

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ

**ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΛΟΙΟΥ *BULK CARRIER*
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΟΙΝΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ
ΕΝΩΣΗΣ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ**

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ

ΠΕΤΡΟΒΙΤΣΟΥ Ε. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

A.M.:15077

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΘΕΟΔΟΥΛΙΔΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2021

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΠΛΟΙΟΥ *BULK CARRIER* ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΚΟΙΝΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΕΝΩΣΗΣ
ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ

Εξεταστική Επιτροπή

Θεοδουλίδης Αλέξανδρος

Πολίτης Κωνσταντίνος

Πέππα Σοφία

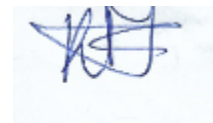
ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Πετροβίτσου Αικατερίνη του Ελευθερίου, με αριθμό μητρώου 15077 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα



Αφιερώνεται στους γονείς μου..

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμότερες ευχαριστίες μου και εκτίμησή μου, στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Θεοδουλίδη Αλέξανδρο, για την βοήθεια και τις πολύτιμες συμβουλές του, στην διεκπεραίωση αυτής της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του τμήματος, που με δίδαξαν και με κατεύθυναν όλα αυτά τα χρόνια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για την πολύτιμη υποστήριξη, που μου προσφέρει καθημερινά, σε όλους τους τομείς.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην ακόλουθη διπλωματική εργασία, γίνεται ο υπολογισμός στη μέγιστης αντοχής πλοίου *Bulk Carrier* με χρήση των κοινών κανονισμών της διεθνούς ένωσης νηογνομόνων. Αρχικά γίνεται μία σύντομη αναφορά στους κανονισμούς *CSR*, καθώς επίσης και σε βασικές έννοιες οι οποίες σχετίζονται με τη συγκεκριμένη μελέτη. Εν συνεχεία, γίνεται η ανάλυση της μεθόδου *Smith*, η οποία και χρησιμοποιήθηκε τόσο για την εύρεση της μέγιστης αντοχής του προαναφερθέντος *Bulk Carrier* όσο και για ένα πειραματικό *box-girder*. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε πρόγραμμα *Excel* με τη δημιουργία κατάλληλου λογισμικού. Ο έλεγχος γίνεται τόσο για κατάσταση *hogging* όσο και για κατάσταση *sagging*. Τέλος καταλήγουμε στη διεξαγωγή συμπερασμάτων της διαδικασίας.

ABSTRACT

In the following senior thesis, the ultimate strength of the Bulk Carrier is calculated using the common regulations of the International Association of Classification Societies. First, a brief reference is made to the CSR regulations, as well as to key concepts related to the specific study. Next, the Smith method is analyzed, which was used both to find the maximum strength of the aforementioned Bulk Carrier and for an experimental box-girder. The method is applied to an Excel program by creating appropriate software. The test is performed for both hogging and sagging mode. Finally we come to the conclusions of the process.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1	8
Εισαγωγή	8
1.1-Γενικά.....	8
1.2-Μέθοδοι Προσδιορισμού Διαμήκους Αντοχής	8
1.3-Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας	9
Κεφάλαιο 2	11
Κοινοί Κανονισμοί του <i>IACS</i>	11
2.1-Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων	11
2.2- <i>CSR (Common Structural Rules)</i>	12
2.2.1 Γενικά.....	12
2.2.2 Πλεονεκτήματα Χρήσης της Μεθόδου	14
Κεφάλαιο 3	20
Υπολογισμός της Μέγιστης Αντοχής με τη Μέθοδο <i>Smith</i>	20
3.1-Γενικά.....	20
3.2-Μέθοδος <i>Smith</i>	20
3.2.1-Περιγραφή Βημάτων Μεθόδου	20
3.2.2-Παραδοχές της Μεθόδου.....	24
3.2.3-Δομικά Στοιχεία της Διατομής.....	25
3.2.4-Καμπύλες σ - ϵ των Δομικών Στοιχείων της Διατομής	26
Κεφάλαιο 4	35
Περιγραφή Αναπτυχθέντος Λογισμικού σε Πλοίο <i>Bulk Carrier</i>	35
4.1-Γενικά	35
4.2-Κατασκευαστικά Στοιχεία <i>Bulk Carrier</i>	35
4.2.1- <i>Bulb Flats</i>	43
4.2.2- <i>Flat Bars</i>	46
4.2.3- <i>Hard Corners</i>	48
4.2.4- <i>Plates</i>	48
4.3-Περιγραφή Υπολογιστικών Φύλλων <i>Excel</i>	50
4.3.1-Γενικά.....	50
4.3.2-Καμπύλες σ - ϵ	50
4.3.3-Καμπύλες <i>M-χ</i>	51
Κεφάλαιο 5	56

Εφαρμογή του Αναπτυχθέντος Λογισμικού σε Ενισχυμένο <i>box-girder</i>	56
5.1-Γενικά	56
5.2-Περιγραφή Αναπτυχθέντος Λογισμικού	57
5.2.1-Υπολογισμός Ουδέτερου Άξονα	57
5.2.2-Υπολογισμός Καμπυλών σ - ϵ Δομικών Στοιχείων	58
5.2.3-Υπολογισμός Καμπυλών M - χ για <i>Hogging</i> και <i>Sagging</i>	71
Κεφάλαιο 6	76
Εφαρμογή του Αναπτυχθέντος Λογισμικού σε Πλοίο <i>Bulk Carrier</i>	76
6.1-Γενικά	76
6.2-Κατασκευή Καμπυλών σ - ϵ	76
6.2.1- <i>Hard corners</i>	76
6.2.2- <i>Plates</i>	77
6.2.3- <i>Bulb Flats</i>	79
6.2.4- <i>Flat Bars</i>	83
6.3-Κατασκευή Καμπύλης M - χ	86
Κεφάλαιο 7	89
Συμπεράσματα	89
Βιβλιογραφία	90

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1-Γενικά

Τα πλοία είναι πολύπλοκες κατασκευές οι οποίες λειτουργούν σε αντίξοες συνθήκες, ενώ πέρα από τη διάβρωση υπάρχει και ένα απρόβλεπτο περιβάλλον. Έτσι είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής του. Ο υπολογισμός της διαμήκουσ αντοχής των πλοίων βασίζεται στη παραδοχή ότι το πλοίο συμπεριφέρεται ως δοκάρι. Η κάθε εγκάρσια τομή φορτίζεται, εάν η άντωση που της ασκείται, δεν εξισορροπείται με το βάρος της. Στις πραγματικές κατασκευές αυτό ισχύει πάντοτε, ακόμα και σε κατάσταση ήρεμου νερού, αναπτύσσονται στη γάστρα του πλοίου διαμήκεισ καμπτικές ροπές και τέμνουσες δυνάμεισ.

Εάν εξεταστούν οι κατανομές των ορθών τάσεων που οφείλονται στη διαμήκη κάμψη, φαίνεται ότι αυτές μεγιστοποιούνται στις περιοχές της κατασκευής που είναι περισσότερο απομακρυσμένες από τον ουδέτερο άξονα. Για τις περισσότερες διατομές πλοίων, ο ουδέτερος άξονα βρίσκεται πλησιέστερα στον πυθμένα και κατά συνέπεια οι υψηλότερες τάσεισ αναπτύσσονται στο κύριο κατάστρωμα. Όταν η μέση τομή του πλοίου συμπίπτει με κοίλο κύματος, οι ορθές τάσεισ στο κατάστρωμα είναι θλιπτικές. Επειδή όμως η κατανομή των ορθών τάσεων εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της καμπτικής ροπής σε κάθε εγκάρσια τομή, οι μέγιστεσ ορθές τάσεισ θα παρατηρηθούν στην περιοχή της μέσησ τομής. Εάν η αντοχή στην περιοχή είναι ανεπαρκής, θα προκύψει λυγισμός και σταδιακή ελαστοπλαστική κατάρρευση της περιοχής αυτήσ. Είναι πιθανό δε, το πλοίο να κοπεί σε δύο τμήματα, εφόσον ακολουθήσει εμφάνιση ρήγματος.

1.2-Μέθοδοι Προσδιορισμού Διαμήκουσ Αντοχής

Υπάρχουν διάφορεσ μέθοδοι για τον προσδιορισμό της διαμήκουσ αντοχής του πλοίου, οι οποίεσ μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίεσ:

- *NonLinear Finite Element (INFEM)*
- *Structural Unit Idealization Method (ISUM)*
- *Simplified Incremental-Iterative Method*

Παρακάτω αναφέρονται ορισμένα βασικά στοιχεία για κάθε μέθοδο υπολογισμού.

NonLinear Finite Element (INFEM)

Η πρώτη μέθοδος διακριτοποιεί τη μεταλλική κατασκευή σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων, ενώ καθένα από αυτά, ανήκει σε μία ομάδα. Αποτελούνται από μικρότερα στοιχεία (*elements*), τα οποία συνδέονται κατάλληλα με κόμβους (*nodes*), ώστε να αναπαρασταθεί σωστά η συμπεριφορά του μοντέλου. Αρχικά, για μια ορισμένη περιοχή επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας και στη συνέχεια ακολουθεί η σύνθεση και η επίλυση όλων αυτών των εξισώσεων στα πλαίσια της κατασκευής. Για κάθε στοιχείο επιλύεται η εξίσωση $F=K \times u$, όπου συνδέει τις εξωτερικά επιβαλλόμενες φορτίσεις με τις μετατοπίσεις στους κόμβους. Το K είναι το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής. Αφού επιτευχθεί ο υπολογισμός των μετατοπίσεων των κόμβων, προσδιορίζονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις του κάθε στοιχείου.

Structural Unit Idealization Method (ISUM)

Η δεύτερη, είναι μια εναλλακτική λύση, η οποία προτάθηκε από τους *Ueda* και *Rashed* (1974, 1984), ώστε να μειώσουν σημαντικά τόσο τον χρόνο κατασκευής του μοντέλου, όσο και τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο. Σε αντίθεση με τη μέθοδο *NLFEM*, κατά την οποία η κατασκευή διαιρείται σε μικρότερα στοιχεία (κόμβους) με πολλούς βαθμούς ελευθερίας και πυκνό πλέγμα, η μέθοδος *Idealized Structural Unit Method (ISUM)* μειώνει τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότεροι κόμβοι. Έτσι μειώνονται και οι άγνωστοι στο μητρώο ακαμψίας $F=k\Delta \times \Delta$. Αυτό επιτυγχάνεται με τη θεώρηση μεγάλων δομικών μονάδων, αντίστοιχου μεγέθους των κατασκευαστικών στοιχείων.

Simplified Incremental-Iterative Method

Ο *Smith* ανέπτυξε μία άλλη το 1997 σύμφωνα με την οποία γίνεται θεώρηση του πλοίου ως καμπτόμενο δοκάρι (*beam theory*). Ενσωματώθηκε στους κανονισμούς *CSR*, ενώ η ουσία της επαυξητικής εύρεση της συνολικής αντίστασης της διατομής του πλοίου σε κάμψη από την άθροιση της συνεισφοράς κάθε δομικού στοιχείου. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται στην εύρεση της μέγιστης αντοχής, στην παρούσα εργασία και θα αναλυθεί εκτενέστερα παρακάτω.

1.3-Διάρθρωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο *Κεφάλαιο 2* γίνεται μία παρουσίαση της Διεθνούς Ένωσης Νηογνομόνων, των *Common Structural Rules* και ορισμένα πλεονεκτήματά τους.

Στο *Κεφάλαιο 3* γίνεται αναλυτική περιγραφή του υπολογισμού της μέγιστης αντοχής με τη μέθοδο *Smith*, αναφέρονται τα βήματα της μεθόδου με τους τύπους υπολογισμού, οι

παραδοχές, τα διαγράμματα σ - ϵ και ο τρόπος διαχωρισμού των κατασκευαστικών στοιχείων της διατομής.

Στο *Κεφάλαιο 4* γίνεται περιγραφή του λογισμικού που δημιουργήθηκε σε περιβάλλον *Excel* για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής πλοίου *bulk carrier*. Γίνεται ο υπολογισμός του ουδέτερου άξονα της διατομής και έπειτα η περιγραφή διαχωρισμού των κατασκευαστικών στοιχείων της διατομής σε ομάδες, καθώς και ανάλυση των τρόπων αστοχίας τους. Επιπροσθέτως αναφέρονται αξιοσημειώτες εντολές και κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του λογισμικού.

Στο *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου *Smith* σε πειραματικό *box-girder* σε περιβάλλον *Excel*, γίνεται περιγραφή των υπολογιστικών φύλλων, όπως επίσης και καταγραφή των εντολών και κωδίκων που χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια παρατίθενται οι πίνακες και τα διαγράμματα που κατασκευάστηκαν.

Στο *Κεφάλαιο 6* παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου *Smith* στο πλοίο *bulk carrier* σε περιβάλλον *Excel* με την παράθεση των πινάκων και των διαγραμμάτων που κατασκευάστηκαν.

Κεφάλαιο 2

Κοινοί Κανονισμοί του IACS

2.1-Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων

Η Διεθνής Ένωση Νηογνώμωνων (*International Association of Classification Societies – IACS*) αποτελείται από δώδεκα διεθνώς αναγνωρισμένους νηογνώμονες με έδρα το Λονδίνο. Επίσης, ιδρύθηκε στις 11 Σεπτεμβρίου 1968 στο Αμβούργο.

Το κύριο μέλημα της Διεθνούς Ένωσης Νηογνώμωνων αφορά τα επίπεδα ασφάλειας των πλοίων, τα οποία κατατάσσει σε κλάσεις, ενώ ταυτόχρονα ασχολείται και με ζητήματα, τα οποία αφορούν το περιβάλλον. Οι θάλασσες είναι απαραίτητο να μένουν καθαρές, όπως επίσης και να μην υπάρχει κίνδυνος ρύπανσης τους από τα πλοία. Επιπροσθέτως, συμβάλλει στην ασφάλεια της ναυσιπλοΐας, την έρευνα και την ανάπτυξη.

Περισσότερο από το 90% του παγκόσμιου διακινούμενου φορτίου, σε χωρητικότητα, γίνεται μέσω θαλάσσης από τα πλοία. Τα πρότυπα κανόνων, που προκύπτουν από διάφορους παράγοντες, είναι εκείνα που ορίζονται από τους μεγαλύτερους νηογνώμονες του κόσμου.

Ο IACS αποτελεί μια μη κυβερνητική οργάνωση και κύριο συνεργάτη του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (*IMO*). Μέσω αυτού εκδίδονται οι διάφορες συμβάσεις του.

Μία από αυτές, με παγκόσμια αποδοχή σήμερα είναι η «Διεθνής Σύμβαση SOLAS» που αφορά την Σύμβαση για την Ασφάλεια Ζωής στη Θάλασσα.

Τα μέλη του IACS είναι:

- Ο Αγγλικός Νηογνώμονας, (*LR*)
- Ο Αμερικάνικος Νηογνώμονας, (*ABS*)
- Ο Γαλλικός Νηογνώμονας, (*BV*)
- Ο Γερμανικός Νηογνώμονας, (*DNV-GL*)
- Ο Ιαπωνικός Νηογνώμονας, (*NK*)
- Ο Ινδικός Νηογνώμονας (*IRS*)
- Ο Ιταλικός Νηογνώμονας, (*RINA*)
- Ο Κινέζικος Νηογνώμονας, (*CCS*)
- Ο Κορεάτικος Νηογνώμονας, (*KR*)
- Ο Κροατικός Νηογνώμονας, (*CRS*)
- Ο Πολωνικός Νηογνώμονας, (*PRS*)

- Ο Ρωσικός Νηογνώμονας, (RS)

ABS	American Bureau of Shipping	ⓈA1E
BV	Bureau Veritas	1
CCS	China Classification Society	*ZCA
CRS	Croatian Register of Shipping	*100A1
DNV GL	Det Norske Veritas / Germanischer Lloyd	Ⓢ1A1/Ⓢ100A5
IRS	Indian Register of Shipping	ⓈSUL
KR	Korean Register of Shipping	ⓈKRS 1
LR	Lloyds Register of Shipping	Ⓢ100A1
NK	Nippon Kaiji Kiokai	NS* MMS*
PRS	Polish Registry of Shipping	*KM
RINA	Registro Italiano Navale	100-A-1.1
RS	Russian Maritime Register of Shipping	KM Ⓢ

Πίνακας 2.1- Σύμβολα μελών του IACS

Η Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων εκδίδει τις ακόλουθες κατηγορίες «νομοθετημάτων»:

- *Unified Requirements*
- *Unified Interpretations*
- *Procedural Requirements*
- *Recommendations*
- *Membership Criteria, Guidance and Procedures*
- *Procedures*
- *Common Structural Rules*

2.2-CSR (*Common Structural Rules*)

2.2.1 Γενικά

Οι κοινοί κατασκευαστικοί κανόνες (CSR) αναπτύχθηκαν με στόχο τον καλύτερο συντονισμό της ναυπηγικής βιομηχανίας, ώστε να επιτευχθεί η σχεδίαση ασφαλέστερων πλοίων, με γνώμονα το περιβάλλον αλλά και την ίδια την κατασκευή. Για πρώτη φορά, προτάθηκαν το 2004, ενώ άρχισαν να χρησιμοποιούνται από την 1η Απριλίου του 2006. Έως και σήμερα συνεχίζεται η ανανέωση και η προσαρμογή τους σε νεότερα δεδομένα και απαιτήσεις. Οι CSR αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας τα καλύτερα τμήματα των προ-

CSR κανονισμών, όπως επίσης και την εμπειρία σε συνδυασμό με τους πόρους των Νηογυμνώνων, οι οποίοι συμμετέχουν σε αυτή την πρωτοβουλία, έχοντας ως στόχο μία σαφή μεθοδολογία σχεδίασης της κατασκευής.

Το αντικείμενο των CSR είναι ο καθορισμός μίας κατασκευής, η οποία μέσω συγκεκριμένων απαιτήσεων θα καταλήξει σε αποδεκτά επίπεδα αντοχής της μεταλλικής κατασκευής, ώστε να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο ο κίνδυνος κατασκευαστικής αστοχίας. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ασφάλεια της ανθρώπινης ζωής, του περιβάλλοντος και της περιουσίας. Μέσω των προαναφερθέντων κανονισμών, γίνεται ο προσδιορισμός των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, των απαιτήσεων για προστασία λόγω διάβρωσης καθώς και οι βασικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες. Επιπλέον, προσδιορίζονται οι διάφορες καταστάσεις φόρτωσης, με γνώμονα τις στατικές και δυναμικές φορτίσεις, αλλά και τις φορτίσεις σε περίπτωση ατυχήματος, ενώ ορίζουν τις ελάχιστες απαιτήσεις διαστάσεων που προκύπτουν από την κάμψη, τον λυγισμό και την κόπωση. Τέλος, προσδιορίζουν τα ελάχιστα αποδεκτά όρια διαστάσεων, με βάση εμπειρικούς κανόνες απαιτήσεων, επιπροσθέτως, ελέγχουν τη σχεδίαση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων για την εκτίμηση της αντοχής, όπως επίσης και της κόπωσης.

Οι κανονισμοί αυτοί εφαρμόζονται στα ακόλουθα πλοία:

- *Bulk carriers* και *double hull oil tankers*
- Αυτοκινούμενα πλοία με απεριόριστη πλοήγηση
- Πλοία με συμβόλαιο κατασκευής από την 1^η Ιουλίου 2015 και μετά.

Επιπροσθέτως, ισχύουν για πλοία τα οποία είναι κατασκευασμένα από χαλύβδινες πλάκες, οι οποίες έχουν συγκολληθεί. Η δομή του πλοίου πλαισιώνεται από διαμήκη ή εγκάρσια διαφράγματα και ενδιάμεσους νομείς. Στους τυπικούς κανονισμούς συμπεριλαμβάνεται ότι:

- Το διπύθμενο, το οποίο θα έχει βάθος σύμφωνο με τις ισχύουσες νομικές απαιτήσεις
- Το μηχανοστάσιο βρίσκεται στην *aft* περιοχή των δεξαμενών φορτίου.

Τα ακόλουθα πλοία, αν και ταξινομούνται στην κατηγορία των *bulk carriers* από σχεδιαστές, δεν χρειάζεται να κατασκευαστούν σύμφωνα με τους CSR:

- *Ore-Bulk-Oil Carriers* ή *OBO Carriers*
- *Bulk Carriers* που μεταφέρουν ξύλο ή παρεμφερές φορτίο
- *Bulk Carriers* με εγκαταστάσεις εκφόρτωσης
- Σε περίπτωση μεταφοράς τσιμέντου, τέφρας (*fly ash*) ή ζάχαρης, τα *grabs* που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης, ζυγίζουν λιγότερο από δέκα τόνους λόγω μικρής πυκνότητας του φορτίου. Ως εκ τούτου, για αυτά τα πλοία η ναυπήγηση σύμφωνα με τους CSR δεν είναι απαιτούμενη. Σε περίπτωση που το υπάρχον φορτίο απαιτεί *grabs* που ζυγίζουν πάνω από δέκα τόνους, τότε το πλοίο είναι αναγκαίο να ναυπηγείται σύμφωνα με αυτούς.

2.2.2 Πλεονεκτήματα Χρήσης της Μεθόδου

Τα προηγούμενα χρόνια οι κατασκευές των *bulk carriers* και των *oil tankers* ήταν αποκλειστικά αρμοδιότητα του νηογνώμονα στα οποία ήταν εγγεγραμμένα. Όμως, με την πάροδο των ετών, προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας ενός ενιαίου συνόλου κοινών δομικών κανόνων ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από όλους σχεδιαστές ανεξαρτήτως νηογνώμονα.

Ως εκ τούτου, δημιουργήθηκαν δύο ξεχωριστές ερευνητικές ομάδες για τη συλλογή στατιστικών δεδομένων, τα οποία θα ήταν ικανά να βοηθήσουν στη μοντελοποίηση των διάφορων καταστάσεων φόρτωσης στη θάλασσα. Αυτές οι πληροφορίες, βοήθησαν αργότερα στη διαμόρφωση εμπειρικών μεθόδων για την εκτίμηση ασφαλών δομικών παραμέτρων. Οι δύο ομάδες έρευνας-μία για τα *bulk carriers* και μία για τα *oil tankers*-αργότερα ενοποιήθηκαν, καθώς είχε προταθεί από τη βιομηχανία πως ήταν προτιμότερο ένα ενιαίο σύνολο κανόνων και για τους δύο τύπους πλοίων.

Παρακάτω θα αναλυθούν οι πιο αξιοσημείωτες πτυχές των *Common Structural Rules*, επισημαίνοντας τα πλεονεκτήματα της έναντι του συστήματος που επικρατούσε παλαιότερα.

Αξιολόγηση της αντοχής σε διαφορετικά βυθίσματα (*drafts*)

Οι *CSR* επικεντρώθηκαν στην αξιολόγηση της αντοχής του πλοίου, σε διαφορετικά βυθίσματα, σε αντίθεση με τους κανόνες που ακολουθούσαν οι νηογνώμονες. Αυτοί οι κανόνες είναι απαραίτητο να ελεγχθούν ως προς τη συμμόρφωση τους για τα ακόλουθα βυθίσματα (*draft conditions*):

- *Scantling draft*: Κατά τη σχεδίαση ενός πλοίου, τα σχέδια του είναι κατασκευασμένα σύμφωνα με το *scantling draft*, το οποίο είναι λίγο ψηλότερο από το *design draft* (4% υψηλότερο). Ο λόγος για τον οποίο διατηρείται πάντα το *scantling draft* στην υψηλότερη πλευρά, σχετίζεται άμεσα με τη λήψη ενός συντελεστή ασφαλείας σε ολόκληρο το δομικό σχεδιασμό. Όσο μεγαλύτερο είναι το βύθισμα, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι υδροστατικές πιέσεις στο *side shell* αλλά και στον πυθμένα της κατασκευής. Για αυτό το λόγο τα σχέδια πάντα κατασκευάζονται λαμβάνοντας υπόψη το *scantling draft* και όχι το *design draft*.
- *Minimum Ballast at midship* στη μέση τομή: Αυτή η κατάσταση συμπεριλήφθηκε πρόσφατα στους *CSR*, ενώ δεν συμπεριλαμβανόταν στους προηγούμενους κανόνες που χρησιμοποιούνταν από τους νηογνώμονες. Ο λόγος που συμπεριλήφθηκε αυτή η κατάσταση, έγκειται στο γεγονός, πως στο συγκεκριμένο βύθισμα η μέση τομή μπορεί να υποστεί περισσότερα φορτία.

- *Minimum Heavy Ballast Draft*: Αφορά μόνο τα *bulk carriers*, όπου μία εκτίμηση σε αυτήν την κατάσταση, απαιτείται για την κατασκευή.
- *Minimum Forward Draft*: Σε αυτήν την κατάσταση το προωαίο τμήμα του πλοίου (περίπου το 25% του μήκους του από το εμπρόσθιο άκρο), υπόκειται σε μεγάλα φορτία λόγω σφυρόκρουσης. Παλαιότερα δεν είχαν συμπεριληφθεί στους κανόνες που χρησιμοποιούνταν από τους νηογνώμονες.

Προηγμένος σχεδιασμός καταστάσεων φόρτωσης (*load scenarios*)

Στους *CSR* έχουν συμπεριληφθεί μελέτες διάφορων καταστάσεων φόρτωσης, μία πτυχή που βοήθησε τις διαδικασίες σχεδιασμού να προχωρήσουν σημαντικά. Παρακάτω γίνεται ανάλυση διάφορων καταστάσεων φόρτωσης:

- *Static Load Scenario*: Αυτή η κατάσταση φόρτωσης αφορά φορτία που δέχεται το πλοίο όταν βρίσκεται στο αγκυροβόλι ή στο λιμάνι. Περιλαμβάνει επίσης τα φορτία στην κατασκευή κατά τη διάρκεια δοκιμής των δεξαμενών. Αυτά τα φορτία δεν έχουν εξάρτηση από το χρόνο.
- *Static and Dynamic Load Scenario*: Είναι η τυπική κατάσταση φόρτωσης ενός πλοίου, ενώ βρίσκεται στη θάλασσα. Τα στατικά φορτία περιλαμβάνουν το φορτίο λόγω της υδροστατικής πίεσης (λαμβάνοντας υπόψη ότι δεν υπάρχει μετατόπιση φορτίου). Τα φορτία λόγω κυμάτων είναι δυναμικής φύσεως, ως αποτέλεσμα του οποίου το συνολικό φορτίο ενός πλοίου μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Οι κανόνες που προϋπήρχαν των *CSR*, δεν μελετούσαν την κατάσταση σύμφωνα με τη μεταβολή ως προς το χρόνο. Αφού συμπεριλήφθηκε η ανάλυση, έγινε πιο ρεαλιστική.
- *Impact Load Scenario*: Ένα πλοίο κινούμενο στη θάλασσα, έρχεται αντιμέτωπο με φορτία λόγω σφυρόκρουσης, *ranting whipping* κλπ., τα οποία είναι φορτία υψηλής συχνότητας. Χρόνια στατιστικών μελετών σχετικά με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από όργανα παρακολούθησης της καταπόνησης της γάστρας του πλοίου, οδήγησαν στη διαμόρφωση εμπειρικών μεθόδων για την πρόβλεψη αυτών των φορτίων.
- *Fatigue Loads Scenarios*: Παρέχει διάφορες μεθόδους για την ανάλυση της πιθανότητας κατάρρευσης λόγω κόπωσης. Βασίζεται σε έναν συνδυασμό εφαρμογής του κανόνα *Palmegren-Miner*, των καμπυλών *S-N* και μιας καμπύλης κατανομής πίεσης για την ανάπτυξη κόπωσης (*fatigue capacity*) του μοντέλου του πλοίου.

Χρήση μεθόδων στατιστικού σχεδιασμού

Οι προηγούμενοι κανόνες, οι οποίοι χρησιμοποιούνταν από τους νηογνώμονες βασίζονταν περισσότερο σε εμπειρικές μεθόδους. Από την άλλη πλευρά, οι *CSR*, συμπεριλαμβάνουν στατιστικές μεθόδους για τη μελέτη της αντοχής του πλοίου. Οι θεμελιώδεις έννοιες των δύο βασικών μεθόδων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- *Working Stress Design (WSD)*: Σε αυτήν την μέθοδο, χρησιμοποιείται μόνο ένας παράγοντας ασφαλείας για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης, ώστε να καθοριστεί το επιτρεπόμενο όριο φόρτωσης. Στην πραγματικότητα, αυτό είναι που έχει εφαρμοστεί από τους κανόνες των μεμονωμένων νηογνώμων μέχρι τώρα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται έλεγχος για να διασφαλιστεί ότι η τάση στο φορτίο είναι πάντα μικρότερη από την αντίσταση ή την αντοχή της κατασκευής. Αυτή η μέθοδος είναι επίσης γνωστή ως *Allowable Stress Design (ASD)*.
- *Partial Safety Factor (PSF)*: Αυτή η μέθοδος είναι γνωστή ως *Load and Resistance Design Method (LRFD)*. Αυτός είναι ένας προηγμένος τρόπος μοντελοποίησης των φορτίων και της αντοχής της δομής του πλοίου. Στη μέθοδο *LRFD*, βελτιώνεται πραγματικά η *WSD* και γίνεται πιο ρεαλιστική. Σε πρακτικές συνθήκες, η αντοχή ολόκληρης της γάστρας δεν είναι ομοιόμορφη παρόλο που το υλικό είναι ίδιο. Ο λόγος μπορεί να είναι τα αποτελέσματα των τάσεων συγκόλλησης κ.λπ. που μειώνουν την εγγενή αντοχή του υλικού. Επίσης η διακύμανση σε αυτές της ιδιότητες είναι αβέβαιη. Έτσι η αντοχή του πλοίου εκφράζεται στην πραγματικότητα ως κατανομή πιθανότητας.

Παρόμοια με εκείνα της αντοχής, όλα τα πιθανά φορτία (που περιλαμβάνουν στατικά, δυναμικά, κόπωση κ.λπ.) έχουν δικές τους συχνότητες εμφάνισης. Αυτές οι συχνότητες και η επίδραση κάθε φορτίου στο πλοίο είναι διαφορετική. Ως εκ τούτου, ο συντελεστής ασφάλειας που λαμβάνεται υπόψη για κάθε φορτίο είναι διαφορετικός.

Έτσι με άλλα λόγια, προσθέτουμε μερικούς παράγοντες σε κάθε φορτίο και την αντίσταση του πλοίου, αντί να αποδίδουμε έναν μόνο παράγοντα ασφαλείας σε όλα τα φορτία. Και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχεδιασμού, ελέγχεται ότι το συσσωρευτικό σύνολο όλων των φορτίων πρέπει να είναι μικρότερο από συσσωρευτικό σύνολο της αντοχής ή της αντίστασης του πλοίου.

