

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΕΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**



ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ  
“ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΣΤΗΜΗ”

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ**  
**ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕ ΒΛΑΒΗ**

Επιβλέπων καθηγητής  
Μ. ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής  
ΠΑΖΙΩΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΑΘΗΝΑ 2009

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕ ΒΛΑΒΗ

Επιβλέπων καθηγητής

Μ. ΣΑΜΟΥΗΛΙΔΗΣ

Επιτροπή καθηγητών

Ν.ΤΣΟΥΒΑΛΗΣ

Π.ΚΑΡΥΔΗΣ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	<b>ΣΕΛ</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ</b>	<b>4</b>
<b>Κεφάλαιο 1-Εισαγωγή</b>	
• 1.1.Γενικά	5
• 1.2.Ορισμός της Μέγιστης Διαμήκουσ Αντοχής	5
• 1.3 Μέθοδος Incremental-Iterative Approach	6
• 1.4.Άλλες εργασίες πάνω στο θέμα	7
• 1.5 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας	8
<b>Κεφάλαιο 2-Μέγιστη Αντοχή Δοκού σκάφους</b>	
• 2.1 Γενικά	9
• 2.2. Φορτία πλοίου και Απόκριση σκάφους	9
• 2.3.Τρόποι κατάρρευσης της δομής	13
• 2.4 Ανάλυση του πλοίου ως Δοκός	16
• 2.4.1 Προσέγγιση Οριακής Ανάλυσης	17
• 2.4.2 Οριακή Ανάλυση Μέγιστης Αντοχής	17
• 2.4.3 Τρόποι κατάρρευσης πλακών και ενισχυμένων πλακών	18
• 2.4.4 Παράγοντες επηρεασμού συμπεριφοράς πλακών	21
• 2.4.5 Λυγισμός δοκών	22
• 2.4.6 Γεωμετρία Βεβλαμένου Σκάφους	25
• 2.4.6.1 Γινόμενο Αδρανείας-Φυγόκεντρη Ροπή	25
• 2.4.6.2 Κύριοι Άξονες Αδρανείας	26
• 2.4.6.3 Ασύμμετρη Κάμψη-Λοξή Κάμψη	28
• 2.4.7 Διατομή με ένα άξονα συμμετρίας	31
<b>Κεφάλαιο 3-Λεπτομέρειες του υπό μελέτη σκάφους</b>	
• 3.1 Γενικά	37
• 3.2 Στοιχεία σκάφους	37
• 3.3 Μέση Τομή Σκάφους	38
• 3.4 Απομείωση Πάχους Ελασμάτων	43
• 3.5 Υπολογισμοί Ροπών Κάμψεως	48
<b>Κεφάλαιο 4-Κοινοί Κανόνες Κατασκευής(CSR)- Εφαρμογή της Μεθόδου- Incremental-Iterative Approach</b>	
• 4.1 Γενικά	50
• 4.2 Περιγραφή Μεθόδου-Βήματα	50
• 4.2.1 Βήμα 1 <sup>ο</sup>	

<b>Χωρισμός Μέσης τομής σε Δομικά στοιχεία</b>	<b>52</b>
• 4.2.2 Βήμα 2 <sup>ο</sup>	
<b>Υπολογισμός καμπύλων Φορτίου</b>	<b>56</b>
• 4.2.3 Βήμα 3 <sup>ο</sup>	
<b>Υπολογισμός βήματος καμπυλότητας και αρχική θέση ουδέτερου άξονα</b>	<b>65</b>
• 4.2.4 Βήμα 4 <sup>ο</sup>	
<b>Υπολογισμός του <math>\epsilon</math> και <math>\sigma</math> για κάθε στοιχείο</b>	<b>68</b>
• 4.2.5 Βήμα 5 <sup>ο</sup>	
<b>Καθορισμός νέου Ουδέτερου Άξονα</b>	<b>68</b>
• 4.2.6 Βήμα 6 <sup>ο</sup>	
<b>Υπολογισμός της Ροπής Κάμψεως</b>	<b>69</b>
• 4.3 Έλεγχοι κώδικα από τον κανονισμό	69
• 4.4 Προγράμματα SAG.m και HOG.m	73
<b>Κεφάλαιο 5-Κοινοί Κανόνες Κατασκευής(CSR)-Εφαρμογή της Μεθόδου Incremental-Iterative Approach σε Βεβλαμένο πλοίο</b>	
• 5.1 Γενικά	78
• 5.2 Ανάλυση στοιχείων σε Βεβλαμένο πλοίο	78
• 5.2.1 Εύρεση νέου κέντρου βάρους	79
• 5.2.2 Εύρεση νέων ροπών αδρανείας	79
• 5.2.3 Εύρεση θέσης ουδέτερου άξονα	79
• 5.3 Μελέτη Περιπτώσεων Βλαβών	80
• 5.3.1 Περίπτωση 1 <sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις	83
• 5.3.2 Περίπτωση 2 <sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις	84
• 5.3.3 Περίπτωση 3 <sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις	85
• 5.3.4 Περίπτωση 4 <sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις	86
• 5.3.5 Περίπτωση 5 <sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις	87
• 5.3.6 Περίπτωση 6 <sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις	88
• 5.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα-Σχολιασμός	89
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>91</b>
<b>Παραρτήματα</b>	
<b>Παράρτημα 1-Μέθοδος ISUM (Συνοπτικά)</b>	<b>93</b>
<b>Παράρτημα 2- Μέθοδος HULLST (Συνοπτικά)</b>	<b>95</b>
<b>Παράρτημα 3-Πληροφορίες δομικών στοιχείων</b>	<b>97</b>
<b>Παράρτημα 4-Βιβλιοθήκες <math>\sigma</math>-<math>\epsilon</math></b>	<b>101</b>
<b>Παράρτημα 5- Προγράμματα SAG.m,HOG.m</b>	<b>107</b>
<b>Παράρτημα 6- Γεωμετρικοί υπολογισμοί στοιχείων</b>	<b>123</b>
<b>Παράρτημα 7-Πρόγραμμα SD-CDA.m</b>	<b>129</b>



## Περίληψη Διπλωματικής

Σύμφωνα με τους περισσότερους διεθνείς αναγνωρισμένους νηογνώμονες η μέγιστη διαμήκης αντοχή της δοκού του πλοίου είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος ελέγχου της δομικής αντοχής του σκάφους.

Η παρούσα εργασία θα περιγράψει την μέθοδο Incremental-Iterative Approach του American Bureau of Shipping,(ABS), για τον υπολογισμό της μέγιστης διαμήκους αντοχής σκάφους.

Το σκάφος που θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή της μεθόδου είναι το Atlantic Explorer, ένα Bulk Carrier 48170 MT τόνων, έτους κατασκευής 2001.

Η μέθοδος εφαρμόζεται με τη χρήση του προγράμματος MatLab με συμπληρωματικές χρήσεις του προγράμματος Excel του Microsoft Office.

Αρχικά γίνεται έλεγχος και υπολογισμός της μέγιστης διαμήκους αντοχής του σκάφους σε άθικτη κατάσταση, σε κατάσταση Sagging και Hogging, και κατόπιν γίνεται νέος υπολογισμός για διάφορες καταστάσεις βλάβης.

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1.Γενικά

Μία από τις πιο σοβαρές πτυχές στον σχεδιασμό και στον δομικό έλεγχο αντοχής ενός σκάφους είναι και ο προσδιορισμός της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής της Δοκού του πλοίου. Λαμβάνοντας υπόψη την περιπλοκότητα κατασκευής ενός πλοίου και το ιδιαίτερα περίπλοκο περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί γίνεται κατανοητό ότι ο υπολογισμός της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα.

Η γραμμική ελαστική ανάλυση είναι αρκετά απλή και βολική για τον ανωτέρω υπολογισμό πλην όμως το όριο ελαστικότητας του υλικού δεν αντιπροσωπεύει την πραγματική δομική αντοχή του σκάφους. Σε γενικές γραμμές η κατασκευή συνεχίζει να αντέχει σε φορτίο ακόμα και όταν ξεπεραστεί αυτό το όριο και αρχίσουν να παρουσιάζονται φαινόμενα τοπικού λυγισμού ή κατάρρευσης. Έτσι η Μέγιστη Διαμήκης Αντοχή της κατασκευής υπερβαίνει το ελαστικό όριο. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί έτσι έχουμε ένα ξεκάθαρο όριο αντοχής της κατασκευής το οποίο υπερβαίνει το γραμμικό ελαστικό όριο.

Παλαιότερα ο υπολογισμός της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής γινόταν με βάση την γραμμική ελαστική ανάλυση με μία διόρθωση για την πλαστικότητα. Με την αύξηση της ικανότητας των ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι δυνατός ένας ακριβέστερος υπολογισμός της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής με αποτέλεσμα την κατασκευή ικανότερων και οικονομικότερων πλοίων.

### 1.2.Ορισμός της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής

Η Μέγιστη Διαμήκης Αντοχή ενός πλοίου καθορίζεται ως η μέγιστη ροπή κάμψης που μπορεί να δεχτεί η δοκός του πλοίου πέραν της οποίας η κατασκευή θα καταρρεύσει. Η κατάρρευση της δοκού του πλοίου ελέγχεται από την μέγιστη αντοχή των δομικών κομματιών που την αποτελούν, λαμβάνοντας υπόψη τον λυγισμό ή την κατάρρευσή τους.

$$M_t = \gamma_{sw} * M_{sw} + \gamma_w * M_w \leq M_u / \gamma_r$$

$M_u$  : Μέγιστη Ροπή Κάμψης

$M_{sw}$ : Ροπή Κάμψης σε Ήρεμο νερό

$M_w$ : Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό

$\gamma_{sw}$ : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1 σύμφωνα με CSR

$\gamma_w$ : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1,2 σύμφωνα με CSR

$\gamma_r$ : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1,1 σύμφωνα με CSR

### 1.3 Μέθοδος Incremental-Iterative Approach.

Για τον υπολογισμό της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής οι Κοινοί Κανόνες Κατασκευής (Common Structural Rules ή CSR για συντομία), που έχουν γίνει διεθνώς αποδεκτοί, έχουν αναπτύξει τη μέθοδο **Incremental-Iterative Approach**. Με βάση αυτή τη μέθοδο αναγνωρίζονται οι κυριότεροι τρόποι κατάρρευσης των στοιχείων που συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή. Όλοι οι σχετικοί τρόποι κατάρρευσης, (όπως plate buckling, beam column buckling, torsional stiffener buckling, local buckling of stiffener) υπολογίζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους έτσι ώστε να βρεθεί το αδύνατο σημείο κάθε δομικού στοιχείου. Σε σκάφη ή γενικότερα σε πλωτές εξέδρες η κάμψη κατά τον διαμήκη άξονα αποτελεί την κυριότερη καταπόνηση έτσι ο υπολογισμός της Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής βασίζεται στην ακαμψία της κατασκευής σε φορτίο σε ήρεμο νερό και σε φορτίο σε κυματισμό.

Το κάθε βήμα της μεθόδου χαρακτηρίζεται από τον υπολογισμό της ροπής κάμψης που εξασκείται στο σκάφος σαν αποτέλεσμα εφαρμοζόμενης καμπυλότητας  $\chi$ . Για κάθε βήμα η καμπυλότητα αυξάνεται κατά μία προκαθορισμένη ποσότητα  $\Delta\chi$ . Η αύξηση της γωνίας στροφής επιφέρει παραμόρφωση σε κάθε δομικό στοιχείο της κατασκευής η τιμή του οποίου εξαρτάται από την απόσταση του στοιχείου από τη θέση του ουδέτερου άξονα εκείνη τη στιγμή. Η τάση  $\sigma$  η οποία τελικά αναπτύσσεται λόγω της παραμόρφωσης είναι δυνατόν να υπολογιστεί από προϋπάρχουσες βιβλιοθήκες τάσεων παραμορφώσεων και τελικά να μετασχηματιστεί σε δύναμη. Το άθροισμα των δυνάμεων από τα δομικά στοιχεία χρησιμοποιείται για να βρεθεί η μεταξύ τους ισορροπία και να υπολογιστεί η νέα θέση του ουδέτερου άξονα. Μόλις γίνει αυτό υπολογίζεται η ροπή κάμψης της διατομής.

Η παραπάνω μέθοδος θεωρείται αρκετά ακριβής και είναι πολύ ταχύτερη από μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων ανεξαρτήτως χρησιμοποιούμενου προγράμματος.

### 1.4. Άλλες εργασίες πάνω στο θέμα

Αν και οι μέθοδοι υπολογισμού με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι αρκετά ευέλικτες και μπορούν να δώσουν ακριβή αποτελέσματα για συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής είναι εξαιρετικά χρονοβόρες και περίπλοκες. Έχουν αναπτυχθεί πιο απλές μέθοδοι οι κυριότερες των οποίων περιγράφονται παρακάτω:

#### A-. Idealised structural Unit Method (ISUM)

Είναι μία απλοποιημένη μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων όπου η μοντελοποίηση των κομματιών γίνεται με χρήση πολύ λιγότερων κόμβων με



αποτέλεσμα την πολύ ταχύτερη επίλυσή της ενώ οι κατασκευαστές της ισχυρίζονται ότι δίνει καλύτερα αποτελέσματα όσο αφορά την σταδιακή κατάρρευση της κατασκευής. Περισσότερες πληροφορίες για αυτή τη μέθοδο περιγράφονται στο Appendix 1

#### B-.HULLST

Είναι μία μέθοδος που αναπτύχθηκε με βάση την μέθοδο Smith. Στην συγκεκριμένη μέθοδο η μέση τομή του σκάφους χωρίζεται σε μικρότερα κομμάτια για τα οποία αναπτύσσονται βιβλιοθήκες τάσεων-παραμορφώσεων. Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα για τα επιμέρους τεμάχια καταλήγουμε σε αποτέλεσμα για ολόκληρη τη μέση τομή. Περισσότερες πληροφορίες για αυτή τη μέθοδο περιγράφονται στο Παράρτημα 2.

### 1.5 Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μία συνοπτική παρουσίαση των τάσεων και των φορτίων τα οποία αναπτύσσονται στη δοκό του πλοίου, οι τρόποι κατάρρευσης της κατασκευής, η μέγιστη αντοχή πλακών, ενισχυμένων ή μη, η αντοχή σε λυγισμό αυτών και των δοκών υποστήριξης αυτών, το φαινόμενο της λοξής κάμψης και της πλαστικής παραμόρφωσης.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το υπό μελέτη πλοίο, ο χωρισμός του σε στοιχεία διαμήκους δομικής αντοχής, οι παραδοχές που γίνονται, ενώ γίνεται και υπολογισμός της Ροπή Κάμψης σε Ήρεμο νερό και της Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται η παρουσίαση της μεθόδου Incremental-Iterative Approach των Κοινών Κανόνων Κατασκευής σε συνάρτηση με το περιβάλλον MATLAB καθώς και τα αποτελέσματα για το υπό μελέτη πλοίο.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται εφαρμογή της ανωτέρου μεθόδου σε γάστρα με βλάβη για την ανεύρεση της εναπομείνουσας αντοχής σε κάμψη.

## Κεφάλαιο 2

### Μέγιστη Αντοχή Δοκού σκάφους

#### 2.1 Γενικά

Είναι βέβαιο ότι ο υπολογισμός της μέγιστης διαμήκους αντοχής του σκάφους και ο καθορισμός του επιπέδου ασφαλείας αυτού είναι ένα από τα πιο δύσκολα μηχανολογικά προβλήματα. Η περιπλοκότητα της κατασκευής του σκάφους σε συνδυασμό με το εντελώς αντίξοο περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί το πλοίο δημιουργεί μεγάλες δυσκολίες στο καθορισμό του επιπέδου φόρτισης του πλοίου και της αντίδρασής του σε αυτή τη φόρτιση. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να κάνει μία μικρή εισαγωγή στα φορτία και τις τάσεις που δέχεται το πλοίο, τους τρόπους κατάρρευσης της δομής του και να περιγράψει τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της μέγιστης διαμήκους αντοχής του σκάφους.

#### 2.2. Φορτία πλοίου και Απόκριση σκάφους

Τα διάφορα φορτία τα οποία καταπονούν το σκάφος κατά τη διάρκεια της ζωής του μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω κατηγορίες.

A. Στατικά φορτία τα οποία μεταβάλλονται μόνο όταν αλλάζει το βάρος του πλοίου, λόγω φόρτωσης-εκφόρτωσης, κατανάλωσης καυσίμων ή μετασκευών.

- Βάρος κατασκευής
- Άνωση
- Θερμικά φορτία λόγω μη γραμμικών μεταβολών θερμοκρασίας μέσα στο σκάφος.
- Συγκεντρωμένα φορτία λόγω δεξαμενισμού ή προσάραξης.

B. Δυναμικά φορτία χαμηλής συχνότητας με διάρκεια ολίγων δευτερολέπτων έως αρκετών λεπτών

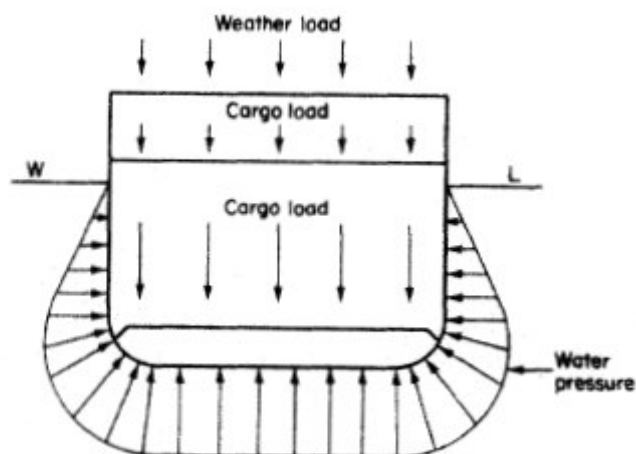
- Δυνάμεις αναπτυσσόμενες από προσπίπτοντα κύματα
- Δυνάμεις αδράνειας αναπτυσσόμενες λόγω μετακινήσεων υγρών μέσα στο σκάφος ή λόγω των επιταχύνσεων του ίδιου του σκάφους
- Δυνάμεις αδράνειας αναπτυσσόμενες λόγω δημιουργίας κυμάτων από το ίδιο το πλοίο λόγω της κίνησης του

Γ. Δυναμικά φορτία υψηλής συχνότητας τα οποία μπορούν να προκαλέσουν κραδασμούς στο σκάφος.

- Υψηλής συχνότητας διαμήκεις ταλαντώσεις της κατασκευής (springing)

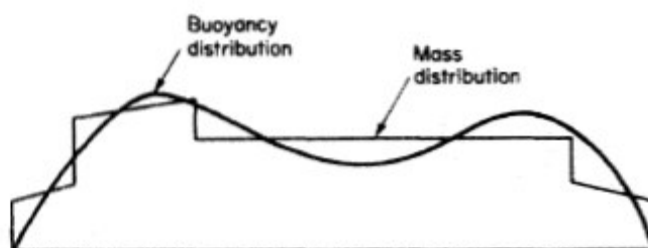
- Τοπικές ταλαντώσεις που οφείλονται στη λειτουργία μηχανολογικών συστημάτων και της έλικας.
- Υδροδυναμικά φορτία λόγω λειτουργίας της έλικας

Δ. Κρουστικά φορτία τα οποία προκύπτουν από την πρόσκρουση κυμάτων πάνω στο σκάφος. Η σφυρόκρουση (bottom slamming) είναι αποτέλεσμα της κρούσης της προωραίας περιοχής του πυθμένα με την επιφάνεια της θάλασσας και συμβαίνει όταν η σχετική ταχύτητα μεταξύ πλώρης και θάλασσας υπερβαίνει ένα κατώτατο όριο.



Εικόνα 2.1

Εξαιρώντας τις δυνάμεις αδράνειας η φόρτιση του πλοίου (Εικόνα 2.1) οφείλεται κυρίως στο ίδιο βάρος του και στη δύναμη που αναπτύσσεται από την πίεση του νερού (Άνωση και Κυματισμός). Η άνιση κατανομή αυτών των φορτίων προκαλεί κάμψη στην κατασκευή.

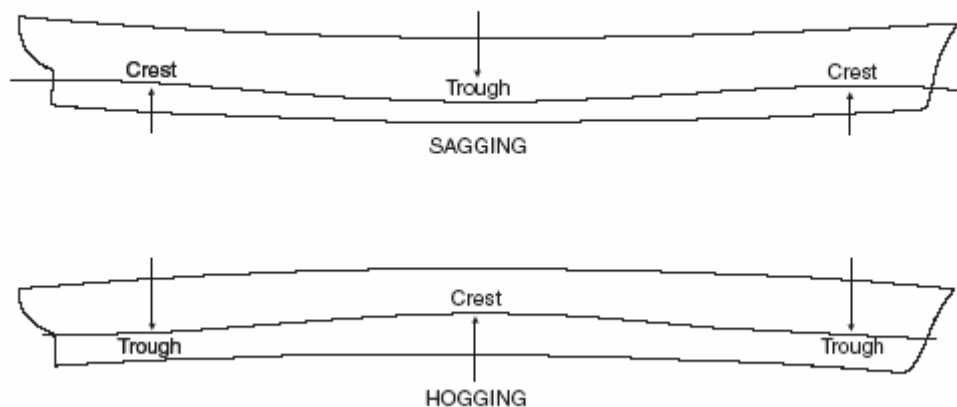


Εικόνα 2.2

Η κάμψη του σκάφους χωρίζεται σε sagging και hogging ανάλογα με τον είδος καταπόνησης των ινών. Στην πρώτη περίπτωση (sagging) οι ίνες του καταστρώματος θλίβονται και ο πυθμένας εφελκύεται ενώ στη δεύτερη (hogging) οι ίνες του καταστρώματος εφελκύνονται και ο πυθμένας θλίβεται (Εικόνα 2.3).

Θεωρώντας το πλοίο ως δοκό είναι δυνατό να υπολογίσουμε τη ροπή κάμψεως σε κάθε μία από τις παραπάνω καταστάσεις διαχωρίζοντας κάθε φορά τη

ροπή σε ροπή σε ήρεμο νερό (still water moment) και ροπή σε κυματισμό (wave moment).



Εικόνα 2.3

Για τον υπολογισμό των αξονικών τάσεων χρησιμοποιείται η θεωρία Euler-Bernoulli η οποία έχει τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- Η δοκός θεωρείται πρισματική, δηλαδή όλες οι διατομές είναι ίδιες.
- Οι διατομές παραμένουν επίπεδες και απλά περιστρέφονται καθώς η δοκός κάμπτεται.
- Εγκάρσιες επιδράσεις στις εμφανιζόμενες τάσεις αγνοούνται (Φαινόμενο Poisson).
- Το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά, το μέτρο ελαστικότητας παραμένει ίδιο σε εφελκυσμό και σε θλίψη.
- Φαινόμενα διάτμησης δεν επηρεάζουν την κάμψη και τις αντίστοιχες τάσεις.

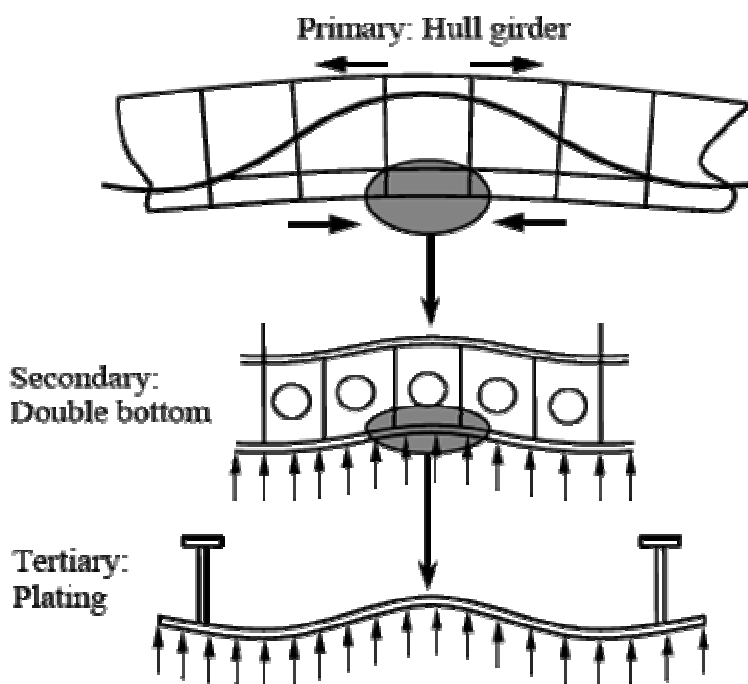
Όλα τα παραπάνω μας δίνουν το τύπο της αξονικής τάσης:

$$\sigma = \frac{M}{SM} = \frac{M_s + M_w}{SM}$$

όπου  $M_s$  είναι η ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό και  $M_w$  η ροπή κάμψης σε κυματισμό (κατάσταση sagging ή hogging αντίστοιχα) και  $SM$  είναι η ροπή αντίστασης (Section Modulus) ως προς τον πυθμένα ή το κατάστρωμα ανάλογα με το πώς θα την υπολογίσουμε. Υπάρχει μία θέση σε όλο το ύψος της διατομής όπου η αξονική δύναμη και κατά επέκταση η ροπή κάμψης, είναι μηδέν. Αυτή η θέση ονομάζεται ουδέτερος άξονας της διατομής. Η θέση του μεταβάλλεται ανάλογα με τη φόρτιση του πλοίου και αυτό θα το χρησιμοποιήσουμε παρακάτω.

Γενικά τα διάφορα φορτία που εξασκούνται στο πλοίο μπορούν να έχουν τοπική αλλά και συνολική επίδραση στη δομή του σκάφους.

Η γεωμετρία του πλοίου και η αντίδραση του στην επιβολή φορτίων κάνουν βολικό το διαχωρισμό των αποκρίσεων του σκάφους σε τρία είδη όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4

Πρωτεύουσες τάσεις ή Πρωτεύουσα απόκριση (Primary Response) ονομάζεται η αντίδραση όλου του σκάφους θεωρούμενου ως δοκού υπό την επίδραση εξωτερικών φορτίων από κάθε διεύθυνση.

Δευτερεύουσες τάσεις ή Δευτερεύουσα απόκριση (Secondary Response) ονομάζεται η αντίδραση ενός ενισχυμένου ελάσματος της κατασκευής τα όρια του οποίου καθορίζονται από τα αντίστοιχα παρόμοια γειτονικά ενισχυμένα ελάσματα.

Τριτεύουσες τάσεις ή Τριτεύουσα απόκριση (Tertiary Response) ονομάζεται η αντίδραση μίας μεμονωμένης πλάκας υλικού τα όρια της οποίας καθορίζονται από τα ενισχυτικά της δευτερεύουσας πλάκας της οποίας αποτελεί τμήμα.

### 2.3. Τρόποι κατάρρευσης της δομής

Κατάρρευση της κατασκευής επέρχεται όταν δεν μπορεί πια να αντέξει τα φορτία που της επιβάλλονται και σαν αποτέλεσμα αυτού δεν μπορεί πια να εκτελέσει την αποστολή της. Εάν η κατάρρευση ενός δομικού στοιχείου απλώς μεταδώσει το φορτίο του στα υπόλοιπα τότε δεν υπάρχει θέμα ασφαλείας της κατασκευής. Εάν όχι τότε λαμβάνει χώρα ένα φαινόμενο τύπου ντόμινο με τα γειτονικά στοιχεία να καταρρέουν το ένα μετά το άλλο με τελικό αποτέλεσμα την αστοχία όλης της κατασκευής. Για το πλοίο ως δοκό τέσσερις κύριοι τρόποι κατάρρευσης μπορούν να διακριθούν:

- Υποχώρηση του υλικού λόγω υπέρβασης της μέγιστης τάσης εφελκυσμού ή θλίψης. (Direct failure)
- Αστάθεια σε θλίψη-Λυγισμός (Buckling)
- Κόπωση (Fatigue)
- Θραύση (Brittle fracture-Cracking)

Ο πρώτος τρόπος κατάρρευσης συμβαίνει όταν η τάση σε ένα δομικό στοιχείο ξεπερνά ένα όριο με αποτέλεσμα μόνιμη πλαστική παραμόρφωση του στοιχείου. Αυτό το όριο ονομάζεται yield stress. Σε κάποιο ακόμα υψηλότερο σημείο τάσεως (ultimate stress) συμβαίνει θραύση του υλικού. Οι περισσότεροι κανονισμοί βασίζονται στην αποφυγή του φτάσει η τάση σε τέτοια επίπεδα.

Ο λυγισμός ενός δομικού στοιχείου με θλιπτική φόρτιση μπορεί να συμβεί σε πολύ χαμηλότερη τάση από το yield stress. Το φορτίο στο οποίο θα συμβεί λυγισμός (Buckling) εξαρτάται πολύ περισσότερο από τη γεωμετρία του στοιχείου και το μέτρο ελαστικότητάς του παρά από την αντοχή του. Η πιο συνηθισμένη περίπτωση αστοχίας αυτού του είδους είναι ο λυγισμός κολόνας σε θλιπτικό φορτίο το οποίο είναι ίσο ή ξεπερνά την Κρίσιμη τάση Euler. Μία πλάκα αντίθετα δεν θα αστοχήσει σε αυτή την περίπτωση αλλά θα έχει μία ελαστική παραμόρφωση στο κέντρο της το οποίο θα πάψει να είναι συνεπίεδο με την υπόλοιπη πλάκα. Με την αφαίρεση του φορτίου η πλάκα θα επιστρέψει στην αρχική της θέση. Το οριακό φορτίο που μπορεί να παραληφθεί από πλάκα εξαρτάται από το yield stress στο οποίο θα φτάσει κάποια στιγμή η λυγισμένη πλάκα.

Η κατάρρευση λόγω κόπωσης είναι αποτέλεσμα σωρευτικών επιδράσεων σε ένα δομικό στοιχείο το οποίο είναι εκτεθειμένο σε μία τάση μεταβαλλόμενη από θλιπτική σε εφελκυστική και αντίθετα για πολλούς κύκλους. Ο κάθε κύκλος της τάσης προκαλεί μία μικρή αλλά μόνιμη ζημιά στο υλικό. Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα η αθροιστική επίδραση των ανωτέρω υποβαθμίζει την ικανότητα του στοιχείου να παραλαμβάνει φορτίο κάτω από το προβλεπόμενο. Η βλάβη λόγω κόπωσης μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες: Κόπωση υψηλών συχνοτήτων και κόπωση χαμηλών συχνοτήτων. Η πρώτη μορφή προκαλεί κατάρρευση μέσω της δημιουργίας πολλών μικρών crack στην κατασκευή τα οποία μεγαλώνουν σιγά-σιγά και συνήθως μπορούν να προληφθούν. Αυτού του είδους η κόπωση αφορά πολλά εκατομμύρια κύκλους χαμηλού επιπέδου τάσης και συνήθως συναντάτε σε περιστρεφόμενα μηχανολογικά τμήματα.. Η δεύτερη μορφή αφορά πολύ υψηλότερα επίπεδα τάσεως τα οποία δημιουργούν crack μετά από μερικές χιλιάδες κύκλους.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι στη διάρκεια ζωής του πλοίου αυτό υποβάλλεται σε κόπωση χαμηλής συχνότητας για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα με επιβολή κόπωσης υψηλών συχνοτήτων για μικρά ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα. (θαλασσοταραχές). Τα crack που δημιουργούνται μπορεί να γίνουν πολύ σοβαρά εάν δεν εντοπισθούν και επισκευαστούν εγκαίρως.

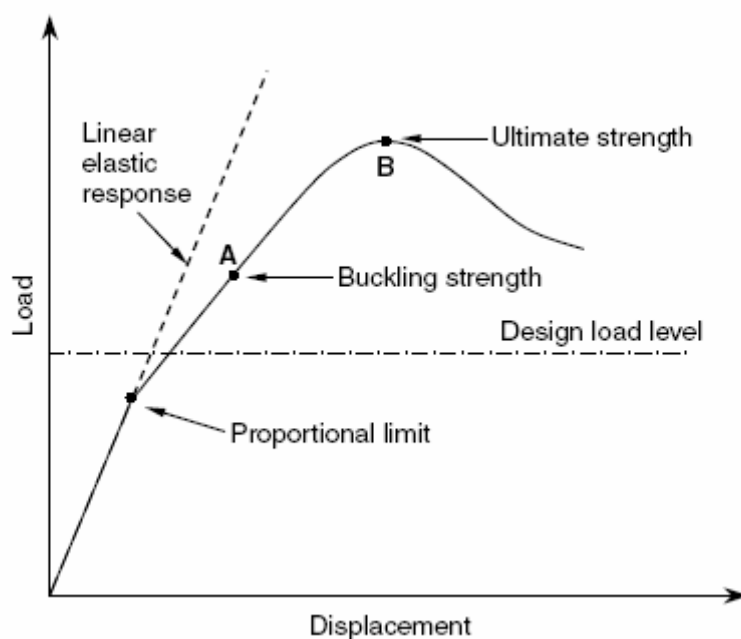
Ο τέταρτος τρόπος κατάρρευσης, η θραύση, είναι η ξαφνική διεύρυνση ενός crack το οποίο επεκτείνεται διαμέσου ενός κύριου τμήματος της κατασκευής. Το αρχικό crack είναι, συνήθως, αποτέλεσμα κακού σχεδιασμού ή κατασκευαστικής πρακτικής. Η κόπωση του υλικού συνήθως παίζει μεγάλο ρόλο στην αρχική δημιουργία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



## 2.4 Ανάλυση του πλοίου ως Δοκός

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μεγάλη προσπάθεια από την ναυπηγική βιομηχανία να αναπτυχθούν οριακές προσεγγίσεις (limit state design) σε σχέση με την παραδοσιακή προσέγγιση επιτρεπόμενης τάσης για το σχεδιασμό και υπολογισμό της αντοχής του σκάφους.

Παραδοσιακά ο σχεδιασμός του πλοίου βασιζόταν στον υπολογισμό της τάσης λυγισμού των διάφορων δομικών στοιχείων με διόρθωση για την πλαστικότητα (σημείο Α εικόνας 2.5).



Εικόνα 2.5

Ο στόχος ήταν να κρατηθούν οι τάσεις κάτω από ένα αποδεκτό επίπεδο το οποίο βασιζόταν σε προηγούμενη εμπειρία και έρευνα. Το αποτέλεσμα ήταν συνήθως να μη λαμβάνεται υπόψη η μεταλυγισμική συμπεριφορά του υλικού ούτε η μέγιστη τάση αυτού.

Σήμερα οι διάφοροι οργανισμοί αναγνωρίζουν το γεγονός ότι η οριακή προσέγγιση είναι μία καλύτερη μέθοδος σχεδιάσεως και υπολογισμού και σαφώς οικονομικότερη.

### 2.4.1 Προσέγγιση Οριακής Ανάλυσης (Limit State Approach)

Σαν οριακό σημείο ορίζεται η κατάσταση στην οποία ένα δομικό στοιχείο ή ολόκληρη η κατασκευή παύει να εκτελεί τη λειτουργία της.

Η οριακή ανάλυση μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα τμήματα:

- Οριακή Ανάλυση Λειτουργικότητας. Αφορά την κανονική λειτουργία και συμπεριλαμβάνει βλάβες που μπορεί να συμβούν στα πλαίσια αυτής.
- Οριακή Ανάλυση Κοπώσεως. Αφορά την πιθανότητα βλάβης λόγω κυκλικών φορτίων.
- Οριακή Ανάλυση Ατυχήματος. Αφορά βλάβες λόγω ατυχημάτων, πυρκαγιών, διαρροών, συγκρούσεων κλπ.
- Οριακή Ανάλυση Μέγιστης Αντοχής. Αφορά την αστοχία της κατασκευής ή στοιχείων αυτής λόγω επιβολής φορτίου που πλησιάζει ή ξεπερνά το μέγιστο δυνατό.

### 2.4.2 Οριακή Ανάλυση Μέγιστης Αντοχής

Ο σκοπός της Οριακής Ανάλυσης Μέγιστης Αντοχής είναι να υπολογίσει την μέγιστη αντοχή της κατασκευής και να καθορίσει το επίπεδο ασφαλείας αυτής. Αυτό εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο:

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

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

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

όπου

$\gamma_o$  : συντελεστής ασφαλείας ο οποίος λαμβάνει υπόψη την σοβαρότητα έκαστου στοιχείου της κατασκευής

$C_k$  : μέτρο ικανότητας κατασκευής

$\gamma_M$  : συντελεστής ασφαλείας

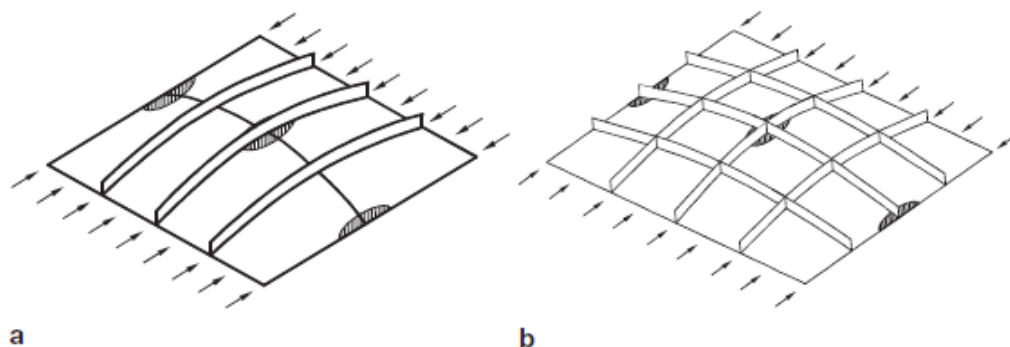
$\gamma_m$  : συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες λόγω ιδιαιτεροτήτων του υλικού.

$\gamma_c$  : συντελεστής ασφαλείας που λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες λόγω ποιότητας κατασκευής, διάβρωσης,

### 2.4.3 Τρόποι κατάρρευσης πλακών και ενισχυμένων πλακών

Οι κυριότεροι τρόποι αστοχίας πλακών και ενισχυμένων πλακών, σε θλιπτικά φορτία κυρίως, μπορούν να χωρισθούν στους κάτωθι έξι τρόπους :

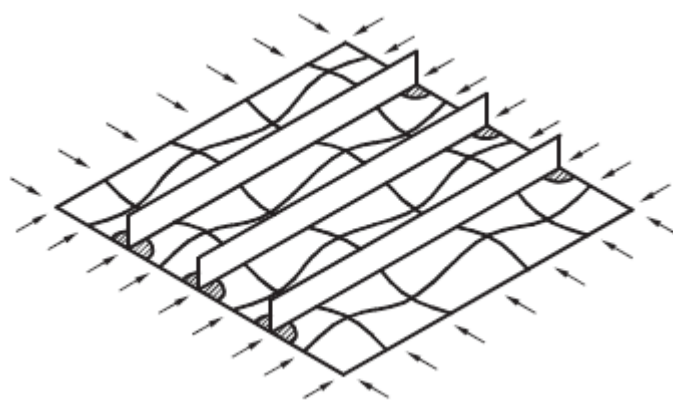
- Ολική κατάρρευση πλάκας και ενισχυτικού ως μονάδα (Εικόνα 2.6): Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης συμβαίνει όταν τα ενισχυτικά είναι σχετικά αδύναμα. Τότε τα ενισχυτικά μαζί με την πλάκα λυγίζουν όλα μαζί αρχικά ελαστικά. Η αστοχία επέρχεται αφού όλη η μονάδα έχει περάσει την τάση λυγισμού και μπαίνει στην πλαστική περιοχή με τα άκρα στα οποία στηρίζεται να αστοχούν πρώτα.



Εικόνα 2.6

Στην α περίπτωση φαίνεται πλάκα ενισχυμένη σε μία διεύθυνση ενώ στην b περίπτωση είναι ενισχυμένη και στις δύο διευθύνσεις.

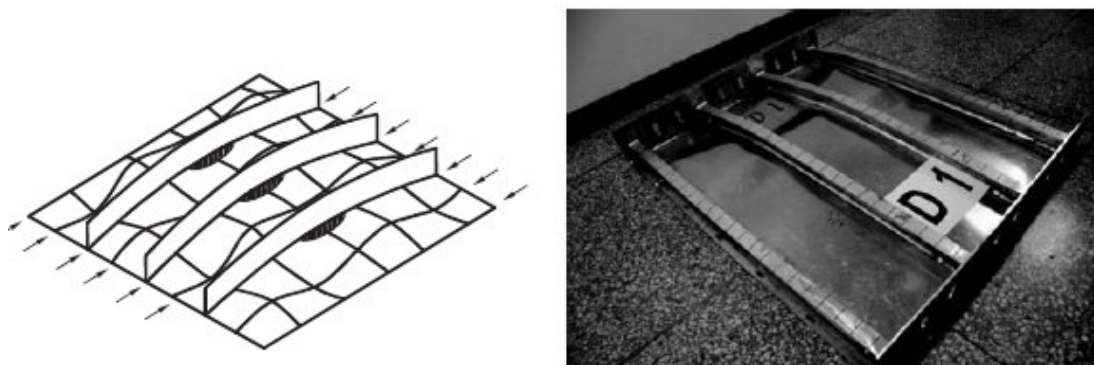
- Διαξονική κατάρρευση συμπίεσης (Εικόνα 2.7) : Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης συμβαίνει όταν η πλάκα καταρρέει στις συνδέσεις της με τα ενισχυτικά χωρίς αυτά να αστοχούν. Αυτό συμβαίνει, κυρίως όταν ασκούνται διαξονικά φορτία στην πλάκα.



Εικόνα 2.7

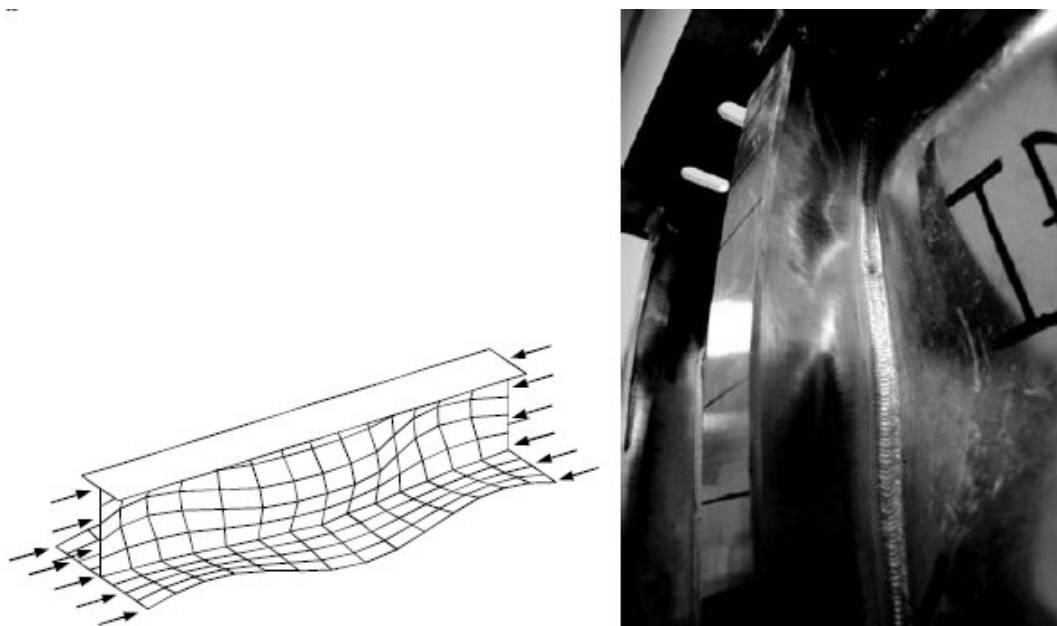
- Κατάρρευση δοκού (Εικόνα 2.8) : Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης συμβαίνει όταν τα ενισχυτικά αστοχούν στο μέσον τους χωρίς

παραμόρφωση της πλάκας. Αυτό συμβαίνει όταν τα ενισχυτικά είναι ενδιάμεσης αντοχής, ούτε πολύ αδύνατα ούτε πολύ δυνατά.



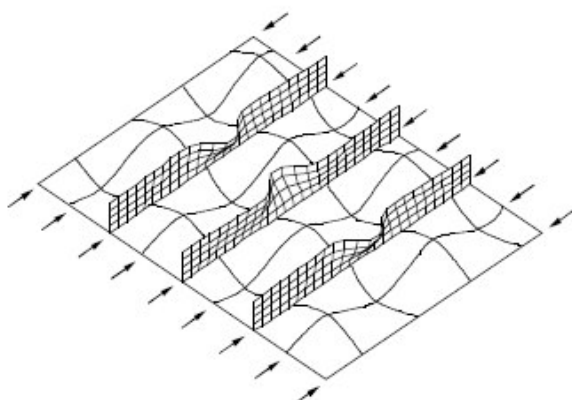
Εικόνα 2.8

- Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού (Εικόνα 2.9): Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης συμβαίνει όταν τα ενισχυτικά έχουν μεγάλο λόγο ύψους προς πάχος κορμού και/ή η φλάντζα αδυνατεί να παραμείνει ευθεία.



Εικόνα 2.9

- Πλάγιος λυγισμός ενισχυτικού (Εικόνα 2.10) : Αυτός ο τρόπος κατάρρευσης συμβαίνει όταν η φλάντζα των ενισχυτικών δεν μπορεί να παραμείνει ευθεία και το ενισχυτικό στραβώνει σε πλάγια διεύθυνση. Αυτό συνήθως συμβαίνει απότομα και αφήνει την πλάκα χωρίς υποστήριξη με αποτέλεσμα να ακολουθεί συνήθως ολική κατάρρευση.



Εικόνα 2.10

- Μικτή κατάρρευση : Αυτό συμβαίνει όταν ο λόγος λυγηρότητας της πλάκας είναι πολύ μικρός με αποτέλεσμα να μη συμβαίνει καθόλου λυγισμός αλλά απευθείας κατάρρευση ολόκληρου του στοιχείου.

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε ότι οι παραπάνω τρόποι αστοχίας συχνά αλληλοεπηρεάζονται και συμβαίνουν ταυτόχρονα. Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τα παραπάνω περιγράφονται παρακάτω.

