



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

**Μέγιστη αντοχή γάστρας δεξαμενόπλοιου  
σε διαμήκη κάμψη με αναλυτικές μεθόδους.**



**Μπουγιούκος Παναγιώτης-Βασίλειος**

**Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Μ. Σ. Σαμουηλίδης**

**ΑΘΗΝΑ 2009**







---

---

## Π Ε Ρ Ι Λ Η Ψ Η

---

---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται κώδικας στο υπολογιστικό περιβάλλον του Matlab που υπολογίζει την μέγιστη διαμήκη αντοχή της γάστρας ενός δεξαμενοπλοίου με αναλυτικές μεθόδους και ειδικότερα με την προσαυξητική επαναληπτική μέθοδο, η οποία περιλαμβάνεται και στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς της Διεθνούς Ένωσης Νηογνωμόνων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, συγκρίνονται με άλλες γνωστές μεθόδους και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα.

## S U M M A R Y

In this dissertation, a Matlab program is presented which can be used to assess the hull girder ultimate capacity of double hull oil tankers. This program is based on the incremental-iterative approach which is a part of Common Structural Rules for double hull oil tankers, adopted by the International Association of Classification Societies. The obtaining results are compared with other known methods and useful conclusions are drawn.

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Ε. Σ. Σαμουηλίδης (επιβλέπων)

Π. Καρύδης

Μ. Τούλιος



---

---

# Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

---

---

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	<b>1</b>
<b>ΛΙΣΤΑ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ</b>	<b>3</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	<b>7</b>
1.1 Εισαγωγή	7
1.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	8
1.3 Η μέθοδος της ιδεατής δομικής μονάδας	9
1.4 Η απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος	12
1.4.1 Η διαδικασία υπολογισμού	12
1.4.2 Συμπεριφορά του «δομικού στοιχείου»	13
1.4.3 Συμπεριφορά του «άκαμπτου γωνιακού στοιχείου»	16
1.5 Σύνοψη	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	<b>18</b>
2.1 Το κατασκευαστικό σώμα του πλοίου	18
2.2 Το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης	22
2.3 Οι τύποι αστοχίας ενός ενισχυμένου ελάσματος	23
2.4 Γενικές αρχές σχεδιασμού	28
2.5 Αρχές και κριτήρια σχεδιασμού για την περίπτωση του σχεδιασμού οριακής κατάστασης	29
2.6 Προδιαγραφές διαμήκους αντοχής από κανονισμούς	31
2.7 Συντελεστής υλικού για χάλυβα υψηλής αντοχής	33
2.8 Ελάχιστη ροπή αντίστασης από κανονισμούς	34
2.9 Απαιτούμενη ροπή αντίστασης από κανονισμούς	35
2.10 Ονομαστικές και λειτουργικές διαστάσεις	35
2.11 Η προσθήκη διάβρωσης	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	<b>39</b>
3.1 Εισαγωγικά	39

3.2	Ενεργοποίηση του Matlab	40
3.3	Βασικά στοιχεία	40
3.4	Πίνακες και διανύσματα στο Matlab	42
3.5	Μαθηματικές συναρτήσεις στο Matlab	47
3.6	Άλλες χρήσιμες συναρτήσεις στο Matlab	49
3.7	Loops στο Matlab	51
3.8	M-αρχεία: scripts και functions	56
3.9	Γραφικές παραστάσεις	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>		<b>66</b>
4.1	Γενικά	66
4.2	Καθορισμός των δομικών στοιχείων	66
4.3	Ελαστοπλαστική αστοχία ενός δομικού στοιχείου	68
4.4	Λυγισμός δοκού κολώνας ενός δομικού στοιχείου	69
4.5	Στρεπτικός λυγισμός ενός δομικού στοιχείου	71
4.6	Τοπικός λυγισμός του κορμού ενός δομικού στοιχείου.	72
4.7	Τοπικός λυγισμός του κορμού ενός δομικού στοιχείου (περίπτωση flat bar).	73
4.8	Λυγισμός ενός εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος	74
4.9	Παρουσίαση του κώδικα	74
4.10	Δημιουργία καμπυλών με χρήση του κώδικα	80
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>		<b>86</b>
5.1	Ρεαλιστική κατασκευαστική απόκριση	86
5.2	Προσαυξητική επαναληπτική διαδικασία που προτείνεται από τον IACS στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (CSR 2008)	89
5.3	Παρουσίαση του κώδικα	94
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>		<b>110</b>
6.1	Εισαγωγικά	110
6.2	Εφαρμογή του κώδικα σε δεξαμενόπλοια	110
6.2.1.	Δεξαμενόπλοιο No1	110
6.2.2.	Δεξαμενόπλοιο No2	122



6.2.3. Δεξαμενόπλοιο Νο3	134
6.3 Εφαρμογή του κώδικα σε πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην	146
6.3.1. Bulk Carrier Νο1	146
6.3.2. Bulk Carrier Νο2	157
6.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων	169
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	<b>170</b>
7.1 Εισαγωγή	170
7.2 Χρήση του MARS2000 για το δεξαμενόπλοιο Νο1	171
7.3 Χρήση του MARS2000 για το δεξαμενόπλοιο Νο2	173
7.4 Χρήση του MARS2000 για το δεξαμενόπλοιο Νο3	175
7.5 Χρήση του MARS2000 για το Bulk Carrier Νο1	177
7.6 Χρήση του MARS2000 για το Bulk Carrier Νο2	179
7.7 Ανακεφαλαίωση	180
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8</b>	<b>182</b>
8.1 Συμπεράσματα	182
8.2 Προτάσεις για διεύρυνση της εργασίας	185
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>187</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	<b>189</b>
A.1 Λυγισμός δοκού κολώνας	191
A.2 Στρεπτικός λυγισμός	192
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b>	<b>195</b>



## 1.1 Εισαγωγή

Η διαμήκης αντοχή είναι ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια για τον σχεδιασμό της γάστρας ενός πλοίου και γενικά αντιστοιχεί στην μέγιστη καμπτική ροπή, την οποία η μέση τομή της γάστρας μπορεί να παραλάβει. Για πολλά χρόνια, προκειμένου να εκτιμηθεί η διαμήκης αντοχή, χρησιμοποιούσαν η γραμμική ελαστική θεωρία. Σύμφωνα με αυτήν την θεωρία, η μέγιστη καμπτική ροπή είναι ίση με την ροπή κάμψης που αναπτύσσεται όταν η μέγιστη τάση στην μέση τομή φτάσει την τάση διαρροής του υλικού. Πρακτικά στον σχεδιασμό μιας γάστρας, αντί της τάσης διαρροής χρησιμοποιείται μια επιτρεπτή τάση η οποία αντιστοιχεί σ' ένα συντελεστή ασφάλειας έναντι της διαρροής.

Ωστόσο, διάφορες έρευνες τα τελευταία είκοσι χρόνια αποκάλυψαν το γεγονός ότι η γραμμική ελαστική θεωρία δεν είναι επαρκής για την εκτίμηση της διαμήκους αντοχής της γάστρας ενός πλοίου. Είναι απαραίτητο στην εκτίμηση αυτή να λάβουμε υπόψη μας τους εξής παράγοντες: 1) τους διάφορους πιθανούς τρόπους αστοχίας, 2) την συμπεριφορά κατά την αστοχία των δομικών στοιχείων, 3) την ανακατανομή των φορτίων στην μέση τομή και 4) την εναπομένουσα αντοχή των δομικών στοιχείων μετά από λυγισμό, ακόμα μετά κι από κατάρρευση. Συνυπολογίζοντας τους παραπάνω παράγοντες, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η μέση τομή καθορίζεται από την μέγιστη διαμήκη αντοχή. Προφανώς ο προσδιορισμός της διαμήκους αντοχής είναι μη γραμμικό πρόβλημα, αφού σ' αυτό υπεισέρχεται μη γραμμικότητα λόγω υλικού αλλά και μη γραμμικότητα λόγω γεωμετρίας. Για τον προσδιορισμό της μέγιστης διαμήκους αντοχής της γάστρας ενός πλοίου υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι: η

μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (NFEM), η μέθοδος της ιδεατής δομικής μονάδας (ISUM) και η απλοποιημένη μέθοδος (SM).

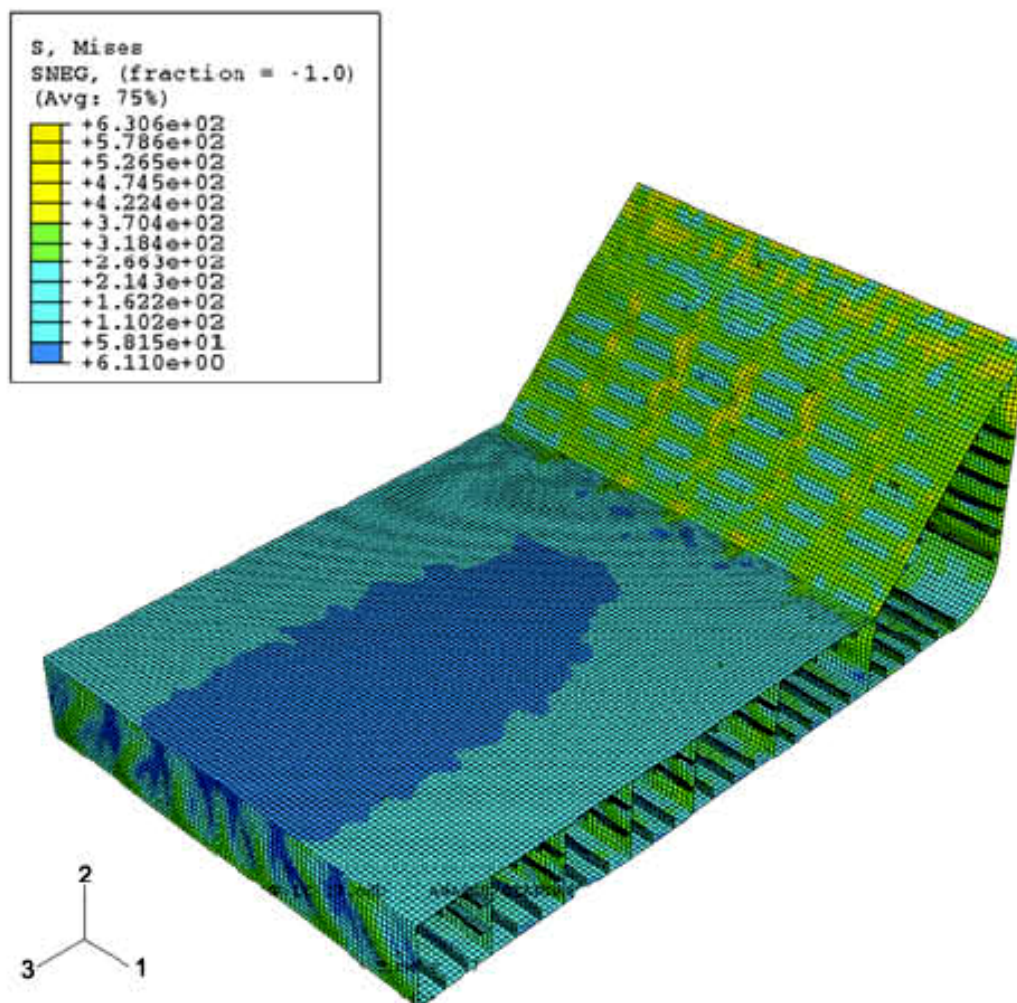
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ανάπτυξη κώδικα στο υπολογιστικό περιβάλλον του Matlab που θα υπολογίζει την μέγιστη διαμήκη αντοχή της γάστρας ενός δεξαμενοπλοίου με αναλυτικές μεθόδους και ειδικότερα με την απλοποιημένη μέθοδο. Ωστόσο για λόγους πληρότητας θα αναφερθούμε συνοπτικά και στις δύο εναλλακτικές μεθόδους υπολογισμού της μέγιστης διαμήκους αντοχής της γάστρας ενός πλοίου.

## **1.2 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων**

Η μέθοδος γενικά των πεπερασμένων στοιχείων παίζει όλο και πιο σημαντικό ρόλο στην γραμμική ανάλυση των κατασκευών καθώς η τεχνολογία στους υπολογιστές εξελίσσεται ολοένα και περισσότερο, γεγονός που οδηγεί στην δραματική μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου.

Η μέθοδος των μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων προσφέρει αρκετές δυνατότητες για την επίλυση του προβλήματος της μέγιστης διαμήκους αντοχής. Με την μέθοδο αυτή, είναι δυνατόν να προσεγγίσουμε την μηχανική συμπεριφορά της κατασκευής με έναν σαφώς πιο ακριβή τρόπο. Διάφορες γεωμετρικές ασυνέχειες που μπορεί να υπάρχουν, με την μέθοδο αυτήν είναι αρκετά πιο εύκολο να περιγραφούν ενώ μπορεί να ληφθεί υπόψη η επίδραση των ενισχυτικών με βελτιωμένη ακρίβεια. Επίσης είναι δυνατόν να προσομοιωθεί η θραύση του υλικού καθώς και η επαφή μεταξύ των στοιχείων. Ερευνητές που ασχολήθηκαν με την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, είναι οι Paik (1996), Nishihara (1983), Akhras (1998) και αρκετοί άλλοι.

Στο σχήμα της επόμενης σελίδας παρουσιάζεται το μοντέλο



Σχήμα 1.1

που δημιουργήθηκε με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων και αφορά πλοίο τύπου bulk carrier.

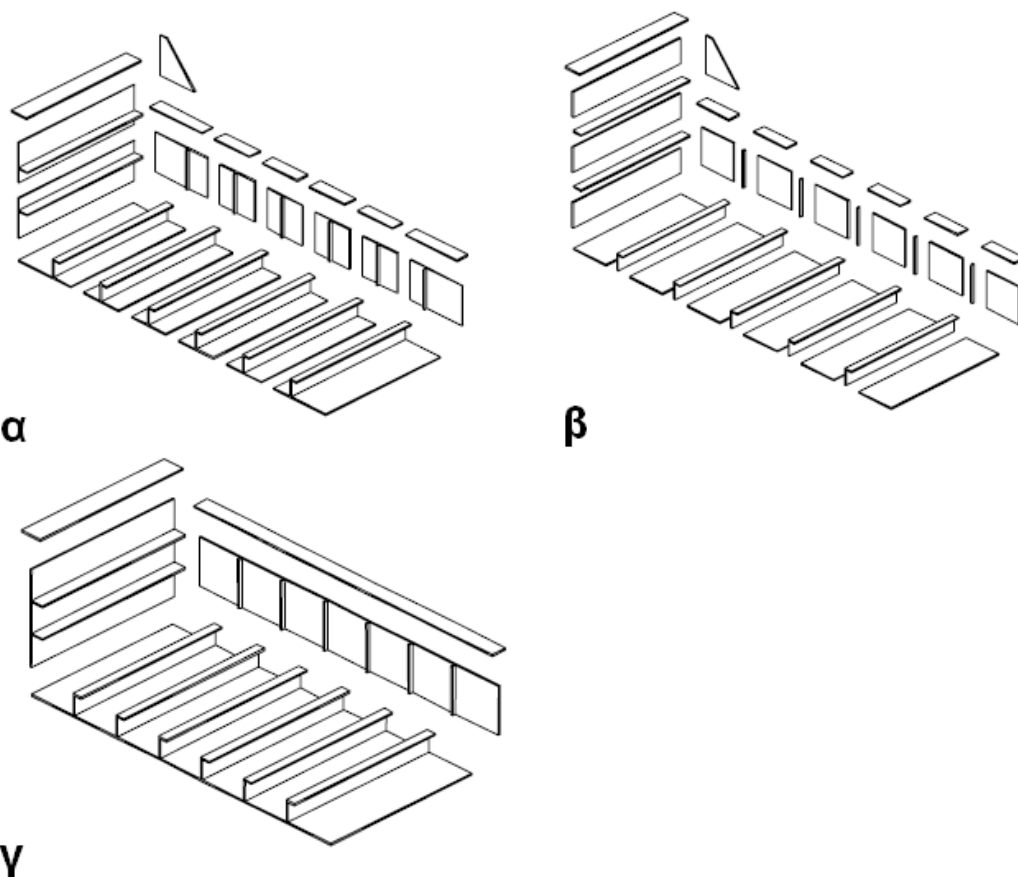
### 1.3 Η μέθοδος της ιδεατής δομικής μονάδας

Αντίθετα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί για την μοντελοποίηση της γάστρας έναν μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων, η μέθοδος της ιδεατής δομικής μονάδας (ISUM) προσομοιώνει την κατασκευή με ένα μόνο στοιχείο

ISUM, το οποίο αποτελείται από έναν μικρό αριθμό κομβικών σημείων.

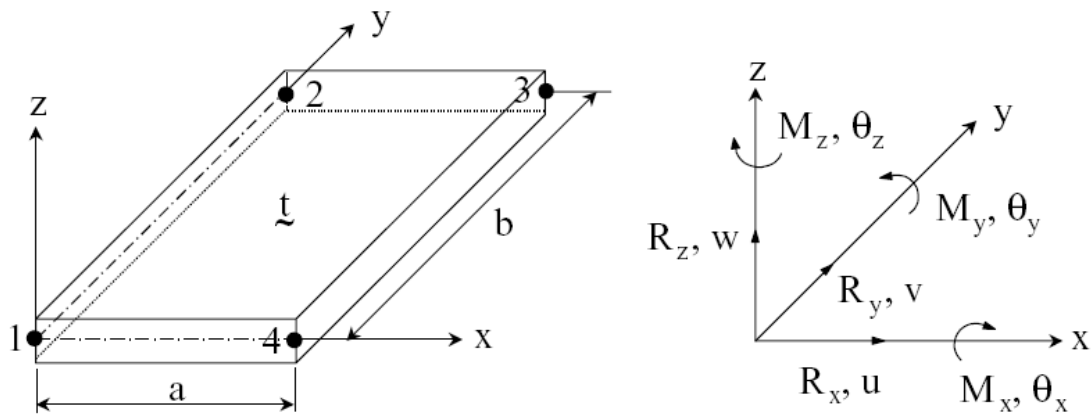
Για την μη γραμμική ανάλυση της γάστρας ενός πλοίου είναι προφανές ότι χρειάζονται διαφορετικοί τύποι στοιχείων ISUM για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου. Συγκεκριμένα, οι γάστρες των πλοίων, οι οποίες αποτελούνται από ελάσματα και διατάξεις στήριξης (π.χ ενισχυτικά) μπορούν να μοντελοποιηθούν με διάφορους τύπους στοιχείων ISUM, όπως τα συνδυασμένα στοιχεία ελάσματος-ενισχυτικού, τα διαχωριστικά στοιχεία ελάσματος-ενισχυτικού (στοιχεία πλάκας για το έλασμα και στοιχεία δοκού για τα ενισχυτικά) καθώς και συνδυασμούς αυτών.

Στο σχήμα 1.2 παρουσιάζονται ορισμένοι τρόποι μοντελοποίησης κατασκευών με στοιχεία ISUM που αποτελούνται από ελάσματα.

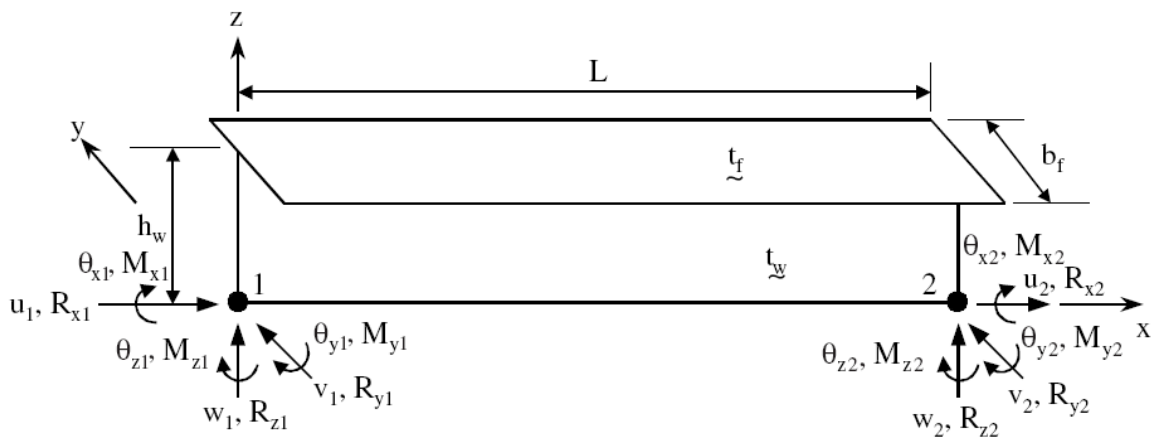


Σχήμα 1.2

Για τις μοντελοποιήσεις που παρουσιάζονται στο παραπάνω σχήμα χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι στοιχείων ISUM: *στοιχείο πλάκας* για τα ελάσματα και *στοιχείο δοκού* για τα ενισχυτικά. Στο επόμενο σχήματα απεικονίζονται αυτά τα στοιχεία.



Σχήμα 1.2.1. Το τοπικό σύστημα συντεταγμένων, οι κομβικές δυνάμεις και μετατοπίσεις για το στοιχείο πλάκας ISUM.



Σχήμα 1.2.2. Το στοιχείο δοκού ISUM χωρίς προσαρτημένο έλασμα.  
(• κομβικό σημείο)

Γενικά, τα αποτελέσματα της μεθόδου της ιδεατής δομικής μονάδας (ISUM) είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (NFEM).

## 1.4 Η απλοποιημένη αναλυτική μέθοδος

### 1.4.1 Η διαδικασία υπολογισμού

Η απλοποιημένη μέθοδος προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Smith στην δεκαετία του 1970. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε περισσότερο και εφαρμόστηκε και από άλλους ερευνητές. Αρκετοί ερευνητές όπως οι Hu και Zhang ανέπτυξαν και υπολογιστικούς κώδικες, βασισμένους στην μέθοδο αυτή.

Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, η μέση τομή του πλοίου χωρίζεται σε «δομικά στοιχεία» και «άκαμπτα γωνιακά στοιχεία», ώστε να καταστεί δυνατή η δημιουργία ενός αναλυτικού μοντέλου με την απλοποιημένη μέθοδο. Ο υπολογισμός της μέγιστης διαμήκους αντοχής με την μέθοδο αυτή γίνεται μέσω της ακόλουθης διαδικασίας. Η καμπυλότητα αυξάνεται προοδευτικά μέσω μικρών προσαυξήσεων. Σε κάθε τιμή της καμπυλότητας προσδιορίζεται η παραμόρφωση κάθε στοιχείου σύμφωνα πάντα με την παραδοχή ότι η μέση τομή παραμένει επίπεδη. Ακολούθως, προσδιορίζεται η τάση των στοιχείων μέσω μιας υπάρχουσας σχέσης τάσης-παραμόρφωσης και υπολογίζεται η ροπή της τάσης αυτής ως προς τον στιγμιαίο ουδέτερο άξονα για κάθε στοιχείο. Η συνισταμένη ροπή όλων των στοιχείων είναι η καμπτική ροπή που ασκείται στην μέση τιμή για την συγκεκριμένη τιμή της καμπυλότητας. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε τιμή της καμπυλότητας και με αυτόν τον τρόπο εξάγεται η καμπύλη της ροπής-καμπυλότητας. Το σημείο της καμπύλης με μηδενική βαθμίδα (κλίση) αντιστοιχεί στην μέγιστη διαμήκη καμπτική ροπή της μέσης τομής. Στην παραπάνω διαδικασία, η θέση του ουδέτερου άξονα σε κάθε προσαύξηση της καμπυλότητας είναι εκείνη στην οποία η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στην μέση τομή είναι μηδέν. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κάποιας επαναληπτικής διαδικασίας ή με την μέθοδο δοκιμής-σφάλματος.



Η ακρίβεια της απλοποιημένης μεθόδου εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ακρίβεια των καμπυλών βράχυνσης. Παρακάτω αναλύονται συνοπτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των καμπυλών αυτών τόσο για τα «δομικά στοιχεία» όσο και για τα «άκαμπτα γωνιακά στοιχεία».

#### 1.4.2 Συμπεριφορά του «δομικού στοιχείου»

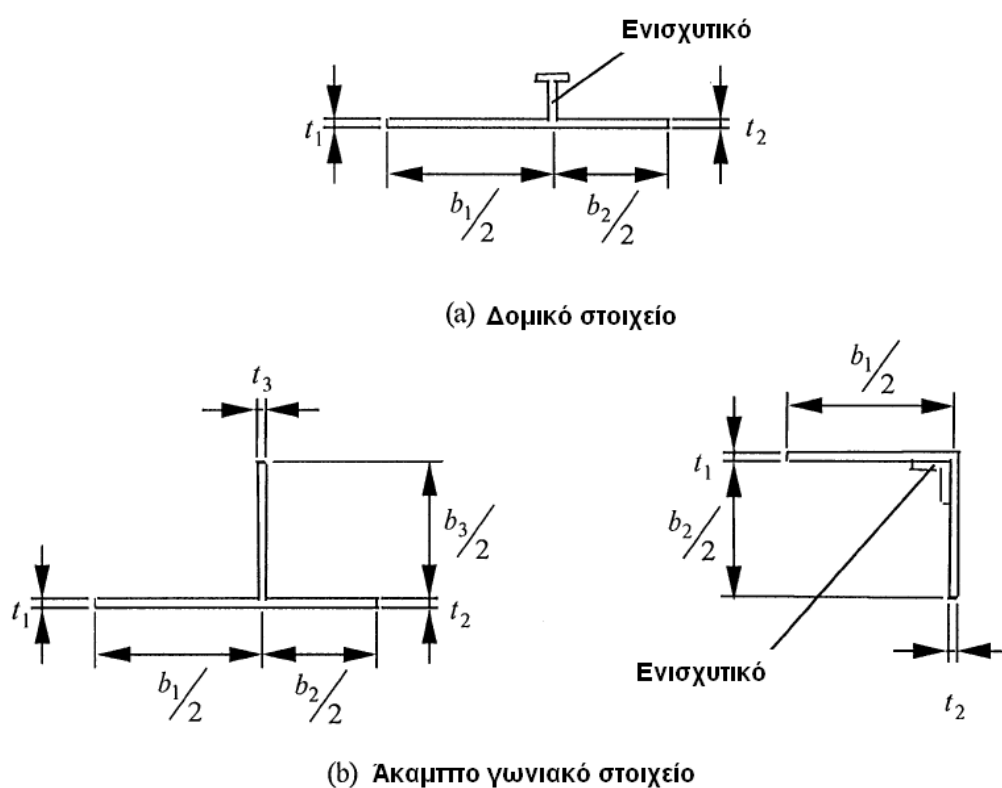
Το δομικό στοιχείο ορίζεται ως ο συνδυασμός ενός ελάσματος και του αντίστοιχου ενισχυτικού όπως φαίνεται στο σχήμα 1.4.1. Σ' αυτόν τον τύπο του δομικού στοιχείου, για τα ελάσματα που βρίσκονται δεξιά και αριστερά του ενισχυτικού γίνεται η παραδοχή ότι έχουν διαφορετική γεωμετρία και είναι από διαφορετικό υλικό. Αυτό χρησιμεύει σε ορισμένες περιπτώσεις που τα ενισχυτικά δεν είναι ισαπέχοντα ή τα ελάσματα είναι από διαφορετικό υλικό ή έχουν διαφορετικό πάχος.

Για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου, θα πρέπει πρώτα να μελετηθεί η μη γραμμική συμπεριφορά του ελάσματος η οποία περιγράφεται από την καμπύλη βράχυνσης. Για τις καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων υπάρχει μεγάλος όγκος πληροφοριών και έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας πολλών επιστημόνων όπως οι Smith, Paik, Hu και Zhang.

Όταν ένα δομικό στοιχείο βρίσκεται υπό θλίψη υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι αστοχίας: 1) διαρροή του ενισχυτικού 2) λυγισμός δοκού κολώνας και 3) στρεπτολυγισμός του ενισχυτικού. Η μη γραμμική συμπεριφορά του δομικού στοιχείου στην περίπτωση της διαρροής του ενισχυτικού περιγράφεται από την καμπύλη βράχυνσης που εκφράζεται μέσω της παρακάτω σχέσης

$$\bar{\sigma}_{ap}(\bar{\epsilon}_a) = \frac{\bar{\sigma}_{as}(\bar{\epsilon}_a)A_s + \frac{1}{2}\sigma_{a1}^{r\delta}(\bar{\epsilon}_a / \bar{\epsilon}_{y1})\bar{\sigma}_{y1}b_1t_1 + \frac{1}{2}\sigma_{a2}^{r\delta}(\bar{\epsilon}_a / \bar{\epsilon}_{y2})\bar{\sigma}_{y2}b_2t_2}{A_s + \frac{1}{2}b_1t_1 + \frac{1}{2}b_2t_2}$$

Όπου  $\bar{\sigma}_{as}$  είναι η αδιάστατη τάση στο ενισχυτικό,  $\sigma_{\alpha 1}^{rd}$  είναι η μέση τάση στο έλασμα,  $A_s$  είναι η διατομή του ενισχυτικού,  $b$  και  $t$  είναι το πλάτος και πάχος του ελάσματος αντίστοιχα.  $\bar{\sigma}_y$  και  $\bar{\epsilon}_y$  είναι η αδιάστατη τάση και παραμόρφωση διαρροής του ελάσματος. Οι δείκτες 1 και 2 αντιστοιχούν στο αριστερό και δεξιό τμήμα του ελάσματος.



Σχήμα 1.4.1

Όσον αφορά τον λυγισμό δοκού κολώνας, η καμπύλη βράχυνσης του δομικού στοιχείου εξάγεται χρησιμοποιώντας μια μέθοδο παρόμοια μ' αυτήν που πρότειναν οι Gordo και Guedes Soares. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην εξαγωγή της σχέσης λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των εναπομενουσών τάσεων. Η καμπύλη για το τμήμα του δομικού στοιχείου που κάμπτεται προς την πλευρά του ελάσματος περιγράφεται από την σχέση:

$$\bar{\sigma}_{as}(\bar{\epsilon}_a) = \begin{cases} \bar{\epsilon}_a \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \left[ 1 - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right]^2 - \frac{1 - \mu}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a}} \right\}, & 0 \leq \bar{\epsilon}_a \leq \bar{\epsilon}_u \\ \bar{\epsilon}_a \left\{ \frac{1}{2} \left[ 1 - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \left[ 1 - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right]^2 - \frac{1 - \mu}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a}} \right\} & \bar{\epsilon}_a \geq \bar{\epsilon}_u \end{cases}$$

Ενώ για το τμήμα του δομικού στοιχείου που κάμπτεται προς την πλευρά του ενισχυτικού περιγράφεται από την σχέση:

$$\bar{\sigma}_{as}(\bar{\epsilon}_a) = \begin{cases} \bar{\epsilon}_a \left\{ \frac{1}{2} \left[ \bar{\sigma}_{ymin} - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \bar{\sigma}_{ymin} - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right]^2 - \frac{\bar{\sigma}_{ymin} - \mu}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a}} \right\}, & 0 \leq \bar{\epsilon}_a \leq \bar{\epsilon}_u \\ \bar{\epsilon}_a \left\{ \frac{1}{2} \left[ \bar{\sigma}_{ymin} - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \left[ \bar{\sigma}_{ymin} - \mu + \frac{1 + \xi}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a} \right]^2 - \frac{\bar{\sigma}_{ymin} - \mu}{\lambda^2} \left( \frac{\rho_e}{\rho_u} \right)^2 \frac{\bar{\epsilon}_u}{\bar{\epsilon}_a}} \right\} & \bar{\epsilon}_a \geq \bar{\epsilon}_u \end{cases}$$

Όπου  $\xi$  και  $\mu$  είναι παράμετροι που σχετίζονται με την αρχική παραμόρφωση και την πλευρική πίεση αντίστοιχα.  $\lambda$  είναι ο συντελεστής λυγηρότητας του ελάσματος,  $\rho_e$  είναι η ενεργή ακτίνα περιστροφής του ελάσματος σε δεδομένη τιμή παραμόρφωσης,  $\rho_u$  είναι η ενεργή ακτίνα περιστροφής του ελάσματος στην κατάσταση μέγιστης αντοχής,  $\bar{\sigma}_{min} = \min(\bar{\sigma}_{y1}, \bar{\sigma}_{y2})$  είναι η αδιάστατη τάση διαρροής του ελάσματος.

Συχνά στην μέση τομή ενός πλοίου συναντάμε ενισχυτικά που έχουν ανοιχτές λεπτότοιχες διατομές όπως τύπου T, Γ. Λόγω της μικρής στρεπτικής ακαμψίας αυτά τα ενισχυτικά μπορεί να αστοχήσουν λόγω στρεπτολυγισμού. Γενικά ο προσδιορισμός της κρίσιμης τάσης στρεπτολυγισμού είναι ένα πρόβλημα ιδιοτιμών. Εάν η απόλυτη τιμή της πλευρικής πίεσης δεν είναι πολύ υψηλή, η ακόλουθη σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της τάσης αυτής:

$$\sigma_{T,E} = \min_{m=1,2,\dots} = \frac{EI_{\omega,D} (m\pi/a)^2 + GJ + [k_{\phi} + 2q\beta_D (\pi^2 m^2 - 3)/12] (a/m\pi)^2}{I_{p,D} + k_{\phi} f / \sigma_{cr} (a/m\pi)^2}$$

Όπου  $I_{\omega,D}$  και  $I_{p,D}$  είναι η πρισματική και πολική ροπή αδράνειας του ενισχυτικού αντίστοιχα. Με  $J$  συμβολίζεται η στρεπτική ροπή αδράνειας της μέσης τομής,  $\beta_D$  είναι ένας συντελεστής που σχετίζεται με την πρισματική ροπή αδράνειας,  $k_\phi$  ο συντελεστής στιβαρότητας ανά μονάδα μήκους,  $q$  η πλευρική πίεση,  $f$  είναι ένας συντελεστής μείωσης και  $\sigma_{cr}$  η τάση λυγισμού του ελάσματος.

Η ανελαστική κρίσιμη τάση στρεπτικού λυγισμού δίνεται από την εξής σχέση:

$$\sigma_{T,E} = \frac{\sigma_{T,cr}}{\sigma_{yS}} = 1 - p_r(1 - p_r) \frac{\sigma_{yS}}{\sigma_{T,E}}$$

Όπου  $p_r$  είναι το όριο αναλογίας του υλικού.

Η κατανομή του φορτίου στην περίπτωση του στρεπτικού λυγισμού έχει την εξής κατανομή:

$$\bar{\sigma}_{as}(\bar{\epsilon}_a) = \bar{\sigma}_{T,cr} \frac{\bar{\epsilon}_T}{\bar{\epsilon}_a} = \frac{\sigma_{T,cr}^2}{\bar{\epsilon}_a}$$

#### 1.4.3 Συμπεριφορά του «άκαμπτου γωνιακού στοιχείου»

Το άκαμπτο γωνιακό στοιχείο αποτελείται συνήθως από αρκετά ελάσματα. Η καμπύλη βράχυνσης ενός τέτοιου στοιχείου είναι η ίδια μ' αυτήν που αντιστοιχεί σ' ένα ελαστικό-απόλυτα πλαστικό υλικό. Παρόλο που δεν πρόκειται να παρατηρηθεί το φαινόμενο του καμπτικού λυγισμού σ' ολόκληρο το άκαμπτο γωνιακό στοιχείο, τα ελάσματα που απαρτίζουν το στοιχείο ενδέχεται να υποστούν λυγισμό και να μην είναι σε θέση να παραλάβουν όλο το φορτίο. Γι' αυτό το λόγο έχει προταθεί από ορισμένους ερευνητές η παρακάτω σχέση για την περιγραφή της καμπύλης βράχυνσης του συγκεκριμένου φορτίου σε περίπτωση που το μοντέλο του ελαστικού

$$\bar{\sigma}_{ah}(\bar{\epsilon}_a) = \frac{\bar{\sigma}_{ah}(\bar{\epsilon}_a)A_s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_b} \bar{\sigma}_{ai}^{r\delta}(\bar{\epsilon}_a / \bar{\epsilon}_{yi}) \bar{\sigma}_{yi} b_i t_i}{A_s + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_b} b_i t_i}$$

απόλυτα πλαστικού υλικού δεν περιγράφει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του στοιχείου.

## 1.5 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ανάπτυξη κώδικα στο υπολογιστικό περιβάλλον του Matlab που θα υπολογίζει την μέγιστη διαμήκη αντοχή της γάστρας ενός δεξαμενοπλοίου με αναλυτικές μεθόδους και αποτελείται από οκτώ κεφάλαια.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα και αναλύονται οι βασικοί τρόποι εκτίμησης της μέγιστης αντοχής. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερή αναφορά σε θεμελιώδεις έννοιες οι οποίες είναι απαραίτητες για την υπολογιστική διαδικασία. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές εντολές του Matlab. Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με τις καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων. Παρατίθενται οι σχέσεις υπολογισμού, ένας κώδικας για την γένεση τους καθώς παραδείγματα εφαρμογής του κώδικα αυτού. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται όλα τα βασικά μέρη του κυρίου κώδικα που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής. Στο έκτο κεφάλαιο περιέχονται τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την εφαρμογή του κώδικα σε υπάρχοντα πλοία. Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων μεταξύ του κώδικα και του προγράμματος Mars 2000. Τέλος το όγδοο κεφάλαιο περιέχει τα συμπεράσματα καθώς και προτάσεις για περαιτέρω εργασία πάνω στο θέμα που πραγματεύεται η διπλωματική αυτή.

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 2

### Β α σ ι κ έ ς έ ν ν ο ι ε ς

---

---

#### 2.1 Το κατασκευαστικό σώμα του πλοίου

Ελάχιστοι από αυτούς που έχουν βρεθεί στη θάλασσα σε άσχημες καιρικές συνθήκες θα αμφισβητήσουν ότι η κατασκευή ενός πλοίου καταπονείται. Το νερό φουσκώνει και χτυπά το πλοίο, το οποίο αντιδρά με τριγμούς και ταλαντώσεις της μεταλλικής του κατασκευής. Η πλώρα τη μία στιγμή αναδύεται και την επόμενη βυθίζεται κάτω από το νερό. Το ογκώδες μέσο τμήμα του πλοίου τη μία στιγμή στηρίζεται αναπαυτικά σε ένα κύμα και την επόμενη στιγμή εγκαταλείπεται σε μία κοιλάδα. Η καταπόνηση του πλοίου αποτελεί πιθανότητα το πιο δύσκολο και περίπλοκο από όλα τα προβλήματα της μηχανικής κατασκευών από τις παρακάτω απόψεις:

- τον καθορισμό της φόρτισης
- την απόκριση της κατασκευής.

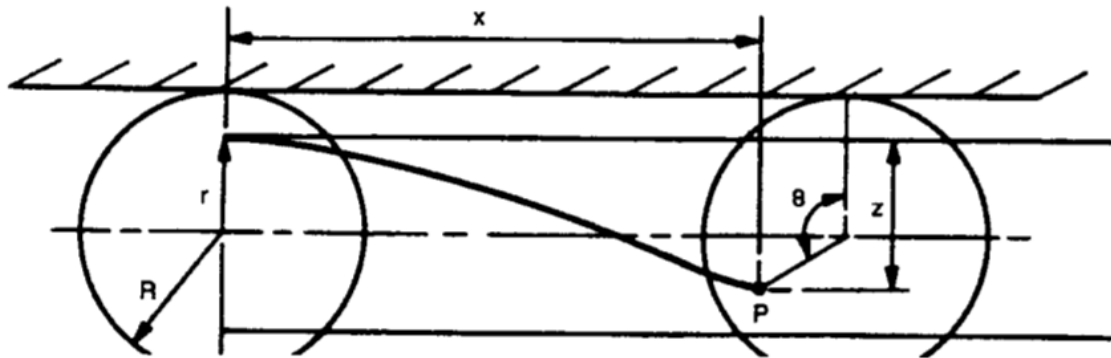
Όπως συμβαίνει και με τα περισσότερα πολύπλοκα προβλήματα, είναι απαραίτητα να αναχθεί σε μία σειρά από ανεξάρτητα, τα οποία μπορούν να αντιμετωπισθούν μεμονωμένα και να υπερτεθούν. Τα μικρότερα στοιχεία της κατασκευής που πρέπει να μελετηθούν είναι οι πλάκες των ελασμάτων και τα μεμονωμένα ενισχυτικά, τα οποία στηρίζονται στις άκρες τους από στοιχεία που είναι συγκριτικά πολύ άκαμπτα. Υπόκεινται σε κάθετα και σε φορτία στο επίπεδο των στοιχείων, υπό την επίδραση των οποίων μπορεί να υπολογιστεί η συμπεριφορά τους σε κάμψη, εφελκυσμό και λυγισμό σε σχέση με τα στηρίγματα. Πολλά από αυτά τα μικρά στοιχεία μαζί αποτελούν μεγάλες επίπεδες ή καμπύλες επιφάνειες ελασμάτων και

σύνολα ενισχυτικών που ονομάζονται πλέγματα, στηριζόμενα στα άκρα τους από φρακτές και άκρες καταστρώματος. Τέλος, πολλές φρακτές, πλέγματα και καταστρώματα μαζί συνιστούν ένα ολοκληρωμένο κοίλο κιβώτιο, του οποίου η συμπεριφορά μπορεί να καθοριστεί ως κιβωτοειδής δοκός.

Εξαιρώντας τα αδρανειακά φορτία λόγω της κίνησης του πλοίου, η φόρτιση του πλοίου προέρχεται από δύο μόνο πηγές, τη βαρύτητα και την πίεση του νερού. Είναι αδύνατο να φανταστούμε μια κατάσταση θαλάσσης, στην οποία τα φορτία εξαιτίας της βαρύτητας και της πίεσης του νερού αλληλοεξουδετερώνονται κατά μήκος του πλοίου. Ακόμη και σε ήρεμο νερό, κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά απίθανο, αλλά και σε κυματισμό που η φόρτιση μεταβάλλεται συνεχώς, είναι εντελώς ασύλληπτο. Υπάρχει λοιπόν μια ανομοιόμορφη φόρτιση κατά μήκος του πλοίου κατά μήκος του πλοίου και επειδή αυτό είναι μια ελαστική κατασκευή, κάμπτεται. Κάμπτεται, σαν ένας ολοκληρωμένος στατικός φορέας, όπως μια δοκός με ελαστική στήριξη, και ονομάζεται στα αγγλικά ship girder. Το πλοίο θα μελετηθεί ως μια δοκός στην επιφάνεια της θάλασσας, που υπόκεινται στους εξής γενικούς επιστημονικούς κανόνες

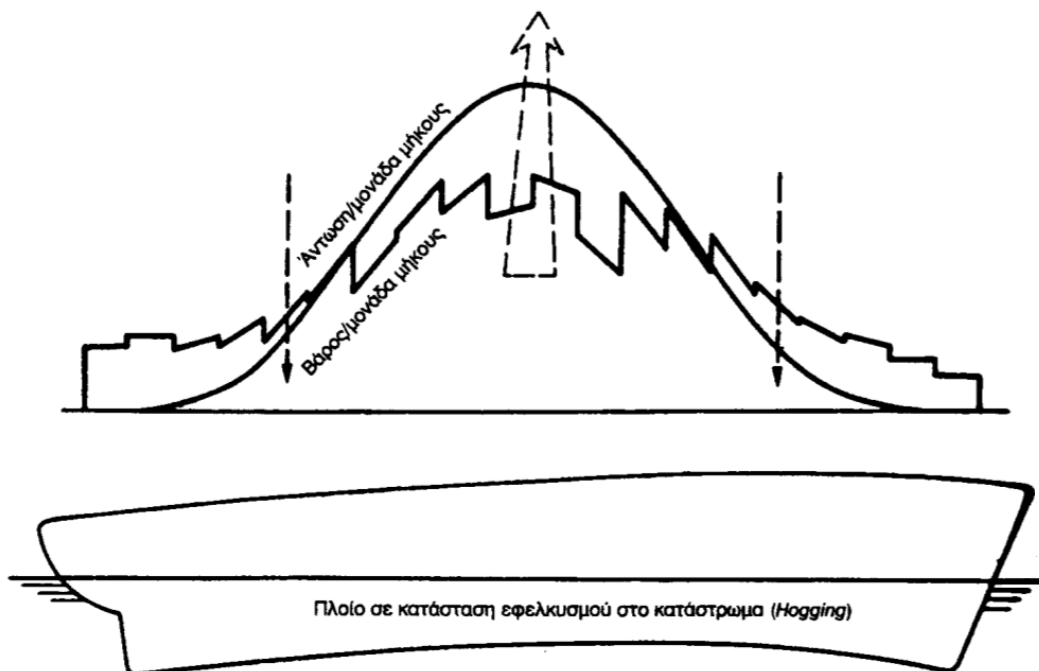
- οι εγκάρσιες επίπεδες διατομές του πλοίου δεν αλλάζουν μορφή κατά την κάμψη
- το υλικό κατασκευής του πλοίου είναι γραμμικά ελαστικό

Σε ήρεμο νερό, η φόρτιση εξαιτίας της βαρύτητας και της πίεσης του νερού είναι φυσικά το βάρος και η άντωση. Η κατανομή της άντωσης κατά μήκος ακολουθεί την καμπύλη επιφανειών, ενώ το βάρος υπολογίζεται ανά μονάδα μήκους. Η σχηματική μορφή τους φαίνεται στο σχήμα 2.2. (Είναι σαφές ότι οι επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν το ολικό βάρος και την ολική άντωση πρέπει να είναι ίσες.)



Σχήμα 2.1.1

Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 2.1.2) οι συνιστώσες που φαίνονται με διακεκομμένη γραμμή θα έκαναν το πλοίο να καμφθεί με τα άκρα του προς τα κάτω (hogging). Η αντίστροφη κατάσταση είναι γνωστή ως sagging (πλοίο σε κατάσταση θλίψης στο κατάστρωμα). Μάλιστα, επειδή είναι πιθανό για ορισμένα από τα φορτηγά πλοία μεγάλου μήκους να αστοχήσουν εφόσον φορτωθούν με λάθος τρόπο, η θεώρηση του hogging ή sagging σε ήρεμο νερό

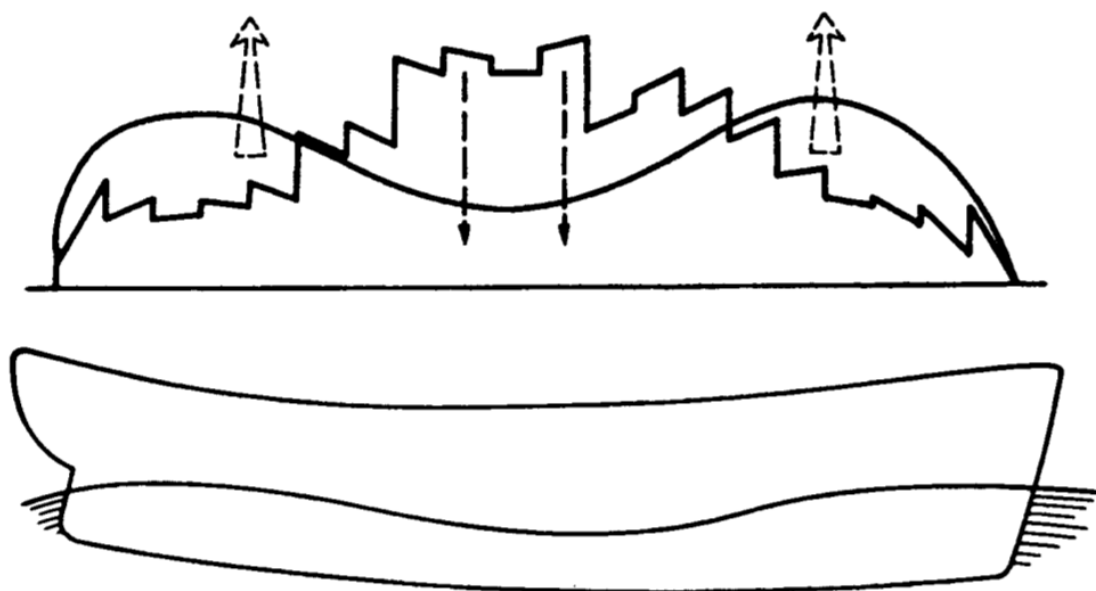


Σχήμα 2.1.2



είναι ουσιώδης για τον υπολογισμό της κατάλληλης διάταξης φορτίου.

Δεν είναι δύσκολο να φανταστεί κάποιος ότι το sag ή το hog ενός σκάφους μπορεί να αυξηθεί σημαντικά από τα κύματα. Ένα μακρύ κύμα με κορυφή στο μέσο του πλοίου θα αυξήσει την δύναμη προς τα πάνω εκεί σε σχέση με τα άκρα και θα αυξηθεί το hogging του πλοίου. Αν υπάρχει κοιλάδα κύματος στο μέσο του πλοίου και κορυφές στα άκρα θα αυξηθεί το sagging (σχήμα 2.1.3).



Σχήμα 2.1.3 Sagging σε κύμα

Τα φορτία στα οποία υπόκειται η συνολική κατασκευή της γάστρας είναι λοιπόν:

- φορτία που οφείλονται στη διαφορετική διαμήκη κατανομή των δυνάμεων βάρους προς τα κάτω και των δυνάμεων άντωσης προς τα πάνω, με το πλοίο στάσιμο σε ήρεμο νερό.
- Τα επιπλέον φορτία που οφείλονται στη διέλευση ομάδας κυμάτων, με το πλοίο να παραμένει στάσιμο.

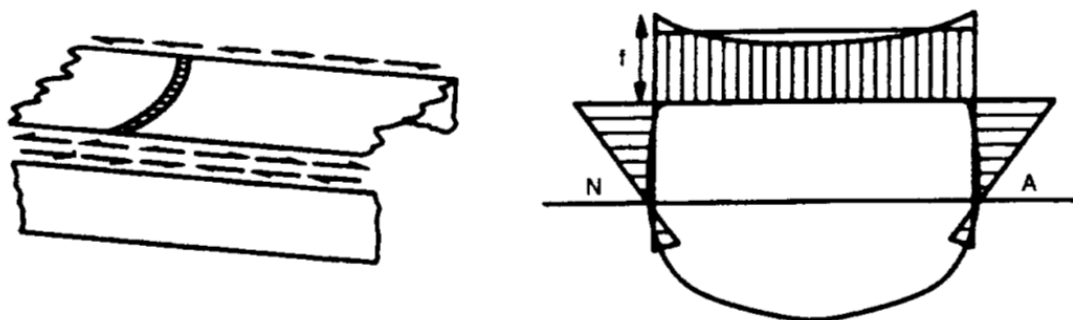
- ☑ Τα φορτία που οφείλονται στην υπέρθεση της ομάδας κυμάτων που δημιουργούνται από την κίνηση του ίδιου του πλοίου σε ήρεμο νερό.
- ☑ Οι διακυμάνσεις της κατανομής του βάρους εξαιτίας των επιταχύνσεων που δημιουργούνται από την κίνηση του πλοίου σε κυματισμούς.

Η θεώρηση της χειρότερης πιθανής φόρτισης που οφείλεται στην πρώτη και δεύτερη κατηγορία φορτίων είναι η βάση του πρότυπου υπολογισμού. Οι επιδράσεις της τρίτης και της τέταρτης κατηγορίας φορτίων είναι μικρότερες και συνήθως δεν λαμβάνονται υπόψη, παρά μόνο μερικώς στη στατιστική προσέγγιση του προβλήματος.

## **2.2 Το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης**

Η απλή θεωρία της κάμψης δοκών υποθέτει ότι οι επίπεδες διατομές της δοκού παραμένουν επίπεδες και ότι οι ορθές τάσεις είναι ευθέως ανάλογες της απόστασης από τον ουδέτερο άξονα. Ένα κατάστρωμα παράλληλο προς τον ουδέτερο άξονα αναμένεται να έχει σταθερή τιμή της τάσης κατά το πλάτος του. Στην πραγματικότητα, η άνω φλάντζα μιας κοίλης κιβωτοειδούς δοκού, όπως μπορεί να θεωρηθεί η γάστρα ενός πλοίου, μπορεί να λάβει το φορτίο του μόνο με διάτμηση στην άκρη του καταστρώματος. Η διάχυση των διατμητικών φορτίων σε ένα επίπεδο κατάστρωμα που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία των ορθών τάσεων είναι ένα δύσκολο μαθηματικό πρόβλημα. Η διάχυση από τα στοιχεία στην ακμή του καταστρώματος σε όλο το πλάτος είναι τέτοια, ώστε οι επίπεδες διατομές δεν παραμένουν επίπεδες και η μαθηματική ανάλυση δείχνει ότι οι ορθές τάσεις μειώνονται προς το μέσο του

καταστρώματος. Το συμπέρασμα αυτό έχει επιβεβαιωθεί από παρατηρήσεις στην πράξη. Αυτό το φαινόμενο είναι γνωστό ως υστέρηση διάτμησης και το μέγεθος της εξαρτάται από τον τύπο της φόρτισης και τις διαστάσεις του πλοίου. Για παράδειγμα, το φαινόμενο της υστέρησης διάτμησης είναι εντονότερο κατά την επίδραση συγκεντρωμένων φορτίων. Για συνηθισμένες μορφές πλοίων η υστέρηση διάτμησης επιφέρει μια διαφορά στο επίπεδο των τάσεων στο μέσο καταστρώμα της τάξης ενός ελάχιστου ποσοστού επί τοις εκατό. Είναι πιο σημαντική η επίδραση της, στις υπερκατασκευές και του ενεργού πλάτους ενός ελάσματος στα προβλήματα τοπικής αντοχής.



Σχήμα 2.2.1 Ορθές τάσεις στην πράξη.

