

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΟΛΙΓΟΚΥΚΛΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ  
ΧΡΗΣΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ SMITH

*Αθήνα 04/2023*

Διπλωματική Εργασία

Όνοματεπώνυμο : Κατσιλούλης Βασίλειος (nm18043)

Επιβλέπων Καθηγητής : Σαμουηλίδης Εμμανουήλ



## ΠΕΡΙΕΓΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη .....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Εισαγωγή.....	7
1. 1 Βιβλιογραφική έρευνα.....	7
1. 2 Το υπο μελέτη πρόβλημα .....	8
1. 3 Οργάνωση της εργασίας.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Μέγιστη Αντοχή του Πλοίου-Δοκού .....	10
2. 1 Γενικά .....	10
2. 2 Η φόρτωση του πλοίου και η κατασκευαστική απόκριση .....	10
2. 3 Τρόποι κατασκευαστικής αστοχίας μιας κατασκευής.....	17
2. 3. 1 Αστοχία του υλικού λόγω υπέρβασης της τάσης διαρροής (Direct failure).....	17
2. 3. 2 Αστάθεια σε Λυγισμό (Buckling).....	17
2. 3. 3 Κόπωση (Fatigue) .....	18
2. 3. 4 Θραύση (Brittle fracture Cracking) .....	18
2. 4 Κάμψη και λυγισμός πρισματικού φορέα κολώνας.....	19
2. 4. 1 Κάμψη .....	19
2. 4. 2 Λυγισμός .....	21
2. 5 Κάμψη και λυγισμός απλών ελασμάτων .....	25
2. 5. 1 Κάμψη .....	25
2. 5. 2 Λυγισμός .....	28
2. 6 Μορφές αστοχίας ενισχυμένων ελασμάτων.....	32
2. 6. 1 Κατάρρευση του ενισχυμένου ελάσματος σαν ενιαία μονάδα υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση.....	32
2. 6. 2 Διαξονική θλιπτική κατάρρευση.....	33
2. 6. 3 Κατάρρευση ως δοκού-κολώνας.....	33
2. 6. 4 Τοπικός λογισμός κορμού ενισχυτικού .....	34
2. 6. 5 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός ενισχυτικού .....	35
2. 6. 6 Ολική διαρροή.....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο :Παρουσίαση μεθοδολογίας Smith.....	36
3. 1 Γενικά .....	36
3. 2 Επαυξητική επαναληπτική διαδικασία που προτείνεται από τον IACS. ....	37
3. 3 Καμπυλες Τάσεων-Παραμορφώσεων δομικών στοιχείων Μέσης Τομής.....	42

3. 3. 1	Ελαστοπλαστική κατάρρευση δομικών στοιχείων .....	46
3. 3. 2	Λυγισμός δοκού κολώνας (Beam-Column Buckling) .....	48
3. 3. 3	Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (Torsional Buckling) .....	51
3. 3. 4	Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού με φλάντζα (Web Local Buckling for Flanged Elements) .....	54
3. 3. 5	Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού σκέτης λάμας (Web Local Buckling for Flat-Bar Elements) .....	55
3. 3. 6	Λυγισμός μη-ενισχυμένων ελασμάτων (Plate Buckling) .....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> : Πρόγραμμα υπολογισμού Μέγιστης Αντοχής .....		57
4. 1	Γενικά .....	57
4. 2	Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεων (σ-ε) .....	57
4. 2. 1	Συναρτήσεις Υπολογισμού καμπυλών σ-ε .....	57
4. 2. 2	Αποτελέσματα εκτέλεσης των συναρτήσεων για διάφορα δομικά στοιχεία. ....	59
4. 3	Κύριος Κώδικας Υπολογισμού Μέγιστης Αντοχής .....	64
4. 3. 1	Αρχείο εισαγωγής δεδομένων “Elements” .....	65
4. 4	Πειραματικά μοντέλα μέσης τομής .....	67
4. 5	Αποτελέσματα εκτέλεσης κώδικα μέγιστης Αντοχής .....	68
4. 5. 1	Μοντέλο “B-2D” .....	68
4. 5. 2	Μοντέλο “B-1S” .....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Εφαρμογή βηματικής – επαναληπτικής μεθόδου (Smith) στην ολικοκυκλική φόρτιση .....		71
5. 1	Γενικά .....	71
5. 2	Παρουσίαση της μελέτης του Shen Li et. al. - An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading .....	72
5. 2. 1	Γενικά .....	72
5. 2. 2	Μονοκυκλική Φόρτιση. Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων.....	74
5. 2. 3	Πολυκυκλική Φόρτιση. Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων.....	77
5. 2. 4	Κανόνας Απόκρισης .....	78
5. 2. 5	Κανόνας Ανανέωσης .....	79
5. 3	Σχηματική Αναπαράσταση δημιουργίας καμπύλης σ-ε σύμφωνα με τους κανόνες απόκρισης/ανανέωσης.....	80
5. 4	Παρουσίαση του Κώδικα Ολιγοκυκλικής Φόρτισης.....	83
5. 5	Αποτελέσματα Εκτέλεσης Κώδικα .....	87
5. 5. 1	Γενικά .....	87
5. 5. 2	Σχολιασμός Αποκλίσεων .....	89

5. 5. 3 Διαγράμματα Τάσεων Παραμορφώσεων.....	90
5. 6 Μελέτη επίδρασης συντελεστών μείωσης τάσης και ελαστικότητας επαναφόρτισης. ....	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : Μελέτη Πεπερασμένων Στοιχείων – Σύγκριση και επαλήθευση αποτελεσμάτων. ...	99
6. 1 Γενικά .....	99
6. 2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων – Θεωρία .....	100
6. 3 Συγκριτική μελέτη με τα αποτελέσματα του Paik .....	103
6. 3. 1 Σχεδίαση Μοντέλου Paik .....	103
6. 3. 2 Αποτελέσματα.....	110
6. 5 Συγκριτική μελέτη με τα αποτελέσματα του Shen Li .....	117
6. 5. 1 Σχεδίαση μοντέλου Shen Li.....	117
6. 5. 2 Αποτελέσματα.....	123
6. 6 Σύγκριση με την καμπύλη τάσεων -παραμορφώσεων του προγράμματος Ultimate Strength. .....	126
Κεφάλαιο 7ο : Συμπεράσματα .....	131
7. 1 Εισαγωγή - Ανασκόπηση της εργασίας.....	131
7. 2 Συμπεράσματα της εργασίας.....	132
7. 3 Προτάσεις για μελλοντική εργασία και βελτίωση.....	134
Βιβλιογραφία.....	136

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την ανάπτυξη ενός προγράμματος υπολογισμού της καμπτικής ροπής μιας πρότυπης μέσης τομής σε εναλλασσόμενο φορτίο το οποίο ξεπερνά το όριο ελαστικότητας των κατασκευαστικών στοιχείων της. Η μελέτη της ολιγοκυκλικής φόρτισης αποκλίνει από την κλασική θεωρία κάμψης καθώς εκδηλώνονται φαινόμενα που επηρεάζουν τόσο την ίδια τη διατομή (λυγισμός κατασκευαστικών στοιχείων) όσο και την συμπεριφορά του υλικού (σκλήρυνση του χάλυβα). Η αντοχή γάστρας σε ολιγοκυκλική φόρτιση είναι ένα πεδίο στο οποίο δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα αυστηροί κανονισμοί ασφαλείας, επομένως χρήζει μεγάλου ενδιαφέροντος για τη μελέτη μιας γάστρας που δέχεται ακραίες φορτίσεις κατά τη διάρκεια της ζωής της. Η μελέτη στηρίζεται σε παρατηρήσεις άλλων ερευνητών από μοντελοποιήσεις πεπερασμένων στοιχείων για διάφορους τύπους ενισχυτικών. Τόσο οι παρατηρήσεις, όσο και τα αποτελέσματα του υπολογιστικού προγράμματος ελέγχονται με μελέτη πεπερασμένων στοιχείων με το πρόγραμμα ABAQUS.

Ο αλγόριθμος στηρίζεται στους ισχύοντες κανονισμούς ασφαλείας που ορίζονται από τους Common Structural Rules ωστόσο δέχεται τροποποίηση ώστε να υπολογίζει την αναπτυσσόμενη ροπή σε κυκλικές φορτίσεις και όχι μονοτονικές, όπως ορίζουν οι κανονισμοί με τη μέθοδο Smith.

Η διαδικασία της μελέτης ξεκινά με τη κατασκευή ενός αλγορίθμου υπολογισμού της μέγιστης καμπτικής ροπής σε μονοτονική φόρτιση όπως ορίζει ο IACS. Μελετώνται όλοι οι τύποι αστοχίας που συμπεριλαμβάνονται στους CSR και δημιουργούνται οι αντίστοιχες καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων και κατ' επέκταση η καμπύλη καμπτικής ροπής.

