



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**«Υπολογισμός της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής
φορτηγού πλοίου μεταφοράς χύδην ξηρού φορτίου
με χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων»**

Επιβλέπων Καθηγητής

Κ. ΑΝΥΦΑΝΤΗΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής

ΜΠΙΡΜΠΑΣ ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019

Αυτή η εργασία αφιερώνεται,

*στους γονείς μου, Θοδωρή και Ευαγγελία
στα αδέρφια μου, Παναγιώτη και Δημήτρη*

Ευχαριστίες

Με το πέρας αυτής της εργασίας ολοκληρώνεται ένα ταξίδι πέντε ετών γεμάτο με ξεχωριστές και πολύτιμες εμπειρίες. Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα άτομα που γνώρισα σε αυτή την πορεία, για την μεγάλη ή μικρή συνεισφορά τους.

Αρχικά ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Κωνσταντίνο Ανυφαντή, για την καθοδήγησή του, την όρεξη και υπομονή να με διδάξει, να με παροτρύνει ώστε να φέρω το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας. Κυρίως όμως για τον ρόλο του, καθηγητή – δασκάλου, που μου έδειξε από την αρχή της συνεργασίας μας. Που μαζί μου μοιράστηκε δικές του διδαχές, απόψεις πάντα με στόχο να με συμβουλέψει θετικά ως φοιτητή αλλά και ως άνθρωπο.

Ακόμη θέλω να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου, τους φίλους μου, τα κοντινά μου άτομα, που βρέθηκαν δίπλα μου όλο αυτό το διάστημα και με υποστηρίξαν καθημερινά. Για όλες τις χαρούμενες ή και δύσκολες στιγμές που ζήσαμε παρέα.

Τελευταία σε σειρά αλλά με την μέγιστη συνεισφορά, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για όλες τις αρχές που μου μετέφερε, τις ευκαιρίες και την πολύτιμη υποστήριξη σε όλους τους τομείς που μου προσφέρει καθημερινά.

Ευστάθιος Μπίρμπας

Περίληψη

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των διαφορετικών τρόπων μοντελοποίησης, σε προγράμματα που εφαρμόζουν αριθμητικές μεθόδους, και η επίδραση τους στην αντοχή σε διαμήκη κάμψη ενός πλοίου που μεταφέρει φορτίο χύδην (Bulk Carrier).

Αρχικά γίνεται σύντομη αναφορά στους κανονισμούς CSR, στις διαθέσιμες μεθόδους υπολογισμού διαμήκους αντοχής καθώς και στις βασικές έννοιες θεωρίας που σχετίζονται με την μελέτη.

Ακολουθεί περιγραφή της διαδικασίας σύνθεσης του υπολογιστικού μέρους. Σε πρώτο στάδιο κατά την εφαρμογή της μη γραμμικής μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων οι δοκιμές γίνονται σε μία πιο απλή κατασκευή, το **Reckling No.23** και οι πιο αποτελεσματικές στρατηγικές μοντελοποίησης εφαρμόζονται στη συνέχεια στον σύνθετο φορέα που αντιπροσωπεύει το **Bulk Carrier**. Η εντατική κατάσταση σε αυτές τις κατασκευές προκύπτει μόνο από την επιβολή στροφής στα δύο άκρα τους κατά το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας και εξετάζεται η μέγιστη επιτρεπόμενη καμπτική ροπή σε φαινόμενα hogging και sagging για κάθε περίπτωση. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης αμελούνται οι στρεπτικές καταπονήσεις, η επίδραση συνδυαστικών φορτίσεων, οι παραμένουσες τάσεις και αρχικές ατέλειες των κατασκευαστικών στοιχείων. Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων γίνεται εφαρμογή της **μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων**, με χρήση του λογισμικού **ABAQUS/CAE**, καθώς και της **επαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου** με χρήση του λογισμικού **MARS2000** – έκδοσης που εφαρμόζει τους κανονισμούς CSR-H 2018. Η ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει περιπτώσεις που χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος στατικής επίλυσης (Abaqus/Standard) καθώς και περιπτώσεις δυναμικής επίλυσης (Abaqus/Explicit).

Το τέλος κάθε ενότητας εξεταζόμενων περιπτώσεων συνοδεύεται με παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο προγραμμάτων σε κοινά διαγράμματα. Επίσης πραγματοποιείται σύγκριση της μέγιστης επιτρεπόμενης καμπτικής ροπής και σχολιασμός του εκάστοτε τρόπου μοντελοποίησης.

Σημαντικό συμπέρασμα της εργασίας αποτελούν οι ιδιαίτερα πιο συντηρητικές τιμές αντοχής σε κάμψη που υπολογίστηκαν με την επαυξητική επαναληπτική μέθοδο συγκριτικά με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Ακόμη οι απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο επίλυσης της πρώτης μεθόδου ήταν σημαντικά μικρότερες από τη δεύτερη. Οι περιπτώσεις δυναμικής επίλυσης με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων προσέγγισαν καλύτερα τα αποτελέσματα της επαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά. Ο χρόνος επίλυσης με χρήση του δυναμικού αλγορίθμου (Explicit) ήταν εξαιρετικά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο απαιτούμενο χρόνο του στατικού αλγορίθμου (Standard).

Λέξεις κλειδιά :

Μέγιστη αντοχή γάστρας πλοίου · Φορηγό πλοίο · Μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων · Επαναληπτική επαυξητική ανάλυση · Ανάλυση σταδιακής κατάρρευσης · Εφελκυσμός πυθμένα · Εφελκυσμός καταστρώματος

Abstract

The aim of this diploma thesis is to study different modelling approaches, by using programs which implement numerical methods, and examine the effect they have on the longitudinal strength of a Bulk Carrier ship.

Initially a brief reference to the Common Structural Rules is made, as well as to the available longitudinal strength calculation methods. The theoretical background of the problem is also presented.

Next, the computational part of this thesis gets extensively described. Different modelling ways of the nonlinear finite element approach are initially tested on a simple structure, **Reckling No.23**, and the most productive modelling strategies are utilized on the more complex structure which represents the **Bulk Carrier**. The response of these structures results exclusively from the application of rotation angle at both ends and the maximum allowable bending moment in hogging and sagging conditions is examined. The torsion load, load combination, welding residual stress and the initial geometric imperfections are not considered in this study. The **finite element method**, *ABAQUS/CAE* software, as well as the **incremental iterative method**, *MARS2000* software – version compatible with CSR-H 2018, are implemented in order to acquire results. The finite element analyses include a number of cases of both implicit static (Abaqus/Standard) and explicit dynamic analysis (Abaqus/Explicit).

In the end of every section the results from both software and for every case are presented in the same diagram. The ultimate bending moment is then examined and compared as well as the corresponding modelling strategy for each scenario.

In general the incremental iterative method required less computing power, less calculation time and produced quite lower strength limits compared to the finite element method. The explicit cases of the finite element approach provided results closer to the ones of the incremental iterative method. The explicit dynamic analysis required significantly greater calculation time compared to the implicit static analysis.

Keywords :

Ultimate hull girder strength · Bulk Carrier · Nonlinear finite element analysis · Incremental iterative analysis · Progressive collapse analysis · Sagging · Hogging

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	v
Λίστα Εικόνων	vii
Λίστα Πινάκων.....	xi
Λίστα Διαγραμμάτων	xii
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή	1
1.1 Γενική προσέγγιση του προβλήματος	1
1.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	2
1.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου	3
1.1.3 Σύγκριση αλγορίθμων Abaqus/Standard & Abaqus/Explicit.....	3
1.2 State-of-the-art	4
1.2.1 Στόχος και ιδιαιτερότητες της διπλωματικής εργασίας.....	6
1.3 Αναλυτική δομή κειμένου	7
Κεφάλαιο 2. Αναφορά σε βασικές έννοιες της μελέτης.....	8
2.1 Εισαγωγή στους CSR.....	8
2.2 Εξεταζόμενα σενάρια αστοχίας από τους κανονισμούς.....	10
2.3 Το πλοίο ως δοκάρι	11
2.4 Εφαρμογή της απλής θεωρίας κάμψης στο πλοίο-δοκάρι	13
2.5 Φορτίσεις του πλοίου ως δοκάρι κατά CSR-H	14
2.6 Η θεωρία της Καθαρής Κάμψης	17
Κεφάλαιο 3. Εφαρμογή της επαναληπτικής – επαυξητικής μεθόδου, λογισμικό Mars2000	19
3.1 Λογισμικό σχεδίασης MARS2000.....	19
3.2 Η μέθοδος του Smith (incremental iterative method).....	20
3.3 Λεπτομέρειες σχεδίασης στο MARS2000	26
3.4 Αποτελέσματα σχεδίασης. Υπολογισμός M _{ultimate} – MARS2000.....	29

Κεφάλαιο 4. Αναφορά σε βασικές έννοιες αστοχίας των κατασκευών.....30

4.1 Μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής.....	30
4.2 Ελαστικός λυγισμός – Θεωρία Euler	32
4.3 Επίδραση ελαστικού και ανελαστικού λυγισμού στην αντοχή πρισματικών φορέων	35
4.4 Καμπύλη διαρροής του υλικού – Όλκιμα Μέταλλα	38
4.5 Προσεγγίσεις της καμπύλης διαρροής του υλικού.....	41
4.6 Κριτήρια διαρροής για όλκιμα υλικά σε επίπεδη εντατική κατάσταση.....	43
4.6.1 Κριτήριο Von Mises	44
4.6.2 Κριτήριο Tresca.....	45
4.6.3 Σύγκριση των κριτηρίων διαρροής υλικού.....	47

Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων – ABAQUS

48

5.1 Ανάλυση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων	48
5.2 Επιλογή είδους πεπερασμένων στοιχείων.....	50
5.3 Η μέθοδος Newton-Raphson.....	52
5.4 Μελέτη της κατασκευής Reckling No.23	56
5.4.1 Ανάλυση για γραμμική συμπεριφορά του Reckling No.23.....	56
5.4.2 Ανάλυση για μη γραμμική συμπεριφορά του Reckling No.23 – Υπολογισμός $M_{ultimate}$	64
5.4.2.1 Αποτελέσματα.....	71
5.4.3 Ανάλυση για μη γραμμική συμπεριφορά του 3-Span Reckling No.23 – Υπολογισμός $M_{ultimate}$	73
5.4.3.1 Αποτελέσματα.....	76
5.5 Μελέτη της κατασκευής bulk carrier	81
5.5.1 Ανάλυση για μη γραμμική συμπεριφορά του bulk carrier – Υπολογισμός $M_{ultimate}$	81
5.5.1.1 Αποτελέσματα.....	87

Κεφάλαιο 6. Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας.....	95
6.1 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα	96
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	97
Βιβλιογραφία	98
Παραρτήματα	
Παράρτημα Α – Δοκιμαστικές μοντελοποιήσεις.....	100
Παράρτημα Α1: Κατασκευή της μισής μέσης τομής bulk carrier	100
Παράρτημα Α2: Κατασκευή 1-Span bulk carrier	104
Παράρτημα Β – Ανάλυση για γραμμική συμπεριφορά του Simple beam.....	107
Παράρτημα Γ– Ιδιότητες επιβαλλόμενων περιορισμών (constraints) στο Abaqus...	114
Παράρτημα Δ – Σχέδιο Μέσης Τομής bulk carrier	116

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 2.1: Διαμήκεις φορτίσεις του πλοίου.....	9
Εικόνα 2.2: Υδροστατική πίεση κατά CSR-H.....	9
Εικόνα 2.3: Υδροδυναμική πίεση κατά CSR-H load cases HSM-2, HSA-2, FSM-2 ...	9
Εικόνα 2.4: Διάμηκες σύστημα ενισχύσεων.....	12
Εικόνα 2.5: Εγκάρσιο σύστημα ενισχύσεων	12
Εικόνα 2.6: Κατανομή τάσεων (αλγεβρικά μεγέθη) στη μέση τομή σε φαινόμενο Sagging.....	13
Εικόνα 2.7: Συντελεστής Κατανομής φορτίσεων σε ήρεμο νερό f_{sw}	15
Εικόνα 2.8: Συντελεστής Κατανομής φορτίσεων σε κυματισμούς f_m	17
Εικόνα 2.9: Πρισματικός Φορέας που υπόκειται σε καθαρή κάμψη.....	18
Εικόνα 3.1: Περιοχή Ελασμάτων και Ενισχυτικών	20
Εικόνα 3.2: Περιοχή Ανθεκτικών Γωνιών.....	20
Εικόνα 3.3: Μειωτική Καμπύλη Φόρτισης για εμφάνιση λυγισμού δοκού-κολόνας σε ενισχυτικό στοιχείο	22
Εικόνα 3.4: Μέθοδος του Smith	24
Εικόνα 3.5: Τυπικό διάγραμμα καμπυλότητας-καμπτικής ροπής	25
Εικόνα 3.6: Περιοχές κατασκευαστικών υλικών μέσης τομής.....	26
Εικόνα 3.7: Πάχη ελασμάτων της μέσης τομής.....	26
Εικόνα 3.8: Διαφορά ισαπόστασης εγκάρσιων ενισχύσεων για τις τρεις περιοχές της μέσης τομής	27
Εικόνα 3.9: Διαστασιολόγηση διαμήκων ενισχυτικών της μέσης τομής	27
Εικόνα 3.10: Μέγιστες καμπτικές ροπές σε sagging, hogging, ροπές αδράνειας και ροπές αντίστασης του bulk carrier	28
Εικόνα 4.1: Σύγκριση αναπτυσσόμενης μετατόπισης	30
Εικόνα 4.2: Διαγράμματα φόρτισης - μετατόπισης	31
Εικόνα 4.3: Ακαριαίος Λυγισμός.....	32
Εικόνα 4.4: Πρισματικός φορέας - καταπόνηση με αξονικό θλιπτικό φορτίο	33
Εικόνα 4.5: Ιδιομορφές λυγισμού σε αξονικά θλιβόμενη δοκό.....	34
Εικόνα 4.6: Επίδραση οριακών συνθηκών στο μήκος της δοκού που λυγίζει ($L_{effective}$)	35
Εικόνα 4.7: Επίδραση λυγισμού στην αστοχία της κατασκευής.....	36
Εικόνα 4.8: Επίδραση διαρροής υλικού στην αστοχία της κατασκευής	37
Εικόνα 4.9: Συνδυαστική επίδραση λυγισμού και διαρροής υλικού στην αστοχία της κατασκευής για διαφορετικές τιμές λυγηρότητας.....	38
Εικόνα 4.10: Καμπύλη Διαρροής	39
Εικόνα 4.11: Επαναφόρτιση δοκιμίου - Νέα Καμπύλη Διαρροής.....	40
Εικόνα 4.12: Φαινόμενο Bauschinger	41

Εικόνα 4.13: Ανελαστικό - Τέλεια Πλαστικό Υλικό.....	42
Εικόνα 4.14: Γραμμικά ελαστικό - Τέλεια Πλαστικό Υλικό.....	42
Εικόνα 4.15: Γραμμικά ελαστικό - Πλαστικό Υλικό	43
Εικόνα 4.16: Κριτήριο διαρροής Von Mises	45
Εικόνα 4.17: Κριτήριο διαρροής Tresca.....	46
Εικόνα 4.18: Σύγκριση των κριτηρίων διαρροής Von Mises, Tresca στο επίπεδο	47
Εικόνα 5.1: Οικογένειες στοιχείων μοντελοποίησης.....	49
Εικόνα 5.2: Είδη στοιχείων μοντελοποίησης	49
Εικόνα 5.3: S4R (Reduced Integration) στοιχείο	51
Εικόνα 5.4: S8R (Reduced Integration) στοιχείο	51
Εικόνα 5.5: B31 στοιχείο και βαθμοί ελευθερίας των κόμβων του	52
Εικόνα 5.6: Μέθοδος Newton - Raphson	54
Εικόνα 5.7: Ανάλυση βήματος 2	54
Εικόνα 5.8: Διαστάσεις και φόρτιση του Reckling No.23.....	56
Εικόνα 5.9: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος του Reckling No.23	57
Εικόνα 5.10: Εγκάρσια διατομή του Reckling No.23.....	58
Εικόνα 5.11: Σύνδεση κόμβων με το Multi-Constraint point, Reckling No.23.....	59
Εικόνα 5.12: Παραμόρφωση του Reckling No.23 και κατανομή των τάσεων - 3D Όψη - Γραμμική συμπεριφορά.....	60
Εικόνα 5.13: Παραμόρφωση του Reckling No.23 και κατανομή των τάσεων - Εγκάρσια Όψη - Γραμμική συμπεριφορά.....	60
Εικόνα 5.14: Παραμόρφωση του Reckling No.23 και κατανομή των τάσεων - Μη γραμμική συμπεριφορά	66
Εικόνα 5.15: Σημείο 1 ~ 4	67
Εικόνα 5.16: Διαστάσεις του 3-Span Reckling No.23.....	73
Εικόνα 5.17,α: Case 3-S.1-1 Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα	76
Εικόνα 5.17,β: Case 3-S.1-1 Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου	76
Εικόνα 5.18,α: Case 3-S.1-2 Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα	77
Εικόνα 5.18,β: Case 3-S.1-2 Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου	77
Εικόνα 5.19,α: Case 3-S.1-3 Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα	78
Εικόνα 5.19,β: Case 3-S.1-3 Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου	78
Εικόνα 5.20: Διαστάσεις και γεωμετρία του bulk carrier	81
Εικόνα 5.21: Όρια περιοχών της μέσης τομής και ισαπόσταση εγκάρσιων ενισχύσεων	82
Εικόνα 5.22: Ενισχυτικοί νομείς (middle area frames)	83
Εικόνα 5.23: Εγκάρσιες ενισχύσεις καταστρώματος (wing area floors).....	83
Εικόνα 5.24: Εγκάρσιες ενισχύσεις πυθμένα (bottom area floors).....	83
Εικόνα 5.25: Bulk carrier - Περίπτωση Α	83
Εικόνα 5.26: Bulk carrier - Περίπτωση Β.....	84
Εικόνα 5.27: Συνδέσεις κόμβων με το Multi-Constraint point, bulk carrier	85
Εικόνα 5.28,α: Case A-2,S Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα.....	88
Εικόνα 5.28,β: Case A-2,S Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου.....	88
Εικόνα 5.29,α: Case B-2,S Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα.....	89

Εικόνα 5.29,β: Case B-2,S Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου.....	89
Εικόνα 5.30,α: Case B-3,S Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα.....	90
Εικόνα 5.30,β: Case B-3,S Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου.....	90
Εικόνα Π-A.1: Σύγκριση ασύμμετρης (μισής) και ολόκληρης μοντελοποίησης της μέσης τομής.....	100
Εικόνα Π-A.2: Νέα θέση ουδέτερου άξονα y_{NA} υπό γωνία φ και ανάλυση διανύσματος ροπής M στο κύριο σύστημα αξόνων	101
Εικόνα Π-A.3: Θέση ουδέτερου άξονα και κατανομή τάσεων της ολόκληρης (συμμετρικής) μοντελοποίησης σε φαινόμενο sagging	101
Εικόνα Π-A.4: Κατανομή διατμητικής δύναμης U_y στη μισή ασύμμετρη μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging	102
Εικόνα Π-A.5: Κατανομή διατμητικής δύναμης U_z στη μισή ασύμμετρη μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging	102
Εικόνα Π-A.6: Κατανομή διατμητικής δύναμης U_y στη συμμετρική (ολόκληρη) μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging	103
Εικόνα Π-A.7: Κατανομή διατμητικής δύναμης U_z στη συμμετρική (ολόκληρη) μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging	103
Εικόνα Π-A.8: Γεωμετρία του 1-Span bulk carrier	104
Εικόνα Π-A.9: Σύνδεση κόμβων MCP-πάκτωση, 1-Span bulk carrier	105
Εικόνα Π-A.10: Σύνδεση κόμβων MCP-στροφή, 1-Span bulk carrier	105
Εικόνα Π-A.11: Περιοχές - Ελεύθερα Edges, 1-Span bulk carrier	105
Εικόνα Π-A.12: Μη γραμμική συγκέντρωση τάσεων της ενδιάμεσης περιοχής, 1-Span bulk carrier	106
Εικόνα Π-A.13: Τοπικές παραμορφώσεις της ενδιάμεσης περιοχής, 1-Span bulk carrier	106
Εικόνα Π-B.1: Διαστάσεις και φόρτιση του Simple Beam	107
Εικόνα Π-B.2: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος του Simple Beam.....	108
Εικόνα Π-B.3: Εγκάρσια διατομή του Simple Beam	109
Εικόνα Π-B.4: Παραμόρφωση του Simple Beam και κατανομή των τάσεων	111
Εικόνα Π-Γ.1: Tie constraint	114
Εικόνα Π-Γ.2: MPC constraint	115
Εικόνα Π-Γ.3: MPC type: Link	115
Εικόνα Π-Γ.4: MPC type: Beam.....	115
Εικόνα Π-Δ.1: Μετασηματισμός διατομής σε L2 προφίλ	116
Εικόνα Π-Δ.2: Bulk carrier's Midship Section 1	117
Εικόνα Π-Δ.3: Bulk carrier's Midship Section 2.....	118
Εικόνα Π-Δ.4: Bulk carrier's Midship Section 3	119

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 2.1: Εξεταζόμενα σενάρια αστοχίας κατά CSR-H.....	11
Πίνακας 5.1: Οριακές συνθήκες MCPs Reckling No.23 - Γραμμική συμπεριφορά ...	59
Πίνακας 5.2: Οριακές συνθήκες MCPs Reckling No.23 - Μη γραμμική συμπεριφορά	64
Πίνακας 5.3: Cases Reckling No.23 - Implicit analysis	65
Πίνακας 5.4: Reckling No.23 - Case 1-2	65
Πίνακας 5.5: Paper Cases Reckling No.23	70
Πίνακας 5.6: Paper Cases border condition details	70
Πίνακας 5.7: Απόκλιση $M_{ultimate}$ από $M_{u-paper}$ - Μοντελοποίηση με shell elements, Reckling No.23	72
Πίνακας 5.8: Απόκλιση $M_{ultimate}$ από $M_{u-paper}$ - Μοντελοποίηση με beam & shell elements, Reckling No.23	72
Πίνακας 5.9: Οριακές συνθήκες MCPs 3-Span Reckling No.23.....	75
Πίνακας 5.10: Cases 3-Span Reckling No.23 - Implicit analysis	75
Πίνακας 5.11: Απόκλιση $M_{ultimate}$ από $M_{u-paper}$ - Μοντελοποίηση με shell elements, 3-Span Reckling No.23 - Implicit analysis	80
Πίνακας 5.12: Απόκλιση $M_{ultimate}$ από $M_{u-paper}$ - Μοντελοποίηση με beam & shell elements, 3-Span Reckling No.23 – Implicit analysis	80
Πίνακας 5.13: Ιδιότητες κατασκευαστικών υλικών του υπό μελέτη bulk carrier	84
Πίνακας 5.14: Οριακές συνθήκες MCPs bulk carrier.....	86
Πίνακας 5.15: Cases bulk carrier, Sagging.....	87
Πίνακας 5.16: Cases bulk carrier, Hogging.....	87
Πίνακας 5.17: Απόκλιση $M_{ultimate}$ Mars – Abaqus, φαινόμενο sagging	93
Πίνακας 5.18: Απόκλιση $M_{ultimate}$ Mars – Abaqus, φαινόμενο hogging.....	93
Πίνακας Π-B.1: Επιβολή οριακών συνθηκών στο Simple Beam.....	109
Πίνακας Π-B.2: Στοιχεία εξεταζόμενης περίπτωσης Simple Beam.....	110
Πίνακας Π-Δ.1: Διαστάσεις ισοδύναμων ενισχυτικών με πέλμα κατά CSR.....	116
Πίνακας Π-Δ.2: Ισοδύναμες διαστάσεις ενισχυτικού HP 180x11.....	116
Πίνακας Π-Δ.3: Διαστάσεις ενισχυτικών	120

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 3.1: Bulk carrier, Mars200 M-k diagram	29
Διάγραμμα 5.1: Απόκλιση τάσεων για τις διαφορετικές μοντελοποιήσεις του Reckling No.23 - Γραμμική συμπεριφορά	63
Διάγραμμα 5.2: Καμπύλη Καμπτικής ροπής - Καμπυλότητας του Reckling No.23 - Μη Γραμμική συμπεριφορά	67
Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, paper – Abaqus για το 1-Span Reckling No.23, Shell elements	71
Διάγραμμα 5.4: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, paper – Abaqus για το 1-Span Reckling No.23, Beam & Shell elements.....	71
Διάγραμμα 5.5: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, paper – Abaqus για το 3-Span Reckling No.23, Shell elements	79
Διάγραμμα 5.6: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, paper – Abaqus για το 3-Span Reckling No.23, Beam & Shell elements.....	79
Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση τιμών καμπυλότητας, Mars - Abaqus, bulk carrier	91
Διάγραμμα 5.8: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, Mars - Abaqus, bulk carrier, φανόμενο sagging	92
Διάγραμμα 5.9: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, Mars - Abaqus, bulk carrier, φανόμενο hogging	92
Διάγραμμα Π-B.1: Απόκλιση τάσεων για τις διαφορετικές μοντελοποιήσεις του Simple Beam - Γραμμική συμπεριφορά.....	113

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Γενική προσέγγιση του προβλήματος

Ένα πλοίο, τόσο κατασκευαστικά όσο και λειτουργικά, αναμφίβολα μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία ιδιαίτερα σύνθετη κατασκευή. Συνεπώς κατά τον σχεδιασμό του, υπεισέρχεται στο πρόβλημα μεγάλος αριθμός και διαφορετικά είδη παραμέτρων που πρέπει να εξεταστούν στα πλαίσια μίας ολοκληρωμένης μελέτης.

Από τους πιο σημαντικούς παράγοντες για τον σχεδιασμό του πλοίου, η διαμήκης αντοχή του είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η μέση τομή του. Μία προσέγγιση μέσω της γραμμικής ελαστικής θεωρίας για την επίλυση του προβλήματος, είναι σχετικά απλή στην εφαρμογή της και πράγματι μέχρι και την προηγούμενη εικοσαετία χρησιμοποιούταν ευρήτατα. Συγκεκριμένα γινόταν η θεώρηση ότι η μέγιστη καμπτική ροπή ισούται με την ροπή κάμψης που αναπτύσσεται όταν η μέγιστη τάση στη μέση τομή φτάσει την τάση διαρροής του υλικού. Ως τάση διαρροής μπορούσε να οριστεί μία επιτρεπόμενη τάση η οποία θα αποτελούσε έμμεσα έναν συντελεστή ασφαλείας έναντι διαρροής. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης βρισκόταν στην παραδοχή ότι το όριο ελαστικής συμπεριφοράς του υλικού είναι αντιπροσωπευτικό της πραγματικής αντοχής της κατασκευής.

Αρκετές μελέτες έχουν υποδείξει ότι για πιο αποτελεσματικές προσεγγίσεις πρέπει να εκτιμηθούν παράλληλα και οι εξής παράμετροι :

- α) οι διαφορετικοί πιθανοί τρόποι αστοχίας της κατασκευής τόσο σε τοπικό αλλά και σε συνολικό επίπεδο, συνήθως λόγω διαρροής του υλικού, λυγισμού, κόπωσης και ψαθυρής θραύσης,
- β) η μηχανική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων της κατά την αστοχία τους,
- γ) η νέα κατάσταση φόρτισης της μέσης τομής που προκύπτει ύστερα από την αστοχία,
- δ) η εναπομένουσα αντοχή την γάστρας αφού πρώτα έχουν εμφανιστεί φαινόμενα λυγισμού ή κατάρρευσης.

Τελικά είναι προφανές ότι καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε ένα μη γραμμικό πρόβλημα λόγω της χαρακτηριστικής του γεωμετρίας αλλά και λόγω υλικού. Μία προσπάθεια να προσδιοριστεί η μέγιστη αντοχή του πλοίου αποκλειστικά με μη γραμμική ανάλυση, στην καλύτερη περίπτωση θα χαρακτηριζόταν ως εξαιρετικά σύνθετη, χρονοβόρα και σε πραγματικές συνθήκες, από οικονομικής άποψης, ιδιαίτερα ασύμφορη. Για αυτό τον λόγο έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για τον προσδιορισμό της μέγιστης διαμήκους αντοχής ενός πλοίου. Ανεξάρτητα από το ποια

επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί τελικά στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναφέρονται συνοπτικά τα πέντε βασικά είδη για λόγους πληρότητας:

- α) Οι απλές “κλειστού τύπου” εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά από τον Caldwell και αναπτύχθηκαν περαιτέρω από τον Paik, στις οποίες γίνεται μία πιο απλή προσέγγιση κατανομής των τάσεων στη διατομή που εξετάζεται.
- β) Η μέθοδος του Smith, ή απλοποιημένη επαυξητική επαναληπτική μέθοδος (incremental iterative method) που λαμβάνει υπόψιν την επίδραση της κατάρρευσης λόγω πλαστικού λυγισμού.
- γ) Τις απλοποιημένες μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων όπως αυτήν της ιδεατής δομικής μονάδας (ISUM) που αναλύουν την σταδιακή κατάρρευση της κατασκευής.
- δ) Τις πειραματικές μεθόδους όπου χρησιμοποιούνται μοντέλα μικρότερης, από την πραγματική, κλίμακας για την ανάλυση της συμπεριφοράς της γάστρας μετά την κατάρρευση.
- ε) Τις μη γραμμικές μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων (NLFEM) που έχουν αναπτυχθεί με την βοήθεια των υπολογιστών. Παράλληλα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας αυξάνονται και οι δυνατότητες ακρίβειας αυτών των μεθόδων.

Έχοντας ολοκληρώσει την συνοπτική παρουσίαση των δυνατών προσεγγίσεων για το υπό μελέτη πρόβλημα, ακολουθεί μία εκτενέστερη αναφορά στη μέθοδο που τελικά θα χρησιμοποιηθεί στο Κεφάλαιο 5.

1.1.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Τα τελευταία χρόνια αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη μέθοδο υπολογιστικής μηχανικής. Είναι στην ουσία μία αριθμητική μέθοδος επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν μία υπαρκτή συνεχή κατασκευή. Η ταχύτατη ανάπτυξη της οφείλεται σε τρία ανεξάρτητα επιστημονικά πεδία. Αυτό της μηχανικής ενεργειακών μεθόδων (Energy Methods), των πληροφοριακών συστημάτων σχεδιασμού (CAD) και των θεωρητικών μαθηματικών προσεγγίσεων (Approximation Theory).

Η βασική της έννοια είναι η υποδιαίρεση ολόκληρης ή μέρους της συνεχούς κατασκευής σε διακριτά τμήματα τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (**elements**) και συνδέονται κατάλληλα στα άκρα τους με κόμβους (**nodes**) ώστε να αναπαρίσταται σωστά η συμπεριφορά ολόκληρου του μοντέλου. Σε κάθε απόλυτα ορισμένη περιοχή με τέτοια στοιχεία, επιλύονται σε πρώτη φάση οι εξισώσεις ισορροπίας και έπειτα ακολουθεί η σύνθεση και η επίλυση όλων αυτών των εξισώσεων στα πλαίσια της κατασκευής. Συγκεκριμένα για κάθε στοιχείο επιλύεται η εξίσωση $\mathbf{F}=\mathbf{K}\cdot\mathbf{u}$, που συνδέει τις μετατοπίσεις των κόμβων με τις εξωτερικά ασκούμενες φορτίσεις. Μόλις υπολογιστούν οι μετατοπίσεις στους κόμβους, προσδιορίζονται οι τάσεις και παραμορφώσεις του κάθε στοιχείου. Το \mathbf{K} είναι το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής.

Στα πλαίσια της γραμμικής (ως προς τις ιδιότητες των υλικών και της γεωμετρίας) ανάλυσης το μητρώο ακαμψίας δεν μεταβάλλεται με την εφαρμογή φόρτιου. Για τις διάφορες φορτίσεις είναι εύκολος ο υπολογισμός των τάσεων-παραμορφώσεων της κατασκευής καθώς προκύπτει από έναν πολλαπλασιασμό του ανάστροφου (και σταθερού) μητρώου ακαμψίας με το διάνυσμα της φόρτισης.

Στα πλαίσια της μη γραμμικής ανάλυσης απαιτείται αρκετές φορές ο εκ νέου υπολογισμός και αναστροφή του μητρώου ακαμψίας. Σε κάθε κόμβο πρέπει να υπάρχει ισορροπία εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων, όμως δεδομένης της συνεχούς μεταβολής του μητρώου ακαμψίας, η λύση κατασκευάζεται σε βήματα. Συνήθως απαιτείται και πλήθος επαναλήψεων σε κάθε βήμα ώστε να υπάρξει ικανοποιητική προσέγγιση της στατικής ισορροπίας σε κάθε κόμβο και να επιτευχθεί σταδιακή επιβολή ολόκληρης της φόρτισης στην κατασκευή. Για τις μη γραμμικές αναλύσεις των μοντέλων αυτής της εργασίας, χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson για την οποία θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο Κεφάλαιο 5.

1.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων συγκριτικά με όσες αναφέρθηκαν, προσεγγίζει ικανοποιητικά διάφορα μη γραμμικά φαινόμενα υλικών και γεωμετρίας που προκύπτουν κατά τη φόρτιση της κατασκευής. Ακόμη υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού της αντοχής του συνόλου, όταν εμφανίζονται ταυτόχρονα περισσότερα από ένα φαινόμενα καταπόνησης. Για παράδειγμα κατά την εμφάνιση του φαινομένου sagging στο πλοίο, δημιουργείται θλίψη του καταστρώματος και ταυτόχρονα τοπικός λυγισμός στο έλασμα και τα ενισχυτικά του. Με πύκνωση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων (**mesh density**) και με χρήση στοιχείων που φέρουν περισσότερους κόμβους (**mesh element type**), μπορούμε να αυξήσουμε την ακρίβεια της λύσης.

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται κατά την μοντελοποίηση στο πρόγραμμα ώστε να αποτυπώνεται σωστά η πραγματική κατασκευή. Επομένως η επιβολή φορτίου και συνοριακών συνθηκών πρέπει να ταυτίζονται ή έστω να προσεγγίζουν τις αληθινές. Η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι πολύ συχνά το πρόβλημα είναι πολύ σύνθετο για να υπάρχει πλήρης εικόνα της στρατηγικής μοντελοποίησης. Επίσης η υπέρμετρη πύκνωση του πλέγματος ή χρήση πιο σύνθετων στοιχείων με περισσότερους κόμβους, μπορεί να αυξήσει εξαιρετικά πολύ τις υπολογιστικές απαιτήσεις και κατ'επέκταση τον χρόνο και το κόστος επίλυσης του προβλήματος.

1.1.3 Σύγκριση αλγορίθμων Abaqus/Standard & Abaqus/Explicit

Στις αναλύσεις που γίνεται χρήση του αλγορίθμου Abaqus/Standard για στατική επίλυση του προβλήματος εμφανίστηκαν θέματα σύγκλισης της λύσης. Αρχικά σε όσες περιπτώσεις ήταν αρκετό για τη λήψη αποτελεσμάτων, έγινε επεξεργασία στο step module του προγράμματος, με εισαγωγή τιμής στην παράμετρο **dissipated energy fraction** (Step type: **Static, General**). Πρακτικά εισάγονται τεχνητές δυνάμεις απόσβεσης στο μοντέλο ώστε να υπάρξει αυτόματη σταθεροποίηση εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων και να ευνοηθεί η σύγκλιση της λύσης. Χρειάζεται ιδιαίτερη

προσοχή στην τιμή της παραμέτρου σε κάθε περίπτωση καθώς υπέρμετρη υποβοήθηση σύγκλισης της λύσης μπορεί να οδηγήσει και σε σημαντική υπερεκτίμηση της μέγιστης αντοχής της κατασκευής.

Σε όσες αναλύσεις ήταν αδύνατη η εξαγωγή αποτελεσμάτων ακόμα και ύστερα από την αυτόματη σταθεροποίηση των δυνάμεων, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Abaqus/Explicit. Σε αυτή τη περίπτωση δημιουργείται νέο Step (Step type: **Dynamic, Explicit**) το οποίο εξασφαλίζει την επιβολή ολόκληρου του φορτίου στην κατασκευή καθώς η εφαρμογή του γίνεται σε πολύ μικρότερα βήματα χωρίς να προκύπτουν προβλήματα σύγκλισης. Η τιμή ενός κατάλληλα μικρού χρονικού βήματος t (stable time increment) προβλέπεται να είναι:

$$t \leq \frac{l_e}{c},$$

όπου:

- l_e : το ελάχιστο μήκος πλευράς στοιχείων διακριτοποίησης.
- $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$: μία ποσότητα που εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας που ισούται με $E=206$ GPa για όλα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στο Bulk Carrier και ρ η πυκνότητα των υλικών.

Η ανάλυση επιλέγεται να γίνει στοιχείο προς στοιχείο (element by element) και όχι συνολικά στην κατασκευή. Με την ολοκλήρωση τέτοιου είδους ανάλυσης χρειάζεται να ελεγχθεί εάν η απόκλιση ολικής κινητικής ενέργειας (ALLKE) με την ολική εσωτερική ενέργεια (ALLIE) είναι μικρότερη του 5%. Ο υπολογισμός των μεγεθών πρέπει να ζητηθεί στο history output της κάθε επίλυσης.

1.2 State-of-the-art

Η ενότητα περιλαμβάνει αναφορές σε παλαιότερες δημοσιεύσεις ώστε να επισημανθεί η επιστημονική πρόοδος που αφορά το πρόβλημα αυτής της μελέτης. Επίσης η αναφορά γίνεται επειδή πλήθος συμπερασμάτων των προηγούμενων εργασιών, συνέβαλαν στην ερευνητική κατεύθυνση και διαμόρφωση του στόχου αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Οι Mansour, Thayamballi (1980) ασχολήθηκαν με την μελέτη της επίδρασης συνδυαστικών φορτίσεων στην αντοχή του πλοίου, επιλύοντας προβλήματα με εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων και πειραματική επαλήθευση των αποτελεσμάτων [5]. Οι Zhiyong Pei, Masahiko Fujikubo (2004) εφάρμοσαν τη μέθοδο της ιδεατής δομικής μονάδας και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus) σε τοπικά ενισχυτικά στοιχεία καθώς και σε μοντελοποίηση κλίμακας-1/3 πραγματικής φρεγάτας. Κατόπιν έγινε σύγκριση των δύο μεθόδων ως προς τον χρόνο επίλυσης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Ενώ παρατηρήθηκε σχετικά μικρή απόκλιση στο όρια αντοχής που προσδιορίστηκαν σε κάθε περίπτωση, η μέθοδος ιδεατής δομικής μονάδας χρειάστηκε

σημαντικά μικρότερο χρόνο επίλυσης σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [12]. Οι Ozguc, Das, Darltop (2006) ανέπτυξαν τον προγραμματιστικό κώδικα υπολογισμού αντοχής, Neptune κατά την εκτέλεση του οποίου λαμβάνονται υπόψη αρχικές ατέλειες και παραμένουσες τάσεις των στοιχείων της κατασκευής. Μελετήθηκαν 4 ξεχωριστές γάστρες πλοίων με εφαρμογή της επαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου, εκτέλεση του κώδικα Neptune και μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Ansys). Αν και με ιδιαίτερα μεγάλη απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ και χρόνο επίλυσης, η έρευνα κατέδειξε τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ως ακριβέστερη [16]. Οι Hadi, Amlashi, Moan (2008) μελέτησαν την επίδραση των συνδυαστικών φορτίσεων και της ύπαρξης αρχικών ατελειών στην αντοχή bulk carrier με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus). Η φόρτιση της κατασκευής προήλθε από την εναλλάξ φόρτωση των κυτών (alternate hold loading) σε φαινόμενο hogging καθώς και από ξεχωριστά σενάρια εξωτερικής επιβαλλόμενης πίεσης στα τοιχώματα του πλοίου. Έγινε διερεύνηση για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων διακριτοποίησης (mesh density) και για διαφορετικά σενάρια πίεσης που προδιαγράφουν οι κανονισμοί CSR και ο νορβηγικός νηογνώμονας DNV. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι στην περιοχή του άδειου κύτους και συγκεκριμένα σε αυτή του διπύθμενου δημιουργούνται μεγάλες παραμορφώσεις οπότε αυτό χαρακτηρίζεται ως κρίσιμο σημείο για τη σχεδίαση του bulk carrier [7]. Οι Paik, Kim, Seo (2008) σύγκριναν τρεις μεθόδους υπολογισμού αντοχής ενός υποθετικού δεξαμενόπλοιου. Χρησιμοποίησαν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Ansys), την μέθοδο της ιδεατής δομικής μονάδας (ALPS/HULL) και την επαυξητική επαναληπτική μέθοδο που ενσωματώνεται στους κανονισμούς CSR-2006. Σε φαινόμενα sagging υπήρξε σύγκλιση των αποτελεσμάτων και τριών μεθόδων. Σε φαινόμενα hogging η χρονικά βέλτιστη μέθοδος των κανονισμών CSR-2006 υπερεκτίμησε σημαντικά στην αντοχή του δεξαμενόπλοιου [9]. Οι Shi Gui-Jie, Wang De-Yu (2012) υπολόγισαν την αντοχή πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μέσω πειραμάτων σε μία αντιπροσωπευτική κατασκευή μικρότερων διαστάσεων, με χρήση της μεθόδου ιδεατής δομικής μονάδας, της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus) και σύγκριναν τα επιμέρους αποτελέσματα. Στην ανάλυση με το λογισμικό Abaqus λήφθηκαν υπόψη οι αρχικές ατέλειες και οι παραμένουσες τάσεις. Παρατηρήθηκε ικανοποιητική σύγκλιση των αποτελεσμάτων και των τριών μεθόδων τόσο σε φαινόμενα sagging όσο και hogging [8]. Οι Khedmati, Rashedi (2014) μελέτησαν την επίδραση αρχικών ατελειών στην αντοχή πλοίου bulk carrier και κάποιων μικρότερων λεπτότοιχων δοκιμίων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Ansys). Για τα λεπτότοιχα δοκίμια, που παρουσιάζουν ομοιότητες στην γεωμετρία με το **Reckling No.23** που μελετάται σε αυτή την εργασία, έγινε επαλήθευση των αποτελεσμάτων μέσω πειραμάτων. Η μελέτη έδειξε ότι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα και ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για σύγκριση με άλλες απλοποιημένες και ταχύτερες μεθόδους υπολογισμού αντοχής της κατασκευής [11].

Η τελευταία αναφορά σε δημοσίευση αφορά και την χρονολογικά πιο πρόσφατη έρευνα. Οι Xu, Song, Pan (2017) μελέτησαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Ansys για implicit και LS-DYNA για explicit περιπτώσεις) την κατασκευή

Reckling No.23 και ένα δεξαμενόπλοιο. Στόχος τους ήταν η διερεύνηση της επίδρασης στην κατασκευαστική αντοχή των παραμέτρων : οριακές συνθήκες (border conditions), γεωμετρικές διαστάσεις τις μοντελοποίησης (geometric range), τύπος στοιχείων (element type), τρόπος φόρτισης της κατασκευής (loading method) και χρόνος επιβολής του φορτίου (loading time). Η ανάλυση, που λαμβάνει υπόψη τις αρχικές ατέλειες, έδειξε ότι τα 3-Span μοντέλα έναντι των 1-Span (παράμετρος geometric range) προσομοιάζουν πιο αποδοτικά την συμπεριφορά της κατασκευής καθώς επιτρέπουν την εμφάνιση επιπλέον ιδιομορφών λυγισμού και τελικά προσδιορίζεται χαμηλότερη συνολική αντοχή. Επίσης η επιβολή ροπής έναντι στροφής στα άκρα της κατασκευής, υπερεκτιμά την αντοχή της επομένως η δεύτερη κρίνεται πιο κατάλληλη για το πρόβλημα (παράμετρος loading method). Τέλος οι μοντελοποιήσεις που έφεραν στοιχεία κελύφους για τα ελάσματα και στοιχεία δοκών για τα ενισχυτικά των κατασκευών, έδωσαν υψηλότερα όρια αντοχής επομένως προτιμήθηκαν οι μοντελοποιήσεις που αποτελούνται αποκλειστικά από στοιχεία κελύφους που φέρουν πιο συντηρητικά όρια ικανότητας παραλαβής καμπτικού φορτίου (παράμετρος element type) [6] .

1.2.1 Στόχος και ιδιαιτερότητες της διπλωματικής εργασίας

Η ερευνητική πορεία και ο σκοπός της εργασίας διαμορφώθηκε ύστερα από μελέτη όλων των δημοσιεύσεων που αναφέρονται στη προηγούμενη παράγραφο. Για τον υπολογισμό αντοχής χρησιμοποιήθηκαν η επαυξητική επαναληπτική μέθοδος (Mars2000) και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus) καθώς μέσω της ανάπτυξης ισχυρότερων υπολογιστικών μέσων, προσφέρουν αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας. Με τα λογισμικά μελετήθηκαν οι κατασκευές **Reckling No.23** και **Bulk Carrier**. Στα πλαίσια της ανάλυσης αμελήθηκαν οι στρεπτικές καταπονήσεις, η επίδραση συνδυαστικών φορτίσεων, οι παραμένουσες τάσεις και αρχικές ατέλειες των κατασκευαστικών στοιχείων. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων εξετάζεται η επίδραση, στην ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει καμπτικό φορτίο, των παραμέτρων:

- Γεωμετρικές διαστάσεις της κατασκευής (**number of Spans**)
- Τύπος στοιχείων γεωμετρίας: στοιχεία κελύφους και στοιχεία δοκών (**shell, beam elements**)
- Διαστάσεις πλέγματος διακριτοποίησης (**Mesh density**)
- Τύπος στοιχείων διακριτοποίησης: 4-κομβικά ή 8-κομβικά (Mesh element type: **S4R, S8R**)

Στις μοντελοποιήσεις με έκταση μεγαλύτερη του ενός Span εξετάστηκε επίσης η επίδραση του διαφορετικού τρόπου μοντελοποίησης των εγκαρσίων ενισχύσεων. Οι περιπτώσεις περιλαμβάνουν:

- Μοντελοποίηση των εγκαρσίων ενισχύσεων με **ανεξάρτητα parts**.
- Ισοδύναμη μοντελοποίηση των εγκαρσίων ενισχύσεων με επιβολή περιορισμών **MPC beam & link type**

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να τονιστεί η δυσκολία μοντελοποίησης πλοίου Bulk Carrier έναντι άλλων τύπων καθώς σε αυτό η ισαπόσταση των εγκάρσιων ενισχύσεων μεταβάλλεται ανά τις περιοχές της μέσης τομής. Για αυτό τον λόγο δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη γεωμετρική έκταση του μοντέλου στο λογισμικό Abaqus. Το μήκος της κατασκευής επιλέγεται να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των εγκάρσιων ισαποστάσεων και συγκεκριμένα τριπλάσιο της μεγαλύτερης ισαπόστασης.

Τέλος πέρα από την μελέτη ισοδύναμων τρόπων μοντελοποίησης έγινε προσπάθεια εύρεσης γεωμετρίας του Bulk Carrier μικρότερης έκτασης αλλά αντιπροσωπευτικής του φυσικού προβλήματος. Μειώνοντας τις διαστάσεις της μοντελοποίησης, μειώνεται δραστικά η απαίτηση σε χρόνο επίλυσης και σε ευρύτερη κλίμακα το κόστος ανάλυσης της κατασκευής. Στο *Παράρτημα Α* παρουσιάζονται οι δοκιμαστικές μοντελοποιήσεις που μελετήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

1.3 Αναλυτική δομή κειμένου

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η προσπάθεια του IACS να δημιουργεί αλλά και να εκσυγχρονίζει τα κριτήρια που πρέπει να πληρούνται σε θέματα αντοχής, αναφέρεται ο τρόπος λειτουργίας των κανονισμών CSR-H καθώς και τα είδη των φορτίων που δέχεται το πλοίο. Τέλος γίνεται αναφορά σε βασικές θεωρητικές έννοιες του προβλήματος προσδιορισμού της μέγιστης καμπτικής ροπής που μπορεί να παραλάβει η γάστρα ενός πλοίου.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το λογισμικό MARS 2000 το οποίο χρησιμοποιείται αρχικά για να αποτυπωθεί ηλεκτρονικά η γεωμετρία της μέσης τομής που εξετάζεται. Αναλύεται η διαδικασία εφαρμογής της επαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου (μέθοδος του Smith) μέσω της οποίας υπολογίζεται η μέγιστη αντοχή της γάστρας βάσει των ενσωματωμένων κανονισμών CSR του προγράμματος. Ακολουθεί περιγραφή των βημάτων της σχεδίασης στο λογισμικό και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής και στα φαινόμενα που την διέπουν. Επίσης παρουσιάζονται και γίνεται σύγκριση των κριτηρίων διαρροής όλκιμων υλικών Von Mises, Tresca.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται επιλογή τύπου πεπερασμένων στοιχείων και περιγράφεται η επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson, που όπως και στη συγκεκριμένη εργασία, βρίσκει ευρεία εφαρμογή για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία σχεδίασης του μοντέλων που μελετήθηκαν με το λογισμικό ABAQUS. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κάθε περίπτωσης και τα επιμέρους συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτά.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η γενική ανασκόπηση της εργασίας και συγκεντρωτικά συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή.

Η εργασία ολοκληρώνεται με την **βιβλιογραφική ανασκόπηση** όλων των συγγραμμάτων και δημοσιεύσεων των οποίων χρησιμοποιήθηκαν αναφορές.

Τέλος επισυνάπτονται **4 παραρτήματα** στα οποία ορισμένα σημεία του βασικού κειμένου αναπτύσσονται περαιτέρω. Για λόγους συνοχής του βασικού κορμού της εργασίας, οι αναλύσεις αυτές, που έχουν καθαρά επεξηγηματικό ύφος, επιλέχθηκε να μην ενσωματωθούν σε αυτό.

Κεφάλαιο 2. Αναφορά σε βασικές έννοιες της μελέτης

2.1 Εισαγωγή στους CSR

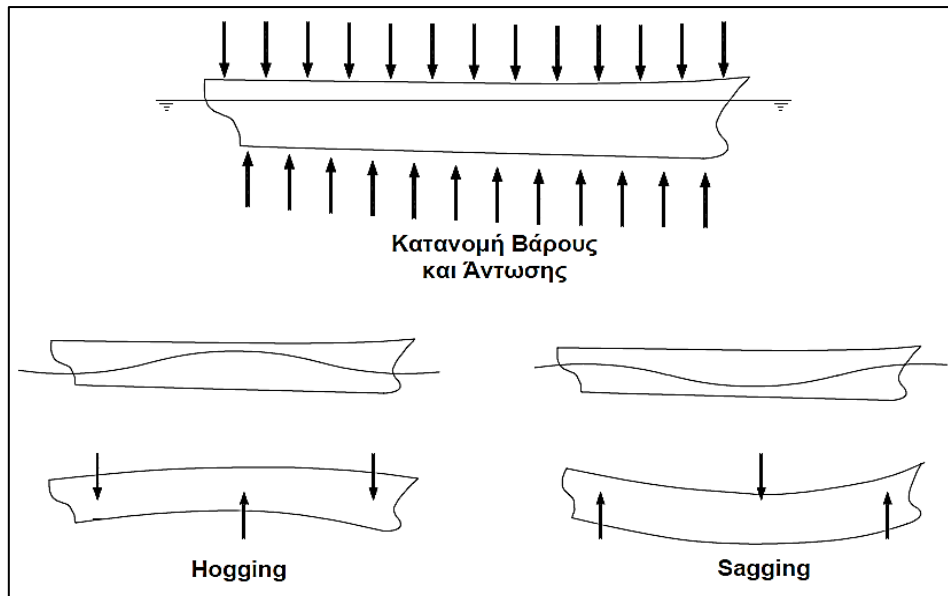
Μέχρι το 1960 οι Νηογνώμονες χρησιμοποιούσαν πίνακες με διαστάσεις για τον σχεδιασμό και την κατασκευή των πλοίων εκείνης της εποχής. Οι πίνακες καταργήθηκαν και την θέση τους ως κριτήριο πήραν υπολογιστικοί τύποι μέσω των οποίων προκύπτουν βάσει γεωμετρίας οι αναμενόμενες φορτίσεις και πραγματοποιούνται και έλεγχος αντοχής. Το 1990 οι Νηογνώμονες υπό την αιγίδα του IACS (International Association of Classification Societies) συμφώνησαν και δημιούργησαν κοινά κατώτατα όρια για τη διαμήκη αντοχή των πλοίων, τα οποία υποστηρίζονται και από στατιστικές μελέτες ατυχημάτων. Στις μέρες μας ο IACS αποτελείται από 13 παγκοσμίως αναγνωρισμένους νηογνώμονες και έχει την έδρα του στο Λονδίνο. Βασικός του στόχος είναι, σε συνεργασία με τον IMO (International Maritime Organization), να επιβάλλει κανονισμούς ασφαλείας από το επίπεδο της κατασκευαστικής ακεραιότητας του εκάστοτε πλοίου έως το επίπεδο της θαλάσσιας ρύπανσης και της ανθρώπινης ζωής.