#### 2.4.4 Παράγοντες επηρεασμού συμπεριφοράς πλακών

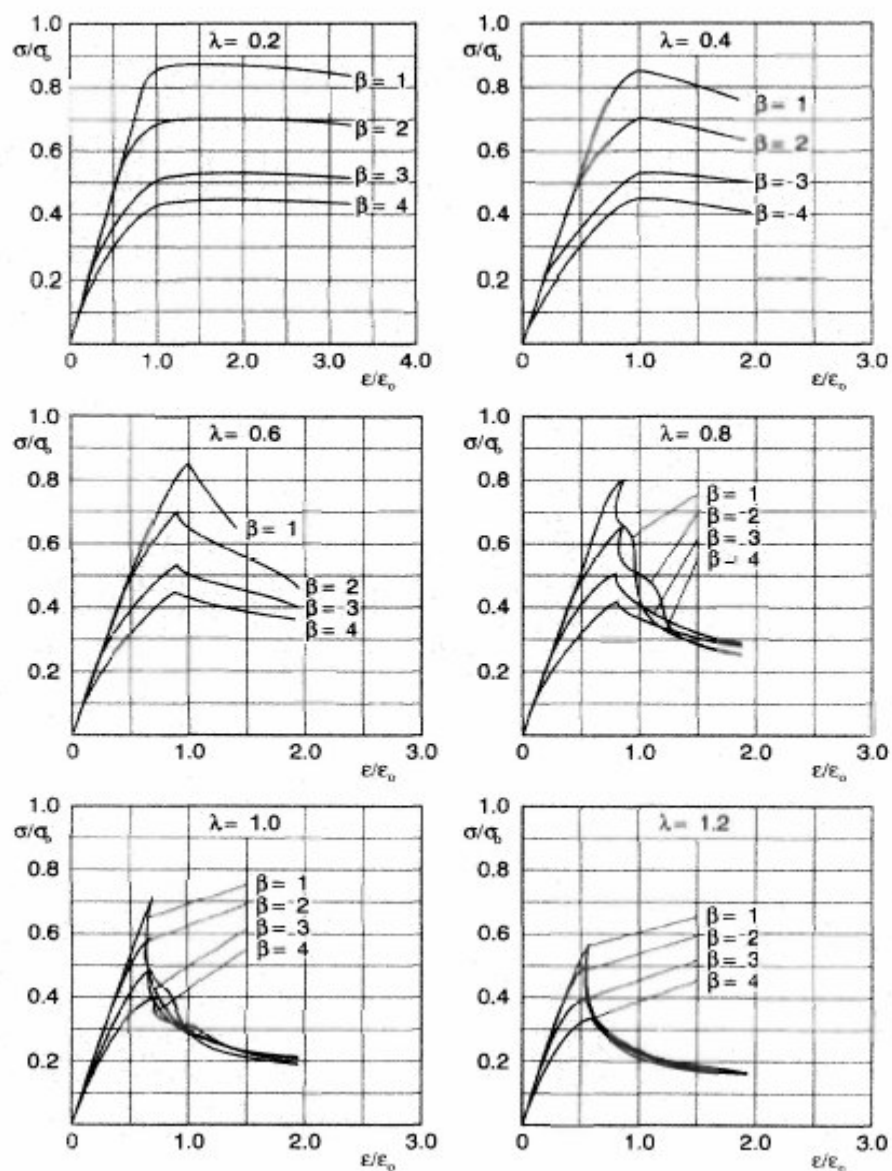
Οι ιδιότητες του υλικού αλλά και η γεωμετρία της πλάκας καθώς και ο τρόπος ενίσχυσης της αλλά και η στήριξή της παίζουν μεγάλο ρόλο στον πιθανό τρόπο κατάρρευσης. Όλα αυτά περιγράφονται στους παρακάτω τύπους χωρίς να αποκλείονται και άλλοι παράγοντες :

Property	Expression
Cross-sectional area	$A = A_p + A_w + A_f, A_e = A_{pe} + A_w + A_f$ <p>where <math>A_p = bt, A_{pe} = b_e t, A_w = h_w t_w, A_f = b_f t_f</math></p>
Equivalent yield strength over the cross-section	$\sigma_{yeq} = \frac{A_p \sigma_{yp} + A_w \sigma_{yw} + A_f \sigma_{yf}}{A}$
Distance from outer surface of attached plating to elastic horizontal neutral axis	$z_0 = \frac{0.5bt^2 + A_w(t + 0.5h_w) + A_f(t + h_w + 0.5t_f)}{A}$ $z_p = \frac{0.5b_e t^2 + A_w(t + 0.5h_w) + A_f(t + h_w + 0.5t_f)}{A_e}$
Moment of inertia	$I = \frac{bt^3}{12} + A_p \left( z_0 - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{h_w^3 t_w}{12} + A_w \left( z_0 - t - \frac{h_w}{2} \right)^2$ $+ \frac{b_f t_f^3}{12} + A_f \left( t + h_w + \frac{t_f}{2} - z_0 \right)^2$ $I_e = \frac{b_e t^3}{12} + A_{pe} \left( z_p - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{h_w^3 t_w}{12} + A_w \left( z_p - t - \frac{h_w}{2} \right)^2$ $+ \frac{b_f t_f^3}{12} + A_f \left( t + h_w + \frac{t_f}{2} - z_p \right)^2$
Radius of gyration	$r = \sqrt{\frac{I}{A}}, r_e = \sqrt{\frac{I_e}{A_e}}$
Column slenderness ratio	$\lambda = \frac{L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{yeq}}{E}}, \lambda_e = \frac{L}{\pi r_e} \sqrt{\frac{\sigma_{yeq}}{E}}$
Plate slenderness ratio	$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{yp}}{E}}$

Note: The subscript 'e' represents the effective cross-section.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης πλακών για διάφορους συνδυασμούς λόγων λυγηρότητας πλάκας και δοκού.

Γενικά για  $\lambda > 0.8$  η αντοχή μειώνεται δραματικά.



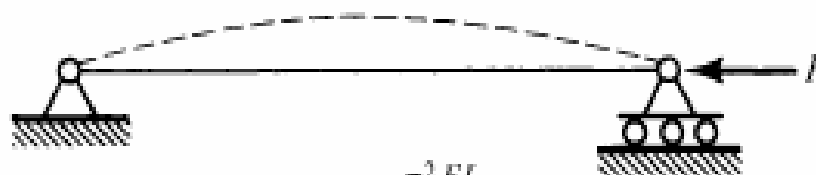
Εικόνα 2.10

#### 2.4.5 Λυγισμός δοκών

Μία δοκός η οποία υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο, χωρίς εκκεντρότητα, αντέχει σε λυγισμό μέχρι ένα κρίσιμο φορτίο σύμφωνα με τη θεωρία του Euler.

Αυτό το φορτίο, για πρισματική δοκό, καθορίζεται ως κάτωθι :

———— : Unbuckled shape  
- - - - - : Buckled shape



(a) Both ends pinned;  $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$

Εικόνα 2.11

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

Το  $P_E$  είναι γνωστό και ως φορτίο λυγισμού κατά Euler, στην ελαστική περιοχή. Το  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας, το  $I$  η ροπή αδρανείας, το  $L$  το μήκος της ράβδου. Για όλες τις πιθανές στηρίξεις της ράβδου ο τύπος μετασχηματίζεται ως εξής :

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

όπου το  $C$  και το  $L$  μεταβάλλεται ανάλογα με τον παρακάτω πίνακα

Boundary Conditions	$C$	$L'$
Both ends simply supported	1	$L$
One end fixed, the other free	$\frac{1}{4}$	$2L$
Both ends fixed	4	$\frac{L}{2}$
One end fixed, the other simply supported	$\left(\frac{4.493}{\pi}\right)^2$	$0.699L$



## 2.4.6 Γεωμετρία Βεβλαμένου σκάφους

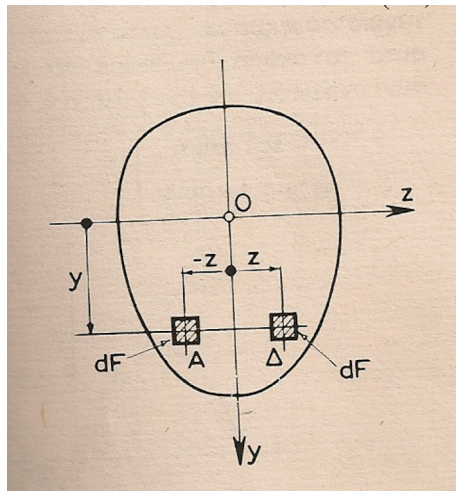
Μετά την ανάλυση των φορτίων του σκάφους καθώς και της ανάλυσης του πλοίου ως δοκός θα αναφερθούμε σε μερικά στοιχεία της γεωμετρίας του σκάφους τα οποία θα φανούν χρήσιμα όταν θα εξετάζεται η αντοχή του βεβλαμένου σκάφους το οποίο δεν θα είναι πλέον συμμετρικό ως προς τον άξονα ZZ.

### 2.4.6.1 Γινόμενο αδρανείας – φυγόκεντρη ροπή

α. Γινόμενο αδρανείας ή φυγόκεντρη ροπή αδρανείας στοιχείου  $dF$  επίπεδης επιφάνειας ονομάζεται το γινόμενο της επιφάνειας  $dF$  με τις συντεταγμένες της  $y$  και  $z$  ήτοι το  $yzdF$ . Το γινόμενο αδρανείας ολόκληρης της επιφάνειας  $F$  ισούται με το ολοκληρωμένο αυτών των γινομένων.

$$J_{yz} = \int_F y * z * df$$

Όταν η διατομή της οποίας ζητείται το γινόμενο αδρανείας  $J_{yz}$  έχει άξονα συμμετρίας λ.χ. τον  $y$  παρατηρείται ότι για οποιαδήποτε στοιχεία  $dF$  συμμετρικά διατεταγμένα ως προς τον  $y$ , π.χ. τα  $A$  και  $\Delta$  με επιφάνεια  $dF$  (Εικόνα 2.12) έχουμε:



Εικόνα 2.12

$$dJ_{yz}^{\Delta} + dJ_{yz}^A = 0$$

Από την αλγεβρική άθροιση αυτών των σχέσεων προκύπτει ,

$$J_{yz}^A + J_{yz}^{\Delta} = 0$$

Συνεπώς το γινόμενο αδρανείας  $J_{yz}$ , διατομής συμμετρικής ως προς τον άξονα  $y$  ή  $z$  ισούται με μηδέν.

β. Όταν δίνεται το γινόμενο αδρανείας  $J_{yz}$  επιφάνειας  $F$  ως προς τους άξονες  $y$  και  $z$  που διέρχονται από το κέντρο βάρους  $K$ , βρίσκουμε το γινόμενο αδρανείας  $J_{y'z'}$  ως προς παράλληλους άξονες  $y'$ ,  $z'$ .

$$J_{y'z'} = \int_F y'z' dF = \int_F (y+b)(z+a) dF = \int_F yz dF + \int_F abdF + \int_F aydF + \int_F bzdF$$

$$J_{y'z'} = J_{yz} + abF$$

Στη παραπάνω διατύπωση λήφθηκε υπόψη ότι τα δύο τελευταία ολοκληρώματα μηδενίζονται, επειδή οι άξονες  $y, z$  διέρχονται από το κέντρο βάρους της επιφάνειας.

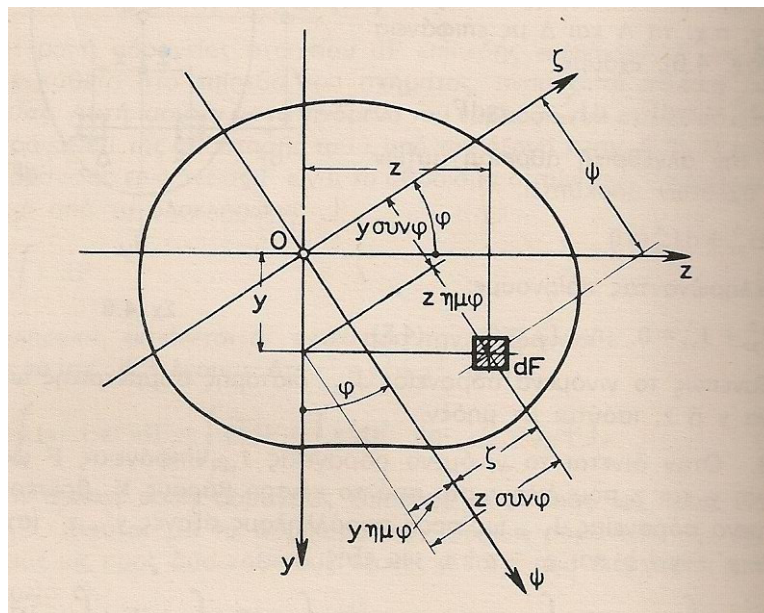
#### 2.4.6.2 Κύριοι άξονες αδρανείας

Το γινόμενο αδρανείας τυχαίας επίπεδης επιφάνειας λαβαίνει διάφορες τιμές όταν το ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων  $y, z$  στο οποίο αναφέρεται, περιστρέφεται γύρω από το σημείο τομής των αξόνων  $y, z$ . Κατά τη διάρκεια της περιστροφής το γινόμενο αδρανείας μεταβάλλει το πρόσημο, πράγμα που σημαίνει ότι αυτό μηδενίζεται για κάποια θέση του συστήματος των ορθογωνίων αξόνων  $y, z$ . Ο προσδιορισμός αυτής της θέσης των αξόνων, που ονομάζονται τότε κύριοι άξονες αδρανείας, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στους υπολογισμούς των κατασκευών. Στην συνέχεια αναλύονται ο τρόπος καθορισμού αυτού του συστήματος καθώς και οι ιδιότητες που παρουσιάζει.

Υποθέτουμε γνωστά τα μεγέθη  $J_y, J_z, J_{yz}$  τυχαίας επιφάνειας  $F$ , ως προς συγκεκριμένο ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων  $y, z$  (Εικόνα 2.13). Υπολογίζουμε αρχικά τα  $J_\psi, J_\zeta, J_{\psi\zeta}$  της ίδιας επιφάνειας ως προς άλλο τυχαίο σύστημα  $\psi, \zeta$  που σχηματίζει γωνία  $\phi$  ως προς το αρχικό  $y, z$ . Για αυτό το σκοπό θεωρούμε στοιχείο  $dF$  της επιφάνειας του οποίου οι συντεταγμένες ως προς το νέο σύστημα είναι:

$$\psi = y \cdot \sigma\upsilon\upsilon\phi + z \cdot \eta\mu\phi$$

$$\zeta = -y \cdot \eta\mu\phi + z \cdot \sigma\upsilon\upsilon\phi$$



Εικόνα 2.13

Εκφράζουμε τις ροπές αδρανείας σε συνάρτηση με τα δεδομένα στοιχεία και καταλήγουμε στις επόμενες εκφράσεις:

$$J_{\Psi} = \int_F \zeta^2 dF = \int_F (-y\eta\mu\phi + z\sigma\nu\phi)^2 dF = \int_F y^2 \eta\mu^2 \phi dF + \int_F z^2 \sigma\nu^2 \phi dF - \int_F 2yz\eta\mu\phi\sigma\nu\phi dF,$$

$$J_{\Psi} = J_Z \eta\mu^2 \phi + J_Y \sigma\nu^2 \phi - J_{YZ} \eta\mu 2\phi$$

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί επίσης με τη μορφή:

$$J_{\Psi} = (J_Y + J_Z)/2 + (J_Y - J_Z)/2 \sigma\nu 2\phi - J_{YZ} \eta\mu 2\phi$$

Παρόμοια εργαζόμενοι (ή θέτοντας όπου  $\phi = \pi/2 + \phi$ ) καταλήγουμε στις σχέσεις,

$$J_{\zeta} = J_Z \sigma\nu^2 \phi + J_Y \eta\mu^2 \phi + J_{YZ} \eta\mu 2\phi$$

$$J_{\zeta} = J_Y + J_Z/2 - J_Y - J_Z/2 \sigma\nu 2\phi + J_{YZ} \eta\mu 2\phi$$

Αθροίζοντας τις παραπάνω σχέσεις διαπιστώνεται ότι ,

$$J_{\Psi} + J_{\zeta} = J_Y + J_Z \quad (J_0)$$

Το άθροισμα λοιπόν των ροπών αδρανείας ως προς τους άξονες ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, είναι ανεξάρτητο από τη γωνία  $\phi$  και ισούται με την πολική ροπή αδρανείας  $J_0$  της επιφάνειας.

Το γινόμενο αδρανείας  $J_{\Psi\zeta}$  εκφράζεται ως εξής:

$$J_{\Psi\zeta} = \int_F \Psi\zeta dF = \int_F (y\sigma\nu\phi + z\eta\mu\phi)(-y\eta\mu\phi + z\sigma\nu\phi) dF \quad \eta$$

$$J_{\Psi\zeta} = J_Y - J_Z/2 \eta\mu 2\phi + J_{YZ} \sigma\nu 2\phi$$

Η γωνία  $\phi$  που ορίζει τη θέση των κυρίων αξόνων αδρανείας ,ως προς τους οποίους άξονες το γινόμενο αδρανείας είναι μηδέν, βρίσκεται αν θέσουμε στη σχέση

$$J_{\Psi\zeta} = 0. \text{ Εξάγεται έτσι η σχέση,}$$

$$\eta\mu 2\phi = -2J_{YZ} / (J_Y - J_Z)$$

από την οποία προκύπτουν δύο γωνίες  $\phi_1, \phi_2$ , που διαφέρουν κατά  $\pi/2$ . Για να βρούμε τώρα τη γωνία  $\phi$  για την οποία η ροπή αδρανείας  $J_{\Psi}$  λαβαίνει τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή, εξισώνουμε με το μηδέν την παράγωγο  $J_{\Psi}$  ως προς  $\phi$ . Καταλήγουμε τότε στην ίδια έκφραση , που σημαίνει ότι ως προς τους κύριους άξονες, η ροπή αδρανείας παίρνει τη μέγιστη ή ελάχιστη τιμή. Με αντικατάσταση των τιμών  $\phi_1, \phi_2$  στη σχέση και θέτοντας  $\max J_{\Psi} = J_1, \min J_{\Psi} = J_2$ , βρίσκουμε τις κύριες ροπές αδρανείας της διατομής:

$$J_{1,2} = (J_Y + J_Z)/2 + - \sqrt{((J_Y - J_Z)/2)^2 + J_{YZ}^2}$$

Όταν ο άξονας  $y$  ή  $z$  του αρχικού συστήματος συντεταγμένων ,είναι άξονας συμμετρίας της διατομής ( $J_{YZ} = 0$ ), η μέγιστη ή ελάχιστη ροπή αδρανείας της διατομής (4.15), αντιστοιχεί στον άξονα συμμετρίας ή στον κάθετο πάνω σ' αυτόν.

Ως προς σύστημα αναφοράς κύριων αξόνων , οι παραπάνω σχέσεις και απλοποιούνται και γράφονται:

$$J_{\psi} = J_1 \eta \mu^2 \varphi + J_2 \sigma \nu^2 \varphi$$

$$J_{\zeta} = J_1 \sigma \nu^2 \varphi + J_2 \eta \mu^2 \varphi$$

### 2.4.6.3 Ασύμμετρη Κάμψη-Λοξή Κάμψη

Στη γενικότερη περίπτωση το επίπεδο το οποίο ενεργεί το καμπτικό ζεύγος δεν περιλαμβάνει κύριο άξονα αδρανείας της διατομής της δοκού. Το είδος αυτό της καταπόνησης, όταν το ζεύγος περιέχει το διαμήκη άξονα της δοκού ονομάζεται λοξή κάμψη.

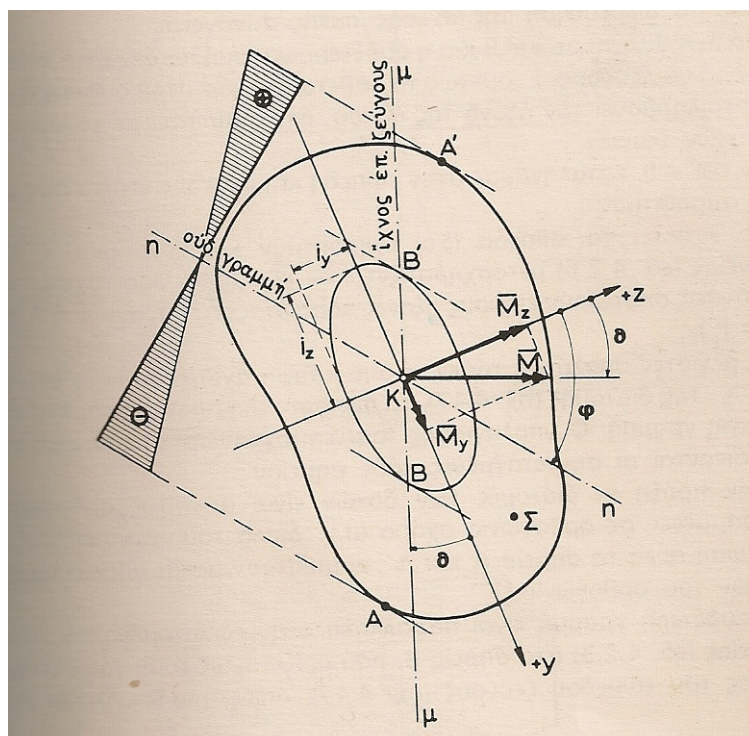
Σε τυχαία διατομή δοκού πάνω στην οποία το ίχνος  $\mu$  του επιπέδου του καμπτικού ζεύγους ( $M$ ), κλίνει με γωνία  $\theta$  ως προς τους κύριους άξονες αδρανείας  $y, z$  της διατομής. Για τον προσδιορισμό της έντασης πάνω στη διατομή αναλύεται η λοξή κάμψη σε επίπεδες κάμψεις κατά τους κύριους άξονες αδρανείας. Για κάθε μια απ' αυτές υπολογίζονται οι τάσεις σύμφωνα με τα γνωστά της επίπεδης κάμψης και στη συνέχεια με την υπέρθεση των μερικών αποτελεσμάτων εξάγεται η ολική ένταση της λοξής κάμψης.

Αναλύουμε την καμπτική ροπή  $M$  στις συνιστώσες ροπές κατά τους κύριους άξονες  $y, z$ , που έχουν μέτρα αντίστοιχα:

$$M_z = M^* \sigma \nu \theta$$

$$M_y = M^* \eta \mu \theta$$

Το ίχνος του επιπέδου ενεργείας του ζεύγους με ροπή  $M_z$  στη διατομή είναι ο άξονας  $y$ , ενώ η αντίστοιχη ουδέτερη γραμμή συμπίπτει με τον άξονα  $z'$  για την ροπή  $M_y$  έχουμε αντίστοιχα τους άξονες  $z$  και  $y$ .



Εικόνα 2.12

Η τάση  $\sigma$  στην τυχαία θέση  $\Sigma(y, z)$  προκύπτει μία αλγεβρική άθροιση των μερικών τάσεων και εκφράζεται από τη σχέση.

$$\sigma = M_y / j_y * z - M_z / j_z * y = M * (z / j_y * \eta \mu \theta - y / j_z * \sigma \nu \theta)$$

όπου  $j_y, j_z$  ροπές αδρανείας ως προς τους κύριους άξονες  $y, z$ . Το αρνητικό πρόσημο του όρου  $M_z y / j_z$ , οφείλεται στη σύνθλιψη ( $\sigma < 0$ ) των ινών στην περιοχή των θετικών  $y$  από την  $M_z$ .

Αν θέσουμε  $\sigma = 0$  στη παραπάνω σχέση παίρνουμε την εξίσωση της ουδέτερης γραμμής  $nn$ , που διέρχεται από το κέντρο βάρους  $K$  της διατομής και κλίνει με γωνία  $\varphi$  ως προς τον άξονα  $z$ :

$$z / j_y * \eta \mu \theta - y / j_z * \sigma \nu \theta = 0$$

$$\epsilon \varphi \theta = y / z = j_z / j_y * \epsilon \varphi \theta$$

Από τη διερεύνηση της σχέσης αυτής συνάγεται:

α) Για  $j_z \neq j_y$  έχουμε  $\varphi \neq 0$  και η ουδέτερη γραμμή  $nn$  δεν είναι κάθετη στο επίπεδο του ζεύγους. Επομένως, το κάθετο επίπεδο στην ουδέτερη γραμμή που περιλαμβάνει τον άξονα της δοκού, δεν συμπίπτει με το επίπεδο των καμπτικών ζευγών.

β) Αν  $\epsilon \varphi \theta = 0$ , καταλήγουμε στην επίπεδη κάμψη και αυτά τα δύο επίπεδα συμπίπτουν.

γ) Για  $j_y = j_z$  τα επίπεδα συμπίπτουν και εδώ, διότι η έλλειψη αδρανείας μετασχηματίζεται σε κύκλο και δύο τυχαίες κάθετες διευθύνσεις αποτελούν κύριους άξονες αδρανείας όπου

$$j_x = j_z \sigma \nu^2 \varphi + j_y \eta \mu^2 \varphi = j_z = j_y$$

Οι μέγιστες απολύτως τάσεις  $\sigma$  από κάμψη αναπτύσσονται στα σημεία  $A$  και  $A'$  της διατομής, τα περισσότερο απομακρυσμένα από την ουδέτερη γραμμή. Ο υπολογισμός τους επιτυγχάνεται από την πρώτη σχέση όταν δίνονται οι συντεταγμένες κάθε σημείου.

Στην πράξη οι διατομές των δοκών είναι συνήθως ορθογώνιες ή εγγεγραμμένες σε ορθογώνιο σχήμα (π.χ. διπλό ταυ, γωνιακό κ.τ.λ.). Στην περίπτωση αυτή τα σημεία  $A$  και  $A'$  συμπίπτουν με τα σημεία της τομής των πλευρών του ορθογωνίου.

Η ουδέτερη γραμμή είναι παράλληλη στην εφαπτομένη της έλλειψης αδρανείας στο σημείο  $B$ , που ορίζεται ως τομή της έλλειψης με το ίχνος του επιπέδου ζεύγους, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια.

Η κεντρική έλλειψη αδρανείας και η εφαπτομένη στο σημείο  $B (y_B, z_B)$  της έλλειψης, έχουν εξισώσεις αντίστοιχα:

$$y^2 / i_z^2 + z^2 / i_y^2 = 1$$

$$y * y_B / i_z^2 + z * z_B / i_y^2 = 1$$

Έχουμε όμως ότι

$$-z_B/y_B = \varepsilon \varphi(-z_B)$$

Άρα ο γωνιακός συντελεστής αυτής της ευθείας δίνεται από την έκφραση:

$$-z_B/y_B * i_z^2 / i_y^2 = \varepsilon \varphi * j_z / j_y = \varepsilon \varphi$$

Από τη σχέση αυτή εξάγεται ότι η εφαπτομένη στο σημείο B είναι παράλληλη προς την ουδέτερη γραμμή nn.

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι η ουδέτερη γραμμή είναι συζυγής προς το ίχνος του επιπέδου του καμπτικού ζεύγους, αναφορικά προς την κεντρική έλλειψη αδρανείας της διατομής.

#### 2.4.7 Διατομή με ένα άξονα συμμετρίας

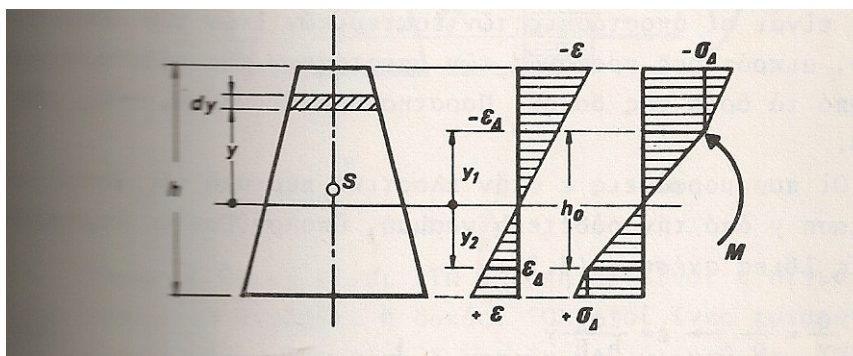
##### A. Ελαστοπλαστική κάμψη

Θεωρούμε δοκό συμμετρική ως προς το κατακόρυφο επίπεδο η οποία καταπονείται με σταθερό καμπτικό ζεύγος M που ενεργεί στο επίπεδο συμμετρίας (Εικόνα 2.13). Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένη η δοκός δεχόμαστε ότι είναι ομοιογενές και ότι ακολουθεί κάποιον απλοποιημένο ελαστοπλαστικό νόμο και ότι ακολουθεί κάποιον απλοποιημένο νόμο  $\sigma, \varepsilon$  με περιοχή αναλογίας πρακτικώς μέχρι την τάση διαρροής  $+\sigma_{\Delta}$ .

Όταν η δοκός υφίσταται ελαστική κάμψη, οι μεγαλύτερες απολύτως παραμορφώσεις και ορθές τάσεις εκδηλώνονται στις ακραίες διαμήκεις ίνες. Η μέγιστη συνεπώς ελαστική ροπή  $M_e$  που μπορεί να αναπτυχθεί στη δοκό είναι αυτή που προκαλεί εμφάνιση της τάσεως διαρροής  $+\sigma_{\Delta}$  στις ακραίες ίνες στο πάνω ή κάτω πέλμα, ή ταυτόχρονα και στα δύο πέλματα. όταν η διατομή έχει άξονες συμμετρίας, η ροπή αυτή δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\sigma_{\max, \min} = \pm \sigma = M/J \quad y_{\max, \min} = M/W^{0,u}$$

$$\max |M_e| = M_{\Delta} = |\sigma_{\Delta}| W^{0,u}$$



Εικόνα 2.13

Μόλις η ροπή ξεπεράσει την τιμή  $M_{\Delta}$  εκδηλώνονται πλαστικές παραμορφώσεις στην περιοχή της διατομής όπου εμφανίζεται τάση ίση με το όριο διαρροής του υλικού, ενώ στην υπόλοιπη διατομή το υλικό εξακολουθεί να

συμπεριφέρεται ελαστικά. Η διανομή των τάσεων καθ' ύψος της δοκού δεν είναι πλέον γραμμική αλλά μεταβάλλεται με νόμο που εξαρτάται από το υλικό και το σχήμα της διατομής. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι η δοκός καταπονείται ελαστοπλαστικά

Οι πλαστικά καταπονούμενες περιοχές της δοκού εξελίσσονται προοδευτικά με την αύξηση της ροπής, από το πάνω ή το κάτω σύνορο της δοκού ή ταυτόχρονα και από τα δύο, προς την εσωτερική περιοχή της δοκού.

Το τμήμα της δοκού που εξακολουθεί να έχει ελαστική συμπεριφορά και το οποίο συνεχώς μειώνεται με την αύξηση της ροπής (και της καμπυλότητας της δοκού), ονομάζεται «ελαστικός πυρήνας».

Η ελαστοπλαστική ροπή  $M(>M_{\Delta})$  εκφράζεται σε συνάρτηση με το ύψος  $h_0$  του ελαστικού πυρήνα από τη σχέση (3,3). Το ύψος  $h_0$  μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτηση με την ακτίνα καμπυλότητας της δοκού, θεωρώντας το κεντρικό τμήμα της δοκού με ύψος  $h_0$  σαν ελαστική δοκό. Όταν και οι δύο ακραίες ζώνες της δοκού έχουν υποστεί πλαστικές παραμορφώσεις θα έχουμε:

$$1/\rho = \epsilon / y = \epsilon_{\Delta} / y_1 = -\epsilon_{\Delta} / -y_2 \rightarrow y_1 + y_2 = 2\rho\sigma_{\Delta} / E \quad \text{ή} \quad h_0 = 2\rho\sigma_{\Delta} / E$$

$y_1, y_2$  είναι οι αποστάσεις των εσωτερικών ινών των πλαστικών ζωνών, μικρότερες προφανώς των αποστάσεων της ουδέτερης γραμμής από τα όρια της δοκού. Παρατηρούμε ότι αν  $h_0 \rightarrow 0$ , τότε  $\rho \rightarrow \infty$ .

Οι παραμορφώσεις  $\epsilon$  στην πλαστική περιοχή της δοκού σε απόσταση  $y$  από την ουδέτερη γραμμή, υπολογίζονται επίσης από τις ίδιες σχέσεις:

$$\epsilon / y = 1/\rho \rightarrow \epsilon = 2\sigma_{\Delta} / h_0 E y$$

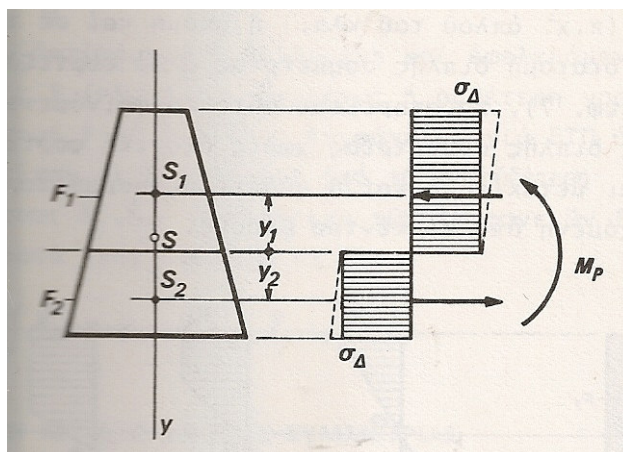
Όταν το υλικό της δοκού είναι Ελαστικό Τελείως Πλαστικό τότε οι τάσεις στην πλαστική περιοχή δεν μπορούν να ξεπεράσουν τη  $|\sigma_{\Delta}|$ , αντίθετα αν το υλικό είναι Ελαστικό Γραμμικά Κρατυνόμενο, τότε αυξάνουν ανάλογα με τις παραμορφώσεις κατά νόμο που παρέχεται από το αντίστοιχο διάγραμμα  $\sigma, \epsilon$ .

## **B. Πλαστική κάμψη**

Με την αύξηση της ροπής κάμψεως  $M$  διαπιστώνουμε για κάποιο μέγεθος  $M_p$  ο ελαστικός πυρήνας «μηδενίζεται» πρακτικά. Οι διαμήκειες ίνες της δοκού καταπονούνται τότε πλαστικά στο σύνολό τους με μόνη εξαίρεση τις ίνες που ορίζουν το ουδέτερο επίπεδο, οι οποίες δεν παραμορφώνονται (εικόνα 2.14). Η δοκός υφίσταται σε αυτή την περίπτωση πλαστική κάμψη για ροπή  $M=M_p$ .

Η πλαστική ροπή  $M_p$  που έχει αυτό το αποτέλεσμα εξισορροπεί τη ροπή των εσωτερικών δυνάμεων, δηλ. της ροπής που παρέχουν η συνισταμένη των δυνάμεων στο θλιβόμενο και στο εφελκυσμένο τμήμα της διατομής αντίστοιχα.

$$M_p = \int y^* \sigma^* dF$$



Εικόνα 2.14

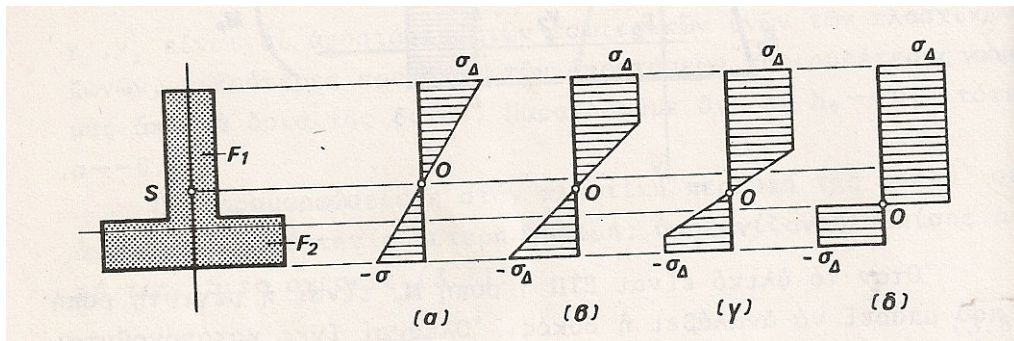
Όταν το υλικό είναι Ελαστικό Τελείως Πλαστικό η ροπή  $M_p$  είναι η μέγιστη που μπορεί να αναλάβει η δοκός. Όλες οι ίνες καταπονούνται με σταθερή τάση, την τάση διαρροής του υλικού  $+\sigma_D$ . Με σταθερή πλέον αυτή τη ροπή συνεχίζεται η παραμόρφωση της δοκού. Όταν το υλικό είναι Ελαστικό Γραμμικά Κρατυνόμενο η ροπή μπορεί να αυξηθεί αφού η τάση αυξάνει πέρα από το όριο διαρροής. Οι διαμήκεις ίνες της δοκού δεν καταπονούνται με σταθερή τάση και η παραμόρφωση συνεχίζεται μόνο με παράλληλη αύξηση της ροπής.

### Γ. Μετακίνηση ουδέτερης γραμμής

Όταν ολόκληρη η διατομή καμπτόμενης δοκού καταπονείται ελαστικά, τότε η ουδέτερη γραμμή διέρχεται όπως είναι γνωστό από το κεντροειδές της διατομής. Με την εκδήλωση όμως και την εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων, η ουδέτερη γραμμή μετακινείται εν γένει ταυτόχρονα με την αύξηση της ροπής κάμψεως μέχρι την οριακή της θέση που αντιστοιχεί σε διατομή πλαστικοποιημένη στο σύνολό της ( $M=M_p$ ). Η ουδέτερη γραμμή δεν παραμένει συνεπώς σταθερή και η θέση της εξαρτάται από το μέγεθος της ροπής και το σχήμα της διατομής.

Μετακίνηση της ουδέτερης γραμμής παρατηρείται όταν οι ακραίες τάσεις εφελκυσμού και θλίψεως της δοκού, όπως προκύπτουν από την ελαστική ανάλυση, δεν είναι απολύτως ίσες. Έτσι σε καμπτόμενες δοκούς με διατομές συμμετρικές περί ένα άξονα (π.χ απλού ταυ κλπ) ή ακόμη και σε καμπτόμενες δοκούς με διατομή διπλής συμμετρίας αλλά φορτιζόμενες και αξονικά παρατηρείται αυτό το φαινόμενο. Σε διατομές όμως διπλής συμμετρίας χωρίς αξονικό φορτίο δεν παρουσιάζεται μετακίνηση και η ουδέτερη γραμμή παραμένει σταθερή, διερχόμενη από το κέντρο βάρους.





Εικόνα 2.15

Στο παραπάνω σχήμα παρακολουθούμε σε δοκό διατομής T από Ελαστικό Τελείως Πλαστικό υλικό, την εξέλιξη τη μορφής του διαγράμματος των ορθών τάσεων και παράλληλα, της θέσεως O της ουδέτερης γραμμής από την ελαστική (α) συμπεριφορά της διατομής, στην ελαστοπλαστική (β), (γ) και τέλος στην πλήρως πλαστική (δ). Εξαιτίας της ασυμμετρίας της διατομής παρατηρούμε ότι η τάση διαρροής παρουσιάζεται πρώτα στις επάνω ίνες της διατομής, αυτό το γεγονός οδηγεί με την αύξηση της ροπής σε μη γραμμική κατανομή των τάσεων, που θα είχε σαν επακόλουθο, αν η ουδέτερη γραμμή εξακολουθούσε να παραμένει αμετακίνητη, την ταχύτερη αύξηση της θλιπτικής δύναμεις σε σύγκριση με την αύξηση της εφελκυστικής δύναμεις. Η εξισορρόπηση της θλιπτικής με την εφελκυστική δύναμη γίνεται μόνο με ταυτόχρονη μετακίνηση της ουδέτερης γραμμής.

Η θέση της ουδέτερης γραμμή υπολογίζεται με τη βοήθεια της παρακάτω σχέσεως. Σε δοκό π.χ. από Ελαστικό Τελείως Πλαστικό υλικό ( $+\sigma_{\Delta}$ ) και διατομή όπως φαίνεται στην εικόνα 2.15, η θέση της ουδέτερης γραμμής για κατανομή τάσεων πλήρως πλαστική ( $M=M_p$ ) ορίζεται ως εξής:

$$\sum X=0 \rightarrow \int \sigma^* dF = 0 \rightarrow F_1 * \sigma_{\Delta} - F_2 * \sigma_{\Delta} = 0 \rightarrow F_1 = F_2 = \frac{F}{2}$$

$F_1, F_2$  είναι αντίστοιχα η θλιβόμενη και εφελκυστική επιφάνεια της διατομής  $F (=F_1 + F_2)$ . Επομένως η ουδέτερη γραμμή διαχωρίζει τη διατομή  $F$  σε δύο ίσες επιφάνειες για Ελαστικό Τελείως Πλαστικό υλικό και  $M = M_p$  Αν  $y_1, y_2$  είναι οι αποστάσεις από τη νέα ουδέτερη γραμμή των κέντρων βάρους  $S_1, S_2$  αντίστοιχα των επιφανειών  $F_1, F_2$  (εικόνα 2.15), θα έχουμε την εξίσωση ισοροπίας

$$\sum M = 0 \rightarrow \int y^* \sigma^* dF = M \rightarrow M_p = \sigma_{\Delta} * \frac{F}{2} * (y_1 + y_2)$$

## Κεφάλαιο 3

### Λεπτομέρειες του υπό μελέτη σκάφους

#### 3.1. Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σκοπός αυτής της μελέτης είναι η εύρεση της Μέγιστης Διαμήκους αντοχής του υπό μελέτη πλοίου. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η παρουσίαση των λεπτομερειών του σκάφους καθώς και η μελέτη της μέσης τομής του. Επιπλέον θα παρουσιασθούν στοιχεία των υλικών κατασκευής καθώς και η απομείωση πάχους μετάλλου που απαιτούν οι κανονισμοί.

#### 3.2. Στοιχεία σκάφους

Το υπό μελέτη σκάφος είναι το Atlantic Explorer, ένα Bulk Carrier 48170 MT τόνων, έτους κατασκευής 2001. Είναι αξιοσημείωτο ότι κατασκευάστηκε πριν την ευρεία και καθολική αποδοχή των κοινών Κανόνων Κατασκευής (CSR) τον Απρίλιο του 2006. Το υλικό κατασκευής του πυθμένα είναι χάλυβας υψηλής αντοχής μέγιστης τάσεως  $315 \text{ N/m}^2$  ενώ το κύριο κατάστρωμα είναι κατασκευασμένο από χάλυβα πολύ υψηλής αντοχής μέγιστης τάσεως  $355 \text{ N/m}^2$ . Το πλοίο διαθέτει πέντε αμπάρια για την μεταφορά βαρέων φορτίων εκ των οποίων το μεσαίο το Νο3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν δεξαμενή ζυγοστάθμισης (Ballast), για αυτό το λόγο είναι και πιο ενισχυμένο.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι κύριες διαστάσεις του πλοίου

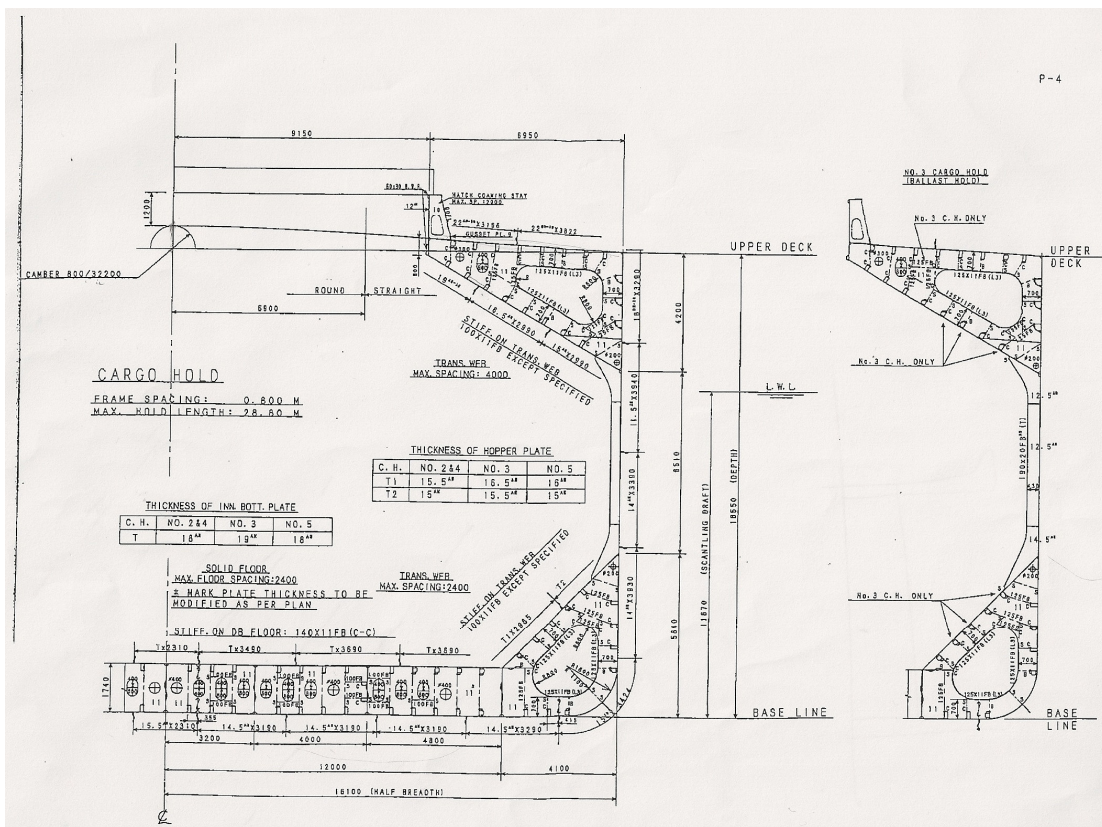
#### PRINCIPAL DIMENSIONS

Length (B.P.)	<Lpp>	180.000 m
Load Water Line Length at ds	<Ll. w. l. >	182.800 m
Scantling length	<Ls>	180.000 m
Breadth (MLD)	<B>	32.200 m
Depth (MLD)	<D>	16.550 m
Draft (MLD)	<d>	10.700 m
Scantling Draft (MLD)	<ds>	11.674 m

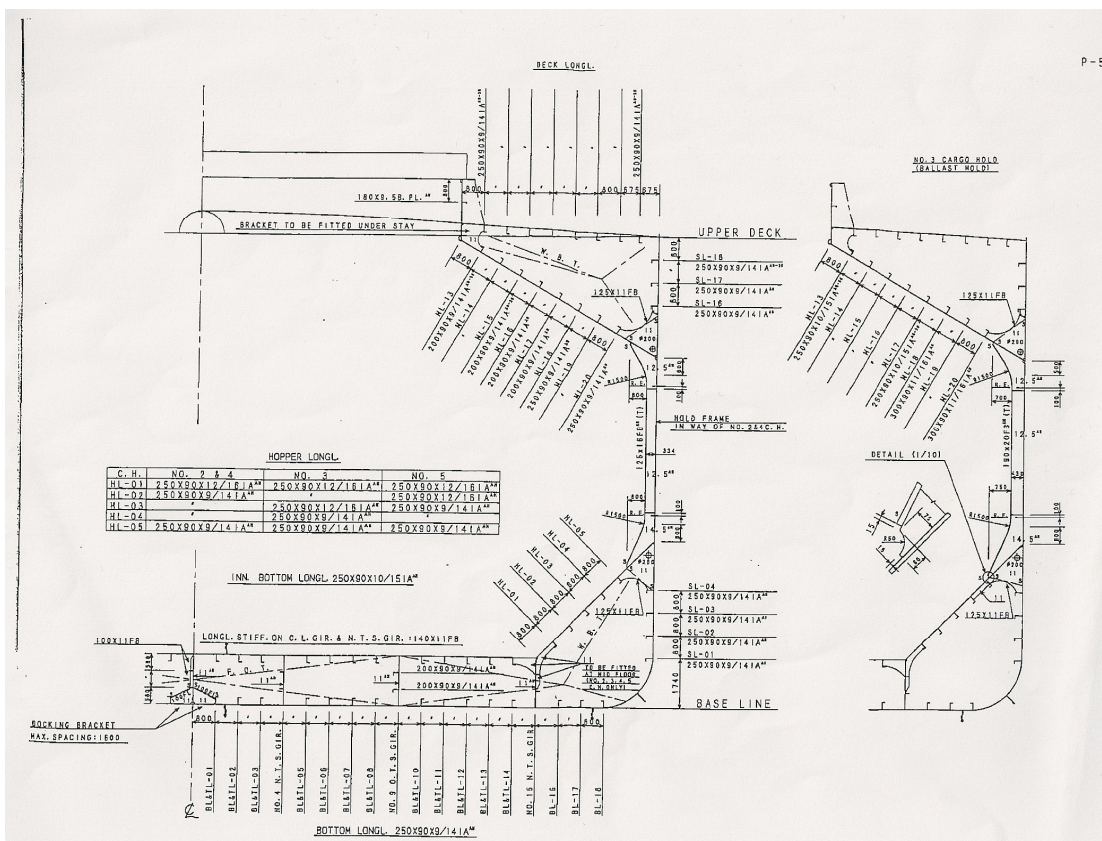
Πίνακας 3.1

#### 3.3. Μέση Τομή Σκάφους

Το σκάφος ακολουθεί το σύστημα ενίσχυσης κατά το διάμηκες, διαθέτει διπύθμενο, πλαϊνή άνω δεξαμενή ζυγοστάθμισης(wing tank), πλαϊνή κάτω δεξαμενή ζυγοστάθμισης(bottom tank), όλα ενισχυμένα κατά το διάμηκες με ενισχυτικά τύπου ανάστροφης γωνίας εκτός από το άνω μέρος του πυθμένα το οποίο είναι ενισχυμένο με απλές μπάρες. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα εγκάρσια ενισχυτικά είναι πυκνότερα στο κάτω μέρος του σκάφους με απόσταση μεταξύ τους 2400mm ενώ στο άνω τμήμα του σκάφους είναι αραιότερα τοποθετημένα με απόσταση μεταξύ τους 4000mm. Στον πίνακα 3.2 φαίνεται η μέση τομή του σκάφους ενώ στον πίνακα 3.3 τα αντίστοιχα ενισχυτικά. Στον πίνακα 3.4 εμφανίζονται το σύνολο των δομικών στοιχείων της μέσης τομής καθώς και οι διαστάσεις αυτών, οι γωνίες των ελασμάτων ως προς την οριζόντιο.