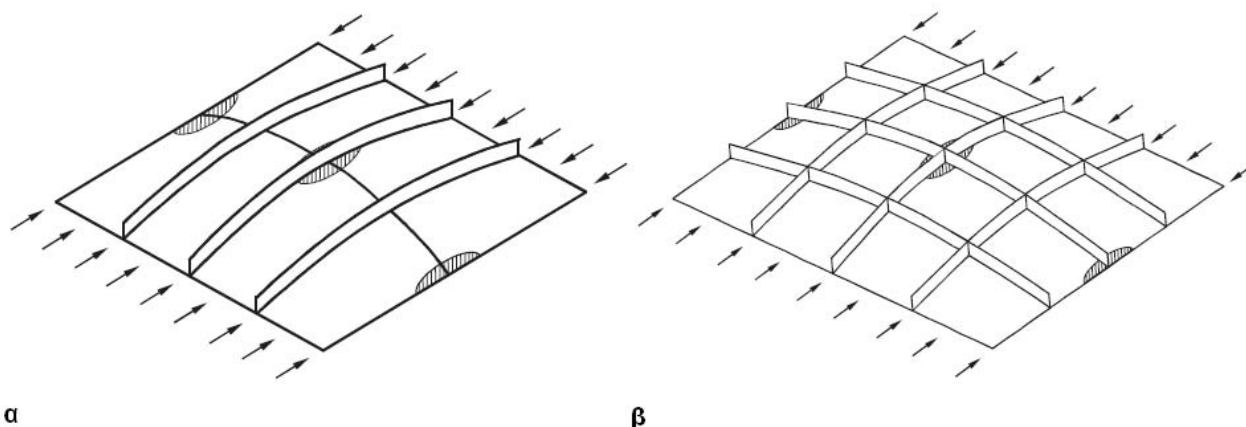
## 2.3 Οι τύποι αστοχίας ενός ενισχυμένου ελάσματος

Οι κύριοι τύποι ολικής αστοχίας ενός ενισχυμένου ελάσματος σύμφωνα με τους Paik και Thayamballi (2003) είναι οι παρακάτω:

- ☑ **Τύπος I:** Ολική κατάρρευση του ελάσματος και του ενισχυτικού ως ενιαία μονάδα
  - Τύπος I-1: Τύπος I για ομοαξονικά ενισχυμένα ελάσματα (Σχήμα 2.3.1<sup>α</sup>)
  - Τύπος I-2: Τύπος I για σταυρωτά ενισχυμένα ελάσματα (Σχήμα 2.3.1<sup>β</sup>)
- ☑ **Τύπος II:** Διαξονική θλιπτική κατάρρευση (Σχήμα 2.3.2)

- ☑ **Τύπος III:** Κατάρρευση δοκού κολώνας (λόγω καμπτικού λυγισμού) (Σχήμα 2.3.3)
- ☑ **Τύπος IV:** Κατάρρευση λόγω τοπικού λυγισμού του κορμού του ενισχυτικού (Σχήμα 2.3.4)
- ☑ **Τύπος V:** Κατάρρευση λόγω στρεπτικού λυγισμού (tripping) (Σχήμα 2.3.5)
- ☑ **Τύπος VI:** Κατάρρευση λόγω μεγάλης διαρροής

Πιο συγκεκριμένα ο τύπος I αντιστοιχεί στην περίπτωση κατάρρευσης στην οποία τα ενισχυτικά δεν είναι και τόσο στιβαρά. Στην περίπτωση αυτή τα ενισχυτικά λυγίζουν μαζί με το έλασμα ως μια ενιαία μονάδα. Η ολική συμπεριφορά κατά τον λυγισμό είναι ίσως αρχικά ελαστική. Το ενισχυμένο έλασμα υπό κανονικές συνθήκες

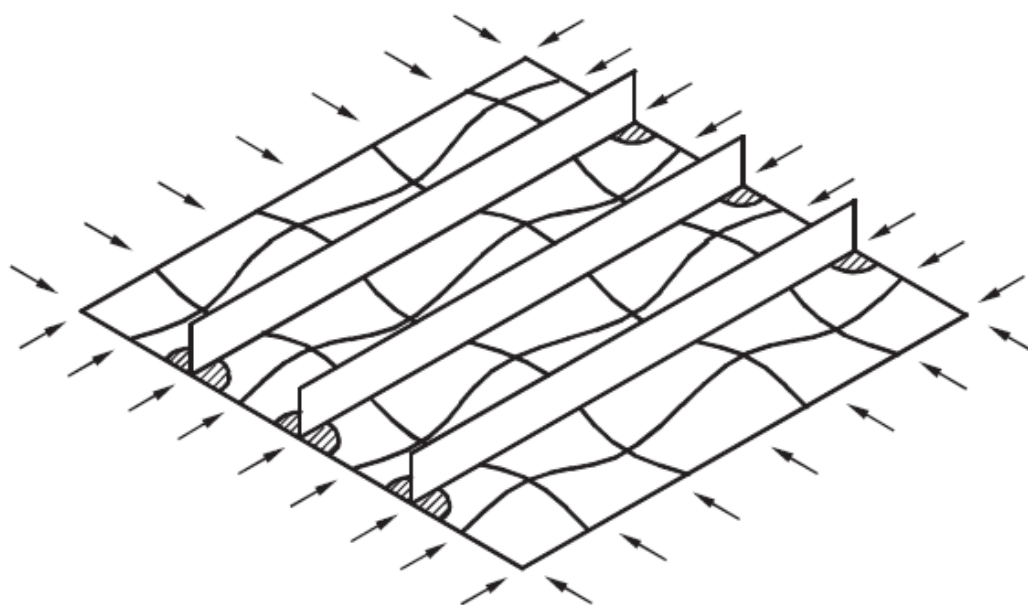


Σχήμα 2.3.1 (α) Τύπος αστοχίας I-1 (β) Τύπος αστοχίας I-2

μπορεί να συνεχίσει να παραλαμβάνει φορτία ακόμα και αφού συμβεί ο λυγισμός στην ελαστική περιοχή. Η μέγιστη αντοχή συνοδεύεται από τον σχηματισμό μιας μεγάλης επιφάνειας διαρροής μέσα στο έλασμα ή κατά μήκος των άκρων του. Η συμπεριφορά κατά την κατάρρευση στον τύπο I-1 είναι λίγο διαφορετική σε σχέση με τον τύπο I-2. Ειδικότερα στον τύπο I-1 η κατάρρευση ξεκινά ως

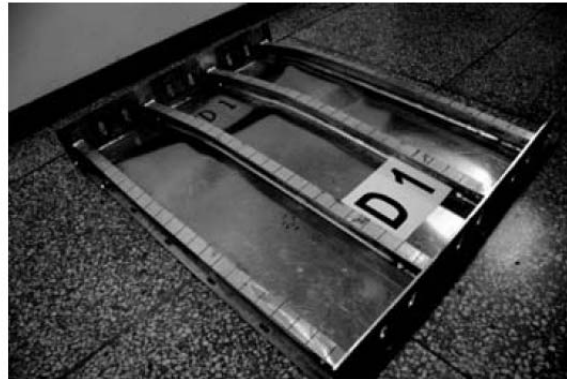
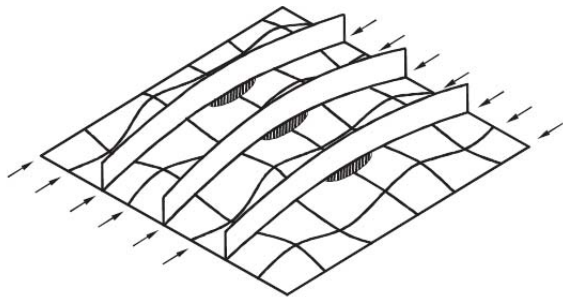
λυγισμός δοκού κολώνας ενώ στον τύπο I-2 η αστοχία ομοιάζει μ' αυτήν ενός ορθοτροπικού ελάσματος.

Ο τύπος αστοχίας II συνδέεται με τον τρόπο κατάρρευσης κατά τον οποίο η διαρροή συμβαίνει κατά μήκος της επιφάνειας που συνδέονται το έλασμα με το ενισχυτικό χωρίς όμως να υπάρχει αστοχία του ενισχυτικού. Αυτός ο τύπος αστοχίας παίζει σημαντικό ρόλο στην περίπτωση της διαξονικής θλιπτικής φόρτισης.



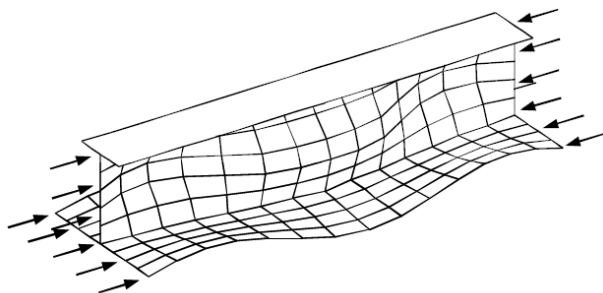
Σχήμα 2.3.2 Τύπος αστοχίας II

Ο τύπος αστοχίας III αντιστοιχεί στον τρόπο κατάρρευσης κατά τον οποίο η μέγιστη αντοχή συνοδεύεται από διαρροή τόσο στο ενισχυτικό όσο και στο έλασμα. Η μορφή αστοχίας αυτής αφορά ενισχυμένα ελάσματα των οποίων τα ενισχυτικά είναι μετρίων διαστάσεων.

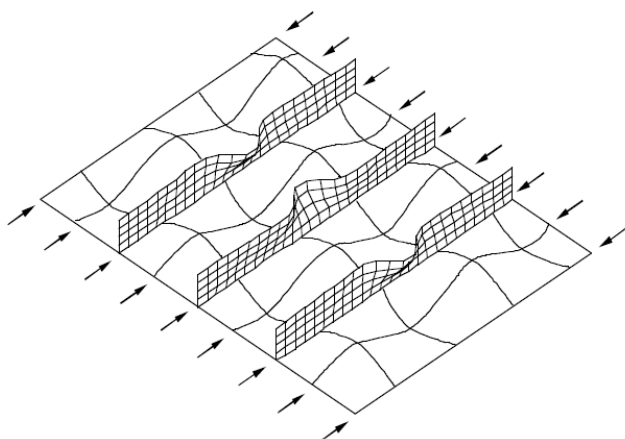


Σχήμα 2.3.3 Τύπος αστοχίας III

Οι τύποι αστοχίας IV και V συνδέονται κυρίως με την κατάρρευση του ενισχυτικού όταν ο λόγος του ύψους του κορμού του ενισχυτικού προς το πάχος του κορμού του ενισχυτικού είναι μεγάλος ή/και όταν ο τύπος του πέλματος του ενισχυτικού αδυνατεί να παραμείνει ευθύγραμμος και λυγίζει ή στρέφεται και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο τύπος αστοχίας IV παρατηρείται όταν η μέγιστη



Σχήμα 2.3.4 Τύπος αστοχίας IV



Σχήμα 2.3.5 Τύπος αστοχίας V

αντοχή είναι συνέπεια καταπόνησης του ενισχυτικού σε στρεπτικό λυγισμό. Ο τύπος αστοχίας V συνδέεται με την κατάρρευση που προκαλείται σε ένα ενισχυμένο έλασμα όταν ο κορμός του ενισχυτικού καταπονείται τοπικά από λυγισμό.

Ο τύπος αστοχίας VI παρατηρείται όταν ο συντελεστής λυγηρότητας του ελάσματος είναι μικρός ή όταν το έλασμα καταπονείται από αξονική εφελκυστική φόρτιση έτσι ώστε να μην συμβαίνει ούτε τοπικά άλλα ούτε και συνολικά λυγισμός μέχρι η διατομή του ενισχυμένου ελάσματος να οδηγηθεί σε ολική διαρροή.

Στα σχήματα 2.3.1 έως και 2.3.5 παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι αστοχίας καθώς και διάφορες κατασκευές που έχουν αστοχήσει από τον συγκεκριμένο τύπο αστοχίας. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να σχεδιαστούν κατασκευές που να έχουν την συμπεριφορά που περιγράφουν αυτοί οι τύποι αστοχίας. Ωστόσο στην πράξη έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο ορισμένοι τύποι αστοχίας να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Όμως για πρακτικούς λόγους

θεωρούμε ότι η αστοχία προέρχεται από την μικρότερη εκ των τιμών μέγιστης αντοχής που υπολογίζονται.

## 2.4 Γενικές αρχές σχεδιασμού

Ένα πλοίο για όσο διάστημα βρίσκεται σε υπηρεσία θα πρέπει να είναι σε θέση παραλαμβάνει όλες τις πιθανές φορτίσεις που μπορεί να παρουσιαστούν. Γι' αυτό τον λόγο, λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό τρεις διαφορετικές προσεγγίσεις:

- Σχεδιασμός με βάση την τάση λειτουργίας
- Σχεδιασμός οριακής κατάστασης
- Σχεδιασμός με βάση την κρίσιμη τάση λυγισμού

Πιο συγκεκριμένα κατά τον *σχεδιασμό με βάση την τάση λειτουργίας* (WSD, Working Stress Design) κύριο μέλημα του μελετητή είναι οι τάσεις λειτουργίας να μην υπερβαίνουν μια συγκεκριμένη τιμή που ονομάζεται επιτρεπόμενη τάση. Ο καθορισμός της επιτρεπτής τάσης γίνεται με βάση προηγούμενα εμπειρικά δεδομένα.

Κατά τον *σχεδιασμό οριακής κατάστασης* (LSD, Limit State Design) θεωρούνται περιπτώσεις φόρτισης κατά τις οποίες το πλοίο παύει να εκπληρώνει τους στόχους του αρχικού σχεδιασμού. Είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι ο σχεδιασμός οριακής κατάστασης είναι πιο ολοκληρωμένη επιλογή για τον σχεδιασμό και την εκτίμηση της αντοχής ενός πλοίου και γενικότερα μιας ναυπηγικής κατασκευής. Χρησιμοποιώντας τον όρο «οριακή κατάσταση» συμπεριλαμβάνουμε τις εξής κατηγορίες:

- Οριακή κατάσταση λειτουργίας (SLS Serviceability Limit



State)

- Απόλυτη οριακή κατάσταση (ULS Ultimate Limit State)
- Οριακή κατάσταση σε περίπτωση κόπωσης (FLS, Fatigue Limit State)
- Οριακή κατάσταση σε περίπτωση ατυχήματος (ALS, Accidental Limit State)

Τέλος, στον σχεδιασμό με βάση τάση λυγισμού (CBSD, Critical Buckling Strength Design) το κριτήριο είναι η λεγόμενη κρίσιμη τάση λυγισμού, η οποία υπολογίζεται από εξισώσεις που εισάγουν μια διόρθωση λόγω πλαστικότητας. Παραδείγματος χάριν η εξίσωση Johnson-Ostenfeld:

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} \sigma_E & \text{για } \sigma_E \leq \rho_r \sigma_F \\ \sigma_F \left( 1 - \frac{\sigma_F}{4\sigma_E} \right) & \text{για } \sigma_E \geq \rho_r \sigma_F \end{cases}$$

Όπου

$\sigma_E$ : η ελαστική τάση λυγισμού

$\sigma_{cr}$ : κρίσιμη ελαστοπλαστική τάση λυγισμού

$\sigma_F$ : τάση διαρροής

## 2.5 Αρχές και κριτήρια σχεδιασμού για την περίπτωση του σχεδιασμού οριακής κατάστασης

Η εκτίμηση της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής περιλαμβάνεται στον σχεδιασμό οριακής κατάστασης. Επομένως είναι απαραίτητο να περιγράψουμε συνοπτικά τις βασικές αρχές και τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη στην περίπτωση αυτή. Το κριτήριο ασφαλείας στην περίπτωση του σχεδιασμού οριακής κατάστασης περιγράφεται από την εξής σχέση:

$$C_d - D_d > 0$$

Όπου  $C_d$  η απόλυτη αντοχή και  $D_d$  η τάση λειτουργίας σε ακραίες συνθήκες. Η προηγούμενη σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\eta = \frac{C_d}{D_d} > 1$$

Όπου  $\eta$ : το μέτρο δομικής επάρκειας, το οποίο πρέπει να είναι μεγαλύτερο της μονάδας για να είμαστε στην ασφαλή περιοχή.

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση με τους συντελεστές ασφαλείας, οι δύο προηγούμενες εξισώσεις μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\frac{C_k}{\gamma_c} - \gamma_D D_k > 0$$
$$\eta = \frac{1}{\gamma_c \gamma_D} \frac{C_k}{D_k} > 1$$

Όπου  $C_d = C_k / \gamma_c$  και  $D_d = \gamma_D D_k$ .

Συγκεκριμένα για δεξαμενόπλοια, το κριτήριο που προτείνει ο IACS στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (CSR 2008) για την μέγιστη διαμήκη αντοχή της γάστρας ενός πλοίου και θα πρέπει να ικανοποιείται από κάθε καινούργιο πλοίο είναι το εξής:

$$\frac{M_u}{\gamma_u} \geq \gamma_{sw} M_{sw} + \gamma_{wv} M_{wv}$$

Όπου

$M_u$ : μέγιστη διαμήκη αντοχή της γάστρας που υπολογίζεται με τις μεθόδους που αναφέραμε στην εισαγωγή (FEM, ISUM, SM)

$M_{sw}$ : ροπή κάμψης κυματισμού

$M_{wv}$ : ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό

$\gamma_u$ : συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.1

$\gamma_{sw}$ : συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.0

$\gamma_{wv}$ : συντελεστής ασφαλείας ίσος με 1.2

## 2.6 Προδιαγραφές διαμήκους αντοχής από κανονισμούς

Μέχρι το 1960 οι Νηογνώμονες καθόριζαν την κατασκευή των εμπορικών πλοίων μέσω πινάκων με διαστάσεις. Κατόπιν αντικατέστησαν τον προσδιορισμό των εφαρμοζόμενων φορτίων και της αντοχής της κατασκευής με τύπους. Το 1990 οι Νηογνώμονες υπό την αιγίδα του IACS (International Association of Classification Societies) συμφώνησαν σε ένα κοινό ελάχιστο επίπεδο για τη διαμήκη αντοχή των πλοίων, το οποίο υποστηρίζεται και από στατιστικές κατασκευαστικής αστοχίας. Σήμερα υπάρχει ευρεία αποδοχή της αρχής ότι η πιθανότητα το φορτίο να υπερβεί την αντοχή κατά τη διάρκεια της ζωής ενός πλοίου είναι ελάχιστη. Αυτή η πιθανότητα μπορεί να είναι τόσο μικρή όσο  $10^{-8}$ . Οι κανονισμοί αυτοί που συμφωνήθηκαν το 1990 για την διαμήκη αντοχή αποτελούν από το 2006, μέρος των Κοινών Δομικών Κανονισμών (Common Structural Rules) που εκδίδονται από τον IACS συνήθως κάθε ένα ή δύο χρόνια. Κάθε καινούργιο πλοίο (bulk carrier ή tanker) που ναυπηγείται τώρα πλέον υπόκειται σ' αυτούς τους κανονισμούς.

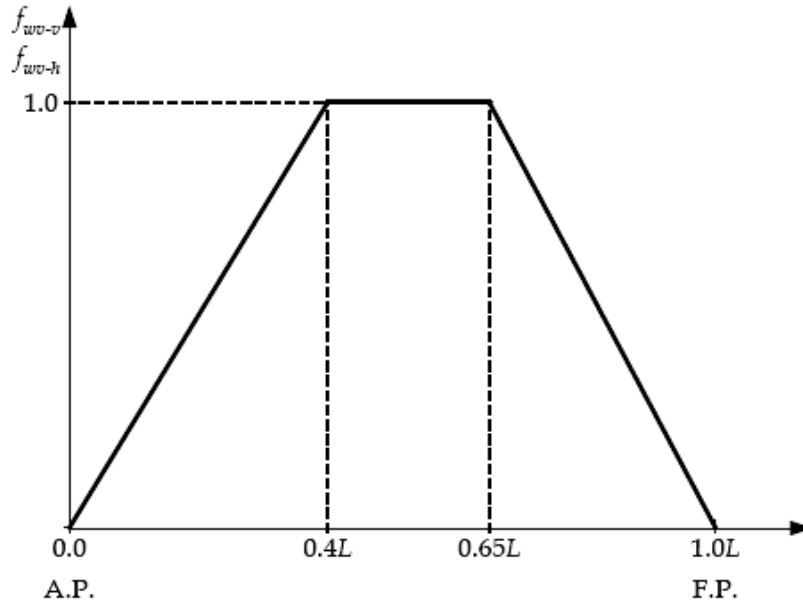
Η ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-hog}$  και  $M_{wv-sag}$  δίνεται από τον τύπο:

$$\text{για κατάσταση hogging: } M_{wv-sag} = f_{prob} \cdot 0.19 f_{wv-v} C_{wv-v} L^2 B C_b$$

$$\text{για κατάσταση sagging: } M_{wv-sag} = f_{prob} \cdot 0.11 f_{wv-v} C_{wv-v} L^2 B (C_b + 0.7) \text{ kNm}$$

όπου

$f_{wv-v}$  : συντελεστής κατανομής για την ροπή κάμψης κυματισμού κατά μήκος του πλοίου.



Σχήμα 2.6.1 Συντελεστής κατανομής για την ροπή κάμψης κυματισμού σε συνάρτηση με το μήκος του πλοίου.

$C_{wv-v}$  : συντελεστής κυματισμού

$$= 10.75 - \left( \frac{300 - L}{100} \right)^2 \quad \text{για} \quad 150 \leq L \leq 300$$

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

$$= 10.75 - \left( \frac{L - 350}{150} \right)^2 \quad \text{για} \quad 350 \leq L \leq 500$$

L: μήκος του πλοίου σε m

B: μέγιστο πλάτος σε m

$C_b$  : συντελεστής γάστρας

$f_{prob}$  : συντελεστής ίσος με την μονάδα

Η ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-min-sea-mid}$  δίνεται από τον τύπο:

για κατάσταση hogging:

$$M_{sw-min-sea-mid} = f_{sea} (Z_{v-min} \sigma_{perm-sea} 10^3 - M_{wv-hog}) \quad \text{kNm}$$

η οποία είναι ισοδύναμη με την σχέση

$$M_{sw-min-sea-mid} = 0.01 C_{wv} L^2 B (11.97 - 1.9 C_b) \quad \text{kNm}$$

για κατάσταση sagging:

$$M_{sw-min-sea-mid} = f_{sea} (Z_{v-min} \sigma_{perm-sea} 10^3 + M_{wv-sag}) \quad \text{kNm}$$

η οποία είναι ισοδύναμη με την σχέση

$$M_{sw-min-sea-mid} = -0.05185 C_{wv} L^2 B (C_b + 0.7) \quad \text{kNm}$$

όπου

$f_{sea}$  : -0.85 για κατάσταση sagging

1.0 για κατάσταση hogging

$Z_{v-min}$  : ελάχιστη ροπή αντίστασης

$\sigma_{perm-sea}$  : επιτρεπόμενη τάση στο κέντρο του πλοίου

$M_{wv-hog}$  : ροπή κάμψης κυματισμού σε κατάσταση hogging

$M_{wv-sag}$  : ροπή κάμψης κυματισμού σε κατάσταση sagging

$C_{wv}$  : Συντελεστής κυματισμού

L: μήκος του πλοίου σε m

B: μέγιστο πλάτος του πλοίου σε m

$C_b$ : συντελεστής γάστρας

## 2.7 Συντελεστής υλικού για χάλυβα υψηλής αντοχής

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλοίων έχει ως ελάχιστο επιτρεπτό όριο διαρροής  $235 \text{ N/mm}^2$  (κοινός ναυπηγικός χάλυβας). Οποιοσδήποτε άλλος τύπος χάλυβα με μεγαλύτερο όριο διαρροής θεωρείται ως χάλυβας υψηλής αντοχής.

Οι βαθμοί χάλυβα που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της γάστρας ενός πλοίου είναι οι εξής:

- A, B, D και E που αντιστοιχούν σε αντοχή όμοια με αυτήν του κοινού ναυπηγικού χάλυβα
- AH, DH και EH που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερη αντοχή από αυτήν του κοινού ναυπηγικού χάλυβα

Για τον προσδιορισμό της ροπής αντίστασης της μέσης τομής ενός πλοίου είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε το είδος του υλικού κατασκευής που χρησιμοποιείται στα διάφορα μέρη του πλοίου καθώς και τον αντίστοιχο συντελεστή υλικού. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται ορισμένες τιμές του ορίου διαρροής με τους αντίστοιχους συντελεστές υλικού. Για τον υπολογισμό των ενδιάμεσων τιμών που δεν περιλαμβάνονται στον πίνακα απαιτείται γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 2.7.1

Τιμή του ορίου διαρροής (N/mm <sup>2</sup> )	Συντελεστής υλικού k
235	1.00
265	0.93
315	0.78
340	0.74
355	0.72
390	0.68

## 2.8 Ελάχιστη ροπή αντίστασης από κανονισμούς

Η ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min}$  για το κατάστρωμα και τον πυθμένα σύμφωνα με τους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς του 2008 δίνεται από την σχέση:

$$Z_{v-min} = 0.9kC_{wv}L^2 B(C_b + 0.7) \cdot 10^{-6}$$

Όπου

$k$  : συντελεστής υλικού για χάλυβα υψηλής αντοχής στο κατάστρωμα ή στον πυθμένα

$C_{wv}$  : Συντελεστής κυματισμού

$L$ : μήκος του πλοίου σε m

$B$ : μέγιστο πλάτος του πλοίου σε m

$C_b$ : συντελεστής γάστρας

## 2.9 Απαιτούμενη ροπή αντίστασης από κανονισμούς

Σύμφωνα με τους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς του 2008 η απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req}$  δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Z_{v-req} = \frac{|M_{sw-perm} + M_{wv-v}|}{\sigma_{perm}} 10^{-3} \quad m^3$$

Όπου

$\sigma_{perm}$  : η επιτρεπόμενη καμπτική τάση σε  $N/mm^2$  που είναι ίση με  $190/k$  για απόσταση μέχρι και  $0.4L$  από το κέντρο του πλοίου

$k$  : συντελεστής υλικού για χάλυβα υψηλής αντοχής

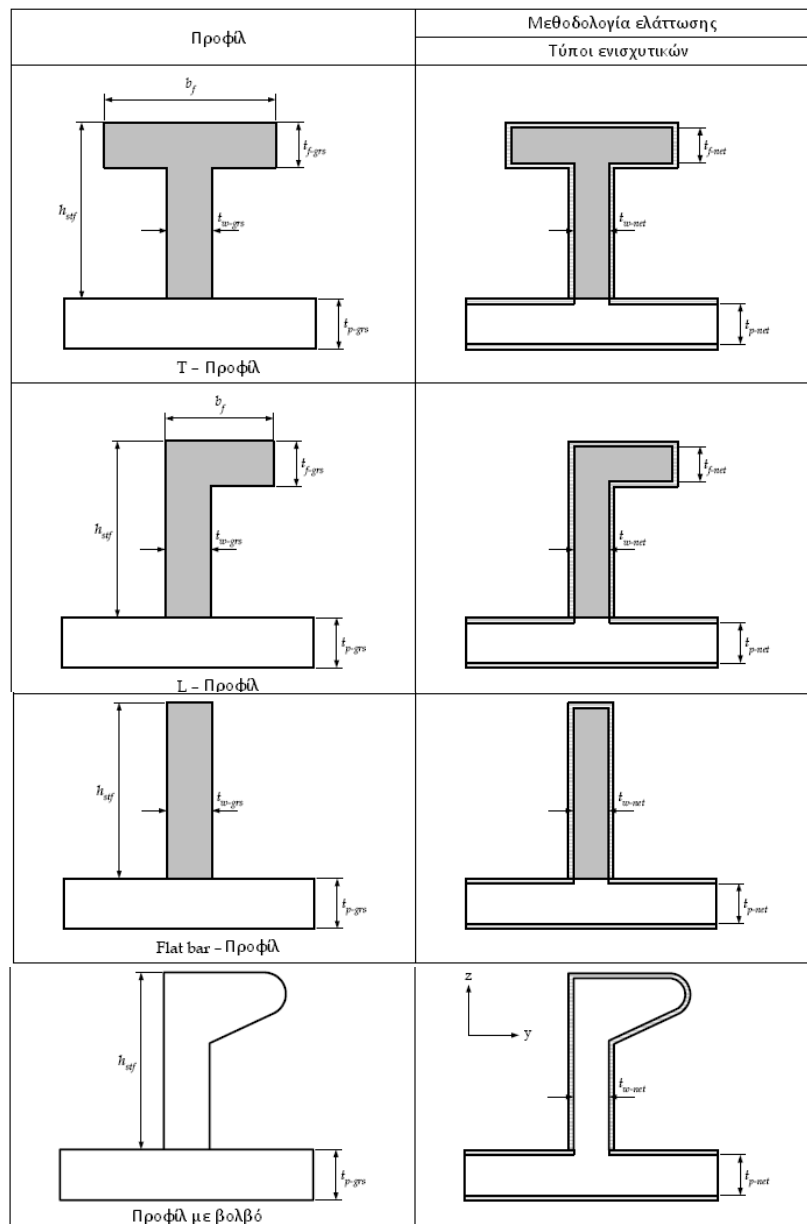
Μπορεί να υπολογιστεί για το κατάστρωμα και τον πυθμένα χρησιμοποιώντας την αντίστοιχη τιμή του συντελεστή για χάλυβα υψηλής αντοχής.

## 2.10 Ονομαστικές και λειτουργικές διαστάσεις

Με τον όρο *ονομαστικές διαστάσεις* (gross dimensions) εννοούμε τις διαστάσεις οι οποίες αναγράφονται στα κατασκευαστικά σχέδια. Αντιθέτως οι *λειτουργικές διαστάσεις* (net

dimensions) προκύπτουν από τις ονομαστικές αφαιρώντας την ποσότητα  $0.5t_{corr}$ . Για παράδειγμα, το λειτουργικό πάχος του πέλματος ενός ενισχυτικού (διατομής Γ) προκύπτει από την σχέση:

$$t_{f-net} = t_{f-grs} - 0.5t_{corr}$$



Σχήμα 2.10.1



Στο σχήμα 2.10.1 παρουσιάζονται οι ονομαστικές διαστάσεις (αριστερό τμήμα) και οι λειτουργικές διαστάσεις (δεξιό τμήμα).

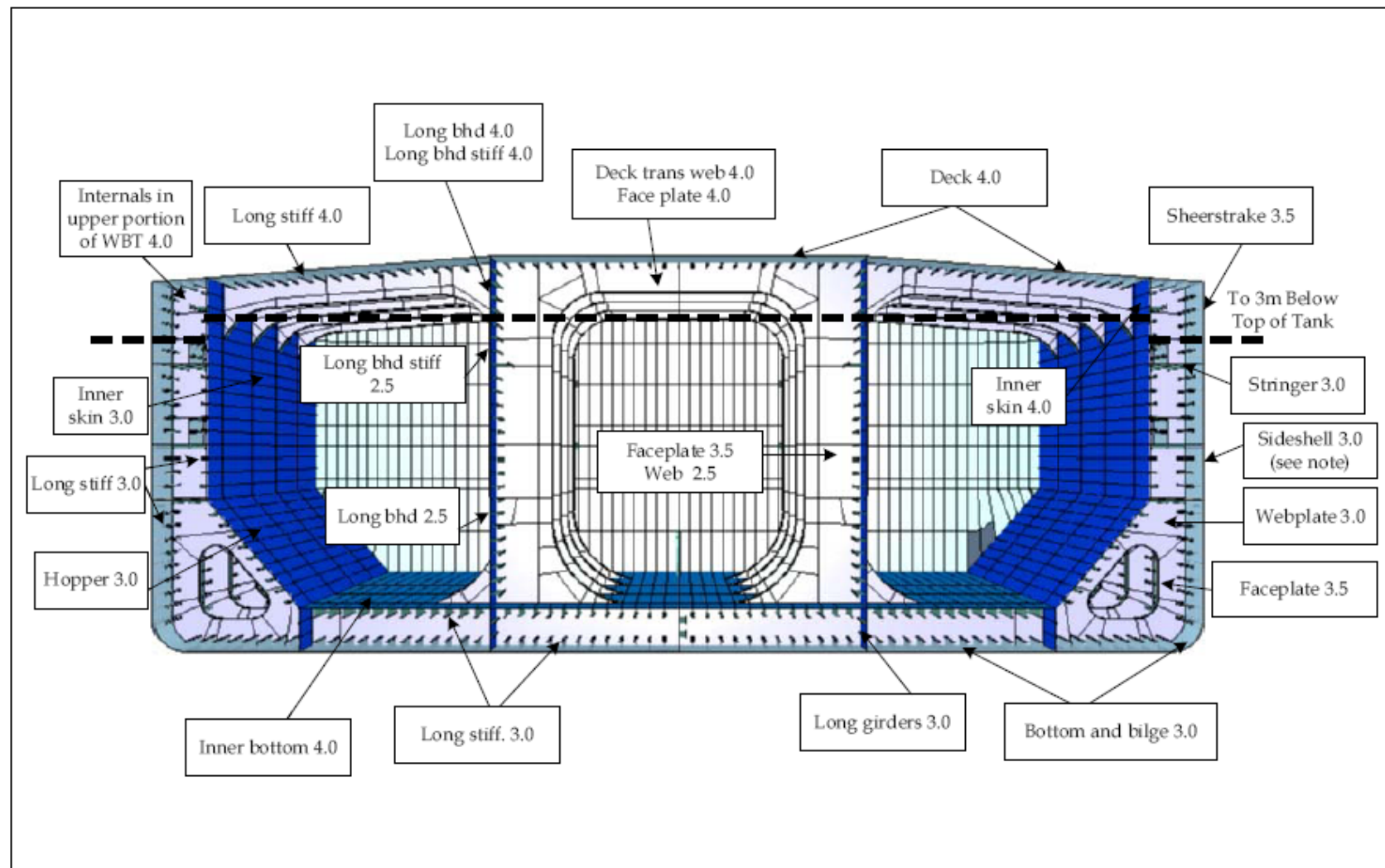
Στο σημείο αυτό πρέπει να επισημάνουμε ότι σύμφωνα τους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς του 2008 (Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers) οι απαιτούμενοι υπολογισμοί για την διαμήκη αντοχή αλλά και γενικότερα για τον σχεδιασμό ενός δεξαμενόπλοιου γίνονται χρησιμοποιώντας τις λειτουργικές διαστάσεις.

## 2.11 Η προσθήκη διάβρωσης

Σε ένα πλοίο που βρίσκεται σε υπηρεσία προκαλείται φθορά στην μεταλλική κατασκευή του που σχετίζεται με την διάβρωση και αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Τέτοιου είδους φθορά έχει θεωρηθεί συχνά υπεύθυνη για την αστοχία ολόκληρων τμημάτων ενός πλοίου. Οπότε για λόγους ασφαλείας, στις λειτουργικές διαστάσεις ενός πλοίου προστίθεται η προσθήκη διάβρωσης  $t_{corr}$  που δίνεται από την σχέση:

$$t_{corr} = t_{was} + 0.5 \text{ mm}$$

Στο σχήμα 2.11.1 παρουσιάζονται οι τιμές της προσθήκης διάβρωσης  $t_{corr}$  για τα διάφορα μέρη του πλοίου.



Σχήμα 2.11.1 Η προσθήκη διάβρωσης για τα διάφορα μέρη του πλοίου.

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 3

---

---

### Ε ι σ α γ ω γ ή σ τ ο M a t l a b

---

---

#### 3.1 Εισαγωγικά

Το Matlab είναι ένα σύγχρονο εργαλείο της πληροφορικής και σήμερα αποτελεί ένα δυναμικό περιβάλλον για επιστημονικούς και αριθμητικούς υπολογισμούς. Το Matlab μπορεί να εγκατασταθεί σε διάφορα υπολογιστικά συστήματα όπως, Microsoft Windows, Linux, Macintosh κ.λ.π.

Το όνομα του προέρχεται από την συντομογραφία των λέξεων Matrix Laboratory και η λειτουργία του βασίζεται κυρίως στην χρήση πινάκων τα στοιχεία των οποίων μπορεί να είναι πραγματικοί ή μιγαδικοί αριθμοί. Έτσι μια απλή βαθμωτή ποσότητα (scalar) θεωρείται σαν πίνακας με ένα στοιχείο. Αυτή είναι μια κομψή και δυναμική ιδέα αλλά μπορεί να δημιουργήσει αρχικά δυσκολίες στον χρήστη των κλασικών γλωσσών προγραμματισμού Fortran, Basic και Pascal. Σε μία απ' αυτές τις γλώσσες για παράδειγμα, η εντολή

$$A = \text{abs}(B)$$

σημαίνει ότι στην μεταβλητή A εκχωρείται η απόλυτη τιμή του αριθμού που έχει αποθηκευτεί στο B. Στο Matlab η μεταβλητή B μπορεί να παριστάνει ένα πίνακα. Τότε σε κάθε στοιχείο του πίνακα A εκχωρείται η απόλυτη τιμή του αντίστοιχου στοιχείου του B. Η πρώτη έκδοση του Matlab έγινε στην δεκαετία του 1970 από τον Cleve Moler. Το Matlab μας απαλλάσσει από ένα πλήθος εργασιών οι οποίες προκύπτουν με την αριθμητική επίλυση διαφόρων προβλημάτων. Αυτό μας επιτρέπει να έχουμε περισσότερο χρόνο για σκέψη και πειραματισμό.

Το Matlab χρησιμοποιεί αλγόριθμους υψηλής αξιοπιστίας, επομένως μπορούμε έχουμε μεγάλη εμπιστοσύνη στα αποτελέσματα που προκύπτουν με την χρήση του. Μπορούν να εκτελεστούν

σημαντικές εργασίες εφαρμόζοντας μόνο μία ή δύο εντολές ή συναρτήσεις (functions). Είναι φανερό ότι πίσω από αυτές τις εντολές βρίσκονται συγκεκριμένες προσεγγιστικές μέθοδοι. Επίσης ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει την δική του συνάρτηση ή αρχείο (πρόγραμμα), με απλές και εύκολα κατανοητές εντολές για την επίλυση ιδιαίτερων εφαρμογών ή για να εφαρμόσει συγκεκριμένες προσεγγιστικές μεθόδους για την επίλυση κάποιων προβλημάτων. Τέλος το Matlab παρέχει την δυνατότητα της δημιουργίας πολύ καλών γραφικών, και την εισαγωγή εικόνων μέσα στα κείμενα.

### 3.2 Ενεργοποίηση του Matlab

Στα περισσότερα υπολογιστικά συστήματα, η εισαγωγή στο Matlab γίνεται με την εντολή συστήματος (system command) matlab. Η έξοδος από το Matlab γίνεται με τις εντολές exit ή quit. Ειδικότερα αν θεωρήσουμε ότι το υπολογιστικό σύστημα είναι ένα PC και το Matlab έχει εγκατασταθεί στον βασικό κατάλογο (root directory) του σκληρού δίσκου, με την εντολή

```
C:\> matlab ↵
```

ενεργοποιούμε το Matlab και στην οθόνη εμφανίζεται το σήμα αναμονής >>.

### 3.3 Βασικά στοιχεία

Αριθμητικοί τελεστές στο Matlab

Το Matlab μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας απλός calculator για τον υπολογισμό αριθμητικών παραστάσεων. Οι βασικοί αριθμητικοί τελεστές είναι:

- ▀ + , πρόσθεσης
- ▀ - , αφαίρεσης
- ▀ \* , πολλαπλασιασμού
- ▀ / , διαίρεσης

- ▀  $\wedge$ , δύναμης

και χρησιμοποιούνται από κοινού με τις παρενθέσεις ( ). Το Matlab λειτουργεί σύμφωνα με τις γνωστές προτεραιότητες στις αριθμητικές πράξεις:

- ▀ Παραστάσεις μέσα σε παρενθέσεις
- ▀ Δυνάμεις
- ▀ Πολλαπλασιασμός (\*), διαίρεση (/), με προτεραιότητα από αριστερά προς τα δεξιά,
- ▀ Πρόσθεση (+), αφαίρεση (-), με προτεραιότητα από αριστερά προς τα δεξιά.

Τύποι αριθμών στο Matlab

Το Matlab αναγνωρίζει τους εξής τύπους αριθμών:

- ▀ Integer (Ακέραιος) π.χ 4854, -2409
- ▀ Real (Πραγματικός) π.χ 1.34, -56.6
- ▀ Complex (Μιγαδικός) π.χ  $3.2-2.1i$ ,  $1+4.4i$ , ( $i = \sqrt{-1}$ )
- ▀ Inf (Άπειρο) π.χ Διαίρεση με το 0,
- ▀ NaN (Αόριστο) π.χ 0/0

Τελεστές πινάκων

Εκ κατασκευής το Matlab χειρίζεται κυρίως πίνακες, και αναγνωρίζει τους παρακάτω τελεστές για τις πράξεις μεταξύ πινάκων:

- ▀ +, πρόσθεση
- ▀ -, αφαίρεση
- ▀ \*, πολλαπλασιασμός
- ▀  $\wedge$ , δύναμη
- ▀  $\backslash$ , αναστροφή
- ▀  $\backslash$ , αριστερή διαίρεση
- ▀ /, δεξιά διαίρεση

Αν οι διαστάσεις των πινάκων δεν συμβιβάζονται για κάποια πράξη, τότε εμφανίζεται ένα μήνυμα λάθους. Αν σε κάθε ένα από τους τελεστές «\*», «\», «/», προηγείται η τελεία «.» τότε οι αντίστοιχες πράξεις εφαρμόζονται μεταξύ των στοιχείων των πινάκων.

#### Εκφράσεις και μεταβλητές

Το Matlab είναι γλώσσα εκφράσεων. Οι εκφράσεις πληκτρολογούνται μεταφράζονται και εκτελούνται. Οι εντολές στο Matlab έχουν το παρακάτω γενικό συντακτικό:

$$\langle \text{μεταβλητή} \rangle = \langle \text{σχέση} \rangle \leftarrow$$

ή

$$\langle \text{σχέση} \rangle \leftarrow$$

Οι εκφράσεις συνήθως αποτελούνται από τελεστές, συναρτήσεις και ονόματα μεταβλητών. Ο υπολογισμός της έκφρασης παράγει γενικά έναν πίνακα, ο οποίος στην συνέχεια εκχωρείται στην μεταβλητή για μελλοντική χρήση. Μία εντολή κανονικά τελειώνει με το πλήκτρο Enter ( $\leftarrow$ ). Αν μία έκφραση δεν χωράει να πληκτρολογηθεί σε μια γραμμή, τότε μπορεί να συνεχιστεί στην επόμενη γραμμή πληκτρολογώντας τρεις συνεχόμενες τελείες « ... » στο σημείο διακοπής και το πλήκτρο Enter. Τέλος αν στην αρχή μιας γραμμής πληκτρολογηθεί ο χαρακτήρας « % » τότε το περιεχόμενο της γραμμής θεωρείται σχόλιο. Το Matlab μας δίνει την δυνατότητα να εκχωρούμε τιμές σε μεταβλητές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επόμενους υπολογισμούς.

### **3.4 Πίνακες και διανύσματα στο Matlab**

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην εισαγωγή, το Matlab δουλεύει βασικά με ένα είδος αντικειμένου (object), έναν ορθογώνιο αριθμητικό πίνακα, ο οποίος μπορεί να έχει και μιγαδικά στοιχεία.

Έτσι μπορούμε να θεωρούμε ότι όλες οι μεταβλητές παριστάνουν πίνακες ποικίλων διαστάσεων και μορφών. Οι πίνακες μπορούν να εισαχθούν στο Matlab με τους παρακάτω τρόπους:

- Άμεσα με την εισαγωγή λίστας στοιχείων
- Έμμεσα δημιουργώντας έναν ειδικό πίνακα με εντολές και συναρτήσεις.
- Χρησιμοποιώντας πίνακες που υπάρχουν σε m-files
- Φορτώνοντας πίνακες από εξωτερικά αρχεία δεδομένων

Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε αναλυτικότερα με την εισαγωγή και τον χειρισμό διανυσμάτων και πινάκων στο Matlab.

### Διανύσματα

Τα διανύσματα μπορούμε να τα χωρίσουμε σε δύο κατηγορίες. Το διάνυσμα-γραμμή (row-vector) και το διάνυσμα-στήλη (column-vector).

#### Διάνυσμα-γραμμή

Ένα διάνυσμα-γραμμή ορίζεται από μια λίστα αριθμών (στοιχείων) οι οποίοι χωρίζονται μεταξύ τους με κόμματα ή κενά και οι οποίοι κλείνονται μέσα σε αγκύλες [ ]. Το γενικό συντακτικό της εντολής μπορεί να γραφεί:

```
>> x = [ x1, x2, ..., xn ] ←
```

Αν οι συντεταγμένες ενός διανύσματος-γραμμή διαφέρουν κατά δεδομένη σταθερή τιμή, τότε μπορούν να οριστούν με σύντομο τρόπο. Έτσι αν η τιμή της πρώτης συντεταγμένης ενός διανύσματος είναι  $x_1$  η σταθερή αύξηση είναι  $a$  και η τιμή της τελευταίας συντεταγμένης να μην υπερβαίνει τον αριθμό  $x_2$ , τότε η εντολή ορισμού του διανύσματος γράφεται:

```
>> x = [ x1: a : x2 ] ←
```

Διάνυσμα-στήλη

Για να ορίσουμε ένα διάνυσμα-στήλη με στοιχεία  $x_1, x_2, \dots, x_n$  το γενικό συντακτικό της εντολής είναι:

$$\gg x = [ x_1 : x_2 : \dots : x_n ] \leftarrow$$

Το ίδιο αποτέλεσμα θα προκύψει αν κάθε συντεταγμένη του διανύσματος-στήλη πληκτρολογείται σε νέα γραμμή.

Απλές πράξεις με διανύσματα

▀ Πρόσθεση και Αφαίρεση

Οι αριθμητικές πράξεις πρόσθεση και αφαίρεση δύο διανυσμάτων του ίδιου μεγέθους και τύπου μπορούν να εκτελεσθούν άμεσα στο Matlab χρησιμοποιώντας τα γνωστά σύμβολα « + » και « - » αντίστοιχα.

▀ Πολλαπλασιασμός αριθμού με διάνυσμα

Επίσης άμεσα εκτελείται και ο πολλαπλασιασμός αριθμού με ένα διάνυσμα.

▀ Αναστροφή διανύσματος

Μπορούμε να μετατρέψουμε ένα διάνυσμα-γραμμή σε ένα διάνυσμα-στήλη και αντίστροφα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται αναστροφή (transpose) και συμβολίζεται με το σύμβολο « ` ».

Γινόμενο διανυσμάτων

Θα περιγράψουμε δύο τρόπους πολλαπλασιασμού δύο διανυσμάτων του ίδιου μήκους.

▀ Εσωτερικό γινόμενο (scalar product)

Θεωρούμε τα διανύσματα  $u$  και  $v$  μήκους  $n$ , όπου  $u$  διάνυσμα-γραμμή και  $v$  διάνυσμα-στήλη:



$$u = [u_1, u_2, \dots, u_n], \quad v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

Το εσωτερικό γινόμενο ορίζεται από την σχέση:

$$u \cdot v = \sum_{i=1}^n u_i v_i$$

Το εσωτερικό γινόμενο στο Matlab ορίζεται με τις εντολές:

```
>> u = [u1, u2, ..., un], v = [v1, v2, ..., vn] ↵  
>> prod1 = u*v ↵
```

#### ■ Γινόμενο στοιχείου προς στοιχείο (dot product)

Ο δεύτερος τρόπος σχηματισμού του γινομένου δύο διανυσμάτων του ίδιου μεγέθους και τύπου, συνήθως δεν χρησιμοποιείται στα Μαθηματικά, αλλά είναι ένα χρήσιμο χαρακτηριστικό του Matlab. Ο μαθηματικός ορισμός αυτού του γινομένου είναι ένα νέο διάνυσμα με στοιχεία:

$$u \cdot v = [u_1 \cdot v_1, u_2 \cdot v_2, \dots, u_n \cdot v_n]$$

και είναι του ίδιου τύπου και μεγέθους με τα δοθέντα.

Στο Matlab το γινόμενο αυτό υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τελεστή (.\*) .

#### ☑ Διαίρεση διανυσμάτων

Ως γνωστόν δεν υπάρχει μαθηματικός ορισμός για την διαίρεση δύο διανυσμάτων. Όμως στο Matlab, ο τελεστής (./) εκτελεί την διαίρεση στοιχείο προς στοιχείο για δύο διανύσματα του ίδιου μεγέθους και τύπου.

#### ☑ Δυνάμεις διανυσμάτων

Μπορούμε να τετραγωνίσουμε τα στοιχεία ενός διανύσματος  $u$  εκτελώντας την πράξη  $u.*u$ . Όμως υπάρχει η δυνατότητα να εκτελέσουμε αυτήν την πράξη κάνοντας χρήση του τελεστή (.^). Με

τον τελευταίο τελεστή μπορούμε να υπολογίσουμε οποιαδήποτε δύναμη.

### Πίνακες

Είναι γνωστό ότι τα διανύσματα γραμμής ή στήλης είναι ειδικές περιπτώσεις πινάκων. Για να εισάγουμε έναν πίνακα στο Matlab εργαζόμαστε με τρόπους ανάλογους εκείνων για διανύσματα.

#### ► Μέγεθος πίνακα

Μπορούμε με μια απλή εντολή να ορίσουμε το μέγεθος ενός πίνακα. Η εντολή γράφεται:

```
>> size(A) ↵
```

όπου  $A$  ένας  $n \times m$  πίνακας. Τότε η απάντηση εμφανίζεται με την μορφή:

```
ans =
```

```
    n    m
```

που δηλώνει ότι το μέγεθος του  $A$  είναι  $n \times m$ .

Το αποτέλεσμα της εντολής,  $size(A)$ , μπορεί να σωθεί για χρήση σε επόμενους υπολογισμούς.

#### ► Αναστροφή πίνακα

Η διαδικασία αυτή είναι ανάλογη με εκείνη των διανυσμάτων και εναλλάσσει τις γραμμές ενός πίνακα με τις αντίστοιχες στήλες.

### Βασικές πράξεις πινάκων

Το Matlab εκτελεί τις βασικές πράξεις μεταξύ πινάκων σύμφωνα με τους κανόνες των μαθηματικών με την προϋπόθεση ότι οι διαστάσεις τους είναι συμβιβαστές με τις πράξεις αυτές και χρησιμοποιώντας τους αντίστοιχους τελεστές.

Παρατήρηση: Για την διαίρεση πινάκων έχουμε να παρατηρήσουμε τα εξής: Αν  $A$  είναι ένας αντιστρέψιμος τετραγωνικός πίνακας και  $b$  ένα κατάλληλο διάνυσμα στήλη ή γραμμή τότε:

- ▶  $x = A \setminus b$  ορίζει την λύση εξίσωσης  $A * x = b$
- ▶  $x = b / A$  ορίζει την λύση εξίσωσης  $x * A = b$

Δημιουργία ειδικών πινάκων

Το Matlab διαθέτει ειδικές εντολές για την δημιουργία και εισαγωγή σ' αυτό πινάκων ειδικής μορφής. Οι κυριότερες περιπτώσεις αναφέρονται στην συνέχεια.

- ▶ `ones(m, n)` : Ορίζει έναν  $m \times n$  πίνακα με όλα τα στοιχεία του ίσα με 1.
- ▶ `zeros(m, n)` : Ορίζει έναν  $m \times n$  πίνακα με όλα τα στοιχεία του ίσα με 0.
- ▶ `eye(n)` : Ορίζει τον μοναδιαίο πίνακα τάξης  $n$ .
- ▶ `diag(A)` : Ορίζει τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα  $A$ . Η συνάρτηση `diag` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός διαγώνιου πίνακα όταν δίνεται το διάνυσμα των διαγώνιων στοιχείων.
- ▶ `triu(A)`, `tril(A)` : Η πρώτη εντολή ορίζει το άνω τριγωνικό μέρος του πίνακα  $A$ , ενώ η δεύτερη το κάτω τριγωνικό μέρος του  $A$ .

Το Matlab διαθέτει και άλλες εντολές για την παραγωγή ειδικών πινάκων, οι οποίες μπορούν να αναζητηθούν κυρίως στο manual του πακέτου.

### 3.5 Μαθηματικές συνάρτησεις στο Matlab

Όπως κάθε γλώσσα προγραμματισμού, το Matlab δεχεται και αναγνωρίζει έναν αριθμό μαθηματικών συναρτήσεων από στοιχειώδεις συναρτήσεις που μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- ▶ Τριγωνομετρικές συναρτήσεις
- ▶ Άλλες βασικές συναρτήσεις

▮ Συναρτήσεις οι οποίες κάνουν μικροδουλειές

Τριγωνομετρικές συναρτήσεις

Πίνακας 3.1

Συνάρτηση	Περιγραφή
$\sin(x)$	ημίτονο
$\cos(x)$	συνημίτονο
$\tan(x)$	εφαπτομένη
$\text{asin}(x)$	αντίστροφο του ημιτόνου
$\text{acos}(x)$	αντίστροφο του συνημίτονου
$\text{atan}(x)$	αντίστροφο της εφαπτομένης
$\sinh(x)$	υπερβολικό ημίτονο
$\cosh(x)$	υπερβολικό συνημίτονο
$\tanh(x)$	υπερβολική εφαπτομένη
$\text{asinh}(x)$	αντίστροφο υπερβ. ημιτόνου
$\text{acosh}(x)$	αντίστροφο υπερβ. συνημίτονου
$\text{atanh}(x)$	αντίστροφο υπερβ. εφαπτομένης

Οι πίνακες 1 και 2 περιέχουν συναρτήσεις των δύο πρώτων κατηγοριών αντίστοιχα. Οι μαθηματικές συναρτήσεις στο Matlab έχουν δύο βασικά πλεονεκτήματα από τις αντίστοιχες μαθηματικές συναρτήσεις στις άλλες γλώσσες προγραμματισμού όπως Fortran και C:

- ▮ Οι μαθηματικές συναρτήσεις στο Matlab ισχύουν για μιγαδικές μεταβλητές χωρίς καμία διάκριση.
- ▮ Οι μαθηματικές συναρτήσεις στο Matlab ισχύουν και για μεταβλητές των οποίων τα ορίσματα είναι διανύσματα ή πίνακες.

- 
- Βασικές συναρτήσεις

Πίνακας 3.2

Βασικές Συναρτήσεις	Περιγραφή
<code>abs(x)</code>	απόλυτη τιμή
<code>sqrt(x)</code>	Τετραγωνική ρίζα
<code>Real(x)</code>	πραγματικό μέρος μιγαδικού
<code>imag(x)</code>	φανταστικό μέρος μιγαδικού
<code>conj(x)</code>	συζυγής μιγαδικού
<code>sign(x)</code>	+1 αν $x > 0$ , -1 αν $x < 0$
<code>exp(x)</code>	εκθετική συνάρτηση
<code>log(x)</code>	λογάριθμός με βάση το e
<code>log10(x)</code>	λογάριθμός με βάση το 10
<code>expm(A)</code>	εκθετική συνάρτηση πίνακα
<code>sqrtm(A)</code>	Τετραγωνική ρίζα πίνακα
<code>angle(x)</code>	όρισμα μιγαδικού αριθμού

### 3.6 Άλλες χρήσιμες συναρτήσεις στο Matlab

- 
- Μέγιστα και ελάχιστα στοιχεία

Το μεγαλύτερο στοιχείο σε ένα διάνυσμα  $u$  με πραγματικά στοιχεία υπολογίζεται εφαρμόζοντας την συνάρτηση `max`. Επομένως η έκφραση:

$$t = \max(u) \Rightarrow t = \max u_i$$

Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε τον δείκτη του μέγιστου στοιχείου του διανύσματος  $u$ . Στην περίπτωση αυτή η έκφραση είναι:

$$[t, j] = \max(u)$$

Όπου  $j$  παριστάνει τον δείκτη.

Αν  $A$  είναι ένας  $m \times n$  πίνακας και  $m > 1$ , η εντολή:

$$v = \max(A)$$

υπολογίζει ένα διάνυσμα  $v$  του οποίου τα στοιχεία είναι το μεγαλύτερο στοιχείο από κάθε στήλη του πίνακα  $A$ .

Αν  $A$  και  $B$  είναι πίνακες του ίδιου μεγέθους, τότε η εντολή:

$$C = \max(A, B) \Rightarrow c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$$

Η συνάρτηση  $\min$  είναι ανάλογη της συνάρτησης  $\max$ .

Τέλος η εντολή:

$$t = \max(\min(A)),$$

υπολογίζει το μέγιστο στοιχείο από το διάνυσμα το οποίο προκύπτει με την εκτέλεση της εντολής  $\min(A)$ .

Οι συναρτήσεις  $\text{sum}$  και  $\text{prod}$

Αν  $u$  είναι ένα διάνυσμα γραμμή ή στήλη τότε οι εντολές:

$$t = \text{sum}(u), \quad t = \text{prod}(u)$$

υπολογίζουν το άθροισμα και το γινόμενο των στοιχείων του διανύσματος  $u$  αντίστοιχα.

Αν  $A$  είναι ένας  $m \times n$  πίνακας και τότε η εντολή:

$$v = \text{sum}(A)$$

ισοδυναμεί με τις εντολές

```
for j = 1:n
    v(j) = sum(A(:, j))
end
```

δηλαδή υπολογίζει ένα διάνυσμα του οποίου κάθε στοιχείο είναι ίσο με το άθροισμα των στοιχείων κάθε στήλης του πίνακα  $A$ .

Τέλος η εντολή:

$$v = \text{prod}(A)$$

είναι ισοδύναμη με τις εντολές:

```
for j = 1:n
```

```
v(j)=prod(A(:,j))  
end
```

και υπολογίζει ένα διάνυσμα του οποίου κάθε στοιχείο είναι ίσο με το γινόμενο των στοιχείων κάθε στήλης του πίνακα A.

#### Στρογγυλοποίηση αριθμών

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι στρογγυλοποίησης ενός αριθμού. Το Matlab διαθέτει διάφορες συναρτήσεις για τον σκοπό αυτό.

### 3.7 Loops στο Matlab

Πολλές φορές υπάρχει η ανάγκη, ένα σύνολο εντολών να εκτελεστεί περισσότερες φορές από μια. Όπως και σε άλλες γλώσσες προγραμματισμού έτσι και στο Matlab έχουμε την δυνατότητα αυτό το σύνολο των εντολών να το εντάξουμε σε μια «σύνθετη» εντολή η οποία είναι γνωστή σαν εντολή loop. Έχουμε δύο βασικούς τύπους εντολών loop οι οποίες χαρακτηρίζονται από αρχή και τέλος, και διακρίνονται ανάλογα με τις λέξεις κλειδιά με τις οποίες ορίζονται.

#### For loops

Στην περίπτωση αυτή όλες οι εντολές μεταξύ των γραμμών οι οποίες αρχίζουν με την λέξη for και τελειώνουν με την λέξη end ορίζουν μία εντολή for-loop. Το γενικό συντακτικό της εντολής for-loop είναι:

```
for {μεταβλητή} = {«μετρητής» (διάνυσμα-γραμμή)}  
    {εντολές}  
end
```

Παρακάτω ακολουθεί ένα παράδειγμα σχετικό με την εντολή for-loop.

### Παράδειγμα

```
>> for i=1:5
    for j=1:5
        H(i,j)=1/(i+j-1);
    end
end
>> H
H =
    1.0000    0.5000    0.3333    0.2500    0.2000
    0.5000    0.3333    0.2500    0.2000    0.1667
    0.3333    0.2500    0.2000    0.1667    0.1429
    0.2500    0.2000    0.1667    0.1429    0.1250
    0.2000    0.1667    0.1429    0.1250    0.1111
```

### Τελεστές συσχέτισης

Μια συσχέτιση στο Matlab έχει την παρακάτω γενική μορφή:

<έκφραση> <τελεστής συσχέτισης> <έκφραση> ↵

Όπου οι τελεστές συσχέτισης τους οποίους αναγνωρίζει το Matlab είναι:

- ▶ == ισότητα
- ▶ ~= όχι ίσον
- ▶ < μικρότερο από
- ▶ <= μικρότερο ή ίσον
- ▶ Μεγαλύτερο από
- ▶ >= μεγαλύτερο ή ίσον



Το αποτέλεσμα μιας συσχέτισης είναι αληθές (true) ή ψευδές (false). Το Matlab παριστάνει τις τιμές true και false με τους αριθμούς 1 και 0 αντίστοιχα. Έτσι αν ένας τελεστής συσχέτισης συσχετίζει εκφράσεις πινάκων το αποτέλεσμα θα είναι ένας πίνακας του ίδιου μεγέθους με τους πίνακες της έκφρασης, του οποίου τα στοιχεία θα είναι 0 ή 1 ανάλογα με το αποτέλεσμα της συσχέτισης στοιχείου προς στοιχείο. Τέλος στο Matlab μπορούν εκφράσεις να συνδέονται και με τους λογικούς τελεστές.

