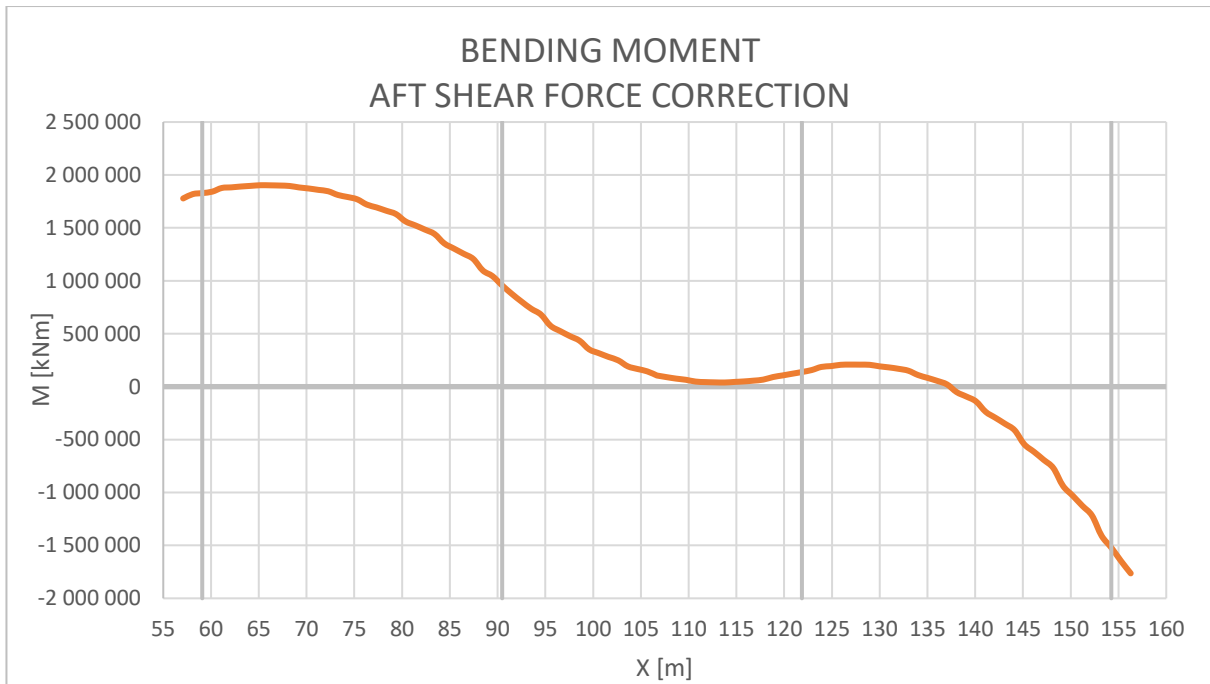
Πίνακας 22 Επιθυμητά και πραγματικά φορτία Q, M

Οι κανονισμοί στην προκειμένη περίπτωση ορίζουν διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων μόνο στην πρυμναία φρακτή του μεσαίου αμπαριού, όπως δείχθηκε κατά την επιλογή της dynamic load case. Η διόρθωση αυτή γίνεται εφαρμόζοντας 2 αντίθετες ροπές στα άκρα του μοντέλου $M_{Y_aft} = -M_{Y_fore}$.

Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών μετά την 1^η διόρθωση στην πρυμναία φρακτή που επιτυγχάνεται η $Q_{aft} = -78\,239\text{ kN}$.



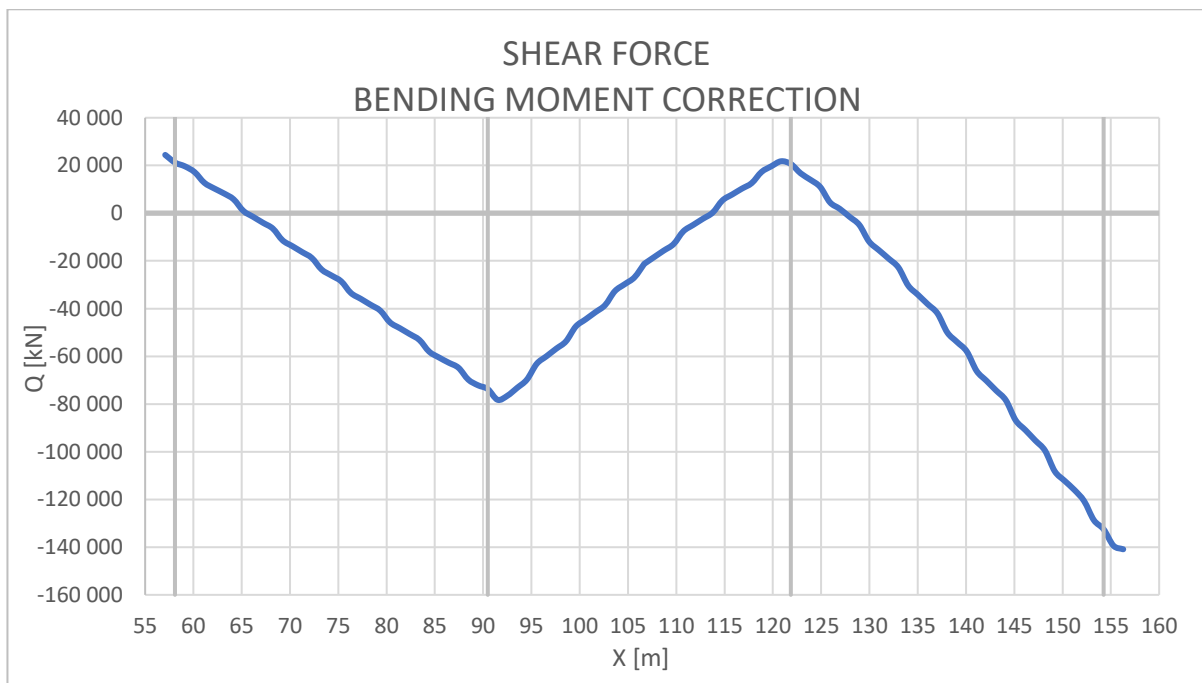
Σχήμα 30 Διατμητικές δυνάμεις μετά από εφαρμογή της διόρθωσης διατμητικών δυνάμεων στην πρυμναία φρακτή



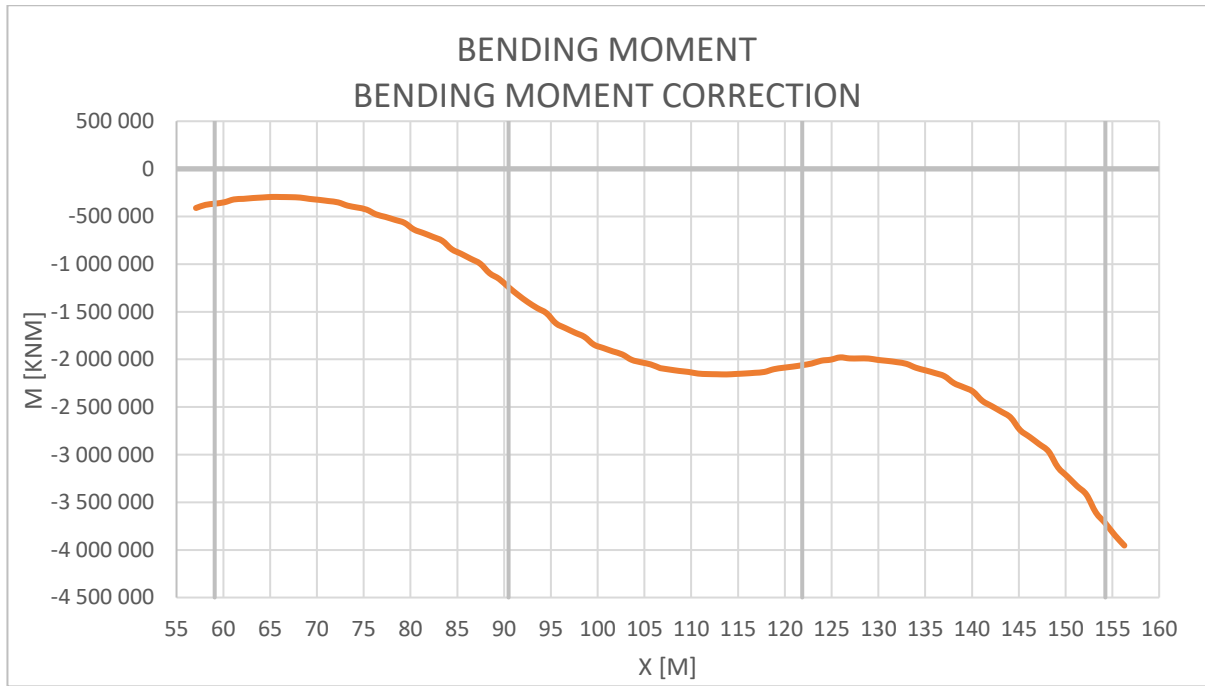
Σχήμα 31 Καμπτικές ροπές μετά από εφαρμογή της διόρθωσης διατμητικών δυνάμεων στην πρυμναία φρακτή

Έχοντας επιτύχει την επιθυμητή διατμητική δύναμη στην πρυμναία φρακτή, μένει να διορθωθεί η καμπτική ροπή και συγκεκριμένα στο σημείο που παρουσιάζεται η ελάχιστη διατμητική δύναμη στο μεσαίο αμπάρι μετά την 1^η διόρθωση. Η διόρθωση της καμπτικής ροπής γίνεται, εφαρμόζοντας στο μοντέλο μια ροπή κάμψης M_{v_end} . Η ροπή αυτή δεν μεταβάλλει το διάγραμμα διατμητικών δυνάμεων.

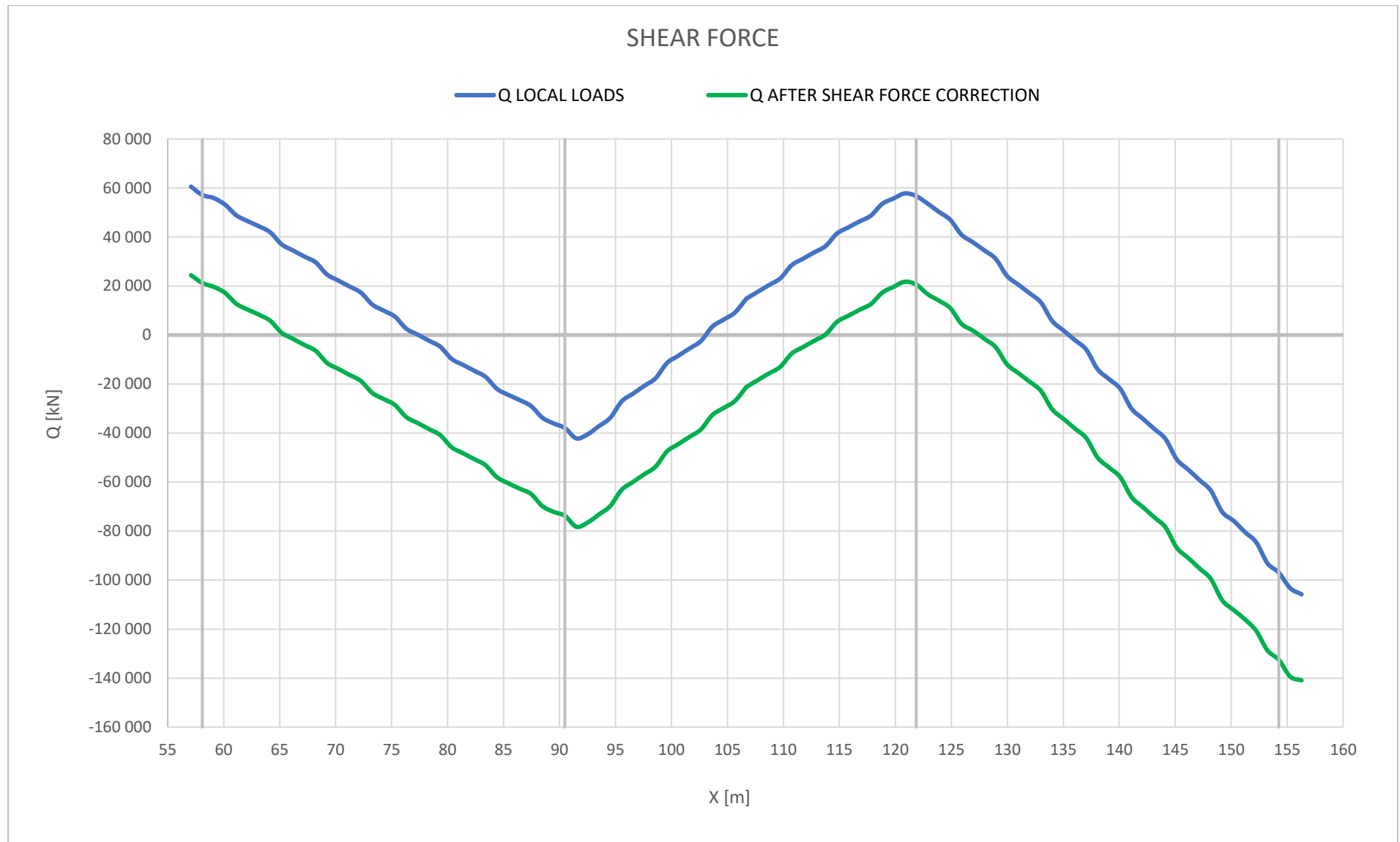
Στη συνέχεια, δίνονται τα τελικά διαγράμματα μετά από τις δύο διορθώσεις όπου επιτυγχάνονται και οι δύο επιθυμητές τιμές. Τέλος δίνονται τα συνοπτικά διαγράμματα των διορθώσεων.



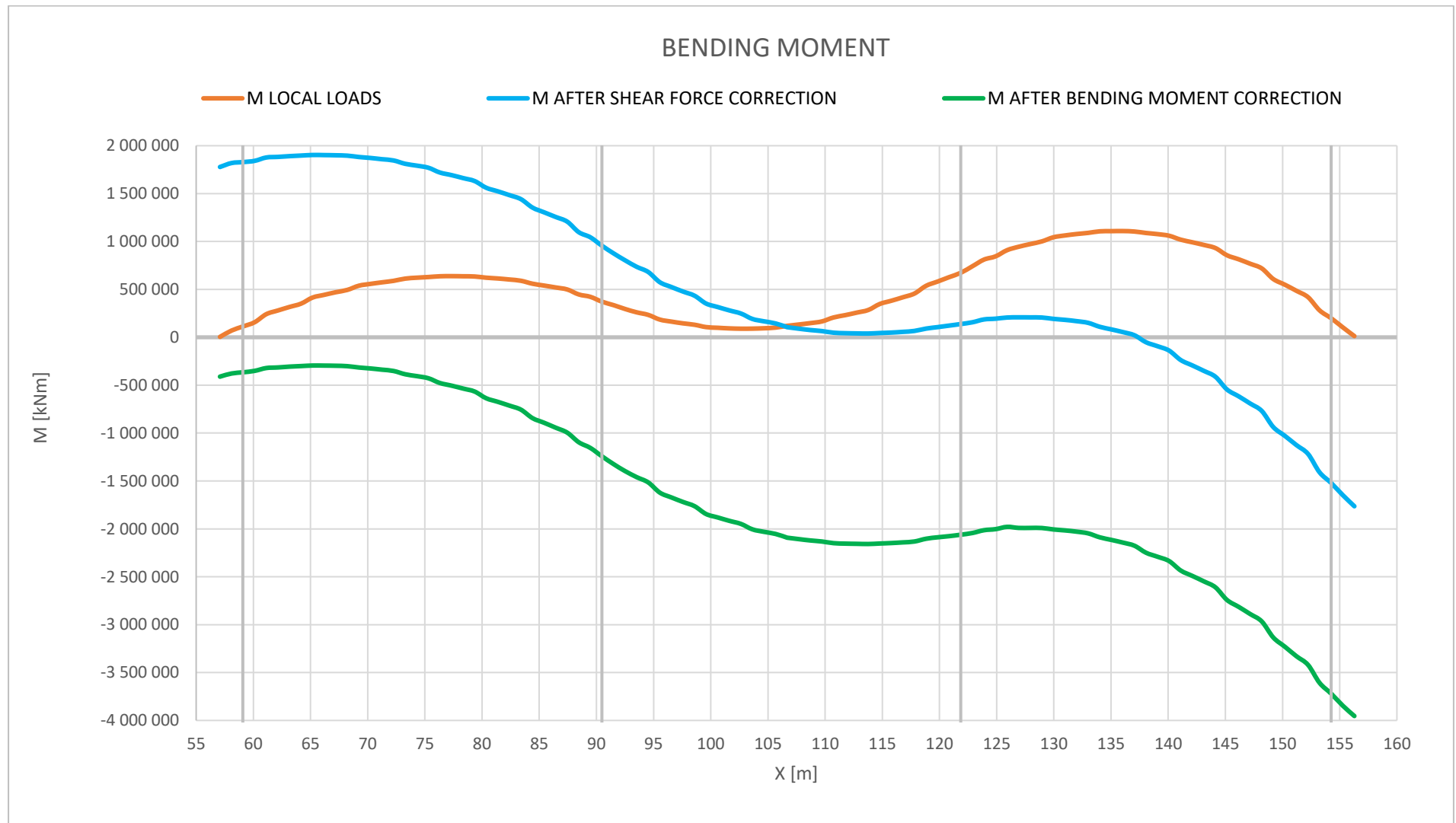
Σχήμα 32 Διατμητικές δυνάμεις μετά από εφαρμογή της διόρθωσης καμπτικής ροπής στο μέσο του κύτους



Σχήμα 33 Καμπτικές ροπές μετά από εφαρμογή της διόρθωσης καμπτικής ροπής στο μέσο του κύτους



Σχήμα 34 Συνοπτική παρουσίαση διόρθωσης διατμητικών δυνάμεων



Σχήμα 35 Συνοπτική παρουσίαση διόρθωσης καμπτικών ροπών

6.3 Επίλυση

Για την επίλυση του αριθμητικού προβλήματος, που ορίστηκε προηγουμένως, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ABAQUS/Standard. Η ανάλυση είναι στατική δίνοντας τη μακροπρόθεσμη απόκριση της κατασκευής, λόγω τις επιβολής των φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών. Η απόκριση αυτή θεωρείται γραμμική συνάρτηση των φορτίσεων.

Οι φορτίσεις επιβάλλονται ταυτόχρονα στο μοντέλο δηλαδή απαιτείται ένα μόνο *Step*. Για την δημιουργία του *Step* επιλέχθηκε, σύμφωνα με τα προηγούμενα, *Procedure Type: General* → *Step: Static, General*. Επίσης η παράμετρος για τη μη-γραμμική γεωμετρία του μοντέλου απενεργοποιήθηκε *NIgeom=OFF*, γιατί δεν αναμένονται υπερβολικά μεγάλες παραμορφώσεις. Τα προηγούμενα, σε συνδυασμό με τα γραμμικά – εξ ορισμού- *Materials* ορίζουν ένα γραμμικό αριθμητικό πρόβλημα.

Output Requests

Το σύνολο των *Field Output Requests* που δημιουργήθηκε περιλαμβάνει τα εξής μεγέθη, που θα υπολογιστούν και θα αποθηκεύουν για περαιτέρω ανάλυση στη συνέχεια:

- Principal Stresses: *S*
- Mises Equivalent Stress: *MISES*
- Total Strains: *E*
- Translations and rotations: *U*
- Reaction Forces and Moments: *CF*
- Section Forces and Moments: *SF*

Μέγεθος προβλήματος

Το τελικό υπολογιστικό πρόβλημα αποτελείται 259,980 μεταβλητές και από 257,382 εξισώσεις. Η επίλυση τους απαιτεί ένα πλήθος αριθμητικών πράξεων της τάξης του $8,03 \times 10^{10}$.

Ο χρόνος που απαιτήθηκε για τη μαθηματική επίλυση του προβλήματος αλλά και ο συνολικός χρόνος της ανάλυσης δίνεται στη συνέχεια.

Solver

ELAPSED SYSTEM TIME (SEC) = 0.20000

ELAPSED TOTAL CPU TIME (SEC) = 6.7000

Analysis

SYSTEM TIME (SEC) = 0.40000

TOTAL CPU TIME (SEC) = 17.500

Τα χαρακτηριστικά του φορητού υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε στην επίλυση του προβλήματος με το ABAQUS/Standard δίνονται στον επόμενο πίνακα:

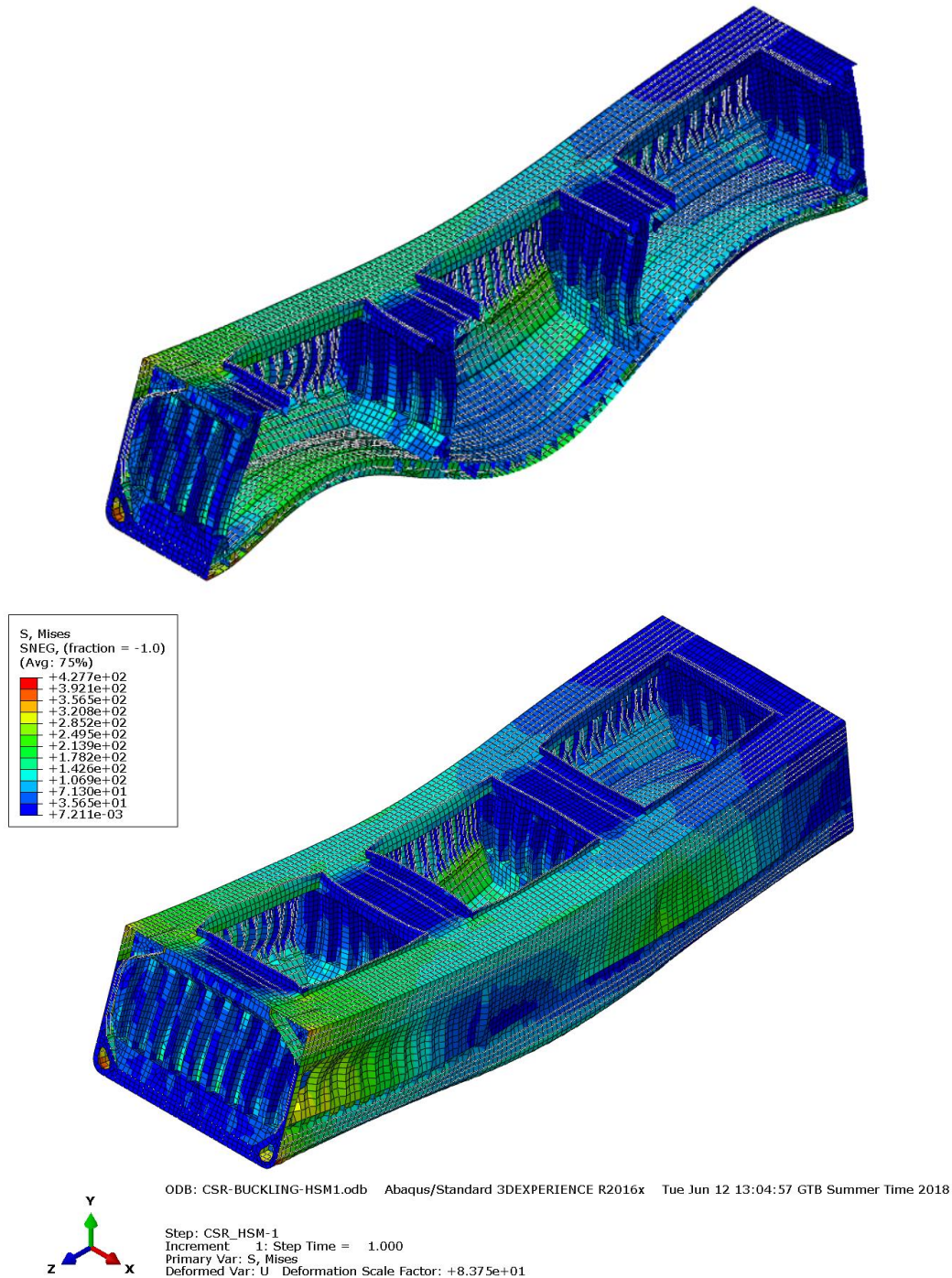
Λειτουργικό	Windows 10 64-bit
CPU	Intel Core i7 @ 2.50 GHz
RAM	16 GB

Πίνακας 23 Χαρακτηριστικά υπολογιστή επίλυσης

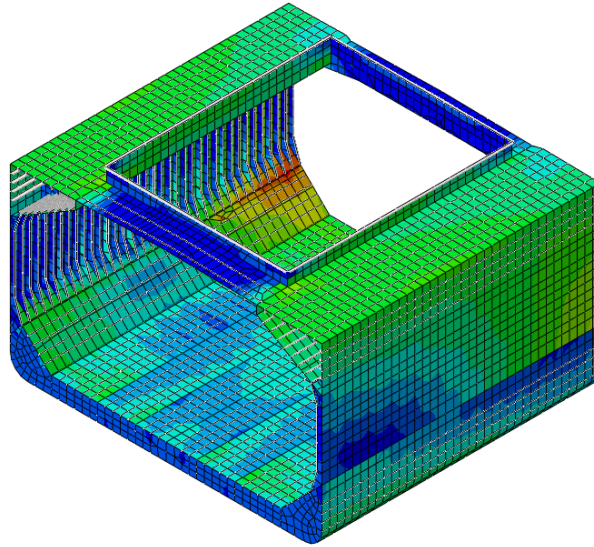
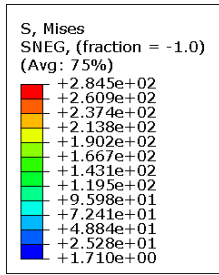
7 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Η απόκριση του μοντέλου στις φορτίσεις HSM-1 (sagging) περιγράφεται από τα παρακάτω διαγράμματα ισοϋψών τάσεων. Αν και το συγκεκριμένο μοντέλο, σύμφωνα με τους κανονισμούς, προορίζεται μονάχα για τη μελέτη λυγισμού στο μεσαίο κύτος, εδώ δίνεται η απόκριση του πλήρους μοντέλου με την παρουσίαση της ισοδύναμης τάσης κατά Mises. Επίσης, παρουσιάζεται η ισοδύναμη τάση Mises για την κατασκευή του μεσαίου αμπαριού.

