

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΕΝΑΠΟΜΕΙΝΟΥΣΑ ΑΝΤΟΧΗ ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ  
ΑΤΥΧΗΜΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΚΟΥΡΟΥΠΑΚΗΣ

Επιβλέπων καθηγητής: Μ.Σ. Σαμουηλίδης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2022

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον καθηγητή της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, Εμμανουήλ Σαμουηλίδη για την καθοδήγησή, τη βοήθεια και τις συμβουλές τις οποίες είχα την τύχη να ακολουθήσω. Επίσης τον ευχαριστώ θερμά για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της μελέτης.

Επιπλέον θέλω να ευχαριστήσω τον κύριο Δημήτρη Γεωργιάδη για την υπερπολύτιμη βοήθειά του ειδικά στα αρχικά στάδια της εργασίας.

## Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι κυρίως εκπαιδευτικός. Μέσω της παρούσας εργασίας επιτυγχάνεται η εξοικείωση με τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες (Common Structural Rules) και με την εφαρμογή τους σε θέματα αντοχής. Επιπλέον αποκτάται μια ικανοποιητική γνώση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μέσω της εφαρμογής της. Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η εξαγωγή των αποτελεσμάτων της παρούσας εργασίας, βγαίνουν κάποια συμπεράσματα.

## Περίληψη

Η παρούσα εργασία μελετά την εναπομείνουσα αντοχή της γάστρας ενός πλοίου containership μετά από ζημιά η οποία έχει προκληθεί από προσάραξη ή σύγκρουση. Η μελέτη ακολουθεί τη διαδικασία που ορίζουν οι κανονισμοί CSR (Common Structural Rules) που έχουν θεσμοθετηθεί από τον IACS (International Association of Classification Societies).

Συγκεκριμένα υπολογίζεται η μέγιστη χωρητικότητα διαμήκους ροπής κάμψης της γάστρας ( $M_U$ ) δηλαδή η μέγιστη ροπή που μπορεί να ασκηθεί στη διατομή πριν αυτή να καταρρεύσει. Η ροπή αυτή προκύπτει μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας στην οποία υπολογίζουμε σε κάθε βήμα την καμπτική ροπή που φέρει η διατομή έχοντας δεδομένη μια καμπυλότητα  $\chi$ . Η μέγιστη τιμή της καμπύλης αυτής είναι η ζητούμενη ροπή  $M_U$ . Η επαναληπτική διαδικασία χωρίζει τα δομικά στοιχεία της διατομής σε διαμήκως ενισχυμένα ελάσματα και σε γωνιακά ελάσματα για τα οποία υπολογίζουμε τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης ( $\sigma - \epsilon$ ) μέσω εξισώσεων, ανάλογα με τη φόρτιση που δέχονται δηλαδή εφελκυσμό ή θλίψη. Υπολογίζοντας την τάση που δέχονται σε κάθε βήμα και μετατρέποντάς τη σε ροπή κάμψης, αθροίζοντας τα επιμέρους στοιχεία προκύπτει η ροπή που φέρει η διατομή.

Η διαδικασία γίνεται αρχικά για άθικτη κατάσταση της γάστρας και στη συνέχεια για τις 2 περιπτώσεις ατυχήματος. Για τις καταστάσεις που έχουμε ζημιά οι κανονισμοί CSR ορίζουν μια περιοχή γύρω από το σημείο της σύγκρουσης (και αντίστοιχα της προσάραξης) η οποία δεν συμμετέχει στην αντοχή της διατομής. Για την περίπτωση της σύγκρουσης ακολουθείται και ένας δεύτερος τρόπος υπολογισμού που περιλαμβάνει τη στροφή του ουδέτερου άξονα λόγω μη συμμετρικής διατομής. Αφού ολοκληρωθούν οι υπολογισμοί συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Το δεύτερο μέρος της εργασίας αποτελεί τον υπολογισμό των καμπύλων  $\sigma - \epsilon$  των ελασμάτων με τη διαμήκη ενίσχυση ενώ αυτά δέχονται θλιπτικά φορτία όπως

συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ζωής τους στο πλοίο. Μελετάται δηλαδή η συμπεριφορά τους σε λυγισμό. Η μελέτη αυτή έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας το λογισμικό Abaqus. Το μοντέλο του ενισχυτικού με το συνεργαζόμενο έλασμα σχεδιάζεται σε πρόγραμμα CAD και διακριτοποιείται σε έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά ενώνονται μεταξύ τους στους κόμβους, στους οποίους γίνονται όλες οι μετρήσεις. Μέσω των μετατοπίσεων των κόμβων γίνεται η ανάλυση που θέλουμε κάθε φορά (στη συγκεκριμένη περίπτωση του λυγισμού), υπολογίζονται οι τάσεις και παραμορφώσεις, και εξάγονται οι καμπύλες  $\sigma - \epsilon$ .

Τέλος χρησιμοποιώντας τις καμπύλες αυτές επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για την εύρεση της μέγιστης ροπής κάμψης της διατομής για άθικτη γάστρα και τη συγκρίνουμε με το αποτέλεσμα που πήραμε έχοντας χρησιμοποιήσει τις καμπύλες μέσω των εξισώσεων από τους κανονισμούς.

## Περιεχόμενα

### Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά / Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Εισαγωγή .....	8
1.1.1 Το παράδειγμα του Ever Given .....	8
1.1.2 Containerships.....	10
1.1.3 Αντικείμενο της εργασίας .....	12
1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	13
1.2.1 Γενικά.....	13
1.2.2 Είδη φορτίσεων.....	14
1.2.3 Κάμψη σε ήρεμο νερό.....	14
1.2.4 Κάμψη σε κυματισμό .....	15
1.2.5 Ορθές τάσεις λόγω κάμψης .....	16
1.2.6 Κάμψη ενισχυμένων ελασμάτων .....	19
1.2.6.1 Υστέρηση διάτμησης – ισοδύναμο πλάτος $b_e$ .....	19
1.2.7 Θεωρία λυγισμού .....	21
1.2.7.1 Βαθμός λυγηρότητας .....	23
1.2.7.2 Παραβολή του Johnson.....	23

### Κεφάλαιο 2: Υπολογισμός μέγιστης καμπτικής ροπής

2.1 Περιγραφή της μεθόδου Smith.....	25
2.1.1 Διαδικασία κατασκευής της καμπύλης καμπτικής ροπής .....	25
2.1.2 Παραδοχές της επαναληπτικής διαδικασίας .....	28
2.1.3 Είδη δομικών στοιχείων .....	29
2.2 Καμπύλες $\sigma$ - $\epsilon$ .....	30
2.2.1 Κατάσταση εφελκυσμού .....	30
2.2.2 Κατάσταση θλίψης .....	31
2.3 Διατομή containership .....	32
2.4 Εναπομείνουσα αντοχή γάστρας μετά από ατύχημα (Residual Strength).....	34
2.4.1 Grounding.....	35
2.4.2 Collision .....	36
2.4.3 Collision δεύτερη μέθοδος - στραμμένοι άξονες.....	37

### Κεφάλαιο 3: Πεπερασμένα στοιχεία

3.1 Επισκόπηση .....	40
3.2 Διακριτοποίηση .....	41

3.2.1	Σχήμα των στοιχείων.....	41
3.3	Τρόπος λειτουργίας.....	43
3.3.1	Στάδια.....	44
3.3.2	Λυγισμός με πεπερασμένα στοιχεία.....	45
3.4	Abaqus.....	46
3.4.1	Βήματα .....	46
3.4.2	Δημιουργία μοντέλου .....	47
3.4.3	Διαμόρφωση υλικού .....	48
3.4.4	Διακριτοποίηση – δημιουργία πλέγματος.....	48
3.4.5	Δημιουργία constraints .....	50
3.5	Γραμμική ανάλυση λυγισμού.....	51
3.5.1	Step.....	51
3.5.2	Boundary conditions – load.....	51
3.6	Προσδιορισμός ιδιομορφών .....	53
3.7	Εισαγωγή ατελειών (imperfections) στη γεωμετρία.....	54
3.8	Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού .....	55
3.8.1	Step.....	56
3.8.2	Boundary conditions – Job .....	57
3.9	Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	58

## Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

4.1	Μέγιστη χωρητικότητα διαμήκους ροπής κάμψης της γάστρας ( $M_U$ ) .....	62
4.1.1	Υπολογισμός $M_U$ άθικτης γάστρας.....	62
4.1.2	Υπολογισμός $M_U$ με το πρόγραμμα MARS2000.....	64
4.1.3	Υπολογισμός $M_{UD}$ – εναπομείνουσα αντοχή γάστρας μετά από ατύχημα.....	66
4.2	Σύγκριση για την κατάσταση Collision της μεθόδου Smith με τη μέθοδο των στραμμένων αξόνων.....	68
4.3	Διαγράμματα καμπυλότητας .....	70
4.4	Αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων .....	75
4.5	Μέθοδος Smith με καμπύλες $\sigma - \epsilon$ από πεπερασμένα .....	80
4.6	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων .....	83
	Συμπεράσματα .....	84
	Παράρτημα Α – Υπολογισμός ροπών σύμφωνα με τους κανονισμούς.....	85
	Βιβλιογραφία .....	89

# Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά / Θεωρητικό υπόβαθρο

## 1.1 Εισαγωγή

### 1.1.1 Το παράδειγμα του Ever Given

Στις 23 Μαρτίου του 2021 το πλοίο τύπου containership με όνομα «Ever Given» της εταιρίας «Evergreen» ήταν προγραμματισμένο να διασχίσει τη διώρυγα του Σουέζ με σκοπό να συνεχίσει το ταξίδι του προς την Ευρώπη. Στις 07:40 (ώρα Αιγύπτου) το πλοίο ξεκίνησε το πέρασμά του από τη διώρυγα και λίγα λεπτά μετά ξέσπασε αμμοθύελλα με ριπές ανέμου έντασης πάνω από 70 χιλιόμετρα ανά ώρα να σφυροκοπούν τη γάστρα του πλοίου. Το αποτέλεσμα ήταν το πλοίο να προσαράξει και κατά συνέπεια να φράξει τη διώρυγα δημιουργώντας τεράστιες επιπτώσεις για την παγκόσμια ναυτιλία. Μετά από 6 ημέρες συνεχούς προσπάθειας από εργάτες το πλοίο ξεκόλλησε και η διώρυγα ήταν και πάλι ανοιχτή. Το «Ever Given» παρέμεινε σε Αιγυπτιακά ύδατα μέχρι να συμφωνηθεί η αποζημίωση που θα έπρεπε να πληρώσει η εταιρία και, αφού όλα κανονίστηκαν και ολοκληρώθηκαν οι απαραίτητοι έλεγχοι, στις 13 Ιουλίου απέπλευσε με προορισμό το Ρότερνταμ της Ολλανδίας.





Εικόνα 1: Η πλήρη του πλοίου Ever Given πριν ξεκινήσει η επισκευή του

Από το λιμάνι του Ρότερνταμ το πλοίο κατευθύνθηκε προς το Φελιξτόου της Αγγλίας για να παραδώσει το τελευταίο του φορτίο, και στη συνέχεια απέπλευσε άφορτο προς την Κίνα για επισκευή. Το περιστατικό αυτό είναι ένα τέλειο παράδειγμα για τη σημασία του να γνωρίζουμε την εναπομείνουσα αντοχή της γάστρας του πλοίου έπειτα από ατύχημα.

Το συμβάν του «Ever Given» διαδόθηκε σε όλον τον κόσμο λόγω της οικονομικής σημασίας του και της σπανιότητάς του, ωστόσο είναι μία από τις πολλές περιπτώσεις που γίνεται ζημιά σε ένα πλοίο.

Σύμφωνα με το JTSB (Japan Transport Safety Board) το πρώτο τρίμηνο του 2022 έχουν καταγραφεί 110 ατυχήματα πλοίων εκ των οποίων τα 17 είναι προσαράξεις και τα 30 είναι περιπτώσεις σύγκρουσης. Στα 110 ατυχήματα έχουν εμπλακεί 149 σκάφη των οποίων η πλειοψηφία (51) είναι αλιευτικά σκάφη και τα αμέσως περισσότερα (31) είναι τα πλοία μεταφοράς φορτίου. <sup>[13]</sup>

Οι κύριες αιτίες πρόκλησης ατυχημάτων είναι τα μηχανικά προβλήματα, το ανθρώπινο λάθος και οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Τα συμβάντα όπου έχουμε προσάραξη γίνονται κοντά σε ακτές και λιμάνια όπου τα νερά είναι ρηχά και η ταχύτητα του πλοίου είναι σχετικά χαμηλή με αποτέλεσμα να είναι συνήθως πιο διαχειρίσιμα και να μην έχουμε πολύ μεγάλες απώλειες.

Οι περιπτώσεις που έχουμε σύγκρουση (collision) διακριτοποιούνται ανάλογα τη σφοδρότητά τους και το περιβάλλον στο οποίο γίνονται. Οι πιο συχνές περιπτώσεις είναι η επαφή ενός σκάφους με κάποια προβλήτα στο λιμάνι ή η ελαφρά επαφή μεταξύ δυο σκαφών πάλι σε χώρο του λιμανιού. Σπανιότερες περιπτώσεις είναι η σύγκρουση δυο πλοίων σε ανοιχτή θάλασσα, ωστόσο εκεί πολλές φορές έχουμε σοβαρές απώλειες, ακόμα και ζωής, και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα βύθισης του πλοίου.

### 1.1.2 Containerships

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, γνωστά και ως containerships, έχουν γίνει η κύρια μορφή θαλάσσιων εμπορευματικών μεταφορών και είναι βασικό γρανάζι του παγκόσμιου εμπορίου. Τα πλοία αυτά μεταφέρουν το φορτίο σε μονάδες TEU (Twenty foot Equivalent Unit) δηλαδή το μέγεθος ενός container μήκους 20 ποδιών (6.096 μέτρα). Το βάρος ενός άδειου container είναι 2 τόνοι.

Ένα πλοίο containership μπορεί να μεταφέρει εξαιρετικά μεγάλο αριθμό φορτίου με το μεγαλύτερο αυτή τη στιγμή (Ιούνιος 2022), το πλοίο «Ever Ace», να έχει μεταφορική ικανότητα 23992 TEU. Το συγκεκριμένο πλοίο έχει μήκος 399.9 μέτρα και πλάτος 61.53 μέτρα. Για να αποκτήσουμε μια εικόνα του μεγέθους αυτού, αρκεί να αναφέρουμε πως αν μεταφέραμε 23992 Containers μέσω ενός τρένου, το τρένο αυτό θα είχε μήκος 168 χιλιόμετρα. <sup>[6],[19]</sup>



Εικόνα 2: Το πλοίο Ever Ace

Από τις αρχές του 21<sup>ου</sup> αιώνα το μέσο μέγεθος ενός Containership έχει υπερδιπλασιαστεί και το 2021 υπολογίζεται ότι υπήρχαν πάνω από 5400 ενεργά πλοία με συνολική χωρητικότητα 24.6 εκατομμύρια TEU.

Το 2017 υπολογίστηκε ότι μεταφέρθηκαν εμπορευματοκιβώτια συνολικής χωρητικότητας 780 εκατομμύρια TEU και πως κάθε χρόνο μεταφέρονται 1 δισεκατομμύριο τόνοι φορτίου μέσω των containers. Πολλές φορές επίσης τα πλοία μεταφέρουν άδεια containers από λιμάνι σε λιμάνι για να καλυφθεί η ζήτηση που υπάρχει.

Υπολογίζεται πως περίπου το 95% του παγκόσμιου φορτίου μεταφέρεται μέσω των Containerships. [6],[19]

### 1.1.3 Αντικείμενο της εργασίας

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη αντοχής πλοίου containership μετά από ατύχημα.

Συγκεκριμένα μελετάται η μέγιστη χωρητικότητα διαμήκους ροπής κάμψης της γάστρας( $M_U$ ), θεωρώντας το πλοίο ως μία δοκό, πέρα από την οποία η κατασκευή καταρρέει.

Αρχικά υπολογίζεται η  $M_U$  η οποία αφορά την άθικτη κατάσταση της γάστρας και στη συνέχεια υπολογίζεται η  $M_{UD}$ , δηλαδή το ίδιο μέγεθος για κατάσταση μετά από ατύχημα.

Η κατάσταση ατυχήματος χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

- Προσάραξη (grounding)
- Σύγκρουση (collision)

Για όλες τις περιπτώσεις η χωρητικότητα ροπής κάμψης υπολογίζεται σύμφωνα με τους κανονισμούς του IACS, δηλαδή με τη μέθοδο Smith. Η μέθοδος αυτή διακριτοποιεί τη μέση τομή του πλοίου σε δομικά στοιχεία, υπολογίζει την συνεισφορά του καθενός ξεχωριστά, και το τελικό άθροισμά τους αποτελεί την χωρητικότητα ροπής κάμψης  $M_U$ .

Ο σκοπός της εύρεσης των  $M_U$  και  $M_{UD}$  είναι ο προσδιορισμός της εναπομείνουσας αντοχής της γάστρας του πλοίου σε περίπτωση που έχουμε μια σύγκρουση ή προσάραξη, έτσι ώστε το πλοίο να μπορέσει να συνεχίσει το ταξίδι του και έπειτα να οδηγηθεί σε επισκευή.

Πρέπει επίσης να επισημανθεί πως η ζημιά πάνω στην οποία γίνεται η μελέτη είναι προσδιορισμένη από τους κανονισμούς του IACS, ανεξάρτητα από το πλοίο και τις συνθήκες του ατυχήματος.

## 1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

### 1.2.1 Γενικά

Ο προσδιορισμός της αντοχής μια τόσο σύνθετης κατασκευής όπως ένα πλοίο είναι μια εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία. Είναι σχεδόν αδύνατο να αναπτυχθεί ένα μοντέλο της κατασκευής το οποίο θα προσομοιάζει λεπτομερώς όλες τις φορτίσεις και καταπονήσεις που δέχεται ένα πλοίο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του.

Η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας του πλοίου καθώς και το πολύ απρόβλεπτο περιβάλλον λειτουργείας του, δηλαδή η θάλασσα, είναι δύο από τις κυριότερες αιτίες που ο προσδιορισμός της αντοχής είναι πάρα πολύ δύσκολος. Οι δυσκολίες οφείλονται και σε άλλες αιτίες, όπως: <sup>[4]</sup>

- Η ανάγκη μιας πολύ λεπτομερούς περιγραφής της κατασκευής λόγω απότομων μεταβολών της γεωμετρίας
- Η χρονική και χωρική μεταβολή της φόρτισης που προέρχεται κυρίως από το ίδιο βάρος (βάρος πλοίου και φορτίου) και τις πιέσεις που ασκούνται από τη θάλασσα
- Η στήριξη του πλοίου στη θάλασσα και την αλληλεπίδραση της φόρτισης με την απόκριση

Για να ξεπεραστούν οι παραπάνω δυσκολίες, η μελέτη αντοχής του πλοίου γίνεται σε πολλά στάδια εξετάζοντας στο κάθε ένα από αυτά συγκεκριμένες μορφές καταπόνησης τμημάτων της κατασκευής.

Οι βασικότερες μελέτες είναι:

- Η μελέτη του πλοίου θεωρούμενου ως κοίλη λεπτότοιχη δοκός
- Η μελέτη τμήματος στο μέσο νομέα
- Η μελέτη κατασκευαστικών συνόλων (διπύθμενο, φρακτές κλπ.)

- Η μελέτη νομέων
- Η μελέτη πλακών και ενισχυτικών
- Η μελέτη κατασκευαστικών λεπτομερειών σε περιοχές συγκέντρωσης τάσεων

Η μελέτη του πλοίου ως δοκάρι, αποτελεί μια από τις κυριότερες παραδοχές για την απλοποίηση του υπολογισμού της αντοχής του πλοίου, και εξετάζει την κάμψη της γάστρας του πλοίου στο κατακόρυφο και στο οριζόντιο επίπεδο, και τη στρέψη. <sup>[4]</sup>

### 1.2.2 Είδη φορτίσεων

Οι φορτίσεις που δέχεται η γάστρα ενός πλοίου μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Συγκεκριμένα υπάρχουν οι:

- Στατικές φορτίσεις
- Δυναμικές φορτίσεις

Οι στατικές φορτίσεις είναι εκείνες που μένουν σταθερές στην πάροδο του χρόνου (ή ενός ταξιδιού) όπως το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, η άντωση και το βάρος του φορτίου που μεταφέρεται.

Δυναμικές ονομάζονται οι φορτίσεις οι οποίες μεταβάλλονται συνεχώς κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού όπως η αλληλεπίδραση με τη θάλασσα, τον άνεμο και το σύστημα πρόωσης (ταλαντώσεις έλικας).

### 1.2.3 Κάμψη σε ήρεμο νερό

Όπως προαναφέρθηκε, η διαμήκης αντοχή του πλοίου υπολογίζεται με την παραδοχή πως η διατομή είναι μια κοίλη δοκός. Επειδή το πλοίο ισορροπεί, η

συνισταμένη δύναμη του βάρους ισούται με τη συνισταμένη δύναμη της άντωσης και το διαμήκες σημείο εφαρμογής τους βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο.

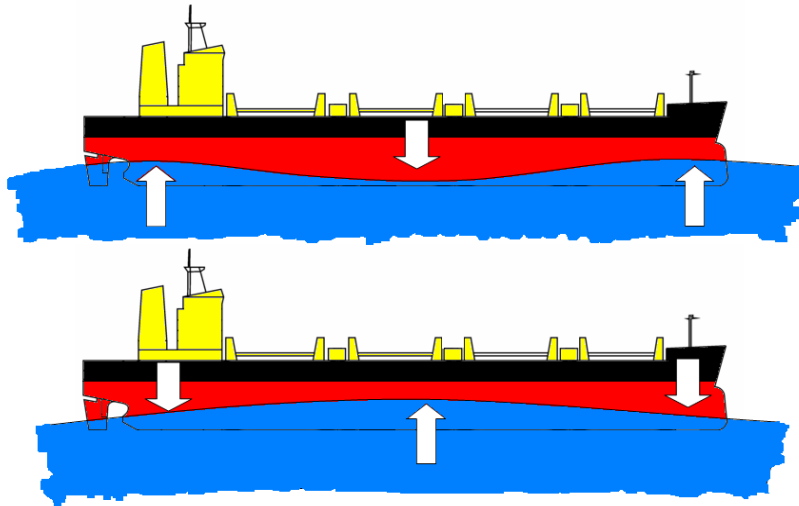
Ωστόσο επειδή κατά μήκος του πλοίου υπάρχει ανομοιομορφία στις κατανομές του βάρους και της άντωσης, προκαλείται κάμψη του πλοίου. Στο ήρεμο νερό που μπορούμε να θεωρήσουμε πως το πλοίο δεν έχει εγκάρσια κλίση, η κάμψη περιορίζεται στο κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του.

Η καμπύλη φόρτισης προκύπτει από τη διαφορά της καμπύλης βάρους και της καμπύλης άντωσης, και από αυτήν προκύπτουν οι τέμνουσες δυνάμεις και οι καμπτικές ροπές<sup>[4]</sup>

Η διαμήκης κάμψη του πλοίου προκαλεί θλίψη και εφελκυσμό στα στοιχεία της διατομής ανάλογα το που βρίσκεται το καθένα σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

#### 1.2.4 Κάμψη σε κυματισμό

Όταν το πλοίο συναντά κύματα, οι φορτίσεις που δέχεται διαφέρουν σε σχέση με εκείνες που δέχεται στο ήρεμο νερό με αποτέλεσμα η κατανομή διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών να αλλάζει. Οι δύο καταστάσεις που βρίσκεται το πλοίο κατά την αλληλεπίδρασή του με κύματα είναι η κατάσταση Hogging και η κατάσταση Sagging. Στην πρώτη περίπτωση ο πυθμένας θλίβεται και το κατάστρωμα εφελκύεται, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το κατάστρωμα θλίβεται και ο πυθμένας εφελκύεται.



Εικόνα 3: Κατάσταση Sagging (πάνω) και κατάσταση Hogging (κάτω)

Για τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός πλοίου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η διατομή του σε οποιοδήποτε μήκος να μπορεί να παραλάβει τις διατμητικές δυνάμεις και τις καμπτικές ροπές που της ασκούνται. Ο υπολογισμός των παραπάνω είναι σαφώς δυσκολότερος όταν μιλάμε για κυματισμό καθώς πρέπει να γίνει η ακριβής εύρεση και ανάλυση του κύματος που προκαλεί δυσμενείς καταστάσεις φόρτισης, αλλά και η δημιουργία μοντέλου που θα υπολογίζει την απόκριση του πλοίου λόγω του κύματος.

Η ροπή σχεδίασης είναι το άθροισμα της μέγιστης ροπής σε ήρεμο νερό και της μέγιστης ροπής σε κυματισμό, και είναι το μέγεθος βάσει του οποίου σχεδιάζεται το πλοίο.

### 1.2.5 Ορθές τάσεις λόγω κάμψης

Για τον προσδιορισμό των ορθών τάσεων λόγω κάμψης στη διατομή του πλοίου εφαρμόζεται η απλή θεωρία της κάμψης, σύμφωνα με την οποία η διατομή στρέφεται γύρω από έναν άξονα ο οποίος ονομάζεται ουδέτερος άξονας.

Στην περίπτωση του πλοίου-δοκού, σύμφωνα με την απλή θεωρία της κάμψης, υπάρχει μια επιφάνεια παράλληλη στην άνω και στην κάτω επιφάνεια του



δοκαριού (στην περίπτωση μας παράλληλη στο κατάστρωμα και στον πυθμένα) πάνω στην οποία η τιμή της τάσης  $\sigma$  και της παραμόρφωσης  $\epsilon$  είναι ίσες με μηδέν.

Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται ουδέτερη επιφάνεια και τέμνει την κάθε διατομή κατά μήκος μιας ευθείας η οποία αποτελεί τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

Για ένα μέλος που επιδέχεται καθαρή κάμψη και όσο οι τάσεις βρίσκονται στην ελαστική περιοχή, ο ουδέτερος άξονας διέρχεται από το κέντρο της διατομής.

Οι ορθές τάσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma = M \frac{y}{I}$$

Σχέση 1: ορθές τάσεις

Όπου:

- $y$  είναι η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της διατομής
- $I$  είναι η ροπή αδράνειας της διατομής γύρω από τον ουδέτερο άξονα
- $M$  είναι η καμπτική ροπή που εφαρμόζεται στη διατομή

Η παραπάνω σχέση βασίζεται στη θεωρία κάμψης Euler-Bernoulli και λόγω των παραδοχών της απλής θεωρίας της κάμψης μαρτυράει γραμμική σχέση μεταξύ των τάσεων και της απόστασης από τον ουδέτερο άξονα. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται πως η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων λόγω κάμψης, θεωρώντας τη γάστρα ως λεπτότοιχη δοκό.