& and | or, ~ not

σε πιο σύνθετες εκφράσεις συσχέτισης.

#### While loops

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες θέλουμε να επαναλάβουμε ένα κομμάτι εντολών του Matlab όσο διάστημα μια λογική συνθήκη είναι αληθής, αλλά δεν γνωρίζουμε εκ των προτέρων τον αριθμό των απαιτούμενων επαναλήψεων. Τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εντολή while-loop. Η γενική μορφή της εντολής είναι:

```
while {σχέση}
    {εντολές}
end
```

και ερμηνεύεται ως εξής. Όσο η {σχέση} είναι αληθής εκτέλεσε τις {εντολές} διαφορετικά συνέχισε να εκτελεί τις εντολές μετά το end. Το επόμενο παράδειγμα δείχνει πως λειτουργεί η εντολή while-loop.

#### Παράδειγμα

```
>> s=1;n=1;
>> while s+(n+1)^2<100
    n=n+1; s=s+n^2;
end
```

```
>> [n, s]
```

```
ans =
```

```
6 91
```

Οι γραμμές του παραπάνω κώδικα μεταξύ των λέξεων κλειδιά while, end θα εκτελεστούν μόνο αν η συνθήκη  $s+(n+1)^2 < 100$  είναι αληθής. Με το παραπάνω παράδειγμα υπολογίζεται η μεγαλύτερη τιμή του n η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε το άθροισμα  $1^2+2^2+\dots+n^2$  να έχει τιμή μικρότερη του 100.

#### Εντολές if

Οι εντολές αυτής της κατηγορίας μας επιτρέπουν να εκτελούμε διαφορετικές εντολές ανάλογα με το αν κάποιες λογικές πράξεις είναι αληθείς ή ψευδείς. Η πιο απλή if εντολή είναι της μορφής:

```
if {σχέση}
    {εντολές}
end
```

#### Παράδειγμα

```
>> a=pi^exp(1); c=exp(pi);
>> if a>=c
    b=sqrt(a^2-c^2)
end
>> b =
    [].
```

Στο παράδειγμα αυτό το b θα πάρει κάποια τιμή μόνο αν  $a \geq c$ . Παρατηρούμε ότι εδώ δεν υπάρχει αποτέλεσμα.

Εντολές if-else

Μπορούμε να δημιουργήσουμε και περισσότερο σύνθετες περιπτώσεις της εντολής if σε συνδυασμό με την λέξη κλειδί else. Η γενική μορφή αυτού του συνδυασμού είναι:

```
if {σχέση}
    {εντολές}
elseif σχέση}
    {εντολές}
else σχέση}
    {εντολές}
end
```

Παράδειγμα

```
>> a=pi*exp(1); c=exp(pi);
if a>=c
    b=sqrt(a^2-c^2)
elseif a^c>c^a
    b=c^a/a^c
else
    b=a^c/c^a
end
```

b =

```
1.2507e-010
```

Εντολή break

Η εντολή break μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σταματήσουμε ένα loop. Το επόμενο πρόγραμμα υπολογίζει όλους τους αριθμούς Fibonacci που είναι μικρότεροι του 100 και δείχνει την χρήση της εντολής break.

### Παράδειγμα

```
>> f(1)=0; f(2)=1;
>> for j=3:100
    z=f(j-1)+f(j-2);
    if z>=100
        break
    end
    f(j)=z
end
```

Columns 1 through 8

0      1      1      2      3      5      8      13

Columns 9 through 12

21      34      55      89

### **3.8 M-αρχεία: scripts και functions**

Το Matlab συνήθως χρησιμοποιείται με την μορφή εντολή προς εντολή. Αυτό σημαίνει ότι όταν εισάγονται εντολές μίας γραμμής, το Matlab τις εκτελεί αμέσως και εμφανίζει τα αποτελέσματα. Όμως το Matlab μπορεί να εκτελεί και μια σειρά εντολών οι οποίες είναι αποθηκευμένες σε δίσκους αρχείων. Τέτοια αρχεία τα οποία περιέχουν εντολές του Matlab και ονομάζονται "M-αρχεία" και έχουν στο όνομα τους σαν προέκταση το ".m". Για παράδειγμα, ένα αρχείο με το όνομα Bessel.m μπορεί να περιέχει εντολές του Matlab οι οποίες υπολογίζουν συναρτήσεις Bessel.

Ένα “Μ-αρχείο” απαρτίζεται από μία σειρά με κανονικές εντολές του Matlab οι οποίες μπορούν να περιέχουν αναφορές σε άλλα “Μ-αρχεία”. Ένα τέτοιο αρχείο μπορεί να καλεί επαναληπτικά τον εαυτόν του.

Μια βασική χρήση των “Μ-αρχείων” είναι να αυτοματοποιούν μεγάλες σειρές εντολών, και ονομάζονται script-αρχεία. Ένας άλλος τύπος “Μ-αρχείων” μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επεκτείνει τις δυνατότητες του Matlab. Τέτοια αρχεία ονομάζονται function-αρχεία, και επιτρέπουν να προστεθούν νέες συναρτήσεις στις ήδη υπάρχουσες συναρτήσεις του Matlab, με τις οποίες ο χρήστης μπορεί να αντιμετωπίσει τα δικά του ιδιαίτερα προβλήματα. Ένα μεγάλο μέρος της δυναμικής του Matlab βασίζεται στην δυνατότητα την οποία έχει ο χρήστης για την δημιουργία των δικών του συναρτήσεων οι οποίες είναι κατάλληλες για τα δικά του προβλήματα

Οι δύο τύποι των “Μ-αρχείων” είναι συνήθη ASCII text-αρχεία και δημιουργούνται με την χρήση του ενσωματωμένου editor.

#### Script-αρχεία

Όταν καλούμε ένα script-αρχείο με το όνομα του, το Matlab απλώς εκτελεί τις εντολές τις οποίες βρίσκει στο αρχείο, αντί να περιμένει να εισαχθούν μέσω του πληκτρολογίου. Οι εντολές στο script-αρχείο λειτουργούν σφαιρικά στα δεδομένα μέσα στον χώρο εργασίας. Τα script-αρχεία είναι χρήσιμα για την επίλυση προβλημάτων ή την δημιουργία σχεδίων, τα οποία απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό εντολών, ο οποίος δεν επιτρέπει κάθε φορά την άμεση πληκτρολόγηση τους.

#### Παράδειγμα

```
% Μ-αρχείο για τον υπολογισμό των αριθμών Fibonacci  
f=[1 1];i=1;  
while f(i)+f(i+1)<1000  
    f(i+2)=f(i)+f(i+1);
```

```
i=i+1;  
end  
plot(f)
```

Αν οι παραπάνω εντολές Matlab περιέχονται σε ένα αρχείο με το όνομα fibno.m και πληκτρολογήσουμε την εντολή fibno, τότε το Matlab θα εκτελέσει τις εντολές αυτές και θα υπολογίσει τους πρώτους 16 αριθμούς Fibonacci τους οποίους θα εμφανίσει σε γραφική παράσταση. Μετά την εκτέλεση του προγράμματος οι μεταβλητές f και i παραμένουν αποθηκευμένες στο χώρο εργασίας (workspace).

#### Function-αρχεία

Αν η πρώτη γραμμή ενός M-αρχείου περιλαμβάνει την λέξη "function" τότε το αρχείο είναι ένα "function-αρχείο". Το function-αρχείο διαφέρει από το script-αρχείο εις το ότι οι τιμές που ορίζονται μπορούν να μεταφερθούν, και οι μεταβλητές που ορίζουμε και χειριζόμαστε μέσα στο αρχείο είναι τοπικές για τη συνάρτηση και δεν λειτουργούν σφαιρικά στον χώρο εργασίας του Matlab. Τα function-αρχεία είναι χρήσιμα διότι μπορούν να επεκτείνουν το Matlab κατασκευάζοντας νέες συναρτήσεις, για την αντιμετώπιση συγκεκριμένων προβλημάτων του χρήστη με συγκεκριμένες μεθόδους, εφαρμόζοντας την γλώσσα Matlab.

#### Παράδειγμα

```
function y = mean(x)  
% υπολογίζει την μέση τιμή. Για διανύσματα επιστρέφει την  
% μέση τιμή για πίνακες, η mean(x) είναι ένα διάνυσμα-  
% γραμμή, του οποίου τα στοιχεία είναι η μέση τιμή των  
% στοιχείων κάθε στήλης.  
[m,n] = size(x);  
if m=1
```

```
m = n; %  
end  
y sum(x)/m;
```

Το αρχείο αυτό ορίζει μια νέα συνάρτηση με το όνομα mean. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται ακριβώς όπως κάθε άλλη συνάρτηση του Matlab. Για παράδειγμα αν z είναι ένα διάνυσμα με στοιχεία τους ακεραίους από το 1 έως το 99.

```
>> z = 1:99 ↵
```

Τότε η μέση τιμή υπολογίζεται πληκτρολογώντας απλά την εντολή:

```
>> mean(z) ↵
```

η οποία δίνει το αποτέλεσμα:

```
ans =  
50.
```

Όταν ένα M-function αρχείο το καλούμε για πρώτη φορά κατά την διάρκεια εργασίας στο περιβάλλον Matlab, τότε αυτό μεταφράζεται (compiled) και τοποθετείται στην μνήμη. Αυτό πλέον είναι διαθέσιμο για μετέπειτα χρήση χωρίς να μεταφραστεί πάλι, και παραμένει στην μνήμη για όλη την διάρκεια εργασίας στο περιβάλλον του Matlab.

### 3.9 Γραφικές παραστάσεις

Οι περισσότερες μαθηματικές συναρτήσεις εκφράζουν πολύπλοκες σχέσεις, σε μια, δύο, τρεις ή περισσότερες διαστάσεις. Για να κατανοήσουμε αυτές χωρίς γραφικές παραστάσεις είναι σχεδόν αδύνατο. Η χρήση των γραφικών είναι πολύ ενδιαφέρουσα από την στοιχειώδη μέχρι την ανώτατη εκπαίδευση, καθώς και για τους επαγγελματίες επιστήμονες και μηχανικούς για τους ίδιους λόγους.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, όταν η Fortran κυριαρχούσε μεταξύ των γλωσσών προγραμματισμού, τα γραφικά δυστυχώς ήταν πλήρως διαχωρισμένα από τους υπολογισμούς. Επομένως πολλοί χρήστες της Fortran αναγκάζονταν να διαβάζουν τα αποτελέσματα από τις λίστες των αποτελεσμάτων.

Σήμερα, τα γραφικά αποτελούν ένα φυσικό κομμάτι των υπολογισμών, του υπολογιστικού περιβάλλοντος Matlab, και είναι δυνατός ο σχεδιασμός των υπολογιστικών αποτελεσμάτων με λίγες και απλές εντολές.

Στο σημείο αυτό θέλουμε να επισημάνουμε μερικές περιπτώσεις οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα. Μερικές εντολές των γραφικών παραμένουν ενεργές ακόμη και μετά το πέρας του σχεδιασμού, και μπορούν να ενεργήσουν σε επόμενες εργασίες. Οι χρήστες θα πρέπει να σβήνουν μεταβλητές και παράθυρα γραφικών, πριν αρχίσει οποιαδήποτε εργασία σχεδιασμού. Η εντολή `clf` καθαρίζει οτιδήποτε υπάρχει στο παράθυρο σχεδιασμού, ενώ η εντολή `cla` καθαρίζει τις σχεδιασμένες καμπύλες και επανασχεδιάζει τους άξονες.

#### Απλός σχεδιασμός

Υποθέτουμε ότι θέλουμε να σχεδιάσουμε τα δεδομένα  $(x_i, y_i)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ . Αρχικά πρέπει να προετοιμάσουμε τα διανύσματα  $x$ ,  $y$  με την ίδια μορφή. Τα δεδομένα σχεδιάζονται με την `plot`. Το επόμενο παράδειγμα υπολογίζει μια απλή γραφική παράσταση.

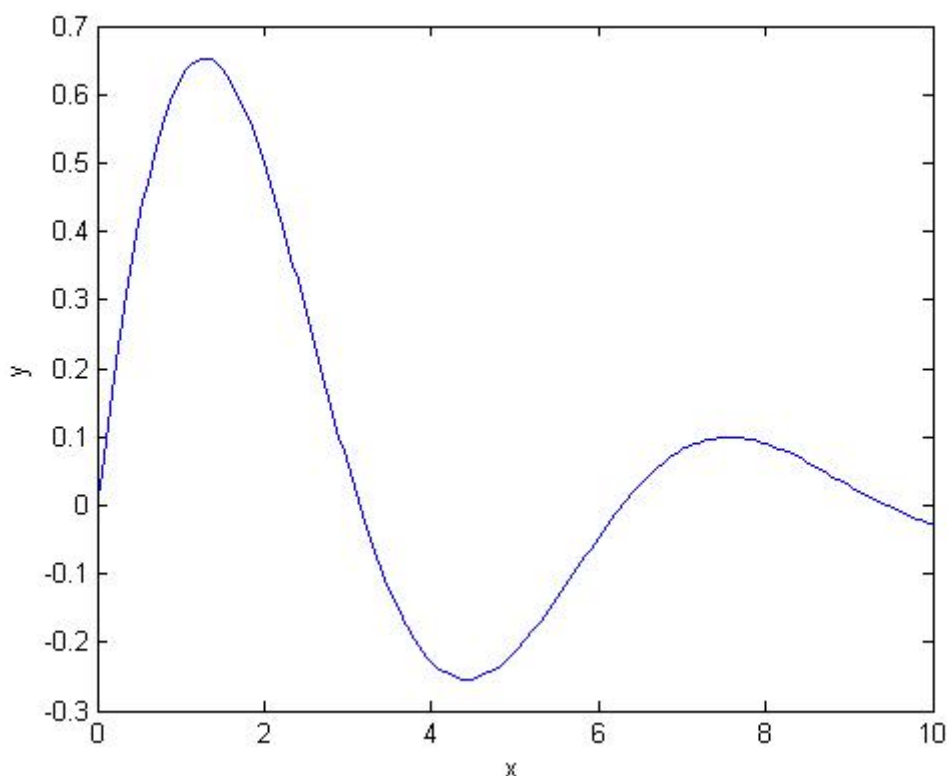
#### Παράδειγμα

Να γίνει η γραφική παράσταση της συνάρτησης:

$$y = \sin x \cdot \exp(-3x), \quad 0 \leq x \leq 10.$$

Η γραφική παράσταση:





Σχήμα 3.9.1

```
>> x=0:0.05:10;↵  
>> y=sin(x).*exp(-0.3*x);↵  
>> plot(x,y)↵  
>> xlabel('x');ylabel('y')↵
```

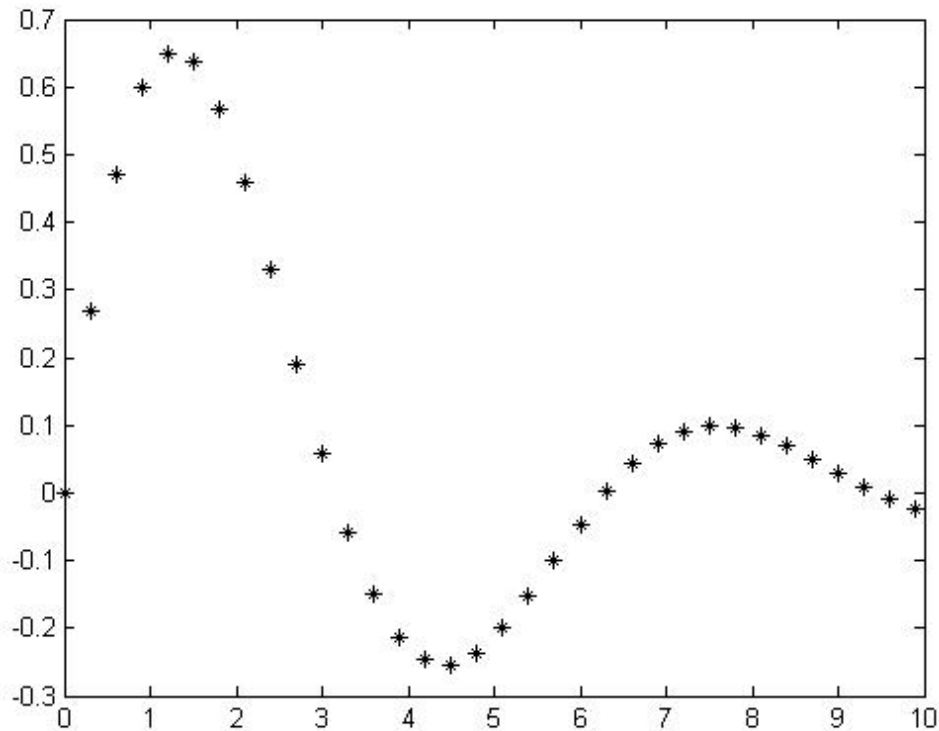
Δεδομένα μπορούν να σχεδιαστούν και με ειδικά σήματα χωρίς να ενώνονται με γραμμές. Το Matlab διαθέτει πέντε χαρακτήρες για τον σκοπό αυτό, οι οποίοι είναι:

•, +, \*, °, x

Η χρήση κάποιου από τους παραπάνω χαρακτήρες σ' ένα γράφημα γίνεται με την κατάλληλη χρήσης της εντολής plot. Το επόμενο παράδειγμα διευκρινίζει πλήρως αυτό το σημείο.

### Παράδειγμα

```
>> x=(0:0.3:10)'; ↵  
>> y=sin(x).*exp(-0.3*x); ↵  
>> plot(x,y,'*k') ↵
```



Σχήμα 3.9.2

Αν στο προηγούμενο παράδειγμα η εντολή plot αντικατασταθεί με την εντολή:

```
>> plot(x,y,x,,'*') ↵
```

τότε η συνάρτηση σχεδιάζεται και με γραμμή και με τον αντίστοιχο χαρακτήρα. Το Matlab δέχεται διάφορους τύπους γραμμών για τον σχεδιασμό συναρτήσεων, καθώς και διάφορα χρώματα. Εξ' ορισμού σχεδιάζει με την συμπαγή γραμμή. Για να σχεδιάσει με επιλεγμένο

τύπο γραμμής, αυτό πρέπει να ορισθεί μέσω της εντολής plot. Το ίδιο συμβαίνει και για την χρήση των χρωμάτων με τα αντίστοιχα σύμβολα φαίνονται στους επόμενους δύο πίνακες:

Είδος γραμμής	Σύμβολο
Solid	-
Dash	--
Dotted	:
Dashdot	-.

Χρώμα	Σύμβολο
Κόκκινο	r
Κίτρινο	y
Ματζέντα	m
Κυανό	c
Πράσινο	g
Μπλε	b
Άσπρο	w
Μαύρο	k

Σχεδιασμός συνάρτησης με την fplot

Ένας εναλλακτικός τρόπος για να σχεδιάσουμε μια συνάρτηση είναι η χρήση της εντολής fplot σύμφωνα με τον επόμενο γενικό τύπο:

```
>> fplot('f-name', [xmin, xmax]) ↵
```

όπου f-name είναι το όνομα ή M-αρχείο της συνάρτησης η οποία πρόκειται να σχεδιασθεί, και xmin, xmax τα όρια του σχεδιασμού.

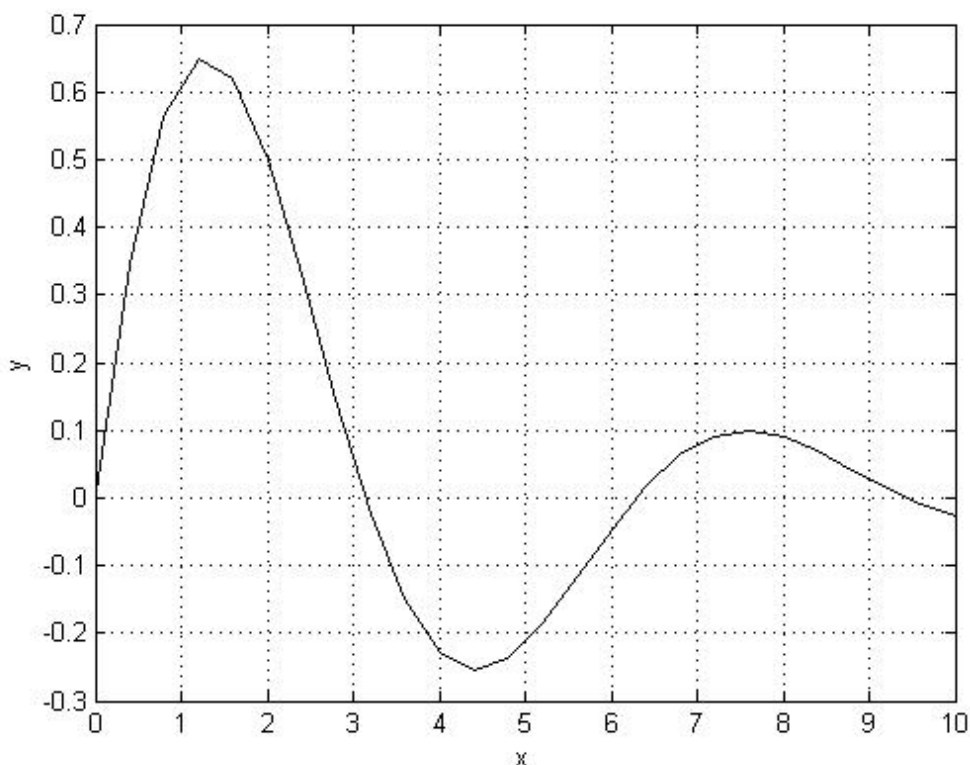
Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές των συντεταγμένων, τα σημεία διαμέρισης και οι τιμές των συντεταγμένων στους άξονες ορίζονται αυτόματα. Το Matlab δέχεται διάφορες εντολές οι οποίες αφορούν την μορφή, το σχήμα και τις συντεταγμένες των αξόνων.

Πλέγμα

Επίσης μπορούμε να προσθέσουμε σε κάποιο γράφημα και πλέγμα με την εντολή `grid on`, ενώ η εντολή `grid off` εξαφανίζει το πλέγμα.

Παράδειγμα

```
x=(0:0.4:10)'; ↵  
>> y=sin(x).*exp(-0.3*x); ↵  
>> plot(x,y,'-k') ↵  
>> grid on ↵  
>> xlabel('x');ylabel('y'); ↵
```



Σχήμα 3.9.3

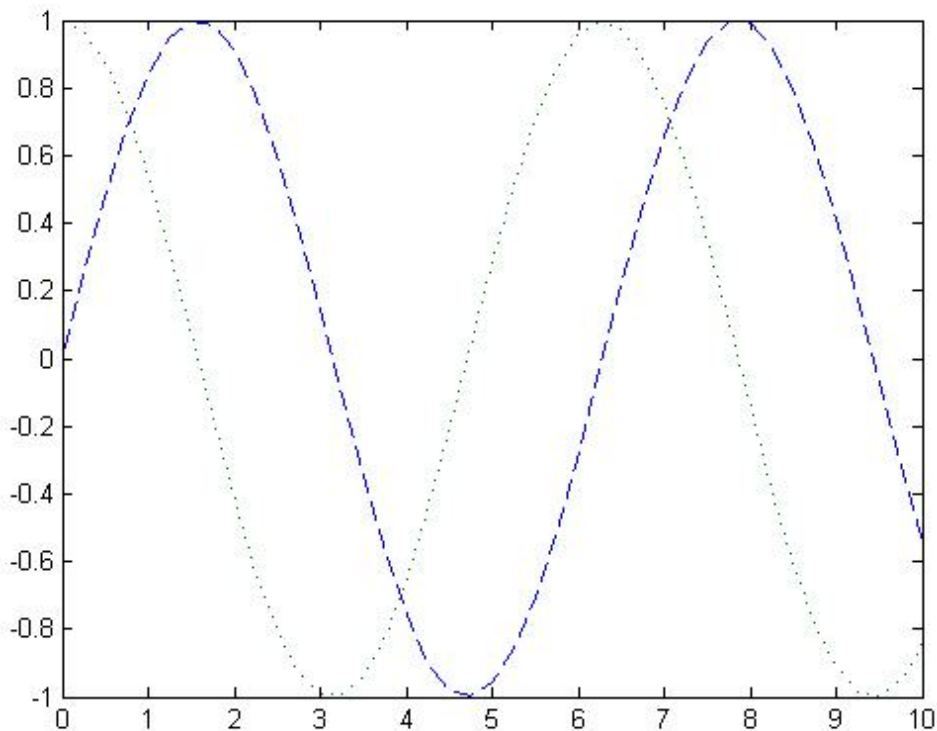
Πολλαπλές καμπύλες

Το Matlab μας δίνει την δυνατότητα να σχεδιάζουμε δύο ή περισσότερες καμπύλες με μια εντολές `plot`. Αυτό μπορεί να γίνει αν γράψουμε όλα τα σύνολα των συντεταγμένων διαδοχικά στην

εντολή plot. Το επόμενο παράδειγμα δείχνει αυτή την δυνατότητα. Επίσης εξ' ορισμού χρησιμοποιούνται διαφορετικά χρώματα, τύποι γραμμών ή σύμβολα για κάθε καμπύλη. Μπορούμε όμως να καθορίσουμε και εμείς αυτά τα στοιχεία μετά από κάθε ζεύγος συντεταγμένων.

### Παράδειγμα

```
>> x=(0:0.25:10)'; ↵  
>> y=sin(x); ↵  
>> z=cos(x); ↵  
>> plot(x,y,'--',x,z,':') ↵
```



Σχήμα 3.9.4

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 4

### Κ α μ π ύ λ ε ς β ρ ά χ υ ν σ η ς δ ι α μ ή κ ω ν σ τ ο ι χ ε ί ω ν

---

---

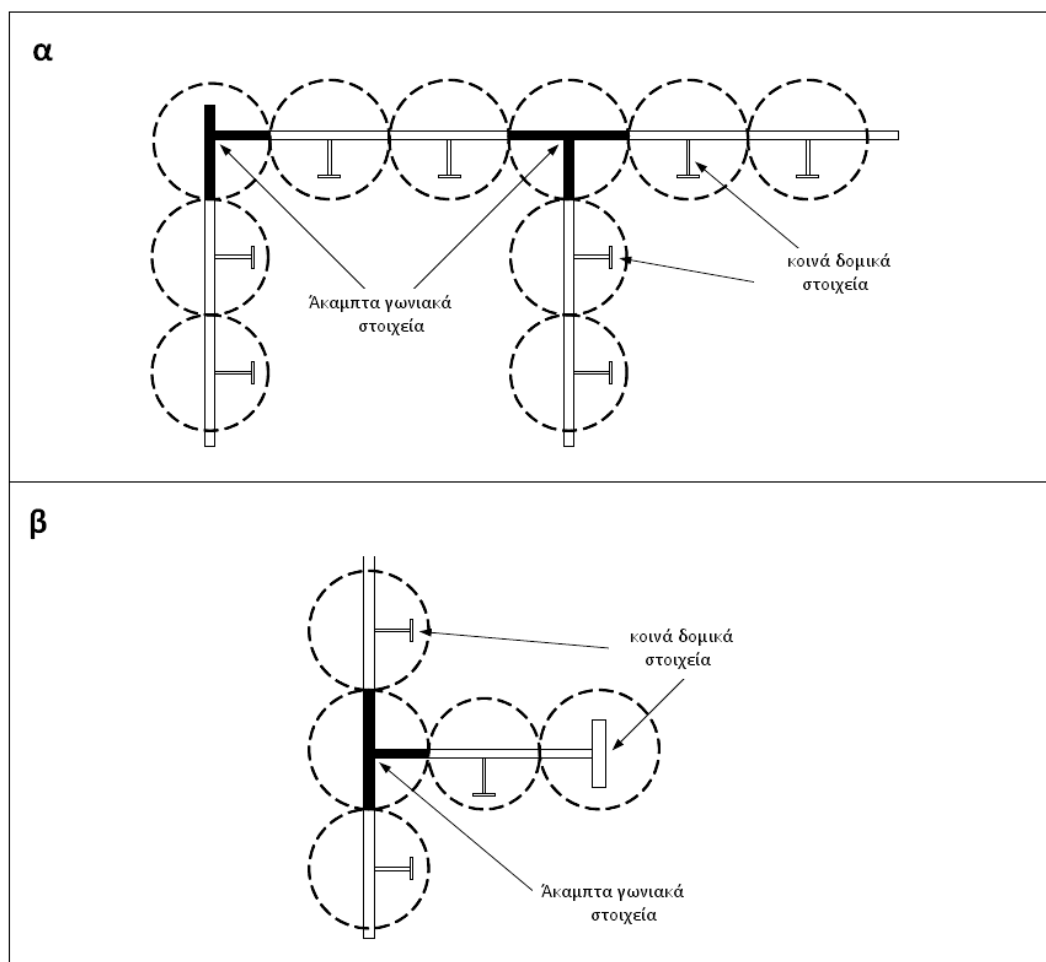
#### 4.1 Γενικά

Ένα σημαντικό τμήμα της προσαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου που θα εφαρμόσουμε για τον υπολογισμό της μέγιστης διαμήκους αντοχής αποτελούν οι καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την μεθοδολογία για την εξαγωγή των συγκεκριμένων καμπυλών όπως αυτή προτείνεται από τον IACS στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (CSR 2008).

#### 4.2 Καθορισμός των δομικών στοιχείων

Πριν παρουσιάσουμε τις εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων, θα πρέπει να διευκρινίσουμε για ποια δομικά στοιχεία θα εξαγάγουμε τις συγκεκριμένες καμπύλες. Ο διαμερισμός της μέσης τομής της γάστρας θα γίνει σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (παράρτημα Α, παράγραφος 2.2.2). Η διατομή της μέσης τομής θα διαιρεθεί σε «κοινά δομικά στοιχεία» και σε «άκαμπτα γωνιακά στοιχεία». Στο σχήμα 4.2.1 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται οι δύο τύποι δομικών στοιχείων. Με «κοινά δομικά στοιχεία» διακρίτοποιούνται τα διαμήκη ενισχυτικά μαζί με το προσαρτημένο έλασμα τους. Αντίθετα με «άκαμπτα γωνιακά στοιχεία» διακρίτοποιούνται τμήματα της μέσης τομής που αποτελούνται μόνο από ελάσματα (π.χ γωνία που

σχηματίζει το έλασμα του πυθμένα με το έλασμα της πλευρικής σταθμίδας).



Σχήμα 4.2.1

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τύποι αστοχίας για ελάσματα και ενισχυτικά

Πίνακας 4.2.1

Στοιχείο	Τύπος αστοχίας	Μειωτική καμπύλη φόρτισης
Εγκάρσια ενισχυμένα ελάσματα ή ενισχυτικά σε εφελκυσμό	Ελαστική, απόλυτα πλαστική αστοχία	Παράγραφος 4.3
Ενισχυτικά σε θλίψη	Λυγισμός δοκού κολώνας	Παράγραφος 4.4
	Στρεπτικός λυγισμός	Παράγραφος 4.5

	Λυγισμός κορμού για προφίλ με πέλμα	Παράγραφος 4.6
	Λυγισμός κορμού για flat bars	Παράγραφος 4.7
<b>Εγκάρσια ενισχυμένα ελάσματα σε θλίψη</b>	Λυγισμός πλάκας	Παράγραφος 4.8

### 4.3 Ελαστοπλαστική αστοχία ενός δομικού στοιχείου

Η εξίσωση που περιγράφει την καμπύλη βράχυνσης για την ελαστοπλαστική αστοχία ενός δομικού στοιχείου παρατίθεται παρακάτω. Η συγκεκριμένη σχέση ισχύει για άκαμπτα γωνιακά στοιχεία που καταπονούνται τόσο για θλίψη (βράχυνση) όσο και για εφελκυσμό (επιμήκυνση) ενός δομικού στοιχείου:

$$\sigma = \Phi \cdot \sigma_{yd}$$

όπου

$\Phi$ : συνάρτηση άκρου

$$\Phi = -1 \text{ για } \varepsilon < -1$$

$$\Phi = \varepsilon \text{ για } -1 < \varepsilon < 1$$

$$\Phi = 1 \text{ για } \varepsilon > 1$$

$\varepsilon$ : σχετική παραμόρφωση

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_{yd}}$$

$\varepsilon_E$ : παραμόρφωση στοιχείου

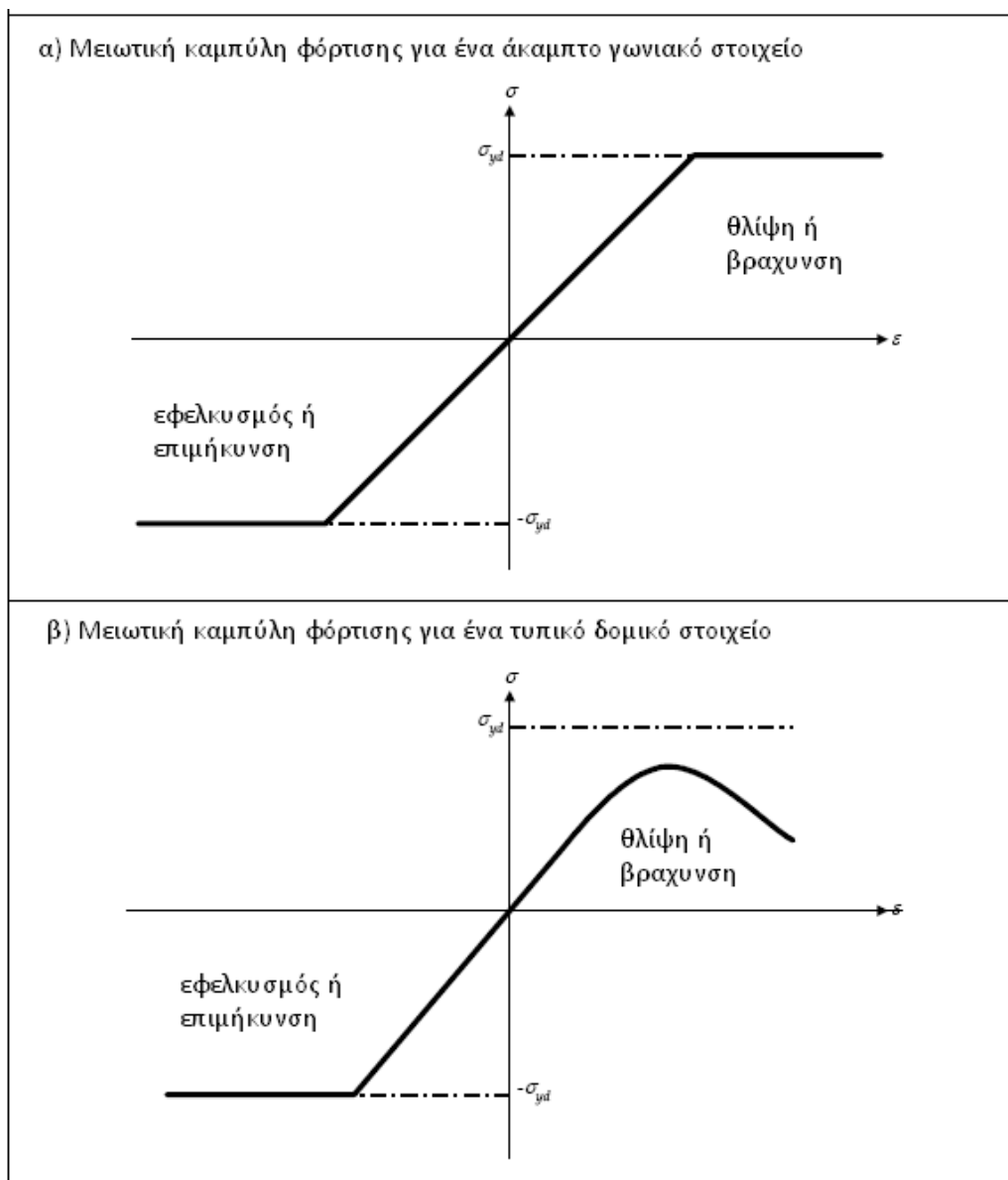
$\varepsilon_{yd}$ : παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην τάση διαρροής

$$\varepsilon_{yd} = \frac{\sigma_{yd}}{E}$$

$\sigma_{yd}$ : τάση διαρροής του υλικού σε  $\text{N/mm}^2$



Στο σχήμα της επόμενης σελίδας παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες βράχυνσης για ένα άκαμπτο γωνιακό στοιχείο και για ένα κοινό δομικό στοιχείο.



Σχήμα 4.3.1

#### 4.4 Λυγισμός δοκού κολώνας ενός δομικού στοιχείου

Η εξίσωση που περιγράφει το τμήμα βράχυνσης της μειωτικής καμπύλης φόρτισης  $\sigma_{CR1} - \epsilon$  για τον λυγισμό δοκού κολώνας παρατίθεται παρακάτω:

$$\sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{C1} \left( \frac{A_{s-net50} + 10^{-2} b_{eff-p} t_{net50}}{A_{s-net50} + 10^{-2} s t_{net50}} \right) \text{ N/mm}^2$$

Όπου

$\Phi$ : συνάρτηση άκρου

$A_{s-net50}$ : λειτουργική διατομή του ενισχυτικού, σε  $\text{cm}^2$ , χωρίς το αντίστοιχο έλασμα.

$\sigma_{C1}$ : κρίσιμη τάση σε  $\text{N/mm}^2$

$$\sigma_{C1} = \frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon} \quad \text{για} \quad \sigma_{E1} \leq \frac{\sigma_{yd}}{2} \varepsilon$$

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

$E$ : μέτρο ελαστικότητας,  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon$ : σχετική παραμόρφωση

$\sigma_{E1}$ : Τάση λυγισμού Euler σε  $\text{N/mm}^2$ :

$$\sigma_{E1} = \pi^2 E \frac{I_{E-net50}}{A_{E-net50} l_{stf}^2} 10^{-4}$$

$I_{E-net50}$ : λειτουργική ροπή αδράνειας των ενισχυτικών σε  $\text{cm}^4$ , συμπεριλαμβανομένου του προσαρτημένου ελάσματος (βλ. Παράρτημα Α)

$b_{eff-s}$ : ενεργό πλάτος, σε  $\text{mm}$ , του προσαρτημένου ελάσματος για το ενισχυτικό:

$$b_{eff-s} = \frac{s}{\beta_p} \quad \text{για} \quad \beta_p > 1.0$$

$$b_{eff-s} = s \quad \text{για} \quad \beta_p \leq 1.0$$

$$\beta_p : = \frac{s}{t_{net50}} \sqrt{\frac{\varepsilon \sigma_{yd}}{E}}$$

$s$ : πλάτος του ελάσματος. Λαμβάνεται ίσο με το διάκενο μεταξύ δύο ενισχυτικών.

$t_{net50}$ : λειτουργικό πάχος του ελάσματος σε  $\text{mm}$

$A_{E-net50}$  : λειτουργική διατομή του ενισχυτικού, σε m, συμπεριλαμβανομένου του προσαρτημένου ελάσματος πάχους  $b_{eff-p}$

$l_{stf}$  : μήκος σε m μεταξύ δύο συνεχόμενων ενισχυμένων νομών

$b_{eff-p}$  : ενεργό πλάτος του ελάσματος

$$b_{eff-p} = \left( \frac{2.25}{\beta_p} - \frac{1.25}{\beta_p^2} \right) s \quad \text{για} \quad \beta_p > 1.25$$

$$b_{eff-p} = s \quad \text{για} \quad \beta_p \leq 1.25$$

## 4.5 Στρεπτικός λυγισμός ενός δομικού στοιχείου

Η εξίσωση που περιγράφει το τμήμα βράχυνσης της μειωτικής καμπύλης φόρτισης  $\sigma_{CR2} - \varepsilon$  για τον στρεπτικό λυγισμό παρατίθεται παρακάτω:

$$\sigma_{CR2} = \Phi \left( \frac{A_{s-net50} \sigma_{C2} + 10^{-2} st_{net50} \sigma_{CP}}{A_{s-net50} + 10^{-2} st_{net50}} \right) \quad \text{N/mm}^2$$

Όπου

$\Phi$ : συνάρτηση άκρου

$A_{s-net50}$ : λειτουργική διατομή του ενισχυτικού, σε  $\text{cm}^2$ , χωρίς το αντίστοιχο έλασμα.

$\sigma_{C2}$ : κρίσιμη τάση σε  $\text{N/mm}^2$

$$\sigma_{C2} = \frac{\sigma_{E2}}{\varepsilon} \quad \text{για} \quad \sigma_{E2} \leq \frac{\sigma_{yd}}{2} \varepsilon$$

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

$\sigma_{E2}$ : στρεπτική τάση λυγισμού Euler σε  $\text{N/mm}^2$

$\sigma_{ET}$ : τάση αναφοράς για στρεπτικό λυγισμό σε  $\text{N/mm}^2$  (βλ.

Παράρτημα Α)

$\varepsilon$ : σχετική παραμόρφωση

s: πλάτος του ελάσματος. Λαμβάνεται ίσο με το διάκενο μεταξύ δύο ενισχυτικών.

$t_{net50}$ : λειτουργικό πάχος του ελάσματος σε mm

$\sigma_{CP}$ : μέγιστη αντοχή του προσαρτημένου ελάσματος για το ενισχυτικό

$$\sigma_{CP} = \left( \frac{2.25}{\beta_p} - \frac{1.25}{\beta_p^2} \right) \sigma_{yd} \quad \text{για} \quad \beta_p > 1.25$$

$$\sigma_{CP} = \sigma_{yd} \quad \text{για} \quad \beta_p \leq 1.25$$

#### 4.6 Τοπικός λυγισμός του κορμού ενός δομικού στοιχείου.

Η εξίσωση που περιγράφει το τμήμα βράχυνσης της μειωτικής καμπύλης φόρτισης  $\sigma_{CR3} - \epsilon$  για τον τοπικό λυγισμό του κορμού ενός ενισχυτικού με πέλμα παρατίθεται παρακάτω:

$$\sigma_{CR3} = \Phi \sigma_{yd} \left( \frac{b_{eff-p} t_{net50} + d_w t_{w-net50} + b_f t_{f-net50}}{s t_{net50} + d_w t_{w-net50} + b_f t_{f-net50}} \right) \quad \text{N/mm}^2$$

Όπου

$\Phi$ : συνάρτηση άκρου

$b_{eff-p}$ : ενεργό πλάτος του ελάσματος, σε mm

$t_{net50}$ : λειτουργικό πάχος του ελάσματος σε mm

$d_w$ : ύψος του κορμού του ενισχυτικού σε mm

$t_{w-net50}$ : λειτουργικό πάχος του κορμού του ενισχυτικού σε mm

$b_f$ : πλάτος του πέλματος του ενισχυτικού σε mm

$t_{f-net50}$ : λειτουργικό πάχος του πέλματος του ενισχυτικού σε mm

s: πλάτος του ελάσματος. Λαμβάνεται ίσο με το διάκενο μεταξύ δύο ενισχυτικών.

$d_{w\text{-eff}}$  : ενεργό ύψος του κορμού του ενισχυτικού σε mm

$$d_{w\text{-eff}} = \left( \frac{2.25}{\beta_w} - \frac{1.25}{\beta_w^2} \right) d_w \quad \text{για} \quad \beta_p > 1.25$$

$$d_{w\text{-eff}} = d_w \quad \text{για} \quad \beta_p \leq 1.25$$

$$\beta_w : = \frac{d_w}{t_{w\text{-net50}}} \sqrt{\frac{\varepsilon \sigma_{yd}}{E}}$$

$\varepsilon$ : σχετική παραμόρφωση

$E$ : μέτρο ελαστικότητας,  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

#### 4.7 Τοπικός λυγισμός του κορμού ενός δομικού στοιχείου (διατομή flat bar).

Η εξίσωση που περιγράφει το τμήμα βράχυνσης της μειωτικής καμπύλης φόρτισης  $\sigma_{CR4} - \varepsilon$  για τον τοπικό λυγισμό του κορμού ενός ενισχυτικού flat bar παρατίθεται παρακάτω:

$$\sigma_{CR4} = \Phi \left( \frac{st_{\text{net50}} \sigma_{CP} + 10^{-2} A_{s\text{-net50}} \sigma_{C4}}{st_{\text{net50}} + 10^{-2} A_{s\text{-net50}}} \right) \text{ N/mm}^2$$

Όπου

$\Phi$ : συνάρτηση άκρου

$\sigma_{CP}$  : μέγιστη αντοχή του προσαρτημένου ελάσματος για το ενισχυτικό (βλ. παράγραφο 4.5)

$\sigma_{C4}$ : κρίσιμη τάση σε  $\text{N/mm}^2$

$$\sigma_{C4} = \frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon} \quad \text{για} \quad \sigma_{E4} \leq \frac{\sigma_{yd}}{2} \varepsilon$$

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

$\varepsilon$ : σχετική παραμόρφωση

$A_{s\text{-net50}}$ : λειτουργική διατομή του ενισχυτικού, σε  $\text{cm}^2$ , χωρίς το αντίστοιχο έλασμα.

$t_{w-net50}$ : λειτουργικό πάχος του κορμού του ενισχυτικού σε mm.

$s$ : πλάτος του ελάσματος. Λαμβάνεται ίσο με το διάκενο μεταξύ δύο ενισχυτικών.

$t_{net50}$ : λειτουργικό πάχος του ελάσματος σε mm

#### 4.8 Λυγισμός ενός εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος

Η εξίσωση που περιγράφει το τμήμα βράχυνσης της μειωτικής καμπύλης φόρτισης  $\sigma_{CR5} - \epsilon$  για τον λυγισμό ενός εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος παρατίθεται παρακάτω:

$$\sigma_{CR5} = \min \left\{ \begin{array}{l} \Phi \sigma_{yd} \left[ \frac{s}{1000 \ell_{stf}} \left( \frac{2.25}{\beta_p} - \frac{1.25}{\beta_p^2} \right) + 0.1 \left( 1 - \frac{s}{1000 \ell_{stf}} \right) \left( 1 + \frac{1}{\beta_p^2} \right)^2 \right] \\ \sigma_{yd} \Phi \end{array} \right. \quad \text{N/mm}^2$$

Όπου

$\Phi$ : συνάρτηση άκρου

$$\beta_p : = \frac{s}{t_{net50}} \sqrt{\frac{\epsilon \sigma_{yd}}{E}}$$

$s$ : πλάτος του ελάσματος. Λαμβάνεται ίσο με το διάκενο μεταξύ δύο ενισχυτικών

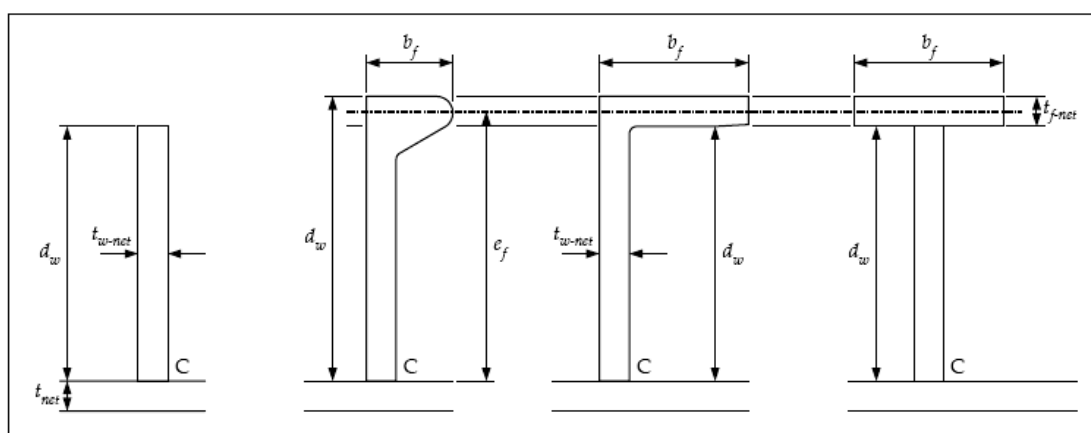
$\ell_{stf}$ : μήκος σε m μεταξύ πρωτευόντων

$\sigma_{yd}$ : τάση διαρροής του υλικού σε N/mm<sup>2</sup>

#### 4.9 Παρουσίαση του κώδικα

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται ο κώδικας σε Matlab που αναπτύχθηκε για την εξαγωγή των καμπυλών βράχυνσης. Στις πρώτες γραμμές του κώδικα δηλώνονται οι βασικές μεταβλητές που είναι απαραίτητες για την εξαγωγή των συγκεκριμένων καμπυλών. Τέτοιες μεταβλητές είναι λειτουργικό πάχος και το πλάτος του

πέλματος του ενισχυτικού, το λειτουργικό πάχος και το ύψος του κορμού του ενισχυτικού καθώς και το λειτουργικό πάχος και το πλάτος του ελάσματος. Αλλάζοντας τις τιμές στις συγκεκριμένες μεταβλητές είναι δυνατόν να εξαχθούν οι καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων για οποιοδήποτε τύπο ενισχυτικού. Οι τύποι των ενισχυτικών που συνήθως συναντώνται σε ένα δεξαμενόπλοιο παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4.9.1 Συνηθισμένοι τύποι ενισχυτικών

Επίσης, σημαντικό είναι να αναφέρουμε ότι στην περίπτωση που έχουμε ενισχυτικό τύπου flat bar θα πρέπει το κομμάτι του κώδικα με τίτλο "*Web local buckling of stiffeners with flanged profiles*" να γίνει σχόλιο (εισάγοντας μπροστά από κάθε γραμμή το σύμβολο %) ενώ θα πρέπει να αφαιρεθεί το σύμβολο % του σχολίου από το κομμάτι του κώδικα με τίτλο "*Web local buckling of flat bar stiffeners*" ώστε να γίνει ενεργό το συγκεκριμένο τμήμα του προγράμματος. Ακόμα θα πρέπει να γίνει η ίδια διαδικασία για τις ιδιότητες  $I_{p-net}$ ,  $I_{t-net}$  και  $I_{w-net}$  ώστε να καταστούν ενεργές οι ιδιότητες που αντιστοιχούν στα flat bars (για διευκόλυνση υπάρχει η αντίστοιχη ένδειξη). Επιπρόσθετα υπάρχει πρόβλεψη στον κώδικα ώστε να είναι δυνατόν να εξαχθεί η καμπύλη για τον λυγισμό ενός εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος.

Είναι εμφανές, στόχος και του συγκεκριμένου κώδικα είναι η γενικότητα που θα επιτρέπει στον χρήστη κάνοντας ελάχιστες αλλαγές να εξαγει καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων για οποιοδήποτε τύπο ενισχυτικού. Ο κώδικας είναι ένα script αρχείο με όνομα Curves.m και παρατίθεται παρακάτω:

## Curves.m

```
%-----%  
%                               Load-end shortening curves                               %  
%-----%  
  
clear all  
clc  
  
bf=90;  
dw=136;  
tf_net=16;  
tw_net=10;  
tp_net=12;  
s=800;  
E=206000;  
syd=235;  
  
h=0.01;  
L=3;  
e=-L:h:L;  
nbc=[601,302];  
  
ef=dw+(0.5*tf_net);  
lstf=2.73;  
Aw_net=(ef-0.5*tf_net)*tw_net;  
Af_net=bf*tf_net;  
Ip_net=((Aw_net*(ef-0.5*tf_net)^2)/3+Af_net*(ef)^2)*10^(-4);  
%Ip_net=(dw^3*tw_net/3*10^4); % Flat bar  
It_net=((ef-0.5*tf_net)*(tw_net)^3)/(3*10^4))*(1-0.63*tw_net/(ef-...  
0.5*tf_net))+ (bf*(tf_net)^3*(1-0.63*tf_net/bf))/(3*10^4);  
%It_net=(dw*tw_net^3/3*10^4)*(1-0.63*(tw_net/dw)); % Flat bar  
Iw_net=((Af_net*(ef)^2*(bf)^2)/(12*10^6))*((Af_net+2.6*Aw_net)/...  
(Af_net+Aw_net));  
%Iw_net=(dw^3*tw_net^3/36*10^6); % Flat bar  
  
%-----%  
% Beam column buckling %  
%-----%  
  
for ii=1:nbc(1)  
    if e(ii)>0;  
        vita_p(ii)=(s/tp_net)*(e(ii)*syd/E)^0.5;  
    else e(ii)<=0;  
        vita_p=0;  
    end
```



```

end
end

for ii=1:nbc(1)
    if e(ii)<-1;
        Phi(ii)=-1;
    elseif e(ii)>=-1 && e(ii)<1;
        Phi(ii)=-1+(ii-201)/100;
    else e(ii)>1;
        Phi(ii)=1;
    end
end

for ii=nbc(2):nbc(1)
    if vita_p(ii)>1;
        beff_s(ii)=s/vita_p(ii);
    else
        beff_s(ii)=s;
    end
end

for ii=nbc(2):nbc(1)
    if vita_p(ii)>1.25
        beff_p(ii)=((2.25/vita_p(ii))-(1.25/(vita_p(ii))^2))*s;
    else
        beff_p(ii)=s;
    end
end

A_snet50=(dw*tw_net+(bf-tw_net)*tf_net)/100;

for ii=nbc(2):nbc(1)
A_Enet50(ii)=(beff_p(ii)/10)*(tp_net/10)+A_snet50;
end

for ii=nbc(2):nbc(1)
    a1(ii)=(beff_s(ii)/10)*(tp_net/10);
    a2=dw*tw_net/100;
    a3=(bf-tw_net)*tf_net/100;
    h1=tp_net/20;
    h2=(tp_net/10)+dw/20;
    h3=(tp_net/10)+(dw/10)-(tf_net/20);
    a3=(bf-tw_net)*tf_net/100;
    I1(ii)=(beff_s(ii)/10)*(tp_net^3/12000);
    I2=(tw_net/10)*(dw^3)/12000;
    I3=((bf-tw_net)/10)*(tf_net^3/12000);
    Si(ii)=I1(ii)+I2+I3;
    Sa(ii)=a1(ii)+A_snet50;
    Sah(ii)=a1(ii)*h1+a2*h2+a3*h3;
    Sahh(ii)=a1(ii)*h1*h1+a2*h2*h2+a3*h3*h3;
    Hoa(ii)=Sah(ii)/Sa(ii);
    I_Enet50(ii)=Si(ii)+Sahh(ii)-Sa(ii)*Hoa(ii)^2;
end

for ii=nbc(2):nbc(1)
sigma_E1(ii)=pi^2*E*I_Enet50(ii)*0.0001/(A_Enet50(ii)*1stf^2);
end

```

```

for ii=NBC(2):NBC(1)
    if sigma_E1(ii)>(syd/2)*e(ii)
        sigma_C1(ii)=syd*(1-(syd*(-3+(ii-1)/100))/(4*sigma_E1(ii)));
    else
        sigma_C1(ii)=sigma_E1(ii)/e(ii);
    end
end

for ii=1:NBC(2)
    sigma_CR1(ii)=syd*Phi(ii);
end

for ii=NBC(2):NBC(1)
sigma_CR1(ii)=Phi(ii)*sigma_C1(ii)*(A_snet50+0.01*beff_p(ii)*...
    tp_net)/(A_snet50+0.01*s*tp_net);
end

%-----%
% Torsional buckling of stiffeners %
%-----%

for ii=NBC(2):NBC(1)
    if vita_p(ii)>1.25
        sigma_CP(ii)=((2.25/vita_p(ii))-(1.25/(vita_p(ii))^2))*syd;
    else
        sigma_CP(ii)=syd;
    end
end

epsilon=1+100*((lstf)^4/(Iw_net*((s/tp_net^3)+4*(ef-0.5*tf_net)/...
    3*12^3)))^0.5;
sigma_ET=(E/Ip_net)*(((epsilon*pi^2*Iw_net*10^-
4)/lstf^2)+(0.385*It_net));
sigma_E2=sigma_ET;

for ii=1:NBC(1)
    sigma_C2(ii)=syd*(1-(syd*(-3+(ii-1)/100))/(4*sigma_E2));
end

for ii=1:NBC(2)
    sigma_CR2(ii)=syd*Phi(ii);
end

for ii=NBC(2):NBC(1)
sigma_CR2(ii)=Phi(ii)*((A_snet50*sigma_C2(ii)+0.01*s*tp_net*...
    sigma_CP(ii))/(A_snet50+0.01*s*tp_net));
end

%-----%
% Web local buckling of stiffeners with flanged profiles %
%-----%

```

```

for ii=1:nbc(1)
    if e(ii)>0
        vita_w(ii)=(dw/tw_net)*(e(ii)*syd/E)^0.5;
    else e(ii)<=0;
        vita_w=0;
    end
end

for ii=1:nbc(1)
    if vita_w(ii)>1.25
        dw_eff(ii)=((2.25/vita_w(ii))-(1.25/(vita_w(ii))^2))*dw;
    else
        dw_eff(ii)=dw;
    end
end

for ii=1:nbc(2)
    sigma_CR3(ii)=syd*Phi(ii);
end

for ii=nbc(2):nbc(1)
sigma_CR3(ii)=Phi(ii)*syd*((beff_p(ii)*tp_net+dw_eff(ii)*tw_net+...
    bf*tf_net)/(s*tp_net+dw*tw_net+bf*tf_net));
end

%-----%
% Web local buckling of flat bar stiffeners %
%-----%

% for ii=1:nbc(1)
%     sigma_E4(ii)=160000*(tw_net/dw)^2;
% end

% for ii=nbc(2):nbc(1)
%     if sigma_E4(ii)>(syd/2)*e(ii)
%         sigma_C4(ii)=syd*(1-(syd*(-3+(ii-1)/100))/(4*sigma_E4(ii)));
%     else
%         sigma_C4(ii)=sigma_E4(ii)/e(ii);
%     end
% end

% for ii=1:nbc(2)
%     sigma_CR4(ii)=syd*Phi(ii);
% end

% for ii=nbc(2):nbc(1)
%     sigma_CR4(ii)=Phi(ii)*((s*tp_net*sigma_CP(ii)+A_snet50*...
%         sigma_C4(ii))/(s*tp_net+0.01*A_snet50));
% end

%-----%
% Buckling of transversely stiffened plate panels %
%-----%

```

```
for ii=1:nbc(2)
    sigma_CR5(ii)=syd*Phi(ii);
end

for ii=nbc(2):nbc(1)
    stress_1(ii)=syd*Phi(ii)*((s/(1000*lstf))*((2.25/vita_p(ii))-...
        (1.25/(vita_p(ii)^2)))+0.1*(1-(s/(1000*lstf)))*...
        (1+(1/(vita_p(ii)^2))^2));
    stress_2(ii)=syd*Phi(ii);
end

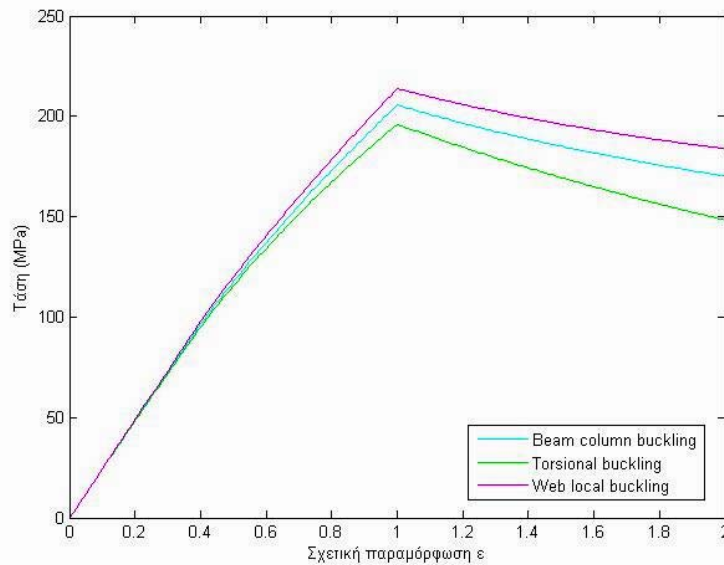
for ii=nbc(2):nbc(1)
    sigma_CR5(ii)=min(stress_1(ii),stress_2(ii));
end

figure(1)
plot(e,sigma_CR1,'-c',e,sigma_CR2,'g',e,sigma_CR3,'m')

figure(2)
plot(e,sigma_CR5,'-m')
```

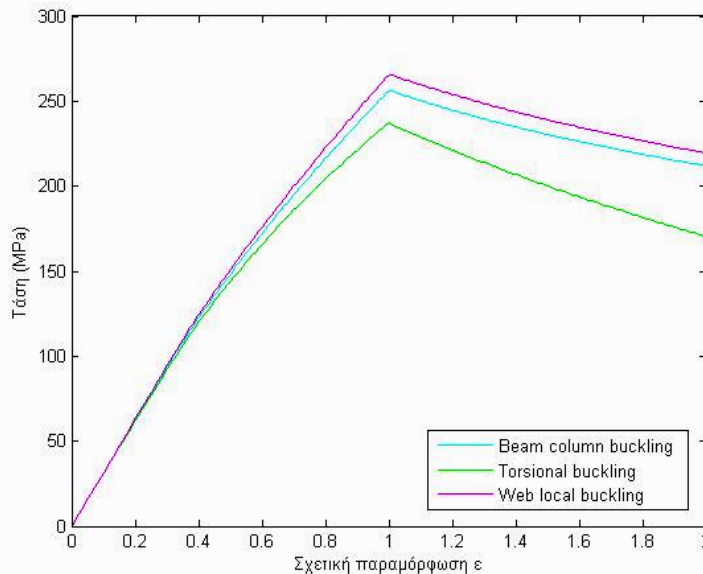
#### 4.10 Δημιουργία καμπυλών με χρήση του κώδικα

Χρησιμοποιώντας τον κώδικα που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο, είναι δυνατόν να εξαγάγουμε τις καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων για οποιοδήποτε τύπο ενισχυτικού. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένες επιλεγμένες περιπτώσεις καμπυλών βράχυνσης για ενισχυτικά διαφόρων διατομών (T, Γ, Flat bar). Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα ενισχυτικά ανήκουν σε διαφορετικά πλοία, των οποίων τα κατασκευαστικά σχέδια χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας και θα παρουσιασθούν σε επόμενο κεφάλαιο.