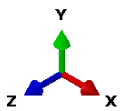
Υπενθυμίζεται πως η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση είναι $\sigma_{all} = 267 \text{ MPa}$. Η τάση αυτή επιτυγχάνεται μόνο σε λεπτομέρειες της κατασκευής στην περιοχή του μεσαίου κύτους.



Εικόνα 34 Συνολική απόκριση μοντέλου: Τάση Mises, deformed

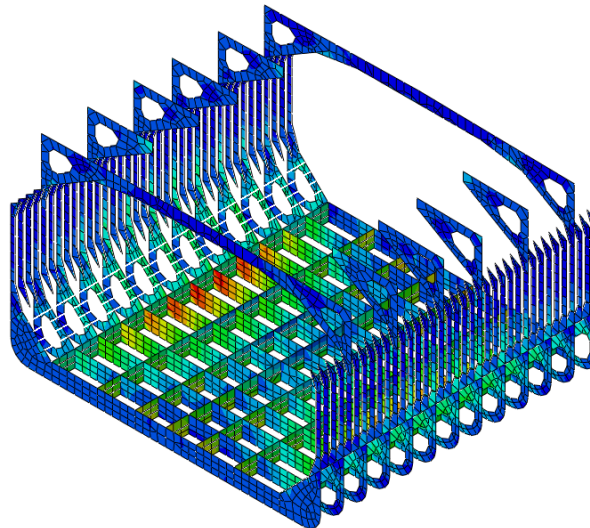
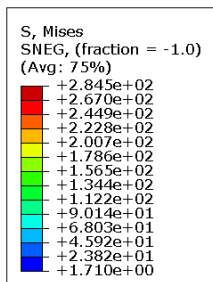


ODB: CSR-BUCKLING-HSM1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Tue Jun 12 13:04:57 GTB Summer Time 2018

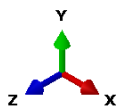


Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises

Εικόνα 35 Απόκριση Mid-Hold: τάση Mises, undeformed



ODB: CSR-BUCKLING-HSM1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Tue Jun 12 13:04:57 GTB Summer Time 2018



Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises

Εικόνα 36 Απόκριση Mid-Hold_Inner Structure: τάση Mises, undeformed

7.1 Περιγραφή Μεθοδολογίας Ανάλυσης Αποτελεσμάτων

Για τα στοιχεία κάθε κατασκευαστική ομάδα ακολουθήθηκε η μεθοδολογία μελέτης λυγισμού που περιγράφεται στους κανονισμούς για την αντοχή απλού ελάσματος, δηλαδή σύμφωνα με τις εξισώσεις αλληλεπίδρασης⁴⁷. Για τις εγκάρσιως ενισχυμένες πλευρές, ακολουθείται ειδική μεθοδολογία⁴⁸. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας στην παρούσα εργασία δίνεται στη συνέχεια. Για κάθε βήμα δίνεται ένα παράδειγμα υπολογισμών σε ένα απλό panel του καταστρώματος που αποτελείται από 6 *Elements* (DK_A1) και ένα από panel του πυθμένα που αποτελείται από 3 *Elements* (BT_A1). Τέλος, δίνεται ειδικό παράδειγμα για την ανάλυση των αποτελεσμάτων των πλευρών.

1. Εξαγωγή των αποτελεσμάτων από το ABAQUS

Τα *Elements* από τα οποία αποτελείται κάθε έλασμα, χωρίστηκαν (νοητά) σε απλά panel μεταξύ των ενισχυτικών και PSM. Για κάθε σύνολο *Elements* λήφθηκαν οι τιμές των τάσεων S_{11}, S_{22}, S_{12} στο κέντρο του κάθε στοιχείου με την εντολή *Probe Values* και καταχωρήθηκαν σε υπολογιστικό φύλλο excel. Αρχικά, σε κάθε στοιχείο είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των τάσεων σ_{ix}, σ_{iy} και $\tau_i, i = 1, 2, \dots, n$. Υπενθυμίζεται ότι στη μελέτη λυγισμού οι θλιπτικές τάσεις και οι διατμητικές είναι θετικές ενώ οι εφελκυστικές αρνητικές. Οι υπολογισμένες τάσεις S_{11} και S_{22} έχουν να κάνουν με τον προσανατολισμό του *Element* (S_{11} =διεύθυνση 1, S_{22} =διεύθυνση 2, S_{12} =διατμητική). Έτσι για κάθε panel γίνεται ο απαραίτητος μετασχηματισμός από S_{11}, S_{22}, S_{12} σε $\sigma_{ix}, \sigma_{iy}, \tau_i$.

Στη συνέχεια, καταχωρήθηκαν και άλλες πληροφορίες όπως η επιφάνεια του κάθε στοιχείου, το συνολικό μήκος και πλάτος του panel, καθώς και το πάχος του αντίστοιχου ελάσματος.

PANEL	S11i MPa	S22i MPa	S12i MPa	σ_{ix} MPa	σ_{iy} MPa	τ_i MPa	ReH_p MPa	Ai mm ²	a mm	b mm	t _p mm	n
DK_A1	-7.76	-139.57	4.41	139.57	7.76	4.41	355	660000	4800	825	22.5	6
	0.93	-134.78	0.07	134.78	-0.93	0.07	355	660000				
	-1.11	-136.41	-1.74	136.41	1.11	1.74	355	660000				
	-1.36	-137.26	-2.66	137.26	1.36	2.66	355	660000				
	1.10	-140.11	-4.14	140.11	-1.10	4.14	355	660000				
	-6.64	-145.39	-8.53	145.39	6.64	8.53	355	660000				
BT_A1	14.81	123.32	-29.75	-123.32	-14.81	29.75	315	632000	2400	790	14.5	3
	22.44	115.88	-38.63	-115.88	-22.44	38.63	315	632000				
	18.87	132.37	-47.45	-132.37	-18.87	47.45	315	632000				

Πίνακας 24 Παράδειγμα λυγισμού - Βήμα 1

2. Εύρεση τάσης αναφοράς για το κάθε panel

Όπως περιγράφηκε νωρίτερα, για τη μελέτη του λυγισμού είναι απαραίτητες οι τάσεις αναφοράς στα άκρα του panel που προκύπτουν από παρεμβολή μεταξύ των τάσεων σε κάθε *Element*. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την παρεμβολή των σ_{ix}, σ_{iy} με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (τετραγωνική για την σ_{ix} , γραμμική για την σ_{iy}).

Στη συνέχεια, η σ_x λαμβάνεται ως η μέγιστη από 3 τιμές:

σ_{x1} : Μέση τιμή σε διάστημα μήκος b από την αρχή του panel

σ_{x2} : Μέση τιμή σε διάστημα μήκος b από το τέλος του panel

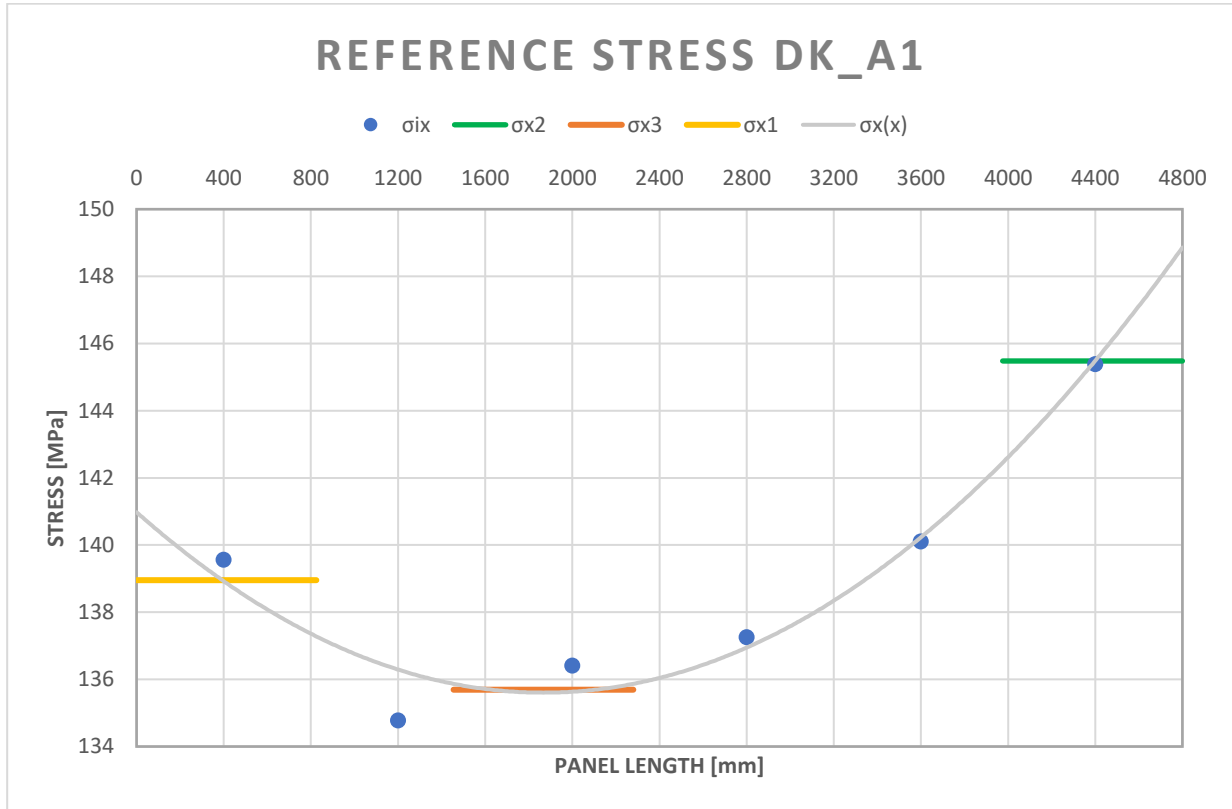
⁴⁷ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 5, 2.2]

⁴⁸ (I.A.C.S., "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers", 2017)
[Pt. 1, Ch. 8, Sec. 4, 4]

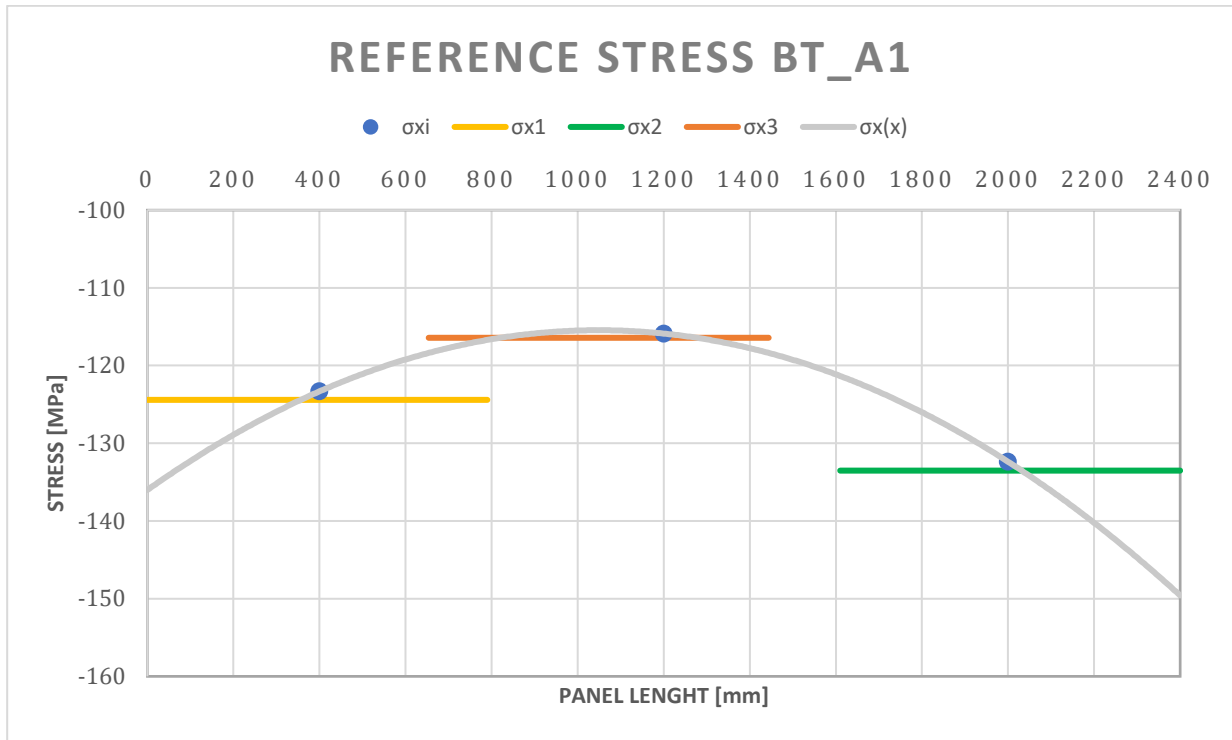
σ_{x3} : Μέση τιμή σε διάστημα μήκος b γύρω από τη μέγιστη τιμή της τάσης

Ενώ η σ_y λαμβάνεται ως η μέγιστη από τις σ_{y1}, σ_{y2} στα άκρα του panel.

Παρακάτω δίνεται γραφικά αυτή η επιλογή της σ_x για τα δύο προηγούμενα panel. Στην περίπτωση του καταστρώματος επιλέγεται η μέγιστη σ_{x2} η οποία ως θλιπτική είναι η δυσμενέστερη για τον λυγισμό, ενώ στην περίπτωση του πυθμένα επιλέγεται η μέγιστη σ_{x3} η οποία ως εφελκυστική είναι και πάλι η δυσμενέστερη για τον λυγισμό.

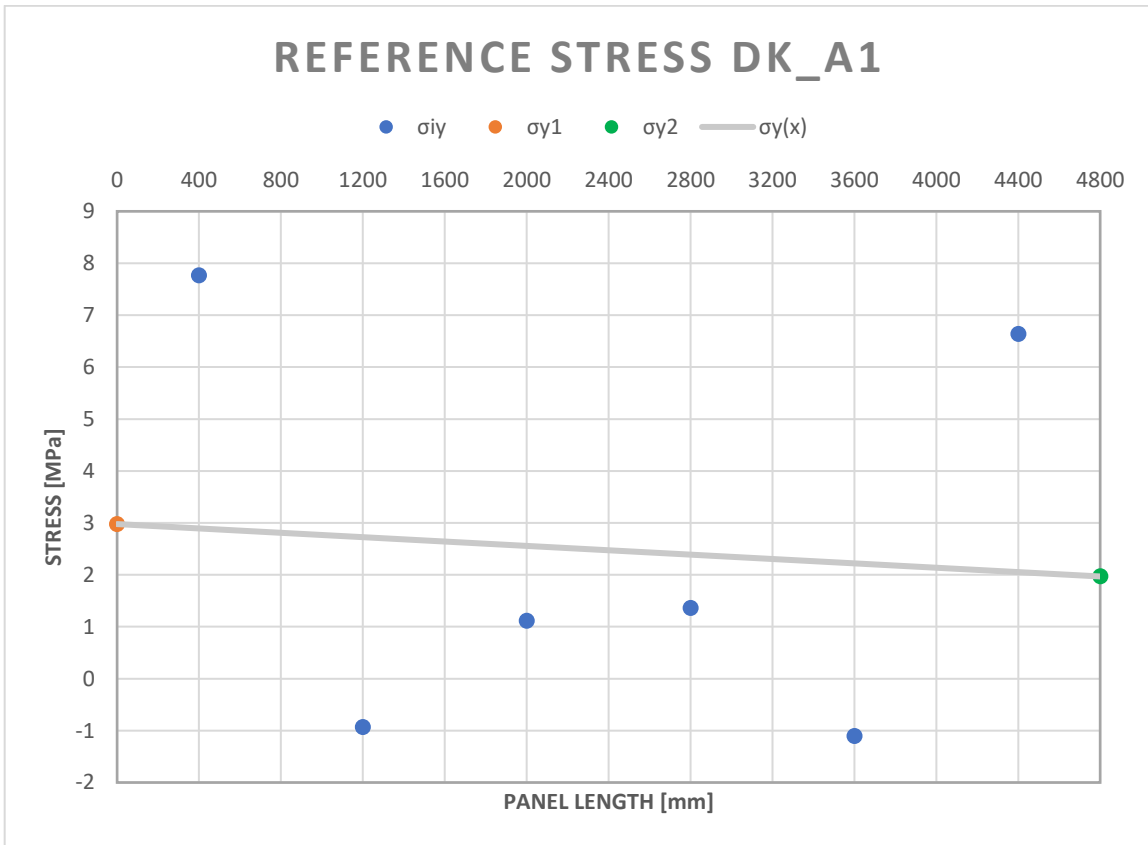


Σχήμα 36 Υπολογισμός σ_x σε panel του καταστρώματος

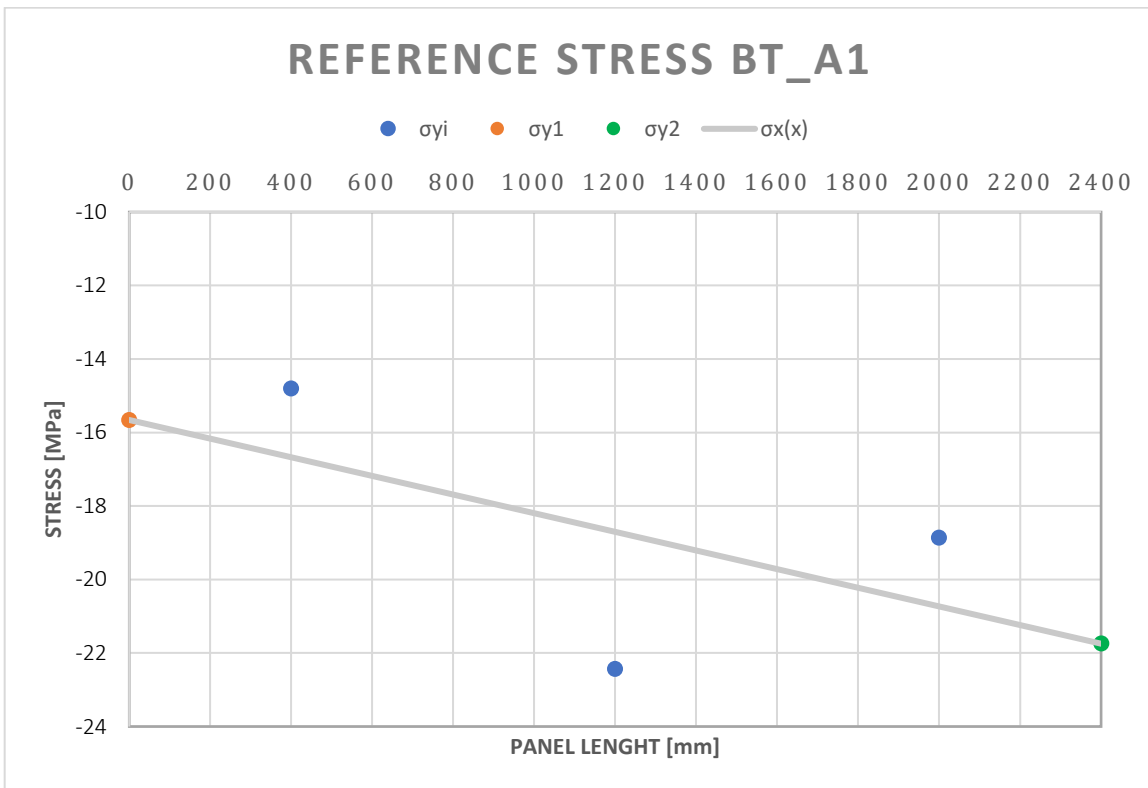


Σχήμα 37 Υπολογισμός σ_x σε panel του πυθμένα

Στα επόμενα, δίνεται γραφικά αυτή η επιλογή της σ_y για τα δύο προηγούμενα panel. Στην περίπτωση του καταστρώματος επιλέγεται η μέγιστη σ_{y1} η οποία ως θλιπτική είναι η δυσμενέστερη για τον λυγισμό, ενώ στην περίπτωση του πυθμένα επιλέγεται η μέγιστη σ_{y1} η οποία ως εφελκυστική είναι και πάλι η δυσμενέστερη για τον λυγισμό.

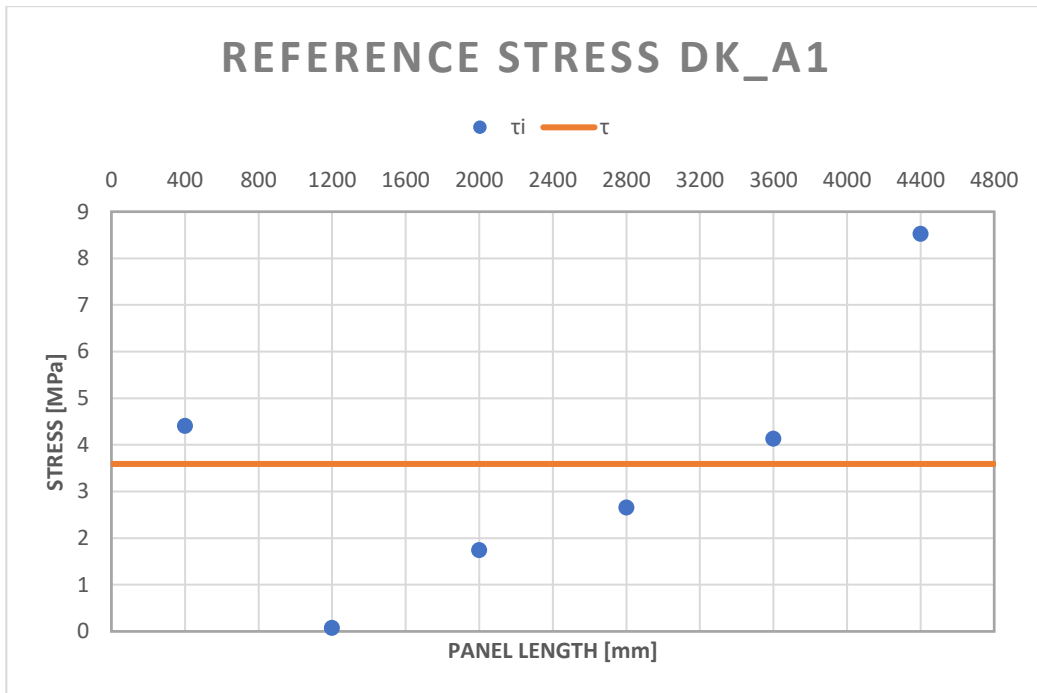


Σχήμα 38 Υπολογισμός σ_y σε panel του καταστρώματος

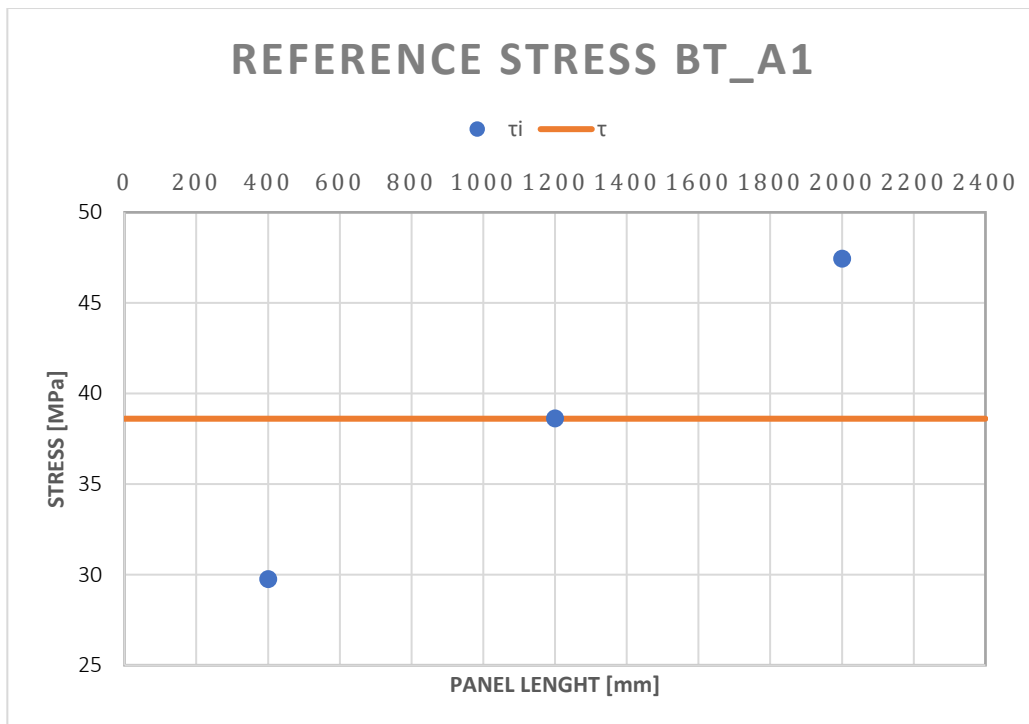


Σχήμα 39 Υπολογισμός σ_y σε panel του πυθμένα

Τέλος, η τ λαμβάνεται ως ο μέσος όρος, όπως φαίνεται στα διαγράμματα.



