



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΠΛΟΙΟΥ ΣΤΗΝ ΑΘΙΚΤΗ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΣΕ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ
ΒΛΑΒΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗ Ι. ΚΟΡΟΥΛΑΚΗ

Επιβλέπων:
Εμμανουήλ Σαμουηλίδης, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ , ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά.....	1
1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	2

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ-ΔΟΚΟΥ

2.1. Γενικά.....	4
2.2. Η φόρτωση του πλοίου και η κατασκευαστική απόκριση.....	4
2.3. Τρόποι κατασκευαστικής αστοχίας.....	13
2.4. Κατασκευαστική ανάλυση του πλοίου-δοκός.....	15
2.4.1 Προσέγγιση οριακής κατάστασης κατά το σχεδιασμό.....	16
2.4.2 Προσέγγιση οριακής μέγιστης αντοχής.....	16
2.5. Κάμψη και λυγισμός πρισματικού φορέα-κολώνας.....	17
2.6. Κάμψη και λυγισμός απλών ελασμάτων.....	22
2.7 Μορφές αστοχίας ενισχυμένων ελασμάτων.....	30
2.8 Ασύμμετρη κάμψη δοκών.....	33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΝΟΝΕΣ CSR-I.A.C.S. ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

3.1. Κριτήρια ελέγχου μέγιστης αντοχής.....	37
3.2 Υπολογισμός της μέγιστης αντοχής με την επαναληπτική μέθοδο.....	40
3.2.1 Διαδικασία.....	40
3.2.2 Προϋποθέσεις.....	43

3.2.3 Μοντελοποίηση της εγκάρσιας τομής.....	44
3.3 Καμπύλες φορτίσεων σ-ε.....	47
3.3.1 Ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα και εγκαρσίως ενισχυμένα ελάσματα.....	47
3.3.2 Γωνιακά στοιχεία.....	48
3.3.3 Ελαστοπλαστική κατάρρευση δομικών στοιχείων.....	48
3.3.4 Λυγισμός δοκού κολόνας.....	50
3.3.5 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός.....	52
3.3.6 Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού με φλάντζα.....	54
3.3.7 Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού σκέτης λάμας.....	55
3.3.8 Λυγισμός ελασμάτων.....	57

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ

4.1. Γενικά.....	58
4.2. Στοιχεία και προδιαγραφές του πλοίου.....	58
4.3. Στοιχεία και προδιαγραφές της μέσης τομής.....	59
4.3.1. Ενισχυμένα πλαίσια πυθμένα.....	62
4.3.2. Ενισχυμένα πλαίσια εσωτερικού πυθμένα.....	63
4.3.3. Ενισχυμένα πλαίσια δεξαμενής hopper tank.....	65
4.3.4. Ενισχυμένα πλευρικά πλαίσια και πλαίσια δεξαμενής t. w. tank.....	66
4.3.5. Ενισχυμένο πλαίσιο καταστρώματος.....	68
4.3.6. Ενισχυμένα πλαίσια σταθμίδων πυθμένα.....	70
4.4.7 Υπολογισμός ροπών σχεδίασης του πλοίου.....	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

5.1. Γενικά	73
-------------------	----

5.2. Βήματα της οριακής επαναληπτικής προσέγγισης.....	73
5.2.1. Βήμα 1 – Διαχωρισμός της εγκάρσιας τομής σε δομικά στοιχεία.....	74
5.2.2. Βήμα 2 – Αναλυτική μοντελοποίηση και παρουσίαση καμπυλών φόρτισης.....	75
5.2.3. Βήμα 3 – Αρχικοποίηση καμπυλότητας και ουδέτερου άξονα.....	88
5.2.4. Βήμα 4-5 - Προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα σε κάθε βήμα.....	92
5.2.5. Βήμα 6 – Υπολογισμός της ροπής κάμψης σε κάθε βήμα.....	93
5.3. Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη.....	94
5.4. Μετατόπιση θέσης ουδέτερου άξονα συναρτήσει επιβαλλόμενης καμπυλότητας.....	96
5.5. Σύγκριση της καμπύλης M-χ με το λογισμικό MARS by BV.....	100
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΣΕ ΒΕΒΛΑΜΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ	
6.1. Γενικά.....	102
6.2. Ιδιαιτερότητες.....	102
6.3. Περίπτωση Α – Βλάβη στο κατάστρωμα σε κατάσταση Hogging.....	103
6.4. Περίπτωση Β – Βλάβη στον πυθμένα σε κατάσταση Hogging.....	119
6.5. Σύγκριση καταστάσεων εξαγωγή συμπερασμάτων.....	134
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	
7.1. Γενικά.....	143
7.2. Εξαγωγή συμπερασμάτων.....	143
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Μία από τις κύριες προκλήσεις στη ναυπηγική που απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, είναι η εκτίμηση της μέγιστης καμπτικής αντοχής της γάστρας του πλοίου. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα της δομής του σκάφους σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα του θαλάσσιου περιβάλλοντος στο οποίο λειτουργεί, είναι αυτονόητο ότι ο προσδιορισμός της μέγιστης καμπτικής αντοχής, είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα μηχανικής.

Παραδοσιακά, ο προσδιορισμός της μέγιστης αντοχής της γάστρας-δοκού βασιζόταν σε εκτιμήσεις της αντοχής λυγισμού των δομικών στοιχείων, που προέρχονται από την ελαστοπλαστική θεωρία λυγισμού. Παρ'όλα αυτά, κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες από τη ναυπηγική βιομηχανία για την ανάπτυξη προσεγγίσεων σχεδιασμού βάσει οριακών καταστάσεων, αντί των παραδοσιακών προσεγγίσεων βάσει επιτρεπόμενων τάσεων για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της αντοχής των θαλάσσιων κατασκευών. Η οριακή κατάσταση ορίζεται ως η κατάσταση κατά την οποία ένα συγκεκριμένο δομικό στοιχείο ή μια ολόκληρη κατασκευαστική δομή, αποτυγχάνει να επιτελέσει τη λειτουργία της [Paik et.al., 2008]. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη οριακή αντοχή αναφέρεται στην κατάρρευση της κατασκευής λόγω απώλειας ακαμψίας και αντοχής.

Σήμερα, η προσέγγιση οριακής κατάστασης, αποτελεί μια πιο ορθολογική βάση για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση της αντοχής, σε αντίθεση με τον παραδοσιακό σχεδιασμό, ο οποίος δεν οδηγούσε κατ'ανάγκη στις πιο συμφέρουσες οικονομικά κατασκευές [Paik et.al., 2008]. Με στόχο την εναρμόνιση, η Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων (IACS), αναθεώρησε τους κανονισμούς όσον αφορά τον κατασκευαστικό σχεδιασμό, αναπτύσσοντας τους κοινούς κατασκευαστικούς κανόνες για πετρελαιοφόρα διπλού τοιχώματος και Bulk Carriers. Ταυτόχρονα, εξετάστηκε η ανάγκη για μια συνεκτική προσέγγιση σχεδιασμού οριακής κατάστασης, δεδομένου ότι οι κανόνες CSR περιλαμβάνουν προσεγγίσεις σχεδιασμού οριακής κατάστασης για την εκτίμηση της αντοχής του πλοίου-δοκού.

Με σκοπό την εκτίμηση της μέγιστης καμπτικής αντοχής της γάστρας, οι CSR έχουν υιοθετήσει δύο εναλλακτικές μεθόδους, τη Single Step και την Multi –Step μέθοδο. Η τελευταία αναφέρεται στην Οριακή Επαναληπτική Προσέγγιση. Σύμφωνα με αυτήν, η μέγιστη καμπτική αντοχή της γάστρας, ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της στατικής μη γραμμικής καμπύλης της ροπής κάμψης, συναρτήσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας (M-χ).

Αναγνωρίζοντας ότι κάθε διάμηκες στοιχείο της γάστρας παίζει σημαντικό ρόλο στην ολική αντοχή και ακαμψία της κατασκευής της γάστρας, όταν αυτή βρίσκεται υπό καθεστώς διαμηκών καμπτικών φορτίων, η οριακή επαναληπτική προσέγγιση βασίζεται στο διαχωρισμό της εγκάρσιας τομής της γάστρας σε ανεξάρτητα δομικά στοιχεία και στον προσδιορισμό των μηχανισμών αστοχίας τους. Οι μηχανισμοί αστοχίας αποτελούνται από της καμπύλες φορτίσεων για κάθε στοιχείο αντίστοιχα. Για το σκοπό αυτό, οι CSR χρησιμοποιούν απλουστευμένες σχεδιαστικές εξισώσεις που αφορούν όλους τους μηχανισμούς αστοχίας για κάθε στοιχείο ξεχωριστά. Τέτοιες μορφές αστοχίας είναι ο λυγισμός ελασμάτων, ο λυγισμός δοκού-κολόνας, ο στρεπτοκαμπτικός και ο λυγισμός κορμού του ενισχυτικού.

Η παρούσα διπλωματική έχει δύο βασικούς στόχους. Ο πρώτος είναι η αναλυτική εφαρμογή της οριακής επαναληπτικής διαδικασίας των CSR σε ένα φορηγό φορτίου χύδην 200000 tdw και ο δεύτερος είναι η τροποποίηση του αλγορίθμου της επαναληπτικής διαδικασίας και η εφαρμογή στο προαναφερθέν πλοίο, σε βεβλαμμένη κατάσταση.

1.2 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Το Κεφάλαιο 2, περιλαμβάνει μια σύντομη εισαγωγή στις τάσεις και τις φορτίσεις στις οποίες υποβάλλεται η γάστρα, παρουσιάζει τους πιθανούς μηχανισμούς αστοχίας των διαμηκών ενισχυτικών και εγκαρσώς ενισχυμένων ελασμάτων και τέλος κάνει μια αναλυτική αναφορά στο φαινόμενο της λοξής-ασύμμετρης κάμψης, το οποίο το μοντελοποιεί και μαθηματικά.

Στο κεφάλαιο 3, γίνεται μια εκτενής αναφορά στους κοινούς κανόνες κατασκευής CSR. Αρχικά αναλύονται τα κριτήρια ελέγχου μέγιστης αντοχής και όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις και στη συνέχεια πραγματοποιείται μια εις βάθος ανάλυση και παρουσίαση των διαδικασιών και προϋποθέσεων της οριακής επαναληπτικής διαδικασίας.

Στο κεφάλαιο 4 πραγματοποιείται η παρουσίαση του υπό μελέτη πλοίου, γίνεται αναφορά στα στοιχεία και τις προδιαγραφές του και στη συνέχεια στη μέση τομή του, η οποία αναλύεται σε ενισχυμένα πλαίσια για την καλύτερη και πιο αποδοτική παρουσίαση των στοιχείων της. Ακόμη στο τέλος γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί σχετικά με τις ροπές σχεδίασης του πλοίου σύμφωνα με τους κανονισμούς.

Η εφαρμογή της οριακής επαναληπτικής διαδικασίας μέσω προγράμματος σε γλώσσα Fortran, που είναι και το βασικό κομμάτι της παρούσας εργασίας, περιγράφεται στο Κεφάλαιο 5. Η εφαρμογή πραγματοποιείται για την άθικτη κατάσταση του πλοίου και περιλαμβάνει όλα τα βήματα της διαδικασίας, όπως ο διαχωρισμός της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία, ο προσδιορισμός των καθαρών διαστάσεων των στοιχείων μετά τις απαραίτητες απομειώσεις, η παρουσίαση των καμπυλών φορτίσεων για τους εκάστοτε μηχανισμούς αστοχίας και τα αναλυτικά αποτελέσματα της διαδικασίας.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η εφαρμογή του αλγορίθμου της επαναληπτικής διαδικασίας για την βεβλαμμένη κατάσταση του πλοίου. Εξετάζονται δύο ξεχωριστές περιπτώσεις βλάβης της μέσης τομής, παρατίθενται όλα τα αποτελέσματα γίνονται όλες οι απαραίτητες συγκρίσεις και εξάγονται συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ-ΔΟΚΟΥ

2.1. Γενικά

Είναι πέραν πάσης αμφιβολίας ότι το έργο της αξιολόγησης της επάρκειας της αντοχής της γάστρας-δοκού, είναι ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα της ναυπηγικής. Η πολυπλοκότητα της δομή του πλοίου, σε συνδυασμό με την πολυπλοκότητα του περιβάλλοντος της θάλασσας στο οποίο λειτουργεί, θέτει θεμελιώδεις δυσκολίες στον προσδιορισμό της φόρτισης του πλοίου και της απόκρισής του στο φορτίο αυτό. Οι στόχοι αυτού του κεφαλαίου είναι να γίνει μια σύντομη εισαγωγή στις καταπονήσεις στις οποίες υποβάλλεται η γάστρα, να συζητηθούν οι πιθανοί τρόποι αστοχίας της κατασκευής και να περιγραφούν οι προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση και αξιολόγηση της αντοχής του πλοίου-δοκού.

2.2. Η φόρτωση του πλοίου και η κατασκευαστική απόκριση

Τα διαφορετικά φορτία που ενεργούν επί του κύτους κατά τη διάρκεια ζωής του, μπορούν να ταξινομηθούν στις ακόλουθες ομάδες:

- Οι δυνάμεις του σώματος, όπως το βάρος η αδράνεια
- Η δυναμική πίεση στο κύτος του πλοίου, λόγω του κυματισμού
- Οι δυνάμεις αδρανείας που προκύπτουν από την επιτάχυνση του ρευστού (με αναφορά τόσο στη θάλασσα όσο και στα υγρά που μεταφέρονται σε δεξαμενές του πλοίου)
- Οι αδρανειακές και οι δυνάμεις απόσβεσης που προκύπτουν λόγω ακτινοβολίας κυματισμού από το πλοίο.

Εξαιρουμένων των αδρανειακών δυνάμεων, η φόρτωση του πλοίου προέρχεται από το δύο κυρίαρχα φορτία, τη βαρύτητα και την πίεση του νερού.

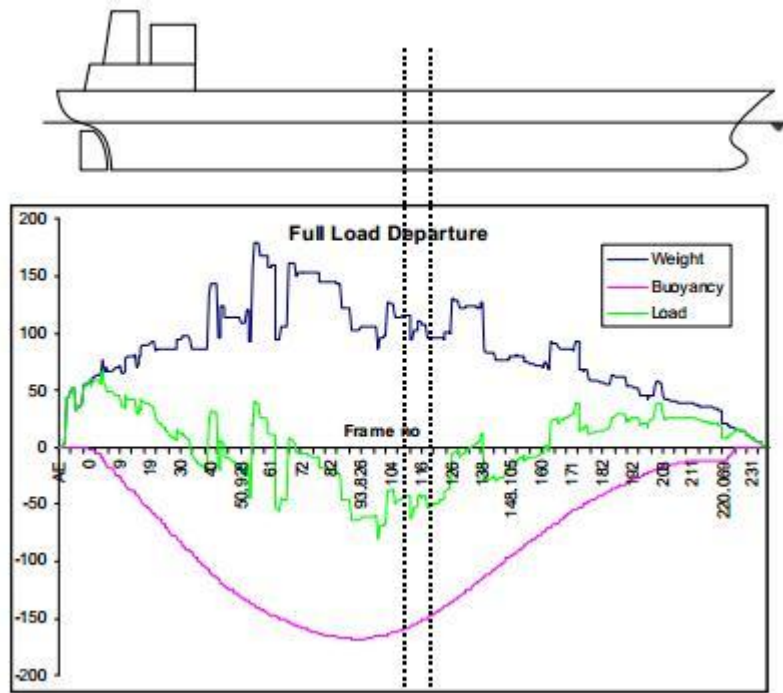
Υποθέτοντας ότι το σκάφος ενεργεί ως μία δοκός, η απόκριση της δοκού μπορεί να προσδιοριστεί με τον υπολογισμό της διαμήκου ροπής κάμψης η οποία εξετάζεται χωριστά για ήρεμο νερό (still water bending moment) και ανοιχτή θάλασσα (wave bending moment).

- *Κάμψη σε ήρεμο νερό*

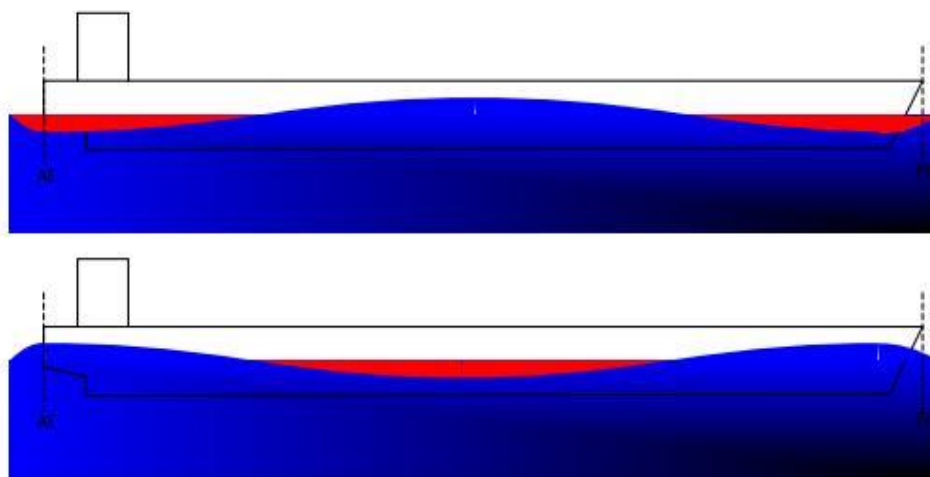
Επειδή το πλοίο ισορροπεί η συνισταμένη δύναμη του βάρους του ισούται με τη συνισταμένη δύναμη της άντωσης και το διάμηκες σημείο εφαρμογής των δύο συνισταμένων δυνάμεων βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο. Όμως οι κατανομές βάρους και άντωσης δεν είναι ομοιόμορφες και η συνισταμένη φόρτιση σε κάθε σημείο προκαλεί κάμψη του πλοίου. Αν θεωρηθεί ότι το πλοίο ισορροπεί χωρίς εγκάρσια κλίση, τότε η κάμψη περιορίζεται στο κατακόρυφο επίπεδο του [Σαμουηλίδης, 2007] (σχήμα 2.1).

- *Κάμψη σε κυματισμό*

Κατά την πρόσπτωση κυματισμών σε ένα πλοίο η καμπτική φόρτιση που δέχεται η γάστρα του καθώς και οι κατανομές των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών, μεταβάλλονται σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη σε ήρεμο νερό [Σαμουηλίδης, 2007]. Για τον υπολογισμό τους απαιτείται η χρήση των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας και ο υπολογισμός της δυναμικής φόρτισης που ασκεί η θάλασσα στη γάστρα. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις, η περίπτωση κατά την οποία οι κορυφές του κύματος ενεργούν στα άκρα του πλοίου, προκαλώντας θλίψη στο κατάστρωμα και εφελκυσμό στον πυθμένα (sagging condition) και η περίπτωση όπου η κορυφή του κύματος ενεργεί στο μέσο του πλοίου, προκαλώντας εφελκυσμό στο κατάστρωμα και θλίψη στον πυθμένα (hogging condition) (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.1 : Πλοίο κάτω από την επίδραση του βάρους του και της υδροστατικής φόρτισης



Σχήμα 2.2 : Το πλοίο στην κορυφή και στην κοιλάδα κύματος

Για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων που προκύπτουν λόγω της διαμήκου κάμψης, χρησιμοποιείται η θεωρία απλής κάμψης δοκού Bernoulli-Euler. Στο σημείο αυτό, θα ήταν είναι χρήσιμο να σημειωθούν οι υποθέσεις βάσει των οποίων εφαρμόζεται η θεωρία αυτή στις κατασκευές πλοίων:

- Οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες μετά την κάμψη
- Η δοκός είναι πρισματική (σταθερή διατομή κατά το μήκος)
- Το φαινόμενο Poisson (εγκάρσιες παραμορφώσεις) αμελείται
- Το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά
- Οι διατμητικές δυνάμεις δεν επηρεάζουν τις καμπτικές τάσεις και παραμορφώσεις

η κατανομή των ορθών τάσεων δίδεται από τον γνωστό τύπο:

$$\sigma = M \frac{y}{I} \rightarrow \sigma_{\max} = \frac{M}{SM} = \frac{M_S + M_W}{SM}$$

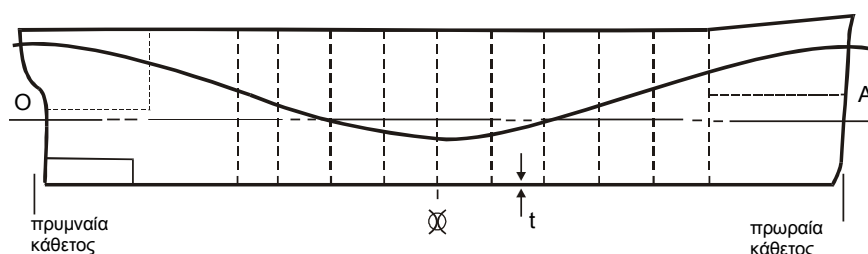
όπου σ είναι η ορθή τάση σε απόσταση y από τον ουδέτερο άξονα της διατομής I η ροπή αδρανείας της διατομής γύρω από τον ουδέτερο άξονα, $S.M.$ η ροπή αντιστάσεως της διατομής, M_S και M_W οι ροπές κάμψης σε ήρεμο νερό και κυματισμό αντίστοιχα. Εάν εξετάσουμε τις κατανομές των ορθών τάσεων που οφείλονται σε διαμήκη κάμψη, παρατηρούμε ότι για σταθερή γεωμετρία διατομής, μεγιστοποιούνται σε περιοχές όπου μεγιστοποιείται η καμπτική ροπή και η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα. Στις περισσότερες διατομές πλοίων ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται πλησιέστερα στον πυθμένα και κατά συνέπεια υψηλότερες τάσεις αναπτύσσονται στο κύριο κατάστρωμα (*main deck*). Όταν η μέση τομή συμπίπτει με κοίλο κύματος τότε οι ορθές τάσεις στο κατάστρωμα είναι θλιπτικές.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η πλέον κρίσιμη περιοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου από άποψη αντοχής είναι το κύριο κατάστρωμα στη περιοχή της μέσης τομής.

Οι ορθές τάσεις λόγω της διαμήκουσ κάμψης δεν είναι οι μοναδικές που αναπτύσσονται στα διαμήκη στοιχεία του πλοίου. Άλλες τάσεις είναι:

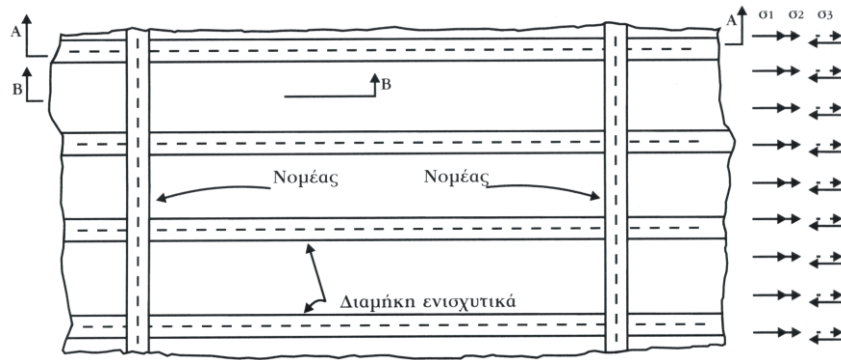
- οι διατμητικές που και αυτές προέρχονται από την κάμψη στο κατακόρυφο επίπεδο,
- αυτές που προκύπτουν από άλλες μορφές καταπόνησης του πλοίου θεωρουμένου ως δοκαριού -στρέψη, οριζόντια κάμψη,
- εξαιτίας της καταπόνησης των ενισχυμένων ελασμάτων μεταξύ των φρακτών και του περιβλήματος,
- εξαιτίας της καταπόνησης μη ενισχυμένων πλακών μεταξύ των ενισχύσεων [Σαμουηλίδης, 2007].

Οι ορθές τάσεις και οι πρώτες δύο από τις προαναφερθείσες, οφείλονται στην απόκριση του πλοίου θεωρουμένου ως δοκαριού και ονομάζονται πρωτεύουσες τάσεις. Οι πρωτεύουσες τάσεις, που οφείλονται στην διαμήκη κάμψη του πλοίου, παραμένουν σταθερές σε διατομές παράλληλες με τον ουδέτερο άξονα της διατομής (πυθμένας, καταστρώματα). Οι πρωτεύουσες τάσεις είναι συνεπώς ομοιόμορφες για κάθε διατομή που ασκούνται και γι' αυτό καλούνται και επιφανειακές τάσεις [Καρύδης, 2000].



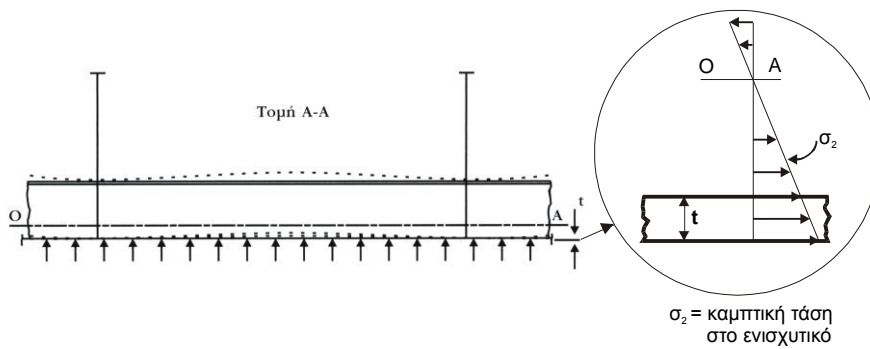
Σχήμα 2.3 : Πρωτεύουσες τάσεις

Οι τάσεις που προέρχονται από την απόκριση των ενισχυμένων ελασμάτων φορτιζομένων εγκάρσιως ονομάζονται δευτερεύουσες τάσεις [Σαμουηλίδης, 2007]. Οι δευτερεύουσες τάσεις προκύπτουν από την φόρτιση συστήματος δοκού-κολόνας (έλασμα-ενισχυτικό) με εγκάρσια φόρτιση (υπενθυμίζεται ότι η διαφορά δοκού και δοκού-κολόνας έγκειται στο ότι η δοκός δεν φέρει αξονικές φορτίσεις) [Καρύδης, 2000].



Σχήμα 2.4 : Δευτερεύουσες τάσεις

Οι τάσεις που προέρχονται από την απόκριση των ελασμάτων μεταξύ των ενισχύσεων, φορτιζομένων εγκαρσίως, ονομάζονται τριτεύουσες τάσεις [Σαμουηλίδης, 2007]. Σε απλά ελάσματα που στηρίζονται σε δοκούς κατά μήκος των πλευρών τους οι τάσεις μεταβάλλονται σε όλη την επιφάνεια και κατά το πάχος τους. Η κατανομή των τάσεων αυτών εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες και μεγιστοποιείται σε ένα σημείο ή σε ένα περιορισμένο αριθμό σημείων. Για τον λόγο αυτό οι τριτεύουσες τάσεις καλούνται και σημειακές [Καρύδης, 2000].



Σχήμα 2.5 : Τριτεύουσες τάσεις

Πρέπει να σημειωθεί ότι η πρόσθεση των τριών τάσεων που προκύπτουν, όταν έχουν την ίδια διεύθυνση, δεν έχει θεωρητική βάση διότι οι κατανομές τους κατά το πάχος των ελασμάτων είναι διαφορετικές, δεν είναι σταθερές στο χρόνο και δεν έχουν την ίδια φάση. Οι προσεγγίσεις που γίνονται για τους υπολογισμούς των πρωτευουσών, των δευτερευουσών και των τριτευουσών τάσεων δίνουν αποτελέσματα διαφορετικής ακρίβειας. Παρόλα αυτά το άθροισμα των τριών μέγιστων τάσεων χρησιμοποιείται σε κάποιες περιπτώσεις για τον έλεγχο των τάσεων που αναπτύσσονται στη γάστρα [Σαμουηλίδης, 2007].

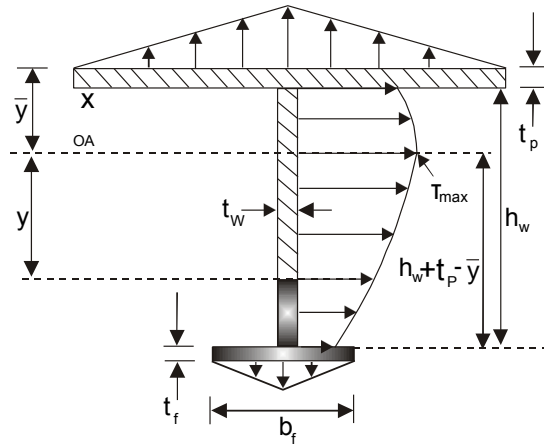
Άμεσο αποτέλεσμα είναι η απόκλιση από τη θεωρία απλής κάμψης επειδή οι αξονικές παραμορφώσεις στη διατομή δεν ακολουθούν τη γραμμική κατανομή καθ' ύψος και δεν είναι σταθερές κατά το πλάτος του πλοίου. Τέτοιες αποκλίσεις συμβαίνουν στα ελεύθερα άκρα ασυνεχών κατασκευαστικών στοιχείων και σε στοιχεία με μη πλήρη μεταξύ τους συνεργασία. Άλλοι λόγοι είναι η υστέρηση διάτμησης (shear lag) και οι σχετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις [Σαμουηλίδης, 2007].

➤ *Συνεργασία στοιχείων κατασκευής*

Για να υπάρχει πλήρης συνεργασία των στοιχείων της κατασκευής κατά την κάμψη, πρέπει οι ενώσεις μεταξύ τους να δύναται να μεταφέρουν τις διατμητικές τάσεις χωρίς ολίσθηση έτσι ώστε να διατηρείται η γραμμική κατανομή των παραμορφώσεων καθ' ύψος. Η απαίτηση αυτή πληρείται όταν τα στοιχεία είναι συγκολλημένα μεταξύ τους [Σαμουηλίδης, 2007].

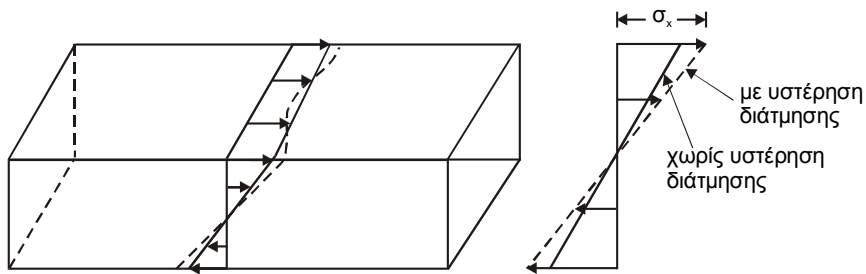
➤ *Υστέρηση διάτμησης*

Σε κάθε λεπτότοιχο δοκάρι που κάμπτεται σε ένα επίπεδο συμμετρίας του όπως στο σχήμα 2.6 το φορτίο ισορροπείται από τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο κορμό και οι οποίες προκαλούν τις αξονικές παραμορφώσεις σε αυτόν. Η αξονική παραμόρφωση μεταφέρεται στα πέλματα μέσω διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις ακμές όπου τα πέλματα ενώνονται με τον κορμό [Σαμουηλίδης, 2007]. Όμως οι επίπεδες διατμητικές τάσεις στο πέλμα δεν είναι ομοιόμορφες κατά το πλάτος του (βλέπε σχήμα 2.6) και έτσι η διατομή του πέλματος δεν παραμένει επίπεδη με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα του να φέρει αξονικές τάσεις όπως αυτές προβλέπονται από την απλή θεωρία της κάμψης.



Σχήμα 2.6 : Κανονική κατανομή τάσεων σε διατομή Τα

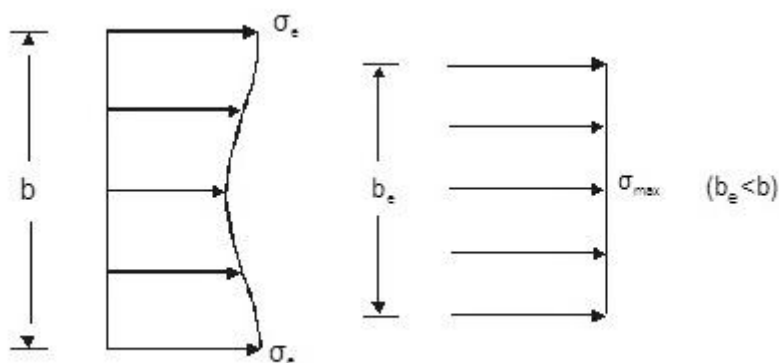
Το φαινόμενο αυτό καλείται υστέρηση διάτμησης, και εμφανίζεται σε διατομές για τις οποίες οι καμπτικές ακαμψίες των στοιχείων τους διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους [Καρύδης, 2000]. Η επίδραση της υστέρησης διάτμησης σε κοίλες δοκούς φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Η κατανομή των ορθών τάσεων σύμφωνα με την απλή θεωρία των δοκών δίνεται από τις συνεχείς γραμμές, ενώ η αντίστοιχη κατανομή, λαμβάνοντας υπόψη την υστέρηση διάτμησης δίνεται από τις διακεκομμένες γραμμές.



Σχήμα 2.7 : Υστέρηση διάτμησης σε κοίλες δοκούς

Το αποτέλεσμα της υστέρησης διάτμησης είναι η μετατροπή των κατανομών των ορθών τάσεων από γραμμικές (σταθερές) σε μη-γραμμικές [Καρύδης, 2000]. Για να υπολογισθεί η απόκλιση των πραγματικών κατανομών από τις αντίστοιχες γραμμικές εισάγεται η έννοια του ισοδύναμου πλάτους ελάσματος σε κάμψη.

Ορίζεται ως ισοδύναμο πλάτος ορθογώνιου ελάσματος που φορτίζεται σε διάτμηση στο επίπεδό του κατά μήκος των πλευρών, το πλάτος υποθετικού ελάσματος που φορτίζεται ομοιόμορφα, έχει το ίδιο πάχος, υπόκειται στην ίδια μέγιστη τάση και φέρει το ίδιο συνολικό φορτίο όπως και το πραγματικό [Καρύδης, 2000].



Σχήμα 2.8 : Ισοδύναμο πλάτος ελάσματος σε κάμψη

➤ *Σχετικές κατακόρυφες μετατοπίσεις*

Έστω δύο δοκοί ορθογωνικής διατομής, ένας συμπαγής και ένας κοίλος που και οι δύο υπόκεινται σε καμπτικά φορτία εφαρμοζόμενα στη μία επιφάνειά τους. Στην περίπτωση του συμπαγούς δοκαριού η διατομή δεν παραμορφώνεται και η μετατόπιση όλων των σημείων της είναι σταθερή. Η συμπεριφορά του κοίλου δοκαριού είναι διαφορετική. Στο κοίλο δοκάρι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των σημείων του κατά μήκος μιας εγκάρσιας τομής του δεν είναι ίσες. Η καμπύλωση αυτή των ελασμάτων προκαλεί διαφορετικές αξονικές δυνάμεις σε σημεία που ισαπέχουν από τον ουδέτερο άξονα της διατομής και απομακρύνει την πραγματική απόκριση από την απλή θεωρία της κάμψης [Σαμουηλίδης, 2007].

2.3. Τρόποι κατασκευαστικής αστοχίας

Κατάρρευση της κατασκευής επέρχεται όταν δεν μπορεί πια να αντέξει τα φορτία που της επιβάλλονται και σαν αποτέλεσμα αυτού δεν μπορεί πια να εκτελέσει την αποστολή της. Η κατάρρευση ενός δομικού στοιχείου μπορεί να προκαλέσει ανακατανομή των τάσεων, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει θέμα ασφαλείας της κατασκευής. Εάν όχι, τότε λαμβάνει χώρα ένα φαινόμενο τύπου ντόμινο με τα γειτονικά στοιχεία να καταρρέουν το ένα μετά το άλλο με τελικό αποτέλεσμα την αστοχία όλης της κατασκευής. Για το πλοίο-δοκός τέσσερις κύριοι τρόποι κατάρρευσης μπορούν να διακριθούν:

- *Αστοχία του υλικού λόγω υπέρβασης της τάσης διαρροής (Direct failure)*

Συμβαίνει όταν η τάση σε ένα δομικό στοιχείο ξεπερνά ένα όριο με αποτέλεσμα μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του στοιχείου. Αυτό το όριο ονομάζεται όριο διαρροής. Σε κάποιο ακόμα υψηλότερο σημείο τάσεως (ultimate stress) συμβαίνει θραύση του υλικού.

- *Αστάθεια σε Λυγισμό (Buckling)*

Ο λυγισμός σαν φαινόμενο γενικά προκύπτει όταν ασκείται θλιπτική φόρτιση στις κύριες ή συνεπίπεδες αξονικές διευθύνσεις ενός κατασκευαστικού στοιχείου ή μιας μεταλλικής κατασκευής. Όταν το κέντρο εφαρμογής του φορτίου δεν συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής και η κατασκευή έχει αρχικές γεωμετρικές ατέλειες (συνθήκες που ικανοποιούνται πάντα), τότε για μία δεδομένη αύξηση της φόρτισης θα παρατηρηθεί μια ξαφνική αλλαγή της μορφής της κατασκευής. Το φορτίο που προκαλεί το λυγισμό, είναι χαρακτηριστικό της γενικής μορφής της κατασκευής, της γεωμετρίας της, των συνθηκών έδρασης και του υλικού. Ο λυγισμός προκαλεί μόνιμες μεταβολές στη γεωμετρία της κατασκευής και στο ελαστικό αλλά και στο ελαστο-πλαστικό πεδίο [Καρύδης, 2000].

➤ *Κόπωση (Fatigue)*

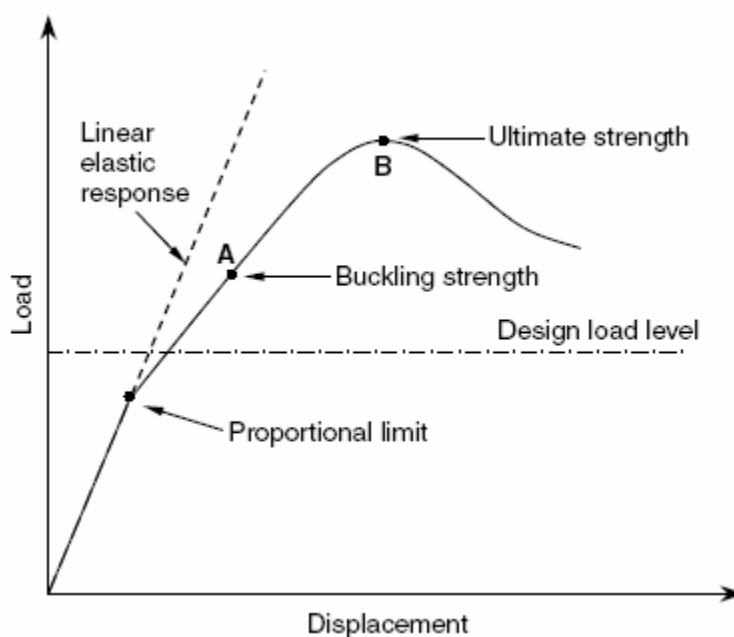
Όταν ένα δομικό στοιχείο υπόκειται σε εναλλασσόμενη φόρτιση, είναι δυνατή η αστοχία μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό εναλλαγών. Όσο μικρότερη είναι η επιβαλλόμενη τάση, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των εναλλαγών πριν σημειωθεί η θραύση. Στη ναυπηγική ενδιαφέρουν κυρίως δύο τύποι θραύσης, η κόπωση υψηλής συχνότητας και χαμηλής τάσης και η κόπωση χαμηλής συχνότητας και υψηλής τάσης. Ο πρώτος τύπος κόπωσης χαρακτηρίζει κυρίως στοιχεία κατασκευών που υπόκεινται σε γρήγορη εναλλαγή φορτίων (π.χ. περιοχές κοντά στην έλικα, μηχανήματα), ενώ ο δεύτερος χαρακτηρίζει κυρίως περιοχές κοντά σε ασυνέχειες της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου [Παπάζογλου, 1995].

➤ *Θραύση (Brittle fracture-Cracking)*

Η θραύση, είναι η ξαφνική διεύρυνση ενός crack το οποίο επεκτείνεται διαμέσου ενός κύριου τμήματος της κατασκευής. Το αρχικό crack είναι, συνήθως, αποτέλεσμα κακού σχεδιασμού ή κατασκευαστικής πρακτικής. Η κόπωση του υλικού συνήθως παίζει μεγάλο ρόλο στην αρχική δημιουργία του crack. Ο έλεγχος κατάρρευσης λόγω θραύσεως περιλαμβάνει ένα συνδυασμό κριτηρίων σχεδιασμού και επιθεώρησης με στόχο την εξάλειψη συγκεντρώσεων τάσεων και την επιλογή τύπων χάλυβα με ισχυρή αντίσταση στη διάδοση της θραύσεως, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες [Παπάζογλου, 1995].

2.4. Κατασκευαστική ανάλυση του πλοίου-δοκός

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια από την ναυπηγική βιομηχανία να αναπτυχθούν οριακές προσεγγίσεις (limit state design) σε σχέση με την παραδοσιακή προσέγγιση επιτρεπόμενης τάσης για το σχεδιασμό και υπολογισμό της αντοχής του σκάφους. Παραδοσιακά ο σχεδιασμός του πλοίου βασιζόταν στον υπολογισμό της τάσης λυγισμού των διάφορων δομικών στοιχείων με διόρθωση για την πλαστική περιοχή [Paik et.al., 2008] (σημείο A σχήματος 2.9).



Σχήμα 2.9 : Κατασκευαστικός σχεδιασμός

Ο στόχος ήταν να κρατηθούν οι τάσεις κάτω από ένα αποδεκτό επίπεδο το οποίο βασιζόταν σε προηγούμενη εμπειρία και έρευνα. Το αποτέλεσμα ήταν συνήθως να μη λαμβάνεται υπόψη η μεταλυγισμική συμπεριφορά του υλικού ούτε η μέγιστη αντοχή αυτού. Σήμερα οι διάφοροι οργανισμοί αναγνωρίζουν το γεγονός ότι η οριακή προσέγγιση είναι μία καλύτερη μέθοδος σχεδιάσεως και υπολογισμού και σαφώς οικονομικότερη [Paik et.al., 2008].

2.4.1 Προσέγγιση οριακής κατάστασης κατά το σχεδιασμό

Οριακή κατάσταση ορίζεται ως η κατάσταση στην οποία ένα συγκεκριμένο δομικό στοιχείο ή μια ολόκληρη κατασκευή αποτυγχάνει να επιτελέσει τη λειτουργία της . Από τη σκοπιά του μηχανικού, τέσσερις τύποι οριακών καταστάσεων λαμβάνονται υπόψη για τις χαλύβδινες κατασκευές :

- **Οριακή κατάσταση λειτουργικότητας** - αντιπροσωπεύει την αστοχία υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.
- **Οριακή κατάσταση κόπωσης** - κόπωση είναι η αστοχία από επιβαλλόμενη εναλλασσόμενη φόρτιση . Παραδείγματα αυτού του τύπου φόρτισης σε θαλάσσιες κατασκευές είναι οι εναλλασσόμενες τάσεις που συνδέονται με το κυματισμό, κραδασμοί και ταλαντώσεις και εναλλασσόμενες φορτίσεις λόγω ανέμου.
- **Οριακή κατάσταση ατυχήματος** - Σύγκρουση , φωτιά , έκρηξη , πεσμένο αντικείμενο , κλπ. αντιπροσωπεύει μεγάλες κατασκευαστικές βλάβες που προκλήθηκαν από ατυχήματα όπως συγκρούσεις , φωτιά , έκρηξη , κλπ.
- **Οριακή κατάσταση μέγιστης αντοχής** - μέγιστη συμπεριφορά αντοχής . αναφέρεται στην αστοχία της κατασκευής, κατά συνέπεια η διατομή δεν έχει πλέον τη δυνατότητα να φέρει τα καμπτικά φορτία [Paik et.al., 2008].

2.4.2 Προσέγγιση οριακής μέγιστης αντοχής

Ο σκοπός αυτής της προσέγγισης και σχεδιασμού, είναι να αξιολογήσει τη μέγιστη ικανότητα παραλαβής και επιβολής φορτίων της κατασκευής και να υπολογίσει τα πραγματικά περιθώρια ασφαλείας συγκρίνοντας τη μέγιστη αντοχή της κατασκευής, με τη μέγιστη φορτωτική κατάσταση στην οποία αυτή θα υποβληθεί [Paik et.al., 2008].

Design Demand (D_d) \leq Design Capacity (C_d)

$$\gamma_o \cdot \sum D_{ki} (F_{kir} \gamma_{fi}) \leq C_k / \gamma_M \text{ or}$$

$$\gamma_o \cdot \sum D_{ki} (F_{kir} \gamma_{fi}) \leq C_k / (\gamma_m \cdot \gamma_c)$$

όπου

$\sum D_d$: ομοιογενείς απαιτήσεις που δύνανται να προστεθούν

γ_o : συντελεστής ασφαλείας ο οποίος λαμβάνει υπόψη την σοβαρότητα έκαστου στοιχείου της κατασκευής

C_k : μέτρο ικανότητας κατασκευής

γ_M : συντελεστής ασφαλείας που σχετίζεται με την παραλαβή φορτίων

γ_m : συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες λόγω ιδιαιτεροτήτων του υλικού.

γ_c : συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες λόγω ποιότητας κατασκευής, διάβρωσης

2.5. Κάμψη και λυγισμός πρισματικού φορέα-κολώνας

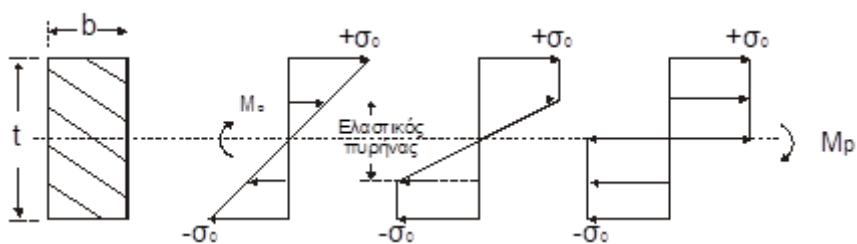
Κάμψη

Η απόκριση και συμπεριφορά πρισματικών διατομών υπό καμπτικές, θλιπτικές αλλά και σύνθετες φορτίσεις, είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στη μελέτη και την ανάλυση της αντοχής των κατασκευών που υποβάλλονται σε φορτίσεις. Η μελέτη στρέφεται στο πρόβλημα της δοκού με ορθογώνια διατομή η οποία στηρίζεται στα άκρα της και η οποία φέρει στατική φόρτιση που μπορεί να είναι κατανεμημένη ή και σημειακή και η οποία ασκείται εγκάρσια στη δοκό [Καρύδης, 2000]. Οι γενικές παραδοχές όσον αφορά στη γραμμική μεταβολή των παραμορφώσεων από τον ουδέτερο άξονα ισχύουν και

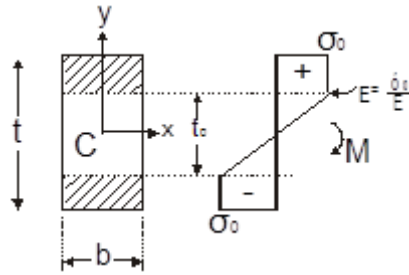
στην ελαστο-πλαστική περιοχή (όχι βέβαια το ίδιο και για τις τάσεις). Ο προσδιορισμός του ελαστικού ορίου αποτελεί το πρώτο στάδιο ανάλυσης των δοκών στην ελαστο-πλαστική περιοχή. Η κατανομή των τάσεων που αντιστοιχούν στο ελαστικό όριο περιλαμβάνεται στο Σχήμα 2.9 (στάδιο 1). Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται το γενικά αποδεκτό μοντέλο συμπεριφοράς δοκού στην ανελαστική (ελαστο-πλαστική) περιοχή (στάδιο 2), το οποίο βασίζεται στις παραδοχές της μηχανικής θεωρίας των δοκών.

Καθώς αυξάνεται το φορτίο, μετά το όριο διαρροής στις εξωτερικές ίνες παύει να αυξάνεται η τάση, και οι πλαστικές περιοχές που αναπτύσσονται επεκτείνονται προς τον ουδέτερο άξονα αλλά και κατά μήκος των ινών της δοκού. Ο τρόπος επέκτασης των πλαστικών περιοχών εξαρτάται πάντοτε από τη σημειακή τάση σε κάθε ίνα και εξαρτάται σε κάθε περίπτωση από τη γεωμετρία, τις οριακές συνθήκες και την κατανομή του επιβαλλόμενου φορτίου. Γενικά όμως η επέκταση των πλαστικών περιοχών συνοδεύεται από σταδιακά μεγαλύτερες μετατοπίσεις για την ίδια αύξηση φορτίου, καθώς οι πλαστικές περιοχές δεν συμβάλλουν πλέον στην παραλαβή μεγαλύτερων φορτίων. Καθώς λοιπόν ελαττώνεται σταδιακά η ωφέλιμη διατομή της δοκού, ελαττώνεται και η καμπτική της ακαμψία. Όταν δε φθάσει στο όριο της πλαστικής άρθρωσης, (στάδιο 3 του σχήματος), η διατομή δεν είναι πλέον σε θέση να παραλάβει άλλο φορτίο και καταρρέει [Καρύδης, 2000].

Στα ενδιάμεσα στάδια της ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς (στάδιο 2), διακρίνονται δύο περιοχές της διατομής, τις πλαστικές περιοχές που βρίσκονται κοντά στις εξωτερικές ίνες και την ελαστική περιοχή που περιβάλλει τον ουδέτερο άξονα και που καλείται ελαστικός πυρήνας της διατομής. Για το τμήμα της διατομής που είναι πάνω από τον ουδέτερο άξονα (από την πλευρά δηλαδή στην οποία ασκούνται οι εξωτερικές φορτίσεις) οι παραμορφώσεις και οι αντίστοιχες τάσεις είναι θλιπτικές, ενώ κάτω από τον ουδέτερο άξονα οι τάσεις είναι εφελκυστικές, όπως δηλαδή και στην ελαστική περιοχή [Καρύδης, 2000].



α) Ελαστικό όριο β) Ελαστο-πλαστικό πεδίο γ) Κατάρρευση



Σχήμα 2.9 : Καμπτική συμπεριφορά ορθογώνιας δοκού στην ελαστο-πλαστική περιοχή

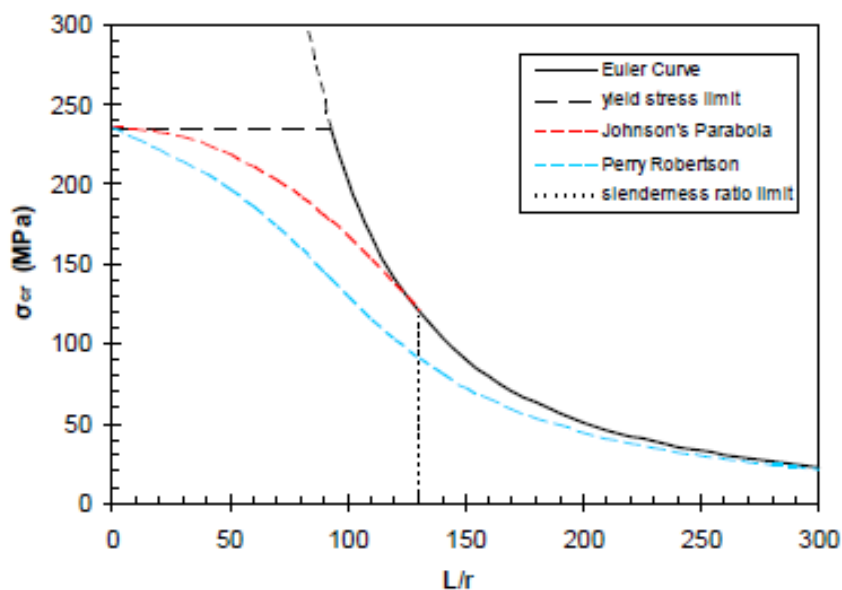
Λυγισμός

Κολόνες ή υποστυλώματα (columns) συναντώνται σε όλες γενικά τις ναυπηγικές κατασκευές. Η θεωρία της κολόνας (column theory) και της δοκού –κολόνας (beam-column) μπορεί να βρει εφαρμογή και στην προσομοίωση των ενισχυμένων ελασμάτων. Αυτό είναι δυνατό διότι οι διαστάσεις των ενισχυμένων ελασμάτων είναι τέτοιες, ώστε η κατάρρευσή τους κατά κανόνα να ακολουθεί το μηχανισμό κατάρρευσης των πρισματικών φορέων. Προκύπτει δηλαδή ολικός λυγισμός. Αυτό συμβαίνει διότι ο τοπικός λυγισμός των διαφόρων στοιχείων που απαρτίζουν το ενισχυτικό αποφεύγεται με κατάλληλη διαστασιολόγησή τους [Καρύδης, 2000].

Εφόσον λοιπόν δεν παρουσιάζονται φαινόμενα τοπικού λυγισμού, η κατάρρευση είναι γενική και προκύπτει μεταξύ των σημείων στήριξης των άκρων στους νομείς. Κατά συνέπεια η θεωρία των δοκών-κολόνων βρίσκει πολύ πιο εκτεταμένη εφαρμογή απ’ ότι αρχικά διαφαίνεται. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι πιο εύχρηστη από τη θεωρία των ελασμάτων. Η συμπεριφορά των κολόνων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας όμως από τους σημαντικότερους είναι το μήκος, ιδιαίτερα σε σχέση με το μέγεθος της εγκάρσιας επιφάνειας και τη μορφή της. Έτσι, εάν σε μία κολόνα σταθερής διατομής αυξήσουμε το μήκος της, παρατηρούμε ότι το φορτίο που μπορεί να παραλάβει ελαττώνεται. Εάν επιχειρήσουμε να αυξήσουμε το φορτίο πέραν του φορτίου λυγισμού παρατηρούμε ότι αυτό δεν είναι εφικτό. Η μαθηματική θεωρία της συμπεριφοράς των κολόνων ξεκίνησε το 18ο αιώνα, οπότε προτάθηκε η εξίσωση ελαστικού λυγισμού (Euler) [Καρύδης, 2000]:

$$P_{cr} = C \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Η γραφική παράσταση της δίνεται στο σχήμα 2.10 Στη σχέση αυτή, P_{cr} είναι το (κρίσιμο) φορτίο ελαστικού λυγισμού, E είναι το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity ή Young's modulus), I είναι η ροπή αδράνειας (moment of inertia) της εγκάρσιας διατομής περί τον άξονα κάμψης, l είναι το μήκος της κολόνας και C είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον τρόπο στήριξης των άκρων. (Σχήμα 2.11)



Σχήμα 2.10 : Καμπύλη Euler και καμπύλες ελαστοπλαστικού σχεδιασμού ισοτροπικών πρισματικών φορέων.