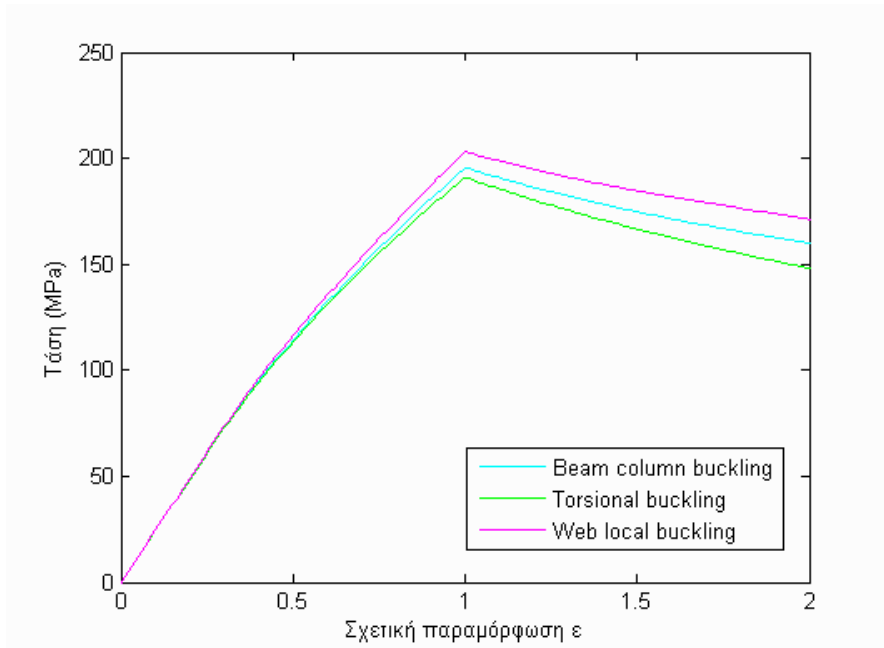


Σχήμα 4.10.1. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής Γ (300x90x13/17) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 800x15.5 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτικός λυγισμός

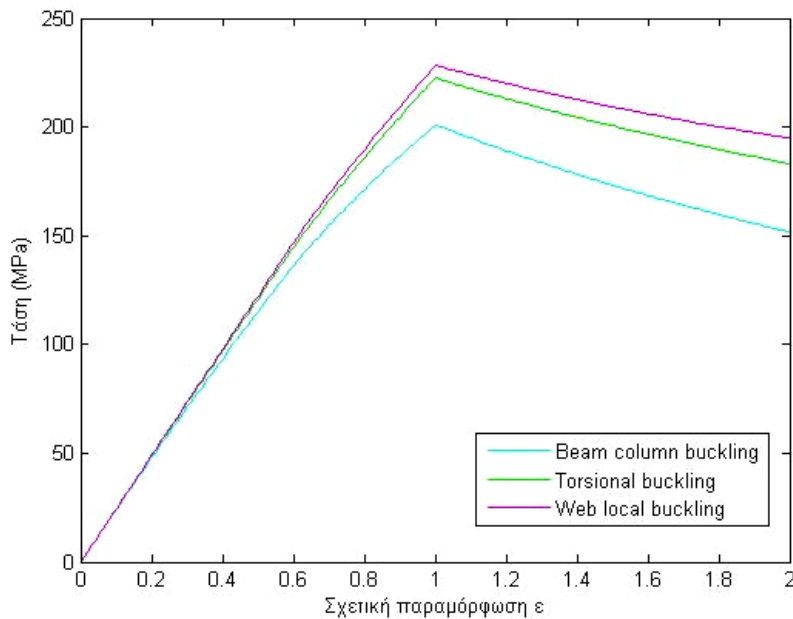
Αξιζει να σημειώσουμε ότι στα ενισχυτικά τύπου T, Γ αλλά flat bars κυρίαρχες μορφές αστοχίας είναι ο λυγισμός δοκού κολώνας και ο στρεπτικός λυγισμός.



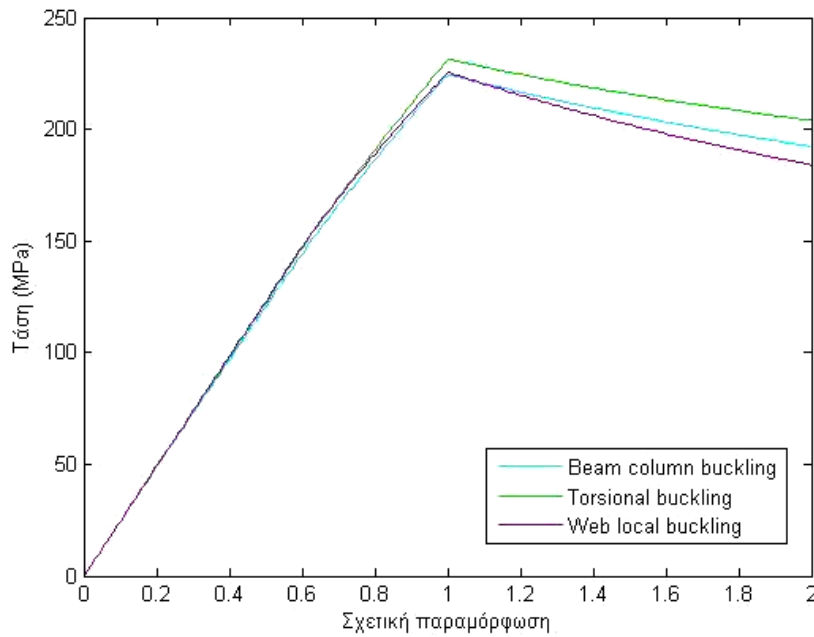
Σχήμα 4.10.2. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής Γ (350x100x12/17) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 820x16.5 και όριο διαρροής του υλικού 315 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτικός λυγισμός



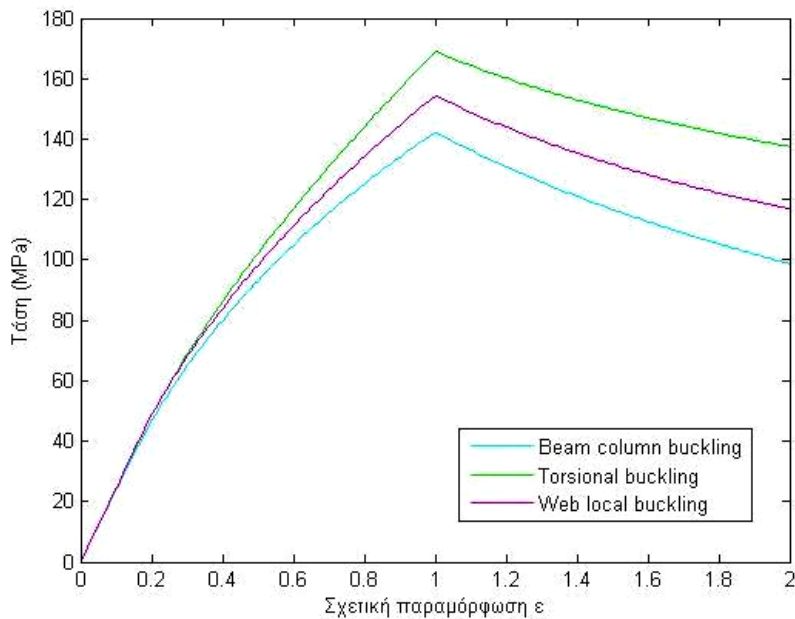
Σχήμα 4.10.3. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής Γ (250x90x10/15) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 750x13.5 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτικός λυγισμός.



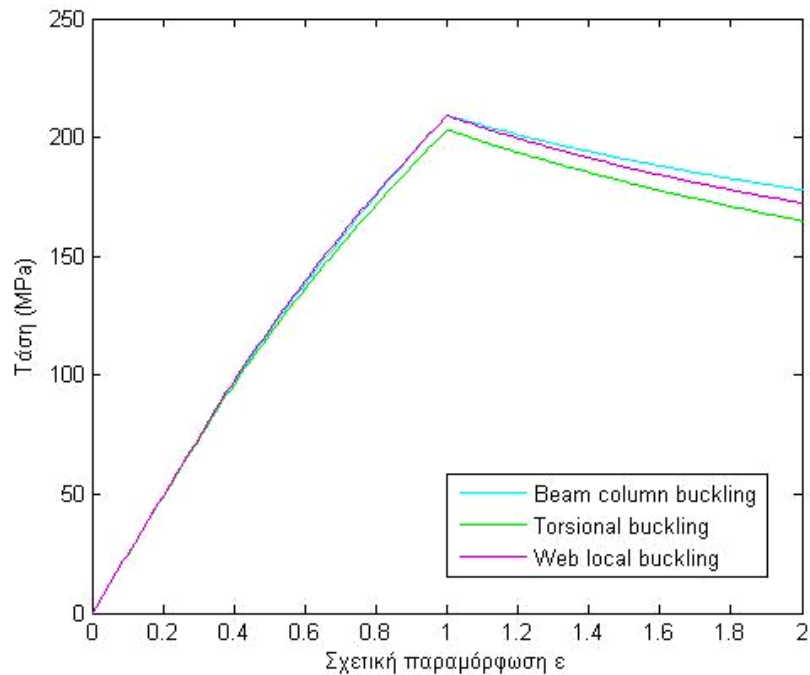
Σχήμα 4.10.4. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής Γ (150x90x12) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 700x15 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο λυγισμός δοκού κολώνας.



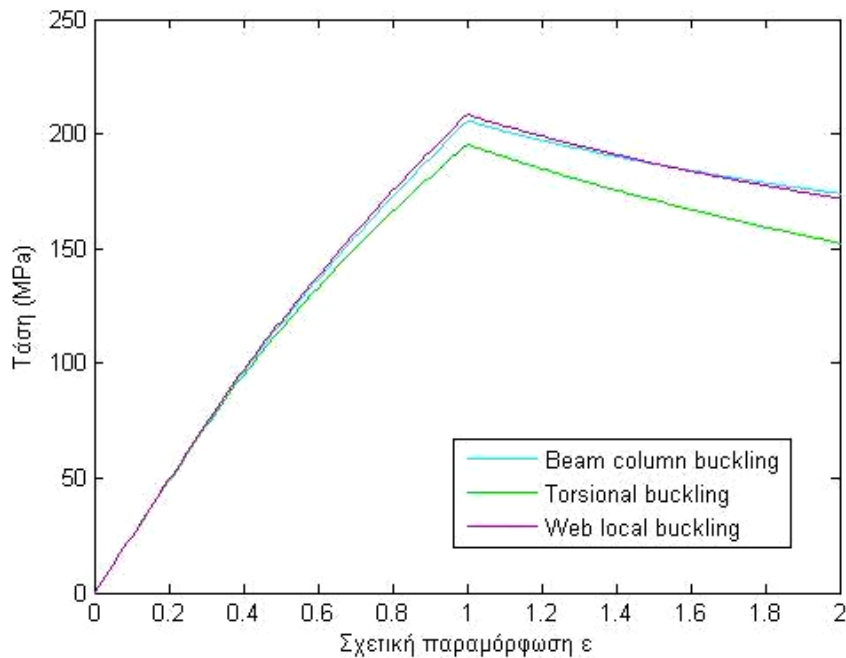
Σχήμα 4.10.5. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής flat bar (300x20) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 700x17 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο λυγισμός δοκού κολώνας.



Σχήμα 4.10.6. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής flat bar (150x10.5) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 755x9 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο λυγισμός δοκού κολώνας.

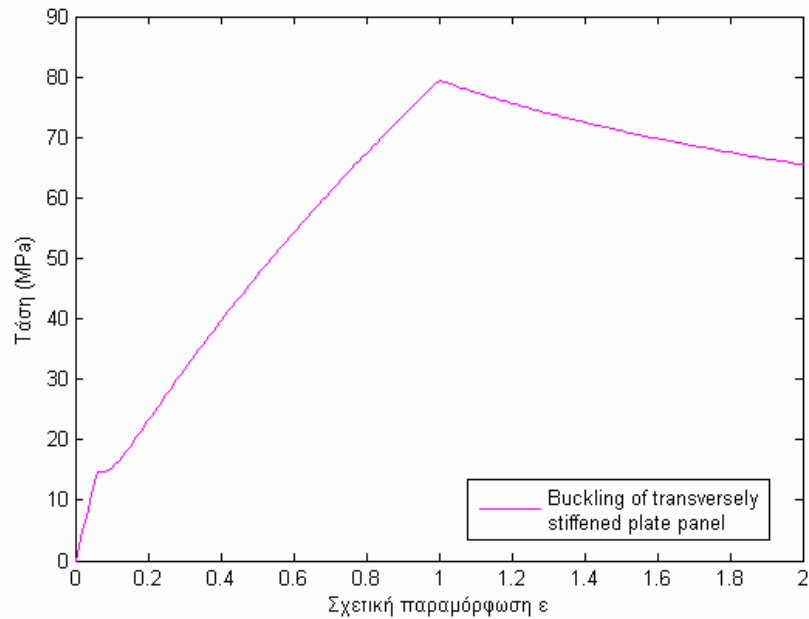


Σχήμα 4.10.7. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής T (400x10) (125x19) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 850x14.5 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτικός λυγισμός.



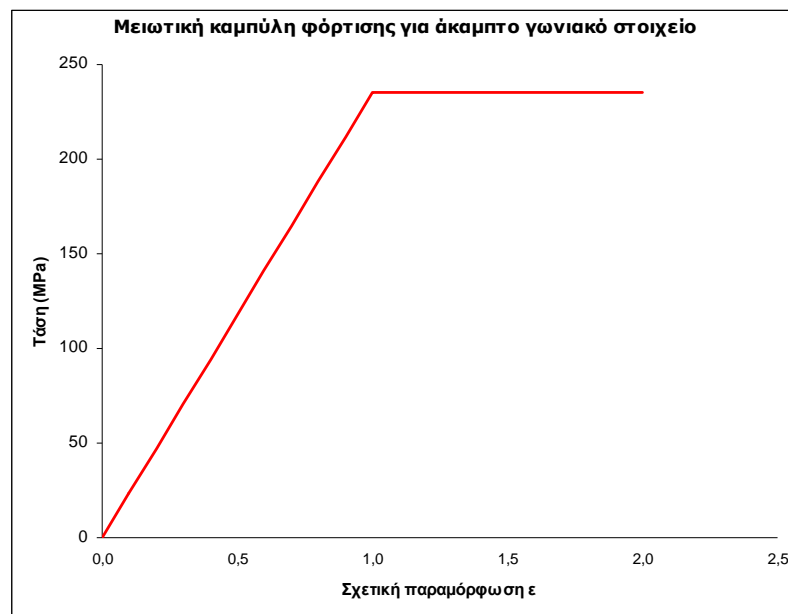
Σχήμα 4.10.8. Καμπύλη βράχυνσης για ενισχυτικό διατομής T (350x10) (100x16) με προσαρτημένο έλασμα ονομαστικών διαστάσεων 760x12.5 και όριο διαρροής του υλικού 245 MPa. Η κυρίαρχη μορφή αστοχίας είναι ο στρεπτικός λυγισμός.





Σχήμα 4.10.9. Τυπική καμπύλη βράχυνσης για εγκάρσια ενισχυμένο έλασμα

Για λόγους πληρότητας, παρατίθεται παρακάτω μια τυπική καμπύλη βράχυνσης για ένα άκαμπτο γωνιακό στοιχείο.



Σχήμα 4.10.10. Τυπική καμπύλη βράχυνσης για άκαμπτο γωνιακό έλασμα.

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 5

---

---

### Π α ρ ο υ σ ί α σ η τ ο υ κ ώ δ ι κ α

---

---

#### 5.1 Ρεαλιστική κατασκευαστική απόκριση

Υπάρχουν κάποιοι λόγοι εκτός από την υστέρηση διάτμησης (shear lag) που μια κοίλη κιβωτοειδής δοκός (hollow box girder), όπως είναι ένα πλοίο, μπορεί να μη συμπεριφέρεται σαν μια απλή δοκός όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η παραμένουσα τάση (strain locked) κατά τη διάρκεια της κατασκευής, η τοπική διαρροή και ο τοπικός λυγισμός θα προκαλέσουν ανακατανομή στην ικανότητα κάθε μέλους να φέρει φορτίο και στην συνεισφορά του σε ολόκληρη τη διατομή. Εάν ακραία φορτία πρόκειται απλώς να συγκρατηθούν, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε την τελική αντοχή της διατομής.

Ας ξεκινήσουμε με μία ακραία κατάσταση. Η τελική αντίσταση σε κάμψη μίας δοκού, μετά την αύξηση ενός φορτίου μέχρι το σημείο όπου η δοκός πέρνα εντελώς στην πλαστική περιοχή είναι:

$$M_p = \sigma_{yd} \cdot S$$

Όπου  $S$  είναι το άθροισμα των πρώτων ροπών της επιφάνειας της διατομής σε κάθε πλευρά του ουδέτερου άξονα. Αυτό εκφράζει την τελική αντοχή μιας τέλειας δοκού, η οποία μετατρέπεται σε πλαστική άρθρωση (plastic hinge). Η κοινή λογική μας λέει ότι μια τέτοια κατάσταση είναι λίγο απίθανη για μια μεγάλη κοίλη κιβωτοειδή δοκό, όπως είναι το πλοίο. Ενώ η εφελκυσόμενη πλευρά μπορεί νοητά να γίνει εντελώς πλαστική, η πλευρά που θλίβεται μπορεί να περάσει

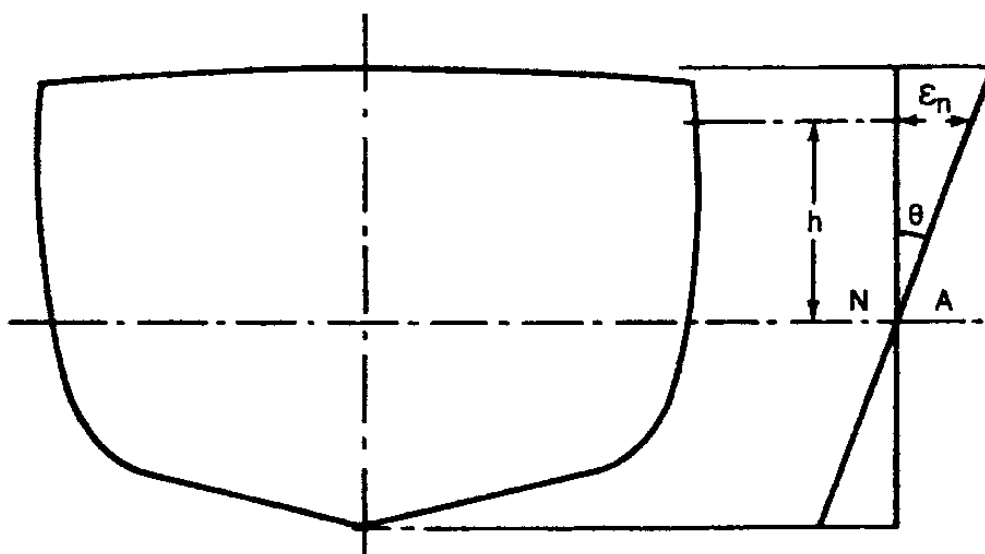
στο λυγισμό πριν συμβεί αυτό. Ο Caldwell ερμήνευσε το γεγονός στη θεώρηση του για την μέγιστη διαμήκη αντοχή σε φορτίσεις, η οποία αποτέλεσε τη βάση σύμφωνα με την οποία υπολογίζεται σήμερα η μέγιστη αντοχή. Η ουσία της μεθόδου είναι η ανάπτυξη της συνολικής αντίστασης σε κάμψη από την άθροιση της συνεισφοράς κάθε στοιχείου. Δεν είναι δύσκολο να φανταστούμε ότι, καθώς αυξάνεται το θλιπτικό φορτίο σε ένα κατάστρωμα, έρχεται κάποια στιγμή που τα ελάσματα θα λυγίσουν, θα προκαλέσουν διαρροή του φορτίου τους και θα ρίξουν ένα αυξημένο βάρος στα κοντινά τους διαμήκη ενισχυτικά. Αυτά με τη σειρά τους μπορεί να λυγίσουν, καθώς αυξάνεται επιπλέον το φορτίο, θα αποφύγουν την συνεισφορά τους και θα ρίξουν ένα επιπλέον βάρος στις «σκληρές περιοχές» (δύσκαμπτα γωνιακά στοιχεία) όπως είναι οι γωνίες των καταστρωμάτων και των συνδέσμων με τις διαμήκεις φρακτές.

Με αυτόν τον τρόπο ο C. S. Smith πρότεινε να γίνεται ο ρεαλιστικός υπολογισμός της αντίστασης της διατομής, μία μέθοδος η οποία τώρα τίθεται σε γενική χρήση. Πρώτα εξετάζεται κάθε στοιχείο που προσφέρει στην ενεργή διατομή και χαράσσεται μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης. Όταν προσεγγισθεί η συμπεριφορά του στοιχείου σε λυγισμό, οι καμπύλες καλούνται καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων (load-end shortening curves).

Κατόπιν υποθέτουμε ότι η διατομή του κατασκευαστικού σώματος του πλοίου κάμπτεται, με τους επίπεδους νομείς να παραμένουν επίπεδοι, και παίρνει μία ακτίνα καμπυλότητας  $\rho$  καθώς η διατομή περιστρέφεται κατά μία γωνία  $\theta$ . Σε οποιαδήποτε απόσταση  $h$  πάνω από τον ουδέτερο άξονα ένα στοιχείο  $n$  με επιφάνεια  $A_n$ , θα παραμορφώνεται κατά μια ποσότητα  $\epsilon_n$ . Η ικανότητα του στοιχείου να δέχεται φορτίο επιλέγεται από τη σχετική καμπύλη βράχυνσης. Όλα αυτά τα στοιχεία που υπολογίζονται έτσι, θα οδηγήσουν σε μία αντίσταση κάμψης της διατομής (καμπτική ροπή)  $M$ .

$$M = \sum_n \sigma_n A_n h_n$$

Αν γίνει για διάφορες τιμές του  $\theta$  και του  $\rho$ , μια καμπύλη βράχυνσης μπορεί να υπολογιστεί για ολόκληρη τη διατομή, ώστε να παρέχει μια καλή ένδειξη της καμπτικής ροπής κατάρρευσης.



Σχήμα 5.1.1

Στον υπολογισμό της  $M$ , ο ουδέτερος άξονας δεν παραμένει ακίνητος και για την μετακίνηση του, πρέπει να επιβληθεί η πρόσθετη συνθήκη για ισορροπία της διατομής:

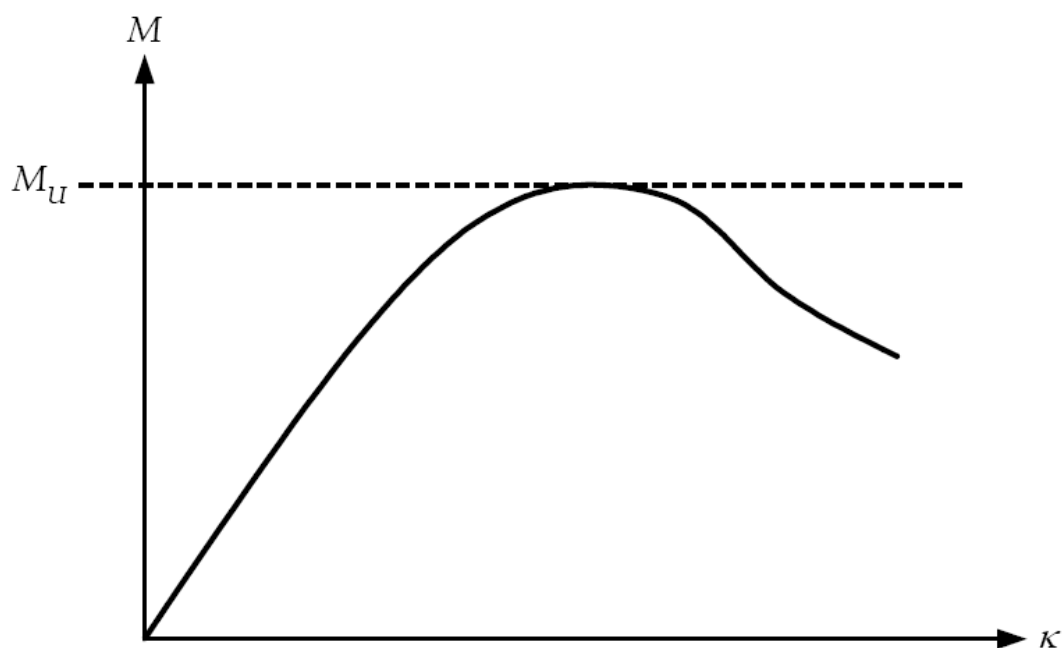
$$\sum_n \sigma_n A_n = 0$$

Για το λόγο αυτό είναι βολικό να θεωρήσουμε αλλαγές στη  $\theta$  με προσαυξήσεις που αθροίζονται διαδοχικά και η διαδικασία αυτή καλείται προσαυξητική ανάλυση. Οι καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων για τα στοιχεία μπορεί να περιέχουν οποιαδήποτε από τις διαφορετικές μορφές του λυγισμού και της πλαστικής συμπεριφοράς, είτε περιλαμβάνουν μόνιμες κατασκευαστικές τάσεις είτε όχι.

## 5.2 Προσαυξητική επαναληπτική διαδικασία που προτείνεται από τον IACS στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (CSR 2008)

Η πλατφόρμα πάνω στην οποία αναπτύχτηκε ο κώδικας που θα παρουσιασθεί σε επόμενη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου είναι η επαναληπτική προσαυξητική διαδικασία που περιέχεται στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (IACS, CSR 2008). Γι' αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να παρουσιασθούν αναλυτικά τα βασικά βήματα της διαδικασίας αυτής.

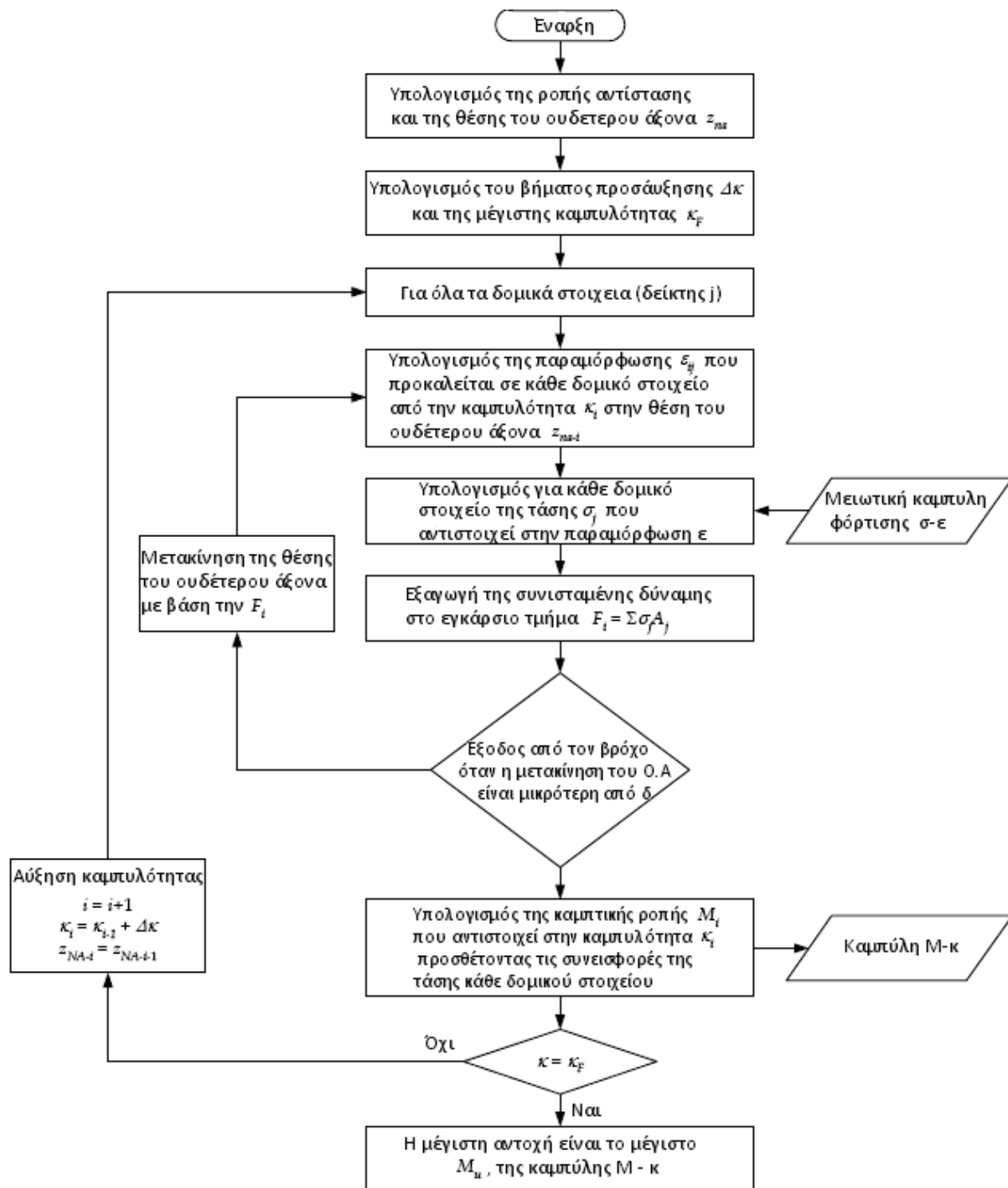
Στην διαδικασία αυτή η μέγιστη αντοχή  $M_u$  σε διαμήκη κάμψη είναι το μέγιστο της καμπύλης  $M$ - $\kappa$  που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2.1



Σχήμα 5.2.1 Καμπύλη ροπής-καμπυλότητας ( $M$ - $\kappa$ )

Η καμπύλη  $M$ - $\kappa$  εξάγεται μέσω της προσαυξητικής επαναληπτικής διαδικασίας. Τα αλγοριθμικά βήματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 5.2.2.

Η καμπτική ροπή  $M_i$  που ασκείται στο κατασκευαστικό σώμα του πλοίου λόγω της επιβληθείσας καμπυλότητας υπολογίζεται σε



Σχήμα 5.2.2 Διάγραμμα ροής της προσαυξητικής επαναληπτικής διαδικασίας

κάθε βήμα της προσαυξητικής διαδικασίας. Αυτή η επιβληθείσα καμπυλότητα αντιστοιχεί σε μια γωνία περιστροφής της διατομής του

κατασκευαστικού σώματος του πλοίου ως προς τον ενεργό οριζόντιο ουδέτερο άξονα, η οποία προκαλεί μια αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$  σε κάθε δομικό στοιχείο. Στην κατάσταση sagging, (για την οποία έχει γραφτεί ο κώδικας που θα παρουσιασθεί παρακάτω) τα δομικά στοιχεία κάτω από τον ουδέτερο άξονα επιμηκύνονται (εφελκύνονται) ενώ τα δομικά στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα βραχύνονται (θλίβονται).

Η τάση  $\sigma_i$  που αναπτύσσεται σε κάθε δομικό στοιχείο λόγω της παραμόρφωσης  $\epsilon$ , υπολογίζεται από την καμπύλη βράχυνσης του δομικού στοιχείου, η οποία λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά του δομικού στοιχείου στην μη γραμμική ελαστοπλαστική περιοχή.

Η δύναμη που ασκείται σε κάθε δομικό στοιχείο υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την διατομή του δομικού στοιχείου με την αντίστοιχη τιμή της τάσης. Το άθροισμα των δυνάμεων όλων των δομικών στοιχείων ισούται με τη συνισταμένη δύναμη που ασκείται στη συνολική διατομή του κατασκευαστικού σώματος του πλοίου. Αυτή η συνισταμένη των δυνάμεων είναι δυνατόν να μην είναι μηδενική γιατί υπάρχει περίπτωση ο ουδέτερος άξονας να έχει μετακινηθεί λόγω μη γραμμικής απόκρισης. Οπότε είναι απαραίτητο να μετακινηθεί ο ουδέτερος άξονας, να υπολογιστούν ξανά οι παραμορφώσεις, οι δυνάμεις για κάθε δομικό στοιχείο καθώς και η συνισταμένη των δυνάμεων. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η συνισταμένη δύναμη να γίνει μικρότερη από την τιμή ανοχής  $\delta$ .

Εφόσον η θέση του ουδέτερου άξονα είναι γνωστή, υπολογίζεται η κατανομή των τάσεων στα δομικά στοιχεία. Η αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή  $M_i$  ως προς το νέο ουδέτερο άξονα λόγω της καμπυλότητας  $\kappa_i$  υπολογίζεται προσθέτοντας την συνεισφορά σε ροπή όλων των δομικών στοιχείων.

Η παραπάνω προσαυξητική επαναληπτική διαδικασία διατυπώνεται αλγοριθμικά ως εξής:

**Βήμα 1:** Διαμέρισε την μέση τομή σε δομικά στοιχεία (τυπικό δομικό στοιχείο, άκαμπτο γωνιακό στοιχείο, εγκάρσια ενισχυμένο έλασμα).

**Βήμα 2:** Προσδιόρισε τις καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων για όλα τα δομικά στοιχεία.

**Βήμα 3:** Υπολόγισε την μέγιστη αναμενόμενη καμπυλότητα  $\kappa_f$ . Το προσαυξητικό βήμα  $\Delta\kappa$  της επαναληπτικής διαδικασίας θα ληφθεί ίσο με  $\kappa_f/300$ . Το βήμα για την πρώτη επανάληψη θα είναι ίσο με  $\Delta\kappa$ . Επίσης για την πρώτη επανάληψη υπολόγισε την αρχική θέση του ουδέτερου άξονα  $z_{NA-i}$  και την ροπή αντίστασης  $Z_{v-net50}$ .

**Βήμα 4:** Για κάθε δομικό στοιχείο (δείκτης  $j$ ), υπολόγισε την παραμόρφωση  $\epsilon_{ij} = \kappa_i (z_j - z_{NA-i})$  που αντιστοιχεί στην καμπυλότητα  $\kappa_i$  και επομένως και την δύναμη  $\sigma_j A_j$  στο δομικό στοιχείο.

**Βήμα 5:** Προσδιόρισε την νέα θέση του ουδέτερου άξονα  $z_{NA-i}$  χρησιμοποιώντας την συνθήκη ισορροπίας των δυνάμεων κατά το διάμηκες σε όλη την μέση τομή. Αναλόγως, μετακίνησε τον ουδέτερο άξονα έως ότου:

$$F_i = 0.1 \sum A_j \sigma_j \text{ kN} = 0$$

Προσοχή, η τάση  $\sigma_j$  είναι θετική για στοιχεία σε θλίψη και αρνητική για στοιχεία σε εφελκυσμό. Επανάλαβε την διαδικασία ξεκινώντας από το βήμα 4 μέχρις ότου ικανοποιηθεί η συνθήκη ισορροπίας. Η συνθήκη ισορροπίας ικανοποιείται όταν η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα είναι μικρότερη από 0.0001m.

**Βήμα 6:** Υπολόγισε την αντίστοιχη ροπή προσθέτοντας τις συνεισφορές σε ροπή όλων των δομικών στοιχείων όπως περιγράφει η παρακάτω σχέση:



$$M_i = 0.1 \sum |A_j \sigma_j (z - z_{NA-i})| \quad \text{kNm} = 0$$

**Βήμα 7:** Αύξησε την καμπυλότητα κατά  $\Delta\kappa$ , χρησιμοποίησε ως αρχική θέση του ουδέτερου άξονα, την τρέχουσα για την προσαύξηση της καμπυλότητας και επανέλαβε όλα τα βήματα από το βήμα 4 και πέρα, μέχρι η καμπυλότητα να πάρει την μέγιστη αναμενόμενη τιμή της. Η μέγιστη αντοχή σε διαμήκη κάμψη είναι το μέγιστο (κορυφή) της καμπύλης  $M-\kappa$ . Εάν δεν υπάρχει μέγιστο στην καμπύλη, αύξησε την καμπυλότητα.

Η μέγιστη αναμενόμενη καμπυλότητα  $\kappa_f$  (σε  $\text{m}^{-1}$ ) σε κατάσταση sagging δίνεται από την σχέση:

$$\kappa_f = 3 \frac{M_{yd}}{EI_{v-net50}} 10^{-3} \quad \text{m}^{-1}$$

Όπου

$M_{yd}$ : κάθετη καμπτική ροπή στο κατάστρωμα ή στο πυθμένα.

Λαμβάνεται η μεγαλύτερη εκ των δύο:

$$Z_{v-net50-dk} \sigma_{yd} 10^3 \quad \text{kNm}$$

$$Z_{v-net50-kl} \sigma_{yd} 10^3 \quad \text{kNm}$$

$Z_{v-net50-dk}$ : ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα

$Z_{v-net50-kl}$ : ροπή αντίστασης στον πυθμένα

$E$ : μέτρο ελαστικότητας,  $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

$\sigma_{yd}$ : το ελάχιστο όριο διαρροής του υλικού σε  $\text{N/mm}^2$

$I_{v-net50}$ : ροπή αδράνειας του κατασκευαστικού σώματος του πλοίου

### 5.3 Παρουσίαση του κώδικα

Ο κώδικας που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής σε κατάσταση sagging αποτελείται από δύο m-αρχεία του Matlab. Αυτά τα αρχεία είναι το function-αρχείο Ship\_Data.m (αρχείο εισόδου) και το script-αρχείο Ultimate\_Strength.m (κύριος κώδικας). Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των δύο αυτών αρχείων και ανάλυση της δομής τους.

#### **Αρχείο εισόδου: Ship\_Data.m**

Στο αρχείο εισόδου περιέχονται όλα εκείνα τα δεδομένα που σχετίζονται με την γεωμετρία του πλοίου. Σκοπός της ύπαρξης ενός τέτοιου αρχείου είναι να είναι δυνατόν σχετικά γρήγορα να εισαχθεί η διατομή ενός πλοίου χωρίς όμως να είναι αναγκαία η τροποποίηση του κύριου κώδικα.

Το αρχείο εισόδου *Ship\_Data.m* είναι ένα function-αρχείο στο οποίο περιέχονται τρία μητρώα – το μητρώο SE, το μητρώο HC και το μητρώο FB – και κάποιες επιμέρους μεταβλητές απαραίτητες για την εκκίνηση της προσαυξητικής επαναληπτικής διαδικασίας.

#### ▀ Μητρώο SE

Το μητρώο SE είναι διαστάσεων  $i \times 8$  και αφορά δομικά στοιχεία τα οποία έχουν διατομή με πέλμα. Ο αριθμός των γραμμών  $i$  είναι ίσος με τον αριθμό των δομικών στοιχείων με πέλμα που περιέχει η μέση τομή του υπό εξέταση πλοίου. Μια πλήρης γραμμή (με οχτώ στοιχεία) περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες ενός δομικού στοιχείου για την εξαγωγή των καμπυλών βράχυνσης. Στην 1<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το ύψος του κορμού σε mm, στην 2<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το λειτουργικό πάχος του κορμού σε mm, στην 3<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το πλάτος του πέλματος σε mm, στην 4<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το λειτουργικό

πάχος του πέλματος σε mm, στην 5<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το διάκενο μεταξύ των ενισχυτικών σε mm, στην 6<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το λειτουργικό πάχος του ενισχυμένου ελάσματος σε mm, στην 7<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το ελάχιστο όριο διαρροής σε MPa (ενισχυτικού ή ενισχυμένου ελάσματος) και τέλος στην 8<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται η απόσταση του κέντρου βάρους του δομικού στοιχείου από τον πυθμένα σε m.

#### ► Μητρώο HC

Το μητρώο HC είναι διαστάσεων  $b \times 3$  και αφορά άκαμπτα γωνιακά στοιχεία. Ο αριθμός των γραμμών  $b$  είναι ίσος με τον αριθμό των άκαμπτων γωνιακών στοιχείων που περιέχει η μέση τομή του υπό εξέταση πλοίου. Μια πλήρης γραμμή (με τρία στοιχεία) περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες ενός άκαμπτου γωνιακού στοιχείου για την εξαγωγή των των καμπυλών βράχυνσης. Στην 1<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται η διατομή του άκαμπτου γωνιακού στοιχείου σε  $\text{mm}^2$ , στην 2<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το ελάχιστο όριο διαρροής σε MPa (εκ των ελασμάτων που αποτελούν το άκαμπτο γωνιακό στοιχείο), τέλος στην 3<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται η απόσταση του κέντρου βάρους του άκαμπτου γωνιακού στοιχείου από τον πυθμένα σε m.

#### ► Μητρώο FB

Το μητρώο FB είναι διαστάσεων  $c \times 4$  και αφορά ενισχυτικά τύπου flat bar. Ο αριθμός των γραμμών  $c$  είναι ίσος με τον αριθμό των ενισχυτικών τύπου flat bar που περιέχει η μέση τομή του υπό εξέταση πλοίου. Μια πλήρης γραμμή (με τέσσερα στοιχεία) περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες ιδιότητες ενός ενισχυτικού τύπου flat bar για την εξαγωγή των καμπυλών βράχυνσης. Στην 1<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το ύψος του κορμού του flat bar σε mm, στην 2<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το λειτουργικό πάχος του κορμού του flat bar σε mm, στην 3<sup>η</sup> στήλη

δηλώνεται το διάκενο μεταξύ των flat bar σε mm, στην 4<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το λειτουργικό πάχος του ενισχυμένου ελάσματος σε mm, τέλος στην 5<sup>η</sup> στήλη δηλώνεται το ελάχιστο όριο διαρροής σε MPa (flat bar ή ενισχυμένου ελάσματος).

#### ► Επιμέρους μεταβλητές

Με τον όρο αυτό εννοούμε μεγέθη όπως η απόσταση μεταξύ δύο κοίλων νομέων  $l_{stf}$  σε m, η αρχική θέση του ουδέτερου άξονα σε m, η ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα  $Z_{v-net50-dk}$  σε  $m^3$ , η ροπή αντίστασης στο πυθμένα  $Z_{v-net50-kl}$  σε  $m^3$ , το όριο διαρροής στο κατάστρωμα  $\sigma_{yd-dk}$  σε MPa, το όριο διαρροής στο πυθμένα  $\sigma_{yd-kl}$  και η ροπή αντίστασης της μέσης τομής  $I_{v-net50}$  σε  $m^4$ . Παρακάτω παρατίθεται ένα τυπικό αρχείο εισόδου.

### Ship\_Data.m

```
function [SE,HC,FB,lstf,Zna_ini,Zv_min_dk,Zv_min_kl,syd_dk,...
        syd_kl,Iv_net50]=Ship_Data

SE = [ 234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811046; %SE01
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE02
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE03
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE04
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE05
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE06
      284.0 9.5 90 14.5 650 12.5 245 0.595165; %SE07
      284.0 9.5 90 14.5 650 12.5 245 1.245165; %SE08
      234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE09
      234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE10
      234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE11
      234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE12
      234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE13
      234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE14
      234.0 10.0 90 14.0 760 13.0 315 1.812420; %SE15
      234.0 10.0 90 14.0 760 13.0 315 1.812420; %SE16
      234.0 10.0 90 14.0 760 13.0 315 1.812420; %SE17
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE18
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE19
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE20
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE21
      284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE22
      234.0 10.5 90 14.5 690 12.5 245 0.053889; %SE23
      186.0 7.0 90 12.0 760 11.5 245 17.312255; %SE24
      186.0 7.0 90 12.0 760 11.5 245 17.365369; %SE25
      186.0 7.0 90 12.0 760 11.5 245 17.418490; %SE26
```

```

186.0  7.0  90  12.0  760  11.5  245  17.471524;  %SE27
186.0  7.0  90  12.0  760  11.5  245  17.529658;  %SE28
186.0  7.0  90  12.0  760  11.5  245  17.529658;  %SE29
235.0  8.5  90  13.5  800  12.5  245  16.696864;  %SE30
138.0  10.5  90  10.5  800  12.5  245  15.896563;  %SE31
234.0  10.5  90  14.5  770  14.5  315  3.977217;  %SE32
234.0  10.5  90  14.5  770  14.5  315  3.255900;  %SE33
234.0  10.5  90  14.5  770  14.5  315  2.531668]; %SE34

HC = [ 8325.0  245  1.795090;  %HC01
      1824.5  245  1.946211;  %HC02
      8515.0  245  0.061935;  %HC03
      12662.5  245  0.039593  %HC04
      12662.5  245  1.821098  %HC05
      12937.5  245  0.041674  %HC06
      12452.5  245  1.929529  %HC07
      11675.0  245  0.036202  %HC08
      16867.5  245  0.230000  %HC09
      11270.0  315  4.567948]; %HC10

FB = [150  9.5  650  11.5  245  1.250000;  %FB01
      150  9.5  650  11.5  245  0.600000;  %FB02
      150  9.5  650  11.5  245  1.250000;  %FB03
      150  9.5  650  11.5  245  0.600000;  %FB04
      150  9.5  700  8.5  245  3.985508;  %FB05
      150  9.5  700  8.5  245  3.985508;  %FB06
      150  9.5  700  8.5  245  9.235508;  %FB07
      150  9.5  700  8.5  245  9.235508;  %FB08
      150  9.5  700  9.0  245  14.486165;  %FB09
      150  9.5  700  9.0  245  14.486165;  %FB10
      150  9.5  650  11.5  245  1.250000;  %FB11
      150  9.5  650  11.5  245  0.600000]; %FB12

% Span of stiffener, in m, equal to spacing between primary
% support members
lstf=2.73;
% Initial position of neutral axis
Zna_ini=7.162;

% Section modulus at deck in m3
Zv_min_dk=10.7241;

% Section modulus at bottom in m3
Zv_min_kl=10.7241;

% Yield stress at deck in N/mm2
syd_dk=245;

% Yield stress at deck in N/mm2
syd_kl=245;

% Hull girder moment of inertia, in m4
Iv_net50=110.704;

```

☑ **Κύριος κώδικας: *Ultimate\_Strength.m***

Το κυρίως πρόγραμμα στις πρώτες γραμμές διαβάζει το αρχείο εισόδου και υπολογίζει τα απαραίτητα δεδομένα για την εκκίνηση της προσαυξητικής επαναληπτικής διαδικασίας. Σ' αυτά περιλαμβάνονται το προσαυξητικό βήμα και η μέγιστη αναμενόμενη καμπυλότητα. Επίσης προσδιορίζει τις διαστάσεις των μητρώων SE, HC και FB, που θα χρειαστούν στην συνέχεια.

Ο κώδικας περιλαμβάνει έναν κύριο βρόχο επανάληψης (for loop) για την καμπυλότητα μέσα στον οποίο υπάρχει ένας βρόχος ανακύκλωσης (while loop) ώστε οποιαδήποτε εντολή υπάρχει εντός του συγκεκριμένου βρόχου να εκτελείται έως ότου η επιθυμητή συνθήκη γίνει αληθής. Η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι η συνθήκη ισορροπίας των δυνάμεων κατά το διάμηκες σε όλη την μέση τομή. Εφόσον αυτή η συνθήκη δεν ικανοποιείται, αλλάζει η θέση του ουδέτερου άξονα και επαναλαμβάνονται όλες οι πράξεις εντός του βρόχου ανακύκλωσης.

Μέσα στον βρόχο ανακύκλωσης υπάρχουν τρεις απλοί βρόχοι επανάληψης (for loop) για τον υπολογισμό των συνισταμένων δυνάμεων των τριών τύπων δομικών στοιχείων (ενισχυτικά με πέλμα, άκαμπτα γωνιακά στοιχεία και flat bars). Προσθέτοντας τις τρεις αυτές επιμέρους συνισταμένες δυνάμεις υπολογίζεται η συνισταμένη δύναμη την οποία επιδιώκουμε να μηδενίσουμε μέσω του βρόχου ανακύκλωσης. Οι αριθμοί των απαιτούμενων επαναλήψεων αυτών των τριών βρόχων καθορίζονται από τις διαστάσεις των μητρώων SE, HC και FB που έχουν προσδιοριστεί στις πρώτες γραμμές του προγράμματος.

Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι για λόγους προγραμματιστικούς το πρόγραμμα θεωρεί τρεις κατηγορίες δομικών στοιχείων. Τα ενισχυτικά με πέλμα, τα άκαμπτα γωνιακά στοιχεία και τα flat bars. Ασφαλώς, τα ενισχυτικά με πέλμα και τα flat bars ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των κοινών δομικών στοιχείων

που προτείνει ο IACS. Όμως προγραμματιστικά είναι προτιμότερο η εισαγωγή τους σε δύο διαφορετικά μητρώα γιατί τα flat bars έχουν δύο διαστάσεις λιγότερες (δεν έχουν πέλμα) και τα μηδενικά στις δύο αντίστοιχες στήλες του μητρώου θα δημιουργούσαν ποικίλα υπολογιστικά προβλήματα. Για αυτούς τους λόγους προτιμήθηκε από τον γράφοντα να δημιουργηθούν δύο διαφορετικά μητρώα.

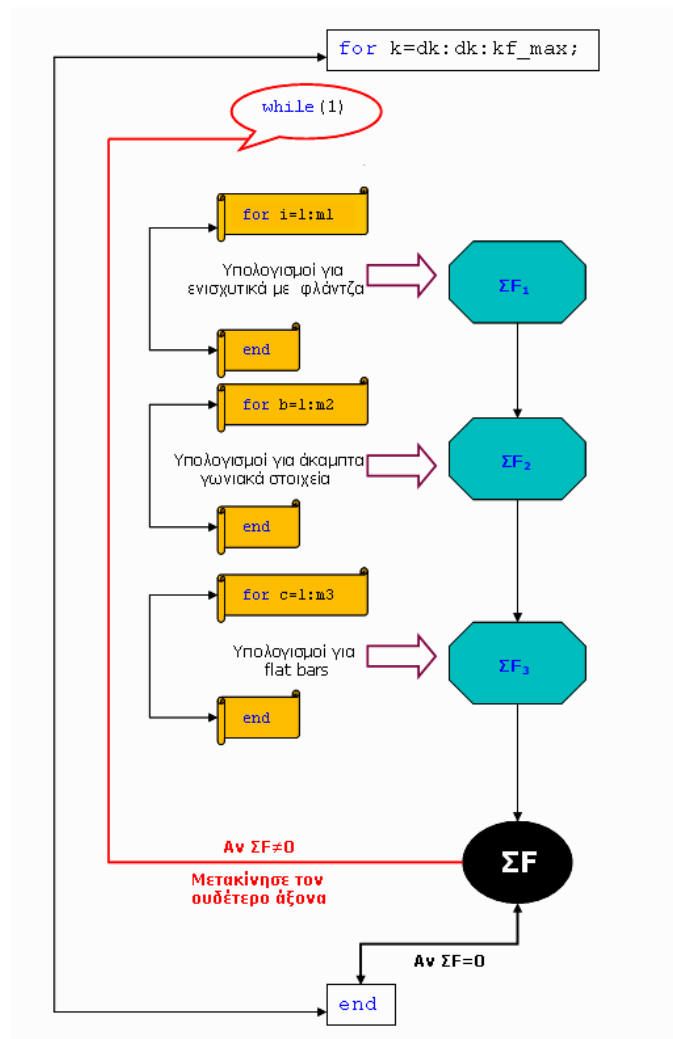
Ένα άλλο σημαντικό τμήμα του προγράμματος είναι ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα. Ο τρόπος που επιλέχθηκε για την μετακίνηση του ουδέτερου άξονα είναι ο ακόλουθος.