Σχήμα 40 Υπολογισμός τ σε panel του καταστρώματος



Σχήμα 41 Υπολογισμός τ σε panel του πυθμένα

3. Εύρεση αντοχής panel σε λυγισμό

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αντοχή του κάθε panel σε απλό λυγισμό σ_{cx}' , σ_{cy}' , τ_c' , δηλαδή όταν δρα τάση σε μία μόνο διεύθυνση. Ο υπολογισμός έγκειται στην εύρεση των C_x , C_y , C_τ σύμφωνα με το [Pt. 1, Ch.8, Sec. 5, 2.2.3]. Η αντοχή εξαρτάται από τη μορφή της φόρτισης (λόγος ψ), από τη γεωμετρία

του ελάσματος (λόγος λυγηρότητας λ) και από την έδρασή του (συντελεστές F_{trans}, F_{long}). Αν κάποιο από τα φορτία είναι εφελκυστικό τότε η αντοχή ισούται με την τάση διαρροής. Επίσης αν η λυγηρότητα του ελάσματος είναι μικρότερη της κρίσιμης, η αντοχή του ελάσματος ισούται με την τάση διαρροής (κοντά ελάσματα καταρρέουν λόγω διαρροής⁴⁹).

PANEL	$R_{eH,p}$ MPa	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	C_x	C_y	C_t	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa
DK_A1	355	145.48	2.98	3.59	1	0.56	1	355	200	205
BT_A1	315	-116.43	-15.66	38.61	1.00	1.00	1.00	315	315	182

Πίνακας 25 Παράδειγμα λυγισμού - Βήμα 3

4. Υπολογισμός συντελεστή χρησιμότητας

Για κάθε απλό panel θα υπολογιστεί, από τις εξισώσεις αλληλεπίδρασης ο ελάχιστος stress multiplier factor, γ_c . Αυτό θα γίνει επιλύοντας αριθμητικά (με την εντολή Solve του Excel) κάθε μία από τις παρακάτω εξισώσεις, που εμπίπτει στην κατάσταση φόρτισης.

Συνδυασμός φορτίσεων	Εξίσωση αλληλεπίδρασης
1. Διαξονική θλίψη/εφελκυσμός και διάτμηση	$\left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0} - B \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0/2} \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0/2} + \left(\frac{\gamma_{c1}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c1} \tau S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$
2. Θλίψη κατά x, εφελκυσμός κατά y και διάτμηση, $\sigma_x \geq 0$	$\left(\frac{\gamma_{c2}\sigma_x S}{\sigma'_{cx}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c2} \tau S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$
3. Μονοαξονική θλίψη κατά y, εφελκυσμός κατά x και διάτμηση, $\sigma_y \geq 0$	$\left(\frac{\gamma_{c3}\sigma_y S}{\sigma'_{cy}}\right)^{e_0} + \left(\frac{\gamma_{c3} \tau S}{\tau'_c}\right)^{e_0} = 1$
4. Καθαρή διάτμηση	$\frac{\gamma_{c4} \tau S}{\tau'_c} = 1$

Πίνακας 26 Εξισώσεις αλληλεπίδρασης

Αφού βρεθεί ο γ_c , από την παρακάτω σχέση υπολογίζεται ο *συντελεστής χρησιμότητας*, η_{act} . Η επιτρεπτή τιμή του για όλα τα διαμήκη ελάσματα είναι :

$$\eta_{act} = \frac{1}{\gamma_c} \leq 1$$

Παρακάτω δίνεται το παράδειγμα για τα δύο panel του καταστρώματος και του πυθμένα. Για το έλασμα του καταστρώματος έγινε έλεγχος με τις εξισώσεις 1, 2, 3 και 4 ενώ για το έλασμα του πυθμένα που εφελκύεται και στις δύο διευθύνσεις έγινε έλεγχος μόνο με τις εξισώσεις 1 και 4.

PANEL	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	F.1	γ_{c1}	F.2	γ_{c2}	F.3	γ_{c3}	F.4	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
DK_A1	145.48	2.98	3.59	355	200	205	1	2.48	1	2.44	1	42	1	57	2.44	0.41
BT_A1	-116.43	-15.66	38.61	315	315	182	1	2.82					1	4.71	2.82	0.35

Πίνακας 27 Παράδειγμα λυγισμού - Βήμα 4

5. Εγκαρσίως ενισχυμένες πλευρές

Για τις πλευρές των Bulk Carrier ακολουθείται διαφορετική μεθοδολογία. Ο έλεγχος γίνεται για το απλό panel μεταξύ των side frames και της ακμής του topside και hopper. Ο συντελεστής χρησιμότητας

⁴⁹ (I.A.C.S., CSR Technical Background Documents, 2016) [Pt. 1, Ch. 8, Sec. 4.1]

η_{vss} , λαμβάνεται ως ο μέγιστος που προκύπτει από τις 4 παρακάτω περιπτώσεις φόρτισης και συνοριακών συνθηκών.

A. 4 πλευρές απλά εδρασμένες

- Θεωρείται μόνο η μέγιστη θλιπτική τάση σ_x , με $\alpha = 1$ και $\psi_x = 1$
- Θεωρούνται όλες οι φορτίσεις στη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη θλιπτική τάση σ_x , με $\alpha = 2$ και $\psi_x = \psi_y = 1$. Το t_p λαμβάνεται όσο το πάχος του ελάσματος στη θέση της μέγιστης σ_x .
- Θεωρούνται όλες οι φορτίσεις στη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη διατμητική τάση τ , με $\alpha = 2$ και $\psi_x = \psi_y = 1$. Το t_p λαμβάνεται όσο το πάχος του ελάσματος στη θέση της μέγιστης τ .

B. 2 κοντές πλευρές πακτωμένες

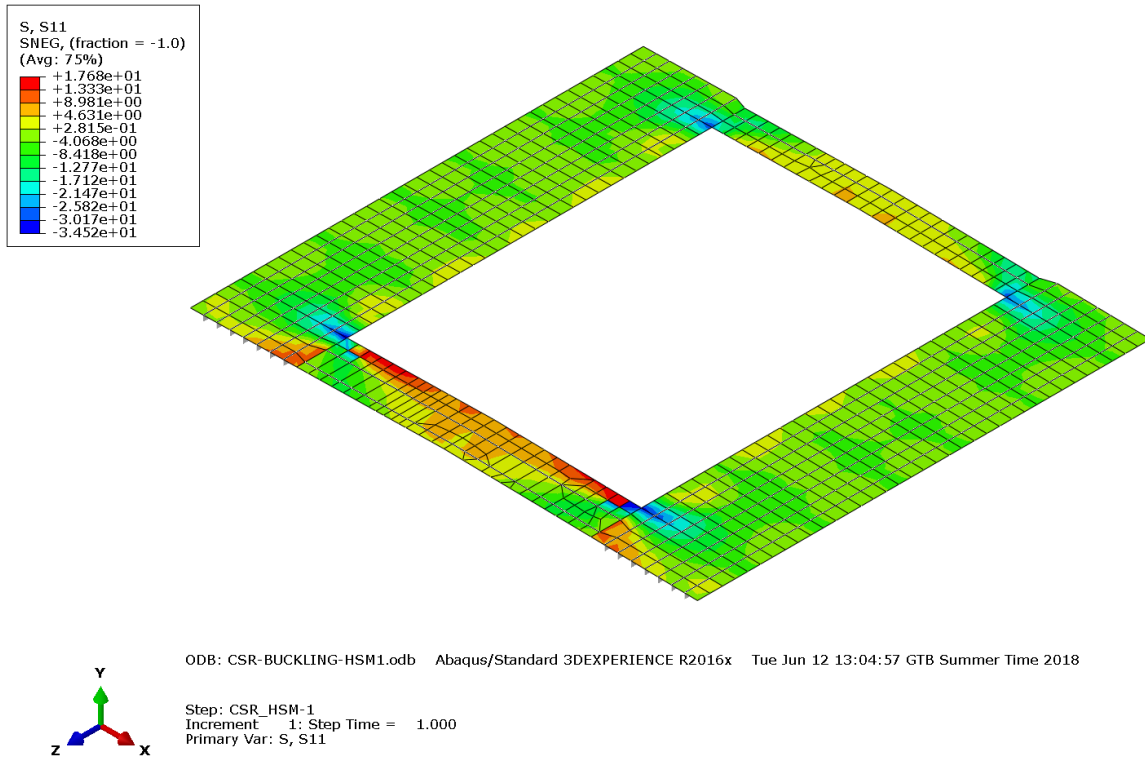
Θεωρούνται όλες οι φορτίσεις ως ο σταθμισμένος μέσος των αποκρίσεων κάθε *Element*, με $\psi_x = \psi_y = 1$. Οι πραγματικές διαστάσεις του panel χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου α . Το t_p λαμβάνεται όσο το ελάχιστο πάχος που εμφανίζεται στο panel.

Στη συνέχεια, δίνεται ο υπολογισμός της αντοχής ενός panel της πλευράς με τους 4 τρόπους.

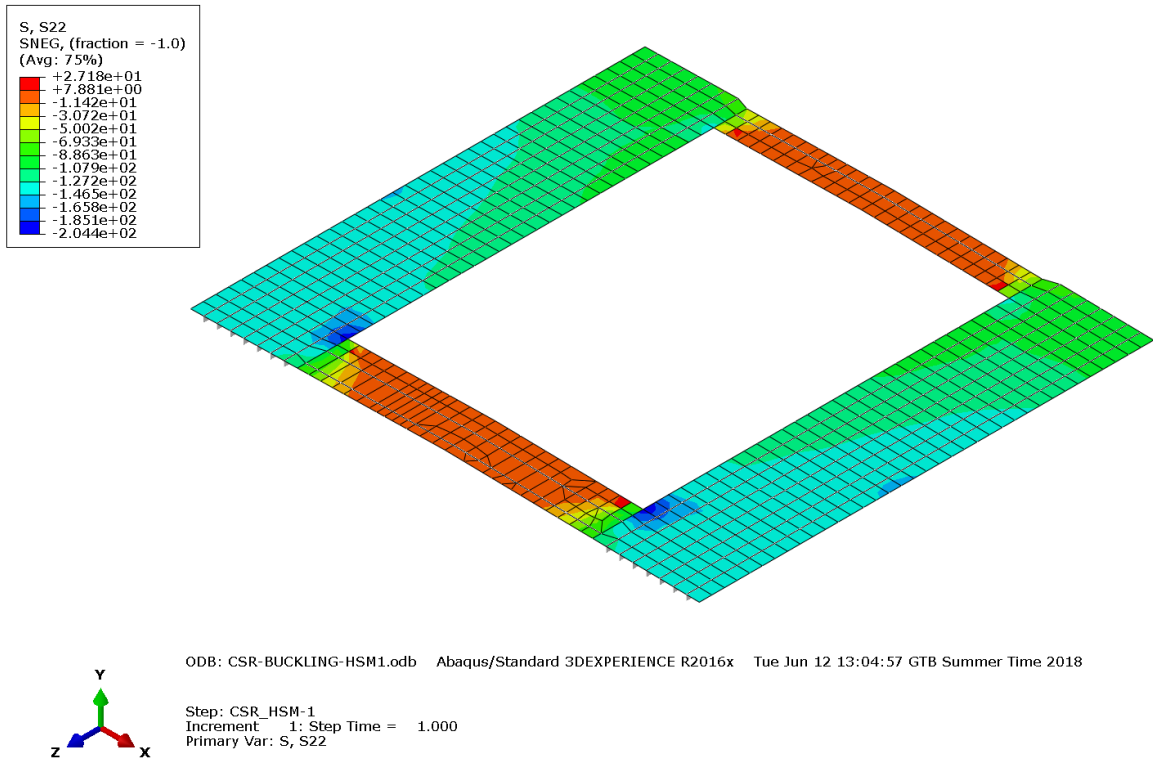
	PANEL	a mm	b mm	t_p mm	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	α	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
A.a	SD_29	7955	800	17.0	13.99	0.00	0.00	1	328	355	205		23			23	0.04
A.b	SD_29	7955	800	17.0	13.99	38.94	98.33	2	328	299	205	5.76	2.10	2.08	2.11	2.08	0.53
A.c	SD_29	7955	800	17.0	7.15	22.55	99.95	2	328	355	205	5.06	2.04	1.97	2.05	1.97	0.51
B	SD_29	7955	800	17.0	-4.36	47.07	91.87	9.9	307	106	205	4.90		1.49	2.18	1.49	0.47

7.2 Κατάστρωμα

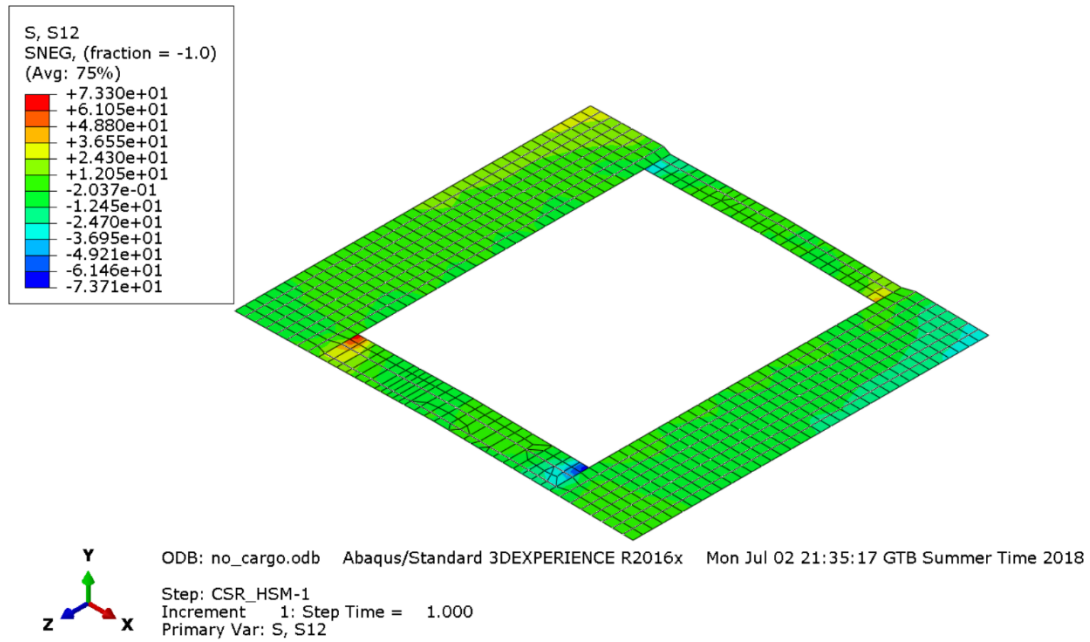
Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στα ελάσματα του καταστρώματος όπως προέκυψαν από την ανάλυση της κατασκευής. Εδώ οι τάσεις S11 είναι παράλληλες στον άξονα X του μοντέλου ενώ οι S22 είναι παράλληλες στον άξονα Z. Τα panels ορίζονται μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών του καταστρώματος και των webs στο topside. Η μελέτη του λυγισμού έγινε μόνο για τα διαμήκη ελάσματα (όχι cross deck) και για τα ελάσματα στα θετικά του άξονα X, δηλαδή συνολικά 40 panels. Όλες οι τάσεις είναι θλιπτικές οπότε έγινε έλεγχος και με τις 4 εξισώσεις αλληλεπίδρασης.



Εικόνα 37 Απόκριση Deck: τάση S11, undeformed



Εικόνα 38 Απόκριση Deck: τάση S22, undeformed



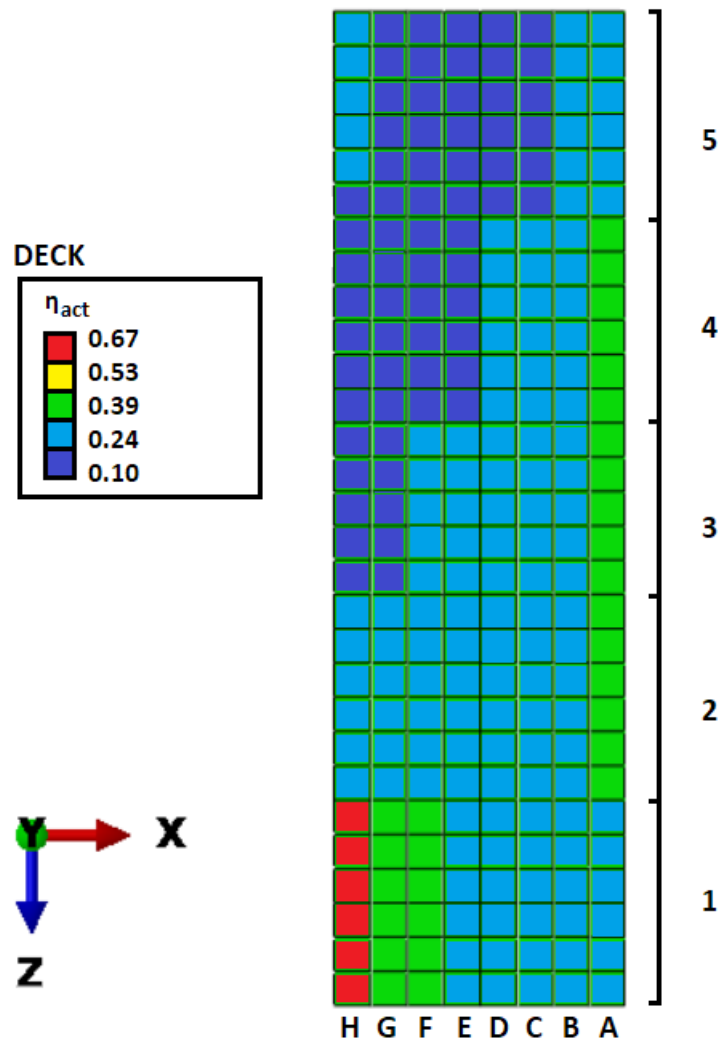
Εικόνα 39 Απόκριση Deck: τάση S12, undeformed

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
DK_A1	4800	825	6	145.48	2.98	3.59	355	200	205	2.48	2.44	41.9	57.1	2.44	0.41
DK_A2	4800	825	6	150.77	2.64	8.11	355	188	205	2.39	2.34	23.3	25.3	2.34	0.43
DK_A3	4000	825	5	148.72	4.56	12.30	355	246	205	2.43	2.35	15.6	16.7	2.35	0.43
DK_A4	4800	825	6	143.89	3.22	16.79	355	237	205	2.50	2.39	11.9	12.2	2.39	0.42
DK_A5	4800	825	6	124.80	2.54	22.50	355	197	205	2.87	2.67	9.0	9.1	2.67	0.37
DK_B1	4800	835	6	139.60	2.54	4.39	355	168	205	2.59	2.54	36.8	46.7	2.54	0.39
DK_B2	4800	835	6	142.77	1.53	8.65	355	182	205	2.51	2.46	23.0	23.7	2.46	0.41
DK_B3	4000	835	5	141.00	2.93	10.79	355	246	205	2.55	2.48	18.3	19.0	2.48	0.40
DK_B4	4800	835	6	133.70	1.51	12.85	355	196	205	2.68	2.60	15.7	16.0	2.60	0.38
DK_B5	4800	835	6	118.00	2.96	17.39	355	215	205	3.05	2.87	11.5	11.8	2.87	0.35
DK_C1	4800	850	6	139.67	9.21	4.84	355	214	205	2.65	2.53	19.7	42.3	2.53	0.39
DK_C2	4800	850	6	140.09	4.56	8.46	355	160	205	2.61	2.51	19.2	24.2	2.51	0.40
DK_C3	4000	850	5	136.82	5.27	9.04	355	167	205	2.68	2.57	17.8	22.7	2.57	0.39
DK_C4	4800	850	6	129.85	4.49	9.48	355	176	205	2.82	2.70	18.3	21.6	2.70	0.37
DK_C5	4800	850	6	116.23	7.84	12.84	355	208	205	3.18	2.97	13.2	16.0	2.97	0.34
DK_D1	4800	850	6	139.55	10.09	4.92	355	225	205	2.66	2.53	19.0	41.7	2.53	0.39
DK_D2	4800	850	6	137.01	5.08	7.67	355	195	205	2.67	2.57	21.1	26.7	2.57	0.39
DK_D3	4000	850	5	132.10	4.29	7.14	355	169	205	2.77	2.67	22.3	28.7	2.67	0.38
DK_D4	4800	850	6	125.33	4.31	6.48	355	183	205	2.92	2.81	24.4	31.6	2.81	0.36
DK_D5	4800	850	6	113.50	9.57	8.59	355	235	205	3.28	3.08	16.4	23.8	3.08	0.32
DK_E1	4800	850	6	140.69	14.69	4.94	355	260	205	2.70	2.51	15.9	41.5	2.51	0.40
DK_E2	4800	850	6	134.30	3.41	6.23	355	157	205	2.71	2.63	25.8	32.9	2.63	0.38
DK_E3	4000	850	5	128.64	4.34	5.19	355	172	205	2.84	2.75	26.9	39.5	2.75	0.36
DK_E4	4800	850	6	121.45	3.46	3.95	355	175	205	2.99	2.91	34.8	51.9	2.91	0.34
DK_E5	4800	850	6	111.22	13.10	4.62	355	261	205	3.36	3.18	17.7	44.3	3.18	0.31
DK_F1	4800	850	6	144.34	19.72	4.20	355	270	205	2.60	2.45	13.0	48.8	2.45	0.41
DK_F2	4800	850	6	132.50	6.41	4.31	355	234	205	2.76	2.67	27.9	47.6	2.67	0.37
DK_F3	4000	850	5	124.40	3.62	3.13	355	166	205	2.94	2.85	36.2	65.5	2.85	0.35

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
DK_F4	4800	850	6	117.17	5.13	1.67	355	223	205	3.12	3.03	40.1	122.5	3.03	0.33
DK_F5	4800	850	6	109.80	17.19	2.46	355	270	205	3.44	3.23	15.3	83.2	3.23	0.31
DK_G1	4800	850	6	148.64	16.02	5.99	355	204	205	2.54	2.38	11.7	34.2	2.38	0.42
DK_G2	4800	850	6	129.26	2.71	2.06	355	161	205	2.80	2.74	49.3	99.5	2.74	0.36
DK_G3	4000	850	5	120.62	3.93	1.70	355	177	205	3.02	2.94	41.3	120.2	2.94	0.34
DK_G4	4800	850	6	113.15	2.85	1.48	355	191	205	3.21	3.14	58.5	138.2	3.14	0.32
DK_G5	4800	850	6	108.28	13.61	4.65	355	212	205	3.65	3.26	14.4	44.1	3.26	0.31
DK_H1	4800	850	6	203.89	17.35	10.35	355	250	205	1.82	1.73	11.2	19.8	1.73	0.58
DK_H2	4800	850	6	126.65	0.18	1.82	355	260	205	2.80	2.80	111	112.5	2.80	0.36
DK_H3	4000	850	5	116.25	0.23	2.25	355	275	205	3.06	3.05	90.7	91.2	3.05	0.33
DK_H4	4800	850	6	109.56	0.19	2.48	355	259	205	3.24	3.23	82.5	82.8	3.23	0.31
DK_H5	4800	850	6	139.86	13.82	5.42	355	253	205	2.66	2.53	16.0	37.8	2.53	0.40

Πίνακας 28 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel του καταστρώματος

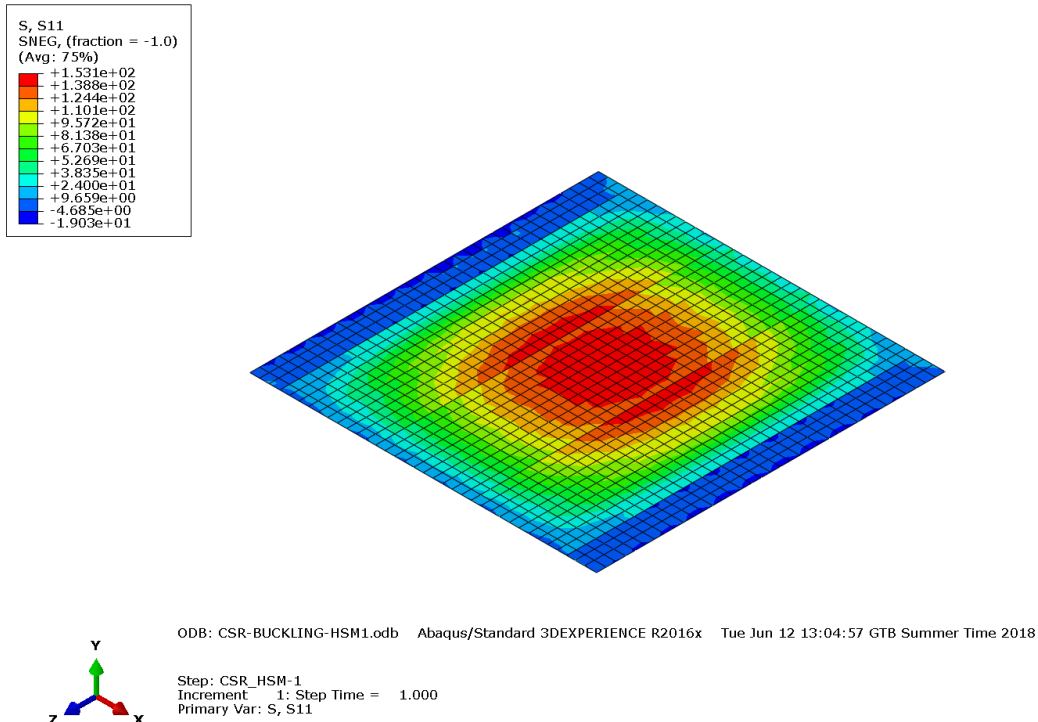
Παρακάτω δίνεται σχηματικά η κατανομή του η_{act} για τα panels του καταστρώματος.