Εάν δηλαδή η κολόνα πακτωθεί στα δύο άκρα, τότε αυξάνεται η τιμή C , καθώς αυξάνεται και η τάση λυγισμού ($\sigma_{cr}=P_{cr}/A$). Η παραπάνω σχέση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση των μακριών διατομών. Όταν όμως ελαττωθεί η λυγηρότητα της κολόνας, παρατηρείται σταδιακή απόκλιση από τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, καθώς η σχέση δίνει τιμές στο φορτίο λυγισμού πολύ υψηλότερες απ' αυτές που παρατηρούνται στην πράξη. Αυτό οφείλεται στο ότι η κολόνα παύει να είναι ελαστική και αρχίζουν να αναπτύσσονται πλαστικές ζώνες σε κρίσιμα σημεία της. Αυτές δεν συμβάλλουν στην μεταφορική ικανότητα της διατομής και έτσι το ωφέλιμο εμβαδόν της διατομής ελαττώνεται. Για το λόγο αυτό, το μεταφερόμενο φορτίο είναι μικρότερο από το αναμενόμενο, ενώ καθώς επεκτείνονται οι πλαστικές ζώνες η απόκλιση των δύο γίνεται ακόμα μεγαλύτερη [Καρούδης, 2000].

Έτσι έχουν προταθεί ορισμένες σχέσεις που περιγράφουν τον ελαστοπλαστικό λυγισμό πρισματικών φορέων, όπως η εξίσωση Perry Robertson και η παραβολή του Johnson, οι γραφικές απεικονίσεις των οποίων φαίνονται επίσης στο διάγραμμα του Σχήματος 2.10, ενώ οι μαθηματικές τους εκφράσεις δίνονται στη συνέχεια.

- Εξίσωση Perry Robertson:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{1}{2}[\sigma_y + (1+\eta)\sigma_E] - \sqrt{\frac{1}{4}[\sigma_y + (1+\eta)\sigma_E]^2 - \sigma_y\sigma_E}$$

Όπου: σ_y η τάση διαρροής του υλικού

σ_E η κρίσιμη τάση ελαστικού λυγισμού κατά Euler

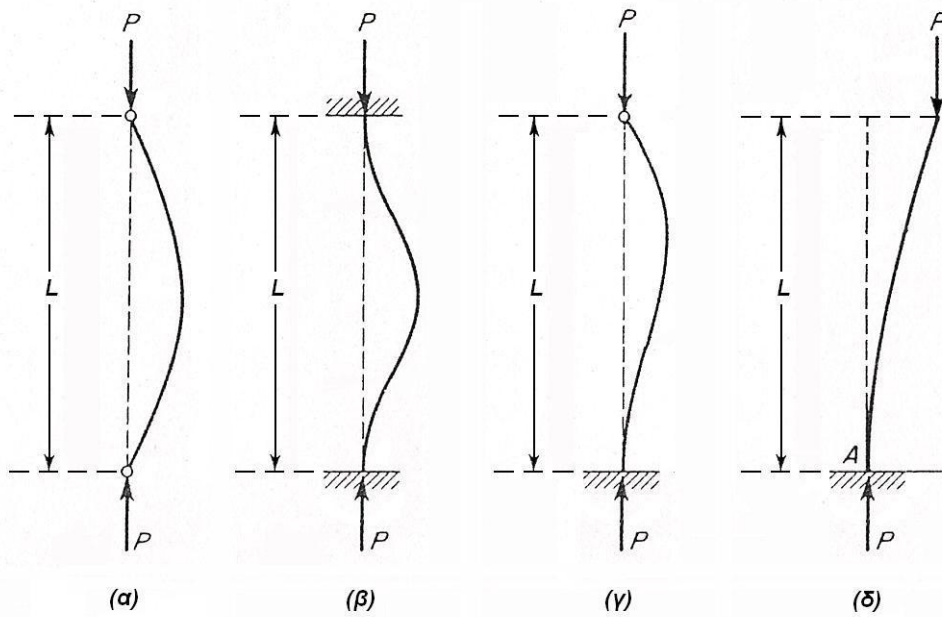
$\eta = 0.003 (L/r)$ γεωμετρικός συντελεστής της διατομής

- Παραβολή του Johnson:

$$\text{για } \sigma_E \leq \frac{\sigma_y}{2} : \sigma_{\alpha} = \sigma_E$$

$$\text{για } \sigma_E > \frac{\sigma_y}{2} : \sigma_{\alpha} = \sigma_y \left(1 - \frac{\sigma_y}{4 \cdot \sigma_E} \right)$$

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 2.10, η εξίσωση Perry Robertson λαμβάνει υπόψη την πλαστική συμπεριφορά των φορέων κάθε βαθμού λυγηρότητας, ενώ η παραβολή του Johnson κάνει το ίδιο μόνο για φορείς με βαθμό λυγηρότητας μικρότερο από ένα συγκεκριμένο όριο ($L / r < 130$ περίπου για το ναυπηγικό χάλυβα), δίνοντας έτσι λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα.



Σχήμα 2.11 Περιπτώσεις συντοριακών συνθηκών λυγισμού δοκών.

2.6. Κάμψη και λυγισμός απλών ελασμάτων

Κάμψη

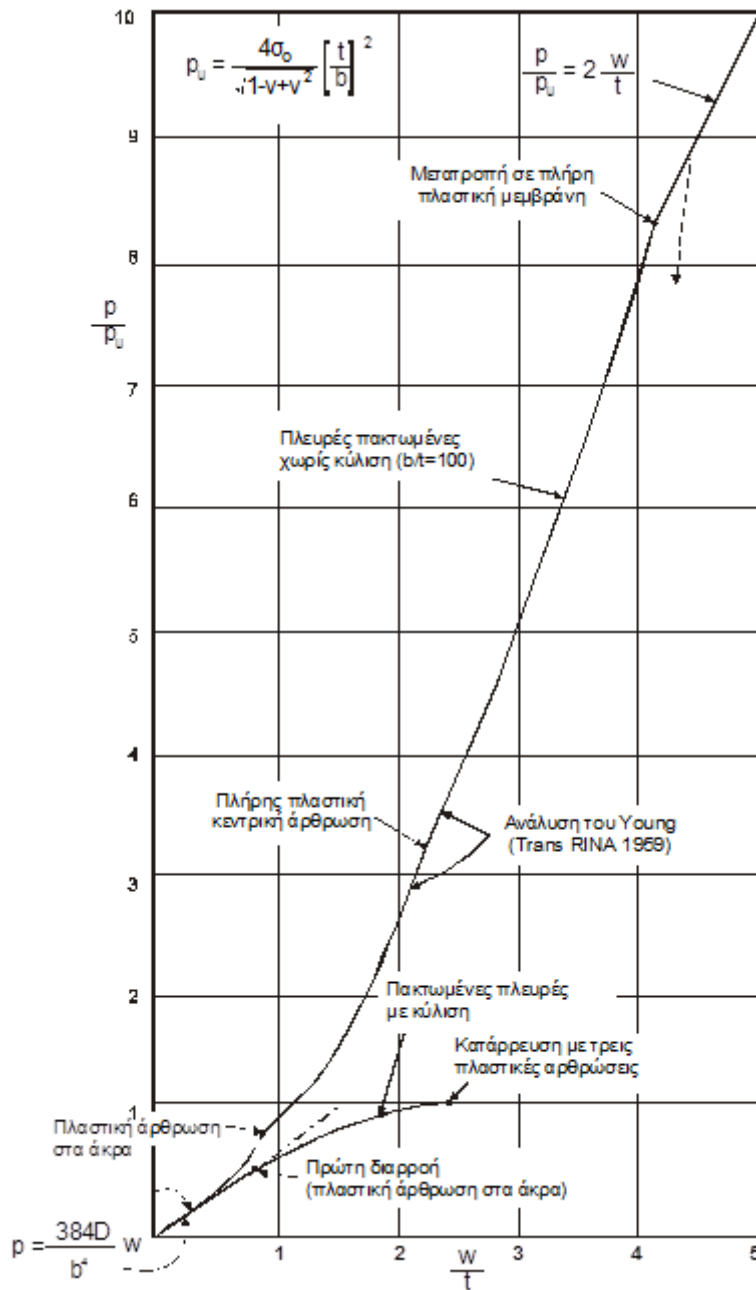
Όταν ασκούνται καμπτικές φορτίσεις (π.χ. υδροστατική πίεση) το έλασμα που στηρίζεται σε ενισχυτικά (stiffeners) και ζυγά (transverse) κάμπτεται και αναπτύσσονται τάσεις στις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις. Κατά κανόνα οι εξωτερικές φορτίσεις δεν είναι αρκετά υψηλές, ώστε να προκαλέσουν κατάρρευση ή εκτεταμένη πλαστική παραμόρφωση. Οι περιοχές του πλοίου που παραλαμβάνουν μόνο καμπτικές φορτίσεις είναι κυρίως οι εγκάρσιες φρακτές. Επειδή σ' αυτές δεν ασκούνται θλιπτικές φορτίσεις, μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την αντοχή του ελάσματος και στη μη γραμμική περιοχή, όταν δηλαδή αρχίζουν να αναπτύσσονται και μεμβρανικές τάσεις, καθότι δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού.

Εάν επιλέξουμε αυτό το κριτήριο σχεδιασμού, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πιο λεπτά ελάσματα και συνεπώς η κατασκευή μας θα είναι ελαφρύτερη. Όμως η τυχόν επιβολή φόρτισης μεγαλύτερη της αναμενόμενης ή η σταδιακή χειροτέρευση της κατάστασης του ελάσματος λόγω διάβρωσης προκαλούν την αύξηση των τάσεων.

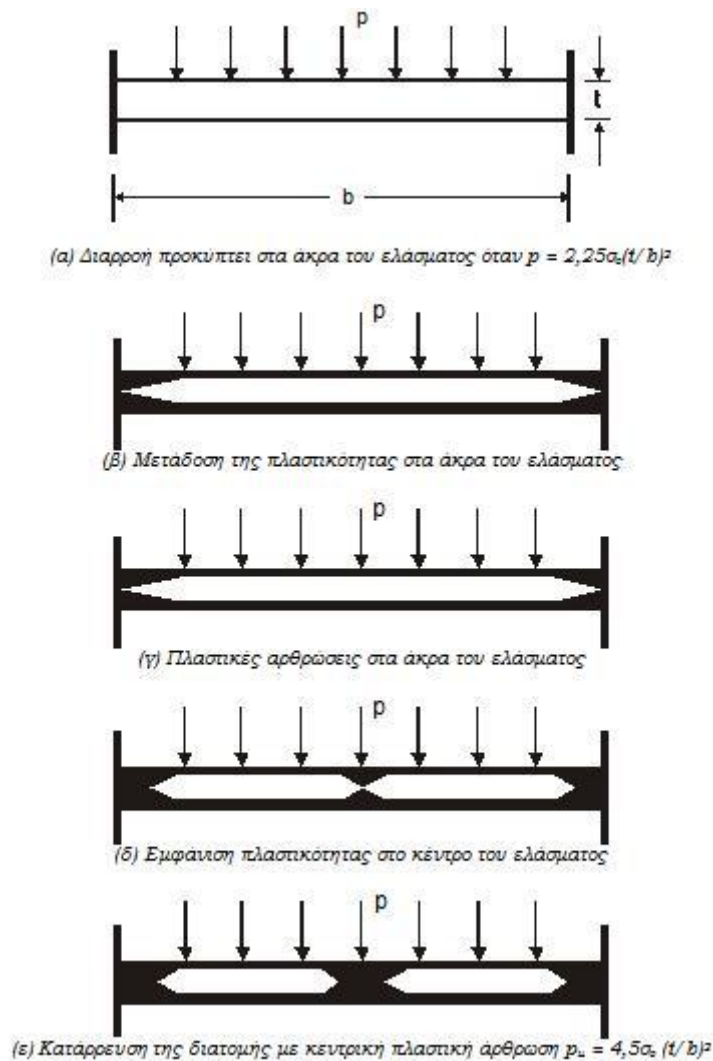
Κατά συνέπεια είναι πιθανόν να προκύψει πλαστικοποίηση σε κάποιο σημείο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το έλασμα πρόκειται να καταρρεύσει άμεσα. Το σχήμα 2.12 δείχνει πως τελική κατάρρευση του ελάσματος προκύπτει όταν η παραμόρφωση σε κάποιο σημείο του οδηγήσει στην γένεση ρήγματος σε πολύ υψηλότερες τάσεις, μετά την μετατροπή του σε πλήρη πλαστική μεμβράνη. Η πρώτη προσέγγιση σε συμπεριφορά των απλών ελασμάτων υπό καμπτικές φορτίσεις επιτυγχάνεται με χρήση της θεωρίας δοκών [Gordo, 2004].

Στο επόμενο στάδιο εξετάζεται η συμπεριφορά των μακριών ελασμάτων, που διαφέρουν από τις δοκούς στο ότι αναπτύσσουν και εγκάρσιες τάσεις. Στα μακριά ελάσματα οι ορθές τάσεις και στις δύο κατευθύνσεις παραμένουν σταθερές σε όλο το μήκος τους. Στα πραγματικά ελάσματα όμως τα οποία έχουν πεπερασμένες διαστάσεις, τα εντατικά πεδία μεταβάλλονται κατά μήκος και των ορθογωνίων κατευθύνσεων [Gordo, 2004].

Στο σχήμα 2.13 παρουσιάζεται η κατανομή των πλαστικών ζωνών σε εγκάρσια τομή ελασμάτων υπό κατανεμημένη φόρτιση. Αρχικά η πλαστικοποίηση εμφανίζεται στα πακτωμένα άκρα, μέχρις ότου αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις. Σε υψηλότερα όμως φορτία το έλασμα πλαστικοποιείται και στο κέντρο, οπότε καταρρέει, εφόσον βέβαια επιτρέπεται η κύλιση των άκρων. Στο σχήμα 2.12 φαίνεται η μεταβολή των μετατοπίσεων καθώς αυξάνεται το φορτίο.



Σχήμα 2.12 : Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για μακριά πακτωμένα ελάσματα υπό ομοιόμορφη κατανομημένη φόρτιση



Σχήμα 2.13 : Μετάδοση πλαστικότητας σε μακρύ έλασμα (πακτωμένο με κύλιση των άκρων)

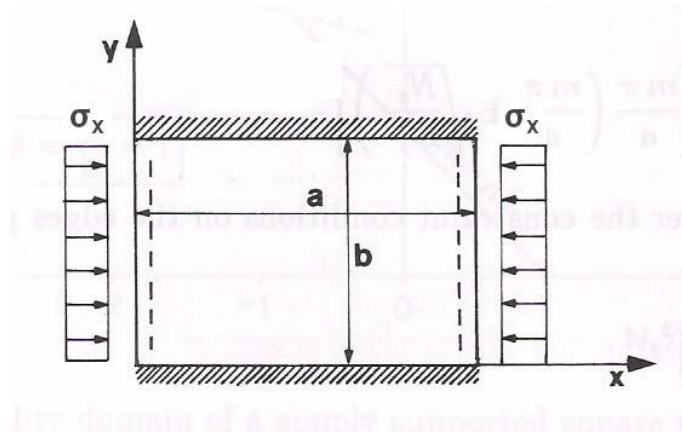
Λυγισμός

Στην περίπτωση μονοαξονικής, συνεπίπεδης, ομοιόμορφης, θλιπτικής φόρτισης ισοτροπικών πλακών διαφόρων συνοριακών συνθηκών με διαστάσεις $(a \times b)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.14 και πάχος t , το κρίσιμο φορτίο (τάση) ελαστικού λυγισμού μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης του Bryan:

$$\sigma_x = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot D}{b^2 \cdot t}$$

όπου: $D = E \cdot t^3 / [12 \cdot (1 - \nu^2)]$

είναι η καμπτική δυσκαμψία της πλάκας. k είναι ο συντελεστής λυγισμού που εξαρτάται από το λόγο πλευρών και δίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 2.15 για διάφορες περιπτώσεις συντοριακών συνθηκών. ν είναι ο λόγος poisson του υλικού (0.3 για ναυπηγικό χάλυβα).



Σχήμα 2.14 : Πλάκα υπό μονοαξονική, συνεπίπεδη, ομοιόμορφη, θλιπτική φόρτιση.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.15, ο διαχωρισμός των διαφόρων περιπτώσεων ως προς τις συντοριακές συνθήκες των αφόρτιστων πλευρών της εκάστοτε υπό εξέταση πλάκας έχει ως εξής:

Περίπτωση A : Και οι δύο αφόρτιστες πλευρές πακτωμένες.

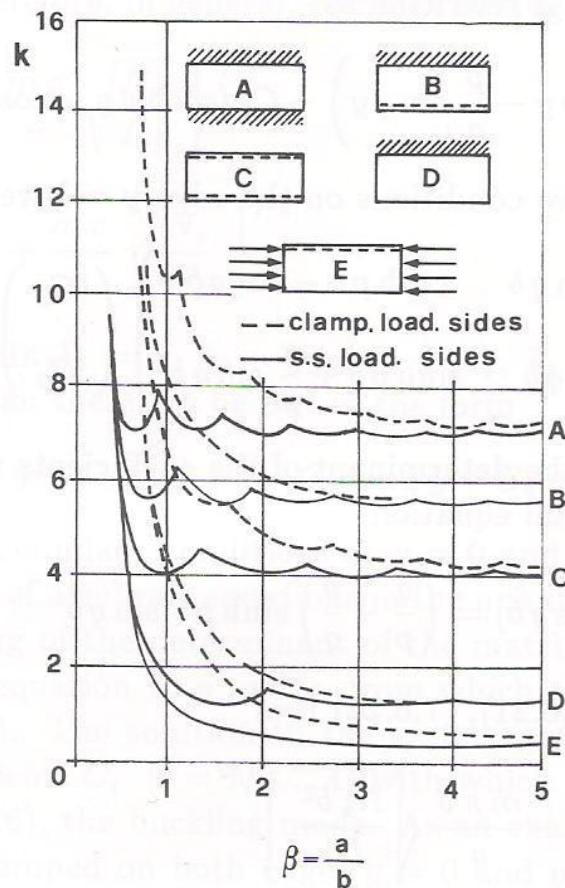
Περίπτωση B : Η μία αφόρτιστη πλευρά πακτωμένη και η άλλη απλά εδρασμένη.

Περίπτωση C : Και οι δύο αφόρτιστες πλευρές απλά εδρασμένες.

Περίπτωση D : Η μία αφόρτιστη πλευρά πακτωμένη και η άλλη ελεύθερη.

Περίπτωση E : Η μία αφόρτιστη πλευρά απλά εδρασμένη και η άλλη ελεύθερη.

Ο περαιτέρω διαχωρισμός των παραπάνω περιπτώσεων ως προς τις συνοριακές συνθήκες των φορτιζόμενων πλευρών γίνεται με διαφορετικό είδος γραμμών, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, δηλαδή οι καμπύλες διακεκομμένης γραμμής αντιστοιχούν στην περίπτωση πακτωμένων φορτιζόμενων άκρων, ενώ οι καμπύλες συνεχούς γραμμής αντιστοιχούν στην περίπτωση απλά εδρασμένων φορτιζόμενων άκρων.



Σχήμα 2.15 : Συντελεστής λυγισμού ισοτροπικών πλακών k , συναρτήσει του λόγου πλευρών $\beta = a / b$, για διάφορες περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών.

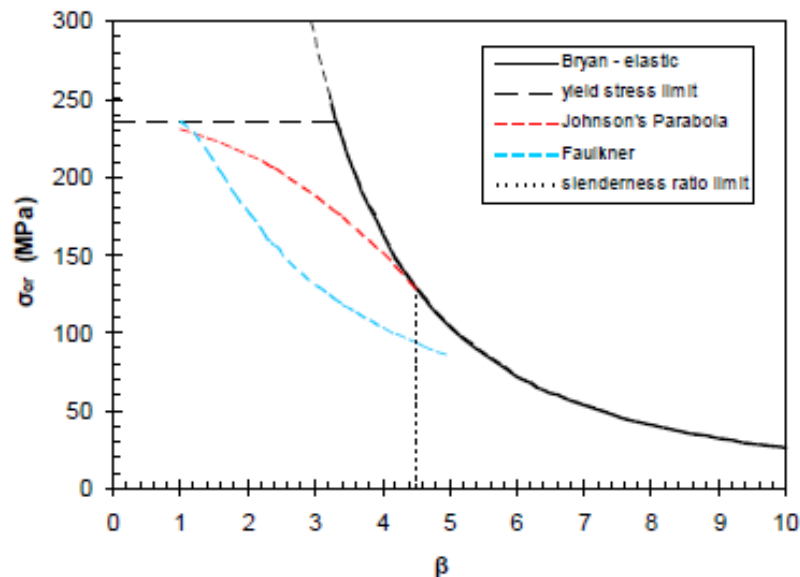
Το μέγεθος της λυγηρότητας μιας ισοτροπικής πλάκας ορίζεται ως εξής:

$$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$$

Έτσι, η σχέση του Bryan μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα με χρήση των σχέσεων ορισμού των μεγεθών καμπτικής ακαμψίας (D) και λυγηρότητας (β), ώστε να παραχθεί η ακόλουθη σχέση που δίνει το κρίσιμο φορτίο (τάση) ελαστικού λυγισμού ορθοτροπικών πλακών συναρτήσει της λυγηρότητας αυτών:

$$\sigma_{cr} = \frac{k \cdot \pi^2 \cdot \sigma_y}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \beta^2}$$

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.16 που ακολουθεί, παρουσιάζεται γραφικά αυτή η σχέση, για ελάσματα από υλικό κοινού ναυπηγικού χάλυβα (E = 206 GPa, ν=0.3)



Σχήμα 2.16 : Ενδεικτική καμπύλη Bryan και καμπύλες ελαστοπλαστικού σχεδιασμού ελασμάτων.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι, όπως και με την καμπύλη του Euler για ελαστικές δοκούς, έτσι και η σχέση του Bryan έχει εφαρμογή μόνο σε λεπτές πλάκες μεγάλης λυγηρότητας (στη συγκεκριμένη περίπτωση για $\beta > 4.5$ ή $t < b / 130$ περίπου), αφού σε ελάσματα με μικρότερη λυγηρότητα, προηγείται τοπική πλαστικοποίηση του υλικού σε κρίσιμες περιοχές, πριν τον ελαστικό λυγισμό. Αυτές οι κρίσιμες περιοχές εμφανίζονται συνήθως κατά μήκος των αφόρτιστων πλευρών, λόγω της κατανομής των τάσεων [Καρύδης, 2000].

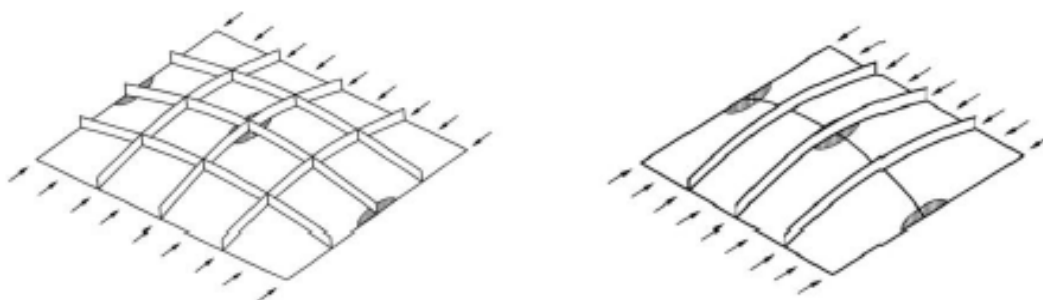
Έτσι, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των ελασμάτων, κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση των δοκών, μπορεί να εφαρμοσθεί η παραβολή του Johnson ή η σχέση του Faulkner, η μαθηματική έκφραση της οποίας δίνεται ακολούθως και ισχύει για ελάσματα μικρής λυγηρότητας ($\beta < 5$), όπως φαίνεται και στην εφαρμογή του Σχήματος 2.16.

- Σχέση Faulkner:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_y \cdot \left(\frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} \right)$$

2.7. Μορφές αστοχίας ενισχυμένων ελασμάτων

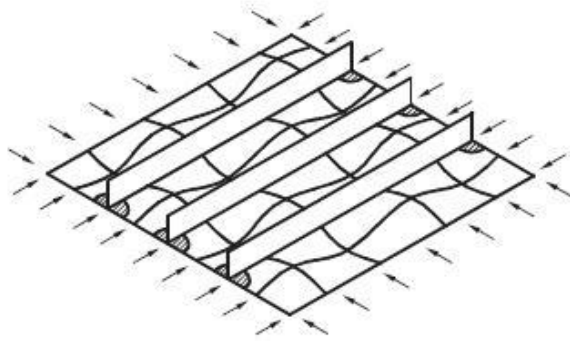
- **Κατάρρευση του ενισχυμένου ελάσματος σαν ενιαία μονάδα υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση.** Αυτή η μορφή αστοχίας αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου τα ενισχυτικά είναι σχετικώς ασθενή. Σε αυτή την περίπτωση το ενισχυτικό λυγίζει μαζί με το έλασμα σαν ενιαία μονάδα. Η συμπεριφορά του ενισχυμένου ελάσματος ίσως είναι αρχικά ελαστική. Το ενισχυμένο έλασμα μπορεί κανονικά να αντέξει επιπλέον φόρτιση πέραν του ορίου του ελαστικού λυγισμού. Η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν σχηματιστούν περιοχές διαρροής του υλικού (γραμμοσκιασμένες περιοχές στα σχήματα) μέσα στο έλασμα και/ή κατά μήκος των ακμών [Paik et.al., 2003]. Στο σχήμα 2.17, η πρώτη διάταξη αντιπροσωπεύει την κατάρρευση δοκού-κολόνας, ενώ η δεύτερη διάταξη προσομοιάζει την κατάρρευση ενός ορθοτροπικού ελάσματος.



Σχήμα 2.17 : Κατάρρευση ενισχυμένου ελάσματος ως ενιαία μονάδα υπό μονοαξονική θλίψη.

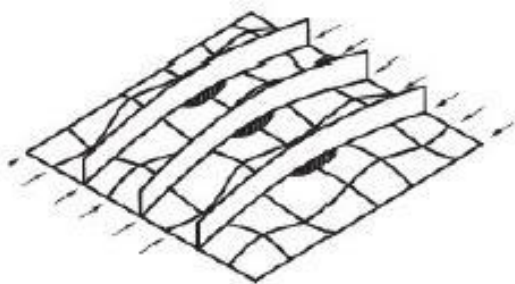
- **Διαξονική θλιπτική κατάρρευση.** Αυτή η μορφή αστοχίας αντιπροσωπεύει την κατάρρευση που συμβαίνει όταν ενισχυμένο έλασμα καταρρέει από διαρροή που συμβαίνει κατά μήκος των σημείων τομής ενισχυτικών και ελάσματος, στα άκρα του ελάσματος, χωρίς όμως αστοχία των ενισχυτικών. Η εν λόγω μορφή κατάρρευσης είναι σημαντική σε κάποιες περιπτώσεις διαξονικής καταπόνησης και/ή σε

περιπτώσεις βραχέων (κοντών) και σθεναρών ελασμάτων [Paik et.al., 2003].



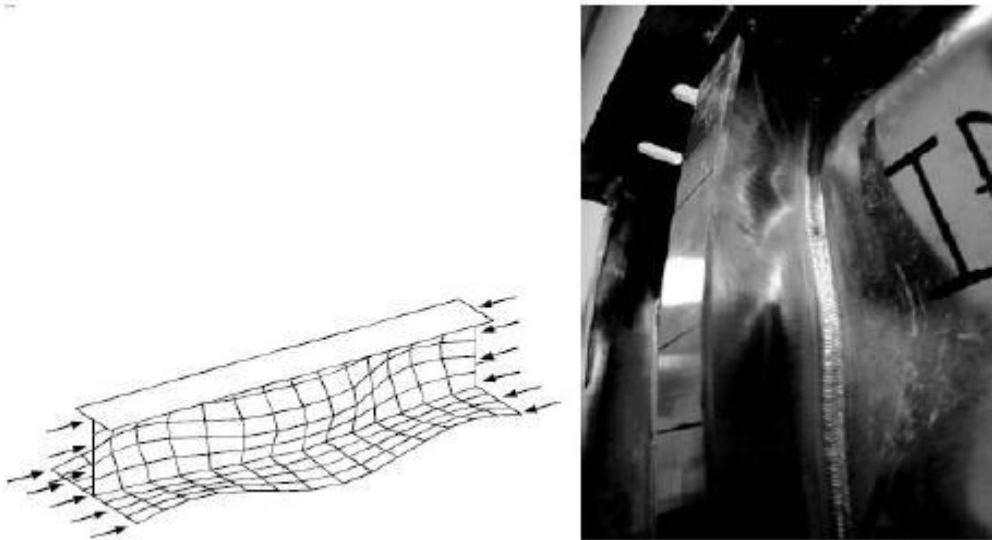
Σχήμα 2.18 : Κατάρρευση ενισχυμένου ελάσματος υπό δυαξονική θλίψη.

- **Κατάρρευση ως δοκού-κολόνας.** Αυτή η μορφή δείχνει την κατάρρευση κατά την οποία η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη διαρροή του ελάσματος και του ενισχυτικού στο μέσο. Συμβαίνει στη περίπτωση κατά την οποία το ενισχυτικό έχει ενδιάμεσες γεωμετρικές ιδιότητες, δεν είναι δηλαδή ούτε ασθενές ούτε πολύ ισχυρό [Paik et.al., 2003].



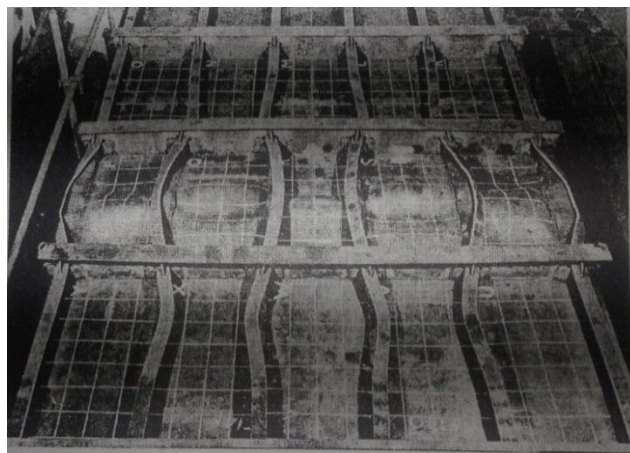
Σχήμα 2.19 : Κατάρρευση δοκού-κολόνας

- **Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού.** Αυτή η μορφή αστοχίας λαμβάνει χώρα όταν ο λόγος ύψους κορμού προς το πάχος του είναι μεγάλος, και/ή όταν το πέλημα του ενισχυτικού δεν κατορθώνει να παραμείνει ευθύ με αποτέλεσμα ο κορμός του ενισχυτικού να λυγίζει ή να συστρέφεται πλευρικά [Paik et.al., 2003].



Σχήμα 2.20 : Τοπική κατάρρευση κορμού του ενισχυτικού

- **Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός ενισχυτικού.** Η μορφή κατάρρευσης αυτή, μπορεί να συμβεί όταν η μέγιστη αντοχή προσεγγίζεται έπειτα από τον εγκάρσιο στρεπτικό λυγισμό (lateral-torsional buckling ή tripping) του ενισχυτικού. Ο τρόπος αυτός αντιπροσωπεύει την αστοχία κατά την οποία επέρχεται τοπική κατάρρευση από λυγισμό του κορμού του ενισχυτικού [Paik et.al., 2003].



Σχήμα 2.21 : Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

- **Ολική διαρροή.** Η αστοχία ολικής διαρροής συμβαίνει όταν η λυγριότητα (slenderness) του ενισχυμένου ελάσματος είναι σχετικά μικρή ή το ενισχυμένο έλασμα είναι βραχύ και σθεναρό και/ή όταν το ενισχυμένο έλασμα τελεί υπό αξονικό εφελκυσμό οπότε δεν συμβαίνει ούτε τοπικός ούτε ολικός λυγισμός αλλά καταρρέει από ολική διαρροή του υλικού [Paik et.al., 2003].

Παρόλο που στην πράξη κάποιιοι από τους παραπάνω τρόπους (μορφές) αστοχίας μπορεί να συμβούν και ταυτόχρονα, κατά τον σχεδιασμό θεωρούμε ότι η κατάρρευση ενός ενισχυμένου ελάσματος θα συμβεί με τον τρόπο ο οποίος προσδίδει στο ενισχυμένο έλασμα την μικρότερη τιμή μέγιστης αντοχής κατά τους υπολογισμούς αν εφαρμοσθεί ο καθένας ξεχωριστά.

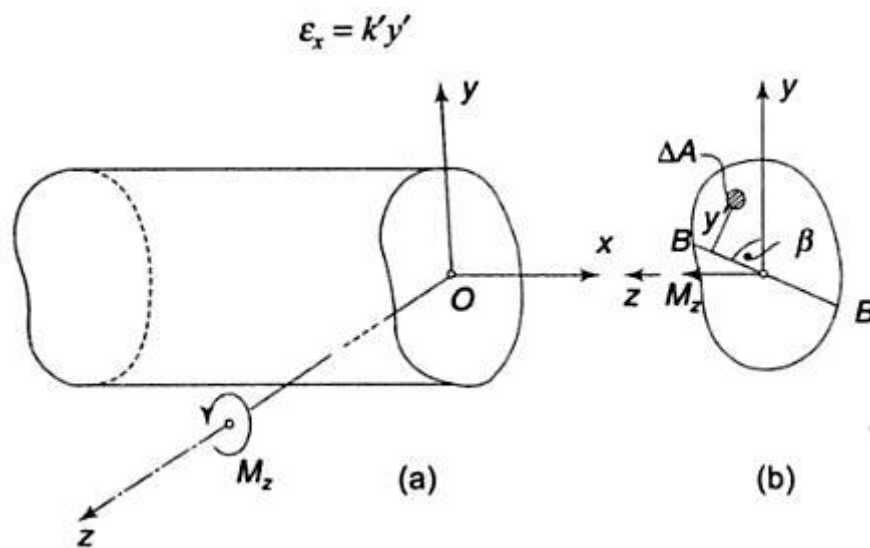
2.8. Ασύμμετρη κάμψη δοκών

Εξετάζοντας το πρόβλημα της κάμψης ευθέων δοκών με ομοιόμορφη εγκάρσια τομή, διακρίνονται τρεις γενικές μέθοδοι για την αντιμετώπισή του. Καθεμία εξετάζεται χωριστά. Όταν η ροπή κάμψης ενεργεί στο επίπεδο συμμετρίας, τότε η κάμψη ονομάζεται συμμετρική. Διαφορετικά η κάμψη ονομάζεται ασύμμετρη [Srinath, 2001].

Μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Στο σχήμα 2.22, η δοκός υπόκειται σε καθαρή κάμψη M_z η οποία κείται στο επίπεδο xy . Η αρχή των αξόνων O συμπίπτει με το κέντρο βάρους της εγκάρσιας τομής. Ο x άξονας είναι ο διαμήκης άξονας της δοκού και ο z έχει διαλεχτεί να συμπίπτει με το φορέα της ροπής. Έχει υποθεθεί ότι οι επίπεδες τομές της δοκού πριν την κάμψη, παραμένουν επίπεδες και μετά την κάμψη (υπόθεση Euler-Bernouli). Αυτό σημαίνει ότι η εγκάρσια τομή θα στραφεί γύρω από άξονα όπου το επάνω μέρος της επιφάνειας της τομής θα υποστεί θλίψη και το κάτω μέρος εφελκυσμό.

Τα σημεία πάνω στον συγκεκριμένο άξονα δεν θα υποβληθούν σε τάσεις και κατά συνέπεια αυτός, καλείται και ουδέτερος άξονας της διατομής.

Στο σχήμα 2.22b, ο ουδέτερος άξονας παριστάνεται από την ευθεία BB η οποία περνάει από το κέντρο βάρους O. Επειδή η εγκάρσια τομή κατά τη διάρκεια της κάμψης στρέφεται γύρω από τον BB, για μία στοιχειώδη επιφάνεια ΔΑ η οποία απέχει απόσταση y' από τον BB, η παραμόρφωση κάθε στοιχειώδους ίνας θα είναι ανάλογη της κάθετης απόστασης y' . Επομένως η παραμόρφωση ισούται με:



Σχήμα 2.22: Δοκός γενικής διατομής υπό κάμψη

Όπου k' σταθερά. Υποθέτοντας ότι δρουν μόνο ορθές τάσεις $\sigma_x, \sigma_y = \sigma_z = 0$, απ' τον νόμο του Hooke :

$$\sigma_x = k'Ey' = ky'$$

Όπου k η αντίστοιχη σταθερά. Η δύναμη που ενεργεί στη στοιχειώδη επιφάνεια ΔΑ είναι :

$$\Delta F_x = ky' \Delta A$$

Για να υπάρχει ισορροπία δυνάμεων στη διατομή, οι προκύπτουσες δυνάμεις που δρουν στην εγκάρσια τομή πρέπει να έχουν μηδενικό άθροισμα :

$$k \iint y' dA = 0$$

Η εξίσωση αυτή δείχνει ότι η πρώτη ροπή της επιφάνειας γύρω από τον BB είναι μηδέν, που σημαίνει ότι ο BB είναι και κεντροβαρικός άξονας.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι γενικά η δοκός δεν θα καμφθεί στο επίπεδο της ροπής και ότι ο ουδέτερος άξονας BB δεν θα ανήκει στο φορέα του διανύσματος της ροπής M_z . Στη γενική περίπτωση ο ουδέτερος άξονας BB θα αποκλίνει κατά μία γωνία β από τον άξονα y . Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ροπές από την κατανομή των ορθών τάσεων γύρω από τους άξονες y, z . Η ροπή γύρω από τον y άξονα είναι μηδενική ενώ η ροπή γύρω από τον z είναι ίση με $-M_z$. Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι μια θετική ορθή τάση σε ένα θετικό σημείο (y,z) , προκαλεί διάνυσμα ροπής στην αρνητική διεύθυνση z . Οπότε:

$$\begin{aligned}\iint \sigma_x z \, dA &= \iint ky'z \, dA = 0 \\ \iint \sigma_x y \, dA &= \iint ky'y \, dA = -M_z\end{aligned}$$

Εκφράζοντας το y' σε συνάρτηση των y, z :

$$\begin{aligned}y' &= CF - DF \\ &= y \sin \beta - z \cos \beta\end{aligned}$$

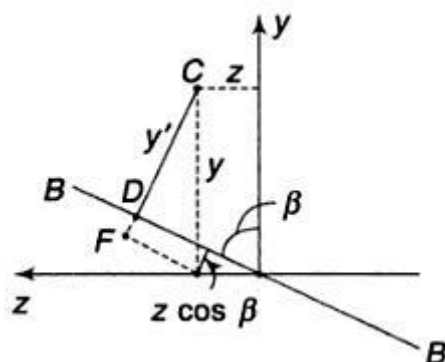
Και με αντικατάσταση στις προηγούμενες:

$$\begin{aligned}k \iint (yz \sin \beta - z^2 \cos \beta) \, dA &= 0 \\ k \iint (y^2 \sin \beta - yz \cos \beta) \, dA &= -M_z \\ I_{yz} \sin \beta - I_y \cos \beta &= 0 \\ k(I_{yz} \cos \beta - I_z \sin \beta) &= M_z\end{aligned}$$

Η τρίτη σχέση δίνει :

$$\tan \beta = \frac{I_y}{I_{yz}}$$

Η οποία καθορίζει τη θέση του ουδέτερου άξονα BB



Σχήμα 2.23 : Θέση του ουδέτερου άξονα και σημείο C σε απόσταση y' από αυτόν

Εκφράζοντας ως προς την ορθή τάση σ_x :

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{M_z (y \sin \beta - z \cos \beta)}{I_{yz} \cos \beta - I_z \sin \beta} \\ &= \frac{y \tan \beta - z}{I_{yz} - I_z \tan \beta} M_z\end{aligned}$$

Και αντικαθιστώντας το $\tan \beta$:

$$\sigma_x = \frac{yI_y - zI_{yz}}{I_{yz}^2 - I_y I_z} M_z$$

Η συγκεκριμένη εξίσωση βοηθά στον υπολογισμό των ορθών τάσεων κατά τη διάρκεια της κάμψης. Συνοψίζοντας, το συμπέρασμα είναι πως όταν μια δοκός γενικής διατομής υπόκειται σε καθαρή κάμψη M_z , τότε κάμπτεται σε ένα επίπεδο το οποίο δεν συμπίπτει υποχρεωτικά με το επίπεδο της ροπής. Με αποτέλεσμα ο ουδέτερος άξονας να αποκλίνει από τον y άξονα κατά μια γωνία β τέτοια ώστε $\beta = I_y/I_{yz}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΚΑΝΟΝΕΣ CSR-I.A.C.S. ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

3.1. Κριτήρια ελέγχου μέγιστης αντοχής

Πρέπει να ελέγχεται ότι η μέγιστη καμπτική αντοχή του πλοίου δοκού σε οποιοδήποτε εγκάρσια διατομή του, είναι σε συμμόρφωση με τον ακόλουθο τύπο :

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_R}$$

Όπου :

M_U : μέγιστη καμπτική αντοχή της εγκάρσιας τομής, υπολογισμένη με τις καθαρές διαστάσεις των στοιχείων.

M_{UH} : μέγιστη καμπτική αντοχή της εγκάρσιας τομής σε κατάσταση hogging που υπολογίζεται με βάση την επαναληπτική διαδικασία. Σχήμα 3.1

M_{SH} : μέγιστη καμπτική αντοχή της εγκάρσιας τομής σε κατάσταση sagging που υπολογίζεται με βάση την επαναληπτική διαδικασία. Σχήμα 3.1

M : ροπή κάμψης σε kN.m

γ_R : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.10

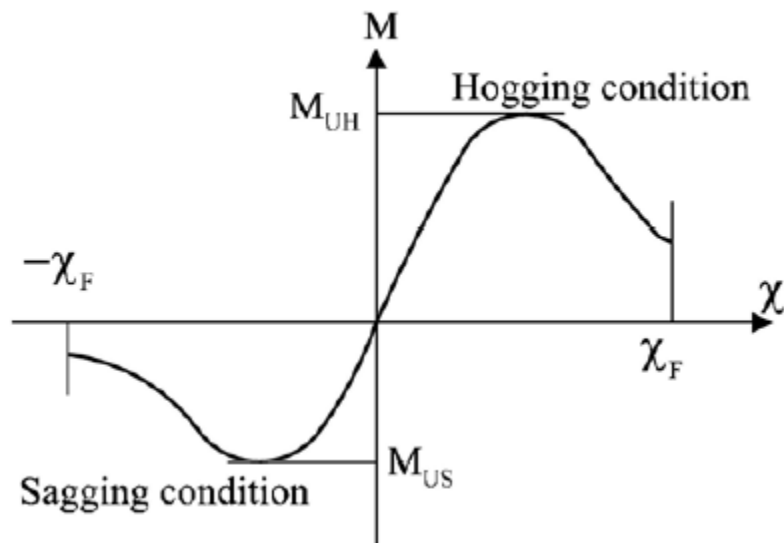
$$M = M_{SW} + \gamma_w M_{WV}$$

Όπου :

M_{SW} : καμπτική ροπή σχεδίασης της εγκάρσιας τομής σε ήρεμο νερό σε kN.m, σε sagging και hogging καταστάσεις για την άθικτη κατάσταση.

M_{WV} : : καμπτική ροπή της εγκάρσιας τομής σε εγκάρσιο κυματισμό σε kN.m, σε sagging και hogging καταστάσεις για την άθικτη κατάσταση.

γ_w : συντελεστής ασφαλείας της ροπής κυματισμού ίσος με 1.20.



Σχήμα 3.1 : Καμπύλη ροπής καμπυλότητας

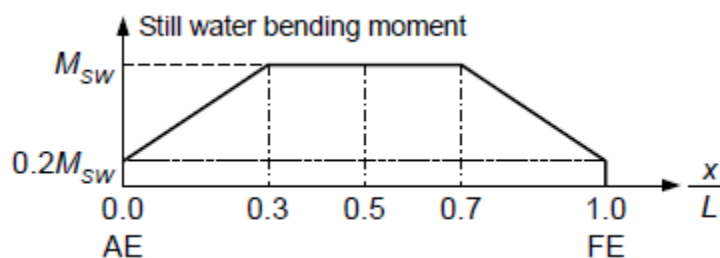
- **Καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό.** Η ροπή σχεδίασης σε ήρεμο νερό $M_{SW,H}$ και $M_{SW,S}$ είναι οι μέγιστες καμπτικές ροπές σε καταστάσεις hogging sagging αντίστοιχα για μια κατάσταση φόρτωσης.

- hogging conditions:

$$M_{SW,H} = 175CL^2B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{WV,H}$$

- sagging conditions:

$$M_{SW,S} = 175CL^2B(C_B + 0.7)10^{-3} - M_{WV,S}$$



Σχήμα 3.2 : Προκαταρκτική κατανομή ροπής κάμψης σε ήρεμο νερό

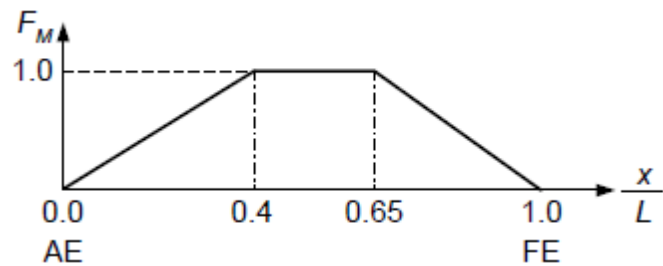
- **Ροπή λόγω κυματισμού.** Οι ροπές κυματισμού στην άθικτη κατάσταση και σε κάθε εγκάρσια τομή, είναι ίσες με :

- hogging conditions:

$$M_{WV,H} = 190F_M f_p CL^2 BC_B 10^{-3}$$

- sagging conditions:

$$M_{WV,S} = 110F_M f_p CL^2 B(C_B + 0.7)10^{-3}$$



Σχήμα 3.3 : Κατανομή συντελεστή F_M

Όπου F_M : συντελεστής κατανομής (βλέπε πίνακα 3.1)

Πίνακας 3.1

Hull transverse section location	Distribution factor F_M
$0 \leq x < 0.4L$	$2.5 \frac{x}{L}$
$0.4L \leq x \leq 0.65L$	1.0
$0.65L < x \leq L$	$2.86 \left(1 - \frac{x}{L}\right)$

3.2 Υπολογισμός της μέγιστης αντοχής με την επαναληπτική μέθοδο

3.2.1 Διαδικασία

Η καμπύλη $M-\chi$ πρόκειται να ληφθεί μέσω μιας στοιχειώδους - επαναληπτικής προσέγγισης, η οποία συνοψίζεται στο διάγραμμα ροής στο Σχήμα 3.4. Στην προσέγγιση αυτή, η μέγιστη καμπτική ροπή M_U ορίζεται ως η μέγιστη τιμή της καμπύλης, η οποία απεικονίζει τη ροπή κάμψης M συναρτήσει της καμπυλότητας χ της εγκάρσιας διατομής του πλοίου. Η καμπύλη πρέπει να λαμβάνεται μέσω μιας επαναληπτικής προσέγγισης. Σε κάθε βήμα της διαδικασίας πραγματοποιείται ο υπολογισμός της ροπής κάμψης M_i που δρα στην εγκάρσια τομή ως αποτέλεσμα μίας επιβληθείσας καμπυλότητα χ_i . Για κάθε βήμα, η χ_i τιμή πρέπει να λαμβάνεται αθροίζοντας μία προσαύξηση της καμπυλότητας $\Delta\chi$, στην τιμή της καμπυλότητας του προηγούμενου βήματος χ_{i-1} . Η προσαύξηση στην καμπυλότητα προκύπτει από μία προσαύξηση της γωνίας περιστροφής της εγκάρσιας τομής γύρω από οριζόντιο ουδέτερο άξονά. Η προσαύξηση αυτή της περιστροφής προκαλεί ορθές παραμορφώσεις ϵ σε κάθε δομικό στοιχείο, του οποίου η τιμή εξαρτάται από την θέση του σε σχέση με τον ουδέτερο άξονα. Σε hogging κατάσταση, τα δομικά στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα επιμηκύνονται, ενώ τα στοιχεία κάτω από τον ουδέτερο άξονα θλίβονται. Το ανάποδο ισχύει σε κατάσταση sagging.

Η τάση σ που επάγεται σε κάθε δομικό στοιχείο εξαιτίας της παραμόρφωσης ϵ , λαμβάνεται από την καμπύλη φόρτισης $\sigma-\epsilon$ του στοιχείου, η οποία λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά του στοιχείου στη μη γραμμική ελαστοπλαστική περιοχή. Η κατανομή των τάσεων που προκαλούνται σε όλα τα στοιχεία που συνθέτουν την εγκάρσια τομή, καθορίζει για κάθε βήμα αλλαγές για τη θέση του ουδέτερου άξονα, δεδομένου ότι οι σχέσεις $\sigma-\epsilon$ είναι μη γραμμικές. Η νέα θέση του ουδέτερου άξονα για το εκάστοτε στάδιο, λαμβάνεται με τη βοήθεια της επαναληπτικής διαδικασίας, επιβάλλοντας την ισορροπία μεταξύ των τάσεων που ενεργούν σε όλα τα στοιχεία της γάστρας.

Μόλις η θέση του ουδέτερου άξονα είναι γνωστή καθώς και η σχετική κατανομή των τάσεων των στοιχείων, η ροπή κάμψης της τομής M_i γύρω από την νέα θέση του ουδέτερου άξονα, που αντιστοιχεί στην καμπυλότητα χ_i στο εκάστοτε στάδιο, λαμβάνεται με την άθροιση της συνεισφοράς του κάθε στοιχείου στις τάσεις.

Τα κύρια στάδια της στοιχειώδους-επαναληπτικής προσέγγισης που περιγράφεται παραπάνω συνοψίζονται ως εξής:

Βήμα 1 χωρίζεται η εγκάρσια τομή του πλοίου σε ενισχυμένα δομικά στοιχεία

Βήμα 2 καθορίζονται οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για τα στοιχεία.

Βήμα 3 αρχικοποιείται η καμπυλότητα χ_i και ο ουδέτερος άξονας για το πρώτο στάδιο δίνοντας την αρχική τιμή της στοιχειώδους καμπυλότητας ως :

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

Όπου Z_D : η απόσταση του καταστρώματος από το βασικό επίπεδο αναφοράς.

Βήμα 4 υπολογίζεται για κάθε στοιχείο η παραμόρφωση $\epsilon_i = \chi(Z_i - Z_{NA})$ και η προκύπτουσα αντίστοιχη τάση.

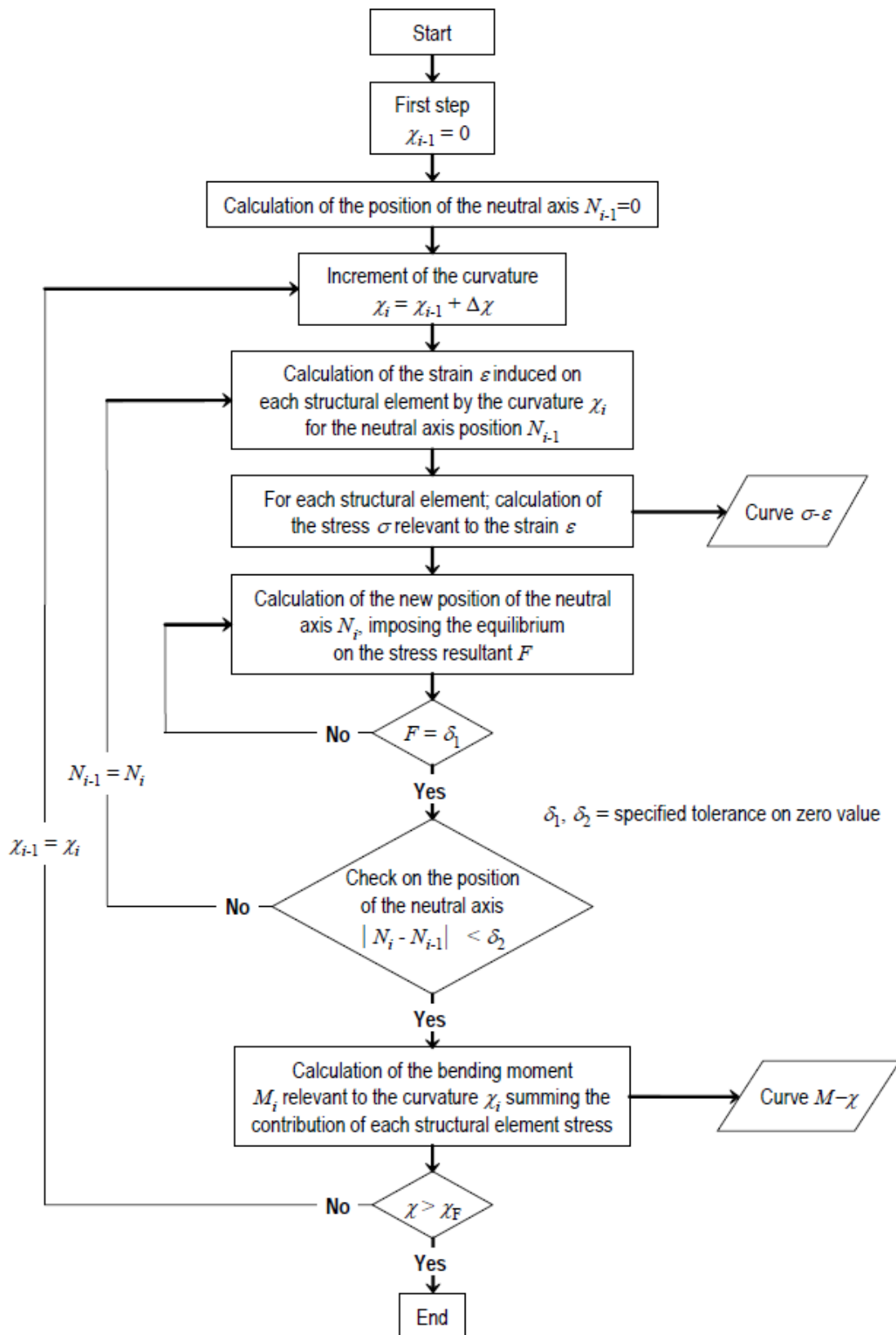
Βήμα 5 καθορίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα Z_{NA} , επιβάλλοντας την ισοροπία των δυνάμεων σε όλη την εγκάρσια τομή :

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

Βήμα 6 υπολογίζεται η προκύπτουσα ροπή αθροίζοντας τη συνεισφορά των στοιχείων :

$$M_U = \sum \sigma_{U_i} A_i (z_i - z_{NA_cur})$$

Βήμα 7 συγκρίνεται η ροπή κάθε βήματος με τη ροπή του προηγούμενου. Εάν η κλίση της M- χ είναι μικρότερη από μία φιξαρισμένη αρνητική τιμή, τερματίζεται η διαδικασία και καθορίζεται η μέγιστη τιμή M_U .