Πίνακας 3.2



Πίνακας 3.3

Α.Α.	Στοιχείο Σκάφους	Διαστάσεις (mm) as Built			Τεμάχια	ANGLE OFF SURFACE
		Περιγραφικά	Μήκος	Πάχος		
1	<b>Ελασμα Κυρίου Καταστρώματος</b>	6950x22	6950	22	1	5
2	<b>Ελασμα Πυθμένα(1)</b>	1150x15,5	1155	15.5	1	0
	<b>Ελασμα Πυθμένα(2)</b>	14140x14,5	14140	14.5	1	0
	<b>Ελασμα εσωτερικού Πυθμένα</b>	12000x19	12000	19	1	0
3	<b>Πλάγια κάτω δοκός</b>	5679x15.5	5679	15.5	1	45
4	<b>Πλάγια άνω Δοκός (1)</b>	2990X15	2990	15	1	30
5	<b>Πλάγια άνω Δοκός (2)</b>	2990X16.5	2990	16.5	1	30
6	<b>Πλάγια άνω Δοκός (3)</b>	2140X19	2140	19	1	30
7	<b>Πλάγιο τοίχωμα (1)</b>	3280x16	3280	16	1	90
8	<b>Πλάγιο τοίχωμα (2)</b>	3940x14.5	3940	14.5	1	90
9	<b>Πλάγιο τοίχωμα (3)</b>	3390x14	3390	14	1	90
10	<b>Πλάγιο τοίχωμα (4)</b>	3930x14	3930	14	1	90
11	<b>Πλάγιο τοίχωμα (5)</b>	3424x15	3307.2798	15	1	45
	<b>Ενισχυτικά εσωτερικού Πυθμένα (πάνω)</b>	140x11	140	11	3	90
	<b>Στηρίγματα εσωτερικού πυθμένα</b>	1740x11	1740	11	4	90
	<b>Ενισχυτικά Πλάγιου τοιχώματος SL-1</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	0

<b>(IA)</b>							
16	<b>SL-2 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1	90
			WEB	250	9	1	0
17	<b>SL-3 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1	90
			WEB	250	9	1	0
18	<b>SL-4 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1	90
			WEB	250	9	1	0
19	<b>SL-16 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1	90
			WEB	250	9	1	0
20	<b>SL-17 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1	90
			WEB	250	9	1	0
21	<b>SL-18 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1	90
			WEB	250	9	1	0
			FLANGE	90	14	1	90
<b>Ενισχυτικά Πλαγιάς άνω</b>							
22	<b>Δοκού ML-13 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
23	<b>ML-14 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
24	<b>ML-15 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
25	<b>ML-16 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
26	<b>ML-17 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
27	<b>ML-18 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
28	<b>ML-19 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150
29	<b>ML-20 (IA)</b>	200x90x9/14	WEB	200	9	1	60
			FLANGE	90	14	1	150

30	<b>Ενισχυτικά Πλαγίας κάτω Δοκού HL-1 (IA)</b>	250x90x12/16	WEB	250	12	1	135
			FLANGE	90	16	1	45
31	<b>HL-2 (IA)</b>	250x90x12/16	WEB	250	12	1	135
			FLANGE	90	16	1	45
32	<b>HL-3 (IA)</b>	250x90x12/16	WEB	250	12	1	135
			FLANGE	90	16	1	45
33	<b>HL-4 (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1	135
			FLANGE	90	14	1	45
34	<b>HL-5 (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1	135
			FLANGE	90	14	1	45
35	<b>Ενισχυτικά Κυρίου Καταστρώματος(IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	8	90
			FLANGE	90	14	8	0
36	<b>Ενισχυτικά Πυθμένα (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	15	90
			FLANGE	90	14	15	0
37	<b>Ενισχυτικά εσωτερικού Πυθμένα (κάτω) (IA)</b>	250x90x10/15	WEB	250	10	12	90
			FLANGE	90	15	12	0

Πίνακας 3.4

### 3.4. Απομείωση Πάχους Ελασμάτων

Όλα τα ελάσματα ενός πλοίου υπόκεινται σε διάβρωση και απομείωση του πάχους τους λόγω της λειτουργίας τους σε ένα εξαιρετικά αντίξοο και διαβρωτικό περιβάλλον. Για το λόγο αυτό έχει προβλεφθεί από του Κοινούς Κανόνες Κατασκευής(CSR) η επαύξηση του πάχους των ελασμάτων κατά μία ποσότητα έτσι ώστε να μην παρατηρηθεί υπέρμετρη μείωση της αντοχής του πλοίου κατά την διάρκεια ζωής του. Η αύξηση του πάχους ελασμάτων βασίζεται στον παρακάτω τύπο:

$$t_c = \text{RoundUp}_{0.5} * (t_{c1} + t_{c2}) + t_{\text{reserve}}$$

Για δομικό στοιχείο μέσα σε ένα διαμέρισμα ισχύει

$$t_c = \text{RoundUp}_{0.5} * (2 * t_{c1}) + t_{\text{reserve}}$$

Οι τιμές  $t_{c1}$  και  $t_{c2}$  δίνονται από τον πίνακα 3.5. Εάν σε κάποιο έλασμα αντιστοιχούν δύο τιμές του πίνακα τότε λαμβάνεται υπόψη η μεγαλύτερη.

Η τιμή  $t_{\text{reserve}}$  είναι ίση με 0,5mm.

Η συνάρτηση  $\text{RoundUp}_{0.5}$  στρογγυλοποιεί το αποτέλεσμα της άθροισης στο πλησιέστερο ακέραιο  $Z$  ή στο  $Z+0,5$

Συνολικά η αύξηση πάχους ελάσματος  $t_c$  δεν πρέπει να είναι λιγότερο από 2mm.

Για αλουμινένια τμήματα της κατασκευής η αύξηση πάχους ελάσματος  $t_c$  είναι μηδενική.

Για το έλεγχο Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής για πάχος ελάσματος σκάφους λαμβάνεται υπόψη το αναφερόμενο στα σχέδια αυτού μειωμένο κατά το ήμισυ του πάχους διάβρωσης  $t_c$

$$t_{\text{net}} = t_{\text{gross}} - 0,5 * t_c$$

Για το υπό μελέτη σκάφος οι μειώσεις πάχους ελασμάτων για τον έλεγχο Μέγιστης Διαμήκους Αντοχής φαίνονται στον πίνακα 3.6



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

Πίνακας 3.5

A.A.	Στοιχείο Σκάφους	Διαστάσεις (mm) as Built			Corrosion reduction (mm)				Total reduction	Διαστάσεις NET Τελικό Πάχος $t_{net}$	
		Περιγραφικά	Μήκος	Πάχος $t_{gross}$	$t_{c1}$	$t_{c2}$	$t_{c1}+t_{c2}$	Roundup <sub>0,5</sub>			
1	<b>Ελασμα Κυρίου Καταστρώματος</b>	6950x22	6950	22	1.7	1	2.7	3	3.5	20.25	
	<b>Ελασμα Πυθμένα(1)</b>	1150x15,5	1155	15.5	1	0.7	1.7	2	2.5	14.25	
2	<b>Ελασμα Πυθμένα(2)</b>	14140x14,5	14140	14.5	1	0.7	1.7	2	2.5	13.25	
3	<b>Ελασμα εσωτερικού Πυθμένα</b>	12000x19	12000	19	3.7	0.7	4.4	4.5	5	16.5	
4	<b>Πλάγια κάτω δοκός</b>	5679x15.5	5679	15.5	3.7	1.2	4.9	5	5.5	12.75	
5	<b>Πλάγια άνω Δοκός (1)</b>	2990X15	2990	15	1.7	1.2	2.9	3	3.5	13.25	
6	<b>Πλάγια άνω Δοκός (2)</b>	2990X16.5	2990	16.5	1.7	1.8	3.5	3.5	4	14.5	
7	<b>Πλάγια άνω Δοκός (3)</b>	2140X19	2140	19	1.7	1.8	3.5	3.5	4	17	
8	<b>Πλάγιο τοίχωμα (1)</b>	3280x16	3280	16	1.7	1	2.7	3	3.5	14.25	
9	<b>Πλάγιο τοίχωμα (2)</b>	3940x14.5	3940	14.5	1.5	2	3.5	3.5	4	12.5	
10	<b>Πλάγιο τοίχωμα (3)</b>	3390x14	3390	14	1.7	1	2.7	3	3.5	12.25	
11	<b>Πλάγιο τοίχωμα (4)</b>	3930x14	3930	14	1.7	1	2.7	3	3.5	12.25	
12	<b>Πλάγιο τοίχωμα (5)</b>	3424x15	3424	15	1.2	1	2.2	2.5	3	13.5	
	<b>Ενισχυτικά εσωτερικού Πυθμένα (πάνω)</b>	140x11	140	11	3.7	3.7	7.4	7.5	8	7	
13	<b>Στηρίγματα εσωτερικού πυθμένα</b>	1740x11	1740	11	0.7	0.7	1.4	1.5	2	10	
14	<b>Ενισχυτικά Πλάγιου τοιχώματος SL-1 (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
15	<b>SL-2 (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
16	<b>SL-3 (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
17	<b>SL-4 (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
18		250x90x9/14	WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7

19	<b>SL-16 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
20	<b>SL-17 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
21	<b>SL-18 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
22	<b>Ενισχυτικά Πλαγίας άνω Δοκού ML-13 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
23	<b>ML-14 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
24	<b>ML-15 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
25	<b>ML-16 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
26	<b>ML-17 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
27	<b>ML-18 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
28	<b>ML-19 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
29	<b>ML-20 (IA)</b>	200x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	200	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
30	<b>Ενισχυτικά Πλαγίας κάτω Δοκού HL-1 (IA)</b>	250x90x12/16	FLANGE	90	16	1.7	1.7	3.4	3.5	4	14
			WEB	250	12	1.7	1.7	3.4	3.5	4	10
31	<b>HL-2 (IA)</b>	250x90x12/16	FLANGE	90	16	1.7	1.7	3.4	3.5	4	14
			WEB	250	12	1.7	1.7	3.4	3.5	4	10
32	<b>HL-3 (IA)</b>	250x90x12/16	FLANGE	90	16	1.7	1.7	3.4	3.5	4	14
			WEB	250	12	1.7	1.7	3.4	3.5	4	10
33	<b>HL-4 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7

34	<b>HL-5 (IA)</b>	250x90x9/14	FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
35	<b>Ενισχυτικά Κυρίου Καταστρώματος(IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	1.7	1.7	3.4	3.5	4	7
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
			FLANGE	90	14	1.7	1.7	3.4	3.5	4	12
36	<b>Ενισχυτικά Πυθμένα (IA)</b>	250x90x9/14	WEB	250	9	0.7	0.7	1.4	1.5	2	8
			FLANGE	90	14	0.7	0.7	1.4	1.5	2	13
			FLANGE	90	14	0.7	0.7	1.4	1.5	2	13
37	<b>Ενισχυτικά εσωτερικού Πυθμένα (κάτω) (IA)</b>	250x90x10/15	WEB	250	10	0.7	0.7	1.4	1.5	2	9
			FLANGE	90	15	0.7	0.7	1.4	1.5	2	14
			FLANGE	90	15	0.7	0.7	1.4	1.5	2	14

Πίνακας 3.6

### 3.5. Υπολογισμοί Ροπών Κάμψεως

Με βάση τα στοιχεία του πλοίου έχουμε τις κάτωθι τιμές

Design Still Water bending moment intact condition at midship						
sagging	$M_{SW,S}$	95500	tf - m	936855.0	KN-m	ships data
hogging	$M_{SW,H}$	111000	tf - m	1088910.0	KN-m	ships data
Design Still Water bending moment in one hold flooded condition at midship						
sagging	$M_{SW,S}$	154000	tf - m	1510740.0	KN-m	ships data
hogging	$M_{SW,H}$	173000	tf - m	1697130.0	KN-m	ships data

Πίνακας 3.7

Η μετατροπή από  $t_f \cdot m$  σε kNm γίνεται με πολλαπλασιασμό με την ποσότητα 9,81.

Με βάση τους Κοινούς Κανόνες Κατασκευής(CSR) είναι δυνατόν να υπολογίσουμε με βάση τις κύριες διαστάσεις του σκάφους την ροπή κάμψεως σε ήρεμο νερό και την ροπή κάμψεως σε κυματισμό.

Η ροπή κάμψεως σε κυματισμό υπολογίζεται με βάση τους παρακάτω τύπους:

Vertical Wave Bending Moments calculation in intact condition(Ch.4, Sect.3,p.11)

hogging	$M_{WV,H}=190F_M f_p C L^2 B C_B 10^{-3} (KN-m)$	1511225.2	KN-m
sagging	$M_{WV,S}=110F_M f_p C L^2 B (C_B+0,7) 10^{-3} (KN-m)$	1632895.0	KN-m

$$F_M : \text{Distribution factor} = 1.00 \text{ as per ch.4,sec.3,p.12}$$

$$f_p : \text{probability coefficient} = 1.00 \text{ as per ch.4,sec.2,p.4}$$

$$C : \text{wave parameter} = 9.44 \text{ as per ch.1,sec.4,p.17}$$

Πίνακας 3.8

Αντίστοιχα η ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό υπολογίζεται με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα με τους παρακάτω τύπους:

Min Required Still Water Bending Moment (ch.4,sec.3,p.10)

The Design Still Water bending moments amidships are to be taken not less than :

hogging	$M_{SW,H}=175C L^2 B (C_B+0,7) 10^{-3} - M_{WV,H}$	1086562.3	KN-m
sagging	$M_{SW,S}=175C L^2 B (C_B+0,7) 10^{-3} - M_{WV,S}$	964892.5	KN-m

Πίνακας 3.9

Γίνεται φανερό ότι η ροπή κάμψεως που απαιτείται ως ελάχιστη ποσότητα από τους Κοινούς Κανόνες Κατασκευής(CSR) είναι μεγαλύτερη από αυτή που διαθέτει το πλοίο σε κατάσταση Sagging, ενώ για την κατάσταση Hogging είναι αρκετή έστω και με πολύ μικρή διαφορά.

**Sagging: CSR(Computed)- 964892.5 KN-m**

**Ship Data----- 936855.0 KN-m**

**Hogging: CSR(Computed)- 1086562.3 KN-m**

**Ship Data----- 1088910.0 KN-m**

Αντίστοιχα η Μέγιστη Διαμήκης Ροπή Κάμψεως που περιμένουμε να βρούμε από την ανάλυση του σκάφους πρέπει να είναι:

$$M_t = \gamma_{sw} * M_{sw} + \gamma_w * M_w \leq M_u / \gamma_r$$

$M_u$  : Μέγιστη Ροπή Κάμψης

$M_{sw}$ : Ροπή Κάμψης σε Ήρεμο νερό

$M_w$ : Ροπή Κάμψης σε Κυματισμό

$\gamma_{sw}$ : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1 σύμφωνα με CSR

$\gamma_w$ : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1,2 σύμφωνα με CSR

$\gamma_r$ : Συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1,1 σύμφωνα με CSR

$Mu_{hog} =$	3096609.929	KN-m	INTACT HOG
$Mu_{sag} =$	3069842.579	KN-m	INTACT SAG

## Κεφάλαιο 4

# Κοινοί Κανόνες Κατασκευής(CSR)-Εφαρμογή της Μεθόδου Incremental-Iterative Approach

### 4.1 Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται λεπτομερειακά η μέθοδος των Κοινών Κανόνων Κατασκευής(CSR) Incremental-Iterative Approach συμπεριλαμβανομένου του χωρισμού της μέσης τομής του σκάφους σε αυτόνομα δομικά στοιχεία, της δημιουργίας των καμπύλων φόρτισης, ελέγχου αυτών και της δημιουργίας των αντίστοιχων προγραμμάτων σε περιβάλλον MATLAB.

### 4.2 Περιγραφή Μεθόδου-Βήματα

Η μέθοδος Incremental-Iterative Approach καθορίζει τη Μέγιστη Διαμήκη Αντοχή σε Κάμψη χωρίζοντας τη μέση τομή του σκάφους ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εγκάρσια ενισχυτικά σε ανεξάρτητα δομικά στοιχεία και αναλύοντας τους μηχανισμούς κατάρρευσης κάθε ενός από αυτά.

Η Μέγιστη Διαμήκη Αντοχή σε Κάμψη καθορίζεται ως το μέγιστο σημείο της καμπύλης της Ροπής Κάμψεως σε συνάρτηση με την Καμπυλότητα του σκάφους στη μέση τομή αυτού.

Κάθε βήμα της μεθόδου παρουσιάζεται με τον υπολογισμό της Ροπής Κάμψεως που επενεργεί στη μέση τομή του σκάφους ως αποτέλεσμα της επιβαλλόμενης Καμπυλότητας  $\chi_i$ .

Για κάθε βήμα η τιμή  $\chi_i$  είναι το αποτέλεσμα της πρόσθεσης μίας σταθερής αύξησης  $\Delta\chi$  στην καμπυλότητα του προηγούμενου βήματος  $\chi_{i-1}$

Η αυξητική ποσότητα  $\Delta\chi$  αντιστοιχεί σε αύξηση της γωνίας περιστροφής της μέσης τομής ως προς τον οριζόντιο ουδέτερο άξονα.

Αυτή η περιστροφή επιφέρει αξονικές παραμορφώσεις σε κάθε δομικό στοιχείο η τιμή της οποίας εξαρτάται από τη θέση του στοιχείου. Σε κατάσταση Hogging τα δομικά στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα επιμηκύνονται ενώ τα στοιχεία κάτω από αυτόν βραχύνονται. Το αντίθετο συμβαίνει σε κατάσταση Sagging.

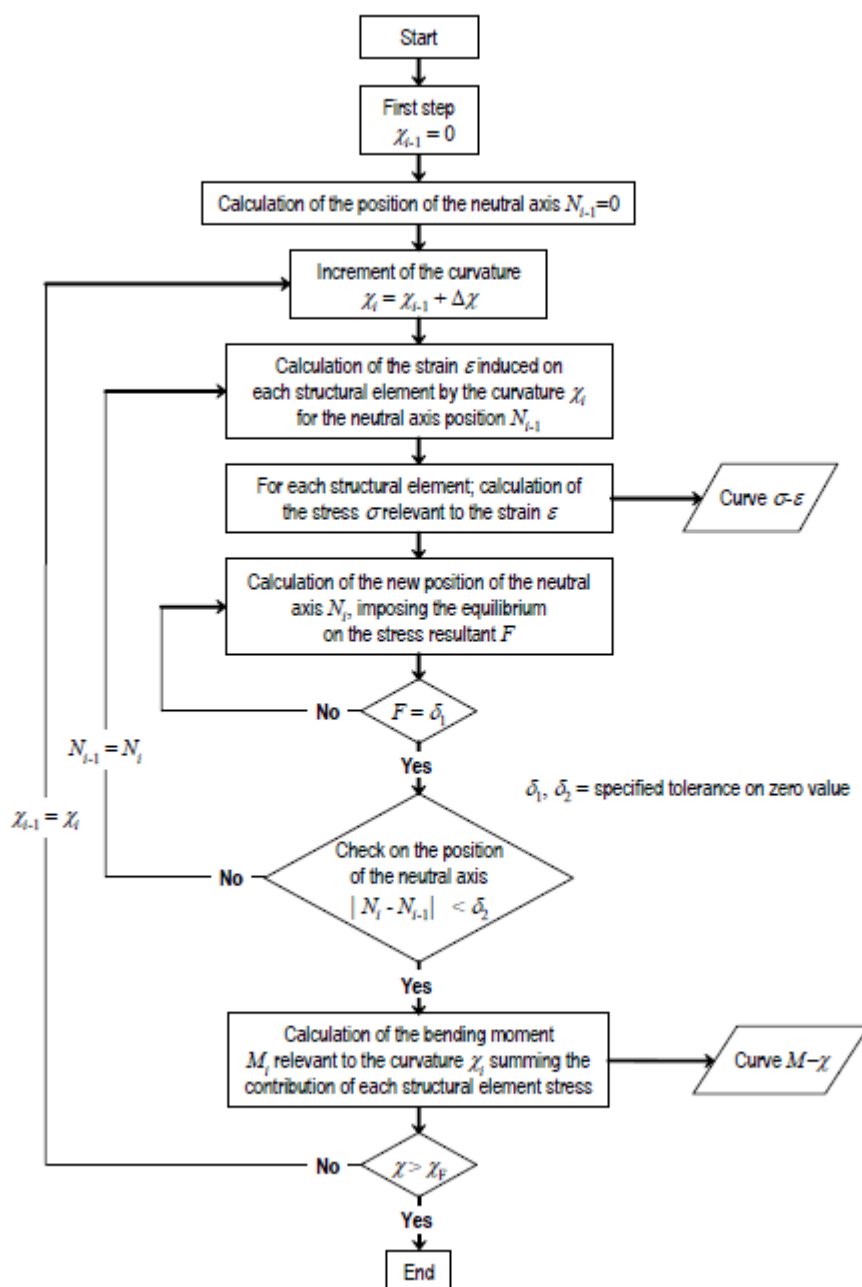
Η τάση  $\sigma$  η οποία προκαλείται σε κάθε δομικό στοιχείο είναι δυνατόν να υπολογισθεί από τις καμπύλες φορτίου του κάθε στοιχείου (load-end shortening curves), καμπύλες οι οποίες έχουν ήδη υπολογισθεί-κατασκευαστεί και οι οποίες λαμβάνουν υπόψη τη συμπεριφορά του δομικού στοιχείου στην μη γραμμική ελαστοπλαστική περιοχή.

Η κατανομή των τάσεων όλων των στοιχείων τα οποία αποτελούν τη μέση τομή του σκάφους καθορίζει τη μεταβολή της θέσεως του ουδέτερου άξονα, αφού η σχέση  $\sigma$ - $\epsilon$  δεν είναι γραμμική. Η νέα θέση του ουδέτερου άξονα σχετίζεται με το βήμα που θα καθορίσουμε στην επαναληπτική διαδικασία μέσω της οποίας θα επιβάλλεται ισορροπία μεταξύ των τάσεων όλων των στοιχείων.

Μόλις είναι γνωστή η νέα θέση του ουδέτερου άξονα και η αντίστοιχη κατανομή τάσεων υπολογίζεται η Ροπή Κάμψεως  $M_i$  για το συγκεκριμένο βήμα, η οποία αντιστοιχεί στην επιβαλλόμενη καμπυλότητα  $\chi_i$ , αθροίζοντας τις ροπές κάμψεως όλων των δομικών στοιχείων.

Τα κυριότερα βήματα της επαναληπτικής διαδικασίας φαίνονται στον πίνακα 4.1 και αναλύονται λεπτομερέστερα παρακάτω.





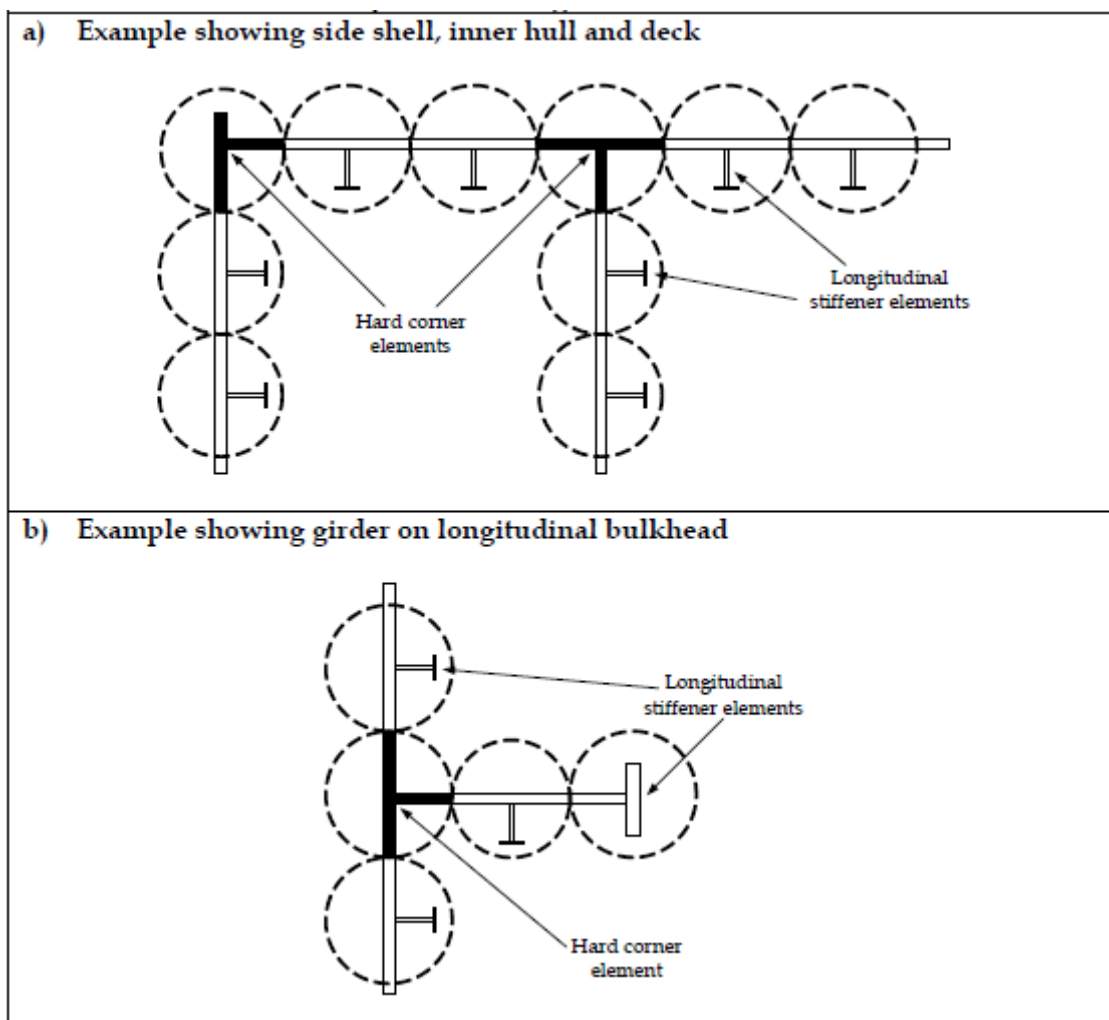
Πίνακας 4.1

#### 4.2.1. Βήμα 1<sup>ο</sup>

##### Χωρισμός Μέσης τομής σε Δομικά στοιχεία.

Το πρώτο βήμα της μεθόδου αφορά το χωρισμό της διατομής (ανάμεσα σε δύο διαδοχικά εγκάρσια ενισχυτικά) σε ανεξάρτητα μεταξύ τους δομικά στοιχεία. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να είναι συνήθη ενισχυτικά με την αντίστοιχη συνδεδεμένη πλάκα (ordinary stiffeners with attached plating), εγκάρσια ενισχυμένες πλάκες (transversely framed plating panels) και σκληρές γωνίες (hard corners).

Οι σκληρές γωνίες(hard corners) είναι ισχυρότερα στοιχεία τα οποία καταρρέουν κυρίως με ελαστοπλαστικό τρόπο. Συνήθως αποτελούνται από πλάκες που δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Γωνίες ανάμεσα σε δοκούς ,συνδέσεις μεγάλων δοκών, το κυρτό της γάστρας είναι χαρακτηριστικές σκληρές γωνίες(hard corners). Στον Πίνακα 4.2 φαίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα σκληρών γωνιών και συνήθων ενισχυτικών.



Πίνακας 4.2

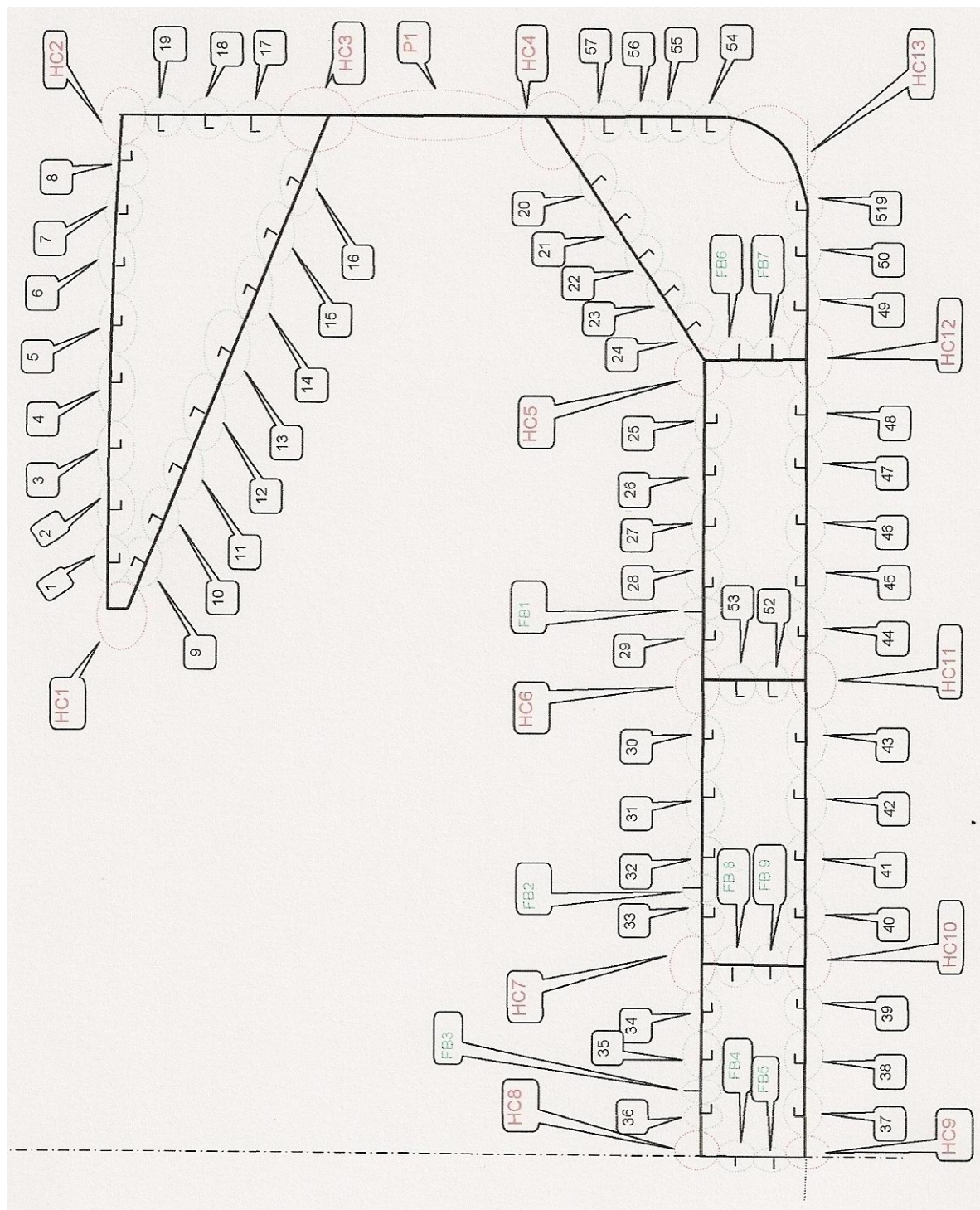
Στον Πίνακα 4.3 φαίνεται ο χωρισμός της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Συνολικά παράγονται πενήντα επτά (57) στοιχεία συνήθη ενισχυτικά με την αντίστοιχη συνδεδεμένη πλάκα, δέκα τρία σκληρές γωνίες(hard corners), εννέα συνήθη ενισχυτικά με την αντίστοιχη συνδεδεμένη πλάκα στυλ FlatBar, και μία εγκάρσια ενισχυμένη πλάκα.

Στο Παράρτημα 3 φαίνονται λεπτομέρειες των δομικών αυτών στοιχείων όπως το σύνολο των διαστάσεων τους, η απόσταση τους από τον πυθμένα, η απόστασή τους από τον ουδέτερο άξονα( για την αέρας κατάσταση πλοίου), η ροπή αδρανείας τους, η απόσταση τους από τον άξονα YY και η τάση διαρροής τους.

Υπενθυμίζεται ότι τα πάχη των ελασμάτων είναι τα  $t_{net}$  όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.

Για τα ανωτέρω δομικά στοιχεία αλλά και για όλη τη διαδικασία ισχύουν οι κάτωθι παραδοχές:

- Η Μέγιστη Αντοχή υπολογίζεται στη μέση τομή ανάμεσα σε δύο συνεχόμενα εγκάρσια ενισχυτικά.
- Το εγκάρσιο τμήμα της δοκού του σκάφους παραμένει επίπεδο καθώς καμπυλώνεται
- Τα δομικά στοιχεία στα οποία χωρίζεται η μέση τομή θεωρείται ότι δρουν ανεξάρτητα το ένα από το άλλο
- Το υλικό του σκάφους έχει ελαστοπλαστική συμπεριφορά.



Πίνακας 4.3

#### 4.2.2 Βήμα 2°

##### Υπολογισμός καμπύλων Φορτίου (Load-end shortening curves)

Το επόμενο βήμα της μεθόδου αφορά την δημιουργία βιβλιοθηκών για κάθε δομικό στοιχείο μέσω των οποίων θα είναι δυνατός ο υπολογισμός της τάσης  $\sigma$  σε κάθε εφαρμοζόμενη καμπυλότητα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται ο τρόπος καταπόνησης-κατάρρευσης των διάφορων δομικών στοιχείων

Element	Mode of failure
Lengthened transversely framed plating panel or ordinary stiffeners	Elasto-plastic collapse
Shortened ordinary stiffeners	Beam column buckling Torsional buckling Web local buckling of flanged profiles Web local buckling of flat bars
Shortened transversely framed plating panel	Plate buckling

Πίνακας 4.4

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τους τρόπους καταπόνησης-κατάρρευσης των δομικών στοιχείων (Θα χρησιμοποιηθεί η αγγλική ορολογία για την αποφυγή ακατανοησίας).

##### Elasto-plastic collapse

Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό τον τρόπο καταπόνησης είναι οι παρακάτω:

$$\sigma = \Phi \cdot R_{EH}$$

$R_{EH}$  : Τάση Διαρροής του Υλικού

$\Phi$  : Καθορίζεται ως εξής

$$\Phi = -1 \quad \text{for} \quad \epsilon < -1$$

$$\Phi = \epsilon \quad \text{for} \quad -1 \leq \epsilon \leq 1$$

$$\Phi = 1 \quad \text{for} \quad \epsilon > 1$$

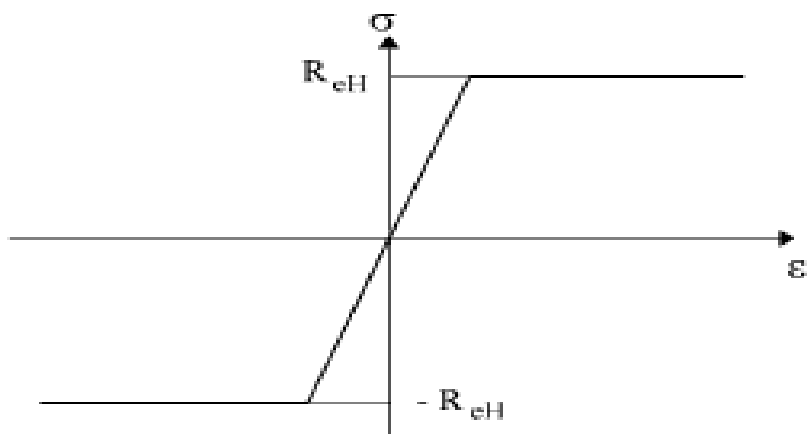
$\epsilon$  : Σχετική Παραμόρφωση ίση με

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

$\varepsilon_E$  : Παραμόρφωση στοιχείου

$\varepsilon_Y$  : Παραμόρφωση στοιχείου σε τάση διαρροής ίση με

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



Διάγραμμα Καμπύλης Φορτίου για Elasto-plastic collapse

### Beam Column Buckling

Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό τον τρόπο καταπόνησης είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_{CRI} = \Phi \sigma_{CI} \frac{A_{stiff} + 10b_E t_p}{A_{stiff} + 10st_p}$$

Όπου

$\Phi$  : όπως καθορίστηκε παραπάνω

$A_{stiff}$  : Η επιφάνεια του ενισχυτικού σε  $cm^2$  χωρίς τη συνδεδεμένη πλάκα

$\sigma_{CI}$  : critical stress in  $N/mm^2$  ίσο με

$$\sigma_{C1} = \frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon} \quad \text{for } \sigma_{E1} \leq \frac{R_{dH}}{2} \varepsilon$$

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

$\varepsilon$  : Σχετική Παραμόρφωση όπως καθορίστηκε παραπάνω

$\sigma_{E1}$  : Τάση λυγισμού κατά Euler σε N/mm<sup>2</sup> ίσο με

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

$I_E$  : Ροπή Αδρανείας του ενισχυτικού σε cm<sup>4</sup> ME συνδεδεμένη πλάκα πλάτους  $b_{E1}$

$b_{E1}$  : Αποτελεσματικό πλάτος της συνδεδεμένης πλάκας σε m ίσο με

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

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

όπου

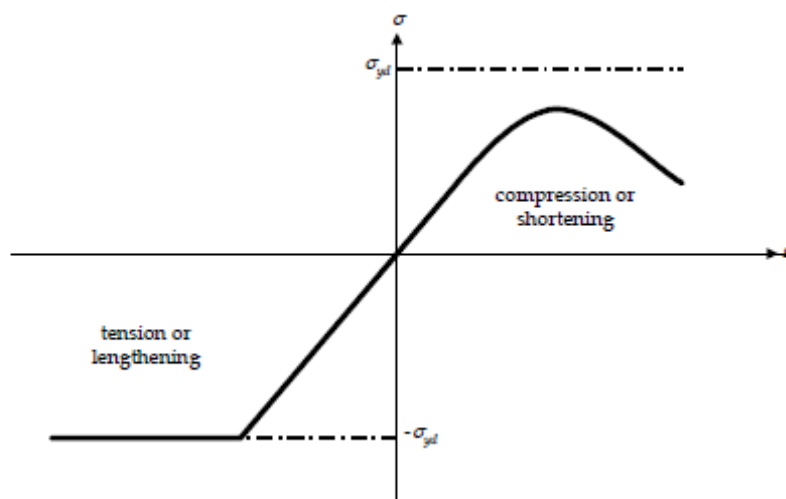
$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_p} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{dH}}{E}}$$

$A_E$  : Επιφάνεια του ενισχυτικού σε cm<sup>2</sup> με συνδεδεμένη πλάκα πλάτους  $b_E$

$b_E$  : Αποτελεσματικό πλάτος της συνδεδεμένης πλάκας σε m ίσο με

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

$$b_E = s \quad \text{for } \beta_E \leq 1.25$$



Διάγραμμα Καμπύλης Φορτίου για Beam Column Buckling

### Torsional Buckling

Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό τον τρόπο καταπόνησης είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_{CR2} = \Phi \frac{A_{stiff} \sigma_{C2} + 10st_p \sigma_{CP}}{A_{stiff} + 10st_p}$$

Όπου

$\Phi$  : όπως καθορίστηκε παραπάνω

$A_{stiff}$  : Η επιφάνεια του ενισχυτικού σε  $cm^2$  χωρίς τη συνδεδεμένη πλάκα

$\sigma_{C2}$  : Κρίσιμη τάση σε  $N/mm^2$  ίσο με

$$\sigma_{C2} = \frac{\sigma_{E2}}{\varepsilon} \quad \text{for } \sigma_{E2} \leq \frac{R_{dH}}{2} \varepsilon$$

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

$\varepsilon$  : Σχετική Παραμόρφωση όπως καθορίστηκε παραπάνω

$\sigma_{E2} = \sigma_{KIT}$  : Τάση λυγισμού κατά Euler σε  $N/mm^2$  ίσο με

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

όπου



$I_P$  : Πολική ροπή αδρανείας σε  $\text{cm}^4$  όπως καθορίζεται στον παρακάτω Πίνακα 4.5 ως προς σημείο C του Πίνακα 4.6

$I_T$  : Ροπή Αδρανείας του St. Venant σε  $\text{cm}^4$  όπως καθορίζεται στον παρακάτω Πίνακα 4.5

$I_\omega$  : Ροπή Αδρανείας σε  $\text{cm}^6$  όπως καθορίζεται στον παρακάτω Πίνακα 4.5

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

Πίνακας 4.5

$\varepsilon$  : Βαθμός Fixation ίσος με

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

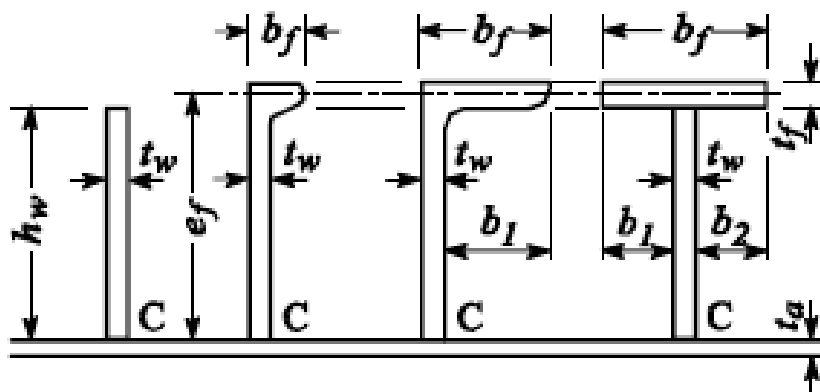
$A_w$  : Επιφάνεια κορμού ίση με

$$A_w = h_w t_w$$

$A_f$  : Επιφάνεια φλάντζας ίση με

$$A_f = b_f t_f$$

$$e_f = h_w + \frac{t_f}{2}, \text{ in mm}$$



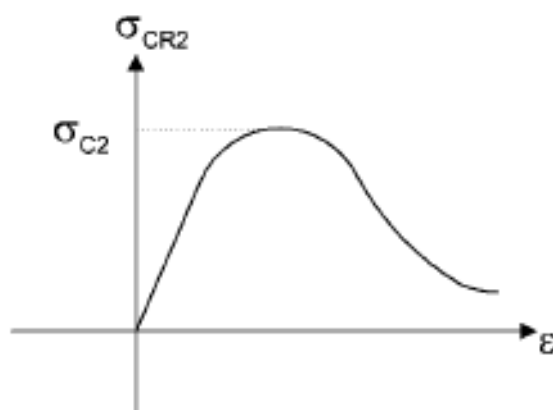
Πίνακας 4.6

$\sigma_{CP}$  : Τάση λυγισμού της συνδεδεμένης πλάκας σε  $N/mm^2$  ίσο με

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

$$\sigma_{CP} = R_{eH} \quad \text{for } \beta_E \leq 1.25$$

$\beta_E$  : όπως καθορίστηκε παραπάνω



Διάγραμμα Καμπύλης Φορτίου για Torsional Buckling

#### Web local buckling of ordinary stiffeners made of flanged profiles

Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό τον τρόπο καταπόνησης είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_{CR3} = \Phi R_{eH} \frac{10^3 b_E t_p + h_{we} t_w + b_f t_f}{10^3 s t_p + h_w t_w + b_f t_f}$$

Όπου

$\Phi$  : όπως καθορίστηκε παραπάνω

$b_E$  : όπως καθορίστηκε παραπάνω

$h_{we}$  : Αποτελεσματικό ύψος σε mm του κορμού ίσο με

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

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

$$\beta_w = \frac{h_w}{t_w} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eH}}{E}}$$

$\varepsilon$  : Σχετική Παραμόρφωση όπως καθορίστηκε παραπάνω

#### Web local buckling of ordinary stiffeners made of flat bars

Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό τον τρόπο καταπόνησης είναι οι παρακάτω:

$$\sigma_{CR4} = \Phi \frac{10st_P \sigma_{CP} + A_{stiff} \sigma_{C4}}{A_{stiff} + 10st_P}$$

Όπου

$\Phi$  : όπως καθορίστηκε παραπάνω

$\sigma_{CP}$  : Τάση λυγισμού της συνδεδεμένης πλάκας σε  $N/mm^2$  όπως καθορίστηκε παραπάνω

$A_{stiff}$  : Η επιφάνεια του ενισχυτικού σε  $cm^2$  χωρίς τη συνδεδεμένη πλάκα

$\sigma_{C4}$  : Κρίσιμη τάση σε  $N/mm^2$  ίση με

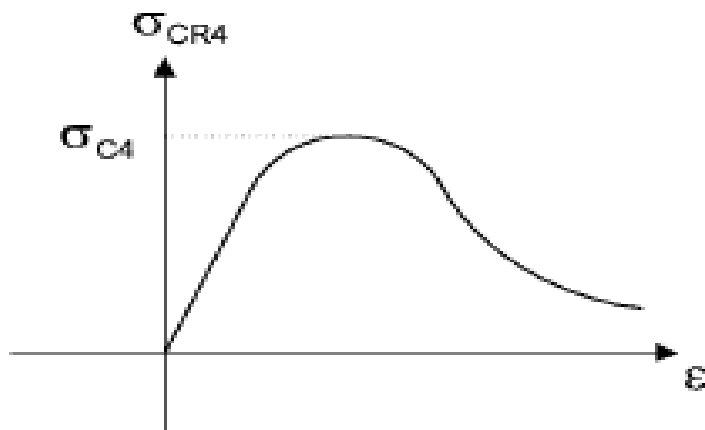
$$\sigma_{C4} = \frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon} \quad \text{for } \sigma_{E4} \leq \frac{R_{eH}}{2} \varepsilon$$

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

$\sigma_{E4}$  : Τοπική τάση λυγισμού κατά Euler σε  $N/mm^2$  ίση με

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

$\varepsilon$  : Σχετική Παραμόρφωση όπως καθορίστηκε παραπάνω



Διάγραμμα Καμπύλης Φορτίου για  
Web local buckling of ordinary stiffeners made of flat bars

### Plate buckling

Οι εξισώσεις που διέπουν αυτό τον τρόπο καταπόνησης είναι οι παρακάτω:

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

Όπου

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

$s$  : Πλάτος πλάκας σε m μετρούμενο στη διάσταση X μεταξύ δύο διαδοχικών εγκάρσιων ενισχυτικών

$l$  : Μακρύτερο τμήμα πλάκας σε m στη διάσταση Z

### Παρατηρήσεις

Αφού αναλύθηκαν οι έξι τρόποι καταπόνησης των δομικών στοιχείων μπορούμε να συνεχίσουμε στη δημιουργία των βιβλιοθηκών τάσεων-παραμορφώσεων (load-end shortening curves). Αυτό γίνεται με τη συγγραφή τριών προγραμμάτων σε περιβάλλον MAT LAB τα οποία φαίνονται στο Παράρτημα 4. Για την εύρεση της τελικής τάσεως σε κάθε εφαρμοζόμενη παραμόρφωση συγκρίνονται οι τιμές που παράγονται από τους τρόπους καταπόνησης και επιλέγεται κάθε φορά η μικρότερη.