Αφού το πρόγραμμα μονοτονικής φόρτισης ολοκληρωθεί, υφίσταται τις απαραίτητες μετατροπές για να μπορέσει να εκτελέσει τον υπολογισμό της καμπτικής ροπής σε εναλλασσόμενη φόρτιση. Εισάγεται ένας τροποποιημένος αλγόριθμος ο οποίος στηρίζεται σε παρατηρήσεις άλλων ερευνητών. Τα αποτελέσματα του προγράμματος εναλλασσόμενης φόρτισης συγκρίνονται με τα αντίστοιχα από άλλες έρευνες για μοντέλα απλών τετραγωνικών φορτηγίδων (box girders).

Τέλος, αφού επιβεβαιωθεί η συμφωνία των αποτελεσμάτων γίνεται μια σύγκριση των καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων του προγράμματος εναλλασσόμενης φόρτισης με τις αντίστοιχες καμπύλες από μελέτη πεπερασμένων στοιχείων. Τα μοντέλα της προηγούμενης ανάλυσης κατασκευάζονται σε πρόγραμμα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (ABAQUS) και διεξάγεται μελέτη της συμπεριφοράς τους σε εναλλασσόμενη φόρτιση.

Με το πέρας των προαναφερόμενων, επιβεβαιώνεται ότι τα αποτελέσματα του προγράμματος που κατασκευάστηκε ανταποκρίνονται στη πραγματικότητα και

προτείνονται σημεία βελτίωσης του αλγορίθμου που θα ενίσχυαν την ακρίβεια των υπολογισμών και θα διεύρυναν το πεδίο εφαρμογής του.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο : Εισαγωγή

### 1. 1 Βιβλιογραφική έρευνα

Η μέγιστη αντοχή γάστρας σε κάμψη εκτιμήθηκε για πρώτη φορά από τον Caldwell (1965) χρησιμοποιώντας την θεωρία πλαστικής ανάλυσης στερεού μηχανισμού. Έκτοτε προέκυψαν διάφορες μέθοδοι ανάλυσης της μέγιστης αντοχής, με την επικρατέστερη που χρησιμοποιείται στη σύγχρονη ανάλυση να είναι η χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Διάφορες μελέτες έχουν διεξαχθεί που διερευνούν τις επιδράσεις των ατελειών της μεταλλικής κατασκευής, τις παραμένουσες τάσεις από συγκολλήσεις, τις οριακές συνθήκες, την έκταση του υπό μελέτη μοντέλου και τις τεχνικές της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (20th ISSC, 2018; Cai et al. , 2017; Tatsumi & Fujikubo, 2020; Wang et al. , 2018). Παραδοσιακά, η μέγιστη αντοχή γάστρας σε κάμψη υπολογίζεται για μονοτονική φόρτιση από μια άθικτη κατάσταση. Ωστόσο, η γάστρα του πλοίου υπόκειται σε κυκλικές φορτίσεις οι οποίες σταδιακά μειώνουν την αντοχή των κατασκευαστικών στοιχείων της - πόσο δε μάλλον όταν βρίσκεται σε ακραίες καιρικές συνθήκες, όπου η αναπτυσσόμενη δύναμη είναι ικανές να παραμορφώσουν πλαστικά τα ενισχυμένα ελάσματα πυθμένα και καταστρώματος. Οι πρώτες μελέτες του φαινομένου ανέδειξαν την σημασία της συσσωρευμένης βλάβης των ελασμάτων (Yao & Nikolov, 1990), ενώ στην πιο σύγχρονη βιβλιογραφία έχουν γίνει μελέτες σε αριθμητικά και πειραματικά μοντέλα που υπόκεινται σε μονοαξονική και διαξονική κυκλική φόρτιση (Komoriyama et al. , 2018, Li et al. , 2020, Jeom Kee Paik et al. , 2020, Tanaka et al. , 2017).

Ο Cui κ. α. στην έρευνα του με τίτλο *“Ultimate strength and failure characteristics research on steel box girders under cyclic-bending moments”* εκτελεί πείραμα κάμψης σε μια πρότυπη γάστρα τετραγωνικής διατομής. Στηριζόμενος στα αποτελέσματα της μελέτης του Cui, ο Shen κ. α. στην έρευνα με τίτλο *“An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading”* προτείνει έναν αλγόριθμο που ενσωματώνει τις παρατηρήσεις του από μοντέλα ενισχυμένων ελασμάτων και μη ενισχυμένων πλακών, ο οποίος δύναται να προβλέψει την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων των στοιχείων αυτών σε εναλλασσόμενη παραμόρφωση (S. Li et al. , 2019). Την έρευνα αυτή συμπληρώνει το paper με τίτλο *“Progressive collapse analysis of ship hull girders subjected to extreme cyclic bending”* από τον ίδιο όπου και γίνεται μια εφαρμογή του αλγόριθμου αυτού σε πρότυπες μέσες τομές και εξαγωγή της καμπύλης ροπής – καμπυλότητας.



## 1. 2 Το υπο μελέτη πρόβλημα

Το πρόβλημα που απασχολεί τον γράφον της παρούσας εργασίας είναι η προσέγγιση της καμπύλης καμπτικής ροπής για μια γάστρα που υποβάλλεται σε εναλλασσόμενη φόρτιση επιβεβλημένης καμπυλότητας. Φορτίσεις τέτοιου μεγέθους ενδέχεται να συναντηθούν σε διακεκριμένες στιγμές κατά τη διάρκεια ζωής της γάστρας από ακραίους κυματισμούς.

Η επιβεβλημένη καμπυλότητα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να επιφέρει πλαστικές παραμορφώσεις στα δομικά στοιχεία της γάστρας , με αποτέλεσμα να αλλάξει η φέρουσα ικανότητά της σε καμπτική ροπή. Το πρόβλημα συνδέεται άρρηκτα με το φαινόμενο του λυγισμού δομικών στοιχείων και με το φαινόμενο της σκλήρυνσης ενός υλικού που υποβάλλεται σε εναλλασσόμενη φόρτιση.

Η καμπύλη καμπτικής ροπής προσεγγίζεται με τη χρήση υπολογιστικού προγράμματος . Το πρόγραμμα που αναπτύσσεται στηρίζεται στους ισχύοντες κανονισμούς ασφαλείας που ορίζονται από τους Common Structural Rules και συγκεκριμένα στην μέθοδο προσέγγισης μέγιστης αντοχής του Smith (μέθοδος Smith) .Ο αλγόριθμος δέχεται τροποποίηση ώστε να υπολογίζει την αναπτυσσόμενη ροπή σε κυκλικές φορτίσεις και όχι απλές μονοτονικές.

### 1.3 Οργάνωση της εργασίας

Η εργασία παρουσιάζεται κατά τη ίδια χρονολογική σειρά της μελέτης που διεξήχθη , δηλαδή :

**Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>** : Εισαγωγή – Βιβλιογραφική έρευνα

**Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>** : Παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο για τη κατανόηση του υπό μελέτη προβήματος (αστοχία υλικών , λυγισμός , κάμψη του πλοίου-δοκού κλπ).

**Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>** : Παρουσίαση της μεθόδου Smith σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς CSR (Common Structural Rules) –

**Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>** : Δημιουργία υπολογιστικού προγράμματος στο MATLAB.

**Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>**: Τροποποίηση του προγράμματος υπολογισμού μέγιστης αντοχής για εναλλασσόμενη φόρτιση – Παρουσίαση των παρατηρήσεων της βιβλιογραφικής έρευνας που χρησιμοποιήθηκαν – Σύγκριση αποτελεσμάτων με αποτελέσματα βιβλιογραφίας

**Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>**: Συγκριτική μελέτη (benchmark study) πεπερασμένων στοιχείων σε δομικό στοιχείο – Μελέτη πεπερασμένων στοιχείων σε δομικό στοιχείο που υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση – Σύγκριση αποτελεσμάτων με τον κώδικα μέγιστης αντοχής

**Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>** : Ανασκόπηση και συμπεράσματα της εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο : Μέγιστη Αντοχή του Πλοίου-Δοκού

### 2.1 Γενικά

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

### 2.2 Η φόρτωση του πλοίου και η κατασκευαστική απόκριση

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

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

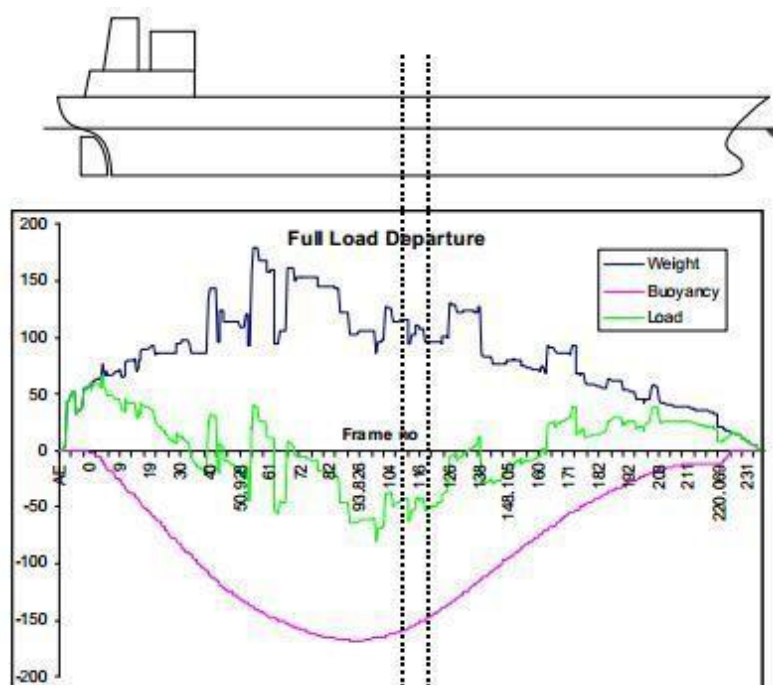
Υποθέτοντας ότι το σκάφος ενεργεί ως μία δοκός, η απόκριση της δοκού μπορεί να προσδιοριστεί με τον υπολογισμό της διαμήκου ροπής κάμψης η οποία εξετάζεται χωριστά για ήρεμο νερό (still water bending moment) και ανοιχτή θάλασσα (wave bending moment).

