



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

**ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ BULK CARRIER ΣΕ ΑΘΙΚΤΗ ΚΑΙ
ΒΕΒΛΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ**

Επιβλέπων καθηγητής

Μ.ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής

ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΕΓΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΗ BULK CARRIER ΣΕ ΑΘΙΚΤΗ ΚΑΙ
ΒΕΒΛΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Επιβλέπων καθηγητής

Μ.ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ

Προπτυχιακός Φοιτητής

ΙΩΑΝΝΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Αξιολογήθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή
την/...../2017

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΕΠΟΠΤΗΣ 1

ΕΠΟΠΤΗΣ 2

.....
Ιωαννίδης Δημήτριος

Προπτυχιακός Φοιτητής Σχολής Ναυπήγων – Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τη θέση του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθούν ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής.

Αφιερώνεται...

στην οικογένειά μου και συγκεκριμένα στους εκπαιδευτικούς γονείς μου, που μου χάρισαν το ζην και το ευ ζην, αλλά και στα αδέρφια μου & κυρίως στο μεγάλο μου αδερφό, Παύλο, ο οποίος με καθοδήγησε στο να σπουδάσω Ναυπηγός στο Ε.Μ.Π. Επίσης, αφιερώνεται στον τρίχρονο ανιψιό μου, Ζήση, ο οποίος μου εμπνέει κέφι και δύναμη για ζωή...

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	11
SUMMARY	12
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού & πιθανοί τρόποι αστοχίας της μεταλλικής κατασκευής	15
1.2 Φορτίσεις πλοίου και απόκριση της κατασκευής του	17
1.3 Εντατικές καταστάσεις σε ναυπηγικές κατασκευές	20
1.4 Η έννοια της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής του πλοίου	21
1.5 Σκοπός διπλωματικής εργασίας	22
1.6 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	25
2.1 Γενικά	25
2.2 Περιγραφή υπολογιστικών μεθόδων	26
2.2.1 Μέθοδος NLFEM (Non Linear Finite Element Method)	26
2.2.2 Μέθοδος ISUM (Idealised Structural Unit Method)	29
2.2.3 Απλοποιημένη Επαυξητική-Επαναληπτική Μέθοδος (Simplified Incremental-Iterative Method)	31
2.2.4 Μέθοδος AM (Analytic Method)	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕΙΩΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (LOAD - END SHORTENING CURVES) ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (AVERAGE STRESS –STRAIN) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ	43
3.1 Εισαγωγή κεφαλαίου	43
3.2 Ελαστο-πλαστική κατάρρευση	44
3.3 Λυγισμός	46
3.3.1 Το φαινόμενο του λυγισμού (buckling)	46
3.3.2 Το μοντέλο δοκού-κολόνας (beam - column)	47
3.3.3 Γενίκευση καμπύλης ελαστικού λυγισμού του Euler για δοκό-κολόνα	49
3.3.4 Ελαστο-πλαστικός λυγισμός απλού ορθογωνίου ελάσματος υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση	51
3.3.5 Ελαστο-πλαστικός λυγισμός ενισχυμένου ελάσματος (ή ενισχυτικού στοιχείου) υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση	52

3.4 Κατάρρευση ενισχυτικού στοιχείου με λυγισμό δοκού-κολόνας (Beam-Column buckling)	53
3.5 Κατάρρευση ενισχυτικού στοιχείου με στρεπτικό λυγισμό ενισχυτικού (Torsional buckling)	58
3.6 Κατάρρευση ενισχυτικού στοιχείου με τοπικό λυγισμό κορμού ενισχυτικού (Web local buckling)	61
3.6.1 Τοπικός λυγισμός κορμού για ενισχυτικά με φλάντζα	61
3.6.2 Τοπικός λυγισμός κορμού για ενισχυτικά χωρίς φλάντζα	62
3.7 Κατάρρευση με λυγισμό ορθογώνιου ελάσματος (Plate buckling)	63
3.8 Δημιουργία αδιάστατων μειωτικών καμπυλών φόρτισης για διάφορα δομικά στοιχεία στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab και έλεγχος της ορθότητάς τους	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ & ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ BULK CARRIERS ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	67
4.1 Εισαγωγή κεφαλαίου	67
4.2 Γενικά χαρακτηριστικά των δύο υπό εξέταση πλοίων	68
4.3 Χρησιμοποιούμενα υλικά μέσης τομής	68
4.4 Εξέταση Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	69
4.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίου	69
4.4.2 Μεγέθη κανονισμών πλοίου	72
4.4.3 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης	73
4.4.4 Υπολογισμός πραγματικής (actual) ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης της Μέσης Τομής του υπό μελέτη πλοίου	78
4.4.5 Κριτήρια διαστασιολόγησης ελασμάτων Μέσης Τομής [5]	84
4.4.6 Υπολογισμός φορτίσεων ελασμάτων	89
4.4.7 Ορισμός EDW (Equivalent Design Wave)	90
4.4.8 Φόρτιση και επιτρεπόμενα πάχη ελασμάτων πυθμένα	94
4.4.9 Φόρτιση και επιτρεπόμενα πάχη ελασμάτων περιβλήματος γάστρας (Side Shell)	97
4.4.10 Φόρτιση και επιτρεπόμενα πάχη εσωτερικού πυθμένα (Inner Bottom) & ελάσματος κάτω πλευρικής δεξαμενής (Hopper Plate)	99
4.4.11 Συνολικός έλεγχος τοπικής αντοχής ελασμάτων της Μέσης Τομής	107
4.4.12 Κριτήρια διαστασιολόγησης ενισχυτικών Μέσης Τομής & έλεγχος	107
4.5 Εξέταση Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος	111

4.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίου	111
4.5.2 Μεγέθη Κανονισμών πλοίου.....	114
4.5.3 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης	114
4.5.4 Υπολογισμός πραγματικής (actual) ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης της Μέσης Τομής του υπό μελέτη πλοίου	115
4.5.5 Έλεγχος τοπικής αντοχής ελασμάτων & ενισχυτικών	117
4.6 Σύγκριση ροπής αντίστασης μεταξύ των δύο Bulk Carriers (αποτελ. MARS 2000)	118
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΠΑΥΞΗΤΙΚΗΣ- ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ CSR-H ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΘΙΚΤΟΥ BULK-CARRIER ΜΟΝΟΥ & ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ.....	119
5.1 Εισαγωγή κεφαλαίου	119
5.2 Περιγραφή μεθόδου & μεθοδολογία υποδιαίρεσης της διατομής του πλοίου σε δομικά στοιχεία	120
5.3 Υποθέσεις εφαρμογής της απλοποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου (Simplified Incremental - Iterative method) των CSR-H.....	121
5.4 Διάγραμμα ροής της απλοποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για την εύρεση της μέγιστης ροπής κατάρρευσης σε hogging/sagging	122
5.5 Εφαρμογή επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk-Carrier Διπλού Τοιχώματος	123
5.5.1 Βήμα 1 – Υποδιαίρεση της εγκάρσιας τομής σε δομικά στοιχεία.....	123
5.5.2 Βήμα 2 – Αναλυτική μοντελοποίηση στοιχείων και καθορισμός καμπυλών σ-ε	125
5.5.3 Βήμα 3 – Αρχικοποίηση καμπυλότητας και ουδέτερου άξονα.....	133
5.5.4 Βήμα 4-5 – Υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης κάθε στοιχείου & προσδιορισμός της θέσης του Ουδέτερου Άξονα $z_{n,i}$ σε κάθε επαναληπτικό βήμα i της καμπυλότητας χ_i	133
5.5.5 Βήμα 6 – Υπολογισμός της ροπής κάμψης σε κάθε βήμα	133
5.5.6 Βήμα 7 – Εύρεση της μέγιστης αντοχής σε hogging & sagging	134
5.5.7 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω κώδικα Ultimate_Strength.m	134
5.5.8 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω του MARS 2000 by BV	135
5.5.9 Συνολική παρουσίαση αποτελεσμάτων	135
5.5.10 Δείκτες Αντοχής	137
5.5.11 Κριτήριο των CSR-H για έλεγχο επάρκειας της επιτευχθείσας μέγιστης αντοχής του άθικτου Bulk Carrier σε κατακόρυφη διαμήκη κάμψη (hogging / sagging).....	138

5.5.12 Παρουσίαση καμπυλών τάσης – σχετικής αξονικής παραμόρφωσης για επιλεγμένα δομικά στοιχεία της Μέσης τομής του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	140
5.5.13 Παρουσίαση της καθ' ύψος κατανομής των ορθών τάσεων για επιλεγμένα βήματα i που αντιστοιχούν σε καμπυλότητα χ_i	147
5.5.14 Κατακόρυφη μετατόπιση Ουδέτερου Άξονα συναρτήσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας χ	149
5.6 Εφαρμογή επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk-Carrier Μονού Τοιχώματος	151
5.6.1 Βήμα 1 & 2 – Υποδιαίρεση της εγκάρσιας τομής σε δομικά στοιχεία & αναλυτική μοντελοποίηση	151
5.6.2 Βήμα 4-7	157
5.6.3 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω του κώδικα Ultimate_Strength.m	157
5.6.4 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω του MARS 2000 by BV	158
5.6.5 Συνολική παρουσίαση αποτελεσμάτων	158
5.6.6 Δείκτες Αντοχής	160
5.6.7 Κριτήριο των CSR-H για έλεγχο επάρκειας της επιτευχθείσας μέγιστης αντοχής του άθικτου Bulk Carrier σε κατακόρυφη διαμήκη κάμψη (hogging / sagging)	161
5.7 Σύγκριση μέγιστης αντοχής των δύο άθικτων Bulk Carriers	161
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΗΜΕΝΗΣ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΒΕΒΛΑΜΜΕΝΟΥ BULK-CARRIER ΜΟΝΟΥ & ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ	163
6.1 Εισαγωγή κεφαλαίου	163
6.2 Τροποποιημένη (Modified) επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος	164
6.2.1 Βήμα 1 - Υποδιαίρεση της βεβλαμμένης διατομής του πλοίου σε δομικά στοιχεία & ορισμός της περιοχής βλάβης	164
6.2.2 Βήμα 2 - Εύρεση νέου κέντρου βάρους $G^{new}(y_G, z_G)$	165
6.2.3 Βήμα 3 - Εύρεση των νέων ροπών αδράνειας	165
6.2.4 Βήμα 4 - Εύρεση θέσης Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα	166
6.2.5 Βήμα 5 - Υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης κάθε στοιχείου & προσδιορισμός της θέσης του Ουδέτερου Άξονα $z_{n,i}$ σε κάθε επαναληπτικό βήμα i της καμπυλότητας χ_i	168
6.2.6 Βήμα 6 – Υπολογισμός της ροπής κάμψης σε κάθε βήμα	170
6.2.7 Βήμα 7 – Εύρεση της εναπομένουσας αντοχής	170
6.3 Διάγραμμα ροής της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου	171

6.4 Κριτήριο των CSR-H για έλεγχο επάρκειας της επιτευχθείσας εναπομένουσας αντοχής σε κατακόρυφη κάμψη (hogging / sagging).....	172
6.5 Χρήση κριτηρίου άθικτης κατάστασης για τον έλεγχο	172
6.6 Εφαρμογή της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος.....	173
6.6.1 Συμμετρική προσάραξη (Grounding Centered)	173
6.6.2 Ασύμμετρη προσάραξη (Grounding Lateral)	175
6.6.3 Σύγκρουση (Collision)	181
6.6.4 Εύρεση εναπομένουσας αντοχής με το λογισμικό MARS 2000 (απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος) για τα 3 σενάρια βλάβης & έλεγχος κριτηρίου των CSR-H για επάρκεια της εναπομένουσας αντοχής σε κάθε περίπτωση	187
6.6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου με τα αντίστοιχα της απλοποιημένης λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή O.A.....	188
6.6.6 Αξιολόγηση βεβλαμμένων καταστάσεων	189
6.7 Εφαρμογή της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος.....	190
6.7.1 Συμμετρική προσάραξη (Grounding Centered)	190
6.7.2 Ασύμμετρη προσάραξη (Grounding Lateral)	191
6.7.3 Σύγκρουση (Collision)	192
6.7.4 Αξιολόγηση βεβλαμμένων καταστάσεων	193
6.8 Εξαγωγή συντελεστών RIF (Residual Strength Index Factor) για τα εξεταζόμενα Bulk Carriers και σύγκριση μεταξύ τους	194
6.9 Συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα μέγιστης & εναπομένουσας αντοχής για τα δύο Bulk Carriers.....	195
6.10 Πίνακες σύγκρισης μέγιστης & εναπομένουσας αντοχής	197
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	199
Γενικά συμπεράσματα	199
Συμπεράσματα βάσει σύγκρισης των δύο Bulk Carriers	199
Προτάσεις για μελλοντική διεύρυνση της εργασίας	200
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....	201
Παράρτημα Α' - Δημιουργία μειωτικής καμπύλης φόρτισης σε Matlab.....	201
Παράρτημα Β' - Υποδιαίρεση της διατομής σε δομικά στοιχεία	205
Παράρτημα Γ' - Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ενισχυτικών Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος (βλ. Παράρτημα Ζ') διαβρωμένων κατά το ½ του περιθωρίου διάβρωσης	207

Παράρτημα Δ' - Κώδικας υπολογισμού μέγιστης αντοχής σε Matlab	211
Παράρτημα Ε' - Κώδικας υπολογισμού εναπομένουσας αντοχής σε Matlab	219
Παράρτημα Ζ' - Σχέδιο Μέσης Τομής Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος.....	229
Παράρτημα Η' - Σχέδιο Μέσης Τομής Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος.....	231
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	233
Διεθνής Βιβλιογραφία.....	233
Ελληνική Βιβλιογραφία	233

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό της να εξετάσει τη μέγιστη αντοχή των πλοίων, που μεταφέρουν φορτίο χύδην (Bulk Carriers), στις καμπτικές καταπονήσεις hogging και sagging, οι οποίες προκύπτουν είτε σαν αποτέλεσμα μιας κατάστασης φόρτωσης του πλοίου, είτε λόγω της επίδρασης κυματισμών και του συνδυασμού αυτών.

Για την εκπλήρωση αυτού του σκοπού επιλέγονται δύο πρόσφατα ναυπηγημένα Bulk Carriers, το ένα διπλού τοιχώματος και το άλλο μονού, με όμοιες κύριες διαστάσεις και μεταφορική ικανότητα. Αρχικά ελέγχεται μέσω του λογισμικού MARS 2000 του Γαλλικού Νηογνώμονα (Bureau Veritas) εάν η τοπική και ολική τους αντοχή στις υπηρεσιακές συνθήκες, με τις ορθές τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης να διατηρούνται στην ελαστική περιοχή, ικανοποιεί τις προδιαγραφές τις οποίες ορίζουν οι ενοποιημένοι κατασκευαστικοί κανονισμοί (Common Structural Rules - Harmonized) του Διεθνούς Οργανισμού Νηογνομόνων (International Association of Classification Societies).

Στη συνέχεια κάνοντας τις υποθέσεις της θεωρίας δοκών Euler-Bernoulli χρησιμοποιείται η απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος του Smith για την εύρεση της μέγιστης αντοχής του καθενός Bulk Carrier σε άθικτη κατάσταση. Η μέθοδος επιλύει το πρόβλημα μηδενισμού της συνιστάμενης αξονικής δύναμης, της οποίας η εφελκυστική και θλιπτική συνιστώσα δίνουν σαν ζεύγος δυνάμεων τη στιγμιαία καμπτική ροπή. Οι πλαστικές παραμορφώσεις, οι οποίες υπεισέρχονται μετά από κάποιο σημείο επιβολής καμπυλότητας στο πλοίο-δοκό, εισάγουν τη μη γραμμικότητα στο πρόβλημα. Επομένως η τελική αστοχία του κάθε στοιχείου της κατασκευής προκύπτει με ελαστοπλαστική κατάρρευση ή ελαστο-πλαστικό λυγισμό, όπως θα εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 3. Το πρόβλημα μηδενισμού της συνιστάμενης αξονικής δύναμης επιλύεται μέσω της μετατόπισης του ουδέτερου άξονα της κάμψης.

Όσον αφορά τη βεβλαμμένη κατάσταση του Bulk Carrier, θεωρούνται τρία σενάρια βλάβης με βάση τους κανονισμούς CSR-H τα οποία είναι: α) συμμετρική προσάραξη (grounding), β) πλευρική προσάραξη (lateral grounding) και γ) σύγκρουση (collision). Για τα σενάρια β και γ, όπου προκύπτει γεωμετρική ασυμμετρία στη διατομή του πλοίου, εφαρμόζεται η τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος, η οποία λαμβάνει υπόψη της και την περιστροφή του ουδέτερου άξονα, πέραν της μετατόπισης, η οποία εξασφαλίζει το μηδενισμό της οριζόντιας ροπής. Ωστόσο, οι κανονισμοί CSR-H εφαρμόζουν και για τις βεβλαμμένες καταστάσεις την απλοποιημένη μέθοδο του Smith. Επομένως ελέγχεται κατά πόσο η αγνόηση της περιστροφής του ουδέτερου άξονα επηρεάζει τον ακριβή υπολογισμό της μέγιστης αντοχής.

Τα αποτελέσματα των δύο Bulk Carriers, σχετικά με τη μέγιστη αντοχή τους σε άθικτη και βεβλαμμένη κατάσταση, συγκρίνονται μεταξύ τους και αξιολογούνται. Σε σύγκριση με τις προβλεπόμενες από τους κανονισμούς φορτίσεις εμφανίζουν μεγάλα αποθέματα αντοχής μέχρι την κατάρρευση. Προκύπτει δε ότι το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος εμφανίζει μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή στην άθικτη κατάσταση υπό sagging.

Παράλληλα εξετάζεται κατά πόσον μειώνει κάθε βλάβη τη μέγιστη αντοχή του καθενός Bulk Carrier. Το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος αποδεικνύεται πιο ανθεκτικό κατόπιν βλάβης.

SUMMARY

This diploma thesis aims at examining the maximum strength of Bulk Carriers in hogging and sagging stresses, that arise either as a result of the ship's loading condition or due to the effects of waves and the combination of these.

To accomplish this, two newly built Bulk Carriers, one double-walled and the other single-walled, with similar principal particulars and deadweight are selected. It is initially checked by the MARS 2000 software of the Bureau Veritas if their local and total strength, with the normal stresses due to longitudinal bending maintained in the elastic area, meets the specifications defined in the CSR-H of the IACS.

Then, using the Euler-Bernoulli theory, Smith's simplified incremental-iterative method is used to find the maximum strength of each Bulk Carrier in intact condition. The method resolves the problem of zeroing the resultant axial force, whose tensile and compressive component give as a pair of forces the instantaneous bending moment. The plastic deformations, which occur after a point of curvature implementation, introduce non-linearity into the problem. Therefore, the final failure of each component of the structure results from elastic-plastic collapse due to material yielding or elastic-plastic buckling, as will be explained in Chapter 3. The problem of zeroing the resultant axial force is solved by shifting the neutral axis of bending.

Regarding the Bulk Carrier's damaged condition, three CSR-H damage scenarios are considered: a) grounding, b) lateral grounding, and c) collision. For scenarios b and c, where the geometrical asymmetry emerges in the cross-section of the ship, the modified incremental-iterative method, which takes also into account the rotation of the neutral axis which ensures that the horizontal torque is zeroed. However, the CSR-H apply Smith's simplified method for the damaged conditions too. It is therefore checked whether ignoring the rotation of the neutral axis affects significantly the exact calculation of the ultimate strength.

The results of the two Bulk Carriers, with regard to their ultimate strength in intact and damaged condition, are compared and evaluated. Compared to the loadings provided by the CSR-H Rules the two ships appear big margins of strength until their collapse. It turns out that the Double Skin Bulk Carrier has higher ultimate strength at intact condition under sagging. At the same time, the diploma thesis examines the amount that each damage reduces the maximum strength of each Bulk Carrier. The Single Skin Bulk Carrier proves to be more durable to damage.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κο Σαμουηλίδη Μανώλη, καθηγητή του Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών-Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ και επιβλέποντα καθηγητή στην παρούσα Διπλωματική μου Εργασία για την πολύτιμη καθοδήγηση πάνω στο αντικείμενο της αντοχής της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Επίσης ευχαριστώ τον κο Γεωργιάδη Δημήτριο, υποψήφιο διδάκτορα ΕΜΠ, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να βοηθήσει με τις ουσιαστικές γνώσεις και επισημάνσεις του, που μου ήταν απαραίτητες. Επιπλέον, ευχαριστώ τον κο Τουζλούδη Δήμο και την δρ.α Ιωαννίδα Κωνσταντίνα, Σμηναγούς της Πολεμικής Αεροπορίας, για τις πολύτιμες συμβουλές τους όσον αφορά τη δομή μιας Διπλωματικής Εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τους γονείς μου, Ιωαννίδα Χρήστο και Κατσαβριά Παγώνα, για την αμέριστη συμπαράσταση και υπομονή τους σε κάθε επίπονη μέρα της συγγραφής αυτής της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Οριακές καταστάσεις σχεδιασμού & πιθανοί τρόποι αστοχίας της μεταλλικής κατασκευής

Τις τελευταίες δεκαετίες λόγω των αυξανόμενων περιβαλλοντικών ανησυχιών και ανησυχιών που άπτονται της ασφάλειας της ανθρώπινης ζωής στο πλοίο, έγιναν αρκετές προσπάθειες από το Διεθνή Οργανισμό Νηογνομόνων (IACS), προκειμένου οι σχεδιάσεις των νέων εμπορικών πλοίων, ιδιαίτερα των bulk carriers και tankers, να λαμβάνουν υπόψη την περίπτωση δημιουργίας βλάβης της μεταλλικής κατασκευής από σύγκρουση (collision) ή προσάραξη (grounding) του πλοίου. Τα στοιχεία για τον επαρκή προσδιορισμό της αντοχής του πλοίου, σε άθικτη ή βεβλαμμένη κατάσταση, είναι: α) ο προσδιορισμός των φορτίσεων, που ασκούνται στο πλοίο, β) ο υπολογισμός των προκαλούμενων τάσεων και παραμορφώσεων, γ) ο προσδιορισμός της μέγιστης αντοχής σε διαμήκη κάμψη του πλοίου, δ) ο προσδιορισμός των κριτηρίων ασφαλείας και ε) ο έλεγχος της κατασκευής μέσω αυτών. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκαν οι κατασκευαστικοί κανονισμοί CSR-H, οι οποίοι εισάγουν τα επιτρεπτά όρια παραμέτρων της σχεδίασης του πλοίου και τους συντελεστές ασφαλείας, που καθιστούν το πλοίο ασφαλές ως προς τη λειτουργία του, αλλά παράλληλα λαμβάνουν υπόψη τους τη «δυσμενή» μεταβολή τους λόγω των τυχαίων θαλάσσιων κυματισμών, στους οποίους υπόκειται ένα πλοίο, ή την πρόκληση ενός ατυχήματος. Έτσι, οι κανονισμοί CSR-H θέτουν απαιτήσεις για τις εξής οριακές καταστάσεις: 1) συνθήκων υπηρεσίας (Serviceability Limit State : SLS), 2) μέγιστης αντοχής (Ultimate Limit State : ULS), 3) κόπωσης (Fatigue Limit State : FLS) και 4) ατυχήματος (Accidental Limit State : ALS).

Συγκεκριμένα, στις συνθήκες υπηρεσίας (SLS) ελέγχονται τα εξής:

- οι τάσεις στα κατασκευαστικά στοιχεία του πλοίου να διατηρούνται σε αποδεκτά επίπεδα,
- οι παραμορφώσεις να μην υπερβαίνουν ένα ελάχιστο επιτρεπόμενο όριο, κλάσμα του ανυποστήρικτου δοκαριού ή της πλάκας, π.χ. το 1/100,
- η διάβρωση, επιλέγοντας ελάσματα μεγαλύτερου πάχους από αυτό που προκύπτει από τη μελέτη αντοχής και
- η ολκιμότητα της κατασκευής, που διασφαλίζεται με την επιλογή υλικών με κατάλληλες ιδιότητες (αποφυγή ψαθυρής θραύσης) [17].

Κατά τον έλεγχο μέγιστης αντοχής (ULS), εξετάζεται αν η κατασκευή μπορεί να φέρει ακραία φορτία, που είναι δυνατόν να αντιμετωπίσει το πλοίο στη διάρκεια ζωής του,

χωρίς να καταρρεύσει, δηλαδή ελέγχεται αν $M_U/M_{DES} \geq 1,2 \div 1,38$ [5], ανάλογα με το πλοίο και τις πιο επώδυνες καταστάσεις φόρτωσης, όπου M_U : η ροπή κατάρρευσης της διατομής του πλοίου, και M_{DES} : η ροπή σχεδίασης στις υπηρεσιακές συνθήκες. Εν γένει, στις συνθήκες ULS ισχύει το παρακάτω κριτήριο:

$$\text{Design Demand (D}_d\text{)} \leq \text{Design Capacity (C}_d\text{)}$$

$$\gamma_0 \cdot \sum D_{ki} (F_{ki}, \gamma_{fi}) \leq C_k / \gamma_M \text{ or}$$

$$\gamma_0 \cdot \sum D_{ki} (F_{ki}, \gamma_{fi}) \leq C_k / (\gamma_M \cdot \gamma_c)$$

Σχήμα 1.1 Κριτήριο συνθηκών ULS [13]

όπου:

$\sum D_{ki}$: ομοιογενείς απαιτήσεις που δύνανται να προστεθούν και έχουν εξάρτηση από το μέγεθος της φόρτισης F_{ki} και του συντελεστή φόρτισης γ_{fi} ,

γ_0 : μερικός συντελεστής ασφαλείας, που λαμβάνει υπόψη τη σοβαρότητα μιας συγκεκριμένης οριακής κατάστασης με βάση την ασφάλεια και τη λειτουργικότητα,

C_k : μέτρο του μέγιστου περιθωρίου (capacity) του σχεδιαστικού μεγέθους,

γ_M : συνολικός διορθωτικός συντελεστής ασφαλείας,

γ_m : μερικός συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες λόγω χρήσης ενός συγκεκριμένου υλικού,

γ_c : μερικός συντελεστής ασφαλείας, που λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες της κατασκευής, που μπορούν να επηρεάσουν το εκτιμώμενο μέγιστο σχεδιαστικό περιθώριο, όπως είναι κατασκευαστικές ατέλειες, παραμένουσες τάσεις και παραμορφώσεις λόγω συγκολλήσεων, απώλεια πάχους λόγω διάβρωσης.

Όσον αφορά το όριο κόπωσης (FLS) του πλοίου γίνεται εκτίμηση των περιοδικών φορτίσεων, που θα αντιμετωπίσει το πλοίο σε όλη τη διάρκεια της ζωής του, και ελέγχεται αν η κατασκευή μπορεί να φέρει ασφαλώς τις εκτιμώμενες εναλλαγές φόρτισης. Τέλος, σε κατάσταση ατυχήματος (ALS) η κατασκευή πρέπει να μπορεί να αντεπεξέλθει χωρίς να υπάρχουν εκτεταμένες ζημιές σε αυτή, ώστε το πλοίο να μπορεί να συνεχίσει τον πλου του

Πίνακας 1.1 Ο Πίνακας δείχνει τους πιθανούς τρόπους αστοχίας ανάλογα με την οριακή κατάσταση, που εξετάζεται το πλοίο [5].

Possible failure modes to be considered	Limit states ⁽¹⁾			
	SLS	ULS	FLS	ALS
Yielding	Y	Y	-	Y
Plastic collapse	-	Y	-	Y
Buckling	Y	Y	-	Y
Rupture	-	Y	-	Y
Fatigue cracking	-	-	Y	-
Brittle fracture ⁽²⁾	-	-	-	-

(1) "Y" indicates that the structural assessment is to be carried out.
(2) Controlled by the material rule requirement of steel grade.

σε ασφαλές μέρος, και να αποτραπούν η μόλυνση του περιβάλλοντος, καθώς και οι απώλειες ζωής.

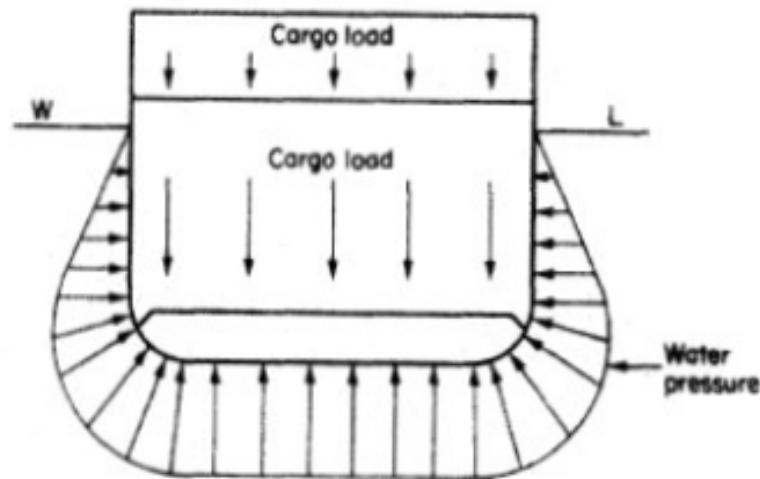
Η παρούσα εργασία εξετάζει αν τελικά θα μπορέσει να αποφύγει το πλοίο την κατάρρευσή του (collapse), έχοντας επαρκή απομένουσα διαμήκη αντοχή μετά από πιθανό ατύχημα λόγω σύγκρουσης του με άλλο πλοίο, ή προσάραξης ή έκρηξης. Οι κανονισμοί και οι μελέτες που αφορούν τη ροπή κατάρρευσης του πλοίου μετά από ρήγμα δημιουργήθηκαν με αφορμή ατυχήματα τα οποία συνέβησαν στο παρελθόν, όπως αυτό του tanker μονού τοιχώματος Prestige, το οποίο υπέστη πλευρικό ρήγμα. Εν συνεχεία κατακλύστηκαν δύο πλευρικές δεξαμενές, απέκτησε κλίση (heeling) και, ενώ διέθετε επαρκή ροπή αντίστασης σε άθικτη κατάσταση, οι καμπτικές ροπές λόγω κυματισμών, που αναπτύχθηκαν, οδήγησαν στην αύξηση των θλιπτικών τάσεων στο κατάστρωμα, μετά στο λυγισμό του και τελικά στο «κόψιμο» του πλοίου στα δύο και την καταβύθισή του απελευθερώνοντας χιλιάδες τόνους πετρελαίου στις ακτές της Γαλλικίας (Πορτογαλία). Συνεπώς, είναι σημαντικό η εναπομένουσα αντοχή μετά από ρήγμα να κρατηθεί σε συγκεκριμένα επίπεδα για να αποφευχθούν οι καταστροφικές συνέπειες της κατάρρευσης της μέσης τομής του πλοίου.



Σχήμα 1.2 Στη φωτογραφία φαίνεται η σταδιακή κατάρρευση της διατομής του πλοίου Prestige, που επήλθε μετά τον αρχικό λυγισμό του καταστρώματος και την επακόλουθη κατάκλυση του μεσαίου αμπαριού λόγω εισροής υδάτων [10].

1.2 Φορτίσεις πλοίου και απόκριση της κατασκευής του

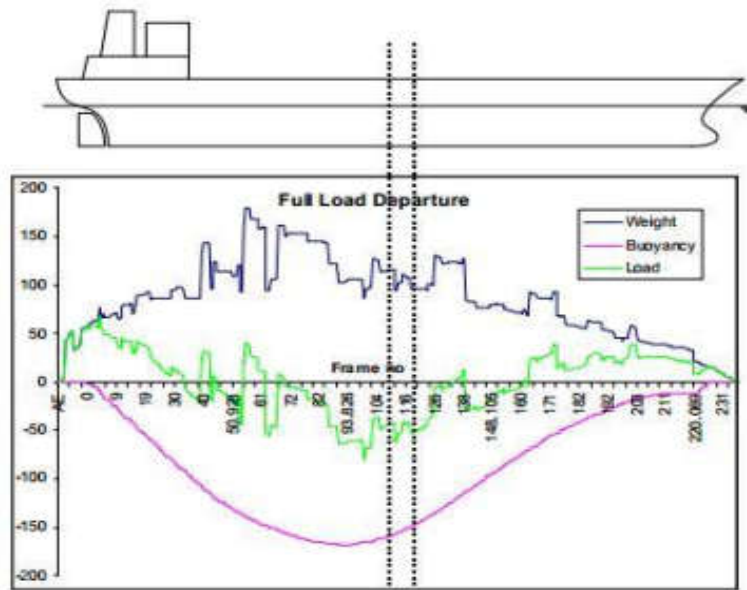
Τα φορτία στα οποία υπόκειται η κατασκευή της γάστρας του πλοίου μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:



Σχήμα 1.3 Στατικές φορτίσεις σε εγκάρσια τομή του πλοίου

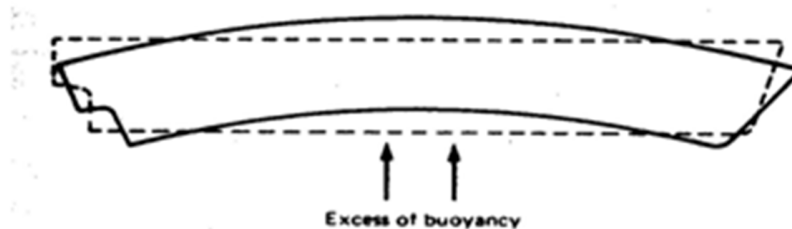
- Στατικά φορτία, που οφείλονται στη διαφορετική διαμήκη κατανομή των δυνάμεων βάρους προς τα κάτω και των δυνάμεων της άντωσης προς τα πάνω, με το πλοίο στάσιμο σε ήρεμο νερό.
- Δυναμικά φορτία χαμηλής συχνότητας, όπως αδρανειακές δυνάμεις λόγω μετακίνησης υγρών μέσα στο σκάφος ή λόγω επιταχύνσεων του ίδιου του σκάφους και δυνάμεις αναπτυσσόμενες από προσπίπτοντες κυματισμούς.
- Δυναμικά φορτία υψηλής συχνότητας, τα οποία προκαλούν κραδασμούς στο σκάφος, όπως υψίσυχοι κυματισμοί που προκαλούν διαμήκεις ταλαντώσεις της κατασκευής (springing), τοπικές ταλαντώσεις που οφείλονται στη λειτουργία μηχανολογικών συστημάτων και της έλικας και υδροδυναμικά φορτία λόγω λειτουργίας της έλικας.
- Κρουστικά φορτία που προκύπτουν από την πρόσκρουση κυμάτων πάνω στο σκάφος, όπως η σφυρόκρουση (slamming), ως αποτέλεσμα της κρούσης της προραίας περιοχής του πυθμένα με την επιφάνεια της θάλασσας, που συμβαίνει όταν η σχετική ταχύτητα μεταξύ πλώρης και θάλασσας υπερβαίνει ένα κατώτατο όριο [14].

Εξαιρώντας τις δυνάμεις αδράνειας, η φόρτιση του πλοίου οφείλεται κυρίως στο ίδιο βάρος και στη δύναμη (άντωση), που αναπτύσσεται από την πίεση του νερού (κάθετη συνιστώσα στην επιφάνεια της γάστρας). Η άνιση κατανομή αυτών των φορτίων κατά το μήκος προκαλεί τη διαμήκη κάμψη της κατασκευής.

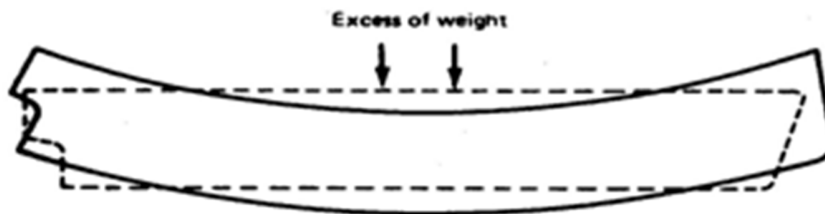


Σχήμα 1.4 Πλοίο υπό την επίδραση του βάρους και της υδροστατικής φόρτισης [17]

Η διαμήκης κάμψη του σκάφους διακρίνεται σε sagging και hogging ανάλογα με το είδος καταπόνησης των ινών. Στην 1^η περίπτωση (sagging) οι ίνες του καταστρώματος θλίβονται και ο πυθμένας εφελκύεται (Σχήμα 1.6), ενώ στη 2^η (hogging) οι ίνες του καταστρώματος εφελκύνονται και ο πυθμένας θλίβεται (Σχήμα 1.5). Υποθέτοντας ότι το σκάφος ενεργεί ως μία κοίλη λεπτότοιχη δοκός, η απόκρισή της μπορεί να προσδιοριστεί με τον υπολογισμό της διαμήκου ροπής κάμψης, η οποία εξετάζεται χωριστά για ήρεμο νερό (still water bending moment) και σε κυματισμό (wave bending moment).



Σχήμα 1.5 Πλοίο σε κατάσταση hogging (κύρτωση). Στο μέσον του πλοίου υπάρχει περίσσεια άντωσης.



Σχήμα 1.6 Πλοίο σε κατάσταση sagging (κοίλωση). Στο μέσον του πλοίου υπάρχει περίσσεια βάρους.

Για τον υπολογισμό των ορθών τάσεων σ , που προκύπτουν λόγω της διαμήκου κάμψης, χρησιμοποιείται η θεωρία απλής κάμψης δοκού Euler-Bernoulli, που αναλύεται στο Κεφάλαιο 2. Υποθέτοντας παράλληλα ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικά ελαστικά προκύπτει ο παρακάτω τύπος υπολογισμού των ορθών τάσεων:

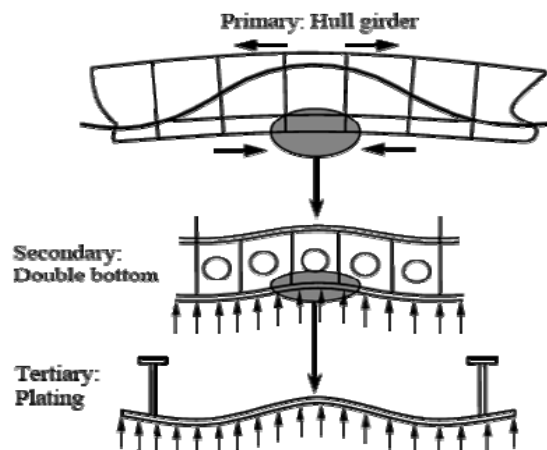
$$\sigma = \frac{M}{SM} = \frac{M_{sw} + M_{wv}}{SM}$$

όπου M_{sw} , M_{wv} η καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό και σε κυματισμό αντίστοιχα και SM (Section Modulus) η ροπή αντίστασης της διατομής στο εκάστοτε σημείο υπολογισμού της ορθής τάσης επί της διατομής, συνήθως κατάστρωμα ή πυθμένας.

1.3 Εντατικές καταστάσεις σε ναυπηγικές κατασκευές

Γενικά, τα διάφορα φορτία, που εξασκούνται στο πλοίο, μπορεί να έχουν, εκτός από συνολική επίδραση στη δομή της κατασκευής, και τοπική επίδραση. Έτσι, το μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του αυτές τις επιδράσεις είναι η ιεράρχηση των τάσεων σε πρωτεύουσες (σ_1), δευτερεύουσες (σ_2) και τριτεύουσες (σ_3), η οποία ακολουθεί την αντίστοιχη ιεράρχηση των στοιχείων της μεταλλικής κατασκευής.

- **Πρωτεύουσες τάσεις (σ_1).** Οι πρωτεύουσες τάσεις οφείλονται στη διαμήκη κάμψη του πλοίου και συνεπώς παραμένουν σταθερές σε ίνες παράλληλες με τον ουδέτερο άξονα της διατομής. Οι πρωτεύουσες τάσεις είναι συνεπώς ομοιόμορφες για κάθε διατομή, που δρουν, και γι' αυτό καλούνται επιφανειακές τάσεις (Σχήμα 1.7).
- **Δευτερεύουσες τάσεις (σ_2).** Οι δευτερεύουσες τάσεις προκύπτουν από τη θλιπτική φόρτιση του ενισχυμένου ελάσματος σε συνδυασμό με κάθετη φόρτιση (μοντέλο δοκού - κολόνας). Η σ_2 , σε αντίθεση με τη σ_1 , μεταβάλλεται κατά το πάχος του ελάσματος. Για το λόγο αυτό οι δευτερεύουσες τάσεις ονομάζονται γραμμικές τάσεις. Ωστόσο, η κατανομή των δευτερουσών τάσεων κατά το πλάτος του ελάσματος δεν είναι σταθερή λόγω του φαινομένου της υστέρησης διάτμησης (shear lag).
- **Τριτεύουσες τάσεις (σ_3).** Σε απλά ελάσματα, που στηρίζονται σε δοκούς κατά μήκος των πλευρών τους, οι τάσεις μεταβάλλονται παντού. Η κατανομή των τάσεων σ_3 εξαρτάται από τη γεωμετρία και τις οριακές συνθήκες και μεγιστοποιείται συνήθως σε ένα σημείο. Για το λόγο αυτό οι τριτεύουσες τάσεις ονομάζονται και σημειακές [12].



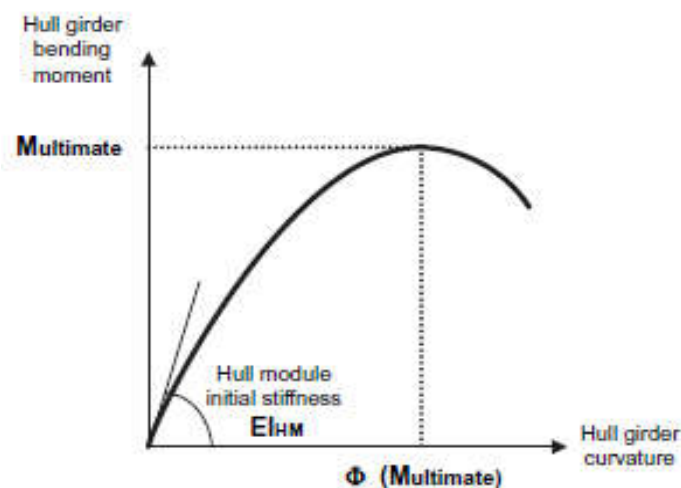
Σχήμα 1.7 Ιεράρχηση τάσεων στα στοιχεία της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

1.4 Η έννοια της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής του πλοίου

Γενικά, η μέγιστη διαμήκουσ αντοχή εκφράζεται με το μέγεθος της μέγιστης διαμήκουσ καμπτικής ροπής (M_U), που μπορεί να αντέξει η μεταλλική κατασκευή δίχως να καταρρεύσει. Γι' αυτό, η M_U μπορεί να λέγεται καμπτική ροπή κατάρρευσης.

Ενώ, η εναπομένουσα αντοχή (residual strength) του πλοίου δεν είναι παρά η μέγιστη διαμήκουσ αντοχή του πλοίου σε βεβλαμμένη κατάσταση, δηλαδή έχοντας αφαιρέσει τα κατασκευαστικά στοιχεία στην περιοχή της βλάβης. Η ροπή M_U προκύπτει ως η μέγιστη τιμή στο διάγραμμα καμπτικής ροπής (M) - καμπυλότητας του πλοίου (χ ή Φ ή κ στη διεθνή βιβλιογραφία) για κατάσταση hogging (διάνυσμα ροπής 0° κατά τον άξονα) και ελάχιστη τιμή για κατάσταση sagging (διάνυσμα ροπής 180° με φορά αντίθετη του οριζόντιου άξονα).

Στο παρακάτω Σχήμα 1.8 παρουσιάζεται ένα ποιοτικό διάγραμμα $M-\Phi$ για μια υποθετική κατάσταση hogging. Η κλίση της ευθείας στη γραμμικά ελαστική περιοχή είναι ίση με $E \cdot I_{HM}$, όπου E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και I_{HM} η ροπή αδράνειας της διατομής. Το μέγεθος $E \cdot I_{HM}$ δείχνει το μέτρο ακαμψίας της κατασκευής και υπολογίζεται σύμφωνα με την απλή θεωρία δοκών από τη σχέση $M = E \cdot I_{HM} \cdot \Phi$.



Σχήμα 1.8 Ποιοτικό διάγραμμα καμπτικής ροπής-καμπυλότητας: $M-\Phi$. Η κλίση του διαγράμματος στο 0 είναι $E \cdot I_{HM}$ σε συμφωνία με την απλή θεωρία δοκών, στην οποία $M = E \cdot I_{HM} \cdot \Phi$. Για $M = M_{ultimate}$ η κλίση του διαγράμματος είναι 0 λόγω μεγιστοποίησης της καμπτικής ροπής, που αντέχει η διατομή.

1.5 Σκοπός διπλωματικής εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εύρεση μιας γρήγορα εφαρμόσιμης μεθόδου για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής ενός πλοίου σε άθικτη και σε βεβλαμμένη κατάσταση. Αυτή η ανάγκη προκύπτει ιδιαίτερα στη φάση της προκαταρκτικής σχεδίασης του πλοίου, όπου ο ελαστοπλαστικός σχεδιασμός των στοιχείων της κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε μια βέλτιστη, αποδοτική και ασφαλή μεταλλική κατασκευή με απλή μέθοδο μικρού υπολογιστικού κόστους.

Οι παραπάνω σκοποί μπορούν να γίνουν εφικτοί μέσω της επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου του Smith, την οποία εφαρμόζει ο Διεθνής Οργανισμός Νηογνομόνων (IACS) στους επικαιροποιημένους κανονισμούς CSR-H (Common Structural Rules – Harmonised). Στη μεν άθικτη κατάσταση η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική, καθώς προβλέπει τη σταδιακή μετακίνηση του Ουδέτερου Άξονα της εγκάρσιας διατομής του πλοίου λόγω εισόδου των τάσεων στα στοιχεία στην ελαστοπλαστική περιοχή με εμφάνιση των φαινομένων διαρροής και λυγισμού. Όμως, για τη βεβλαμμένη κατάσταση (ρήγμα από σύγκρουση ή προσάραξη), όπου δεν υπάρχει γεωμετρική συμμετρία της διατομής ως προς τον κατακόρυφο άξονα, στη συγκεκριμένη εργασία τροποποιείται η μέθοδος μέσω κώδικα στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab έτσι, ώστε να συμπεριληφθεί η περιστροφή του Ουδέτερου Άξονα που συμβαίνει. Επομένως ελέγχεται το κατά πόσον ακριβής είναι η μέθοδος του Smith για την πρόβλεψη της εναπομένουσας αντοχής σε περίπτωση βλάβης. Η εφαρμογή της επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου του Smith πραγματοποιείται εδώ για Bulk Carrier διπλού και μονού τοιχώματος, ενώ γίνεται και η μεταξύ τους σύγκριση.

Τα αποτελέσματα των δύο Bulk Carriers, σχετικά με τη μέγιστη αντοχή τους σε άθικτη και βεβλαμμένη κατάσταση, συγκρίνονται μεταξύ τους και αξιολογούνται, ώστε στο τέλος της ανάγνωσης της διπλωματικής ο αναγνώστης να αποκτήσει μια εικόνα της βέλτιστης σχεδίασης ενός Bulk Carrier, στο οποίο η ορθολογικότερη χρήση υλικών και η σωστή διάταξη ελασμάτων και ενισχυτικών στη διατομή της κατασκευής μπορεί να δώσει οικονομικό όφελος και μεγιστοποίηση της ασφάλειας του πλοίου σε ακραίες φορτίσεις, που υπερβαίνουν την ελαστική περιοχή.

1.6 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται λόγος για τις και για τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών. Έμφαση δίνεται στην απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο του Smith, η οποία κρίνεται ως η πιο γρήγορη, ακριβής, αποτελεσματική και ταυτόχρονα οικονομικότερη από πλευράς κόστους.

Το Κεφάλαιο 3 πραγματεύεται τη δημιουργία «βιβλιοθήκης» μειωτικών καμπυλών φόρτισης¹ μέσης τάσης – μέσης παραμόρφωσης για κάθε δομικό στοιχείο της διατομής του πλοίου. Εξετάζονται οι δύο πιθανοί τρόποι αστοχίας του κάθε δομικού στοιχείου: ελαστοπλαστική κατάρρευση λόγω διαρροής υλικού και ελαστοπλαστικός λυγισμός.

Στο Κεφάλαιο 4 ελέγχεται η τοπική αντοχή ελασμάτων και ενισχυτικών των δύο υπό εξέταση Bulk Carriers ανάλογα με τις φορτίσεις τους σε υπηρεσιακές συνθήκες, καθώς και η ροπή αντίστασης των διατομών τους. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στα χρησιμοποιούμενα υλικά, στα επιτρεπόμενα πάχη ελασμάτων και στις διαστάσεις των ενισχυτικών της Μέσης Τομής των δύο πλοίων.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται η εφαρμογή της επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου κατά CSR-H, για να υπολογιστεί η μέγιστη αντοχή του άθικτου Bulk Carrier Μονού και Διπλού Τοιχώματος. Ελέγχεται η επάρκεια της μέγιστης αντοχής όσον αφορά τις ακραίες καμπτικές καταπονήσεις που ορίζουν οι κανονισμοί CSR-H. Επιπλέον, μέσω των εξαγόμενων δεικτών αντοχής για τα δύο Bulk Carriers γίνεται η μεταξύ τους σύγκριση. Δίνονται ενδεικτικοί πίνακες και σχετικά διαγράμματα.

Στο Κεφάλαιο 6 εφαρμόζεται η τροποποιημένη η επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος, για να υπολογιστεί η εναπομένουσα αντοχή σε Bulk Carriers, που έχουν πάθει βλάβη και διαθέτουν μονό και διπλό τοίχωμα. Χρησιμοποιούνται τρία σενάρια βλάβης: η συμμετρική και η ασύμμετρη προσάραξη καθώς και η σύγκρουση. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα καθώς και οι συντελεστές RIF (Residual Strength Index Factor).

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 εκφράζονται τα γενικά συμπεράσματα της Διπλωματικής Εργασίας και κατόπιν παρατίθενται τα βοηθητικά Παραρτήματα για την κατανόηση του κειμένου. Η Βιβλιογραφία, διεθνής και ελληνική, αποτελεί την κατακλείδα αυτής της μελέτης.

¹ Ο όρος μειωτική καμπύλη φόρτισης αποτελεί κατά λέξη μετάφραση του αγγλικού όρου load end shortening curve, ο οποίος συναντάται στη σελίδα 255 της ελληνικής έκδοσης της βιβλιογραφικής πηγής [8], γλωσσική επιμέλεια: Ελένη Γιαννακοπούλου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

2.1 Γενικά

Για την εκτίμηση της ροπής κατάρρευσης (ultimate strength) του πλοίου υπό διαφορετικές συνθήκες, είτε σε άθικτη, είτε σε βεβλαμμένη κατάσταση, έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι που λαμβάνουν υπόψη τους τις ποικίλες εξωτερικές φορτίσεις σε ολικό και τοπικό επίπεδο, τη γεωμετρία της διατομής, τις παραμένουσες τάσεις μετά τη συγκόλληση, τις κατασκευαστικές ατέλειες που προκύπτουν π.χ.: παραμένουσες παραμορφώσεις λόγω κακής εφαρμογής συγκολλήσεων και τοπικά βέλη κάμψης λόγω αντικανονικής φόρτωσης του αμπαριού, καθώς και τη μείωση της ροπής αντίστασης της διατομής λόγω φαινομένων διάβρωσης και έκθεσης στο θαλάσσιο περιβάλλον. Από όλες τις μεθόδους οι πιο αποδοτικές και χαμηλού υπολογιστικού κόστους είναι οι μέθοδοι προοδευτικής κατάρρευσης, οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τους τις πλαστικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται κατά την κάμψη. Σε αυτές παρατηρείται αστοχία λόγω υπέρβασης της τάσης διαρροής (yielding) του υλικού: $\sigma > \sigma_Y$ ή της κρίσιμης τάσης λυγισμού (buckling): $\sigma_{Comp} > \sigma_{crit,b}$ στα θλιβόμενα μέλη (όπου σ η ορθή εφελκυστική ή θλιπτική τάση, σ_Y η τάση διαρροής του υλικού, σ_{Comp} η θλιπτική τάση και $\sigma_{crit,b}$ η κρίσιμη τάση λυγισμού). Σε αυτές τις μεθόδους λαμβάνεται υπόψη η σταδιακή μετάβαση του κάθε στοιχείου προς την αστοχία του (μη γραμμικά μοντέλα), η αναδιανομή των τάσεων (load shedding) στη διατομή του πλοίου μετά από την αστοχία ορισμένων κατασκευαστικών στοιχείων, καθώς και η εναπομένουσα αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων σε μεταγενέστερο στάδιο της αστοχίας, π.χ.: προβλέπουν τη μεταλυγισμική συμπεριφορά (post-buckling behaviour) των ενισχυμένων ελασμάτων.

Γενικά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ροπής κατάρρευσης σε διαμήκη κάμψη μπορούν να διαιρεθούν σε τέσσερις κατηγορίες: α) Πειραματικές μέθοδοι, στις οποίες ένα μοντέλο κοίλης λεπτότοιχης κιβωτιοειδούς δοκού (box girder model) υποβάλλεται σε διαμήκη κάμψη εφαρμόζοντας τις κατάλληλες οριακές συνθήκες στα άκρα της και μετρώντας, κατά την κάμψη, μέσω οργάνων (π.χ. strain gauges) τις αξονικές παραμορφώσεις (axial strains) και τα τοπικά βέλη κάμψης (lateral deflections) σε επιλεγμένα σημεία [3], β) Μέθοδοι με απευθείας εξαγωγή αποτελεσμάτων, όπως: επεξεργασία δεδομένων από ατυχήματα πλοίων, π.χ. από τα δεξαμενόπλοια *Prestige* και *Energy Concentration*, εμπειρικές φόρμουλες, π.χ. του Guedes Soares και αναλυτικές μέθοδοι (Analytic method: AM) [3], γ) Μέθοδοι προοδευτικής κατάρρευσης, που λαμβάνουν υπόψη τη μη γραμμικότητα υλικού και γεωμετρίας, όπως η μέθοδος «εξιδανικευμένων» δομικών μονάδων (ISUM) και η απλοποιημένη μέθοδος (Simplified Method: SM) του Smith που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας [3] και δ) Αριθμητικές μέθοδοι, όπως η μέθοδος των μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων (NLFEM) [3].

Οι αναλυτικές λύσεις, οι οποίες προκύπτουν συνήθως από την απευθείας επίλυση

μη γραμμικών συστημάτων, είναι καταλληλότερες για τη δημιουργία κανονισμών, γιατί εξάγουν άμεσα τύπους -συνήθως αξιόπιστους- για τους σχεδιαστές. Βέβαια δεν είναι πάντα εύκολη και δυνατή η εξαγωγή αναλυτικών λύσεων, όταν η προς μελέτη κατασκευή, μεταξύ άλλων, είναι αρκετά σύνθετη, με πολύπλοκη γεωμετρία και οριακές συνθήκες, με πολλές διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης και αποκρίσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα συχνά, μετά από απαραίτητες απλουστεύσεις, να επιλύεται ένα πρόβλημα που απέχει αρκετά από το αρχικό και κατά συνέπεια να εξάγονται αποτελέσματα που δεν περιγράφουν πλήρως και ολοκληρωμένα το πρόβλημα.

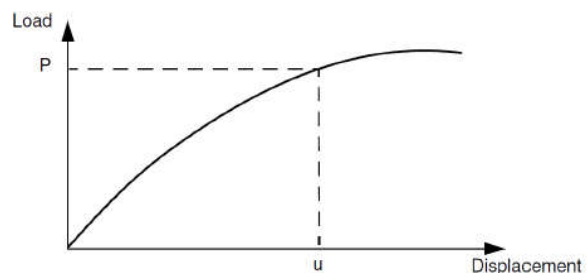
Από την άλλη μεριά, οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναγνωρισθεί σήμερα, ως πολύ σημαντικό εργαλείο στη μη γραμμική ανάλυση. Όντως, τα μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία είναι χρήσιμα στον προσδιορισμό των μη γραμμικών αποτελεσμάτων μιας κατασκευής. Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι επίσης χρήσιμες στην ανάλυση δυναμικών προβλημάτων, όπως η σφυρόκρουση, εκρήξεις από φωτιά ή αέρια, προσαράξεις ή συγκρούσεις κ.α. Παρόλα αυτά, οι αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ, εμπειρία χρήστη και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται σημαντικά από την επάρκεια και την καταλληλότητα των εργαλείων και των μεθόδων μοντελοποίησης που υιοθετούνται. Παρά την εξέλιξη στον τομέα των Η/Υ καθώς και την ανάπτυξη πολλών αξιόλογων εμπορικών πακέτων εφαρμογών πεπερασμένων στοιχείων, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι αρκετά χρονοβόρες, όσον αφορά την ολοκλήρωση μιας ανάλυσης πολύπλοκων κατασκευών με πολλούς βαθμούς ελευθερίας.

Οι πειραματικές μέθοδοι, με τη σειρά τους, απαιτούν εξειδικευμένες εγκαταστάσεις, καθιστώντας τις έτσι εξαιρετικά ακριβές. Επιπλέον οι παραδοχές που υποχρεωτικά γίνονται κατά τη μοντελοποίηση του πειράματος μπορεί να οδηγήσουν σε ανακριβή συμπεράσματα. Τα πειράματα αυτά διακρίνονται σε α) πειράματα επαλήθευσης μιας μεθόδου, συνήθως NLFEM και β) πειράματα εύρεσης της μέγιστης αντοχής κοίλης κιβωτιοειδούς δοκού, που προσομοιώνει τη διατομή του πλοίου σε μικρή κλίμακα.

2.2 Περιγραφή υπολογιστικών μεθόδων

2.2.1 Μέθοδος NLFEM (Non Linear Finite Element Method)

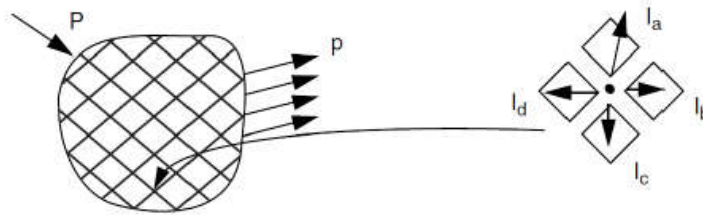
Σε αυτή τη μέθοδο η μεταλλική κατασκευή διακριτοποιείται σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων. Το καθένα από αυτά τα στοιχεία ανήκει σε μια «οικογένεια» στοιχείων, όπως για παράδειγμα τα επίπεδα τετραγωνικά στοιχεία. Αποτελούνται από μικρότερα στοιχεία (elements) και κόμβους (nodes). Το σύνολο των στοιχείων ορίζει το πλέγμα. Για κάθε στοιχείο επιλύεται μια εξίσωση $F=K*u$, που συνδέει τις εξωτερικά επιβαλλόμενες φορτίσεις με τις μετατοπίσεις στους κόμβους. Από τις μετατοπίσεις



Σχήμα 2.1 Μη γραμμική καμπύλη φορτίου-μετατόπισης [16].

μπορούν να βρεθούν οι παραμορφώσεις και από τις παραμορφώσεις υπολογίζονται οι τάσεις. Η σύνδεση φορτίσεων-μετατοπίσεων γίνεται μέσω του μητρώου ακαμψίας K . Σε ένα γραμμικό πρόβλημα η απόκριση της κατασκευής σε κάθε περίπτωση φόρτισης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα της φόρτισης με το ανάστροφο μητρώο ακαμψίας, που διατηρείται σταθερό και ανεξάρτητο του επιβαλλόμενου φορτίου.

Ωστόσο σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα, η κλίση της καμπύλης εφαρμοζόμενης δύναμης-μετατόπισης και γενικότερα αιτίου – απόκρισης της κατασκευής μεταβάλλεται καθώς η κατασκευή παραμορφώνεται. Κατά συνέπεια, το μητρώο ακαμψίας θα πρέπει να δημιουργηθεί και να αναστραφεί πολλές φορές κατά τη διάρκεια της ανάλυσης κάνοντας την πιο «ακριβή υπολογιστικά» σε σχέση με τη γραμμική ανάλυση. Σκοπός της μεθόδου, λοιπόν είναι να καθοριστεί η απόκριση της κατασκευής καθώς μεταβάλλεται το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο. Αν θεωρήσουμε ως P τα εξωτερικά φορτία και I τα εσωτερικά, τότε σε κάθε κόμβο θα πρέπει να ισχύει η ισότητα $P-I=0$, ώστε η κατασκευή να βρίσκεται σε στατική ισορροπία [16]. Το εσωτερικό φορτίο σε κάθε κόμβο προκύπτει από τις τάσεις που ασκούνται στα στοιχεία, που περικλείουν τον συγκεκριμένο κόμβο.

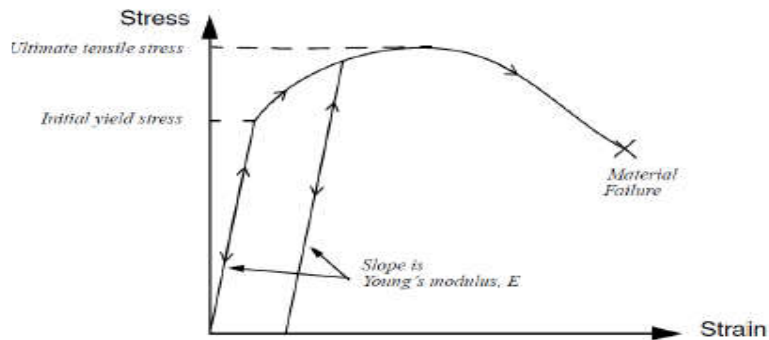


Σχήμα 2.2 Εξωτερικό & εσωτερικό φορτίο σε μία προσομοίωση [16]

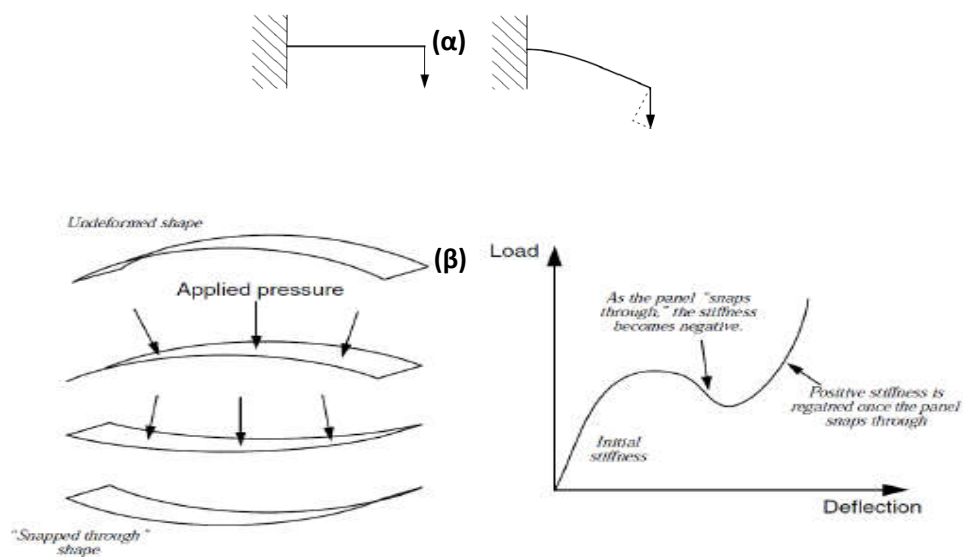
Λόγω του ότι στη μη γραμμική ανάλυση η λύση δεν μπορεί να επιτευχθεί αντιστρέφοντας μία φορά το μητρώο ακαμψίας, η λύση βρίσκεται επιβάλλοντας τα επιθυμητά φορτία σταδιακά και αυξητικά και επιλύοντας τις εξισώσεις στατικής ισορροπίας για κάθε επιβαλλόμενο φορτίο. Έτσι, τα λογισμικά πακέτα πεπερασμένων στοιχείων, όπως το Abaqus, επιβάλλουν το φορτίο «βηματικά» και βρίσκουν την προσεγγιστική κατάσταση ισορροπίας στο τέλος κάθε βήματος. Πολλές φορές είναι απαραίτητες περισσότερες από μία επαναλήψεις, ώστε να βρεθεί μία ικανοποιητική λύση για κάποια επαύξηση του φορτίου. Το άθροισμα όλων αυτών των επαυξητικών αποκρίσεων είναι η προσεγγιστική λύση της μη γραμμικής λύσης, γι' αυτό μπορούμε να πούμε ότι τα λογισμικά FE χρησιμοποιούν συνδυασμό προοδευτικών-επαναληπτικών μεθόδων (incremental-iterative methods), όπως η μέθοδος Newton-Rapshon και ο αλγόριθμος Riks, για την εύρεση της μη γραμμικής λύσης [16].

Η μέθοδος των μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων πλεονεκτεί σε σχέση με τις άλλες από άποψη ακριβείας αποτελεσμάτων, καθώς μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα τις μη γραμμικότητες του προβλήματος λόγω υλικού, γεωμετρίας και συνοριακών συνθηκών, που δεν μπορούν να προβλεφθούν από την απλή θεωρία δοκών Euler-

Bernoulli. Γεωμετρικές μη γραμμικότητες εννοούνται οι μεγάλες μετατοπίσεις, όπου το φορτίο εξισορροπείται από το συνδυασμό καμπτικών και μεμβρανικών τάσεων, ή περιστροφές του δοκαριού, αρχικές τάσεις και αλλαγή κλίσης επιφάνειας μετά από φόρτιση. Επίσης, με τα μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία είναι εφικτό να προβλεφθούν συνδυαστικοί τρόποι αστοχίας των κατασκευαστικών στοιχείων, π.χ. λυγισμός του ενισχυτικού αλλά ταυτόχρονα λυγισμός του ελάσματος, οπότε το σύστημα έλασμα-ενισχυτικό αστοχεί συνδυαστικά υπό θλιπτικό φορτίο. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί δοκιμές διαφορετικών παραμέτρων, όπως: πυκνότητα πλέγματος και τύπου στοιχείων, ώστε να υπάρχει σύγκλιση των διαφορετικών λύσεων και να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερη η τελική λύση. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην επιλογή των οριακών συνθηκών, ώστε να αντιπροσωπεύει με ακρίβεια το φυσικό πρόβλημα. Τέλος, απαιτείται μεγάλη υπολογιστική μνήμη και ισχύς για τη διαχείριση των πράξεων με τα μητρώα και η μοντελοποίηση των αρχικών παραμορφώσεων και παραμενουσών τάσεων είναι περίπλοκη.



Σχήμα 2.3 Μη γραμμικότητα υλικού. Το Διάγραμμα δείχνει πώς μεταβάλλεται η παραμόρφωση συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης. Φαίνονται η τάση διαρροής και η τάση κατάρρευσης του υλικού [16].

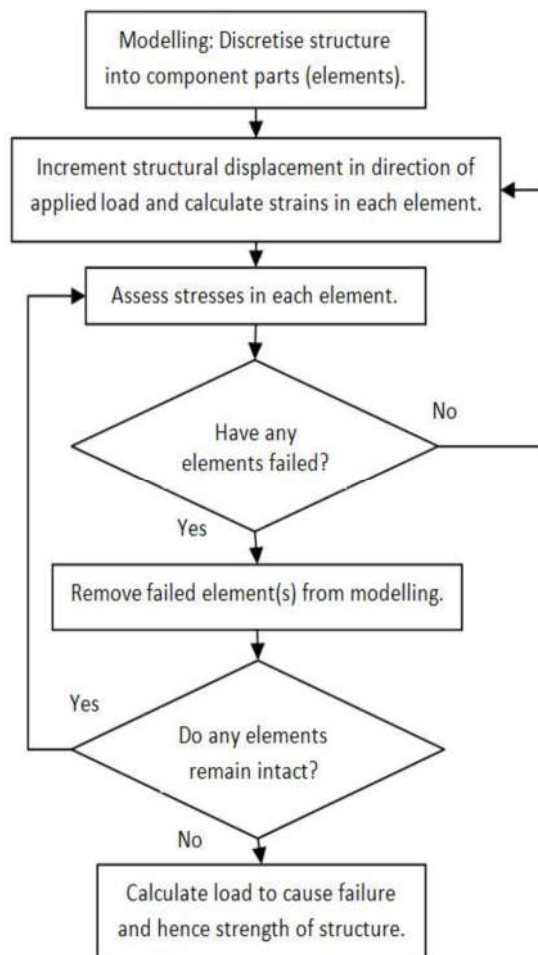


Σχήμα 2.4 (α,β) Μη γραμμικότητα γεωμετρίας. Στο (α) Σχήμα η μεγάλη εκτροπή που παρατηρείται στη φόρτιση δοκών οδηγεί στην ανάπτυξη αξονικής συνιστώσας φορτίου. Στο (β) Σχήμα η επιβολή φορτίου αλλάζει την καμπυλότητα της δοκού [16].

2.2.2 Μέθοδος ISUM (Idealised Structural Unit Method)

Η μέθοδος ISUM εισήχθη από τον Ueda et al. το 1984, και πλέον αποτελεί μια καλά τεκμηριωμένη μέθοδο για την ανάλυση πολύπλοκων και μεγάλης κλίμακας κατασκευαστικών διατάξεων, όπως είναι αυτή του πλοίου. Σε αντίθεση με τη μέθοδο NLFEM, στην οποία η κατασκευαστική διάταξη υποδιαιρείται σε μικρά στοιχεία (κόμβους) με πολλούς βαθμούς ελευθερίας και το πλέγμα είναι πολύ πυκνό, η μέθοδος ISUM μειώνει τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των αγνώστων στο μητρώο ακαμψίας ($\{F\} = [k(\Delta)] * \{\Delta\}$ όπου $\{F\}$: το μητρώο των επιβαλλόμενων φορτίσεων, δυνάμεων και ροπών, $[k(\Delta)]$: το μητρώο ακαμψίας που είναι μια συνάρτηση εξαρτώμενη των μετατοπίσεων, $\{\Delta\}$: το μητρώο μετατοπίσεων) [11]. Αυτό επιτυγχάνεται με τη θεώρηση μεγάλων δομικών μονάδων αντίστοιχου μεγέθους των κατασκευαστικών στοιχείων, π.χ. ορθογωνίων ελασμάτων ή ενισχυτικών ή ενισχυμένων ελασμάτων εντός αραιού πλέγματος (coarse mesh idealization), των οποίων η απόκριση σε φορτίσεις είναι γνωστή.

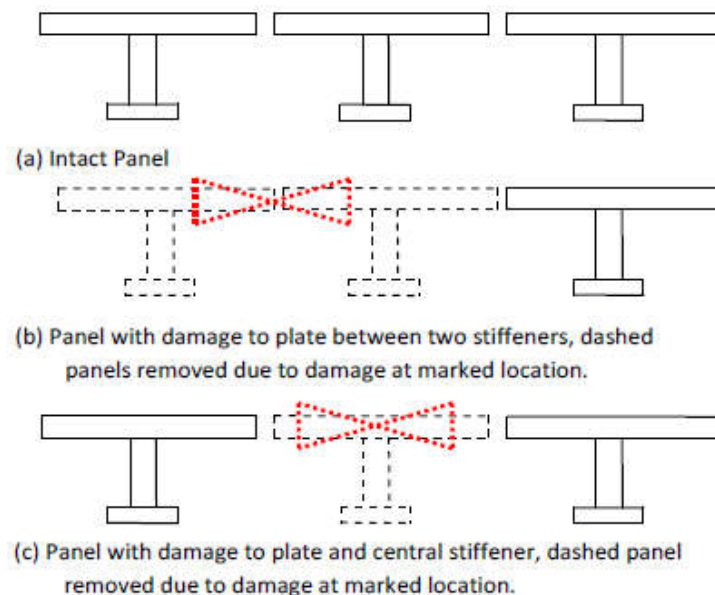
Η πληροφορία για την απόκριση των δομικών μονάδων παρέχεται από καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (σ - ϵ) τόσο για εφελκυστικά, όσο και για θλιπτικά φορτία. Αυτές οι καμπύλες προκύπτουν, είτε από εφαρμογή μεθόδου NLFEM, είτε από ημι-αναλυτικές σχέσεις. Εάν αντί των καμπυλών αυτών χρησιμοποιηθούν συνολικά τα FEA, τότε ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στον τύπο και στο μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος. Η μέθοδος ISUM εφαρμόζεται επιβάλλοντας σταδιακά μεγαλύτερη καμπυλότητα στο πλοίο. Αρχικά η μέθοδος εκτιμά την παραμόρφωση κάθε στοιχείου και από την καμπύλη σ - ϵ προκύπτει η ορθή τάση στο στοιχείο. Αν κάποιο στοιχείο έχει φτάσει την τάση κατάρρευσής του, τότε βγαίνει από την ανάλυση [11]. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η διατομή του πλοίου να μην μπορεί να λάβει μεγαλύτερη φόρτιση, δηλαδή $dM/dx=0$. Σε αυτό το βήμα προκύπτει και η μέγιστη αντοχή του πλοίου σε διαμήκη κάμψη. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος πρέπει να βρεθεί το στοιχειώδες μητρώο



Σχήμα 2.5 Μέθοδος ISUM [10]

ακαμψίας σε κάθε βήμα μέσω κάποιας αριθμητικής μεθόδου, π.χ. Newton-Raphson, και να προστεθεί η συνεισφορά του στο ήδη υπολογισμένο.

Δίνει καλά αποτελέσματα για την αρχική φάση της μελέτης της κατασκευής και μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό κόστος, αφού το πλέγμα είναι αραιό, οπότε ο υπολογισμός καταλαμβάνει μικρή υπολογιστική μνήμη (CPU) και απαιτεί μικρό χρόνο. Επίσης, δίνει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη αρχικές παραμορφώσεις και παραμένουσες τάσεις από συγκολλήσεις. Μειονέκτημά της είναι ότι η καμπύλη σ - ϵ κάθε στοιχείου προκύπτει θεωρώντας ότι το στοιχείο βρίσκεται σε άθικτη κατάσταση. Ως εκ τούτου, κατά τον υπολογισμό της εναπομένουσας αντοχής (residual strength) του πλοίου, όπου θεωρείται βλάβη στη διατομή, κάθε στοιχείο, έστω και μερικώς κατεστραμμένο λόγω της βλάβης, αφαιρείται εντελώς από την επαυξητική (incremental) διαδικασία [11]. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται, για παράδειγμα, ένα ενισχυμένο πανελ ελασμάτων (Σχήμα 2.6a). Σύμφωνα με τη μέθοδο ISUM το πανελ αυτό αντιμετωπίζεται σαν 3 διαφορετικά ενισχυμένα ελάσματα. Αν υπάρξει εξωτερική ζημιά στο έλασμα μεταξύ των δύο ενισχυτικών, θα πρέπει να αφαιρεθούν και τα δύο ενισχυμένα ελάσματα (Σχήμα 2.6b). Αν υπάρξει μόνο στο ένα, τότε πρέπει να αφαιρεθεί το ένα (Σχήμα 2.6c). Φυσικά, όπως αντιλαμβάνεται εύκολα κάποιος, η μέθοδος υπερτερεί ριζικά μιας αναλυτικής μεθόδου, αλλά υστερεί σε σχέση με τα NLFEM, όσον αφορά την ακρίβεια υπολογισμών.



Σχήμα 2.6 Αφαίρεση στοιχείου από την επαυξητική ανάλυση της μεθόδου ISUM λόγω υπέρβασης βλάβης [10].

2.2.3 Απλοποιημένη Επαυξητική-Επαναληπτική Μέθοδος (Simplified Incremental-Iterative Method)

Η απλοποιημένη μέθοδος (SM) εισήχθη από τον Smith το 1977 [3]. Στη μέθοδο αυτή γίνεται η θεώρηση του πλοίου ως καμπτόμενου δοκαριού (beam theory). Η μέθοδος του Smith ενσωματώθηκε στους κανονισμούς CSR-H, με βάση τους οποίους τα δομικά στοιχεία της διατομής του πλοίου διαχωρίζονται σε 3 κατηγορίες: α) διαμήκως ενισχυμένα ελάσματα (ενισχυτικά στοιχεία) τα οποία αποτελούνται από το διάμηκες ενισχυτικό μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα, β) ανθεκτικές γωνίες, όταν πρόκειται για δύο ελάσματα συγκολλημένα υπό γωνία, τα οποία διαθέτουν μεγάλη ακαμψία και κατά συνέπεια δε λυγίζουν, αλλά αστοχούν μετά την υπέρβαση της τάσης διαρροής τους, γ) εγκάρσια ενισχυμένα ελάσματα, δηλαδή ελάσματα ενισχυμένα με εγκάρσια ενισχυτικά, π.χ. νομείς ή μπρακέτα. Η ουσία της μεθόδου επαυξητικής μεθόδου του Smith είναι η εύρεση της συνολικής αντίστασης της διατομής του πλοίου σε κάμψη από την άθροιση της συνεισφοράς κάθε δομικού στοιχείου.

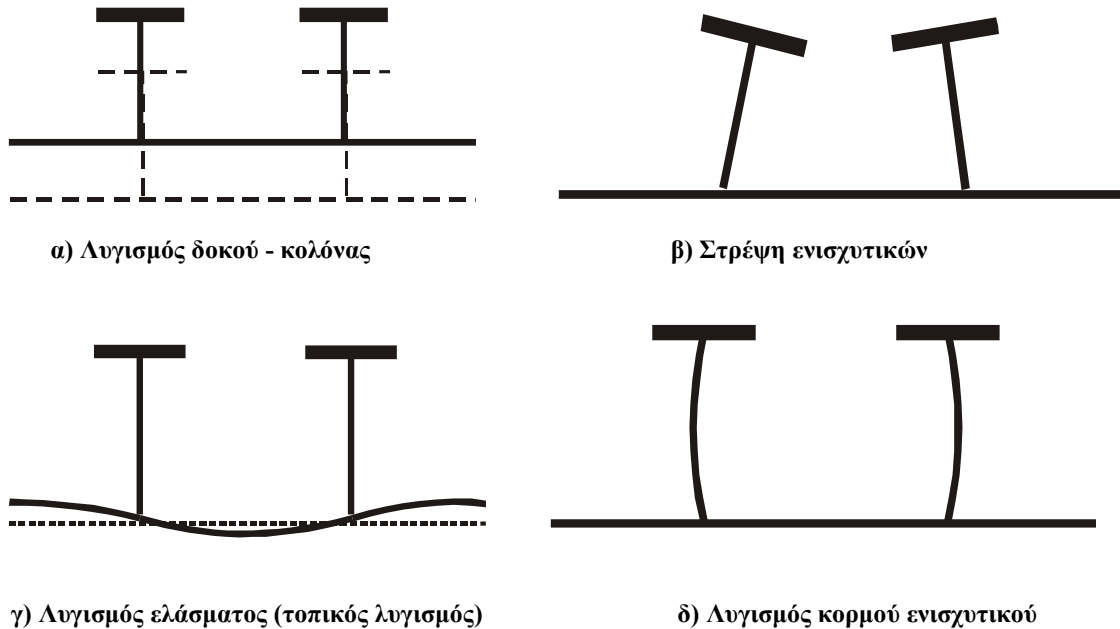
Δεν είναι δύσκολο να προβλέψει κανείς ότι καθώς αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο στο κατάστρωμα, έρχεται κάποια στιγμή που τα ελάσματα θα λυγίσουν, θα προκαλέσουν μεταβίβαση του φορτίου τους στα κοντινά ενισχυτικά. Αυτά με τη σειρά τους μπορεί να λυγίσουν, καθώς αυξάνεται επιπλέον το φορτίο, θα αποφύγουν τη συνεισφορά τους και θα ρίξουν ένα επιπλέον βάρος στις «σκληρές» περιοχές, όπως είναι οι γωνίες των καταστρωμάτων και των συνδέσμων με τις διαμήκεις φρακτές. Κάθε στοιχείο της κατασκευής, που συμμετέχει στην ενεργή διατομή, έχει μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (σ-ε). Όταν προσεγγισθεί η συμπεριφορά του στοιχείου σε λυγισμό, οι καμπύλες αυτές καλούνται μειωτικές καμπύλες φόρτισης (load shortening curves) και συνήθως σχεδιάζονται σε αδιάστατη μορφή ως μια οικογένεια καμπυλών για ένα εύρος υποτιθέμενων αρχικών ατελειών [8].

Κατόπιν, θεωρώντας το πλοίο σαν δοκάρι, λόγω του ότι είναι μεγάλου μήκους λεπτότοιχη κατασκευή με μεγάλη καμπτική ακαμψία ($E \cdot I_{HM}$), γίνονται οι παραδοχές της απλής θεωρία της κάμψης (beam theory) των Euler-Bernoulli, γνωστές και ως παραδοχές του Navier (1826), οι οποίες είναι οι εξής:

- Οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και η διατομή στρέφεται γύρω από έναν άξονα, που λέγεται ουδέτερος άξονας (Neutral Axis).
- Δεν υπάρχει παραμόρφωση του ουδέτερου επιπέδου.
- Η διατομή του δοκαριού παραμένει σταθερή κατά το μήκος.
- Οι παραμορφώσεις λόγω διάτμησης από την διαμήκη κάμψη του πλοίου αγνοούνται.
- Η διατομή του δοκαριού είναι πολύ μικρή συγκριτικά με το μήκος του, οπότε οι εγκάρσιες παραμορφώσεις αγνοούνται (φαινόμενο Poisson).

Η διαδικασία της μεθόδου περιγράφεται παρακάτω. Διακριτοποιούμε τη διατομή του πλοίου στα 3 είδη δομικών στοιχείων: ενισχυτικά στοιχεία (stiffener elements), ανθεκτικές γωνίες (hard corners) και (εγκαρσίως) ενισχυμένα ελάσματα (stiffened plate

elements). Για κάθε στοιχείο ορίζουμε τις καμπύλες φόρτισης σ - ϵ που ανταποκρίνονται στις πιθανές μορφές αστοχίας του στοιχείου, οι οποίες είναι οι εξής: ελαστοπλαστική κατάρρευση, λυγισμός ως δοκός-κολόνα, στρεπτικός λυγισμός (στρέψη ενισχυτικών), λυγισμός κορμού ενισχυτικού και λυγισμός ελάσματος.



Σχήμα 2.7 (α-δ) Μορφές λυγισμού σε ενισχυμένα ελάσματα υπό θλίψη

Αρχικά υποθέτουμε ότι η διατομή του κατασκευαστικού σώματος του πλοίου κάμπτεται με τους επίπεδους νομείς να παραμένουν επίπεδοι. Το κατασκευαστικό σώμα παίρνει μία καμπυλότητα χ [m^{-1}] = $1/R$ (όπου R η ακτίνα καμπυλότητας), καθώς η διατομή στρέφεται κατά γωνία θ (βλ. Σχήμα 2.10). Σε οποιαδήποτε κατακόρυφη απόσταση h από τον ουδέτερο άξονα της κάμψης ένα στοιχείο (element) με επιφάνεια A_{elem} παραμορφώνεται κατά μία ποσότητα:

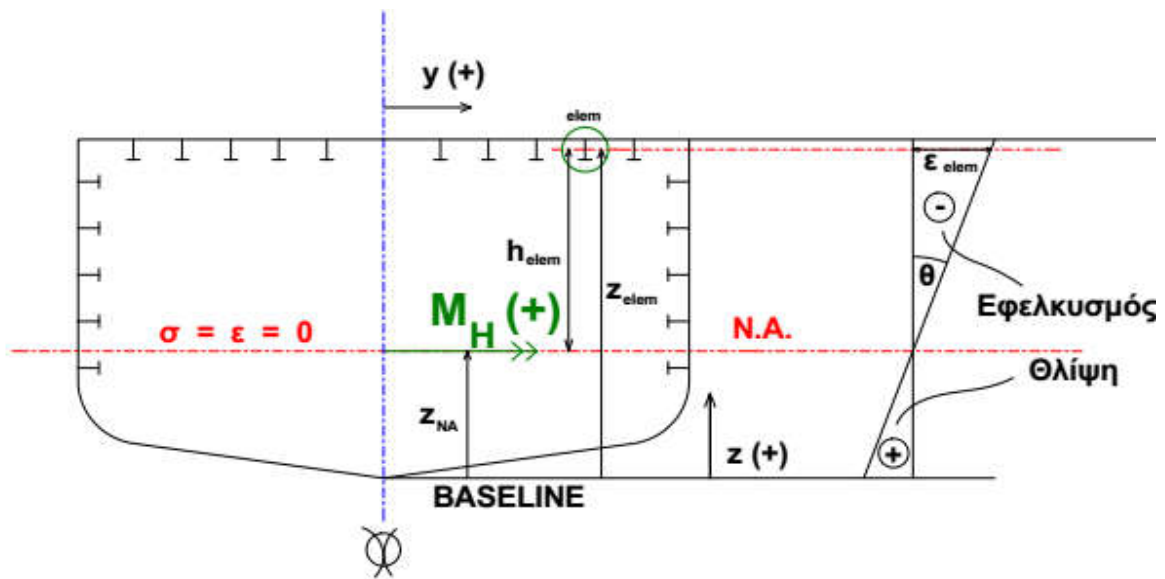
$$\epsilon_{\text{elem}} = -\chi * h_{\text{elem}} \quad (1)$$

δηλαδή η διαμήκης ορθή τροπή ϵ_x μεταβάλλεται γραμμικά με την απόσταση h από την ουδέτερη επιφάνεια που είναι συνέπεια της απλής θεωρίας δοκών. Η ικανότητα του στοιχείου να παραλαμβάνει φορτίο (σ_{elem}) υπολογίζεται από τις σχετικές μειωτικές καμπύλες φόρτισης. Συγκεκριμένα, για την εκάστοτε παραμόρφωση του στοιχείου βρίσκουμε τη μέγιστη τάση που μπορεί να παραλάβει το στοιχείο. Η κατανομή τάσεων στα στοιχεία, που προκύπτει, θα δώσει την αντίστοιχη ροπή κάμψης της διατομής:

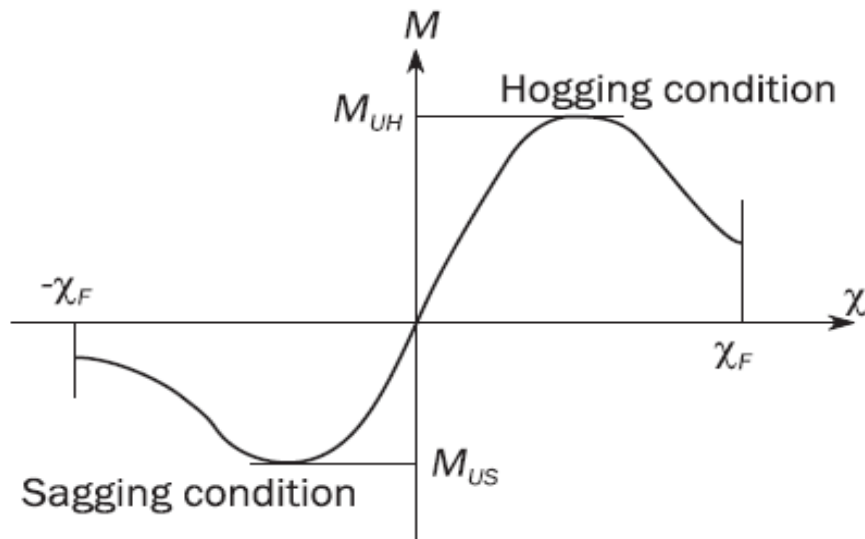
$$M = -\int_A (z - z_{NA}) \sigma \, dA \quad \text{ή αναλυτικά σύμφωνα με τον τύπο:}$$

$$M = \pm \sum_{elem=1}^N |\sigma_{elem} A_{elem} h_{elem}|, \text{ όπου } h_{elem} = z_{elem} - z_{NA} \ \& \ \begin{cases} M > 0, \text{ hogging} \\ M < 0, \text{ sagging} \end{cases}$$

Αν γίνει αυτή η διαδικασία για διάφορες τιμές της καμπυλότητας χ , μία μειωτική καμπύλη φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί για ολόκληρη τη διατομή, ώστε να παρέχει μια καλή ένδειξη της καμπτικής ροπής κατάρρευσης σε hogging και sagging [8]. Αυτή η καμπύλη δεν είναι άλλη από το διάγραμμα M- χ (Σχήμα 2.9).



Σχήμα 2.8 Κατάσταση hogging (Εφελκυσμός καταστρώματος) – Έχει γίνει η σύμβαση ότι οι θλιπτικές τάσεις είναι θετικές και οι εφελκυστικές αρνητικές, ενώ στη βιβλιογραφία συνήθως συναντάται το ανάποδο.



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα καμπτικής ροπής-καμπυλότητας. Στο σχήμα φαίνεται η ροπή κατάρρευσης σε hogging M_{UH} & sagging M_{US} .

Στον υπολογισμό της M , ο ουδέτερος άξονας δεν μπορεί να παραμένει ακίνητος, εκτός αν η συμπεριφορά του υλικού είναι τελείως ελαστική. Κατά συνέπεια πρέπει να επιβληθεί η εξής συνθήκη ισορροπίας της συμμετρικής διατομής ως προς τον άξονα z [8], προκειμένου να υφίσταται καθαρή κάμψη:

$$\Sigma F = 0 \Leftrightarrow \sum_{\text{elem}=1}^N \sigma_{\text{elem}} * A_{\text{elem}} = 0 \Leftrightarrow \sum |\sigma_i| * A_i = \sum |\sigma_j| * A_j \quad (2),$$

όπου ΣF η συνισταμένη δύναμη στη διατομή, i – στοιχείο υπό θλίψη και j – στοιχείο υπό εφελκυσμό

Για το λόγο αυτό, είναι βολικό να θεωρήσουμε αλλαγές στη γωνία θ , ή ισοδύναμα στην καμπυλότητα χ της διατομής, με προσαυξήσεις που αθροίζονται διαδοχικά και η διαδικασία ονομάζεται επαυξητική ανάλυση (incremental analysis)². Παράλληλα, για κάθε επαύξηση της καμπυλότητας η θέση του ουδέτερου άξονα θα πρέπει να προσδιορισθεί με τη μέθοδο δοκιμής και λάθους (trial and error method), ώσπου να βρεθεί μια κατανομή τάσεων στη διατομή, που ικανοποιεί την εξίσωση (2). Η διαδικασία αυτή γίνεται επαναληπτικά (iteratively).

Η μέθοδος του Smith είναι γρήγορη υπολογιστικά, απλή και αποτελεσματική μέθοδος για την μοντελοποίηση μιας διατομής (2-D) και εκτίμηση της ροπής κατάρρευσης του πλοίου υπό διαμήκη κάμψη. Επίσης, μέσω των μειωτικών καμπυλών μπορεί να ληφθούν υπόψη παραμένουσες τάσεις και αρχικές παραμορφώσεις. Ωστόσο, το γεγονός ότι η μέθοδος βασίζεται στις μειωτικές καμπύλες φόρτισης εισάγει μία αβεβαιότητα όσον αφορά τον τρόπο αστοχίας του κάθε στοιχείου και τη μετα-λυγισμική συμπεριφορά του. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό, αν σκεφτεί κανείς ότι δύο μειωτικές καμπύλες, που τέμνονται, σημαίνει ότι αλληλεπιδρούν δύο φαινόμενα λυγισμού για κάποιες παραμορφώσεις ϵ .

Μειονέκτημα, επίσης, της μεθόδου είναι ότι στη διατομή επιδρούν μόνο καμπτικά φορτία (καθαρή κάμψη), ενώ παραλείπονται αξονικές, διατμητικές και στρεπτικές φορτίσεις, που μπορούν να ληφθούν υπόψη στις μεθόδους NLFEM και ISUM. Δηλαδή λόγω της απλουστευτικής παραδοχής της θεωρίας Euler-Bernoulli δεν μπορεί να γίνει ακριβής εκτίμηση της μέγιστης αντοχής του πλοίου. Τέλος, υπάρχει δυσκολία στο να ληφθούν υπόψη οι οριακές συνθήκες στα άκρα της δοκού και η αλληλεπίδραση μεταξύ των δομικών στοιχείων (interaction between adjacent elements), π.χ. δεν μπορεί να

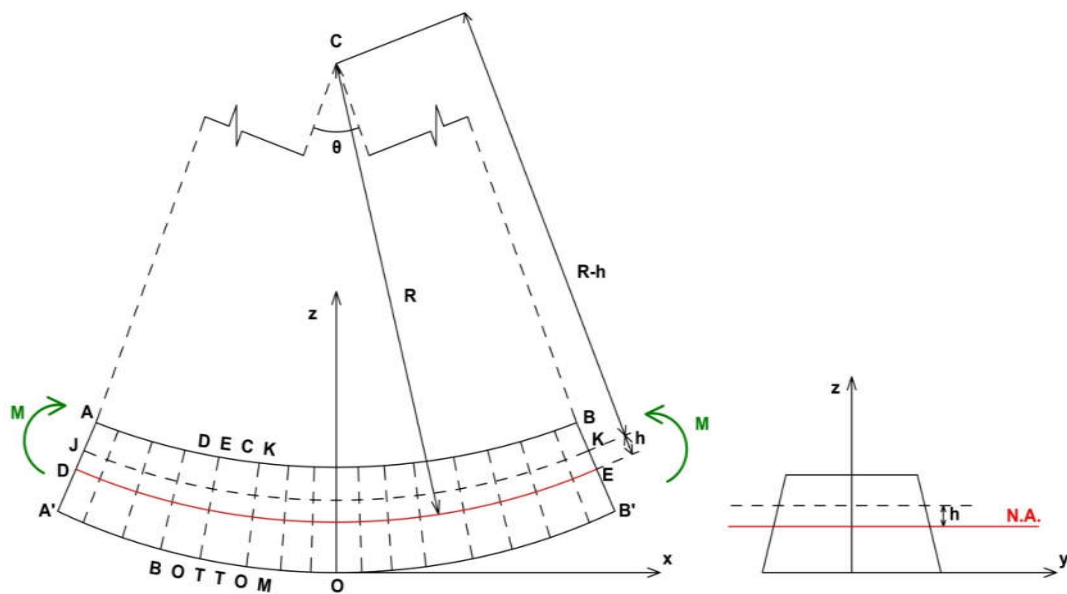
² Ο όρος επαυξητική ανάλυση αποτελεί κατά λέξη μετάφραση του αγγλικού όρου incremental analysis, ο οποίος συναντάται στη σελίδα 256 της ελληνικής έκδοσης της βιβλιογραφικής πηγής [8], γλωσσική επιμέλεια: Ελένη Γιαννακοπούλου, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.

προβλεφθεί ο ταυτόχρονος λυγισμός δύο ή περισσότερων ενισχυμένων ελασμάτων (grillage buckling).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το λογισμικό πρόγραμμα MARS 2000 του Γαλλικού Νηογνώμονα (Bureau Veritas), που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, υπολογίζει την ροπή κατάρρευσης του πλοίου σύμφωνα με την απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο, όπως αυτή προδιαγράφεται στους κανονισμούς CSR-H. Οι επικαιροποιημένοι κανονισμοί CSR-H του 2014 περιλαμβάνουν πρόσθετες απαιτήσεις για την εναπομένουσα αντοχή μετά από ρήγμα, που δεν υπήρχαν σε παλαιότερα CSR. Το MARS 2000 δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της ροπής κατάρρευσης με διάφορα μοντέλα αστοχίας, όπως το ελαστικό-ιδανικά πλαστικό μοντέλο (EIP: Elastic Ideally Plastic) και το μοντέλο δοκού-κολόνας (BM: Beam Column), που εφαρμόζονται για τα δομικά στοιχεία της κατασκευής [1].

Απόδειξη της σχέσης (1) - γραμμικότητα της διαμήκουσ τροπής του στοιχείου

Από τα παραπάνω έπεται ότι πρέπει να υπάρχει μια επιφάνεια παράλληλη προς την άνω και κάτω επιφάνεια του μέλους, όπου οι ϵ_x και σ_x είναι μηδέν. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται ουδέτερη επιφάνεια (neutral surface). Η ουδέτερη επιφάνεια τέμνει το επίπεδο συμμετρίας κατά μήκος ενός τόξου κύκλου DE (Σχ. 2.10) και μια εγκάρσια διατομή κατά μήκος μιας ευθείας που λέγεται ουδέτερος άξονας (neutral axis) της διατομής (Σχήμα 2.10). Συμβολίζοντας με R την ακτίνα του τόξου DE, με θ την επίκεντρη γωνία που αντιστοιχεί στο DE και παρατηρώντας ότι το μήκος του τόξου DE ισούται με το μήκος του απαραμόρφωτου μέλους, έχουμε: $L=R*\theta$ (3). Θεωρώντας τώρα το μήκος L' του τόξου JK που βρίσκεται σε απόσταση h πάνω από την ουδέτερη επιφάνεια, θα έχουμε:



Σχήμα 2.10 Στο Σχήμα φαίνεται η διαμήκης και η εγκάρσια τομή δοκού που κάμπτεται με τα κοίλα προς τα άνω (για πλοία κατάσταση sagging).

$L' = (R-h) \cdot \theta$ (4). Επειδή το αρχικό μήκος του JK ήταν L , η παραμόρφωση του JK θα είναι: $\delta = L' - L$ (5). Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (3) και (4) στην (5) παίρνουμε: $\delta = (R-h) \cdot \theta - R \cdot \theta = -h \cdot \theta$. Όμως η διαμήκης τροπή ϵ_x στα στοιχεία του JK δίνεται ως εξής: $\epsilon_x = \delta/L = -h \cdot \theta / R \cdot \theta = -h/R$. Τελικά $\epsilon_x = -\chi \cdot h$ ή $\epsilon_{elem} = -\chi \cdot h_{elem}$.

Επίσης η καμπτική ροπή συνδέεται με την ορθή αξονική τάση μέσω της σχέσης:

$$M(x) = - \int \sigma_x h dA \Rightarrow \xrightarrow{\text{Γραμ. ελαστική περιοχή: } \sigma_x = E \epsilon_x} M(x) = E \chi \int h^2 dA \Rightarrow$$

$$M(x) = E I_y \chi$$

όπου $M > 0$ σε hogging και $M < 0$ σε sagging.

2.2.4 Μέθοδος AM (Analytic Method)

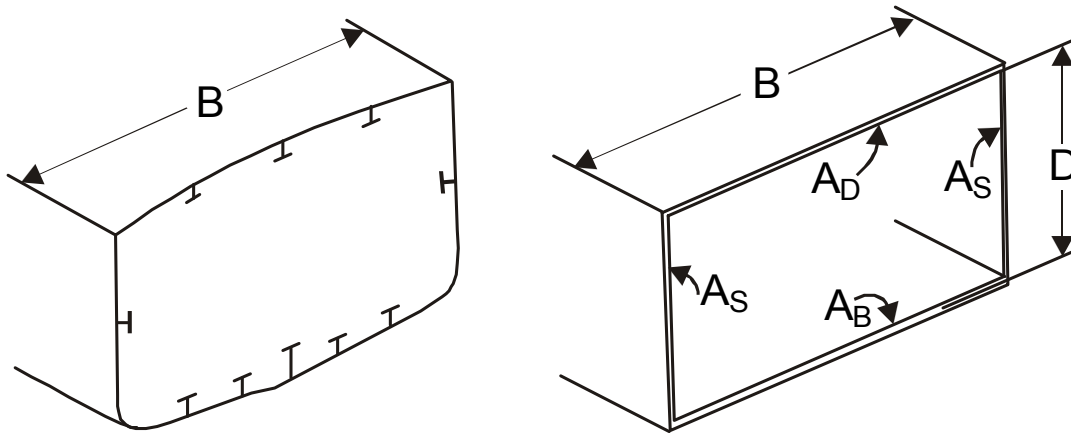
Ο Caldwell (1965) ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να εκτιμήσει θεωρητικά την ροπή κατάρρευσης και εξέτασε την επίδραση του λυγισμού στην ροπή κατάρρευσης. Γι' αυτό το σκοπό εισήγαγε την «Πλαστική Σχεδίαση», η οποία λάμβανε υπόψη τη διαρροή και το λυγισμό των στοιχείων. Αυτό που έκανε ο Caldwell είναι να μοντελοποιήσει την ενισχυμένη διατομή σαν μια διατομή χωρίς ενισχυτικά, ισοδύναμου εμβαδού και πάχους με την πρώτη, η οποία διαθέτει ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο στο κατάστρωμα, στον πυθμένα και στις πλευρές. Αν στην θλιβόμενη περιοχή της διατομής υπάρξουν φαινόμενα λυγισμού, τότε οι θλιπτικές τάσεις δεν φτάνουν την τάση διαρροής του υλικού του στοιχείου, και κατά συνέπεια δεν προσεγγίζεται ποτέ η τέλεια πλαστική ροπή κατάρρευσης της διατομής M_p . Παρακάτω εξετάζονται 2 περιπτώσεις αντοχής, εκ των οποίων η πρώτη είναι ιδανική, αφού δεν υπάρχει λυγισμός:

Το συνολικό εμβαδόν της διατομής είναι: $A = A_d + A_b + 2 \cdot A_s$ (6)

όπου A_d = εμβαδό διατομής καταστρώματος

A_b = εμβαδό διατομής πυθμένα

A_s = εμβαδό διατομής πλευράς



Σχήμα 2.11 Πραγματική και ισοδύναμη διατομή πλοίου για την εφαρμογή της μεθόδου AM.

Το υλικό θεωρείται όλκιμο, με ομοιόμορφη τάση διαρροής σ_0 (θλιπτική και εφελκυστική), αγνοείται δε το φαινόμενο της σκλήρυνσης (strain hardening) [12].