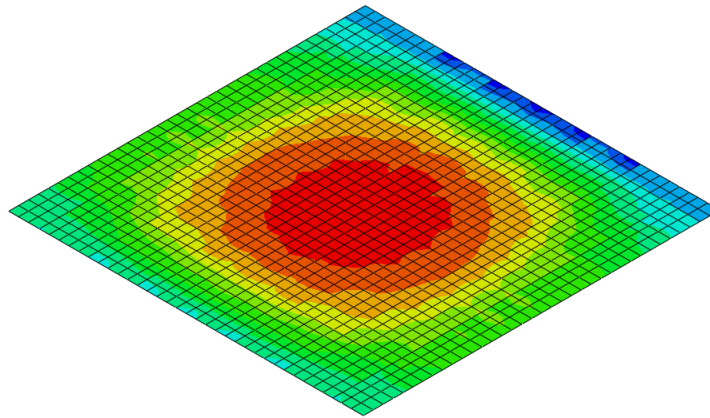
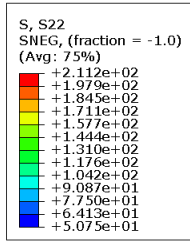
Εικόνα 40 Κατανομή η_{act} για τα panel του καταστρώματος

7.3 Εξωτερικός Πυθμένας

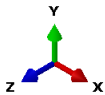
Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στα ελάσματα του εξωτερικού πυθμένα όπως προέκυψαν από την ανάλυση της κατασκευής. Εδώ οι τάσεις S11 είναι παράλληλες στον άξονα X του μοντέλου ενώ οι S22 είναι παράλληλες στον άξονα Z. Τα panels ορίζονται μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών του πυθμένα ή των girders και των floors του διπύθμενου. Η μελέτη του λυγισμού έγινε για τα ελάσματα στα θετικά του άξονα X, μεταξύ των Central Girder και Side Girder No. 3 δηλαδή συνολικά 150 panels. Σε όλη την έκταση του πυθμένα οι τάσεις και στις δύο διευθύνσεις εφελκυστικές οπότε ο έλεγχος γίνεται μόνο για λυγισμό λόγω διάτμησης, δηλαδή με τις εξισώσεις αλληλεπίδρασης 1 και 4.



Εικόνα 41 Απόκριση Bottom: Τάση S11, undeformed

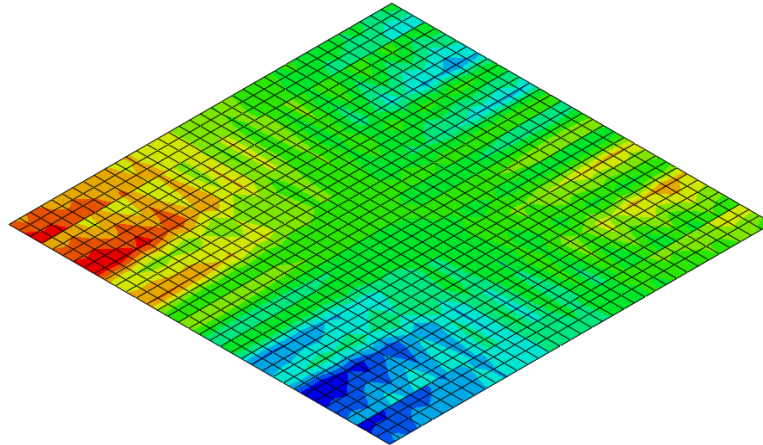
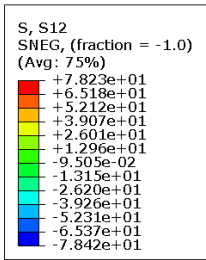


ODB: CSR-BUCKLING-HSM1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Tue Jun 12 13:04:57 GTB Summer Time 2018

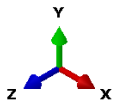


Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S22

Εικόνα 42 Απόκριση Bottom: Τάση S22, undeformed



ODB: CSR-BUCKLING-HSM1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Tue Jun 12 13:04:57 GTB Summer Time 2018



Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S12

Εικόνα 43 Απόκριση Bottom: τάση S12, undeformed

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
BT_A1	2400	790	3	-116.43	-15.66	38.61	315	315	182	2.82	4.71	2.82	0.35
BT_A2	2400	790	3	-137.63	-24.18	36.97	315	315	182	2.44	4.92	2.44	0.41

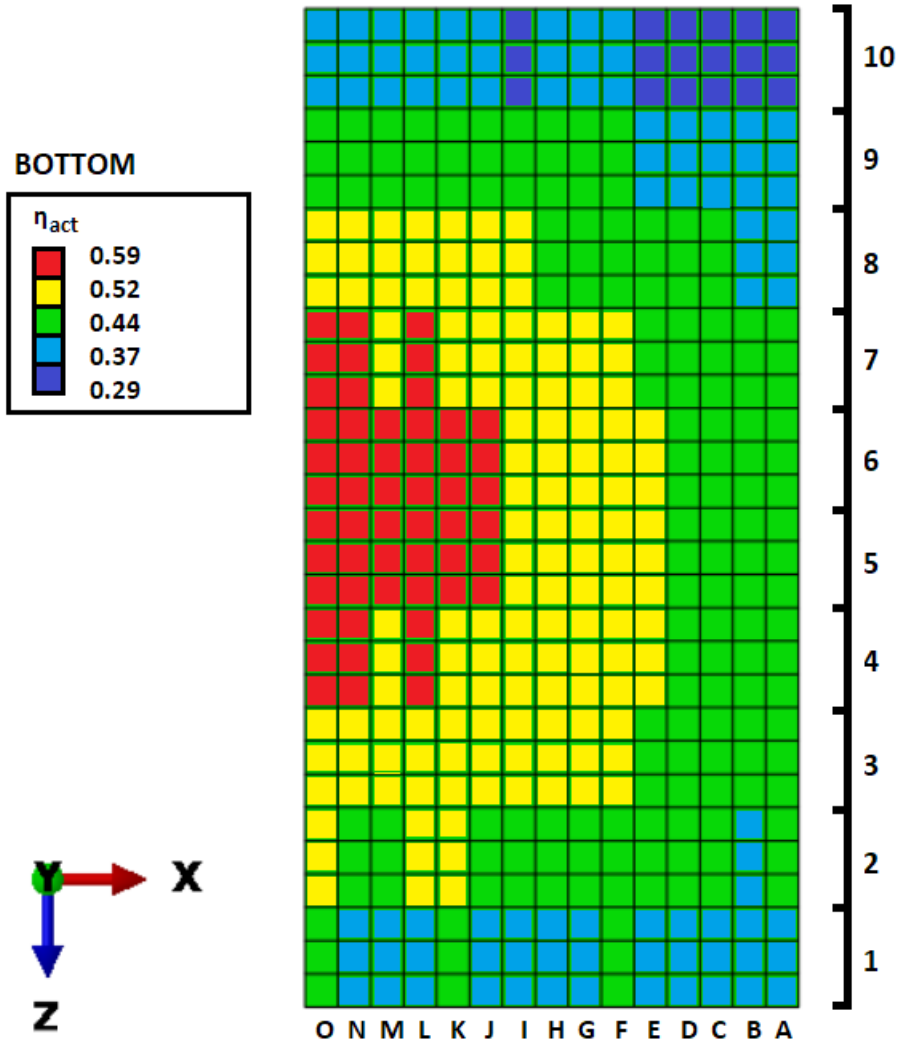
PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
BT_A3	2400	790	3	-142.66	-28.99	33.99	315	315	182	2.39	5.35	2.39	0.42
BT_A4	2400	790	3	-146.55	-31.65	28.20	315	315	182	2.34	6.45	2.34	0.43
BT_A5	2400	790	3	-147.50	-33.70	22.01	315	315	182	2.34	8.26	2.34	0.43
BT_A6	2400	790	3	-145.88	-34.48	18.59	315	315	182	2.38	9.78	2.38	0.42
BT_A7	2400	790	3	-141.37	-34.30	16.35	315	315	182	2.46	11.12	2.46	0.41
BT_A8	2400	790	3	-133.95	-33.09	13.74	315	315	182	2.60	13.24	2.60	0.38
BT_A9	2400	790	3	-124.46	-29.18	12.31	315	315	182	2.79	14.77	2.79	0.36
BT_A10	2400	790	3	-100.30	-21.51	7.85	315	315	182	3.44	23.16	3.44	0.29
BT_B1	2400	790	3	-118.54	-16.32	44.91	315	315	182	2.76	4.05	2.76	0.36
BT_B2	2400	790	3	-133.78	-22.16	41.61	315	315	182	2.49	4.37	2.49	0.40
BT_B3	2400	790	3	-143.37	-25.24	36.34	315	315	182	2.35	5.00	2.35	0.43
BT_B4	2400	790	3	-148.02	-27.69	29.39	315	315	182	2.29	6.19	2.29	0.44
BT_B5	2400	790	3	-149.56	-29.38	24.22	315	315	182	2.28	7.51	2.28	0.44
BT_B6	2400	790	3	-147.96	-30.49	22.13	315	315	182	2.32	8.22	2.32	0.43
BT_B7	2400	790	3	-143.08	-30.53	19.39	315	315	182	2.40	9.38	2.40	0.42
BT_B8	2400	790	3	-134.73	-29.31	16.12	315	315	182	2.56	11.28	2.56	0.39
BT_B9	2400	790	3	-120.45	-28.14	15.60	315	315	182	2.88	11.66	2.88	0.35
BT_B10	2400	790	3	-101.55	-22.64	13.67	315	315	182	3.40	13.31	3.40	0.29
BT_C1	2400	790	3	-125.19	-31.56	52.02	315	315	182	2.70	3.50	2.70	0.37
BT_C2	2400	790	3	-143.36	-49.32	47.04	315	315	182	2.44	3.87	2.44	0.41
BT_C3	2400	790	3	-155.55	-61.34	39.27	315	315	182	2.29	4.63	2.29	0.44
BT_C4	2400	790	3	-161.77	-69.41	30.75	315	315	182	2.22	5.91	2.22	0.45
BT_C5	2400	790	3	-164.04	-74.96	22.71	315	315	182	2.21	8.01	2.21	0.45
BT_C6	2400	790	3	-162.65	-77.69	20.10	315	315	182	2.23	9.05	2.23	0.45
BT_C7	2400	790	3	-157.37	-75.22	16.79	315	315	182	2.30	10.83	2.30	0.43
BT_C8	2400	790	3	-147.77	-69.78	15.64	315	315	182	2.45	11.63	2.45	0.41
BT_C9	2400	790	3	-130.63	-59.92	15.91	315	315	182	2.77	11.43	2.77	0.36
BT_C10	2400	790	3	-108.36	-42.30	17.10	315	315	182	3.31	10.64	3.31	0.30
BT_D1	2400	790	3	-126.93	-33.44	59.15	315	315	182	2.65	3.07	2.65	0.38
BT_D2	2400	790	3	-145.82	-50.96	52.09	315	315	182	2.39	3.49	2.39	0.42
BT_D3	2400	790	3	-158.63	-64.10	42.26	315	315	182	2.24	4.30	2.24	0.45
BT_D4	2400	790	3	-164.92	-72.74	32.14	315	315	182	2.18	5.66	2.18	0.46
BT_D5	2400	790	3	-167.33	-78.45	22.09	315	315	182	2.16	8.23	2.16	0.46
BT_D6	2400	790	3	-165.99	-81.62	17.00	315	315	182	2.19	10.70	2.19	0.46
BT_D7	2400	790	3	-160.69	-79.38	13.10	315	315	182	2.26	13.88	2.26	0.44
BT_D8	2400	790	3	-150.94	-73.36	14.27	315	315	182	2.40	12.75	2.40	0.42
BT_D9	2400	790	3	-133.02	-62.79	19.57	315	315	182	2.72	9.29	2.72	0.37
BT_D10	2400	790	3	-109.85	-46.24	26.52	315	315	182	3.26	6.86	3.26	0.31
BT_E1	2400	790	3	-131.54	-41.28	68.14	315	315	182	2.56	2.67	2.56	0.39
BT_E2	2400	790	3	-154.26	-66.29	58.37	315	315	182	2.28	3.12	2.28	0.44
BT_E3	2400	790	3	-167.60	-84.80	45.74	315	315	182	2.14	3.98	2.14	0.47
BT_E4	2400	790	3	-174.54	-98.68	33.83	315	315	182	2.06	5.38	2.06	0.49
BT_E5	2400	790	3	-177.28	-107.61	22.28	315	315	182	2.03	8.16	2.03	0.49
BT_E6	2400	790	3	-176.16	-111.50	14.94	315	315	182	2.04	12.17	2.04	0.49
BT_E7	2400	790	3	-170.92	-106.58	11.18	315	315	182	2.10	16.26	2.10	0.48
BT_E8	2400	790	3	-160.86	-96.02	14.23	315	315	182	2.24	12.78	2.24	0.45
BT_E9	2400	790	3	-142.52	-79.73	27.97	315	315	182	2.52	6.50	2.52	0.40
BT_E10	2400	790	3	-114.56	-55.10	38.36	315	315	182	3.10	4.74	3.10	0.32
BT_F1	2400	790	3	-135.93	-37.95	68.48	315	315	182	2.47	2.66	2.47	0.41
BT_F2	2400	790	3	-163.05	-59.44	56.22	315	315	182	2.15	3.23	2.15	0.47
BT_F3	2400	790	3	-174.41	-79.68	42.79	315	315	182	2.06	4.25	2.06	0.49
BT_F4	2400	790	3	-180.90	-92.23	31.02	315	315	182	2.00	5.86	2.00	0.50
BT_F5	2400	790	3	-184.14	-100.47	19.69	315	315	182	1.97	9.24	1.97	0.51

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
BT_F6	2400	790	3	-182.22	-104.45	10.82	315	315	182	1.99	16.81	1.99	0.50
BT_F7	2400	790	3	-176.40	-99.57	8.67	315	315	182	2.06	20.97	2.06	0.49
BT_F8	2400	790	3	-166.82	-89.94	16.58	315	315	182	2.17	10.97	2.17	0.46
BT_F9	2400	790	3	-150.78	-71.38	31.25	315	315	182	2.39	5.82	2.39	0.42
BT_F10	2400	790	3	-119.55	-51.79	45.18	315	315	182	2.94	4.03	2.94	0.34
BT_G1	2400	790	3	-136.98	-37.57	15.71	315	315	182	2.56	11.58	2.56	0.39
BT_G2	2400	790	3	-165.73	-65.16	19.03	315	315	182	2.17	9.56	2.17	0.46
BT_G3	2400	790	3	-178.44	-88.07	19.43	315	315	182	2.03	9.36	2.03	0.49
BT_G4	2400	790	3	-186.00	-104.76	16.45	315	315	182	1.95	11.05	1.95	0.51
BT_G5	2400	790	3	-190.00	-115.62	13.88	315	315	182	1.90	13.10	1.90	0.53
BT_G6	2400	790	3	-188.00	-119.85	12.68	315	315	182	1.91	14.34	1.91	0.52
BT_G7	2400	790	3	-181.69	-113.11	11.31	315	315	182	1.98	16.08	1.98	0.50
BT_G8	2400	790	3	-171.09	-99.81	10.00	315	315	182	2.11	18.19	2.11	0.47
BT_G9	2400	790	3	-153.52	-78.26	10.37	315	315	182	2.37	17.53	2.37	0.42
BT_G10	2400	790	3	-120.09	-52.04	10.84	315	315	182	3.01	16.78	3.01	0.33
BT_H1	2400	790	3	-137.35	-48.38	26.48	315	315	182	2.59	6.87	2.59	0.39
BT_H2	2400	790	3	-162.15	-78.91	25.59	315	315	182	2.23	7.11	2.23	0.45
BT_H3	2400	790	3	-178.64	-102.02	23.06	315	315	182	2.02	7.89	2.02	0.49
BT_H4	2400	790	3	-186.28	-118.41	18.32	315	315	182	1.93	9.93	1.93	0.52
BT_H5	2400	790	3	-189.54	-129.17	12.97	315	315	182	1.88	14.03	1.88	0.53
BT_H6	2400	790	3	-188.51	-134.44	9.16	315	315	182	1.87	19.86	1.87	0.53
BT_H7	2400	790	3	-182.90	-128.04	7.27	315	315	182	1.94	25.03	1.94	0.52
BT_H8	2400	790	3	-171.82	-115.06	6.92	315	315	182	2.08	26.30	2.08	0.48
BT_H9	2400	790	3	-150.47	-94.93	6.94	315	315	182	2.39	26.19	2.39	0.42
BT_H10	2400	790	3	-118.54	-65.97	5.52	315	315	182	3.06	32.93	3.06	0.33
BT_I1	2400	790	3	-136.53	-43.58	36.08	315	315	182	2.57	5.04	2.57	0.39
BT_I2	2400	790	3	-162.02	-76.74	32.30	315	315	182	2.22	5.63	2.22	0.45
BT_I3	2400	790	3	-180.21	-101.69	26.63	315	315	182	2.00	6.83	2.00	0.50
BT_I4	2400	790	3	-188.72	-120.29	20.11	315	315	182	1.90	9.05	1.90	0.53
BT_I5	2400	790	3	-192.25	-132.24	13.19	315	315	182	1.85	13.79	1.85	0.54
BT_I6	2400	790	3	-191.22	-137.05	7.66	315	315	182	1.84	23.75	1.84	0.54
BT_I7	2400	790	3	-185.13	-129.92	5.64	315	315	182	1.91	32.25	1.91	0.52
BT_I8	2400	790	3	-173.15	-115.40	7.77	315	315	182	2.06	23.41	2.06	0.48
BT_I9	2400	790	3	-149.44	-93.14	13.43	315	315	182	2.41	13.55	2.41	0.42
BT_I10	2400	790	3	-116.96	-61.32	16.34	315	315	182	3.10	11.13	3.10	0.32
BT_J1	2400	790	3	-140.22	-53.63	46.97	315	315	182	2.51	3.87	2.51	0.40
BT_J2	2400	790	3	-167.60	-88.01	39.96	315	315	182	2.14	4.55	2.14	0.47
BT_J3	2400	790	3	-186.35	-114.66	30.87	315	315	182	1.92	5.89	1.92	0.52
BT_J4	2400	790	3	-195.06	-133.94	22.27	315	315	182	1.82	8.17	1.82	0.55
BT_J5	2400	790	3	-198.89	-146.65	13.65	315	315	182	1.76	13.32	1.76	0.57
BT_J6	2400	790	3	-197.96	-152.39	5.52	315	315	182	1.75	32.97	1.75	0.57
BT_J7	2400	790	3	-192.02	-144.43	4.84	315	315	182	1.82	37.60	1.82	0.55
BT_J8	2400	790	3	-179.82	-128.68	13.58	315	315	182	1.96	13.39	1.96	0.51
BT_J9	2400	790	3	-155.93	-105.35	23.51	315	315	182	2.28	7.74	2.28	0.44
BT_J10	2400	790	3	-120.50	-73.25	30.81	315	315	182	2.95	5.90	2.95	0.34
BT_K1	2400	790	3	-141.17	-41.09	53.84	315	315	182	2.43	3.38	2.43	0.41
BT_K2	2400	790	3	-173.78	-70.62	42.82	315	315	182	2.05	4.25	2.05	0.49
BT_K3	2400	790	3	-188.43	-98.23	31.73	315	315	182	1.92	5.73	1.92	0.52
BT_K4	2400	790	3	-197.39	-117.63	22.16	315	315	182	1.83	8.21	1.83	0.55
BT_K5	2400	790	3	-201.93	-130.09	12.79	315	315	182	1.78	14.22	1.78	0.56
BT_K6	2400	790	3	-200.16	-134.33	3.25	315	315	182	1.78	55.91	1.78	0.56
BT_K7	2400	790	3	-193.64	-126.19	6.76	315	315	182	1.85	26.89	1.85	0.54
BT_K8	2400	790	3	-181.11	-110.71	17.60	315	315	182	1.99	10.33	1.99	0.50