- Κάμψη σε ήρεμο νερό

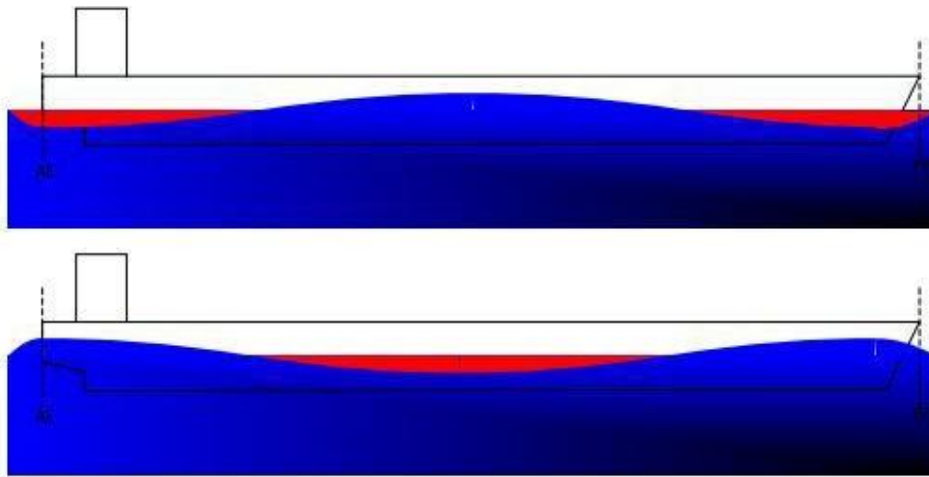
Επειδή το πλοίο ισορροπεί, η δύναμη του βάρους του ισούται με τη συνισταμένη δύναμη της άντωσης και το διάμηκες σημείο εφαρμογής των δύο συνισταμένων δυνάμεων βρίσκεται στην ίδια κατακόρυφο. Όμως οι κατανομές βάρους και άντωσης δεν είναι ομοιόμορφες και η συνισταμένη φόρτιση σε κάθε σημείο προκαλεί κάμψη του πλοίου. Αν θεωρηθεί ότι το πλοίο ισορροπεί χωρίς εγκάρσια κλίση, τότε η κάμψη περιορίζεται στο κατακόρυφο επίπεδο του [Σαμουηλίδης, 2007] (σχήμα 2. 1).

- Κάμψη σε κυματισμό

Κατά την πρόσπτωση κυματισμών σε ένα πλοίο η καμπτική φόρτιση που δέχεται η γάστρα του καθώς και οι κατανομές των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών, μεταβάλλονται σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη σε ήρεμο νερό [Σαμουηλίδης, 2007]. Για τον υπολογισμό τους απαιτείται η χρήση των εξισώσεων δυναμικής ισορροπίας και ο υπολογισμός της δυναμικής φόρτισης που ασκεί η θάλασσα στη γάστρα. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις, η περίπτωση κατά την οποία οι κορυφές του κύματος ενεργούν στα άκρα του πλοίου, προκαλώντας θλίψη στο κατάστρωμα και εφελκυσμό στον πυθμένα (sagging condition) και η περίπτωση όπου η κορυφή του κύματος ενεργεί στο μέσο του πλοίου, προκαλώντας εφελκυσμό στο κατάστρωμα και θλίψη στον πυθμένα (hogging condition) (σχήμα 2. 2).



Σχήμα 2. 1 : Πλοίο κάτω από την επίδραση του βάρους του και της υδροστατικής φόρτισης



Σχήμα 2. 2 : Το πλοίο στην κορυφή και στην κοιλάδα κύματος

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

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

Η κατανομή των ορθών τάσεων δίδεται από τον γνωστό τύπο:

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{M}{SM} = \frac{Ms + Mw}{SM}$$

όπου  $\sigma$  είναι η ορθή τάση σε απόσταση  $y$  από τον ουδέτερο άξονα της διατομής  $y$ ,  $I$  η ροπή αδρανείας της διατομής γύρω από τον ουδέτερο άξονα,  $SM$  η ροπή αντιστάσεως της διατομής,  $Ms$  και  $Mw$  οι ροπές κάμψης σε ήρεμο νερό και κυματισμό αντίστοιχα. Εάν

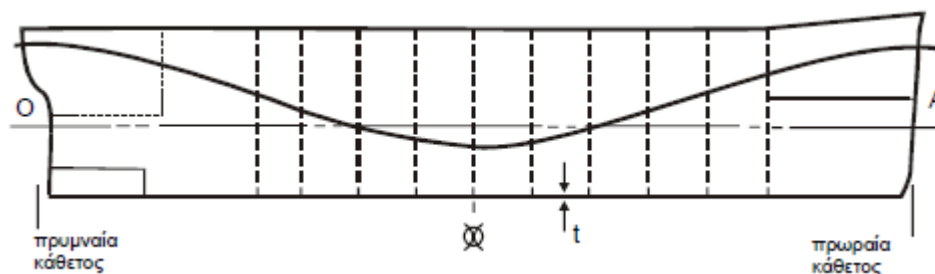
εξετάσουμε τις κατανομές των ορθών τάσεων που οφείλονται σε διαμήκη κάμψη, παρατηρούμε ότι για σταθερή γεωμετρία διατομής, μεγιστοποιούνται σε περιοχές όπου μεγιστοποιείται η καμπτική ροπή και η απόσταση από τον ουδέτερο άξονα. Στις περισσότερες διατομές πλοίων ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται πλησιέστερα στον πυθμένα και κατά συνέπεια υψηλότερες τάσεις αναπτύσσονται στο κύριο κατάστρωμα (main deck). Όταν η μέση τομή συμπίπτει με κοίλο κύματος τότε οι ορθές τάσεις στο κατάστρωμα είναι θλιπτικές.

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

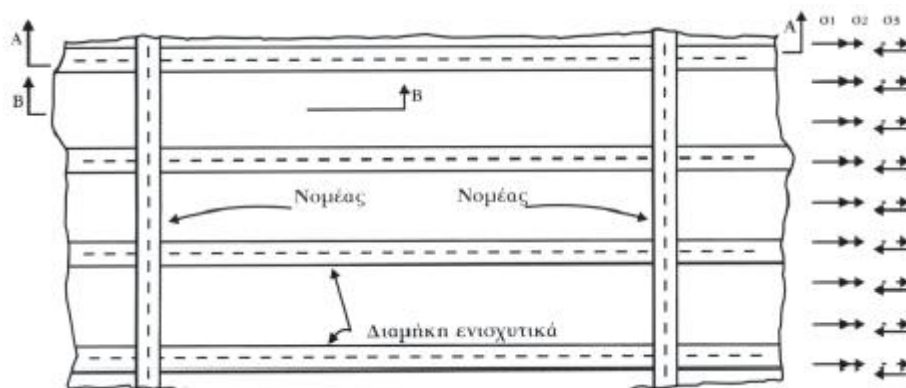
Οι ορθές τάσεις λόγω της διαμήκου κάμψης δεν είναι οι μοναδικές που αναπτύσσονται στα διαμήκη στοιχεία του πλοίου. Άλλες τάσεις είναι:

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

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



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

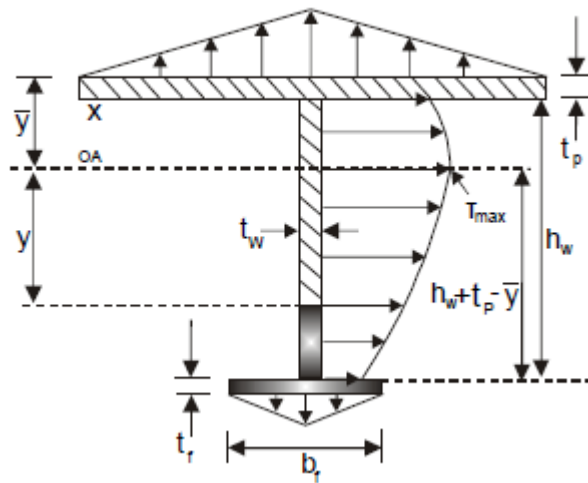


Σχήμα 2. 4. Δευτερεύουσες τάσεις

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

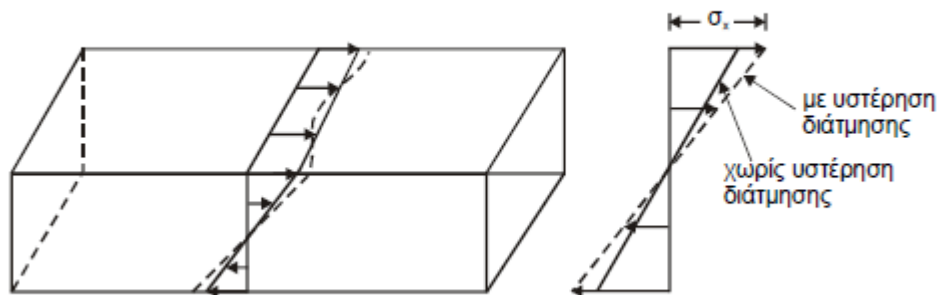
- Υστέρηση διάτμησης

Σε κάθε λεπτότοιχο δοκάρι που κάμπτεται σε ένα επίπεδο συμμετρίας του όπως στο σχήμα 2. 6 το φορτίο ισορροπείται από τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο κορμό και οι οποίες προκαλούν τις αξονικές παραμορφώσεις σε αυτόν. Η αξονική παραμόρφωση μεταφέρεται στα πέλματα μέσω διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται στις ακμές όπου τα πέλματα ενώνονται με τον κορμό [Σαμουηλίδης, 2007]. Όμως οι επίπεδες διατμητικές τάσεις στο πέλμα δεν είναι ομοιόμορφες κατά το πλάτος του (βλέπε σχήμα 2. 6) και έτσι η διατομή του πέλματος δεν παραμένει επίπεδη με αποτέλεσμα να μειώνεται η ικανότητα του να φέρει αξονικές τάσεις όπως αυτές προβλέπονται από την απλή θεωρία της κάμψης.



Σχήμα 2. 6 : Κανονική κατανομή τάσεων σε διατομή Ταυ

Το φαινόμενο αυτό καλείται υστέρηση διάτμησης, και εμφανίζεται σε μη συμπαγείς διατομές [Καρύδης, 2000]. Η επίδραση της υστέρησης διάτμησης σε κοίλες δοκούς φαίνεται στο Σχήμα 2. 7. Η κατανομή των ορθών τάσεων σύμφωνα με την απλή θεωρία των δοκών δίνεται από τις συνεχείς γραμμές, ενώ η αντίστοιχη κατανομή, λαμβάνοντας υπόψη την υστέρηση διάτμησης δίνεται από τις διακεκομμένες γραμμές.



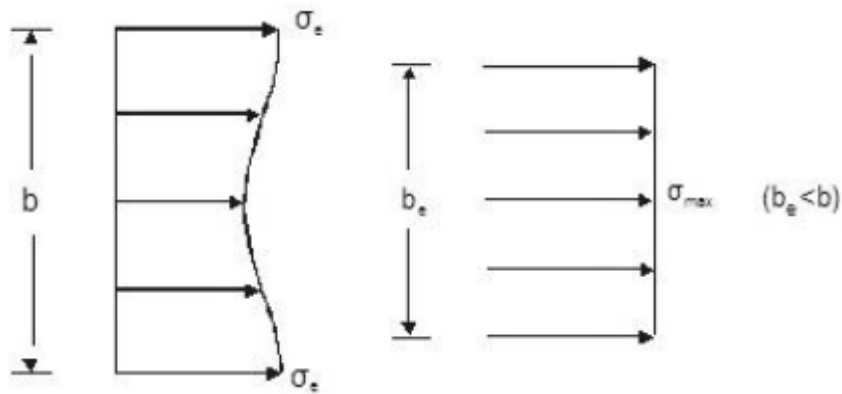
Σχήμα 2. 7 : Υστέρηση διάτμησης σε κοίλες δοκούς

Το αποτέλεσμα της υστέρησης διάτμησης είναι ότι η κατανομή των τάσεων γίνεται από γραμμική σε μη-γραμμική [Καρύδης, 2000]. Για να υπολογισθεί η απόκλιση των



πραγματικών κατανομών από τις αντίστοιχες γραμμικές εισάγεται η έννοια του ισοδύναμου πλάτους ελάσματος σε κάμψη.

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



Σχήμα 2. 8 : Ισοδύναμο πλάτος ελάσματος σε κάμψη

## 2. 3 Τρόποι κατασκευαστικής αστοχίας μιας κατασκευής

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

### 2. 3. 1 Αστοχία του υλικού λόγω υπέρβασης της τάσης διαρροής (Direct failure)

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

### 2. 3. 2 Αστάθεια σε Λυγισμό (Buckling)

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

### 2. 3. 3 Κόπωση (Fatigue)

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

### 2. 3. 4 Θραύση (Brittle fracture Cracking)

Η θραύση, είναι η ξαφνική διεύρυνση ενός crack το οποίο επεκτείνεται διαμέσου ενός κύριου τμήματος της κατασκευής, είτε από απότομη φόρτιση ή από την επίδραση πολλών μικρότερων κυκλικών φορτίσεων. Το αρχικό crack μπορεί να είναι αποτέλεσμα κακής κατασκευαστικής πρακτικής (πχ αστοχία κατά τη συγκόλληση) ή λανθασμένου σχεδιασμού (συσσώρευση τάσεων). Ο έλεγχος κατάρρευσης λόγω θραύσεως περιλαμβάνει ένα συνδυασμό κριτηρίων σχεδιασμού και επιθεώρησης με στόχο την εξάλειψη συγκεντρώσεων τάσεων και την επιλογή τύπων χάλυβα με ισχυρή αντίσταση στη διάδοση της θραύσεως, ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες (Παπάζογλου, 1995)].

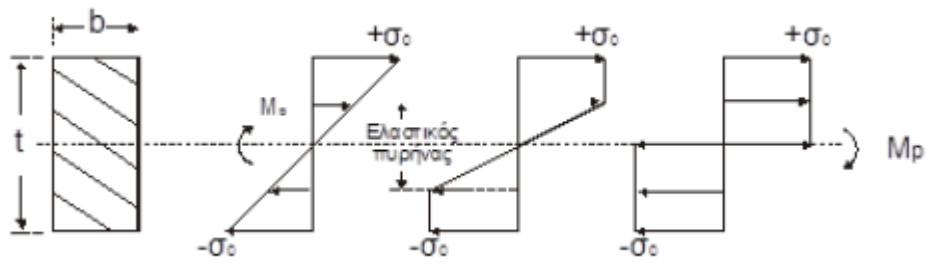
## 2. 4 Κάμψη και λυγισμός πρισματικού φορέα κολώνας

### 2. 4. 1 Κάμψη

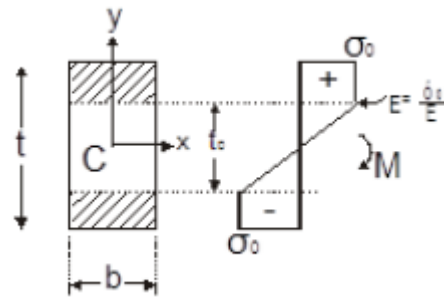
Η απόκριση και συμπεριφορά πρισματικών διατομών υπό καμπτικές, θλιπτικές αλλά και σύνθετες φορτίσεις, είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στη μελέτη και την ανάλυση της αντοχής των κατασκευών που υποβάλλονται σε φορτίσεις. Η μελέτη περιλαμβάνει το πρόβλημα της δοκού με ορθογώνια διατομή η οποία στηρίζεται στα άκρα της και η οποία φέρει στατική φόρτιση που μπορεί να είναι κατανεμημένη ή και σημειακή και η οποία ασκείται εγκάρσια στη δοκό [Καρύδης, 2000]. Οι γενικές παραδοχές όσον αφορά στη γραμμική μεταβολή των παραμορφώσεων από τον ουδέτερο άξονα ισχύουν και στην ελαστοπλαστική περιοχή (όχι βέβαια το ίδιο και για τις τάσεις). Ο προσδιορισμός του ορίου ελαστικότητας αποτελεί το πρώτο στάδιο ανάλυσης των δοκών στην ελαστοπλαστική περιοχή. Η κατανομή των τάσεων που αντιστοιχούν στο όριο ελαστικότητας περιλαμβάνεται στο Σχήμα 2. 9 (στάδιο 1). Στο σχήμα αυτό απεικονίζεται το γενικά αποδεκτό μοντέλο συμπεριφοράς δοκού στην ανελαστική (ελαστοπλαστική) περιοχή (στάδιο 2), το οποίο βασίζεται στις παραδοχές της μηχανικής θεωρίας των δοκών.