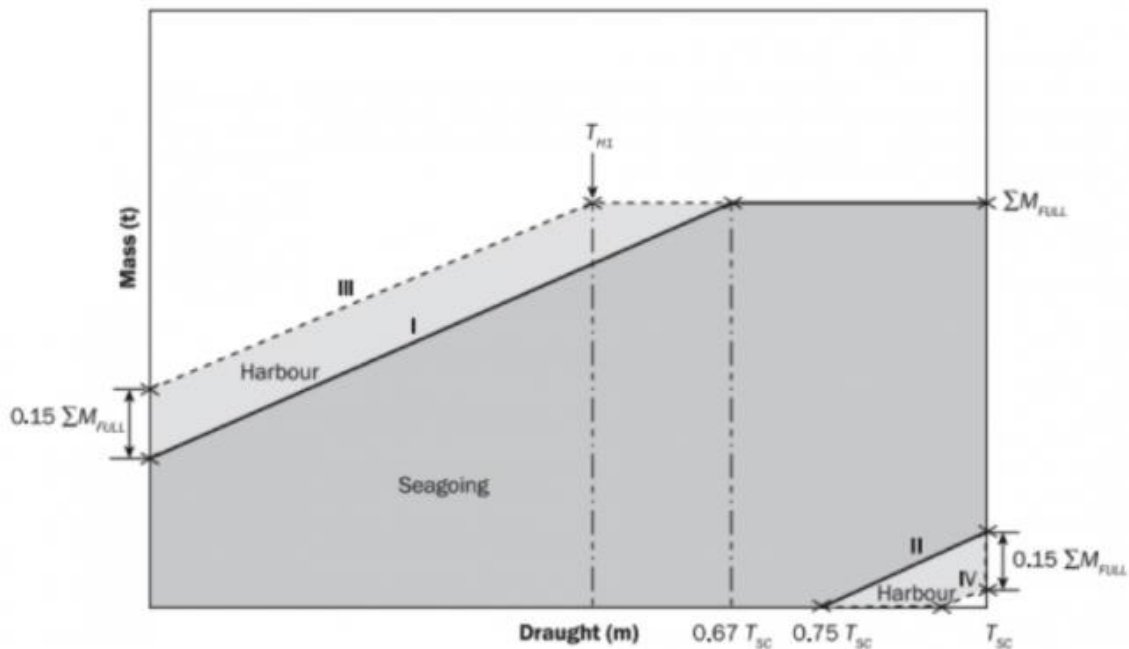
Λεπτομερής ανάλυση για διάφορα μοτίβα φόρτωσης

Αυτή είναι μία άλλη πτυχή που δεν εξετάστηκε στους μεμονωμένους νηογνώμονες. Δεδομένου του ότι οι κανονισμοί *CSR* έχουν επικεντρωθεί σε δύο ήδη πλοίων, έχουν δώσει το χρόνο και το εύρος για τον καθορισμό των επιτρεπόμενων ορίων φόρτωσης και τύπους για τον καθορισμό των καθορισμό των διαστάσεων, ανάλογα με το πιθανό μοτίβο

φόρτωσης που μπορεί να είναι δυνατό σε *bulk carriers* και *tankers* των διαμορφώσεων των δεξαμενών και των *holds*. Αυτό, περιλαμβάνει επίσης περιλαμβάνει πιθανούς συνδυασμούς για εναλλακτική *hold loading* σε περίπτωση *bulk carrier*.

Καμπύλες *hold mass*

Ένα άλλο από τα νέα χαρακτηριστικά του *IACS* είναι οι καμπύλες *hold mass*. Αυτές οι καμπύλες, δημιουργούνται σε διάφορες συνθήκες όπως *Sea Going* και *Harbour*. Οι καμπύλες αυτές είναι χρήσιμες για τον ποσοτικό προσδιορισμό: Τα μέγιστα και ελάχιστα όρια φορτίου που μπορούν να φορτωθούν σε ένα συγκεκριμένο *hold*, ανάλογα με τα βυθίσματα (*draft conditions*). Η μέγιστη και η ελάχιστη μάζα φορτίου σε οποιαδήποτε παρακείμενη δεξαμενή φορτίου ανάλογα με τις συνθήκες βυθίσματος.



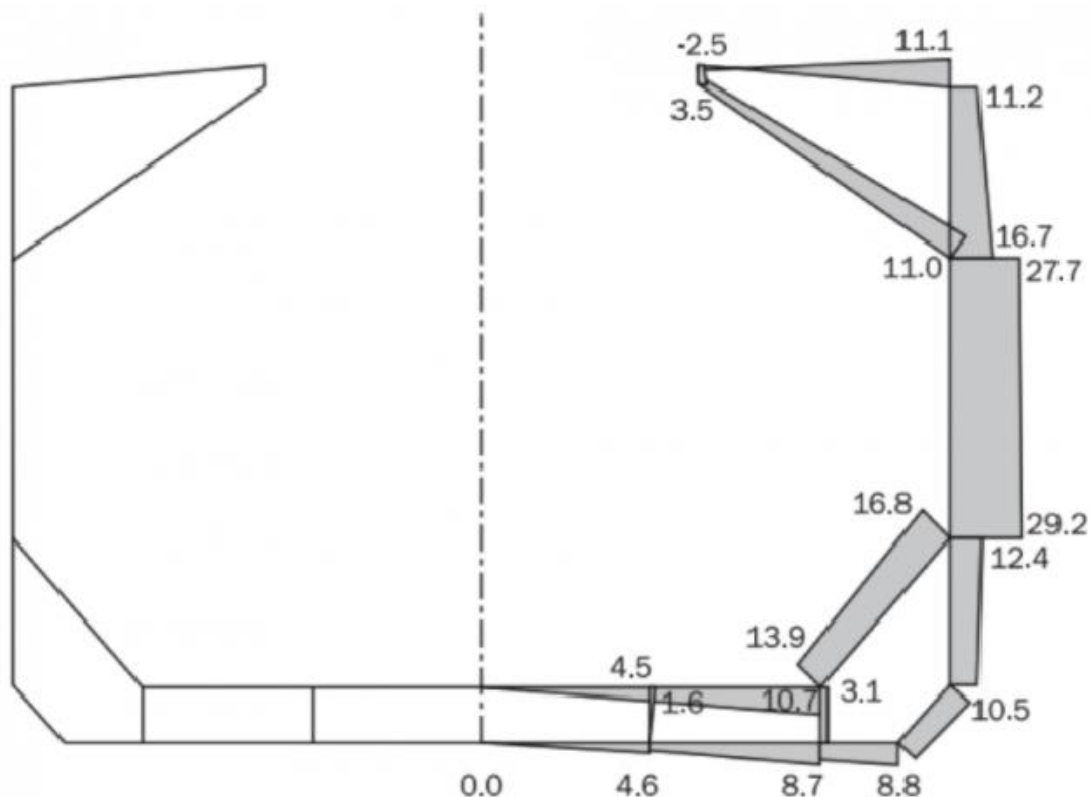
Σχήμα 2.1-Καμπύλες *hold mass*

Hull girder residual strength

Η αντοχή της γάστρας αναλύεται για τη μέγιστη χωρητικότητα, *yield capacity*, μέγιστη *ultimate capacity*. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό σε αυτούς τους κανόνες είναι η εκτίμηση της αντοχής της γάστρας σε περίπτωση βλάβης σε οποιοδήποτε σημείο του πλοίου. Η ροπή κάμψης στη γάστρα σε διάφορες πιθανές συνθήκες βλάβης πρέπει να είναι τέτοια ώστε η αντίστοιχη τάση κάμψης σε συνδυασμό με άλλα φορτία, να μην υπερβαίνει τη *residual strength* της γάστρας. Έτσι έχουν αντιμετωπιστεί διάφορες περιπτώσεις βλαβών για την ανάλυση διάφορων συνθηκών και φτάνουν στην απαιτούμενη αντοχή της γάστρας για να αποφευχθεί η αστοχία σε όλες τις περιπτώσεις.

Υπολογισμός ροής διάτμησης (*shear flow*)

Όταν η γάστρα υποβάλλεται σε διαμήκη ροπή κάμψης, δημιουργούνται επίσης διατμητικές τάσεις σε κάθε τμήμα της. Η διαμήκης τάση κάμψης λειτουργεί ως παράμετρος για τις διαστάσεις των δομικών διαμηκών μελών, ενώ η διατμητική τάση σε κάθε τμήμα καθορίζει τις διαστάσεις των εγκάρσιων ενισχυτικών μελών σε κάθε τμήμα. Στους προηγούμενους κανονισμούς των μεμονωμένων νηογνωμόνων, ήταν δυνατή η αξιολόγηση των διατμητικών τάσεων. Όμως η κατεύθυνση της ροής της διάτμησης δεν εξετάζοταν λεπτομερώς, κάτι το οποίο έχει τηρηθεί στους νέους κανονισμούς. Η διατμητική ροή κατά μήκος μεμονωμένων εγκάρσιων δομικών μελών μπορεί να υπολογιστεί και να προστεθεί ώστε να ληφθεί το διάγραμμα καθαρής (*net*) διάτμησης σε κάθε τμήμα του πλοίου.



Σχήμα 2.2- Διάγραμμα ροής διάτμησης

Λεπτομερείς οδηγίες για τη διεξαγωγή ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

Οι προηγούμενοι κανονισμοί των μεμονωμένων νηογνωμόνων, παρείχαν μόνο αποσπάσματα οδηγιών για τη μοντελοποίηση της γάστρας του πλοίου για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Όμως, δεδομένου ότι η βιομηχανία πλέον καθιστά σχεδόν υποχρεωτικό τον έλεγχο της επάρκειας των διαστάσεων με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, οι κανονισμοί CSR έχει συμπεριλάβει λεπτομερείς οδηγίες για τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται, για τη μοντελοποίηση κάθε τμήματος της γάστρας. Η

μοντελοποίηση και η σωστή σύνδεση των ακραίων συνδέσεων είναι σημαντική για τη λήψη σωστών αποτελεσμάτων, επομένως αυτοί οι κανόνες έχουν καθορίσει μεθόδους και οριακές συνθήκες που πρέπει να διατηρούνται κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης της γάστρας και των τοπικών δομών ενίσχυσης. Σχεδόν όλοι οι μεγάλοι νηογνώμονες, πλέον έχουν δημιουργήσει δικά τους λογισμικά, έτσι ώστε να διασφαλίσουν ότι ένα σχέδιο συμμορφώνεται από τους *CSR* του *IACS*.

Εν κατακλείδι, μπορεί να αναφερθεί ότι οι *CSR* του *IACS* είναι το πρώτο βήμα προς τη μετάβαση από το δομικό σχέδιο *Level 1* (το οποίο εφαρμοζόταν τα προηγούμενα χρόνια) στο *Level 2* και στο *Level 3*. Αν και αυτοί οι κανονισμοί δεν έχουν εφαρμοστεί σε άλλους τύπους πλοίων, βρίσκονται σε διαδικασία ανατροφοδότησης, ώστε να αποφασιστεί εάν μπορεί να εφαρμοστεί και σε αυτούς.

Κεφάλαιο 3

Υπολογισμός της Μέγιστης Αντοχής με τη Μέθοδο *Smith*

3.1-Γενικά

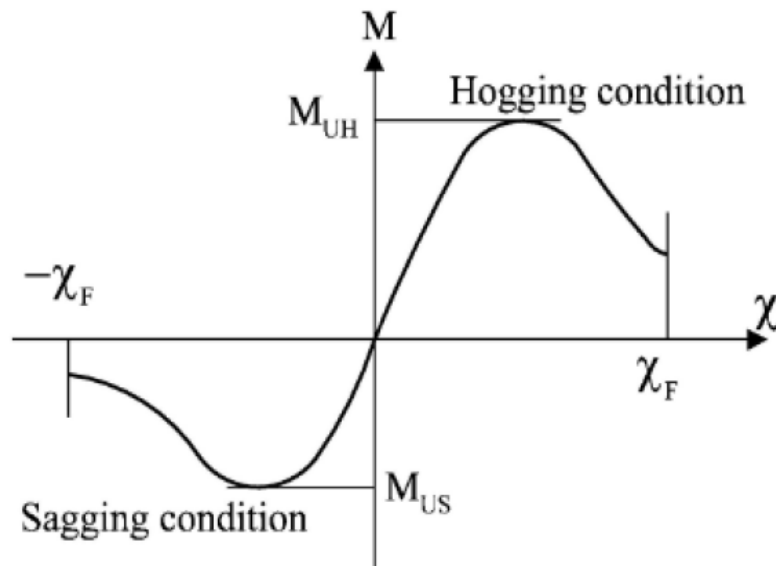
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η μέθοδος των Κοινών Κατασκευαστικών Κανόνων (*C.S.R*) *Incremental-Iterative Approach*. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάστηκε το 1977 από τον *Smith*, ενώ σύμφωνα με αυτή το πλοίο θεωρείται ως ένα καμπτόμενο δοκάρι δοκάρι όπως έχει ήδη αναφερθεί. Οι εν λόγω κανονισμοί *C.S.R*, εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής διαμήκους κάμψης δύο ναυπηγικών κατασκευών:

- Του *box-girder* N400, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για μία πειραματική ανάλυση της επίδρασης του *frame spacing* στον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής τους
- Της διατομής του παράλληλου τμήματος της γάστρας ενός *bulk carrier*.

3.2-Μέθοδος *Smith*

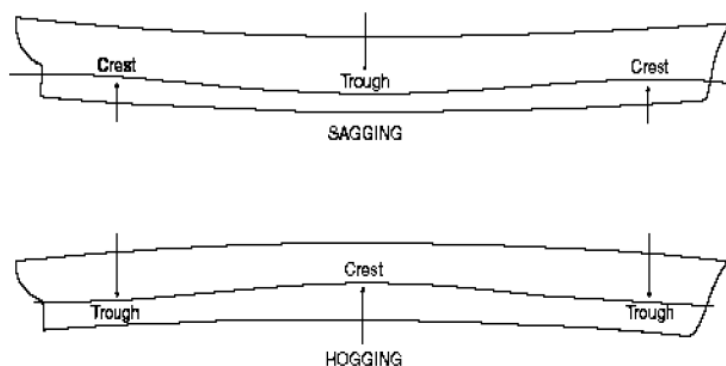
3.2.1-Περιγραφή Βημάτων Μεθόδου

Η εν λόγω μέθοδος, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέγιστης διαμήκους αντοχής σε κάμψη, η οποία εντοπίζεται στο διάγραμμα ροπών κάμψεως M συναρτήσει των καμπυλοτήτων χ στη μέση τομή του συγκεκριμένου *bulk carrier* ή του πειραματικού *box-girder* N400. Η ροπή αυτή αναπτύσσεται είτε σε κατάσταση *hogging*, είτε σε κατάσταση *sagging*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.1:



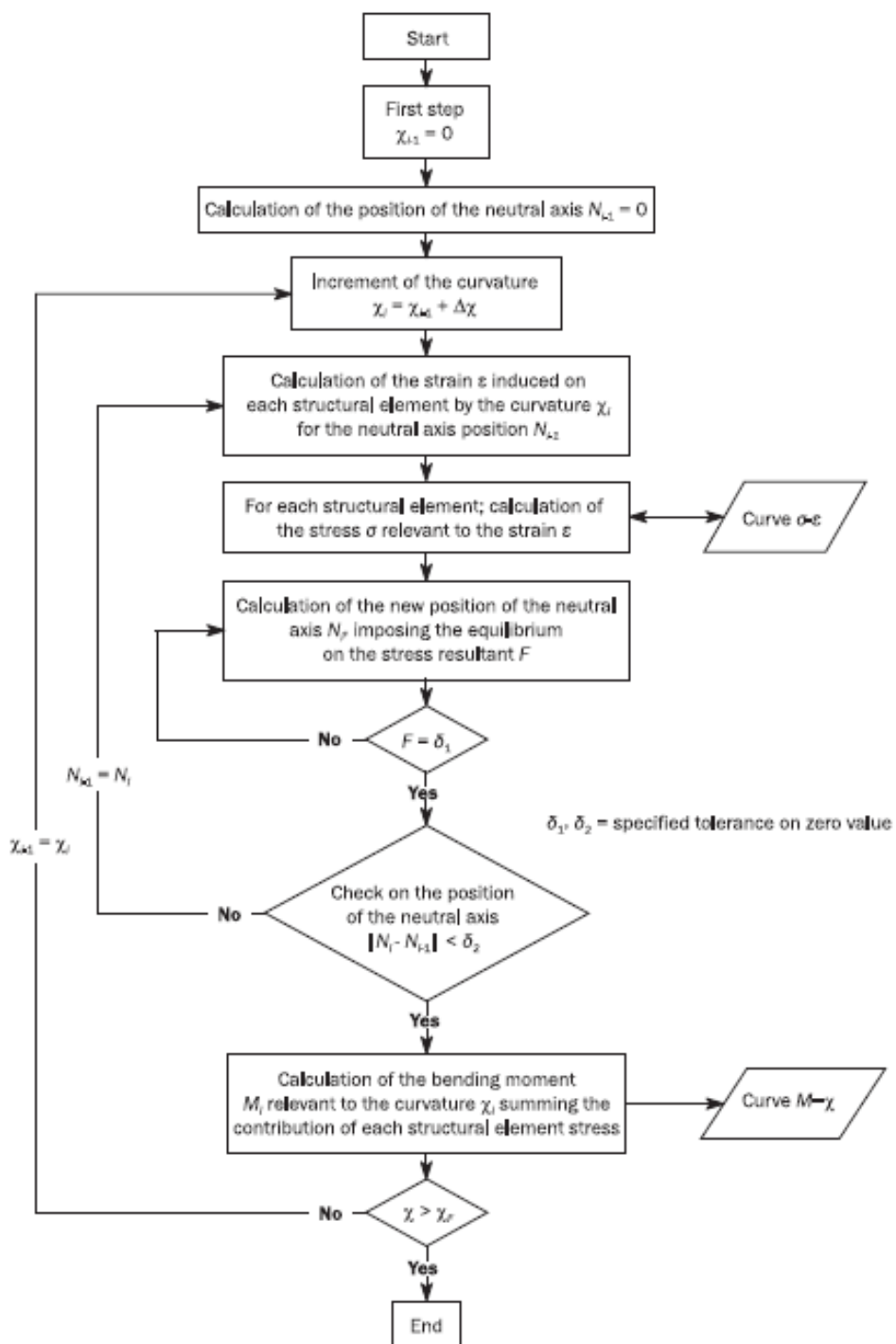
Σχήμα 3.1- Καμπύλη καμπτικής ροπής M -καμυλότητας χ

Η εκάστοτε καμυλότητα χ λαμβάνεται ως θετική για την κατάσταση *hogging* και αρνητική για την κατάσταση *sagging*. Σε κατάσταση *hogging*, όσα στοιχεία βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα εφελκύνονται, ενώ όσα βρίσκονται κάτω από αυτόν, θλίβονται. Αντιθέτως, σε κατάσταση *sagging* όσα βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα θλίβονται, ενώ όσα βρίσκονται κάτω από αυτόν εφελκύνονται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2-Καταστάσεις *sagging-hogging*

Η καμπύλη M - χ κατασκευάζεται μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2- Μέθοδος της επαναληπτικής διαδικασίας

Αρχικά, για κάθε βήμα η τιμή της καμπυλότητας χ_i προκύπτει από την πρόσθεση μίας σταθερής τιμής $\Delta\chi$ του προηγούμενου βήματος χ_{i-1} . Η προαναφερθείσα αύξηση,

αντιπροσωπεύει την αύξηση της γωνίας περιστροφής της διατομής ως προς τον οριζόντιο ουδέτερο άξονα της. Η περιστροφή αυτή, προκαλεί αξονικές παραμορφώσεις ε (strain) στο εκάστοτε δομικό στοιχείο, οι οποίες επηρεάζονται και από την απόσταση του εκάστοτε δομικού στοιχείου από τον οριζόντιο άξονα της διατομής.

Η τάση σ που αναπτύσσεται σε κάθε δομικό στοιχείο, μπορεί να υπολογιστεί από τις καμπύλες φορτίου του κάθε στοιχείου (load-end shortening curves), στην οποία λαμβάνεται υπόψη η συμπεριφορά του στη μη γραμμική ελαστοπλαστική περιοχή (nonlinear elastoplastic domain). Η κατανομή των τάσεων, του συνόλου των στοιχείων, μεταβάλλει τη θέση του ουδέτερου άξονα, σε κάθε επαναληπτικό βήμα διότι η σχέση σ - ε είναι μη γραμμική.

Η νέα θέση του ουδέτερου άξονα, είναι αποτέλεσμα της επαναληπτικής διαδικασίας, η οποία επιβάλλεται ως συνθήκη ισορροπίας τάσεων. Αφού προσδιοριστεί αυτή η θέση, η εύρεση της καμπτικής ροπής M επιτυγχάνεται μετά την άθροιση του συνόλου των ροπών που αναπτύσσονται σε κάθε δομικό στοιχείο της διατομής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα βήματα της μεθόδου:

- **Βήμα 1^ο:** Διαχωρισμός της μέσης τομής της κατασκευής σε δομικά στοιχεία
- **Βήμα 2^ο:** Καθορισμός της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης (σ - ε) όλων των στοιχείων της κατασκευής
- **Βήμα 3^ο:** Υπολογισμός της αρχικής καμπυλότητας χ_1 και της θέσης του ουδέτερου άξονα της διατομής για το αρχικό βήμα. Το χ_1 αντιστοιχεί στην τιμή της καμπυλότητας, η οποία επιφέρει τάση ίση με το 1% της τάσης διαρροής, όπως φαίνεται παρακάτω:

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

Όπου:

z_D : το κοίλο του πλοίου, σε m

z_n : αρχικό ύψος ουδέτερου άξονα

- **Βήμα 4^ο:** Υπολογισμός της παραμόρφωσης $\varepsilon_i = \chi(z_i - z_n)$ και στη συνέχεια της τάσης σ_i που της αντιστοιχεί
- **Βήμα 5^ο:** Υπολογισμός της θέσης $z_{NA_{cur}}$ του ουδέτερου άξονα σε κάθε βήμα, με επιβολή ισορροπίας δυνάμεων στη συγκεκριμένη διατομή, σύμφωνα με τον τύπο: $\sum A_{i-n50} \sigma_i = \sum A_{j-n50} \sigma_j$, όπου το i συμβολίζει τα στοιχεία που βρίσκονται υπό θλίψη, ενώ το j τα στοιχεία που βρίσκονται υπό εφέλκυσμό
- **Βήμα 6^ο:** Υπολογισμός της Ροπής Κάμψης της διατομής σύμφωνα με τον τύπο: $M_U = \sum \sigma_{UI} A_{i-n50} |z_i - z_{NA_{cur}}|$, αθροίζοντας τις επιμέρους ροπές του κάθε δομικού στοιχείου της διατομής
- **Βήμα 7^ο:** Σύγκριση της Ροπής Κάμψης που προκύπτει με τη Ροπή που προέκυψε στο προηγούμενο βήμα. Εάν η κλίση της καμπύλης M - χ είναι μικρότερη από μια συγκεκριμένη αρνητική τιμή, η διαδικασία υπολογισμού σταματάει με την εύρεση

της M_U . Στην αντίθετη περίπτωση, γίνεται αύξηση της καμπυλότητας κατά $\Delta\chi$ και επιστροφή στο Βήμα 4^ο.

3.2.2-Παραδοχές της Μεθόδου

Για να επιτευχθεί η εφαρμογή της μεθόδου πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η μέγιστη αντοχή υπολογίζεται στις εγκάρσιες διατομές μεταξύ δύο γειτονικών εγκάρσιων νομέων
- Η εγκάρσια τομή της γάστρας παραμένει επίπεδη, ενώ αυξάνεται η καμπυλότητα της
- Το υλικό της διατομής έχει ελαστοπλαστική συμπεριφορά
- Η εγκάρσια διατομή χωρίζεται σε πλήθος δομικών στοιχείων, το καθένα εκ των οποίων, δρα ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Τα δομικά αυτά στοιχεία είναι τα παρακάτω:
 - Εγκάρσια ενισχυμένες πλάκες ή και ενισχυτικά με συνδεδεμένη πλάκα
 - Σκληρές γωνιές, οι οποίες αποτελούνται από διασταυρωμένα ελάσματα.
- Αφού υπολογιστούν οι καμπύλες σ - ϵ κάθε δομικού στοιχείου της διατομής για όλους τους πιθανούς τρόπους κατάρρευσης τους, λαμβάνεται ως τάση σ η μικρότερη εξ αυτών
- Η επαναληπτική διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου η καμπυλότητα πάρει μία συγκεκριμένη τιμή χ_F σε m^{-1} σε κατάσταση *hogging* και *sagging* σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

$$\chi_F = \pm 0.003 \frac{M_Y}{EI_{y-n50}}$$

Όπου:

M_Y : Λαμβάνεται ως η μικρότερη τιμή των M_{Y1} και M_{Y2} σε kNm .

$$M_{Y1} = 10^3 R_{eH} Z_{B-n50}$$

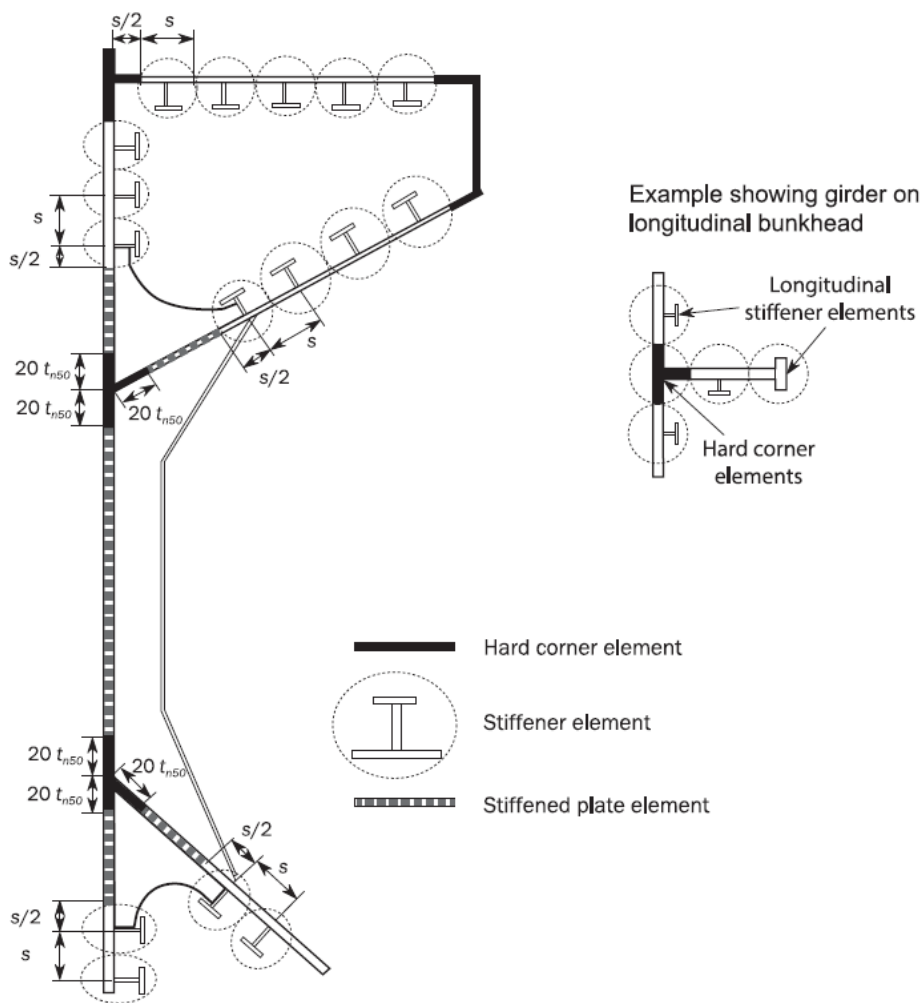
$$M_{Y2} = 10^3 R_{eH} Z_{B-n50}$$

Εάν η τιμή χ_F , που θα προκύψει δεν επαρκεί για τον υπολογισμό στην μέγιστης Καμπτικής Ροπής, τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι η επιβαλλόμενη καμπυλότητα επιτρέψει τον υπολογισμό της.

3.2.3-Δομικά Στοιχεία της Διατομής

α) *Hard corner elements*

Οι σκληρές γωνιές αποτελούν τα πιο ανθεκτικά στοιχεία, τα οποία συνθέτουν το εγκάρσιο τμήμα της διατομής ενώ σε περίπτωση κατάρρευσης θα υποστούν ελαστοπλαστική αστοχία. Συνήθως αποτελούνται από δύο πλάκες που δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η έκταση μίας γωνιάς από το σημείο τομής των πλακών, θεωρείται ίση με $20t_{n50}$ σε εγκάρσια ενισχυμένο πλαίσιο και έως $0,5 s$ σε διάμηκες ενισχυμένο πλαίσιο, όπως φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 3.3-Απεικόνιση δομικών στοιχείων διατομής

Όπου:

t_{n50} : Καθαρό πάχος της πλάκας, σε mm

s : Απόσταση του παρακείμενου διαμήκους ενισχυτικού, σε m

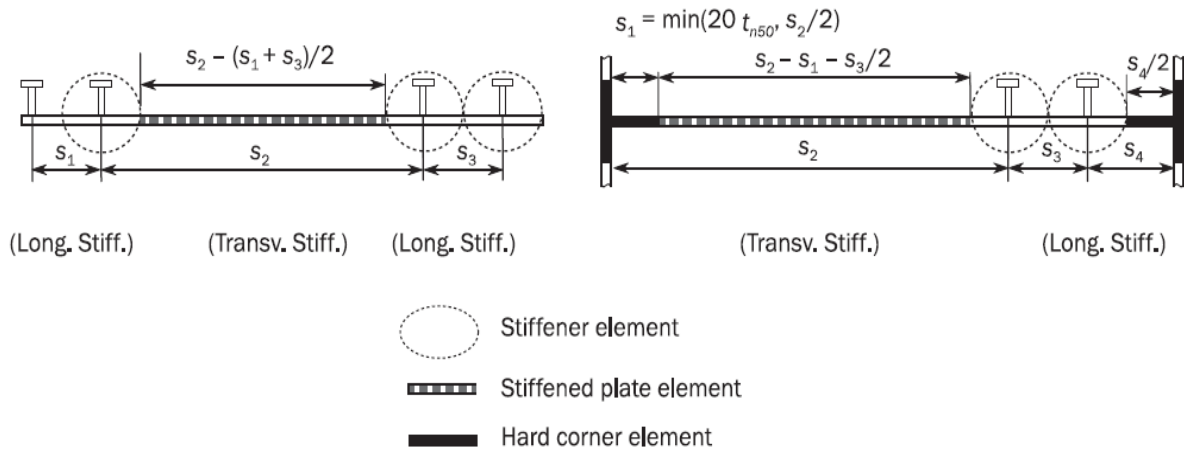
β) Stiffener elements

Το ενισχυτικό αποτελεί στοιχείο ενίσχυσης μαζί με την προσαρτημένη σε αυτό πλάκα. Για τον υπολογισμό του πλάτους της προσαρτημένης πλάκας ισχύει ότι:

- Ισούται με τη μέση απόσταση του ενισχυτικού όταν τα ελάσματα και στις δύο πλευρές του ενισχυτικού είναι διαμήκη
- Ισούται με το πλάτος του διαμήκους ενισχυμένου ελάσματος, όταν αυτό στη μία πλευρά του ενισχυτικού είναι διάμηκες, ενώ στην άλλη πλευρά του είναι εγκάρσιο.

γ) Stiffened plate elements

Το έλασμα μεταξύ ενισχυτικών, μεταξύ ενισχυτικού και σκληρής γωνιάς ή μεταξύ σκληρών γωνιών, πρέπει να αντιμετωπίζεται ως ενισχυμένο έλασμα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4:



Σχήμα 3.4-Απεικόνιση στοιχείων διατομής

3.2.4-Καμπύλες σ - ϵ των Δομικών Στοιχείων της Διατομής

Τα δομικά στοιχεία της διατομής, μπορούν να καταρρεύσουν με έναν από τους τρόπους αστοχίας, σύμφωνα με τον Πίνακα 3.1. Σύμφωνα με τις βιβλιοθήκες αυτές, υπολογίζεται η τάση του εκάστοτε δομικού στοιχείου, από τις οποίες επιλέγεται η μικρότερη.