Για δομικά στοιχεία τύπου συνήθους ενισχυτικού συγκρίνονται οι τιμές ανάμεσα σε τάσεις τύπου Beam Column Buckling, Torsional Buckling και Web local buckling of ordinary stiffeners made of flanged profiles και επιλέγεται η ελάχιστη των τριών κάθε φορά για ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων. Παρατηρήθηκε ότι η τάση Beam Column Buckling είναι πάντα η μικρότερη.

Αντίστοιχα για δομικά στοιχεία τύπου Flat Bar συγκρίνονται οι τιμές ανάμεσα σε τάσεις τύπου Beam Column Buckling, Torsional Buckling και Web local buckling of ordinary stiffeners made of flat bars και επιλέγεται η ελάχιστη των τριών κάθε φορά για ένα μεγάλο εύρος παραμορφώσεων.

Αντίστοιχα για δομικά στοιχεία τύπου Plate λαμβάνεται υπόψη η τιμή Plate buckling.

Για δομικά στοιχεία τύπου σκληρής γωνίας(Hard Corner) λαμβάνεται υπόψη η τιμή της elasto-plastic collapse

Πρέπει να επισημανθεί ότι σε περίπτωση επιμήκυνσης δηλαδή αρνητικής παραμόρφωσης, σύμφωνα με τη σύμβαση προσήμων που κάνουν οι Κοινοί Κανόνες Κατασκευής, λαμβάνεται υπόψη για ΟΛΑ τα δομικά στοιχεία η τιμή της elasto-plastic collapse.

#### 4.2.3 Βήμα 3<sup>ο</sup>

##### Υπολογισμός βήματος καμπυλότητας και αρχική θέση ουδέτερου άξονα

Η αρχική καμπυλότητα που θα αποτελέσει και το βήμα αύξησης της υπολογίζεται με τον τύπο :

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

όπου

$z_D$  : Είναι το κοίλο του σκάφους

$N$  : Η αρχική θέση του ουδέτερου άξονα

Στον Πίνακα 4.8 του EXCEL φαίνεται η εύρεση αρχικής θέσεως του Ουδέτερου άξονα, η Ροπή Αδρανείας της διατομής καθώς και η Ροπή αντίστασης ως προς πυθμένα και ως προς κατάστρωμα. Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο ευρέθησαν αυτά τα αποτελέσματα είναι το πρόγραμμα CenterGravity\_SecondMoment σε περιβάλλον MAT LAB. Η σύγκριση τους φαίνεται παρακάτω:

Αποτελέσματα

EXCEL

MATLAB

Απόσταση ΟΑ από πυθμένα	6.234 m	6.3298 m
Απόσταση ΟΑ από κατάστρωμα	10.316m	10.2202 m
Ροπή Αδρανείας διατομής	103.217 m <sup>4</sup>	107.2379 m <sup>4</sup>
Ροπή αντίστασης διατομής (Κατάστρωμα)	10.006 m <sup>3</sup>	10.4927 m <sup>3</sup>
Ροπή αντίστασης διατομής (Πυθμένας)	16.557 m <sup>3</sup>	16.9417 m <sup>3</sup>

Πίνακας 4.7

4.2.4 Βήμα 4<sup>ο</sup>

Πίνακας 4.8

A.A.	Στοιχείο Σκάφους	Περιγραφικά	Μήκος	Πλάτος	Τελικό Πάχος	Διαστάσεις (mm) as Built	Διαστάσεις NET	Τμήματα	α=surface (mm <sup>2</sup> )	h=height from bottom (mm)	α <sup>3</sup> h <sup>2</sup> (m <sup>5</sup> )	α <sup>3</sup> h <sup>3</sup> (m <sup>6</sup> )	I=moment of inertia (m <sup>4</sup> )	ANGLE OFF SURFACE
1	Ελαστική Κυρίως Καταστρώματος	650x22	6850	22	20,25	14073,5	16550	1	2.39226	38.546353	0.04320796	0.01759008	5	
2	Ελαστική Πυθμένα(1)	1150x15,5	1195	15,5	14,25	18453,25	0	1	0	0	2.74104E-06	2.74104E-06	0	
3	Ελαστική Πυθμένα(2)	14140x14,5	14140	14,5	13,25	18736,5	0	1	0	0	4.46213E-06	4.46213E-06	0	
4	Ελαστική επωτερικού Πυθμένα	1200x19	12000	19	16,5	19800,0	1740	1	0.34462	0.5994648	0.097300873	0.007300873	48	
5	Πλάγια άνω Δοκός (1)	5679x15,5	5979	15,5	12,75	72407,25	3750	1	0.51889	6.7651645	0.007392777	0.007392777	30	
6	Πλάγια άνω Δοκός (2)	2800x15	2800	15	13,25	36817,5	1387,5	1	0.16565	0.4857625	0.003719529	0.003719529	30	
7	Πλάγια άνω Δοκός (3)	2140x19	2140	19	17,5	36330	1587,5	1	0.57233	9.1683264	0.004190388	0.004190388	90	
8	Πλάγια τοίχωμα (1)	3260x16	3260	16	14,25	46740	14810	1	0.66663	10.390661	0.003711442	0.003711442	90	
9	Πλάγια τοίχωμα (2)	3840x14,5	3940	14,5	12,5	49250	11300	1	0.58625	6.2897325	0.003798949	0.003798949	90	
10	Πλάγια τοίχωμα (3)	3390x14	3390	14	12,25	41527,5	7835	1	0.19136	0.7698816	0.001963008	0.001963008	90	
11	Πλάγια τοίχωμα (4)	3390x14	3390	14	12,25	41527,5	7835	1	0.19136	0.7698816	0.001963008	0.001963008	90	
12	Πλάγια τοίχωμα (5)	140x10	140	10	1,5	444,7796	1210,06099	3	0.09531	0.0098317	0.000004602	0.000004602	90	
13	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα (κόψω)	1740x11	1740	11	10	2844	870	4	0.06352	0.0526802	0.01759008	0.01759008	90	
14	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-1 (Α)	250x60x6/14	250	60	7	1750	1740	1	0.003045	0.00526802	7.14593E-09	7.14593E-09	0	
15	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-2 (Α)	250x60x6/14	250	60	9	1750	1740	1	0.004471	0.0095108	0.000000729	0.000000729	0	
16	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-3 (Α)	250x60x6/14	250	60	7	1750	1740	1	0.003045	0.00526802	7.14593E-09	7.14593E-09	0	
17	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-4 (Α)	250x60x6/14	250	60	9	1750	1740	1	0.004471	0.0095108	0.000000729	0.000000729	0	
18	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-5 (Α)	250x60x6/14	250	60	7	1750	1740	1	0.003045	0.00526802	7.14593E-09	7.14593E-09	0	
19	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-6 (Α)	250x60x6/14	250	60	9	1750	1740	1	0.004471	0.0095108	0.000000729	0.000000729	0	
20	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-7 (Α)	250x60x6/14	250	60	7	1750	1740	1	0.003045	0.00526802	7.14593E-09	7.14593E-09	0	
21	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-8 (Α)	250x60x6/14	250	60	9	1750	1740	1	0.004471	0.0095108	0.000000729	0.000000729	0	
22	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-9 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
23	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-10 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
24	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-11 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
25	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-12 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
26	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-13 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
27	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-14 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
28	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-15 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
29	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-16 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
30	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-17 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
31	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-18 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
32	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-19 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
33	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-20 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
34	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-21 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
35	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-22 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
36	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-23 (Α)	200x60x6/14	200	60	7	1400	1400	1	0.002241	0.3588461	3.50143E-06	3.50143E-06	60	
37	Εισαγωγικά επωτερικού Πυθμένα SL-24 (Α)	200x60x6/14	200	60	9	1400	1400	1	0.003296	0.6226242	3.50143E-06	3.50143E-06	60	

**Αποτελέσματα**  
 Απόσταση OA από πυθμένα  
 Απόσταση OA από καταστρώμα  
 Ροπή αδράνειας διατομής  
 Ροπή αντίστασης διατομής(Καταστρώμα)  
 Ροπή αντίστασης διατομής(Πυθμένας)

$H=I(\alpha^3 h)/\Sigma a=$   
 6.234 m  
 $D=H=$   
 10.376 m  
 $I_{xx}=\Sigma(I)+\Sigma(I^2 \cdot \alpha^2) \cdot H^{-2} \cdot \Sigma(a)=$   
 103.217 m<sup>4</sup>  
 $Section Modulus(Deck)=I_{xx}/(D-H)=$   
 10.006 m<sup>3</sup>  
 $Section Modulus(Bottom)=I_{xx}/(H)=$   
 16.857 m<sup>3</sup>

$\Sigma(a^3 h)=$  7.5188  
 $\Sigma(I \cdot \alpha^3)=$  0.36624071  
 $\Sigma(a^3 h^2)=$  98.1132

Παραδοχή ότι το κομμάτι Πλάγια τοίχωμα 5 είναι ελεύθερο με καλή κλιμάκωση με υποστηρίξιμο μήκους



### Υπολογισμός του $\epsilon$ και $\sigma$ για κάθε στοιχείο

Η παραμόρφωση κάθε στοιχείου υπολογίζεται με τον τύπο

$$\epsilon = \chi * z$$

όπου

$\chi$  : η εκάστοτε καμπυλότητα

$z$  : η απόσταση του στοιχείου από τον ουδέτερο άξονα.

Η τάση υπολογίζεται από τις βιβλιοθήκες που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο βήμα με χρήση γραμμικής παρεμβολής ή με εκ νέου υπολογισμό χρησιμοποιώντας τους τύπους τρόπων κατάρρευσης.

#### 4.2.5 Βήμα 5<sup>ο</sup>

##### Καθορισμός νέου Ουδέτερου Άξονα

Η δύναμη που εξασκεί το κάθε δομικό στοιχείο λόγω της καμπύλωσης του είναι ίση με

$$F = \sigma * A$$

όπου

$A$  : η επιφάνεια του στοιχείου

Αν  $F_1 = \Sigma(\sigma_i * A_i)$  είναι η συνολική δύναμη των στοιχείων υπό σύνθλιψη και  $F_2 = \Sigma(\sigma_j * A_j)$  συνολική δύναμη των στοιχείων υπό εφελκυσμό τότε ισορροπία επιτυγχάνεται όταν

$ABS(F_1 - F_2) \leq \delta_1$  όπου  $\delta_1$  είναι μία καθορισμένη ανοχή. Στο σημείο αυτό έχουμε τη νέα θέση του ουδέτερου άξονα. Για να επιτευχθεί η ανωτέρω ισορροπία σε μία επαναληπτική διαδικασία δοκιμάζουμε διάφορες θέσεις του ουδέτερου άξονα δηλαδή ουσιαστικά μεταβάλλουμε το  $z$  του κάθε στοιχείου όπως αυτό περιγράφει στο προηγούμενο βήμα.

#### 4.2.6 Βήμα 6<sup>ο</sup>

##### Υπολογισμός της Ροπής Κάμψεως

Η Ροπή Κάμψεως στη διατομή αφού έχει καθορισθεί η νέα θέση του ουδέτερου άξονα υπολογίζεται αθροίζοντας τη ροπή που εξασκούν όλα τα στοιχεία ως εξής :

$M_u = \Sigma(\sigma \cdot A \cdot z)$ . Συγκρίνουμε τη ροπή που βρίσκουμε σε κάθε βήμα με αυτή του προηγούμενου και μόλις η διαφορά μεταξύ τους γίνει αρνητική δηλαδή η νέα ροπή είναι μικρότερη της προηγούμενης τότε σταματάμε τη διαδικασία εφόσον έχουμε φτάσει στη μέγιστη ροπή.

Η μέγιστη καμπυλότητα την οποία προτείνουν οι Κοινοί Κανόνες Κατασκευής για την επαναληπτική διαδικασία είναι:

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

όπου  $M_y$  είναι το μικρότερο των κάτωθι ποσοτήτων σε kNm

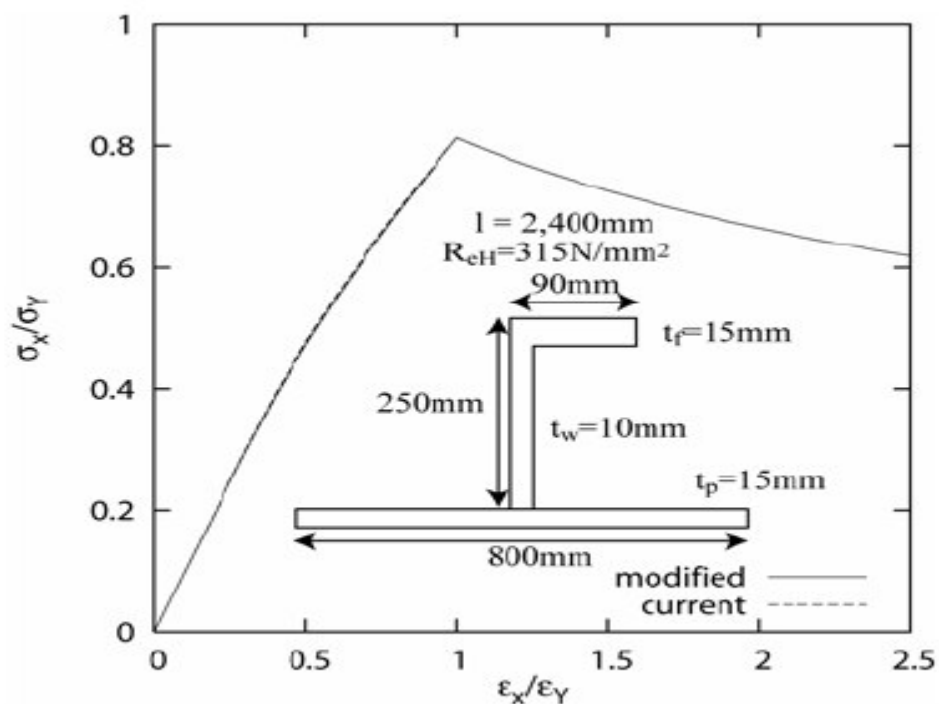
$$M_{Y1} = 10^3 R_{cH} Z_{AB}$$

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

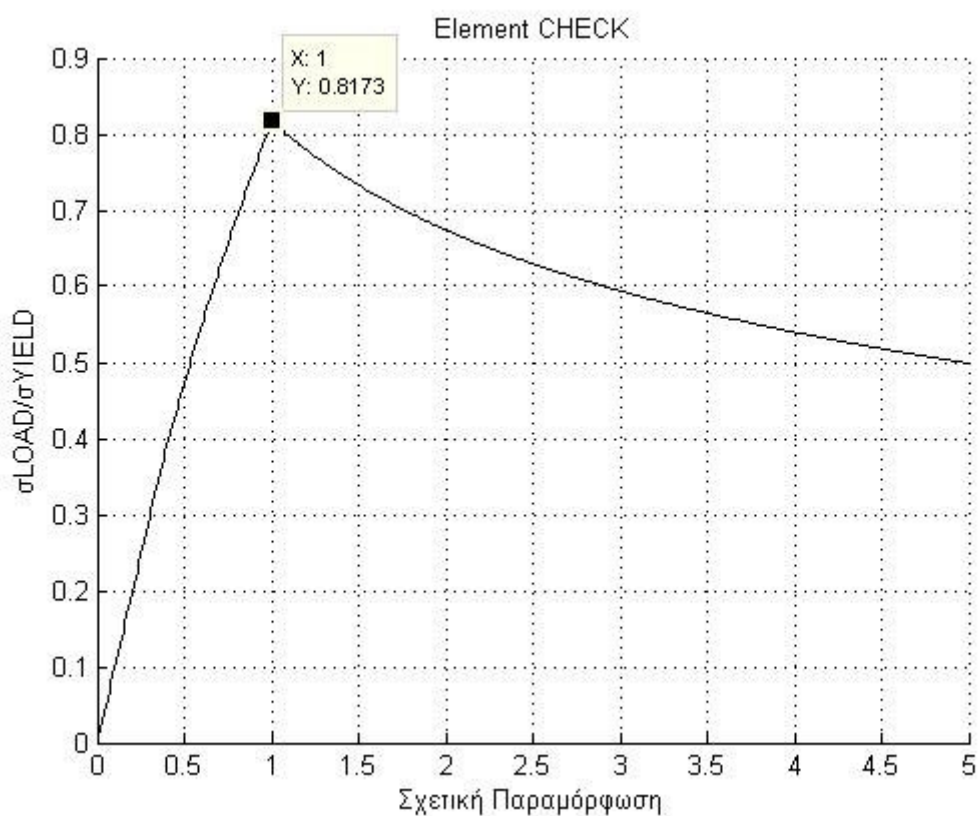
Φυσικά είναι αυτονόητο ότι η καμπυλότητα αυτή μπορεί να ξεπεραστεί εάν δεν επαρκεί για την επίτευξη του μέγιστου της ροπής κάμψεως.

#### 4.3 Έλεγχοι κώδικα από τον κανονισμό

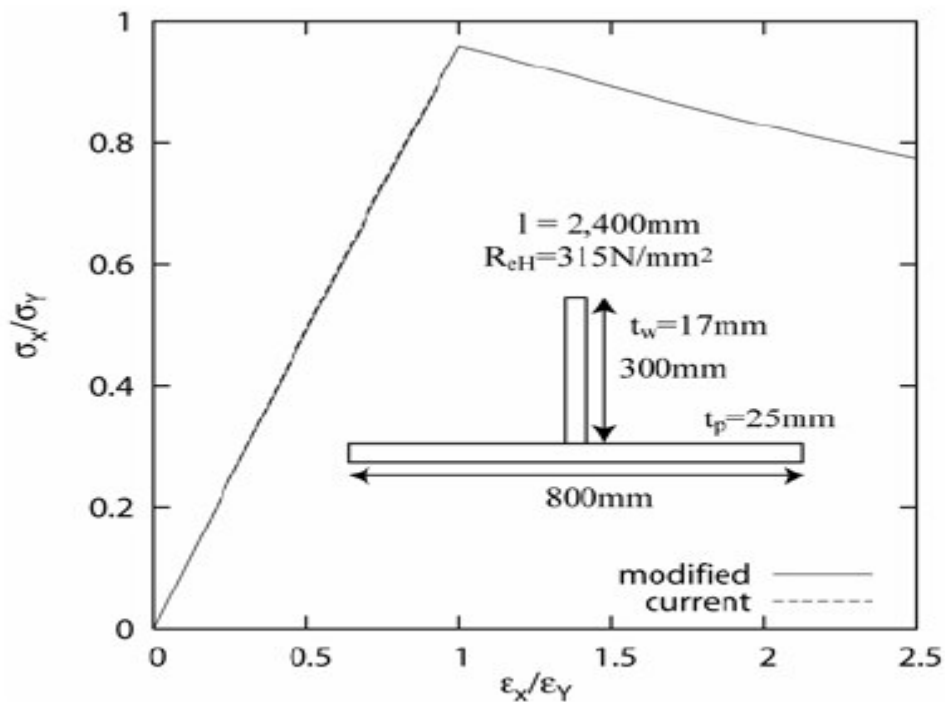
Οι Κοινοί Κανόνες Κατασκευής δίνουν κάποια διαγράμματα για να είναι δυνατός ο έλεγχος του κώδικα σε οποιοδήποτε πρόγραμμα έχει αυτός κατασκευαστεί μέσω γνωστών αποτελεσμάτων σε δομικά στοιχεία με δεδομένες διαστάσεις. Ακολουθεί μία σύγκριση ένα προς ένα των διαγραμμάτων που δίδει ο κανονισμός με τα αποτελέσματα που παράγει ο κώδικας δημιουργίας βιβλιοθηκών που παρατίθεται στο Παράρτημα 4.



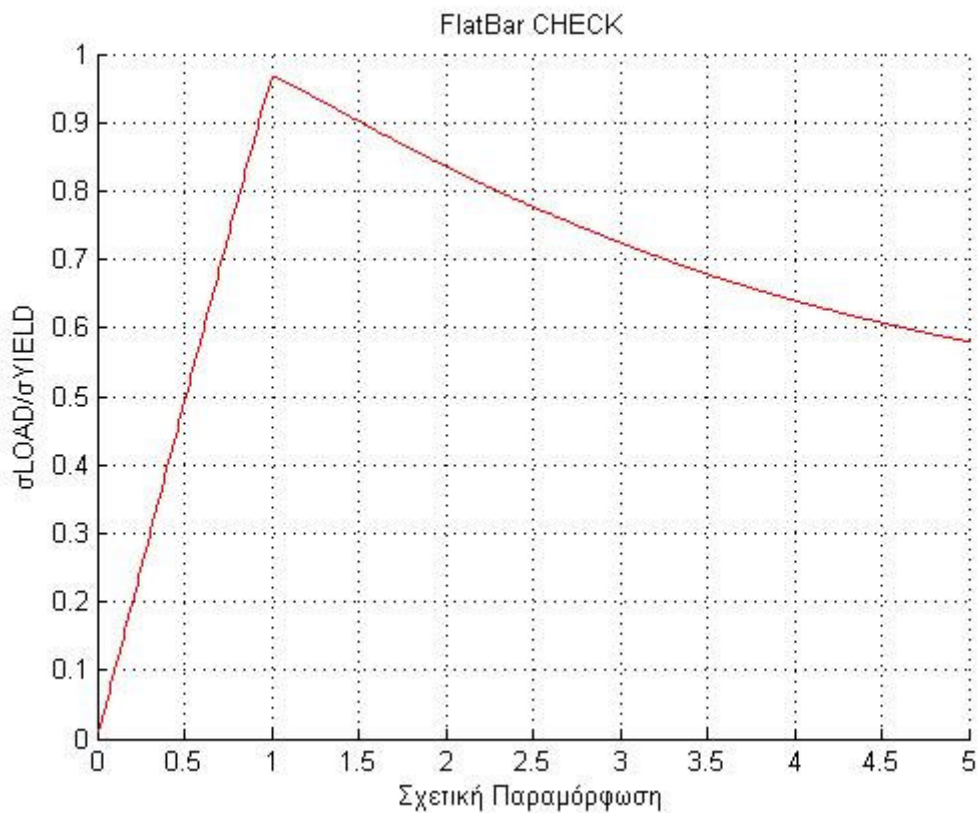
(a) Angle



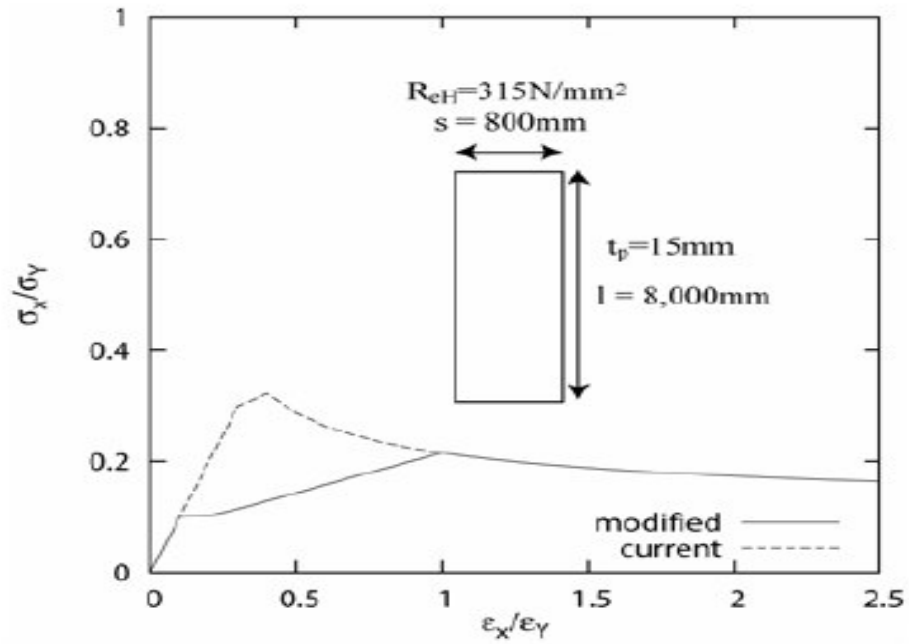
Angle CHECK



(c) Flat Bar



FlatBar CHECK



(d) Plate

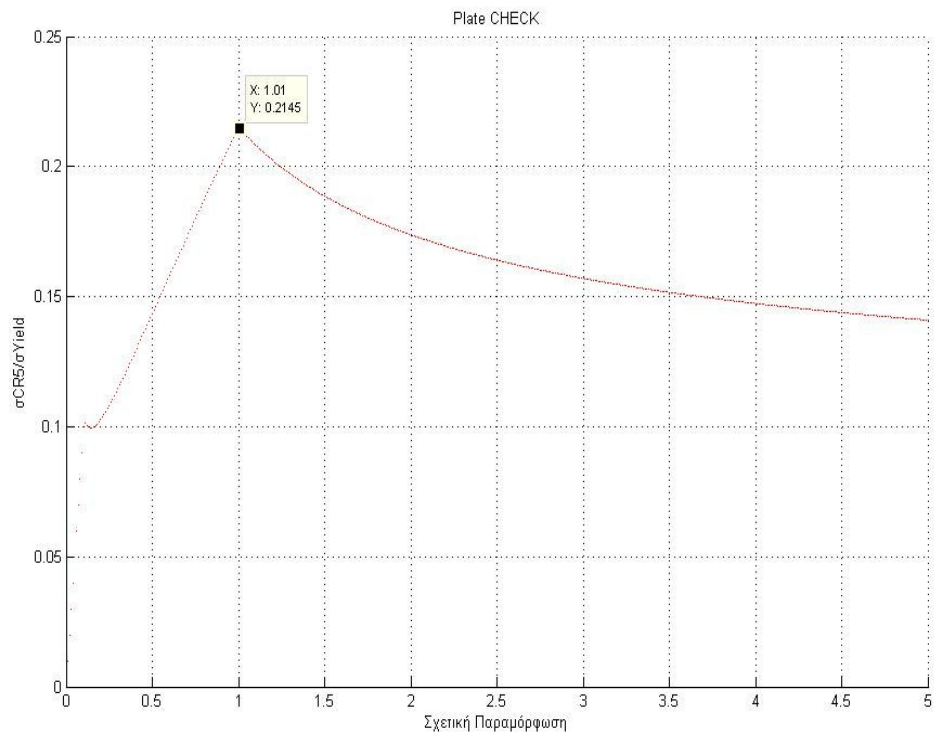


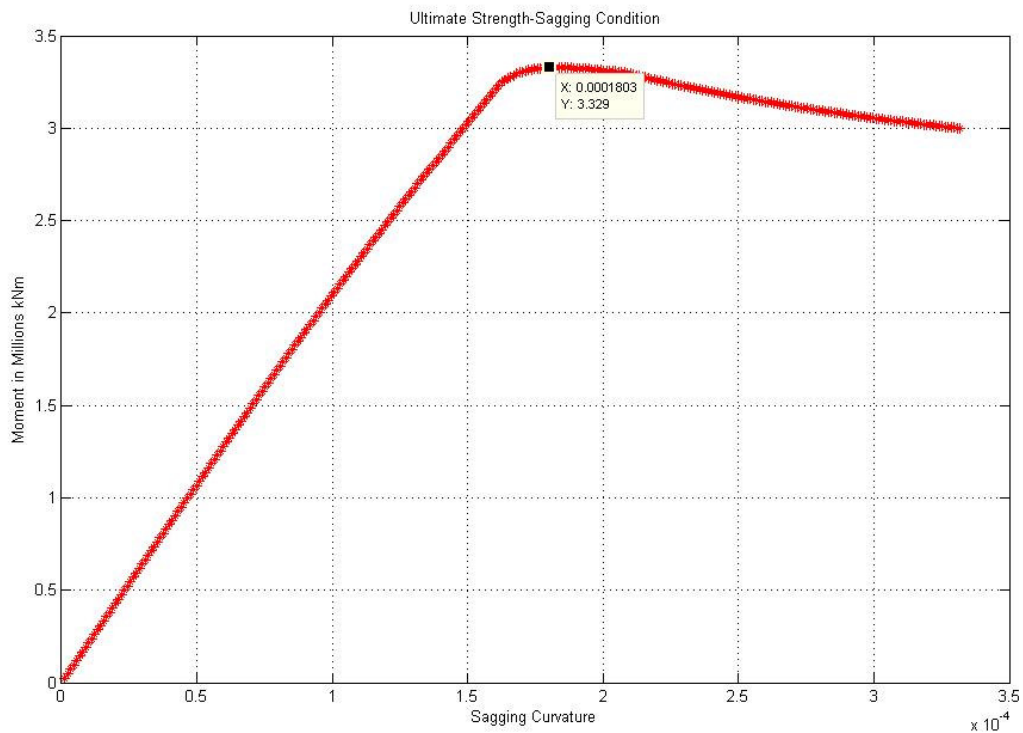
Plate CHECK

#### 4.4 Προγράμματα SAG.m και HOG.m

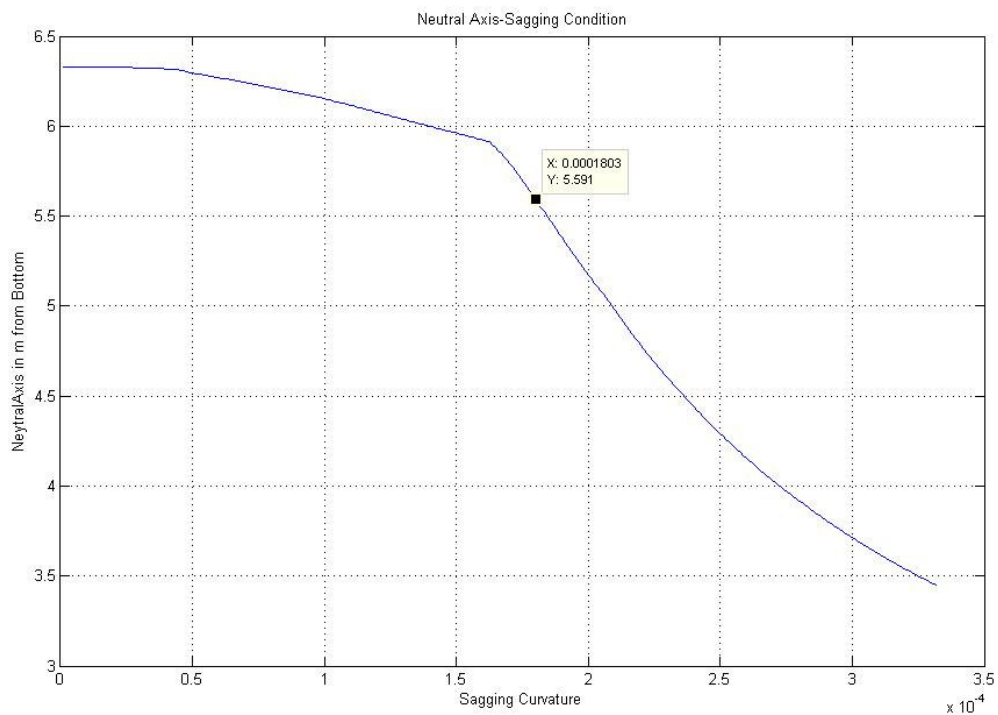
Τα προγράμματα SAG.m και HOG.m έχουν γραφεί σε περιβάλλον MATLAB και χρησιμοποιούν την βηματική διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω για να καταλήξουν σε αποτελέσματα όσον αφορά τη Μέγιστη Διαμήκη Αντοχή του σκάφους καθώς και το διάγραμμα Ροπής Κάμψεως-Καμυλότητας (M-κ). Ολόκληρος ο κώδικας του κάθε προγράμματος φαίνεται στο Παράρτημα 5.

Το πρόγραμμα έχει ένα εξωτερικό loop το οποίο μεταβάλλει την επιβαλλόμενη καμυλότητα από την τιμή εκκινήσεως της έως την τελική τιμή της όπως αυτές έχουν καθορισθεί παραπάνω. Τα δομικά στοιχεία είναι χωρισμένα κατά ομάδες ανάλογα με τον τύπο τους. Σε κάθε ομάδα με εσωτερικό loop υπολογίζεται η τάση σε κάθε δομικό στοιχείο σε κάθε βήμα τού loop καμυλότητας. Στο τέλος κάθε βήματος του loop καμυλότητας έχουν υπολογισθεί οι τάσεις ,οι δυνάμεις και οι ροπές κάθε στοιχείου. Δυνάμεις και ροπές είναι ομαδοποιημένες κατά τύπο δομικού στοιχείου. Το απόλυτο άθροισμα των δυνάμεων ελέγχεται αν είναι μικρότερο από 50 N. Εάν ναι τότε αποτυπώνεται η ροπή και η θέση του ουδέτερου άξονα. Εάν όχι τότε μεταβάλλεται η απόσταση των στοιχείων από τον ουδέτερο άξονα είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω κατά ένα αρχικό βήμα. Το βήμα αυτό είναι μεταβαλλόμενο για να αποφευχθεί εμπλοκή μεταξύ δύο τιμών. Η διαδικασία μεταβολής απόστασης των στοιχείων από τον ουδέτερο άξονα είναι δυνατόν να επαναληφθεί έως και χίλιες φορές. Πρακτικά επιτυγχάνεται ισορροπία μετά από εκατό το πολύ επαναλήψεις.

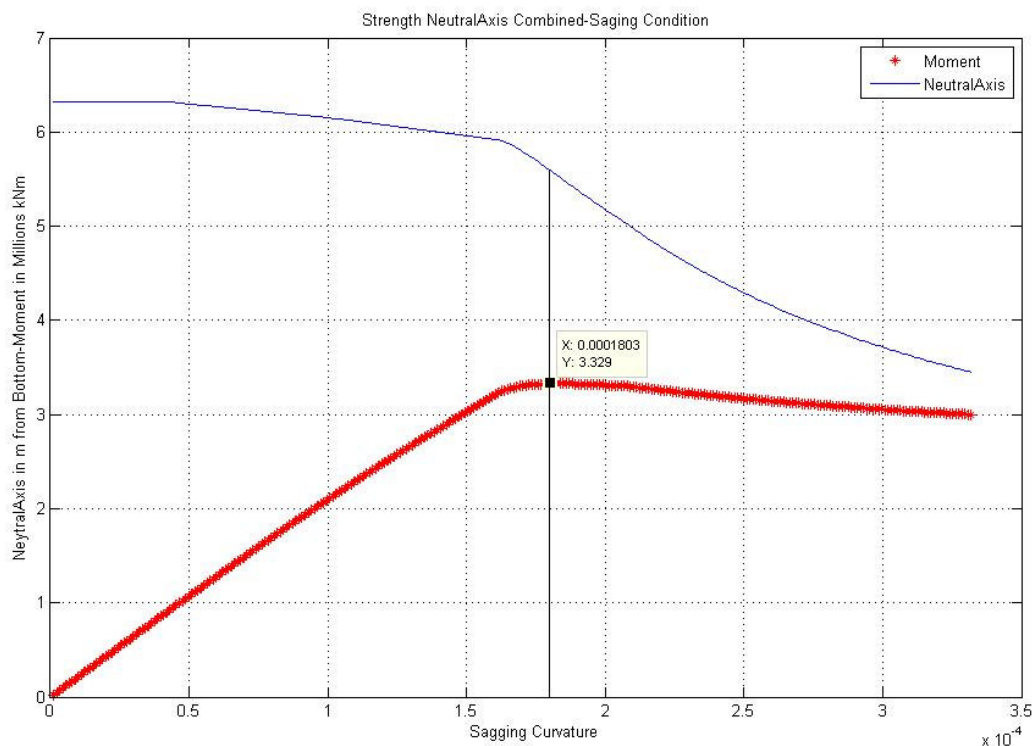
Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σε κατάσταση Sagging.



Πίνακας 4.9



Πίνακας 4.10



Πίνακας 4.11

Η μέγιστη ροπή κάμψης υπολογίζεται σε 3.3291 εκατομμύρια kNm και επιτυγχάνεται σε καμπυλότητα  $0.0001803 \text{ m}^{-1}$ . Ο ουδέτερος άξονας εκείνη τη στιγμή βρίσκεται σε απόσταση 5.5912 m από τον πυθμένα. Το αποτέλεσμα της ροπής είναι αρκετά υψηλότερο από το αναμενόμενο που υπολογίστηκε στο Κεφ 3 παρ.3.5 και **ικανοποιεί** τον κανονισμό.

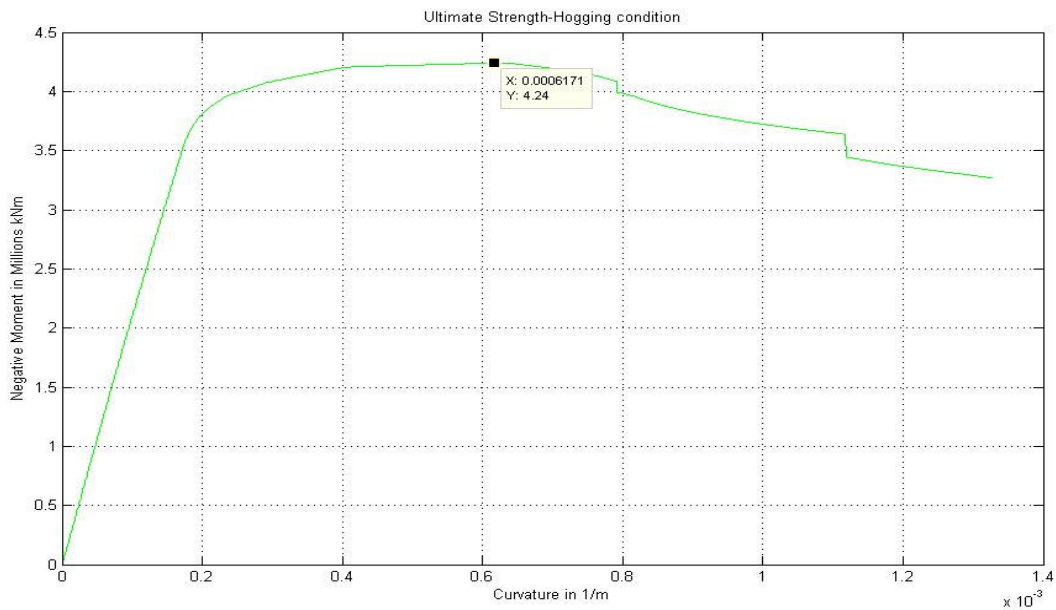
**Πραγματική τιμή :** 3.329.100,000 kNm

**Υπολογιζόμενη από CSR :** 3.069.842,579 kNm (Κεφ 3 παρ.3.5)

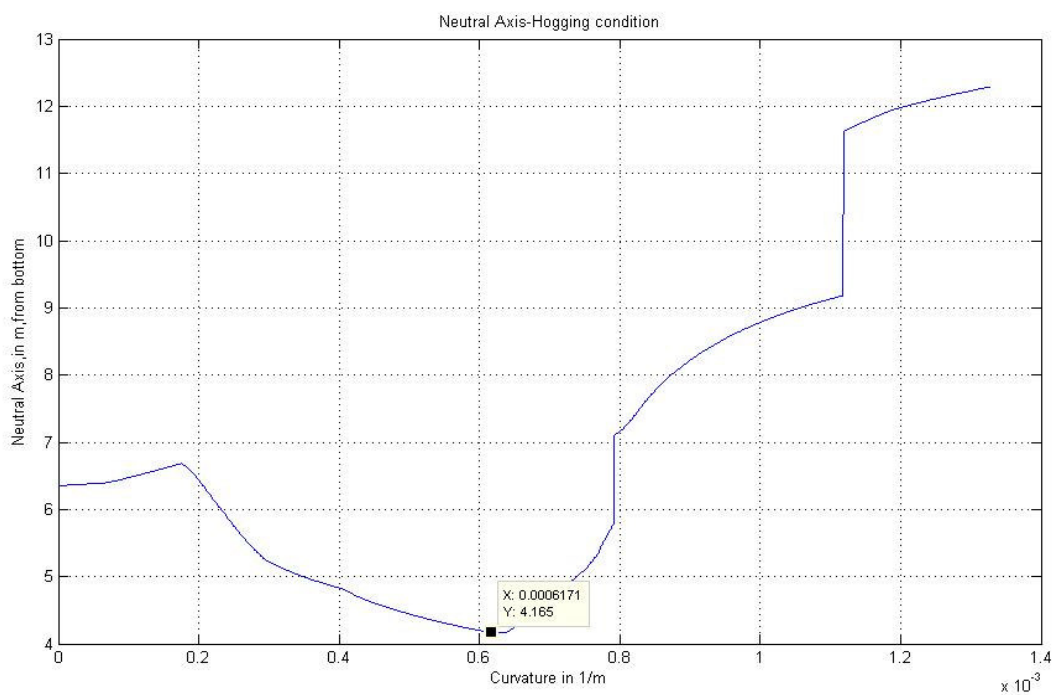
Τα ενισχυτικά του καταστρώματος δηλαδή τα E1 έως και E8 είναι τα πρώτα τα οποία καταρρέουν λίγο πριν τη Μέγιστη ροπή και ακολουθούν ένα-ένα τα ενισχυτικά της άνω πλαγίας δοκού δηλαδή τα E9 έως και E19 και η γωνία του καταστρώματος HC1, HC2.

Αντίστοιχα στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται τα αποτελέσματα σε κατάσταση Hogging:

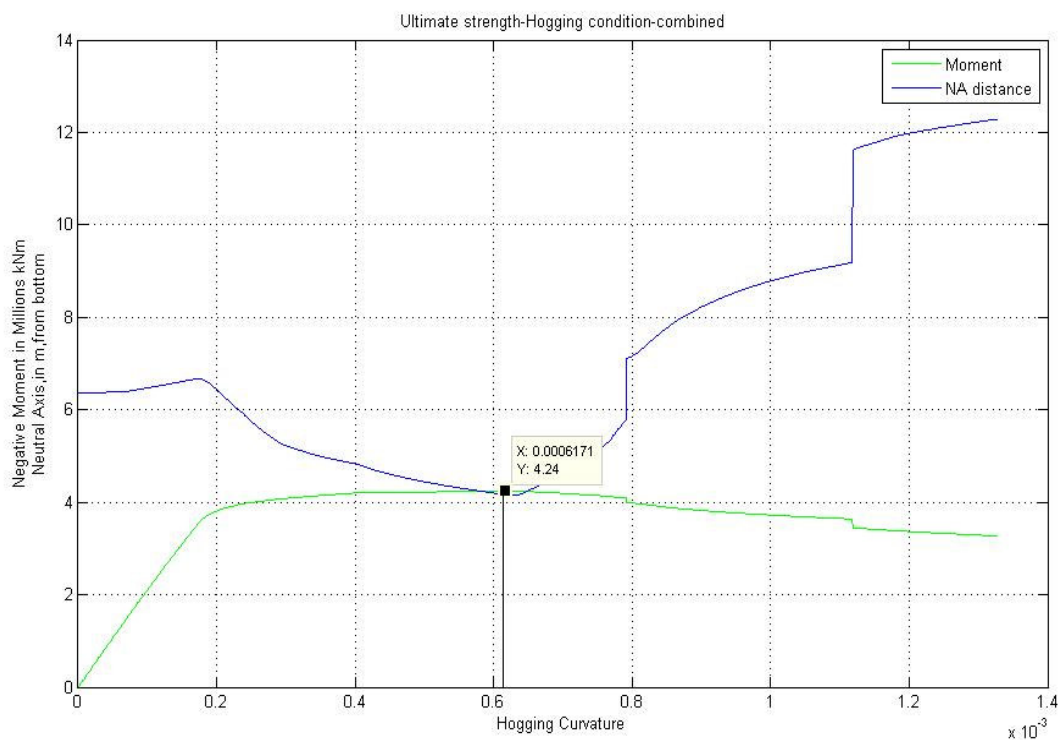




Πίνακας 4.12



Πίνακας 4.13



Πίνακας 4.14

Η μέγιστη ροπή κάμψης υπολογίζεται σε 4.24 εκατομμύρια kNm και επιτυγχάνεται σε καμπυλότητα  $0.0006171 \text{ m}^{-1}$ . Ο ουδέτερος άξονας εκείνη τη στιγμή βρίσκεται σε απόσταση 4.165 m από τον πυθμένα. Το αποτέλεσμα της ροπής είναι υψηλότερο από το αναμενόμενο που υπολογίστηκε στο Κεφ 3 παρ.3.5 και ικανοποιεί τον κανονισμό.

**Πραγματική τιμή :** 4240000 kNm

**Υπολογιζόμενη από CSR :** 3096609.929kNm (Κεφ 3 παρ.3.5)

## Κεφάλαιο 5

# Κοινοί Κανόνες Κατασκευής(CSR)-Εφαρμογή της Μεθόδου Incremental-Iterative Approach σε Βεβλαμένο πλοίο.

### 5.1 Γενικά.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιασθεί μία προσπάθεια εφαρμογής της μεθόδου Incremental-Iterative Approach σε Βεβλαμένο πλοίο. Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του νέου κέντρου βάρους καθώς και της νέας ροπής αδρανείας, και στους δύο άξονες, και την κλίση που λαμβάνουν οι νέοι κύριοι άξονες και φυσικά τη καινούργια Μέγιστη Διαμήκη Αντοχή του βεβλαμένου σκάφους.

### 5.2 Ανάλυση στοιχείων σε Βεβλαμένο πλοίο.

Μία από τις κυριότερες διαφορές στη μελέτη του πλοίου όταν αυτό είναι ακέραιο και όταν είναι βεβλαμένο είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση το πλοίο δεν είναι μία συμμετρική κατασκευή. Αυτό το γεγονός δημιουργεί την ανάγκη πρόσθετων υπολογισμών για ποσότητες που στη περίπτωση ακεραίου σκάφους είναι αλληλοαναιρούμενες. Στις παρακάτω παραγράφους φαίνεται ο υπολογισμός του κέντρου βάρους η νέα ροπή αδρανείας ως προς ΥΥ άξονα αλλά και ως προς ZZ, η αρχική θέση του ουδέτερου άξονα καθώς και οι αρχικές αποστάσεις των στοιχείων από αυτόν. Σημασία έχει και ο υπολογισμός των αποστάσεων των στοιχείων από τον άξονα κάθετο στον ουδέτερο για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω. Ακολουθεί ο υπολογισμός των τάσεων με βάση τη μέθοδο και τους τύπους των Κοινών Κανόνων Κατασκευής. Με την τάση που παράγεται υπολογίζεται η αξονική δύναμη, η ροπή κάμψεως και η ροπή ως προς ZZ άξονα την οποία προσπαθούμε να μηδενίσουμε αλλάζοντας την κλίση του ουδέτερου άξονα.