Για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας της διατομής λαμβάνονται υπόψη τα εξής στοιχεία:

- Το κύριο και τα ενδιάμεσα καταστρώματα
- Το πλευρικό περίβλημα
- Τα διαμήκη ενισχυτικά
- Ελάσματα πυθμένα (εσωτερικού και εξωτερικού)
- Οι διαμήκεις φρακτές

Η σχέση ένα μπορεί να γραφτεί και ως αποτέλεσμα των ροπών κάμψης σε ήρεμο νερό και κυματισμό. Συγκεκριμένα αν  $M_{sw}$  είναι η ροπή σε ήρεμο νερό και  $M_w$  είναι η ροπή σε κυματισμό, η σχέση 1 μετατρέπεται:

$$\sigma = M \frac{y}{I} \rightarrow \sigma_{max} = \frac{M_{sw} + M_w}{SM}$$

Όπου SM (Section Modulus) είναι η ροπή αντίστασης, μέγεθος που χαρακτηρίζει τη διατομή και ισούται με:

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

Όπου  $y_d$  είναι η απόσταση του καταστρώματος από τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται πιο κοντά στον πυθμένα οπότε η απόστασή του από το κατάστρωμα είναι μεγαλύτερη από την απόστασή του από τον πυθμένα. Έτσι γίνεται εύκολα αντιληπτό πως τη μεγαλύτερη καταπόνηση λόγω κάμψης τη δέχεται το κατάστρωμα στην περιοχή της μέσης τομής του πλοίου, αποτελώντας την πιο κρίσιμη περιοχή από άποψη αντοχής.<sup>[4]</sup>

Σε περίπτωση ανεπαρκούς αντοχής υπάρχει σοβαρός κίνδυνος ελαστο-πλαστικής κατάρρευσης και λυγισμού, ενώ δεν αποκλείεται αν υπάρχει κάποιο ρήγμα να έχουμε καταστροφικές συνέπειες με το χειρίστο σενάριο να είναι το πλοίο να κοπεί στα δύο.

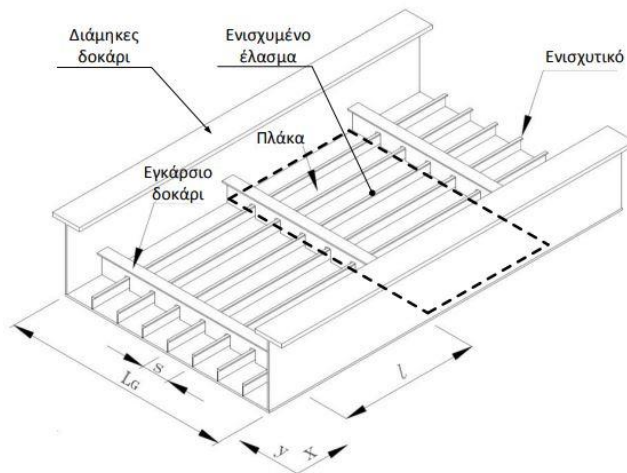


Εικόνα 4: Αστοχία του πλοίου MOL Comfort λόγω ρήγματος

### 1.2.6 Κάμψη ενισχυμένων ελασμάτων

Ενισχυμένα ελάσματα συναντώνται παντού κατά το μήκος και πλάτος ενός πλοίου. Τα ελάσματα αποτελούν λεπτότοιχα δομικά στοιχεία που προβάλλουν μικρή αντίσταση σε κάμψη (έχουν μειωμένη καμπτική δυσκαμψία) λόγω του μικρού πάχους σε σχέση με το πλάτος και το μήκος τους. Για να αυξηθεί η καμπτική δυσκαμψία συγκολλούνται ενισχυτικές δοκοί παράλληλα σε μία ή και στις δύο διευθύνσεις του ελάσματος διαμορφώνοντας ένα σύστημα ενίσχυσης. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι η δημιουργία πλακών με μικρότερες διαστάσεις από τις αρχικές, ικανοποιώντας έτσι των απαιτήσεων σχεδίασης και των κανονισμών. Τα κομμάτια που σχηματίζονται ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εγκάρσια δοκάρια και σε δύο διαδοχικά διαμήκη δοκάρια ονομάζονται ενισχυμένα ελάσματα.

[1]



Εικόνα 5: Διακριτοποίηση ενισχυμένου ελάσματος

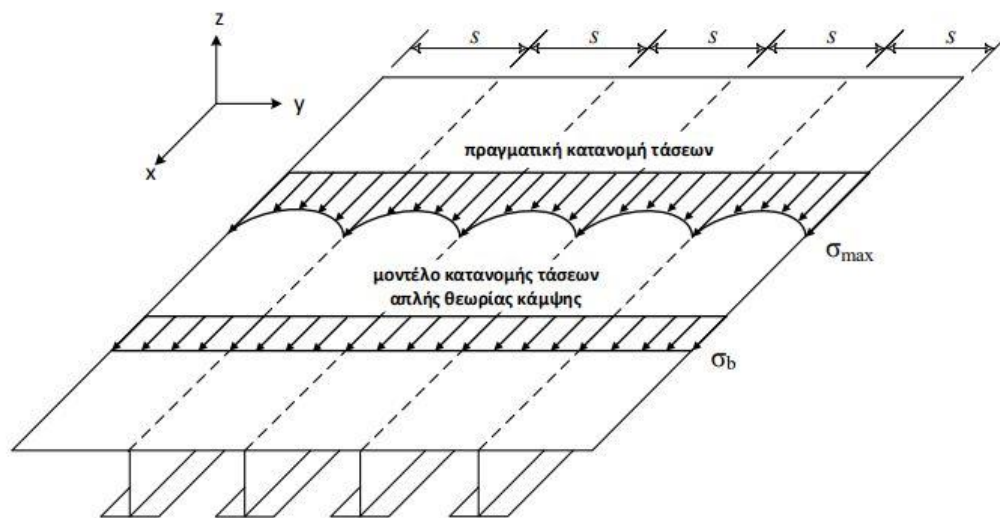
#### 1.2.6.1 Υστέρηση διάτμησης – ισοδύναμο πλάτος $b_e$

Μια δοκός που παραλαμβάνει κάθετα φορτία καταπονείται ταυτόχρονα σε κάμψη και διάτμηση. Σε πολλές περιπτώσεις (γέφυρες, έργα υποδομής) λαμβάνεται μόνο η κάμψη ως καταπόνηση στην φάση ελέγχου αντοχής. Αγνοούνται δηλαδή οι

διατμητικές τάσεις σε διακριτούς φορείς όπου το πλάτος του πέλματος είναι σχετικά μικρό. Οι διατμητικές δυνάμεις οι οποίες αναπτύσσονται στις ακμές όπου ο κορμός ενώνεται με τα πέλματα, μεταφέρουν σε αυτά αξονικές παραμορφώσεις.

Οι δυνάμεις αυτές ωστόσο δεν είναι ομοιόμορφες κατά το πλάτος του πέλματος με αποτέλεσμα η διατομή του να μην παραμένει επίπεδη. Έτσι, μειώνεται η ικανότητά του να φέρει αξονικές τάσεις όπως υπολογίζονται από την απλή θεωρία της κάμψης.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υστέρηση διάτμησης και το αποτέλεσμα αυτού είναι η μη σταθερή κατανομή ορθών τάσεων λόγω κάμψης στα σημεία που έχουν ίση απόσταση από τον ουδέτερο άξονα. <sup>[1]</sup>

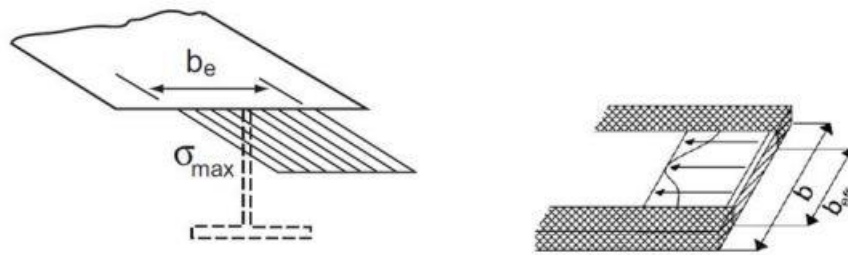


Εικόνα 6: Το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης

Όπως παρατηρείται στην παραπάνω εικόνα, οι τάσεις είναι μεγαλύτερες στην ένωση του κορμού με το πέλμα, και όχι ίσες καθ'όλο το πλάτος όπως λέει η απλή θεωρία της κάμψης. Στις ναυπηγικές κατασκευές η υστέρηση διάτμησης έχει μεγαλύτερη επιρροή στην κάμψη των κατασκευαστικών στοιχείων (πχ ενισχυτικά) και όχι στην κάμψη του πλοίου ως δοκός.

Για την απλοποίηση του προβλήματος της υστέρησης διάτμησης στον υπολογισμό της ροπής αντίστασης χρησιμοποιείται το ισοδύναμο πλάτος λόγω κάμψης (ή ενεργό πλάτος) καθώς οι ορθές τάσεις μειώνονται όσο κινούμαστε από το ενισχυτικό στο μέσο της ισαπόστασης. Η περιοχή αυτή δηλαδή δεν είναι το ίδιο «αποτελεσματική» όσο είναι η περιοχή του συνεργαζόμενου ελάσματος κοντά στο ενισχυτικό. Αποτέλεσμα της θεωρίας αυτής είναι η περιοχή που παραλαμβάνει τάσεις να είναι μικρότερη από το πραγματική γεωμετρική περιοχή (όπως η ισαπόσταση  $s$  των ενισχυτικών). Η περιοχή συμβολίζεται με  $b_e$  και θεωρείται πως σε αυτήν κατανέμεται ομοιόμορφα η τάση με μέγεθος ίσο με τη μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση  $\sigma_{max}$ .<sup>[1]</sup>

Στην εικόνα που ακολουθεί επεξηγείται το παραπάνω φαινόμενο.



Εικόνα 7: Απεικόνιση του ισοδύναμου πλάτους  $b_e$

### 1.2.7 Θεωρία λυγισμού

Κατά τη διάρκεια της ζωής του πλοίου αρκετά δομικά του στοιχεία υπόκεινται σε θλιπτικές φορτίσεις. Στα στοιχεία αυτά ο έλεγχος αντοχής αφορά και τον λυγισμό. Η γεωμετρία των στοιχείων είναι τέτοια που ο λυγισμός προκύπτει στην ελαστοπλαστική περιοχή. Για αυτό, η παρουσία τοπικού λυγισμού φέρνει ως αποτέλεσμα την τοπική κατάρρευση της κατασκευής. Στην περιοχή της μέσης τομής μελετάται η αντοχή σε λυγισμό των στοιχείων της διατομής ανάλογα αν βρισκόμαστε σε κατάσταση Hogging (θλίψη, άρα και φαινόμενο λυγισμού, στον

πυθμένα) είτε σε κατάσταση Sagging (θλίψη, άρα και φαινόμενο λυγισμού στο κατάστρωμα). Όπως προαναφέρθηκε, η περιοχή του πλοίου με τις μεγαλύτερες ορθές τάσεις λόγω κάμψης είναι το κατάστρωμα στη μέση τομή και αυτό ισχύει και στην περίπτωση ελέγχου αντοχής σε λυγισμό.

Κατά τους κανονισμούς CSR (Common Structural Rules) ο έλεγχος έναντι λυγισμού ενός ενισχυμένου ελάσματος βασίζεται στον έλεγχο λυγισμού των πλακών που σχηματίζονται μεταξύ των ενισχυτικών, και στον έλεγχο λυγισμού των ενισχυτικών μαζί με το ισοδύναμο πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος. Η ισοδύναμη διατομή των ενισχυτικών θεωρείται ως πρισματικός φορέας και μελετάται η συμπεριφορά τους σε λυγισμό ως αποτέλεσμα θλιπτικών φορτίσεων παράλληλα στο διαμήκη άξονά τους. <sup>[1]</sup>

Στα πλαίσια μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών, ενδιαφέρον για τη σχεδίαση φορέων έναντι λυγισμού έχει το ελάχιστο κρίσιμο φορτίο κατά Euler  $P_E$  το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$P_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Η μελέτη του φορέα για αντοχή σε λυγισμό απαιτεί τη μετατροπή του κρίσιμου φορτίου  $P_E$  σε κρίσιμη τάση, η οποία προκύπτει διαιρώντας το κρίσιμο φορτίο με το εμβαδό  $A$  της διατομής. Έτσι, παίρνουμε:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 EI}{AL^2}$$

Οι σχέσεις αυτές, που εκφράζουν το πρόβλημα του ελαστικού λυγισμού κατά Euler, υπολογίζουν το μέγιστο θλιπτικό φορτίο, και αντίστοιχα τη μέγιστη επιτρεπόμενη τάση, που μπορεί ένας φορέας να παραλάβει για να μην προκύψει πρόβλημα ευστάθειας και κατάρρευσής του.

Παρατηρείται πως το φαινόμενο του ελαστικού λυγισμού εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φορέα, συνεπώς

συνδέεται με τη δυσκαμψία και όχι με την αντοχή του υλικού. Ωστόσο, η δομική συμπεριφορά του χάλυβα και του αλουμινίου, υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των πλοίων, χαρακτηρίζεται ως ελαστοπλαστική με αποτέλεσμα τα υλικά αυτά να μην μπορούν να παραλάβουν τάσεις μεγαλύτερες από το όριο διαρροής τους  $\sigma_y$ .<sup>[1]</sup>

#### 1.2.7.1 Βαθμός λυγηρότητας

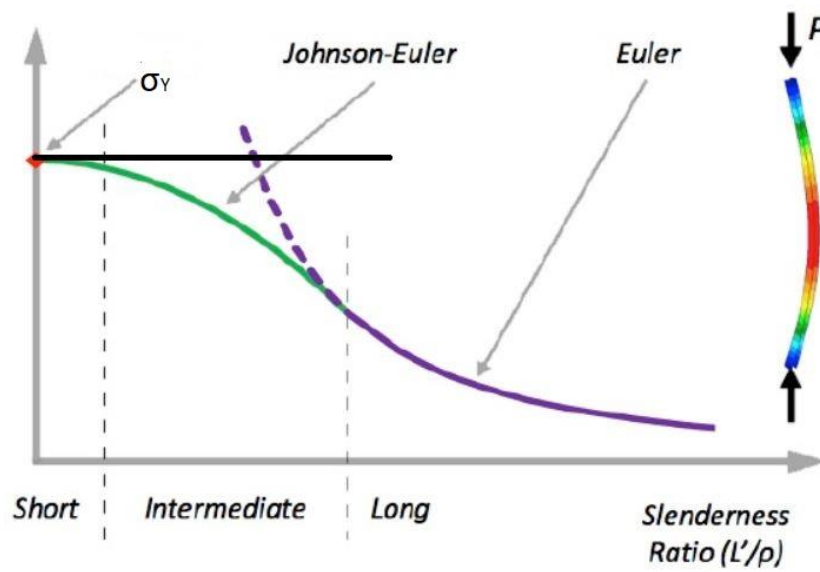
Ο βαθμός λυγηρότητας είναι ένα μέγεθος που συναντάται στους κανονισμούς σχεδίασης φορέων υπό τη δράση θλιπτικών φορτίσεων και εκφράζει την αντίσταση ενός φορέα έναντι λυγισμού. Εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά στοιχεία του φορέα και όχι από το υλικό. Ουσιαστικά εκφράζει το πόσο «εύκολα ή δύσκολα» λυγίζει ένας φορέας.

Ο βαθμός λυγηρότητας ορίζεται ως:

$$\lambda = \frac{L}{\sqrt{\frac{I}{A}}}$$

#### 1.2.7.2 Παραβολή του Johnson

Η τάση κατάρρευσης πραγματικών υποστυλωμάτων αποκλίνει από τη θεωρία λυγισμού τέλειων φορέων λόγω ατελειών και παραμένουσων τάσεων. Τον τελευταίο αιώνα, βασιζόμενοι σε πειραματικά αποτελέσματα, ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στη δημιουργία εμπειρικών καμπυλών αντοχής υποστυλωμάτων. Στους κανονισμούς CSR και URS χρησιμοποιείται η παραβολή του Johnson η οποία υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια την τάση κατάρρευσης βραχύκορμων φορέων αλλά υποεκτιμά την αντοχή των υψίκορμων φορέων. Για τους φορείς δηλαδή με μικρό βαθμό λυγηρότητας  $\lambda$  χρησιμοποιείται η καμπύλη Johnson ενώ για φορείς με υψηλό βαθμό λυγηρότητας  $\lambda$  χρησιμοποιείται η αντίστοιχη του Euler, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Στον άξονα  $\gamma$  έχουμε την κρίσιμη τάση κατάρρευσης και στον άξονα  $\chi$  έχουμε τον βαθμό λυγηρότητας  $\lambda$ .<sup>[1]</sup>



Εικόνα 8: Οι καμπύλες Euler – Johnson.

Η κρίσιμη τάση που οριοθετεί την παραβολή Johnson προκύπτει από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_{cr} = \sigma_E \quad \text{για } \sigma_E \leq \frac{\sigma_Y}{2}$$

$$\sigma_{cr} = \sigma_Y \left[ 1 - \frac{\sigma_Y}{4\sigma_E} \right] \quad \text{για } \sigma_E > \frac{\sigma_Y}{2}$$

Όπου

- $\sigma_E$  είναι η κρίσιμη τάση λυγισμού Euler
- $\sigma_Y$  είναι το όριο διαρροής του υλικού

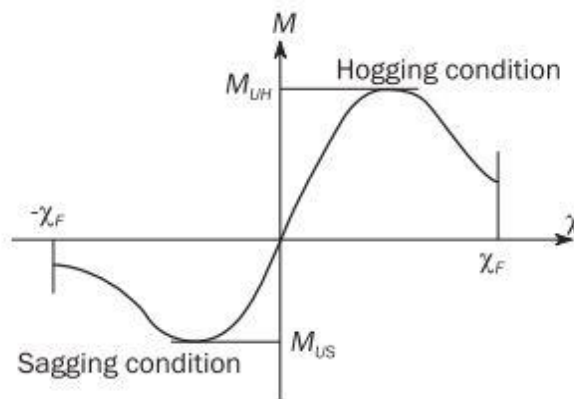


# Κεφάλαιο 2: Υπολογισμός μέγιστης καμπτικής ροπής

## 2.1 Περιγραφή της μεθόδου Smith

Η μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να αναπτύξει η εγκάρσια διατομή της γάστρας ενός πλοίου ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της καμπτικής ροπής  $M$  (ή  $M_U$  όπως έχει αναφερθεί παραπάνω) ως προς την καμπυλότητα  $\chi$  της εγκάρσιας διατομής.

Στην κατάσταση Hogging η καμπυλότητα παίρνει θετικές τιμές ενώ στην κατάσταση Sagging παίρνει αρνητικές τιμές.



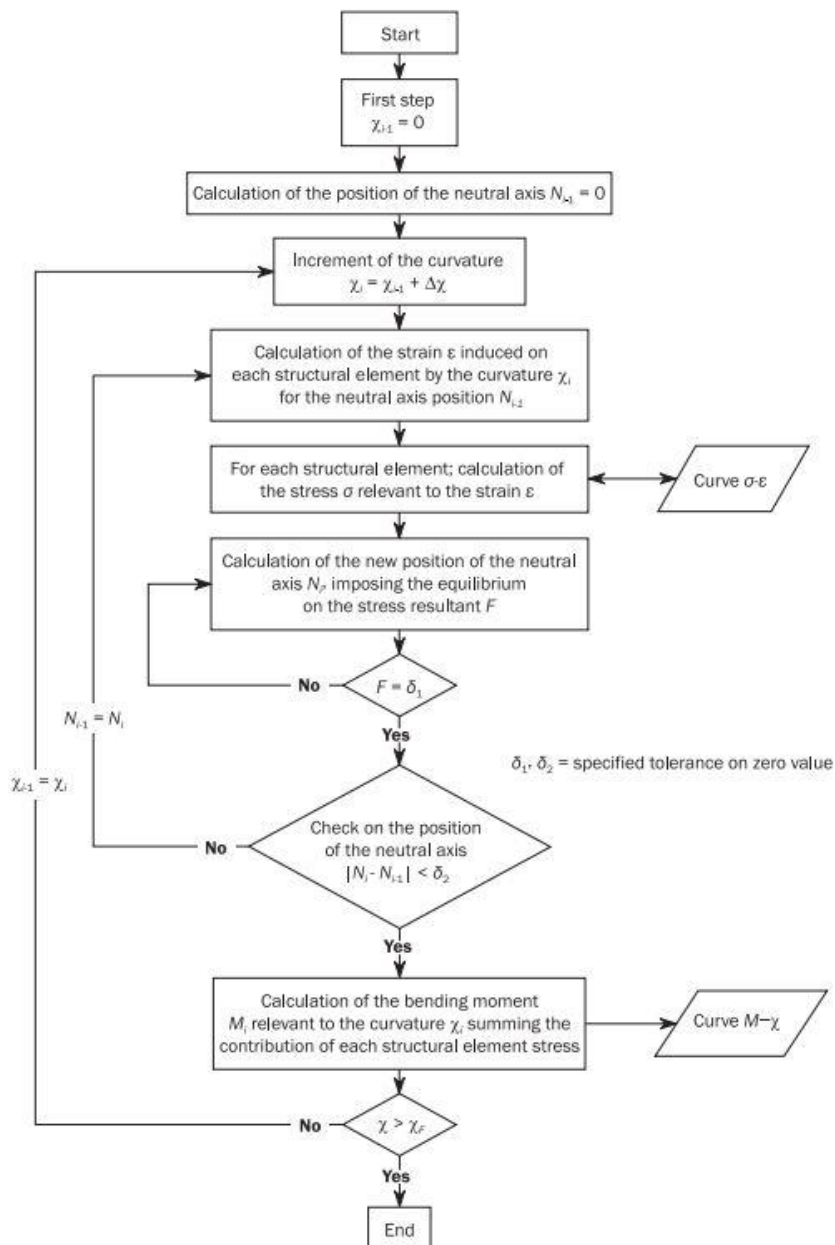
Εικόνα 9: Η καμπτική ροπή  $M$  σε συνάρτηση με την καμπυλότητα  $\chi$

Η καμπύλη  $M$ - $\chi$  κατασκευάζεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας η οποία αναλύεται στη συνέχεια.

### 2.1.1 Διαδικασία κατασκευής της καμπύλης καμπτικής ροπής

Οι κανονισμοί CSR (Common Structural Rules) ορίζουν μια επαναληπτική διαδικασία η οποία παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Μέσω αυτής προσδιορίζεται η μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η γάστρα του πλοίου ως η μέγιστη τιμή αυτής της καμπύλης. Για κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας δημιουργείται ένα σημείο της καμπύλης με συντεταγμένες  $(\chi_i, M_i)$  δηλαδή η

καμπτική ροπή  $M_i$  που αναπτύσσεται στην εγκάρσια διατομή για δεδομένη καμπυλότητα  $\chi_i$ .



Εικόνα 10: Η επαναληπτική διαδικασία των CSR

Η μεταβολή της καμπυλότητας από βήμα σε βήμα προκύπτει αν στην καμπυλότητα του προηγούμενου βήματος προσθέσουμε την τιμή  $\Delta\chi$  η οποία ορίζεται παρακάτω. Η αύξηση αυτή ουσιαστικά αντιστοιχεί στην αύξηση της γωνίας περιστροφής της διατομής ως προς τον οριζόντιο ουδέτερο άξονά της.

Λόγω της αύξησης αυτής προκαλείται παραμόρφωση  $\epsilon$  (strain) στα δομικά στοιχεία της διατομής και η τιμή της εξαρτάται από της απόσταση του κάθε στοιχείου από τον ουδέτερο άξονα της διατομής.

Στην κατάσταση Hogging τα στοιχεία που βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα εφελκύνονται ενώ εκείνα που βρίσκονται κάτω από τον ουδέτερο άξονα θλίβονται. Στην κατάσταση Sagging συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή τα στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα θλίβονται και τα στοιχεία κάτω από αυτόν εφελκύνονται.

Με δεδομένη την παραμόρφωση  $\epsilon$  καθορίζεται η τάση  $\sigma$  που αναπτύσσεται σε κάθε δομικό στοιχείο μέσω των καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης  $\sigma$ - $\epsilon$  (load end-shortening curve) οι οποίες λαμβάνουν υπόψιν η συμπεριφορά του στοιχείου στη μη γραμμική ελαστο-πλαστική περιοχή.

Επειδή η σχέση των  $\sigma$ - $\epsilon$  δεν είναι γραμμική, η κατανομή των τάσεων στα δομικά στοιχεία της διατομής μεταβάλλει τη θέση του ουδέτερου άξονα από βήμα σε βήμα της διαδικασίας. Η νέα θέση του ουδέτερου άξονα προσδιορίζεται μέσω πάλι μιας επαναληπτικής διαδικασίας με την οποία επιβάλλεται ως συνθήκη η ισορροπία μεταξύ των τάσεων που κατανέμονται στη διατομή.

Όταν προσδιοριστεί η νέα θέση του ουδέτερου άξονα τότε υπολογίζεται η καμπτική ροπή  $M_i$  που αναπτύσσει η διατομή λόγω της επιβαλλόμενης καμπυλότητας  $\chi_i$ , αθροίζοντας τη συνεισφορά σε ροπή του κάθε δομικού στοιχείου της διατομής. Ακολουθούν συνοπτικά τα βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας:

**Βήμα 1.** Διαμερισμός της διατομής σε δομικά στοιχεία

**Βήμα 2.** Καθορισμός σχέσης τάσης – παραμόρφωσης για όλα τα δομικά στοιχεία

**Βήμα 3.** Υπολογισμός της αρχικής τιμής της καμπυλότητας και της αρχικής θέσης του ουδέτερου άξονα (χρησιμοποιώντας την τιμή καμπυλότητας που αναπτύσσει τάση ίση με το 1% της τάσης διαρροής του καταστρώματος αντοχής)

$$\chi_1 = \Delta\chi = 0.01 \frac{R_{eH}}{E} \frac{1}{z_D - z_n}$$

**Βήμα 4.** Υπολογισμός για κάθε στοιχείο της παραμόρφωσης  $\epsilon_i = \chi^* z_i$  και της αντίστοιχης τάσης  $\sigma_i$

**Βήμα 5.** Υπολογισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα  $Z_{NA}$  σε κάθε βήμα επιβάλλοντας ισορροπία θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων στη διατομή:

$$\sum A_i \sigma_i = \sum A_j \sigma_j$$

Όπου τα στοιχεία  $-i$  είναι τα στοιχεία υπό θλίψη και τα στοιχεία  $-j$  είναι εκείνα υπό εφελκυσμό

**Βήμα 6.** Υπολογισμός της καμπτικής ροπής μέσω του αθροίσματος:

$$M_U = \sum \sigma_{Uj} A_{j-n50} |z_j - z_{NA\_cur}|$$

**Βήμα 7.** Εάν η κλίση της καμπύλης είναι μικρότερη από μια προκαθορισμένη, τερματισμός της επαναληπτικής διαδικασίας. Αλλιώς, αύξηση της καμπυλότητας κατά  $\Delta\chi$  και επιστροφή στο βήμα 4

### 2.1.2 Παραδοχές της επαναληπτικής διαδικασίας

Για την πραγματοποίηση της παραπάνω επαναληπτικής διαδικασίας, γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Ο υπολογισμός της μέγιστης αντοχής γίνεται στις εγκάρσιες διατομές της γάστρας του πλοίου μεταξύ δύο διαδοχικών ενισχυμένων εγκάρσιων νομέων
- Η συμπεριφορά του υλικού είναι ελαστοπλαστική
- Η διατομή παραμένει επίπεδη μετά την κάμψη
- Η διατομή χωρίζεται σε δομικά στοιχεία τα οποία δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους. Αυτά είναι διαμήκη ενισχυτικά που δρουν μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα, ανθεκτικά γωνιακά ελάσματα, και στοιχεία ενισχυμένης πλάκας.
- Οι καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  των στοιχείων φανερώνουν τους πιθανούς τρόπους κατάρρευσης του κάθε στοιχείου και η τάση  $\sigma$  επιλέγεται ως η μικρότερη τάση μεταξύ των διαφόρων τύπων κατάρρευσης.