Θα επικεντρωθούμε στους κανονισμούς που αφορούν την αντοχή της κατασκευής. Οι κανονισμοί που συμφωνήθηκαν το 1990 αποτελούν από το 2006 μέρος των λεγόμενων Κοινών Δομικών Κανονισμών (Common Structural Rules – CSR). Εκδίδονται από τον IACS περίπου κάθε ένα με δύο χρόνια και αφορούν όλα τα φορτηγά πλοία των οποίων το μήκος υπερβαίνει τα 90 μέτρα και περιλαμβάνουν τυποποιημένες διαδικασίες σχεδίασης ανάλογα με την κάθε περίπτωση ώστε να ελαχιστοποιείται πάντα η πιθανότητα αστοχίας σε θέματα αντοχής. Οι περιπτώσεις πλοίων που, λόγω διαστάσεων ή άλλων χαρακτηριστικών, δεν είναι δυνατό να καταταχθούν σε κάποια κατηγορία, ελέγχονται μεμονωμένα από τον οργανισμό.

Ακολουθώντας την πορεία μίας διαδικασίας σχεδίασης σε πρώτο στάδιο προσδιορίζονται τα υλικά που χρησιμοποιούνται, τα απαιτούμενα πάχη για προστασία της κατασκευής από διάβρωση και οι βασικές διαστάσεις – όρια τους που ικανοποιούν τους κανονισμούς.

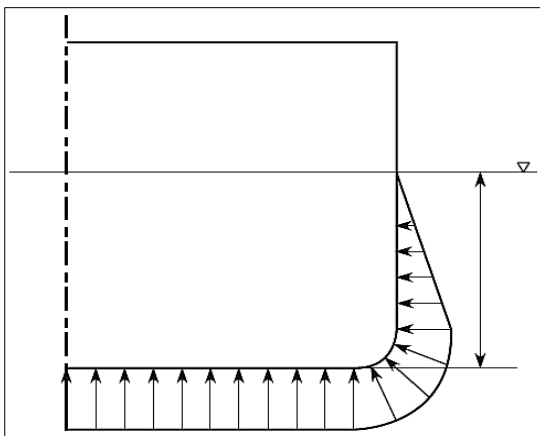
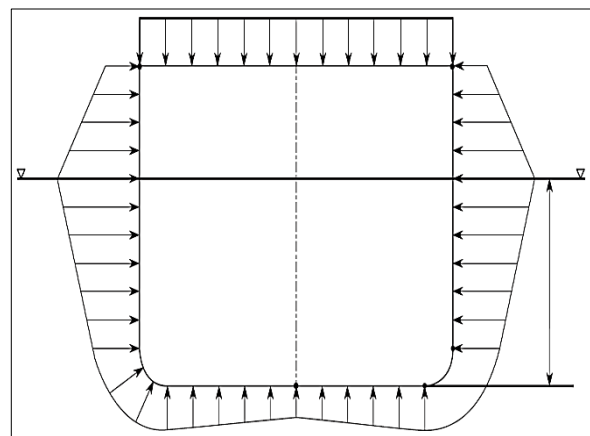
Σε δεύτερο στάδιο προσδιορίζονται οι πιθανές φορτίσεις που μπορούν να εμφανιστούν οι οποίες ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με το σημείο εμφάνισής τους :

- α) **Διαμήκεις φορτίσεις** που δέχεται το πλοίο και οφείλονται στις διάφορες κατανομές βάρους κατά το μήκος του καθώς και στις καταστάσεις θάλασσας όταν παρουσιάζονται φαινόμενα hogging και sagging,



Εικόνα 2.1: Διαμήκειες φορτίσεις του πλοίου.

- β) **Εγκάρσιες φορτίσεις** που συνήθως προκαλούνται από την υδροστατική πίεση που ασκεί το νερό εξωτερικά στη γάστρα του πλοίου αλλά και από τις πιέσεις που δημιουργούν τα ρευστά περιεχόμενα των δεξαμενών στα τοιχώματά τους, [17]

Εικόνα 2.2: Υδροστατική πίεση
κατά CSR-HΕικόνα 2.3: Υδροδυναμική πίεση κατά CSR-H
load cases HSM-2, HSA-2, FSM-2

- γ) **Αδρανειακές φορτίσεις** που οφείλονται σε μετακίνηση μεγάλων μαζών κατά τον πλου και επηρεάζουν ιδιαίτερα την εγκάρσια ευστάθεια του σκάφους.

Ακόμη μπορεί να γίνει πιο αναλυτική ταξινόμηση των φορτίσεων σύμφωνα με το είδος τους:

α) **Στατικές φορτίσεις** που αναπτύσσονται λόγω της κατανομής βάρους, άντωσης, λόγω θερμικής καταπόνησης και κατά τη συγκέντρωση φορτίσεων στη διάρκεια του δεξαμενισμού,

β) **Δυναμικές φορτίσεις** που διακρίνονται σε όσες έχουν χαμηλή συχνότητα (περίοδος ταλάντωσης με τάξη μεγέθους μερικά δευτερόλεπτα έως λεπτά) :

- i. Φόρτιση της γάστρας λόγω της ταλαντωτικής κίνησης του πλοίου,
- ii. Δυνάμεις λόγω κυματισμών που προσπίπτουν στη γάστρα του πλοίου
- iii. Αδρανειακές φορτίσεις από τις επιταχύνσεις που δημιουργούν οι κυματισμοί,

και σε αυτές που έχουν υψηλή συχνότητα :

- i. Φορτίσεις λόγω της αλληλεπίδρασης εξαρτημάτων της γάστρας,
- ii. Δονήσεις που προέρχονται από την περιστροφική λειτουργία μηχανισμών και της έλικας,
- iii. Κρουστικές φορτίσεις,

γ) **Ειδικές φορτίσεις** που εμφανίζονται για μικρό χρονικό διάστημα αλλά δεν πρέπει να αμελούνται καθώς προκαλούν μεγάλη καταπόνηση, όπως:

- i. Κατά την ανύψωση και μεταφορά βαρέων αντικειμένων,
- ii. Λόγω διαφοράς πίεσης στις δεξαμενές φορτίου,
- iii. Κατά τη διάρκεια ατυχήματος προσάραξης ή σύγκρουσης με άλλο πλοίο.

Μόλις καθοριστούν οι φορτίσεις ολοκληρώνεται ο υπολογισμός των απαιτήσεων στις διαστάσεις των δομικών στοιχείων της κατασκευής, που προσφέρουν επαρκή αντοχή σε φαινόμενα λυγισμού, κάμψης και κόπωσης.

Σε τρίτο και τελευταίο στάδιο προκύπτουν τα ελάχιστα αποδεκτά όρια διαστάσεων με τη χρήση εμπειρικών κανονισμών και η τελική σχεδίαση ελέγχεται για την αντοχή και την κόπωση της με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι κανονισμοί δεν επιβάλλουν περιορισμούς στο είδος των ενισχυτικών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επομένως σε κάθε περίπτωση δύναται να επιλεγεί η καταλληλότερη λύση σε τύπο, μέγεθος και κόστος ενισχυτικού.

2.2 Εξεταζόμενα σενάρια αστοχίας από τους κανονισμούς

Εκτός από την ταξινόμηση των πιθανών φορτίσεων στη γάστρα, οι κανονισμοί προβλέπουν συγκεκριμένα σενάρια-οριακές καταστάσεις που κάθε κατασκευή πρέπει να ικανοποιεί από άποψη αντοχής [17] . Τα σενάρια είναι τα εξής:

α) **Serviceability limit state (SLS)**, το οποίο για συνθήκες υπηρεσίας προβλέπει σχεδίαση τέτοια ώστε τα μεγέθη που ακολουθούν, να μην ξεπερνούν τα επιθυμητά όρια ασφαλείας:

1. Η φθορά σε τοπικό επίπεδο των δομικών στοιχείων της κατασκευής που μπορεί να μειώσει την προσδοκώμενη διάρκεια αντοχής τους.

2. Η παραμόρφωση των στοιχείων που επηρεάζει την συνεισφορά τους στην συνολική αντοχή της κατασκευής.
- β) Ultimate limit state (ULS), σενάριο που προβλέπει την μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η γάστρα του πλοίου, διαδικασία που αποτελεί και αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας, και περιλαμβάνει:
1. Τον προσδιορισμό της ικανότητας των στοιχείων να παραμορφώνονται δραστικά (μεγάλες μετατοπίσεις, λυγισμός)
 2. Τον έλεγχο των αναπτυσσόμενων τάσεων στα στοιχεία και την αντοχή τους όταν εμφανίζεται πλαστική διαρροή.
- γ) Fatigue limit state (FLS), που μέσω της εφαρμογής του εξασφαλίζεται η επιθυμητή αντοχή των δομικών στοιχείων σε κόπωση λόγω κυκλικών (περιοδικών) φορτίσεων.
- δ) Accidental limit state (ALS), το οποίο αφορά την ικανότητα της κατασκευής να μην αστοχεί σε περιπτώσεις ατυχήματος ή σπάνια φαινόμενα όπως ακραίες θαλάσσιες συνθήκες. Μάλιστα στα πλαίσια του σεναρίου εξετάζονται περιπτώσεις τόσο άθικτης όσο βεβλαμμένης κατάστασης του πλοίου.

Ακολουθεί ο πίνακας 2.1 στον οποίο φαίνονται οι πιθανές μορφές αστοχίας σε κάθε σενάριο από τα παραπάνω. Σε κάθε σενάριο μπορεί να αντιστοιχεί παραπάνω από μία μορφή αστοχίας. Τέλος σημειώνεται ότι τα διάφορα δομικά μέρη της κατασκευής μπορεί να έχουν κοινά είδη αστοχίας.

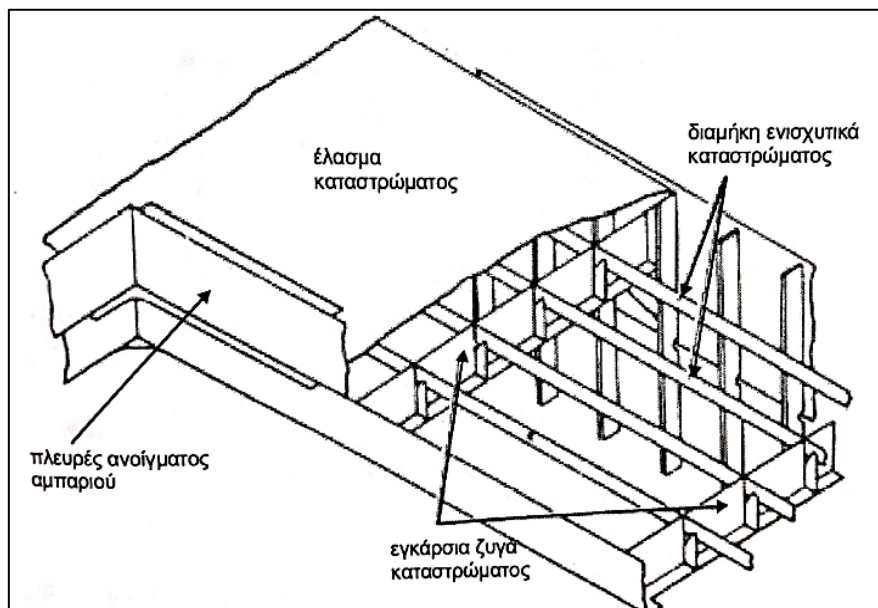
Πίνακας 2.1: Εξεταζόμενα σενάρια αστοχίας κατά CSR-H

Possible failure modes to be considered	Limit States			
	SLS	ULS	FLS	ALS
Yielding	Y	Y	-	Y
Plastic collapse	-	Y	-	Y
Buckling	Y	Y	-	Y
Rupture	-	Y	-	Y
Fatigue cracking	-	-	Y	-
Brittle fracture	-	-	-	-

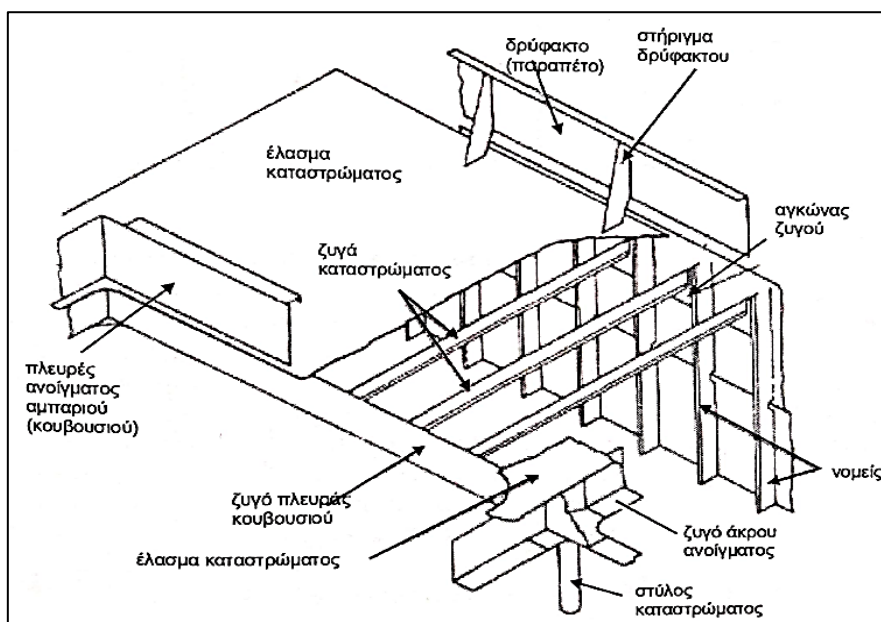
2.3 Το πλοίο ως δοκάρι

Το πλοίο μπορεί προσεγγιστικά να θεωρηθεί ομοιόμορφος πρισματικός φορέας λεπτών τοιχωμάτων, όπου το κύριο μέρος του, το εξωτερικό κέλυφος, το συνθέτουν ενισχυμένα ελάσματα, φρακτές και καταστρώματα. Σύμφωνα με την ανάλυση των φορτίσεων που προηγήθηκε στο ίδιο κεφάλαιο, δημιουργούνται φορτίσεις τόσο ομοεπίπεδες όσο και κάθετες στις επιφάνειες των ελασμάτων της γάστρας. Προκειμένου να υπάρξει ομαλή διάχυση των εξωτερικών φορτίσεων στο σύνολο της κατασκευής, χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δύο συστήματα εσωτερικών ενισχύσεων. Το πρωτεύον σύστημα έχει διαμήκη προσανατολισμό, ενώ το δευτερεύον μπορεί να εκτείνεται και κατά την εγκάρσια διεύθυνση (εικόνες 2.4.,2.5) [22] . Ακόμα οι

εσωτερικές ενισχύσεις στηρίζονται στις φρακτές, καταστρώματα και πυθμένα του πλοίου. Οι φορτίσεις που ασκούνται κάθετα στην επιφάνεια των ελασμάτων οφείλονται για την εμφάνιση του φαινομένου της τοπικής κάμψης των ενισχύσεων. Όμως για πλοία που το μήκος τους ξεπερνά τα 90 μέτρα εμφανίζεται διαμήκης κάμψη της γάστρας του που πλέον δεν μπορεί να αμεληθεί. Λόγω της συγκεκριμένης καταπόνησης αναπτύσσονται τάσεις στα επιμέρους τμήματα της κατασκευής και λόγω αυτών προκύπτει εφελκυσμός και θλίψη κατά το διάμηκες επίπεδο.



Εικόνα 2.4: Διάμηκες σύστημα ενισχύσεων



Εικόνα 2.5: Εγκάρσιο σύστημα ενισχύσεων

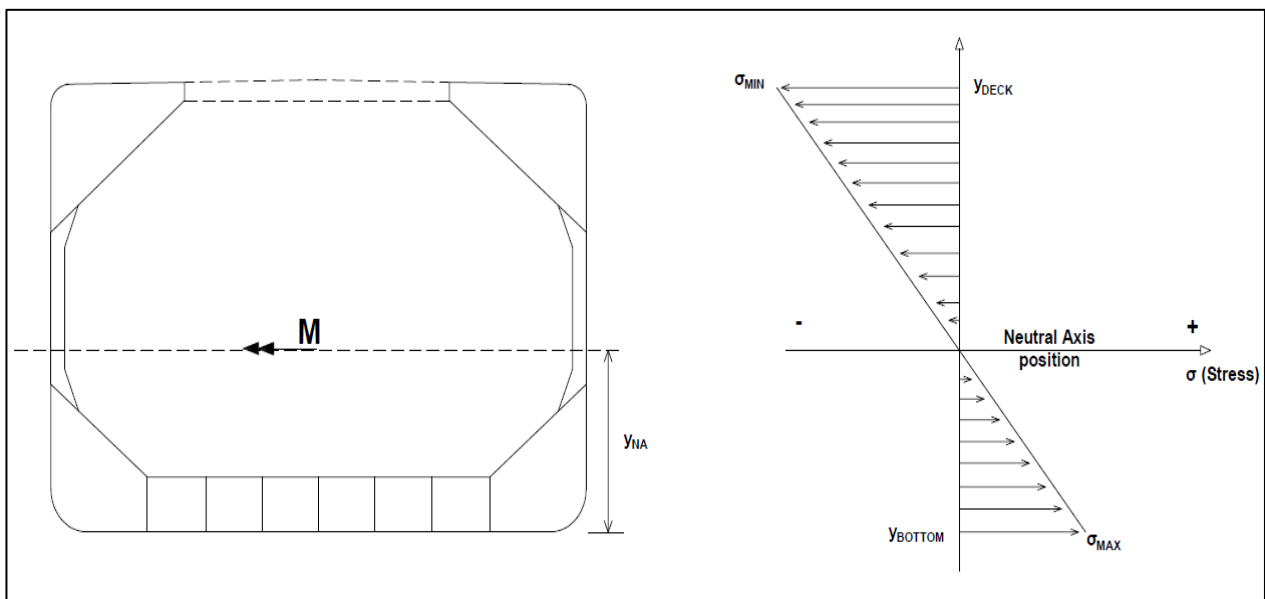
2.4 Εφαρμογή της Απλής Θεωρίας Κάμψης στο πλοίο-δοκάρι

Στα πλαίσια της απλής θεωρίας κάμψης των Euler, Bernoulli, μπορούν να γίνουν διάφορες παραδοχές απλοποίησης του προβλήματος της κάμψης της γάστρας του πλοίου. Το πλοίο μελετάται ιδανικά, ως ένας τρισδιάστατος, λεπτότοιχος φορέας-δοκάρι. Ακολουθούν οι στοιχειώδεις παραδοχές για τις οποίες ισχύει η θεωρία [1] :

- α) Οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες κατά την ανάλυση και η διατομή στρέφεται γύρω από έναν άξονα που καλείται ουδέτερος άξονας. Το ουδέτερο επίπεδο δεν παραμορφώνεται.
- β) Η ανάλυση γίνεται για πρισματικό φορέα σταθερής διατομής κατά το μήκος του.
- γ) Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις θεωρούνται αμελητέες επειδή η διατομή του πλοίου έχει πολύ μικρότερες διαστάσεις σε σχέση με το μήκος του.
- δ) Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση ανάμεσα σε καμπτικές και διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις.
- ε) Η συμπεριφορά του υλικού να είναι ελαστική με ίδιο μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό και θλίψη. Η τάση λόγω διαμήκουσ κάμψης αυξάνεται γραμμικά με την απόσταση από τον ουδέτερο άξονα σύμφωνα με την σχέση:

$$\sigma = \frac{M}{I} \cdot y_{NA}$$

Επομένως οι μέγιστες τιμές της εμφανίζονται στον πυθμένα και το κατάστρωμα. Λόγω της θέσης του ουδέτερου άξονα πιο κοντά στο πυθμένα, παρουσιάζεται στην εικόνα 2.6 η τυπική κατανομή των τάσεων στην μέση τομή του πλοίου κατά την κάμψη του (φαινόμενο sagging):



Εικόνα 2.6: Κατανομή τάσεων (αλγεβρικά μεγέθη) στη μέση τομή σε φαινόμενο Sagging

2.5 Φορτίσεις του πλοίου ως δοκάρη κατά CSR-H

Ακολουθώντας τα πλαίσια της μελέτης αυτής της εργασίας, γίνεται αναφορά μόνο στους τύπους των κατακόρυφων καμπτικών ροπών σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς όπως προδιαγράφονται από τους κανονισμούς CSR-H [17].

▪ Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε ήρεμο νερό

Στο *Part 1, Ch. 4, Sec. 4, 2.1.1, CSR-H 2018* δίνονται οι τύποι υπολογισμού της ελάχιστης απαιτούμενης κατακόρυφης καμπτικής ροπής σε περίπτωση hogging και sagging, $M_{sw-h-min}$ και $M_{sw-s-min}$, αντίστοιχα:

• Φαινόμενο Hogging

$$M_{sw-h-min} = f_{sw} (171 C_W \cdot L^2 \cdot B (C_B + 0.7) 10^{-3} - M_{wv-h-mid})$$

• Φαινόμενο Sagging

$$M_{sw-s-min} = -0.85 f_{sw} (171 C_W \cdot L^2 \cdot B (C_B + 0.7) 10^{-3} + M_{wv-s-mid})$$

Όπου τα επιμέρους μεγέθη ορίζονται:

- $M_{wv-h-mid}$: Ροπή κάμψης σε κυματισμούς σε περίπτωση hogging στη διαμήκη θέση της μέσης τομής.
- $M_{wv-s-mid}$: Ροπή κάμψης σε κυματισμούς σε περίπτωση sagging στη διαμήκη θέση της μέσης τομής.
- f_{sw} : Συντελεστής κατανομής των καμπτικών φορτίσεων για ήρεμο νερό κατά το μήκος x του πλοίου, ορίζεται ως εξής στα διαστήματα:

$$f_{sw} = 0.0 \text{ για } x \leq 0$$

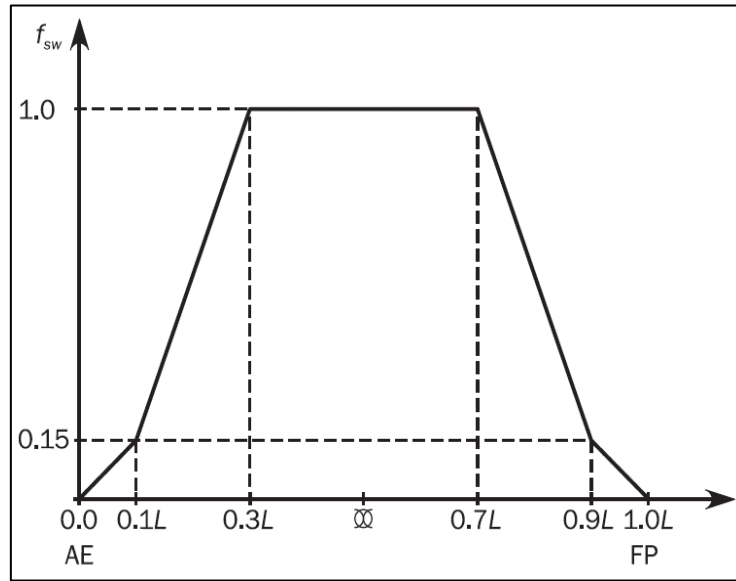
$$f_{sw} = 0.15 \text{ στο } x = 0.1L$$

$$f_{sw} = 1.0 \text{ για } 0.3L \leq x \leq 0.7L$$

$$f_{sw} = 0.15 \text{ στο } x = 0.9L$$

$$f_{sw} = 0.0 \text{ για } x \geq L$$

Ενώ για ενδιάμεσες τιμές υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή (εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7: Συντελεστής Κατανομής φορτίσεων σε ήρεμο νερό f_{sw}

- L : Μήκος κανονισμών [m]. Ορίζεται ως η απόσταση από τον κεντρικό άξονα του πηδαλίου μέχρι την πλώρη. Υπολογίζεται στο ύψος της ισάλου γραμμής για το βύθισμα σχεδίασης.
- C_w : Συντελεστής κύματος [m]. Για τις διάφορες τιμές του μήκους κανονισμών ορίζεται:

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

$$C_w = 10.75, \text{ για } 300 \leq L \leq 350$$

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

- C_B : Συντελεστής γάστρας του πλοίου για το βύθισμα σχεδίασης.

▪ Κατακόρυφη Ροπή Κάμψης σε κυματισμούς

Στο *Part 1, Ch. 4, Sec. 4, 3.1.1 CSR-H 2018* δίνονται οι τύποι υπολογισμού της προβλεπόμενης κατακόρυφης καμπτικής ροπής σε κυματισμούς σε περίπτωση hogging και sagging, M_{wv-h} και M_{wv-s} , αντίστοιχα:

• Φαινόμενο Hogging

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

• Φαινόμενο Sagging

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

Όπου τα επιμέρους μεγέθη ορίζονται:

- f_{nl-vh} : Συντελεστής διόρθωσης για τη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής στο φαινόμενο Hogging. Λαμβάνει τιμές:

$$f_{nl-vh} = 1.0, \text{ για μελέτη αντοχής.}$$

$$f_{nl-vh} = 1.0, \text{ για μελέτη κόπωσης.}$$

- f_{nl-vs} : Συντελεστής διόρθωσης για τη μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής στο φαινόμενο Sagging. Λαμβάνει τιμές:

$$f_{nl-vs} = 0.58 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B} \right), \text{ για μελέτη αντοχής.}$$

$$f_{nl-vs} = 1.0, \text{ για μελέτη κόπωσης.}$$

- f_p : Συντελεστής που λαμβάνει τιμές:

$$f_p = \begin{cases} 1.0 \\ 0.8 \\ 0.4 \end{cases}, \text{ για μελέτης αντοχής ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο σχεδίασης.}$$

$$f_p = 0.9 \left[0.27 - (6 + 4f_T) L \cdot 10^{-5} \right], \text{ για μελέτη κόπωσης.}$$

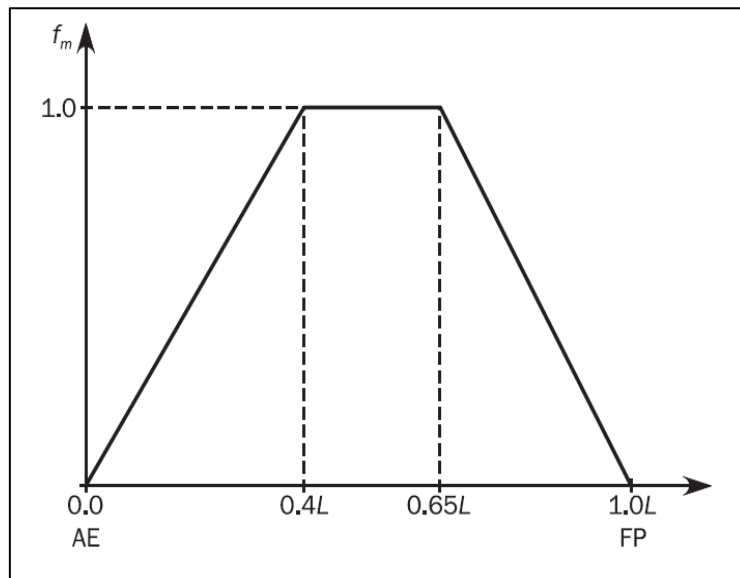
- f_m : Συντελεστής κατανομής των καμπτικών φορτίσεων σε κυματισμούς κατά το μήκος x του πλοίου, ορίζεται ως εξής στα διαστήματα:

$$f_m = 0.0 \text{ για } x \leq 0$$

$$f_m = 0.1 \text{ για } 0.4L \leq x \leq 0.65L$$

$$f_m = 0.0 \text{ για } x \geq L$$

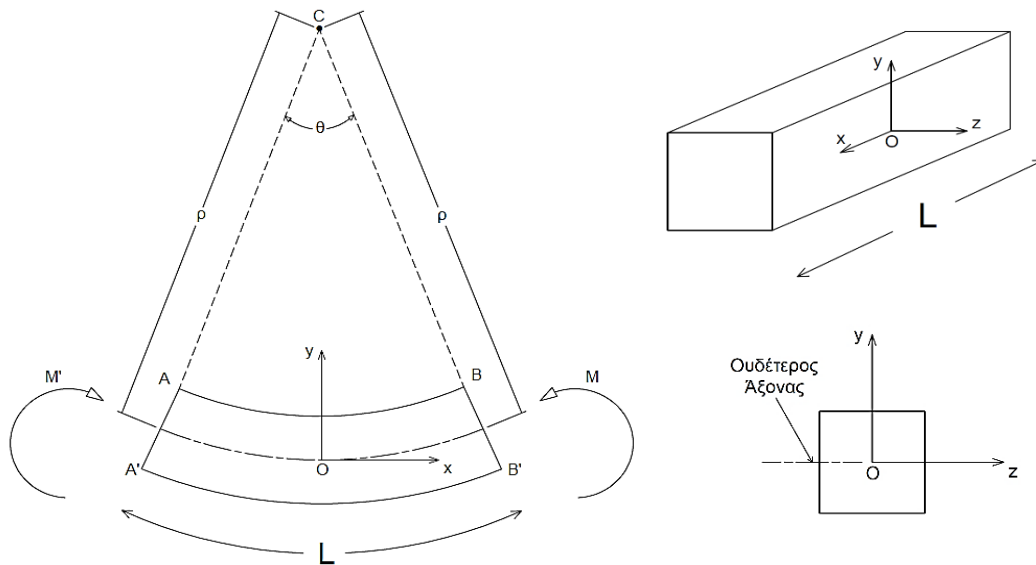
Ενώ για ενδιάμεσες τιμές υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή (εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Συντελεστής Κατανομής φορτίσεων σε κυματισμούς f_m

2.6 Η θεωρία της Καθαρής Κάμψης

Στον πρισματικό φορέα της εικόνας 2.9 ασκείται ένα ζεύγος ροπών \mathbf{M} , \mathbf{M}' στα άκρα του κατά το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του. Η διατομή του φορέα έχει διπλή συμμετρία στο επίπεδο yz . Ο φορέας κάμπτεται ομοιόμορφα και όλα τα σημεία που βρίσκονται σε σταθερή απόσταση από το O , για παράδειγμα όλα τα σημεία της γραμμής AB , αποκτούν σταθερή καμπυλότητα. Σύμφωνα με το σχήμα το μήκος τη γραμμής AB μειώνεται (θλίψη), ενώ το μήκος της γραμμής $A'B'$ αυξάνεται (εφελκυσμός). Επομένως ανάμεσα σε αυτές τις δύο γραμμές που οριοθετούν την δοκό υπάρχει μία γραμμή κατά την οποία οι τάσεις μηδενίζονται, ο ουδέτερος άξονας. Όσο οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες του ορίου διαρροής σ_Y , οι τάσεις και οι παραμορφώσεις μεταβάλλονται γραμμικά με την απόσταση από τον ουδέτερο άξονα [4].



Εικόνα 2.9: Πρισματικός Φορέας που υπόκειται σε καθαρή κάμψη

Επομένως το μήκος της γραμμής του ουδέτερου άξονα δεν μεταβάλλεται κατά την κάμψη της δοκού. Θεωρώντας ρ την ακτίνα το τόξου που σχηματίζει ο ουδέτερος άξονας με το σημείο C και θ την επίκεντρη γωνία του ίδιου τόξου, τότε το μήκος του ουδέτερου άξονα μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των μεγεθών:

$$L = \rho \cdot \theta \quad (\text{Εξ. 2.1}),$$

Ακόμη ορίζεται η ποσότητα:

$$k = \frac{1}{\rho} \quad (\text{Εξ. 2.2}),$$

που ονομάζεται καμπυλότητα (curvature) της ουδέτερης επιφάνειας και χρησιμοποιείται για να μετρηθεί η παραμόρφωση που προκαλεί η ασκούμενη καμπτική ροπή στον φορέα. Από τις εξισώσεις 2.1, 2.2 προκύπτει:

$$k = \frac{\theta}{L} \quad (\text{Εξ. 2.3}),$$

όπως θα δούμε στη συνέχεια η σχέση των δύο μεγεθών, καμπυλότητα k και καμπτική ροπή M , συνθέτει το διάγραμμα από το οποίο προσδιορίζεται η μέγιστη καμπτική ροπή που μπορούν να παραλάβουν οι εξεταζόμενες μοντελοποιήσεις.

Κεφάλαιο 3. Εφαρμογή της επαναληπτικής - επαυξητικής μεθόδου, λογισμικό Mars2000

3.1 Λογισμικό Σχεδίασης Mars 2000

Το λογισμικό Mars2000 έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται από τον γαλλικό νηογνώμονα Bureau Veritas σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR (H) που ανακοινώνει ο IACS. Με αυτό το εργαλείο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει υπολογισμούς αντοχής για ελάσματα και ενισχυτικά οποιασδήποτε εγκάρσιας διατομής του πλοίου που επιθυμεί. Ακόμη επιτρέπει τον έλεγχο αντοχής όλων των εγκάρσιων νομέων και φρακτών της κατασκευής, για τα οποία μπορεί να υπολογίσει :

- α) Τις γεωμετρικές τους ιδιότητες (εμβαδό επιφανειών, ροπές αδράνειας και ροπές αντίστασης),
- β) Τα κριτήρια αντοχής της γάστρας του πλοίου,
- γ) Τη μέγιστη τιμή καμπτικής ροπής που μπορεί να παραλάβει η διατομή,
- δ) Το είδος, το μέγεθος και την ισαπόσταση ενισχυτικών με παράλληλο έλεγχο στα όρια διαρροής, λυγισμού και στις ελάχιστες απαιτήσεις για τα πάχη τους.

Σε αντίθεση με τα διάφορα είδη μεθόδων υπολογισμού διαμήκους αντοχής που αναφέρονται στο εισαγωγικό μέρος της εργασίας, το Mars2000 επιτρέπει να εξάγουμε αποτελέσματα σε αρκετά μικρότερο χρονικό διάστημα επεξεργασίας, διατηρώντας παράλληλα ένα ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας υπολογισμών.

Στην περίπτωση μας για να προσδιορίσουμε τη μέγιστη αντοχή σε διαμήκη κάμψη πρέπει να εισάγουμε όλες τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της ημιδιατομής της μέσης τομής του πλοίου μας. Συγκεκριμένα δημιουργούμε στο παράρτημα του BSD (Basic Ship Data – Introduction Shell) μία καινούργια βάση δεδομένων που αφορά το δικό μας πλοίο και εισάγουμε σε αυτή τις κύριες διαστάσεις του, τα υλικά κατασκευής και τα όρια φόρτισης που δίνει το ναυπηγείο στο οποίο κατασκευάστηκε. Στη συνέχεια επιλέγουμε να επεξεργαστούμε τη δική μας βάση δεδομένων μιας και το πρόγραμμα φέρει άλλες τρεις βάσεις ως παραδείγματα σχεδίασης για τον χρήστη. Στο παράρτημα MarsIn σχεδιάζουμε την μορφή της μισής μέσης τομής και ακολουθεί η εισαγωγή των υλικών κατασκευής, των τύπων των ενισχυτικών και της ισαπόστασης τους κατά το εγκάρσιο επίπεδο καθώς δηλώνεται και η ισαπόσταση των νομέων κατά το διάμηκες επίπεδο. Επειδή μας ενδιαφέρει μόνο ο υπολογισμός της μέγιστης καμπτικής ροπής που δημιουργούν τα φαινόμενα sagging και hogging, στο αρχείο σχεδίασης δεν εισάγουμε πληροφορίες για το είδος και την ποιότητα των συγκολλήσεων μεταξύ ελασμάτων και ενισχυτικών, στοιχεία για τον υπολογισμό της κόπωσης ούτε λεπτομέρειες για τα εγκάρσια ενισχυτικά που φέρει η διατομή [18].

Για τον υπολογισμό της ροπής κατάρρευσης του πλοίου το λογισμικό Mars2000 χρησιμοποιεί την απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο (μέθοδος του Smith). Η έκδοση του λογισμικού Oct 5, 2018 εφαρμόζει τους κανονισμούς CSR (H) July 2018.

Ακολουθεί αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο πριν την εφαρμογή της μεθόδου του Smith όπως την προδιαγράφουν οι κανονισμοί και στην συνέχεια παρουσίαση των αποτελεσμάτων του λογισμικού Mars2000.

3.2 Η μέθοδος του Smith (incremental iterative method)

Η μέθοδος παρουσιάστηκε το 1977 από τον Smith. Στα πλαίσια της μεθόδου το πλοίο θεωρείται ως ένα καμπτόμενο δοκάρι (εφαρμογή απλής θεωρίας κάμψης). Σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR 01/01/2018 από το *Part 1, Chapter 5, Appendix 2* για εφαρμογή της μεθόδου ακολουθούνται τα εξής 7 βήματα [17] :

Βήμα 1 : Πραγματοποιείται υποδιαίρεση του πλοίου σε τρεις βασικές περιοχές:

- i. Ελάσματα ενισχυμένα κατά το διάμηκες ή το εγκάρσιο επίπεδο

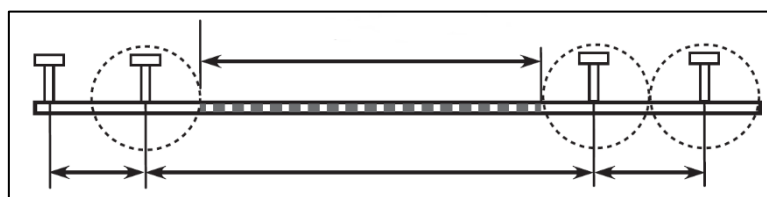
Αυτή η κατηγορία ορίζεται από την περιοχή του ελάσματος που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στοιχεία των παρακάτω κατηγοριών (εικόνα 3.1).

- ii. Ενισχυτικά με διαμήκη ή εγκάρσιο προσανατολισμό

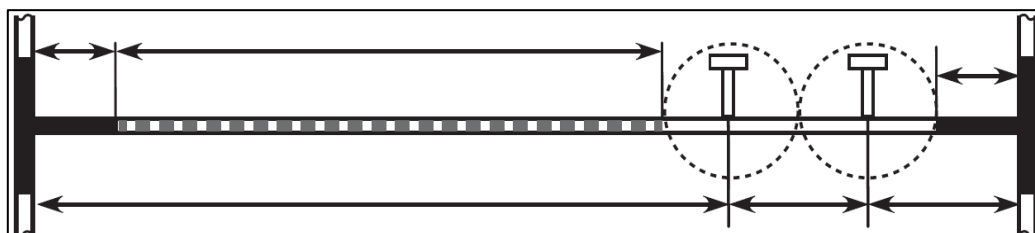
Αυτή η κατηγορία ορίζεται από το ενισχυτικό και μία περιοχή εκατέρωθεν του ενισχυτικού της οποίας οι διαστάσεις φαίνονται στην εικόνα 3.1.

- iii. Ανθεκτικές Γωνίες

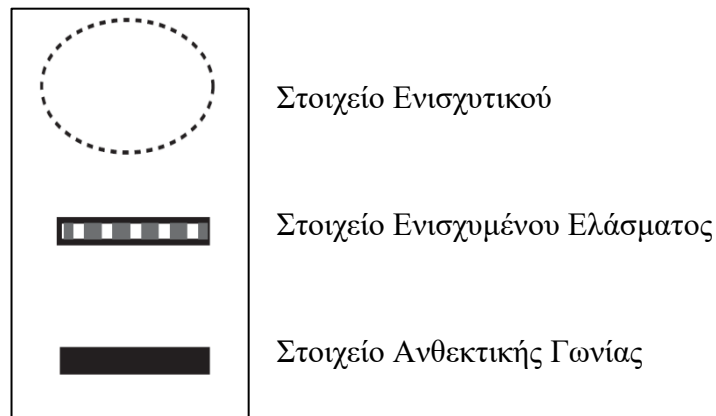
Αυτή η κατηγορία ορίζεται από την περιοχή συγκόλλησης δύο ελασμάτων τα οποία δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Τα ελάσματα αυτά διαθέτουν μεγάλη ακαμψία, επομένως αστοχούν όταν διαρρεύσει πλαστικά το υλικό τους. Τα όρια της περιοχής αυτής καθορίζονται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.1: Περιοχή Ελασμάτων και Ενισχυτικών

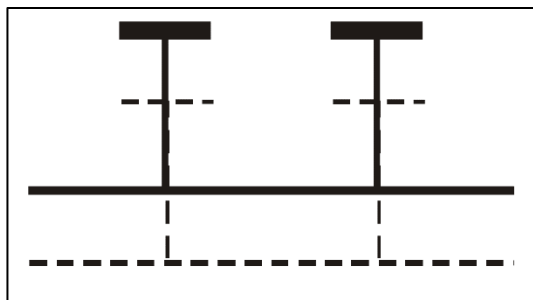


Εικόνα 3.2: Περιοχή Ανθεκτικών Γωνιών

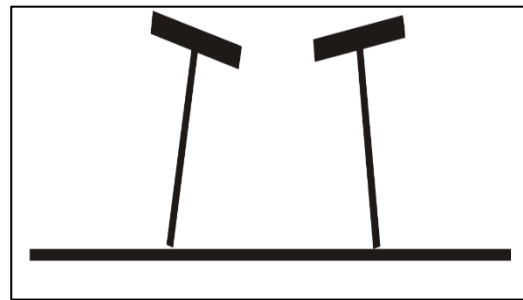


Βήμα 2 : Προσδιορίζεται η καταπόνηση και οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης (διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης) κάθε στοιχείου.

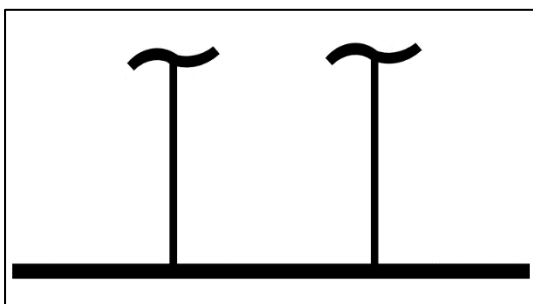
Κατά την θλίψη του καταστρώματος (sagging) τα ενισχυτικά του δύναται να αστοχήσουν με τους εξής 5 τρόπους [22] :



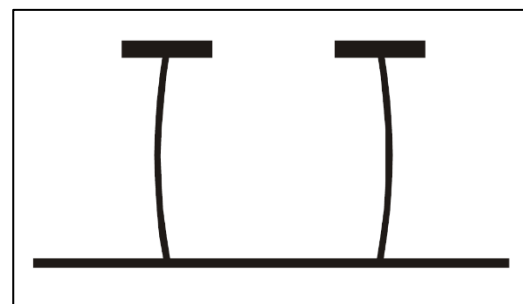
Λυγισμός δοκού-κολόνας
(Beam column buckling)



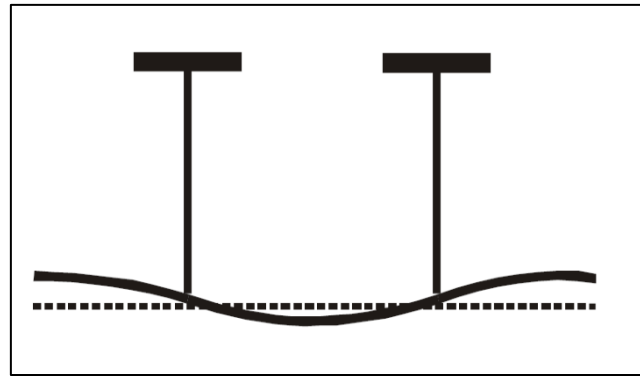
Στρεπτικός λυγισμός
(Torsional buckling)



Τοπικός λυγισμός πέλματος ενισχυτικών

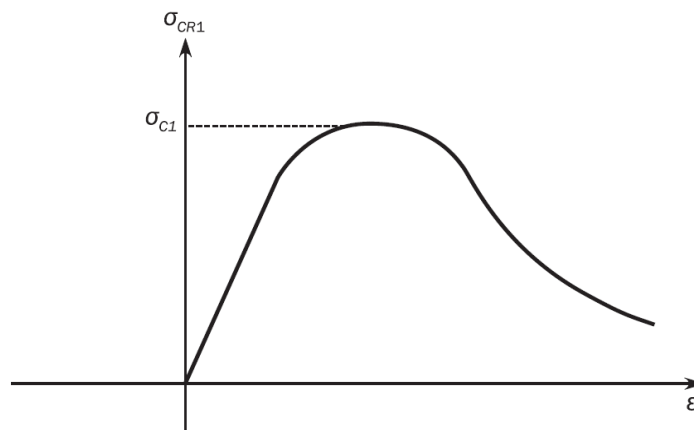


Τοπικός λυγισμός στον κορμό των ενισχυτικών



Λυγισμός ελάσματος

Όλα τα δομικά στοιχεία της διατομής χαρακτηρίζονται από μία καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Όταν σε αυτή συμπεριλαμβάνεται και η συμπεριφορά του δομικού στοιχείου σε λυγισμό, τότε η καμπύλη καλείται μειωτική καμπύλη φόρτισης και ενδεικτικά παρουσιάζεται στην εικόνα 3.3 η μορφή της για συγκεκριμένη περίπτωση λυγισμού.



Εικόνα 3.3: Μειωτική Καμπύλη Φόρτισης για εμφάνιση λυγισμού δοκού-κολόνας σε ενισχυτικό στοιχείο

Βήμα 3 : Προσδιορίζεται ο ουδέτερος άξονας και επιβάλλεται στοιχειώδης τιμή καμπυλότητας στη διατομή χ_1 . Πρακτικά τιμή η οποία επιφέρει τάση στο κατάστρωμα ίση με το 1% της τάσης διαρροής.

Βήμα 4 : Υπολογίζεται για κάθε στοιχείο η αντίστοιχη παραμόρφωση ϵ_i και τάση σ_i .

Βήμα 5 : Σε κάθε στοιχειώδες βήμα εφαρμογής της καμπυλότητας γίνεται εκ νέου προσδιορισμός του ουδέτερου άξονα Z_{NA_cur} μέσω της ισορροπίας των δυνάμεων στη διατομή:

$$\Sigma F=0 \Leftrightarrow \Sigma A_i |\sigma_i| = \Sigma A_j \sigma_j ,$$

όπου με δείκτη i συμβολίζεται το εμβαδόν του εκάστοτε στοιχείου και η θλιπτική τάση που αναπτύσσεται σε αυτό, ενώ με δείκτη j το εμβαδό και η εφελκυστική τάση σε αυτό.

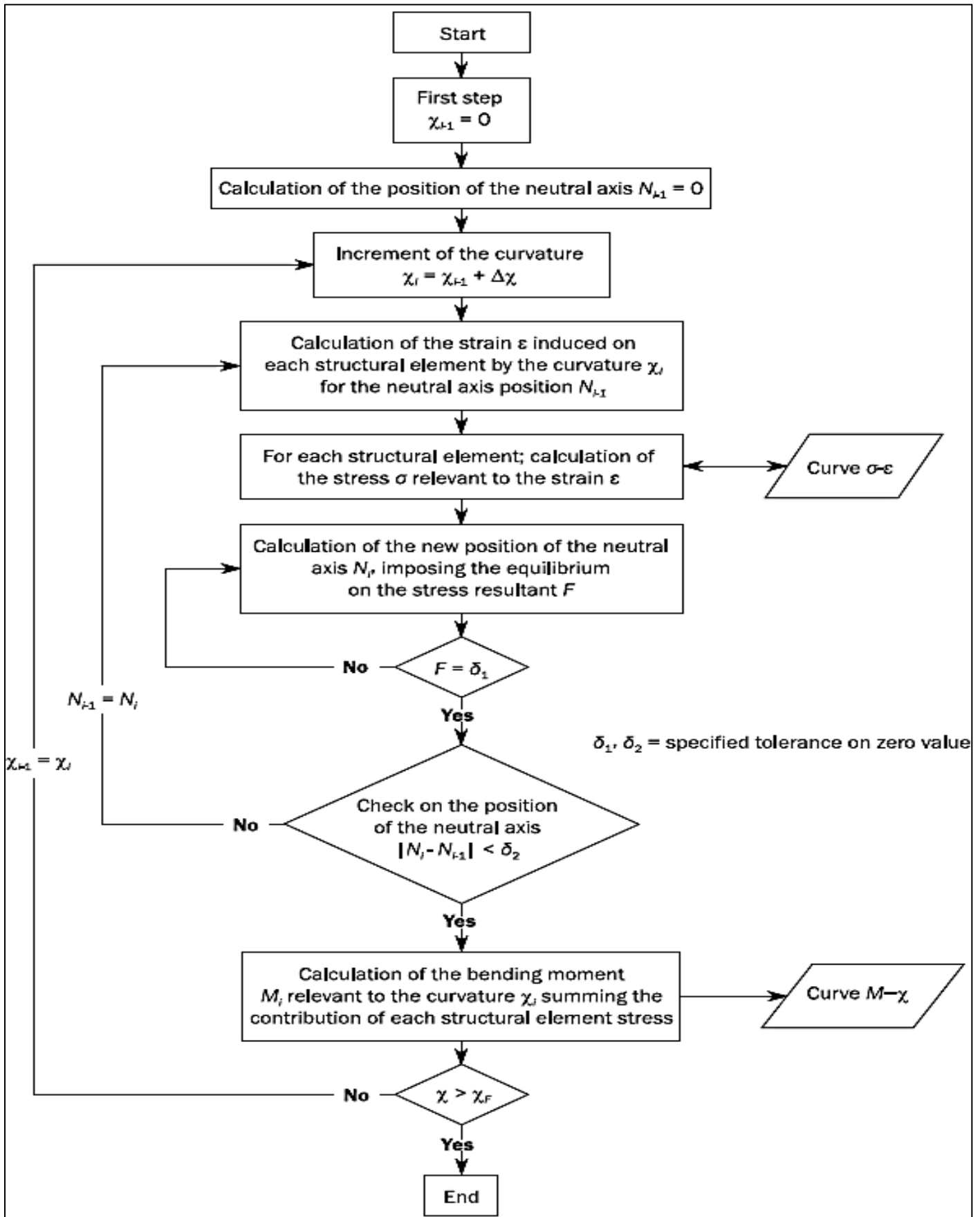
Βήμα 6 : Υπολογίζεται η συνολική καμπτική ροπή στη διατομή που προκύπτει από την συνεισφορά όλων των στοιχείων της:

$$M_U = \sum \sigma_{U_i} A_i \left(Z_i - Z_{NA_cur} \right)$$

Βήμα 7 : Τέλος γίνεται σύγκριση της τιμής της καμπτικής ροπής του τρέχοντος βήματος με του προηγούμενου. Εάν η στοιχειώδης κλίση έχει τιμή μικρότερη από μία αρνητική σταθερά, τότε η διαδικασία τερματίζεται αφού έχει προσδιοριστεί η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει η διατομή. Διαφορετικά η τιμή της επιβαλλόμενης καμπυλότητας αυξάνεται στοιχειωδώς και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το **βήμα 4** και ύστερα.

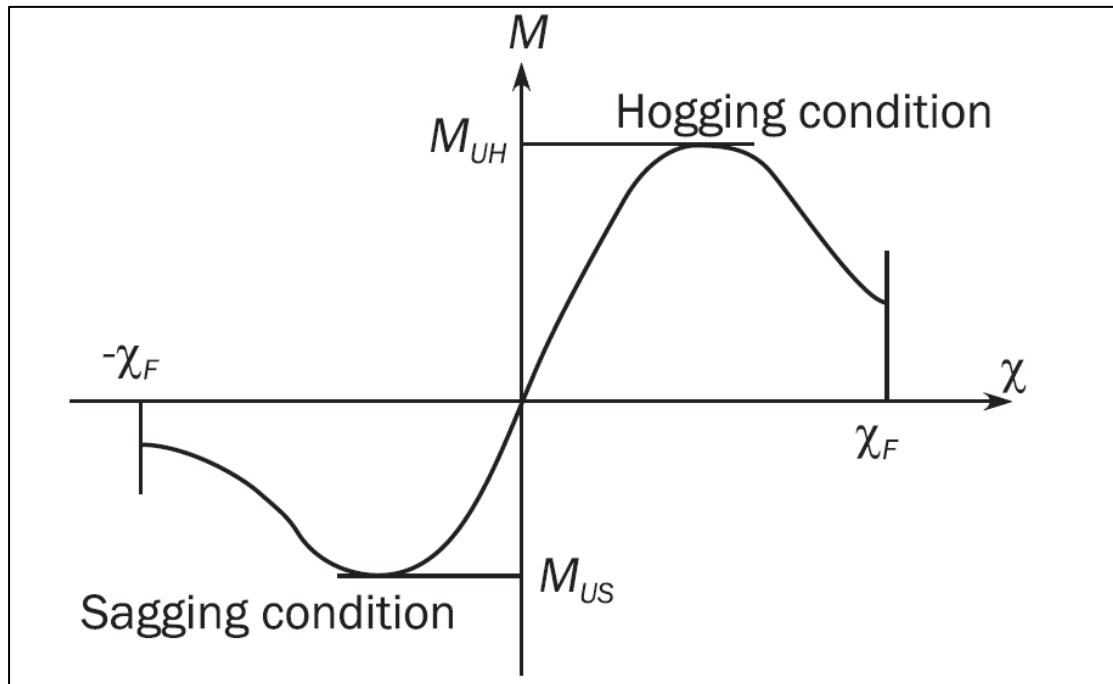
Η επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος του Smith είναι σύντομη στην εφαρμογή της και μπορεί εκτιμήσει ικανοποιητικά την μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η διατομή. Επίσης δεν απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Με την χρήση των μειωτικών φόρτισης περιγράφονται αρκετοί μηχανισμοί κατάρρευσης της συνολικής διατομής, όμως δεν υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθεί ο τρόπος αστοχίας του κάθε δομικού της στοιχείου ξεχωριστά. Επίσης σύμφωνα με τις απλοποιήσεις που κάνουμε στα πλαίσια της απλής θεωρίας κάμψης Euler-Bernoulli, αμελούνται τα αξονικά, διατμητικά και στρεπτικά φορτία που ασκούνται, επομένως η μέθοδος υπερεκτιμά την μέγιστη αντοχή του πλοίου λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις καμπτικές φορτίσεις.