Καταρχήν σε κάθε προσαυξητικό βήμα της καμπυλότητας, ο ουδέτερος άξονας μετακινείται κατά διάστημα  $dz$  (συνήθως 0.01m) από την τιμή που είχε στο προηγούμενο προσαυξητικό βήμα. Σε περίπτωση που η συνισταμένη των δυνάμεων κατά το διάμηκες είναι μεγαλύτερη από μια τιμή ανοχής (συνήθως 50N), τότε ο ουδέτερος άξονας μετακινείται προς τα πάνω με βήμα που επιλέγεται από τον χρήστη (συνήθως 0.001m) ώστε να μπουν περισσότερα δομικά στοιχεία κάτω από τον ουδέτερο άξονα. Αυτό γίνεται διότι τα δομικά στοιχεία κάτω από τον ουδέτερο άξονα έχουν αρνητική συνεισφορά στην συνισταμένη των δυνάμεων με αποτέλεσμα την μείωση της.

Εφόσον η συνισταμένη των δυνάμεων κατά το διάμηκες είναι μικρότερη από μια τιμή ανοχής (συνήθως -50N), τότε ο ουδέτερος άξονας μετακινείται προς τα κάτω με βήμα που πάλι επιλέγεται από τον χρήστη (συνήθως 0.001m) ώστε να μείνουν περισσότερα δομικά στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα. Αυτό γίνεται διότι τα δομικά στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα έχουν θετική συνεισφορά στην συνισταμένη των δυνάμεων με αποτέλεσμα την μείωση της απόλυτης τιμής της. Αν πάλι η συνισταμένη των δυνάμεων κατά το διάμηκες βρίσκεται εντός του διαστήματος ανοχής  $[-Tol, Tol]$  (συνήθως -50N έως 50N) τότε ο βρόχος ανακύκλωσης (while loop)

διακόπτεται με την εντολή `break` και τότε ακολουθεί το επόμενο προσαυξητικό βήμα της καμπυλότητας.

Μετά από τον κύριο βρόχο επανάληψης για την καμπυλότητας υπάρχουν κάποιες εντολές για την δημιουργία του ζητούμενου διαγράμματος ροπής-καμπυλότητας M-κ. Προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή η δομή του προγράμματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.3.1 το διάγραμμα ροής του κώδικα όπου είναι εμφανή τα βασικά τμήματα. Αμέσως μετά το σχήμα 5.3.1 παρατίθεται ο κώδικας `Ultimate_Strength.m` που αναπτύχθηκε για την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής σε διαμήκη κάμψη της γάστρας ενός δεξαμενοπλοίου.



Σχήμα 5.3.1 Διάγραμμα ροής του κώδικα Ultimate Strength



## Ultimate\_Strength.m

```

clc
clear all
[SE,HC,FB,lstf,Zna_ini,Zv_min_dk,Zv_min_kl,syd_dk,...
                                syd_kl,Iv_net50]=Ship_Data_5;

m1=size(SE,1);
m2=size(HC,1);
m3=size(FB,1);
E=206000;
Myd_kl=1000*Zv_min_kl*syd_kl;
Myd_dk=1000*Zv_min_dk*syd_dk;
Myd=max(Myd_kl,Myd_dk);
kf_max=0.003*Myd/(E*Iv_net50);
dk=kf_max/300;

iter=0;

for k=dk:dk:kf_max;

iter=iter+1;
Zna(1)=Zna_ini;

dz=0.01;
while(1)
Zna(iter+1)=Zna(iter)-dz;

%-----%
% CALCULATIONS FOR FLANGED STIFFENERS %
%-----%

for i=1:m1
    e_el_se(i,iter)=dk*iter*(SE(i,8)-Zna(iter));
    e_yd_se(i,iter)=SE(i,7)/E;
    e_rel_se(i,iter)=e_el_se(i,iter)/e_yd_se(i,iter);

    if e_rel_se(i,iter)<-1;
        Fi_se(i,iter) = -1;
    elseif e_rel_se(i,iter)>=-1 && e_rel_se(i,iter)<1;
        Fi_se(i,iter) = e_rel_se(i,iter);
    else e_rel_se(i,iter)>1;
        Fi_se(i,iter) = 1;
    end

%-----%
% Beam Column Buckling of flanged stiffeners %
%-----%

    if e_rel_se(i,iter)>0;
        vita_p_se(i,iter)=SE(i,5)/SE(i,6)*((e_rel_se(i,iter)*...
                                SE(i,7))/E)^0.5;
    else
        vita_p_se(i,iter)=0;
    end
end

```

```

if vita_p_se(i,iter)>1.25;
    beff_p_se(i,iter)=(2.25/vita_p_se(i,iter))-(1.25/...
    (vita_p_se(i,iter))^2))*SE(i,5);
else
    beff_p_se(i,iter)= SE(i,5);
end

if vita_p_se(i,iter)>1;
    beff_s_se(i,iter)= SE(i,5)/vita_p_se(i,iter);
else
    beff_s_se(i,iter)= SE(i,5);
end

A_Enet50_se(i,iter)=0.01*(SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)*SE(i,4)+...
    beff_p_se(i,iter)*SE(i,6));
zp_se(i,iter)=0.1*(0.5*beff_s_se(i,iter)*(SE(i,6)^2)+SE(i,1)*...
    SE(i,2)*(SE(i,6)+0.5*SE(i,1))+SE(i,3)*SE(i,4)*...
    (SE(i,6)+SE(i,1)+0.5*SE(i,4)))/A_Enet50_se(i,iter);
I_Enet50_se(i,iter)=10^-5*((beff_s_se(i,iter)*(SE(i,6))^3)/12+...
    (beff_s_se(i,iter)*(SE(i,6))*(zp_se(i,iter)-...
    SE(i,6)/2)^2+SE(i,1)^3*SE(i,2)/12+SE(i,1)*...
    SE(i,2)*(zp_se(i,iter)-SE(i,6)-SE(i,1)/2)^2+...
    ((SE(i,3)*SE(i,4)^3)/12)+SE(i,3)*SE(i,4)*(SE(i,6)+...
    SE(i,1)+SE(i,4)/2-zp_se(i,iter)^2));

% Euler column buckling stress  $\sigma_{E1}$ 
if e_rel_se(i,iter)>0;
    sigma_E1_se(i,iter)= pi^2*E*(I_Enet50_se(i,iter)/...
    (A_Enet50_se(i,iter)*lstf^2))*10^-4;
else
    sigma_E1_se(i,iter)=0;
end

% Critical stress  $\sigma_{C1}$ 
if sigma_E1_se(i,iter)>(SE(i,7)/2)*e_rel_se(i,iter)
    sigma_C1_se(i,iter)=SE(i,7)*(1-(SE(i,7)*e_rel_se(i,iter))/...
    (4*sigma_E1_se(i,iter)));
else
    sigma_C1_se(i,iter)= sigma_E1_se(i,iter)/e_rel_se(i,iter);
end

% Critical stress  $\sigma_{CR1}$ 
A_snet50_se(i,iter)=0.01*(SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)*SE(i,4));

sigma_CR1_se(i,iter)=Fi_se(i,iter)*sigma_C1_se(i,iter)*...
    ((A_snet50_se(i,iter)+0.01*beff_p_se(i,iter)*...
    SE(i,6))/(A_snet50_se(i,iter)+0.01*SE(i,5)*SE(i,6)));

%-----%
% Torsional buckling of flanged stiffeners %
%-----%

ef_se(i,iter)=SE(i,1)+0.5*SE(i,4); % For angles and T bars
Aw_net_se(i,iter)=(ef_se(i,iter)-0.5*SE(i,4))*SE(i,2);
Af_net_se(i,iter)=SE(i,3)*SE(i,4);

Ip_net_se(i,iter)= ((Aw_net_se(i,iter)*(ef_se(i,iter)-...

```

```

0.5*SE(i,4))^2)/3+Af_net_se(i,iter)*...
    (ef_se(i,iter)^2))/3)*10^-4;

It_net_se(i,iter)=(((ef_se(i,iter)-0.5*SE(i,4))*SE(i,2)^3)/...
    (3*10^4))*(1-0.63*(SE(i,2)/(ef_se(i,iter) ...
    -0.5*SE(i,4))))+(((SE(i,3)*SE(i,4)^3)/(3*10^4))*(1-
    ...0.63*SE(i,4)/SE(i,3)));

Iw_net_se(i,iter)=(Af_net_se(i,iter)*(ef_se(i,iter)^2)*...
    (SE(i,3)^2)/(12*10^6))*((Af_net_se(i,iter)+2.6*...
    Aw_net_se(i,iter))/(Af_net_se(i,iter)+Aw_net_se(i,iter)));
% Iw_net(i,iter)=((SE(i,3)^3)*SE(i,4)*(ef(i,iter))^2)/(12*10^6);for
T-bars
% Iw_net(i,iter)=(SE(i,1)*(SE(i,2)^3)/(36*10^6)

epsilon_se(i,iter)=1+100*((1stf^4)/(Iw_net_se(i,iter))*((SE(i,5)/...
    (SE(i,6)^3))+4*(ef_se(i,iter) ...0.5*SE(i,4))/(3*SE(i,2)^3)))^1/2;

sigma_ET_se(i,iter)=(E/(Ip_net_se(i,iter)))*((epsilon_se(i,iter)*...
    pi^2*Iw_net_se(i,iter)*10^4)/(1stf^2)+0.385*It_net_se(i,iter));

% Euler torsional buckling stress sigma_E2
if e_rel_se(i,iter)>0;
    sigma_E2_se(i,iter)=sigma_ET_se(i,iter);
else
    sigma_E2_se(i,iter)=0;
end

% Critical stress sigma_C2
if sigma_E2_se(i,iter)>(SE(i,7))/2*e_rel_se(i,iter)
    sigma_C2_se(i,iter)=SE(i,7)*(1-(SE(i,7)*e_rel_se(i,iter))/...
        (4*sigma_E2_se(i,iter)));
else
    sigma_C2_se(i,iter)= sigma_E2_se(i,iter)/e_rel_se(i,iter);
end

if vita_p_se(i,iter)>1.25;
    sigma_CP_se(i,iter)= ((2.25/vita_p_se(i,iter)-...
        (1.25/vita_p_se(i,iter)^2)))*SE(i,7);
else
    sigma_CP_se(i,iter)= SE(i,7);
end

% Critical stress sigma_CR2
sigma_CR2_se(i,iter)=Fi_se(i,iter)*((A_snet50_se(i,iter)*...
    sigma_C2_se(i,iter)+0.01*SE(i,5)*SE(i,6)*...
    sigma_CP_se(i,iter))/(A_snet50_se(i,iter)+...
    0.01*SE(i,5)*SE(i,6)));

%-----%
% Web local buckling of flanged stiffeners %
%-----%

```

```

if e_rel_se(i,iter)>0;
vita_w_se(i,iter)=
SE(i,1)/SE(i,2)*((e_rel_se(i,iter)*SE(i,7))/E)^0.5;
else
vita_w_se(i,iter)=0;
end

if vita_w_se(i,iter)>1.25;
dw_eff_se(i,iter)= ((2.25/vita_w_se(i,iter)-...
(1.25/vita_w_se(i,iter)^2))*SE(i,1);
else
dw_eff_se(i,iter)= SE(i,1);
end

sigma_CR3_se(i,iter)=Fi_se(i,iter)*SE(i,7)*((beff_p_se(i,iter)*...
SE(i,6)+dw_eff_se(i,iter)*SE(i,2)+SE(i,3)*...
SE(i,4))/(SE(i,5)*SE(i,6)+SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)...
*SE(i,4)));

stress_1(i,iter)=min(sigma_CR1_se(i,iter),sigma_CR3_se(i,iter));
stress_2(i,iter)=min(sigma_CR2_se(i,iter),sigma_CR3_se(i,iter));

if e_rel_se(i,iter)< 0;
sigma_CR_se(i,iter)= SE(i,7)*Fi_se(i,iter);
else
sigma_CR_se(i,iter)=min(stress_1(i,iter),stress_2(i,iter));
end

%-----%
% Total Force of structural elements %
%-----%
A_se(i,iter)= SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)*SE(i,4)+SE(i,5)*SE(i,6);
Force_eL_se(i,iter)= A_se(i,iter)*sigma_CR_se(i,iter)/1000;
Moment_eL_se(i,iter)=Force_eL_se(i,iter)*(SE(i,8)-Zna(iter));
Force_se(iter)= sum( Force_eL_se(:,iter));
Moment_se(iter)=sum( Moment_eL_se(:,iter));
end

%-----%
% CALCULATIONS FOR HARD CORNERS %
%-----%

for b=1:m2
e_el_hc(b,iter)=dk*iter*(HC(b,3)-Zna(iter));
e_yd_hc(b,iter)=HC(b,2)/E;
e_rel_hc(b,iter)=e_el_hc(b,iter)/e_yd_hc(b,iter);

if e_rel_hc(b,iter)<-1;
Fi_hc(b,iter) = -1;
elseif e_rel_hc(b,iter)>=-1 && e_rel_hc(b,iter)<1;
Fi_hc(b,iter) = e_rel_hc(b,iter);
else e_rel_hc(b,iter)>1;
Fi_hc(b,iter) = 1;
end

sigma_CR_hc(b,iter)= Fi_hc(b,iter)*HC(b,2);

```

```

%------%
% Total Force of hard corners                                     %
%------%
A_hc(b,iter)= HC(b,1);
Force_eL_hc(b,iter)= A_hc(b,iter)*sigma_CR_hc(b,iter)/1000;
Moment_eL_hc(b,iter)=Force_eL_hc(b,iter)*(HC(b,3)-Zna(iter));
Force_hc(iter)= sum( Force_eL_hc(:,iter));
Moment_hc(iter)=sum( Moment_eL_hc(:,iter));

end

%------%
% CALCULATIONS FOR FLAT BARS                                     %
%------%

for c=1:m3
    e_el_fb(c,iter)=dk*iter*(FB(c,6)-Zna(iter));
    e_yd_fb(c,iter)=FB(c,5)/E;
    e_rel_fb(c,iter)=e_el_fb(c,iter)/e_yd_fb(c,iter);

    if e_rel_fb(c,iter)<-1;
        Fi_fb(c,iter) = -1;
    elseif e_rel_fb(c,iter)>=-1 && e_rel_fb(c,iter)<1;
        Fi_fb(c,iter) = e_rel_fb(c,iter);
    else e_rel_fb(c,iter)>1;
        Fi_fb(c,iter) = 1;
    end

%------%
% Beam Column Buckling of flat bars                             %
%------%
    if e_rel_fb(c,iter)>0;
        vita_p_fb(c,iter)=
FB(c,3)/FB(c,4)*((e_rel_fb(c,iter)*FB(c,5))/E)^0.5;
    else
        vita_p_fb(c,iter)=0;
    end

    if vita_p_fb(c,iter)>1.25;
        beff_p_fb(c,iter)=(2.25/vita_p_fb(c,iter))-(1.25/...
(vita_p_fb(c,iter))^2))*FB(c,3);
    else
        beff_p_fb(c,iter)= FB(c,3);
    end

    if vita_p_fb(c,iter)>1;
        beff_s_fb(c,iter)= FB(c,3)/vita_p_fb(c,iter);
    else
        beff_s_fb(c,iter)= FB(c,3);
    end

A_Enet50_fb(c,iter)=0.01*(FB(c,1)*FB(c,2)+beff_p_fb(c,iter)*FB(c,4));
zp_fb(c,iter)=0.1*(0.5*beff_s_fb(c,iter)*(FB(c,4)^2)+FB(c,1)*...

```

```

        FB(c,2)*(FB(c,4)+0.5*FB(c,1))/A_Enet50_fb(c,iter);
I_Enet50_fb(c,iter)=10^-5*((beff_s_fb(c,iter))*(FB(c,4))^3)/12+...
        (beff_s_fb(c,iter))*(FB(c,4))*(zp_fb(c,iter)-...
        FB(c,4)/2)^2+FB(c,1)^3*FB(c,2)/12+FB(c,1)*...
        FB(c,2)*(zp_fb(c,iter)-FB(c,4)-FB(c,1)/2)^2));

% Euler column buckling stress  $\sigma_{E1}$ 
if e_rel_fb(c,iter)>0;
    sigma_E1_fb(c,iter)= pi^2*E*(I_Enet50_fb(c,iter)/...
        (A_Enet50_fb(c,iter)*lstf^2))*10^-4;
else
    sigma_E1_fb(c,iter)=0;
end

% Critical stress  $\sigma_{C1}$ 
if sigma_E1_fb(c,iter)>(FB(c,5)/2)*e_rel_fb(c,iter)
    sigma_C1_fb(c,iter)=FB(c,5)*(1-(FB(c,5)*e_rel_fb(c,iter))/...
        (4*sigma_E1_fb(c,iter)));
else
    sigma_C1_fb(c,iter)= sigma_E1_fb(c,iter)/e_rel_fb(c,iter);
end

% Critical stress  $\sigma_{CR1}$ 
A_snet50_fb(c,iter)= 0.01*FB(c,1)*FB(c,2);

sigma_CR1_fb(c,iter)=Fi_fb(c,iter)*sigma_C1_fb(c,iter)*...
((A_snet50_fb(c,iter)+0.01*beff_p_fb(c,iter))*...
FB(c,4))/(A_snet50_fb(c,iter)+0.01*FB(c,3)*FB(c,4));

%------%
% Torsional buckling of flat bars %
%------%

ef_fb(c,iter)=FB(c,1); % For flat bars
Aw_net_se(c,iter)=ef_fb(c,iter)*FB(c,2);
Af_net_fb(c,iter)=0;

Ip_net_fb(c,iter)= (FB(c,1)^3*FB(c,2))/(3*10^4);
It_net_fb(c,iter)=(FB(c,1)*FB(c,2)^3)/(3*10^4)*(1-0.63*(FB(c,2)/...
        FB(c,1)));
Iw_net_fb(c,iter)=(FB(c,1)^3*FB(c,2)^3)/(36*10^6);

epsilon_fb(c,iter)=1+100*((lstf^4)/(Iw_net_fb(c,iter))*((FB(c,3)/...
        (FB(c,4)^3))+4*(ef_fb(c,iter))/(3*FB(c,2)^3)))^1/2;

sigma_ET_fb(c,iter)=(E/(Ip_net_fb(c,iter)))*((epsilon_fb(c,iter)*...
        pi^2*Iw_net_fb(c,iter)*10^-4)/(lstf^2)+0.385*It_net_fb(c,iter));

% Euler torsional buckling stress  $\sigma_{E2}$ 
if e_rel_fb(c,iter)>0;
    sigma_E2_fb(c,iter)=sigma_ET_fb(c,iter);
else

```

```
        sigma_E2_fb(c,iter)=0;
end

% Critical stress  $\sigma_{C2}$ 
if sigma_E2_fb(c,iter)>(FB(c,5))/2*e_rel_fb(c,iter)
    sigma_C2_fb(c,iter)=FB(c,5)*(1-(FB(c,5)*e_rel_fb(c,iter))/...
        (4*sigma_E2_fb(c,iter)));
else
    sigma_C2_fb(c,iter)= sigma_E2_fb(c,iter)/e_rel_fb(c,iter);
end

if vita_p_fb(c,iter)>1.25;
    sigma_CP_fb(c,iter)= ((2.25/vita_p_fb(c,iter)-...
        (1.25/vita_p_fb(c,iter)^2)))*FB(c,5);
else
    sigma_CP_fb(c,iter)= FB(c,5);
end

% Critical stress  $\sigma_{CR2}$ 
sigma_CR2_fb(c,iter)=Fi_fb(c,iter)*((A_snet50_fb(c,iter)*...
    sigma_C2_fb(c,iter)+0.01*FB(c,3)*FB(c,4)*...
    sigma_CP_fb(c,iter))/(A_snet50_fb(c,iter)+...
    0.01*FB(c,3)*FB(c,4)));

%-----%
% Web local buckling of flat bars %
%-----%

if vita_p_fb(c,iter)>1.25;
    sigma_CP_fb(c,iter)= ((2.25/vita_p_fb(c,iter)-...
        (1.25/vita_p_fb(c,iter)^2)))*FB(c,5);
else
    sigma_CP_fb(c,iter)= FB(c,5);
end

% Euler buckling stress  $\sigma_{E4}$ 
if e_rel_fb(c,iter)>0;
    sigma_E4(c,iter)=160000*(FB(c,2)/FB(c,1))^2;
else
    sigma_E4(c,iter)=0;
end

% Critical stress  $\sigma_{C4}$ 
if sigma_E4(c,iter)>(FB(c,5))/2*e_rel_fb(c,iter)
    sigma_C4(c,iter)=FB(c,5)*(1-(FB(c,5)*e_rel_fb(c,iter))/...
        (4*sigma_E4(c,iter)));
else
    sigma_C4(c,iter)= sigma_E4(c,iter)/e_rel_fb(c,iter);
end

sigma_CR4_fb(c,iter)=Fi_fb(c,iter)*((FB(c,3)*FB(c,4)*...
    sigma_CP_fb(c,iter)+0.01*A_snet50_fb(c,iter)*...
    sigma_C4(c,iter))/(FB(c,3)*FB(c,4)+...
```

```

                                0.01*A_snet50_fb(c,iter));

stress_3(c,iter)=min(sigma_CR1_fb(c,iter),sigma_CR4_fb(c,iter));
stress_4(c,iter)=min(sigma_CR2_fb(c,iter),sigma_CR4_fb(c,iter));

if e_rel_fb(c,iter)< 0;
    sigma_CR_fb(c,iter)= FB(c,5)*Fi_fb(c,iter);
else
    sigma_CR_fb(c,iter)=min(stress_3(c,iter),stress_4(c,iter));
end

%------%
% Total Force of flat bars                                     %
%------%
A_fb(c,iter)=FB(c,1)*FB(c,2)+FB(c,3)*FB(c,4);
Force_eL_fb(c,iter)= A_fb(c,iter)*sigma_CR_fb(c,iter)/1000;
Moment_eL_fb(c,iter)=Force_eL_fb(c,iter)*(FB(c,6)-Zna(iter));
Force_fb(iter)= sum(Force_eL_fb(:,iter));
Moment_fb(iter)=sum( Moment_eL_fb(:,iter));

end

%------%
% Total Force                                               %
%------%

SF(iter)=Force_se(iter)+Force_hc(iter)+Force_fb(iter);

%------%
% Total Moment                                             %
%------%

Mu(iter)=2*(Moment_se(iter)+Moment_hc(iter)+Moment_fb(iter));

%------%
% Adjustment of the neutral axis                            %
%------%

Tol=0.005;

if SF(iter)>Tol;
    Zna(iter)=Zna(iter)+0.0001;
elseif SF(iter)<-Tol;
    Zna(iter)=Zna(iter)-0.0001;
else
    Zna(iter)=Zna(iter);
    break
end
end

```



```
end

%-----%
% Plots                                     %
%-----%

Curv1=(dk:dk:kf_max)';
Curv2=(0:dk:kf_max)';

figure(1)
plot(Curv1,Mu);
figure(2)
plot(Curv2,Zna);
axis([0 6e-04 0 7.5])
```

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 6

---

---

### Ε φ α ρ μ ο γ ή τ ο υ κ ώ δ ι κ α

---

---

#### 6.1 Εισαγωγικά

Με την βοήθεια του κώδικα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα γίνει εκτίμηση της μέγιστης αντοχής σε διαμήκη κάμψη της γάστρας δεξαμενοπλοίων (product oil tankers) αλλά και πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carriers). Θα παρουσιαστούν αναλυτικά όλοι οι υπολογισμοί που έγιναν προκειμένου να δημιουργηθεί το αρχείο εισόδου για κάθε πλοίο, ο διαμερισμός της μέσης τομής του πλοίου σε δομικά στοιχεία, η μετακίνηση της θέσης του ουδέτερου άξονα συναρτήσει της αυξανόμενης καμπυλότητας καθώς και η καμπύλη ροπής-καμπυλότητας που προκύπτει από την εκτέλεση του κώδικα και με την βοήθεια της οποίας προσδιορίζεται η μέγιστη αντοχή. Επιπλέον θα γίνει σύγκριση της προκύπτουσας μέγιστης αντοχής με το κριτήριο που θέτει ο IACS στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (CSR 2008) και έχει παρουσιασθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (παράγραφος 2.10) της παρούσας εργασίας.

#### 6.2 Εφαρμογή του κώδικα σε δεξαμενόπλοια

##### 6.2.1. Δεξαμενόπλοιο Νο1

Το πρώτο πλοίο που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του κώδικα είναι ένα δεξαμενόπλοιο (product oil tanker) με τις εξής κύριες διαστάσεις:

*Μήκος (μεταξύ καθέτων)  $L_{BP}$ : 174.94m*

Πλάτος  $B$  : **27.34m**

Κοίλο  $D$ : **16.7m**

Βύθισμα  $T$ : **10.63m**

Συντελεστής γάστρας  $C_B$ : **0.85**

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της μέσης τομής του πλοίου (κανονικός νομέας, ενισχυμένος νομέας) αλλά και ένα σχήμα στο οποίο φαίνεται η διακριτοποίηση της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τομή του πλοίου διαμερίστηκε σε 90 τυπικά δομικά στοιχεία (συμπεριλαμβανομένου 12 ενισχυτικών flat bar) και σε 22 άκαμπτα γωνιακά στοιχεία.

Όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την δημιουργία του αρχείου εισόδου είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τα 3 μητρώα καθώς και οι επιμέρους μεταβλητές. Παρακάτω παρατίθενται οι υπολογισμοί.

#### Υπολογισμός απαιτούμενων βασικών μεγεθών

Συντελεστής υλικού  $k$  για το κατάστρωμα: **0.983**

Συντελεστής υλικού  $k$  για τον πυθμένα: **0.983**

Συντελεστής κυματισμού  $C_{wv-v}$  : **9.35**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req-dk}$  στο κατάστρωμα: **10.72m<sup>3</sup>**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req-kl}$  στον πυθμένα: **10.15m<sup>3</sup>**

Ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min-dk}$  στο κατάστρωμα: **10.72m<sup>3</sup>**

Ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min-kl}$  στον πυθμένα: **10.72m<sup>3</sup>**

Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-hog}$  : **1.263.654 kNm (hogging)**

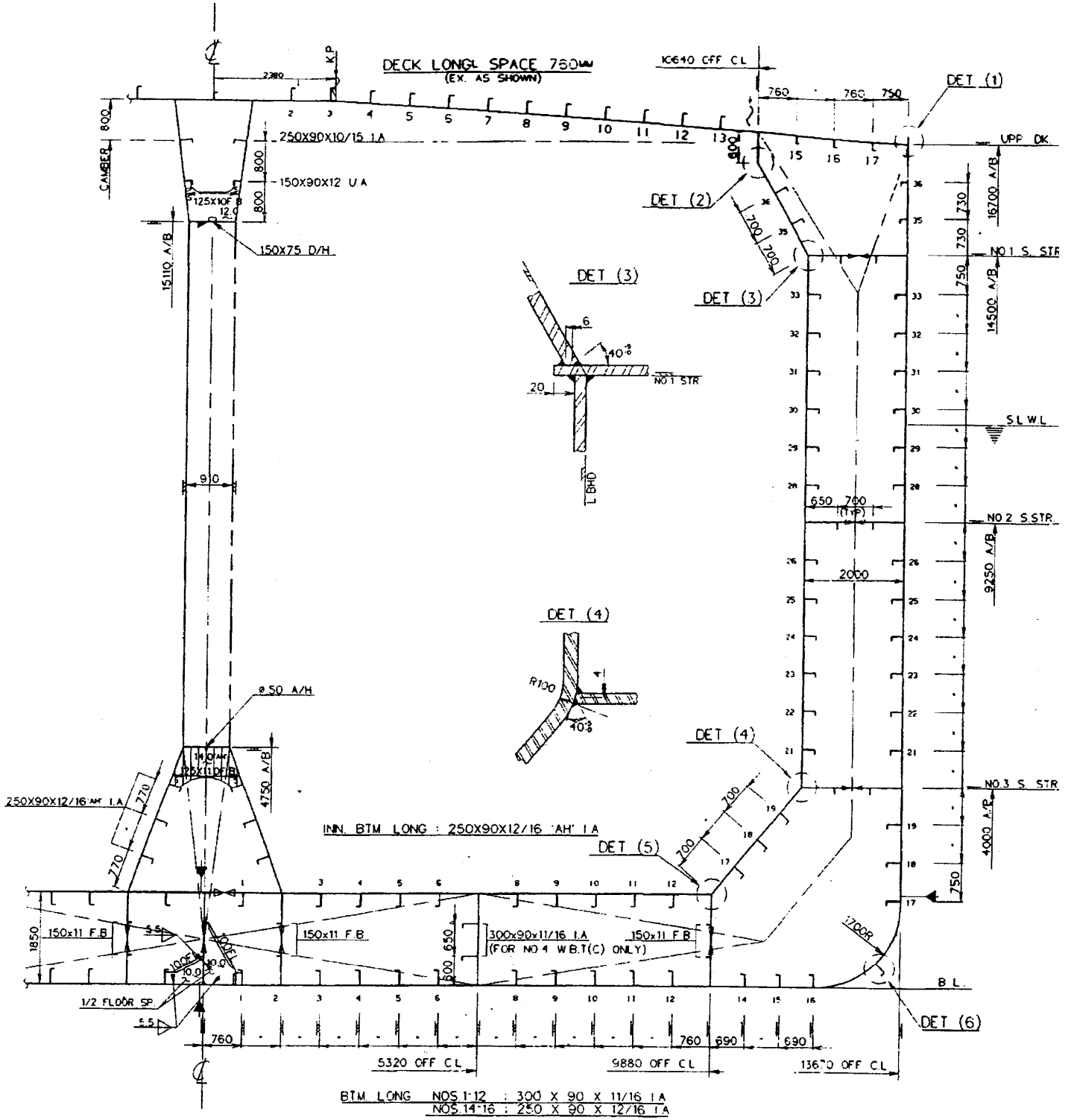
Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-sag}$  : **-1.334.075 kNm (sagging)**

Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-hog}$  : **810.225 kNm (hogging)**

Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-sag}$  : **-628.834 kNm (sagging)**

**ORDINARY SECTION**

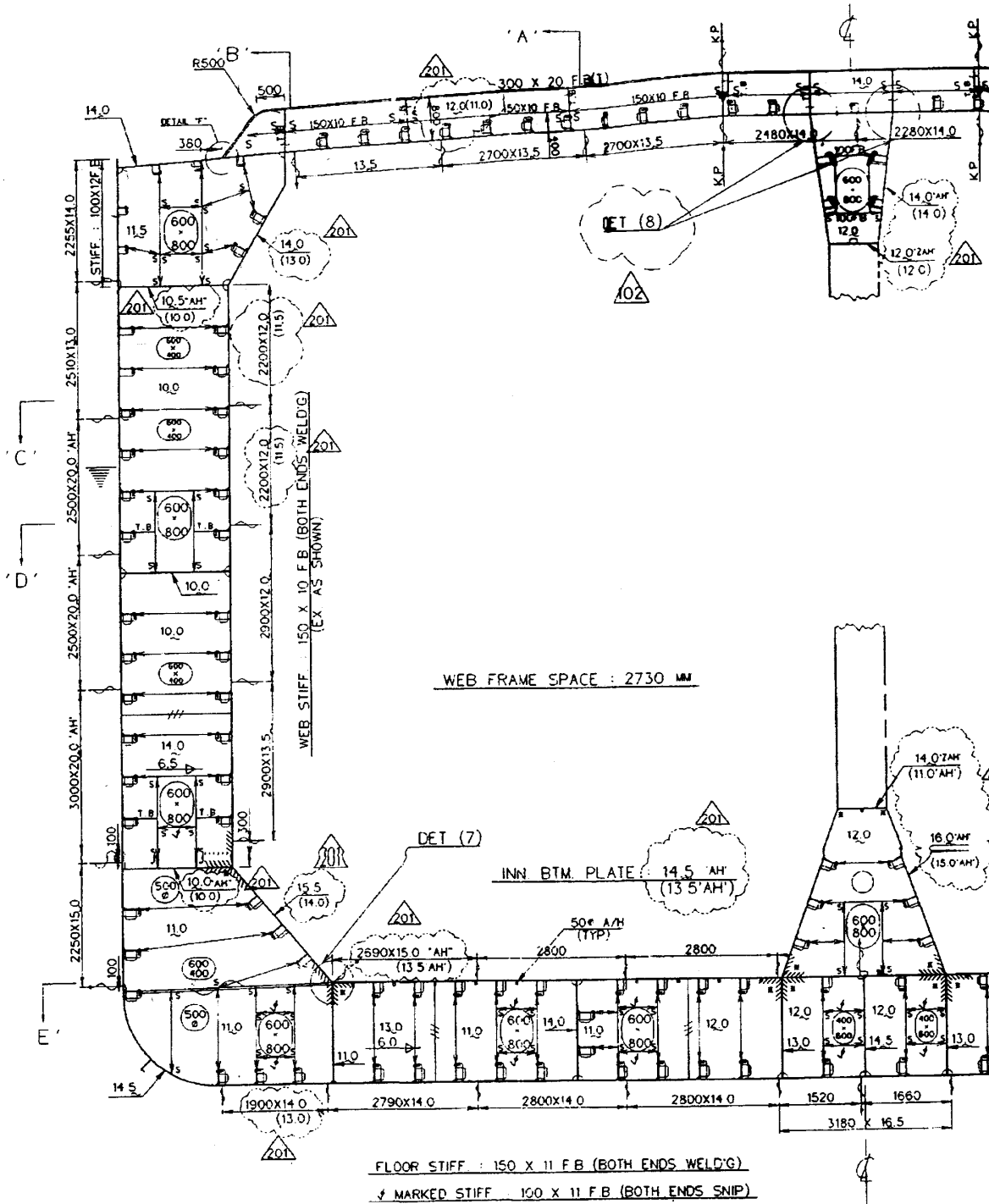
ORD FR SPACE 910 MM



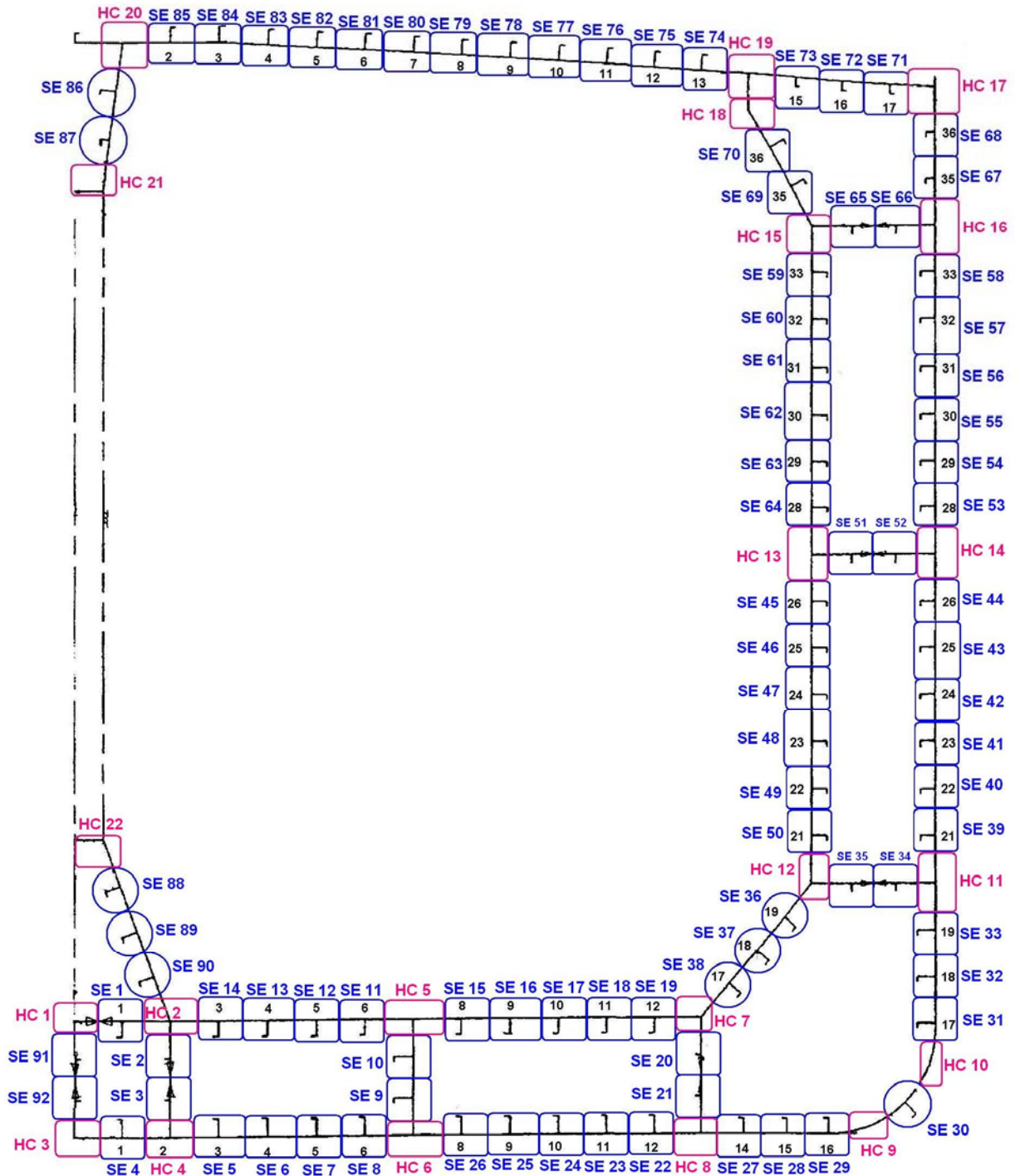
Σχήμα 6.2.1.1 Κανονικός νομέας

### TYPICAL WEB SECTION

\* MARK : NO SCALLOP  
 // MARK : FULL PENT. WELD'G  
 WITHOUT BACK GOUGING



Σχήμα 6.2.1.2 Ενισχυμένος νομέας



Σχήμα 6.2.1.3 Διακριτοποίηση της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία

Τέλος, για τον υπολογισμό της αρχικής θέσης του ουδέτερου άξονα παρουσιάζεται το φύλλο εργασίας του Excel.









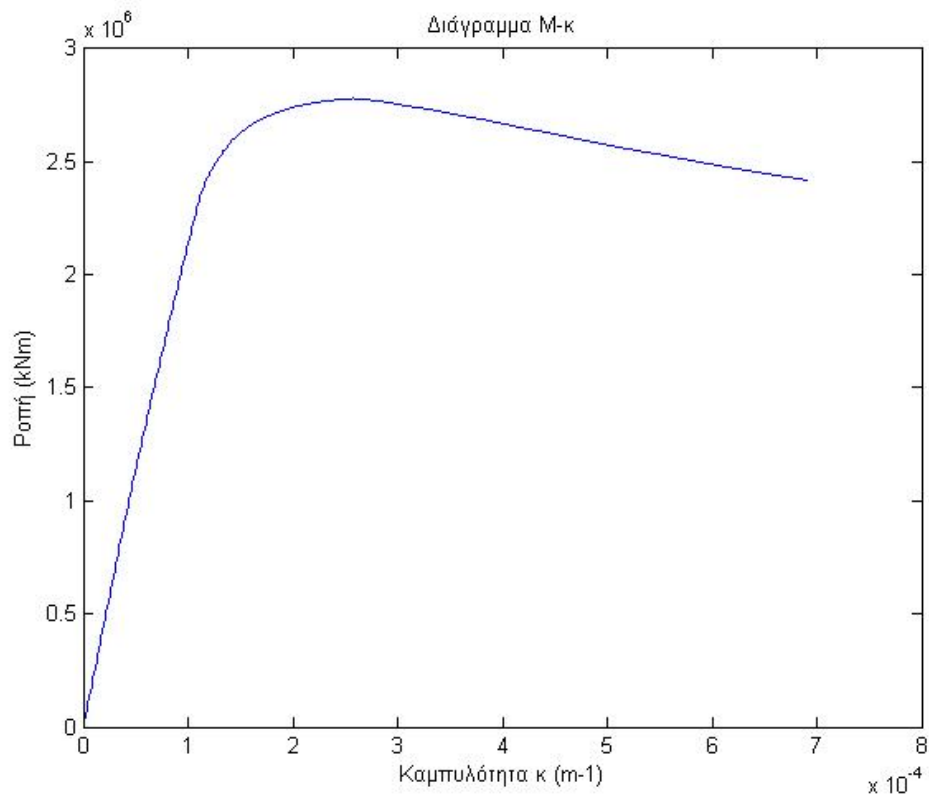
Τώρα είμαστε σε θέση να δημιουργήσουμε το αρχείο εισόδου για το 1<sup>ο</sup> πλοίο.

```
function [SE,HC,FB,lstf,Zna_ini,Zv_min_dk,Zv_min_kl,syd_dk,...
syd_kl,Iv_net50]=Ship_Data
SE = [ 234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811046; %SE01
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE04
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE05
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE06
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE07
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE08
284.0 9.5 90 14.5 650 12.5 245 0.595165; %SE09
284.0 9.5 90 14.5 650 12.5 245 1.245165; %SE10
234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE11
234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE12
234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE13
234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE14
234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE15
234.0 10.0 90 14.0 760 12.5 315 1.811076; %SE16
234.0 10.0 90 14.0 760 13.0 315 1.812420; %SE17
234.0 10.0 90 14.0 760 13.0 315 1.812420; %SE18
234.0 10.0 90 14.0 760 13.0 315 1.812420; %SE19
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE22
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE23
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE24
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE25
284.0 9.5 90 14.5 760 12.5 245 0.062025; %SE26
234.0 10.5 90 14.5 690 12.5 245 0.053889; %SE27
234.0 10.5 90 14.5 690 12.5 245 0.053889; %SE28
234.0 10.5 90 14.5 690 12.5 245 0.053889; %SE29
234.0 10.5 90 14.5 75 11.5 245 0.529077; %SE30
284.0 9.5 90 14.5 750 13.5 245 1.745846; %SE31
284.0 9.5 90 14.5 750 13.5 245 2.495846; %SE32
284.0 9.5 90 14.5 750 13.5 245 3.245846; %SE33
234.0 10.5 90 14.5 700 14.0 245 2.330415; %SE36
234.0 10.5 90 14.5 700 14.0 245 3.173905; %SE37
234.0 10.5 90 14.5 700 14.0 245 3.874387; %SE38
234.0 10.5 90 14.5 750 18.5 245 4.746662; %SE39
234.0 10.5 90 14.5 750 18.5 245 5.496662; %SE40
234.0 10.5 90 14.5 750 18.5 245 6.246662; %SE41
234.0 10.5 90 14.5 750 18.5 245 6.996662; %SE42
235.0 10.5 90 13.5 750 18.5 245 7.746877; %SE43
235.0 10.5 90 13.5 750 18.5 245 8.496877; %SE44
235.0 8.5 90 13.5 750 10.5 245 8.495080; %SE45
235.0 8.5 90 13.5 750 10.5 245 7.745080; %SE46
235.0 8.5 90 13.5 750 12.0 245 6.995528; %SE47
235.0 8.5 90 13.5 750 12.0 245 6.245528; %SE48
235.0 8.5 90 13.5 750 12.0 245 5.495528; %SE49
235.0 8.5 90 13.5 750 12.0 245 4.745528; %SE50
235.0 8.5 90 13.5 750 18.5 245 9.996792; %SE53
235.0 8.5 90 13.5 750 18.5 245 10.746792; %SE54
235.0 8.5 90 13.5 750 18.5 245 11.496792; %SE55
```

235.0	8.5	90	13.5	750	11.5	245	12.245388;	%SE56
235.0	8.5	90	13.5	750	11.5	245	13.097881;	%SE57
235.0	8.5	90	13.5	750	11.5	245	13.745388;	%SE58
235.0	8.5	90	13.5	750	10.5	245	13.745080;	%SE59
235.0	8.5	90	13.5	750	10.5	245	13.104412;	%SE60
235.0	8.5	90	13.5	750	10.5	245	12.245080;	%SE61
235.0	8.5	90	13.5	750	10.5	245	11.495080;	%SE62
235.0	8.5	90	13.5	750	10.5	245	10.745080;	%SE63
235.0	8.5	90	13.5	750	10.5	245	9.995080;	%SE64
138.0	10.5	90	10.5	730	11.5	245	15.226051;	%SE67
138.0	10.5	90	10.5	730	11.5	245	15.956051;	%SE68
234.0	10.5	90	14.5	700	12.5	245	15.157399;	%SE69
234.0	10.5	90	14.5	700	12.5	245	15.742671;	%SE70
138.0	10.0	90	10.0	750	12.0	245	16.719138;	%SE71
138.0	10.0	90	10.0	750	12.0	245	16.772604;	%SE72
138.0	10.0	90	10.0	750	12.0	245	16.825719;	%SE73
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	16.993553;	%SE74
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.046671;	%SE75
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.099787;	%SE76
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.152900;	%SE77
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.206021;	%SE78
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.259142;	%SE79
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.312255;	%SE80
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.365369;	%SE81
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.418490;	%SE82
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.471524;	%SE83
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.529658;	%SE84
186.0	7.0	90	12.0	760	11.5	245	17.529658;	%SE85
235.0	8.5	90	13.5	800	12.5	245	16.696864;	%SE86
138.0	10.5	90	10.5	800	12.5	245	15.896563;	%SE87
234.0	10.5	90	14.5	770	14.5	315	3.977217;	%SE88
234.0	10.5	90	14.5	770	14.5	315	3.255900;	%SE89
234.0	10.5	90	14.5	770	14.5	315	2.531668];	%SE90
HC = [	8325.0	245	1.795090;	%HC01				
	1824.5	245	1.946211;	%HC02				
	8515.0	245	0.061935;	%HC03				
	12662.5	245	0.039593	%HC04				
	12662.5	245	1.821098	%HC05				
	12937.5	245	0.041674	%HC06				
	12452.5	245	1.929529	%HC07				
	11675.0	245	0.036202	%HC08				
	16867.5	245	0.230000	%HC09				
	16867.5	245	1.000000	%HC10				
	14337.5	245	4.024520	%HC11				
	11737.5	245	3.993610	%HC12				
	10212.5	245	9.250000	%HC13				
	16212.5	245	9.250000	%HC14				
	10787.5	245	14.554491	%HC15				
	11350.0	245	14.502120	%HC16				
	9187.5	245	16.618367	%HC17				
	8437.5	245	16.216928	%HC18				
	12680.0	245	16.858728	%HC19				
	14120.0	245	17.429178	%HC20				
	9777.5	315	15.212276	%HC21				
	11270.0	315	4.567948];	%HC22				

```
FB = [ 150  9.5  650  11.5  245    1.250000;  
      150  9.5  650  11.5  245    0.600000;  
      150  9.5  650  11.5  245    1.250000;  
      150  9.5  650  11.5  245    0.600000;  
      150  9.5  700   8.5  245    3.985508;  
      150  9.5  700   8.5  245    3.985508;  
      150  9.5  700   8.5  245    9.235508;  
      150  9.5  700   8.5  245    9.235508;  
      150  9.5  700   9.0  245   14.486165;  
      150  9.5  700   9.0  245   14.486165;  
      150  9.5  650  11.5  245    1.250000;  
      150  9.5  650  11.5  245    0.600000];  
  
lstf=2.73;  
Zna_ini=7.164;  
Zv_min_kl=10.7241;  
Zv_min_dk=10.7241;  
syd_dk=245;  
syd_kl=245;  
Iv_net50=110.704;
```

Εκτελώντας τον κώδικα λαμβάνουμε την εξής καμπύλη Μ-κ

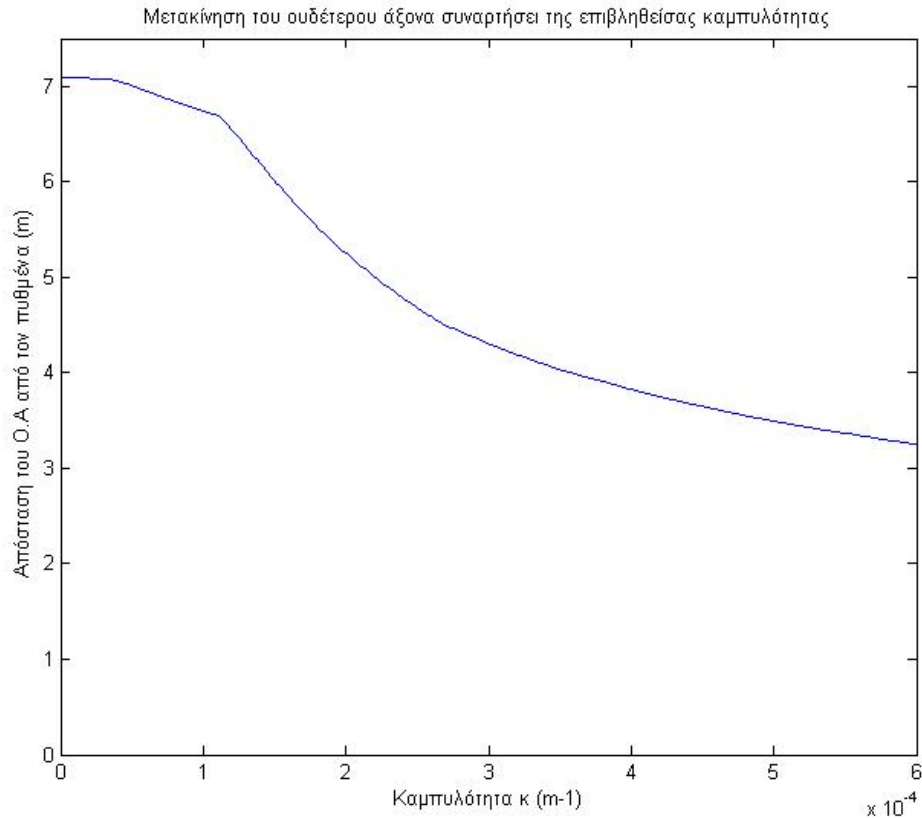


Σχήμα 6.2.1.4 Διάγραμμα ροπής- καμπυλότητας

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη αντοχή είναι:

$M_u = 2.768.931 \text{ KNm}$  με καμπυλότητα  $\kappa = 2.8111643e-04 \text{ m}^{-1}$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα



Σχήμα 6.2.1.5

Έλεγχος για το κριτήριο που προτείνει ο IACS (CSR 2008)

Το κριτήριο είναι το εξής:

$$\frac{M_u}{Y_u} \geq Y_{sw} M_{sw} + Y_{wv} M_{wv} \Rightarrow \frac{2.768.931}{1.1} \geq 1.0 \cdot 628.834 + 1.2 \cdot 1.334.075$$

$$2.517.210 \geq 2.229.724 \quad \boxed{OK}$$

Προφανώς το κριτήριο ικανοποιείται.

### 6.2.2. Δεξαμενόπλοιο Νο2

Το δεύτερο πλοίο που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του κώδικα είναι πάλι ένα δεξαμενόπλοιο (product oil tanker) με τις εξής κύριες διαστάσεις:

Μήκος (μεταξύ καθέτων)  $L_{BP}$ : **183.00m**

Πλάτος  $B$  : **32.2m**

Κοίλο  $D$ : **19.1m**

Βύθισμα  $T$  (design): **11.00m**

Βύθισμα  $T$  (scantling): **12.43m**

Συντελεστής γάστρας  $C_B$ : **0.815**

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της μέσης τομής του πλοίου (κανονικός νομέας, ενισχυμένος νομέας) αλλά και ένα σχήμα στο οποίο φαίνεται η διακριτοποίηση της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τομή του πλοίου διαμερίστηκε σε 108 τυπικά δομικά στοιχεία (συμπεριλαμβανομένου 13 ενισχυτικών flat bar) και σε 22 άκαμπτα γωνιακά στοιχεία.