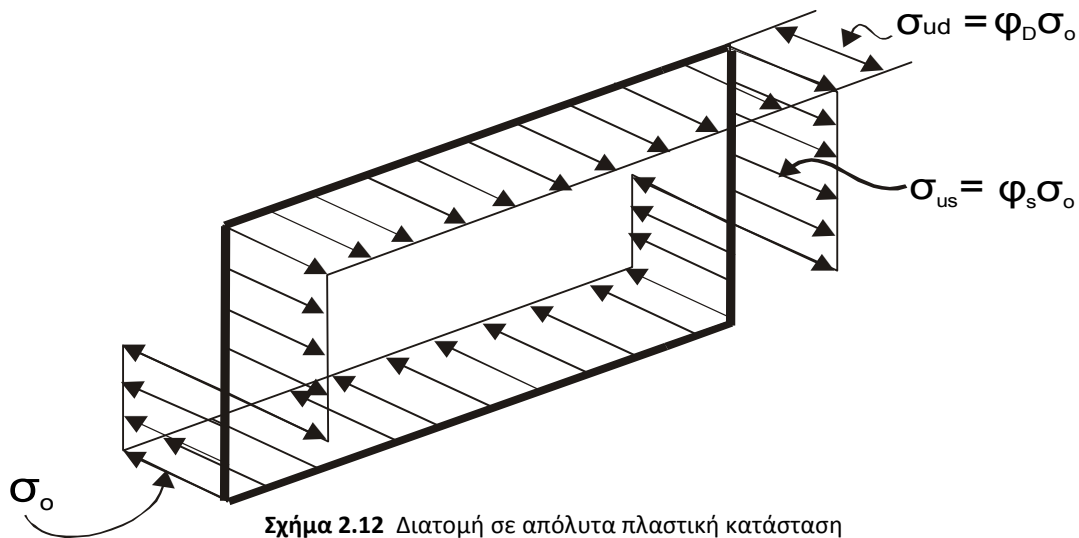
Μέγιστη διαμήκης αντοχή του πλοίου χωρίς λυγισμό ($M_U=M_F$)

Υποθέτουμε, σύμφωνα με την κλασική θεωρία της πλαστικότητας, ότι, όταν αυξάνεται η φόρτιση, προκύπτει διαρροή στο κατάστρωμα και μετέπειτα και στον πυθμένα (εφόσον ο ουδέτερος άξονας είναι πλησιέστερος στον πυθμένα). Στη συνέχεια, η πλαστικοποιημένη περιοχή επεκτείνεται προς τον ουδέτερο άξονα, μέχρις ότου ολόκληρη η διατομή γίνει απόλυτα πλαστική. Ταυτόχρονα μετατοπίζεται σταδιακά ο ουδέτερος άξονας έτσι, ώστε στην απόλυτα πλαστική κατάσταση η ισορροπία δυνάμεων στη διαμήκη κατεύθυνση ($\Sigma F_x=0$) να οδηγεί στη διχοτόμηση του εμβαδού της διατομής από τον πλαστικό ουδέτερο άξονα (ΠΟΑ ή PNA), όπως δείχνει το Σχήμα (2.12). Για τον πλαστικό ουδέτερο άξονα έχουμε:

$$\Sigma F_x = 0 \Leftrightarrow F_{\text{tensile}} = F_{\text{compressive}} \Leftrightarrow \sigma_0 * \left[A_d + 2 * \frac{c_d}{D} * A_s \right] = \sigma_0 * \left[A_b + 2 * \frac{D - c_d}{D} \right] \quad (7)$$

όπου c_d : η απόσταση του ΠΟΑ από το κατάστρωμα και D : το κοίλο του πλοίου

Η σχέση (7) γίνεται:
$$\frac{c_d}{D} = \frac{2 A_s + A_b - A_d}{4 A_s} \quad (8)$$



Σχήμα 2.12 Διατομή σε απόλυτα πλαστική κατάσταση

Η πλήρης πλαστική καμπτική ροπή, M_p , είναι:

$$M_p = \sigma_0 A_d c_d + \sigma_0 A_b (D - c_d) + 2A_s \sigma_0 \left\{ \frac{c_d}{D} \frac{c_d}{2} + \frac{D - c_d}{D} \frac{D - c_d}{2} \right\}$$

$$\text{ή} \quad M_p = \sigma_0 * Z_p \quad (9)$$

όπου Z_p , η πλαστική ροπή αντίστασης, δίνεται από τη σχέση:

$$Z_p = A_d c_d + A_b (D - c_d) + 2A_s \left\{ \frac{c_d}{D} \frac{c_d}{2} + \frac{D - c_d}{D} \frac{D - c_d}{2} \right\}$$

γράφοντας: $A_d/A = \alpha_d$, $A_s/A = \alpha_s$, $A_b/A = \alpha_b$, $c_d/D = \gamma$ (10) ,

η σχέση (9) γίνεται: $M_p = \sigma_0 AD \left\{ \alpha_d \gamma + \alpha_b (1 - \gamma) + 2\alpha_s \left(\frac{1}{2} - \gamma + \gamma^2 \right) \right\}$ (11)

Από την (8) και την (10): $\gamma = \frac{2\alpha_s + \alpha_b - \alpha_d}{4\alpha_s}$

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα:

1. Η αντοχή/βάρους διατομής αυξάνεται με τη μείωση του συντελεστή α_s , που είναι λογικό αφού οι περιοχές μακριά από τον ουδέτερο άξονα, κατάστρωμα και πυθμένας, συνεισφέρουν περισσότερο στην αντοχή.
2. Για οποιαδήποτε τιμή του α_s , η αντοχή/βάρους (απόδοση) μεγιστοποιείται όταν το εμβαδό της διατομής του καταστρώματος (A_d) είναι ίσο με το εμβαδό της διατομής του πυθμένα (A_b). Αυτό ισχύει, διότι, αν $A_d = A_b$, τότε ο ουδέτερος άξονας θα βρίσκεται κοντά στο μέσο του κοίλου D . Κατά συνέπεια, το κατάστρωμα δε θα

καταρρέει ελαστοπλαστικά, πριν από τον πυθμένα, παραλαμβάνοντας μεγαλύτερες τάσεις, και δε θα υπάρξει μετατόπιση του ουδέτερου άξονα, αλλά οι δύο διατομές, καταστρώματος και πυθμένα θα παραλαμβάνουν τις ίδιες τάσεις, γεγονός που αυξάνει την αντοχή [12].

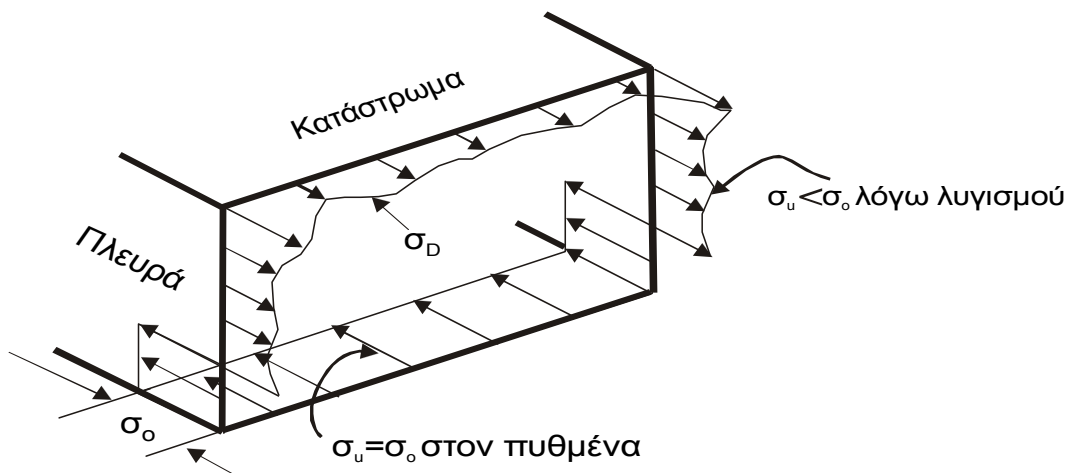
Μέγιστη διαμήκης αντοχή του πλοίου με λυγισμό

Όταν συμβεί λυγισμός, η μέγιστη αντοχή, διαφέρει όταν το πλοίο είναι στο κοίλο ή στην κορυφή του κύματος. Θεωρούμε την πρώτη περίπτωση, κατά την οποία το κατάστρωμα υποβάλλεται σε θλιπτικό φορτίο (sagging). Όταν αυξάνεται η διαμήκης καμπτική ροπή, προκύπτουν τα εξής:

1. Λυγισμός των ελασμάτων του καταστρώματος για $\sigma < \sigma_0$
2. α) Αν το κατάστρωμα είναι ενισχυμένο στην εγκάρσια κατεύθυνση, θα δημιουργηθεί κοιλότητα σε ολόκληρο το πλάτος μεταξύ των διαμήκων ζυγών και θα επέλθει αστοχία σε τάση αρκετά μικρότερη της τάσης διαρροής.
β) Αν το κατάστρωμα είναι ενισχυμένο στη διαμήκη κατεύθυνση, το φορτίο θα διαχυθεί από τα ελάσματα στα ενισχυτικά, μέχρις ότου συμβεί τοπικός λυγισμός με μέση τάση μικρότερη της τάσης διαρροής.
3. Σε μεγαλύτερες φορτίσεις το κατάστρωμα δε συμβάλλει πλέον στην αντοχή και αστοχούν σταδιακά τα πλευρικά ελάσματα.
4. Είναι επίσης δυνατό να παρατηρηθεί διαρροή και στα ελάσματα του πυθμένα.

Κατά την κατάρρευση της διατομής η κατανομή των τάσεων θα είναι γενικά της μορφής, που δείχνει το Σχήμα 2.13. Ορίζουμε τώρα τις αντίστοιχες μέσες τάσεις κατάρρευσης στο κατάστρωμα, σ_{ud} , και στα πλευρικά ελάσματα, σ_{us} , με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma_{ud} A_d = \int \sigma_d dA_d \quad \text{και} \quad \sigma_{us} A_s = \int \sigma_s dA_s$$



Σχήμα 2.13 Κατανομή διαμήκων τάσεων κατά την κατάρρευση διατομής πλοίου με ένα κύριο κατάστρωμα (με λυγισμό).

Στη μέθοδο αυτή ορίζεται ο συντελεστής αντοχής:

$$\varphi = \text{μέση τάση κατάρρευσης/τάση διαρροής} = \sigma_{ult} / \sigma_0$$

Συνεπώς, θεωρώντας την κατάσταση sagging, όπου το κατάστρωμα υποβάλλεται σε θλίψη, ενώ ο πυθμένας σε εφελκυσμό, λόγω των παραπάνω σχέσεων ισχύουν τα εξής:

- η μέση τάση κατάρρευσης του καταστρώματος θα δίνεται από: $\sigma_{ud} = \varphi_d \cdot \sigma_{od}$, όπου $\varphi_d < 1$, αφού $\sigma_{ud} < \sigma_{od}$ λόγω λυγισμού
- η μέση τάση κατάρρευσης της πλευράς της διατομής θα δίνεται από: $\sigma_{us} = \varphi_s \cdot \sigma_{os}$, όπου $\varphi_s < 1$ για το τμήμα της πλευράς άνω του ουδέτερου άξονα και $\varphi_s = 1$ για το τμήμα κάτω από τον ουδέτερο άξονα και
- η μέση τάση κατάρρευσης του πυθμένα θα δίνεται από: $\sigma_{ub} = \varphi_b \cdot \sigma_{ob}$, όπου $\varphi_b = 1$, αφού $\sigma_{ub} = \sigma_{ob}$ λόγω διαρροής υλικού στον πυθμένα.

Παίρνοντας ισορροπία θλιπτικών-εφελκυστικών τάσεων έχουμε:

$$\sigma_0 \left\{ \varphi_d A_d + \frac{2c_d}{D} \varphi_s A_s \right\} = \sigma_0 \left\{ \frac{2 * (D - c_d)}{D} A_s + A_b \right\} \Leftrightarrow$$

$$\frac{c_d}{D} \varphi_s = \frac{D - c_d}{D} + \frac{A_b}{2A_s} - \frac{\varphi_d A_d}{2A_s} \xLeftrightarrow{\gamma = c_d/D} \gamma \varphi_s - (1 - \gamma) = \frac{A_b}{2A_s} - \frac{\varphi_d A_d}{2A_s} \Leftrightarrow$$

$$\gamma (\varphi_s + 1) = \frac{A_b - \varphi_d A_d + 2A_s}{2A_s} \xLeftrightarrow{\alpha_b = \frac{A_b}{A}, \alpha_s = \frac{A_s}{A}, \alpha_d = \frac{A_d}{A}} \gamma = \frac{\mathbf{a_b - \varphi_d a_d + 2a_s}}{\mathbf{2a_s(1 + \varphi_s)}}$$

Η μέγιστη καμπτική ροπή δίνεται από τη σχέση:

$$M_U = \sigma_0 \varphi_d A_d c_d + \sigma_0 A_b (D - c_d) + 2A_s \sigma_0 \left\{ \varphi_s \frac{c_d c_d}{D} + \frac{D - c_d}{D} \frac{D - c_d}{2} \right\}$$

$$= \sigma_0 \varphi_d A_d D \gamma + \sigma_0 A_b D (1 - \gamma) + 2A_s \sigma_0 \left\{ \varphi_s \frac{D \gamma^2}{2} + (1 - \gamma) D \left(\frac{1}{2} - \frac{\gamma}{2} \right) \right\}$$

$$= \sigma_0 \varphi_d A_d D \gamma + \sigma_0 A_b D (1 - \gamma) + 2A_s D \sigma_0 \left\{ \varphi_s \frac{\gamma^2}{2} + \frac{1}{2} + \frac{\gamma^2}{2} - \gamma \right\}$$

$$\Leftrightarrow M_U = \sigma_0 A D \left[\varphi_d \alpha_d \gamma + \alpha_b (1 - \gamma) + 2\alpha_s \left\{ \frac{1}{2} - \gamma + \frac{\gamma^2 (1 + \varphi_s)}{2} \right\} \right] \quad (12)$$

Τελικά από τις σχέσεις (11) και (12) προκύπτει ο λόγος M_U/M_P , που ονομάζεται συντελεστής φόρτισης, και εκφράζει το βαθμό, στον οποίο η μέγιστη αντοχή επηρεάζεται από τα φαινόμενα λυγισμού [12].

Παρατήρηση

Ο συντελεστής γ είναι σημαντικός, γιατί δηλώνει τη θέση του ουδέτερου άξονα κατά την κατάρρευση της διατομής, και άρα μπορεί να προσδιοριστεί χάρη σε αυτόν η επαγόμενη κατανομή των τάσεων.

Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα μεθόδου

Πρόκειται για μια μέθοδο που δίνει γρήγορα αποτελέσματα για τη φάση της προμελέτης του πλοίου, όπου επιζητείται μια ποιοτική εικόνα της μέγιστης αντοχής του σε διαμήκη κάμψη. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος φαίνεται να υπερεκτιμά τη ροπή κατάρρευσης, αφού δε λαμβάνεται υπόψη η μείωση της αντοχής των στοιχείων μετά το λυγισμό. Επίσης, οι συντελεστές αντοχής δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια και κατά συνέπεια δεν είναι δυνατός ο επακριβής υπολογισμός της πραγματικής μέγιστης αντοχής κάθε στοιχείου. Η μέθοδος υστερεί ακόμα όσον αφορά ασύμμετρες γεωμετρικές διατομές, όπως συμβαίνει κατόπιν βλάβης, στις οποίες ο ουδέτερος άξονας είναι κεκλιμένος, είτε όταν υπάρχει υπάρχει διαξονική κάμψη της διατομής [3]. Τέλος, έχουν γίνει αρκετές βελτιώσεις της μεθόδου, κυρίως από τους Maestro και Marino, ώστε:

- ✓ να προκύπτουν ακριβέστεροι συντελεστές αντοχής φ ,
- ✓ να εισάγεται η καθυστέρηση της αστοχίας επιμέρους στοιχείων, π.χ. των ανθεκτικών γωνιών και
- ✓ να εισάγεται η μείωση αντοχής των στοιχείων με την υπέρβαση της μέγιστης αντοχής τους και η διάχυση φορτίου στα παρακείμενα στοιχεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕΙΩΤΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (LOAD - END SHORTENING CURVES) ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ (AVERAGE STRESS - STRAIN) ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΤΥΠΟ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

3.1 Εισαγωγή κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν οι μορφές αστοχίας των δομικών στοιχείων³ της μεταλλικής κατασκευής σύμφωνα με την απλοποιημένη μέθοδο του Smith. Γενικά, όπως επισημάνθηκε και στο Κεφάλαιο 2, οι μορφές αστοχίας των στοιχείων λόγω διαμήκους κάμψης του πλοίου που εξετάζονται είναι (φαινόμενα θραύσης, ρωγμών & κόπωσης αγνοούνται):

- ✓ Ελαστο-πλαστική κατάρρευση για επιμηκνόμενα μέλη
- ✓ Λυγισμός για θλιβόμενα μέλη

Οι ανθεκτικές γωνίες είναι τα στοιχεία της κατασκευής που αστοχούν πάντα με ελαστο-πλαστική κατάρρευση ανεξαρτήτως του αν επιμηκνούνται ή θλίβονται. Από την άλλη μεριά, τα υπόλοιπα στοιχεία που θλίβονται, ακολουθούν τη μειωτική καμπύλη φόρτισης που δίνει την ελάχιστη τάση για την αντίστοιχη παραμόρφωσή τους.

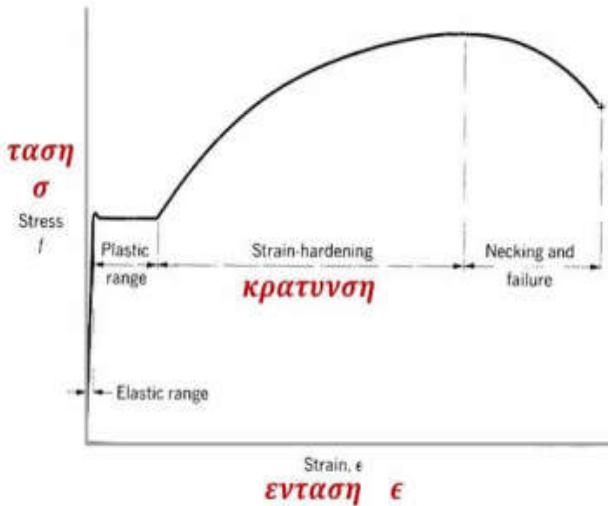
Συγκεκριμένα έχουμε τα εξής:

Δομικά Στοιχεία		Τρόπος Αστοχίας	Ορισμός αστοχίας στην ενότητα:
Ανθεκτικές Γωνίες		Ελαστο-πλαστική κατάρρευση	[3.2]
Εφελκυόμενα στοιχεία		Ελαστο-πλαστική κατάρρευση	[3.2]
Θλιβόμενα στοιχεία	Διαμήκη ενισχυτικά στοιχεία	Λυγισμός συστήματος δοκού-κολώνας	[3.4]
		Στρεπτικός λυγισμός	[3.5]
		Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού με φλάντζα	[3.6.1]
	Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού χωρίς φλάντζα	[3.6.2]	
	Εγκαρσίως ενισχυμένα ελάσματα	Λυγισμός απλού ορθογωνίου ελάσματος	[3.7]

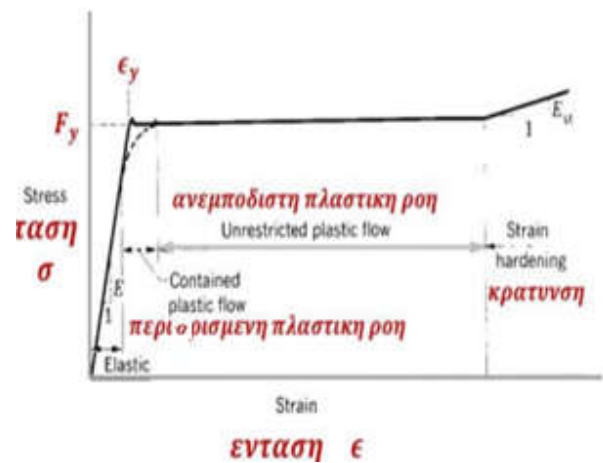
³ Τα δομικά στοιχεία της διατομής των δύο υπό εξέταση Bulk Carriers απεικονίζονται στα Παραρτήματα Ζ' και Η'.

3.2 Ελαστο-πλαστική κατάρρευση

Η θεώρηση της ελαστο-πλαστικής κατάρρευσης του στοιχείου οφείλεται στο ότι το χρησιμοποιούμενο υλικό, εν προκειμένω ο ναυπηγικός χάλυβας, παρουσιάζει εν γένει όλκιμη συμπεριφορά. Με λίγα λόγια το υλικό δεν θραύεται μετά την υπέρβαση της ελαστικής περιοχής, αλλά συνεχίζει να παραλαμβάνει τάσεις βάσει του διαγράμματος σ - ϵ (Σχήματα 3.1), όπως φαίνεται παρακάτω. Άρα, το κατασκευαστικό στοιχείο αφότου διαρρέει, μπορεί να αντέξει τάσεις μεγαλύτερες του ορίου διαρροής του υλικού σ_y , αλλά αυτές οι τάσεις συνοδεύονται από μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό, σε οποιαδήποτε κατασκευαστική σχεδίαση όπου οι μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις δεν είναι επιθυμητές, χρησιμοποιείται σαν όριο των αναπτυσσόμενων τάσεων το όριο διαρροής.

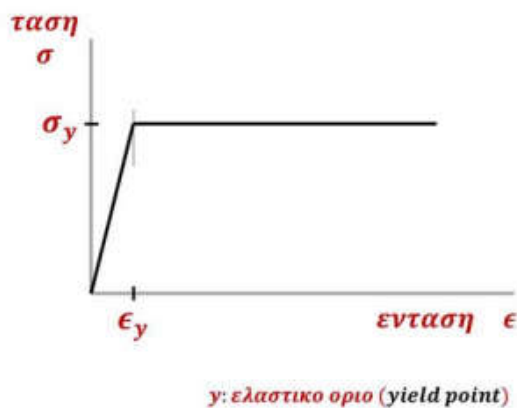


Σχήμα 3.1 Πραγματικό διάγραμμα σ - ϵ για χάλυβα



Σχήμα 3.2 Ιδεατό διάγραμμα σ - ϵ λαμβάνοντας υπόψη την κράτυνηση του υλικού

Ιδεατο Διαγραμμα $\sigma - \epsilon$ για χάλυβα



Σχήμα 3.3 Ελαστικό-απόλυτα πλαστικό μοντέλο σ - ϵ

Από τα παραπάνω μοντέλα ελαστο-πλαστικής κατάρρευσης χρησιμοποιείται το τρίτο (ελαστικό-απόλυτα πλαστικό) στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής του πλοίου. Η χρήση αυτού του μοντέλου για τα δομικά στοιχεία είναι ασφαλής και δίνει μάλλον συντηρητικά αποτελέσματα στον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής, αν λάβει υπόψη του κάποιος ότι: α) το όριο εφελκυσμού του χάλυβα είναι ~ 590-620 Mpa, δηλαδή αρκετά μεγαλύτερο από το όριο διαρροής (315 & 355 Mpa) του και β) η περιοχή των πλαστικών παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση είναι σχεδόν τριπλάσια της περιοχής ελαστικών παραμορφώσεων. Μάλιστα είναι πιθανό να μην παρατηρηθεί αστοχία λόγω θραύσης των δομικών στοιχείων στην εφελκυσόμενη πλευρά, καθώς μπορεί πρωτύτερα η διατομή του πλοίου να έχει καταρρεύσει λόγω ελαστο-πλαστικού λυγισμού των στοιχείων στη θλιβόμενη πλευρά.

Σχέση ελαστο-πλαστικής κατάρρευσης κατά CSR-H:

Η εξίσωση που περιγράφει τη μειωτική καμπύλη σ - ε για την ελαστο-πλαστική κατάρρευση του στοιχείου, επιμηκνόμενου ($\varepsilon < 0$) ή θλιβόμενου ($\varepsilon > 0$), δίνεται από τη σχέση:

όπου:

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

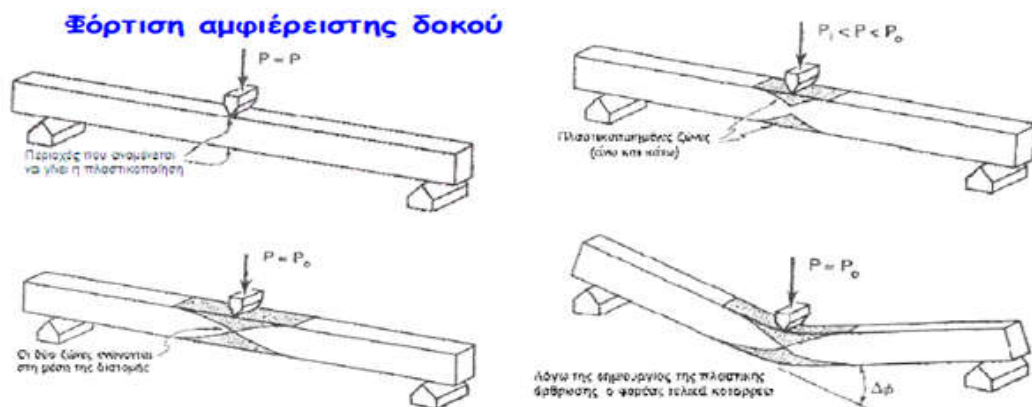
(...)_{n-50}: λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς μόνο το 50% του περιθωρίου διάβρωσης των κανονισμών CSR-H για τα πάχη ελάσματος και ενισχυτικού

ε : στιγμιαία διαμήκης σχετική ανοιγμένη παραμόρφωση ($\varepsilon = \varepsilon_{elem} / \varepsilon_{yield}$) όπου ε_{elem} η στιγμιαία παραμόρφωση του δομικού στοιχείου κατά τη φόρτιση και $\varepsilon_{yield} = \frac{R_{eHA}}{E}$ η παραμόρφωση του στοιχείου στην τάση διαρροής του

$$\Phi: \text{η συνάρτηση } \Phi(\varepsilon) = \begin{cases} -1, & \text{για } \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & \text{για } -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \text{για } \varepsilon > 1 \end{cases}$$

R_{eHA} [N/mm²]: ισοδύναμη τάση διαρροής του δομικού στοιχείου που δίνεται από τη σχέση:

$$R_{eHA} = \frac{R_{eHp} A_{p-n50} + R_{eHs} A_{s-n50}}{A_{p-n50} + A_{s-n50}} \quad (\text{για σύμβολα βλ. σελ. 54})$$



Σχήμα 3.4 Πλαστική κατάρρευση αμφιέριστης δοκού υπό κάμψη

3.3 Λυγισμός

3.3.1 Το φαινόμενο του λυγισμού (buckling)

Λυγισμός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μια ελαστική ράβδος με ευθύγραμμο άξονα, που υποβάλλεται σε κεντρική αξονική θλίψη με συνεχώς αυξανόμενη τιμή φορτίου, μεταπίπτει, μετά από μια οριακή τιμή φορτίου, σε κατάσταση ασταθούς ισορροπίας. Ουσιαστικά ο λυγισμός είναι το φαινόμενο αστάθειας της κατασκευής (instability of structure) κατά το οποίο η παραμόρφωση της κατασκευής παύει να υφίσταται μόνο σε ένα επίπεδο (ή αξονικά) και ασκείται σε περισσότερα μετά την υπέρβαση του φορτίου λυγισμού. Εάν η φόρτιση της κατασκευής ασκείται κάθετα στην επιφάνεια του φορέα, τότε προκαλούνται εγκάρσιες μετατοπίσεις λόγω κάμψης και συναφή εσωτερικά εντατικά πεδία, τα μεγέθη των οποίων είναι ευθέως ανάλογα προς το μέγεθος της φόρτισης στη γραμμικά ελαστική περιοχή (μοντέλο δοκού). Εάν όμως η φόρτιση ασκείται μόνο στην κύρια αξονική διεύθυνση, τότε για να προκληθούν εγκάρσιες μετατοπίσεις προτού συμβεί λυγισμός, θα πρέπει:

- ✚ το κέντρο εφαρμογής του φορτίου να μη συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής ή
- ✚ η κατασκευή να έχει αρχικές γεωμετρικές ατέλειες (π.χ. βέλος κάμψης v_0) [12]

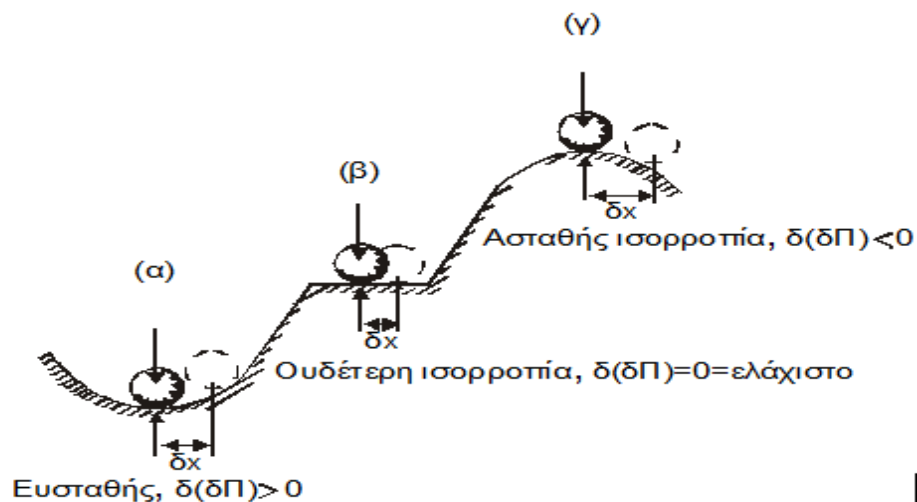
Όπως είναι φυσικό στις πραγματικές κατασκευές ικανοποιούνται και οι 2 παραπάνω συνθήκες. Κατά συνέπεια, όταν σε μία πραγματική κατασκευή ασκείται φόρτιση στην αξονική διεύθυνση αυτή θα υποστεί κάμψη, μετά δε την αφαίρεση της φόρτισης η κατασκευή θα επανακτήσει την αρχική της μορφή. Εάν όμως συνεχιστεί η αύξηση της φόρτισης, τότε σε κάποιο στάδιο ($P=P_{cr}$) θα παρατηρηθεί μία ξαφνική και μόνιμη αλλαγή της μορφής της κατασκευής. Το φαινόμενο αυτό καλείται λυγισμός.

Γενικά ο λυγισμός επηρεάζεται από: α) τη μορφολογία της κατασκευής (π.χ. κολόνα, ορθογώνιο έλασμα), β) τη γεωμετρία της (π.χ. μήκος κολόνας, λόγος b/t ελάσματος), γ) τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού της (E , σ_0 , ν) και δ) τις συνθήκες έδρασης (π.χ. απλή στήριξη, πάκτωση).

Το φαινόμενο του λυγισμού μιας κατασκευής μπορεί να περιγραφεί με αρκετά κατανοητό τρόπο μέσω της ενεργειακής θεώρησης της απόκρισης των κατασκευών. Η κατάσταση (α) του Σχήματος 3.5 αφορά ένα ευρύ φάσμα αποκρίσεων. Σε αυτή την περίπτωση οι φορτίσεις είναι δυνατόν να επιφέρουν μεταβολές στη μόνιμη κατάσταση ισορροπίας μετά την αφαίρεση του εξωτερικού φορτίου. Για μικρές ποσότητες παρεχόμενου δυναμικού έργου $\delta\Pi$, όπου $\delta\Pi = \delta U - \delta W$ (U : η εσωτερική ελαστική ενέργεια παραμόρφωσης της κατασκευής και W : το έργο των εξωτερικών δυνάμεων), η κατασκευή υποβάλλεται σε μη-μόνιμες παραμορφώσεις (ελαστικές). Όταν δε παύουν να ασκούνται οι εξωτερικές φορτίσεις η κατασκευή επανέρχεται στην αρχική της κατάσταση (**Ευσταθής ισορροπία**) δηλαδή $\delta(\delta\Pi) > 0$. Μία τέτοια περίπτωση είναι και η απόκριση κατασκευών υπό καμπτικές φορτίσεις οι οποίες προκαλούν μικρές μετατοπίσεις. Η συμπεριφορά αυτή

παριστάνεται με μικρές μετατοπίσεις της σφαίρας από την αρχική κατάσταση ισορροπίας - όταν αφαιρούνται οι εξωτερικές φορτίσεις η κατάσταση ισορροπίας επανέρχεται στην αρχική κατάσταση.

Η κατάσταση (β) του Σχήματος 3.5 αντιστοιχεί στη συμπεριφορά της τέλειας πρισματικής διατομής υπό θλιπτικό φορτίο ίσο με το φορτίο λυγισμού (μοντέλο κολόνας). Στην περίπτωση αυτή τα εξωτερικά φορτία δεν παρέχουν δυναμικό έργο ($\delta(\delta\Pi)=0$), η δε κατασκευή παραμορφώνεται ανάλογα με το μέγεθος και την φορά τους (**Ουδέτερη ισορροπία**). Η συμπεριφορά της κατασκευής όπως περιγράφεται στο (γ) του Σχήματος 3.5 είναι τέτοια ώστε απειροελάχιστα μικρές πρόσθετες φορτίσεις να επιφέρουν κατάρρευση. Μία τέτοια περίπτωση είναι και η περίπτωση πρισματικού φορέα με αρχικές μετατοπίσεις (μη τέλεια κολόνα) υπό θλιπτικό φορτίο ίσο με το φορτίο λυγισμού. Εάν το εξωτερικό φορτίο υπερβεί το συγκεκριμένο όριο, τότε η τελική κατάσταση ισορροπίας δεν θα είναι η αρχική αλλά μία νέα (**Ασταθής ισορροπία**). Στο Σχήμα 3.5(γ) περιγράφεται η απόκριση κατασκευών που φέρουν φορτία που προκαλούν λυγισμό. Σε αυτή την περίπτωση για να επανακτήσει δε η κατασκευή την αρχική της μορφή θα πρέπει να της παρασχεθεί πρόσθετη ενέργεια. Βλέπουμε δηλαδή ότι ο λυγισμός προκαλεί μόνιμες μεταβολές στη γεωμετρία της κατασκευής [12].



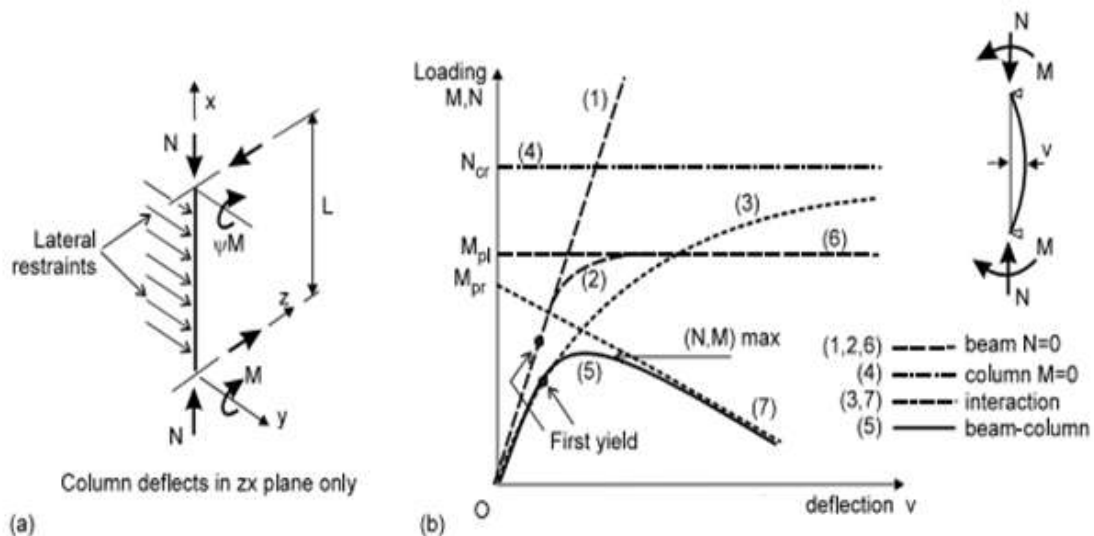
Σχήμα 3.5 Καταστάσεις ισορροπίας φορτισμένης κατασκευής [12]

3.3.2 Το μοντέλο δοκού-κολόνας (beam - column)

Στις ναυπηγικές κατασκευές συχνά γίνεται χρήση του μοντέλου δοκού-κολόνας για τη μελέτη της συμπεριφοράς των ενισχυμένων ελασμάτων (stiffened panels). Αυτό είναι δυνατό διότι οι διαστάσεις των ενισχυμένων ελασμάτων που χρησιμοποιούνται στις ναυπηγικές κατασκευές ($b/t < 35$) 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 στοιχείων (συνεργαζόμενο έλασμα και ενισχυτικό) που απαρτίζουν το ενισχυμένο έλασμα αποφεύγεται με κατάλληλη διαστασιολόγησή τους. Εφόσον, λοιπόν, δεν παρουσιάζονται φαινόμενα τοπικού λυγισμού η κατάρρευση είναι γενική, προκύπτει δηλαδή μεταξύ των σημείων στήριξης των άκρων.

Κατά συνέπεια, η θεωρία αυτή έχει πολύ πιο εκτεταμένη εφαρμογή από ό,τι αρχικά διαφαίνεται. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι είναι πιο εύχρηστη από τη θεωρία λυγισμού των ενισχυμένων ελασμάτων και ότι υπάρχουν πολλά διαθέσιμα αποτελέσματα, που έχουν μεν αποκτηθεί για δομοστατικές κατασκευές, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και για τη μελέτη της κατασκευής του πλοίου [12].

Ένας πρισματικός φορέας κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί δοκός-κολόνα όταν παραλαμβάνει συνδυασμένες καμπτικές και αξονικές θλιπτικές φορτίσεις που οδηγούν το φορέα σε αστάθεια, σε αντίθεση με τη δοκό που παραλαμβάνει μόνο καμπτικές και την κολόνα που παραλαμβάνει μόνο αξονικές θλιπτικές φορτίσεις. Στο παρακάτω σχήμα 3.6(b) έχουμε τα εξής, αγνοώντας το φαινόμενο της σκλήρυνσης (θεώρηση απόλυτα πλαστικής περιοχής): Η καμπύλη (1) δείχνει τη γραμμικά ελαστική συμπεριφορά της δοκού, η καμπύλη (6) δείχνει την άκαμπτη-απόλυτα πλαστική συμπεριφορά δοκού με ροπή κατάρρευσης την M_p , η καμπύλη (2) δείχνει μια ενδιάμεση των (1) και (6) συμπεριφορά της δοκού: την (πραγματική) ελαστικο-πλαστική συμπεριφορά της δοκού, η καμπύλη (4) δείχνει το φορτίο ελαστικού λυγισμού N_{cr} μιας τέλει κολόνας το οποίο προκύπτει από την καμπύλη Euler, η καμπύλη (3) δείχνει τη μείωση του φορτίου λυγισμού λόγω αλληλεπίδρασης επιβολής του θλιπτικού φορτίου N και της καμπτικής ροπής $M+N*v$, όπου v : το βέλος κάμψης του φορέα, για ελαστική συμπεριφορά μη τέλει κολόνας, η καμπύλη (7) δείχνει την πλαστική κατάρρευση λόγω αλληλεπίδρασης επιβολής του θλιπτικού φορτίου N και της καμπτικής ροπής $M+N*v$, η καμπύλη (5) δείχνει την πραγματική συμπεριφορά της δοκού-κολόνας, δηλαδή τη μετάβαση από την καμπύλη (3) ελαστικού λυγισμού στην καμπύλη (7) της κατάρρευσης λόγω πλαστικοποίησης του φορέα. Η καμπύλη (5) εμπεριέχει τη γεωμετρική, λόγω μη τέλει κολόνας, και την υλική, λόγω παρουσίας πλαστικών ζωνών, μη γραμμικότητα, που οδηγεί σε ελάττωση κλίσης της καμπύλης και κατάρρευση. Να σημειωθεί ότι τέλεια κολόνα υφίσταται όταν: α) δεν υπάρχει αρχικό βέλος κάμψης στην εγκάρσια κατεύθυνση καθόλο το μήκος της, β) οι τάσεις σε όλα τα σημεία πριν την επιβολή φορτίου είναι μηδέν και γ) το κέντρο εφαρμογής του φορτίου συμπίπτει με τον κεντροβαρικό άξονα της διατομής.



Σχήμα 3.6 Απόκριση πρισματικών φορέων ανάλογα με τη φόρτιση [9]

3.3.3 Γενίκευση καμπύλης ελαστικού λυγισμού του Euler για δοκό-κολόνα

Η συμπεριφορά μιας τέλει κολόνας, ή πρισματικού φορέα χωρίς αρχικές ατέλειες, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας όμως από τους σημαντικότερους είναι το μήκος, ιδιαίτερα σε σχέση με τις διαστάσεις και την κατανομή του υλικού της εγκάρσιας επιφάνειας. Έτσι, εάν αυξηθεί το μήκος της πρισματικής διατομής, παρατηρείται ότι το μέγιστο φορτίο ελαττώνεται. Το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει ο πρισματικός φορέας προσδιορίζεται από το κρίσιμο φορτίο ελαστικού λυγισμού P_{cr} ή την κρίσιμη τάση λυγισμού σ_{cr} που δίνονται από τον τύπο του Euler: $P_E = \frac{\pi^2 EI_E}{L_e^2}$ (13) και $\sigma_E = \frac{\pi^2 EI_E}{A_E L_e^2} =$

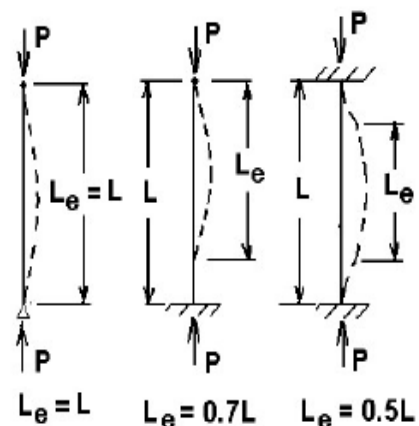
$$\pi^2 E \left(\frac{r}{L_e} \right)^2 \xleftrightarrow{\text{Σε αδιάστατη μορφή}} \frac{\sigma_E}{\sigma_e} = \frac{\sigma_E}{\varepsilon \sigma_0} = \frac{1}{\lambda^2} \quad (14)$$

όπου λ : σταθερό για τέλεια κολόνα και εξαρτώμενο της παραμόρφωσης για μη τέλεια κολόνα λόγω μεταβολής της καμπτικής ακαμψίας E^*I_E του φορέα (π.χ. στο ενισχυμένο έλασμα) & της φέρουσας επιφάνειας A_E , P_E το φορτίο ελαστικού λυγισμού, E το μέτρο ελαστικότητας, I_E η ροπή αδράνειας της διατομής περί τον άξονα κάμψης, L το μήκος διατομής, $L_e (= kL)$ το ανυποστήρικτο μήκος του φορέα, k ο συντελεστής λυγισμού ανάλογα με τις συνθήκες στήριξης, A_E το εμβαδό της διατομής του

πρισματικού φορέα, $r (= \sqrt{\frac{I_E}{A}})$ η ακτίνα αδράνειας της διατομής, σ_0 η τάση διαρροής του υλικού του στοιχείου, σ_e η στιγμιαία θλιπτική τάση στον φορέα ($=\varepsilon^* \sigma_0$), ε η στιγμιαία διαμήκης σχετική ανοιγμένη παραμόρφωση $= \varepsilon_{elem}/\varepsilon_y$ όπου ε_{elem} η στιγμιαία διαμήκης παραμόρφωση του στοιχείου και ε_y η παραμόρφωση στην τάση διαρροής, $\lambda(\varepsilon)$ η στιγμιαία λυγηρότητα του φορέα στην τάση σ_e , ίση με $\frac{L_e}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_e}{E}} = f\left(\frac{L_e}{r}\right)$ και με $\lambda_{crit} = \frac{L_e}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_0}{E}}$

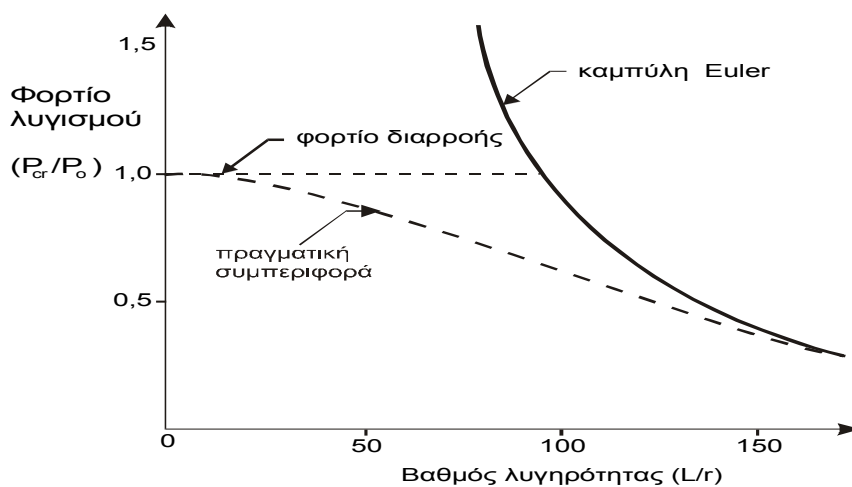
ώστε να ισχύει ο νόμος του Hooke για γραμμικά ελαστικό υλικό. Το $\varepsilon > 0$ κατά σύμβαση για τα θλιπτικά φορτία. Συνήθως το k λαμβάνεται ίσο με 1 γιατί δίνει το ελάχιστο κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Η παραπάνω σχέση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση των διατομών με σχετικά μεγάλο μήκος. Όταν ελαττωθεί το μήκος παρατηρείται σταδιακά απόκλιση από τα προσδοκώμενα αποτελέσματα καθώς η σχέση (13) δίνει τιμές για το φορτίο λυγισμού πολύ υψηλότερες από αυτές που παρατηρούνται στην πράξη. Αυτό προκύπτει διότι η συμπεριφορά της διατομής παύει να είναι ελαστική, καθώς αρχίζουν να δημιουργούνται πλαστικές ζώνες σε κρίσιμα σημεία της.

Οι πλαστικές αυτές ζώνες δεν συμβάλλουν στη μεταφορική της ικανότητα και έτσι, το ωφέλιμο εμβαδόν της διατομής ελαττώνεται. Για το λόγο αυτό το μεταφερόμενο φορτίο είναι μικρότερο από το αναμενόμενο, σταδιακά δε καθώς επεκτείνονται οι

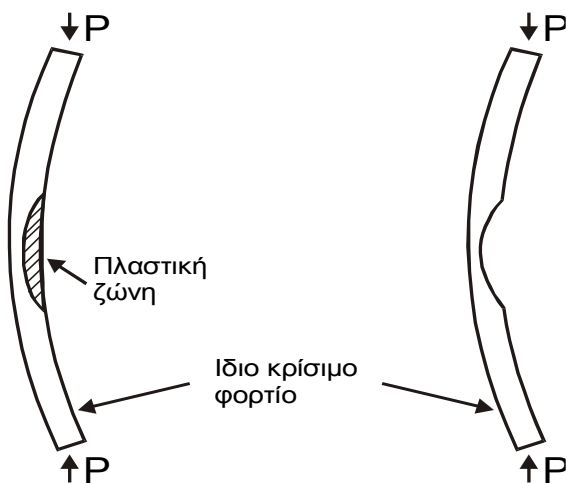


Σχήμα 3.7 Για αμφίεριστο φορέα $k=1$, για αμφίπακτο φορέα $k=0.5$ και για φορέα μιας πάκτωσης και μιας στήριξης $k=0.7$

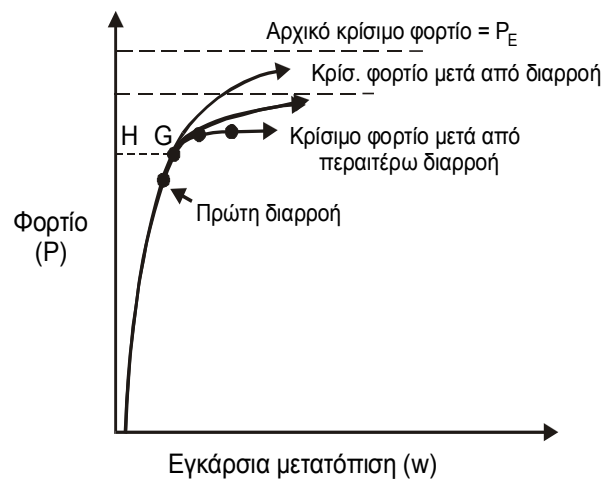
πλαστικές ζώνες η απόκλιση της πραγματικής από την αναμενόμενη συμπεριφορά αυξάνεται. Τα παραπάνω γίνονται πιο σαφή εάν σχεδιάσουμε την καμπύλη Euler, όπως γίνεται στο Σχήμα 3.8. Βλέπουμε ότι για τιμές του λόγου L/r (βαθμού λυγηρότητας) μικρότερες του 100-150, η πραγματική συμπεριφορά προσεγγίζεται με μία καμπύλη διαφορετική της αρχικής (διακεκομμένη γραμμή). Εάν λοιπόν η υπό μελέτη διατομή συμβάλλει στην αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, γίνεται αντιληπτό ότι τυχόν αστοχία μπορεί να έχει καταστροφικά αποτελέσματα, καθότι η τοπική κατάρρευση μπορεί να επεκταθεί και ευρύτερα. Για τον λόγο αυτό οι συντελεστές ασφάλειας που χρησιμοποιούνται κατά το σχεδιασμό φορέων που υποβάλλονται σε θλιπτικές φορτίσεις είναι υψηλοί (2,5-3,0) [12].



Σχήμα 3.8 Καμπύλες αντοχής πρισματικής διατομής [12]



Σχήμα 3.9 Ισοδύναμη διατομή μετά από την πλαστικοποίηση υλικού



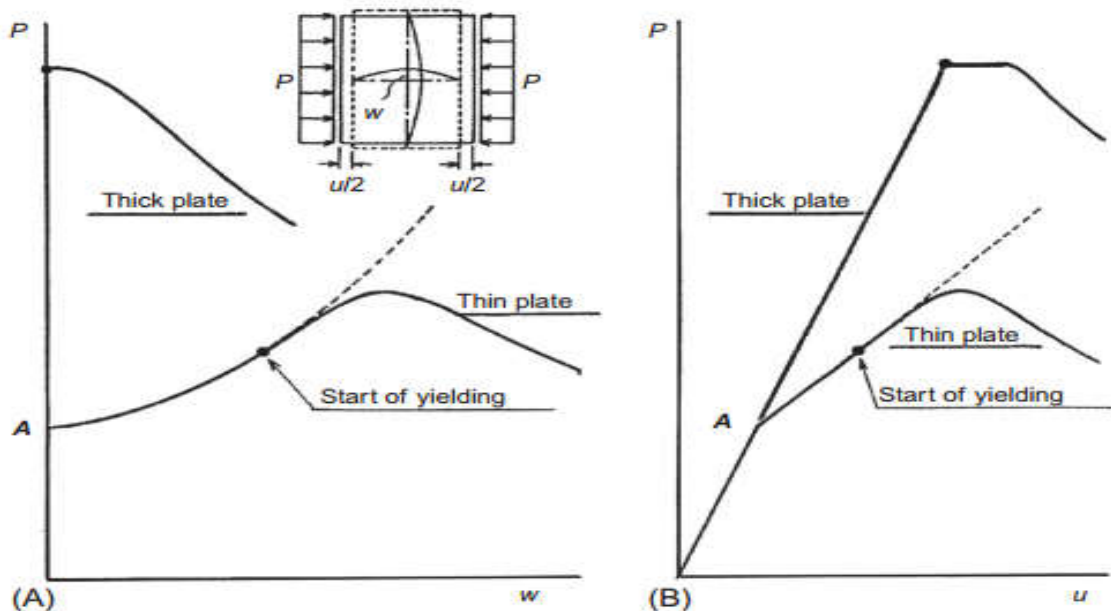
Σχήμα 3.10 Μεταβολή του κρίσιμου φορτίου λυγισμού κατά την πλαστικοποίηση της διατομής

Εν γένει, με βάση τα παραπάνω μπορεί να ειπωθεί ότι το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μιας δοκού-κολόνας εξαρτάται από τα εξής:

- ✓ Αρχικό βέλος κάμψης του πρισματικού φορέα (αρχικές ατέλειες)
- ✓ Εκκεντρότητα του θλιπτικού αξονικού φορτίου
- ✓ Παρουσία κάθετων φορτίων
- ✓ Μήκος φορέα και γενικά επίδραση μη-ελαστικής συμπεριφοράς
- ✓ Τύπος συνθηκών στα άκρα του φορέα
- ✓ Παρουσία τοπικού λυγισμού
- ✓ Ύπαρξη παραμενουσών τάσεων

3.3.4 Ελαστο-πλαστικός λυγισμός απλού ορθογωνίου ελάσματος υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση

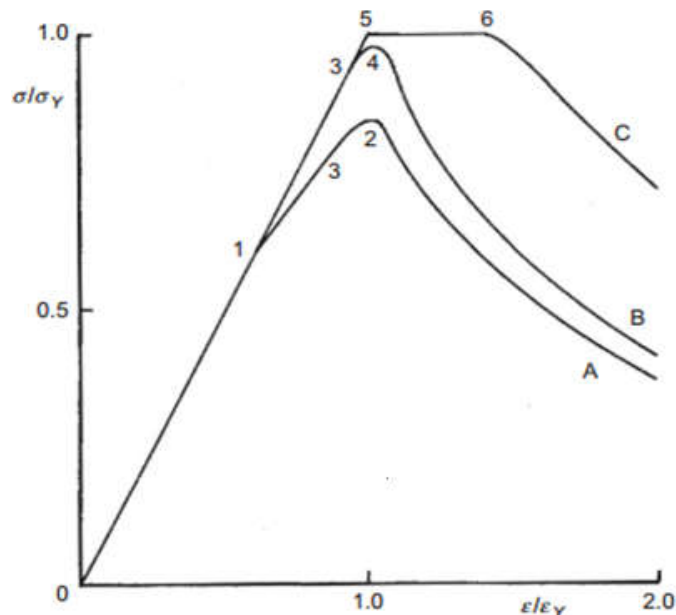
Στην περίπτωση ενός απλά εδρασμένου ελάσματος υπό μονοαξονική θλίψη η συμπεριφορά της αστοχίας του δίνεται από το Σχήμα 3.11. Το Σχήμα 3.11 δείχνει το πώς μεταβάλλεται το βέλος κάμψης w και η αξονική μετατόπιση u του ελάσματος συναρτήσει της φόρτισης P . Όσον αφορά τα λεπτά ελάσματα, μετά την υπέρβαση του σημείου A (ελαστικός λυγισμός), το βέλος κάμψης αυξάνεται με γρήγορο ρυθμό. Αυτή η αύξηση του βέλους κάμψης όμως προκαλεί μείωση του μέτρου ακαμψίας (tangent modulus) της P-u. Η μείωση αυτή παραμένει περίπου σταθερή μέχρι την πρώτη διαρροή του ελάσματος. Εν συνεχεία το βέλος κάμψης και η αξονική παραμόρφωση αυξάνονται μέχρις ότου το μέτρο ακαμψίας γίνει 0, δηλαδή το λεπτό έλασμα φτάσει τη μέγιστη αντοχή του (ultimate strength). Ακολουθεί η κατάρρευση του ελάσματος. Αντίθετα με ένα λεπτό έλασμα, στο παχύ έλασμα η διαρροή θα λάβει χώρα στα άκρα του ελάσματος προτού συμβεί λυγισμός. Σε αυτή την περίπτωση η μέγιστη αντοχή του ελάσματος δεν είναι άλλη από την τάση διαρροής του υλικού. Έτσι, διατηρώντας το φορτίο P_{crit} παρατηρείται ότι σε κάποια παραμόρφωση u προκύπτει και λυγισμός. Μετά από αυτό το σημείο ακολουθεί η κατάρρευση του ελάσματος.



Σχήμα 3.11 Ελαστο-πλαστικός λυγισμός λεπτού και παχέος ελάσματος [10].

3.3.5 Ελαστο-πλαστικός λυγισμός ενισχυμένου ελάσματος (ή ενισχυτικού στοιχείου) υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση

- Όταν η λυγηρότητα του συνεργαζόμενου ελάσματος (β_E) είναι μεγάλη (λεπτό έλασμα) τότε στο ενισχυμένο έλασμα αντιστοιχεί η καμπύλη A του Σχήματος 3.12. Στο σημείο 1 (διακλάδωση) της καμπύλης συμβαίνει ο ελαστικός λυγισμός του συνεργαζόμενου ελάσματος. Εδώ ο τρόπος παραμόρφωσης του ενισχυμένου ελάσματος αλλάζει ακολουθώντας έναν δευτερεύοντα δρόμο ισορροπίας (path of equilibrium) με ανοδική πορεία (ευσταθής λυγισμός). Διαθέτει δηλαδή μεταλυγισμική αντοχή. Εν συνεχεία το μέτρο ακαμψίας της καμπύλης μειώνεται λόγω αύξησης του βέλους κάμψης κάθετα στον άξονα της φόρτισης. Στο σημείο 3 σημειώνεται η πρώτη διαρροή του υλικού, ενώ στο σημείο 2 το ενισχυμένο έλασμα φτάνει τη μέγιστη αντοχή του (κατάρρευση με ελαστο-πλαστικό λυγισμό).
- Η καμπύλη B αντιπροσωπεύει την κατάρρευση ενισχυμένου ελάσματος με συνεργαζόμενο έλασμα μικρής λυγηρότητας (μεσαίου πάχους). Ως εκ τούτου το σημείο 3 πλέον αποτελεί το σημείο πρώτης διαρροής. Στο σημείο 4 το ενισχυμένο έλασμα φτάνει τη μέγιστη αντοχή του αφότου υποστεί λυγισμό.
- Η καμπύλη C αντιπροσωπεύει το ενισχυμένο έλασμα που έχει συνεργαζόμενο έλασμα πολύ μικρής λυγηρότητα β_E (παχύ έλασμα). Ως εκ τούτου προηγείται η πρώτη διαρροή του υλικού στο σημείο 5 και αφότου έχουν αναπτυχθεί σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις, σημειώνεται στο 6 λυγισμός του ελάσματος ή του ενισχυτικού και επακόλουθη κατάρρευση.



Σχήμα 3.12 Καμπύλες κατάρρευσης (ή μειωτικές καμπύλες φόρτισης) ενισχυμένων ελασμάτων με ελαστο-πλαστικό λυγισμό [10].

3.4 Κατάρρευση ενισχυτικού στοιχείου με λυγισμό δοκού-κολόνας (Beam-Column buckling)

Σχέση μειωτικής φόρτισης κατά CSR-H:

Η μέση τάση μειωτικής φόρτισης που οδηγεί σε κατάρρευση με λυγισμό δοκού-κολόνας, σε MPa (N/mm²), δίνεται από τη σχέση:



Σχήμα 3.13 Λυγισμός δοκού-κολόνας

$$\sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{C1} \frac{A_{s-n50} + A_{pE-n50}}{A_{s-n50} + A_{p-n50}} \quad (15)$$

όπου:

(...)_{n-50}: λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς το 50% του περιθωρίου διάβρωσης που ορίζουν οι κανονισμοί CSR-H για τα πάχη ελάσματος και ενισχυτικού

Φ : η συνάρτηση $\Phi(\epsilon)$, όπως ορίστηκε στην ελαστο-πλαστική κατάρρευση των στοιχείων, και δίνεται από τη σχέση $\Phi(\epsilon) = \sigma_e / R_{eHA}$

σ_{C1} [N/mm²]: κρίσιμη τάση λυγισμού η οποία δίνεται με βάση τη γενικευμένη⁴ καμπύλη Johnson-Ostenfeld, δηλαδή:

$$\sigma_{C1} = \begin{cases} \frac{\sigma_{E1}}{\epsilon} & \text{για } \sigma_{E1} \leq \frac{R_{eHB}}{2} \epsilon \\ R_{eHB} \left(1 - \frac{R_{eHB}}{4\sigma_{E1}} \epsilon \right) & \text{για } \sigma_{E1} > \frac{R_{eHB}}{2} \epsilon \end{cases}$$

R_{eHB} [N/mm²]: ισοδύναμη τάση διαρροής του θεωρούμενου ενισχυτικού στοιχείου που δίνεται από τη σχέση: $R_{eHB} = \frac{R_{eHp} A_{pEI-n50} I_{pE} + R_{eHs} A_{s-n50} I_{sE}}{A_{pEI-n50} I_{pE} + A_{s-n50} I_{sE}} = \sigma_o$

ϵ : στιγμιαία διαμήκης σχετική ανοιγμένη παραμόρφωση ($\epsilon = \epsilon_{elem} / \epsilon_{yield}$)

R_{eHp}, R_{eHs} [N/mm²]: τάση διαρροής συνεργαζόμενου ελάσματος και ενισχυτικού

A_{s-n50}, A_{p-n50} [cm²]: εμβαδό ενισχυτικού και ελάσματος αντίστοιχα ($A_{p-n50} = s * t_{n50}$)

$A_{pEI-n50}$ [cm²]: Ισοδύναμο εμβαδό συνεργαζόμενου ελάσματος που δίνεται από τη σχέση: $A_{pEI-n50} = 10 b_{E1} * t_{n50}$

⁴ Γενικευμένη ονομάζεται λόγω της εξάρτησης από την στιγμιαία διαμήκη σχετική ανοιγμένη παραμόρφωση ϵ .

t_{n50} [mm] : ολικό πάχος ελάσματος - 50% του πάχους διάβρωσης

I_{pE} [mm]: Απόσταση ουδέτερου άξονα ενισχυτικού στοιχείου με πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος b_{E1} από την κάτω ίνα του συνεργαζόμενου ελάσματος

I_{sE} [mm]: Απόσταση ουδέτερου άξονα ενισχυτικού στοιχείου από την κορυφή του ενισχυτικού

σ_{E1} [N/mm²]: κρίσιμη τάση ελαστικού λυγισμού κατά Euler από τον τύπο:

$$\sigma_{E1}(\varepsilon) = \pi^2 E \frac{I_{E-n50}(\varepsilon)}{A_{E-n50}(\varepsilon) L^2} 10^{-4}$$

L [m]: το ανυποστήρικτο μήκος του συστήματος διαμήκους ενισχυτικού-συνεργαζόμενου ελάσματος

I_{E-n50} [cm⁴] : η δεύτερη ροπή αδράνειας του ενισχυτικού στοιχείου ως προς τον ουδέτερο του άξονα με πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος b_{E1}

A_{E-n50} [cm²]: Εμβαδό ενισχυτικού μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους b_E , δηλαδή $A_{E-n50} = A_{s-n50} + A_{pE-n50}$

$b_{E1}(\varepsilon)$ [m] : μειωμένο ισοδύναμο πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος σε θλίψη, διορθωμένο λόγω αλλαγής της σχετικής παραμόρφωσης ε στο στοιχείο, και δίνεται από τη σχέση:

$$b_{E1} = \begin{cases} \frac{s}{\beta_E} & \text{για } \beta_E > 1 \\ s & \text{για } \beta_E \leq 1 \end{cases}$$

s [m] : ισαπόσταση μεταξύ δύο ενισχυτικών \equiv πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος

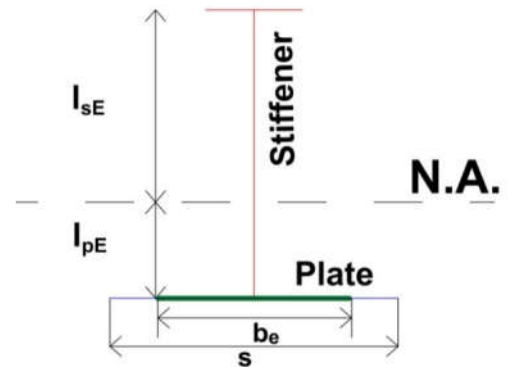
$\beta_E(\varepsilon)$: λυγηρότητα ελάσματος που δίνεται από τη σχέση: $\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_{n50}} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$

A_{pE-n50} [cm²] : Εμβαδό συνεργαζόμενου ελάσματος πλάτους b_E που δίνεται από τη σχέση:

$$A_{pE-n50} = 10 b_E * t_{n50}$$

b_E [m] : ισοδύναμο πλάτος ελάσματος σε θλίψη, που αποτελεί μέτρο της μέγιστης αντοχής του (βλ. Σχήμα 3.14) και δίνεται από τη σχέση:

Ενισχυτικό στοιχείο (Stiffener Element)



Σχήμα 3.14 Πραγματική & Ισοδύναμη διατομή του συστήματος ενισχυτικού-συνεργαζόμενου ελάσματος

$$b_E = \begin{cases} \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) s & \text{για } \beta_E > 1,25 \\ s & \text{για } \beta_E \leq 1,25 \end{cases} \quad ^5$$

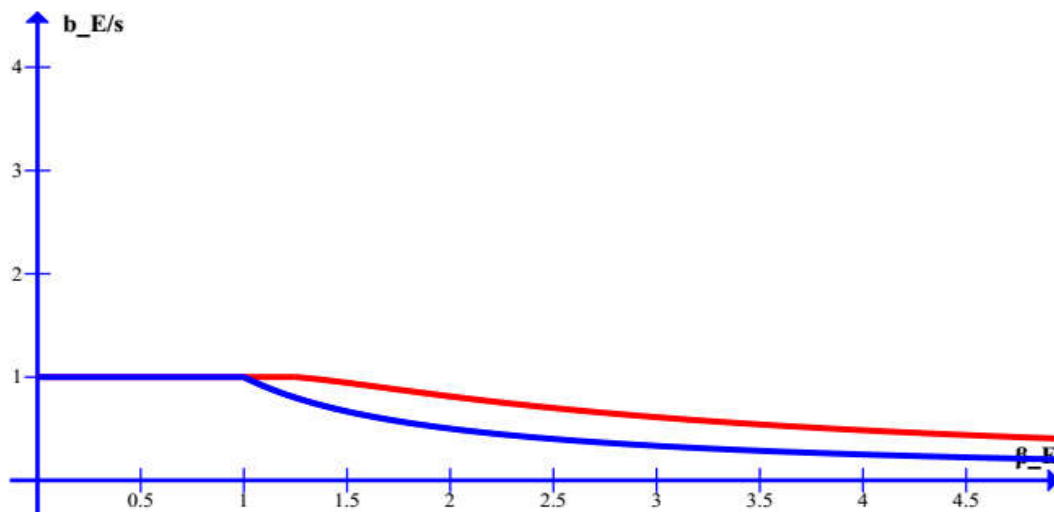
Ισοδύναμο πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος σε θλίψη

Το b_E προκύπτει από τη δημιουργία ισοδύναμης κατανομής με την πραγματική σταθερής θλιπτικής τάσης σ_{\max} των αφόρτιστων πλευρών κατά το πλάτος b_E του ενισχυμένου ελάσματος (βλ. Σχήμα 3.14 & 3.17).

Μειωμένο ισοδύναμο πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος σε θλίψη

Κατά την κατάρρευση ενός ενισχυμένου ελάσματος, ο Wagner έδειξε ότι η συμβολή του ελάσματος στην αντοχή της διατομής συνίσταται στην ικανότητα παραλαβής πρόσθετων φορτίων (δηλαδή στην ακαμψία του, $dP/d\epsilon$), και όχι στη μεταφορική του ικανότητα (P). Στην ανελαστική περιοχή και προ της κατάρρευσης, το ισοδύναμο πλάτος του ελάσματος μειώνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο. Σε αυτή τη φάση της φόρτισης, η ακαμψία του ελάσματος εξαρτάται από το ισοδύναμο πλάτος στο προηγούμενο στάδιο φόρτισης και στο επόμενο. Επιδή δε στο επόμενο στάδιο το ισοδύναμο πλάτος θα είναι μικρότερο, αυτό καλείται μειωμένο ισοδύναμο πλάτος, b_{E1} , και ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$b_{E1} = b_E + |\sigma_{\max}| db_E/d\sigma_{\max}$ όπου σ_{\max} η μέγιστη θλιπτική τάση κατά μήκος των αφόρτιστων πλευρών κατανεμημένη στο b_E (βλ. Σχήμα 3.17). Εφόσον $db_E/d\sigma_{\max} < 0$, τότε $b_{E1} < b_E$, όταν αυξάνεται το φορτίο [12]. Αυτός είναι και ο λόγος που η καμπύλη του b_{E1} δίνει κατά τι μικρότερες τιμές της καμπύλης του b_E για κάθε λυγηρότητα ελάσματος. Για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω μπορεί να δει κανείς τα σχήματα 3.15 & 3.17.



Σχήμα 3.15 Η κόκκινη καμπύλη δείχνει πώς μεταβάλλεται το b_E/s συναρτήσει της λυγηρότητας β_E του συνεργαζόμενου ελάσματος και η μπλε πώς μεταβάλλεται το b_{E1}/s συναρτήσει της λυγηρότητας.

⁵ Ο πρώτος κλάδος προέρχεται από πειραματικά αποτελέσματα και είναι γνωστός στη βιβλιογραφία ως η σχέση του Frankland για απλά εδρασμένα ελάσματα.

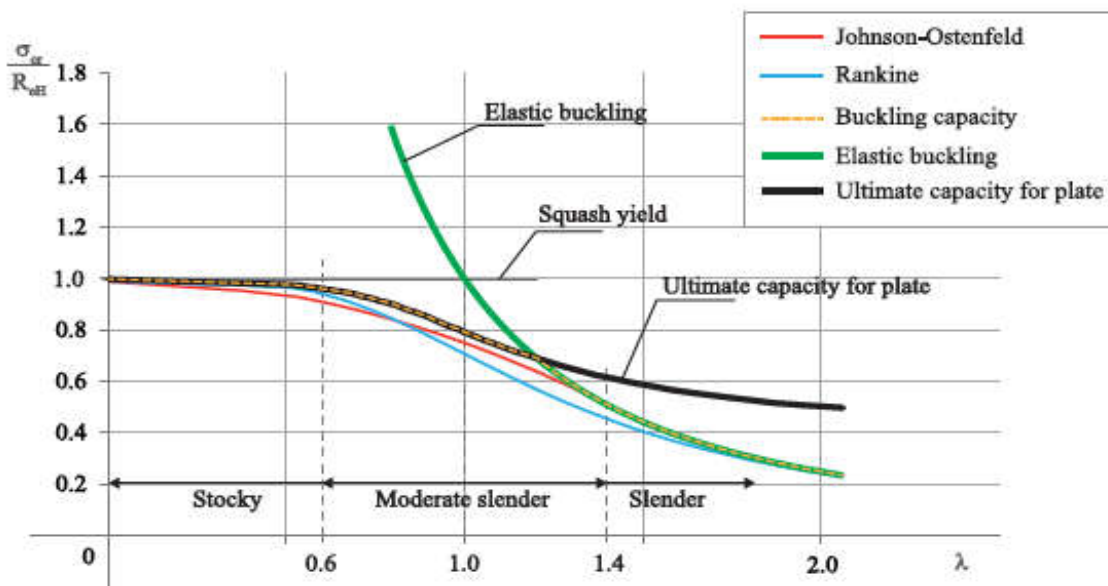
Γενικευμένη καμπύλη Johnson-Ostenfeld (Ελαστο-πλαστικός σχεδιασμός)

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω ο IACS στους CSR-H υπολογίζει το φορτίο κατάρρευσης των ενισχυτικών στοιχείων από τη ρεαλιστική καμπύλη αντοχής πρισματικών φορέων (column strength curve) για ελαστο-πλαστικό σχεδιασμό, που είναι γνωστή ως σχέση-καμπύλη Johnson-Ostenfeld:

$$\frac{P_u}{P_e}(\epsilon) = \begin{cases} 1 - \frac{\lambda(\epsilon)^2}{4} & \text{για } \lambda(\epsilon) < \sqrt{2} \\ \frac{1}{\lambda(\epsilon)^2} & \text{για } \lambda(\epsilon) \geq \sqrt{2} \text{ (καμπύλη Euler)} \end{cases} \quad (16)$$

Διακρίνονται 3 περιοχές αστοχίας όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

- ✚ Για επιμήκη υποστυλώματα (ή κολόνες), όπου η λυγηρότητα είναι μεγάλη, η αστοχία προβλέπεται από την καμπύλη του Euler και η τιμή της σ_{cr} , όπως παρατηρήθηκε από πειράματα, εξαρτάται από το μέτρο ελαστικότητας E του χάλυβα που χρησιμοποιείται, αλλά όχι από την τάση διαρροής του R_{eHB} (ελαστικός λυγισμός).
- ✚ Σε υποστηλώματα μέσου μήκους η αστοχία εξαρτάται από την R_{eHB} και το E (ελαστοπλαστικός λυγισμός). Τα ναυπηγικά ελάσματα σχεδιάζονται με τέτοιον τρόπο ώστε να καταρρέουν με ελαστοπλαστικό λυγισμό.
- ✚ Για πολύ κοντά υποστηλώματα και θλιβόμενους στύλους, η αστοχία προκύπτει ουσιαστικά σαν αποτέλεσμα διαρροής, πριν την εμφάνιση του λυγισμού.



Σχήμα 3.16 Στο σχήμα δίνεται η κρίσιμη τάση λυγισμού ελασμάτων & φορέων προς την τάση διαρροής τους σαν συνάρτηση της λυγηρότητάς τους. Η πράσινη καμπύλη είναι η καμπύλη ελαστικού λυγισμού (καμπύλη Euler). Οι υπόλοιπες καμπύλες λαμβάνουν υπόψη και το φαινόμενο της πλαστικοποίησης του υλικού.

Δικαιολόγηση σχέσης (15) – ολικού λυγισμού δοκού-κολόνας

Η σχέση (16) γράφεται ισοδύναμα λόγω της (14):

$$\frac{P_u}{P_e}(\varepsilon) = \begin{cases} 1 - \frac{\sigma_e}{4\sigma_{E1}(\varepsilon)} & \text{για } \sqrt{\frac{\sigma_e}{\sigma_{E1}(\varepsilon)}} < \sqrt{2} \\ \frac{\sigma_{E1}(\varepsilon)}{\sigma_e} & \text{για } \sqrt{\frac{\sigma_e}{\sigma_{E1}(\varepsilon)}} \geq \sqrt{2} \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{\max}(\varepsilon) = \begin{cases} \sigma_e \left(1 - \frac{\sigma_e}{4\sigma_{E1}(\varepsilon)}\right) & \text{για } \sigma_{E1}(\varepsilon) > \frac{\sigma_e}{2} \quad \begin{matrix} \sigma_e = \Phi(\varepsilon) R_{eHB} \\ \leftarrow \rightleftharpoons \end{matrix} \\ \sigma_e \frac{\sigma_{E1}(\varepsilon)}{\sigma_e} & \text{για } \sigma_{E1}(\varepsilon) \leq \frac{\sigma_e}{2} \quad \sigma_e = \varepsilon R_{eHB} \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{\max}(\varepsilon) = \begin{cases} \Phi(\varepsilon) R_{eHB} \left(1 - \frac{\varepsilon R_{eHB}}{4\sigma_{E1}(\varepsilon)}\right) & \text{για } \sigma_{E1}(\varepsilon) > \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon \\ \Phi(\varepsilon) R_{eHB} \frac{\sigma_{E1}(\varepsilon)}{\varepsilon R_{eHB}} & \text{για } \sigma_{E1}(\varepsilon) \leq \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon \end{cases} \quad (17)$$

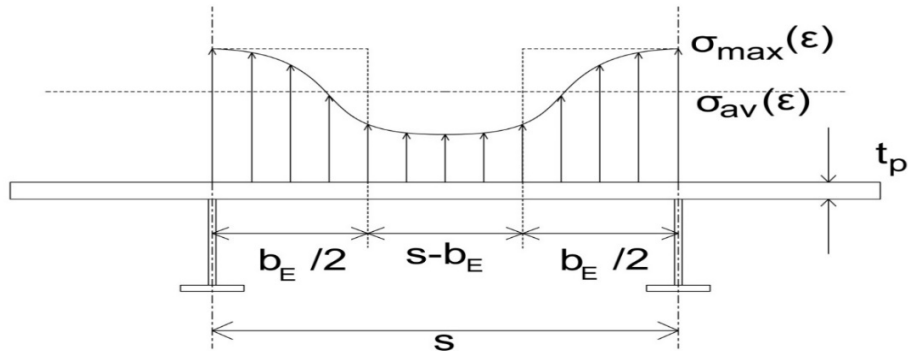
Όμως για κάθε σχετική παραμόρφωση ε , η μέση θλιπτική τάση $\sigma_{av}(\varepsilon)$ στο σύστημα ενισχυτικό-συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους $b_E(\varepsilon)$ μπορεί να βρεθεί εάν θεωρηθεί η παρακάτω ισοροπία τάσεων:

$$(A_{Stiff} + s t_p) \sigma_{av}(\varepsilon) = (A_{Stiff} + b_E(\varepsilon) t_p) \sigma_{\max}(\varepsilon) \quad \begin{matrix} \text{Για } \sigma_{av}(\varepsilon) = \sigma_{C1} \\ \leftarrow \rightleftharpoons \end{matrix}$$

$$\Leftrightarrow \sigma_{CR1} = \Phi(\varepsilon) \sigma_{C1} \frac{A_{Stiff} + b_E(\varepsilon) t_p}{A_{Stiff} + s t} \Rightarrow \sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{C1} \frac{A_{S-n50} + A_{pE-n50}}{A_{S-n50} + A_{p-n50}}$$

όπου

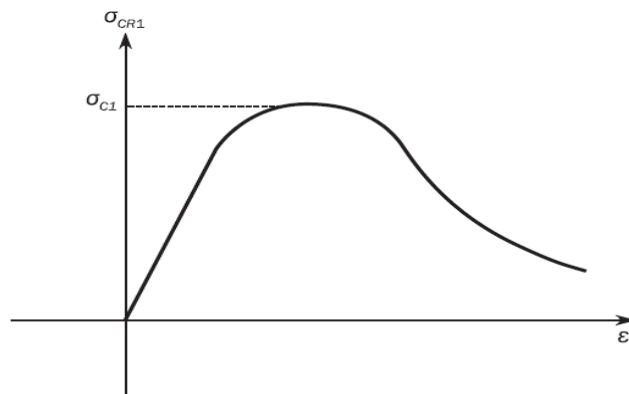
$$\sigma_{C1} = \begin{cases} \frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon} & \text{για } \sigma_{E1} \leq \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon \\ R_{eHB} \left(1 - \frac{R_{eHB} \varepsilon}{4\sigma_{E1}}\right) & \text{για } \sigma_{E1} > \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon \end{cases}$$



Σχήμα 3.17 Διάχυση φορτίου προς τα ενισχυμένα άκρα που αντέχουν περισσότερο. Στο Σχήμα φαίνεται το ισοδύναμο πλάτος ελάσματος που αποτελείται από τις μεταλυγισμικές περιοχές που φέρουν το φορτίο.

Συμπεράσματα:

- α) Η λυγηρότητα δοκού-κολόνας είναι μεταβαλλόμενη και εξαρτώμενη του ε .
- β) Η κατάρρευση του ενισχυμένου ελάσματος επέρχεται με ελαστοπλαστικό λυγισμό δοκού-κολόνας όταν $\sigma_{E1}(\varepsilon) = \frac{R_{eHB}}{2}$
- γ) Στη σχέση των CSR-H το Φ ορίζει την πλαστικοποίηση ή μη του υλικού ανάλογα με την παραμόρφωση. Η τάση σ_{CI} ορίζει την κρίσιμη τάση ελαστο-πλαστικού λυγισμού ανάλογα με τη λυγηρότητα της δοκού-κολόνας σύμφωνα με τη γενικευμένη σχέση Johnson-Ostenfeld (μη γραμμικότητα γεωμετρίας). Ο όρος $\frac{A_{S-n50}+A_{pE-n50}}{A_{S-n50}+A_{p-n50}}$, ο οποίος λαμβάνει υπόψη το ισοδύναμο πλάτος σε θλίψη, χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της μετα-λυγισμικής αντοχής του ενισχυμένου ελάσματος (μη γραμμικότητα γεωμετρίας).
- δ) Ο λυγισμός δοκού-κολόνας δίνει σαν μόνιμο αποτέλεσμα τον ίδιο μόνιμα παραμορφωμένο φορέα, που θα προέκυπτε από την ελαστική κάμψη του φορέα γύρω από τον οριζόντιο κεντροβαρικό του άξονα.



Σχήμα 3.18 Τυπική μορφή κατάρρευσης ενισχυτικού στοιχείου με λυγισμό δοκού-κολόνας

3.5 Κατάρρευση ενισχυτικού στοιχείου με στρεπτικό λυγισμό ενισχυτικού (Torsional buckling)

Σχέση μειωτικής φόρτισης κατά CSR-H

Η μέση τάση μειωτικής φόρτισης που οδηγεί σε κατάρρευση με εγκάρσιο-στρεπτικό λυγισμό (lateral-torsional) ⁶ του ενισχυτικού, σε MPa (N/mm²), δίνεται από τη σχέση:

⁶ Ο εγκάρσιος-στρεπτικός (ή στρεπτο-καμπτικός) λυγισμός είναι ευρύτερη κατηγορία του στρεπτικού. Ουσιαστικά πρόκειται για εγκάρσιο και στρεπτικό λυγισμό ταυτόχρονα. Ο εγκάρσιος προέρχεται από την κάμψη του φορέα ως προς τον κατακόρυφο άξονα Oz.

$$\sigma_{CR2} = \Phi \frac{A_{S-n50}\sigma_{C2} + A_{P-n50}\sigma_{CP}}{A_{S-n50} + A_{P-n50}} \quad (18)$$

όπου

Φ : η συνάρτηση $\Phi(\varepsilon)$, όπως ορίστηκε παραπάνω

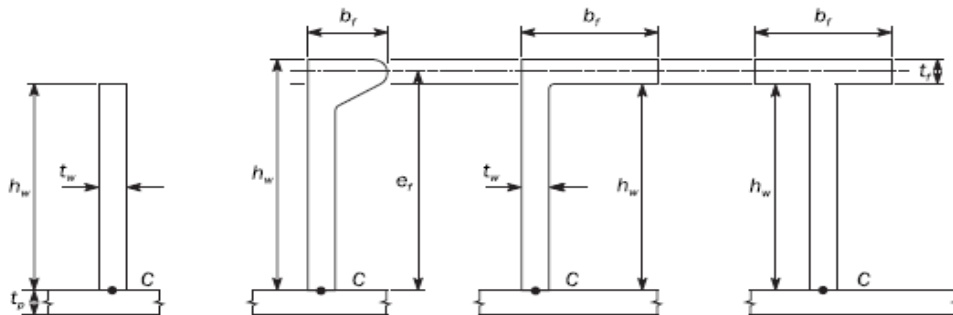
σ_{C2} [N/mm²]: κρίσιμη τάση λυγισμού ενισχυτικού η οποία δίνεται με βάση τη γενικευμένη καμπύλη Johnson-Ostenfeld, δηλαδή:

$$\sigma_{C2} = \begin{cases} \frac{\sigma_{E2}}{\varepsilon} & \text{για } \sigma_{E2} \leq \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon \\ R_{eHs} \left(1 - \frac{R_{eHs} \varepsilon}{4\sigma_{E2}} \right) & \text{για } \sigma_{E2} > \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon \end{cases}$$

R_{eHp} , R_{eHs} [N/mm²]: τάση διαρροής συνεργαζόμενου ελάσματος και ενισχυτικού

σ_{E2} [N/mm²] : κρίσιμη τάση στρεπτο-καμπτικού ελαστικού λυγισμού από τον τύπο:

$$\sigma_{E2}(\varepsilon) = \sigma_{ET} = \frac{E}{I_P} \left(\frac{\varepsilon' \pi^2 I_\omega 10^2}{L^2} + 0.385 I_T \right) \text{ σύμφωνα με CSR - H}$$



Σχήμα 3.19 Διατομές ενισχυτικών που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική βιομηχανία: απλή λάμα (flat bar), βολβολάμα (bulb flat), γωνιά (angle bar), λάμα τύπου T (T-bar)

L [m] : το ανυποστήρικτο μήκος του συστήματος διαμήκους ενισχυτικού-συνεργαζόμενου ελάσματος

I_P [cm⁴] : η πολική ροπή αδράνειας του ενισχυτικού ως προς το σημείο C του ενισχυτικού, που δίνεται στον παρακάτω πίνακα ανάλογα με τον τύπο ενισχυτικού.

I_T [cm⁴] : Ροπή αδράνειας ενισχυτικού σε στρέψη σύμφωνα με την αρχή του Saint-Venant, που δίνεται στον παρακάτω πίνακα ανάλογα με τον τύπο ενισχυτικού

I_{ω} [cm⁶] : Ροπή αδράνειας ενισχυτικού περί τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το σημείο C + Διαμήκης Στρέβλωση, που δίνεται από τον παρακάτω πίνακα και ισχύει ότι: $I_{\omega} = I_z \bar{z}^2 + \Gamma$, όπου \bar{z} η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα του ενισχυτικού μέχρι το σημείο C και Γ η διαμήκης στρέβλωση, που αγνοείται (αρχή του Saint-Venant).

ϵ' : βαθμός στήριξης ενισχυτικού, που δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon' = 1 + \frac{\left(\frac{L}{\pi}\right)^2 10^{-3}}{\sqrt{I_{\omega} \left(\frac{0.75s}{t_p^3} + \frac{e_f - 0.5t_f}{t_w^3}\right)}}$$

Πίνακας 3.1 Ροπές Αδράνειας ενισχυτικών

	Flat bars ⁽¹⁾	Bulb, angle and T profiles
I_F	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \times 10^4}$	$\left(\frac{A_w (e_r - 0.5t_r)^2}{3} + A_r e_r^2\right) 10^{-4}$
I_T	$\frac{h_w t_w^3}{3 \times 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w}\right)$	$\frac{(e_r - 0.5t_r) t_r^3}{3 \times 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_w}{e_r - 0.5t_r}\right) + \frac{b_r t_r^3}{3 \cdot 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_r}{b_r}\right)$
I_{ω}	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \times 10^8}$	$\frac{A_r e_r^2 b_r^2 (A_r + 2.6A_w)}{12 \times 10^8}$ for bulb and angle profiles. $\frac{b_r^3 t_r e_r^2}{12 \times 10^8}$ for T profiles.
(1)	t_w is the net web thickness, in mm. $t_{w,nd}$ as defined in [2.3.2] is not to be used in this table.	

όπου t_p (πάχος ελάσματος), h_w (ύψος κορμού), t_w (πάχος κορμού), e_f (Σχ. 3.17), b_f (πλάτος φλάντζας), t_f (πάχος φλάντζας), όπως ορίζονται στο παραπάνω σχήμα με τα ενισχυτικά

s [m] : ισαπόσταση μεταξύ δύο ενισχυτικών \equiv πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος

ϵ : στιγμιαία διαμήκης σχετική ανοιγμένη παραμόρφωση, όπως ορίστηκε παραπάνω

$\beta_E(\epsilon)$: λυγηρότητα ελάσματος, όπως ορίστηκε παραπάνω

σ_{CP} [m] : η κρίσιμη τάση λυγισμού του ελάσματος που δίνεται από την παρακάτω σχέση⁷:

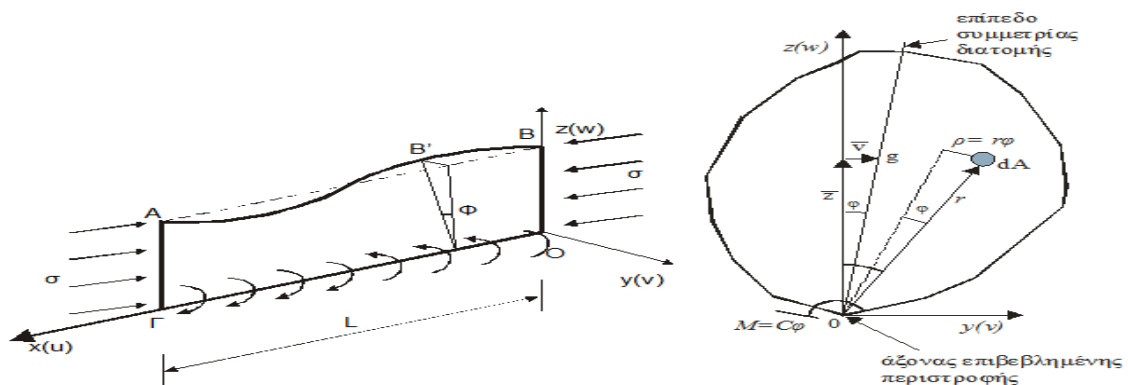
⁷ Ο παράγοντας Φ βγαίνει σαν κοινός παράγοντας στη σχέση (18)

$$\sigma_{av} S = \sigma_{max} b_E \xleftrightarrow{\sigma_{av}=\sigma_{CP} \text{ ΚΑΙ } \sigma_{max}=\Phi R_{eHp}} \sigma_{CP} = \begin{cases} \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^2} \right) R_{eHp} & \text{για } \beta_E > 1,25 \\ R_{eHp} & \text{για } \beta_E \leq 1,25 \end{cases}$$

Δικαιολόγηση σχέσης (18)

Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει ολικός λυγισμός ως εξής: πρώτα λυγίζει το έλασμα και «ρίχνει» το φορτίο προς τις ενισχυμένες πλευρές, έχει δηλαδή μεταλυγισμική αντοχή, και έπειτα λυγίζει το ενισχυτικό λόγω στρεπτο-καμπτικού λυγισμού, οπότε και αστοχεί ολόκληρο το στοιχείο. Οπότε για κάθε ε έχουμε:

$$(A_{Stiff} + A_p) \sigma_{av}(\varepsilon) = A_{Stiff} \sigma_{C2} + A_p \sigma_{CP} \xleftrightarrow{\text{Στα CSR } \sigma_{av}(\varepsilon) \equiv \sigma_{CR2}} \Leftrightarrow \sigma_{CR2} = \Phi(\varepsilon) \frac{A_{Stiff} \sigma_{C2} + A_p \sigma_{CP}}{A_{Stiff} + A_p} \xleftrightarrow{\text{IACS}} \sigma_{CR2} = \Phi \frac{A_{S-n50} \sigma_{C2} + A_{p-n50} \sigma_{CP}}{A_{S-n50} + A_{p-n50}}$$



Σχήμα 3.20 Εγκάρσιος-στρεπτικός λυγισμός απλής λάμας συγκολλημένης με έλασμα κατά μήκος της πλευράς ΟΓ.

Συμπέρασμα

Ο εγκάρσιος-στρεπτικός λυγισμός ενισχυτικού στη γενική του μορφή δίνει κάμψη περί τον άξονα z, στρέψη περί τον άξονα Ox και περιστροφή περί τον Ox (βλ. Σχήμα 3.20). Η κατάρρευση του ενισχυτικού στοιχείου προκύπτει σαν αποτέλεσμα της μείωσης της αντοχής του συνεργαζόμενου ελάσματος και τη διάχυση ολοένα και μεγαλύτερου φορτίου στο ενισχυτικό, το οποίο τελικά λυγίζει. Η ελαστο-πλαστική κατάρρευση του ενισχυτικού εξαρτάται από τη λυγηρότητα του ενισχυτικού, το στρεπτικό περιορισμό του ενισχυτικού λόγω σύνδεσης με το έλασμα και τις αρχικές ατέλειες που αγνοούνται.

3.6 Κατάρρευση ενισχυτικού στοιχείου με τοπικό λυγισμό κορμού ενισχυτικού (Web local buckling)

3.6.1 Τοπικός λυγισμός κορμού για ενισχυτικά με φλάντζα

Η μέση τάση μειωτικής φόρτισης που οδηγεί σε κατάρρευση του στοιχείου με λυγισμό του κορμού του ενισχυτικού, σε MPa (N/mm²), δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{CR3} = \Phi \frac{10^3 b_E t_{n50} R_{eHp} + (h_{we} t_{w-n50} + b_f t_{f-n50}) R_{eHs}}{10^3 s t_{n-50} + h_w t_{w-n50} + b_f t_{f-n50}} \quad (19)$$

όπου:

Φ : η συνάρτηση $\Phi(\varepsilon)$, όπως ορίστηκε παραπάνω

b_E [m]: όπως ορίστηκε παραπάνω

h_{we} [mm] : ισοδύναμο ύψος κορμού ενισχυτικού που δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$h_{we} = \begin{cases} \left(\frac{2,25}{\beta_w} - \frac{1,25}{\beta_w^2} \right) h_w & \text{για } \beta_w \geq 1,25 \\ h_w & \text{για } \beta_w < 1,25 \end{cases}$$

β_w : στιγμιαία λυγηρότητα κορμού του ενισχυτικού που δίνεται από τον τύπο:

$$\beta_w = \frac{h_w}{t_{w-n50}} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHs}}{E}}$$

h_w, b_f : ύψος κορμού

R_{eHs} [N/mm²] : τάση διαρροής του ενισχυτικού

ε : όπως ορίστηκε παραπάνω

Δικαιολόγηση σχέσης (19)

Με το ίδιο σκεπτικό που εφαρμόστηκε στις άλλες μορφές αστοχίας με λυγισμό προκύπτει και η σχέση (19). Παρατηρούμε ότι ο τοπικός λυγισμός του κορμού του ενισχυτικού δε συνεπάγεται την κατάρρευσή του, αλλά τη μείωση του ενεργού-αποδοτικού σε θλίψη ύψους καθώς το φορτίο διαχέεται προς την αφόρτιστη περιοχή, όπως αντίστοιχα ισχύει για τη μεταλυγισμική αντοχή του ενισχυμένου ελάσματος. Στην προκειμένη περίπτωση, λοιπόν, ο τοπικός λυγισμός του κορμού οδηγεί σε κατάρρευση ολόκληρου του στοιχείου αυξανόμενης της παραμόρφωσης. Γενικά, ο τοπικός λυγισμός κορμού αποφεύγεται με την κατάλληλη επιλογή πάχους κορμού και την ύπαρξη φλάντζας που αυξάνει τη δυσκαμψία.

3.6.2 Τοπικός λυγισμός κορμού για ενισχυτικά χωρίς φλάντζα

Η μέση τάση μειωτικής φόρτισης που οδηγεί σε κατάρρευση του στοιχείου με λυγισμό του κορμού του ενισχυτικού, σε MPa (N/mm²), δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{CR4} = \Phi \frac{A_{p-n50} \sigma_{CP} + A_{s-n50} \sigma_{C4}}{A_{p-n50} + A_{s-n50}}$$

όπου:

Φ : η συνάρτηση $\Phi(\varepsilon)$, όπως ορίστηκε παραπάνω

σ_{CP} [N/mm²] : κρίσιμη τάση κατάρρευσης του ελάσματος, όπως ορίστηκε παραπάνω

σ_{C4} [N/mm²] : κρίσιμη τάση λυγισμού του ενισχυτικού που δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{C4} = \begin{cases} \frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon} & \text{για } \sigma_{E4} \leq \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon \\ R_{eHs} \left(1 - \frac{R_{eHs} \varepsilon}{4\sigma_{E4}}\right) & \text{για } \sigma_{E4} > \frac{R_{eHs}}{2} \varepsilon \end{cases}$$

σ_{E4} [N/mm²] : κρίσιμη τάση εγκάρσιου τοπικού ελαστικού λυγισμού κατά Euler, η οποία δίνεται από τη σχέση: $\sigma_{E4} = 160000 \left(\frac{t_{w-n50}}{h_w}\right)^2$ σύμφωνα με τους CSR-H. Ο τοπικός ελαστικός λυγισμός μπορεί να αποφευχθεί με κατάλληλη επιλογή του λόγου t_{w-n50}/h_w , ώστε να αποφεύγεται να συμβαίνει για μικρές τάσεις.

ε : όπως ορίστηκε παραπάνω

3.7 Κατάρρευση με λυγισμό ορθογώνιου ελάσματος (Plate buckling)

Ο παρακάτω τύπος ανταποκρίνεται στα στοιχεία που είναι μεμονωμένα ελάσματα (χωρίς διαμήκη ενίσχυση), ενισχυμένα κατά το εγκάρσιο.

$$\sigma_{CR5} = \min \left\{ \begin{array}{l} R_{eHp} \Phi \\ \Phi R_{eHp} \left[\frac{s}{L} \left(\frac{2,25}{\beta_E} - \frac{1,25}{\beta_E^2} \right) + 0,1 \left(1 - \frac{s}{L} \right) + \left(1 + \frac{1}{\beta_E^2} \right)^2 \right] \end{array} \right.$$

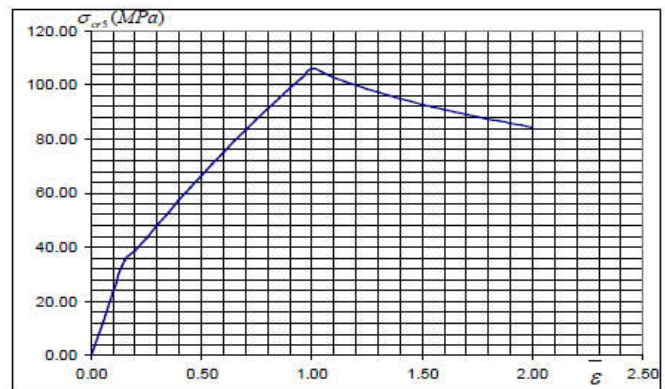
όπου

Φ : συνάρτηση ελαστικής - απόλυτα πλαστικής περιοχής, όπως ορίστηκε παραπάνω

β_E : (στιγμιαία λόγω εξάρτησης από το ε) λυγηρότητα του ελάσματος, όπως ορίστηκε παραπάνω

s [m]: πλάτος μεμονωμένου ελάσματος

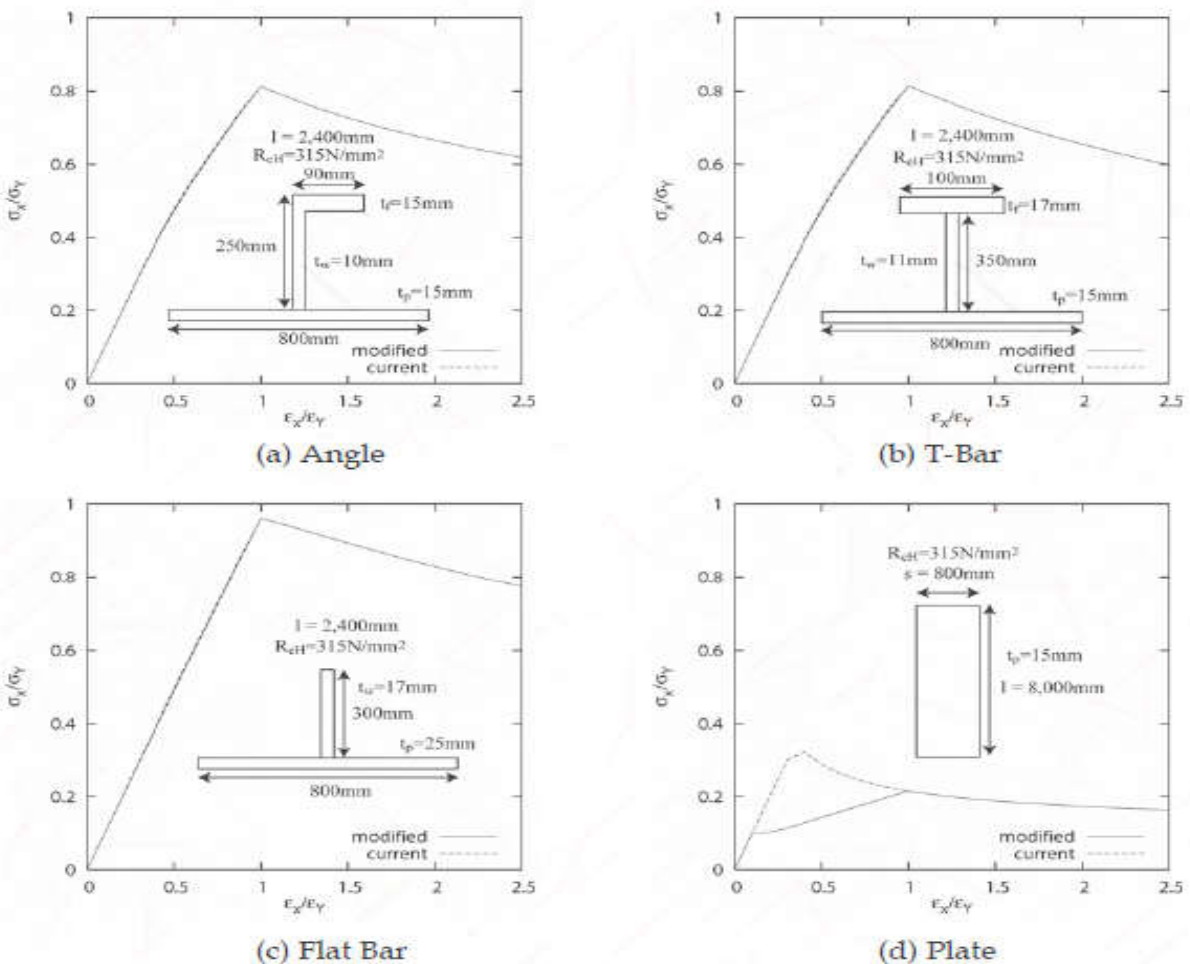
L [m] : μήκος μεμονωμένου ελάσματος



Σχήμα 3.21 Τυπική μορφή μειωτικής καμπύλης φόρτισης εγκάρσιως ενισχυμένου ελάσματος

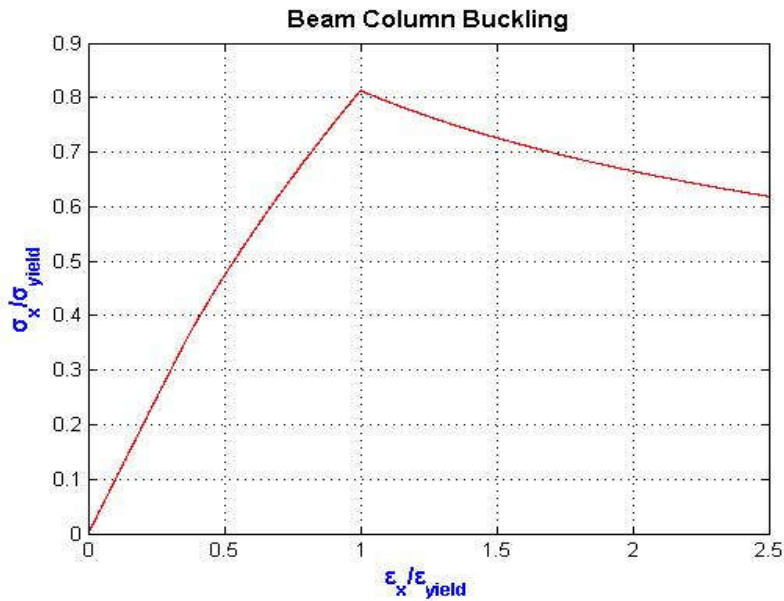
3.8 Δημιουργία αδιάστατων μειωτικών καμπυλών φόρτισης για διάφορα δομικά στοιχεία στο προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab και έλεγχος της ορθότητάς τους

Για το λόγο ότι οι μειωτικές καμπύλες κάθε στοιχείου παίζουν σημαντικό ρόλο στην εξαγωγή της ροπής κατάρρευσης ολόκληρης της διατομής του πλοίου αυξανόμενης της καμπυλότητας, παρακάτω παρατίθενται παραδείγματα προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθότητα των δημιουργούμενων καμπυλών από κώδικες. Οι κώδικες βασίζονται στις παραπάνω σχέσεις των CSR-H, είναι γραμμένοι σε γλώσσα προγραμματισμού Matlab 2007 και παρουσιάζονται στο παράρτημα Α'. Οι καμπύλες που εξάγονται από τους κώδικες συγκρίνονται με τις μειωτικές καμπύλες που παρέχονται στη δημοσίευση **I.A.C.S./Rules Change Notice No 1/November 2007** (φαίνονται στο παρακάτω σχήμα). Η μείωση πάχους των στοιχείων λόγω διάβρωσης αγνοείται.