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_c' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
BT_K9	2400	790	3	-160.93	-85.09	30.03	315	315	182	2.24	6.06	2.24	0.45
BT_K10	2400	790	3	-121.07	-57.55	42.89	315	315	182	2.92	4.24	2.92	0.34
BT_L1	2400	790	3	-143.78	-48.92	5.08	315	315	182	2.49	35.78	2.49	0.40
BT_L2	2400	790	3	-177.46	-80.86	4.56	315	315	182	2.05	39.88	2.05	0.49
BT_L3	2400	790	3	-192.98	-108.90	4.68	315	315	182	1.88	38.83	1.88	0.53
BT_L4	2400	790	3	-201.84	-128.06	4.90	315	315	182	1.78	37.14	1.78	0.56
BT_L5	2400	790	3	-206.53	-140.86	4.74	315	315	182	1.72	38.35	1.72	0.58
BT_L6	2400	790	3	-204.83	-146.49	4.72	315	315	182	1.72	38.50	1.72	0.58
BT_L7	2400	790	3	-198.26	-137.81	4.71	315	315	182	1.79	38.62	1.79	0.56
BT_L8	2400	790	3	-185.63	-121.73	5.16	315	315	182	1.93	35.25	1.93	0.52
BT_L9	2400	790	3	-164.73	-96.33	9.19	315	315	182	2.20	19.79	2.20	0.46
BT_L10	2400	790	3	-123.28	-68.13	17.21	315	315	182	2.93	10.57	2.93	0.34
BT_M1	2400	790	3	-139.84	-45.81	6.37	315	315	182	2.55	28.54	2.55	0.39
BT_M2	2400	790	3	-169.05	-79.95	7.06	315	315	182	2.15	25.78	2.15	0.47
BT_M3	2400	790	3	-188.59	-106.39	7.54	315	315	182	1.92	24.12	1.92	0.52
BT_M4	2400	790	3	-197.73	-127.43	6.33	315	315	182	1.81	28.73	1.81	0.55
BT_M5	2400	790	3	-201.39	-139.41	4.20	315	315	182	1.76	43.34	1.76	0.57
BT_M6	2400	790	3	-200.92	-144.86	2.24	315	315	182	1.75	81.19	1.75	0.57
BT_M7	2400	790	3	-194.94	-136.21	1.50	315	315	182	1.82	121.43	1.82	0.55
BT_M8	2400	790	3	-182.22	-119.81	1.89	315	315	182	1.96	96.21	1.96	0.51
BT_M9	2400	790	3	-156.90	-95.74	1.93	315	315	182	2.30	94.25	2.30	0.43
BT_M10	2400	790	3	-118.69	-64.36	2.70	315	315	182	3.06	67.48	3.06	0.33
BT_N1	2400	790	3	-140.98	-49.07	18.55	315	315	182	2.53	9.80	2.53	0.39
BT_N2	2400	790	3	-170.46	-84.53	15.56	315	315	182	2.13	11.69	2.13	0.47
BT_N3	2400	790	3	-191.38	-111.08	12.08	315	315	182	1.89	15.05	1.89	0.53
BT_N4	2400	790	3	-200.80	-131.16	8.79	315	315	182	1.78	20.70	1.78	0.56
BT_N5	2400	790	3	-205.19	-144.65	4.71	315	315	182	1.72	38.58	1.72	0.58
BT_N6	2400	790	3	-204.08	-149.71	0.99	315	315	182	1.72	183.34	1.72	0.58
BT_N7	2400	790	3	-197.95	-140.98	3.15	315	315	182	1.78	57.81	1.78	0.56
BT_N8	2400	790	3	-184.84	-124.67	7.32	315	315	182	1.93	24.85	1.93	0.52
BT_N9	2400	790	3	-158.43	-101.00	11.08	315	315	182	2.27	16.42	2.27	0.44
BT_N10	2400	790	3	-119.02	-68.27	14.80	315	315	182	3.03	12.29	3.03	0.33
BT_O1	2400	790	3	-144.86	-47.85	29.58	315	315	182	2.44	6.15	2.44	0.41
BT_O2	2400	790	3	-175.59	-82.01	23.06	315	315	182	2.06	7.89	2.06	0.48
BT_O3	2400	790	3	-195.04	-109.09	16.25	315	315	182	1.86	11.19	1.86	0.54
BT_O4	2400	790	3	-204.49	-128.69	10.80	315	315	182	1.76	16.84	1.76	0.57
BT_O5	2400	790	3	-210.31	-144.13	5.02	315	315	182	1.69	36.24	1.69	0.59
BT_O6	2400	790	3	-209.27	-147.37	1.11	315	315	182	1.69	164.45	1.69	0.59
BT_O7	2400	790	3	-202.79	-138.18	6.16	315	315	182	1.76	29.54	1.76	0.57
BT_O8	2400	790	3	-189.00	-121.90	12.98	315	315	182	1.90	14.01	1.90	0.53
BT_O9	2400	790	3	-162.79	-98.36	21.12	315	315	182	2.21	8.61	2.21	0.45
BT_O10	2400	790	3	-124.69	-66.23	30.22	315	315	182	2.88	6.02	2.88	0.35

Πίνακας 29 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel του εξωτερικού πυθμένα

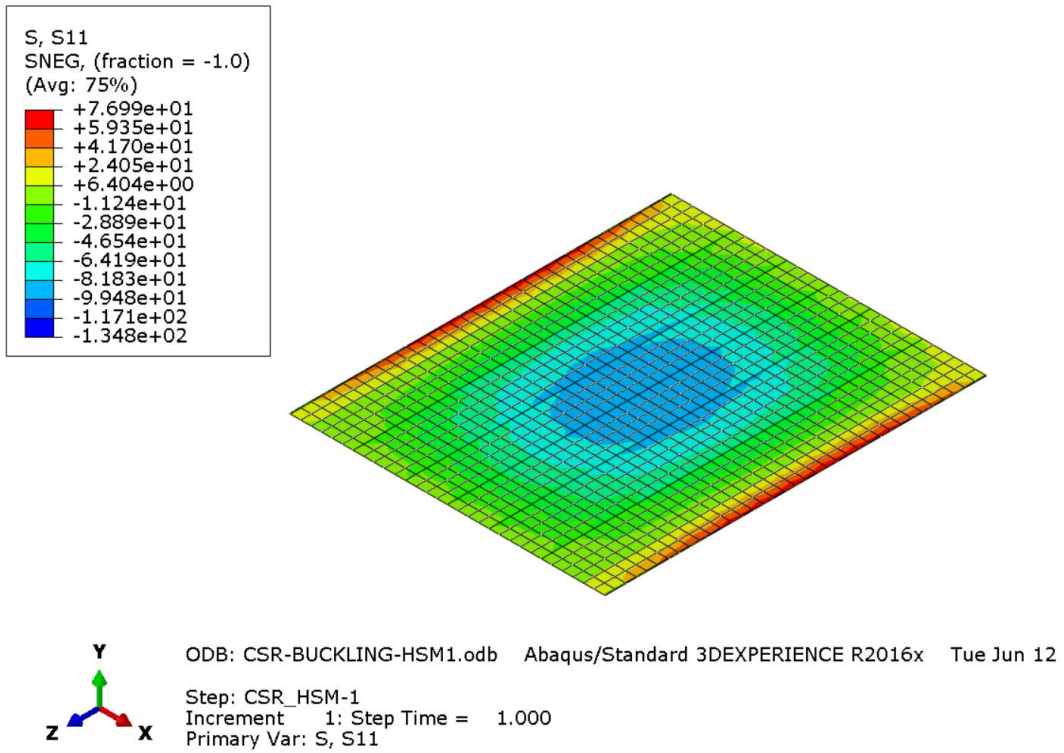
Παρακάτω δίνεται σχηματικά η κατανομή του η_{act} για τα panels του εξωτερικού πυθμένα.



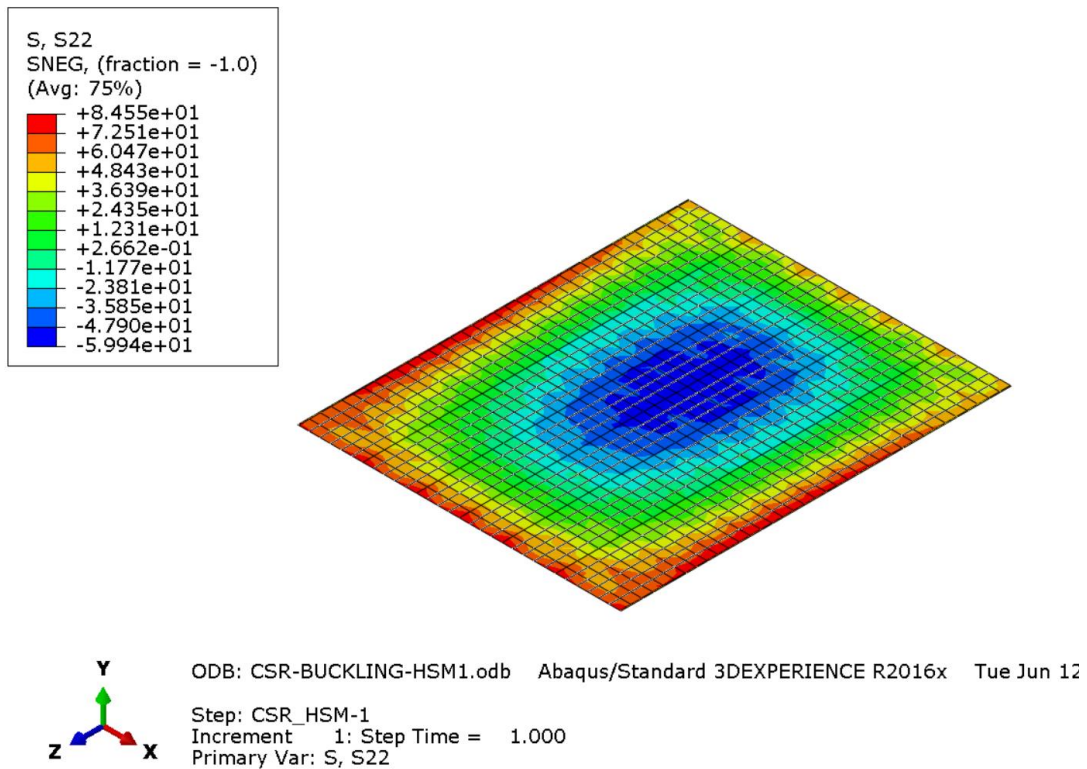
Εικόνα 44 Κατανομή η_{act} για τα panel του εξωτερικού πυθμένα

7.4 Εσωτερικός πυθμένας

Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα όπως προέκυψαν από την ανάλυση της κατασκευής. Εδώ οι τάσεις S_{11} είναι παράλληλες στον άξονα X του μοντέλου ενώ οι S_{22} είναι παράλληλες στον άξονα Z. Τα panels ορίζονται μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών του εσωτερικού πυθμένα ή των girders και των floors του διτύθμενου. Η μελέτη του λυγισμού έγινε για τα ελάσματα στα θετικά του άξονα X, μεταξύ των Central Girder και Side Girder No. 3 δηλαδή συνολικά 150 panels. Στην έκταση του πυθμένα οι τάσεις μεταβάλλονται και στις δύο διευθύνσεις από εφελκυστικές σε θλιπτικές, όπως φαίνεται στην εικόνα, οπότε ο έλεγχος γίνεται χρησιμοποιώντας κάθε φορά τις κατάλληλες εξισώσεις αλληλεπίδρασης.

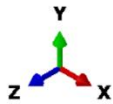
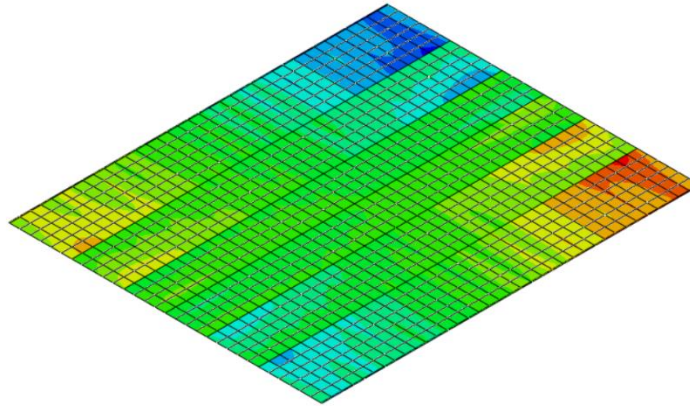
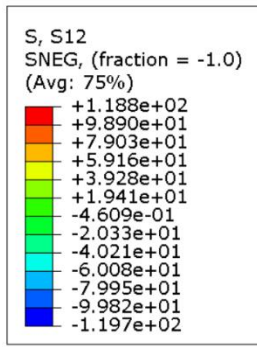


Εικόνα 45 Απόκριση Inner_Bottom: Τάση S11, undeformed



Εικόνα 46 Απόκριση Inner_Bottom: Τάση S22, undeformed

7. Ανάλυση αποτελεσμάτων | Κωνσταντίνα Μπαλωτή



ODB: no_cargo.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Mon Jul 02 21:35:17 GTB Summer Time 2018

Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S12

Εικόνα 47 Απόκριση Inner_Bottom: τάση S12, undeformed

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
IN_A1	2400	790	3	-72.13	-35.92	39.27	355	355	205	5.34			5.22	5.22	0.19
IN_A2	2400	790	3	-79.61	-48.05	34.26	355	355	205	4.92			5.98	4.92	0.20
IN_A3	2400	790	3	-82.66	-59.72	22.35	355	355	205	4.73			9.17	4.73	0.21
IN_A4	2400	790	3	-82.23	-66.00	8.54	355	355	205	4.70			24.00	4.70	0.21
IN_A5	2400	790	3	-80.89	-69.93	8.29	355	355	205	4.66			24.72	4.66	0.21
IN_A6	2400	790	3	-78.33	-71.95	22.89	355	355	205	4.64			8.96	4.64	0.22
IN_A7	2400	790	3	-74.50	-71.64	38.98	355	355	205	4.64			5.26	4.64	0.22
IN_A8	2400	790	3	-69.69	-67.61	54.11	355	355	205	4.71			3.79	3.79	0.26
IN_A9	2400	790	3	-61.48	-56.46	67.33	355	355	205	5.02			3.04	3.04	0.33
IN_A10	2400	790	3	-52.77	-46.84	73.99	355	355	205	5.39			2.77	2.77	0.36
IN_B1	2400	790	3	-48.30	-1.12	39.85	355	355	205	6.70			5.14	5.14	0.19
IN_B2	2400	790	3	-45.52	-0.46	34.18	355	355	205	7.19			6.00	6.00	0.17
IN_B3	2400	790	3	-43.19	-0.02	23.14	355	355	205	7.85			8.86	7.85	0.13
IN_B4	2400	790	3	-40.93	-0.14	17.36	355	355	205	8.44			11.81	8.44	0.12
IN_B5	2400	790	3	-38.33	0.04	17.12	355	250	205	8.97		11.97	11.97	8.97	0.11
IN_B6	2400	790	3	-35.50	-0.20	22.67	355	355	205	9.41			9.04	9.04	0.11
IN_B7	2400	790	3	-32.43	-0.69	37.73	355	355	205	9.15			5.43	5.43	0.18
IN_B8	2400	790	3	-29.23	-0.62	52.97	355	355	205	8.43			3.87	3.87	0.26
IN_B9	2400	790	3	-26.69	-0.66	65.52	355	355	205	7.70			3.13	3.13	0.32
IN_B10	2400	790	3	-25.69	-3.68	73.77	355	355	205	7.26			2.78	2.78	0.36
IN_C1	2400	790	3	-54.16	-9.47	41.09	355	355	205	6.40			4.99	4.99	0.20
IN_C2	2400	790	3	-48.92	-12.17	35.08	355	355	205	7.31			5.84	5.84	0.17
IN_C3	2400	790	3	-46.39	-14.40	24.03	355	355	205	8.18			8.53	8.18	0.12
IN_C4	2400	790	3	-43.49	-14.81	14.80	355	355	205	9.05			13.84	9.05	0.11
IN_C5	2400	790	3	-40.69	-14.95	13.77	355	355	205	9.72			14.88	9.72	0.10
IN_C6	2400	790	3	-37.86	-15.50	20.72	355	355	205	10.1			9.89	9.89	0.10
IN_C7	2400	790	3	-35.17	-15.82	36.67	355	355	205	9.56			5.59	5.59	0.18
IN_C8	2400	790	3	-32.84	-16.12	51.94	355	355	205	8.59			3.95	3.95	0.25
IN_C9	2400	790	3	-31.29	-13.92	65.13	355	355	205	7.65			3.15	3.15	0.32

7. Ανάλυση αποτελεσμάτων | Κωνσταντίνα Μπαλωτή

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
IN_C10	2400	790	3	-33.17	-12.28	74.00	355	355	205	6.87			2.77	2.77	0.36
IN_D1	2400	790	3	-41.02	14.91	44.65	355	173	205	6.53		4.09	4.59	4.09	0.24
IN_D2	2400	790	3	-30.80	18.53	37.18	355	160	205	7.72		4.37	5.51	4.37	0.23
IN_D3	2400	790	3	-24.16	22.74	25.62	355	156	205	8.69		4.86	8.00	4.86	0.21
IN_D4	2400	790	3	-19.27	25.20	14.79	355	152	205	9.53		5.27	13.86	5.27	0.19
IN_D5	2400	790	3	-15.14	26.15	12.87	355	147	205	10.1		5.11	15.93	5.11	0.20
IN_D6	2400	790	3	-11.84	26.64	19.63	355	148	205	10.3		4.64	10.44	4.64	0.22
IN_D7	2400	790	3	-9.45	26.35	35.83	355	151	205	9.59		3.78	5.72	3.78	0.26
IN_D8	2400	790	3	-8.36	24.77	51.58	355	155	205	8.61		3.16	3.97	3.16	0.32
IN_D9	2400	790	3	-10.37	21.26	65.84	355	161	205	7.67		2.75	3.11	2.75	0.36
IN_D10	2400	790	3	-17.38	17.91	76.73	355	191	205	6.73		2.52	2.67	2.52	0.40
IN_E1	2400	790	3	-34.25	11.93	49.35	355	214	205	7.27		3.95	4.15	3.95	0.25
IN_E2	2400	790	3	-23.08	17.70	40.25	355	180	205	8.75		4.32	5.09	4.32	0.23
IN_E3	2400	790	3	-15.39	22.01	27.94	355	166	205	10.2		4.91	7.34	4.91	0.20
IN_E4	2400	790	3	-9.45	25.03	13.51	355	156	205	11.6		5.53	15.18	5.53	0.18
IN_E5	2400	790	3	-4.81	26.49	8.76	355	152	205	12.3		5.42	23.39	5.42	0.18
IN_E6	2400	790	3	-1.23	25.92	18.57	355	147	205	12.4		4.78	11.03	4.78	0.21
IN_E7	2400	790	3	1.05	25.32	35.31	299	153	205	5.57	5.80	3.91	5.80	3.91	0.26
IN_E8	2400	790	3	1.49	22.57	51.84	299	163	205	5.90	3.95	3.28	3.95	3.28	0.30
IN_E9	2400	790	3	-1.06	18.16	67.66	355	178	205	8.21		2.80	3.03	2.80	0.36
IN_E10	2400	790	3	-9.38	10.79	80.88	355	245	205	7.17		2.50	2.53	2.50	0.40
IN_F1	2400	790	3	-32.54	19.61	55.42	355	181	205	6.63		3.29	3.70	3.29	0.30
IN_F2	2400	790	3	-21.66	29.93	43.49	355	168	205	7.24		3.37	4.71	3.37	0.30
IN_F3	2400	790	3	-12.54	37.12	30.84	355	157	205	7.66		3.36	6.65	3.36	0.30
IN_F4	2400	790	3	-5.79	41.92	15.63	355	152	205	7.89		3.40	13.12	3.40	0.29
IN_F5	2400	790	3	-0.44	43.83	9.19	355	148	205	8.02		3.29	22.31	3.29	0.30
IN_F6	2400	790	3	3.17	44.24	17.33	299	148	205	3.37	11.6	3.12	11.83	3.12	0.32
IN_F7	2400	790	3	4.92	43.10	34.64	299	151	205	3.48	5.85	2.85	5.92	2.85	0.35
IN_F8	2400	790	3	4.55	39.15	52.24	299	156	205	3.75	3.90	2.61	3.92	2.61	0.38
IN_F9	2400	790	3	-0.17	32.30	69.03	355	172	205	6.92		2.45	2.97	2.45	0.41
IN_F10	2400	790	3	-7.03	20.78	86.75	355	197	205	6.39		2.23	2.36	2.23	0.45
IN_G1	2400	790	3	-25.07	35.71	9.48	355	195	205	7.10		5.16	21.62	5.16	0.19
IN_G2	2400	790	3	-12.64	48.20	11.73	355	173	205	6.58		3.45	17.47	3.45	0.29
IN_G3	2400	790	3	-1.37	56.33	8.70	355	160	205	6.23		2.80	23.55	2.80	0.36
IN_G4	2400	790	3	6.45	61.53	7.43	299	154	205	2.57	22.3	2.48	27.59	2.48	0.40
IN_G5	2400	790	3	12.43	63.92	8.99	299	150	205	2.44	15.4	2.31	22.80	2.31	0.43
IN_G6	2400	790	3	16.30	63.90	13.31	299	147	205	2.42	11.0	2.25	15.40	2.25	0.44
IN_G7	2400	790	3	17.79	63.70	20.77	299	153	205	2.51	8.03	2.27	9.87	2.27	0.44
IN_G8	2400	790	3	16.77	59.89	26.74	299	160	205	2.77	6.73	2.43	7.66	2.43	0.41
IN_G9	2400	790	3	10.86	52.31	30.32	299	174	205	3.39	6.40	2.83	6.76	2.83	0.35
IN_G10	2400	790	3	1.81	38.35	26.70	299	202	205	5.11	7.65	4.08	7.67	4.08	0.24
IN_H1	2400	790	3	-24.03	25.09	18.22	355	196	205	8.61		6.03	11.25	6.03	0.17
IN_H2	2400	790	3	-5.98	37.31	17.12	355	170	205	8.69		4.10	11.97	4.10	0.24
IN_H3	2400	790	3	7.62	47.61	12.13	299	161	205	3.50	14.8	3.26	16.89	3.26	0.31
IN_H4	2400	790	3	17.24	54.05	9.43	299	154	205	3.00	12.6	2.79	21.75	2.79	0.36
IN_H5	2400	790	3	24.04	56.40	9.36	299	149	205	2.79	10.2	2.59	21.89	2.59	0.39
IN_H6	2400	790	3	28.05	56.57	12.43	299	148	205	2.77	8.42	2.54	16.49	2.54	0.39
IN_H7	2400	790	3	29.13	54.97	20.90	299	152	205	2.92	6.62	2.59	9.80	2.59	0.39
IN_H8	2400	790	3	26.49	49.40	28.68	299	160	205	3.36	5.68	2.82	7.15	2.82	0.36
IN_H9	2400	790	3	18.19	39.17	34.02	299	173	205	4.43	5.44	3.34	6.02	3.34	0.30
IN_H10	2400	790	3	2.33	25.31	35.64	299	218	205	7.51	5.73	4.50	5.75	4.50	0.22
IN_I1	2400	790	3	-17.21	55.23	26.64	355	179	205	5.49		2.86	7.69	2.86	0.35
IN_I2	2400	790	3	4.65	69.75	22.98	299	165	205	2.40	8.73	2.23	8.92	2.23	0.45

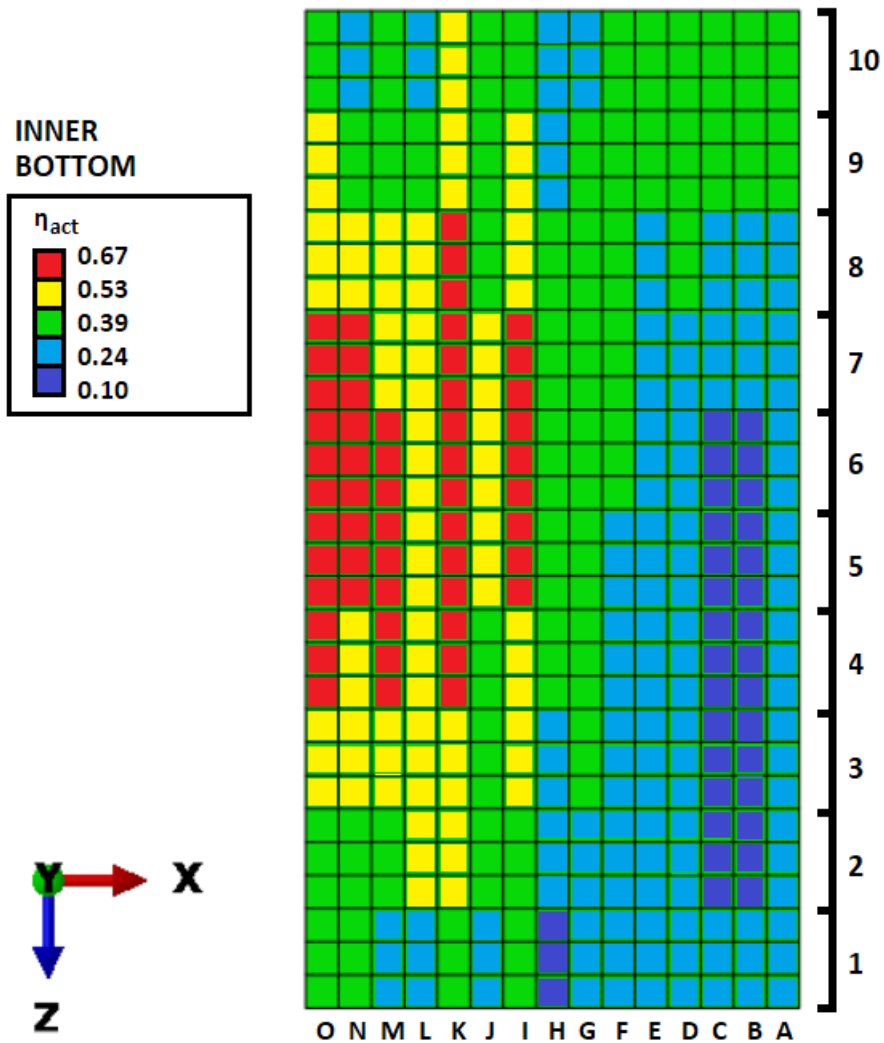
7. Ανάλυση αποτελεσμάτων | Κωνσταντίνα Μπαλωτή