Σχήμα 3.4 : Αλγόριθμος της διαδικασίας για την εύρεση της καμπύλης M-χ

3.2.2 Προϋποθέσεις

Κατά την εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφεται, πρέπει να γίνουν οι ακόλουθες παραδοχές:

- η μέγιστη αντοχή υπολογίζεται σε εγκάρσιες τομές μεταξύ δύο γειτονικών εγκάρσιων νομέων.
- το υλικό κατασκευής έχει ελαστο-πλαστική συμπεριφορά.
- η εγκάρσια τομή αποτελείται από στοιχεία τα οποία θεωρείται ότι ενεργούν ανεξάρτητα.

Τέτοια στοιχεία είναι :

- εγκάρσιως ενισχυμένα ελάσματα ή/και συνήθη ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα.
 - γωνιακά στοιχεία, που απαρτίζονται από ελάσματα που συναντιούνται.
- σύμφωνα με την επαναληπτική διαδικασία, η ροπή κάμψης M_i που ενεργεί στην εγκάρσια τομή για κάθε χ_i τιμή της καμπυλότητας, προκύπτει από την άθροιση της συνεισφοράς της τάσης σ που ενεργεί σε κάθε στοιχείο. Η τάση σ , που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση ϵ του κάθε στοιχείου, πρέπει να λαμβάνεται για κάθε αύξηση της καμπυλότητας, από την μη γραμμική καμπύλη φόρτισης σ - ϵ του στοιχείου. Αυτές οι καμπύλες πρέπει να προκύπτουν από τους μηχανισμούς αστοχίας του στοιχείου. Η τάση σ επιλέγεται ως η χαμηλότερη μεταξύ των τιμών που λαμβάνονται από τις καμπύλες φορτίσεων σ - ϵ .
 - η διαδικασία πρέπει να επαναλαμβάνεται μέχρι η τιμή της επιβαλλόμενης καμπυλότητας να γίνει χ_F σε sagging και hogging καταστάσεις. Η τιμή αυτή προκύπτει από τον τύπο :

$$\chi_F = \pm 0.003 \frac{M_Y}{EI_Y}$$

Όπου :

M_Y : η μικρότερη από τις τιμές M_{Y1} και M_{Y2} :

$$M_{Y1} = 10^3 R_{eH} Z_{AB}$$

$$M_{Y2} = 10^3 R_{eH} Z_{AD}$$

3.2.3 Μοντελοποίηση της εγκάρσιας τομής

Οι εγκάρσιες τομές πρέπει να θεωρείται ότι αποτελούνται από τα μέλη που συμβάλλουν στη μέγιστη αντοχή της γάστρας. Τα δομικά στοιχεία κατηγοριοποιούνται ως ένα ενισχυτικό με συνεργαζόμενο έλασμα, ένα εγκαρσίως ενισχυμένο έλασμα ή ένα σκληρό γωνιακό στοιχείο. Το έλασμα του περιβλήματος συμπεριλαμβανομένων των ελασμάτων στις νευρώσεις ή τις πλευρικές σταθμίδες, εξιδανικεύονται είτε σε ένα ενισχυτικό με συνεργαζόμενο έλασμα, είτε σε ένα εγκαρσίως ενισχυμένο έλασμα ή ένα σκληρό γωνιακό στοιχείο. Το έλασμα του περιβλήματος κατηγοριοποιείται στα εξής δύο είδη:

- Διαμήκως ενισχυμένο έλασμα του οποίου η μακρύτερη πλευρά είναι κατά τη διαμήκη διεύθυνση, και
- Εγκαρσίως ενισχυμένο έλασμα του οποίου η μακρύτερη πλευρά είναι στην κάθετη προς την διαμήκη κατεύθυνση.

Σκληρά γωνιακά στοιχεία

Τα σκληρά γωνιακά στοιχεία είναι τα πιο ισχυρά στοιχεία που συνθέτουν την εγκάρσια τομή, η οποία καταρρέει κυρίως με ελαστοπλαστικό τρόπο (διαρροή ου υλικού), γενικά αποτελούνται από δύο ελάσματα που δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η έκταση ενός σκληρού γωνιακού στοιχείου από το σημείο τομής των ελασμάτων, λαμβάνεται ίση με $20t_p$ για εγκαρσίως ενισχυμένο έλασμα και σε $0.5s$ για διαμήκως ενισχυμένο έλασμα. (Βλ. Σχήμα 3.5)

όπου:

t_p : Μεικτό προσφερόμενο πάχος του ελάσματος, σε mm

s : Απόσταση από γειτονικό διάμηκες ενισχυτικό, σε m

Το έλασμα του bilge, οι ζωστήρες και διαδοκίδες καταστρώματος και ελάσματα ενωμένα πρόσωπο με πρόσωπο θεωρούνται τυπικά σκληρά γωνιακά στοιχεία.

Ενισχυτικό με συνεργαζόμενο έλασμα

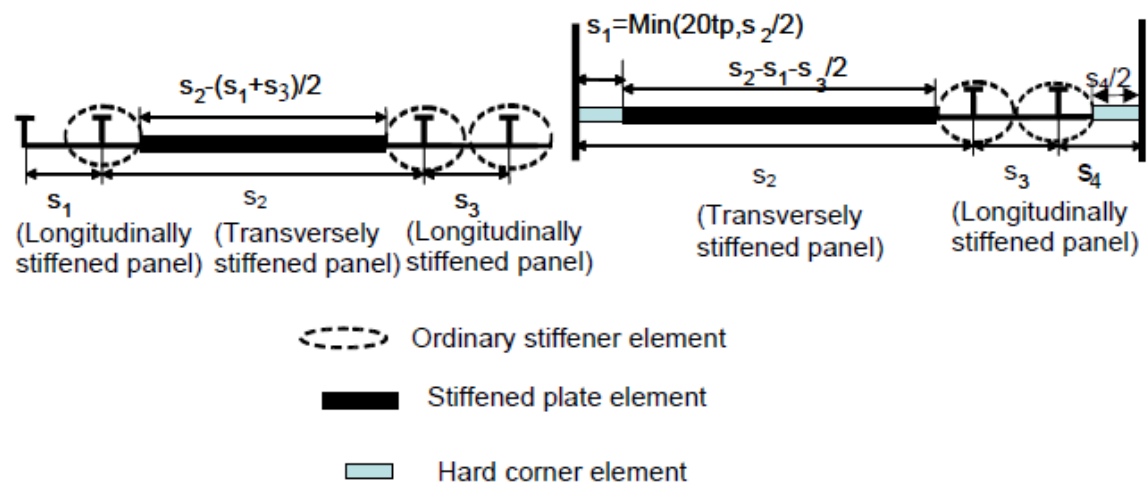
Το στοιχείο ενισχυτικού με συνεργαζόμενο έλασμα αποτελείται από ένα συνηθισμένο ενισχυτικό μαζί με το προσαρμοσμένο έλασμα.

Το πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος είναι:

- Ίσο με τη μέση απόσταση των ενισχυτικών του ελάσματος όταν τα ελάσματα και στις δύο πλευρές του ενισχυτικού είναι διαμήκως ενισχυμένα, ή
- Ίσο με το πλάτος του διαμήκως ενισχυμένου ελάσματος όταν το έλασμα από τη μία μεριά του ενισχυτικού είναι διαμήκως ενισχυμένο και από την άλλη μεριά εγκάρσιως (Βλ. Σχήμα 3.5).

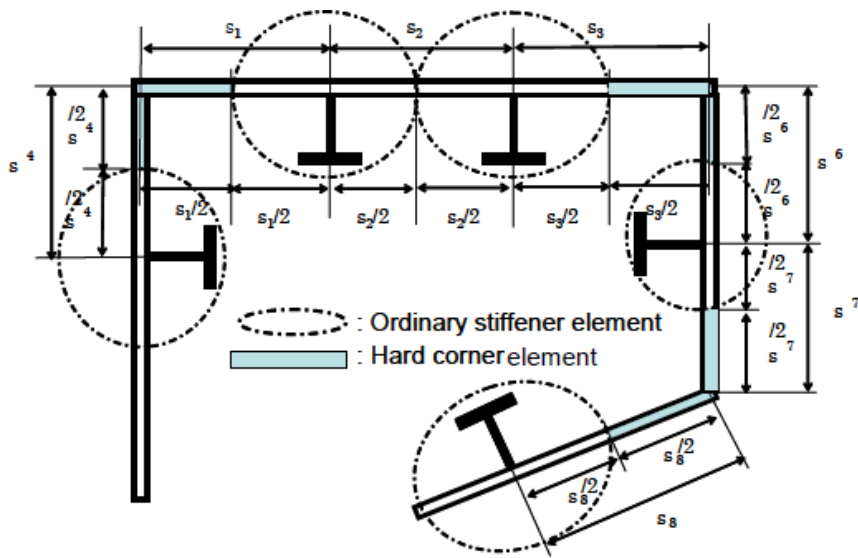
Εγκάρσιως ενισχυμένο έλασμα

Το έλασμα μεταξύ ενός ενισχυτικού με συνεργαζόμενο έλασμα, μεταξύ ενός ενισχυτικού με συνεργαζόμενο έλασμα και ενός σκληρού γωνιακού στοιχείου ή μεταξύ σκληρών γωνιακών στοιχείων, αντιμετωπίζεται ως εγκάρσιως ενισχυμένο έλασμα.

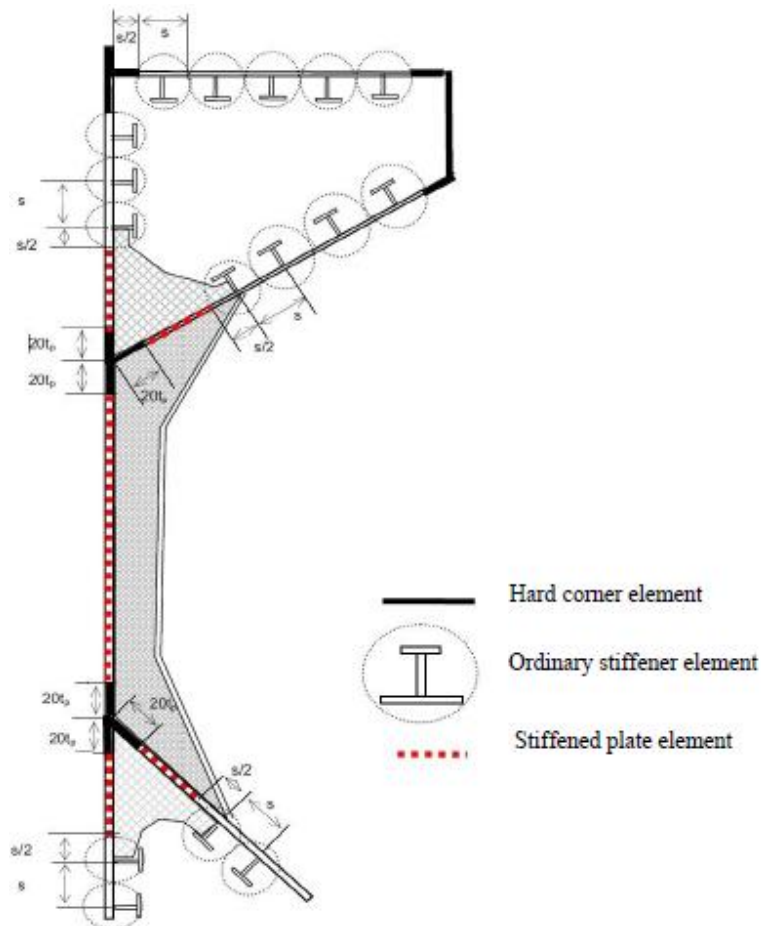


Σχήμα 3.5 : Έκταση του πλάτους του συνεργαζόμενου ελάσματος και του γωνιακού στοιχείου.

Τυπικά παραδείγματα μοντελοποίησης εγκάρσιας τομής πλοίου, παρουσιάζεται στα σχήματα 3.6 και 3.7.



Σχήμα 3.6 : Έκταση του πλάτους του συνεργαζόμενου ελάσματος και του γωνιακού στ.



Σχήμα 3.7 : Παράδειγμα μοντελοποίησης εγκάρσιας διατομής πλοίου

3.3 Καμπύλες φορτίσεων σ - ϵ

3.3.1 Ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα και εγκαρσίως ενισχυμένα ελάσματα

- Σε περίπτωση που τα ελάσματα είναι ενισχυμένα με μη συνεχή διαμήκη ενισχυτικά, οι δυνάμεις που προκύπτουν από τις αντίστοιχες τάσεις στην επιφάνειά τους θεωρείται μηδενική.
- Σε περίπτωση που παρέχεται κάποιο άνοιγμα σε εγκαρσίως ενισχυμένα ελάσματα, η επιφάνεια που αντιστοιχεί στο αντίστοιχο έλασμα όπου υπολογίζονται οι δυνάμεις, προκύπτει αφαιρώντας την επιφάνεια του ανοίγματος.
- Για εγκαρσίως ενισχυμένα ελάσματα, το ενεργό πλάτος του ελάσματος που χρησιμοποιείται για τις καμπύλες φορτίσεων, θεωρείται το ολικό πλάτος. Δηλαδή το πλάτος πρέπει να υπολογίζεται μέχρι το σημείο τομής γειτονικού ελάσματος ή γειτονικού διαμήκους ενισχυτικού και όχι μέχρι το σημείο τομής γωνιακού στοιχείου ή συνεργαζόμενου ελάσματος ενός ενισχυτικού. Όταν υπολογίζονται οι συνολικές δυνάμεις στα στοιχεία, οι επιφάνειες των εγκαρσίως ενισχυμένων ελασμάτων, θεωρούνται ως αυτές μεταξύ ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα και γωνιακών στοιχείων, ή μεταξύ γωνιακών στοιχείων.

Πίνακας 3.2

Στοιχείο	Μορφή αστοχίας	Αρίθμηση
Εφελκυόμενο εγκάρσιως ενισχυμένο έλασμα ή ενισχυτικό με συνεργαζόμενο έλασμα	Ελαστοπλαστική κατάρρευση	
Θλιβόμενο ενισχυτικό με συνεργαζόμενο έλασμα	Λυγισμός δοκού κολόνας	1
	Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός	2
	Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικών με φλάντζα	3
	Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού σκέτης λάμας	4
Θλιβόμενο εγκάρσιως ενισχυμένο έλασμα	Λυγισμός ελασμάτων	5

3.3.2 Γωνιακά στοιχεία

- Οι καμπύλες φορτίσεων των γωνιακών στοιχείων, για εφελκυόμενα και θλιβόμενα γωνιακά στοιχεία, πρέπει να προκύπτουν με βάση την ελαστοπλαστική κατάρρευση.

3.3.3 Ελαστοπλαστική κατάρρευση δομικών στοιχείων

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη σ - ϵ της ελαστοπλαστικής κατάρρευσης των κατασκευαστικών στοιχείων που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί και ισχύει για θετικές (θλίψη) και αρνητικές (εφελκυσμός) παραμορφώσεις (Βλέπε σχήμα 3.8) :

$$\sigma = \Phi R_{eHA}$$

όπου :

R_{eHA} : Ισοδύναμη ελάχιστη τάση διαρροής του στοιχείου σε N/mm^2 , η οποία προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$R_{eHA} = \frac{R_{eHp} \cdot A_p + R_{eHs} \cdot A_s}{A_p + A_s}$$

Φ : Συνάρτηση συσχέτισης

$$\Phi = -1 \quad \varepsilon < -1$$

$$\Phi = \varepsilon \quad -1 \leq \varepsilon \leq 1$$

$$\Phi = 1 \quad \varepsilon > 1$$

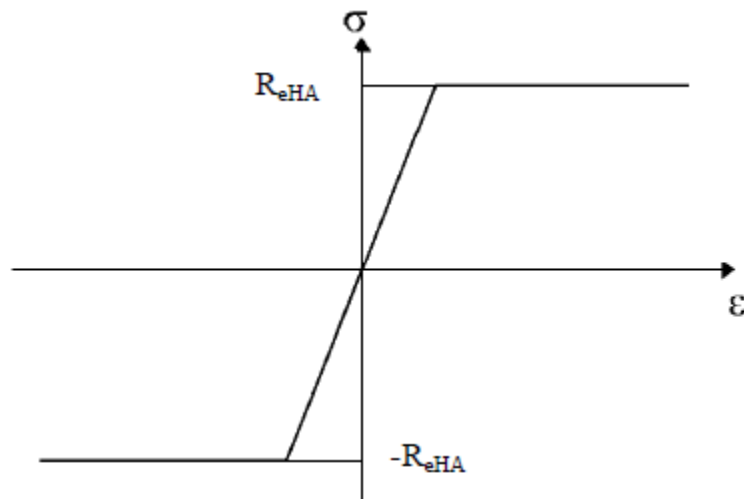
ε : Σχετική παραμόρφωση ίση με :

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y}$$

ε_E : Παραμόρφωση του στοιχείου

ε_Y : Παραμόρφωση διαρροής στο στοιχείο, ίση με :

$$\varepsilon_Y = \frac{R_{eHA}}{E}$$



Σχήμα 3.8 : Καμπύλη φόρτισης σ-ε για ελαστοπλαστική κατάρρευση

3.3.4 Λυγισμός δοκού κολόνας

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη $\sigma_{CR1-\varepsilon}$ του λυγισμού κολόνας των κατασκευαστικών στοιχείων που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί (Βλέπε σχήμα 3.9) :

$$\sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{C1} \frac{A_s + A_{pE}}{A_s + A_p}$$

όπου :

Φ : Συνάρτηση συσχέτισης όπως παραπάνω [3.3.3]

σ_{C1} : Κρίσιμη τάση σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{C1} = \frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon} \quad \sigma_{E1} \leq \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_{C1} = R_{eHB} \left(1 - \frac{R_{eHB} \varepsilon}{4 \sigma_{E1}} \right) \quad \sigma_{E1} > \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon$$

R_{eHB} : Ισοδύναμη ελάχιστη τάση διαρροής του στοιχείου σε N/mm^2 , η οποία προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$R_{eHB} = \frac{R_{eHp} A_{pEI} l_{pE} + R_{eHs} A_s l_{sE}}{A_{pEI} l_{pE} + A_s l_{sE}}$$

A_{pEI} : Ενεργή επιφάνεια σε cm^2 , ίση με :

$$A_{pEI} = 10 b_{EI} t_p$$

l_{pE} : Απόσταση σε mm μετρούμενη από τον ουδέτερο άξονα του ενισχυτικού με το συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους b_{EI} , στον πάτο του συνεργαζόμενου ελάσματος

l_{sE} : Απόσταση σε mm μετρούμενη από τον ουδέτερο άξονα του ενισχυτικού με το συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους b_{EI} , στην κορυφή του ενισχυτικού

ε : Σχετική παραμόρφωση όπως παραπάνω [3.3.3]

σ_{E1} : Κρίσιμη τάση λυγισμού κατά Euler σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{E1} = \pi^2 E \frac{I_E}{A_E l^2} 10^{-4}$$

I_E : Καθαρή ροπή αδράνειας ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους b_{E1} σε cm^4

b_{E1} : Ενεργό πλάτος σε m του συνεργαζόμενου ελάσματος, ίσο με :

$$b_{E1} = \frac{s}{\beta_E} \quad \beta_E > 1.0$$

$$b_{E1} = s \quad \beta_E \leq 1.0$$

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$$

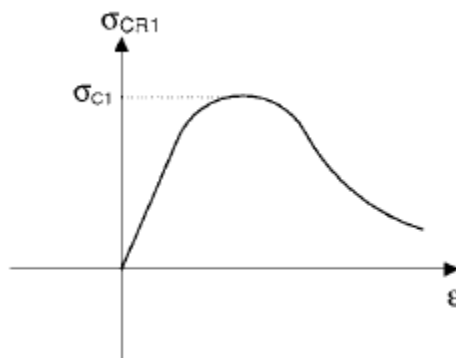
A_{pE} : Ενεργή επιφάνεια σε cm^2 του συνεργαζόμενου ελάσματος πλάτους b_E , ίση με :

$$A_{pE} = 10 b_E t_p$$

b_E : Ενεργό πλάτος σε m του συνεργαζόμενου ελάσματος, ίσο με :

$$b_E = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) s \quad \beta_E > 1.25$$

$$b_E = s \quad \beta_E \leq 1.25$$



Σχήμα 3.9 : Καμπύλη φόρτισης σ-ε για λυγισμό δοκού κολόνας

3.3.5 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη $\sigma_{CR2}-\varepsilon$ του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού των κατασκευαστικών στοιχείων που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί (Βλέπε σχήμα 3.11) :

$$\sigma_{CR2} = \Phi \frac{A_s \sigma_{C2} + A_p \sigma_{CP}}{A_s + A_p}$$

όπου :

Φ : Συνάρτηση συσχέτισης όπως παραπάνω [3.3.3]

σ_{C2} : Κρίσιμη τάση σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{C2} = \frac{\sigma_{E2}}{\varepsilon} \quad \sigma_{E2} \leq \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_{C2} = R_{eHs} \left(1 - \frac{R_{eHs} \varepsilon}{4 \sigma_{E2}} \right) \quad \sigma_{E2} > \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon$$

σ_{E2} : Κρίσιμη τάση στρεπτοκαμπτικού λυγισμού κατά Euler σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{E2} = \frac{E}{I_p} \left(\frac{\pi^2 I_{\omega} 10^2}{a^2} \varepsilon + 0.385 I_T \right)$$

I_p : Καθαρή πολική ροπή αδρανείας του ενισχυτικού σε cm^4 , που σχετίζεται με το σημείο C (Βλέπε σχήμα 3.10)

I_T : Καθαρή ροπή αδρανείας St. Venant's του ενισχυτικού σε cm^4 (Βλέπε πίνακα 3.3)

I_{ω} : Καθαρή ροπή αδρανείας τομέως του ενισχυτικού σε cm^6 , που σχετίζεται με το σημείο C (Βλέπε πίνακα 3.3)

ε : Βαθμός στερέωσης ίσος με :

$$\varepsilon = 1 + 10^{-3} \sqrt{\frac{a^4}{\frac{3}{4} \pi^4 I_w \left(\frac{b}{t^3} + \frac{4h_w}{3t_w^3} \right)}}$$

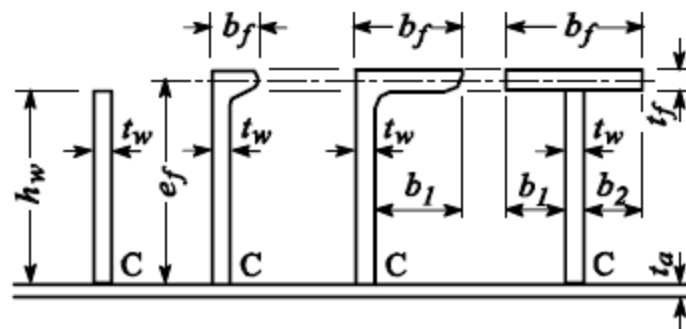
A_w : Καθαρή επιφάνεια κορμού του ενισχυτικού ίση με :

$$A_w = h_w t_w$$

A_f : Καθαρή επιφάνεια της φλάντζας του ενισχυτικού ίση με :

$$A_f = b_f t_f$$

$$e_f = h_w + \frac{t_f}{2}$$



Σχήμα 3.10 : Διαστάσεις των ενισχυτικών

Πίνακας 3.3

Profile	I_p	I_T	I_w
Flat bar	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \cdot 10^4}$	$\frac{h_w t_w^3}{3 \cdot 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w} \right)$	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \cdot 10^6}$
Sections with bulb or flange	$\left(\frac{A_w h_w^2}{3} + A_f e_f^2 \right) 10^{-4}$	$\frac{h_w t_w^3}{3 \cdot 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w} \right) + \frac{b_f t_f^3}{3 \cdot 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_f}{b_f} \right)$	for bulb and angle sections: $\frac{A_f e_f^2 b_f^2}{12 \cdot 10^6} \left(\frac{A_f + 2.6 A_w}{A_f + A_w} \right)$ for tee-sections $\frac{b_f^3 t_f e_f^2}{12 \cdot 10^6}$

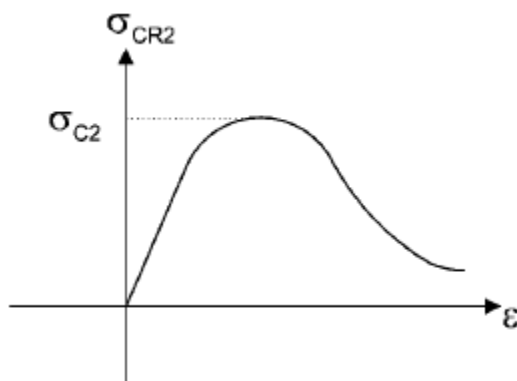
ε : Σχετική παραμόρφωση όπως παραπάνω [3.3.3]

σ_{CP} : Κρίσιμη τάση λυγισμού του συνεργαζόμενου ελάσματος σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{CP} = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) R_{eHp} \quad \beta_E > 1.25$$

$$\sigma_{CP} = R_{eHp} \quad \beta_E \leq 1.25$$

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$$



Σχήμα 3.11 : Καμπύλη φόρτισης σ - ε για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό

3.3.6 Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού με φλάντζα

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη σ_{CR3} - ε του τοπικού λυγισμού των κατασκευαστικών στοιχείων με φλάντζα που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί :

$$\sigma_{CR3} = \Phi \frac{10^3 b_E t_p R_{eHp} + (h_w t_w + b_f t_f) R_{eHs}}{10^3 s t_p + h_w t_w + b_f t_f}$$

όπου :

Φ : Συνάρτηση συσχέτισης όπως παραπάνω [3.3.3]

b_E : Ενεργό πλάτος σε m του συνεργαζόμενου ελάσματος, ίσο με :

$$b_E = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) s \quad \beta_E > 1.25$$

$$b_E = s \quad \beta_E \leq 1.25$$

h_{we} : Ενεργό ύψος σε mm του κορμού του ενισχυτικού, ίσο με :

$$h_{we} = \left(\frac{2.25}{\beta_w} - \frac{1.25}{\beta_w^2} \right) h_w \quad \beta_w > 1.25$$

$$h_{we} = h_w \quad \beta_w \leq 1.25$$

$$\beta_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{\varepsilon R_e H_s}{E}}$$

ε : Σχετική παραμόρφωση όπως παραπάνω [3.3.3]

3.3.7 Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού σκέτης λάμας

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη $\sigma_{CR4-\varepsilon}$ του τοπικού λυγισμού των κατασκευαστικών στοιχείων σκέτης λάμας που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί (Βλέπε σχήμα 3.12) :

$$\sigma_{CR4} = \Phi \frac{A_p \sigma_{CP} + A_s \sigma_{C4}}{A_p + A_s}$$

όπου :

Φ : Συνάρτηση συσχέτισης όπως παραπάνω [3.3.3]

σ_{CP} : Κρίσιμη τάση λυγισμού του συνεργαζόμενου ελάσματος σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{CP} = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) R_{eHp} \quad \beta_E > 1.25$$

$$\sigma_{CP} = R_{eHp} \quad \beta_E \leq 1.25$$

σ_{C4} : Κρίσιμη τάση σε N/mm^2 , ίση με :

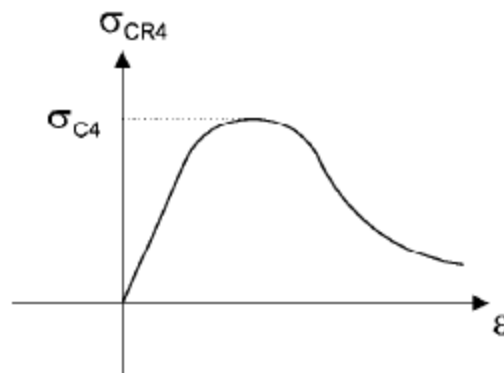
$$\sigma_{C4} = \frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon} \quad \text{for } \sigma_{E4} \leq \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon$$

$$\sigma_{C4} = R_{eHs} \left(1 - \frac{R_{eHs} \varepsilon}{4 \sigma_{E4}} \right) \quad \text{for } \sigma_{E4} > \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon$$

σ_{E4} : Κρίσιμη τάση τοπικού λυγισμού κατά Euler σε N/mm^2 , ίση με :

$$\sigma_{E4} = 160000 \left(\frac{t_w}{h_w} \right)^2$$

ε : Σχετική παραμόρφωση όπως παραπάνω [3.3.3]



Σχήμα 3.12 : Καμπύλη φόρτισης σ - ε για τοπικό λυγισμό κορμού ενισχυτικού σκέτης λάμας

3.3.8 Λυγισμός ελασμάτων

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη σ_{CR5} -ε του λυγισμού των ελασμάτων της εγκάρσιας τομής του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί :

$$\sigma_{CR5} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{eHp} \Phi \\ \Phi R_{eHp} \left[\frac{s}{l} \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) + 0.1 \left(1 - \frac{s}{l} \right) \left(1 + \frac{1}{\beta_E^2} \right)^2 \right] \end{array} \right\}$$

όπου :

Φ : Συνάρτηση συσχέτισης όπως παραπάνω [3.3.3]

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{E R_{eHp}}{E}}$$

s : Πλάτος του ελάσματος σε m, μεταξύ ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα

l : Μακρύτερη πλευρά του ελάσματος σε m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΛΟΙΟΥ

4.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η παρουσίαση του υπό μελέτη πλοίου, ώστε να είναι δυνατή η λεπτομερής μοντελοποίησή του σύμφωνα πάντα με τους διεθνείς κανονισμούς CSR (Common Structural Rules). Θα παρουσιαστούν όλα τα στοιχεία που συνθέτουν την εγκάρσια τομή του πλοίου και σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει η ανάλυσή τους σε δομικά στοιχεία όπως απαιτείται για την εφαρμογή της επαναληπτικής διαδικασίας και την εύρεση της μέγιστης διαμήκους αντοχής.

4.2. Στοιχεία και προδιαγραφές του πλοίου

Το υπό μελέτη πλοίο είναι το ARIADNE, φορηγό φορτίου χύδην (Bulk Carrier) 180000 TDW και έτους κατασκευής 2009. Συμμορφώνεται πλήρως με τους κανονισμούς CSR (Common Structural Rules) και αποτελείται από εννιά αμπάρια εκ των οποίων το υπ' αριθμόν 6 δύναται να κατακλυσθεί με θαλάσσιο έρμα σε περίπτωση ζυγοστάθμισης, ενώ τα αμπάρια οκτώ και δύο μπορούν να κατακλυσθούν εν μέρει μόνο σε κατάσταση λιμενισμού. Η εγκάρσια τομή του αποτελείται κυρίως από χάλυβες υψηλής αντοχής. Το κατάστρωμα και ο πυθμένας είναι κατασκευασμένα από χάλυβα πολύ υψηλής αντοχής με όριο διαρροής 355MPa, ενώ τα πλευρικά ελάσματα είναι κατασκευασμένα από χάλυβα υψηλής αντοχής και ορίου διαρροής 315MPa.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριες διαστάσεις και η κλάση του υπό μελέτη πλοίου.

Πίνακας 4.1

PRINCIPAL DIMENSIONS

LENGTH	D. A.	approx. 292.00 M
LENGTH	B. P.	283.00 M
BREADTH	MOULDED	45.00 M
DEPTH	MOULDED	24.70 M
DRAUGHT	DESIGN	16.50 M
DRAUGHT	SCANT.	18.20 M

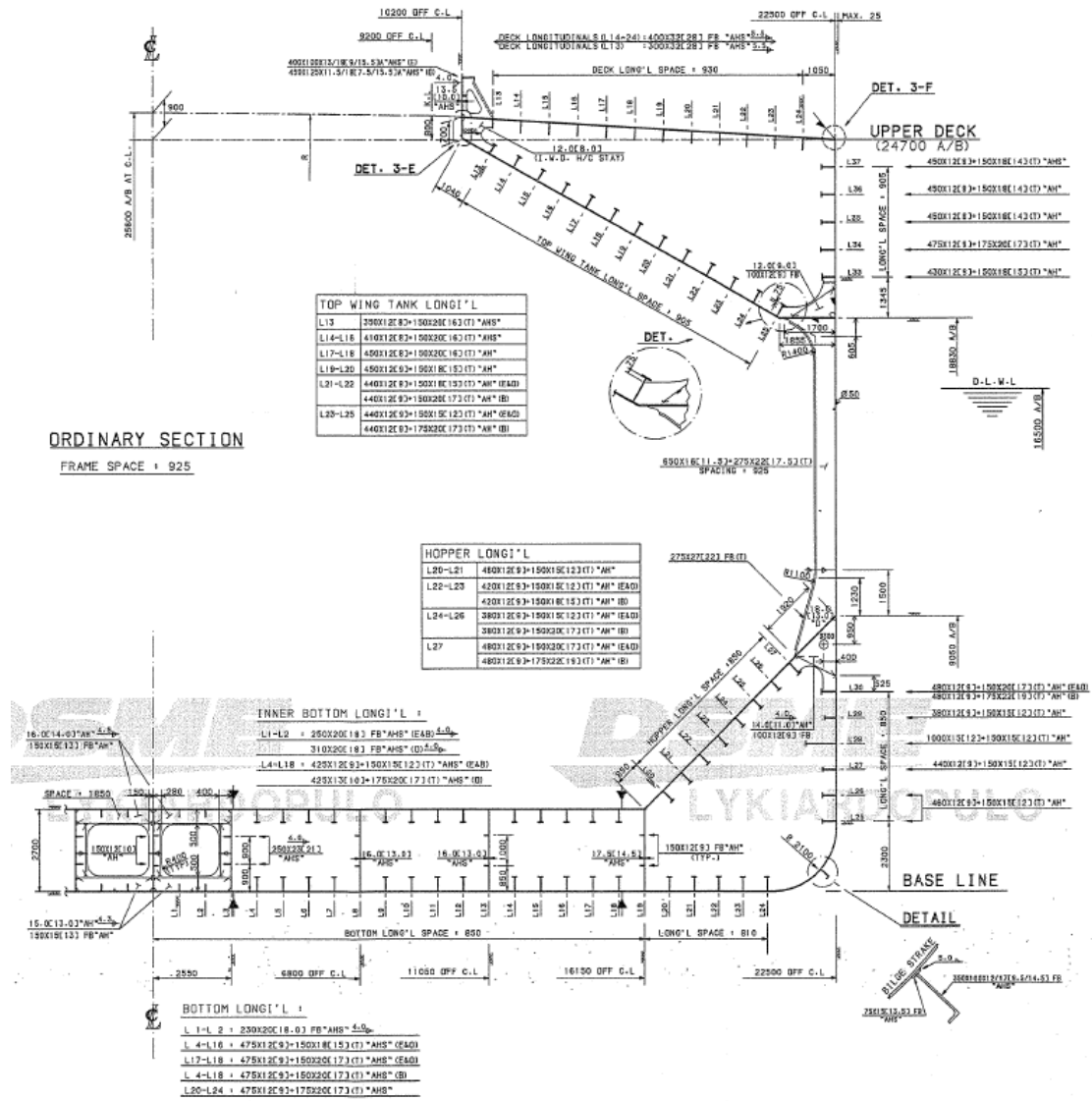
CLASSIFICATION

Lloyd's Register
+100A1 Bulk Carrier, CSR, BC-A, (maximum cargo density 3.0 t/m ³), (holds 2, 4, 6 and 8 may be empty), ESP,
GRAB25], LI, *IWS, ShipRight (CM), +LMC, UMS with the descriptive note ShipRight (SCM).

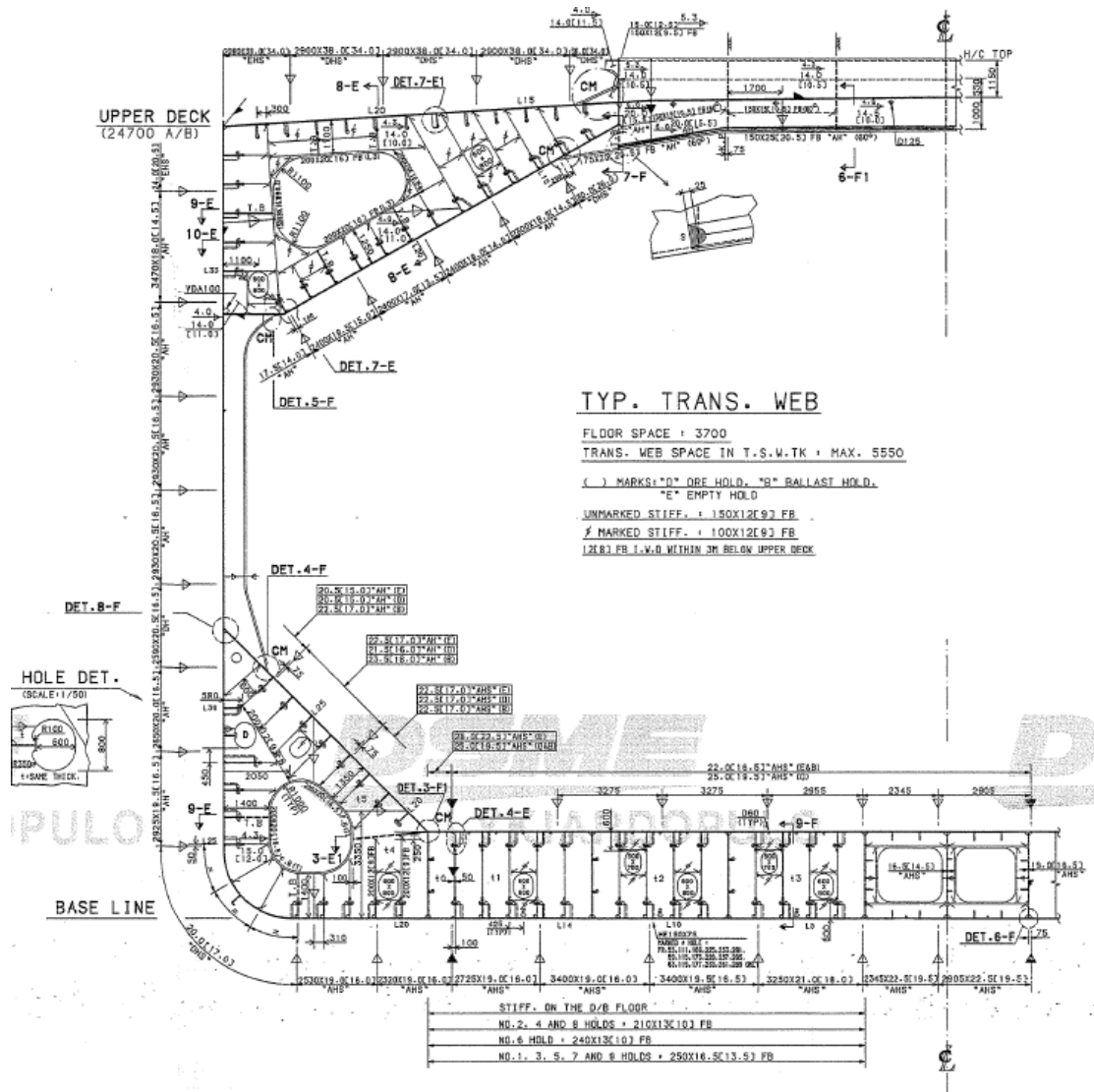
4.3. Στοιχεία και προδιαγραφές της μέσης τομής

Το υπό μελέτη πλοίο είναι κατασκευασμένο με εγκάρσιο σύστημα ενίσχυσης και διαθέτει διπύθμενο, πλαϊνή άνω δεξαμενή (wing tank) και πλαϊνή κάτω δεξαμενή (hopper tank) ενισχυμένα κατά το διάμηκες με ενισχυτικά τύπου T σχεδόν σε όλη τη μέση τομή εξαιρουμένου του καταστρώματος που φέρει ενισχυτικά απλής λάμας. Στον πυθμένα οι εγκάρσιοι ιστοί ενίσχυσης επαναλαμβάνονται κάθε 3700mm ενώ στο άνω μέρος του πλοίου έχουν μέγιστη απόσταση μεταξύ τους τα 5550mm. Επίσης το frame spacing είναι 925mm. Παρακάτω στα σχήματα 4.1α και 4.1β παρουσιάζεται η γενικευμένη μέση τομή με όλες τις απαραίτητες κατασκευαστικές λεπτομέρειες.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν σε πίνακες αναλυτικά όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία της εγκάρσιας τομής πριν το χωρισμό τους σε δομικά στοιχεία. Η μοντελοποίηση των δομικών στοιχείων και οι προκύπτουσες διαστάσεις, συμμορφώνονται πλήρως με τις οδηγίες των κανονισμών και παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 4.1α : Μέση τομή του πλοίου



Σχίμα 4.1β : Μέση τομή του πλοίου

Για λόγους κατανόησης και καλύτερης παρουσίασης των στοιχείων, η μέση τομή χωρίζεται σε 15 ενισχυμένα πλαίσια, εις εξ αυτών αποτελείται από άλλοτε συνδεόμενα ή και συνεχόμενα κομμάτια ελασμάτων τα οποία ενισχύονται διαμήκως ή εγκάρσιως από τα αντίστοιχα διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά. Κάθε ένα από αυτά θεωρείται ότι εκτείνεται κατά το διάμηκες όσο και ο αντίστοιχος διαμήκης διαμερισμός, ο οποίος αλλάζει ανάλογα με την κατακόρυφη θέση των στοιχείων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλαίσια αυτά και ταξινομούνται οι διαστάσεις των στοιχείων που τα αποτελούν.

Όλες οι αναφερόμενες διαστάσεις, είναι οι δοθείσες μεικτές (gross) διαστάσεις οι οποίες δεν συμπεριλαμβάνουν την απομείωση (corrosion addition) του πάχους των ελασμάτων λόγω λειτουργικής διάβρωσης στη διάρκεια της ζωής τους.

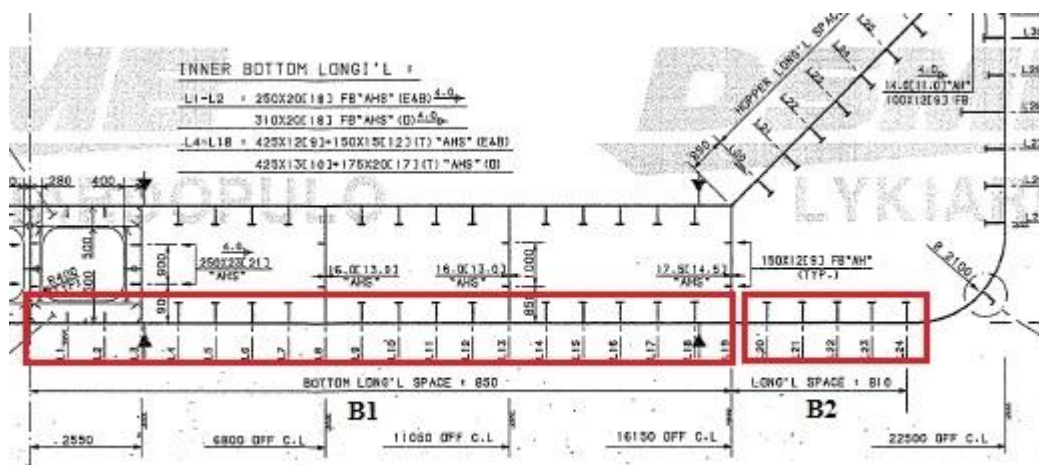
4.3.1. Ενισχυμένα πλαίσια πυθμένα

Τα ελάσματα του πυθμένα αποτελούνται από τα πλαίσια **B1 B2** τα οποία χωρίζονται από την πλευρική σταθμίδα της δεξαμενής hopper tank. Το πάχος του ελάσματος στο πλαίσιο B1, δεν είναι ενιαίο αλλά παρουσιάζει διαβαθμίσεις. Παρακάτω στον πίνακα 4.2 και σχήμα 4.2, δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η διαρρύθμιση των στοιχείων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ``AHS`` και ``AH``, σημαίνει 355 N/mm² και 315 N/mm² ελάχιστο όριο διαρροής αντίστοιχα.

Πίνακας 4.2

Πλαίσιο	Διαμερισμός Ενισχυτικών (mm)	Αρ. Ενισχυτικού	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)	Κορμός (mm)	Φλάντζα (mm)
B 1	850	L1	22.5 ^{AHS}	2345	230x20 ^{AHS}	-
		L2				
		L4	21 ^{AHS}	3250	475x12 ^{AHS}	150x18 ^{AHS}
		L5				
		L6				
		L7				
		L9	19.5 ^{AHS}	3400		
		L10				
		L11				
		L12	19 ^{AHS}	3400		
		L14		2725		
		L15				
		L16				
		L17			150x20 ^{AHS}	
L18						

B 2	810	L20	19 ^{AHS}	2320	475x12 ^{AHS}	175x20 ^{AHS}
		L21				
		L22				
		L23				
		L24				



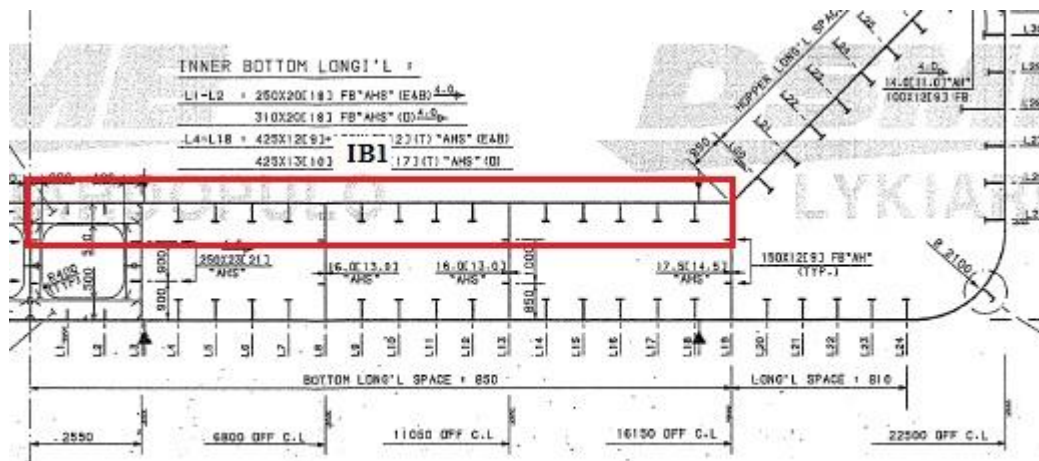
Σχήμα 4.2 : Ενισχυμένα πλαίσια πυθμένα

4.3.2. Ενισχυμένα πλαίσια εσωτερικού πυθμένα

Τα έλασμα του εσωτερικού πυθμένα αποτελείται από το πλαίσιο **IB1** το οποίο εκτείνεται από την πλευρική σταθμίδα της δεξαμενής hopper tank, μέχρι τη σταθμίδα της C1. Το πάχος του ελάσματος στο πλαίσιο IB1, είναι ενιαίο και δεν παρουσιάζει διαβαθμίσεις. Παρακάτω στον πίνακα 4.3 και σχήμα 4.3, δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η διαρρύθμιση των στοιχείων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ``AHS`` και ``AH``, σημαίνει 355 N/mm² και 315 N/mm² ελάχιστο όριο διαρροής αντίστοιχα.

Πίνακας 4.3

Πλαίσιο	Διαμερισμός Ενισχυτικών (mm)	Αρ. Ενισχυτικού -	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)	Κορμός (mm)	Φλάντζα (mm)
IB 1	850	L1	25 ^{AHS}	2345	310x20 ^{AHS}	-
		L2				
		L4		2955	425x13 ^{AHS}	175x20 ^{AHS}
		L5				
		L6				
		L7		3275		
		L9				
		L10				
		L11		3275		
		L12				
		L14				
		L15		4300		
		L16				
		L17				
		L18				



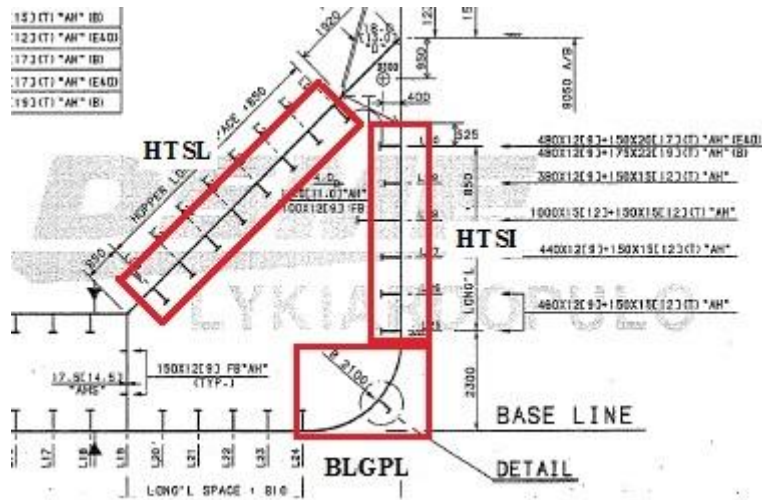
Σχήμα 4.3 : Ενισχυμένα πλαίσια εσωτερικού πυθμένα

4.3.3. Ενισχυμένα πλαίσια δεξαμενής hopper tank

Η δεξαμενή hopper αποτελείται από το άνω κεκλιμένο ενισχυμένο πλαίσιο HTSL, το κάτω πλευρικό HTSI και το bilgeplate BLGPL. Όλα τα πλαίσια εκτός του bilgeplate παρουσιάζουν αλλαγές στα πάχη των ελασμάτων τους. Παρακάτω στον πίνακα 4.4 και σχήμα 4.4, δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η διαρρύθμιση των στοιχείων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ``AHS, DHS`` και ``AH, DH``, σημαίνει 355 N/mm^2 και 315 N/mm^2 ελάχιστο όριο διαρροής αντίστοιχα.

Πίνακας 4.4

Πλαίσιο	Διαμερισμός Ενισχυτικών (mm)	Αρ. Ενισχυτικού	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)	Κορμός (mm)	Φλάντζα (mm)
HTSL	850	L20	22.5^{AHS}	3400	$460 \times 12^{\text{AH}}$	$150 \times 15^{\text{AH}}$
		L21				
		L22			$420 \times 12^{\text{AH}}$	
		L23				
		L24	21.5^{AH}	3400	$380 \times 12^{\text{AH}}$	
		L25				
		L26				
L27		$480 \times 12^{\text{AH}}$			$150 \times 20^{\text{AH}}$	
HTSI		L25	19.5^{AH}	2925	$460 \times 12^{\text{AH}}$	$150 \times 15^{\text{AH}}$
		L26				
		L27			$440 \times 12^{\text{AH}}$	
		L28			$1000 \times 15^{\text{AH}}$	
		L29	20^{AH}	2650	$380 \times 12^{\text{AH}}$	
		L30			$480 \times 12^{\text{AH}}$	$150 \times 20^{\text{AH}}$
BLGPL	-	-	20^{DHS}	-	-	-



Σχήμα 4.4 : Ενισχυμένα πλαίσια δεξαμενής hopper tank

4.3.4. Ενισχυμένα πλευρικά πλαίσια και πλαίσια δεξαμενής top wing tank

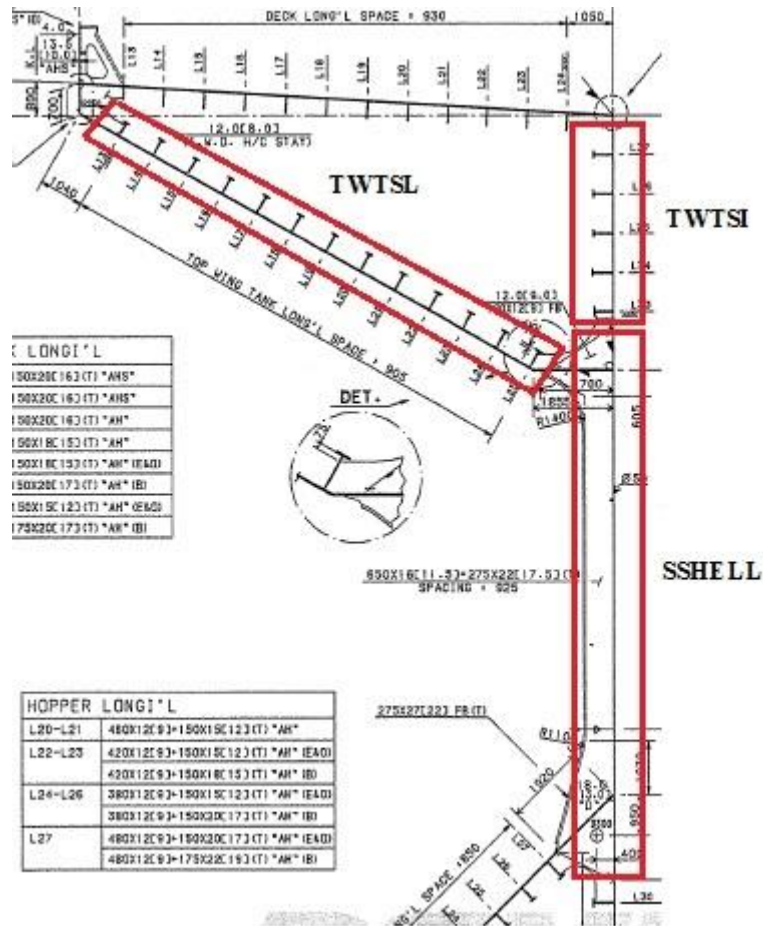
Σε αυτήν την ενότητα περιλαμβάνεται το κεκλιμένο ενισχυμένο πλαίσιο TWTSL, το πλευρικό ενισχυμένο πλαίσιο TWTSI και το επίσης πλευρικό SSHELL. Όλα τα πλαίσια παρουσιάζουν αλλαγές στα πάχη των ελασμάτων τους. Παρακάτω στον πίνακα 4.5 και σχήμα 4.5, δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η διαρρύθμιση των στοιχείων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ``AHS, DHS, EHS`` και ``AH, DH``, σημαίνει 355 N/mm^2 και 315 N/mm^2 ελάχιστο όριο διαρροής αντίστοιχα.