<i>Element</i>	<i>Mode of failure</i>
<i>Lengthened stiffened plate element or stiffener element</i>	<i>Elastoplastic collapse</i>
<i>Shortened stiffener element</i>	<i>Beam column buckling Torsional buckling Web local buckling of flanged profiles Web local buckling of flat bars</i>
<i>Shortened stiffened plate element</i>	<i>Plate buckling</i>

Πίνακας 3.1-Τρόποι κατάρρευσης δομικών στοιχείων

3.2.4.1-Elastoplastic collapse of structural elements

Η καμπύλη σ - ε , η οποία περιγράφει την ελαστοπλαστική κατάρρευση των δομικών στοιχείων της διατομής, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα, συμπεριλαμβάνοντας τιμές θετικής και αρνητικής παραμόρφωσης. Η τάση σ , υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Όπου:

- R_{eHA} : Ελάχιστο όρο διαρροής του υλικού, σε N/mm^2

$$R_{eHA} = \frac{R_{eHp}A_{p-n50} + R_{eHs}A_{s-n50}}{A_{p-n50} + A_{s-n50}}$$

- Φ : *Edge function*, ίση με:

- $\Phi = -1$ για $\varepsilon < -1$
- $\Phi = \varepsilon$ για $-1 \leq \varepsilon \leq 1$
- $\Phi = 1$ για $\varepsilon > 1$

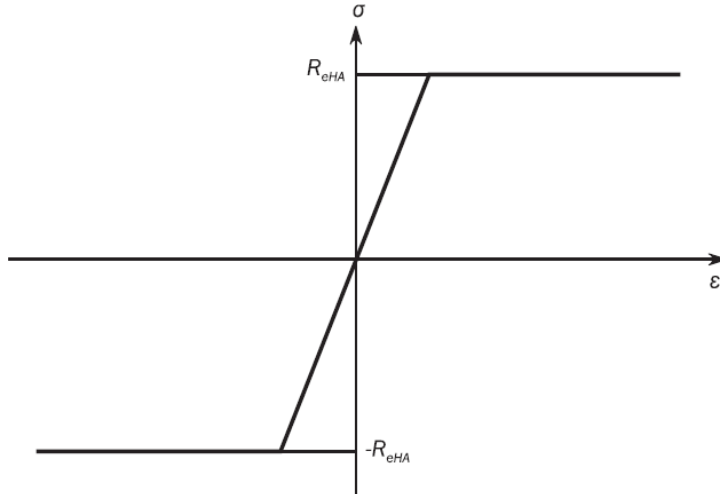
- ε : Σχετική παραμόρφωση, ίση με

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

- ε_E : Παραμόρφωση δομικού στοιχείου

- ε_Y : Παραμόρφωση στο όριο διαρροής του δομικού στοιχείου, ίση με

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



Σχήμα 3.5-Καμπύλη σ - ε για *elastoplastic collapse*

3.2.4.2-Beam column buckling

Η καμπύλης σ_{CR1} - ε , η οποία περιγράφει τον τρόπο κατάρρευσης *beam column buckling* των δομικών στοιχείων της διατομής, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

$$\sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{C1} \frac{A_{S-n50} + A_{pE-n50}}{A_{S-n50} + A_{p-n50}}$$

Όπου:

- Φ : *Edge function*, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- σ_{C1} : Κρίσιμη τάση, σε N/mm^2
 - $\sigma_{C1} = \frac{\sigma_{E1}}{\varepsilon}$ για $\sigma_{E1} \leq \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon$
 - $\sigma_{C1} = R_{eHB} \left(1 - \frac{R_{eHB} \varepsilon}{4\sigma_{E1}} \right)$ για $\sigma_{E1} > \frac{R_{eHB}}{2} \varepsilon$
- R_{eHB} : Ελάχιστο όριο διαρροής, σε N/mm^2 , του δομικού στοιχείου σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

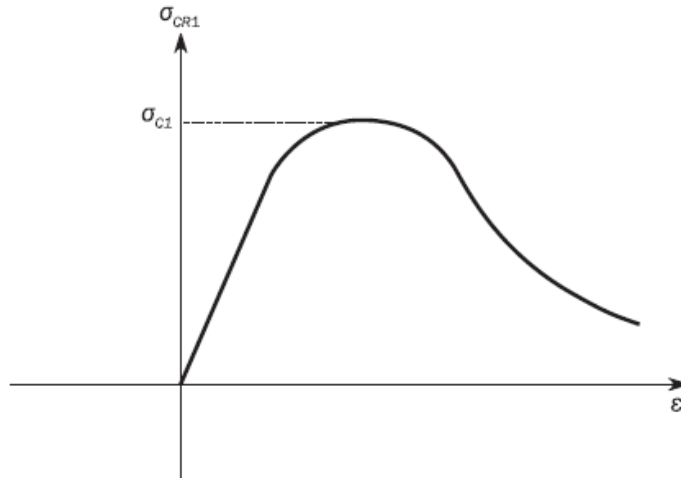
$$R_{eHB} = \frac{R_{eHB} A_{pEI-n50} \ell_{pE} + R_{eHS} A_{S-n50} \ell_{sE}}{A_{pE-n50} \ell_{pE} + A_{S-n50} \ell_{sE}}$$

- $A_{pEI-n50}$: *Effective area*, σε cm^2

$$A_{pEI-n50} = 10b_{E1}t_{n50}$$
- ℓ_{pE} : Απόσταση, σε mm , η οποία μετριέται από τον ουδέτερο άξονα του ενισχυτικού, με τη συνδεδεμένη πλάκα πλάτους b_{E1} , μέχρι το κατώτερο σημείο της ενισχυμένης πλάκας.
- ℓ_{sE} : Απόσταση, σε mm , η οποία μετριέται από τον ουδέτερο άξονα του ενισχυτικού μέχρι το ανώτερο σημείο του.
- ε : Σχετική παραμόρφωση, όπως έχει προσδιοριστεί παραπάνω.
- σ_{E1} : Τάση λυγισμού κατά Euler, σε N/mm^2 , ίση με:

$$\sigma_{E1} = \pi^2 E \frac{I_{E-n50}}{A_{E-n50} \ell^2} 10^{-4}$$
- I_{E-n50} : Ροπή αδράνειας του ενισχυτικού, σε mm^4 , μαζί με την ενισχυμένη πλάκα, πλάτους b_{E1}
- A_{E-n50} : Εμβαδόν, σε cm^2 , του ενισχυτικού μαζί με τη συνδεδεμένη πλάκα πλάτους b_E
- b_{E1} : Ενεργό πλάτος διορθωμένο για σχετική παραμόρφωση, σε m , της συνδεδεμένης πλάκας, ίσο με:
 - $b_{E1} = \frac{s}{\beta_E}$ για $\beta_E > 1.0$
 - $b_{E1} = s$ για $\beta_E \leq 1.0$
- β_E : $\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_{n50}} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$
- A_{pE-n50} : Εμβαδόν, σε cm^2 , της συνδεδεμένης πλάκας πλάτους b_E , ίση με:

$$A_{pE-n50} = 10b_E t_{n50}$$
- b_E : Ενεργό πλάτος, σε m , της συνδεδεμένης πλάκας, ίσο με:
 - $b_E = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) s$ για $\beta_E > 1.25$
 - $b_E = s$ για $\beta_E \leq 1.25$



Σχήμα 3.6- Καμπύλη σ_{CR1} - ϵ για beam column buckling

3.2.4.3-Torsional buckling

Η καμπύλης σ_{CR2} - ϵ , η οποία περιγράφει τον τρόπο κατάρρευσης *torsional buckling* των δομικών στοιχείων της διατομής, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

$$\sigma_{CR2} = \Phi \frac{A_{S-n50}\sigma_{C2} + A_{p-n50}\sigma_{CP}}{A_{S-n50} + A_{p-n50}}$$

Όπου:

- Φ : Edge function, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- σ_{C2} : Κρίσιμη τάση, σε N/mm^2 , ίση με
 - $\sigma_{C2} = \frac{\sigma_{E2}}{\epsilon}$ για $\sigma_{E2} \leq \frac{R_{eHs}}{2} \epsilon$
 - $\sigma_{C2} = R_{eHs} \left(1 - \frac{R_{eHs}\epsilon}{4\sigma_{E2}}\right)$ για $\sigma_{E2} > \frac{R_{eHs}}{2}$
- σ_{E2} : Τάση λυγισμού κατά Euler, σε N/mm^2 , ίση με σ_{ET}
- σ_{ET} : Ονομαστική τάση λυγισμού σε, N/mm^2

$$\sigma_{ET} = \frac{E}{I_p} \left(\frac{\epsilon \pi^2 I_{\omega} 10^2}{\ell^2} + 0.385 I_T \right)$$

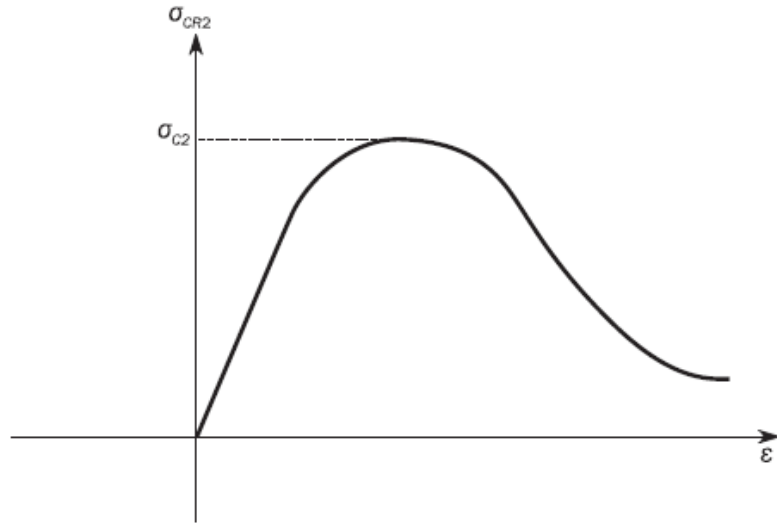
- I_p : Πολική ροπή αδράνειας του ενισχυτικού, σε cm^4 , σύμφωνα με τον πίνακα 3.2

- I_T : Ροπή αδράνειας *St. Venant's* του ενισχυτικού, σε cm^4 , σύμφωνα με τον πίνακα 3.2
- I_ω : Σύμφωνα με τον πίνακα 3.2

	<i>Flat bars</i>	<i>Bulb, angle, L2, L3, T profiles</i>
I_P	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \times 10^4}$	$\left(\frac{A_w (e_f - 0.5t_f)^2}{3} + A_f e_f^2 \right) 10^{-4}$
I_T	$\frac{h_w t_w^3}{3 \times 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w} \right)$	$\frac{(e_f - 0.5t_f)t_w^3}{3 \times 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_w}{e_f - 0.5t_f} \right) + \frac{b_f t_f^3}{3 \times 10^4} \left(1 - 0.63 \frac{t_f}{b_f} \right)$
I_ω	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \times 10^6}$	$\frac{A_f e_f b_f^2}{12 \times 10^6} \left(\frac{A_f + 2.6A_w}{A_f + A_w} \right)$ <p><i>For bulb, angle, L2 και L3 profiles</i></p> $\frac{b_f^3 t_f e_f^2}{12 \times 10^6}$ <p><i>για T profiles</i></p>

Πίνακας 3.2- Ροπές αδράνειας

- ε : Σχετική παραμόρφωση, όπως έχει προσδιοριστεί παραπάνω.
- σ_{CP} : Τάση λυγισμού συνδεδεμένης πλάκας, σε N/mm^2 , ίση με:
 - $\sigma_{CP} = \left(\frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) R_{eHp}$ για $\beta_E > 1.25$
 - $\sigma_{CP} = R_{eHp}$ για $\beta_E \leq 1.25$
- β_E : Συντελεστής, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί.



Σχήμα 3.7- Καμπύλη $\sigma_{CR2}-\epsilon$ για torsional buckling

3.2.4.4-Web local buckling of stiffeners made of flanged profiles

Η καμπύλης $\sigma_{CR3}-\epsilon$, η οποία περιγράφει τον τρόπο κατάρρευσης *web local buckling of stiffeners made of flanged profiles* των δομικών στοιχείων της διατομής, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

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

Όπου:

- Φ : Edge function, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- b_E : Ενεργό πλάτος, σε m, της συνδεδεμένης πλάκας, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- h_{we} : Ενεργό ύψος του web, σε mm, ίσο με:
 - $h_{we} = \left(\frac{2.25}{\beta_w} - \frac{1.25}{\beta_w^2} \right) h_w$ για $\beta_w \geq 1.25$
 - $h_{we} = h_w$ για $\beta_w < 1.25$
- β_w : $\beta_w = \frac{h_w}{t_{w-n50}} \sqrt{\frac{\epsilon R_{eHs}}{E}}$

- ε : Σχετική παραμόρφωση, όπως έχει προσδιοριστεί παραπάνω.

3.2.4.5-Web local buckling of stiffeners made of flat bars

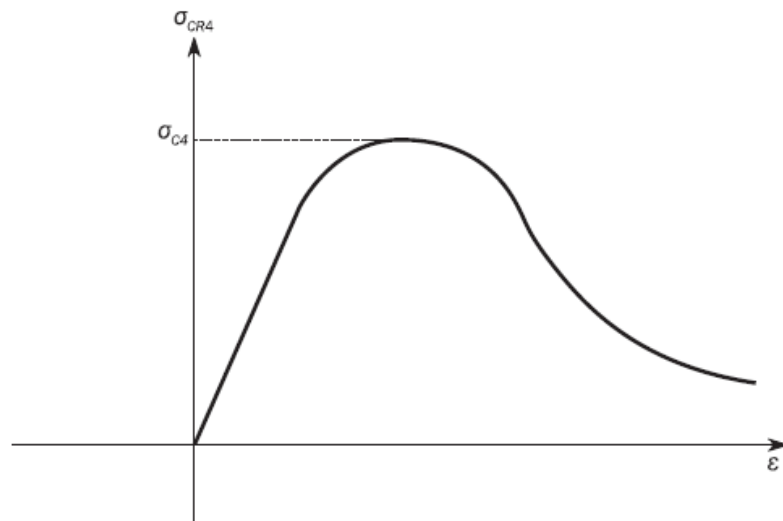
Η καμπύλης $\sigma_{CR4}-\varepsilon$, η οποία περιγράφει τον τρόπο κατάρρευσης *web local buckling of stiffeners made of flat bars* των δομικών στοιχείων της διατομής, υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

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

Όπου:

- Φ : *Edge function*, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- σ_{CP} : Τάση λυγισμού συνδεδεμένης πλάκας, σε N/mm^2 , όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- σ_{C4} : Κρίσιμη τάση, σε N/mm^2 , ίση με
 - $\sigma_{C4} = \frac{\sigma_{E4}}{\varepsilon}$ για $\sigma_{E4} \leq \frac{Re_{HS}}{2} \varepsilon$
 - $\sigma_{C4} = Re_{HS} \left(1 - \frac{Re_{HS}\varepsilon}{4\sigma_{E4}}\right)$ για $\sigma_{E4} > \frac{Re_{HS}}{2}$
- σ_{E4} : Τοπική τάση λυγισμού κατά *Euler*, σε N/mm^2 , ίση με:

$$\sigma_{E4} = 160000 \left(\frac{t_{w-n50}}{h_w}\right)^2$$
- ε : Σχετική παραμόρφωση, όπως έχει προσδιοριστεί παραπάνω.



Σχήμα 3.8- Καμπύλη $\sigma_{CR4}-\varepsilon$ για *web local buckling of stiffeners made of flat bars*

3.2.4.6-Plate buckling

Η καμπύλης σ_{CR5} -ε, η οποία περιγράφει τον τρόπο των εγκάρσια ενισχυμένων ελάσματα, που συνθέτουν τη διατομή, σύμφωνα με την παρακάτω φόρμουλα:

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

Όπου:

- Φ : Edge function, όπως έχει ήδη προσδιοριστεί
- β_E : $\beta_E = \frac{s}{t_{n50}} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$
- s : Πλάτος ελάσματος, σε m , ίσο με την απόσταση μεταξύ των ενισχυτικών
- ℓ : Μακρύτερη πλευρά της πλάκας, σε m .

Κεφάλαιο 4

Περιγραφή Αναπτυχθέντος Λογισμικού σε Πλοίο *Bulk Carrier*

4.1-Γενικά

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός αυτής της μελέτης είναι η εύρεση της μέγιστης Διαμήκους Αντοχής του υπό μελέτη πλοίου (*bulk carrier*). Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η παρουσίαση των λεπτομερειών του πλοίου και όπως επίσης και των στοιχείων κατασκευής του. Βασικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εφαρμογή των κανόνων *CSR*, παρατίθενται ακολούθως στον Πίνακα 4.1:

PRINCIPAL PARTICULARS	
LENGTH SCANTLING	192.035 m
LENGTH B.P.	194.50 m
BREADTH	32.26 m
DEPTH	18.50 m
SCANTLING DRAFT (MOULD)	13.30 m
CAMBER	0.50 m
C _b (MOULD)	0.89
SERVICE SPEED	14.4 Kn

Πίνακας 4.1-Κύριες Διαστάσεις

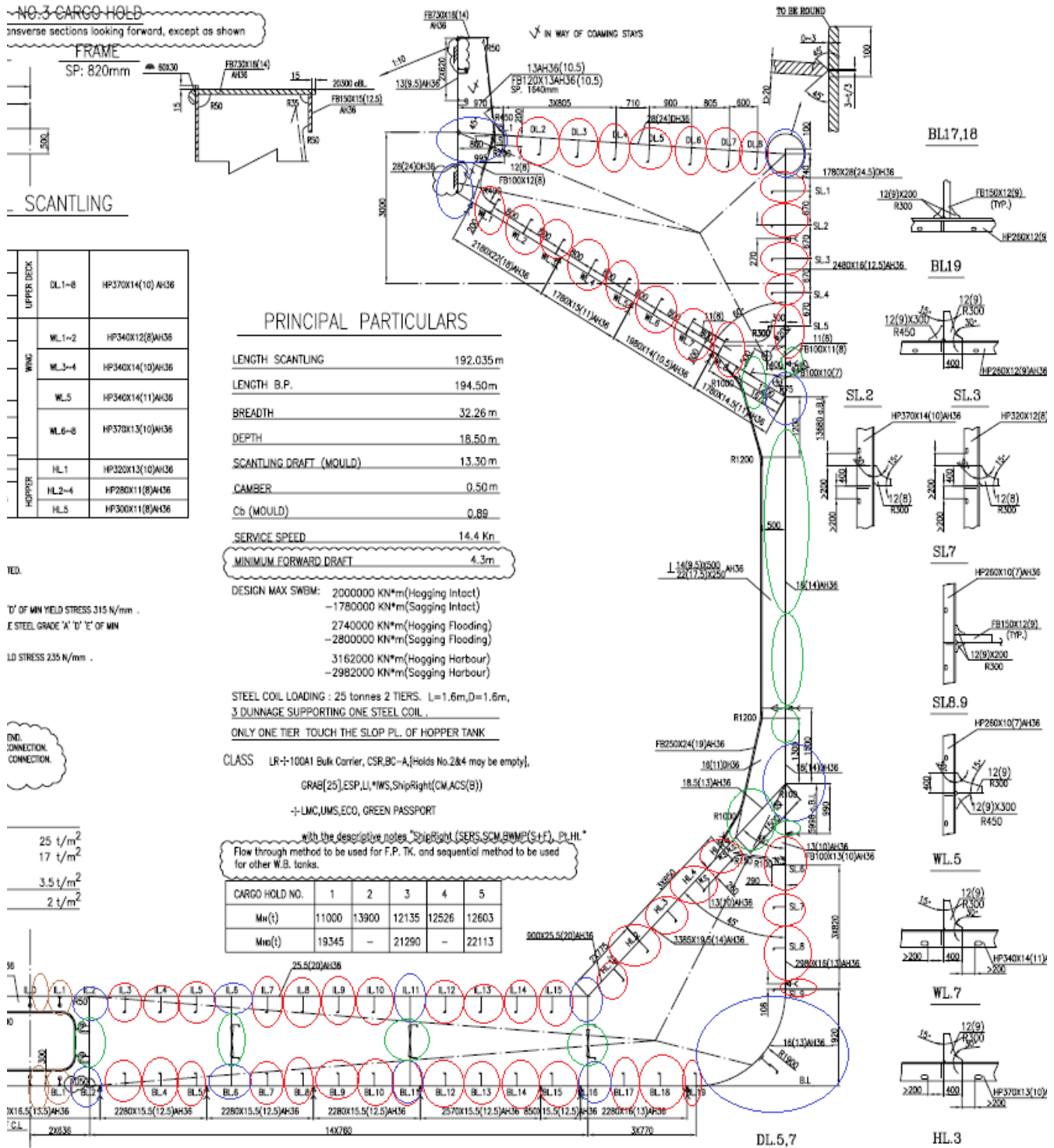
4.2-Κατασκευαστικά Στοιχεία *Bulk Carrier*

Το υλικό της γάστρας, των ελασμάτων και των ενισχυτικών είναι ναυπηγικός χάλυβας υψηλής αντοχής *AH-36* και *DH-36*. Στον πίνακα 4.2 αναφέρονται τα όρια διαρροής ανάλογα με το είδος του εκάστοτε χάλυβα:

MATERIALS			
MARK	EXPLANATION	min yield stress $R_{eH}(N/mm^2)$	material factor k
NO MARK	GRADE KA STEEL	235	1
AH	GRADE KA-32 STEEL	315	0.78
AH-36	GRADE KA-36 STEEL	355	0.72
DH-36	GRADE KD-32 STEEL	355	0.68

Πίνακας 4.2- Χαρακτηριστικά χαλύβων

Ως διατομή υπολογισμού μέγιστης αντοχής χρησιμοποιήθηκε το *No 3 Hold*. Η διατομή χωρίστηκε σε 85 κατασκευαστικά στοιχεία, εκ των οποίων τα 60 είναι διαμήκη ενισχυτικά, τα 14 ανθεκτικά γωνιακά και τα 11 εγκάρσιως ενισχυμένα ελάσματα. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο διαχωρισμός της διατομής σε δομικά στοιχεία.



Σχήμα 4.1- Διαχωρισμός της διατομής σε δομικά στοιχεία

Μετά τον διαχωρισμό των κατασκευαστικών στοιχείων της διατομής, κατασκευάζεται ένα υπολογιστικό φύλλο στο *Excel*, με σκοπό την εύρεση του ουδέτερου άξονα ως προς την τρόπιδα και της ροπής αδράνειας ως προς τον αρχικό ουδέτερο άξονα. Σημειώνεται ότι τα

πάχη των ελασμάτων έχουν ληφθεί μειωμένα, λόγω της λειτουργίας τους σε ένα εξαιρετικά αντίξοο και διαβρωτικό περιβάλλον. Τα νέα πάχη υπολογίζονται σύμφωνα με τον τύπο:

$$t_c = Roundup_{0,5} \times (t_{c1} + t_{c2}) + t_{reserve}$$

Οι τιμές t_{c1} και t_{c2} λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.3:

Compartment type	Structural member		t_{c1} or t_{c2}		
			Oil tankers	BC-A or BC-B ships with $L \geq 150$ m	Other BC ships
Ballast water tank, bilge tank, drain storage tank, chain locker (4)	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	2.0		
		Elsewhere	1.5		
	Other members (2) (3)	Within 3m below top of tank (4)	1.7		
		Elsewhere	1.2		
Cargo oil tank, slop tank	Face plate of PSM	Within 3m below top of tank (4)	1.7	N/A	
		Elsewhere	1.4		
	Inner-bottom plating/bottom of tank		2.1		
	Other members	Within 3m below top of tank (4)	1.7		
		Elsewhere	1.0		
Dry bulk cargo hold (5)	Transverse bulkhead	Upper part (6)	N/A	2.4	1.0
		Lower stool: sloping plate, vertical plate and top plate (7)		5.2	2.6
		Other parts		3.0	1.5
	Sloped plating of hopper tank, inner bottom plating			3.7	2.4
	Other members	Upper part (6)		1.8	1.0
		Webs and flanges of the upper end brackets of side frames of single side bulk carriers			
		Webs and flanges of lower brackets of side frames of single side bulk carriers			
		Other parts			
Exposed to atmosphere	Weather deck plating		1.7		
	Other members		1.0		

Πίνακας 4.3-Τιμές t_{c1} , t_{c2}

Στον πίνακα 4.4 φαίνεται η διαδικασία υπολογισμού του ουδέτερου άξονα:

Κατασκευαστικό Στοιχείο	Διαστάσεις	Εμβαδό ν (cm ²)	h(cm) απόσταση από B.L	a x h (cm ³)	a x h ² (cm ⁴)	i (cm ⁴)
Ενισχυτικά						
Upper Deck						
DL1	37*1,4(1,25)	67,79	1885	127784	240873122,8	9184,55
DL2	37*1,4(1,25)	67,79	1880	127445	239596976	9184,55
DL3	37*1,4(1,25)	67,79	1875	127106	238324218,8	9184,55
DL4	37*1,4(1,25)	67,79	1870	126767	237054851	9184,55
DL5	37*1,4(1,25)	67,79	1865	126428	235788872,8	9184,55
DL6	37*1,4(1,25)	67,79	2015	136597	275242652,8	9184,55
DL7	37*1,4(1,25)	67,79	1857,5	125920	233896260,7	9184,55
DL8	37*1,4(1,25)	67,79	1855	125750	233267084,8	9184,55
Wing						
WL1	34*1,2(1,0)	58,78	1730	101689	175922662	3430,435
WL2	34*1,2(1,0)	58,78	1690	99338,2	167881558	3430,435
WL3	34*1,4(1,2)	58,78	1645	96693,1	159060149,5	3430,435
WL4	34*1,4(1,2)	58,78	1605	94341,9	151418749,5	3430,435
WL5	34*1,4(1,25)	60,48	1565	94651,2	148129128	3531,475
WL6	37*1,3(1,25)	67,79	1525	103380	157654118,8	4678,39
WL7	37*1,3(1,25)	67,79	1485	100668	149492202,8	4678,39
WL8	37*1,3(1,25)	67,79	1450	98295,5	142528475	4678,39
Hopper Tank						
HL1	32*1,3(1,15)	52,59	230	12095,7	2782011	2720,01
HL2	28*1,1(0,95)	41,22	285	11747,7	3348094,5	1633,8
HL3	28*1,1(0,95)	41,22	345	14220,9	4906210,5	1633,8
HL4	28*1,1(0,95)	41,22	405	16694,1	6761110,5	1633,8

HL5	30*1,1(0,95)	46,73	445	20794,9	9253708,25	2125,555
Side Shell						
SL1	37*1,4(1,2)	67,79	1776	120395	213821591	172,23
SL2	37*1,4(1,2)	67,79	1709	115853	197992965	172,23
SL3	32*1,2(1,15)	52,59	1642	86352,8	141791264,8	97,86
SL4	32*1,2(1,15)	52,59	1575	82829,3	130456068,8	97,86
SL5	37*1,3(1,25)	67,79	1508	102227	154158798,6	172,23
SL6	30*1,1(0,8)	46,73	438	20467,7	8964870,12	75,68
SL7	26*1,0(0,7)	36,05	355	12797,8	4543201,25	42,8
SL8	26*1,0(0,7)	36,05	275	9913,75	2726281,25	42,8
SL9	26*1,0(0,7)	36,05	192	6921,6	1328947,2	42,8
Bottom						
BL0	18*0,75(0,725)	13,05	0	0	0	680,4
BL1	15*1,2(1,1)	16,5	0	0	0	309,375
BL2	Girder					
BL3	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL4	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL5	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL6	26*1,0(0,7)	36,05	0			2421,72
BL7	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL8	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL9	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL10	26*1,0(0,7)	36,05				2421,72
BL11	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL12	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL13	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL14	26*1,0(0,7)	36,05				2421,72
BL15	26*1,0(0,7)	36,05	0	0	0	2421,72
BL16	26*1,0(0,7)					
BL17	26*1,0(0,7)	38,65	0	0	0	2593,45
BL18	26*1,0(0,7)	38,65	0	0	0	2593,45
BL19	26*1,0(0,7)	38,65	0	0	0	2593,45
Inner Bottom						
IL0	18*1,1(1,05)	18,9	178	3364,2	598827,6	1020,6
IL1	18*2,2(2,1)	37,8	178	6728,4	1197655,2	1020,6
IL2	Girder					
IL3	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,02	1666261,56	5342,16

IL4	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL5	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL6	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL7	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL8	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL9	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL10	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL11	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL12	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL13	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL14	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
IL15	32*1,3(1,0)	52,59	178	9361,0 2	1666261,56	5342,16
Platings						
Main Deck	700*28(26)	1820	1870	340340 0	636435800 0	307125
Side shell (1)	178*2,8(2,625)	467,25	1765	824696	145558888 1	1233696
Side shell (2)	248*1,6(1,425)	353,4	1555	549537	854530035	1811293
Side shell (3)	682,5*1,8(1,6)	1092	1090	119028 0	129740520 0	4238836 9
Side shell (4)	249*1,8(1,6)	398,4	624,5	248801	155376099, 6	2058433
Side shell (5)	298*1,6(1,45)	432,1	350	151235	52932250	3213807
Wing plating (1)	218*2,2(2,0)	436	1695	739020	125263890 0	363333, 3
Wing plating (2)	178*1,5(1,3)	231,4	1600	370240	592384000	123413, 3
Wing plating (3)	189*1,4(1,225)	231,525	1505	348445	524409913, 1	174126, 1
Wing plating (4)	178*1,45(1,275)	226,95	1410	320000	451199295	136642, 8
Hopper plating (1)	90*2,55(2,275)	204,75	210	42997, 5	9029475	72089,0 6
Hopper plating (2)	338,5*1,95(1,675)	566,987 5	360	204116	73481580	2609324

Hopper plating (3)	170*1,85(1,575)	267,75	540	144585	78075900	295082,8
Bilge plating	R(190)*16(14,5)	432,535	68,98089172	29836,7	2058158,723	1472512
Inner bottom	1191,2*2,55(2,275)	27,0998	178	4823,76	858630,0632	3,2E+08
Bottom plating (1)	127,2*1,65(1,5)	190,8	0	0	0	257259,5
Bottom plating (2)	228*1,55(1,4)	319,2	0	0	0	1382774
Bottom plating (3)	228*1,55(1,4)	319,2	0	0	0	1382774
Bottom plating (4)	228*1,55(1,4)	319,2	0	0	0	1382774
Bottom plating (5)	257*1,55(1,4)	359,8	0	0	0	1980369
Bottom plating (6)	80*1,55(1,4)	112	0	0	0	1347426
Bottom plating (7)	228*1,6(1,45)	330,6	0	0	0	1432159
Girders						
IL2 - BL2	178*1,2(1,075)	191,35	89	17030,2	1515683,35	505227,8
IL6 - BL6	178*1,15(1,0)	178	89	15842	1409938	469979,3
IL11 - BL11	178*1,15(1,0)	178	89	15842	1409938	469979,3
IL16 - BL16	178*1,15(1,0)	178	89	15842	1409938	469979,3
Bulb Flat (1) IIL2 - BL2	16,0*0,9(0,8)	16,18	59	954,62	56322,58	6,54
Bulb Flat (2) IIL2 - BL2	16,0*0,9(0,8)	16,18	119	1925,42	229124,98	6,54
Bulb Flat (1) IIL6 - BL6	16,0*0,9(0,8)	16,18	59	954,62	56322,58	6,54
Bulb Flat (2) IIL6 - BL6	16,0*0,9(0,8)	16,18	119	1925,42	229124,98	6,54
Bulb Flat (1) IIL11 - BL11	16,0*0,9(0,8)	16,18	59	954,62	56322,58	6,54
Bulb Flat (2) IIL11 - BL11	16,0*0,9(0,8)	16,18	119	1925,42	229124,98	6,54
Bulb Flat (1) IIL16 - BL16	16,0*0,9(0,8)	16,18	59	954,62	56322,58	6,54
Bulb Flat (2) IIL16 - BL16	16,0*0,9(0,8)	16,18	119	1925,42	229124,98	6,54
Flat bottom on Wing	10*1,0(0,85)	8,5	1410	11985	16898850	159,375

		Σ(A)		Σ(A*h)	Σ(A*h ²)	Σ(I)
Σύνολο		13084,4		1,1E+0	172805365	3,88E+0
		6		7	44	8

Πίνακας 4.4-Υπολογισμός ουδέτερου άξονα

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, υπολογίζονται τα αθροίσματα, από τα οποία προκύπτει ότι το ύψος του ουδέτερου άξονα h_{NA} ισούται με:

$$h_{NA} = \frac{\Sigma(a \times h)}{\Sigma(a)} = 8,588m$$

Για την κατασκευή των καμπυλών σ-ε είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των δομικών στοιχείων του *bulk carrier* και η κατάταξη τους σε υπολογιστικά φύλλα *Excel*. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν τρία είδη δομικών στοιχείων τα οποία θα μελετηθούν ανά ομάδες, ανάλογα και με την κατά ύψος θέση στην οποία βρίσκονται.