#### Υπολογισμός απαιτούμενων βασικών μεγεθών

Συντελεστής υλικού  $k$  για το κατάστρωμα: **0.983**

Συντελεστής υλικού  $k$  για τον πυθμένα: **0.983**

Συντελεστής κυματισμού  $C_{wv-v}$  : **9.48**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req-dk}$  στο κατάστρωμα: **13.70m<sup>3</sup>**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req-kl}$  στον πυθμένα: **12.97m<sup>3</sup>**

Ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min-dk}$  στο κατάστρωμα: **13.70m<sup>3</sup>**

Ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min-dk}$  στον πυθμένα: **13.70m<sup>3</sup>**

Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-hog}$  : **1.583.731 kNm (hogging)**

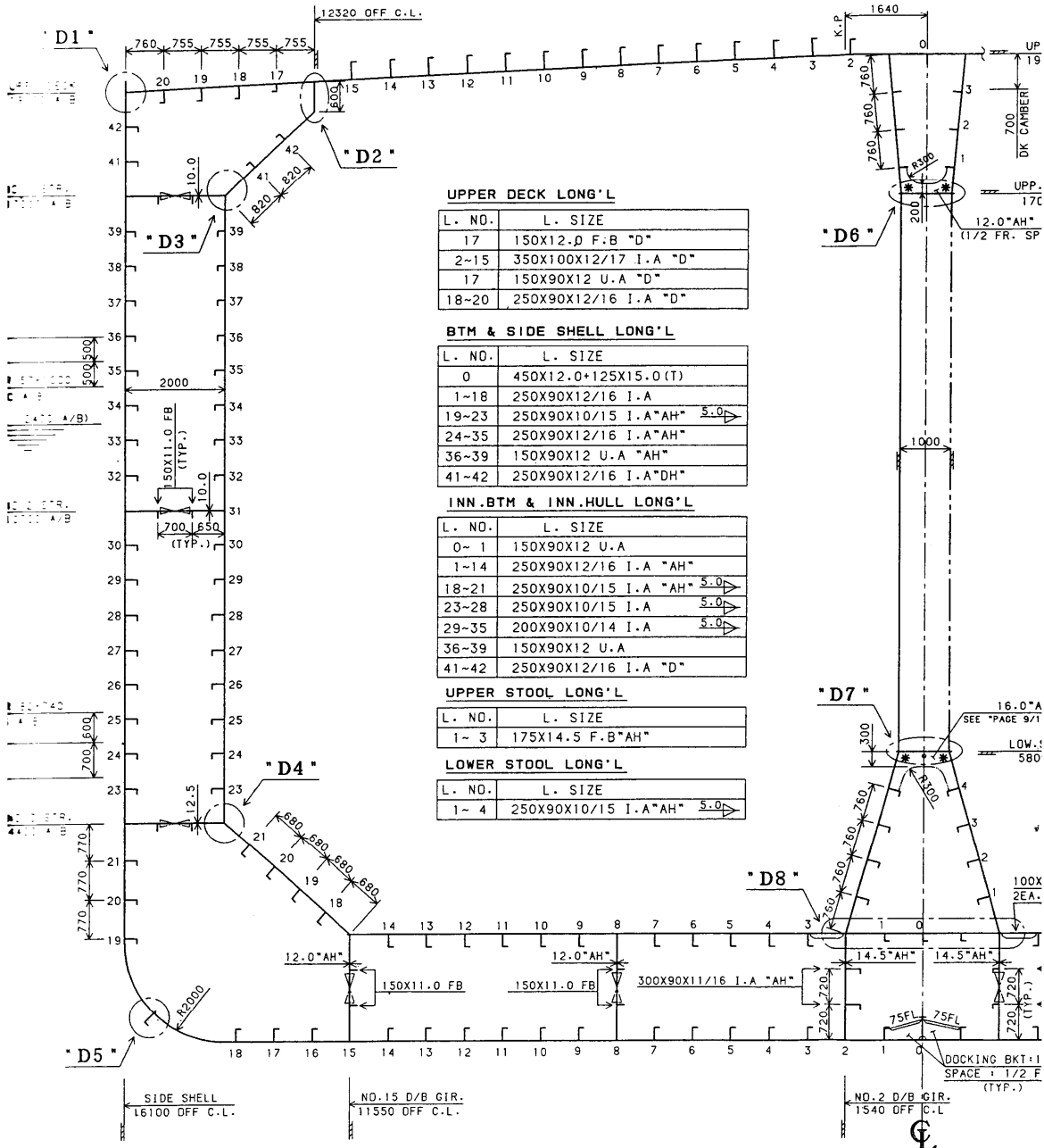
Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-sag} : -1.704.416 \text{ kNm (sagging)}$

Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-hog} : 1.005.000 \text{ kNm (hogging)}$

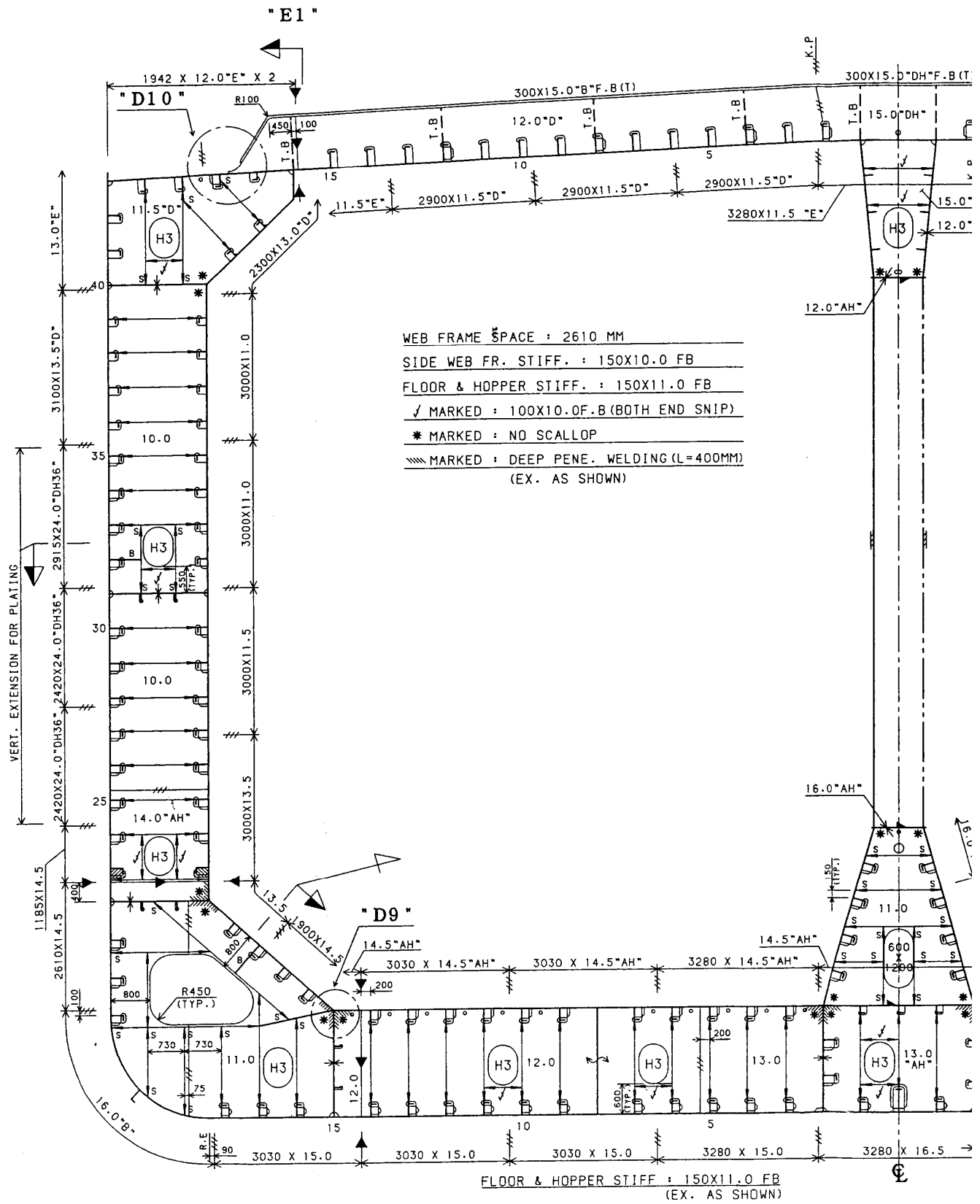
Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-sag} : -877.000 \text{ kNm (sagging)}$

UPPER DECK, INN. BTM & BOTTOM LONG'L SPACE : 770 MM  
SIDE SHELL & INN. BHD LONG'L SPACE : 700 MM

\* MARKED : NO SCALLOP  
(EX. AS SHOWN)



Σχήμα 6.2.2.1 Κανονικός νομέας

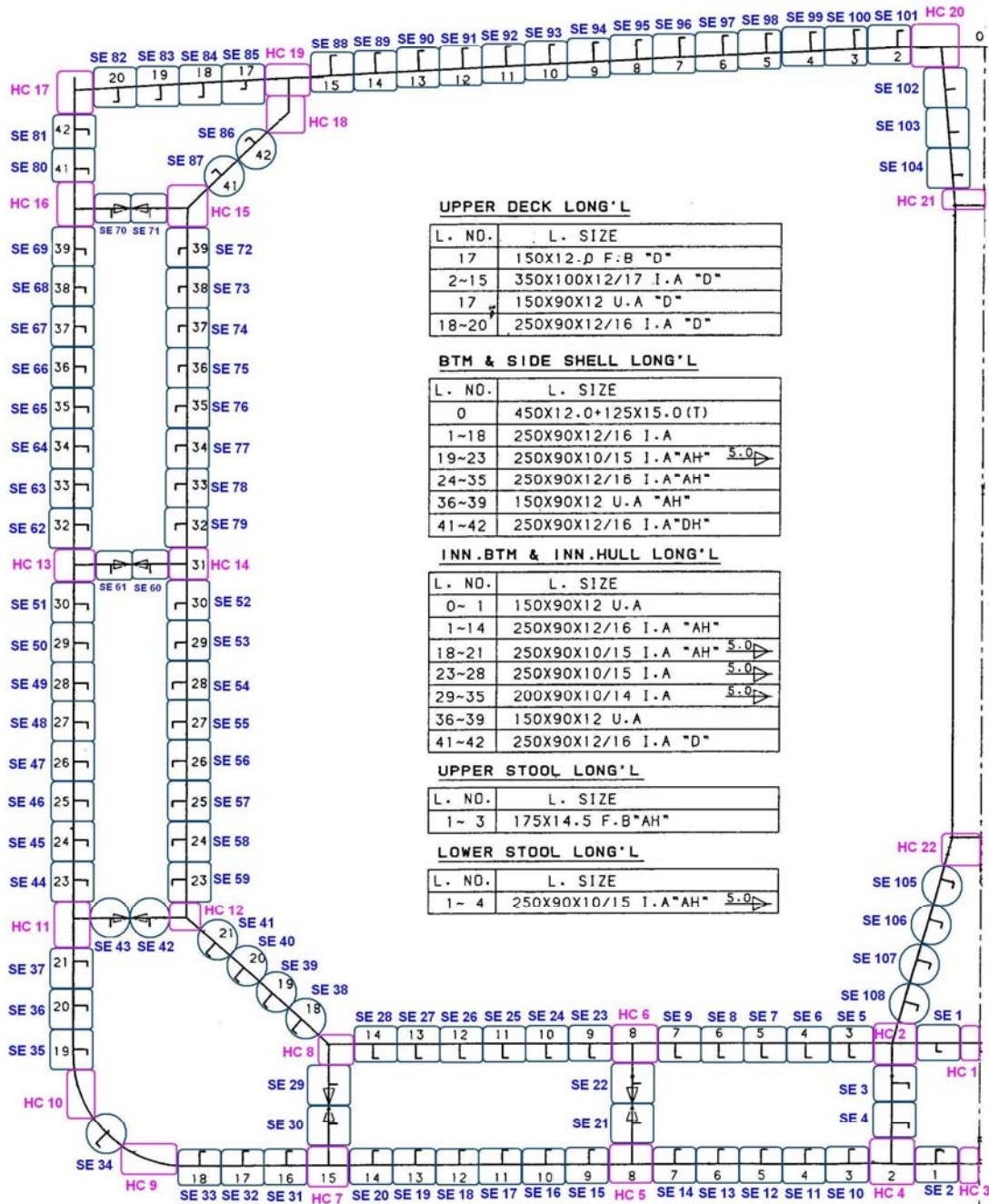


Σχήμα 6.2.2.2 Ενισχυμένος νομέας



UPPER DECK, INN. BTM & BOTTOM LONG'L SPACE : 770 MM  
SIDE SHELL & INN. BHD LONG'L SPACE : 700 MM

\* MARKED : NO SCALLOP  
(EX. AS SHOWN)



Σχήμα 6.2.2.3 Καθορισμός των δομικών στοιχείων.

Τέλος, για τον υπολογισμό της αρχικής θέσης του ουδέτερου άξονα παρουσιάζεται το αντίστοιχο φύλλο εργασίας του Excel.







241	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο06 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	0.052336912	19706.69838	3330	65909077.69	1303714680775.86	30687492.63
242	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο09 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	19950.01074	1500	29825916.11	697004392769.34	31471.7739
243	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο07 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	-0.052334567	19626.00703	3330	66023267.41	1309030620311.69	30687492.63
244	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο07 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	19990.30839	1500	29996464.09	699410704379.90	31471.7739
245	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο06 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	-0.052334567	19667.10560	3330	66167461.92	1314367207563.46	30687492.63
246	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο06 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	20030.60004	1500	30045912.07	601037007934.69	31471.7739
247	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο05 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	-0.052334567	19907.40433	3330	66291656.43	1319694000631.22	30687492.63
248	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο05 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	20070.9067	1500	30106360.04	604261943433.42	31471.7739
249	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο04 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	-0.052334567	19947.70299	3330	66425950.94	1325043145214.96	30687492.63
250	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο04 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	20111.20535	1500	30166808.02	606680070976.39	31471.7739
251	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο03 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	-0.052334567	19990.00164	3330	66500045.46	1330402297614.66	30687492.63
252	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο03 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	20161.594	1500	30227266	609124670263.47	31471.7739
253	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο02 350x12 (καρμύς)	12	333	4	10	333	93	0.998629607	-0.052334567	19990.00164	3330	66560045.46	1330402297614.66	30687492.63
254	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο02 100x17 (φιδόνισ)	17	100	4	15	100	3	0.052336912	0.998629637	20191.80265	1500	30287703.98	611563341594.69	31471.7739
255	FLAT BAR ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ ΦΡΑΚΤΗΣ Νο1 175x14.5	14.5	175	3	13	175	3	0.052336912	0.998629637	17520	2275	39688000	698312160000.00	47854.70776
256	FLAT BAR ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ ΦΡΑΚΤΗΣ Νο2 175x14.5	14.5	175	3	13	175	3	0.052336912	0.998629637	18280	2275	41587000	760210360000.00	47854.70776
257	FLAT BAR ΑΝΩ ΒΑΣΗΣ ΦΡΑΚΤΗΣ Νο3 175x14.5	14.5	175	3	13	175	3	0.052336912	0.998629637	19040	2275	43316000	824736640000.00	47854.70776
											1588724.5	13030897087	191492484648674.00	368431671789.94
											Ολική διατομή (mm <sup>2</sup> ) Σ α <sup>2</sup> h <sup>2</sup> (mm <sup>2</sup> ) Σ α <sup>3</sup> h <sup>3</sup> h <sup>2</sup> (mm <sup>3</sup> ) Σ I (mm <sup>4</sup> )			

Απόσταση ΟΑ από πυθμένα: 8.202m

Ροπή αδράνειας μέσης τομής Iv-net50: 169.96m<sup>4</sup>

Ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα: 15.596 m<sup>3</sup>

Ροπή αντίστασης στον πυθμένα: 20.72 m<sup>3</sup>

Το αρχείο εισόδου για το 2<sup>ο</sup> πλοίο είναι το εξής:

```
function [SE,HC,FB,lstf,Zna_ini,Zv_min_dk,Zv_min_kl,syd_dk,...
        syd_kl,Iv_net50]=Ship_Data

SE = [ 234.0 10.0 90 12.5 770 12.5 315 2.106242; %SE01
      234.0 10.5 90 14.5 770 15.0 245 0.045622; %SE02
      284.0 9.5 90 13.0 720 13.0 315 0.724182; %SE03
      284.0 9.5 90 14.5 760 13.0 315 1.444182; %SE04
      234.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE05
      234.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE06
      234.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE07
      234.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE08
      234.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE09
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE10
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE11
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE12
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE13
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE14
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE15
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE16
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE17
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE18
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE19
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE20
      284.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE23
      284.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE24
      284.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE25
      284.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE26
      284.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE27
      284.0 10.0 90 14.0 770 12.5 315 2.106242; %SE28
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE31
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE32
      234.0 10.5 90 14.5 770 13.5 245 0.048120; %SE33
      234.0 10.5 90 14.5 80 12.5 245 0.576203; %SE34
      235.0 8.5 90 13.5 770 13.0 245 2.085865; %SE35
      235.0 8.5 90 13.5 770 13.0 245 2.855865; %SE36
      235.0 8.5 90 13.5 770 13.0 245 3.625865; %SE37
      235.0 8.5 90 13.5 680 13.0 245 2.494567; %SE38
      235.0 8.5 90 13.5 680 13.0 245 2.960931; %SE39
      235.0 8.5 90 13.5 680 12.0 245 3.394965; %SE40
      235.0 8.5 90 13.5 680 12.0 245 3.839167; %SE41
      235.0 8.5 90 13.5 700 13.0 245 5.095559; %SE44
      234.0 10.5 90 14.5 700 13.0 245 5.795434; %SE45
      234.0 10.5 90 14.5 700 22.5 315 6.496990; %SE46
      234.0 10.5 90 14.5 700 22.5 315 7.196990; %SE47
      234.0 10.5 90 14.5 700 22.5 315 7.896990; %SE48
      234.0 10.5 90 14.5 700 22.5 315 8.596990; %SE49
      234.0 10.5 90 14.5 700 22.5 315 9.296990; %SE50
      234.0 10.5 90 14.5 700 22.5 315 9.996990; %SE51
      186.0 10.5 90 12.5 700 10.0 245 9.994784; %SE52
      186.0 10.5 90 12.5 700 10.0 245 9.294784; %SE53
      235.0 8.5 90 13.5 700 10.0 245 8.594646; %SE54
      235.0 8.5 90 13.5 700 12.0 245 7.895292; %SE55
      235.0 8.5 90 13.5 700 12.0 245 7.195292; %SE56
      235.0 8.5 90 13.5 700 12.0 245 6.495292; %SE57
      235.0 8.5 90 13.5 700 12.0 245 5.795292; %SE58
```

235.0	8.5	90	13.5	700	12.0	245	5.095292;	%SE59
234.0	10.5	90	14.5	700	22.5	315	11.396990;	%SE62
234.0	10.5	90	14.5	700	22.5	315	12.096990;	%SE63
234.0	10.5	90	14.5	700	22.5	315	12.796990;	%SE64
234.0	10.5	90	14.5	700	22.5	315	13.496990;	%SE65
138.0	10.5	90	10.5	700	12.0	245	14.196990;	%SE66
138.0	10.5	90	10.5	700	12.0	245	14.896990;	%SE67
138.0	10.5	90	10.5	700	12.0	245	15.596990;	%SE68
138.0	10.5	90	10.5	700	12.0	245	16.296990;	%SE69
138.0	10.5	90	10.5	700	9.5	245	16.295990;	%SE72
138.0	10.5	90	10.5	700	9.5	245	15.595298;	%SE73
138.0	10.5	90	10.5	700	9.5	245	14.895298;	%SE74
138.0	10.5	90	10.5	700	9.5	245	14.195298;	%SE75
186.0	8.5	90	12.5	700	9.5	245	13.494589;	%SE76
186.0	8.5	90	12.5	700	9.5	245	12.794589;	%SE77
186.0	8.5	90	12.5	700	9.5	245	12.094589;	%SE78
186.0	8.5	90	12.5	700	9.5	245	11.394589;	%SE79
234.0	10.5	90	14.5	700	11.5	245	17.695028;	%SE80
234.0	10.5	90	14.5	700	11.5	245	18.395028;	%SE81
234.0	10.0	90	14.0	760	10.0	245	19.088810;	%SE82
234.0	10.0	90	14.0	755	10.0	245	19.128095;	%SE83
234.0	10.0	90	14.0	755	10.0	245	19.167609;	%SE84
138.0	10.0	90	10.0	755	10.0	245	19.220303;	%SE85
234.0	10.5	90	14.5	820	11.5	245	18.395028;	%SE86
234.0	10.5	90	14.5	820	11.5	245	17.791996;	%SE87
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.424557;	%SE88
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.464856;	%SE89
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.500177;	%SE90
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.545453;	%SE91
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.585751;	%SE92
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.626050;	%SE93
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.666349;	%SE94
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.706648;	%SE95
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.746946;	%SE96
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.787245;	%SE97
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.827462;	%SE98
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.867842;	%SE99
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.894961;	%SE100
333.0	12.0	100	15.0	770	9.5	245	19.899938;	%SE101
235.0	8.5	90	13.5	760	14.5	315	5.150222;	%SE105
235.0	8.5	90	13.5	760	15.5	315	4.398394;	%SE106
235.0	8.5	90	13.5	760	15.5	315	3.644761;	%SE107
235.0	8.5	90	13.5	760	15.5	315	2.891129];	%SE108
HC = [	5005.0	315	2.150000;	%HC01				
	20450.0	245	2.165787;	%HC02				
	5775.0	245	0.008250;	%HC03				
	15652.5	245	0.059353	%HC04				
	14175.0	245	0.053500	%HC05				
	13685.5	315	2.103005	%HC06				
	14175.0	245	0.053500	%HC07				
	13100.0	245	2.137775	%HC08				
	22199.5	245	0.020000	%HC09				
	22199.5	245	1.080000	%HC10				
	12855.0	245	4.386992	%HC11				
	11580.0	245	4.402165	%HC12				
	18300.0	245	10.700000	%HC13				

```

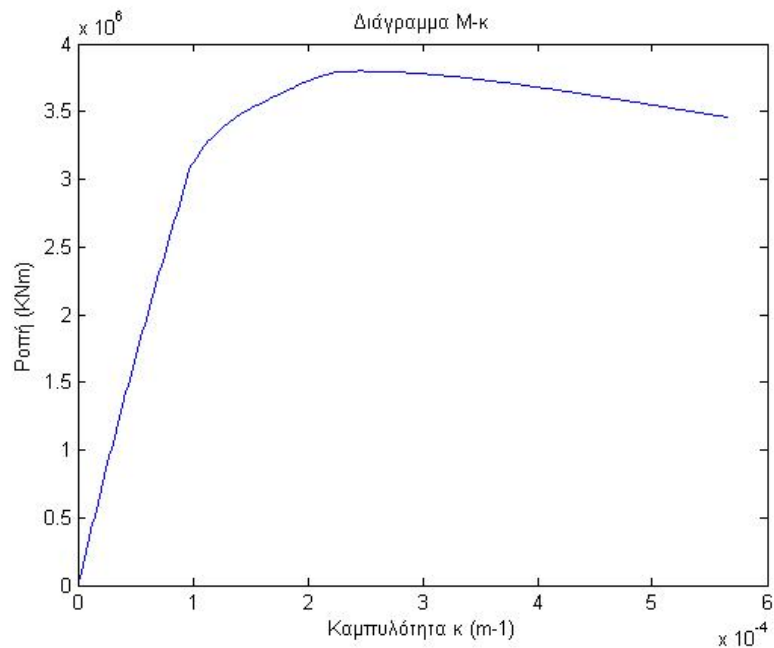
9375.0 245 10.703267 %HC14
10590.0 245 17.062391 %HC15
10775.0 245 16.997158 %HC16
9780.0 245 19.182306 %HC17
8165.5 245 18.525088 %HC18
10882.5 245 19.182306 %HC19
14120.0 245 19.749333 %HC20
9240.0 245 17.082045 %HC21
12760.0 245 5.717954]; %HC22

FB = [ 150 9.5 720 10.5 245 1.335937;
150 9.5 720 11.5 245 1.335937;
150 9.5 720 11.5 245 1.335937;
150 9.5 720 11.5 245 1.335937;
150 9.5 700 11.0 245 4.388288;
150 9.5 700 11.0 245 4.388288;
150 9.5 700 8.5 245 10.685508;
150 9.5 700 8.5 245 10.685508;
150 9.5 700 8.5 245 16.985508;
150 9.5 700 8.5 245 16.985508;
175 13.0 760 11.5 245 19.040000;
175 13.0 760 11.5 245 18.280000;
175 13.0 760 11.5 245 18.280000];

lstf=2.61;
Zna_ini=8.202;
Zv_min_kl=20.72;
Zv_min_dk=15.59;
syd_dk=245;
syd_kl=245;
Iv_net50=169.96;

```

Εκτελώντας τον κώδικα λαμβάνουμε την εξής καμπύλη Μ-κ

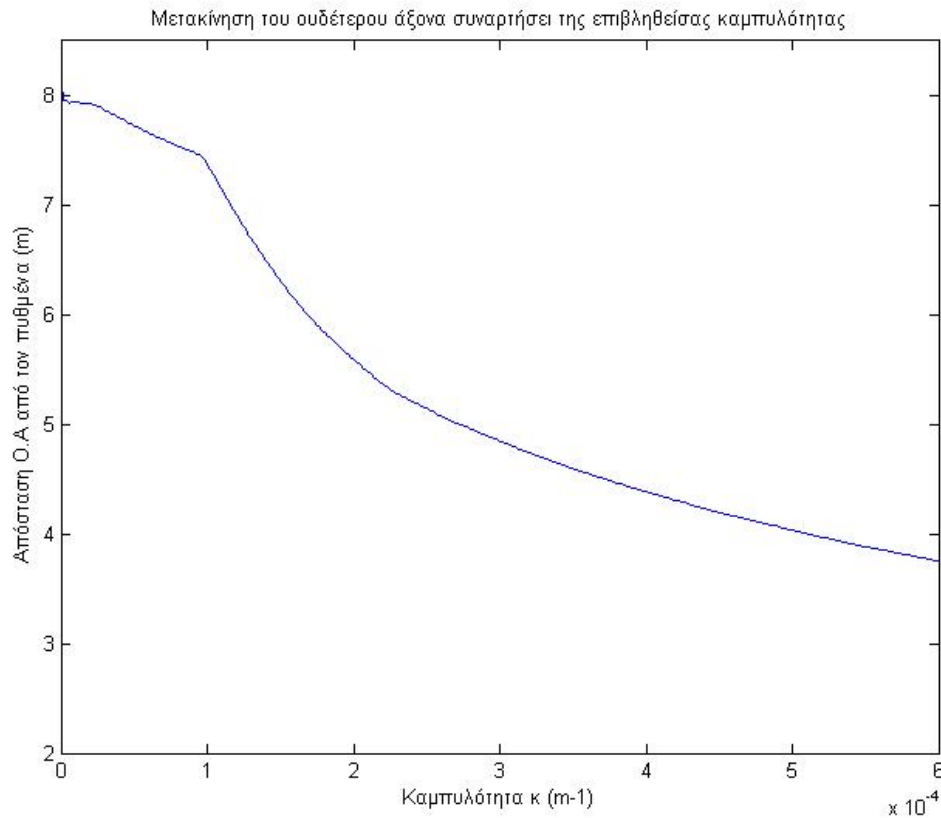


Σχήμα 6.2.2.4



Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη αντοχή είναι:  
 $M_u = 3.798.758 \text{ KNm}$  με καμπυλότητα  $\kappa = 2.49385e-04 \text{ m}^{-1}$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα



Σχήμα 6.2.2.5

### Έλεγχος για το κριτήριο που προτείνει ο IACS (CSR 2008)

Το κριτήριο είναι το εξής:

$$\frac{M_u}{Y_u} \geq Y_{sw} M_{sw} + Y_{wv} M_{wv} \Rightarrow \frac{3.798.758}{1.1} \geq 1.0 \cdot 877.000 + 1.2 \cdot 1.704.416$$

$$3.453.416 \geq 2.922.299 \quad \boxed{OK}$$

Προφανώς το κριτήριο ικανοποιείται.

### 6.2.3. Δεξαμενόπλοιο Νο3

Το τρίτο πλοίο που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του κώδικα είναι πάλι ένα δεξαμενόπλοιο (product oil tanker) με τις εξής κύριες διαστάσεις:

Μήκος (μεταξύ καθέτων)  $L_{BP}$ : **205.00m**

Πλάτος  $B$  : **37.0m**

Κοίλο  $D$ : **18.9m**

Βύθισμα  $T$  (design): **12.80m**

Βύθισμα  $T$  (scantling): **14.00m**

Συντελεστής γάστρας  $C_B$ : **0.84**

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της μέσης τομής του πλοίου (κανονικός νομέας, ενισχυμένος νομέας) αλλά και ένα σχήμα στο οποίο φαίνεται η διακριτοποίηση της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τομή του πλοίου διαμερίστηκε σε 107 τυπικά δομικά στοιχεία (συμπεριλαμβανομένου 26 ενισχυτικών flat bar) και σε 19 άκαμπτα γωνιακά στοιχεία.

#### Υπολογισμός απαιτούμενων βασικών μεγεθών

Συντελεστής υλικού  $k$  για το κατάστρωμα: **0.983**

Συντελεστής υλικού  $k$  για τον πυθμένα: **0.78**

Συντελεστής κυματισμού  $C_{wv-v}$  : **9.824**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req-dk}$  στο κατάστρωμα: **20.80m<sup>3</sup>**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{v-req-kl}$  στον πυθμένα: **15.63m<sup>3</sup>**

Ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min-dk}$  στο κατάστρωμα: **20.80m<sup>3</sup>**

Ελάχιστη ροπή αντίστασης  $Z_{v-min-kl}$  στον πυθμένα: **16.51m<sup>3</sup>**

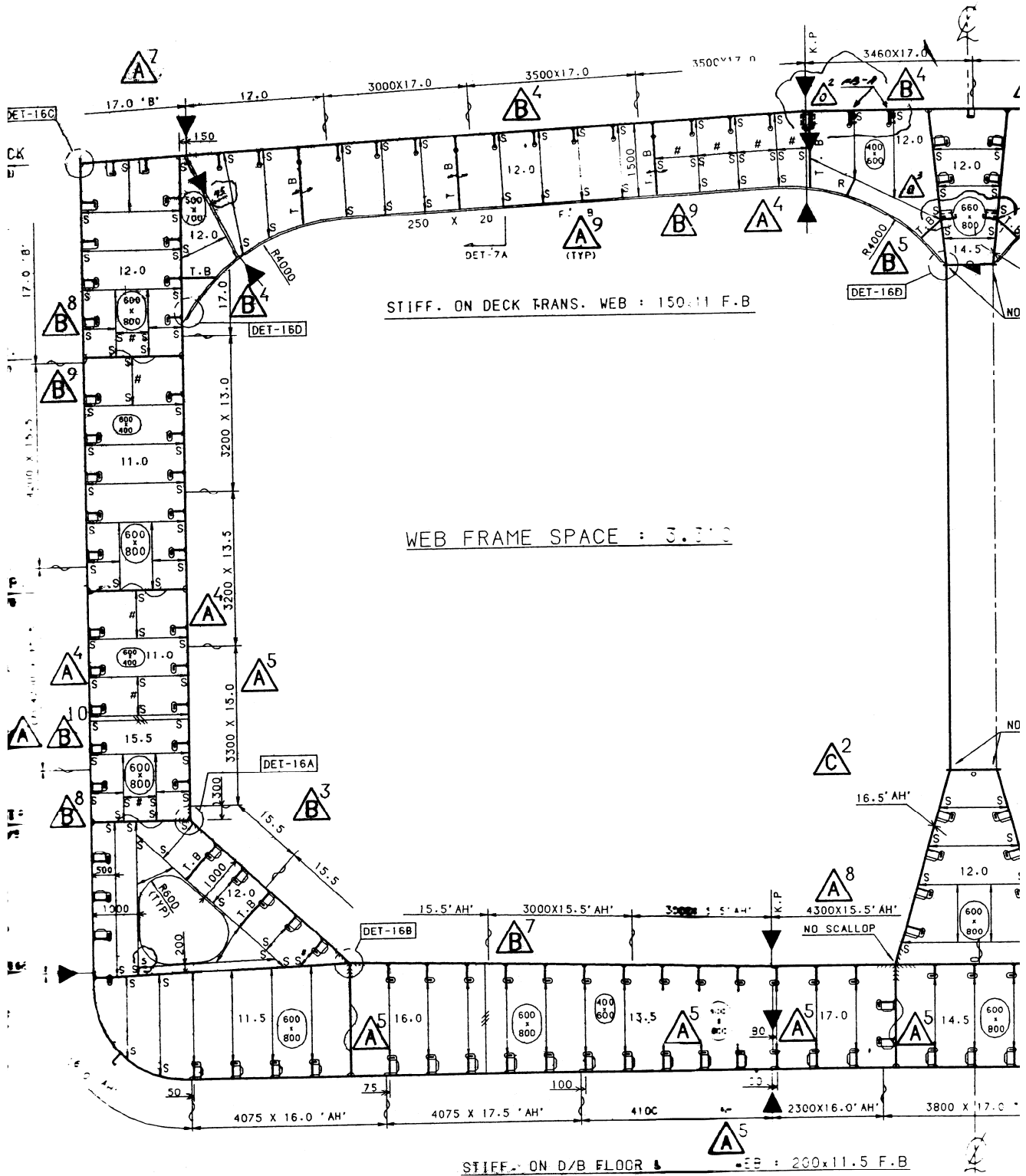
Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-hog}$  : **2.437.997 kNm (hogging)**

Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-sag}$  : **-2.587.698 kNm (sagging)**

Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-hog}$  : **1.644.000 kNm (hogging)**

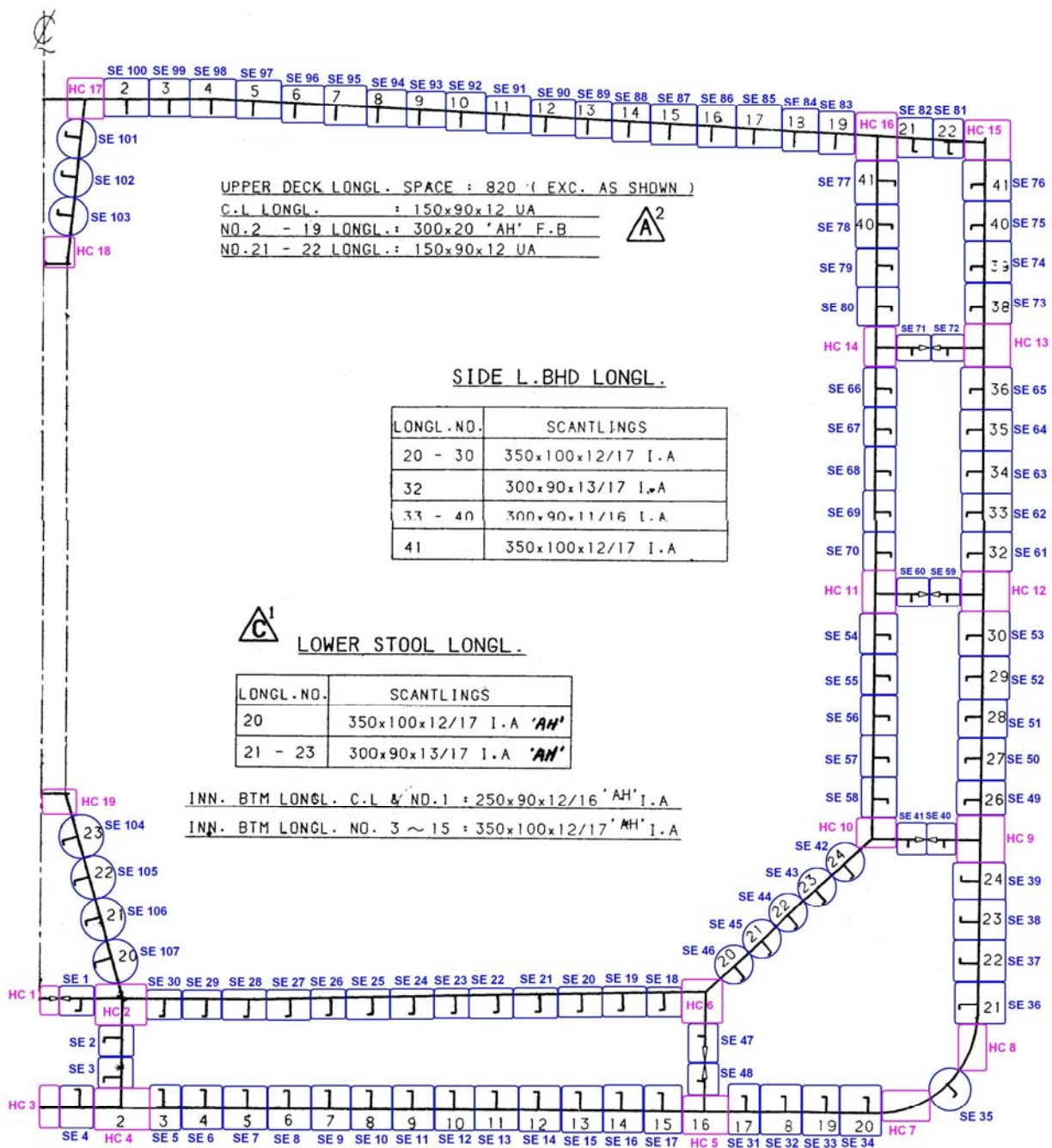


# WEB FRAME SECTION



Σχήμα 6.2.3.2 Ενισχυμένος νομέας

## ORDINARY FRAME SECTION



Σχήμα 6.2.3.3 Καθορισμός των δομικών στοιχείων

Τέλος, για τον υπολογισμό της αρχικής θέσης του ουδέτερου άξονα παρουσιάζεται το αντίστοιχο φύλλο εργασίας του Excel.









Απόσταση ΟΑ από πυθμένα: 8.602m

Ροπή αδράνειας μέσης τομής Iv-net50: 225.17m<sup>4</sup>

Ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα: 21.87 m<sup>3</sup>

Ροπή αντίστασης στον πυθμένα: 26.17 m<sup>3</sup>

Το αρχείο εισόδου για το 3<sup>ο</sup> πλοίο διαμορφώνεται ως εξής:

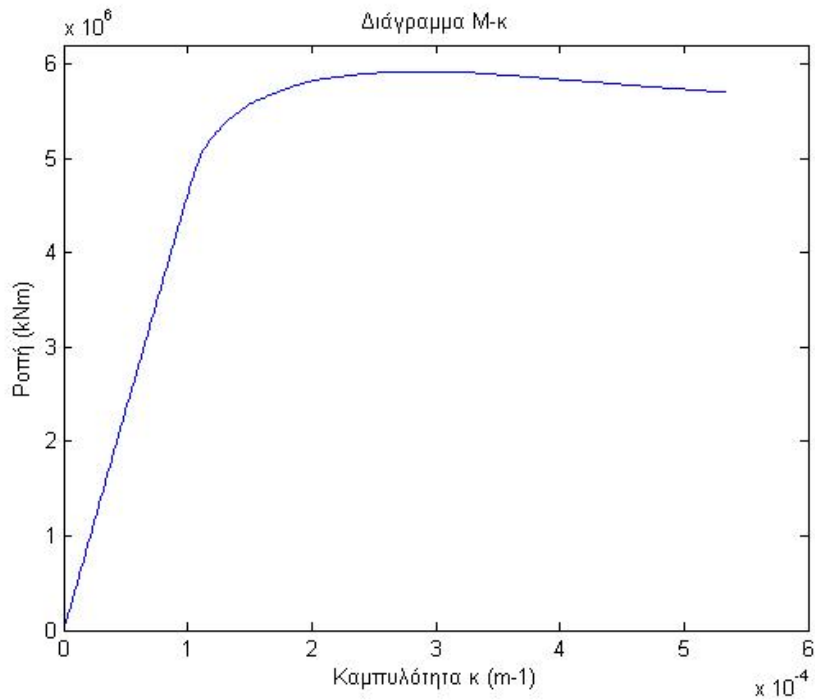
```
function [SE,HC,FB,lstf,Zna_ini,Zv_min_dk,Zv_min_kl,syd_dk,...
        syd_kl,Iv_net50]=Ship_Data

SE = [ 234.0 10.0 90 14.0 820 13.5 315 2.060552; %SE01
      333.0 10.5 100 15.5 755 13.5 315 1.334914; %SE02
      333.0 10.5 100 15.5 755 13.5 315 0.579914; %SE03
      283.0 11.5 90 15.5 820 15.5 315 0.056176; %SE04
      283.0 11.5 90 15.5 820 15.5 315 0.056176; %SE05
      283.0 11.5 90 15.5 820 15.5 315 0.056176; %SE06
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.5 315 0.054398; %SE07
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.5 315 0.054398; %SE08
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.5 315 0.054398; %SE09
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.5 315 0.054398; %SE10
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.5 315 0.054398; %SE11
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.5 315 0.054398; %SE12
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.0 315 0.055065; %SE13
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.0 315 0.055065; %SE14
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.0 315 0.055065; %SE15
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.0 315 0.055065; %SE16
      283.0 11.5 90 15.5 820 16.0 315 0.055065; %SE17
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE18
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE19
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE20
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE21
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE22
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE23
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE24
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE25
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE26
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE27
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE28
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE29
      333.0 10.5 100 15.5 820 13.5 315 2.032735; %SE30
      283.0 11.5 90 15.5 820 14.5 315 0.058037; %SE31
      283.0 11.5 90 15.5 820 14.5 315 0.058037; %SE32
      283.0 11.5 90 15.5 820 14.5 315 0.058037; %SE33
      283.0 11.5 90 15.5 820 14.5 315 0.058037; %SE34
      283.0 11.5 90 15.5 75 14.5 315 0.455175; %SE35
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 2.095230 %SE36
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 2.895230 %SE37
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 3.695230 %SE38
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 4.495230 %SE39
      333.0 10.5 100 15.5 740 14.0 245 4.519437; %SE42
      333.0 10.5 100 15.5 740 14.0 245 4.024281; %SE43
      333.0 10.5 100 15.5 740 14.0 245 3.529124; %SE44
      333.0 10.5 100 15.5 740 14.0 245 3.033968; %SE45
      333.0 10.5 100 15.5 740 14.0 245 2.538812; %SE46
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 6.095230; %SE49
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 6.895230; %SE50
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 7.695230; %SE51
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 8.495230; %SE52
      333.0 10.5 100 15.5 800 14.0 245 9.295230; %SE53
      333.0 10.5 100 15.5 800 12.0 245 9.294708; %SE54
      333.0 10.5 100 15.5 800 13.5 245 8.495109; %SE55
      333.0 10.5 100 15.5 800 13.5 245 7.695109; %SE56
```

333.0	10.5	100	15.5	800	13.5	245	6.895109;	%SE57
333.0	10.5	100	15.5	800	13.5	245	6.095109;	%SE58
283.0	11.5	90	15.5	800	14.0	245	10.896039;	%SE61
284.0	14.5	90	14.5	800	14.0	245	11.696138;	%SE62
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	12.496138;	%SE63
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	13.296138;	%SE64
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	12.496138;	%SE65
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	12.496138;	%SE66
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	13.496138;	%SE67
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	12.496138;	%SE68
284.0	9.5	90	14.5	800	14.0	245	11.696138;	%SE69
283.0	11.5	90	15.5	800	14.0	245	10.896138;	%SE70
284.0	9.5	90	14.5	800	15.5	245	15.696420;	%SE73
284.0	9.5	90	14.5	800	15.5	245	16.496420;	%SE74
284.0	9.5	90	14.5	800	15.5	245	17.296420;	%SE75
333.0	10.5	100	15.5	800	15.5	245	18.095550;	%SE76
333.0	10.5	100	15.5	800	15.5	245	18.095550;	%SE77
284.0	9.5	90	14.5	800	15.5	245	17.296420;	%SE78
284.0	9.5	90	14.5	800	15.5	245	16.496420;	%SE79
284.0	9.5	90	14.5	800	15.5	245	15.696420;	%SE80
138.0	10.5	90	10.5	700	15.5	245	18.921527;	%SE81
138.0	10.5	90	10.5	700	15.5	245	18.960602;	%SE82
284.0	11.0	90	14.5	760	15.0	245	18.493710;	%SE101
284.0	11.0	90	14.5	760	15.0	245	18.183710;	%SE102
284.0	11.0	90	14.5	760	15.0	245	17.416290;	%SE103
283.0	11.5	90	15.5	820	15.0	315	5.251598;	%SE104
333.0	11.5	90	15.5	820	15.0	315	4.458883;	%SE105
283.0	11.5	90	15.5	820	15.0	315	3.667480;	%SE106
283.0	11.5	90	15.5	820	15.0	315	2.872716];	%SE107
HC = [	5535.00	315	2.100000				%HC01	
	22383.75	245	2.110281				%HC02	
	6355.00	245	0.008500				%HC03	
	16658.75	315	0.044944				%HC04	
	13622.50	315	0.019033				%HC05	
	13627.50	315	2.078183				%HC06	
	21097.50	315	0.200000				%HC07	
	21097.50	315	1.050000				%HC08	
	14350.50	245	5.300000				%HC09	
	13730.00	245	5.245481				%HC10	
	12750.00	245	10.100000				%HC11	
	14350.00	245	10.100000				%HC12	
	14950.00	245	14.908027				%HC13	
	13950.00	245	14.922939				%HC14	
	11350.00	245	18.797137				%HC15	
	18134.75	245	18.797137				%HC16	
	17430.00	245	19.644079				%HC17	
	11370.00	245	16.585726				%HC18	
	12390.00	315	5.998244];				%HC19	
FB = [	150	9.0	855	9.0	245	5.288806;		
	150	9.0	855	9.0	245	5.288806;		
	150	9.0	855	11.0	245	1.440000;		
	150	9.0	855	11.0	245	0.058500;		
	150	9.0	855	9.0	245	10.088806;		
	150	9.0	855	9.0	245	10.088806;		

```
150 9.0 855 9.0 245 14.888806;  
150 9.0 855 9.0 245 14.888806;  
300 18.0 820 15.0 245 19.017011;  
300 18.0 820 15.0 245 19.062784;  
300 18.0 820 15.0 245 19.108558;  
300 18.0 820 15.0 245 19.154332;  
300 18.0 820 15.0 245 19.200105;  
300 18.0 820 15.0 245 19.245879;  
300 18.0 820 15.0 245 19.291652;  
300 18.0 820 15.0 245 19.337426;  
300 18.0 820 15.0 245 19.383199;  
300 18.0 820 15.0 245 19.428973;  
300 18.0 820 15.0 245 19.474747;  
300 18.0 820 15.0 245 19.520520;  
300 18.0 820 15.0 245 19.566294;  
300 18.0 820 15.0 245 19.612070;  
300 18.0 820 15.0 245 19.657841;  
300 18.0 820 15.0 245 19.654237;  
300 18.0 820 15.0 245 19.654237;  
300 18.0 820 15.0 245 19.654237];  
  
lstf=3.31;  
Zna_ini=8.603;  
Zv_min_kl=26.17;  
Zv_min_dk=21.87;  
syd_dk=245;  
syd_kl=315;  
Iv_net50=225.17;
```

Εκτελώντας τον κώδικα λαμβάνουμε την εξής καμπύλη M-κ

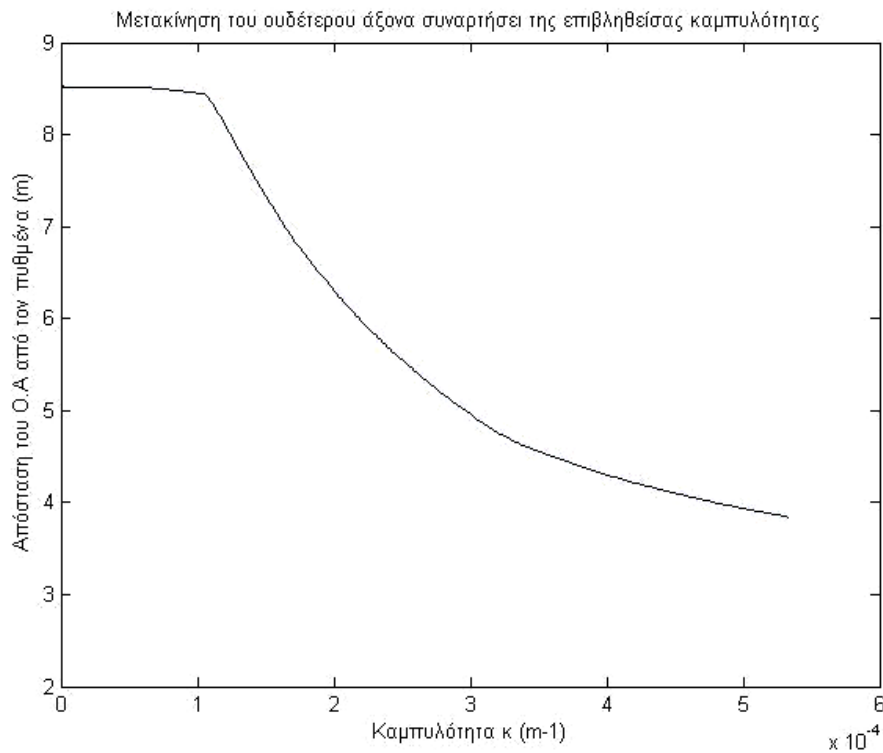


Σχήμα 6.2.3.4

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη αντοχή είναι:

$M_u = 5.915.608 \text{ KNm}$  με καμπυλότητα  $\kappa = 2.861293e-04 \text{ m}^{-1}$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα



Σχήμα 6.2.3.5

Έλεγχος για το κριτήριο που προτείνει ο IACS (CSR 2008)

Το κριτήριο είναι το εξής:

$$\frac{M_u}{Y_u} \geq Y_{sw} M_{sw} + Y_{wv} M_{wv} \Rightarrow \frac{5.915.608}{1.1} \geq 1.0 \cdot 1.550.000 + 1.2 \cdot 2.587.698$$
$$5.378.825 \geq 4.655.238 \quad \boxed{OK}$$

Προφανώς το κριτήριο ικανοποιείται.

## 6.3 Εφαρμογή του κώδικα σε πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην

Για την εκτίμηση της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής πλοίων μεταφοράς φορτίου χύδην έγιναν κάποιες τροποποιήσεις στον κώδικα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο προκειμένου να είναι εναρμονισμένος με τους κοινούς δομικούς κανονισμούς του 2008 για πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην (CSR Bulk Carriers 2008). Ο ακριβής κώδικας παρουσιάζεται στο παράρτημα Β.

### 6.3.1. Bulk Carrier No1

Το πρώτο πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του κώδικα παρουσιάζεται παρακάτω και έχει τις εξής κύριες διαστάσεις:

Μήκος (μεταξύ καθέτων)  $L_{BP}$ : **179.062m**

Πλάτος  $B$  : **30.50m**

Κοίλο  $D$ : **15.8m**

Βύθισμα  $T$  (design): **10.70m**

Βύθισμα  $T$  (scantling): **11.25m**

Συντελεστής γάστρας  $C_B$ : **0.81**

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της μέσης τομής του πλοίου (κανονικός νομέας, ενισχυμένος νομέας) αλλά και ένα σχήμα στο οποίο φαίνεται η διακριτοποίηση της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τομή του πλοίου διαμερίστηκε σε 67 τυπικά δομικά στοιχεία, σε 14 άκαμπτα γωνιακά στοιχεία και σε ένα εγκάρσια ενισχυμένο έλασμα (transversely stiffened plate).

Όπως αναλύθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για την δημιουργία του αρχείου εισόδου είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τα τέσσερα μητρώα καθώς και οι επιμέρους μεταβλητές. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι θα έχουμε ένα μητρώο παραπάνω: το μητρώο TSPP που

αφορά το εγκάρσια ενισχυμένου ελάσμα. Παρακάτω παρατίθενται οι υπολογισμοί.

Υπολογισμός απαιτούμενων βασικών μεγεθών

Συντελεστής υλικού  $k$  για το κατάστρωμα: **0.72**

Συντελεστής υλικού  $k$  για τον πυθμένα: **0.78**

Συντελεστής κυματισμού  $C_{wv-v}$ : **9.42**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{R-MIN}$  στο κατάστρωμα: **9.77m<sup>3</sup>**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{R-MIN}$  στον πυθμένα: **9.77m<sup>3</sup>**

Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-H}$ : **1.750.299 kNm (hogging)**

Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-S}$ : **-1.480.130 kNm (sagging)**

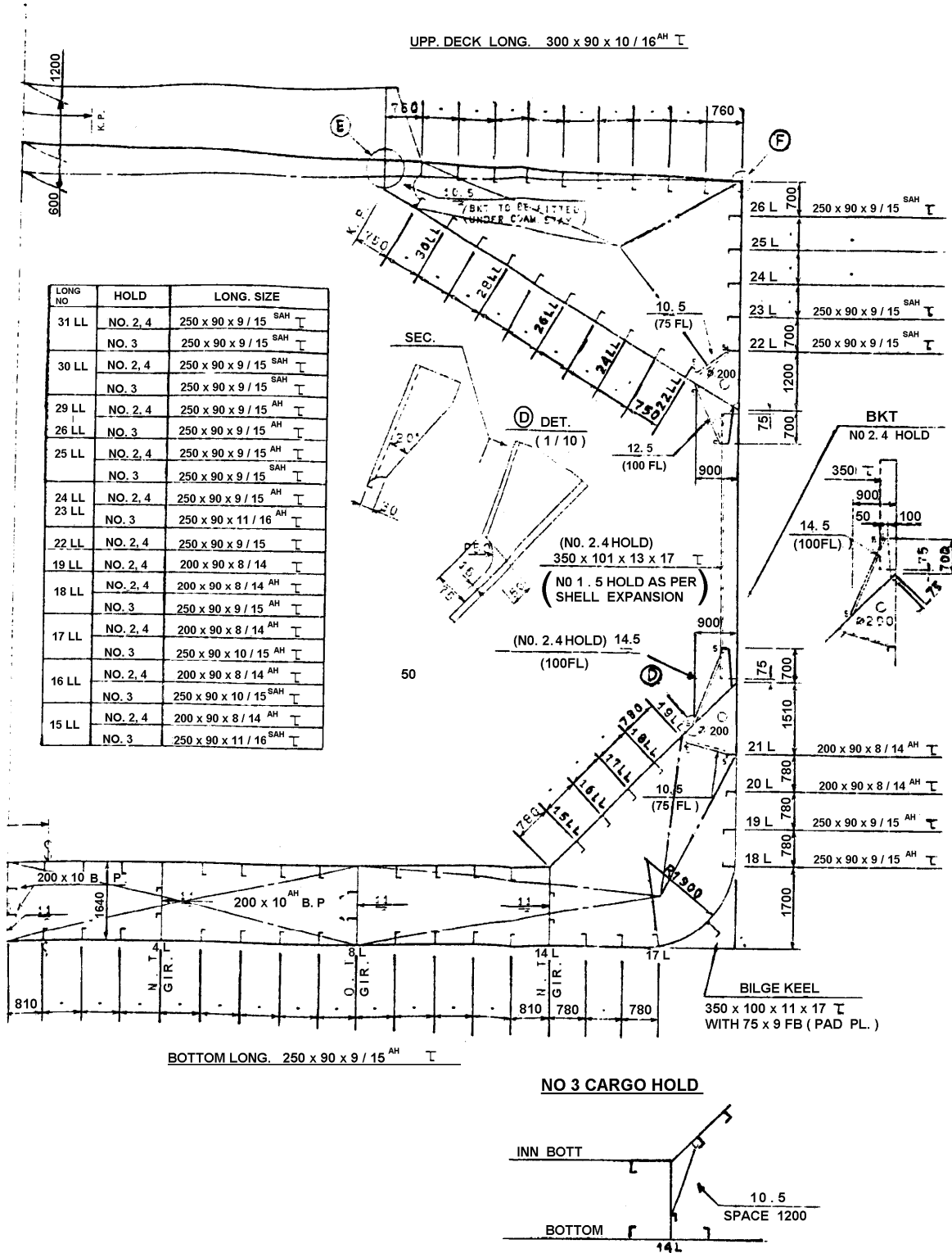
Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-H}$ : **1.010.430 kNm (hogging)**

Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-S}$ : **-823.280 kNm (sagging)**

Μήκος του εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος  $l$ : **4.00m**

Λειτουργικό πάχος του εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος: **14mm**

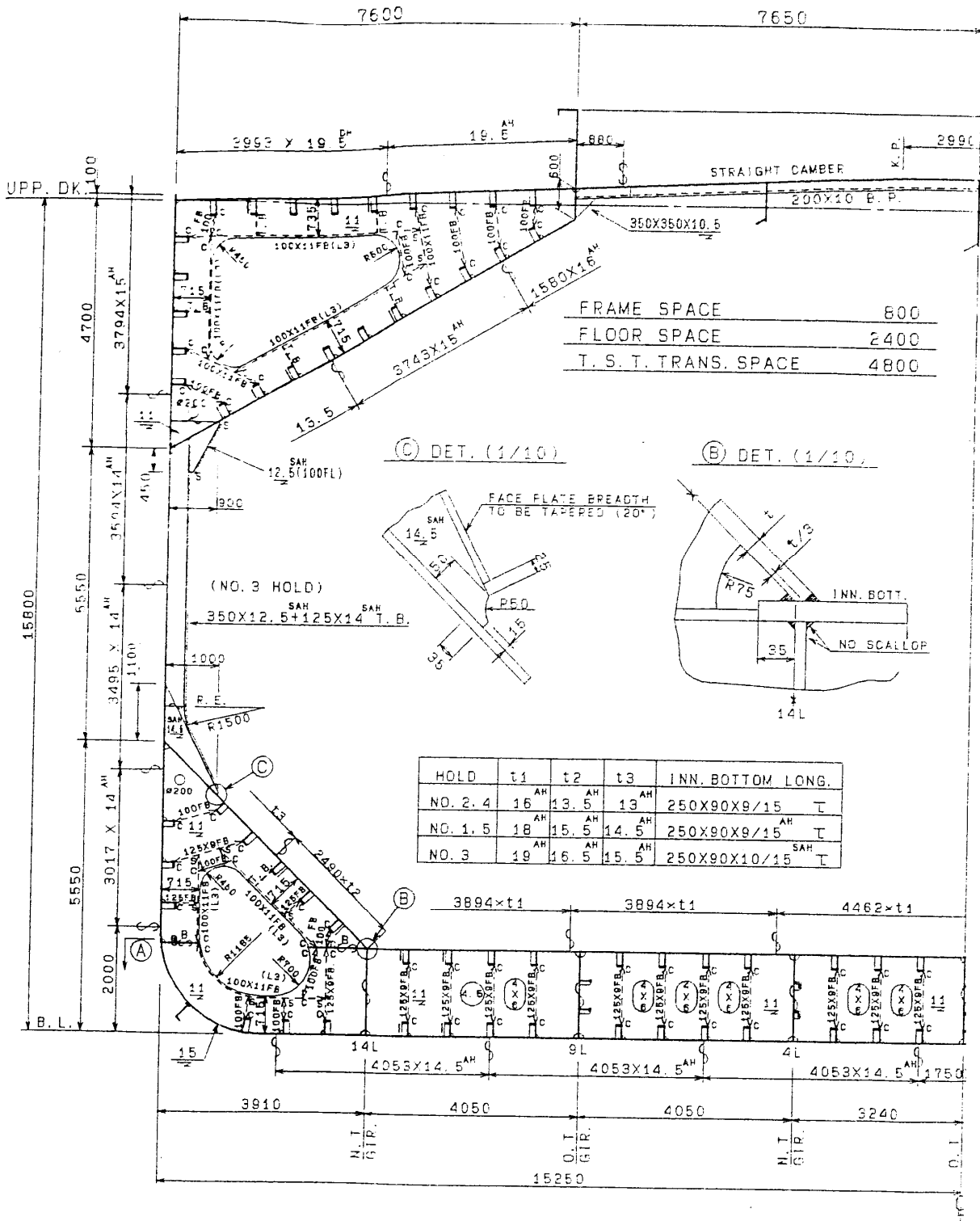
# ORDINARY FRAME SECTION



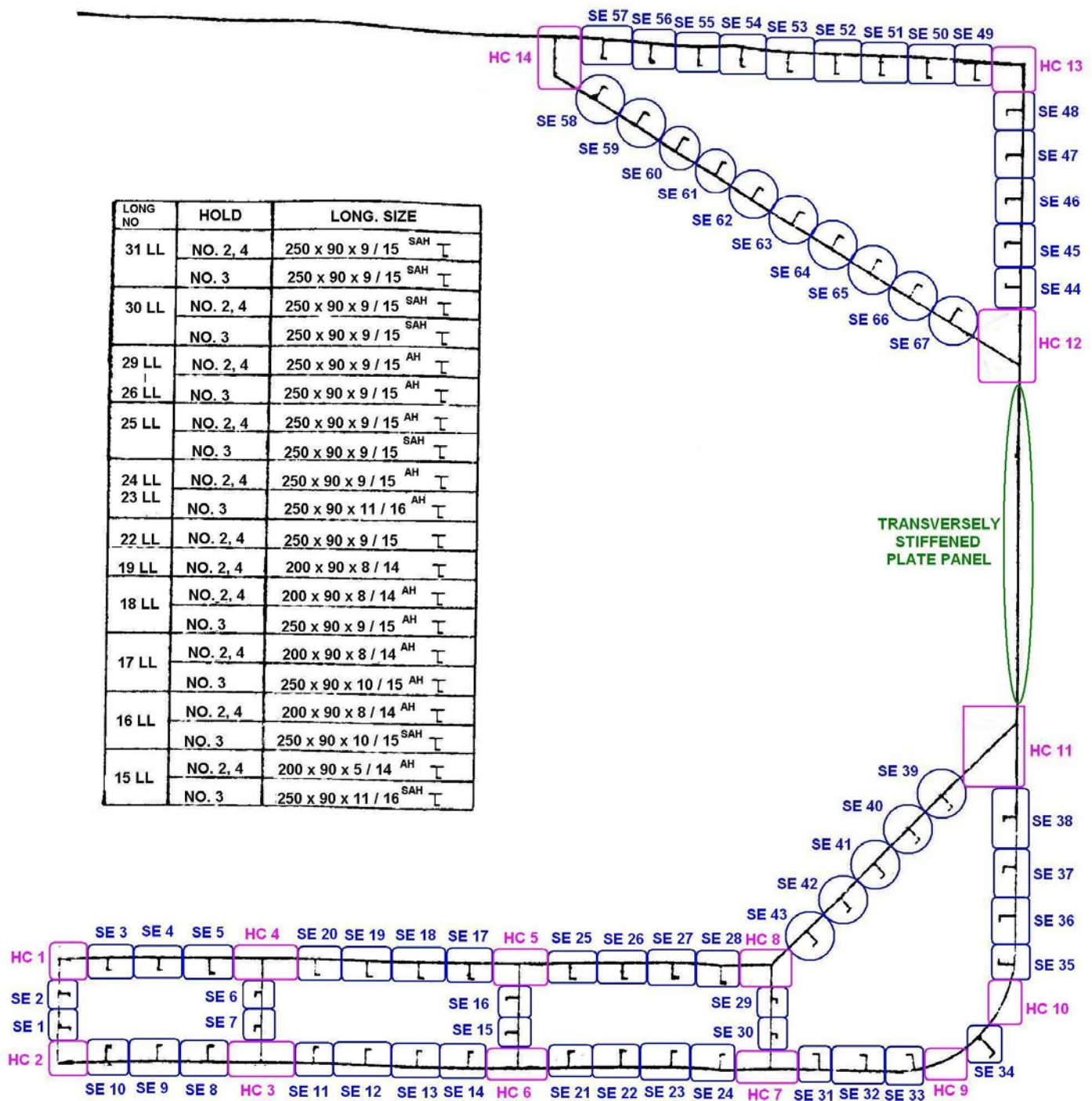
Σχήμα 6.3.1.1 Κανονικός νομέας



# WEB FRAME SECTION



Σχήμα 6.3.1.2 Ενισχυμένος νομέας



Σχήμα 6.3.1.3 Καθορισμός των δομικών στοιχείων

Τέλος, για τον υπολογισμό της αρχικής θέσης του ουδέτερου άξονα παρουσιάζεται το αντίστοιχο φύλλο εργασίας του Excel.