Πίνακας 4.5α

Πλαίσιο	Διαμερισμός Ενισχυτικών (mm)	Αρ. Ενισχυτικού	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)	Κορμός (mm)	Φλάντζα (mm)		
TWTSL	905	L13	30 ^{DHS}	1800	350x12 ^{AHS}	150x20 ^{AHS}		
		L14						
		L15	18.5 ^{AH}	2300	410x12 ^{AHS}			
		L16						
		L17						
		L18	18 ^{AH}	2400	450x12 ^{AHS}			
		L19				150x18 ^{AH}		
		L20	17 ^{AH}	2400				
		L21						
		L22				440x12 ^{AH}		
		L23	18.5 ^{AH}	2400				
		L24						
		L25						
		TWTSI		L33	18 ^{AH}	3470	430x12 ^{AH}	150x18 ^{AH}
				L34			475x12 ^{AH}	175x20 ^{AH}
L35								
L36	24 ^{EHS}			1850	450x12 ^{AH}	150x18 ^{AH}		
L37								

Πίνακας 4.5β

Πλαίσιο	Αρ. Ελασμάτων	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)
	No		
SSHELL	1	20.5	2930
	2		
	3		
	4		2590



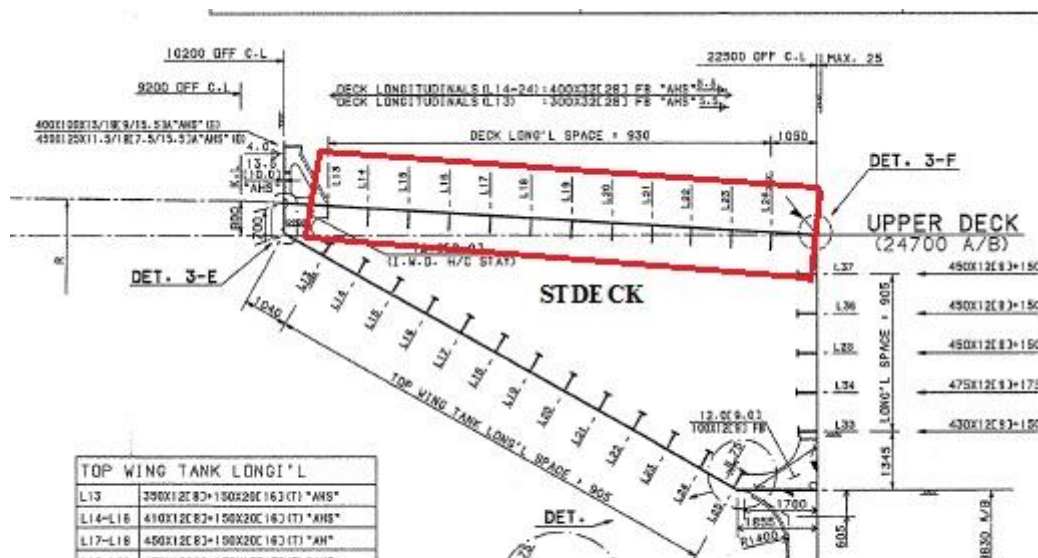
Σχήμα 4.5 : Ενισχυμένα πλευρικά πλαίσια και πλαίσια δεξαμενής top wing tank

4.3.5. Ενισχυμένο πλαίσιο καταστρώματος

Σε αυτήν την ενότητα περιλαμβάνεται το κεκλιμένο ενισχυμένο πλαίσιο STDECK. Το πλαίσιο δεν παρουσιάζει αλλαγές στα πάχη των ελασμάτων του. Παρακάτω στον πίνακα 4.6 και σχήμα 4.6, δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η διαρρύθμιση των στοιχείων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ``AHS, DHS, EHS`` και ``AH, DH``, σημαίνει 355 N/mm^2 και 315 N/mm^2 ελάχιστο όριο διαρροής αντίστοιχα.

Πίνακας 4.6

Πλαίσιο	Διαμερισμός Ενισχυτικών (mm)	Αρ. Ενισχυτικού	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)	Κορμός (mm)	Φλάντζα (mm)
STDECK	930	L13	38 ^{DHS}	1520	300x32 ^{AHS}	-
		L14		2900	400x32 ^{AHS}	
		L15				
		L16				
		L17				
		L18				
		L19				
		L20				
		L21				
		L22				
		L23		2080		
L24						



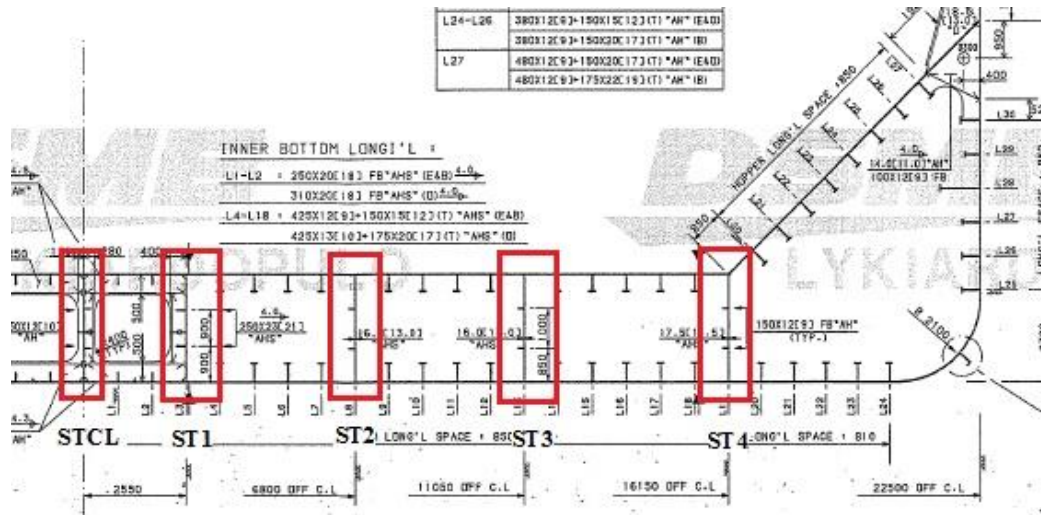
Σχήμα 4.6 : Ενισχυμένο πλαίσιο καταστρώματος

4.3.6. Ενισχυμένα πλαίσια σταθμίδων πυθμένα

Σε αυτήν την ενότητα περιλαμβάνονται τα ενισχυμένα πλαίσια σταθμίδων του πυθμένα SG1,SG2,SG3,SG4,SGCL. Τα πλαίσια SG2,SG3 έχουν το ίδιο πάχος ελάσματος ενώ τα υπόλοιπα διαφέρουν. Όλα τα πλαίσια είναι ενισχυμένα με ενισχυτικά απλής λάμας. Παρακάτω στον πίνακα 4.7 και σχήμα 4.7, δίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις και η διαρρύθμιση των στοιχείων αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι ``AHS, DHS, EHS`` και ``AH, DH``, σημαίνει 355 N/mm² και 315 N/mm² ελάχιστο όριο διαρροής αντίστοιχα.

Πίνακας 4.7

Πλαίσιο	Διαμερισμός Ενισχυτικών (mm)	Αρ. Ενισχυτικού -	Πάχος Ελάσματος (mm)	Διαμερισμός Ελασμάτων (mm)	Κορμός (mm)	Φλάντζα (mm)
SGCL	925	L1CL	16.5 ^{AHS}	2700	150x12 ^{AH}	-
		L2CL			250X23 ^{AHS}	
SG1	900	L1ST1	19 ^{AHS}			
		L2ST1				
SG2	925	L1ST2	16 ^{AHS}		150X12 ^{AH}	
		L2ST2				
SG3		L1ST3				
		L2ST3				
SG4		L1ST4	17.5 ^{AHS}			
		L2ST4				



Σχήμα 4.7 : Ενισχυμένα πλαίσια σταθμίδων πυθμένα

4.4.7. Υπολογισμός ροπών σχεδίασης του πλοίου

Σε αυτό το σημείο θα ήταν χρήσιμο να γίνει μια αναφορά στους κοινούς κανόνες κατασκευής CSR και στις τιμές που προβλέπουν αυτοί για τις μέγιστες τιμές της ροπής σε ήρεμο νερό αλλά και σε κυματισμό. Επίσης θα αναφερθούν και οι επιτρεπόμενες τιμές των ροπών σε ήρεμο νερό του πλοίου και με βάση το loading manual για την αντίστοιχη κατάσταση υπηρεσίας.

Οι μέγιστες ροπές σε ήρεμο νερό και σε κυματισμό γύρω από τη μέση τομή σύμφωνα με τους κοινούς κανόνες κατασκευής, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.8. Ακόμη οι τιμές που προβλέπει το εγχειρίδιο λειτουργίας για την μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή που δέχεται η μέση τομή του πλοίου σε ήρεμο νερό, παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.9.

Πίνακας 4.8

Ροπές Κάμψης CSR	Hogging Κατάσταση	Sagging Κατάσταση
	(kNm)	(kNm)
Ροπή σε ήρεμο νερό	4.215.665	3.195.440
Ροπή σε κυματισμό	6.325.904	6.626.129

Πίνακας 4.9

Hogging Κατάσταση	Sagging Κατάσταση
(kNm)	(kNm)
5.003.100	4.022.100

Λαμβάνοντας υπόψη τη ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό σε κατάσταση Hogging σύμφωνα με το loading manual, $M_{SWH} = 4.215.665 \text{ kNm}$ και την καμπτική ροπή σχεδίασης σε κυματισμό για την άθικτη κατάσταση, $M_{WVH} = 6.325.904 \text{ kNm}$ και σύμφωνα με τη σχέση που περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο

$$M = M_{SW} + \gamma_w M_{WV} \quad \gamma_w = 1.20$$

Αναμένεται μια τιμή μέγιστης ροπής κάμψης, μεγαλύτερη ή ίση με :

$$M = 11.806.749,8 \text{ kNm}$$

Σε επόμενο κεφάλαιο θα ελεγχθεί εάν ικανοποιείται ο κανονισμός για τη μέγιστη διαμήκη αντοχή του πλοίου αφού αυτή πρώτα υπολογιστεί από την επαναληπτική διαδικασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ

5.1. Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο συνοψίζεται η εφαρμογή της CSR οριακής επαναληπτικής προσέγγισης που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, για την αξιολόγηση της μέγιστης αντοχής του φορτηγού φορτίου χύδην που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στα στάδια της διαδικασίας που περιγράφεται εδώ, συμπεριλαμβάνονται, ο χωρισμός της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία, ο προσδιορισμός των καθαρών διαστάσεων μετά τις απομειώσεις λόγω της επίδρασης της διάβρωσης, ο υπολογισμός των καμπυλών φόρτισης των στοιχείων και η παρουσίαση των παρατηρήσεων και παραδοχών που έχουν γίνει.

5.2. Βήματα της οριακής επαναληπτικής προσέγγισης

Η οριακή επαναληπτική προσέγγιση, είναι μία μέθοδος των κοινών κανόνων κατασκευής CSR για την εκτίμηση της μέγιστης διαμήκους καμπτικής ροπής που μπορεί να υποβληθεί η γάστρα του πλοίου. Στοχεύει στο να προσδιορίσει τη μέγιστη αντοχή σε κάμψη, χωρίζοντας την εγκάρσια τομή μεταξύ δύο παρακείμενων εγκάρσιων νομέων σε δομικά στοιχεία τα οποία θεωρείται ότι δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και χρησιμοποιώντας τους τρόπους κατάρρευσής τους μέσα από τις καμπύλες φορτίσεων.

Η μέγιστη ικανότητα παραλαβής καμπτικού φορτίου σε κατάσταση Hogging μίας εγκάρσιας τομής πλοίου, καθορίζεται ως η μέγιστη τιμή της στατικής μη γραμμικής καμπύλης ροπής-καμπυλότητας $M-\chi$, η οποία παρουσιάζει την προοδευτική κατάρρευση της γάστρας υπό διαμήκη ροπή κάμψης.

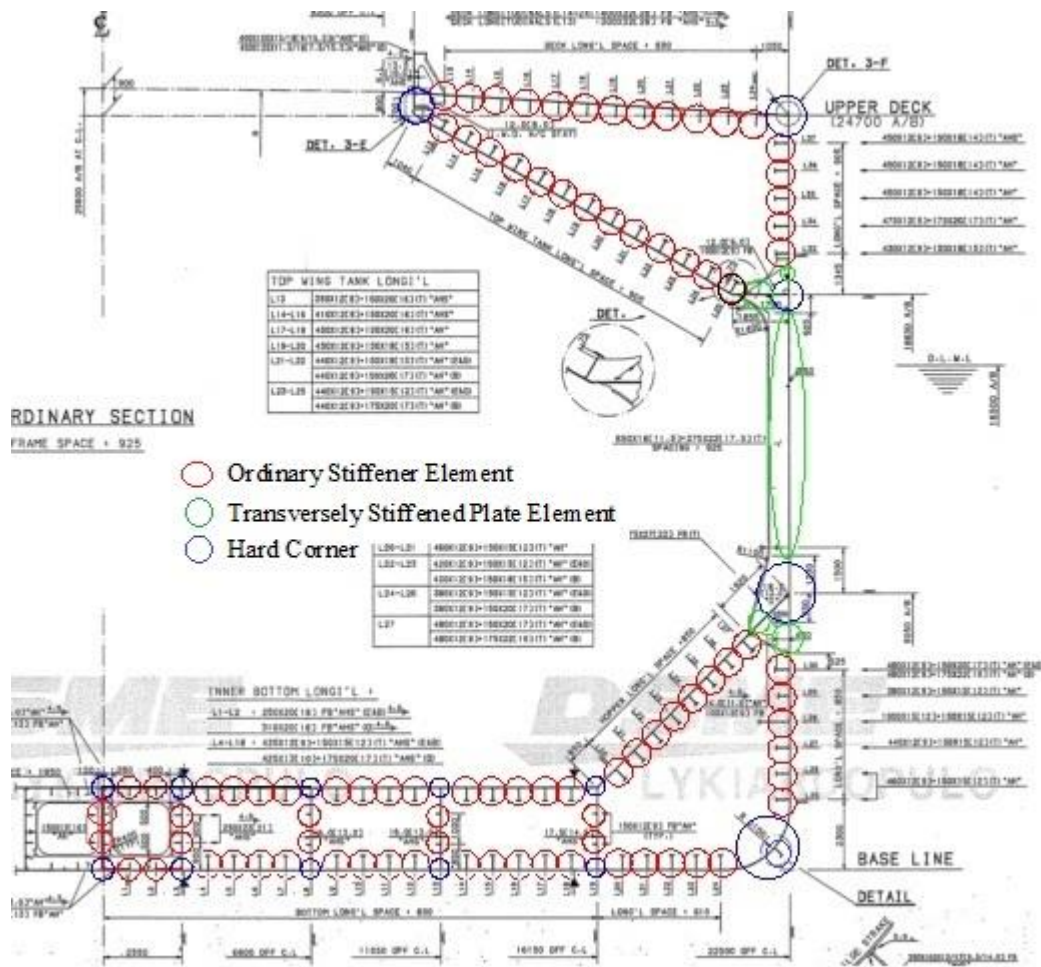
Σε κάθε βήμα, η γάστρα υποβάλλεται σε μία καμπυλότητα χ_i , προσδιορίζονται οι προκύπτουσες παραμορφώσεις ϵ_{ij} , και τάσεις σ_{ij} που δρουν σε κάθε δομικό στοιχείο j , υπολογίζεται η νέα θέση του ουδέτερου άξονα με βάση την επιβολή της ισορροπίας δυνάμεων και καταγράφεται η προκύπτουσα ροπή M_i . Η μέγιστη αντοχή της γάστρας είναι η μέγιστη τιμή M_u της καμπύλης M- χ .

Λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου δόθηκε στο Κεφάλαιο 3. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται τα βήματα της διαδικασίας όπως αυτά εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη, για τον προσδιορισμό της μέγιστης αντοχής του πλοίου ARIADNE.

5.2.1. Βήμα 1 – Διαχωρισμός της εγκάρσιας τομής σε δομικά στοιχεία

Στο πρώτο βήμα της επαναληπτικής προσέγγισης, πραγματοποιείται ο διαχωρισμός της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Παρακάτω στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση της εγκάρσιας τομής σύμφωνα πάντα με τους κανονισμούς μοντελοποίησης, όπως αυτοί έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Τα δομικά στοιχεία στα οποία μοντελοποιείται η διατομή είναι ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα (Ordinary Stiffener Element), εγκαρσώς ενισχυμένα ελάσματα (Transversely Stiffened Plate Element) και γωνιακά στοιχεία (Hard Corners). Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι το bilge plate του πυθμένα, μοντελοποιείται σε hard corner και ότι η διατομή αποτελείται από συνολικά 176 ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα, 10 εγκαρσώς ενισχυμένα ελάσματα και 34 γωνιακά στοιχεία.



Σχήμα 5.1 : Μοντελοποίηση της διατομής

5.2.2. Βήμα 2 – Αναλυτική μοντελοποίηση και παρουσίαση καμπυλών φόρτισης

Στο Κεφάλαιο 3 όπου γίνεται η αναλυτική περιγραφή της επαναληπτικής προσέγγισης, περιγράφονται οι κανονισμοί με βάση τους οποίους γίνεται η μοντελοποίηση των στοιχείων. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η αναλυτική παρουσίαση της μοντελοποίησης με όλες τις απαραίτητες διαστάσεις και τιμές των δομικών στοιχείων, αφού πρώτα δοθούν κάποιες επιπλέον απαιτήσεις των κανονισμών σχετικά με τον καθορισμό των διαστάσεων.

- **Μειωμένα πάχη**

Όπως προαναφέρθηκε, η εγκάρσια διατομή της γάστρας απαρτίζεται από δομικά στοιχεία (structural elements) τα οποία συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή της γάστρας και τα οποία εκλαμβάνονται στους υπολογισμούς μέγιστης αντοχής όχι με τα πραγματικά πάχη ναυπηγήσεως $t_{gross_offered}$ αλλά με τα πάχη $t_{net_offered}$ τα οποία θεωρούνται μειωμένα κατά τι λόγω κάποιας θεωρούμενης υποθετικής διάβρωσης:

$$t_{net_offered} = t_{gross_offered} - 0.5 t_C$$

όπου t_C το περιθώριο διάβρωσης του δομικού στοιχείου.

Το περιθώριο διάβρωσης t_C , μετρούμενο σε mm, που υφίσταται σε κάθε δομικό στοιχείο της γάστρας εξαρτάται από τις διαβρωτικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή του, οι οποίες αρκετές φορές είναι διαφορετικές σε κάθε πλευρά του. Είναι:

$$t_C = \text{Roundup}_{0.5}(t_{C1} + t_{C2}) + 0.5$$

ή

$$t_C = \text{Roundup}_{0.5}(2t_{C1}) + 0.5$$

όπου t_{C1} , t_{C2} οι αντίστοιχες διαβρώσεις εκατέρωθεν του δομικού στοιχείου οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1.

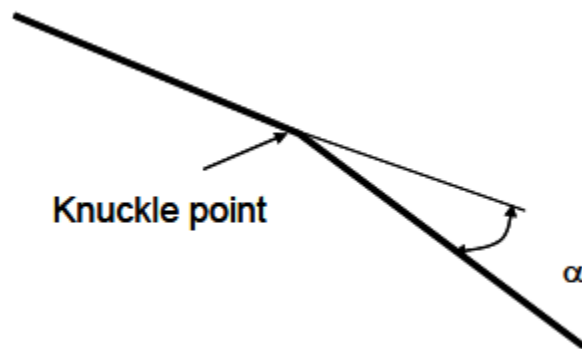
Η τιμή του t_C δεν πρέπει να λαμβάνεται, έστω και αν προκύπτει, ποτέ μικρότερη των 2 mm εκτός των περιπτώσεων κορμού ή πέλματος ενισχυτικών.

Πίνακας 5.1

Compartment Type	Structural member		Corrosion addition, t_{c1} or t_{c2} in mm	
			BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other
Ballast water tank ⁽²⁾	Face plate of primary members	Within 3m below the top of tank ⁽³⁾	2.0	
		Elsewhere	1.5	
	Other members	Within 3 m below the top of tank ⁽³⁾	1.7	
		Elsewhere	1.2	
Dry bulk cargo hold ⁽¹⁾	Transverse bulkhead	Upper part ⁽⁴⁾	2.4	1.0
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate	5.2	2.6
		Other parts	3.0	1.5
	Other members	Upper part ⁽⁴⁾	1.8	1.0
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers		
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers	2.2	1.2
		Other parts	2.0	1.2
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating	Continuous wooden ceiling	2.0	1.2
		No continuous wooden ceiling	3.7	2.4
	Exposed to atmosphere	Horizontal member and weather deck ⁽⁵⁾		1.7
Non horizontal member		1.0		
Exposed to sea water ⁽⁷⁾			1.0	
Fuel oil tanks and lubricating oil tanks ⁽²⁾			0.7	
Fresh water tanks			0.7	
Void spaces ⁽⁶⁾	Spaces not normally accessed, e.g. access only through bolted manholes openings, pipe tunnels, etc.		0.7	
Dry spaces	Internal of deck houses, machinery spaces, stores spaces, pump rooms, steering spaces, etc.		0.5	
Other compartments than above			0.5	
Notes				
(1) Dry bulk cargo hold includes holds, intended for the carriage of dry bulk cargoes, which may carry water ballast.				
(2) The corrosion addition of a plating between water ballast and heated fuel oil tanks is to be increased by 0.7 mm.				
(3) This is only applicable to ballast tanks with weather deck as the tank top.				
(4) Upper part of the cargo holds corresponds to an area above the connection between the top side and the inner hull or side shell. If there is no top side, the upper part corresponds to the upper one third of the cargo hold height.				
(5) Horizontal member means a member making an angle up to 20° as regard as a horizontal line.				
(6) The corrosion addition on the outer shell plating in way of pipe tunnel is to be considered as water ballast tank.				
(7) Outer side shell between normal ballast draught and scantling draught is to be increased by 0.5 mm.				

- *Σημείο αλλαγής διεύθυνσης ελάσματος*

Στην περίπτωση που υπάρχει κάποιο σημείο αλλαγής διεύθυνσης των ελασμάτων και εκτροπής σε κάποια γωνία (Βλέπε Σχήμα 5.2), οι επιφάνειες των ελασμάτων εκατέρωθεν του σημείου που σχηματίζουν γωνία μεγαλύτερη των 30 μοιρών, μοντελοποιούνται σε ένα ενιαίο γωνιακό στοιχείο. Η κάθε πλευρά του γωνιακού στοιχείου θεωρείται ότι εκτείνεται κατά $20t_p$ για εγκάρσιως ενισχυμένα ελάσματα και $0.5s$ για διαμήκως ενισχυμένα.



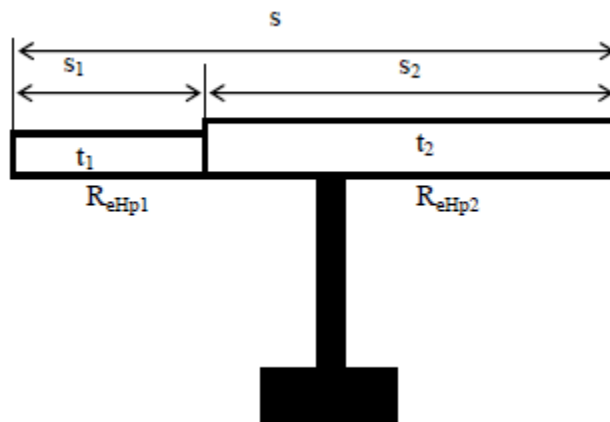
Σχήμα 5.2 : Αλλαγή διεύθυνσης ελάσματος

- *Αλλαγή πάχους και τάσεως διαρροής*

Όταν και όπου το συνεργαζόμενο έλασμα είναι κατασκευασμένο από διαφορετικά πάχη χαλύβων ή/και από χάλυβες με διαφορετικό σημείο τάσεως διαρροής, τότε λαμβάνεται υπόψη ο ένας μέσος όρος πάχους ή/και τάσεως διαρροής σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις :

$$t = \frac{t_1 s_1 + t_2 s_2}{s}, \quad R_{eHp} = \frac{R_{eHp1} t_1 s_1 + R_{eHp2} t_2 s_2}{ts}$$

Όπου R_{eHp1} , R_{eHp2} , t_1 , t_2 , s_1 , s_2 και s δείχνονται στο Σχήμα 5.3



Σχήμα 5.3 : R_{eHp1} , R_{eHp2} , t_1 , t_2 , s_1 , s_2 και s

Στη συνέχεια παραθέτονται οι πίνακες με όλα τα δομικά στοιχεία τα οποία συνθέτουν τη μέση τομή, όπου καταγράφονται όλες οι μεικτές διαστάσεις και οι διαστάσεις μετά τις απομειώσεις παχών. Επίσης δίνονται οι ενεργές επιφάνειες των στοιχείων, οι τάσεις διαρροής σε κάθε έλασμα αλλά και οι αποστάσεις του εγκάρσιου συστήματος ενίσχυσης.

Πίνακας 5.2 : Διαστασιολόγηση ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα

Location of ordinary stiffeners		gross			net							A	Rehs	Rehp	I
		tp	tw	tf	tp	bp	tw	bw	tf	bf					
	L4	21	12	18	19.5	850	10.5	475	16.5	150	24037.5	355	355	3.7	
	L5	21	12	18	19.5	850	10.5	475	16.5	150	24037.5	355	355	3.7	
	L6	21	12	18	19.5	850	10.5	475	16.5	150	24037.5	355	355	3.7	
	L7	20.1	12	18	18.6	850	10.5	475	16.5	150	23272.5	355	355	3.7	
	L9	19.5	12	18	18	850	10.5	475	16.5	150	22762.5	355	355	3.7	
	L10	19.5	12	18	18	850	10.5	475	16.5	150	22762.5	355	355	3.7	
	L11	19.2	12	18	17.7	850	10.5	475	16.5	150	22507.5	355	355	3.7	
	L12	19	12	18	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	355	355	3.7	
Bottom plate	L14	19	12	18	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	355	355	3.7	
	L15	19	12	18	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	355	355	3.7	
	L16	19	12	18	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	355	355	3.7	
	L17	19	12	20	17.5	850	10.5	475	18.5	150	22637.5	355	355	3.7	
	L18	19	12	20	17.5	850	10.5	475	18.5	150	22637.5	355	355	3.7	
	L20	19	12	20	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	355	355	3.7	
	L21	19	12	20	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	355	355	3.7	
	L22	19	12	20	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	355	355	3.7	
	L23	19	12	20	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	355	355	3.7	
	L24	19.5	12	20	18	810	10.5	475	18.5	175	22805	355	355	3.7	
	L4	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L5	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L6	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L7	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L9	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
In. Bottom plate	L10	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L11	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L12	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L14	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L15	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L16	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L17	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
	L18	25	13	20	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	355	355	3.7	
Bottom plate	L1	22.5	20	-	21	850	18.5	230	-	-	22105	355	355	3.7	
	L2	22.5	20	-	21	850	18.5	230	-	-	22105	355	355	3.7	
In. Bottom plate	L1	25	20	-	22.25	850	18.5	310	-	-	24647.5	355	355	3.7	
	L2	25	20	-	22.25	850	18.5	310	-	-	24647.5	355	355	3.7	
2550 OFF C L girder	st up	19	23	-	17.5	900	21.5	250	-	-	21125	355	355	3.7	
	st down	19	23	-	17.5	900	21.5	250	-	-	21125	355	355	3.7	
CL girder	st up	16.5	12	-	15	925	10.5	150	-	-	15450	315	355	3.7	
6800 OFF C L girder	>>	16	12	-	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	315	355	3.7	
11050 OFF C L girder	>>	16	12	-	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	315	355	3.7	
16150 OFF C L girder	>>	17.5	12	-	16	925	10.5	150	-	-	16375	315	355	3.7	
CL girder	st down	16.5	12	-	15	925	10.5	150	-	-	15450	315	355	3.7	
6800 OFF C L girder	>>	16	12	-	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	315	355	3.7	
11050 OFF C L girder	>>	16	12	-	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	315	355	3.7	
16150 OFF C L girder	>>	17.5	12	-	16	925	10.5	150	-	-	16375	315	355	3.7	

Πίνακας 5.3 : Διαστασιολόγηση ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα

Location of ordinary stiffeners		gross			net			A	Rehs	Rehp	I			
		tp	tw	tf	tp	bp	tw					bw	tf	bf
Lower side shell	L25	19.7	12	15	18.2	850	10.5	460	13.5	150	22325	315	315	3.7
	L26	19.5	12	15	18	850	10.5	460	13.5	150	22155	315	315	3.7
	L27	19.5	12	15	18	850	10.5	440	13.5	150	21945	315	315	3.7
	L28	19.5	15	15	18	850	13.5	1000	13.5	150	30825	315	315	3.7
	L29	20	12	15	18.5	850	10.5	380	13.5	150	21740	315	315	3.7
	L30	20	12	20	18.5	850	10.5	480	18.5	150	23540	315	315	3.7
Sheer strake shell	L33	18	12	18	16.5	905	10.5	430	16.5	150	21922.5	315	315	5.55
	L34	18	12	20	16.5	905	10.5	475	18.5	175	23157.5	315	315	5.55
	L35	18	12	18	16.25	905	10	450	16	150	21606.25	315	315	5.55
	L36	22	12	18	20.25	905	10	450	16	150	25226.25	315	355	5.55
	L37	24	12	18	22.25	905	10	450	16	150	27036.25	355	355	5.55
Sloped plate of hopper tank	L20	22.5	12	15	19.75	850	10.5	460	13.5	150	23642.5	315	355	3.7
	L21	22.5	12	15	19.75	850	10.5	460	13.5	150	23642.5	315	355	3.7
	L22	22.5	12	15	19.75	850	10.5	420	13.5	150	23222.5	315	355	3.7
	L23	21.9	12	15	19.15	850	10.5	420	13.5	150	22712.5	315	355	3.7
	L24	21.5	12	15	18.75	850	10.5	380	13.5	150	21952.5	315	355	3.7
	L25	21.5	12	15	18.75	850	10.5	380	13.5	150	21952.5	315	355	3.7
	L26	21.5	12	15	18.75	850	10.5	380	13.5	150	21952.5	315	355	3.7
Sloped plate of top wing tank	L27	20.9	12	20	18.15	850	10.5	480	18.5	150	23242.5	315	355	3.7
	L13	30	12	20	28	905	10	350	18	150	31540	355	355	5.55
	L14	28.8	12	20	26.8	905	10	410	18	150	31054	355	355	5.55
	L15	18.5	12	20	16.5	905	10	410	18	150	21732.5	355	315	5.55
	L16	18.5	12	20	16.5	905	10	410	18	150	21732.5	355	315	5.55
	L17	18.3	12	20	16.55	905	10	450	18	150	22177.75	315	315	5.55
	L18	18	12	20	16.25	905	10.5	450	18.5	150	22206.25	315	315	5.55
	L19	19	12	18	17.25	905	10.5	450	16.5	150	22811.25	315	315	5.55
	L20	17.1	12	18	15.35	905	10.5	450	16.5	150	21091.75	315	315	5.55
	L21	17	12	18	15.25	905	10.5	440	16.5	150	20896.25	315	315	5.55
	L22	17.4	12	18	15.65	905	10.5	440	16.5	150	21258.25	315	315	5.55
	L23	18.5	12	15	16.75	905	10.5	440	13.5	150	21803.75	315	315	5.55
Deck plate	L24	18.5	12	15	16.75	905	10.5	440	13.5	150	21803.75	315	315	5.55
	L13	30	32	-	28	930	30	300	-	-	35040	355	355	5.55
	L14	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L15	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L16	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L17	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L18	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L19	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L20	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
	L21	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55
L22	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55	
L23	38	32	-	36	930	30	400	-	-	45480	355	355	5.55	
L24	38	32	-	36	990	30	400	-	-	47640	355	355	5.55	

Πίνακας 5.4 : Διαστασιολόγηση εγκάρσιως ενισχυμένων ελασμάτων

Location of plates off B.L. (m)		gross		net		<i>bp</i>	<i>s</i>	<i>l</i>	<i>A</i>	<i>Rehp</i>
		<i>tp</i>	<i>tw</i>	<i>tf</i>	<i>tp</i>					
13.53	p1	20.5	18.75	8960	0.925	8.96	168000	315		
19.48	p2	18	16.5	482.5	0.925	0.4825	7961.25	315		
8.28	p3	20.5	17.75	1345	0.925	1.345	23873.75	315		
18.83	p4	17.5	15.75	1155	0.925	1.155	18191.25	315		
7.81	p5	20.35	18.5	1665	0.925	1.665	31385.25	315		

Πίνακας 5.5 : Διαστασιολόγηση γωνιακών στοιχείων

Location of hard corners		gross			net			<i>tw</i>	<i>bw</i>	<i>tf</i>	<i>bf</i>	<i>A</i>	<i>Reha</i>
		<i>tp</i>	<i>tw</i>	<i>tf</i>	<i>tp</i>	<i>bp</i>	<i>tw</i>						
	L3 h d	21.9	19	-	20.4	850	17.5	450	-	-	25215	355	
Bottom-girders connections	L8 h d	19.5	16	-	18	850	14.5	425	-	-	21462.5	355	
	L13 h d	19	16	-	17.5	850	14.5	425	-	-	21037.5	355	
	L19 h d	19	17.5	-	17.5	830	16	425	-	-	21325	355	
In. Bottom-girders connections	L3 h d	25	19	-	22.25	850	17.5	450	-	-	26787.5	355	
	L8 h d	25	16	-	22.25	850	14.5	425	-	-	25075	355	
	L13 h d	25	16	-	22.25	850	14.5	425	-	-	25075	355	
CL girder	h d up	22.5	16.5	-	19.75	850	15	450	-	-	23537.5	355	
	h d down	22.5	16.5	-	21	850	15	450	-	-	24600	355	
Side shell-sloped plate of t.w.t. connection	h d	20.5	17.5	-	19	820	16	350	-	-	21180	315	
Sheer strake	h d	24	38	-	22.25	623.5	36	525	-	-	32772.9	355	

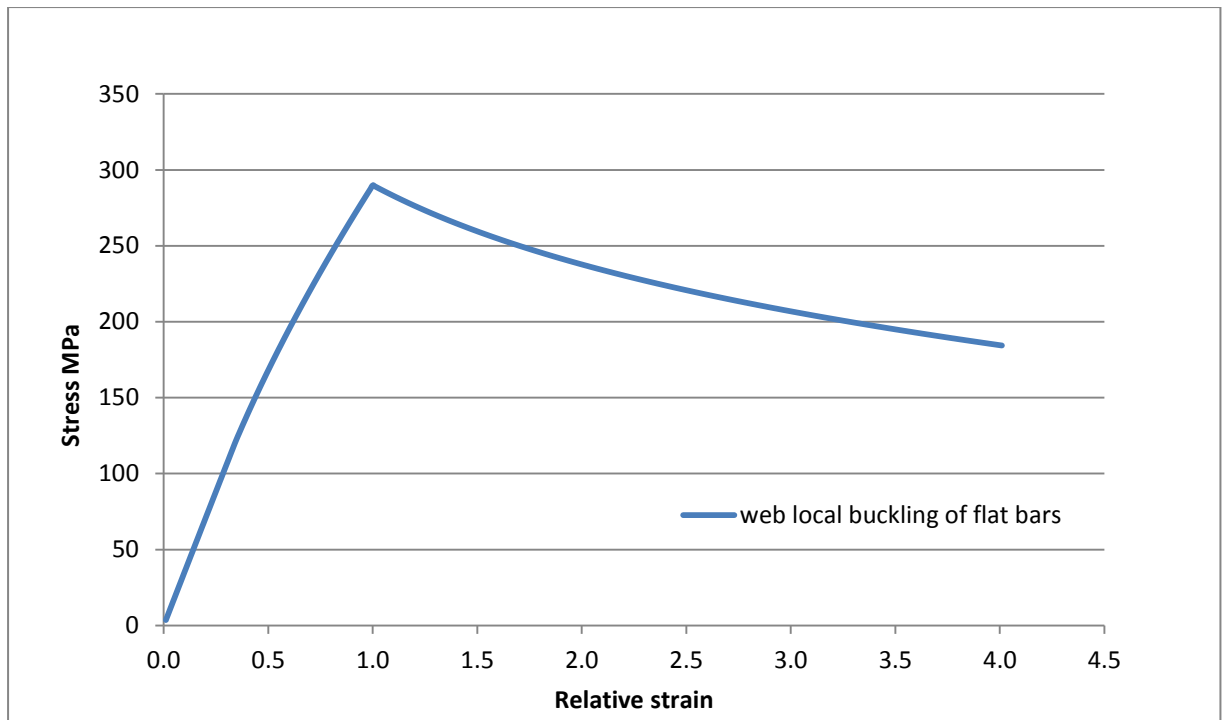
Πίνακας 5.6 : Διαστασιολόγηση γωνιακών στοιχείων

Location of hard corners	gross			net			<i>t2</i>	<i>b2</i>	<i>t3</i>	<i>b3</i>	<i>A</i>	<i>Reha</i>
	<i>t1</i>	<i>t2</i>	<i>t3</i>	<i>t1</i>	<i>b1</i>	<i>t2</i>						
Inner bottom-hopper connection	25	17.5	22.5	22.25	425	16	425	19.75	425	24650	355	
Deck-sloped plate of t.w.t. connection	38	30	30	36	555	28	700	27.75	587.5	55883.13	355	
Bilge strake	15	12	17	13.75	75	10.75	350	15.75	100	6368.75	355	
Side shell-sloped plate of hopper connection	20.5	20.5	-	18.75	820	17.75	410	-	-	22652.5	315	
Bilgeplate	20	-	-	17.75	-	-	-	-	-	49654	355	
T.w.t knuckled L25	17.5	18.5	-	15.75	350	16.75	452.5	-	-	13091.88	315	

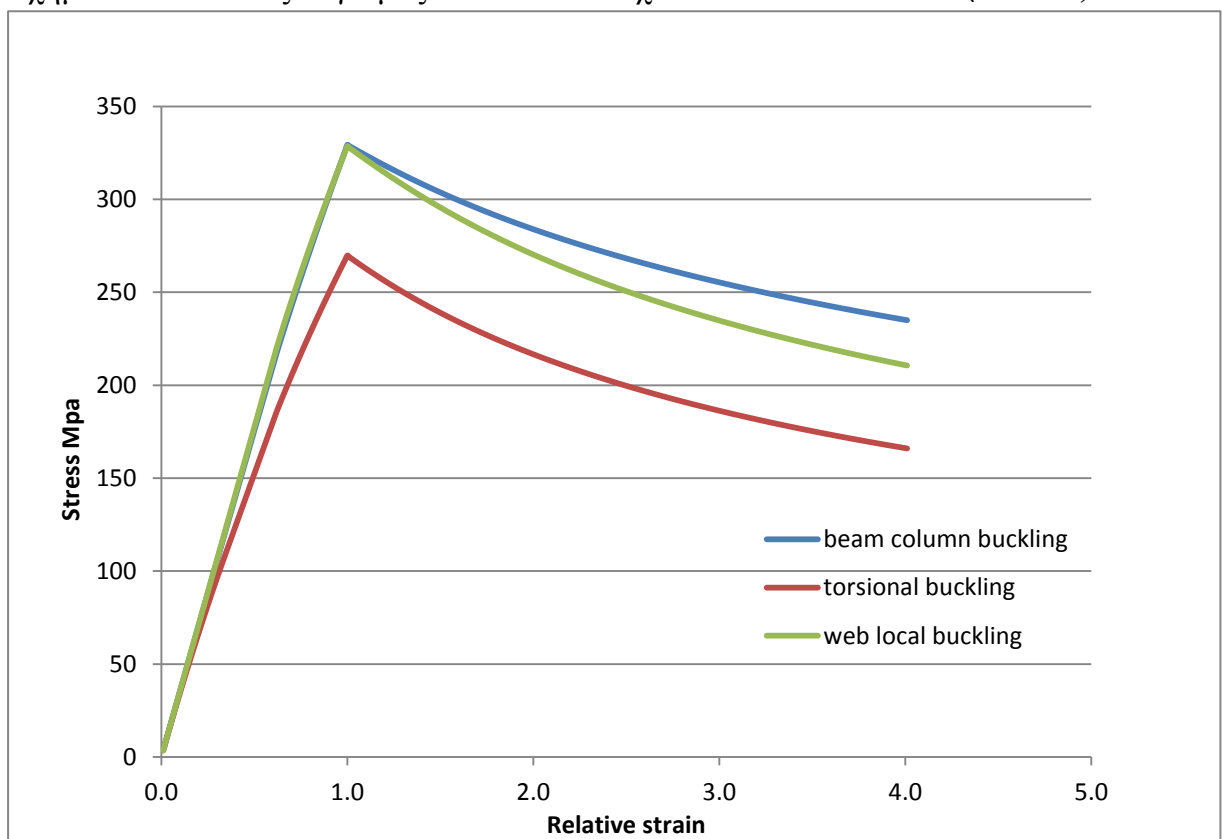
Αφού έγινε η παρουσίαση της αναλυτικής μοντελοποίησης των στοιχείων, το επόμενο βήμα της επαναληπτικής προσέγγισης, είναι ο προσδιορισμός των καμπυλών φόρτισης των στοιχείων για τους διάφορους τρόπους κατάρρευσης τους. Υπενθυμίζεται ότι όλα τα στοιχεία της διατομής δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο και ότι η μοντελοποίηση τους εκτείνεται μεταξύ δύο παρακείμενων εγκάρσιων ιστών ενίσχυσης.

Ο CSR, όπως έχει περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 3 αναλυτικά, προβλέπει συγκεκριμένες σχέσεις που περιγράφουν τους τρόπους κατάρρευσης των στοιχείων. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται, ο λυγισμός δοκού κολόνας, ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός, ο τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικών και η ελαστοπλαστική κατάρρευση σε εφελκυσμό. Όλοι οι προαναφερθείς μηχανισμοί παρουσιάζονται παρακάτω γραφικά, συγκεκριμένα για το διάμηκες ενισχυτικό **L10** του πυθμένα, με μεικτές διαστάσεις **475x12+150x18** και όριο διαρροής **355MPa**, το ενισχυτικό **L10** του εσωτερικού πυθμένα με διαστάσεις **425x13+175x20** και όριο διαρροής **355MPa**, το ενισχυτικό **L24** της hopper tank με διαστάσεις **380x12+150x15** και όριο διαρροής **315MPa**, το **L28** του κάτω πλευρικού ελάσματος με διαστάσεις **1000x15+150x15** και όριο διαρροής **315MPa**, το ενισχυτικό **St down of flat bar** στη θέση **2550 off CL** (Βλέπε Πίνακα 5.2), με διαστάσεις **250x23** και όριο διαρροής επίσης τα **355MPa**, το ενισχυτικό του καταστρώματος **L17** με διαστάσεις **400x32** και όριο διαρροής **355MPa** και το γωνιακό στοιχείο **Sheerstrake** με όριο διαρροής **355MPa**.

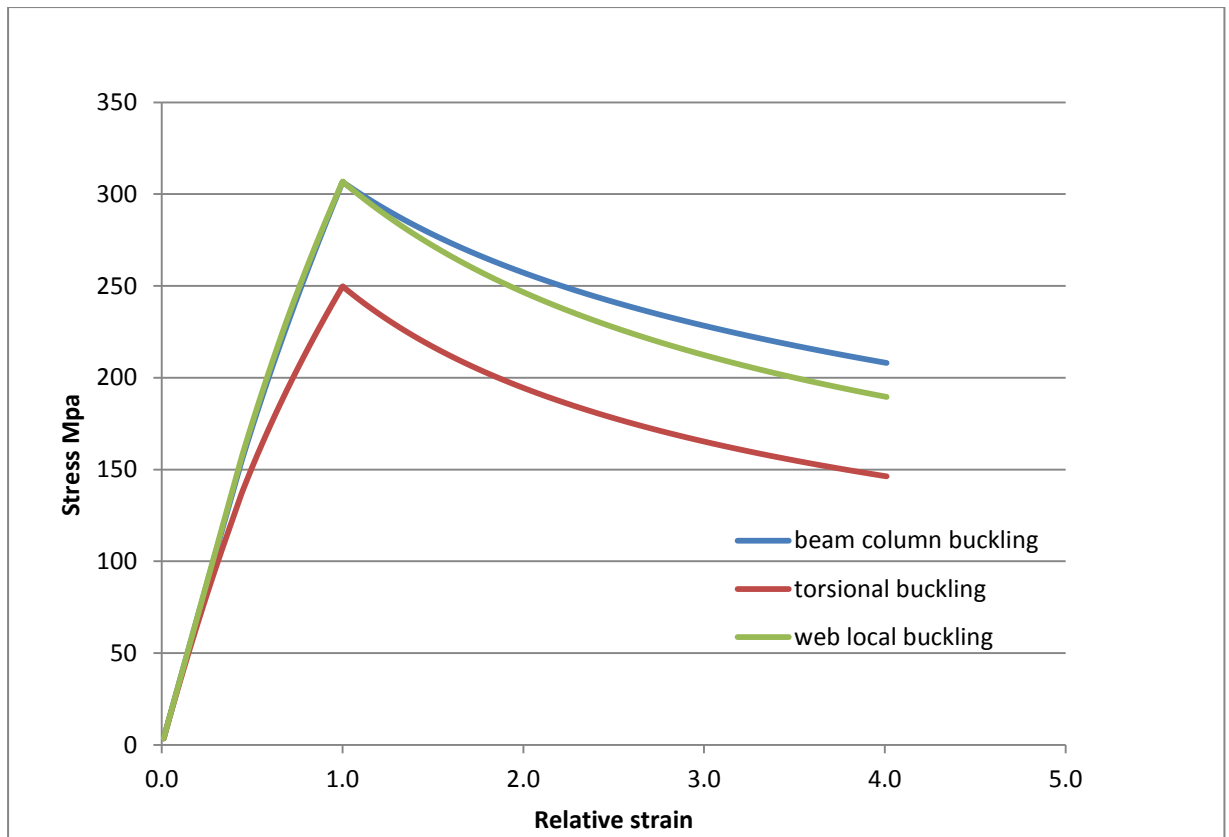
Ακολουθεί η παρουσίαση πρώτα ξεχωριστά των μηχανισμών αστοχίας και στη συνέχεια σε ένα συνδυασμένο γράφημα όπου θα γίνουν και κάποιες παρατηρήσεις.



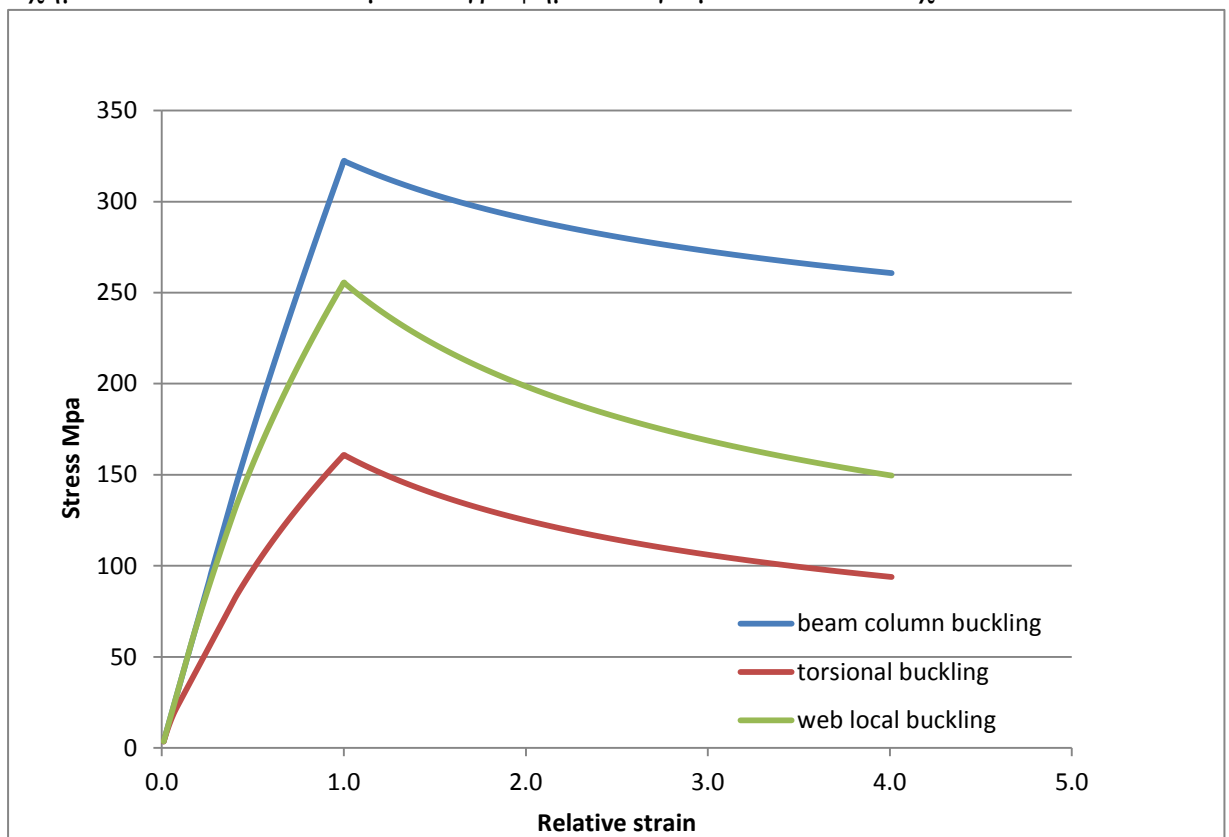
Σχήμα 5.4 : Τοπικός λυγισμός ιστού του ενισχυτικού **St. of flat bar (250x23)**



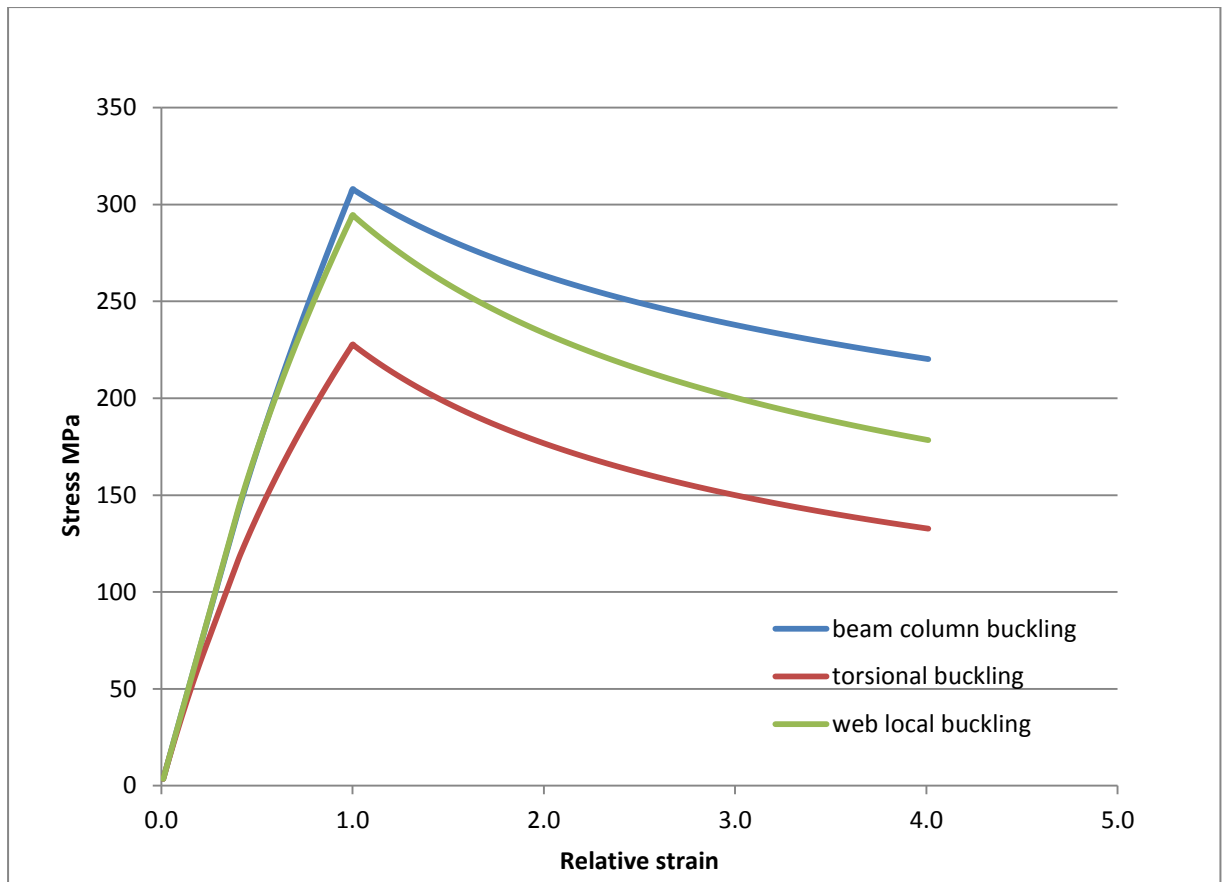
Σχήμα 5.5: Συνδυασμένο γράφημα λυγισμού του ενισχυτικού **L10 (425x13+175x20)**



Σχήμα 5.6 : Συνδυασμένο γράφημα λυγισμού του ενισχυτικού **L24**



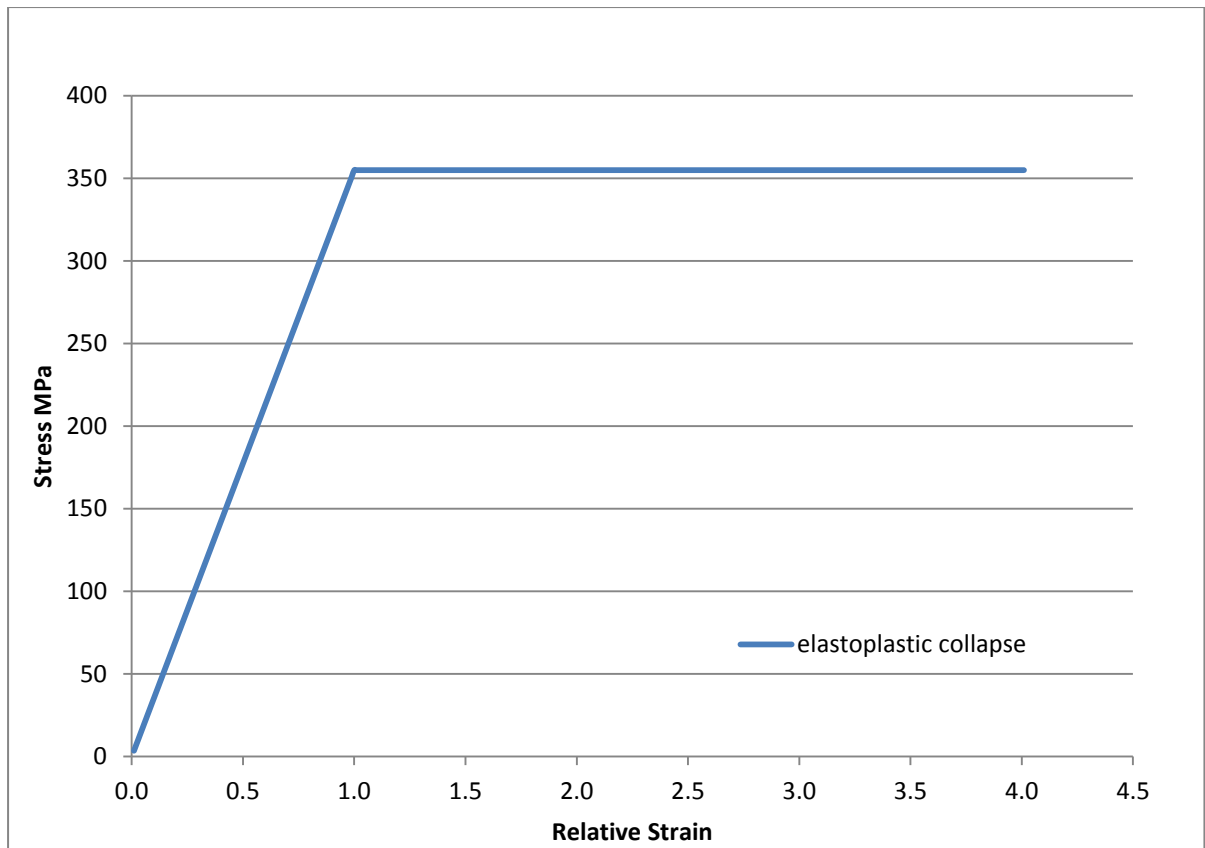
Σχήμα 5.7 : Συνδυασμένο γράφημα λυγισμού του ενισχυτικού **L28**



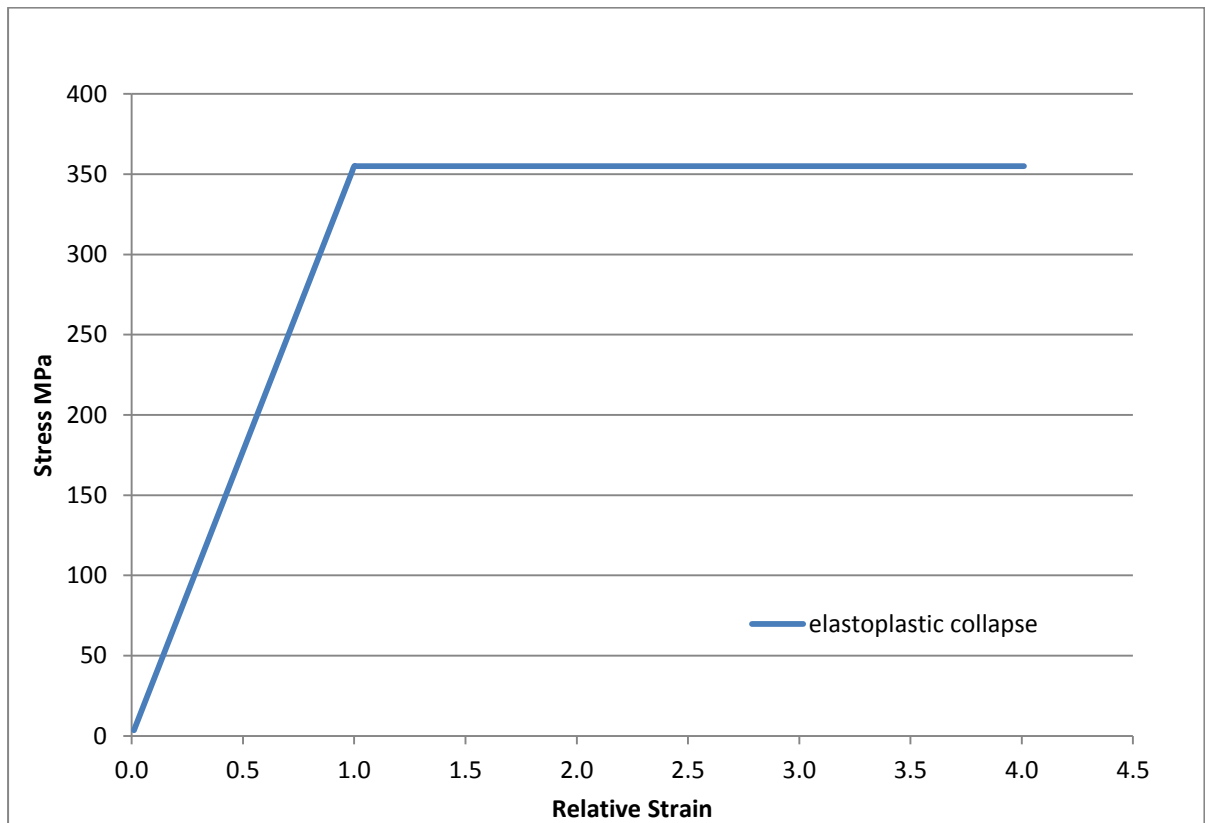
Σχήμα 5.8 : Συνδυασμένο γράφημα λυγισμού του ενισχυτικού **L10 (475x12+150x18)**

Σε όλα τα παραπάνω διαγράμματα τα δομικά στοιχεία για τη **Hogging** κατάσταση που αναλύεται στην παρούσα εργασία, θλίβονται. Εύκολα παρατηρεί κανείς ότι από τη σχετική παραμόρφωση 1.0 και μετά, οι καμπύλες κατασκευάζονται σύμφωνα με τη διόρθωση του Johnson λόγω πλαστικότητας. Επίσης προκύπτει ότι ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός δίνει τα πιο συντηρητικά αποτελέσματα για τις τάσεις που δέχεται το ενισχυτικό, ενώ ο λυγισμός δοκού κολόνας, υπερεκτιμά την αντοχή των ενισχυτικών κατά το λυγισμό τους.