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

Στα ενδιάμεσα στάδια της ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς (στάδιο 2), διακρίνονται δύο περιοχές της διατομής, τις πλαστικές περιοχές που βρίσκονται κοντά στις εξωτερικές ίνες και την ελαστική περιοχή που περιβάλλει τον ουδέτερο άξονα και που καλείται ελαστικός πυρήνας της διατομής. Για το τμήμα της διατομής που είναι πάνω από τον ουδέτερου άξονα (από την πλευρά δηλαδή στην οποία ασκούνται οι εξωτερικές φορτίσεις) οι παραμορφώσεις και οι αντίστοιχες τάσεις είναι θλιπτικές, ενώ κάτω από τον ουδέτερο άξονα οι τάσεις είναι εφελκυστικές, όπως δηλαδή και στην ελαστική περιοχή [Καρύδης, 2001].



Σχήμα 2. 9A : α) Ελαστικό όριο β) Ελαστοπλαστικό πεδίο γ) Κατάρρευση



Σχήμα 2. 9B : Καμπτική συμπεριφορά ορθογώνιας δοκού στην ελαστοπλαστική

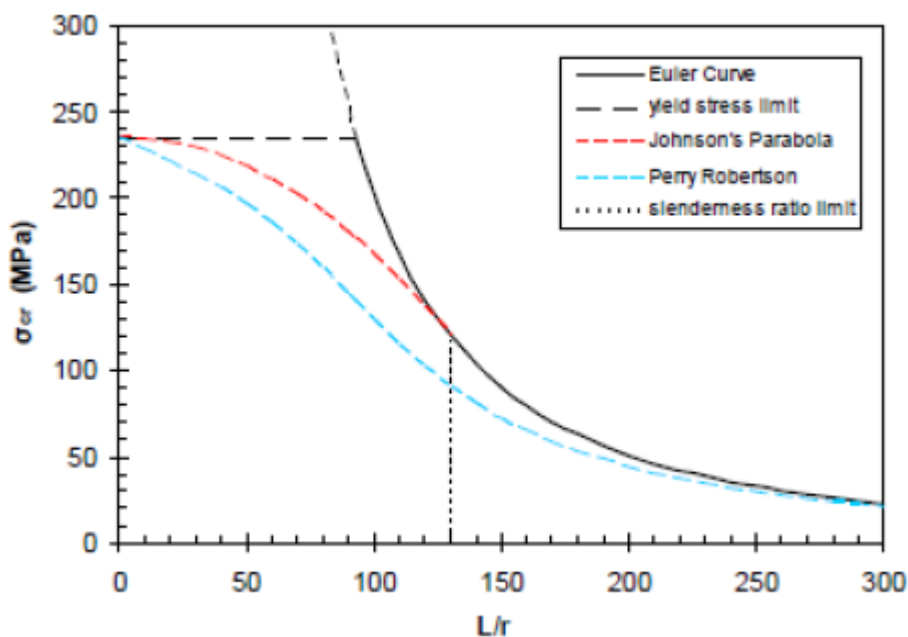
## 2. 4. 2 Λυγισμός

Ο λυγισμός χαρακτηρίζεται από μια ξαφνική πλάγια αστοχία ενός δομικού μέλους, το οποίο υπόκειται σε υψηλή θλιπτική τάση, που στο σημείο αστοχίας αυτή η τάση είναι μικρότερη από τη μέγιστη θλιπτική τάση που μπορεί να αντέξει αυτό το υλικό. Η μαθηματική ανάλυση του λυγισμού συχνά κάνει χρήση μιας "τεχνητής" εκκεντρότητας αξονικού φορτίου, που εισάγει μια δευτερεύουσα καμπτική ροπή που δεν είναι μέρος των πρωταρχικών δυνάμεων που εφαρμόζονται και μελετώνται. Καθώς το εφαρμοζόμενο φορτίο αυξάνεται σε ένα μέλος, όπως ένα υποστύλωμα, τελικά θα γίνει αρκετά μεγάλο ώστε να προκαλέσει στο μέλος αστάθεια και λυγισμό. Περαιτέρω φορτίο θα προκαλέσει σημαντικές και κάπως απρόβλεπτες παραμορφώσεις, πιθανώς να οδηγήσει και σε πλήρη απώλεια της φέρουσας ικανότητας του μέλους .Ο λυγισμός συναντάται συχνά σε κατασκευές με μεγάλους λόγους διαστάσεων όπως για παράδειγμα σε μια κολώνα .

Το μέγιστο φορτίο, που μερικές φορές ονομάζεται κρίσιμο φορτίο, προκαλεί κατάσταση ασταθούς ισορροπίας στο υποστύλωμα. Αυτό σημαίνει, ότι η εισαγωγή της παραμικρή πλευρικής δύναμης (διαταραχής) θα προκαλέσει την αστοχία σε λυγισμό. Ο τύπος του Euler για τα υποστυλώματα χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι πλευρικές δυνάμεις, δίνεται παρακάτω. Ωστόσο, ακόμα και αν λαμβάνονται υπόψη, η τιμή του κρίσιμου φορτίου παραμένει περίπου ίδια.<sup>[1]</sup> Το κρίσιμο φορτίο Euler δίνεται από τον τύπο:

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

Η γραφική παράσταση της δίνεται στο σχήμα 2. 10 Στη σχέση αυτή.  $P_{cr}$  είναι το (κρίσιμο) φορτίο ελαστικού λυγισμού,  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity ή Young's modulus),  $I$  είναι η ροπή αδράνειας (moment of inertia) της εγκάρσιας διατομής περί τον άξονα κάμψης,  $L$  είναι το μήκος της κολόνας και  $C$  είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τον τρόπο στήριξης των άκρων. (Σχήμα 2. 11)



Σχήμα 2. 10 - Καμπύλη Euler και καμπύλες ελαστοπλαστικού σχεδιασμού ισοτροπικών πρισματικών φορέων.

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

Έτσι έχουν προταθεί ορισμένες σχέσεις που περιγράφουν τον ελαστοπλαστικό λογισμό πρισματικών φορέων, όπως η εξίσωση Perry Robertson η παραβολή του Johnson, οι γραφικές απεικονίσεις των οποίων φαίνονται επίσης στο διάγραμμα του Σχήματος 2. 10, ενώ οι μαθηματικές τους εκφράσεις δίνονται στη συνέχεια.

- Εξίσωση Perry Robertson.

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{2} (\sigma_y + (1 + \eta)\sigma_E) - \sqrt{\frac{1}{4} * (\sigma_y + (1 + \eta)\sigma_E)^2 - \sigma_y \sigma_E}$$

Όπου:

$\sigma_y$  η τάση διαρροής του υλικού

$\sigma_E$  η κρίσιμη τάση ελαστικού λογισμού κατά Euler

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

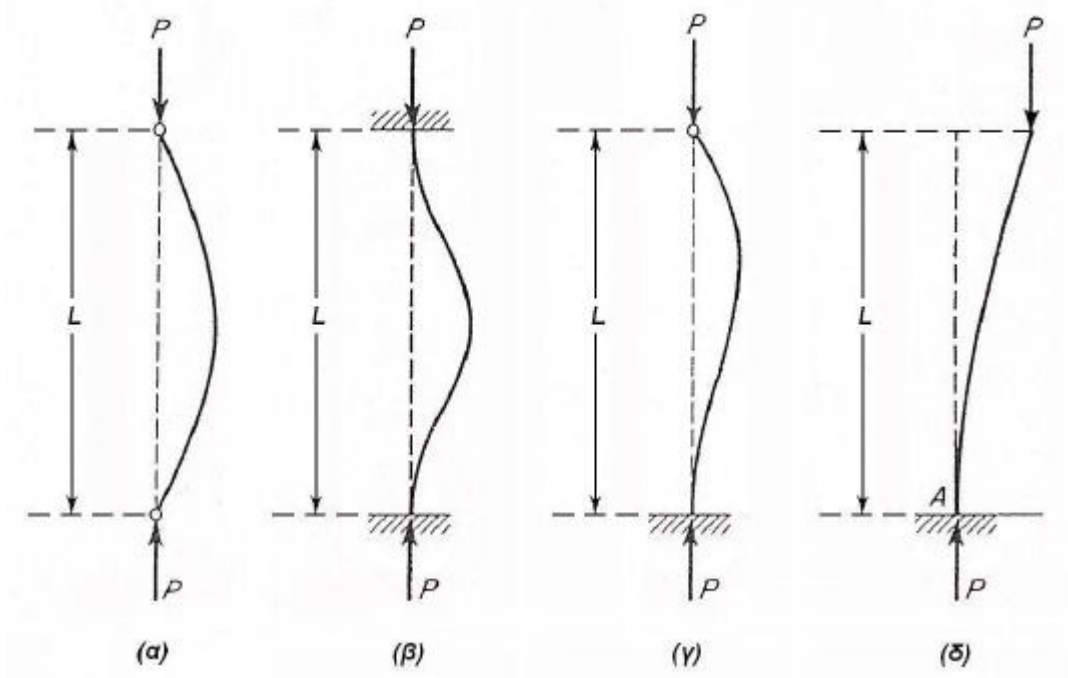
- Παραβολή του Johnson:

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

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

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 2. 10, η εξίσωση Perry Robertson λαμβάνει υπόψη την πλαστική συμπεριφορά των φορέων κάθε βαθμού λυγηρότητας, ενώ η παραβολή του Johnson κάνει το ίδιο μόνο για φορείς με βαθμό λυγηρότητας μικρότερο από ένα συγκεκριμένο όριο ( $L/r < 130$  περίπου για το ναυπηγικό χάλυβα), δίνοντας έτσι λιγότερο συντηρητικά αποτελέσματα.