#### 5.2.1 Εύρεση νέου κέντρου βάρους.

Για την εύρεση του νέου κέντρου βάρους της διατομής καταρχήν υπολογίζονται οι αποστάσεις από τον ΥΥ άξονα και τον ZZ άξονα όλων των επιμέρους στοιχείων στα οποία έχει χωριστεί η διατομή, με βάση το σχέδιο της μέσης τομής του σκάφους. Κατόπιν υπολογίζεται η στατική ροπή επιφανείας του κάθε στοιχείου ως προς άξονα ZZ και άξονα ΥΥ. Η ανωτέρω ροπή μηδενίζεται ως προς κεντροβαρικό άξονα. Το νέο κέντρο βάρους της διατομής δίδεται από τους τύπους:

$$S_y = \Sigma (z_i * A_i) \text{ Στατική ροπή ως προς άξονα ΥΥ}$$

$S_z = \Sigma (y_i * A_i)$  Στατική ροπή ως προς άξονα ZZ

$y_o = S_y / \Sigma(A_i)$  Νέο κέντρο βάρους τιμή στον άξονα YY

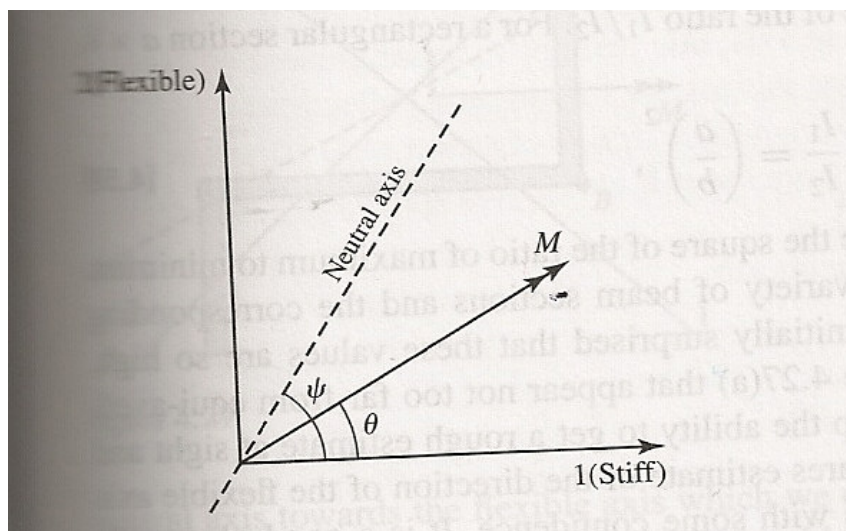
$z_o = S_z / \Sigma(A_i)$  Νέο κέντρο βάρους τιμή στον άξονα ZZ

### 5.2.2 Εύρεση νέων ροπών αδρανείας.

Για την εύρεση των ροπών αδρανείας της διατομής υπολογίζονται πρώτα οι ροπές αδρανείας των επιμέρους στοιχείων της διατομής ως προς τους κεντροβαρικούς τους άξονες όπως αυτό φαίνεται στο Παράρτημα 6. Κατόπιν μετασχηματίζονται ως προς άξονες παράλληλους στους αρχικούς ZZ και YY και υπολογίζεται και το γινόμενο αδρανείας έκαστου στοιχείου ενώ ταυτόχρονα υπολογίζεται και ο όρος Steiner έκαστου στοιχείου ως προς τους αρχικούς άξονες. Οι τύποι και η θεωρία που για τα παραπάνω έχει αναπτυχθεί στο Κεφάλαιο 2. Αφού βρεθούν οι τιμές των  $I_z$ ,  $I_y$ ,  $I_{zy}$ , είναι δυνατόν να βρεθεί και η κλίση των νέων κύριων αξόνων ως προς την οριζόντιο.

### 5.2.3 Εύρεση θέσης ουδέτερου άξονα

Είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητό ότι σε μη συμμετρικό σκάφος, όπως είναι το βεβλαμένο, ο ουδέτερος άξονας δεν συμπίπτει πλέον με τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας. Στη γενικότερη περίπτωση μπορούμε να επιλύσουμε το πρόβλημα ως εξής:



Εικόνα 5.1

Χωρίζουμε την εξασκούμενη ροπή στις δύο συνιστώσες της στους κύριους άξονες όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1

$$M_1 = M * \sigma \nu \theta$$

$$M_2 = M \cdot \eta \mu \theta$$

Χρησιμοποιώντας το γνωστό τύπο της τάσεως έχουμε:

$$\sigma_{zz} = M \cdot y \cdot \sigma_{\text{συνθ}} / I_1 - M \cdot z \cdot \eta \mu \theta / I_2$$

Για τον ουδέτερο άξονα ισχύει ότι  $\sigma_{zz} = 0$  άρα έχουμε :

$$y/x = \epsilon \phi \psi = M \cdot \eta \mu \theta / I_2 \cdot I_1 / (M \cdot \sigma_{\text{συνθ}}) = I_1 / I_2 \cdot \epsilon \phi \theta$$

Στα πλοία το  $I_1$  είναι πάντα μικρότερο από το  $I_2$  άρα η γωνία  $|\psi| < |\theta|$  δηλαδή ο ουδέτερος άξονας είναι πάντα μεταξύ του άξονα με τη μικρότερη ροπή αδρανείας και του άξονα όπου ασκείται η ροπή κάμψεως.

### 5.3 Μελέτη Περιπτώσεων Βλαβών

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με τη μελέτη πέντε διαφορετικών περιπτώσεων βλαβών εκ των οποίων οι τέσσερις δεν είναι συμμετρικές

- Περίπτωση 1<sup>η</sup> : Σε αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόσουμε μια συμμετρική βλάβη στον πυθμένα του πλοίου αφαιρώντας τα κομμάτια HC9, E37, E38, E39 και από δεξιά και από αριστερά
- Περίπτωση 2<sup>η</sup> : Σε αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόσουμε μια μη συμμετρική βλάβη στα δεξιά του σκάφους στο ύψος του κυρίου καταστρώματος αφαιρώντας τα κομμάτια HC2(R).
- Περίπτωση 3<sup>η</sup> : Σε αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόσουμε μια μη συμμετρική βλάβη στα δεξιά του σκάφους στο ύψος του κυρίου καταστρώματος αφαιρώντας τα κομμάτια HC2(R), E8(R), E19(R).
- Περίπτωση 4<sup>η</sup> : Σε αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόσουμε μια μη συμμετρική βλάβη στα δεξιά του σκάφους στο ύψος του κυρίου καταστρώματος αφαιρώντας τα κομμάτια HC2(R), E7(R), E8(R), E18(R), E19(R).
- Περίπτωση 5<sup>η</sup> : Σε αυτήν την περίπτωση θα εφαρμόσουμε μια μη συμμετρική βλάβη στα δεξιά του σκάφους στο ύψος του κυρίου καταστρώματος αφαιρώντας τα κομμάτια HC2(R), E6(R), E7(R), E8(R), E17(R), E18(R), E19(R).
- Περίπτωση 6<sup>η</sup> : Στην τελευταία αυτή περίπτωση θα εφαρμόσουμε μία πολύ μεγάλης εκτάσεως βλάβη στα δεξιά του σκάφους αφαιρώντας τα κομμάτια HC1(R), HC2(R), E1(R) έως E19(R).

	TOTAL AREA in m <sup>2</sup>	Z in m	Y in m	Iz in m <sup>4</sup>	Iy in m <sup>4</sup>	INCLINATION in degrees
<b>CASE 0</b>	2.4449	6.3298	0	330.3869	107.2379	0
<b>CASE 1</b>	2.3426	6.6039	0	330.1193	103.0397	0

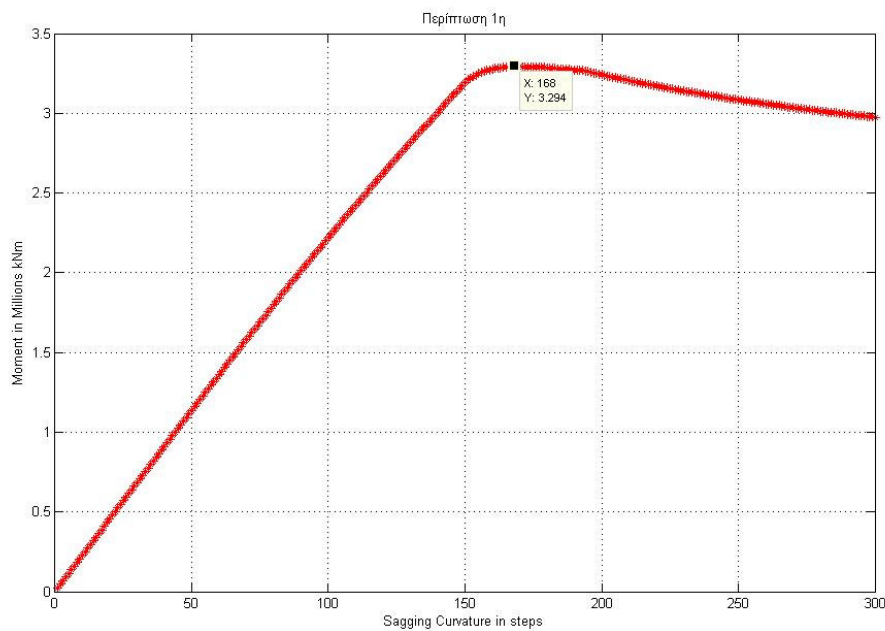
<b>CASE 2</b>	2.4323	6.2777	-0.0821	327.2079	105.9321	0.5263
<b>CASE 3</b>	2.4018	6.152	-0.2832	319.6742	102.7067	1.8133
<b>CASE 4</b>	2.3699	6.0222	-0.4927	311.9273	99.5564	2.2747
<b>CASE 5</b>	2.3369	5.8879	-0.71	304.4985	95.9815	3.655
<b>CASE 6</b>	2.0963	4.7821	-2.136	273.0979	60.0675	13.4783

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής μετά από κάθε περίπτωση βλάβης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το κέντρο βάρους «απομακρύνεται» από τη βλάβη, η ροπή αδρανείας μειώνεται όπως φυσικά και η επιφάνεια της διατομής. Η γωνία κλίσεως των κυρίων αξόνων σε κάθε περίπτωση δείχνει ότι ο  $I_y$  άξονας κλίνει προς τη βλάβη. Έλεγχος στα αποτελέσματα γεωμετρίας έγινε με το πρόγραμμα MARS-2000 χρησιμοποιώντας την επιλογή HALF-SECTION με τα κάτωθι αποτελέσματα:

<b>CASE</b>	<b>TOTAL AREA in m<sup>2</sup></b>	<b>Z in m</b>	<b>Y in m</b>	<b>I<sub>y</sub> in m<sup>4</sup></b>	<b>I<sub>z</sub> in m<sup>4</sup></b>	<b>I<sub>zy</sub> in m<sup>4</sup></b>	<b>INCLINATION in degrees</b>
<b>Geometry Check</b>	1.2225	10.604	6.3293	64.1741	17.1778	18.653	26.2714
<b>Mars2000</b>	1.2044	10.584	6.48	63.3615	18.6025	18.0919	26.97

### 5.3.1 Περίπτωση 1<sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις

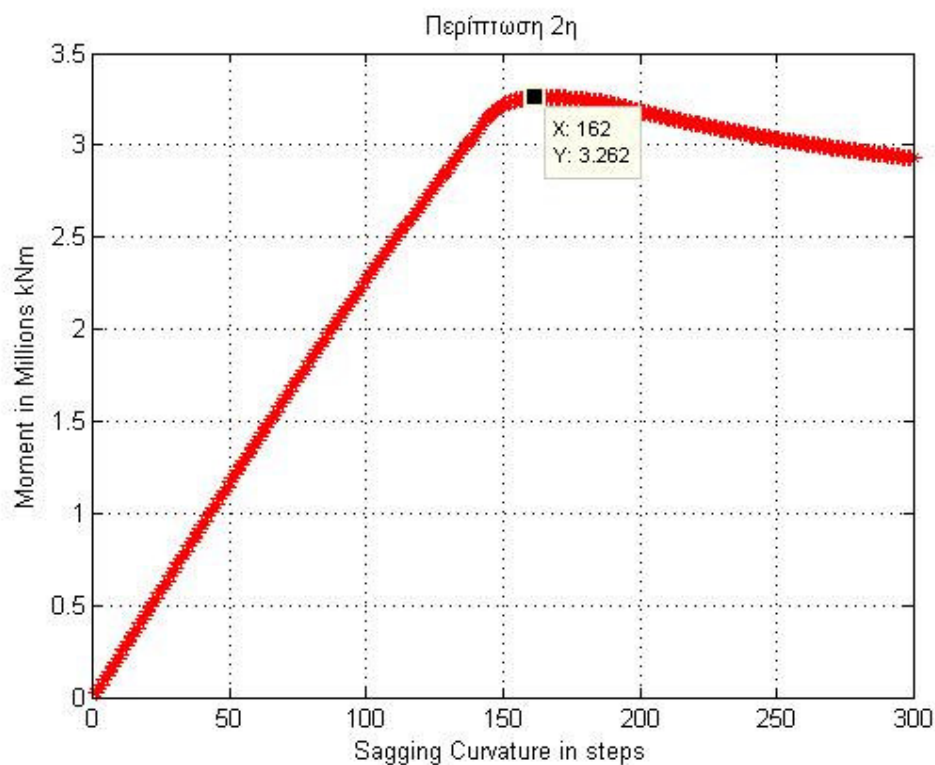
Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει κλίση των κυρίων αξόνων και ο ουδέτερος άξονας εξακολουθεί να είναι ο ίδιος με το άξονα του  $I_y$ . Καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα καταρρέει πρώτα το HC2 ακολουθεί πολύ γρήγορα το HC1 και μετά το HC3. Η εναπομένουσα αντοχή είναι 3,2939 εκατομμύρια kNm ενώ ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται στα 5,8494 m από τον πυθμένα σε αυτή τη φάση. Στην εικόνα 5.1 φαίνεται το διάγραμμα της ροπής κάμψεως.



Εικόνα 5.1

### 5.3.2 Περίπτωση 2<sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις

Σε αυτή την περίπτωση η βλάβη δεν είναι συμμετρική και μπορούμε να διακρίνουμε διάφορες περιπτώσεις ανάλογα με την ακρίβεια που θέλουμε να επιτύχουμε το μηδενισμό της ροπής στον κατακόρυφο άξονα. Στην εικόνα 5.2 φαίνεται το διάγραμμα ροπής κάμψεως η οποία φτάνει τα 3.263 εκατομμύρια kNm με ακρίβεια της τάξης του ενός εκατομμυρίου kNm για την ροπή στον κάθετο άξονα  $M_z$ . Αυξάνοντας την ακρίβεια το διάγραμμα διατηρεί τη μορφή του και η ροπή κάμψεως φτάνει τα 3.27 εκατομμύρια kNm.

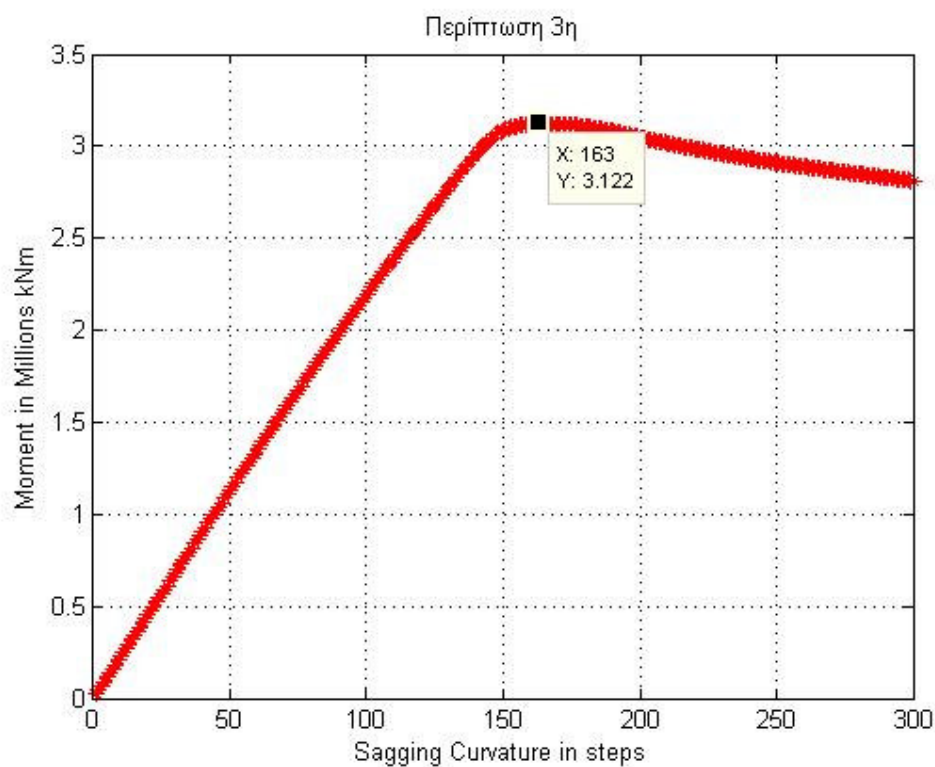


Εικόνα 5.2



### 5.3.3 Περίπτωση 3<sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις

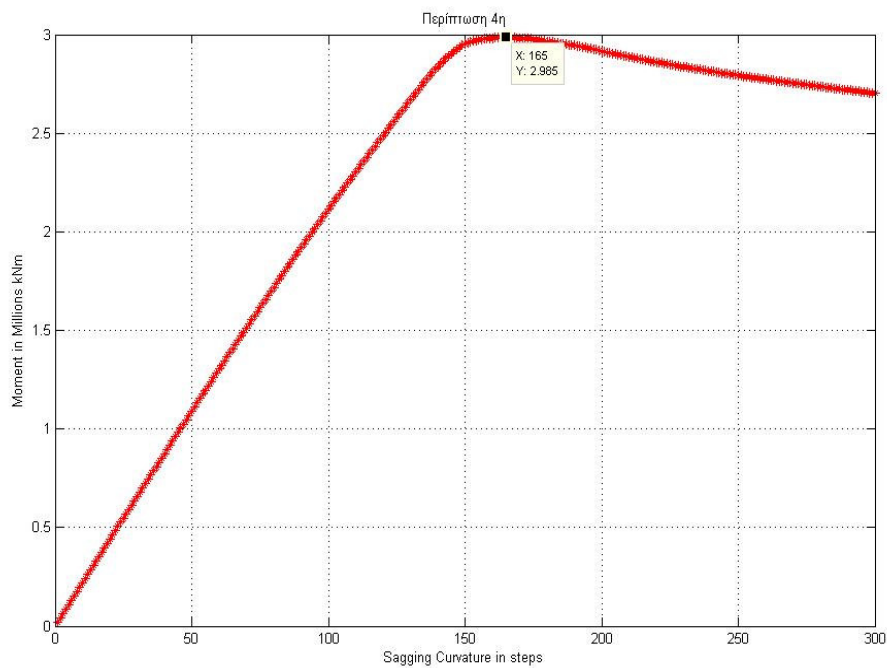
Τα αποτελέσματα ροπής κάμψεως σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στην εικόνα 5.3. Η τιμή ξεκινά από τα 3.122 εκατομμύρια kNm και αυξάνοντας την ακρίβεια το διάγραμμα διατηρεί τη μορφή του και η ροπή κάμψεως φτάνει τα 3.19 εκατομμύρια kNm.



Εικόνα 5.3

### 5.3.4 Περίπτωση 4<sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις

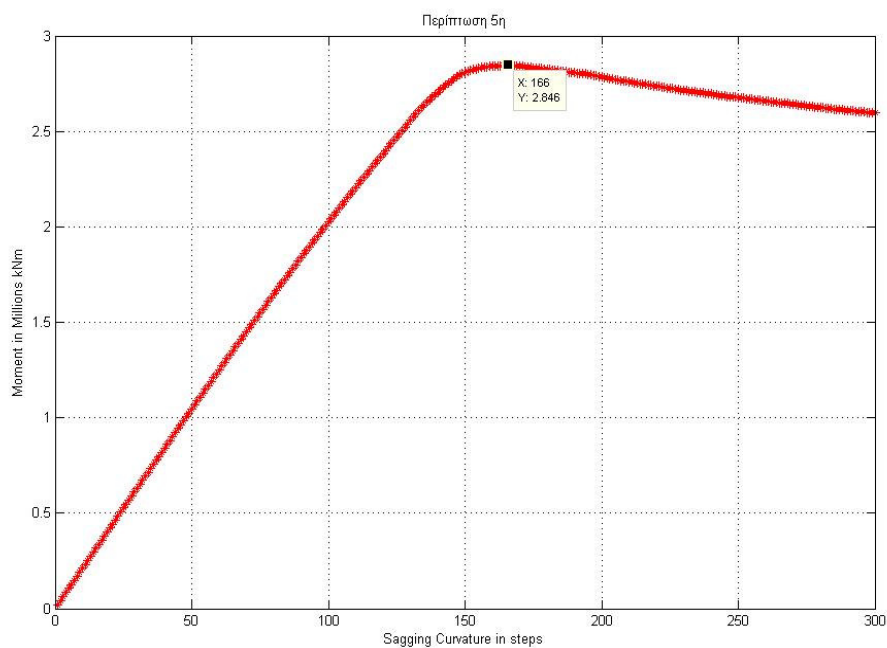
Τα αποτελέσματα ροπής κάμψεως σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στην εικόνα 5.4. Η τιμή ξεκινά από τα 2.985 εκατομμύρια kNm και αυξάνοντας την ακρίβεια το διάγραμμα διατηρεί τη μορφή του και η ροπή κάμψεως φτάνει τα 3.13 εκατομμύρια kNm.



Εικόνα 5.4

### 5.3.5 Περίπτωση 5<sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις

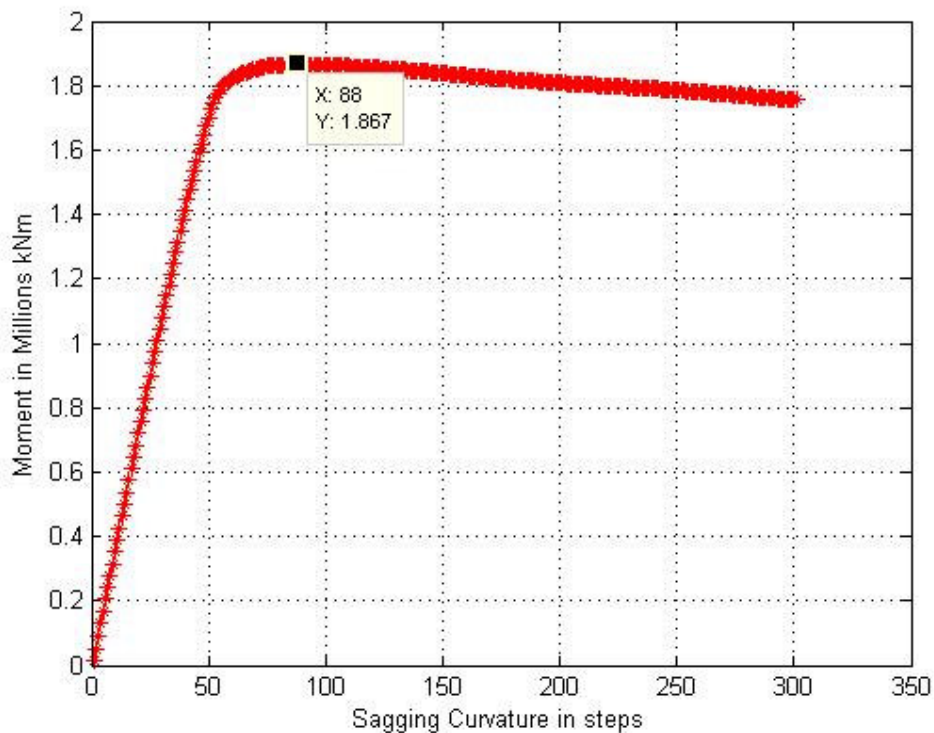
Τα αποτελέσματα ροπής κάμψεως σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στην εικόνα 5.5. Η τιμή ξεκινά από τα 2.841 εκατομμύρια kNm και αυξάνοντας την ακρίβεια το διάγραμμα διατηρεί τη μορφή του και η ροπή κάμψεως φτάνει τα 3.01 εκατομμύρια kNm.



Εικόνα 5.5

### 5.3.6 Περίπτωση 6<sup>η</sup> Εναπομένουσα Αντοχή-Τάσεις

Τα αποτελέσματα ροπής κάμψεως σε αυτή την περίπτωση φαίνονται στην εικόνα 5.6. Η τιμή ξεκινά από 1.867 και αυξάνοντας την ακρίβεια το διάγραμμα διατηρεί τη μορφή του και η ροπή κάμψεως φτάνει τα 1.878 εκατομμύρια kNm.



	Precision 10 <sup>(0)</sup>					Precision 10 <sup>(-6)</sup>				
	MAX Moment	Curvature STEP	Final Z	Final Y	Final Angle	MAX Moment	Curvature STEP	Final Z	Final Y	Final Angle
<b>Case 1</b>	3.29	168	5.8494	0	0					
<b>Case 2</b>	3.2624	162	5.5393	-0.0867	0.3559	3.2779	184	5.0059	-0.0821	1.3166E-05
<b>Case 3</b>	3.1225	163	5.3605	-0.3002	1.2305	3.19	201	4.6071	-0.2832	1.18E-05
<b>Case 4</b>	2.9851	165	5.1722	-0.5246	2.1521	3.13	227	4.2686	-0.4927	8.90E-06
<b>Case 5</b>	2.8461	166	5.0148	-0.7576	3.1203	3.0135	244	4.0684	-0.71	-2.92E-06
<b>Case 6</b>	1.8666	88	3.2575	-2.4169	10.4606	1.8784	53	3.199	-2.1355	-8.9852E-12

#### 5.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα-Σχολιασμός

Στον παραπάνω πίνακα μπορούν να αναγνωσθούν τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραπάνω βλαβών.

Γίνεται φανερό ότι καθώς μεγαλώνει η περιοχή της βλάβης και περισσότερα δομικά στοιχεία τίθενται εκτός τόσο περισσότερο μειώνεται η μέγιστη αντοχή της κατασκευής και η ροπή αδρανείας της διατομής. Καθώς προσπαθούμε να μειώσουμε την εμφανιζόμενη ροπή  $M_z$  μεταβάλλοντας τη γωνία κλίσεως του ουδέτερου άξονα με την οριζόντιο η ροπή κάμψης μεγαλώνει αλλά σε μάλλον μικρό βαθμό (μόλις 0.2 στην περίπτωση Νο5) καθώς μεγαλώνει το συνημίτονο της προαναφερθείσας γωνίας.

Σε όλες τις περιπτώσεις η HC1(R) (βλέπε Πίνακα 4.3) φτάνει πρώτη στο όριο των  $355 \text{ N/mm}^2$ , ακολουθεί η HC2(R) (στην έκτη περίπτωση) και μετά οι αντίστοιχες αριστερές γωνίες. Στα FlatBars οι τάσεις δεν υπερβαίνουν τα  $-213 \text{ N/mm}^2$  ενώ στα ordinary Elements τα  $345 \text{ N/mm}^2$ . Τα elements μέχρι και το Νο 19 καταπονούνται θλιπτικά στις αρχικές φάσεις ενώ σταδιακά καθώς κατεβαίνει και ο ουδέτερος άξονας σε θλιπτική φόρτιση μπαίνουν και τα Νο 20,21,22,23,55,56,57.

## **Βιβλιογραφία**

1. Intermediate Mechanics of Materials- J.R.Barber
2. Principles of Naval Architecture Vol I- S.N.A.M.E.
3. Introduction to Naval Architecture – Thomas C. Gilbert and Bruce Johnson
4. An Assessment of the Ultimate Plastic strength of the ship's aged hulls - Gennadiy Egorov and Vitaly Kozlyakov
5. Ultimate Strength and reliability assessment for the ship hull girders used in ISSC-2000 benchmark study - Hai Hong Sun and Yong Bai
6. Assessment of Ultimate Longitudinal strength of aged tankers - A.Ikeda, T.Tao, N.Yamamoto, M.Yoneda
7. Methodologies on hull girder ultimate strength assessment of FPSOs – X.Wang, H.Sun, T.Yao
8. Comparative study of ultimate hull girder strength of large double hull tankers – E.Qi, W.Cui, Z.Wan
9. Ultimate Strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading conditions-A case study Part 1 Nonlinear finite element modeling and ultimate hull girder capacity – H.Amlashi, T.Moan
10. Longitudinal strength of ships with accidental damages – G.Wang, Y.Chen, H.Zhang, H.Peng
11. Longitudinal strength reliability of a tanker hull accidentally grounded – R.M.Luis, A.P.Teixeira, C.Soaes
12. Ship Shaped Offshore Installations : Design,Building and Operation – J.K.Paik, A.K.Thayamballi
13. Rules for Building and Classing Steel Vessels 2008 Part 5A,5B – ABS Common Structural Rules
14. Τεχνική Μηχανική Τόμος I, II, III – Ε.Μαρκέτος
15. Αντοχή Υλικών – Schaum's Outline Series
16. Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου – Μ.Σαμουηλίδης
17. Σύγχρονο Μαθηματικό Λογισμικό MATLAB-MATHEMATICA – Γ.Παπαγεωργίου, Χ.Τσίτουρας

18. Εισαγωγή στη MATLAB – Γ.Γεωργίου, Χ.Ξενοφώντος



## Παράρτημα 1

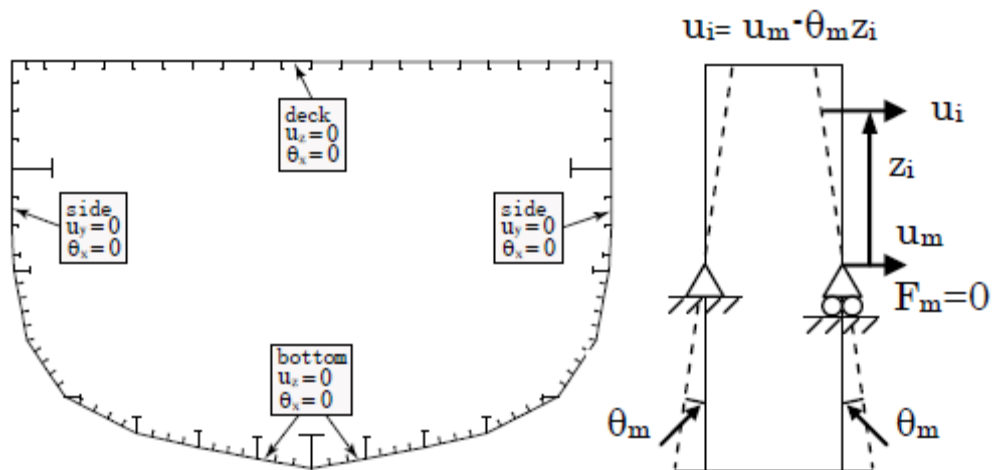
### APPLICATION OF IDEALIZED STRUCTURAL UNIT METHOD

Idealized Structural Unit Method (ISUM), in its original version developed by Ueda and Rashed (1984), is employed as an alternative approach to the progressive collapse analysis of a ship hull girder in longitudinal bending. ISUM is based on a matrix formulation similar to the conventional FE analysis, but it employs particular definitions of elements, which are of the same size scale as the structural members themselves.

An ISUMstiffened panel model, most recently developed by Fujikubo and Kaeding (2002), is used for the present study. A rectangular plate panel between stiffeners is modeled by a few ISUM plate elements. The nonlinear buckling behavior of the plate elements is idealized by an appropriate shape function assumed based on a collapse mode. The nonlinear contribution of the post-buckling deflection to the membrane strains is evaluated based on the theory of elastic large deflection analysis. Stiffeners are modelled by thin-walled beam-column elements that can cope with lateral torsional buckling behaviors. The rotational constraint offered by the bending stiffness of the plate is added to the torsional stiffness of the beam as distributed spring. More details about the ISUM-stiffened panel model can be found in Fujikubo and Kaeding (2002). A longitudinal hull girder segment extending half the frame spacing in the fore and aft directions from a transverse frame is taken as a region for the progressive collapse analysis of a hull girder cross section, as shown in Figure 4. A forced rotation is applied at the master nodes specified in the bothends cross sections assuming that the cross sections remain plane. The longitudinal displacement at the master nodes,  $u_m$ , is allowed under the zero axial load condition. The shift of the neutral axis due to buckling and yielding of structural members can therefore be automatically considered throughout the analysis. The incremental form of stiffness equation is solved by the iterative procedure using the Newton-Raphson method under arc-length control.

A more detailed procedure of the progressive collapse analysis is given by Pei and Fujikubo (2005). According to their study, the CPU time required for the ISUM analysis is about 1/80 of that for FE analysis.

Figure 4: Region and boundary conditions for ISUM analysis



## Παράρτημα 2

### **HULLST METHOD**

HULLST is an in-house code developed by Yao and Nikolov (1992) on the basis of the Smith's Method (1977). In the Smith's Method, the cross section of a hull girder is divided into small elements composed of a stiffener and attached plating. Before performing progressive collapse of a hull girder subjected to longitudinal bending moment, average stress-average strain relationships of individual elements under axial load are derived considering the influences of buckling and yielding. In the progressive collapse analysis on a hull girder, four assumptions are made, which are:

- (1) Plane cross section of a hull girder remains plane during progressive collapse.
- (2) Each element behaves according to the average stress average strain relationship which has been derived prior to progressive collapse analysis of a hull girder.
- (3) No interaction takes place between adjacent elements.
- (4) Bending moment is applied with respect to the instantaneous neutral axis of the cross section at every incremental step so that no axial force exists.

The validation of the assumption of plane cross section can be found in, e.g., Pei and Fujikubo (2005) and Yamamoto et al.(2007).

The Smith's Method is a rather simple method but is known to give relatively accurate ultimate hull girder strength. The accuracy of the calculated results depends on the used average stress-average strain relationships. Smith (1977) performed elasto-plastic large deflection analyses on stiffener elements and

plate elements separately, applying the FEM. In HULLST, average stress-average strain relationships of the stiffener elements with attached plating shown in Figure 3 are derived analytically according to the following procedure:

- (1) Combining the results of elastic large deflection analysis and rigid plastic mechanism analysis both in analytical forms, the average stress-average strain relationship of attached plating

is derived first. The plate part of the element is assumed to behave following this average stress-average strain relationship.

- (2) It is assumed that the whole cross section of the element is effective against vertical bending but only the stiffener part is effective for horizontal bending and torsion. Under this condition, flexural-torsional buckling of the element is considered as a beam-column.

- (3) A sinusoidal deflection mode is assumed for elastic buckling of the stiffener under axial load. After yielding condition is satisfied at a mid-span point,

plastic deflection component is introduced which gives a constant plastic curvature at the yielded middle part of the span.

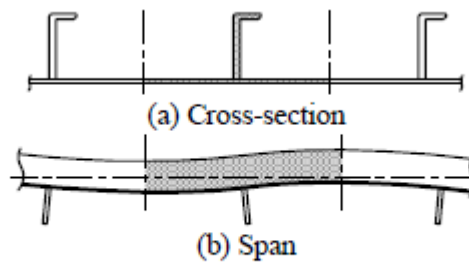


Figure 3: Stiffened plate element in HULLST

(4) Curvatures are increased at both ends of the element, and the combination of deflection and elastic/elastoplastic stress distributions at both ends is searched which satisfies equilibrium condition of forces in an axial direction and bending moments.

(5) For the specified curvature, average stress and average strain are calculated with the obtained axial force and deflection considering the influence of large deflection.

## Παράρτημα 3

Πληροφορίες Δομικών Στοιχείων

### Στοιχεία Ordinary Elements

	s in mm	tP in mm	bF in mm	tF in mm	hW in mm	tW in mm	A=εμβαδόν in mm <sup>2</sup>	CG-ως προς άξονα εφαπτόμενο στο s(attached plate)	Zn-Απόσταση από OA(mm)	ReH in N/mm <sup>2</sup>	Zi-Απόσταση από τον Πυθμένα(mm)	Yi-Απόσταση από Μέση Τομή(mm) -Αριστερό Κομμάτι	Γωνία ως προς άξονα ZZ(σε μοίρες)	Γωνία ως προς άξονα ZZ(σε μοίρες)- Αριστερό κομμάτι	
E1	800	20.25	90	12	250	7	18946	35.96566558	10280.03433	355	16514.03433	9950	-9950	5	175
E2	800	20.25	90	12	250	7	18946	35.96566558	10280.03433	355	16514.03433	10750	-10750	5	175
E3	800	20.25	90	12	250	7	18946	35.96566558	10280.03433	355	16514.03433	11550	-11550	5	175
E4	800	20.25	90	12	250	7	18946	35.96566558	10280.03433	355	16514.03433	12350	-12350	5	175
E5	800	20.25	90	12	250	7	18946	35.96566558	10280.03433	355	16514.03433	13150	-13150	5	175
E6	800	20.25	90	12	250	7	18946	35.96566558	10280.03433	355	16514.03433	13950	-13950	5	175
E7	737.5	20.25	90	12	250	7	17680.375	37.8154336	10278.18457	355	16512.18457	14718.75	-14718.75	5	175
E8	675	20.25	90	12	250	7	16414.75	39.95044663	10276.04955	355	16510.04955	15425	-15425	5	175
E9	800	17	90	12	200	7	15996	30.60490123	9802.504622	355	16036.50462	9842.820323	-9842.820323	150	30
E10	800	17	90	12	200	7	15996	30.60490123	9402.504622	355	15636.50462	10535.64065	-10535.64065	150	30
E11	800	14.5	90	12	200	7	13996	32.29965704	9003.972324	355	15237.97232	11228.46097	-11228.46097	150	30
E12	800	14.5	90	12	200	7	13996	32.29965704	8603.972324	315	14837.97232	11921.28129	-11921.28129	150	30
E13	800	14.5	90	12	200	7	13996	32.29965704	8203.972324	315	14437.97232	12614.10162	-12614.10162	150	30
E14	800	14.5	90	12	200	7	13996	32.29965704	7803.972324	315	14037.97232	13306.92194	-13306.92194	150	30
E15	800	13.25	90	12	200	7	12996	33.48691905	7386.956742	315	13620.95674	13999.74226	-13999.74226	150	30
E16	1295	13.25	90	12	200	7	19554.75	24.4773121	6997.197974	315	13231.19797	15121.24516	-15121.24516	150	30
E17	800	14.25	90	12	250	7	14146	41.15152693	7916	315	14150	16064.99152	-16064.99152	90	90
E18	800	14.25	90	12	250	7	14146	41.15152693	8716	315	14950	16064.99152	-16064.99152	90	90
E19	800	14.25	90	12	250	7	14146	41.15152693	9516	355	15750	16064.99152	-16064.99152	90	90

E20	1239.5	12.75	90	12	250	7	18549.625	32.21270561	-751.0923976	315	5482.907602	15139.20056	-15139.20056	45	135
E21	800	12.75	90	12	250	7	12946	43.3964545	-1559.000502	315	4674.999498	14262.7417	-14262.7417	45	135
E22	800	12.75	90	14	250	10	13820	50.35021708	-2363.917555	315	3870.082445	13697.05627	-13697.05627	45	135
E23	800	12.75	90	14	250	10	13820	50.35021708	-3163.917555	315	3070.082445	13131.37085	-13131.37085	45	135
E24	800	12.75	90	14	250	10	13820	50.35021708	-3963.917555	315	2270.082445	12565.68542	-12565.68542	45	135
E25	800	16.5	90	14	250	9	16584	43.50868307	-4537.508683	315	1696.491317	11200	-11200	0	0
E26	800	16.5	90	14	250	9	16584	43.50868307	-4537.508683	315	1696.491317	10400	-10400	0	0
E27	800	16.5	90	14	250	9	16584	43.50868307	-4537.508683	315	1696.491317	9600	-9600	0	0
E28	645	16.5	90	14	250	9	14026.5	49.93752005	-4543.93752	315	1690.06248	8800	-8800	0	0
E29	555	16.5	90	14	250	9	12541.5	54.87360962	-4548.87361	315	1685.12639	8000	-8000	0	0
E30	800	16.5	90	14	250	9	16584	43.50868307	-4537.508683	315	1696.491317	6400	-6400	0	0
E31	800	16.5	90	14	250	9	16584	43.50868307	-4537.508683	315	1696.491317	5600	-5600	0	0
E32	490	16.5	90	14	250	9	11469	59.2335208	-4553.233521	315	1680.766479	4800	-4800	0	0
E33	710	16.5	90	14	250	9	15099	46.97640572	-4540.976406	315	1693.023594	4000	-4000	0	0
E34	800	16.5	90	14	250	9	16584	43.50868307	-4537.508683	315	1696.491317	2400	-2400	0	0
E35	635	16.5	90	14	250	9	13861.5	50.43374635	-4544.433746	315	1689.566254	1600	-1600	0	0
E36	565	16.5	90	14	250	9	12706.5	54.26817967	-4548.26818	315	1685.73182	800	-800	0	0
E37	800	14.25	90	13	250	9	14703	45.2933585	-6188.706642	315	45.2933585	800	-800	0	0
E38	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	1600	-1600	0	0
E39	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	2400	-2400	0	0
E40	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	4000	-4000	0	0
E41	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	4800	-4800	0	0
E42	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	5600	-5600	0	0
E43	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	6400	-6400	0	0
E44	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	8000	-8000	0	0
E45	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	8800	-8800	0	0
E46	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	9600	-9600	0	0
E47	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	10400	-10400	0	0
E48	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	11200	-11200	0	0
E49	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	12800	-12800	0	0
E50	800	13.25	90	13	250	9	13903	46.87083723	-6187.129163	315	46.87083723	13600	-13600	0	0
E51	400	13.25	90	13	250	9	8603	71.66485528	-6162.335145	315	71.66485528	14400	-14400	0	0

E52	580	10	90	13	200	8	8466	580	-5654	315	580	16052.5626	-16052.5626	90	90
E53	580	10	90	13	200	8	8466	1160	-5074	315	1160	16052.5626	-16052.5626	90	90
E54	400	12.25	90	12	250	7	7646	1740	-4494	315	1740	16035.23019	-16035.23019	90	90
E55	800	12.25	90	12	250	7	12546	2540	-3694	315	2540	16060.52686	-16060.52686	90	90
E56	800	12.25	90	12	250	7	12546	3340	-2894	315	3340	16060.52686	-16060.52686	90	90
E57	1250	12.25	90	12	250	7	18058.5	4140	-2094	315	4140	16072.57635	-16072.57635	90	90

-1

### Στοιχεία HardCorner

	ba	ta	bb	tb	bc	tc	Εμβαδον	Zη-Απόσταση από ΟΑ(mm)	ReH in N/mm <sup>2</sup>	Zι-Απόσταση από τον Πυθμένα	Υι-Απόσταση από Μέση Τομή	Υι-Απόσταση από Μέση Τομή(mm)- Αριστερό Κομμάτι	lzcg	lycg
HC1	400	17	800	13	400	20.25	25300	9904.095166	355	16138.09517	9214.916388	-9214.916388	3458015430	329702802.1
HC2	400	14.25	337.5	20.25	0	0	12534.375	10203.65434	355	16437.65434	15931.89214	-15931.89214	218722113	667647204.9
HC3	2800	12.5	825	14.25	0	0	46756.25	6167.858876	315	12401.85888	15742.76452	-15742.76452	23741122780	1625041284
HC4	850	12.25	840	13.25	0	0	21542.5	-968.2458563	315	5265.754144	15803.01515	-15803.01515	1379196986	802309449.9
HC5	400	16.5	400	12.75	290	10	14600	-4473.400759	315	1760.599241	11958.98965	-11958.98965	177285749.3	463503720.8
HC6	400	16.5	400	16.5	290	10	16100	-4520.118012	315	1713.881988	7200	-7200	70613517.44	704024166.7
HC7	400	16.5	400	16.5	290	10	16100	-4520.118012	315	1713.881988	3200	-3200	70613517.44	704024166.7
HC8	0	0	400	16.5	290	10	9500	-4538.263158	315	1695.736842	138.9473684	-138.9473684	62833746.27	168613640.4
HC9	0	0	400	14.25	290	10	8600	-6185.104651	315	48.89534884	132.5581395	-132.5581395	60832627.17	152907887.6
HC10	400	13.25	400	13.25	290	10	13500	-6202.851852	315	31.14814815	3200	-3200	68353950.58	565357500
HC11	400	13.25	400	13.25	290	10	13500	-6202.851852	315	31.14814815	7200	-7200	68353950.58	565357500
HC12	400	13.25	400	13.25	290	10	13500	-6202.851852	315	31.14814815	12000	-12000	68353950.58	565357500
HC13	3307.3	13.5	10	13.5	10	13.5	44918.55	-5071.721436	315	1162.278564	13761.38574	-13761.38574	21458813807	20719767294

### Στοιχεία FlatBar

s	in mm	tp mm	in	hW mm	in	tW mm	in	Εμβαδόν in mm <sup>2</sup>	Zn-Απόσταση από ΟΑ(mm)	ReH in N/mm <sup>2</sup>	Zi-Απόσταση από τον Πυθμένα(mm)	Yi-Απόσταση από Μέση Τομή	Yi-Απόσταση από Μέση Τομή(mm)-Αριστερό Κομμάτι	Γωνία ως προς άξονα ZZ(σε μοίρες)
FB 1	400	16.5		140		7		7580	-4424	315	1810	8335	-8335	0
FB 2	400	16.5		140		7		7580	-4424	315	1810	4645	-4645	0
FB 3	400	16.5		140		7		7580	-4424	315	1810	1155	-1155	0
FB 4	580	10		100		10		6800	-5074	315	1160	0	0	90
FB 5	580	10		100		10		6800	-5654	315	580	0	0	90
FB 6	580	10		100		10		6800	-5074	315	1160	12000	-12000	90
FB 7	580	10		100		10		6800	-5654	315	580	12000	-12000	90
FB 8	580	10		100		10		6800	-5074	315	1160	3200	-3200	90
FB 9	580	10		100		10		6800	-5654	315	580	3200	-3200	90

### Στοιχεία Plate

	Length of Plate in mm	Thickness of Plate in mm	Εμβαδόν Plate σε mm <sup>2</sup>	Zi-Απόσταση από τον Πυθμένα(mm)	Yi-Απόσταση από Μέση Τομή(mm)	Yi-Απόσταση από Μέση Τομή(mm)-Αριστερό Κομμάτι
PL1	2940	12.25	36015	7760	16100	-16100
PL2	2540	12.5	31750	9680	16100	-16100