Τα επόμενα διαγράμματα αφορούν την ελαστοπλαστική κατάρρευση, το πρώτο περιγράφει το μηχανισμό του ενισχυτικού **L17** και το δεύτερο του γωνιακού στοιχείου **Sheerstrake**, αυτά τα στοιχεία σε αντίθεση με τα προηγούμενα, για την κατάσταση **Hogging**, εφελκούνται.



Σχήμα 5.9 : Ελαστοπλαστική κατάρρευση ενισχυτικού **L17 (400x32)**



Σχήμα 5.10 : Ελαστοπλαστική κατάρρευση γωνιακού στοιχείου **Sheerstrake**

5.2.3. Βήμα 3 – Αρχικοποίηση καμπυλότητας και ουδέτερου άξονα

Για την εκτίμηση του βήματος που χρησιμοποιήθηκε για την αύξηση της καμπυλότητας χ_i , υπολογίστηκε πρώτα η μέγιστη αναμενόμενη τιμή της χ_F , όπως περιγράφεται και αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

Η τιμή αυτή προκύπτει από τον τύπο :

$$\chi_F = \pm 0.003 \frac{M_Y}{EI_Y}$$

Όπου :

M_Y : η μικρότερη από τις τιμές M_{Y1} και M_{Y2} :

$$M_{Y1} = 10^3 R_{eH} Z_{AB}$$

$$M_{Y2} = 10^3 R_{eH} Z_{AD}$$

Στον πίνακα που ακολουθεί, υπολογίζονται αναλυτικά η ροπή αδράνειας και στην συνέχεια η ροπή αντίστασης πυθμένα και καταστρώματος. Αφού υπολογίστηκε η μέγιστη αναμενόμενη τιμή της καμπυλότητας χ_F , για την πιο αποτελεσματική παρουσίαση και σύνθεση της καμπύλης M- χ , γίνεται η επιλογή 300 βημάτων για την επαναληπτική προσέγγιση, δηλαδή $\Delta\chi = \chi_F/300$.

Οι τιμές που προκύπτουν από τους υπολογισμούς για την καμπυλότητα είναι:

$$\chi_F = 3.3 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

$$\Delta\chi = 1.1 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$$

Επίσης η αρχική τιμή του ελαστικού ουδέτερου άξονα, υπολογίσθηκε να είναι:

$$N_{NA\text{-initial}} = 10.85982 \text{ m above Base Line}$$

Πίνακας 5.7 : Ροπή αδράνειας ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα

Location of ordinary stiffeners		net							KG B.L. (m)	Item's		Item's Inertia
		tp	bp	tw	bw	tf	bf	A		Moment (cm ² *m)	Ix (cm ⁴)	abt B.L. (cm ² *m ²)
	L4	19.5	850	10.5	475	16.5	150	24037.5	0.11	26.88	75040.75	3.01
	L5	19.5	850	10.5	475	16.5	150	24037.5	0.11	26.88	75040.75	3.01
	L6	19.5	850	10.5	475	16.5	150	24037.5	0.11	26.88	75040.75	3.01
	L7	18.6	850	10.5	475	16.5	150	23272.5	0.11	26.66	74060.83	3.05
	L9	18	850	10.5	475	16.5	150	22762.5	0.12	26.53	73379.93	3.09
	L10	18	850	10.5	475	16.5	150	22762.5	0.12	26.53	73379.93	3.09
	L11	17.7	850	10.5	475	16.5	150	22507.5	0.12	26.46	73030.62	3.11
	L12	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	0.12	26.41	72794.32	3.12
Bottom plate	L14	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	0.12	26.41	72794.32	3.12
	L15	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	0.12	26.41	72794.32	3.12
	L16	17.5	850	10.5	475	16.5	150	22337.5	0.12	26.41	72794.32	3.12
	L17	17.5	850	10.5	475	18.5	150	22637.5	0.12	27.94	77337.44	3.45
	L18	17.5	850	10.5	475	18.5	150	22637.5	0.12	27.94	77337.44	3.45
	L20	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	0.13	30.20	82744.68	4.07
	L21	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	0.13	30.20	82744.68	4.07
	L22	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	0.13	30.20	82744.68	4.07
	L23	17.5	810	10.5	475	18.5	175	22400	0.13	30.20	82744.68	4.07
	L24	18	810	10.5	475	18.5	175	22805	0.13	30.32	83470.58	4.03
	L4	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L5	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L6	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L7	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L9	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
In. Bottom plate	L10	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L11	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L12	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L14	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L15	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L16	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L17	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
	L18	22.25	850	11.5	425	18.5	175	27037.5	2.60	701.66	72338.77	1820.88
Bottom plate	L1	21	850	18.5	230	-	-	22105	0.03	7.66	7353.06	0.27
	L2	21	850	18.5	230	-	-	22105	0.03	7.66	7353.06	0.27
In. Bottom plate	L1	22.25	850	18.5	310	-	-	24647.5	2.65	653.21	16815.30	1731.16
	L2	22.25	850	18.5	310	-	-	24647.5	2.65	653.21	16815.30	1731.16
2550 OFF C L girder	st up	17.5	900	21.5	250	-	-	21125	1.80	380.25	106333.20	684.45
	st down	17.5	900	21.5	250	-	-	21125	0.90	190.13	106333.20	171.11
CL girder	st up	15	925	10.5	150	-	-	15450	1.85	285.83	98953.48	528.78
6800 OFF C L girder	>>	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	1.85	277.27	95656.31	512.95
11050 OFF C L girder	>>	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	1.85	277.27	95656.31	512.95
16150 OFF C L girder	>>	16	925	10.5	150	-	-	16375	1.85	302.94	105547.90	560.43
CL girder	st down	15	925	10.5	150	-	-	15450	0.85	131.33	99131.99	111.63
6800 OFF C L girder	>>	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	0.85	127.39	95833.58	108.28
11050 OFF C L girder	>>	14.5	925	10.5	150	-	-	14987.5	0.85	127.39	95833.58	108.28
16150 OFF C L girder	>>	16	925	10.5	150	-	-	16375	0.85	139.19	105728.71	118.31

Πίνακας 5.8 : Ροπή αδράνειας ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα

Location of ordinary stiffeners		net							A	KG B.L. (m)	Item's Moment (cm ² *m)	Item's Ix (cm ⁴)	Item's Inertia abt B.L. (cm ² *m ²)
		tp	bp	tw	bw	tf	bf						
Lower side shell	L25	18.2	850	10.5	460	13.5	150	22325	2.30	513.48	93526.42	1180.99	
	L26	18	850	10.5	460	13.5	150	22155	3.15	697.88	92502.88	2198.33	
	L27	18	850	10.5	440	13.5	150	21945	4.00	877.80	92502.68	3511.20	
	L28	18	850	13.5	1000	13.5	150	30825	4.85	1495.01	92518.94	7250.81	
	L29	18.5	850	10.5	380	13.5	150	21740	5.70	1239.18	95060.96	7063.33	
	L30	18.5	850	10.5	480	18.5	150	23540	6.55	1541.87	95202.55	10099.25	
Sheer strake shell	L33	16.5	905	10.5	430	16.5	150	21922.5	20.18	4422.86	102385.63	89231.29	
	L34	16.5	905	10.5	475	18.5	175	23157.5	21.08	4881.60	102748.24	102904.15	
	L35	16.25	905	10	450	16	150	21606.25	21.99	4750.13	100826.97	104431.70	
	L36	20.25	905	10	450	16	150	25226.25	22.89	5774.29	125534.22	132173.47	
	L37	22.25	905	10	450	16	150	27036.25	23.80	6433.28	137887.85	153079.79	
Sloped plate of hopper tank	L20	19.75	850	10.5	460	13.5	150	23642.5	3.23	763.78	63291.22	2467.42	
	L21	19.75	850	10.5	460	13.5	150	23642.5	3.83	905.88	63291.22	3470.94	
	L22	19.75	850	10.5	420	13.5	150	23222.5	4.44	1031.00	51666.68	4577.32	
	L23	19.15	850	10.5	420	13.5	150	22712.5	5.04	1144.65	51249.88	5768.69	
	L24	18.75	850	10.5	380	13.5	150	21952.5	5.65	1239.68	40859.32	7000.56	
	L25	18.75	850	10.5	380	13.5	150	21952.5	6.25	1371.62	40859.32	8570.04	
	L26	18.75	850	10.5	380	13.5	150	21952.5	6.85	1503.56	40859.32	10298.12	
	L27	18.15	850	10.5	480	18.5	150	23242.5	7.42	1724.97	79960.02	12802.01	
Sloped plate of top wing tank	L13	28	905	10	350	18	150	31540	24.32	7669.88	44985.34	186515.63	
	L14	26.8	905	10	410	18	150	31054	23.88	7414.65	62230.12	177036.87	
	L15	16.5	905	10	410	18	150	21732.5	23.44	5094.74	54793.35	119435.74	
	L16	16.5	905	10	410	18	150	21732.5	22.99	4996.40	54793.35	114869.50	
	L17	16.55	905	10	450	18	150	22177.75	22.55	5000.51	66987.02	112748.62	
	L18	16.25	905	10.5	450	18.5	150	22206.25	22.10	4907.15	68403.90	108438.63	
	L19	17.25	905	10.5	450	16.5	150	22811.25	21.64	4935.95	65376.56	106805.38	
	L20	15.35	905	10.5	450	16.5	150	21091.75	21.19	4469.69	63258.39	94719.96	
	L21	15.25	905	10.5	440	16.5	150	20896.25	20.74	4333.24	60118.45	89858.24	
	L22	15.65	905	10.5	440	16.5	150	21258.25	20.28	4311.84	60565.98	87457.65	
	L23	16.75	905	10.5	440	13.5	150	21803.75	19.82	4321.67	55612.51	85658.80	
	L24	16.75	905	10.5	440	13.5	150	21803.75	19.37	4223.01	55612.51	81792.33	
Deck plate	L13	28	930	30	300	-	-	35040	26.29	9211.07	24909.13	242134.38	
	L14	36	930	30	400	-	-	45480	26.21	11922.13	58343.21	312526.85	
	L15	36	930	30	400	-	-	45480	26.16	11897.60	58343.21	311242.01	
	L16	36	930	30	400	-	-	45480	26.11	11873.07	58343.21	309959.82	
	L17	36	930	30	400	-	-	45480	26.05	11848.54	58343.21	308680.28	
	L18	36	930	30	400	-	-	45480	26.00	11824.00	58343.21	307403.38	
	L19	36	930	30	400	-	-	45480	25.94	11799.47	58343.21	306129.13	
	L20	36	930	30	400	-	-	45480	25.89	11774.94	58343.21	304857.53	
	L21	36	930	30	400	-	-	45480	25.84	11750.41	58343.21	303588.57	
	L22	36	930	30	400	-	-	45480	25.78	11725.88	58343.21	302322.26	
	L23	36	930	30	400	-	-	45480	25.73	11701.34	58343.21	301058.60	
	L24	36	990	30	400	-	-	47640	24.69	11761.36	59048.77	290364.53	
									SUM		256262.78	6315885.80	5664296.62

Πίνακας 5.9 : Ροπή αδράνειας γωνιακών στοιχείων

Location of hard corners	net	tp	bp	tw	bw	tf	bf	A	KG B.L. (m)	Item's		
										Moment (cm ² *m)	Ix (cm ⁴)	abt B.L. (cm ² *m ²)
Bottom-girders connections	L3 h d	20.4	850	17.5	450	-	-	25215	0.08	20.17	43307.37	1.61
	L8 h d	18	850	14.5	425	-	-	21462.5	0.07	15.02	30870.54	1.05
	L13 h d	17.5	850	14.5	425	-	-	21037.5	0.07	14.73	30643.58	1.03
	L19 h d	17.5	830	16	425	-	-	21325	0.08	17.06	32945.15	1.36
In. Bottom-girders connections	L3 h d	22.25	850	17.5	450	-	-	26787.5	2.62	701.83	44366.34	1838.80
	L8 h d	22.25	850	14.5	425	-	-	25075	2.64	661.98	32597.59	1747.63
	L13 h d	22.25	850	14.5	425	-	-	25075	2.64	661.98	32597.59	1747.63
Cl girder	h d up	19.75	850	15	450	-	-	23537.5	2.63	619.04	38003.66	1628.07
	h d down	21	850	15	450	-	-	24600	0.07	17.22	38619.91	1.21
Side shell-sloped plate of t.w.t. connection	h d	19	820	16	350	-	-	21180	18.83	3988.19	87311.88	75097.69
Sheer strake	h d	22.25	623.5	36	525	-	-	32772.9	24.64	8075.24	54287.57	198973.82

Πίνακας 5.10 : Ροπή αδράνειας γωνιακών στοιχείων

Location of hard corners	net							KG B.L. (m)	Item's			
	t1	b1	t2	b2	t3	b3	A		Moment (cm ² *m)	Ix (cm ⁴)	abt B.L. (cm ² *m ²)	
Inner bottom-hopper connection	22.25	425	16	425	19.75	425	24650	2.82	695.13	118734.30	1960.27	
Deck-sloped plate of t.w.t. connection	36	555	28	700	27.75	587.5	55883.1	25.03	13987.55	89236.57	350108.28	
Bilge strake	13.75	75	10.75	350	15.75	100	6368.75	0.53	33.75	12365.80	17.89	
Side shell-sloped plate of hopper connection	18.75	820	17.75	410	-	-	22652.5	9	2038.73	121306.09	18348.53	
Bilgeplate	17.75	-	-	-	-	-	49654	0.7	347.58	120569.05	243.30	
T.w.t knuckled L25	15.75	350	16.75	452.5	-	-	13091.9	18.83	2465.20	44618.29	46419.72	
								SUM		34360.39	972381.28	698137.89

Πίνακας 5.11 : Ροπή αδράνειας εγκάρσιως ενισχυμένων ελασμάτων

Location of plates off B.L. (m)	net	tp	bp	s	l	A	KG B.L. (m)	Item's			
								Moment (cm ² *m)	Ix (cm ⁴)	abt B.L. (cm ² *m ²)	
13.53	p1	18.75	8960	0.925	8.96	168000	13.53	22730.40	112394240	307542.31	
19.48	p2	16.5	482.5	0.925	0.4825	7961.25	19.48	1550.95	15445.24	30214.46	
8.28	p3	17.75	1345	0.925	1.345	23873.75	8.28	1977.82	359901.75	16385.26	
18.83	p4	15.75	1155	0.925	1.155	18191.25	18.83	3425.41	202229.85	64500.52	
7.81	p5	18.5	1665	0.925	1.665	31385.25	7.81	2450.40	725058.12	19131.52	
							SUM		32134.99	113696874.96	437774.07

Πίνακας 5.12 : Αποτελέσματα ροπών αντίστασης

Moulded Depth of vessel (cm)	2470.00
Total Area of elements (cm²)	29724.15
Neutral Axis from Base Line (cm)	1086.00
Neutral Axis from Deckline (cm)	1384.00

Moment of Inertia about N.A. (cm⁴)	32,945,541,590
Moment of Inertia about B.L. (cm⁴)	68,002,085,200
Moment of Inertia about Deck (cm⁴)	89,880,843,050
Bottom Section Modulus (cm³)	30,336,594.47
Deck Section Modulus (cm³)	23,804,582.07

Bottom Section Modulus (cm³) full section	60,673,188.94
Deck Section Modulus (cm³) full section	47,609,164.14

5.2.4. Βήμα 4-5 - Προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα σε κάθε βήμα

Τα βήματα 4-5 αναφέρονται στην επαναληπτική διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται μέχρι το άθροισμα των αξονικών δυνάμεων που δρουν στα στοιχεία, να είναι μηδενικό. Σε αυτή την κατάσταση, η εκτιμώμενη κατανομή των τάσεων που εφαρμόζεται στη μέση τομή, βρίσκεται σε ισορροπία. Για κάθε δομικό στοιχείο, η παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε καμπυλότητα χ_i , υπολογίζεται ως $\epsilon_i = \chi(z_i - z_{NA})$, η αντιστοιχη τάση που προκύπτει λαμβάνεται από τις καμπύλες φόρτισης (Βήμα 2) και η δύναμη που δρα στο στοιχείο, υπολογίζεται ως $\sigma_i A_i$. Στην κατάσταση Hogging που μελετάται εδώ, τα δομικά στοιχεία που βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα εφελκούνται, ενώ αυτά που βρίσκονται κάτω, θλίβονται.

Χωρίς να είναι γνωστή εκ των προτέρων η θέση του ουδέτερου άξονα στην οποία η κατανομή των τάσεων βρίσκεται σε ισορροπία, ο νέος ουδέτερος άξονας τίθεται σε μια νέα υποτιθέμενη θέση και στη συνέχεια υπολογίζονται οι δυνάμεις και το άθροισμα τους. Στην περίπτωση που το άθροισμα είναι μηδενικό, η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται και η καινούρια θέση έχει καθοριστεί, σε αντίθετη περίπτωση ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται ανάλογα, και το άθροισμα των δυνάμεων υπολογίζεται ξανά.

Στην παρούσα μελέτη, έχει αναπτυχθεί ένα λογισμικό, το οποίο μετατοπίζει τον ουδέτερο άξονα κατά ένα συγκεκριμένο μήκος, σε περίπτωση που το άθροισμα των δυνάμεων ξεφεύγει από κάποια όρια. Αυτά τα όρια είναι:

$$-1000\text{N} < F_{\text{SUM}} < 1000\text{N}$$

Όταν το άθροισμα των δυνάμεων είναι σε μέσα στα όρια, το λογισμικό προχωρά στον υπολογισμό των τάσεων και στη συνέχεια τυπώνει την προκύπτουσα ροπή M .

5.2.5. Βήμα 6 – Υπολογισμός της ροπής κάμψης σε κάθε βήμα

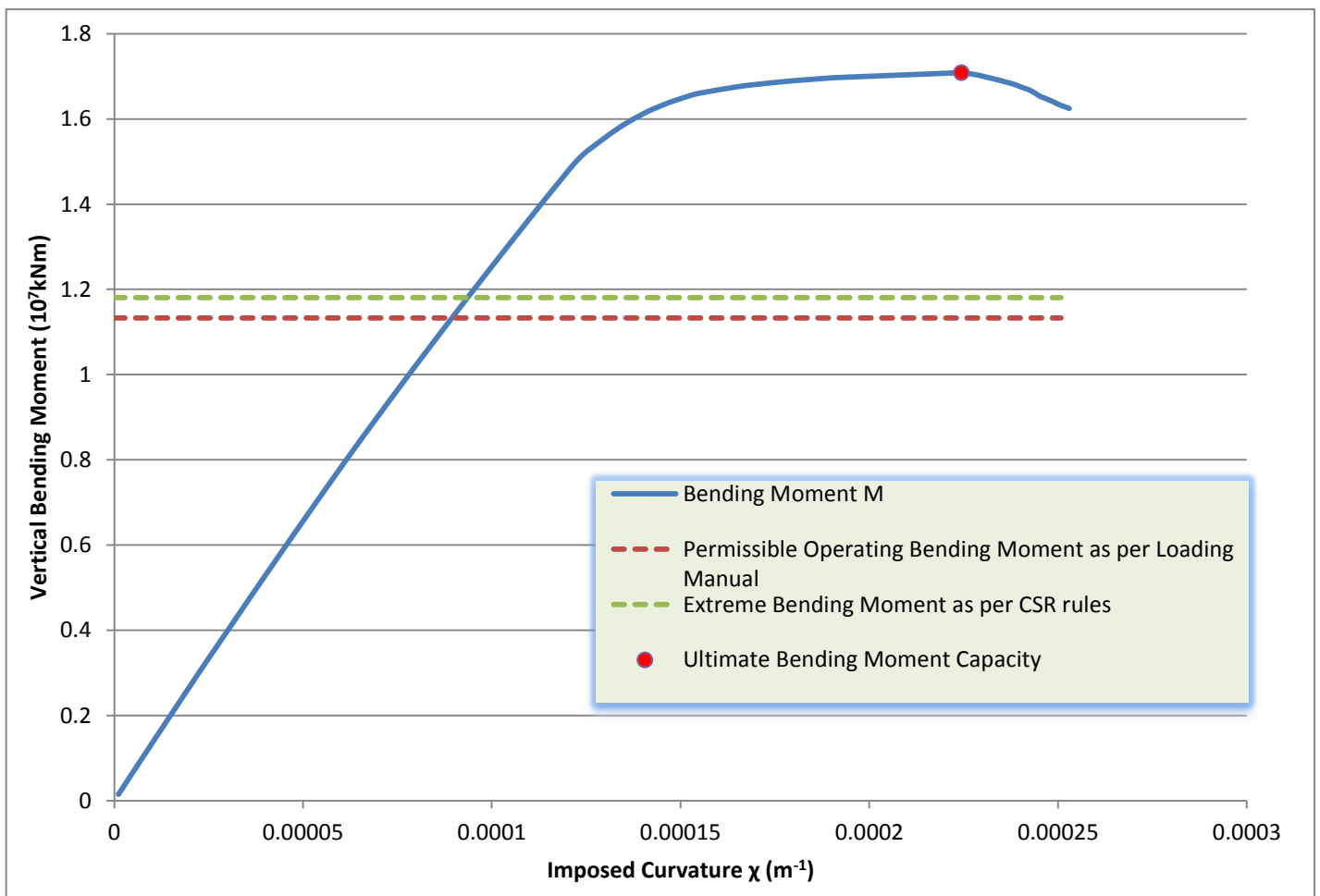
Έχοντας υπολογίσει τη νέα θέση του ουδέτερου άξονα σε κάθε βήμα, η αντίστοιχη ροπή κάμψης, προκύπτει αθροίζοντας τις τάσεις σε κάθε δομικό στοιχείο όπως ακολουθεί:

$$M_U = \sum \sigma_{U_i} A_i \text{ abs}(z_i - z_{NA})$$

Όπου $(z_i - z_{NA})$, είναι η κατακόρυφη απόσταση κάθε στοιχείου από τον ουδέτερο άξονα.

5.3. Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη

Σε αυτό το σημείο, γίνεται η παρουσίαση του γραφήματος της ροπής κάμψης σε συνάρτηση με την επιβαλλόμενη καμπυλότητα. Πάνω στο γράφημα επισημαίνονται σημεία με τις ροπές σχεδίασης κατά CSR που υπολογίστηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Ακολουθεί το Σχήμα 5.11 το οποίο παρουσιάζει το γράφημα της ροπής, όπως αυτή κατασκευάστηκε σύμφωνα με τις απαιτήσεις των κοινών κανόνων κατασκευής CSR.



Σχήμα 5.11: Ροπή κάμψης συναρτήσει επιβαλλόμενης καμπυλότητας

Η μέγιστη καμπτική αντοχή του φορτηγού πλοίου Bulk Carrier της παρούσας μελέτης, είναι η μέγιστη τιμή του διαγράμματος M-χ και είναι σημειωμένη με μια κόκκινη τελεία. Αντιστοιχεί σε **1.70855×10^7 kNm** και σε τιμή καμπυλότητας **2.244×10^{-4}** που προκύπτει στο βήμα **204** της επαναληπτικής διαδικασίας.

Η μέγιστη καμπτική ροπή στην οποία αναμένεται το πλοίο να λειτουργήσει και κατά συνέπεια να πληροί, έχει υπολογιστεί σύμφωνα με τους κοινούς κανόνες κατασκευής CSR σε προηγούμενο κεφάλαιο, είναι ίση με **1.18067×10^7 kNm** και παρουσιάζεται στο παραπάνω διάγραμμα με μια πράσινη γραμμή.

Επίσης σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει αναφερθεί ότι πρέπει να ισχύει η παρακάτω σχέση για τις ροπές κάμψης.

$$M \leq \frac{M_U}{\gamma_R}$$

Όπου

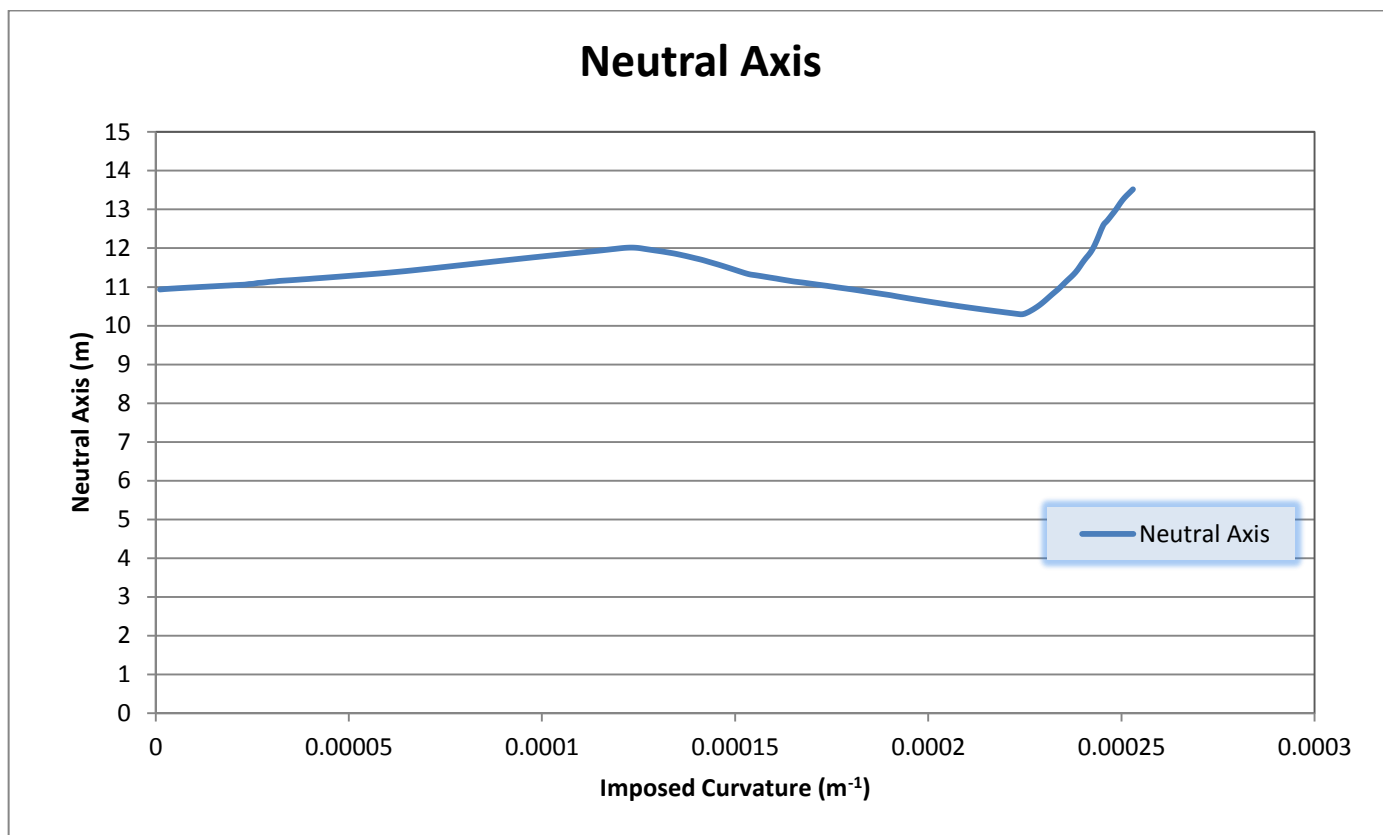
$$M = M_{Sw} + \gamma_w M_{Wv} \quad \gamma_w = 1.20$$

$$M = \mathbf{1.18067 \times 10^7 \text{ kNm}}$$

Γνωρίζοντας τώρα ότι $M_U = \mathbf{1.70855 \times 10^7 \text{ kNm}}$, προκύπτει ότι η απαίτηση πληρείται, δηλαδή η μέγιστη αντοχή του πλοίου σε κάμψη, είναι μεγαλύτερη από την μέγιστη καμπτική ροπή στην οποία αναμένεται αυτό να λειτουργήσει σύμφωνα με τον CSR.

Ακόμη, στο γράφημα παρουσιάζεται με μια κόκκινη γραμμή, η μέγιστη επιτρεπόμενη ροπή, σύμφωνα με το loading manual του πλοίου, στην οποία αναμένεται να λειτουργήσει και είναι ίση με $M = \mathbf{1.13290 \times 10^7 \text{ kNm}}$.

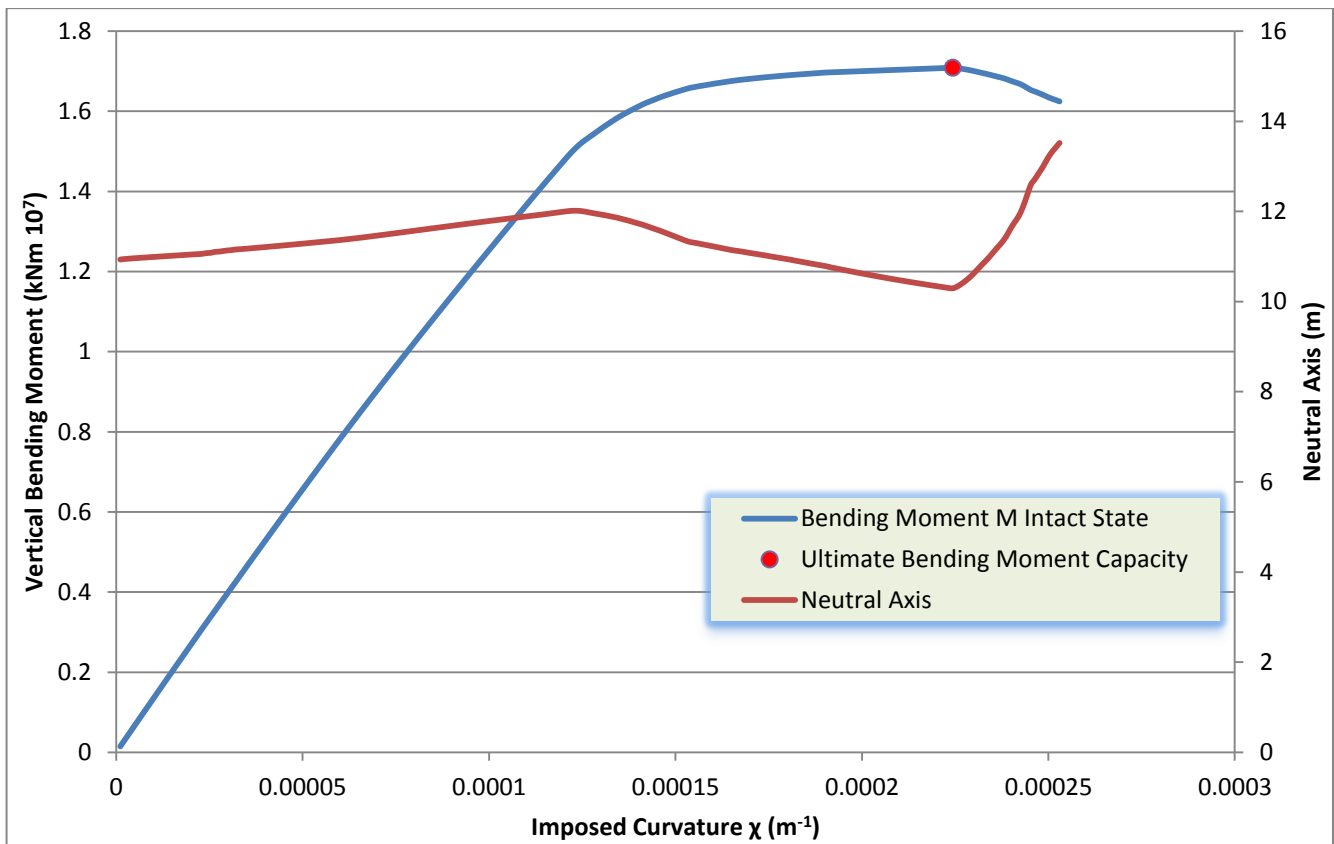
5.4. Μετατόπιση θέσης ουδέτερου άξονα συναρτήσει επιβαλλόμενης καμπυλότητας



Σχήμα 5.12: Θέση ουδέτερου άξονα συναρτήσει επιβαλλόμενης καμπυλότητας

Στο παραπάνω γράφημα απεικονίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα συναρτήσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας χ . Στο αρχικό στάδιο βημάτων αύξησης της καμπυλότητας, παρατηρείται προς τα πάνω μετατόπιση του ουδέτερου άξονα, που είναι και αναμενόμενο για την Hogging κατάσταση που μελετάται εδώ.

Στη συνέχεια παρατηρείται μετατόπιση προς τα κάτω. Αυτό σημαίνει ότι το άθροισμα των δυνάμεων κάτω από τον ουδέτερο άξονα, είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των επάνω δυνάμεων. Με αποτέλεσμα ο άξονας να τείνει να κατέβει προς τα κάτω ώστε να αυξηθούν οι δυνάμεις που εφελκύνουν τη διατομή και να επικρατήσει ισορροπία. Το φαινόμενο αυτό είναι άξιο παρατήρησης και περαιτέρω διερεύνησης.

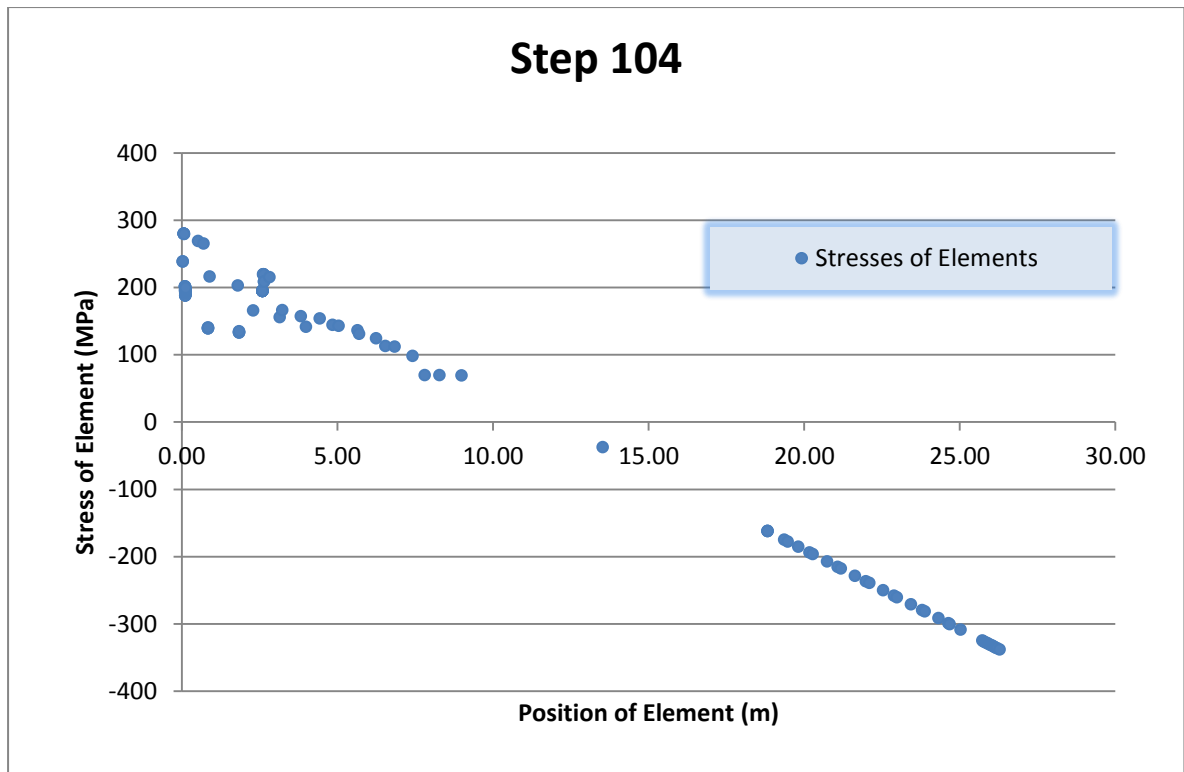


Σχήμα 5.13: Ροπή κάμψης και ουδέτερος άξονας συναρτήσεως επιβαλλόμενης καμπυλότητας

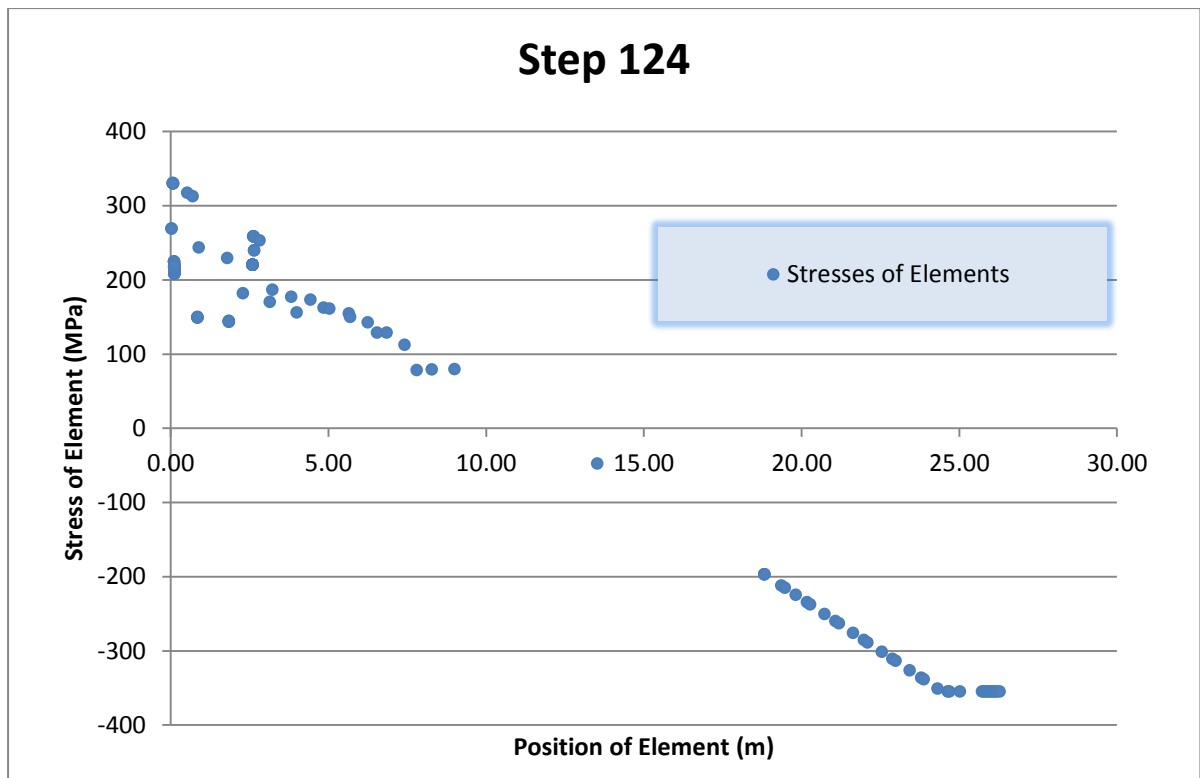
Παρακάτω παρατίθενται κάποια στιγμιότυπα τάσεων στα ανάλογα στάδια της επαναληπτικής διαδικασίας, ώστε να εξηγηθεί η πτώση του ουδέτερου άξονα.

Στη συνέχεια δίνονται δύο στιγμιότυπα των τάσεων στα στοιχεία. Το ένα αντιστοιχεί στο βήμα 104 της επαναληπτικής διαδικασίας, και δείχνει τις τάσεις στα στοιχεία λίγα βήματα πριν την απότομη πτώση του ουδέτερου άξονα.

Το δεύτερο δείχνει τις τάσεις των στοιχείων λίγα βήματα μετά την πτώση του ουδέτερου άξονα.



Σχήμα 5.14: Στιγμιότυπο βήματος 104



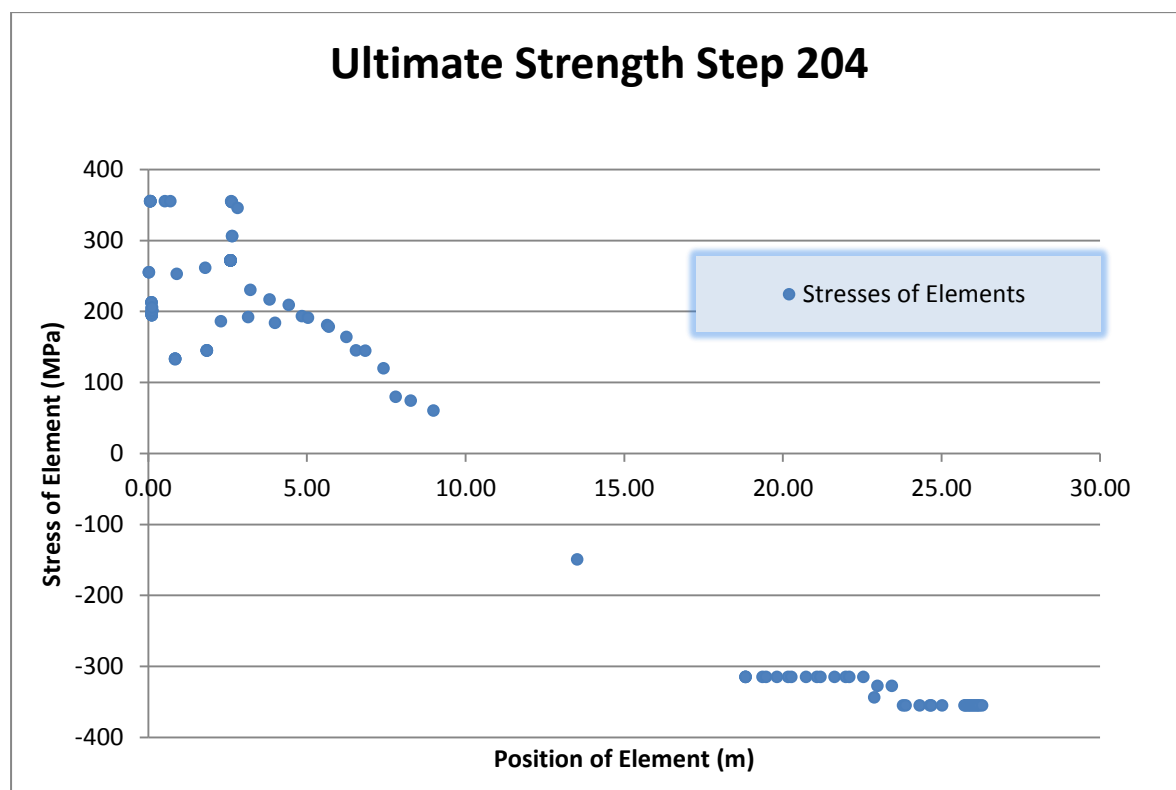
Σχήμα 5.15: Στιγμιότυπο βήματος 124

Μετά τη σύγκριση των δύο γραφημάτων, παρατηρείται ότι στο δεύτερο γράφημα, στην περιοχή των τάσεων προς το κατάστρωμα, σημειώνονται μέγιστες τάσεις σε αρκετά από τα δομικά στοιχεία σε σχέση με το πρώτο γράφημα.

Αυτό σημαίνει ότι εκείνη τη στιγμή οι δυνάμεις που εφελκύνουν έχουν φτάσει σε ένα σχετικό οριακό επίπεδο, και δεν μπορούν να αντισταθμίσουν τις δυνάμεις που θλίνουν, με αποτέλεσμα ο ουδέτερος άξονας να αναγκάζεται να κινηθεί προς τα κάτω ώστε να μειώσει τις θλιπτικές δυνάμεις και να επιβάλει την ισορροπία.

Ακόμη ένα αίτιο που οδηγεί σε αυτήν την κίνηση του ουδέτερου άξονα, είναι ότι τα hard corners, τα οποία είναι σημαντικά περισσότερα στον πυθμένα και στο κάτω μέρος γενικά, υποτίθεται ότι αστοχούν με ελαστοπλαστική κατάρρευση και κατά τη θλίψη τους, με αποτέλεσμα να δίνουν περίσσεια αντοχής στο κάτω τμήμα του πλοίου. Γι' αυτό και οι δυνάμεις που θλίνουν υπερτερούν σε αυτό το σημείο. Σημειώνεται ότι το λογισμικό έτρεξε και μειωμένα hard corners στον πυθμένα και δεν παρουσίασε την πτώση αυτή του ουδέτερου άξονα.

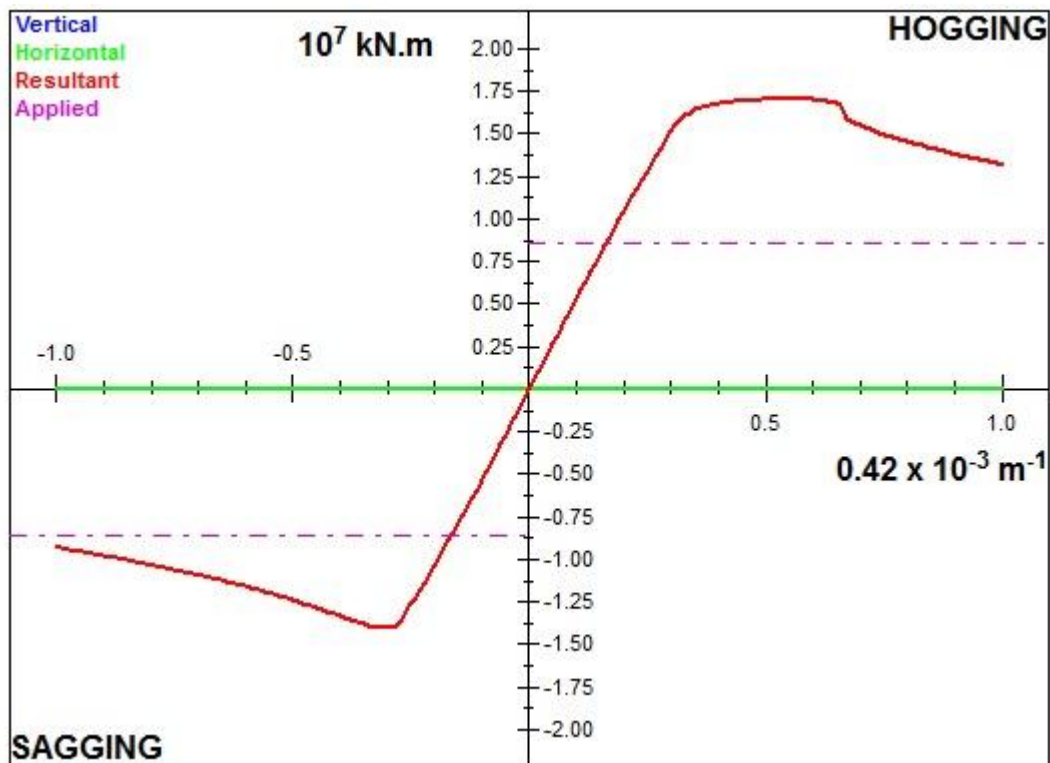
Ακολουθεί το στιγμιότυπο των τάσεων τη στιγμή που η διατομή παρουσιάζει τη μέγιστη αντοχή.



Σχήμα 5.16: Στιγμιότυπο 204 κατά τη μέγιστη αντοχή

Είναι ξεκάθαρο ότι σε αυτό το στάδιο τα στοιχεία έχουν, σχεδόν όλα, φτάσει στις μέγιστες τιμές των τάσεων με αποτέλεσμα να δίνουν συνολικά τη μέγιστη ροπή κάμψης. Αν κάποιος συγκρίνει τα προηγούμενα στιγμιότυπα με αυτό εύκολα παρατηρεί τις διαφορές στις τάσεις.