Η σχηματική απεικόνιση όλης της μεθόδου και της επαναληπτικής διαδικασίας φαίνεται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Μέθοδος του Smith

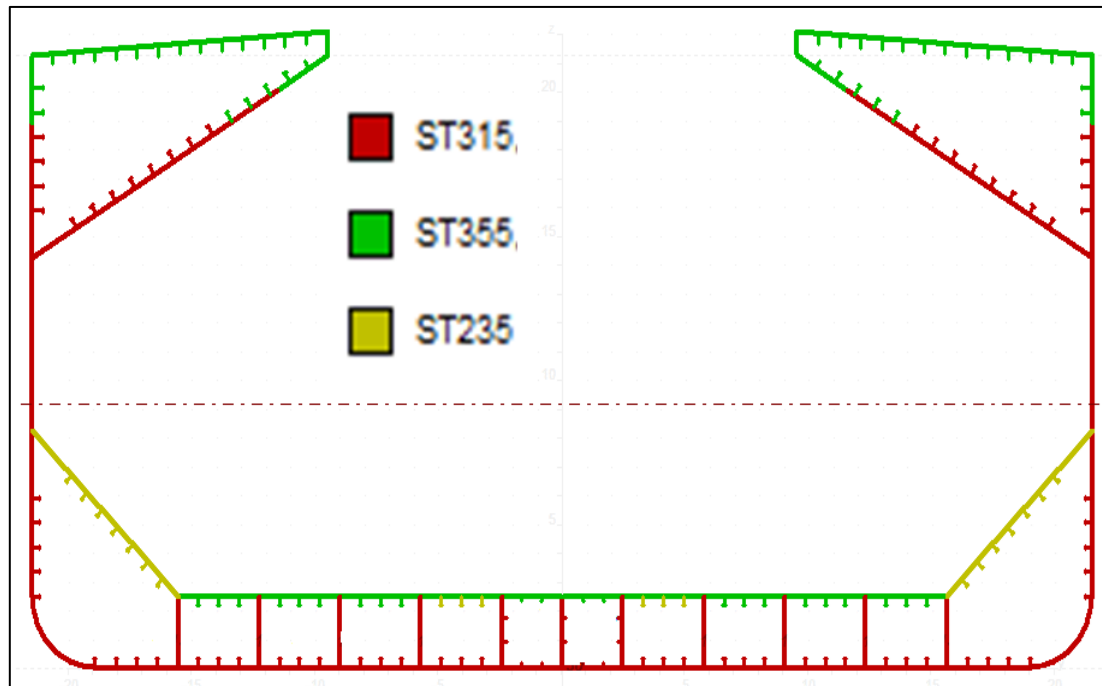
Το διάγραμμα καμπυλότητας-καμπτικής ροπής παράγεται μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων της διαδικασίας για της διάφορες τιμές της καμπυλότητας. Η τελική μορφή του παρουσιάζεται στην εικόνα 3.5. Τα μεγέθη M_{UH} και M_{US} είναι αντίστοιχα οι ροπές κατάρρευσης σε φαινόμενα hogging και sagging.



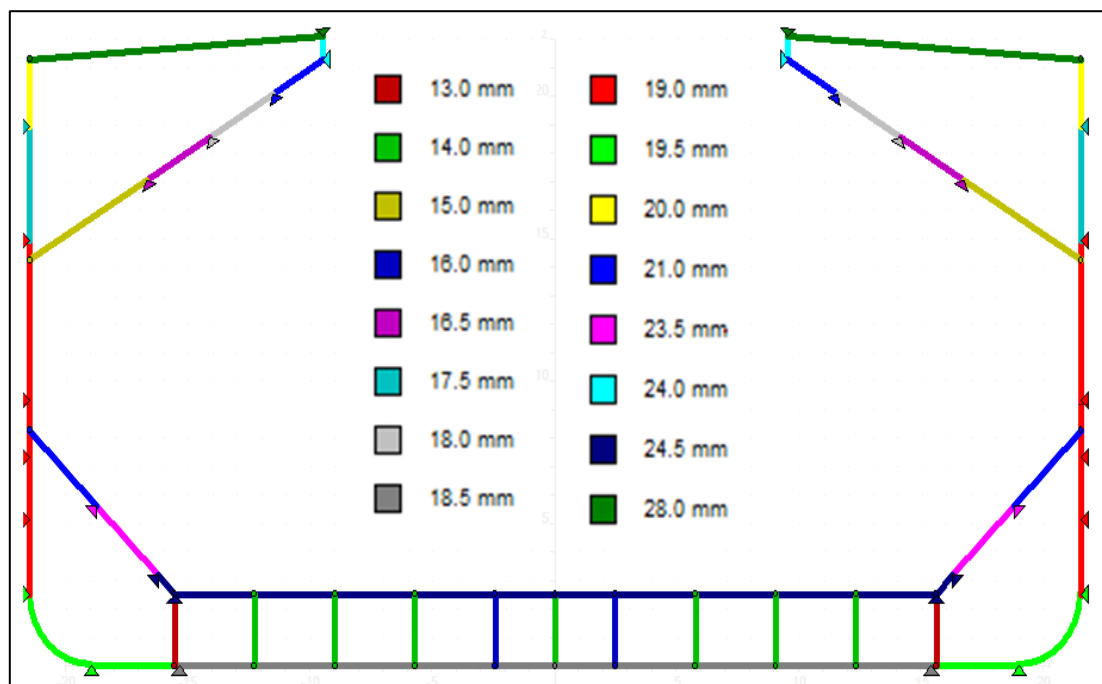
Εικόνα 3.5: Τυπικό διάγραμμα καμπυλότητας-καμπτικής ροπής

3.3 Λεπτομέρειες σχεδίασης στο Mars2000

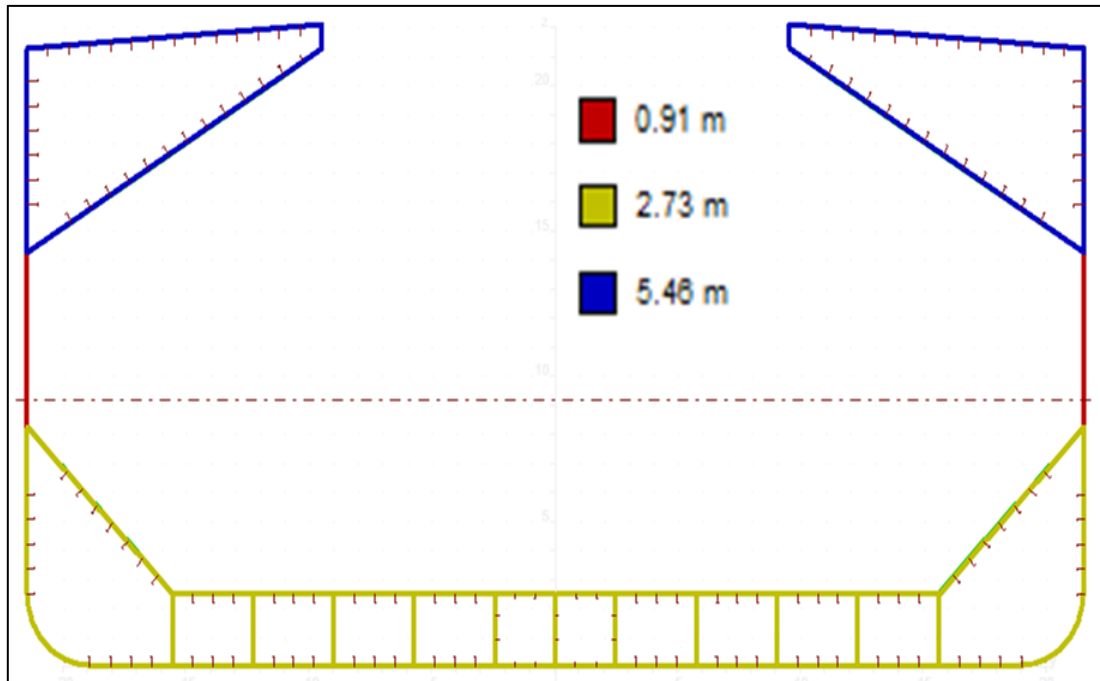
Σε αυτή την σύντομη ενότητα παρουσιάζονται εικόνες με τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες της μέσης τομής που σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις πληροφορίες του σχεδίου που περιέχει το Παράρτημα Δ.



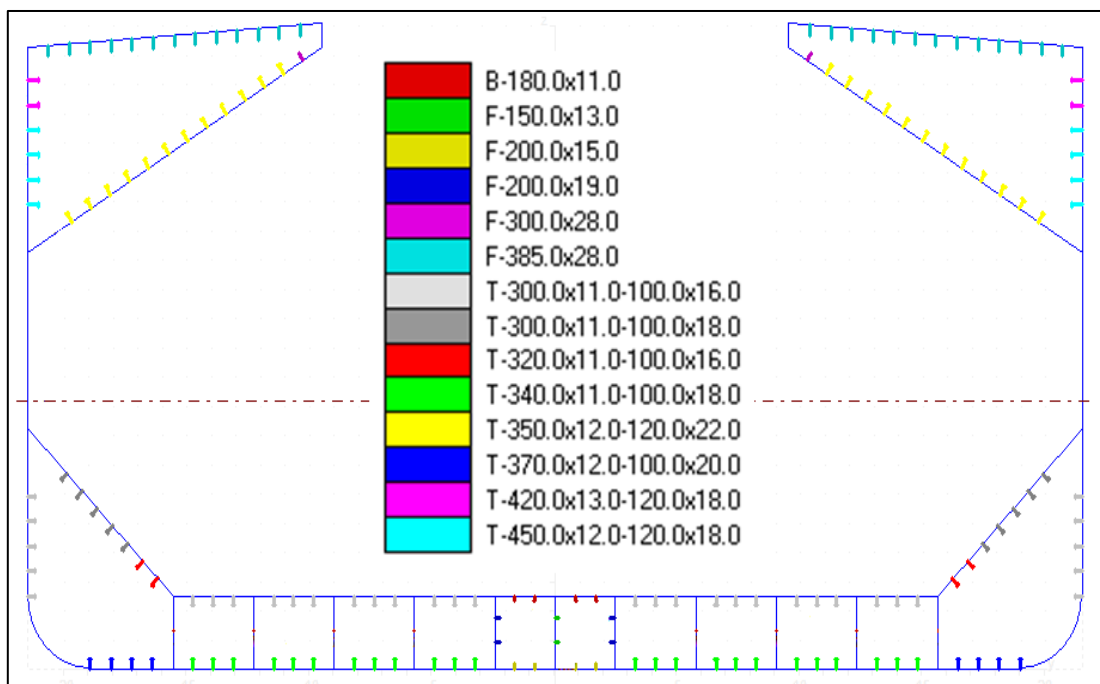
Εικόνα 3.6: Περιοχές κατασκευαστικών υλικών μέσης τομής



Εικόνα 3.7: Πάχη ελασμάτων της μέσης τομής



Εικόνα 3.8: Διαφορά ισαπόστασης εγκάρσιων ενισχύσεων για τις τρεις περιοχές της μέσης τομής



Εικόνα 3.9: Διαστασιολόγηση διαμήκων ενισχυτικών της μέσης τομής

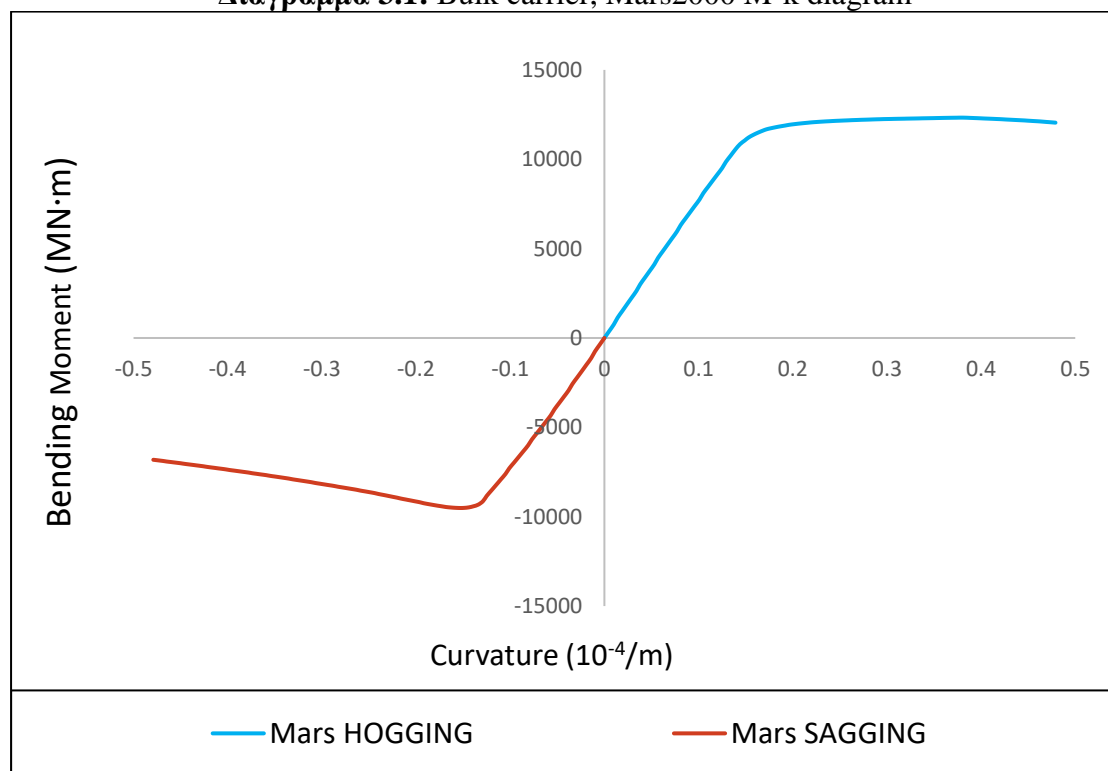
	Hogging	Sagging	
Design S.W.B.M. (still water bending moment)	5 341 264.	- 5 546 276.	(kNm)
Design vertical wave bending moment (Rule)	4 024 376.	- 4 237 424.	(kNm)
Design horizontal wave bending moment (Rule)	2 369 184.		(kNm)
Ultimate Bending Capacity (kN.m)			
Mu		Gross area of cross-section	5.29975 m ²
		Effective area of cross-section	5.29975 m ²
Hogging	12 330 210.	Moment of inertia / GY axis	403.5599 m ⁴
Sagging	- 9 511 652.	Moment of inertia / GZ axis	1229.6870 m ⁴
		Neutral axis (above base line)	9.209 m
		Section modulus at deck (Wp)	33.3777 m ³
		Section modulus at bottom (Wf)	43.8209 m ³

Εικόνα 3.10: Μέγιστες καμπτικές ροπές σε sagging, hogging, ροπές αδράνειας και ροπές αντίστασης του bulk carrier

3.4 Αποτελέσματα σχεδίασης. Υπολογισμός $M_{ultimate}$ - Mars2000

Με εφαρμογή της επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου σχεδιάστηκε στο λογισμικό το διάγραμμα 3.1 στο οποίο περιγράφεται η συμπεριφορά του bulk carrier για τις διάφορες τιμές καμπυλότητας. Σε απόλυτες τιμές το μέγιστο καμπτικό φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο φορέας πριν την κατάρρευση εμφανίζεται σε φαινόμενο sagging. Η μικρότερη αντοχή σε αυτή τη περίπτωση οφείλεται σε συνδυασμό φαινομένων διαρροής υλικού, στις διάφορες περιοχές της μέσης τομής, όσο και φαινομένων λυγισμού που εμφανίζονται κατά την θλιπτική φόρτιση του καταστρώματος.

Διάγραμμα 3.1: Bulk carrier, Mars2000 M-k diagram



Κεφάλαιο 4. Αναφορά σε βασικές έννοιες αστοχίας των κατασκευών

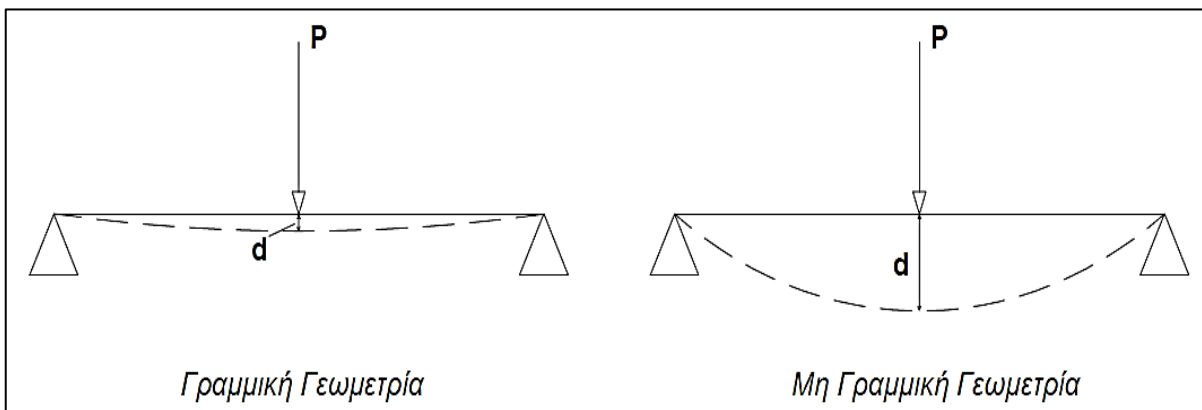
4.1 Μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής

Βασικός στόχος κατά τη σχεδίαση του πλοίου είναι να προσδιοριστούν οι ελάχιστες δυνατές διαστάσεις των δομικών του στοιχείων για τις οποίες έχουμε την επιθυμητή αντοχή. Με αυτό τον τρόπο ελαχιστοποιείται το κόστος κατασκευής αλλά πλέον έχουμε μικρότερους συντελεστές ασφαλείας. Η βέλτιστη χρήση υλικού πολύ συχνά οδηγεί στη δημιουργία μίας πιο εύκαμπτης κατασκευής, τόσο σε συνολικό επίπεδο όσο σε τοπικό επίπεδο διατομών των στοιχείων. Η μείωση της ακαμψίας ευνοεί την ανάπτυξη μεγαλύτερων παραμορφώσεων κατά την επιβολή φορτίων. Έτσι η τελική γεωμετρία μπορεί να διαφέρει σημαντικά από την αρχική, οι εξισώσεις ισορροπίας δεν μπορούν να γραφούν κοινές με την απαραμόρφωτη κατάσταση και απαιτείται η εφαρμογή ειδικών μεθόδων ανάλυσης για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά της παραμορφωμένης κατασκευής. Τέλος μπορεί να εμφανιστούν διαφορετικές μορφές αστοχίας σε σχέση με αυτές που εμφανίζονται στην γραμμική ανάλυση, οι οποίες καλούνται με τον γενικό όρο «αστάθεια» ή «λυγισμός».

Στα πλαίσια της εργασίας οι μορφές μη γραμμικής γεωμετρίας που μπορούν να εμφανιστούν κατά τη μη γραμμική ανάλυση στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι [23] :

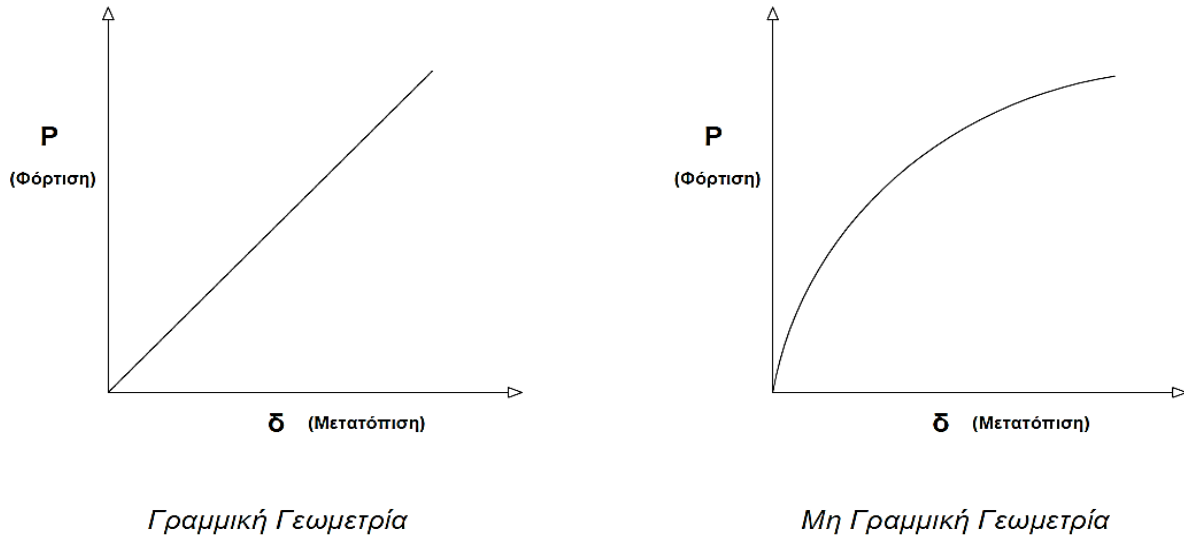
A. Μεγάλες μετατοπίσεις, περιστροφές στους κόμβους των στοιχείων της κατασκευής.

Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζεται η σύγκριση στη συμπεριφορά μίας αμφιέριστης δοκού σε περίπτωση γραμμικής και μη γραμμικής γεωμετρίας. Η δοκός φέρει συγκεντρωμένη εξωτερική φόρτιση P στο μέσο της, ενώ κάτω από αυτή φαίνεται η αναπτυσσόμενη μετατόπιση d σε κάθε περίπτωση.



Εικόνα 4.1: Σύγκριση Αναπτυσσόμενης Μετατόπισης

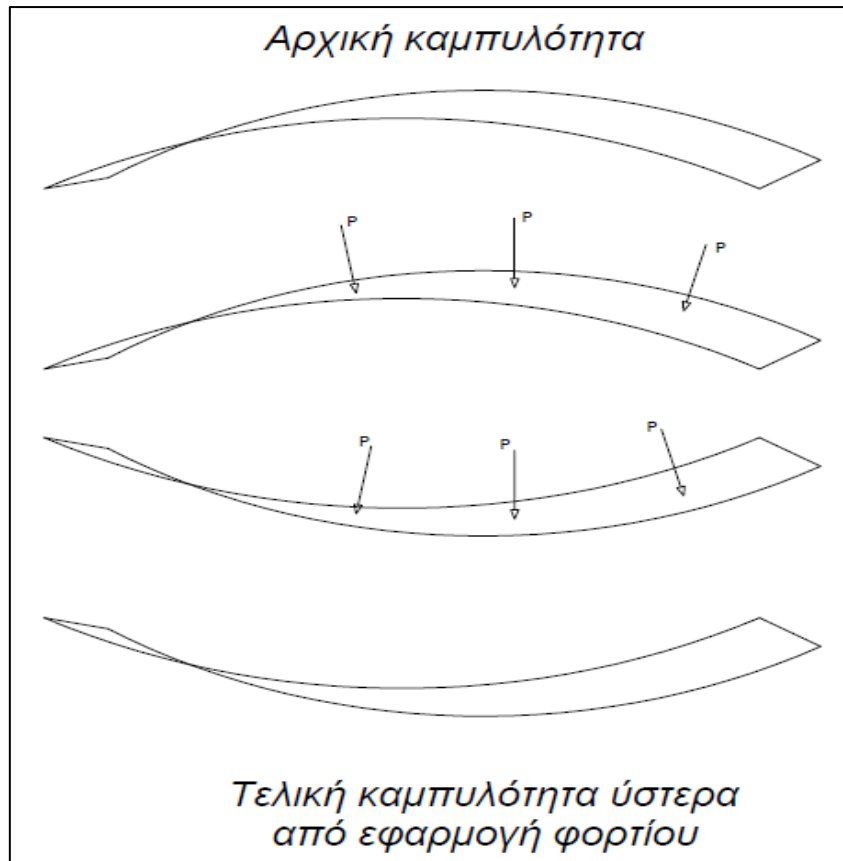
Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται για τις δύο περιπτώσεις η σχέση P- δ . Είναι ξεκάθαρο ότι για μεγάλες μεταβολές δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες μετατοπίσεις περιστροφές δεν είναι γραμμικώς ανάλογες της επιβαλλόμενης φόρτισης.



Εικόνα 4.2: Διαγράμματα Φόρτισης-Μετατόπισης

B. Αλλαγή στην κλίση επιφανειών που καταπονούνται.

Η επιφάνεια στην οποία ασκείται η φόρτιση λυγίζει απότομα με αποτέλεσμα να αποκτήσει αντίθετη καμπυλότητα. Το φαινόμενο, όπως φαίνεται στο έλασμα της εικόνας 4.3, καλείται «ακαριαίος» λυγισμός (snap-through buckling) και είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο λόγω της δυναμικής του φύσης. Αν και η γεωμετρία μεταβάλλεται έντονα, η συμπεριφορά του υλικού μετά από το φαινόμενο μπορεί να συνεχίσει να είναι ελαστική.

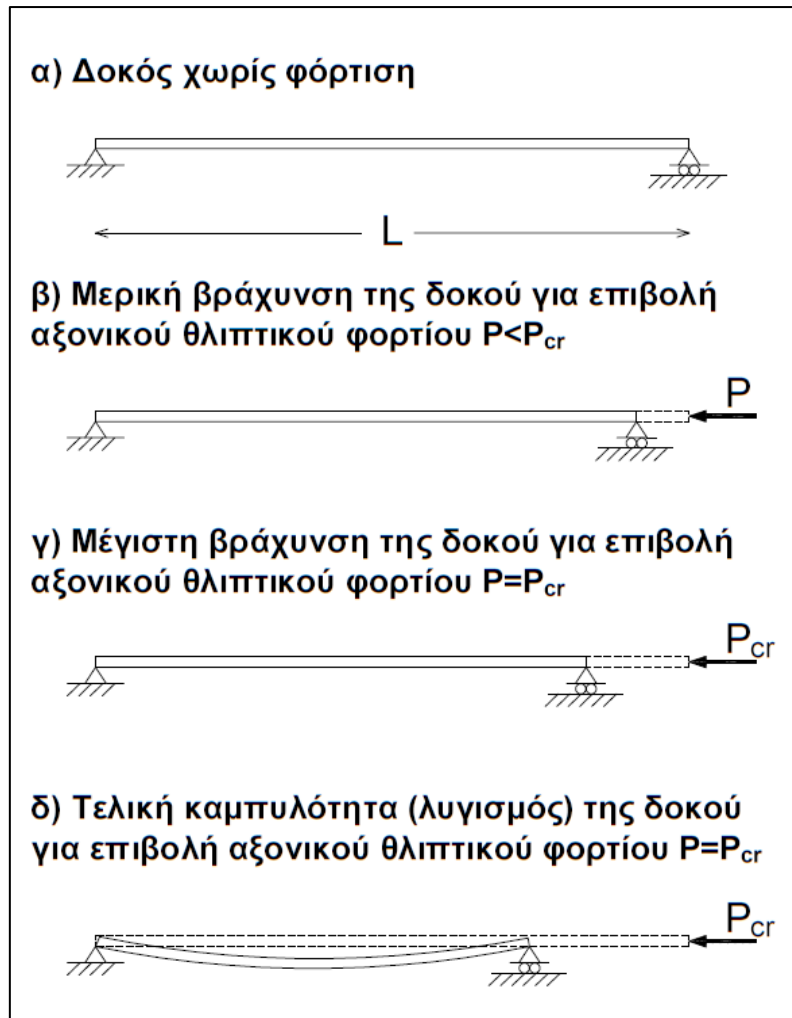


Εικόνα 4.3: Ακαριαίος Λυγισμός

Ακολουθεί μία εκτενέστερη αναφορά στο φαινόμενο και τα είδη λυγισμού.

4.2 Ελαστικός Λυγισμός - Θεωρία Euler

Το φαινόμενο του λυγισμού εμφανίζεται σε μία κατασκευή μόνο σε περιπτώσεις επιβολής θλιπτικού φορτίου σε αυτή ή στα επιμέρους στοιχεία της. Γενικά για μικρές τιμές κεντρικών θλιπτικών αξονικών φορτίσεων που αναπτύσσονται σε μακρόστενους φορείς (όπως τα διαμήκη ενισχυτικά της γάστρας του πλοίου), αυτοί παρουσιάζουν μείωση του μήκους τους χωρίς ιδιαίτερη μεταβολή στην γεωμετρία τους. Η βράχυνση μεταβάλλεται γραμμικά με την μεταβολή της φόρτισης μέχρι αυτή να φτάσει ένα συγκεκριμένο όριο. Η τιμή αυτή καλείται κρίσιμο φορτίο λυγισμού (ή φορτίο Euler) και για περαιτέρω αύξηση της φόρτισης εμφανίζονται μεγάλες αξονικές και εγκάρσιες παραμορφώσεις στην κατασκευή. Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η απαραμόρφωτη κατάσταση αξονικά θλιβόμενης δοκού και στη συνέχεια τα δύο είδη παραμορφώσεων που δέχεται σε περίπτωση που η τιμή της φόρτισης P ξεπεράσει το κρίσιμο φορτίο λυγισμού P_{cr} [23] :



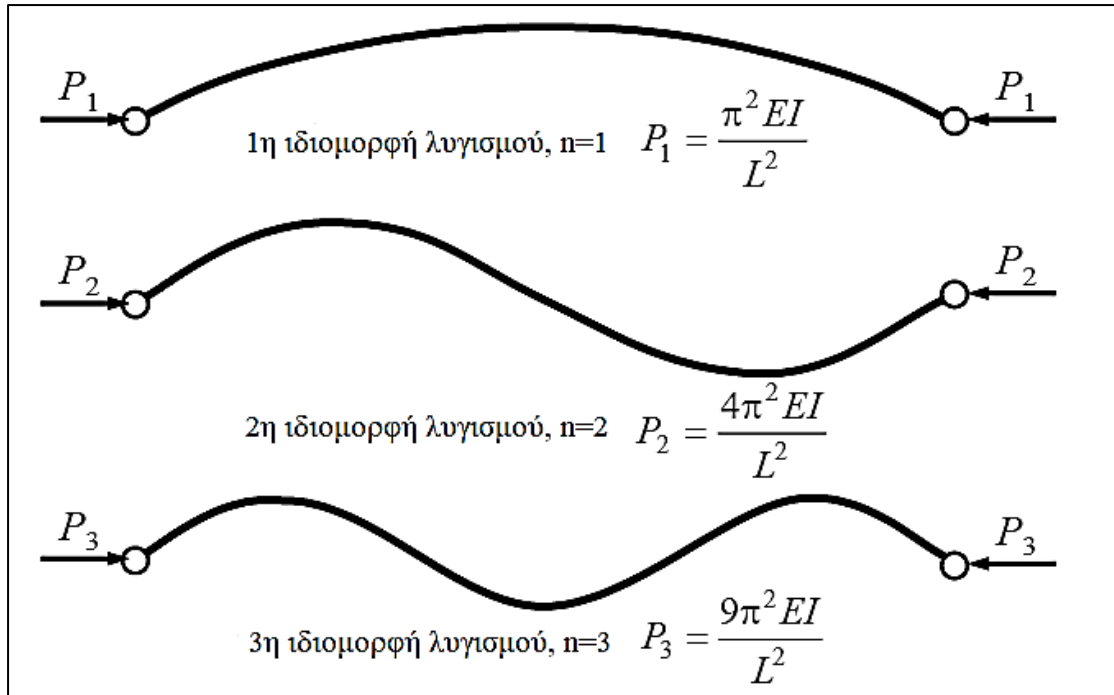
Εικόνα 4.4: Πρισματικός φορέας - καταπόνηση με αξονικό θλιπτικό φορτίο

Εάν γίνει επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας, του καταστατικού νόμου του υλικού και του συμβιβαστού παραμορφώσεων για την παραμορφωμένη κατάσταση του φορέα του παραπάνω σχήματος, μπορεί να γραφεί η μαθηματική διατύπωση για το κρίσιμο φορτίο λυγισμού [23] :

$$P_{cr,n} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (\text{Εξ. 1})$$

Όπου:

- $n = 1, 2, 3$, ακέραιες τιμές για τις οποίες προκύπτουν οι τρεις πρώτες ιδιομορφές λυγισμού (εικόνα 4.5),
- E το μέτρο ελαστικότητας της δοκού,
- I η ροπή αδράνειας της διατομής,
- L το μήκος του φορέα.



Εικόνα 4.5: Ιδιομορφές λυγισμού σε αξονικά θλιβόμενη δοκό

Για έναν φορέα που στηρίζεται μόνο στα άκρα του, κρίσιμο θεωρείται το φορτίο που αντιστοιχεί στην πρώτη ιδιομορφή λυγισμού, καθώς είναι το ελάχιστο που απαιτείται για εμφάνιση αστοχίας. Σε αυτή την περίπτωση οι υπόλοιπες ιδιομορφές αποτελούν θεωρητικές μαθηματικές επιλύσεις, δηλαδή ο φορέας αστοχεί πριν αυτές εμφανιστούν. Πολύ συχνά όμως προκειμένου να αυξηθεί η αντοχή έναντι λυγισμού, ο φορέας μπορεί να ενισχυθεί στο μήκος του κατά το εγκάρσιο επίπεδο του με σκοπό να περιοριστούν οι μετατοπίσεις σε αυτή την διεύθυνση. Έτσι μπορεί να παραληφθεί μεγαλύτερο θλιπτικό φορτίο ενώ πλέον δύναται να εμφανιστούν απευθείας σε αυτόν ιδιομορφές μεγαλύτερης τάξης για τις οποίες αστοχεί. Επομένως σε μία κατασκευή όπως η γάστρα του πλοίου, που φέρει πλήθος διαμήκων και εγκάρσιων ενισχύσεων, έχει μεγάλη σημασία να γίνεται μελέτη και πρόβλεψη και των ιδιομορφών μεγαλύτερης τάξης.

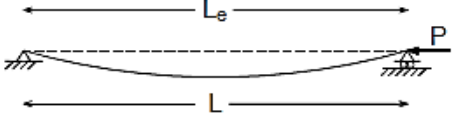
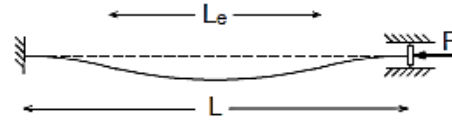
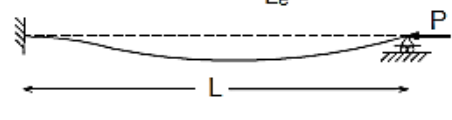
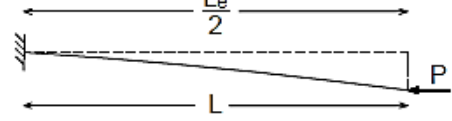
Ο αριθμός n είναι άμεσα συνδεδεμένος με την καμπυλότητα που αποκτά ο φορέας. Η καμπυλότητα κ εμφανίζεται στην εξίσωση ισορροπίας της δοκού συναρτήσει του βέλους κάμψης w , η οποία γράφεται απλοποιημένη με την θεώρηση ότι ακριβώς πριν την εμφάνιση του λυγισμού, οι γεωμετρικές μεταβολές είναι μικρές:

$$w'' + k^2 w = 0 \quad (\text{Εξ. 2})$$

με $k^2 = P/EI$ να είναι μια αδιάστατη διατύπωση του φορτίου. Η εξίσωση ισορροπίας έχει λύση της μορφής:

$$w = A \sin(kx) + B \cos(kx) \quad (\text{Εξ. 3})$$

Όπου τα A,B είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις οριακές συνθήκες στο $x=0$ και $x=L$ της δοκού. Επομένως ανάλογα με το είδος στήριξης στα άκρα της δοκού μεταβάλλεται η τιμή του κρίσιμου φορτίου. Ακολουθεί συγκεντρωτικός πίνακας των περιπτώσεων στήριξης αξονικά θλιβόμενης ράβδου και το $P_{cr,1}$, δηλαδή το κρίσιμο φορτίο λυγισμού για εμφάνιση της πρώτης ιδιομορφής, που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση [23] :

Οριακές Συνθήκες		Ισοδύναμο μήκος λυγισμού $L_{effective}$
Αμφιαρθρωτή δοκός		$L_e = L$
Αμφίπακτη δοκός		$L_e = 0.5L$
Πάκτωση σε ένα μόνο άκρο		$L_e = 0.707L$
Πρόβολος δοκός		$L_e = 2L$

Εικόνα 4.6: Επίδραση οριακών συνθηκών στο μήκος της δοκού που λυγίζει ($L_{effective}$)

4.3 Επίδραση του ελαστικού και ανελαστικού λυγισμού στην αντοχή πρισματικών φορέων

Η εμφάνιση λυγισμού σε στοιχεία της κατασκευής που καταπονούνται με θλιπτικά φορτία μπορεί να προκαλέσει πρόωρη αστοχία λόγω υλικού με εμφανιζόμενες τάσεις πολύ μικρότερες του ορίου διαρροής των στοιχείων. Για να γίνει εκτίμηση της επίδρασης του λυγισμού πρέπει η τάση που τον προκαλεί σ_{cr} να συγκριθεί με την τάση διαρροής του υλικού. Από την εξίσωση 1, για το κρίσιμο φορτίο Euler ($n=1$), διαιρώνοντας τα δύο μέλη με το εμβαδό A της εγκάρσιας διατομής της δοκού προκύπτει:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \pi^2 \frac{EI/A}{L^2} \Rightarrow \sigma_{cr} = \pi^2 \cdot E \frac{r^2}{L^2} \quad (\text{Εξ. 4})$$

Όπου $r = \sqrt{I/A}$ η ακτίνα αδράνειας της δοκού. Ορίζεται η ποσότητα $\lambda = L/r$ που καλείται λυγηρότητα της δοκού. Με περαιτέρω επίλυση της εξίσωσης 4 προκύπτει η τελική σχέση κρίσιμης τάσης λυγισμού-λυγηρότητας:

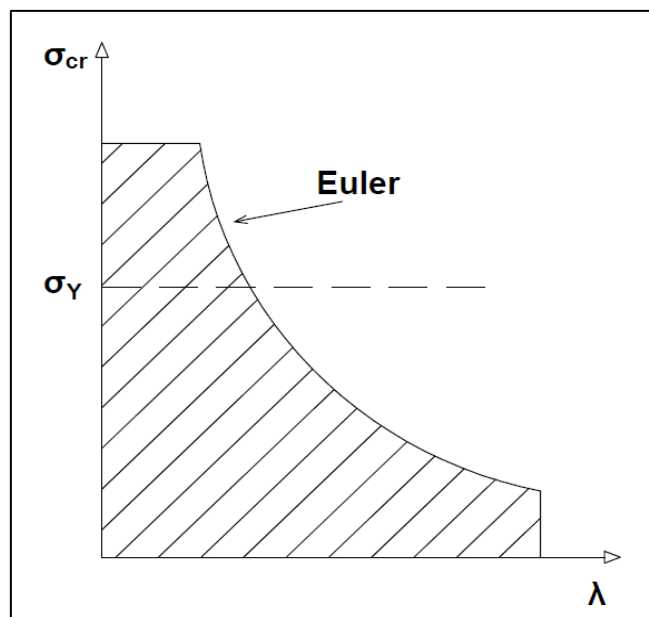
$$\sigma_{cr} = \pi^2 \frac{E}{(L/r)^2} \Rightarrow \sigma_{cr} = \pi^2 \frac{E}{(\lambda)^2} \quad (\text{Εξ. 5})$$

Στα πλαίσια της θεωρίας του ελαστικού λυγισμού τέλειων φορέων κατά Euler προβλέπεται:

- Η ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Επομένως οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι ανάλογες των παραμορφώσεων της κατασκευής.
- Η απουσία αρχικών ατελειών. Δηλαδή η ύπαρξη ενός απόλυτα ευθύγραμμου φορέα, χωρίς ελαττωματική γεωμετρία και παραμένουσες τάσεις.

Η σχέση κρίσιμης τάσης λυγισμού-λυγηρότητας για αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στη γραφική παράσταση της εικόνας 4.7 και καλείται καμπύλη Euler.

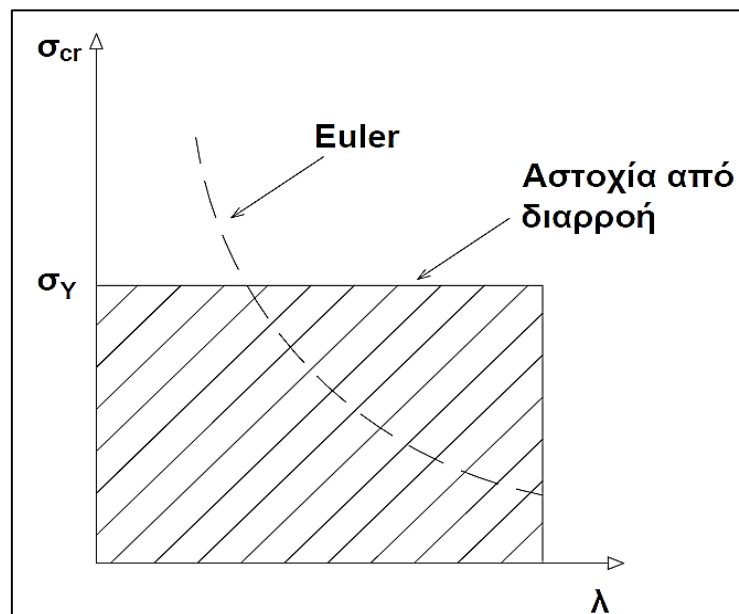
Με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται το όριο διαρροής του υλικού σ_Y ως απλή αναφορά σε περίπτωση που το υλικό είχε ελαστοπλαστικές ιδιότητες. Στη περιοχή κάτω από την καμπύλη η κατασκευή δεν κινδυνεύει από φαινόμενα λυγισμού [23].



Εικόνα 4.7: Επίδραση λυγισμού στην αστοχία της κατασκευής

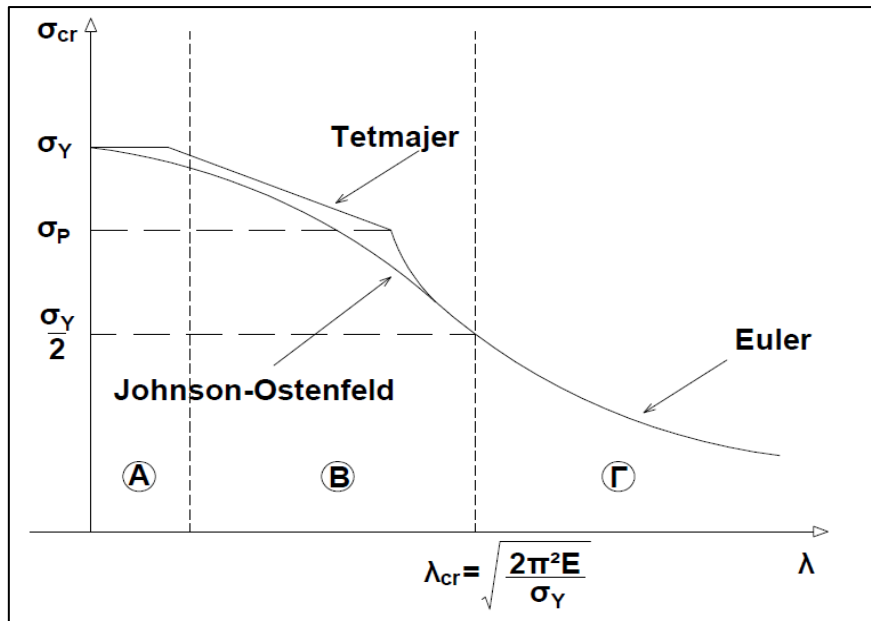
Η πραγματική συμπεριφορά ατελών πρισματικών φορέων απέχει από την θεωρία Euler:

- α) Για ελαστοπλαστική συμπεριφορά υλικού. Ακολουθεί η εικόνα 4.8 στην οποία φαίνεται η απλοποιημένη (για τέλεια πλαστική συμπεριφορά υλικού) σχέση κρίσιμης τάσης διαρροής υλικού-λυγηρότητας, με το υλικό του φορέα να βρίσκεται στην πλαστική περιοχή. Η κατασκευή για φορτίσεις που βρίσκονται κάτω από την καμπύλη αντέχει έναντι διαρροής υλικού [23] .



Εικόνα 4.8: Επίδραση διαρροής υλικού στην αστοχία της κατασκευής

- β) Για τιμές λυγηρότητας μικρότερες από μία κρίσιμη τιμή λ_{cr} . Οι φορείς με χαμηλή λυγηρότητα χαρακτηρίζονται ως βραχύκορμοι και η συμπεριφορά τους περιγράφεται από άλλες μαθηματικές σχέσεις (καμπύλες Tetmajer, Johnson-Ostenfeld). Στην εικόνα 4.9 φαίνονται οι καμπύλες που περιγράφουν καλύτερα την απόκριση του φορέα σε λυγισμό για τις διάφορες τιμές λυγηρότητας [23] .



Εικόνα 4.9: Συνδυαστική επίδραση λυγισμού και διαρροής υλικού στην αστοχία της κατασκευής για διαφορετικές τιμές λυγηρότητας

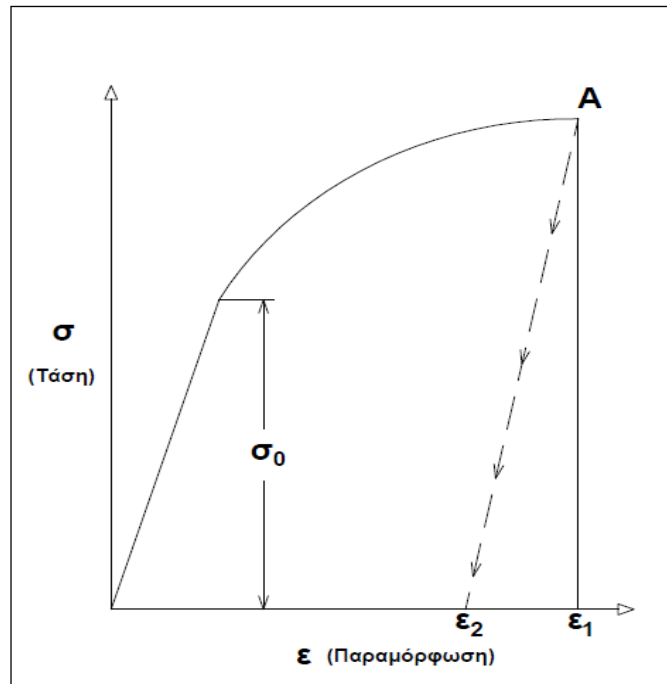
Τελικά προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λυγηρότητα επηρεάζει δραστικά την αντοχή της κατασκευής έναντι λυγισμού. Για μεγάλες τιμές λυγηρότητας, δηλαδή μεγάλη αναλογία μήκους του φορέα σχετικά με τις διαστάσεις της διατομής του, η αστοχία θα προέλθει από μεγάλη παραμόρφωση της γεωμετρίας που μειώνει ιδιαίτερα την τιμή της κρίσιμης τάσης αστοχίας. Ποιοτικά το διάγραμμα χωρίζεται σε τρεις περιοχές:

- Περιοχή Α : Χαμηλές τιμές λυγηρότητας, αφορά βραχύκορμους φορείς και η αστοχία καθορίζεται από το όριο διαρροής του υλικού – Ανελαστικός λυγισμός.
- Περιοχή Β : Ενδιάμεσες τιμές λυγηρότητας, αφορά φορείς μεσαίου μεγέθους και η μέγιστη τάση αποκλίνει τόσο από την τάση διαρροής σ_Y του υλικού όσο από την κρίσιμη τάση κατά Euler σ_{cr} .
- Περιοχή Γ : Μεγάλες τιμές λυγηρότητας, αφορά υψίκορμους φορείς και η μέγιστη τάση προβλέπεται από την θεωρία Euler – Ελαστικός λυγισμός.

4.4 Καμπύλη διαρροής του υλικού – Όλκιμα μέταλλα

Η καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης ενός υλικού προκύπτει από υποβολή ειδικά διαμορφωμένου δοκιμίου, κατασκευασμένο από το επιθυμητό υλικό, σε πείραμα μονοαξονικού εφελκυσμού. Η καμπύλη που προκύπτει καλείται και **καμπύλη διαρροής** του υλικού και παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά του υλικού στην ελαστική και πλαστική περιοχή.

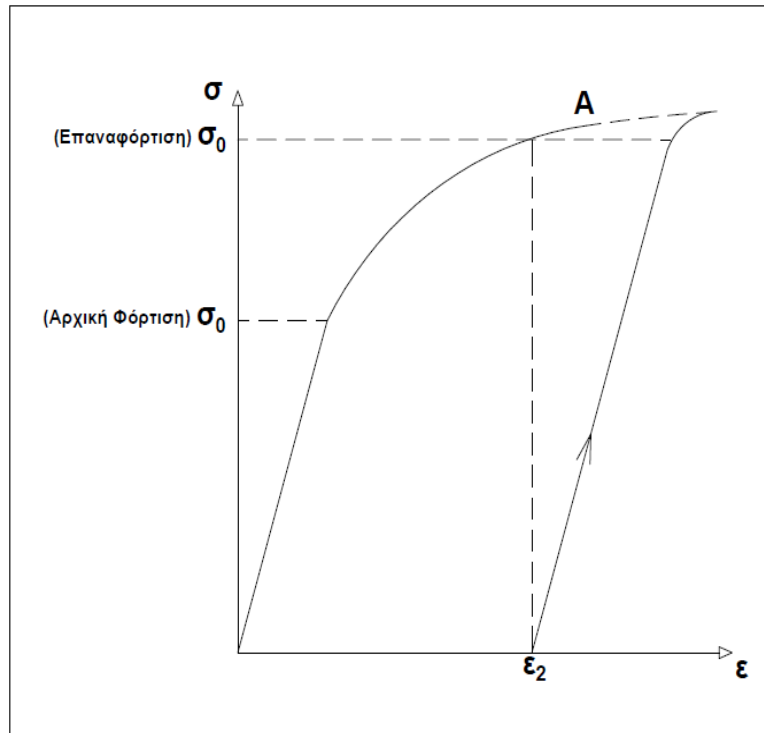
Η μορφή της καμπύλης διαρροής ενός τυπικού όλκιμου μετάλλου παρουσιάζεται στην εικόνα 4.10. Η γραμμική σχέση που συνδέει την τάση με την παραμόρφωση (νόμος του Hooke), ισχύει μέχρι την τιμή της τάσης διαρροής σ_0 [23].



Εικόνα 4.10: Καμπύλη Διαρροής

Σε περίπτωση παραμόρφωσης του δοκιμίου έως το σημείο A, ύστερα από αφαίρεση του επιβαλλόμενου φορτίου, η παραμόρφωση του δοκιμίου μειούται από την τιμή ϵ_1 στην τιμή ϵ_2 . Η ποσότητα $\epsilon_1 - \epsilon_2$ καλείται ελαστική ανάκτηση του υλικού και είναι το ελαστικό μέρος της συνολικής παραμόρφωσης του δοκιμίου, το οποίο μηδενίζεται κατά την διακοπή της φόρτισης.

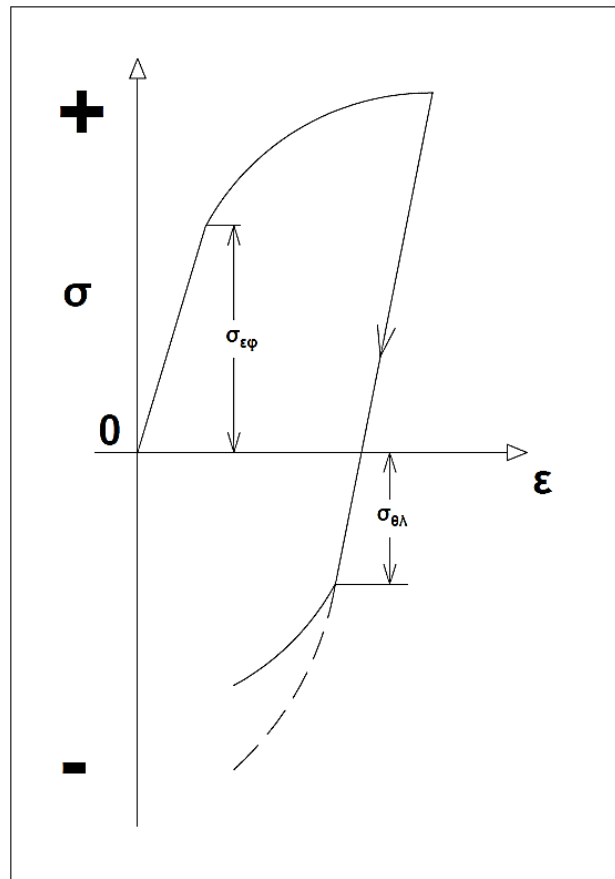
Εάν το φαινόμενο της φόρτισης του υλικού επαναληφθεί, τότε η καμπύλη διαρροής του υλικού μετασχηματίζεται σε αυτήν της εικόνας 4.11. Ύστερα από σύγκριση των καμπυλών της αρχικής και της τελικής φόρτισης είναι εμφανές ότι στην ελαστική περιοχή οι δύο καμπύλες έχουν την ίδια κλίση. Αυτό είναι αναμενόμενο δεδομένου ότι οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού, εξαρτώνται μόνο από την εσωτερική δομή των ατόμων του και όχι από την φόρτιση που του έχει επιβληθεί [23].