### 2.1.3 Είδη δομικών στοιχείων

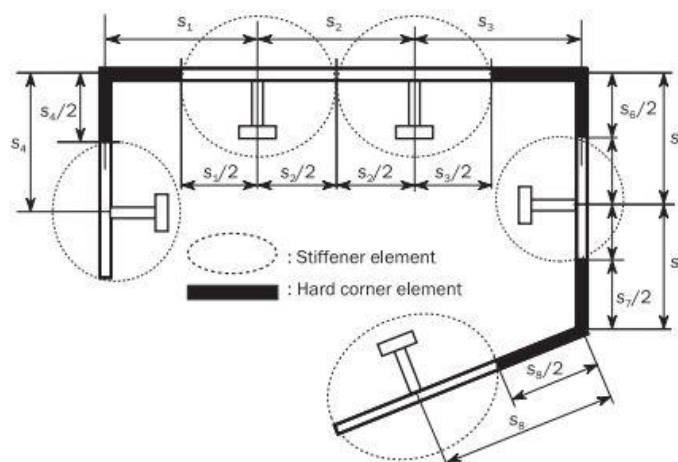
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα δομικά στοιχεία που αποτελούν τη διατομή είναι είτε διαμήκη ενισχυτικά (Longitudinal stiffener elements) μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα, είτε ανθεκτικά γωνιακά ελάσματα (Hard corner elements), είτε στοιχεία ενισχυμένης πλάκας (stiffened plate elements).

- Hard corner elements

Τα Hard corner elements είναι πιο στιβαρά στοιχεία που συνθέτουν το εγκάρσιο τμήμα της δοκού κύτους, τα οποία καταρρέουν σύμφωνα με έναν ελαστοπλαστικό τρόπο αστοχίας (διαρροή υλικού). Γενικά αποτελούνται από δύο πλάκες που δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο και στην περίπτωση της διατομής του πλοίου της παρούσας εργασίας έχουν μήκος  $0.5*s$ , όπου  $s$  είναι η ισαπόσταση των ενισχυτικών.

- Longitudinal stiffener elements

Τα stiffener elements αποτελούνται από από τα ενισχυτικά και το συνεργαζόμενο έλασμα (προσαρτημένη πλάκα). Το πλάτος της πλάκας είναι ίσο με  $s$ , δηλαδή την ισαπόσταση των ενισχυτικών, με το ενισχυτικό να είναι ακριβώς στο κέντρο της πλάκας μήκους  $s$ .

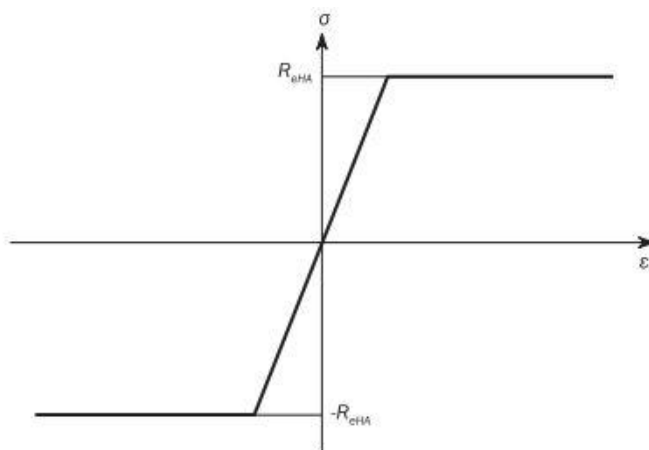


Εικόνα 11: Διαχωρισμός Hard corner element και stiffener element

## 2.2 Καμπύλες $\sigma$ - $\varepsilon$

### 2.2.1 Κατάσταση εφελκυσμού

Τα δομικά στοιχεία της διατομής υπόκεινται σε εφελκυσμό και θλίψη ανάλογα με την κατάσταση του κυματισμού (Hogging – Sagging). και το αν είναι πάνω ή κάτω από τον ουδέτερο άξονα. Όταν το στοιχείο βρίσκεται σε εφελκυσμό, ανεξαρτήτως το είδος του δομικού στοιχείου, η καμπύλη  $\sigma$ - $\varepsilon$  που περιγράφει τη συμπεριφορά του στοιχείου είναι εκείνη της ελαστοπλαστικής κατάρρευσης η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.



Εικόνα 12: Καμπύλη  $\sigma$ - $\varepsilon$  ελαστοπλαστικής κατάρρευσης

Σημειώνεται πως το σημείο στο οποίο η καμπύλη ξεκινάει να είναι σταθερή στο R είναι το σημείο στο οποίο έχουμε σχετική παραμόρφωση  $\varepsilon = 1$ , καθώς και πως το R ισούται με το όριο διαρροής του υλικού από το οποίο αποτελείται το δομικό στοιχείο.

### 2.2.2 Κατάσταση θλίψης

Στην περίπτωση της θλίψης η καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  εξαρτάται από το είδος του δομικού στοιχείου.

Στα **Hard corner elements**, η καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  είναι η ίδια με εκείνη του εφελκυσμού που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή η καμπύλη της ελαστοπλαστικής κατάρρευσης.

Στα **stiffener elements** υπάρχουν τρεις τρόποι κατάρρευσης. Συγκεκριμένα ένα stiffener element το οποίο θλίβεται μπορεί να καταρρεύσει με τους εξής τρόπους:

1. Λυγισμός δοκού – κολώνας - Beam column buckling
2. Στρεπτικός λυγισμός - Torsional buckling
3. Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού με πέλμα (ή τύπου πλάκας αν το ενισχυτικό είναι flat bar) – Web local buckling

Για κάθε ένα ενισχυτικό υπολογίζονται και οι τρεις καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  και ως τάση κατάρρευσης θεωρούμε τη μικρότερη τάση  $\sigma$  για δεδομένο  $\epsilon$ .

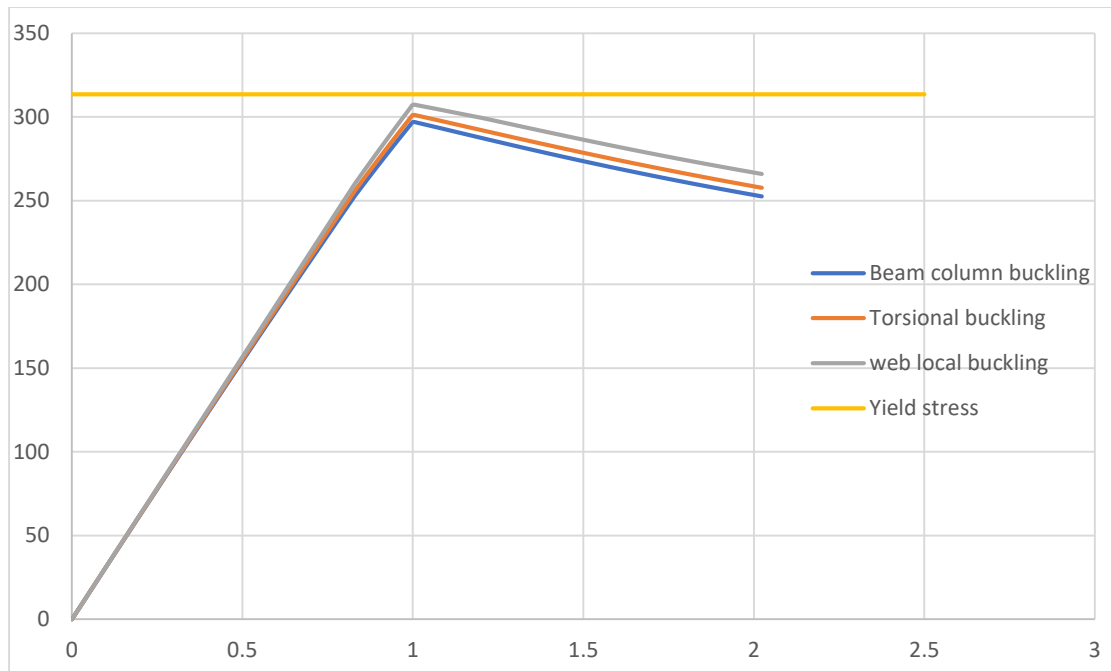
Παρακάτω απεικονίζεται η σύγκριση των τριών καμπυλών για ενισχυτικό angle bar που βρίσκεται στον εξωτερικό πυθμένα του υπό μελέτη πλοίου.

Οι διαστάσεις του ενισχυτικού είναι οι εξής:

Κορμός: 350mm x 12mm

Φλάντζα: 90mm x 17mm

Πάχος ελάσματος: 25mm



Εικόνα 13: Καμπύλες σ-ε για λυγισμό ενισχυτικού

Όπως παρατηρούμε, το ενισχυτικό καταρρέει λόγω Beam column buckling.

## 2.3 Διατομή containership

Στη παρούσα εργασία οι υπολογισμοί της μέγιστης χωρητικότητας διαμήκους ροπής κάμψης της γάστρας ( $M_u$ ) έγιναν για πλοίο containership. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε πλοίο χωρητικότητας 3500 TEU και με τις εξής κύριες διαστάσεις:

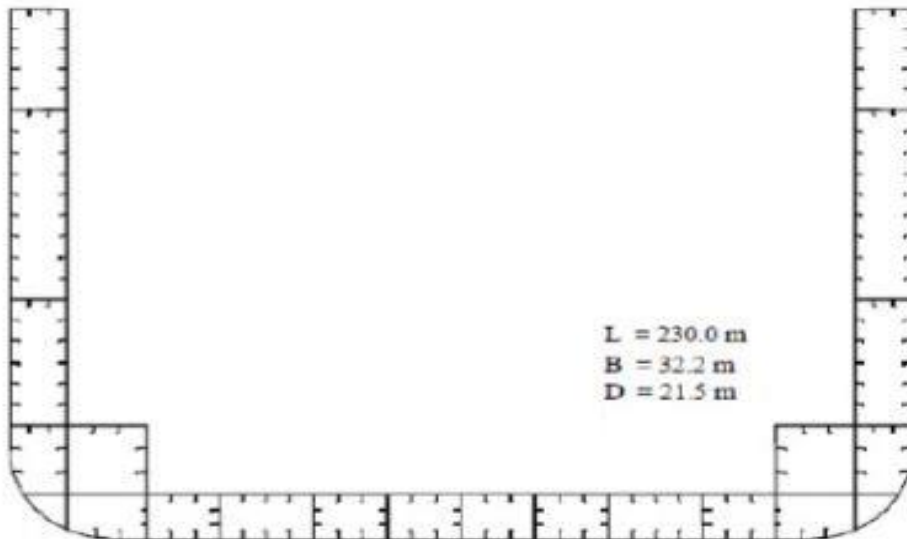
- $L_{BP} = 230$  m
- $B = 32.2$  m
- $D = 21.5$  m





Εικόνα 14: Containership χωρητικότητας 3500 TEU

Η μέση τομή του πλοίου πάνω στο οποίο έγινε η μελέτη είναι η παρακάτω.



Εικόνα 15: Midship section

Το υλικό που χρησιμοποιείται έχει όριο διαρροής τα 313.6 Μρα εκτός από το έλασμα στο κατάστρωμα το οποίο έχει όριο διαρροής 352.8 Μρα. Αυτό συμβαίνει καθώς, όπως έχει προαναφερθεί, το μέρος του πλοίου που καταπονείται περισσότερο από τη ροπή κάμψης είναι το κατάστρωμα γύρω από την περιοχή της μέσης τομής καθώς είναι το κομμάτι της διατομής που απέχει περισσότερο από τον ουδέτερο άξονα. Για αυτό και το έλασμα στο κατάστρωμα είναι σημαντικά παχύτερο από τα υπόλοιπα ελάσματα και έχει και υψηλότερο όριο διαρροής.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί πως το όριο διαρροής του υλικού των ενισχυτικών είναι σε όλες τις περιπτώσεις ίσο με του υλικού του συνεργαζόμενου ελάσματος του καθενός.

Επιπλέον, επειδή στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μια συντηρητική μελέτη, τα πάχη και τα όρια διαρροής εξάγονται αυτούσια από τα σχέδια του πλοίου δίχως να υπολογίζεται η προσαύξηση του πάχους λόγω διάβρωσης.

Αφού προσδιοριστούν οι καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  για όλα τα δομικά στοιχεία, υπολογίζεται μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας η μέγιστη χωρητικότητα διαμήκου ροπής κάμψης της γάστρας ( $M_u$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.

## 2.4 Εναπομείνουσα αντοχή γάστρας μετά από ατύχημα (Residual Strength)

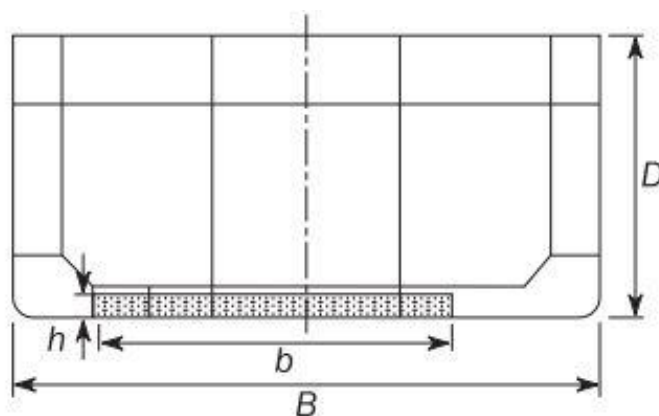
Η μέθοδος Smith εφαρμόζεται τόσο για άθικτη γάστρα όσο και για γάστρα η οποία έχει καταπονηθεί από ατύχημα, δηλαδή για περίπτωση προσάραξης (grounding) και για περίπτωση σύγκρουσης (collision). Σε περιπτώσεις που η ένταση της σύγκρουσης είναι μεγάλη, οι κίνδυνοι που παρουσιάζονται είναι σοβαρότεροι από τη μείωση αντοχής της γάστρας σε κάμψη καθώς εμπλέκεται ο παράγοντας της εισχώρησης νερού στο πλοίο και κατά συνέπεια η πιθανή βύθισή του.

Για τις περιπτώσεις grounding και collision οι κανονισμοί CSR οριοθετούν, στη διατομή, μια περιοχή γύρω από το σημείο του ατυχήματος οποία δεν συμμετέχει

στην αντοχή της γάστρας οπότε και δεν υπολογίζεται στη χωρητικότητα ροπής κάμψης  $M_{UD}$ .

### 2.4.1 Grounding

Στην περίπτωση που έχουμε προσάραξη, η ζημιά πρέπει να θεωρείται στο κάτω μέρος της πιο δυσμενούς εγκάρσιας θέσης της διατομής. Στην εικόνα που ακολουθεί, το γραμμοσκιασμένο κομμάτι αποτελεί την περιοχή της διατομής στην οποία θεωρούμε ότι έχει γίνει η ζημιά.



Εικόνα 16: Ζημιά Grounding

Η απόσταση  $b$  είναι ίση με  $0.6 * B$ , και

Η απόσταση  $h$  είναι ίση με  $B/20$  ή ίση με 2 μέτρα, όποια τιμή είναι μικρότερη

Όπου  $B$  είναι το πλάτος του πλοίου

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας παίρνουμε:

$$b = 0.6 * 32.2 \quad \rightarrow \quad \mathbf{b = 19.32 \text{ m}}$$

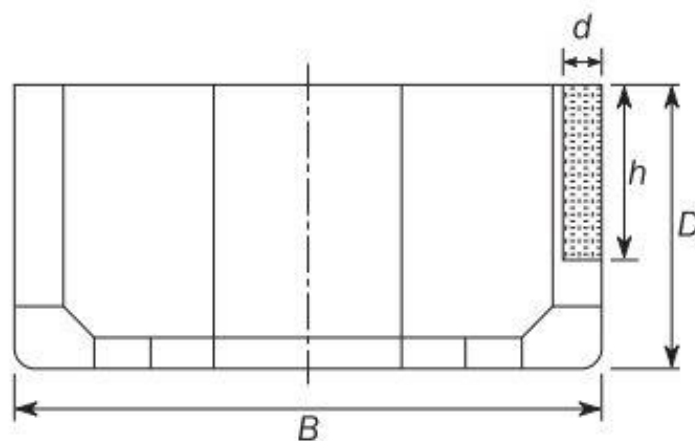
$$h = \min(B/20, 2) \quad \rightarrow \quad \mathbf{h = 1.61 \text{ m}}$$

Για να υπολογίσουμε λοιπόν την  $M_{UD}$  λαμβάνουμε υπόψιν όλα τα δομικά στοιχεία της διατομής εκτός από εκείνα που βρίσκονται στο παραλληλόγραμμο με διαστάσεις  $b * h$ .

## 2.4.2 Collision

Για την περίπτωση της σύγκρουσης η ζημιά θεωρείται στη μία πλευρά και να περιλαμβάνει το κατάστρωμα εξάλων. Συγκεκριμένα, η ζημιά εκτείνεται από το σημείο τομής των χυτευμένων γραμμών του καταστρώματος και του πλευρικού ελάσματος και έχει:

- Μήκος  $h$  με φορά προς τα κάτω και
- Πλάτος  $d$  με φορά προς το κέντρο της διατομής



Εικόνα 17: Ζημιά Collision

Η απόσταση  $h$  είναι ίση με  $0.6 * D$ , και

Η απόσταση  $d$  είναι ίση με  $B/16$

Όπου  $B$  είναι το πλάτος του πλοίου και  $D$  είναι το κοίλο του πλοίου

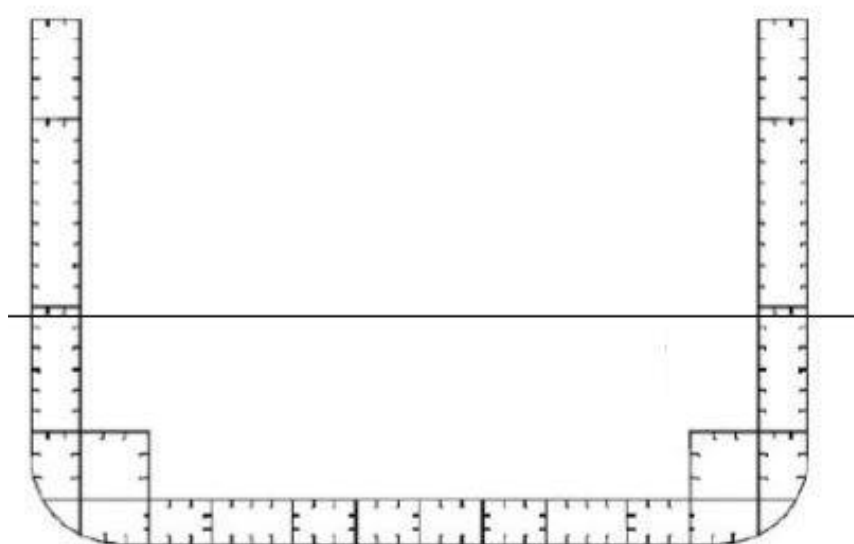
Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας παίρνουμε:

$$h = 0.6 * 32.2 \quad \rightarrow \quad h = 19.32 \text{ m}$$

$$d = B/16 \quad \rightarrow \quad d = 2.0125 \text{ m}$$

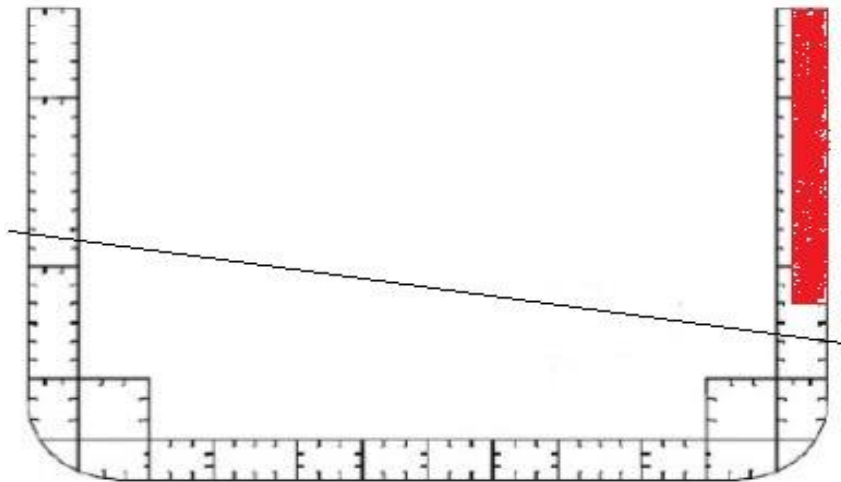
### 2.4.3 Collision δεύτερη μέθοδος - στραμμένοι άξονες

Όπως είναι γνωστό, ο ουδέτερος άξονας της διατομής είναι μια ευθεία γραμμή παράλληλη στο επίπεδο όπως και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αυτό οφείλεται στη συμμετρία της διατομής. Στην περίπτωση που έχουμε σύγκρουση από τη μια πλευρά η ζημιά δεν είναι συμμετρική και επειδή τα δομικά στοιχεία εκεί δεν λαμβάνονται υπόψιν στην αντοχή, μπορούμε να πούμε πως η μια πλευρά συνεισφέρει περισσότερο από την άλλη στην ολική αντοχή της γάστρας.



Εικόνα 18: Ουδέτερος άξονας της διατομής

Σε αυτήν την περίπτωση λοιπόν ακολουθείται η ίδια διαδικασία με την διαφοροποίηση μόνο ότι λαμβάνεται υπόψιν η στροφή του ουδέτερου άξονα κατά γωνία κλίσης  $\alpha$ , όπως απεικονίζεται παρακάτω. Για την περίπτωση της προσάραξης (Grounding) η ζημιά γίνεται στον πυθμένα του πλοίου οπότε η διατομή παραμένει συμμετρική.



Εικόνα 19: Στραμμένος ουδέτερος άξονας της διατομής

Η διαφοροποιημένη αυτή μέθοδος εφαρμόζεται στην περίπτωση της σύγκρουσης (Collision) αφού πρώτα έχει ακολουθηθεί η διαδικασία που ορίζουν οι κανονισμοί CSR.

Η εφαρμογή των δύο μεθόδων στην παρούσα εργασία γίνεται για τη σύγκρισή τους με τον συντελεστή ουδέτερου άξονα που υπάρχει στους CSR, ο οποίος όπως φαίνεται παρακάτω εφαρμόζεται μόνο στην περίπτωση του Collision.

$C_{NA}$  : Neutral axis coefficient taken as:

- $C_{NA} = 1.0$  for grounding,
- $C_{NA} = 1.1$  for collision.

Εικόνα 20: Συντελεστής ουδέτερου άξονα από CSR

Στην επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται για τον υπολογισμό της  $M_{UD}$  η μοναδική αλλαγή βρίσκεται στο **Βήμα 5** το οποίο είναι το εξής:

- Υπολογισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα  $Z_{NA}$  σε κάθε βήμα επιβάλλοντας ισορροπία δυνάμεων στη διατομή:

$$\sum A_i \sigma_i = \sum A_j \sigma_j$$

Η αλλαγή στο συγκεκριμένο βήμα είναι η προθήκη μιας ακόμα συνθήκης ισορροπίας η οποία είναι η εξής:

$$\sum A_i \sigma_i \gamma_i = \sum A_j \sigma_j \gamma_j$$

Όπου τα στοιχεία – i είναι τα στοιχεία υπό θλίψη, τα στοιχεία – j είναι εκείνα υπό εφελκυσμό, και  $\gamma$  είναι η απόσταση του δομικού στοιχείου από την Center Line του πλοίου

Η πρώτη σχέση εκφράζει την ισορροπία των θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων ως προς τον διαμήκη άξονα του πλοίου και η δεύτερη σχέση εκφράζει την ισορροπία των θλιπτικών και εφελκυστικών δυνάμεων ως προς τον κατακόρυφο άξονα (Center Line). Η δεύτερη σχέση συναντάται μόνο στη συγκεκριμένη περίπτωση καθώς είναι η μόνη περίπτωση στην οποία δεν υπάρχει συμμετρία στη διατομή.

# Κεφάλαιο 3: Πεπερασμένα στοιχεία

## 3.1 Επισκόπηση

Για την επίλυση διαφόρων προβλημάτων, είτε είναι ένα απλό πείραμα εφελκυσμού είτε είναι ο υπολογισμός των τάσεων σε μια πλάκα, υπάρχουν πολλές αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις συναντάμε διάφορες δυσκολίες όπως πολυπλοκότητα στη γεωμετρία, στα φορτία ή ακόμα και στα υλικά που χρησιμοποιούνται.

Στις περιπτώσεις αυτές, μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος είναι **η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων**, μιας τεχνικής δηλαδή που χρησιμοποιεί υπολογιστική ισχύ για την λύση των σύνθετων και πολύπλοκων προβλημάτων.

Τα λογισμικά που έχουν δημιουργηθεί για την επίλυση προβλημάτων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιούνται για μεγάλο αριθμό εφαρμογών συμπεριλαμβανομένων των:

- Στατική ανάλυση
- Δυναμική ανάλυση
- Ανάλυση λυγισμού
- Ρευστομηχανική
- Μεταφορά θερμότητας
- Ηλεκτρομαγνητικά προβλήματα

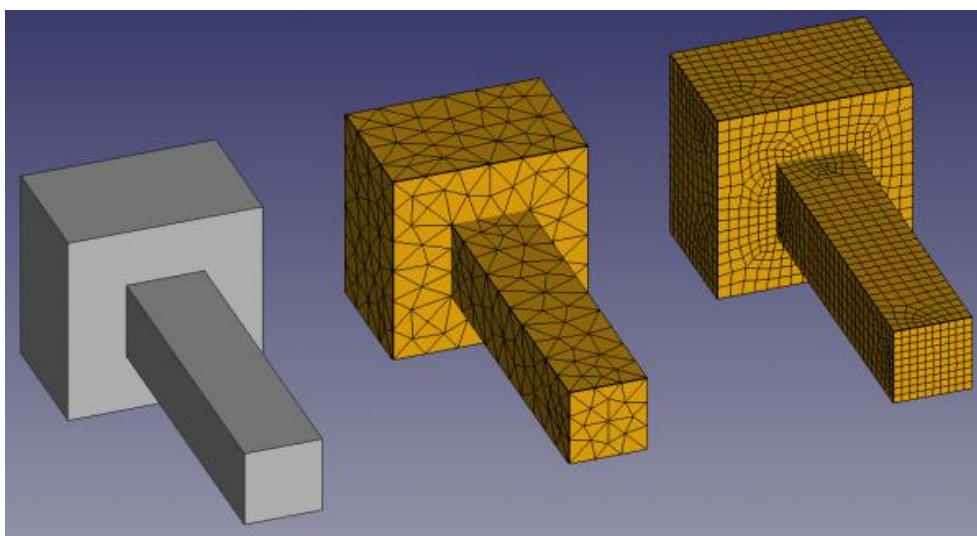
Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για την ανάλυση λυγισμού των ενισχυτικών της διατομής του πλοίου.



## 3.2 Διακριτοποίηση

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η επίλυση προβλημάτων όπου εμφανίζεται πολυπλοκότητα τη γεωμετρία, ειδικά αν το πρόβλημά μας απαιτεί τρισδιάστατη μοντελοποίηση.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων χωρίζει το μοντέλο, το οποίο θέλουμε να μελετήσουμε, σε μικρά στοιχεία (elements) τα οποία ενώνονται μεταξύ τους σε σημεία που αποκαλούνται κόμβοι (nodes). Τα στοιχεία μαζί με τους κόμβους αποτελούν το πλέγμα (mesh). Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διακριτοποίηση και είναι εξαιρετικά χρήσιμη καθώς οι απαιτήσεις ισορροπίας που υπάρχουν σε κάθε πρόβλημα, χρειάζεται πλέον να ικανοποιούνται σε έναν πεπερασμένο αριθμό στοιχείων και όχι σε ολόκληρο το μοντέλο.