5.5. Σύγκριση της καμπύλης M-χ με το λογισμικό MARS by BV



Ultimate Bending Capacity (kN.m)
 Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)

	Mu		Ultimate	Mb	%	
Hogging	17 102 510.	Navigation	15 547 730.	8 614 860.	55.41	Hogging
Sagging	-14 054 600.		-12 776 910.	-8 616 617.	67.44	Sagging
		Harbour	15 547 730.	8 073 374.	51.93	Hogging
			-12 776 910.	-8 044 955.	62.96	Sagging
		Damaged	15 547 730.	4 331 888.	27.86	Hogging
			-12 776 910.	-4 573 294.	35.79	Sagging

The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin

$$M_{UH_MARS} = 17,102,510 \text{ kNm}$$

$$M_{UH_CALC} = 17,085,5195 \text{ kNm}$$

$$\text{Difference} = 0.00101\%$$

Τα δύο διαγράμματα ροπών είναι σχεδόν πανομοιότυπα. Η μέγιστη αντοχή διαφέρει μόλις **0.00101%** και παρουσιάζεται και στα δύο διαγράμματα, από όσο είναι δυνατόν να διαβασθεί στο διάγραμμα του MARS, σε καμπυλότητα **0.0002244 m⁻¹** περίπου. Επίσης και στα δύο γραφήματα, σε καμπυλότητα με τιμή **0.0001232 m⁻¹**, σταματάει η φαινομενική γραμμικότητα της καμπύλης.

Στο διάγραμμα που υπολογίσθηκε στην παρούσα εργασία, από ένα σημείο και μετά δεν υπάρχει ένα τμήμα της καμπύλης, ενώ στο διάγραμμα του MARS υπάρχει. Αυτό συμβαίνει διότι το λογισμικό της παρούσας εργασίας, μερικά βήματα μετά τον προσδιορισμό της μέγιστης τιμής της ροπής, ήταν προγραμματισμένο να σταματάει, πράγμα όμως που δεν ενδιαφέρει ιδιαίτερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΡΙΑΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗΣ ΣΕ ΒΕΒΛΑΜΜΕΝΟ ΠΛΟΙΟ

6.1. Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζεται η εφαρμογή της CSR οριακής επαναληπτικής προσέγγισης που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, για την αξιολόγηση της μέγιστης αντοχής του φορτηγού φορτίου χύδην που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αλλά σε βεβλαμμένη κατάσταση. Στην μελέτη που παρουσιάζεται εδώ, θα εξεταστούν δύο καταστάσεις με βλάβη, η πρώτη θα φέρει βλάβη στο κατάστρωμα και η δεύτερη στον πυθμένα.

6.2. Ιδιαιτερότητες

Όταν η προσέγγιση γίνεται σε πλοίο το οποίο έχει υποστεί κάποια βλάβη, οι συνθήκες και οι παράμετροι που συνθέτουν το πρόβλημα, διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με την προσέγγιση στην άθικτη κατάσταση. Σημειώνεται πως η υπόθεση ότι το πλοίο βρίσκεται υπό καθεστώς συμμετρικής φόρτισης, ισχύει και για την βεβλαμμένη κατάσταση. Εισχωρώντας τώρα βαθύτερα στην ανάλυση του προβλήματος, προκύπτουν οι εξής ιδιαιτερότητες.

Η πιο σημαντική ιδιαιτερότητα που προκύπτει, είναι αυτή της γεωμετρικής ασυμμετρίας, η οποία επιφέρει τις εξής αλλαγές:

- Μείωση της συνολικής επιφάνειας της διατομής
- Μετακίνηση του κέντρου βάρους της διατομής
- Μετατόπιση και στροφή του ουδέτερου άξονα
- Μείωση της συνολικής ροπής αδρανείας της διατομής

Αυτό που αφορά κυρίως την παρούσα προσέγγιση και είναι και η ειδοποιός διαφορά σε σχέση με την άθικτη κατάσταση, είναι ο προσδιορισμός της νέας θέσης του ουδέτερου άξονα και ο συνεχής επαναπροσδιορισμός της σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας.

Η αρχική θέση του ουδέτερου άξονα σε βεβλαμμένη διατομή, έχει παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Συνοπτικά υπενθυμίζεται ότι ο νέος ουδέτερος άξονας της διατομής περνά από το νέο κέντρο βάρους της διατομής και εκτρέπεται από το οριζόντιο επίπεδο σε μια γωνία η οποία προσδιορίζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$\tan\beta = \frac{I_y}{I_{yz}}$$

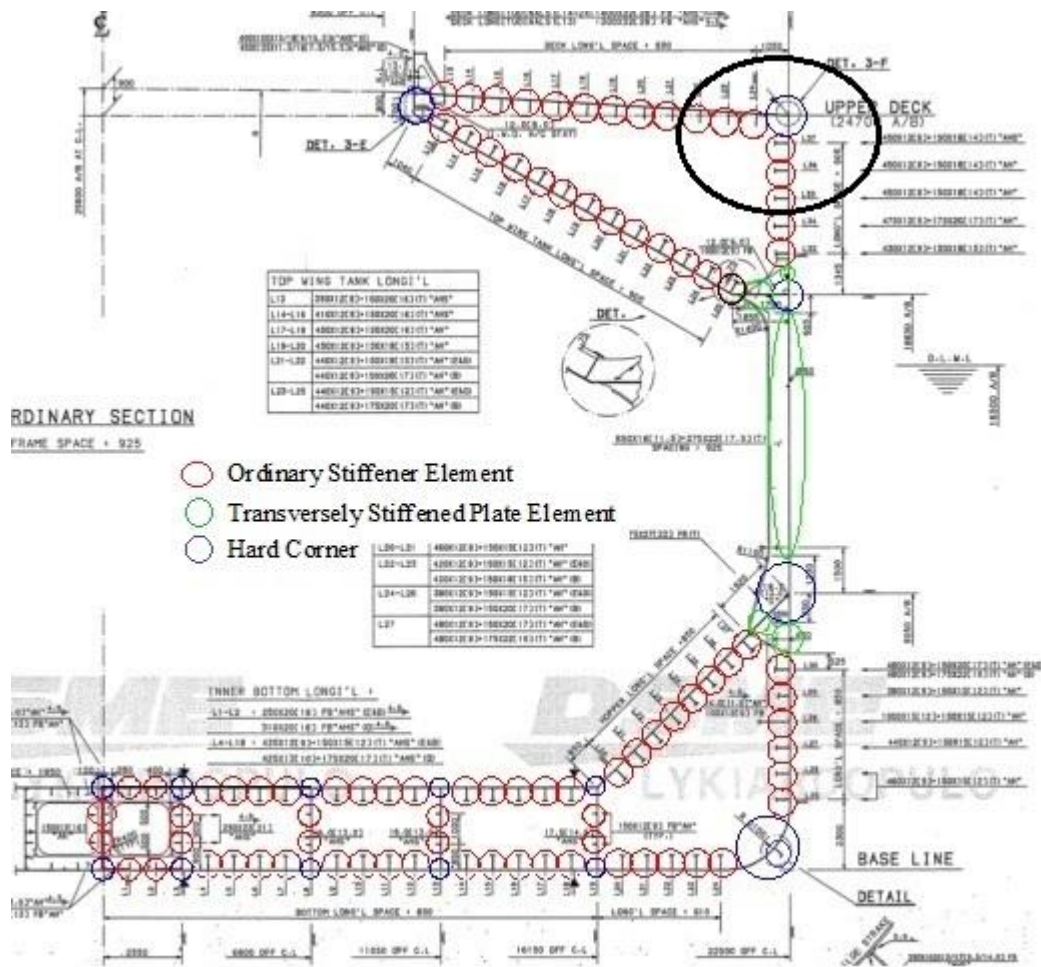
Όπου I_y η ροπή αδρανείας γύρω από τον κάθετο άξονα της διατομής και I_{yz} η φυγόκεντρη ροπή αδρανείας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο καταστάσεις που θα μελετηθούν.

6.3. Περίπτωση Α – Βλάβη στο κατάστρωμα σε κατάσταση Hogging

Στην πρώτη περίπτωση θεωρήθηκε ότι αφαιρείται ένα κομμάτι του καταστρώματος που εκτείνεται μέχρι λίγα μέτρα κάτω από το ζωστήρα. Το κομμάτι που αφαιρείται εμπεριέχει έξι συνολικά συνήθη ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα, τρία του καταστρώματος και τρία στο πλευρικό έλασμα και ένα γωνιακό στοιχείο.

Στο παρακάτω σχήμα σημειώνεται το κομμάτι που αφαιρείται από τη διατομή και στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες με όλα τα αναλυτικά γεωμετρικά στοιχεία που απαιτούνται.



Σχήμα 6.1: Το κομμάτι της διατομής που αφαιρέθηκε στην περίπτωση Α

Πίνακας 6.1

Location of ordinary stiffeners		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (+/-m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (cm ⁴)	Iy steiner (+x) (m ⁴)	Iy steiner (-x) (m ⁴)	Ixy (+x) (m ⁴)	Ixy (-x) (m ⁴)
	L4	24037.5	0.11	3.40	2687.70	81727.50	10.03	0.42	0.16	1.02	-0.64
	L5	24037.5	0.11	4.25	2687.70	102159.38	10.03	0.61	0.29	1.23	-0.84
	L6	24037.5	0.11	5.10	2687.70	122591.25	10.03	0.83	0.45	1.44	-1.05
	L7	23272.5	0.11	5.95	2666.41	138471.38	9.57	1.06	0.62	1.59	-1.22
	L9	22762.5	0.12	7.65	2652.60	174133.13	9.26	1.62	1.07	1.95	-1.59
	L10	22762.5	0.12	8.50	2652.60	193481.25	9.26	1.97	1.35	2.15	-1.78
	L11	22507.5	0.12	9.35	2645.81	210445.13	9.11	2.31	1.65	2.32	-1.96
	L12	22337.5	0.12	10.20	2641.33	227842.50	9.00	2.70	1.98	2.49	-2.13
Bottom plate	L14	22337.5	0.12	11.90	2641.33	265816.25	9.00	3.60	2.76	2.88	-2.52
	L15	22337.5	0.12	12.75	2641.33	284803.13	9.00	4.10	3.20	3.07	-2.71
	L16	22337.5	0.12	13.60	2641.33	303790.00	9.00	4.63	3.67	3.26	-2.91
	L17	22637.5	0.12	14.45	2794.33	327111.88	9.01	5.26	4.23	3.50	-3.14
	L18	22637.5	0.12	15.30	2794.33	346353.75	9.01	5.86	4.77	3.70	-3.33
	L20	22400	0.13	16.96	3020.26	379904.00	7.83	7.06	5.86	4.03	-3.67
	L21	22400	0.13	17.77	3020.26	398048.00	7.83	7.72	6.46	4.21	-3.86
	L22	22400	0.13	18.58	3020.26	416192.00	7.83	8.40	7.09	4.40	-4.04
	L23	22400	0.13	19.39	3020.26	434336.00	7.83	9.12	7.75	4.58	-4.22
	L24	22805	0.13	20.20	3031.56	460661.00	8.05	10.05	8.59	4.85	-4.49
	L4	27037.5	2.60	3.40	70165.59	91927.50	11.47	0.48	0.19	0.87	-0.54
	L5	27037.5	2.60	4.25	70165.59	114909.38	11.47	0.69	0.32	1.05	-0.72
	L6	27037.5	2.60	5.10	70165.59	137891.25	11.47	0.94	0.50	1.22	-0.89
	L7	27037.5	2.60	5.95	70165.59	160873.13	11.47	1.23	0.72	1.40	-1.07
	L9	27037.5	2.60	7.65	70165.59	206836.88	11.47	1.93	1.27	1.75	-1.42
In. Bottom plate	L10	27037.5	2.60	8.50	70165.59	229818.75	11.47	2.33	1.61	1.93	-1.60
	L11	27037.5	2.60	9.35	70165.59	252800.63	11.47	2.78	1.98	2.10	-1.78
	L12	27037.5	2.60	10.20	70165.59	275782.50	11.47	3.27	2.40	2.28	-1.95
	L14	27037.5	2.60	11.90	70165.59	321746.25	11.47	4.35	3.34	2.63	-2.31
	L15	27037.5	2.60	12.75	70165.59	344728.13	11.47	4.96	3.87	2.81	-2.48
	L16	27037.5	2.60	13.60	70165.59	367710.00	11.47	5.60	4.44	2.99	-2.66
	L17	27037.5	2.60	14.45	70165.59	390691.88	11.47	6.28	5.05	3.16	-2.83
	L18	27037.5	2.60	15.30	70165.59	413673.75	11.47	7.00	5.69	3.34	-3.01
Bottom plate	L1	22105	0.03	0.85	766.11	18789.25	10.75	0.06	0.00	0.37	-0.01
	L2	22105	0.03	1.70	766.11	37578.50	10.75	0.14	0.02	0.56	-0.21
In. Bottom plate	L1	24647.5	2.65	0.85	65321.32	20950.38	11.39	0.07	0.00	0.31	-0.01
	L2	24647.5	2.65	1.70	65321.32	41900.75	11.39	0.15	0.02	0.47	-0.17
2550 OFF C L girder	st up	21125	1.80	2.51	38025.00	52960.38	0.47	0.23	0.06	0.59	-0.31
	st down	21125	0.90	2.51	19012.50	52960.38	0.47	0.23	0.06	0.65	-0.34
CL girder	st up	15450	1.85	0.02	28582.50	247.20	29.24	0.01	0.01	0.10	0.10
6800 OFF C L girder	>>	14987.5	1.85	6.78	27726.88	101675.20	28.31	0.86	0.54	0.96	-0.76
11050 OFF C L girder	>>	14987.5	1.85	11.03	27726.88	165372.08	28.31	2.10	1.58	1.49	-1.29
16150 OFF C L girder	>>	16375	1.85	16.13	30293.75	264194.25	31.09	4.69	3.86	2.33	-2.12
CL girder	st down	15450	0.85	0.02	13132.50	247.20	28.28	0.01	0.01	0.12	0.11
6800 OFF C L girder	>>	14987.5	0.85	6.78	12739.38	101675.20	27.35	0.86	0.54	1.07	-0.85
11050 OFF C L girder	>>	14987.5	0.85	11.03	12739.38	165372.08	27.35	2.10	1.58	1.67	-1.45
16150 OFF C L girder	>>	16375	0.85	16.13	13918.75	264194.25	30.12	4.69	3.86	2.61	-2.37

Πίνακας 6.2

Location of ordinary stiffeners		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (m ⁴)	Iy steiner pos (m ⁴)	Iy steiner neg (m ⁴)	Ixy pos (m ⁴)	Ixy neg (m ⁴)
	L25	22325	2.30	22.40	51347.50	499990.70	5.81	11.79	10.23	4.05	-3.78
	L26	22155	3.15	22.40	69788.25	496161.23	5.81	12.45	10.81	3.82	-3.56
	L27	21945	4.00	22.40	87780.00	491589.95	5.24	11.62	10.09	3.14	-2.93
Lower side shell	L28	30825	4.85	22.20	149501.25	684345.83	47.79	13.34	11.57	3.14	-2.93
	L29	21740	5.70	22.42	123918.00	487345.58	3.76	14.56	12.65	2.87	-2.67
	L30	23540	6.55	22.38	154187.00	526801.66	8.08	12.64	10.97	2.03	-1.89
	L33	21922.5	20.18	22.40	442286.44	490954.39	5.77	11.78	10.23	-5.03	4.69
	L34	23157.5	21.08	22.37	488160.10	518033.28	8.83	12.42	10.79	-5.80	5.40
Sheer strake shell	L35	21606.25	21.99	22.39	475013.41	483807.15	6.15	0.00	10.08	0.00	5.47
	L36	25226.25	22.89	22.40	577428.86	565143.68	6.15	0.00	11.78	0.00	6.88
	L37	27036.25	23.80	22.41	643327.57	605828.29	6.16	0.00	12.64	0.00	7.90
	L20	23642.5	3.23	16.82	76377.92	397714.14	10.15	7.33	6.08	2.93	-2.67
	L21	23642.5	3.83	17.42	90587.89	411923.28	10.15	7.84	6.54	2.77	-2.53
Sloped plate of hopper tank	L22	23222.5	4.44	18.02	103100.37	418399.78	10.15	8.21	6.89	2.55	-2.33
	L23	22712.5	5.04	18.62	114464.54	422884.04	9.84	8.56	7.22	2.31	-2.12
	L24	21952.5	5.65	19.12	123967.62	419797.66	9.63	8.71	7.38	2.02	-1.86
	L25	21952.5	6.25	19.81	137161.85	434966.84	9.63	9.32	7.95	1.82	-1.68
	L26	21952.5	6.85	20.42	150356.07	448226.15	9.63	9.87	8.46	1.59	-1.47
	L27	23242.5	7.42	21.05	172496.59	489138.41	9.34	11.08	9.54	1.45	-1.34
	L13	31540	24.32	11.13	766987.80	351166.36	17.35	4.49	3.38	-5.28	4.58
	L14	31054	23.88	11.96	741464.96	371343.73	16.60	5.05	3.88	-5.39	4.72
	L15	21732.5	23.44	12.79	509473.97	278002.14	10.24	4.01	3.13	-3.89	3.44
	L16	21732.5	22.99	13.50	499640.01	293432.22	10.24	4.44	3.51	-3.95	3.51
Sloped plate of top wing tank	L17	22177.75	22.55	14.29	500051.07	316964.40	10.27	5.05	4.04	-4.11	3.68
	L18	22206.25	22.10	15.08	490715.32	334803.63	10.09	5.59	4.53	-4.17	3.75
	L19	22811.25	21.64	15.86	493595.40	361717.99	10.70	6.32	5.18	-4.32	3.91
	L20	21091.75	21.19	16.64	446968.64	351051.09	9.53	6.41	5.30	-4.02	3.65
	L21	20896.25	20.74	17.43	433324.39	364158.95	9.47	6.94	5.79	-3.98	3.64
	L22	21258.25	20.28	18.21	431184.02	387091.47	9.71	7.67	6.45	-4.04	3.71
	L23	21803.75	19.82	18.99	432166.98	413987.80	10.38	8.53	7.22	-4.12	3.79
	L24	21803.75	19.37	19.77	422300.79	431081.94	10.38	9.22	7.86	-4.08	3.77
	L13	35040	26.29	11.23	921107.42	393639.36	18.78	5.07	3.82	-6.75	5.86
	L14	45480	26.21	12.16	1192213.11	553173.24	24.14	7.63	5.89	-9.39	8.25
	L15	45480	26.16	13.09	1189759.92	595378.68	24.14	8.77	6.88	-10.03	8.89
	L16	45480	26.11	14.02	1187306.73	637629.60	24.14	9.98	7.96	-10.67	9.53
Deck plate	L17	45480	26.05	14.95	1184853.54	679835.04	24.14	11.27	9.12	-11.30	10.16
	L18	45480	26.00	15.88	1182400.35	722085.96	24.14	12.64	10.35	-11.92	10.79
	L19	45480	25.94	16.81	1179947.15	764291.40	24.14	14.08	11.67	-12.54	11.42
	L20	45480	25.89	17.73	1177493.96	806542.32	24.14	15.61	13.06	-13.16	12.04
	L21	45480	25.84	18.66	1175040.77	848747.76	24.14	17.21	14.53	-13.77	12.65
	L22	45480	25.78	19.59	1172587.58	890998.68	24.14	0.00	16.08	0.00	13.26
	L23	45480	25.73	20.52	1170134.39	933204.12	24.14	0.00	17.71	0.00	13.87
	L24	47640	24.69	21.45	1176136.32	1021735.08	24.14	0.00	20.33	0.00	14.19

Πίνακας 6.3

Location of		A	KG y B.L.	KG x C.L.	A*KG y	A*KG x	Item's Iy	Iy steiner (+x)	Iy steiner (-x)	Ixy (+x)	Ixy (-x)
hard corners		(mm ²)	(m)	(+/-m)	(mm ² *m)	(mm ² *m)	(cm ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)
Bottom-girders	L3 h d	25215.00	0.08	2.55	2017.20	64298.25	10.44	0.28	0.08	0.86	-0.45
	L8 h d	21462.50	0.07	6.80	1502.38	145945.00	9.21	1.24	0.78	1.66	-1.32
connections	L13 h d	21037.50	0.07	11.05	1472.63	232464.38	8.96	2.95	2.22	2.54	-2.20
	L19 h d	21325.00	0.08	16.15	1706.00	344398.75	8.34	6.12	5.03	3.68	-3.34
In. Bottom-girders	L3 h d	26787.50	2.62	2.55	70183.25	68308.13	11.39	0.30	0.08	0.68	-0.36
	L8 h d	25075.00	2.64	6.80	66198.00	170510.00	11.39	1.45	0.91	1.45	-1.15
	L13 h d	25075.00	2.64	11.05	66198.00	277078.75	11.39	3.52	2.64	2.27	-1.96
CL girder	h d up	23537.50	2.63	0.00	61903.63	0.00	10.11	0.02	0.02	0.14	0.14
	h d down	24600.00	0.07	0.00	1722.00	0.00	10.75	0.02	0.02	0.20	0.20
Side shell-sloped	h d	21180.00	18.83	22.44	398819.40	475279.20	24.33	11.43	9.93	-4.21	3.93
plate of t.w.t.											
connection											
Sheer strake	h d	32772.88	24.64	22.33	807523.64	731818.30	24.57	0.00	15.21	0.00	10.15

Πίνακας 6.4

Location of		A	KG y B.L.	KG x C.L.	A*KG y	A*KG x	Item's Iy	Iy steiner (+x)	Iy steiner (-x)	Ixy (+x)	Ixy (-x)
hard corners		(mm ²)	(m)	(+/-m)	(mm ² *m)	(mm ² *m)	(cm ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)
Inner bottom-hopper		24650.00	2.82	16.20	69513.00	399330.00	11.87	7.12	5.86	3.12	-2.83
connection											
Deck-sloped plate of		55883.13	25.03	10.39	1398754.62	580625.67	9.83	6.99	5.15	-9.22	7.92
t.w.t. connection											
Bilge strake		6368.75	0.53	21.90	3375.44	139475.63	0.02	3.35	2.91	1.42	-1.33
Side shell-sloped plate		22652.50	9.00	22.44	203872.50	508322.10	1.02	12.22	10.62	0.67	-0.62
of hopper connection											
Bilgeplate		49654.00	0.70	21.90	34757.80	1087422.60	38166.90	29.38	25.94	10.79	-10.04
T.w.t knuckled L25		13091.88	18.83	20.60	246520.01	269692.63	1.86	5.99	5.14	-2.40	2.22

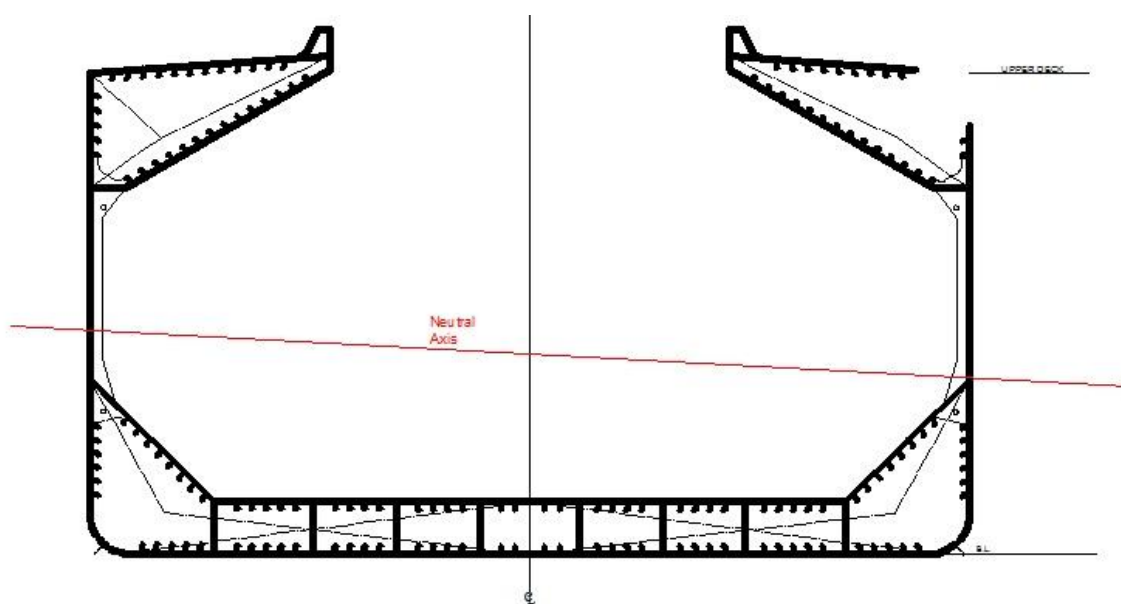
Πίνακας 6.5

Location of		A	KG y B.L.	KG x C.L.	A*KG y	A*KG x	Item's Iy	Iy steiner (+x)	Iy steiner (-x)	Ixy (+x)	Ixy (-x)
plates off B.L. (m)		(mm ²)	(m)	(+/-m)	(mm ² *m)	(mm ² *m)	(cm ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)	(m ⁴)
13.53	p1	168000	13.53	22.49	2273040.00	3778320.00	0.0492	91.05	79.11	-12.75	11.88
19.48	p2	7961.25	19.48	22.49	155095.10	179048.51	0.0018	4.32	3.75	-1.71	1.59
8.28	p3	23873.8	8.28	21.5	197782.08	513285.63	0.0063	11.86	10.24	1.06	-0.98
18.83	p4	18191.3	18.83	21.57	342541.24	392385.26	20.2230	9.10	7.86	-3.48	3.24
7.81	p5	31385.3	7.81	22.44	245040.34	704285.01	0.0093	16.94	14.71	1.80	-1.67

Section's Centroid (m)	(-0.79,10.27)
Iy Total (m⁴)	1401.7
Ixy Total (m⁴)	47.5
tan-1	0.0531
fi (degrees)	3.04

Προηγουμένως υπολογίστηκαν τα απαραίτητα πρόσθετα στοιχεία για την εκτέλεση του λογισμικού. Είναι πλέον γνωστά το κέντρο βάρους της διατομής, η ροπή αδράνειας ως προς τη CL, η φυγόκεντρη ροπή αδρανείας και η γωνία στην οποία εκτρέπεται ο ελαστικός ουδέτερος άξονας της διατομής.

Ακολουθεί σκαρίφημα σχεδιασμένο σε AUTOCAD, το οποίο παρουσιάζει τη μέση τομή του πλοίου και τη θέση του ουδέτερου άξονα, όπως αυτή υπολογίστηκε να είναι προηγουμένως.



Σχήμα 6.2 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου

Για να γίνει η εφαρμογή του λογισμικού στην βεβλαμμένη κατάσταση που μελετάται εδώ, χρειάστηκε να γίνουν πρώτα κάποιες απαραίτητες αλλαγές. Υπενθυμίζεται ότι για την άθικτη κατάσταση, υπήρχε μόνο μια συνθήκη η οποία έπρεπε να ικανοποιείται. Η συνθήκη αυτή αφορούσε το συνολικό άθροισμα των αξονικών δυνάμεων το οποίο έπρεπε να βρίσκεται μεταξύ κάποιων καθορισμένων τιμών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία στη διατομή. Έτσι ίσχυε:

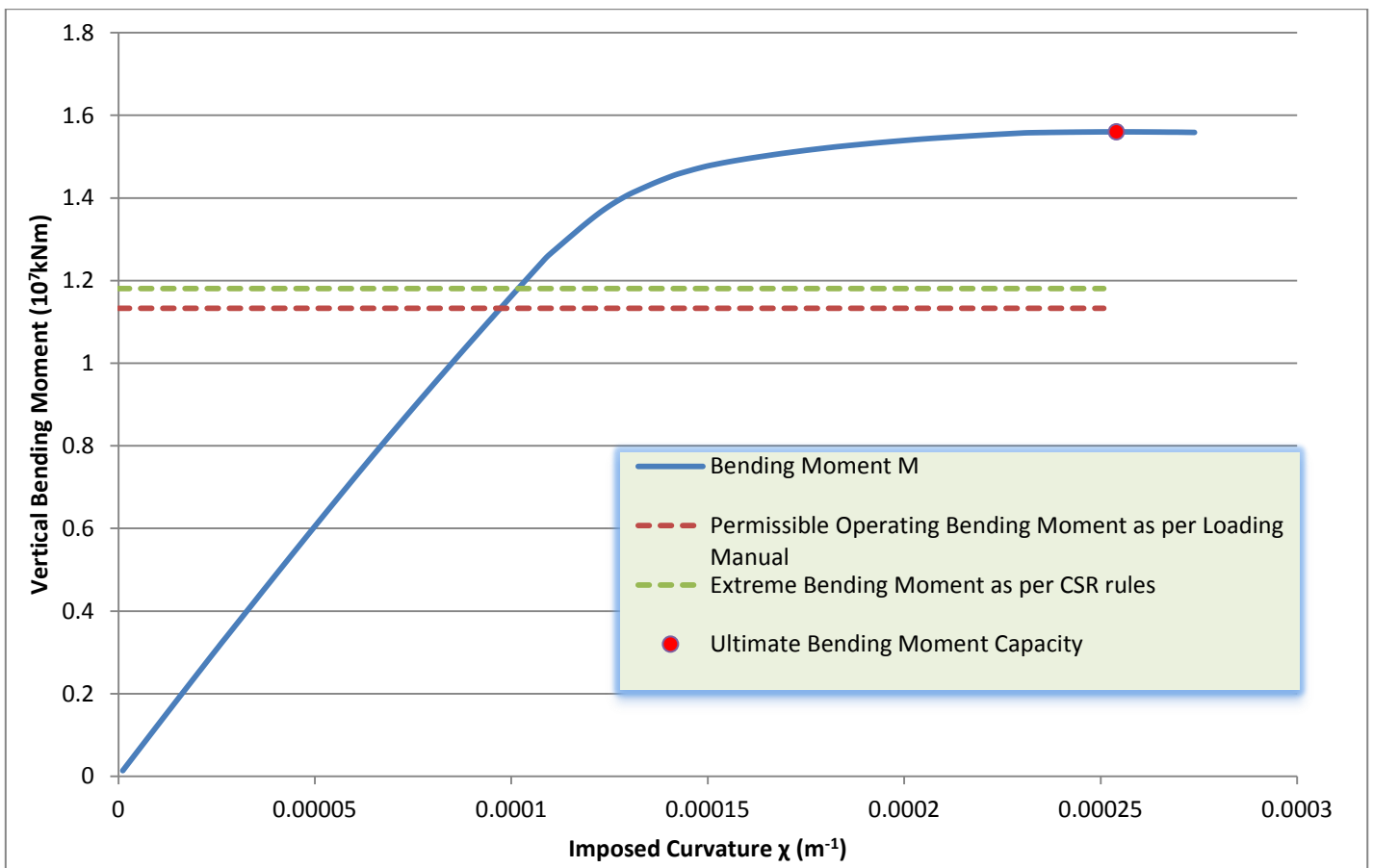
$$-1000N < F_{SUM} < 1000N$$

Στη νέα κατάσταση, εκτός από τη συνθήκη ισορροπίας των δυνάμεων, για να είναι εφικτό να υπολογιστεί το άθροισμα της ροπής γύρω από τον οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους, θα πρέπει να προστεθεί άλλη μια συνθήκη που αφορά τη ροπή γύρω από τον κάθετο άξονα της διατομής.

Για το λόγο ακριβώς ότι η διατομή πλέον είναι μη συμμετρική, προκύπτουν συνιστώσες της ροπής και στους δύο άξονες. Πρέπει λοιπόν η εγκάρσια ροπή που εφαρμόζεται, να βρίσκεται μέσα σε κάποια πολύ μικρά όρια στα οποία να αντιστοιχούν πολύ μικρές τάσεις. Να ισχύει δηλαδή:

$$-1000\text{Nm} < M_y < 1000\text{Nm}$$

Στο λογισμικό που αναπτύχθηκε, υπάρχει μια εσωτερική διαδικασία η οποία, αφού προηγουμένως ισορροπήσει τις δυνάμεις μέσω της κατακόρυφης μετατόπισης του ουδέτερου άξονα, στη συνέχεια ισορροπεί την εγκάρσια ροπή μεταβάλλοντας τη γωνία στροφής του. Παρακάτω δίνονται γραφικά η καμπύλη της ροπής $M-\chi$ μετά της εκτέλεση του λογισμικού καθώς και αναλυτικοί πίνακες με όλα τα αριθμητικά στοιχεία που προέκυψαν.



Σχήμα 6.3: Ροπή κάμψης συναρτήσει επιβαλλόμενης καμπυλότητας

Η μέγιστη καμπτική αντοχή του φορτηγού πλοίου Bulk Carrier της παρούσας μελέτης για την περίπτωση A, είναι η μέγιστη τιμή του διαγράμματος M-χ και είναι σημειωμένη με μια κόκκινη τελεία. Αντιστοιχεί σε 1.5599×10^7 kNm και σε τιμή καμπυλότητας 2.541×10^{-4} που προκύπτει στο βήμα 231 της επαναληπτικής διαδικασίας.

Πίνακας 6.6: Αριθμητικά στοιχεία λογισμικού

ΣF (N)	M_x (Nm)	NA y (m)	fi (degrees)	M_y (Nm)	Step
494.8368114	136912512.8	10.32699966	-3.18000007	-907.356926	1
-969.1142897	273632020.3	10.33494966	-3.18183707	999.173392	2
-975.0630563	410206513.4	10.34213966	-3.18346607	999.5893673	3
-954.1416796	546646333.9	10.34859966	-3.18499607	987.3664638	4
-917.1229821	682955292.7	10.35468966	-3.18649207	999.9375032	5
-908.5536621	819136379.7	10.36053966	-3.18796907	981.252269	6
-947.4242173	955191124.4	10.36622966	-3.18942007	985.6064198	7
-922.325731	1091118581	10.37183966	-3.19088907	974.4487886	8
-944.4537177	1226921418	10.37735966	-3.19234107	974.4184778	9
-858.158604	1362599412	10.38282966	-3.19379607	984.0752303	10
-905.0300038	1498152056	10.38824966	-3.19524007	959.3215544	11
-805.867616	1633579393	10.39364966	-3.19668507	990.8393312	12
-874.9756935	1768880757	10.39901966	-3.19813507	949.565483	13
-923.6401836	1904057124	10.40436966	-3.19959707	978.3938858	14
-843.3740023	2039108546	10.40970966	-3.20105607	996.466846	15
-821.2219279	2174033676	10.41503966	-3.20250707	924.5897564	16
-808.0192862	2308833325	10.42035966	-3.20395107	969.6098989	17
-836.3478148	2443507148	10.42566966	-3.20542607	961.1618507	18
-730.7846157	2578055449	10.43097966	-3.20687607	923.7705403	19
-869.9044433	2712474231	10.43628966	-3.20835407	996.6509924	20
-804.7925745	2846768014	10.44159966	-3.20980907	917.6232702	21
-405.4880692	2980217855	10.44941966	-3.21728607	914.0309232	22
-373.217986	3113473338	10.45732966	-3.22249307	936.8770684	23
-715.6207934	3247263529	10.46281966	-3.22444607	922.9914152	24
-700.107298	3376760747	10.48284966	-3.22352707	-925.90633	25
142.2651646	3508687053	10.49250966	-3.23892507	920.1374213	26
-954.1741254	3641150233	10.50053966	-3.23762307	-868.338767	27
-943.0993129	3771995123	10.51350966	-3.23322107	-865.388781	28
429.9777446	3903340914	10.52318966	-3.24759307	921.9481449	29
-446.5462653	4035680851	10.52950966	-3.24987907	958.304483	30
-903.2990162	4166885767	10.53897966	-3.23972407	-846.627222	31
-482.7333768	4298864864	10.54541966	-3.24174007	896.1202383	32
-727.592789	4430689343	10.55185966	-3.24364607	872.1788447	33
-683.857105	4562350370	10.55832966	-3.24565107	948.634019	34

-725.3822882	4692931115	10.56771966	-3.23665007	-983.168184	35
-413.027788	4823850791	10.57514966	-3.23893807	947.0633979	36
-694.0442142	4954600225	10.58258966	-3.24049007	969.6716996	37
-502.3787403	5085429538	10.58945966	-3.24272807	894.4058265	38
-480.3519426	5215702379	10.59723966	-3.24519607	994.774679	39
-643.6409805	5345770195	10.60508966	-3.24695907	847.081567	40
-288.2579772	5475896620	10.61236966	-3.24939707	976.0003161	41
-685.9955003	5605821394	10.61969966	-3.25182007	861.3709412	42
-361.5448195	5735525209	10.62714966	-3.25416607	928.3453831	43
-644.7016253	5864990408	10.63471966	-3.25649207	902.4614246	44
-272.9872025	5994238094	10.64237966	-3.25898107	961.6389099	45
-651.1397759	6123289753	10.65005966	-3.26151407	805.9794987	46
-433.1839697	6252144831	10.65777966	-3.26405707	993.5150713	47
-116.7637092	6380798318	10.66553966	-3.26655207	970.8711794	48
-320.8849264	6509238805	10.67334966	-3.26894407	848.8033645	49
-198.0172579	6637455341	10.68123966	-3.27149707	907.1321898	50
-65.11001364	6765451940	10.68918966	-3.27412507	977.2429055	51
-139.7318183	6893260279	10.69713966	-3.27677407	746.55868	52
-358.7535859	7020883038	10.70508965	-3.27946507	992.1750065	53
-207.3060915	7148149392	10.71327965	-3.28280807	886.9723856	54
-466.8817762	7275017716	10.72175965	-3.28670207	865.9715069	55
1.189930987	7401603029	10.73036965	-3.29072707	868.3777974	56
-404.927847	7527902554	10.73907965	-3.29490307	911.213669	57
184.0344093	7653764448	10.74809965	-3.30009507	843.3221482	58
255.7796995	7779236204	10.75733965	-3.30588807	891.6423016	59
-636.4468992	7904409506	10.76666965	-3.31190207	801.093191	60
-517.4335706	8029217694	10.77619965	-3.31809907	789.9695706	61
-305.1013371	8153607010	10.78599965	-3.32380407	858.6593176	62
-115.3565919	8277553386	10.79607965	-3.32925307	939.4319077	63
-249.9380439	8401146885	10.80630965	-3.33452807	905.4833922	64
-388.8879102	8524467182	10.81657965	-3.33979507	879.1695691	65
-15.10486423	8647528738	10.82687965	-3.34501307	968.6940013	66
-439.1713514	8770278059	10.83726965	-3.34991807	949.34852	67
-318.9352644	8892766959	10.84768965	-3.35475407	941.369705	68
291.2249773	9014905620	10.85823965	-3.35958807	699.2055321	69
171.7382095	9136623180	10.86899965	-3.36394807	775.5811693	70
267.8905873	9258077759	10.87977965	-3.36813107	892.3493238	71
-421.6977499	9379203534	10.89063965	-3.37220707	856.9714268	72
39.71320306	9500025744	10.90156965	-3.37616607	926.8398807	73
27.26442465	9620590239	10.91249965	-3.38007007	901.4968678	74
257.021187	9740882412	10.92346965	-3.38362407	859.3918985	75
-122.4602642	9860940089	10.93440965	-3.38716107	642.0912428	76
338.8844541	9980780562	10.94531965	-3.39061807	857.1656775	77
320.9493533	10100382297	10.95620965	-3.39405107	646.8098075	78

369.4363291	10219770809	10.96705965	-3.39742207	717.468228	79
-184.4988327	10338841448	10.97796965	-3.40074607	745.0677596	80
366.3828606	10457601731	10.98894965	-3.40390907	851.6623905	81
-115.807585	10576123702	10.99990965	-3.40690707	670.7853268	82
-117.3684615	10694420545	11.01085965	-3.40968207	953.5429241	83
411.9714107	10812513911	11.02176965	-3.41233907	746.0176282	84
-35.10989239	10930378303	11.03265965	-3.41486707	902.5197572	85
387.9688848	11047992434	11.04356965	-3.41738107	829.2717548	86
400.5812647	11165416218	11.05441965	-3.41983307	871.8540352	87
400.5779338	11282628232	11.06523965	-3.42216607	855.8043978	88
43.48542668	11399634753	11.07601965	-3.42443507	590.0755239	89
87.60816731	11516444720	11.08675965	-3.42663007	911.4196948	90
10.0102923	11633027341	11.09748964	-3.42888107	876.5872003	91
23.25208255	11749393440	11.10819964	-3.43103807	760.0810072	92
223.47082	11865585416	11.11884964	-3.43311607	839.4962019	93
-195.2603787	11981588067	11.12944964	-3.43510807	898.451094	94
424.3909047	12097348082	11.14006964	-3.43717207	875.0820413	95
22.45543858	12212927122	11.15062964	-3.43921007	644.618435	96
4.889692254	12328294955	11.16117964	-3.44130307	717.2780666	97
-340.2649501	12443443762	11.17171964	-3.44349107	847.4762999	98
-31.20282977	12558410906	11.18221964	-3.44568507	623.2687577	99
950.959704	12654153937	11.18052964	-3.49149307	969.4309479	100
789.2492264	12744225902	11.17549964	-3.54892207	870.4687181	101
194.0121118	12834149870	11.17070964	-3.60540407	807.9372425	102
294.0086095	12923935752	11.16614964	-3.66091107	780.370117	103
998.0161912	13013520054	11.16186964	-3.71564207	933.0527627	104
943.0462306	13102899811	11.15784964	-3.76963007	765.6354904	105
877.2392889	13192081020	11.15408964	-3.82283907	803.3280311	106
144.0164599	13281092559	11.15054964	-3.87524107	647.8008893	107
727.7596397	13367377487	11.14563964	-3.93126406	942.390075	108
953.8901415	13452445707	11.14031964	-3.98778606	617.8412552	109
159.5943646	13535224202	11.13375964	-4.04326306	969.856762	110
555.1412452	13615538341	11.12592964	-4.09575906	761.7779192	111
547.4414311	13692284949	11.11601964	-4.14652206	667.1899157	112
258.5010103	13764198276	11.10320964	-4.19859406	680.9028204	113
786.849578	13833730950	11.08912965	-4.24612506	885.3493546	114
312.1179378	13899017752	11.07248965	-4.29352306	621.7458627	115
926.343008	13961202192	11.05415965	-4.33721406	607.0590148	116
997.9559233	14021222879	11.03473965	-4.37482206	860.8137534	117
747.478908	14077938554	11.01339965	-4.41012506	596.5120454	118
136.0312615	14128913796	10.98841965	-4.43993706	723.3245904	119
880.2839239	14176660957	10.96167965	-4.46110906	952.9386392	120
600.5997915	14223462528	10.93477965	-4.48448106	657.8482311	121
974.5374628	14269937671	10.90819965	-4.50826906	859.2081068	122

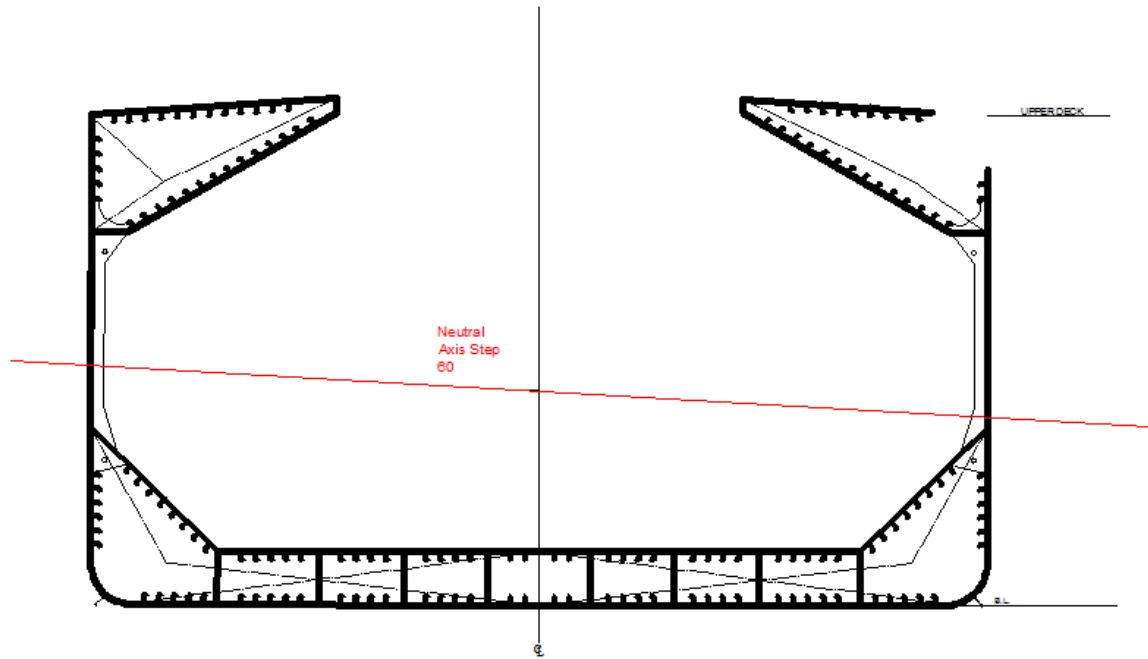
797.0722989	14316370877	10.88210965	-4.53174606	985.7060506	123
131.8946757	14361928578	10.85590965	-4.55729606	961.2641432	124
194.9234541	14405032896	10.82838965	-4.58268506	593.9396639	125
802.4699667	14446309677	10.80006965	-4.60855506	889.2283009	126
274.532598	14486886641	10.77177965	-4.63612306	713.1687675	127
191.2654439	14526862885	10.74360965	-4.66494606	795.5301671	128
967.5352917	14563999742	10.71381965	-4.68539106	776.7223146	129
-879.9256324	14596713442	10.68160966	-4.69754206	818.1067608	130
-712.2885837	14626720581	10.64839966	-4.71171906	745.459279	131
-829.0594479	14656431663	10.61598966	-4.72709606	966.1522154	132
-907.02309	14685858143	10.58439966	-4.74359006	897.0341951	133
-527.652456	14713663402	10.55308966	-4.76603306	898.7974882	134
-596.4632857	14740698982	10.52231966	-4.78845806	935.3844094	135
-996.1388161	14766606646	10.49165966	-4.81189406	861.225358	136
-571.0377493	14789615446	10.46147966	-4.84520906	717.9240274	137
-372.9052385	14810495865	10.43046966	-4.87914106	777.3404127	138
-880.9717438	14831177520	10.40019966	-4.91344006	702.5132391	139
-804.3468095	14851658817	10.37069966	-4.94811206	703.1503554	140
-976.6991836	14870997178	10.34128966	-4.98103106	714.3980857	141
-975.9033691	14889916055	10.31298966	-5.01544306	947.0498202	142
-274.4098371	14908110872	10.28424967	-5.04549006	735.5630337	143
-265.2694377	14925210037	10.25510967	-5.07025606	874.1109133	144
-286.2026754	14942414233	10.22686967	-5.09377306	728.3230273	145
-870.874683	14959344798	10.19920967	-5.11741206	905.4087944	146
-895.1856755	14975456204	10.17145967	-5.13855306	708.024362	147
-957.5920358	14991494195	10.14422967	-5.15964606	897.4784677	148
-578.5952913	15007237329	10.11795967	-5.18149606	723.9735993	149
-655.7669835	15022906147	10.09217967	-5.20325806	787.0512629	150
-332.0910642	15038532812	10.06682967	-5.22485306	971.2323391	151
-405.0896592	15054026560	10.04206967	-5.24653406	732.4103004	152
-823.6211839	15068869910	10.01707967	-5.26553706	715.7789226	153
-891.4349221	15083249431	9.992069673	-5.28243306	695.9290037	154
-497.1353242	15096984919	9.967049673	-5.29682806	750.4088329	155
-307.0180075	15110890728	9.942739674	-5.30967606	947.4128109	156
-441.8837314	15124732107	9.919039675	-5.32229606	983.8011578	157
-987.7296706	15138397717	9.895999675	-5.33512806	632.9149452	158
-911.0606642	15151815849	9.873779676	-5.34831206	716.6938394	159
-895.9307601	15164578878	9.851029676	-5.35831106	678.6837231	160
-957.8792105	15177055380	9.829099677	-5.36944506	675.9088088	161
-557.666724	15189493792	9.807529677	-5.38048006	655.2451371	162
-630.7278493	15201922113	9.786229678	-5.39136706	947.1484439	163
-940.4999976	15214049460	9.765839678	-5.40254306	976.7779169	164
-618.1814774	15225874372	9.746379679	-5.41412606	730.7020994	165
-722.3432113	15237631533	9.727289679	-5.42560706	926.3568439	166

-491.4668348	15248631279	9.70740968	-5.43258706	955.3044044	167
-957.1860937	15258938369	9.68715968	-5.43673306	936.0009282	168
-624.8965546	15269235914	9.667189681	-5.44088606	868.0538319	169
-540.6448852	15279524402	9.647469681	-5.44495506	741.764883	170
-432.5966324	15289653523	9.628349682	-5.44902806	700.2316612	171
-715.1761872	15299734085	9.609549682	-5.45306606	717.6282277	172
-643.2386178	15309812006	9.590979683	-5.45702506	684.4135298	173
-630.0962307	15319820096	9.572779683	-5.46093606	781.0170097	174
-935.4160308	15329575470	9.554589684	-5.46361906	764.0296901	175
-203.876156	15338906134	9.535909684	-5.46369806	756.8446387	176
746.0519281	15348124501	9.517709685	-5.46373206	838.0563041	177
795.9952883	15357152838	9.499299685	-5.46221306	-878.554746	178
756.3812678	15366148206	9.481219686	-5.46059706	-700.665685	179
385.0599899	15375081994	9.463469686	-5.45895006	-660.447058	180
992.7910001	15383958106	9.446089687	-5.45751106	-881.842983	181
628.5525129	15392651155	9.429339687	-5.45632306	-906.356615	182
942.9940791	15401212331	9.413109687	-5.45519206	-806.763845	183
906.1517673	15409648935	9.397349688	-5.45410306	-694.918405	184
561.8453696	15417993792	9.381769688	-5.45276206	-953.762104	185
866.5122775	15426049288	9.365819689	-5.44951206	-726.232183	186
626.3591992	15433805389	9.349579689	-5.44436806	-691.666681	187
484.2371222	15441186699	9.333059689	-5.43703506	-904.645403	188
886.6404929	15448038412	9.31567969	-5.42597906	-695.787507	189
847.978212	15454830631	9.29860969	-5.41492506	-733.251221	190
641.2841736	15461549786	9.282019691	-5.40461006	-713.88339	191
786.1854472	15468262850	9.265639691	-5.39448106	-907.589847	192
943.754155	15474904794	9.249589692	-5.38429106	-967.843232	193
869.2685885	15481518268	9.233759692	-5.37409806	-649.640964	194
987.5843925	15488132379	9.218089692	-5.36398206	-961.440114	195
853.2430485	15494661984	9.202759693	-5.35372406	-922.279235	196
497.0380505	15501050494	9.187899693	-5.34321106	-834.0119	197
596.253453	15507315534	9.173559693	-5.33301506	-876.134184	198
860.7295529	15513529376	9.159549694	-5.32321906	-652.80717	199
796.0123673	15519662898	9.146039694	5.31455106	-766.340581	200
862.758002	15525774988	9.132709694	5.30585806	-979.342938	201
943.8861205	15531809030	9.119679695	5.29696306	-693.736033	202
722.7408	15537751560	9.107189695	5.28931506	-616.252348	203
680.4848462	15543643940	9.094959695	5.28172206	-893.08856	204
639.8516654	15549408898	9.083289696	5.27485906	-931.022377	205
656.4653582	15555032620	9.072389696	5.26990006	-679.713478	206
759.4648536	15560551665	9.061919696	5.26525406	-837.640101	207
990.0719853	15565990439	9.051739697	5.26042106	-781.803587	208
904.9111235	15571334778	9.042079697	5.25675006	-923.757472	209
772.1328902	15576473857	9.033279697	5.25447106	-756.735761	210

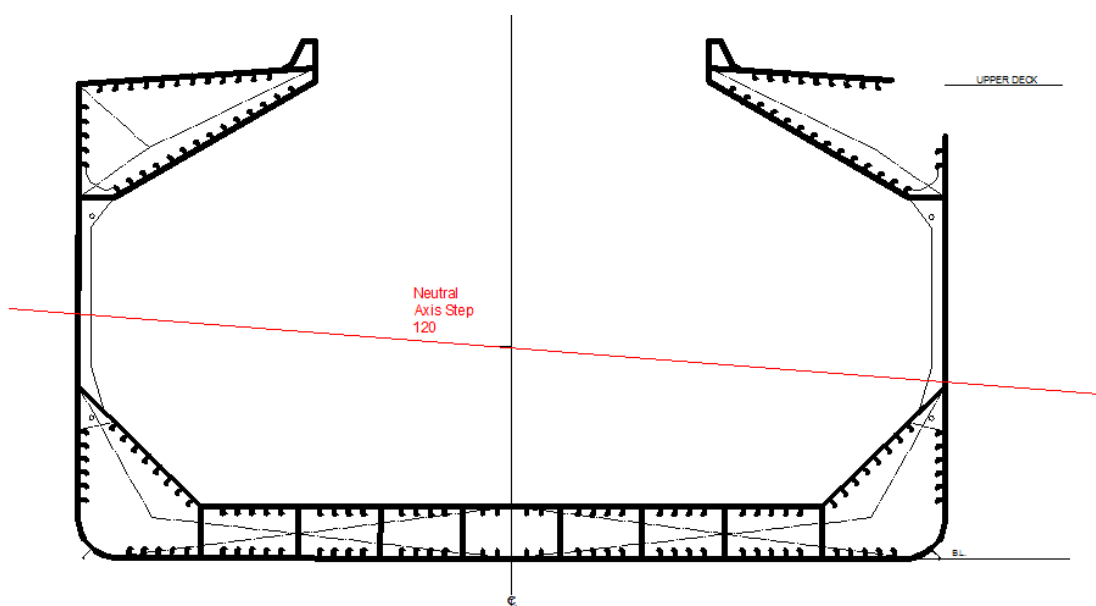
497.2966891	15579104474	9.022039697	5.26697606	700.6513971	211
-938.782143	15580820643	9.010439698	5.28528806	814.0479452	212
700.3296709	15582494699	8.999179698	5.30398106	988.3775684	213
882.3635992	15584216002	8.988169698	5.32202006	737.088745	214
850.6155175	15585862954	8.977559698	5.34020506	834.0583691	215
-717.3854448	15587404132	8.967439699	5.35802906	962.689107	216
-772.9085911	15588773255	8.958109699	-5.37701606	818.6797625	217
-948.9142269	15590028295	8.949339699	-5.39690906	939.3073066	218
-577.3118956	15591243178	8.940839699	-5.41699806	765.1852931	219
-989.2096706	15592460976	8.9323897	-5.43683706	746.1171794	220
-817.2891786	15593561307	8.9245297	-5.45762906	860.8100238	221
-564.8032137	15594631111	8.9168797	-5.47851806	758.0255961	222
-799.3239606	15595642758	8.9094997	-5.49887206	815.6559651	223
-617.0332307	15596451548	8.9030297	-5.52023906	918.2984312	224
-891.5174416	15597282263	8.8967397	-5.54164206	798.6173936	225
-807.2992156	15598126478	8.890529701	-5.56275806	896.828769	226
-774.7168457	15598802052	8.885049701	-5.58446106	914.9156815	227
-946.6692166	15599349369	8.880159701	-5.60669906	940.2548665	228
-699.7897636	15599575520	8.876859701	-5.63347706	773.1395413	229
-662.1572763	15599819499	8.873529701	-5.65988806	859.6788265	230
-645.237199	15599959894	8.870679701	-5.68693106	956.5753937	231
-983.990042	15599928499	8.868539701	-5.71427906	708.8918907	232
-766.0266163	15599763724	8.867299701	-5.74279506	932.1095493	233
-682.3335308	15599584232	8.866149701	-5.77109406	968.5183293	234
-704.7793272	15599288820	8.865479701	-5.79950906	901.952851	235
-882.7223059	15598786084	8.865679701	-5.82900906	910.199553	236
-704.4465481	15598248936	8.865999701	-5.85758906	970.6720919	237
-858.8671864	15597684244	8.866449701	-5.88609006	937.8607736	238
-752.0644088	15596949401	8.867629701	-5.91553506	739.9093395	239
-827.8629482	15596237778	8.868729701	-5.94458406	843.7279687	240
-726.8060026	15595459030	8.870099701	-5.97330506	855.9480734	241
-919.8531983	15594480020	8.872259701	-6.00236906	819.4277971	242
-682.2165805	15593526873	8.874339701	-6.03106606	824.4525782	243
-862.2853227	15592516356	8.876699701	-6.06038506	738.9889641	244
-776.130473	15591121419	8.880759701	-6.09314706	927.4565401	245
-851.173186	15589604101	8.885319701	-6.12636606	948.2235068	246
-813.1061928	15588116345	8.889759701	-6.15913706	713.0649648	247
-875.902528	15586660151	8.894069701	-6.19143106	883.6550039	248
-999.7912825	15585062500	8.8989597	-6.22425806	847.2267344	249

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και από τη στιγμή που είναι πλέον γνωστή η θέση του ουδέτερου άξονα σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, είναι δυνατός ο σχεδιασμός ενδεικτικών σκαριφημάτων για τον προσδιορισμό σχηματικά της θέσης του άξονα στη διατομή. Επίσης δίνονται τα γραφήματα για την κατακόρυφη θέση και στροφή του άξονα.