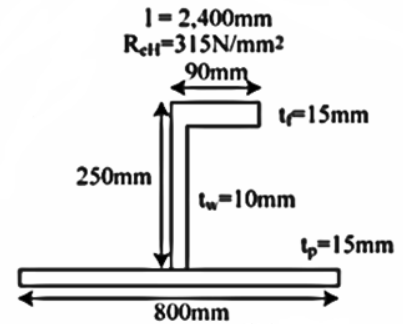


Σχήμα 3.22 Μειωτικές καμπύλες φόρτισης για τρία ενισχυτικά στοιχεία (stiffener elements) και ένα εγκάρσια ενισχυμένο έλασμα (stiffened plate element)

A) Λυγισμός γωνιακού ενισχυτικού-συνεργαζόμενου ελάσματος ως συστήματος δοκού-κολόνας



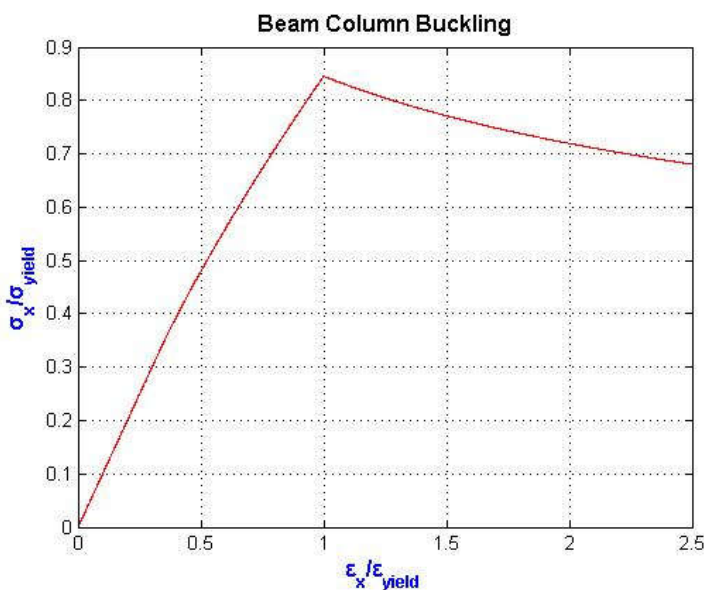
Σχήμα 3.23 Μειωτική καμπύλη ενισχυτικού στοιχείου που καταρρέει με λυγισμό δοκού-κολόνας, όπως εξήχθη από τον κώδικα Matlab



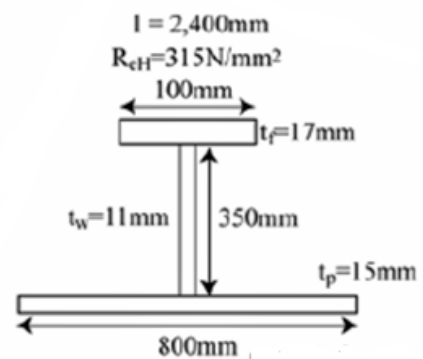
Σχήμα 3.24 Στο σχήμα φαίνονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στον κώδικα Matlab

Όπως παρατηρείται συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.22 και 3.23 οι καμπύλες λυγισμού είναι ταυτόσημες.

B) Λυγισμός ενισχυτικού ταυ-συνεργαζόμενου ελάσματος ως συστήματος δοκού-κολόνας



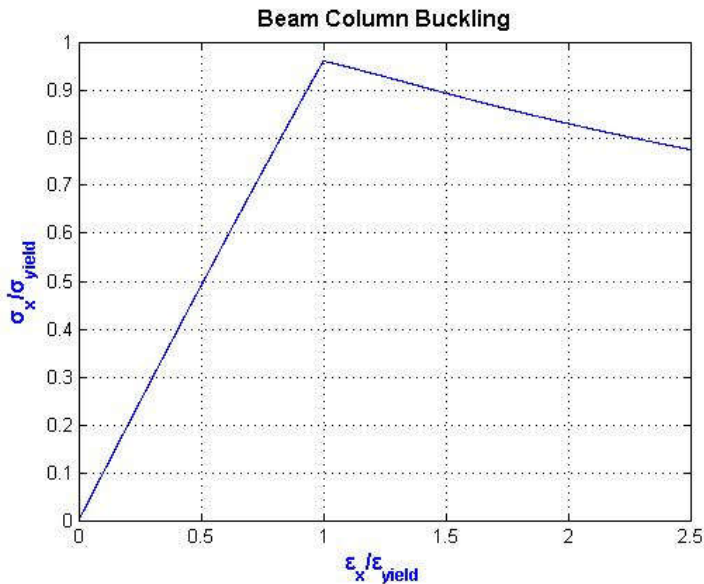
Σχήμα 3.25 Μειωτική καμπύλη ενισχυτικού στοιχείου που καταρρέει, όπως εξήχθη από τον κώδικα Matlab.



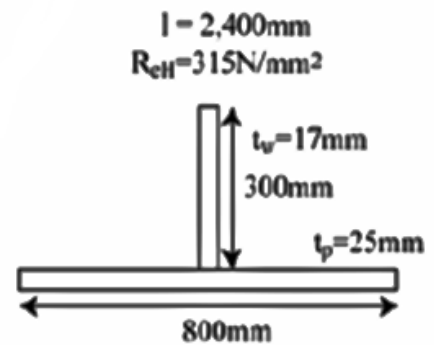
Σχήμα 3.26 Στο σχήμα φαίνονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στον κώδικα Matlab.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 3.22 και 3.25 οι καμπύλες λυγισμού είναι ταυτόσημες.

Γ) Λυγισμός απλής λάμας-συνεργαζόμενου ελάσματος ως συστήματος δοκού-κολόνας



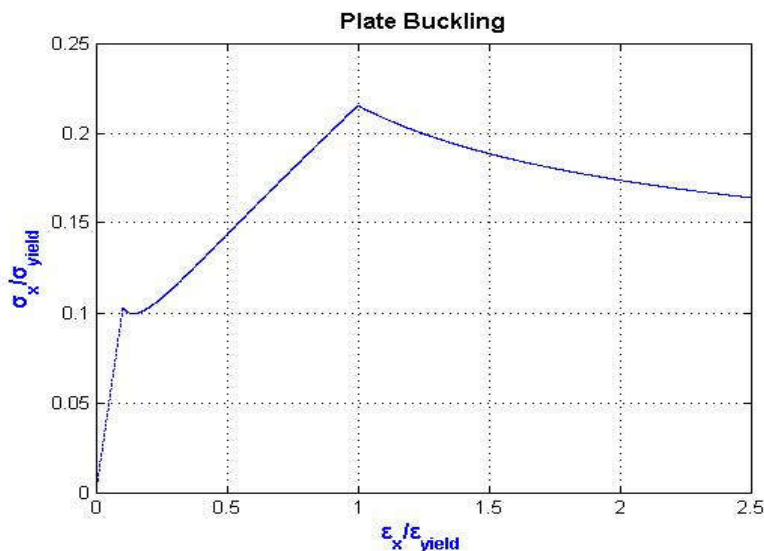
Σχήμα 3.27 Μειωτική καμπύλη ενισχυτικού στοιχείου που καταρρέει, όπως εξήχθη από τον κώδικα Matlab.



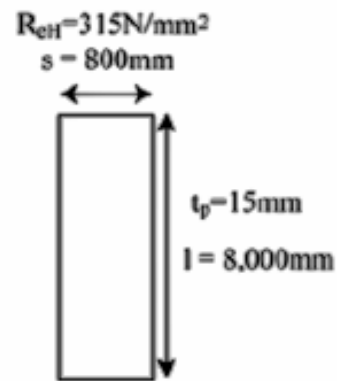
Σχήμα 3.28 Στο σχήμα φαίνονται τα δεδομένα που εισήχθησαν σαν δεδομένα στον κώδικα Matlab.

Συγκρίνοντας τα Σχήματα 3.22 και 3.27 οι καμπύλες λυγισμού είναι ταυτόσημες.

Δ) Λυγισμός ορθογωνίου ελάσματος



Σχήμα 3.29 Μειωτική καμπύλη φόρτισης ορθογωνίου ελάσματος, όπως εξήχθη από τον κώδικα Matlab



Σχήμα 3.30 Στο σχήμα φαίνονται τα δεδομένα που εισήχθησαν σαν δεδομένα στον κώδικα Matlab.

Συγκρίνοντας τα σχήματα 3.22 και 3.29 οι καμπύλες είναι ταυτόσημες.

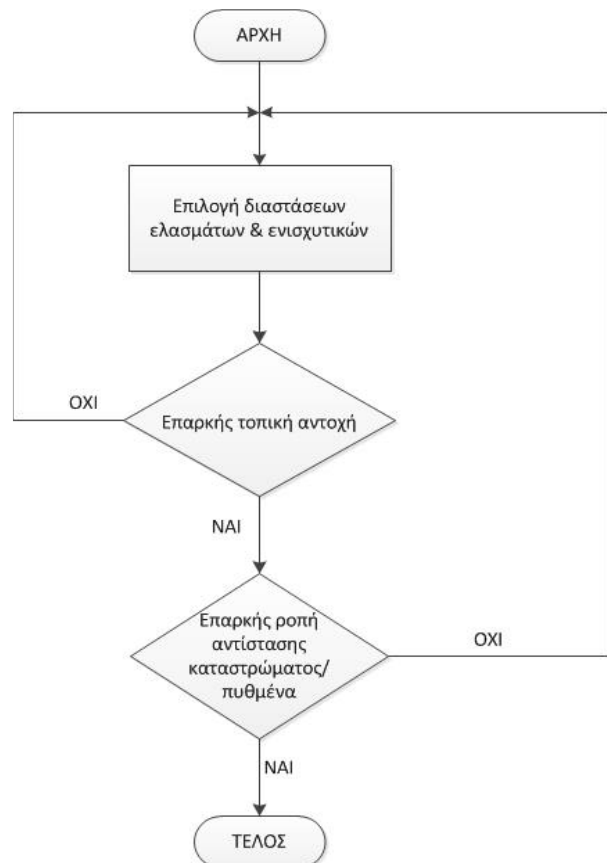
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΟΠΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΕΛΑΣΜΑΤΩΝ & ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΩΝ BULK CARRIERS ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΤΟΥΣ ΓΙΑ ΥΠΗΡΕΣΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

4.1 Εισαγωγή κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο καταγράφονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τον έλεγχο της τοπικής και ολικής αντοχής της μέσης τομής των υπό εξέταση πλοίων (bulk carriers διπλού & μονού τοιχώματος) σε φορτίσεις υπηρεσιακών συνθηκών (SLS). Το ενδιαφέρον στρέφεται ιδιαίτερα στα στοιχεία αντοχής της μέσης τομής των πλοίων και στις σχετικές με την αντοχή απαιτήσεις που προδιαγράφουν οι κυριότεροι νηογνώμονες στους ενοποιημένους κανονισμούς CSR-H. Με βάση τα κύρια χαρακτηριστικά των δύο πλοίων υπολογίζονται οι απαιτούμενες τιμές των στοιχείων αντοχής της μέσης τομής σύμφωνα με τις προδιαγραφές των Νηογνώμωνων. Σύμφωνα με τους κανονισμούς των Νηογνώμωνων και προκειμένου να υπάρχει επαρκής τοπική αντοχή, γίνεται η διαστασιολόγηση των ελασμάτων, των ενισχυτικών και των λοιπών κατασκευαστικών στοιχείων της μέσης τομής. Μετά την επιλογή διαστάσεων των ελασμάτων & ενισχυτικών, ελέγχεται εάν η «διαμορφωμένη» μέση τομή έχει επαρκή ροπή αντίστασης ούτως ώστε να μπορεί να παραλάβει τις ορθές τάσεις λόγω διαμήκους κάμψης του πλοίου.

Ο έλεγχος γίνεται τόσο για την αντοχή της μέσης τομής ούσας ακέραιας, δηλαδή χωρίς να έχουν υποστεί τα κατασκευαστικά της στοιχεία διάβρωση (gross scantlings), όσο και για την αντοχή της με το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο να έχει μειωθεί κατά πάχος ίσο με το μισό του περιθωρίου διάβρωσης

($t_{net50} = t_{gross} - 0.5 t_{corr}$). Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η διαδικασία ελέγχου της αντοχής, τοπικής & ολικής. Αυτή η διαδικασία παρουσιάζεται στο τελικό της στάδιο, δηλαδή με τους κανονισμούς για τοπική και ολική αντοχή να πληρούνται. Ο έλεγχος πραγματοποιείται κατά βάση με το λογισμικό MARS 2000 του Γαλλικού Νηογνώμονα και αναλυτικά μέσω σχέσεων σε ορισμένα σημεία προς δικαιολόγηση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.1 Διαδικασία ελέγχου τοπικής & ολικής αντοχής της κατασκευής. Οι τάσεις παραμένουν στην ελαστική περιοχή.

4.2 Γενικά χαρακτηριστικά των δύο υπό εξέταση πλοίων

Τα υπό εξέταση πλοία είναι τύπου ξηρού φορτίου χύδην (bulk carrier). Το πρώτο bulk carrier με μεταφορική ικανότητα 30,000 τόνους DWT διαμοιρασμένους στα 5 αμπάρια του είναι διπλού τοιχώματος (**Handysize Double Skin Bulk Carrier**) προσεγγίζοντας τις σχεδιάσεις των tankers. Το γεγονός ότι έχει διπλά τοιχώματα του εγγυάται περισσότερη ασφάλεια όσον αφορά την προστασία του φορτίου χύδην και την αποφυγή της εκροής του στη θάλασσα. Το δεύτερο bulk carrier είναι φτιαγμένο κοντά στα πρότυπα των περισσότερων bulk carriers. Είναι μονού τοιχώματος με μεταφορική ικανότητα 33,000 τόνους DWT (**Handysize Single Skin Bulk Carrier**), 5 αμπάρια και έχει παρόμοιες κύριες διαστάσεις (μήκος, πλάτος, κούιλο) με το πρώτο, γεγονός που εξυπηρετεί την μεταξύ τους σύγκριση όσον αφορά την αντοχή. Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριες διαστάσεις και η κλάση των υπό μελέτη πλοίων.

Γενικά ένα Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος έχει τα εξής προτερήματα έναντι του Μονού: α) προστασία του εσωτερικού τοιχώματος κατά της διάβρωσης, β) πρόσθετη ασφάλεια σε περίπτωση τοπικής κατάρρευσης της κατασκευής, γ) προστασία του εξωτερικού τοιχώματος από κτυπήματα κατά την εκφόρτωση, δ) βελτιωμένη κατάσταση κατά τη μελλοντική μεταπώληση του σκάφους. Τα μειονεκτήματά του, όμως, είναι τα εξής: α) αύξηση του κόστους ανέγερσης της κατασκευής, β) αύξηση του κόστους συντήρησης, γ) ελάττωση της τάξης του 0-8% του διαθέσιμου χώρου για τη μεταφορά φορτίου χύδην [12].

Πίνακας 4.1 Κύριες διαστάσεις Bulk Carrier διπλού τοιχώματος

PRINCIPAL DIMENSIONS		
LENGTH O. A.	abt. 178.70	M
LENGTH B. P.	170.00	M
LENGTH (SCANTLING)	168.57	M
BREADTH (MLD)	28.00	M
DEPTH (MLD)	14.00	M
DRAFT (DESIGN)	9.50	M
DRAFT (SCANTLING)	9.79	M
Cb (AT SCANTLING DRAFT)	0.8139	
CLASSIFICATION : ABS		
✱ A1(E), "Bulk Carrier", BC-A (Hold 2 and 4 may be empty),		
✱ AMS, ✱CCU, PSCM, CSR, SafeShip-CM, ESP, ES, UWILD, TCM,		
GRAB[20]		

Πίνακας 4.2 Κύριες διαστάσεις Bulk Carrier μονού τοιχώματος

PRINCIPAL DIMENSIONS	
LENGTH (O.A.)	abt 177.4 m
LENGTH (B.P.)	168.0 m
BREADTH (MLD)	28.2 m
DEPTH (MLD)	14.2 m
DESIGNED DRAFT	9.5 m
SCANTLING DRAFT	10.2 m
DEADWEIGHT (at Scantling Draft)	abt. 33000 t
CAPACITY OF CARGO HOLDS	abt. 42000 m ³
MAIN ENGINE	MAN B&W 6S42MC MK7 + "TIER II" 1 SET
M.C.R.	6480KW/136.0r/min
C.S.R.	5832KW/131.3r/min
SERVICE SPEED (AT DRAFT 9.5m, CSR WITH 15% S.M.)	abt. 14.2 Kn
COMPLEMENT	24 Persons + 1 Pilot
CLASSIFICATION	GL ✱ 100 A5, E1 Bulk Carrier. BC-A, CSR, ESP, Holds 2,4 may be empty, IW, HLP, CM-PS, BWM, GRAB(20t)
	✱ MC, AUT

4.3 Χρησιμοποιούμενα υλικά μέσης τομής

Στην κατασκευή των μεγάλων εμπορικών πλοίων χρησιμοποιείται ευρύτατα ο χάλυβας, γεγονός που οφείλεται: στο υψηλό μέτρο ελαστικότητάς του ($E_{steel}=206 \text{ GPa}$), στην υψηλή τάση διαρροής του σ_y , η οποία αποτελεί το όριο μετάβασης από την

ελαστική στην πλαστική περιοχή, και στην υψηλή μέγιστη τάση εφελκυσμού σ_{ult} . Εν γένει, έχει καθιερωθεί η χρήση του χάλυβα υψηλής αντοχής, καθώς επιτρέπει τη μείωση του πάχους των ελασμάτων & ενισχυτικών, λόγω της υψηλότερης τάσης διαρροής που διαθέτει σε σχέση με τον κοινό ναυπηγικό χάλυβα (Grade A). Ιδιαίτερα στις απομακρυσμένες περιοχές από τον ουδέτερο άξονα της κάμψης του πλοίου όπου οι ορθές τάσεις που μπορεί να εμφανιστούν είναι υψηλές, όπως το κατάστρωμα αντοχής, χρησιμοποιούνται οι χάλυβες Grade AH 36 και DH 36 (χρησιμοποιούνται για συγκολλήσεις ελάσματος με πάχος άνω των 23 mm) με όριο διαρροής 355 Mpa, καθώς μπορούν να σημειώσουν μείωση του απαιτούμενου πάχους ελασμάτων & ενισχυτικών για την επίτευξη της απαιτούμενης ροπής αντίστασης (rule section modulus). Οι χρησιμοποιούμενοι χάλυβες φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα:

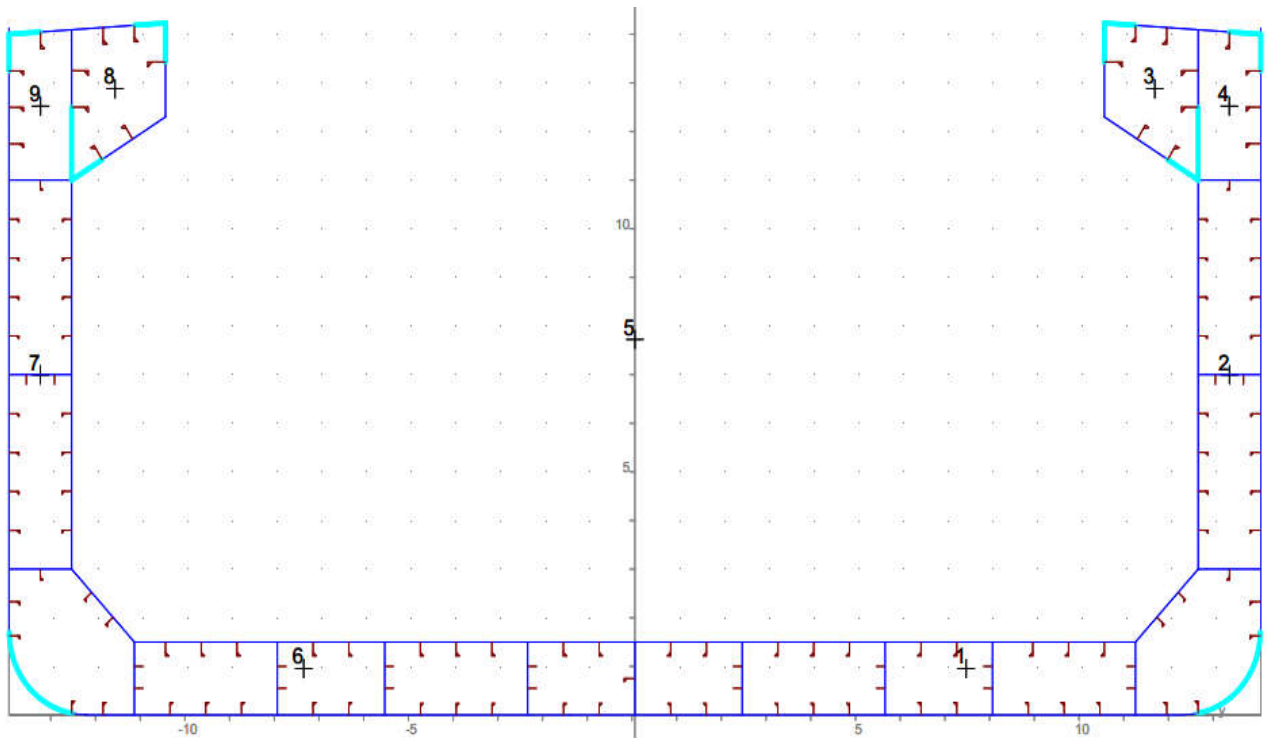
Πίνακας 4.3 Χάλυβες Μέσης Τομής των δύο πλοίων

Υλικά	Όριο Διαρροής σ_y
Χάλυβας υψηλής αντοχής «Grade AH 32»	315 N/mm ²
Χάλυβας υψηλής αντοχής «Grade AH 36»	355 N/mm ²
Χάλυβας υψηλής αντοχής «Grade DH 36»	355 N/mm ²

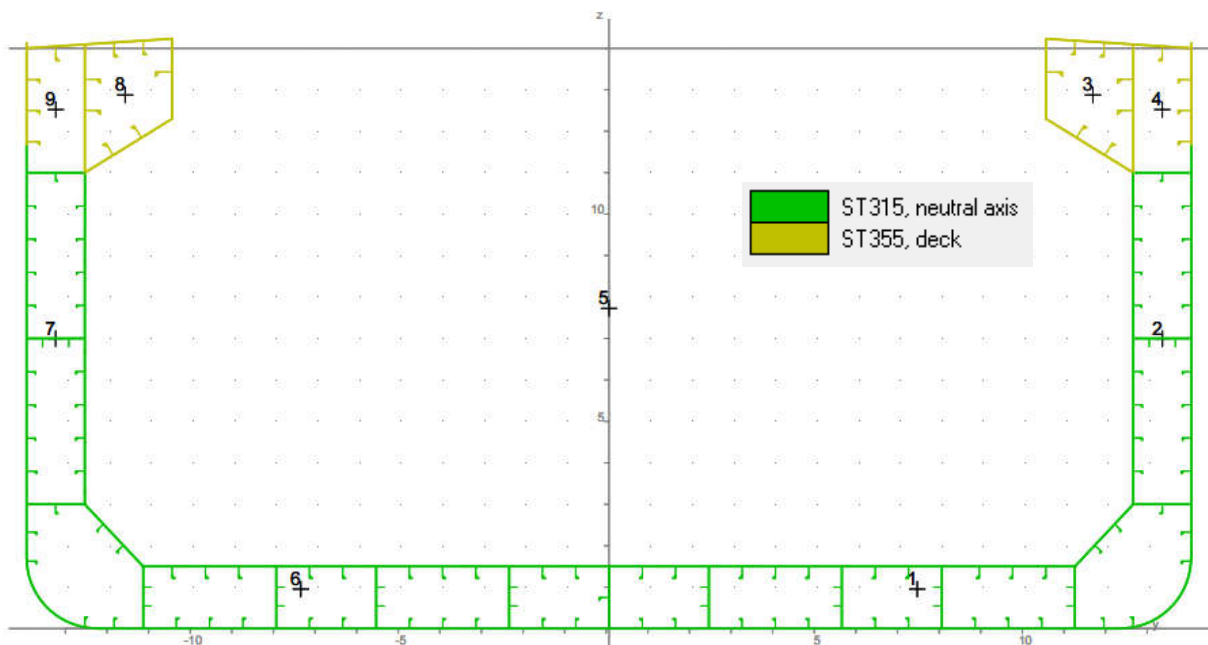
4.4 Εξέταση Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος

4.4.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίου

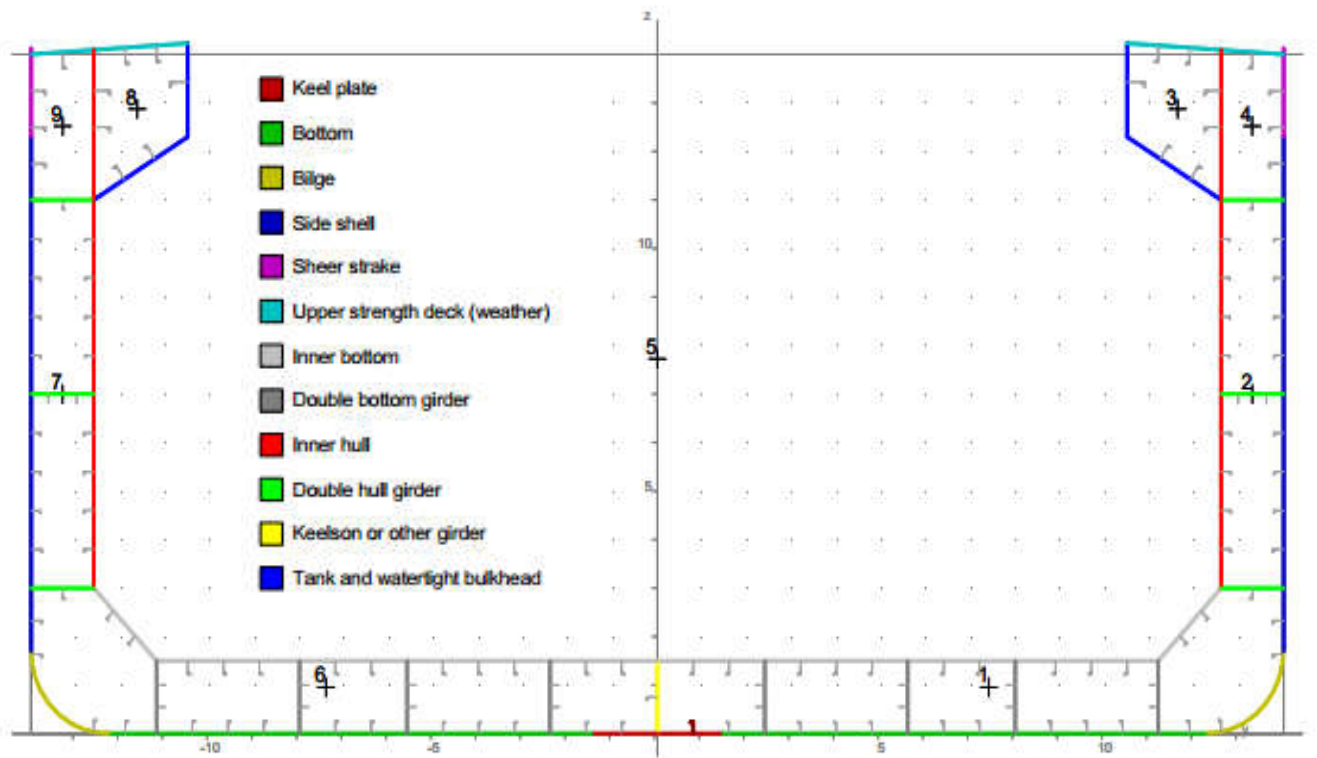
Το υπό εξέταση πλοίο είναι κατασκευασμένο με διάμηκες σύστημα ενίσχυσης και διαθέτει διπύθμενες δεξαμενές έρματος (Διαμερίσματα 1 & 6 / Σχήμα 4.2), πλευρικές δεξαμενές έρματος (Διαμερίσματα 2 & 7 / Σχήμα 4.2) και άνω πλευρικές δεξαμενές (Διαμερίσματα 3 & 8 / Σχήμα 4.2) αποθήκευσης βαρέος καυσίμου (Heavy Fuel Oil). Ο χώρος φορτίου χύδην απεικονίζεται ως Διαμέρισμα 5/ Σχήμα 4.2, ενώ τα Διαμερίσματα 4 & 8 / Σχήμα 4.2 αποτελούν τούνελ με σωληνώσεις. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ένας «απλός νομέας» (ordinary frame) στο μέσο του πλοίου, ο οποίος δεν διαθέτει δευτερεύουσα εγκάρσια ενίσχυση. Οι εγκάρσια ενισχυμένοι νομείς (web frames) σε αυτό το πλοίο είναι τοποθετημένοι ανά 2400 mm μεταξύ τους, όσον αφορά όλα τα διαμερίσματα της μέσης τομής πλην του χώρου φορτίου. Τα διαμήκη ενισχυτικά της μέσης τομής είναι βολβολάμες (bulb flats) και απλές λάμες (flat bars), όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.2. Επίσης για την αποφυγή του λυγισμού σε ορισμένες περιοχές που είτε δεν χρησιμοποιείται διαμήκης ενίσχυση, είτε είναι επιθυμητή η μείωση του ανυποστήρικτου πλάτους του ελάσματος μεταξύ 2 διαδοχικών διαμήκων ενισχυτικών, τοποθετούνται εγκάρσια μπρακέτα (γαλάζιο χρώμα / Σχήμα 4.2) στο ήμισυ της απόστασης μεταξύ των δύο ενισχυμένων νομέων (=1200 mm). Τα υπό κλίμακα (1:100) σχέδια του απλού και ενισχυμένου νομέα, όπου εμφανίζονται οι διαστάσεις ελασμάτων & ενισχυτικών βρίσκονται στο Παράρτημα Ζ', όπου επίσης φαίνεται και ο διαχωρισμός της διατομής του απλού νομέα σε δομικά στοιχεία (βλ. Κεφάλαιο 5).



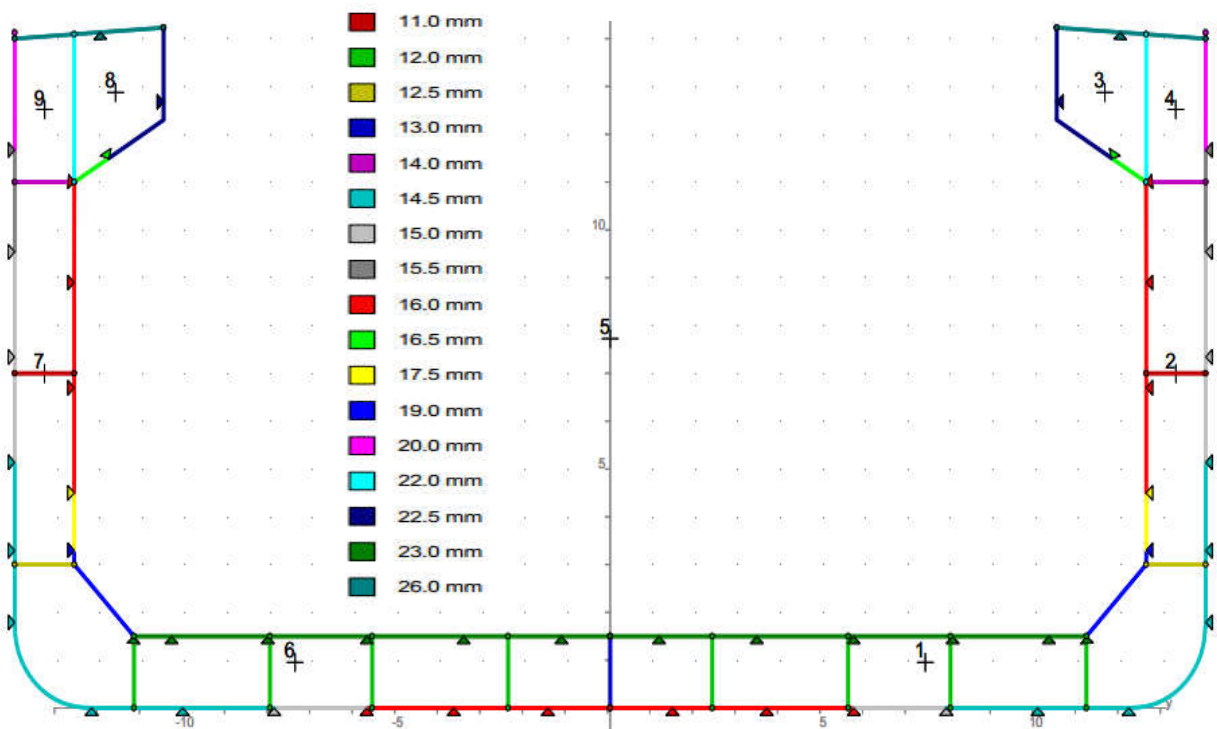
Σχήμα 4.2 Μέση Τομή του εν λόγω Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος δημιουργημένη στο MARS 2000. Στο Σχήμα φαίνεται η οριζόντια και κατακόρυφη κλίμακα του πλοίου σε μέτρα.



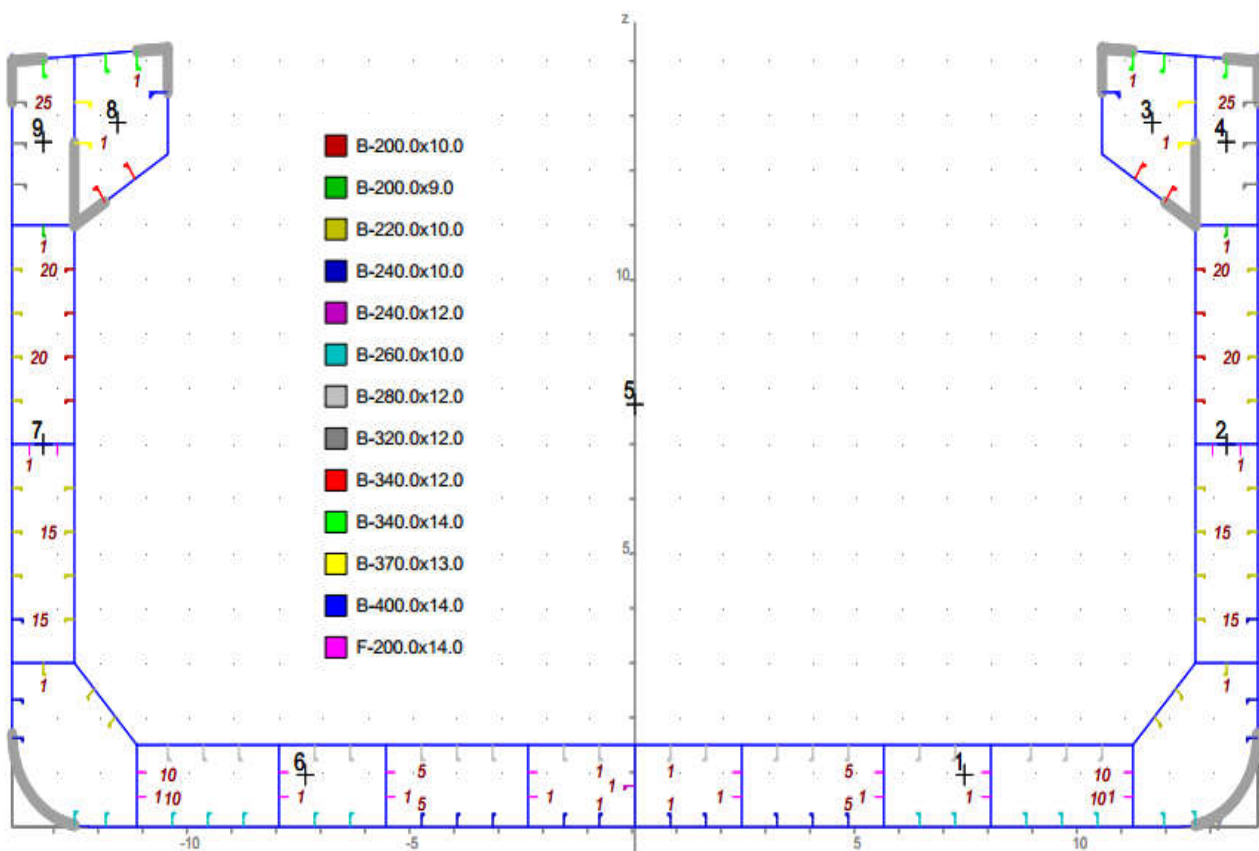
Σχήμα 4.3 Το Σχήμα δείχνει τις περιοχές της Μέσης Τομής που χρησιμοποιείται ο χάλυβας ορίου διαρροής 315 Mpa και και 355 Mpa.



Σχήμα 4.4 Ονοματολογία ελασμάτων του εν λόγω Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος



Σχήμα 4.5 Ολικό πάχος (gross thickness) των ελασμάτων της Μέσης Τομής. Τα βέλη κάτω από τα ελάσματα υποδηλώνουν τις συγκολλήσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 4.6 «Ολικές» διαστάσεις (gross) ενισχυτικών Μέσης Τομής. Με κόκκινα γράμματα αριθμούνται τα ενισχυτικά.

4.4.2 Μεγέθη κανονισμών πλοίου

Οι ενοποιημένοι κανονισμοί που προδιαγράφουν την αντοχή της μέσης τομής (Common Structural Rules) απαιτούν τον υπολογισμό κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών του πλοίου. Αυτά είναι τα εξής:

A) το **μήκος κανονισμών** (Rule Length), το οποίο ορίζεται με βάση τους κανονισμούς ως εξής: “The Rule length L is the distance, in m, measured on the waterline at the scantling draught T_{SC} from the forward side of the stem to the centre of the rudder stock. L is to be not less than 96% and need not exceed 97% of the extreme length on the waterline at the scantling draught T_{SC} ”. Με βάση τα παραπάνω το μήκος των κανονισμών είναι: $L_{RULE} = L_{SC} = 168.57 \text{ m}$ (βλ. Πίνακα 4.1).

B) το **βύθισμα αντοχής**, το οποίο ορίζεται ως το μέγιστο επιτρεπόμενο από τους κανονισμούς της γραμμής φόρτωσης βύθισμα, δηλαδή $T_{SCANTLING} = T_{ILLC} = 9.79 \text{ m}$.

Γ) το **ελάχιστο βύθισμα ερματισμού** (Minimum Ballast Draught) $T_{BAL} = 5.50 \text{ m}$ που προκύπτει από την κατάσταση Ballast Arrival του πλοίου, κατά την οποία το πλοίο δεν έχει φορτίο στα αμπάρια παρά μόνο θαλασσινό νερό στις δεξαμενές έρματος (Ballast Tanks).

4.4.3 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης

Ο τύπος υπολογισμού της ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αδράνειας δίνεται στους κανονισμούς CSR-H, και είναι ο παρακάτω:

$$I_{yR} = 2.7 \cdot C_w \cdot L^3 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \cdot 10^{-8} \text{ [m}^4\text{]}$$

όπου:

- C_w : ο συντελεστής κυματισμών ο οποίος λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.4),
- L : το μήκος κανονισμών όπως ορίστηκε παραπάνω
- $B, C_B (T_{SC})$: πλάτος πλοίου & συντελεστής γάστρας (βλ. Πίνακα 4.1)

Πίνακας 4.4 Τιμές του συντελεστή C_w κατά CSR-H

Wave Coefficient C_w	
Rule Length	C_w
$150 \leq L \leq 300$	$10.75 - [(300-L)/100]^{3/2}$
$300 < L < 350$	10.75
$350 \leq L \leq 500$	$10.75 - [(L-350)/150]^{3/2}$

Σύμφωνα με τον πίνακα 4.4 η τιμή του συντελεστή C_w για μήκος κανονισμών ίσο με $L = 168.57 \text{ m}$ είναι $C_w = 10.75 - [(300 - L) / 100]^{3/2} = 9.243$. Η τιμή της ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αδράνειας της μέσης τομής του υπό εξέταση σκάφους υπολογίζεται σύμφωνα με τα παραπάνω: $I_{yR} = 50.67 \text{ m}^4$. Ο τύπος υπολογισμού της ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης δίνεται από τη σχέση:

$$Z_R = 0.9 \cdot k \cdot C_w \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

όπου:

- C_w , ο συντελεστής κυματισμών,
- k , ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού, ο οποίος λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον πίνακα των H-CSR (Πίνακας 4.5),
- L , το μήκος κανονισμών όπως ορίστηκε παραπάνω

Πίνακας 4.5 Τιμές του συντελεστή k κατά CSR-H

Values of k	
Specified minimum yield stress $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	k
235	1
265	0.93
315	0.78
340	0.74
355	0.72
390	0.68

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.3 ο χάλυβας Grade AH (315 N/mm²) χρησιμοποιείται στον πυθμένα και στην ουδέτερη περιοχή και οι χάλυβες Grade AH 36 και Grade DH 36 (355 N/mm²) σε περιοχές κοντά στο ανώτερο κατάστρωμα (upper deck), κατά συνέπεια η απαίτηση ροπής αντίστασης θα είναι διαφορετική στον πυθμένα από ό,τι στο κατάστρωμα λόγω διαφορετικών συντελεστών k: $Z_{min-BOT-n50} = 7.816 \text{ m}^3$ και $Z_{min-DECK-n50} = 7.215 \text{ m}^3$, όπου $Z_{min-BOT-n50}$ και $Z_{min-DECK-n50}$ η ελάχιστη ροπή αντίστασης στον πυθμένα και στο κατάστρωμα για gross scantings - 50% του πάχους διάβρωσης κάθε κατασκευαστικού στοιχείου.

Όμως σύμφωνα με τους CSR-H πρέπει σε κάθε περιοχή κατά μήκος του πλοίου, και άρα και στη Μέση Τομή (x/L=0.5) του, να ισχύει: $\sigma_L \leq \sigma_{perm}$ όπου σ_L [N/mm²]: η προκύπτουσα ορθή τάση από την κάμψη του πλοίου (βλ. Πίνακα 4.9) σε κατακόρυφο επίπεδο (διαμήκης κάμψη) και σ_{perm} [N/mm²]: η μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να λάβει εκείνη η περιοχή χωρίς να διαρρεύσει ακραία ίνα της Μέσης Τομής (κατάστρωμα/πυθμένας) και δίνεται από τον Πίνακα 4.8. Από τις δεδομένες καταστάσεις φόρτωσης του πλοίου και σύμφωνα με το εγχειρίδιο φόρτωσής (Loading Manual) του, η μέγιστη επιτρεπόμενη καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό για το πλοίο είναι: $M_{sw-hog} = 881,000 \text{ kN*m}$ (hogging) και η ελάχιστη $M_{sw-sag} = -868,000 \text{ kN*m}$ (sagging). Επίσης η μέγιστη/ελάχιστη επιτρεπόμενη καμπτική ροπή κυματισμού ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$M_{wv-hog} = 0.19 f_{nl-vhog} f_m f_{ps} C_w L^2 B C_B = 1,137,421 \text{ kN*m} \ \&$$

$$M_{wv-sag} = -0.19 f_{nl-vsag} f_m f_{ps} C_w L^2 B C_B = -1,227,017 \text{ kN*m}, \text{ όπου } f_{nl-vhog}, f_{nl-vsag}, f_m, f_{ps} \text{ δίνονται στους παρακάτω Πίνακες και τα υπόλοιπα μεγέθη όπως ορίστηκαν παραπάνω.}$$

f_{ps} : Coefficient for strength assessments which is dependant on the applicable design load scenario specified in Ch 4, Sec 7, and to be taken as: $f_{ps} = 1.0$ for extreme sea loads design load scenario. $f_{ps} = 0.8$ for the ballast water exchange design load scenario. $f_{ps} = 0.8$ for the accidental flooded design load scenario at sea. $f_{ps} = 0.4$ for the harbour/sheltered water design load scenario.
--

Πίνακας 4.6 Τιμές του συντελεστή f_{ps} κατά CSR-H

Πίνακας 4.7 Τιμές των συντελεστών $f_{nl-vhog}$, $f_{nl-vsag}$ & f_m κατά CSR-H

f_{nl-vh}	: Coefficient considering nonlinear effects applied to hogging, to be taken as: $f_{nl-vh} = 1.0$ for strength and fatigue assessment.
f_m	: Distribution factor for vertical wave bending moment along the ship's length, to be taken as: $f_m = 0.0$ for $x \leq 0$ $f_m = 1.0$ for $0.4L \leq x \leq 0.65L$ $f_m = 0.0$ for $x \geq L$
f_{nl-vs}	: Coefficient considering nonlinear effects applied to sagging, to be taken as: $f_{nl-vs} = 0.58 \left(\frac{C_B + 0.7}{C_B} \right)$ for strength assessment. $f_{nl-vs} = 1.0$ for fatigue assessment.

Πίνακας 4.8 Τιμές της μέγιστης επιτρεπόμενης ορθής τάσης σ_{perm} [N/mm²] καθ' όλο το μήκος του πλοίου για κάθε συνθήκη (εν πλω, σε λιμάνι, υπό κατάκλιση) κατά CSR-H

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

Πίνακας 4.9 Προκύπτουσα ορθή τάση από τη διαμήκη κάμψη του πλοίου σε σημεία μιας εγκάρσιας τομής x

Operation	Normal stress, σ_L		
	At any point located below Z_{VD}	At bottom ⁽¹⁾	At deck ⁽¹⁾
Seagoing	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wy}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wy}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw} + M_{wy}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
Harbour/sheltered water	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-p}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$
Flooded condition at sea for bulk carriers having a length L of 150 m or above	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wy}}{Z_{A-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wy}}{Z_{B-n50}} 10^{-3}$	$\sigma_L = \frac{M_{sw-f} + M_{wy}}{Z_{D-n50}} 10^{-3}$

(1) The σ_L values at bottom and deck, correspond to the application of formula given for any point, calculated at equivalent deck line and at baseline.

Με βάση τα παραπάνω η (σχ. 4.1) για συνθήκες κανονικής πλεύσης γράφεται ισοδύναμα:

❖ για το κατάστρωμα (deck) σε κατάσταση hogging :

$$\frac{M_{sw-hog}+M_{wv-hog}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{hog-seag} \geq \frac{M_{sw-hog}+M_{wv-hog}}{263.88} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{hog-seag} \geq 7.649 \text{ m}^3$$

για το κατάστρωμα (deck) σε κατάσταση sagging :

$$\frac{|M_{sw-sag}+M_{wv-sag}|}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{sag-seag} \geq \frac{|M_{sw-sag}+M_{wv-sag}|}{263.88} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{sag-seag} \geq 7.939 \text{ m}^3$$

❖ για τον πυθμένα (bottom) σε κατάσταση hogging :

$$\frac{M_{sw-hog}+M_{wv-hog}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{hog-seag} \geq \frac{M_{sw-hog}+M_{wv-hog}}{243.59} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{hog-seag} \geq 8.286 \text{ m}^3$$

❖ για τον πυθμένα (bottom) σε κατάσταση sagging :

$$\frac{|M_{sw-sag}+M_{wv-sag}|}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{sag-seag} \geq \frac{|M_{sw-sag}+M_{wv-sag}|}{243.59} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{sag-seag} \geq 8.600 \text{ m}^3$$

Με όμοιο σκεπτικό με παραπάνω, και με βάση τους Πίνακες 4.8 & 4.9, προκύπτουν οι περιορισμοί της ροπής αντίστασης της Μέσης Τομής για κατάστρωμα και πυθμένα για τις συνθήκες λιμανιού (Harbour ή Port) & υπό κατάκλυση (Flooded):

Για συνθήκες λιμανιού (δεν υπάρχει ροπή κυματισμού), δεδομένου ότι $M_{sw-hog-p} = 1,573,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ και $M_{sw-sag-p} = -1,573,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ προκύπτει:

❖ Για το κατάστρωμα (deck) σε κατάσταση hogging :

$$\frac{M_{sw-hog-p}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{hog-p} \geq \frac{M_{sw-hog-p}}{198.61} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{hog-port} \geq 7.920 \text{ m}^3$$

❖ Για το κατάστρωμα (deck) σε κατάσταση sagging :

$$\frac{|M_{sw-sag-p}|}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{sag-p} \geq \frac{|M_{sw-sag-p}|}{198.61} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{sag-port} \geq 7.920 \text{ m}^3$$

❖ Για τον πυθμένα (bottom) σε κατάσταση hogging :

$$\frac{M_{sw-hog-p}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{hog-p} \geq \frac{M_{sw-hog-p}}{183.33} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{hog-port} \geq 8.580 \text{ m}^3$$

❖ Για τον πυθμένα (bottom) σε κατάσταση sagging :

$$\frac{|M_{sw-sag-p}|}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{143}{k} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{sag-p} \geq \frac{|M_{sw-sag-p}|}{183.33} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{sag-port} \geq 8.580 \text{ m}^3$$

Για συνθήκες κατάκλυσης του πλοίου, δεδομένου ότι

$M_{sw-hog-f} = 1,110,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ & $M_{sw-sag-f} = -1,169,000 \text{ kN}\cdot\text{m}$, και επίσης $M_{wv-hog-f} = 909,937 \text{ kN}\cdot\text{m}$ & $M_{wv-sag-f} = -981,614 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (βλ. Σχέσεις καμπτικής ροπής κυματισμού και Πίνακα 4.6) προκύπτει:

❖ για το κατάστρωμα (deck) σε κατάσταση hogging :

$$\frac{M_{sw-hog-f}+M_{wv-hog-f}}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{hog-f} \geq \frac{M_{sw-hog-f}+M_{wv-hog-f}}{263.88} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{hog-flood} \geq 7.654 \text{ m}^3$$

για το κατάστρωμα (deck) σε κατάσταση sagging :

$$\frac{|M_{sw-sag-f}+M_{wv-sag-f}|}{Z_{D-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{sag-f} \geq \frac{|M_{sw-sag-f}+M_{wv-sag-f}|}{263.88} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{D-n50}^{sag-flood} \geq 8.149 \text{ m}^3$$

❖ για τον πυθμένα (bottom) σε κατάσταση hogging :

$$\frac{M_{sw-hog-f}+M_{wv-hog-f}}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{hog-f} \geq \frac{M_{sw-hog-f}+M_{wv-hog-f}}{243.59} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{hog-flood} \geq 8.292 \text{ m}^3$$

❖ για τον πυθμένα (bottom) σε κατάσταση sagging :

$$\frac{|M_{sw-sag-f}+M_{wv-sag-f}|}{Z_{B-n50}} 10^{-3} \leq \frac{190}{k} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{sag-seag} \geq \frac{|M_{sw-sag-f}+M_{wv-sag-f}|}{243.59} 10^{-3} \Leftrightarrow Z_{B-n50}^{sag-fl} \geq 8.828 \text{ m}^3$$

Πίνακας 4.10 Συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα για την ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης καταστρώματος/πυθμένα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα.

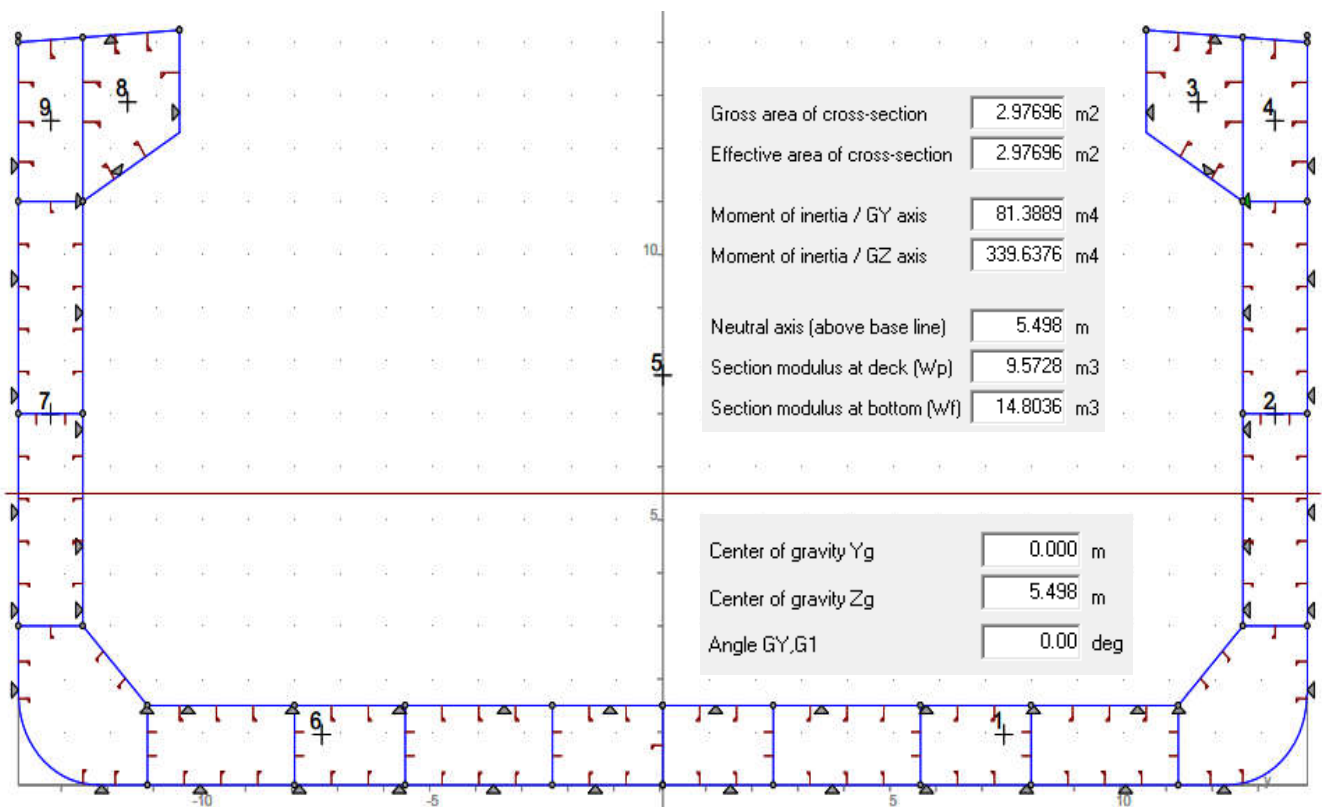
Rule section moduli	Deck (m³)	Bottom (m³)
Minimum section modulus	7.2151	7.8164
Modulus based on design BM, Hog. (2 018 421.0 kNm)	7.6488	8.2861
Modulus based on design BM, Sag. (-2 095 017.0 kNm)	7.9390	8.6006
<i>Flooded conditions</i>		
Modulus based on damaged BM, Hog. (2 019 937.0 kNm)	7.6545	8.2924
Modulus based on damaged BM, Sag. (-2 150 614.0 kNm)	8.1497	8.8288
<i>Harbour</i>		
Modulus based on harbour SWBM, Hog. (1 573 000.0 kNm)	7.9200	8.5800
Modulus based on harbour SWBM, Sag. (-1 573 000.0 kNm)	7.9200	8.5800
Rule Modulus	8.1497	8.8288

Τελικά επιλέγοντας την μέγιστη τιμή από τον Πίνακα 4.10, η ελάχιστη απαιτούμενη ροπή αντίστασης είναι: $Z_{D-n50}^{\min} = 8.150 \text{ m}^3$ και $Z_{B-n50}^{\min} = 8.829 \text{ m}^3$

4.4.4 Υπολογισμός πραγματικής (actual) ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης της Μέσης Τομής του υπό μελέτη πλοίου

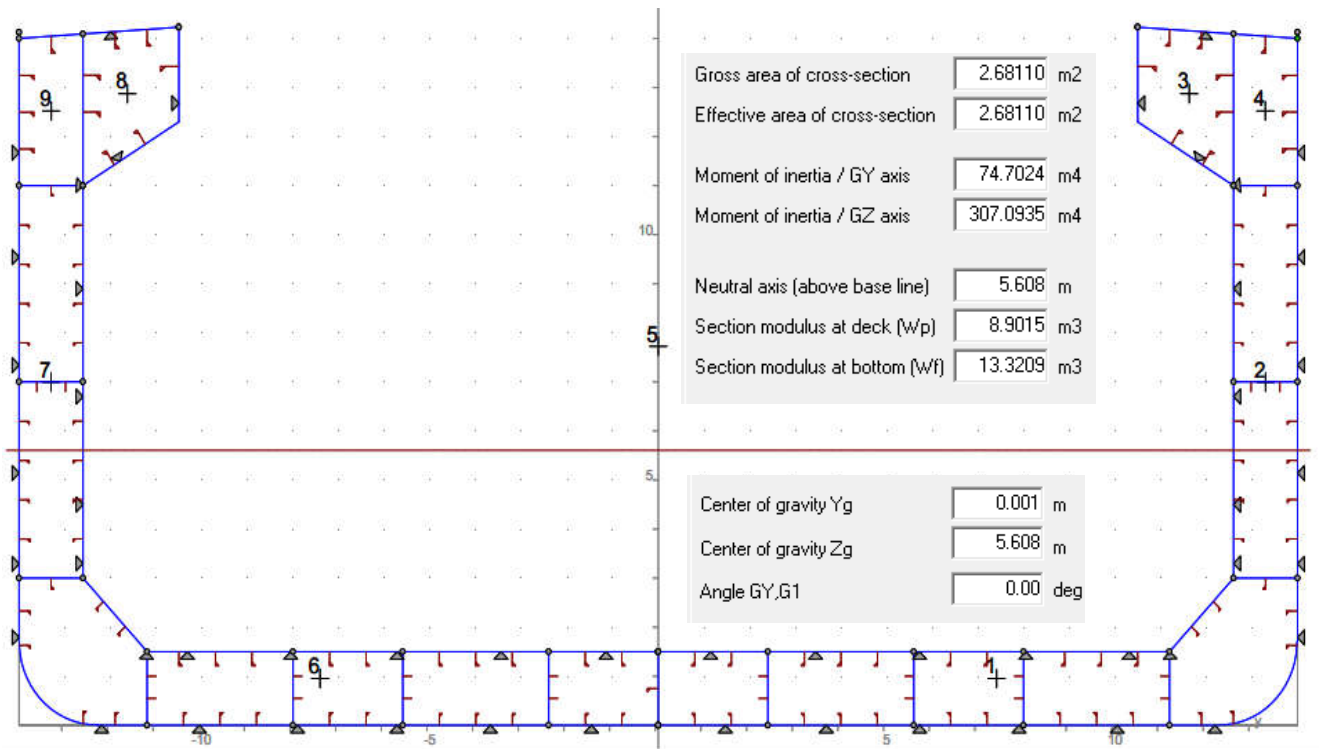
Με βάση τα παραπάνω στοιχεία για το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος μπορεί να υπολογιστεί η ροπή αδράνειας της επιφάνειας της μέσης τομής, η κατακόρυφη θέση του ουδέτερου άξονα καθώς και η ροπή αντίστασης της διατομής στο ύψος του πυθμένα και του καταστρώματος. Συγκεκριμένα στα Σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του MARS 2000 για τη μέση τομή ούσα ακέραια (gross scantling approach / βλ. Σχήματα 4.7), όσο και τα αποτελέσματα με το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο να έχει μειωθεί κατά πάχος ίσο με το μισό του περιθωρίου διάβρωσης (n50-scantling approach / βλ. Σχήμα 4.8). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός της ροπής αντίστασης για net-50 scantlings σε υπολογιστικό φύλλο Excel και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα του MARS 2000.

➤ Ακέραια Διατομή (Intact gross section)



Σχήμα 4.7 Στο Σχήμα φαίνεται η κατακόρυφη θέση ($z_n = 5.498$ m από την τρόπιδα) του Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα ($M_{app} < M_{yield}$). Οι ορθές τάσεις των στοιχείων σε αυτό το ύψος μηδενίζονται. Ο ελαστικός ουδέτερος άξονας διέρχεται από το κέντρο βάρους G ($y_G=0$, $z_G=5.498$) της διατομής. Επίσης, στο σχήμα υπάρχει το εμβαδό της διατομής A, οι δεύτερες ροπές αδράνειας της διατομής I_y , I_z γύρω από τους άξονες GY & GZ και η ροπή αντίστασης καταστρώματος πυθμένα.

➤ Ελαττωμένη διατομή κατά το 1/2 του περιθωρίου διάβρωσης (Intact net section)



Σχήμα 4.8 Στο Σχήμα φαίνεται η κατακόρυφη θέση ($z_n = 5.608$ m από την τρόπιδα) του Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα ($M_{appi} < M_{yield}$). Οι ορθές τάσεις των στοιχείων σε αυτό το ύψος μηδενίζονται. Ο ελαστικός ουδέτερος άξονας διέρχεται από το κέντρο βάρους G ($y_G=0$, $z_G=5.608$) της διατομής. Επίσης, στο σχήμα υπάρχει το εμβαδό της διατομής A, οι δεύτερες ροπές αδράνειας της διατομής I_y , I_z γύρω από τους άξονες GY & GZ και η ροπή αντίστασης καταστρώματος πυθμένα.

Με βάση τα αποτελέσματα στα Σχήματα 4.7 & 4.8 η ροπή αντίστασης της Μέσης Τομής του πλοίου είναι επαρκής σε κατάσταση & πυθμένα. Κανονικά πρέπει να ελεγχθεί επιπρόσθετα η ροπή αντίστασης στην ανώτερη κατακόρυφη συντεταγμένη που αλλάζει η τάση διαρροής του υλικού από 315 σε 355 Mpa. Όμως λόγω των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από το Σχήμα 4.9 αυτό δεν καθίσταται απαραίτητο, καθώς σε αυτή την κατακόρυφη συντεταγμένη ισχύει $\sigma_L < \sigma_{perm}$.

Επεξήγηση του παρακάτω Πίνακα 4.11 για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης καταστρώματος/πυθμένα

Στον Πίνακα 4.11 γίνεται διαχωρισμός της Μέσης τομής σε ελάσματα ίδιου πάχους και σε ενισχυτικά. Γι' αυτό ο υπολογισμός της κεντροβαρικής ροπής του στοιχείου και της ροπής του ως προς την τρόπιδα. Για την εύρεση της κεντροβρικής ροπής αδράνειας ενισχυτικών βλ. Παράρτημα Γ'.

Για την εύρεση της κεντροβαρικής ροπής αδράνειας ενός ελάσματος χρησιμοποιείται ο τύπος (b: πλάτος, t: πάχος, α κλίση με την οριζόντιο):

Moment of Inertia-Self=

= $bt^3/12$ για οριζόντιο έλασμα

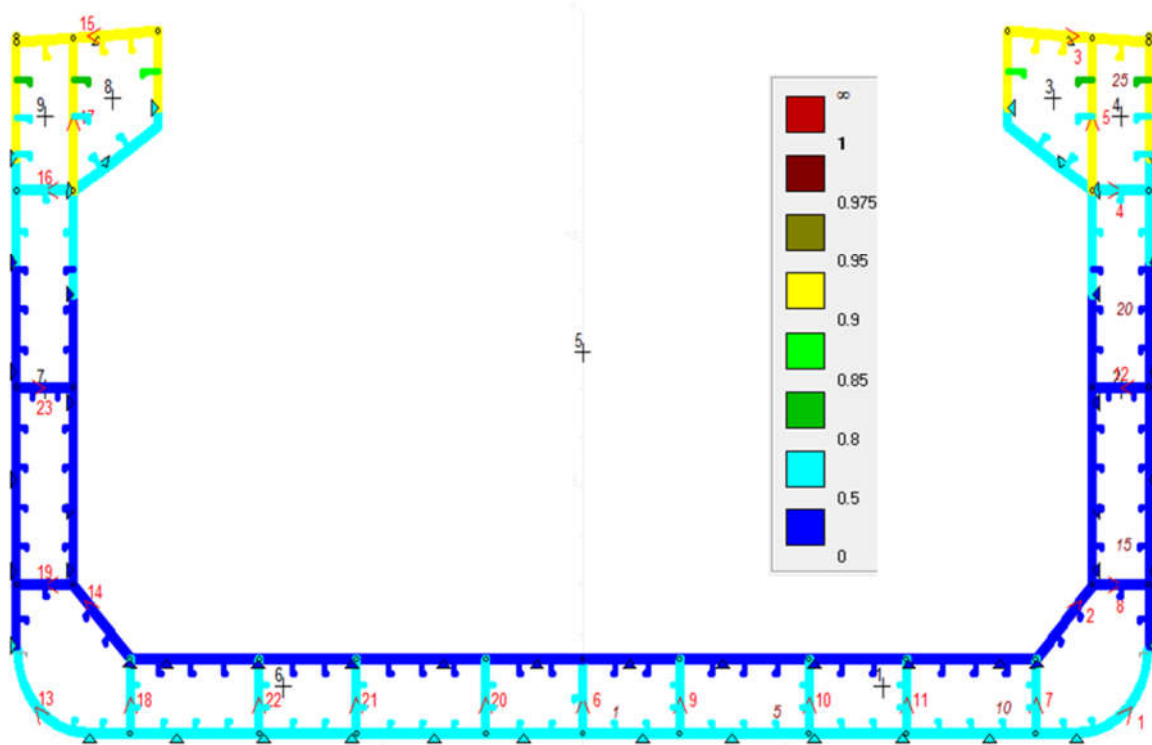
= $tb^3/12$ για κατακόρυφο έλασμα

= $bt(t^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha)/12$ για κεκλιμένο έλασμα

Πίνακας 4.12 Ο παρακάτω Πίνακας δείχνει την απόκλιση των γεωμετρικών μεγεθών (επεξήγηση στον Πίνακα 4.11) της Μέσης Τομής που προέκυψαν από τον αναλυτικό υπολογισμό με τα αντίστοιχα από τα αποτελέσματα του MARS 2000

Μέγεθος	Αποτέλεσμα MARS 2000	Αναλυτικός Υπολογισμός	Απόκλιση $(\beta-\alpha)/\alpha*100\%$
I_{NA} ή I_{y-n50} [m^4]	74.70	73.49	-1.6 %
M_{y-axis} [m^3]	15.03 (= z_n*A)	14.92	-0.7 %
A [m^2]	2.68	2.62	-2.2 %
z_{NA} [m]	5.608	5.687	+1.4 %
Z_D [m^3]	8.90	8.84	-0.68 %
Z_B [m^3]	13.32	12.92	-3.0%

Εν γένει, παρατηρείται καλή συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων του αναλυτικού υπολογισμού και των αποτελεσμάτων του MARS 2000. Οι αποκλίσεις που παρατηρούνται όσον αφορά τη ροπή αντίστασης είναι μικρές, και εφόσον δεν παραβιάζεται ο κανονισμός της ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης (στο κατάστρωμα: $8.84 > 8.15$ και στον πυθμένα: $12.92 > 8.83$), μπορούν να αγνοηθούν. Δικαιολογούνται δε από την απόκλιση (-2.2%) του εμβαδού της διατομής μεταξύ των 2 υπολογισμών, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στο ότι οι βολβολάμες αντικαθίστανται στον αναλυτικό υπολογισμό από περίπου ίσου εμβαδού γωνιές (angle bars) ή ότι το έλασμα υδροσυλλεκτών (bilge) αντικαθίσταται από 3 περίπου ίσου εμβαδού ελάσματα.



Σχήμα 4.9 Στο Σχήμα διαπιστώνεται η γραμμική μεταβολή του $\sigma_{app}/\sigma_{perm}$ κατά το ύψος του πλοίου. Στις περιοχές κοντά στον ουδέτερο άξονα το κλάσμα παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 0.5, στις περιοχές κοντά στον πυθμένα τιμές μεταξύ 0.5 και 0.8, ενώ στις περιοχές κοντά στο κατάστρωμα παίρνει τις μέγιστες τιμές, δηλαδή μεταξύ 0.9 και 0.95, λόγω της μεγαλύτερης απόστασής τους από τον Ο.Α.

4.4.5 Κριτήρια διαστασιολόγησης ελασμάτων Μέσης Τομής [5]

➤ Ελάχιστα Πάχη Ελασμάτων (Mini. Thickness)

Η επιλογή των ελάχιστων τιμών των διαστάσεων του εκάστοτε στοιχείου διαμήκους αντοχής προδιαγράφεται αναλυτικά στους σχετικούς κανονισμούς (CSR-H) ανάλογα με τη θέση του και το μήκος του πλοίου (βλ. Πίνακα 4.13).

Πίνακας 4.13 Ελάχιστο πάχος ελασμάτων

Element	Location	Area	Net thickness
Shell	Keel	-	7.5 + 0.03 L ₂
	Bottom Side shell Bilge	Fore Part	6.5 + 0.03 L ₂
		Machinery space Aft part	7.0 + 0.03 L ₂
		Elsewhere	5.5 + 0.03 L ₂
Breasthook	Fore part	6.5	
Deck	Weather deck, strength deck, internal tank boundary	-	4.5 + 0.02 L ₂
	Platform deck	Machinery space	2.8 + 0.0067 s
		Elsewhere	6.5
Inner bottom ^(*)	-	Machinery space	6.6 + 0.024 L ₂
		Elsewhere	5.5 + 0.03 L ₂

➤ Απαιτήση λυγηρότητας ελάσματος (Prop. Crit. Thick.)

Ο σχετικός κανονισμός υπάρχει στους CSR-H για την αποφυγή τοπικού λυγισμού του ελάσματος στο στάδιο της σχεδίασης:

$$t_{\text{net-Rule}} = \frac{b}{C} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

όπου: R_{eH} η τάση διαρροής του υλικού, b η ισαπόσταση μεταξύ των ενισχυτικών του εξεταζόμενου ελάσματος και C=100 για όρια δεξαμενών, C=120 αλλιώς

➤ Περιθώριο Διάβρωσης (Corrosion Margin) για ελάσματα & ενισχυτικά

Το καθαρό πάχος, t_{net}, των ελασμάτων και των ενισχυτικών προσαυξάνεται σύμφωνα με τον πίνακα των CSR-H (Πίνακας 4.14), για να συμπεριληφθεί και ένα περιθώριο ασφαλείας λόγω διάβρωσης.

➤ Αποφυγή μονοαξονικού λυγισμού του ελάσματος μεταξύ ενισχυτικών μέσω του κριτηρίου η_{Plate} ≤ η_{allowable} (=1.00 για ελάσματα)

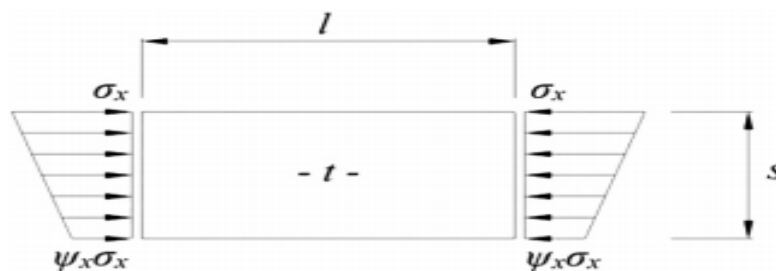
η_{Plate} : ο μέγιστος συντελεστής αποθέματος αντοχής ελάσματος σε λυγισμό (maximum plate utilization factor) και η_{allowable} : ο μέγιστος επιτρεπόμενος συντελεστής αποθέματος αντοχής σε λυγισμό. Όμως η_{Plate} = σ_{appl} / σ_{x,crit} όπου σ_{appl} η ασκούμενη θλιπτική τάση στο έλασμα και σ_{x,crit} (= C_x*R_{eH}) η κρίσιμη τάση λυγισμού του ελάσματος με

$$C_x = \begin{cases} 1, \lambda \leq \lambda_c \text{ για στιβαρά ελάσματα (stocky)} \\ c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2} \right), \lambda > \lambda_c \text{ για λεπτά ελάσματα} \end{cases}$$

το συντελεστή μείωσης αντοχής του ελάσματος λόγω λυγισμού που λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά κατάρρευσης των ελασμάτων βάσει της λυγηρότητάς τους λ σε σχέση με

μια κρίσιμη τιμή λυγηρότητας, λ_c = $\frac{c}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{0.88}{c}} \right)$ όπου c = (1.25-0.12*Ψ_x) με Ψ_x

το λόγο θλιπτικών τάσεων μεταξύ των ακραίων ινών της ίδιας πλευράς φόρτισης.



Εμβόλιμο Σχήμα: Μοντέλο ελάσματος που υπόκειται σε διαμήκη μοναξονική θλίψη.

Η λυγηρότητα δίνεται από τη σχέση: $\lambda = \sqrt{\frac{ReH}{K\sigma_E}}$ όπου $K = \frac{8.4}{\Psi_x + 1.1}$ συντελεστής λυγισμού και σ_E η τάση ελαστικού λυγισμού απλά εδρασμένου ελάσματος που δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{s}\right)^2 \xleftrightarrow{\nu=0.3 \text{ για χάλυβα}} \sigma_E = 0.9E \left(\frac{t}{s}\right)^2 \quad (\text{τύπος του Bryan})$$

Πίνακας 4.14 Προσαύξηση πάχους ελασμάτων και ενισχυτικών λόγω διάβρωσης

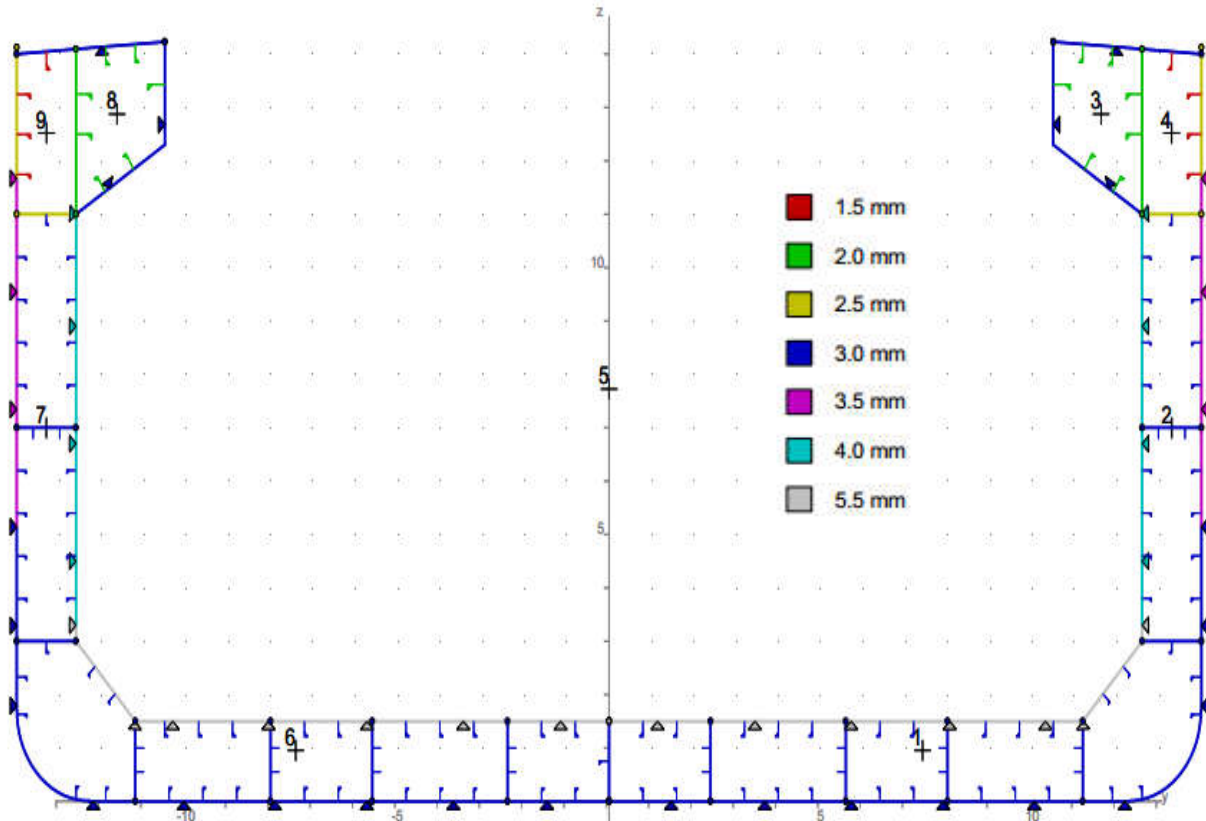
Compartment type	Structural member		t_{cor} of t_{c2}			
			Oil tankers	BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other BC ships	
Ballast water tank, bilge tank, drain storage tank, chain locker (a)	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	2.0			
		Elswhere	1.5			
	Other members (4) (a)	Within 3m below top of tank (4)	1.7			
		Elswhere	1.2			
Cargo oil tank	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	1.7	N/A		
		Elswhere	1.4			
	Inner-bottom plating/bottom of tank	2.1				
	Other members	Within 3m below top of tank (4)	1.7			
Elswhere		1.0				
Dry bulk cargo hold (4)	Transverse bulkhead	Upper part (4)	N/A	2.4	1.0	
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate (7)		5.2	2.6	
				Other parts	3.0	1.5
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating			3.7	2.4	
	Other members	Upper part (4)		N/A	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				
Other parts						
Exposed to atmosphere	Weather deck plating		1.7			
	Other members		1.0			
Exposed to seawater	Shell plating between the minimum design ballast draught waterline and the scantling draught waterline		1.5			
	Shell plating elswhere		1.0			
Fuel and lube oil tank			0.7			
Fresh water tank			0.7			
Void spaces (4)	Spaces not normally accessed, e.g. access only via bolted manhole openings, pipe tunnels, inner surface of stool space not common with a dry bulk cargo hold or ballast cargo hold, etc.		0.7			
Dry spaces	Internals of machinery spaces, pump room, store rooms, steering gear space, etc.		0.5			

Ο τύπος που εφαρμόζεται για την εύρεση της προσαύξησης του πάχους ελάσματος & ενισχυτικού λόγω διάβρωσης, t_{corr} , δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$t_{corr} = \text{Roundup}_{0.5}(t_{c1} + t_{c2}) + t_{res}$$

όπου t_{c1} η προσαύξηση πάχους για την άνω όψη του ελάσματος ανάλογα με το διαβρωτικό περιβάλλον, π.χ. θαλασινό νερό, διαβρωτικό φορτίο, κ.ά., t_{c2} η προσαύξηση πάχους για την κάτω όψη του ελάσματος, t_{res} ένα επιπλέον πάχος ανοχής το οποίο ισούται με 0.5 mm.

Για τα ενισχυτικά, που βρίσκονται εξ ολοκλήρου (και οι 2 όψεις) σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, ισχύει $t_{c1} = t_{c2}$. Παρακάτω φαίνεται το περιθώριο διάβρωσης του κάθε στοιχείου ανάλογα με τη θέση του σε σχέση με το διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 4.10 Προσαύξηση πάχους ελασμάτων και ενισχυτικών t_{corr} [mm] λόγω διάβρωσης για το εν λόγω πλοίο Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος. Παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο t_{corr} προβλέπεται για τον εσωτερικό πυθμένα (Inner Bottom), καθώς υπάρχει εκτεταμένη διάβρωση στην άνω όψη λόγω του φορτίου, και στην κάτω λόγω του θαλάσσιου έρματος.

➤ **Αυξημένα πάχη στα ελάσματα που έρχονται σε επαφή με την δαγκάνα φορτοεκφόρτωσης βάρους 20 tons (Grab Thickness)**

Ο σχετικός κανονισμός που υπάρχει στους CSR-H αναφέρεται στα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα (inner bottom), του ελάσματος κάτω πλευρικής δεξαμενής (hopper plate) και στα ελάσματα του εσωτερικού τοιχώματος (inner hull) που εμπεριέχονται εντός 3.0 μέτρων άνω του εσωτερικού πυθμένα. Συγκεκριμένα για τον εσωτερικό πυθμένα

χρησιμοποιείται η σχέση: $t_{GRAB} = 0.62\sqrt{bk} \left(\frac{M_{GR}}{20}\right)^{0.25}$

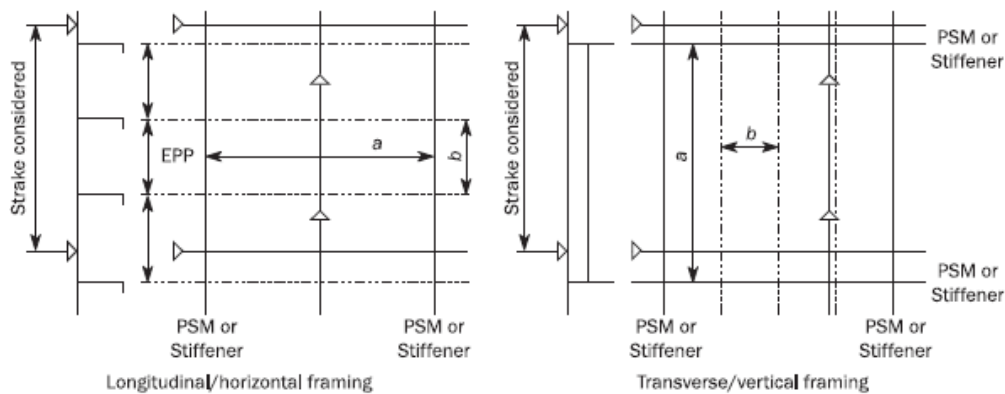
όπου b: η απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών εκατέρωθεν του εξεταζόμενου ελάσματος, και k: ο συντελεστής ασφαλείας του υλικού του ελάσματος, όπως ορίστηκε παραπάνω (βλ. Πίνακα 4.5), ενώ για το hopper plate και το εσωτερικό τοίχωμα χρησιμοποιείται ο

αντίστοιχος τύπος: $t_{GRAB} = 0.55\sqrt{bk} \left(\frac{M_{GR}}{20}\right)^{0.25}$

➤ **Κριτήριο πάχους για ελάσματα που υπόκεινται σε κάθετες πιέσεις**⁸

Σύμφωνα με τους κανονισμούς η σχέση υπολογισμού του καθαρού πάχους, t_{net} , των ελασμάτων είναι η παρακάτω, και αναφέρεται στο εκάστοτε E.P.P (Elementary Plate Panel), όπως αυτό ορίζεται στο Σχήμα 4.11.

$$t_{net} [mm] = 0.0158 a_p b \sqrt{\frac{|P|}{\chi C_a R_{eH}}}$$



Σχήμα 4.11 Ορισμός του E.P.P για διαμήκη & εγκάρσια ενίσχυση

όπου:

- $a_p = \min(1.2 - \frac{b}{2.1a}, 1)$, που είναι ένας διορθωτικός παράγοντας για το λόγο των διαστάσεων των ελασμάτων, όπου b είναι η απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών του E.P.P, ή ισοδύναμα το πλάτος του E.P.P σε mm, a η απόσταση των εγκάρσιων ενισχύσεων (web frames), ή ισοδύναμα το μήκος του E.P.P σε mm.
- C_a , είναι ο συντελεστής επιτρεπόμενης καμπτικής καταπόνησης, ο οποίος συσχετίζεται με την ορθή τάση στο έλασμα, και δίνεται από τη σχέση:

$$C_a = \beta - \alpha \frac{|\sigma_{hg}|}{R_{eH}}$$

και δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή C_{a-max} , που ορίζεται στον Πίνακα 4.7.

Πίνακας 4.15: Τιμές των β , α , C_{a-max} ανάλογα με τη κατάσταση φόρτισης (στατική ή συνδυασμός στατικής - δυναμικής) & την ενίσχυση (διαμήκη ή εγκάρσια).

Acceptance criteria set	Structural member		β	α	C_{a-max}
AC-S	Longitudinal strength members	Longitudinally stiffened plating	0.9	0.5	0.8
		Transversely stiffened plating	0.9	1.0	0.8
	Other members		0.8	0	0.8
AC-SD	Longitudinal strength members	Longitudinally stiffened plating	1.05	0.5	0.95
		Transversely stiffened plating	1.05	1.0	0.95
	Other members		1.0	0	1.0

⁸ Στα αποτελέσματα του MARS 2000 αναφέρεται ως Load Thick.

- $R_{eH}[\text{N}/\text{mm}^2]$, είναι το όριο διαρροής του χρησιμοποιούμενου χάλυβα
- χ , συντελεστής ο οποίος παίρνει τις παρακάτω τιμές

- In intact condition:
 - $\chi = 0.70$ for inner bottom and hopper of bulk carriers,
 - $\chi = 1.00$ for other cases.
- In flooded condition:
 - $\chi = 1.00$ for collision bulkheads for acceptance criteria set AC-S,
 - $\chi = 0.95$ for collision bulkheads for acceptance criteria set AC-SD,
 - $\chi = 1.15$ for other watertight boundaries of compartments.

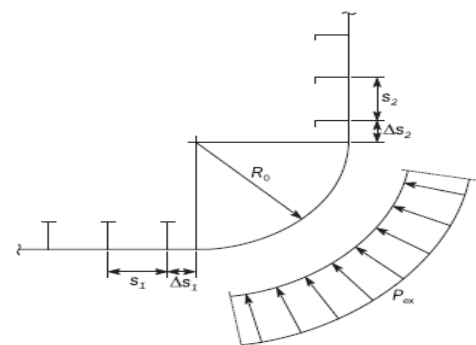
- $\sigma_{hg}[\text{N}/\text{mm}^2]$, η ορθή τάση που ασκείται στο έλασμα λόγω διαμήκουσ κατακόρυφης & οριζόντιας καμπτικής ροπής, και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{hg}\left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right] = \left(\frac{M_{sw} + M_{wv-LC}}{I_{y-n50}}(z - z_n) - \frac{M_{wh-LC}}{I_{z-n50}}y\right) * 10^{-3}$$

όπου M_{sw} [kN*m] η μέγιστη/ελάχιστη καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό για hogging/sagging όπως αυτή προκύπτει από το εγχειρίδιο φόρτωσης του πλοίου ανάμεσα σε όλες τις πιθανές καταστάσεις φόρτωσης, M_{wv-LC} [kN*m] η κατακόρυφη καμπτική ροπή κυματισμού ανάλογα με την εκάστοτε δυναμική κατάσταση που υπόκειται το έλασμα, z, y [m] η κατακόρυφη και οριζόντια συντεταγμένη του E.P.P, z_n [m] η κατακόρυφη θέση του ουδέτερου άξονα της κάμψης, I_{y-n50}, I_{z-n50} [m⁴] η ροπή αδράνειας της μέσης τομής γύρω από τον οριζόντιο και κατακόρυφο κεντροβαρικό άξονα της μέσης τομής, M_{wh-LC} [kN*m] η οριζόντια καμπτική ροπή κυματισμού ανάλογα με τη δυναμική κατάσταση, όπως προβλέπεται στους CSR-H.

Load combination factor	M_{wv-LC}
$C_{wv} \geq 0$	$f_{\beta} C_{wv} M_{wv-h}$
$C_{wv} < 0$	$f_{\beta} C_{wv} M_{wv-s} $

- P [kN/m²], είναι η πίεση σχεδίασης για τη δυσμενέστερη κατάσταση φόρτισης. Η ολική πίεση δίνεται από το άθροισμα της στατικής συνιστώσας P_{static} και της δυναμικής συνιστώσας $P_{dynamic}$, ο υπολογισμός των οποίων προβλέπεται στους CSR-H ανάλογα με την περιοχή που βρίσκεται το έλασμα (π.χ. εξωτερική υδροστατική φόρτιση) και την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου (π.χ. πλήρες βύθισμα ή βύθισμα ερματισμού).



Σχήμα 4.12 Ασκούμενη φόρτιση στο bilge plate.

Για το έλασμα υδροσυλλεκτών (Bilge plate) η απαίτηση σε πάχος των CSR-H είναι:

$$t_{\text{net-bilge}} = 6.45 \times 10^{-4} (P_{\text{ex}} S_b)^{0.4} R^{0.6}$$

όπου:

- P_{ex} η εξασκούμενη υδροστατική πίεση και η δυναμική πίεση λόγω κυματισμού
- S_b η απόσταση μεταξύ των εγκάρσιων ενισχύσεων που ενισχύουν το έλασμα
- R είναι η ενεργός ακτίνα του ελάσματος υπολογιζόμενη σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο: $R=R_0 + 0.5 (\Delta S_1 + \Delta S_2)$, όπου R_0 , ΔS_1 και ΔS_2 ορίζονται στο Σχήμα 4.12.

4.4.6 Υπολογισμός φορτίσεων ελασμάτων

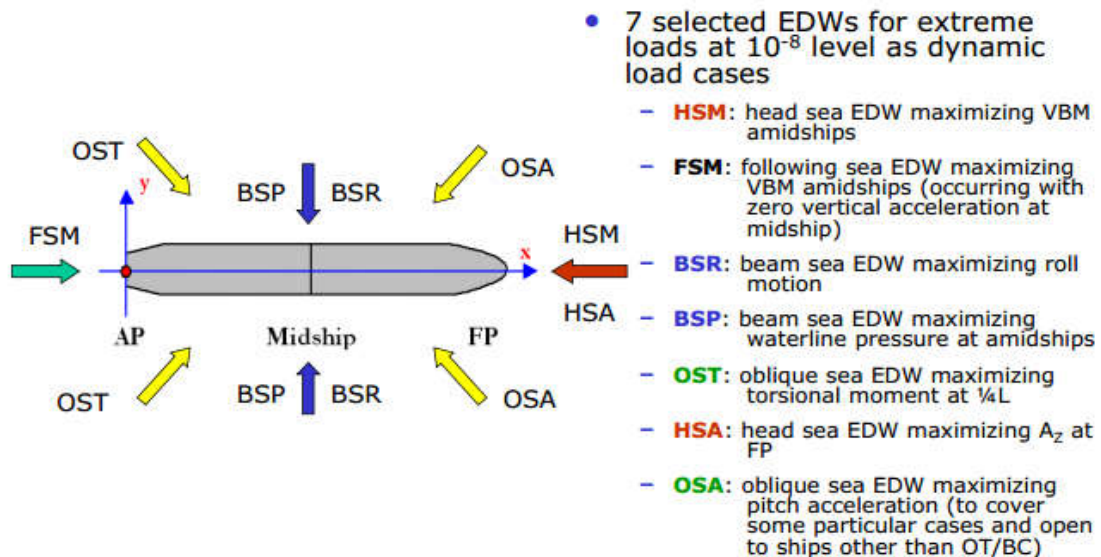
Για τον υπολογισμό του πάχους των διαφόρων ελασμάτων είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι φορτίσεις σύμφωνα με τις οποίες σχεδιάζονται τα εν λόγω ελάσματα.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει το πώς μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της φόρτισης του ελάσματος ανάλογα με τη θέση του, π.χ. αν είναι εξωτερικό έλασμα πυθμένα τότε: $P = P_{\text{ex}} = P_{\text{hydrost}} + P_{\text{wv-dyn}}$.

Πίνακας 4.16 Εφαρμοζόμενες πιέσεις στα ελάσματα ανάλογα με τη θέση τους, το περιεχόμενο του διαμερίσματος (π.χ. έρμα, υγρό καύσιμο) που βρίσκονται, και την κατάσταση φόρτωσης του πλοίου (π.χ. Full Load Departure, Normal Ballast Condition, Harbour Condition, Alternate).

Item	Design load set	Load component	Draught	Design load	Loading condition
External shell and exposed deck	SEA-1	P_{ex}, P_D	T_{SC}	S+D	Full Load condition ⁽¹⁾
	SEA-2	P_{ex}	T_{SC}	S	Harbour condition ⁽²⁾
Water ballast tank (oil tanker and bulk carrier)	WB-1	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽³⁾	T_{BAL}	S+D	Normal ballast condition
	WB-2	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽³⁾	T_{BAL}	S+D	Normal ballast condition Water ballast exchange
	WB-3	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽³⁾	$0.25T_{SC}$	S	Harbour/test condition
Water ballast tank (bulk carrier) and bulk cargo hold assigned as ballast hold	WB-4	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽³⁾	T_{BAL+H} ⁽⁷⁾	S+D	Heavy ballast condition
	WB-5 ⁽⁴⁾	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽³⁾	T_{BAL+H} ⁽⁷⁾	S+D	Heavy ballast condition Water ballast exchange
	WB-6 ⁽⁵⁾	P_{ex}	-	S	Harbour/test condition
Cargo oil tank	OT-1	P_{in}	T_{SC}	S+D	Full Load condition
	OT-2	P_{in}	$0.6T_{SC}$	S+D	Partial load condition
	OT-3	P_{in}	-	S	Harbour/Test condition
Bulk cargo hold	BC-1	P_{ex}	T_{SC}	S+D	Homogeneous loading, fully filled
	BC-2	P_{ex}	-	S	
	BC-3	P_{ex}	T_{SC}	S+D	Homogeneous heavy cargo, partially filled (BC-A, B ships)
	BC-4	P_{ex}	-	S	
	BC-5	P_{ex}	T_{SC}	S+D	Alternate light cargo, fully filled (BC-A ships)
	BC-6	P_{ex}	-	S	
	BC-7	P_{ex}	T_{SC}	S+D	Alternate heavy cargo, partially filled (BC-A ships,)
	BC-8	P_{ex}	-	S	
Other tanks (fuel oil tank, fresh water tank)	TK-1	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽⁶⁾	T_{BAL}	S+D	Normal ballast condition
	TK-2	$P_{\text{in}} - P_{\text{ex}}$ ⁽⁶⁾	$0.25T_{SC}$	S	Harbour/test condition
Compartments not carrying liquids	FD-1 ⁽⁸⁾	P_{in}	T_{SC}	S+D	Flooded condition
	FD-2 ⁽⁸⁾	P_{in}	-	S	Flooded condition
Exposed deck, internal decks or platforms	DL-1 ⁽⁹⁾	P_{ex}, F_U	T_{BAL}	S+D	Normal ballast condition
	DL-2 ⁽⁹⁾	P_{ex}, F_U	-	S	Harbour condition

Παρακάτω παρουσιάζονται οι υπολογισμοί για τα κρίσιμα (που δέχονται τη μεγαλύτερη φόρτιση) στοιχειώδη ελάσματα (E.P.P) μόνον της κρίσιμης δυναμικής κατάστασης φόρτισης όπως αυτή προέκυψε με βάση το MARS 2000, δηλαδή αυτής που απαιτείται το μεγαλύτερο πάχος ελάσματος. Η φιλοσοφία των κανονισμών CSR-H βασίζεται στο ότι οι δυναμικές καταστάσεις φόρτισης μετατρέπονται σε ισοδύναμες στατικές μέσω των ισοδύναμων σχεδιαστικών κυματισμών **EDW** (Equivalent Design Waves), οι οποίοι αντιστοιχούν στους παρακάτω πραγματικούς κυματισμούς (βλ. Σχήμα 4.13): HSA-1 & 2 (μετωπικοί κυματισμοί/180°), HSM-1 & 2 (μετωπικοί), FSM (ακολουθούντες κυματισμοί/0°), BSR-1 (Port ή Starboard) & 2, BSP-1 (Port ή Starboard) & 2 (πλευρικοί κυματισμοί/90° ή 270°), OST-1 (Port ή Starboard) & 2 και OSA-1 (Port ή Starboard) & 2 (λοξοί κυματισμοί). Οι κυματισμοί EDW-1 αφορούν τη μεγιστοποίηση ενός παράγοντα φόρτισης (π.χ. της κατακόρυφης καμπτικής ροπής), ενώ οι κυματισμοί EDW-2 την ελαχιστοποίησή του.



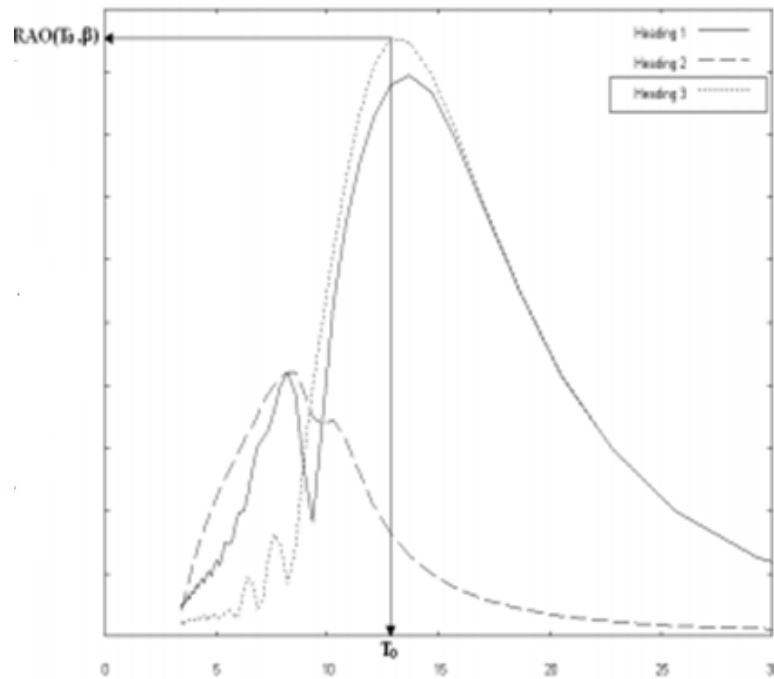
Σχήμα 4.13 Ισοδύναμοι σχεδιαστικοί κυματισμοί με βάση τους οποίους προκύπτουν οι αντίστοιχες δυναμικές φορτίσεις των στοιχειωδών ελασμάτων σε τοπικό επίπεδο και κατά συνέπεια η δυσμενέστερη δυναμική φόρτιση βάσει τις οποίες προδιαγράφεται το απαιτούμενο πάχος ελάσματος από τους κανονισμούς [6].

4.4.7 Ορισμός EDW (Equivalent Design Wave)

Απλό αρμονικό κύμα με πλάτος A_0 , περίοδο T_0 και κατεύθυνση κυματισμού β_0 από το οποίο παράγεται η ίδια φόρτιση (π.χ. κατακόρυφη καμπτική ροπή) με την προβλεπόμενη μέγιστη από τους κανονισμούς με πιθανότητα εμφάνισης 10^{-8} υπό την επίδραση τυχαίων κυματισμών (τυχαίας περιόδου T και κατεύθυνσης κυματισμού β ως προς την κατεύθυνση πλεύσης του πλοίου).

Πώς προκύπτει το EDW:

- Από υδροδυναμικές εξισώσεις που συνδέουν τις φορτίσεις του πλοίου με τη διέγερση της θάλασσας βρίσκεται η συνάρτηση RAO (T,β) (πλάτος απόκρισης σε διέγερση μοναδιαίου πλάτους και συχνότητας ω). Επιλέγεται το ζεύγος (T₀,β₀) το οποίο μεγιστοποιεί τη συνάρτηση RAO (T,β) [6].



Σχήμα 4.14 Συναρτήσεις RAO(T,β). Η μέγιστη τιμή όλων είναι το RAO(T₀,β₀).

- Από φασματική ανάλυση προσδιορίζεται το πλάτος της απόκρισης (π.χ. ροπή κυματισμού) σε διέγερση συχνότητας ω₀ με πιθανότητα εμφάνισης 10⁻⁸ : X. Τα φάσματα προκύπτουν από καταστάσεις θάλασσας που παρατηρούνται στο Βόρειο Ατλαντικό [6].

Τελικά:

$$A_{EDW} = A_0 = \frac{X}{|RAO(T_0, \beta_0)|} \quad (\text{σχ. 1})$$

όπου A₀ το πλάτος της διέγερσης του αρμονικού κύματος.

Αφού βρίσκονται οι παράμετροι A₀, T₀ και β₀ ορίζεται το εκάστοτε EDW.

Παράλληλα για την ανάκτηση του πλάτους άλλων δυναμικών μεγεθών χρησιμοποιούνται οι συνδυαστικοί συντελεστές φορτίσεων LCF (Load Combination Factors).

Ουσιαστικά πρόκειται για συντελεστές που συσχετίζουν την τιμή του πλάτους μιας απόκρισης με το πλάτος της κρίσιμης απόκρισης. Δίνονται από τον παρακάτω τύπο [6]:

$$LCF_j = \frac{A_{EDW-i}(T_i) * RAO_j * \cos(\Delta\varepsilon)}{X_j} \Rightarrow LCF_j = \frac{A_{EDW-i}(T_i)}{A_{EDW-j}(T_j)} * \frac{RAO_j(T_j)}{RAO_j(T_j)} * \cos(\Delta\varepsilon)$$

Όπου

$A_{EDW-i}(T_i)$: το πλάτος του EDW για τη μεγιστοποιημένη (κρίσιμη) απόκριση i

RAO_j : Response Amplitude Operator για την απόκριση j

$\Delta\varepsilon$: η διαφορά φάσης μεταξύ της απόκρισης i και j για την περίοδο T_i

T_i : η περίοδος του αρμονικού κύματος EDW $_i$ για την απόκριση i

T_j : η περίοδος του αρμονικού κύματος EDW $_j$ για την απόκριση j

Πίνακας 4.17 Μήκος και ύψος αρμονικού κύματος EDW για κάθε περίπτωση

EDW	λ (Regular design wave length, in m)
HSM	$0.6(1+f_r)L$
HSA	$0.6(1+f_r)L$
FSM	$0.6(1+2f_r/3)L$
BSR	$gT_s^2/(2\pi)$
BSP	$(0.2+0.4f_r)L$
OST	$0.45L$
OSA	$0.70L$

$f_r = T_{LC}/T_{SC}$
 T_{SC} : Design moulded draft of the ship, in m.
 T_{LC} : Draft amidships for the relevant loading condition, in m.