Εικόνα 20: Διακριτοποίηση μοντέλου

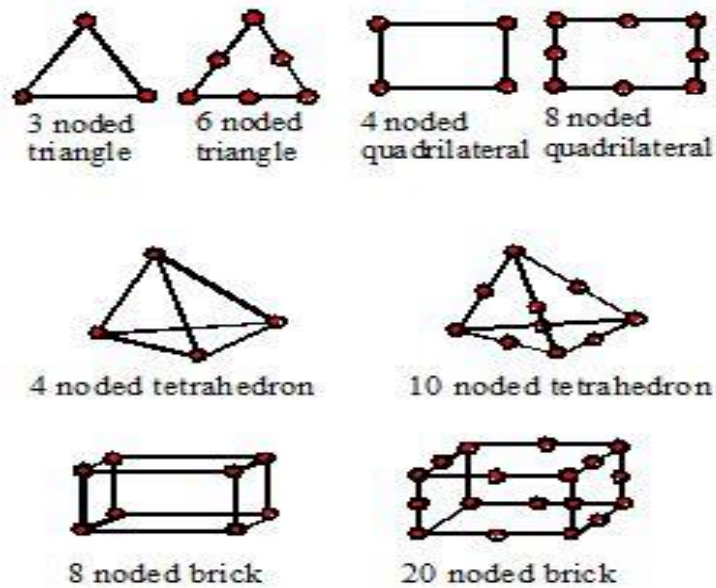
### 3.2.1 Σχήμα των στοιχείων

Υπάρχουν πολλοί τύποι στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση των μοντέλων, με τα πιο χαρακτηριστικά να είναι τα:

- Solid elements (για τρισδιάστατα μοντέλα)

- Surface elements (για δισδιάστατα μοντέλα)
- Line elements

Ακόμα και στοιχεία ίδιου τύπου και μεγέθους μπορούν να χωριστούν σε πάρα πολλές κατηγορίες ανάλογα με το πόσους κόμβους έχει το καθένα αλλά και τι είδος φορτίου μπορεί να παραλάβει.



Εικόνα 21: Τύποι στοιχείων

Είναι προφανές πως όσο περισσότερους κόμβους έχουν τα στοιχεία με τα οποία γίνεται η διακριτοποίηση τόσο περισσότερο ακριβή είναι και τα αποτελέσματά που εξάγουμε από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Ωστόσο όσο περισσότεροι είναι οι κόμβοι τόσο περισσότερη υπολογιστική ισχύ χρειαζόμαστε καθώς αυξάνονται οι εξισώσεις που έχει να λύσει το λογισμικό που χρησιμοποιούμε. Για αυτό μια τακτική που ακολουθείται συχνά είναι η μεταβολή του μεγέθους των στοιχείων δίνοντας έμφαση στα πιο κρίσιμα σημεία του μοντέλου όπως για παράδειγμα η περιοχή κοντά στο σημείο που ασκείται ένα φορτίο ή σε σημείο που παρατηρούνται συγκεντρώσεις τάσεων. Στα τμήματα αυτά εφαρμόζουμε πιο πυκνό πλέγμα (μεγαλύτερο αριθμό στοιχείων και κόμβων) έτσι

ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια, ενώ στο υπόλοιπο μοντέλο το πλέγμα είναι πιο αραιό.

Το κύριο μειονέκτημα λοιπόν της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μεγάλη απαίτηση σε ισχύ του υπολογιστή, συνεπώς και το υψηλό κόστος.

Ένας πολύ ισχυρός υπολογιστής σήμερα μπορεί να λύσει προβλήματα με 50 εκατομμύρια κόμβους και 8 εκατομμύρια στοιχεία επιτρέποντάς μας να ξεπεράσουμε οποιαδήποτε πολυπλοκότητα στη γεωμετρία, και επιπλέον μπορούμε να αξιοποιήσουμε σύνθετες ιδιότητες των υλικών όπως για παράδειγμα η πλαστικότητα.

Παλαιότερα τα προβλήματα λυνόντουσαν σε δύο διαστάσεις και μέσω παραδοχών οδηγούμασταν στη λύση αλλά με σαφώς μικρότερη ακρίβεια.

### 3.3 Τρόπος λειτουργίας

Η βασική έννοια της μεθόδου είναι η δυνατότητα προσομοίωσης του πραγματικού μοντέλου με στοιχεία, όπως δηλαδή στη μητρική ανάλυση. Για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε μητρικές μεθόδους, πρέπει να προσομοιώσουμε την πραγματική κατασκευή με έναν πεπερασμένο αριθμό διακριτών μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές είναι οι μετατοπίσεις των κόμβων και οι παράγωγοί τους. Οι αλληλεπιδράσεις των στοιχείων εκφράζονται σε συνάρτηση με τις μετατοπίσεις των κόμβων. Επειδή ο αριθμός των κόμβων είναι πεπερασμένος, έστω και πολύ μεγάλος σε αριθμό, το πρόβλημα εκφράζεται ως ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων οι οποίες λύνονται με αριθμητικές μεθόδους.

Για να μπορέσουμε να έχουμε μια ακριβή λύση ενός προβλήματος, έχοντας χωρίσει το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία, θα πρέπει να ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας και γεωμετρικής συμβιβαστότητας στο εσωτερικό των στοιχείων και στα σύνορά τους.

Ο τρόπος μεταβολής των τάσεων και των μετατοπίσεων των στοιχείων καθορίζεται από συναρτήσεις. Έτσι, ενώ οι συνθήκες ισορροπίας ικανοποιούνται μόνο στους

κόμβους, επιτυγχάνεται επαρκής συμβιβαστικότητα στα σύνορά και στο εσωτερικό των στοιχείων.

Επειδή όμως μια προσομοίωση δεν μπορεί να αναπαράξει πλήρως τη συμπεριφορά ενός συνεχούς μοντέλου όσα στοιχεία και κόμβους έχει το πλέγμα που έχουμε φτιάξει, πρέπει να ορίσουμε σωστά τις ιδιότητες των στοιχείων έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα που θα έχει η μέθοδος.

### 3.3.1 Στάδια

Τα στάδια λύσης ενός προβλήματος χρησιμοποιώντας τα πεπερασμένα στοιχεία είναι τα εξής:

1. Δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου σε πρόγραμμα CAD
2. Χωρίζουμε το μοντέλο σε πεπερασμένα στοιχεία και έτσι φτιάχνουμε το πλέγμα, εφαρμόζουμε δηλαδή τη διαδικασία της διακριτοποίησης.
3. Ορίζουμε τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος
4. Λύνουμε το πρόβλημα χρησιμοποιώντας λογισμικό (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το Abaqus)
5. Αξιολογούμε τα αποτελέσματα

Το πιο δύσκολο κομμάτι στην όλη διαδικασία είναι σαφώς η επίλυση του προβλήματος (στάδιο 4) για αυτό και, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, χρειαζόμαστε κατάλληλο λογισμικό. Η δουλειά του μηχανικού αποτελείται από τα υπόλοιπα στάδια και είναι εξαιρετικά κρίσιμη. Ο μηχανικός πρέπει οπωσδήποτε να ορίσει σωστά το πρόβλημα που θα λύσει ο υπολογιστής, να σιγουρευτεί ότι το πλέγμα είναι κατάλληλο και να ορίσει τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Το τελικό στάδιο, δηλαδή η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, είναι και το πιο σημαντικό αφ' ενός γιατί μέσω αυτού φτάνουμε στη λύση αφετέρου επειδή είναι ένας τρόπος να αποκαλυφθεί κάποιο λάθος που έχει γίνει στα προηγούμενα στάδια.

### 3.3.2 Λυγισμός με πεπερασμένα στοιχεία

Ραβδωτοί φορείς καθώς επίσης και πλάκες παραμορφώνονται καταστροφικά όταν τους ασκήσουμε θλιπτικά φορτία όταν τα φορτία φτάσουν μια συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή. Για την περιγραφή της αστοχίας αυτής χρησιμοποιείται ο όρος **λυγισμός** και η αστοχία προκύπτει ενώ παρουσιάζονται τάσεις μικρότερες από το όριο διαρροής του υλικού.

Ο έλεγχος αντοχής σε λυγισμό δεν γίνεται να περιοριστεί στα πλαίσια της γραμμικής ανάλυσης τάσεων καθώς δεν θα φαινόταν η δομική αστοχία του μοντέλου.

Για αυτό απαιτείται ένας διαφορετικός τρόπος υπολογισμού της αντοχής σε λυγισμό ο οποίος θα εφαρμόζει μη γραμμική ανάλυση για τον έλεγχο λυγισμού έναντι δεδομένης φόρτισης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **ανάλυση σε λυγισμό (Buckling Analysis)** και υπάρχει πάντα σαν ξεχωριστή λειτουργία στα διαθέσιμα λογισμικά που επιλύουν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η ανάλυση σε λυγισμό ξεκινάει βρίσκοντας τις διακριτές τιμές αξονικού φορτίου με τις οποίες το μοντέλο που μελετάμε θα λυγίσει, και κάθε μία από αυτές τις τιμές επιφέρει μια ιδιαίτερη μορφή λυγισμού. Οι διακριτές τιμές ονομάζονται **ιδιοτιμές (eigenvalues)** και οι μορφές λυγισμού ονομάζονται **ιδιομορφές**. Η διαδικασία υπολογισμού τους ονομάζεται πρόβλημα ιδιοτιμών και αποτελεί το μέρος της ανάλυσης του λυγισμού στο οποίο χρησιμοποιείται γραμμική ανάλυση.

Στη συνέχεια εκτελούμε τη μη γραμμική ανάλυση για το λόγο που αναφέρθηκε προηγουμένως, η οποία ονομάζεται **snap through buckling**. Στη συγκεκριμένη διαδικασία δίνουμε εντολή στο λογισμικό που χρησιμοποιούμε να ενεργοποιήσει τη μη γραμμική γεωμετρία (non linear geometry) έτσι ώστε να λάβει υπόψιν τις μεγάλες μετατοπίσεις των κόμβων, φαινόμενο το οποίο παρατηρείται σχεδόν συνέχεια όταν έχουμε λυγισμό.

## 3.4 Abaqus

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Abaqus με σκοπό τη μελέτη σε λυγισμό των ενισχυτικών της διατομής του υπό μελέτη πλοίου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την εξαγωγή των καμπυλών σ-ε και τη σύγκρισή τους με εκείνες από τη μέθοδο Smith. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως λόγω έλλειψης μεγάλης υπολογιστικής ισχύως το πλέγμα που δημιουργείται μέσω της διακριτοποίησης δεν είναι όσο πυκνό όσο το επιθυμητό, καθώς πυκνότερο πλέγμα ισοδυναμεί σε περισσότερους κόμβους και στοιχεία δηλαδή περισσότερες εξισώσεις προς επίλυση. Για αυτό ενδέχεται τα αποτελέσματα να παρουσιάζουν ένα μικρό σφάλμα, το οποίο ωστόσο να μην μας απομακρύνει από μια αξιοπρεπή εκτίμηση.

### 3.4.1 Βήματα

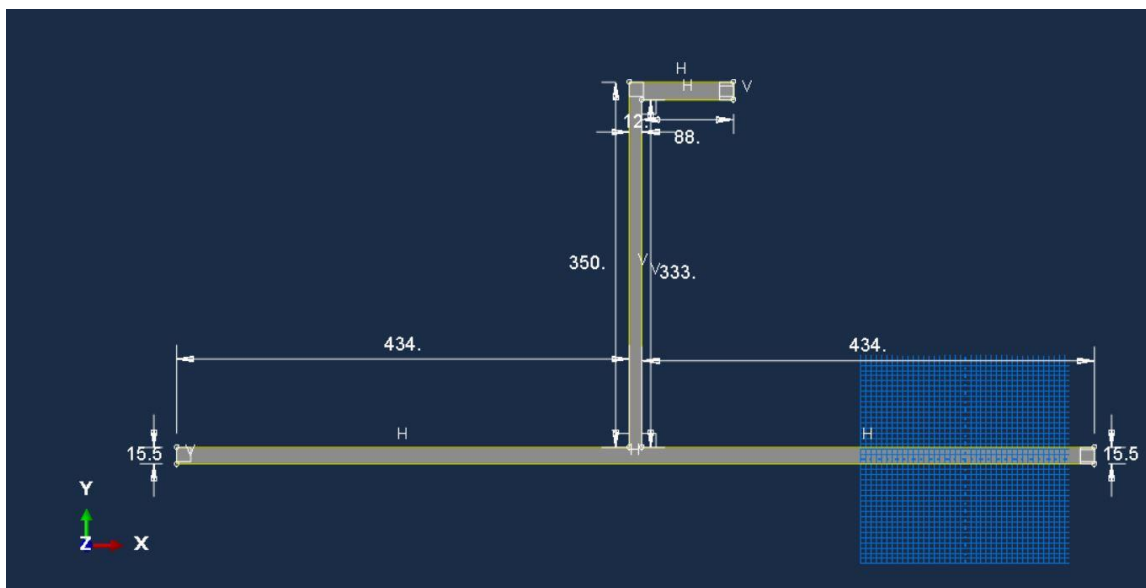
Τα βήματα που ακολουθήθηκαν στη διαδικασία είναι τα εξής:

1. Γραμμική ανάλυση λυγισμού
2. Προσδιορισμός Ιδιομορφών
3. Εισαγωγή ατελειών (imperfections) στη γεωμετρία
4. Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού

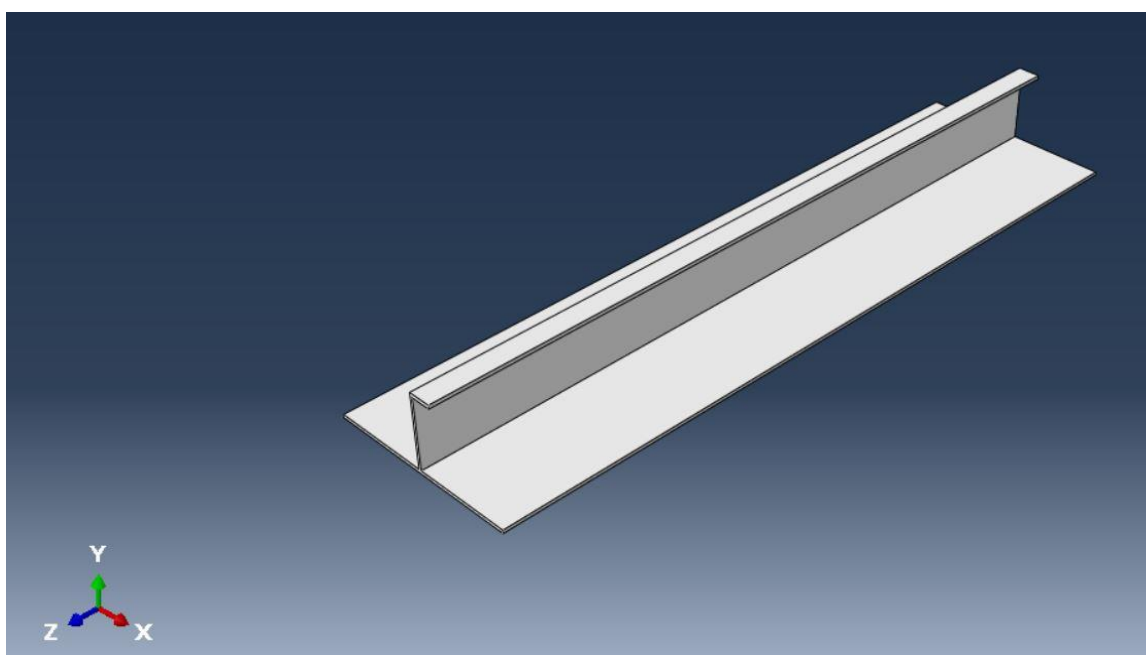
Το πιο χρονοβόρο κομμάτι της διαδικασίας είναι το βήμα 4 καθώς το πρόγραμμα πρέπει να λύσει πολυάριθμες εξισώσεις, έχοντας να συνυπολογίσει τη μη γραμμική γεωμετρία του μοντέλου όσο αυτό υπόκειται σε λυγισμό. Οι καμπύλες σ-ε εξάγονται αφού τελειώσει το συγκεκριμένο βήμα

### 3.4.2 Δημιουργία μοντέλου

Το πρώτο σκέλος της διαδικασίας δεν είναι άλλο από τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου σε CAD. Στο πρόγραμμα Abaqus η σχεδίαση του ενισχυτικού μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα γίνεται με τη δημιουργία ενός δισδιάστατου σκίτσου και έπειτα μέσω της εντολής extrude η μετατροπή του σε 3D μοντέλο.



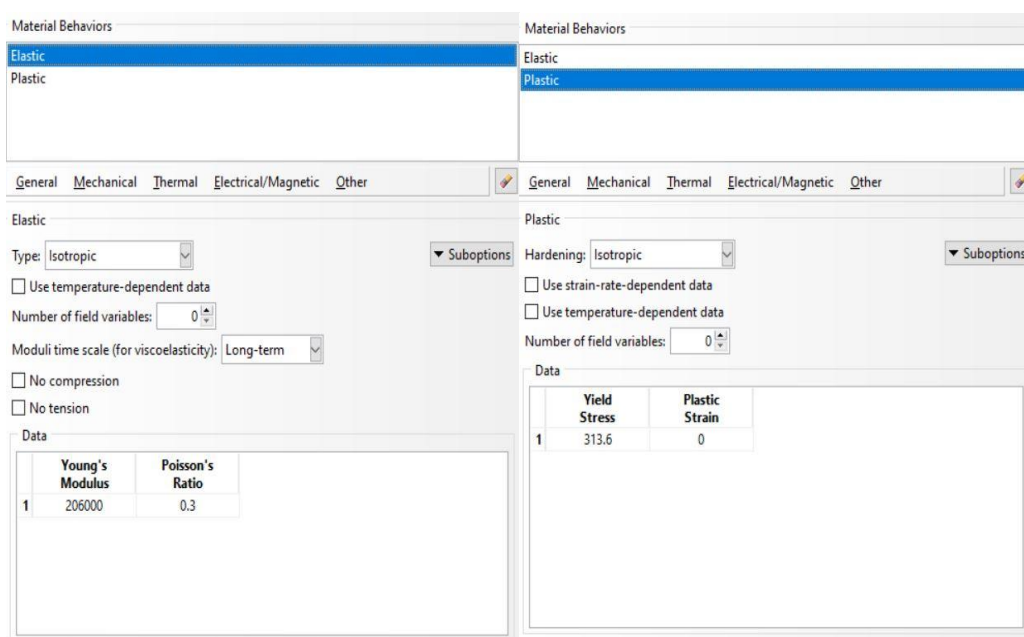
Εικόνα 22: 2D σκίτσο



Εικόνα 23: 3D μοντέλο

### 3.4.3 Διαμόρφωση υλικού

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των ιδιοτήτων του υλικού στο πρόγραμμα έτσι ώστε να μπορέσει να κάνει τους απαραίτητους υπολογισμούς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρειάζεται να εισάγουμε το μέτρο ελαστικότητας E, το λόγο του Poisson ν και το όριο διαρροής του υλικού.

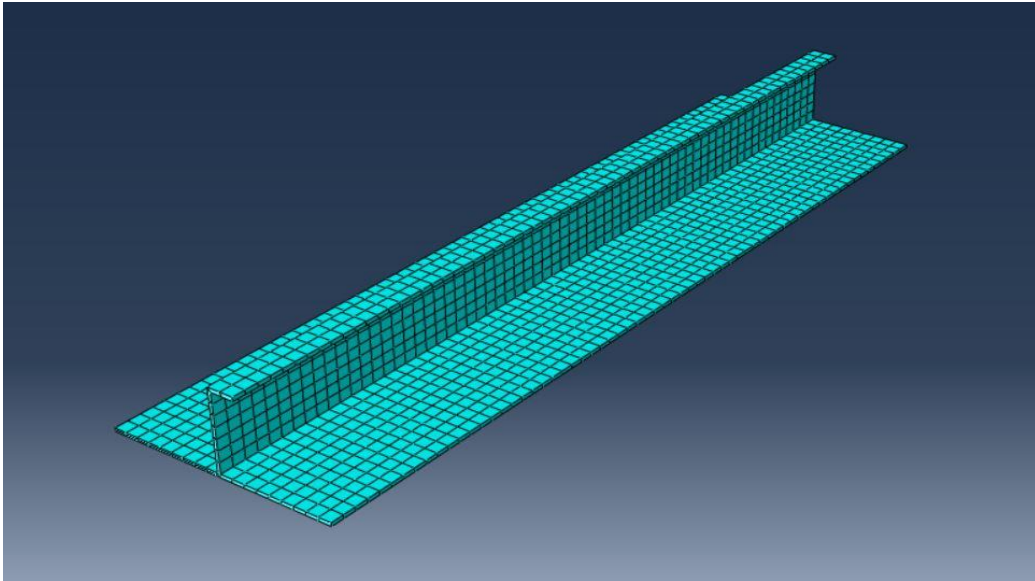


Εικόνα 24: 3D Ιδιότητες υλικού

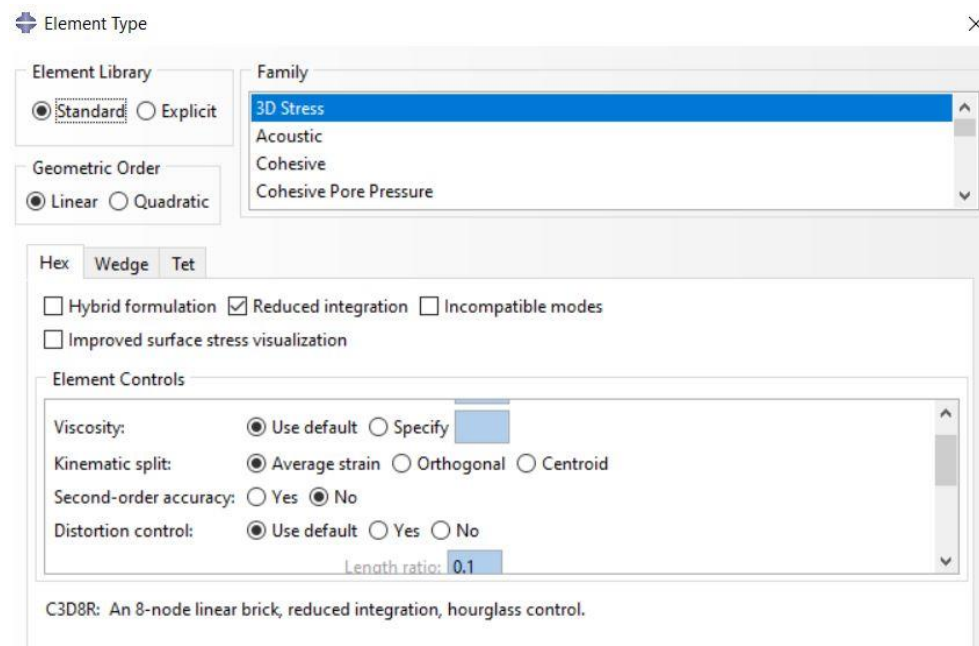
### 3.4.4 Διακριτοποίηση – δημιουργία πλέγματος

Η δημιουργία του πλέγματος είναι εξαιρετικά σημαντική καθώς ουσιαστικά πάνω σε αυτό βασίζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, το πλέγμα στην παρούσα εργασία είναι πιο αραιό από το ιδεατό λόγω περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος. Για να φτιάξουμε το πλέγμα χρησιμοποιούμε την εντολή Mesh αφού έχουμε επιλέξει τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να έχουν τα στοιχεία μας όπως το μέγεθος και ο αριθμός των κόμβων. Για το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιούνται κυβικά στοιχεία με το καθένα να έχει από 8 κόμβους.





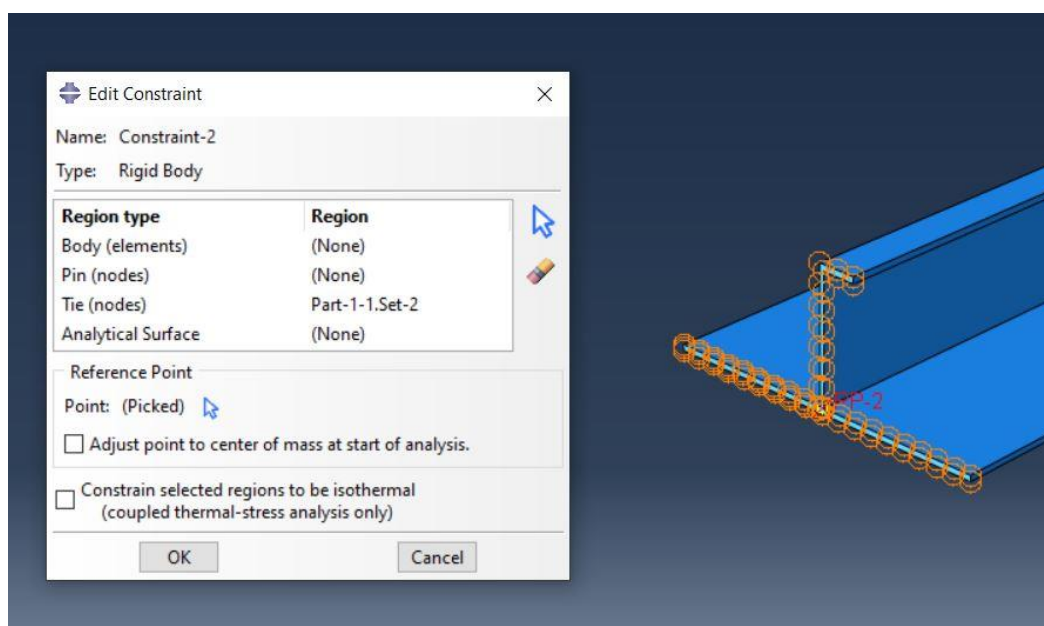
Εικόνα 25: Το μοντέλο μετά τη διακριτοποίηση



Εικόνα 26: Τα χαρακτηριστικά των στοιχείων

### 3.4.5 Δημιουργία constraints

Αφού διαμορφωθεί το πλέγμα και έχουν δημιουργηθεί οι κόμβοι, απαραίτητο είναι να «δέσουμε» τους κόμβους των ακριανών διατομών του μοντέλου σε ένα Reference Point ανά άκρο έτσι ώστε να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τις συνοριακές συνθήκες ή/και τα φορτία που επιθυμούμε. Το «δέσιμο» αυτό πραγματοποιείται δημιουργώντας constraints από τη λειτουργία Interaction, και παρουσιάζεται στην εικόνα 28.



Εικόνα 27: Δημιουργία Constraints

Οι κόμβοι (πορτοκαλί κύκλοι) έχουν δεθεί με το RP-2 (Reference Point – 2), και το ίδιο συμβαίνει και στο άλλο άκρο του ενισχυτικού.

Η δημιουργία του μοντέλου έχει ολοκληρωθεί και τώρα μπορούμε να ξεκινήσουμε την επίλυση του προβλήματος ακολουθώντας με τη σειρά τα στάδια που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

## 3.5 Γραμμική ανάλυση λυγισμού

Η γραμμική ανάλυση είναι το πρώτο βήμα της διαδικασίας μελέτης του λυγισμού. Από αυτή θα πάρουμε τις ιδιοτιμές και τις ιδιομορφές.