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
IN_I3	2400	790	3	19.58	81.14	16.45	299	157	205	2.02	9.03	1.88	12.46	1.88	0.53
IN_I4	2400	790	3	30.25	88.00	8.11	299	152	205	1.83	8.82	1.72	25.27	1.72	0.58
IN_I5	2400	790	3	37.68	91.64	5.45	299	149	205	1.73	7.60	1.62	37.61	1.62	0.62
IN_I6	2400	790	3	42.08	91.47	11.20	299	147	205	1.70	6.35	1.59	18.30	1.59	0.63
IN_I7	2400	790	3	42.99	91.22	21.16	299	151	205	1.75	5.30	1.60	9.69	1.60	0.62
IN_I8	2400	790	3	39.77	86.61	30.59	299	155	205	1.89	4.68	1.68	6.70	1.68	0.59
IN_I9	2400	790	3	29.96	76.56	38.49	299	164	205	2.23	4.45	1.90	5.32	1.90	0.53
IN_I10	2400	790	3	10.82	61.58	43.66	299	182	205	2.95	4.55	2.35	4.69	2.35	0.43
IN_J1	2400	790	3	-18.90	31.16	36.81	355	194	205	7.65		3.88	5.57	3.88	0.26
IN_J2	2400	790	3	2.91	46.30	30.18	299	171	205	3.64	6.75	3.07	6.79	3.07	0.33
IN_J3	2400	790	3	19.22	58.98	21.67	299	161	205	2.87	7.62	2.55	9.46	2.55	0.39
IN_J4	2400	790	3	30.62	67.06	11.79	299	154	205	2.44	8.05	2.25	17.39	2.25	0.44
IN_J5	2400	790	3	38.50	69.94	2.54	299	149	205	2.27	7.67	2.13	80.61	2.13	0.47
IN_J6	2400	790	3	42.79	69.89	10.29	299	148	205	2.24	6.35	2.08	19.92	2.08	0.48
IN_J7	2400	790	3	43.35	67.85	21.89	299	152	205	2.36	5.21	2.13	9.36	2.13	0.47
IN_J8	2400	790	3	39.17	60.80	33.37	299	160	205	2.72	4.48	2.32	6.14	2.32	0.43
IN_J9	2400	790	3	28.20	48.15	44.52	299	172	205	3.55	4.03	2.64	4.60	2.64	0.38
IN_J10	2400	790	3	8.08	31.08	53.77	299	212	205	5.75	3.76	3.14	3.81	3.14	0.32
IN_K1	2400	790	3	-11.71	52.66	47.53	355	184	205	5.58		2.54	4.31	2.54	0.39
IN_K2	2400	790	3	9.04	72.77	36.75	299	169	205	2.35	5.41	2.05	5.58	2.05	0.49
IN_K3	2400	790	3	25.88	85.25	26.96	299	158	205	1.94	5.97	1.75	7.60	1.75	0.57
IN_K4	2400	790	3	37.54	93.69	15.46	299	153	205	1.73	6.44	1.61	13.26	1.61	0.62
IN_K5	2400	790	3	45.67	97.24	3.74	299	149	205	1.63	6.43	1.53	54.75	1.53	0.65
IN_K6	2400	790	3	50.06	97.54	9.12	299	147	205	1.61	5.61	1.50	22.46	1.50	0.67
IN_K7	2400	790	3	50.74	96.48	22.23	299	152	205	1.66	4.67	1.52	9.22	1.52	0.66
IN_K8	2400	790	3	46.81	90.03	35.95	299	157	205	1.83	3.98	1.61	5.70	1.61	0.62
IN_K9	2400	790	3	35.81	77.93	49.35	299	169	205	2.24	3.53	1.83	4.15	1.83	0.55
IN_K10	2400	790	3	18.19	56.72	64.80	299	188	205	3.17	3.05	2.14	3.16	2.14	0.47
IN_L1	2400	790	3	-12.14	41.22	7.68	355	187	205	7.60		4.39	26.67	4.39	0.23
IN_L2	2400	790	3	10.47	59.54	2.91	299	170	205	2.98	25.3	2.84	70.46	2.84	0.35
IN_L3	2400	790	3	26.53	73.93	3.14	299	160	205	2.29	10.9	2.15	65.28	2.15	0.46
IN_L4	2400	790	3	38.51	83.26	3.19	299	154	205	1.97	7.63	1.84	64.17	1.84	0.54
IN_L5	2400	790	3	45.44	86.29	3.97	299	148	205	1.83	6.46	1.72	51.67	1.72	0.58
IN_L6	2400	790	3	49.48	86.80	5.34	299	148	205	1.81	5.88	1.70	38.36	1.70	0.59
IN_L7	2400	790	3	48.88	84.79	6.58	299	153	205	1.92	5.89	1.79	31.16	1.79	0.56
IN_L8	2400	790	3	45.65	76.99	6.33	299	160	205	2.20	6.29	2.06	32.36	2.06	0.49
IN_L9	2400	790	3	35.30	62.88	4.29	299	172	205	2.90	8.20	2.72	47.75	2.72	0.37
IN_L10	2400	790	3	16.76	42.72	4.70	299	197	205	4.89	15.8	4.54	43.61	4.54	0.22
IN_M1	2400	790	3	-7.86	53.05	4.06	355	186	205	6.33		3.48	50.44	3.48	0.29
IN_M2	2400	790	3	19.36	71.88	4.73	299	169	205	2.48	14.0	2.34	43.38	2.34	0.43
IN_M3	2400	790	3	38.55	85.76	4.02	299	159	205	1.98	7.56	1.85	50.96	1.85	0.54
IN_M4	2400	790	3	52.06	93.42	3.52	299	152	205	1.73	5.67	1.63	58.19	1.63	0.62
IN_M5	2400	790	3	60.96	99.17	3.38	299	150	205	1.61	4.86	1.52	60.70	1.52	0.66
IN_M6	2400	790	3	66.10	98.54	4.42	299	147	205	1.59	4.47	1.49	46.36	1.49	0.67
IN_M7	2400	790	3	66.46	96.99	7.20	299	152	205	1.66	4.38	1.56	28.47	1.56	0.64
IN_M8	2400	790	3	61.07	89.62	9.42	299	158	205	1.86	4.67	1.75	21.76	1.75	0.57
IN_M9	2400	790	3	47.35	76.52	9.78	299	170	205	2.34	5.85	2.19	20.96	2.19	0.46
IN_M10	2400	790	3	21.35	54.98	8.65	299	189	205	3.64	11.3	3.36	23.70	3.36	0.30
IN_N1	2400	790	3	-9.66	49.00	16.94	355	185	205	6.60		3.49	12.10	3.49	0.29
IN_N2	2400	790	3	17.98	66.23	13.98	299	166	205	2.64	10.2	2.44	14.66	2.44	0.41
IN_N3	2400	790	3	38.09	80.77	10.65	299	159	205	2.09	6.96	1.94	19.24	1.94	0.52
IN_N4	2400	790	3	51.79	90.38	6.50	299	153	205	1.80	5.58	1.69	31.51	1.69	0.59
IN_N5	2400	790	3	61.24	94.37	1.50	299	149	205	1.68	4.87	1.58	136.7	1.58	0.63

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
IN_N6	2400	790	3	66.07	94.24	3.19	299	148	205	1.66	4.49	1.56	64.33	1.56	0.64
IN_N7	2400	790	3	66.29	92.01	8.35	299	152	205	1.74	4.36	1.64	24.54	1.64	0.61
IN_N8	2400	790	3	60.25	83.99	13.47	299	158	205	1.98	4.55	1.85	15.21	1.85	0.54
IN_N9	2400	790	3	45.37	69.58	17.83	299	166	205	2.51	5.40	2.29	11.50	2.29	0.44
IN_N10	2400	790	3	19.48	50.71	22.27	299	192	205	3.94	7.45	3.35	9.20	3.35	0.30
IN_O1	2400	790	3	-9.95	52.25	29.11	355	187	205	6.05		3.03	7.04	3.03	0.33
IN_O2	2400	790	3	16.62	70.25	22.56	299	167	205	2.48	7.70	2.24	9.09	2.24	0.45
IN_O3	2400	790	3	34.89	85.31	16.86	299	159	205	1.98	6.57	1.82	12.15	1.82	0.55
IN_O4	2400	790	3	47.80	95.64	10.61	299	155	205	1.72	5.75	1.60	19.31	1.60	0.62
IN_O5	2400	790	3	55.80	98.10	4.29	299	148	205	1.61	5.28	1.51	47.72	1.51	0.66
IN_O6	2400	790	3	59.80	98.62	2.18	299	148	205	1.59	4.98	1.50	94.04	1.50	0.67
IN_O7	2400	790	3	59.96	96.86	9.09	299	153	205	1.67	4.76	1.57	22.54	1.57	0.64
IN_O8	2400	790	3	55.84	88.73	17.01	299	158	205	1.89	4.67	1.74	12.05	1.74	0.57
IN_O9	2400	790	3	43.30	74.55	25.05	299	169	205	2.38	4.93	2.12	8.18	2.12	0.47
IN_O10	2400	790	3	21.28	55.99	34.93	299	196	205	3.58	5.18	2.84	5.87	2.84	0.35

Πίνακας 30 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel του εσωτερικού πυθμένα

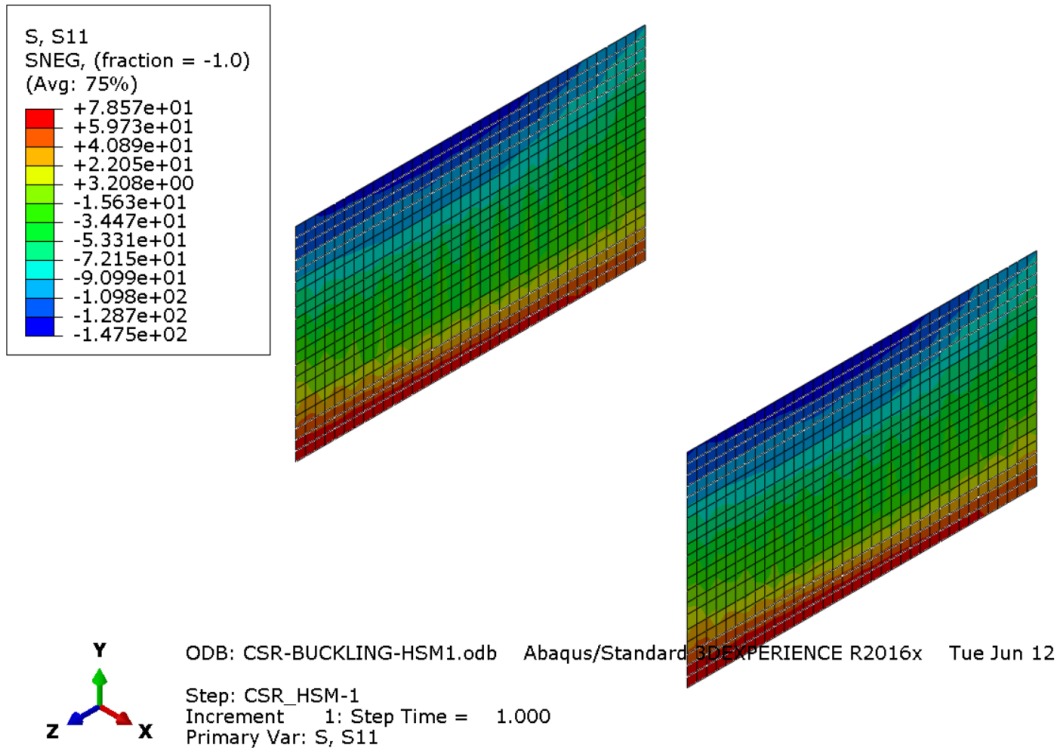
Παρακάτω δίνεται σχηματικά η κατανομή του η_{act} για τα panels του εσωτερικού πυθμένα.



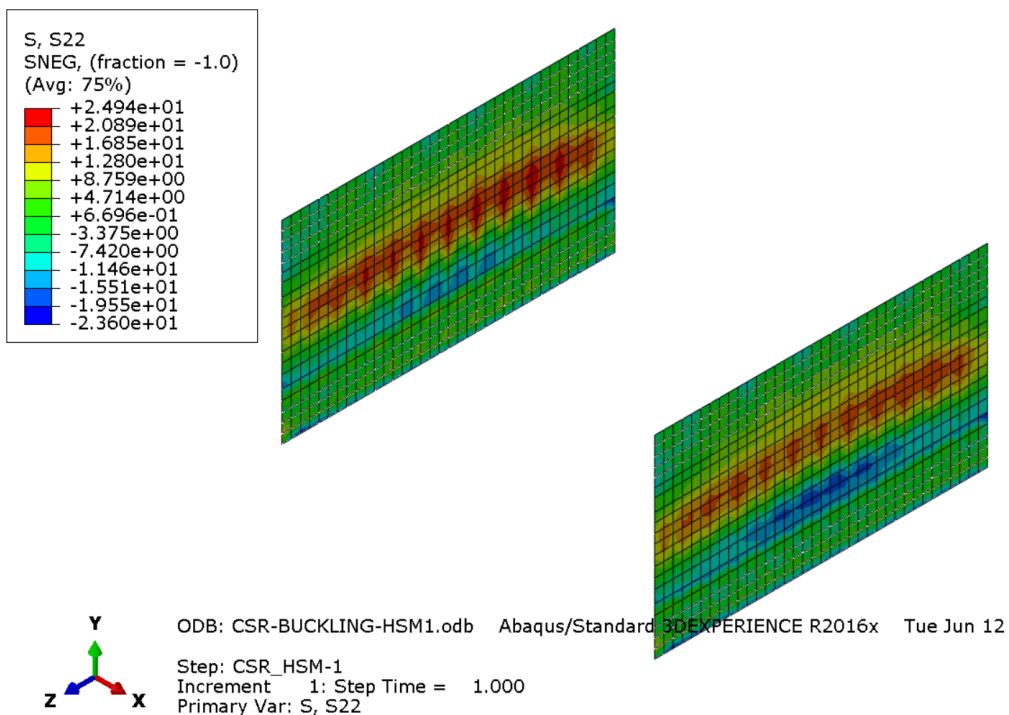
Εικόνα 48 Κατανομή η_{act} για τα panel του εσωτερικού πυθμένα

7.5 Πλευρές

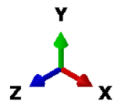
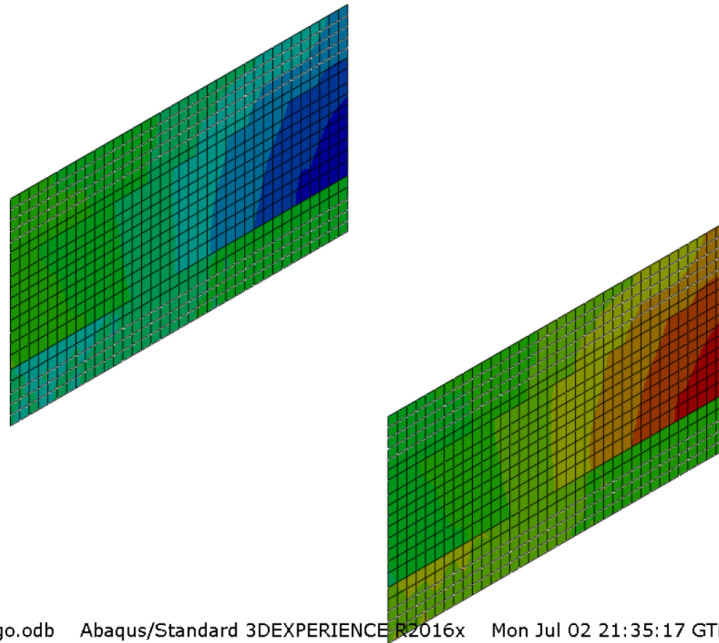
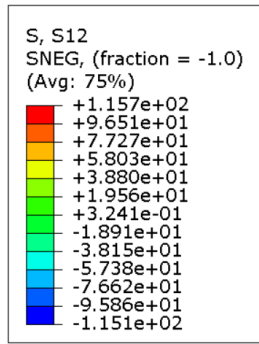
Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στα ελάσματα των πλευρών του πλοίου όπως προέκυψαν από την ανάλυση της κατασκευής. Εδώ οι τάσεις S11 είναι παράλληλες στον άξονα Z του μοντέλου ενώ οι S22 είναι παράλληλες στον άξονα Y. Τα panels ορίζονται μεταξύ των side frames και της ακμής του topside και horpper. Η μελέτη του λυγισμού έγινε για τα ελάσματα που βρίσκονται στα θετικά του άξονα X. Οι υπολογισμοί έγιναν με τις 4 μεθόδους που αναλύθηκαν προηγουμένως.



Εικόνα 49 Απόκριση Sides: Τάση S11, undeformed



Εικόνα 50 Απόκριση Sides: Τάση S22, undeformed



ODB: no_cargo.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Mon Jul 02 21:35:17 GTB Summer Time 2018

Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S12

Εικόνα 51 Απόκριση Sides: τάση S12, undeformed

Μέθοδος Α

a. Θεωρείται μόνο η μέγιστη θλιπτική τάση σ_x , με $\alpha = 1$ και $\psi_x = 1$.

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c2}	γ_c	η_{act}
SD_1	7955	800	1	8.62	0.00	0.00	328	355	205	38.05	38.05	0.03
SD_2	7955	800	1	7.69	0.00	0.00	328	355	205	42.65	42.65	0.02
SD_3	7955	800	1	10.27	0.00	0.00	328	355	205	31.93	31.93	0.03
SD_4	7955	800	1	9.00	0.00	0.00	328	355	205	36.46	36.46	0.03
SD_5	7955	800	1	18.17	0.00	0.00	328	355	205	18.05	18.05	0.06
SD_6	7955	800	1	11.28	0.00	0.00	328	355	205	29.06	29.06	0.03
SD_7	7955	800	1	11.87	0.00	0.00	328	355	205	27.64	27.64	0.04
SD_8	7955	800	1	22.70	0.00	0.00	328	355	205	14.45	14.45	0.07
SD_9	7955	800	1	15.23	0.00	0.00	328	355	205	21.53	21.53	0.05
SD_10	7955	800	1	16.37	0.00	0.00	328	355	205	20.04	20.04	0.05
SD_11	7955	800	1	29.68	0.00	0.00	328	355	205	11.05	11.05	0.09
SD_12	7955	800	1	17.95	0.00	0.00	328	355	205	18.27	18.27	0.05
SD_13	7955	800	1	18.09	0.00	0.00	328	355	205	18.13	18.13	0.06
SD_14	7955	800	1	31.42	0.00	0.00	328	355	205	10.44	10.44	0.10
SD_15	7955	800	1	19.24	0.00	0.00	328	355	205	17.04	17.04	0.06
SD_16	7955	800	1	19.23	0.00	0.00	328	355	205	17.06	17.06	0.06
SD_17	7955	800	1	32.85	0.00	0.00	328	355	205	9.98	9.98	0.10
SD_18	7955	800	1	18.72	0.00	0.00	328	355	205	17.52	17.52	0.06
SD_19	7955	800	1	18.52	0.00	0.00	328	355	205	17.71	17.71	0.06
SD_20	7955	800	1	30.87	0.00	0.00	328	355	205	10.63	10.63	0.09
SD_21	7955	800	1	17.49	0.00	0.00	328	355	205	18.75	18.75	0.05
SD_22	7955	800	1	16.08	0.00	0.00	328	355	205	20.39	20.39	0.05
SD_23	7955	800	1	26.67	0.00	0.00	328	355	205	12.30	12.30	0.08
SD_24	7955	800	1	13.23	0.00	0.00	328	355	205	24.79	24.79	0.04
SD_25	7955	800	1	12.34	0.00	0.00	328	355	205	26.57	26.57	0.04
SD_26	7955	800	1	20.25	0.00	0.00	328	355	205	16.20	16.20	0.06

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c2}	γ_c	η_{act}
SD_27	7955	800	1	10.74	0.00	0.00	328	355	205	30.53	30.53	0.03
SD_28	7955	800	1	9.13	0.00	0.00	328	355	205	35.92	35.92	0.03
SD_29	7955	800	1	13.99	0.00	0.00	328	355	205	23.44	23.44	0.04
SD_30	7955	800	1	6.74	0.00	0.00	328	355	205	48.68	48.68	0.02

Πίνακας 31 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel της πλευράς με τη μέθοδο A.a

- b. Θεωρούνται όλες οι φορτίσεις στη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη θλιπτική τάση σ_x , με $\alpha = 2$ και $\psi_x = \psi_y = 1$. Το t_p λαμβάνεται όσο το πάχος του ελάσματος στη θέση της μέγιστης σ_x .

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
SD_1	7955	800	2	8.62	-0.55	13.62	328	355	205	30	13		15	13	0.07
SD_2	7955	800	2	7.69	6.42	10.82	328	229	205	26	17	16	19	16	0.06
SD_3	7955	800	2	10.27	5.06	9.70	328	229	205	26	17	18	21	17	0.06
SD_4	7955	800	2	9.00	11.78	0.79	328	229	205	19	36	19	259	19	0.05
SD_5	7955	800	2	18.17	39.11	0.96	328	229	205	6.10	18	6	213	6	0.17
SD_6	7955	800	2	11.28	16.40	0.33	328	229	205	14	29	14	629	14	0.07
SD_7	7955	800	2	11.87	16.97	11.63	328	229	205	13	14	10	18	10	0.10
SD_8	7955	800	2	22.70	47.09	10.53	328	229	205	5.01	11	4.62	19	4.62	0.22
SD_9	7955	800	2	15.23	21.45	9.00	328	229	205	10	15	9.25	23	9.25	0.11
SD_10	7955	800	2	16.37	20.77	22.87	328	229	205	9.67	7.83	6.54	8.96	6.54	0.15
SD_11	7955	800	2	29.68	57.35	22.35	328	229	205	4.04	6.63	3.51	9.17	3.51	0.28
SD_12	7955	800	2	17.95	23.43	21.23	328	229	205	8.88	8.12	6.45	9.65	6.45	0.15
SD_13	7955	800	2	18.09	23.63	36.18	328	229	205	7.93	5.24	4.64	5.67	4.64	0.22
SD_14	7955	800	2	31.42	60.63	34.86	328	229	205	3.74	4.86	3.01	5.88	3.01	0.33
SD_15	7955	800	2	19.24	25.56	33.52	328	229	205	7.64	5.55	4.77	6.12	4.77	0.21
SD_16	7955	800	2	19.23	24.89	49.26	328	229	205	6.92	3.95	3.63	4.16	3.63	0.28
SD_17	7955	800	2	32.85	63.53	48.42	328	229	205	3.48	3.74	2.58	4.23	2.58	0.39
SD_18	7955	800	2	18.72	24.74	47.17	328	229	205	7.08	4.12	3.76	4.34	3.76	0.27
SD_19	7955	800	2	18.52	25.35	62.70	328	229	205	6.23	3.16	2.97	3.27	2.97	0.34
SD_20	7955	800	2	30.87	61.00	61.58	328	229	205	3.49	3.08	2.34	3.33	2.34	0.43
SD_21	7955	800	2	17.49	24.48	60.93	328	229	205	6.45	3.26	3.06	3.36	3.06	0.33
SD_22	7955	800	2	16.08	23.22	75.78	328	229	205	5.90	2.65	2.54	2.70	2.54	0.39
SD_23	7955	800	2	26.67	56.71	75.18	328	229	205	3.56	2.61	2.13	2.73	2.13	0.47
SD_24	7955	800	2	13.23	20.87	74.26	328	229	205	6.26	2.72	2.61	2.76	2.61	0.38
SD_25	7955	800	2	12.34	21.79	87.16	328	229	205	5.58	2.33	2.25	2.35	2.25	0.44
SD_26	7955	800	2	20.25	47.03	86.24	328	229	205	3.91	2.32	2.04	2.38	2.04	0.49
SD_27	7955	800	2	10.74	19.54	86.65	328	229	205	5.80	2.35	2.28	2.37	2.28	0.44
SD_28	7955	800	2	9.13	12.76	97.15	328	229	205	5.76	2.10	2.08	2.11	2.08	0.48
SD_29	7955	800	2	13.99	38.94	98.33	328	229	205	4.12	2.06	1.90	2.08	1.90	0.53
SD_30	7955	800	2	6.74	9.41	102.5	328	229	205	5.69	1.99	1.98	2.00	1.98	0.50

Πίνακας 32 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel της πλευράς με τη μέθοδο A.b

- c. Θεωρούνται όλες οι φορτίσεις στη θέση που εμφανίζεται η μέγιστη διατμητική τάση τ , με $\alpha = 2$ και $\psi_x = \psi_y = 1$. Το t_p λαμβάνεται όσο το πάχος του ελάσματος στη θέση της μέγιστης τ .