4.2.1-Bulb Flats

Τα *bulb flats* (βολβολάμες) είναι διαμήκη ενισχυτικά, οι διαστάσεις των οποίων βρίσκονται στο σχέδιο του υπό μελέτη πλοίου όπως φαίνεται στον πίνακα 4.5:

BOTTOM	BL.0	FB180X15(13)AH36	UPPER DECK	DL.1~8	HP370X14(10) AH36
	BL.1	FB150X12(10)AH36			
	BL.3~15	HP260X10(7)AH36			
	BL.17~19	HP260X12(9)AH36			
INNER BOTTOM	IL.0,1	FB180X22(20)AH36	WING	WL.1~2	HP340X12(8)AH36
	IL.3~15	HP320X13(10)AH36		WL.3~4	HP340X14(10)AH36
SIDE SHELL	SL.1~2	HP370X14(10)AH36		WL.5	HP340X14(11)AH36
	SL.3~4	HP320X12(8)AH36		WL.6~8	HP370X13(10)AH36
	SL.5	HP370X13(10)AH36			
	SL.6	HP300X11(8)AH36			
	SL.7~9	HP260X10(7) AH36			
HATCH COAMING	CL.1,2	HP180X10(6) AH36	HOPPER	HL.1	HP320X13(10)AH36
				HL.2~4	HP280X11(8)AH36
				HL.5	HP300X11(8)AH36

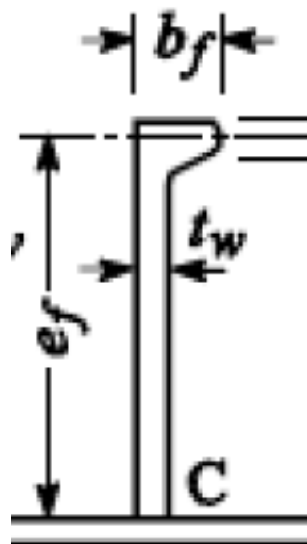
Πίνακας 4.5-Διαστάσεις bulb flats

Για κάθε *bulb flat* ζητείται ένα σύνολο χαρακτηριστικών, το σύνολο των οποίων εξαρτάται από τις διαστάσεις του. Η εύρεση του γίνεται από το *TATA STEEL bulb flat BRO*. Για παράδειγμα τα *bulb flats* του *upper deck DL1-8* έχουν διαστάσεις $370 \times 14(10)$. Ανατρέχοντας στον Πίνακα 4.6, που προαναφέρθηκε φαίνεται πως στον κατάλογο δεν υπάρχει *bulb flat* με πάχος $t=10\text{mm}$. Αυτομάτως, αναζητείται το αμέσως μεγαλύτερο πάχος το οποίο υπάρχει στον πίνακα:

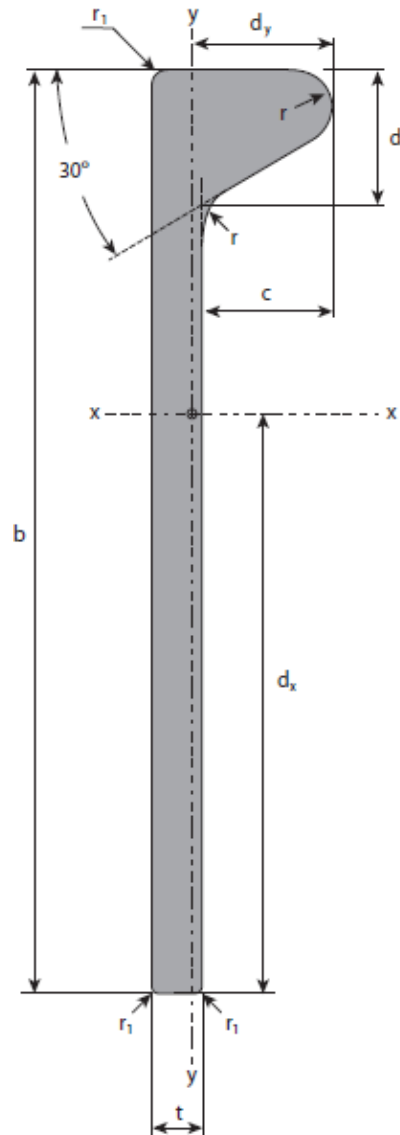
Section Description	Section Description					Mass per metre	Area of section
	b mm	t mm	c mm	d mm	r mm	G kg/m	F cm ²
370x12.5	370	12.5	53.5	56.9	16.5	53.22	67.79
370x13	370	13.0	53.5	56.9	16.5	54.67	69.64
370x14	370	14.0	53.5	56.9	16.5	57.54	73.30
370x15	370	15.0	53.5	56.9	16.5	60.44	77.00
370x16	370	16.0	53.5	56.9	16.5	63.35	80.70

Πίνακας 4.6-Διαστάσεις DL1-8

Έτσι λοιπόν επιλέγεται το *bulb flat* με διαστάσεις 370×12.5 . Το εμβαδόν του εντοπίζεται στη στήλη *area of section*. Όταν πρόκειται για ενισχυτικό το οποίο είναι κατακόρυφο, η ροπή αδράνειας του επιλέγεται από τη στήλη I_x , ενώ όταν είναι οριζόντιο επιλέγεται από τη στήλη I_y . Στην περίπτωση που πρόκειται για κεκλιμένο ενισχυτικό, ως ροπή αδράνειας λαμβάνεται το ημίθροισμα των I_x και I_y . Επιπροσθέτως, για την εφαρμογή των κανονισμών είναι απαραίτητες κάποιες από τις διαστάσεις τους, οι οποίες προσδιορίζονται στα σχήματα 4.2 και 4.3:



Σχήμα 4.2- Bulb flat

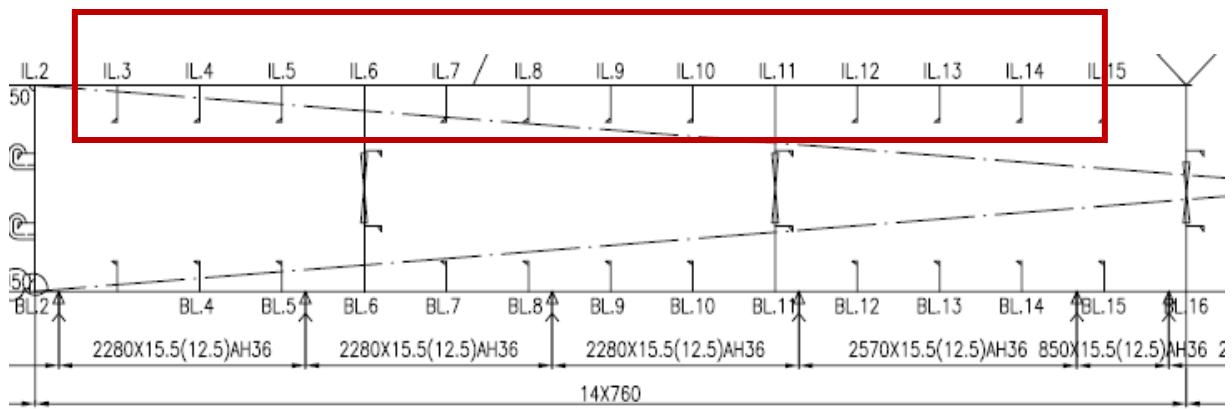


Σχήμα 4.3-Bulb flat

Στις βολβολάμες παρατηρούνται οι εξής τρόποι αστοχίας:

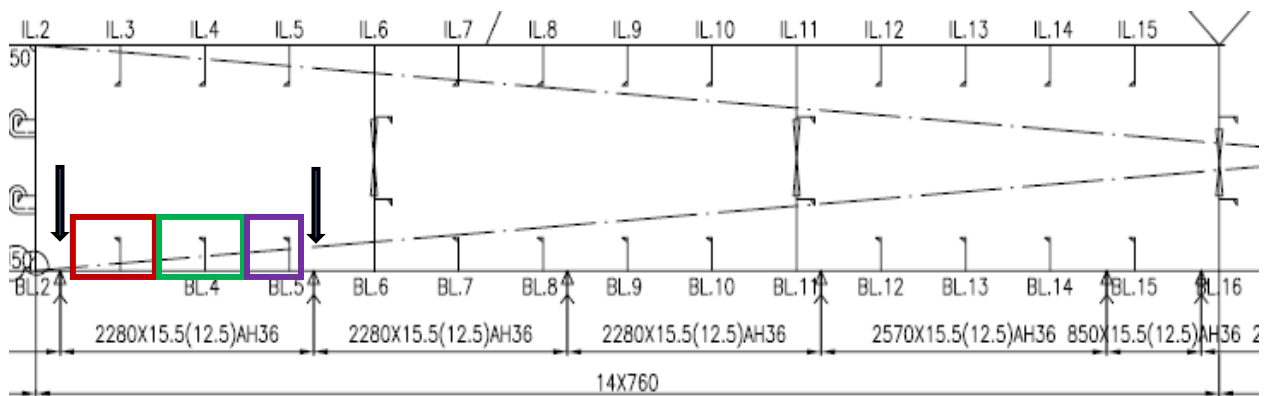
- *Elastoplastic collapse*
- *Beam column buckling*
- *Torsional buckling*
- *Web local buckling of flanged profiles*

Για κάθε έναν από του παραπάνω τρόπους αστοχίας δημιουργούνται ζεύγη σ - ϵ , τα οποία αποτυπώνονται σε καμπύλες. Σε ένα υπολογιστικό φύλλο κάθε φορά, τοποθετείται μια βολβολάμα, μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα της. Εάν οι βολβολάμες βρίσκονται στο ίδιο ύψος, έχουν όμοιο συνεργαζόμενο έλασμα και είναι ίδιου είδους, τοποθετούνται στο ίδιο υπολογιστικό φύλλο. Για παράδειγμα, οι βολβολάμες του *inner bottom IL3-15*, όπως φαίνεται και σχήμα 4.4:



Σχήμα 4.4-Bulb flats IL3-15

Συνήθως τα συνεργαζόμενα ελάσματα καθορίζονται από την παρουσία ή όχι συγκόλλησης μεταξύ των βολβολαμών, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.5:



Σχήμα 4.5-Συνεργαζόμενα ελάσματα

4.2.2-Flat Bars

Τα *flat bars* είναι διαμήκη ενισχυτικά και στο υπό μελέτη πλοίου υπάρχουν σύνολο τέσσερα. Τα δύο εξ αυτών βρίσκονται στο *inner bottom* (*IL0*, *IL1*) και τα υπόλοιπα δύο στο *bottom* (*BL0*, *BL1*). Για την εφαρμογή των κανονισμών είναι απαραίτητες οι διαστάσεις τους οι οποίες προσδιορίζονται στο σχήμα 4.7:

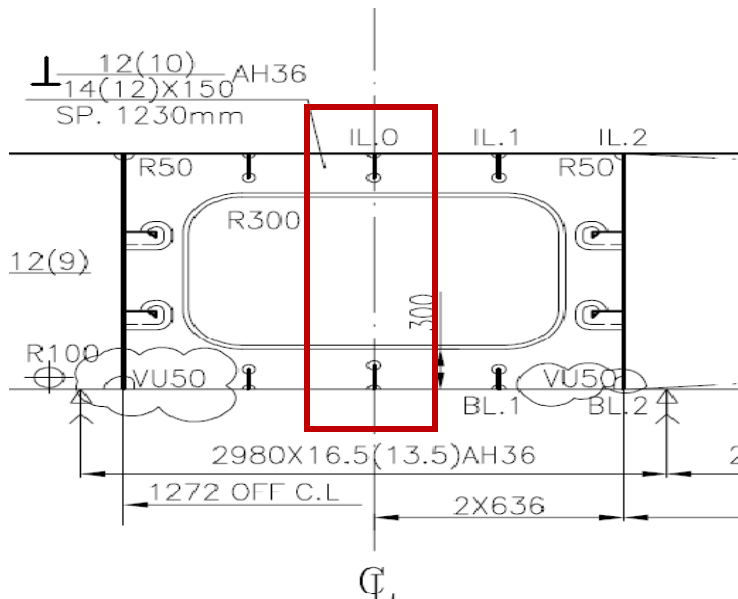


Σχήμα 4.7-Διαστάσεις flat bar

Στα flat bars παρατηρούνται οι εξής τρόποι αστοχίας:

- *Elastoplastic collapse*
- *Beam column buckling*
- *Torsional buckling*
- *Web local buckling of flat bars*

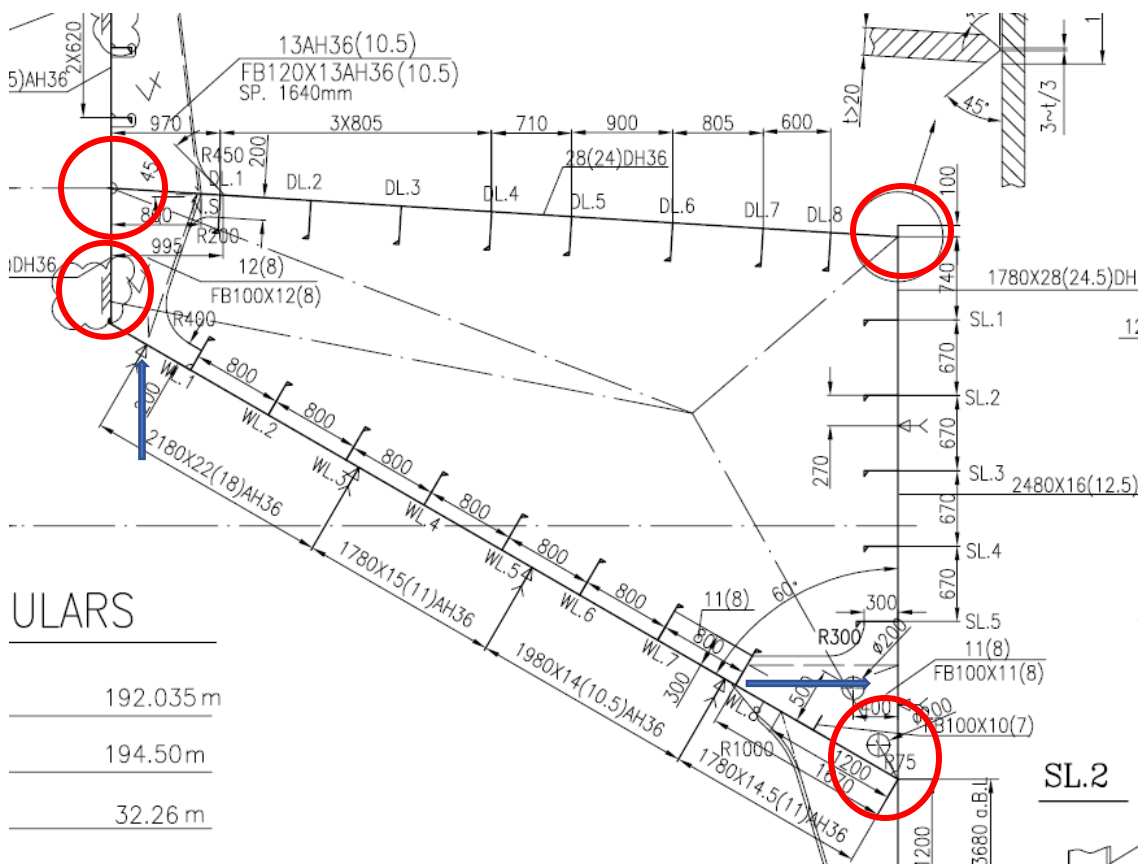
Για κάθε έναν από του παραπάνω τρόπους αστοχίας, δημιουργούνται ζεύγη σ - ϵ , τα οποία αποτυπώνονται σε καμπύλες. Σε ένα υπολογιστικό φύλλο κάθε φορά τοποθετείται μια βολβολάμα, μαζί με το συνεργαζόμενο έλασμα της. Στα flat bars ILO κα BLO λαμβάνεται το μισό πάχος και το μισό συνεργαζόμενο έλασμα καθώς βρίσκονται πάνω στην *center line* του υπό μελέτη πλοίου όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8:



Σχήμα 4.8- Flat bars ILO, BLO

4.2.3-Hard Corners

Το υπό μελέτη πλοίο αποτελείται στο σύνολο από 13 *hard corners*, ενώ το *bilge* έχει θεωρηθεί και αυτό *hard corner*. Τα *hard corners* αστοχούν μόνο με *elastoplastic collapse*. Σύμφωνα με τον κανονισμό όταν ένα *hard corner* βρίσκεται μεταξύ 2 *plates*, τότε το μήκος κάθε *hard corner element* ισούται με $20t_{n50}$. Στην περίπτωση που υπάρχει συγκόλληση 2 ελασμάτων το *hard corner element* μετράτε μέχρι εκείνο το σημείο. Στο παρακάτω σχήματα φαίνονται ορισμένες γωνίες από τις οποίες αποτελείται η διατομή καθώς και μερικά σημεία στα οποία υπάρχει συγκόλληση:



Σχήμα 4.9-Hard corners της διατομής

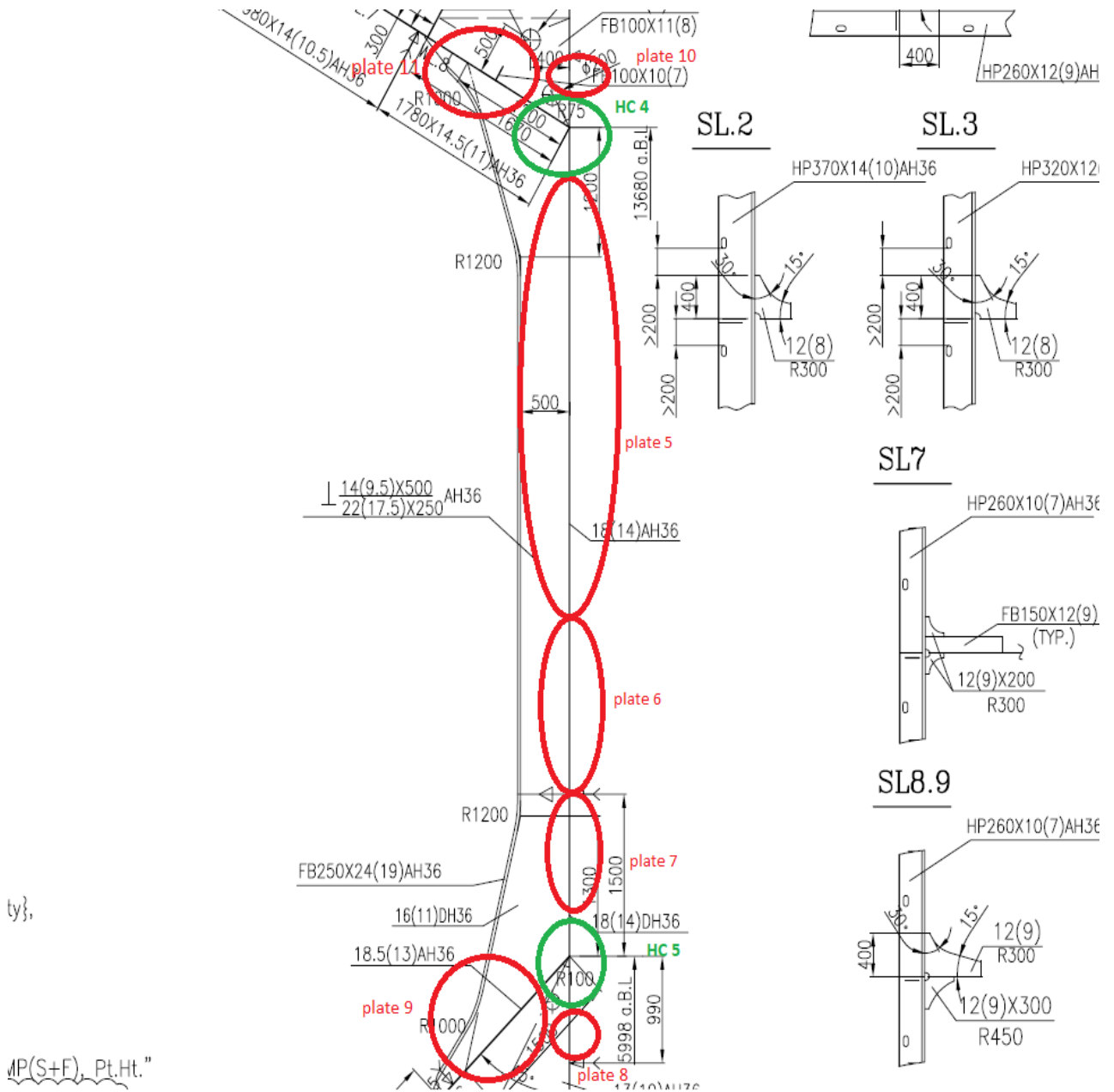
4.2.4-Plates

Το υπό μελέτη πλοίο αποτελείται στο σύνολο από 11 *plates*, στα οποία παρατηρούνται δύο τρόποι αστοχίας:

- *Elastoplastic collapse*

- *Plate buckling*

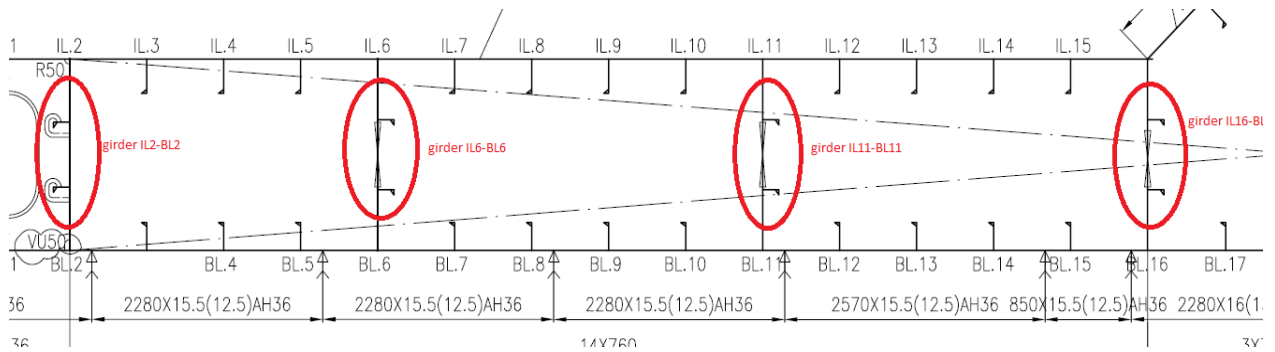
Τα *plates* βρίσκονται μεταξύ των υπόλοιπων δομικών στοιχείων της διατομής, δηλαδή των *bulb flats* και των *hard corners*. Στο Σχήμα 4.10 και 4.11 φαίνονται μερικά από τα *plates* του πλοίου, διαχωρισμένα σύμφωνα με τους κανονισμούς:



Σχήμα 4.10-Plates της διατομής

ty},

MP(S+F), Pt.Ht."



Σχήμα 4.11-Plates διατομής

Όπως φαίνεται στο σχήμα το *plate 5* διαχωρίστηκε με το *plate 6* παρόλο που δεν υπάρχει ανάμεσα τους κάποιο άλλο δομικό στοιχείο. Ο λόγος που συνέβη αυτό, είναι διότι στο σημείο εκείνο που γίνεται ο διαχωρισμός τους, βρίσκεται ο ουδέτερος άξονας και το συγκεκριμένο *plate* ως ενιαίο θα έπρεπε να υποστεί ταυτοχρόνως εφελκυσμό και θλίψη.

4.3-Περιγραφή Υπολογιστικών Φύλλων *Excel*

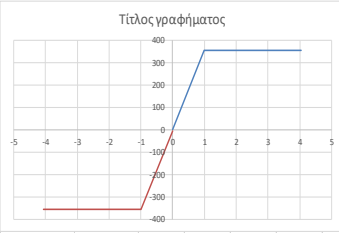
4.3.1-Γενικά

Αφού έχει επιτευχθεί ο διαχωρισμός, των υπό μελέτη δομικών στοιχείων, ακολουθεί η τοποθέτηση τους σε υπολογιστικά φύλλα, έτσι ώστε να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί και να οδηγηθούμε στη διαμόρφωση των καμπυλών σ - ϵ και M - χ . Οι υπολογισμοί αυτοί γίνονται σύμφωνα με τους *Common Structural Rules*, στους οποίους εμπεριέχεται η μέθοδος *Smith* την οποία ακολουθούμε.

4.3.2-Καμπύλες σ - ϵ

Συνολικά δημιουργήθηκαν 65 υπολογιστικά φύλλα, ένα για κάθε δομικό στοιχείο, εκτός από τις περιπτώσεις που πρόκειται για όμοια στοιχεία με ίδια καθ' ύψος θέση, όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα οποία τοποθετήθηκαν στο ίδιο. Σε κάθε ένα εξ αυτών εξετάζονται οι περιπτώσεις *hogging* και *sagging*. Μετά το πέρας των υπολογισμών της τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ , δημιουργούνται τα αντίστοιχα διαγράμματα για κάθε στοιχείο ώστε να διαπιστωθεί η ορθότητα τους σύμφωνα με τον κανονισμό. Παρακάτω, φαίνεται το υπολογιστικό φύλλο του *bulb flat SL1* για *elastoplastic collapse*, με τους αντίστοιχους πίνακες και το διάγραμμα που προέκυψε:

Κατάσταση hogging					Κατάσταση sagging								
elastoplastic collapse					elastoplastic collapse								
bulb flat SL1					bulb flat SL1								
s	0,705	m			hNA	8,588837	m	θέση του ουδέτερου άξονα					
s1	0,37	m			ReH	355	N/mm ²	όριο διαρροής					
s2	0,335	m			E	200000	N/mm ²	μέτρο ελαστικότητας					
t1-n50	26,25	mm			Depth (Mould)	18,5	m	καύλο					
t2-n50	26,25	mm			zd	17,76	m						
ReHp1	355	N/mm ²											
ReHp2	355	N/mm ²											
tn50	26,25	mm											
ReHs	355	N/mm ²											
ReHp	355	N/mm ²											
Ap50	185,0625	cm ²											
As-n50	67,79	cm ²											
ReHA	355	N/mm ²											
εγ	0,001775												
hw	370	mm											
tw	12,5	mm											
καμπυλότητα χ	εε	ε	Φ	σ	ε	σ	καμπυλότητα χ	εε	ε	Φ	σ	ε	σ
1,79091E-06	1,64247E-05	0,009253	0,009253367	3,284945346	0,009253	3,284945346	-1,79091E-06	-1,64247E-05	-0,00925	-0,00925	-3,28495	-0,00925	-3,28495
3,58182E-06	3,28495E-05	0,018507	0,018506734	6,569890691	0,018507	6,569890691	-3,58182E-06	-3,28495E-05	-0,01851	-0,01851	-6,56989	-0,01851	-6,56989
5,37273E-06	4,92742E-05	0,02776	0,02776102	9,854836037	0,02776	9,854836037	-5,37273E-06	-4,92742E-05	-0,02776	-0,02776	-9,85484	-0,02776	-9,85484
7,16364E-06	6,56989E-05	0,037013	0,037013469	13,13978138	0,037013	13,13978138	-7,16364E-06	-6,56989E-05	-0,03701	-0,03701	-13,1398	-0,03701	-13,1398
8,95455E-06	8,21236E-05	0,046267	0,046266836	16,42472673	0,046267	16,42472673	-8,95455E-06	-8,21236E-05	-0,04627	-0,04627	-16,4247	-0,04627	-16,4247
1,07455E-05	9,85484E-05	0,05552	0,05520203	19,70967207	0,05552	19,70967207	-1,07455E-05	-9,85484E-05	-0,05552	-0,05552	-19,7097	-0,05552	-19,7097
1,25364E-05	0,000114973	0,064774	0,06477357	22,99461742	0,064774	22,99461742	-1,25364E-05	-0,000114973	-0,06477	-0,06477	-22,9946	-0,06477	-22,9946
1,43273E-05	0,000131398	0,074027	0,074026937	26,27956276	0,074027	26,27956276	-1,43273E-05	-0,000131398	-0,07403	-0,07403	-26,2796	-0,07403	-26,2796
1,61182E-05	0,000147823	0,08328	0,083280305	29,56450811	0,08328	29,56450811	-1,61182E-05	-0,000147823	-0,08328	-0,08328	-29,5645	-0,08328	-29,5645
1,79091E-05	0,000164247	0,092534	0,092533672	32,84945346	0,092534	32,84945346	-1,79091E-05	-0,000164247	-0,09253	-0,09253	-32,8495	-0,09253	-32,8495
1,97E-05	0,000180672	0,101787	0,101787039	36,1343988	0,101787	36,1343988	-1,97E-05	-0,000180672	-0,10179	-0,10179	-36,1344	-0,10179	-36,1344
2,14909E-05	0,000197097	0,11104	0,111040406	39,41934415	0,11104	39,41934415	-2,14909E-05	-0,000197097	-0,11104	-0,11104	-39,4193	-0,11104	-39,4193
2,32818E-05	0,000213521	0,120294	0,120293773	42,70428949	0,120294	42,70428949	-2,32818E-05	-0,000213521	-0,12029	-0,12029	-42,7043	-0,12029	-42,7043
2,50727E-05	0,000229946	0,129547	0,12954714	45,98923484	0,129547	45,98923484	-2,50727E-05	-0,000229946	-0,12955	-0,12955	-45,9892	-0,12955	-45,9892
2,68636E-05	0,000246371	0,138801	0,138800508	49,27418018	0,138801	49,27418018	-2,68636E-05	-0,000246371	-0,1388	-0,1388	-49,2742	-0,1388	-49,2742
2,86546E-05	0,000262796	0,148054	0,148053875	52,55912553	0,148054	52,55912553	-2,86546E-05	-0,000262796	-0,14805	-0,14805	-52,5591	-0,14805	-52,5591
3,04455E-05	0,00027922	0,157307	0,157307242	55,84407088	0,157307	55,84407088	-3,04455E-05	-0,00027922	-0,15731	-0,15731	-55,8441	-0,15731	-55,8441
3,22364E-05	0,000295645	0,166561	0,166560609	59,12901622	0,166561	59,12901622	-3,22364E-05	-0,000295645	-0,16656	-0,16656	-59,129	-0,16656	-59,129
3,40273E-05	0,00031207	0,175814	0,175813976	62,41396157	0,175814	62,41396157	-3,40273E-05	-0,00031207	-0,17581	-0,17581	-62,414	-0,17581	-62,414
3,58182E-05	0,000328495	0,185067	0,185067349	65,69890691	0,185067	65,69890691	-3,58182E-05	-0,000328495	-0,18507	-0,18507	-65,6989	-0,18507	-65,6989
3,76091E-05	0,000344919	0,194321	0,194320711	68,98385226	0,194321	68,98385226	-3,76091E-05	-0,000344919	-0,19432	-0,19432	-68,9839	-0,19432	-68,9839
3,94E-05	0,000361344	0,203574	0,203574078	72,2687976	0,203574	72,2687976	-3,94E-05	-0,000361344	-0,20357	-0,20357	-72,2688	-0,20357	-72,2688
4,11909E-05	0,000377769	0,212827	0,212827445	75,55374295	0,212827	75,55374295	-4,11909E-05	-0,000377769	-0,21283	-0,21283	-75,5537	-0,21283	-75,5537
4,29818E-05	0,000394193	0,222081	0,222080812	78,83868829	0,222081	78,83868829	-4,29818E-05	-0,000394193	-0,22208	-0,22208	-78,8387	-0,22208	-78,8387
4,47727E-05	0,000410618	0,231334	0,231334179	82,12363364	0,231334	82,12363364	-4,47727E-05	-0,000410618	-0,23133	-0,23133	-82,1236	-0,23133	-82,1236
4,65637E-05	0,000427043	0,240588	0,240587546	85,40857899	0,240588	85,40857899	-4,65637E-05	-0,000427043	-0,24059	-0,24059	-85,4086	-0,24059	-85,4086
4,83546E-05	0,000443468	0,249841	0,249840914	88,69352433	0,249841	88,69352433	-4,83546E-05	-0,000443468	-0,24984	-0,24984	-88,6935	-0,24984	-88,6935
5,01455E-05	0,000459892	0,259094	0,259094281	91,97846968	0,259094	91,97846968	-5,01455E-05	-0,000459892	-0,25909	-0,25909	-91,9785	-0,25909	-91,9785
5,19364E-05	0,000476317	0,268348	0,268347648	95,26341502	0,268348	95,26341502	-5,19364E-05	-0,000476317	-0,26835	-0,26835	-95,2634	-0,26835	-95,2634
5,37273E-05	0,000492742	0,277601	0,277601015	98,54836037	0,277601	98,54836037	-5,37273E-05	-0,000492742	-0,2776	-0,2776	-98,5484	-0,2776	-98,5484
5,55182E-05	0,000509167	0,286854	0,286854382	101,8333057	0,286854	101,8333057	-5,55182E-05	-0,000509167	-0,28685	-0,28685	-101,833	-0,28685	-101,833
5,73091E-05	0,000525591	0,296108	0,296107749	105,1182511	0,296108	105,1182511	-5,73091E-05	-0,000525591	-0,29611	-0,29611	-105,118	-0,29611	-105,118
5,91E-05	0,000542016	0,305361	0,305361117	108,4031964	0,305361	108,4031964	-5,91E-05	-0,000542016	-0,30536	-0,30536	-108,403	-0,30536	-108,403



Εικόνα 4.1-Υπολογιστικό φύλλο SL1

Με παρόμοια διαδικασία, η οποία θα αναλυθεί εκτενώς στο **Κεφάλαιο 6**, δημιουργούνται και τα υπόλοιπα υπολογιστικά φύλλα.