139	ΕΝΙΣΧ. ΑΝΘ ΠΛΕΥΡ. ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ Νο30 250x9 (κορμός)	9	235	4	7	235	60	0.86602496	0.5	14851.75809	1645	24431142.06	362845411653.71	5679493.784	
140	ΕΝΙΣΧ. ΑΝΘ ΠΛΕΥΡ. ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ Νο30 90x15 (φλάντζα)	15	90	4	13	90	30	0.5	0.866025625	14953.51618	1170	17495613.93	261620945911.67	209795.6313	
141	ΕΝΙΣΧ. ΑΝΘ ΠΛΕΥΡ. ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ Νο31 250x9 (κορμός)	9	235	4	7	235	60	0.86602496	0.5	15226.75809	1645	25048017.06	381400096320.86	5679493.784	
142	ΕΝΙΣΧ. ΑΝΘ ΠΛΕΥΡ. ΔΕΞΑΜΕΝΗΣ Νο31 90x15 (φλάντζα)	15	90	4	13	90	30	0.5	0.866025625	15328.51618	1170	17934363.93	274907187607.65	209795.6313	
143	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο9 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	15718.33497	2272	35712057.04	561334074949.58	106882.507	
144	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο9 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15573.23029	1260	19622270.16	305562131950.34	845345.9171	
145	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο8 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	15778.2263	2272	35848134.69	565620053190.70	106882.507	
146	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο8 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15633.12362	1260	19697735.76	307937138074.84	845345.9171	
147	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο7 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	15838.12163	2272	35984212.34	569922331718.99	106882.507	
148	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο7 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15693.01695	1260	19773201.35	310301183971.27	845345.9171	
149	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο6 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	15898.01496	2272	36120289.99	574240910534.43	106882.507	
150	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο6 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15752.91028	1260	19848666.95	312674269639.63	845345.9171	
151	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο5 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	15957.90829	2272	36256367.63	578575789637.04	106882.507	
152	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο5 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15812.80361	1260	19924132.55	315056395079.92	845345.9171	
153	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο4 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	16017.80162	2272	36392445.28	582926969026.81	106882.507	
154	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο4 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15872.69694	1260	19999598.15	317447560292.14	845345.9171	
155	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο3 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	16077.69495	2272	36526522.93	587294448703.75	106882.507	
156	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο3 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15932.59027	1260	20075063.74	319847765276.29	845345.9171	
157	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο2 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	16137.58828	2272	36664600.58	591678228667.84	106882.507	
158	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο2 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	15992.4836	1260	20150529.34	322257010032.37	845345.9171	
159	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο1 300x10 (κορμός)	10	284	4	8	284	4.52	0.07880701	0.996889891	16197.48161	2272	36800678.23	596078308919.11	106882.507	
160	ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΟ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ Νο1 90x16 (φλάντζα)	16	90	4	14	90	94.52	0.99689	-0.078805692	16052.37693	1260	20225994.94	324675294560.38	845345.9171	
												<b>1090627.45</b>	<b>7098822697</b>	<b>91484832570386.00</b>	<b>245671220785.78</b>
												<b>Συνολική διατομή (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>Σ ai*hi (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Σ ai<sup>3</sup>hi (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>Σ I (mm<sup>4</sup>)</b>

Απόσταση ΟΑ από πυθμένα: 6.509m

Ροπή αδράνειας μέσης τομής Iv-net50: 91.05m<sup>4</sup>

Ροπή αντίστασης στο κατάστρωμα Z<sub>AD</sub>: 9.80 m<sup>3</sup>

Ροπή αντίστασης στον πυθμένα Z<sub>AB</sub>: 13.99 m<sup>3</sup>

Οπότε το αρχείο εισόδου για το 1<sup>ο</sup> πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην διαμορφώνεται ως εξής:

```
function [SE,HC,FB,TSPP,lstf,Zna_ini,Zad,Zab,ReH_dk,...
                                                ReH_kl,I_yr]=Ship_Data

SE = [ 172.0  9.0  39  12.7  550  10.0  245  0.543720;    %SE01
      172.0  9.0  39  12.7  550  10.0  245  1.093720;    %SE02
      235.0  8.0  90  14.0  810  15.0  315  1.605569;    %SE03
      235.0  8.0  90  14.0  810  15.0  315  1.605569;    %SE04
      235.0  8.0  90  14.0  810  15.0  315  1.605569;    %SE05
       93.0  6.0  75   6.0  550  10.0  245  1.092407;    %SE06
       93.0  6.0  75   6.0  550  10.0  245  0.542407;    %SE07
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE08
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE09
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE10
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE11
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE12
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE13
      235.0  8.0  90  14.0  810  13.5  315  0.043036;    %SE14
      172.0  8.5  39  12.2  550   9.5  245  0.543720;    %SE15
      172.0  8.5  39  12.2  550   9.5  245  1.093720;    %SE16
      235.0  8.0  90  15.0  810  15.0  245  1.605569;    %SE17
      235.0  8.0  90  15.0  810  15.0  245  1.605569;    %SE18
      235.0  8.0  90  15.0  810  15.0  245  1.605569;    %SE19
      235.0  8.0  90  15.0  810  15.0  245  1.605569;    %SE20
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.042796;    %SE21
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.042796;    %SE22
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.042796;    %SE23
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.042796;    %SE24
      235.0  7.5  90  13.5  810  14.5  245  1.605928;    %SE25
      235.0  7.5  90  13.5  810  14.5  245  1.605928;    %SE26
      235.0  7.5  90  13.5  810  14.5  245  1.605928;    %SE27
      235.0  7.5  90  13.5  810  14.5  245  1.605928;    %SE28
       93.0  5.5  75   5.5  550   9.5  245  1.092484;    %SE29
       93.0  5.5  75   5.5  550   9.5  245  0.542484;    %SE30
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.042796;    %SE31
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.042796;    %SE32
      235.0  7.5  90  13.5  810  13.0  315  0.041958;    %SE33
      333.0  9.0 100  15.5   75   7.0  315  0.452434;    %SE34
      235.0  7.0  90  13.0  780  12.0  315  1.704324;    %SE35
      235.0  7.0  90  13.0  780  12.0  315  2.475675;    %SE36
      186.0  6.0  90  12.0  780  12.0  315  3.255794;    %SE37
      186.0  6.0  90  12.0  780  12.0  315  4.035794;    %SE38
      186.0  6.5  90  12.5  780  12.5  245  4.375928;    %SE39
      186.0  6.5  90  12.5  780  12.5  245  3.824385;    %SE40
      186.0  6.0  90  12.0  780  12.0  245  3.273012;    %SE41
      186.0  6.0  90  12.0  780  12.0  245  2.721470;    %SE42
      186.0  6.0  90  12.0  780  12.0  245  2.169930;    %SE43
      235.0  7.0  90  13.0  700  14.5  315  12.295581;    %SE44
      235.0  7.0  90  13.0  700  14.5  315  12.995581;    %SE45
      235.0  7.0  90  13.0  700  14.5  315  13.695581;    %SE46
      333.0 10.5 100  15.5  800  14.0  245  14.395581;    %SE47
      333.0 10.5 100  15.5  800  14.0  245  15.095581;    %SE48
      284.0  8.0  90  14.0  760  17.5  245  15.819327;    %SE49
      284.0  8.0  90  14.0  760  17.5  245  15.879327;    %SE50
```

```
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 15.939113; %SE51
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 15.999007; %SE52
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 16.058900; %SE53
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 16.118793; %SE54
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 16.178687; %SE55
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 16.238580; %SE56
284.0 8.0 90 14.0 760 17.5 245 16.298473; %SE57
284.0 7.0 90 14.0 750 14.0 315 15.151512; %SE58
284.0 7.0 90 14.0 750 14.0 315 14.772569; %SE59
284.0 7.0 90 14.0 750 13.0 315 14.395633; %SE60
284.0 7.0 90 14.0 750 13.0 315 14.032273; %SE61
284.0 7.0 90 14.0 750 13.0 315 13.649513; %SE62
284.0 7.0 90 14.0 750 13.0 315 13.278392; %SE63
284.0 7.0 90 14.0 750 13.0 315 12.899513; %SE64
284.0 7.0 90 14.0 750 11.5 315 12.531677; %SE65
284.0 7.0 90 14.0 750 11.5 315 12.149137; %SE66
284.0 7.0 90 14.0 750 11.5 245 11.785446]; %SE67

HC = [ 8167.50 245 1.595372 %HC01
      8747.50 245 0.047200 %HC02
      13565.00 245 0.032677 %HC03
      13770.00 245 1.613529 %HC04
      13770.00 245 1.613529 %HC05
      13565.00 245 0.032677 %HC06
      13300.00 245 0.033184 %HC07
      12325.00 245 1.657368 %HC08
      20148.75 245 0.200000 %HC09
      20148.75 245 1.000000 %HC10
      25840.00 315 4.916099 %HC11
      21900.00 245 11.430890 %HC12
      12612.50 315 15.740907 %HC13
      20393.75 315 16.093013]; %HC14

FB = [];

TSPP= [4000 14 780 315 8.65];

lstf=3.200;
Zna_ini=6.509;

Zr_min_kl=13.99;

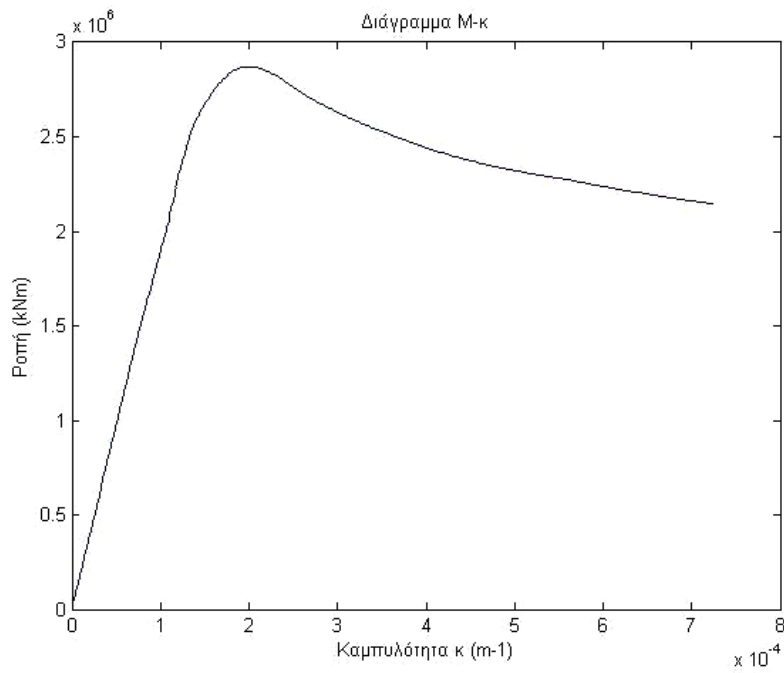
Zr_min_dk=9.86;

ReH_dk=315;

ReH_kl=315;

I_yr=91.05;
```

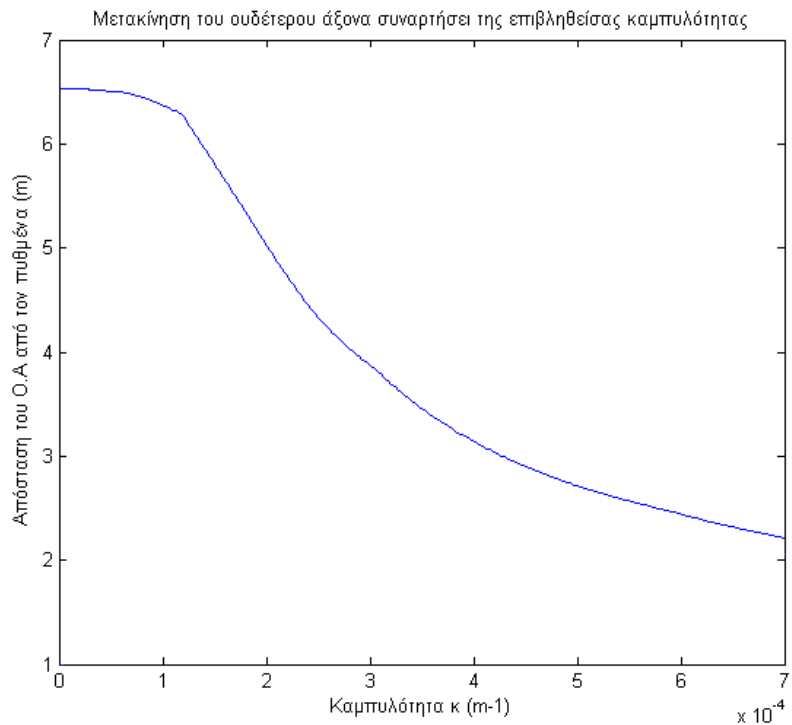
Εκτελώντας τον κώδικα λαμβάνουμε την εξής καρπύλη M-κ



Σχήμα 6.3.1.4

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη αντοχή είναι:

$M_u = 2.901.996 \text{ KNm}$  με καμπυλότητα  $\kappa = 2.0165693e-04 \text{ m}^{-1}$



Σχήμα 6.3.1.5



Στο δεύτερο σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα.

### Έλεγχος για το κριτήριο που προτείνει ο IACS (CSR Bulk Carrier 2008)

Το κριτήριο είναι το εξής:

$$\frac{M_u}{Y_u} \geq Y_{sw} M_{sw} + Y_{wv} M_{wv} \Rightarrow \frac{2.901.699}{1.1} \geq 1.0 \cdot 823.280 + 1.2 \cdot 1.480.130$$
$$2.637.908 \geq 2.599.436 \quad \boxed{OK}$$

Είναι φανερό ότι το κριτήριο ικανοποιείται.

### **6.3.2. Bulk Carrier No2**

Παρουσιάζεται παρακάτω το δεύτερο πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην που επιλέχθηκε για την εφαρμογή του κώδικα.

Μήκος (μεταξύ καθέτων)  $L_{BP}$ : **283.000m**

Πλάτος  $B$ : **45.00m**

Κοίλο  $D$ : **24.70m**

Βύθισμα  $T$  (design): **16.50m**

Βύθισμα  $T$  (scantling): **18.20m**

Συντελεστής γάστρας  $C_B$ : **0.85**

Στις σελίδες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά σχέδια της μέσης τομής του πλοίου (κανονικός νομέας, ενισχυμένος νομέας) αλλά και ένα σχήμα στο οποίο φαίνεται η διακριτοποίηση της μέσης τομής σε δομικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, η μέση τομή του πλοίου διαμερίστηκε σε 90 τυπικά δομικά στοιχεία (συμπεριλαμβανομένων 28 flat bars), σε 16 άκαμπτα γωνιακά στοιχεία και σε ένα εγκάρσια ενισχυμένο έλασμα (transversely stiffened plate).

Όπως και στο προηγούμενο πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην, έτσι και στο συγκεκριμένο είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τα τέσσερα μητρώα (συμπεριλαμβανομένου του μητρώου TSSP) καθώς και οι επιμέρους μεταβλητές. Παρακάτω παρατίθενται οι υπολογισμοί.

Υπολογισμός απαιτούμενων βασικών μεγεθών

Συντελεστής υλικού  $k$  για το κατάστρωμα: **0.78**

Συντελεστής υλικού  $k$  για τον πυθμένα: **0.78**

Συντελεστής κυματισμού  $C_{wv-v}$ : **10.68**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{R-MIN}$  στο κατάστρωμα: **41.88m<sup>3</sup>**

Απαιτούμενη ροπή αντίστασης  $Z_{R-MIN}$  στον πυθμένα: **41.88m<sup>3</sup>**

Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-h}$ : **7.313.183 kNm (hogging)**

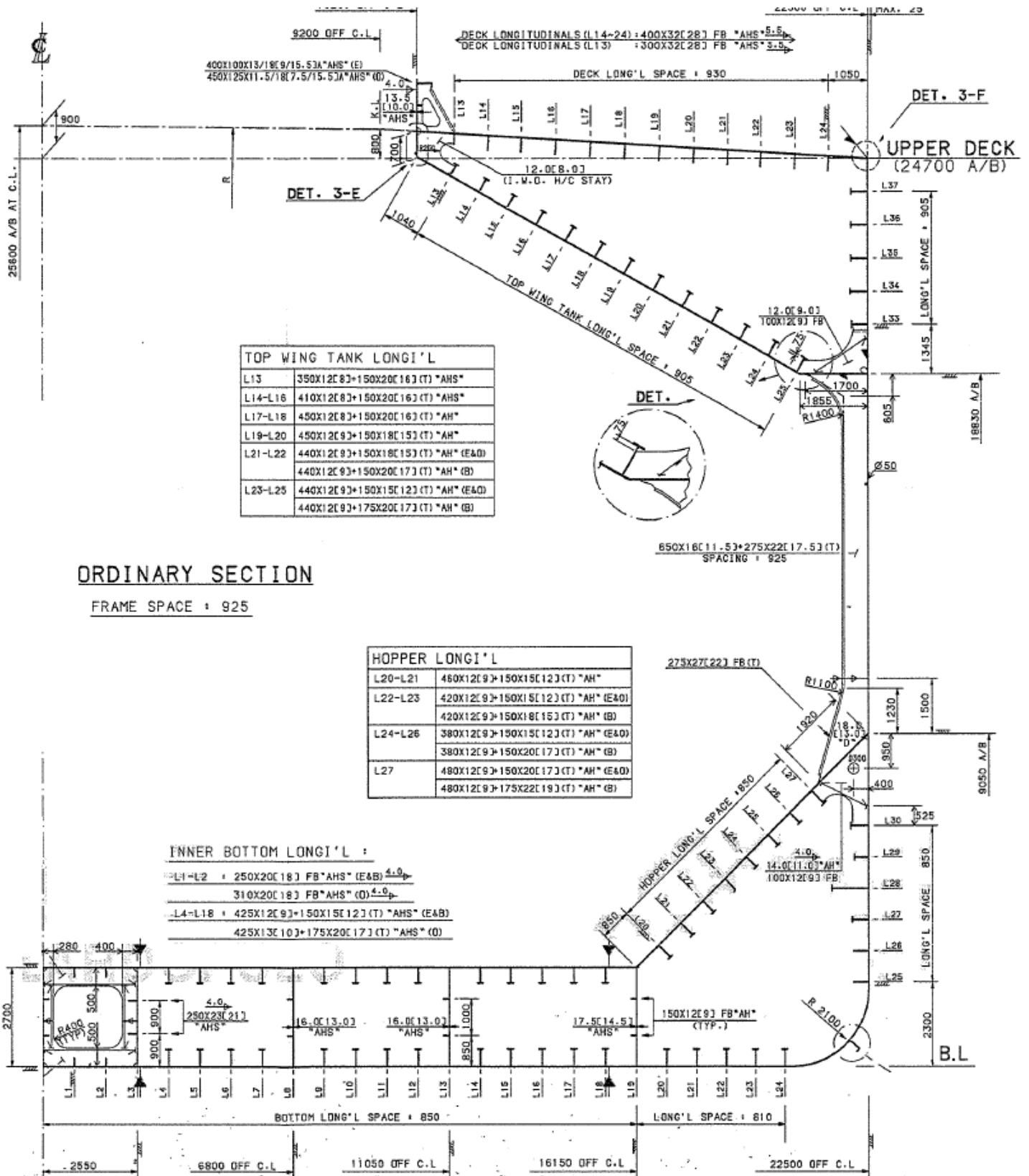
Ροπή κάμψης σε κυματισμό  $M_{wv-s}$ : **-6.562.620 kNm (sagging)**

Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-h}$ : **3.985.685 kNm (hogging)**

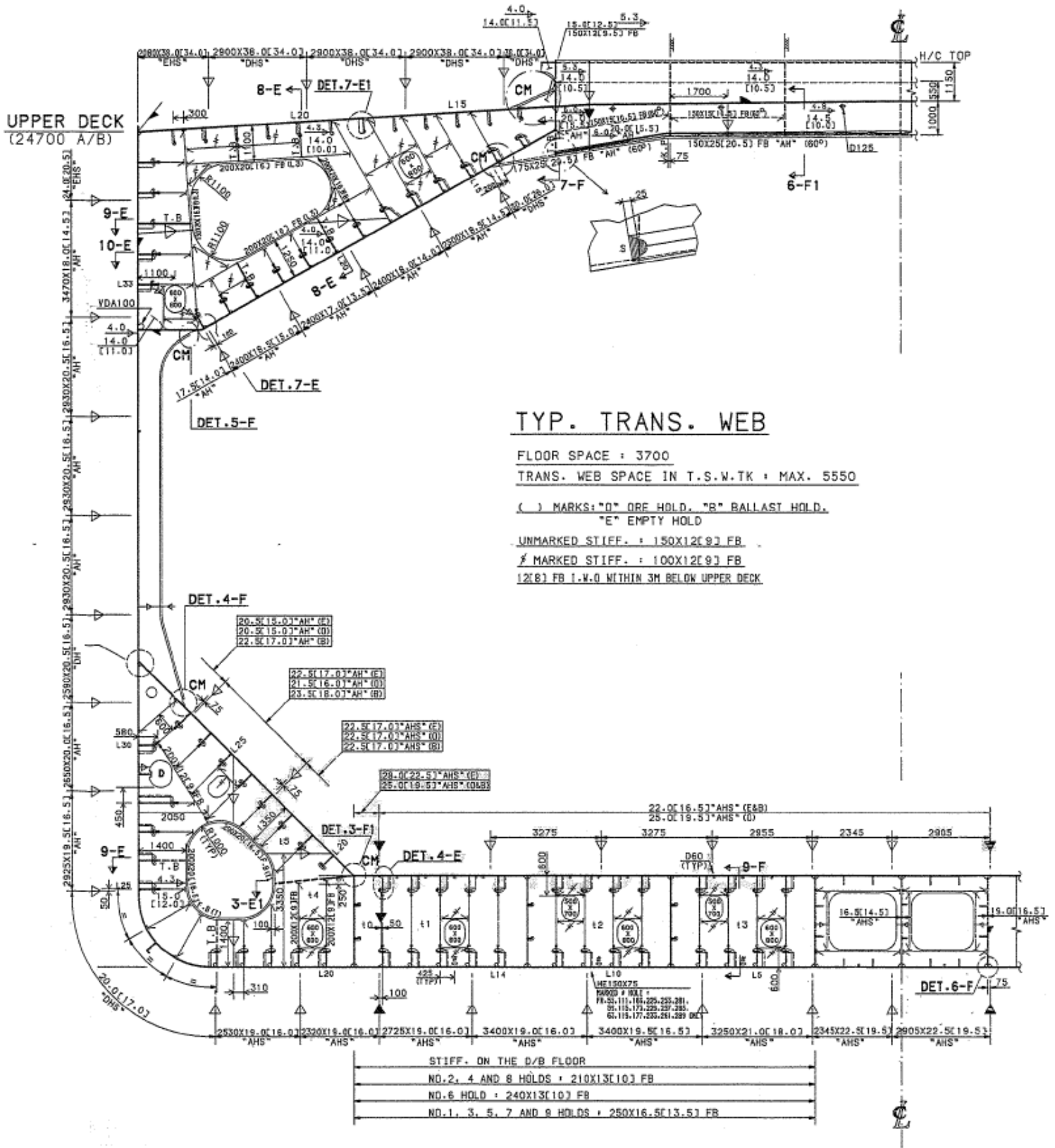
Ροπή κάμψης σε ήρεμο νερό  $M_{sw-s}$ : **-3.093.380 kNm (sagging)**

Μήκος του εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος  $l$ : **7.945m**

Λειτουργικό πάχος του εγκάρσια ενισχυμένου ελάσματος: **18.5mm**



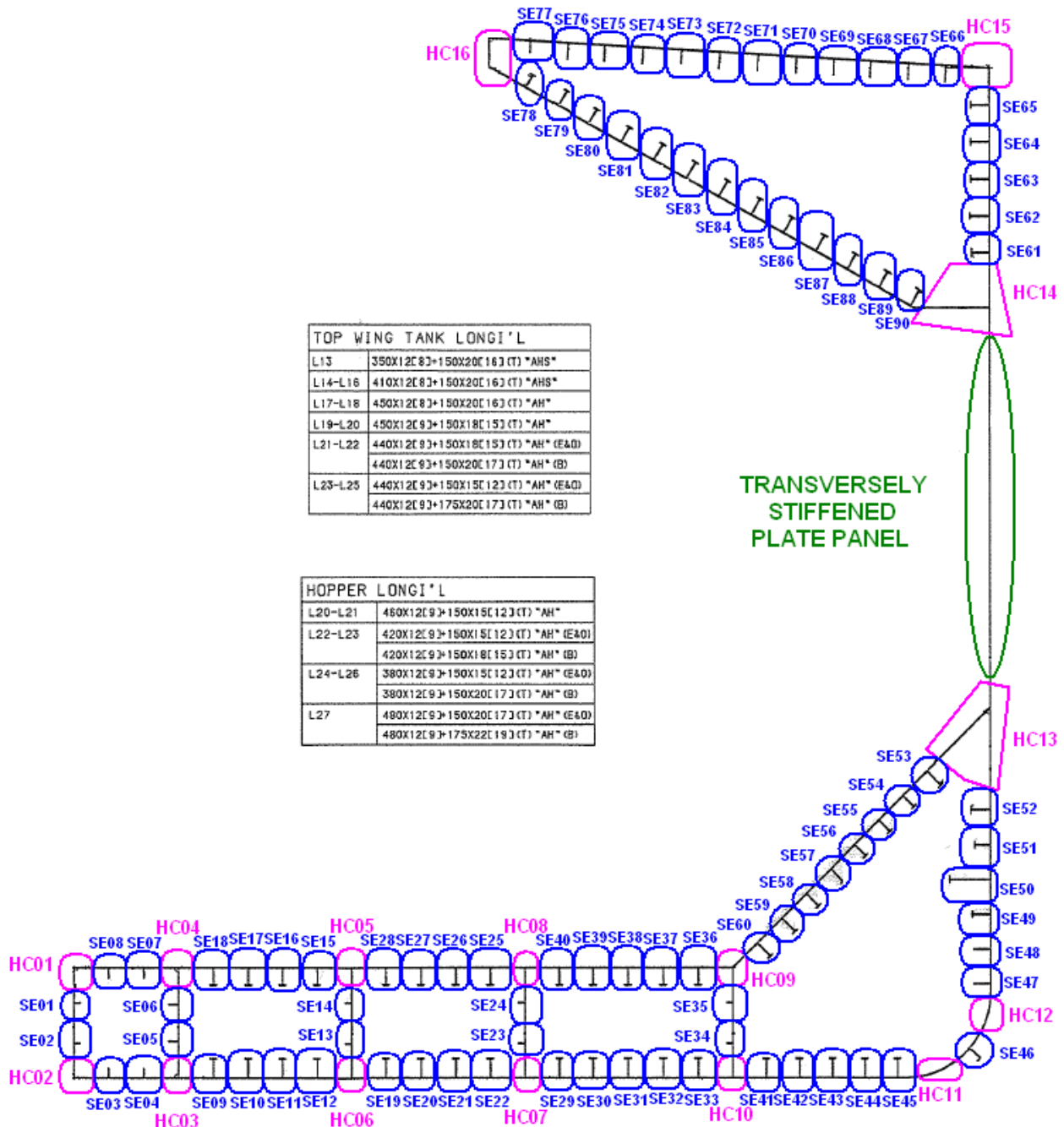
Σχήμα 6.3.2.1 Κανονικός νομέας



Σχήμα 6.3.2.2 Ενισχυμένος νομέας

**ORDINARY SECTION**

FRAME SPACE = 925



Σχήμα 6.3.2.3 Καθορισμός των δομικών στοιχείων

Τέλος, για τον υπολογισμό της αρχικής θέσης του ουδέτερου άξονα παρουσιάζεται το αντίστοιχο φύλλο εργασίας του Excel









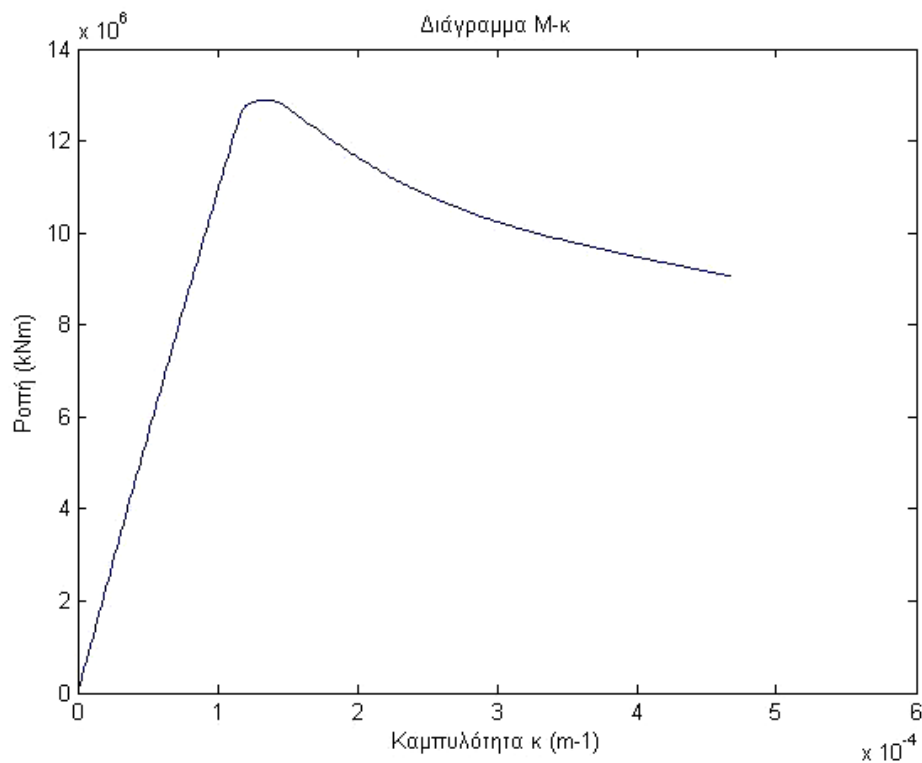
Οπότε το αρχείο εισόδου για το 2<sup>ο</sup> πλοίο μεταφοράς φορτίου χύδην διαμορφώνεται ως εξής:

```
function [SE,HC,FB,TSPP,lstf,Zna_ini,Zad,Zab,ReH_dk,...
        ReH_kl,I_yr]=Ship_Data
SE = [ 457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE09
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE10
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE11
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE12
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE15
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE16
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE17
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE18
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE19
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE20
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE21
      457.0  9.0 150  15.0  850  18.0  355  0.420907;    %SE22
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE25
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE26
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE27
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE28
      457.0  9.0 150  15.0  850  16.0  355  0.417068;    %SE29
      457.0  9.0 150  15.0  850  16.0  355  0.417068;    %SE30
      457.0  9.0 150  15.0  850  16.0  355  0.417068;    %SE31
      457.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418146;    %SE32
      457.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418146;    %SE33
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE36
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE37
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE38
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE39
      410.0  9.0 150  12.0  850  16.5  355  2.622729;    %SE40
      455.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418317;    %SE41
      455.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418317;    %SE42
      455.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418317;    %SE43
      455.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418317;    %SE44
      455.0  9.0 150  18.0  850  16.0  355  0.418317;    %SE45
      333.0  9.5 100  14.5  75  13.5  315  0.395927;    %SE46
      445.0  9.0 150  12.0  850  16.5  315  2.300000;    %SE47
      445.0  9.0 150  12.0  850  16.5  315  3.150000;    %SE48
      425.0  9.0 150  12.0  850  16.5  315  4.000000;    %SE49
      985.0  12.0 150  12.0  850  16.5  315  4.850000;    %SE50
      365.0  9.0 150  12.0  850  16.5  315  5.700000;    %SE51
      460.0  9.0 150  18.0  850  17.0  315  6.550000;    %SE52
      460.0  9.0 150  17.0  850  15.5  315  7.426178;    %SE53
      365.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  6.846945;    %SE54
      365.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  6.245905;    %SE55
      365.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  5.644864;    %SE56
      405.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  5.042069;    %SE57
      405.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  4.441029;    %SE58
      405.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  3.839989;    %SE59
      445.0  9.0 150  12.0  850  17.0  315  3.237255;    %SE60
      412.0  9.0 150  15.0  905  14.5  315  20.175000;    %SE61
      455.0  9.0 175  17.0  905  14.0  315  21.080000;    %SE62
```

432.0	9.0	150	12.0	905	14.5	315	21.985000;	%SE63
432.0	9.0	150	12.0	905	14.5	315	22.890000;	%SE64
432.0	9.0	150	12.0	905	14.5	315	23.795000;	%SE65
330.0	8.0	150	18.0	905	26.0	315	24.299795;	%SE78
390.0	8.0	150	18.0	905	26.0	315	23.848981;	%SE79
390.0	8.0	150	18.0	905	26.0	315	23.419271;	%SE80
430.0	8.0	150	18.0	905	14.5	315	22.968077;	%SE81
430.0	8.0	150	18.0	905	14.5	315	22.515577;	%SE82
432.0	9.0	150	15.0	905	14.0	315	22.061281;	%SE83
432.0	9.0	150	15.0	905	14.0	315	21.608728;	%SE84
422.0	9.0	150	15.0	905	13.5	315	21.157417;	%SE85
422.0	9.0	150	15.0	905	13.5	315	20.247049;	%SE86
425.0	9.0	150	12.0	905	13.5	315	20.247049;	%SE87
425.0	9.0	150	12.0	905	15.0	315	19.790260;	%SE88
425.0	9.0	150	12.0	905	15.0	315	19.337760;	%SE89
425.0	9.0	150	12.0	905	15.0	315	18.791510];	%SE90
HC =	[	13537.50	355	2.591551			%HC01	
		14812.50	355	0.105408			%HC02	
		21787.50	355	0.067282			%HC03	
		19875.00	355	2.633774			%HC04	
		19875.00	355	2.633774			%HC05	
		19875.00	355	0.073107			%HC06	
		19450.00	355	0.074316			%HC07	
		19875.00	355	2.554387			%HC08	
		23312.50	355	2.702882			%HC09	
		20125.00	355	0.078356			%HC10	
		28041.50	355	0.200000			%HC11	
		28041.50	355	1.000000			%HC12	
		44475.00	315	8.244648			%HC13	
		44357.50	315	18.929778			%HC14	
		25086.25	355	24.616338			%HC15	
		26660.75	355	25.192194];			%HC16	
FB =	[	150	8.0	900	14.5	315	1.800000;	
		150	8.0	900	14.5	315	0.900000;	
		230	18.0	850	19.5	355	0.030787;	
		230	18.0	850	19.5	355	0.030787;	
		250	21.0	900	14.5	355	0.900000;	
		250	21.0	900	14.5	355	1.800000;	
		250	18.0	850	16.5	355	2.669635;	
		250	18.0	850	16.5	355	2.669635;	
		150	9.0	900	13.0	355	0.900000;	
		150	9.0	900	13.0	355	1.800000;	
		150	9.0	900	13.0	355	0.900000;	
		150	9.0	900	13.0	355	1.800000;	
		150	9.0	900	14.5	355	0.900000;	
		150	9.0	900	14.5	355	1.800000;	
		400	28.0	930	34.0	355	24.700543;	
		400	28.0	930	34.0	355	24.753460;	
		400	28.0	930	34.0	355	24.806347;	
		400	28.0	930	34.0	355	24.859233;	
		400	28.0	930	34.0	355	24.912119;	
		400	28.0	930	34.0	355	24.965006;	
		400	28.0	930	34.0	355	25.017892;	

```
400 28.0 930 34.0 355 25.070778;  
400 28.0 930 34.0 355 25.123665;  
400 28.0 930 34.0 355 25.176550;  
400 28.0 930 34.0 355 25.229437;  
300 28.0 930 34.0 355 25.303151];  
  
TSPP= [7945 18.5 850 315 14.2525];  
  
lstf=3.700;  
  
Zna_ini=11.073;  
  
Zr_min_kl=50.78;  
  
Zr_min_dk=41.27;  
  
ReH_dk=315;  
  
ReH_kl=355;  
  
I_yr=562.36;
```

Εκτελώντας τον κώδικα, λαμβάνουμε τα εξής:

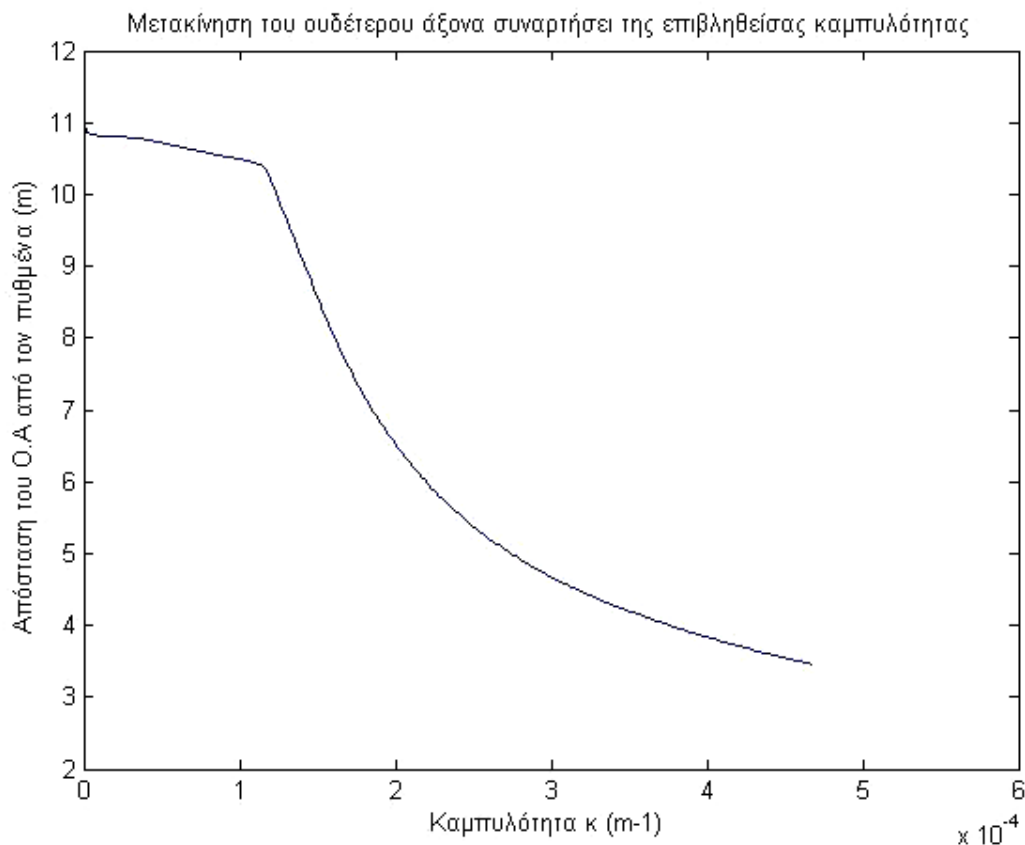


Σχήμα 6.3.2.4

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η μέγιστη αντοχή είναι:

$M_u = 12.899.176 \text{KNm}$  με καμπυλότητα  $\kappa = 1.338252 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η μετακίνηση του ουδέτερου άξονα καθώς αυξάνεται η καμπυλότητα.



Σχήμα 6.3.2.5

Έλεγχος για το κριτήριο που προτείνει ο IACS (CSR Bulk Carrier 2008)

Το κριτήριο είναι το εξής:

$$\frac{M_u}{Y_u} \geq Y_{sw} M_{sw} + Y_{wv} M_{wv} \Rightarrow \frac{12.899.176}{1.1} \geq 1.0 \cdot 3.093.380 + 1.2 \cdot 6.562.620$$

$$11.726.652 \geq 10.968.524 \quad \boxed{OK}$$

Προφανώς το κριτήριο ικανοποιείται.

## 6.4 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Ανακεφαλαιωτικά παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της εφαρμογής του κώδικα για τα πέντε πλοία (3 δεξαμενόπλοια και 2 πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην) στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6.3.1

<b>Πλοίο</b>	<b>Μέγιστη αντοχή <math>M_u</math> (kNm)</b>	<b>Απόκλιση (%) από το κριτήριο που θέτει ο IACS</b>
Product Oil Tanker No1	2.768.931	12.89
Product Oil Tanker No2	3.798.758	18.17
Product Oil Tanker No3	5.915.608	15.54
Bulk Carrier No1	2.901.996	1.48
Bulk Carrier No2	12.899.176	6.91

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 7

---

---

### Σ ύ γ κ ρ ι σ η τ ο υ κ ώ δ ι κ α

---

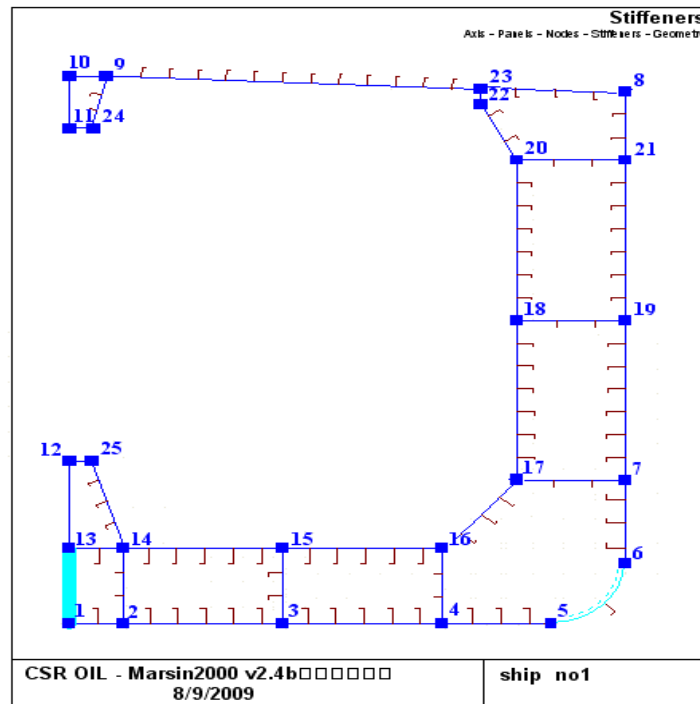
---

#### 7.1 Εισαγωγή

Μετά την εφαρμογή του κώδικα σ' υπάρχοντα πλοία, είναι αυτονόητο ότι πρέπει να ελεγχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Αυτό μπορεί να γίνει, χρησιμοποιώντας μια από τις βασικές μεθόδους εκτίμησης της μέγιστης αντοχής (πεπερασμένα στοιχεία, μέθοδος ιδεατής δομικής μονάδας) που παρουσιάστηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Ωστόσο οι συγκεκριμένες μέθοδοι είναι χρονοβόρες και απαιτούν και ειδικό λογισμικό για την εφαρμογή τους. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξειδικευμένα προγράμματα που ασχολούνται γενικά με την αντοχή ενός πλοίου και με τα οποία είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε και την μέγιστη αντοχή σε διαμήκη κάμψη. Τέτοια προγράμματα είναι το Poseidon ND και το Mars 2000. Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε για να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματα του κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι το Mars 2000 το οποίο διατίθεται από τον οργανισμό Bureau Veritas. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα απαιτεί τον χρήστη ουσιαστικά την εισαγωγή με κάθε λεπτομέρεια όλης της ημιδιατομής της μέσης τομής της γάστρας του πλοίου. Πιο συγκριμένα, είναι απαραίτητη η εισαγωγή των κυρίων διαστάσεων, των ενισχυτικών, των ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής και των ισαποστάσεων μεταξύ των ενισχυτικών. Στις επόμενες σελίδες παρουσιάζεται η εκτίμηση για την μέγιστη αντοχή όλων των υπό εξέταση πλοίων που προέκυψε από το πρόγραμμα Mars 2000 καθώς η απόκλιση του κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με το Mars 2000.

## 7.2 Χρήση του MARS2000 για το δεξαμενόπλοιο Νο1

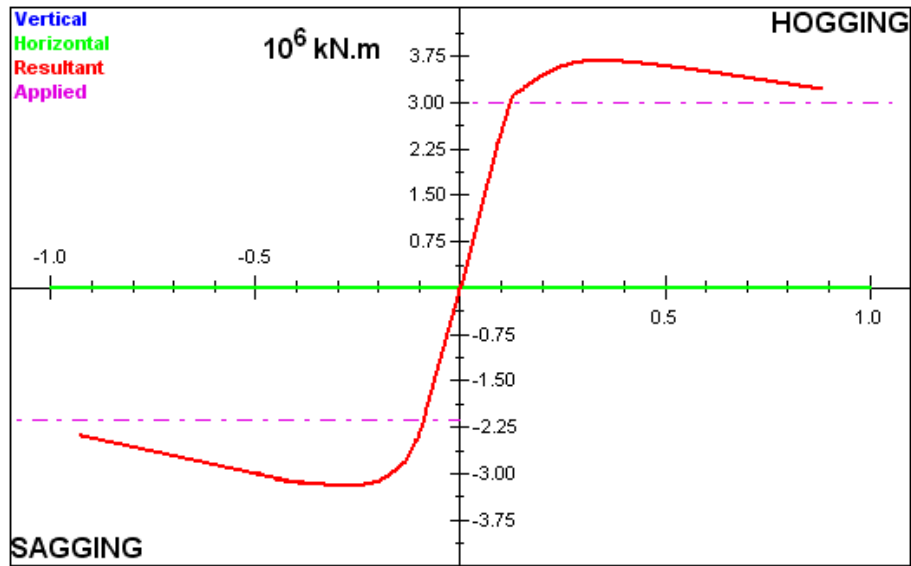
Αφού δημιουργήθηκε το αντίστοιχο μοντέλο που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.2.1 προέκυψαν τα αποτελέσματα και το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας που ακολουθούν.



Σχήμα 7.2.1. Το μοντέλο του πλοίου στο MARS 2000

Hull girder strength criteria						
Hull Girder Loads		Section Moduli	Ultimate Strength	Net/Gross Moduli		
<b>Ultimate Bending Capacity (kN.m)</b>						
Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)						
	<b>Mu</b>		<b>Ultimate</b>	<b>Mb</b>	<b>%</b>	
Hogging	3 748 616	Navigation	3 407 492	2 691 237	78.98	Hogging
Sagging	- 3 253 929		- 2 957 821	- 2 707 885	91.55	Sagging
The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin						
Close						

Σχήμα 7.2.2. Καρτέλα αποτελεσμάτων του MARS 2000



Σχήμα 7.2.3. Διάγραμμα ροής-καμπυλότητας του MARS 2000

Όπως είναι προφανές η προκύπτουσα μέγιστη αντοχή από το Mars 2000 είναι  $M_u = 3.253.929 \text{ kNm}$

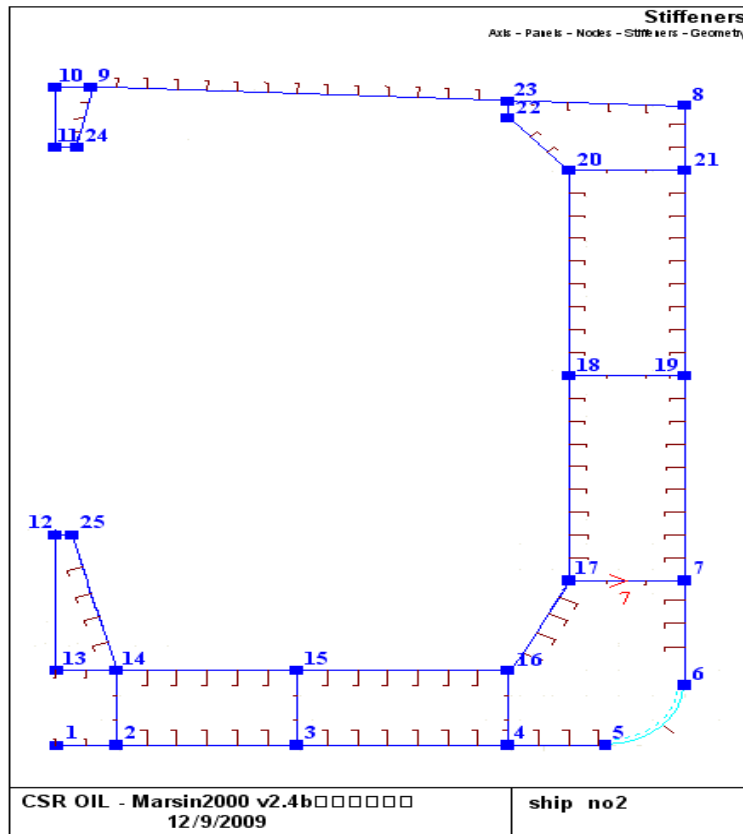
Οπότε για την απόκλιση του κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με το Mars 2000 έχουμε:

$$\sigma_1 = \frac{3.253.929 - 2.768.931}{3.253.929} = 0.149 \quad \text{ή} \quad 14.9\%$$



### 7.3 Χρήση του MARS2000 για το δεξαμενόπλοιο Νο2

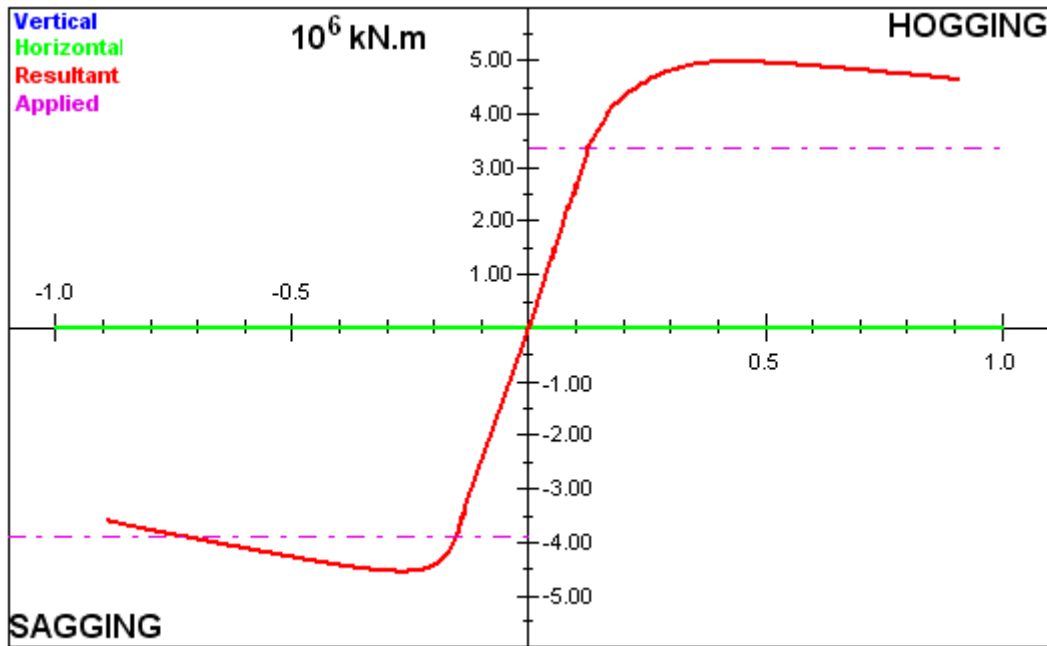
Αφού δημιουργήθηκε το αντίστοιχο μοντέλο που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.3.1 προέκυψαν τα αποτελέσματα και το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας που ακολουθούν.



Σχήμα 7.3.1. Το μοντέλο του πλοίου στο MARS 2000

Hull girder strength criteria					
Hull Girder Loads		Section Moduli	Ultimate Strength	Net/Gross Moduli	
<b>Ultimate Bending Capacity (kN.m)</b>					
Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)					
	<b>Mu</b>		<b>Ultimate</b>	<b>Mb</b>	<b>z</b>
Hogging	5 006 107.	Navigation	4 450 551.	3 382 419.	76.00
Sagging	- 4 498 223.		- 4 088 885.	- 3 689 401.	90.23
					Hogging
					Sagging
The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin					
Close					

Σχήμα 7.3.2. Καρτέλα αποτελεσμάτων του MARS 2000



Σχήμα 7.3.3. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του MARS 2000

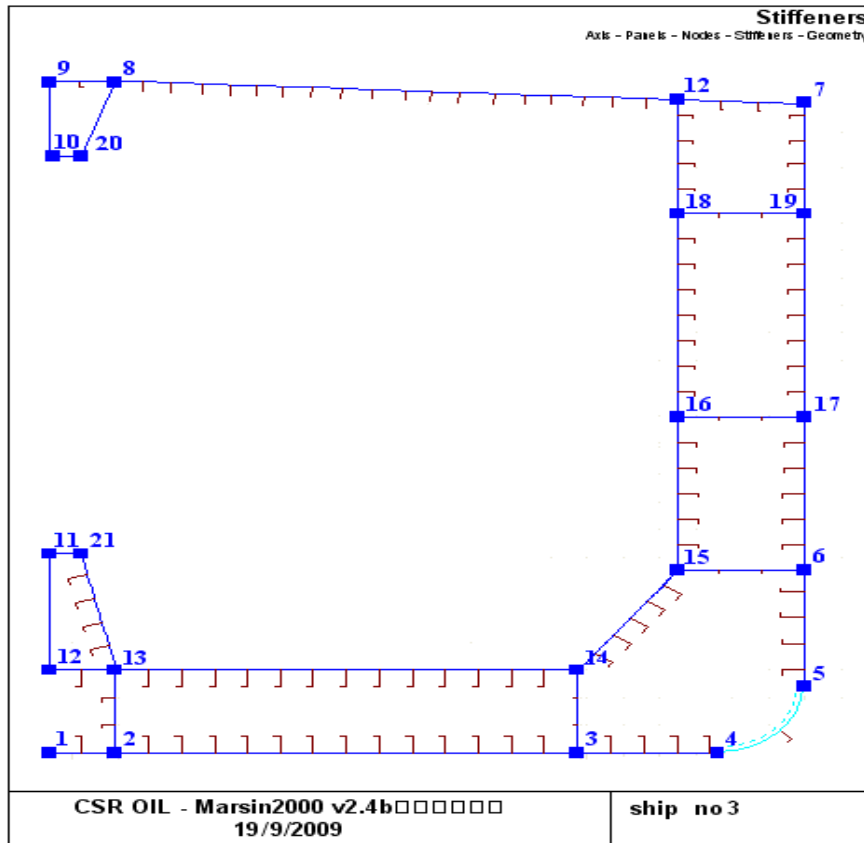
Όπως είναι προφανές η προκύπτουσα μέγιστη αντοχή σε κατάσταση sagging από το Mars 2000 είναι  $M_u = 4.498.223 \text{ kNm}$

Οπότε για την απόκλιση του κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με το Mars 2000 έχουμε:

$$\sigma_2 = \frac{4.498.223 - 3.798.758}{4.498.223} = 0.155 \quad \text{ή} \quad 15.5\%$$

## 7.4 Χρήση του MARS2000 για το δεξαμενόπλοιο Νο3

Αφού δημιουργήθηκε το αντίστοιχο μοντέλο που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.4.1 προέκυψαν τα αποτελέσματα και το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας που ακολουθούν.