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
SD_1	7955	800	2	8.62	-0.55	13.62	328	355	205	30	13		15	13	0.07
SD_2	7955	800	2	7.69	6.42	10.82	328	229	205	26	17	16	19	16	0.06

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
SD_3	7955	800	2	10.27	5.06	9.70	328	229	205	26	17	18	21	17	0.06
SD_4	7955	800	2	-6.72	77.95	6.66	355	236	205	4.35		2.99	31	2.99	0.33
SD_5	7955	800	2	-6.21	82.08	10.26	355	236	205	4.15		2.81	20	2.81	0.36
SD_6	7955	800	2	-6.92	80.66	13.19	355	236	205	4.19		2.83	16	2.83	0.35
SD_7	7955	800	2	-7.66	81.34	16.77	355	236	205	4.13		2.76	12	2.76	0.36
SD_8	7955	800	2	-7.75	83.19	15.98	355	236	205	4.04		2.72	13	2.72	0.37
SD_9	7955	800	2	-7.09	83.89	20.71	355	236	205	4.01		2.63	9.90	2.63	0.38
SD_10	7955	800	2	-8.03	82.57	22.91	355	236	205	4.04		2.64	8.95	2.64	0.38
SD_11	7955	800	2	-7.57	86.22	26.80	355	236	205	3.88		2.49	7.65	2.49	0.40
SD_12	7955	800	2	-7.73	83.52	30.60	355	236	205	3.97		2.50	6.70	2.50	0.40
SD_13	7955	800	2	-8.90	84.08	33.91	355	236	205	3.90		2.44	6.04	2.44	0.41
SD_14	7955	800	2	-8.89	85.52	34.01	355	236	205	3.84		2.40	6.03	2.40	0.42
SD_15	7955	800	2	-7.44	83.93	38.82	355	236	205	3.91		2.37	5.28	2.37	0.42
SD_16	7955	800	2	-8.46	81.59	41.57	355	236	205	3.97		2.37	4.93	2.37	0.42
SD_17	7955	800	2	9.33	39.91	47.77	328	229	205	5.21	4.22	3.24	4.29	3.24	0.31
SD_18	7955	800	2	12.59	22.41	50.69	328	229	205	7.47	3.94	3.62	4.04	3.62	0.28
SD_19	7955	800	2	12.65	22.78	59.17	328	229	205	6.89	3.40	3.17	3.46	3.17	0.32
SD_20	7955	800	2	8.70	38.42	61.89	328	229	205	5.00	3.28	2.75	3.31	2.75	0.36
SD_21	7955	800	2	11.96	21.86	65.11	328	229	205	6.68	3.10	2.93	3.15	2.93	0.34
SD_22	7955	800	2	11.83	20.69	73.16	328	229	205	6.37	2.77	2.65	2.80	2.65	0.38
SD_23	7955	800	2	7.89	35.67	75.93	328	229	205	4.86	2.68	2.39	2.70	2.39	0.42
SD_24	7955	800	2	9.41	18.89	78.75	328	229	205	6.28	2.58	2.50	2.60	2.50	0.40
SD_25	7955	800	2	9.72	18.22	85.80	328	229	205	5.96	2.37	2.31	2.39	2.31	0.43
SD_26	7955	800	2	6.98	29.37	88.05	328	229	205	4.99	2.32	2.17	2.33	2.17	0.46
SD_27	7955	800	2	8.64	14.89	91.47	328	229	205	5.93	2.23	2.19	2.24	2.19	0.46
SD_28	7955	800	2	9.13	12.76	97.15	328	229	205	5.76	2.10	2.08	2.11	2.08	0.48
SD_29	7955	800	2	7.15	22.55	99.95	328	229	205	5.06	2.04	1.97	2.05	1.97	0.51
SD_30	7955	800	2	6.74	9.41	102.5	328	229	205	5.69	1.99	1.98	2.00	1.98	0.50

Πίνακας 33 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel της πλευράς με τη μέθοδο A.c

Μέθοδος Β

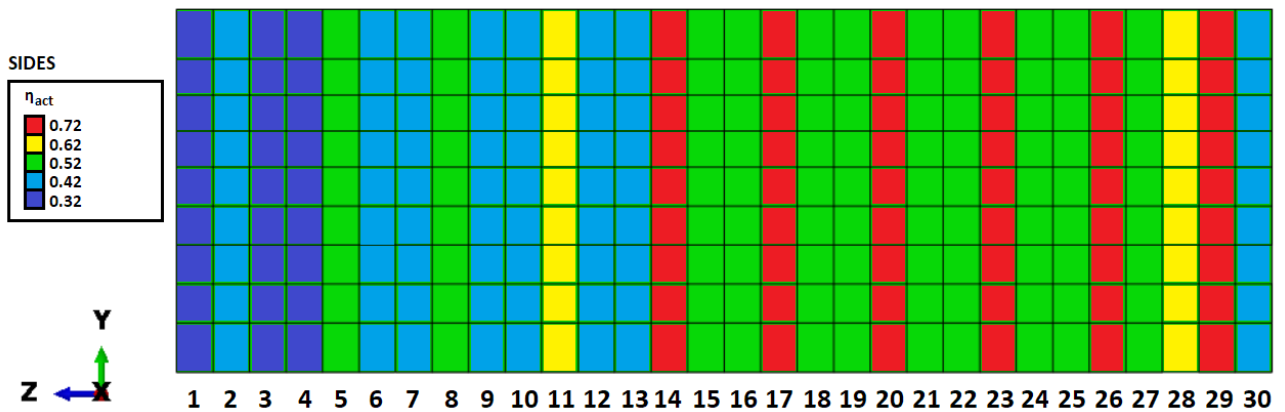
Θεωρούνται όλες οι φορτίσεις ως ο σταθμισμένος μέσος των αποκρίσεων κάθε *Element*, με $\psi_x = \psi_y = 1$. Οι πραγματικές διαστάσεις του panel χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του λόγου α . Το t_p λαμβάνεται όσο το ελάχιστο πάχος που εμφανίζεται στο panel.

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
SD_1	7955	800	9.9	-7.43	33.4	3.99	307	106	205	9.40		3.14	51.3	3.14	0.32
SD_2	7955	800	9.9	-5.71	42.0	3.62	307	106	205	7.86		2.51	56.6	2.51	0.40
SD_3	7955	800	9.9	-6.76	39.4	4.43	307	106	205	8.21		2.67	46.2	2.67	0.37
SD_4	7955	800	9.9	-8.25	36.7	4.57	307	106	205	8.55		2.86	44.9	2.86	0.35
SD_5	7955	800	9.9	-3.26	54.9	5.88	307	106	205	6.26		1.92	34.9	1.92	0.52
SD_6	7955	800	9.9	-7.29	40.3	7.20	307	106	205	7.97		2.60	28.5	2.60	0.39
SD_7	7955	800	9.9	-7.89	38.7	13.08	307	106	205	8.10		2.65	15.7	2.65	0.38
SD_8	7955	800	9.9	-2.22	58.3	13.32	307	106	205	5.93		1.79	15.4	1.79	0.56
SD_9	7955	800	9.9	-6.03	43.2	15.27	307	106	205	7.50		2.37	13.4	2.37	0.42
SD_10	7955	800	9.9	-6.52	41.7	22.28	307	106	205	7.54		2.38	9.20	2.38	0.42
SD_11	7955	800	9.9	0.24	65.5	24.46	307	106	205	1.61	8.38	1.56	8.38	1.56	0.64
SD_12	7955	800	9.9	-5.73	43.8	26.63	307	106	205	7.19		2.23	7.70	2.23	0.45
SD_13	7955	800	9.9	-6.28	42.7	34.15	307	106	205	7.08		2.20	6.00	2.20	0.45
SD_14	7955	800	9.9	0.43	66.3	35.03	307	106	205	1.58	5.85	1.50	5.85	1.50	0.67
SD_15	7955	800	9.9	-5.23	44.8	37.18	307	106	205	6.80		2.08	5.51	2.08	0.48
SD_16	7955	800	9.9	-5.86	42.9	45.17	307	106	205	6.70		2.06	4.54	2.06	0.49
SD_17	7955	800	9.9	1.19	68.5	47.45	307	106	205	1.53	4.32	1.40	4.32	1.40	0.71
SD_18	7955	800	9.9	-6.67	42.3	49.56	307	106	205	6.55		2.02	4.14	2.02	0.49
SD_19	7955	800	9.9	-6.76	42.4	56.60	307	106	205	6.28		1.94	3.62	1.94	0.52

PANEL	a mm	b mm	α	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
SD_20	7955	800	9.9	0.04	65.8	58.75	307	106	205	1.57	3.49	1.39	3.49	1.39	0.72
SD_21	7955	800	9.9	-6.86	41.4	61.05	307	106	205	6.19		1.91	3.36	1.91	0.52
SD_22	7955	800	9.9	-7.28	40.2	68.71	307	106	205	5.97		1.85	2.98	1.85	0.54
SD_23	7955	800	9.9	-1.36	61.8	71.03	307	106	205	4.75		1.39	2.89	1.39	0.72
SD_24	7955	800	9.9	-8.67	37.4	73.09	307	106	205	5.93		1.87	2.80	1.87	0.54
SD_25	7955	800	9.9	-8.90	36.6	78.73	307	106	205	5.75		1.82	2.60	1.82	0.55
SD_26	7955	800	9.9	-3.45	55.0	80.85	307	106	205	4.83		1.44	2.53	1.44	0.69
SD_27	7955	800	9.9	-8.93	35.0	83.25	307	106	205	5.66		1.79	2.46	1.79	0.56
SD_28	7955	800	9.9	-8.93	33.3	89.36	307	106	205	5.51		1.75	2.29	1.75	0.57
SD_29	7955	800	9.9	-4.36	47.1	91.87	307	106	205	4.90		1.49	2.23	1.49	0.67
SD_30	7955	800	9.9	-8.87	28.5	93.84	307	106	205	5.56		1.78	2.18	2.13	0.47

Πίνακας 34 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel της πλευράς με τη μέθοδο B

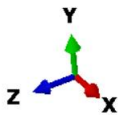
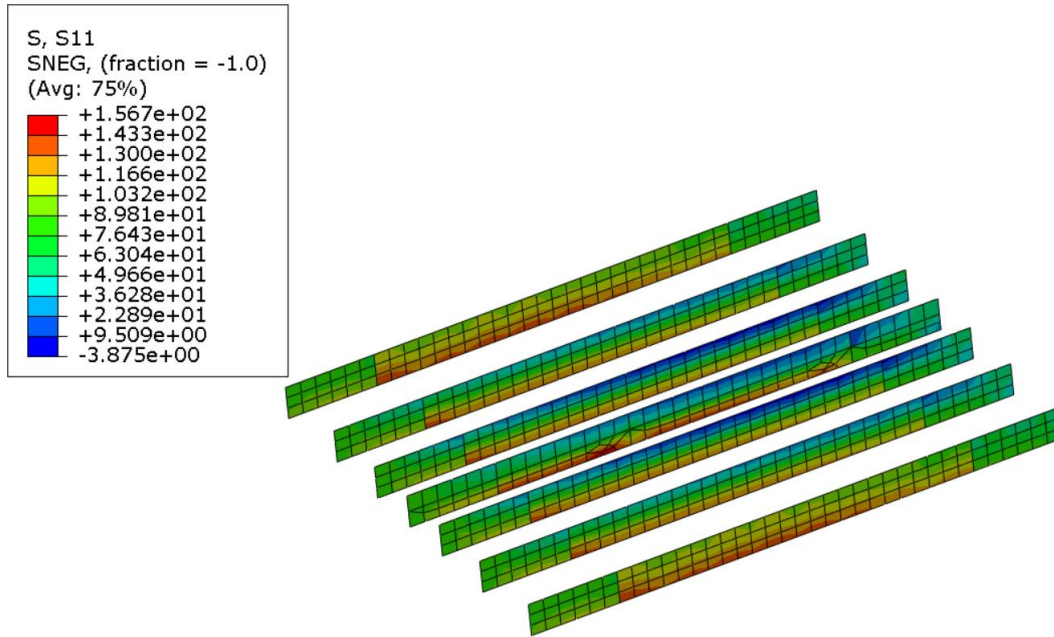
Παρακάτω δίνεται σχηματικά η χειριστή κατανομή του η_{act} για τα panels των πλευρών.



Εικόνα 52 Κατανομή η_{act} για τα panel των πλευρών

7.6 Σταθμίδες διπύθμενου

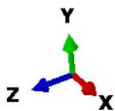
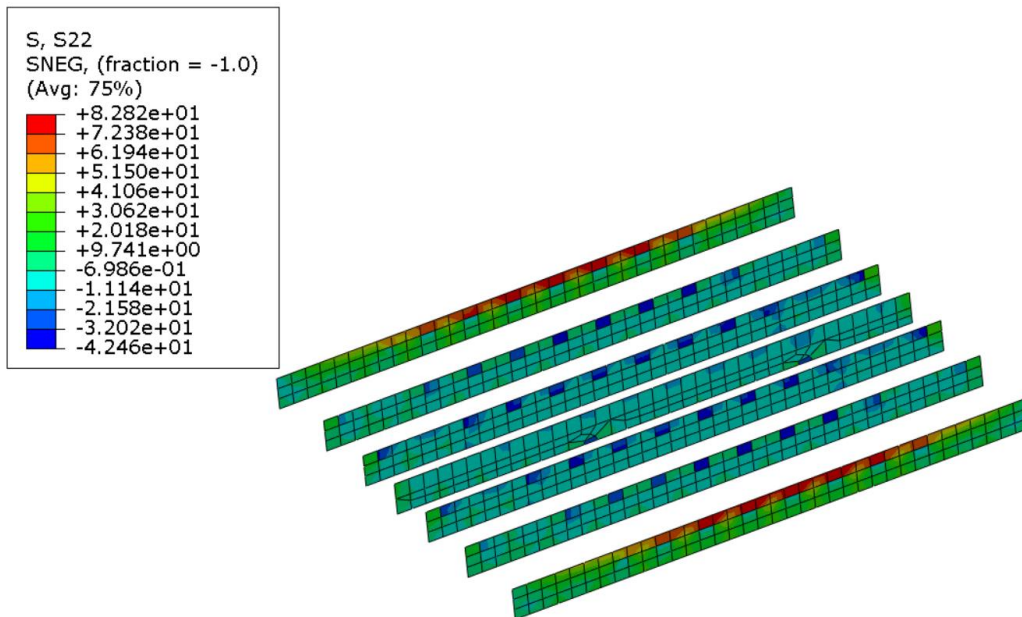
Στη συνέχεια, δίνονται τα διαγράμματα των τάσεων στα ελάσματα των σταθμίδων του διπυθμένου όπως προέκυψαν από την ανάλυση της κατασκευής. Εδώ οι τάσεις S11 είναι παράλληλες στον άξονα Z του μοντέλου ενώ οι S22 είναι παράλληλες στον άξονα Y. Τα panels ορίζονται μεταξύ των διαμήκων ενισχυτικών των σταθμίδων και των floors του διπύθμενου. Η μελέτη του λυγισμού έγινε για τα ελάσματα που ανήκουν στις Side Girder No. 1, Side Girder No. 2 και Side Girder No. 3 δηλαδή συνολικά 90 panels. Οι τάσεις μεταβάλλονται και στις δύο διευθύνσεις από εφελκυστικές σε θλιπτικές, όπως φαίνεται στην εικόνα, οπότε ο έλεγχος γίνεται χρησιμοποιώντας κάθε φορά τις κατάλληλες εξισώσεις αλληλεπίδρασης.



ODB: CSR-BUCKLING-HSM1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Tue Jun

Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S11

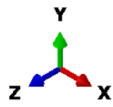
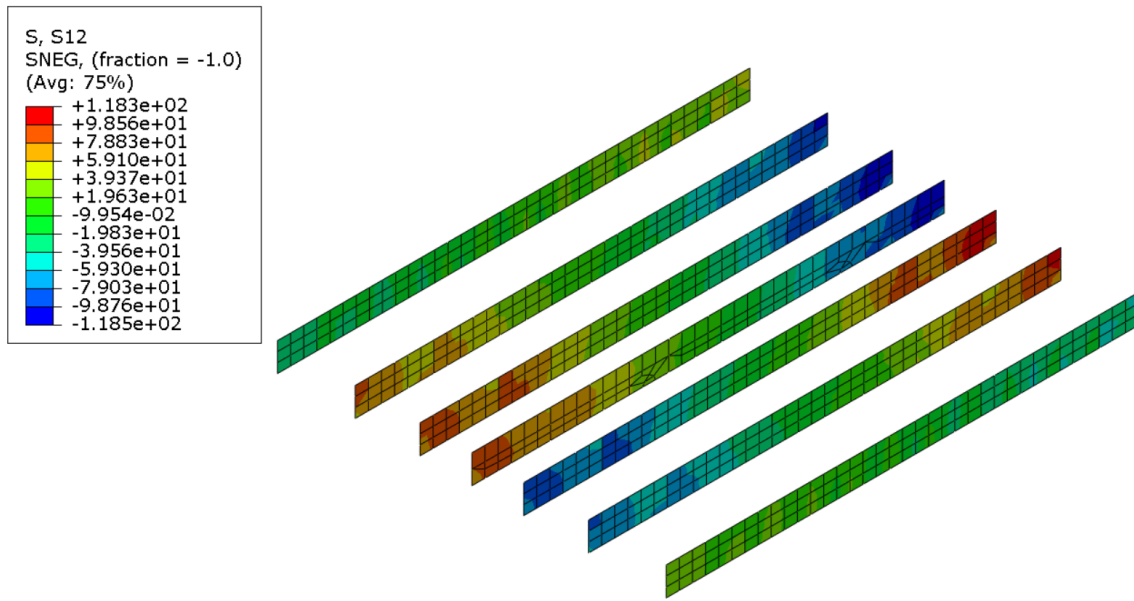
Εικόνα 53 Εικόνα 41 Απόκριση Girders: Τάση S11, undeformed



ODB: CSR-BUCKLING-HSM1.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Tue Jun

Step: CSR_HSM-1
Increment 1: Step Time = 1.000
Primary Var: S, S22

Εικόνα 54 Εικόνα 41 Απόκριση Girders: Τάση S22, undeformed



ODB: no_cargo.odb Abaqus/Standard 3DEXPERIENCE R2016x Mon Jul 02 21:35:17 GTB Summer Time 2018

Step: CSR_HSM-1
 Increment 1: Step Time = 1.000
 Primary Var: S, S12

Εικόνα 55 Απόκριση Girders: τάση S12, undeformed

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
GR_A1	2400	580	3	-68.68	-36.54	14.46	355	355	180	5.91			12.42	5.91	0.17
GR_A2	2400	580	3	-93.16	-48.58	17.79	355	355	180	4.36			10.09	4.36	0.23
GR_A3	2400	580	3	-96.55	-61.60	14.09	355	355	180	4.17			12.74	4.17	0.24
GR_A4	2400	580	3	-97.84	-71.15	7.98	355	355	180	4.05			22.48	4.05	0.25
GR_A5	2400	580	3	-97.89	-75.04	6.56	355	355	180	4.00			27.37	4.00	0.25
GR_A6	2400	580	3	-95.67	-78.11	9.59	355	355	180	4.02			18.72	4.02	0.25
GR_A7	2400	580	3	-92.06	-77.72	17.73	355	355	180	4.11			10.13	4.11	0.24
GR_A8	2400	580	3	-85.19	-70.68	26.12	355	355	180	4.42			6.87	4.42	0.23
GR_A9	2400	580	3	-81.28	-57.23	32.18	355	355	180	4.75			5.58	4.75	0.21
GR_A10	2400	580	3	-55.44	-47.44	25.70	355	355	180	6.58			6.98	6.58	0.15
GR_B1	2400	580	3	-69.56	2.58	17.95	355	137	180	4.96		9.54	10.00	4.96	0.20
GR_B2	2400	580	3	-103.47	2.76	23.76	355	126	180	3.36		7.26	7.56	3.36	0.30
GR_B3	2400	580	3	-104.85	-7.86	23.66	355	355	180	3.48			7.59	3.48	0.29
GR_B4	2400	580	3	-106.49	-9.17	23.18	355	355	180	3.44			7.75	3.44	0.29
GR_B5	2400	580	3	-105.75	-10.27	22.05	355	355	180	3.49			8.14	3.49	0.29
GR_B6	2400	580	3	-103.13	-10.98	25.08	355	355	180	3.58			7.16	3.58	0.28
GR_B7	2400	580	3	-99.06	-10.04	27.54	355	355	180	3.71			6.52	3.71	0.27
GR_B8	2400	580	3	-92.42	-8.69	29.11	355	355	180	3.95			6.17	3.95	0.25
GR_B9	2400	580	3	-90.59	2.11	33.66	355	134	180	3.79		5.26	5.33	3.79	0.26
GR_B10	2400	580	3	-57.23	5.18	27.52	355	103	180	5.72		5.86	6.52	5.72	0.17
GR_C1	2400	580	3	-102.88	-7.83	19.96	355	355	180	3.55			8.99	3.55	0.28
GR_C2	2400	580	3	-130.10	-8.98	24.76	355	355	180	2.80			7.25	2.80	0.36
GR_C3	2400	580	3	-126.50	-14.55	24.65	355	355	180	2.94			7.28	2.94	0.34
GR_C4	2400	580	3	-131.12	-17.81	23.71	355	355	180	2.86			7.57	2.86	0.35
GR_C5	2400	580	3	-131.93	-19.16	22.38	355	355	180	2.86			8.02	2.86	0.35
GR_C6	2400	580	3	-128.43	-19.15	25.12	355	355	180	2.94			7.15	2.94	0.34
GR_C7	2400	580	3	-122.67	-18.38	27.22	355	355	180	3.07			6.60	3.07	0.33
GR_C8	2400	580	3	-113.70	-15.60	28.83	355	355	180	3.29			6.23	3.29	0.30
GR_C9	2400	580	3	-118.72	-9.26	34.19	355	355	180	3.06			5.25	3.06	0.33

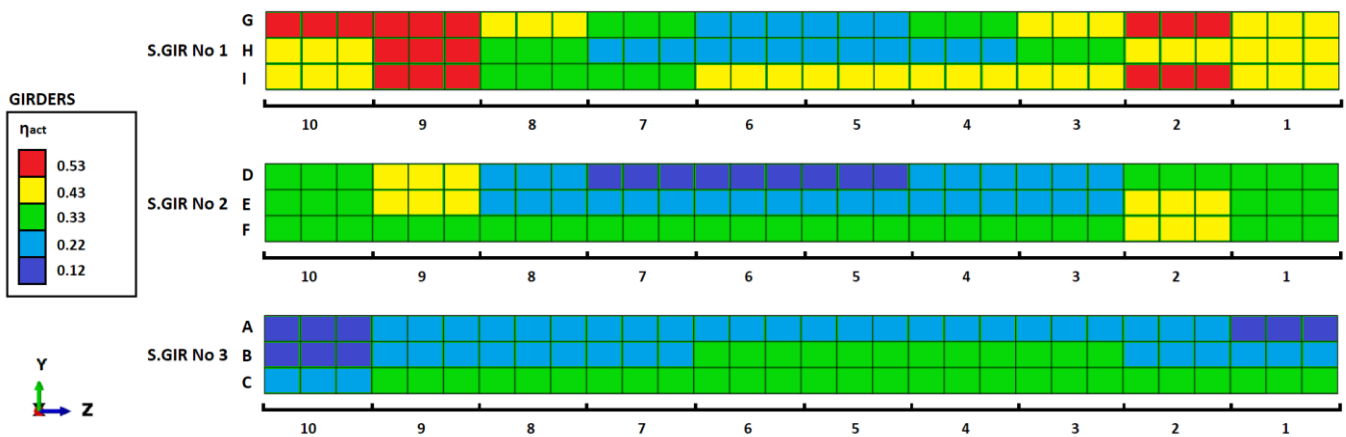
7. Ανάλυση αποτελεσμάτων | Κωνσταντίνα Μπαλωτή