4.3.3-Καμπύλες $M-\chi$

Αφού έχουν υπολογιστεί όλα τα ζεύγη τιμών $\sigma-\epsilon$ για κάθε δομικό στοιχείο της διατομής, δημιουργείται ένα συγκεντρωτικό υπολογιστικό φύλλο στο οποίο καταγράφεται το σύνολο τους. Για συγκεκριμένες τιμές καμπυλοτήτων χ , οι οποίες έχουν ήδη υπολογιστεί, υπολογίζονται ροπές MU για κάθε δομικό στοιχείο. Αυτό, προϋποθέτει την εύρεση της τάσης σ , η οποία αντιστοιχεί στην εκάστοτε παραμόρφωση. Αυτό γίνεται με συνδυασμό των εντολών, **FORECAST**, **OFFSET** και **MATCH**, οι οποίες κάνουν μία γραμμική παρεμβολή στους πίνακες όλων των υπολογιστικών φύλλων για κάθε στοιχείο. Για τα στοιχεία τα οποία εφελκύνονται, οι τιμές αντλούνται μόνο από το *elastoplastic collapse*. Για στοιχεία τα οποία θλίβονται, οι τιμές αντλούνται από όλους τους πιθανούς τρόπους κατάρρευσης και επιλέγεται κάθε φορά ο μικρότερος εξ αυτών. Έτσι, μια εντολή η οποία αφορά στοιχείο σε εφελκυσμό είναι η εξής:

FORECAST (\$F\$9; OFFSET('HC 1'!X23:X1778;MATCH('M-x '!'\$F\$9;'HC 1'!W23:W1778;1)-1;0;2);OFFSET('HC 1'!W23:W1778;MATCH('M-x '!'\$F\$9;'HC 1'!W23:W1778;1)-1;0;2))

Ενώ, μία εντολή η οποία αφορά στοιχείο σε θλίψη είναι η εξής:

MIN(FORECAST(\$F\$39;OFFSET('HL2'!X25:X1576;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!W25:W1576;1)-1;0;2);OFFSET('HL2'!W25:W1576;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!W25:W1576;1)-1;0;2));FORECAST('M-x '!'\$F\$39;OFFSET('HL2'!AU25:AU900;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!AD25:AD900;-1)-1;0;2);OFFSET('HL2'!AD25:AD900;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!AD25:AD900;-1)-1;0;2));FORECAST('M-x '!'\$F\$39;OFFSET('HL2'!BS25:BS900;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!BD25:BD900;-1)-1;0;2);OFFSET('HL2'!BD25:BD900;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!BD25:BD900;-1)-1;0;2));FORECAST('M-x '!'\$F\$39;OFFSET('HL2'!CH25:CH900;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!CB25:CB900;-1)-1;0;2);OFFSET('HL2'!CB25:CB900;MATCH('M-x '!'\$F\$39;'HL2'!CB25:CB900;-1)-1;0;2)))

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να γίνει ταχύτερη με τη χρήση μίας μακροεντολής, η οποία συμπεριλαμβάνει αυτόματη Αναζήτηση Στόχου ώστε να μηδενίζει το άθροισμα και την αυτόματη μετακίνηση του ουδέτερου άξονα. Στο υπολογιστικό φύλλο υπάρχει το κουμπί *hogging* το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του πίνακα ροπής *MU* και καμπυλοτήτων *χ*. Προηγουμένως πρέπει να οριστεί ο αριθμός γραμμών και ο αριθμός επαναλήψεων. Ο κώδικας της μακροεντολής φαίνεται παρακάτω:

```

Sub Macrol()

Range("l36").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("d3")

End Sub

Sub Κομπ(1_Κλικ())
Dim zna_cur, Mu, xi, s, k, line_correct As Integer
'Range("j2").Value = 30
k = Range("j2").Value
Range("d3").Value = 0.3082666

If Range("j1").Value > 0 And k > 0 Then
Range("j1").Value = 1
Cells(6, 14).Value = 1
Cells(6, 15).Value = 0
Cells(6, 16).Value = 0
Cells(6, 17).Value = 0
For s = 1 To k
Range("j1").Value = 1 + s
'Range("l36").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("d3")
Macrol
line_correct = 6 + s

'xi= Cells(6, 15).Value
zna_cur = Range("D3").Value
Mu = Range("M36").Value
Cells(line_correct, 14).Value = 1 + s
Cells(line_correct, 16).Value = Mu
Cells(line_correct, 17).Value = zna_cur

Next s

ElseIf Range("j1").Value < 0 Or k < 0 Then
'lathos entoli ftiakse ta J1, J2
MsgBox ("ΠΡΟΣΕΕΞ ΚΑΛΑ J1, J2")

End If

End Sub

```

Εικόνα 4.2-Κώδικας μακροεντολής

```

Sub Mχsagging_Kouμπίλ_Kλιx()
Dim zna_cur, Mu, xi, s, k, line_correct As Integer
'Range("j2").Value = 30
k = Range("j2").Value
Range("d3").Value = 0.3082666

If Range("j1").Value > 0 And k > 0 Then
Range("j1").Value = 1
Cells(6, 14).Value = 1
Cells(6, 15).Value = 0
Cells(6, 16).Value = 0
Cells(6, 17).Value = 0
For s = 1 To k
Range("j1").Value = 1 + s
'Range("l36").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("d3")
Macrol
line_correct = 6 + s

'xi= Cells(6, 15).Value
zna_cur = Range("D3").Value
Mu = Range("M36").Value
Cells(line_correct, 14).Value = 1 + s
Cells(line_correct, 16).Value = Mu
Cells(line_correct, 17).Value = zna_cur

Next s

ElseIf Range("j1").Value < 0 Or k < 0 Then
'lathos entoli ftiakse ta J1, J2
MsgBox ("ΠΡΟΣΕΞΕ ΚΑΛΑ J1, J2")

End If

End Sub

```

Εικόνα 4.3-Κώδικας μακροεντολής

Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται το σύνολο των δομικών στοιχείων της διατομής και στήλες στις οποίες υπολογίζεται:

- Το εμβαδό A_i του κάθε στοιχείου
- Η παραμόρφωση εE_i του κάθε στοιχείου
- Η σχετική παραμόρφωση ε_i του κάθε στοιχείου
- Η τάση σ_i του κάθε στοιχείου με γραμμική παρεμβολή
- Το γινόμενο $A_i \times \sigma_i$ του κάθε στοιχείου
- Η ροπή MU_i

								hogging			
structural element	zi (m)	Ai (m ²)	$\epsilon E_i = \chi^2 (z_i - z_n)$	ϵI	$\sigma_i (N/m^2)$	$A_i \cdot \sigma_i (N)$	MU (Nm)				
Hard Corner 1	18,5	0,029757	0,001790339	1,008641655	355000000	10563735	55001914,56				
Hard Corner 2	18,5	0,030708	0,001790339	1,008641655	355000000	10901162,5	56758789,24				
Hard Corner 3	17,75	0,023205	0,001532448	0,863350943	306489584,6	7112090,812	31696263,6				
Hard Corner 4	13,55	0,017306	8,82582E-05	0,049722951	17651647,73	305472,7962	78406,64089				
Hard Corner 5	6	0,015201	-0,002507845	-1,412870223	-355000000	-5396443,75	39358028,52				
Hard Corner IL2	1,78	0,023014	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8169881,25	94062513,8				
Hard Corner IL6	1,78	0,022703	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8059387,5	92790363,13				
Hard Corner IL11	1,78	0,022703	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8059387,5	92790363,13				
Hard Corner IL16	1,78	0,019461	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-6908521,875	79540070,94				
Hard Corner BL2	0	0,008806	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-3126218,75	41557847,89				
Hard Corner BL6	0	0,01583	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5619650	74703844,67				
Hard Corner BL11	0	0,01097	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-3894350	51768867,72				
Hard Corner BL16	0	0,019461	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-6908521,875	91837239,88				
DL1	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL2	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL3	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL4	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL5	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL6	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL7	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
DL8	18,5	0,029529	0,001790339	1,008641655	355000000	10482795	54580486,44				
WL1	17,3	0,360044	0,001377713	0,776176515	275542662,8	99207344,72	397491396,6				
WL2	16,9	0,359044	0,001240171	0,698688135	248034287,9	89055098,84	321192626,9				
WL3	16,45	0,353644	0,001085437	0,611513707	217087366,1	76771535,94	242342640,2				
WL4	16,05	0,356954	0,000947895	0,534025327	189578991,1	67670884,41	186546504,8				
WL5	15,65	0,362378	0,000810353	0,456536947	162070616,2	58730744,72	138409164,5				
WL6	15,25	0,478742	0,000672811	0,379048567	134562241,2	64420529,21	126049914,8				
WL7	14,85	0,482294	0,000535269	0,301560187	107053866,3	51631437,39	80373268,23				
WL8	14,5	0,474342	0,00041492	0,233757854	82984038,22	39362773,17	47497998,4				
HL1	2,3	0,28366	-0,003780107	-2,12963774	-355000000	-100699433,1	1107021790				
HL2	2,85	0,181386	-0,00350987	-2,023091217	-355000000	-64392118,75	672467947,7				
HL3	3,45	0,177618	-0,003384674	-1,906858647	-355000000	-63054212,5	620663227,9				
HL4	4,05	0,177618	-0,003178361	-1,790626077	-355000000	-63054212,5	582830700,4				
HL5	4,45	0,222773	-0,003040819	-1,713137696	-355000000	-79084415	699369336,8				
SL1	17,76	0,025285	0,001535886	0,865288152	307177294	7767054,673	34692893,96				
SL2	17,09	0,02266	0,001305504	0,735495115	261100766	5916608,632	22463428,67				
SL3	16,42	0,017253	0,001075121	0,605702079	215024238	3707959,421	11599204,88				
SL4	15,75	0,014807	0,000844739	0,475909042	168947709,9	2501524,267	6145427,304				
SL5	15,08	0,020592	0,000614356	0,346116005	122871181,9	2530163,377	4520574,773				
SL6	4,38	0,021714	-0,003064889	-1,726698163	-355000000	-7708470	68708113,23				
SL7	3,55	0,018669	-0,003350289	-1,887486552	-355000000	-6627495	64573850,5				
SL8	2,75	0,023034	-0,003625372	-2,042463312	-355000000	-8176892,5	86211650,89				
SL9	1,92	0,008345	-0,003910772	-2,203251701	-355000000	-2962475	33693196,69				
BL0	0	0,006413	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-2276437,5	32016427,92				
BL1	0	0,011738	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-4166812,5	50590800,81				
BL3	0	0,016513	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5862115	77927011,19				
BL4	0	0,014245	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5056975	67224021,94				
BL5	0	0,011977	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-4251835	56521032,7				
BL7	0	0,014245	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5056975	67224021,94				
BL8	0	0,011977	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-4251835	56521032,7				
BL9	0	0,016513	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5862115	77927011,19				
BL10	0	0,014245	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5056975	67224021,94				
BL12	0	0,016513	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5862115	77927011,19				
BL13	0	0,014245	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5056975	67224021,94				
BL14	0	0,016037	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5693135	75680704,8				
BL15	0	0,015519	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5509245	73236194,91				
BL17	0	0,014705	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-5220186,25	69393642,45				
BL18	0	0,017496	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-6211080	82565917,02				
BL19	0	0,00652	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-2314422,5	30766374,94				
IL0	1,78	0,009113	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-3235159,375	37247447,55				
IL1	1,78	0,015098	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-5359834,375	61709525,44				
IL2	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
IL3	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
IL4	1,78	0,022549	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8004895	92162973,16				
IL5	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
IL7	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
IL8	1,78	0,022549	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8004895	92162973,16				
IL9	1,78	0,022549	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8004895	92162973,16				
IL10	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
IL12	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
IL13	1,78	0,022549	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8004895	92162973,16				
IL14	1,78	0,022549	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-8004895	92162973,16				
IL15	1,78	0,020843	-0,003958911	-2,230372634	-355000000	-7399176,25	85189135,17				
Bilge	0	0,05539	-0,004570973	-2,575195925	-355000000	-19663450	261392669,4				
IL2 - BL2	0,165	0,003548	-0,004514237	-2,543231969	-355000000	-1259362,5	16533322,62				
IL6 - BL6	0,18	0,0036	-0,004509079	-2,540326154	-355000000	-1278000	16758831,81				
IL11 - BL11	0,18	0,0036	-0,004509079	-2,540326154	-355000000	-1278000	16758831,81				
IL16 - BL16	0,18	0,0036	-0,004509079	-2,540326154	-355000000	-1278000	16758831,81				
plate 5	11,13	0,07696	-0,00074387	-0,419081748	-148774020,7	-11449648,63	24769333,21				
plate 6	8	0,00656	-0,001820135	-1,025428323	-355000000	-2328800	12327099,75				
plate 7	7,33	0,00656	-0,002050518	-1,1552136	-355000000	-2328800	13887395,75				
plate 8	4,665	0,01072	-0,002966891	-1,671487692	-355000000	-3805600	32835960,96				
plate 9	5,4	0,021499	-0,002714157	-1,529102794	-355000000	-7632056,25	62024315,12				
plate 10	14,125	0,005344	0,000285975	0,161112498	57194936,71	305635,443	254188,7677				
plate 11	14,25	0,012941	0,000328957	0,185327617	63763,57723	825,1803939	789,427862				
SUM=						-1,11443E-08	9455082868				

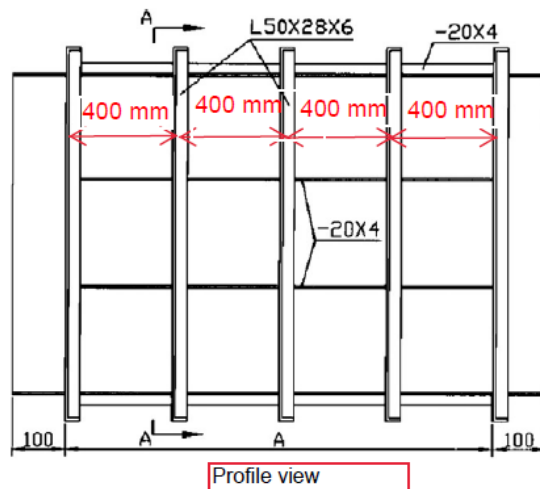
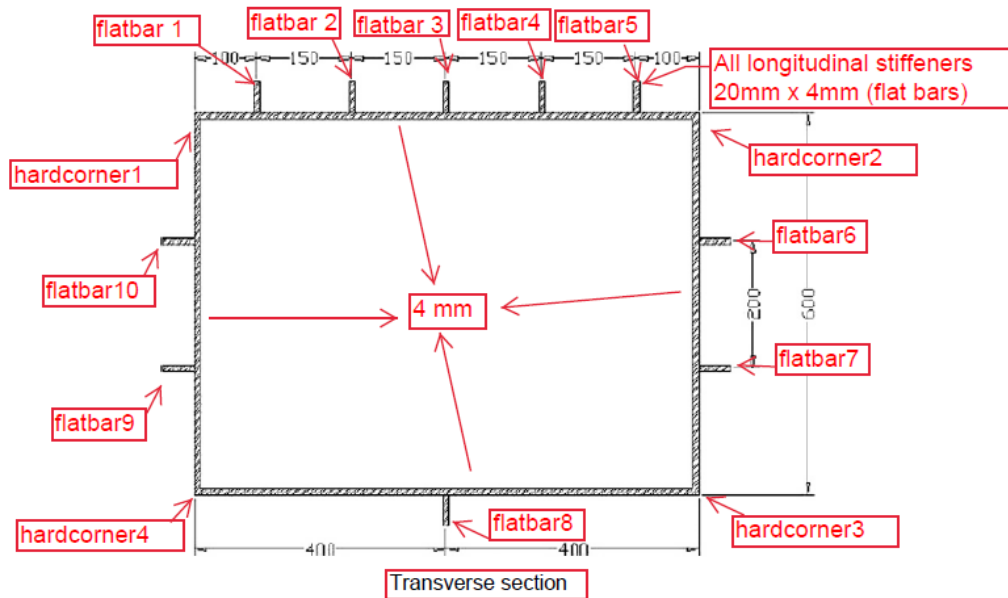
Πίνακας 4.7- Υπολογισμός ροπήs MU

Κεφάλαιο 5

Εφαρμογή του Αναπτυχθέντος Λογισμικού σε Ενισχυμένο *box-girder*

5.1-Γενικά

Το *box-girder* N400, χρησιμοποιήθηκε για μία πειραματική ανάλυση διαμήκους κάμψης, με στόχο την εύρεση της μέγιστης αντοχής του, από τους *J.M. Gordo* και *C. Guedes Soares* στο *Technical University of Lisbon*. Το εν λόγω *box-girder* έχει 400mm απόσταση μεταξύ των νομέων της, οι οποίοι είναι τέσσερις, ενώ έχει μήκος 1400mm. Το υλικό του μοντέλου είναι ναυπηγικός χάλυβας, έχει όριο διαρροής R_{eH} ίσο με 270 N/mm^2 και μέτρο *Young* ίσο με 210000 N/mm^2 . Αποτελείται από δέκα *flat bars* (20mm×4mm) και τέσσερα *hard corners* (50mm×100mm). Στο Σχήμα 5.1 φαίνεται η διατομή του *box-girder*.



Σχήμα 5.1-Διατομή box girder

5.2-Περιγραφή Αναπτυχθέντος Λογισμικού

5.2.1-Υπολογισμός Ουδέτερου Άξονα

Για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής του box-girder αναπτύχθηκε στο πρόγραμμα Excel λογισμικό με διάφορα υπολογιστικά φύλλα. Για την εύρεση του ουδέτερου άξονα της διατομής, κατασκευάστηκε πίνακας με τα γεωμετρικά στοιχεία των *flat bars* και των *hard corners*, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1:

	structural element	item description	as built dimension (mm)		yield stress (N/mm ²)	απόσταση κέντρου στοιχείου από BL, h (mm)	εμβαδό στοιχείου α	a*h	συνολικό εμβαδό	a*h ²	ροπή αδράνειας (I)
1	hard corner 1	horizontal plate	50	4	270	600	200	120000	600	7200000	266,666667
		vertical plate	100	4	270	550	400	220000		12100000	512
2	hard corner 2	horizontal plate	50	4	270	600	200	120000	600	7200000	266,666667
		vertical plate	100	4	270	550	400	220000		12100000	512
3	hard corner 3	horizontal plate	200	4	270	0	800	0	1200	0	1066,666667
		vertical plate	100	4	270	50	400	20000		1000000	512
4	hard corner 4	horizontal plate	200	4	270	0	800	0	1200	0	1066,666667
		vertical plate	100	4	270	50	400	20000		1000000	512
5	ordinary stiffener 1	web	20	4	270	610	80	48800	580	2978000	2666,666667
		attached stiffener	125	4	270	600	500	300000		18000000	666,666667
6	ordinary stiffener 2	web	20	4	270	610	80	48800	680	2978000	2666,666667
		attached stiffener	150	4	270	600	600	360000		21600000	800
7	ordinary stiffener 3	web	20	4	270	610	80	48800	680	2978000	2666,666667
		attached stiffener	150	4	270	600	600	360000		21600000	800
8	ordinary stiffener 4	web	20	4	270	610	80	48800	680	2978000	2666,666667
		attached stiffener	150	4	270	600	600	360000		21600000	800
9	ordinary stiffener 5	web	20	4	270	610	80	48800	580	2978000	2666,666667
		attached stiffener	125	4	270	600	500	300000		18000000	666,666667
10	ordinary stiffener 6	web	20	4	270	400	80	32000	880	12800000	2666,666667
		attached stiffener	200	4	270	400	800	320000		32000000	1066,666667
11	ordinary stiffener 7	web	20	4	270	200	80	16000	880	3200000	2666,666667
		attached stiffener	200	4	270	200	800	160000		32000000	1066,666667
12	ordinary stiffener 8	web	20	4	270	-10	80	-800	1680	8000	2666,666667
		attached stiffener	400	4	270	0	1600	0		2133,333333	
13	ordinary stiffener 9	web	20	4	270	400	80	32000	880	12800000	2666,666667
		attached stiffener	200	4	270	200	800	160000		32000000	1066,666667
14	ordinary stiffener 10	web	20	4	270	200	80	16000	880	3200000	2666,666667
		attached stiffener	200	4	270	400	800	320000		128000000	1066,666667
							Σ(a)	Σ(a*h)		Σ(a*h ²)	Σ(I)
							12000	3699200		189684000	41514,66667

Πίνακας 5.1

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα υπολογίζονται τα αθροίσματα, από τα οποία προκύπτει ότι το ύψος του ουδέτερου άξονα h_{NA} ισούται με:

$$h_{NA} = \frac{\sum(a \times h)}{\sum(a)} = 0,308m$$

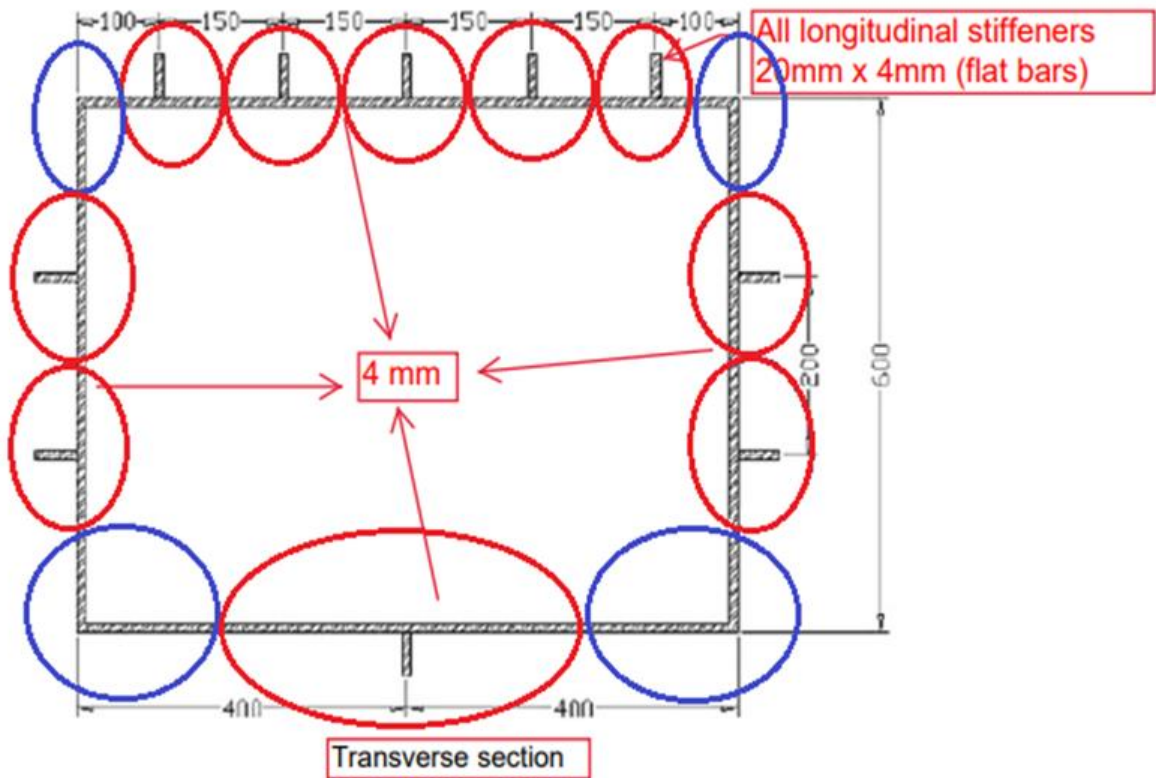
5.2.2-Υπολογισμός Καμπυλών σ - ϵ Δομικών Στοιχείων

Στη συνέχεια, είναι απαραίτητος ο χωρισμός της διατομής σε δεκατέσσερα δομικά στοιχεία. Αυτά ομαδοποιούνται σε δύο είδη:

- *Hard Corners: HC1, HC2, HC3, HC4*
- *Flat Bars: FB1, FB2, FB3, FB4, FB5, FB6, FB7, FB8, FB9, FB10*

Τα δομικά στοιχεία έχουν ενιαίο όριο διαρροής σε όλη τη διατομή τους,

Με το κόκκινο χρώμα συμβολίζονται τα *flat bars* μαζί με της συνδεδεμένη πλάκα, ενώ με το μπλε χρώμα συμβολίζονται τα *hard corners*, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2:



Σχήμα 5.2- Χωρισμός διατομής σε δομικά στοιχεία

Για κάθε δομικό στοιχείο κατασκευάστηκε στο *Excel* ένα υπολογιστικό φύλλο, στο οποίο υπολογίζεται η τάση σ που προκύπτει από κάθε τρόπο αστοχίας ανάλογα με το είδος του. Η τοποθέτηση των στοιχείων στα υπολογιστικά φύλλα γίνεται με βάση το είδος τους και την κατακόρυφη θέση στην οποία βρίσκονται. Όμοια στοιχεία που βρίσκονται στο ίδιο ύψος τοποθετούνται σε κοινό υπολογιστικό φύλλο. Επιπροσθέτως, κάθε τρόπος αστοχίας υπολογίζεται τόσο για κατάσταση *hogging* όσο και για κατάσταση *sagging*, ασκώντας κάθε φορά τις ίδιες καμπυλότητες.

5.2.2.1-Υπολογισμός καμπυλών σ - ϵ για *hard corners*

Στη διατομή του *box-girder* όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν τέσσερα *hard corners*, τα οποία ανά δύο βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Σύμφωνα με το *Common Structural Rules*, ο τρόπος κατάρρευσης ενός *hard corner* είναι *elastoplastic collapse*. Σύμφωνα με τους τύπους που δίνονται από τους κανονισμούς γίνεται ο υπολογισμός της τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ , κάθε φορά για διαφορετική καμπυλότητα χ , έτσι ώστε τελικά να κατασκευαστεί η καμπύλη.

Για κατάσταση *hogging* τα *HC1*, *HC2* εφελκύνονται καθώς βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα. Επίσης βρίσκονται στο ίδιο ύψος και είναι πλήρως συμμετρικά ως προς τον άξονα y .

- Η καμπυλότητα χ του εφαρμόζεται είναι θετική και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Ο παραπάνω τύπος αποτελεί και το βήμα για την προσαύξηση του εκάστοτε χ_i .

- Η παραμόρφωση ε υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_i = \chi(z_i - z_n)$$

- Η σχετική παραμόρφωση ε_γ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_\gamma = \frac{R_{eHA}}{E}$$

- Ο υπολογισμός του *Edge Function* Φ , σχετίζεται άμεσα με την σχετική παραμόρφωση ε σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$\begin{aligned} \Phi &= -1 \text{ για } \varepsilon < -1 \\ \Phi &= \varepsilon \text{ για } -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ \Phi &= 1 \text{ για } \varepsilon > 1 \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό του χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $IF(ABS(\varepsilon) < 1; \varepsilon; 1)$

- Ο υπολογισμός της τάσης σ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Τέλος, στο αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο κατασκευάστηκε ο πίνακας 5.2, ώστε να υπάρξει μεγάλος εύρος επαναλήψεων.

hogging				
καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	σ
4,40716E-05	1,13780E-05	8,84958E-03	8,84958E-03	2,38939E+00
8,81431E-05	2,27561E-05	1,76992E-02	1,76992E-02	4,77877E+00
0,000132215	3,41341E-05	2,65487E-02	2,65487E-02	7,16816E+00
0,000176286	4,55121E-05	3,53983E-02	3,53983E-02	9,55754E+00
0,000220358	5,68901E-05	4,42479E-02	4,42479E-02	1,19469E+01
0,000264429	6,82682E-05	5,30975E-02	5,30975E-02	1,43363E+01
0,000308501	7,96462E-05	6,19470E-02	6,19470E-02	1,67257E+01
0,000352572	9,10242E-05	7,07966E-02	7,07966E-02	1,91151E+01
0,000396644	1,02402E-04	7,96462E-02	7,96462E-02	2,15045E+01
0,000440716	1,13780E-04	8,84958E-02	8,84958E-02	2,38939E+01

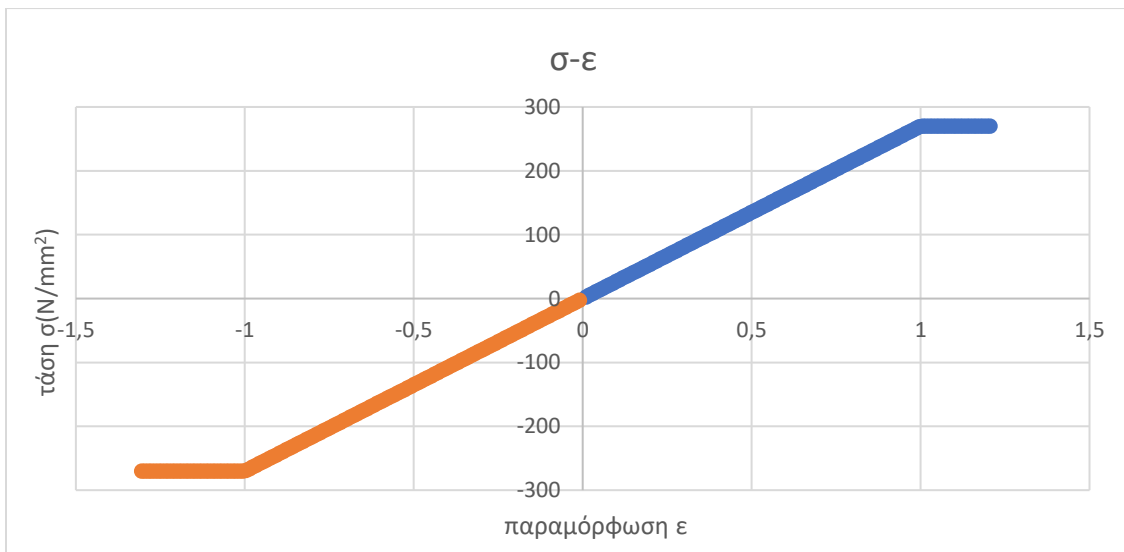
Πίνακας 5.2- Εύρεση ε, σ

Αφού έχει ολοκληρωθεί η κατάσταση *hogging*, εξετάζεται η κατάσταση *sagging* κατά την οποία ισχύουν τα αντίστροφα. Δηλαδή τα *HC1*, *HC2* έχουν υποστεί θλίψη καθώς βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα (κατάστρωμα). Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας σε αυτήν την κατάσταση προστίθεται το μείον στον τύπο των κανονισμών, ενώ για τον υπολογισμό του *Edge Function* Φ , χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $IF(ABS(\varepsilon) < 1; \varepsilon; -1)$.

Η διαδικασία που ακολουθείται στη συνέχεια είναι όμοια με την παραπάνω με αποτέλεσμα να προκύψει ο πίνακας 5.3 και η καμπύλη στο σχήμα 5.3, η οποία περιλαμβάνει και τα δύο καταστάσεις.