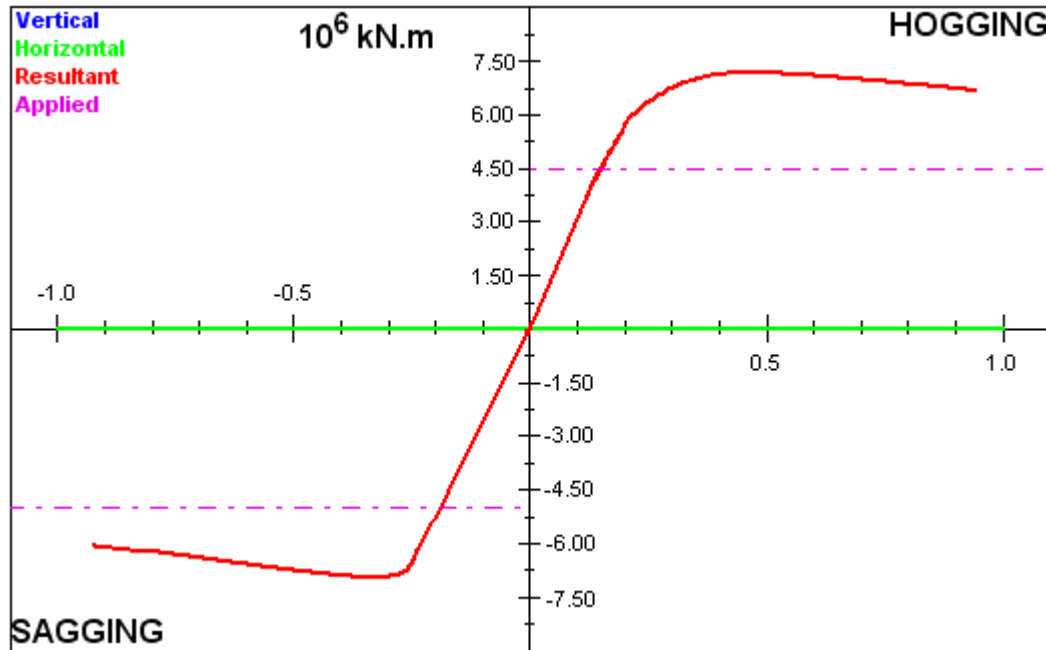
Σχήμα 7.4.1. Το μοντέλο του πλοίου στο MARS 2000

Hull girder strength criteria					
Hull Girder Loads		Section Moduli	Ultimate Strength	Net/Gross Moduli	
<b>Ultimate Bending Capacity (kN.m)</b>					
Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)					
	<b>Mu</b>		<b>Ultimate</b>	<b>Mb</b>	<b>%</b>
Hogging	7 263 304.	Navigation	6 602 343.	4 990 711.	75.59
Sagging	- 6 850 923.		- 6 227 489.	- 5 776 315.	92.45
					Hogging
					Sagging

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

Close

Σχήμα 7.4.2. Καρτέλα αποτελεσμάτων του MARS 2000



Σχήμα 7.4.3. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του MARS 2000

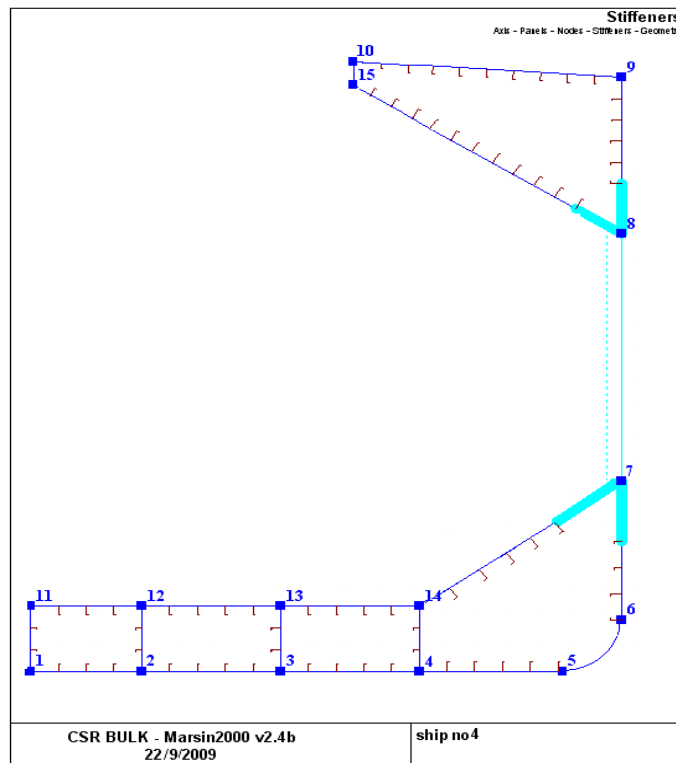
Όπως είναι προφανές η προκύπτουσα μέγιστη αντοχή σε κατάσταση sagging από το Mars 2000 είναι  $M_u = 6.850.923 \text{ kNm}$

Οπότε για την απόκλιση του κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με το Mars 2000 έχουμε:

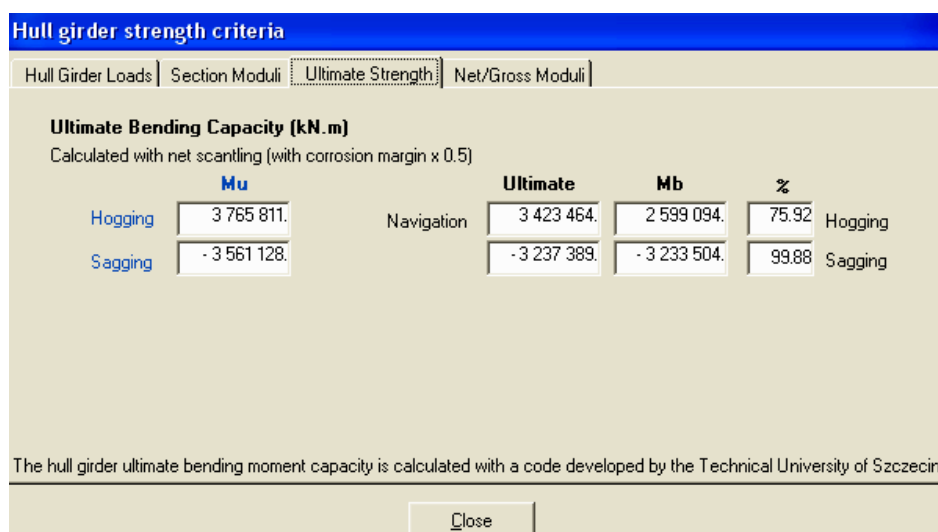
$$\sigma_3 = \frac{6.850.923 - 5.915.608}{6.850.923} = 0.1365 \text{ ή } 13.65\%$$

## 7.5 Χρήση του MARS2000 για το Bulk Carrier No1

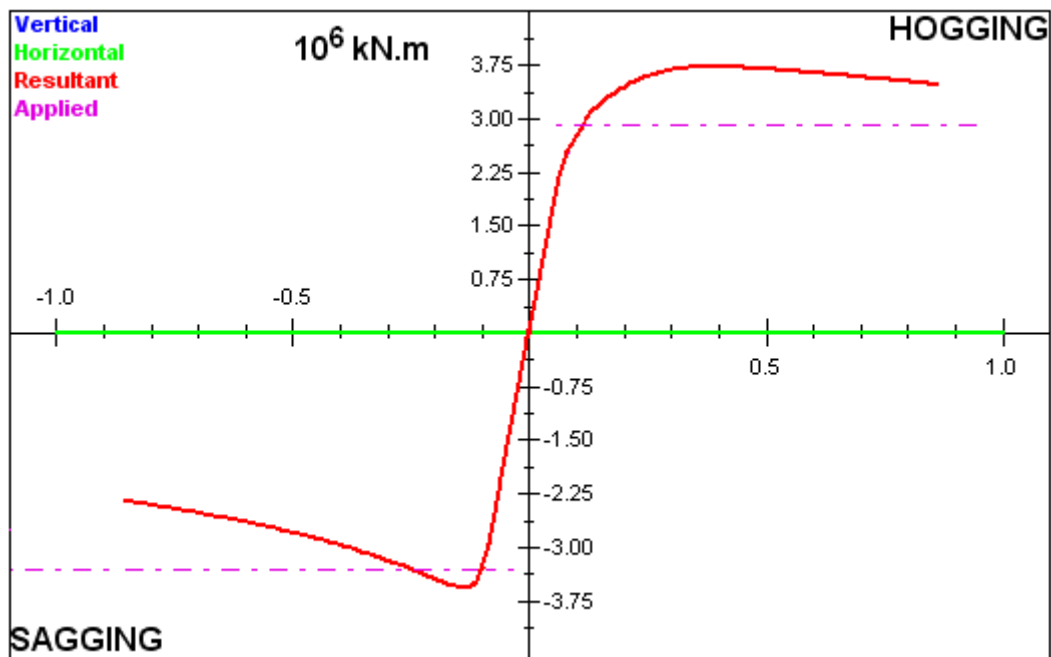
Δημιουργώντας το αντίστοιχο μοντέλο που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.5.1 προκύπτουν τα αποτελέσματα και το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας που ακολουθούν.



Σχήμα 7.5.1. Το μοντέλο του πλοίου στο MARS 2000



Σχήμα 7.5.2. Καρτέλα αποτελεσμάτων του MARS 2000



Σχήμα 7.5.3. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του MARS 2000

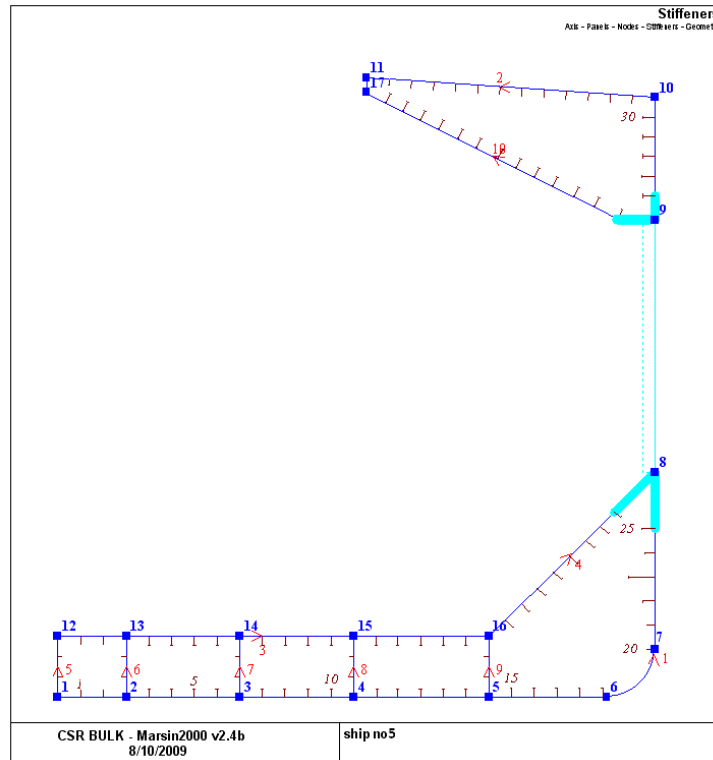
Όπως είναι προφανές η προκύπτουσα μέγιστη αντοχή σε κατάσταση sagging από το Mars 2000 είναι  $M_u = 3.561.128 \text{ kNm}$

Οπότε για την απόκλιση του κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με το Mars 2000 έχουμε:

$$\sigma_4 = \frac{3.561.128 - 2.901.996}{3.561.128} = 0.1850 \quad \text{ή} \quad 18.5\%$$

## 7.6 Χρήση του MARS2000 για το Bulk Carrier No2

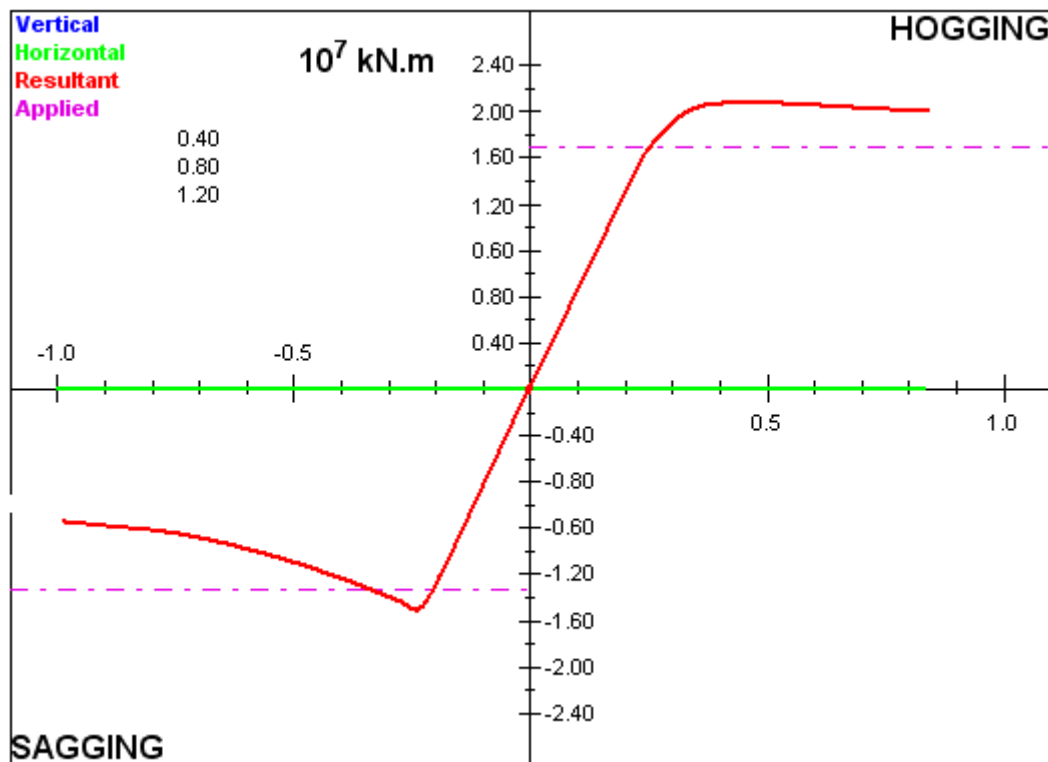
Δημιουργώντας το αντίστοιχο μοντέλο που παρουσιάζεται στο σχήμα 7.6.1 προκύπτουν τα αποτελέσματα και το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας που ακολουθούν.



Σχήμα 7.6.1. Το μοντέλο του πλοίου στο MARS 2000

Hull girder strength criteria					
Hull Girder Loads		Section Moduli	Ultimate Strength	Net/Gross Moduli	
<b>Ultimate Bending Capacity (kN.m)</b>					
Calculated with net scantling (with corrosion margin x 0.5)					
	<b>Mu</b>		<b>Ultimate</b>	<b>Mb</b>	<b>%</b>
Hogging	20 832 717.	Navigation	19 938 826.	15 189 398.	76.18 Hogging
Sagging	-15 677 326.		-14 252 115.	-14 226 461.	99.82 Sagging
The hull girder ultimate bending moment capacity is calculated with a code developed by the Technical University of Szczecin					
Close					

Σχήμα 7.6.2. Καρτέλα αποτελεσμάτων του MARS 2000.



Σχήμα 7.6.3. Διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας του MARS 2000

Όπως είναι προφανές η προκύπτουσα μέγιστη αντοχή σε κατάσταση sagging από το Mars 2000 είναι  $M_u = 15.677.326 \text{ kNm}$

Οπότε για την απόκλιση του κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με το Mars 2000 έχουμε:

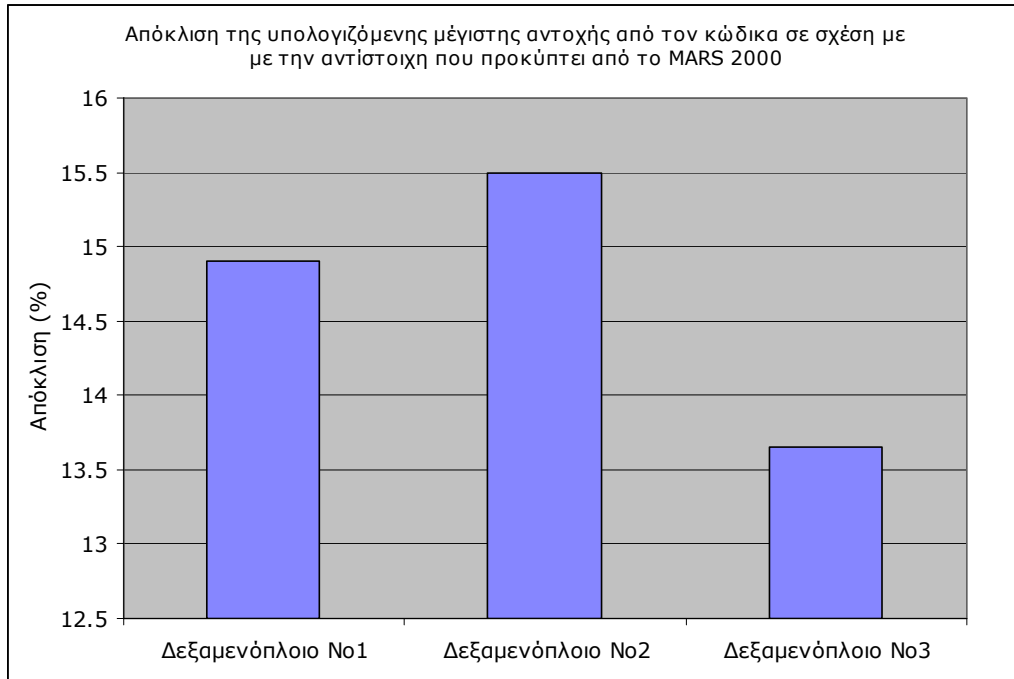
$$\sigma_5 = \frac{15.677.326 - 12.899.176}{15.677.326} = 0.177 \quad \text{ή} \quad 17.7\%$$

## 7.7 Ανακεφαλαίωση

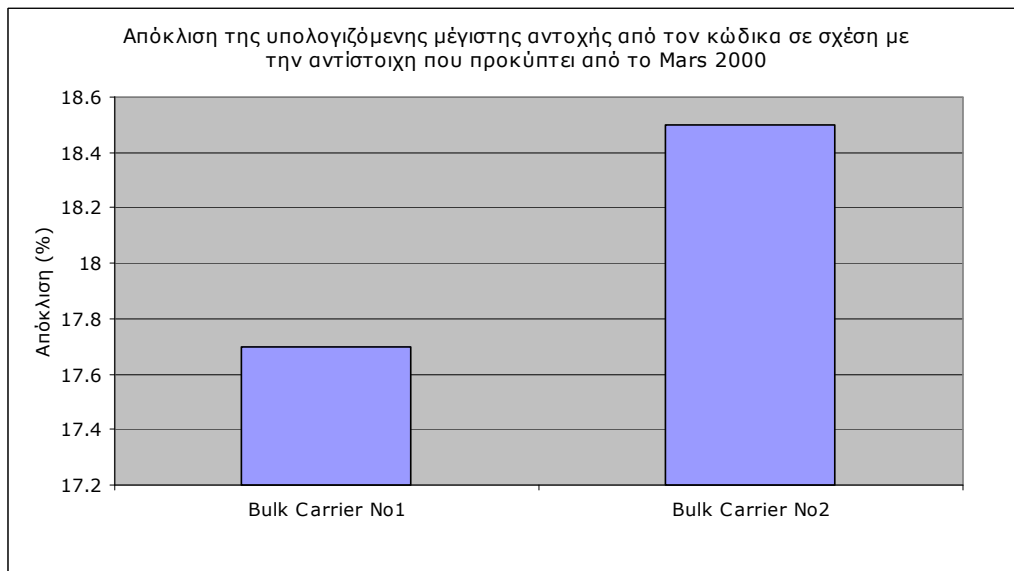
Χρησιμοποιώντας το Mars 2000 για την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής διαπιστώσαμε ότι για τα δεξαμενόπλοια η απόκλιση της τιμής που λαμβάνουμε από τον κώδικα *Ultimate\_Strength.m* σε σχέση με την αντίστοιχη από το Mars 2000 κυμαίνεται στα επίπεδα μεταξύ 13.65% και 15.5%. Όσον αφορά τα bulk carriers, η αντίστοιχη απόκλιση είναι κάπως μεγαλύτερη (17.7% και 18.5%).



Παρακάτω παρουσιάζονται σχηματικά υπό μορφή ραβδογράμματος οι αποκλίσεις για τα δύο είδη πλοίων.



Σχήμα 7.7.1



Σχήμα 7.7.2

---

---

## Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο 8

### Σ υ μ π ε ρ ά σ μ α τ α

---

---

#### 8.1 Συμπεράσματα

Όπως προαναφέρθηκε η εκτίμηση της μέγιστης αντοχής σε διαμήκη κάμψη της γάστρας ενός πλοίου μπορεί να γίνει είτε με μια από τις τρεις μεθόδους που αναλύθηκαν στην εισαγωγή είτε με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού σε θέματα γενικής και τοπικής αντοχής πλοίου όπως το Mars 2000. Κοινό χαρακτηριστικό των παραπάνω τρόπων εκτίμησης της μέγιστης αντοχής αποτελεί το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα χρονοβόροι και δεν μπορούν να επαναληφθούν εύκολα για διαφορετικά πλοία. Αυτό συμβαίνει βέβαια σε κάθε περίπτωση για διαφορετικούς λόγους. Για παράδειγμα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι ιδιαίτερα επίπονο να κατασκευαστεί το μοντέλο της ημιδιατομής του πλοίου, ενώ το Mars 2000 απαιτεί από τον χρήστη μεγάλη εξοικείωση σε προγράμματα τύπου CAD. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη σε κάποιον που ασχολείται με το συγκεκριμένο ζήτημα, να υπάρξει ένας τρόπος που να επιτρέπει στον μελετητή την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής χωρίς να είναι ιδιαίτερα χρονοβόρος και να εφαρμόζεται εύκολα και γρήγορα για διαφορετικά πλοία. Γι' αυτό κι ο κώδικας που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής έχει ως κύριο στόχο να είναι αρκετά γενικός ώστε να ανταποκρίνεται δίνοντας ικανοποιητικά και έγκυρα αποτελέσματα για οποιαδήποτε μέση τομή ενός πλοίου. Διαβάζοντας κάποιος τα δύο κεφάλαια (έκτο και έβδομο) μπορεί να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι ο κώδικας Ultimate\_Strength.m ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις που τέθηκαν

προηγουμένως. Χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αρχείο εισόδου με δεδομένα που πολύ εύκολα μπορούν να υπολογιστούν σε ένα φύλλο Excel. Όσον αφορά την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, βρέθηκε από τις συγκρίσεις που έγιναν με το Mars 2000 ότι η απόκλιση για δεξαμενόπλοια κυμαίνεται περίπου στο 15% ενώ για bulk carriers φτάνει στο 18%. Όσον αφορά την αυτή την διαφορά στις αποκλίσεις για τους δύο τύπους πλοίων, είναι πολύ πιθανόν να οφείλεται στην ερμηνεία των Κοινών Δομικών Κανονισμών. Πιο συγκεκριμένα για τα bulk carriers, το κομμάτι των κανονισμών που αναφέρεται στην προσθήκη διάβρωσης είναι ιδιαίτερα δυσνόητο και απαιτεί μεγάλη εξοικείωση με την τοπολογία του πλοίου και ίσως να οδηγεί σε κάποια σφάλματα στην εξαγωγή των λειτουργικών διαστάσεων (net dimensions). Το γεγονός αυτό με την σειρά του έχει ως επίπτωση την μεγαλύτερη απόκλιση στην υπολογιζόμενη τιμή της μέγιστης αντοχής. Όσον αφορά γενικότερα την απόκλιση που παρατηρείται και στους δύο τύπους πλοίων αυτή είναι μέχρι ως ενός σημείου δικαιολογημένη αφού το Mars 2000 είναι ένα εμπορικό πακέτο που χρησιμοποιεί τεχνολογία λογισμικού CAD σε συνδυασμό με σύνθετους αλγόριθμους επίλυσης. Ο κώδικας που παρουσιάστηκε, επιλύει το πρόβλημα της μέγιστης αντοχής στηριζόμενος σε ένα while-loop για να εκτελέσει την απαραίτητη μετακίνηση του ουδέτερου άξονα.

Επίσης εκτελώντας τον κώδικα και παρατηρώντας τα διαγράμματα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το διάγραμμα που παρουσιάζει την μετακίνηση του ουδέτερου άξονα συναρτήσει της επιβληθείσας καμπυλότητας έχει την ίδια μορφή για όλα τα πλοία ανεξαρτήτως τύπου πλοίου. Μάλιστα υπάρχει για όλα τα πλοία στο συγκεκριμένο διάγραμμα μια συγκεκριμένη τιμή της καμπυλότητας (σχετικά μικρή και προς το κέντρο των αξόνων) στην οποία παρατηρείται ένα «σπάσιμο» στην

καμπύλη. Εάν κάποιος το εξετάσει το θέμα από μαθηματικής σκοπιάς, μπορεί να ισχυριστεί ότι πρόκειται για ένα σημείο καμπής.

- Το διάγραμμα ροπής-καμπυλότητας για δεξαμενόπλοια σε κατάσταση sagging έχει διαφορετική μορφή από το αντίστοιχο για τα bulk carriers. Πιο συγκεκριμένα, στα δεξαμενόπλοια η ροπή αφού πάρει την μέγιστη τιμή της, αρχίζει και μειώνεται με πιο αργό ρυθμό από ότι στην περίπτωση του bulk carrier όπου σαφώς η μείωση είναι πιο απότομη. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τα ευρήματα των προσομοιώσεων με το Mars 2000. Επίσης μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι στην καμπύλη ροπής-καμπυλότητας ενός δεξαμενόπλοιου, τα κοίλα είναι πάντα προς τα κάτω, ενώ στα bulk carriers τα κοίλα είναι προς τα πάνω.
- Οι κυρίαρχες μορφές αστοχίας των ενισχυτικών είναι πάντα ο λυγισμός δοκού κολώνας και ο στρεπτικός λυγισμός. Ο τοπικός λυγισμός του κορμού προξενεί πάντα μεγαλύτερες τάσεις από τους δύο προαναφερθέντες τρόπους καταπόνησης με αποτέλεσμα να μην προκαλείται εξαιτίας του, αστοχία. Αξίζει να αναφέρουμε ότι σχεδόν πάντα το πρώτο ενισχυτικό που οδηγούταν σε κατάρρευση βρισκόταν στο κατάστρωμα με κυρίαρχη μορφή αστοχίας τον λυγισμό τύπου κολώνας.
- Χρειάζεται προσοχή στο καθορισμό της τιμής με την οποία θα ανεβαίνει (ή κατεβαίνει αντίστοιχα) ο ουδέτερος άξονας όταν η αρχική μείωση που εκτελείται σε κάθε προσαυξητικό βήμα δεν είναι αρκετή για να επιτευχθεί ισορροπία. Πιο απλά, μια μεγάλη τιμή μετακίνησης του O.A μπορεί να οδηγήσει το πρόγραμμα σε άπειρες επαναλήψεις χωρίς ποτέ να βρίσκει σημείο ισορροπίας (δηλαδή, τιμή για τον O.A που

θα δίνει συνισταμένη δύναμη από την καθορισμένη τιμή ανοχής). Αρκετά μικρή τιμή μετακίνησης του Ο.Α μπορεί να οδηγήσει σε καθυστέρηση της σύγκλισης. Γενικά, η μέθοδος που προτείνεται για τον προσδιορισμό της κατάλληλης τιμής είναι η μέθοδος δοκιμής-σφάλματος.

## **8.2 Προτάσεις για διεύρυνση της εργασίας**

Χρησιμοποιώντας ως βάση τον κώδικα που παρουσιάστηκε θα ήταν δυνατόν να προσδιοριστεί η μέγιστη αντοχή ενός πλοίου μετά από βλάβη. Επίσης ενδιαφέρον θα ήταν να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνει ο κώδικας με τα αντίστοιχα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ή της ιδεατής δομικής μονάδας.



---

---

## Β Ι Β Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α

---

---

[1] Amlashi, K.K, Moan, T., "Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study Part 1: Nonlinear finite element modelling and ultimate hull girder capacity", *Marine Structures*, **Vol:1–26**, 2008.

[2] Amlashi, K.K, Moan, T., "Ultimate strength analysis of a bulk carrier hull girder under alternate hold loading condition – A case study Part 2: Stress distribution in the double bottom and simplified approaches", *Marine Structures*, **Vol:22**, 2009.

[3] Qi E., Cui W, Wan Z., "Comparative study of ultimate hull girder strength of large double hull tankers", *Marine Structures*, **Vol:18**, 2005

[4] Hu Y., Zhang A., Sun J., "Analysis on the ultimate longitudinal strength of a bulk carrier by using a simplified method", *Marine Structures*, **Vol:14**, 2001.

[5] Patten S. A., "Inelastic Analysis of Tripping Failure of Stiffened Steel Panels due to Stiffener Flange Transverse Initial Eccentricity, Dissertation, 2006.

[6] Paik, J. K., Thayamballi A. K., "Ship-Shaped Offshore Installations", *Cambridge University Press*, 2007.

[7] Eyres, D.J., "Ship Construction", *Butterworth-Heinemann*, Fifth Edition, 2001.

[8] Rawson, K.J., Tupper, E.C., "Basic Ship Theory", *Butterworth-Heinemann*, Fifth Edition, 2001.

[9] IACS, Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers, International Association of Classification Societies.

**[10]** Rawson, K.J., Tupper, E.C., "Basic Ship Theory", *Butterworth-Heinemann*, Fifth Edition, 2001.

**[11]** Smith M. J., "Ultimate strength assessment of naval and commercial ships", Technical Report, 2008

**[12]** Naar H., "Ultimate Strength Of Hull Girder For Passenger Ships", Doctoral Dissertation, 2006



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

(Απαραίτητες σχέσεις για την εξαγωγή των καμπυλών βράχυνσης)



## A1. Λυγισμός δοκού κολώνας

Ιδιότητα	Σχέση
Επιφάνεια διατομής	$A = A_p + A_w + A_f, A_e = A_{pe} + A_w + A_f$ where $A_p = bt, A_{pe} = b_e t, A_w = h_w t_w, A_f = b_f t_f$
Ισοδύναμο όριο διαρροής στην επιφάνεια της διατομής	$\sigma_{Yeq} = \frac{A_p \sigma_{Yp} + A_w \sigma_{Yw} + A_f \sigma_{Yf}}{A}$
Απόσταση της εξωτερικής επιφάνειας του προσαρτημένου ελάσματος από τον ελαστικό οριζόντιο ουδέτερο άξονα	$z_o = \frac{0.5bt^2 + A_w(t + 0.5h_w) + A_f(t + h_w + 0.5t_f)}{A}$ $z_p = \frac{0.5b_e t^2 + A_w(t + 0.5h_w) + A_f(t + h_w + 0.5t_f)}{A_e}$
Ροπή αδράνειας	$I = \frac{bt^3}{12} + A_p \left( z_o - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{h_w^3 t_w}{12} + A_w \left( z_o - t - \frac{h_w}{2} \right)^2$ $+ \frac{b_f t_f^3}{12} + A_f \left( t + h_w + \frac{t_f}{2} - z_o \right)^2$ $I_e = \frac{b_e t^3}{12} + A_{pe} \left( z_p - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{h_w^3 t_w}{12} + A_w \left( z_p - t - \frac{h_w}{2} \right)^2$ $+ \frac{b_f t_f^3}{12} + A_f \left( t + h_w + \frac{t_f}{2} - z_p \right)^2$
Ακτίνα αδρανείας	$r = \sqrt{\frac{I}{A}}, r_e = \sqrt{\frac{I_e}{A_e}}$
Συντελεστής λυγηρότητας ράβδου	$\lambda = \frac{L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{Yeq}}{E}}, \lambda_e = \frac{L}{\pi r_e} \sqrt{\frac{\sigma_{Yeq}}{E}}$
Συντελεστής λυγηρότητας του ελάσματος	$\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{Yp}}{E}}$

Όπου

L: το μήκος του ελάσματος-ράβδου

b: το πάχος του προσαρτημένου ελάσματος

b<sub>e</sub>: το ενεργό πάχος του προσαρτημένου ελάσματος

σ<sub>Yp</sub>: το όριο διαρροής του ελάσματος

σ<sub>Yw</sub>: το όριο διαρροής του κορμού του ενισχυτικού

σ<sub>Yf</sub>: το όριο διαρροής του πέλματος του ενισχυτικού

## A2. Στρεπτικός Λυγισμός

Τάση αναφοράς για τον στρεπτικό λυγισμό  $\sigma_{ET}$

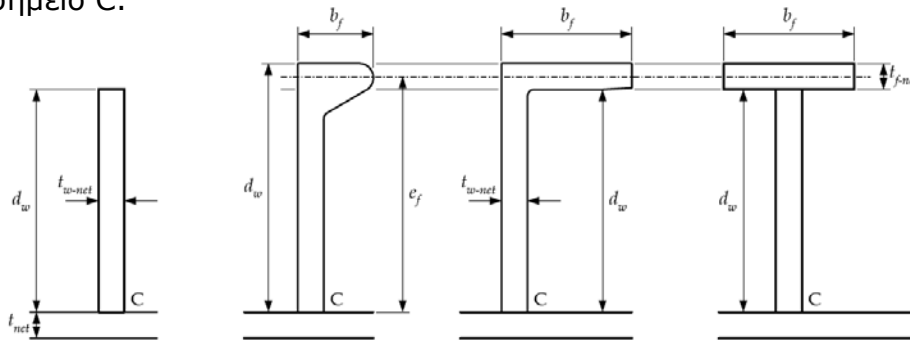
$$\sigma_{ET} = \frac{E}{I_{p-net}} \left( \frac{\epsilon \pi^2 I_{\omega-net} 10^{-4}}{\ell_t^2} + 0.385 I_{T-net} \right)$$

Όπου

$I_{p-net}$  : λειτουργική πολική αδράνεια του ενισχυτικού ως προς το σημείο C σε  $cm^4$  (βλ. σχήμα A2.1 & πίνακα A2.1)

$I_{T-net}$  : λειτουργική ροπή αδράνειας St. Venant σε  $cm^4$

$I_{\omega-net}$  : λειτουργική ροπή αδράνειας του ενισχυτικού ως προς το σημείο C.



Σχήμα A2.1

Πίνακας A2.1

Ροπές αδράνειας		
ιδιότητα	Flat bars	Βολβολάμες, γωνίες, T-διατομές
$I_{p-net}$	$\frac{d_w^3 t_{w-net}}{3 \times 10^4}$	$\left( \frac{A_{w-net} (e_f - 0.5 t_{f-net})^2}{3} + A_{f-net} e_f^2 \right) 10^{-4}$
$I_{T-net}$	$\frac{d_w t_{w-net}^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_{w-net}}{d_w} \right)$	$\frac{(e_f - 0.5 t_{f-net}) t_{w-net}^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_{w-net}}{e_f - 0.5 t_{f-net}} \right)$ + $\frac{b_f t_{f-net}^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_{f-net}}{b_f} \right)$
$I_{\omega-net}$	$\frac{d_w^3 t_{w-net}^3}{36 \times 10^6}$	για βολβολάμες και γωνίες : $\frac{A_{f-net} e_f^2 b_f^2}{12 \times 10^6} \left( \frac{A_{f-net} + 2.6 A_{w-net}}{A_{f-net} + A_{w-net}} \right)$ για T-διατομές: $\frac{b_f^3 t_{f-net} e_f^2}{12 \times 10^6}$

Βαθμός καθορισμού (degree of fixation)  $\varepsilon$

$$\varepsilon = 1 + 100 \sqrt{\frac{\ell_t^4}{I_{w-net} \left( \frac{s}{t_{net}^3} + \frac{4(e_f - 0.5t_{f-net})}{3t_{w-net}^3} \right)}}$$

Απόσταση σύνδεσης  $e_f$

Για βολβολάμες:

$$e_f = (d_w - 0.5t_{f-net})$$

Για γωνίες και T-διατομές:



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

(Κώδικας Ultimate Strength με βάση τους  
Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς για bulk Carriers)





## Ultimate Strength.m

(για bulk carriers)

```

clc
clear all
[SE,HC,FB,TSPP,lstf,Zna_ini,Zad,Zab,ReH_dk,...
                                ReH_kl,I_yr]=Ship_Data;

m1=size(SE,1);
m2=size(HC,1);
m3=size(FB,1);
E=206000;
My1=1000*Zab*ReH_kl;
My2=1000*Zad*ReH_dk;
My=min(My1,My2);
kf=0.003*Myd/(E*I_yr);
dk=kf/300;

iter=0;

for k=dk:dk:1.0*kf;

iter=iter+1;
Zna(1)=Zna_ini;

dz=0.011;
while(1)
Zna(iter+1)=Zna(iter)-dz;

%-----%
% CALCULATIONS FOR FLANGED STIFFENERS %
%-----%

for i=1:m1
    e_el_se(i,iter)=dk*iter*(SE(i,8)-Zna(iter));
    e_yd_se(i,iter)=SE(i,7)/E;
    e_rel_se(i,iter)=e_el_se(i,iter)/e_yd_se(i,iter);

    if e_rel_se(i,iter)<-1;
        Fi_se(i,iter) = -1;
    elseif e_rel_se(i,iter)>=-1 && e_rel_se(i,iter)<1;
        Fi_se(i,iter) = e_rel_se(i,iter);
    else e_rel_se(i,iter)>1;
        Fi_se(i,iter) = 1;
    end

%-----%
% Beam Column Buckling of flanged stiffeners %
%-----%

    if e_rel_se(i,iter)>0;
        vita_E_se(i,iter)=
SE(i,5)/SE(i,6)*((e_rel_se(i,iter)*SE(i,7))/E)^0.5;
    else
        vita_E_se(i,iter)=0;
    end

    if vita_E_se(i,iter)>1.25;

```

```

        bE_se(i,iter)=(2.25/vita_E_se(i,iter))-(1.25/...
(vita_E_se(i,iter))^2))*SE(i,5);
    else
        bE_se(i,iter)= SE(i,5);
    end

    if vita_E_se(i,iter)>1;
        bE1_se(i,iter)= SE(i,5)/vita_E_se(i,iter);
    else
        bE1_se(i,iter)= SE(i,5);
    end

    A_E_se(i,iter)=0.01*(SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)*SE(i,4)+...
        bE_se(i,iter)*SE(i,6));
    zp_se(i,iter)=0.1*(0.5*bE1_se(i,iter)*(SE(i,6)^2)+SE(i,1)*...
        SE(i,2)*(SE(i,6)+0.5*SE(i,1))+SE(i,3)*SE(i,4)*...
        (SE(i,6)+SE(i,1)+0.5*SE(i,4)))/A_E_se(i,iter);
    I_E_se(i,iter)=10^-5*((bE1_se(i,iter)*(SE(i,6))^3)/12+...
        (bE1_se(i,iter)*(SE(i,6))*(zp_se(i,iter)-...
        SE(i,6)/2)^2+SE(i,1)^3*SE(i,2)/12+SE(i,1)*...
        SE(i,2)*(zp_se(i,iter)-SE(i,6)-SE(i,1)/2)^2+...
        ((SE(i,3)*SE(i,4)^3)/12)+SE(i,3)*SE(i,4)*(SE(i,6)+...
        SE(i,1)+SE(i,4)/2-zp_se(i,iter)^2));

    % Euler column buckling stress  $\sigma_{E1}$ 
    if e_rel_se(i,iter)>0;
        sigma_E1_se(i,iter)= pi^2*E*(I_E_se(i,iter)/...
            (A_E_se(i,iter)*lstf^2))*10^-4;
    else
        sigma_E1_se(i,iter)=0;
    end

    % Critical stress  $\sigma_{C1}$ 
    if sigma_E1_se(i,iter)>(SE(i,7)/2)*e_rel_se(i,iter)
        sigma_C1_se(i,iter)=SE(i,7)*(1-(SE(i,7)*e_rel_se(i,iter))/...
            (4*sigma_E1_se(i,iter)));
    else
        sigma_C1_se(i,iter)= sigma_E1_se(i,iter)/e_rel_se(i,iter);
    end

    % Critical stress  $\sigma_{CR1}$ 
    A_stif_se(i,iter)=0.01*(SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)*SE(i,4));

    sigma_CR1_se(i,iter)=Fi_se(i,iter)*sigma_C1_se(i,iter)*...
        ((A_stif_se(i,iter)+0.01*bE_se(i,iter))*...
        SE(i,6))/(A_stif_se(i,iter)+0.01*SE(i,5)*SE(i,6));

    %-----%
    % Torsional buckling of flanged stiffeners %
    %-----%

    ef_se(i,iter)=SE(i,1)+0.5*SE(i,4); % For angles and T bars
    Aw_se(i,iter)=(ef_se(i,iter)-0.5*SE(i,4))*SE(i,2);
    Af_se(i,iter)=SE(i,3)*SE(i,4);

```

```

Ip_se(i,iter)= (((Aw_se(i,iter)*(ef_se(i,iter)-...
                0.5*SE(i,4))^2)/3+Af_se(i,iter)*...
                (ef_se(i,iter)^2))/3)*10^-4;

It_se(i,iter)=(((ef_se(i,iter)-0.5*SE(i,4))*SE(i,2)^3)/...
                (3*10^4))* (1-0.63*(SE(i,2)/(ef_se(i,iter)-
0.5*...
                SE(i,4))))+(((SE(i,3)*SE(i,4)^3)/(3*10^4))* (1-
0.63*SE(i,4)/SE(i,3)));

Iw_se(i,iter)=(Af_se(i,iter)*(ef_se(i,iter)^2)*...
                (SE(i,3)^2)/(12*10^6))* ((Af_se(i,iter)+2.6*...
                Aw_se(i,iter))/(Af_se(i,iter)+Aw_se(i,iter)));
% Iw_se(i,iter)=((SE(i,3)^3)*SE(i,4)*(ef(i,iter))^2)/(12*10^6);
%for T-bars
% Iw_se(i,iter)=(SE(i,1)*(SE(i,2)^3)/(36*10^6)

epsilon_se(i,iter)=1+100*((1stf^4)/(Iw_se(i,iter))*((SE(i,5)/...
                (SE(i,6)^3))+4*(ef_se(i,iter)-
0.5*SE(i,4))/(3*SE(i,2)^3))))^1/2;

sigma_ET_se(i,iter)=(E/(Ip_se(i,iter)))*((epsilon_se(i,iter)*...
                pi^2*Iw_se(i,iter)*10^-4)/(1stf^2)+0.385*It_se(i,iter));

% Euler torsional buckling stress sigma_E2
if e_rel_se(i,iter)>0;
    sigma_E2_se(i,iter)=sigma_ET_se(i,iter);
else
    sigma_E2_se(i,iter)=0;
end

% Critical stress sigma_C2
if sigma_E2_se(i,iter)>(SE(i,7))/2*e_rel_se(i,iter)
    sigma_C2_se(i,iter)=SE(i,7)*(1-(SE(i,7)*e_rel_se(i,iter))/...
                (4*sigma_E2_se(i,iter)));
else
    sigma_C2_se(i,iter)= sigma_E2_se(i,iter)/e_rel_se(i,iter);
end

if vita_E_se(i,iter)>1.25;
    sigma_CP_se(i,iter)= ((2.25/vita_E_se(i,iter)-...
                (1.25/vita_E_se(i,iter)^2)))*SE(i,7);
else
    sigma_CP_se(i,iter)= SE(i,7);
end

% Critical stress sigma_CR2
sigma_CR2_se(i,iter)=Fi_se(i,iter)*((A_stif_se(i,iter)*...
                sigma_C2_se(i,iter)+0.01*SE(i,5)*SE(i,6)*...
                sigma_CP_se(i,iter))/(A_stif_se(i,iter)+...
                0.01*SE(i,5)*SE(i,6)));

%-----%
% Web local buckling of flanged stiffeners %

```

```

%-----%
if e_rel_se(i,iter)>0;
vita_w_se(i,iter)=SE(i,1)/SE(i,2)*((e_rel_se(i,iter)*SE(i,7))/E)^0.5;
else
vita_w_se(i,iter)=0;
end

if vita_w_se(i,iter)>1.25;
    hwe_se(i,iter)= ((2.25/vita_w_se(i,iter)-...
                    (1.25/vita_w_se(i,iter)^2))) *SE(i,1);
else
    hwe_se(i,iter)= SE(i,1);
end

sigma_CR3_se(i,iter)=Fi_se(i,iter)*SE(i,7)*((bE_se(i,iter)*...
                    SE(i,6)+hwe_se(i,iter)*SE(i,2)+SE(i,3)*...
                    SE(i,4))/(SE(i,5)*SE(i,6)+SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)...
                    *SE(i,4)));

stress_1(i,iter)=min(sigma_CR1_se(i,iter),sigma_CR3_se(i,iter));
stress_2(i,iter)=min(sigma_CR2_se(i,iter),sigma_CR3_se(i,iter));

if e_rel_se(i,iter)< 0;
    sigma_CR_se(i,iter)= SE(i,7)*Fi_se(i,iter);
else
    sigma_CR_se(i,iter)=min(stress_1(i,iter),stress_2(i,iter));
end

%-----%
% Total Force of structural elements %
%-----%
A_se(i,iter)= SE(i,1)*SE(i,2)+SE(i,3)*SE(i,4)+SE(i,5)*SE(i,6);
Force_eL_se(i,iter)= A_se(i,iter)*sigma_CR_se(i,iter)/1000;
Moment_eL_se(i,iter)=Force_eL_se(i,iter)*(SE(i,8)-Zna(iter));
Force_se(iter)= sum( Force_eL_se(:,iter));
Moment_se(iter)=sum( Moment_eL_se(:,iter));
end

%-----%
% CALCULATIONS FOR HARD CORNERS %
%-----%

for b=1:m2
    e_el_hc(b,iter)=dk*iter*(HC(b,3)-Zna(iter));
    e_yd_hc(b,iter)=HC(b,2)/E;
    e_rel_hc(b,iter)=e_el_hc(b,iter)/e_yd_hc(b,iter);

    if e_rel_hc(b,iter)<-1;
        Fi_hc(b,iter) = -1;
    elseif e_rel_hc(b,iter)>=-1 && e_rel_hc(b,iter)<1;
        Fi_hc(b,iter) = e_rel_hc(b,iter);
    else e_rel_hc(b,iter)>1;
        Fi_hc(b,iter) = 1;
    end
end

```

```

sigma_CR_hc(b,iter)= Fi_hc(b,iter)*HC(b,2);

%-----%
% Total Force of hard corners %
%-----%

A_hc(b,iter)= HC(b,1);
Force_eL_hc(b,iter)= A_hc(b,iter)*sigma_CR_hc(b,iter)/1000;
Moment_eL_hc(b,iter)=Force_eL_hc(b,iter)*(HC(b,3)-Zna(iter));
Force_hc(iter)= sum( Force_eL_hc(:,iter));
Moment_hc(iter)=sum( Moment_eL_hc(:,iter));

end

%-----%
% CALCULATIONS FOR FLAT BARS %
%-----%

for c=1:m3
    e_el_fb(c,iter)=dk*iter*(FB(c,6)-Zna(iter));
    e_yd_fb(c,iter)=FB(c,5)/E;
    e_rel_fb(c,iter)=e_el_fb(c,iter)/e_yd_fb(c,iter);

    if e_rel_fb(c,iter)<-1;
        Fi_fb(c,iter) = -1;
    elseif e_rel_fb(c,iter)>=-1 && e_rel_fb(c,iter)<1;
        Fi_fb(c,iter) = e_rel_fb(c,iter);
    else e_rel_fb(c,iter)>1;
        Fi_fb(c,iter) = 1;
    end

%-----%
% Beam Column Buckling of flat bars %
%-----%

    if e_rel_fb(c,iter)>0;
        vita_E_fb(c,iter)=
        FB(c,3)/FB(c,4)*((e_rel_fb(c,iter)*FB(c,5))/E)^0.5;
    else
        vita_E_fb(c,iter)=0;
    end

    if vita_E_fb(c,iter)>1.25;
        bE_fb(c,iter)=((2.25/vita_E_fb(c,iter))-(1.25/...
        (vita_E_fb(c,iter))^2))*FB(c,3);
    else
        bE_fb(c,iter)= FB(c,3);
    end

    if vita_E_fb(c,iter)>1;
        bE1_fb(c,iter)= FB(c,3)/vita_E_fb(c,iter);
    else
        bE1_fb(c,iter)= FB(c,3);
    end

    A_E_fb(c,iter)=0.01*(FB(c,1)*FB(c,2)+bE_fb(c,iter)*FB(c,4));
    zp_fb(c,iter)=0.1*(0.5*bE1_fb(c,iter)*(FB(c,4)^2)+FB(c,1)*...
    FB(c,2)*(FB(c,4)+0.5*FB(c,1)))/A_E_fb(c,iter);

```

```

I_E_fb(c,iter)=10^-5*((bE1_fb(c,iter))*(FB(c,4))^3)/12+...
                (bE1_fb(c,iter))*(FB(c,4))*(zp_fb(c,iter)-...
                FB(c,4)/2)^2+FB(c,1)^3*FB(c,2)/12+FB(c,1)*...
                FB(c,2)*(zp_fb(c,iter)-FB(c,4)-FB(c,1)/2)^2));

% Euler column buckling stress  $\sigma_{E1}$ 
if e_rel_fb(c,iter)>0;
    sigma_E1_fb(c,iter)= pi^2*E*(I_E_fb(c,iter)/...
                        (A_E_fb(c,iter)*lstf^2))*10^-4;
else
    sigma_E1_fb(c,iter)=0;
end

% Critical stress  $\sigma_{C1}$ 
if sigma_E1_fb(c,iter)>(FB(c,5)/2)*e_rel_fb(c,iter)
    sigma_C1_fb(c,iter)=FB(c,5)*(1-(FB(c,5)*e_rel_fb(c,iter))/...
                        (4*sigma_E1_fb(c,iter)));
else
    sigma_C1_fb(c,iter)= sigma_E1_fb(c,iter)/e_rel_fb(c,iter);
end

% Critical stress  $\sigma_{CR1}$ 
A_stif_fb(c,iter)= 0.01*FB(c,1)*FB(c,2);

sigma_CR1_fb(c,iter)=Fi_fb(c,iter)*sigma_C1_fb(c,iter)*...
                    ((A_stif_fb(c,iter)+0.01*bE_fb(c,iter)*...
                    FB(c,4))/(A_stif_fb(c,iter)+0.01*FB(c,3)*FB(c,4)));

%-----%
% Torsional buckling of flat bars %
%-----%

ef_fb(c,iter)=FB(c,1); % For flat bars
Aw_fb(c,iter)=ef_fb(c,iter)*FB(c,2);
Af_fb(c,iter)=0;

Ip_fb(c,iter)= (FB(c,1)^3*FB(c,2))/(3*10^4);

It_fb(c,iter)=(FB(c,1)*FB(c,2)^3)/(3*10^4)*(1-0.63*(FB(c,2)/...
                    FB(c,1)));
Iw_net_fb(c,iter)=(FB(c,1)^3*FB(c,2)^3)/(36*10^6);

epsilon_fb(c,iter)=1+100*((lstf^4)/(Iw_net_fb(c,iter))*((FB(c,3)/...
                    (FB(c,4)^3))+4*(ef_fb(c,iter))/(3*FB(c,2)^3)))^1/2;

sigma_ET_fb(c,iter)=(E/(Ip_fb(c,iter)))*((epsilon_fb(c,iter)*...
                    pi^2*Iw_net_fb(c,iter)*10^-4)/(lstf^2)+0.385*It_fb(c,iter));

% Euler torsional buckling stress  $\sigma_{E2}$ 
if e_rel_fb(c,iter)>0;
    sigma_E2_fb(c,iter)=sigma_ET_fb(c,iter);
else
    sigma_E2_fb(c,iter)=0;
end

```

```

% Critical stress  $\sigma_{C2}$ 
if sigma_E2_fb(c,iter)>(FB(c,5))/2*e_rel_fb(c,iter)
    sigma_C2_fb(c,iter)=FB(c,5)*(1-(FB(c,5)*e_rel_fb(c,iter))/...
        (4*sigma_E2_fb(c,iter)));
else
    sigma_C2_fb(c,iter)= sigma_E2_fb(c,iter)/e_rel_fb(c,iter);
end

if vita_E_fb(c,iter)>1.25;
    sigma_CP_fb(c,iter)= ((2.25/vita_E_fb(c,iter)-...
        (1.25/vita_E_fb(c,iter)^2)))*FB(c,5);
else
    sigma_CP_fb(c,iter)= FB(c,5);
end

% Critical stress  $\sigma_{CR2}$ 
sigma_CR2_fb(c,iter)=Fi_fb(c,iter)*((A_stif_fb(c,iter)*...
    sigma_C2_fb(c,iter)+0.01*FB(c,3)*FB(c,4)*...
    sigma_CP_fb(c,iter))/(A_stif_fb(c,iter)+...
    0.01*FB(c,3)*FB(c,4));

%------%
% Web local buckling of flat bars %
%------%

if vita_E_fb(c,iter)>1.25;
    sigma_CP_fb(c,iter)= ((2.25/vita_E_fb(c,iter)-...
        (1.25/vita_E_fb(c,iter)^2)))*FB(c,5);
else
    sigma_CP_fb(c,iter)= FB(c,5);
end

%Euler buckling stress  $\sigma_{E4}$ 
if e_rel_fb(c,iter)>0;
    sigma_E4(c,iter)=160000*(FB(c,2)/FB(c,1))^2;
else
    sigma_E4(c,iter)=0;
end

%Critical stress  $\sigma_{C4}$ 
if sigma_E4(c,iter)>(FB(c,5))/2*e_rel_fb(c,iter)
    sigma_C4(c,iter)=FB(c,5)*(1-(FB(c,5)*e_rel_fb(c,iter))/...
        (4*sigma_E4(c,iter)));
else
    sigma_C4(c,iter)= sigma_E4(c,iter)/e_rel_fb(c,iter);
end

sigma_CR4_fb(c,iter)=Fi_fb(c,iter)*((FB(c,3)*FB(c,4)*...
    sigma_CP_fb(c,iter)+0.01*A_stif_fb(c,iter)*...
    sigma_C4(c,iter))/(FB(c,3)*FB(c,4)+...
    0.01*A_stif_fb(c,iter));

stress_3(c,iter)=min(sigma_CR1_fb(c,iter),sigma_CR4_fb(c,iter));

```

```

stress_4(c,iter)=min(sigma_CR2_fb(c,iter),sigma_CR4_fb(c,iter));

if e_rel_se(i,iter)< 0;
    sigma_CR_fb(c,iter)= FB(c,5)*Fi_fb(c,iter);
else
    sigma_CR_fb(c,iter)=min(stress_3(c,iter),stress_4(c,iter));
end

%-----%
% Total Force of flat bars                                     %
%-----%
A_fb(c,iter)=FB(c,1)*FB(c,2)+FB(c,3)*FB(c,4);
Force_eL_fb(c,iter)= A_fb(c,iter)*sigma_CR_fb(c,iter)/1000;
Moment_eL_fb(c,iter)=Force_eL_fb(c,iter)*(FB(c,6)-Zna(iter));
Force_fb(iter)= sum(Force_eL_fb(:,iter));
Moment_fb(iter)=sum( Moment_eL_fb(:,iter));

%end

%-----%
% CALCULATIONS FOR TRANSVERSELY STIFFENED PLATE PANEL      %
%-----%

e_el_tspp(iter)=dk*iter*(TSPP(1,5)-Zna(iter));
e_yd_tspp(iter)=TSPP(4)/E;
e_rel_tspp(iter)=e_el_tspp(iter)/e_yd_tspp(iter);

if e_rel_tspp(iter)<-1;
    Fi_tspp(iter) = -1;
elseif e_rel_tspp(iter)>=-1 && e_rel_tspp(iter)<1;
    Fi_tspp(iter) = e_rel_tspp(iter);
else e_rel_tspp(iter)>1;
    Fi_tspp(iter) = 1;
end

if e_rel_tspp(iter)>0;
    vita_E_tspp(iter)=
TSPP(3)/TSPP(2)*((e_rel_tspp(iter)*TSPP(4))/E)^0.5;
else
    vita_E_tspp(iter)=0;
end

stress_9(iter)=TSPP(4)*Fi_tspp(iter);
stress_10(iter)=TSPP(4)*Fi_tspp(iter)*((TSPP(3)/1000*lstf)* ...
    (((2.25/vita_E_tspp(iter))-(1.25/(vita_E_tspp(iter))^2))+0.1*...
    (1-TSPP(3)/(1000*lstf))*(1+(1/(vita_E_tspp(iter))^2)))));

sigma_CR5_tspp(iter)=min(stress_9(iter),stress_10(iter));

%-----%
% Total Force of transversely stiffened plate panel         %
%-----%
A_tspp(iter)=TSPP(1)*TSPP(2);

```



```
Force_tspp(iter)= A_tspp(iter)*sigma_CR5_tspp(iter)/1000;
Moment_tspp(iter)=Force_tspp(iter)*(TSPP(5)-Zna(iter));

% Moment_fb(iter)=sum( Moment_eL_fb(:,iter));

%------%
% Total Force %
%------%

SF(iter)=Force_se(iter)+Force_hc(iter)+Force_tspp(iter)+...
        Force_fb(iter);

%------%
% Total Moment %
%------%

Mu(iter)=2*(Moment_se(iter)+Moment_hc(iter)+Moment_tspp(iter)+...
        Moment_fb(iter));

%------%
% Adjustment of the neutral axis %
%------%

Tol=1500;

if SF(iter)>Tol;
    Zna(iter)=Zna(iter)+0.00009;
elseif SF(iter)<-Tol;
    Zna(iter)=Zna(iter)-0.00009;
else
    Zna(iter)=Zna(iter);
    break
end
end
end

end

%------%
% Plots %
%------%

Curv1=(dk:dk:1.0*kf)';
Curv2=(0:dk:1.0*kf)';

figure(1)
plot(Curv1,Mu);
figure(2)
plot(Curv2,Zna);
```