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
GR_C10	2400	580	3	-86.89	-9.69	27.37	355	355	180	4.23			6.56	4.23	0.24
GR_D1	2400	580	3	-36.16	3.21	49.34	355	91	180	7.49		3.54	3.64	3.54	0.28
GR_D2	2400	580	3	-36.01	9.50	56.20	355	121	180	6.73		2.97	3.19	2.97	0.34
GR_D3	2400	580	3	-31.68	7.92	40.59	355	97	180	8.22		3.91	4.42	3.91	0.26
GR_D4	2400	580	3	-27.03	8.59	24.78	355	97	180	10.0		5.56	7.24	5.56	0.18
GR_D5	2400	580	3	-23.80	8.04	12.99	355	87	180	11.9		7.69	13.82	7.69	0.13
GR_D6	2400	580	3	-20.55	8.32	10.97	355	88	180	13.3		8.12	16.36	8.12	0.12
GR_D7	2400	580	3	-17.87	8.67	20.43	355	91	180	13.5		6.08	8.79	6.08	0.16
GR_D8	2400	580	3	-17.06	8.67	40.16	355	91	180	10.9		3.83	4.47	3.83	0.26
GR_D9	2400	580	3	-16.30	11.18	62.69	355	115	180	8.18		2.63	2.86	2.63	0.38
GR_D10	2400	580	3	-13.99	4.39	60.87	355	89	180	9.13		2.86	2.95	2.86	0.35
GR_E1	2400	580	3	-61.72	1.57	54.49	355	127	180	5.07		3.28	3.29	3.28	0.30
GR_E2	2400	580	3	-81.89	12.08	61.66	355	92	180	3.72		2.55	2.91	2.55	0.39
GR_E3	2400	580	3	-78.87	8.42	42.80	355	91	180	4.08		3.66	4.19	3.66	0.27
GR_E4	2400	580	3	-76.94	8.86	26.27	355	89	180	4.27		5.15	6.83	4.27	0.23
GR_E5	2400	580	3	-74.47	9.36	11.56	355	92	180	4.45		7.59	15.53	4.45	0.22
GR_E6	2400	580	3	-71.54	9.74	3.79	355	92	180	4.62		8.94	47.36	4.62	0.22
GR_E7	2400	580	3	-68.55	10.31	19.84	355	93	180	4.73		5.75	9.05	4.73	0.21
GR_E8	2400	580	3	-64.53	10.32	40.28	355	92	180	4.80		3.68	4.46	3.68	0.27
GR_E9	2400	580	3	-65.43	14.29	65.12	355	97	180	4.29		2.39	2.76	2.39	0.42
GR_E10	2400	580	3	-46.48	3.78	63.96	355	98	180	5.83		2.75	2.81	2.75	0.36
GR_F1	2400	580	3	-104.61	-0.43	57.34	355	355	180	3.24			3.13	3.13	0.32
GR_F2	2400	580	3	-131.30	2.27	65.57	355	104	180	2.58		2.72	2.74	2.58	0.39
GR_F3	2400	580	3	-129.21	0.57	42.49	355	89	180	2.69		4.22	4.23	2.69	0.37
GR_F4	2400	580	3	-130.91	-0.08	26.07	355	355	180	2.69			6.89	2.69	0.37
GR_F5	2400	580	3	-130.61	0.09	11.92	355	141	180	2.71		15.05	15.06	2.71	0.37
GR_F6	2400	580	3	-127.83	0.01	4.09	355	151	180	2.78		43.89	43.89	2.78	0.36
GR_F7	2400	580	3	-123.49	0.15	18.20	355	118	180	2.86		9.86	9.87	2.86	0.35
GR_F8	2400	580	3	-117.02	1.32	38.21	355	121	180	2.96		4.67	4.70	2.96	0.34
GR_F9	2400	580	3	-116.01	3.24	66.30	355	124	180	2.87		2.68	2.71	2.68	0.37
GR_F10	2400	580	3	-84.98	0.25	63.93	355	144	180	3.83		2.81	2.81	2.81	0.36
GR_G1	2400	580	3	-24.22	18.44	61.97	355	116	180	6.89		2.44	2.90	2.44	0.41
GR_G2	2400	580	3	-16.66	23.55	72.47	355	126	180	6.51		2.08	2.48	2.08	0.48
GR_G3	2400	580	3	-9.21	19.59	52.57	355	105	180	8.96		2.63	3.41	2.63	0.38
GR_G4	2400	580	3	-2.96	19.50	32.72	355	101	180	12.5		3.40	5.49	3.40	0.29
GR_G5	2400	580	3	1.23	18.46	14.56	255	92	180	4.96	12.22	4.33	12.33	4.33	0.23
GR_G6	2400	580	3	4.65	18.24	10.49	255	89	180	5.03	15.50	4.46	17.12	4.46	0.22
GR_G7	2400	580	3	6.09	19.81	24.43	255	94	180	4.72	7.04	3.63	7.35	3.63	0.28
GR_G8	2400	580	3	6.50	21.49	49.33	255	100	180	4.17	3.58	2.59	3.64	2.59	0.39
GR_G9	2400	580	3	6.27	26.66	77.77	255	119	180	3.55	2.29	1.89	2.31	1.89	0.53
GR_G10	2400	580	3	1.40	21.69	73.46	255	106	180	3.76	2.44	2.02	2.44	2.02	0.50
GR_H1	2400	580	3	-60.61	-6.04	69.61	355	355	180	5.04			2.58	2.58	0.39
GR_H2	2400	580	3	-77.45	6.42	80.60	355	100	180	3.81		2.16	2.23	2.16	0.46
GR_H3	2400	580	3	-72.89	3.33	56.95	355	114	180	4.35		3.10	3.15	3.10	0.32
GR_H4	2400	580	3	-70.10	3.49	35.53	355	96	180	4.75		4.83	5.05	4.75	0.21
GR_H5	2400	580	3	-66.94	3.54	16.49	355	93	180	5.11		9.39	10.89	5.11	0.20
GR_H6	2400	580	3	-64.01	3.74	4.08	355	90	180	5.38		19.43	43.98	5.38	0.19
GR_H7	2400	580	3	-61.34	4.08	24.68	355	94	180	5.46		6.57	7.27	5.46	0.18
GR_H8	2400	580	3	-58.64	3.72	51.15	355	88	180	5.27		3.40	3.51	3.40	0.29
GR_H9	2400	580	3	-59.67	7.03	82.63	355	103	180	4.47		2.10	2.17	2.10	0.48
GR_H10	2400	580	3	-44.30	-4.86	79.00	355	355	180	5.72			2.27	2.27	0.44
GR_I1	2400	580	3	-107.53	7.89	71.26	355	114	180	2.98		2.41	2.52	2.41	0.41
GR_I2	2400	580	3	-131.73	11.98	83.09	355	136	180	2.43		2.06	2.16	2.06	0.49

PANEL	a mm	b mm	n	σ_x MPa	σ_y MPa	τ MPa	σ_{xc}' MPa	σ_{yc}' MPa	τ_c' MPa	γ_{c1}	γ_{c2}	γ_{c3}	γ_{c4}	γ_c	η_{act}
GR_I3	2400	580	3	-130.16	10.58	55.49	355	122	180	2.54		2.97	3.24	2.54	0.39
GR_I4	2400	580	3	-131.61	8.75	34.74	355	103	180	2.58		4.40	5.17	2.58	0.39
GR_I5	2400	580	3	-131.49	8.24	16.48	355	92	180	2.61		7.04	10.89	2.61	0.38
GR_I6	2400	580	3	-129.04	8.50	3.29	355	91	180	2.66		10.20	54.60	2.66	0.38
GR_I7	2400	580	3	-124.78	9.37	22.57	355	99	180	2.72		5.77	7.95	2.72	0.37
GR_I8	2400	580	3	-117.87	11.25	47.99	355	115	180	2.80		3.30	3.74	2.80	0.36
GR_I9	2400	580	3	-113.76	14.33	81.98	355	135	180	2.72		2.05	2.19	2.05	0.49
GR_I10	2400	580	3	-80.06	10.51	77.30	355	120	180	3.67		2.20	2.32	2.20	0.45

Πίνακας 35 Υπολογισμοί λυγισμού για τα panel των girders

Παρακάτω δίνεται σχηματικά η κατανομή του η_{act} για τα panels των σταθμίδων.

Εικόνα 56 Κατανομή η_{act} για τα panel των σταθμίδων

Από την παραπάνω μελέτη φαίνεται ότι όλα τα ελάσματα της κατασκευής ικανοποιούν τα κριτήρια λυγισμού. Εντούτοις, θα μπορούσε να γίνει εκτίμηση των πιο κρίσιμων σημείων από άποψη λυγισμού για την κάθε ομάδα κατασκευαστικών στοιχείων. Για τον εσωτερικό και εξωτερικό πυθμένα τα κρίσιμα σημεία παρουσιάζονται στο κέντρο του αμπαριού, εξ' αιτίας των μεγάλων παραμορφώσεων λόγω του στερεού φορτίου. Από τα ελάσματα του καταστρώματος, σε πιο δυσμενή φόρτιση βρίσκονται αυτά προς την πρωραία φρακτή του αμπαριού λόγω μεγαλύτερης - κατά απόλυτες τιμές- ροπή κάμψης. Τέλος, για τις πλευρές και τις σταθμίδες του διπύθμενου, τα panel που καταπονούνται περισσότερο είναι αυτά που βρίσκονται κοντά την πρυμναία φρακτή όπου παρατηρείται μεγαλύτερη διατμητική δύναμη.

8 Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας τη μελέτη του λυγισμού στα διαμήκη ελάσματα του εν λόγω πλοίου, θα ήταν σκόπιμο να γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των κύριων σημείων της ανάλυσης, αρχικά, του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια, των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Η μελέτη έγινε στο μεσαίο αμπάρι (No. 3 Cargo Hold) ενός Bulk Carrier (61,462 t DWT) χρησιμοποιώντας ένα λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, έκτασης 3 αμπαριών, σε κατάσταση Sagging και εναλλάξ φόρτωση με γεμάτο το μεσαίο αμπάρι. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το ABAQUS/CAE.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις παρακάτω παραμέτρους για το μοντέλο: Όσον αφορά τη γεωμετρία έγινε όσο το δυνατόν ακριβής μοντελοποίηση αγνοώντας μικρά στοιχεία (brackets, web stiffeners) και οπές ενώ στην διαστασιολόγηση των κατασκευαστικών στοιχείων χρησιμοποιήθηκαν τα πάχη αφαιρώντας το περιθώριο διάβρωσης. Για τις συνοριακές συνθήκες, οι κόμβοι στις ακραίες διατομές συνδέθηκαν με σταθερό σημείο στον ουδέτερο άξονα και ορίστηκαν συνθήκες απλής άρθρωσης στη μία και άρθρωσης με κύλιση στην άλλη. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση ελασμάτων ήταν Shell Element, ενώ για τα διαμήκη ενισχυτικά χρησιμοποιήθηκαν Beam Element. Τέλος, το μέγεθος των στοιχείων διακριτοποίησης ήταν περίπου όσο η ισαπόσταση των ενισχυτικών.

Στο μοντέλο εφαρμόστηκαν τα φορτία που υπολογίζονται αναλυτικά από τους κανονισμούς. Αρχικά, επιβλήθηκαν οι υδροστατικές πιέσεις, στο εξωτερικό περίβλημα και τα βάρη της κατασκευής και του φορτίου. Οι υδροστατικές φορτίσεις και τα βάρη υπολογίστηκαν, με βάση τους κανονισμούς από την κατάσταση φόρτωσης και την dynamic load case HSM-1, η οποία προκαλεί στο υπό μελέτη πλοίο μέγιστη ροπή κάμψης Sagging. Στη συνέχεια, εφαρμόστηκαν, επιπλέον, ορισμένες ροπές κάμψης στα άκρα του μοντέλου ώστε να διορθωθούν οι κατανομές διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών που προέκυψαν από τις παραπάνω φορτίσεις και να επιτευχθούν κάποιες επιθυμητές-target τιμές.

Για τη διατμητική δύναμη, η επιθυμητή τιμή στην πρυμναία φρακτή του μεσαίου κύτους υπολογίζεται ως το άθροισμα της επιτρεπόμενης διατμητικής δύναμης σε ήρεμο νερό και της διατμητικής δύναμης σε κυματισμό όπως προκύπτει για την HSM-1. Εφαρμόζοντας δύο ίσες και αντίθετες ροπές κάμψης στα άκρα του μοντέλου, επιτυγχάνεται η τιμή αυτή στην πρυμναία φρακτή του Cargo Hold No. 3.

Η επιθυμητή τιμή της καμπτικής ροπής, δηλαδή η μέγιστη κατά το μήκος του αμπαριού υπολογίζεται ίση με τη ροπή κάμψης σε κυματισμό της κατάστασης HSM-1 (sagging), αγνοώντας τη ροπή σε ήρεμο νερό. Επιβάλλοντας μια σταθερή ροπή κάμψης στο μοντέλο, η κατανομή ροπής κάμψης παρουσιάζει την επιθυμητή τιμή, περίπου σταθερή, στο πρωραίο μισό του αμπαριού. Η κατάσταση που επιτεύχθηκε, εν τέλει πρόκειται για μία μη πραγματική κατάσταση που όμως περιλαμβάνεται στους απαιτούμενους ελέγχους και είναι δυσμενέστερη από την πραγματική.

Τελικά, η εντατική κατάσταση, που επιτεύχθηκε μετά την επίλυση του προβλήματος, προέκυψε από την απόκριση του μοντέλου στις υδροστατικές φορτίσεις και στα βάρη καθώς και στις διορθωμένες κατανομές ροπής κάμψης και διατμητικής δύναμης. Από αυτήν, εξάχθηκαν οι τιμές των ορθών και διατμητικών τάσεων στα κέντρα του κάθε element και χρησιμοποιήθηκαν ως αποτελέσματα για την εφαρμογή της μελέτης λυγισμού.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, τα διαμήκη ελάσματα του κύτους χωρίστηκαν σε απλά panel, σε καθένα από τα οποία εφαρμόστηκε το κριτήριο λυγισμού για απλά ελάσματα. Το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψη τον συνδυασμό τάσεων στις διευθύνσεις παράλληλες με τις πλευρές του panel καθώς και τη διάτμηση. Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο λόγος χρησιμότητας, η_{act} , του panel από τον

υπολογισμό της τελικής αντοχής τους που εξαρτάται τόσο από τις διαστάσεις του (μήκος, πλάτος, πάχος) αλλά και από την έδρασή του.

Τέλος, δείχθηκε πως κατασκευή ικανοποιεί το κριτήριο λυγισμού, αφού όλα τα panel έχουν επαρκή αντοχή σε λυγισμό δηλαδή $\eta_{act} \leq 1.0$. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς το εν λόγω πλοίο είναι κατασκευασμένο το 2012 οπότε και εμπίπτει σε αυτήν την κατηγορία κανονισμών. Συνεπώς, κατά τη σχεδίαση του από το ναυπηγείο και την αποδοχή του από την κλάση έγινε η εν λόγω μελέτη για τη συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης. Ας σημειωθεί, ότι η διαδικασία ελέγχου αντοχής με Πεπερασμένα Στοιχεία βάσει των Κανονισμών CSR, είναι ιδιαίτερος χρονοβόρα, ακόμα και για έναν μόνο έλεγχο, όπως αυτός που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Ενδεικτικά, εκτιμάται ότι ένας εξοικειωμένος μελετητής, με τα εργαλεία που ήταν διαθέσιμα εν προκειμένω, θα χρειαζόταν περίπου 10 ημέρες εργασίας για την υλοποίηση της παρούσας μελέτης.

8.1 Προτάσεις για επόμενη εργασία

Στο σημείο αυτό θα μπορούσε να γίνει κάποια πρόταση για περαιτέρω επεξεργασία και μελέτη των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία έγινε έλεγχος με βάση το κριτήριο κατάρρευσης απλού ελάσματος. Μία ολοκληρωμένη μελέτη λυγισμού θα απαιτούσε και έλεγχο με βάση τα κριτήρια κατάρρευσης ενισχυμένου ελάσματος και κατάρρευση ενισχυτικού. Ακόμα, θα μπορούσε να γίνει και μελέτη αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων της πτυχωτής εγκάρσιας φρακτής. Με τον τρόπο αυτό θα ολοκληρωνόταν η μελέτη για αντοχή σε λυγισμό, ενός κύτους πλοίου τύπου Bulk Carrier. Τέλος, θα είχε ενδιαφέρον η χρήση κάποιας παραμετρική τεχνικής ή κάποιου προγραμματιστικού αλγορίθμου, ώστε η μελέτη αυτή να μπορεί να γίνει επαναλαμβανόμενα για πολλές περιπτώσεις.

Βιβλιογραφία

- [1] Horn, G. E. (2013). "IACS Summary of the IMO GBS and the Harmonised Common". TSCF 2013 Shipbuilders Meeting.
- [2] Hughes, K. P. (2010). "Ship Structural Analysis and Design". New Jersey, USA: SNAME.
- [3] I.A.C.S. (2015, January). "Classification societies - Their key role". London: I.A.C.S.
- [4] I.A.C.S. (2016, December 01). CSR Technical Background Documents.
- [5] I.A.C.S. (2017, January 01). "Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers".
- [6] Καρύδης, Π. (2000). Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου. Αθήνα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πλοία Bulk Carrier

STRUCTURE	SCANTLING REQUIREMENTS	STRESS REQUIREMENTS
Midship, Section	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Minimum net moment of inertia [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Minimum net, Section modulus [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Minimum ultimate bending capacity [Ch. 5, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max permissible shear force [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max permissible vertical bending stress [Ch. 5, Sec. 1]

STRUCTURAL ELEMENT	TYPE	PRINCIPAL LOADS	SCANTLING REQUIREMENTS	STRESS REQUIREMENTS	BUCKLING REQUIREMENTS
Side Shell	Plating	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lateral pressure (sea/ballast/cargo) ✓ Global shear forces 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] ✓ <i>Side shell</i>: Min. thickness [Ch. 6, Sec. 4] ✓ <i>Sheer strake</i>: Min. width [Ch. 3, Sec. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Inner Side	Plating	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lateral pressure (ballast/cargo) ✓ Global shear forces 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Bottom Shell	Plating	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lateral pressure (sea/ballast/oil) ✓ Global bending moments 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Keel	Plating	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lateral pressure (sea/ballast/oil) ✓ Global bending moments 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]

STRUCTURAL ELEMENT	TYPE	PRINCIPAL LOADS	SCANTLING REQUIREMENTS	STRESS REQUIREMENTS	BUCKLING REQUIREMENTS
		✓ Docking local pressure		✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2]	
Bilge	Plating	✓ Lateral pressure (sea/ballast/oil)	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] ✓ <i>Bilge Plating</i> : Min. thickness [Ch. 6, Sec. 4]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2]	✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Strength deck	Plating	✓ Lateral pressure (green water) ✓ Global bending moments ✓ Local loads (cargo/cranes)	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] ✓ <i>Deck stringer plate</i> : Min. width [Ch. 3, Sec. 6]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2]	✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Inner Bottom	Plating	✓ Lateral pressure (ballast/cargo) ✓ Global bending moments	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2]	✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Transverse Bulkhead	Plating	✓ Lateral pressure (ballast/cargo) ✓ Global shear forces ✓ Local loads (cranes etc)	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] ✓ <i>Corrugated bkd</i> : Min. thickness [Ch. 6, Sec. 4] ✓ <i>Corrugated bkd</i> : Min. thickness [Pt II Ch. 1, Sec. 3]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2]	✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5] ✓ <i>Corrugated bkd</i> : Max shear stress of corrugation webs [Pt II Ch. 1, Sec. 3]
Wash Bulkheads	Plating	✓ Global shear forces	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1]	✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]

STRUCTURAL ELEMENT	TYPE	PRINCIPAL LOADS	SCANTLING REQUIREMENTS	STRESS REQUIREMENTS	BUCKLING REQUIREMENTS
				<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	
Hopper Tank Sloping Plate	Plating	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lateral pressure (ballast/cargo) ✓ Global shear forces 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Topside Tank Sloping Plate	Plating	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Lateral pressure (ballast/oil) ✓ Global shear forces 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. thickness (yield Check) [Ch. 6, Sec. 4] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Von Mises stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Centerline Bottom Girder	PSM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Local shear forces ✓ Local bending moments ✓ Lateral pressure (ballast/oil) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. net, Section modulus [Ch. 6, Sec. 6] ✓ Min. net shear area [Ch. 6, Sec. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Axial stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5] ✓ Min web thickness [Ch. 8, Sec. 2]
Bottom Girder	PSM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Local shear forces ✓ Local bending moments ✓ Lateral pressure (ballast/oil) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. net, Section modulus [Ch. 6, Sec. 6] ✓ Min. net shear area [Ch. 6, Sec. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Axial stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5] ✓ Min web thickness [Ch. 8, Sec. 2]
Floor	PSM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Local shear forces ✓ Local bending moments ✓ Lateral pressure (ballast/oil) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. net, Section modulus [Ch. 6, Sec. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5] ✓ Min web thickness [Ch. 8, Sec. 2]

STRUCTURAL ELEMENT	TYPE	PRINCIPAL LOADS	SCANTLING REQUIREMENTS	STRESS REQUIREMENTS	BUCKLING REQUIREMENTS
			✓ Min. net shear area [Ch. 6, Sec. 6]	✓ Axial stress Check [Ch. 7, Sec. 2]	
Web Frame	PSM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Local bending moments ✓ Local shear forces ✓ Lateral pressure 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. net, Section modulus [Ch. 6, Sec. 6] ✓ Min. net shear area [Ch. 6, Sec. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Axial stress Check [Ch. 7, Sec. 2] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. web & flange thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Deck Transverse	PSM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Local shear forces ✓ Lateral pressure (sea / deck cargo) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Axial stress Check [Ch. 7, Sec. 2] ✓ Max. hull girder shear stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. net moment of inertia [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Pillar	PSM	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Compressive axial loads 		<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. compressive load [Ch. 6, Sec. 6] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness of Section [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5]
Ordinary Stiffener – Side Frame	Stiffener	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Global bending moments ✓ Local shear forces ✓ Lateral pressure 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ Min. web plating thickness [Ch. 6, Sec. 5] ✓ Min. Section modulus [Ch. 6, Sec. 5] ✓ <i>Side Frame</i>: Min. net connection area of brackets [Pt II Ch. 1, Sec. 3] ✓ <i>Side Frame</i>: Min. net, Section modulus [Pt II Ch. 1, Sec. 3] ✓ <i>Side Frames</i>: Min. net shear area [Pt II Ch. 1, Sec. 3] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1] ✓ Max normal stress [Ch. 6, Sec. 5] ✓ Max. shear stress [Ch. 6, Sec. 5] 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Min. thickness of web & flange [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Max. allowable utilisation factor [Ch. 8, Sec. 5] ✓ <i>Flat bar</i>: Min. thickness [Ch. 8, Sec. 2]

STRUCTURAL ELEMENT	TYPE	PRINCIPAL LOADS	SCANTLING REQUIREMENTS	STRESS REQUIREMENTS	BUCKLING REQUIREMENTS
End Bracket	Stiffener	✓ Local forces (bending, torsional)	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3] ✓ <i>Side Frame Bracket</i> : Min. net, Section modulus [Pt II Ch. 1, Sec. 3] ✓ <i>Side Frame Bracket</i> : Min. thickness [Pt II Ch. 1, Sec. 3]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1]	✓ Min. web thickness [Ch. 8, Sec. 2] ✓ Min. reinforcement depth [Ch. 8, Sec. 2]
Tripping Bracket	Stiffener	✓ Local forces (bending, torsional)	✓ Min. thickness [Ch. 6, Sec. 3]	✓ Max. bending normal stress [Ch. 5, Sec. 1]	✓ Max. unsupported length [Ch. 8, Sec. 2]
Web stiffeners of PSM	Stiffener	✓ Local forces (bending, torsional)			✓ Min. moment of inertia [Ch. 8, Sec. 2]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

GENERAL ARRANGEMENT PLAN

MIDSHIP SECTION