## Παράρτημα 4

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζονται τα προγράμματα ELEMENT\_Libraries.m, HC\_Libraries.m, FB\_Libraries.m τα οποία χρησιμοποιούνται για την δημιουργία των βιβλιοθηκών τάσεων παραμορφώσεων.

```
clc
clear all
%Elements Libraries
%-----
%-----General Data-----
%-----
E=2.06*10^5; %Young's Modulus in N/mm^2
zD=16.550;% Z,coordinate ,in m, of strength deck at side
Zab=16.551;%Section Modulus at bottom,in m^3
Zad=10.004;%Section Modulus at deck,in m^3
N=6.235;% Vetrical distance,in m, from the baseline to the
horizontal transverse neutral axis of the hull
I=103.193;%Moment of inertia,in m^4,of the hull transverse
section about it's horizontal neutral axis
ReH=235;%Min Yield stress,in N/mm^2
%-----Matrix Preallocation to speed up
programme-----
e=zeros(57,701);
sigmaCR1=zeros(57,701);
sigmaCR2=zeros(57,701);
sigmaCR3=zeros(57,701);
aaa=zeros(57,701);
sigmaE=zeros(57,701);
%-----
%-----Element E Dimentions-----
%-----
Edim=xlsread('E_ALT.xls');
for i=1:57
s=Edim(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
tP=Edim(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating attached
hW=Edim(i,5);% Height of web,in mm
tW=Edim(i,6);%Net thickness,in mm,of the web
bF=Edim(i,3);%Width,in mm,of the flange
tF=Edim(i,4);%Net thickness,in mm,of the flange
Astiff=(hW*tW+bF*tF)/100 ;%Net sectional area of the
stiffener,in cm^2, without attached plating
ReH=Edim(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
eY=ReH/E;%Strain at yield stress in the element

count=0 %#ok<NOPTS>
for x=-2:0.01:5
count=count+1;%Counter
e(i,count)=x;%Relative strain

if e(i,count)>=1
F=1;
elseif (-1<e(i,count)&& e(i,count)<1)
F=e(i,count);
```

```

else
    F=-1;
end

if F>0

%2.2.4 Beam column Buckling-----
-----
betaE=(1000*s*sqrt(e(i,count)*ReH/E))/tP;
% bE:Effective width,in m,of the attached shell plating
if betaE>1.25
    bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*s ;
else
    bE=s;
end
%Element Center of Gravity in cm
CG=(( (bE*1000)*tP*(tP/2)+(hW*tW)*(tP+hW/2)+(bF-
tW)*tF*(tP+hW-tF/2))/((bE*1000)*tP+hW*tW+(bF-
tW)*tF))/10;%use of bE NOT s
%AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners with
attached shell plating of width bE
AE=Astiff+bE*tP*10;
% bE1: Effective width,in m,of the attached shell plating
if betaE>1
    bE1=s/betaE ;
else
    bE1=s;
end
%IE: Net moment of inertia of ordinary stiffeners,in
cm^4,with attached shell plating of width bE1
Ix=((bE1*1000)*(tP^3)/3+((bF-tW)*(tF^3)/12+(bF-
tW)*tF*(tP+hW-
tF/2)^2)+(tW*(hW^3)/12+hW*tW*(tP+hW/2)^2))/10^4;
Steiner=AE*CG^2;
IE=Ix-Steiner;
if i<=19
    l=4; %Spacing,in m,of transverse webs IN WING TANK
else
    l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
end
sigmaE1=(pi)^2*E*IE*10^(-4)/(AE*l^2);%Euler column buckling
stress,in N/mm^2
if sigmaE1>ReH*e(i,count)/2
    sigmaC1=ReH*(1-ReH*e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical
stress,in N/mm^2
else
    sigmaC1=sigmaE1/e(i,count);
end

sigmaCR1(i,count)=F*sigmaC1*(Astiff+10*bE*tP)/(Astiff+10*s*
tP);
%2.2.5 Torsional buckling-----
-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
if betaE>1.25
    sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*ReH;
else
    sigmaCP=ReH;
end

```

```
%sigmae: Euler torsional buckling stress, in N/mm^2
Aw=hW*tW;
Af=bF*tF;
ef=hW+tF/2;
Ip=(Aw*hW^2/3+Af*ef^2)/10000;
It=hW*tW^3*(1-0.63*tW/hW)/30000+bF*tF^3*(1-
0.63*tF/bF)/30000;
Iw=Af*ef^2*bF^2*(Af+2.6*Aw)/(12000000*(Af+Aw));
a=l*1000;%
b=800;%
t=tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*hW/(3*tW^3))))
;
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress, in N/mm^2
    if sigmae>ReH*e(i,count)/2
        sigmaC2=ReH*(1-ReH*e(i,count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/e(i,count);
    end

sigmaCR2(i,count)=F*(Astiff*sigmaC2+10*s*tP*sigmaCP)/(Astif
f+10*s*tP);
%2.2.6 Web local buckling of flanged profiles-----
-----
betaW=hW*sqrt(e(i,count)*ReH/E)/tW;
    if betaW>1.25
        hWE=(2.25/betaW-1.25/betaW^2)*hW;%hWE:Effective
height, in mm, of the web
    else
        hWE=hW;
    end

sigmaCR3(i,count)=F*ReH*(10^3*bE*tP+hWE*tW+bF*tF)/(10^3*s*t
P+hW*tW+bF*tF);
%-----
-----
aaa(i,count)=min(sigmaCR1(i,count),sigmaCR2(i,count));
sigmaE(i,count)=min(aaa(i,count),sigmaCR3(i,count));%Final
stress of the element

    else
        sigmaE(i,count)=F*ReH;
    end

end
end
```

---

```
clc
clear all
%FlatBar Libraries
%-----
-----
%-----General Data-----
-----
```

```

E=2.06*10^5; %Young's Modulus in N/mm^2
zD=16.550;% Z,coordinate ,in m, of strength deck at side
Zab=16.551;%Section Modulus at bottom,in m^3
Zad=10.004;%Section Modulus at deck,in m^3
N=6.235;% Vetrical distance,in m, from the baseline to the
horizontal transverse neutral axis of the hull
I=103.193;%Moment of inertia,in m^4,of the hull transverse
section about it's horizontal neutral axis
ReH=235;%Min Yield stress,in N/mm^2
%-----Matrix Preallocation to speed up
programme-----
FB_sigmaCR1=zeros(9,701);
FB_sigmaCR2=zeros(9,701);
FB_sigmaCR4=zeros(9,701);
bbb=zeros(9,701);
FB_e=zeros(9,701);
FB_sigmaE=zeros(9,701);
%-----
FBdim=xlsread('FB_ALT.xls');
count=0;
for x=-2:0.01:5;
    count=count+1;
for i=1:9;
FB_s=FBdim(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
FB_tP=FBdim(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating
attached
FB_hW=FBdim(i,3);%Height of web,in mm
FB_tW=FBdim(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
FB_A=FBdim(i,5);%Total stiffener area in mm^2
%FB_z(i,1);%Element height,in m,from Neutral Axis
FB_Astiff=FB_hW*FB_tW/100 ;%Net sectional area of the
stiffener,in cm^2, without attached plating
FB_ReH=FBdim(i,7); %Min Yield stress,in N/mm^2
FB_eY=FB_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
%ei=x*FB_z(i,1);%Element strain
FB_e(i,count)=x;%Relative strain

        if FB_e(i,count)>=1
            F=1;
        elseif (-1<FB_e(i,count) &&FB_e(i,count)<1)
            F=FB_e(i,count);
        else
            F=-1;
        end

        if F>0
%-----2.2.4 Beam column Buckling of Flat Bar----
%-----
betaE=(1000*FB_s*sqrt(FB_e(i,count)*FB_ReH/E))/FB_tP;
        if betaE>1.25
            bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_s;%bE:Effective
width,in m,of the attached shell plating
        else
            bE=FB_s;
        end
%FlatBar Center of Gravity in cm
CG=((bE*1000*FB_tP*FB_tP/2+FB_hW*FB_tW*(FB_tP+FB_hW/2))/(bE
*1000*FB_tP+FB_hW*FB_tW))/10;%use of bE NOT s

```

```

FB_AE=FB_Astiff+bE*FB_tP*10;
%FB_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners
with attached shell plating of width bE
    if betaE>1
        bE1=FB_s/betaE;%bE1: Effective width,in m,of the
attached shell plating
    else
        bE1=FB_s;
    end
%FB_IE: Net moment of inertia of FlatBar stiffeners,in
cm^4,with attached shell plating of width bE1
FB_Ix=(bE1*1000*(FB_tP^3)/3+FB_tW*(FB_hW^3)/12+FB_hW*FB_tW*
(FB_tP+FB_hW/2)^2)/10^4;
Steiner=FB_AE*CG^2;
FB_IE=FB_Ix-Steiner;
l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
sigmaE1=(pi)^2*E*FB_IE*10^(-4)/(FB_AE*l^2);%Euler column
buckling stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC1=FB_ReH*(1-
FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical stress,in
N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR1(i,count)=F*sigmaC1*(FB_Astiff+10*bE*FB_tP)/(FB_
Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_ReH;
    else
        sigmaCP=FB_ReH;
    end
%sigmae: Euler torsional buckling stress,in N/mm^2
Ip=FB_hW^3*FB_tW/30000;
It=FB_hW*FB_tW^3*(1-0.63*FB_tW/FB_hW)/30000;
Iw=FB_hW^3*FB_tW^3/36000000;
a=1*1000;%CHECK it
b=800;%CHECK it
t=FB_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*FB_hW/(3*FB_tW
^3)))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmae>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC2=FB_ReH*(1-FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR2(i,count)=F*(FB_Astiff*sigmaC2+10*FB_s*FB_tP*sig
maCP)/(FB_Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%-----2.2.7 Web local buckling of flat bars-----
betaE=(1000*FB_s*sqrt(FB_e(i,count)*FB_ReH/E))/FB_tP;
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_ReH ;
    else

```

```

        sigmaCP=FB_ReH;
    end
    sigmaE4=160000*(FB_tW/FB_hW)^2;%sigmaE4: Local Euler
    buckling stress,in N/mm^2
    %sigmaC4: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmaE4>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC4=FB_ReH*(1-FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmaE4));
    else
        sigmaC4=sigmaE4/FB_e(i,count);
    end
    FB_sigmaCR4(i,count)=F*(10*FB_s*FB_tP*sigmaCP+FB_Astiff*sig
    maC4)/(FB_Astiff+10*FB_s*FB_tP);
    %-----FINAL__STRESS-----
    bbb(i,count)=min(FB_sigmaCR1(i,count),FB_sigmaCR2(i,count))
    ;
    FB_sigmaE(i,count)=min(bbb(i,count),FB_sigmaCR4(i,count));%
    Final stress of the Flat Bar,in N/mm^2
    else
        FB_sigmaE(i,count)=F*FB_ReH;
    end

end
end

-----
clear all
clc
% HardCorner Libraries
HCdim=xlsread('HC_ALT.xls');
z1=16.550;%Element height,in m,from Bottom
E=2.06*10^5;%Young's Modulus in N/mm^2
ReH=355*0.72;%Min Yield stress,in N/mm^2,of steel Grade
AH36 with k factor 0.72
eY=ReH/E;%Strain at yield stress in the element
zD=16.550;% Z,coordinate ,in m, of strength deck at side
N=6.156;% Vetrical distance,in m, from the baseline to the
horizontal transverse neutral axis of the hull
Dx=0.01*ReH/(E*(zD-N));%Initial curvature and Step
Zab=16.535;%Section Modulus at bottom,in m^3
Zad=9.793;%Section Modulus at deck,in m^3
I=101.787;%Moment of inertia,in m^4,of the hull transverse
section about it's horizontal neutral axis
HC_e=zeros(13,701);
HC_sigmaE=zeros(13,701);
count=0;
for x=-2:0.01:5
    count=count+1;
    for i=1:13
        %HC_A=HCdim(i,1);%Total Hard corner Area in mm^2
        %HC_z(i,1);%Hard Corner height,in m,from Neutral Axis
        HC_ReH=HCdim(i,3);%Min Yield stress,in N/mm^2
        HC_eY=HC_ReH/E;%Strain at yield stress in the Hard
Corner
        %ei=x*HC_z(i,1);%Element strain
        HC_e(i,count)=x;%ei/HC_eY;%Relative strain

        if HC_e(i,count)>=1
            F=1;
        elseif (-1<HC_e(i,count) && HC_e(i,count)<1)

```

```
        F=HC_e(i, count);  
    else  
        F=-1;  
    end  
  
    HC_sigmaE(i, count)=F*HC_ReH; %Final stress of the Hard  
    Corner, in N/mm^2  
    end  
end
```

## Παράρτημα 5

Σε αυτό το παράρτημα παρουσιάζεται ολόκληρος ο κώδικας των προγραμμάτων SAG.m και HOG.m

### SAG.m

```
clc
clear all
%Sagging Condition
%-----
%-----General Data-----
%-----
E=2.06*10^5; %Young's Modulus in N/mm^2
zD=16.550;% Z,coordinate ,in m, of strength deck at side
Zab=16.551;%Section Modulus at bottom,in m^3
Zad=10.004;%Section Modulus at deck,in m^3
N=6.235;% Vetical distance,in m, from the baseline to the
horizontal transverse neutral axis of the hull
I=103.193;%Moment of inertia,in m^4,of the hull transverse
section about it's horizontal neutral axis
ReH=235;%Min Yield stress,in N/mm^2
Dx=0.01*ReH/(E*(zD-N));%Initial curvature and Step
M1=1000*ReH*Zab;
M2=1000*ReH*Zad;
M=min(M1,M2);
FinalCurvature=0.003*M/(E*I);%FinalCurvature
Edim=xlsread('E_ALT.xls');
FBdim=xlsread('FB_ALT.xls');
HCdim=xlsread('HC_ALT.xls');
count=0;
mom=0;
E_z=Edim(:,9)/1000;
FB_z=FBdim(:,6)/1000;
HC_z=HCdim(:,2)/1000;
PL_z=-N+(5840+6510/2)/1000;
NeutralAxisFinal=N;
%-----Matrix Preallocation to speed up
programme-----
TotalForce=zeros(300,1000);
Curvature=zeros(1,300);
TotalMoment=zeros(1,300);
Total_E_Moment=zeros(1,300);
Total_FB_Moment=zeros(1,300);
Total_HC_Moment=zeros(1,300);
PL_Moment=zeros(1,300);
NeutralAxis=zeros(1,300);
E_e=zeros(57,300);
E_sigmaCR1=zeros(57,300);
E_sigmaCR2=zeros(57,300);
E_sigmaCR3=zeros(57,300);
FB_sigmaCR1=zeros(9,300);
FB_sigmaCR2=zeros(9,300);
FB_sigmaCR4=zeros(9,300);
aaa=zeros(57,300);
bbb=zeros(9,300);
E_sigmaE=zeros(57,300);
Force_Element=zeros(1,57);
```



```

TotalForceElement=zeros(1,300);
FB_e=zeros(9,300);
FB_sigmaE=zeros(9,300);
Force_FlatBar=zeros(1,9);
TotalForceFlatBar=zeros(1,300);
HC_e=zeros(13,300);
HC_sigmaE=zeros(13,300);
Force_HardCorner=zeros(1,13);
TotalForceHardCorner=zeros(1,300);
PL_e=zeros(1,300);
PL_sigmaE=zeros(1,300);
TotalForcePlate=zeros(1,300);
E_Moment=zeros(57,1);
FB_Moment=zeros(9,1);
HC_Moment=zeros(13,1);
%-----
-----
for x=Dx:Dx:FinalCurvature+Dx%Curvature
    count=count+1;%Counter
    upNeutralAxis=0;
    downNeutralAxis=0;
    stepNA=0.01;%Neutral axis position change to establish
equilibrium

    for na=1:1001
%-----
-----
%Element Forces-----
-----
for i=1:57
E_s=Edim(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
E_tP=Edim(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating
attached
E_hW=Edim(i,5);% Height of web,in mm
E_tW=Edim(i,6);%Net thickness,in mm,of the web
E_bF=Edim(i,3);%Width,in mm,of the flange
E_tF=Edim(i,4);%Net thickness,in mm,of the flange
%E_z(i,1);%Element height,in m,from NA
E_A=Edim(i,7);%Total stiffener area in mm^2
E_Astiff=(E_hW*E_tW+E_bF*E_tF)/100 ;%Net sectional area of
the stiffener,in cm^2, without attached plating
E_ReH=Edim(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
E_eY=E_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*E_z(i,1);%Element strain
E_e(i,count)=ei/E_eY;%Relative strain

    if E_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<E_e(i,count)&& E_e(i,count)<1)
        F=E_e(i,count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0

%-----2.2.4 Beam column Buckling-----
-----
betaE=(1000*E_s*sqrt(E_e(i,count)*E_ReH/E))/E_tP;

```

```

% bE:Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_s ;
    else
        bE=E_s;
    end

%Element Center of Gravity in cm
CG=(( (bE*1000)*E_tP*(E_tP/2)+(E_hW*E_tW)*(E_tP+E_hW/2)+(E_bF-E_tW)*E_tF*(E_tP+E_hW-E_tF/2)))/(bE*1000*E_tP+E_hW*E_tW+(E_bF-E_tW)*E_tF))/10;%use of bE NOT s

%E_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners with attached shell plating of width bE
E_AE=E_Astiff+bE*E_tP*10;

% bE1: Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1
        bE1=E_s/betaE ;
    else
        bE1=E_s;
    end

%E_IE: Net moment of inertia of ordinary stiffeners,in cm^4,with attached shell plating of width bE1
E_Ix=((bE1*1000)*(E_tP^3)/3+((E_bF-E_tW)*(E_tF^3)/12+(E_bF-E_tW)*E_tF*(E_tP+E_hW-E_tF/2)^2)+(E_tW*(E_hW^3)/12+E_hW*E_tW*(E_tP+E_hW/2)^2))/10^4;
Steiner=E_AE*CG^2;
E_IE=E_Ix-Steiner;
if i<=19
    l=4; %Spacing,in m,of transverse webs IN WING TANK
else
    l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
end
sigmaE1=(pi)^2*E*E_IE*10^(-4)/(E_AE*l^2);%Euler column buckling stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>E_ReH*E_e(i,count)/2
        sigmaC1=E_ReH*(1-E_ReH*E_e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical stress,in N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/E_e(i,count);
    end

E_sigmaCR1(i,count)=F*sigmaC1*(E_Astiff+10*bE*E_tP)/(E_Astiff+10*E_s*E_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_ReH;
    else
        sigmaCP=E_ReH;
    end

%sigmae: Euler torsional buckling stress,in N/mm^2
Aw=E_hW*E_tW;
Af=E_bF*E_tF;
ef=E_hW+E_tF/2;
Ip=(Aw*E_hW^2/3+Af*ef^2)/10000;
It=E_hW*E_tW^3*(1-0.63*E_tW/E_hW)/30000+E_bF*E_tF^3*(1-0.63*E_tF/E_bF)/30000;

```

```

Iw=Af*ef^2*E_bF^2*(Af+2.6*Aw)/(12000000*(Af+Aw));
a=1*1000;%
b=800;%
t=E_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*E_hW/(3*E_tW^3
)))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmae>E_ReH*E_e(i,count)/2
        sigmaC2=E_ReH*(1-E_ReH*E_e(i,count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/E_e(i,count);
    end

E_sigmaCR2(i,count)=F*(E_Astiff*sigmaC2+10*E_s*E_tP*sigmaCP
)/(E_Astiff+10*E_s*E_tP);
%-----2.2.6 Web local buckling of flanged
profiles-----
betaW=E_hW*sqrt(E_e(i,count)*E_ReH/E)/E_tW;
    if betaW>1.25
        hWE=(2.25/betaW-1.25/betaW^2)*E_hW;%hWE:Effective
height,in mm,of the web
    else
        hWE=E_hW;
    end

E_sigmaCR3(i,count)=F*E_ReH*(10^3*bE*E_tP+hWE*E_tW+E_bF*E_t
F)/(10^3*E_s*E_tP+E_hW*E_tW+E_bF*E_tF);
%_____FINAL__STRESS_____
aaa(i,count)=min(E_sigmaCR1(i,count),E_sigmaCR2(i,count));
E_sigmaE(i,count)=min(aaa(i,count),E_sigmaCR3(i,count));%Fi
nal stress of the element,in N/mm^2
    else
        E_sigmaE(i,count)=F*E_ReH;
    end

Force_Element(i)=E_sigmaE(i,count)*E_A;
E_Moment(i)=Force_Element(i)*E_z(i,1);
end
TotalForceElement(count)=sum(Force_Element);
Total_E_Moment(count)=2*sum(E_Moment);
%-----
%FB Forces-----
%-----
for i=1:9;
FB_s=FBdim(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
FB_tP=FBdim(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating
attached
FB_hW=FBdim(i,3);%Height of web,in mm
FB_tW=FBdim(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
FB_A=FBdim(i,5);%Total stiffener area in mm^2
%FB_z(i,1);%Element height,in m,from Neutral Axis
FB_Astiff=FB_hW*FB_tW/100 ;%Net sectional area of the
stiffener,in cm^2, without attached plating
FB_ReH=FBdim(i,7); %Min Yield stress,in N/mm^2
FB_eY=FB_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*FB_z(i,1);%Element strain
FB_e(i,count)=ei/FB_eY;%Relative strain

```

```

    if FB_e(i, count) >= 1
        F=1;
    elseif (-1 < FB_e(i, count) && FB_e(i, count) < 1)
        F=FB_e(i, count);
    else
        F=-1;
    end

    if F > 0
%-----2.2.4 Beam column Buckling of Flat Bar-----
%-----
betaE=(1000*FB_s*sqrt(FB_e(i, count)*FB_ReH/E))/FB_tP;
    if betaE > 1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_s; %bE: Effective
width, in m, of the attached shell plating
    else
        bE=FB_s;
    end
%FlatBar Center of Gravity in cm
CG=( (bE*1000*FB_tP*FB_tP/2+FB_hW*FB_tW*(FB_tP+FB_hW/2)) / (bE
*1000*FB_tP+FB_hW*FB_tW) ) / 10; %use of bE NOT s
FB_AE=FB_Astiff+bE*FB_tP*10;
%FB_AE: Net sectional area, in cm^2, of ordinary stiffeners
with attached shell plating of width bE
    if betaE > 1
        bE1=FB_s/betaE; %bE1: Effective width, in m, of the
attached shell plating
    else
        bE1=FB_s;
    end
%FB_IE: Net moment of inertia of FlatBar stiffeners, in
cm^4, with attached shell plating of width bE1
FB_Ix=(bE1*1000*(FB_tP^3)/3+FB_tW*(FB_hW^3)/12+FB_hW*FB_tW*
(FB_tP+FB_hW/2)^2)/10^4;
Steiner=FB_AE*CG^2;
FB_IE=FB_Ix-Steiner;
l=2.4; %Spacing, in m, of transverse webs IN bottom TANK
sigmaE1=(pi)^2*E*FB_IE*10^(-4)/(FB_AE*l^2); %Euler column
buckling stress, in N/mm^2
    if sigmaE1 > FB_ReH*FB_e(i, count)/2
        sigmaC1=FB_ReH*(1-
FB_ReH*FB_e(i, count)/(4*sigmaE1)); %Critical stress, in
N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/FB_e(i, count);
    end
FB_sigmaCR1(i, count)=F*sigmaC1*(FB_Astiff+10*bE*FB_tP)/(FB_
Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating, in N/mm^2
    if betaE > 1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_ReH;
    else
        sigmaCP=FB_ReH;
    end
%sigmae: Euler torsional buckling stress, in N/mm^2
Ip=FB_hW^3*FB_tW/30000;
It=FB_hW*FB_tW^3*(1-0.63*FB_tW/FB_hW)/30000;

```

```

Iw=FB_hW^3*FB_tW^3/36000000;
a=1*1000;%CHECK it
b=800;%CHECK it
t=FB_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*FB_hW/(3*FB_tW
^3)))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmae>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC2=FB_ReH*(1-FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR2(i,count)=F*(FB_Astiff*sigmaC2+10*FB_s*FB_tP*sig
maCP)/(FB_Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%-----2.2.7 Web local buckling of flat bars-----
-----
betaE=(1000*FB_s*sqrt(FB_e(i,count)*FB_ReH/E))/FB_tP;
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_ReH ;
    else
        sigmaCP=FB_ReH;
    end
sigmaE4=160000*(FB_tW/FB_hW)^2;%sigmaE4: Local Euler
buckling stress,in N/mm^2
%sigmaC4: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmaE4>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC4=FB_ReH*(1-FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmaE4));
    else
        sigmaC4=sigmaE4/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR4(i,count)=F*(10*FB_s*FB_tP*sigmaCP+FB_Astiff*sig
maC4)/(FB_Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%_____FINAL__STRESS_____
bbb(i,count)=min(FB_sigmaCR1(i,count),FB_sigmaCR2(i,count))
;
FB_sigmaE(i,count)=min(bbb(i,count),FB_sigmaCR4(i,count));%
Final stress of the Flat Bar,in N/mm^2
    else
        FB_sigmaE(i,count)=F*FB_ReH;
    end
end
Force_FlatBar(i)=FB_sigmaE(i,count)*FB_A;
FB_Moment(i)=Force_FlatBar(i)*FB_z(i,1);
end
TotalForceFlatBar(count)=sum(Force_FlatBar);
Total_FB_Moment(count)=2*sum(FB_Moment);%-FB_Moment(4)-
FB_Moment(5);
%-----
-----
%Hard Corners Forces-----
-----
for i=1:13
    HC_A=HCdim(i,1);%Total Hard corner Area in mm^2
    %HC_z(i,1);%Hard Corner height,in m,from Neutral Axis
    HC_ReH=HCdim(i,3);%Min Yield stress,in N/mm^2
    HC_eY=HC_ReH/E;%Strain at yield stress in the Hard
Corner
    ei=x*HC_z(i,1);%Element strain
    HC_e(i,count)=ei/HC_eY;%Relative strain

```

```

    if HC_e(i, count) >= 1
        F=1;
    elseif (-1 < HC_e(i, count) && HC_e(i, count) < 1)
        F=HC_e(i, count);
    else
        F=-1;
    end

    HC_sigmaE(i, count)=F*HC_ReH; %Final stress of the Hard
Corner, in N/mm^2
    Force_HardCorner(i)=HC_sigmaE(i, count)*HC_A;
    HC_Moment(i)=Force_HardCorner(i)*HC_z(i, 1);
end
TotalForceHardCorner(count)=sum(Force_HardCorner);
Total_HC_Moment(count)=2*sum(HC_Moment); %-HC_Moment(8)-
HC_Moment(9);
%-----
%-----
%Plate Forces-----
%-----
PL_tP=12.25; %Net thickness, in mm, of the plating (the
smaller of the two)
PL_s=0.8; %Plate breadth, in m, taken as the Frame spacing(X
dimension)
%CHAPTER 6 APPENDIX 1 Equivalent length
%b1=3390-450=2940 with 14mm thickness reduced to 12.25mm
%b2=3940-1400=2540 with 14.5mm thickness reduced to 12.5mm
%b'=b1+b2*(t1/t2)^1.5=5404--->l
l=5.404; %Longer side of the plate, in m(Z dimension)
PL_A=PL_tP*1*10^3; %Area of plate in mm^2
%PL_z=(5840+6510/2)/1000; %Element height, in m, from Bottom
PL_ReH=355; %Min Yield stress, in N/mm^2, with k factor 0.72
PL_eY=PL_ReH/E; %Strain at yield stress in the element
ei=x*PL_z; %Element strain
PL_e(count)=ei/PL_eY; %Relative strain

    if PL_e(count) >= 1
        F=1;
    elseif (-1 < PL_e(count) && PL_e(count) < 1)
        F=PL_e(count);
    else
        F=-1;
    end

    if F > 0
        betaE=10^3*PL_s*sqrt(PL_e(count)*PL_ReH/E)/PL_tP;
        sigmaCR5a=F*PL_ReH;
        sigmaCR5b=F*PL_ReH*(PL_s/l*(2.25/betaE-
1.25/betaE^2)+0.1*(1-PL_s/l)*(1+1/betaE^2)^2);
        sigmaCR5=min(sigmaCR5a, sigmaCR5b);
        PL_sigmaE(count)=sigmaCR5;
    else
        PL_sigmaE(count)=F*PL_ReH;
    end
TotalForcePlate(count)=PL_sigmaE(count)*PL_A;
PL_Moment(count)=2*TotalForcePlate(count)*PL_z;
%-----
%-----

```

```
TotalForce(count,na)=2*(TotalForceElement(count)+TotalForceFlatBar(count)+TotalForcePlate(count)+TotalForceHardCorner(count));
if abs(TotalForce(count,na))<=50;
    mom=mom+1;

TotalMoment(mom)=(Total_E_Moment(count)+Total_FB_Moment(count)+Total_HC_Moment(count)+PL_Moment(count))/10^9;%Total Moment in millions kNm
Curvature(mom)=x;
NeutralAxisFinal=NeutralAxisFinal;
jolly=1 %#ok<NOPTS>
break
elseif TotalForce(count,na)>50
E_z=E_z-stepNA;
FB_z=FB_z-stepNA;
HC_z=HC_z-stepNA;
PL_z=PL_z-stepNA;
NeutralAxisFinal=NeutralAxisFinal+stepNA;
upNeutralAxis=1;
elseif TotalForce(count,na)<-50
E_z=E_z+stepNA;
FB_z=FB_z+stepNA;
HC_z=HC_z+stepNA;
PL_z=PL_z+stepNA;
NeutralAxisFinal=NeutralAxisFinal-stepNA;
downNeutralAxis=1;
end
if (upNeutralAxis>=1 && downNeutralAxis>=1)
    stepNA=stepNA/2;
end
if NeutralAxisFinal<0
    jolly=-1;
    break
end
if NeutralAxisFinal>16.550
    jolly=16.550;
    break
end
end
if NeutralAxisFinal<0
    jolly=-1 %#ok<NOPTS>
    warning('Neutral Axis out of bounds') %#ok<WNTAG>
    break
end
if NeutralAxisFinal>16.550
    jolly=16.550 %#ok<NOPTS>
    warning('Neutral Axis out of bounds') %#ok<WNTAG>
    break
end
end

end

%-----
%-----M-x Curve Creation-----
figure
plot(Curvature>TotalMoment,'--rs')
xlabel('Sagging Curvature')
ylabel({'Moment in Millions kNm';'Neutral Axis,in m,from bottom'})
```

```
grid on
hold on
plot(Curvature,NeutralAxis,'--h')
figure
plot(Curvature>TotalMoment,'--rs')
xlabel('Curvature')
ylabel('Moment in Millions kNm')
grid on
figure
plot(Curvature,NeutralAxis,'--h')
xlabel('Curvature')
ylabel('Neutral Axis,in m,from bottom')
grid on
```

---

## HOG.m

```
clc
clear all
%Hogging Condition
%-----
%-----General Data-----
E=2.06*10^5; %Young's Modulus in N/mm^2
zD=16.550;% Z,coordinate ,in m, of strength deck at side
Zab=16.551;%Section Modulus at bottom,in m^3
Zad=10.004;%Section Modulus at deck,in m^3
N=6.235;% Vetrical distance,in m, from the baseline to the
horizontal transverse neutral axis of the hull
I=103.193;%Moment of inertia,in m^4,of the hull transverse
section about it's horizontal neutral axis
ReH=235;%Min Yield stress,in N/mm^2
Dx=0.01*ReH/(E*(zD-N));%Initial curvature and Step
M1=1000*ReH*Zab;
M2=1000*ReH*Zad;
M=min(M1,M2);
FinalCurvature=0.003*M/(E*I);%FinalCurvature
Edim=xlsread('E_ALT.xls');
FBdim=xlsread('FB_ALT.xls');
HCdim=xlsread('HC_ALT.xls');
count=0;
mom=0;
E_z=Edim(:,9)/1000;
FB_z=FBdim(:,6)/1000;
HC_z=HCdim(:,2)/1000;
PL_z=-N+(5840+6510/2)/1000;
NeutralAxisFinal=N;
%-----Matrix Preallocation to speed up
programme-----
TotalForce=zeros(1200,1000);
Curvature=zeros(1,1200);
TotalMoment=zeros(1,1200);
Total_E_Moment=zeros(1,1200);
Total_FB_Moment=zeros(1,1200);
Total_HC_Moment=zeros(1,1200);
```



```

PL_Moment=zeros(1,1200);
NeutralAxis=zeros(1,1200);
E_e=zeros(57,1200);
E_sigmaCR1=zeros(57,1200);
E_sigmaCR2=zeros(57,1200);
E_sigmaCR3=zeros(57,1200);
FB_sigmaCR1=zeros(9,1200);
FB_sigmaCR2=zeros(9,1200);
FB_sigmaCR4=zeros(9,1200);
aaa=zeros(57,1200);
bbb=zeros(9,1200);
E_sigmaE=zeros(57,1200);
Force_Element=zeros(1,57);
TotalForceElement=zeros(1,1200);
FB_e=zeros(9,1200);
FB_sigmaE=zeros(9,1200);
Force_FlatBar=zeros(1,9);
TotalForceFlatBar=zeros(1,1200);
HC_e=zeros(13,1200);
HC_sigmaE=zeros(13,1200);
Force_HardCorner=zeros(1,13);
TotalForceHardCorner=zeros(1,1200);
PL_e=zeros(1,1200);
PL_sigmaE=zeros(1,1200);
TotalForcePlate=zeros(1,1200);
E_Moment=zeros(57,1);
FB_Moment=zeros(9,1);
HC_Moment=zeros(13,1);
%-----
for x=-Dx:-Dx:-4*FinalCurvature-Dx%Curvature
    count=count+1;%Counter
    upNeutralAxis=0;
    downNeutralAxis=0;
    stepNA=0.01;%Neutral axis position change to establish
equilibrium

    for na=1:1001
%-----
%Element Forces-----
for i=1:57
E_s=Edim(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
E_tP=Edim(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating
attached
E_hW=Edim(i,5);% Height of web,in mm
E_tW=Edim(i,6);%Net thickness,in mm,of the web
E_bF=Edim(i,3);%Width,in mm,of the flange
E_tF=Edim(i,4);%Net thickness,in mm,of the flange
%E_z(i,1);%Element height,in m,from NA
E_A=Edim(i,7);%Total stiffener area in mm^2
E_Astiff=(E_hW*E_tW+E_bF*E_tF)/100 ;%Net sectional area of
the stiffener,in cm^2, without attached plating
E_ReH=Edim(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
E_eY=E_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*E_z(i,1);%Element strain
E_e(i,count)=ei/E_eY;%Relative strain

    if E_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<E_e(i,count)&& E_e(i,count)<1)

```

```

        F=E_e(i, count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0

%-----2.2.4 Beam column Buckling-----
betaE=(1000*E_s*sqrt(E_e(i, count)*E_ReH/E))/E_tP;
% bE:Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_s ;
    else
        bE=E_s;
    end
%Element Center of Gravity in cm
CG=((bE*1000)*E_tP*(E_tP/2)+(E_hW*E_tW)*(E_tP+E_hW/2)+(E_b
F-E_tW)*E_tF*(E_tP+E_hW-
E_tF/2))/(bE*1000*E_tP+E_hW*E_tW+(E_bF-E_tW)*E_tF)/10;%use
of bE NOT s
%E_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners
with attached shell plating of width bE
E_AE=E_Astiff+bE*E_tP*10;
% bE1: Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1
        bE1=E_s/betaE ;
    else
        bE1=E_s;
    end
%E_IE: Net moment of inertia of ordinary stiffeners,in
cm^4,with attached shell plating of width bE1
E_Ix=((bE1*1000)*(E_tP^3)/3+((E_bF-E_tW)*(E_tF^3)/12+(E_bF-
E_tW)*E_tF*(E_tP+E_hW-
E_tF/2)^2)+(E_tW*(E_hW^3)/12+E_hW*E_tW*(E_tP+E_hW/2)^2))/10
^4;
Steiner=E_AE*CG^2;
E_IE=E_Ix-Steiner;
if i<=19
    l=4;%Spacing,in m,of transverse webs IN WING TANK
else
    l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
end
sigmaE1=(pi)^2*E*E_IE*10^(-4)/(E_AE*l^2);%Euler column
buckling stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>E_ReH*E_e(i, count)/2
        sigmaC1=E_ReH*(1-
E_ReH*E_e(i, count)/(4*sigmaE1));%Critical stress,in N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/E_e(i, count);
    end

E_sigmaCR1(i, count)=F*sigmaC1*(E_Astiff+10*bE*E_tP)/(E_Asti
ff+10*E_s*E_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_ReH;
    else
        sigmaCP=E_ReH;
    end

```

```

end
%sigmae: Euler torsional buckling stress,in N/mm^2
Aw=E_hW*E_tW;
Af=E_bF*E_tF;
ef=E_hW+E_tF/2;
Ip=(Aw*E_hW^2/3+Af*ef^2)/10000;
It=E_hW*E_tW^3*(1-0.63*E_tW/E_hW)/30000+E_bF*E_tF^3*(1-
0.63*E_tF/E_bF)/30000;
Iw=Af*ef^2*E_bF^2*(Af+2.6*Aw)/(12000000*(Af+Aw));
a=1*1000;%
b=800;%
t=E_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*E_hW/(3*E_tW^3
)))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
if sigmae>E_ReH*E_e(i,count)/2
sigmaC2=E_ReH*(1-E_ReH*E_e(i,count)/(4*sigmae));
else
sigmaC2=sigmae/E_e(i,count);
end

E_sigmaCR2(i,count)=F*(E_Astiff*sigmaC2+10*E_s*E_tP*sigmaCP
)/(E_Astiff+10*E_s*E_tP);
%-----2.2.6 Web local buckling of flanged
profiles-----
betaW=E_hW*sqrt(E_e(i,count)*E_ReH/E)/E_tW;
if betaW>1.25
hWE=(2.25/betaW-1.25/betaW^2)*E_hW;%hWE:Effective
height,in mm,of the web
else
hWE=E_hW;
end

E_sigmaCR3(i,count)=F*E_ReH*(10^3*bE*E_tP+hWE*E_tW+E_bF*E_t
F)/(10^3*E_s*E_tP+E_hW*E_tW+E_bF*E_tF);
%_____FINAL__STRESS_____
aaa(i,count)=min(E_sigmaCR1(i,count),E_sigmaCR2(i,count));
E_sigmaE(i,count)=min(aaa(i,count),E_sigmaCR3(i,count));%Fi
nal stress of the element,in N/mm^2
else
E_sigmaE(i,count)=F*E_ReH;
end

Force_Element(i)=E_sigmaE(i,count)*E_A;
E_Moment(i)=Force_Element(i)*E_z(i,1);
end
TotalForceElement(count)=sum(Force_Element);
Total_E_Moment(count)=2*sum(E_Moment);
%-----
%FB Forces-----
for i=1:9;
FB_s=FBdim(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
FB_tP=FBdim(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating
attached
FB_hW=FBdim(i,3);%Height of web,in mm
FB_tW=FBdim(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
FB_A=FBdim(i,5);%Total stiffener area in mm^2
%FB_z(i,1);%Element height,in m,from Neutral Axis

```

```

FB_Astiff=FB_hW*FB_tW/100 ;%Net sectional area of the
stiffener,in cm^2, without attached plating
FB_ReH=FBdim(i,7); %Min Yield stress,in N/mm^2
FB_eY=FB_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*FB_z(i,1);%Element strain
FB_e(i,count)=ei/FB_eY;%Relative strain

    if FB_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<FB_e(i,count) &&FB_e(i,count)<1)
        F=FB_e(i,count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0
%-----2.2.4 Beam column Buckling of Flat Bar----
betaE=(1000*FB_s*sqrt(FB_e(i,count)*FB_ReH/E))/FB_tP;
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_s;%bE:Effective
width,in m,of the attached shell plating
    else
        bE=FB_s;
    end
%FlatBar Center of Gravity in cm
CG=((bE*1000*FB_tP*FB_tP/2+FB_hW*FB_tW*(FB_tP+FB_hW/2))/(bE
*1000*FB_tP+FB_hW*FB_tW))/10;%use of bE NOT s
FB_AE=FB_Astiff+bE*FB_tP*10;
%FB_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners
with attached shell plating of width bE
    if betaE>1
        bE1=FB_s/betaE;%bE1: Effective width,in m,of the
attached shell plating
    else
        bE1=FB_s;
    end
%FB_IE: Net moment of inertia of FlatBar stiffeners,in
cm^4,with attached shell plating of width bE1
FB_Ix=(bE1*1000*(FB_tP^3)/3+FB_tW*(FB_hW^3)/12+FB_hW*FB_tW*
(FB_tP+FB_hW/2)^2)/10^4;
Steiner=FB_AE*CG^2;
FB_IE=FB_Ix-Steiner;
l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
sigmaE1=(pi)^2*E*FB_IE*10^(-4)/(FB_AE*l^2);%Euler column
buckling stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC1=FB_ReH*(1-
FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical stress,in
N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR1(i,count)=F*sigmaC1*(FB_Astiff+10*bE*FB_tP)/(FB_
Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_ReH;
    else

```

```

        sigmaCP=FB_ReH;
    end
%sigmae: Euler torsional buckling stress,in N/mm^2
Ip=FB_hW^3*FB_tW/30000;
It=FB_hW*FB_tW^3*(1-0.63*FB_tW/FB_hW)/30000;
Iw=FB_hW^3*FB_tW^3/36000000;
a=1*1000;%CHECK it
b=800;%CHECK it
t=FB_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*FB_hW/(3*FB_tW
^3)))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmae>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC2=FB_ReH*(1-FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR2(i,count)=F*(FB_Astiff*sigmaC2+10*FB_s*FB_tP*sig
maCP)/(FB_Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%-----2.2.7 Web local buckling of flat bars-----
betaE=(1000*FB_s*sqrt(FB_e(i,count)*FB_ReH/E))/FB_tP;
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_ReH ;
    else
        sigmaCP=FB_ReH;
    end
%sigmaE4: Local Euler buckling stress,in N/mm^2
sigmaE4=160000*(FB_tW/FB_hW)^2;
%sigmaC4: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmaE4>FB_ReH*FB_e(i,count)/2
        sigmaC4=FB_ReH*(1-FB_ReH*FB_e(i,count)/(4*sigmaE4));
    else
        sigmaC4=sigmaE4/FB_e(i,count);
    end
FB_sigmaCR4(i,count)=F*(10*FB_s*FB_tP*sigmaCP+FB_Astiff*sig
maC4)/(FB_Astiff+10*FB_s*FB_tP);
%_____FINAL__STRESS_____
bbb(i,count)=min(FB_sigmaCR1(i,count),FB_sigmaCR2(i,count))
;
FB_sigmaE(i,count)=min(bbb(i,count),FB_sigmaCR4(i,count));%
Final stress of the Flat Bar,in N/mm^2
    else
        FB_sigmaE(i,count)=F*FB_ReH;
    end
end
Force_FlatBar(i)=FB_sigmaE(i,count)*FB_A;
FB_Moment(i)=Force_FlatBar(i)*FB_z(i,1);
end
TotalForceFlatBar(count)=sum(Force_FlatBar);
Total_FB_Moment(count)=2*sum(FB_Moment)-FB_Moment(4)-
FB_Moment(5);
%-----
%Hard Corners Forces-----
for i=1:13
    HC_A=HCdim(i,1);%Total Hard corner Area in mm^2
    %HC_z(i,1);%Hard Corner height,in m,from Neutral Axis
    HC_ReH=HCdim(i,3);%Min Yield stress,in N/mm^2
    HC_eY=HC_ReH/E;%Strain at yield stress in the Hard
Corner

```

```

ei=x*HC_z(i,1);%Element strain
HC_e(i,count)=ei/HC_eY;%Relative strain

if HC_e(i,count)>=1
    F=1;
elseif (-1<HC_e(i,count) && HC_e(i,count)<1)
    F=HC_e(i,count);
else
    F=-1;
end

HC_sigmaE(i,count)=F*HC_ReH;%Final stress of the Hard
Corner,in N/mm^2
Force_HardCorner(i)=HC_sigmaE(i,count)*HC_A;
HC_Moment(i)=Force_HardCorner(i)*HC_z(i,1);
end
TotalForceHardCorner(count)=sum(Force_HardCorner);
Total_HC_Moment(count)=2*sum(HC_Moment)-HC_Moment(8)-
HC_Moment(9);
%-----
%Plate Forces-----
PL_tP=12.25; %Net thickness,in mm,of the plating (the
smaller of the two)
PL_s=0.8;%Plate breadth,in m,taken as the Frame spacing(X
dimension)
%CHAPTER 6 APPENDIX 1 Equivalent length
%b1=3390-450=2940 with 14mm thickness reduced to 12.25mm
%b2=3940-1400=2540 with 14.5mm thickness reduced to 12.5mm
%b'=b1+b2*(t1/t2)^1.5=5404--->1
l=5.404;%Longer side of the plate,in m(Z dimension)
PL_A=PL_tP*1*10^3;%Area of plate in mm^2
%PL_z=(5840+6510/2)/1000;%Element height,in m,from Bottom
PL_ReH=355; %Min Yield stress,in N/mm^2
PL_eY=PL_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*PL_z;%Element strain
PL_e(count)=ei/PL_eY;%Relative strain

if PL_e(count)>=1
    F=1;
elseif (-1<PL_e(count) && PL_e(count)<1)
    F=PL_e(count);
else F=-1;
end

if F>0
betaE=10^3*PL_s*sqrt(PL_e(count)*PL_ReH/E)/PL_tP;
sigmaCR5a=F*PL_ReH;
sigmaCR5b=F*PL_ReH*(PL_s/l*(2.25/betaE-
1.25/betaE^2)+0.1*(1-PL_s/l)*(1+1/betaE^2)^2);
sigmaCR5=min(sigmaCR5a,sigmaCR5b);
PL_sigmaE(count)=sigmaCR5;
else
    PL_sigmaE(count)=F*PL_ReH;
end
TotalForcePlate(count)=PL_sigmaE(count)*PL_A;
PL_Moment(count)=2*TotalForcePlate(count)*PL_z;
%-----

```

```
TotalForce(count,na)=TotalForceElement(count)+TotalForceFlatBar(count)+TotalForcePlate(count)+TotalForceHardCorner(count);
if abs(TotalForce(count,na))<=50;
    mom=mom+1;

TotalMoment(mom)=(Total_E_Moment(count)+Total_FB_Moment(count)+Total_HC_Moment(count)+PL_Moment(count))/10^9;%Total Moment in millions kNm
Curvature(mom)=x;
NeutralAxisFinal=NeutralAxisFinal;
jolly=1 %#ok<NOPTS>
break
elseif TotalForce(count,na)>50
E_z=E_z+stepNA;
FB_z=FB_z+stepNA;
HC_z=HC_z+stepNA;
PL_z=PL_z+stepNA;
NeutralAxisFinal=NeutralAxisFinal-stepNA;
downNeutralAxis=1;
elseif TotalForce(count,na)<-50
E_z=E_z-stepNA;
FB_z=FB_z-stepNA;
HC_z=HC_z-stepNA;
PL_z=PL_z-stepNA;
NeutralAxisFinal=NeutralAxisFinal+stepNA;
upNeutralAxis=1;
end
if (upNeutralAxis>=1 && downNeutralAxis>=1)
    stepNA=stepNA/2;
end
if NeutralAxisFinal<0
    jolly=-1;
    break
end
if NeutralAxisFinal>16.550
    jolly=16.550;
    break
end
end
if NeutralAxisFinal<0
    jolly=-1 %#ok<NOPTS>
    warning('Neutral Axis out of bounds') %#ok<WNTAG>
    break
end
if NeutralAxisFinal>16.550
    jolly=16.550 %#ok<NOPTS>
    warning('Neutral Axis out of bounds') %#ok<WNTAG>
    break
end
end

end

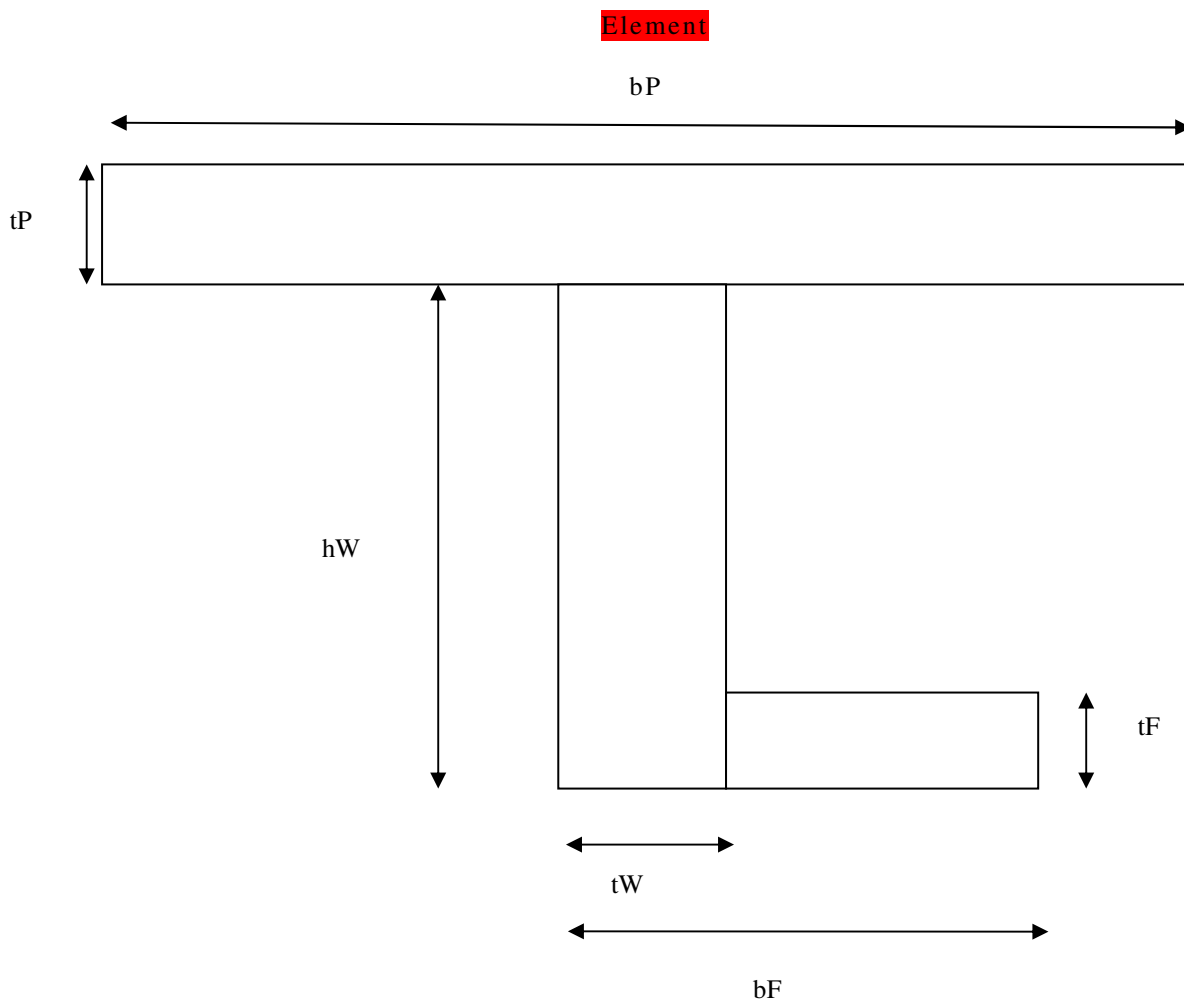
%-----
%-----M-x Curve Creation-----
figure
plot(-Curvature,-TotalMoment,'--r.')
xlabel('Hogging Curvature')
ylabel({'Negative Moment in Millions kNm';'Neutral Axis,in m,from bottom'})
```

```
hold on
plot(-Curvature,NeutralAxis,'--.')
xlabel('Curvature')
ylabel('Neutral Axis,in m,from bottom')
grid on
%figure
%plot(NeutralAxis>TotalMoment)
xlabel('NeutralAxis,in m,from bottom')
ylabel('Moment in Millions kNm')
%grid on
```



## Παράρτημα 6

Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα μπορούμε να δούμε τον υπολογισμό του κέντρου βάρους και της ροπής αδρανείας ενός τυπικού δομικού στοιχείου της διαθέσιμης διατομής :



Επιφάνεια Element

$$\text{Area} = (bP * tP + hW * tW + (bF - tW) * tF)$$

Εύρεση Κέντρου Βάρους του Element ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση bP

$$CG_z = [bP * tP * tP / 2 + (hW * tW) * (tP + hW / 2) + (bF - tW) * tF * (tP + hW - tF / 2)] / \text{Area}$$

Εύρεση Ροπής Αδρανείας του Element ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση bP

$$I_z = bP * tP^3 / 3 + [(bF - tW) * tF^3 / 12 + (bF - tW) * tF * (tP + hW - tF / 2)^2] + [tW * hW^3 / 12 + hW * tW * (tP + hW / 2)^2]$$

Όρος Steiner για τον άξονα Z

$$\text{SteinerZ} = \text{Area} * CG_z^2$$

Εύρεση Ροπής Αδρανείας του Element ως προς κεντροβαρικό Z άξονα.

$$I_{CG_z} = I_z - \text{SteinerZ}$$

-----  
Εύρεση Κέντρου Βάρους του Element ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση tP  
 $CG_y = (bP * tP * bP/2 + hW * tW * bP/2 + (bF - tW) * tF * (bP/2 + tW/2 + (bF - tW)/2)) / Area$

Εύρεση Ροπής Αδρανείας του Element ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση tP  
 $I_y = tP * bP^3 / 3 + [hW * tW^3 / 12 + (hW * tW) * (bP/2)^2] + [(bF - tW)^3 * tF / 12 + (bF - tW) * tF * (bP/2 + tW/2 + (bF - tW)/2)]$

Όρος Steiner για τον άξονα Y  
 $SteinerY = Area * CG_y^2$

Εύρεση Ροπής Αδρανείας του Element ως προς κεντροβαρικό Y άξονα.  
 $I_{CG_y} = I_z - SteinerY$

-----  
Για το Flat Bar τα bF, tF είναι 0.