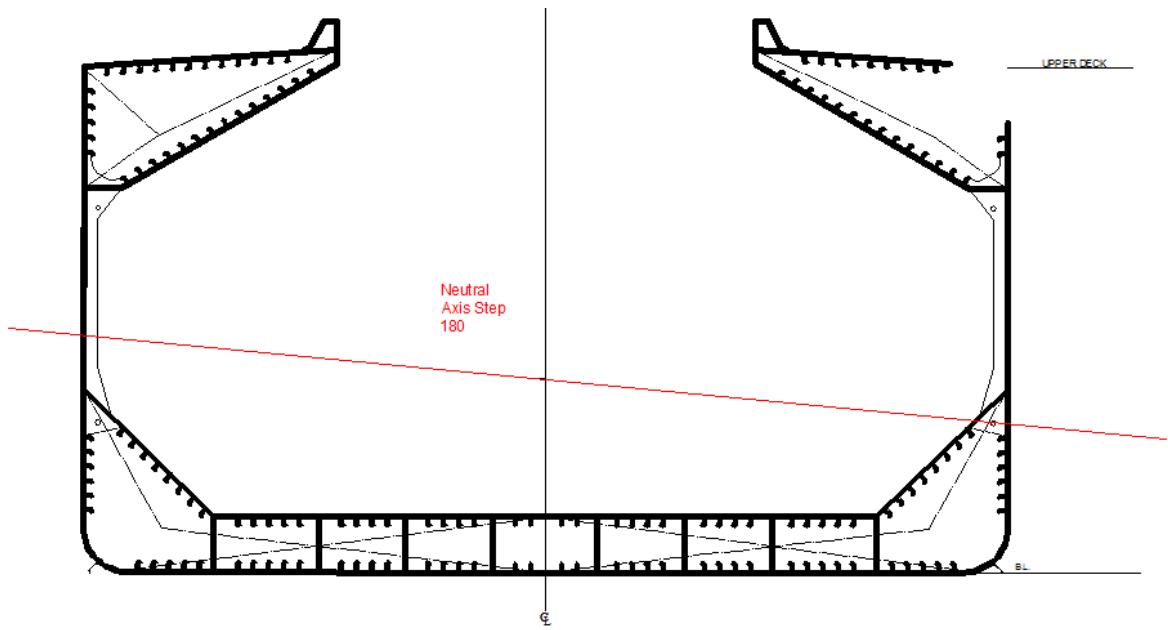
Παρακάτω δίνονται σκαριφήματα σχεδιασμένα στο AUTOCAD τα οποία περιέχουν την ακριβή θέση του ουδέτερου άξονα για κάθε εξήντα (60) Steps.



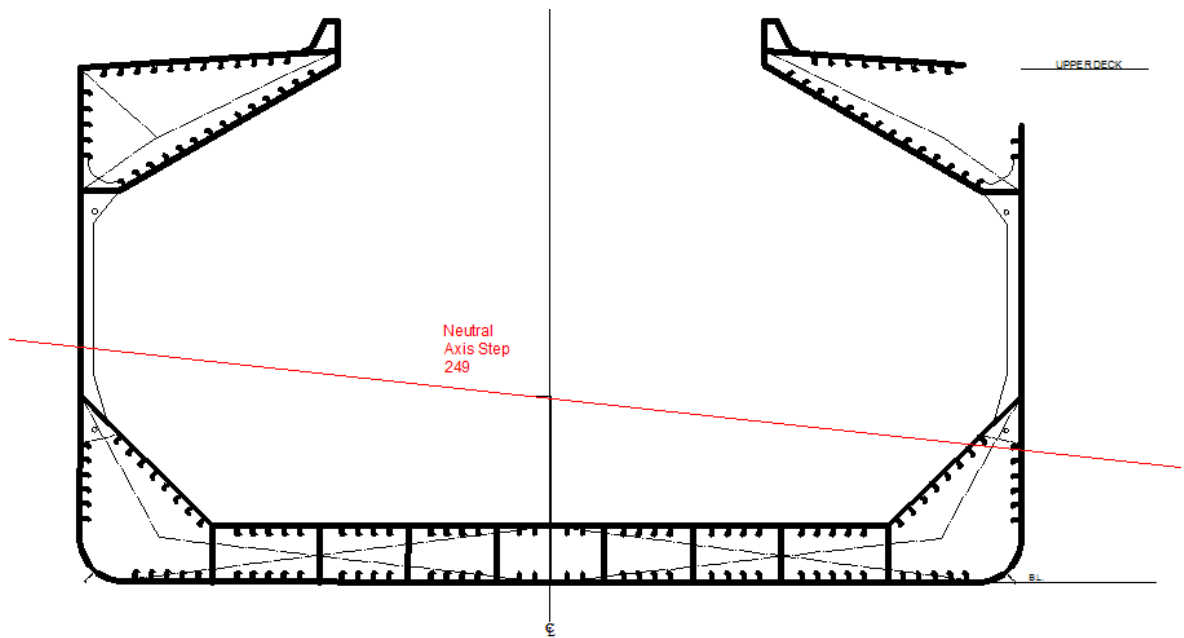
Σχήμα 6.4 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 60



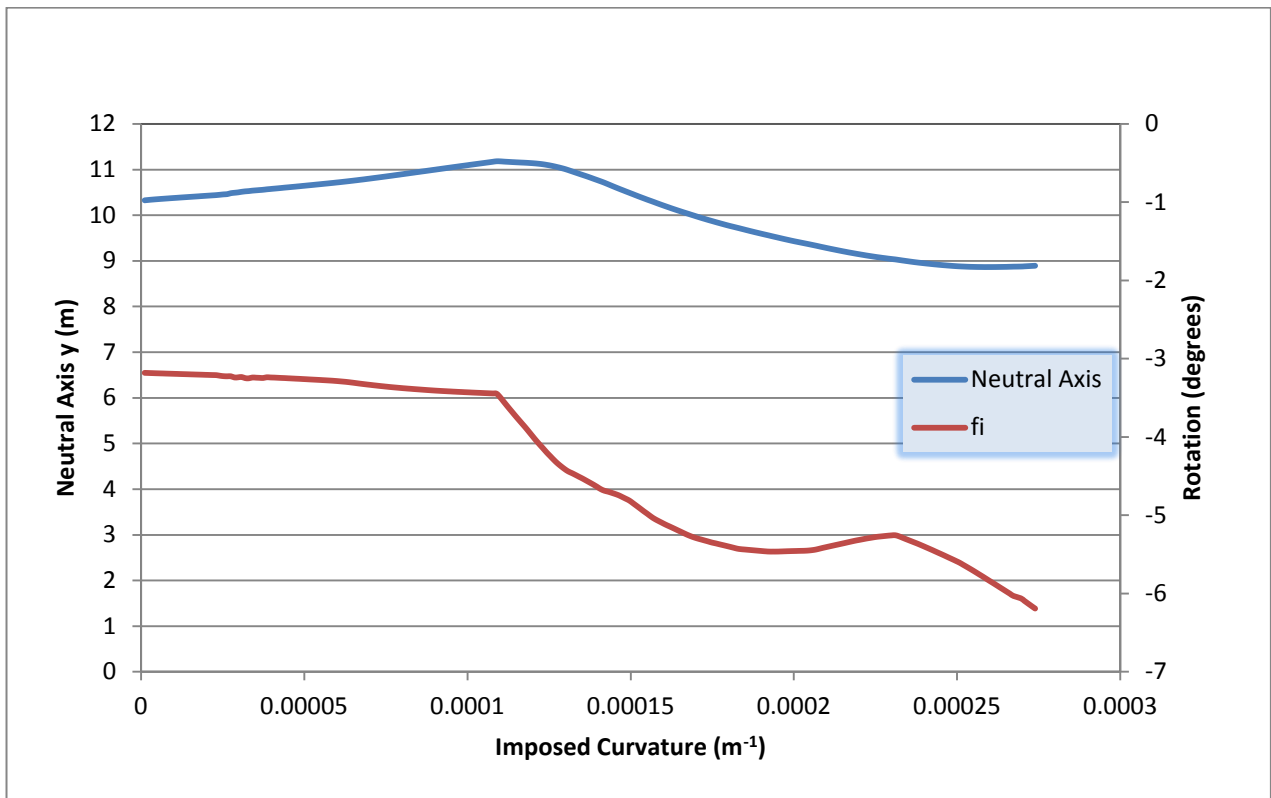
Σχήμα 6.5 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 120



Σχήμα 6.6 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 180

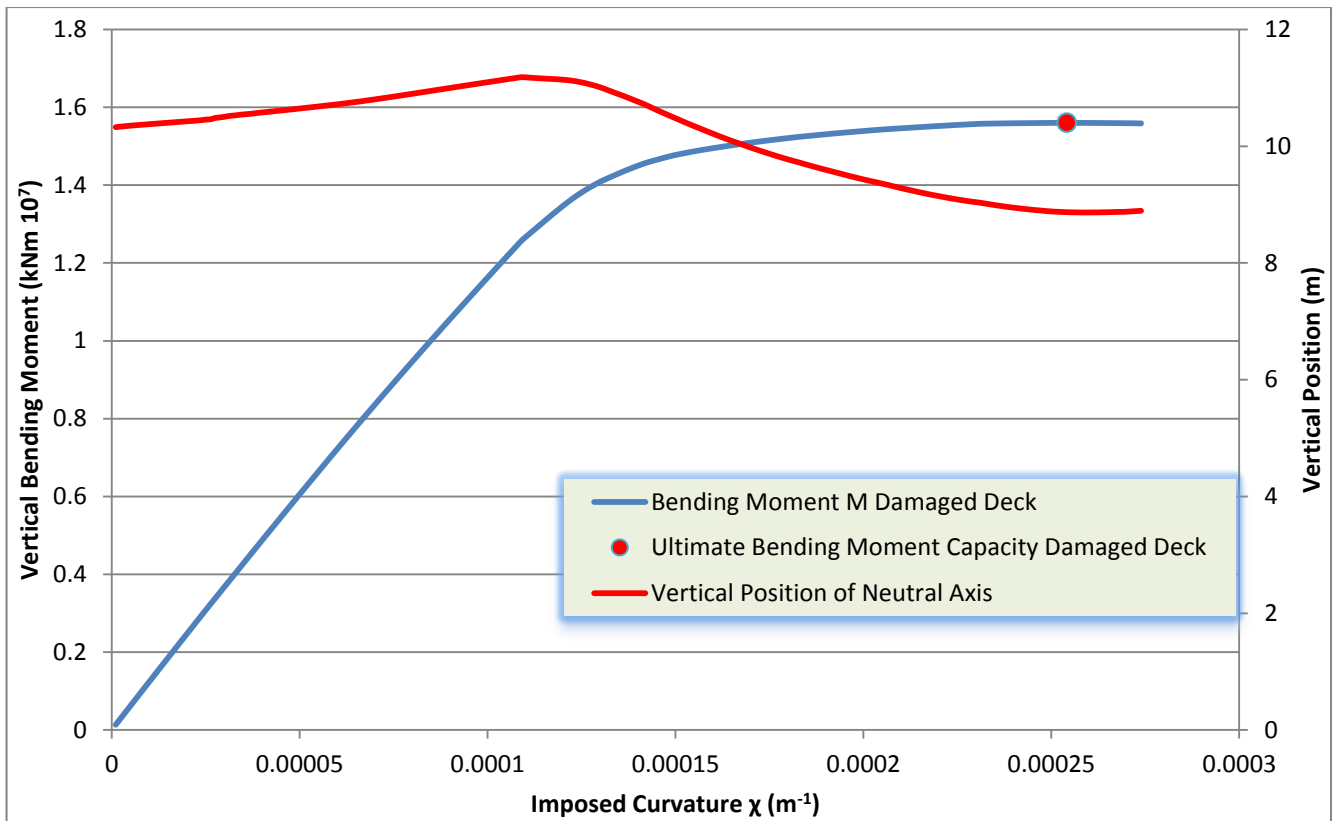


Σχήμα 6.7 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 249

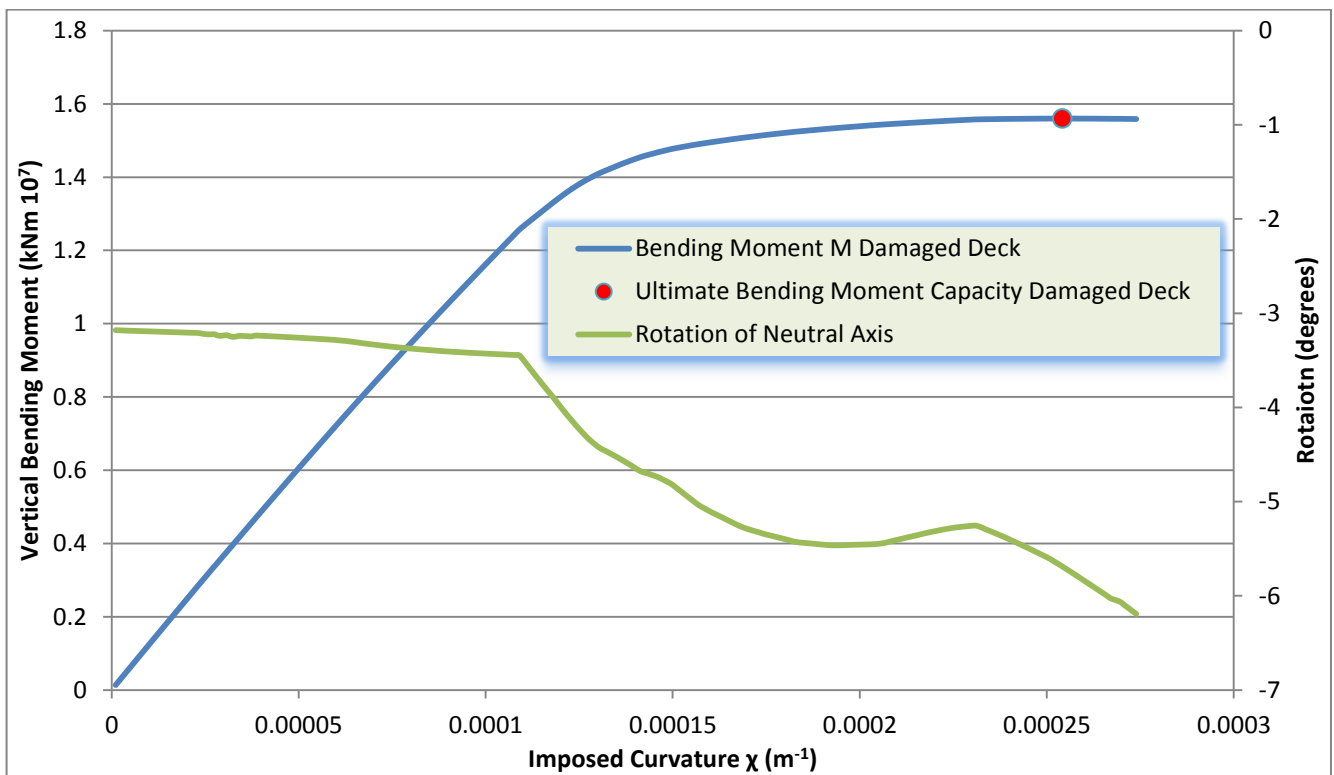


Σχήμα 6.8 : Κατακόρυφη θέση ουδέτερου άξονα και στροφή

Παρατηρώντας το γράφημα με την κατακόρυφη θέση και τη στροφή του ουδέτερου άξονα, φαίνεται ότι καθ' όλη τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας, περιστρέφεται ορολογιακά, ενώ η καθ' ύψος θέση αυξάνεται μέχρι ένα σημείο και στη συνέχεια μειώνεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δύο καμπύλες κατακόρυφης θέσης και στροφής, παρουσιάζουν στα ίδια σημεία καμπυλότητας, έντονες ασυνέχειες με μεγάλη αλλαγή κλίσης.



Σχήμα 6.9 : Ροπή κάμψεως και κατακόρυφη θέση ουδέτερου άξονα

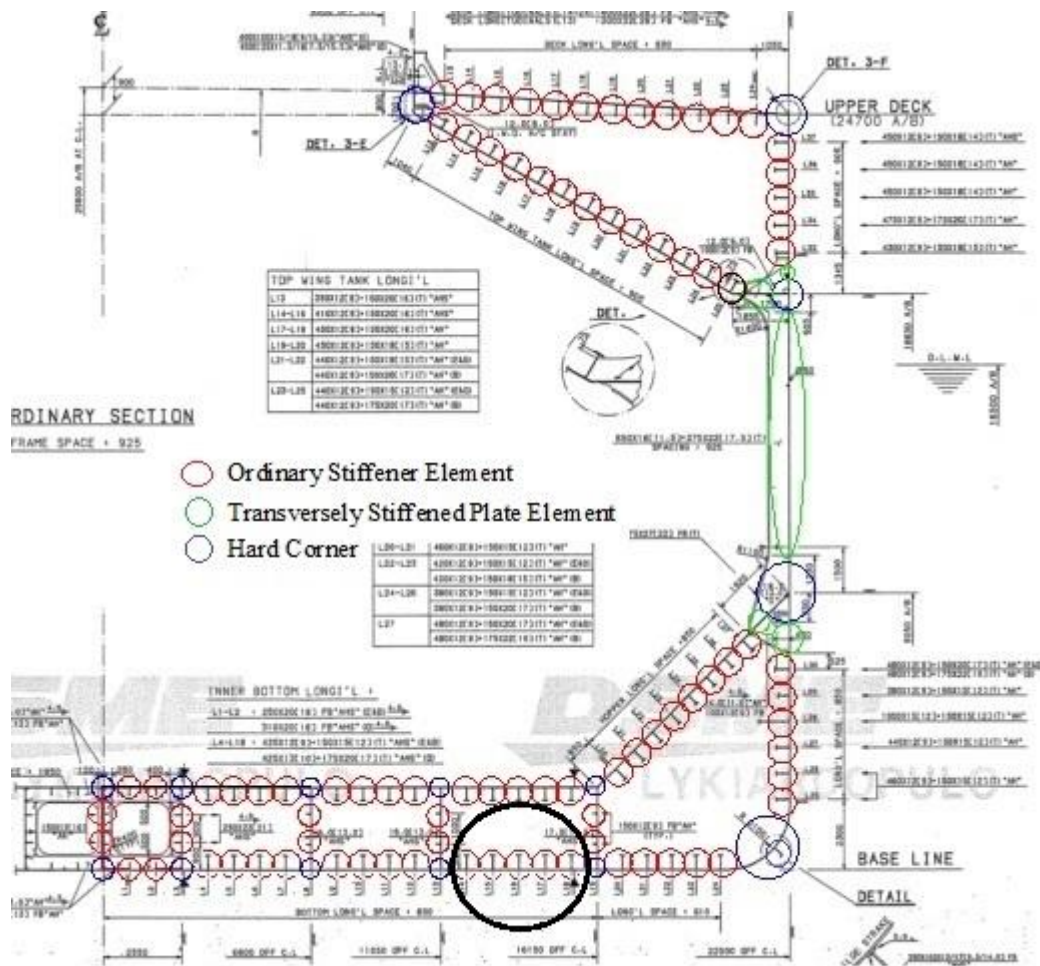


Σχήμα 6.10 : Ροπή κάμψεως και στροφή ουδέτερου άξονα

6.4. Περίπτωση B – Βλάβη στον πυθμένα σε κατάσταση Hogging

Στη δεύτερη περίπτωση θεωρήθηκε ότι αφαιρείται ένα κομμάτι του πυθμένα που εκτείνεται από το ενισχυτικό L14 έως το ενισχυτικό L18. Το κομμάτι που αφαιρείται εμπεριέχει πέντε συνολικά συνήθη ενισχυτικά με συνεργαζόμενο έλασμα, τα οποία όλα ανήκουν στο έλασμα του πυθμένα.

Στο παρακάτω σχήμα σημειώνεται το κομμάτι που αφαιρείται από τη διατομή και στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικοί πίνακες με όλα τα αναλυτικά γεωμετρικά στοιχεία που απαιτούνται. Ισχύουν όλες οι παραδοχές που έχουν ληφθεί υπόψη και για την περίπτωση A.



Σχήμα 6.11: Το κομμάτι της διατομής που αφαιρέθηκε στην περίπτωση B

Πίνακας 6.7

Location of ordinary stiffeners		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (+/-m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (cm ⁴)	Iy steiner (+x) (m ⁴)	Iy steiner (-x) (m ⁴)	Ixy (+x) (m ⁴)	Ixy (-x) (m ⁴)
	L4	24037.5	0.11	3.40	2687.70	81727.50	10.03	0.32	0.24	0.96	-0.83
	L5	24037.5	0.11	4.25	2687.70	102159.38	10.03	0.49	0.38	1.19	-1.05
	L6	24037.5	0.11	5.10	2687.70	122591.25	10.03	0.69	0.56	1.41	-1.27
	L7	23272.5	0.11	5.95	2666.41	138471.38	9.57	0.90	0.75	1.58	-1.45
	L9	22762.5	0.12	7.65	2652.60	174133.13	9.26	1.43	1.24	1.97	-1.84
	L10	22762.5	0.12	8.50	2652.60	193481.25	9.26	1.75	1.55	2.18	-2.05
	L11	22507.5	0.12	9.35	2645.81	210445.13	9.11	2.08	1.86	2.37	-2.24
	L12	22337.5	0.12	10.20	2641.33	227842.50	9.00	2.45	2.21	2.56	-2.43
Bottom plate	L14	22337.5	0.12	11.90	2641.33	265816.25	9.00	3.30	3.03	0.00	-2.85
	L15	22337.5	0.12	12.75	2641.33	284803.13	9.00	3.78	3.48	0.00	-3.05
	L16	22337.5	0.12	13.60	2641.33	303790.00	9.00	4.29	3.97	0.00	-3.26
	L17	22637.5	0.12	14.45	2794.33	327111.88	9.01	4.90	4.56	0.00	-3.51
	L18	22637.5	0.12	15.30	2794.33	346353.75	9.01	5.48	5.12	0.00	-3.73
	L20	22400	0.13	16.96	3020.26	379904.00	7.83	6.64	6.25	4.22	-4.09
	L21	22400	0.13	17.77	3020.26	398048.00	7.83	7.28	6.87	4.42	-4.29
	L22	22400	0.13	18.58	3020.26	416192.00	7.83	7.95	7.52	4.61	-4.49
	L23	22400	0.13	19.39	3020.26	434336.00	7.83	8.65	8.20	4.81	-4.68
	L24	22805	0.13	20.20	3031.56	460661.00	8.05	9.55	9.07	5.10	-4.97
	L4	27037.5	2.60	3.40	70165.59	91927.50	11.47	0.36	0.27	0.84	-0.72
	L5	27037.5	2.60	4.25	70165.59	114909.38	11.47	0.55	0.43	1.03	-0.91
	L6	27037.5	2.60	5.10	70165.59	137891.25	11.47	0.78	0.63	1.23	-1.11
	L7	27037.5	2.60	5.95	70165.59	160873.13	11.47	1.04	0.88	1.42	-1.30
	L9	27037.5	2.60	7.65	70165.59	206836.88	11.47	1.69	1.48	1.81	-1.69
In. Bottom plate	L10	27037.5	2.60	8.50	70165.59	229818.75	11.47	2.08	1.84	2.01	-1.89
	L11	27037.5	2.60	9.35	70165.59	252800.63	11.47	2.50	2.23	2.20	-2.08
	L12	27037.5	2.60	10.20	70165.59	275782.50	11.47	2.96	2.67	2.40	-2.28
	L14	27037.5	2.60	11.90	70165.59	321746.25	11.47	4.00	3.66	2.79	-2.67
	L15	27037.5	2.60	12.75	70165.59	344728.13	11.47	4.58	4.22	2.98	-2.86
	L16	27037.5	2.60	13.60	70165.59	367710.00	11.47	5.20	4.81	3.18	-3.06
	L17	27037.5	2.60	14.45	70165.59	390691.88	11.47	5.85	5.44	3.37	-3.25
	L18	27037.5	2.60	15.30	70165.59	413673.75	11.47	6.55	6.12	3.56	-3.44
Bottom plate	L1	22105	0.03	0.85	766.11	18789.25	10.75	0.03	0.01	0.27	-0.14
	L2	22105	0.03	1.70	766.11	37578.50	10.75	0.09	0.05	0.48	-0.35
In. Bottom plate	L1	24647.5	2.65	0.85	65321.32	20950.38	11.39	0.03	0.01	0.23	-0.12
	L2	24647.5	2.65	1.70	65321.32	41900.75	11.39	0.10	0.05	0.41	-0.30
2550 OFF C L girder	st up	21125	1.80	2.51	38025.00	52960.38	0.47	0.16	0.11	0.54	-0.44
	st down	21125	0.90	2.51	19012.50	52960.38	0.47	0.16	0.11	0.59	-0.48
CL girder	st up	15450	1.85	0.02	28582.50	247.20	29.24	0.00	0.00	0.04	0.04
6800 OFF C L girder	>>	14987.5	1.85	6.78	27726.88	101675.20	28.31	0.75	0.64	0.97	-0.90
11050 OFF C L girder	>>	14987.5	1.85	11.03	27726.88	165372.08	28.31	1.92	1.74	1.56	-1.49
16150 OFF C L girder	>>	16375	1.85	16.13	30293.75	264194.25	31.09	4.41	4.13	2.47	-2.40
CL girder	st down	15450	0.85	0.02	13132.50	247.20	28.28	0.00	0.00	0.04	0.04
6800 OFF C L girder	>>	14987.5	0.85	6.78	12739.38	101675.20	27.35	0.75	0.64	1.08	-1.00
11050 OFF C L girder	>>	14987.5	0.85	11.03	12739.38	165372.08	27.35	1.92	1.74	1.73	-1.65
16150 OFF C L girder	>>	16375	0.85	16.13	13918.75	264194.25	30.12	4.41	4.13	2.74	-2.66

Πίνακας 6.8

Location of ordinary stiffeners		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (m ⁴)	Iy steiner pos (m ⁴)	Iy steiner neg (m ⁴)	Ixy pos (m ⁴)	Ixy neg (m ⁴)
	L25	22325	2.30	22.40	51347.50	499990.70	5.81	11.26	10.74	4.35	-4.25
	L26	22155	3.15	22.40	69788.25	496161.23	5.81	11.89	11.34	4.15	-4.06
	L27	21945	4.00	22.40	87780.00	491589.95	5.24	11.10	10.59	3.46	-3.38
Lower side shell	L28	30825	4.85	22.20	149501.25	684345.83	47.79	12.73	12.15	3.52	-3.44
	L29	21740	5.70	22.42	123918.00	487345.58	3.76	13.91	13.27	3.29	-3.21
	L30	23540	6.55	22.38	154187.00	526801.66	8.08	12.07	11.52	2.41	-2.35
	L33	21922.5	20.18	22.40	442286.44	490954.39	5.77	11.25	10.74	-4.52	4.42
	L34	23157.5	21.08	22.37	488160.10	518033.28	8.83	11.86	11.32	-5.25	5.13
Sheer strake shell	L35	21606.25	21.99	22.39	475013.41	483807.15	6.15	11.09	10.58	-5.34	5.22
	L36	25226.25	22.89	22.40	577428.86	565143.68	6.15	12.96	12.37	-6.76	6.60
	L37	27036.25	23.80	22.41	643327.57	605828.29	6.16	13.90	13.26	-7.80	7.62
	L20	23642.5	3.23	16.82	76377.92	397714.14	10.15	6.90	6.48	3.17	-3.07
	L21	23642.5	3.83	17.42	90587.89	411923.28	10.15	7.40	6.96	3.03	-2.94
Sloped plate of hopper tank	L22	23222.5	4.44	18.02	103100.37	418399.78	10.15	7.76	7.32	2.81	-2.73
	L23	22712.5	5.04	18.62	114464.54	422884.04	9.84	8.10	7.65	2.58	-2.51
	L24	21952.5	5.65	19.12	123967.62	419797.66	9.63	8.25	7.81	2.31	-2.24
	L25	21952.5	6.25	19.81	137161.85	434966.84	9.63	8.85	8.39	2.12	-2.07
	L26	21952.5	6.85	20.42	150356.07	448226.15	9.63	9.39	8.92	1.91	-1.87
	L27	23242.5	7.42	21.05	172496.59	489138.41	9.34	10.55	10.04	1.81	-1.76
	L13	31540	24.32	11.13	766987.80	351166.36	17.35	4.10	3.73	-4.76	4.54
	L14	31054	23.88	11.96	741464.96	371343.73	16.60	4.64	4.25	-4.86	4.65
	L15	21732.5	23.44	12.79	509473.97	278002.14	10.24	3.70	3.41	-3.51	3.37
	L16	21732.5	22.99	13.50	499640.01	293432.22	10.24	4.12	3.81	-3.57	3.43
Sloped plate of top wing tank	L17	22177.75	22.55	14.29	500051.07	316964.40	10.27	4.70	4.37	-3.71	3.57
	L18	22206.25	22.10	15.08	490715.32	334803.63	10.09	5.23	4.87	-3.76	3.63
	L19	22811.25	21.64	15.86	493595.40	361717.99	10.70	5.93	5.55	-3.89	3.76
	L20	21091.75	21.19	16.64	446968.64	351051.09	9.53	6.03	5.66	-3.61	3.50
	L21	20896.25	20.74	17.43	433324.39	364158.95	9.47	6.54	6.16	-3.57	3.47
	L22	21258.25	20.28	18.21	431184.02	387091.47	9.71	7.25	6.85	-3.62	3.52
	L23	21803.75	19.82	18.99	432166.98	413987.80	10.38	8.08	7.65	-3.67	3.57
	L24	21803.75	19.37	19.77	422300.79	431081.94	10.38	8.75	8.30	-3.63	3.53
	L13	35040	26.29	11.23	921107.42	393639.36	18.78	4.63	4.22	-6.13	5.85
	L14	45480	26.21	12.16	1192213.11	553173.24	24.14	7.02	6.44	-8.56	8.20
	L15	45480	26.16	13.09	1189759.92	595378.68	24.14	8.11	7.49	-9.17	8.81
	L16	45480	26.11	14.02	1187306.73	637629.60	24.14	9.28	8.61	-9.77	9.41
Deck plate	L17	45480	26.05	14.95	1184853.54	679835.04	24.14	10.52	9.81	-10.37	10.01
	L18	45480	26.00	15.88	1182400.35	722085.96	24.14	11.85	11.09	-10.96	10.60
	L19	45480	25.94	16.81	1179947.15	764291.40	24.14	13.25	12.45	-11.55	11.19
	L20	45480	25.89	17.73	1177493.96	806542.32	24.14	14.73	13.89	-12.13	11.78
	L21	45480	25.84	18.66	1175040.77	848747.76	24.14	16.29	15.40	-12.71	12.36
	L22	45480	25.78	19.59	1172587.58	890998.68	24.14	17.93	16.99	-13.29	12.94
	L23	45480	25.73	20.52	1170134.39	933204.12	24.14	19.64	18.67	-13.86	13.51
	L24	47640	24.69	21.45	1176136.32	1021735.08	24.14	22.45	21.38	-14.09	13.75

Πίνακας 6.8

Location of hard corners		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (+/-m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (cm ⁴)	Iy steiner (+x) (m ⁴)	Iy steiner (-x) (m ⁴)	Ixy (+x) (m ⁴)	Ixy (-x) (m ⁴)
	L3 h d	25215.00	0.08	2.55	2017.20	64298.25	10.44	0.20	0.13	0.78	-0.63
Bottom-girders	L8 h d	21462.50	0.07	6.80	1502.38	145945.00	9.21	1.07	0.92	1.67	-1.54
connections	L13 h d	21037.50	0.07	11.05	1472.63	232464.38	8.96	2.69	2.45	2.62	-2.49
	L19 h d	21325.00	0.08	16.15	1706.00	344398.75	8.34	5.74	5.38	3.85	-3.72
In. Bottom-girders	L3 h d	26787.50	2.62	2.55	70183.25	68308.13	11.39	0.21	0.14	0.64	-0.52
connections	L8 h d	25075.00	2.64	6.80	66198.00	170510.00	11.39	1.25	1.07	1.49	-1.38
	L13 h d	25075.00	2.64	11.05	66198.00	277078.75	11.39	3.21	2.92	2.39	-2.28
Cl girder	h d up	23537.50	2.63	0.00	61903.63	0.00	10.11	0.00	0.00	0.05	0.05
	h d down	24600.00	0.07	0.00	1722.00	0.00	10.75	0.00	0.00	0.07	0.07
Side shell-sloped plate of t.w.t. connection	h d	21180.00	18.83	22.44	398819.40	475279.20	24.33	10.92	10.42	-3.73	3.65
Sheer strake	h d	32772.88	24.64	22.33	807523.64	731818.30	24.57	16.73	15.96	-10.05	9.82

Πίνακας 6.9

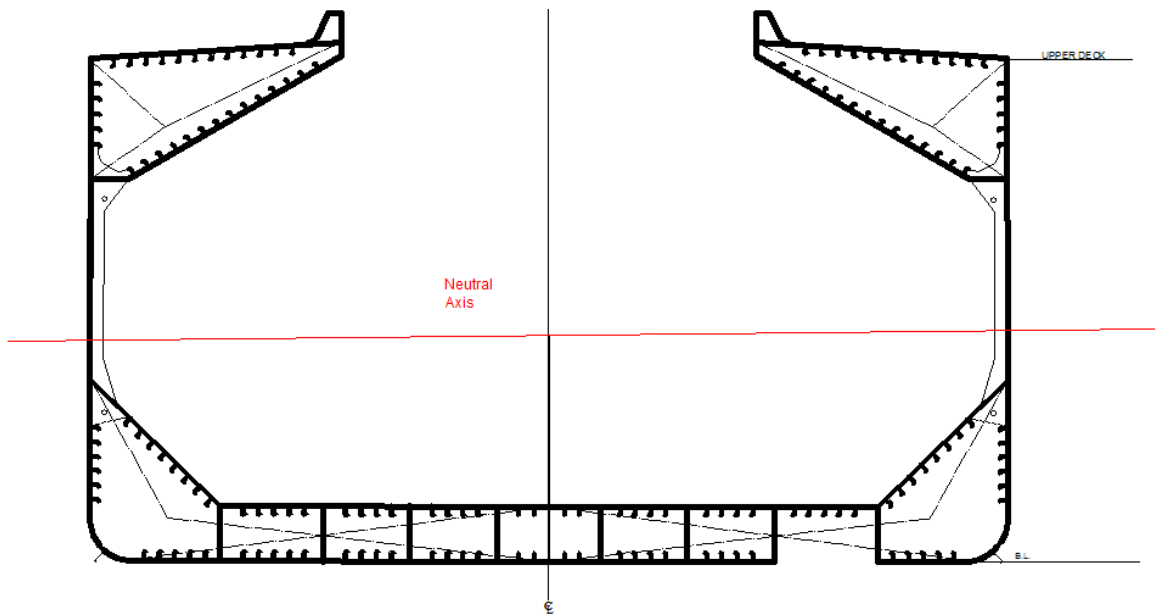
Location of hard corners		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (+/-m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (cm ⁴)	Iy steiner (+x) (m ⁴)	Iy steiner (-x) (m ⁴)	Ixy (+x) (m ⁴)	Ixy (-x) (m ⁴)
Inner bottom-hopper connection		24650.00	2.82	16.20	69513.00	399330.00	11.87	6.69	6.27	3.35	-3.24
Deck-sloped plate of t.w.t. connection		55883.13	25.03	10.39	1398754.62	580625.67	9.83	6.34	5.73	-8.31	7.90
Bilge strake		6368.75	0.53	21.90	3375.44	139475.63	0.02	3.20	3.05	1.50	-1.47
Side shell-sloped plate of hopper connection		22652.50	9.00	22.44	203872.50	508322.10	1.02	11.68	11.14	1.06	-1.04
Bilgeplate		49654.00	0.70	21.90	34757.80	1087422.60	38166.90	28.20	27.06	11.41	-11.14
T.w.t knuckled L25		13091.88	18.83	20.60	246520.01	269692.63	1.86	5.70	5.42	-2.12	2.07

Πίνακας 6.10

Location of plates off B.L. (m)		A (mm ²)	KG y B.L. (m)	KG x C.L. (+/-m)	A*KG y (mm ² *m)	A*KG x (mm ² *m)	Item's Iy (cm ⁴)	Iy steiner (+x) (m ⁴)	Iy steiner (-x) (m ⁴)	Ixy (+x) (m ⁴)	Ixy (-x) (m ⁴)
13.53	p1	168000	13.53	22.49	2273040.00	3778320.00	0.0492	86.97	83.01	-9.42	9.20
19.48	p2	7961.25	19.48	22.49	155095.10	179048.51	0.0018	4.12	3.93	-1.52	1.49
8.28	p3	23873.8	8.28	21.5	197782.08	513285.63	0.0063	11.31	10.77	1.45	-1.41
18.83	p4	18191.3	18.83	21.57	342541.24	392385.26	20.2230	8.67	8.26	-3.08	3.01
7.81	p5	31385.3	7.81	22.44	245040.34	704285.01	0.0093	16.18	15.44	2.32	-2.27

Section's Centroid (m)	(-0.26,11.07)
Iy Total (m⁴)	1518.8
Ixy Total (m⁴)	-16.72
tan-1	-0.011
fi (degrees)	-0.63

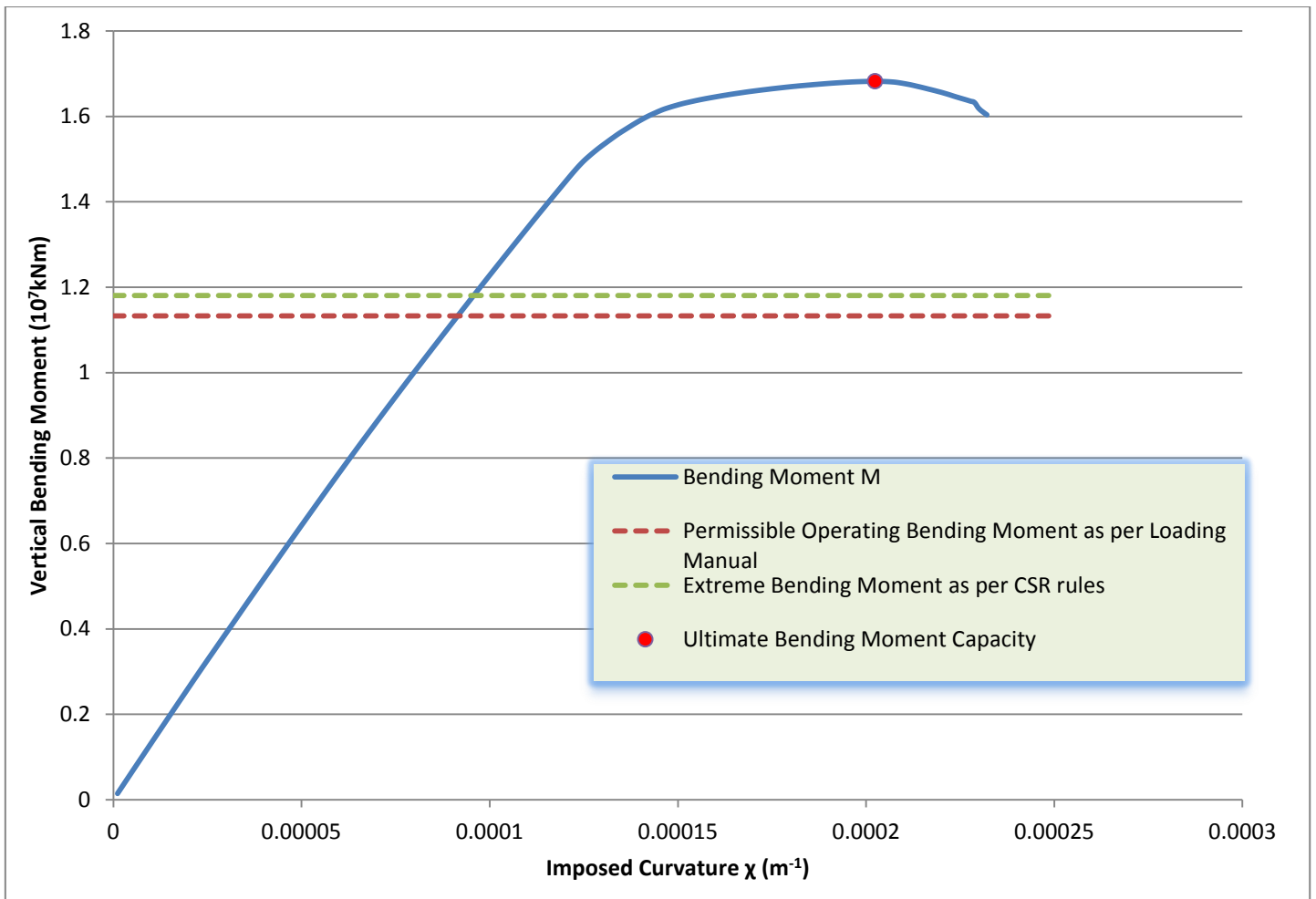
Ακολουθεί σκαρίφημα σχεδιασμένο σε AUTOCAD, το οποίο παρουσιάζει τη μέση τομή του πλοίου και τη θέση του ουδέτερου άξονα, όπως αυτή υπολογίστηκε να είναι προηγουμένως.



Σχήμα 6.12 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου

Ισχύουν οι ίδιες παραδοχές για τις συνθήκες που προσαρμόστηκαν στο λογισμικό όπως και στην περίπτωση Α.

Παρακάτω δίνονται γραφικά η καμπύλη της ροπής $M-x$ μετά της εκτέλεση του λογισμικού καθώς και αναλυτικοί πίνακες με όλα τα αριθμητικά στοιχεία που προέκυψαν.



Σχήμα 6.13: Ροπή κάμψης συναρτήσει επιβαλλόμενης καμπυλότητας

Η μέγιστη καμπτική αντοχή του φορτηγού πλοίου Bulk Carrier της παρούσας μελέτης για την περίπτωση B, είναι η μέγιστη τιμή του διαγράμματος M- χ και είναι σημειωμένη με μια κόκκινη τελεία. Αντιστοιχεί σε **1.6822×10^7 kNm** και σε τιμή καμπυλότητας **2.024×10^{-4}** που προκύπτει στο βήμα **184** της επαναληπτικής διαδικασίας. Σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη τιμή της ροπής παρουσιάζεται πιο νωρίς.

Πίνακας 6.11: Αριθμητικά στοιχεία λογισμικού

<i>SF (N)</i>	<i>Mx (Nm)</i>	<i>NA y (m)</i>	<i>fi (degrees)</i>	<i>My (Nm)</i>	<i>Step</i>
-477.9267747	145810458	11.1473999	0.673399985	292.3466841	1
-984.5471302	291394274.5	11.1567099	0.673124985	995.248321	2
-975.8062249	436810515.7	11.1643399	0.672530985	989.834402	3
-973.1102799	582071285.4	11.1711799	0.671867985	991.0503007	4
-991.8967767	727182469.4	11.1775999	0.671144985	978.5835778	5
-994.4831131	872146312.6	11.1837799	0.670400985	994.646467	6
-993.9267915	1016964530	11.1897999	0.669619985	971.1974674	7
-962.7314148	1161638379	11.1957099	0.668861985	991.724534	8
-955.6708013	1306169080	11.2015299	0.668071985	978.0064211	9
-966.1499894	1450555025	11.2072999	0.667234985	951.1675533	10
-908.01267	1594797380	11.2130299	0.666432985	959.4354166	11
-972.8177152	1738897207	11.2187099	0.665621985	971.8486296	12
-975.3147303	1882853459	11.2243699	0.664780985	992.3592457	13
-962.1337379	2026666162	11.2300099	0.663919985	944.6731445	14
-952.3884557	2170334118	11.2356399	0.663093985	936.9912952	15
-928.5636901	2313859798	11.2412499	0.662231985	989.3507748	16
-979.1219145	2457241096	11.2468499	0.661375985	918.7575032	17
-957.8026575	2600474979	11.2524599	0.660520985	983.3521544	18
-862.5563743	2743568645	11.2580499	0.659637985	958.170257	19
-975.205421	2886512099	11.2636499	0.658782985	981.4339329	20
-957.6944243	3028594824	11.2717699	0.664342985	-985.1267025	21
-792.2619517	3168972225	11.2850799	0.657945985	923.8311657	22
-713.2687825	3309494068	11.2967399	0.657615985	990.3427969	23
-985.6470305	3448789470	11.3121599	0.657710985	-880.366131	24
-709.2933762	3588853995	11.3237799	0.657353985	975.5411	25
-610.5211647	3728871586	11.3341299	0.670384985	-965.104846	26
-802.2091541	3868688145	11.3444599	0.656933985	902.0543395	27
-839.6043745	4008357956	11.3546099	0.668564985	-997.2721201	28
-716.4649363	4147848938	11.3647199	0.656484985	943.0821936	29
-900.9416383	4288193549	11.3716699	0.655723985	889.4153023	30
-722.1247955	4428363095	11.3786199	0.654949985	895.4384373	31
-621.9445978	4568352781	11.3855699	0.654161985	904.4491417	32
-644.0498248	4707446434	11.3941599	0.653641985	891.3981503	33
-980.6837543	4846912049	11.4014199	0.652920985	838.8768815	34
-708.7725389	4986174016	11.4087299	0.652168985	889.0488863	35
-971.9034167	5124531822	11.4176599	0.651652985	819.3926296	36
-660.5320101	5263205272	11.4253899	0.651164985	818.9408377	37
-789.8275064	5401626223	11.4332399	0.650600985	993.6234209	38
-752.8300017	5539796000	11.44119989	0.649988985	816.9392026	39
-971.4817122	5677679603	11.44931989	0.649575985	913.1903308	40
-966.5046069	5815312850	11.45752989	0.648981985	819.2785589	41
-956.840202	5952704116	11.46579989	0.648292985	925.258667	42

-613.0817513	6089859750	11.47411989	0.647630985	905.8884868	43
-939.8404282	6226763071	11.48249989	0.647147985	869.5345562	44
-483.8532957	6363421520	11.49094989	0.646566985	857.688847	45
-634.806929	6499833784	11.49944989	0.645953985	962.2840171	46
-476.2032961	6636014459	11.50797989	0.645335985	910.5568865	47
-620.6866533	6771962494	11.51652989	0.644724985	995.1029019	48
-675.9384752	6907716498	11.52504989	0.644085985	753.5762003	49
-487.6279322	7043258890	11.53356989	0.643502985	861.9290013	50
-962.8579017	7178497686	11.54221989	0.643125985	803.6452135	51
-671.7946286	7313450187	11.55097989	0.642729985	746.753715	52
-431.7664776	7448116248	11.55982989	0.642301985	888.1577269	53
-561.9453654	7582273251	11.56905989	0.641157985	969.2591912	54
-580.1407065	7715996889	11.57855989	0.639712985	988.6763963	55
-399.9864451	7849258855	11.58835989	0.638543985	968.9057289	56
-677.9569647	7982068545	11.59840989	0.637292985	764.7187997	57
-794.6357828	8114386274	11.60875989	0.636785985	966.6746351	58
-513.9670651	8246294901	11.61930989	0.636149985	968.1699805	59
-895.5248536	8377639888	11.63020989	0.634927985	759.7632862	60
-454.7251246	8508579136	11.64126989	0.633877985	831.0756785	61
-372.9529853	8639174054	11.65240989	0.632662985	761.5926458	62
-662.9994068	8769441146	11.66360989	0.631086985	912.5480496	63
-599.5706977	8899416630	11.67482989	0.629511985	867.7496444	64
-983.2316238	9028992511	11.68616989	0.628049985	824.4916102	65
-911.4247366	9158073728	11.69773989	0.626505985	753.9775601	66
-328.5245517	9286867888	11.70930989	0.624952985	748.041275	67
-432.6645324	9415375034	11.72086989	0.623365985	866.5349686	68
-567.1505946	9543607545	11.73240989	0.621749985	981.4261043	69
-595.0105061	9671562069	11.74393989	0.620212985	866.7482101	70
-919.6557207	9799241174	11.75544989	0.618670985	901.2987891	71
-799.24584	9926635040	11.76695989	0.617120985	761.3310194	72
-703.4961608	10053757349	11.77844989	0.615589985	671.6621656	73
-861.7040527	10180543850	11.78997989	0.614049985	804.1488142	74
-187.5897087	10306880780	11.80166989	0.612503985	825.7412139	75
-624.7719999	10432934266	11.81333989	0.610933985	793.9174762	76
-574.2242406	10558707655	11.82499989	0.609404985	613.5553131	77
-473.5702742	10684227906	11.83661988	0.607880985	999.632117	78
-431.3564586	10809464275	11.84822988	0.606399985	980.5436498	79
-824.791008	10934445099	11.85979988	0.604882985	665.9094532	80
-846.1080044	11059182432	11.87132988	0.603317985	755.8222256	81
-777.4915724	11183684138	11.88280988	0.601710985	869.9769842	82
-973.0554018	11307960810	11.89422988	0.600110985	927.7985039	83
-775.3051944	11432013496	11.90559988	0.598552985	813.9792998	84
-482.4729052	11555821452	11.91693988	0.597164985	936.345935	85
-921.9138879	11679406938	11.92821988	0.595798985	800.9390411	86