EDW	H (Regular Wave Height, in m)
HSM	$1.31 \times C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$
HSA	$1.09 \times C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$
FSM	$1.31 \times C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$
BSR	$0.88 C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$
BSP	$1.5 C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$
OST	$1.38 C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$
OSA	$1.38 C_w \sqrt{\frac{L+\lambda-125}{L}}$

λ : Regular design wave length for each EDW, in m.
 C_w : Wave coefficient in m, to be taken as:
 $C_w = 10.75 - \{(300-L)/100\}^{1.5}$ $90m \leq L \leq 300m$
 $C_w = 10.75$ $300m < L \leq 350m$
 $C_w = 10.75 - \{(L-350)/150\}^{1.5}$ $350m < L \leq 500m$

Πίνακας 4.18 Συντελεστές LCF για κάθε απόκριση για διάφορα EDW

Load component	LCF	HSM-1	HSM-2	FSM-1	FSM-2
Hull girder loads	M_{WW} C_{WW}	-1	1	$-0.75 - 0.2f_r$	$0.75 + 0.2f_r$
	Q_{WW} C_{QW}	$-1.0 f_{lp}$	$1.0 f_{lp}$	$(-0.75-0.2f_r) f_{lp}$	$(0.75+0.2f_r) f_{lp}$
	M_{WH} C_{WH}	0	0	0	0
	M_{WT} C_{WT}	0	0	0	0
Longitudinal accelerations	a_{surge} C_{XS}	$0.3 - 0.2f_r$	$0.2f_r - 0.3$	$-0.4f_r + 0.2$	$0.4f_r - 0.2$
	a_{pitch} C_{XP}	-0.9	0.9	0.1	-0.1
	$g \sin \varphi$ C_{XG}	$0.4f_r + 0.4$	$-0.4f_r - 0.4$	-0.15	0.15
Transverse accelerations	a_{sway} C_{YS}	0	0	0	0
	a_{roll} C_{YR}	0	0	0	0
	$g \sin \theta$ C_{YG}	0	0	0	0
Vertical accelerations	a_{heave} C_{ZS}	$0.8f_r - 0.15$	$0.15 - 0.8f_r$	0	0
	a_{pitch} C_{ZP}	0	0	0	0
	a_{pitch} C_{ZP}	-0.9	0.9	0.1	-0.1

Πίνακας 4.19 Βασικά Δεδομένα για την διεξαγωγή των υπολογισμών τοπικής αντοχής

Lbp	170	m
Loa	178.7	m
B	28	m
Tdes	9.5	m
D	14	m
Tsc	9.79	m
TBAL	5.5	m
Cb	0.814	
Web Spacing: Lp	2400	mm
Rule Length: L	168.57	m
ReH1	315	N/mm ²
ReH2	355	N/mm ²
Neutral Axis vertical position: zn	5.608	m
Iy-n50	74.70	m ⁴
Iz-n50	307.09	m ⁴
Grab weight: MGR	20.00	t
Rules		
Cw	9.243	-
Msw-hog (Navigation)	881000.0	kN*m
Msw-sag (Navigation)	-868000.0	kN*m
Mwv-hog (Navigation)	1137421.0	kN*m
Mwv-sag (Navigation)	-1227017.0	kN*m

Επεξήγηση συμβόλων που χρησιμοποιούνται παρακάτω

f_b : διορθωτικός συντελεστής λόγω κατεύθυνσης κυματισμών

f_{ps} : διορθωτικός συντελεστής λόγω συνθήκης πλευσης

f_T : συντελεστής βυθίσματος ($T_{LOAD COND}/T_{SCANT}$)

f_{nl} : συντελεστής διόρθωσης μη γραμμικότητας

k_a : συντελεστής κατανομή πλάτους κύματος κατά το διάμηκες του πλοίου

λ : μήκος κύματος της δυναμικής κατάστασης

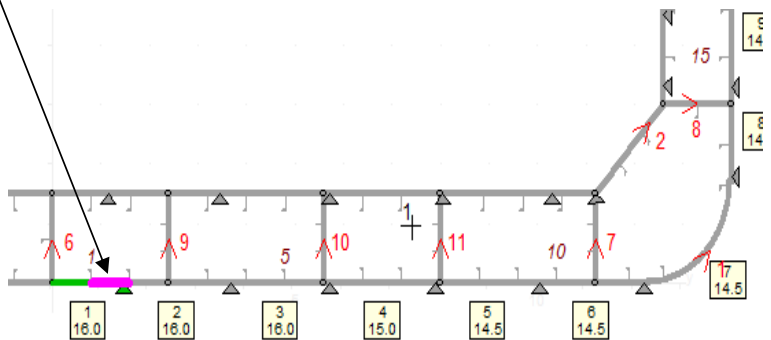
k_p : συντελεστής κατανομής φάσης

4.4.8 Φόρτιση και επιτρεπόμενα πάχη ελασμάτων πυθμένα

Πίνακας 4.20 Πίνακας υπολογισμού απαιτούμενου ολικού πάχους ελάσματος τρόπιδας από τους κανονισμούς.

KEEL PLATE/2σ E.P.P from C.L		
Minim. Thckn.	12.56	mm
b	800	mm
Z _{E.P.P}	0.00	m
Y _{E.P.P}	1.60	m
α _p	1.00	
Critical Load Case		SEA ⁹ FSM-2
T _{LC}		T _{SC}
f _T		1.00
σ _{hg} (θλιπτ/hogg)	-151.52	N/mm ²
ReH	315	N/mm ²
β	1.05	-
α	0.50	-
Ca	0.809	-
χ	1.00	-
P_{static}	98.44	kN/m²
f _{ps}	1.00	-
f _{nl}	0.90	-
f _h	2.60	-
k _a	1.00	-
k _p	1.00	-
f _{yz}	1.11	-
L ₀	168.57	m
λ	168.57	m
P_{wave}	27.04	kN/m²
P	125.48	kN/m²
Load thckn.	8.87	mm
Proportional Crit. Thick.	9.26	mm
t _{c1}	1.0	mm
t _{c2}	1.2	mm
t _{res}	0.5	mm
t_{corr}	3.0	mm
t_{gross(Rule)}	15.50	mm
t_{gross(Actual)}	16.00	mm
η_{plate}	0.64 (<1.00)	

Παρατήρηση: Μόνο για τους συγκεκριμένους υπολογισμούς τοπικής αντοχής με (-) θεωρείται η θλιπτική τάση και με (+) η εφελκυστική. Η τιμή της σ_{hg} (z) επιλέγεται ως η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή αναπτυσσόμενη ορθή τάση μεταξύ των καταστάσεων hogging & sagging.



Στην προκειμένη περίπτωση:

- $P_{static} = \rho * g * (T_{SC} - z)$
- $P_{wv-dyn} = f_{ps} f_{nl} f_h k_a k_p f_{yz} C_w \sqrt{\frac{L_0 + \lambda - 125}{L}}$
- f_{yz} : συντελεστής κατανομής υδροδυναμικής πίεσης κατά το πλάτος και καθ' ύψος,

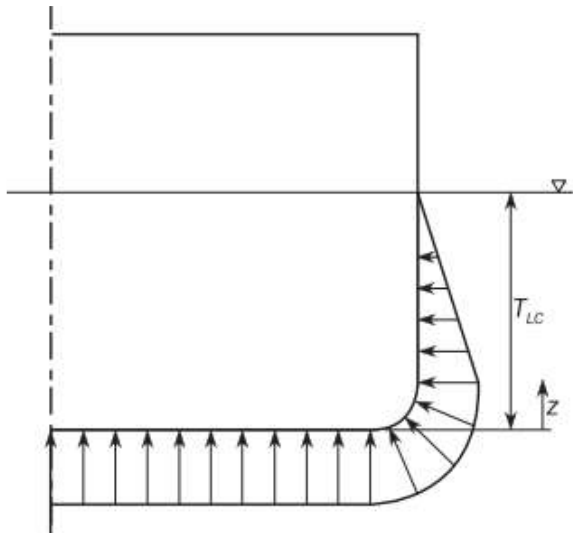
$$f_{yz} = \frac{Z_{E.P.P}}{T_{LC}} + f_{yB} + 1$$

όπου

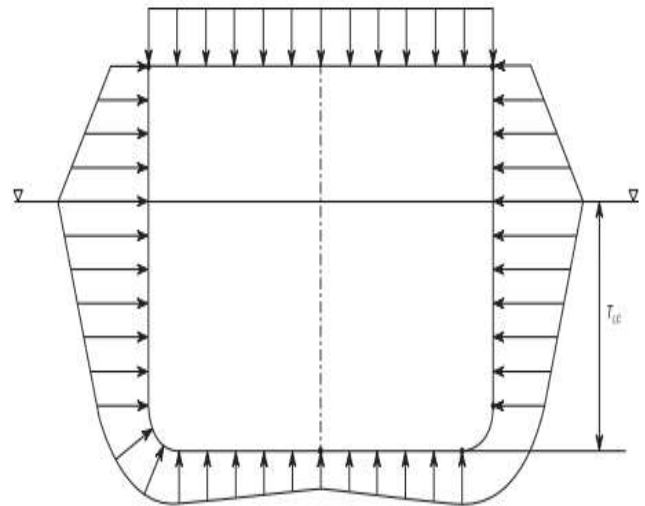
$$f_{yB} = \frac{|2y_{E.P.P}|}{B}$$

Ροπές κυματισμού	
C _{wv} (f _T =1)	1.00
C _{wh} (f _T =1)	0.00
f _β	1.00
M _{wv-hog-LC}	1137421.0 kN*m
M _{wh-LC}	0.00

⁹ Sea Pressure

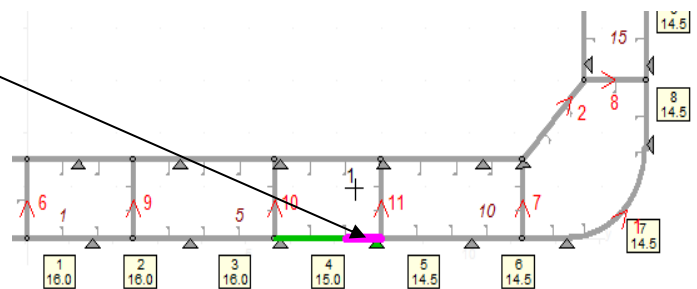


Σχήμα 4.15 Κατανομή υδροστατικής πίεσης στα εξωτερικά βρεχόμενα ελάσματα της μέσης τομής



Σχήμα 4.16 Κατανομή υδροδυναμικής πίεσης για κατάσταση FSM-2 στα εξωτερικά ελάσματα της μέσης τομής

BOTTOM PLATE 3/ 3ο E.P.P		
Minim. Thckn.	10.56	mm
b	800	mm
Z _{E.P.P}	0.00	m
Y _{E.P.P}	8.00	m
α _p	1.00	
Critical Load Case		SEA FSM-2
T _{LC}		T _{SC}
f _T		1.00
σ _{hg} (θλιπτ/hogg)	-151.52	N/mm ²
ReH	315	N/mm ²
β	1.05	-
α	0.50	-
Ca	0.809	-
χ	1.00	
Pstatic	98.44	kN/m²
f _{ps}	1.00	-
f _{nl}	0.90	-
f _h	2.60	-
k _a	1.00	-
k _p	1.00	-
f _{yz}	1.57	-
L ₀	168.57	m
λ	168.57	m
Pwave	38.13	kN/m²
P	136.57	kN/m²
Load thickn.	9.25	mm

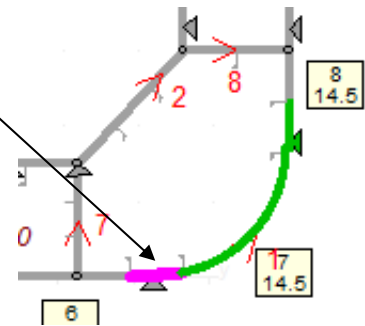


Proportional Crit. Thick.	9.26 mm	
tc1	1.0 mm	
tc2	1.2	mm
tres	0.5	mm
t_{corr}	3.0	mm
t_{gross}(Rule)	13.50¹⁰	mm
t_{gross}(Actual)	15.00	mm
η_{plate}	0.68 (<1.00)	

Ροπές κυματισμού	
C _{wv} (f _T =1)	1.00
C _{wh} (f _T =1)	0.00
f _β	1.00
M _{wv-hog-LC}	1137421.0 kN*m

¹⁰ Η στρογγυλοποίηση γίνεται στο πλησιέστερο ήμισυ, δηλ. $t_{gr} = t_{cor} + \text{round}(\text{min.thick.}) = 3.0 + 10.5 = 13.5 \text{ mm}$

BOTTOM PLATE 5/4o E.P.P		
Minim. Thckn.	10.56	mm
b	700	mm
Z _{E.P.P}	0.026	m
Y _{E.P.P}	12.60	m
α _p	1.00	
Critical Load Case		SEA BSP-1
T _{LC}		T _{sc}
f _T		1.00
σ _{hg} (εφέλκ/sagg)	101.53	N/mm ²
ReH	315	N/mm ²
β	1.05	-
α	0.50	-
Ca	0.889	-
χ	1.00	
P _{static}	98.18	kN/m ²
P _{wave}	67.95 ¹¹	kN/m ²
P	166.13	kN/m ²
Load thick.	8.52	mm
Proportional Crit. Thick.	8.10	mm
t _{c1}	1.0	mm
t _{c2}	1.2	mm
t _{res}	0.5	mm
t _{corr}	3.0	mm
t _{gross(Rule)}	13.50	mm
t _{gross(Actual)}	14.50	mm
η _{plate}		0.67 (<1.00)

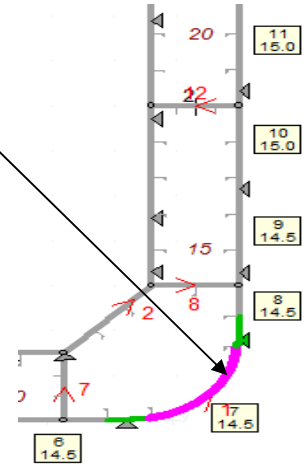


Ροπές κυματισμού	
C _{wv} (f _T =1)	-0.50
C _{wh} (f _T =1)	0.00
f _β	0.80
M _{wv-sag-LC}	-490806.80 kN*m
M _{wh-LC}	0.00

Αφού το ακραίο έλασμα, που δέχεται τις υψηλότερες πιέσεις (βλ. Σχήμα 4.15 & 4.16), πληροί τους κανονισμούς, τότε και τα προηγούμενα θα τους πληρούν.

¹¹ Η υδροδυναμική πίεση υπολογίζεται σύμφωνα με τον αντίστοιχο τύπο & τους αντίστοιχους συντελεστές για τη δυναμική κατάσταση BSP-1 που προβλέπονται από τους CSR-H.

BILGE PLATE/2o E.P.P		
Minim. Thckn.	10.56	mm
Z _{E.P.P}	0.026	m
Y _{E.P.P}	12.60	m
sb	1200	mm
R	1700	mm
Critical Load Case		SEA BSP-1
P _{static}	98.18	kN/m²
P _{dyn}	67.95	kN/m²
P	166.13	kN/m²
Load thckn.	7.37	mm
tc1	1.2	mm
tc2	1.0	mm
tres	0.5	mm
t_{corr}	3.0	mm
t_{gross(Rule)}	13.50	mm
t_{gross(Actual)}	14.50	mm



4.4.9 Φόρτιση και επιτρεπόμενα πάχη ελασμάτων περιβλήματος γάστρας (Side Shell)

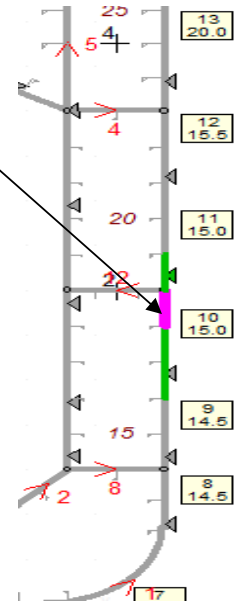
Όπως και στα ελάσματα του πυθμένα, έτσι και στα ελάσματα της πλευράς του πλοίου ασκείται υδροστατική και υδροδυναμική πίεση. Η μεν υδροστατική πίεση μειώνεται προς την ελεύθερη επιφάνεια του νερού, ενώ η υδροδυναμική πίεση αυξάνεται λόγω μεγαλύτερης επίδρασης των κυματισμών.

SIDE SHELL PLATE 2/1o E.P.P		
Minim. Thckn.	10.56	mm
b	800	mm
α _p	1.00	-
Critical Load Case		SEA BSP-1
T		T _{sc}
f _T		1.00
σ _{hg} (εφελκ/sagg)	47.44	N/mm ²
Re _H	315	N/mm ²
β	1.05	-
α	0.50	-
Ca	0.950	-
χ	1.00	-
Proportional Crit. Thick.	9.26	mm
P _{static}	68.28	kN/m²

Z _{E.P.P}	3.00 m
Y _{E.P.P}	14.00 m

P _{wave}	89.11	kN/m²
P	157.39	kN/m²
Load thckn.	9.17	mm
tc1	1.2	mm
tc2	1.0	mm
tres	0.5	mm
t_{corr}	3.0	mm
t_{gross(Rule)}	13.50	mm
t_{gross(Actual)}	14.50	mm
η_{plate}	0.45 (<1.00)	

SIDE SHELL PLATE 3/3o E.P.P		
Minim. Thckn.	10.56	mm
b	800	mm
Z _{E.P.P}	7.00	m
Y _{E.P.P}	14.00	m
Critical Load Case		SEA BSP-1
T _{LC}		T _{sc}
f _T		1.00
σ _{hg} (θλυττ/sagg)	-10.77	N/mm ²
ReH	315	N/mm ²
Ca	0.950	-
Pstatic	36.10	kN/m²
Pwave	105.24	kN/m²
P	166.13	kN/m²
Load thick.	8.69	mm
Proportional Crit. Thick.	9.26	mm
tc1	1.5	mm
tc2	1.2	
tres	0.5	mm
tcorr	3.5	mm
t_{gross}(Rule)	14.00	mm
t_{gross}(Actual)	15.00	mm

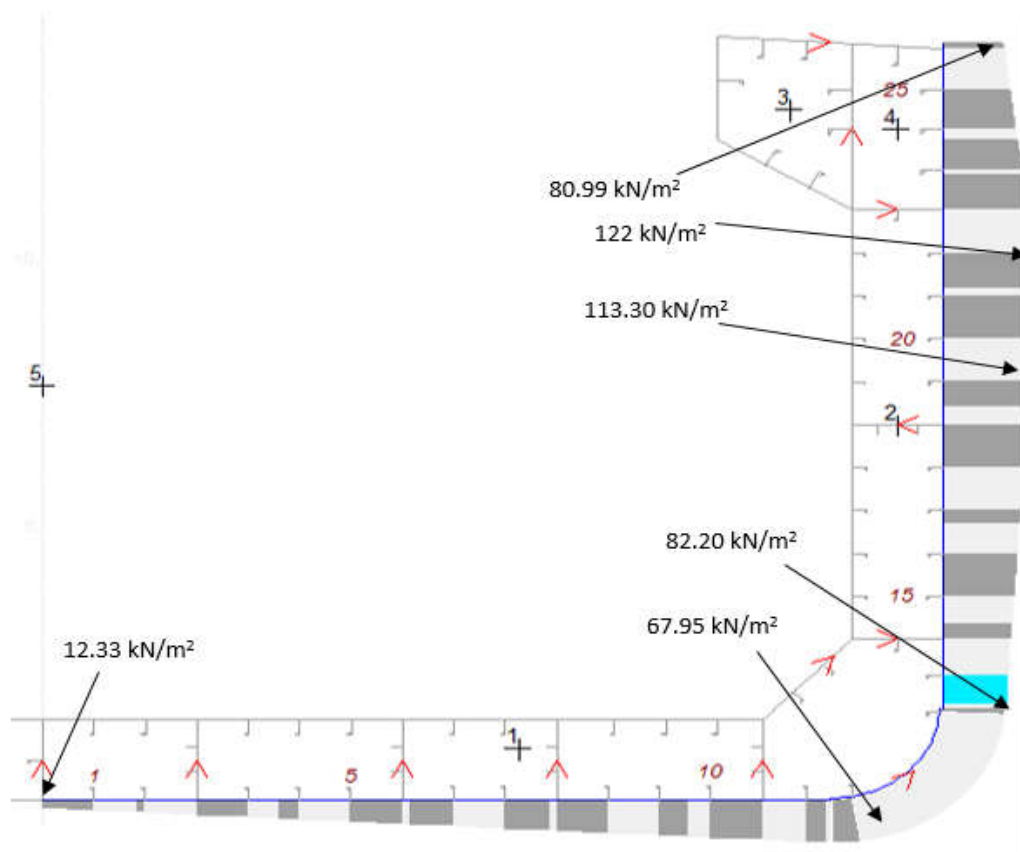


η_{plate}	0.49 (<1.00)
--------------------------	------------------------

SIDE SHELL PLATE 5/1o E.P.P		
Minim. Thckn.	10.56	mm
b	800	mm
Z _{E.P.P}	9.40	m
Y _{E.P.P}	14.00	m
Critical Load Case		SEA BSP-1
T _{LC}		T _{sc}
f _T		1.00
σ _{hg} (θλυττ/sagg)	-68.98	N/mm ²
ReH	315	N/mm ²
Ca	0.941	-
Pstatic	3.92	kN/m²
Pwave	121.36	kN/m²
P	125.28	kN/m²
Load thick.	8.22	mm

Proportional Crit. Thick.	9.26	mm
tc1	1.5	mm
tc2	1.2	
tres	0.5	mm
tcorr	3.5	mm
t_{gross}(Rule)	14.00	mm
t_{gross}(Actual)	15.50	mm

η_{plate}	0.66 (<1.00)
--------------------------	------------------------



Σχήμα 4.17 Κατανομή υδροδυναμικής φόρτισης στο εξωτερικό περίβλημα του πλοίου για τη δυναμική κατάσταση BSP-1 σύμφωνα με το MARS 2000

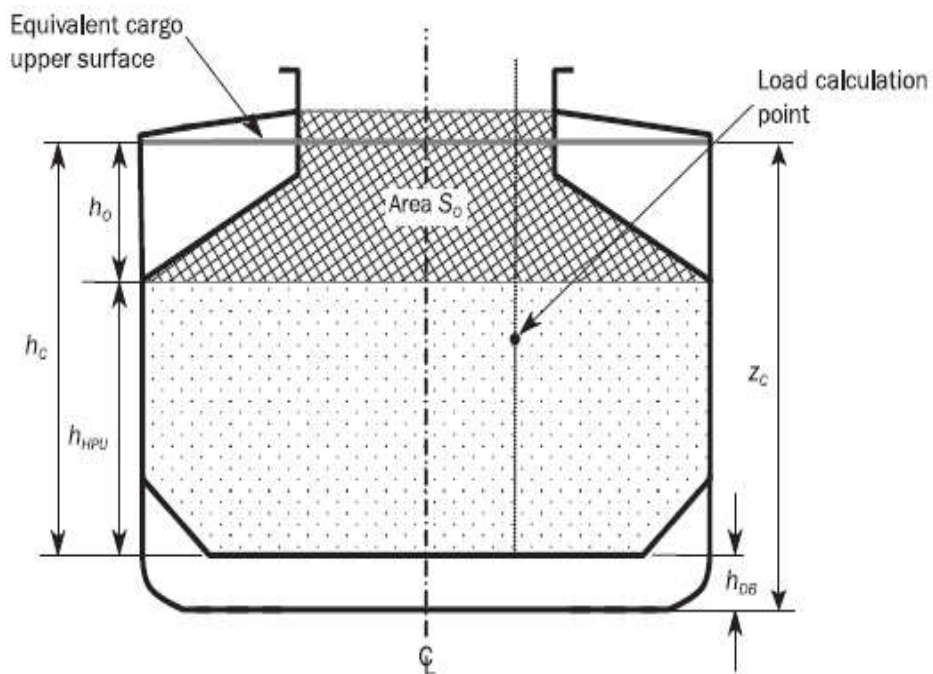
Σύμφωνα με το Σχήμα 4.17 η μέγιστη τιμή της δυναμικής πίεσης προκύπτει στο έλασμα κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια (9.79 m). Πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια δεν υπάρχει υδροστατική πίεση, ενώ η υδροδυναμική πίεση μειώνεται. Παράλληλα η διάβρωση δεν είναι τόσο έντονη, άρα οι απαιτήσεις των κανονισμών σε πάχη είναι μειωμένες δεδομένου και ότι η ισαπόσταση των ενισχυτικών παραμένει ίδια (800 mm) ή μικρότερη (700 mm).

4.4.10 Φόρτιση και επιτρεπόμενα πάχη εσωτερικού πυθμένα (Inner Bottom) & ελάσματος κάτω πλευρικής δεξαμενής (Hopper Plate)

Πίνακας 4.21 Χαρακτηριστικά αμπαριού ξηρού φορτίου χύδην

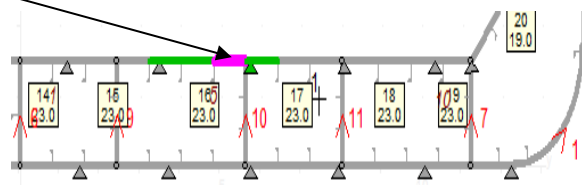
Dry Cargo Characteristics		
ήηρυ (βλ. Σχήμα 4.15)	9.50	m
Area S ₀ (βλ. Σχήμα 4.15)	71.96	m ²
Πλάτους αμπαριού: ΒΗ	25.20	m
Μήκος αμπαριού: ΙΗ	28.85	m
Περικλειόμενος όγκος από το στόμιο του αμπαριού: V _{HC}	656.45	m ³
Συνολικός όγκος αμπαριού μέχρι το στόμιά του: V _{Full}	9078.96	m ³

Πυκνότητα φορτίου στην Homogenous Scantl. Condition	0.6953	t/m ³
Συνολική μάζα φορτίου μέχρι το στόμιο του αμπαριού: ΜΗ	6312.60	t
Ισοδύναμο εμβαδό: $S_A = S_0 + V_{HC}/I_H =$	93.38	m ²
$h_0 = S_A/BH =$	3.76	m
Ισοδύναμο ύψος φορτίου: $h_c = h_0 + h_{HPU} =$	13.26	m
Μέγιστη πυκνότητα φορτίου: ρ_c	1.00	t/m ³



Σχήμα 4.18 Στο Σχήμα φαίνεται ο ορισμός της «ισοδύναμης» ελεύθερης επιφάνειας του χύδην φορτίου που θα προέκυπτε χωρίς την παρουσία άνω πλευρικών δεξαμενών. Το ισοδύναμο ύψος φορτίου που προκύπτει (βλ. παραπάνω Πίνακα) δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της στατικής πίεσης που δέχονται τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα [5].

INNER BOTTOM PLATE 3 (3ο E.P.P.) {Επεξήγηση βλ. Σελ. 104-106}		
Minim. Thckn.	10.56	mm
b	800	mm
Z _{E.P.P}	1.50	m
Y _{E.P.P}	4.80	m
X _{E.P.P}	84.80	m
αρ	1.00	-
Critical Load Case		BULK 5 BSP-1
σ _{hg} (εφελκ/sagg)	74.72	N/mm ²
ReH	315	N/mm ²
β	1.05	-
α	0.50	-
Ca	0.931	-
χ	0.70	-
Γωνία που σχηματίζει το E.P.P. με το οριζόντιο επίπεδο: α	0	deg
Γωνία ανάπαυσης σιτηρών: Ψ	30	deg
$K_c = \cos^2 a + (1 - \sin \Psi) \sin^2 a$	1.00	-
Κατακόρυφη συντεταγμένη ανώτερης επιβάνειας φορτίου από την B.L.: z _c =h _c +h _{DB}	14.76	m
P_{bulk,static}	130.07	kN/m²
f _p =f _{ps}	1.00	-
f _{nl}	0.80	-
f _β	0.80	-
Load Comb. Factors:	0.20	-
C _{XG}	0.20	-
C _{XS}	0.00	-
C _{XP}	-0.20	-
C _{YG}	-0.20	-
C _{YS}	-0.90	-
C _{YR}	0.30	-
C _{ZH}	1.00	-
C _{ZR}	0.30	-
C _{ZP}	-0.20	-
a ₀ (βλ. σελ. 102)	0.438	-
R (βλ. σελ. 102)	7.00	m



φ	11.290	deg
λφ	202.284	m
Tφ	11.382	sec
GM	3.360	m
kr	9.80	m
fbk	1.00	-
Tθ	12.334	sec
θ	26.191	deg
asurge	0.859	m/s ²
apitch	0.065	rad/s ²
asway	1.288	m/s ²
aroll	0.119	rad/s ²
aheave	4.293	m/s ²
ax	-0.394	m/s ²
ay	-2.051	m/s ²
az	4.714	m/s ²
xG,hold	95.225	m
yG,hold	0.000	m
zG,hold	7.730	m
P_{bulk,dyn}	51.15	kN/m²
P_{total}	181.21	kN/m²
Load thckn.	11.87	mm
Συντελεστής ασφαλείας υλικού: k	0.78	-
Grab. Thckn. t_{GR}	15.49	mm
t _{c1}	3.7	mm
t _{c2}	1.2	mm
t _{res}	0.5	mm
t_{corr}	5.5	mm
t_{gross(Rule)}	21.00	mm
t_{gross(Actual)}	23.00	mm

Πίνακας 4.22 Συνδυαστικοί συντελεστές αποκρίσεων

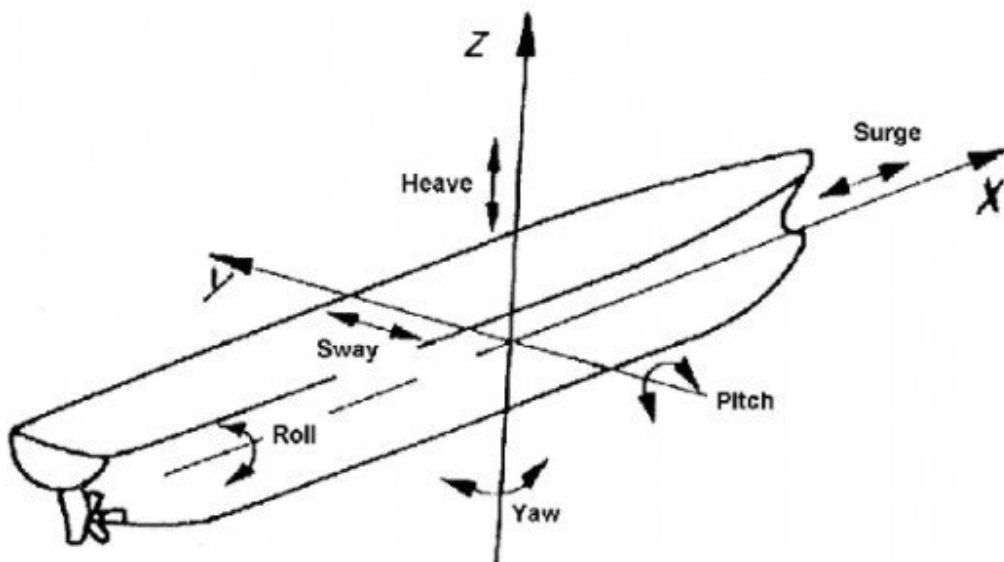
C_{WV}	: Load combination factor to be applied to the vertical wave bending moment.
C_{QW}	: Load combination factor to be applied to the vertical wave shear force.
C_{WH}	: Load combination factor to be applied to the horizontal wave bending moment.
C_{WT}	: Load combination factor to be applied to the wave torsional moment.
C_{XS}	: Load combination factor to be applied to the surge acceleration.
C_{XP}	: Load combination factor to be applied to the longitudinal acceleration due to pitch.
C_{XG}	: Load combination factor to be applied to the longitudinal acceleration due to pitch motion.
C_{YS}	: Load combination factor to be applied to the sway acceleration.
C_{YR}	: Load combination factor to be applied to the transverse acceleration due to roll.
C_{YG}	: Load combination factor to be applied to the transverse acceleration due to roll motion.
C_{ZH}	: Load combination factor to be applied to the heave acceleration.
C_{ZR}	: Load combination factor to be applied to the vertical acceleration due to roll.
C_{ZP}	: Load combination factor to be applied to the vertical acceleration due to pitch.

Παράμετρος επιτάχυνσης:

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

Κατακόρυφη συντεταγμένη του κέντρου στροφής του πλοίου:

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



Σχήμα 4.19 Στο Σχήμα φαίνονται οι κινήσεις του κέντρου βάρους G του πλοίου στους άξονες x,y,z και οι στροφές του ως προς τους άξονες x,y,z.

Πίνακας 4.23 Χαρακτηριστικά κίνησης pitch πλοίου σύμφωνα με τους CSR-H

Pitch motion
The pitch period T_ϕ in s, is to be taken as:
$T_\phi = \sqrt{\frac{2\pi \lambda_\phi}{g}}$
where:
$\lambda_\phi = 0.6 (1 + f_T) L$
The pitch angle ϕ , in deg, is to be taken as:
$\phi = 1350 f_p L^{-0.94} \left\{ 1.0 + \left(\frac{2.57}{\sqrt{gL}} \right)^{1.2} \right\}$
where:
f_p : Coefficient to be taken as:
$f_p = f_{ps}$ for strength assessment.
$f_p = f_{ps} [(0.27 - 0.02f_T) - (13 - 5f_T) L \times 10^{-6}]$ for fatigue assessment.

Πίνακας 4.24 Χαρακτηριστικά κίνησης roll πλοίου σύμφωνα με τους CSR-H: περίοδος T_θ & γωνία διατοιχισμού θ .

Roll motion
The roll period T_θ in s, to be taken as:
$T_\theta = \frac{2.3\pi k_r}{\sqrt{g GM}}$
The roll angle θ , in deg, to be taken as:
$\theta = \frac{9000 (1.25 - 0.025 T_\theta) f_p f_{BR}}{(B + 75)\pi}$
where:
f_p : Coefficient to be taken as:
$f_p = f_{ps}$ for strength assessment.
$f_p = f_{ps} (0.23 - 4f_T B \times 10^{-4})$ for fatigue assessment.
f_{BR} : To be taken as:
$f_{BR} = 1.2$ for ships without bilge keel.
$f_{BR} = 1.0$ for ships with bilge keel.
k_r : Roll radius of gyration, in m, in the considered loading condition, to be adopted.
GM : Metacentric height, in m, in the considered loading condition.

Πίνακας 4.25 Μετακεντρικό ύψος GM και ακτίνα διατοιχισμού kr για Bulk Carriers ανάλογα με την κατάσταση φόρτωσής τους και το βύθισμα.

Loading condition ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾		Application	T_{LC}	k_r	GM
Full load condition	Homogeneous loading	All bulk carriers	T_{sc}	0.35B	0.12B
	Alternate heavy cargo	BC-A		0.40B	0.20B
	Alternate light cargo	BC-A		0.35B	0.12B
	Homogeneous heavy cargo	BC-B, BC-A		0.42B	0.25B
Steel coil loading ⁽³⁾		All bulk carriers designated for the carriage of steel products		0.42B	0.25B
Heavy ballast condition		All bulk carriers	$T_{BAL,H}$	0.40B	0.25B
Normal ballast condition		All bulk carriers	T_{BAL}	0.45B	0.33B

Τύποι των CSR-H για την εύρεση των επιταχύνσεων του κέντρου βάρους του πλοίου σε κάθε κίνηση ή στροφή:

- ✓ $a_{surge} = 0.2 f_p a_0 g$
- ✓ $a_{sway} = 0.3 f_p a_0 g$
- ✓ $a_{heave} = f_p a_0 g$
- ✓ $a_{roll} = f_p \theta \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\theta}\right)^2$
- ✓ $\alpha_{pitch} = f_p \left(\frac{3.1}{\sqrt{gL}} + 1.0\right) \varphi \frac{\pi}{180} \left(\frac{2\pi}{T_\varphi}\right)^2$

Αφού βρεθούν οι επιταχύνσεις στο κ.β. CG του πλοίου τότε μέσω των παρακάτω τύπων μπορούν να βρεθούν οι επιταχύνσεις στους άξονες x,y,z σε κάθε σημείο του πλοίου:

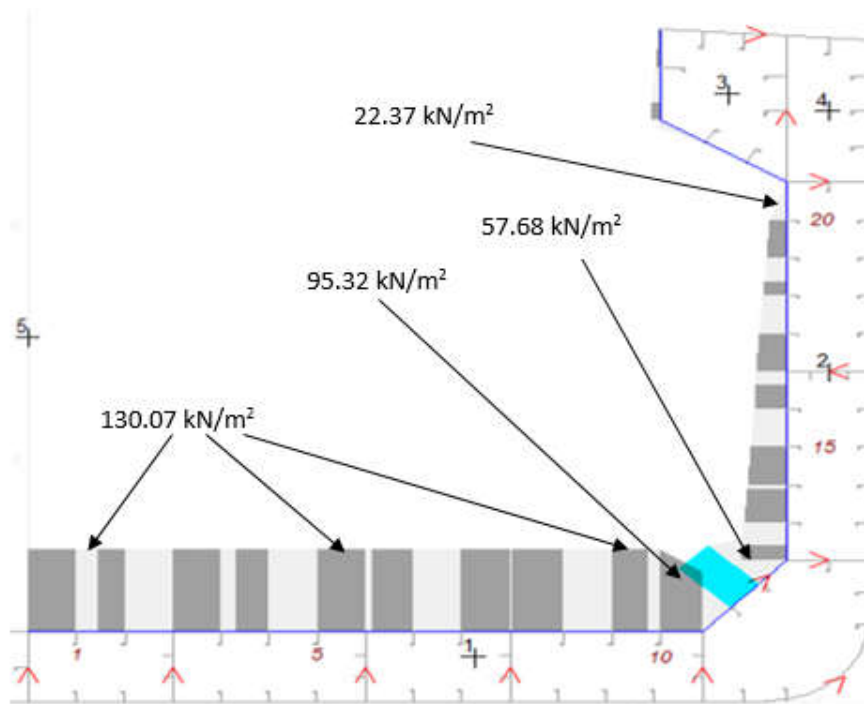
- ✓ $a_x = -C_{XG} g \sin\varphi + C_{XS} a_{surge} + C_{XP} a_{pitch} (z - R)$
- ✓ $a_y = C_{YG} g \sin\theta + C_{YS} a_{sway} - C_{YR} a_{roll} (z - R)$
- ✓ $a_z = C_{ZH} a_{heave} + C_{ZR} a_{roll} y - C_{ZP} a_{pitch} (x - 0.45L)$

Άρα θέτοντας στις συντεταγμένες x,y,z τις συντεταγμένες του κέντρου βάρους του αμπαριού $x_{G,hold}$, $y_{G,hold}$, $z_{G,hold}$ παίρνουμε τις επιταχύνσεις στο κέντρο βάρους του αμπαριού.

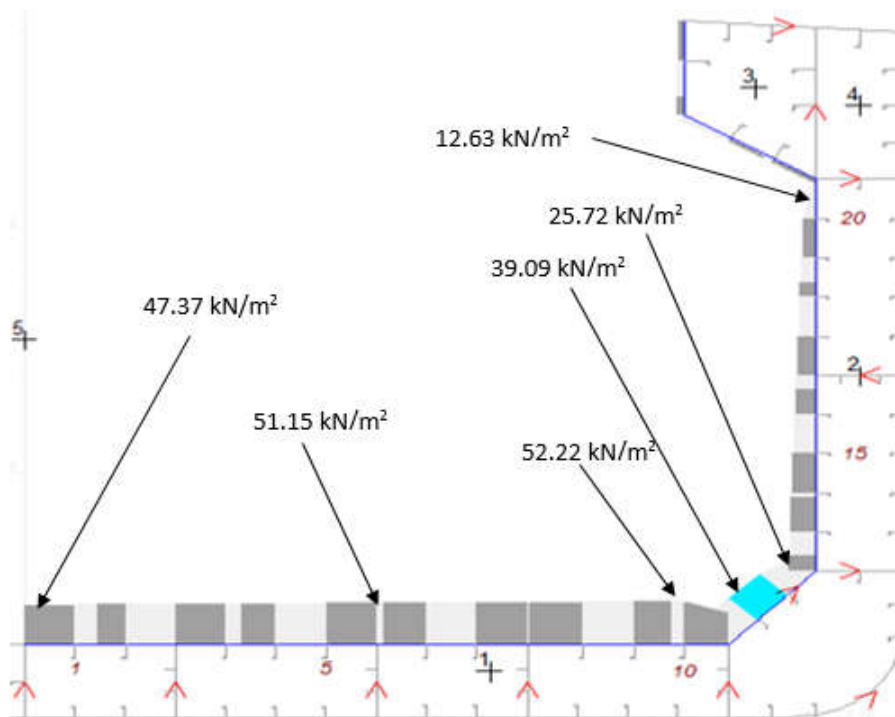
Για τον υπολογισμό των πιέσεων $P_{bulk,static}$ και $P_{bulk,dyn}$ χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

➤ $P_{bulk,static} = \rho_c g K_c (z_c - z_{E.P.P})$

➤ $P_{bulk,dyn} = \begin{cases} f_\beta \rho_c [0.25 a_x (x_G - x_{E.P.P}) + 0.25 a_y (y_G - y_{E.P.P}) + f_{dc} K_c a_z (z_c - z_{E.P.P})], & \text{εάν } z \leq z_c \\ 0, & \text{εάν } z > z_c \end{cases}$



Σχήμα 4.20 Στο Σχήμα φαίνεται η κατανομή της στατικής πίεσης $P_{bulk,static}$ λόγω φορτίου χύδην στα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα, του hopper plate και του εσωτερικού τοιχώματος. Στο πρώτο E.P.P του hopper plate (βλ. σελ. 108): $\alpha=133$ deg άρα λόγω $\Psi=30$ deg: $K_c=0.73$ και επειδή $z_{E.P.P} = 1.5$ m προκύπτει $P_{bulk,static}=95.32$ kN/m².



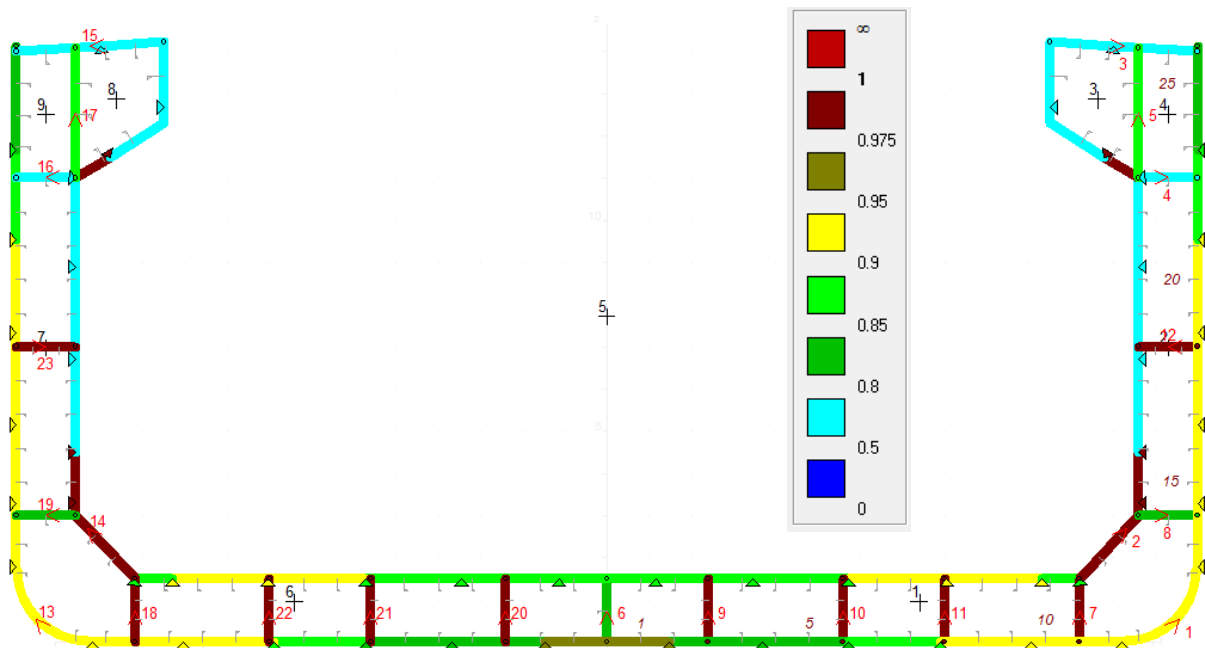
Σχήμα 4.21 Στο Σχήμα φαίνεται η κατανομή της δυναμικής πίεσης $P_{bulk,dyn}$ στα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα, του hopper plate και του εσωτερικού τοιχώματος.

Με βάση τα Σχήματα 4.20 και 4.21 οι πιέσεις στον εσωτερικό πυθμένα και στο hopper plate κυμαίνονται στα επίπεδα του E.P.P 3 του 3^{ου} ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα. Συνεπώς για τον εσωτερικό πυθμένα το πάχος των 23 mm είναι αποδεκτό. Για το hopper plate προκύπτει:

HOPPER PLATE (1o E.P.P)		
P_{total}	134.41	kN/m²
Load thickn.	8.95	mm
Συντελεστής ασφαλείας υλικού: k	0.78	-
Prop. thickn.	9.26	mm
Grab. Thickn. t_{GR}	13.74	mm
t _{c1}	3.7	mm
t _{c2}	1.2	mm
t _{res}	0.5	mm
t_{corr}	5.5	mm
t_{gross(Rule)}	19.00	mm
t_{gross(Actual)}	19.00	mm
η_{plate}	0.56 (<1.00)	

Δεδομένου ότι οι φορτίσεις είναι περίπου ίδιες και στα άλλα E.P.P του hopper plate καθώς και η ισαπόσταση των ενισχυτικών, το πάχος των 19 mm είναι αποδεκτό από τους κανονισμούς. Ομοίως με παραπάνω ελέγχονται από πλευράς τοπικής αντοχής τα ελάσματα του εσωτερικού πυθμένα (inner hull), της άνω πλευρικής δεξαμενής H.F.O. (υγρό φορτίο) και του καταστρώματος (deck) ανάλογα με την εκάστοτε κρίσιμη δυναμική κατάσταση (βλ. Σχήμα 4.22).

4.4.11 Συνολικός έλεγχος τοπικής αντοχής ελασμάτων της Μέσης Τομής



Σχήμα 4.22 Με χρωματική διαβάθμιση φαίνεται μεταξύ ποιων τιμών κυμαίνεται η τιμή του λόγου $t_{max,Rule}/t_{actual}$ δηλαδή η μεγαλύτερη απαιτούμενη τιμή του πάχους ελάσματος που προβλέπεται από τους κανονισμούς προς την πραγματική τιμή του πάχους του ελάσματος. Οι καφέ περιοχές δηλώνουν ότι ο λόγος βρίσκεται μεταξύ 0.975 και 1. Το ότι δεν υπάρχει κόκκινη περιοχή σημαίνει ότι όλες οι διαστάσεις των ελασμάτων είναι αποδεκτές από πλευράς τοπικής αντοχής από τους CSR-H.

4.4.12 Κριτήρια διαστασιολόγησης ενισχυτικών Μέσης Τομής & έλεγχος

Για τη διαστασιολόγηση των ενισχυτικών υπάρχουν πολλά κριτήρια. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας παρουσιάζονται μόνο τα επικρατέστερα:

- Απαίτηση ελάχιστου πάχους για κορμό ενισχυτικού σύμφωνα με τον Πίνακα 4.25

Πίνακας 4.26 Ελάχιστο απαιτούμενο πάχος κορμού σύμφωνα με τους CSR-H (L_2 το μήκος κανονισμών)

Element	Location	Net thickness
Stiffeners and attached end brackets	Watertight boundary	$3.5 + 0.015 L_2$
	Other structure	$3.0 + 0.015 L_2$
Cargo hold side frames webs of single side bulk carriers	Foremost hold ⁽¹⁾	$6.0 + 0.026 L$
	Other holds ⁽¹⁾	$5.2 + 0.023 L$
Tripping brackets		$5.0 + 0.015 L_2$
(1) L needs not to be taken greater than 200 m		

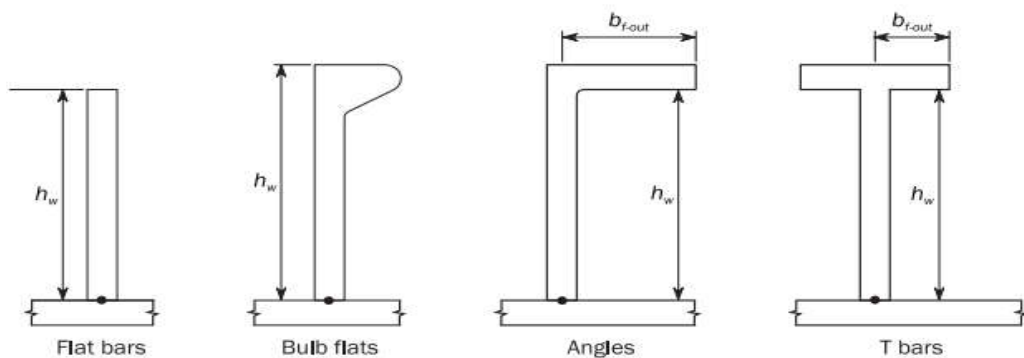
- Απαίτηση ελάχιστου πάχους κορμού – φλάντζας ενισχυτικού για την αποφυγή του τοπικού λυγισμού (Prop. Criteria)

a)

$$t_{web-net} \geq \frac{h_w}{C_w} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$

b)

$$t_{f-net} \geq \frac{b_{f-out}}{C_f} \sqrt{\frac{R_{eH}}{235}}$$



Σχήμα 4.23 Τύποι ενισχυτικών

Πίνακας 4.27 Συντελεστές κορμού & φλάντζας ενισχυτικού ανάλογα με τον τύπο του ενισχυτικού

Type of Stiffener	C_w	C_f
Angle bars	75	12
T-bars	75	12
Bulb bars	45	-
Flat bars	22	-

- Απαίτηση ελάχιστης ροπής αντίστασης συστήματος προσκείμενου ελάσματος – ενισχυτικού

$$Z [cm^3] = \frac{|P| s l_{bdg}^2}{f_{bdg} \chi C_s R_{eH}}$$

όπου

- s, η απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών σε mm,
- f_{bdg} , παράγοντας καμπτικής ροπής για ενισχυτικά
- l_{bdg} , το ενεργό μήκος κάμψης σε m, ίσο με το μήκος του ενισχυτικού ανάμεσα

- στους εγκάρσια ενισχυμένους νομείς ή στα εγκάρσια ενισχυτικά
- C_s , είναι ο συντελεστής επιτρεπόμενης καμπτικής καταπόνησης, ο οποίος λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον Πίνακα .
 - χ , συντελεστής ο οποίος λαμβάνει τιμές 0.90, εάν πρόκειται για εσωτερικό πυθμένα bulk-carrier, και 1.00 σε άλλες περιπτώσεις
 - R_{eH} [N/mm²], η τάση διαρροής του χάλυβα
 - P [kN/m²], η ασκούμενη πίεση στο προσκείμενο έλασμα

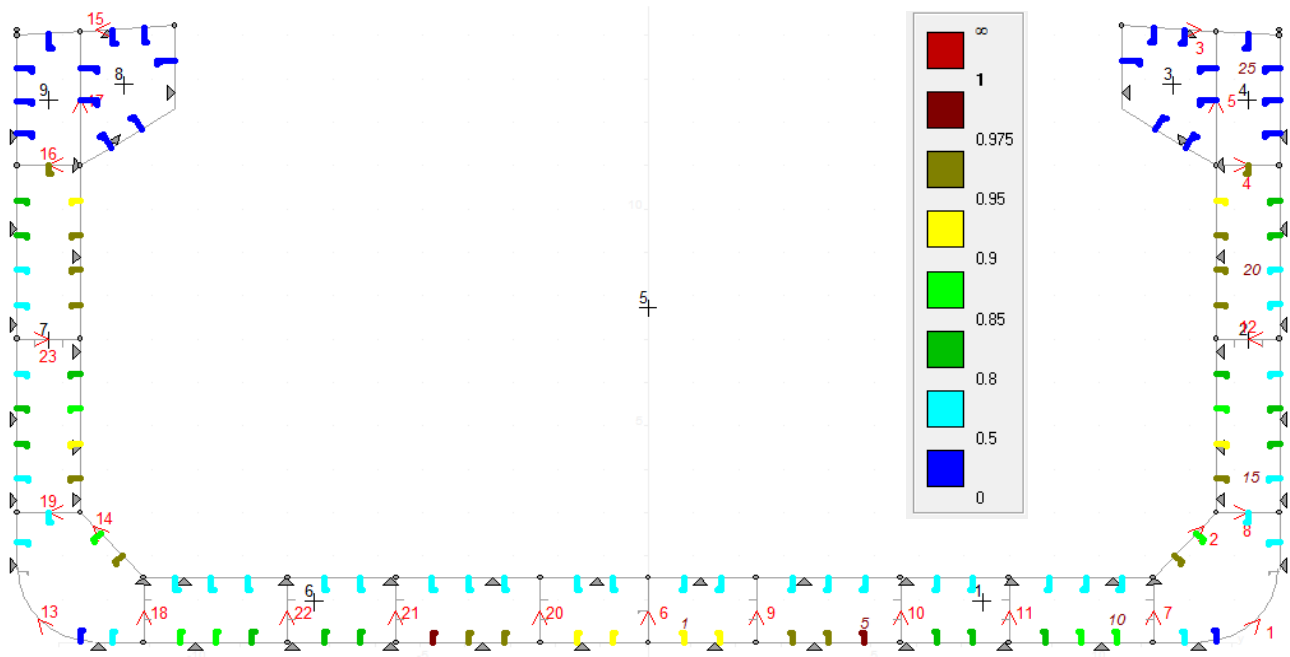
Πίνακας 4.28 Τιμές του συντελεστή C_s ανάλογα με την ορθή τάση (εφελκυστική ή θλιπτική) και την πλευρά άσκησης της πίεσης (πλευρά ελάσματος ή ενισχυτικού).

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

Πίνακας 4.29 Τιμές συντελεστών για ενισχυτικά (διαμήκη ή εγκάρσια) ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης (μόνο στατική ή στατική & δυναμική)

Acceptance criteria set	Structural member	β_s	α_s	C_{s-max}
AC-S	Longitudinal strength member	0.85	1.0	0.75
	Transverse or vertical member	0.75	0	0.75
AC-SD	Longitudinal strength member	1.0	1.0	0.9
	Transverse or vertical member	0.9	0	0.9

Πρέπει να σημειωθεί ότι στον έλεγχο των CSR-H περιλαμβάνεται και ο έλεγχος λυγισμού των ενισχυτικών, ο οποίος εδώ έχει παραληφθεί λόγω του ότι οι φορτίσεις σε υπηρεσιακές συνθήκες SLS (Serviceability Limit State) για τις συγκεκριμένες διαστάσεις ενισχυτικών δεν είναι ικανές να προκαλέσουν ελαστο-πλαστικό λυγισμό των ενισχυτικών. Αυτό συμβαίνει διότι παραπάνω έχει εξασφαλιστεί ο μη λυγισμός των στοιχειωδών ελασμάτων (E.P.P.), ο οποίος προηγείται του λυγισμού του ενισχυτικού ή της κατάρρευσης όλου του ενισχυμένου ελάσματος. Στις ακραίες συνθήκες ULS (Ultimate Limit State), όμως, που μπορεί να υπερβεί το φορτίο λυγισμού του στοιχειώδους ελάσματος και άρα προκύπτει διάχυση μεγαλύτερου φορτίου προς τα ενισχυτικά, πρέπει να εξεταστεί ο λυγισμός τους. Για αυτό το λόγο δημιουργούνται οι μειωτικές καμπύλες φόρτισης.



Σχήμα 4.24 Με χρωματική διαβάθμιση φαίνεται μεταξύ ποιων τιμών κυμαίνεται η τιμή του λόγου Z_{Rule}/Z_{actual} για κάθε ενισχυτικό (MARS 2000). Το ότι δεν υπάρχουν κόκκινα ενισχυτικά σημαίνει ότι οι διαστάσεις τους πληρούν το κριτήριο $Z_{Rule}/Z_{actual} < 1$.

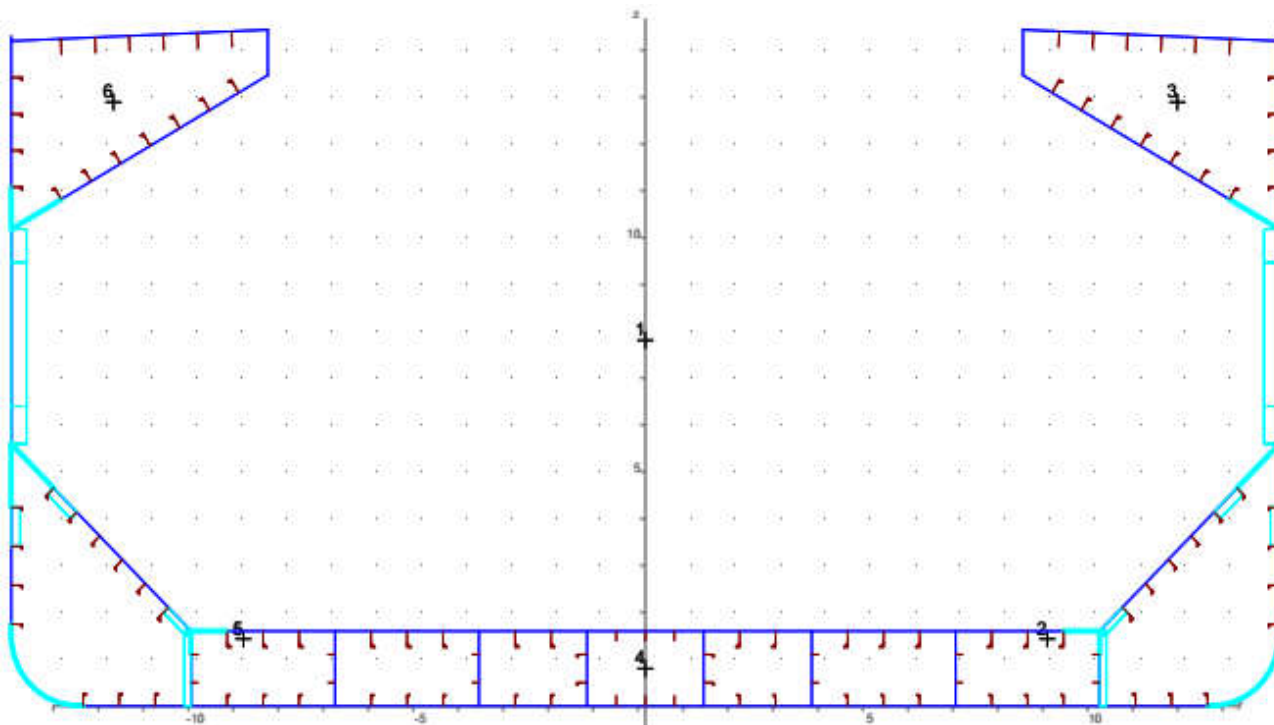
Πίνακας 4.30 Παράδειγμα ελέγχου του κριτηρίου $Z_{Rule}/Z_{actual} < 1$ για το 1^ο ενισχυτικό του πυθμένα με συνεργαζόμενο έλασμα καθαρού πάχους 13 mm.

STIFF. NO. 1 (from C.L.)/BOTTOM		
LOAD. CONDITION: SEA-FSM2		
Pst	98.44	kN/m ²
Pdyn	25.65	kN/m ²
Ptotal	124.09	kN/m ²
s	800	mm
lbdg	2400	mm
fbdg	12	-
χ	1.00	-
ReH	315	N/mm ²
βs	1.0	-
αs	1.0	-
σhg	-145.03	N/mm ²
Cs	0.540	-
Z(Rule)	280.35	cm³
Καθαρή κεντροβαρική ροπή αδράνειας ενισχυτικού-ελάσματος Iy-net	6443.09	cm ⁴
z0	21.23	cm
Z(Actual)=Iy/z0	303.46	cm³

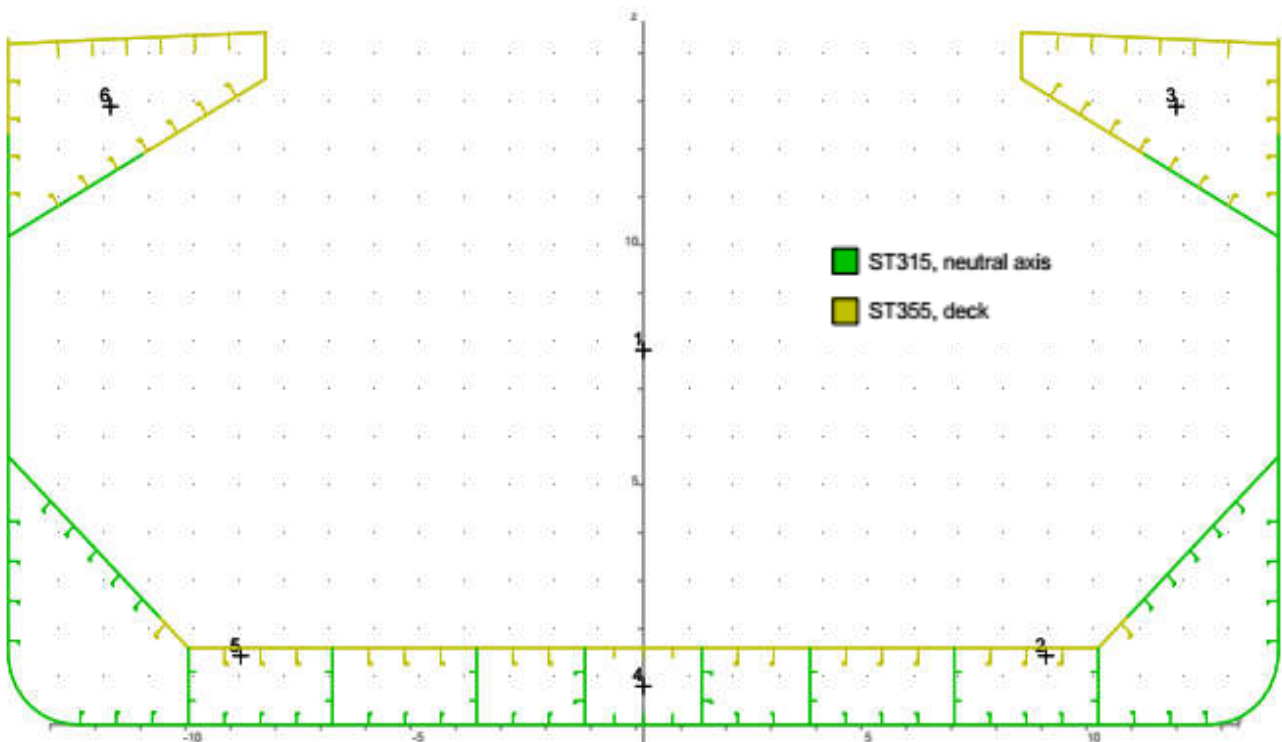
4.5 Εξέταση Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος

4.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά πλοίου

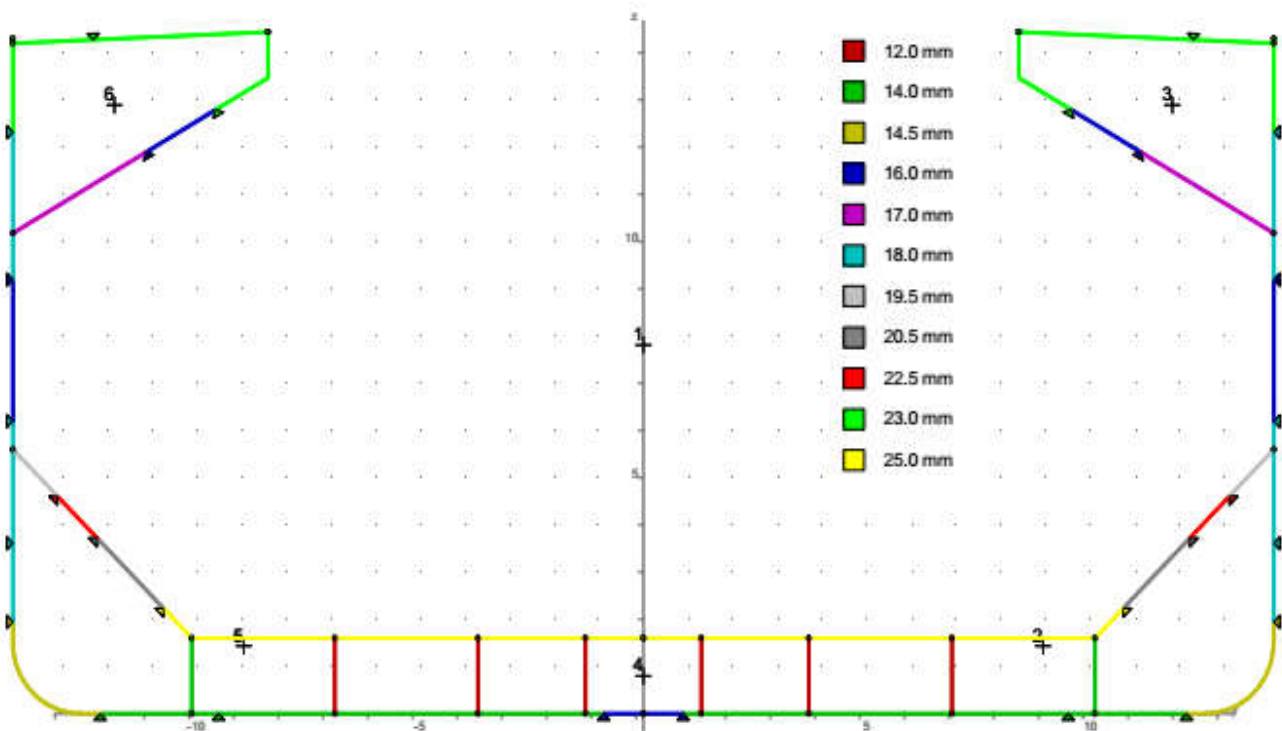
Το υπό μελέτη πλοίο είναι κατασκευασμένο με διάμηκες σύστημα ενίσχυσης και διαθέτει κάτω πλευρικές δεξαμενές έρματος (Διαμερίσματα 2 & 5 / Σχήμα 4.22) και άνω πλευρικές δεξαμενές καυσίμου (Διαμερίσματα 3 & 6 / Σχήμα 4.22). Ο χώρος φορτίου χύδην απεικονίζεται ως Διαμέρισμα 1 στο Σχήμα 4.22, ενώ το Διαμέρισμα 4 / Σχήμα 4.22 αποτελεί κενό χώρο. Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται ένας «απλός νομέας» (ordinary frame) στο μέσο του πλοίου. Οι εγκάρσια ενισχυμένοι νομείς (web frames) σε αυτό το πλοίο είναι τοποθετημένοι ανά 2400 mm μεταξύ τους, όσον αφορά όλα τα διαμερίσματα της μέσης τομής πλην του χώρου φορτίου στον οποίο είναι τοποθετημένες εγκάρσιες ενισχύσεις ανά 800 mm που ενισχύουν το πλευρικό έλασμα μεταξύ της άνω και κάτω πλευρικής δεξαμενής. Τα διαμήκη ενισχυτικά της μέσης τομής είναι βολλολάμες (bulb flats) και απλές λάμες (flat bars), όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.22. Επίσης για την αποφυγή του λυγισμού σε ορισμένες περιοχές που είτε δεν χρησιμοποιείται διαμήκης ενίσχυση, είτε είναι επιθυμητή η μείωση του ανυποστήρικτου πλάτους του ελάσματος μεταξύ δύο διαδοχικών διαμήκων ενισχυτικών, τοποθετούνται εγκάρσια μπρακέτα ή ενισχυτικά (γαλάζιο χρώμα / Σχήμα 4.22) στο ήμισυ της απόστασης μεταξύ δύο ενισχυμένων νομέων (=1200 mm). Τα υπό κλίμακα (1:100) σχέδια του απλού και ενισχυμένου νομέα όπου εμφανίζονται οι διαστάσεις ελασμάτων & ενισχυτικών βρίσκονται στο Παράρτημα Η', όπου επίσης φαίνεται και ο διαχωρισμός του νομέα σε δομικά στοιχεία (βλ. Κεφάλαιο 5).



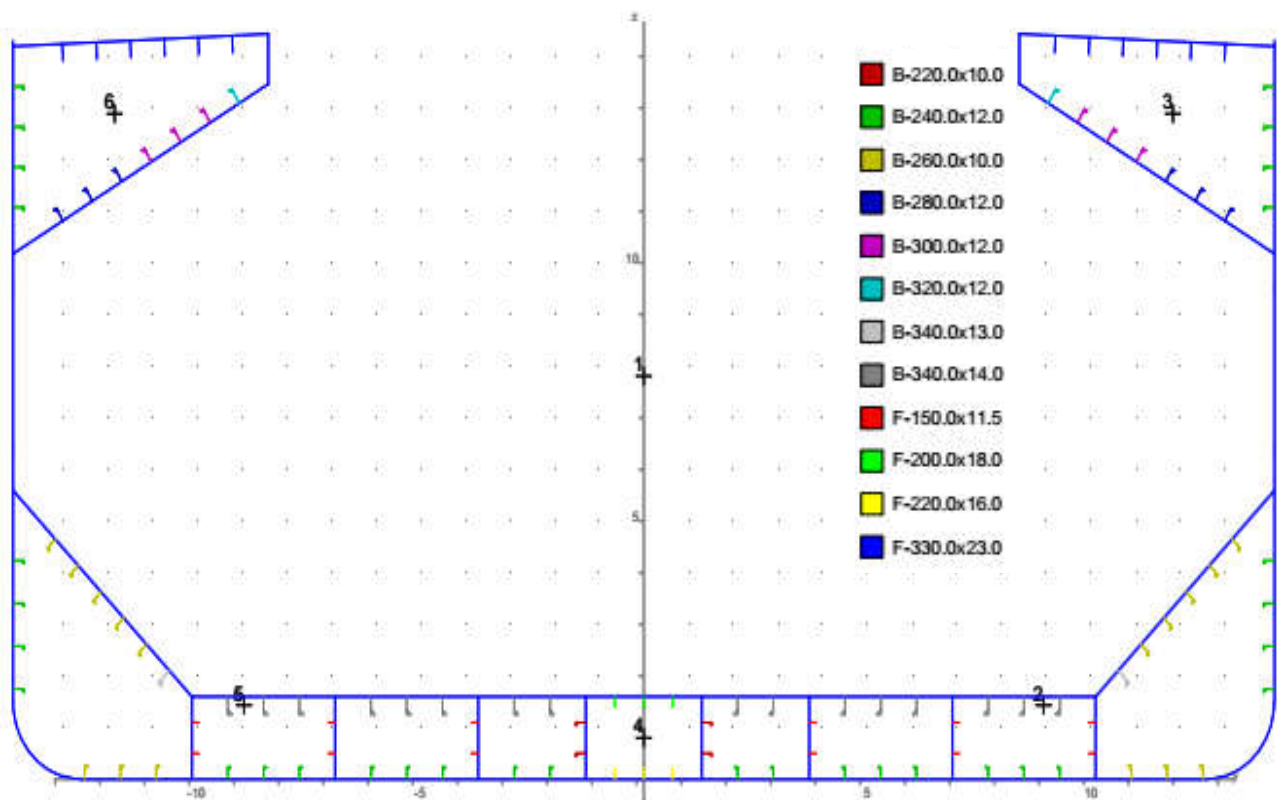
Σχήμα 4.22 Μέση Τομή του εν λόγω Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος δημιουργημένη στο MARS 2000. Στο Σχήμα φαίνεται η οριζόντια και η κατακόρυφη κλίμακα του πλοίου σε μέτρα.



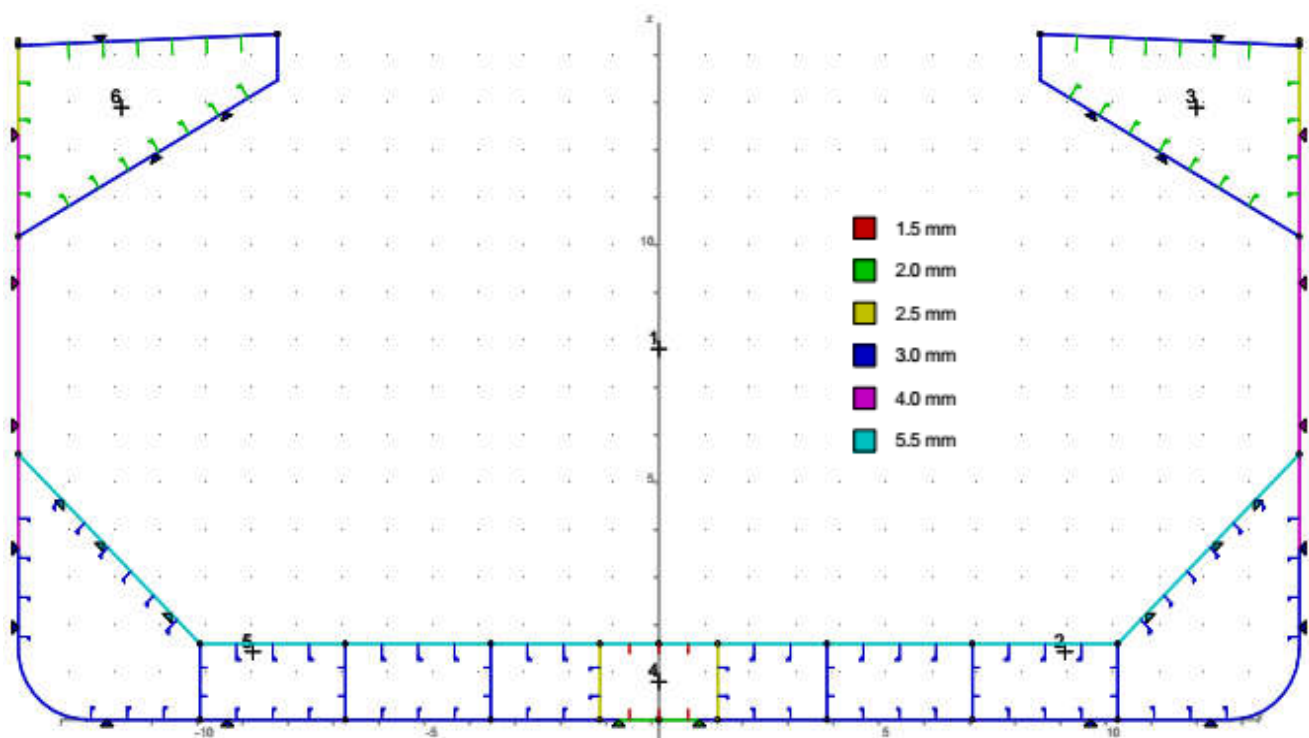
Σχήμα 4.23 Το Σχήμα δείχνει τις περιοχές της Μέσης Τομής που χρησιμοποιείται το κάθε είδος χάλυβα.



Σχήμα 4.24 Συνολικό πάχος (gross thickness) των ελασμάτων της Μέσης Τομής. Τα βέλη κάτω από τα ελάσματα υποδηλώνουν τις συγκολλήσεις μεταξύ των ελασμάτων.



Σχήμα 4.25 «Ολικές» διαστάσεις (gross) ενισχυτικών Μέσης Τομής.



Σχήμα 4.26 Προσαύξηση πάχους ελασμάτων και ενισχυτικών t_{corr} [mm] λόγω διάβρωσης για το εν λόγω Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος.

4.5.2 Μεγέθη Κανονισμών πλοίου

Οι ενοποιημένοι κανονισμοί που προδιαγράφουν τα ζητήματα αντοχής μέσης τομής (Common Structural Rules) απαιτούν τον υπολογισμό κάποιων χαρακτηριστικών μεγεθών του πλοίου. Αυτά είναι τα εξής:

A) το μήκος κανονισμών (Rule Length) $L_{RULE} = L_{SC} = 166.36 \text{ m}$

B) το βύθισμα αντοχής, το οποίο ορίζεται ως το μέγιστο επιτρεπόμενο από τους κανονισμούς της γραμμής φόρτωσης βύθισμα, δηλαδή $T_{SCANTLING} = T_{ILLC} = 10.20 \text{ m}$

Γ) το ελάχιστο βύθισμα ερματισμού (Minimum Ballast Draught) $T_{BAL} = 5.50 \text{ m}$ που προκύπτει από την κατάσταση Ballast Arrival του πλοίου, κατά την οποία το πλοίο δεν έχει φορτίο στα αμπάρια παρά μόνο θαλασσινό νερό στις δεξαμενές έρματος (Ballast Tanks).

4.5.3 Υπολογισμός ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης

$$I_{yR} = 2.7 \cdot C_W \cdot L^3 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \cdot 10^{-8} \text{ [m}^4\text{]} \text{ (για δεδομένα βλ. Πίνακα 4.1)}$$

Προκύπτει: $I_{yR} = 49.31 \text{ m}^4$. Ο τύπος υπολογισμού της ελάχιστης απαιτούμενης ροπής αντίστασης δίνεται από τη σχέση:

$$Z_R = 0.9 \cdot k \cdot C_W \cdot L^2 \cdot B \cdot (C_B + 0.7) \cdot 10^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

Επίσης στον παρακάτω Πίνακα φαίνεται η επιτρεπόμενη ροπή αντίστασης σε πυθμένα και κατάστρωμα για κάθε κατάσταση πλεύσης (εν πλω, σε λιμάνι, υπό κατάκλυση). Από αυτές τις τιμές επιλέγεται η μεγαλύτερη ως η ελάχιστη επιτρεπόμενη ροπή αντίστασης.

Πίνακας 4.31 Συγκεντρωτικά όλα τα αποτελέσματα για την ελάχιστη επιτρεπόμενη ροπή αντίστασης καταστρώματος/πυθμένα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα. Οι συνολικές ροπές προκύπτουν με αντίστοιχο τρόπο με αυτές που προέκυψαν από το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος.

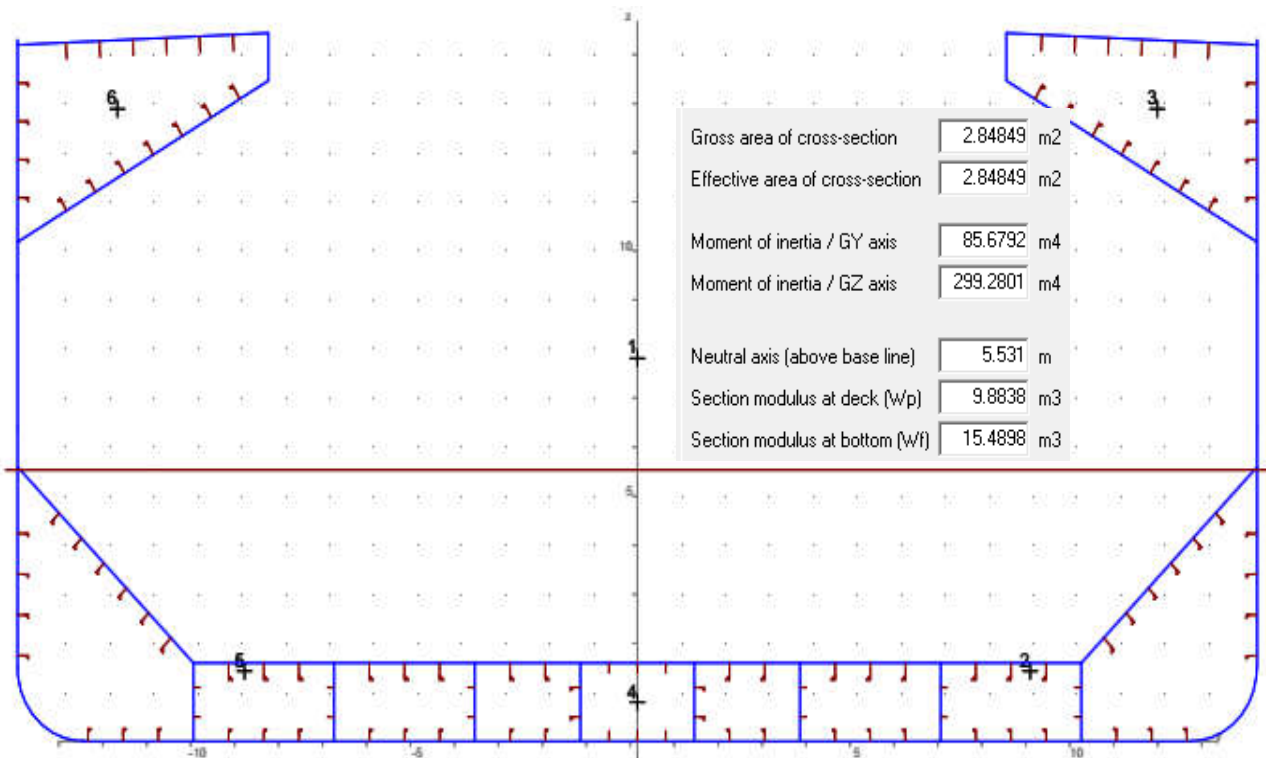
Rule section moduli	Deck (m ³)	Bottom (m ³)
Minimum section modulus	7.1133	7.7061
Modulus based on design BM, Hog. (2 183 209.0 kNm)	8.2732	8.9626
Modulus based on design BM, Sag. (-2 009 706.0 kNm)	7.6157	8.2504
<i>Flooded conditions</i>		
Modulus based on damaged BM, Hog. (2 224 167.0 kNm)	8.4284	9.1308
Modulus based on damaged BM, Sag. (-2 317 765.0 kNm)	8.7831	9.5150
<i>Harbour</i>		
Modulus based on harbour SWBM, Hog. (1 053 000.0 kNm)	5.3018	5.7436
Modulus based on harbour SWBM, Sag. (- 800 000.0 kNm)	4.0280	4.3636
Rule Modulus	8.7831	9.5150

Άρα: $Z_{D-n50}^{Rule} = 8.783 \text{ m}^3$ και $Z_{B-n50}^{Rule} = 9.515 \text{ m}^3$

4.5.4 Υπολογισμός πραγματικής (actual) ροπής αδράνειας και ροπής αντίστασης της Μέσης Τομής του υπό μελέτη πλοίου

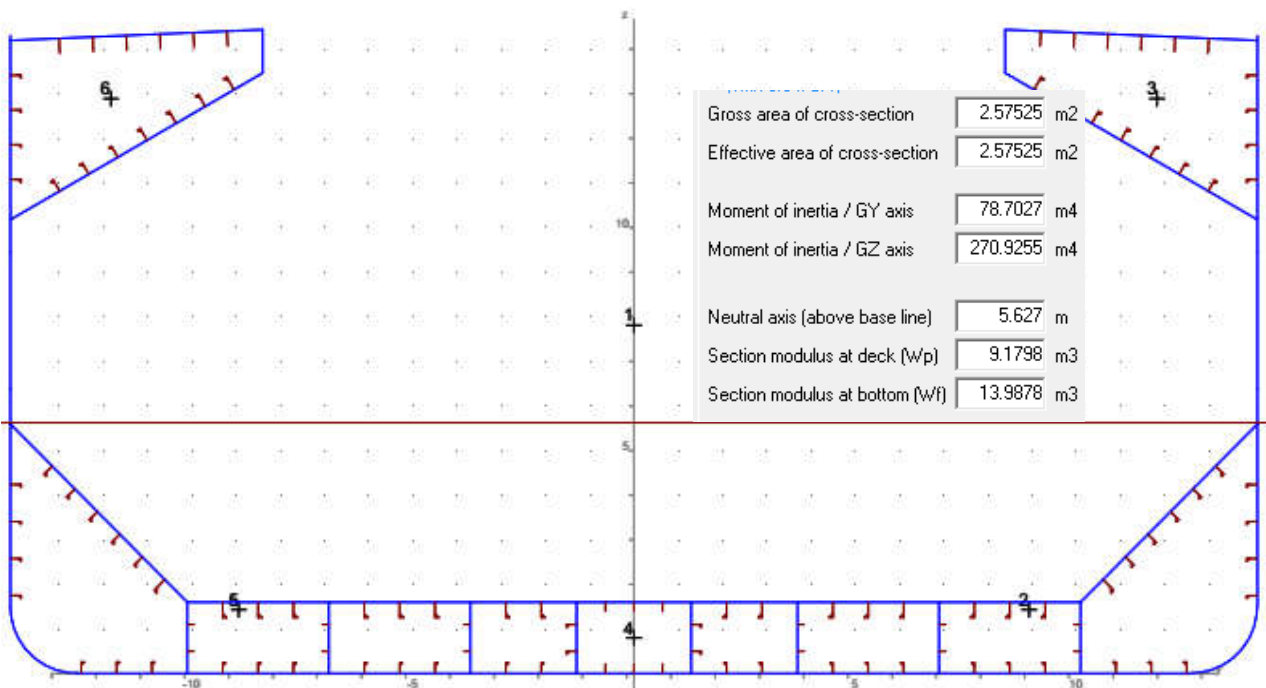
Με βάση τα παραπάνω στοιχεία για το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος μπορεί να υπολογιστεί η ροπή αδράνειας της επιφάνειας της μέσης τομής, η κατακόρυφη θέση του ουδέτερου άξονα καθώς και η ροπή αντίστασης της διατομής στο ύψος του πυθμένα και του καταστρώματος. Συγκεκριμένα στα Σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του MARS 2000 για τη μέση τομή ούσα ακέραια (gross scantling approach / βλ. Σχήματα 4.27 & 4.28), όσο και τα αποτελέσματα με το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο να έχει μειωθεί κατά πάχος ίσο με το μισό του περιθωρίου διάβρωσης (net - 50% scantling approach / βλ. Σχήματα 4.24, 4.25 για t_{gross} & 4.26 για περιθώριο διάβρωσης t_{corr}).

➤ Ακέραια Διατομή



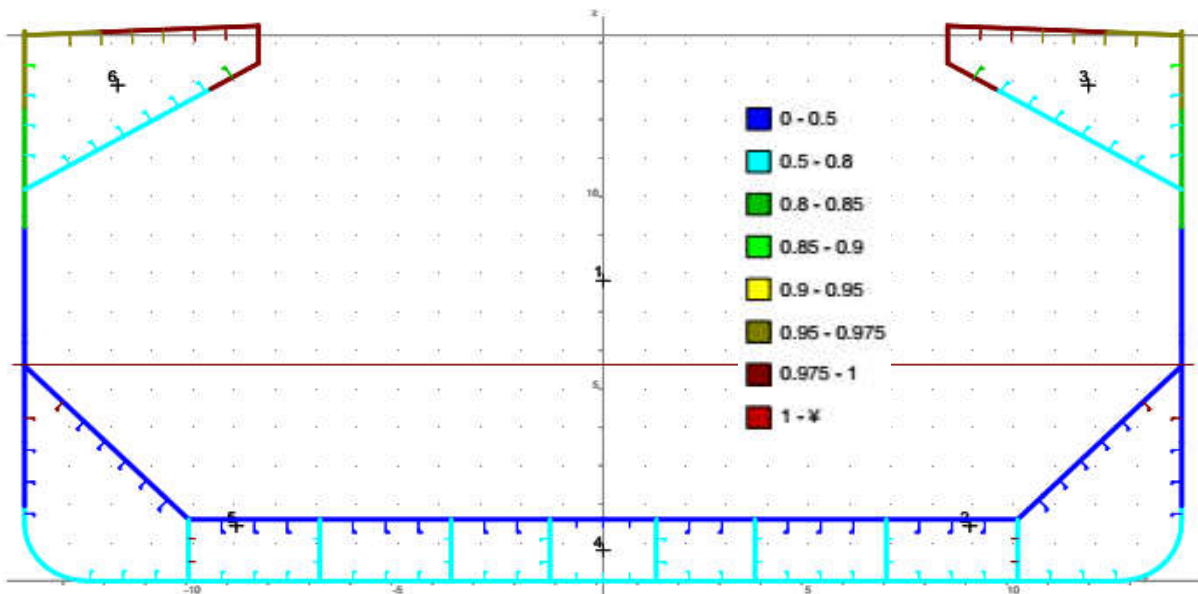
Σχήμα 4.27 Στο Σχήμα φαίνεται η κατακόρυφη θέση ($z_n = 5.531 \text{ m}$ από την τρόπιδα) του Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα ($M_{appl} < M_{yield}$). Οι ορθές τάσεις των στοιχείων σε αυτό το ύψος μηδενίζονται. Ο ελαστικός ουδέτερος άξονας διέρχεται από το κέντρο βάρους G ($y_G=0$, $z_G=5.531$) της διατομής. Επίσης, στο σχήμα υπάρχει το εμβαδό της διατομής A, οι δεύτερες ροπές αδράνειας της διατομής I_y , I_z γύρω από τους άξονες GY & GZ και η ροπή αντίστασης καταστρώματος πυθμένα.

➤ Ελαττωμένη διατομή κατά το 1/2 του περιθωρίου διάβρωσης



Σχήμα 4.28 Στο Σχήμα φαίνεται η κατακόρυφη θέση ($z_n = 5.627$ m από την τρόπιδα) του Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα ($M_{appl} < M_{yield}$). Οι ορθές τάσεις των στοιχείων σε αυτό το ύψος μηδενίζονται. Ο ελαστικός ουδέτερος άξονας διέρχεται από το κέντρο βάρους G ($y_G=0, z_G=5.627$) της διατομής. Επίσης, στο σχήμα υπάρχει το εμβαδό της διατομής A, οι δεύτερες ροπές αδράνειας της διατομής I_y, I_z γύρω από τους άξονες GY & GZ και η ροπή αντίστασης καταστρώματος πυθμένα.

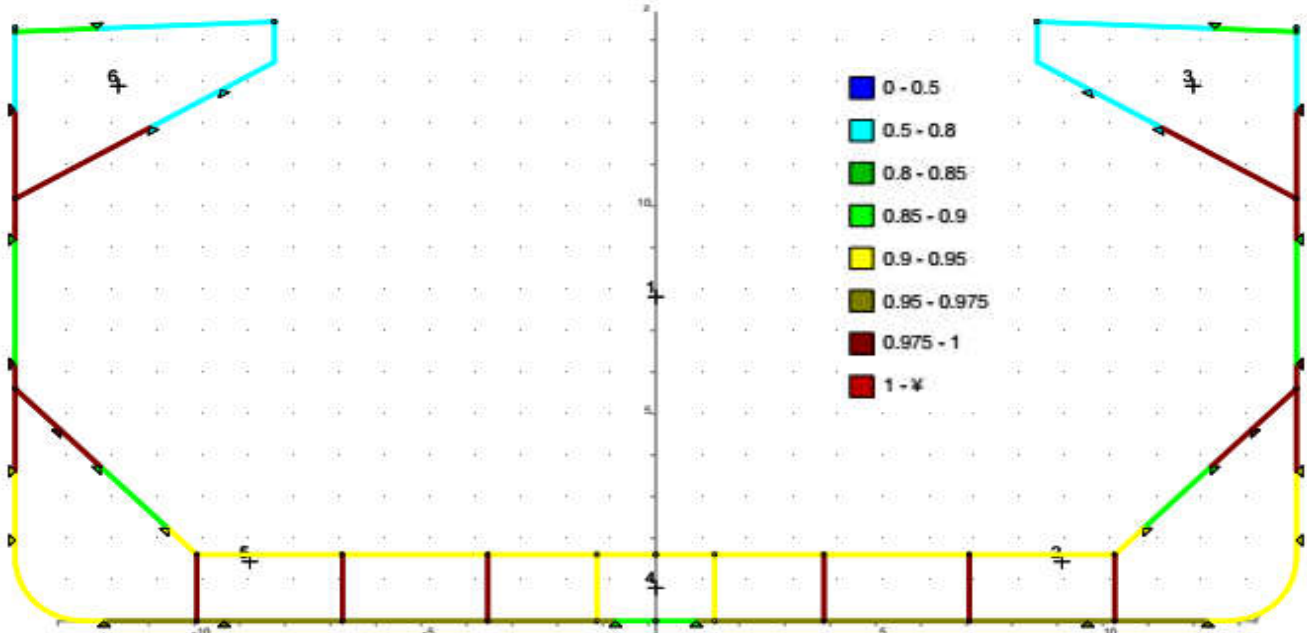
Εφόσον $Z_{D-n50}^{Actual} > Z_{D-n50}^{Rule}, Z_{B-n50}^{Actual} > Z_{B-n50}^{Rule}$ & $I_{y-n50}^{Actual} > I_{yR}$ η αντοχή της διατομής είναι αποδεκτή από τους κανονισμούς CSR-H.



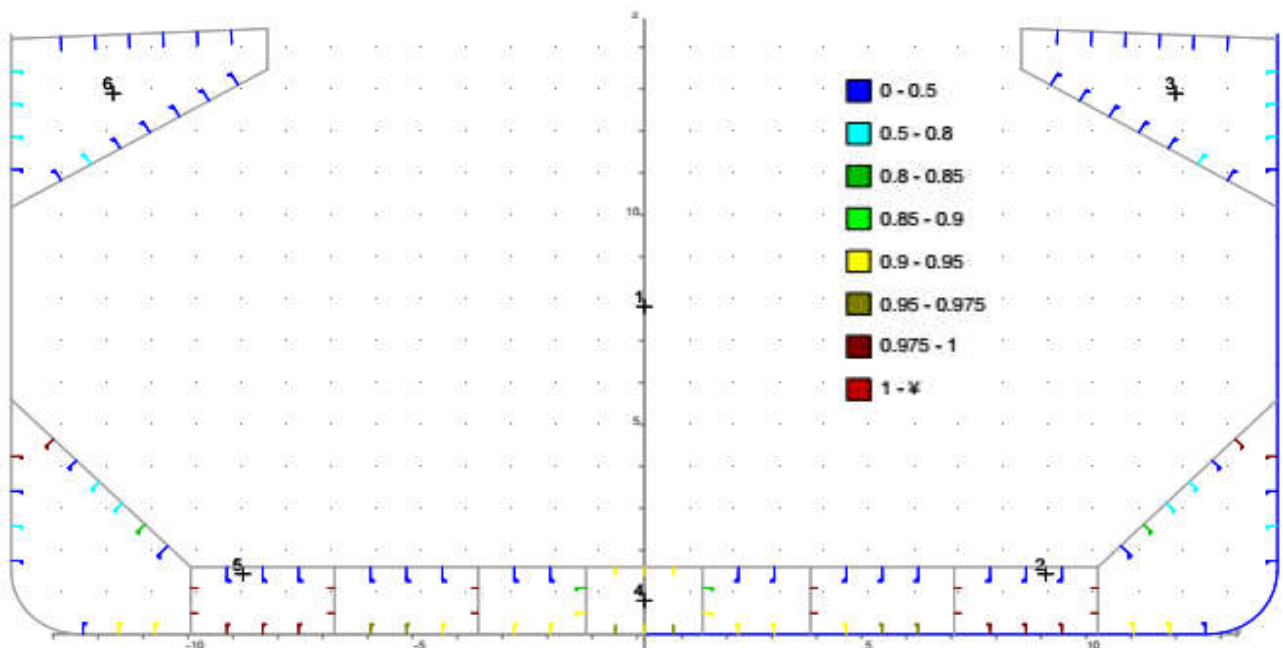
Σχήμα 4.8 Στο Σχήμα διαπιστώνεται η μεταβολή της $\sigma_{appl}/\sigma_{perm}$ κατά το ύψος του πλοίου. Στις περιοχές κοντά στον ουδέτερο άξονα το κλάσμα παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 0.5, στις περιοχές κοντά στον πυθμένα τιμές μεταξύ 0.5 και 0.8, ενώ στις περιοχές κοντά στο κατάστρωμα παίρνει τις μέγιστες τιμές, δηλαδή 0.95-0.975 και 0.975-1, λόγω της μεγαλύτερης απόστασής τους από τον Ο.Α.

4.5.5 Έλεγχος τοπικής αντοχής ελασμάτων & ενισχυτικών

Ο έλεγχος της τοπικής αντοχής γίνεται σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στον έλεγχο της τοπικής αντοχής των ελασμάτων & ενισχυτικών του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος. Από το λογισμικό MARS 2000 προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα:



Σχήμα 4.19 Με χρωματική διαβάθμιση φαίνεται μεταξύ ποιων τιμών κυμαίνεται η τιμή του λόγου $t_{max,Rule}/t_{actual}$ δηλαδή η μεγαλύτερη απαιτούμενη τιμή του πάχους ελάσματος που προβλέπεται από τους κανονισμούς προς την πραγματική τιμή του πάχους του ελάσματος. Οι καφέ περιοχές δηλώνουν ότι ο λόγος βρίσκεται μεταξύ 0.975 και 1. Το ότι δεν υπάρχει κόκκινη περιοχή σημαίνει ότι όλες οι διαστάσεις των ελασμάτων είναι αποδεκτές από πλευράς τοπικής αντοχής από τους CSR-H.



Σχήμα 4.21 Με χρωματική διαβάθμιση φαίνεται μεταξύ ποιων τιμών κυμαίνεται η τιμή του λόγου Z_{Rule}/Z_{actual} για κάθε ενισχυτικό (MARS 2000). Το ότι δεν υπάρχουν κόκκινα ενισχυτικά σημαίνει ότι οι διαστάσεις τους πληρούν το κριτήριο $Z_{Rule}/Z_{actual} < 1$.

4.6 Σύγκριση ροπής αντίστασης μεταξύ των δύο Bulk Carriers (αποτελ MARS 2000)

Πίνακας 4.32 Πίνακας σύγκρισης για τα δύο εξεταζόμενα Bulk Carriers

	A Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	B Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος	Απόκλιση (A-B)/A *100%
Ροπή αντίστασης στον πυθμένα: $Z_{B-n50}^{Actual} [m^3]$	13.32	13.99	-5.03 %
Ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα: $Z_{D-n50}^{Actual} [m^3]$	8.90	9.18	-3.15 %

Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει ότι το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος έχει μεγαλύτερη ροπή αντίστασης σε σχέση με το Διπλού Τοιχώματος. Κατά συνέπεια η ροπή πρώτης διαρροής καταστρώματος/πυθμένα του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος θα είναι μεγαλύτερη. Το γεγονός ότι οι ροπές αντίστασης των δύο Bulk Carriers είναι παρεμφερείς κάνει ενδιαφέρουσα τη σύγκριση της μέγιστης αντοχής τους (βλ. Κεφάλαιο 5 & 6) η οποία θα είναι διαφορετική λόγω διαφορετικής διάταξης ελασμάτων και ενισχυτικών στη διατομή του κάθε πλοίου και χρήσης των χαλύβων, αλλά και του διαφορετικού τύπου δομικών στοιχείων, που οδηγεί σε διαφορετικά τοπικά φορτία λυγισμού και διαρροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΕΠΑΥΕΝΤΙΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ CSR-H ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΘΙΚΤΟΥ BULK-CARRIER ΜΟΝΟΥ & ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

5.1 Εισαγωγή κεφαλαίου

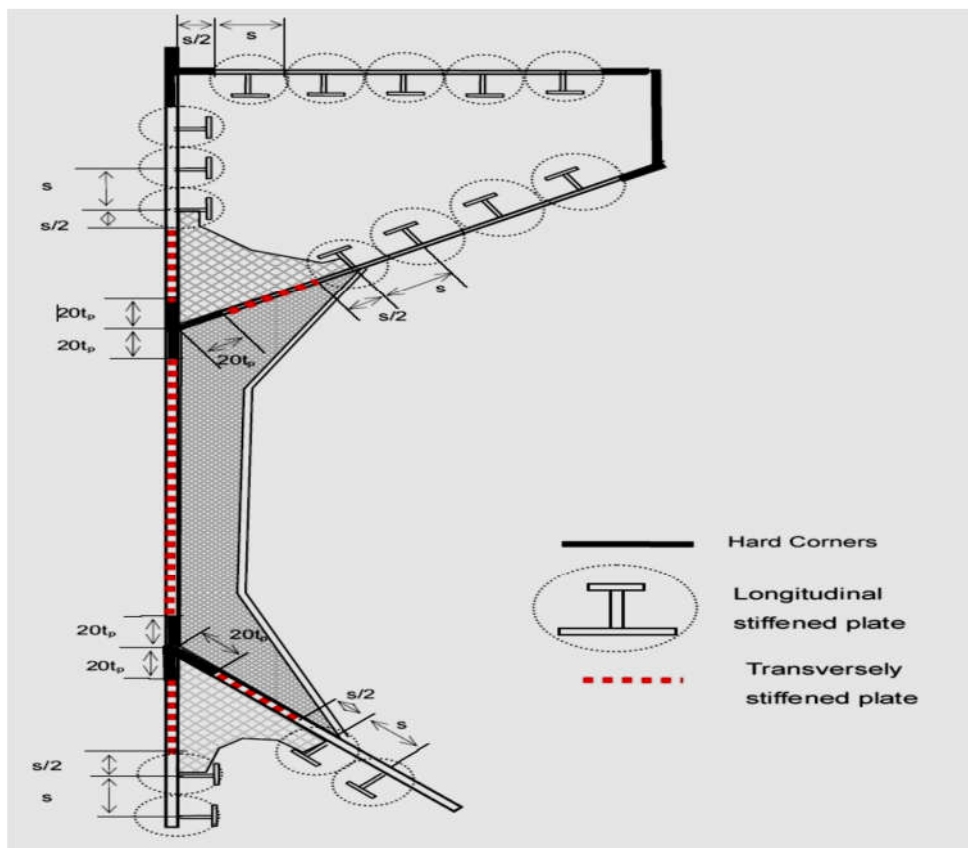
Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει η ελαστο-πλαστική θώρηση της κάμψης της διατομής του πλοίου, καθώς αυτή μπορεί να παρέχει ρεαλιστική εκτίμηση της ροπής κατάρρευσης. Αυτό είναι προφανές λόγω του ότι υπεισέρχονται τα φαινόμενα της διαρροής υλικού και λυγισμού που προσδίδουν ανακατανομή των τάσεων στη διατομή του πλοίου. Μέχρι όμως να παρουσιαστούν, δηλαδή για $M < M_Y$ (ροπή πρώτης διαρροής), ισχύει η γραμμική ελαστική θεωρία. Οι εξισώσεις για την ελαστική και ελαστο-πλαστική κάμψη για μικρά βέλη κάμψεως έχουν κοινή προέλευση, όπως φαίνεται παρακάτω:

<u>Εξισώσεις</u>	<u>Ελαστική κάμψη</u>	<u>Ελαστο-πλαστική κάμψη</u>
Συμβιβαστού των παραμορφώσεων (ίδια και για τις δύο)	$\varepsilon_x = -\frac{z - z_n}{r}$	$\varepsilon_x = -\frac{z - z_n}{r}$
Καταστατικός νόμος του υλικού	$\sigma_x = E\varepsilon_x = -\frac{E(z - z_n)}{r}$	Μειωτικές καμπύλες σ - ε
Συνθήκες στατικής ισορροπίας	$M_y = \frac{EI_y}{r} \Leftrightarrow M_y = -\frac{\sigma_x I_y}{z - z_n}$ όπου EI_y σταθερό	$\Sigma F_x = 0$ $M_y = \int_A (z - z_n) \sigma_x dA$

Όπου r είναι η ακτίνα καμπυλότητας της κάμψης, z_n η κατακόρυφη απόσταση του ουδέτερου άξονα από την τρόπιδα, I_y η ροπή αδράνειας, M_y η κατακόρυφη (επειδή δρα στο κατακόρυφο επίπεδο) καμπτική ροπή που παραλαμβάνει η διατομή.