Αντίστοιχα  
Επιφάνεια FlatBar  
 $Area = (bP * tP + hW * tW)$

Εύρεση Κέντρου Βάρους του FlatBar ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση bP

$CG_z = [bP * tP * tP/2 + (hW * tW) * (tP + hW/2)] / Area$

Αντίστοιχα η Ροπή Αδρανείας του FlatBar είναι

Εύρεση Ροπής Αδρανείας του Flat Bar ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση bP

$I_z = bP * tP^3 / 3 + [tW * hW^3 / 12 + hW * tW * (tP + hW/2)^2]$

Όρος Steiner για τον άξονα Z

$SteinerZ = (hW * tW + bP * tP) * CG_z^2$

$I_{CG_z} = I_z - SteinerZ$

Εύρεση Κέντρου Βάρους του FlatBar ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση tP

$CG_y = [bP * tP * bP/2 + hW * tW * bP/2] / Area$

Αντίστοιχα η Ροπή Αδρανείας του FlatBar είναι

Εύρεση Ροπής Αδρανείας του Flat Bar ως προς άξονα που εφάπτεται στην διάσταση tP

$I_y = tP * bP^3 / 3 + [hW * tW^3 / 12 + hW * tW * (bP/2)^2]$

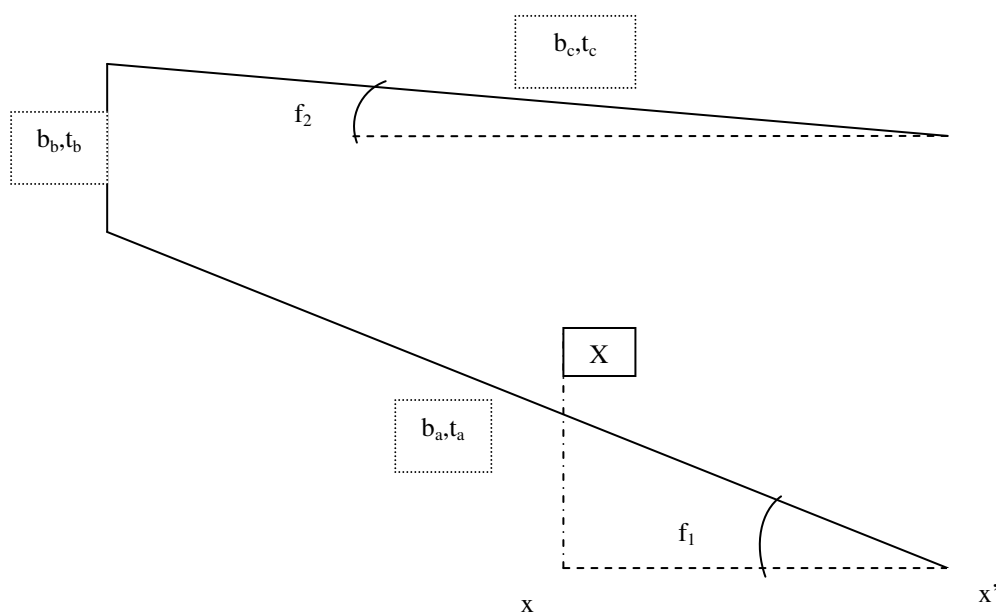
Όρος Steiner για τον άξονα Y

$SteinerZ = (hW * tW + bP * tP) * CG_y^2$

$I_{CG_y} = I_y - SteinerY$



### HC1



f: Γωνίες

b: Πλάτη

t: Πάχη

Εύρεση Κέντρου βάρους

Εμβαδά

$$E_a = b_a * t_a$$

$$E_b = b_b * t_b$$

$$E_c = b_c * t_c$$

Ύψη επιμέρους κέντρων βάρους ως προς άξονα xx'

$$H_a = \sin f_1 * b_a / 2$$

$$H_b = \sin f_1 * b_a + b_b / 2$$

$$H_c = \sin f_1 * b_a + b_b - \sin f_2 * b_c / 2$$

$$X = (E_a * H_a + E_b * H_b + E_c * H_c) / (E_a + E_b + E_c)$$

Εύρεση Ροπής Αδρανείας

Ροπή Αδρανείας ως προς άξονα xx'

$$I_a = b_a^3 * t_a / 12 * \sin^2 f_1 + H_a^2 * E_a$$

$$I_b = b_b^3 * t_b / 12 + H_b^2 * E_b$$

$$I_c = b_c^3 * t_c / 12 * \sin^2 f_2 + H_c^2 * E_c$$

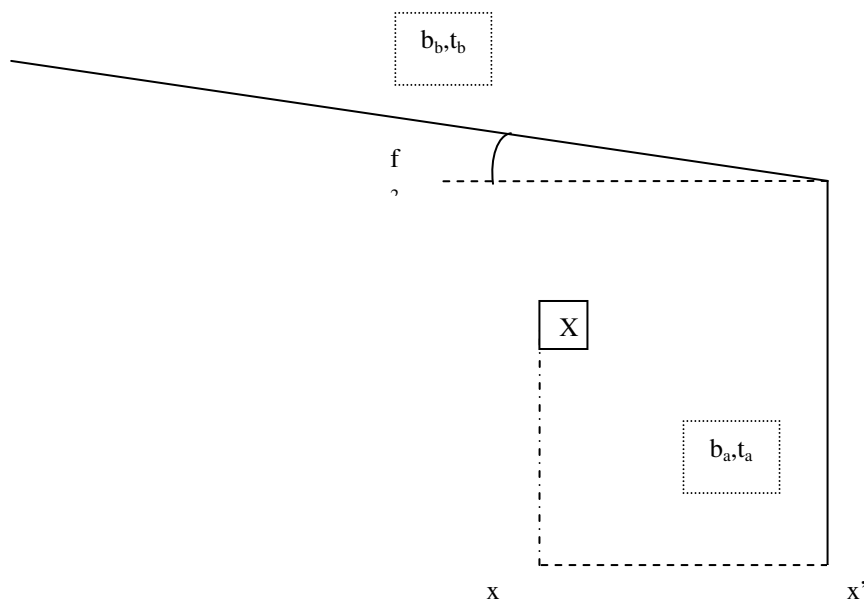
$$I = I_a + I_b + I_c$$

Όρος Steiner

$$\text{Steiner} = (E_a + E_b + E_c) * X^2$$

$$I_{CG} = I - \text{Steiner}$$

## HC2



$f$ : Γωνίες

$b$ : Πλάτη

$t$ : Πάχη

Εύρεση Κέντρου βάρους

Εμβαδά

$$E_a = b_a * t_a$$

$$E_b = b_b * t_b$$

Ύψη επιμέρους κέντρων βάρους ως προς άξονα  $xx'$

$$H_a = b_a / 2$$

$$H_b = b_a + b_b / 2 * \sin f$$

$$X = (E_a * H_a + E_b * H_b) / (E_a + E_b)$$

Εύρεση Ροπής Αδρανείας

Ροπή Αδρανείας ως προς άξονα  $xx'$

$$I_a = b_a^3 * t_a / 3$$

$$I_b = b_b^3 * t_b / 12 * \sin^2 f + H_b^2 * E_b$$

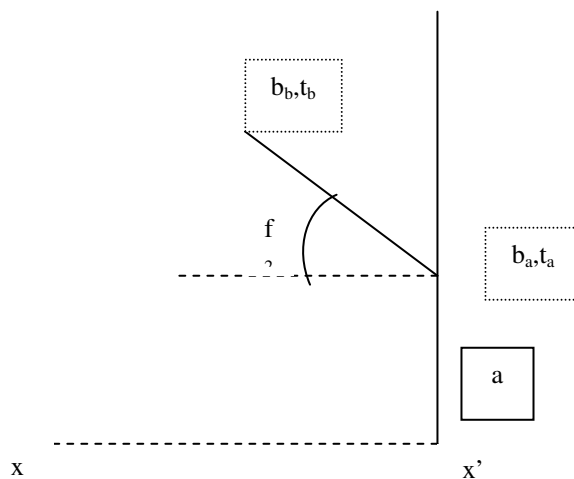
$$I = I_a + I_b$$

Όρος Steiner

$$\text{Steiner} = (E_a + E_b) * X^2$$

$$I_{CG} = I - \text{Steiner}$$

### HC3



f: Γωνίες

b: Πλάτη

t: Πάχη

Εύρεση Κέντρου βάρους

Εμβαδά

$$E_a = b_a \cdot t_a$$

$$E_b = b_b \cdot t_b$$

Ύψη επιμέρους κέντρων βάρους ως προς άξονα xx'

$$H_a = b_a / 2$$

$$H_b = a + b_b / 2 \cdot \sin f$$

$$X = (E_a \cdot H_a + E_b \cdot H_b) / (E_a + E_b)$$

Εύρεση Ροπής αδρανείας

Ροπή Αδρανείας ως προς άξονα xx'

$$I_a = b_a^3 \cdot t_a / 3$$

$$I_b = b_b^3 \cdot t_b / 12 \cdot \sin^2 f + H_b^2 \cdot E_b$$

$$I = I_a + I_b$$

Όρος Steiner

$$\text{Steiner} = (E_a + E_b) \cdot X^2$$

$$I_{CG} = I - \text{Steiner}$$

## Παράρτημα 7

Εδώ παρουσιάζεται ο κώδικας του προγράμματος SD-CDA το οποίο χρησιμοποιείται για την εύρεση απομένουσας αντοχής βεβλαμένου σκάφους.

```
clc
clear all
%-----Finding the Geometric Center-----
EdimR=xlsread('E_R_Damaged_3A.xls');
EdimL=xlsread('E_L_Damaged_3A.xls');
FBdimR=xlsread('FB_R_Damaged_3A.xls');
FBdimL=xlsread('FB_L_Damaged_3A.xls');
HCdimR=xlsread('HC_R_Damaged_3A.xls');
HCdimL=xlsread('HC_L_Damaged_3A.xls');
PLdimR=xlsread('PL_R_Damaged_3A.xls');
PLdimL=xlsread('PL_L_Damaged_3A.xls');
countE_R=0;
countE_L=0;
countFB_R=0;
countFB_L=0;
countHC_R=0;
countHC_L=0;
countPL_R=0;
countPL_L=0;
%-----Matrix Preallocation-----
E_R_Sz=zeros(1,57);
E_R_Sy=zeros(1,57);
E_R_Icgz=zeros(1,57);
E_R_Icgy=zeros(1,57);
E_R_Iz=zeros(1,57);
E_R_Iy=zeros(1,57);
E_R_Izy=zeros(1,57);
E_R_SteinerY_Bottom=zeros(1,57);
E_R_SteinerZ_Middle=zeros(1,57);
E_R_SteinerZY=zeros(1,57);
E_R_z_na=zeros(1,57);
E_R_y_na=zeros(1,57);

E_L_Sz=zeros(1,57);
E_L_Sy=zeros(1,57);
E_L_Icgz=zeros(1,57);
E_L_Icgy=zeros(1,57);
E_L_Iz=zeros(1,57);
E_L_Iy=zeros(1,57);
E_L_Izy=zeros(1,57);
E_L_SteinerY_Bottom=zeros(1,57);
E_L_SteinerZ_Middle=zeros(1,57);
E_L_SteinerZY=zeros(1,57);
E_L_z_na=zeros(1,57);
E_L_y_na=zeros(1,57);

FB_R_Sz=zeros(1,9);
FB_R_Sy=zeros(1,9);
FB_R_Icgz=zeros(1,9);
FB_R_Icgy=zeros(1,9);
```

```
FB_R_Iz=zeros(1,9);
FB_R_Iy=zeros(1,9);
FB_R_Izy=zeros(1,9);
FB_R_SteinerY_Bottom=zeros(1,9);
FB_R_SteinerZ_Middle=zeros(1,9);
FB_R_SteinerZY=zeros(1,9);
FB_R_z_na=zeros(1,9);
FB_R_y_na=zeros(1,9);

FB_L_Sz=zeros(1,9);
FB_L_Sy=zeros(1,9);
FB_L_Icgz=zeros(1,9);
FB_L_Icgy=zeros(1,9);
FB_L_Iz=zeros(1,9);
FB_L_Iy=zeros(1,9);
FB_L_Izy=zeros(1,9);
FB_L_SteinerY_Bottom=zeros(1,9);
FB_L_SteinerZ_Middle=zeros(1,9);
FB_L_SteinerZY=zeros(1,9);
FB_L_z_na=zeros(1,9);
FB_L_y_na=zeros(1,9);

HC_R_Sz=zeros(1,13);
HC_R_Sy=zeros(1,13);
HC_R_SteinerY_Bottom=zeros(1,13);
HC_R_SteinerZ_Middle=zeros(1,13);
HC_R_SteinerZY=zeros(1,13);
HC_R_z_na=zeros(1,13);
HC_R_y_na=zeros(1,13);

HC_L_Sz=zeros(1,13);
HC_L_Sy=zeros(1,13);
HC_L_SteinerY_Bottom=zeros(1,13);
HC_L_SteinerZ_Middle=zeros(1,13);
HC_L_SteinerZY=zeros(1,13);
HC_L_z_na=zeros(1,13);
HC_L_y_na=zeros(1,13);

PL_R_Sz=zeros(1,2);
PL_R_Sy=zeros(1,2);
PL_R_Iz=zeros(1,2);
PL_R_Iy=zeros(1,2);
PL_R_SteinerY_Bottom=zeros(1,2);
PL_R_SteinerZ_Middle=zeros(1,2);
PL_R_SteinerZY=zeros(1,2);

PL_L_Sz=zeros(1,2);
PL_L_Sy=zeros(1,2);
PL_L_Iz=zeros(1,2);
PL_L_Iy=zeros(1,2);
PL_L_SteinerY_Bottom=zeros(1,2);
PL_L_SteinerZ_Middle=zeros(1,2);
PL_L_SteinerZY=zeros(1,2);
%-----
%-----
%Elements_____RIGHT SECTION
for i=1:57;
    countE_R=countE_R+1;
    E_R_bP=EdimR(i,1);%Width,in mm, of attached plating
```



```

E_R_tP=EdimR(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating attached
E_R_hW=EdimR(i,5); % Height of web,in mm
E_R_tW=EdimR(i,6); %Net thickness,in mm,of the web
E_R_bF=EdimR(i,3); %Width,in mm,of the flange
E_R_tF=EdimR(i,4); %Net thickness,in mm,of the flange
E_R_ReH=EdimR(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
E_R_z=EdimR(i,11); %Element height,in mm,from Bottom
E_R_y=EdimR(i,12); %Element distance,in mm,from middle(RIGHT SECTION)
E_R_A=EdimR(i,7); %Total stiffener area in mm^2
E_R_degrees=EdimR(i,14); %Inclination of Element in degrees
E_R_Sy(countE_R)=E_R_A*E_R_z; %First Moment yy
E_R_Sz(countE_R)=E_R_A*E_R_y; %First Moment zz
%Finding Element Center of Gravity
CGyi=(E_R_bP*E_R_tP*E_R_tP/2+E_R_hW*E_R_tW*(E_R_tP+E_R_hW/2)+...
(E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF*(E_R_tP+E_R_hW-E_R_tF/2))/E_R_A;
CGzi=(E_R_bP*E_R_tP*E_R_bP/2+E_R_hW*E_R_tW*E_R_bP/2+...
(E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF*(E_R_bP/2+E_R_tW/2+(E_R_bF-
E_R_tW)/2))/E_R_A;
%Finding Iz,Iy
Iy=E_R_bP*(E_R_tP^3)/3+(E_R_bF-E_R_tW)*(E_R_tF^3)/12+...
(E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF*(E_R_tP+E_R_hW-E_R_tF/2)^2+...
E_R_tW*(E_R_hW^3)/12+E_R_hW*E_R_tW*(E_R_tP+E_R_hW/2)^2;
Iz=E_R_tP*(E_R_bP^3)/3+E_R_hW*(E_R_tW^3)/12+E_R_hW*E_R_tW*(E_R_bP/2)^2+...
(E_R_bF-E_R_tW)^3*E_R_tF/12+(E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF*(E_R_bP/2+...
E_R_tW/2+(E_R_bF-E_R_tW)/2)^2;
%Finding Steiner
SteinerY=E_R_A*CGzi^2;
SteinerZ=E_R_A*CGyi^2;
%Finding Icgz,Icgy
E_R_Icgz(countE_R)=Iz-SteinerZ;
E_R_Icgy(countE_R)=Iy-SteinerY;
%Finding final I including inclination
E_R_Iy(countE_R)=E_R_Icgy(countE_R)*(cosd(E_R_degrees))^2+...
E_R_Icgz(countE_R)*(sind(E_R_degrees))^2;
E_R_Iz(countE_R)=E_R_Icgy(countE_R)*(sind(E_R_degrees))^2+...
E_R_Icgz(countE_R)*(cosd(E_R_degrees))^2;
E_R_Izy(countE_R)=(E_R_Icgz(countE_R)-
E_R_Icgy(countE_R))/2*sind(2*E_R_degrees);
E_R_SteinerY_Bottom(countE_R)=E_R_A*E_R_z^2;%Steiner for each part
relative to bottom
E_R_SteinerZ_Middle(countE_R)=E_R_A*E_R_y^2;%Steiner for each part
relative to middle section
E_R_SteinerZY(countE_R)=E_R_z*E_R_y*E_R_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%Elements_____LEFT SECTION
for i=1:57;
countE_L=countE_L+1;
E_L_bP=EdimL(i,1); %Width,in mm, of attached plating
E_L_tP=EdimL(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating attached
E_L_hW=EdimL(i,5); % Height of web,in mm
E_L_tW=EdimL(i,6); %Net thickness,in mm,of the web
E_L_bF=EdimL(i,3); %Width,in mm,of the flange
E_L_tF=EdimL(i,4); %Net thickness,in mm,of the flange
E_L_ReH=EdimL(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
E_L_z=EdimL(i,11); %Element height,in mm,from Bottom
E_L_y=EdimL(i,13); %Element distance,in mm,from middle(LEFT SECTION)
E_L_A=EdimL(i,7); %Total stiffener area in mm^2

```

```

E_L_degrees=EdimL(i,15);%Inclination of Element in degrees
E_L_Sy(countE_L)=E_L_A*E_L_z;%First Moment yy
E_L_Sz(countE_L)=E_L_A*E_L_y;%First Moment zz
%Finding Element Center of Gravity
CGyi=(E_L_bP*E_L_tP*E_L_tP/2+E_L_hW*E_L_tW*(E_L_tP+E_L_hW/2)+...
(E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF*(E_L_tP+E_L_hW-E_L_tF/2))/E_L_A;
CGzi=(E_L_bP*E_L_tP*E_L_bP/2+E_L_hW*E_L_tW*E_L_bP/2+...
(E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF*(E_L_bP/2+E_L_tW/2+(E_L_bF-
E_L_tW)/2))/E_L_A;
%Finding Iz,Iy
Iy=E_L_bP*(E_L_tP^3)/3+(E_L_bF-E_L_tW)*(E_L_tF^3)/12+...
(E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF*(E_L_tP+E_L_hW-E_L_tF/2)^2+...
E_L_tW*(E_L_hW^3)/12+E_L_hW*E_L_tW*(E_L_tP+E_L_hW/2)^2;
Iz=E_L_tP*(E_L_bP^3)/3+E_L_hW*(E_L_tW^3)/12+E_L_hW*E_L_tW*(E_L_bP/2)^2+...
(E_L_bF-E_L_tW)^3*E_L_tF/12+...
(E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF*(E_L_bP/2+E_L_tW/2+(E_L_bF-E_L_tW)/2)^2;
%Finding Steiner
SteinerY=E_L_A*CGzi^2;
SteinerZ=E_L_A*CGyi^2;
%Finding Icgz,Icgy
E_L_Icgz(countE_L)=Iz-SteinerZ;
E_L_Icgy(countE_L)=Iy-SteinerY;
%Finding final I including inclination
E_L_Iy(countE_L)=E_L_Icgy(countE_L)*(cosd(E_L_degrees))^2+...
E_L_Icgz(countE_L)*(sind(E_L_degrees))^2;
E_L_Iz(countE_L)=E_L_Icgy(countE_L)*(sind(E_L_degrees))^2+...
E_L_Icgz(countE_L)*(cosd(E_L_degrees))^2;
E_L_Izy(countE_L)=(E_L_Icgz(countE_L)-
E_L_Icgy(countE_L))/2*sind(2*E_L_degrees);
E_L_SteinerY_Bottom(countE_L)=E_L_A*E_L_z^2;%Steiner for each part
relative to bottom
E_L_SteinerZ_Middle(countE_L)=E_L_A*E_L_y^2;%Steiner for each part
relative to middle section
E_L_SteinerZY(countE_L)=E_L_z*E_L_y*E_L_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%FlatBar_____RIGHT SECTION
for i=1:9;
countFB_R=countFB_R+1;
FB_R_bP=FBdimR(i,1);%Width,in mm, of attached plating
FB_R_tP=FBdimR(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating attached
FB_R_hW=FBdimR(i,3);%Height of web,in mm
FB_R_tW=FBdimR(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
FB_R_z=FBdimR(i,8);%FlatBar height,in mm,from Bottom
FB_R_y=FBdimR(i,9);%FlatBar distance,in mm,from middle(RIGHT SECTION)
FB_R_A=FBdimR(i,5);%Total stiffener area in mm^2
FB_R_degrees=FBdimR(i,11);%Inclination
FB_R_Sy(countFB_R)=FB_R_A*FB_R_z;%First Moment yy
FB_R_Sz(countFB_R)=FB_R_A*FB_R_y;%First Moment zz
%Finding FlatBar Center of Gravity
CGyi=(FB_R_bP*FB_R_tP*FB_R_tP/2+...
(FB_R_hW*FB_R_tW)*(FB_R_tP+FB_R_hW/2))/FB_R_A;
CGzi=(FB_R_bP*FB_R_tP*FB_R_bP/2+FB_R_hW*FB_R_tW*FB_R_bP/2)/FB_R_A;
%Finding Iz,Iy
Iy=FB_R_bP*(FB_R_tP^3)/3+FB_R_tW*(FB_R_hW^3)/12+...
FB_R_hW*FB_R_tW*(FB_R_tP+FB_R_hW/2)^2;
Iz=FB_R_tP*(FB_R_bP^3)/3+FB_R_hW*(FB_R_tW^3)/12+...
FB_R_hW*FB_R_tW*(FB_R_bP/2)^2;

```

```

%Finding Steiner
SteinerY=FB_R_A*CGzi^2;
SteinerZ=FB_R_A*CGyi^2;
%Finding Icgz,Icgy
FB_R_Icgz(countFB_R)=Iz-SteinerZ;
FB_R_Icgy(countFB_R)=Iy-SteinerY;
%Finding final I including inclination
FB_R_Iy(countFB_R)=FB_R_Icgy(countFB_R)*(cosd(FB_R_degrees))^2+...
    FB_R_Icgz(countFB_R)*(sind(FB_R_degrees))^2;
FB_R_Iz(countFB_R)=FB_R_Icgy(countFB_R)*(sind(FB_R_degrees))^2+...
    FB_R_Icgz(countFB_R)*(cosd(FB_R_degrees))^2;
FB_R_Izy(countFB_R)=(FB_R_Icgz(countFB_R)-
FB_R_Icgy(countFB_R))/2*sind(2*FB_R_degrees);
FB_R_SteinerY_Bottom(countFB_R)=FB_R_A*FB_R_y^2;%Steiner for each
part relative to bottom
FB_R_SteinerZ_Middle(countFB_R)=FB_R_A*FB_R_z^2;%Steiner for each
part relative to middle section
FB_R_SteinerZY(countFB_R)=FB_R_z*FB_R_y*FB_R_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%FlatBar_____LEFT SECTION
for i=1:9;
    countFB_L=countFB_L+1;
    FB_L_bP=FBdimL(i,1);%Width,in mm, of attached plating
    FB_L_tP=FBdimL(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating attached
    FB_L_hW=FBdimL(i,3);%Height of web,in mm
    FB_L_tW=FBdimL(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
    FB_L_z=FBdimL(i,8);%FlatBar height,in mm,from Bottom
    FB_L_y=FBdimL(i,10);%FlatBar distance,in mm,from middle(LEFT SECTION)
    FB_L_A=FBdimL(i,5);%Total stiffener area in mm^2
    FB_L_degrees=FBdimL(i,11);%Inclination
    FB_L_Sy(countFB_L)=FB_L_A*FB_L_z;%First Moment yy
    FB_L_Sz(countFB_L)=FB_L_A*FB_L_y;%First Moment zz
    %Finding FlatBar Center of Gravity
    CGyi=(FB_L_bP*FB_L_tP*FB_L_tP/2+...
        (FB_L_hW*FB_L_tW)*(FB_L_tP+FB_L_hW/2))/FB_L_A;
    CGzi=(FB_L_bP*FB_L_tP*FB_L_bP/2+FB_L_hW*FB_L_tW*FB_L_bP/2)/FB_L_A;
    %Finding Iz,Iy
    Iy=FB_L_bP*(FB_L_tP^3)/3+FB_L_tW*(FB_L_hW^3)/12+...
        FB_L_hW*FB_L_tW*(FB_L_tP+FB_L_hW/2)^2;
    Iz=FB_L_tP*(FB_L_bP^3)/3+FB_L_hW*(FB_L_tW^3)/12+...
        FB_L_hW*FB_L_tW*(FB_L_bP/2)^2;
    %Finding Steiner
    SteinerY=FB_L_A*CGzi^2;
    SteinerZ=FB_L_A*CGyi^2;
    %Finding Icgz,Icgy
    FB_L_Icgz(countFB_L)=Iz-SteinerZ;
    FB_L_Icgy(countFB_L)=Iy-SteinerY;
    %Finding final I including inclination
    FB_L_Iy(countFB_L)=FB_L_Icgy(countFB_L)*(cosd(FB_L_degrees))^2+...
        FB_L_Icgz(countFB_L)*(sind(FB_L_degrees))^2;
    FB_L_Iz(countFB_L)=FB_L_Icgy(countFB_L)*(sind(FB_L_degrees))^2+...
        FB_L_Icgz(countFB_L)*(cosd(FB_L_degrees))^2;
    FB_L_Izy(countFB_L)=(FB_L_Icgz(countFB_L)-
    FB_L_Icgy(countFB_L))/2*sind(2*FB_L_degrees);
    FB_L_SteinerY_Bottom(countFB_L)=FB_L_A*FB_L_z^2;%Steiner for each
part relative to bottom
    FB_L_SteinerZ_Middle(countFB_L)=FB_L_A*FB_L_y^2;%Steiner for each
part relative to middle section

```

```

FB_L_SteinerZY(countFB_L)=FB_L_z*FB_L_y*FB_L_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%HardCorner_____RIGHT SECTION
for i=1:13;
    countHC_R=countHC_R+1;
    HC_R_A=HCdimR(i,11);%Total Hard corner Area in mm^2
    HC_R_z=HCdimR(i,14);%HardCorner height,in mm,from Bottom
    HC_R_y=HCdimR(i,15);%HardCorner distance,in mm,from middle(RIGHT
SECTION)
    HC_R_Iy=HCdimR(i,21);%Moment of Inertia, yy axis
    HC_R_Iz=HCdimR(i,30);%Moment of Inertia, zz axis
    HC_R_Sy(countHC_R)=HC_R_A*HC_R_z;
    HC_R_Sz(countHC_R)=HC_R_A*HC_R_y;
    HC_R_SteinerY_Bottom(countHC_R)=HC_R_A*HC_R_z^2;%Steiner for each
part relative to bottom
    HC_R_SteinerZ_Middle(countHC_R)=HC_R_A*HC_R_y^2;%Steiner for each
part relative to middle section
    HC_R_SteinerZY(countHC_R)=HC_R_z*HC_R_y*HC_R_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%HardCorner_____LEFT SECTION
for i=1:13;
    countHC_L=countHC_L+1;
    HC_L_A=HCdimL(i,11);%Total Hard corner Area in mm^2
    HC_L_z=HCdimL(i,14);%HardCorner height,in mm,from Bottom
    HC_L_y=HCdimL(i,16);%HardCorner distance,in mm,from middle(LEFT
SECTION)
    HC_L_Iy=HCdimL(i,21);%Moment of Inertia, zz axis
    HC_L_Iz=HCdimL(i,30);%Moment of Inertia, yy axis
    HC_L_Sy(countHC_L)=HC_L_A*HC_L_z;
    HC_L_Sz(countHC_L)=HC_L_A*HC_L_y;
    HC_L_SteinerY_Bottom(countHC_L)=HC_L_A*HC_L_z^2;%Steiner for each
part relative to bottom
    HC_L_SteinerZ_Middle(countHC_L)=HC_L_A*HC_L_y^2;%Steiner for each
part relative to middle section
    HC_L_SteinerZY(countHC_L)=HC_L_z*HC_L_y*HC_L_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%PLATE_____RIGHT SECTION
for i=1:2;
    countPL_R=countPL_R+1;
    PL_R_bP=PLdimR(i,1);%Length of plate in mm(z dimension)
    PL_R_tP=PLdimR(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating
    PL_R_A=PLdimR(i,3);%Plate area ,in mm^2
    PL_R_z=PLdimR(i,4);%Plate height,in mm,from bottom
    PL_R_y=PLdimR(i,5);%Plate distance,in mm,from middle(RIGHT SECTION)
    PL_R_Sy(countPL_R)=PL_R_A*PL_R_z;
    PL_R_Sz(countPL_R)=PL_R_A*PL_R_y;
    PL_R_Iz(countPL_R)=PL_R_bP*(PL_R_tP^3)/12;
    PL_R_Iy(countPL_R)=PL_R_tP*(PL_R_bP^3)/12;
    PL_R_SteinerY_Bottom(countPL_R)=PL_R_A*PL_R_z^2;%Steiner for each
part relative to bottom
    PL_R_SteinerZ_Middle(countPL_R)=PL_R_A*PL_R_y^2;%Steiner for each
part relative to middle section
    PL_R_SteinerZY(countPL_R)=PL_R_z*PL_R_y*PL_R_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%PLATE_____LEFT SECTION

```

```

for i=1:2;
    countPL_L=countPL_L+1;
    PL_L_bP=PLdimL(i,1);%Length of plate in mm(z dimension)
    PL_L_tP=PLdimL(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating
    PL_L_A=PLdimL(i,3);%Plate area ,in mm^2
    PL_L_z=PLdimL(i,4);%Plate height,in mm,from bottom
    PL_L_y=PLdimL(i,6);%Plate distance,in mm,from middle(LEFT SECTION)
    PL_L_Sy(countPL_L)=PL_L_A*PL_L_z;
    PL_L_Sz(countPL_L)=PL_L_A*PL_L_y;
    PL_L_Iz(countPL_L)=PL_L_bP*(PL_L_tP^3)/12;
    PL_L_Iy(countPL_L)=PL_L_tP*(PL_L_bP^3)/12;
    PL_L_SteinerY_Bottom(countPL_L)=PL_L_A*PL_L_z^2;%Steiner for each
part relative to bottom
    PL_L_SteinerZ_Middle(countPL_L)=PL_L_A*PL_L_y^2;%Steiner for each
part relative to middle section
    PL_L_SteinerZY(countPL_L)=PL_L_z*PL_L_y*PL_L_A;%Steiner for Izy
end
%-----
%-----NEO Γεωμετρικό Κέντρο-----
%Sz=(sum(E_R_Sz)+sum(E_L_Sz)+sum(FB_R_Sz)+sum(FB_L_Sz)+sum(HC_R_Sz)+s
um(HC_L_Sz)+sum(PL_R_Sz)+sum(PL_L_Sz))/10^9;
s1=sum(E_R_Sz)/10^9;
s2=sum(E_L_Sz)/10^9;
s3=sum(FB_R_Sz)/10^9;
s4=sum(FB_L_Sz)/10^9;
s5=sum(HC_R_Sz)/10^9;
s6=sum(HC_L_Sz)/10^9;
s7=sum(PL_R_Sz)/10^9;
s8=sum(PL_L_Sz)/10^9;
Sz=s1+s2+s3+s4+s5+s6+s7+s8;
%H συνολική επιφάνεια της μέσης τομής είναι
disp('Total area of middle section in m2 is')
TotalArea=(sum(EdimR(:,7))+sum(EdimL(:,7))+sum(FBdimR(:,5))+...
sum(FBdimL(:,5))+sum(HCdimR(:,11))+sum(HCdimL(:,11))+...
sum(PLdimR(:,3))+sum(PLdimL(:,3)))/10^6 %#ok<NOPTS>
Sy=(sum(E_R_Sy)+sum(E_L_Sy)+sum(FB_R_Sy)+sum(FB_L_Sy)+...
sum(HC_R_Sy)+sum(HC_L_Sy)+sum(PL_R_Sy)+sum(PL_L_Sy))/10^9;
%H απόσταση του κέντρου βάρους απο την μέση τομή είναι
disp('Center of Gravity from middle section (y dimension)in m is')
New_Y_CG=Sz/TotalArea %#ok<NOPTS>
%H απόσταση του κέντρου βάρους απο τον πυθμένα (z διάσταση) είναι
disp('Center of Gravity from bottom (z dimension)in m is')
New_Z_CG=Sy/TotalArea %#ok<NOPTS>
%-----
%-----NEA Ροπή Αδρανείας-----
%Θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο Iοα=Σ(i)+Σ(αi*hi^2)-H^2*Σ(αi)
%Βρίσκουμε το Σ(i)
iz1=sum(E_R_Iz)/10^12;iz2=sum(E_L_Iz)/10^12;iz3=sum(FB_R_Iz)/10^12;
iz4=sum(FB_L_Iz)/10^12;iz5=sum(HC_R_Iz)/10^12;iz6=sum(HC_L_Iz)/10^12;
iz7=sum(PL_R_Iz)/10^12;iz8=sum(PL_L_Iz)/10^12;
Sigma_i_z=iz1+iz2+iz3+iz4+iz5+iz6+iz7+iz8;
iy1=sum(E_R_Iy)/10^12;iy2=sum(E_L_Iy)/10^12;iy3=sum(FB_R_Iy)/10^12;
iy4=sum(FB_L_Iy)/10^12;
iy5=sum(HC_R_Iy)/10^12;iy6=sum(HC_L_Iy)/10^12;
iy7=sum(PL_R_Iy)/10^12;iy8=sum(PL_L_Iy)/10^12;
Sigma_i_y=iy1+iy2+iy3+iy4+iy5+iy6+iy7+iy8;

izy1=sum(E_R_Izy)/10^12;izy2=sum(E_L_Izy)/10^12;izy3=sum(FB_R_Izy)/10
^12;

```

```

    izy4=sum(FB_L_Izy)/10^12;
    Sigma_i_zy=izy1+izy2+izy3+izy4;
    %Βρίσκουμε το Σ(αi*hi^2)
    ahy1=sum(E_R_SteinerY_Bottom)/10^12;ahy2=sum(E_L_SteinerY_Bottom)/10^
    12;
    ahy3=sum(FB_R_SteinerY_Bottom)/10^12;ahy4=sum(FB_L_SteinerY_Bottom)/1
    0^12;
    ahy5=
    sum(HC_R_SteinerY_Bottom)/10^12;ahy6=sum(HC_L_SteinerY_Bottom)/10^12;
    ahy7=
    sum(PL_R_SteinerY_Bottom)/10^12;ahy8=sum(PL_L_SteinerY_Bottom)/10^12;
    Sigma_aihi2_y=ahy1+ahy2+ahy3+ahy4+ahy5+ahy6+ahy7+ahy8;
    ahz1=sum(E_R_SteinerZ_Middle)/10^12;ahz2=sum(E_L_SteinerZ_Middle)/10^
    12;
    ahz3=sum(FB_R_SteinerZ_Middle)/10^12;ahz4=sum(FB_L_SteinerZ_Middle)/1
    0^12;
    ahz5=sum(HC_R_SteinerZ_Middle)/10^12;ahz6=sum(HC_L_SteinerZ_Middle)/1
    0^12;
    ahz7=sum(PL_R_SteinerZ_Middle)/10^12;ahz8=sum(PL_L_SteinerZ_Middle)/1
    0^12;
    Sigma_aihi2_z=ahz1+ahz2+ahz3+ahz4+ahz5+ahz6+ahz7+ahz8;
    ahzy1=sum(E_R_SteinerZY)/10^12;ahzy2=sum(E_L_SteinerZY)/10^12;
    ahzy3=sum(FB_R_SteinerZY)/10^12;ahzy4=sum(FB_L_SteinerZY)/10^12;
    ahzy5=sum(HC_R_SteinerZY)/10^12;ahzy6=sum(HC_L_SteinerZY)/10^12;
    ahzy7=sum(PL_R_SteinerZY)/10^12;ahzy8=sum(PL_L_SteinerZY)/10^12;
    Sigma_aihi2_zy=ahzy1+ahzy2+ahzy3+ahzy4+ahzy5+ahzy6+ahzy7+ahzy8;
    %Το νέο Iz,Iy της μέσης τομής είναι
    Intermediate_Iz_Total=Sigma_i_z+Sigma_aihi2_z-New_Y_CG^2*TotalArea;
    Intermediate_Iy_Total=Sigma_i_y+Sigma_aihi2_y-New_Z_CG^2*TotalArea;
    Intermediate_Izy_Total=Sigma_i_zy+Sigma_aihi2_zy-
    New_Z_CG*New_Y_CG*TotalArea;
    P1=(Intermediate_Iy_Total+Intermediate_Iz_Total)/2;
    P2=(Intermediate_Iz_Total-Intermediate_Iy_Total)/2;
    P3=Intermediate_Izy_Total;
    disp('Moment of Inertia yy axis,in m4,is')
    New_Iy_Total=P1-sqrt(P2^2+P3^2) %#ok<NOPTS>
    disp('Moment of Inertia zz axis,in m4,is')
    New_Iz_Total=P1+sqrt(P2^2+P3^2) %#ok<NOPTS>
    %Η κλίση των νέων κυρίων αξόνων θα είναι
    disp('Inclination,in degrees,is')
    Incline=atand(-P3/P2)/2 %#ok<NOPTS>

%-----
%Ο νέος αρχικός ουδέτερος άξονας θα είναι
Intermediate_Incline=atand(New_Iy_Total/New_Iz_Total*tand(Incline));
disp('The new Neutral Axis Ininial is between YY and Iy with
inclination to the Horizontal,in degrees,is')
NA_Incline=Incline-Intermediate_Incline %#ok<NOPTS>
%-----
%καθορισμός αποστάσεων απο OA
count=0;
for i=1:57
    count=count+1;
    E_R_z=EdimR(i,11);%Element height,in mm,from Bottom
    E_R_y=EdimR(i,12);%Element distance,in mm,from middle(RIGHT
SECTION)
    E_L_z=EdimL(i,11);%Element height,in mm,from Bottom

```

```
E_L_y=EdimL(i,13);%Element distance,in mm,from middle(LEFT
SECTION)
E_R_z_intermediate=(E_R_z-New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(E_R_y-
New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
E_L_z_intermediate=(E_L_z-New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(E_L_y-
New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
E_R_y_intermediate=-(E_R_z-New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(E_R_y-
New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
E_L_y_intermediate=-(E_L_z-New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(E_L_y-
New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
E_R_z_na(count)=(E_R_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+E_R_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
E_L_z_na(count)=(E_L_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+E_L_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
E_R_y_na(count)=(-E_R_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+E_R_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
E_L_y_na(count)=(-E_L_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+E_L_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
end
count=0;
for i=1:9
count=count+1;
FB_R_z=FBdimR(i,8);%FlatBar height,in mm,from Bottom
FB_R_y=FBdimR(i,9);%FlatBar distance,in mm,from middle(RIGHT
SECTION)
FB_L_z=FBdimL(i,8);%FlatBar height,in mm,from Bottom
FB_L_y=FBdimL(i,10);%FlatBar distance,in mm,from middle(LEFT
SECTION)
FB_R_z_intermediate=(FB_R_z-New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(FB_R_y-
New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
FB_L_z_intermediate=(FB_L_z-New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(FB_L_y-
New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
FB_R_y_intermediate=-(FB_R_z-
New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(FB_R_y-New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
FB_L_y_intermediate=-(FB_L_z-
New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(FB_L_y-New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
FB_R_z_na(count)=(FB_R_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+FB_R_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
FB_L_z_na(count)=(FB_L_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+FB_L_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
FB_R_y_na(count)=(-FB_R_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+FB_R_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
FB_L_y_na(count)=(-FB_L_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+FB_L_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
end
count=0;
for i=1:13;
count=count+1;
HC_R_z=HCdimR(i,14);%HardCorner height,in mm,from Bottom
HC_R_y=HCdimR(i,15);%HardCorner distance,in mm,from middle(RIGHT
SECTION)
```

```

    HC_L_z=HCdimL(i,14);%HardCorner height,in mm,from Bottom
    HC_L_y=HCdimL(i,16);%HardCorner distance,in mm,from middle(LEFT
SECTION)
    HC_R_z_intermediate=(HC_R_z-New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(HC_R_y-
New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
    HC_L_z_intermediate=(HC_L_z-New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(HC_L_y-
New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
    HC_R_y_intermediate=-(HC_R_z-
New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(HC_R_y-New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
    HC_L_y_intermediate=-(HC_L_z-
New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(HC_L_y-New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
    HC_R_z_na(count)=(HC_R_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+HC_R_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
    HC_L_z_na(count)=(HC_L_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+HC_L_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
    HC_R_y_na(count)=(-HC_R_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+HC_R_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
    HC_L_y_na(count)=(-HC_L_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+HC_L_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
end
cg_PL_R_z=(PL_R_Sy(1)+PL_R_Sy(2))/sum(PLdimR(:,3));
cg_PL_R_y=PLdimR(1,5);
cg_PL_L_z=(PL_L_Sy(1)+PL_L_Sy(2))/sum(PLdimL(:,3));
cg_PL_L_y=PLdimL(1,6);
    PL_R_z_intermediate=(cg_PL_R_z-
New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(cg_PL_R_y-New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
    PL_L_z_intermediate=(cg_PL_L_z-
New_Z_CG*1000)*cosd(Incline)+(cg_PL_L_y-New_Y_CG*1000)*sind(Incline);
    PL_R_y_intermediate=-(cg_PL_R_z-
New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(cg_PL_R_y-New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
    PL_L_y_intermediate=-(cg_PL_L_z-
New_Z_CG*1000)*sind(Incline)+(cg_PL_L_y-New_Y_CG*1000)*cosd(Incline);
    PL_R_z_na=(PL_R_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+PL_R_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
    PL_L_z_na=(PL_L_z_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline)+PL_L_y_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline))/1000;
    PL_R_y_na=(-PL_R_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+PL_R_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
    PL_L_y_na=(-PL_L_z_intermediate*sind(-
Intermediate_Incline)+PL_L_y_intermediate*cosd(-
Intermediate_Incline))/1000;
%
%-----Sagging Condition-----
%
%-----General Data-----
E=2.06*10^5; %Young's Modulus in N/mm^2
zD=16.550;% Z,coordinate ,in m, of strength deck at side
Zab=16.551;%Section Modulus at bottom,in m^3,in intact condition
Zad=10.004;%Section Modulus at deck,in m^3,in intact condition
N=6.235;% Vetrical distance,in m, from the baseline to the horizontal
%transverse neutral axis of the hull,in intact condition
I=103.193;%Moment of inertia,in m^4,of the hull transverse section