### 3.5.1 Step

Αρχικά πρέπει να ορίσουμε το βήμα (step) το οποίο καθορίζει τον τύπο ανάλυσης που θέλουμε να κάνουμε. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε το step **“buckle”** (λυγισμός) έχοντας πρώτα επιλέξει τύπο διαδικασίας **Linear Perturbation** (γραμμική διαταραχή). Στο συγκεκριμένο step επίσης, επιλέγουμε τον αριθμό ιδιομορφών και ιδιοτιμών που θέλουμε να υπολογίσει το πρόγραμμα. Η επιλογή του step buckle είναι απολύτως απαραίτητη και δεν μπορεί να αντικατασταθεί με άλλο καθώς, όπως προαναφέρθηκε, το λογισμικό έχει συγκεκριμένη λειτουργία για την ανάλυση ενός μοντέλου σε λυγισμό.

### 3.5.2 Boundary conditions – load

Οι συνοριακές συνθήκες που θα επιλέξουμε για να προσομοιώσουμε το πρόβλημα του λυγισμού είναι ένα από τα πιο κρίσιμα βήματα στην όλη διαδικασία. Σε περίπτωση που είναι λάθος οι συνοριακές συνθήκες είναι πιθανό να λύνουμε διαφορετικό πρόβλημα από εκείνο που θέλουμε, και θα οδηγηθούμε προφανώς σε εσφαλμένα αποτελέσματα. Το ίδιο ισχύει και για το φορτίο το οποίο θα ασκήσουμε στο μοντέλο.

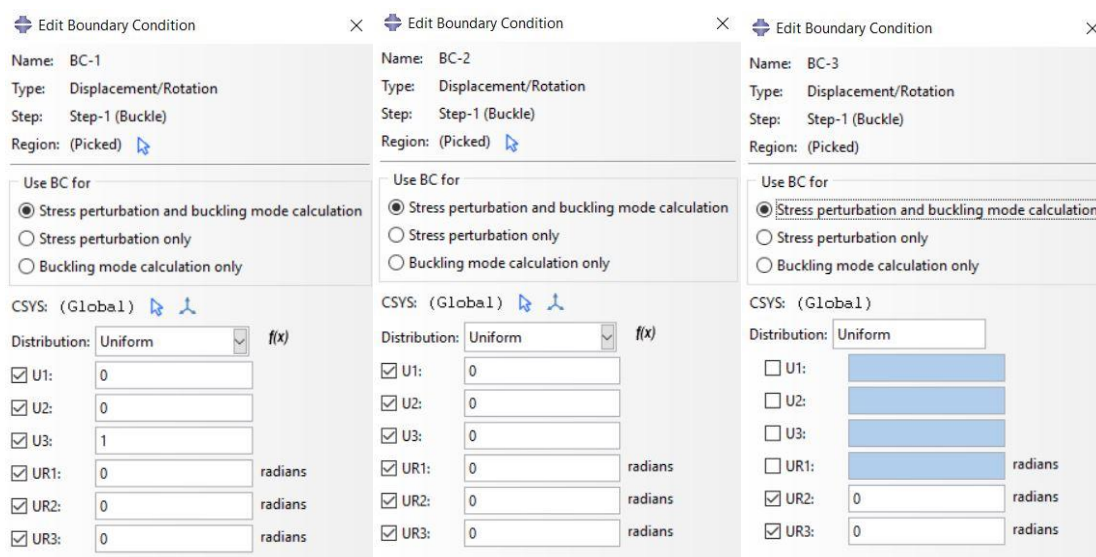
Στη δική μας περίπτωση, επειδή αναζητούμε τη δύναμη που δέχεται το ενισχυτικό για δεδομένη παραμόρφωση, δεν ασκούμε κάποιο φορτίο αλλά εφαρμόζουμε τη μέθοδο του Displacement control δηλαδή μετατοπίζουμε το ένα άκρο του ενισχυτικού κατά μήκος του διαμήκους άξονά του και σαν αποτέλεσμα παίρνουμε τη δύναμη που δέχεται όσο ασκούμε τη μετατόπιση. Τη δύναμη την εξάγουμε σε

αργότερο στάδιο (στη μη γραμμική ανάλυση), αλλά το βήμα αυτό είναι απαραίτητο και στη γραμμική ανάλυση έτσι ώστε να λύσουμε το πρόβλημα ιδιοτιμών.

Στο δύο άκρα εφαρμόζουμε συνθήκες συμμετρίας θεωρώντας τα πακτωμένα, και στο ένα άκρο ασκούμε τη μετατόπιση που αναφέρθηκε μόλις. Επίσης στα δύο άκρα των ελασμάτων εκατέρωθεν του κορμού απαγορεύουμε την περιστροφή των κόμβων γύρω από το διαμήκη και τον κατακόρυφο άξονα του ενισχυτικού με σκοπό να προσομοιάσουμε τη συμπεριφορά του ελάσματος στη διατομή.

Οι συνοριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν απεικονίζονται παρακάτω.

Με U1 U2 U3 συμβολίζεται η κίνηση στον x,y και z άξονα και με UR1 UR2 UR3 συμβολίζεται η περιστροφή γύρω από τον x,y και z άξονα αντίστοιχα.



Εικόνα 28: Συνοριακές συνθήκες

Με BC-1 (Boundary Condition – 1) συμβολίζουμε τις συνοριακές συνθήκες του ενός άκρου του ενισχυτικού. Όπως βλέπουμε, η μόνη κίνηση που επιτρέπουμε στο άκρο είναι η U3 δηλαδή η μετατόπιση πάνω στο διαμήκη άξονα του ενισχυτικού, με το πρόσημο του αριθμού 1 να δίνει την φορά της μετατόπισης (ο αριθμός 0 σημαίνει ότι δεν επιτρέπουμε κίνηση). Στην παρούσα φάση οποιονδήποτε αριθμό μεγαλύτερο του μηδενός και να βάλουμε δεν αλλάζει το αποτέλεσμα.

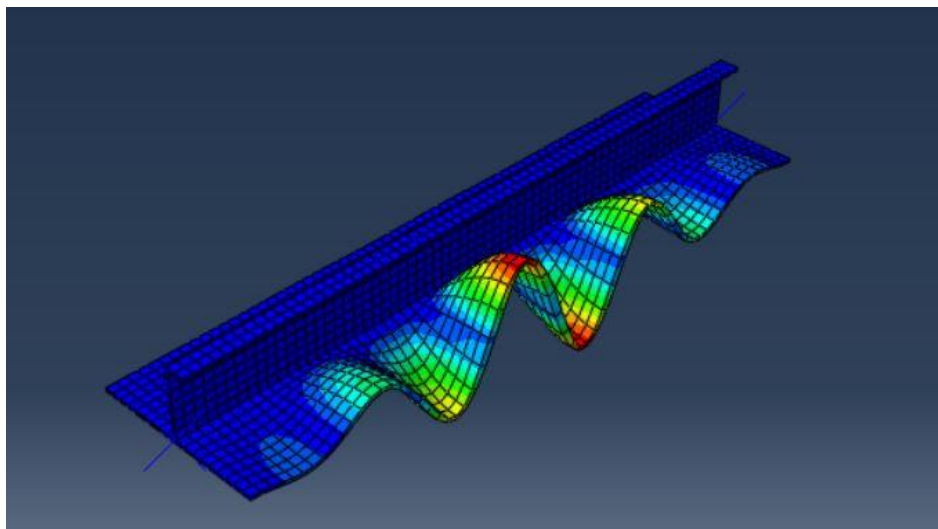
Με BC-2 (Boundary Condition – 2) συμβολίζουμε τις συνοριακές συνθήκες του άλλου άκρου του ενισχυτικού. Όπως και στο απέναντι άκρο έχουμε επιβάλει πάκτωση, έχοντας έτσι συνθήκες συμμετρίας οι οποίες προσομοιάζουν πολύ καλά το πρόβλημα λυγισμού ενός ενισχυτικού.

Με BC-3 (Boundary Condition – 3) συμβολίζουμε τις συνοριακές συνθήκες στα άκρα των ελασμάτων δεξιά και αριστερά από το ενισχυτικό.

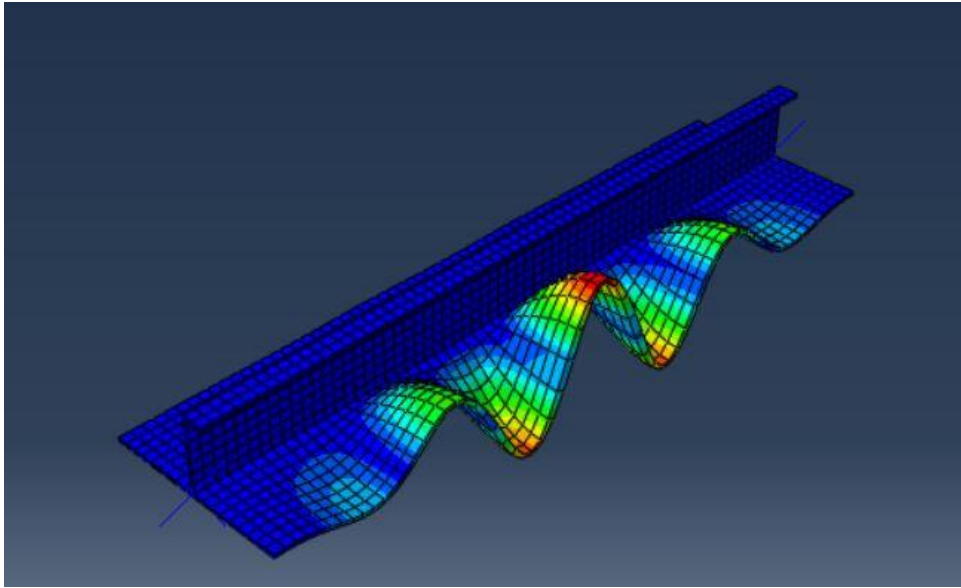
Αφού οριστούν οι οριακές συνθήκες το πρόγραμμα είναι έτοιμο να ξεκινήσει την ανάλυση. Πηγαίνοντας στην ενότητα Job επιλέγουμε create job και εκτελούμε την ανάλυση. Το αρχείο της γραμμικής ανάλυσης το ονομάζουμε Job-1.

### 3.6 Προσδιορισμός ιδιομορφών

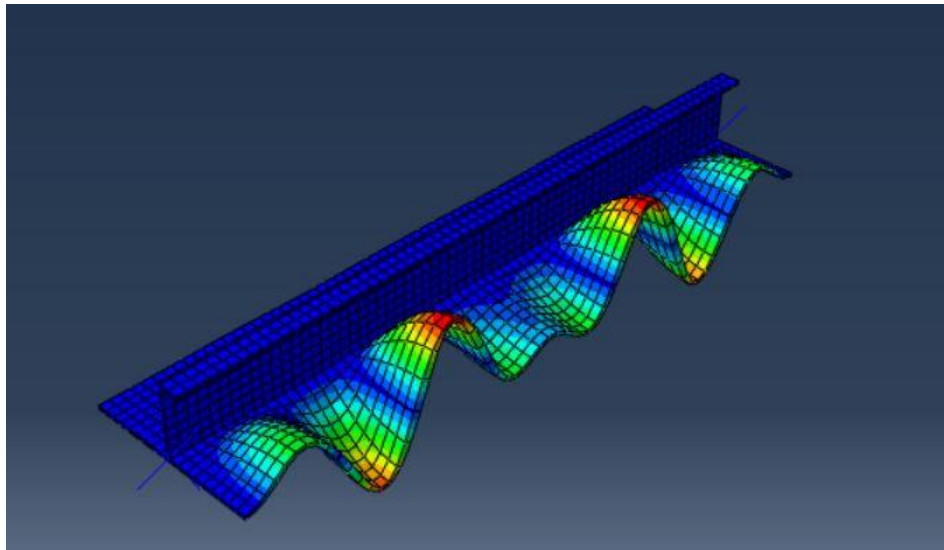
Όταν ολοκληρωθεί η γραμμική ανάλυση το πρόγραμμα παρουσιάζει τις ιδιοτιμές και τις ιδιομορφές που του έχουμε ζητήσει. Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε επιλέξει να παρουσιάσει τις 3 πρώτες ιδιομορφές και ιδιοτιμές. Πρακτικό ενδιαφέρον στην περίπτωση μας έχει η πρώτη ιδιοτιμή καθώς είναι εκείνη που δίνει λυγισμό της πλάκας. Οι ιδιομορφές απεικονίζονται παρακάτω.



Εικόνα 29: Πρώτη ιδιομορφή



Εικόνα 30: Δεύτερη ιδιομορφή



Εικόνα 31: Τρίτη ιδιομορφή

### 3.7 Εισαγωγή ατελειών (imperfections) στη γεωμετρία

Το κρίσιμο φορτίο που υπολογίζεται μέσω γραμμικής ότι πρέπει να δεχθεί ένας φορέας για να λυγίσει είναι συνήθως μεγαλύτερο από εκείνο που πραγματικά αντέχει. Αυτό συμβαίνει επειδή σε μια γραμμική ανάλυση δεν υπάρχουν γεωμετρικές ατέλειες (imperfections) οι οποίες υπάρχουν στην πραγματικότητα.

Αυτός είναι και ένας κύριος λόγος για τον οποίο απαιτείται μη γραμμική ανάλυση για τη μοντελοποίηση του λυγισμού.

Για να περάσουμε τις γεωμετρικές ατέλειες στη μη γραμμική ανάλυση έτσι ώστε να κάνουμε τη μελέτη λυγισμού, χρησιμοποιούμε το υπόδειγμα της πρώτης ιδιομορφής από τη γραμμική ανάλυση. Αυτό το επιτυγχάνουμε, αφού δημιουργήσουμε αντίγραφο του μοντέλου με το οποίο τρέξαμε τη γραμμική ανάλυση, επιλέγοντας edit keywords και πληκτρολογώντας τις γραμμές που φαίνονται στην εικόνα 33.



```
*IMPERFECTION,FILE=Job-1,STEP=1,1.6
```

Εικόνα 32: Εισαγωγή ατελειών

Με τις λέξεις Imperfection file = Job-1 ζητάμε από το πρόγραμμα να λάβει τις γεωμετρικές ατέλειες από τη γραμμική ανάλυση καθώς Job-1 είχαμε ονομάσει το αρχείο το οποίο τρέξαμε για να γίνει η γραμμική ανάλυση. Ο αριθμός 1 στη δεύτερη σειρά δηλώνει ότι από τη γραμμική ανάλυση θέλουμε την πρώτη ιδιομορφή, και ο αριθμός 1.6 καθορίζει το πλάτος των ατελειών που θα εισάγουμε στη μη γραμμική ανάλυση. Οι κανονισμοί του IACS για imperfections στην πλάκα συνιστούν πλάτος ίσο με  $L/2000$  με  $L$  να είναι το μήκος του φορέα, ή περίπου ίσο με το  $1/10$  του πάχους της πλάκας. Στην προκειμένη περίπτωση το μήκος ισούται με 3270 mm και το πάχος ισούται με 15.5 mm οπότε επιλέγουμε πλάτος ίσο με 1.6 mm.

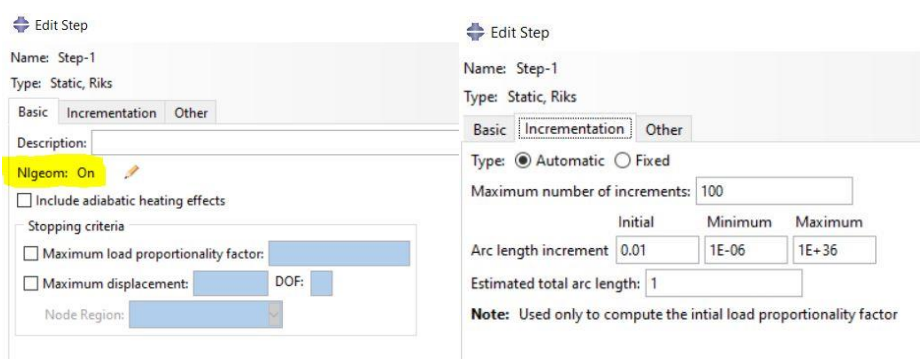
### 3.8 Μη γραμμική ανάλυση λυγισμού

Το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης σε λυγισμό είναι η μη γραμμική ανάλυση. Μέσω αυτής θα εξάγουμε τις καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  οι οποίες είναι το αρχικό ζητούμενο για την παρούσα εργασία. Κατά τη διάρκεια της μη γραμμικής ανάλυσης οι κόμβοι δέχονται μεγάλες μετατοπίσεις προκαλώντας σημαντικές παραμορφώσεις στη γεωμετρία του

μοντέλου το οποίο από ένα σημείο και μετά καταρρέει. Τα αποτελέσματα που θα εξάγουμε από το πρόγραμμα είναι η Reaction force που ασκείται στο ενισχυτικό έχοντας υποστεί δεδομένη μετατόπιση (displacement) το ένα του άκρο. Έπειτα θα μετατρέψουμε την δύναμη σε τάση και τη μετατόπιση σε παραμόρφωση, παίρνοντας έτσι το ζητούμενο αποτέλεσμα δηλαδή την καύλη  $\sigma$ - $\epsilon$ .

### 3.8.1 Step

Στη μη γραμμική ανάλυση θα πρέπει οπωσδήποτε να χρησιμοποιήσουμε νέο βήμα (step) από τι προηγουμένως. Συγκεκριμένα το step θα πρέπει να υποστηρίζει non linear geometry, δηλαδή μη γραμμική γεωμετρία, καθώς ανάμεσα στα increments θα έχουμε μεγάλες μετατοπίσεις κόμβων. Αν χρησιμοποιούσαμε διαφορετικό step, το πρόγραμμα θα ερμηνεύει σαν σφάλμα τις μεγάλες μετατοπίσεις οπότε και θα τερματίζει τη διαδικασία δίχως να έχει ολοκληρώσει την προσομοίωση του λυγισμού. Για αυτό είναι κρίσιμο κατά την επιλογή του step να ενεργοποιήσουμε τη λειτουργία Nlgeom (non linear geometry) όπως φαίνεται στην εικόνα 34. Το step που επιλέγουμε είναι το “static, Riks” με το οποίο τροποποιείται το ασκούμενο φορτίο ανάλογα με τη μετατόπιση στο προηγούμενο increment. Αυτό σημαίνει πως η απώλεια σταθερότητας δεν μπορεί να είναι πολύ σοβαρή με αποτέλεσμα η καμπύλη δύναμης – μετατόπισης (Force displacement) να είναι αρκετά ομαλή. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο επιλέξαμε το συγκεκριμένο Step.



Εικόνα 33: Επιλογή step για τη μη γραμμική ανάλυση



Ο μέγιστος αριθμός από increments επιλέγεται να είναι 100, αριθμός υπερ-αρκετός για τη παρούσα μελέτη. Σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις όπου χρειάζονται παραπάνω increments τότε αυξάνουμε τον αριθμό και ξανατρέχουμε το πρόγραμμα. Ο καθορισμός του arc length increment αντιστοιχεί στο ελάχιστο και ανώτατο όριο αύξησης φορτίου μεταξύ 2 increments που θα «πούμε» στο πρόγραμμα να οριοθετήσει. Σε περίπτωση που διαπιστωθεί σφάλμα και χρειάζεται να ελαττώσουμε ή να αυξήσουμε το όριο, ξανατρέχουμε το πρόγραμμα έχοντας κάνει τις τροποποιήσεις που απαιτούνται.

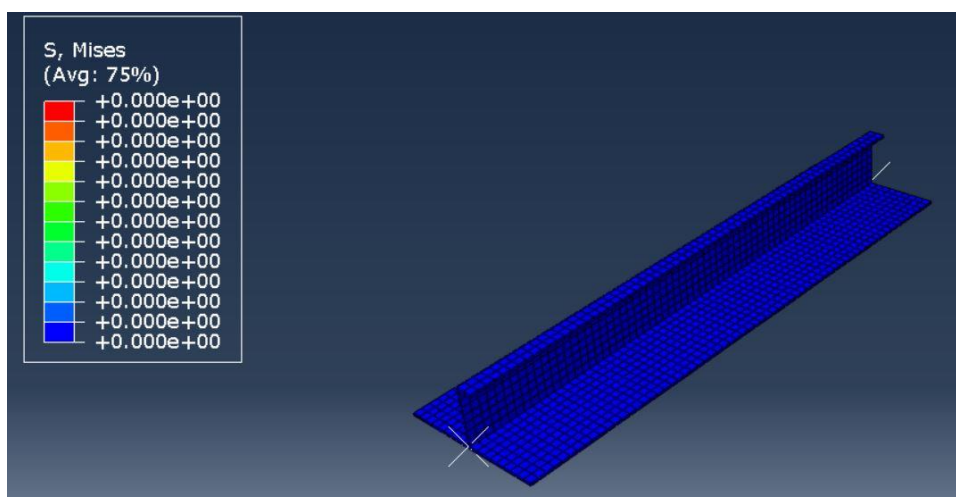
### 3.8.2 Boundary conditions – Job

Οι συνοριακές συνθήκες πρέπει να είναι ακριβώς ίδιες με εκείνες στη γραμμική ανάλυση καθώς αν υπήρχαν αλλαγές θα επιλύαμε διαφορετικό πρόβλημα. Όταν φτιάξουμε το μοντέλο για τη γραμμική ανάλυση, πατώντας την επιλογή copy model δημιουργούμε ένα αντίγραφο του με το οποίο θα τρέξουμε τη μη γραμμική ανάλυση. Η μόνη αλλαγή που θα κάνουμε είναι η εισαγωγή των ατελειών, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, και η αλλαγή του βήματος (step) από Linear perturbation – Buckle σε Static - Riks .

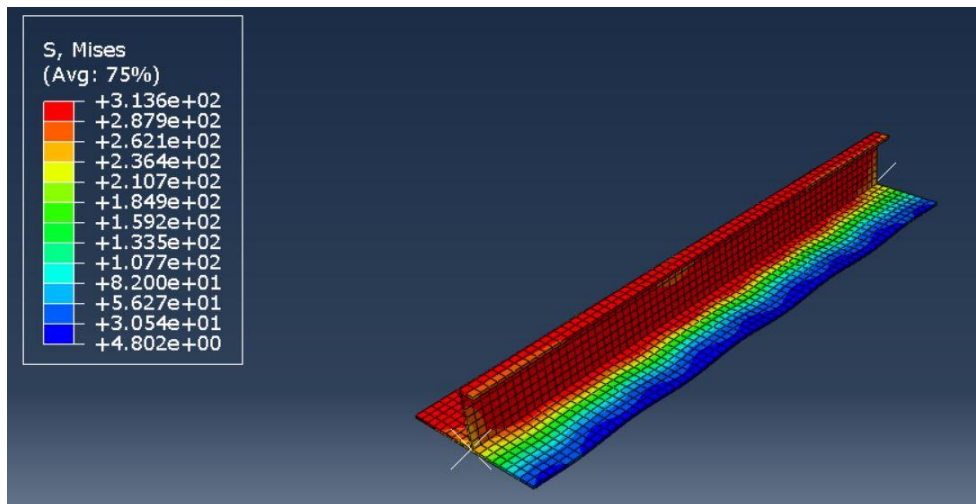
Αφού γίνουν οι παραπάνω αλλαγές πηγαίνουμε πάλι στην ενότητα Job, δημιουργούμε καινούριο Job με διαφορετικό όνομα από εκείνο της γραμμικής ανάλυσης και έπειτα τρέχουμε το πρόγραμμα. Για να ολοκληρωθεί η μη γραμμική ανάλυση απαιτείται σημαντικά περισσότερος χρόνος από όσο χρειάστηκε η γραμμική ανάλυση. Εδώ πρέπει να σημειωθεί πως είναι απαραίτητο να έχουμε τρέξει πρώτα τη γραμμική ανάλυση καθώς από εκεί έχουμε δώσει εντολή στο πρόγραμμα να αντλήσει τα imperfections τα οποία είναι αναγκαία στη μη γραμμική ανάλυση.

### 3.9 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

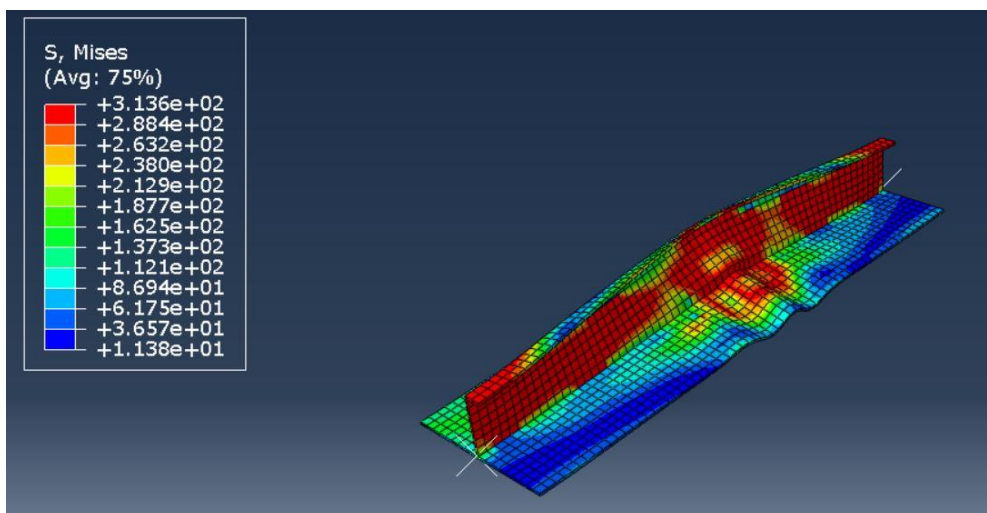
Αφού ολοκληρωθούν όλα τα στάδια είμαστε έτοιμη να εξάγουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που μπορεί να βγάλει το Abaqus είναι πάρα πολλά καθώς κάνει πλήρη ανάλυση λυγισμού. Αρχικά μας δίνει τη δυνατότητα να παρακολουθήσουμε τις παραμορφώσεις του μοντέλου από την αρχή μέχρι το τέλος περνώντας από όλα τα ενδιάμεσα στάδια. Ακολουθεί, στις παρακάτω εικόνες, παράδειγμα για ενισχυτικό στην αρχή της προσομοίωσης, τη στιγμή που το φορτίο παίρνει την κρίσιμη τιμή του, αλλά και το τέλος της διαδικασίας. Στην εικόνα 37 το ενισχυτικό έχει καταρρεύσει πλήρως, ωστόσο η μετατόπιση που δέχεται ουσιαστικά δεν υπάρχει στην πραγματικότητα καθώς αντιστοιχεί σε εξωπραγματικά θλιπτικά φορτία που δεν παρατηρούνται στη διάρκεια ζωής και λειτουργίας ενός πλοίου.