5.2 Περιγραφή μεθόδου & μεθοδολογία υποδιαίρεσης της διατομής του πλοίου σε δομικά στοιχεία

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θεωρείται ότι η μέγιστη (διαμήκης) κατακόρυφη καμπτική ροπή ασκείται στο μέσον του πλοίου, όπως προκύπτει από την απλή θεωρία της κάμψης. Για αυτό το λόγο εξετάζεται η μέγιστη αντοχή της μέσης τομής του πλοίου. Η εφαρμογή της απλοποιημένης μεθόδου του Smith για την εύρεση της ροπής κατάρρευσης της μέσης τομής, που έχει υιοθετηθεί από τους κανονισμούς του IACS: CSR-H, έχει σαν υπόθεση ότι κάθε δομικό στοιχείο αστοχεί με συγκεκριμένους τρόπους που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3. Παράλληλα λόγω του ότι στο σημείο που η καμπτική ροπή γίνεται μέγιστη, η κατακόρυφη διατμητική δύναμη μηδενίζεται (περίπου στο μέσον του πλοίου), δίνει στη μέθοδο των CSR-H ρεαλιστικό πλεονέκτημα, αφού δε λαμβάνει υπόψη τις διατμητικές τάσεις στα στοιχεία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μοντελοποίηση της τομής ενός Bulk Carrier στα δομικά στοιχεία (elements) της μεθόδου των CSR-H. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, το πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος στα ενισχυτικά στοιχεία καθορίζεται από την ισαπόσταση των ενισχυτικών. Στο παράρτημα Β' παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η υποδιαίρεση της διατομής στα επιμέρους δομικά στοιχεία.



Σχήμα 5.1 Πλευρικό τμήμα της κατασκευής Bulk-Carrier μονού τοιχώματος που αποτελείται από α) ανθεκτικές γωνίες, β) διαμήκως ενισχυμένα ελάσματα (ενισχυτικά στοιχεία) και γ) εγκάρσια ενισχυμένα ελάσματα.

5.3 Υποθέσεις εφαρμογής της απλοποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου (Simplified Incremental - Iterative method) των CSR-H

- 1) Η αντοχή κατάρρευσης της διατομής του πλοίου υπολογίζεται μεταξύ δύο εγκάρσιων ενισχυμένων νομέων (transverse web frames).
- 2) Οι εγκάρσιες τομές του πλοίου παραμένουν επίπεδες αυξανόμενης της καμπυλότητας της κάμψης (αγνοείται η διάτμηση).
- 3) Το υλικό έχει ελαστική-πλήρως πλαστική συμπεριφορά.
- 4) Η εγκάρσια διατομή χωρίζεται σε δομικά στοιχεία (ενισχυτικά στοιχεία, εγκάρσια ενισχυμένα ελάσματα και ανθεκτικές γωνίες).
- 5) Οι καμπύλες σ-ε κάθε δομικού στοιχείου αντιπροσωπεύουν τους πιθανούς μηχανισμούς κατάρρευσης (failure modes) του κάθε στοιχείου και η τάση σ λαμβάνεται ως η μικρότερη μεταξύ των τάσεων των διαφορετικών τρόπων αστοχίας.
- 6) Κάθε δομικό στοιχείο αστοχεί αυτόνομα και ανεξάρτητα από τα άλλα. Αγνοούνται δηλαδή φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ δομικών στοιχείων.
- 7) Υποτίθεται ότι η μέγιστη αντοχή θα έχει «βρεθεί» μέχρι την καμπυλότητα χ_F (αν όχι, ο χρήστης αυξάνει την τιμή της), σε m^{-1} , σε κατάσταση hogging ή sagging όπου:

$$\chi_F = \pm 3 * \chi_{yield} = \pm 0,003 \frac{M_Y [kN * m]}{E \left[\frac{N}{mm^2} \right] I_{y-n50} [m^4]}$$

όπου M_Y η ροπή πρώτης διαρροής και δίνεται από τον τύπο:

$M_Y = \min(M_{Y1}, M_{Y2})$ όπου η ροπή διαρροής στοιχείου του πυθμένα είναι

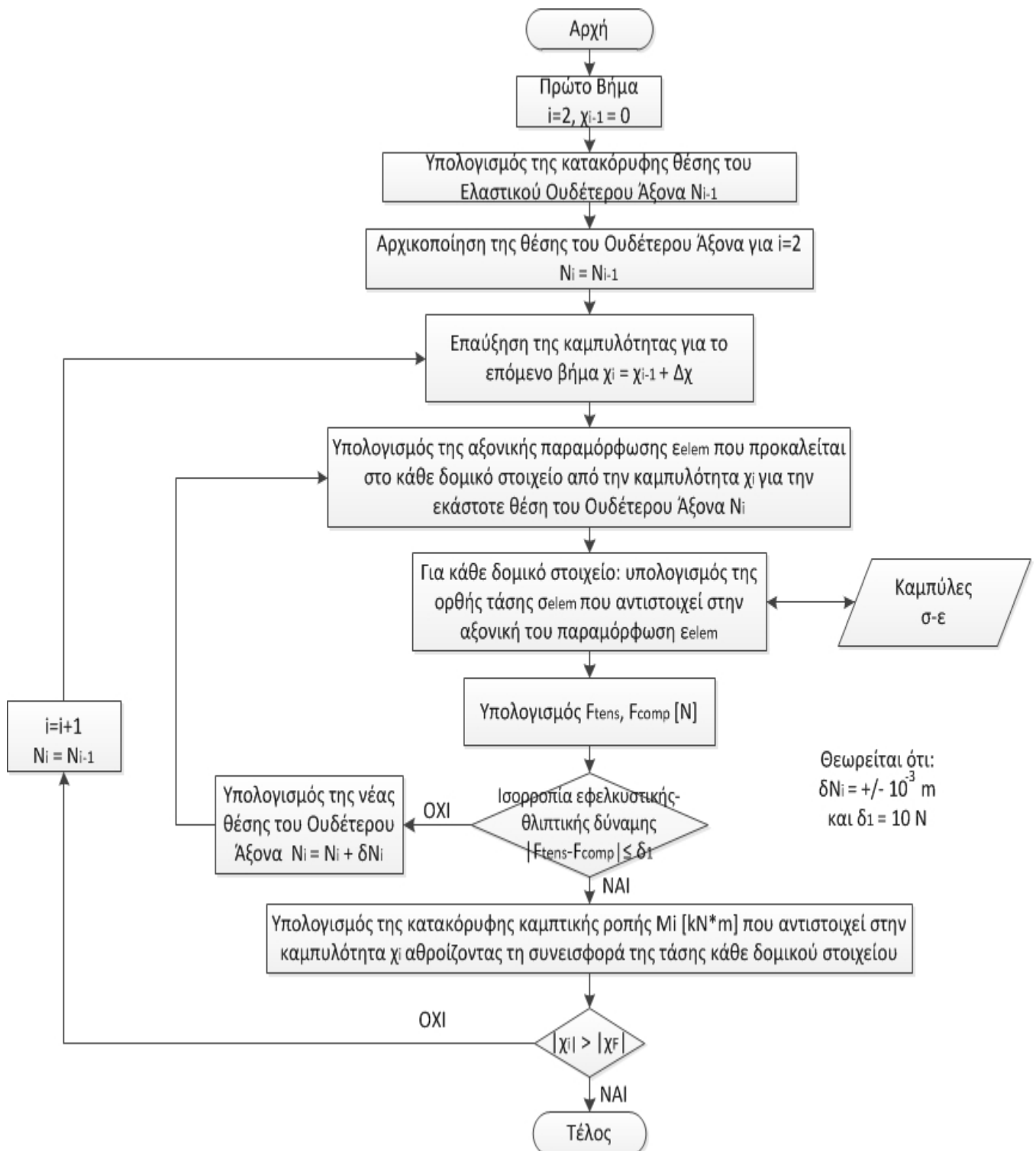
$M_{Y1} = 10^3 R_{eHb} Z_{B-n50}$ και η ροπή διαρροής στοιχείου του καταστρώματος

$M_{Y2} = 10^3 R_{eHd} Z_{D-n50}$ όπου $R_{eHb}, R_{eHd} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$ η τάση διαρροής του υλικού

στον πυθμένα και στο κατάστρωμα αντίστοιχα, $Z_{B-n50}, Z_{D-n50} [m^3]$ η ροπή αντίστασης στον πυθμένα και στο κατάστρωμα αντίστοιχα

- 8) Σύμφωνα με την επαυξητική μέθοδο για κάθε καμπυλότητα χ_i προσδιορίζεται μια καμπτική ροπή $M(\chi_i)$ από την άθροιση της συνεισφοράς του κάθε στοιχείου: $\sigma_{elem} * A_{elem}$. Η τάση $\sigma_{elem}(\chi_i)$, ή $\sigma_{elem}(\epsilon_i)$ ισοδύναμα, προκύπτει από τη μειωτική καμπυλη μονοαξονικής φόρτισης του στοιχείου.
- 9) Η επαναληπτικότητα της μεθόδου για κάθε καμπυλότητα χ_i έγκειται στο να λυθεί η μη γραμμική εξίσωση ισορροπίας εφελκυστικής-θλιπτικής δύναμης που δίνει την εκάστοτε θέση του ουδέτερου άξονα $z_n(\chi_i)$. Αυτό πραγματοποιείται μέσω δοκιμής και λάθους.
- 10) Αγνοείται η κάμψη των στοιχείων λόγω κατακόρυφων πιέσεων σε τοπικό επίπεδο και η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων και παραμορφώσεων.

5.4 Διάγραμμα ροής της απλοποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για την εύρεση της μέγιστης ροπής κατάρρευσης σε hogging/sagging



Επεξηγήσεις διαγράμματος ροής της απλοποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου

- Το βήμα της καμυλότητας $\Delta\chi$ δίνεται από τη σχέση:

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

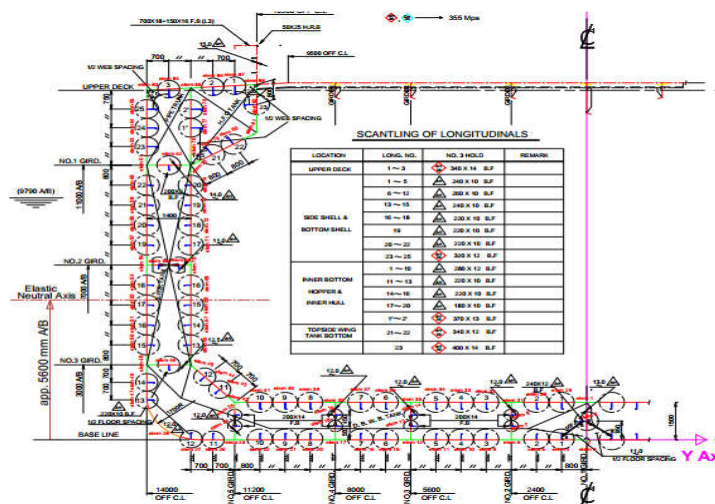
που ισοδυναμεί με την καμυλότητα που προκαλεί στο κατάστρωμα ορθή τάση ίση με το 1% της τάσης διαρροής του υλικού στο κατάστρωμα.

- Το βήμα μεταβολής της κατακόρυφης θέσης του Ουδέτερου Άξονα δN_i επιλέγεται επαρκώς μικρό, ώστε να εξασφαλίζεται η αποφυγή ατέρμονα βρόχου και η ικανοποίηση της συνθήκης $|F_{tens} - F_{comp}|_{current} \leq 10 \text{ N}$. Το πρόσημο του δN_i καθορίζεται από την καμπτική κατάσταση (hogging/sagging) και το πρόσημο της στιγμιαίας διαφοράς $(F_{tens} - F_{comp})_{current}$. Π.χ. για κατάσταση hogging (εφελκυστικές τάσεις άνω του ουδέτερου άξονα) και $(F_{tens} - F_{comp})_{current} < 0$ θα πρέπει $\delta N_i < 0$ ώστε να επιτευχθεί η ισορροπία εφελκυστικής-θλιπτικής δύναμης.
- Η αρχικοποίηση της θέσης του Ο.Α. στη θέση του Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα έγινε προκειμένου να αποφευχθούν οι πολλές επαναλήψεις στην αρχή για να επιτευχθεί ισορροπία.

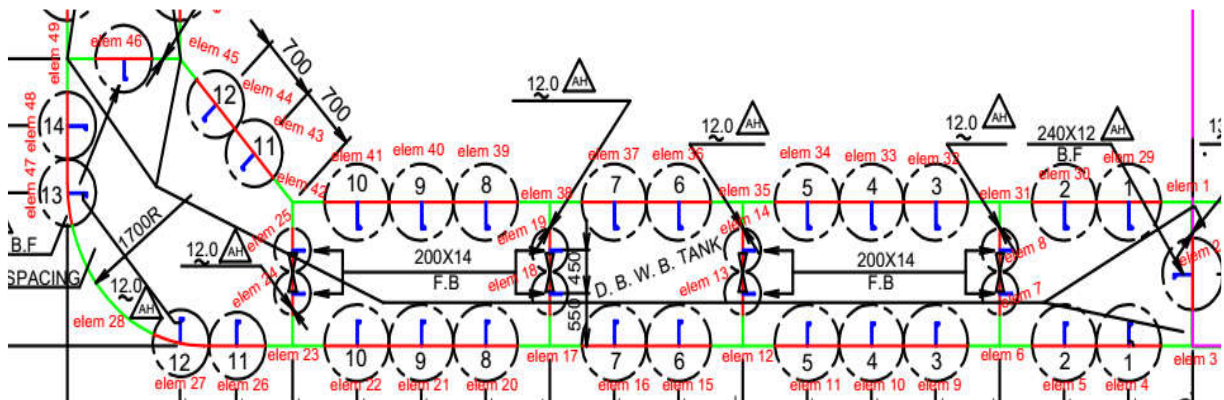
5.5 Εφαρμογή επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk-Carrier Διπλού Τοιχώματος

5.5.1 Βήμα 1 - Υποδιαίρεση της εγκάρσιας τομής σε δομικά στοιχεία

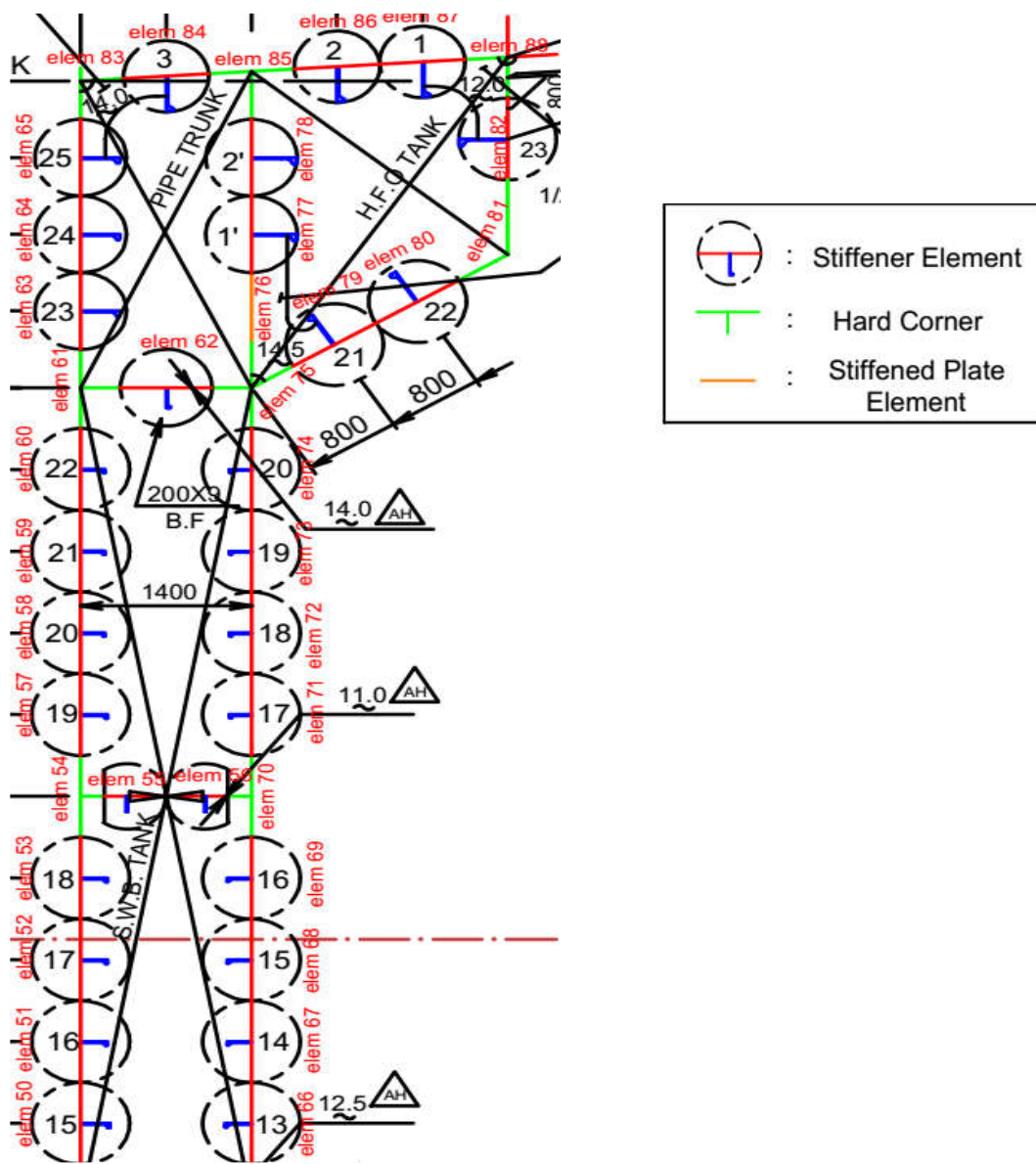
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η υποδιαίρεση της μισής μέσης τομής του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος σε δομικά στοιχεία σύμφωνα με το Παράρτημα Β'. Τα δομικά στοιχεία αριθμούνται από το 1-88. Τα δομικά στοιχεία 1-3 ως μη συμμετρικά λαμβάνονται μόνο μία φορά υπόψη στην απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο, ενώ τα στοιχεία 4-88 εις διπλούν. Το παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται σε μεγαλύτερη ανάλυση (κλίμακα 1:100) στο Παράρτημα Ζ'.



Σχήμα 5.2 Υποδιαίρεση της διατομής του Bulk Carrier σε δομικά στοιχεία



Σχήμα 5.3 Δομικά στοιχεία 1-49



Σχήμα 5.4 Δομικά στοιχεία 50-88

5.5.2 Βήμα 2 - Αναλυτική μοντελοποίηση στοιχείων και καθορισμός καμπυλών σ-ε

Η αναλυτική μοντελοποίηση των δομικών στοιχείων έγινε με βάση το Παράρτημα Β' και αφορά τα πάχη των δομικών στοιχείων μειωμένα κατά το 1/2 του περιθωρίου διάβρωσης ($t_{net-50} = t_{gross_offered} - 0.5 * t_{corr}$). Οι παρακάτω πίνακες δίνουν την αναλυτική μοντελοποίηση των δομικών στοιχείων:

Πίνακας 5.1 Εύρεση χαρακτηριστικών αναλυτικής μοντελοποίησης των ανθεκτικών γωνιακών στοιχείων (ισοδύναμο καθαρό πάχος t_{p-n50} στοιχείου, ισοδύναμο εμβαδό A_{p-n50} στοιχείου & ισοδύναμη τάση διαρροής Re_{HP}) με βάση τα χαρακτηριστικά των συμβαλλόμενων ελασμάτων

HARD CORNERS																								
Number of Element	t1-gross (mm)	t2-gross (mm)	t3-gross (mm)	t4-gross (mm)	tcorr1/2 (mm)	tcorr2/2 (mm)	tcorr3/2 (mm)	tcorr4/2 (mm)	s1 (mm)	s2 (mm)	s3 (mm)	s4 (mm)	t1-n50 (mm)	t2-n50 (mm)	t3-n50 (mm)	t4-n50 (mm)	ReHp1 (MPa)	ReHp2 (MPa)	ReHp3 (MPa)	ReHp4 (MPa)	s (mm)	tp-n50 (mm)	Ap-n50 (cm ²)	ReHp (MPa)
elem1	23	13	0	0	2.75	1.5	0	0	800	375	0	0	20.25	11.5	0	0	315	315	0	0	1175	17.46	205.13	315
elem3	16	13	0	0	1.5	1.5	0	0	800	375	0	0	14.5	11.5	0	0	315	315	0	0	1175	13.54	159.13	315
elem6	16	11	0	0	1.5	1.5	0	0	800	325	0	0	14.5	9.5	0	0	315	315	0	0	1125	13.06	146.88	315
elem12	16	15	11	0	1.5	1.5	1.5	0	525	325	325	0	14.5	13.5	9.5	0	315	315	315	0	1175	12.84	150.88	315
elem17	14.5	15	11	0	1.5	1.5	1.5	0	500	300	325	0	13	13.5	9.5	0	315	315	315	0	1125	12.12	136.38	315
elem23	14.5	11.5	0	0	1.5	1.5	0	0	750	325	0	0	13	10	0	0	315	315	0	0	1075	12.09	130.00	315
elem28	14.5	0	0	0	1.5	0	0	0	1579	0	0	0	13	0	0	0	315	0	0	0	1579	13.00	205.27	0
elem31	23	11	0	0	2.75	1.5	0	0	800	275	0	0	20.25	9.5	0	0	315	315	0	0	1075	17.50	188.13	315
elem35	23	11	0	0	2.75	1.5	0	0	800	275	0	0	20.25	9.5	0	0	315	315	0	0	1075	17.50	188.13	315
elem38	23	11	0	0	2.75	1.5	0	0	800	275	0	0	20.25	9.5	0	0	315	315	0	0	1075	17.50	188.13	315
elem42	23	19	11.5	0	2.75	2.75	1.5	0	400	350	275	0	20.25	16.25	10	0	315	315	315	0	1025	16.13	165.38	315
elem45	19	17.5	12.5	0	2.75	2	1.5	0	596	100	350	0	16.25	15.5	11	0	315	315	315	0	1046	14.42	150.85	315
elem49	14.5	12.5	0	0	1.5	1.5	0	0	750	350	0	0	13	11	0	0	315	315	315	0	1100	12.36	136.00	315
elem54	15	11	0	0	1.75	1.5	0	0	800	192.5	0	0	13.25	9.5	0	0	315	315	315	0	992.5	12.52	124.29	315
elem61	15.5	14	0	0	1.75	1.25	0	0	775	325	0	0	13.75	12.75	0	0	315	315	0	0	1100	13.45	148.00	315
elem70	16	11	0	0	2	1.5	0	0	800	192.5	0	0	14	9.5	0	0	315	315	0	0	992.5	13.13	130.29	315
elem75	16.5	22	14	16	1.5	1	1.25	2	400	440	325	400	15	21	12.75	14	355	355	315	315	1565	15.96	249.84	339.4
elem81	22.5	22.5	0	0	1.5	1.5	0	0	470	733	0	0	21	21	0	0	355	355	0	0	1203	21.00	252.63	355
elem83	26	20	0	0	1.5	1.5	0	0	503	350.9	0	0	24.5	18.5	0	0	355	355	0	0	853.9	22.03	188.14	355
elem85	26	22	0	0	1.5	1	0	0	701.7	468.3	0	0	24.5	21	0	0	355	355	0	0	1170	23.10	270.26	355
elem88	26	22.5	0	0	1.5	1.5	0	0	350.9	400	0	0	24.5	21	0	0	355	355	0	0	750.9	22.64	169.96	355

Πίνακας 5.2 Χαρακτηριστικά αναλυτικής μοντελοποίησης των εγκάρσια ενισχυμένων ελασμάτων.

STIFFENED PLATE ELEMENTS							
Number of Element	tp-gross (mm)	tcorr/2 (mm)	s (mm)	tp-n50 (mm)	l (mm)	Ap-n50 = l * tp-n50 /100 (cm ²)	ReHp (MPa)
elem76	22	1	1200	21	685	143.85	355

Πίνακας 5.3 Χαρακτηριστικά αναλυτικής μοντελοποίησης των συνεργαζόμενων ελασμάτων των ενισχυτικών στοιχείων

STIFFENER ELEMENT'S PLATING																								
Number of Element	t1-gross (mm)	t2-gross (mm)	t3-gross (mm)	t4-gross (mm)	tcor1/2 (mm)	tcor2/2 (mm)	tcor3/2 (mm)	tcor4/2 (mm)	s1 (mm)	s2 (mm)	s3 (mm)	s4 (mm)	t1-n50 (mm)	t2-n50 (mm)	t3-n50 (mm)	t4-n50 (mm)	ReHp1 (MPa)	ReHp2 (MPa)	ReHp3 (MPa)	ReHp4 (MPa)	s (mm)	tp-n50 (mm)	Ap-n50 (cm ²)	ReHp (MPa)
elem2	13.0	0	0	0	1.5	0	0	0	750	0	0	0	11.50	0	0	0	315	0	0	0	750	11.50	86.25	315
elem4,5,9,10,11	16.0	0	0	0	1.5	0	0	0	800	0	0	0	14.50	0	0	0	315	0	0	0	800	14.50	116.00	315
elem15,16	15.0	0	0	0	1.5	0	0	0	800	0	0	0	13.50	0	0	0	315	0	0	0	800	13.50	108.00	315
elem20,21,22	14.5	0	0	0	1.5	0	0	0	800	0	0	0	13.00	0	0	0	315	0	0	0	800	13.00	104.00	315
elem26,27	14.5	0	0	0	1.5	0	0	0	700	0	0	0	13.00	0	0	0	315	0	0	0	700	13.00	91.00	315
elem29,30,32,33,34,36,37,39,40	23.0	0	0	0	2.75	0	0	0	800	0	0	0	20.25	0	0	0	315	0	0	0	800	20.25	162.00	315
elem7,8,13,14,18,19	11.0	0	0	0	1.5	0	0	0	450	0	0	0	9.50	0	0	0	315	0	0	0	450	9.50	42.75	315
elem24,25	11.5	0	0	0	1.5	0	0	0	450	0	0	0	10.00	0	0	0	315	0	0	0	450	10.00	45.00	315
elem43,44	19.0	0	0	0	2.75	0	0	0	700	0	0	0	16.25	0	0	0	315	0	0	0	700	16.25	113.75	315
elem46	12.5	0	0	0	1.5	0	0	0	700	0	0	0	11.00	0	0	0	315	0	0	0	700	11.00	77.00	315
elem47,48	14.5	0	0	0	1.5	0	0	0	700	0	0	0	13.00	0	0	0	315	0	0	0	700	13.00	91.00	315
elem50,51	14.5	0	0	0	1.5	0	0	0	800	0	0	0	13.00	0	0	0	315	0	0	0	800	13.00	104.00	315
elem52	14.5	15	0	0	1.5	1.75	0	0	145	655	0	0	13.00	13.25	0	0	315	315	0	0	800	13.20	105.64	315
elem53,57,58	15.0	0	0	0	1.75	0	0	0	800	0	0	0	13.25	0	0	0	315	0	0	0	800	13.25	106.00	315
elem55,56	11.0	0	0	0	1.5	0	0	0	507.5	0	0	0	9.50	0	0	0	315	0	0	0	507.5	9.50	48.21	315
elem59	15.0	15.5	0	0	1.75	1.75	0	0	550	250	0	0	13.25	13.75	0	0	315	315	0	0	800	13.41	107.25	315
elem60	15.5	0	0	0	1.75	0	0	0	800	0	0	0	13.75	0	0	0	315	0	0	0	800	13.75	110.00	315
elem62	14	0	0	0	1.25	0	0	0	700	0	0	0	12.75	0	0	0	315	0	0	0	700	12.75	89.25	315
elem63	15.5	20	0	0	1.75	1.25	0	0	305	445	0	0	13.75	18.75	0	0	315	355	0	0	750	16.72	125.38	341.62
elem64,65	20	0	0	0	1.25	0	0	0	750	0	0	0	18.75	0	0	0	355	0	0	0	750	18.75	140.63	355
elem66	17.5	0	0	0	2	0	0	0	800	0	0	0	15.50	0	0	0	315	0	0	0	800	15.50	124.00	315
elem67	17.5	16	0	0	2	2	0	0	300	500	0	0	15.50	14.00	0	0	315	315	0	0	800	14.56	116.50	315
elem68,69,71,72,73,74	16	0	0	0	2	0	0	0	800	0	0	0	14.00	0	0	0	315	0	0	0	800	14.00	112.00	315
elem77,78	22	0	0	0	1	0	0	0	750	0	0	0	21	0	0	0	355	0	0	0	750	21.00	157.50	355
elem79	16.5	22.5	0	0	1.5	1.5	0	0	562	238	0	0	15	21	0	0	355	355	0	0	800	16.79	134.28	355
elem80,82	22.5	0	0	0	1.5	0	0	0	800	0	0	0	21	0	0	0	355	0	0	0	800	21.00	168.00	355
elem84,86,87	26	0	0	0	1.5	0	0	0	700	0	0	0	24.5	0	0	0	0	0	0	0	700	24.50	171.50	0

Η αναλυτική μοντελοποίηση των ενισχυτικών που αντιστοιχούν στα παραπάνω ενισχυτικά στοιχεία υπάρχει στο Παράρτημα Γ΄.

Με βάση τα παραπάνω εξαγόμενα & προσθέτοντας τις πληροφορίες για τις συντεταγμένες του κ.β. κάθε στοιχείου (μετρήθηκαν μέσω Autocad) & το μήκος του (βλ. Παράρτημα Ζ΄) προκύπτει ο παρακάτω Γενικευμένος Πίνακας δομικών στοιχείων ο οποίος δίνεται σαν είσοδος (input) στον κώδικα υπολογισμού της μέγιστης αντοχής της Μέσης Τομής σε hogging/sagging. Αναφέρεται ότι τα συμμετρικά δομικά στοιχεία των στοιχείων 4-88 ως προς τη Centerline, τα οποία είναι τα 89-173 και έχουν αντίθετα y (δηλ. +) από τα 4-88, παραλείπονται από τον πίνακα διότι ο Ο.Α. της κάμψης είναι οριζόντιος // στον άξονα Y του πλοίου και άρα η μονοαξονική τους παραμόρφωση ϵ είναι η ίδια με των 4-88. Οπότε αρκεί να ληφθεί η συνεισφορά των στοιχείων 4-88 δύο φορές. Στη βεβλαμμένη & ασύμμετρου ρήγματος κατάσταση όμως δίνονται και τα στοιχεία 89-173 σαν είσοδος στον κώδικα (ίδιες τιμές κελιών με τα συμμετρικά & θετικά y), καθώς λόγω του κεκλιμένου πλέον Ο.Α. ο οποίος σε κάθε βήμα μετακινείται κατακόρυφα και στρέφεται, οι παραμορφώσεις τους σε σχέση με των συμμετρικών τους είναι διαφορετικές (βλ. Κεφάλαιο 6).

Πίνακας 5.4 Γενικευμένος Πίνακας (αρχείο [Datamet.xlsx](#)) αναλυτικών χαρακτηριστικών για όλα τα δομικά στοιχεία της 1/2 Μέσης Τομής του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος.

Number of element [Half section]	Type of element	Net Area of plate: A_{p-n50}	Plate's Yield stress: R_{eHp}	Net Area of stiffener: A_{s-n50}	Stiffener's yield stress: R_{eHs}	Distance of the element's centre of gravity from the base line : Z_{elem}	Equivalent net thickness of plate: t_{p-n50} (only for stiffener & stiff. plate elements)	Element's equivalent width: s (only for stiffener elem & stiff. plate elements)	Vertical distance of stiffener's centre of gravity from its bottom: cg_z_stiff	Moment of inertia through its centroid coordinate y -axis: $I_y-stiff$	Thickness of stiffener's web: t_{w-n50}	Height of stiffener's web: h_w	Width of stiffener's flange: b_f	Thickness of stiffener's flange: t_{f-n50}	Unsupported length: L	Type of stiffener	Total area of element $A-n50$	Distance of the element's centre of gravity from the centerline: y_{elem}
-	-	cm^2	N/mm^2	cm^2	N/mm^2	m	mm	m	mm	cm^4	mm	mm	mm	mm	m	-	cm^2	m
1	Hard Corner	205.13	315	0.00	0	1.470	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	205.13	0.001
2	Stiffener element	86.25	315	33.14	315	0.747	11.50	0.750	145.79	1912.98	12.00	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	119.39	-0.035
3	Hard Corner	159.13	315	0.00	0	0.062	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	159.13	0.001
4	Stiffener element	116.00	315	28.35	315	0.024	14.50	0.800	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	144.35	-0.798
5	Stiffener element	116.00	315	28.35	315	0.024	14.50	0.800	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	144.35	-1.598
6	Hard Corner	146.88	315	0.00	0	0.041	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	146.88	-2.400
7	Stiffener element	42.75	315	25.00	315	0.564	9.50	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	67.75	-2.361
8	Stiffener element	42.75	315	25.00	315	1.014	9.50	1.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	67.75	-2.361
9	Stiffener element	116.00	315	28.35	315	0.024	14.50	0.800	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	144.35	-3.198
10	Stiffener element	116.00	315	28.35	315	0.024	14.50	0.800	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	144.35	-3.998
11	Stiffener element	116.00	315	28.35	315	0.024	14.50	0.800	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	144.35	-4.798
12	Hard Corner	150.88	315	0.00	0	0.046	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	150.88	-5.592
13	Stiffener element	42.75	315	25.00	315	0.564	9.50	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	67.75	-5.561
14	Stiffener element	42.75	315	25.00	315	1.014	9.50	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	67.75	-5.561
15	Stiffener element	108.00	315	31.49	315	0.026	13.50	0.800	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	139.49	-6.397
16	Stiffener element	108.00	315	31.49	315	0.026	13.50	0.800	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	139.49	-7.197
17	Hard Corner	136.38	315	0.00	0	0.037	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	136.38	-7.996
18	Stiffener element	42.75	315	25.00	315	0.548	9.50	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	67.75	-7.985
19	Stiffener element	42.75	315	25.00	315	0.998	9.50	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	67.75	-7.985
20	Stiffener element	104.00	315	31.49	315	0.032	13.00	0.800	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	135.49	-8.797
21	Stiffener element	104.00	315	31.49	315	0.032	13.00	0.800	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	135.49	-9.597
22	Stiffener element	104.00	315	31.49	315	0.032	13.00	0.800	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	135.49	-10.397
23	Hard Corner	130.00	315	0.00	0	0.037	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	130.00	-11.178
24	Stiffener element	45.00	315	25.00	315	0.548	10.00	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	70.00	-11.185
25	Stiffener element	45.00	315	25.00	315	0.998	10.00	0.450	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	70.00	-11.185
26	Stiffener element	91.00	315	31.49	315	0.036	13.00	0.700	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	122.49	-11.888
27	Stiffener element	91.00	315	31.49	315	0.060	13.00	0.700	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	1.200	Bulb flat	122.49	-12.588
28	Hard Corner	205.27	315	0.00	0	0.649	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	205.27	-13.572
29	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-0.798
30	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-1.598
31	Hard Corner	188.13	315	0.00	0	1.490	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.400	-	188.13	-2.401
32	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-3.198
33	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-3.998
34	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-4.798
35	Hard Corner	188.13	315	0.00	0	1.490	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	188.13	-5.601
36	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-6.398
37	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-7.198
38	Hard Corner	188.13	315	0.00	0	1.490	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	188.13	-8.001
39	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-8.798
40	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-9.598

41	Stiffener element	162.00	315	40.35	315	1.476	20.25	0.800	174.10	3187.71	10.50	252.00	50.50	27.50	2.400	Bulb flat	202.35	-10.398
42	Hard Corner	165.38	315	0.00	0	1.530	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	165.38	-11.142
43	Stiffener element	113.75	315	25.01	315	2.000	16.25	0.700	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	138.76	-11.688
44	Stiffener element	113.75	315	25.01	315	2.511	16.25	0.700	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	138.76	-12.166
45	Hard Corner	150.85	315	0.00	0	3.044	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	150.85	-12.616
46	Stiffener element	77.00	315	25.01	315	2.971	11.00	0.700	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	102.01	-13.297
47	Stiffener element	91.00	315	28.35	315	1.599	13.00	0.700	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	1.200	Bulb flat	119.35	-13.959
48	Stiffener element	91.00	315	28.35	315	2.298	13.00	0.700	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	119.35	-13.973
49	Hard Corner	136.00	315	0.00	0	3.020	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	136.00	-13.955
50	Stiffener element	104.00	315	28.35	315	3.798	13.00	0.800	150.19	1646.04	8.50	216.00	42.50	23.50	2.400	Bulb flat	132.35	-13.973
51	Stiffener element	104.00	315	25.01	315	4.598	13.00	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	129.01	-13.980
52	Stiffener element	105.64	315	25.01	315	5.398	13.20	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	130.65	-13.980
53	Stiffener element	106.00	315	25.01	315	6.198	13.25	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	131.01	-13.980
54	Hard Corner	124.29	315	0.00	0	7.001	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	124.29	-13.992
55	Stiffener element	48.21	315	25.00	315	6.986	9.50	0.640	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	73.21	-12.928
56	Stiffener element	48.21	315	25.00	315	6.986	9.50	0.640	100.00	833.33	12.50	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	73.21	-13.570
57	Stiffener element	106.00	315	25.01	315	7.798	13.25	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	131.01	-13.988
58	Stiffener element	106.00	315	25.01	315	8.598	13.25	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	131.01	-13.986
59	Stiffener element	107.25	315	25.01	315	9.398	13.41	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	132.26	-13.982
60	Stiffener element	110.00	315	25.01	315	10.199	13.75	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	135.01	-13.986
61	Hard Corner	148.00	315	0.00	0	10.993	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	148.00	-13.961
62	Stiffener element	89.25	315	20.14	315	10.983	12.75	0.700	123.02	812.89	7.50	181.00	35.50	18.50	2.400	Bulb flat	109.39	-13.298
63	Stiffener element	125.38	341.62	50.86	355	11.746	16.72	0.750	202.12	5271.03	11.25	288.00	57.25	32.25	2.400	Bulb flat	176.24	-13.946
64	Stiffener element	140.63	355	50.86	355	12.496	16.72	0.750	202.12	5271.03	11.25	288.00	57.25	32.25	2.400	Bulb flat	191.49	-13.954
65	Stiffener element	140.63	355	50.86	355	13.246	16.72	0.750	202.12	5271.03	11.25	288.00	57.25	32.25	1.200	Bulb flat	191.49	-13.954
66	Stiffener element	124.00	315	25.01	315	3.798	15.50	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	149.01	-12.619
67	Stiffener element	116.50	315	25.01	315	4.598	14.56	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	141.51	-12.615
68	Stiffener element	112.00	315	25.01	315	5.398	14.00	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	137.01	-12.614
69	Stiffener element	112.00	315	25.01	315	6.198	14.00	0.800	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	0.000	Bulb flat	137.01	-12.614
70	Hard Corner	130.29	315	0.00	0	6.999	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	130.29	-12.607
71	Stiffener element	112.00	315	22.14	315	7.799	14.00	0.800	120.93	888.89	8.50	181.00	36.50	18.50	2.400	Bulb flat	134.14	-12.609
72	Stiffener element	112.00	315	22.14	315	8.599	14.00	0.800	120.93	888.89	8.50	181.00	36.50	18.50	2.400	Bulb flat	134.14	-12.609
73	Stiffener element	112.00	315	22.14	315	9.399	14.00	0.800	120.93	888.89	8.50	181.00	36.50	18.50	2.400	Bulb flat	134.14	-12.609
74	Stiffener element	112.00	315	22.14	315	10.199	14.00	0.800	120.93	888.89	8.50	181.00	36.50	18.50	2.400	Bulb flat	134.14	-12.609
75	Hard Corner	249.84	338	0.00	0	11.058	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	249.84	-12.593
76	Stiffened plate element	143.85	355	0.00	0	11.783	21.00	1.200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.685	-	143.85	-12.611
77	Stiffener element	157.50	355	64.92	355	12.496	21.00	0.750	237.47	8957.20	12.00	332.00	66.00	38.00	1.200	Bulb flat	222.42	-12.539
78	Stiffener element	157.50	355	64.92	355	13.246	21.00	0.750	237.47	8957.20	12.00	332.00	66.00	38.00	2.400	Bulb flat	222.42	-12.539
79	Stiffener element	134.28	355	54.06	355	11.457	16.79	0.800	217.15	6316.99	11.00	306.00	60.00	34.00	1.200	Bulb flat	188.34	-11.919
80	Stiffener element	134.28	355	54.06	355	11.879	21.00	0.800	217.15	6316.99	11.00	306.00	60.00	34.00	2.400	Bulb flat	188.34	-11.266
81	Hard Corner	252.63	355	0.00	0	12.481	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	252.63	-10.568
82	Stiffener element	168.00	355	75.78	355	13.428	21.00	0.800	256.33	12224.27	13.00	359.00	71.00	41.00	1.200	Bulb flat	243.78	-10.572
83	Hard Corner	188.14	355	0.00	0	13.947	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	188.14	-13.922
84	Stiffener element	171.50	355	61.87	355	14.001	24.50	0.700	211.63	7228.69	13.25	306.00	62.25	34.25	1.200	Bulb flat	233.37	-13.300
85	Hard Corner	270.26	355	0.00	0	14.017	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	270.26	-12.600
86	Stiffener element	171.50	355	60.86	355	14.094	24.50	0.700	211.88	7106.34	13.00	306.00	62.00	34.00	2.400	Bulb flat	232.36	-11.897
87	Stiffener element	171.50	355	60.86	355	14.141	24.50	0.700	211.88	7106.34	13.00	306.00	62.00	34.00	1.200	Bulb flat	232.36	-11.197
88	Hard Corner	169.96	355	0.00	0	14.138	0.00	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	169.96	-10.580

Οι καμπύλες σ-ε καθορίζονται σύμφωνα με τους τύπους του Κεφαλαίου 3.

5.5.3 Βήμα 3 – Αρχικοποίηση καμπυλότητας και ουδέτερου άξονα

Για την εκτίμηση του βήματος που χρησιμοποιείται για την αύξηση της καμπυλότητας χι υπολογίζεται πρώτα η μέγιστη αναμενόμενη τιμή της χ_F για την οποία συνήθως επιλέγεται:

$$\chi_F = \pm 3 * \chi_{yield} = \pm 0,003 \frac{M_Y \text{ [kN * m]}}{E \left[\frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right] I_{y-n50} [\text{m}^4]}$$

$$M_{Y1} = 10^3 R_{eHb} Z_{B-n50} = 10^3 * 315 * 12.92 = 4,189,500 \text{ kN * m}$$

$$M_{Y2} = 10^3 R_{eHd} Z_{D-n50} = 10^3 * 355 * 8.84 = 3,138,200 \text{ kN * m}$$

Συνεπώς πρώτο διαρρέει το κατάστρωμα σε ροπή $M_Y = M_{Y2}$.

Με βάση τους αναλυτικούς υπολογισμούς (βλ. Κεφάλαιο 4) $I_{y-n50} = 73.70 \text{ m}^4$ και άρα

$$\chi_F = \pm 6.2 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

Συνεπώς η καμπυλότητα χ μεταβάλλεται στο διάστημα $[0, 6.2 * 10^{-4})$ για κατάσταση hogging και στο διάστημα $[0, -6.2 * 10^{-4})$ για κατάσταση sagging.

Επιπλέον η αρχική τιμή του βήματος της καμπυλότητας θα είναι:

$$\Delta\chi = 0.01 \frac{R_{eH}}{E} \frac{1}{z_D - z_n} = 0.01 * \frac{355}{206000} * \frac{1}{14 - 5.687} = 2.07 * 10^{-6} \text{ m}^{-1}$$

Η θέση του ελαστικού ουδέτερου άξονα όπως υπολογίστηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4 είναι: $z_{n-initial} = 5.687 \text{ m above baseline}$.

5.5.4 Βήμα 4-5 - Υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης $\epsilon_{elem} = \chi_i * (z_{elem} - z_n)$ κάθε στοιχείου & προσδιορισμός της θέσης του Ουδέτερου Άξονα $z_{n,i}$ σε κάθε επαναληπτικό βήμα i της καμπυλότητας χ_i

Τα βήματα 4-5 αναφέρονται στην επαναληπτική διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το άθροισμα των αξονικών δυνάμεων που δρουν στα στοιχεία γίνει μηδενικό. Χωρίς να είναι γνωστή εκ των προτέρων η θέση του Ο.Α. στην οποία η κατανομή των τάσεων (εφελκυστικών-θλιπτικών) βρίσκεται σε ισορροπία, ο νέος Ο.Α. τίθεται αρχικά στη θέση του προηγούμενου βήματος και στη συνέχεια υπολογίζονται οι δυνάμεις και το άθροισμά τους. Στην περίπτωση που το άθροισμά τους είναι μηδενικό, η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται και η νέα θέση του Ο.Α. έχει καθοριστεί. Σε αντίθετη περίπτωση ο Ο.Α. μετατοπίζεται ανάλογα και το άθροισμα των δυνάμεων υπολογίζεται ξανά.

5.5.5 Βήμα 6 – Υπολογισμός της ροπής κάμψης σε κάθε βήμα

Έχοντας υπολογίσει τη θέση του Ο.Α. για κάθε επαναληπτικό βήμα i , αντίστοιχη ροπή κάμψης προκύπτει αθροίζοντας τις τάσεις σε κάθε δομικό στοιχείο:

$$M_i = \pm \sum_{elem=1}^N |\sigma_{elem} A_{elem} h_{elem}|, \text{ όπου } h_{elem} = z_{elem} - z_{n,i} \ \& \ \begin{cases} M > 0, \text{ hogging} \\ M < 0, \text{ sagging} \end{cases}$$

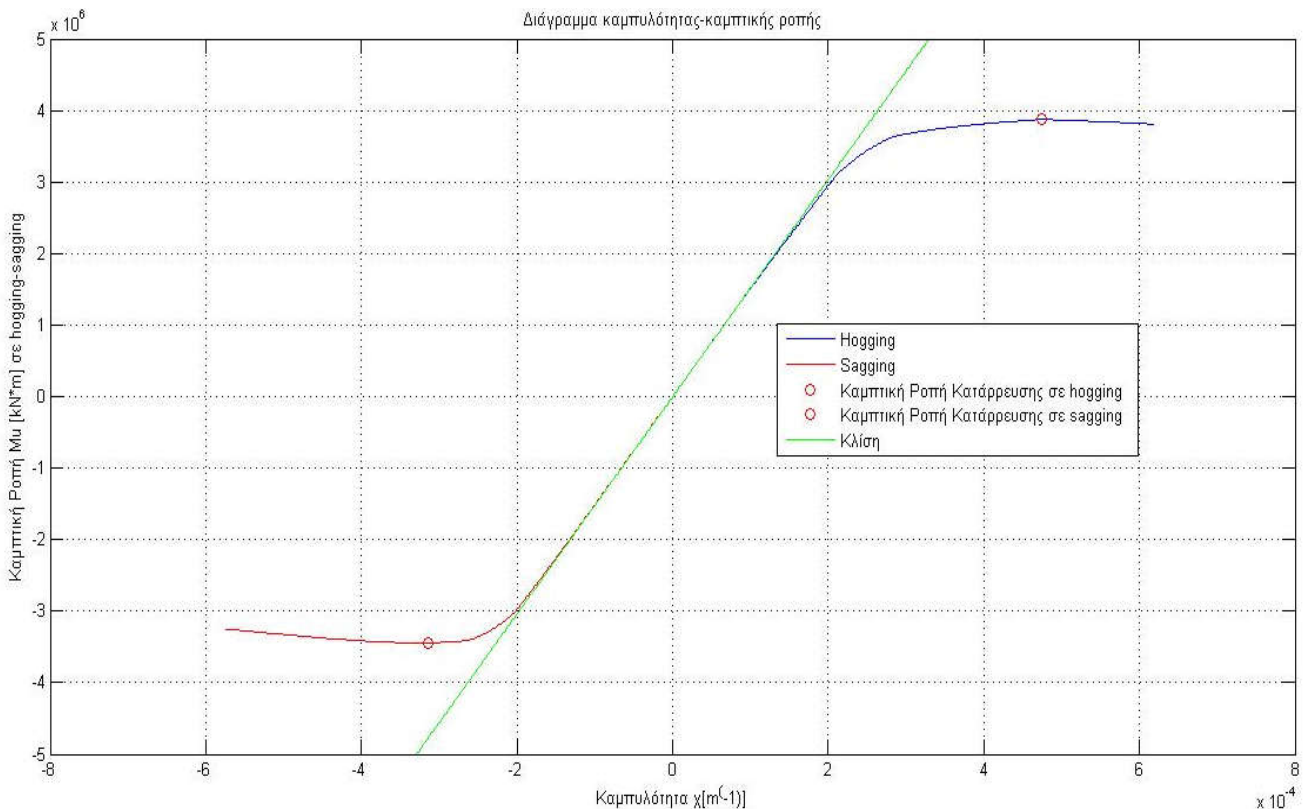
όπου $N = 173$ δομικά στοιχεία

5.5.6 Βήμα 7 - Εύρεση της μέγιστης αντοχής σε hogging & sagging

Τα μέγιστο της καμπύλης $M_i - \chi_i$ δίνει την M_{U-hog} και το ελάχιστο την M_{U-sag} .

Ο κώδικας **Ultimate_Strength.m** (βλ. Παράρτημα Δ') που είναι γραμμένος σε Matlab με δεδομένον τον Πίνακα 5.4 (σε Excel) για τα δομικά στοιχεία διεκπεραιώνει τον υπολογισμό μέγιστης αντοχής της τομής του πλοίου σε hogging/sagging.

5.5.7 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω κώδικα Ultimate_Strength.m

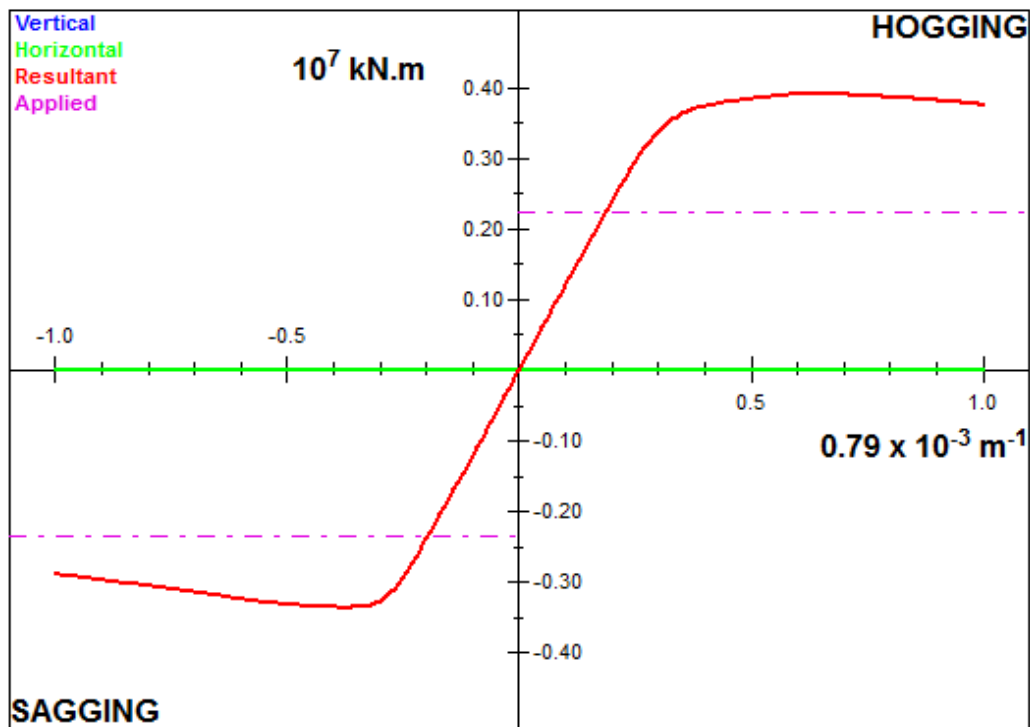


Σχήμα 5.5 Διάγραμμα καμπτικής ροπής $M -$ καμπυλότητας χ . Με κόκκινους κύκλους σημειώνεται η καμπτική ροπή κατάρρευσης σε hogging/sagging. Η πράσινη γραμμή δείχνει την απόκριση της κατασκευής στην ελαστική περιοχή και αντιπροσωπεύει την ευθεία $E \cdot I_{y-n50}$ η οποία εφάπτεται της καμπύλης $M-\chi$ στο $\chi=0$.

Προκύπτουν από τον κώδικα, λοιπόν, τα παρακάτω:

- $M_{U-hog} = 3,874,228 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-hog} = 4.75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{U-sag} = -3,443,125 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-sag} = -3.14 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

5.5.8 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω του MARS 2000 by BV



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα M-χ του προγράμματος MARS 2000 του BV

Όπως φαίνεται στο σχήμα η οριζόντια συνιστώσα της καμπτικής ροπής είναι μηδέν λόγω της συμμετρίας της Μέσης Τομής του Bulk Carrier ως προς τη Centerline.

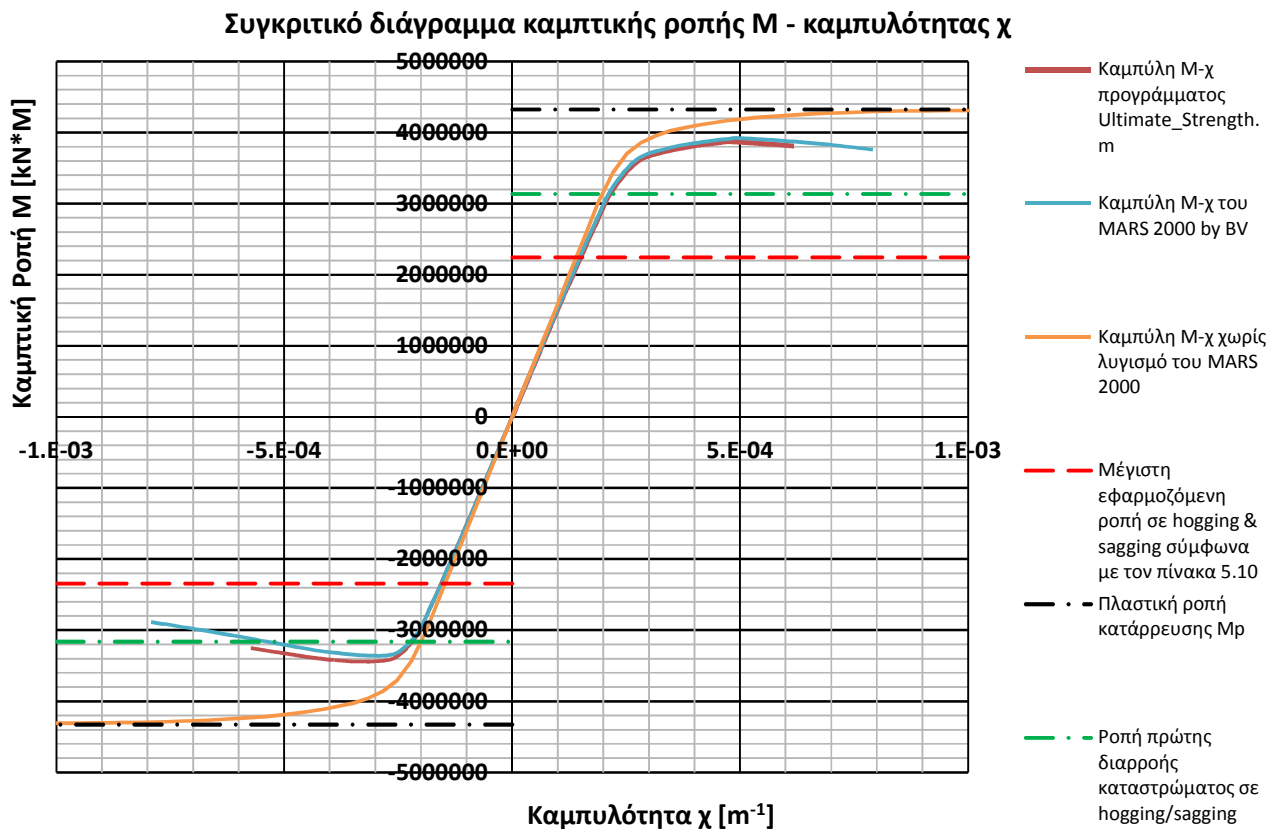
Από το πρόγραμμα MARS 2000 προκύπτουν τα παρακάτω:

- $M_{U-hog} = 3,920,609 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-hog} = 4.91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{U-sag} = -3,360,019 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-sag} = -2.93 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

5.5.9 Συνολική παρουσίαση αποτελεσμάτων

	(1) Ultimate_Strength.m	(2) MARS 2000	Απόκλιση υπολογισμού (1) από (2)
M_{U-hog}	3,874,228	3,920,609	1.18 %
M_{U-sag}	-3,443,125	-3,360,019	-2.47 %
χ_{U-hog}	$4.75 \cdot 10^{-4}$	$4.91 \cdot 10^{-4}$	3.26 %
χ_{U-sag}	$-3.14 \cdot 10^{-4}$	$-2.93 \cdot 10^{-4}$	-7.17 %

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο υπολογισμών είναι μικρές, ειδικά όσον αφορά τη ροπή κατάρρευσης σε hogging/sagging. Αυτές οι διαφορές δεν οφείλονται σε σφάλμα του κώδικα αλλά σε ενδεχόμενη ελάχιστα διαφορετική αναλυτική μοντελοποίηση (input αρχείο) των δομικών στοιχείων. Αυτό αποδεικνύεται στο παρακάτω Σχήμα, όπου η καμπύλη του κώδικα σε σύγκριση με την καμπύλη του προγράμματος MARS 2000 παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά και μικρές αποκλίσεις (βλ. κόκκινη & μπλε καμπύλη). Να σημειωθεί ότι η κόκκινη καμπύλη σταματάει στην καμπυλότητα χ που έχει οριστεί από τον κώδικα ($\pm 3 \chi_{yield}$). Επιπλέον των δύο καμπυλών που προαναφέρθηκαν, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη M- χ του MARS 2000 χωρίς την επίδραση του λυγισμού των δομικών στοιχείων παρά μόνο της ελαστικής-ιδανικά πλαστικής τους κατάρρευσης. Μέσω της καμπύλης αυτής (πορτοκαλί) βρίσκεται η ιδανική πλαστική ροπή κατάρρευσης M_p που είναι ίδια (κατά απόλυτη τιμή) για hogging/sagging.



Σχήμα 5.7 Συγκριτικό διάγραμμα M- χ των παραπάνω υπολογισμών

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.7 η μέγιστη αντοχή (σε απόλυτες τιμές) της Μέσης Τομής του πλοίου σε sagging είναι μικρότερη από ό,τι σε hogging. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην κατάσταση hogging το κατάστρωμα, που δέχεται τις μεγαλύτερες τάσεις, εφελκύεται και άρα αστοχεί με ελαστικό-ιδανικά πλαστικό τρόπο (μεγαλύτερη αντοχή από

ό,τι αν λυγίξει), ενώ ο πυθμένας δεχόμενος μικρότερες τάσεις θλίβεται άρα αστοχεί με λυγισμό. Κατά την κατάρρευση σε hogging δηλαδή συνυπάρχουν στα δομικά στοιχεία ελαστικές παραμορφώσεις, πλαστικές λόγω διαρροής υλικού και πλαστικές λόγω λυγισμού. Αντίθετα, στην κατάσταση sagging το κατάστρωμα θλίβεται και τελικά λυγίζει αρκετά γρήγορα (σε μικρές καμπυλότητες) μη δυνάμενο να αντέξει μεγαλύτερες τάσεις, οδηγώντας τη διατομή σε κατάρρευση χωρίς να έχει προηγηθεί σημαντική ελαστοπλαστική κατάρρευση στην πλευρά του εφελκυσμού.

Προκειμένου να περιοριστούν τυχόν διαφορές των ροπών κατάρρευσης λόγω διαφορετικής αναλυτικής μοντελοποίησης των δομικών στοιχείων επιλέγεται ο μέσος όρος των δύο υπολογισμών για την εξαγωγή παρακάτω συμπερασμάτων. Έτσι:

$$M_{U-hog} = 3,897,418 \text{ kN} * \text{m} \quad \& \quad M_{U-sag} = -3,401,572 \text{ kN} * \text{m}$$

5.5.10 Δείκτες Αντοχής

Η πλαστική ροπή κατάρρευσης που προκύπτει σύμφωνα με το Σχήμα 5.7 είναι:

$$|M_p| = 4,325,234 \text{ kN} * \text{m}$$

Οι δείκτες αντοχής, πραγματική ροπή κατάρρευσης/πλαστική ροπή κατάρρευσης που υπολογίζονται παρακάτω, δείχνουν την επίδραση του λυγισμού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος, τόσο μικρότερη η επίδραση του λυγισμού.

- $\frac{M_{U-hog}}{M_p} = 0.90$
- $\frac{|M_{U-sag}|}{|M_p|} = 0.79$

Επίσης υπολογίζονται οι δείκτες:

- $\frac{M_{Y-hog}}{M_p} = 0.72$ και $\frac{M_{Y-sag}}{M_p} = 0.72$
- $\frac{M_{Y-hog}}{M_{U-hog}} = 0.80$ και $\frac{M_{Y-sag}}{M_{U-sag}} = 0.93$

που δείχνουν το απόθεμα αντοχής της διατομής σε hogging/sagging μετά την πρώτη διαρροή του υλικού στο κατάστρωμα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος, τόσο μικρότερο το απόθεμα αντοχής. Οι πολλές ανθεκτικές γωνίες κοντά στο κατάστρωμα αστοχούν με διαρροή του υλικού τους, γεγονός που δικαιολογεί την ποσότητα $\frac{M_{Y-sag}}{M_{U-sag}} = 0.93$.

5.5.11 Κριτήριο των CSR-H για έλεγχο επάρκειας της επιτευχθείσας μέγιστης αντοχής του άθικτου Bulk Carrier σε κατακόρυφη διαμήκη κάμψη (hogging / sagging)

Για κάθε κατάσταση πλεύσης του πλοίου (εν πλω, σε λιμάνι, υπό κατάκλυση) θα πρέπει να ισχύει για την μέγιστη κατά απόλυτη τιμή κατακόρυφη καμπτική ροπή M_{bend} το κριτήριο:

$$|M_{bend}| \leq \frac{|M_U|}{\gamma_R} \left(\frac{M_U}{\gamma_R} = M_{Ultimate} \right)$$

όπου $\gamma_R = \gamma_M * \gamma_{DB}$, $\gamma_M (= 1.1)$: συντελεστής ασφαλείας που καλύπτει τις αβεβαιότητες λόγω υλικού, γεωμετρίας και αδυναμίας ακριβούς εκτίμησης της αντοχής από τη μέθοδο,

γ_{DB} (βλ. Πίνακα 5.5): συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη την κάμψη του διπύθμενου μεταξύ των εγκάρσιων φρακτών λόγω ανισοκατανομής της κατακόρυφης πίεσης από το φορτίο και της πίεσης του νερού. Για την κατάσταση hogging, προκειμένου να παρθεί η δυσμενέστερη περίπτωση φόρτωσης, θεωρείται ότι το μεσαίο αμπάρι είναι άδειο σε εναλλάξ φόρτωση του πλοίου και άρα η κάμψη του διπύθμενου (το οποίο θλίβεται σε κατάσταση hogging) μεταξύ των δύο διαδοχικών φρακτών του αμπαριού, οδηγεί σε μεγαλύτερο βέλος κάμψεως και συνεπαγόμενη μείωση της αντοχής σε λυγισμό. Για το λόγο αυτό ο συντελεστής ασφαλείας είναι αυξημένος (=1.25) έναντι άλλων καταστάσεων φόρτωσης.

$|M_U|$: η μέγιστη κατά απόλυτη τιμή κατακόρυφη καμπτική ροπή σε κατάσταση hogging/sagging που μπορεί να παραλάβει η διατομή του Bulk-Carrier, όπως προκύπτει από την επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο,

$M_{bend} = \gamma_S M_{sw} + \gamma_w M_{ww}$ όπου γ_S : συντελεστής ασφαλείας για τη μέγιστη κατά απόλυτη τιμή επιτρεπόμενη καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό, γ_w : συντελεστής ασφαλείας για τη μέγιστη κατά απόλυτη τιμή ροπή κυματισμού

Πίνακας 5.5 Ο Πίνακας δίνει την τιμή του συντελεστή γ_{DB} για hogging/sagging και για την εκάστοτε κατάσταση φόρτωσης & τύπο του πλοίου. Στην παρούσα περίπτωση το Bulk Carrier είναι τύπου A (μεταφέρει φορτίο ειδικού βάρους < 1 ton/m³).

<ul style="list-style-type: none"> • For hogging condition: <ul style="list-style-type: none"> • $\gamma_{DB} = 1.25$ for empty cargo holds in alternate condition of BC-A bulk carriers, • $\gamma_{DB} = 1.10$ for oil tankers, for BC-B and BC-C bulk carriers and loaded cargo holds in alternate condition of BC-A bulk carriers, • For sagging condition: $\gamma_{DB} = 1.0$

Πίνακας 5.6 Ο Πίνακας δίνει τις τιμές των συντελεστών γ_S και γ_w για κάθε σχεδιαστικό σενάριο του πίνακα 5.7.

Design load scenarios	γ_S	γ_w
A	1.0	1.2
B	1.0	1.3

Παρακάτω δίνονται οι καμπτικές ροπές για κάθε συνθήκη πλεύσης, όπως αυτές υπολογίστηκαν στο Κεφάλαιο 4.

Πίνακας 5.7 Ο Πίνακας δίνει τα σχεδιαστικά σενάρια ανάλογα με τις συνθήκες πλεύσης (εν πλω, υπό κατάκλυση, σε λιμάνι) με βάση τα οποία υπολογίζονται οι συντελεστές γ_S και γ_W .

Design load scenarios		Permissible still water bending moment, M_{sw-U}
A	S+D	M_{sw-h} or M_{sw-s}
	S	M_{sw-p-h} or M_{sw-p-s}
	A: S+D	M_{sw-f}
B	S+D	Maximum sagging still water bending moment for operational seagoing homogeneous full load condition ⁽¹⁾
(1) The maximum still water bending moment is to be taken from the departure condition with the ship homogeneously loaded at maximum draught and corresponding arrival and any mid-voyage conditions.		

Πίνακας 5.8 Παρουσιάζονται η καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό & σε κυματισμό για όλες τις πιθανές συνθήκες του πλοίου σε κατάσταση hogging

Condition	Vertical still water bending moment M_{sw-hog} [kN*m]	Vertical wave bending moment M_{wv-hog} [kN*m]
Navigation	881,000	1,137,421
Flooded	1,110,000	909,937
On port	1,573,000	-

Πίνακας 4.9 Παρουσιάζονται η καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό & σε κυματισμό για όλες τις πιθανές συνθήκες του πλοίου σε κατάσταση sagging

Condition	Vertical still water bending moment M_{sw-sag} [kN*m]	Vertical wave bending moment M_{wv-sag} [kN*m]
Navigation	-868,000	-1,227,017
Flooded	-1,169,000	-981,614
On port	-1,573,000	-

Πίνακας 5.10 Σε αυτό τον πίνακα ελέγχεται το κριτήριο $|M_{bend}| \leq |M_{Ultimate}|$ για κάθε κατάσταση

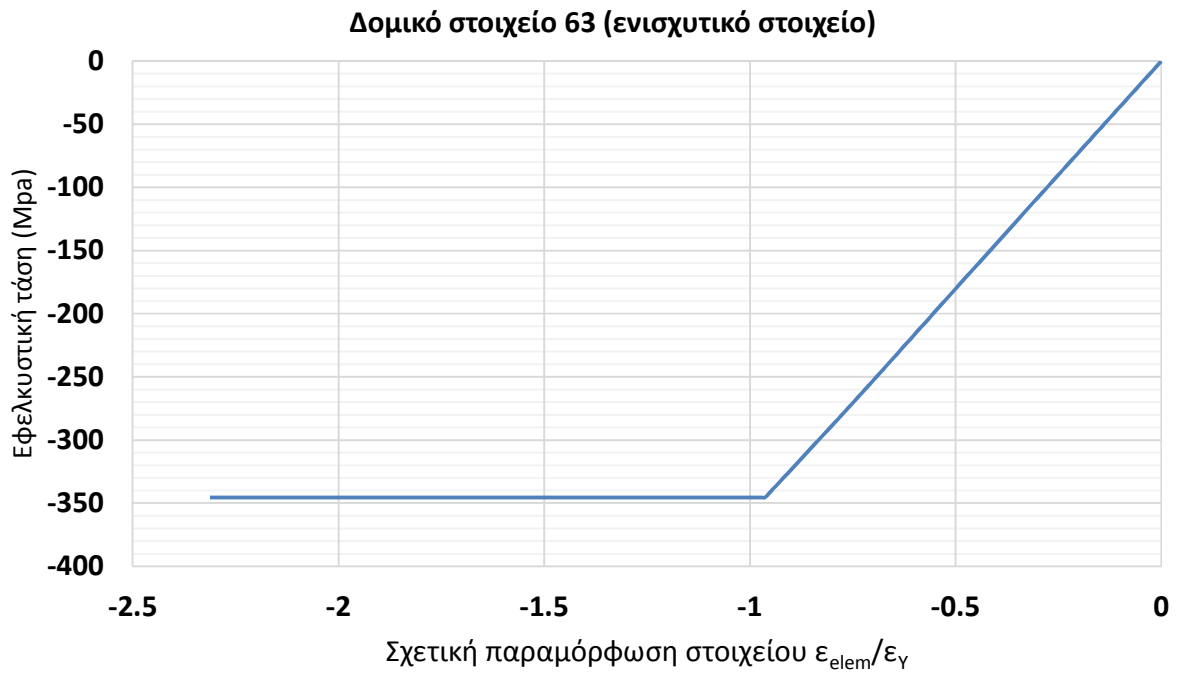
Μονάδες μέτρησης: kN*m	$M_{Ultimate}$	M_{bend}	$ M_{bend} \leq M_{Ultim} $	$(M_{bend}/M_{Ultimate}) * 100\%$	Condition
Navigation	2,834,486	2,245,905	TRUE	79.24 %	Hogging
	-3,092,338	-2,340,421	TRUE	75.68 %	Sagging
Port	2,834,486	1,573,000	TRUE	55.50 %	Hogging
	-3,092,338	-1,573,000	TRUE	50.87 %	Sagging
Flooded	3,221,007	2,201,924	TRUE	68.36 %	Hogging
	-3,092,338	-2,346,937	TRUE	75.89 %	Sagging

5.5.12 Παρουσίαση καμπυλών τάσης - σχετικής αξονικής παραμόρφωσης για επιλεγμένα δομικά στοιχεία της Μέσης τομής του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος

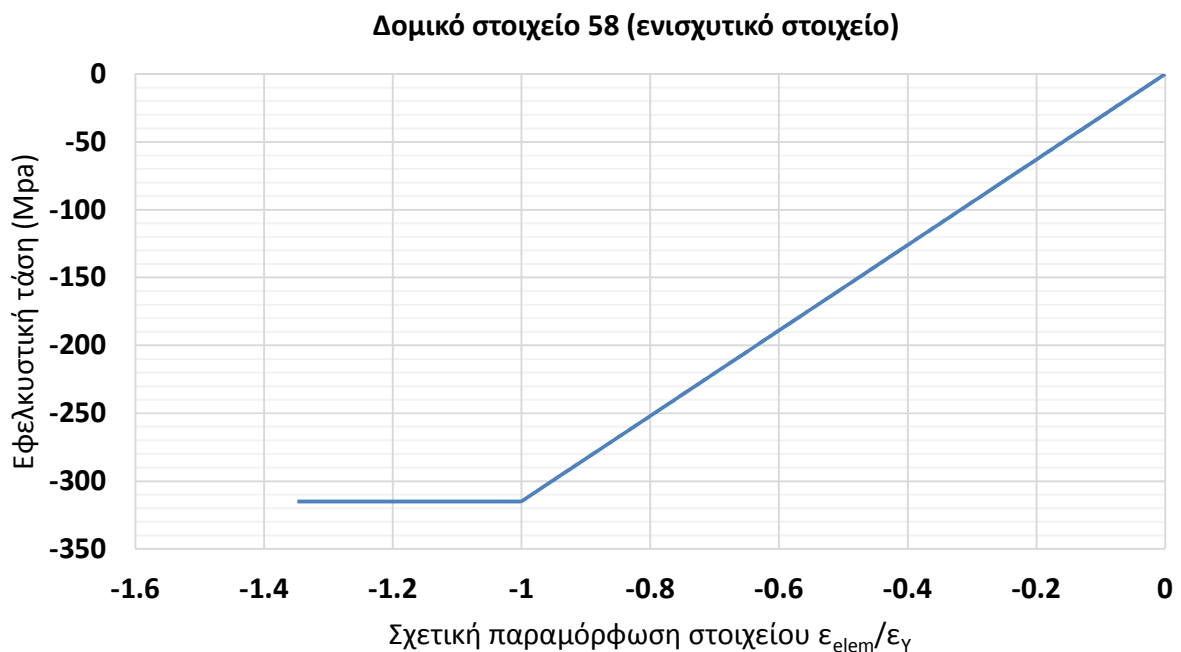
✚ Εφελκυσόμενα δομικά στοιχεία σε hogging



Σχήμα 5.8 Στο Σχήμα φαίνεται η τάση που δέχεται το στοιχείο συναρτήσει της σχετικής παραμόρφωσης $\bar{\epsilon}$, που δείχνει πόσες φορές μεγαλύτερη παραμόρφωση από την παραμόρφωση του στοιχείου στην τάση διαρροής του έχει υποστεί. Το διάγραμμα έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χ_f του κώδικα.

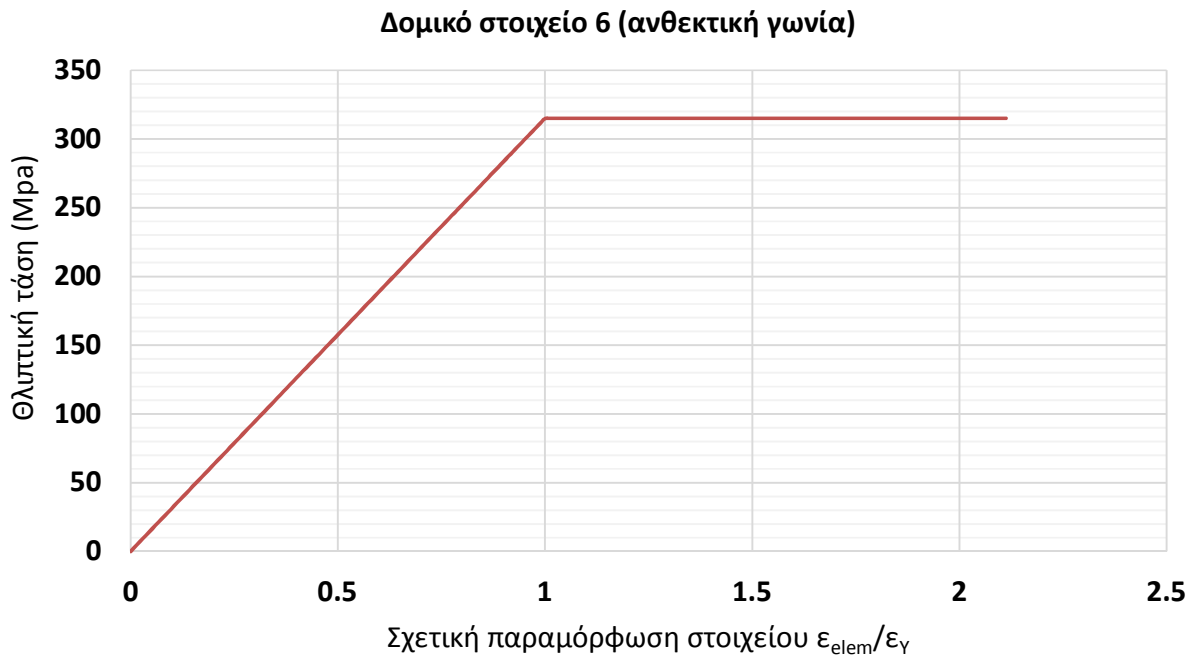


Σχήμα 5.9 Το διάγραμμα έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF του κώδικα.

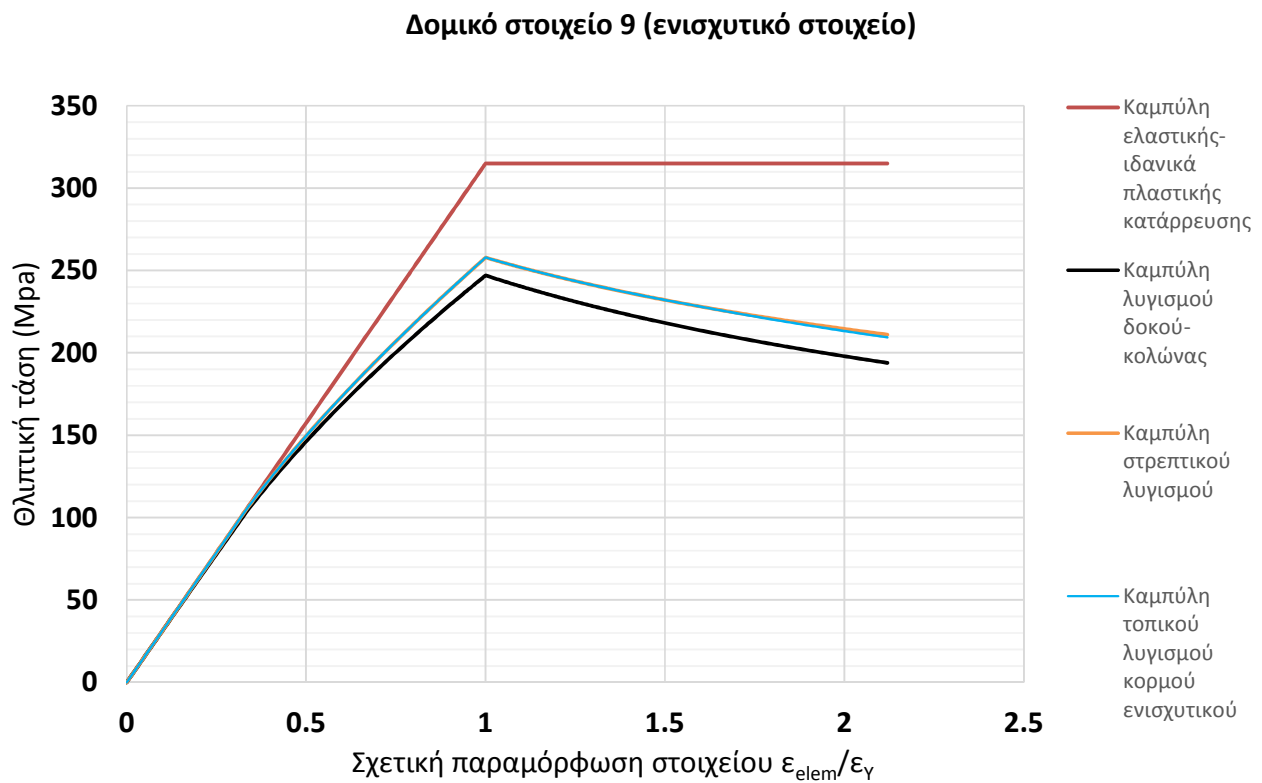


Σχήμα 5.10 Το διάγραμμα έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF του κώδικα. Επειδή το δομικό στοιχείο 58 βρίσκεται πιο κοντά στον Ο.Α. της κάμψης, οι παραμορφώσεις του είναι μικρότερες από ό,τι των στοιχείων 88 και 63.

Θλιβόμενα δομικά στοιχεία σε hogging

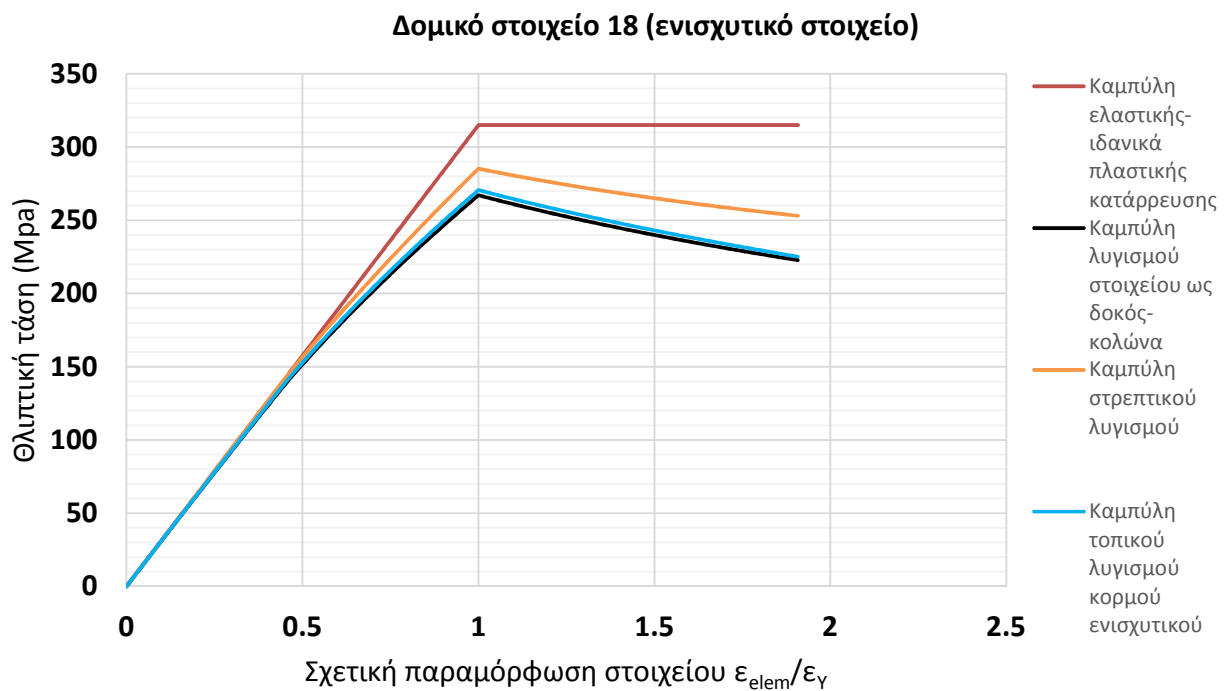


Σχήμα 5.11 Το διάγραμμα έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF του κώδικα. Τάση διαρροής του στοιχείου τα 315 Μpa.

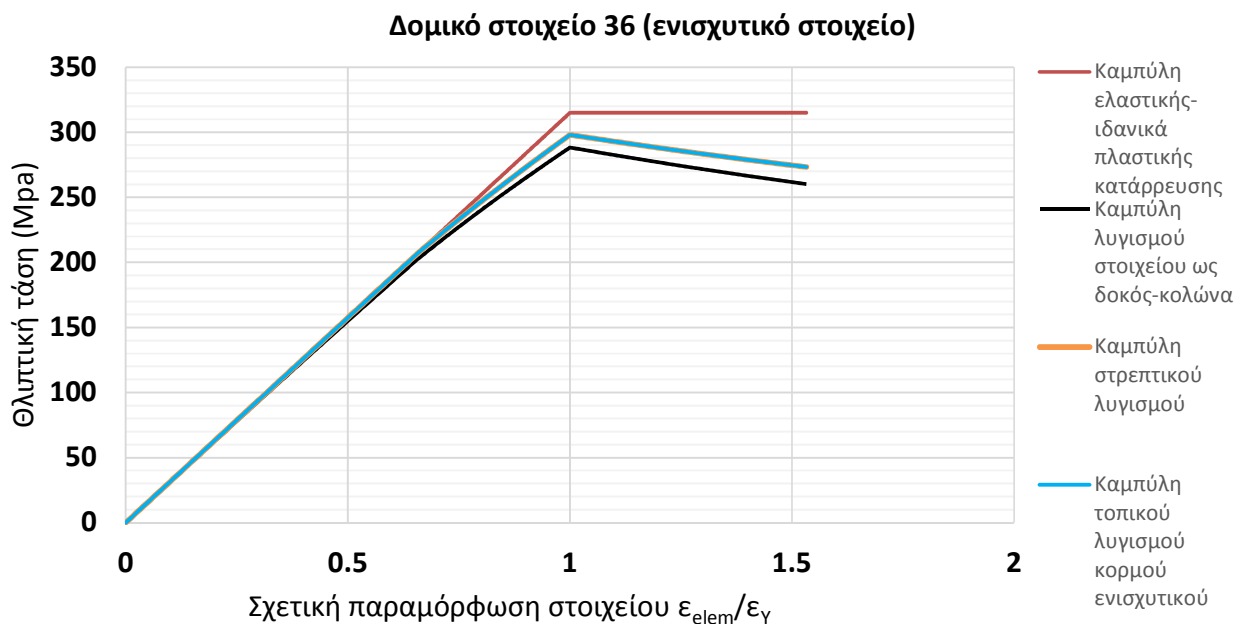


Σχήμα 5.12 Οι καμπύλες φόρτισης έχουν σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF του κώδικα.

Από το Σχήμα 5.12 παρατηρείται ότι για το στοιχείο 9 η κρίσιμη καμπύλη βάσει της οποίας τελικά θα παραλάβει τις αντίστοιχες τάσεις είναι η μαύρη, δηλ. η καμπύλη λυγισμού δοκού-κολόνας. Επίσης παρατηρείται ότι για το σχεδιασμένο εύρος παραμορφώσεων η καμπύλη στρεπτικού λυγισμού με την καμπύλη τοπικού λυγισμού του κορμού σχεδόν συμπίπτουν.

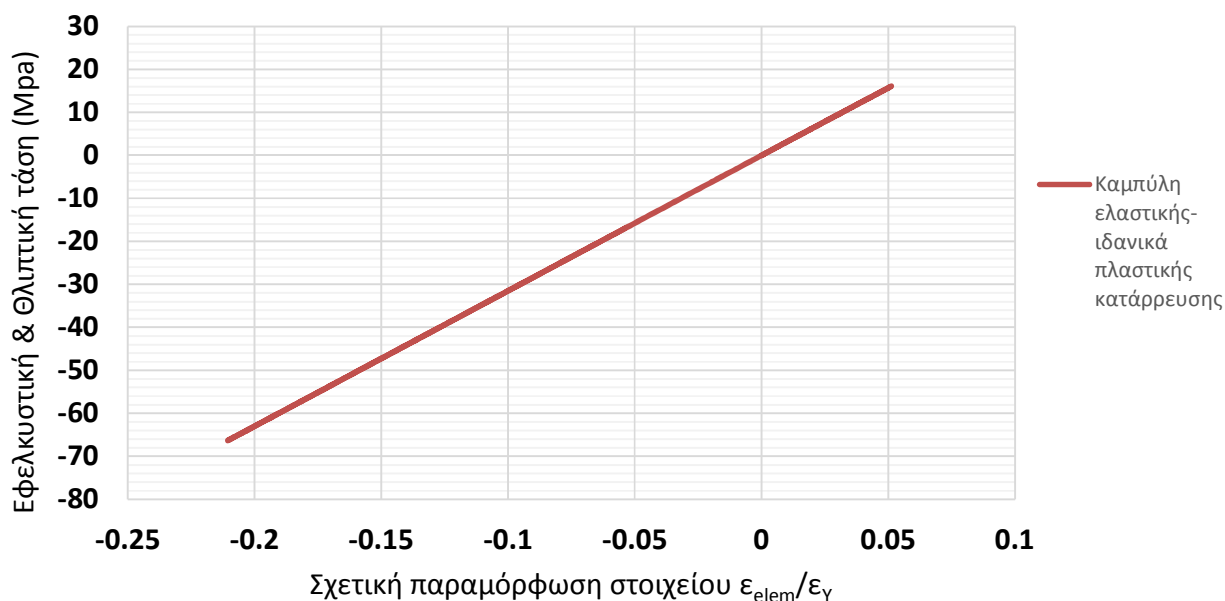


Σχήμα 5.13 Οι καμπύλες φόρτισης έχουν σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χ_F του κώδικα.



Σχήμα 5.14 Οι καμπύλες φόρτισης έχουν σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χ_F του κώδικα. επικρατεί η κατάρρευση του ενισχυτικού στοιχείου με λυγισμό δοκού-κολόνας.

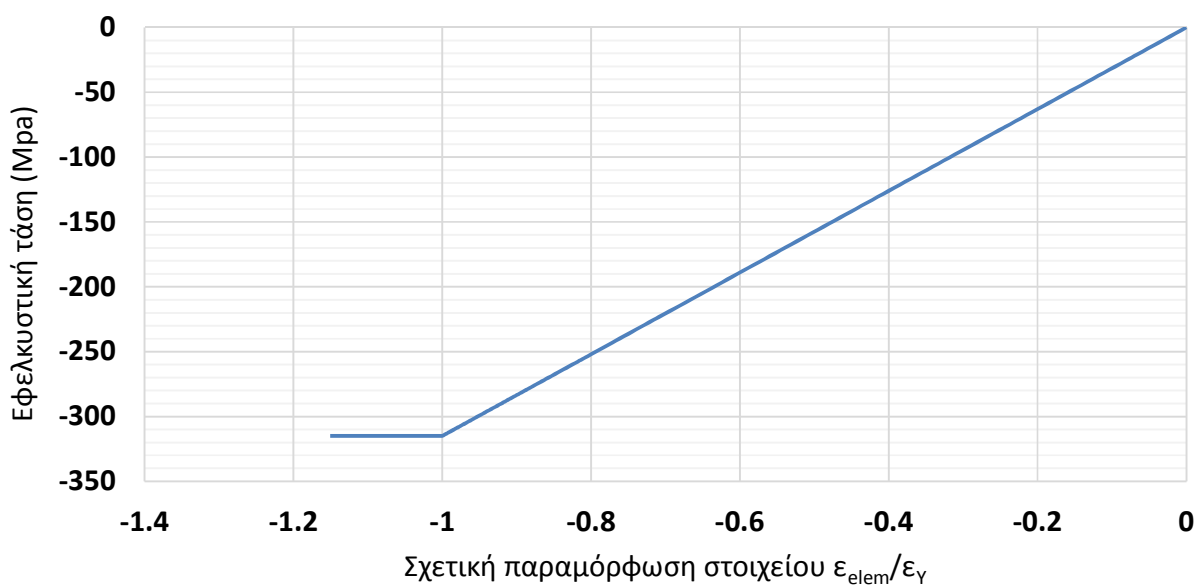
Δομικό στοιχείο 52 (ενισχυτικό στοιχείο)



Σχήμα 5.15 Η καμπύλη φόρτισης έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF του κώδικα. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα η φόρτιση του στοιχείου βρίσκεται στη γραμμική ελαστική περιοχή. Αυτό συμβαίνει διότι το στοιχείο βρίσκεται κοντά στη στιγμιαία θέση του Ο.Α., οπότε παραλαμβάνει μικρές τάσεις.

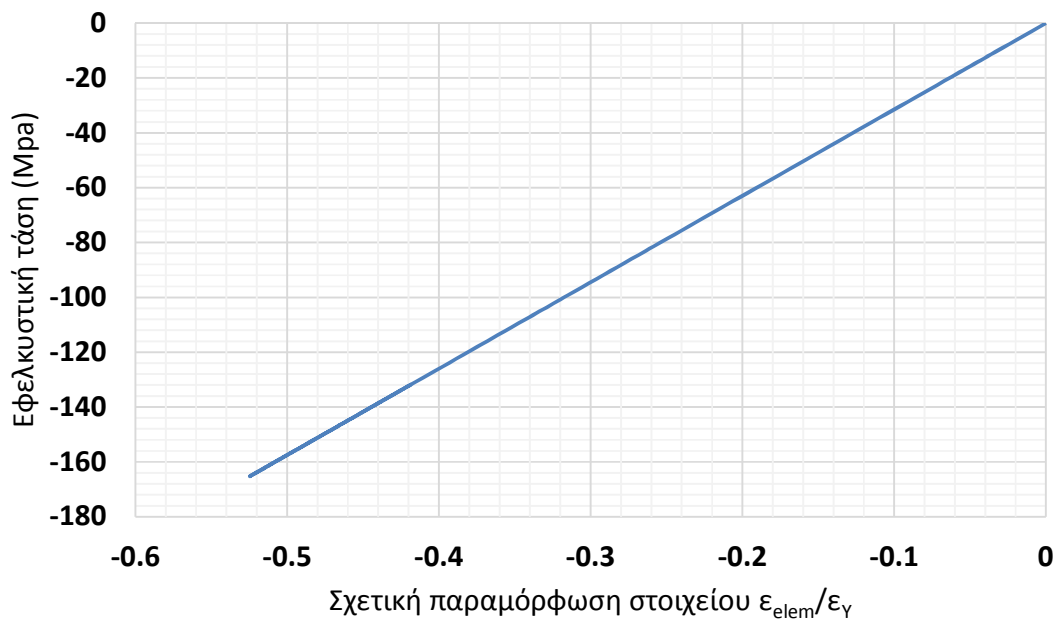
✚ Εφελκυσμένα δομικά στοιχεία σε sagging

Δομικό στοιχείο 12 (ανθεκτική γωνία)



Σχήμα 5.16 Η καμπύλη φόρτισης έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF σε sagging του κώδικα.

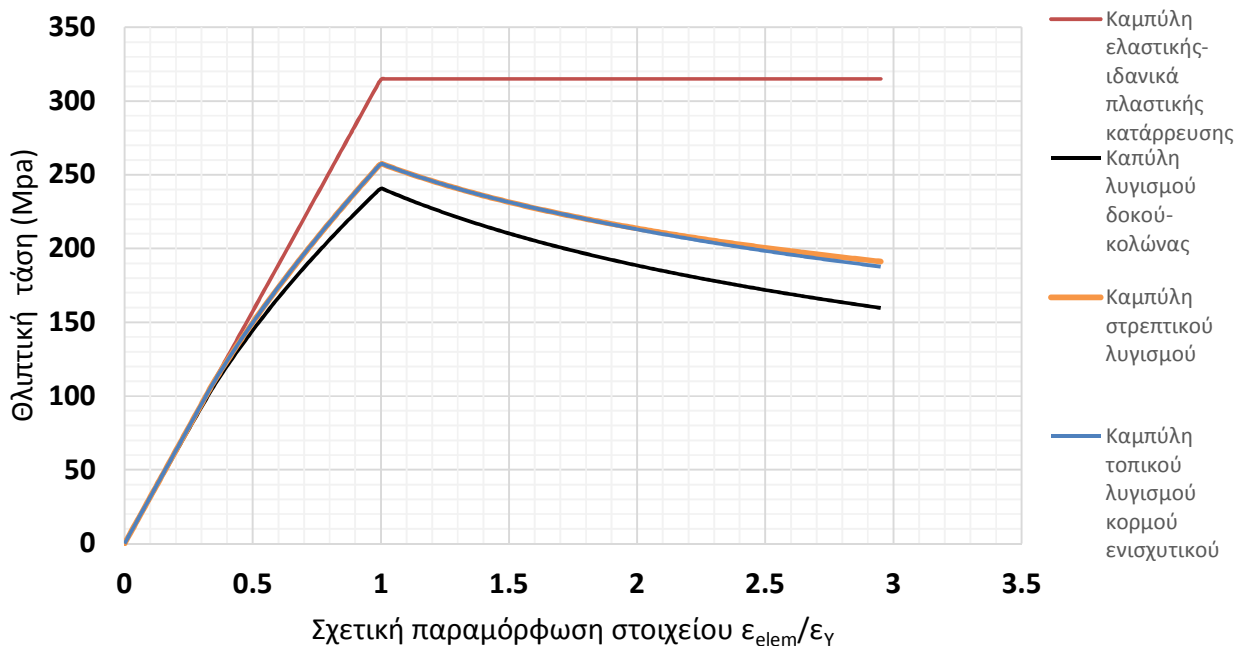
Δομικό στοιχείο 43 (ενισχυτικό στοιχείο)



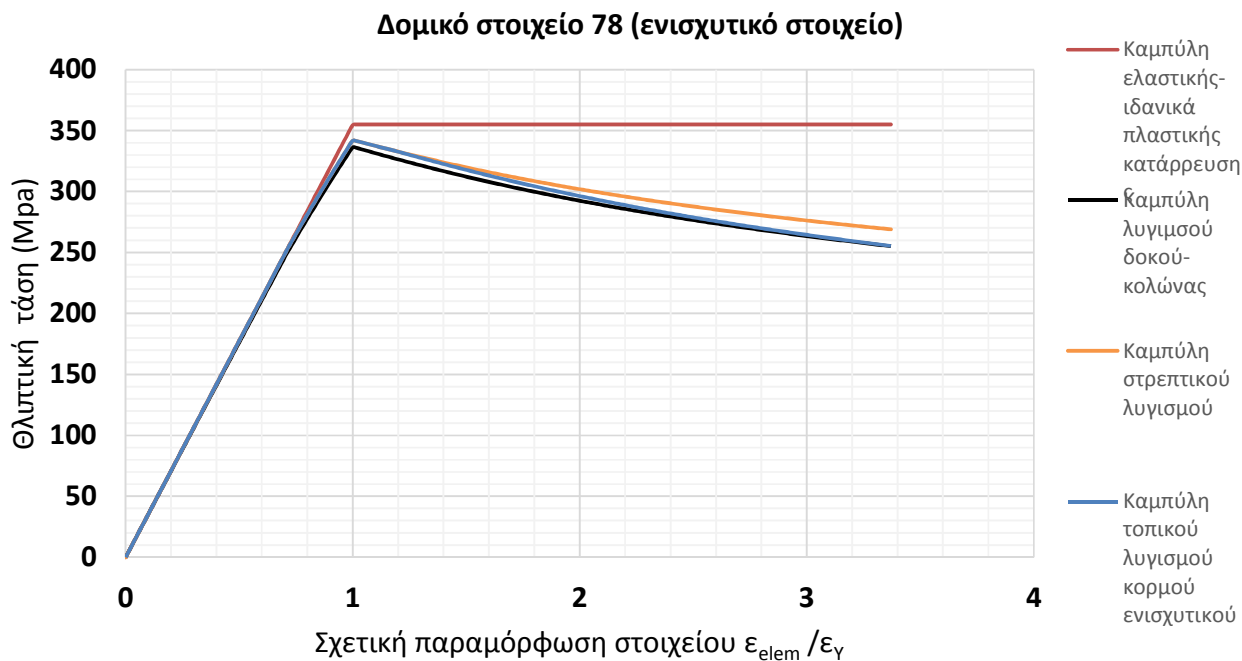
Σχήμα 5.17 Η καμπύλη φόρτισης έχει σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF σε sagging του κώδικα. Το στοιχείο καταπονείται μόνο στη γραμμική ελαστική περιοχή.

🚧 Θλιβόμενα δομικά στοιχεία σε sagging

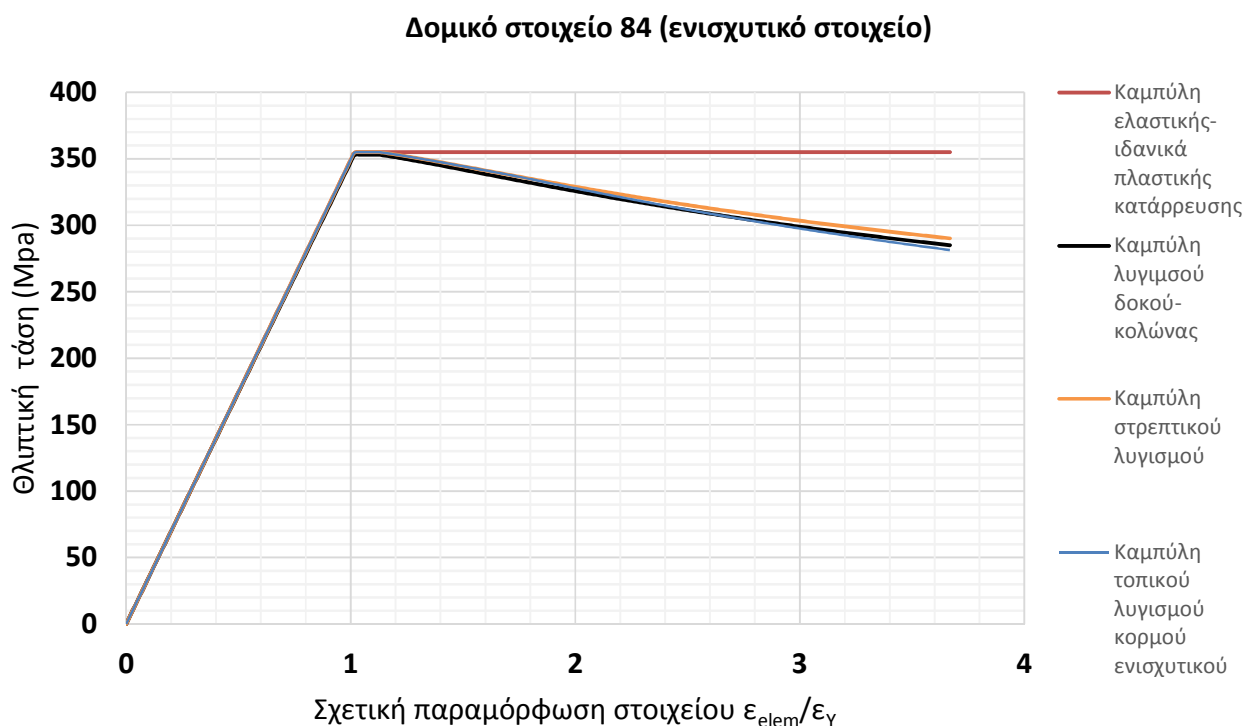
Δομικό στοιχείο 62 (ενισχυτικό στοιχείο)



Σχήμα 5.18 Οι καμπύλες φόρτισης έχουν σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χF σε sagging του κώδικα. Η κατάρρευση του στοιχείου σημειώνεται πολύ πριν από την τάση διαρροής του υλικού, γεγονός που εξηγείται λόγω του λεπτού πάχους συνεργαζόμενου ελάσματος.