Εικόνα 4.11: Επαναφόρτιση δοκιμίου – Νέα Καμπύλη Διαρροής

Κατά την επαναφόρτιση του υλικού αυτό διαρρέει σε μία νέα τιμή τάσης σ_0 . Μάλιστα αυτή η τιμή αντιστοιχεί στην παραμόρφωση ϵ_2 της εικόνας 4.11, δηλαδή λόγω της μόνιμης πλαστικής παραμόρφωσης που δημιουργήθηκε με την αρχική φόρτιση του δοκιμίου. Πρακτικά με την επανάληψη εφαρμογής φορτίου στο δοκίμιο, το νέο όριο διαρροής που προκύπτει είναι το άθροισμα του αρχικού συν την αύξηση που προκαλεί το φαινόμενο της εργοσκλήρυνσης. Η εσκεμμένη πλαστική παραμόρφωση όλκιμων μετάλλων συνηθίζεται ώστε να επιτυγχάνονται καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.

Αν και στα πλαίσια της θεωρίας της πλαστικότητας θεωρείται αμελητέα, ένα φαινόμενο με πρακτικά σημαντική επίδραση στα όλκιμα μεταλλικά υλικά, είναι αυτό του Bauschinger. Στην εικόνα 4.12 ένα δοκίμιο αρχικά εφελκύεται πέραν του ορίου διαρροής του, στη συνέχεια αποφορτίζεται και ύστερα θλίβεται. Λόγω το φαινομένου Bauschinger κατά την θλίψη του δοκιμίου παρατηρείται μειωμένο όριο διαρροής συγκριτικά με το αρχικό. Ωστόσο γίνεται η παραδοχή ότι η αντοχή σε εφέλκυσμό και θλίψη δεν μεταβάλλεται κατά την αλληλουχία φορτίσεων που προκαλούν πλαστική διαρροή [23].

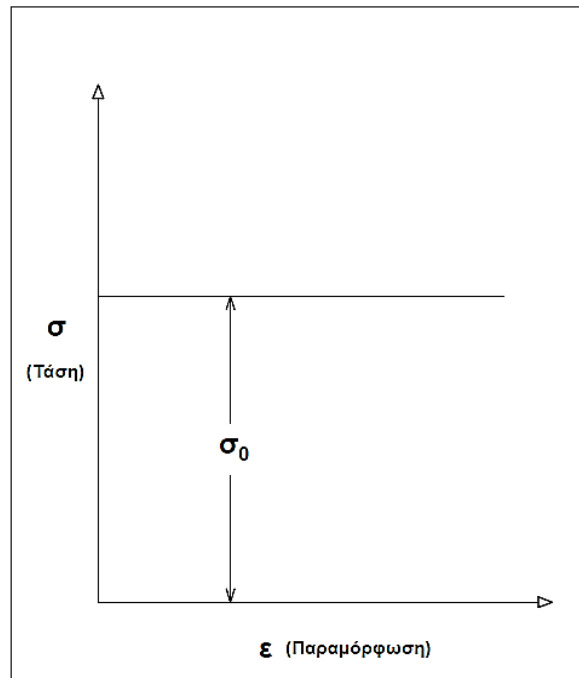


Εικόνα 4.12: Φαινόμενο Bauschinger

4.5 Προσεγγίσεις της καμπύλης διαρροής του υλικού

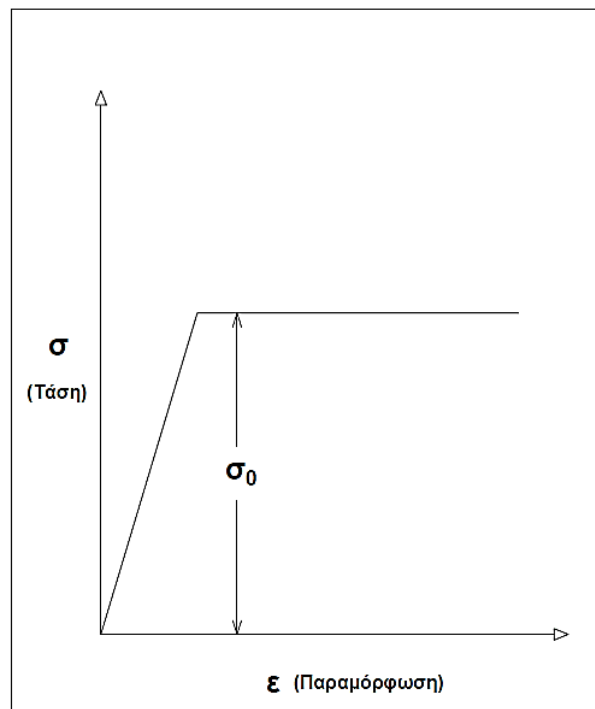
Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου της πλαστικής διαρροής του υλικού, σε πρακτικές εφαρμογές συνηθίζεται να εφαρμόζονται πιο απλές προσεγγίσεις της πραγματικής καμπύλης διαρροής. Ακολουθεί αναφορά στις τρεις βασικές απλοποιήσεις για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα πλαίσια της μοντελοποίησης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων.

Η πρώτη από αυτές αφορά **ανελαστικό – τέλεια πλαστικό υλικό**. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.13, δεν εμφανίζεται καθόλου η ελαστική περιοχή της καμπύλης διαρροής, επειδή το υλικό δεν μπορεί να παραμορφωθεί ελαστικά ($E=\infty$). Όταν η τιμή της τάσης γίνει ίση με σ_0 , ξεκινά η πλαστική παραμόρφωση του υλικού χωρίς να εμφανίζεται εργοσκλήρυνση. Επομένως η πλαστική διαρροή διαδίδεται υπό σταθερή τάση σ_0 και στο διάγραμμα η πλαστική περιοχή είναι μια οριζόντια γραμμή με τιμή $\sigma=\sigma_0$ [4] :



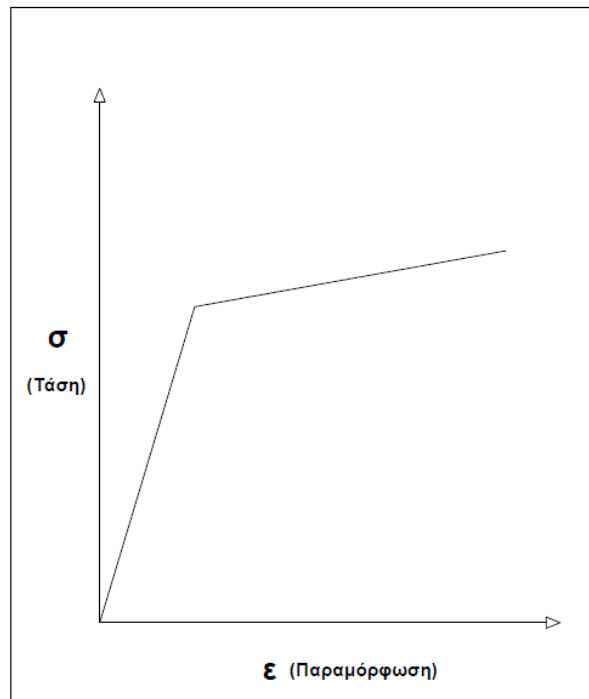
Εικόνα 4.13: Ανελαστικό-Τέλεια Πλαστικό Υλικό

Η δεύτερη αφορά **γραμμικά ελαστικό – τέλεια πλαστικό υλικό**. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.14, σε αυτή την περίπτωση το υλικό έχει ένα όριο τάσης σ_0 κάτω από το οποίο επιδέχεται ελαστική παραμόρφωση. Όμοια με την προηγούμενη περίπτωση η συμπεριφορά του υλικού στην πλαστική περιοχή είναι ίδια, δηλαδή παραμορφώνεται χωρίς να εργοσκληρύνεται [23] .



Εικόνα 4.14: Γραμμικά ελαστικό-Τέλεια Πλαστικό Υλικό

Η τρίτη αφορά **γραμμικά ελαστικό – πλαστικό υλικό**. Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.15, σε αυτή την περίπτωση το υλικό επιδέχεται ελαστική παραμόρφωση για τάση μικρότερη από σ_0 και εργοσκληρύνεται γραμμικά κατά την διάρκεια της πλαστικής διαρροής. Επομένως η σχέση τάσης – παραμόρφωσης είναι γραμμική και στην πλαστική περιοχή. Ενώ αυτή η περίπτωση περιγράφεται με πιο περίπλοκες μαθηματικές σχέσεις συγκριτικά με τις προηγούμενες περιπτώσεις, προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική καμπύλη διαρροής του υλικού ενός όλκιμου μετάλλου [23]



Εικόνα 4.15: Γραμμικά ελαστικό-Πλαστικό Υλικό

4.6 Κριτήρια Διαρροής για όλκιμα υλικά σε επίπεδη εντατική κατάσταση

Συνήθως οι κατασκευές που αποτελούνται από όλκιμα υλικά σχεδιάζονται με τρόπο τέτοιο ώστε το υλικό να μην διαρρέει, στις αναμενόμενες συνθήκες φόρτισης. Σε περιπτώσεις μονοαξονικής καταπόνησης, η τιμή της ορθής τάσης σ_x που προκαλεί τη διαρροή στο υλικό μπορεί να προσδιοριστεί από ένα πείραμα εφελκυσμού σε ένα δοκίμιο με το ίδιο υλικό, μιας και τόσο η κατασκευή όσο και το δοκίμιο, βρίσκονται στην ίδια εντατική κατάσταση.

Όταν έχουμε πολυαξονική εντατική κατάσταση για τη πρόβλεψη της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης πριν τη διαρροή σ_y , πρέπει αρχικά να χρησιμοποιήσουμε κάποιο

κριτήριο διαρροής, με το οποίο στη συνέχεια θα μπορέσουμε να συσχετίσουμε τις επιδράσεις που έχουν η πραγματική πολυαξονική εντατική κατάσταση με την πειραματική μοναξονική καταπόνηση, στο υλικό.

Τα κριτήρια διαρροής είναι ιδιαίτερα σημαντικά στη θεωρία της πλαστικότητας. Χρησιμοποιώντας εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις προσδιορίζεται μία ισοδύναμη τάση της οποίας η τιμή εξαρτάται από τις κύριες τάσεις που εμφανίζονται στην εκάστοτε εντατική κατάσταση. Κατόπιν η ισοδύναμη τάση συγκρίνεται με το γνωστό, μέσω πειραμάτων εφελκυσμού, όριο διαρροής του υλικού και με αυτό τον τρόπο γίνεται έλεγχος εάν θα υπάρξει πλαστική διαρροή. Δύο σπουδαία κριτήρια αποτελούν αυτό της **μέγιστης διατμητικής τάσης – Tresca** (maximum shear-stress criterion) και αυτό της **μέγιστης ενέργειας διατμητικής παραμόρφωσης – Von Mises** (distortion-energy criterion), μιας και προβλέπουν αποτελεσματικά την πλαστική διαρροή όλκιμων υλικών σε σύνθετες εντατικές καταστάσεις. Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των δύο κριτηρίων.

4.6.1 Κριτήριο Von Mises

Για την εφαρμογή του κριτηρίου διαρροής Von Mises, για συγκεκριμένο υλικό, προσδιορίζεται η τροπική ενέργεια στρέβλωσης η οποία προκαλεί μεταβολές στο σχήμα του. Σύμφωνα με αυτό δεν έχουμε πλαστική διαρροή του υλικού, όσο η τροπική ενέργεια στρέβλωσης ανά μονάδα όγκου στο υλικό έχει τιμή μικρότερη από την τιμή της τροπικής ενέργειας στρέβλωσης που προκαλεί διαρροή σε ένα δοκίμιο ίδιο υλικού σε πείραμα εφελκυσμού. Με χρήση των κύριων τάσεων το κριτήριο διατυπώνεται με την *εξίσωση 1*:

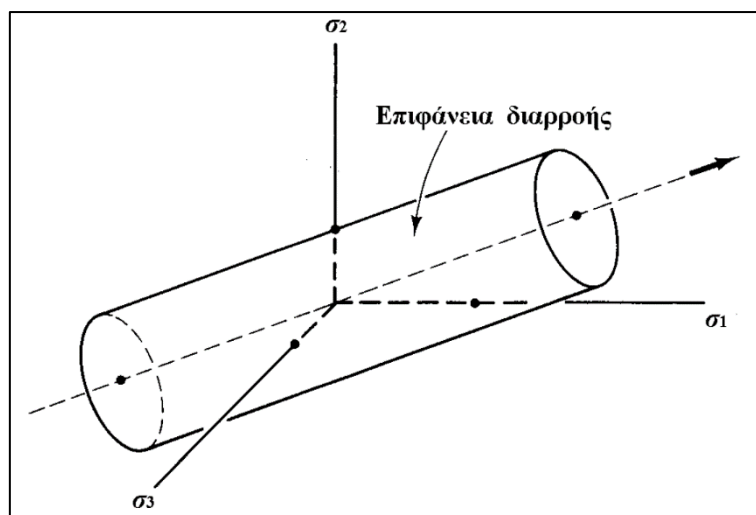
$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (\text{Εξ. 1})$$

1)

Με χρήση των καρτεσιανών συνιστωσών πρέπει να ισχύει η *εξίσωση 2*. Η μορφή αυτή συναντάται πιο συχνά εφόσον για την εφαρμογή του κριτηρίου δεν απαιτείται υπολογισμός των κύριων τάσεων:

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}{2}} \quad (\text{Εξ. 2})$$

Ενώ η γεωμετρική αναπαράστασή του στον χώρο συναρτήσκει των κύριων τάσεων είναι [23] :



Εικόνα 4.16: Κριτήριο διαρροής Von Mises

Σύμφωνα με την εξίσωση 1 και 2 γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η πλαστική διαρροή δεν εξαρτάται μεμονωμένα από κάποια ορθή ή διατμητική τάση. Χρησιμοποιείται ευρήματα για την μελέτη της πλαστικής συμπεριφοράς μεταλλικών, όλκιμων υλικών καθώς το όριο διαρροής αυτών των υλικών, είναι ανεξάρτητο της υδροστατικής συνιστώσας του τανυστή τάσης.

Η εφαρμογή του όμως έχει και περιορισμούς καθώς δε μπορεί να συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς η διαφορά αντοχής του εκάστοτε υλικού σε εφελκυσμό και θλίψη, μία ιδιότητα που χαρακτηρίζει όλα τα υλικά.

4.6.2 Κριτήριο Tresca

Για την εφαρμογή του κριτηρίου διαρροής Tresca, για συγκεκριμένο υλικό, προσδιορίζεται η μέγιστη διατμητική τάση που εμφανίζεται σε αυτό. Σύμφωνα με το κριτήριο δεν έχουμε πλαστική διαρροή του υλικού, όσο η τιμή της διατμητικής τάσης σε αυτό δεν ξεπερνά την μέγιστη διατμητική τάση σ_A που αναπτύσσεται σε δοκίμιο ίδιου υλικού, τη στιγμή που εμφανίζεται πλαστική διαρροή σε πείραμα εφελκυσμού. Η μέγιστη διατμητική τάση, στην τρισδιάστατη εντατική κατάσταση, ισούται με:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{Εξ. 3})$$

όπου $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$ η αλγεβρικά μέγιστη και ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα.

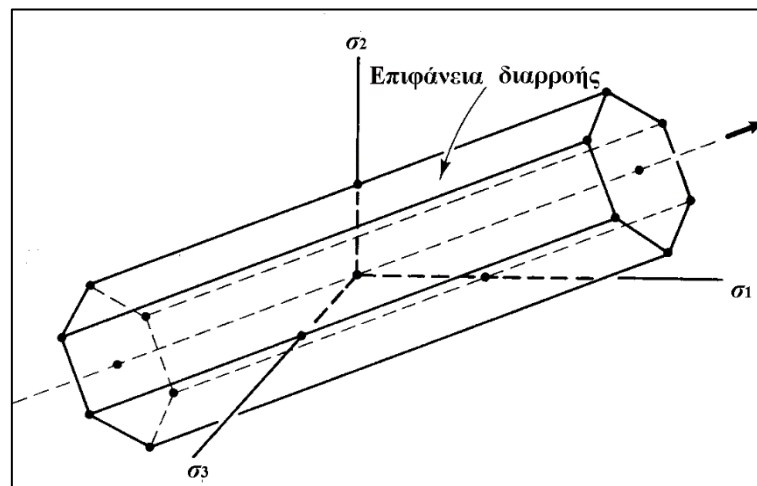
Στην μοναξονική καταπόνηση του δοκιμίου σε πείραμα εφελκυσμού, όταν αρχίζει η διαρροή ισχύει $\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, όπου σ_0 είναι το όριο διαρροής του υλικού σε εφελκυσμό. Σύμφωνα με την εξίσωση 3 κατά την έναρξη της διαρροής, η μέγιστη διατμητική τάση είναι:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = \frac{\sigma_0 - 0}{2} = \frac{\sigma_0}{2} = \tau_0 \quad (\text{Εξ. 4})$$

Επομένως σε μία σύνθετη εντατική κατάσταση, η πλαστική διαρροή θα ξεκινήσει όταν θα είναι:

$$\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = \sigma_0 \quad (\text{Εξ. 5})$$

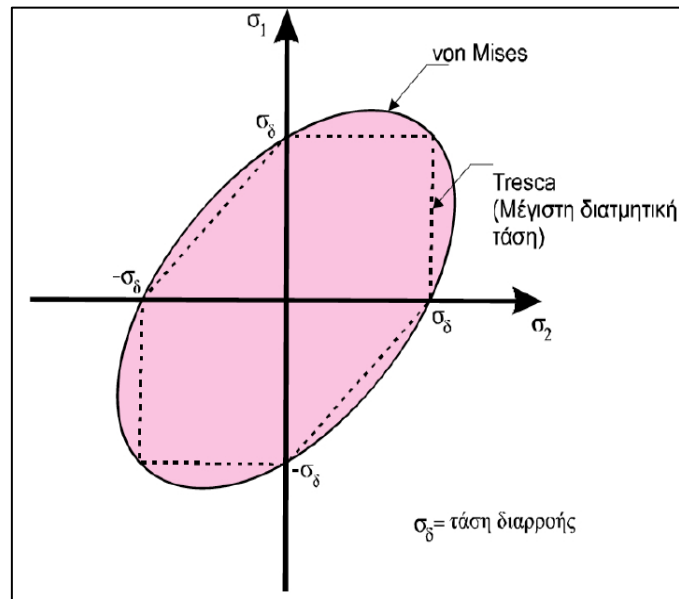
Ενώ το κριτήριο είναι απλό στην εφαρμογή του, έχει ένα βασικό μειονέκτημα. Όπως φαίνεται στην *εξίσωση 5*, δεν λαμβάνεται υπόψη η τάση της οποίας το αλγεβρικό μέτρο βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές των $\sigma_{\max}, \sigma_{\min}$. Η γεωμετρική αναπαράστασή του στον χώρο συναρτήσει των κύριων τάσεων είναι [23] :



Εικόνα 4.17: Κριτήριο διαρροής Tresca

4.6.3 Σύγκριση των κριτηρίων διαρροής υλικού

Παρουσιάζεται στην εικόνα 4.18 σχηματική σύγκριση των δύο κριτηρίων στην περίπτωση που η τρίτη κύρια τάση είναι μηδενική $\sigma_3=0$. Επισημαίνεται ότι η έλλειψη (κριτήριο **Von Mises**) διέρχεται από τις κορυφές του εξάγωνου (κριτήριο **Tresca**). Η χρωματιστή περιοχή είναι η ελαστική και δεν έχουμε πλαστικές παραμορφώσεις εντός των ορίων της. Στην γενική περίπτωση το κριτήριο Tresca είναι πιο συντηρητικό σε σχέση με το κριτήριο του Von Mises [23].



Εικόνα 4.18: Σύγκριση των κριτηρίων διαρροής Von Mises, Tresca στο επίπεδο

Κεφάλαιο 5. Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων – Abaqus

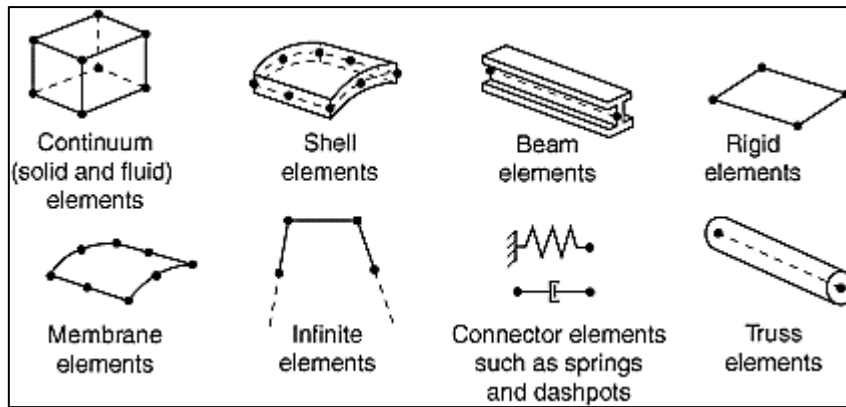
Για τον προσδιορισμό της μέγιστης αντοχής της γάστρας του πλοίου με την εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, οι κανονισμοί CSR ενσωματώνουν τα κριτήρια που πρέπει να πληρούν τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για αυτή την ανάλυση (*Part 1, Ch. 5, Appendix 2, 3.1.1, CSR-H 2018*) [17]. Επομένως η ορθή σχεδίαση ενός υπολογιστικού μοντέλου πρέπει να λαμβάνει υπόψη :

- Τη μη γραμμική γεωμετρική συμπεριφορά.
- Τη μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού.
- Γεωμετρικές ατέλειες και παραμένουσες τάσεις στο εσωτερικό της κατασκευής.
- Την πολυαξονική καταπόνηση των στοιχείων.
- Τις οριακές συνθήκες.
- Την επίδραση του φαινομένου του λυγισμού και την εναπομένουσα αντοχή της κατασκευής.
- Την αλληλεπίδραση των επιμέρους στοιχείων της διατομής.
- Την εναπομένουσα αντοχή ύστερα από μόνιμη παραμόρφωση, αστοχία των τοπικών ενισχυτικών σε χώρους όπως το διπύθμενο της δεξαμενής.

5.1 Ανάλυση στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων

Με χρήση του εμπορικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν δύο κατασκευές. Η πρώτη αντιπροσωπεύει τη πραγματική μέση τομή του Bulk carrier που μελετάμε, ενώ η δεύτερη κατασκευή, Reckling No. 23, φέρει μικρότερες διαστάσεις και πιο απλή γεωμετρία. Σε όλες τις περιπτώσεις έγινε Abaqus/Standard analysis, η οποία προσφέρει αποτελέσματα μεγάλης ακρίβειας σε προβλήματα στατικών φορτίσεων. Υπήρξαν περιπτώσεις που ήταν αδύνατο να επιβληθεί όλο το φορτίο στην κατασκευή, άρα και να προσδιοριστεί η μέγιστη καμπτική ροπή που αντέχει ο φορέας (αδυναμία σύγκλισης της λύσης). Σε αυτές έγινε τροποποίηση στις ρυθμίσεις του step module (ενεργοποίηση του automatic stabilization) με σκοπό να ολοκληρωθεί η επίλυση. Αν και με αυτές τις ρυθμίσεις υπερεκτιμάται η αντοχή του φορέα, σε κάθε περίπτωση έγινε έλεγχος για το αν είναι αποδεκτή η απόκλιση των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων.

Το πρόγραμμα προσφέρει διάφορες οικογένειες στοιχείων που φέρουν μηχανικές ιδιότητες όπως [19] :

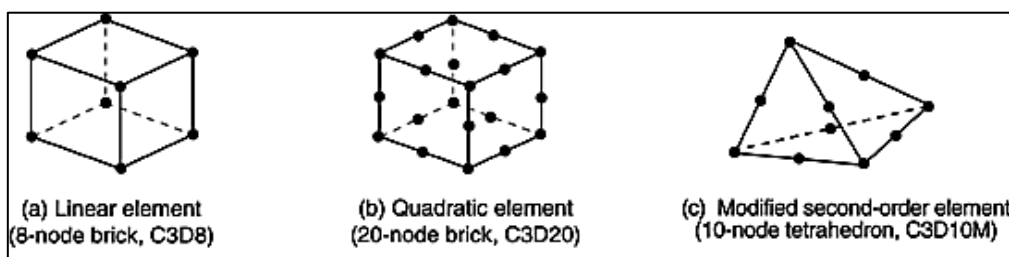


Εικόνα 5.1: Οικογένειες στοιχείων μοντελοποίησης.

Οι υπολογισμοί του προγράμματος γίνονται στα γραμμοσκιασμένα σημεία της εικόνας (nodes).

Σε ένα πρόβλημα όπως αυτής της εργασίας, μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε τις μετατοπίσεις και στροφές σε κάθε σημείο της κατασκευής προκειμένου να υπολογίσουμε στη συνέχεια τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε κάθε περιοχή. Το λογισμικό υπολογίζει αρχικά τις παραμορφώσεις σε κάθε κόμβο του στοιχείου και παρεμβάλλει τις τιμές των παραμορφώσεων για όλα τα στοιχεία που βρίσκονται ανάμεσα στους κόμβους. Η τάξη της παρεμβολής εξαρτάται από το πλήθος των κόμβων του κάθε στοιχείου, για παράδειγμα:

- α) Σε στοιχεία με κόμβους μόνο στα άκρα τους, όπως ο 8-κόμβος κύβος του σχήματος (α), χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή σε όλες τις διευθύνσεις.
- β) Σε στοιχεία που φέρουν και ενδιάμεσους κόμβους, όπως ο 20-κόμβος κύβος του σχήματος (β), χρησιμοποιείται πολυώνυμο παρεμβολής 2^{nd} τάξης.
- γ) Ενώ σε στοιχεία με τροποποιημένες γεωμετρίες που φέρουν ενδιάμεσους κόμβους, όπως το 10-κόμβο τετράεδρο του σχήματος (γ), χρησιμοποιείται τροποποιημένο πολυώνυμο παρεμβολής 2^{nd} τάξης.



Εικόνα 5.2: Είδη στοιχείων μοντελοποίησης.

Οι υπολογισμοί του προγράμματος γίνονται στα γραμμοσκιασμένα σημεία της εικόνας (nodes).

5.2 Επιλογή είδους πεπερασμένων στοιχείων

Σύμφωνα με την ανάλυση που προηγήθηκε, για τη μοντελοποίηση στο λογισμικό Abaqus, κρίνονται κατάλληλα δύο είδη: στοιχεία κελύφους και στοιχεία δοκού. Ακολουθεί αναφορά των ιδιοτήτων τους. Επίσης, δεδομένου ότι το πρόγραμμα προσφέρει μεγάλη ποικιλία είδους στοιχείων που βρίσκονται στην ίδια οικογένεια, γίνεται συγκεκριμένη αναφορά σε αυτά που χρησιμοποιήθηκαν. Στην ανάλυση που ακολουθεί σε αυτό το κεφάλαιο οποιαδήποτε γενική αναφορά σε στοιχεία κελύφους ή στοιχεία δοκού θα εννοεί τα είδη που παρουσιάζονται παρακάτω. Επειδή χρησιμοποιήθηκαν 2 τύποι στοιχείων κελύφους, αυτό θα διευκρινίζεται σε κάθε περίπτωση [19].

- i. **Στοιχεία – Κελύφη (Shell elements).** Χρησιμοποιήθηκαν συμβατικά στοιχεία κελύφη για τη μοντελοποίηση των ελασμάτων της κατασκευής καθώς σε αυτά τα μέρη η τιμή του πάχους είναι σημαντικά μικρότερη από τις υπόλοιπες διαστάσεις. Για της αποτύπωση της τρισδιάστατης επιφάνειας μέσα στο λογισμικό σχεδιάζεται μία δισδιάστατη επιφάνεια στην οποία, μέσω της ανάθεσης διατομής σε αυτή, προσδίδεται η ιδιότητα του πάχους. Στο επίπεδο διακριτοποίησης των στοιχείων κελυφών χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι στοιχείων:

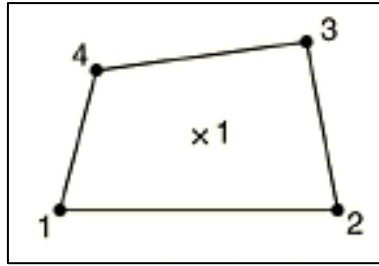
- a) **Στοιχεία S4R (Reduced Integration),**

χαρακτηρίζονται ως στοιχεία γενικής χρήσης από το λογισμικό καθώς σε αυτά εφαρμόζεται αυτόματα η θεωρία των παχέων πλακών όταν η διάσταση του πάχους είναι της τάξεως $1/15$ ή μεγαλύτερη συγκριτικά με τη διάσταση του μήκους του κελύφους, ενώ σε περίπτωση που η αναλογία διαστάσεων είναι μικρότερη χρησιμοποιείται η θεωρία του Kirchhoff για λεπτά ελάσματα.

Με τον όρο reduced integration δηλώνεται ότι σε αυτά τα στοιχεία πραγματοποιείται ολοκλήρωση χαμηλότερης τάξης για να υπολογιστεί η ακαμψία τους. Αν και δεν είναι τα πιο κατάλληλα στοιχεία για μη γραμμικές αναλύσεις, κατά τις οποίες εμφανίζονται μεγάλες παραμορφώσεις, η χρήση τους προσφέρει ένα ικανοποιητικό επίπεδο ακρίβειας της λύσης και παράλληλα μειωμένο χρόνο επίλυσης ειδικά σε τρισδιάστατα προβλήματα.

Το στοιχείο φέρει 4 κόμβους στα άκρα του, όπου ο καθένας από αυτούς έχει 6 βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές. Οι παραμορφώσεις υπολογίζονται μόνο στους κόμβους του στοιχείου και στη συνέχεια γίνεται γραμμική παρεμβολή για των υπολογισμό των ίδιων μεγεθών στα ενδιάμεσα σημεία του.

Τέλος υπάρχει η δυνατότητα αυτόματης υποδιαίρεσης του S4R στοιχείου σε τριγωνικό στοιχείο κελύφους 3 κόμβων S3R. Πέρα από το διαφορετικό αριθμό κόμβων, τα δύο στοιχεία είναι συμβατά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα για διακριτοποίηση της κατασκευής. Ακολουθεί η τυπική του μορφή:



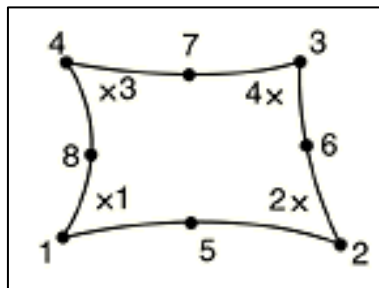
Εικόνα 5.3: S4R (Reduced Integration) στοιχείο

β) Στοιχεία S8R (Reduced Integration),

χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που μπορεί να εφαρμοστεί η θεωρία παχέων ελασμάτων. Δηλαδή όταν το κέλυφος έχει ομοιογένεια υλικού και ο λόγος της διάστασης του πάχους προς τη διάσταση το μήκους του κελύφους ξεπερνά το 1/15.

Το στοιχείο φέρει 8 κόμβους στα άκρα του με κάθε κόμβο να έχει έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές. Οι υπολογισμοί του λογισμικού γίνονται μόνο στους κόμβους του στοιχείου και χρησιμοποιείται πολώνυμο παρεμβολής 2^{ης} τάξης για εύρεση των παραμορφώσεων στα ενδιάμεσα σημεία.

Βασική διαφορά με το στοιχείο S4R είναι η βελτιωμένη ακρίβεια της λύσης παράλληλα όμως και ο περισσότερος απαιτούμενος χρόνος επίλυσης. Ακολουθεί η τυπική του μορφή:



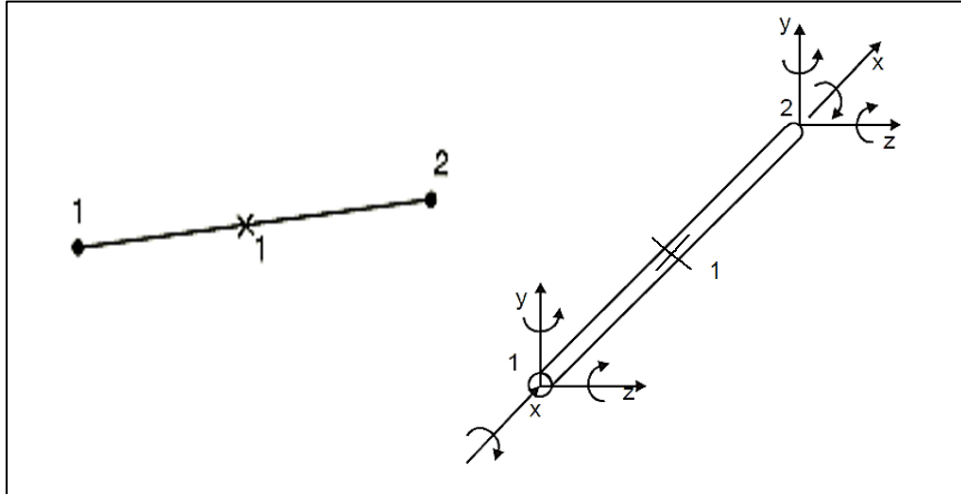
Εικόνα 5.4: S8R (Reduced Integration) στοιχείο

- ii. **Στοιχεία – Δοκοί (Beam elements).** Στα πλαίσια της θεωρίας δοκών, ένα τρισδιάστατο σώμα μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα μονοδιάστατο σώμα-ευθεία στην περίπτωση που οι διαστάσεις της διατομής του είναι πολύ μικρότερες από το μήκος μεταξύ των στηρίξεων στις οποίες ισορροπεί. Η ακαμψία της δοκού εξαρτάται από την κατάσταση παραμόρφωσης στην οποία βρίσκεται. Έτσι και στο λογισμικό Abaqus γίνεται χρήση ενός μονοδιάστατου στοιχείου γραμμής στο οποίο ανατίθεται εικονική διατομή.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται το στοιχείο B31, όπου ο αριθμός 3 δηλώνει ότι το δοκάρι δύναται να παραμορφωθεί στο χώρο, ενώ ο αριθμός 1 ότι

πραγματοποιείται γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων στα ενδιάμεσα των κόμβων σημεία. Φέρει δύο κόμβους στα άκρα του που έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές.

Με τη χρήση αυτού του στοιχείου μοντελοποιούνται αποτελεσματικά οι διαμήκεις και εγκάρσιες ενισχύσεις που φέρουν τα ελάσματα της κατασκευής που εξετάζεται. Ακολουθεί η τυπική του μορφή:



Εικόνα 5.5: B31 στοιχείο και βαθμοί ελευθερίας των κόμβων του

5.3 Η μέθοδος Newton-Raphson

Χρησιμοποιείται πολύ συχνά σε προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για την επίλυση μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας. Ο Νεύτωνας κατασκεύασε μία πρώτη εκδοχή της μεθόδου το 1669. Ο Raphson παρουσίασε την γενική μορφή της μεθόδου το 1690. Και οι δύο ακολούθησαν την ίδια συλλογιστική πορεία και παρήγαγαν κοινά αποτελέσματα. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, για τις μη γραμμικές αναλύσεις εφαρμόζεται η πλήρης μέθοδος Newton-Raphson η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 4.6 και η ανάλυση της επανάληψης 2 στην εικόνα 5.7.

Γενικά για την υλοποίηση μη γραμμικών μεθόδων επίλυσης χρησιμοποιείται μία χρονική μεταβλητή που υποδιαιρείται σε επιμέρους διακριτά τμήματα Δt . Για κάθε τμήμα πρέπει να προσδιοριστεί μία θέση ισορροπίας των δυνάμεων, παραμορφώσεων και της ενέργειας του φορέα. Θεωρείται η συνθήκη ισορροπίας της σχέσης [23] :

$${}^t\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F} = \mathbf{0} \quad (\text{Εξ. 1})$$

με ${}^t\mathbf{R}$ το διάνυσμα των εσωτερικών δυνάμεων στους κόμβους στο χρονικό διάστημα t και ${}^t\mathbf{F}$ το διάνυσμα των εξωτερικών δυνάμεων στους κόμβους λόγω παραμορφώσεων. Η επιβολή του φορτίου γίνεται σε βήματα κατάλληλου μεγέθους ώστε η απόκριση της κατασκευής να μπορεί να θεωρηθεί γραμμική σε κάθε ένα από αυτά. Μόλις επιτευχθεί

ισορροπία στο χρονικό διάστημα t , η διαδικασία επαναλαμβάνεται για χρονικό διάστημα $t + \Delta t$, οπότε η συνθήκη ισορροπίας της εξίσωσης 1 γίνεται:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = 0 \quad (\text{Εξ. 2})$$

Το διάνυσμα ${}^{t+\Delta t}\mathbf{F}$ μπορεί να εκφραστεί σε σχέση με το αντίστοιχο διάνυσμα του χρονικού διαστήματος t ως:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{F} = {}^t\mathbf{F} + \mathbf{F} \quad (\text{Εξ. 3})$$

με το \mathbf{F} να αποτελεί την επαύξηση των δυνάμεων στους κόμβους λόγω παραμορφώσεων από το διάστημα t στο διάστημα Δt . Το διάνυσμα \mathbf{F} προσεγγίζεται από το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας ${}^t\mathbf{K}$ από την σχέση:

$$\mathbf{F} = {}^t\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} \quad (\text{Εξ. 4})$$

Το διάνυσμα \mathbf{U} εκφράζει την επαύξηση των μετατοπίσεων από το διάστημα t στο διάστημα Δt , ενώ το ${}^t\mathbf{K}$ είναι η παράγωγος των εσωτερικών δυνάμεων στους κόμβους ${}^t\mathbf{F}$ προς τις μετατοπίσεις των κόμβων ${}^t\mathbf{U}$.

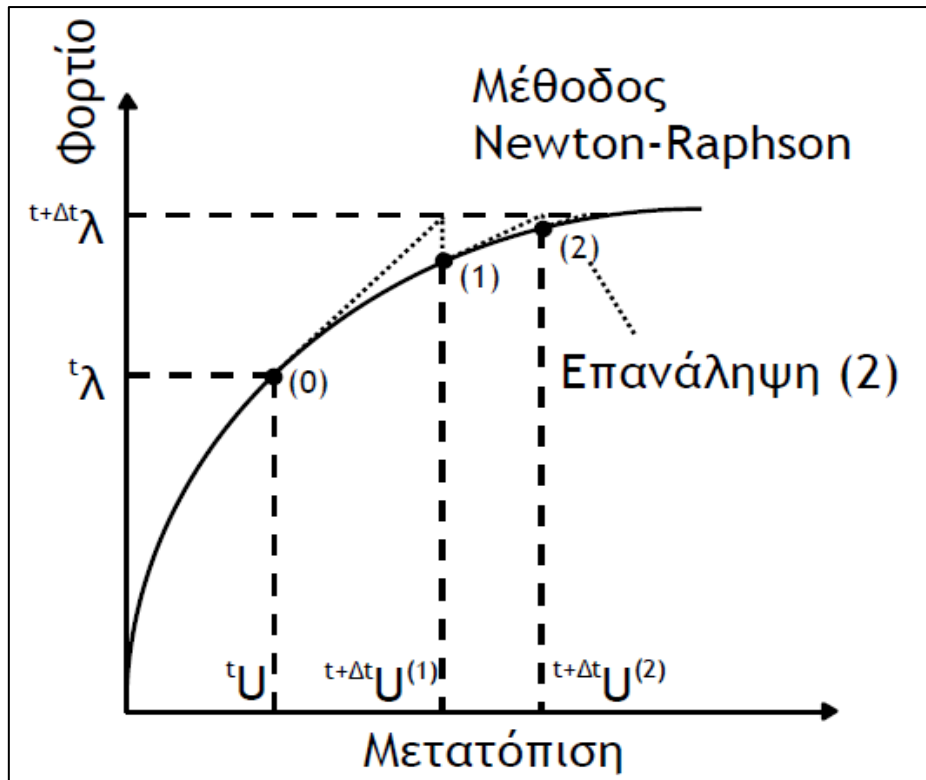
Από τις εξισώσεις 3 και 4 με αντικατάστασή τους στην εξίσωση 2, παίρνουμε:

$${}^t\mathbf{K} \cdot \mathbf{U} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F} \quad (\text{Εξ. 5})$$

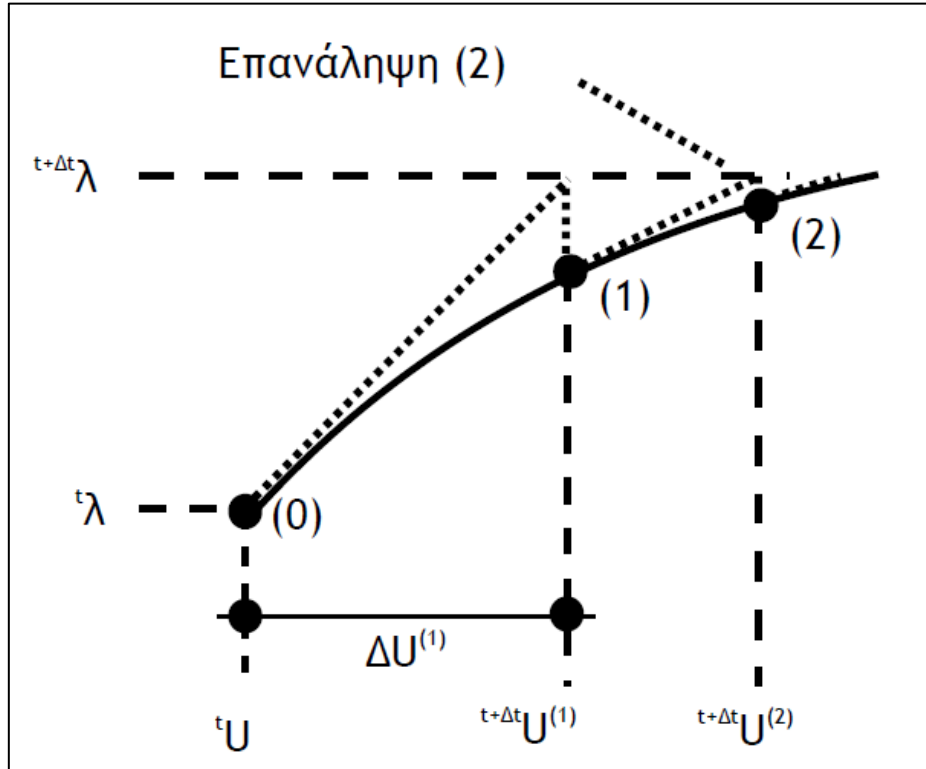
Με επίλυση της εξίσωσης 5 ως προς \mathbf{U} , προκύπτει μία προσέγγιση για τις μετατοπίσεις στο χρονικό διάστημα $t + \Delta t$:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U} = {}^t\mathbf{U} + \mathbf{U} \quad (\text{Εξ. 6})$$

Στη συνέχεια μπορούν να υπολογιστούν επίσης προσεγγιστικά οι τάσεις και οι εξωτερικές δυνάμεις στους κόμβους για το χρονικό διάστημα $t + \Delta t$. Όμως λόγω των προσεγγίσεων, για να βρεθεί μία θέση ισορροπίας σε κάθε βήμα, συχνά απαιτείται πλήθος επαναλήψεων για να πετύχουμε την επιθυμητή ακρίβεια.



Εικόνα 5.6: Μέθοδος Newton-Raphson



Εικόνα 5.7: Ανάλυση βήματος 2

Συγκεκριμένα για την πλήρη μέθοδο Newton-Raphson οι εξισώσεις 5,6 αναλύονται στις εξισώσεις 7,8 αντίστοιχα:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{(i-1)}\Delta\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)} \quad (\text{Εξ. 7})$$

Όπου ο δείκτης i συμβολίζει τον αριθμό της τρέχουσας επανάληψης, ${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^{(i-1)}$ είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας και $\Delta\mathbf{U}^{(i)}$ η επαύξηση στο διάνυσμα των μετατοπίσεων από το χρονικό διάστημα t έως το $t + \Delta t$, δηλαδή μεταξύ των επαναλήψεων με δείκτες $(i-1)$ και i :

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i)} = {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U}^{(i)} \quad (\text{Εξ. 8})$$

Οι εξισώσεις 7,8 αποτελούν τα βασικά βήματα επίλυσης της μεθόδου, που επιτυγχάνεται ύστερα από αριθμό επαναλήψεων και βήματος επανάληψης Δt . Σε κάθε επανάληψη εφαρμόζονται οι αρχικές συνθήκες:

$${}^{t+\Delta t}\mathbf{K}^0 = {}^t\mathbf{K}, \quad {}^{t+\Delta t}\mathbf{U}^0 = {}^t\mathbf{U}, \quad \Delta{}^t\mathbf{F}^{(0)} = {}^t\mathbf{F},$$

ενώ για να για τον έλεγχο της σύγκλισης και των επαναλήψεων χρησιμοποιούνται τα εξής κριτήρια:

➤ Κριτήριο Μετατοπίσεων

$$\frac{\|\Delta\mathbf{U}^i\|_2}{\|{}^{t+\Delta t}\mathbf{U}\|_2} \leq \varepsilon_D$$

➤ Κριτήριο Δυνάμεων

$$\|{}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i)}\|_2 \leq \varepsilon_F \|{}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F}\|_2$$

➤ Κριτήριο Ενέργειας

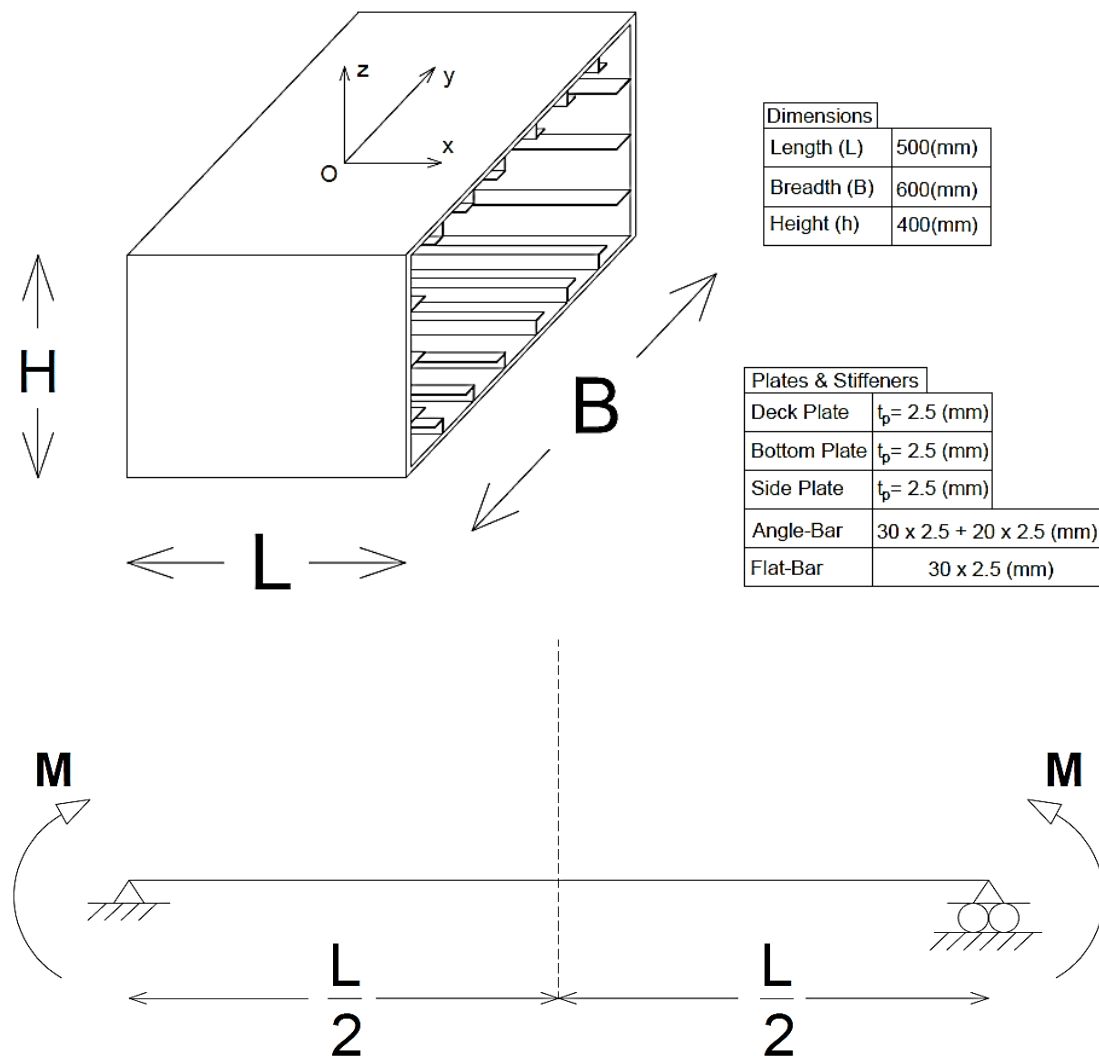
$$\Delta\mathbf{U}^{(i)T} ({}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^{t+\Delta t}\mathbf{F}^{(i-1)}) \leq \varepsilon_E (\Delta\mathbf{U}^{(1)T} ({}^{t+\Delta t}\mathbf{R} - {}^t\mathbf{F})),$$

Όπου τα μεγέθη ε_D , ε_F , ε_E αποτελούν τις ανοχές των κριτηρίων. Η επιλογή τους επηρεάζει τον χρόνο επίλυσης του προβλήματος και το επίπεδο προσέγγισης της πραγματικής λύσης.

5.4 Μελέτη της κατασκευής Reckling No.23

5.4.1 Ανάλυση για γραμμική συμπεριφορά του Reckling No.23

Η γεωμετρία του μοντέλου **Reckling No. 23** φαίνεται εικόνα 5.8. Πρόκειται για μία λεπτότοιχη δοκό που φέρει διαμήκειες ενισχύσεις στα οριζόντια και κατακόρυφα ελάσματα της. Το αριστερό μέρος της δοκού στηρίζεται με άρθρωση, ενώ το δεξί με κύλιση. Για να μελετήσουμε την καθαρή κάμψη, σε κάθε άκρο της επιβάλλεται μία ροπή. Οι δύο ροπές είναι αντίθετης φοράς και ίσου μέτρου. Όπως και για την μοντελοποίηση **Simple Beam** (Παράρτημα Β) έτσι και εδώ, η επίλυση και ο υπολογισμός της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης πραγματοποιήθηκε αρχικά χωρίς την βοήθεια υπολογιστή και στη συνέχεια έγινε σύγκριση με την μέγιστη τάση της κάθε περίπτωσης που προσδιόρισε το πρόγραμμα.



Εικόνα 5.8: Διαστάσεις και Φόρτιση του Reckling No.23

Αρχικά σχεδιάζουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος όπως φαίνεται στην εικόνα 5.9 και στη συνέχεια υπολογίζουμε τις δυνάμεις που ασκούνται λύνοντας τις εξισώσεις ισορροπίας.



Εικόνα 5.9: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος του Reckling No.23

Οι εξισώσεις ισορροπίας της δοκού:

$$\Sigma F_x = 0 \quad [1]$$

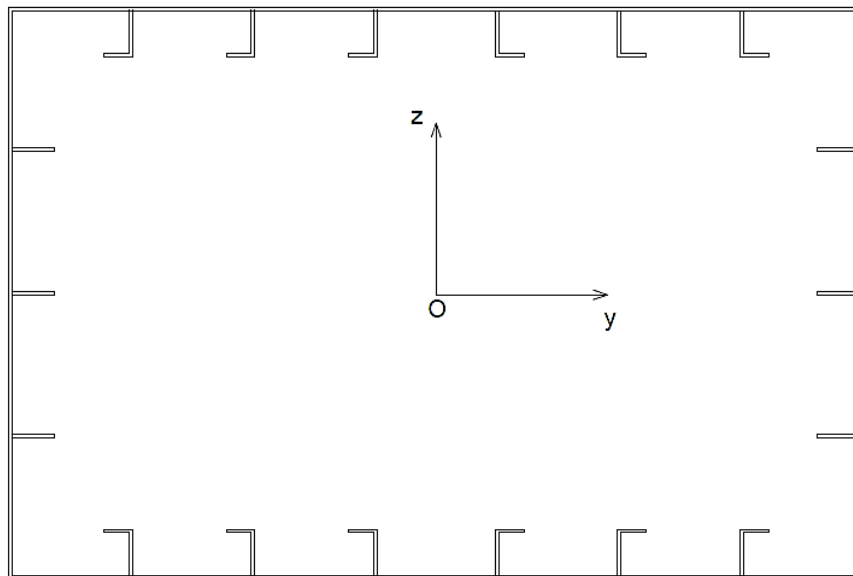
$$\Sigma F_y = 0 \quad [2]$$

$$\Sigma M_{(A)} = 0 \quad (\text{με θετική φορά την ωρολογιακή}) \quad [3]$$

Προκύπτει:

- $H_A = 0 \text{ kN}$
- $V_A = -V_B$
- $M_A = M_B$

Για να έχουμε ισοδύναμο πρόβλημα με αυτό του **Simple Beam** όσο αναφορά τις φορτίσεις και δεδομένης της σχέσης που υπολογίστηκε για τις δύο ροπές M_A, M_B , επιλέγουμε να έχουν το ίδιο μέτρο με πριν $M_A = M_B = 1,25 \text{ kNm}$. Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα διαγράμματα $[N], [Q], [M]$ και λαμβάνεται η μέγιστη τιμή της ροπής $M = 1,25 \text{ kNm}$. Υπολογίζεται για το $x = L/2$ η ροπή αδράνειας της διατομής που φαίνεται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10: Εγκάρσια διατομή του Reckling No.23

Η ροπή αδράνειας της διατομής είναι:

$$I_{yy} = 19.666,78385 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Είναι προφανές ότι ο ουδέτερος άξονας ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Για την μέγιστη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα $Z_{\max} = 0.2 \text{ m}$, υπολογίζεται η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ANALYTIC}} = \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot Z_{\max} = 1.271 \text{ MPa}$$

Για την αντίστοιχη μελέτη στο ABAQUS το μοντέλο ονομάστηκε **Reckling No.23**. Έγινε Implicit analysis με τη χρήση στοιχείου κελύφους για τα ελάσματα της δοκού (3D, shell, extrusion). Για τα ενισχυτικά έγινε σχεδίαση με στοιχεία κελύφους (shell elements) στην πρώτη μοντελοποίηση και στοιχεία δοκού (beam elements) στην δεύτερη. Επίσης εξετάστηκαν διαφορετικά μεγέθη στοιχείων διακριτοποίησης : 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 [mm], για τετράκομβο (S4R, Reduced Integration) και οκτάκομβο στοιχεία (S8R).