Εικόνα 34: Αρχικό στάδιο πριν την άσκηση μετατόπισης

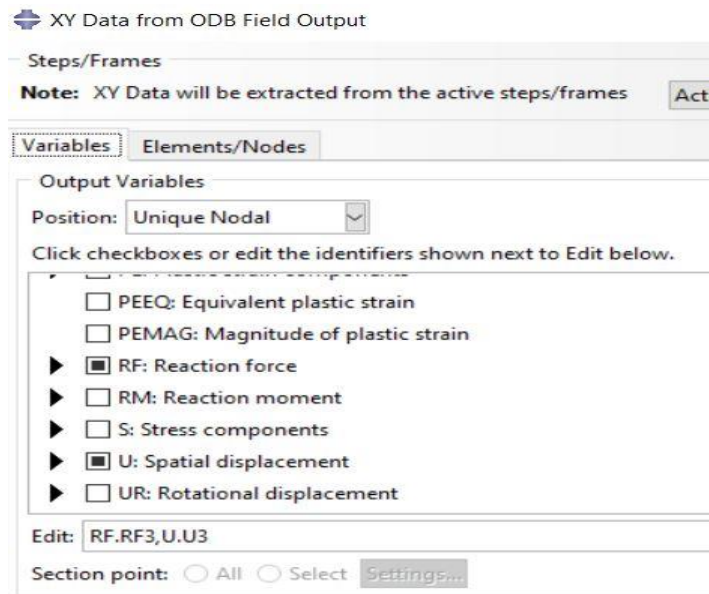


Εικόνα 35: Η στιγμή που έχουμε το μέγιστο φορτίο και  $\epsilon = 1$



Εικόνα 36: Το ενισχυτικό μετά το τέλος της διαδικασίας

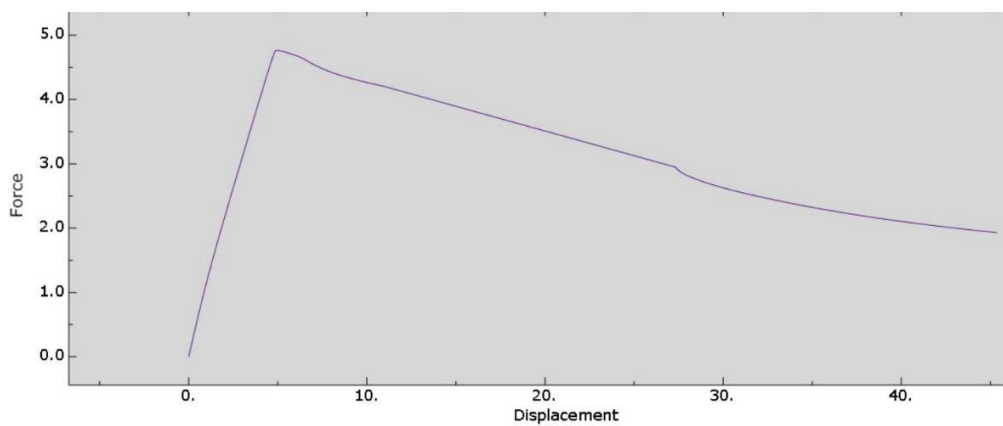
Στην παρούσα εργασία το αποτέλεσμα που χρειαζόμαστε είναι η καμπύλη force – displacement. Για την εξαγωγή της καμπύλης πρέπει να πάμε στην επιλογή field output στην οποία μας δίνεται η δυνατότητα να μελετήσουμε τις μετατοπίσεις, τις τάσεις, τις δυνάμεις κλπ. σε όλους τους κόμβους του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγουμε να μας εμφανίσει το πρόγραμμα την RF3 (reaction force 3) και το U3 (displacement) όπου ο αριθμός 3 αναφέρεται στη φορά του διαμήκους άξονα του ενισχυτικού, εκεί δηλαδή που ασκήσαμε τη μετατόπιση στα Boundary conditions προηγουμένως.



Εικόνα 37: Επιλογή field output

Ο κόμβος που επιλέγουμε για να υπολογιστούν τα RF3 και U3 είναι το reference point το οποίο είχαμε «δέσει» με τους κόμβους στο άκρο του ενισχυτικού. Έτσι διαιρώντας τη δύναμη με το εμβαδό της διατομής παίρνουμε την τάση  $\sigma$  που ασκείται.

Η καμπύλη force – displacement εμφανίζεται παρακάτω:



Εικόνα 38: Καμπύλη force displacement

Για να μετατρέψουμε τη καμπύλη αυτή σε καμπύλη σ-ε πρέπει να διαιρέσουμε τη δύναμη RF με το εμβαδό της διατομής και τη μετατόπιση U με το μήκος του ενισχυτικού. Οι σχέσεις για τη μετατροπή είναι οι εξής:

$$\sigma = \frac{RF}{A}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{U}{L}\right) * 1/(\sigma_Y/E)$$

Για παράδειγμα,  $\varepsilon = 1$  παίρνουμε όταν η μετατόπιση ισούται με  $U = 4.9704$  που είναι εξαιρετικά κοντά στο σημείο κορύφωσης της καμπύλης.

# Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα

## 4.1 Μέγιστη χωρητικότητα διαμήκου ροπής κάμψης της γάστρας ( $M_U$ )

### 4.1.1 Υπολογισμός $M_U$ άθικτης γάστρας

Αρχικά υπολογίστηκε η ροπή  $M_U$  για κατάσταση άθικτης γάστρας έτσι ώστε να γίνει σύγκριση με τις περιπτώσεις ατυχήματος και να υπολογιστεί το ποσοστό εναπομείνουσας αντοχής. Το αποτέλεσμα ακολουθεί στον παρακάτω πίνακα. Η ροπή σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται και για την κατάσταση Hogging και για την κατάσταση Sagging.

Hogging	7426720 kN*m
Sagging	-7557415 kN*m

Πίνακας 1: Ροπή  $M_U$  για άθικτη γάστρα

Οι τιμές αυτές ελέγχθηκαν για το αν είναι εντός ορίων των κανονισμών του IACS και συγκεκριμένα του κανονισμού URS-11a που αναφέρεται στα Containerships. Ο κανονισμός είναι ο εξής:

#### **S11A.5.4 Acceptance criteria**

The hull girder ultimate bending capacity at any hull transverse section is to satisfy the following criteria:

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_M \gamma_{DB}}$$

Εικόνα 39: Κανονισμός IACS

Όπου

$$\gamma_M = 1.05$$

$\gamma_{DB} = 1.15$  Για κατάσταση Hogging

$\gamma_{DB} = 1.0$  Για κατάσταση Sagging

Η ροπή M ορίζεται από τον ίδιο κανονισμό ως:

The vertical hull girder bending moment, M in hogging and sagging conditions, to be considered in the ultimate strength check is to be taken as:

$$M = \gamma_s M_s + \gamma_w M_w$$

where:

$M_s$  = Permissible still water bending moment, in kNm, defined in 2.4

$M_w$  = Vertical wave bending moment, in kNm, defined in 2.4.

$\gamma_s$  = Partial safety factor for the still water bending moment, to be taken as:  
 $\gamma_s = 1.0$

$\gamma_w$  = Partial safety factor for the vertical wave bending moment, to be taken as:  
 $\gamma_w = 1.2$

Εικόνα 40: Κανονισμός IACS

Οπότε έτσι ώστε το πλοίο να πληροί τα κριτήρια, πρέπει

$$M_U > M * \gamma_{DB} * \gamma_M$$

Κάνοντας τους υπολογισμούς\* προκύπτουν τα εξής:

- Για την κατάσταση Hogging πρέπει  $7426229 \text{ kN*m} > 6946229 \text{ kN*m}$
- Για την κατάσταση Sagging πρέπει  $7773320 \text{ kN*m} > 6121065 \text{ kN*m}$

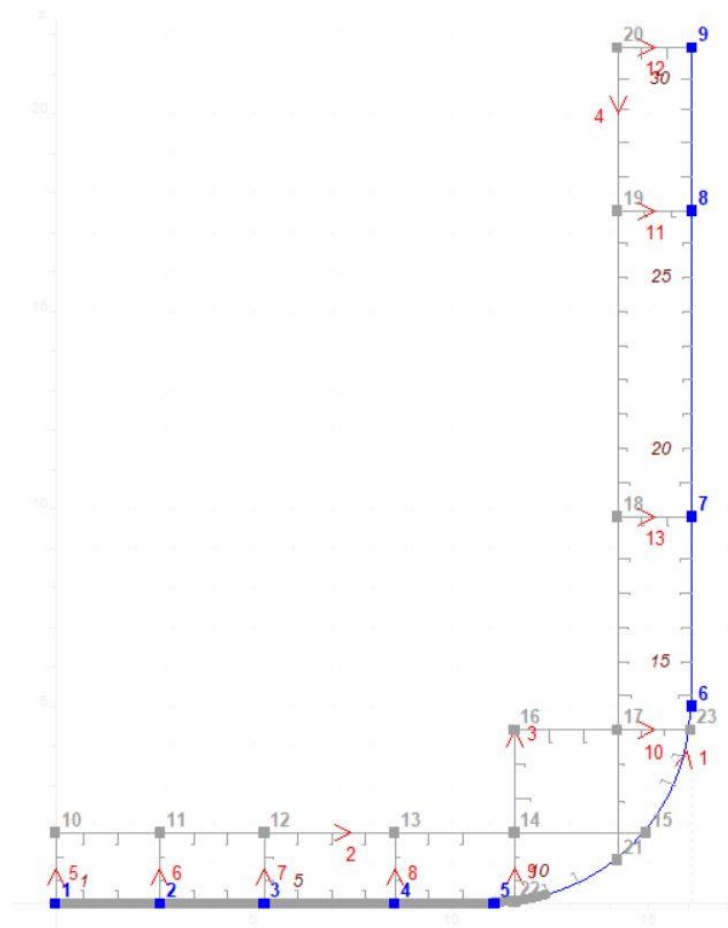
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τιμή της ροπής  $M_U$  που υπολογίστηκε είναι δεκτή και εντός ορίων των κανονισμών.

\*Οι αναλυτικοί υπολογισμοί των ροπών από τους κανονισμούς παρουσιάζονται στο παράρτημα Α

#### 4.1.2 Υπολογισμός $M_U$ με το πρόγραμμα MARS2000

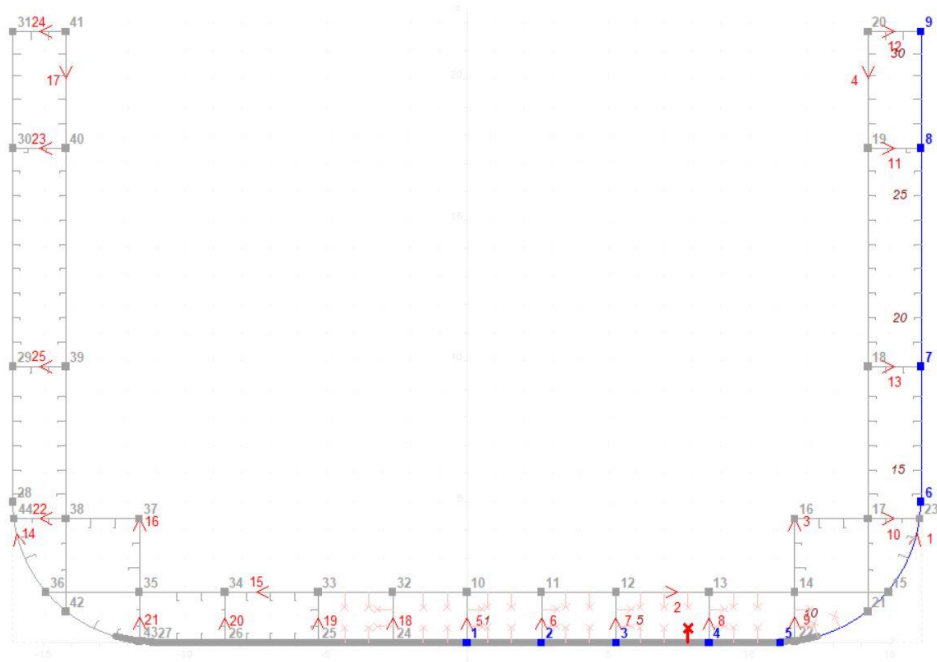
Ο υπολογισμός της ροπής  $M_U$  έγινε και χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MARS2000 της Bureau Veritas, έτσι ώστε να γίνει μια επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκε στο εν λόγω πρόγραμμα η διατομή του πλοίου και έπειτα υπολογίστηκε μέσω αυτού η ροπή  $M_U$  για Hogging και για Sagging. Στη συνέχεια εφαρμόσαμε ζημιά στη διατομή έτσι ώστε να υπολογίσει το πρόγραμμα τη ροπή  $M_{UD}$  έπειτα από προσάραξη και σύγκρουση.

Οι διατομές του πλοίου μέσω του προγράμματος MARS2000 παρουσιάζονται παρακάτω.

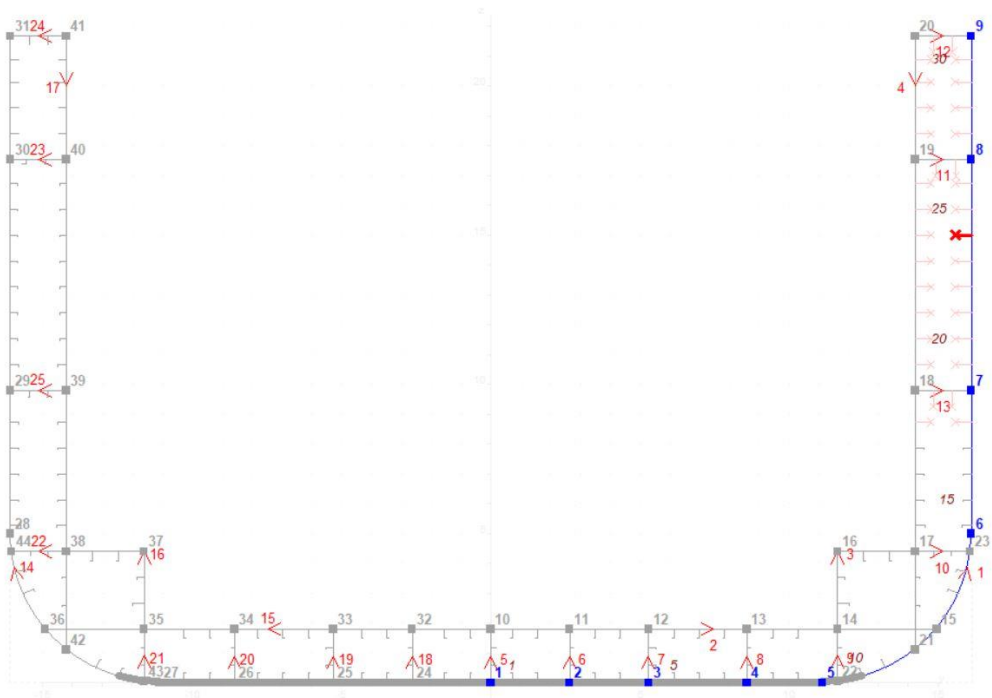


Εικόνα 41: Διατομή του πλοίου στο MARS2000





Εικόνα 42: Διατομή του πλοίου σε κατάσταση Grounding στο MARS2000



Εικόνα 43: Διατομή του πλοίου σε κατάσταση Collision στο MARS2000

Ακολουθούν τα αποτελέσματα των ροπών  $M_U - M_{UD}$  που εξήχθησαν από το πρόγραμμα.

Intact	Hogging	7694701 kN*m
	Sagging	-7773320 kN*m
Grounding	Hogging	4925813 kN*m
	Sagging	-6108869 kN*m
Collision	Hogging	5146569 kN*m
	Sagging	-4153990 kN*m

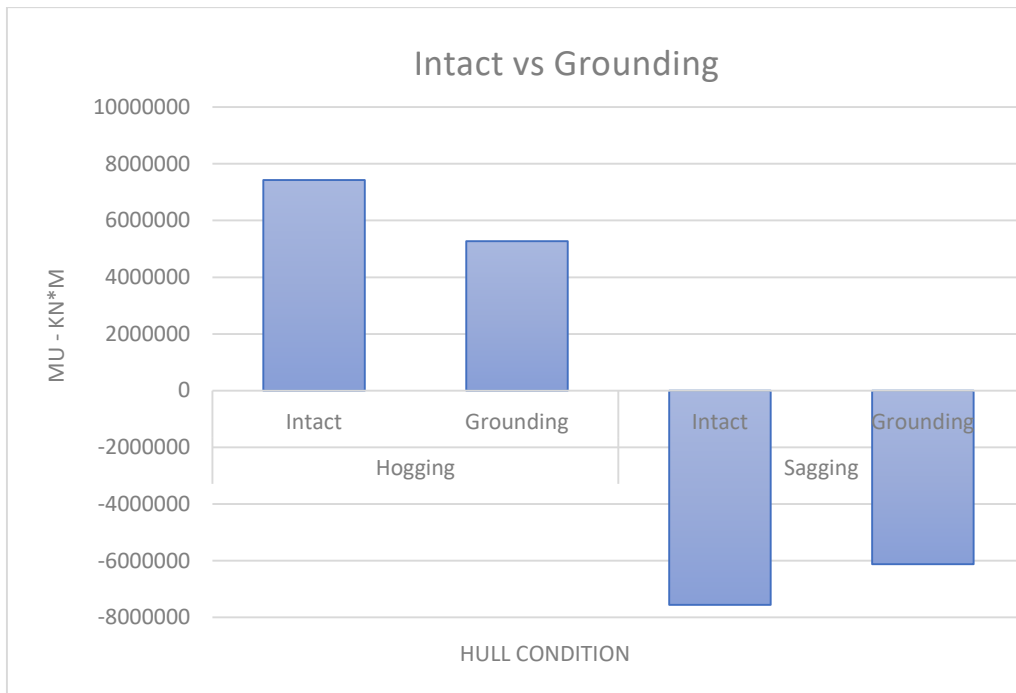
Πίνακας 2: Ροπές  $M_U - M_{UD}$  από MARS2000

#### 4.1.3 Υπολογισμός $M_{UD}$ – εναπομείνουσα αντοχή γάστρας μετά από ατύχημα

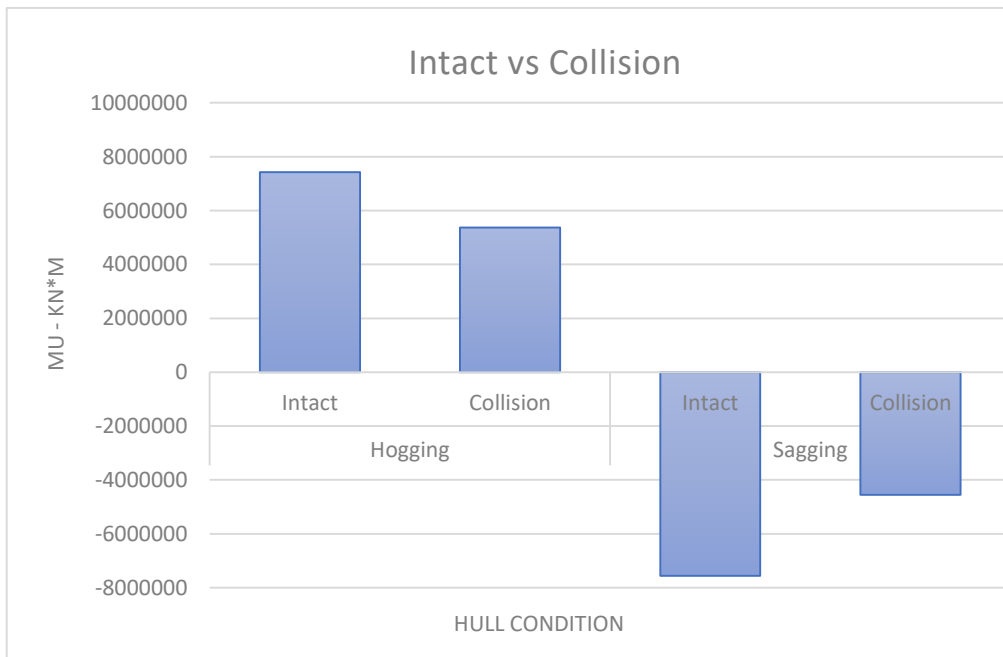
Στη συνέχεια ακολούθησαν οι υπολογισμοί για την κατάσταση της γάστρας έπειτα από ατύχημα δηλαδή collision και grounding. Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται οι τιμές της άθικτης γάστρας, τα αποτελέσματα της εκάστοτε ζημιάς και το ποσοστό εναπομείνουσας αντοχής σε σχέση με την αρχική κατάσταση.

Hull Condition	Condition	MU	% Αντοχής
Intact	Hogging	7426720	-
	Sagging	-7557415	-
Grounding	Hogging	5276611	71.05%
	Sagging	-6121887	81%
Collision	Hogging	5374040	72.36%
	Sagging	-4549841	60.2%

Πίνακας 3: Ροπή έπειτα από ατύχημα



Διάγραμμα 1: Σύγκριση άθικτης γάστρας με grounding



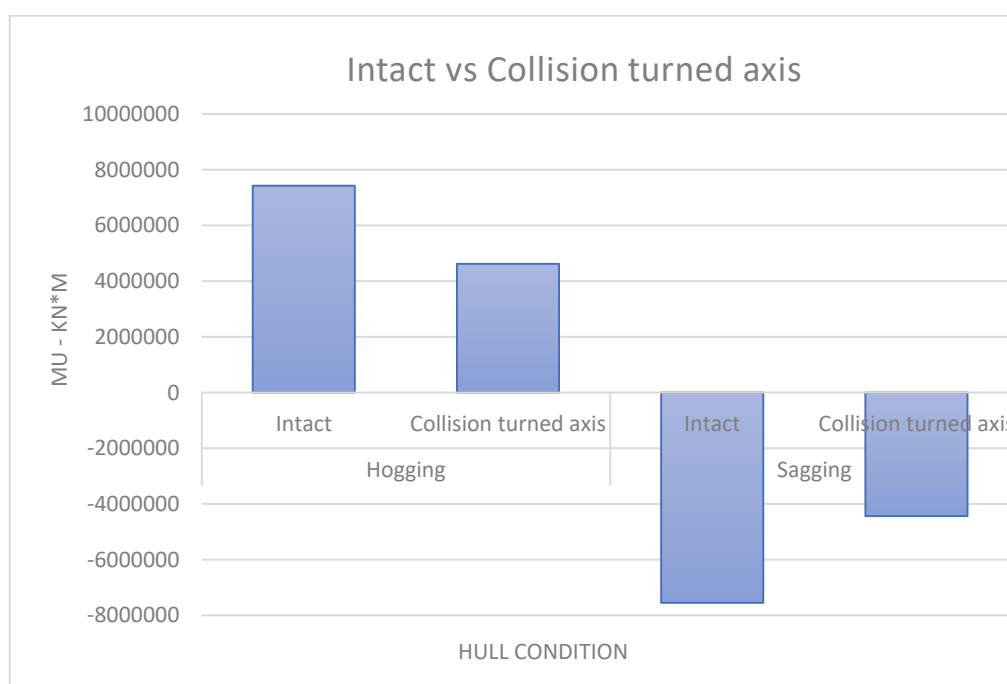
Διάγραμμα 2: Σύγκριση άθικτης γάστρας με Collision

## 4.2 Σύγκριση για την κατάσταση Collision της μεθόδου Smith με τη μέθοδο των στραμμένων αξόνων

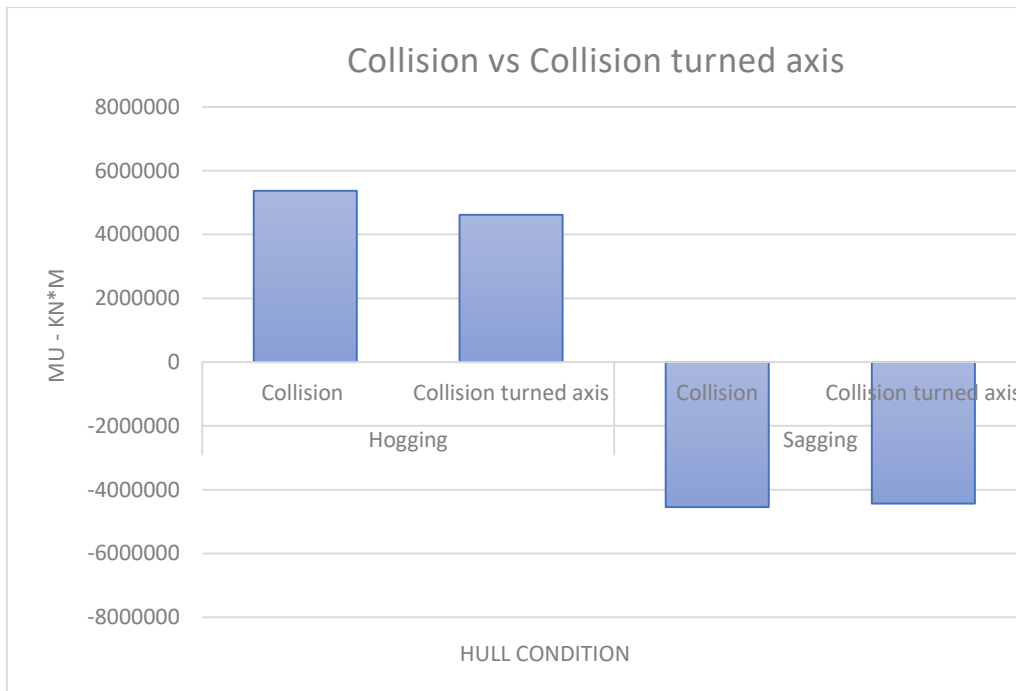
Επόμενο βήμα είναι η σύγκριση της αντοχής σε σύγκρουση μεταξύ των κανονισμών του IACS και της μεθόδου που ακολουθήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τη στροφή του ουδέτερου άξονα. Έπειτα έγινε η σύγκριση με το συντελεστή ουδέτερου άξονα  $C_{NA}$  που υπάρχει στους κανονισμούς του IACS. Ακολουθεί πίνακας με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα.

Hull Condition	Condition	MU	% Αντοχής
Intact	Hogging	7426720	-
	Sagging	-7557415	-
Collision	Hogging	5374040	72.36%
	Sagging	-4549841	60.2%
Collision – Turned axis	Hogging	4619533	62.2%
	Sagging	-4434313	58.67%

Πίνακας 4: Ροπή  $M_u$  με τις δύο μεθόδους για collision



Διάγραμμα 3: Σύγκριση άθικτης γάστρας με τη μέθοδο στραμμένου άξονα για Collision



Διάγραμμα 4: Σύγκριση Collision με τη μέθοδο στραμμένου άξονα για Collision

Σύμφωνα με τη μέθοδο των στραμμένων αξόνων η εναπομείνουσα αντοχή της γάστρας είναι μικρότερη από τη μέθοδο που οριοθετεί ο IACS, κάτι αναμενόμενο λόγω της ύπαρξης του συντελεστή ουδέτερου άξονα.

Για να γίνει η σύγκριση με τον συγκεκριμένο συντελεστή πρέπει να υπολογίσουμε τον αντίστοιχο συντελεστή από τα αποτελέσματα που έχουμε.