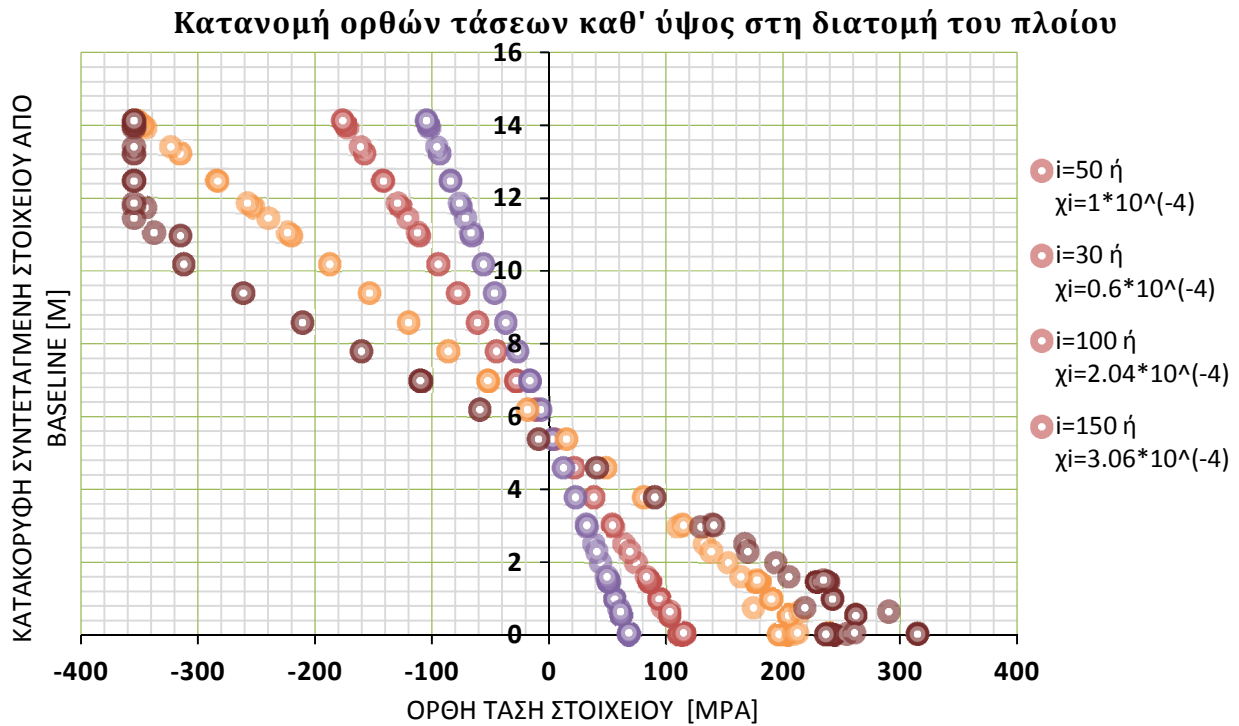
Σχήμα 5.19 Οι καμπύλες φόρτισης έχουν σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χ_F σε sagging του κώδικα. Η τάση κατάρρευσης του στοιχείου προσεγγίζει την τάση διαρροής του.



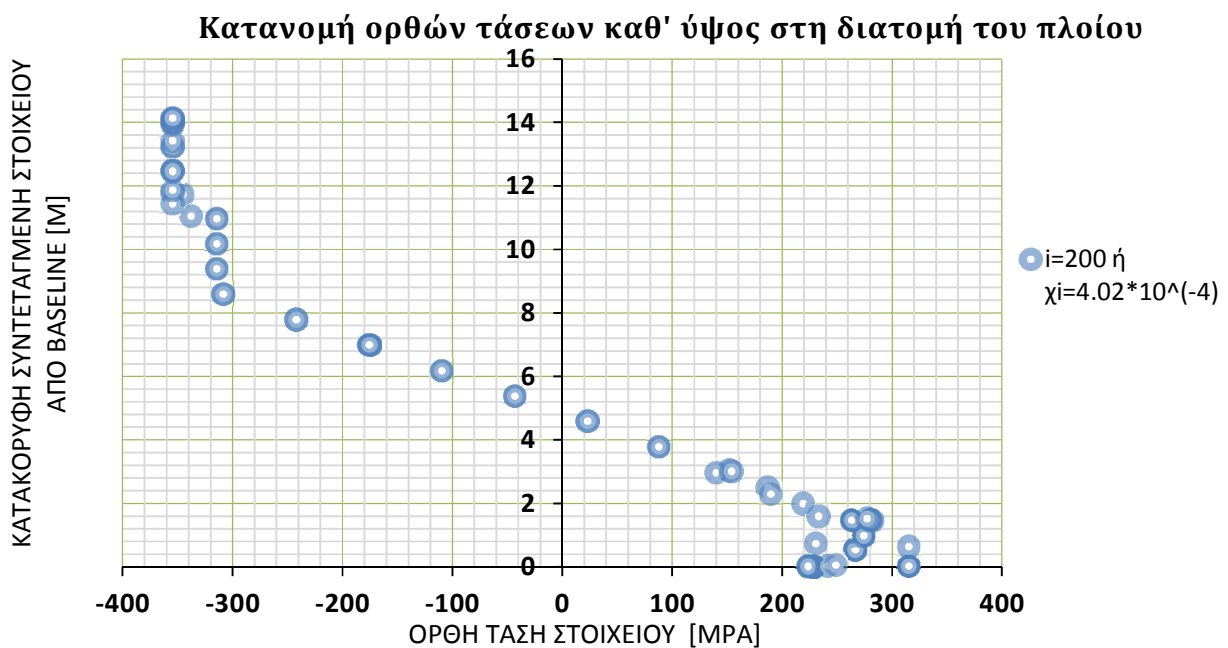
Σχήμα 5.20 Οι καμπύλες φόρτισης έχουν σχεδιαστεί μέχρι την σχετική παραμόρφωση του στοιχείου στην τελική καμπυλότητα χ_F σε sagging του κώδικα. Στο ενισχυτικό στοιχείο παρατηρείται πρώτα διαρροή υλικού και στη συνέχεια κατάρρευση με λυγισμό δοκού-κολώνας. Αυτό εξηγείται λόγω του μεγάλου πάχους συνεργαζόμενου ελάσματος.

5.5.13 Παρουσίαση της καθ' ύψος κατανομής των ορθών τάσεων για επιλεγμένα βήματα i που αντιστοιχούν σε καμπυλότητα χ_i

❖ Κατάσταση hogging

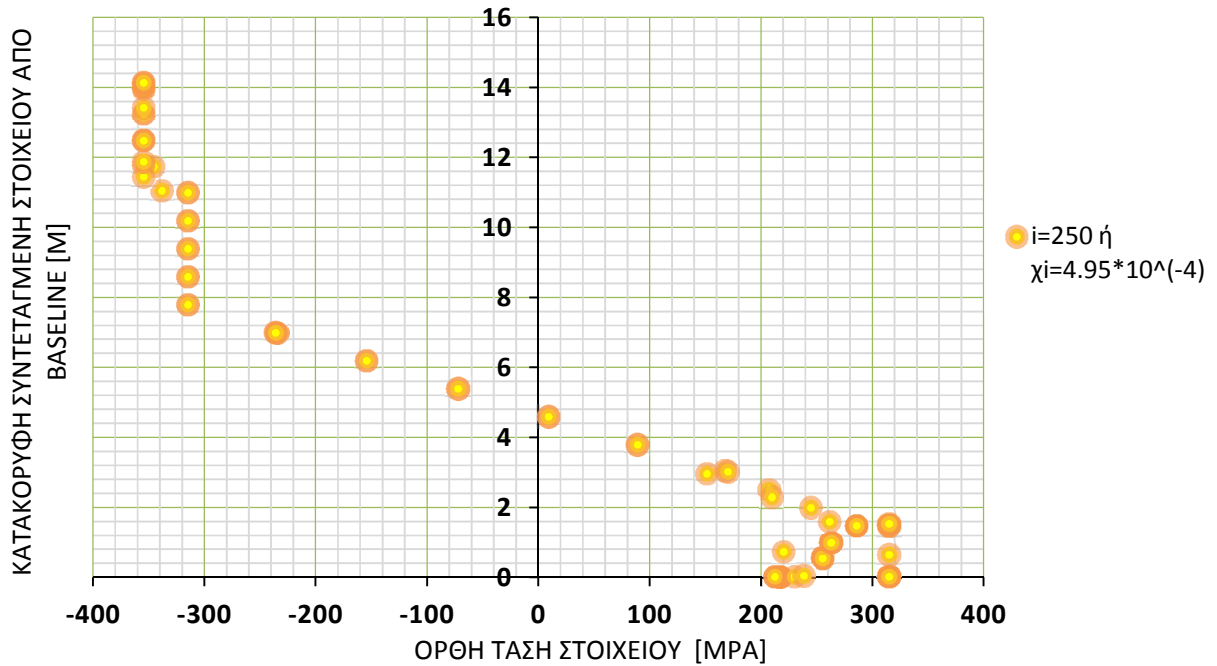


Σχήμα 5.21 Όπως διαπιστώνεται από το παραπάνω σχήμα, για μικρές καμπυλότητες οι κατανομές είναι γραμμικές λόγω της γραμμικής ελαστικής περιοχής. Οι μετέπειτα κατανομές χάνουν σταδιακά αυτή τη γραμμικότητα στα άκρα τους, καθώς κάποια στοιχεία παραμορφώνονται πλαστικά λόγω διαρροής ή λυγισμού.



Σχήμα 5.22 Παρατηρείται σημαντική αύξηση των τάσεων με έντονη διαρροή υλικού & λυγισμό.

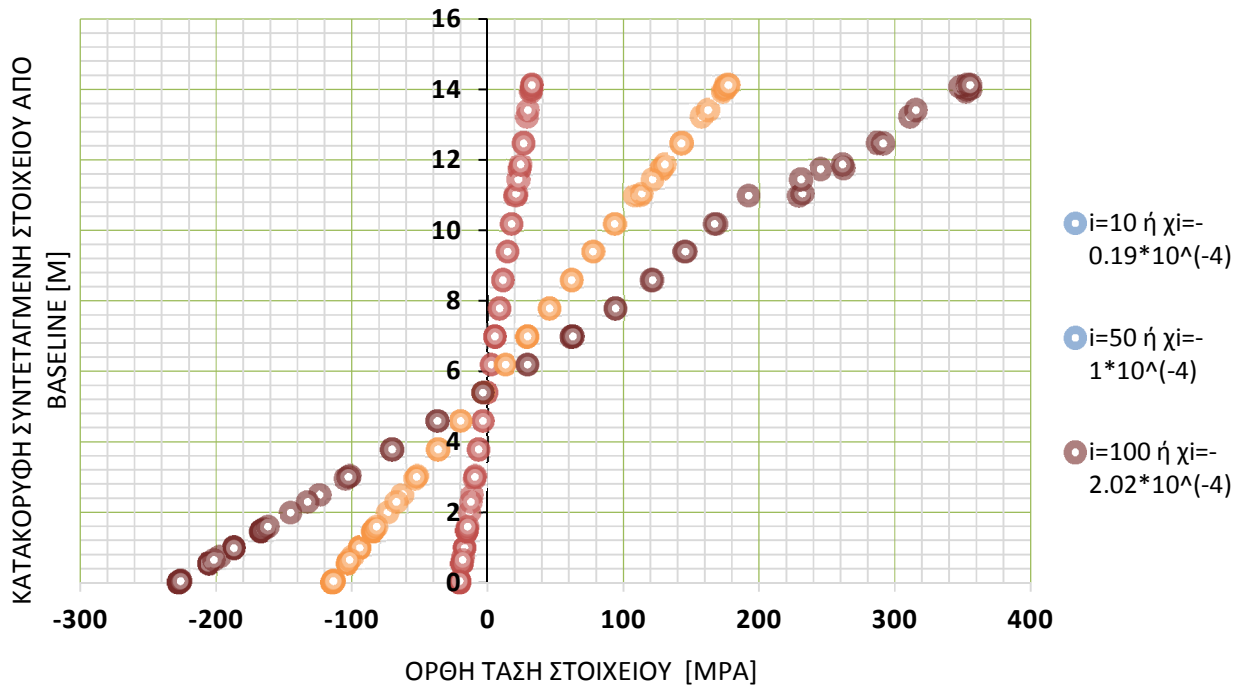
Κατανομή ορθών τάσεων καθ' ύψος στη διατομή του πλοίου



Σχήμα 5.23 Κατανομή ορθών τάσεων σε καμπυλότητα που έχει επέλθει η κατάρρευση της τομής.

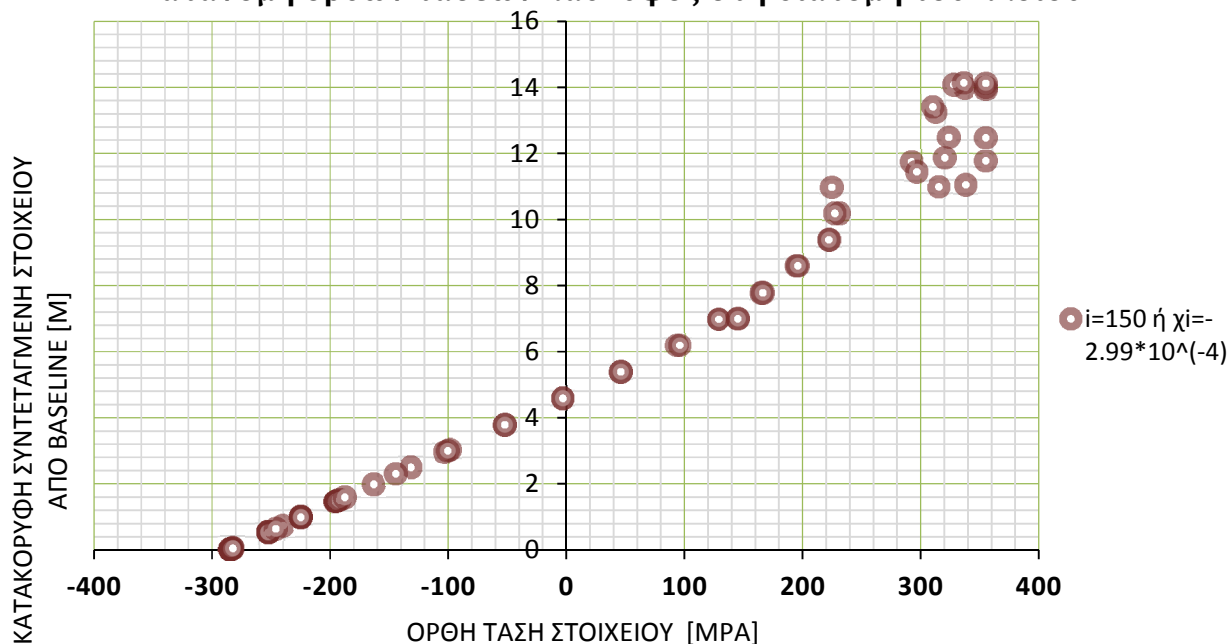
❖ Κατάσταση sagging

Κατανομή ορθών τάσεων καθ' ύψος στη διατομή του πλοίου



Σχήμα 5.24 Κατανομή ορθών τάσεων στη διατομή του πλοίου για $i=30, 50$ & 100 .

Κατανομή ορθών τάσεων καθ' ύψος στη διατομή του πλοίου



Σχήμα 5.25 Κατανομή ορθών τάσεων στη διατομή του πλοίου για $i=150$. Η κατανομή αντιπροσωπεύει καμπυλότητα μετά την κατάρρευση της διατομής. Οι ανθεκτικές γωνίες αστοχούν με ελαστο-πλαστική κατάρρευση, ενώ τα ενισχυτικά στοιχεία και εγκάρσια ενισχυμένα ελάσματα με ελαστο-πλαστικό λυγισμό. Στις περιοχές κάτω του Ο.Α. δεν προλαβαίνουν να αναπτυχθούν πλαστικές παραμορφώσεις, ως εκ τούτου η κατανομή των τάσεων στην εφελκόμενη πλευρά είναι γραμμική κατά την κατάρρευση σε sagging.

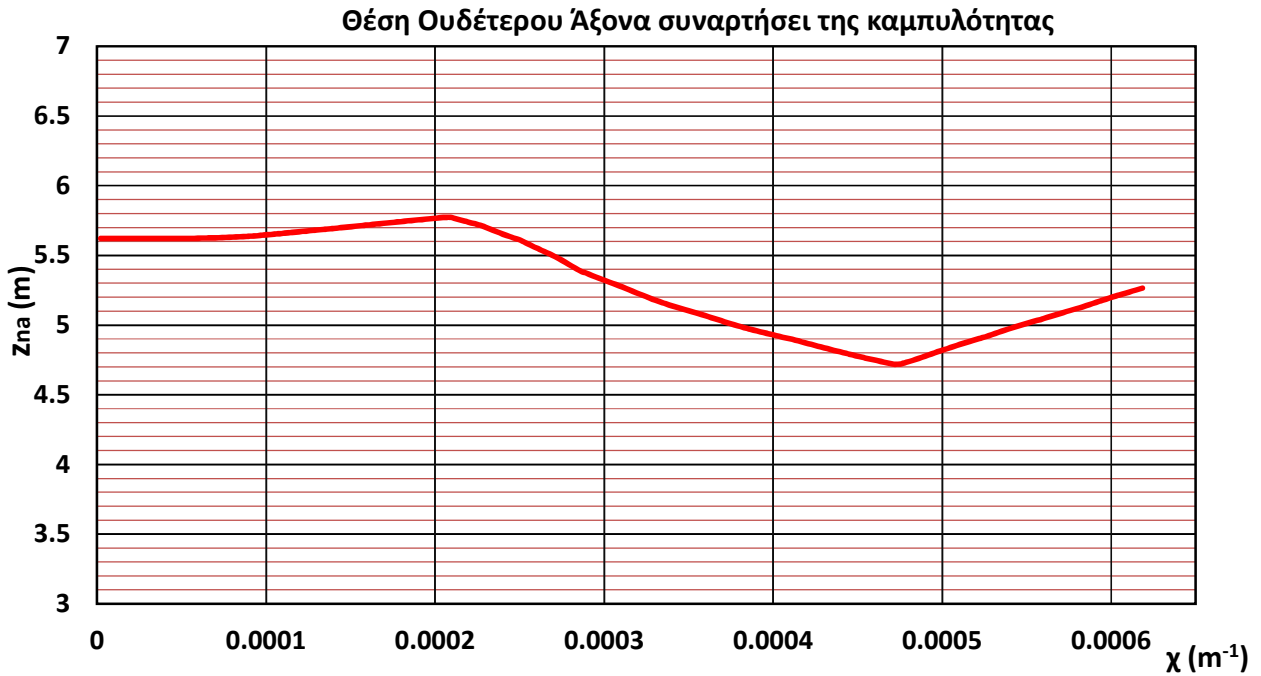
5.5.14 Κατακόρυφη μετατόπιση Ουδέτερου Άξονα συναρτήσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας χ

▪ Κατάσταση hogging

Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 5.26, μέχρι την καμπυλότητα $0.58 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ η κατακόρυφη θέση του Ο.Α. z_{NA} παραμένει σταθερή (Ελαστικός Ο.Α.) και ίση με **5.622 m**¹². Αυτό οφείλεται στο ότι οι αξονικές παραμορφώσεις μέχρι αυτή την καμπυλότητα είναι ελαστικές. Μετά την καμπυλότητα αυτή ο Ο.Α. μετακινείται συνεχώς προς το κατάστρωμα μέχρι την καμπυλότητα $2.09 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ($z_{NA}=5.773 \text{ m}$), διότι οι περιοχές κοντά στον πυθμένα έχουν υποστεί λυγισμό και άρα παραλαμβάνουν μικρότερες τάσεις. Στην καμπυλότητα $2.09 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ κάποια δομικά στοιχεία του καταστρώματος φτάνουν την τάση διαρροής του υλικού, οπότε δεν μπορούν να αντέξουν μεγαλύτερες τάσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μετακίνηση του Ο.Α. προς τον πυθμένα μέχρι την καμπυλότητα $4.73 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ ($z_{NA}=4.719 \text{ m}$). Μετά την καμπυλότητα αυτή, όπου οι περιοχές του καταστρώματος και του πυθμένα έχουν αστοχήσει από λυγισμό και διαρροή,

¹² Η θέση του Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα είναι διαφορετική από αυτή που υπολογίστηκε στο Κεφ. 4 για το λόγο ότι η προσέγγιση του εμβαδού των στοιχείων και της κατανομής του στη Μέση Τομή στα επιμέρους στοιχεία είναι ελάχιστα διαφορετικά στους δύο υπολογισμούς.

ο Ο.Α. μετακινείται για μικρό διάστημα προς τα πάνω μέχρι που η διατομή καταρρέει ($\sim 4.75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ με $z_{NA}=4.760 \text{ m}$).



Σχήμα 5.26 Μετατόπιση Ο.Α. για κατάσταση hogging



Σχήμα 5.27 Μετατόπιση Ο.Α. για κατάσταση sagging

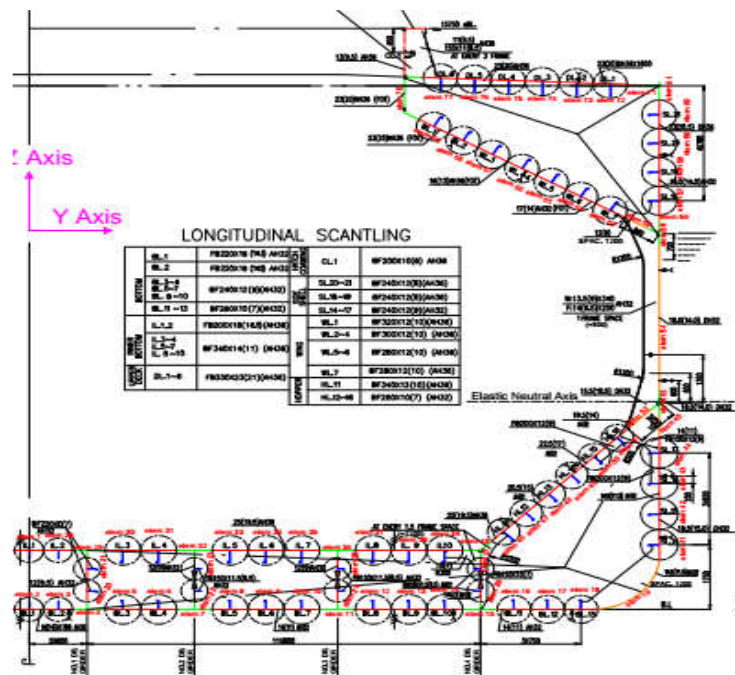
▪ **Κατάσταση sagging**

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω διάγραμμα, μέχρι την καμπυλότητα $0.98 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ η κατακόρυφη θέση του Ο.Α. z_{NA} παραμένει σταθερή (Ελαστικός Ο.Α.) και ίση με **5.622 m**. Μετά την καμπυλότητα αυτή ο Ο.Α. μετακινείται συνεχώς προς τον πυθμένα μέχρι την τελική κατάρρευση της διατομής ($\sim -2.92 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ με $z_{NA}=4.735 \text{ m}$) γεγονός που οφείλεται στις συνεχώς αυξανόμενες θλιπτικές τάσεις άνω του Ο.Α. αναγκάζοντας τον Ο.Α. να μειώσει το εμβαδό της εφελκυόμενης επιφάνειας (κάτω του Ο.Α.) προκειμένου να επέλθει η τελική ισορροπία των δυνάμεων. Παρατηρείται μάλιστα ότι περίπου μέχρι την καμπυλότητα $2.00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ η πτώση του Ο.Α. γίνεται με «αργούς ρυθμούς» (μικρή κλίση), ενώ μετέπειτα παρουσιάζεται η ραγδαία πτώση του προς τον πυθμένα λόγω του ότι πολλά στοιχεία άνω του Ο.Α. καταρρέουν με ελαστο-πλαστικό λυγισμό.

5.6 Εφαρμογή επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk-Carrier Μονού Τοιχώματος

5.6.1 Βήμα 1 & 2 – Υποδιαίρεση της εγκάρσιας τομής σε δομικά στοιχεία & αναλυτική μοντελοποίηση

Ακολουθείται η διαδικασία που εφαρμόστηκε για το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η υποδιαίρεση της μισής μέσης τομής του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος σε δομικά στοιχεία σύμφωνα με το Παράρτημα Β'. Τα δομικά στοιχεία αριθμούνται από το 1-77. Τα δομικά στοιχεία 1-2 ως μη συμμετρικά λαμβάνονται μόνο μία φορά υπόψη στην απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο, ενώ τα στοιχεία 3-77 εις διπλούν. Το παρακάτω Σχήμα (5.28) παρουσιάζεται σε μεγαλύτερη ανάλυση (κλίμακα 1:100) στο Παράρτημα Η'.



Σχήμα 5.28 Υποδιαίρεση της διατομής του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος σε δομικά στοιχεία.

Τα συμμετρικά δομικά στοιχεία των στοιχείων 3-77 ως προς τη Centerline, τα οποία είναι τα 78-152 και έχουν αντίθετα y (δηλ. -) από τα 3-77, παραλείπονται από τον πίνακα διότι ο Ο.Α. της κάμψης είναι οριζόντιος // στον άξονα Y του πλοίου και άρα η μονοαξονική τους παραμόρφωση ϵ είναι η ίδια με των 3-77. Οπότε αρκεί να ληφθεί η συνεισφορά των στοιχείων 3-77 δύο φορές. Στη βεβλαμμένη & ασύμμετρης βλάβης κατάσταση όμως δίνονται και τα στοιχεία 78-152 σαν είσοδος στον κώδικα (ίδιες τιμές κελιών με τα συμμετρικά & αρνητικά y), καθώς λόγω του κεκλιμένου πλέον Ο.Α. ο οποίος σε κάθε βήμα μετακινείται κατακόρυφα και στρέφεται, οι παραμορφώσεις τους σε σχέση με των συμμετρικών τους είναι διαφορετικές (βλ. Κεφάλαιο 6).

Πίνακας 5.11 Γενικευμένος Πίνακας (αρχείο [Datamet.xlsx](#)) αναλυτικών χαρακτηριστικών για όλα τα δομικά στοιχεία της 1/2 Μέσης Τομής του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος.

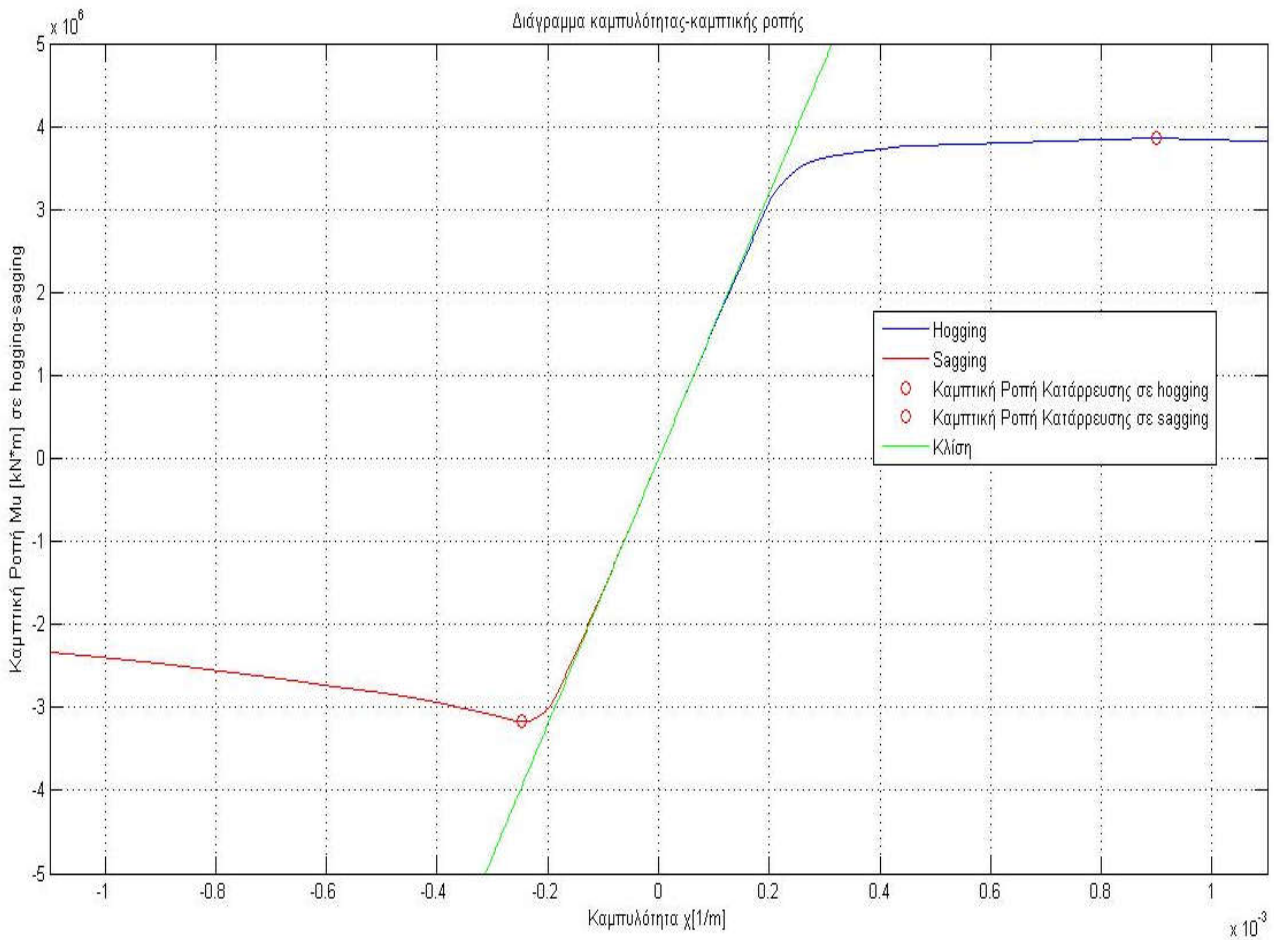
Number of element [Half section]	Type of element	Net Area of plate: A _{p-n50}	Plate's Yield stress: Re _{Hp}	Net Area of stiffener: A _{s-n50}	Stiffener's yield stress: Re _{Hs}	Distance of the element's centre of gravity from the base line of vessel : z _{elem}	Equivalent net thickness of plate: t _{p-n50} (only for stiffener elem & stiff. plate elements)	Element's equivalent width: s (only for stiffener elem & stiff. plate elements)	Vertical distance of stiffener's centre of gravity from its bottom: cg_z_stiff	Moment of inertia through its centroid coordinate y-axis: I _{y-stiff}	Thickness of stiffener's web: tw	Height of stiffener's web: hw	Width of stiffener's flange: bf	Thickness of stiffener's flange: tf	Unsupported length: L	Type of stiffener	Total area of element A-n50	Distance of the element's centre of gravity from the centerline of vessel: y _{elem}
-	-	cm ²	N/mm ²	cm ²	N/mm ²	m	mm	m	mm	cm ⁴	mm	mm	mm	mm	m	-	cm ²	m
1	Stiffener element	144.63	355.00	34.50	355.00	1.584	22.25	0.65	100.00	1150.00	17.25	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	179.13	0.002
2	Stiffener element	97.50	315.00	33.55	315.00	0.026	15.00	0.65	110.00	1353.18	15.25	220.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	131.05	0.002
3	Stiffener element	95.38	315.00	33.55	315.00	0.026	14.67	0.65	110.00	1353.18	15.25	220.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	128.93	0.652
4	Hard Corner	112.13	315.00	0.00	0.00	0.015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	112.13	1.330
5	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	2.095
6	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	2.895
7	Hard Corner	121.00	315.00	0.00	0.00	0.015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	121.00	3.730
8	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	4.495
9	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	5.295
10	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	6.095
11	Hard Corner	121.00	315.00	0.00	0.00	0.015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	121.00	6.930
12	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	7.695
13	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	8.495
14	Stiffener element	100.00	315.00	33.14	315.00	0.032	12.50	0.80	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	133.14	9.295
15	Hard Corner	121.88	315.00	0.00	0.00	0.015	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	121.88	10.130
16	Stiffener element	93.75	315.00	31.49	315.00	0.039	12.50	0.75	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	125.24	10.843
17	Stiffener element	93.75	315.00	31.49	315.00	0.039	12.50	0.75	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	125.24	11.593
18	Stiffener element	96.63	315.00	31.49	315.00	0.039	12.88	0.75	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	1.200	Bulb flat	128.12	12.343
19	Hard Corner	269.88	315.00	0.00	0.00	0.380	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	269.88	13.446
20	Stiffener element	64.50	315.00	25.01	315.00	0.500	10.75	0.60	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	89.51	1.338
21	Stiffener element	64.50	315.00	25.01	315.00	1.100	10.75	0.60	135.03	1220.64	8.50	199.00	39.50	20.50	2.400	Bulb flat	89.51	1.338
22	Stiffener element	63.00	315.00	13.60	315.00	0.492	10.50	0.60	68.00	209.62	10.00	136.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	76.60	3.714
23	Stiffener element	63.00	315.00	13.60	315.00	1.092	10.50	0.60	68.00	209.62	10.00	136.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	76.60	3.714
24	Stiffener element	63.00	315.00	13.60	315.00	0.492	10.50	0.60	68.00	209.62	10.00	136.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	76.60	6.914
25	Stiffener element	63.00	315.00	13.60	315.00	1.092	10.50	0.60	68.00	209.62	10.00	136.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	76.60	6.914
26	Stiffener element	75.00	315.00	13.60	315.00	0.500	12.50	0.60	68.00	209.62	10.00	136.00	0.00	0.00	1.200	Flat bar	88.60	10.088
27	Stiffener element	75.00	315.00	13.60	315.00	1.100	12.50	0.60	68.00	209.62	10.00	136.00	0.00	0.00	1.200	Flat bar	88.60	10.088
28	Stiffener element	144.63	355.00	34.50	355.00	1.584	22.25	0.65	100.00	1150.00	17.25	200.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	179.13	0.652
29	Hard Corner	193.94	350.57	0.00	0.00	1.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	193.94	1.330
30	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	2.094
31	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	2.894
32	Hard Corner	199.00	350.78	0.00	0.00	1.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	199.00	3.698
33	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	4.494
34	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	5.294
35	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	6.094
36	Hard Corner	199.00	350.78	0.00	0.00	1.600	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	199.00	6.898
37	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	7.694
38	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	2.400	Bulb flat	236.85	8.494
39	Stiffener element	178.00	355.00	58.85	355.00	1.555	22.25	0.80	212.42	6862.30	12.50	306.00	61.50	33.50	1.200	Bulb flat	236.85	9.294

40	Hard Corner	194.10	349.85	0.00	0.00	1.648	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	194.10	10.055
41	Stiffener element	115.43	315.00	33.14	315.00	1.750	13.91	0.83	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	1.200	Bulb flat	148.56	14.076
42	Stiffener element	136.95	315.00	33.14	315.00	2.580	16.50	0.83	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	2.400	Bulb flat	170.09	14.076
43	Stiffener element	135.88	315.00	33.14	315.00	3.410	16.37	0.83	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	1.200	Bulb flat	169.01	14.076
44	Stiffener element	132.80	315.00	33.14	315.00	4.240	16.00	0.83	145.79	1912.98	10.50	216.00	44.50	23.50	1.200	Bulb flat	165.94	14.076
45	Stiffened plate element	99.20	315.00	0.00	0.00	4.970	16.00	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.620	-	99.20	14.105
46	Stiffener element	152.10	346.60	55.46	355.00	2.071	21.13	0.72	215.04	6470.60	11.50	306.00	60.50	33.50	1.200	Bulb flat	207.56	10.639
47	Stiffener element	127.80	315.00	31.49	315.00	2.596	17.75	0.72	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	159.29	11.133
48	Stiffener element	127.80	315.00	31.49	315.00	3.106	17.75	0.72	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	159.29	11.643
49	Stiffener element	132.70	315.00	31.49	315.00	3.616	18.43	0.72	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	2.400	Bulb flat	164.19	12.153
50	Stiffener element	142.20	315.00	31.49	315.00	4.126	19.75	0.72	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	1.200	Bulb flat	173.69	12.663
51	Stiffener element	129.00	315.00	31.49	315.00	4.636	17.92	0.72	164.80	2147.52	8.50	234.00	45.50	25.50	1.200	Bulb flat	160.49	13.173
52	Stiffened plate element	120.60	315.00	0.00	0.00	5.170	16.75	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.720	-	120.60	13.654
53	Hard Corner	145.95	315.00	0.00	0.00	5.576	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	145.95	14.074
54	Stiffened plate element	630.40	315.00	0.00	0.00	7.892	16.00	0.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.940	-	630.40	14.105
55	Hard Corner	150.45	315.00	0.00	0.00	10.204	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	150.45	14.059
56	Stiffened plate element	29.45	315.00	0.00	0.00	10.597	15.50	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.190	-	29.45	14.105
57	Stiffener element	124.80	315.00	34.56	355.00	11.079	16.00	0.78	145.50	1998.17	11.00	216.00	45.00	24.00	1.200	Bulb flat	159.36	14.073
58	Stiffener element	124.80	315.00	34.56	355.00	11.859	16.00	0.78	145.50	1998.17	11.00	216.00	45.00	24.00	2.400	Bulb flat	159.36	14.073
59	Stiffener element	165.63	352.30	34.56	355.00	12.641	21.23	0.78	145.50	1998.17	11.00	216.00	45.00	24.00	2.400	Bulb flat	200.19	14.083
60	Stiffener element	169.65	355.00	34.56	355.00	13.421	21.75	0.78	145.50	1998.17	11.00	216.00	45.00	24.00	2.400	Bulb flat	204.21	14.083
61	Hard Corner	183.98	355.00	0.00	0.00	14.125	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	183.98	14.027
62	Stiffened plate element	89.90	315.00	0.00	0.00	10.489	15.50	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.580	-	89.90	13.581
63	Stiffener element	117.80	315.00	42.00	355.00	10.852	15.50	0.76	173.60	3323.53	11.00	252.00	51.00	28.00	1.200	Bulb flat	159.80	13.020
64	Stiffener element	117.80	315.00	42.00	355.00	11.232	15.50	0.76	173.60	3323.53	11.00	252.00	51.00	28.00	2.400	Bulb flat	159.80	12.342
65	Stiffener element	117.80	315.00	42.00	355.00	11.612	15.50	0.76	173.60	3323.53	11.00	252.00	51.00	28.00	2.400	Bulb flat	159.80	11.684
66	Stiffener element	112.85	340.44	45.90	355.00	11.992	14.85	0.76	187.94	4174.95	11.00	270.00	54.00	30.00	2.400	Bulb flat	158.75	11.026
67	Stiffener element	110.20	355.00	45.90	355.00	12.372	14.50	0.76	187.94	4174.95	11.00	270.00	54.00	30.00	2.400	Bulb flat	156.10	10.368
68	Stiffener element	125.25	355.00	45.90	355.00	12.752	16.48	0.76	187.94	4174.95	11.00	270.00	54.00	30.00	2.400	Bulb flat	171.15	9.710
69	Stiffener element	163.40	355.00	49.92	355.00	13.132	21.50	0.76	202.46	5168.58	11.00	288.00	57.00	32.00	2.400	Bulb flat	213.32	9.052
70	Hard Corner	378.40	355.00	0.00	0.00	13.953	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	-	378.40	8.473
71	Stiffened plate element	77.40	355.00	0.00	0.00	14.233	21.50	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.36	-	77.40	13.558
72	Stiffener element	163.40	355.00	62.37	355.00	14.200	21.50	0.76	148.50	4584.66	21.00	297.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	225.77	13.001
73	Stiffener element	163.40	355.00	62.37	355.00	14.233	21.50	0.76	148.50	4584.66	21.00	297.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	225.77	12.242
74	Stiffener element	163.40	355.00	62.37	355.00	14.266	21.50	0.76	148.50	4584.66	21.00	297.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	225.77	11.483
75	Stiffener element	163.40	355.00	62.37	355.00	14.299	21.50	0.76	148.50	4584.66	21.00	297.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	225.77	10.723
76	Stiffener element	163.40	355.00	62.37	355.00	14.333	21.50	0.76	148.50	4584.66	21.00	297.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	225.77	9.964
77	Stiffener element	163.40	355.00	62.37	355.00	14.366	21.50	0.76	148.50	4584.66	21.00	297.00	0.00	0.00	2.400	Flat bar	225.77	9.205

5.6.2 Βήμα 4-7

Ο κώδικας **Ultimate_Strength.m** (βλ. Παράρτημα Δ΄) που είναι γραμμένος σε Matlab με δεδομένον τον Πίνακα 5.11 (σε Excel) για τα δομικά στοιχεία διεκπεραιώνει τον υπολογισμό μέγιστης αντοχής της τομής του πλοίου σε hogging/sagging.

5.6.3 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω του κώδικα Ultimate_Strength.m

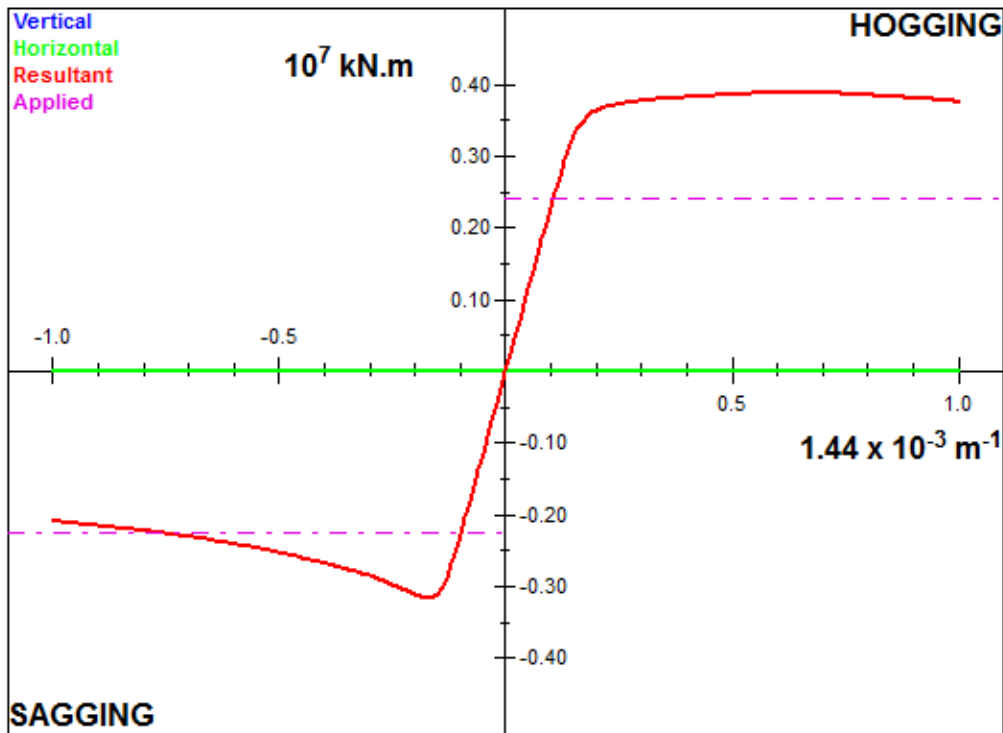


Σχήμα 5.29 Διάγραμμα καμπτικής ροπής M – καμπυλότητας χ . Με κόκκινους κύκλους σημειώνεται η καμπτική ροπή κατάρρευσης σε hogging/sagging. Η πράσινη γραμμή δείχνει την απόκριση της κατασκευής στην ελαστική περιοχή και αντιπροσωπεύει την ευθεία $E \cdot I_{y-n50}$ η οποία εφάπτεται της καμπύλης M - χ στο $\chi=0$.

Προκύπτουν από τον κώδικα, λοιπόν, τα παρακάτω:

- $M_{U-hog} = 3,857,922 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-hog} = 9.00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{U-sag} = -3,167,284 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-sag} = -2.48 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

5.6.4 Υπολογισμός μέγιστης αντοχής σε κάμψη μέσω του MARS 2000 by BV



Σχήμα 5.30 Διάγραμμα Μ-χ του προγράμματος MARS 2000 του BV

Όπως φαίνεται στο σχήμα η οριζόντια συνιστώσα της καμπτικής ροπής είναι μηδέν λόγω της συμμετρίας της Μέσης Τομής του Bulk Carrier ως προς τη Centerline.

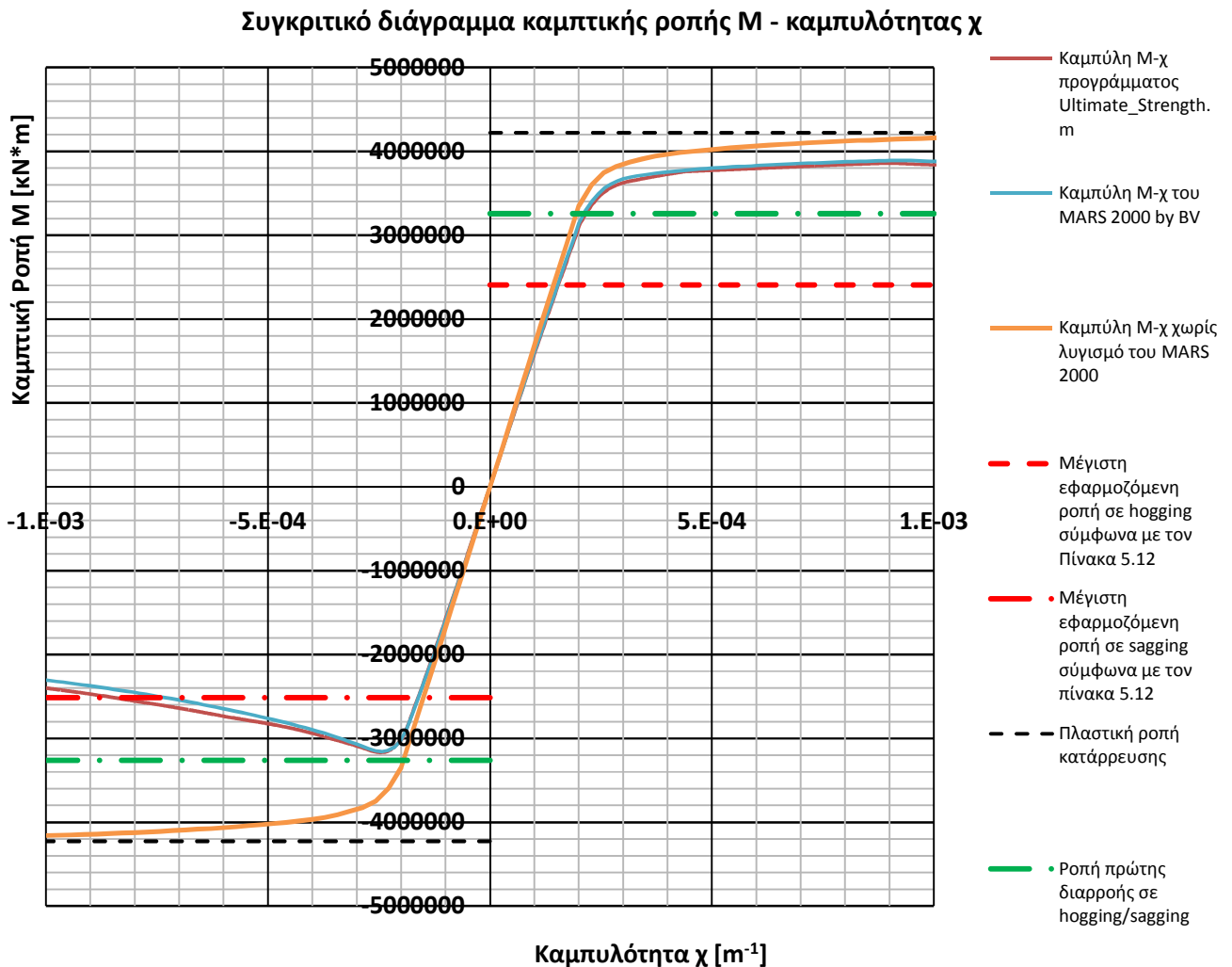
Από το λογισμικό MARS 2000 λοιπόν προκύπτουν τα παρακάτω:

- $M_{U-hog} = 3,892,383 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-hog} = 9.20 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{U-sag} = -3,360,019 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{U-sag} = -2.44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

5.6.5 Συνολική παρουσίαση αποτελεσμάτων

	(1) Ultimate_Strength.m	(2) MARS 2000	Απόκλιση υπολογισμού (1) από (2)
M_{U-hog}	3,857,922	3,892,383	-0.89 %
M_{U-sag}	-3,167,284	-3,158,198	0.29 %
χ_{U-hog}	$9.00 \cdot 10^{-4}$	$9.20 \cdot 10^{-4}$	-2.17 %
χ_{U-sag}	$-2.48 \cdot 10^{-4}$	$-2.44 \cdot 10^{-4}$	1.64 %

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο υπολογισμών είναι μικρές, ειδικά όσον αφορά τη ροπή κατάρρευσης σε hogging/sagging. Αυτές οι διαφορές δεν οφείλονται σε σφάλμα του κώδικα αλλά σε ενδεχόμενη ελάχιστα διαφορετική αναλυτική μοντελοποίηση (input αρχείο) των δομικών στοιχείων. Αυτό αποδεικνύεται στο παρακάτω Σχήμα, όπου η καμπύλη του κώδικα σε σύγκριση με την καμπύλη του προγράμματος MARS 2000 παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά και μικρές αποκλίσεις (βλ. κόκκινη & μπλε καμπύλη). Επιπλέον των δύο καμπυλών που προαναφέρθηκαν, στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται η καμπύλη M-χ του MARS 2000 χωρίς την επίδραση του λυγισμού των δομικών στοιχείων (μόνο της ελαστική-ιδανικά πλαστική κατάρρευση). Μέσω της καμπύλης αυτής (πορτοκαλί) βρίσκεται η ιδανική πλαστική ροπή κατάρρευσης M_p που είναι ίδια (κατά απόλυτη τιμή) για hogging/sagging.



Σχήμα 5.31 Συγκριτικό διάγραμμα M-χ των παραπάνω υπολογισμών

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.31 η μέγιστη αντοχή του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος σε sagging είναι αισθητά μικρότερη από ό,τι σε hogging. Μάλιστα στην κατάσταση hogging προσεγγίζεται η πλαστική ροπή κατάρρευσης της διατομής, γεγονός που οφείλεται στο ότι δεν παρουσιάζεται έντονα το φαινόμενο του λυγισμού κατά το hogging. Έτσι η διατομή καταρρέει σε μεγάλη καμπυλότητα και αφότου έχουν λυγίσει κάποια δομικά στοιχεία στην θλιβόμενη πλευρά. Αντίθετα στο sagging οι τάσεις που αναπτύσσονται στις περιοχές του καταστρώματος είναι καθοριστικές για την κατάρρευση των δομικών στοιχείων εκεί. Η διατομή καταρρέει σε μικρή καμπυλότητα και πιο απότομα σε σχέση με την διατομή του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος. Αυτό οφείλεται στο ότι το Bulk Carrier Διπλό Τοιχώματος διαθέτει πολλές ανθεκτικές γωνίες άνω του Ο.Α. που αστοχούν με ελαστικό-ιδανικά πλαστικό τρόπο γεγονός που εμποδίζει την γρήγορη κατάρρευση της διατομής λόγω λυγισμού πολλών ενισχυτικών στοιχείων (ενισχυτικό-συνεργαζόμενο έλασμα).

Προκειμένου να περιοριστούν τυχόν διαφορές των ροπών κατάρρευσης λόγω διαφορετικής αναλυτικής μοντελοποίησης των δομικών στοιχείων επιλέγεται ο μέσος όρος των δύο παραπάνω υπολογισμών για την εξαγωγή παρακάτω συμπερασμάτων. Έτσι:

$$M_{U-hog} = 3,875,153 \text{ kN} * \text{m} \quad \& \quad M_{U-sag} = -3,162,741 \text{ kN} * \text{m}$$

5.6.6 Δείκτες Αντοχής

Η πλαστική ροπή κατάρρευσης που προκύπτει σύμφωνα με το Σχήμα 5.31 είναι:

$$|M_P| = 4,224,645 \text{ kN} * \text{m}$$

Οι δείκτες αντοχής, πραγματική ροπή κατάρρευσης/πλαστική ροπή κατάρρευσης, που υπολογίζονται παρακάτω, δείχνουν την επίδραση του λυγισμού στη διαμόρφωση της ροπής κατάρρευσης. Όσο μεγαλύτερος ο λόγος είναι, τόσο μικρότερη η επίδραση του λυγισμού.

- $\frac{M_{U-hog}}{M_P} = 0.92$
- $\frac{|M_{U-sag}|}{|M_P|} = 0.75$

Επίσης υπολογίζονται οι δείκτες (M_Y ροπή πρώτης διαρροής):

- $\frac{M_{Y-hog}}{M_P} = 0.77$ και $\frac{M_{Y-sag}}{M_P} = 0.77$
- $\frac{M_{Y-hog}}{M_{U-hog}} = 0.84$ και $\frac{M_{Y-sag}}{M_{U-sag}} = 1.03$

που δείχνουν το απόθεμα αντοχής της διατομής σε hogging μετά την πρώτη διαρροή του καταστρώματος. Ο λόγος 1.03 στην κατάσταση sagging υποδηλώνει ότι η κατάρρευση της διατομής προκύπτει σαν αποτέλεσμα ελαστο-πλαστικού λυγισμού.

5.6.7 Κριτήριο των CSR-H για έλεγχο επάρκειας της επιτευχθείσας μέγιστης αντοχής του άθικτου Bulk Carrier σε κατακόρυφη διαμήκη κάμψη (hogging / sagging)

Όπως έγινε ο έλεγχος για το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος, γίνεται και ο αντίστοιχος για το Bulk Μονού:

Πίνακας 5.12 Σε αυτό τον πίνακα ελέγχεται το κριτήριο $|M_{bend}| \leq |M_{Ultimate}|$ για κάθε κατάσταση

Μονάδες μέτρησης: kN*m	$M_{Ultimate}$	M_{bend}	$ M_{bend} \leq M_{Ultimate} $	$(M_{bend}/M_{Ultimate}) * 100\%$	Condition
Navigation	2,830,824	2,409,251	TRUE	85.11 %	Hogging
	-2,871,089	-2,251,647	TRUE	78.42 %	Sagging
Port	2,830,824	1,053,000	TRUE	37.20 %	Hogging
	-2,871,089	-800,000	TRUE	27.86 %	Sagging
Flooded	3,538,530	2,405,001	TRUE	67.97 %	Hogging
	-2,871,089	-2,511,317	TRUE	87.47 %	Sagging

5.7 Σύγκριση μέγιστης αντοχής των δύο άθικτων Bulk Carriers

Στην κατάσταση hogging τα δύο Bulk Carrier εμφανίζουν σχεδόν όμοια συμπεριφορά με μικρή διαφορά της τάξης του 0.4 %. Αντίθετα στην κατάσταση sagging η μέγιστη αντοχή του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος υπερτερεί κατά **7 %** της αντίστοιχης του Μονού Τοιχώματος. Συγκεκριμένα η διαφορά είναι ~ 0.24 GN*m. Όσον αφορά τους δείκτες αντοχής συμπεραίνεται ότι στο sagging το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος προσεγγίζει περισσότερο την πλαστική ροπή κατάρρευσης, που σημαίνει ότι ο λυγισμός των στοιχείων δεν είναι τόσο έντονος όσο στο Bulk Carrier Μονού. Τέλος, παρατηρείται ότι στην κατάσταση hogging το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στο ελαστο-πλαστικό «κομμάτι» της καμπύλης M-χ σε σύγκριση με το Μονού που παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή στο ελαστικό «κομμάτι».

	Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος
hogging	3,897,418 kN*m	3,875,153 kN*m
sagging	-3,401,572 kN*m	-3,162,741 kN*m

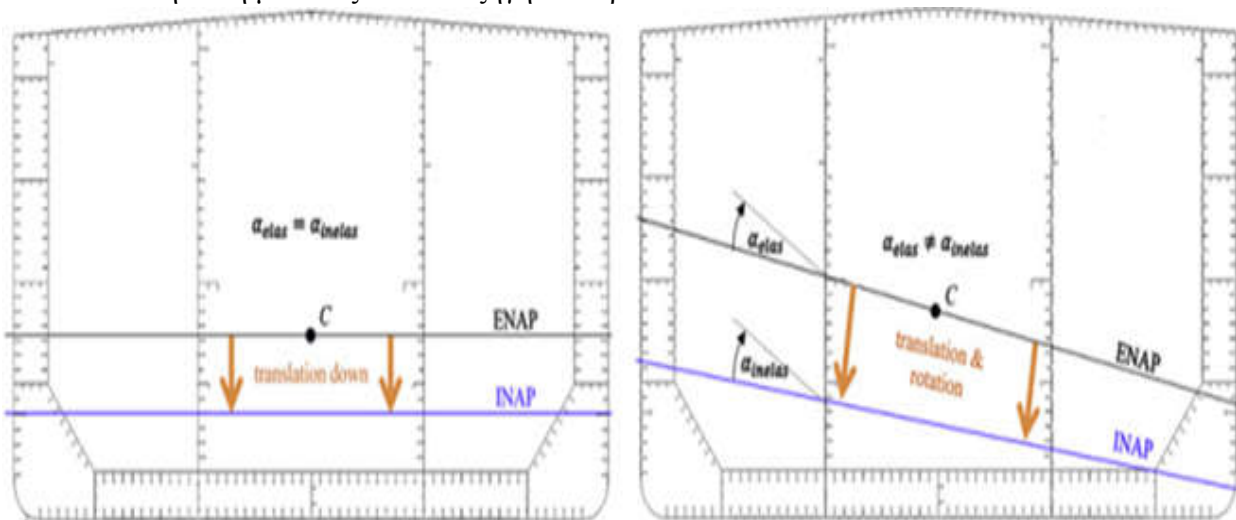
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΡΟΠΟΠΟΗΜΕΝΗΣ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ-ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΒΕΒΛΑΜΜΕΝΟΥ BULK-CARRIER ΜΟΝΟΥ & ΔΙΠΛΟΥ ΤΟΙΧΩΜΑΤΟΣ

6.1 Εισαγωγή κεφαλαίου

Σε αυτό το Κεφάλαιο εξετάζεται η μέγιστη αντοχή των δύο Bulk Carriers σε βεβλαμμένη κατάσταση (damaged condition), ή αλλιώς η εναπομένουσα αντοχή (Residual Strength). Συγκεκριμένα για κάθε Bulk Carrier θεωρούνται 3 σενάρια βλάβης της κατασκευής τους. Τα δύο πρώτα σενάρια αφορούν την προσάραξη (grounding) του Bulk Carrier και τη βλάβη τμήματος του πυθμένα του πλοίου. Στο πρώτο σενάριο προσάραξης η βλάβη είναι συμμετρική ως προς τη Centerline του πλοίου, ενώ στο δεύτερο ασύμμετρη. Το τρίτο σενάριο αφορά την πλευρική σύγκρουση (collision) του Bulk Carrier και την ασύμμετρη βλάβη του εξωτερικού του περιβλήματος. Οι ιδιαιτερότητες που εισάγονται με τις βλάβες αυτές είναι οι εξής:

- ✚ Μείωση της συνολικής επιφάνειας της διατομής
- ✚ Μετακίνηση του κέντρου βάρους της διατομής
- ✚ Μετατόπιση και στροφή του Ουδέτερου Άξονα (στις ασύμμετρες βλάβες)
- ✚ Μείωση της συνολικής ροπής αδράνειας της διατομής

Για την εύρεση της ροπής κατάρρευσης με την ανάλογη προσαρμογή του Ουδέτερου Άξονα (σε κάθε επαυξητικό βήμα) χρησιμοποιείται η τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος που θα εξηγηθεί παρακάτω.

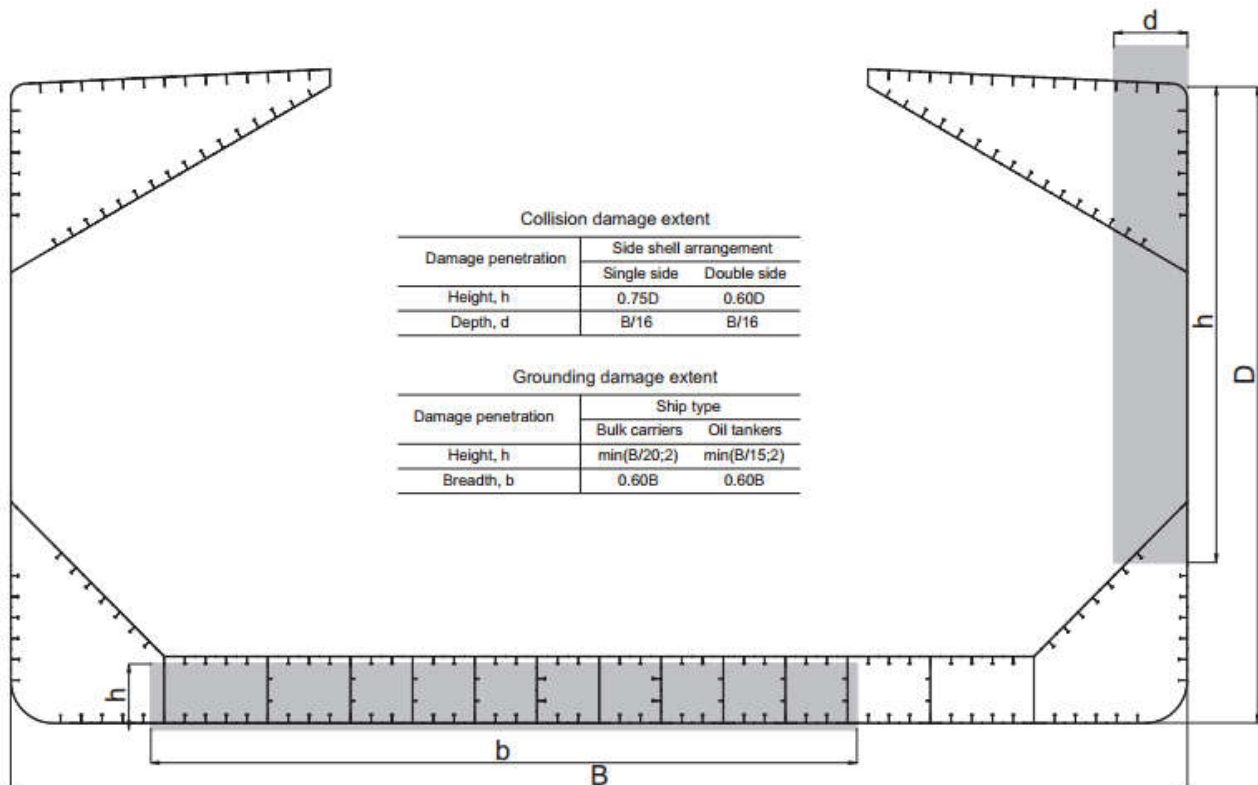


Σχήμα 6.1 Στο αριστερό σχέδιο απεικονίζεται μια διατομή χωρίς γεωμετρική ασυμμετρία στην οποία φαίνεται ο ελαστικός (ENAP) και ο στιγμιαίος ανελαστικός (INAP) ουδέτερος άξονας. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο μετατόπιση του ουδέτερου άξονα. Στο δεξιό σχέδιο απεικονίζεται μια διατομή με γεωμετρική ασυμμετρία στην οποία φαίνεται ο κεκλιμένος ελαστικός ουδέτερος άξονας (ENAP) και ο στιγμιαίος κεκλιμένος ανελαστικός (INAP). Σε αυτή την περίπτωση εκτός από κατακόρυφη μετατόπιση παρουσιάζεται στροφή του ουδέτερου άξονα.

6.2 Τροποποιημένη (Modified) επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος

6.2.1 Βήμα 1 - Υποδιαίρεση της βεβλαμμένης διατομής του πλοίου σε δομικά στοιχεία & ορισμός της περιοχής βλάβης

Η διατομή του Bulk Carrier υποδιαιρείται σε δομικά στοιχεία με τον τρόπο που αυτό έγινε στο Κεφάλαιο 5. Ωστόσο, η περιοχή βλάβης που ορίζεται από τους κανονισμούς του IACS (CSR-H) παύει να συνεισφέρει στην αντοχή της κατασκευής, δηλαδή τα δομικά στοιχεία εντός αυτής της περιοχής δεν παραλαμβάνουν πρωτεύουσες ορθές τάσεις ($\sigma_{elem}=0$).



Σχήμα 6.2 Στο Σχήμα παρουσιάζονται οι περιοχές βλάβης του πλοίου για προσάραξη & σύγκρουση. Η περιοχή βλάβης ορίζεται από την εξωτερική επιφάνεια του πλοίου προς το εσωτερικό του. Συγκεκριμένα ανάλογα με τον τύπο του πλοίου (Bulk Carrier ή Oil Tanker) και το τοίχωμά του (διπλού ή μονού) οι CSR-H προδιαγράφουν την έκταση την βλάβης (b για προσάραξη & h για σύγκρουση) και την εισχώρηση της (h για προσάραξη & d για σύγκρουση) [2].

Παραδοχή

Να σημειωθεί ότι για στις ασύμμετρες βλάβες η διατομή του πλοίου θεωρείται ότι παραμένει όρθια (κάθετη προς την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας), δηλαδή αγνοείται η εγκάρσια κλίση (heeling) του πλοίου λόγω απώλειας ευστάθειας από τη γεωμετρική ασυμμετρία και ενδεχόμενης ασύμμετρης κατάκλυσης με νερό.

6.2.2 Βήμα 2 - Εύρεση νέου κέντρου βάρους $G^{new}(y_G, z_G)$

Για την εύρεση του κέντρου βάρους της βεβλαμμένης διατομής υπολογίζονται οι αποστάσεις y_{elem} και z_{elem} των δομικών στοιχείων από τους άξονες Oz και Oy αντίστοιχα (Σχήμα 6.4). Κατόπιν υπολογίζεται η στατική ροπή επιφάνειας του κάθε άθικτου στοιχείου ως προς τους άξονες Oz και Oy . Η ανωτέρω ροπή ολόκληρης της διατομής μηδενίζεται ως προς κεντροβαρικό άξονα. Το νέο κέντρο βάρους δίνεται από τους παρακάτω τύπους:

$$S_y = \sum_{elem=1}^N z_{elem} A_{elem} \quad \text{όπου } S_y \text{ η στατική ροπή ως προς άξονα } Oy$$

$$S_z = \sum_{elem=1}^N y_{elem} A_{elem} \quad \text{όπου } S_z \text{ η στατική ροπή ως προς άξονα } Oz$$

$$y_G = \frac{S_y}{\sum_{elem=1}^N A_{elem}} \quad \text{όπου } y_G \text{ η οριζόντια συντεταγμένη του κ. β. στον άξονα } Oy$$

$$z_G = \frac{S_z}{\sum_{elem=1}^N A_{elem}} \quad \text{όπου } z_G \text{ η κατακόρυφη συντεταγμένη του κ. β. στον άξονα } Oz$$

Όπου N ο αριθμός των άθικτων δομικών στοιχείων.

6.2.3 Βήμα 3 - Εύρεση των νέων ροπών αδράνειας

Για την εύρεση των ροπών αδράνειας της βεβλαμμένης διατομής γίνεται χρήση της απλουστευτικής παραδοχής ότι η κεντροβαρική ροπή αδράνειας κάθε στοιχείου είναι προσεγγιστικά μηδέν λόγω του ότι η διατομή είναι χωρισμένη σε δομικά στοιχεία μικρού εμβαδού με $A_{elem} \rightarrow dA$ και άρα η ροπές αδράνειας μπορούν να προσεγγιστούν από τους τύπους (για επεξήγηση αξόνων βλ. σχήμα 6.4):

$$I_{y0} = \sum_{elem=1}^N (z_{elem} - z_G)^2 * A_{elem}$$

$$I_{z0} = \sum_{elem=1}^N (y_{elem} - y_G)^2 * A_{elem}$$

$$\text{Γινόμενο αδράνειας: } I_{y0z0} = \sum_{elem=1}^N (z_{elem} - z_G) * (y_{elem} - y_G) * A_{elem}$$

Να σημειωθεί ότι ο προσδιορισμός των I_{y0} , I_{z0} και I_{y0z0} εξυπηρετεί την εύρεση της θέσης (κατακόρυφη συντεταγμένη & γωνία ως προς οριζόντιο άξονα) του Ελαστικού Ουδέτερου

Άξονα. Όμως επειδή ο κώδικας της τροποποιημένης-επαυξητικής μεθόδου προσαρμόζει τη θέση του Ο.Α. ανάλογα με τη στιγμιαία κατανομή τάσεων, δεν είναι απαραίτητος ο επακριβής προσδιορισμός του Ελαστικού Ο.Α. στο πρώτο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, καθώς η θέση του χρησιμοποιείται μόνο για αρχικοποίηση της θέσης του Ο.Α.

6.2.4 Βήμα 4 - Εύρεση θέσης Ελαστικού Ουδέτερου Άξονα

Ο τρόπος προσδιορισμού μιας ευθείας στο επίπεδο είναι με ένα σημείο και μια γωνία (συντελεστής κατεύθυνσης). Έτσι η θέση του Ελαστικού Ο.Α. προσδιορίζεται από την κατακόρυφη συντεταγμένη του κ.β. της διατομής z_G , εφόσον ο ελαστικός Ο.Α. ($\sigma_{xx} = 0$) διέρχεται από αυτό, και από τη γωνία α που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο. Το z_G προκύπτει από τα παραπάνω. Η γωνία α προκύπτει από τη σχέση:

$$\alpha_{\text{initial}} = \tan^{-1} \left(\frac{I_{y_0z_0}}{I_{z_0}} \right) \quad (20)$$

όπου $I_{y_0z_0}$ το γινόμενο αδράνειας του οριζόντιου κεντροβαρικού συστήματος αξόνων (G_{y_0}, G_{z_0}) και I_{z_0} η ροπή αδράνειας ως προς τον κατακόρυφο κεντροβαρικό άξονα Gz_0 .

Με το δείκτη *initial* υποδηλώνεται η αρχικοποίηση της γωνίας α της οποίας η τιμή μεταβάλλεται σε κάθε καμπυλότητα χ_i δηλαδή $\alpha = \alpha(\chi)$.

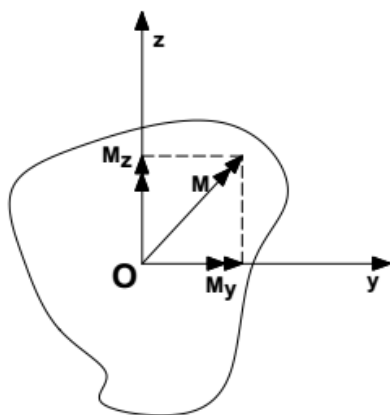
Απόδειξη της σχέσης (20) [19]

Θεωρείται μια τυχαία διατομή που καταπονείται από μια ροπή $\mathbf{M}(M_y, M_z)$ και μια αξονική δύναμη N . Κάνοντας χρήση της παραδοχής Bernoulli, η οποία δέχεται την επιπεδότητα των διατομών, οι τροπές θα δίνονται από μια γραμμική σχέση της μορφής:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\beta y + \gamma z + \delta}{E} \quad \text{όπου } E \text{ το μέτρο ελαστικότητας, } yOz \text{ ένα τυχαίο σύστημα}$$

αναφοράς πάνω στη διατομή και β, γ, δ σταθερές. Τότε οι ορθές τάσεις θα δίνονται από τη σχέση:

$$\sigma_{xx} = \beta y + \gamma z + \delta \quad (21)$$



Σχήμα 6.3 Τυχαία διατομή υπό γενικευμένη κάμψη (τυχαίο σύστημα αξόνων)

Η αξονική δύναμη N είναι συνισταμένη των ορθών τάσεων σ_{xx} , δηλαδή :

$$N = \int_A \sigma_{xx} dA \quad (22)$$

Η ροπή $M(M_y, M_z)$ είναι συνισταμένη των ροπών των ορθών τάσεων :

$$-M_y = \int_A \sigma_{xx} z dA \quad (23) \quad \text{και} \quad M_z = \int_A \sigma_{xx} y dA \quad (24)$$

(το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο ότι η διανυσματικά θετική M_y εφελκύει τις θετικές ίνες του z στις οποίες $\sigma_{xx} < 0$)

Εισάγοντας την (21) στις (22), (23) & (24) παίρνουμε:

$$(\Sigma_1): \begin{cases} N = \beta S_z + \gamma S_y + \delta A \\ -M_y = \beta I_{yz} + \gamma I_{yy} + \delta S_y \\ M_z = \beta I_{zz} + \gamma I_{yz} + \delta S_z \end{cases}$$

Όπου A το εμβαδό της διατομής, $S_z = \int_A y dA$, $S_y = \int_A z dA$

οι στατικές ροπές της διατομής ως προς τους άξονες Oz και Oy αντίστοιχα και

I_{zz} , I_{yy} , I_{yz} οι ροπές αδράνειας της διατομής ως προς το τυχαίο σύστημα Oyz .

Στη συνέχεια μεταβαίνοντας από το τυχαίο ορθογώνιο σύστημα Oyz στο ορθογώνιο κεντροβαρικό σύστημα αξόνων Gy_0z_0 (οι στατικές ροπές μηδενίζονται) το σύστημα (Σ_1) μετασχηματίζεται σε:

$$(\Sigma_2): \begin{cases} N = \delta A \\ -M_y = \beta I_{y_0z_0} + \gamma I_{y_0} \\ M_z = \beta I_{z_0} + \gamma I_{y_0z_0} \end{cases}$$

Επιπλέον αν θεωρήσουμε την περίπτωση της **λοξής κάμψης** όπου ασκείται μόνο η ροπή $\mathbf{M}(M_y, M_z)$ τότε $N=0$ ή $\delta=0$ και

λύνοντας το παραπάνω σύστημα (Σ_2) προκύπτουν:

$$\beta = \frac{M_z I_{y_0} + M_y I_{y_0z_0}}{I_{y_0} I_{z_0} - I_{y_0z_0}^2} \quad \text{και} \quad \gamma = -\frac{M_y I_{z_0} + M_z I_{y_0z_0}}{I_{y_0} I_{z_0} - I_{y_0z_0}^2} \quad [19]$$

Εισάγοντας τις τιμές των β , γ , $\delta=0$ στην (21) βρίσκουμε την ακόλουθη σχέση για τις ορθές τάσεις:

$$\sigma_{xx} = \frac{M_z I_{y0} + M_y I_{y0z0}}{I_{y0} I_{z0} - I_{y0z0}^2} y - \frac{M_y I_{z0} + M_z I_{y0z0}}{I_{y0} I_{z0} - I_{y0z0}^2} z \quad [19]$$

Όμως επειδή ο ουδέτερος άξονας είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων της διατομής όπου μηδενίζονται οι ορθές τάσεις:

$$\sigma_{xx} = 0 \xrightarrow{I_{y0} I_{z0} - I_{y0z0}^2 > 0} z = \frac{M_z I_{y0} + M_y I_{y0z0}}{M_y I_{z0} + M_z I_{y0z0}} y \quad (25)$$

Η σχέση (25) χρησιμοποιείται για την εύρεση της θέσης του Ελαστικού Ουδέτερου άξονα της διατομής του Bulk Carrier. Συγκεκριμένα: σύμφωνα με την αρχική θεώρηση ότι η ροπή \mathbf{M} ασκείται μόνο στην y-διεύθυνση ($M = M_y$) δηλαδή $M_z = 0$ η σχέση (25) δίνει:

$$z = \frac{I_{y0z0}}{I_{z0}} y \quad (26) \quad (\text{βλ. Σχήμα 6.4})$$

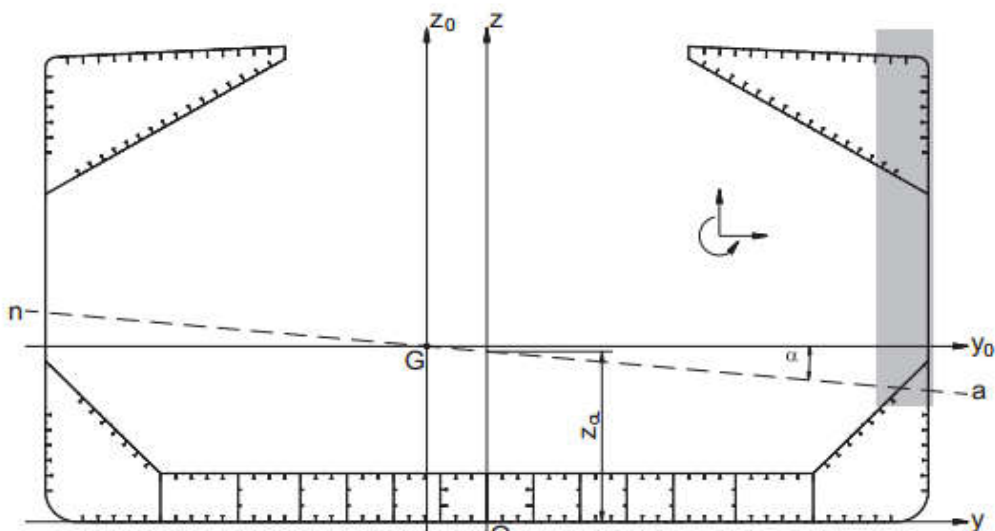
Η σχέση (26) δίνει την εξίσωση ευθείας του Ελαστικού Ο.Α. με κλίση σε σχέση με την οριζόντιο:

$$\tan \alpha = \frac{I_{y0z0}}{I_{z0}}$$

Επειδή οι συντεταγμένες (0,0) ικανοποιούν τη σχέση (26), αυτό σημαίνει ότι ο ελαστικός Ο.Α. διέρχεται από το κέντρο βάρους G της διατομής.

6.2.5 Βήμα 5 - Υπολογισμός της αξονικής παραμόρφωσης κάθε στοιχείου & προσδιορισμός της θέσης του Ουδέτερου Άξονα $z_{n,i}$ σε κάθε επαναληπτικό βήμα i της καμπυλότητας χ_i

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το παρακάτω σχήμα η θέση του στιγμιαίου Ο.Α. δίνεται από τη σχέση: $z_n(\chi) = z_{CL}(\chi) + y * \tan \alpha(\chi)$, όπου $z_{CL}(\chi)$ η κατακόρυφη συντεταγμένη



Σχήμα 6.4 Βεβλαμμένη διατομή Bulk Carrier όπου παρουσιάζεται η θέση του κεκλιμένου Ο.Α. Θετικές είναι οι δεξιόστροφες γωνίες α [2].

του σημείου που ο Ο.Α. τέμνει τον άξονα Oz (Centerline) & $\alpha(\chi)$ η γωνία του με την οριζόντιο. Όσον αφορά την αξονική παραμόρφωση σε κάθε στοιχείο, χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\varepsilon_{\text{elem}}(\chi) = [z_{\text{elem}} - z_{\text{CL}}(\chi) - y_{\text{elem}} * \tan \alpha(\chi)] * \cos \alpha(\chi) * \chi$$

όπου ο όρος στην αγκύλη επί $\cos \alpha(\chi)$ δίνει την κάθετη απόσταση του στοιχείου από τον στιγμιαίο κεκλιμένο Ουδέτερο Άξονα.

Στη συνέχεια αφού προσδιοριστεί η τάση $\sigma_{\text{elem}}(\chi)$ για κάθε στοιχείο από τις καμπύλες σ - ε ελέγχεται η ικανοποίηση των εξής **δύο κριτηρίων για την αξονική δύναμη και την οριζόντια καμπτική ροπή αντίστοιχα:**

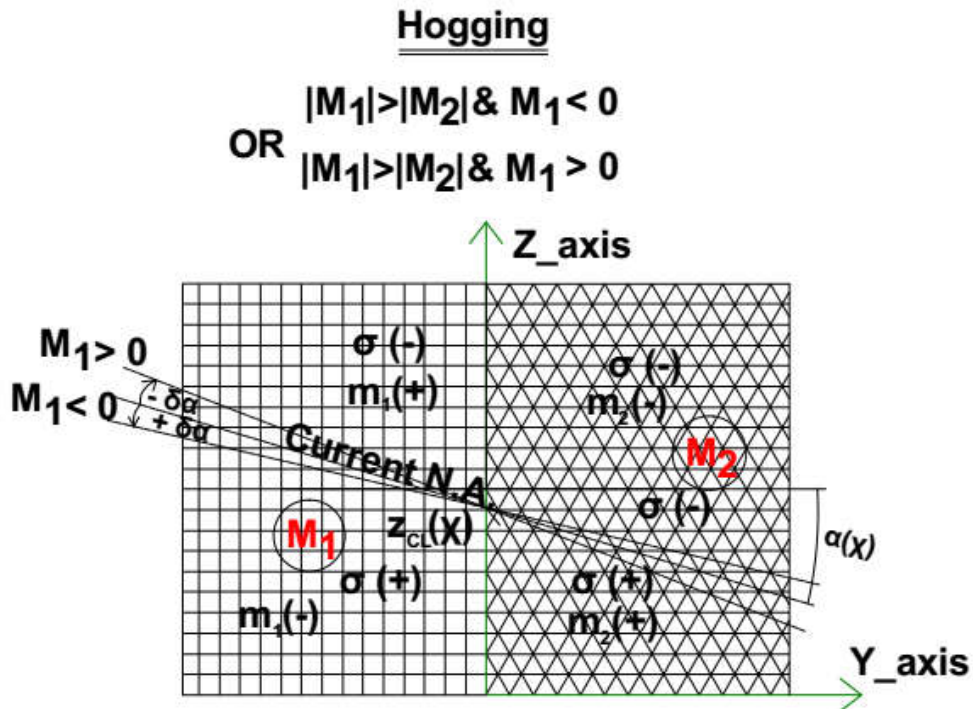
$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{\text{elem}=1}^N \sigma_{\text{elem}}(\chi) * A_{\text{elem}} = 0 \\ \sum_{\text{elem}=1}^N \sigma_{\text{elem}}(\chi) * y_{\text{elem}} * A_{\text{elem}} = 0 \end{array} \right.$$

[2]

Το πρώτο κριτήριο αφορά την κατοκόρυφη μετατόπιση του Ο.Α., ενώ το δεύτερο τη στροφή του Ο.Α., προκειμένου να μηδενιστεί η οριζόντια καμπτική ροπή ($M_z=0$) εφόσον η διατομή υφίσταται μόνο κατακόρυφη καμπτική ροπή ($M=M_y$) σύμφωνα με την αρχική παραδοχή ότι η διατομή παραμένει όρθια. Οι κατακόρυφες μετατοπίσεις του Ο.Α. γίνονται ανάλογα με τον προηγούμενο στιγμιαίο Ο.Α. κάνοντας την πράξη $z_{\text{CL}} \pm \delta z$ προκειμένου να επέλθει ισορροπία εφελκυστικής-θλιπτικής δύναμης. Από την άλλη μεριά, με παγωμένο το z_{CL} , αφού έχει ικανοποιηθεί η πρώτη συνθήκη, ελέγχεται η δεύτερη συνθήκη μέσω της ισορροπίας των ροπών M_1 και M_2 , όπου M_1 η οριζόντια ροπή των στοιχείων αριστερά του άξονα Oz & M_2 η οριζόντια ροπή των στοιχείων δεξιά του άξονα Oz. Στο σχήμα 6.5 φαίνεται η στοιχειώδης στροφή $\delta\alpha$ (δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη) του Ο.Α. προκειμένου να επέλθει ισορροπία. Συγκεκριμένα:

- για κατάσταση hogging & $|M_1| > |M_2|$ & $M_1 < 0 \rightarrow + \delta\alpha$
- για κατάσταση hogging & $|M_1| > |M_2|$ & $M_1 > 0 \rightarrow - \delta\alpha$
- για κατάσταση hogging & $|M_2| > |M_1|$ & $M_2 < 0 \rightarrow + \delta\alpha$
- για κατάσταση hogging & $|M_2| > |M_1|$ & $M_2 > 0 \rightarrow - \delta\alpha$
- για κατάσταση sagging & $|M_1| > |M_2|$ & $M_1 < 0 \rightarrow - \delta\alpha$
- για κατάσταση sagging & $|M_1| > |M_2|$ & $M_1 > 0 \rightarrow + \delta\alpha$
- για κατάσταση sagging & $|M_2| > |M_1|$ & $M_2 < 0 \rightarrow - \delta\alpha$
- για κατάσταση sagging & $|M_2| > |M_1|$ & $M_2 > 0 \rightarrow + \delta\alpha$

Επί της ουσίας τα δομικά στοιχεία ομαδοποιούνται σε 4 τεταρτημόρια με τον Ο.Α. να στρέφεται μειώνοντας την επιφάνεια του τεταρτημορίου που δίνει μεγαλύτερη οριζόντια ροπή. Η στροφή του Ο.Α. γίνεται γύρω από το σημείο $(0, z_{CL})$.



Σχήμα 6.5 Στο Σχήμα φαίνεται το πρόσημο των ορθών τάσεων (- για εφελκυστικές & + για θλιπτικές) και το πρόσημο των οριζόντιων ροπών σε κάθε τεταρτημόριο.

6.2.6 Βήμα 6 – Υπολογισμός της ροπής κάμψης σε κάθε βήμα

Έχοντας υπολογίσει τη θέση του Ο.Α. για κάθε επαναληπτικό βήμα i , αντίστοιχη ροπή κάμψης προκύπτει αθροίζοντας τις τάσεις σε κάθε δομικό στοιχείο:

$$M_i = \pm \sum_{elem=1}^N |\sigma_{elem} A_{elem} h_{elem}|, \text{ όπου } h_{elem} = z_{elem} - z_G \text{ \& } \begin{cases} M_i > 0, \text{ hogging} \\ M_i < 0, \text{ sagging} \end{cases}$$

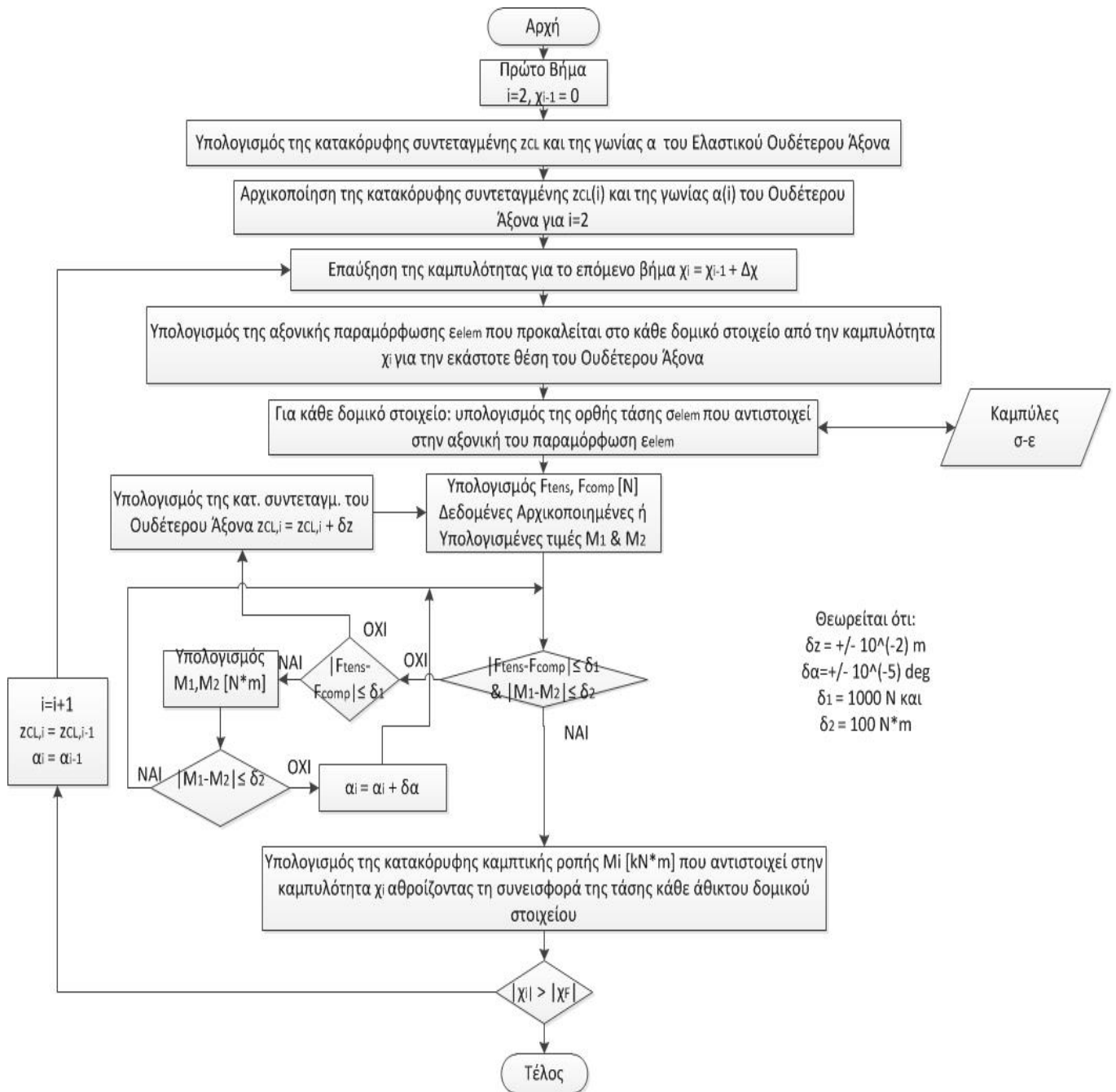
όπου N = αριθμός άθικτων στοιχείων

Να σημειωθεί ότι επειδή η M_i προκύπτει ως ζεύγος δυνάμεων (εφελκυστικής - θλιπτικής), δεν έχει σημασία ως προς ποιον οριζόντιο άξονα λαμβάνονται οι ροπές (τελικά ως προς τον Gy_0).

6.2.7 Βήμα 7 – Εύρεση της εναπομένουσας αντοχής M_{UD-hog} & M_{UD-sag}

Τα μέγιστο της καμπύλης $M_i - \chi_i$ δίνει την M_{UD-hog} και το ελάχιστο την M_{UD-sag} .

6.3 Διάγραμμα ροής της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου



Σχήμα 6.6 Στο Σχήμα φαίνεται το Διάγραμμα Ροής της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για την εύρεση της ροπής κατάρρευσης σε hogging/sagging της βεβλαμμένης διατομής. Οι τιμές $\delta z, \delta \alpha, \delta_1, \delta_2$ καθορίζονται από το χρήστη.

6.4 Κριτήριο των CSR-H για έλεγχο επάρκειας της επιτευχθείσας εναπομένουσας αντοχής σε κατακόρυφη κάμψη (hogging / sagging)

Για κάθε περίπτωση βλάβης πρέπει να ικανοποιείται το κριτήριο:

$$|M_D| \leq \frac{|M_{UD}|}{\gamma_{RD} * C_{NA}} \left(\frac{M_{UD}}{\gamma_{RD} * C_{NA}} = M_{Ultimate} \right)$$

όπου γ_{RD} (= 1.0) : συντελεστής ασφαλείας για την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής της βεβλαμμένης διατομής,

C_{NA} : συντελεστής ασφαλείας λόγω στροφής του Ο.Α. Επειδή στους κανονισμούς CSR-H ο υπολογισμός της M_{UD} βασίζεται στην απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο, το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα του υπολογισμού λόγω στροφής του Ο.Α. στις ασύμμετρες καταστάσεις. Επειδή στην ασύμμετρη προσάραξη οι γωνίες στροφής του Ο.Α. είναι μικρές (μικρή απόκλιση μεθόδου) ο συντελεστής λαμβάνεται 1.0, ενώ στη σύγκρουση 1.1.

$|M_{UD}|$: η εναπομένουσα αντοχή σε hogging/sagging κατόπιν βλάβης,

$M_D = \gamma_{SD} M_{sw} + \gamma_{WD} M_{wv}$ όπου M_D : καμπτική ροπή σε βεβλαμμένη κατάσταση,

M_{sw}, M_{wv} : η καμπτική ροπή σε ήρεμο νερό και κυματισμό αντίστοιχα, γ_{SD} (= 1.1), γ_{WD} (= 0.67) : συντελεστές καμπτικής ροπής ήρεμου νερού και κυματισμού αντίστοιχα. Η τιμή $\gamma_{SD} = 1.1$ δικαιολογείται από την ενδεχόμενη κατάκλυση του πλοίου λόγω βλάβης, ενώ η τιμή $\gamma_{WD} = 0.67$ από τη μειωμένη ροπή κυματισμού λόγω ρηχών νερών ή κίνησης σε λιμάνι, όπου και συμβαίνουν τα περισσότερα ατυχήματα προσάραξης ή σύγκρουσης.

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση υπολογίζεται η εφαρμοζόμενη M_D για hogging/sagging:

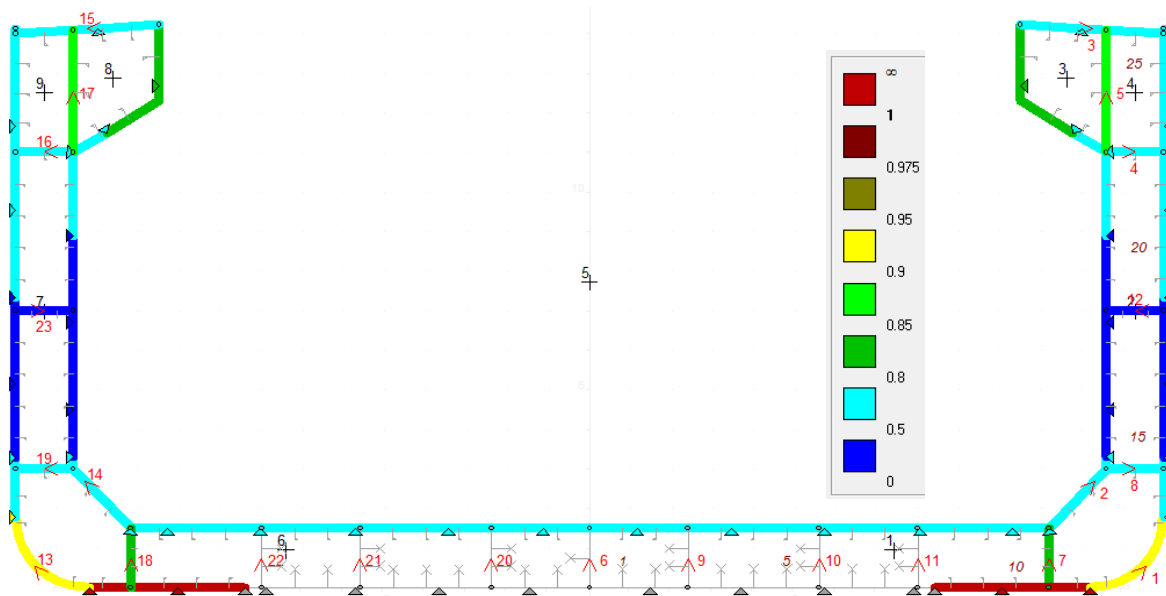
<u>Total bending moment in damaged condition</u>	Vertical bending moment M_{D-hog} [kN*m]	Vertical wave bending moment M_{D-sag} [kN*m]
Double Skin Bulk Carrier	1,731,172	-1,776,902
Single Skin Bulk Carrier	1,915,540	-1,690,503

6.5 Χρήση κριτηρίου άθικτης κατάστασης για τον έλεγχο

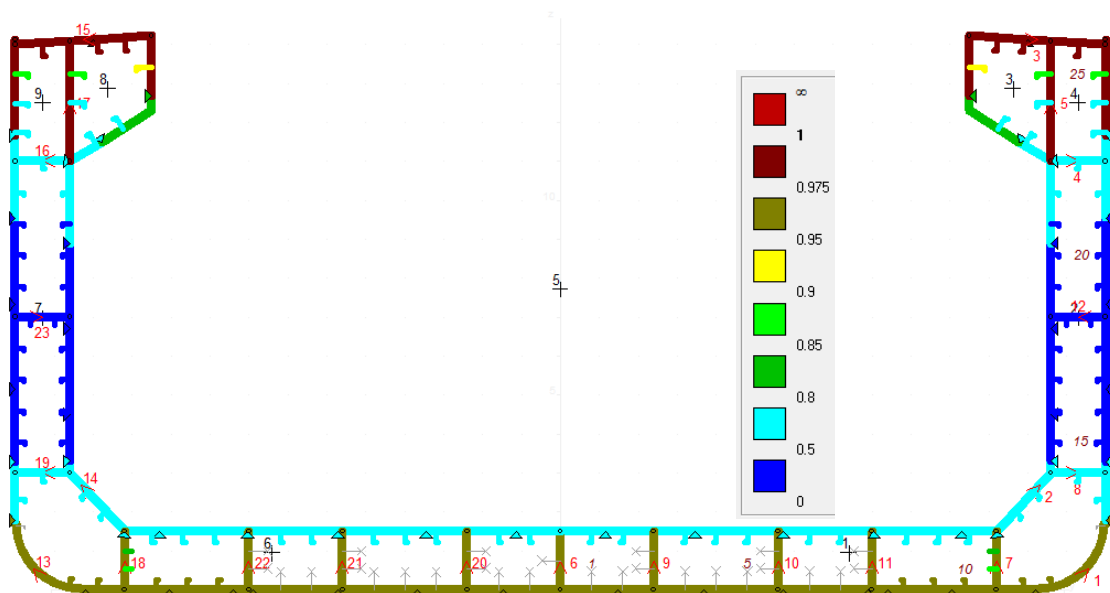
Επειδή στις παρακάτω βεβλαμμένες διατομές χρησιμοποιείται η τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος, δε χρειάζεται να ληφθεί υπόψη ο συντελεστής C_{NA} . Επιπλέον, προκειμένου να γίνει πιο συντηρητικό το κριτήριο ελέγχου (μεγαλύτεροι κυματισμοί, ή ισοδύναμα $\gamma_{WD} = 1.2$), επιλέγεται σαν M_D η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging/sagging του άθικτου Bulk Carrier. Έτσι, το κριτήριο γίνεται $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$. Αν ικανοποιείται αυτό το κριτήριο, τότε δε χρειάζεται ο έλεγχος για το πρώτο.

6.6 Εφαρμογή της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος

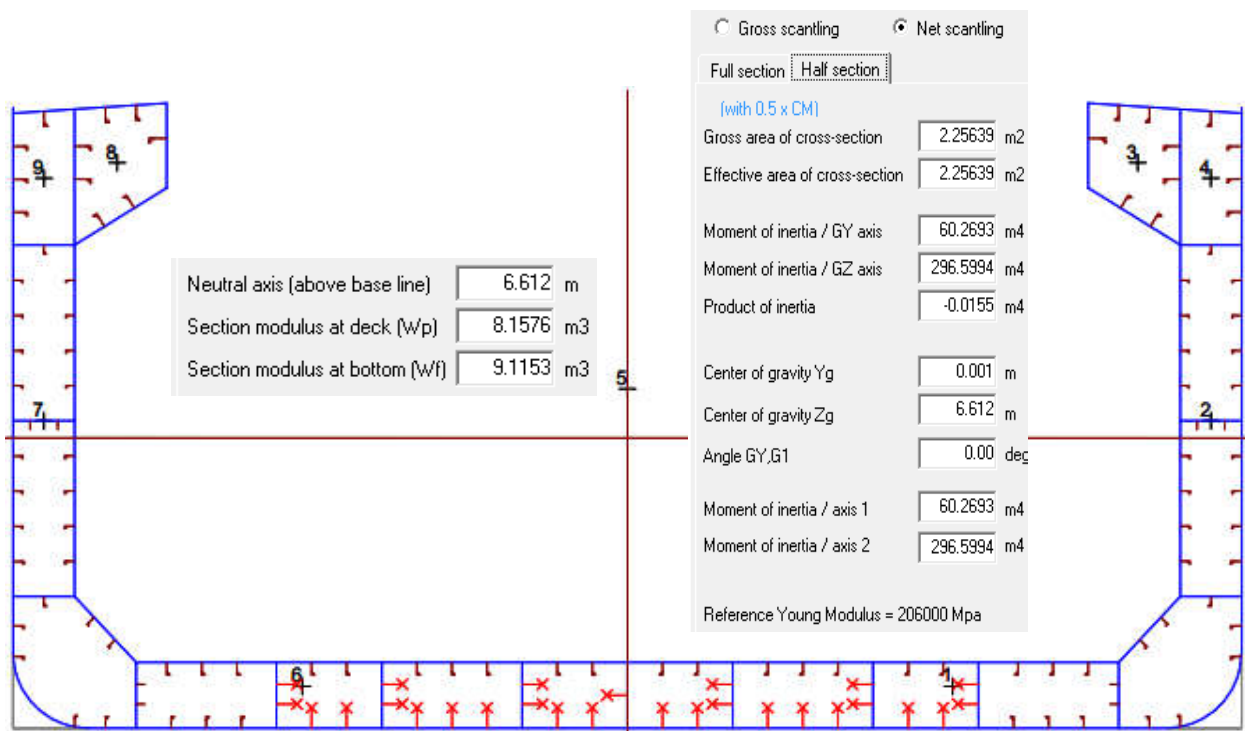
6.6.1 Συμμετρική προσάραξη (Grounding Centered)



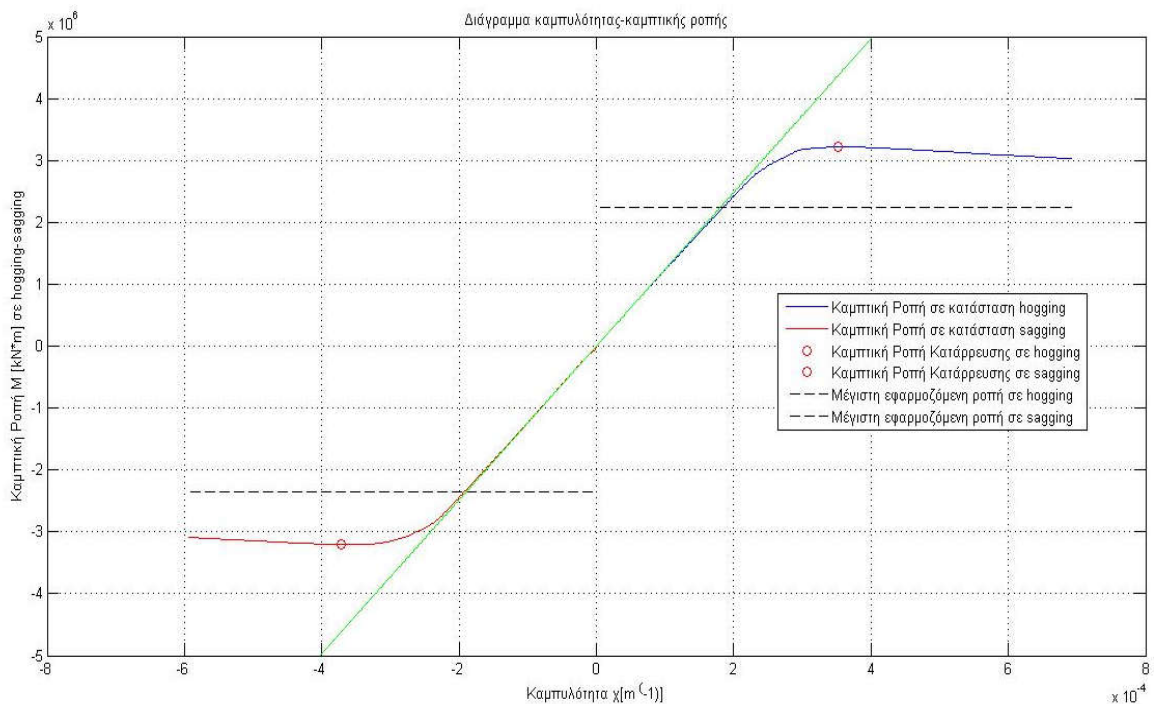
Σχήμα 6.7 Στο Σχήμα φαίνεται η περιοχή βλάβης (άσπρη περιοχή) για τη συμμετρική προσάραξη του πλοίου. Η βλάβη ορίζεται από $y=-8.4$ m έως το $y=8.4$ m και από $z=0$ έως το $z=1.4$ m. Με χρωματική διαβάθμιση παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\sigma_{appl}/\sigma_{x,crit}$ (τάση λυγισμού ελάσματος) που προκύπτει με βάση τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή ($M_{sw}+M_{ww}$) στη δυσμενέστερη κατάσταση (hogging ή sagging). Στις κόκκινες περιοχές προκύπτει ελαστο-πλαστικός λυγισμός (σε hogging). Το αποτέλεσμα της εικόνας αποτελεί δείγμα ότι τελικά η διατομή δεν καταρρέει σε αυτή τη ροπή, όπως αποδεικνύεται παρακάτω.