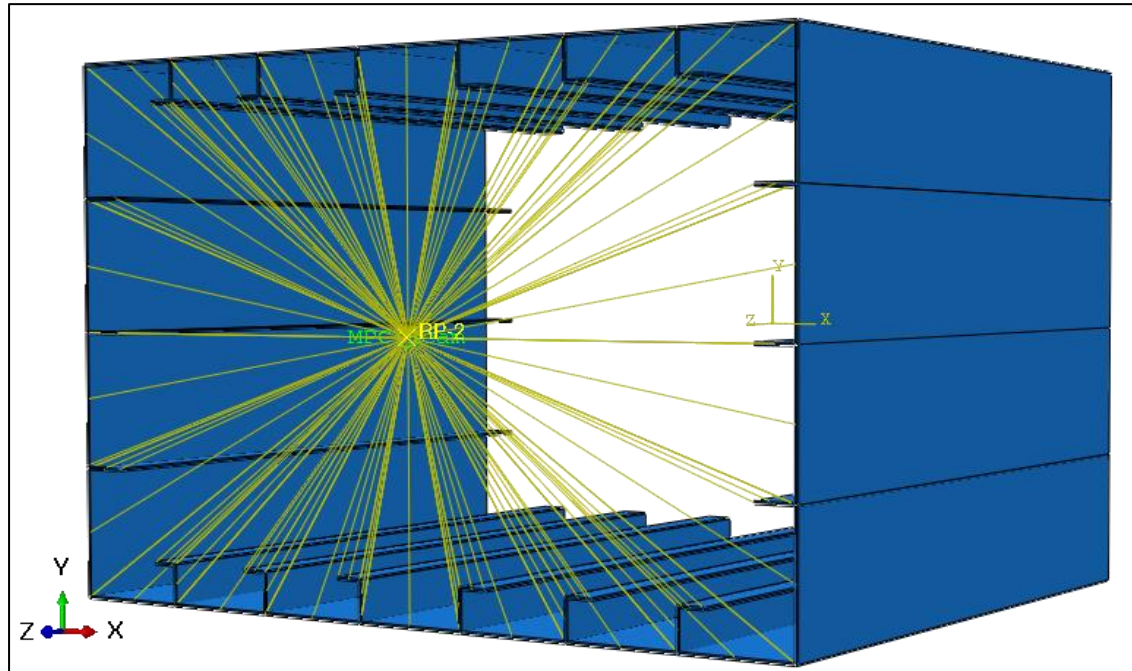
➤ Ιδιότητες Υλικού

Το υλικό θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό με Young's Modulus $E=210 \text{ GPa}$, Poisson's ratio $\nu=0.3$.

➤ Επιβολή Φορτίσεων και Οριακών Συνθήκων

Αρχικά δημιουργήθηκαν δύο reference points τα οποία τοποθετήθηκαν το ένα στο αριστερό και το άλλο στο δεξί άκρο της δοκού κατά τον διαμήκη άξονα και στο ύψος του άξονα συμμετρίας κατά τον κατακόρυφο άξονα. Στη συνέχεια τα reference points

μετατράπηκαν σε MCP-Beam (Multiple Constraint Point – Beam Type) και αυτά συσχετίστηκαν με όλα τα points και τα edges των μελών της δοκού που βρίσκονται στην ίδια διαμήκη θέση (slave nodes) μέσω rigid links όπως φαίνεται στην εικόνα 5.11:



Εικόνα 5.11: Σύνδεση κόμβων με το Multi-Constraint point, Reckling No.23

Και στα δύο MCP σημεία έγινε εφαρμογή τόσο των φορτίσεων όσο και των οριακών συνθηκών. Επιβλήθηκε Moment load, με θετική την ωρολογιακή φορά και μέτρο $CM1 = 1.25 \text{ kNm}$, δηλαδή το διάνυσμα της ροπής είναι παράλληλο στον εγκάρσιο άξονα. Οι οριακές συνθήκες των δύο σημείων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Οριακές συνθήκες MCPs Reckling No.23 – Γραμμική συμπεριφορά

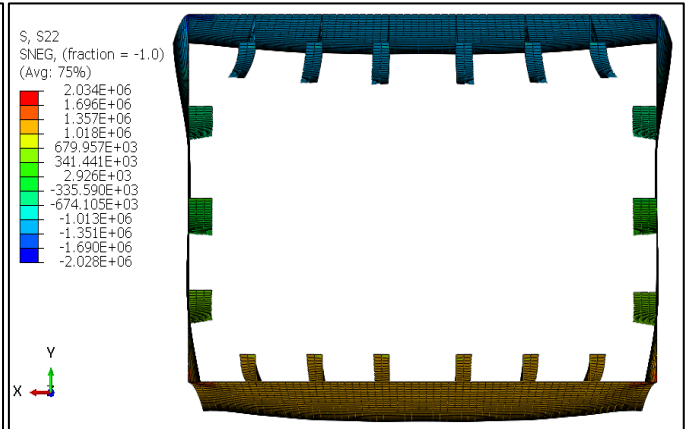
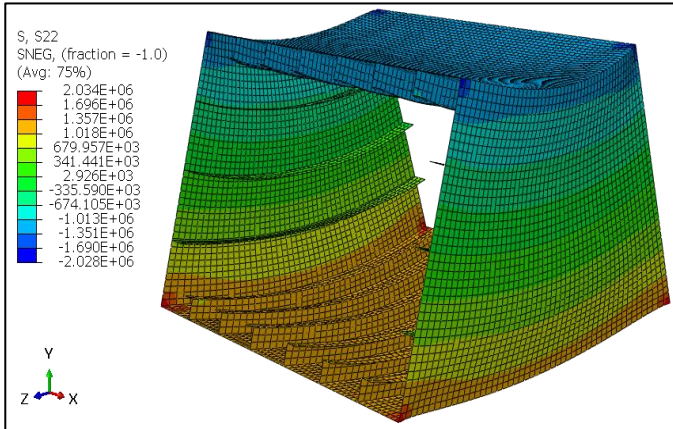
Τοποθεσία	Μετατοπίσεις			Στροφές		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Αριστερό άκρο (άρθρωση)	fix	fix	fix	-	-	fix
Δεξί άκρο (κύλιση)	fix	fix	-	-	-	-

➤ Αποτελέσματα

Στα πλαίσια της γραμμικά ελαστικής ανάλυσης δεν έχουμε πλαστική διαρροή της δοκού αφού $\sigma_{\max} < \sigma_y$. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα για ένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν στις εικόνες 5.12-13. Σημειώνεται ότι η τιμή για την

μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση λαμβάνεται ακριβώς στη μέση της δοκού και για την συγκεκριμένη περίπτωση είναι $\sigma_{\max} = 1,339 \text{ MPa}$.

Οι μεγαλύτερες από την σ_{\max} τιμές τάσης που εμφανίζονται στην αρχή και στο τέλος της δοκού, στα σημεία ένωσης των οριζόντιων και των κάθετων ελασμάτων, δεν αφορούν το φαινόμενο της καθαρής κάμψης. Δημιουργούνται από τις οριακές συνθήκες που έχουν επιβληθεί στα MCPs με τα οποία αυτά τα σημεία είναι συσχετισμένα (slave nodes).



Εικόνα 5.12: Παραμόρφωση του Reckling No.23 και κατανομή των τάσεων – 3D Όψη – Γραμμική συμπεριφορά

Εικόνα 5.13: Παραμόρφωση του Reckling No.23 και κατανομή των τάσεων – Εγκάρσια Όψη – Γραμμική συμπεριφορά

Η μέγιστη τάση σ_{FEA} κάθε περίπτωσης παρουσιάζεται στους πίνακες που ακολουθούν, διαιρείται με την $\sigma_{ANALYTIC}$ και στη συνέχεια κατασκευάζεται διάγραμμα με οριζόντιο άξονα το μέγεθος των στοιχείων διακριτοποίησης και κατακόρυφο το κλάσμα $\sigma_{ANALYTIC} / \sigma_{FEA}$.

Mesh Density: 5 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.341 (MPa)	1.342 (MPa)	1.34 (MPa)	1.34 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9478	0.947	0.9485	0.9485

Mesh Density: 10 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.340 (MPa)	1.341 (MPa)	1.339 (MPa)	1.339 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9485	0.9478	0.9492	0.9492

Mesh Density: 15 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.339 (MPa)	1.340 (MPa)	1.339 (MPa)	1.339 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9492	0.9485	0.9492	0.9492

Mesh Density: 20 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.339 (MPa)	1.340 (MPa)	1.339 (MPa)	1.339 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9492	0.9485	0.9492	0.9492

Mesh Density: 25 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.339 (MPa)	1.340 (MPa)	1.343 (MPa)	1.339 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9492	0.9485	0.9463	0.9492

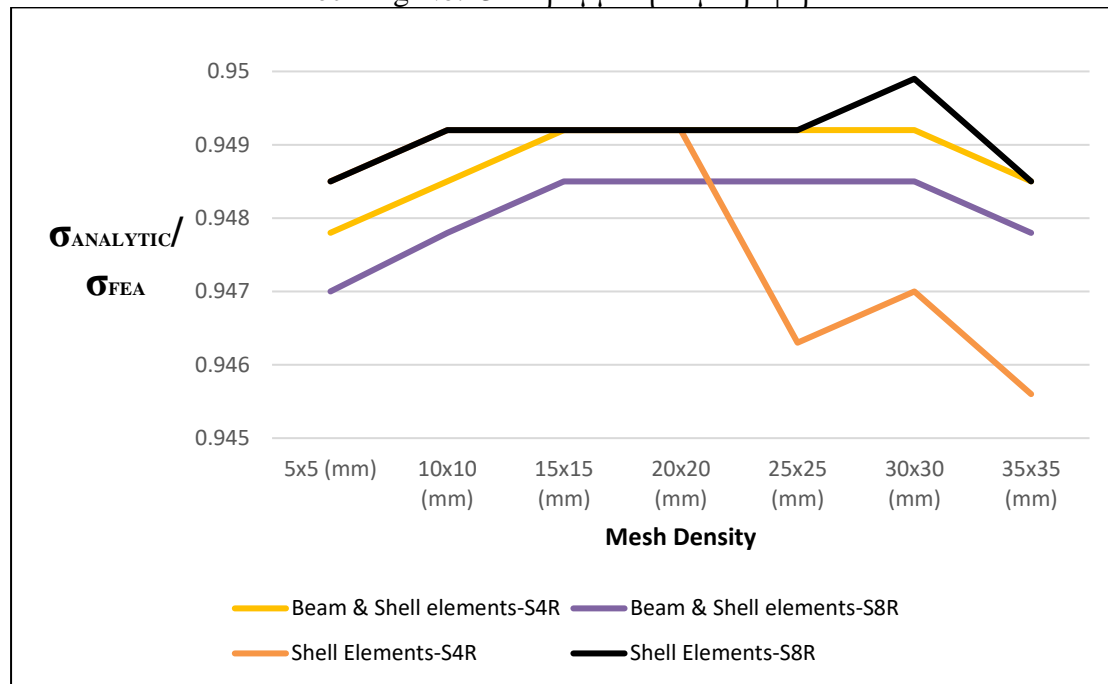
Mesh Density: 30 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.339 (MPa)	1.340 (MPa)	1.342 (MPa)	1.338 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9492	0.9485	0.947	0.9499

Mesh Density: 35 mm	Beam & Shell elements		Shell elements	
	Element Type		Element Type	
	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration	S4R, Reduced Integration	S8R, Reduced Integration
σ_{FEA}	1.340 (MPa)	1.341 (MPa)	1.344 (MPa)	1.340 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9485	0.9478	0.9456	0.9485

➤ Συμπεράσματα

Αρχικά παρατίθεται το διάγραμμα 5.1 που συγκεντρώνει τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που λύθηκαν στο Abaqus.

Διάγραμμα 5.1: Απόκλιση τάσεων για τις διαφορετικές μοντελοποιήσεις του Reckling No.23 – Γραμμική συμπεριφορά



Παρατηρούμε ότι ακόμα και στην περίπτωση που η απόκλιση $\sigma_{ANALYTIC} - \sigma_{FEA}$ μεγιστοποιείται (Καμπύλη: Shell Elements-S4R, Σημείο: 35x35 mesh density), η τιμή της κυμαίνεται σε αποδεκτά όρια ($\approx 5\% \sigma_{ANALYTIC}$). Επομένως για το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν κρίνεται απαραίτητη η χρήση πυκνότερου πλέγματος διακριτοποίησης ή οκτακομβικών στοιχείων (S8R) έναντι τετρακομβικών (S4R), δηλαδή μεθόδων που αυξάνουν την ακρίβεια της λύσης αλλά ανεβάζουν ταυτόχρονα τον υπολογιστικό χρόνο, καθώς όλα τα σενάρια προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματική λύση.

5.4.2 Ανάλυση για μη γραμμική συμπεριφορά του Reckling No.23 – Υπολογισμός M_{ultimate}

Στα πλαίσια αυτής της ανάλυσης δίνονται ελαστοπλαστικές ιδιότητες στο υλικό και προσδιορίζεται η μέγιστη ροπή που μπορεί να παραλάβει το **Reckling No.23**. Επίσης εξετάζεται η επίδραση στην αντοχή της δοκού που έχουν οι μεγάλες παραμορφώσεις που δημιουργούνται (μη γραμμική γεωμετρία).

Όπως και στην γραμμικά ελαστική ανάλυση, κατασκευάζεται ένα μοντέλο μόνο με στοιχεία κελύφους (shell elements) και ένα δεύτερο με στοιχεία κελύφους για τα ελάσματα και στοιχεία δοκού για τα ενισχυτικά (beam & shell elements). Έγινε Implicit analysis, μελετήθηκαν διαφορετικά μεγέθη στοιχείων διακριτοποίησης : 5, 10, 20 [mm], για τετράκομβα (S4R, Reduced Integration) και οκτάκομβα στοιχεία (S8R).

➤ Ιδιότητες Υλικού

Το υλικό θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό με Young's Modulus $E=210$ GPa, Poisson's ratio $\nu=0.3$, όριο διαρροής $\sigma_y=246$ MPa με πλαστική παραμόρφωση (Plastic strain) = 0

➤ Επιβολή Φορτίσεων και Οριακών Συνθήκων

Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να πραγματοποιείται η πλαστική διαρροή του υλικού. Η φόρτιση της δοκού προκύπτει από την επιβολή στροφής θ (rad), κατά το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο με θετική την ωρολογιακή φορά, στα ίδια σημεία MCPs που έχουν δημιουργηθεί για την γραμμικά ελαστική ανάλυση. Οι οριακές συνθήκες των MCPs παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2:

Πίνακας 5.2: Οριακές συνθήκες MCPs Reckling No.23 – Μη γραμμική συμπεριφορά

Τοποθεσία	Μετατοπίσεις			Στροφές		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Αριστερό άκρο (άρθρωση)	fix	fix	fix	0.005 (rad)	-	fix
Δεξί άκρο (κύλιση)	fix	fix	-	-0.005 (rad)	-	-

Σύμφωνα με τις παραμέτρους που εξετάζουμε, δημιουργείται ο πίνακας 5.3 στον οποίο συγκεντρώνονται όλες οι περιπτώσεις.

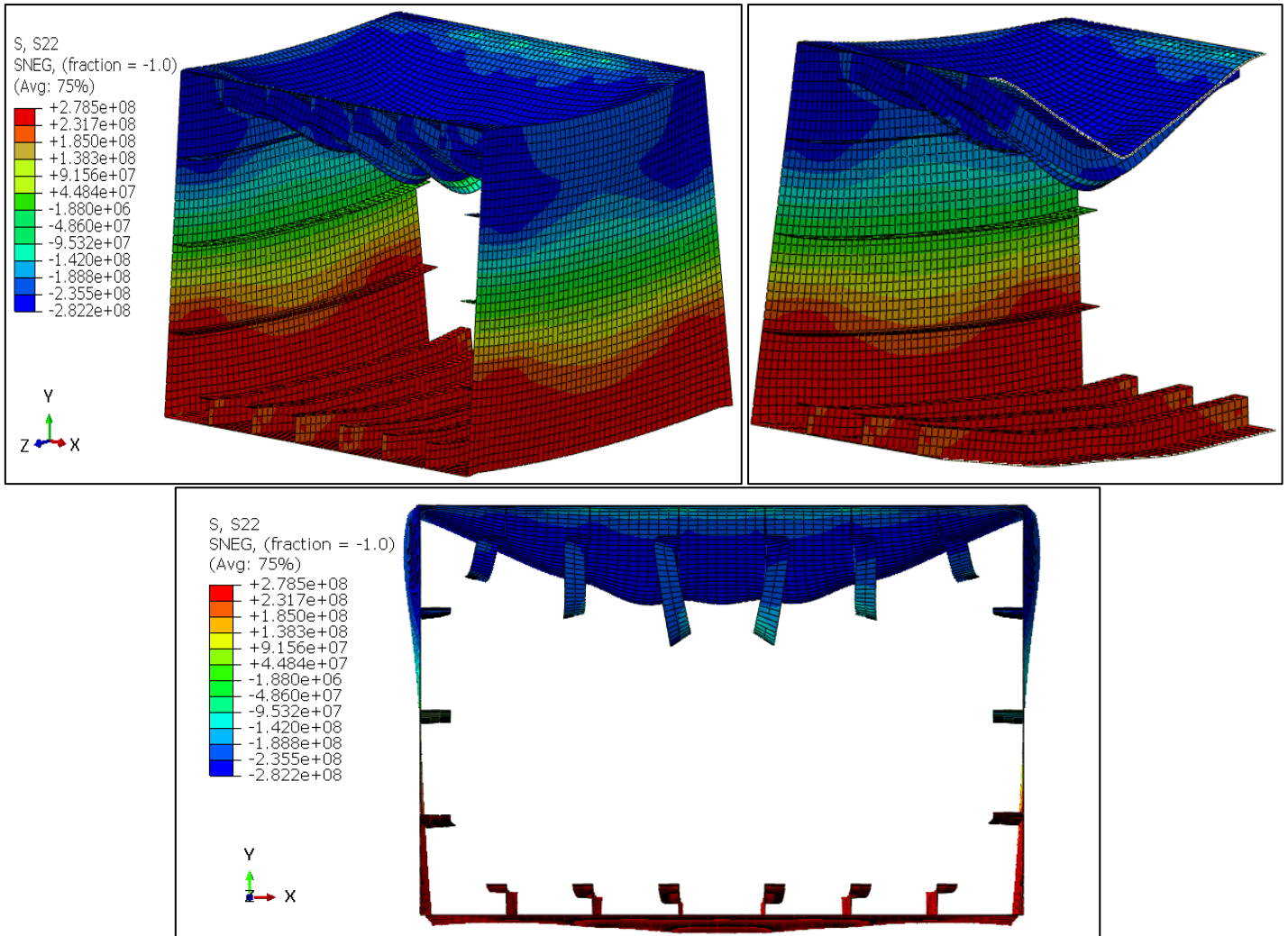
Πίνακας 5.3: Cases Reckling No.23 - Implicit analysis

CASES No.	Model Strategy		Element Type		Mesh Density (mm)		
	Beams & Shells	Shells only	S4R	S8R	5	10	20
CASE 1-1		•	•		•		
CASE 1-2		•	•			•	
CASE 1-3		•	•				•
CASE 1-4		•		•	•		
CASE 1-5		•		•		•	
CASE 1-6		•		•			•
CASE 2-1	•		•		•		
CASE 2-2	•		•			•	
CASE 2-3	•		•				•
CASE 2-4	•			•	•		
CASE 2-5	•			•		•	
CASE 2-6	•			•			•

Ενδεικτικά επιλέγεται ένα από τα σενάρια που εξετάστηκαν (Πίνακας 5.4) παρουσιάζεται στην εικόνα 5.14 το παραμορφωμένο σχήμα την στιγμή που ασκείται η μέγιστη ροπή κάμψης που μπορεί να παραλάβει ο φορέας.

Πίνακας 5.4: Reckling No.23 – Case 1-2.

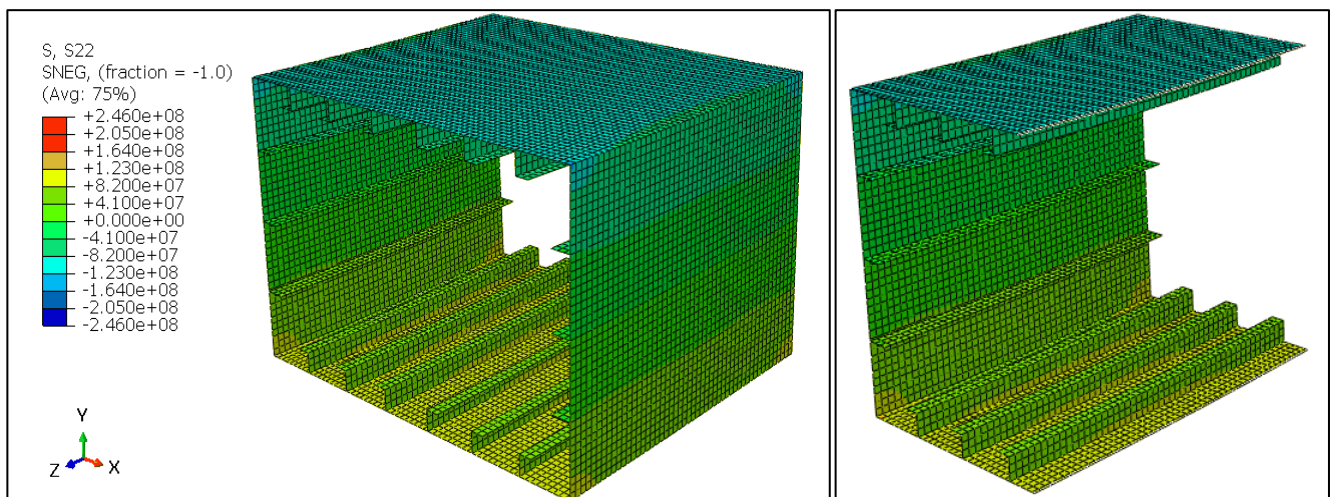
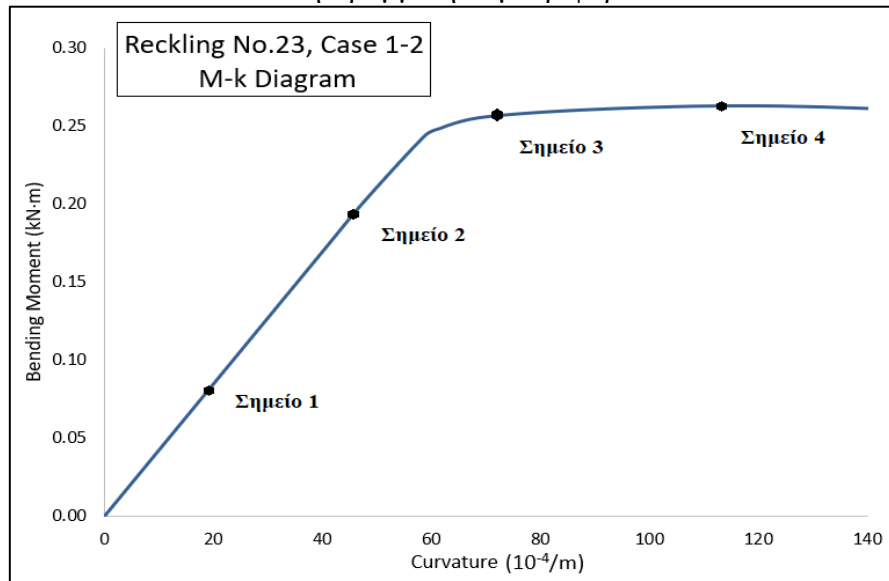
Model Strategy	Element Type	Mesh Density
Shells Only	S4R, Reduced Integration	10 [mm]



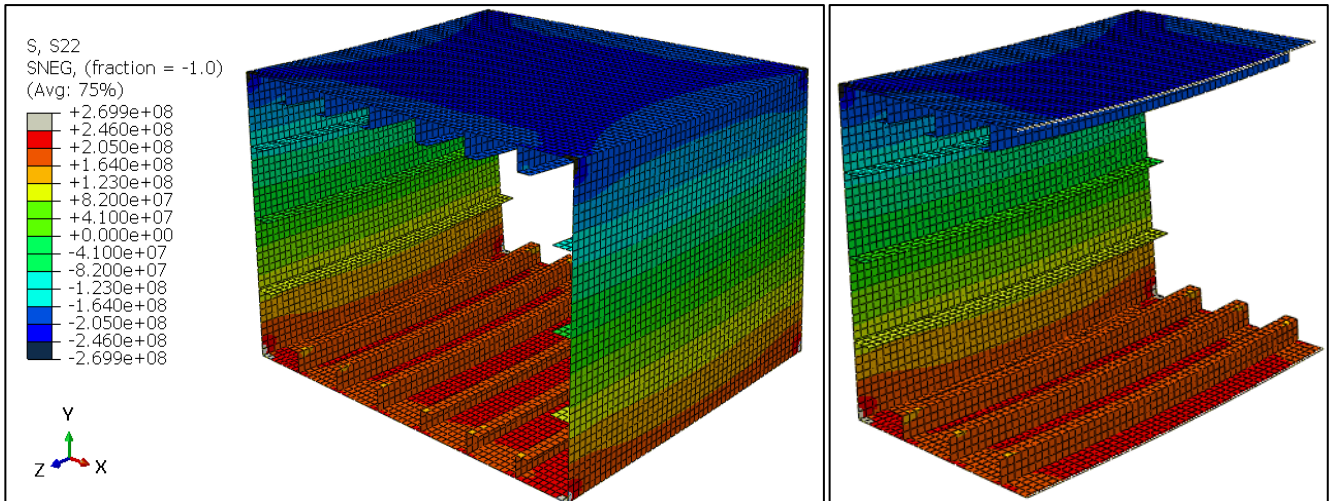
Εικόνα 5.14: Παραμόρφωση του Reckling No.23 και κατανομή των τάσεων – Μη γραμμική συμπεριφορά

Στη συνέχεια για το ίδιο Case 1-2, για τα 4 σημεία που φαίνονται στο διάγραμμα 5.2 επισυνάπτονται οι εικόνες 5.15, Σημείο 1-4, στις οποίες φαίνεται η εξέλιξη των τάσεων καθώς επιβάλλεται στον φορέα μεγαλύτερη καμπτική ροπή μέχρις ότου να προσδιοριστεί η ροπή κατάρρευσης, **M_{ultimate}** (Σημείο 4). Κατά την ανάλυση με το λογισμικό Abaqus, προσδιορίστηκε επίσης μεγάλο μέρος της καμπύλης δεξιά από το Σημείο 4. Όταν ο φορέας παραλάβει το μέγιστο καμπτικό φορτίο, η αντοχή του μειώνεται και εμφανίζονται φαινόμενα λυγισμού στο «κατάστρωμα» του Reckling. Ωστόσο δεν γίνεται αναφορά σε αυτή την περιοχή της καμπύλης, καθώς η μελέτη της μεταλυσισμικής συμπεριφοράς του φορέα βρίσκεται εκτός των πλαισίων αυτής της εργασίας.

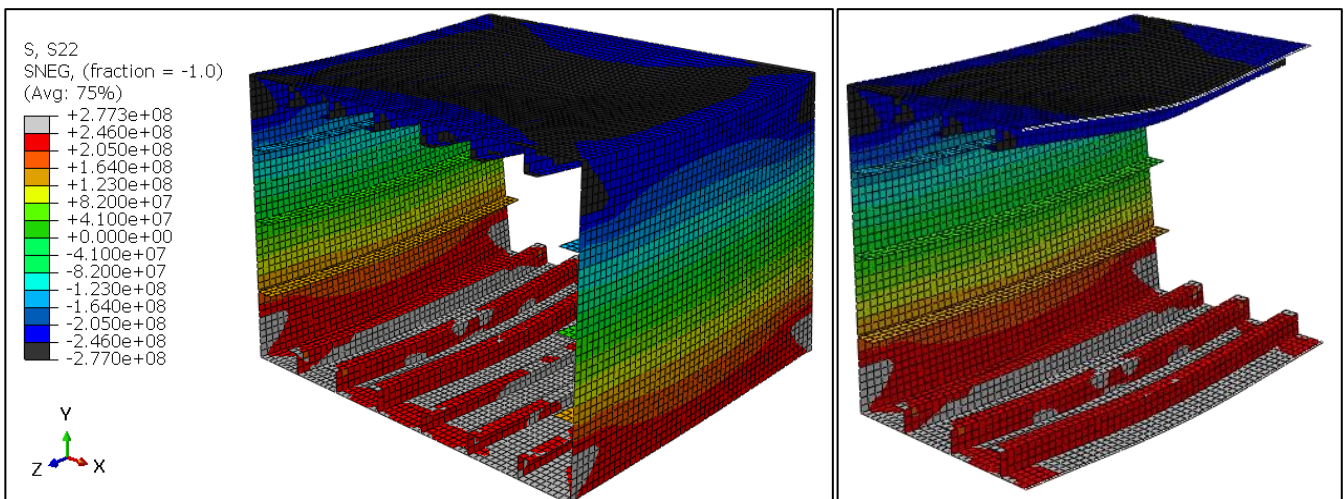
Διάγραμμα 5.2: Καμπύλη Καμπτικής ροπής - Καμπυλότητας του Reckling No.23, Μη Γραμμική συμπεριφορά



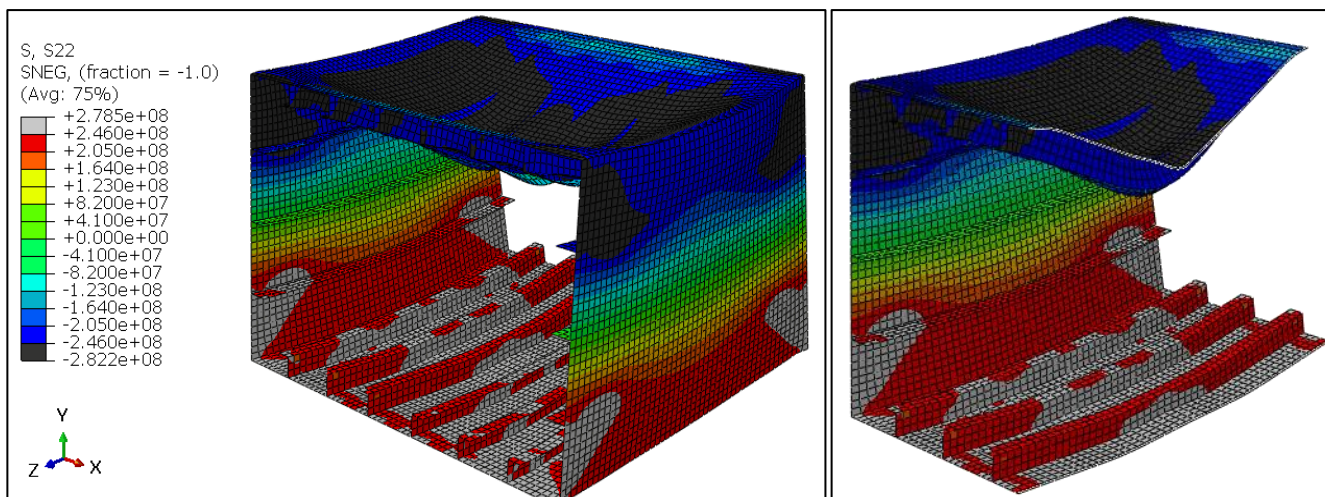
Εικόνα 5.15: Σημείο 1 – Το υλικό βρίσκεται στην γραμμικά ελαστική περιοχή, οι τάσεις, παραμορφώσεις έχουν χαμηλές τιμές.



Εικόνα 5.15: Σημείο 2 – Το υλικό βρίσκεται στο μεταίχμιο της ελαστικής-ελαστοπλαστικής περιοχής, οι τάσεις σε πυθμένα και κατάστρωμα πλησιάζουν τα όρια διαρροής του υλικού.



Εικόνα 5.15: Σημείο 3 – Το υλικό έχει περάσει στην ελαστοπλαστική περιοχή, παρατηρείται αισθητή αλλαγή στη γεωμετρία του καταστρώματος (βύθιση), ενώ οι τάσεις στις μαύρες και τις γκρι περιοχές έχουν ξεπεράσει το όριο διαρροής $\sigma_y=246$ MPa.



Εικόνα 5.15: Σημείο 4 – Σε αυτό το βήμα προσδιορίζεται η ροπή κατάρρευσης του φορέα, η βύθιση του καταστρώματος είναι μεγάλη (μη γραμμική γεωμετρία - έναρξη λυγισμού). Οι περιοχές που έχουν υποστεί πλαστική διαρροή θα συνεχίσουν να αυξάνονται σε σχέση με τα προηγούμενα βήματα και η ικανότητα του φορέα να παραλάβει επιπλέον καμπτικό φορτίο θα μειωθεί.

Οι παραγόμενες καμπύλες M-k της κάθε περίπτωσης συγκρίνονται με τις καμπύλες M-k που δημοσιεύτηκαν στο paper «Study on influence of nonlinear finite element method models on ultimate bending moment for hull girder» των Ming Cai Xu, Zhao Jun Song, Jin Pan και αφορούν αντίστοιχες μοντελοποιήσεις ακριβώς της ίδιας γεωμετρίας, Reckling No.23 [6]. Συγκεκριμένα οι παράμετροι που μελετήθηκαν στο paper ήταν:

- α) Αριθμός δοκιμών,
- β) Οριακές συνθήκες,
- γ) Χρόνος επιβολής του φορτίου,
- δ) Μέθοδος επιβολής του φορτίου,
- ε) Είδη πεπερασμένων στοιχείων,

και τα διαφορετικά σενάρια ταξινομούνται στον πίνακα 5.5:

Πίνακας 5.5: Paper Cases Reckling No.23

Paper Cases No.	Number of spans		Boundary Condition			Loading Time (s)						Loading Methods		Model Strategy	
	1	3	BC1	BC2	BC3	0.25	0.05	0.1	0.5	1	2	Rotation Angle	Moment	Beams & Shells	Shells only
CASE P.2-1	•		•			•						•			•
CASE P.2-2		•		•		•						•			•
CASE P.2-3		•			•	•						•			•
CASE P.2-4		•			•	•						•			•
CASE P.2-5		•			•	•						•		•	
CASE P.2-6		•			•	•							•		•
CASE P.2-7		•			•		•					•			•
CASE P.2-8		•			•			•				•			•
CASE P.2-9		•			•				•			•			•
CASE P.2-10		•			•					•		•			•
CASE P.2-11		•			•						•	•			•

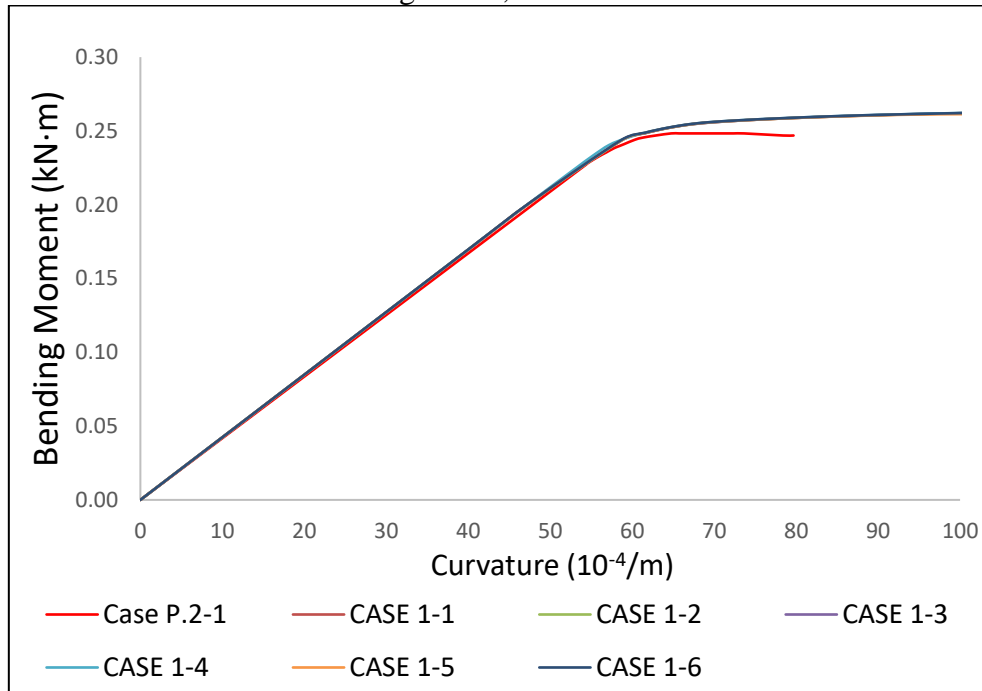
Ακολουθεί στον πίνακα 5.6 η ανάλυση των οριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται στο paper:

Πίνακας 5.6: Paper Cases border condition details

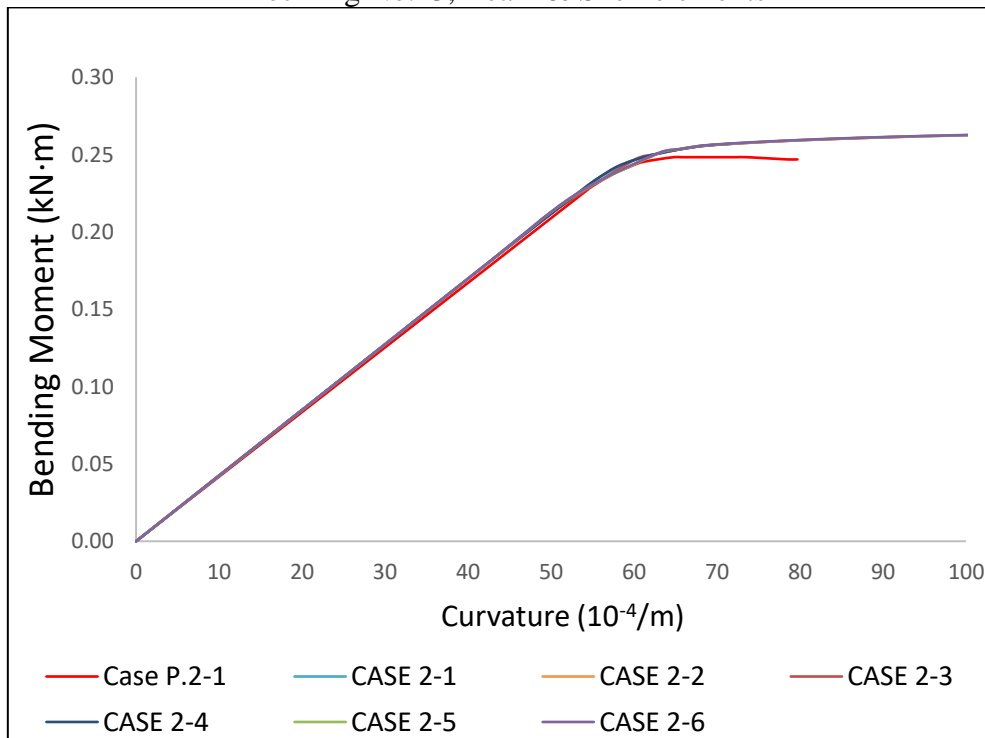
Paper BCs Cases No.	Location	Translations			Rotations		
		δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
One Span (BC1)	Fore end	fix	fix	fix	-	-	fix
	Aft end	fix	fix	-	-	-	-
Two Spans (BC2)	Fore end	fix	fix	fix	-	-	fix
	Aft end	fix	fix	-	-	-	-
	Horizon member at frame	-	fix	-	-	-	-
	Vertical member at frame	fix	-	-	-	-	-
Three Spans (BC3)	Fore end	fix	fix	fix	-	-	fix
	Aft end	fix	fix	-	-	-	-
	Horizon stiffened panel at frame	-	C_{dy}	-	-	-	-
	Web of the stiffeners on horizon plate at frame	C_{dx}	-	-	-	-	-
	Vertical stiffened panel at frame	C_{dx}	-	-	-	-	-
	Web of the stiffeners on vertical plate at frame	-	C_{dy}	-	-	-	-

5.4.2.1 Αποτελέσματα

Διάγραμμα 5.3: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, paper – Abaqus για το 1-Span Reckling No.23, Shell elements



Διάγραμμα 5.4: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, paper – Abaqus για το 1-Span Reckling No.23, Beam & Shell elements



Πίνακας 5.7: Απόκλιση **Multimate** από **Mu-paper** – Μοντελοποίηση με shell elements, Reckling No.23

Case No.	Multimate (kN·m)	Ποσοστιαία απόκλιση από Mu-paper , Case P.2-1
CASE 1-1	0.262869	5.86
CASE 1-2	0.262982	5.90
CASE 1-3	0.263100	5.95
CASE 1-4	0.262851	5.85
CASE 1-5	0.261348	5.24
CASE 1-6	0.262603	5.75

Πίνακας 5.8: Απόκλιση **Multimate** από **Mu-paper** – Μοντελοποίηση με beam & shell elements, Reckling No.23

Case No.	Multimate (kN·m)	Ποσοστιαία απόκλιση από Mu-paper , Case P.2-1
CASE 2-1	0.256169	3.16*
CASE 2-2	0.261674	5.38
CASE 2-3	0.263781	6.22
CASE 2-4	0.257015	3.50*
CASE 2-5	0.262883	5.86
CASE 2-6	0.263727	6.20

Στα διαγράμματα 5.3, 5.4 φαίνεται για όλα τα cases αυτής της εργασίας ικανοποιητική προσέγγιση της μορφής της καμπύλης M-k που υπολογίστηκε στο paper. Επίσης στους πίνακες 5.7, 5.8 παρουσιάζεται η ποσοστιαία απόκλιση της μέγιστης καμπτικής ροπής των cases από αυτή που προσδιορίζεται στο paper.

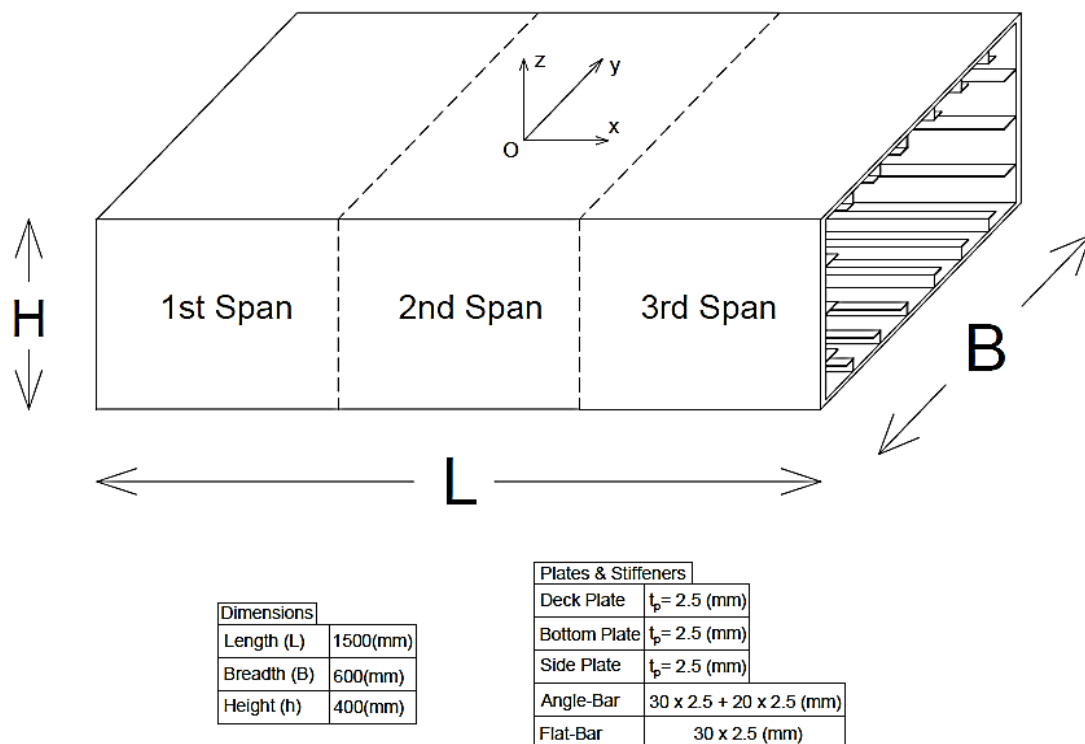
Με δεδομένο ότι στα πλαίσια αυτής της εργασίας, σε αντίθεση με αυτή του paper αναφοράς, δεν λαμβάνονται υπόψη οι αρχικές γεωμετρικές ατέλειες (initial geometric imperfections) για την εκτίμηση της αντοχής και δεδομένης της τάξης μεγέθους της απόκλισης των μέγιστων καμπτικών ροπών ($\approx 5-6\%$ **Mu-paper**), η σχεδίαση θεωρείται αποδεκτή.

Δεν παρατηρήθηκε βελτίωση της ακρίβειας της λύσης με την χρήση οκτάκομβων (S8R) έναντι τετράκομβων στοιχείων (S4R) ή με την πύκνωση του πλέγματος διακριτοποίησης.

* (Για τα Cases 2-1, 2-4, που φέρουν το πυκνότερο πλέγμα διακριτοποίησης, το πρόγραμμα δεν κατάφερε να επιβάλει όλο το φορτίο στο δοκίμιο (Αδυναμία σύγκλισης της λύσης). Για αυτό τον λόγο η ροπή που υπολογίστηκε σε αυτές τις περιπτώσεις δεν μπορεί να συγκριθεί με την ροπή που υπολογίζεται στο paper.)

5.4.3 Ανάλυση για μη γραμμική συμπεριφορά του 3-SPAN Reckling No.23 – Υπολογισμός M_{Ultimate}

Με την ολοκλήρωση της μελέτης για το δοκίμιο Reckling No.23, διερευνάται η επίδραση του μήκους του δοκιμίου στην μέγιστη ικανότητα παραλαβής καμπτικής ροπής, **M_{Ultimate}**. Για αυτό σχεδιάζεται το δοκίμιο που διαφέρει από το Reckling No.23 μόνο στη διάσταση του μήκους και ονομάζεται **3-Span Reckling No.23**. Η γεωμετρία του παρουσιάζεται στην εικόνα 5.16. Το δοκίμιο φέρει τις ίδιες ελαστοπλαστικές ιδιότητες με το 1-Span Reckling No.23 και κατά την ανάλυση στο λογισμικό λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της μη γραμμικής γεωμετρίας. Ανάμεσα σε κάθε span τοποθετούνται κατακόρυφες ενισχύσεις από ξεχωριστά parts που σχεδιάστηκαν ή ισοδύναμες μοντελοποιήσεις αυτών με επιβολή constraints, που έχουν τον ρόλο εγκαρσίων φρακτών.



Εικόνα 5.16: Διαστάσεις του 3-Span Reckling No.23

Όπως έγινε για το δοκίμιο 1-Span Reckling No.23 έτσι και για το δοκίμιο 3-Span Reckling No.23, κατασκευάζεται ένα μοντέλο μόνο με στοιχεία κελύφους (shell elements) και ένα δεύτερο με στοιχεία κελύφους για τα ελάσματα και στοιχεία δοκού για τα ενισχυτικά (beam & shell elements). Γίνεται μελέτη για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων διακριτοποίησης : 10, 20 [mm], μόνο για τετράκομβα στοιχεία (S4R, Reduced Integration). Οι εγκάρσιες φρακτές σχεδιάζονται σε τρία διαφορετικά σενάρια:

- 1) Μοντελοποίηση με ανεξάρτητα parts και ένωση τους στο βασικό μοντέλο με **tie constraint** στη διαμήκη θέση του κάθε span.
- 2) Μοντελοποίηση με **Multiple Constraint Point – Beam Type** συνδέοντας ένα reference point (master point), που τοποθετείται στη διαμήκη θέση του κάθε span, με όλα τα σημεία του βασικού μοντέλου που βρίσκονται στην ίδια διαμήκη θέση (slave nodes).
- 3) Μοντελοποίηση με **Multiple Constraint Point – Link Type** συνδέοντας ένα reference point (master point), που τοποθετείται στη διαμήκη θέση του κάθε span, με όλα τα σημεία του βασικού μοντέλου που βρίσκονται στην ίδια διαμήκη θέση (slave nodes).

➤ Ιδιότητες Υλικού

Το υλικό θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό τέλεια πλαστικό με Young's Modulus $E=210$ GPa, Poisson's ratio $\nu=0.3$, όριο διαρροής $\sigma_y=246$ MPa με πλαστική παραμόρφωση (Plastic strain) = 0

➤ Επιβολή Φορτίσεων και Οριακών Συνθήκων

Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να πραγματοποιείται η πλαστική διαρροή του υλικού. Η φόρτιση της δοκού προκύπτει από την επιβολή στροφής θ (rad), κατά το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο με θετική την ωρολογιακή φορά, σε σημεία MCPs που τοποθετούνται στα δύο άκρα του δοκιμίου. Τα σημεία MCPs συσχετίζονται με όλα τα points και edges που βρίσκονται στην ίδια διαμήκη θέση (slave nodes). Οι οριακές συνθήκες των MCPs παρουσιάζονται στον πίνακα 5.9:

Πίνακας 5.9: Οριακές συνθήκες MCPs 3-Span Reckling No.23.

Τοποθεσία	Μετατοπίσεις			Στροφές		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Αριστερό άκρο (άρθρωση)	fix	fix	fix	0.015 (rad)	-	fix
Δεξί άκρο (κύλιση)	fix	fix	-	-0.015 (rad)	-	-
Διαμήκης Θέση Span, MCP, Beam Type	S*	S	S	S	S	S
Διαμήκης Θέση Span, MCP, Link Type	-	-	-	S	S	S

* Το σύμβολο S υποδεικνύει την κοινή συμπεριφορά (ομοιόμορφες μετατοπίσεις και στροφές) όλων των κόμβων που βρίσκονται σε κάθε Span. Στο Παράρτημα Γ γίνεται εκτενέστερη αναφορά για τη χρήση Beam και Link Type MCPs.

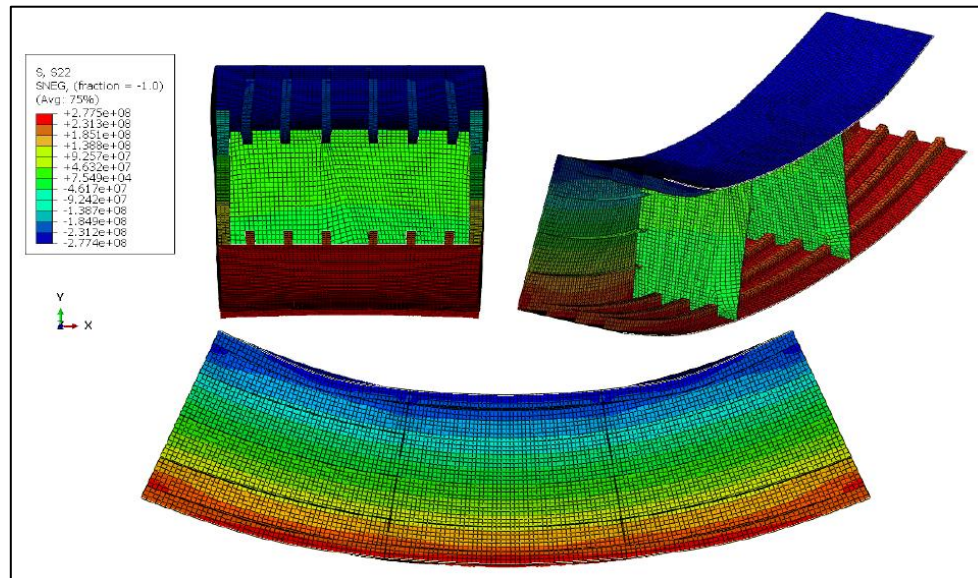
Σύμφωνα με τις παραμέτρους που εξετάζουμε, δημιουργείται ο πίνακας 5.10 στον οποίο συγκεντρώνονται όλες οι περιπτώσεις.