Σχήμα 2. 11 Περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών λυγισμού δοκών.

## 2. 5 Κάμψη και λυγισμός απλών ελασμάτων

### 2. 5. 1 Κάμψη

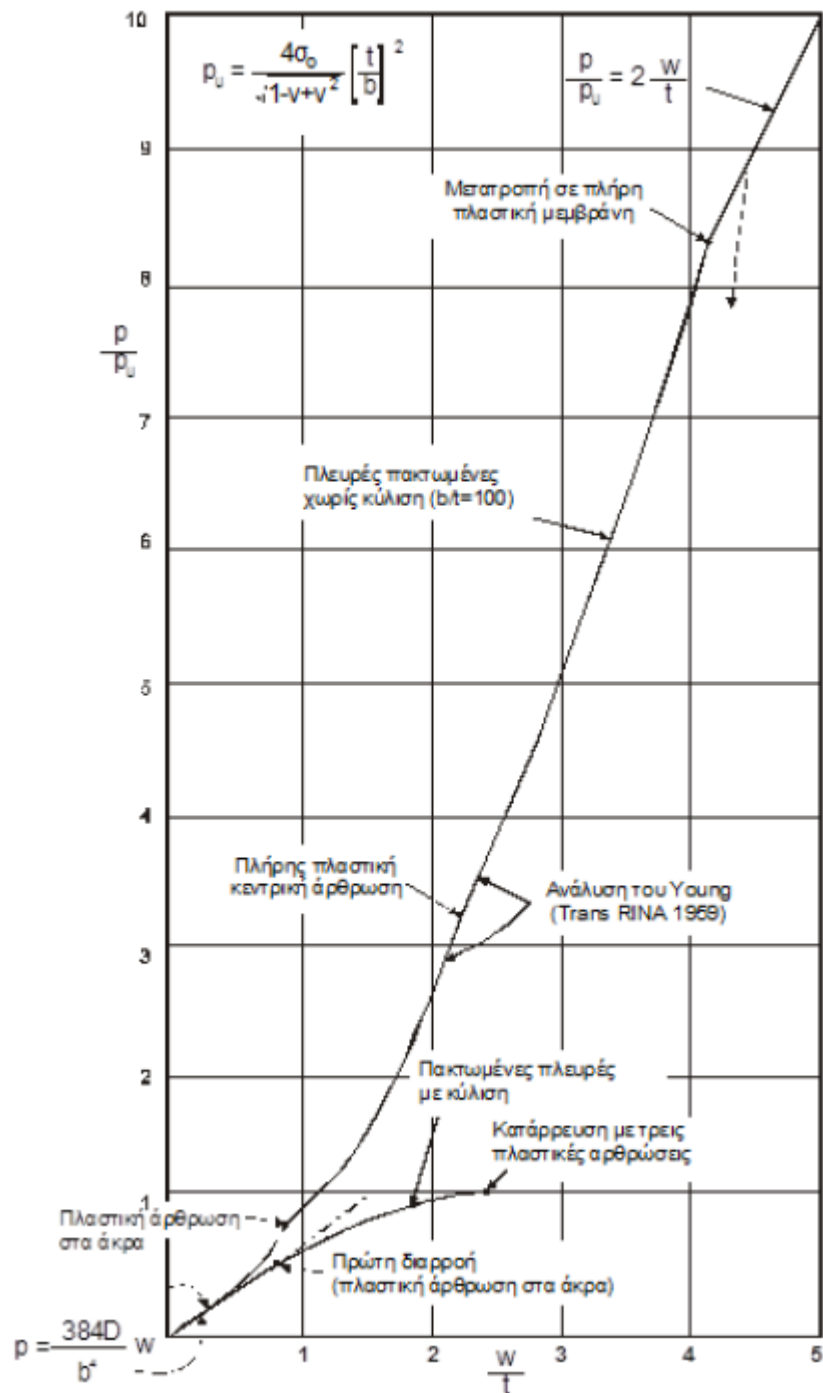
Όταν ασκούνται καμπτικές φορτίσεις (π. χ. υδροστατική πίεση) το έλασμα που στηρίζεται σε ενισχυτικά (stiffeners) και ζυγά (transverse) κάμπτεται και αναπτύσσονται τάσεις στις δύο εγκάρσιες κατευθύνσεις. Κατά κανόνα οι εξωτερικές φορτίσεις δεν είναι αρκετά υψηλές, ώστε να προκαλέσουν κατάρρευση ή εκτεταμένη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

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

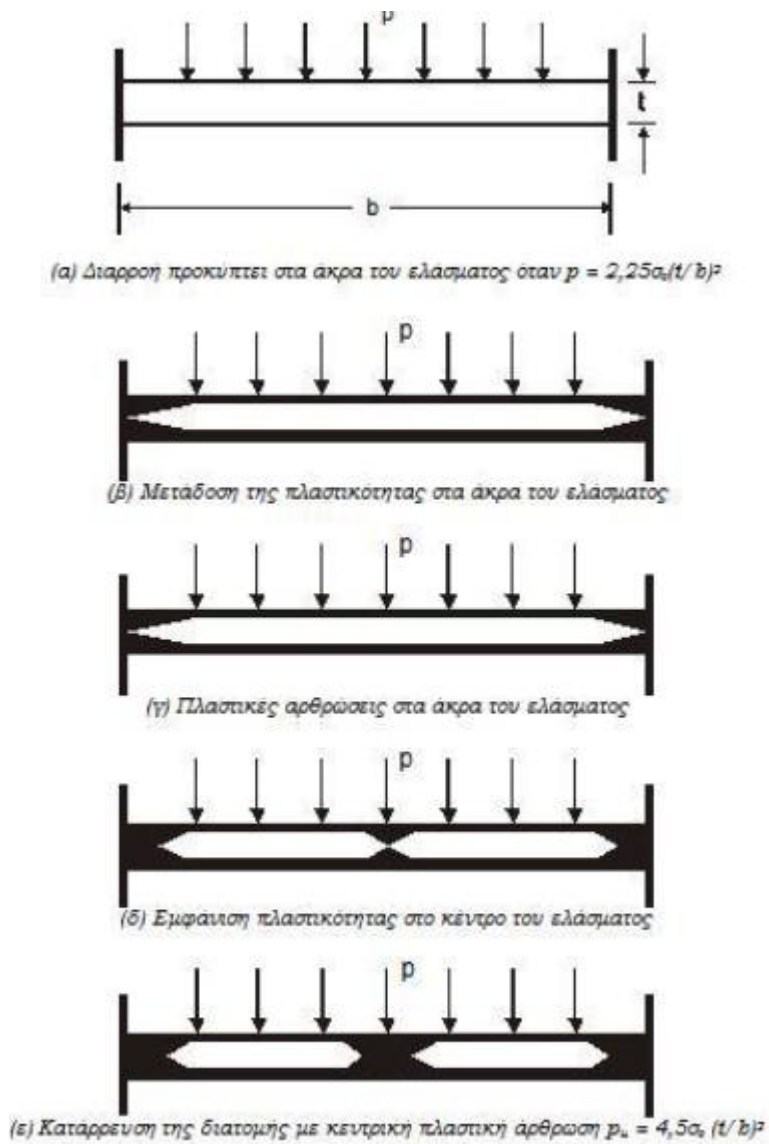
Κατά συνέπεια είναι πιθανόν να προκύψει πλαστικοποίηση σε κάποιο σημείο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι το έλασμα πρόκειται να καταρρεύσει άμεσα. Το σχήμα 2. 12 δείχνει πως τελική κατάρρευση του ελάσματος προκύπτει όταν η παραμόρφωση σε κάποιο σημείο του οδηγήσει στην γένεση ρήγματος σε πολύ υψηλότερες τάσεις, μετά την μετατροπή του σε πλήρη πλαστική μεμβράνη. Η πρώτη προσέγγιση σε συμπεριφορά των απλών ελασμάτων υπό καμπτικές φορτίσεις επιτυγχάνεται με χρήση της θεωρίας δοκών (Gordo, 2004).

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

Στο σχήμα 2. 13 παρουσιάζεται η κατανομή των πλαστικών ζωνών σε εγκάρσια τομή ελασμάτων υπό κατανεμημένη φόρτιση. Αρχικά η πλαστικοποίηση εμφανίζεται στα πακτωμένα άκρα, μέχρις ότου αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις. Σε υψηλότερα όμως φορτία το έλασμα πλαστικοποιείται και στο κέντρο, οπότε καταρρέει, εφόσον βέβαια επιτρέπεται η κύλιση των άκρων. Στο σχήμα 2. 12 φαίνεται η μεταβολή των μετατοπίσεων καθώς αυξάνεται το φορτίο.