Ο συντελεστής υπολογίζεται διαιρώντας τη ροπή MU από την κατάσταση collision με την αντίστοιχη από τη μέθοδο των στραμμένων αξόνων. Έτσι, παίρνουμε:

- Για την κατάσταση Hogging

$$C' = \frac{5374040}{4619533} \rightarrow C' = 1.163$$

- Για την κατάσταση Sagging

$$C' = \frac{-4549841}{-4434313} \rightarrow C' = 1.026$$

Στους κανονισμούς CSR ο συντελεστής ουδέτερου άξονα ισούται με:

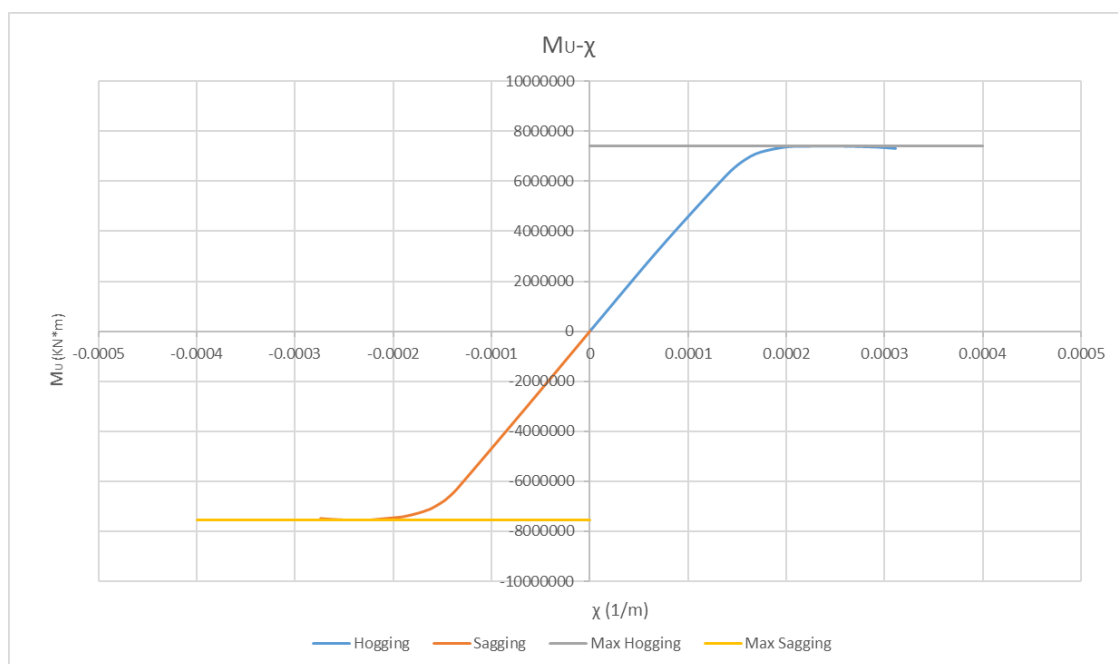
$$C_{NA} = 1.1$$

Τιμή αρκετά παραπλήσια με τους συντελεστές που εξάγαμε και σχεδόν ίση με το μέσο όρο τους.

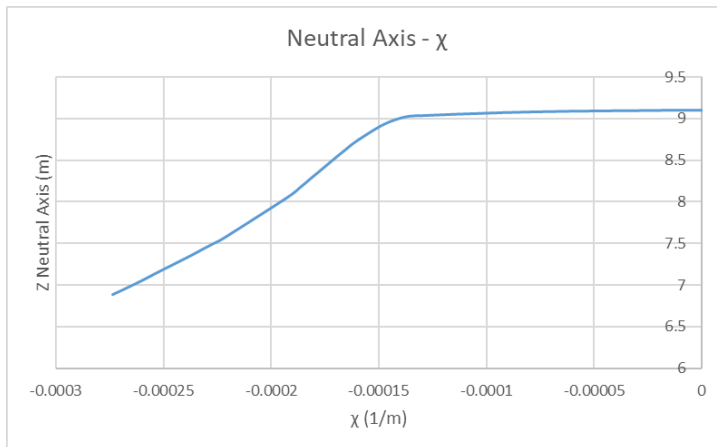
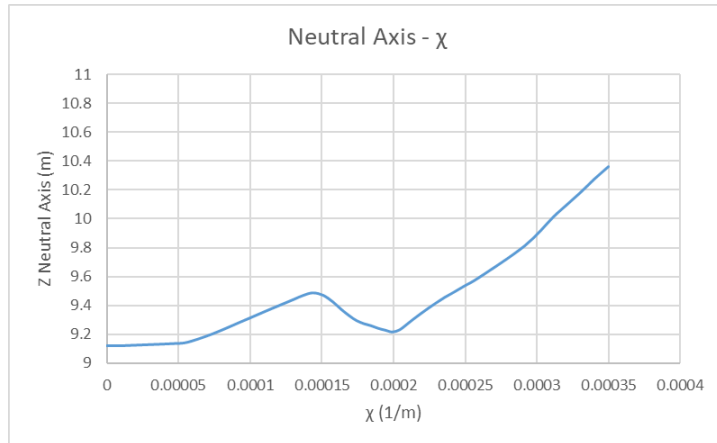
### 4.3 Διαγράμματα καμπυλότητας

Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα  $M - \chi$  (ροπής καμπυλότητας) καθώς και η μετατόπιση του ουδέτερου άξονα κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας, για όλες τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν.

#### Άθικτη γάστρα

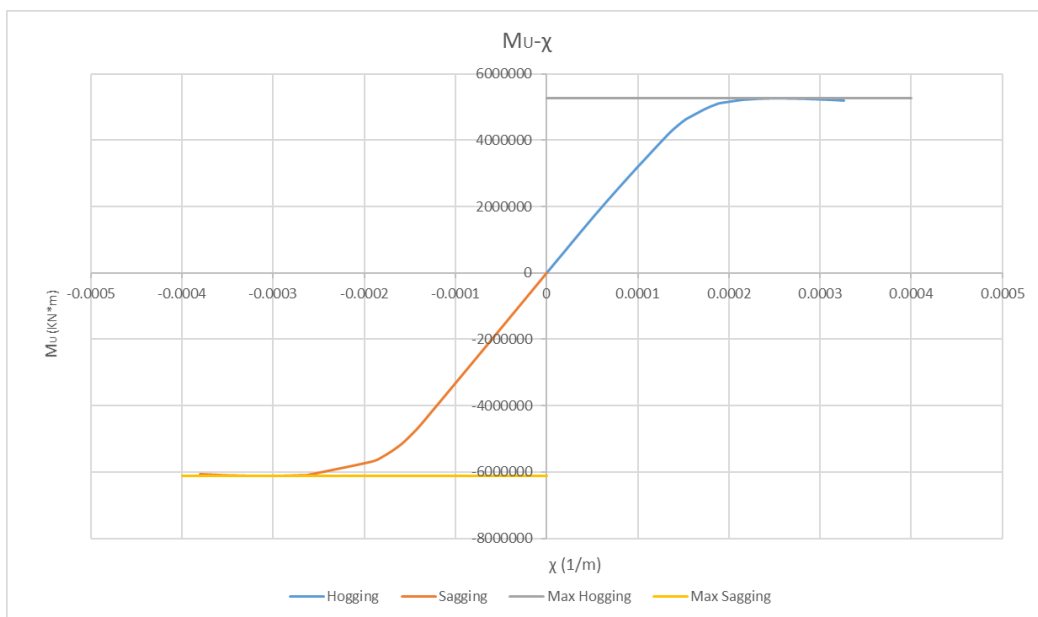


Διάγραμμα 5: Διάγραμμα  $M - \chi$  για άθικτη γάστρα

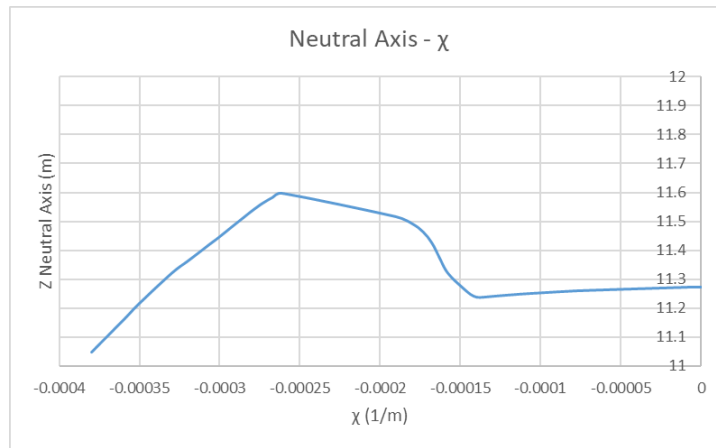
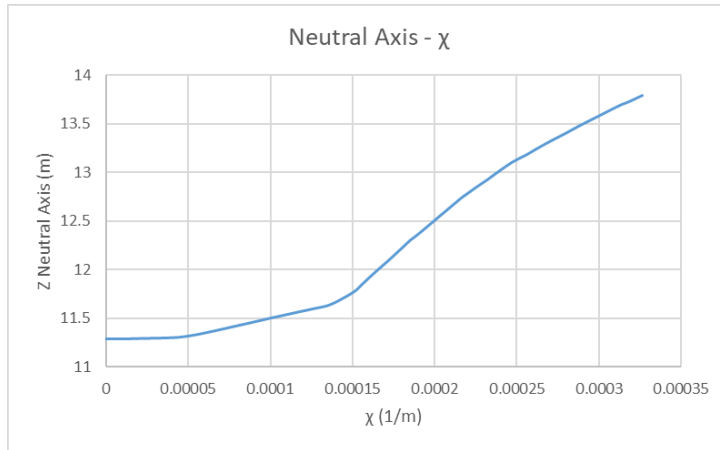


Διάγραμμα 6: Διάγραμμα μετατόπισης άξονα για άθικτη γάστρα

### Grounding

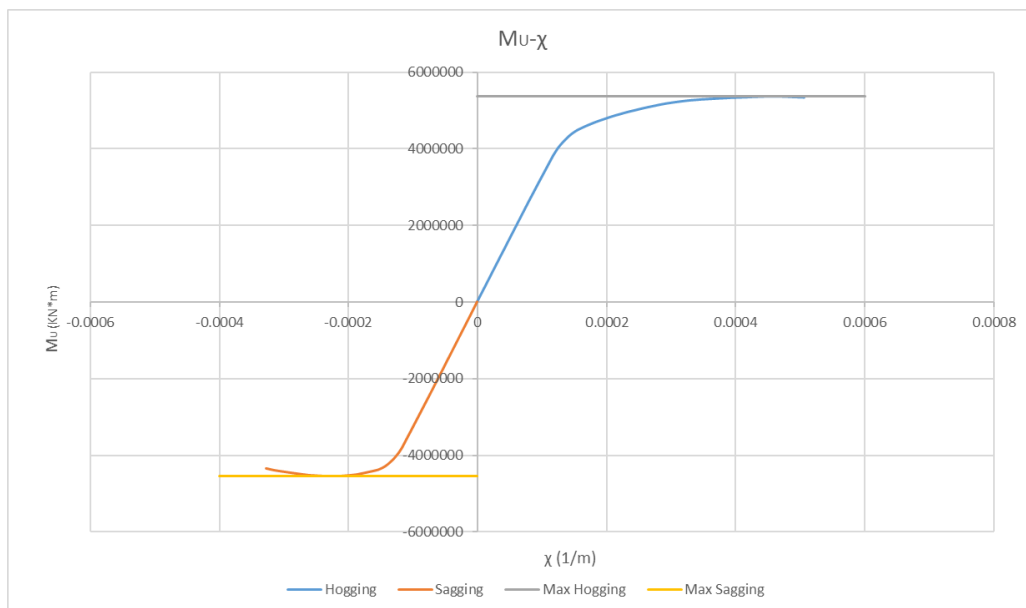


Διάγραμμα 7: Διάγραμμα M –  $\chi$  για Grounding



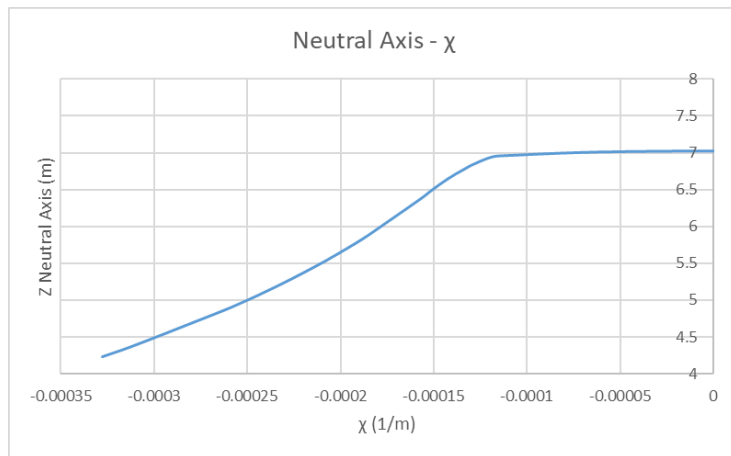
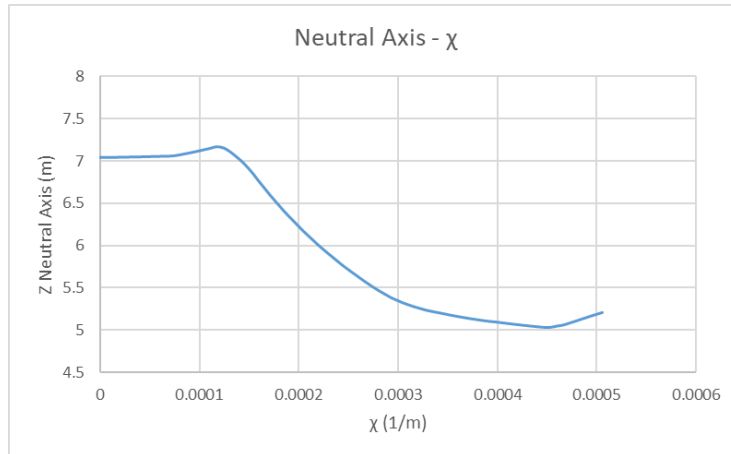
Διάγραμμα 8: Διάγραμμα μετατόπισης άξονα για Grounding

### Collision



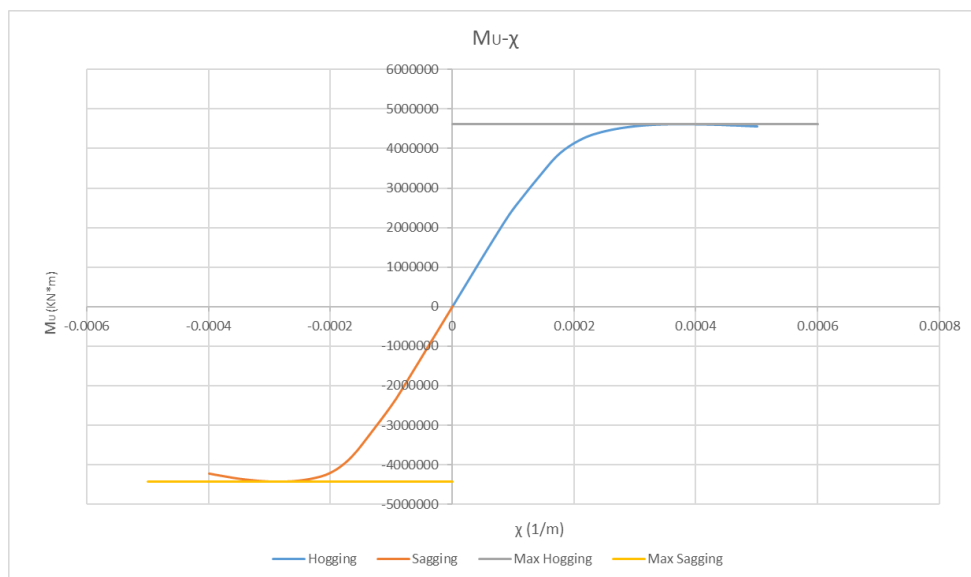
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα M –  $\chi$  για Collision



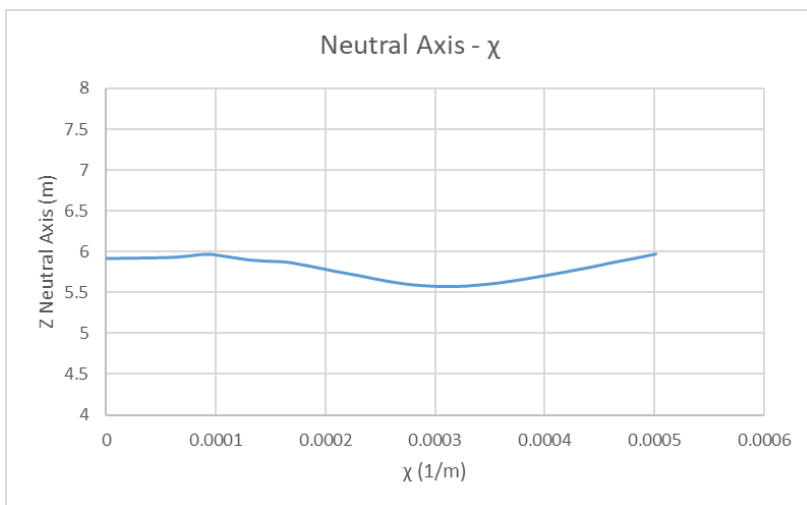
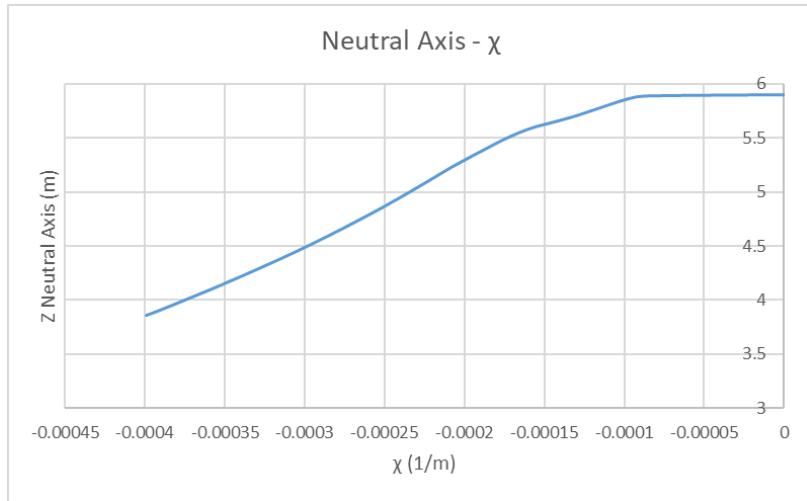


Διάγραμμα 10: Διάγραμμα μετατόπισης άξονα για Collision

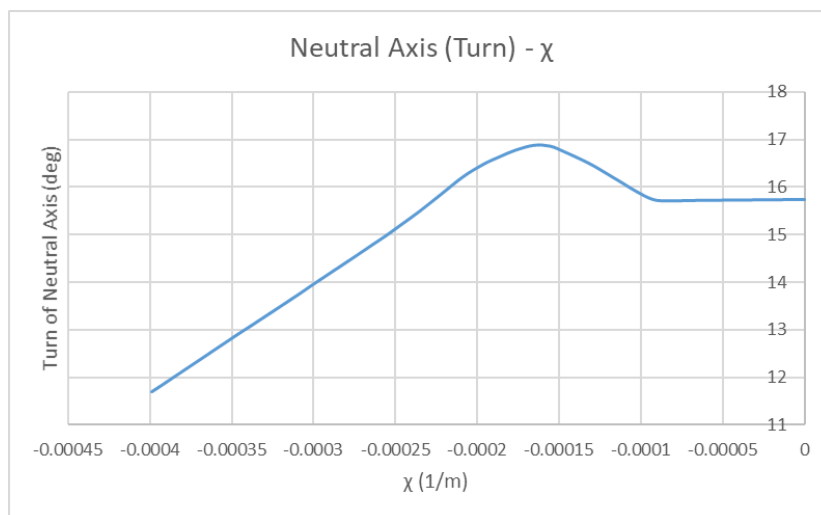
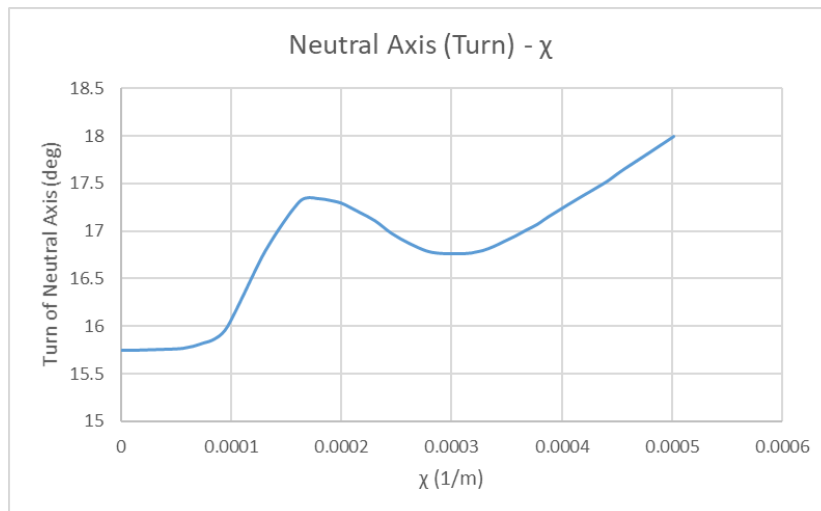
### Collision – Turned Axis



Διάγραμμα 11: Διάγραμμα M –  $\chi$  για Collision – Turned Axis



Διάγραμμα 12: Διάγραμμα μετατόπισης άξονα για Collision – Turned Axis



Διάγραμμα 13: Διάγραμμα στροφής άξονα για Collision – Turned Axis

#### 4.4 Αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων

Όπως αναφέραμε ο σκοπός της προσομοίωσης πειράματος λυγισμού είναι η εξαγωγή των καμπυλών  $\sigma - \epsilon$  με σκοπό να τις συγκρίνουμε με τις καμπύλες που δημιουργούνται από τη μέθοδο smith. Έπειτα θα γίνει η μέθοδος Smith και θα υπολογιστεί η ροπή MU χρησιμοποιώντας τις καμπύλες από τα πεπερασμένα στοιχεία.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι καμπύλες από 4 ενισχυτικά και συγκεκριμένα ένα από το έλασμα του πυθμένα, ένα από το έλασμα του διπύθμενου, ένα από το έλασμα του καταστρώματος, και ένα από το δοκάρι ανάμεσα στα πλευρικά ελάσματα.

#### Ενισχυτικό στον πυθμένα

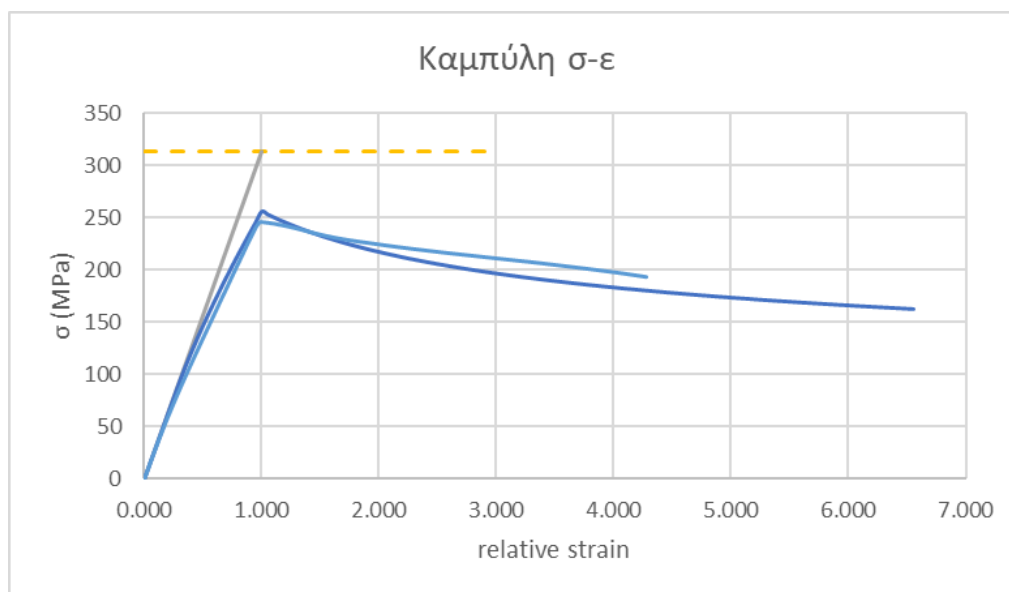
Διαστάσεις ενισχυτικού:

Κορμός: 350mm x 12mm

Φλάντζα: 100mm x 17mm

Έλασμα: 880mm x 15.5mm

Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη του Smith.



Διάγραμμα 14: Καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  από πεπερασμένα και από Smith για ενισχυτικό στον πυθμένα

Η πιο μακρινή καμπύλη (με χρώμα μπλε σκούρο) είναι η καμπύλη του Smith και η άλλη γραμμή είναι εκείνη από τα πεπερασμένα στοιχεία. Η καμπύλη που εκτείνεται

προς τα πάνω (γκρι χρώμα) είναι η καμπύλη που θα παίρναμε αν είχαμε ελαστοπλαστική κατάρρευση όπως στις περιπτώσεις του εφελκυσμού. Όπως βλέπουμε η μέγιστη τάση που παραλαμβάνει το ενισχυτικό είναι σημαντικά μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού (διακεκομμένη πορτοκαλί γραμμή).

### Ενισχυτικό στο διτύθμενο

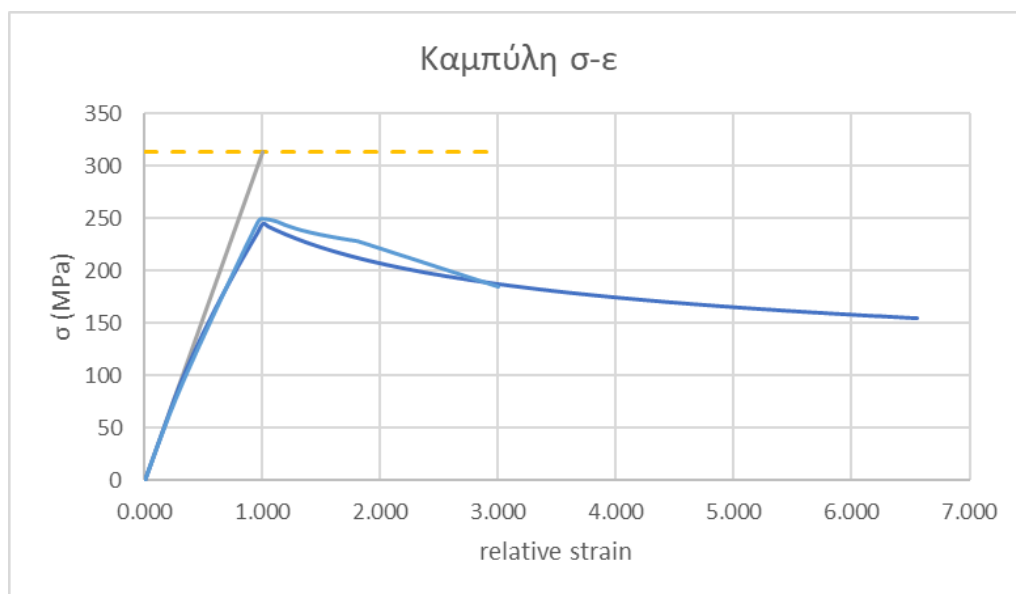
Διαστάσεις ενισχυτικού:

Κορμός: 300mm x 13mm

Φλάντζα: 90mm x 17mm

Έλασμα: 880mm x 14mm

Ομοίως, παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη του Smith.