Πίνακας 5.10: Cases 3-Span Reckling No.23- Implicit analysis

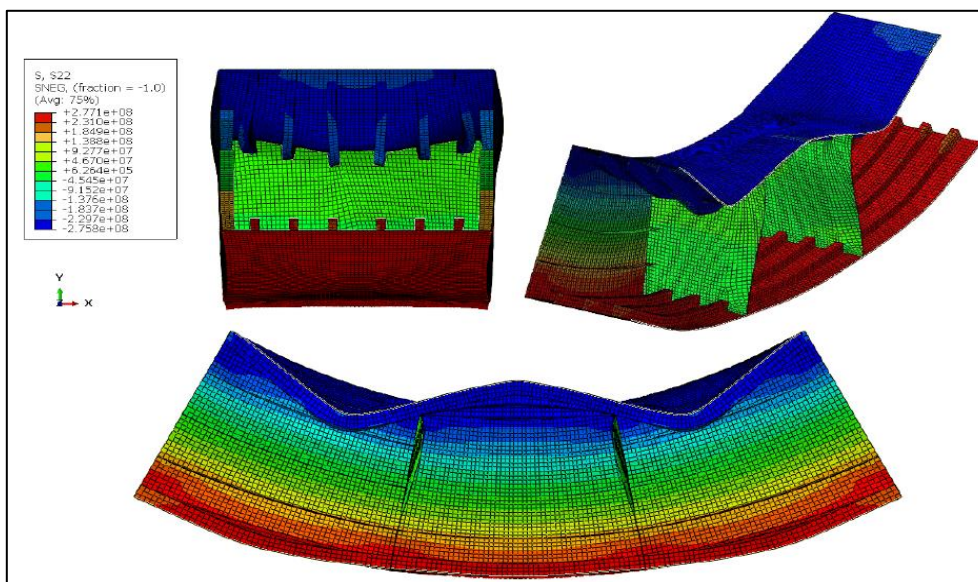
3-Span CASES No.	Model Strategy		Element Type	Mesh Density (mm)		Μοντελοποίηση εγκάρσιων φρακτών		
	Beams & Shells	Shells only	S4R	10	20	Ανεξάρτητα Parts	MCPs Beam Type	MCPs Link Type
CASE 3-S.1-1		•	•	•		•		
CASE 3-S.1-2		•	•	•			•	
CASE 3-S.1-3		•	•	•				•
CASE 3-S.1-4		•	•		•	•		
CASE 3-S.1-5		•	•		•		•	
CASE 3-S.1-6		•	•		•			•
CASE 3-S.2-1	•		•	•		•		
CASE 3-S.2-2	•		•	•			•	
CASE 3-S.2-3	•		•	•				•
CASE 3-S.2-4	•		•		•	•		
CASE 3-S.2-5	•		•		•		•	
CASE 3-S.2-6	•		•		•			•

5.4.3.1 Αποτελέσματα

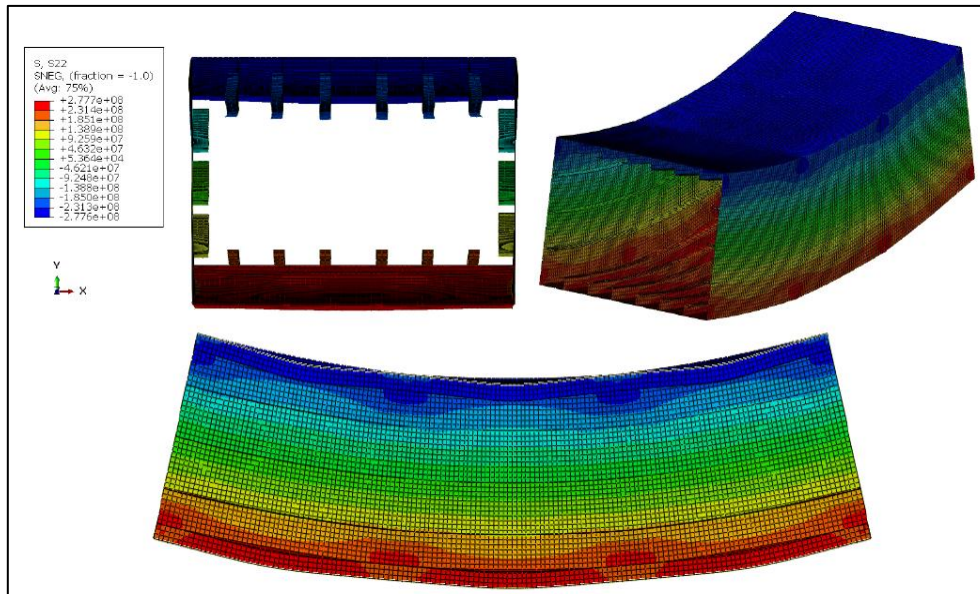
Ενδεικτικά παρουσιάζονται για τα τρία πρώτα Cases **3-S.1-(1~3)** οι παραμορφωμένες καταστάσεις στην ελαστική (ακριβώς πριν αρχίσει η διαρροή υλικού) και στην ελαστοπλαστική περιοχή (στο σημείο που παραλαμβάνεται το μέγιστο καμπτικό φορτίο M_u).



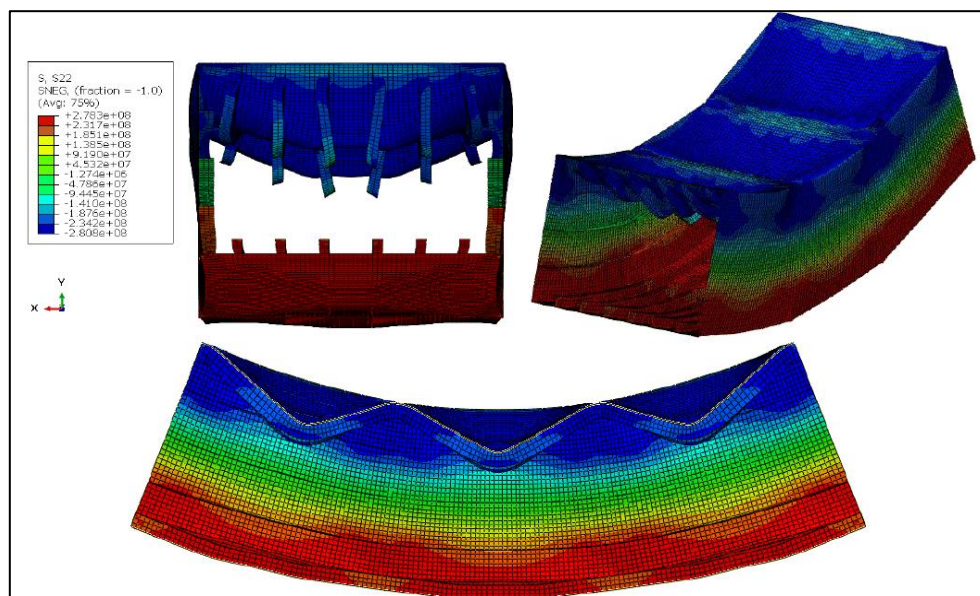
Εικόνα 5.17,α : Case 3-S.1-1 Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα (scale deformation: 100)



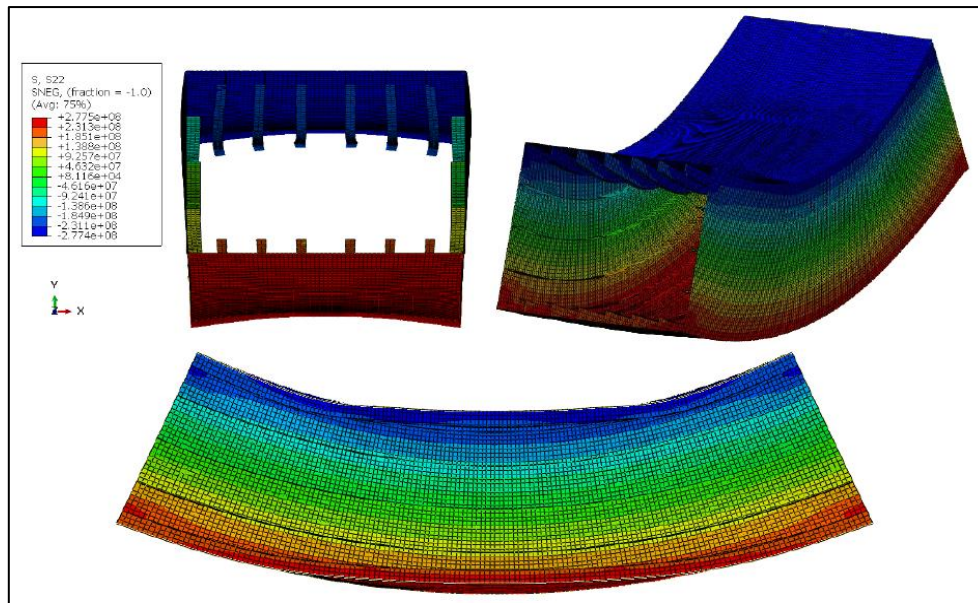
Εικόνα 5.17,β : Case 3-S.1-1 Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου (scale deformation: 100)



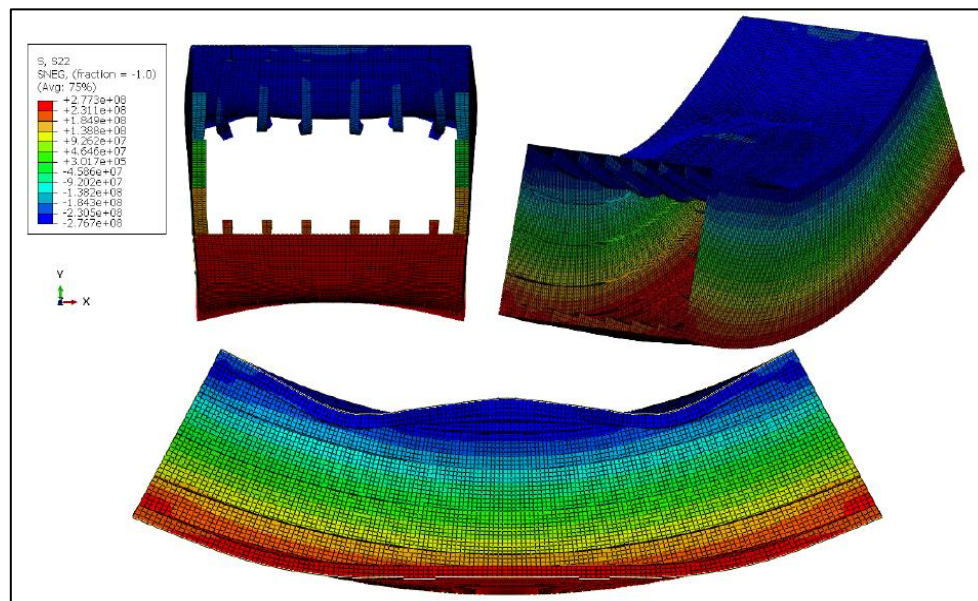
Εικόνα 5.18,α : Case 3-S.1-2 Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα
(scale deformation: 50)



Εικόνα 5.18,β : Case 3-S.1-2 Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου
(scale deformation: 50)



Εικόνα 5.19,α : Case 3-S.1-3 Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα (scale deformation: 100)



Εικόνα 5.19,β Case 3-S.1-3 Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου (scale deformation: 100)

Οι παραγόμενες καμπύλες M-k της κάθε περίπτωσης συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες M-k του paper αναφοράς. Συγκεκριμένα τα CASES 3-S.1-(1~6) αυτής της εργασίας συγκρίνονται με το Case P.2-3 (που αφορά 3-Span δοκίμιο και μοντελοποίηση μόνο με shell elements) του paper. Τα CASES 3-S.2-(1~6)

Πίνακας 5.11: Απόκλιση **Multimate** από **Mu-paper** - Μοντελοποίηση με shell elements, 3-Span Reckling No.23 - Implicit analysis

Case No.	Multimate (kN·m)	Ποσοστιαία απόκλιση από Mu-paper, Case P.2-3
CASE 3-S.1-1	0.242526	5.77
CASE 3-S.1-2	0.256513	8.66
CASE 3-S.1-3	0.263520	4.52
CASE 3-S.1-4	0.256757	5.87
CASE 3-S.1-5	0.262993	8.44
CASE 3-S.1-6	0.254071	4.76

Πίνακας 5.12 Απόκλιση **Multimate** από **Mu-paper** - Μοντελοποίηση με beam & shell elements, 3-Span Reckling No.23 - Implicit analysis

Case No.	Multimate (kN·m)	Ποσοστιαία απόκλιση από Mu-paper, Case P.2-5
CASE 3-S.2-1	0.270366	12.36*
CASE 3-S.2-2	0.261219	8.56
CASE 3-S.2-3	0.267216	11.05*
CASE 3-S.2-4	0.258428	7.39
CASE 3-S.2-5	0.263318	9.43
CASE 3-S.2-6	0.265219	10.22*

- Για την μοντελοποίηση μόνο με στοιχεία κελύφους, παρατηρείται απόκλιση ($\approx 5\%$) των μέγιστων καμπτικών ροπών σε σχέση με την μέγιστη τιμή που υπολογίζεται στο αντίστοιχο σενάριο του paper (Case P.2-3). Εξαιρέση αποτελούν τα Cases **3-S.1-2** και **3-S.1-5** που αποκλίνουν περαιτέρω από την τιμή αναφοράς ($\approx 8-9\%$).
- Για την μοντελοποίηση με στοιχεία δοκού και στοιχεία κελύφους, η απόκλιση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια καθώς διαφέρουν από το αντίστοιχο σενάριο του Paper (Case P.2-5) περίπου 8-9%. Εξαιρούνται τα Cases **3-S.2-1**, **3-S.2-3**, **3-S.2-6** που εκτός από διαφορά στις μέγιστες τιμές καμπτικού φορτίου (απόκλιση $\approx 10-12\%$), έχουν διαφορετική μορφή καμπύλης M-k (διάγραμμα 5.6).

* Οι περιπτώσεις με διαφορετική μορφή καμπύλης δεν αποτελούν αξιόπιστο αποτέλεσμα της ανάλυσης.

Βασική διαφοροποίηση στην ανάλυση του 3-Span σε σχέση με το 1-Span Reckling No.23, αποτελεί η χρήση damping factor στο step module προκειμένου να γίνει δυνατή η σύγκλιση της λύσης μέχρι την επιβολή ολόκληρου του φορτίου. Το step τροποποιείται εισάγοντας μικρές τιμές για dissipated energy fraction. Με αυτή τη διαδικασία γενικά ευνοείται η επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων όμως ταυτόχρονα

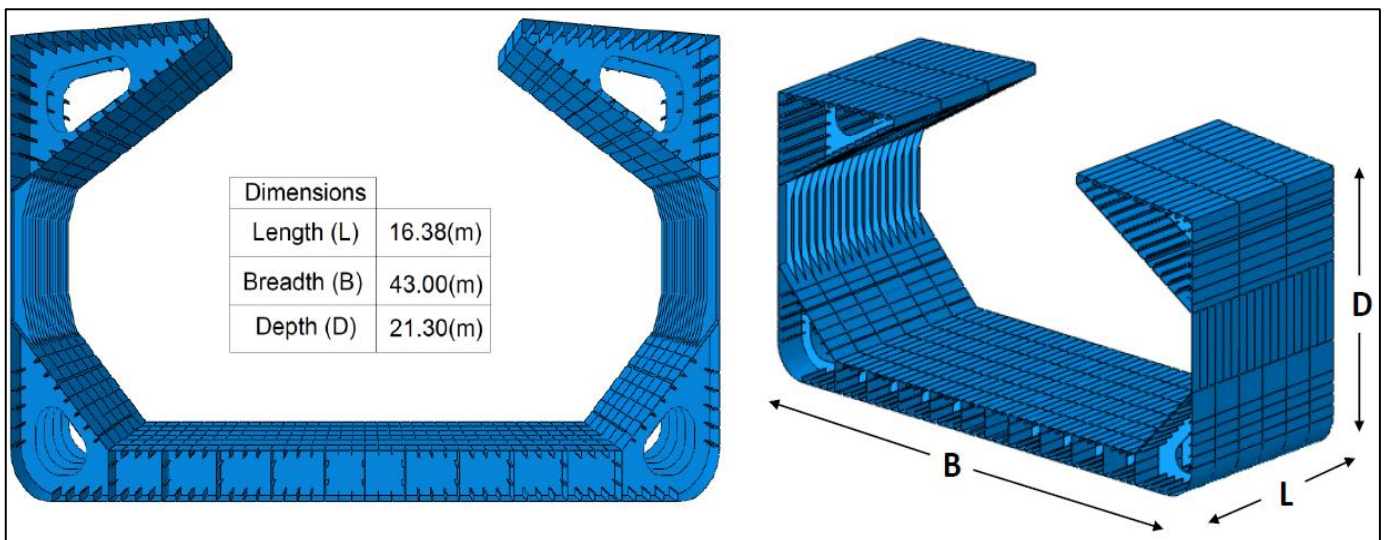
παρατηρήθηκε υπερεκτίμηση του μέγιστου καμπτικού φορτίου, ιδιαίτερα στις μοντελοποιήσεις με στοιχεία δοκού και στοιχεία κελύφους.

Η επίδραση του διαφορετικού αριθμού span επέτρεψε την εμφάνιση ανώτερων ιδιομορφών λυγισμού (εικόνες 5.17~19) χωρίς να έχει σημαντική επίδραση στη μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή.

5.5 Μελέτη της κατασκευής bulk carrier

5.5.1 Ανάλυση για μη γραμμική συμπεριφορά του Bulk Carrier- Υπολογισμός $M_{ultimate}$

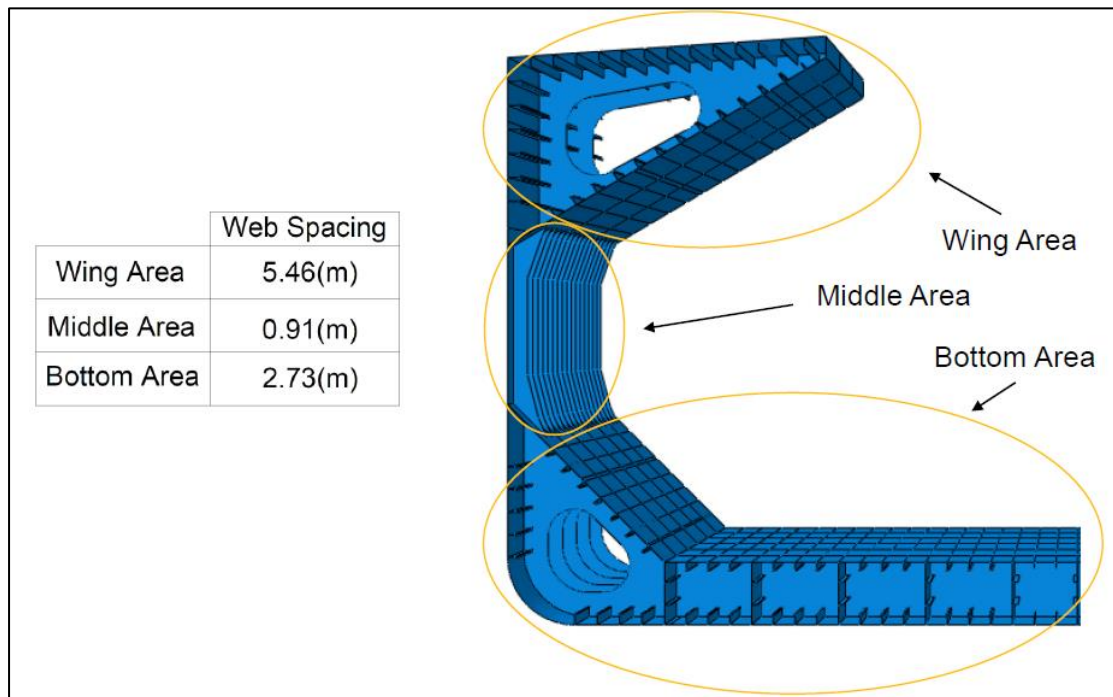
Η γεωμετρία της μέσης τομής του πλοίου που μελετήθηκε καθώς και οι διαστάσεις του μοντέλου που σχεδιάστηκε στο λογισμικό φαίνονται στην εικόνα 5.20. Επίσης το *Παράρτημα Δ* περιέχει εικόνες με το σχέδιο της μέσης τομής και αναλυτικό πίνακα διαστάσεων για τα ενισχυτικά. Οι διαστάσεις του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ταυτίζονται με τις βασικές διαστάσεις του πραγματικού bulk carrier εκτός από αυτή του μήκους.



Εικόνα 5.20: Διαστάσεις και γεωμετρία του bulk carrier

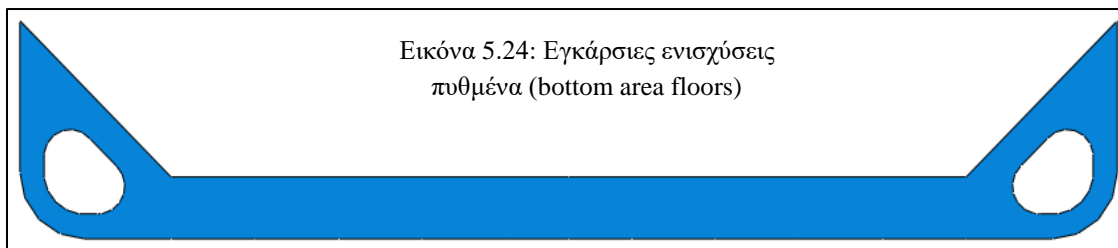
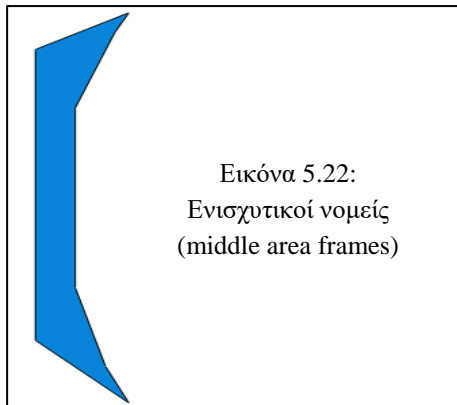
Αφού προηγήθηκε η ανάλυση του **3-Span Reckling No.23**, η επιλογή μήκους του μοντέλου του πλοίου είναι κατάλληλη ώστε κάθε περιοχή του (wing, middle, bottom area) να έχει έκταση τουλάχιστον 3 ή περισσότερα Span. Σύμφωνα με το σχέδιο της

μέσης τομής η ισαπόσταση των εγκάρσιων ενισχύσεων μεταβάλλεται ανά τις περιοχές της (στο ίδιο μήκος έχουμε διαφορετικό αριθμό Span). Στην εικόνα 5.21 φαίνεται που οριοθετείται η καθεμία από τις περιοχές καθώς και οι αντίστοιχες ισαποστάσεις του εγκάρσιου συστήματος ενίσχυσης. Επομένως με μήκος κατασκευής $L=16.38$ m (το οποίο είναι ακέραιο πολλαπλάσιο των επιμέρους ισαποστάσεων), θα έχουμε 3 Spans στη περιοχή του καταστρώματος (Wing area), 18 Spans στην ενδιάμεση περιοχή (Middle area) και 6 Spans στην περιοχή του πυθμένα (Bottom area).



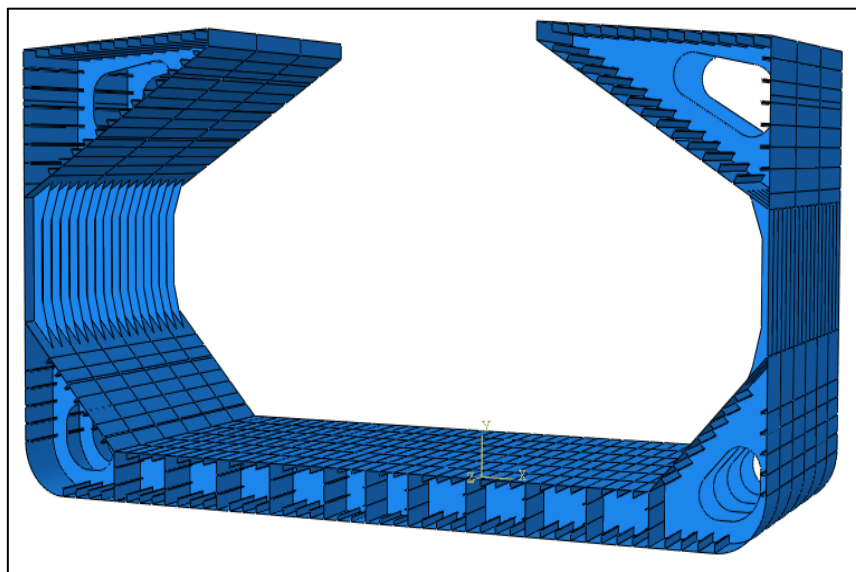
Εικόνα 5.21: Όρια περιοχών της μέσης τομής και ισαπόσταση εγκάρσιων ενισχύσεων.

Αρχικά κατασκευάστηκαν δύο ξεχωριστά μοντέλα που αποτελούνται από τα ελάσματα και τα διαμήκη ενισχυτικά της πραγματικής κατασκευής. Το πρώτο μοντέλο περιέχει μόνο στοιχεία κελύφους ενώ στο δεύτερο για τα ελάσματα χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία κελύφους και για τα διαμήκη ενισχυτικά στοιχεία δοκού. Ακόμη σε ανεξάρτητα parts σχεδιάστηκαν οι εγκάρσιες ενισχύσεις που φέρει το πλοίο στην περιοχή του πυθμένα (εικόνα 5.24) και του καταστρώματος (εικόνα 5.23) καθώς και οι νομείς που ενισχύουν την ενδιάμεση περιοχή (εικόνα 5.22).



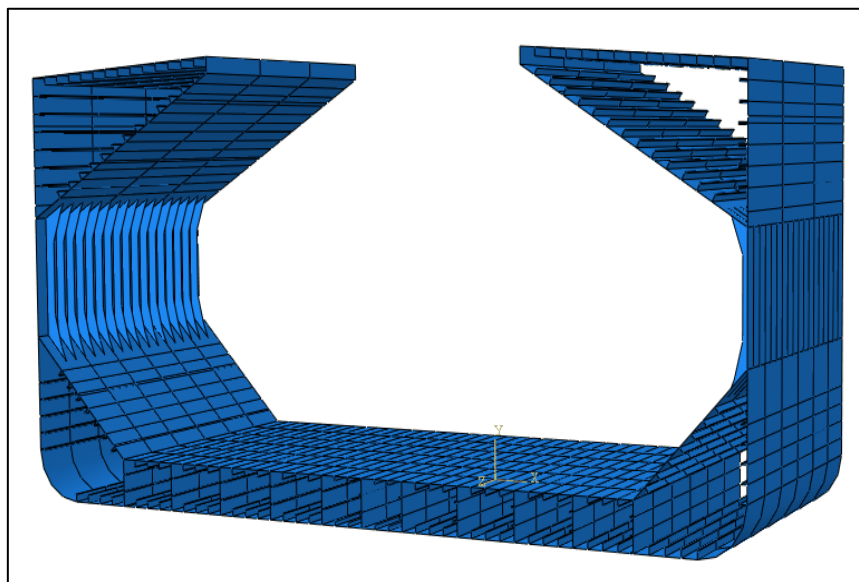
Τα parts στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στα βασικά μοντέλα (εντός του assembly module με την εντολή merge/cut instances → merge from geometry, remove intersecting boundaries). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε στα ενιαία parts που προέκυψαν. Επομένως δημιουργούνται τα εξής σενάρια:

1. **Περίπτωση Α**, στην οποία όλα τα parts (ελάσματα, διαμήκη ενισχυτικά, εγκάρσιες ενισχύσεις καταστρώματος και πυθμένα, νομείς) είναι ενωμένα (merged).



Εικόνα 5.25: Bulk carrier – Περίπτωση Α

2. **Περίπτωση Β**, στην οποία ενώνονται τα ελάσματα, διαμήκη ενισχυτικά και νομείς, ενώ γίνεται ισοδύναμη μοντελοποίηση των εγκαρσίων ενισχύσεων καταστρώματος και πυθμένα με επιβολή constraints: **MCP – Beam Type** και με **MCP – Link Type**.



Εικόνα 5.26: Bulk carrier – Περίπτωση Β

➤ Ιδιότητες Υλικού

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν φέρουν ελαστοπλαστικές ιδιότητες (Πίνακας 5.13) σύμφωνα τα στοιχεία που δίνονται για αυτά στο σχέδιο της μέσης τομής. Η κατασκευή αποτελείται από τρία διαφορετικά υλικά. Στα πλαίσια της μη γραμμικής ανάλυσης, αυτά θεωρήθηκαν γραμμικά ελαστικά τέλεια πλαστικά. Στους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση της μη γραμμικής γεωμετρίας στην αντοχή του φορέα. Ακολουθεί πίνακας με τις ιδιότητες τους:

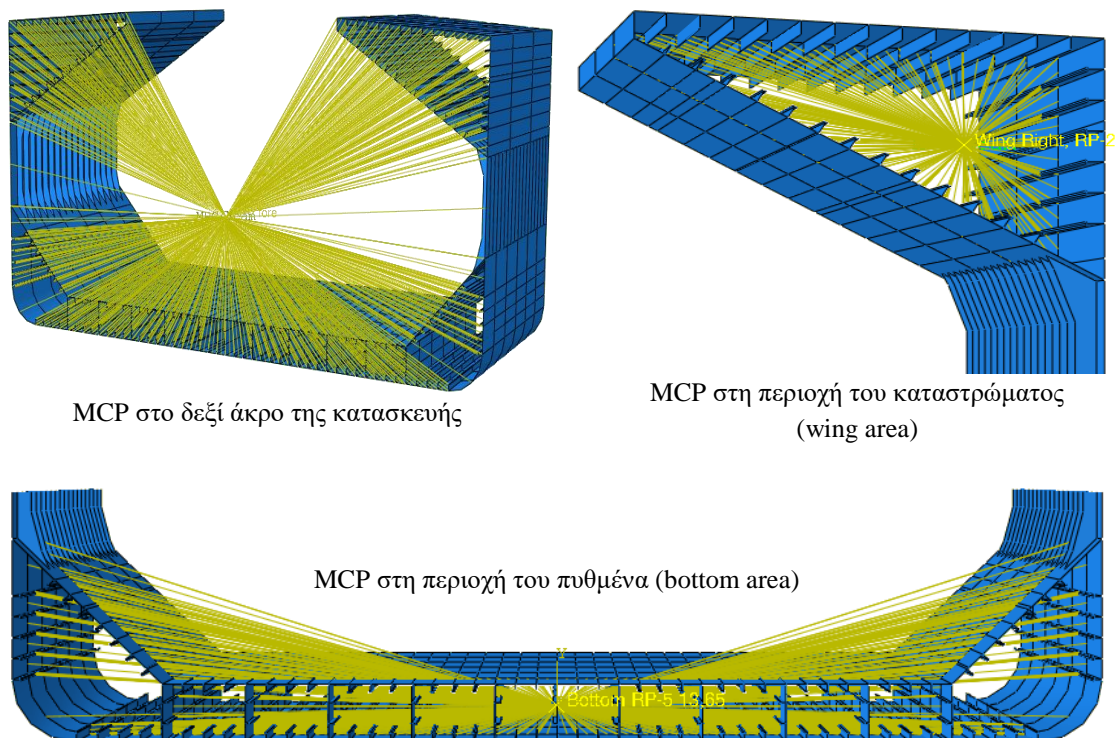
Πίνακας 5.13: Ιδιότητες κατασκευαστικών υλικών του υπό μελέτη bulk carrier

<i>Material Properties</i>	Ελαστική συμπεριφορά		Πλαστική συμπεριφορά	
	Young's Modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν	Όριο διαρροής σ_y (MPa)	Plastic strain
No Marked Steel - Mild Steel Grade 'A'	206	0.3	235	0
Marked 'AH', 'DH' - Higher Tensile Steel Grade 'A', 'D'	206	0.3	315	0
Marked 'AH36', 'DH36', 'EH36' - Higher Tensile Steel Grade 'A', 'D', 'E'	206	0.3	355	0

➤ Επιβολή Φορτίσεων και Οριακών Συνθήκων

Οι επιβαλλόμενες φορτίσεις πρέπει να είναι αρκετά μεγάλες ώστε να πραγματοποιείται η πλαστική διαρροή του υλικού. Επειδή η απόσταση του καταστρώματος από το οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας είναι μεγαλύτερη, για το ίδιο καμπτικό φορτίο οι αναπτυσσόμενες τάσεις αναμένονται μεγαλύτερες από αυτές που θα προέκυπταν στον πυθμένα. Όπως αναφέρθηκε το μοντέλο μελετάται τόσο σε φαινόμενα hogging όσο και sagging. Το ελάχιστο καμπτικό φορτίο (άρα και κρίσιμο) για το οποίο αστοχεί η κατασκευή, προσδιορίζεται σε κατάσταση sagging. Αυτό οφείλεται σε ένα συνδυασμό των φαινομένων λυγισμού και διαρροής υλικού που εμφανίζονται κατά την θλίψη του καταστρώματος.

Στην κατασκευή επιβάλλονται συνθήκες πάκτωσης στο MCP που βρίσκεται στο αριστερό της άκρο και στροφή θ (rad) κατά το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο στο MCP που βρίσκεται στο δεξί της άκρο. Σε κάθε άκρο της κατασκευής συσχετίζονται με το αντίστοιχο MCP όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στην ίδια διαμήκη θέση (εικόνα 5.27 - άνω αριστερά περιοχή). Στην περίπτωση που γίνεται ισοδύναμη μοντελοποίηση των εγκαρσίων φρακτών με MCP Beam ή Link Type, δεν δεσμεύεται κάποιος βαθμός ελευθερίας σε αυτά τα σημεία προκειμένου να δημιουργηθεί ομοιόμορφη παραμόρφωση (μετατοπίσεις και στροφές) σε όλους τους κόμβους που βρίσκονται στην ίδια διαμήκη θέση και έχουν συσχετιστεί μέσω rigid links με τα MCPs. Σε κάθε Span αντιστοιχεί ξεχωριστό MCP (εικόνα 5.27 – κάτω και άνω δεξιά περιοχή) . Οι οριακές συνθήκες των MCPs παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14.



Εικόνα 5.27: Συνδέσεις κόμβων με το Multi-Constraint point, bulk carrier

Πίνακας 5.14: Οριακές συνθήκες MCPs bulk carrier.

Τοποθεσία	Μετατοπίσεις			Στροφές			
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z	
Αριστερό άκρο (πάκτωση)	fix	fix	fix	fix	fix	fix	
Δεξί άκρο (ελεύθερο)	-	-	-	Sagging -0.0035 (rad)	Hogging 0.0045 (rad)	-	-
Διαμήκης Θέση Span, MCP, Beam Type	S*	S	S	S	S	S	
Διαμήκης Θέση Span, MCP, Link Type	-	-	-	S	S	S	

* Το σύμβολο S υποδεικνύει την κοινή συμπεριφορά (ομοιόμορφες μετατοπίσεις και στροφές) όλων των κόμβων που βρίσκονται σε κάθε Span. Στο *Παράρτημα Γ* γίνεται εκτενέστερη αναφορά για τη χρήση Beam και Link Type MCPs.

Γίνεται μελέτη για μέγεθος στοιχείων διακριτοποίησης : 500 [mm], μόνο για τετράκομβρα στοιχεία (S4R, Reduced Integration).

Κατά την μελέτη του **Reckling No.23** υπήρχε συμμετρία ως προς ένα οριζόντιο επίπεδο και το υλικό στο άνω και κάτω μέρος του (προσεγγιστικά το κατάστρωμα και ο πυθμένας του φορέα) ήταν ίδιο. Για αυτούς τους λόγους με επιβολή στροφής, με μέτρο αρκετά μεγάλο για να προκληθεί η κατάρρευση και ανεξαρτήτως του πρόσημού της, ήταν δυνατός ο υπολογισμός του συγκεκριμένου μέγιστου καμπτικού φορτίου που μπορεί να παραλάβει ο φορέας. Δηλαδή η συμπεριφορά του **Reckling No.23** σε φαινόμενα hogging και sagging ήταν ακριβώς η ίδια.

Στην περίπτωση του **bulk carrier** αυτές οι προϋποθέσεις παύουν να ισχύουν επομένως κρίνεται αναγκαία η μελέτη του φορέα και ο προσδιορισμός της **M_{ultimate}** τόσο σε φαινόμενα θλίψης όσο και εφελκυσμού του καταστρώματος. Στον πίνακα 5.15 συγκεντρώνονται, για τις διαφορετικές παραμέτρους, όλες οι περιπτώσεις που εξετάστηκαν για φαινόμενο **sagging**, ενώ αντίστοιχα στον πίνακα 5.16 όλες οι περιπτώσεις για φαινόμενο **hogging**:

Πίνακας 5.15: Cases bulk carrier, Sagging

<i>Bulk carrier Cases No.</i>		CASE A-1,S	CASE A-2,S	CASE B-1,S	CASE B-2,S	CASE B-3,S	CASE B-4,S	
<i>Model Strategy</i>	Beams & Shells**	•		•	•			
	Shells only*		•			•	•	
<i>Element Type</i>	S4R	•	•	•	•	•	•	
<i>Mesh Density (mm)</i>	500	•	•	•	•	•	•	
<i>Μοντελοποίηση εγκάρσιων φρακτών</i>	Περίπτωση A		•	•				
	Περίπτωση B	MCPs - Beam Type			•		•	
		MCPs - Link Type				•		•

* Για όλα τα Cases με μοντελοποίηση αποκλειστικά με στοιχεία κελύφους έγινε Implicit Analysis με χρήση damping factor.

** Για όλα τα Cases με μοντελοποίηση με στοιχεία δοκού και κελύφους έγινε Explicit Analysis καθώς παρουσιάστηκαν προβλήματα σύγκλισης.

Πίνακας 5.16: Cases bulk carrier, Hogging

<i>Bulk carrier Cases No.</i>		CASE A-1,H	CASE A-2,H	CASE B-1,H	CASE B-2,H	CASE B-3,H	CASE B-4,H	
<i>Model Strategy</i>	Beams & Shells**	•		•	•			
	Shells only*		•			•	•	
<i>Element Type</i>	S4R	•	•	•	•	•	•	
<i>Mesh Density (mm)</i>	500	•	•	•	•	•	•	
<i>Μοντελοποίηση εγκάρσιων φρακτών</i>	Περίπτωση A		•	•				
	Περίπτωση B	MCPs - Beam Type			•		•	
		MCPs - Link Type				•		•

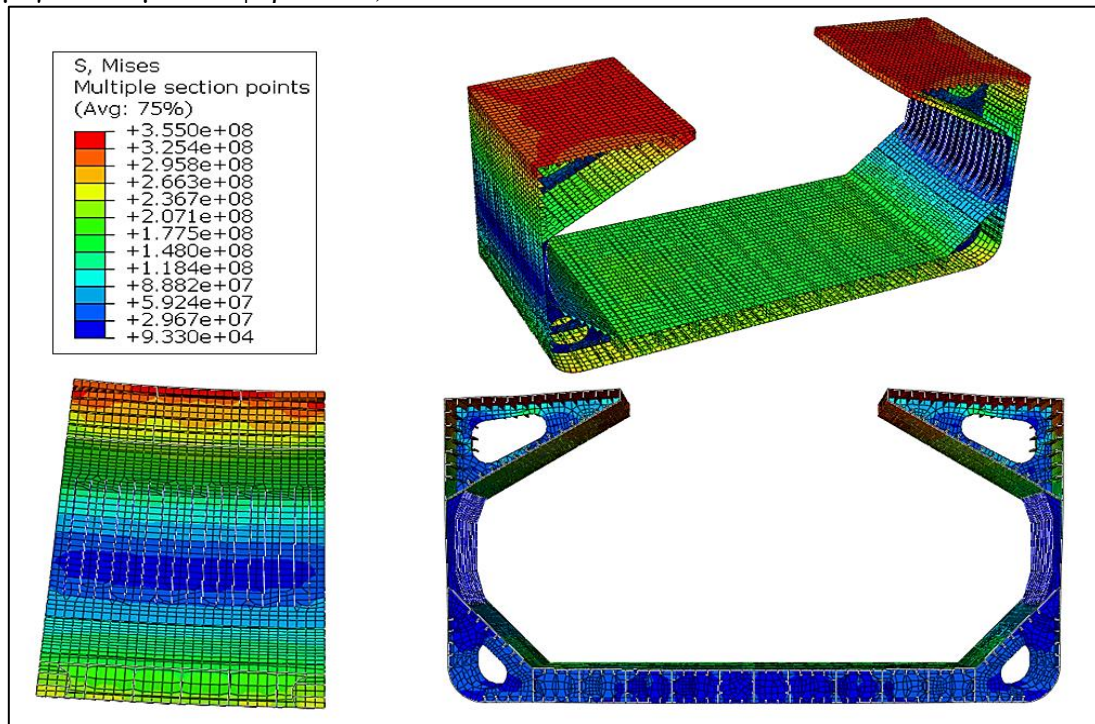
* Για όλα τα Cases με μοντελοποίηση αποκλειστικά με στοιχεία κελύφους έγινε Implicit Analysis με χρήση damping factor.

** Για όλα τα Cases με μοντελοποίηση με στοιχεία δοκού και κελύφους έγινε Explicit Analysis καθώς παρουσιάστηκαν προβλήματα σύγκλισης.

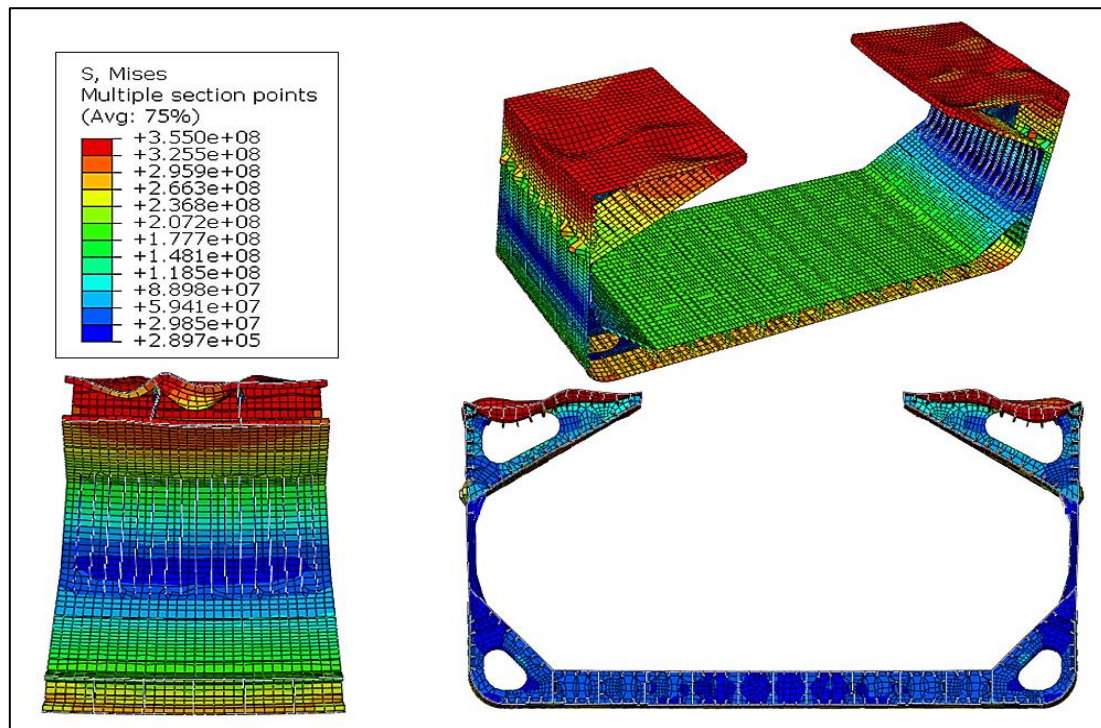
5.5.1.1 Αποτελέσματα

Ενδεικτικά παρουσιάζονται για το φαινόμενο **sagging** τα Cases **A-2,S**, **B-2,S** και **B-3,S** οι παραμορφωμένες καταστάσεις στην ελαστική (ακριβώς πριν αρχίσει η διαρροή

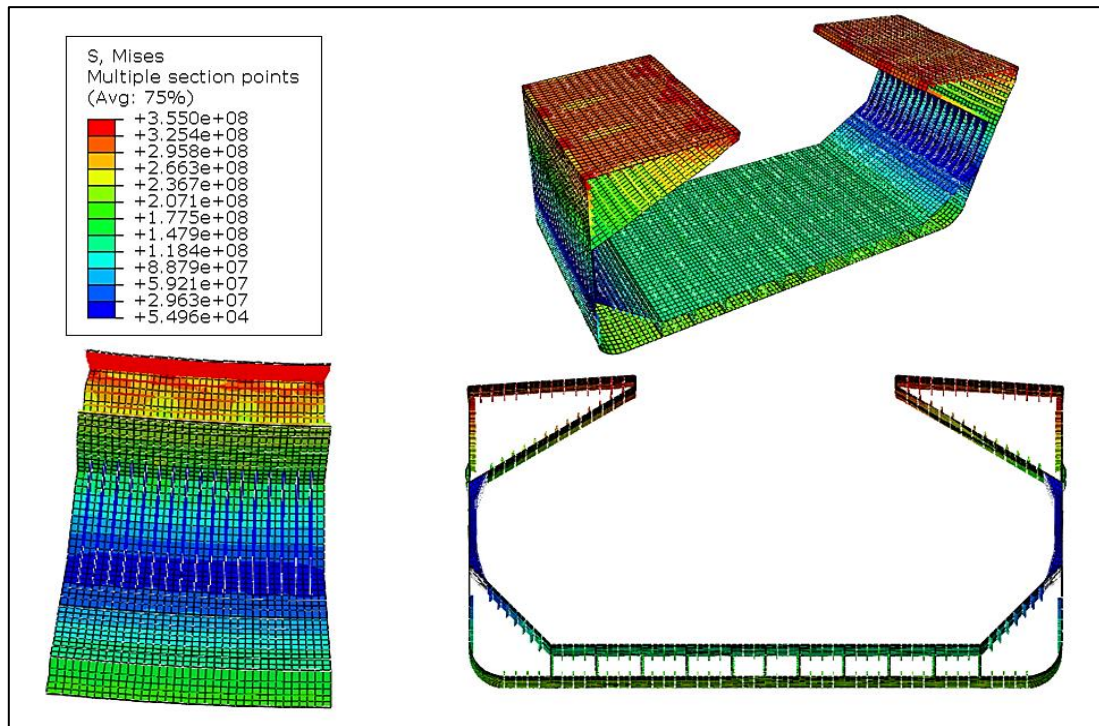
υλικού) και στην ελαστοπλαστική περιοχή (στο σημείο που παραλαμβάνεται το μέγιστο καμπτικό φορτίο M_u).