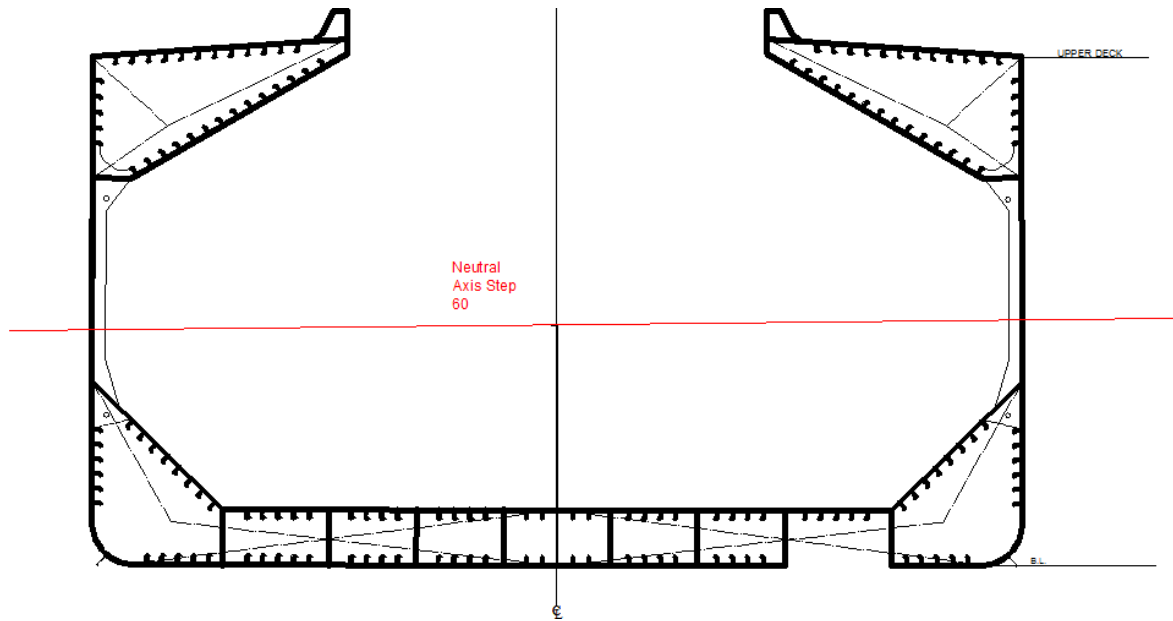
-524.8659163	11802778573	11.93944988	0.594423985	627.3009834	87
-265.1924504	11925900216	11.95065988	0.592971985	854.2156476	88
-972.5332995	12048814888	11.96179988	0.591528985	674.5938177	89
-528.7120733	12171485412	11.97292988	0.590204985	968.073099	90
-502.2017596	12293937213	11.98400988	0.588939985	606.8770589	91
-240.9070258	12416177008	11.99503988	0.587715985	922.4251622	92
-123.3900142	12538206236	12.00601988	0.586450985	973.5781533	93
-14.88128047	12659997451	12.01697988	0.585070985	840.7302748	94
-557.8766719	12781596886	12.02786988	0.583704985	906.8192186	95
-155.8055458	12902958436	12.03874988	0.582443985	904.1358264	96
-376.6854183	13024087084	12.04960988	0.581400985	993.4959498	97
-357.6914766	13144988954	12.06044988	0.580489985	938.2565277	98
-552.231149	13265687019	12.07123988	0.579622985	603.365178	99
-966.1149631	13386162537	12.08199988	0.578756985	881.8571982	100
-833.2792114	13506429767	12.09272988	0.577848985	964.9266795	101
-245.4622947	13626078182	12.10378988	0.577669985	543.8490844	102
-411.5648259	13745127088	12.11513988	0.577784985	-699.8268944	103
-136.5222037	13863391576	12.12693988	0.577377985	504.6874356	104
-461.5185612	13981176397	12.13890988	0.576481985	982.1651387	105
-786.021729	14098679798	12.15087988	0.575553985	795.3325001	106
-698.1184672	14215905045	12.16285988	0.574563985	752.9489778	107
-503.0486685	14332852870	12.17483988	0.573558985	634.9663997	108
-750.1386905	14449490460	12.18683988	0.572574985	985.9929278	109
-408.8229018	14565849697	12.19884988	0.571678985	748.6502663	110
252.1743495	14681023620	12.21023988	0.572258985	-808.6050036	111
421.2265388	14791901752	12.21884988	0.580135985	-731.3013525	112
76.71108947	14896473569	12.22333988	0.597202985	-920.6036729	113
317.1053096	14991727047	12.22169988	0.624602985	-551.5100877	114
674.2580105	15077784492	12.21406988	0.660073985	-636.1096975	115
424.2897718	15160045181	12.20419988	0.688128985	-866.0847598	116
491.0546603	15238426791	12.19201988	0.706216985	-771.0734338	117
832.7879277	15312715676	12.17741988	0.712836985	-895.7334005	118
956.0176994	15384020857	12.16118988	0.710655985	907.9079893	119
550.6845951	15455234365	12.14533988	0.708507985	925.9150994	120
789.0659419	15524574740	12.12861988	0.709065985	-829.1031566	121
744.6650662	15592752227	12.11154988	0.711266985	-857.3228968	122
253.6976502	15655527199	12.09109988	0.722989985	-595.9984701	123
77.97938138	15716324051	12.06973988	0.734454985	-814.9915659	124
389.5439724	15777064225	12.04880988	0.745756985	-991.1201118	125
330.5127186	15836757835	12.02755988	0.758877985	-584.0116122	126
810.3253458	15893499518	12.00467988	0.771156985	-950.2300852	127
246.9304739	15947364089	11.98021988	0.773798985	-666.2950622	128
569.3759926	15999090086	11.95466988	0.772906985	769.131983	129
116.0820218	16045282682	11.92602988	0.782716985	-845.9415575	130

-233.3961933	16088998736	11.89912988	0.801162985	-967.5329544	131
-717.3013408	16131870438	11.87375988	0.821720984	-719.0453856	132
-296.4662962	16170064393	11.85053988	0.842139984	-868.4943707	133
-698.1269568	16202074916	11.82743989	0.868441984	-667.4625111	134
-359.1903606	16232258607	11.80508989	0.894316984	-764.1038298	135
-521.5816485	16260506342	11.78435989	0.915383984	-878.0445149	136
-368.1946654	16287730634	11.76570989	0.933307984	-660.0603071	137
-489.5626997	16311928841	11.74988989	0.953710984	-951.454783	138
787.5474762	16334488959	11.73512989	0.969561984	-710.6964841	139
485.3635854	16356150822	11.72222989	0.981180984	-906.4808738	140
-873.0324489	16377261692	11.70921989	0.990638984	-906.1465382	141
-319.8875292	16397158130	11.69516989	0.994070984	-886.7373112	142
303.1444033	16415648766	11.68014989	1.004811984	-741.9504426	143
-871.8120568	16433300765	11.66491989	1.015820984	-994.6908007	144
-953.245971	16450564255	11.64934989	1.024971984	-986.7498082	145
-862.2537984	16467491632	11.63469989	1.034049984	-878.5638198	146
-722.355369	16484158458	11.62080989	1.042220984	-898.9652338	147
945.3094263	16500155594	11.60695989	1.051729984	-729.1009458	148
783.9939273	16515842110	11.59313989	1.061551984	-720.3573706	149
887.131606	16530904311	11.58015989	1.066664984	-802.8012047	150
886.0014915	16545251876	11.56751989	1.067049984	-927.8894414	151
755.56892	16559605399	11.55504989	1.067434984	-761.6875286	152
469.4467354	16573711546	11.54232989	1.066205984	720.4794023	153
834.5887924	16586652530	11.52784989	1.067014984	-883.7315757	154
572.293042	16599134554	11.51273989	1.070793984	-867.5245297	155
940.3166505	16611575475	11.49794989	1.074814984	-858.7212697	156
853.1390297	16623403450	11.48253989	1.076297984	-766.70137	157
960.74042	16635165250	11.46742989	1.077914984	-827.4714431	158
618.9315102	16646899511	11.45258989	1.079656984	-778.1108385	159
826.6728605	16657970545	11.4379699	1.083870984	-804.1312667	160
538.539999	16668748621	11.4233799	1.089569984	-839.3184343	161
607.6988218	16679521451	11.4090099	1.095199984	-718.6123335	162
542.3921691	16689991815	11.3956199	1.100866984	-798.1309863	163
655.7787444	16699727972	11.3812699	1.104509984	-937.2091258	164
984.1704916	16709284778	11.3673399	1.108281984	-799.4944534	165
885.6394021	16718449571	11.3534299	1.112142984	-958.4027741	166
811.9761046	16726726815	11.3380799	1.115239984	-741.6962633	167
633.8388105	16734962596	11.3230599	1.117986984	-850.2218189	168
868.6555051	16743210540	11.3082099	1.120704984	-816.5831324	169
588.4982353	16751439853	11.2935999	1.123153984	-837.6196366	170
887.702814	16759346842	11.2787599	1.123364984	-899.1767175	171
186.0754037	16766991254	11.2635599	1.121892984	761.8213819	172
10.55911221	16774647852	11.2485299	1.120450984	994.2994888	173
609.0218067	16781729609	11.2325199	1.123437984	-757.4712295	174

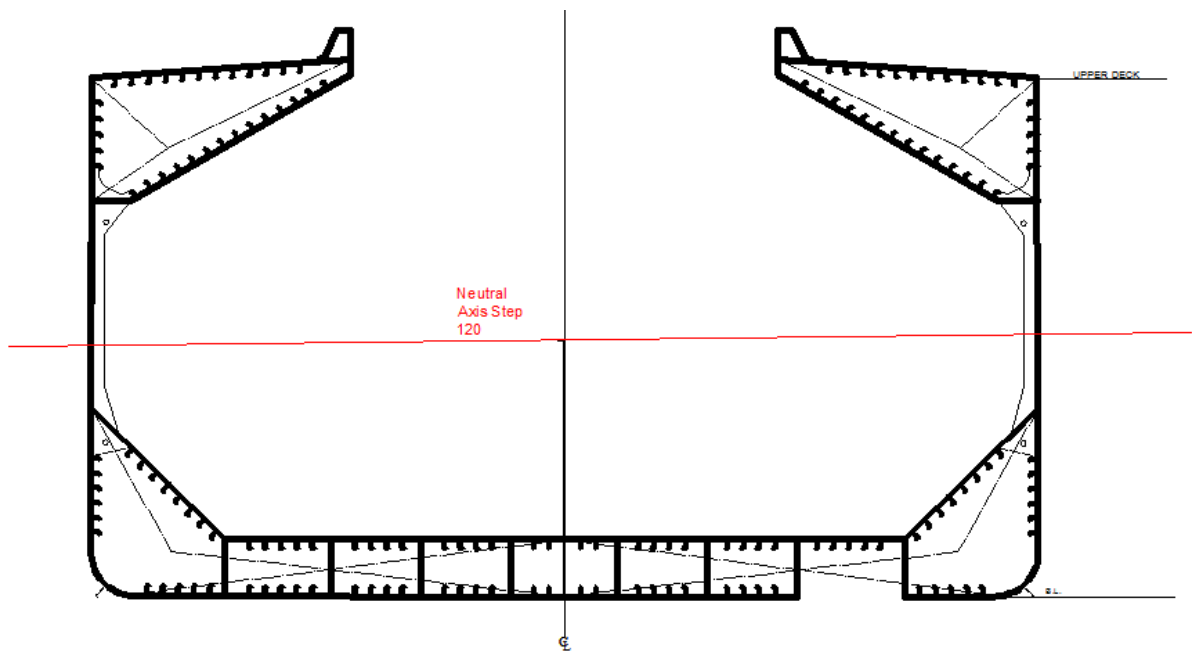
720.6159917	16787939896	11.2149299	1.132839984	-802.2886643	175
635.8683012	16794132602	11.1975999	1.142360984	-997.8848974	176
737.8562829	16799985845	11.1815399	1.154548984	-820.2798516	177
753.6378412	16805272089	11.1668199	1.168910984	-833.4519402	178
-996.3290902	16809931284	11.1523199	1.182052984	-829.7534904	179
-998.7291815	16813841072	11.1398999	1.197952984	-772.9105428	180
-643.2711329	16817286274	11.1293399	1.216415983	-826.2132645	181
-815.6536363	16819725571	11.1225599	1.240950983	-971.9124533	182
-697.5639518	16821352095	11.1189199	1.269377983	-924.3653226	183
-955.3598536	16822145228	11.1184599	1.302922983	-814.9809023	184
-730.8189357	16821800966	11.1223399	1.339691983	-767.4519786	185
-978.7654603	16819577128	11.1333499	1.378936983	-887.6505858	186
-867.994844	16815241310	11.1524699	1.417799983	-994.0293379	187
-951.3403631	16809018128	11.1789099	1.452792983	-969.2316583	188
-978.5038147	16800296040	11.2149799	1.482378983	-916.8822168	189
916.1271327	16786164821	11.2723899	1.494402983	-915.4606977	190
-342.3251968	16769477668	11.3395799	1.499171983	-894.6136107	191
982.1357345	16751910433	11.4098599	1.507464983	-815.3915401	192
-867.641701	16731907808	11.48949989	1.508009983	-973.6253477	193
-181.8752175	16709155061	11.57992989	1.510119983	-848.0403829	194
-905.6533657	16686687540	11.66879989	1.509898983	901.0752103	195
-968.1886869	16662947005	11.76188989	1.505650983	932.1751742	196
-902.1936102	16638521600	11.85454988	1.497703983	861.6252487	197
-925.461261	16614856711	11.94347988	1.488348983	923.777006	198
-940.6340712	16589682450	12.03824988	1.469019983	854.9748333	199
-934.4352176	16564235587	12.13347988	1.455196983	872.7272413	200
-840.7537344	16535735133	12.23929987	1.455379983	-858.7683108	201
-964.1245963	16506942126	12.34625987	1.449943983	949.8013721	202
-967.390522	16474870084	12.46680987	1.423677983	985.0096553	203
-998.4149644	16445153164	12.57094987	1.403449983	986.1385604	204
-909.5099274	16416790900	12.66359986	1.399538983	863.046062	205
-952.1789548	16388423469	12.75575986	1.399517983	893.3492111	206
985.2955626	16358151660	12.85383986	1.406665983	-820.0351147	207
-912.8510225	16326670589	12.95502986	1.401482983	827.3750779	208
-981.8440328	16190646226	13.46864984	1.898843982	-961.3852381	209
-971.7581162	16107905398	13.75390984	2.155277981	-853.9253014	210
-940.5045665	16037115433	13.98116983	2.346029981	-996.6479355	211

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και από τη στιγμή που είναι πλέον γνωστή η θέση του ουδέτερου άξονα σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, είναι δυνατός ο σχεδιασμός ενδεικτικών σκαριφημάτων για τον προσδιορισμό σχηματικά της θέσης του άξονα στη διατομή. Επίσης δίνονται τα γραφήματα για την κατακόρυφη θέση και στροφή του άξονα.

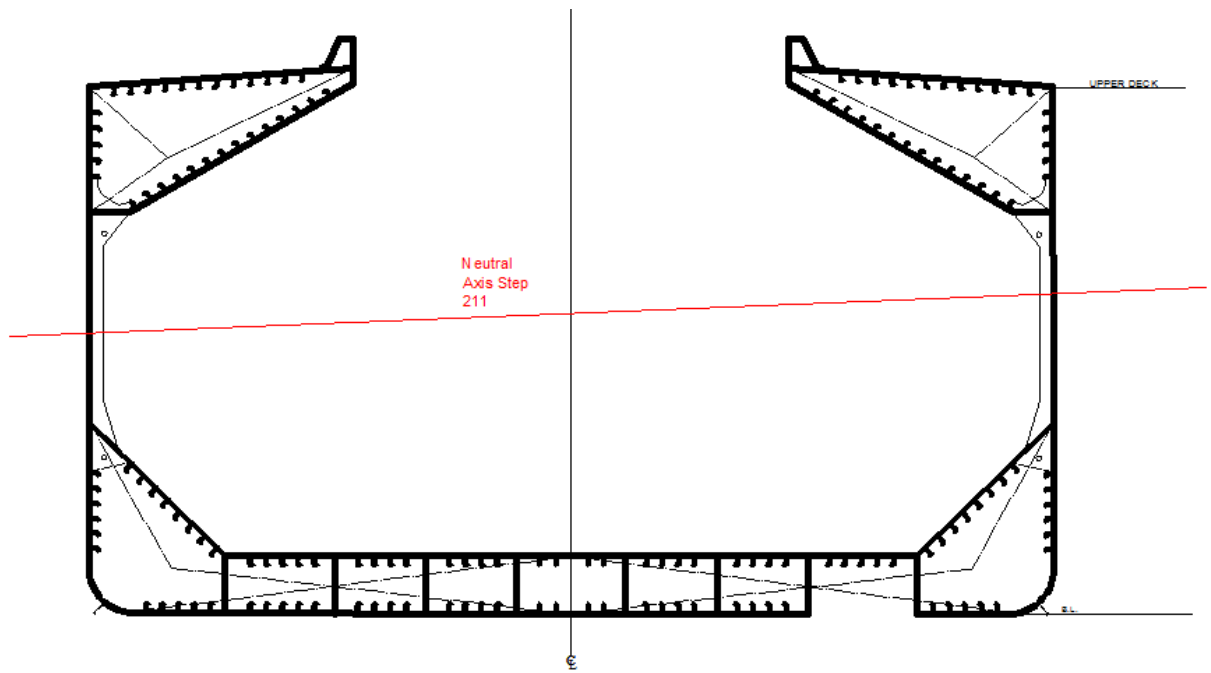
Παρακάτω δίνονται σκαριφήματα σχεδιασμένα στο AUTOCAD τα οποία περιέχουν την ακριβή θέση του ουδέτερου άξονα για κάθε εξήντα (60) Steps.



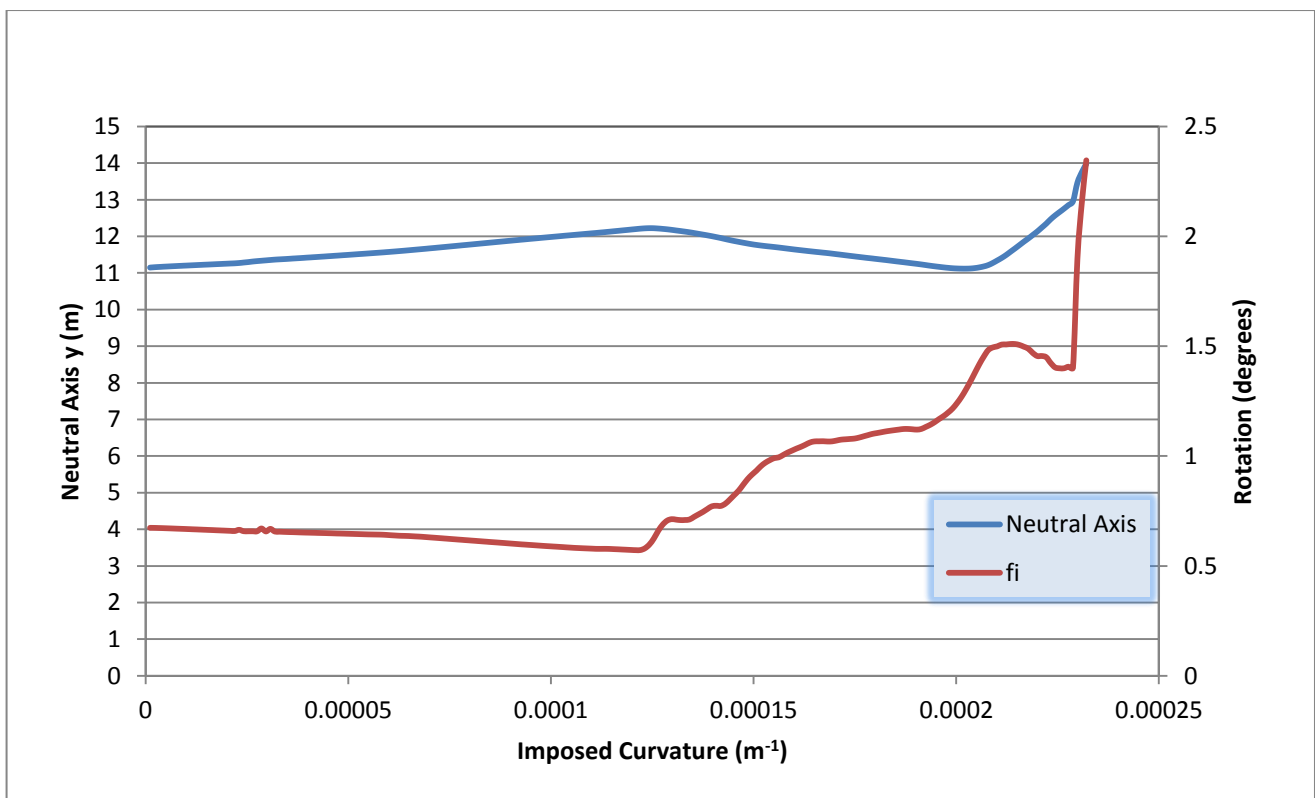
Σχήμα 6.14 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 60



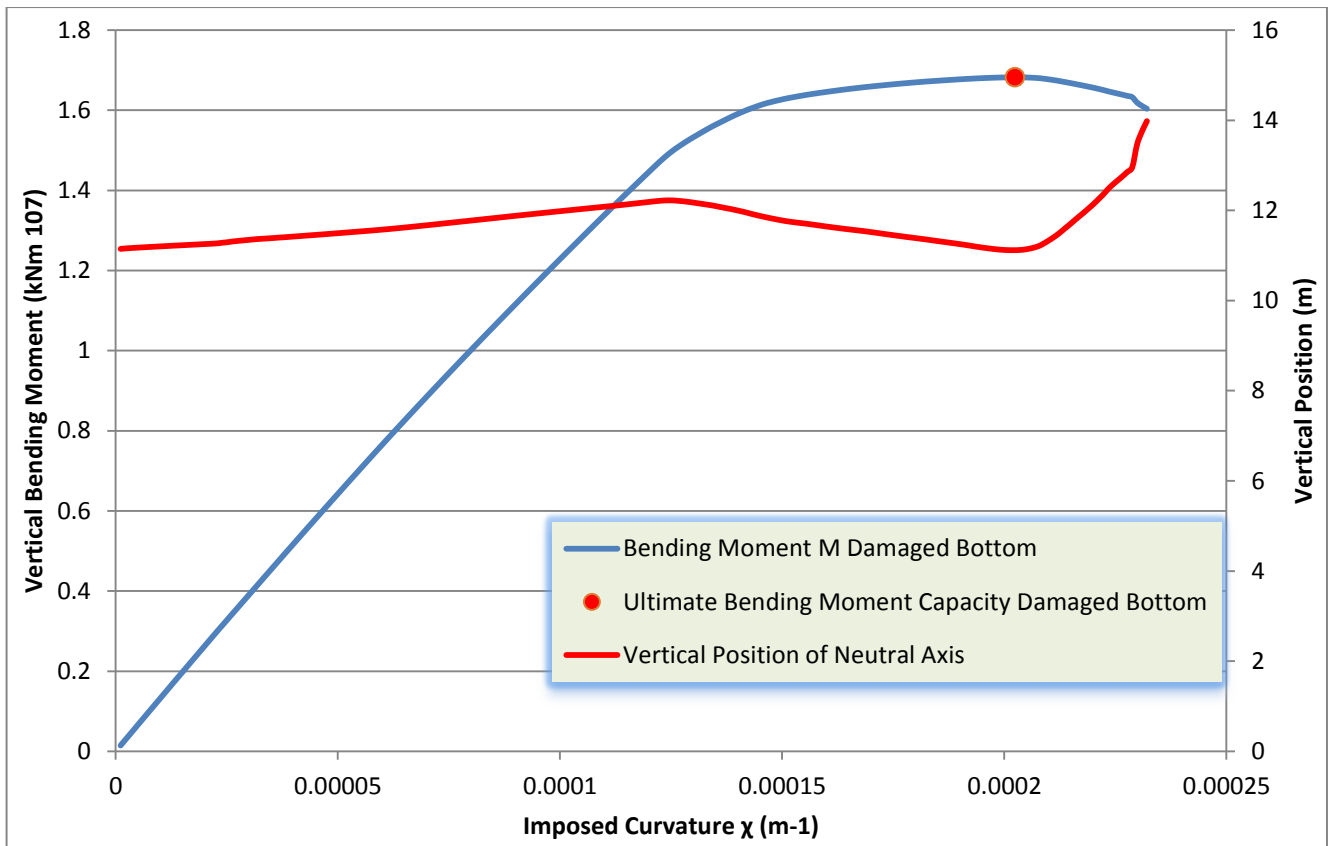
Σχήμα 6.15 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 120



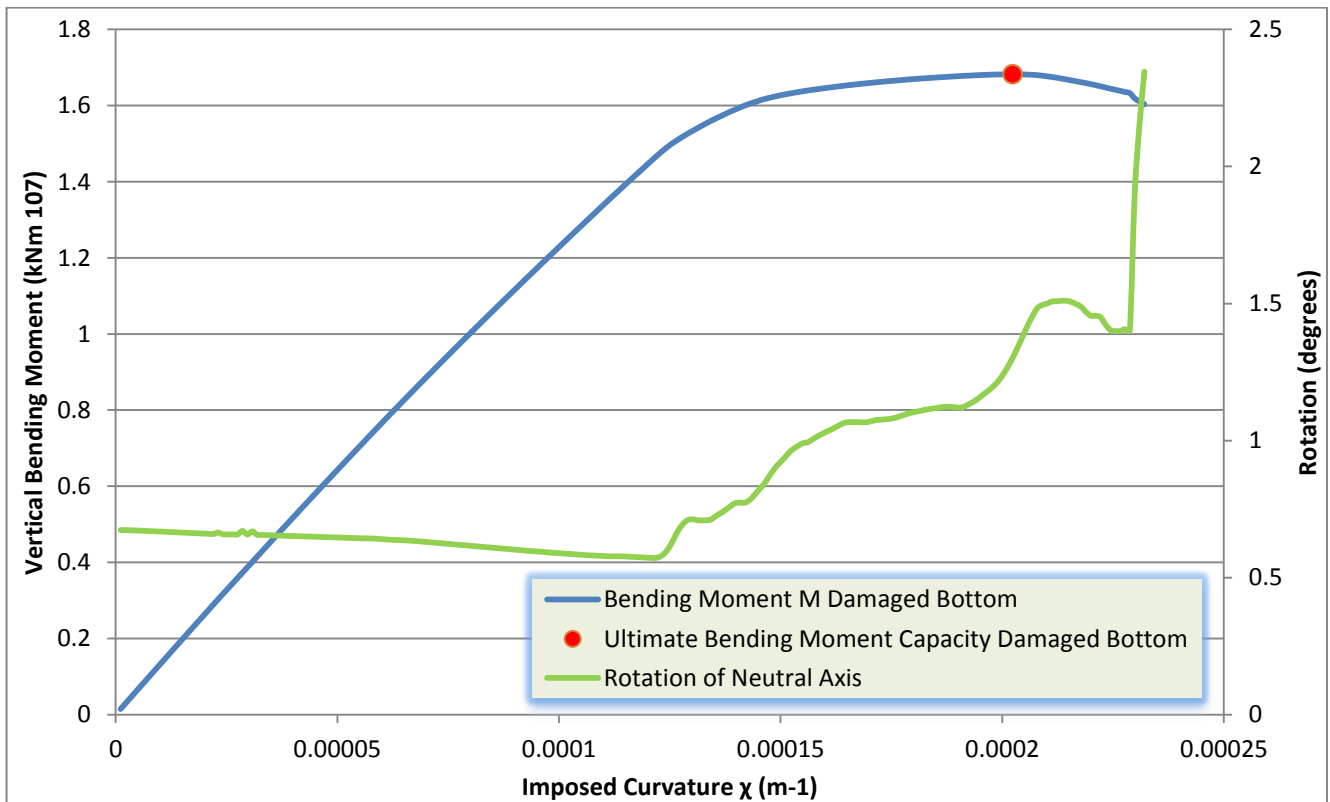
Σχήμα 6.16 : Θέση ουδέτερου άξονα στη μέση τομή του πλοίου – Step 211



Σχήμα 6.17 : Κατακόρυφη θέση ουδέτερου άξονα και στροφή



Σχήμα 6.18 : Ροπή κάμψεως και κατακόρυφη θέση ουδέτερου άξονα

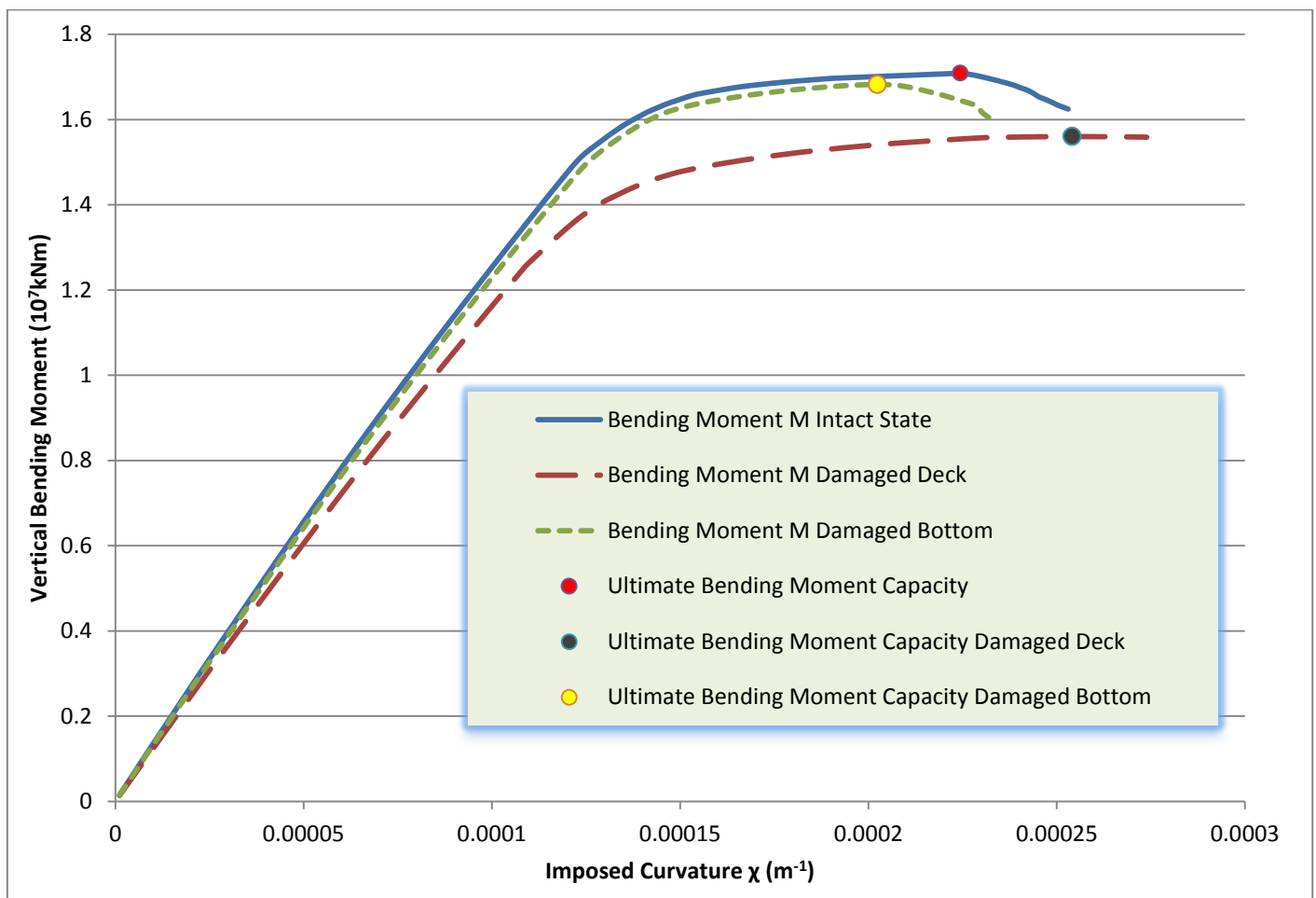


Σχήμα 6.19 : Ροπή κάμψεως και στροφή ουδέτερου άξονα

Παρατηρώντας το γράφημα με την κατακόρυφη θέση και τη στροφή του ουδέτερου άξονα, φαίνεται ότι ο ουδέτερος άξονας ανυψώνεται και περιστρέφεται ορολογιακά μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της καμπυλότητας και στη συνέχεια χάνει ύψος και περιστρέφεται αντιορολογιακά μέχρι το τελευταίο στάδιο όπου ανυψώνεται και πάλι περιστρέφεται αντιορολογιακά.

6.5. Σύγκριση καταστάσεων εξαγωγή συμπερασμάτων

Στο σημείο αυτό και μετά την αναλυτική παρουσίαση των καταστάσεων που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, θα γίνει σύγκριση των καμπυλών ροπής-καμπυλότητας, για την άθικτη και τις δύο βεβλαμμένες καταστάσεις που προηγήθηκαν. Στη συνέχεια θα υπολογιστούν οι ποσοστιαίες διαφορές μεταξύ των τιμών της ροπής ανά κατάσταση και θα ακολουθήσουν σχόλια και συμπεράσματα. Ακολουθεί γράφημα που εμπεριέχει τις τρεις καμπύλες για τις τρεις καταστάσεις αντίστοιχα.



Σχήμα 6.20 : Σύγκριση καμπυλών των τριών καταστάσεων

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις ποσοστιαίες διαφορές ανάμεσα στις ροπές, οι μέγιστες τιμές εμπεριέχονται στα κελία με την γκρι σκίαση.

Πίνακας 6.12: Ποσοστιαίες διαφορές ροπών

<i>Mx (Nm)</i> <i>Damaged Deck</i>	<i>Mx intact</i> <i>(Nm)</i>	<i>dif %</i>	<i>Mx (Nm)</i> <i>Damaged Bottom</i>	<i>Mx intact</i> <i>(Nm)</i>	<i>dif %</i>
136912512.8	148897202.8	8.048969	145810458	148897202.8	2.073071
273632020.3	297565599.9	8.043127	291394274.5	297565599.9	2.073938
410206513.4	446061523	8.038131	436810515.7	446061523	2.073931
546646333.9	594396590.7	8.0334	582071285.4	594396590.7	2.073583
682955292.7	742575066.1	8.028787	727182469.4	742575066.1	2.072867
819136379.7	890600849.2	8.024298	872146312.6	890600849.2	2.072145
955191124.4	1038473620	8.019703	1016964530	1038473620	2.071222
1091118581	1186196560	8.015365	1161638379	1186196560	2.07033
1226921418	1333769777	8.011005	1306169080	1333769777	2.069375
1362599412	1481191833	8.006554	1450555025	1481191833	2.068389
1498152056	1628461771	8.002013	1594797380	1628461771	2.067251
1633579393	1775582547	7.997553	1738897207	1775582547	2.066102
1768880757	1922554674	7.993214	1882853459	1922554674	2.065024
1904057124	2069375729	7.988815	2026666162	2069375729	2.063887
2039108546	2216045185	7.984343	2170334118	2216045185	2.062732
2174033676	2362565713	7.97997	2313859798	2362565713	2.061569
2308833325	2508929644	7.975366	2457241096	2508929644	2.060183
2443507148	2655147508	7.970945	2600474979	2655147508	2.059115
2578055449	2801210096	7.966366	2743568645	2801210096	2.057734
2712474231	2947124221	7.961999	2886512099	2947124221	2.056653
2846768014	3092876962	7.957282	3028594824	3092876962	2.078393
2980217855	3235648942	7.894277	3168972225	3235648942	2.060691
3113473338	3380888623	7.909615	3309494068	3380888623	2.11171
3247263529	3521637567	7.791092	3448789470	3521637567	2.068586
3376760747	3666225397	7.895441	3588853995	3666225397	2.110383
3508687053	3809062958	7.885821	3728871586	3809062958	2.105278
3641150233	3950645356	7.83404	3868688145	3950645356	2.074527
3771995123	4094438377	7.875152	4008357956	4094438377	2.102374
3903340914	4235844155	7.849752	4147848938	4235844155	2.077395
4035680851	4379146419	7.843208	4288193549	4379146419	2.076954
4166885767	4522254645	7.858224	4428363095	4522254645	2.076211
4298864864	4665185660	7.852223	4568352781	4665185660	2.075649
4430689343	4807926365	7.846148	4707446434	4807926365	2.089881
4562350370	4949738709	7.82644	4846912049	4949738709	2.077416
4692931115	5091929631	7.8359	4986174016	5091929631	2.076926
4823850791	5233904954	7.834574	5124531822	5233904954	2.089704
4954600225	5375006503	7.821503	5263205272	5375006503	2.08002
5085429538	5516384556	7.812273	5401626223	5516384556	2.080318

5215702379	5657524903	7.809467	5539796000	5657524903	2.080926
5345770195	5798404962	7.806194	5677679603	5798404962	2.082044
5475896620	5938996701	7.797615	5815312850	5938996701	2.082571
5605821394	6079331108	7.788846	5952704116	6079331108	2.08291
5735525209	6219420187	7.780387	6089859750	6219420187	2.083159
5864990408	6359276168	7.772673	6226763071	6359276168	2.083776
5994238094	6498878213	7.765034	6363421520	6498878213	2.084309
6123289753	6638208361	7.756891	6499833784	6638208361	2.084517
6252144831	6777305979	7.748819	6636014459	6777305979	2.084774
6380798318	6916165096	7.740804	6771962494	6916165096	2.085008
6509238805	7054788446	7.73304	6907716498	7054788446	2.084711
6637455341	7193218741	7.726213	7043258890	7193218741	2.084739
6765451940	7331412065	7.719661	7178497686	7331412065	2.085743
6893260279	7469328994	7.712456	7313450187	7469328994	2.086918
7020883038	7606932220	7.704146	7448116248	7606932220	2.087779
7148149392	7744024002	7.694638	7582273251	7744024002	2.088717
7275017716	7880497261	7.683266	7715996889	7880497261	2.087436
7401603029	8016570819	7.671208	7849258855	8016570819	2.087076
7527902554	8152187295	7.65788	7982068545	8152187295	2.086787
7653764448	8287337796	7.645077	8114386274	8287337796	2.086937
7779236204	8422057564	7.632593	8246294901	8422057564	2.086933
7904409506	8556148767	7.617203	8377639888	8556148767	2.086323
8029217694	8689763598	7.601425	8508579136	8689763598	2.085033
8153607010	8822992311	7.586829	8639174054	8822992311	2.0834
8277553386	8955724063	7.572483	8769441146	8955724063	2.080043
8401146885	9088189069	7.559726	8899416630	9088189069	2.077118
8524467182	9220350591	7.547255	9028992511	9220350591	2.075388
8647528738	9352157610	7.534399	9158073728	9352157610	2.075285
8770278059	9483416985	7.519852	9286867888	9483416985	2.072556
8892766959	9614370323	7.505467	9415375034	9614370323	2.069769
9014905620	9745011863	7.492102	9543607545	9745011863	2.066743
9136623180	9875367368	7.480676	9671562069	9875367368	2.063774
9258077759	10005450139	7.469653	9799241174	10005450139	2.060966
9379203534	10135232529	7.459414	9926635040	10135232529	2.058142
9500025744	10264733804	7.449858	10053757349	10264733804	2.055352
9620590239	10393949062	7.440472	10180543850	10393949062	2.053168
9740882412	10522853238	7.431167	10306880780	10522853238	2.052413
9860940089	10651268892	7.420044	10432934266	10651268892	2.049846
9980780562	10779399978	7.408756	10558707655	10779399978	2.047353
10100382297	10907242349	7.397471	10684227906	10907242349	2.044646
10219770809	11034819727	7.386155	10809464275	11034819727	2.042221
10338841448	11162129270	7.375724	10934445099	11162129270	2.039792
10457601731	11289154051	7.36594	11059182432	11289154051	2.037102
10576123702	11415920760	7.356367	11183684138	11415920760	2.034322

10694420545	11542462638	7.34715	11307960810	11542462638	2.031645
10812513911	11668757916	7.337919	11432013496	11668757916	2.028874
10930378303	11794842563	7.329172	11555821452	11794842563	2.026488
11047992434	11920712293	7.321038	11679406938	11920712293	2.024253
11165416218	12046355483	7.312911	11802778573	12046355483	2.021997
11282628232	12171719987	7.30457	11925900216	12171719987	2.019598
11399634753	12296859877	7.296376	12048814888	12296859877	2.017141
11516444720	12421786685	7.288339	12171485412	12421786685	2.015018
11633027341	12546475945	7.280519	12293937213	12546475945	2.012826
11749393440	12670966334	7.273107	12416177008	12670966334	2.010812
11865585416	12795245005	7.265665	12538206236	12795245005	2.008862
11981588067	12919227211	7.257703	12659997451	12919227211	2.006542
12097348082	13043010880	7.250341	12781596886	13043010880	2.004246
12212927122	13166590525	7.243055	12902958436	13166590525	2.002281
12328294955	13289958935	7.236019	13024087084	13289958935	2.000547
12443443762	13413118498	7.229301	13144988954	13413118498	1.99901
12558410906	13536076936	7.222669	13265687019	13536076936	1.99755
12654153937	13658825185	7.355473	13386162537	13658825185	1.996238
12744225902	13781329972	7.525428	13506429767	13781329972	1.994729
12834149870	13903552374	7.691577	13626078182	13903552374	1.995707
12923935752	14025538940	7.854266	13745127088	14025538940	1.999295
13013520054	14147331954	8.014316	13863391576	14147331954	2.007024
13102899811	14267926832	8.165356	13981176397	14267926832	2.009755
13192081020	14387808367	8.310698	14098679798	14387808367	2.009539
13281092559	14507360810	8.452731	14215905045	14507360810	2.00902
13367377487	14626651036	8.609445	14332852870	14626651036	2.00865
13452445707	14745670066	8.770197	14449490460	14745670066	2.008587
13535224202	14863451840	8.936199	14565849697	14863451840	2.002241
13615538341	14975744814	9.08273	14681023620	14975744814	1.96799
13692284949	15079215822	9.197633	14791901752	15079215822	1.905365
13764198276	15172924644	9.284475	14896473569	15172924644	1.822003
13833730950	15255697698	9.32089	14991727047	15255697698	1.730309
13899017752	15329175184	9.329644	15077784492	15329175184	1.639949
13961202192	15402083130	9.355104	15160045181	15402083130	1.571462
14021222879	15474890773	9.39372	15238426791	15474890773	1.528049
14077938554	15547603738	9.45268	15312715676	15547603738	1.510767
14128913796	15620226886	9.54732	15384020857	15620226886	1.512181
14176660957	15689425088	9.641935	15455234365	15689425088	1.492666
14223462528	15756053403	9.726997	15524574740	15756053403	1.469141
14269937671	15822606108	9.812975	15592752227	15822606108	1.452693
14316370877	15882926610	9.863143	15655527199	15882926610	1.431722
14361928578	15940716917	9.904124	15716324051	15940716917	1.407671
14405032896	15996951846	9.951389	15777064225	15996951846	1.374559
14446309677	16049172548	9.987199	15836757835	16049172548	1.323524

14486886641	16101172478	10.02589	15893499518	16101172478	1.2898
14526862885	16153132683	10.06783	15947364089	16153132683	1.273862
14563999742	16200213904	10.09995	15999090086	16200213904	1.241489
14596713442	16241863603	10.12907	16045282682	16241863603	1.210335
14626720581	16282701834	10.17019	16088998736	16282701834	1.189625
14656431663	16323513655	10.21276	16131870438	16323513655	1.174032
14685858143	16362521728	10.24698	16170064393	16362521728	1.176208
14713663402	16398426724	10.27393	16202074916	16398426724	1.197382
14740698982	16431868207	10.29201	16232258607	16431868207	1.214771
14766606646	16465295348	10.31678	16260506342	16465295348	1.243762
14789615446	16497084290	10.35012	16287730634	16497084290	1.269034
14810495865	16528148684	10.39229	16311928841	16528148684	1.308192
14831177520	16558350374	10.43083	16334488959	16558350374	1.351955
14851658817	16585182859	10.45225	16356150822	16585182859	1.380944
14870997178	16604936403	10.44231	16377261692	16604936403	1.371127
14889916055	16623679258	10.42948	16397158130	16623679258	1.362641
14908110872	16640871149	10.41268	16415648766	16640871149	1.353429
14925210037	16658061272	10.40248	16433300765	16658061272	1.34926
14942414233	16675238755	10.3916	16450564255	16675238755	1.347354
14959344798	16692396161	10.38228	16467491632	16692396161	1.347347
14975456204	16708120777	10.37019	16484158458	16708120777	1.34044
14991494195	16723698375	10.35778	16500155594	16723698375	1.336683
15007237329	16739289467	10.34723	16515842110	16739289467	1.334868
15022906147	16754884705	10.33716	16530904311	16754884705	1.336807
15038532812	16768682191	10.31774	16545251876	16768682191	1.332426
15054026560	16781720241	10.29509	16559605399	16781720241	1.323552
15068869910	16793834660	10.27142	16573711546	16793834660	1.310738
15083249431	16804693520	10.24383	16586652530	16804693520	1.297501
15096984919	16815090227	10.21764	16599134554	16815090227	1.284297
15110890728	16825493289	10.1905	16611575475	16825493289	1.271391
15124732107	16835905722	10.16383	16623403450	16835905722	1.262197
15138397717	16846326123	10.13828	16635165250	16846326123	1.253454
15151815849	16855629437	10.10828	16646899511	16855629437	1.23834
15164578878	16864781669	10.08138	16657970545	16864781669	1.22629
15177055380	16873746625	10.05521	16668748621	16873746625	1.214893
15189493792	16882723415	10.02936	16679521451	16882723415	1.203609
15201922113	16891695489	10.00357	16689991815	16891695489	1.1941
15214049460	16900253098	9.977387	16699727972	16900253098	1.186521
15225874372	16908339711	9.950506	16709284778	16908339711	1.177259
15237631533	16915681862	9.920087	16718449571	16915681862	1.165973
15248631279	16923028350	9.894193	16726726815	16923028350	1.159967
15258938369	16930386126	9.872473	16734962596	16930386126	1.154277
15269235914	16937751542	9.850868	16743210540	16937751542	1.148565
15279524402	16945118112	9.829343	16751439853	16945118112	1.142974

15289653523	16952491588	9.808812	16759346842	16952491588	1.13933
15299734085	16959879288	9.788662	16766991254	16959879288	1.13732
15309812006	16966870460	9.766435	16774647852	16966870460	1.132929
15319820096	16971098430	9.729944	16781729609	16971098430	1.115831
15329575470	16975140105	9.693968	16787939896	16975140105	1.10279
15338906134	16979009536	9.659594	16794132602	16979009536	1.088856
15348124501	16982840424	9.625692	16799985845	16982840424	1.076702
15357152838	16986676022	9.592949	16805272089	16986676022	1.067919
15366148206	16990524850	9.560485	16809931284	16990524850	1.062908
15375081994	16994378715	9.528426	16813841072	16994378715	1.062337
15383958106	16998243851	9.49678	16817286274	16998243851	1.064566
15392651155	17002115184	9.466258	16819725571	17002115184	1.072747
15401212331	17005996393	9.436578	16821352095	17005996393	1.08576
15409648935	17009882947	9.407672	16822145228	17009882947	1.103698
15417993792	17013779968	9.379375	16821800966	17013779968	1.128374
15426049288	17017682293	9.352819	16819577128	17017682293	1.164114
15433805389	17021595259	9.328091	16815241310	17021595259	1.212307
15441186699	17025518827	9.305632	16809018128	17025518827	1.271625
15448038412	17029449305	9.28633	16800296040	17029449305	1.345629
15454830631	17033266997	9.266786	16786164821	17033266997	1.450703
15461549786	17037088709	9.2477	16769477668	17037088709	1.570756
15468262850	17040916946	9.228694	16751910433	17040916946	1.695956
15474904794	17044756323	9.210173	16731907808	17044756323	1.835453
15481518268	17048599462	9.191847	16709155061	17048599462	1.99104
15488132379	17052453141	9.173582	16686687540	17052453141	2.144944
15494661984	17056316987	9.155875	16662947005	17056316987	2.306301
15501050494	17060187019	9.139035	16638521600	17060187019	2.471634
15507315534	17064066187	9.122976	16614856711	17064066187	2.632488
15513529376	17067949823	9.107248	16589682450	17067949823	2.802137
15519662898	17071843640	9.092051	16564235587	17071843640	2.973364
15525774988	17075740566	9.077004	16535735133	17075740566	3.162413
15531809030	17079649715	9.062485	16506942126	17079649715	3.353158
15537751560	17083561856	9.048525	16474870084	17083561856	3.563026
15543643940	17085519497	9.024458	16445153164	17085519497	3.748006
15549408898	17076944525	8.945017	16416790900	17076944525	3.86576
15555032620	17063282108	8.839152	16388423469	17063282108	3.955034
15560551665	17047027827	8.719855	16358151660	17047027827	4.041034
15565990439	17028652294	8.589416	16326670589	17028652294	4.122356
15571334778	17007117858	8.442248	16190646226	17007117858	4.800764
15576473857	16983489940	8.284611	16107905398	16983489940	5.155504
15579104474	16959688461	8.140385	16037115433	16959688461	5.439799
15580820643	16936794440	8.006083			
15582494699	16912426470	7.863637			
15584216002	16885628948	7.707222			

15585862954	16860081513	7.557606
15587404132	16833988317	7.405162
15588773255	16802681475	7.224491
15590028295	16763989208	7.002873
15591243178	16728474569	6.798177
15592460976	16695588347	6.607299
15593561307	16649272965	6.340887
15594631111	16590547397	6.002914
15595642758	16530490142	5.655291
15596451548	16493148260	5.436783
15597282263	16451823326	5.194203
15598126478	16409487923	4.944465
15598802052	16361265359	4.660173
15599349369	16318892811	4.409266
15599575520	16282792089	4.195942
15599819499	16246407487	3.979883

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται μια σύγκριση τιμών της ροπής κάμψεως με το πρόγραμμα MARS και για τις βεβλαμμένες καταστάσεις. Γενικά το πρόγραμμα δεν είναι εξειδικευμένο σε καταστάσεις μετά από βλάβη και δεν εφαρμόζει τις απαραίτητες στροφές του ουδέτερου άξονα καθώς υπολογίζει τις δυνάμεις. Για το λόγο αυτό οι τιμές παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από τις υπολογισμένες με την επαναληπτική διαδικασία. Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές του MARS και οι τιμές που υπολογίσθηκαν με τον αλγόριθμο για τις βεβλαμμένες καταστάσεις A και B.

Ultimate Bending Capacity (kN.m)		Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)				
	Mu		Ultimate	Mb	%	
Hogging	16 305 210.	Navigation	14 822 920.	8 614 860.	58.12	Hogging
Sagging	-13 083 640.		-11 894 220.	-8 616 617.	72.44	Sagging
		Harbour	14 822 920.	8 073 374.	54.47	Hogging
			-11 894 220.	-8 044 955.	67.64	Sagging
		Damaged	14 822 920.	4 331 888.	29.22	Hogging
			-11 894 220.	-4 573 294.	38.45	Sagging

The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin

Για την κατάσταση A - Βλάβη στο κατάστρωμα

$$M_{UH_MARS} = 16,305,210 \text{ kNm}$$

$$M_{UH_CALC} = 15,599,928 \text{ kNm}$$

$$\text{Difference} = 0.045\%$$

Ultimate Bending Capacity (kN.m)
 Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)

	Mu		Ultimate	Mb	%	
Hogging	16 411 980.	Navigation	14 919 980.	8 614 860.	57.74	Hogging
Sagging	-13 286 240.		-12 078 400.	-8 616 617.	71.34	Sagging
		Harbour	14 919 980.	8 073 374.	54.11	Hogging
			-12 078 400.	-8 044 955.	66.61	Sagging
		Damaged	14 919 980.	4 331 888.	29.03	Hogging
			-12 078 400.	-4 573 294.	37.86	Sagging

The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin

Για την κατάσταση B - Βλάβη στον πυθμένα

$$M_{UH_MARS} = 16,411,980 \text{ kNm}$$

$$M_{UH_CALC} = 16,822,145 \text{ kNm}$$

$$\text{Difference} = 0.024\%$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1. Γενικά

Συνοψίζοντας, η παρούσα εργασία αποτελεί μια εκτεταμένη προσπάθεια στο προσδιορισμό της μέγιστης αντοχής πλοίου σε άθικτη κατάσταση αλλά κυρίως σε καταστάσεις μετά από βλάβη. Στόχος ήταν να κατασκευαστεί κατάλληλο πρόγραμμα σε γλώσσα Fortran βασισμένο στον αλγόριθμο του CSR για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής πλοίου, το οποίο όμως με κατάλληλες μετατροπές να μπορεί να υπολογίσει τη μέγιστη αντοχή και σε κατάσταση μετά από βλάβη. Ο στόχος επετεύχθη και έτσι μετά την παρουσίαση των διαδικασιών και των αποτελεσμάτων, ακολουθεί η εξαγωγή συμπερασμάτων.

7.2. Εξαγωγή συμπερασμάτων

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται η εξαγωγή των συμπερασμάτων. Συμπεράσματα τα οποία είναι κρίσιμης σημασίας και προέκυψαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκτέλεσης της μελέτης.

Συμπεράσματα:

- Το σημαντικότερο συμπέρασμα που εξήχθη, είναι το γεγονός ότι για τις βεβλαμμένες καταστάσεις, η κατακόρυφη μετατόπιση του ουδέτερου άξονα ισορροπούσε τις αξονικές δυνάμεις και η περιστροφή του, την εγκάρσια συνιστώσα της ροπής κάμψης. Πρόκειται για δύο διαδικασίες οι οποίες λειτούργησαν σχεδόν ανεξάρτητα επηρεάζοντας η μια ελάχιστα την άλλη.

- Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, έδειξαν ότι η παραδοχή του CSR για την ελαστοπλαστική κατάρρευση των hard corners και κατά τη θλίψη τους, προσδίδει ίσως πολύ παραπάνω αντοχή στην μέση τομή κατά την κάμψη.
- Τα hard corners οφείλονται αποκλειστικά για την πτώση θέσης που παρουσιάζει ο ουδέτερος άξονας κατά την επαναληπτική διαδικασία στην άθικτη hogging κατάσταση. Υπενθυμίζεται ότι το λογισμικό έτρεξε δοκιμαστικά με μειωμένες τις επιφάνειες των hard corners και ο ουδέτερος άξονας μετατοπιζόταν συνεχώς προς τα επάνω.
- Η μελέτη των δύο βεβλαμμένων καταστάσεων έδειξε πως κατά την προσάραξη, η αντοχή της διατομής δεν μειώνεται τόσο σημαντικά σε σχέση με την άθικτη κατάσταση, όσο συμβαίνει στην κατάσταση με την βλάβη στο κατάστρωμα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι στην κατάσταση με την βλάβη στο κατάστρωμα, αφαιρέθηκε εκτός από τα συνήθη ενισχυτικά και ένα hard corner.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής

Chapman, S., 2003, “*Fortran 90/95 for Scientists and Engineers*”.

Dalma, E., 2009, “*Ultimate Hull Girder Strength Assessment Using Semi-Analytical and Computational Methods*”, Dissertation, NTUA., Athens.

Gordo, J. M., Guedes Soares, C., 2004, “*Approximate Method to Evaluate the Hull Girder Collapse Strength*”.

I.A.C.S., July 2012, *Common Structural Rules for Bulk Carriers*

Paik, J.K., Kim, B.J., Seo. J.K., 2008, “*Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part III hull girders*”, Ocean Engineering, Vol. 35:281-286.

Paik, J.K., Kim, B.J., Seo. J.K., 2008, “*Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels*”, Ocean Engineering, Vol. 35:271-280.

Paik, J.K., Thayamballi, A.K., 2003, “*Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*”, John Wiley & Sons, Chichester, UK.

Srinath, L., 2001, “*Advanced Mechanics of Solids*”.

Yong, B., 2003, “*Marine Structural Design*”, Elsevier, First Edition.

Ελληνική

Βαδαλουκά, Β., Γ. Παπαδόπουλος, 2009, “*Μηχανική των Υλικών*”, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Καρύδης, Π., 2000, “*Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου – Θέματα τοπικής Αντοχής*”, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μαργαρίτης, Ι., 2007, “*Ανάλυση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς ρηγματοποιημένων ελασμάτων υπό μονοαξονική θλίψη με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων*”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Ματαράς, Δ., Κουτελιέρης, Α., 2000, “Προγραμματισμός Fortran 90/95 για Επιστήμονες και Μηχανικούς”.

Πάντος, Α., 2009, “Αυγισμός πολύστρωτων δοκών και πλακών από σύνθετα υλικά με γεωμετρικές ατέλειες: Παραμετρική μελέτη και πειραματική διερεύνηση”, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Παπάζογλου, Β., 1995, “Ναυπηγική Τεχνολογία”, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Σαμουηλίδης, Μ., 2007, “Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου”, Ε.Μ.Π., Αθήνα.