Sagging				
καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	σ
-4,40716E-05	-1,1378E-05	-0,008849578	-0,008849578	-2,389386066
-8,81431E-05	-2,27561E-05	-0,017699156	-0,017699156	-4,778772132
-0,000132215	-3,41341E-05	-0,026548734	-0,026548734	-7,168158198
-0,000176286	-4,55121E-05	-0,035398312	-0,035398312	-9,557544264
-0,000220358	-5,68901E-05	-0,04424789	-0,04424789	-11,94693033
-0,000264429	-6,82682E-05	-0,053097468	-0,053097468	-14,3363164
-0,000308501	-7,96462E-05	-0,061947046	-0,061947046	-16,72570246
-0,000352572	-9,10242E-05	-0,070796624	-0,070796624	-19,11508853
-0,000396644	-0,000102402	-0,079646202	-0,079646202	-21,50447459
-0,000440716	-0,00011378	-0,08849578	-0,08849578	-23,89386066

Πίνακας 5.3-Εύρεση σ, ε (*HC1*, *HC2*)



Σχήμα 5.3-Καμπύλη $\sigma-\varepsilon$ (*HC1*, *HC2*)

Για κατάσταση *hogging* τα $HC3$, $HC4$ θλίβονται καθώς βρίσκονται κάτω από τον ουδέτερο άξονα. Επίσης βρίσκονται στο ίδιο ύψος και είναι πλήρως συμμετρικά ως προς τον άξονα $y'y$. Για την εύρεση της παραμόρφωσης ε και της τάσης σ , ακολουθείται η ίδια διαδικασία, ώστε να προκύψει ο πίνακας 5.4

hogging				
καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	σ
4,40716E-05	-1,28116E-05	-0,009964549	-9,96455E-03	-2,69043E+00
8,81431E-05	-2,56231E-05	-0,019929097	-1,99291E-02	-5,38086E+00
0,000132215	-3,84347E-05	-0,029893646	-2,98936E-02	-8,07128E+00
0,000176286	-5,12463E-05	-0,039858195	-3,98582E-02	-1,07617E+01
0,000220358	-6,40578E-05	-0,049822743	-4,98227E-02	-1,34521E+01
0,000264429	-7,68694E-05	-0,059787292	-5,97873E-02	-1,61426E+01
0,000308501	-8,96809E-05	-0,069751841	-6,97518E-02	-1,88330E+01
0,000352572	-0,000102493	-0,079716389	-7,97164E-02	-2,15234E+01
0,000396644	-0,000115304	-0,089680938	-8,96809E-02	-2,42139E+01
0,000440716	-0,000128116	-0,099645486	-9,96455E-02	-2,69043E+01

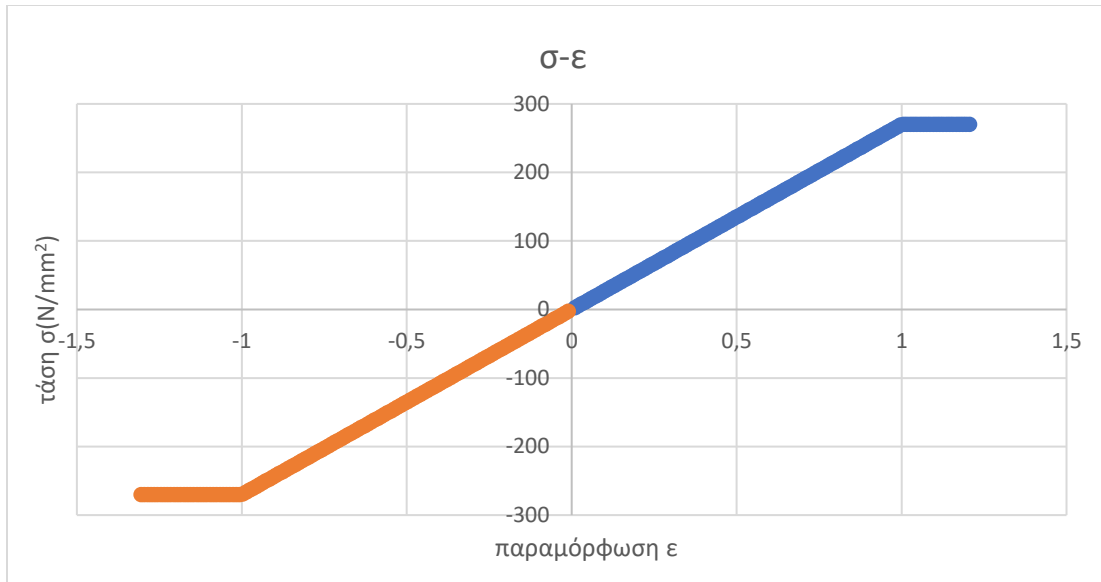
Πίνακας 5.4-Εύρεση ε, σ

Αφού έχει ολοκληρωθεί η κατάσταση *hogging*, εξετάζεται η κατάσταση *sagging* κατά την οποία ισχύουν τα αντίστροφα. Δηλαδή τα $HC3$, $HC4$ έχουν υποστεί εφελκυσμό, διότι βρίσκονται κάτω από τον ουδέτερο άξονα (πυθμένας). Για τον υπολογισμό της καμπυλότητας σε αυτήν την κατάσταση προστίθεται το μείον στον τύπο των κανονισμών, ενώ για τον υπολογισμό του *Edge Function* Φ , χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση $IF(ABS(\varepsilon) < I; \varepsilon; -I)$.

Η διαδικασία που ακολουθείται στη συνέχεια είναι όμοια με την παραπάνω με αποτέλεσμα να προκύψει ο πίνακας 5.5 και η καμπύλη στο σχήμα 5.4, η οποία περιλαμβάνει και τα δύο καταστάσεις.

sagging				
καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	σ
-4,40716E-05	1,28116E-05	0,009964549	0,009964549	2,690428134
-8,81431E-05	2,56231E-05	0,019929097	0,019929097	5,380856268
-0,000132215	3,84347E-05	0,029893646	0,029893646	8,071284401
-0,000176286	5,12463E-05	0,039858195	0,039858195	10,76171254
-0,000220358	6,40578E-05	0,049822743	0,049822743	13,45214067
-0,000264429	7,68694E-05	0,059787292	0,059787292	16,1425688
-0,000308501	8,96809E-05	0,069751841	0,069751841	18,83299694
-0,000352572	0,000102493	0,079716389	0,079716389	21,52342507
-0,000396644	0,000115304	0,089680938	0,089680938	24,2138532
-0,000440716	0,000128116	0,099645486	0,099645486	26,90428134

Πίνακας 5.5-Εύρεση σ, ε ($HC3, HC4$)



Σχήμα 5.4-Καμπύλη σ-ε (HC3,HC4)

5.2.2.2-Υπολογισμός καμπυλών σ-ε για flat bars

Στη διατομή του *box-girder* υπάρχουν δέκα *flat bars*, τα οποία μπορούν να καταρρεύσουν με τέσσερις διαφορετικούς τρόπους αστοχίας: *elastoplastic collapse*, *beam column buckling*, *torsional buckling*, *web local buckling of stiffeners made of flat bars*. Όπως έχει προαναφερθεί, σε κατάσταση *hogging* τα *flat bars* που βρίσκονται πάνω από τον ουδέτερο άξονα εφελκύνονται, ενώ σε κατάσταση *sagging* θλίβονται.

Το *FB1* με το *FB5* και το *FB6* με το *FB10* εμφανίζουν συμμετρία ως προς τον $y'y$, ενώ τα *FB2*, *FB3*, *FB4* είναι όμοια.

Για το *elastoplastic collapse* των *FB1* και *FB5* γίνεται υπολογισμός όμοιος με εκείνον για τα *hard corners*, δηλαδή:

- Η καμπυλότητα χ του εφαρμόζεται είναι θετική και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Ο παραπάνω τύπος αποτελεί και το βήμα για την προσαύξηση του εκάστοτε χ_i .

- Η παραμόρφωση ε υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_i = \chi(z_i - z_n)$$

- Η σχετική παραμόρφωση ε_r υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{R_{eHA}}{E}$$

- Ο υπολογισμός του *Edge Function* Φ , σχετίζεται άμεσα με την σχετική παραμόρφωση ε σύμφωνα με τα παρακάτω:

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

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

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

- Ο υπολογισμός της τάσης σ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

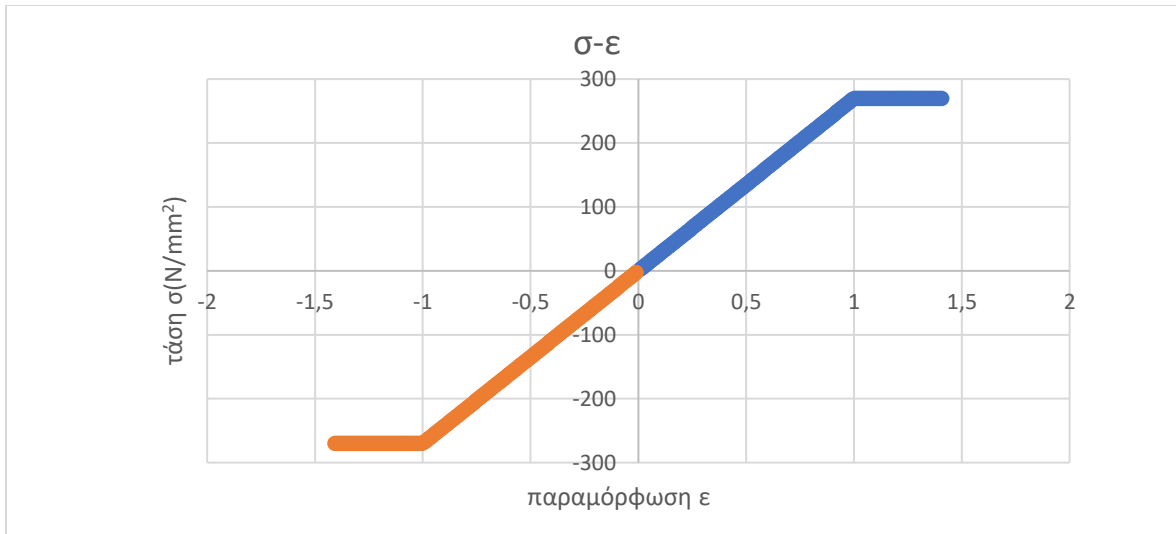
Τέλος, στο αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο κατασκευάζονται οι πίνακες 5.6 και 5.7, ώστε να σχεδιαστεί η αντίστοιχη καμπύλη:

hogging				
καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	σ
4,40716E-05	1,32979E-05	0,010342779	1,03428E-02	2,792550274
8,81431E-05	2,65957E-05	2,06856E-02	2,06856E-02	5,58510E+00
0,000132215	3,98936E-05	3,10283E-02	3,10283E-02	8,37765E+00
0,000176286	5,31914E-05	4,13711E-02	4,13711E-02	1,11702E+01
0,000220358	6,64893E-05	5,17139E-02	5,17139E-02	1,39628E+01
0,000264429	7,97872E-05	6,20567E-02	6,20567E-02	1,67553E+01
0,000308501	9,30850E-05	7,23995E-02	7,23995E-02	1,95479E+01
0,000352572	1,06383E-04	8,27422E-02	8,27422E-02	2,23404E+01
0,000396644	1,19681E-04	9,30850E-02	9,30850E-02	2,51330E+01
0,000440716	1,32979E-04	1,03428E-01	1,03428E-01	2,79255E+01

Πίνακας 5.6-Εύρεση σ, ε (FB1,FB5)

sagging				
καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	σ
-4,40716E-05	-1,32979E-05	-0,010342779	-0,010342779	-2,792550274
-8,81431E-05	-2,65957E-05	-0,020685558	-0,020685558	-5,585100548
-0,000132215	-3,98936E-05	-0,031028336	-0,031028336	-8,377650823
-0,000176286	-5,31914E-05	-0,041371115	-0,041371115	-11,1702011
-0,000220358	-6,64893E-05	-0,051713894	-0,051713894	-13,96275137
-0,000264429	-7,97872E-05	-0,062056673	-0,062056673	-16,75530165
-0,000308501	-9,3085E-05	-0,072399452	-0,072399452	-19,54785192
-0,000352572	-0,000106383	-0,08274223	-0,08274223	-22,34040219
-0,000396644	-0,000119681	-0,093085009	-0,093085009	-25,13295247
-0,000440716	-0,000132979	-0,103427788	-0,103427788	-27,92550274

Πίνακας 5.7-Εύρεση σ, ε (FB1,FB5)



Σχήμα 5.5-Καμπύλη σ-ε (FB1,FB5)

Για το *beam column buckling* των *FB1* και *FB5* γίνεται υπολογισμός ο οποίος μέχρι τον υπολογισμό του Φ είναι όμοιος με το *elastoplastic collapse*, δηλαδή:

- Η καμπυλότητα χ του εφαρμόζεται είναι αρνητική και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Ο παραπάνω τύπος αποτελεί και το βήμα για την προσαύξηση του εκάστοτε χ_i .

- Η παραμόρφωση ε υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_i = \chi(z_i - z_n)$$

- Η σχετική παραμόρφωση ε_γ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_\gamma = \frac{R_{eHA}}{E}$$

- Ο υπολογισμός του *Edge Function* Φ , σχετίζεται άμεσα με την σχετική παραμόρφωση ε σύμφωνα με τα παρακάτω:

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

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

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

- Υπολογισμός της κρίσιμης τάσης σ_{C1}

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

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

- Υπολογισμός του ελάχιστου ορίου διαρροής R_{eHB} σύμφωνα με τον τύπο:

$$R_{eHB} = \frac{R_{eHB}A_{pEI-n50}\ell_{pE} + R_{eHS}A_{S-n50}\ell_{sE}}{A_{pE-n50}\ell_{pE} + A_{S-n50}\ell_{sE}}$$

- Υπολογισμός της τάση λυγισμού κατά Euler σ_{E1} σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_{E1} = \pi^2 E \frac{I_{E-n50}}{A_{E-n50}\ell^2} 10^{-4}$$

- Ενεργό πλάτος διορθωμένο για σχετική παραμόρφωση b_{E1} : της συνδεδεμένης πλάκας σύμφωνα με τον:

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

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

- Υπολογισμός εμβαδού A_{pE-n50} της συνδεδεμένης πλάκας πλάτους b_E σύμφωνα με τον τύπο:

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

- Υπολογισμός του ενεργού πλάτους, b_E σε m , της συνδεδεμένης πλάκας, ίσο με:

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

$$b_E = s \text{ για } \beta_E \leq 1.25$$

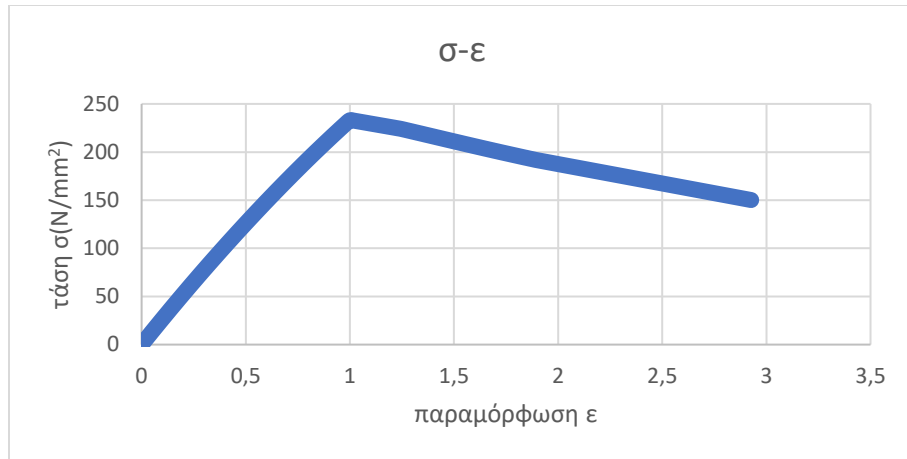
- Ο υπολογισμός της τάσης υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_{CR1} = \Phi \sigma_{C1} \frac{A_{S-n50} + A_{pE-n50}}{A_{S-n50} + A_{p-n50}}$$

Τέλος, στο αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο κατασκευάζονται ο πίνακας 5.8, ώστε να σχεδιαστεί η αντίστοιχη καμπύλη:

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	$b E$	A_{pE-n50}	$b E 1$	$A E-n50$	γ	I_{xplate}	$I_{xstiffener}$	$I E-n50$	$\sigma E 1$	$A_{pEI-n50}$	$I s E$	$I p E$	$R e H B$	$\sigma C 1$	$\sigma C R 1$
-4,40716E-05	-1,32979E-05	-0,010342779	0,113957	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	1,326437	296,2495	5	3,6551724	2,0344828	270	269,363722	-2,7859694	
-8,81431E-05	-2,65957E-05	-0,020688558	0,161159	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	2,238129	499,869	5	3,6551724	2,0344828	270	269,245814	-5,5694998	
-0,000132215	-3,98936E-05	-0,031028336	0,197379	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	2,238129	499,869	5	3,6551724	2,0344828	270	268,868721	-8,3425491	
-0,000176286	-5,31914E-05	-0,041371115	0,227914	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	2,238129	499,869	5	3,6551724	2,0344828	270	268,491628	-11,107798	
-0,000220358	-6,64893E-05	-0,051713894	0,254816	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	2,238129	499,869	5	3,6551724	2,0344828	270	268,114535	-13,865247	
-0,000264429	-7,97872E-05	-0,062056673	0,279136	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	2,238129	499,869	5	3,6551724	2,0344828	270	267,737442	-16,614895	
-0,000308501	-9,3085E-05	-0,072399452	0,301502	0,125	5	0,125	5,8	2,034483	0,203646453	1,122790329	2,238129	499,869	5	3,6551724	2,0344828	270	267,360348	-19,356743	

Πίνακας 5.8-Εύρεση σ, ϵ (FB1,FB5)



Σχήμα 5.6-Καμπύλη σ-ε (FB1,FB5)

Για το *torsional buckling* των *FB1* και *FB5* γίνεται υπολογισμός ο οποίος μέχρι τον υπολογισμό του Φ είναι όμοιος με το *elastoplastic collapse*, δηλαδή:

- Η καμπυλότητα χ του εφαρμόζεται είναι θετική και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Ο παραπάνω τύπος αποτελεί και το βήμα για την προσαύξηση του εκάστοτε χ_i .

- Η παραμόρφωση ε υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_i = \chi(z_i - z_n)$$

- Η σχετική παραμόρφωση ε_γ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_\gamma = \frac{R_{eHA}}{E}$$

- Ο υπολογισμός του *Edge Function* Φ , σχετίζεται άμεσα με την σχετική παραμόρφωση ε σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$\begin{aligned} \Phi &= -1 \text{ για } \varepsilon < -1 \\ \Phi &= \varepsilon \text{ για } -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ \Phi &= 1 \text{ για } \varepsilon > 1 \end{aligned}$$

- Η κρίσιμη τάση, σ_{C2} υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

- Η τάση λυγισμού κατά *Euler*, σ_{E2} είναι ίση με σ_{ET}

- Η ονομαστική τάση λυγισμού σ_{ET} υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

- Η τάση λυγισμού συνδεδεμένης πλάκας, σ_{CP} υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

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

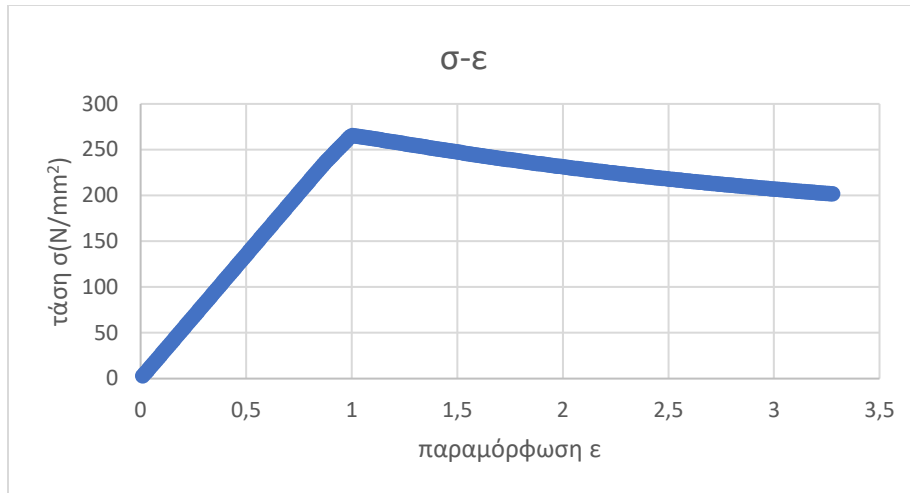
- Ο υπολογισμός της τάσης υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_{CR2} = \Phi \frac{A_{S-n50} \sigma_{C2} + A_{p-n50} \sigma_{CP}}{A_{S-n50} + A_{p-n50}}$$

Τέλος, στο αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο κατασκευάζονται ο πίνακας 5.9, ώστε να σχεδιαστεί η αντίστοιχη καμπύλη:

sagging	καμπυλότητα χ	εΕ	ε	Φ	βΕ	σCP	Ip	IT	Iω	ef=hw(flat bar)	ε(degree of fixation)	σE2	σC2	cCR2
	-4,40716E-05	-1,32979E-05	-0,010342779	-0,01034	0,113956965	270	1,066667	0,037291	0,014222222	20	1,000489067	1082842,439	269,9998	-2,79255
	-8,81431E-05	-2,65957E-05	-0,020685558	-0,02069	0,161159486	270	1,066667	0,037291	0,014222222	20	1,000489067	1082842,439	269,9997	-5,5851
	-0,000132215	-3,98936E-05	-0,031028336	-0,03103	0,197379253	270	1,066667	0,037291	0,014222222	21	1,000476024	1082828,36	269,9995	-8,37765
	-0,000176286	-5,31914E-05	-0,041371115	-0,04137	0,22791393	270	1,066667	0,037291	0,014222222	22	1,000463972	1082815,35	269,9993	-11,1702
	-0,000220358	-6,64893E-05	-0,051713894	-0,05171	0,25481552	270	1,066667	0,037291	0,014222222	23	1,000452792	1082803,281	269,9991	-13,9627
	-0,000264429	-7,97872E-05	-0,062056673	-0,06206	0,279136417	270	1,066667	0,037291	0,014222222	24	1,000442382	1082792,044	269,999	-16,7553
	-0,000308501	-9,3085E-05	-0,072399452	-0,0724	0,30150179	270	1,066667	0,037291	0,014222222	25	1,000432659	1082781,548	269,9988	-19,5478
	-0,000352572	-0,000106383	-0,08274223	-0,08274	0,322318971	270	1,066667	0,037291	0,014222222	26	1,000423551	1082771,715	269,9986	-22,3404
	-0,000396644	-0,000119681	-0,093085009	-0,09309	0,341870895	270	1,066667	0,037291	0,014222222	27	1,000414994	1082762,478	269,9984	-25,1329
	-0,000440716	-0,000132979	-0,103427788	-0,10343	0,360363565	270	1,066667	0,037291	0,014222222	28	1,000406936	1082753,779	269,9983	-27,9255

Πίνακας 5.9-Εύρεση σ,ε (FB1,FB5)



Σχήμα 5.7-Καμπύλη σ-ε (FB1,FB5)

Για το *web local buckling of stiffeners made of flat bars* των FB1 και FB5 γίνεται υπολογισμός ο οποίος μέχρι τον υπολογισμό του Φ είναι όμοιος με το *elastoplastic collapse*, δηλαδή:

- Η καμπυλότητα χ του εφαρμόζεται είναι αρνητική και υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Ο παραπάνω τύπος αποτελεί και το βήμα για την προσαύξηση του εκάστοτε χ_i .

- Η παραμόρφωση ε υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_i = \chi(z_i - z_n)$$

- Η σχετική παραμόρφωση ε_γ υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\varepsilon_\gamma = \frac{R_{eHA}}{E}$$

- Ο υπολογισμός του *Edge Function* Φ , σχετίζεται άμεσα με την σχετική παραμόρφωση ε σύμφωνα με τα παρακάτω:

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

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

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

- Η κρίσιμη τάση, σ_{C4} υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

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

- Η τοπική τάση λυγισμού κατά *Euler*, σ_{E4} υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\sigma_{E4} = 160000 \left(\frac{t_{w-n50}}{h_w} \right)^2$$

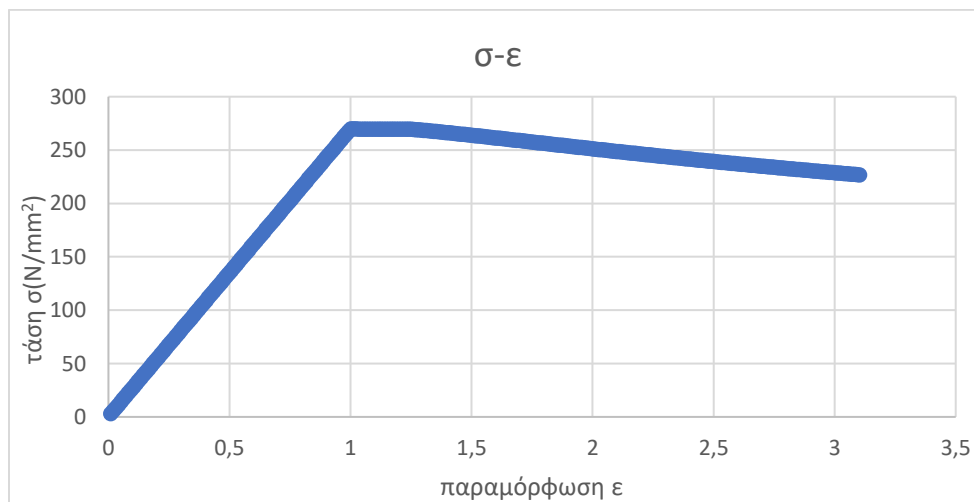
- Ο υπολογισμός της τάσης υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

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

Τέλος, στο αντίστοιχο υπολογιστικό φύλλο κατασκευάζονται ο πίνακας 5.10, ώστε να σχεδιαστεί η αντίστοιχη καμπύλη:

sagging									
καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	σ_{CP}	σ_{E4}	σ_{C4}	σ_{CR4}	π
-4,40716E-05	-1,32979E-05	-0,010342779	-0,010342779	0,113956965	270	6400	269,9705	-2,79251	
-8,81431E-05	-2,65957E-05	-0,020685558	-0,020685558	0,161159486	270	6400	269,9411	-5,58493	
-0,000132215	-3,98936E-05	-0,031028336	-0,031028336	0,197379253	270	6400	269,9116	-8,37727	
-0,000176286	-5,31914E-05	-0,041371115	-0,041371115	0,22791393	270	6400	269,8822	-11,1695	
-0,000220358	-6,64893E-05	-0,051713894	-0,051713894	0,25481552	270	6400	269,8527	-13,9617	
-0,000264429	-7,97872E-05	-0,062056673	-0,062056673	0,279136417	270	6400	269,8233	-16,7538	
-0,000308501	-9,3085E-05	-0,072399452	-0,072399452	0,30150179	270	6400	269,7938	-19,5458	
-0,000352572	-0,000106383	-0,08274223	-0,08274223	0,322318971	270	6400	269,7644	-22,3377	
-0,000396644	-0,000119681	-0,093085009	-0,093085009	0,341870895	270	6400	269,7349	-25,1295	
-0,000440716	-0,000132979	-0,103427788	-0,103427788	0,360363565	270	6400	269,7055	-27,9213	

Πίνακας 5.10-Εύρεση σ, ϵ (FB1,FB5)



Σχήμα 5.8-Καμπύλη $\sigma-\epsilon$ (FB1,FB5)

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόζεται και για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία της διατομής, με αποτέλεσμα να προκύπτουν οι πίνακες τάσης σ και παραμόρφωσης ϵ , όπως επίσης και οι αντίστοιχες καμπύλες. Για κάθε *hard corner* προκύπτουν δύο πίνακες, ενώ για κάθε *flat bar* προκύπτουν τέσσερις πίνακες, οι οποίοι συγκεντρώνονται σε ένα υπολογιστικό φύλλο.

5.2.3-Υπολογισμός Καμυλών M - χ για *Hogging* και *Sagging*

Για τον υπολογισμό των ροπών M συναρτήσει των καμυλολοτήτων χ , κατασκευάζονται δύο νέα υπολογιστικά φύλλα για κάθε περίπτωση, ενώ στόχος είναι η δημιουργία δύο καμυλών.

Για την κατάσταση *hogging*, δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας:

	structural element		as built dimension (mm)	t(mm)	z _i (m)	A _i (m ²)	$\epsilon E_i = \chi^*(z_i - z_n)$	ϵ_i	$\sigma_i(N/m^2)$	A _i * $\sigma_i(N)$	MU(Nm)																																																																																																																																																																																																						
1	hard corner 1	horizontal plate	50	4	0,56643836	0,0006	0,000376562	0,292881521	79078010,74	47446,8064	81080,21867																																																																																																																																																																																																						
		vertical plate	100	4								2	hard corner 2	horizontal plate	50	4	0,56643836	0,0006	0,000376562	0,292881521	79078010,74	47446,8064	81080,21867	vertical plate	100	4	3	hard corner 3	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654	vertical plate	100	4	4	hard corner 4	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654	vertical plate	100	4	5	flatbar 1	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	6	flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=		
2	hard corner 2	horizontal plate	50	4	0,56643836	0,0006	0,000376562	0,292881521	79078010,74	47446,8064	81080,21867																																																																																																																																																																																																						
		vertical plate	100	4								3	hard corner 3	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654	vertical plate	100	4	4	hard corner 4	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654	vertical plate	100	4	5	flatbar 1	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	6	flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463						
3	hard corner 3	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654																																																																																																																																																																																																						
		vertical plate	100	4								4	hard corner 4	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654	vertical plate	100	4	5	flatbar 1	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	6	flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																					
4	hard corner 4	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	0,000255614	0,198810867	-53678934,1	-64414,7209	74720,74654																																																																																																																																																																																																						
		vertical plate	100	4								5	flatbar 1	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	6	flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																				
5	flatbar 1	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701																																																																																																																																																																																																						
		plate	125	4								6	flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																			
6	flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166																																																																																																																																																																																																						
		plate	150	4								7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																		
7	flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166																																																																																																																																																																																																						
		plate	150	4								8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166	plate	150	4	9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																	
8	flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	0,000386161	0,300347527	81093832,23	55143,8059	96635,51166																																																																																																																																																																																																						
		plate	150	4								9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701	plate	125	4	10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																
9	flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	0,000386161	0,300347527	81093832,23	47034,4227	82424,40701																																																																																																																																																																																																						
		plate	125	4								10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																															
10	flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865																																																																																																																																																																																																						
		plate	200	4								11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																																														
11	flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164																																																																																																																																																																																																						
		plate	200	4								12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691	plate	400	4	13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																																																													
12	flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	0,000249539	0,194086077	-52403240,85	-88037,4446	99696,00691																																																																																																																																																																																																						
		plate	400	4								13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164	plate	200	4	14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																																																																												
13	flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	0,000295814	0,230077859	-62121021,8	-54666,4992	73385,80164																																																																																																																																																																																																						
		plate	200	4								14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865	plate	200	4	SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																																																																																											
14	flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	0,000339886	0,264355745	71376051,28	62810,9251	96881,2865																																																																																																																																																																																																						
		plate	200	4								SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																																																																																																										
SUM=										153815,841	1206587,463																																																																																																																																																																																																						

Πίνακας 5.11-Υπολογισμός MU

Στον πίνακα αναφέρεται το είδος κάθε στοιχείου, οι διαστάσεις τους, το εμβαδόν του A_i , την απόσταση του κέντρου βάρους του στοιχείου από τον πυθμένα z_i , η παραμόρφωση ϵ , η τάση σ , το πηλίκο εμβαδού-τάσης $A_i \times \sigma_i$ και τέλος η ροπή M που ασκείται στο *box-girder*.