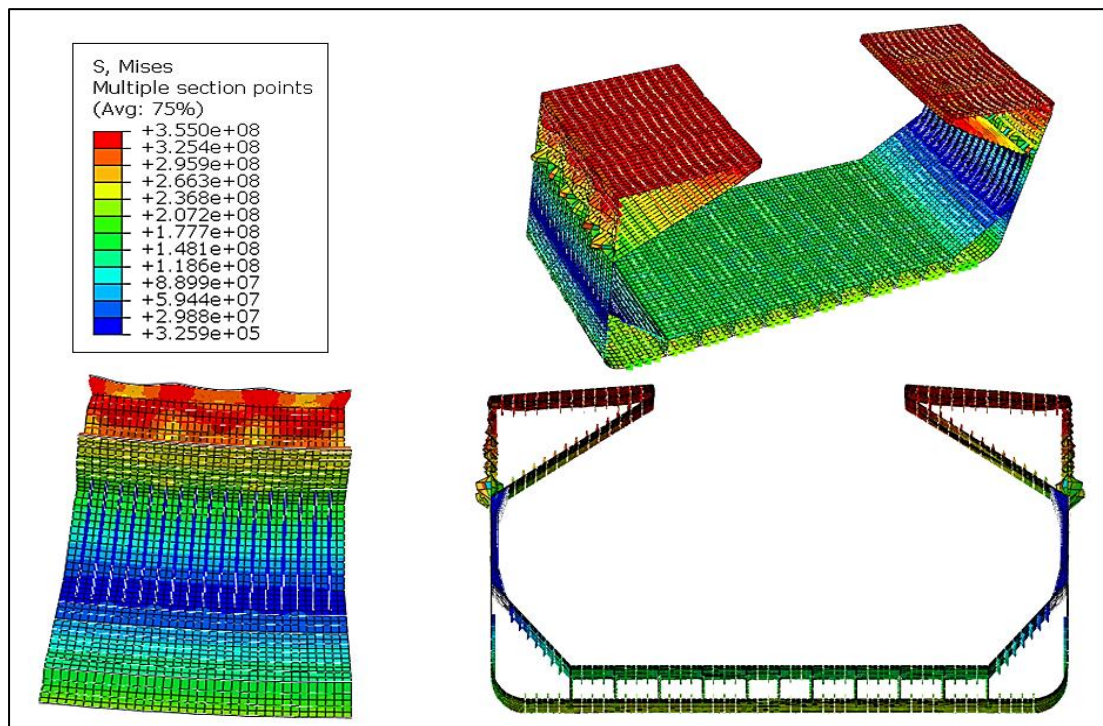
Εικόνα 5.28,α : Case A-2,S Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα
(scale deformation: 50)



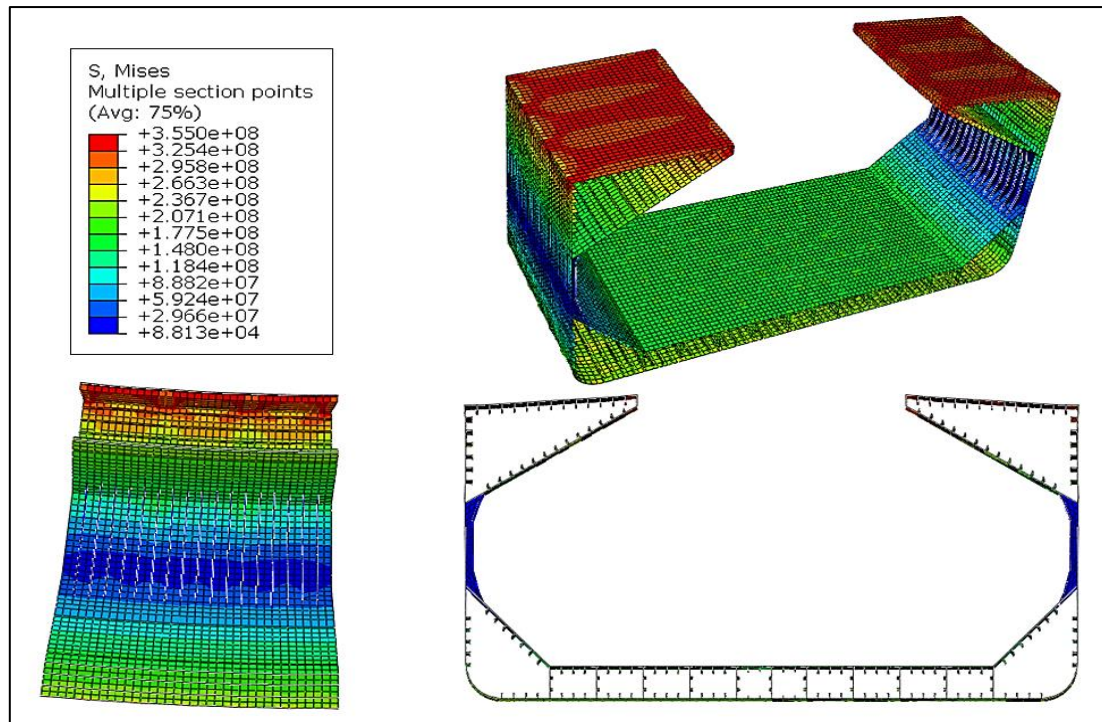
Εικόνα 5.28,β : Case A-2,S Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου
(scale deformation: 50)



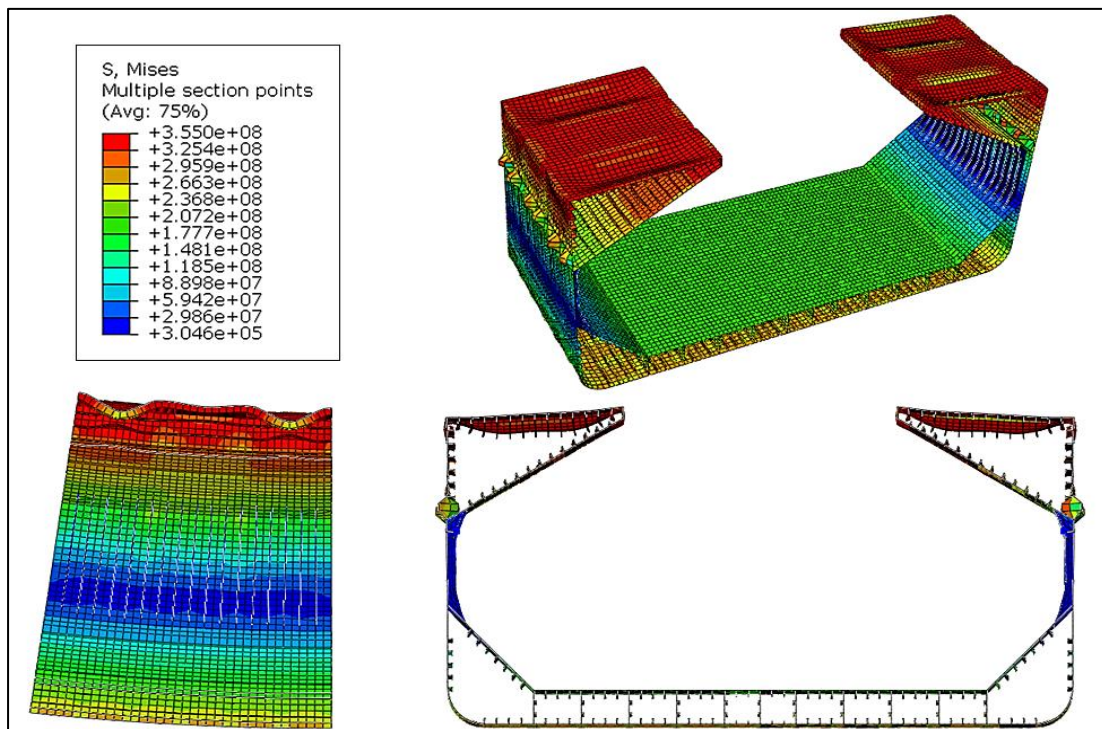
Εικόνα 5.29,α : Case B-2,S Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα
(scale deformation: 50)



Εικόνα 5.29,β : Case B-2,S Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου
(scale deformation: 50)



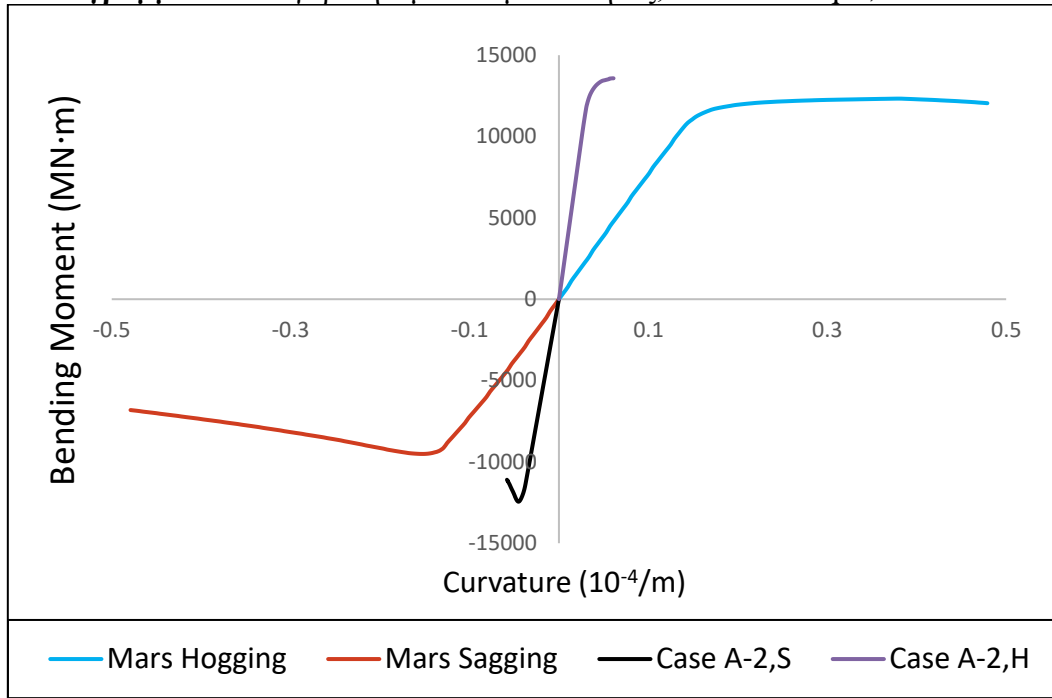
Εικόνα 5.30,α : Case B-3,S Όριο ελαστικής συμπεριφοράς του φορέα
(scale deformation: 50)



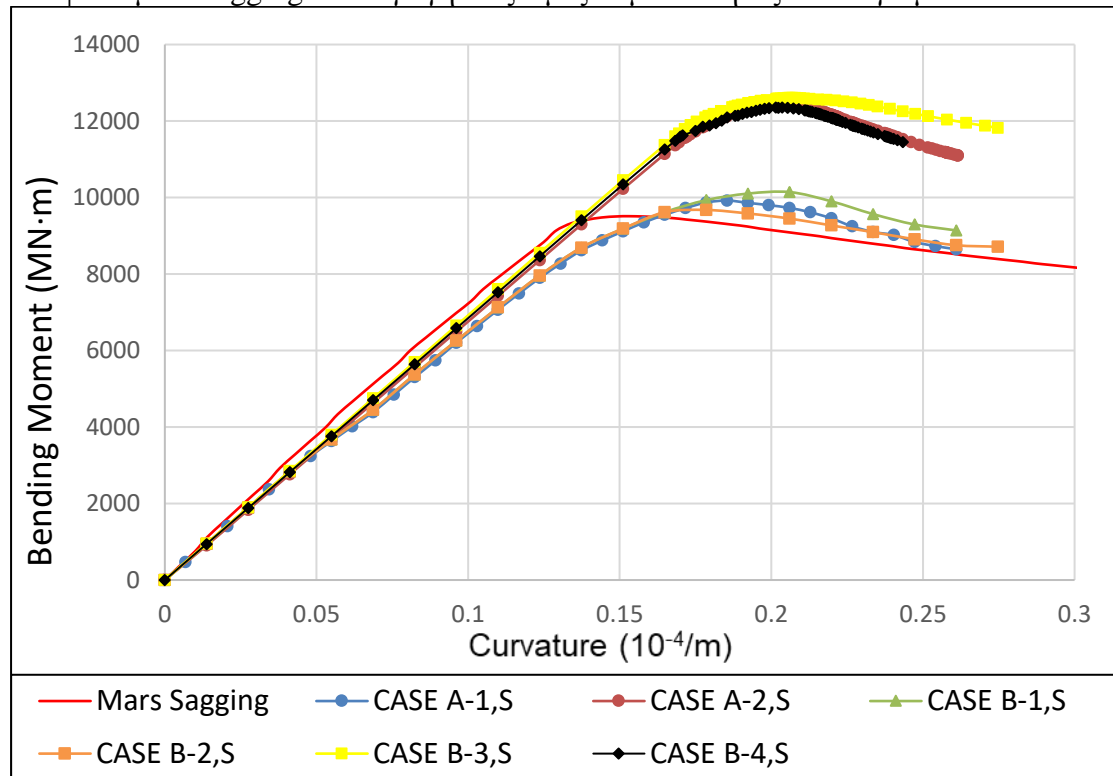
Εικόνα 5.30,β : Case B-3,S Παραλαβή του μέγιστου καμπτικού φορτίου
(scale deformation: 50)

Οι παραγόμενες καμπύλες M-k της κάθε περίπτωσης συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες του Mars2000. Για διευκόλυνση της σύγκρισης στα τελικά διαγράμματα οι τιμές καμπυλότητας των αποτελεσμάτων του Abaqus **ανάγονται** στις αντίστοιχες τιμές του Mars. Όμως αρχικά μόνο για τα Case **A-2,S**, Case **A-2,H** παρουσιάζεται στο διάγραμμα 5.7 η πραγματική σχέση των τιμών καμπυλότητας μεταξύ Abaqus και Mars:

Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση τιμών καμπυλότητας, Mars – Abaqus, bulk carrier

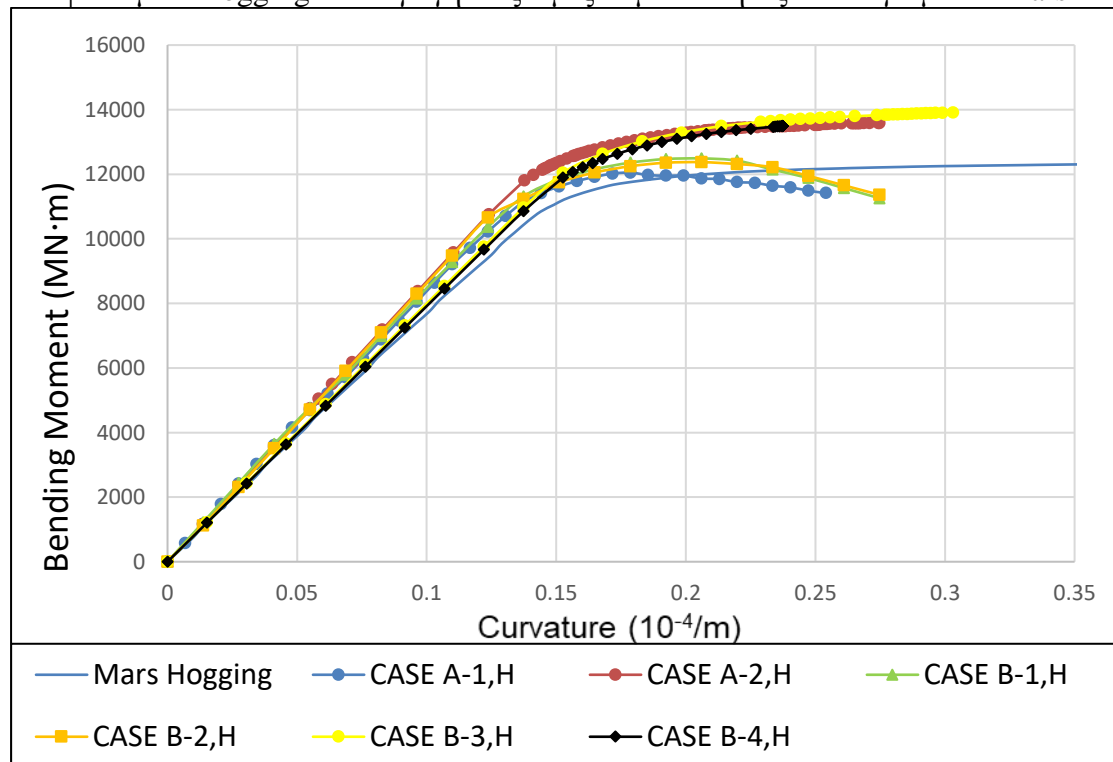


Διάγραμμα 5.8: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, Mars – Abaqus, bulk carrier, φαινόμενο sagging – Αναγωγή στις τιμές καμπυλότητας του λογισμικού Mars.



* Οι αρνητικές τιμές, σύμφωνα με την σύμβαση προσήμων, της καμπτικής ροπής αντικαθίστανται σε απόλυτη τιμή.

Διάγραμμα 5.9: Σύγκριση διαγραμμάτων M-k, Mars – Abaqus, bulk carrier, φαινόμενο hogging – Αναγωγή στις τιμές καμπυλότητας του λογισμικού Mars



Πίνακας 5.17 Απόκλιση **Multimate Mars** – Abaqus, φαινόμενο **sagging**

Case No.	Multimate (kN·m)	Ποσοστιαία απόκλιση από M_{u-Mars}, Sagging	Αλγόριθμος επίλυσης του λογισμικού Abaqus
CASE A-1,S	-9920.9	4.30	Explicit
CASE A-2,S	-12445.0	30.83	Standard
CASE B-1,S	-10141.9	6.62	Explicit
CASE B-2,S	-9674.1	1.70	Explicit
CASE B-3,S	-12605.3	32.52	Standard
CASE B-4,S	-12353.0	29.87	Standard

Πίνακας 5.18 Απόκλιση **Multimate Mars** – Abaqus, φαινόμενο **hogging**

Case No.	Multimate (kN·m)	Ποσοστιαία απόκλιση από M_{u-Mars}, Hogging	Αλγόριθμος επίλυσης του λογισμικού Abaqus
CASE A-1,H	12050.1	-2.27	Explicit
CASE A-2,H	13579.2	10.12	Standard
CASE B-1,H	12489.1	1.28	Explicit
CASE B-2,H	12374.1	0.35	Explicit
CASE B-3,H	13920.2	12.89	Standard
CASE B-4,H	13492.3	9.42	Standard

- Στα Cases που μελετάται το φαινόμενο **hogging**, τόσο για τις **στατικές** (χρήση αλγορίθμου Abaqus/Standard) όσο για τις **δυναμικές** αναλύσεις (χρήση αλγορίθμου Abaqus/Explicit), υπάρχει μικρότερη απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του λογισμικού Mars και του Abaqus συγκριτικά με τα Cases που αφορούν το φαινόμενο **sagging**.
- Οι **δυναμικές** αναλύσεις (Abaqus), εξίσου για τα **δύο** φαινόμενα που μελετήθηκαν, προσέγγισαν σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα της επαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου (Mars), καθώς η ελάχιστη ποσοστιαία απόκλιση (**CASE B-2,H**) είναι μικρότερη του |1|% ενώ η μέγιστη (**CASE B-1,S**) πλησιάζει το |7|%.
- Τα αποτελέσματα των **στατικών** αναλύσεων (Abaqus) παρουσίασαν μικρότερη συσχέτιση τιμών με αυτά του λογισμικού Mars. Η ελάχιστη ποσοστιαία απόκλιση (**CASE A-2,H**) είναι μικρότερη του |11|% ενώ η μέγιστη απόκλιση (**CASE B-3,S**) φτάνει έως και |33|%. Συμπερασματικά, αν και ήταν απαραίτητη για την εξαγωγή

αποτελεσμάτων, η τροποποίηση της παραμέτρου **dissipated energy fraction** στο Step Module, υπερεκτίμησε (θετικά ποσοστά αποκλίσεων) σημαντικά την μέγιστη αντοχή της κατασκευής.

- Τα τέσσερα Cases: **A-1~2,S** και **A-1~2,H** στα οποία γίνεται μοντελοποίηση των εγκάρσιων ενισχύσεων με ανεξάρτητα parts, αποτελούν προσεγγίσεις μεγαλύτερης ακρίβειας όσον αφορά την γεωμετρία της πραγματικής κατασκευής. Ωστόσο στις περισσότερες περιπτώσεις στα αποτελέσματα των τεσσάρων Cases: **B-(2,4),S** και **B-(2,4),H** όπου οι εγκάρσιες ενισχύσεις μοντελοποιήθηκαν ισοδύναμα με επιβολή περιορισμών **MCP – Link Type**, παρατηρήθηκε πιο συντηρητική εκτίμηση αντοχής της κατασκευής. Με χαμηλότερα όρια αντοχής, οι μοντελοποιήσεις αυτές προσέφεραν πιο ασφαλή μελέτη του Bulk Carrier.

Οι Ming Cai Xu, Zhao Jun Song, Jin Pan στα πλαίσια της δικής τους δημοσίευσης παρουσίασαν ανάλυση ευαισθησίας για διαφορετικές τιμές του χρονικού διαστήματος επιβολής του φορτίου (loading time) για τα **Explicit Cases** της μελέτης. Η μέγιστη από αυτές τις τιμές (2 sec) ήταν περίπου το 30% του αντίστοιχου χρόνου φόρτισης της πραγματικής κατασκευής (ως φόρτιση του αληθινού προβλήματος θεωρήθηκε κύμα με περίοδο 5.53 και 5.27 sec). Παρατηρήθηκε ότι για αύξηση της τιμής της παραμέτρου, μειώνεται η αντοχή της κατασκευής σε διαμήκη κάμψη αλλά αυξάνεται εξαιρετικά η απαίτηση σε χρόνο επίλυσης [6] .

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία δεν έγινε μελέτη ευαισθησίας της συγκεκριμένης παραμέτρου για τις **δυναμικές** αναλύσεις, όμως το χρονικό διάστημα επιβολής του φορτίου θεωρήθηκε ως το 100% του πραγματικού χρόνου φόρτισης. Το φορτίο επιβάλλεται σε πολύ μικρά βήματα (χρονικά σταθερά) ώστε η κάθε δυναμική και εξ'ορισμού χρονικά μεταβαλλόμενη ανάλυση να επιλυθεί ψευδοστατικά. Επίσης η ανάλυση έγινε στοιχείο προς στοιχείο (element by element) και σε κάθε περίπτωση έγινε έλεγχος της ποσοστιαίας απόκλισης της ολικής κινητικής ενέργειας (ALLKE) από την ολική εσωτερική ενέργεια (ALLIE) ώστε να είναι μικρότερη του 5%. Επομένως όλοι οι λόγοι που αναφέρονται σε αυτή την παράγραφο σε συνδυασμό με την υπερεκτίμηση που επέφερε στα όρια αντοχής η τροποποίηση της παραμέτρου **dissipated energy fraction**, συνέβαλαν στην μεγάλη θετική απόκλιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις **στατικές** αναλύσεις.

Τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα των **δυναμικών** αναλύσεων προσφέρουν μεγαλύτερη αξιοπιστία στην μελέτη αντοχής της κατασκευής. Ακόμη επαληθεύονται και από τα αυτά που δημιουργήθηκαν μέσω της επαναληπτικής επαυξητικής μεθόδου καθώς πλησιάζουν καλύτερα τα όρια αντοχής συγκριτικά με τα αποτελέσματα των **στατικών** αναλύσεων. Ωστόσο βασικό μειονέκτημα των **δυναμικών** αναλύσεων αποτελεί το κόστος μελέτης. Ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος ήταν περίπου δέκα φορές μεγαλύτερος (5,500~6,500 λεπτά για κάθε ένα Explicit Case) σε σχέση από τον αντίστοιχο χρόνο υπολογισμού των **στατικών** αναλύσεων. Σε μια εκτεταμένη έρευνα που περιλαμβάνει πλήθος **δυναμικών** αναλύσεων (χρήση αλγορίθμου Abaqus/Explicit) θα πρέπει να εκτιμηθεί με προσοχή η σημαντική επίδραση του χρόνου επίλυσης στο κόστος της μελέτης.

Κεφάλαιο 6. Ανασκόπηση διπλωματικής εργασίας

Με την ολοκλήρωση του υπολογιστικού μέρους της εργασίας γίνεται εκ νέου αναφορά στη διαδικασία σύνθεσης ολόκληρης της μελέτης και της ερευνητικής της πορείας. Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν:

- Η σύγκριση διαφορετικών μεθόδων μελέτης αντοχής των κατασκευών
- Η διερεύνηση της επίδρασης ξεχωριστών και ισοδύναμων τρόπων μοντελοποίησης του ίδιου φυσικού προβλήματος.

Για τον υπολογισμό αντοχής χρησιμοποιήθηκαν η επαυξητική επαναληπτική μέθοδος (Mars2000) και η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus). Με το λογισμικό Mars2000 μελετήθηκε η κατασκευή **Bulk Carrier** ενώ με το λογισμικό Abaqus/CAE μελετήθηκαν οι κατασκευές **Reckling No.23** και **Bulk Carrier**. Στα πλαίσια της ανάλυσης αμελήθηκαν οι στρεπτικές καταπονήσεις, η επίδραση συνδυαστικών φορτίσεων, οι παραμένουσες τάσεις και αρχικές ατέλειες των κατασκευαστικών στοιχείων. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων, για τον προσδιορισμό των ορίων αντοχής, σε φαινόμενα sagging, hogging, των δύο υπό μελέτη κατασκευών, εξετάστηκαν οι παράμετροι:

- Γεωμετρικές διαστάσεις της κατασκευής (**number of Spans**)
- Τύπος στοιχείων γεωμετρίας: στοιχεία κελύφους και στοιχεία δοκών (**shell, beam elements**)
- Διαστάσεις πλέγματος διακριτοποίησης (**Mesh density**)
- Τύπος στοιχείων διακριτοποίησης: 4-κομβικά ή 8-κομβικά (Mesh element type: **S4R, S8R**)

Στις μοντελοποιήσεις με έκταση μεγαλύτερη του ενός Span εξετάστηκε επίσης η επίδραση του διαφορετικού τρόπου μοντελοποίησης των εγκαρσίων ενισχύσεων. Οι περιπτώσεις περιλαμβάνουν:

- Μοντελοποίηση των εγκαρσίων ενισχύσεων με **ανεξάρτητα parts**.
- Ισοδύναμη μοντελοποίηση των εγκαρσίων ενισχύσεων με επιβολή περιορισμών **MPC beam & link type**

Τέλος πέρα από την μελέτη ισοδύναμων τρόπων μοντελοποίησης έγινε προσπάθεια εύρεσης γεωμετρίας του Bulk Carrier μικρότερης έκτασης και ταυτόχρονα ισοδύναμης και αντιπροσωπευτικής του φυσικού προβλήματος. Στο *Παράρτημα Α* παρουσιάζονται οι δοκιμαστικές μοντελοποιήσεις που μελετήθηκαν. Με κύριο γνώμονα την μείωση του γεωμετρικού όγκου μοντελοποίησης γεγονός, που θα επέφερε την επιθυμητή μείωση σε:

- Χρόνο μοντελοποίησης της κατασκευής
- Στον απαιτούμενο χρόνο επίλυσης από το λογισμικό
- Σε ευρύτερη κλίμακα στο κόστος μελέτης αντοχής της κατασκευής

6.1 Συγκεντρωτικά συμπεράσματα

Η ενότητα αφορά τις πιο σημαντικές παρατηρήσεις που έγιναν κατά την διάρκεια της ανάλυσης.

Αρχικά πρέπει να γίνει αναφορά στην απόκλιση των αποτελεσμάτων, για την μέγιστη αντοχή, των μεθόδων που έγινε εφαρμογή. Η επαναληπτική επαυξητική μέθοδος (Mars2000), που χρησιμοποιήθηκε μόνο για την κατασκευή **Bulk Carrier**, παρήγαγε πιο συντηρητικά αποτελέσματα μέγιστης αντοχής τόσο σε φαινόμενα sagging όσο και hogging. Μάλιστα ο υπολογιστικός χρόνος ήταν ιδιαίτερα μικρότερος συγκριτικά με τις αναλύσεις της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Abaqus).

Η εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων επέτρεψε την δοκιμή εναλλακτικών-ισοδύναμων μοντελοποιήσεων του ίδιου προβλήματος. Δεδομένου του ίδιου τύπου ανάλυσης (στατική-δυναμική ανάλυση) παρατηρήθηκε σημαντική σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Ωστόσο κατά την σύγκριση των δύο τύπων αναλύσεων, οι στατικές αναλύσεις (Abaqus/Standard) υπολόγισαν αισθητά μεγαλύτερα όρια αντοχής σε σχέση με τις δυναμικές αναλύσεις (Abaqus/Explicit). Επομένως οι δυναμικές αναλύσεις υπερεκτιμούν σε μικρότερο βαθμό την αντοχή την κατασκευής και βρίσκονται πλησιέστερα στα αποτελέσματα της επαναληπτικής επαυξητικής μεθόδου. Για αυτό τον λόγο και επειδή μέσω αυτών αποφεύγονται προβλήματα σύγκλισης της λύσης, που εμφανίζονται μόνο σε στατικές αναλύσεις, είναι προτεινόμενες για περαιτέρω ανάλυση. Βέβαια πριν την εφαρμογή τους πρέπει να εκτιμηθεί και η εξαιρετικά μεγάλη απαίτηση τους σε χρόνο υπολογισμού συγκριτικά με τις στατικές αναλύσεις.

Η μελέτη της κατασκευής **Reckling No.23** με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων επιτάχυνε την διερεύνηση εναλλακτικών-ισοδύναμων τρόπων μοντελοποίησης καθώς ως γεωμετρία μικρού μεγέθους, σε σχέση με το Bulk Carrier, είχε χαμηλή απαίτηση σε χρόνο υπολογισμού.

Η παράμετρος της **γεωμετρικής έκτασης** από 1 σε 3 Span επέτρεψε την εμφάνιση ανώτερων ιδιομορφών λυγισμού στην κατασκευή καθιστώντας την μοντελοποίηση περισσότερο αντιπροσωπευτική του φυσικού προβλήματος και έδωσε σχετικά πιο συντηρητικά όρια αντοχής. Για τις περιπτώσεις μοντελοποιήσεων με έκταση ανώτερη του ενός Span τα σενάρια στα οποία οι εγκάρσιες ενισχύσεις σχεδιάζονται με **ανεξάρτητα parts** αντιπροσωπεύουν καλύτερα της πραγματική κατασκευή. Στις περιπτώσεις εφαρμογής περιορισμών **MPC Beam type** δεν παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση των ορίων αντοχής. Στις περιπτώσεις εφαρμογής περιορισμών **MPC Link type** υπολογίστηκαν πιο συντηρητικά όρια αντοχής τόσο σε φαινόμενα sagging όσο και hogging. Με το φαινόμενο αυτό να οφείλεται στο είδους του συγκεκριμένου περιορισμού που δεσμεύει μόνο **τις μετατοπίσεις** των συσχετισμένων κόμβων και οδηγεί σε διαφορετικές μορφές παραμορφώσεων (Παράρτημα Γ), η τελευταία περίπτωση μοντελοποίησης προτείνεται, ως πιο συντηρητική, για ασφαλέστερη σχεδίαση.

Η μεταβολή του **μεγέθους πλέγματος διακριτοποίησης** δεν επηρέασε σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων στις περιπτώσεις ανάλυσης του Reckling No.23 για αυτό για το Bulk Carrier κρίθηκε σκόπιμη η ανάλυση με μία μόνο, συγκεκριμένη τιμή πλέγματος διακριτοποίησης. Κατά την μελέτη και των δύο κατασκευών το μέγεθος του πλέγματος επιλέχθηκε να είναι μικρότερο των ελάχιστων ισαποστάσεων εγκάρσιων ενισχύσεων κάθε περίπτωσης.

Η γεωμετρία με **αποκλειστική χρήση στοιχείων κελύφους** για όλα τα κατασκευαστικά μέρη έναντι **συνδυασμού στοιχείων δοκού** για τα ενισχυτικά και **στοιχείων κελύφους** για τα ελάσματα της κατασκευής, μπορεί να χαρακτηριστεί πιο

κατάλληλη καθώς η ανάλυσή της παρήγαγε χαμηλότερα όρια αντοχής ενώ λόγω της ομοιογένειας των στοιχείων (μόνο στοιχεία κελύφους) δημιουργήθηκαν λιγότερα προβλήματα σύγκλισης της λύσης.

Η χρήση οκτάκομβων (S8R) έναντι τετράκομβων (S4R) **στοιχείων διακριτοποίησης** αύξησε τον απαιτούμενο χρόνο ανάλυσης της κατασκευής Reckling No.23, χωρίς να προσφέρει σημαντική βελτίωση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Για αυτό το λόγο για την ανάλυση της πολύ μεγαλύτερης γεωμετρίας, Bulk Carrier, επιλέχθηκαν μόνο τετράκομβοι (S4R) στοιχεία διακριτοποίησης.

Οι αναλύσεις στις οποίες έγινε εφαρμογή του δυναμικού αλγορίθμου **Abaqus/Explicit** αύξησαν κατά πολύ τον χρόνο επίλυσης σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιήθηκε ο στατικός αλγόριθμος **Abaqus/Standard**. Ωστόσο η εφαρμογή τους κρίθηκε απαραίτητη καθώς ξεπεράστηκαν προβλήματα σύγκλισης της λύσης που εμφανίστηκαν στις στατικές αναλύσεις. Επίσης για την κατασκευή Bulk Carrier υπολογίστηκαν πιο συντηρητικά όρια αντοχής σε φαινόμενα hogging και sagging και αυτό καθιστά πιο ασφαλή την μελέτη αντοχής με τις Explicit αναλύσεις.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνοντας την παρουσίαση και τον σχολιασμό των αποτελεσμάτων αυτής της διπλωματικής εργασίας, μπορούν να προταθούν ιδέες για μελλοντική επέκταση του αντικειμένου της. Από την αρχή της εργασίας έγιναν ξεκάθαρες οι απλοποιήσεις και παραδοχές του προβλήματος που εξετάστηκε.

Επομένως προτείνεται μία πιο ολοκληρωμένη μελέτη που εξετάζει την επίδραση στην που έχουν οι **αρχικές ατέλειες** και οι **παραμένουσες τάσεις** στην αντοχή της κατασκευής. Επίσης μπορεί να γίνει ανάλυση για **συνδυαστική καμπτική και στρεπτική** φόρτιση των κατασκευών. Ακόμη η **επιβολή πίεσης** στα εξωτερικά τοιχώματα της κατασκευής μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα το φυσικό πρόβλημα της υδροστατικής και υδροδυναμικής πίεσης που ασκείται στο πλοίο. Κατά την ανάλυση των μοντελοποιήσεων με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων προτείνεται για τις κρίσιμες περιοχές που αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις και παραμορφώσεις η **τοπική πύκνωση του πλέγματος διακριτοποίησης** για την δημιουργία ακριβέστερων αποτελεσμάτων.

Τέλος, η προσπάθεια εύρεσης γεωμετρίας, μικρότερων διαστάσεων και ταυτόχρονα αντιπροσωπευτικής της πλήρους μοντελοποίησης, μπορεί να συνεχιστεί σε μελλοντική έρευνα. Οι δοκιμαστικές μοντελοποιήσεις της παρούσας μελέτης, μαζί με όσα συμπεράσματα προέκυψαν από την ανάλυσή τους, παρουσιάζονται στο *Παράρτημα Α* που ακολουθεί αμέσως μετά την βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Owen F. Hughes, Jeom Kee Paik, ‘*Ship Structural Analysis and Design*’, Society of Naval Architects & Marine Engineers, 2010
- [2] Robert D. Cook, ‘*Finite Element Modeling for Stress Analysis*’, John Wiley & Sons, Inc, 1995
- [3] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, JR, Elliot R. Eisenberg, ‘*Vector Mechanics for Engineers: Statics, 9th Edition*’, McGraw-Hill Education, 2013
- [4] Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, JR, John T. Dewolf, David E. Mazurec, ‘*Statics & Mechanics of Materials, 2nd Edition*’, McGraw-Hill Education, 2017
- [5] A. E. Mansour, A. Thayamballi, ‘*Ultimate strength of a ship’s hull girder plastic and buckling modes*’, Ship Structure Committee, 1980
- [6] Ming Cai Xu, Zhao Jun Song, Jin Pan, ‘*Study on influence of nonlinear finite element method models on ultimate bending moment for hull girder*’, Thin Walled Structures, Elsevier, 2017
- [7] Hadi K.K. Amlashi, Torgeir Moan, ‘*Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study Part 1: Nonlinear finite element modeling and ultimate hull girder capacity*’, Marine Structures, 2008
- [8] Shi Gui-Jie, Wang De-Yu, ‘*Ultimate strength model experiment regarding a container ship’s hull structures*’, Ships and Offshore Structures, 2012
- [9] Jeom Kee Paik, Bong Ju Kim, Jung Kwan Seo, ‘*Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part 3 hull girders*’, Ocean Engineering, Elsevier, 2008
- [10] Eivind Steen, Eirik Byklum, Kjetil G. Vilming, Tom K. Ostvold, ‘*Computerized Buckling Models for Ultimate Strength Assessment of Stiffened Ship Hull Panels*’, Norske Veritas
- [11] Mohammad Reza Khedmati, Ahmad Reza Rashedi, ‘*Nonlinear finite element modeling and progressive collapse analysis of a product carrier under longitudinal bending*’, Applied Ocean Research, Elsevier, 2014
- [12] Zhiyong Pei, Masahiko Fujikubo, ‘*Application of Idealised Structural Unit Method to Progressive Collapse Analysis of Ship’s Hull Girder under Longitudinal Bending*’, The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2004
- [13] Zhi Shu, Torgeir Moan, ‘*Ultimate hull girder strength of a bulk carrier under combined global and local loads in the hogging and alternate hold loading condition using nonlinear finite element analysis*’, Jasnaoe, 2011

[14] Samuel Izaak Latumahina, Muhammad Zubair Muis Alie, Ganding Sitepu, ‘‘*The Ultimate Strength of Double Hull Oil Tanker Due to Grounding and Collision*’’, International Conference on Nuclear Technologies and Sciences, 2017

[15] Muzibur Rahman, Rajia Sultana Kamol, Reyana Islam, ‘‘*Structural Analysis of a Ship on Global Aspect Using Ansys*’’, International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science, 2017

[16] O. Ozguc , P. K. Das & N. Barltop, ‘‘*A proposed method to evaluate hull girder ultimate strength*’’, Ships and Offshore Structures, 2006

[17] I.A.C.S., ‘‘Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers Harmonized’’, January 2018

[18] Bureau Veritas, ‘‘*CSR for Bulk Carriers and Oil Tankers assessments within MARS*’’, 2015

[19] Dassault Systemes, ‘‘SIMULIA User assistance, Abaqus/CAE’’, 2018

[20] Χριστόφορος Γ. Προβατίδης, ‘‘*Πεπερασμένα στοιχεία στην ανάλυση κατασκευών, Δεύτερη έκδοση*’’, Εκδόσεις Τζιόλα, 2017

[21] Γ. Τσαμασφύρος, Ε.Ε. Θεοτόκογλου, ‘‘*Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων I*’’, Εκδόσεις Συμμετρία, 2005

[22] Πέτρος Α. Καρύδης, ‘‘*Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου – Θέματα τοπικής αντοχής, Δεύτερη έκδοση*’’, Εκδόσεις Συμμετρία, 2017

[23] Χαράλαμπος Ι. Γαντές, ‘‘*Μη γραμμική συμπεριφορά των κατασκευών*’’, Σύνδεσμος ελληνικών ακαδημαϊκών βιβλιοθηκών, 2015

Παράρτημα Α

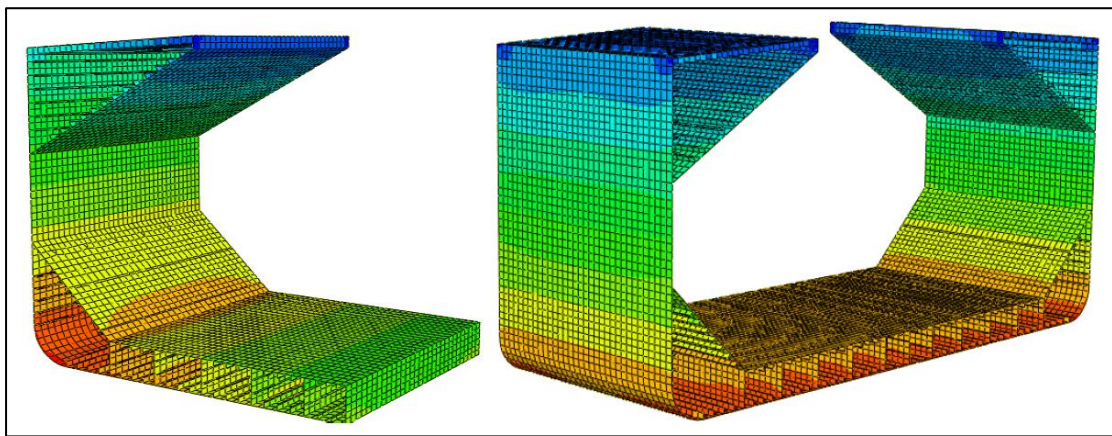
Δοκιμαστικές μοντελοποιήσεις

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζεται ο ίδιος στόχος με τον οποίο ξεκίνησε και η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Δηλαδή σε πρώτο στάδιο την διερεύνηση εναλλακτικών τρόπων μοντελοποίησης του ίδιου φυσικού προβλήματος. Σε δεύτερο στάδιο την δημιουργία πιο αποτελεσματικών και ταχύτερων, ως προς την επεξεργασία τους, μοντελοποιήσεων που θα μπορούσαν να μειώσουν δραστικά την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ και κατ'επέκταση το κόστος ανάλυσής τους με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Συγκεκριμένα καθ'όλη της διάρκεια σύνθεσης του υπολογιστικού μέρους αυτής της εργασίας, έγινε προσπάθεια εύρεσης γεωμετρίας μικρότερου μεγέθους αλλά ταυτόχρονα αντιπροσωπευτικής του φυσικού προβλήματος. Θα ακολουθήσει αναφορά σε δύο βασικές ιδέες που προέκυψαν στην πορεία.

A1. Κατασκευή της μισής μέσης τομής bulk carrier

Η πρώτη αφορά μοντελοποίηση της **μισής συμμετρικής μέσης τομής**, δηλαδή τομή του ολόκληρου μοντέλου κατά τον διαμήκη άξονα συμμετρίας του και σχεδίαση μόνο μίας από τις δύο πλευρές του.

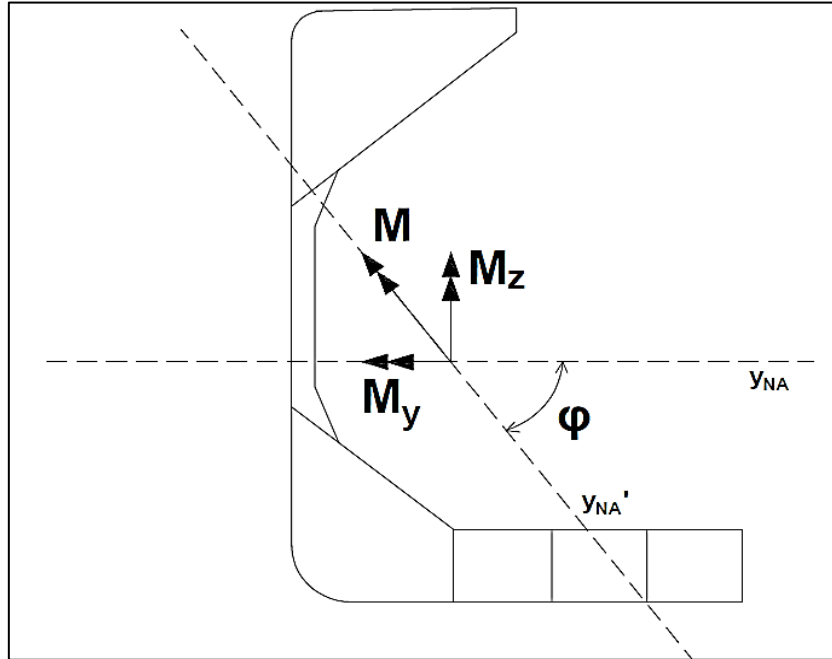


Εικόνα Π-Α.1: Σύγκριση ασύμμετρης (μισής) και ολόκληρης μοντελοποίησης της μέσης τομής

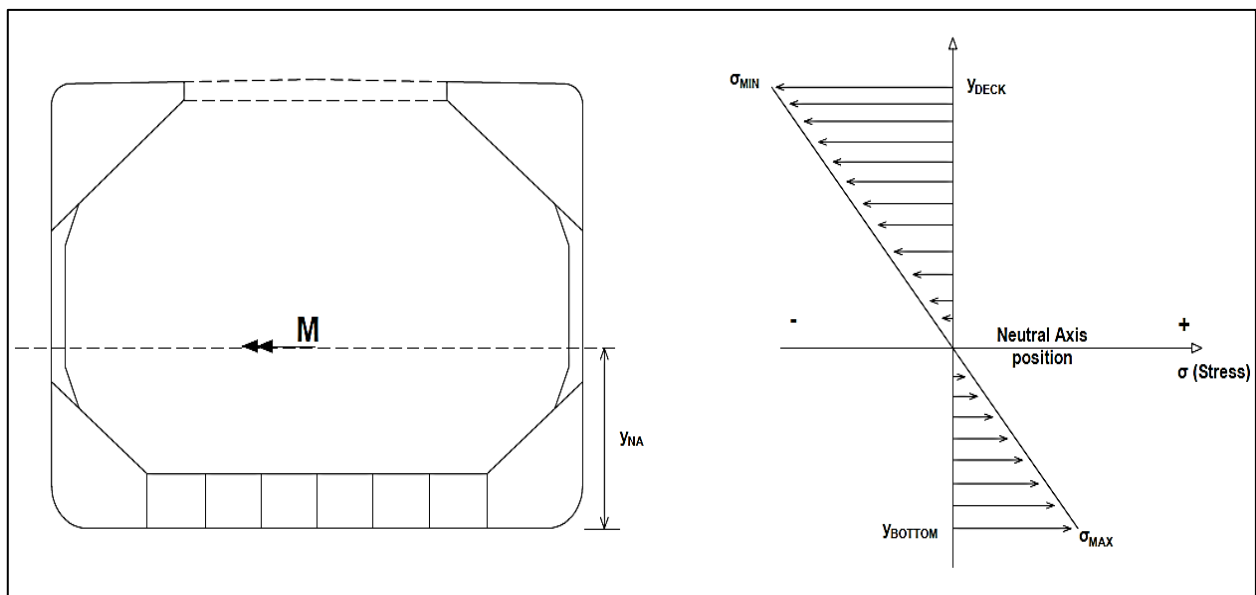
Στο ασύμμετρο μοντέλο, αριστερά στην εικόνα Π-Α.1, έγινε αρχικά η ανάλυση για γραμμική συμπεριφορά (ελαστικές ιδιότητες υλικών και γραμμική γεωμετρία) ώστε να ελεγχθεί η ακεραιότητα της μοντελοποίησης. Όπως και στη σχεδίαση της ολόκληρης (συμμετρικής) κατασκευής οι κόμβοι στο ένα άκρο συνδέθηκαν με MCP στο οποίο επιβλήθηκαν συνθήκες πάκτωσης και οι κόμβοι στο άλλο άκρο συνδέθηκαν με MCP στο οποίο δόθηκε στροφή θ (αρνητικού πρόσημου για να δημιουργηθεί φαινόμενο sagging) κατά το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο. Στα σημεία και edges που βρίσκονται πάνω στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας επιβλήθηκαν οριακές συνθήκες εγκάρσιας συμμετρίας. Στα πλαίσια της ελαστικής ανάλυσης δεν τοποθετήθηκαν εγκάρσιες

ενισχύσεις επομένως η κατασκευή ήταν ένα ενιαίο part από στοιχεία κελύφους για τα ελάσματα και τα διαμήκη της ενισχυτικά.

Με την ολοκλήρωση του job έγινε έλεγχος και σύγκριση με τα στοιχεία της ολόκληρης κατασκευής, αρχικά για την θέση του ουδέτερου άξονα και κατόπιν για το αν οι τάσεις μεταβάλλονται γραμμικά εκατέρωθεν αυτού. Τα αποτελέσματα του ελέγχου για τις δύο κατασκευές φαίνονται στις εικόνες Π-Α.2, Π-Α.3. Σχεδιάστηκε η τυπική μορφή της μέσης τομής κάθε περίπτωσης και η κατανομή των τάσεων:



Εικόνα Π-Α.2: Νέα θέση ουδέτερου άξονα y'_{NA} υπό γωνία ϕ και ανάλυση διανύσματος ροπής M στο κύριο σύστημα αξόνων



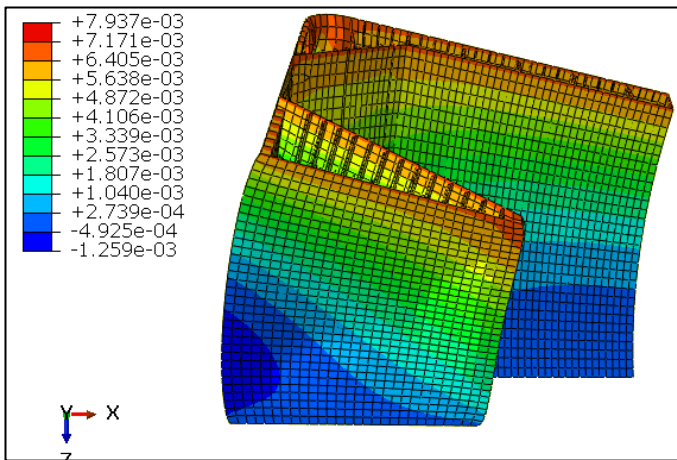
Εικόνα Π-Α.3: Θέση ουδέτερου άξονα και κατανομή τάσεων της ολόκληρης (συμμετρικής) μοντελοποίησης σε φαινόμενο sagging

Παρατηρήθηκε για την μισή μοντελοποίηση ότι το κύριο σύστημα αξόνων είναι στραμμένο κατά μία **γωνία ϕ** . Ο οριζόντιος άξονας συμμετρίας είναι στραμμένος κατά την ίδια γωνία και ταυτίζεται με τον προηγούμενος κύριο οριζόντιο άξονα. Στις φωτογραφίες η ασκούμενη στροφή θ που δημιουργεί την τελική καμπυλότητα, έχει αντικατασταθεί από μία ισοδύναμη ροπή \mathbf{M} , το διάνυσμα της οποίας βρίσκεται πάνω στον στραμμένο οριζόντιο άξονα συμμετρίας.

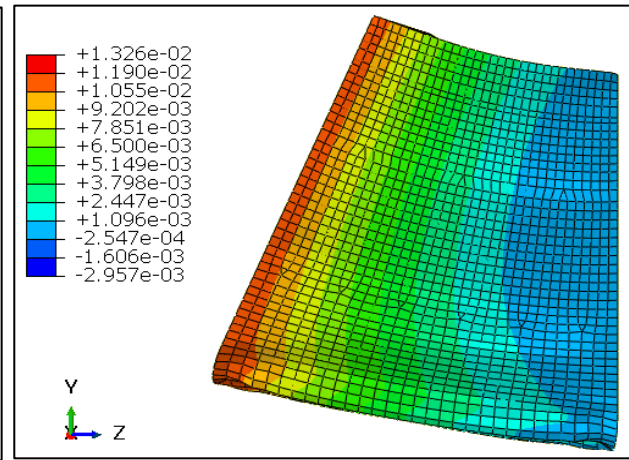
Ο υπολογισμός τη γωνίας ϕ μπορεί να γίνει με αναλυτικές μεθόδους αλλά και με χρήση του κύκλου Mohr. Σε περιπτώσεις που η ροπή \mathbf{M} ασκείται κατά μήκος κάποιου κύριου άξονα, ισχύει η αρχή της επαλληλίας, δηλαδή δύναται να αναλυθεί σε δύο συνιστώσες $\mathbf{M}_y = \mathbf{M} \cdot \cos\phi$, $\mathbf{M}_z = \mathbf{M} \cdot \sin\phi$ που ασκούνται κατά μήκος των αρχικών (χωρίς τη στροφή ϕ) κύριων αξόνων. Η τάσεις υπολογίζονται από την συνεισφορά των ροπών \mathbf{M}_y , \mathbf{M}_z μέσω της σχέσης [4] :

$$\sigma_x = -\frac{M_z \cdot y}{I_z} + \frac{M_y \cdot z}{I_y}$$

Η θεωρία της ασύμμετρης κάμψης προβλέπει ότι ο φορέας κάμπτεται σε περισσότερα από ένα επίπεδο. Για επαλήθευση για την μισή μοντελοποίηση μετρήθηκαν και έγινε σύγκριση της τάξης μεγέθους των διατμητικών δυνάμεων που αντιστοιχούν στις ροπές \mathbf{M}_y , \mathbf{M}_z . Παρουσιάζονται οι εικόνες Π-Α.4, Π-Α.5 στις οποίες φαίνεται η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων \mathbf{U}_y , \mathbf{U}_z αντίστοιχα:



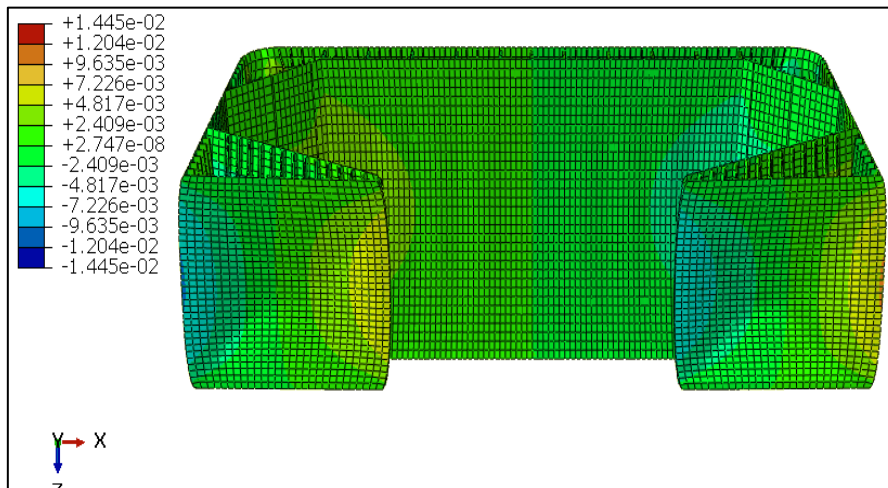
Εικόνα Π-Α.4: Κατανομή διατμητικής δύναμης \mathbf{U}_y στη μισή ασύμμετρη μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging



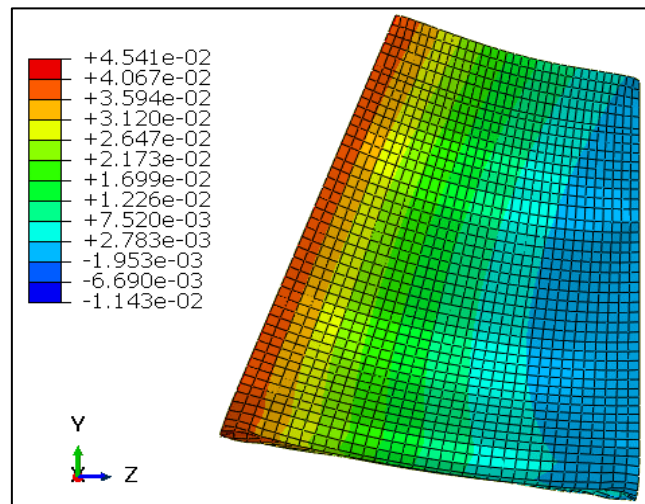
Εικόνα Π-Α.5: Κατανομή διατμητικής δύναμης \mathbf{U}_z στη μισή ασύμμετρη μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging

Οι διατμητικές δυνάμεις \mathbf{U}_y , \mathbf{U}_z είναι μεγέθη ίδιας τάξης, επομένως η καμπτική φόρτιση της οποίας το διάνυσμα είναι παράλληλο στον άξονα y , δεν μπορεί να αμεληθεί στους υπολογισμούς. Για αυτό τον λόγο το συγκεκριμένο **ασύμμετρο** μοντέλο **απορρίφθηκε** για περαιτέρω ανάλυση.

Όμως κατά την σχεδίαση συμμετρικής, κατά το εγκάρσιο επίπεδο, κατασκευής γίνεται η υπόθεση ότι οι ροπές επιβάλλονται μόνο πάνω στο διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας. Όπως και πριν για επαλήθευση μετρήθηκαν και έγινε σύγκριση της τάξης μεγέθους των διατμητικών δυνάμεων που αντιστοιχούν στις ροπές M_y , M_z . Παρουσιάζονται οι εικόνες Π-Α.6, Π-Α.7 στις οποίες φαίνεται η κατανομή των διατμητικών δυνάμεων U_y , U_z αντίστοιχα:



Εικόνα Π-Α.6: Κατανομή διατμητικής δύναμης U_y στη συμμετρική (ολόκληρη) μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging

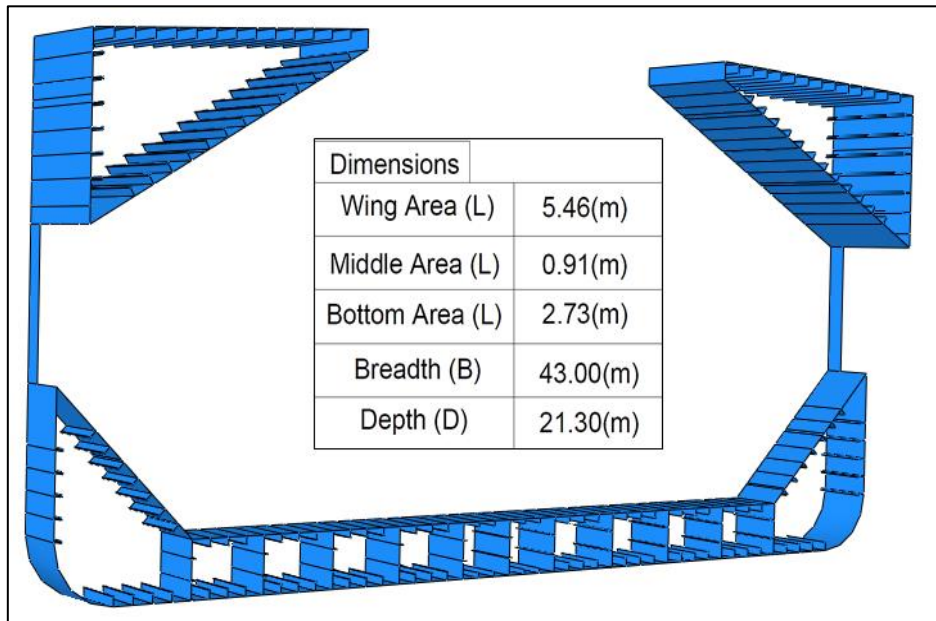


Εικόνα Π-Α.7: Κατανομή διατμητικής δύναμης U_z στη συμμετρική (ολόκληρη) μοντελοποίηση, φαινόμενο sagging

Πράγματι η υπόθεση επαληθεύεται καθώς η τάξη μεγέθους της U_y είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τη τάξη της U_z . Επομένως μόνο σε αυτή τη περίπτωση μπορεί να γίνει η απλοποίηση ότι τα καμπτικά φορτία εμφανίζονται μόνο σε ένα επίπεδο. Για αυτό τον λόγο η ανάλυση **συνέχισε** με το συγκεκριμένο μοντέλο που φέρει γεωμετρία **συμμετρική** κατά το εγκάρσιο επίπεδο.