Σχήμα 2. 12 : Καμπύλες φορτίου-μετατόπισης για μακριά πακτωμένα ελάσματα υπό ομοιόμορφη κατανεμημένη φόρτιση.



Σχήμα 2. 13 : Μετάδοση πλαστικότητας σε μακρύ έλασμα (πακτωμένο με κύλιση των άκρων)

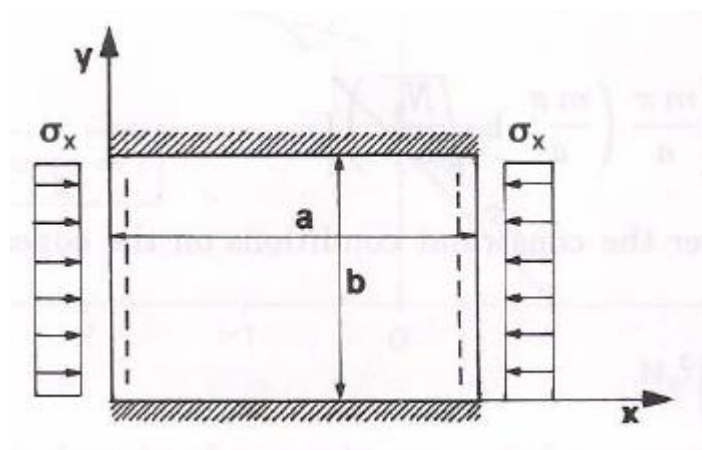
## 2. 5. 2 Λυγισμός

Στην περίπτωση μονοαξονικής, συνεπίπεδης, ομοιόμορφης, θλιπτικής φόρτισης ισοτροπικών πλακών διαφόρων συνοριακών συνθηκών με διαστάσεις (a x b ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. 14 και πάχος τ, το κρίσιμο φορτίο (τάση) ελαστικού λυγισμού μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης του Bryan:

$$\sigma_{cr} = \frac{k \pi^2 D}{b^2 t}$$

όπου:  $D = \frac{E \cdot t^3}{12(1-\nu^2)}$

είναι η καμπτική δυσκαμψία της πλάκας. k είναι ο συντελεστής λυγισμού που εξαρτάται από το λόγο πλευρών και δίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 2. 15 για διάφορες περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών. ν είναι ο λόγος poisson του υλικού (0. 3 για ναυπηγικό χάλυβα).



Σχήμα 2. 14 : Πλάκα υπό μονοαξονική, συνεπίπεδη, ομοιόμορφη, θλιπτική φόρτιση.

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2. 15, ο διαχωρισμός των διαφόρων περιπτώσεων ως προς τις συνοριακές συνθήκες των αφόρτιστων πλευρών της εκάστοτε υπό εξέταση πλάκας έχει ως εξής:

Περίπτωση A : Και οι δύο αφόρτιστες πλευρές πακτωμένες.

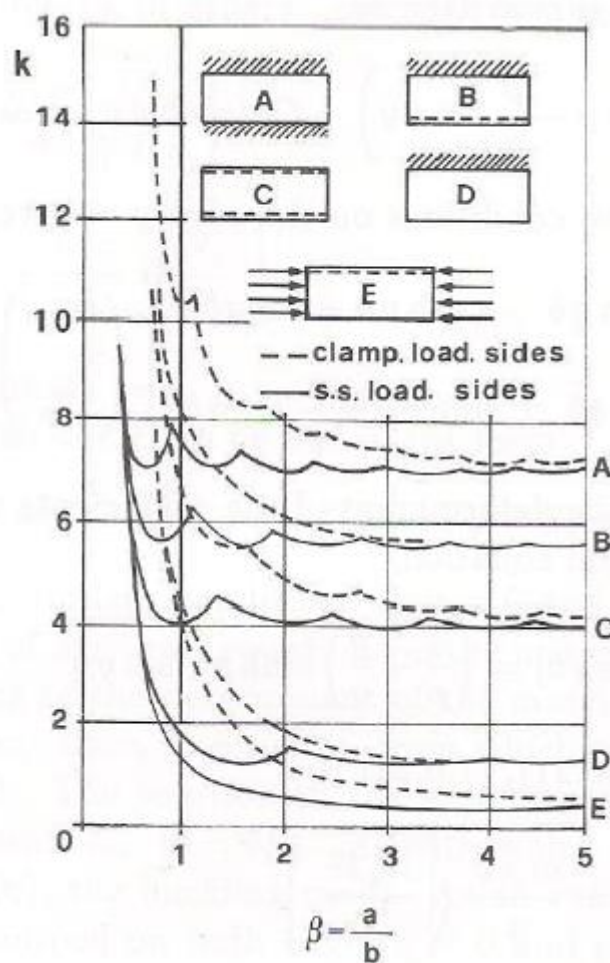
Περίπτωση B : Η μία αφόρτιστη πλευρά πακτωμένη και η άλλη απλά εδρασμένη.

Περίπτωση C : Και οι δύο αφόρτιστες πλευρές απλά εδρασμένες.

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

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

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



Σχήμα 2. 15 - Συντελεστής λυγισμού ισοτροπικών πλακών  $k$ , συναρτήσει του λόγου πλευρών  $\beta = a / b$  για διάφορες περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών.

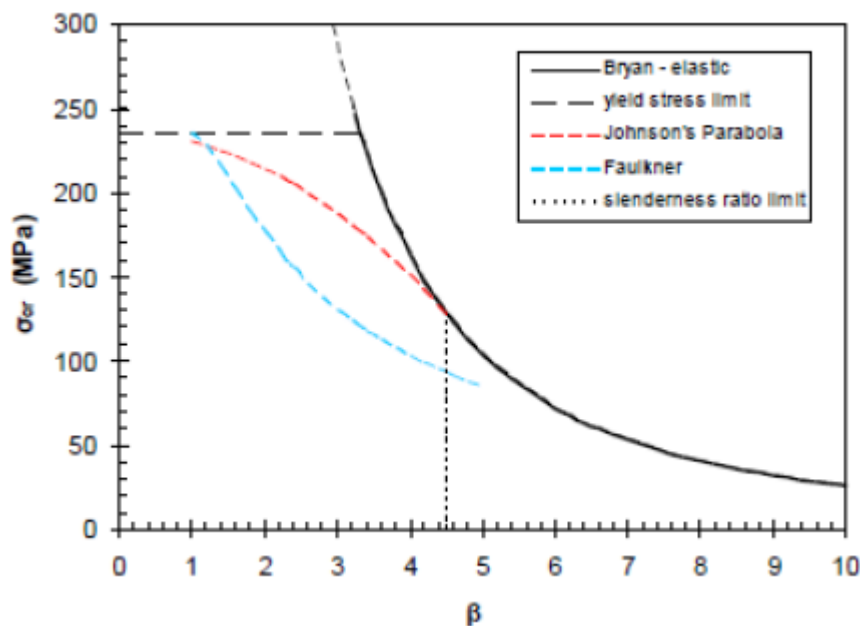
Το μέγεθος της λυγηρότητας μιας ισοτροπικής πλάκας ορίζεται ως εξής:

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

Έτσι, η σχέση του Bryan μπορεί να τροποποιηθεί κατάλληλα με χρήση των σχέσεων ορισμού των μεγεθών καμπτικής ακαμψίας ( $D$ ) και λυγηρότητας ( $\beta$ ). ώστε να παραχθεί η ακολουθη σχέση που δίνει το κρίσιμο φορτίο (τάση) ελαστικού λογισμού ορθοτροπικών πλακών συναρτήσει της λυγηρότητας αυτών.

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

Στο διάγραμμα του Σχήματος 2. 16 που ακολουθεί, παρουσιάζεται γραφικά αυτή η σχέση, για ελάσματα από υλικό κοινού ναυπηγικού χαλυβα ( $E = 206 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ ).



Σχήμα 2. 16 Ενδεικτική καμπύλη Bryan και καμπύλες ελαστοπλαστικού σχεδιασμού ελασμάτων.

Στο διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι, όπως και με την καμπύλη του Euler για ελαστικές δοκούς, έτσι και η σχέση του Bryan έχει εφαρμογή μόνο σε λεπτές πλάκες μεγάλης λυγηρότητας (στη συγκεκριμένη περίπτωση για  $\beta > 4.5$  ή 130 περίπου), αφού σε ελάσματα με μικρότερη λυγηρότητα, προηγείται τοπική πλαστικοποίηση του υλικού σε κρίσιμες

περιοχές, πριν τον ελαστικό λογισμό. Αυτές οι κρίσιμες περιοχές εμφανίζονται συνήθως κατά μήκος των αφόρτιστων πλευρών, λόγω της κατανομής των τάσεων [Καρύδης, 2000].