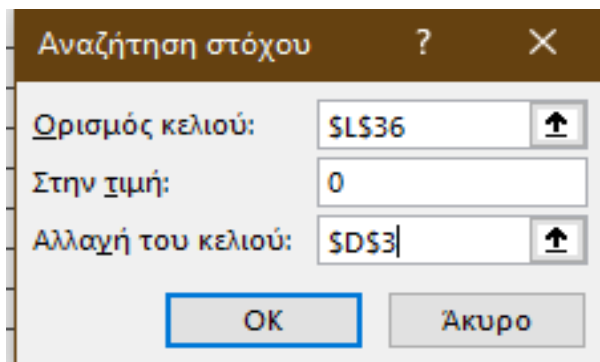
Ο τελικός αυτός πίνακας αντλεί δεδομένα για την τάση σ από τους συγκεντρωτικούς πίνακες, κάθε φορά για ένα συγκεκριμένο ϵ το οποίο αντιστοιχεί σε μία καμυλότητα χ . Η αντιστοίχιση της παραμόρφωσης ϵ με την τάση σ , εάν πρόκειται για στοιχείο που εφελκύεται (πάνω από τον ουδέτερο άξονα) γίνεται μέσω γραμμικής παρεμβολής. Η γραμμική παρεμβολή επιτυγχάνεται μέσω συνδυασμού των εντολών *FORECAST*, *OFFSET* και *MATCH*. Π.χ. για το στοιχείο *HCI* η εντολή που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

FORECAST('M- χ (hogging)')!\$J\$8;OFFSET('elastcollapse hardcorners'!E60:E2000;MATCH('M- χ (hogging)')!\$J\$8;'elastcollapse hardcorners'!C60:C2000;1)-1;0;2);OFFSET('elastcollapse hardcorners'!C60:C2000;MATCH('M- χ (hogging)')!\$J\$8;'elastcollapse hardcorners'!C60:C2000;1)-1;0;2)))*1000000

Εάν πρόκειται για στοιχείο το οποίο θλίβεται (κάτω από τον ουδέτερο άξονα) λαμβάνεται υπόψη η μικρότερη από τις τέσσερις τάσεις σ , π.χ. για το στοιχείο *FB8*, η εντολή που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής:

```
MIN(-FORECAST('M-χ (hogging)'!$J$30;OFFSET('elastcollapse 6,8,10'!Z59:Z2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'elastcollapse 6,8,10'!Y59:Y2000;1)-1;0;2);OFFSET('elastcollapse 6,8,10'!Y59:Y2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'elast collapse 6,8,10'!Y59:Y2000;1)-1;0;2));-FORECAST('M-χ (hogging)'!$J$30;OFFSET('beam column buckling 8'!X75:X2000;MATCH('M-χ (hogging)'!J30;'beam column buckling 8'!W75:W2000;1)-1;0;2);OFFSET('beam column buckling 8'!W75:W2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'beam column buckling 8'!W75:W2000;1)-1;0;2));-FORECAST('M-χ (hogging)'!$J$30;OFFSET('torsional buckling 8'!Q31:Q2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'torsional buckling 8'!P31:P2000;1)-1;0;2);OFFSET('torsional buckling 8'!P31:P2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'torsional buckling 8'!P31:P2000;1)-1;0;2));-FORECAST('M-χ (hogging)'!$J$30;OFFSET('weblocalbuck (flatbars) 8'!L26:L2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'weblocalbuck (flatbars) 8'!K26:K2000;1)-1;0;2);OFFSET('weblocalbuck (flatbars) 8'!K26:K2000;MATCH('M-χ (hogging)'!$J$30;'weblocalbuck (flatbars) 8'!K26:K2000;1)-1;0;2))))*1000000
```

Συνεπώς, για κάθε καμπυλότητα που έχει υπολογιστεί, γίνεται υπολογισμός και της ροπής που αντιστοιχεί σε αυτή. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της *Αναζήτησης Στόχου*, κατά την οποία ζητείται το άθροισμα του γινομένου $A_i \times \sigma_i$ να ισούται με μηδέν, αφού προηγουμένως έχει υπολογιστεί το άθροισμα των ροπών από τα δομικά στοιχεία του *box-girder*. Δηλαδή, στην εντολή αυτή ως ορισμός κελιού τίθεται το γινόμενο $A_i \times \sigma_i$ και η αλλαγή κελιού αντιστοιχεί στη νέα θέση του ουδέτερου άξονα, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 5.1-Αναζήτηση Στόχου

Αφού αυτή η διαδικασία επαναληφθεί αρκετές φορές δημιουργούνται αρκετά ζεύγη *M-χ* ώστε τελικά να κατασκευαστεί η καμπύλη για κατάσταση *hogging*:

Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να γίνει ταχύτερη με τη χρήση μίας μακροεντολής, η οποία συμπεριλαμβάνει αυτόματη *Αναζήτηση Στόχου* ώστε να μηδενίζει το άθροισμα και την αυτόματη μετακίνηση του ουδέτερου άξονα. Στο υπολογιστικό φύλλο υπάρχει το κουμπί *hogging* το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του πίνακα ροπής *MU* και καμπυλοτήτων χ . Προηγουμένως πρέπει να οριστεί ο αριθμός γραμμών και ο αριθμός επαναλήψεων. Ο κώδικας της μακροεντολής φαίνεται παρακάτω:

```
Sub Macrol()

Range("l36").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("d3")

End Sub

Sub Κουμπί_Κλίκ()
Dim zna_cur, Mu, xi, s, k, line_correct As Integer
'Range("j2").Value = 30
k = Range("j2").Value
Range("d3").Value = 0.3082666

If Range("j1").Value > 0 And k > 0 Then
Range("j1").Value = 1
Cells(6, 14).Value = 1
Cells(6, 15).Value = 0
Cells(6, 16).Value = 0
Cells(6, 17).Value = 0
For s = 1 To k
Range("j1").Value = 1 + s
'Range("l36").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("d3")
Macrol
line_correct = 6 + s

'xi= Cells(6, 15).Value
zna_cur = Range("D3").Value
Mu = Range("M36").Value
Cells(line_correct, 14).Value = 1 + s
Cells(line_correct, 16).Value = Mu
Cells(line_correct, 17).Value = zna_cur

Next s

ElseIf Range("j1").Value < 0 Or k < 0 Then
'lathos entoli ftiakse ta J1, J2
MsgBox ("ΠΡΟΣΕΕΕ ΚΑΛΑ J1, J2")

End If

End Sub
```

Εικόνα 5.1-Κώδικας μακροεντολής

```

Sub Mχsagging_Kouρνίλ_Kλίκ()
Dim zna_cur, Mu, xi, s, k, line_correct As Integer
'Range("j2").Value = 30
k = Range("j2").Value
Range("d3").Value = 0.3082666

If Range("j1").Value > 0 And k > 0 Then
Range("j1").Value = 1
Cells(6, 14).Value = 1
Cells(6, 15).Value = 0
Cells(6, 16).Value = 0
Cells(6, 17).Value = 0
For s = 1 To k
Range("j1").Value = 1 + s
'Range("l36").GoalSeek Goal:=0, ChangingCell:=Range("d3")
Macrol
line_correct = 6 + s

'xi= Cells(6, 15).Value
zna_cur = Range("D3").Value
Mu = Range("M36").Value
Cells(line_correct, 14).Value = 1 + s
Cells(line_correct, 16).Value = Mu
Cells(line_correct, 17).Value = zna_cur

Next s

ElseIf Range("j1").Value < 0 Or k < 0 Then
'lathos entoli ftiakse ta J1, J2
MsgBox ("ΠΡΟΣΕΞΕ ΚΑΛΑ J1, J2")

End If

End Sub

```

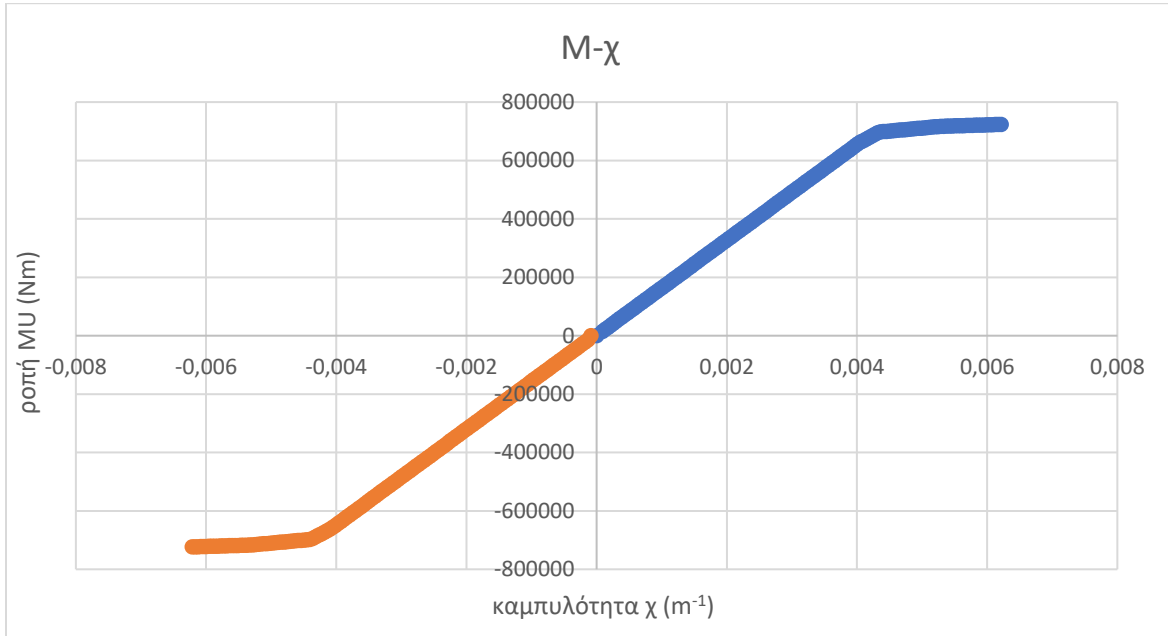
Εικόνα 5.2- Κώδικας μακροεντολής

Για την κατάσταση *sagging*, δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας:

structural element		as built dimension (mm)	t(mm)	zi (m)	Ai(m ²)	εEi=χi*(zi-zn)	εi	σi(N/m ²)	Ai*σi(N)	MU(Nm)
hard corner 1	horizontal plate	50	4	0,56643836	0,0006	-5,68901E-05	-0,0442479	-11946932,98		
	vertical plate	100	4							
hard corner 2	horizontal plate	50	4	0,56643836	0,0006	-5,68901E-05	0,0442479	-11946932,98	-7168,15979	1850,615924
	vertical plate	100	4							
hard corner 3	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	6,40578E-05	0,049822754	13452143,66	16142,5724	4692,631251
	vertical plate	100	4							
hard corner 4	horizontal plate	200	4	0,01756757	0,0012	6,40578E-05	0,049822754	13452143,66	16142,5724	4692,631251
	vertical plate	100	4							
flatbar 1	stiffener	20	4	0,61	0,00058	-6,64893E-05	-0,051713905	-13962754,47	-8098,39759	2443,556501
	plate	125	4							
flatbar 2	stiffener	20	4	0,61	0,00068	-6,64893E-05	-0,051713905	-13962754,47	-9494,67304	2864,859346
	plate	150	4							
flatbar 3	stiffener	20	4	0,61	0,00068	-6,64893E-05	-0,051713905	-13962754,47	-9494,67304	2864,859346
	plate	150	4							
flatbar 4	stiffener	20	4	0,61	0,00068	-6,64893E-05	-0,051713905	-13962754,47	-9494,67304	2864,859346
	plate	150	4							
flatbar 5	stiffener	20	4	0,61	0,00058	-6,64893E-05	-0,051713905	-13962754,47	-8098,39759	2443,556501
	plate	125	4							
flatbar 6	stiffener	20	4	0,4	0,00088	-2,02142E-05	-0,015722124	-4244973,521	-3735,5767	342,6769025
	plate	200	4							
flatbar 7	stiffener	20	4	0,2	0,00088	2,38574E-05	0,018555763	5010055,958	4408,84924	477,3314114
	plate	200	4							
flatbar 8	stiffener	20	4	-0,01	0,00168	7,01325E-05	0,054547544	14727836,91	24742,766	7874,797662
	plate	400	4							
flatbar 9	stiffener	20	4	0,2	0,00088	2,38574E-05	0,018555763	5010055,958	4408,84924	477,3314114
	plate	200	4							
flatbar 10	stiffener	20	4	0,4	0,00088	-2,02142E-05	-0,015722124	-4244973,521	-3735,5767	342,6769025
	plate	200	4							
SUM=									-642,678019	36082,99968

Πίνακας 5.12-Υπολογισμός MU

Όπως ακριβώς στην κατάσταση *hogging*, έτσι και στη *sagging* ο πίνακας αντλεί δεδομένα από τους τελικούς πίνακες $\sigma-\epsilon$, κάθε φορά για μια ορισμένη καμπυλότητα. Έτσι με την *Αναζήτηση Στόχου* δημιουργούνται ζεύγη $M-\chi$, τα οποία αποτυπώνονται στην παρακάτω καμπύλη και για τις δύο καταστάσεις:



Σχήμα 5.10-Καμπύλη $MU-\chi$ (*hogging-sagging*)

Κεφάλαιο 6

Εφαρμογή του Αναπτυχθέντος Λογισμικού σε Πλοίο *Bulk Carrier*

6.1-Γενικά

Στο παρόν Κεφάλαιο θα γίνεται η εφαρμογή του λογισμικού που κατασκευάστηκε προκειμένου να βρεθεί η τελική αντοχή του *bulk carrier*, με τη χρήση της μεθόδου *Smith*. Στο *Κεφάλαιο 4*, έγινε περιγραφή του υπολογισμού του ουδέτερου άξονα, του τρόπου διαχωρισμού των δομικών στοιχείων του πλοίου, του τρόπου που κατατάσσονται σε υπολογιστικά φύλλα για τη δημιουργία καμπυλών σ - ϵ και τέλος του υπολογιστικού φύλλου στο οποίο καταλήγει στα διαγράμματα M - χ για καταστάσεις *hogging* και *sagging*.

6.2-Κατασκευή Καμπυλών σ - ϵ

6.2.1-*Hard corners*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο τρόπος κατάρρευσης των *hard corners* είναι *elastoplastic collapse*. Παρακάτω θα γίνει ο υπολογισμός της τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ για το *HCI* της διατομής, το οποίο σε κατάσταση *hogging* εφελκύεται, ενώ σε κατάσταση *sagging* θλίβεται, καθώς είναι πάνω από τον ουδέτερο άξονα. Στους παρακάτω πίνακες υπολογίζεται η τάση και η παραμόρφωση, ενώ τελικά προκύπτει προκύπτουν και τα διαγράμματα για κάθε τρόπο αστοχίας.

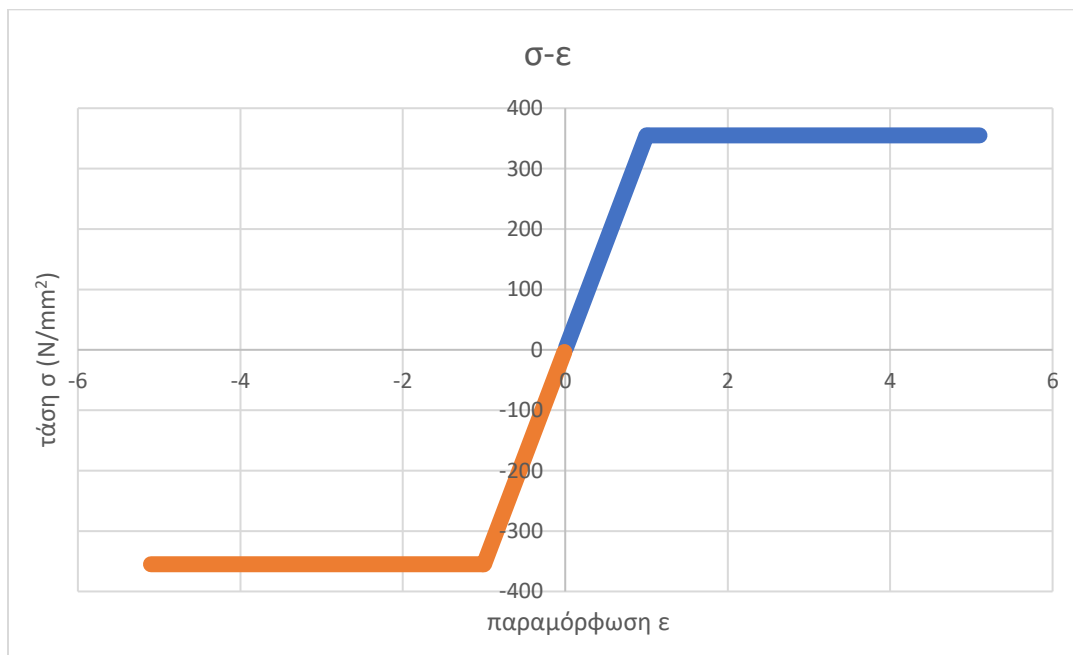
Elastoplastic collapse

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
1,79091E-06	0,00001775	0,01	0,01	3,55
3,58182E-06	0,0000355	0,02	0,02	7,1
5,37273E-06	0,00005325	0,03	0,03	10,65
7,16364E-06	0,000071	0,04	0,04	14,2
8,95455E-06	0,00008875	0,05	0,05	17,75
1,07455E-05	0,0001065	0,06	0,06	21,3

Πίνακας 6.1-Εύρεση σ, ϵ σε *hogging* (*HCI*)

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
-1,79091E-06	-0,00001775	-0,01	-0,01	-3,55
-3,58182E-06	-0,0000355	-0,02	-0,02	-7,1
-5,37273E-06	-0,00005325	-0,03	-0,03	-10,65
-7,16364E-06	-0,000071	-0,04	-0,04	-14,2
-8,95455E-06	-0,00008875	-0,05	-0,05	-17,75
-1,07455E-05	-0,0001065	-0,06	-0,06	-21,3

Πίνακας 6.2-Εύρεση σ, ϵ σε *sagging* (HC1)



Σχήμα 6.1-Καμπύλη $\sigma-\epsilon$ (HC1)

6.2.2-Plates

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο τρόπος κατάρρευσης των *plates* είναι *elastoplastic collapse* και *plate buckling*. Παρακάτω θα γίνει ο υπολογισμός της τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ για το HC1 της διατομής, το οποίο σε κατάσταση *hogging* εφελκύεται, ενώ σε κατάσταση *sagging* θλίβεται, καθώς είναι πάνω από τον ουδέτερο άξονα. Στους παρακάτω πίνακες υπολογίζεται η τάση και η παραμόρφωση, ενώ τελικά προκύπτει προκύπτουν και τα διαγράμματα για κάθε τρόπο αστοχίας.

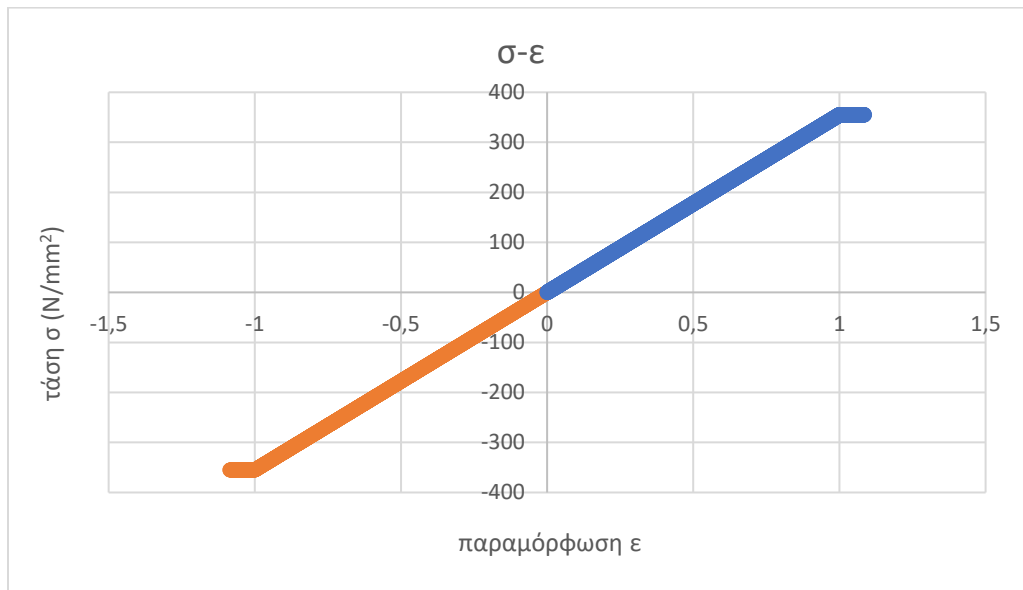
Elastoplastic collapse

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
-1,79091E-06	-4,6E-06	-0,00256	-0,00256	-0,9102
-3,58182E-06	-9,1E-06	-0,00513	-0,00513	-1,8204
-5,37273E-06	-1,4E-05	-0,00769	-0,00769	-2,7306
-7,16364E-06	-1,8E-05	-0,01026	-0,01026	-3,6408
-8,95455E-06	-2,3E-05	-0,01282	-0,01282	-4,55099

Πίνακας 6.3-Εύρεση σ, ϵ σε sagging (plate 5)

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
1,79091E-06	4,55099E-06	0,002564	0,002564	0,910199
3,58182E-06	9,10199E-06	0,005128	0,005128	1,820398
5,37273E-06	1,3653E-05	0,007692	0,007692	2,730597
7,16364E-06	1,8204E-05	0,010256	0,010256	3,640796
8,95455E-06	2,2755E-05	0,01282	0,01282	4,550995

Πίνακας 6.4-Εύρεση σ, ϵ σε hogging (plate 5)

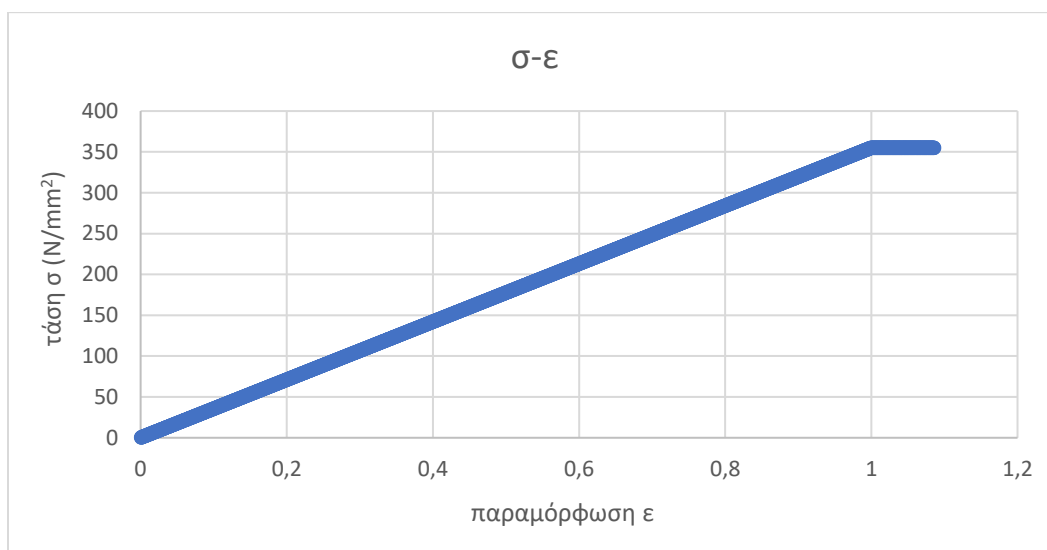


Σχήμα 6.2-Καμπύλη $\sigma-\epsilon$ (plate 5)

Plate buckling

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	$\sigma_{CR5(1)}$	$\sigma_{CR5(2)}$	min σ_{cr5}
-1,79091E-06	-4,55099E-06	-0,00256	-0,00256	0,641325	-0,9102	-5,868074	-5,868073661
-3,58182E-06	-9,10199E-06	-0,00513	-0,00513	0,906971	-1,8204	-11,46962	-11,46961767
-5,37273E-06	-1,3653E-05	-0,00769	-0,00769	1,110808	-2,7306	-17,02368	-17,02367868
-7,16364E-06	-1,8204E-05	0,01026	0,01026	1,28265	-3,6408	-21,90294	-21,90293632
-8,95455E-06	-2,2755E-05	-0,01282	-0,01282	1,434047	-4,55099	-26,26012	-26,26011745
-1,07455E-05	-2,7306E-05	-0,01538	-0,01538	1,570919	-5,46119	-30,22266	-30,22266457

Πίνακας 6.5-Εύρεση σ, ϵ σε sagging (plate 5)



Σχήμα 6.3-Καμπύλη σ - ϵ (plate 5)

6.2.3-Bulb Flats

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο τρόπος κατάρρευσης των *bulb flats* είναι *elastoplastic collapse*, *beam column buckling*, *torsional buckling*, *web local buckling of flanged profiles*. Παρακάτω θα γίνει ο υπολογισμός της τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ για το *IL4* της διατομής, το οποίο σε κατάσταση *sagging* εφελκύεται, ενώ σε κατάσταση *hogging* θλίβεται, καθώς είναι κάτω από τον ουδέτερο άξονα. Στους παρακάτω πίνακες υπολογίζεται η τάση και η παραμόρφωση, ενώ τελικά προκύπτει προκύπτουν και τα διαγράμματα για κάθε τρόπο αστοχίας.

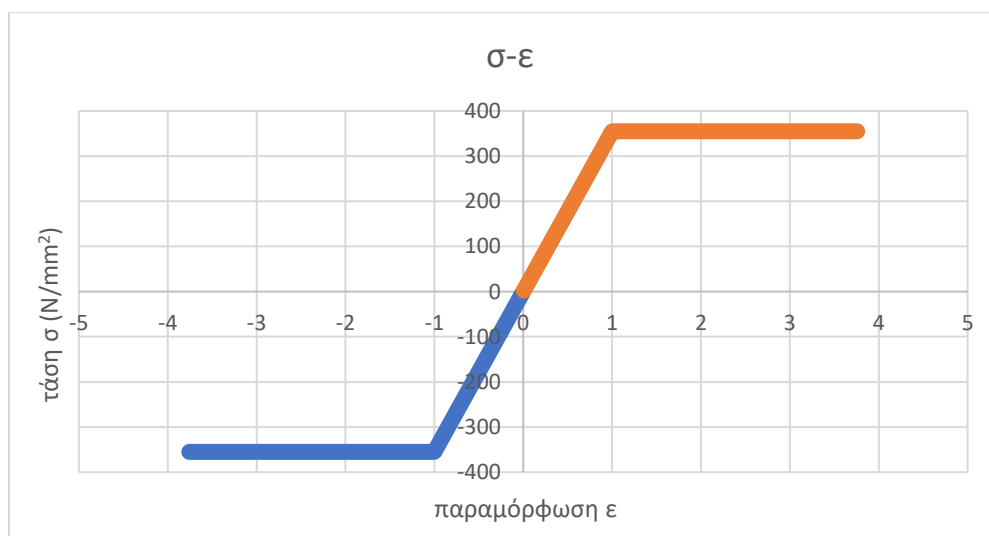
Elastoplastic collapse

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
-1,79091E-06	1,2194E-05	0,006869866	0,006869866	2,438802
-3,58182E-06	2,4388E-05	0,013739732	0,013739732	4,877605
-5,37273E-06	3,6582E-05	0,020609598	0,020609598	7,316407
-7,16364E-06	4,8776E-05	0,027479464	0,027479464	9,75521
-8,95455E-06	6,09701E-05	0,03434933	0,03434933	12,19401

Πίνακας 6.6-Εύρεση σ, ϵ σε sagging (IL4)

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
1,79091E-06	-1,2194E-05	-0,00687	-0,00686987	-2,4388
3,58182E-06	-2,4388E-05	-0,01374	-0,01373973	-4,8776
5,37273E-06	-3,6582E-05	-0,02061	-0,0206096	-7,31641
7,16364E-06	-4,8776E-05	-0,02748	-0,02747946	-9,75521
8,95455E-06	-6,09701E-05	-0,03435	-0,03434933	-12,194

Πίνακας 6.7-Εύρεση σ, ϵ σε hogging (IL4)

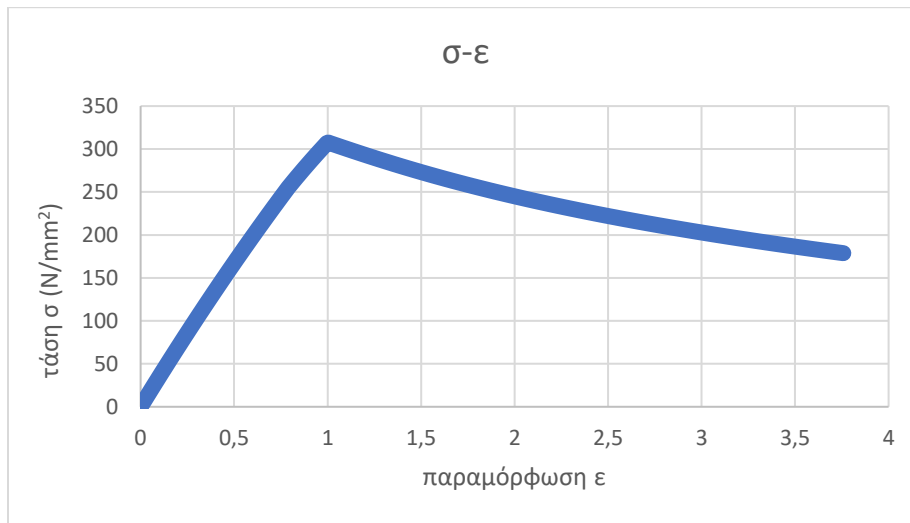


Σχήμα 6.4-Καμπύλη σ - ϵ (IL4)

Beam column buckling

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	bE	$A\rho E-n50$	$bE1$	$AE-n50$	γ	I_{xplate}	$I_{xstiffener}$	$IE-n50$	$\sigma E1$	$A\rho EI-n50$	$I_s E$	$I_p E$	$ReHB$	$\sigma C1$	$\sigma CR1$
1,79091E-06	-1,219E-05	-0,00687	-0,00687	0,116656	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	354,7239	-2,43691
3,58182E-06	-2,439E-05	-0,01374	-0,01374	0,164976	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	354,4478	-4,87002
5,37273E-06	-3,658E-05	-0,02061	-0,02061	0,202053	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	354,1717	-7,29934
7,16364E-06	-4,878E-05	-0,02748	-0,02748	0,233311	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	353,8956	-9,72486
8,95455E-06	-6,097E-05	-0,03435	-0,03435	0,26085	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	353,6195	-12,1466
1,07455E-05	-7,316E-05	-0,04122	-0,04122	0,285747	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	353,3434	-14,5645
1,25364E-05	-8,536E-05	-0,04809	-0,04809	0,308642	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	353,0673	-16,9787
1,43273E-05	-9,755E-05	-0,05496	-0,05496	0,329952	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	352,7912	-19,389
1,61182E-05	-0,0001097	-0,06183	-0,06183	0,349967	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	352,515	-21,7956
1,79091E-05	-0,0001219	-0,0687	-0,0687	0,368897	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	352,2389	-24,1983
1,97E-05	-0,0001341	-0,07557	-0,07557	0,386903	0,76	172,9	0,76	225,49	29,1406	77,0631765	5342,16	5419,223	783,9155456	172,9	51,34401	29,1406	355	351,9628	-26,5973

Πίνακας 6.8-Εύρεση σ, ϵ σε hogging (IL4)

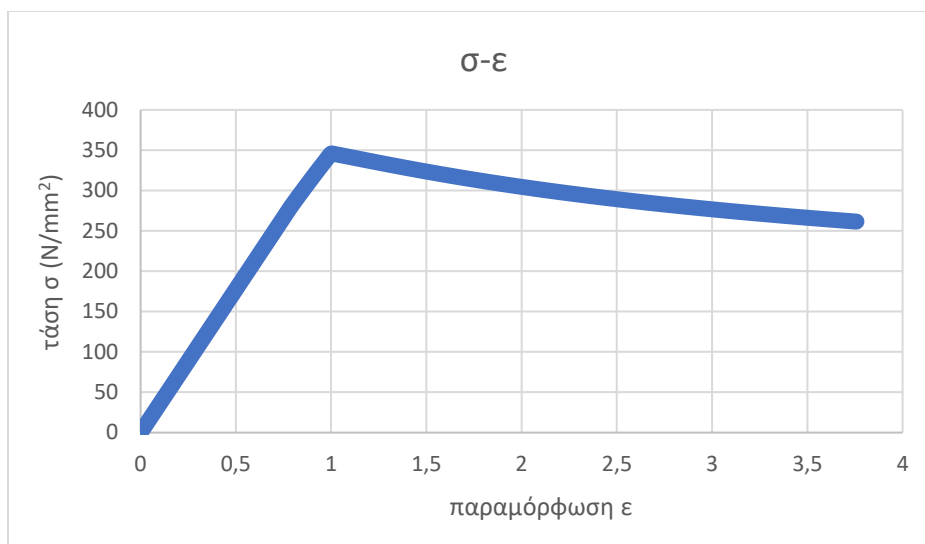


Σχήμα 6.5-Καμπύλη $\sigma-\epsilon$ (IL4)