Σχήμα 6.8 Με χρωματική διαβάθμιση παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\sigma_{appl}/\sigma_{perm}$ που προκύπτει με βάση τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή ($M_{sw}+M_{ww}$) στη δυσμενέστερη κατάσταση (hogging ή sagging). Το ότι δεν υπάρχει κόκκινη περιοχή σημαίνει ότι για τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή δεν προκύπτει διαρροή υλικού στην περίπτωση συμμετρικής προσάραξης.



Σχήμα 6.9 Στο Σχήμα φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βεβλαμμένης διατομής. Όπως είναι προφανές, λόγω του ότι η βλάβη είναι συμμετρική, το σύστημα κυρίων αξόνων συμπίπτει με το σύστημα αξόνων GY,GZ.



Σχήμα 6.10 Διάγραμμα M-χ για συμμετρική προσάραξη που προκύπτει από τον κώδικα Residual_Stength.m σε Matlab. Η εναπομένουσα αντοχή είναι επαρκής αφού $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$.

Τρέχοντας τον κώδικα **Residual_Strength.m** (βλ. κώδικα στο Παράρτημα Ε') που εφαρμόζει την τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο με αρχείο εισόδου αυτό της σελ. 129 (βλ. Παρατήρηση σελ. 127) και με συντεταγμένες βλάβης αυτές του σχήματος 6.7 προκύπτει το παραπάνω διάγραμμα Μ-χ.

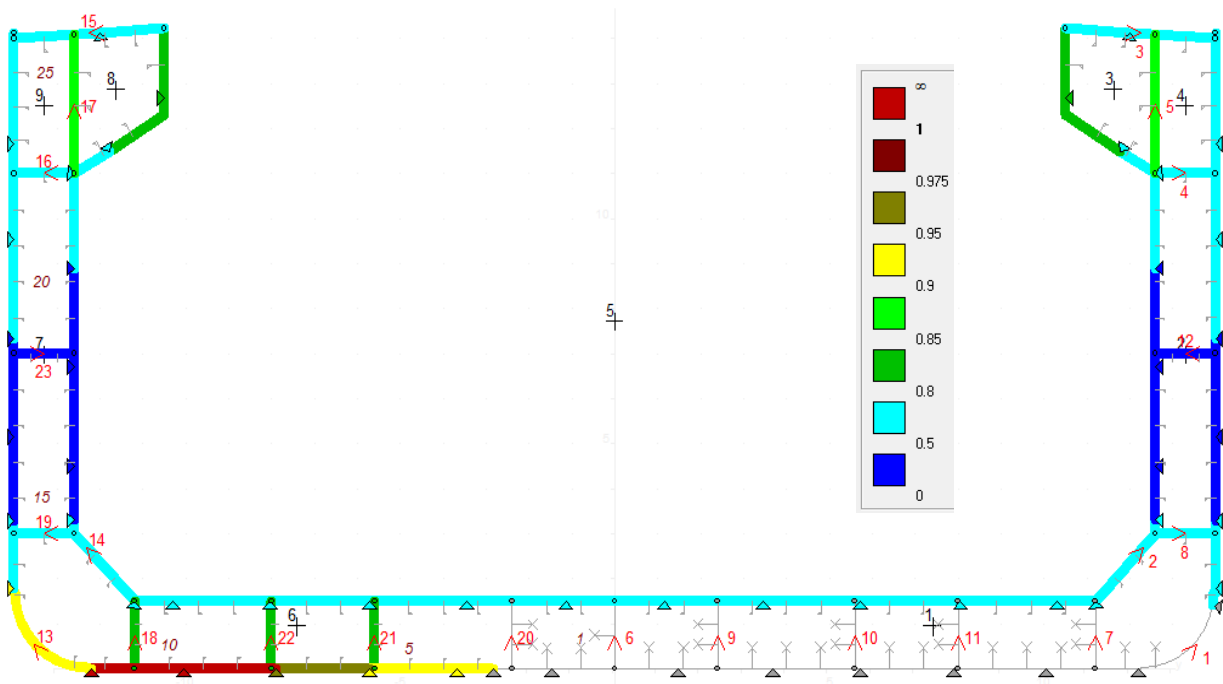
Προκύπτουν από τον κώδικα τα παρακάτω:

- $M_{UD-hog} = 3,215,635 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-hog} = 3.52 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{UD-sag} = -3,205,419 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-sag} = -3.71 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

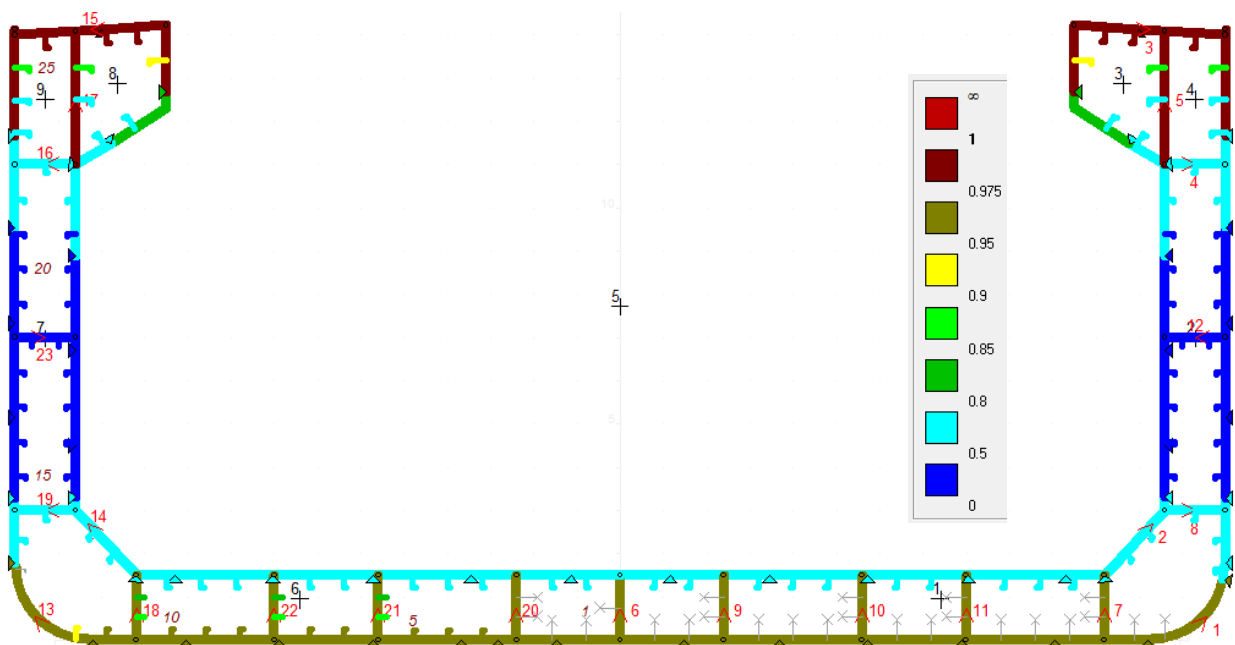
Η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging θεωρείται $2,245,905 \text{ kN}\cdot\text{m}$ και η μέγιστη σε sagging $-2,346,937 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (από την άθικτη κατάσταση, σελ. 142/Κεφάλαιο 5).

6.6.2 Ασύμμετρη προσάραξη (Grounding Lateral)

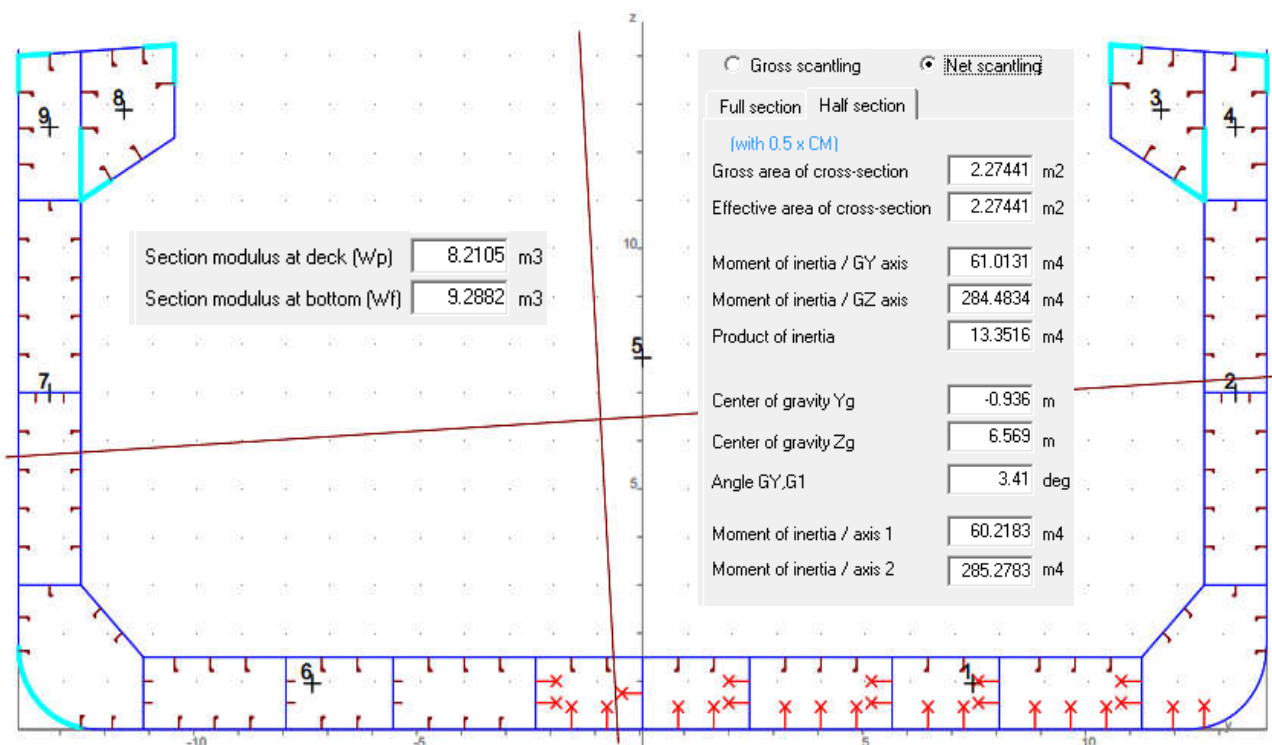
6.6.2α Έλεγχος εναπομένουσας αντοχής



Σχήμα 6.11 Στο Σχήμα φαίνεται η περιοχή βλάβης (άσπρη περιοχή) για την ασύμμετρη προσάραξη του πλοίου. Η βλάβη ορίζεται από $y=-2.82 \text{ m}$ έως το $y=13.98 \text{ m}$ και από $z=0$ έως το $z=1.4 \text{ m}$. Με χρωματική διαβάθμιση παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\sigma_{appl}/\sigma_{x,crit}$ (τάση λυγισμού ελάσματος) που προκύπτει με βάση τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή ($M_{sw}+M_{ww}$) στη δυσμενέστερη κατάσταση (hogging ή sagging). Στις κόκκινες περιοχές προκύπτει ελαστο-πλαστικός λυγισμός (σε hogging). Το αποτέλεσμα της εικόνας αποτελεί δείγμα ότι τελικά η διατομή δεν καταρρέει σε αυτή τη ροπή, όπως αποδεικνύεται παρακάτω.



Σχήμα 6.12 Με χρωματική διαβάθμιση παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\sigma_{app1}/\sigma_{perm}$ που προκύπτει με βάση τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή ($M_{sw}+M_{wv}$) στη δυσμενέστερη κατάσταση (hogging ή sagging). Το ότι δεν υπάρχει κόκκινη περιοχή σημαίνει ότι για τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή δεν προκύπτει διαρροή υλικού στην περίπτωση ασύμμετρης προσάραξης.



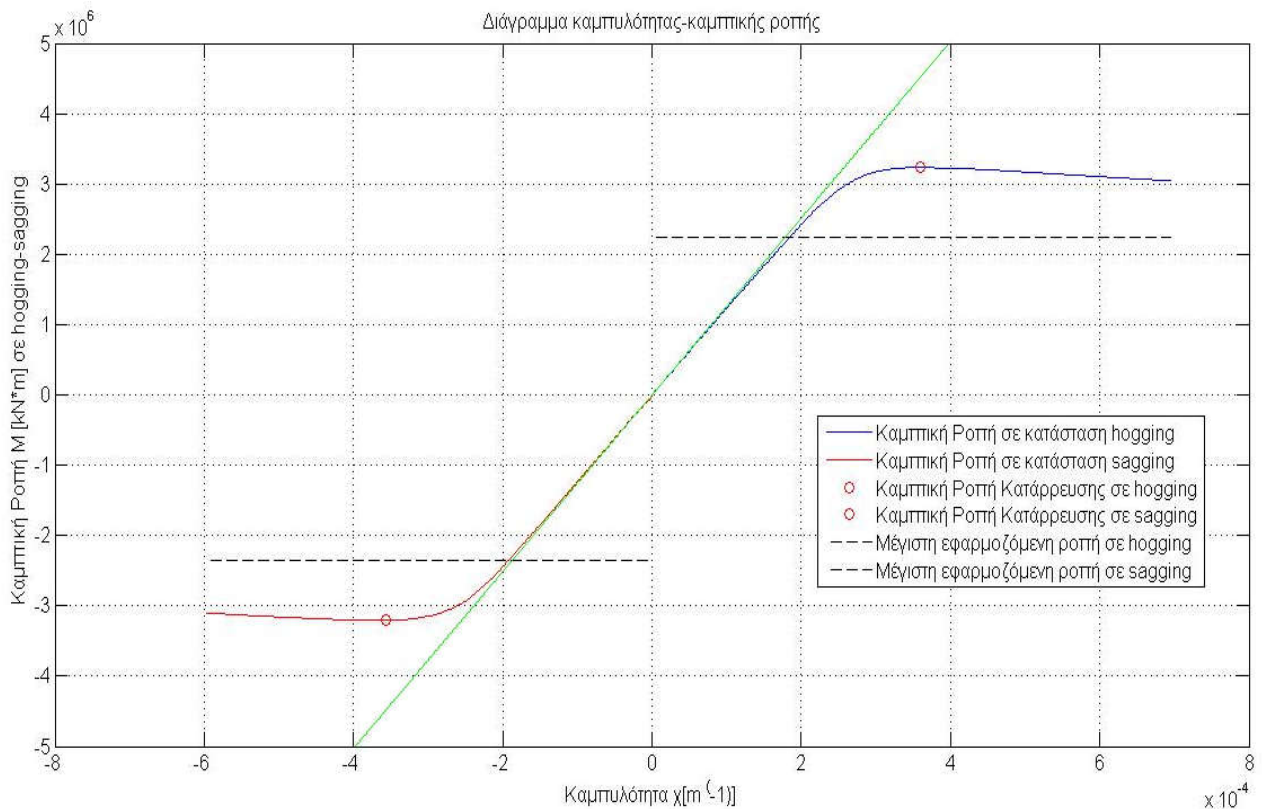
Σχήμα 6.13 Στο Σχήμα φαίνονται η ελαστική ροπή αντίστασης σε κατάρωμα & πυθμένα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βεβλαμμένης διατομής. Όπως είναι προφανές, λόγω του ότι η βλάβη είναι ασύμμετρη, το σύστημα κυρίων αξόνων (axis1,axis2) δεν συμπίπτει με το σύστημα αξόνων GY,GZ. Στο Σχήμα φαίνεται η θέση του κέντρου βάρους της διατομής G (-0.936,6.569).

- Με βάση τα δεδομένα του Σχήματος 6.13 υπολογίζεται η γωνία α του Ελαστικού Ο.Α. :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{13.35}{284.48} \right) = 2.69 \text{ deg}$$

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, ο ελαστικός Ο.Α. θα βρίσκεται ανάμεσα στον κύριο άξονα με την μικρότερη ροπή αδράνειας (axis 1) και το διάνυσμα της ροπής \mathbf{M} .

- Η εξίσωση ευθείας του ελαστικού Ο.Α. με βάση το σημείο G και τη γωνία α είναι: $z = 0.047 * y + 6.61$. Για $y=0$ παίρνουμε $z_{CL} = 6.61 \text{ m}$.



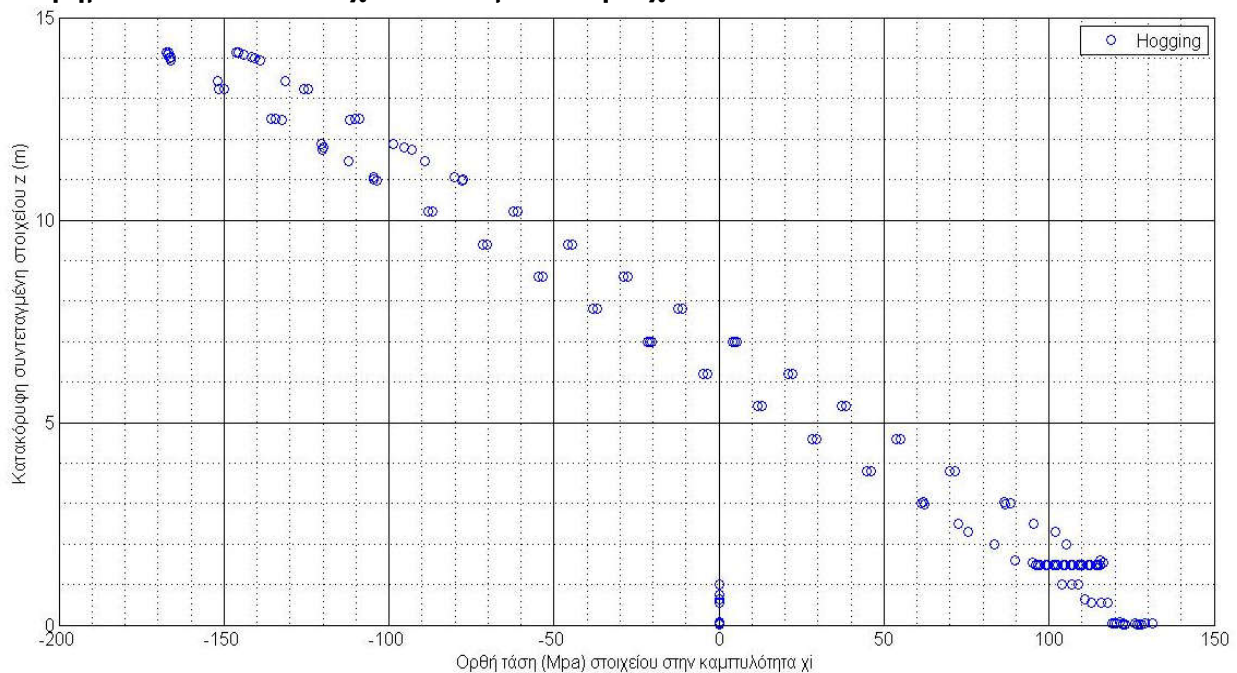
Σχήμα 6.14 Διάγραμμα M- χ για ασύμμετρη προσάραξη που προκύπτει από τον κώδικα Residual_Stength.m σε Matlab. Η πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει την ελαστική κάμψη. **H εναπομένουσα αντοχή είναι επαρκής αφού $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$.**

Προκύπτουν από τον κώδικα τα παρακάτω:

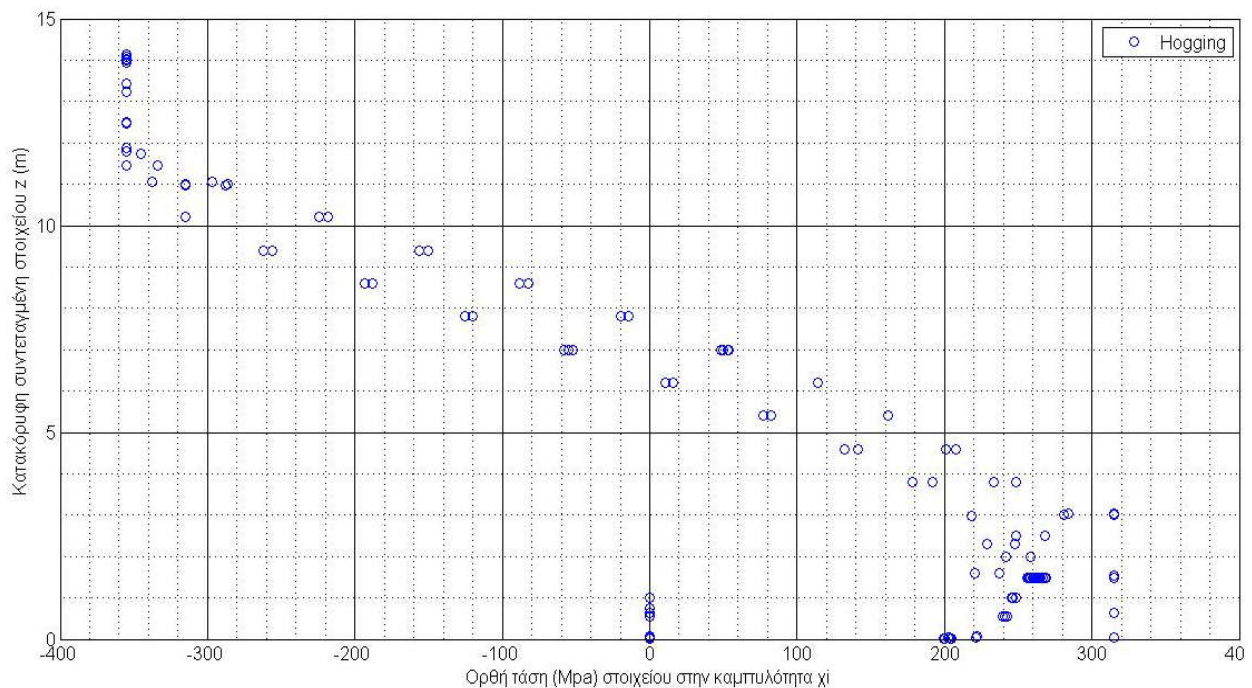
- $M_{UD-hog} = 3,233,012 \text{ kN*m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-hog} = 3.60 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{UD-sag} = -3,209,101 \text{ kN*m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-sag} = -3.57 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

Η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging είναι $2,245,905 \text{ kN*m}$ και η μέγιστη σε sagging $-2,346,937 \text{ kN*m}$.

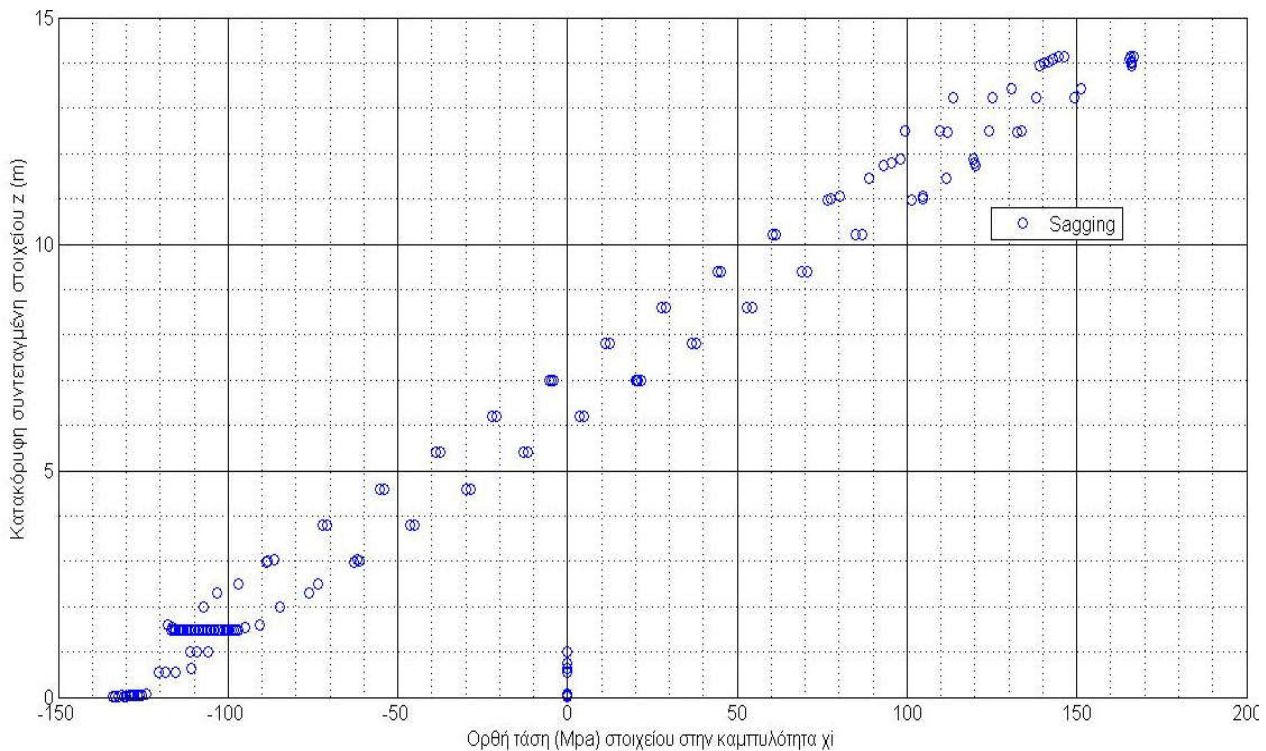
6.6.2β Παρουσίαση της καθ' ύψος κατανομής των ορθών τάσεων για επιλεγμένα βήματα i που αντιστοιχούν σε καμπυλότητα χ



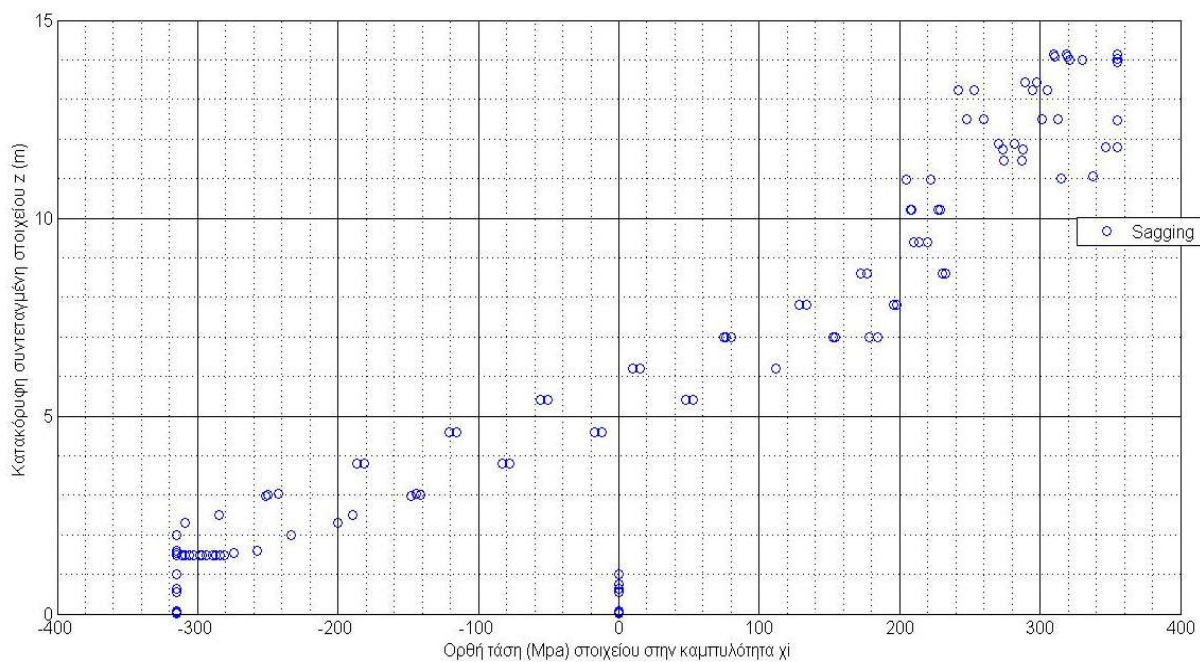
Σχήμα 6.15 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση hogging για $i=50$ ή καμπυλότητα $\chi=1.01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Παρατηρείται ότι τα συμμετρικά δομικά στοιχεία ως προς τη Centerline ή τα παρακείμενα παρουσιάζουν διαφορετικές ορθές τάσεις μεταξύ τους λόγω της κλίσης του Ο.Α. Η συμπεριφορά της κατανομής είναι γραμμική αφού οι τάσεις βρίσκονται στη γραμμική ελαστική περιοχή. Τα στοιχεία με τάση 0 είναι τα στοιχεία εντός της περιοχής βλάβης.



Σχήμα 6.16 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση hogging για $i=200$ ή καμπυλότητα $\chi=4.13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ δηλαδή μετά την κατάρρευση της διατομής. Παρατηρείται ότι πολλά στοιχεία έχουν φτάσει την τάση διαρροής τους (355 MPa & 315 MPa) ενώ στη θλιβόμενη περιοχή έχουν καταρρεύσει και με ελαστο-πλαστικό λυγισμό.



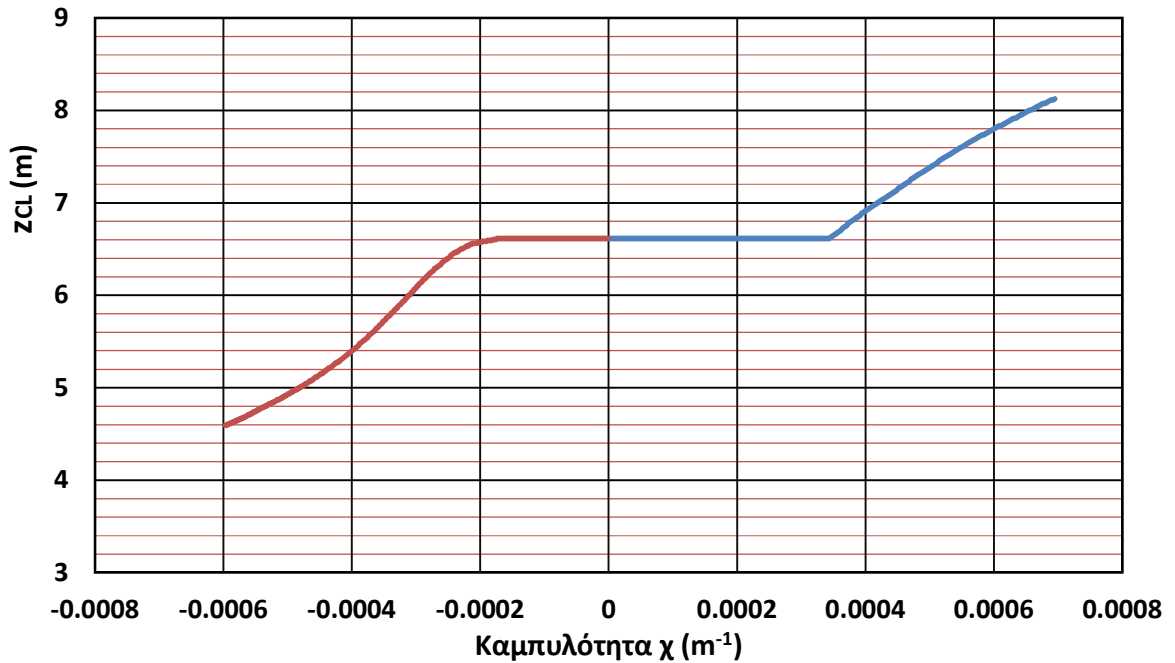
Σχήμα 6.17 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση sagging για $i=50$ ή καμπυλότητα $\chi_i=-1.01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Παρατηρείται ότι τα συμμετρικά δομικά στοιχεία ως προς τη Centerline ή τα παρακείμενα παρουσιάζουν διαφορετικές ορθές τάσεις μεταξύ τους λόγω της κλίσης του Ο.Α. Η συμπεριφορά της κατανομής είναι γραμμική αφού οι τάσεις βρίσκονται στη γραμμική ελαστική περιοχή. Τα στοιχεία με τάση 0 είναι τα στοιχεία εντός της περιοχής βλάβης.



Σχήμα 6.18 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση sagging για $i=200$ ή καμπυλότητα $\chi_i=-3.97 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ δηλαδή μετά την κατάρρευση της διατομής. Παρατηρείται ότι πολλά στοιχεία έχουν φτάσει την τάση διαρροής τους (355 Mpa & 315 Mpa) ενώ στη θλιβόμενη περιοχή έχουν καταρρεύσει με ελαστο-πλαστικό λυγισμό.

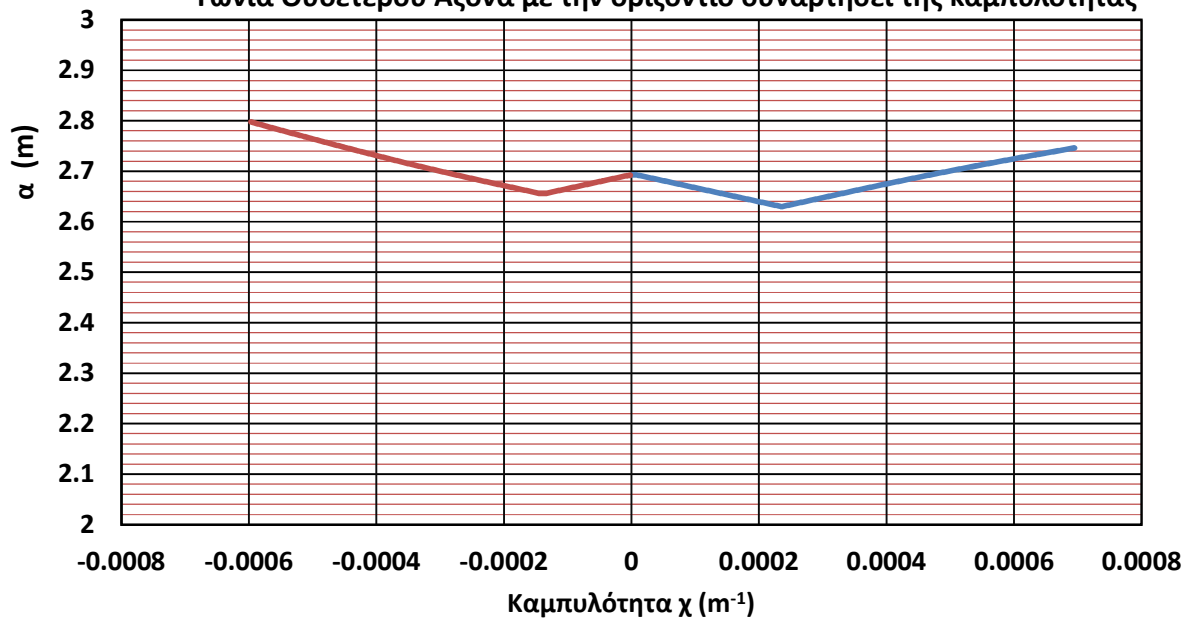
6.6.2γ Θέση Ουδέτερου Άξονα συναρτήσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας χ

Κατακόρυφη συντεταγμένη Ουδέτερου Άξονα συναρτήσει της καμπυλότητας



Σχήμα 6.19 Στο σχήμα διαπιστώνεται η κατακόρυφη μετατόπιση dz του Ο.Α. σε hogging (μπλε καμπύλη) και sagging (κόκκινη καμπύλη). Η ανοδική πορεία του Ο.Α. στο hogging οφείλεται στην αποδυνάμωση της αντοχής των περιοχών του πυθμένα.

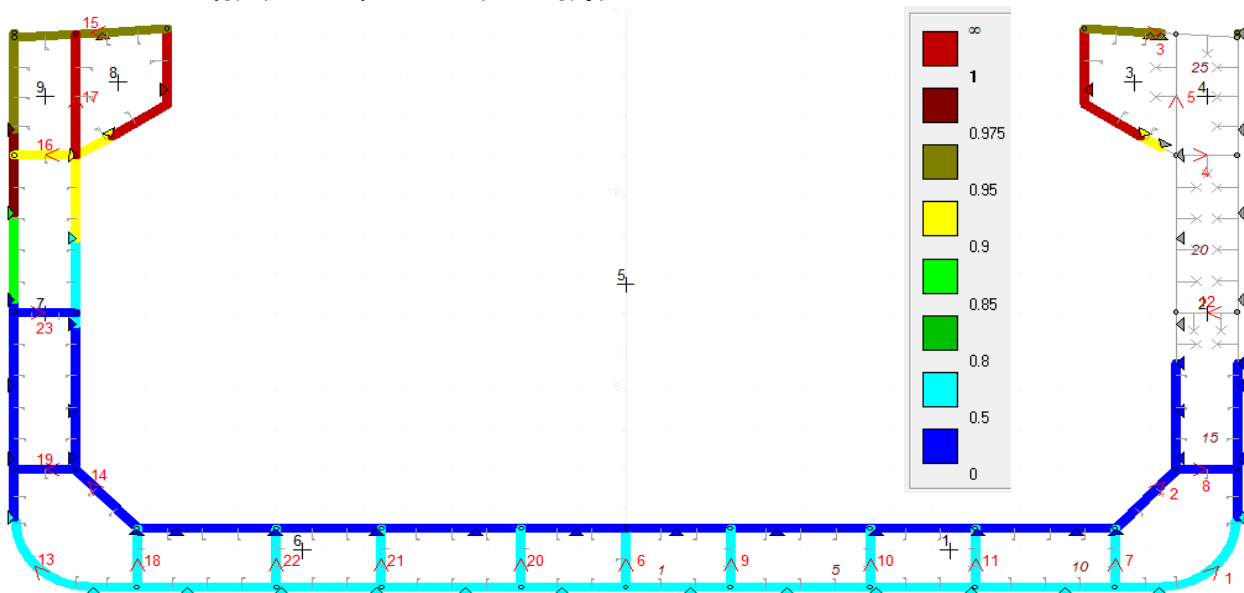
Γωνία Ουδέτερου Άξονα με την οριζόντιο συναρτήσει της καμπυλότητας



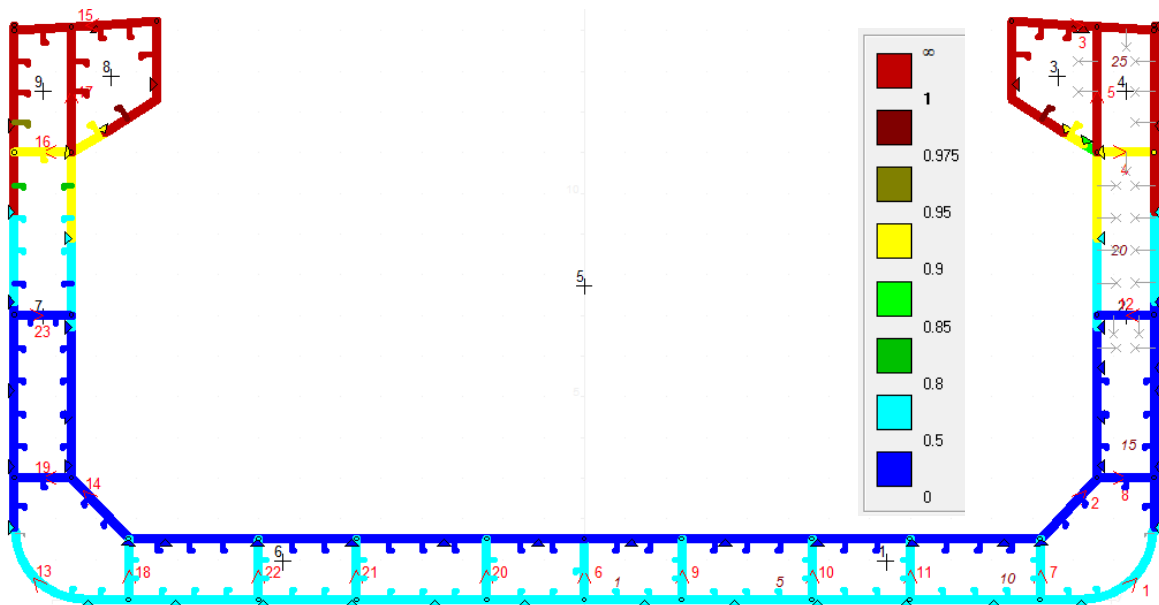
Σχήμα 6.20 Στο σχήμα διαπιστώνεται η στροφή του Ο.Α. $\delta\alpha$ σε hogging (μπλε καμπύλη) και sagging (κόκκινη καμπύλη) προκειμένου να μηδενίζεται η συνιστώσα M_z σε κάθε επαυξητικό βήμα. Παρατηρείται ότι και στο hogging και στο sagging η στροφή είναι αρνητική (δεξιόστροφη) μέχρι κάποιο σημείο και μετά θετική (αριστερόστροφη) μέχρι την κατάρρευση της διατομής.

6.6.3 Σύγκρουση (Collision)

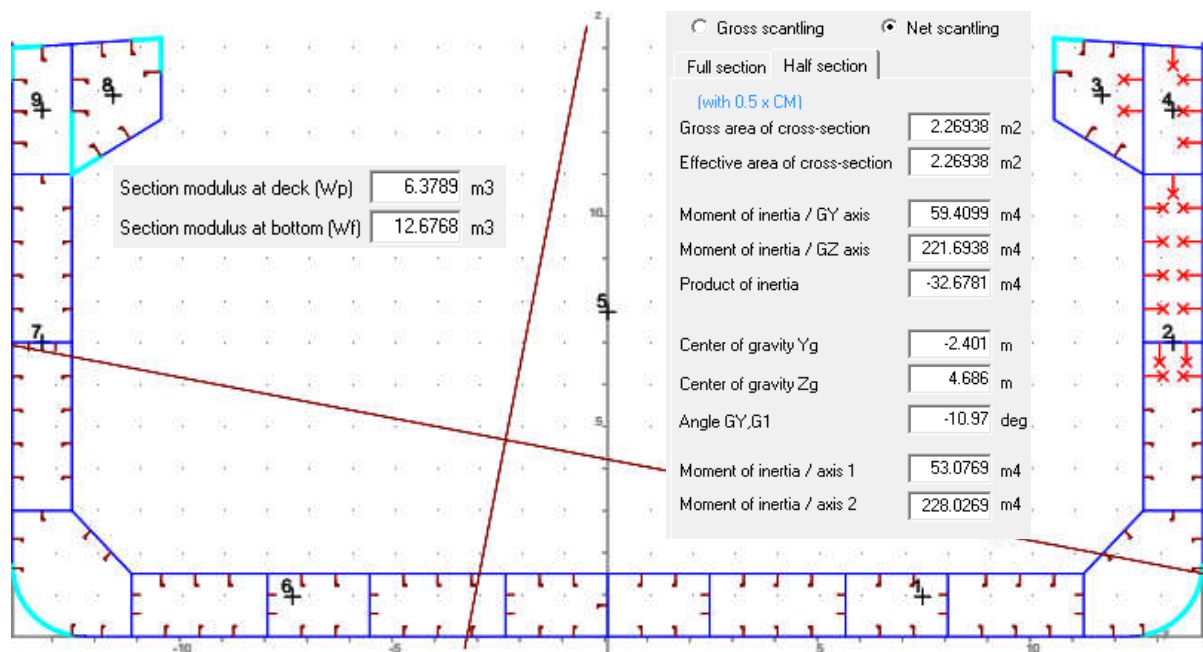
6.6.3α Έλεγχος εναπομένουσας αντοχής



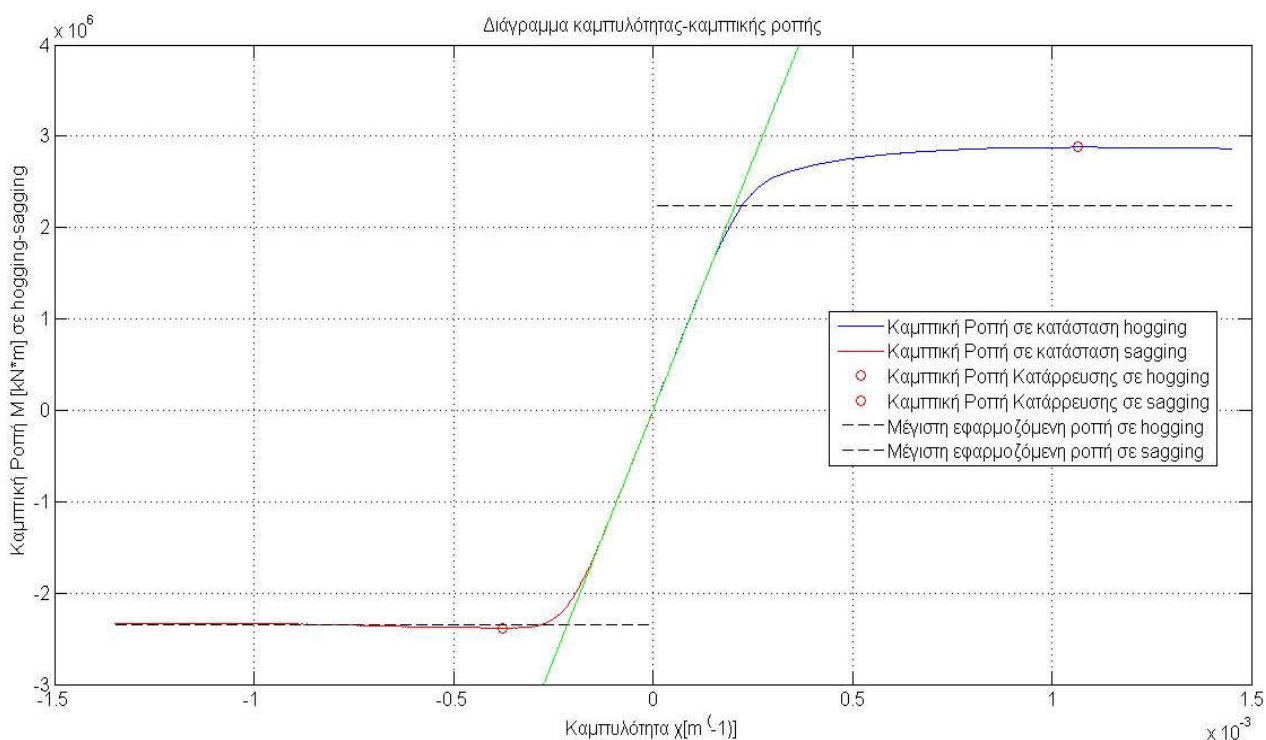
Σχήμα 6.21 Στο Σχήμα φαίνεται η περιοχή βλάβης (άσπρη περιοχή) για την περίπτωση σύγκρουσης του πλοίου. Η βλάβη ορίζεται από $y=12.25\text{ m}$ έως το $y=14.0\text{ m}$ και από $z=5.7\text{ m}$ έως το $z=14.1\text{ m}$. Με χρωματική διαβάθμιση παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\sigma_{\text{appl}}/\sigma_{x,\text{crit}}$ (τάση λυγισμού ελάσματος) που προκύπτει με βάση τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή ($M_{sw}+M_{ww}$) στη δυσμενέστερη κατάσταση (hogging ή sagging). Στις κόκκινες περιοχές προκύπτει ελαστο-πλαστικός λυγισμός (σε sagging).



Σχήμα 6.22 Με χρωματική διαβάθμιση παρουσιάζεται η τιμή του λόγου $\sigma_{\text{appl}}/\sigma_{\text{perm}}$ που προκύπτει με βάση τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή ($M_{sw}+M_{ww}$) στη δυσμενέστερη κατάσταση (hogging ή sagging). Το ότι υπάρχει εκτεταμένη κόκκινη περιοχή σημαίνει ότι για τη μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή προκύπτει ενδεχόμενη διαρροή υλικού.



Σχήμα 6.23 Στο Σχήμα φαίνονται η ελαστική ροπή αντίστασης σε κατάστρωμα & πυθμένα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βεβλαμμένης διατομής. Όπως είναι προφανές, λόγω του ότι η βλάβη είναι ασύμμετρη το σύστημα κυρίων αξόνων (axis1,axis2) δεν συμπίπτει με το σύστημα αξόνων GY,GZ. Στο Σχήμα φαίνεται η θέση του κέντρου βάρους της διατομής G (-2.401,4.686).



Σχήμα 6.24 Διάγραμμα M- χ για την περίπτωση σύγκρουσης που προκύπτει από τον κώδικα Residual_Stength.m σε Matlab. Η πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει την ελαστική κάμψη της διατομής. **Η εναπομένουσα αντοχή είναι επαρκής αφού $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$.** Για την περίπτωση sagging το συντηρητικό κριτήριο ικανοποιείται οριακά.

- Με βάση τα δεδομένα του Σχήματος 5.13 υπολογίζεται η γωνία α του Ελαστικού Ο.Α. :

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{-32.68}{221.69} \right) = -8.39 \text{ deg}$$

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, ο ελαστικός Ο.Α. θα βρίσκεται ανάμεσα στον κύριο άξονα με την μικρότερη ροπή αδράνειας (axis 1) και το διάνυσμα της ροπής \mathbf{M} .

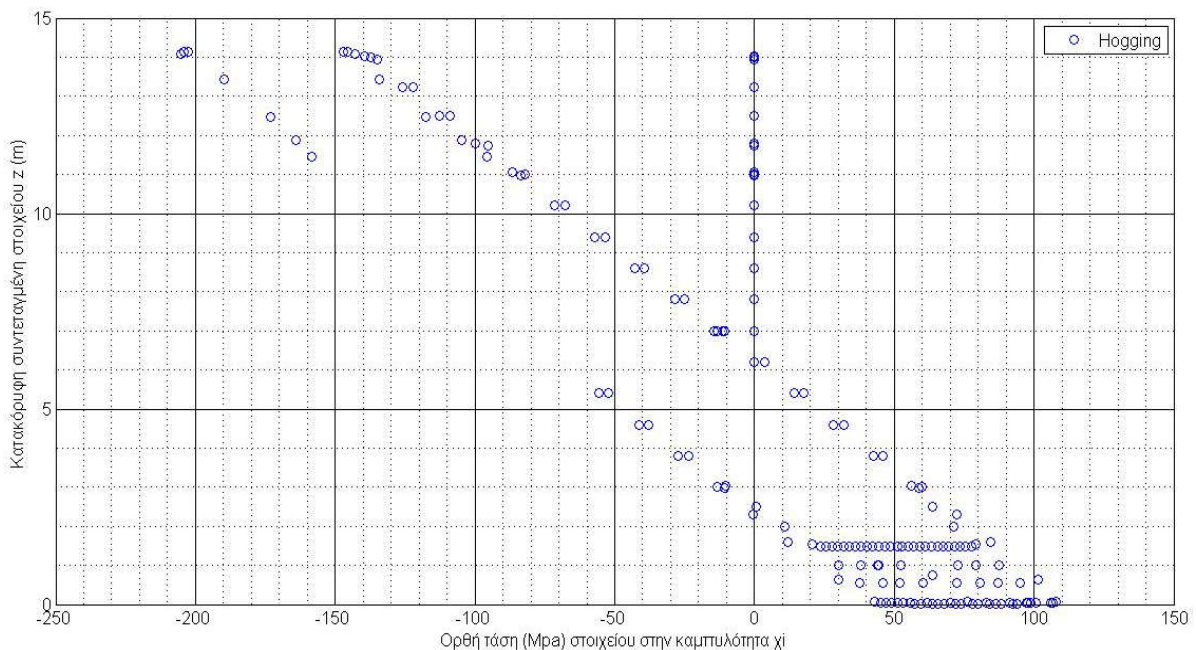
- Η εξίσωση ευθείας του ελαστικού Ο.Α. με βάση το σημείο G και τη γωνία α είναι: $z = -0.147 * y + 4.33$. Για $y=0$ παίρνουμε $z_{CL} = 4.33 \text{ m}$.

Προκύπτουν από τον κώδικα, λοιπόν, τα παρακάτω:

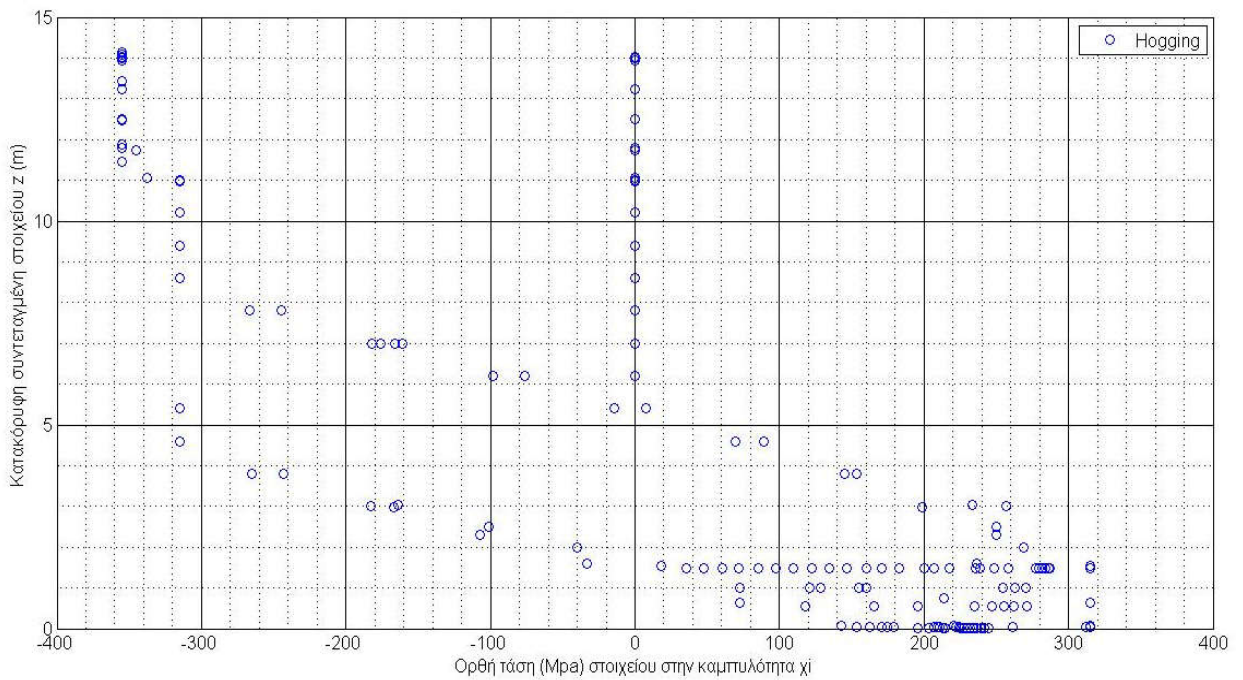
- $M_{UD-hog} = 2,879,719 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-hog} = 1.06 * 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
- $M_{UD-sag} = -2,385,778 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-sag} = -3.76 * 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

Η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging είναι $2,245,905 \text{ kN}\cdot\text{m}$ και η μέγιστη σε sagging $-2,346,937 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ($98.4\% * M_{UD-sag}$).

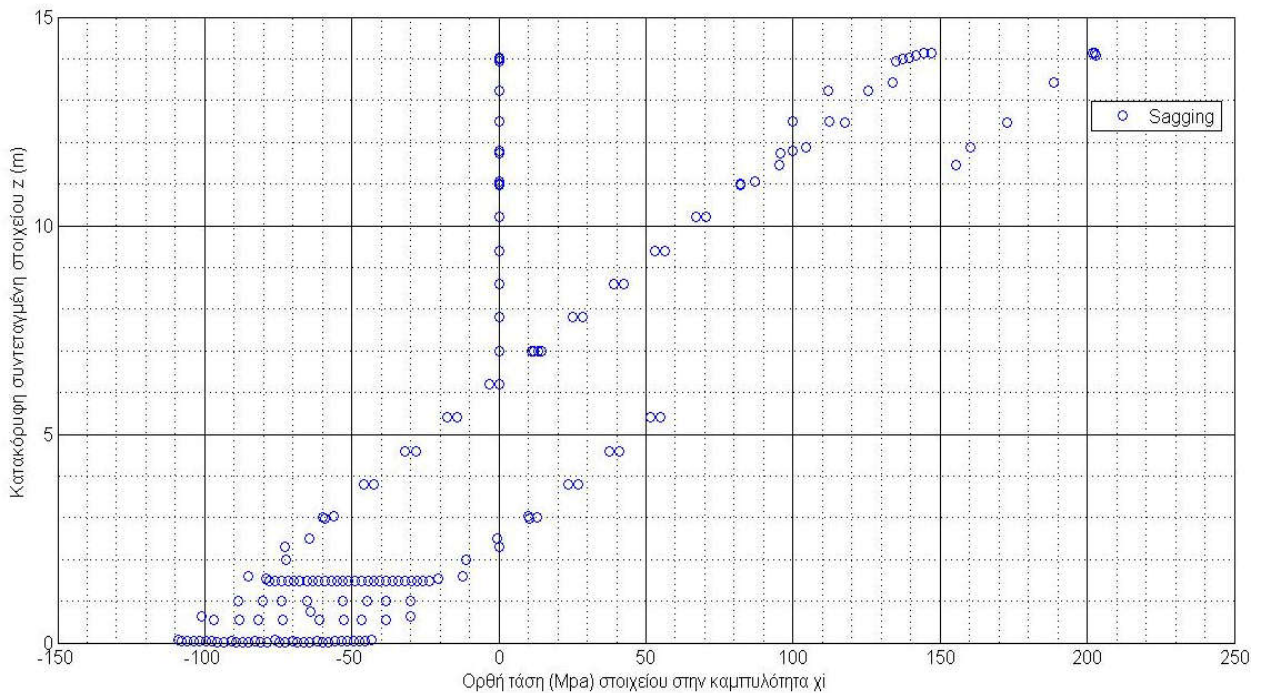
6.6.3β Παρουσίαση της καθ' ύψος κατανομής των ορθών τάσεων για επιλεγμένα βήματα i που αντιστοιχούν σε καμπυλότητα χ_i



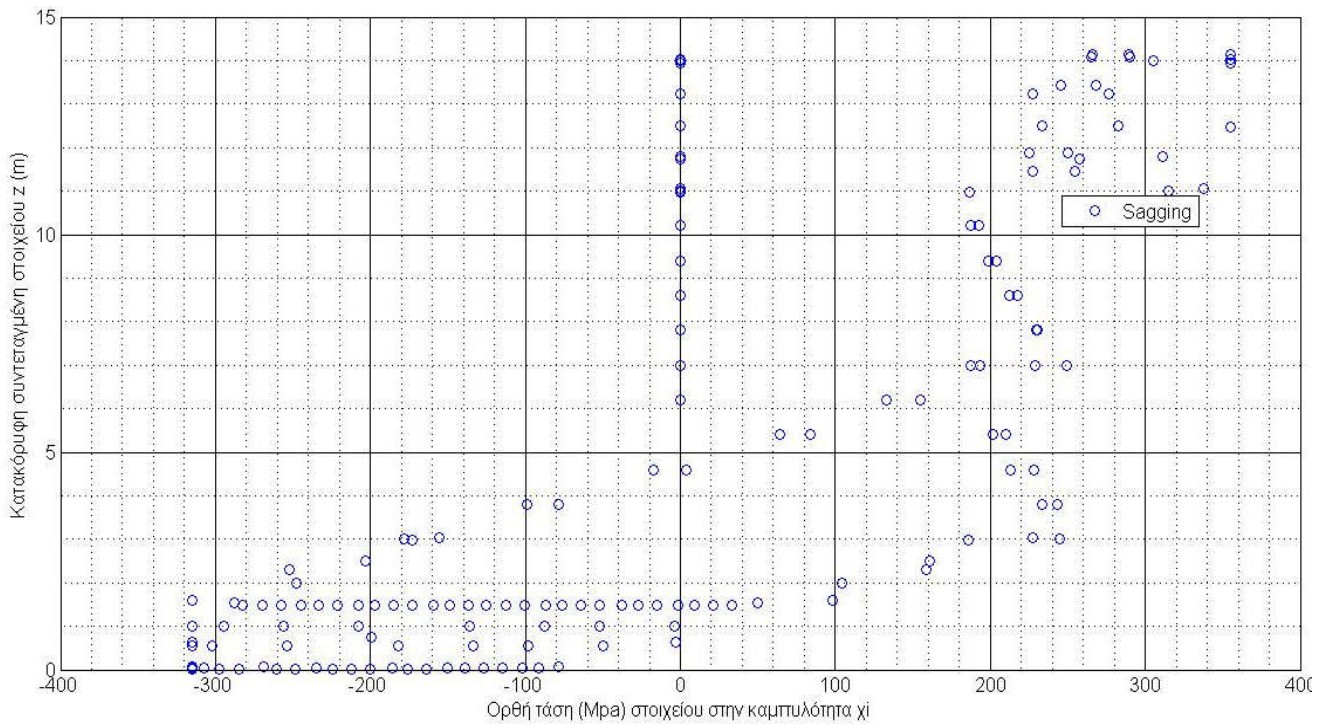
Σχήμα 6.25 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση hogging για $i=50$ ή καμπυλότητα $\chi_i=0.87*10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Παρατηρείται ότι τα συμμετρικά δομικά στοιχεία ως προς τη Centerline ή τα παρακείμενα παρουσιάζουν διαφορετικές ορθές τάσεις μεταξύ τους λόγω της κλίσης του Ο.Α. Η συμπεριφορά της κατανομής είναι γραμμική αφού οι τάσεις βρίσκονται στη γραμμική ελαστική περιοχή. Τα στοιχεία με τάση 0 είναι τα στοιχεία εντός της περιοχής βλάβης.



Σχήμα 6.26 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση hogging για $i=300$ ή καμπυλότητα $\chi_i=5.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Παρατηρείται ότι αρκετά στοιχεία έχουν φτάσει την τάση διαρροής τους (355 Μpa & 315 Μpa). Τα στοιχεία με τάση 0 είναι τα στοιχεία εντός της περιοχής βλάβης.

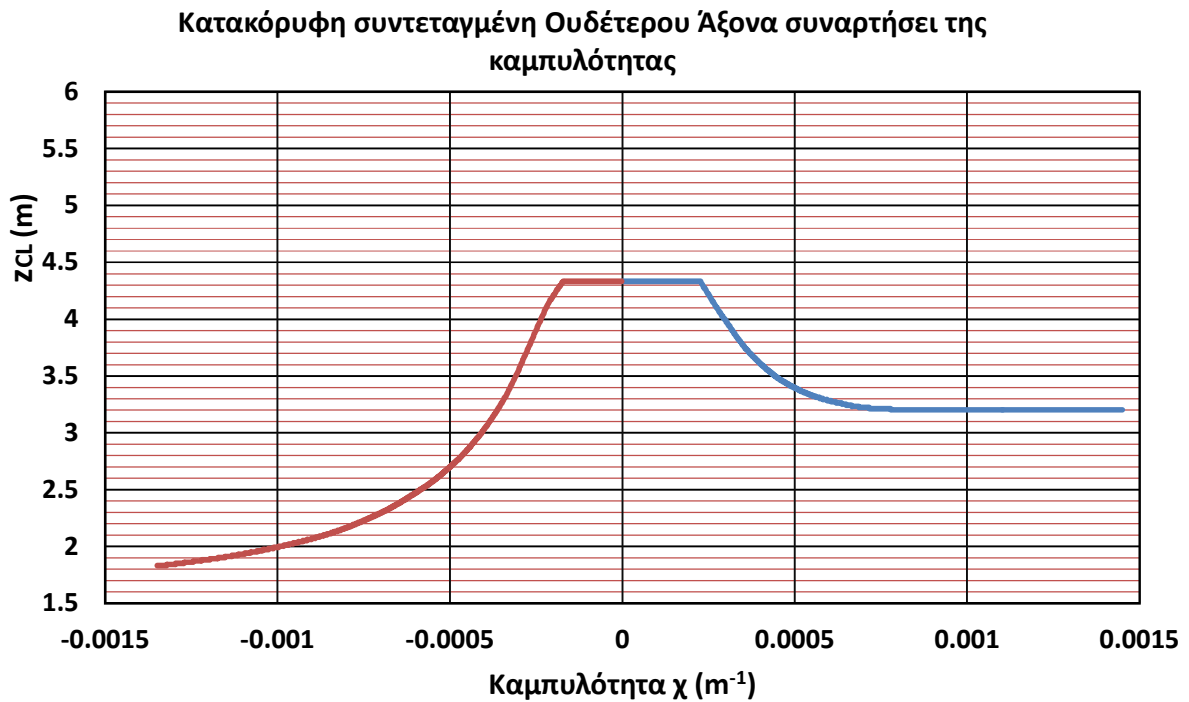


Σχήμα 6.27 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση sagging για $i=50$ ή καμπυλότητα $\chi_i=-0.87 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. Παρατηρείται ότι τα συμμετρικά δομικά στοιχεία ως προς τη Centerline ή τα παρακαείμενα παρουσιάζουν διαφορετικές ορθές τάσεις μεταξύ τους λόγω της κλίσης του Ο.Α. Η συμπεριφορά της κατανομής είναι γραμμική αφού οι τάσεις βρίσκονται στη γραμμικά ελαστική περιοχή. Τα στοιχεία με τάση 0 είναι τα στοιχεία εντός της περιοχής βλάβης.

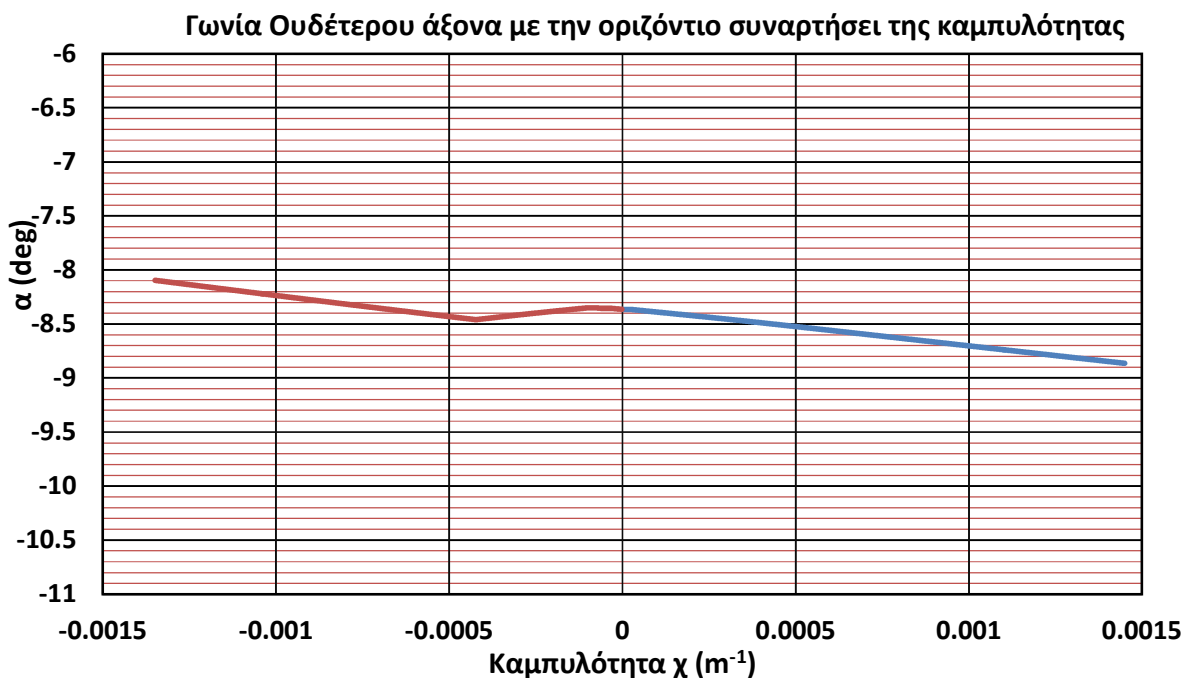


Σχήμα 6.28 Κατανομή ορθών τάσεων στα επιμέρους δομικά στοιχεία κατά το ύψος της βεβλαμμένης διατομής σε κατάσταση *sagging* για $i=300$ ή καμπυλότητα $\chi_i=-5.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ δηλαδή η διατομή έχει καταρρεύσει. Παρατηρείται ότι τα περισσότερα στοιχεία στη θλιβόμενη περιοχή έχουν καταρρεύσει υπερβαίνοντας την τάση διαρροής τους (355 Μρα & 315 Μρα) ή με ελαστο-πλαστικό λυγισμό. Στην εφελκυσμένη πλευρά τα περισσότερα στοιχεία βρίσκονται στην ελαστική περιοχή. Τα στοιχεία με τάση 0 είναι τα στοιχεία εντός της περιοχής βλάβης.

6.6.3γ Θέση Ουδέτερου Άξονα συναρτήσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας χ

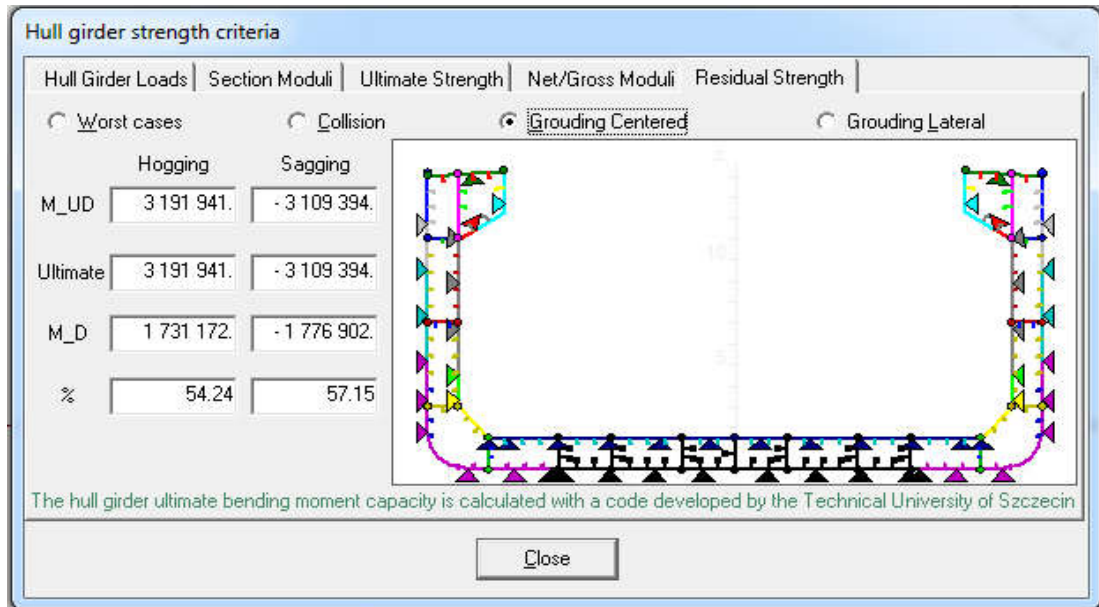


Σχήμα 6.29 Στο σχήμα διαπιστώνεται η κατακόρυφη μετατόπιση dz του Ο.Α. σε hogging (μπλε καμπύλη) και sagging (κόκκινη καμπύλη). Η καθοδική πορεία του Ο.Α. σε hogging και sagging οφείλεται στην αποδυνάμωση της αντοχής των περιοχών του καταστρώματος.

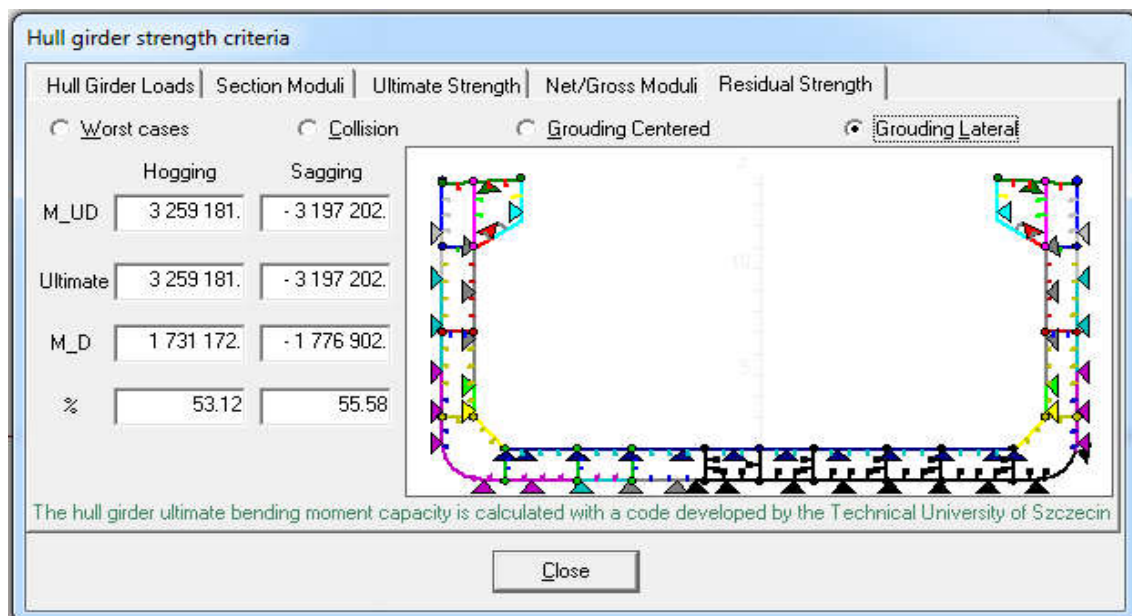


Σχήμα 6.30 Στο σχήμα διαπιστώνεται η στροφή του Ο.Α. $\delta\alpha$ σε hogging (μπλε καμπύλη) και sagging (κόκκινη καμπύλη) προκειμένου να μηδενίζεται η συνιστώσα M_z σε κάθε επαυξητικό βήμα.

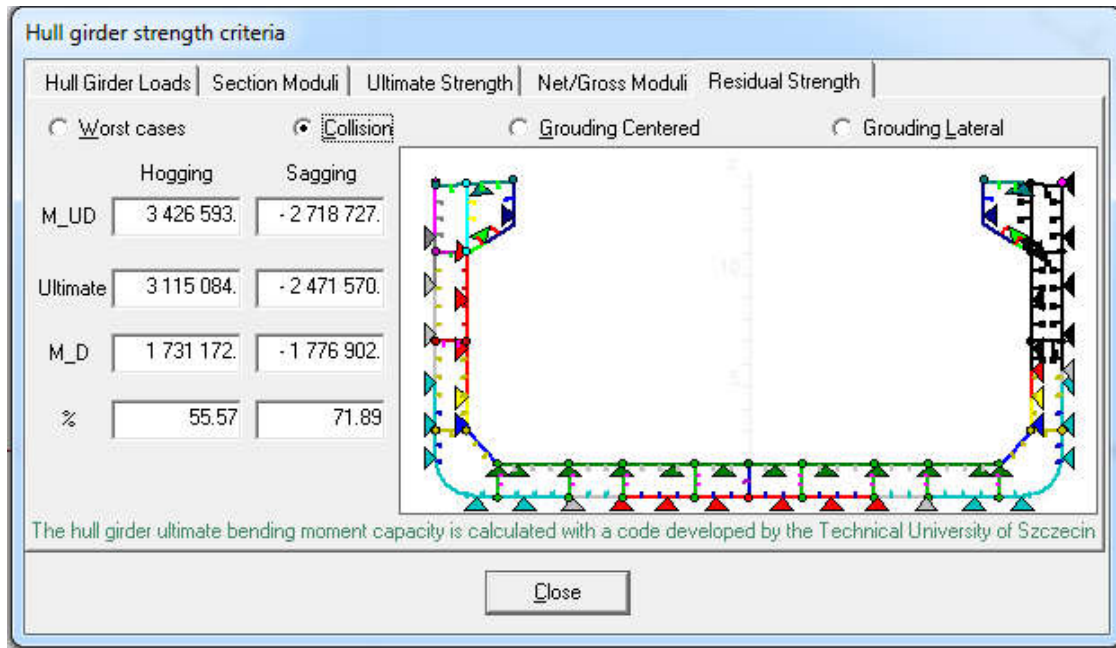
6.6.4 Εύρεση εναπομένουσας αντοχής με το λογισμικό MARS 2000 (απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος) για τα 3 σενάρια βλάβης & έλεγχος κριτηρίου των CSR-H για επάρκεια της εναπομένουσας αντοχής σε κάθε περίπτωση



Σχήμα 6.31 Περίπτωση συμμετρικής προσάραξης του Bulk Carrier



Σχήμα 6.32 Περίπτωση ασύμμετρης προσάραξης του Bulk Carrier



Σχήμα 6.33 Περίπτωση σύγκρουσης του Bulk Carrier

Όπως είναι αντιληπτό, το κριτήριο των CSR-H ικανοποιείται σε όλες τις περιπτώσεις βλάβης και με μεγάλα περιθώρια της τάξης του 19-45% μέχρι την τελική κατάρρευση.

6.6.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου με τα αντίστοιχα της απλοποιημένης λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή O.A.

Πίνακας 6.1 Πίνακας σύγκρισης εκτιμώμενων ροπών κατάρρευσης για hogging

Μονάδες Μέτρησης: kN*m	A Τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος (Matlab)	B Απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδος & χρήση συντελεστή O.A. (Mars 2000)	Απόκλιση (A-B)/A*100%
Grounding Centered	3,215,635	3,191,941	0.74 %
Grounding Lateral	3,233,012	3,259,181	-0.81 %
Collision	2,879,719	3,115,084	-8.17 %

Πίνακας 6.2 Πίνακας σύγκρισης εκτιμώμενων ροπών κατάρρευσης για **sagging**

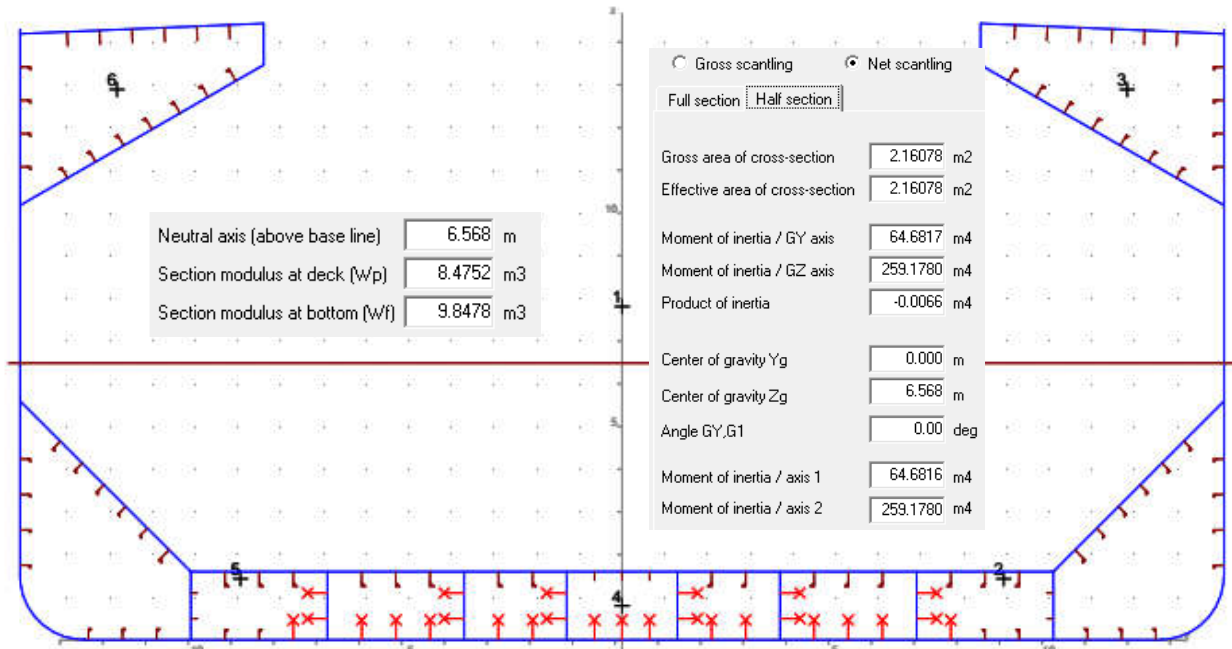
Μονάδες Μέτρησης: kN*m	A Τροποποιημένη επαυξητική- επαναληπτική μέθοδος (Matlab)	B Απλοποιημένη επαυξητική- επαναληπτική μέθοδος & χρήση συντελεστή O.A. (Mars 2000)	Απόκλιση (A-B)/A*100%
Grounding Centered	-3,205,419	-3,109,194	3.00 %
Grounding Lateral	-3,209,101	-3,197,202	0.37 %
Collision	-2,385,778	-2,471,570	-3.60 %

6.6.6 Αξιολόγηση βεβλαμμένων καταστάσεων

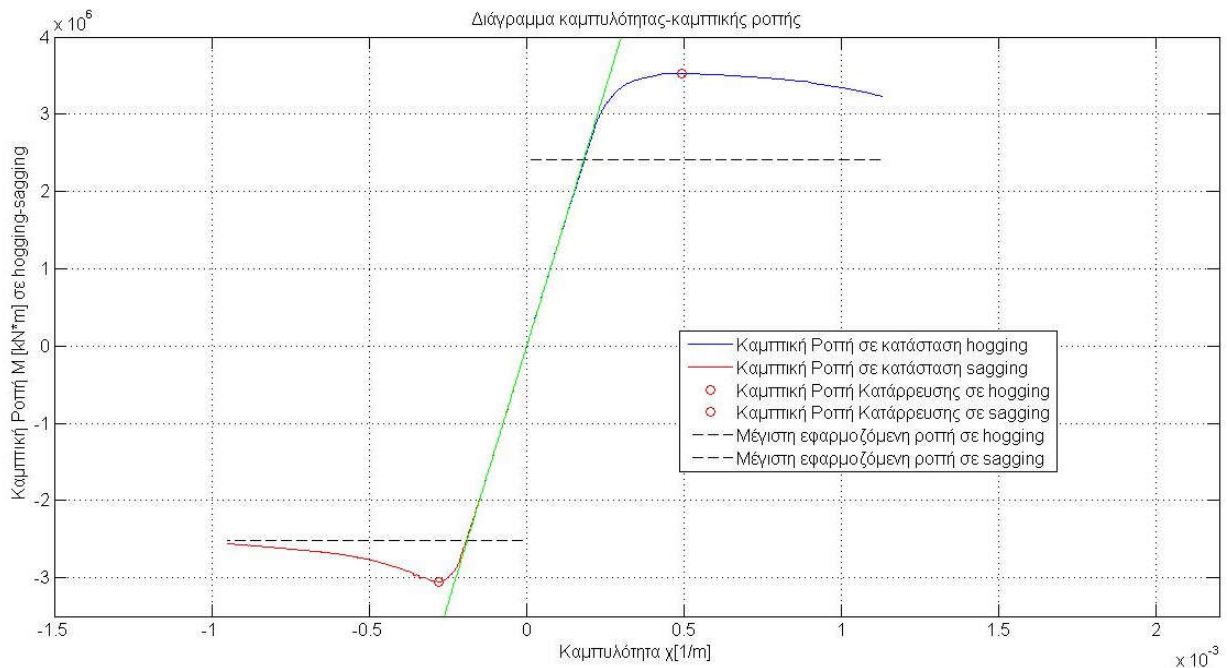
Η δυσμενέστερη βλάβη είναι η πλευρική λόγω σύγκρουσης, καθώς από αυτήν προκύπτουν οι μικρότερες τιμές εναπομένουσας αντοχής σε hogging & sagging και άρα υπάρχει το μικρότερο περιθώριο αύξησης της εφαρμοζόμενης ροπής λόγω κυματισμών. Επίσης, τα αποτελέσματα (Ultimate τιμές) παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες από την τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο για τις 2 περιπτώσεις προσάραξης επειδή η κλίση του O.A. ως προς την οριζόντιο είναι μηδενική ή μικρή. Αντίθετα, για την περίπτωση της σύγκρουσης υπάρχει σημαντικότερη απόκλιση (βλ. παραπάνω πίνακες).

6.7 Εφαρμογή της τροποποιημένης επαυξητικής-επαναληπτικής μεθόδου για το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος

6.7.1 Συμμετρική προσάραξη (Grounding Centered)



Σχήμα 6.34 Στο Σχήμα φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βεβλαμμένης διατομής. Όπως είναι προφανές, λόγω του ότι η βλάβη είναι συμμετρική το σύστημα κυρίων αξόνων συμπίπτει με το σύστημα αξόνων GY,GZ. Η βλάβη ορίζεται από το $y=-8.46$ έως $y=8.46$ m και $z=0$ έως $z=1.4$ m.



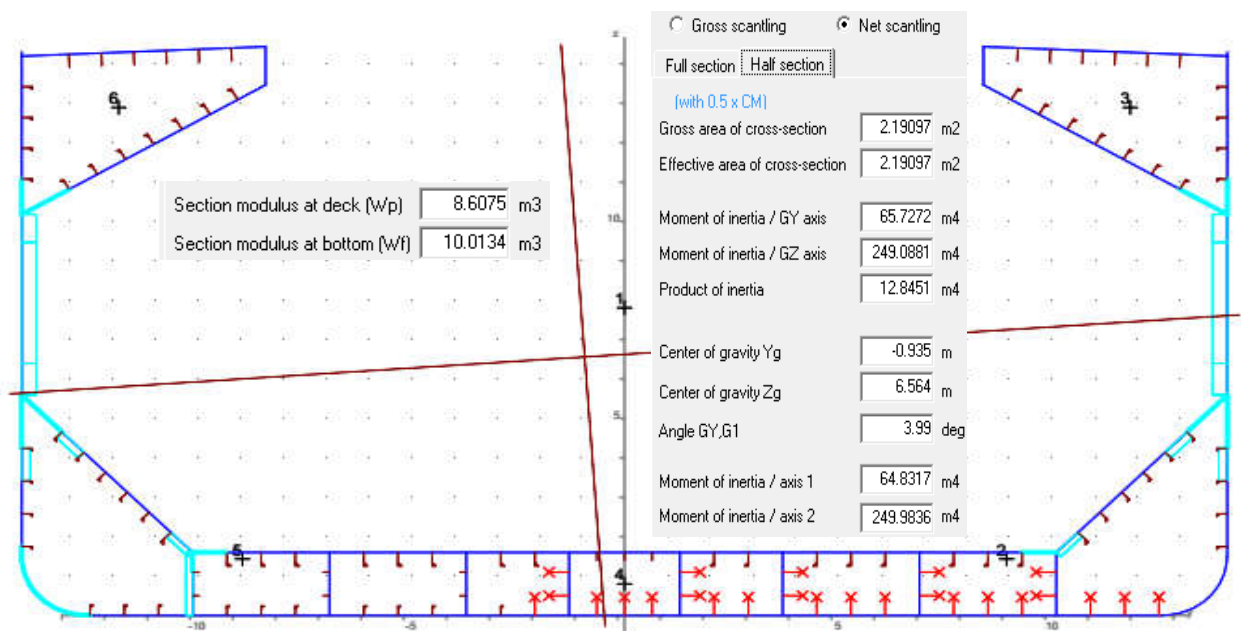
Σχήμα 6.35 Διάγραμμα M-χ για την περίπτωση συμμετρικής προσάραξης που προκύπτει από τον κώδικα Residual_Stength.m σε Matlab. Η πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει την ελαστική κάμψη της διατομής. Η **εναπομένουσα αντοχή είναι επαρκής αφού $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$.**

Προκύπτουν από τον κώδικα τα παρακάτω:

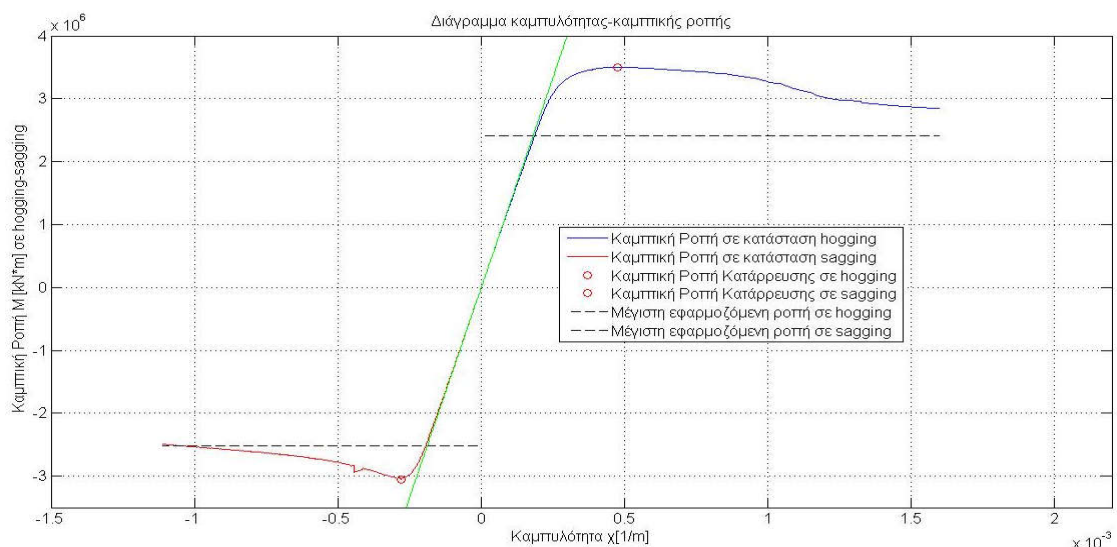
- $M_{UD-hog} = 3,528,312 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-hog} = 4.92 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{UD-sag} = -3,050,200 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-sag} = -2.63 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

Η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging είναι $2,409,251 \text{ kN}\cdot\text{m}$ και η μέγιστη σε sagging $-2,511,317 \text{ kN}\cdot\text{m}$ (από την άθικτη κατάσταση, σελ. 63/Κεφάλαιο 5).

6.7.2 Ασύμμετρη προσάραξη (Grounding Lateral)



Σχήμα 6.36 Στο Σχήμα φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βεβλαμμένης διατομής. Η βλάβη ορίζεται από το $\gamma = -2.82$ έως $\gamma = 14.1 \text{ m}$ και $z = 0$ έως $z = 1.4 \text{ m}$.



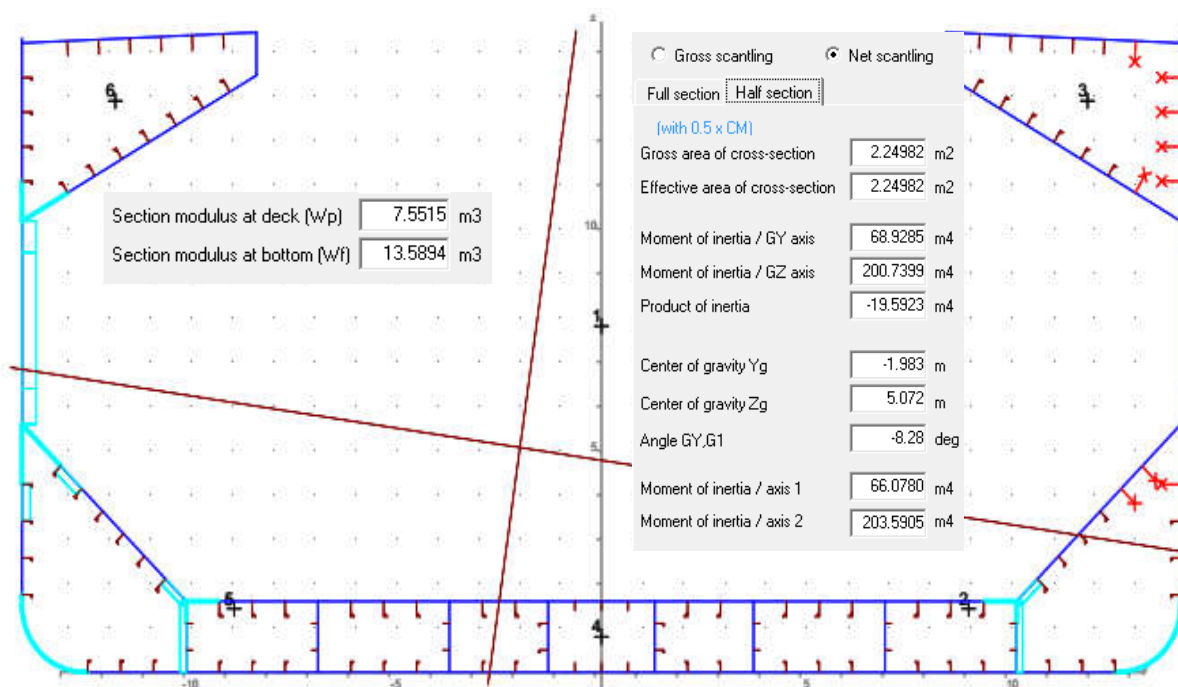
Σχήμα 6.37 Διάγραμμα M- χ για την περίπτωση ασύμμετρης προσάραξης που προκύπτει από τον κώδικα Residual_Stength.m σε Matlab. Η πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει την ελαστική κάμψη της διατομής. **Η εναπομένουσα αντοχή είναι επαρκής αφού $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$.**

Προκύπτουν από τον κώδικα τα παρακάτω:

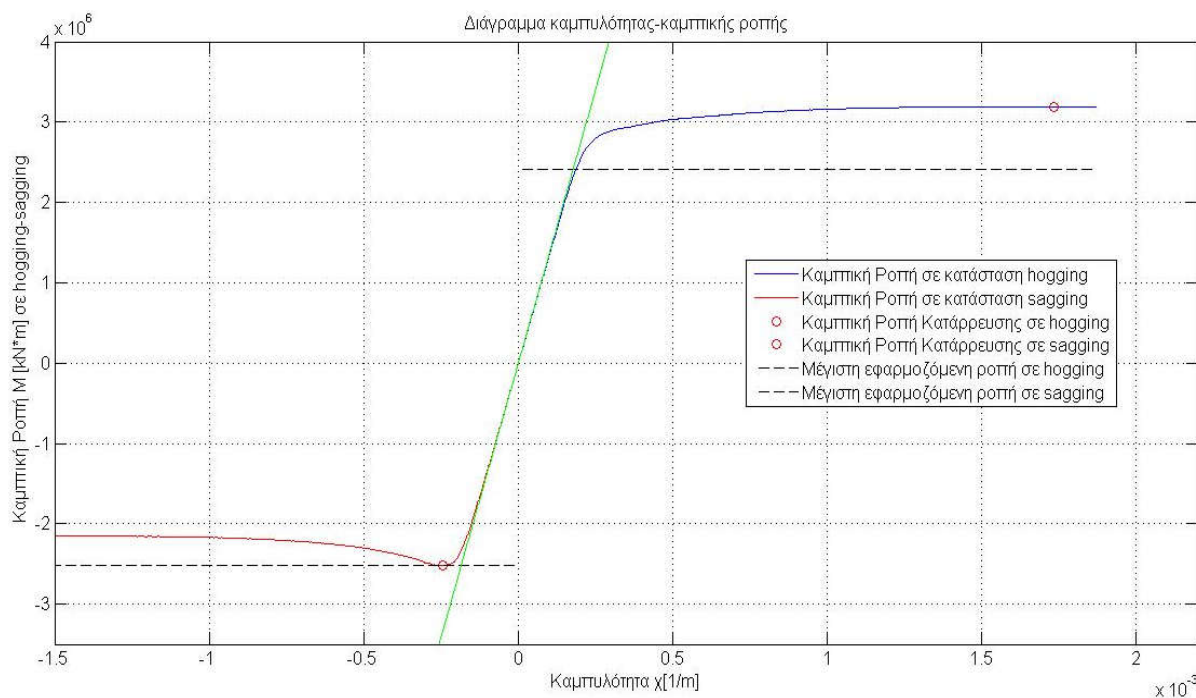
- $M_{UD-hog} = 3,503,745 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-hog} = 4.74 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$
- $M_{UD-sag} = -3,048,395 \text{ kN}\cdot\text{m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-sag} = -2.79 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

Η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging είναι 2,409,251 kN*m και η μέγιστη σε sagging -2,511,317 kN*m.

6.7.3 Σύγκρουση (Collision)



Σχήμα 6.38 Στο Σχήμα φαίνονται η ελαστική ροπή αντίστασης σε κατάστρωμα & πυθμένα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της βεβλαμμένης διατομής. Όπως είναι προφανές, λόγω του ότι η βλάβη είναι ασύμμετρη το σύστημα κυρίων αξόνων (axis1,axis2) δεν συμπίπτει με το σύστημα αξόνων GY,GZ. Στο Σχήμα φαίνεται η θέση του κέντρου βάρους της διατομής G (-1.983,5.072). Η βλάβη ορίζεται στη δεξιά πλευρά της διατομής από $\gamma=12.34$ έως $\gamma=14.2 \text{ m}$ (απεριόριστα προς τα δεξιά) και από $z=3.55$ έως $z=14.3 \text{ m}$ (απεριόριστα προς τα πάνω).



Σχήμα 6.39 Διάγραμμα M-χ για την περίπτωση σύγκρουσης που προκύπτει από τον κώδικα Residual_Stength.m σε Matlab. Η πράσινη καμπύλη αντιπροσωπεύει την ελαστική κάμψη της διατομής. Η **εναπομένουσα αντοχή είναι επαρκής αφού $|M_{D-INT}| \leq |M_{UD}|$** . Στο sagging κριτήριο ικανοποιείται οριακά.

Προκύπτουν από τον κώδικα, λοιπόν, τα παρακάτω:

- $M_{UD-hog} = 3,192,296 \text{ kN*m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-hog} = 1.73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
- $M_{UD-sag} = -2,524,269 \text{ kN*m}$ στην καμπυλότητα $\chi_{UD-sag} = -0.25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Η μέγιστη εφαρμοζόμενη ροπή σε hogging είναι 2,409,251 kN*m και η μέγιστη σε sagging -2,511,317 kN*m (99.48% * M_{UD}).

6.7.4 Αξιολόγηση βεβλαμμένων καταστάσεων

Εφόσον ικανοποιείται το κριτήριο άθικτης κατάστασης (βλ. σελ. 172) για όλα τα σενάρια βλάβης, τότε ικανοποιείται σίγουρα το κριτήριο των κανονισμών CSR-H. Η δυσμενέστερη βλάβη και για το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος είναι η πλευρική βλάβη λόγω σύγκρουσης, καθώς από αυτήν προκύπτουν οι μικρότερες τιμές εναπομένουσας αντοχής σε hogging & sagging και άρα υπάρχει το μικρότερο περιθώριο αύξησης της εφαρμοζόμενης ροπής λόγω κυματισμών ή κατάκλυσης.

6.8 Εξαγωγή συντελεστών RIF (Residual Strength Index Factor) για τα εξεταζόμενα Bulk Carriers και σύγκριση μεταξύ τους

Ο συντελεστής $RIF = \frac{M_U-DAMAGED}{M_U-INTACT}$ δίνει το λόγο της μέγιστης άντοχης του πλοίου στη βεβλαμμένη κατάσταση προς τη μέγιστη άντοχή του στην άθικτη κατάσταση [4]. Δε γίνεται χρήση συντελεστών ασφαλείας, παρά μόνο διαιρούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την τροποποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο για τη βεβλαμμένη κατάσταση και την απλοποιημένη για την άθικτη κατάσταση. Με βάση την ανωτέρω σχέση προκύπτουν τα εξής:

Πίνακας 6.3 Πίνακας σύγκρισης συντελεστών RIF των δύο Bulk Carriers για hogging.