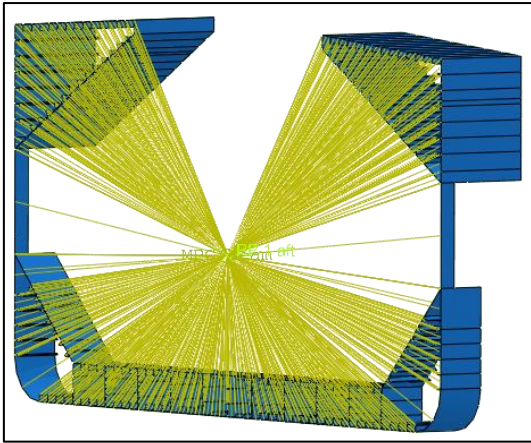
A2. Κατασκευή 1-Span bulk carrier

Η δεύτερη αφορά μοντελοποίηση συμμετρική κατά το εγκάρσιο επίπεδο, της οποίας το μήκος μεταβάλλεται ανά της περιοχές της μέσης τομής (wing, middle, bottom area). Η κάθε περιοχή έχει έκταση 1 Span, δηλαδή ίση με την απόσταση των εγκάρσιων ενισχύσεων κάθε περιοχής. Η γεωμετρία που σχεδιάζεται και τα διαφορετικά μήκη παρουσιάζονται στην εικόνα Π-Α.6:

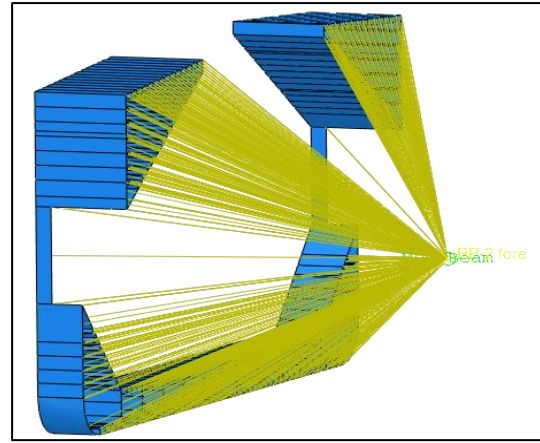


Εικόνα Π-Α.8: Γεωμετρία του 1-Span bulk carrier

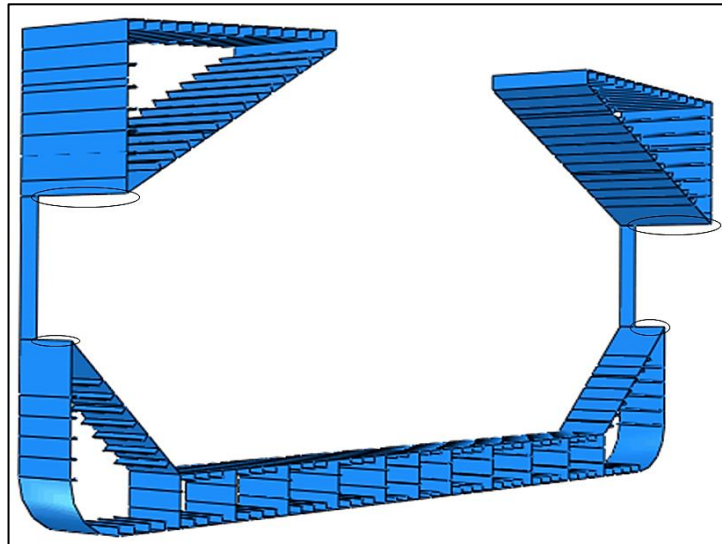
Και σε αυτό το μοντέλο έγινε αρχικά η ανάλυση για γραμμική συμπεριφορά (ελαστικές ιδιότητες υλικών και γραμμική γεωμετρία) ώστε να ελεγχθεί η ακεραιότητα τις μοντελοποίησης. Οι κόμβοι στο ένα άκρο συνδέθηκαν με MCP στο οποίο επιβλήθηκαν συνθήκες πάκτωσης (εικόνα Π-Α.7) και οι κόμβοι στο άλλο άκρο συνδέθηκαν με MCP στο οποίο δόθηκε στροφή θ (αρνητικού πρόσημου για να δημιουργηθεί φαινόμενο sagging) κατά το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο (εικόνα Π-Α.8). Στα edges που προεξέχουν σε αυτή την περίπτωση λόγω διαφορετικού μήκους των περιοχών (εικόνα Π-Α.9) δεν επιβλήθηκε κάποια οριακή συνθήκη ούτε συσχετίστηκαν με το MCP που στρέφεται.



Εικόνα Π-Α.9: Σύνδεση κόμβων με MCP-πάκτωση, 1-Span bulk carrier

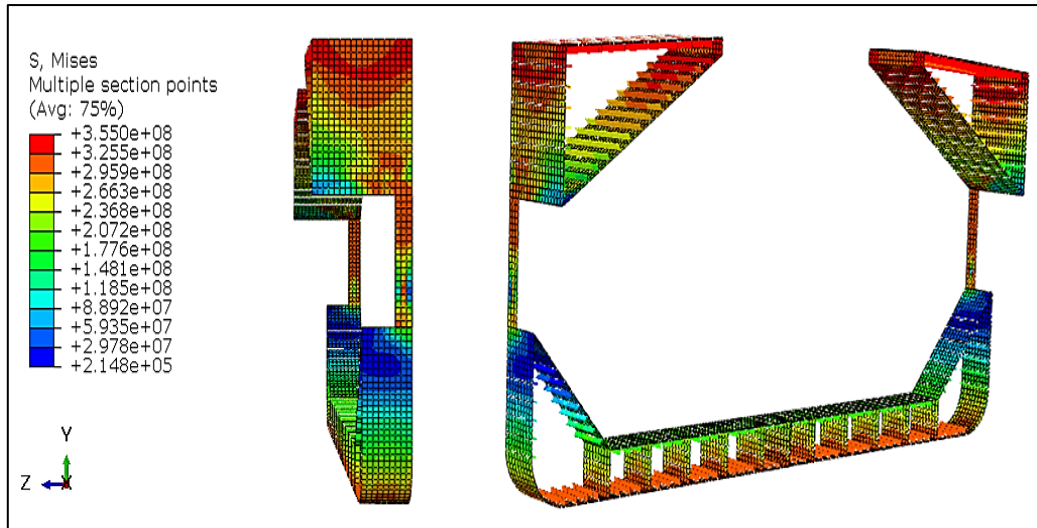


Εικόνα Π-Α.10: Σύνδεση κόμβων με MCP-στροφή θ , 1-Span bulk carrier

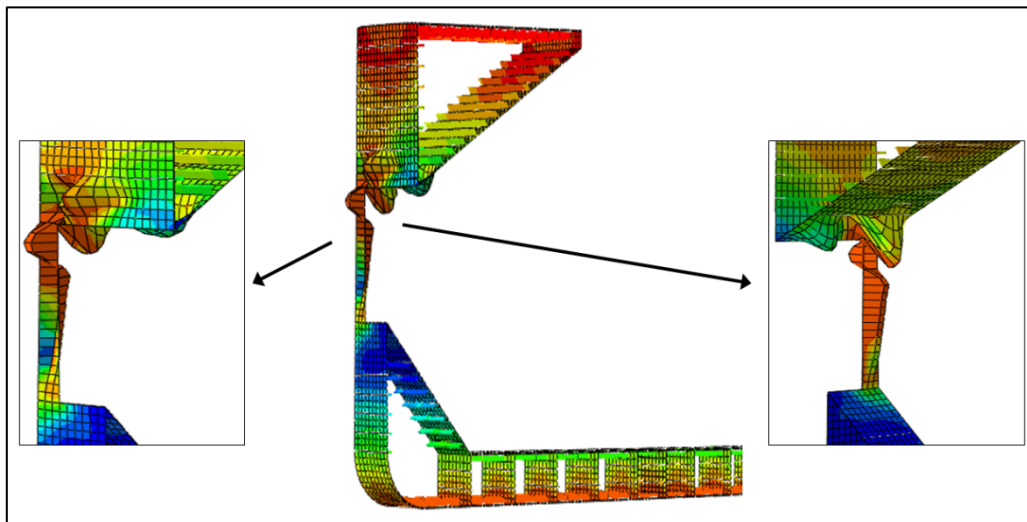


Εικόνα Π-Α.11: Περιοχές - Ελεύθερα edges, 1-Span bulk carrier

Με την ολοκλήρωση του job έγινε έλεγχος για τη θέση του ουδέτερου άξονα και την κατανομή των τάσεων γύρω από αυτόν. Πράγματι η σωστή θέση του ουδέτερου άξονα επαληθεύτηκε και οι τάσεις μειώνονται γραμμικά με κατεύθυνση από το κατάστρωμα ή τον πυθμένα προς τον ουδέτερο άξονα. Όμως κοντά στην ενδιάμεση περιοχή παρατηρήθηκαν έντονες και μη γραμμικές συγκεντρώσεις τάσεων από τις οποίες προκύπτουν και ιδιαίτερα μεγάλες τοπικές παραμορφώσεις:



Εικόνα Π-A.12: Μη γραμμική συγκέντρωση τάσεων της ενδιάμεσης περιοχής, 1-Span bulk carrier



Εικόνα Π-A.13: Τοπικές παραμορφώσεις της ενδιάμεσης περιοχής, 1-Span bulk carrier

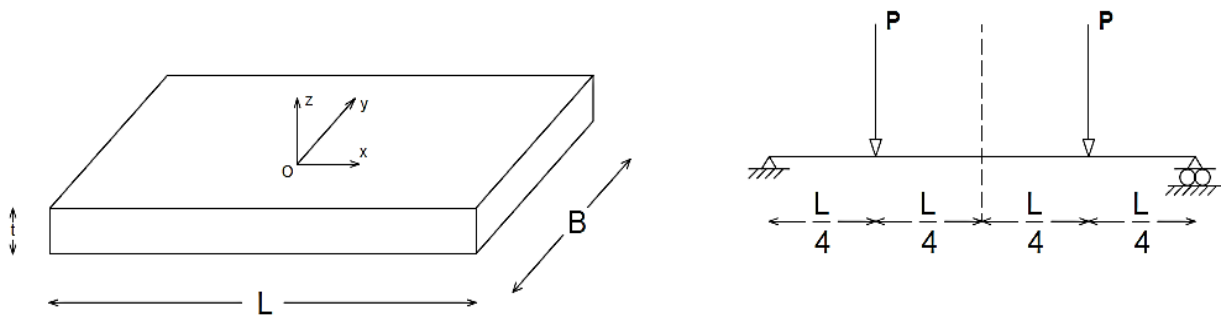
Στα πλαίσια αυτής της εργασίας η ανάλυση του 1-Span bulk carrier ολοκληρώθηκε σε αυτό το σημείο. Σε επόμενη εργασία μπορεί να γίνει διερεύνηση και εφαρμογή κατάλληλων περιορισμών κατά μήκος των edges που προεξέχουν (εικόνα Π-A.9) ώστε να δημιουργείται ομοιόμορφη παραμόρφωση και γραμμική μεταβολή των τάσεων σε όλη τη μέση τομή.

Παράρτημα Β

Ανάλυση για γραμμική συμπεριφορά του Simple Beam

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζεται η ανάλυση ενός απλού προβλήματος που σκοπό είχε την ομαλή εισαγωγή στο σχεδιαστικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και την εξοικείωση με τις έννοιες που στη συνέχεια μελετήθηκαν για τις πιο σύνθετες μοντελοποιήσεις της εργασίας.

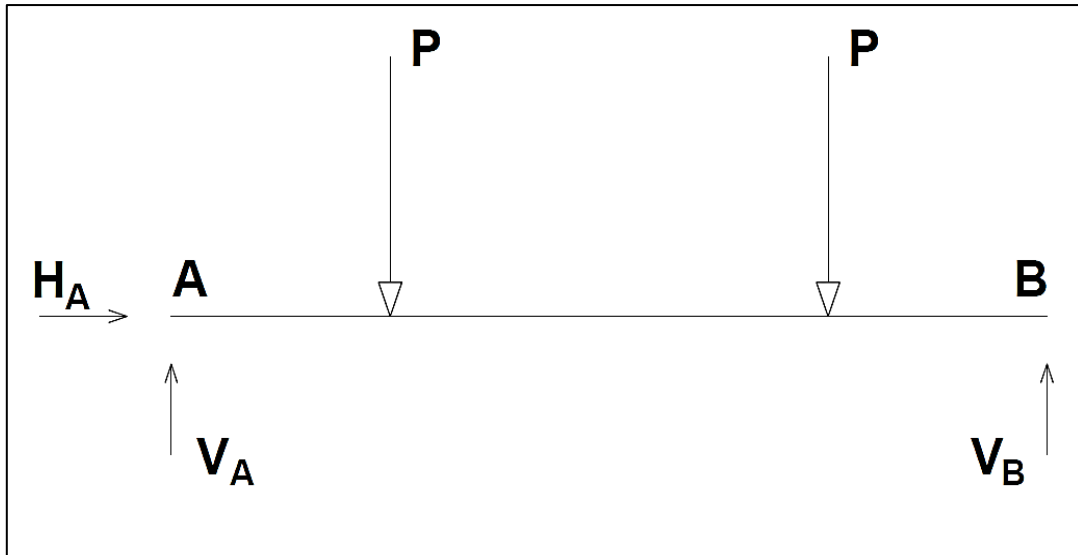
Έγινε σχεδίαση μίας μακρόστενης, συμπαγούς δοκού της οποίας τμήμα υποβάλλεται σε καθαρή κάμψη. Με εφαρμογή ίδιου κατακόρυφου φορτίου $P = 5 \text{ kN}$ στο $0.25L$ και $0.75L$ της δοκού, η καθαρή κάμψη εμφανίζεται μέσα σε αυτό το διάστημα (πρόβλημα 4-point bending). Αρχικά η επίλυση και ο υπολογισμός της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης πραγματοποιήθηκε χωρίς την βοήθεια υπολογιστή και στη συνέχεια έγινε σύγκριση με την μέγιστη τάση της κάθε περίπτωσης που έλυσε το πρόγραμμα. Η γεωμετρία της δοκού παρουσιάζεται στην εικόνα Π.Β.1:



Dimensions	
Length (L)	1000(mm)
Breadth (B)	100(mm)
Thickness (t)	20(mm)

Εικόνα Π-Β.1: Διαστάσεις και Φόρτιση του Simple Beam

Αρχικά σχεδιάζουμε το διάγραμμα ελευθέρου σώματος (εικόνα Π-Β.2) και στη συνέχεια υπολογίζουμε τις δυνάμεις που ασκούνται λύνοντας τις εξισώσεις ισορροπίας.



Εικόνα Π-Β.2: Διάγραμμα ελευθέρου σώματος Simple Beam

Οι εξισώσεις ισορροπίας της δοκού:

$$\Sigma F_x = 0 \quad [1]$$

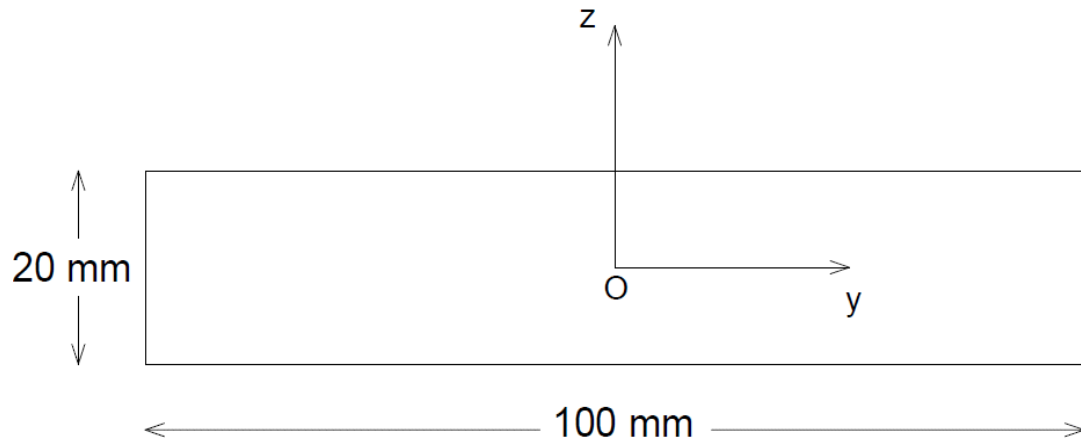
$$\Sigma F_y = 0 \quad [2]$$

$$\Sigma M_{(A)} = 0 \quad (\text{με θετική φορά την ωρολογιακή}) \quad [3]$$

Προκύπτει:

- $H_A = 0 \text{ kN}$
- $V_B = 5 \text{ kN}$
- $V_A = 5 \text{ kN}$

Στη συνέχεια κατασκευάζονται τα διαγράμματα $[N],[Q],[M]$ και λαμβάνεται η μέγιστη τιμή της ροπής $M=1,25 \text{ kNm}$. Υπολογίζεται για το $x=L/2$ η ροπή αδράνειας της διατομής που φαίνεται στην εικόνα Π-Β.3:



Εικόνα Π-Β.3: Εγκάρσια διατομή του Simple Beam

Η ροπή αδράνειας της διατομής είναι:

$$I_{yy} = 6.666 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Είναι προφανές ότι ο ουδέτερος άξονας ταυτίζεται με τον άξονα συμμετρίας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Για την μέγιστη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα $z_{\max} = 0.01 \text{ m}$, υπολογίζεται η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ANALYTIC}} = \frac{M_y}{I_{yy}} \cdot z_{\max} = 187.5 \text{ MPa}$$

Για την αντίστοιχη μελέτη στο ABAQUS το μοντέλο ονομάστηκε **Simple Beam**. Έγινε Implicit analysis με τη χρήση συμπαγούς στοιχείου (3D, solid, extrusion), για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων διακριτοποίησης : 5, 10, 15, 20, 25 [mm] , για τετράκομβο (S4R, Reduced Integration) και οκτάκομβο στοιχεία (S8R) καθώς και για τοποθέτηση-ανάθεση του section πάνω, στη μέση και κάτω από την σχεδιασμένη επιφάνεια του part.

➤ Ιδιότητες Υλικού

Το υλικό θεωρήθηκε γραμμικά ελαστικό με Young's Modulus $E=210 \text{ GPa}$, Poisson's ratio $\nu=0.3$.

➤ Επιβολή Φορτίσεων και Οριακών Συνθήκων

Έγινε εφαρμογή Line load σε διεύθυνση παράλληλη στις μικρές πλευρές της δοκού στο $0.25L$ και $0.75L$, με κατάλληλη τιμή ώστε με πολλαπλασιασμό της με την απόσταση εφαρμογής του φορτίου να ισούται με $V_A = V_B = 5 \text{ kN}$. Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στα δύο άκρα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1:

Πίνακας Π-Β.1: Επιβολή οριακών συνθηκών στο Simple Beam

Τοποθεσία	Μετατοπίσεις			Στροφές		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Αριστερό άκρο (άρθρωση)	-	fix	fix	-	-	-
Δεξί άκρο (κύλιση)	-	fix	-	-	-	-

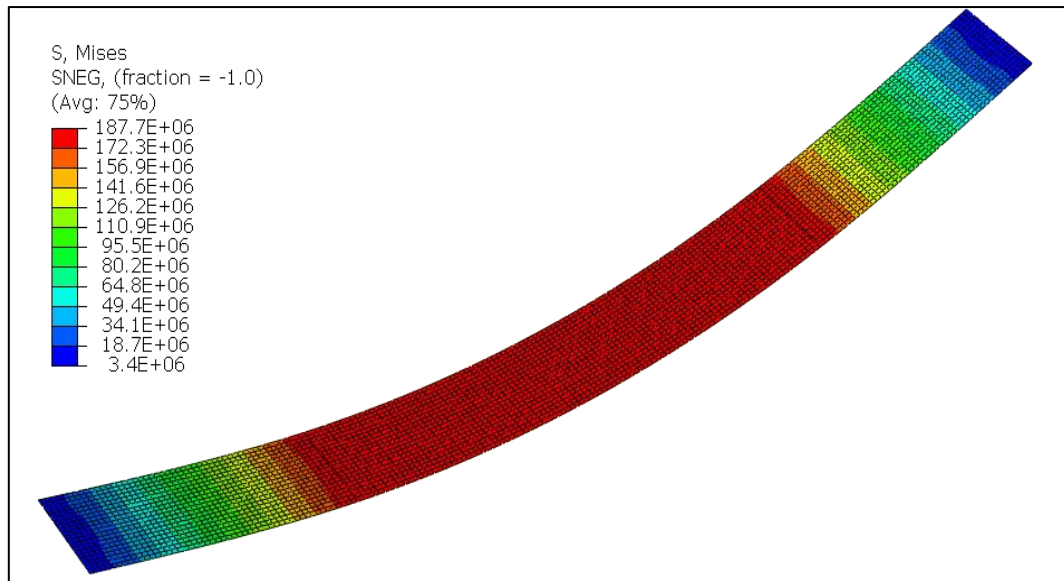
➤ Αποτελέσματα

Δεν προσδιορίστηκε η μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η δοκός διότι χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες φορτίσεις, όπως στον αναλυτικό υπολογισμό στο χαρτί, για τις οποίες είναι σαφές ότι δεν έχουμε πλαστική διαρροή του υλικού αφού $\sigma_{\max} < \sigma_y$. Ενδεικτικά παρουσιάζεται το παραμορφωμένο σχήμα για το σενάριο του Πίνακα Π-Β.2 στην εικόνα Π-Β.4:

Πίνακας Π-Β.2: Στοιχεία εξεταζόμενης περίπτωσης Simple Beam

Model element	Element Type	Mesh Density	Section Location
Solid	S4R, Reduced Integration	5 [mm]	Middle

Εμφανίζεται η κατανομή των τάσεων κατά μήκος της δοκού οι οποίες μεγιστοποιούνται στο $x=L/2$ και εκεί $\sigma_{\max} = 187.7 \text{ MPa}$.



Εικόνα Π-Β.4: Παραμόρφωση του Simple Beam και κατανομή των τάσεων.

Η μέγιστη τάση σ_{FEA} κάθε περίπτωσης παρουσιάζεται στους πίνακες που ακολουθούν, διαιρείται με την $\sigma_{ANALYTIC}$ και στη συνέχεια κατασκευάζεται διάγραμμα με οριζόντιο άξονα το μέγεθος των στοιχείων διακριτοποίησης και κατακόρυφο το κλάσμα $\sigma_{ANALYTIC} / \sigma_{FEA}$

Mesh Density: 5 mm	Element Shell, S4R			Element Shell, S8R		
	Section surface location			Section surface location		
	Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
σ_{FEA}	187.9 (MPa)	187.9 (MPa)	187.9 (MPa)	188.0 (MPa)	188.0 (MPa)	188.0 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9978	0.9978	0.9978	0.9973	0.9973	0.9973

Mesh Density: 10 mm	Element Shell, S4R			Element Shell, S8R		
	Section surface location			Section surface location		
	Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
σ_{FEA}	187.7 (MPa)	187.7 (MPa)	187.7 (MPa)	188.1 (MPa)	188.1 (MPa)	188.1 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9989	0.9989	0.9989	0.9968	0.9968	0.9968

Mesh Density: 15 mm	Element Shell, S4R			Element Shell, S8R		
	Section surface location			Section surface location		
	Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
σ_{FEA}	187.7 (MPa)	187.7 (MPa)	187.7 (MPa)	188.1 (MPa)	188.1 (MPa)	188.1 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9989	0.9989	0.9989	0.9968	0.9968	0.9968

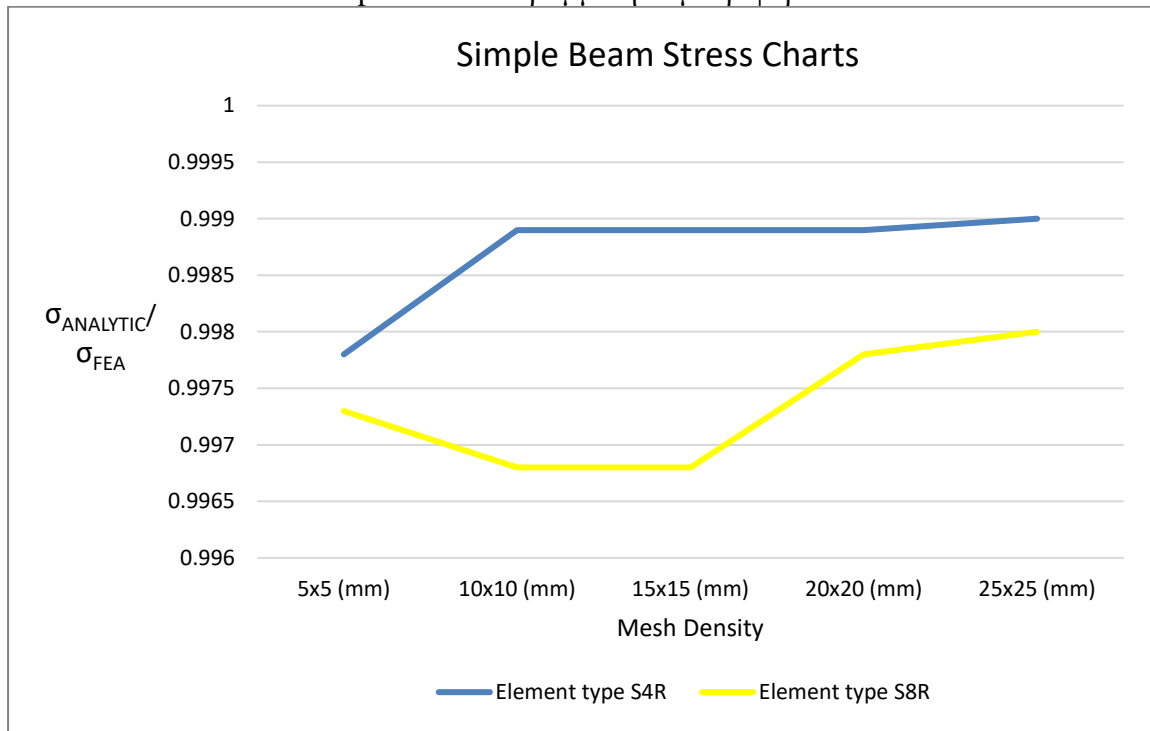
Mesh Density: 20 mm	Element Shell, S4R			Element Shell, S8R		
	Section surface location			Section surface location		
	Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
σ_{FEA}	187.7 (MPa)	187.7 (MPa)	187.7 (MPa)	187.9 (MPa)	187.8 (MPa)	187.9 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.9989	0.9989	0.9989	0.9978	0.9978	0.9978

Mesh Density: 25 mm	Element Shell, S4R			Element Shell, S8R		
	Section surface location			Section surface location		
	Top	Middle	Bottom	Top	Middle	Bottom
σ_{FEA}	187.6 (MPa)	187.6 (MPa)	187.6 (MPa)	187.8 (MPa)	187.8 (MPa)	187.8 (MPa)
$\frac{\sigma_{ANALYTIC}}{\sigma_{FEA}}$	0.999	0.999	0.999	0.998	0.998	0.998

➤ Συμπεράσματα

Αρχικά παρατίθεται το *διάγραμμα 1* στο οποίο συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που λύθηκαν στο Abaqus.

Διάγραμμα Π-Β.1: Απόκλιση τάσεων για τις διαφορετικές μοντελοποιήσεις του Simple Beam – Γραμμική συμπεριφορά



Παρατηρείται ότι όλες οι μοντελοποιήσεις προσεγγίζουν την πραγματική λύση με λιγότερο από 0.5% απόκλιση $\sigma_{ANALYTIC} - \sigma_{FEA}$. Προκύπτει το συμπέρασμα ότι τόσο η σχετική μεταβολή της θέσης του section profile από την σχεδιασμένη επιφάνεια, όσο η πύκνωση του πλέγματος διακριτοποίησης και η χρήση οκτακομβικών στοιχείων (S8R), δεν επηρεάζουν την ακρίβεια της λύσης.

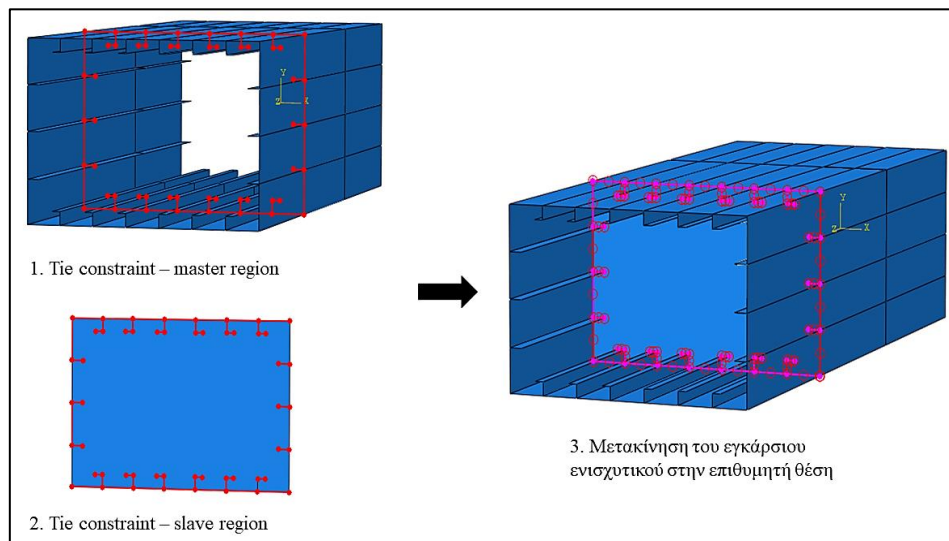
Παράρτημα Γ

Ιδιότητες επιβαλλόμενων περιορισμών (constraints) στο Abaqus

Σε αυτό το παράρτημα δίνονται πληροφορίες για όλα τα είδη των περιορισμών που επιβλήθηκαν σε σημεία των κατασκευών, κατά της διάρκειας της σχεδίασής τους στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικά είδη περιορισμών [19] :

1. Περιορισμός Tie :

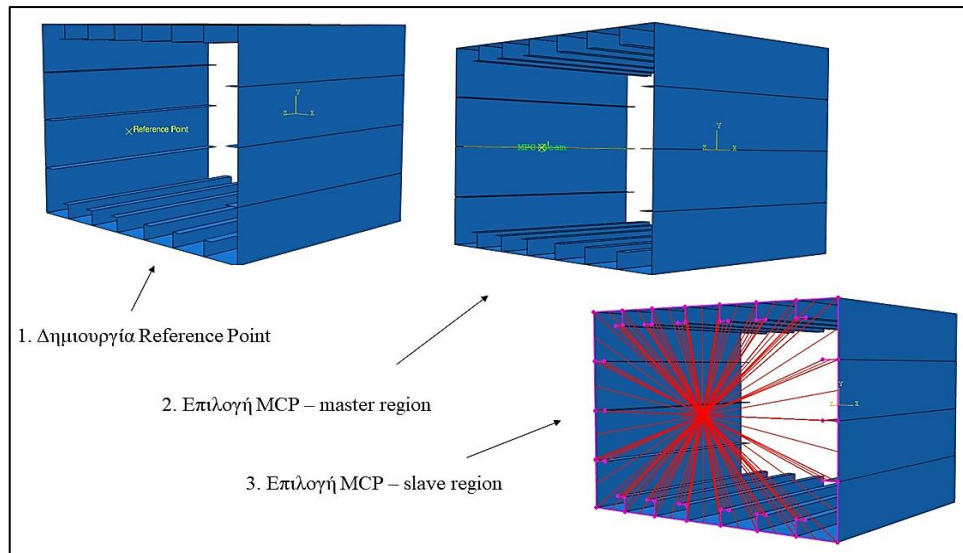
Που επιτρέπει την ένωση δύο περιοχών ακόμα και αν η διακριτοποίησή τους διαφέρει σημαντικά. Επιλέγεται στην περίπτωση που οι εγκάρσιες ενισχύσεις μοντελοποιούνται με ανεξάρτητα parts και συσχετίζει τους περιφερειακούς κόμβους τους (slave region) με το επιθυμητό σημείο (master region) του **βασικού μοντέλου** (το part που αποτελείται από τα πλευρικά ελάσματα και τα διαμήκη ενισχυτικά). Υπάρχει η δυνατότητα ένωσης επιφανειών (surface to surface), περιοχής κόμβων (node region to node region) καθώς και συνδυασμός αυτών (node to surface). Για την περιοχές που συσχετίζονται, είναι προαιρετική η δέσμευση των επιμέρους βαθμών ελευθερίας που επιτρέπουν στροφή των κόμβων.



Εικόνα Π-Γ.1: Tie constraint

2. Περιορισμός Multi-point (MPC) :

Μέσω του οποίου συσχετίζεται η κίνηση κόμβων (slave nodes) με την κίνηση ενός σημείου (master node). Επιλέγεται στην περίπτωση που γίνεται ισοδύναμη μοντελοποίηση των εγκάρσιων ενισχύσεων με σημεία MPC beam ή link type. Από το interaction module του προγράμματος δημιουργείται ένα σημείο αναφοράς (reference point) στο οποίο ανατίθεται η ιδιότητα του **master node** και συνδέονται με αυτό όλοι οι κόμβοι του **βασικού μοντέλου**, **slave nodes**, που πρέπει να έχουν όμοια συμπεριφορά.

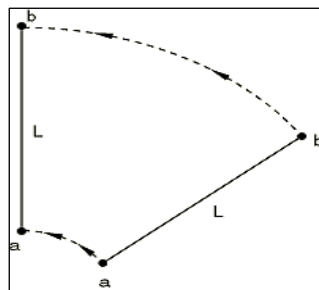


Εικόνα Π-Γ.2: MPC constraint

Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαφορετικές ιδιότητες των δύο τύπων MPC:

➤ MPC type Link

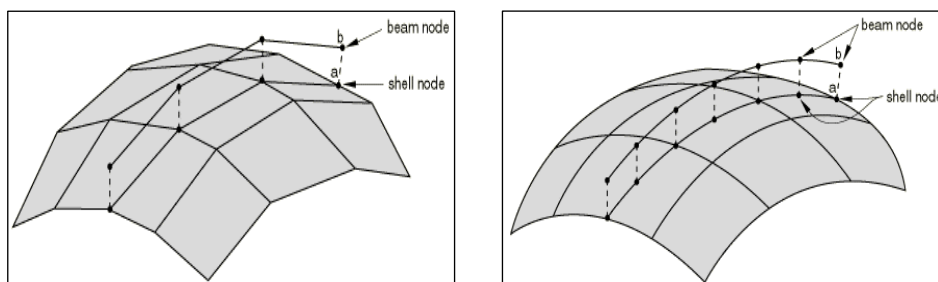
Δημιουργεί έναν άκαμπτο σύνδεσμο μεταξύ δύο κόμβων ώστε η μεταξύ του απόσταση να παραμένει σταθερή κατά την μετακίνησή τους. Για υλοποίηση αυτού του περιορισμού τροποποιούνται κατάλληλα οι μετατοπίσεις του πρώτου κόμβου. Οι στροφές παραμένουν ανεξάρτητες του περιορισμού [19].



Εικόνα Π-Γ.3: MPC type: Link

➤ MPC type Beam

Δημιουργεί έναν άκαμπτο σύνδεσμο μεταξύ δύο κόμβων ώστε να συσχετιστούν οι επιμέρους μετατοπίσεις και στροφές τους [19].



Εικόνα Π-Γ.4: MPC type: Beam

Παράρτημα Δ

Σχέδιο Μέσης Τομής bulk carrier

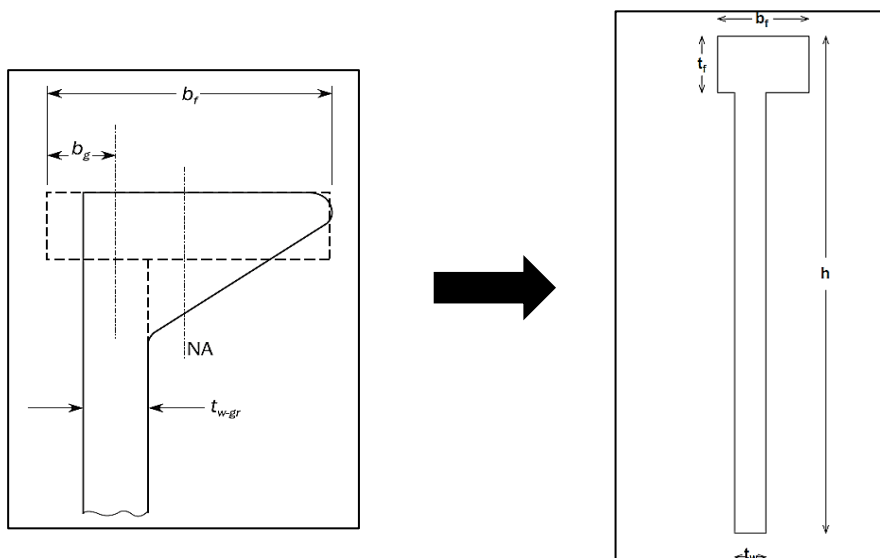
Σε αυτό το παράρτημα επισυνάπτονται εικόνες της μέσης τομής του bulk carrier που μελετήθηκε στα λογισμικά MARS και Abaqus. Περιγράφεται ακόμα η διαδικασία μετασχηματισμού ενισχυτικού βολβολάμα (κατά Holland profile standard) σε ισοδύναμο (ίδια επιφάνεια, ίδια θέση ουδέτερου άξονα και ίδια ροπή αδράνειας) ενισχυτικό L2 σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR. Όπως φαίνεται στο σχέδιο της μέσης τομής τα δοκάρια του διπύθμενου εκατέρωθεν του keel μέχρι το σημείο που ξεκινά το έλασμα του hopper (πέρας του εσωτερικού πυθμένα), φέρουν ενισχυτικά με προφίλ και διαστάσεις HP 180x11 AH. Σύμφωνα με τον πίνακα B.1. του παραρτήματος (από *Part 1, Ch. 9, Sec. 4, 5.1.2, CSR-H 2018*) με γραμμική παρεμβολή υπολογίζονται οι διαστάσεις του ισοδύναμου προφίλ ενισχυτικού με πέλμα [17].

Πίνακας Π-Δ.1: Διαστάσεις ισοδύναμων ενισχυτικών με πέλμα κατά CSR.

HP-bulb		Equivalent built-up flange in gross thickness		
Height (mm)	Gross web thickness, t_{w-gr} (mm)	b_f (mm)	t_{f-gr} (mm)	b_g (mm)
200	9 - 13	$t_{w-gr} + 24.5$	22.9	$(t_{w-gr} + 0.9)/2$
220	9 - 13	$t_{w-gr} + 27.6$	25.4	$(t_{w-gr} + 1.0)/2$
240	10 - 14	$t_{w-gr} + 30.3$	28.0	$(t_{w-gr} + 1.1)/2$
260	10 - 14	$t_{w-gr} + 33.0$	30.6	$(t_{w-gr} + 1.3)/2$
280	10 - 14	$t_{w-gr} + 35.4$	33.3	$(t_{w-gr} + 1.4)/2$
300	11 - 16	$t_{w-gr} + 38.4$	35.9	$(t_{w-gr} + 1.5)/2$
320	11 - 16	$t_{w-gr} + 41.0$	38.5	$(t_{w-gr} + 1.6)/2$
340	12 - 17	$t_{w-gr} + 43.3$	41.3	$(t_{w-gr} + 1.7)/2$
370	13 - 19	$t_{w-gr} + 47.5$	45.2	$(t_{w-gr} + 1.9)/2$
400	14 - 19	$t_{w-gr} + 51.7$	49.1	$(t_{w-gr} + 2.1)/2$
430	15 - 21	$t_{w-gr} + 55.8$	53.1	$(t_{w-gr} + 2.3)/2$

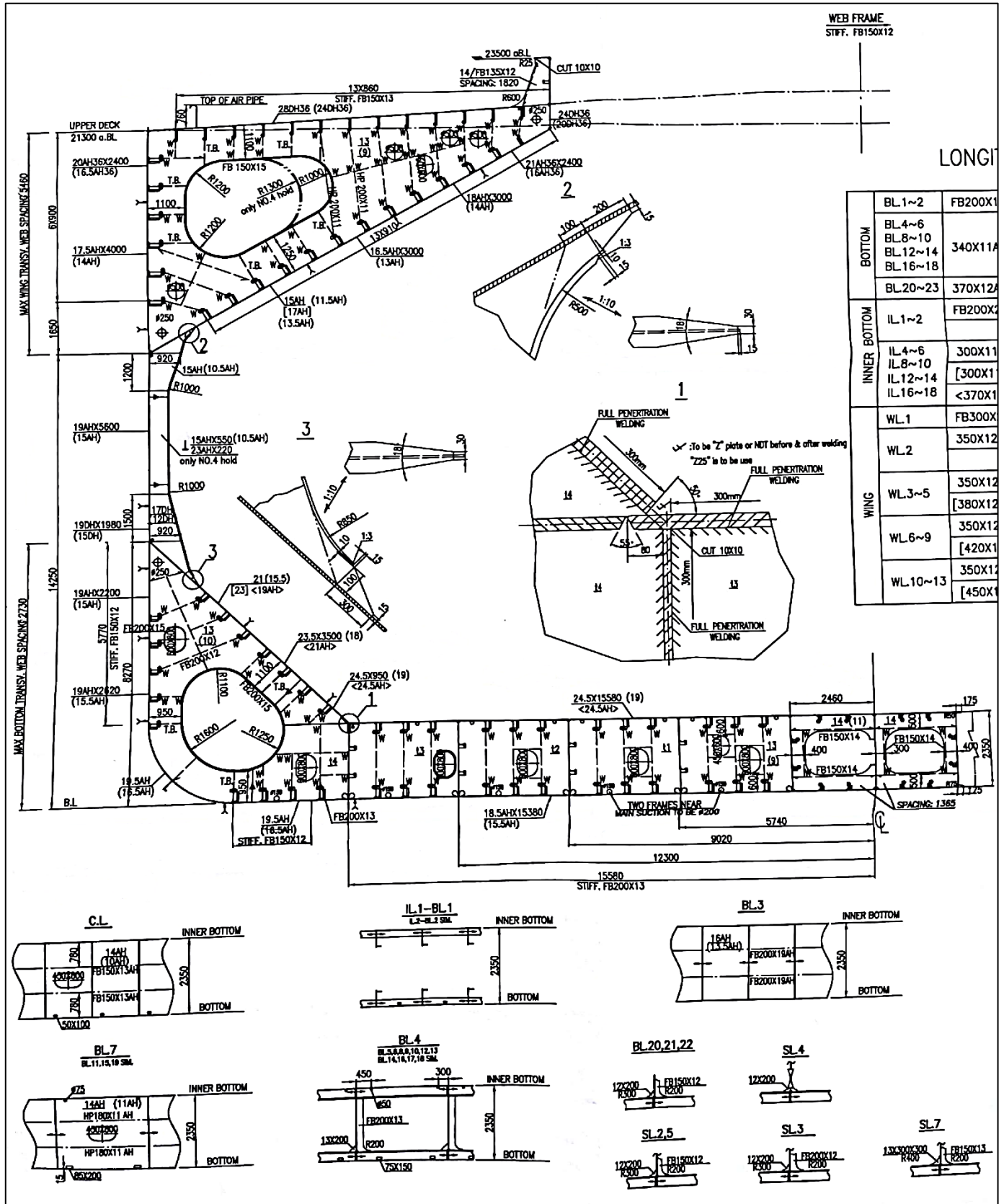
Πίνακας Π-Δ.2: Ισοδύναμες διαστάσεις ενισχυτικού HP 180x11.

Ισοδύναμο προφίλ	(mm)
Ύψος κορμού h	180
Πάχος κορμού t_w	11
Μήκος πέλματος b_f	32.4
Πάχος πέλματος t_f	20.4
Απόσταση αριστερού άκρου από τον κορμό b_g	5.9

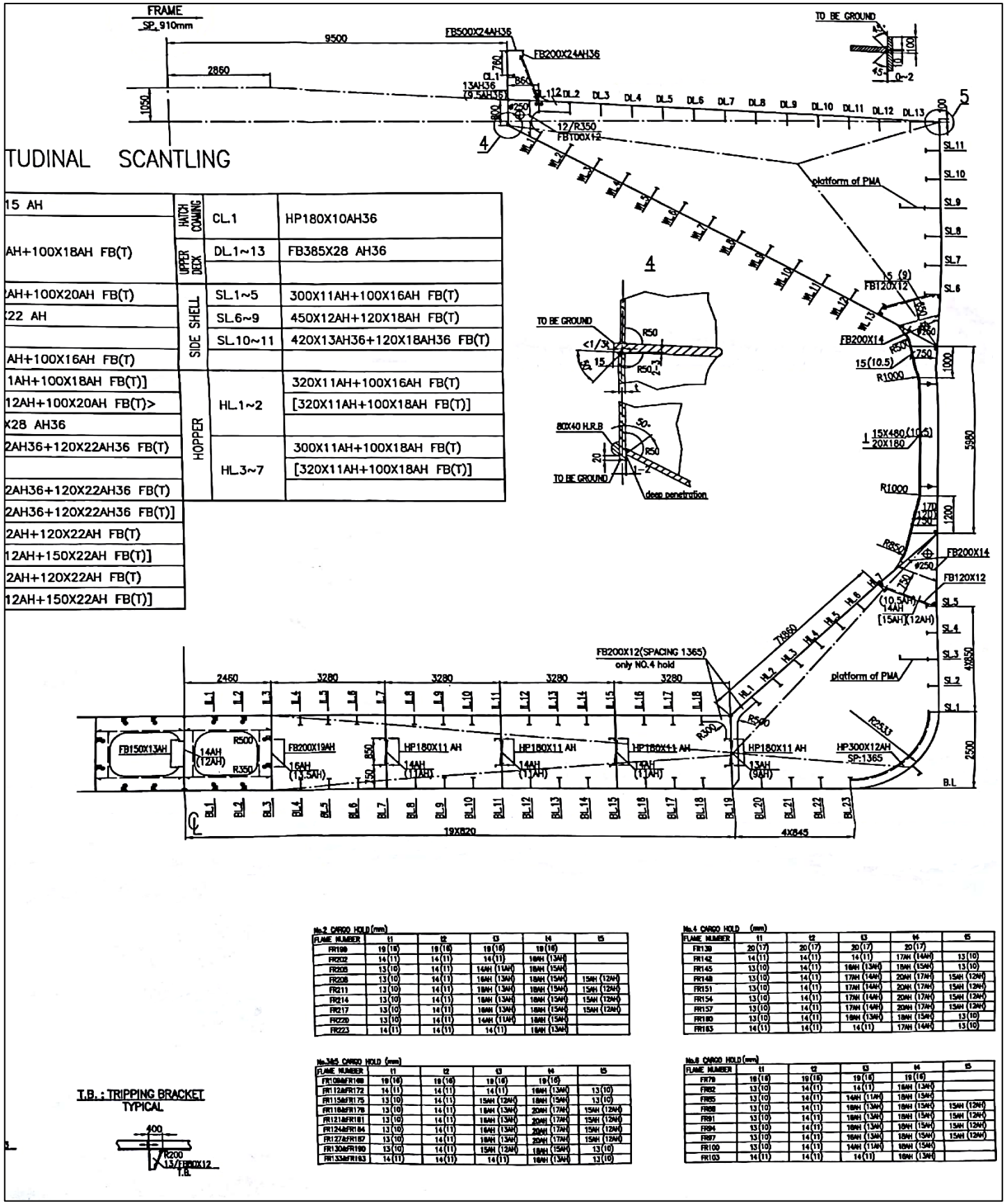


Εικόνα Π-Δ.1: Μετασχηματισμός διατομής σε L2 προφίλ.

Ακολουθούν οι εικόνες της μέσης τομής και πίνακας με τις διαστάσεις των ενισχυτικών.



Εικόνα Π-Δ.2: Bulk carrier's Midship Section 1.



Εικόνα Π-Δ.3: Bulk carrier's Midship Section 2.

PRINCIPAL PARTICULARS

LENGTH SCANTLING	237.07 m
LENGTH (P.P.)	240.00 m
BREADTH (MLD)	43.00 m
DEPTH (MLD)	21.30 m
DESIGNED DRAFT	14.50 m
SCANTLING DRAFT	15.00 m
Cb	0.8554
MAX.AHEAD SERVICE SPEED	15.70 kn
CLASSIFICATION	BV I ✗ HULL, ✗ MACH,BULK CARRIER ESP,CSR, BC-A(HOLD NO.2,4,6 MAY BE EMPTY) INWATERSURVEY UNRESTRICTED NAVIGATION, VERISTAR-HULL,GRAB(25) AUT-UMS MON-SHAFT

MAX. ALLOWABLE STILL WATER BENDING MOMENT:

LOADING CONDITION	HOGGING(KN-M)	SAGGING(KN-M)
INTACT CONDITION	2920000	-3000000
FLOODED CONDITION	3680000	-4250000
IN HARBOUR	5341264	-5546276

MAX. CARGO MASS

CARGO HOLD NO.	1	2	3	4	5	6	7
VOLUME(m ³)	16883	19434	19436	19436	19436	19436	17951
Hom-Load(t)	14434	16600	16601	16601	16601	16601	15340
After-Load(t)	25779	29662	29662	29662	29662	29662	27403

Topside tanks to be interconnected with hopper tanks via trunks and /or pipes.

REMARKS:

- < > MARK: HEAVY CARGO HOLD ONLY
 [] MARK: NO.4 BALLAST HOLD ONLY
 NO MARK: OTHER CARGO HOLD
 *: NO SCOLLOP
 "S" : SNIPPED END.
 "W" OR NO MARKED : WELDED CONNECTION.
 "B" : BRACKET CONNECTION.

MATERIALS

- NO MARKED STEEL: MILD STEEL GRADE 'A' OF MIN YIELD STRESS 235 N/mm².
- MARKED 'AH','DH': HIGHER TENSILE STEEL GRADE 'A','D' OF MIN YIELD STRESS 315 N/mm².
- MARKED STEEL 'AH36' 'DH36' 'EH36': HIGHER TENSILE STEEL GRADE 'A' 'D' 'E' OF MIN YIELD STRESS 355 N/mm².
- PLATE THICKNESS WITH "()" ---RENEWAL THICKNESS OF PLATE.
PLATE THICKNESS WITHOUT "()" ---BUILT THICKNESS OF PLATE.

					114,500 DWT BULK CARRIER	Initial design	Detail design	Production design	Finished plan
Mark	Number	Modif. Sheet No.	Sign.	Date	MIDSHIP SECTION S1155~S1157	Drawing No. S1155F110401F			
Drawn				2010-10-31		Mark	Mass(kg)	Scale 1 : 100	
Checked				2010-10-31		Sheet 1 of 1			
Rechecked				2010-10-31		SHANGHAI SHIPYARD CO.,LTD			
Approve				2010-10-31					

0.25m²

Εικόνα Π-Δ.4: Bulk carrier's Midship Section 3.

Πίνακας Π-Δ.3: Διαστάσεις ενισχυτικών.

BOTTOM	BL 1~2	FB200X15 AH	HATCH COAMING	CL 1	HP180X10 AH36
	BL 4~6	340X11 AH + 100X18 AH FB(T)			
	BL 8~10				
	BL 12~14				
	BL 16~18				
	BL 20~23	370X12 AH + 100X20 AH FB(T)	UPPER DECK	DL 1~13	FB385X28 A36
INNER BOTTOM	IL 1~2	FB200X15 AH	SIDE SHELL	SL 1~5	300X11 AH + 100X16 AH FB(T)
	IL 4~6	300X11 AH + 100X16 AH FB(T)		SL 6~9	450X12 AH + 120X18 AH FB(T)
	IL 8~10	[300X11 AH + 100X18 AH FB(T)]		SL 10~11	420X13 AH36 + 120X18 AH36 FB(T)
	IL 12~14				
	IL 16~18	<370X12 AH + 100X20 AH FB(T)>			
	WING	WL 1		FB300X28 A36	HOPPER
WL 2		350X12 AH36 + 120X22 AH36 FB(T)	[320X11 AH + 100X18 AH FB(T)]		
WL 3~5		350X12 AH36 + 120X22 AH36 FB(T)	HL 3~7	300X11 AH + 100X18 AH FB(T)	
		[380X12 AH36 + 120X22 AH36 FB(T)]			
WL 6~9		350X12 AH + 120X22 AH FB(T)	[320X11 AH + 100X18 AH FB(T)]		
		[420X12 AH + 150X22 AH FB(T)]			
WL 10~13		350X12 AH + 120X22 AH FB(T)			
	[450X12 AH + 150X22 AH FB(T)]				

Ακολουθούν δύο σημειώσεις που αφορούν τη σχεδίαση της μέσης τομής στα λογισμικά MARS και Abaqus:

Σημείωση 1

Για τα πάχη ελασμάτων χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές με την προσαύξηση του πάχους διάβρωσης – gross thickness (Οι τιμές αυτές βρίσκονται πάντα εκτός παρενθέσεων στο συγκεκριμένο σχέδιο).

Σημείωση 2

Από το πίνακα διαστασιολόγησης των ενισχυτικών, για όσες περιοχές δίνεται παραπάνω από μία επιλογή σχεδίασης, επιλέγονται και πάλι οι τιμές εκτός παρενθέσεων.