Torsional buckling

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	σCP	t_f	e_f	A_f	A_w	I_p	I_T	I_ω	t_p	ϵ (degree of fixation)	$\sigma E2$	$\sigma C2$	$cCR2$
1,79091E-06	-1,2194E-05	-0,00687	-0,00687	0,116656	355	48,6	295,7	2137,9	3121,1	2,63566	0,01262	0,109697	22,75	1,00185362	1360465	354,9998	-2,43880221
3,58182E-06	-2,4388E-05	-0,01374	-0,01374	0,164976	355	48,6	295,7	2137,9	3121,1	2,63566	0,01262	0,109697	22,75	1,00185362	1360465	354,9997	-4,8776039
5,37273E-06	-3,6582E-05	-0,02061	-0,02061	0,202053	355	48,6	295,7	2137,9	3121,1	2,63566	0,01262	0,109697	22,75	1,00185362	1360465	354,9995	-7,31640509
7,16364E-06	-4,8776E-05	-0,02748	-0,02748	0,233311	355	48,6	295,7	2137,9	3121,1	2,63566	0,01262	0,109697	22,75	1,00185362	1360465	354,9994	-9,75520577
8,95455E-06	-6,097E-05	-0,03435	-0,03435	0,26085	355	48,6	295,7	2137,9	3121,1	2,63566	0,01262	0,109697	22,75	1,00185362	1360465	354,9992	-12,1940059
1,07455E-05	-7,3164E-05	-0,04122	-0,04122	0,285747	355	48,6	295,7	2137,9	3121,1	2,63566	0,01262	0,109697	22,75	1,00185362	1360465	354,999	-14,6328056

Πίνακας 6.9-Εύρεση σ, ϵ σε hogging (IL4)

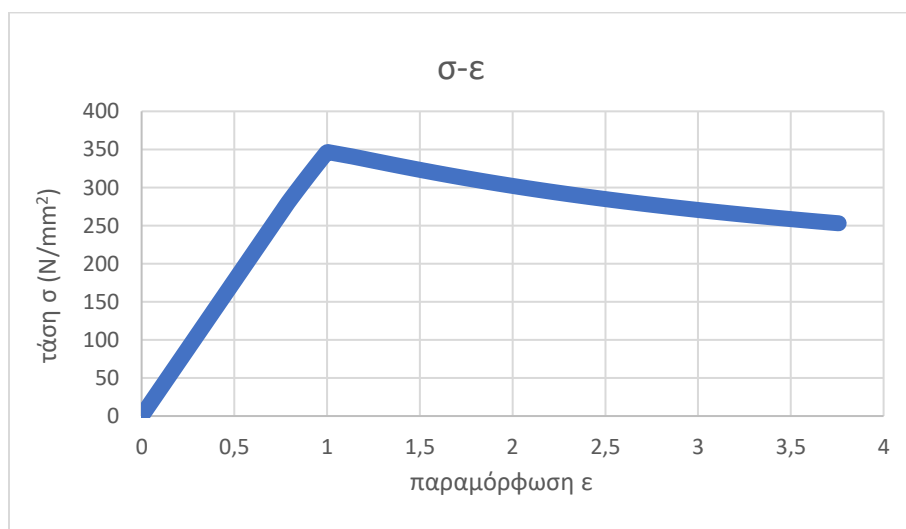


Σχήμα 6.6-Καμπύλη σ-ε σε hogging(IL4)

Web local buckling of flanged profiles

καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	βE	βw	hwe	bE	σCR3
1,79091E-06	-1,2194E-05	-0,00687	-0,00687	0,116656	0,097168	320	0,76	-2,4388
3,58182E-06	-2,4388E-05	-0,01374	-0,01374	0,164976	0,137417	320	0,76	-4,8776
5,37273E-06	-3,6582E-05	-0,02061	-0,02061	0,202053	0,168301	320	0,76	-7,31641
7,16364E-06	-4,8776E-05	-0,02748	-0,02748	0,233311	0,194337	320	0,76	-9,75521
8,95455E-06	-6,097E-05	-0,03435	-0,03435	0,26085	0,217275	320	0,76	-12,194

Πίνακας 6.9-Εύρεση σ,ε σε hogging(IL4)



Σχήμα 6.7-Καμπύλη σ-ε σε hogging(IL4)

6.2.4-Flat Bars

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο τρόπος κατάρρευσης των *flat bars* είναι *elastoplastic collapse*, *beam column buckling*, *torsional buckling*, *web local buckling of flat bars*. Παρακάτω θα γίνει ο υπολογισμός της τάσης σ και της παραμόρφωσης ϵ για το *IL1* της διατομής, το οποίο σε κατάσταση *sagging* εφελκύεται, ενώ σε κατάσταση *hogging* θλίβεται, καθώς είναι κάτω από τον ουδέτερο άξονα. Στους παρακάτω πίνακες υπολογίζεται η τάση και η παραμόρφωση, ενώ τελικά προκύπτει προκύπτουν και τα διαγράμματα για κάθε τρόπο αστοχίας.

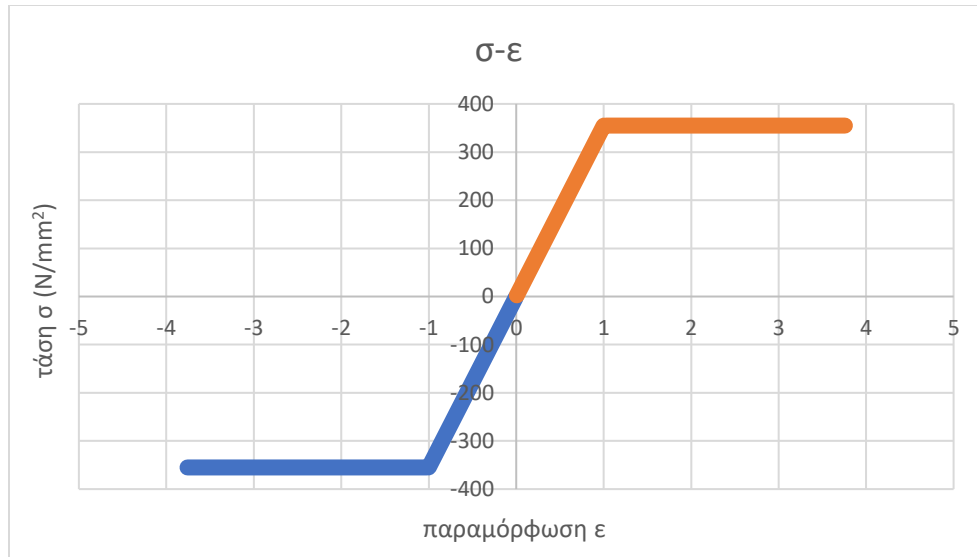
Elastoplastic collapse

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
-1,79091E-06	1,2194E-05	0,006869866	0,006869866	2,438802
-3,58182E-06	2,4388E-05	0,013739732	0,013739732	4,877605
-5,37273E-06	3,6582E-05	0,020609598	0,020609598	7,316407
-7,16364E-06	4,8776E-05	0,027479464	0,027479464	9,75521
-8,95455E-06	6,09701E-05	0,03434933	0,03434933	12,19401

Πίνακας 6.10-Εύρεση σ, ϵ σε *hogging*(IL1)

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	σ
1,79091E-06	-1,2194E-05	-0,00687	-0,00686987	-2,4388
3,58182E-06	-2,4388E-05	-0,01374	-0,01373973	-4,8776
5,37273E-06	-3,6582E-05	-0,02061	-0,0206096	-7,31641
7,16364E-06	-4,8776E-05	-0,02748	-0,02747946	-9,75521
8,95455E-06	-6,09701E-05	-0,03435	-0,03434933	-12,194

Πίνακας 6.11-Εύρεση σ, ϵ σε *hogging*(IL1)

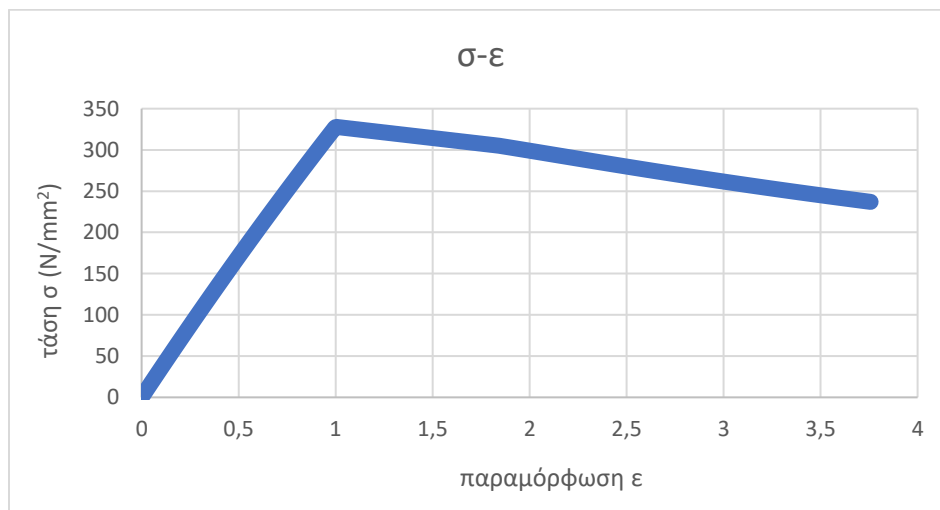


Σχήμα 6.8-Καμπύλη σ-ε σε hogging(IL1)

Beam column buckling

καμπυλότητα χ	εE	ε	Φ	βE	bE	ApE-n50	bE1	AE-n50	γ	Ixplate	Ixstiffener	IE-n50	σE1	ApEI-n50	IsE	IpE	ReHB	σC1	σCR1
1,79091E-06	-1,219E-05	-0,00687	-0,00687	0,076363	0,4975	113,1813	0,4975	150,9813	16,59945	49,287918	5342,16	5391,448	1164,774688	113,1813	36,75547	16,59945	355	354,8142	-2,43753
3,58182E-06	-2,439E-05	-0,01374	-0,01374	0,107994	0,4975	113,1813	0,4975	150,9813	16,59945	49,287918	5342,16	5391,448	1164,774688	113,1813	36,75547	16,59945	355	354,6284	-4,8725
5,37273E-06	-3,658E-05	-0,02061	-0,02061	0,132265	0,4975	113,1813	0,4975	150,9813	16,59945	49,287918	5342,16	5391,448	1164,774688	113,1813	36,75547	16,59945	355	354,4425	-7,30492
7,16364E-06	-4,878E-05	-0,02748	-0,02748	0,152727	0,4975	113,1813	0,4975	150,9813	16,59945	49,287918	5342,16	5391,448	1164,774688	113,1813	36,75547	16,59945	355	354,2567	-9,73478
8,95455E-06	-6,097E-05	-0,03435	-0,03435	0,170754	0,4975	113,1813	0,4975	150,9813	16,59945	49,287918	5342,16	5391,448	1164,774688	113,1813	36,75547	16,59945	355	354,0709	-12,1621

Πίνακας 6.12-Εύρεση σ,ε σε hogging(IL1)

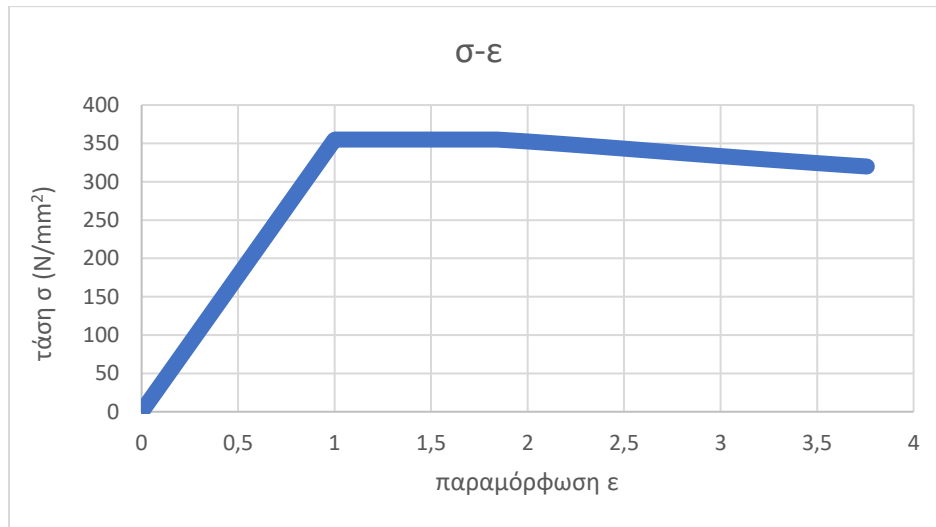


Σχήμα 6.9-Καμπύλη σ-ε σε hogging(IL1)

Torsional buckling

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	σ_{CP}	I_p	I_T	I_ω	t_p	ϵ (degree of fixation)	σ_{E2}	σ_{C2}	c_{CR2}
1,79091E-06	-1,2194E-05	-0,00687	-0,00687	0,076363	355	4082,4	51,4819	1500,282	22,75	1,003591234	12031195	355	-2,43880243
3,58182E-06	-2,4388E-05	-0,01374	-0,01374	0,107994	355	4082,4	51,4819	1500,282	22,75	1,003591234	12031195	355	-4,8776048
5,37273E-06	-3,6582E-05	-0,02061	-0,02061	0,132265	355	4082,4	51,4819	1500,282	22,75	1,003591234	12031195	354,9999	-7,31640711
7,16364E-06	-4,8776E-05	-0,02748	-0,02748	0,152727	355	4082,4	51,4819	1500,282	22,75	1,003591234	12031195	354,9999	-9,75520935
8,95455E-06	-6,097E-05	-0,03435	-0,03435	0,170754	355	4082,4	51,4819	1500,282	22,75	1,003591234	12031195	354,9999	-12,1940115

Πίνακας 6.13-Εύρεση σ, ϵ σε hogging(IL1)

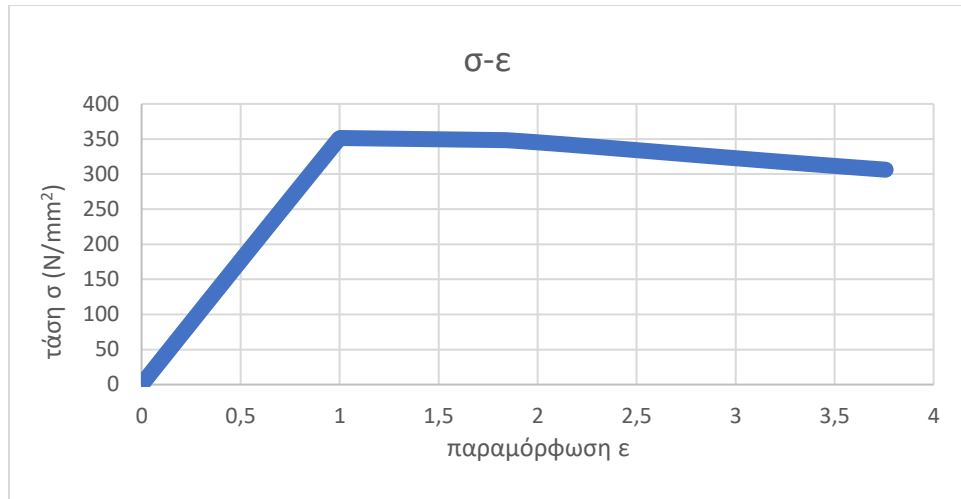


Σχήμα 6.10-Καμπύλη $\sigma-\epsilon$ σε hogging(IL1)

Web local buckling of flat bars

καμπυλότητα χ	ϵE	ϵ	Φ	βE	σ_{CP}	σ_{E4}	σ_{C4}	σ_{Cr4}
1,79091E-06	-1,2194E-05	-0,00687	-0,00687	0,076363	355	2177,778	354,900613	-2,43863
3,58182E-06	-2,4388E-05	-0,01374	-0,01374	0,107994	355	2177,778	354,801225	-4,87692
5,37273E-06	-3,6582E-05	-0,02061	-0,02061	0,132265	355	2177,778	354,701838	-7,31487
7,16364E-06	-4,8776E-05	-0,02748	-0,02748	0,152727	355	2177,778	354,60245	-9,75247
8,95455E-06	-6,097E-05	-0,03435	-0,03435	0,170754	355	2177,778	354,503063	-12,1897

Πίνακας 6.14-Εύρεση σ, ϵ σε hogging(IL1)



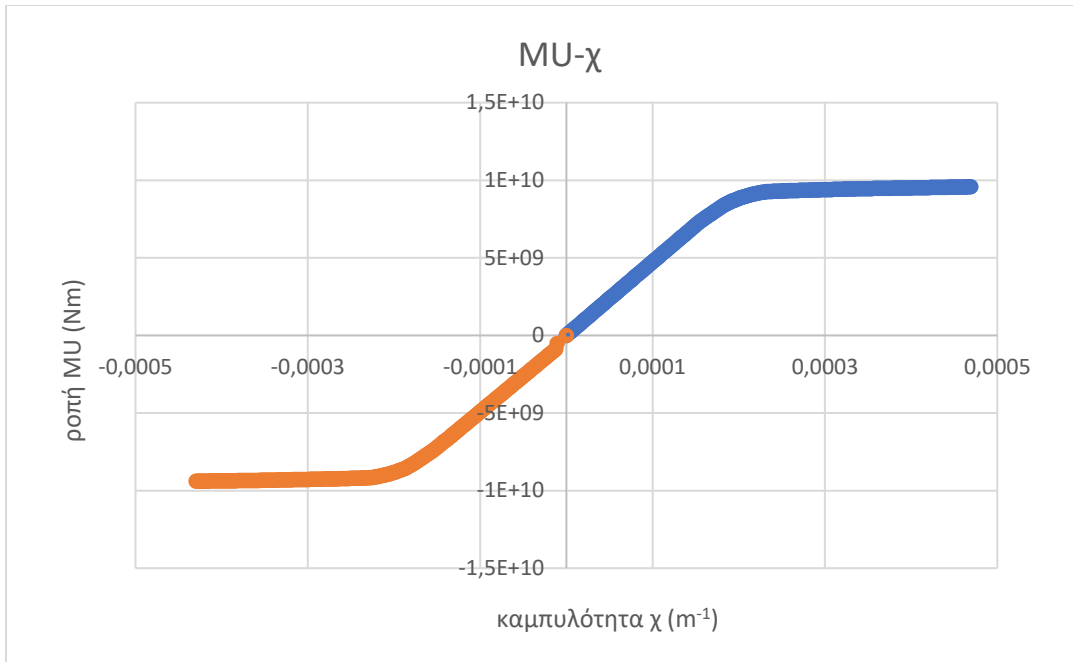
Σχήμα 6.11-Καμπύλη σ-ε σε hogging(IL1)

6.3-Κατασκευή Καμπύλης M-χ

Αφού καταγραφούν στο υπολογιστικό φύλλο όλα τα δομικά στοιχεία της διατομής γίνονται οι κατάλληλοι υπολογισμοί, όπως έχει αναλυθεί στο *Κεφάλαιο 4*, ώστε να κατασκευαστεί το Σχήμα 6.12 με την καμπύλη *MU-χ* για κατάσταση *hogging* και *sagging*.

								sagging					
structural element	zi (m)	Ai(m ²)	$\varepsilon E_i \chi_i^2 (z_i - z_n)$	ε_i	$\alpha_i(N/m^2)$	Ai* $\alpha_i(N)$	MU(Nm)						
Hard Corner 1	18,5	0,029757	-0,004331	-2,44	-355000000	-10563735	46198509,47						
Hard Corner 2	18,5	0,0307075	-0,004331	-2,44	-355000000	-10901163	47674185,22						
Hard Corner 3	17,75	0,023205	-0,004003264	-2,25535972	-355000000	-8237775	29848029,35						
Hard Corner 4	13,55	0,017305625	-0,002167939	-1,22137415	-355000000	-6143496,9	3542880,674						
Hard Corner 5	6	0,01520125	0,001131275	0,63733801	226254994,5	3439358,74	27950595,22						
Hard Corner IL2	1,78	0,02301375	0,002975339	1,67624733	355000000	8169881,25	100870974,5						
Hard Corner IL6	1,78	0,0227025	0,002975339	1,67624733	355000000	8059387,5	99506742,6						
Hard Corner IL11	1,78	0,0227025	0,002975339	1,67624733	355000000	8059387,5	99506742,6						
Hard Corner IL16	1,78	0,019460625	0,002975339	1,67624733	355000000	6908521,88	85297363,85						
Hard Corner BL2	0	0,00880625	0,003753167	2,11446026	355000000	3126218,75	44163116,77						
Hard Corner BL6	0	0,01583	0,003753167	2,11446026	355000000	5619650	79387041,99						
Hard Corner BL11	0	0,01097	0,003753167	2,11446026	355000000	3894350	55014267,25						
Hard Corner BL16	0	0,019460625	0,003753167	2,11446026	355000000	6908521,88	97594532,79						
DL1	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL2	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL3	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL4	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL5	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL6	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL7	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
DL8	18,5	0,029529	-0,004331	-2,44	-355000000	-10482795	45844533,6						
WL1	17,3	0,3600435	-0,003806622	-2,14457555	-355000000	-127815443	405598282,7						
WL2	16,9	0,3590435	-0,003631829	-2,04610073	-355000000	-127460443	353487579,9						
WL3	16,45	0,3536435	-0,003435187	-1,93531657	-355000000	-125543443	291676591,6						
WL4	16,05	0,3569535	-0,003260394	-1,83684175	-355000000	-126718493	243719202,4						
WL5	15,65	0,3623775	-0,003085601	-1,73836693	-355000000	-128644013	195964973,2						
WL6	15,25	0,4787415	-0,002910809	-1,63989212	-355000000	-169953233	190910512,5						
WL7	14,85	0,482294	-0,002736016	-1,5414173	-355000000	-171214370	123841415,4						
WL8	14,5	0,4743415	-0,002583072	-1,45525184	-355000000	-168391233	62862474,68						
HL1	2,3	0,283660375	0,002748108	1,54823006	355000000	100699433	1190940773						
HL2	2,85	0,18138625	0,002507768	1,41282719	355000000	64392118,8	726129830,2						
HL3	3,45	0,1776175	0,002245579	1,26511497	355000000	63054212,5	673210151,4						
HL4	4,05	0,1776175	0,00198339	1,11740274	355000000	63054212,5	635377623,9						
HL5	4,45	0,222773	0,001808597	1,01892793	355000000	79084415	765275206,4						
SL1	17,76	0,02528525	-0,004007633	-2,25782159	-355000000	-8976263,8	32613567,17						
SL2	17,09	0,02266025	-0,003714855	-2,09287627	-355000000	-8044388,8	23838034,04						
SL3	16,42	0,01725275	-0,003422077	-1,92793095	-355000000	-6124726,3	14045908,46						
SL4	15,75	0,0148065	-0,0031293	-1,76298564	-355000000	-5256307,5	8532627,256						
SL5	15,08	0,020592	-0,002835522	-1,59804032	-355000000	-7310160	6968863,549						
SL6	4,38	0,021714	0,001839186	1,03616102	355000000	7708470	75132051,73						
SL7	3,55	0,018669	0,002201881	1,24049626	355000000	6627495	70096946,57						
SL8	2,75	0,0230335	0,002551466	1,4374459	355000000	8176892,5	93025954,45						
SL9	1,92	0,008345	0,002914162	1,64178114	355000000	2962475	36162007,91						
BL0	0	0,0064125	0,003753167	2,11446026	355000000	2276437,5	32158522,22						
BL1	0	0,0117375	0,003753167	2,11446026	355000000	4166812,5	58863259,97						
BL3	0	0,016513	0,003753167	2,11446026	355000000	5862115	82812269,39						
BL4	0	0,014245	0,003753167	2,11446026	355000000	5056975	71438307,84						
BL5	0	0,011977	0,003753167	2,11446026	355000000	4251835	60064346,3						
BL7	0	0,014245	0,003753167	2,11446026	355000000	5056975	71438307,84						
BL8	0	0,011977	0,003753167	2,11446026	355000000	4251835	60064346,3						
BL9	0	0,016513	0,003753167	2,11446026	355000000	5862115	82812269,39						
BL10	0	0,014245	0,003753167	2,11446026	355000000	5056975	71438307,84						
BL12	0	0,016513	0,003753167	2,11446026	355000000	5862115	82812269,39						
BL13	0	0,014245	0,003753167	2,11446026	355000000	5056975	71438307,84						
BL14	0	0,016037	0,003753167	2,11446026	355000000	5693135	80425141,65						
BL15	0	0,015519	0,003753167	2,11446026	355000000	5509245	77827385,01						
BL17	0	0,01470475	0,003753167	2,11446026	355000000	5220186,25	73743942,24						
BL18	0	0,017496	0,003753167	2,11446026	355000000	6211080	87741989,05						
BL19	0	0,0065195	0,003753167	2,11446026	355000000	2314422,5	32695124,46						
IL0	1,78	0,009113125	0,002975339	1,67624733	355000000	3235159,38	39943503,3						
IL1	1,78	0,015098125	0,002975339	1,67624733	355000000	5359834,38	66176202,54						
IL2	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
IL3	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
IL4	1,78	0,022549	0,002975339	1,67624733	355000000	8004895	98833940,71						
IL5	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
IL7	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
IL8	1,78	0,022549	0,002975339	1,67624733	355000000	8004895	98833940,71						
IL9	1,78	0,022549	0,002975339	1,67624733	355000000	8004895	98833940,71						
IL10	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
IL12	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
IL13	1,78	0,022549	0,002975339	1,67624733	355000000	8004895	98833940,71						
IL14	1,78	0,022549	0,002975339	1,67624733	355000000	8004895	98833940,71						
IL15	1,78	0,02084275	0,002975339	1,67624733	355000000	7399176,25	91355320,31						
Bilge	0	0,05539	0,003753167	2,11446026	-355000000	-19663450	277779422,3						
IL2 - BL2	0,165	0,0035475	0,003681065	2,0738394	355000000	1259362,5	17582826,25						
IL6 - BL6	0,18	0,0036	0,00367451	2,07014659	355000000	1278000	17823867,21						
IL11 - BL11	0,18	0,0036	0,00367451	2,07014659	355000000	1278000	17823867,21						
IL16 - BL16	0,18	0,0036	0,00367451	2,07014659	355000000	1278000	17823867,21						
plate 5	11,13	0,07696	-0,001110443	-0,62560151	-317,7144365	-24,451303	73,27292539						
plate 6	8	0,00656	0,000257311	0,14496393	51462195,39	337592,002	2068320,852						
plate 7	7,33	0,00656	0,000550089	0,30990925	110017783,1	721716,657	4905282,913						
plate 8	4,665	0,01072	0,001714646	0,96599771	342929187,9	3676200,89	34783065,74						
plate 9	5,4	0,02149875	0,001393464	0,78505024	278692834,3	5991547,57	52286366,04						
plate 10	14,125	0,00534375	-0,002419204	-1,3629317	-355000000	-1897031,3	3202,111333						
plate 11	14,25	0,01294125	-0,002473827	-1,39370508	-355000000	-4594143,8	566513,2421						
SUM=						-683427335	10183719252						

Πίνακας 6.15-Δομικά στοιχεία διατομής



Σχήμα 6.12- Καμπύλη MU-χ

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσα διπλωματικής εργασίας και τον υπολογισμό της μέγιστης διαμήκους αντοχής πλοίου *Bulk Carrier* με την μέθοδο *Smith*, εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η μέθοδος *Smith* είναι μια προσεγγιστική μέθοδος υπολογισμού διαμήκους αντοχής, με αποτέλεσμα να δείχνει μια εκτίμηση αυτής. Επιδέχεται βελτιώσεων, οι οποίες αυξάνουν την πολυπλοκότητα. Πιο συγκεκριμένα, το υλικό έχει θεωρηθεί ελαστικό απολύτως πλαστικό, ενώ αν εισαγάγαμε μία βελτίωση αυτή θα ήταν, η θεώρηση του υλικού σε ελαστικό απολύτως πλαστικό με κράτυνση.
- Ο έλεγχος του μη γραμμικού λυγισμού είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, το οποίο για να υπολογιστεί απαιτεί τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων για κάθε στοιχείο. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν απλοποιημένες σχέσεις λυγισμού σύμφωνα με τους κανονισμούς *CSR*.
- Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής, δηλαδή να κατασκευαζόταν ένα μοντέλο του συγκεκριμένου *Bulk Carrier* με πεπερασμένα στοιχεία. Αυτό όμως απαιτούσε χρόνο και μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

Βιβλιογραφία

1. International Association of Classification Societies
[Online] Available from:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%94%CE%B9%CE%B5%CE%B8%CE%BD%CE%A%CF%82_%CE%88%CE%BD%CF%89%CF%83%CE%B7_%CE%9D%CE%B7%CE%BF%CE%B3%CE%BD%CF%89%CE%BC%CF%8C%CE%BD%CF%89%CE%BD
[ημερομηνία ανάκτησης: 17/11/2020]
2. IACS publications, 2020
[Online] Available from:
<http://www.iacs.org.uk/publications/> [ημερομηνία ανάκτησης: 17/11/2020]
3. New aspects of IACS harmonized C.S.R. for ships, 2019
[Online] Available from:
<https://www.marineinsight.com/naval-architecture/9-new-aspects-of-iacs-harmonised-common-structural-rules-csr-for-ships/> [ημερομηνία ανάκτησης: 3/12/2020]
4. I.A.C.S., Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers, January 2019
5. Πέτρος Α. Καρύδης, «Επιθεώρηση, Συντήρηση και Επισκευή της Μεταλλικής Κατασκευής του Πλοίου», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2002
6. Professor Alaa Mansour and Donald Liu, “Strength of Ships and Ocean Structures”, Jersey City 2008
7. Μπίρμπας Ευστάθιος, «Υπολογισμός της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής φορτηγού πλοίου μεταφοράς χύδην ξηρού φορτίου με χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2019
8. Χαλάστης Παναγιώτης, «Υπολογισμός Διαμήκουσ Αντοχής Γάστρας Πλοίου Μεταφοράς Φορτίου Χύδην», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009
9. Παζιώτης Κωνσταντίνος, «Υπολογισμός Μέγιστης Αντοχής Γάστρας με Βλάβη», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2009
10. Αθανασόπουλος Δημήτρης, «Βελτιστοποίηση Μέσης Τομής Τάνκερ με Χρήση των Κοινών Κατασκευαστικών Κανόνων», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα 2017
11. I.A.C.S Summary of the IMO GBS and the Harmonised Common Structural Rules, TSCF 2013
12. Ship Structure Committee, “Reliability-Based Performance Assessment of Damaged Ships”, 2011

13. Παρίδη Μαρία, «Ο Ρόλος των Νηογνομώνων στη Ναυτιλία, Θεσμική Οικονομική και Τεχνική Προσέγγιση» Διπλωματική Εργασία, ΠΑ.ΠΕΙ, Πειραιάς 2011
14. J.M. Gordo, C. Guedes Soares, “Experimental analysis of the effect of frame spacing variation on the ultimate bending moment of box girders”, Marine Structures, 2014
15. Ιωαννίδης Δημήτριος, «Μέγιστη Αντοχή Bulk Carrier σε Άθικτη και Βεβλαμμένη Κατάσταση», Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Αθήνα 2017
16. Gui-jie Shi, Dawei Gao, Hong Zhou, “Analysis of Hull Girder Ultimate Strength and Residual Strength Based in IACS CSR-H” June 2019