HOGGING	Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος
RIF_{GROUND_CENT}	0.825	0.910
RIF_{GROUND_LATER}	0.830	0.904
RIF_{COLLISION}	0.739	0.824

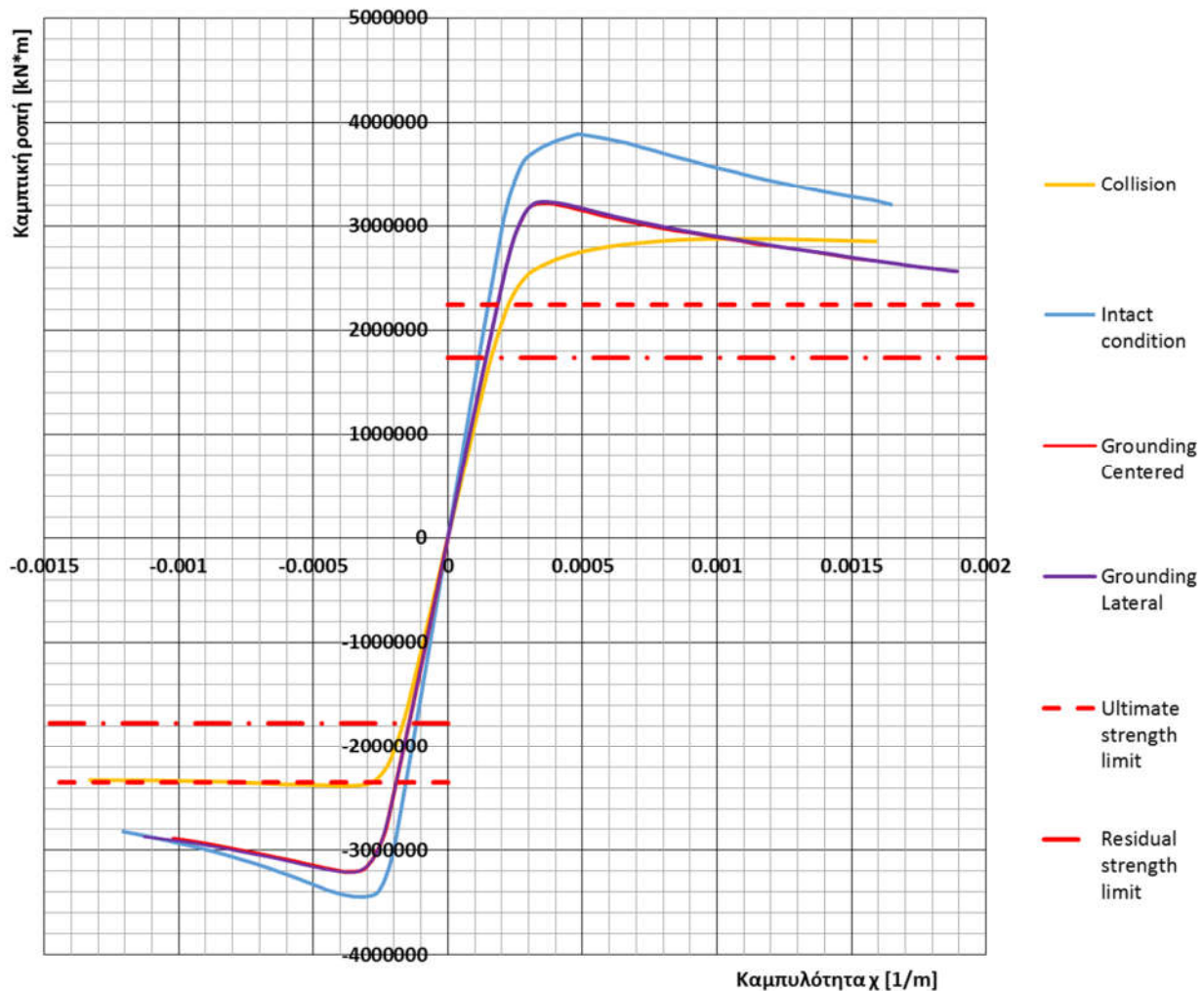
Πίνακας 6.4 Πίνακας σύγκρισης συντελεστών RIF των δύο Bulk Carriers για sagging.

SAGGING	Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος
RIF_{GROUND_CENT}	0.942	0.964
RIF_{GROUND_LATER}	0.943	0.975
RIF_{COLLISION}	0.701	0.798

Παρατηρείται ότι το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος είναι πιο «ανθεκτικό» έναντι βλάβης, καθώς η άντοχή του σε κάθε βεβλαμμένη κατάσταση (σενάριο) τόσο για hogging όσο και για sagging διατηρείται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την αρχική κατάσταση ($RIF_{BULK_MONΟΥ} > RIF_{BULK_ΔΙΠΛΟΥ}$) από ό,τι στο Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος. Η διαφορά γίνεται έντονα εμφανής στην περίπτωση της σύγκρουσης. Αυτό το πλεονέκτημα του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος εξαρτάται προφανώς από την επιφάνεια δομικών στοιχείων που αφαιρείται λόγω της κάθε βλάβης και της κρισιμότητας που έχουν αυτά για τη μέγιστη άντοχή, π.χ. οι ανθεκτικές γωνίες αντέχουν περισσότερο.

6.9 Συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα μέγιστης & εναπομένουσας αντοχής για τα δύο Bulk Carriers

Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος: Καμπύλες κατακόρυφης καμπτικής ροπής συναρτήσει της καμπυλότητας & όρια μέγιστης καμπτικής φόρτισης

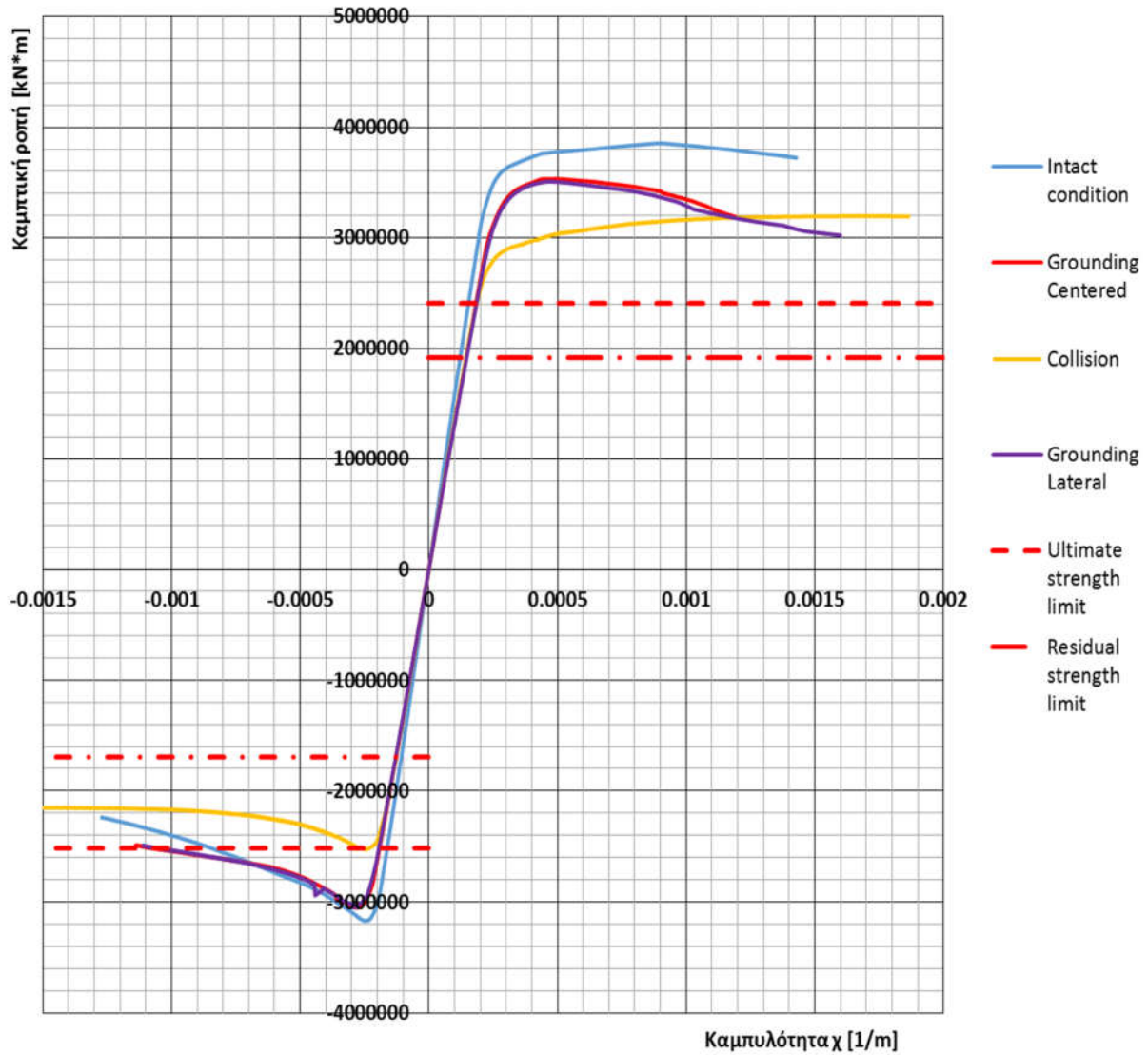


Σχήμα 6.40 Συγκεντρωτικό διάγραμμα Μ-χ.

Πίνακας 6.5 Πίνακας που υποδηλώνει τι ποσοστό της εναπομένουσας αντοχής για κάθε βεβλαμμένη κατάσταση του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος είναι η προβλεπόμενη από τους CSR-H καμπτική φόρτιση.

(Residual str. Limit / M_{UD})*100%	HOGGING	SAGGING
Grounding Centered	53.83 %	55.43 %
Grounding Lateral	53.54 %	55.37 %
Collision	60.11 %	Δυσμενέστερο: 74.48 %

Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος: Καμπύλες κατακόρυφης καμπτικής ροπής συναρτήσει της καμπλότητας & όρια μέγιστης καμπτικής φόρτισης



Σχήμα 6.41 Συγκεντρωτικό διάγραμμα Μ-χ.

Πίνακας 6.6 Πίνακας που υποδηλώνει τι ποσοστό της εναπομένουσας αντοχής για κάθε βεβλαμμένη κατάσταση του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος είναι η προβλεπόμενη από τους CSR-H καμπτική φόρτιση.

(Residual str. Limit / M_{UD})*100%	HOGGING	SAGGING
Grounding Centered	54.29 %	55.42 %
Grounding Lateral	54.67 %	55.45 %
Collision	60.00 %	Δυσμενέστερο: 66.97 %

6.10 Πίνακες σύγκρισης μέγιστης & εναπομένουσας αντοχής

Πίνακας 6.7 Στον Πίνακα φαίνεται ποιο πλοίο έχει τη μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή σε κάθε κατάσταση για καμπτική καταπόνηση hogging.

HOGGING	Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος
INTACT	3,897,418 kN*m	3,875,153 kN*m
GROUND. CENT.	3,215,633 kN*m	3,528,312 kN*m
GROUND. LATERAL	3,233,012 kN*m	3,503,745 kN*m
COLLISION	2,879,778 kN*m	3,192,296 kN*m

Παρατηρείται ότι το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος υπερτερεί σε hogging, πλην της περίπτωσης άθικτης κατάστασης, όπου η διαφορά είναι μικρή.

Πίνακας 6.8 Στον Πίνακα φαίνεται ποιο πλοίο έχει τη μεγαλύτερη μέγιστη αντοχή σε κάθε κατάσταση για καμπτική καταπόνηση sagging.

SAGGING	Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος	Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος
INTACT	-3,401,572 kN*m	-3,162,741 kN*m
GROUND. CENT.	-3,205,419 kN*m	-3,050,200 kN*m
GROUND. LATERAL	-3,209,101 kN*m	-3,048,395 kN*m
COLLISION	-2,385,778 kN*m	-2,524,269 kN*m

Παρατηρείται ότι το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος υπερτερεί σε sagging, πλην της περίπτωσης σύγκρουσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι πολλές ανθεκτικές γωνίες (πλευρικά και στο κατάστρωμα), που διαθέτει το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος, συνεχίζουν να παραλαμβάνουν ορθές τάσεις και αφότου τα παρακείμενα ενισχυτικά στοιχεία έχουν αστοχήσει με λυγισμό. Έτσι η διατομή του αργεί να καταρρεύσει. Στην περίπτωση σύγκρουσης, όμως, η εικόνα αυτή αντιστρέφεται, αφού πολλές ανθεκτικές γωνίες εξουδετερώνονται λόγω της βλάβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Γενικά συμπεράσματα

1. Η μέγιστη αντοχή των άθικτων Bulk-Carriers είναι επαρκής σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR-H του IACS. Μάλιστα παρουσιάζουν σημαντικό περιθώριο αντοχής μέχρι την υποτιθέμενη κατάρρευση. Τα κριτήρια των CSR-H ικανοποιούνται και στη βεβλαμμένη κατάσταση.
2. Μικρότερη μέγιστη αντοχή παρουσιάζεται στην κατάσταση sagging από ό.τι σε hogging λόγω εμφάνισης του λυγισμού, που προηγείται της διαρροής, στα δομικά στοιχεία της κατασκευής.
3. Όπως προέκυψε από το Κεφάλαιο 6, όσον αφορά τις ασύμμετρες βλάβες, η κατακόρυφη μετατόπιση του Ουδέτερου Άξονα ισορροπεί τις αξονικές δυνάμεις και η περιστροφή του εξασφαλίζει το μηδενισμό της οριζόντιας ροπής M_z . Πρόκειται για δύο διαδικασίες που λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους.
4. Η περιστροφή του Ουδέτερου Άξονα έχει σημαντική επίδραση στην εναπομένουσα αντοχή της βεβλαμμένης διατομής, ιδιαίτερα στην περίπτωση σύγκρουσης. Συγκεκριμένα η μείωση του 10% της εναπομένουσας αντοχής, που θεωρούν οι κανονισμοί CSR-H μέσω του συντελεστή $C_{NA} = 1.1$, δεν είναι απολύτως λογική, διότι αυτός ο συντελεστής μείωσης εξαρτάται άμεσα από την περιοχή (location) της βλάβης και την έκτασή (extent of damage) της.
5. Η δυσμενέστερη βεβλαμμένη κατάσταση και για τα δύο Bulk Carriers, τόσο σε hogging όσο και σε sagging, προέκυψε ότι είναι αυτή λόγω σεναρίου σύγκρουσης.
6. Επικρατούσα μορφή κατάρρευσης ενισχυτικών στοιχείων με βολβολάμα ο λυγισμός δοκού-κολόνας.

Συμπεράσματα βάσει σύγκρισης των δύο Bulk Carriers

7. Στην άθικτη κατάσταση υπερτερεί το Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος, ενώ στις βεβλαμμένες καταστάσεις το Μονού Τοιχώματος, πλην του sagging σε συμμετρική και ασύμμετρη προσάραξη.
8. $RIF_{BULK_MONOY} > RIF_{BULK_ΔΙΠΛΟΥ}$ (RIF : Residual strength index factor), επειδή το Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος έχει μεγαλύτερη ελαστική ροπή αντίστασης και άρα διαρρέει σε υψηλότερες τάσεις. Βεβαίως ο συντελεστής μείωσης της μέγιστης αντοχής λόγω βλάβης, RIF , εξαρτάται από την έκταση και την περιοχή της βλάβης. Επομένως θα μπορούσε να θεωρηθεί ως τυχαία συνάρτηση και να μελετηθεί με πιθανοθεωρητικά μοντέλα δεδομένης της τυχαιότητας της βλάβης.
9. Παρατηρήθηκε ότι τα ενισχυτικά στοιχεία που διαθέτουν ενισχυτικά με φλάντζα καταρρέουν σε μεγαλύτερη τάση από αυτά που δεν έχουν. Οι απλές λάμες αστοχούν πιο εύκολα λόγω μικρότερης στρεπτικής και καμπτικής τους ακαμψίας. Ένας λόγος που το κατάστρωμα του Bulk Carrier Μονού Τοιχώματος καταρρέει «γρήγορα» είναι ότι τα ενισχυτικά του καταστρώματος ως απλές λάμες αστοχούν σε μικρότερη τάση από τις αντίστοιχες βολβολάμες του Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος.

Προτάσεις για μελλοντική διεύρυνση της εργασίας

Στην εξαγωγή των καμπυλών σ-ε για κάθε δομικό στοιχείο αγνοήθηκε η επίδραση των παραμενουσών τάσεων & παραμορφώσεων καθώς και η επίδραση της κάθετης φόρτισης που εν γένει μεταβάλλουν την κλίση της καμπύλης (μέτρο ακαμψίας) σε κάθε σχετική αξονική παραμόρφωση και μεταβάλλουν την κρίσιμη τάση κατάρρευσης του στοιχείου. Για το λόγο αυτό πάρθηκε συντελεστής ασφαλείας σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR-H για την τελική εκτίμηση της μέγιστης αντοχής των πλοίων στην άθικτη κατάσταση. Μια πιο ακριβής εκτίμηση των καμπυλών σ-ε για τα δομικά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει μέσω NLFEM, όπου παράλληλα θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και άλλες φορτίσεις πέραν της αξονικής, που οδηγούν σε ελαστο-πλαστικό λυγισμό.

Ακόμα πρέπει να σημειωθεί ότι στην παρούσα διπλωματική δε γίνεται λόγος για τη διαμήκη έκταση της βλάβης (longitudinal extent of damage), καθώς γίνεται η παραδοχή ότι η βλάβη υφίσταται μεταξύ δύο εγκάρσια ενισχυμένων νομέων και τα παρακείμενα κατά το διάμηκες στοιχεία εκατέρωθεν αυτών των νομέων παραμένουν άθικτα. Αυτή η παραδοχή, όμως, ενδέχεται να μεταβάλλει σημαντικά την εναπομένουσα αντοχή. Για το λόγο αυτό η μέθοδος των NLFEM μπορεί να αποδειχθεί σίγουρα πιο ακριβής σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου οι οριακές συνθήκες των δομικών στοιχείων μεταβάλλονται.

Χρησιμοποιώντας ως βάση τον κώδικα που παρουσιάζεται στο Παράρτημα Ε' θα ήταν δυνατό να προσδιοριστεί η εναπομένουσα αντοχή κατόπιν βλάβης για ένα Bulk Carrier ή Tanker. Στη συνέχεια θεωρώντας πολλές βλάβες μεταβλητού μεγέθους κατά το πλάτος και κατά το ύψος θα μπορούσε να εξαχθεί μια ακριβής σχέση για το πώς μειώνεται η μέγιστη αντοχή του πλοίου συναρτήσει των διαστάσεων της βλάβης και της περιοχής της. Επίσης ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει ο κώδικας της εναπομένουσας αντοχής με τα αντίστοιχα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (NLFEM) ή της μεθόδου ιδεατών δομικών μονάδων (ISUM), οι οποίες μπορούν να συμπεριλάβουν περαιτέρω φορτίσεις και επιπλέον μη γραμμικότητες υλικού και γεωμετρίας. Τέλος, χρήσιμο θα ήταν να εφαρμοστεί η απλοποιημένη και η τροποποιημένη μέθοδος και για μεγαλύτερων διαστάσεων Bulk Carriers και Oil Tankers από τα πλοία που εξετάστηκαν στην εργασία, καθώς σύμφωνα με σχετική εξέταση του συγγραφέα στη βιβλιογραφία παρατηρήθηκε ότι, όσο μεγαλώνει το μέγεθος του πλοίου, μεγαλώνει και η απόκλιση μεταξύ μέγιστης αντοχής σε hogging και sagging, καθώς ο λυγισμός είναι πιο έντονος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α' - Δημιουργία μειωτικής καμπύλης φόρτισης σε Matlab

A) Κώδικας Matlab για το παράδειγμα Α:

```
% Δεδομένα ενισχυτικού στοιχείου: τα παρακάτω δίνονται στο
%πρόγραμμα προκειμένου να υπολογίσει την καμπύλη
%s[m]: πλάτος συνεργαζόμενου ελάσματος, l[m]: ανυποστήρικτο
%μήκος ενισχυτικού στοιχείου, t_p[mm]: πάχος ελάσματος,
%h_w[mm]: ύψος κορμού ενισχυτικού, t_w[mm]: πάχος κορμού
%ενισχυτικού, b_f[mm]: πάχος φλάντζας ενισχυτικού,
%t_f[mm]: πάχος φλάντζας ενισχυτικού, R_eHp[Mpa]: τάση
%διαρροής ελάσματος, R_eHs[Mpa]: τάση διαρροής ενισχυτικού
%E[Mpa]: μέτρο ελαστικότητας χάλυβα, As[cm^4]: Εμβαδό
%ενισχυτικού, cg_s[mm]: καθ' ύψος θέση κέντρου βάρους του
%ενισχυτικού, I_stiff_bot[cm^4]: η ροπή αδράνειας
%ενισχυτικού ως προς τον πόδα του ενισχυτικού,
%I_stiff[cm^4]: ροπή αδράνειας ενισχυτικού ως προς τον
%οριζόντιο κεντροβαρικό άξονα, Ap[cm^4]: Εμβαδό ελάσματος
s=0.8;l=2.4;t_p=15;
h_w=235;t_w=10;b_f=90;t_f=15;
R_eHp=315;R_eHs=315;
E=206000;
As=23.5*1+9*1.5;
cg_s=(235*10*235/2+90*15*(15/2+235))/(235*10+90*15);
I_stiff_bot=(1/12*23.5^3*1+23.5*1*(23.5/2)^2)+(1/12*1.5^3*9+
9*1.5*(23.5+1.5/2)^2);
I_stiff=I_stiff_bot-As*((cg_s)/10)^2; %θεώρημα Steiner
Ap=10*s*t_p;
%Παρακάτω το πρόγραμμα υπολογίζει τη μειωτική καμπύλη
%λυγισμού σύμφωνα με τη θεωρία λυγισμού όπως αναπτύχθηκε
%στο Κεφάλαιο 2
figure
%e: η στιγμιαία σχετική ανοιγμένη παραμόρφωση του στοιχείου
for e=0:10^(-3):2.5
%Λυγισμός στοιχείου ως δοκού-κολόνας
vita_e=10^3*(s/t_p)*sqrt(e*R_eHp/E);
%vita_e: λυγηρότητα ελάσματος
if vita_e>1.25
b_e=(2.25/vita_e-1.25/vita_e^2)*s;
else
b_e=s;
end
if vita_e>1
b_e1=s/vita_e;
else
b_e1=s;
```

```

end
A_pEI=10*b_e1*t_p; %b_e1[m], A_pEI [cm^2]
A_E1=A_pEI+As;
A_pE=10*b_e*t_p;
A_E=A_pE+As;
l_pE=(A_pEI*t_p/2+As*(cg_s+t_p))/A_E1;
l_sE=(t_p+h_w+t_f)-l_pE;

I_E1=1/12*(t_p/10)^3*(b_e1*100)+A_pEI*(t_p/20)^2+I_stiff+As*
(cg_s/10+t_p/10)^2;%Ροπή αδράνειας ενισχ. στοιχείου ως προς
την κάτω ίνα του συνεργ. ελάσματος
I_E=I_E1-A_E1*(l_pE*0.1)^2; % I_E [cm^4]: ροπή
%αδράνειας ενισχυτικ. στοιχείου ως προς τον ουδέτερο άξονα
%του στοιχείου
stress_E1=pi^2*E*I_E/(A_E*l^2)*10^(-4);
%τάση ελαστικού λυγισμού κατά Euler
R_eHB=(R_eHp*A_pEI*l_pE+R_eHs*As*l_sE)/(A_pEI*l_pE+As*l_sE);
if stress_E1<=(R_eHB/2)*e%σχέση Johnson-Ostenf.
    stress_C1=stress_E1/e;
else
    stress_C1=R_eHB*(1-R_eHB*e/(4*stress_E1));
end
%Ελεγχος πλαστικοποίησης υλικού
if e<-1
    F=-1;
elseif (e>=-1) & (e<=1)
    F=e;
else
    F=1;
end
%Κρίσιμη τάση λυγισμού στοιχείου ως δοκού-κολόνας
stress_CR1=F*stress_C1*(As+A_pE)/(As+Ap);
plot(e, stress_CR1/315, 'r')
%αδιαστατοποίηση της κρίσιμης τάσης διαιρώντας με την
%τάση διαρροής
hold on
end
grid on
xlabel('σ_x/σ_{yield}', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Co
lor', 'b')
ylabel('ε_x/ε_{yield}', 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Co
lor', 'b')

```

B) Κώδικας Matlab για το παράδειγμα B:

Τα μόνα που τροποποιούνται σε σχέση με το παράδειγμα A είναι τα δεδομένα:

```

% Δεδομένα
s=0.8;l=2.4;t_p=15;
h_w=350;t_w=11;b_f=100;t_f=17;
R_eHp=315;R_eHs=315;
E=206000;
As=35*1.1+10*1.7;
cg_s=(350*11*350/2+100*17*(17/2+350))/(350*11+100*17);
I_stiff_bot=(1/12*35^3*1.1+35*1.1*(35/2)^2)+(1/12*1.7^3*10+1
0*1.7*(35+1.7/2)^2);
I_stiff=I_stiff_bot-As*((cg_s)/10)^2;
Ap=10*s*t_p;

```

Γ) Κώδικας Matlab για το παράδειγμα Γ:

Τα μόνα που τροποποιούνται σε σχέση με το παράδειγμα Α είναι τα δεδομένα:

```

% Δεδομένα
s=0.8;l=2.4;t_p=25;
h_w=300;t_w=17;
R_eHp=315;R_eHs=315;
E=206000;
As=30*1.7;
cg_s=300/2;
I_stiff_bot=(1/12*30^3*1.7+30*1.7*(30/2)^2);
I_stiff=I_stiff_bot-As*((cg_s)/10)^2;
Ap=10*s*t_p;

```

Δ) Κώδικας Matlab για το παράδειγμα Δ:

```

% Δεδομένα
s=0.8;l=8;t_p=15;
R_eHp=315;
E=206000;
Ap=10*1*t_p;
figure
for e=0:10^(-3):2.5
    if e<-1
        F=-1;
    elseif (e>=-1) & (e<=1)
        F=e;
    else
        F=1;
    end
    %Λυγισμός του εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος
    vita_E=10^3*s/t_p*sqrt(e*R_eHp/E);

```

```

        stress_CR=min(R_eHp*F,F*R_eHp*(s/l*(2.25/vita_E-
1.25/vita_E^2)+0.1*(1-s/l)*(1+1/vita_E^2)^2));
        plot(e, stress_CR/315, 'b')
        hold on
end
grid on
title('Plate Buckling','FontSize',12,'FontWeight','bold')
xlabel('σ_x/σ_{yield}','FontSize',12,'FontWeight','bold','Co
lor','b')
ylabel('ε_x/ε_{yield}','FontSize',12,'FontWeight','bold','Co
lor','b')

```

Παράρτημα Β' - Υποδιαίρεση της διατομής σε δομικά στοιχεία

Modelling of the hull girder cross section [5]

Hull girder transverse sections are to be considered as being constituted by the members contributing to the hull girder ultimate strength. The structural members are categorised into a stiffener element, a stiffened plate element or a hard corner element. The plate panel including web plate of girder or side stringer is idealised into either a stiffened plate element, an attached plate of a stiffener element or a hard corner element.

The plate panel is categorised into the following two kinds:

- Longitudinally stiffened panel of which the longer side is in the longitudinal direction, and
- Transversely stiffened panel of which the longer side is in the perpendicular direction to the longitudinal direction.

a) Hard corner element:

Hard corner elements are sturdier elements composing the hull girder transverse section, which collapse mainly according to an elasto-plastic mode of failure (material yielding); they are generally constituted by two plates not lying in the same plane. The extent of a hard corner element from the point of intersection of the plates is taken equal to $20 t_{n50}$ on transversely stiffened panel and to $0.5 s$ on a longitudinally stiffened panel, see Figure 2. where:

t_{n50} : Net offered thickness of the plate, in mm.

s : Spacing of the adjacent longitudinal stiffener, in m.

Bilge, sheer strake-deck stringer elements, girder-deck connections and face plate-web connections on large girders are typical hard corners.

b) Stiffener element:

The stiffener constitutes a stiffener element together with the attached plate.

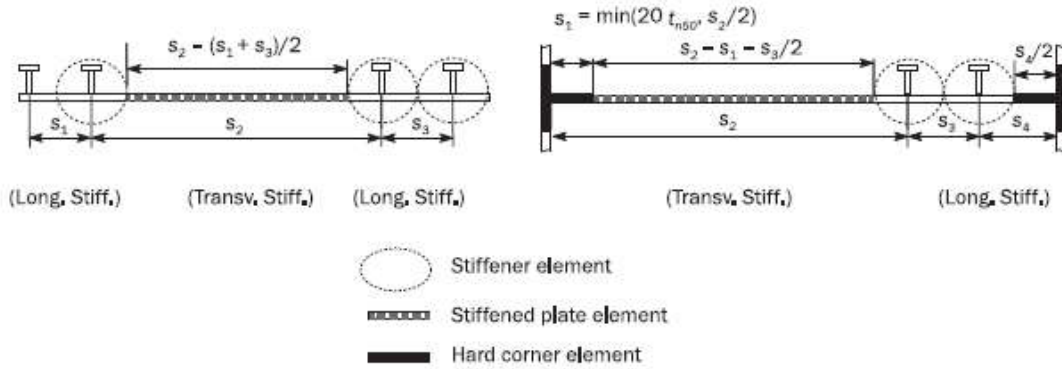
The attached plate width is in principle:

- Equal to the mean spacing of the stiffener when the panels on both sides of the stiffener are longitudinally stiffened, or
- Equal to the width of the longitudinally stiffened panel when the panel on one side of the stiffener is longitudinally stiffened and the other panel is of the transversely stiffened, see Figure 2.

c) Stiffened plate element:

The plate between stiffener elements, between a stiffener element and a hard corner element or between hard corner elements is to be treated as a stiffened plate element, see Figure 2.

Figure 2 : Extension of the breadth of the attached plating and hard corner element

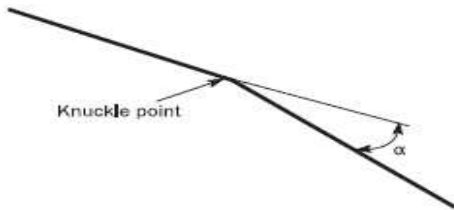


- In case of the knuckle point as shown in Figure 5, the plating area adjacent to knuckles in the plating with an angle greater than 30 deg is defined as a hard corner. The extent of one side of the corner is taken equal to $20 t_{n50}$ on transversely framed panels and to $0.5 s$ on longitudinally framed panels from the knuckle point.
- Where the plate members are stiffened by non-continuous longitudinal stiffeners, the non-continuous stiffeners are considered only as dividing a plate into various elementary plate panels.
- Where attached plating is made of steels having different thicknesses and/or yield stresses, an average thickness and/or average yield stress obtained from the following formula are to be used for the calculation.

$$t_{p-n50} = \frac{t_{1-n50}s_1 + t_{2-n50}s_2}{s} \quad \& \quad R_{eHp} = \frac{R_{eHp1}t_{1-n50}s_1 + R_{eHp2}t_{2-n50}s_2}{t_{n50}s}$$

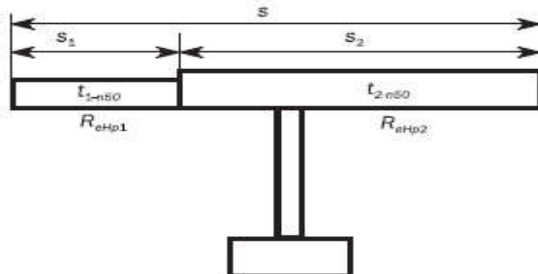
where R_{eHp1} , R_{eHp2} , t_{1-n50} , t_{2-n50} , s_1 , s_2 and s are shown in Figure 6.

Figure 5 : Plating with knuckle point



$$[A_{p-n50} = t_{p-n50} * s]$$

Figure 6 : Element with different thickness and yield strength



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ' - Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά ενισχυτικών Bulk Carrier Διπλού Τοιχώματος (βλ. Παράρτημα Ζ') διαβρωμένων κατά το 1/2 του περιθωρίου διάβρωσης

Bulb flat stiffeners																		
Location	Number of Stiffener	hw'	tw'	θ	tcor/2 (mm)	hw (mm)	tw-n50 (mm)	a	bf (mm)	tf-n50 (mm)	Aw-n50 (mm ²)	Af-n50 (mm ²)	Z _{G,stiff-n50} (mm)	Y _{G,stiff-n50} (mm)	I _{yy,stiff-n50} (cm ⁴)	I _{zz,stiff-n50} (cm ⁴)	As-n50 (cm ²)	I _{yy,stiff} /I _{yy-n50}
Bottom	B.F 1-5	240	10	0	1.5	216	8.5	1	42.5	23.5	1836.00	998.75	150.19	10.24	1646.04	34.83	28.35	1646.04
Bottom	B.F 6-12	260	10	0	1.5	234	8.5	1	45.5	25.5	1989.00	1160.25	164.80	11.07	2147.52	46.29	31.49	2147.52
Inn. Bottom	B.F 1-10	280	12	180	1.5	252	10.5	1	50.5	27.5	2646.00	1388.75	174.10	12.13	3187.71	68.37	40.35	3187.70
No. 1 Double Bottom Girder	B.F of elem2	240	12	90	1.5	216	10.5	1	44.5	23.5	2268.00	1045.75	145.79	10.61	1912.98	40.03	33.14	40.02
Inner Hull	B.F 13	220	10	90	1.5	199	8.5	1	39.5	20.5	1691.50	809.75	135.03	9.27	1220.64	24.70	25.01	24.70
Inner Hull	B.F 14-16	220	10	90	1.5	199	8.5	1	39.5	20.5	1691.50	809.75	135.03	9.27	1220.64	24.70	25.01	24.70
Inner Hull	B.F 17-20	200	10	90	1.5	181	8.5	1	36.5	18.5	1538.50	675.25	120.93	8.52	888.89	17.62	22.14	17.62
Inner Hull	B.F 1'-2'	370	13	90	1	332	12	1	66	38	3984.00	2508.00	237.47	16.43	8957.20	208.02	64.92	208.02
Side Shell	B.F 13-15	240	10	90	1.5	216	8.5	1	42.5	23.5	1836.00	998.75	150.19	10.24	1646.04	34.83	28.35	34.83
Side Shell	B.F 16-19	220	10	90	1.5	199	8.5	1	39.5	20.5	1691.50	809.75	135.03	9.27	1220.64	24.70	25.01	24.70
Side Shell	B.F 20-22	220	10	90	1.5	199	8.5	1	39.5	20.5	1691.50	809.75	135.03	9.27	1220.64	24.70	25.01	24.70
Side Shell	B.F 23-25	320	12	90	0.75	288	11.25	1	57.25	32.25	3240.00	1846.31	202.12	13.97	5271.03	116.06	50.86	116.06
Hopper Plate	B.F 11-12	220	10	133	1.5	199	8.5	1	39.5	20.5	1691.50	809.75	135.03	9.27	1220.64	24.70	25.01	580.95
No. 3 Double Hull Girder	B.F of elem46	220	10	180	1.5	199	8.5	1	39.5	20.5	1691.50	809.75	135.03	9.27	1220.64	24.70	25.01	1220.63
No. 1 Double Hull Girder	B.F of elem62	200	9	180	1.5	181	7.5	1	35.5	18.5	1357.50	656.75	123.02	8.31	812.89	16.21	20.14	812.88
Topside Wig Tank Bott.	B.F 21-22	340	12	32	1	306	11	1	60	34	3366.00	2040.00	217.15	14.75	6316.99	140.84	54.06	4582.63
Topside Wig Tank Bott.	B.F 23	400	14	90	1	359	13	1	71	41	4667.00	2911.00	256.33	17.64	12224.27	279.63	75.78	279.631
Upper Deck	B.F 1-2	340	14	180	1	306	13	1	62	34	3978.00	2108.00	211.88	14.99	7106.34	155.83	60.86	7106.34
Upper Deck	B.F 3	340	14	180	0.75	306	13.25	1	62.25	34.25	4054.50	2132.06	211.63	15.07	7228.69	158.65	61.87	7228.68
Flat bar stiffeners																		
No. 2,3,4,5 Double Bottom Girder	F.B of elem7,8,13,14,18,19,24,25	200	14	90	1.5	200	12.5	-	0	0	2500.00	0.00	100.00	6.25	833.33	3.26	25.00	3.26
No. 2 Double Hull Girder	F.B of elem55,56	200	14	180	1.5	200	12.5	-	0	0	2500.00	0.00	100.00	6.25	833.33	3.26	25.00	833.33

L-Profile Section

Corroded L-Profile Section

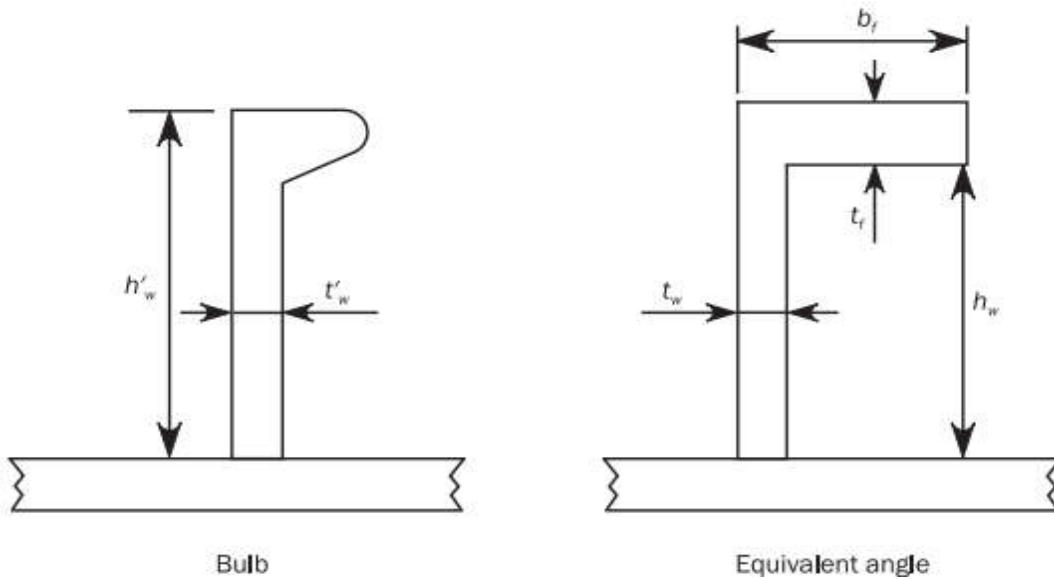
Flat bar Section

Corroded flat bar Section

Επεξήγηση Πίνακα Παραρτήματος Γ'

Σύμφωνα με τους CSR-H η βολβολάμα μπορεί να αντικατασταθεί από ισοδύναμο γωνιακό ενισχυτικό σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους:

$$h_w = h'_w - \frac{h'_w}{9.2} + 2, b_f = a \left(t'_w + \frac{h'_w}{6.7} - 2 \right), t_f = \frac{h'_w}{9.2} - 2, t_w = t'_w$$



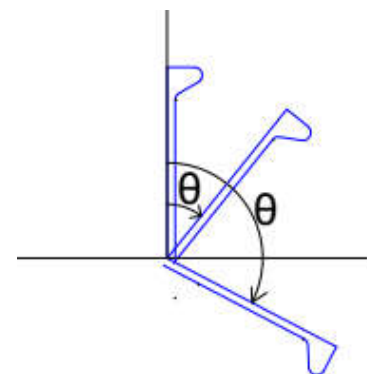
Ο συντελεστής α δίνεται από το παρακάτω:

α : Coefficient equal to:
$\alpha = 1.1 + \frac{(120 - h'_w)^2}{3000}$ for $h'_w \leq 120$
$\alpha = 1.0$ for $h'_w > 120$

Οι διαστάσεις του ενισχυτικού h_w και b_f παραμένουν αναλόγιωτες (βλ. παραπάνω Σχήματα Πίνακα) όσον αφορά τη διάβρωση, ενώ για τις διαστάσεις πάχους κορμού και φλάντζας ισχύει:

$$t_{w-n50} = t_{w-gr} - \frac{t_{corr}}{2} \quad \& \quad t_{f-n50} = t_{f-gr} - \frac{t_{corr}}{2}$$

γωνία θ : η δεξιόστροφη γωνία που σχηματίζει το ενισχυτικό με την κατακόρυφο



$A_{w-n50} [= h_w * t_{w-n50}]$: εμβαδό κορμού ενισχυτικού

$A_{f-n50} [= b_f * t_{f-n50}]$: εμβαδό φλάντζας ενισχυτικού

$z_{G-n50} [= (A_{f-n50} * (h_w + \frac{t_{f-n50}}{2}) + A_{w-n50} * \frac{h_{w-n50}}{2}) / (A_{f-n50} + A_{w-n50})]$:

κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους ενισχυτικού μετρούμενη από τη βάση του

$y_{G-n50} [= (A_{f-n50} * \frac{b_f}{2} + A_{w-n50} * \frac{t_{w-n50}}{2}) / (A_{f-n50} + A_{w-n50})]$: οριζόντια θέση κέντρου βάρους ενισχυτικού

$I_{yy,stiff-n50}$: δεύτερη ροπή αδράνειας ενισχυτικού ως προς τον οριζόντιο κεντροβαρικό άξονα yy_{stiff} παράλληλο προς το συνεργαζόμενο έλασμα (με την υπόθεση ότι όλα τα ενισχυτικά σχηματίζουν γωνία 90° με το συνεργαζόμενο έλασμα)

$$= \left\{ \frac{1}{12} * b_f * t_{f-n50}^3 + A_{f-n50} * \left(h_w + \frac{t_{f-n50}}{2} - z_{G-n50} \right)^2 + \frac{1}{12} * h_w^3 * t_{w-n50} + A_{w-n50} * \left(\frac{h_w}{2} - z_{G-n50} \right)^2 \right\} / 10^4$$

$I_{zz,stiff-n50}$: δεύτερη ροπή αδράνειας ενισχυτικού ως προς τον κατακόρυφο κεντροβαρικό άξονα zz_{stiff} παράλληλο προς τον άξονα του ενισχυτικού

$$= \left\{ \frac{1}{12} * b_f^3 * t_{f-n50} + A_{f-n50} * \left(\frac{b_f}{2} - y_{G-n50} \right)^2 + \frac{1}{12} * h_w * t_{w-n50}^3 + A_{w-n50} * \left(\frac{t_{w-n50}}{2} - y_{G-n50} \right)^2 \right\} / 10^4$$

$I_{yy,stiff}/YY-n50$: δεύτερη ροπή αδράνειας ενισχυτικού ως προς οριζόντιο κεντροβαρικό άξονα παράλληλο προς τον άξονα YY της διατομής του πλοίου

$$[= I_{yy,stiff-n50} * \cos^2 \theta + I_{zz,stiff-n50} * \sin^2 \theta]$$

Παράρτημα Δ' - Κώδικας υπολογισμού μέγιστης αντοχής σε Matlab

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζεται ο κώδικας υπολογισμού της μέγιστης αντοχής σε hogging/sagging της εγκάρσιας τομής Bulk-Carrier σύμφωνα με την απλοποιημένη επαυξητική-επαναληπτική μέθοδο των CSR-H (μέθοδος Smith).

Ultimate_strength.m

```
clear all
close all
i=2;
x_hog(1)=0;x_sag(1)=0;N(1)=0;
z_d=14;%Θέση καταστρώματος για το Bulk Carrier
E=206000; %mPa
I_y=73.70; %Moment of inertia for net scntlings in m^4
z_n(1,1)=0; %Position of neutral axis before implementing
curvature [m^-1] above baseline
%before implying curvature in m
z_n(2,1)=5.687;%Supposed initial position of neutral axis
before implementing curvature [m^-1] above baseline
z_n(1,2)=0;z_n(2,2)=5.687;
Z_B=12.92;%Section Modulus at bottom in m^3
Z_D=8.84;%Section Modulus at deck in m^3
R_eH_bott=315;%Minimum yield stress at bottom in N/mm^2
R_eH_deck=355;%Minimum yield stress at deck in N/mm^2
M_y=min(10^3*R_eH_bott*Z_B,10^3*R_eH_deck*Z_D);%the lesser
yielding moment in kN*m
xF_hog=0.003*M_y/(E*I_y);xF_sag=-
0.003*M_y/(E*I_y);%xf:curvature at which the procedure is
terminated
x(1,1)=0;x(1,2)=0;
R_eH=R_eH_deck;%selected as yield stress of the first
yielded area (deck)
dx_hog=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-z_n(2,1)));%incremental step of
curvature
dx_sag=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-z_n(2,2)));
[num,txt]=xlsread('Datanet.xlsx');
el=num(:,1);type=txt(3:90,2);Ap=num(:,3);R_eHp=num(:,4);As=n
um(:,5);R_eHs=num(:,6);
z=num(:,7);t_p=num(:,8);s=num(:,9);cg_s=num(:,10);I_stiff=nu
m(:,11);t_w=num(:,12);
h_w=num(:,13);b_f=num(:,14);t_f=num(:,15);l=num(:,16);type_o
f_stiff=txt(3:90,17);A=num(:,18);
%input the data of 1/2 ordinary midship section of bulk
carrier
Mu_hog(1)=0;Mu_sag(1)=0;
while (x(i-1,1)+dx_hog<=xF_hog) && (x(i-1,2)-dx_sag>=xF_sag)
    for t=1:2 %1:hogging & 2:sagging
```

```

if t==1 && (x(i-1,1)+dx_hog<=xF_hog)
    x(i,t)=x(i-1,t)+dx_hog;
elseif t==2 && (x(i-1,2)-dx_sag>=xF_sag)
    x(i,t)=x(i-1,t)-dx_sag ;
else
    if t==1
        t=2;
        x(i,t)=x(i-1,t)-dx_sag;
    else
        break
    end
end
sum1=10^(10);sum2=0;
while abs(sum1-sum2)>=10
    for elem=1:1:size(el,1)
        strain(i,t,elem)=-x(i,t)*(z(elem)-z_n(i,t)); %(-)
για εφελκυσμό και (+) για θλίψη
    end
for elem=1:1:size(el,1)
    TF1 = strcmp(type(elem), 'Hard Corner');TF2 =
strcmp(type(elem), 'Stiffener element');TF3 =
strcmp(type_of_stiff(elem), 'Bulb flat');
    TF4 = strcmp(type_of_stiff(elem), 'Angle bar');TF5 =
strcmp(type_of_stiff(elem), 'Tee bar');TF6 =
strcmp(type_of_stiff(elem), 'Flat bar');
    if TF1==1
        %Ελαστο-πλαστική κατάρρευση της "άκαμπτης γωνίας"
        strain_yield(elem)=R_eHp(elem)/E;
        e(elem)=strain(i,t,elem)/strain_yield(elem);
        if e(elem)<-1
            F(elem)=-1;
        elseif (e(elem)>=-1) && (e(elem)<=1)
            F(elem)=e(elem);
        else
            F(elem)=1;
        end
        stress(i,t,elem)=F(elem)*R_eHp(elem);
        str(i,t,elem)=0;
    elseif TF2==1
        %Ελαστο-πλαστική κατάρρευση του συστήματος
ενισχυτικό-έλασμα
        R_eHa(elem)=(R_eHp(elem)*Ap(elem)+R_eHs(elem)*As(elem))/(Ap(
elem)+As(elem));
        strain_yield(elem)=R_eHa(elem)/E;
        e(elem)=strain(i,t,elem)/strain_yield(elem);
        if e(elem)<-1

```

```

        F(elem)=-1;
elseif (e(elem)>=-1) && (e(elem)<=1)
        F(elem)=e(elem);
else
        F(elem)=1;
end
stress(i,t,elem)=F(elem)*R_eHa(elem);%εάν η τάση
είναι εφελκυστική τότε σ=stress(elem), αλλιώς αν είναι
θλιπτική, πρέπει να βρούμε τις κρίσιμες τάσεις λυγισμού
str(i,t,elem)=0;
if stress(i,t,elem)>0 %Load-end shortening curves-
>compression
        %Λυγισμός στοιχείου ως δοκού-κολόνας

vita_e(elem)=10^3*(s(elem)/t_p(elem))*sqrt(e(elem)*R_eHp(ele
m)/E);%plate slenderness
        if vita_e(elem)>1.25
                b_e(elem)=(2.25/vita_e(elem)-
1.25/vita_e(elem)^2)*s(elem);
        else
                b_e(elem)=s(elem);
        end
        if vita_e(elem)>1
                b_e1(elem)=s(elem)/vita_e(elem);
        else
                b_e1(elem)=s(elem);
        end
        A_pEI(elem)=10*b_e1(elem)*t_p(elem); %b_e1[m] &
t_p[mm], A_pEI [cm^2]
        A_E1(elem)=A_pEI(elem)+As(elem);
        A_pE(elem)=10*b_e(elem)*t_p(elem);
        A_E(elem)=A_pE(elem)+As(elem);%Sectional area of
of attached plating of width b_e

l_pE(elem)=(A_pEI(elem)*t_p(elem)/2+As(elem)*(cg_s(elem)+t_p
(elem)))/A_E1(elem);% Distance in mm from the neutral axis
of the stiffener
        %with attached plate of width b_e1 to the bottom
of the attached plate
        l_sE(elem)=(t_p(elem)+h_w(elem)+t_f(elem))-
l_pE(elem);% Distance in mm from the neutral axis of the
stiffener with attached plate
        %of width b_e1 to the top of the stiffener

l_pE(elem)=(A_pEI(elem)*t_p(elem)/2+As(elem)*(cg_s(elem)+t_p
(elem)))/A_E1(elem);

```



```

I_E1(elem)=1/12*(t_p(elem)/10)^3*(b_e1(elem)*100)+A_pEI(elem)
)*(t_p(elem)/20)^2+I_stiff(elem)+As(elem)*(cg_s(elem)/10+t_p
(elem)/10)^2;%Ροπή αδράνειας ενισχ. στοιχείου ως προς την
κάτω ίνα του συνεργ. ελάσματος
    I_E(elem)=I_E1(elem)-
A_E1(elem)*(l_pE(elem)*0.1)^2; % I_E [cm^4]: ροπή αδράνειας
ενισχυτικ. στοιχείου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του
στοιχείου
    stress_E1(elem)=pi^2*E*I_E(elem)*10^(-
4)/(A_E(elem)*l(elem)^2);

R_eHB(elem)=(R_eHp(elem)*A_pEI(elem)*l_pE(elem)+R_eHs(elem)*
As(elem)*l_sE(elem))/(A_pEI(elem)*l_pE(elem)+As(elem)*l_sE(e
lem));
    if stress_E1<=(R_eHB(elem)/2)*e(elem)
        stress_C1(elem)=stress_E1(elem)/e(elem);
    else
        stress_C1(elem)=R_eHB(elem)*(1-
R_eHB(elem)*e(elem)/(4*stress_E1(elem)));
    end

stress_CR1(i,t,elem)=F(elem)*stress_C1(elem)*(As(elem)+A_pE(
elem))/(As(elem)+Ap(elem));
    %Στρεπτικός Λυγισμός
    if vita_e(elem)>1.25
        stress_CP(elem)=(2.25/vita_e(elem)-
1.25/vita_e(elem)^2)*R_eHp(elem);
    else
        stress_CP(elem)=R_eHp(elem);%Buckling stress
of the attched plating in Mpa
    end
    if (TF3 ==1) || (TF4 == 1) || (TF5 == 1)
        e_f(elem)=h_w(elem)+0.5*t_f(elem);
        A_w(elem)=h_w(elem)*t_w(elem);
        A_f(elem)=As(elem)*100*t_f(elem);
        I_P(elem)=(A_w(elem)*(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem))^2)/3+A_f(elem)*e_f(elem)^2)*10^(-4);%cm^4
        I_T(elem)=(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem))*t_w(elem)^3/(3*10^4))*(1-
0.63*t_w(elem)/(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem)))+(b_f(elem)*t_f(elem)^3/(3*10^4)*(1-
0.63*t_f(elem)/b_f(elem)));
        %cm^4
        if (TF3 ==1) || (TF4 == 1)

```

```

I_w(elem)=(A_f(elem)*e_f(elem)^2*b_f(elem)^2/(12*10^6))*((A_f(elem)+2.6*A_w(elem))/(A_f(elem)+A_w(elem)));%cm^6
else

I_w(elem)=b_f(elem)^3*t_f(elem)*e_f(elem)^2/(12*10^6);
end
elseif (TF6 == 1)
e_f(elem)=h_w(elem);
I_P(elem)=h_w(elem)^3*t_w(elem)/(3*10^4);
I_T(elem)=h_w(elem)*t_w(elem)^3/(3*10^4)*(1-
0.63*t_w(elem)/h_w(elem));
I_w(elem)=h_w(elem)^3*t_w(elem)^3/(36*10^6);
end
epsilon(elem)=1+((l(elem)/pi)^2*10^(-
3))/sqrt(I_w(elem)*(0.75*s(elem)/t_p(elem)^3+(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem))/t_w(elem)^3));

stress_E2(elem)=E/I_P(elem)*(epsilon(elem)*pi^2*I_w(elem)*10
^2/l(elem)^2+0.385*I_T(elem));
if (stress_E2(elem)<=R_eHs(elem)/2*e(elem))
stress_C2(elem)=stress_E2(elem)/e(elem);
else
stress_C2(elem)=R_eHs(elem)*(1-
R_eHs(elem)*e(elem)/(4*stress_E2(elem)));
end

stress_CR2(i,t,elem)=F(elem)*(As(elem)*stress_C2(elem)+Ap(el
em)*stress_CP(elem))/(As(elem)+Ap(elem));
%Τοπικός λυγισμός του κορμού ενισχυτικού με φλάντζα
if (TF3 ==1) || (TF4 == 1) || (TF5 == 1)

vita_w(elem)=h_w(elem)/t_w(elem)*sqrt(e(elem)*R_eHs(elem)/E)
;
if vita_w(elem)>=1.25
h_we(elem)=(2.25/vita_w(elem)-
1.25/vita_w(elem)^2)*h_w(elem);
else
h_we(elem)=h_w(elem);
end

stress_CR3(i,t,elem)=F(elem)*((10^3*b_e(elem)*t_p(elem)*R_eH
p(elem)+(h_we(elem)*t_w(elem)+b_f(elem)*t_f(elem))*R_eHs(ele
m))/(10^3*s(elem)*t_p(elem)+h_w(elem)*t_w(elem)+b_f(elem)*t_
f(elem));
%Τοπικός λυγισμός του κορμού ενισχυτικού χωρίς
φλάντζα

```

```

else

stress_E3(elem)=160000*(t_w(elem)/h_w(elem))^2;
    if (stress_E3(elem)<=R_eHs(elem)/2*e(elem))
        stress_C3(elem)=stress_E3(elem)/e(elem);
    else
        stress_C3(elem)=R_eHs(elem)*(1-
R_eHs(elem)*e(elem)/(4*stress_E3(elem)));
    end

stress_CR3(i,t,elem)=F(elem)*(Ap(elem)*stress_CP(elem)+As(el
em)*stress_C3(elem))/(Ap(elem)+As(elem));
    end
    str(i,t,elem)=stress(i,t,elem);

stress(i,t,elem)=min([stress(i,t,elem),stress_CR1(i,t,elem),
stress_CR2(i,t,elem),stress_CR3(i,t,elem)]);
    end
else
    %Ελαστο-πλαστική κατάρρευση του εγκάρσια
ενισχυμένου ελάσματος
    %(stiffened plate element)
    strain_yield(elem)=R_eHp(elem)/E;
    e(elem)=strain(i,t,elem)/strain_yield(elem);
    if e(elem)<-1
        F(elem)=-1;
    elseif (e(elem)>=-1) && (e(elem)<=1)
        F(elem)=e(elem);
    else
        F(elem)=1;
    end
    stress(i,t,elem)=F(elem)*R_eHp(elem);
    if stress(i,t,elem)>0 %εάν η τάση είναι θλιπτική
        %Λυγισμός του ενισχυμένου ελάσματος

vita_E(elem)=10^3*s(elem)/t_p(elem)*sqrt(e(elem)*R_eHp(elem)
/E);

stress_CR5(i,t,elem)=min(abs(R_eHp(elem)*F(elem)),abs(F(elem)
)*R_eHp(elem)*(s(elem)/l(elem)*(2.25/vita_E(elem)-
1.25/vita_E(elem)^2)+0.1*(1-
s(elem)/l(elem))*(1+1/vita_E(elem)^2)^2));
    str(i,t,elem)=stress(i,t,elem);
    stress(i,t,elem)=stress_CR5(i,t,elem);
    end
    str(i,t,elem)=0;
end
end

```

```

end
%stress
sum1=0;% Αθροισμα  $\Sigma A_i \cdot \sigma_i$ , όπου  $\sigma_i$  η τάση
κατασκευαστικού στοιχείου πάνω από τον ουδέτερο άξονα
sum2=0;% Αθροισμα  $\Sigma A \cdot \sigma_i$ , όπου  $\sigma_i$  η τάση κατασκευαστικού
στοιχείου κάτω από τον ουδέτερο άξονα
for elem=1:1:size(e1,1)
    if z(elem)>z_n(i,t)
        if elem>3 % τα στοιχεία 4-88 είναι συμμετρικά ως
        προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας
            %άρα πρέπει να ληφθούν υπόψη 2 φορές

sum1=sum1+2*abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*10^(-2);% Η δύναμη
μετατρέπεται σε Newton, αφού  $N = \text{Mpa}[=100 \text{ N/cm}^2] * \text{cm}^2$ 
*10^(-2)
        else
            sum1=sum1+abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*10^(-
2);
        end
    else
        if elem>3

sum2=sum2+2*abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*10^(-2);
        else

sum2=sum2+abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*10^(-2);
        end
    end
end
if sum1>sum2 && abs(sum1-sum2)>=10
    z_n(i,t)=z_n(i,t)+10^(-3);
elseif sum1<sum2 && abs(sum1-sum2)>=10
    z_n(i,t)=z_n(i,t)-10^(-3);
end
end
if t==1
    Mu_hog(i)=0;
    for elem=1:size(e1,1)
        if elem<=3

Mu_hog(i)=Mu_hog(i)+abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*abs(z(elem)
)-z_n(i,t))*10^(-1);
        else

Mu_hog(i)=Mu_hog(i)+2*abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*abs(z(el
em)-z_n(i,t))*10^(-1);
        end
    end
end

```

```

        end
    else
        Mu_sag(i)=0;
        for elem=1:size(e1,1)
            if elem<=3
                Mu_sag(i)=Mu_sag(i)-
abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*abs(z(elem)-z_n(i,t))*10^(-1);
%% Mu_hogg [kN*m]
                else %% συμμετρικά κατασκευαστικά στοιχεία
                    Mu_sag(i)=Mu_sag(i)-
2*abs(stress(i,t,elem))*A(elem)*abs(z(elem)-z_n(i,t))*10^(-
1); %%Mu_sagg [kN*m]
                end
            end
        end
    end
end
end
dx_hog=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-z_n(i,1)));
dx_sag=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-z_n(i,2)));
if (x(i-1,1)+dx_hog<=xF_hog) && (x(i-1,2)-dx_sag>=xF_sag)
    i=i+1;
    z_n(i,1)=z_n(i-1,1);z_n(i,2)=z_n(i-1,2);
else
    i=i+1;
end
end
end
%%Εντολές εκτύπωσης αποτελεσμάτων
figure
plot(x(:,1),Mu_hog(:))
hold on
plot(x(:,2),Mu_sag(:),'r')
grid on
title('Διάγραμμα καμπυλότητας-καμπτικής ροπής')
hold on
[max_hog I_hog]=max(Mu_hog(:));[min_sag
I_sag]=min(Mu_sag(:));
max_hog
min_sag
plot(x(I_hog,1),max_hog,'ro')
hold on
plot(x(I_sag,2),min_sag,'ro')
legend('Καμπτική Ροπή σε κατάσταση hogging','Καμπτική Ροπή
σε κατάσταση sagging','Καμπτική Ροπή Κατάρρευσης σε
hogging','Καμπτική Ροπή Κατάρρευσης σε sagging')
plot(x(:,1),(206*10^6*I_y).*x(:,1),'g');plot(x(:,2),(206*
10^6*I_y).*x(:,2),'g');
axis([-8*10^(-4) 8*10^(-4) -5*10^6 5*10^6])

```

```

legend('Hogging','Sagging','Καμπτική Ροπή Κατάρρευσης σε
hogging','Καμπτική Ροπή Κατάρρευσης σε sagging','Κλίση')
xlabel('Καμπυλότητα  $\chi$ [m-1])')
ylabel('Καμπτική Ροπή Mu [kN*m] σε hogging-sagging')

```

Παράρτημα Ε' - Κώδικας υπολογισμού εναπομένουσας αντοχής σε Matlab

Residual strength.m

```

clear all
close all
x_hog(1)=0;x_sag(1)=0;N(1)=0;
z_d=14;%Θέση καταστρώματος για το Bulk Carrier
E=206000; %mPa
I_y=60.269; %Moment of inertia for gross scantling
(grounding centered cond) m^4
Z_B=9.115;%Section Modulus at bottom in m^3
Z_D=8.157;%Section Modulus at deck in m^3
R_eH_bott=315;R_eH_deck=355;
M_y=min(10^3*R_eH_bott*Z_B,10^3*R_eH_deck*Z_D);%the lesser
yielding moment in kN*m
xF_hog=0.003*M_y/(E*I_y);xF_sag=-
0.003*M_y/(E*I_y);%xf:curvature at which the
%procedure is terminated
x(1,1)=0;x(1,2)=0;
R_eH=R_eH_bott;
dx_hog=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-5));%incremental step of
curvature
dx_sag=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-5));
[num,txt]=xlsread('Datanet.xlsx');
el=num(:,1);type=txt(3:175,2);Ap=num(:,3);R_eHp=num(:,4);As=
num(:,5);R_eHs=num(:,6);
z=num(:,7);t_p=num(:,8);s=num(:,9);cg_s=num(:,10);I_stiff=nu
m(:,11);t_w=num(:,12);
h_w=num(:,13);b_f=num(:,14);t_f=num(:,15);l=num(:,16);type_o
f_stiff=txt(3:175,17);
A=num(:,18);y=num(:,19);
%input the data of ordinary midship section of bulk carrier
Mres(1,1)=0;Mres(1,2)=0;
athr1=0;athr2=0;athr3=0;
disp('Δώσε συντεταγμένες ρήγματος')
y1=
input('y1=');y2=input('y2=');z1=input('z1=');z2=input('z2=')
;
i=2;
yield_hog=0;yield_sag=0;

```

```

for elem=1:1:size(e1,1)
    if y(elem)<y1 | y(elem)>y2 | z(elem)<z1 | z(elem)>z2
        athr1=athr1+A(elem)*y(elem);
        athr3=athr3+A(elem)*z(elem);
        athr2=athr2+A(elem);
    end
end
y_G=athr1/athr2;z_G=athr3/athr2;
athr4=0;athr5=0;athr6=0;
for elem=1:1:size(e1,1)
    if y(elem)<y1 || y(elem)>y2 || z(elem)<z1 || z(elem)>z2
        athr4=athr4+A(elem)*(y(elem)-y_G)*(z(elem)-z_G);
%I_y0z0
        athr5=athr5+A(elem)*(y(elem)-y_G)^2; %I_z0
        athr6=athr6+A(elem)*(z(elem)-z_G)^2; %I_y0
    end
end
end
I_y0z0=athr4;I_z0=athr5;I_y0=athr6;
tan_a(i,1)=athr4/athr5;z_CL(i,1)=z_G-
y_G*tan_a(i,1);a(i,1)=atan(athr4/athr5);
tan_a(i,2)=athr4/athr5;z_CL(i,2)=z_G-
y_G*tan_a(i,2);a(i,2)=atan(athr4/athr5);
while (x(i-1,1)+dx_hog<=xF_hog) && (x(i-1,2)-dx_sag>=xF_sag)
    for t=1:2 %1:hogging & 2:sagging
        if t==1 && (x(i-1,1)+dx_hog<=xF_hog)
            x(i,t)=x(i-1,t)+dx_hog;
        elseif t==2 && (x(i-1,2)-dx_sag>=xF_sag)
            x(i,t)=x(i-1,t)-dx_sag ;
        else
            if t==1
                t=2;
                x(i,t)=x(i-1,t)-dx_sag;
            else
                break
            end
        end
    end
    sum1=10^(10);sum2=0;%αρχικοποίησης
    M1=10^10;M2=0;
    while abs(sum1-sum2)>=1000 && abs(abs(M1)-abs(M2))>=100
        while abs(sum1-sum2)>=1000
            for elem=1:1:size(e1,1)
                z_n(i,t,elem)=z_CL(i,t)+y(elem)*tan_a(i,t);
                strain(elem)=-x(i,t)*(z(elem)-
z_n(i,t,elem))*cos(a(i,t)); %(-) για εφελκυσμό και (+) για
θλίψη
                if (y(elem)>=y1 & y(elem)<=y2) & (z(elem)>=z1 &
z(elem)<=z2)

```



```

        strain(elem)=0;
    end
end
for elem=1:1:size(el,1)
    TF1 = strcmp(type(elem), 'Hard Corner'); TF2 =
strcmp(type(elem), 'Stiffener element'); TF3 =
strcmp(type_of_stiff(elem), 'Bulb flat');
    TF4 = strcmp(type_of_stiff(elem), 'Angle bar'); TF5 =
strcmp(type_of_stiff(elem), 'Tee bar'); TF6 =
strcmp(type_of_stiff(elem), 'Flat bar');
    if TF1==1
        %Ελαστο-πλαστική κατάρρευση της "άκαμπτης γωνίας"
        strain_yield(elem)=R_eHp(elem)/E;
        R_eHa(elem)=R_eHp(elem);
        e(elem)=strain(elem)/strain_yield(elem);
        if e(elem)<-1
            F(elem)=-1;
        elseif (e(elem)>=-1) & (e(elem)<=1)
            F(elem)=e(elem);
        else
            F(elem)=1;
        end
        stress(elem)=F(elem)*R_eHp(elem);
        str(elem)=0;
    elseif TF2==1
        %Ελαστο-πλαστική κατάρρευση του συστήματος
ενισχυτικό-έλασμα
        R_eHa(elem)=(R_eHp(elem)*Ap(elem)+R_eHs(elem)*As(elem))/(Ap(
elem)+As(elem));
        strain_yield(elem)=R_eHa(elem)/E;
        e(elem)=strain(elem)/strain_yield(elem);
        if e(elem)<-1
            F(elem)=-1;
        elseif (e(elem)>=-1) & (e(elem)<=1)
            F(elem)=e(elem);
        else
            F(elem)=1;
        end
        stress(elem)=F(elem)*R_eHa(elem); %εάν η τάση είναι
εφελκυστική τότε σ=stress(elem), αλλιώς αν είναι θλιπτική,
πρέπει να βρούμε τις κρίσιμες τάσεις λυγισμού
        str(elem)=0;
        if stress(elem)>0 %Load-end shortening curves-
>compression
            %Λυγισμός στοιχείου ως δοκού-κολόνας

```

```

vita_e(elem)=10^3*(s(elem)/t_p(elem))*sqrt(e(elem)*R_eHp(elem)/E);%plate slenderness
    if vita_e(elem)>1.25
        b_e(elem)=(2.25/vita_e(elem)-
1.25/vita_e(elem)^2)*s(elem);
    else
        b_e(elem)=s(elem);
    end
    if vita_e(elem)>1
        b_e1(elem)=s(elem)/vita_e(elem);
    else
        b_e1(elem)=s(elem);
    end
    A_pEI(elem)=10*b_e1(elem)*t_p(elem); %b_e1[m] &
t_p[mm], A_pEI [cm^2]
    A_E1(elem)=A_pEI(elem)+As(elem);
    A_pE(elem)=10*b_e(elem)*t_p(elem);
    A_E(elem)=A_pE(elem)+As(elem);%Sectional area of
of attached plating of width b_e

l_pE(elem)=(A_pEI(elem)*t_p(elem)/2+As(elem)*(cg_s(elem)+t_p
(elem)))/A_E1(elem);% Distance in mm from the neutral axis
of the stiffener
    %with attached plate of width b_e1 to the bottom
of the attached plate
    l_sE(elem)=(t_p(elem)+h_w(elem)+t_f(elem))-
l_pE(elem);% Distance in mm from the neutral axis of the
stiffener with attached plate
    %of width b_e1 to the top of the stiffener

l_pE(elem)=(A_pEI(elem)*t_p(elem)/2+As(elem)*(cg_s(elem)+t_p
(elem)))/A_E1(elem);

I_E1(elem)=1/12*(t_p(elem)/10)^3*(b_e1(elem)*100)+A_pEI(elem)
*(t_p(elem)/20)^2+I_stiff(elem)+As(elem)*(cg_s(elem)/10+t_p
(elem)/10)^2;%Ροπή αδράνειας ενισχ. στοιχείου ως προς την
κάτω ίνα του συνεργ. ελάσματος
    I_E(elem)=I_E1(elem)-
A_E1(elem)*(l_pE(elem)*0.1)^2; % I_E [cm^4]: ροπή αδράνειας
ενισχυτικ. στοιχείου ως προς τον κεντροβαρικό άξονα του
στοιχείου
    stress_E1(elem)=pi^2*E*I_E(elem)*10^(-
4)/(A_E(elem)*l(elem)^2);

R_eHB(elem)=(R_eHp(elem)*A_pEI(elem)*l_pE(elem)+R_eHs(elem)*

```

```

As(elem)*l_sE(elem))/(A_pEI(elem)*l_pE(elem)+As(elem)*l_sE(e
lem));
    if stress_E1<=(R_eHB(elem)/2)*e(elem)
        stress_C1(elem)=stress_E1(elem)/e(elem);
    else
        stress_C1(elem)=R_eHB(elem)*(1-
R_eHB(elem)*e(elem)/(4*stress_E1(elem)));
    end

stress_CR1(elem)=F(elem)*stress_C1(elem)*(As(elem)+A_pE(elem
))/(As(elem)+Ap(elem));
    %Στρεπτικός Λυγισμός
    if vita_e(elem)>1.25
        stress_CP(elem)=(2.25/vita_e(elem)-
1.25/vita_e(elem)^2)*R_eHp(elem);
    else
        stress_CP(elem)=R_eHp(elem);%Buckling stress
of the attached plating in Mpa
    end
    if (TF3 ==1) || (TF4 == 1) || (TF5 == 1)
        e_f(elem)=h_w(elem)+0.5*t_f(elem);
        A_w(elem)=h_w(elem)*t_w(elem);
        A_f(elem)=As(elem)*100*t_f(elem);
        I_P(elem)=(A_w(elem)*((e_f(elem)-
0.5*t_f(elem))^2)/3+A_f(elem)*e_f(elem)^2)*10^(-4);%cm^4
        I_T(elem)=(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem))*t_w(elem)^3/(3*10^4))*(1-
0.63*t_w(elem)/(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem)))+(b_f(elem)*t_f(elem)^3/(3*10^4)*(1-
0.63*t_f(elem)/b_f(elem)));
        %cm^4
        if (TF3 ==1) || (TF4 == 1)

I_w(elem)=(A_f(elem)*e_f(elem)^2*b_f(elem)^2/(12*10^6))*((A_
f(elem)+2.6*A_w(elem))/(A_f(elem)+A_w(elem)));%cm^6
        else

I_w(elem)=b_f(elem)^3*t_f(elem)*e_f(elem)^2/(12*10^6);
        end
        elseif (TF6 == 1)
            e_f(elem)=h_w(elem);
            I_P(elem)=h_w(elem)^3*t_w(elem)/(3*10^4);
            I_T(elem)=h_w(elem)*t_w(elem)^3/(3*10^4)*(1-
0.63*t_w(elem)/h_w(elem));
            I_w(elem)=h_w(elem)^3*t_w(elem)^3/(36*10^6);
        end

```

```

        epsilon(elem)=1+((l(elem)/pi)^2*10^(-
3))/sqrt(I_w(elem)*(0.75*s(elem)/t_p(elem)^3+(e_f(elem)-
0.5*t_f(elem))/t_w(elem)^3));

stress_E2(elem)=E/I_P(elem)*(epsilon(elem)*pi^2*I_w(elem)*10
^2/l(elem)^2+0.385*I_T(elem));
    if (stress_E2(elem)<=R_eHs(elem)/2*e(elem))
        stress_C2(elem)=stress_E2(elem)/e(elem);
    else
        stress_C2(elem)=R_eHs(elem)*(1-
R_eHs(elem)*e(elem)/(4*stress_E2(elem)));
    end

stress_CR2(elem)=F(elem)*(As(elem)*stress_C2(elem)+Ap(elem)*
stress_CP(elem))/(As(elem)+Ap(elem));
    %Τοπικός λυγισμός του κορμού ενισχυτικού με
φλάντζα
    if (TF3 ==1) || (TF4 == 1) || (TF5 == 1)

vita_w(elem)=h_w(elem)/t_w(elem)*sqrt(e(elem)*R_eHs(elem)/E)
;
    if vita_w(elem)>=1.25
        h_we(elem)=(2.25/vita_w(elem)-
1.25/vita_w(elem)^2)*h_w(elem);
    else
        h_we(elem)=h_w(elem);
    end

stress_CR3(elem)=F(elem)*((10^3*b_e(elem)*t_p(elem)*R_eHp(el
em)+(h_we(elem)*t_w(elem)+b_f(elem)*t_f(elem))*R_eHs(elem))/
(10^3*s(elem)*t_p(elem)+h_w(elem)*t_w(elem)+b_f(elem)*t_f(el
em)));
    %Τοπικός λυγισμός του κορμού ενισχυτικού χωρίς
φλάντζα
    else

stress_E3(elem)=160000*(t_w(elem)/h_w(elem))^2;
    if (stress_E3(elem)<=R_eHs(elem)/2*e(elem))
        stress_C3(elem)=stress_E3(elem)/e(elem);
    else
        stress_C3(elem)=R_eHs(elem)*(1-
R_eHs(elem)*e(elem)/(4*stress_E3(elem)));
    end

stress_CR3(elem)=F(elem)*(Ap(elem)*stress_CP(elem)+As(elem)*
stress_C3(elem))/(Ap(elem)+As(elem));
    end

```

```

        str(elem)=stress(elem);

stress(elem)=min([stress(elem),stress_CR1(elem),stress_CR2(e
lem),stress_CR3(elem)]);
    end
    else
        %Ελαστο-πλαστική κατάρρευση του εγκάρσια
ενισχυμένου ελάσματος
        %(stiffened plate element)
        strain_yield(elem)=R_eHp(elem)/E;
        R_eHa(elem)=R_eHp(elem);
        e(elem)=strain(elem)/strain_yield(elem);
        if e(elem)<-1
            F(elem)=-1;
        elseif (e(elem)>=-1) & (e(elem)<=1)
            F(elem)=e(elem);
        else
            F(elem)=1;
        end
        stress(elem)=F(elem)*R_eHp(elem);
        if stress(elem)>0 %εάν η τάση είναι θλιπτική
            %Λυγισμός του ενισχυμένου ελάσματος

vita_E(elem)=10^3*s(elem)/t_p(elem)*sqrt(e(elem)*R_eHp(elem)
/E);

stress_CR5(elem)=min(R_eHp(elem)*F(elem),F(elem)*R_eHp(elem)
*(s(elem)/l(elem)*(2.25/vita_E(elem)-
1.25/vita_E(elem)^2)+0.1*(1-
s(elem)/l(elem))*(1+1/vita_E(elem)^2)^2));
        str(elem)=stress(elem);
        stress(elem)=stress_CR5(elem);
    end
    str(elem)=0;
end
    if (y(elem)>=y1 & y(elem)<=y2) & (z(elem)>=z1 &
z(elem)<=z2)
        stress(elem)=0;
    end
end
    sum1=0;% Αθροισμα Σ Ai*σι, όπου σi η τάση
κατασκευαστικού στοιχείου πάνω από τον ουδέτερο άξονα
    sum2=0;% Αθροισμα Σ A*σι, όπου σi η τάση κατασκευαστικού
στοιχείου κάτω από τον ουδέτερο άξονα
    for elem=1:1:size(e1,1)
        if z(elem)>z_n(i,t,elem)

```

```

        sum1=sum1+abs(stress(elem))*A(elem)*10^(-2);
% Η δύναμη μετατρέπεται σε Newton, αφού N = Mpa [=100 N/cm^2]
* cm^2 *10^(-2)
        else
            sum2=sum2+abs(stress(elem))*A(elem)*10^(-2);
        end
    end
sum1,sum2
    if sum1>sum2 & abs(sum1-sum2)>=1000
        z_CL(i,t)=z_CL(i,t)+10^(-2);
    elseif sum1<sum2 & abs(sum1-sum2)>=1000
        z_CL(i,t)=z_CL(i,t)-10^(-2);
    end
end
M1=0;M2=0;
for elem=1:1:size(el,1)
    if y(elem)>=0
        M1=M1+stress(elem)*(y(elem)-0)*A(elem)*10^(-
2); %N*m
    else
        M2=M2+stress(elem)*(y(elem)-0)*A(elem)*10^(-
2); %N*m
    end
end
    if abs(M1)>abs(M2) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M1<0 & t==1 % hogging
        a(i,t)=a(i,t)+10^(-5);
    elseif abs(M1)>abs(M2) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M1>0 & t==1 % hogging
        a(i,t)=a(i,t)-10^(-5);
    elseif abs(M2)>abs(M1) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M2<0 & t==1 %hogging
        a(i,t)=a(i,t)+10^(-5);
    elseif abs(M2)>abs(M1) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M2>0 & t==1 %hogging
        a(i,t)=a(i,t)-10^(-5);
    elseif abs(M1)>abs(M2) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M1<0 & t==2 % sagging
        a(i,t)=a(i,t)-10^(-5);
    elseif abs(M1)>abs(M2) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100
& M1>0 & t==2 % sagging
        a(i,t)=a(i,t)+10^(-5);
    elseif abs(M2)>abs(M1) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M2<0 & t==2 %sagging
        a(i,t)=a(i,t)-10^(-5);
    elseif abs(M2)>abs(M1) & abs(abs(M1)-abs(M2))>=100 &
M2>0 & t==2 %sagging

```

```

        a(i,t)=a(i,t)+10^(-5);
    end
    tan_a(i,t)=tan(a(i,t));
    M1,M2
end
if i==100 | i==50 | i==200 | i==300
    if t==1
        figure
        axis([-360 360 -20 20])
        plot(stress(1:173),z(1:173),'o')
        grid on
        grid minor
        legend('Hogging')
    else
        figure
        axis([-360 360 0 20])
        plot(stress(1:173),z(1:173),'o')
        grid on
        grid minor
        legend('Sagging')
    end
end
if t==1
    Mres(i,1)=0;
    for elem=1:size(e1,1)
Mres(i,t)=Mres(i,t)+abs(stress(elem))*A(elem)*abs(z(elem)-
z_G)*10^(-1); %%Mu_hog [kN*m]
        end
    else
        Mres(i,2)=0;
        for elem=1:size(e1,1)
            Mres(i,t)=Mres(i,t)-
abs(stress(elem))*A(elem)*abs(z(elem)-z_G)*10^(-1);
%%Mu_sagg [kN*m]
        end
    end

    end
    dx_hog=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-z_CL(i,1)));
    dx_sag=0.01*(R_eH/E)*(1/(z_d-z_CL(i,2)));
    if (x(i,1)+dx_hog<=xF_hog) & (x(i,2)-dx_sag>=xF_sag)
        i=i+1;
        tan_a(i,1)=tan_a(i-1,1);tan_a(i,2)=tan_a(i-
1,2);a(i,1)=a(i-1,1);a(i,2)=a(i-1,2);
        z_CL(i,1)=z_CL(i-1,1);z_CL(i,2)=z_CL(i-1,2);
    else

```



```

        i=i+1;
    end
end
%%Εντολές εκτύπωσης αποτελεσμάτων
figure
plot(x(:,1),Mres(:,1))
hold on
plot(x(:,2),Mres(:,2),'r')
grid on
grid minor
title('Διάγραμμα καμπυλότητας-καμπτικής ροπής')
axis([-8*10^(-4) 8*10^(-4) -5*10^(6) 5*10^(6)])
hold on
[max_res_hog I_hog]=max(Mres(:,1));[min_res_sag
I_sag]=min(Mres(:,2));
max_res_hog
min_res_sag
plot(x(I_hog,1),max_res_hog,'ro')
hold on
plot(x(I_sag,2),min_res_sag,'ro')
legend('Καμπτική Ροπή σε κατάσταση hogging','Καμπτική Ροπή
σε κατάσταση sagging','Καμπτική Ροπή Κατάρρευσης σε
hogging','Καμπτική Ροπή Κατάρρευσης σε sagging')
plot(x(:,1),(206*10^6*I_y).*x(:,1),'g');plot(x(:,2),(206*10^
6*I_y).*x(:,2),'g');
xlabel('Καμπυλότητα χ[m ^(-1)]')
ylabel('Καμπτική Ροπή M [kN*m] σε hogging-sagging')

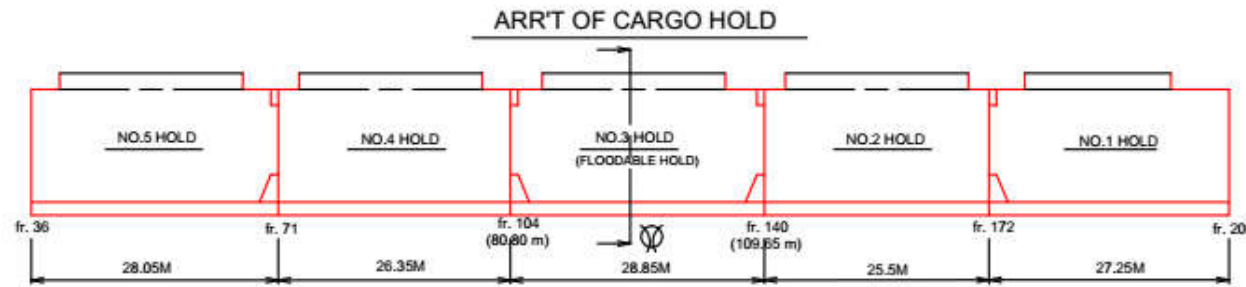
```

Παράρτημα Ζ'

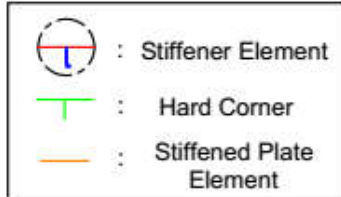
MIDSHIP SECTION PLAN (Double Skin Handysize Bulk Carrier)

PRINCIPAL DIMENSIONS

LENGTH O. A.	abt. 178.70	M
LENGTH B. P.	170.00	M
LENGTH (SCANTLING)	168.57	M
BREADTH (MLD)	28.00	M
DEPTH (MLD)	14.00	M
DRAFT (DESIGN)	9.50	M
DRAFT (SCANTLING)	9.79	M
Cb (AT SCANTLING DRAFT)	0.8139	



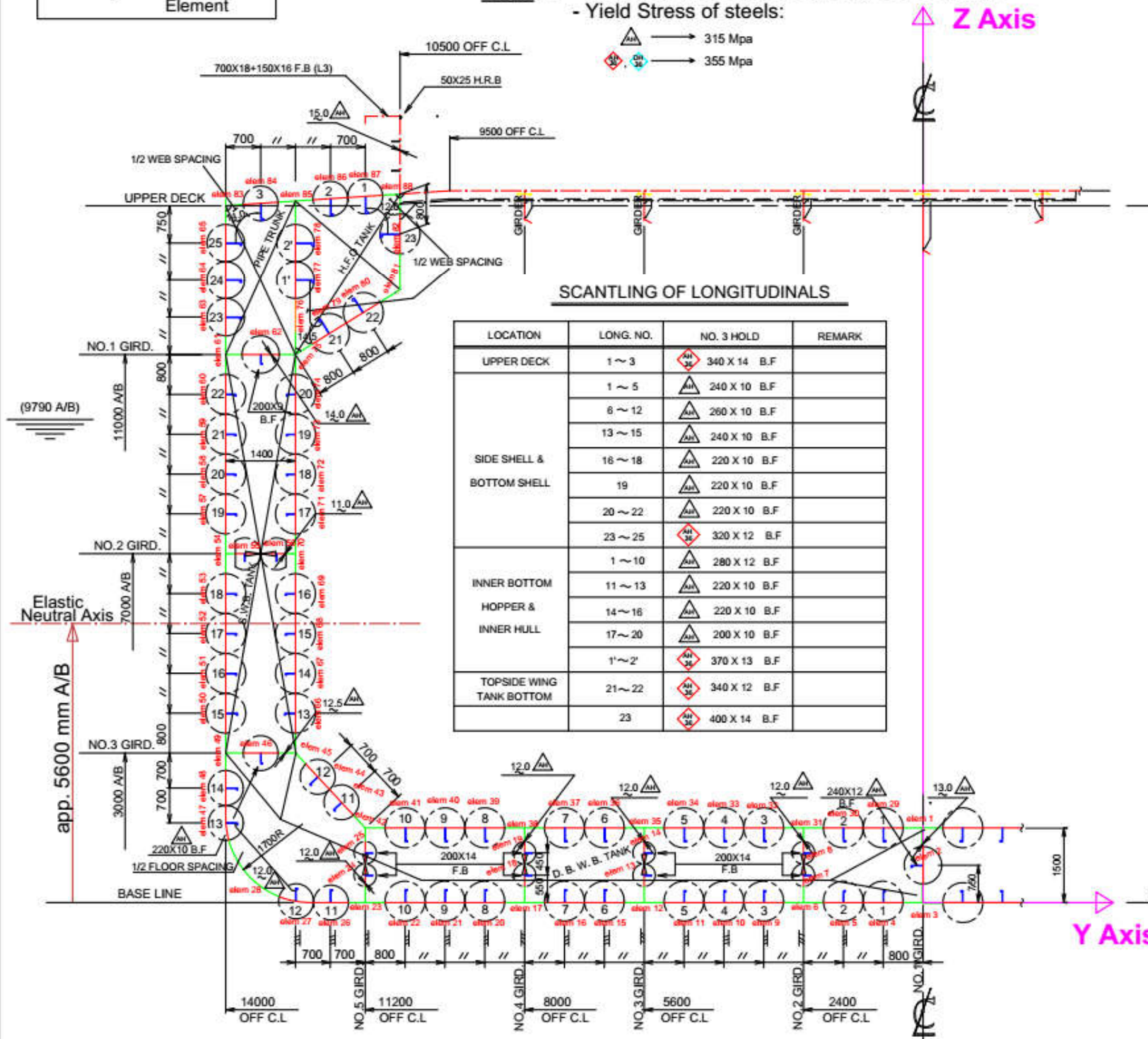
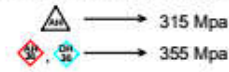
Note :



ORDINARY SECTION (1:100)

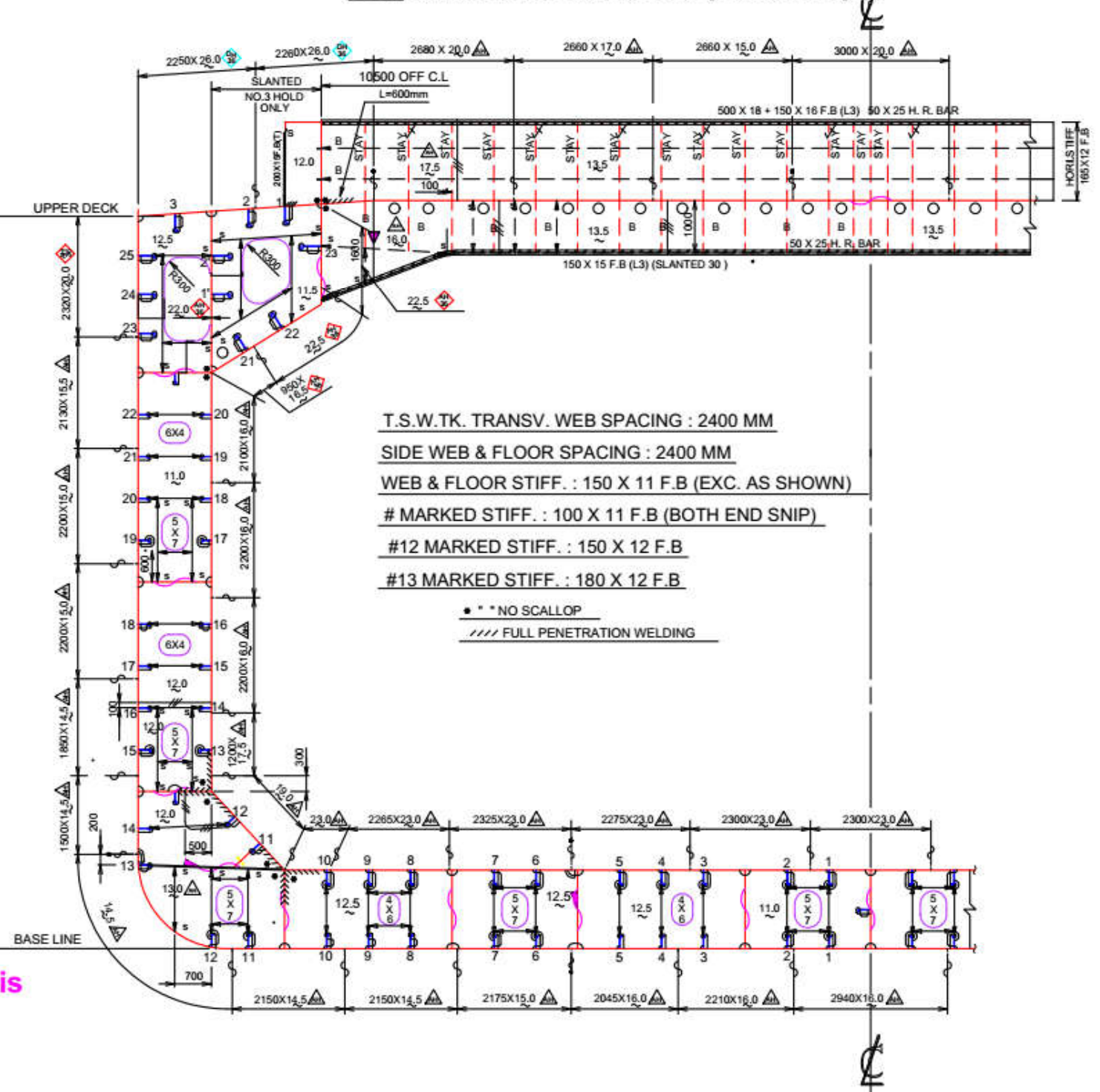
(Hatch Coaming not contributing to longitudinal strength)

Notes : - All dimensions correspond to gross scantlings
- Yield Stress of steels:

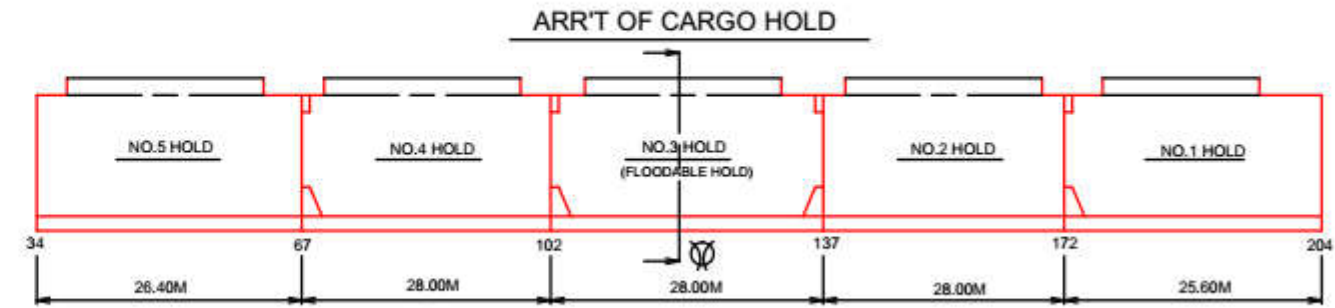


TYPICAL WEB SECTION (1:100)

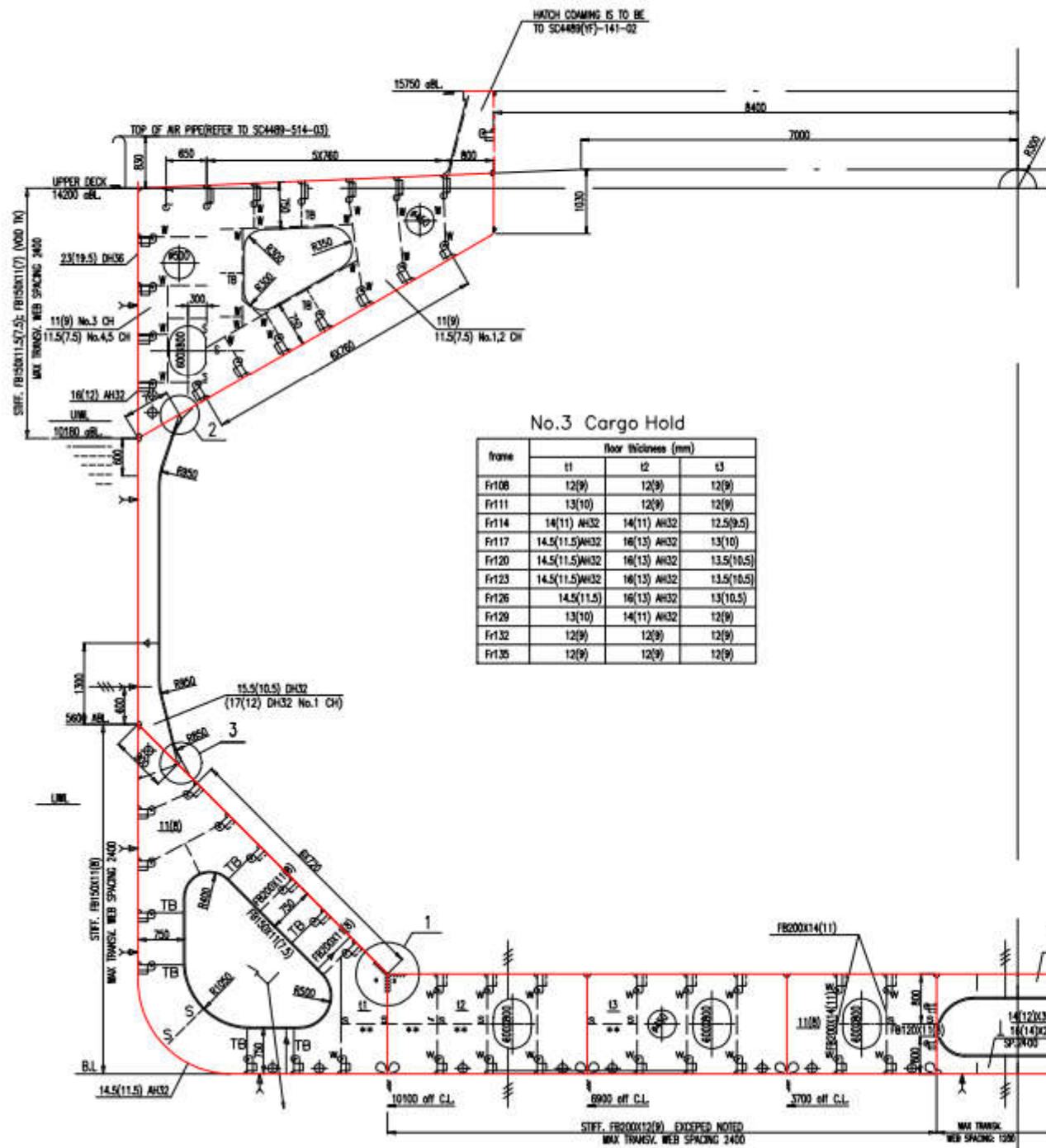
Note : All dimensions correspond to gross scantlings



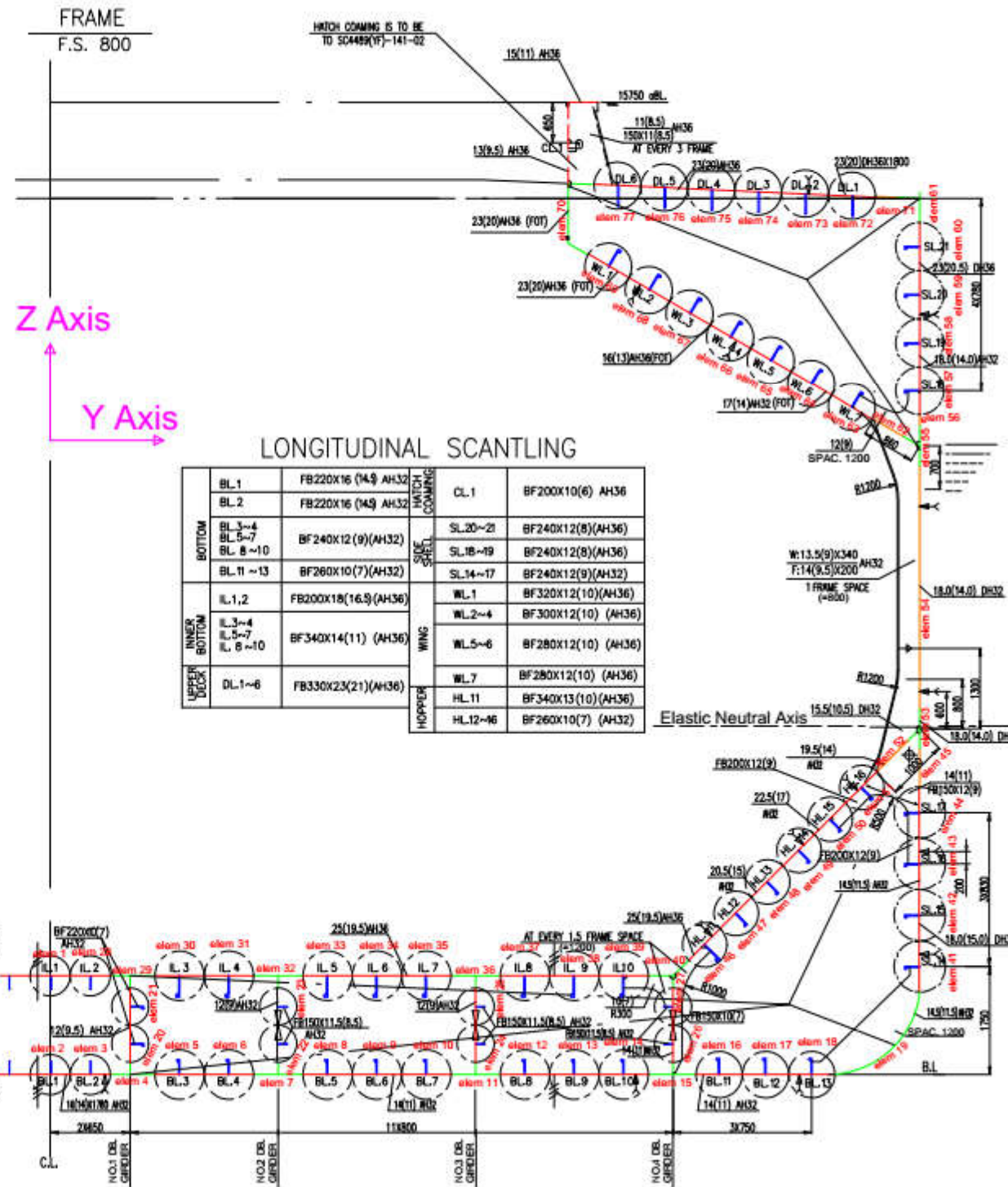
MIDSHIP SECTION PLAN (Single Skin Handysize Bulk Carrier)



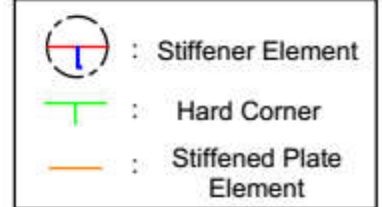
TYPICAL WEB SECTION



ORDINARY SECTION



Note :



PRINCIPAL PARTICULARS

LENGTH (O.A.)	~177.5m
LENGTH (P.P.)	168.0 m
LENGTH SCANTLING	166.36m
BREADTH (M.L.D)	28.20m
DEPTH (M.L.D)	14.2 m
DESIGNED DRAFT	9.50 m
SCANTLING DRAFT (MOULD)	10.2 m
CB	0.8277
CAMBER (UPPER DECK)	0.3m
LOAD ON TANK TOP (CARGO HOLD #1,3,5)	20 t/m ²
LOAD ON TANK TOP (CARGO HOLD #2,4)	18 t/m ²
SERVICE SPEED (AT DRIFT 9.5m, CSR WITH 10% S.W.)	~14.2 kn
STILL WATER BENDING MOMENT:	
INTACT CONDITION:	HOGGING 1053000 KNm
	SAGGING 800000 KNm
FLOODED CONDITION:	HOGGING 1320000 KNm
	SAGGING 1350000 KNm

CLASS
 CL 100 AS, E1 Bulk Carrier, BC-A, CSR, ESP,
 Holds 2,4 may be empty, IW,HLP,CM-PS BWM, GRAB(20t)
 ● MC, AUT

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής Βιβλιογραφία

- [1] Bureau Veritas, “*MARS 2000 User’s Guide-Calculation of a Section*”, Paris, 2000
- [2] Campanile A., Piscopo V., Scamardella A., “*Statistical Properties of bulk carrier residual strength*”, Ocean Engineering, Elsevier, Naples, 2015
- [3] Enrong Qi, Weicheng Cui, Zhengquan Wan, “*Comparative Study of ultimate hull girder strength of large double hull tankers*”, Marine Structures, Elsevier, China, 2005
- [4] Hussein A.W., Guedes Soares C., “*Reliability and residual strength of double hull tankers according to the new IACS structural rules*”, Ocean Engineering, Elsevier, Lisbon
- [5] I.A.C.S., *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers Harmonized*, January 2014
- [6] I.A.C.S., Phillipe Baumans, Age Boe, “*CSR-H Loads*”, Presentation, September 2012
- [7] I.A.C.S., “*Rule Change Notice No. 1*”, November 2007
- [8] Rawson K.J., Tupper E.C., “*Basic Ship Theory*”, Longman Group Limited, Volume 1, UK, 1994
- [9] Shama M., “*Buckling of Ship Structures*”, Springer, Egypt, 2013
- [10] Tetsuya Y., Masahico F., “*Buckling and Ultimate Strength of Ship and Ship-like floating Structures*”, Elsevier, UK, 2016
- [11] Underwood J., Sobey A., Blake J., Sheno R., “*Ultimate Collapse Strength Assessment of Damaged Steel-Plated Structures*”, University of Southampton, UK

Ελληνική Βιβλιογραφία

- [12] Καρύδης Π., «*Η Μεταλλική Κατασκευή του Πλοίου – Θέματα τοπικής Αντοχής*», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2000
- [13] Κορουλάκης Π., «*Μέγιστη αντοχή πλοίου στην άθικτη κατάσταση και σε καταστάσεις μετά από βλάβη*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2014
- [14] Παζιώτης Κ., «*Υπολογισμός μέγιστης αντοχής γάστρας με βλάβη*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2009
- [15] Παπάζογλου Β., «*Ναυπηγική Τεχνολογία*», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995
- [16] Πολλάλης Χ., «*Προσομοίωση πειραμάτων προσδιορισμού μέγιστης αντοχής με τη χρήση του Abaqus Implicit*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012

- [17] Σαμουηλίδης Μ., «*Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου*», Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010
- [18] Σουλιώτης Χ., «*Μελέτη προσαράξεων πλοίων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων*», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012
- [19] Τσαμασφύρος Γ.Ι., «*Μηχανική Παραμορφωσίμων Σωμάτων ΙΙ*», Αθήνα, 1991
- [20] Χατζίκος Ε., «*Matlab 6 για Μηχανικούς*», εκδ. Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, 2003