```



```
%about it's horizontal neutral axis,in intact condition
ReH=235;%Min Yield stress,in N/mm^2
Dx=0.01*ReH/(E*(zD-N));%Initial curvature and Step
M1=1000*ReH*Zab;
M2=1000*ReH*Zad;
M=min(M1,M2);
FinalCurvature=0.003*M/(E*I);%FinalCurvature
mom=0;
count=0;
jolly=0;
precision=10^(-6);
%-----
%-----Matrix Preallocation-----
E_R_e=zeros(57,300);
E_R_sigmaCR1=zeros(57,300);
E_R_sigmaCR2=zeros(57,300);
E_R_sigmaCR3=zeros(57,300);
E_R_comp=zeros(57,300);
E_R_sigmaE=zeros(57,300);
E_R_Force=zeros(57,1);
E_R_Moment_Y=zeros(57,1);
E_R_Moment_Z=zeros(57,1);
Total_E_R_Force=zeros(1,300);
Total_E_R_Moment_Y=zeros(1,300);
Total_E_R_Moment_Z=zeros(1,300);

E_L_e=zeros(57,300);
E_L_sigmaCR1=zeros(57,300);
E_L_sigmaCR2=zeros(57,300);
E_L_sigmaCR3=zeros(57,300);
E_L_comp=zeros(57,300);
E_L_sigmaE=zeros(57,300);
E_L_Force=zeros(57,1);
E_L_Moment_Y=zeros(57,1);
E_L_Moment_Z=zeros(57,1);
Total_E_L_Force=zeros(1,300);
Total_E_L_Moment_Y=zeros(1,300);
Total_E_L_Moment_Z=zeros(1,300);

FB_R_e=zeros(9,300);
FB_R_sigmaCR1=zeros(9,300);
FB_R_sigmaCR2=zeros(9,300);
FB_R_sigmaCR4=zeros(9,300);
FB_R_comp=zeros(9,300);
FB_R_sigmaE=zeros(9,300);
FB_R_Force=zeros(9,1);
FB_R_Moment_Y=zeros(9,1);
FB_R_Moment_Z=zeros(9,1);
Total_FB_R_Force=zeros(1,300);
Total_FB_R_Moment_Y=zeros(1,300);
Total_FB_R_Moment_Z=zeros(1,300);

FB_L_e=zeros(9,300);
FB_L_sigmaCR1=zeros(9,300);
FB_L_sigmaCR2=zeros(9,300);
FB_L_sigmaCR4=zeros(9,300);
FB_L_comp=zeros(9,300);
FB_L_sigmaE=zeros(9,300);
FB_L_Force=zeros(9,1);
```

```
FB_L_Moment_Y=zeros(9,1);
FB_L_Moment_Z=zeros(9,1);
Total_FB_L_Force=zeros(1,300);
Total_FB_L_Moment_Y=zeros(1,300);
Total_FB_L_Moment_Z=zeros(1,300);

HC_R_e=zeros(13,300);
HC_R_sigmaE=zeros(13,300);
HC_R_Force=zeros(13,1);
HC_R_Moment_Y=zeros(13,1);
HC_R_Moment_Z=zeros(13,1);
Total_HC_R_Force=zeros(1,300);
Total_HC_R_Moment_Y=zeros(1,300);
Total_HC_R_Moment_Z=zeros(1,300);

HC_L_e=zeros(13,300);
HC_L_sigmaE=zeros(13,300);
HC_L_Force=zeros(13,1);
HC_L_Moment_Y=zeros(13,1);
HC_L_Moment_Z=zeros(13,1);
Total_HC_L_Force=zeros(1,300);
Total_HC_L_Moment_Y=zeros(1,300);
Total_HC_L_Moment_Z=zeros(1,300);

PL_R_e=zeros(1,300);
PL_R_sigmaE=zeros(1,300);
Total_PL_R_Force=zeros(1,300);
PL_R_Moment_Y=zeros(1,300);
PL_R_Moment_Z=zeros(1,300);

PL_L_e=zeros(1,300);
PL_L_sigmaE=zeros(1,300);
Total_PL_L_Force=zeros(1,300);
PL_L_Moment_Y=zeros(1,300);
PL_L_Moment_Z=zeros(1,300);

Curvature=zeros(1,300);
TotalMoment_Y=zeros(300,200);
SagMoment=zeros(1,300);
FinalAngle=zeros(300,200);
TotalMoment_Z=zeros(300,200);
TotalForce=zeros(300,100);
NeutralAxis_Z=zeros(1,300);
NeutralAxis_Y=zeros(1,300);
Interincline=zeros(300,200);
Mz=zeros(300,200);
My=zeros(300,200);
%-----
%-----
YoFinal=New_Y_CG;
ZoFinal=New_Z_CG;
AngleFinal=NA_Incline;
MEGISTHROPH=0;
NA_out_of_bounds=0;
oxi_isoropia_d=0;
oxi_isoropia_i=0;
for x=Dx:Dx:FinalCurvature+Dx*Curvature
    count=count+1;%Counter
    upNeutralAxis=0;
```

```

        downNeutralAxis=0;
        stepNA=0.01;%Neutral axis position change to establish
equilibrium
        isoropia=0;
        stepINCLINATION=5;
        clockwise=0;
        anticlockwise=0;
        if (MEGISTHROPH==1 || NA_out_of_bounds==1 ||
oxi_isoropia_d==1 || oxi_isoropia_i==1)
            disp('Max Moment reached or NA out of bounds')
            MEGISTHROPH
            NA_out_of_bounds
            oxi_isoropia_d
            oxi_isoropia_i
            break
        end
    for na_distance=1:101
        stepINCLINATION=5;
        clockwise=0;
        anticlockwise=0;
        if (isoropia==1 || MEGISTHROPH==1 || NA_out_of_bounds==1 ||
oxi_isoropia_d==1 || oxi_isoropia_i==1)
            break
        end

        for na_inclination=1:201
            Interincline(count,na_inclination)=Intermediate_Incline;
            NeutralAxis_Z(count)=ZoFinal;
            NeutralAxis_Y(count)=YoFinal;
            if (NeutralAxis_Z(count)<0 || NeutralAxis_Z(count)>16.550 ||
abs(NeutralAxis_Y(count))>16.100)
                NA_out_of_bounds=1;
                break
            end
        end
    end

%-----
%Element Right Forces-----
for i=1:57
E_R_s=EdimR(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
E_R_tP=EdimR(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating attached
E_R_hW=EdimR(i,5);% Height of web,in mm
E_R_tW=EdimR(i,6);%Net thickness,in mm,of the web
E_R_bF=EdimR(i,3);%Width,in mm,of the flange
E_R_tF=EdimR(i,4);%Net thickness,in mm,of the flange
E_R_ReH=EdimR(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
E_R_A=EdimR(i,7);%Total stiffener area in mm^2
E_R_y=EdimR(i,12)/1000;%Element distance,in m,from middle(RIGHT
SECTION)
E_R_Astiff=(E_R_hW*E_R_tW+E_R_bF*E_R_tF)/100;%Net sectional area of
the
%stiffener,in cm^2, without attached plating
E_R_eY=E_R_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*E_R_z_na(i);%Element strain
E_R_e(i,count)=ei/E_R_eY;%Relative strain

    if E_R_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<E_R_e(i,count)&& E_R_e(i,count)<1)
        F=E_R_e(i,count);
    else

```

```

        F=-1;
    end

    if F>0

%-----2.2.4 Beam column Buckling-----
betaE=(1000*E_R_s*sqrt(E_R_e(i,count)*E_R_ReH/E))/E_R_tP;
% bE:Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_R_s ;
    else
        bE=E_R_s;
    end
%Element Center of Gravity in cm
CG=((bE*1000)*E_R_tP*(E_R_tP/2)+(E_R_hW*E_R_tW)*(E_R_tP+E_R_hW/2)+...
.
    (E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF*(E_R_tP+E_R_hW-
E_R_tF/2))/(bE*1000*E_R_tP+...
    E_R_hW*E_R_tW+(E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF))/10;%use of bE NOT s
%E_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners with
attached shell plating of width bE
E_R_AE=E_R_Astiff+bE*E_R_tP*10;
% bE1: Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1
        bE1=E_R_s/betaE;
    else
        bE1=E_R_s;
    end
%E_IE: Net moment of inertia of ordinary stiffeners,in cm^4,with
attached shell plating of width bE1
E_R_Ix=((bE1*1000)*(E_R_tP^3)/3+((E_R_bF-E_R_tW)*(E_R_tF^3)/12+...
    (E_R_bF-E_R_tW)*E_R_tF*(E_R_tP+E_R_hW-E_R_tF/2)^2)+...
    (E_R_tW*(E_R_hW^3)/12+E_R_hW*E_R_tW*(E_R_tP+E_R_hW/2)^2))/10^4;
Steiner=E_R_AE*CG^2;
E_R_IE=E_R_Ix-Steiner;
if i<=19
    l=4; %Spacing,in m,of transverse webs IN WING TANK
else
    l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
end
sigmaE1=(pi)^2*E*E_R_IE*10^(-4)/(E_R_AE*l^2);%Euler column buckling
stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>E_R_ReH*E_R_e(i,count)/2
        sigmaC1=E_R_ReH*(1-E_R_ReH*E_R_e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical
stress,in N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/E_R_e(i,count);
    end

E_R_sigmaCR1(i,count)=F*sigmaC1*(E_R_Astiff+10*bE*E_R_tP)/(E_R_Astiff
+10*E_R_s/E_R_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_R_ReH;
    else
        sigmaCP=E_R_ReH;
    end
%sigmae: Euler torsional buckling stress,in N/mm^2

```

```

Aw=E_R_hW*E_R_tW;
Af=E_R_bF*E_R_tF;
ef=E_R_hW+E_R_tF/2;
Ip=(Aw*E_R_hW^2/3+Af*ef^2)/10000;
It=E_R_hW*E_R_tW^3*(1-0.63*E_R_tW/E_R_hW)/30000+E_R_bF*E_R_tF^3*(1-
0.63*E_R_tF/E_R_bF)/30000;
Iw=Af*ef^2*E_R_bF^2*(Af+2.6*Aw)/(12000000*(Af+Aw));
a=1*1000;%
b=800;%
t=E_R_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*E_R_hW/(3*E_R_tW^3))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmae>E_R_ReH*E_R_e(i,count)/2
        sigmaC2=E_R_ReH*(1-E_R_ReH*E_R_e(i,count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/E_R_e(i,count);
    end

E_R_sigmaCR2(i,count)=F*(E_R_Astiff*sigmaC2+10*E_R_s*E_R_tP*sigmaCP)/
(E_R_Astiff+10*E_R_s*E_R_tP);
%-----2.2.6 Web local buckling of flanged profiles-----
betaW=E_R_hW*sqrt(E_R_e(i,count)*E_R_ReH/E)/E_R_tW;
    if betaW>1.25
        hWE=(2.25/betaW-1.25/betaW^2)*E_R_hW;%hWE:Effective height,in
mm,of the web
    else
        hWE=E_R_hW;
    end

E_R_sigmaCR3(i,count)=F*E_R_ReH*(10^3*bE_R_tP+hWE*E_R_tW+E_R_bF*E_R
_tF)/(10^3*E_R_s*E_R_tP+E_R_hW*E_R_tW+E_R_bF*E_R_tF);
%_____FINAL_STRESS_____
E_R_comp(i,count)=min(E_R_sigmaCR1(i,count),E_R_sigmaCR2(i,count));
E_R_sigmaE(i,count)=min(E_R_comp(i,count),E_R_sigmaCR3(i,count));%Fin
al stress of the element,in N/mm^2
    else
        E_R_sigmaE(i,count)=F*E_R_ReH;
    end

E_R_Force(i)=E_R_sigmaE(i,count)*E_R_A;
E_R_Moment_Y(i)=E_R_Force(i)*E_R_z_na(i);
E_R_Moment_Z(i)=E_R_Force(i)*E_R_y_na(i);
end
Total_E_R_Force(count)=sum(E_R_Force);
Total_E_R_Moment_Y(count)=sum(E_R_Moment_Y);
Total_E_R_Moment_Z(count)=sum(E_R_Moment_Z);
%
%Element Left Forces-----
for i=1:57
E_L_s=EdimL(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
E_L_tP=EdimL(i,2); %Net thickness,in mm,of the plating attached
E_L_hW=EdimL(i,5); % Height of web,in mm
E_L_tW=EdimL(i,6);%Net thickness,in mm,of the web
E_L_bF=EdimL(i,3);%Width,in mm,of the flange
E_L_tF=EdimL(i,4);%Net thickness,in mm,of the flange
E_L_ReH=EdimL(i,10); %Min Yield stress,in N/mm^2
E_L_A=EdimL(i,7);%Total stiffener area in mm^2

```

```

E_L_y=EdimL(i,13)/1000;%Element distance,in m,from middle(LEFT
SECTION)
E_L_Astiff=(E_L_hW*E_L_tW+E_L_bF*E_L_tF)/100 ;%Net sectional area of
the stiffener,in cm^2, without attached plating
E_L_eY=E_L_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*E_L_z_na(i);%Element strainSOS-SOS-SOS
E_L_e(i,count)=ei/E_L_eY;%Relative strain

    if E_L_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<E_L_e(i,count)&& E_L_e(i,count)<1)
        F=E_L_e(i,count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0

%-----2.2.4 Beam column Buckling-----
betaE=(1000*E_L_s*sqrt(E_L_e(i,count)*E_L_ReH/E))/E_L_tP;
% bE:Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_L_s ;
    else
        bE=E_L_s;
    end
%Element Center of Gravity in cm
CG=(( (bE*1000)*E_L_tP*(E_L_tP/2)+(E_L_hW*E_L_tW)*(E_L_tP+E_L_hW/2)+..
.
    (E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF*(E_L_tP+E_L_hW-
E_L_tF/2))/(bE*1000*E_L_tP+...
    E_L_hW*E_L_tW+(E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF))/10;%use of bE NOT s
%E_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners with
attached shell plating of width bE
E_L_AE=E_L_Astiff+bE*E_L_tP*10;
% bE1: Effective width,in m,of the attached shell plating
    if betaE>1
        bE1=E_L_s/betaE;
    else
        bE1=E_L_s;
    end
%E_IE: Net moment of inertia of ordinary stiffeners,in cm^4,with
attached shell plating of width bE1
E_L_Ix=((bE1*1000)*(E_L_tP^3)/3+((E_L_bF-E_L_tW)*(E_L_tF^3)/12+...
    (E_L_bF-E_L_tW)*E_L_tF*(E_L_tP+E_L_hW-E_L_tF/2)^2)+...
    (E_L_tW*(E_L_hW^3)/12+E_L_hW*E_L_tW*(E_L_tP+E_L_hW/2)^2))/10^4;
Steiner=E_L_AE*CG^2;
E_L_IE=E_L_Ix-Steiner;
    if i<=19
        l=4; %Spacing,in m,of transverse webs IN WING TANK
    else
        l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
    end
sigmaE1=(pi)^2*E*E_L_IE*10^(-4)/(E_L_AE*l^2);%Euler column buckling
stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>E_L_ReH*E_L_e(i,count)/2
        sigmaC1=E_L_ReH*(1-E_L_ReH*E_L_e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical
stress,in N/mm^2
    else

```

```

sigmaC1=sigmaE1/E_L_e(i, count);
end

E_L_sigmaCR1(i, count)=F*sigmaC1*(E_L_Astiff+10*bE*E_L_tP)/(E_L_Astiff
+10*E_L_s/E_L_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating, in N/mm^2
if betaE>1.25
sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*E_L_ReH;
else
sigmaCP=E_L_ReH;
end
%sigmae: Euler torsional buckling stress, in N/mm^2
Aw=E_L_hW*E_L_tW;
Af=E_L_bF*E_L_tF;
ef=E_L_hW+E_L_tF/2;
Ip=(Aw*E_L_hW^2/3+Af*ef^2)/10000;
It=E_L_hW*E_L_tW^3*(1-0.63*E_L_tW/E_L_hW)/30000+E_L_bF*E_L_tF^3*(1-
0.63*E_L_tF/E_L_bF)/30000;
Iw=Af*ef^2*E_L_bF^2*(Af+2.6*Aw)/(12000000*(Af+Aw));
a=1*1000;%
b=800;%
t=E_L_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*E_L_hW/(3*E_L_tW^3))));
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress, in N/mm^2
if sigmae>E_L_ReH*E_L_e(i, count)/2
sigmaC2=E_L_ReH*(1-E_L_ReH*E_L_e(i, count)/(4*sigmae));
else
sigmaC2=sigmae/E_L_e(i, count);
end

E_L_sigmaCR2(i, count)=F*(E_L_Astiff*sigmaC2+10*E_L_s*E_L_tP*sigmaCP)/
(E_L_Astiff+10*E_L_s*E_L_tP);
%-----2.2.6 Web local buckling of flanged profiles-----
betaW=E_L_hW*sqrt(E_L_e(i, count)*E_L_ReH/E)/E_L_tW;
if betaW>1.25
hWE=(2.25/betaW-1.25/betaW^2)*E_L_hW;%hWE:Effective height, in
mm, of the web
else
hWE=E_L_hW;
end

E_L_sigmaCR3(i, count)=F*E_L_ReH*(10^3*bE*E_L_tP+hWE*E_L_tW+E_L_bF*E_L
_tF)/(10^3*E_L_s*E_L_tP+E_L_hW*E_L_tW+E_L_bF*E_L_tF);
%_____FINAL_STRESS_____
E_L_comp(i, count)=min(E_L_sigmaCR1(i, count), E_L_sigmaCR2(i, count));
E_L_sigmaE(i, count)=min(E_L_comp(i, count), E_L_sigmaCR3(i, count));%Fin
al stress of the element, in N/mm^2
else
E_L_sigmaE(i, count)=F*E_L_ReH;
end

E_L_Force(i)=E_L_sigmaE(i, count)*E_L_A;
E_L_Moment_Y(i)=E_L_Force(i)*E_L_z_na(i);
E_L_Moment_Z(i)=E_L_Force(i)*E_L_y_na(i);
end
Total_E_L_Force(count)=sum(E_L_Force);
Total_E_L_Moment_Y(count)=sum(E_L_Moment_Y);

```

```
Total_E_L_Moment_Z(count)=sum(E_L_Moment_Z);
%
%FlatBar Right Forces-----
for i=1:9;
FB_R_s=FBdimR(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
FB_R_tP=FBdimR(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating attached
FB_R_hW=FBdimR(i,3);%Height of web,in mm
FB_R_tW=FBdimR(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
FB_R_A=FBdimR(i,5);%Total stiffener area in mm^2
FB_R_y=FBdimR(i,9)/1000;%FlatBar distance,in m,from middle(RIGHT
SECTION)
FB_R_Astiff=FB_R_hW*FB_R_tW/100 ;%Net sectional area of the
stiffener,in cm^2, without attached plating
FB_R_ReH=FBdimR(i,7); %Min Yield stress,in N/mm^2
FB_R_eY=FB_R_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*FB_R_z_na(i);%Element strain
FB_R_e(i,count)=ei/FB_R_eY;%Relative strain

    if FB_R_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<FB_R_e(i,count) &&FB_R_e(i,count)<1)
        F=FB_R_e(i,count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0
%-----2.2.4 Beam column Buckling of Flat Bar-----
betaE=(1000*FB_R_s*sqrt(FB_R_e(i,count)*FB_R_ReH/E))/FB_R_tP;
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_R_s;%bE:Effective width,in
m,of the attached shell plating
    else
        bE=FB_R_s;
    end
%FlatBar Center of Gravity in cm
CG=((bE*1000*FB_R_tP*FB_R_tP/2+FB_R_hW*FB_R_tW*(FB_R_tP+FB_R_hW/2))/(
bE*1000*FB_R_tP+FB_R_hW*FB_R_tW))/10;%use of bE NOT s
FB_R_AE=FB_R_Astiff+bE*FB_R_tP*10;
%FB_R_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners with
attached shell plating of width bE
    if betaE>1
        bE1=FB_R_s/betaE;%bE1: Effective width,in m,of the attached
shell plating
    else
        bE1=FB_R_s;
    end
%FB_R_IE: Net moment of inertia of FlatBar stiffeners,in cm^4,with
attached shell plating of width bE1
FB_R_Ix=(bE1*1000*(FB_R_tP^3)/3+FB_R_tW*(FB_R_hW^3)/12+FB_R_hW*FB_R_t
W*(FB_R_tP+FB_R_hW/2)^2)/10^4;
Steiner=FB_R_AE*CG^2;
FB_R_IE=FB_R_Ix-Steiner;
l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
sigmaE1=(pi)^2*E*FB_R_IE*10^(-4)/(FB_R_AE*l^2);%Euler column buckling
stress,in N/mm^2
    if sigmaE1>FB_R_ReH*FB_R_e(i,count)/2
        sigmaC1=FB_R_ReH*(1-
FB_R_ReH*FB_R_e(i,count)/(4*sigmaE1));%Critical stress,in N/mm^2
```



```

else
    sigmaC1=sigmaE1/FB_R_e(i, count);
end
FB_R_sigmaCR1(i, count)=F*sigmaC1*(FB_R_Astiff+10*bE*FB_R_tP)/(FB_R_Astiff+10*FB_R_s*FB_R_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating, in N/mm^2
if betaE>1.25
    sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_R_ReH;
else
    sigmaCP=FB_R_ReH;
end
%sigmae: Euler torsional buckling stress, in N/mm^2
Ip=FB_R_hW^3*FB_R_tW/30000;
It=FB_R_hW*FB_R_tW^3*(1-0.63*FB_R_tW/FB_R_hW)/30000;
Iw=FB_R_hW^3*FB_R_tW^3/36000000;
a=1*1000;%CHECK it
b=800;%CHECK it
t=FB_R_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*FB_R_hW/(3*FB_R_tW^3))))
;
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress, in N/mm^2
if sigmae>FB_R_ReH*FB_R_e(i, count)/2
    sigmaC2=FB_R_ReH*(1-FB_R_ReH*FB_R_e(i, count)/(4*sigmae));
else
    sigmaC2=sigmae/FB_R_e(i, count);
end
FB_R_sigmaCR2(i, count)=F*(FB_R_Astiff*sigmaC2+10*FB_R_s*FB_R_tP*sigmaCP)/(FB_R_Astiff+10*FB_R_s*FB_R_tP);
%-----2.2.7 Web local buckling of flat bars-----
betaE=(1000*FB_R_s*sqrt(FB_R_e(i, count)*FB_R_ReH/E))/FB_R_tP;
if betaE>1.25
    sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_R_ReH ;
else
    sigmaCP=FB_R_ReH;
end
sigmaE4=160000*(FB_R_tW/FB_R_hW)^2;%sigmaE4: Local Euler buckling stress, in N/mm^2
%sigmaC4: Critical stress, in N/mm^2
if sigmaE4>FB_R_ReH*FB_R_e(i, count)/2
    sigmaC4=FB_R_ReH*(1-FB_R_ReH*FB_R_e(i, count)/(4*sigmaE4));
else
    sigmaC4=sigmaE4/FB_R_e(i, count);
end
FB_R_sigmaCR4(i, count)=F*(10*FB_R_s*FB_R_tP*sigmaCP+FB_R_Astiff*sigmaC4)/(FB_R_Astiff+10*FB_R_s*FB_R_tP);
%_____FINAL_STRESS_____
FB_R_comp(i, count)=min(FB_R_sigmaCR1(i, count), FB_R_sigmaCR2(i, count))
;
FB_R_sigmaE(i, count)=min(FB_R_comp(i, count), FB_R_sigmaCR4(i, count));%
Final stress of the Flat Bar, in N/mm^2
else
    FB_R_sigmaE(i, count)=F*FB_R_ReH;
end

FB_R_Force(i)=FB_R_sigmaE(i, count)*FB_R_A;
FB_R_Moment_Y(i)=FB_R_Force(i)*FB_R_z_na(i);
FB_R_Moment_Z(i)=FB_R_Force(i)*FB_R_y_na(i);

```

```

end
Total_FB_R_Force(count)=sum(FB_R_Force);
Total_FB_R_Moment_Y(count)=sum(FB_R_Moment_Y);
Total_FB_R_Moment_Z(count)=sum(FB_R_Moment_Z);
%
%FlatBar Left Forces-----
for i=1:9;
FB_L_s=FBdimL(i,1)/1000;%Width,in m, of attached plating
FB_L_tP=FBdimL(i,2);%Net thickness,in mm,of the plating attached
FB_L_hW=FBdimL(i,3);%Height of web,in mm
FB_L_tW=FBdimL(i,4);%Net thickness,in mm,of the web
FB_L_A=FBdimL(i,5);%Total stiffener area in mm^2
FB_L_y=FBdimL(i,10)/1000;%FlatBar distance,in m,from middle(LEFT
SECTION)
FB_L_Astiff=FB_L_hW*FB_L_tW/100 ;%Net sectional area of the
stiffener,in cm^2, without attached plating
FB_L_ReH=FBdimL(i,7); %Min Yield stress,in N/mm^2
FB_L_eY=FB_L_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*FB_L_z_na(i);%Element strain
FB_L_e(i,count)=ei/FB_L_eY;%Relative strain

    if FB_L_e(i,count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<FB_L_e(i,count) &&FB_L_e(i,count)<1)
        F=FB_L_e(i,count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0
%-----2.2.4 Beam column Buckling of Flat Bar-----
betaE=(1000*FB_L_s*sqrt(FB_L_e(i,count)*FB_L_ReH/E))/FB_L_tP;
    if betaE>1.25
        bE=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_L_s;%bE:Effective width,in
m,of the attached shell plating
    else
        bE=FB_L_s;
    end
%FlatBar Center of Gravity in cm
CG=((bE*1000*FB_L_tP*FB_L_tP/2+FB_L_hW*FB_L_tW*(FB_L_tP+FB_L_hW/2))/(
bE*1000*FB_L_tP+FB_L_hW*FB_L_tW))/10;%use of bE NOT s
FB_L_AE=FB_L_Astiff+bE*FB_L_tP*10;
%FB_L_AE: Net sectional area,in cm^2,of ordinary stiffeners with
attached shell plating of width bE
    if betaE>1
        bE1=FB_L_s/betaE;%bE1: Effective width,in m,of the attached
shell plating
    else
        bE1=FB_L_s;
    end
%FB_L_IE: Net moment of inertia of FlatBar stiffeners,in cm^4,with
attached shell plating of width bE1
FB_L_Ix=(bE1*1000*(FB_L_tP^3)/3+FB_L_tW*(FB_L_hW^3)/12+FB_L_hW*FB_L_t
W*(FB_L_tP+FB_L_hW/2)^2)/10^4;
Steiner=FB_L_AE*CG^2;
FB_L_IE=FB_L_Ix-Steiner;
l=2.4;%Spacing,in m,of transverse webs IN bottom TANK
sigmaE1=(pi)^2*E*FB_L_IE*10^(-4)/(FB_L_AE*l^2);%Euler column buckling
stress,in N/mm^2

```

```

    if sigmaE1>FB_L_ReH*FB_L_e(i, count)/2
        sigmaC1=FB_L_ReH*(1-
FB_L_ReH*FB_L_e(i, count)/(4*sigmaE1));%Critical stress,in N/mm^2
    else
        sigmaC1=sigmaE1/FB_L_e(i, count);
    end
FB_L_sigmaCR1(i, count)=F*sigmaC1*(FB_L_Astiff+10*bE*FB_L_tP)/(FB_L_Astiff+10*FB_L_s*FB_L_tP);
%-----2.2.5 Torsional buckling-----
%sigmaCP: Buckling stress of the attached plating,in N/mm^2
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_L_ReH;
    else
        sigmaCP=FB_L_ReH;
    end
%sigmae: Euler torsional buckling stress,in N/mm^2
Ip=FB_L_hW^3*FB_L_tW/30000;
It=FB_L_hW*FB_L_tW^3*(1-0.63*FB_L_tW/FB_L_hW)/30000;
Iw=FB_L_hW^3*FB_L_tW^3/36000000;
a=1*1000;%CHECK it
b=800;%CHECK it
t=FB_L_tP;%
epsilon=1+sqrt(a^4/((3/4)*(pi)^4*Iw*(b/t^3+4*FB_L_hW/(3*FB_L_tW^3))))
;
sigmae=E/Ip*((pi)^2*Iw*100*epsilon/a^2+0.356*It);
%sigmaC2: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmae>FB_L_ReH*FB_L_e(i, count)/2
        sigmaC2=FB_L_ReH*(1-FB_L_ReH*FB_L_e(i, count)/(4*sigmae));
    else
        sigmaC2=sigmae/FB_L_e(i, count);
    end
FB_L_sigmaCR2(i, count)=F*(FB_L_Astiff*sigmaC2+10*FB_L_s*FB_L_tP*sigma
CP)/(FB_L_Astiff+10*FB_L_s*FB_L_tP);
%-----2.2.7 Web local buckling of flat bars-----
betaE=(1000*FB_L_s*sqrt(FB_L_e(i, count)*FB_L_ReH/E))/FB_L_tP;
    if betaE>1.25
        sigmaCP=(2.25/betaE-1.25/(betaE)^2)*FB_L_ReH ;
    else
        sigmaCP=FB_L_ReH;
    end
sigmaE4=160000*(FB_L_tW/FB_L_hW)^2;%sigmaE4: Local Euler buckling
stress,in N/mm^2
%sigmaC4: Critical stress,in N/mm^2
    if sigmaE4>FB_L_ReH*FB_L_e(i, count)/2
        sigmaC4=FB_L_ReH*(1-FB_L_ReH*FB_L_e(i, count)/(4*sigmaE4));
    else
        sigmaC4=sigmaE4/FB_L_e(i, count);
    end
FB_L_sigmaCR4(i, count)=F*(10*FB_L_s*FB_L_tP*sigmaCP+FB_L_Astiff*sigma
C4)/(FB_L_Astiff+10*FB_L_s*FB_L_tP);
%_____FINAL STRESS_____
FB_L_comp(i, count)=min(FB_L_sigmaCR1(i, count),FB_L_sigmaCR2(i, count))
;
FB_L_sigmaE(i, count)=min(FB_L_comp(i, count),FB_L_sigmaCR4(i, count));%
Final stress of the Flat Bar,in N/mm^2
    else
        FB_L_sigmaE(i, count)=F*FB_L_ReH;
    end
end

```

```
FB_L_Force(i)=FB_L_sigmaE(i, count)*FB_L_A;  
FB_L_Moment_Y(i)=FB_L_Force(i)*FB_L_z_na(i);  
FB_L_Moment_Z(i)=FB_L_Force(i)*FB_L_y_na(i);  
end  
Total_FB_L_Force(count)=sum(FB_L_Force);  
Total_FB_L_Moment_Y(count)=sum(FB_L_Moment_Y);  
Total_FB_L_Moment_Z(count)=sum(FB_L_Moment_Z);  
%  
%Hard Corner Right Forces-----  
for i=1:13  
    HC_R_y=HCdimR(i,15)/1000;%HardCorner distance,in m,from  
middle(RIGHT SECTION)  
    HC_R_A=HCdimR(i,11);%Total Hard corner Area in mm^2  
    HC_R_ReH=HCdimR(i,13);%Min Yield stress,in N/mm^2  
    HC_R_eY=HC_R_ReH/E;%Strain at yield stress in the Hard Corner  
    ei=x*HC_R_z_na(i);%Element strain  
    HC_R_e(i, count)=ei/HC_R_eY;%Relative strain  
  
    if HC_R_e(i, count)>=1  
        F=1;  
    elseif (-1<HC_R_e(i, count) && HC_R_e(i, count)<1)  
        F=HC_R_e(i, count);  
    else  
        F=-1;  
    end  
  
    HC_R_sigmaE(i, count)=F*HC_R_ReH;%Final stress of the Hard  
Corner,in N/mm^2  
  
    HC_R_Force(i)=HC_R_sigmaE(i, count)*HC_R_A;  
    HC_R_Moment_Y(i)=HC_R_Force(i)*HC_R_z_na(i);  
    HC_R_Moment_Z(i)=HC_R_Force(i)*HC_R_y_na(i);  
end  
Total_HC_R_Force(count)=sum(HC_R_Force);  
Total_HC_R_Moment_Y(count)=sum(HC_R_Moment_Y);  
Total_HC_R_Moment_Z(count)=sum(HC_R_Moment_Z);  
%  
%Hard Corner Left Forces-----  
for i=1:13  
    HC_L_y=HCdimL(i,16)/1000;%HardCorner distance,in m,from  
middle(LEFT SECTION)  
    HC_L_A=HCdimL(i,11);%Total Hard corner Area in mm^2  
    HC_L_ReH=HCdimL(i,13);%Min Yield stress,in N/mm^2  
    HC_L_eY=HC_L_ReH/E;%Strain at yield stress in the Hard Corner  
    ei=x*HC_L_z_na(i);%Element strain  
    HC_L_e(i, count)=ei/HC_L_eY;%Relative strain  
  
    if HC_L_e(i, count)>=1  
        F=1;  
    elseif (-1<HC_L_e(i, count) && HC_L_e(i, count)<1)  
        F=HC_L_e(i, count);  
    else  
        F=-1;  
    end  
  
    HC_L_sigmaE(i, count)=F*HC_L_ReH;%Final stress of the Hard  
Corner,in N/mm^2  
  
    HC_L_Force(i)=HC_L_sigmaE(i, count)*HC_L_A;
```

```

    HC_L_Moment_Y(i)=HC_L_Force(i)*HC_L_z_na(i);
    HC_L_Moment_Z(i)=HC_L_Force(i)*HC_L_y_na(i);
end
Total_HC_L_Force(count)=sum(HC_L_Force);
Total_HC_L_Moment_Y(count)=sum(HC_L_Moment_Y);
Total_HC_L_Moment_Z(count)=sum(HC_L_Moment_Z);

%
%-----
%Plate Right Force-----
PL_R_tP=12.25; %Net thickness,in mm,of the plating (the smaller of
the two)
PL_R_s=0.8;%Plate breadth,in m,taken as the Frame spacing(X
dimension)
l=5.404;%Longer side of the plate,in m(Z dimension)
PL_R_A=PL_R_tP*1*10^3;%Area of plate in mm^2
PL_R_ReH=355; %Min Yield stress,in N/mm^2, with k factor 0.72
PL_R_eY=PL_R_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*PL_R_z_na;%Element strain
PL_R_e(count)=ei/PL_R_eY;%Relative strain

    if PL_R_e(count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<PL_R_e(count) && PL_R_e(count)<1)
        F=PL_R_e(count);
    else
        F=-1;
    end

    if F>0
        betaE=10^3*PL_R_s*sqrt(PL_R_e(count)*PL_R_ReH/E)/PL_R_tP;
        sigmaCR5a=F*PL_R_ReH;
        sigmaCR5b=F*PL_R_ReH*(PL_R_s/l*(2.25/betaE-
1.25/betaE^2)+0.1*(1-PL_R_s/l)*(1+1/betaE^2)^2);
        sigmaCR5=min(sigmaCR5a,sigmaCR5b);
        PL_R_sigmaE(count)=sigmaCR5;
    else
        PL_R_sigmaE(count)=F*PL_R_ReH;
    end
Total_PL_R_Force(count)=PL_R_sigmaE(count)*PL_R_A;
PL_R_Moment_Y(count)=Total_PL_R_Force(count)*PL_R_z_na;
PL_R_Moment_Z(count)=Total_PL_R_Force(count)*PL_R_y_na;
%
%-----
%Plate Left Force-----
PL_L_tP=12.25; %Net thickness,in mm,of the plating (the smaller of
the two)
PL_L_s=0.8;%Plate breadth,in m,taken as the Frame spacing(X
dimension)
l=5.404;%Longer side of the plate,in m(Z dimension)
PL_L_A=PL_L_tP*1*10^3;%Area of plate in mm^2
PL_L_ReH=355; %Min Yield stress,in N/mm^2, with k factor 0.72
PL_L_eY=PL_L_ReH/E;%Strain at yield stress in the element
ei=x*PL_L_z_na;%Element strain
PL_L_e(count)=ei/PL_L_eY;%Relative strain

    if PL_L_e(count)>=1
        F=1;
    elseif (-1<PL_L_e(count) && PL_L_e(count)<1)
        F=PL_L_e(count);
    else

```

```

    F=-1;
end

if F>0
    betaE=10^3*PL_L_s*sqrt(PL_L_e(count)*PL_L_ReH/E)/PL_L_tP;
    sigmaCR5a=F*PL_L_ReH;
    sigmaCR5b=F*PL_L_ReH*(PL_L_s/l*(2.25/betaE-
1.25/betaE^2)+0.1*(1-PL_L_s/l)*(1+1/betaE^2)^2);
    sigmaCR5=min(sigmaCR5a,sigmaCR5b);
    PL_L_sigmaE(count)=sigmaCR5;
else
    PL_L_sigmaE(count)=F*PL_L_ReH;
end
Total_PL_L_Force(count)=PL_L_sigmaE(count)*PL_L_A;
PL_L_Moment_Y(count)=Total_PL_L_Force(count)*PL_L_z_na;
PL_L_Moment_Z(count)=Total_PL_L_Force(count)*PL_L_y_na;
%-----
TotalMoment_Z(count,na_inclination)=...
    (Total_E_R_Moment_Z(count)+Total_E_L_Moment_Z(count)+...
    Total_FB_R_Moment_Z(count)+Total_FB_L_Moment_Z(count)+...
    Total_HC_R_Moment_Z(count)+Total_HC_L_Moment_Z(count)+...
    PL_R_Moment_Z(count)+PL_L_Moment_Z(count))/10^9;%Total Moment Z
neutral axis in millions kNm

TotalMoment_Y(count,na_inclination)=...
    (Total_E_R_Moment_Y(count)+Total_E_L_Moment_Y(count)+...
    Total_FB_R_Moment_Y(count)+Total_FB_L_Moment_Y(count)+...
    Total_HC_R_Moment_Y(count)+Total_HC_L_Moment_Y(count)+...
    PL_R_Moment_Y(count)+PL_L_Moment_Y(count))/10^9;%Total Moment Y
neutral axis in millions kNm

AngleFinal=Incline-Intermediate_Incline;
FinalAngle(count,na_inclination)=AngleFinal;
Mz(count,na_inclination)=TotalMoment_Y(count,na_inclination)*sind(Ang
leFinal
My(count,na_inclination)=TotalMoment_Y(count,na_inclination)*cosd(Ang
leFinal

    if (na_inclination==201 &&
abs(Mz(count,na_inclination))>precision)
        oxi_isoropia_i=1;
        break
    end
    if abs(Mz(count,na_inclination))<=precision;
TotalForce(count,na_distance)=Total_E_R_Force(count)+Total_E_L_Force(
count)+...

Total_FB_R_Force(count)+Total_FB_L_Force(count)+...

Total_HC_R_Force(count)+Total_HC_L_Force(count)+...
        Total_PL_R_Force(count)+Total_PL_L_Force(count);

    if (na_distance==101 &&
abs(TotalForce(count,na_distance))>100)
        oxi_isoropia_d=1;
        break
    end

if abs(TotalForce(count,na_distance))<=100;

```

```
        mom=mom+1;  
        SagMoment (mom)=My (count,na_inclination);%Total Moment in millions  
kNm  
        Curvature (mom)=x;  
  
        jolly=jolly+1 %#ok<NOPTS>  
        isoropia=1;  
        if SagMoment (mom)>3.33  
            MEGISTHROPH=1;  
            break  
        end  
  
        break  
elseif TotalForce (count,na_distance)>100  
    E_R_z_na=E_R_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    E_R_y_na=E_R_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    E_L_z_na=E_L_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    E_L_y_na=E_L_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    FB_R_z_na=FB_R_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    FB_R_y_na=FB_R_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    FB_L_z_na=FB_L_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    FB_L_y_na=FB_L_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    HC_R_z_na=HC_R_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    HC_R_y_na=HC_R_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    HC_L_z_na=HC_L_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    HC_L_y_na=HC_L_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    PL_R_z_na=PL_R_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    PL_R_y_na=PL_R_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    PL_L_z_na=PL_L_z_na-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    PL_L_y_na=PL_L_y_na-stepNA*sind (AngleFinal);  
    upNeutralAxis=1;  
    YoFinal=YoFinal+stepNA*sind (AngleFinal);  
    ZoFinal=ZoFinal+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    break  
elseif TotalForce (count,na_distance)<-100  
    E_R_z_na=E_R_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    E_R_y_na=E_R_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    E_L_z_na=E_L_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    E_L_y_na=E_L_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    FB_R_z_na=FB_R_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    FB_R_y_na=FB_R_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    FB_L_z_na=FB_L_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    FB_L_y_na=FB_L_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    HC_R_z_na=HC_R_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    HC_R_y_na=HC_R_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    HC_L_z_na=HC_L_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    HC_L_y_na=HC_L_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    PL_R_z_na=PL_R_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    PL_R_y_na=PL_R_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    PL_L_z_na=PL_L_z_na+stepNA*cosd (AngleFinal);  
    PL_L_y_na=PL_L_y_na+stepNA*sind (AngleFinal);  
    downNeutralAxis=1;  
    YoFinal=YoFinal-stepNA*sind (AngleFinal);  
    ZoFinal=ZoFinal-stepNA*cosd (AngleFinal);  
    break  
end  
  
elseif Mz (count,na_inclination)>precision  
    Intermediate_Incline=Intermediate_Incline+stepINCLINATION;
```

```
anticlockwise=1;
AngleFinal=Incline-Intermediate_Incline;

E_R_z_na_OLD=E_R_z_na;
E_L_z_na_OLD=E_L_z_na;
E_R_y_na_OLD=E_R_y_na;
E_L_y_na_OLD=E_L_y_na;

E_R_z_na=(E_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+E_R_y_na_OLD*sind(AngleFinal)
);

E_L_z_na=(E_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+E_L_y_na_OLD*sind(AngleFinal)
);
E_R_y_na=(-
E_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+E_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
E_L_y_na=(-
E_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+E_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

FB_R_z_na_OLD=FB_R_z_na;
FB_L_z_na_OLD=FB_L_z_na;
FB_R_y_na_OLD=FB_R_y_na;
FB_L_y_na_OLD=FB_L_y_na;

FB_R_z_na=(FB_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+FB_R_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));

FB_L_z_na=(FB_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+FB_L_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));
FB_R_y_na=(-
FB_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+FB_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
FB_L_y_na=(-
FB_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+FB_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

HC_R_z_na_OLD=HC_R_z_na;
HC_L_z_na_OLD=HC_L_z_na;
HC_R_y_na_OLD=HC_R_y_na;
HC_L_y_na_OLD=HC_L_y_na;

HC_R_z_na
=(HC_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+HC_R_y_na_OLD*sind(AngleFinal));

HC_L_z_na=(HC_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+HC_L_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));
HC_R_y_na=(-
HC_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+HC_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
HC_L_y_na=(-
HC_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+HC_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

PL_R_z_na_OLD=PL_R_z_na;
PL_L_z_na_OLD=PL_L_z_na;
PL_R_y_na_OLD=PL_R_y_na;
PL_L_y_na_OLD=PL_L_y_na;

PL_R_z_na=(PL_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+PL_R_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));

PL_L_z_na=(PL_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+PL_L_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));
```



```
    PL_R_y_na=(-
PL_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+PL_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
    PL_L_y_na=(-
PL_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+PL_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

    elseif Mz(count,na_inclination)<-precision
        Intermediate_Incline=Intermediate_Incline-stepINCLINATION;
        clockwise=1;
        AngleFinal=Incline-Intermediate_Incline;

        E_R_z_na_OLD=E_R_z_na;
        E_L_z_na_OLD=E_L_z_na;
        E_R_y_na_OLD=E_R_y_na;
        E_L_y_na_OLD=E_L_y_na;

E_R_z_na=(E_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+E_R_y_na_OLD*sind(AngleFinal)
);

E_L_z_na=(E_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+E_L_y_na_OLD*sind(AngleFinal)
);
    E_R_y_na=(-
E_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+E_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
    E_L_y_na=(-
E_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+E_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

        FB_R_z_na_OLD=FB_R_z_na;
        FB_L_z_na_OLD=FB_L_z_na;
        FB_R_y_na_OLD=FB_R_y_na;
        FB_L_y_na_OLD=FB_L_y_na;

FB_R_z_na=(FB_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+FB_R_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));

FB_L_z_na=(FB_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+FB_L_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));
    FB_R_y_na=(-
FB_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+FB_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
    FB_L_y_na=(-
FB_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+FB_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

        HC_R_z_na_OLD=HC_R_z_na;
        HC_L_z_na_OLD=HC_L_z_na;
        HC_R_y_na_OLD=HC_R_y_na;
        HC_L_y_na_OLD=HC_L_y_na;

    HC_R_z_na
=(HC_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+HC_R_y_na_OLD*sind(AngleFinal));

HC_L_z_na=(HC_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+HC_L_y_na_OLD*sind(AngleFin
al));
    HC_R_y_na=(-
HC_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+HC_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
    HC_L_y_na=(-
HC_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+HC_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

        PL_R_z_na_OLD=PL_R_z_na;
        PL_L_z_na_OLD=PL_L_z_na;
        PL_R_y_na_OLD=PL_R_y_na;
        PL_L_y_na_OLD=PL_L_y_na;
```

```
PL_R_z_na=(PL_R_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+PL_R_y_na_OLD*sind(AngleFinal));
PL_L_z_na=(PL_L_z_na_OLD*cosd(AngleFinal)+PL_L_y_na_OLD*sind(AngleFinal));
    PL_R_y_na=(-
PL_R_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+PL_R_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));
    PL_L_y_na=(-
PL_L_z_na_OLD*sind(AngleFinal)+PL_L_y_na_OLD*cosd(AngleFinal));

    end
        if ((clockwise==1) && (anticlockwise==1))
            stepINCLINATION=stepINCLINATION/2;
            clockwise=0;
            anticlockwise=0;
        end

        end%of inclination loop

        if ((upNeutralAxis==1) && (downNeutralAxis==1))
            stepNA=stepNA/2;
            upNeutralAxis=0;
            downNeutralAxis=0;
        end

        end%end of distance loop

    end%end of curvature loop
figure
plot(SagMoment(1,:) , 'r*--')
xlabel('Sagging Curvature in steps')
ylabel('Moment in Millions kNm')
grid on
sag=max(SagMoment) %#ok<NOPTS>
```