Διάγραμμα 15: Καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  από πεπερασμένα και από Smith για ενισχυτικό στο διτύθμενο

## Ενισχυτικό στο κατάστρωμα

Διαστάσεις ενισχυτικού:

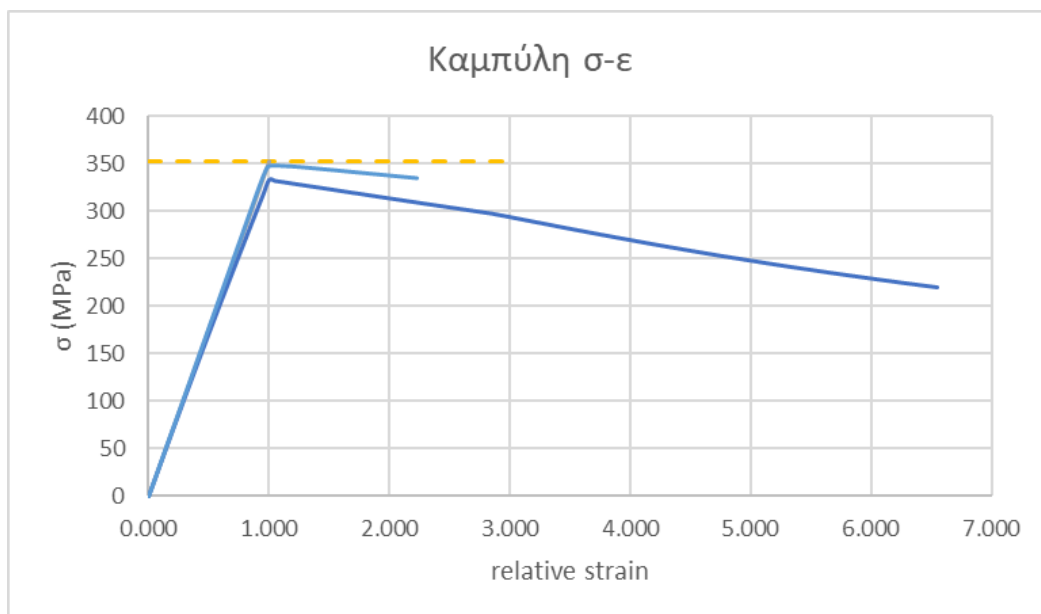
Κορμός: 300mm x 38mm

Φλάντζα: - (το ενισχυτικό είναι Flat bar)

Έλασμα: 680mm x 38mm

Η περιοχή του καταστρώματος, όπως έχουμε αναφέρει, είναι το μέρος του πλοίου που καταπονείται περισσότερο από κάμψη καθώς έχει τη μεγαλύτερη απόσταση από τον ουδέτερο άξονα. Για αυτόν τον λόγο το έλασμα είναι σημαντικά παχύτερο (υπερδιπλάσιο) από εκείνο στον πυθμένα.

Ομοίως, παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη του Smith.



Διάγραμμα 16: Καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  από πεπερασμένα και από Smith για ενισχυτικό στο κατάστρωμα

## Ενισχυτικό στο δοκάρι ανάμεσα στα πλευρικά ελάσματα

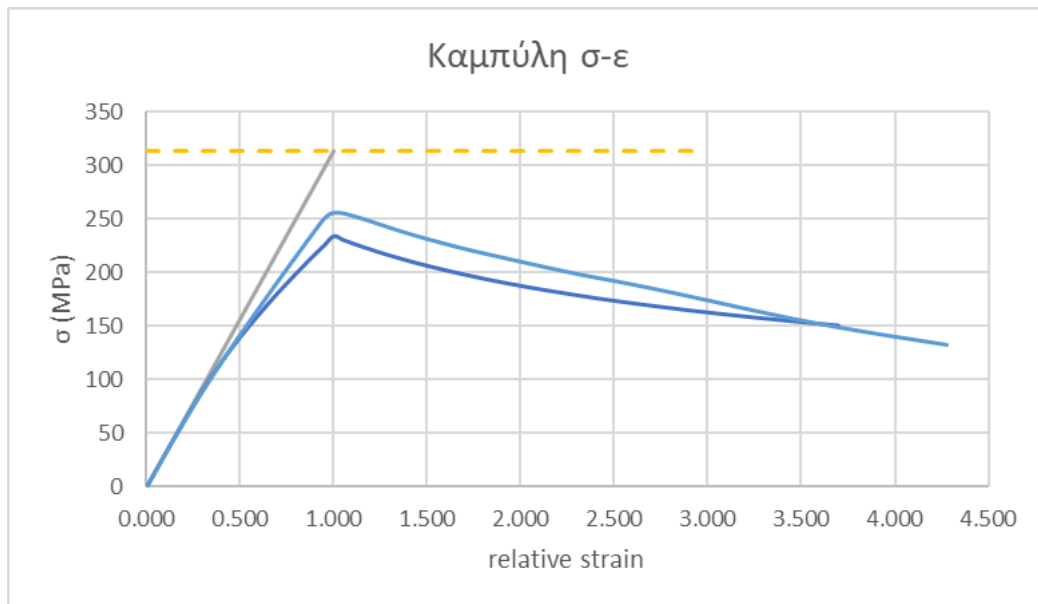
Διαστάσεις ενισχυτικού:

Κορμός: 150mm x 12mm

Φλάντζα: 90mm x 12mm

Έλασμα: 680mm x 12mm

Ομοίως, παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  σε σύγκριση με την αντίστοιχη καμπύλη του Smith.



Διάγραμμα 17: Καμπύλη  $\sigma - \epsilon$  από πεπερασμένα και από Smith για ενισχυτικό στο δοκάρι ανάμεσα στα πλευρικά ελάσματα

## 4.5 Μέθοδος Smith με καμπύλες $\sigma - \epsilon$ από πεπερασμένα

Τελευταίο βήμα της παρούσας εργασίας ήταν ο υπολογισμός της ροπής  $M_U$  χρησιμοποιώντας τις καμπύλες λυγισμού που εξάγαμε από το Abaqus αντί για εκείνες που υπολογίσαμε στη μέθοδο Smith. Ο τρόπος που έγιναν οι υπολογισμοί είναι ακριβώς ο ίδιος και εφαρμόστηκε η ίδια επαναληπτική διαδικασία που ακολουθήσαμε προηγουμένως. Η μοναδική διαφορά είναι ότι για κάθε ενισχυτικό το οποίο καταπονούνταν σε λυγισμό, για δεδομένη παραμόρφωση  $\epsilon$ , υπολογίστηκε η τάση  $\sigma$  μέσω γραμμικής παρεμβολής στις καμπύλες του Abaqus.

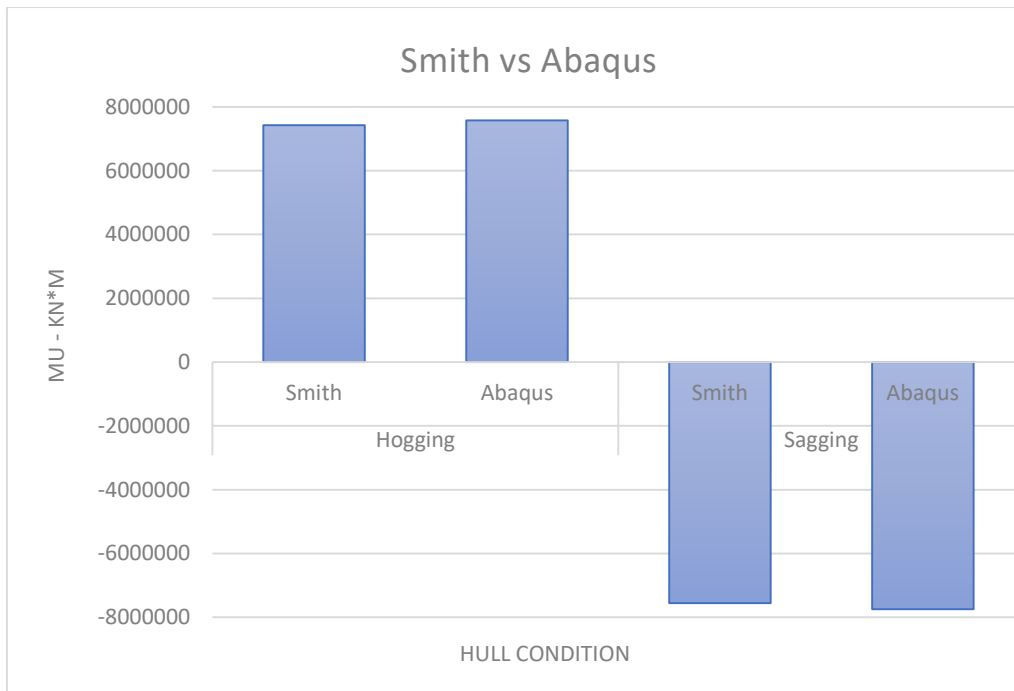
Η γραμμική παρεμβολή χρησιμοποιήθηκε καθώς οι καμπύλες του Abaqus διαμορφώνονται από σημεία με συντεταγμένες ( $\epsilon_i$ ,  $\sigma_i$ ) και όχι από κάποια εξίσωση η οποία υπολογίζει την τάση  $\sigma$  για δεδομένη παραμόρφωση  $\epsilon$  όπως γίνεται στη μέθοδο Smith.

Το αποτέλεσμα, σε σύγκριση με τη μέθοδο Smith, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και στο παρακάτω διάγραμμα.

Μέθοδος	Wave condition	$M_U$
Smith	Hogging	7426720
	Sagging	-7557415
Abaqus	Hogging	7582637
	Sagging	-7748858

Πίνακας 5 Ροπή  $M_U$  χρησιμοποιώντας πεπερασμένα στοιχεία



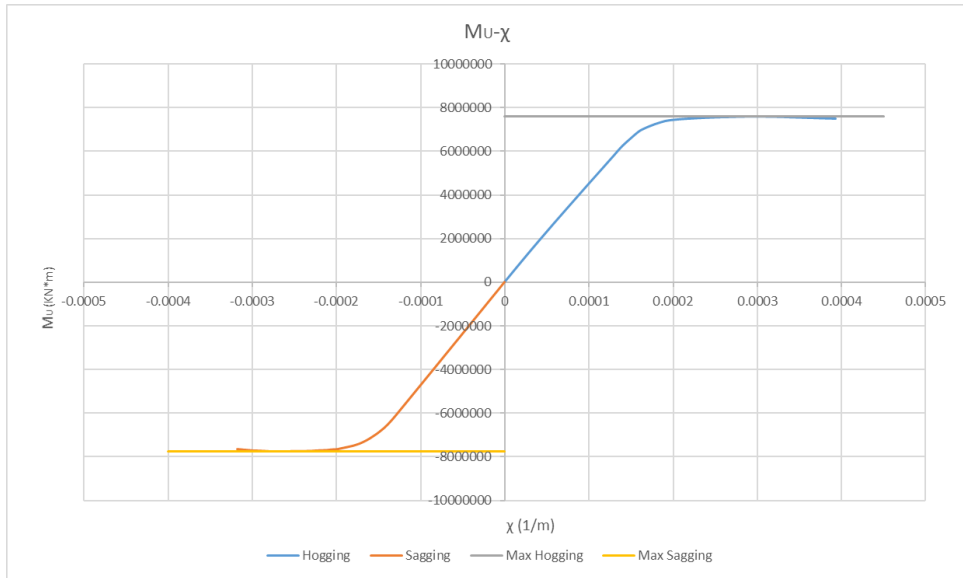


Διάγραμμα 18: Σύγκριση της ροπής  $M_u$  χρησιμοποιώντας εξώσεις Smith ή πεπερασμένα στοιχεία

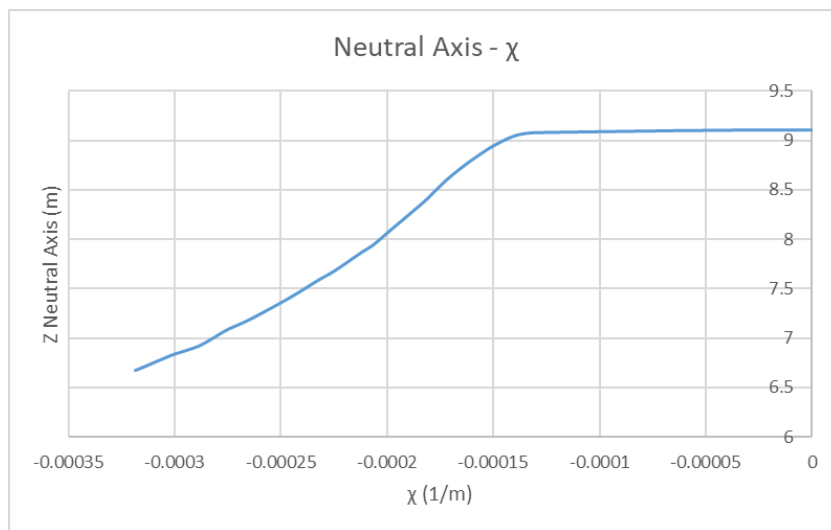
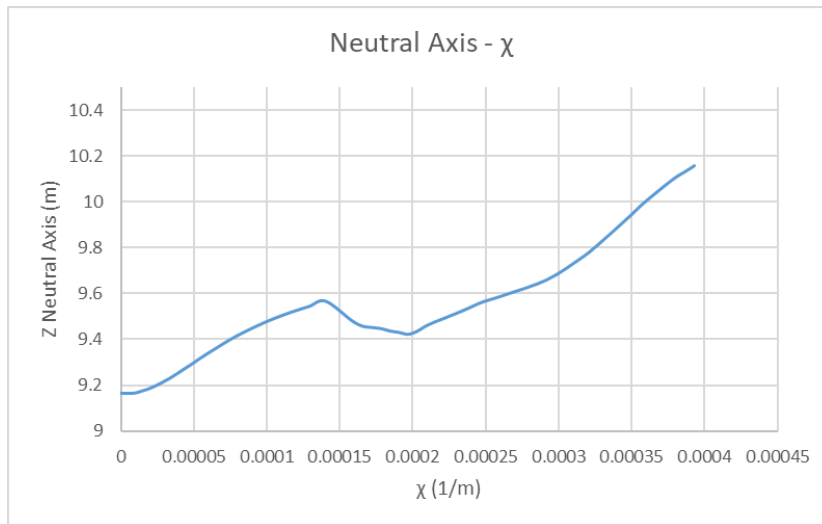
Όπως παρατηρούμε οι τιμές είναι πολύ κοντά. Συγκεκριμένα οι αποκλίσεις είναι οι εξής:

- Για την κατάσταση Hogging  
Απόκλιση = 2.05%
- Για την κατάσταση Sagging  
Απόκλιση = 2.47%

Ακολουθεί το διάγραμμα  $M - \chi$  καθώς και το διάγραμμα μετατόπισης του ουδέτερου άξονα.



Διάγραμμα 19: Διάγραμμα Μ – χ για άθικτη γάστρα με καμπύλες από Αβαqus



Διάγραμμα 20: Διάγραμμα μετατόπισης άξονα για για άθικτη γάστρα με καμπύλες από Αβαqus

#### 4.6 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

	<b>Hull state</b>	<b>Condition</b>	<b>M<sub>U</sub></b>
Smith	Intact	Hogging	7426720 kN*m
		Sagging	-7557415 kN*m
	Grounding	Hogging	5276611 kN*m
		Sagging	-6121887 kN*m
	Collision	Hogging	5374040 kN*m
		Sagging	-4549841 kN*m
	Collision – Turned Axis	Hogging	4619533 kN*m
		Sagging	-4434313 kN*m
MARS2000	Intact	Hogging	7694701 kN*m
		Sagging	-7779920 kN*m
	Grounding	Hogging	4925812 kN*m
		Sagging	-6108869 kN*m
	Collision	Hogging	5146569 kN*m
		Sagging	-4153990 kN*m
Abaqus	Intact	Hogging	7582637 kN*m
		Sagging	-7748858 kN*m

Πίνακας 6 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

## Συμπεράσματα

Από την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα τα οποία είναι τα εξής:

- Η δυσμενέστερη συνθήκη ατυχήματος είναι η σύγκρουση (Collision) καθώς εκεί παρατηρείται η μικρότερη εναπομείνουσα αντοχή γάστρας.
- Η μέγιστη χωρητικότητα διαμήκους ροπής κάμψης  $M_u$  στην κατάσταση Sagging είναι μεγαλύτερη από ότι στην κατάσταση Hogging. Αυτό ισχύει στην άθικτη κατάσταση καθώς και στην περίπτωση της προσάραξης (Grounding), ενώ στην περίπτωση του Collision οι ρόλοι αντιστρέφονται.
- Η επίδραση των στραμμένων αξόνων στην περίπτωση του Collision, ενώ έχει κάποια σημασία, δεν είναι πολύ μεγάλη καθώς η διαφορά των δυο μεθόδων που εφαρμόστηκαν καλύπτεται από τον συντελεστή ουδέτερου άξονα  $C_{NA}$  που υπάρχει στη μεθοδολογία των κανονισμών CSR.
- Οι καμπύλες λυγισμού από τα πεπερασμένα στοιχεία είναι πολύ κοντά στις θεωρητικές καμπύλες του Smith. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ξανά πως οι καμπύλες του Abaqus, λόγω έλλειψης υπολογιστικής ισχύως, ενδέχεται να έχουν κάποιο μικρό σφάλμα.
- Εφαρμόζοντας τη μέθοδο Smith με τις καμπύλες του Abaqus το αποτέλεσμα της ροπής  $M_u$  βγαίνει παραπλήσιο με την αρχική μέθοδο.

## Παράρτημα Α – Υπολογισμός ροπών σύμφωνα με τους κανονισμούς

### Ροπή σε κυματισμό:

Ο υπολογισμός της ροπής σε κυματισμό έγινε σύμφωνα με τους κανονισμούς του IACS και συγκεκριμένα με την παράγραφο UR S11A.2.3.1 που παρουσιάζεται παρακάτω.

#### S11A.2.3.1 Wave parameter

The wave parameter is defined as follows:

$$C = 1 - 1.50 \left( 1 - \sqrt{\frac{L}{L_{ref}}} \right)^{2.2} \quad \text{for } L \leq L_{ref}$$

$$C = 1 - 0.45 \left( \sqrt{\frac{L}{L_{ref}}} - 1 \right)^{1.7} \quad \text{for } L > L_{ref}$$

where:

$L_{ref}$  Reference length, in m, taken as:

$$L_{ref} = 315 C_W^{-1.3} \quad \text{for the determination of vertical wave bending moments according to 2.3.2}$$

$$L_{ref} = 330 C_W^{-1.3} \quad \text{for the determination of vertical wave shear forces according to 2.3.3}$$

#### S11A.2.3.2 Vertical wave bending moments

The distribution of the vertical wave induced bending moments,  $M_W$  in kNm, along the ship length is given in Figure 6, where:

$$M_{W-Hog} = +1.5 f_R L^3 C C_W \left( \frac{B}{L} \right)^{0.8} f_{NL-Hog}$$

$$M_{W-Sag} = -1.5 f_R L^3 C C_W \left( \frac{B}{L} \right)^{0.8} f_{NL-Sag}$$

where:

$f_R$ : Factor related to the operational profile, to be taken as:  
 $f_R = 0.85$

$f_{NL-Hog}$ : Non-linear correction for hogging, to be taken as:  
 $f_{NL-Hog} = 0.3 \frac{C_B}{C_W} \sqrt{T}$ , not to be taken greater than 1.1

$f_{NL-Sag}$ : Non-linear correction for sagging, to be taken as:  
 $f_{NL-Sag} = 4.5 \frac{1 + 0.2 f_{Bow}}{C_W \sqrt{C_B L^{0.3}}}$ , not to be taken less than 1.0

Εικόνα 44: Κανονισμός για ροπή σε κυματισμό

Όπου το  $L_{ref}$  υπολογίστηκε ίσο με  $L_{ref} = 438.75 \text{ m}$ , το  $C$  υπολογίστηκε ίσο με  $C = 0.911$ , το  $f_{NL-Hog}$  υπολογίστηκε ίσο με  $f_{NL-Hog} = 0.93$ , το  $f_{NL-Sag}$  υπολογίστηκε ίσο με  $f_{NL-Sag} = 1.377$  και επιπλέον έχουμε:  $C_w = 0.775$ ,  $L = 230 \text{ m}$ ,  $T = 12.5 \text{ m}$

Έτσι έχουμε τελικώς τις εξής τιμές των ροπών:

- Για Hogging  $\rightarrow M_{WAVE,HOG} = 2116068 \text{ kN}\cdot\text{m}$
- Για Sagging  $\rightarrow M_{WAVE,SAG} = -2501145 \text{ kN}\cdot\text{m}$

#### Ροπή σε ήρεμο νερό:

Ο υπολογισμός της ροπής σε ήρεμο νερό έγινε χρησιμοποιώντας τη σχέση 1:

$$\sigma = M \frac{y}{I} \rightarrow \sigma_{max} = \frac{M_{sw} + M_w}{SM}$$

Όπου  $SM$  (Section Modulus) είναι η ροπή αντίστασης της διατομής και ισούται με:

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

$I$  είναι η ροπή αδράνειας της διατομής και  $y_d$  είναι η απόσταση του ουδέτερου άξονα από το κατάστρωμα. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε πως παίρνουμε την απόσταση από το κατάστρωμα καθώς ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται πιο κοντά στον πυθμένα του πλοίου, οπότε η ελάχιστη ροπή αντίστασης προκύπτει από τη συγκεκριμένη απόσταση.

Η ροπή αντίστασης  $SM$  υπολογίστηκε με το πρόγραμμα MARS2000 και ισούται με:

$$SM = 21.92 \text{ m}^3$$

Η ροπή είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη ροπή που ορίζουν οι κανονισμοί του IACS όπως φαίνεται παρακάτω:

S7.1 The minimum midship section modulus at deck and keel for ships  $90 \text{ m} \leq L \leq 500 \text{ m}$  and made of hull structural steel is

$$W_{\min} = cL^2B(C_b + 0.7)k \quad (\text{cm}^3)$$

where  $L$  = Rule length (m)

$B$  = Rule breadth (m)

$C_b$  = Rule block coefficient;  $C_b$  is not to be taken less than 0.60

$c$  =  $c_n$  for new ships

$c$  =  $c_s$  for ships in service =  $0.9 c_n$

$$\begin{aligned} c_n &= 10.75 - \left( \frac{300 - L}{100} \right)^{3/2} && \text{for } 90 \text{ m} \leq L \leq 300 \text{ m} \\ &= 10.75 \left( \frac{L - 350}{150} \right)^{3/2} && \text{for } 300 \text{ m} < L < 350 \text{ m} \\ &= 10.75 - \left( \frac{L - 350}{150} \right)^{3/2} && \text{for } 350 \text{ m} \leq L \leq 500 \text{ m} \end{aligned}$$

$k$  = material factor

$k$  = 1.0 for ordinary hull structural steel,

$k$  < 1.0 for higher tensile steel according to S4.

Εικόνα 45: Κανονισμός για ελάχιστη ροπή

Το  $W_{\min}$  υπολογίστηκε ίσο με  $21.5 \text{ m}^3$  δηλαδή μικρότερο από τη ροπή της διατομής που υπολογίσαμε προηγουμένως.

Στη σχέση 1 η ροπή  $\sigma_{\max}$  παίρνεται ίση με  $175/k \text{ MPa}$  και είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη όπως ορίζει ο παρακάτω κανονισμός του IACS.

### S11.3.1 Bending strength amidships

#### S11.3.1.1 Section modulus

- (i) Hull section modulus,  $Z$ , calculated in accordance with S5, is not to be less than the values given by the following formula in way of  $0.4 L$  midships for the still water bending moments  $Ms$  given in S11.2.1.1 and the wave bending moments  $Mw$  given in S11.2.2.1, respectively:

$$\frac{|Ms + Mw|}{\sigma} \times 10^3 \quad (\text{cm}^3)$$

where,

$\sigma$  = permissible bending stress =  $175/k \text{ (N/mm}^2\text{)}$

$k$  = 1.0 for ordinary hull structural steel

$k$  < 1.0 for higher tensile steel according to S4.

Εικόνα 46: Κανονισμός για επιτρεπόμενη τάση

Ο παράγοντας υλικού  $k$  υπολογίστηκε ίσος με 0.72 σύμφωνα με τον παρακάτω κανονισμό από τον IACS.

**S4**  
(1973)  
(Rev.1  
1974)  
(Rev.2  
Apr  
2007)  
(Rev.3  
May  
2010)  
(Rev.4  
Apr  
2017)

### Criteria for the Use of High Tensile Steel with Minimum Yield Stress of 315 N/mm<sup>2</sup>, 355 N/mm<sup>2</sup> and 390 N/mm<sup>2</sup>

This UR does not apply to CSR Bulk Carriers and Oil Tankers.

The material factor  $k$  is defined as follows:

$$k = 0.78 \text{ for steel with } R_{eH} = 315 \text{ N/mm}^2$$

$$k = 0.72 \text{ for steel with } R_{eH} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$k = 0.66 \text{ for steel with } R_{eH} = 390 \text{ N/mm}^2 \text{ provided that a fatigue assessment of the structure is performed to verify compliance with the requirements of the Society,}$$

$$k = 0.68 \text{ for steel with } R_{eH} = 390 \text{ N/mm}^2 \text{ in other cases.}$$

Where:

$R_{eH}$  : Minimum yield stress, in N/mm<sup>2</sup>

Εικόνα 47: Κανονισμός παράγοντα υλικού  $k$

Έτσι, χρησιμοποιώντας τη ροπή κυματισμού ( $M_w$ ) που υπολογίσαμε παραπάνω οι ροπές σε ήρεμο νερό είναι οι εξής:

- Για Hogging  $\rightarrow M_{SW,HOG} = 3213289 \text{ kN}\cdot\text{m}$
- Για Sagging  $\rightarrow M_{SW,SAG} = -2828212 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Οπότε συνολικά εφαρμόζοντας τον κανονισμό που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 4.1.1 οι απαιτούμενες ελάχιστες μέγιστες ροπές είναι οι εξής:

- Για Hogging  $\rightarrow M_{HOG} = 6946229 \text{ kN}\cdot\text{m}$
- Για Sagging  $\rightarrow M_{SAG} = -6121065 \text{ kN}\cdot\text{m}$



## Βιβλιογραφία

- [1] Ανυφαντής Κωνσταντίνος Ν. (2020). *Στατική ναυπγικών κατασκευών*
- [2] Καρύδης Πέτρος Α. *Υπολογιστικές μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές*
- [3] Προβατίδης Χριστόφορος Γ. (2017). *Πεπερασμένα στοιχεία στην ανάλυση κατασκευών*
- [4] Σαμουηλίδης Εμμανουήλ Σ. (2011). *Σημειώσεις αντοχής πλοίου*
- [5] Χαλαστής Παναγιώτης (2009). ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΧΥΔΗΝ
- [6] allseasshipping.com (2022). A glimpse into containerships: History, types and fun facts
- [7] Bayraktarkatal Ertekin, Ölmez Hasan (2016). Effects of Key Factors on Hull Girder Ultimate Strength Estimation by Progressive Collapse Calculations
- [8] Beer Ferdinand, Johnston E. Russel, DeWolf John, Mazurek David (2017). *Μηχανική των υλικών*
- [9] Braw Elisabeth (2021). What the Ever Given Taught the World
- [10] Campanile A., Piscopo V., Scamardella A. (2015). Time-variant bulk carrier reliability analysis in pure bending intact and damage conditions
- [11] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES (2020). Requirements concerning STRENGTH OF SHIPS
- [12] INTERNATIONAL ASSOCIATION OF CLASSIFICATION SOCIETIES (2021). Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers
- [13] Japan Transport Safety Board (2022). Statistics of Marine Accident
- [14] Malaznik Scott (2013). Crippling of thin-walled composite sections using progressive failure analysis
- [15] Pagadalu Vignesh (2021). How to model a structure undergoing global instability in Abaqus?
- [16] Spilman Rick (2013). Container ship MOL Comfort Breaks in Two off Yemen, Crew Rescued

**[17]**

[brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En1750/Notes/FEA\\_Intro/FEA\\_Intro.htm](http://brown.edu/Departments/Engineering/Courses/En1750/Notes/FEA_Intro/FEA_Intro.htm)

**[18]** [commons.wikimedia.org/wiki/File:Arrufoquebranto.PNG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arrufoquebranto.PNG)

**[19]** [costamare.com/industry\\_containerisation](http://costamare.com/industry_containerisation)

**[20]** [fleetmon.com](http://fleetmon.com)

**[21]** [marinetraffic.com](http://marinetraffic.com)

**[22]** [wiki.freecadweb.org/File:FEM\\_Mesh.png](http://wiki.freecadweb.org/File:FEM_Mesh.png)