Έτσι, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των ελασμάτων, κατ' αντιστοιχία με την περίπτωση των δοκών, μπορεί να εφαρμοσθεί η παραβολή του Johnson ή η σχέση του Faulkner, η μαθηματική έκφραση της οποίας δίνεται ακολούθως και ισχύει για ελάσματα μικρής λυγηρότητας ( $\beta < 5$ ), όπως φαίνεται και στην εφαρμογή του Σχήματος 2. 16.

- Σχέση Faulkner

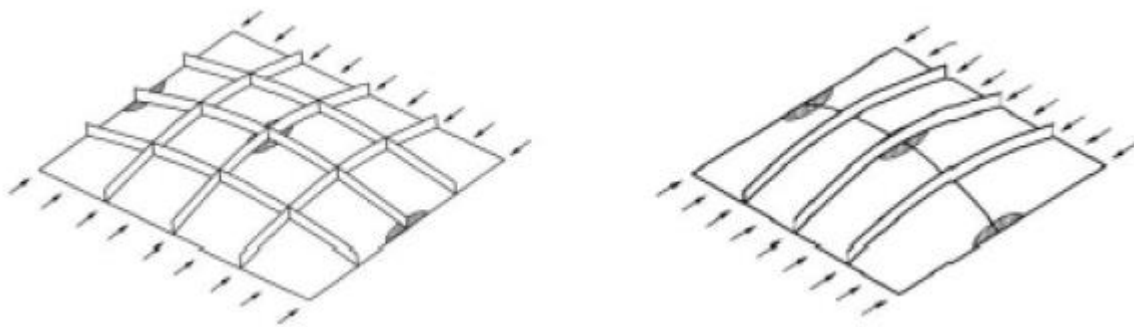
$$\sigma_{cr} = \sigma_y * \left( \frac{2}{\beta} - \frac{1}{\beta^2} \right)$$



## 2. 6 Μορφές αστοχίας ενισχυμένων ελασμάτων

### 2. 6. 1 Κατάρρευση του ενισχυμένου ελάσματος σαν ενιαία μονάδα υπό μονοαξονική θλιπτική φόρτιση

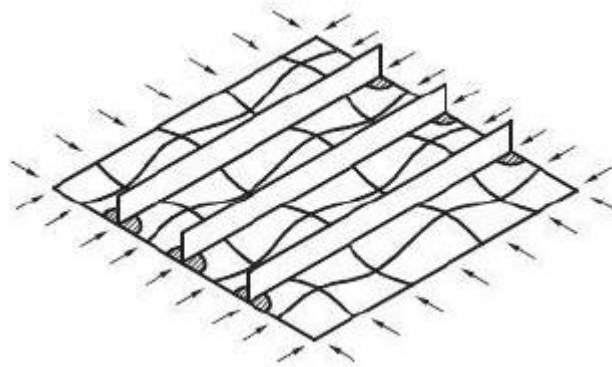
Αυτή μορφή αστοχίας αντιπροσωπεύει την περίπτωση όπου τα ενισχυτικά είναι σχετικώς ασθενή. Σε αυτή την περίπτωση το ενισχυτικό λυγίζει μαζί με το έλασμα σαν ενιαία μονάδα. Η συμπεριφορά του ενισχυμένου ελάσματος είναι αρχικά ελαστική. Το ενισχυμένο έλασμα μπορεί κανονικά να αντέξει επιπλέον φόρτιση πέραν του ορίου του ελαστικού λυγισμού. Η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται όταν σχηματιστούν περιοχές διαρροής του υλικού (γραμμοσκιασμένες περιοχές στα σχήματα) μέσα στο έλασμα και/ή κατά μήκος των ακμών [Paik et. al. , 2003]. Στο σχήμα 2. 17, η πρώτη διάταξη αντιπροσωπεύει την κατάρρευση δοκού- κολόνας, ενώ η δεύτερη διάταξη προσομοιάζει την κατάρρευση ενός ορθοτροπικού ελάσματος.



Σχήμα 2. 17 : Κατάρρευση ενισχυμένου ελάσματος ως ενιαία μονάδα υπό μονοαξονική θλίψη.

### 2. 6. 2 Διαξονική θλιπτική κατάρρευση

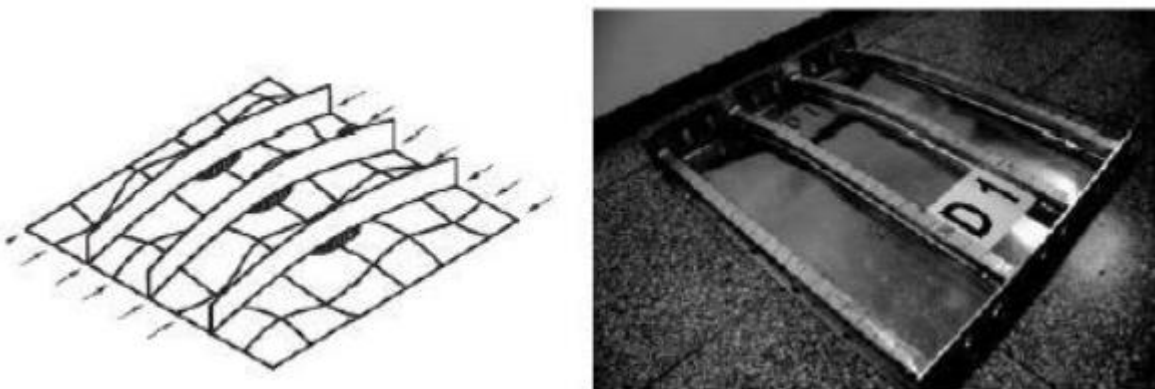
Αυτή η μορφή αστοχίας αντιπροσωπεύει την κατάρρευση που συμβαίνει όταν ενισχυμένο έλασμα καταρρέει από διαρροή που συμβαίνει κατά μήκος των σημείων τομής ενισχυτικών και ελάσματος, στα άκρα του ελάσματος, χωρίς όμως αστοχία των ενισχυτικών. Η εν λόγω μορφή κατάρρευσης είναι σημαντική σε κάποιες περιπτώσεις διαξονικής καταπόνησης και ή σε περιπτώσεις βραχέων (κοντών) και σθεναρών ελασμάτων [Paik et. al. 2003].



Σχήμα 2. 18 : Κατάρρευση ενισχυμένου ελάσματος υπό διαξονική θλίψη.

### 2. 6. 3 Κατάρρευση ως δοκού-κολόνας

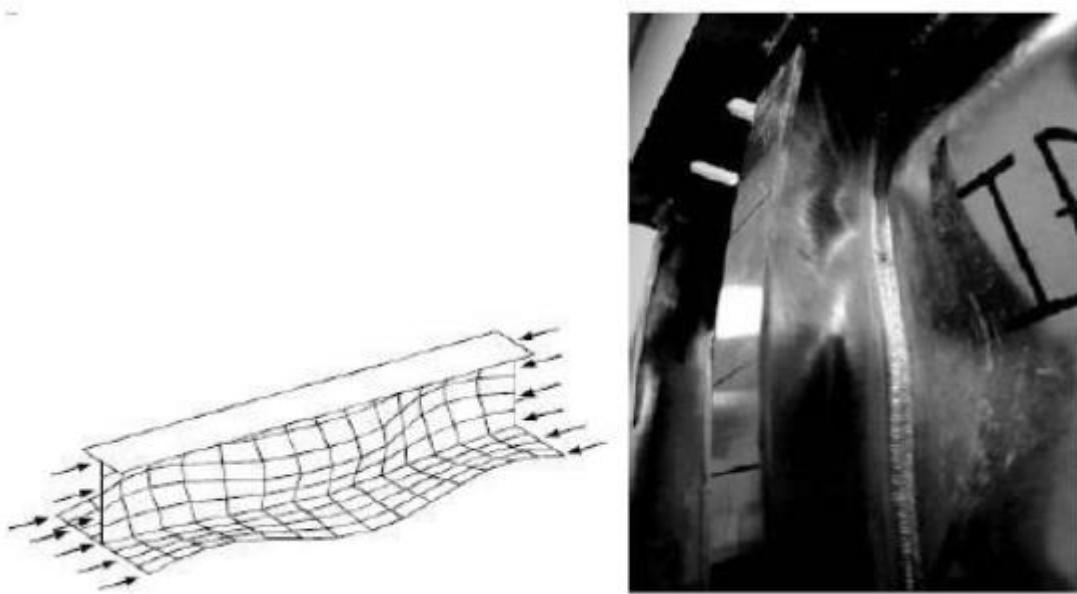
Αυτή η μορφή δείχνει την κατάρρευση κατά την οποία η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται με την ταυτόχρονη διαρροή του ελάσματος και του ενισχυτικού στο μέσο. Συμβαίνει στη περίπτωση κατά την οποία το ενισχυτικό έχει ενδιάμεσες γεωμετρικές ιδιότητες, δεν είναι δηλαδή ούτε ασθενές ούτε πολύ ισχυρό [Paik et.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



Σχήμα 2. 19 : Κατάρρευση δοκού-κολόνας

#### 2. 6. 4 Τοπικός λογισμός κορμού ενισχυτικού

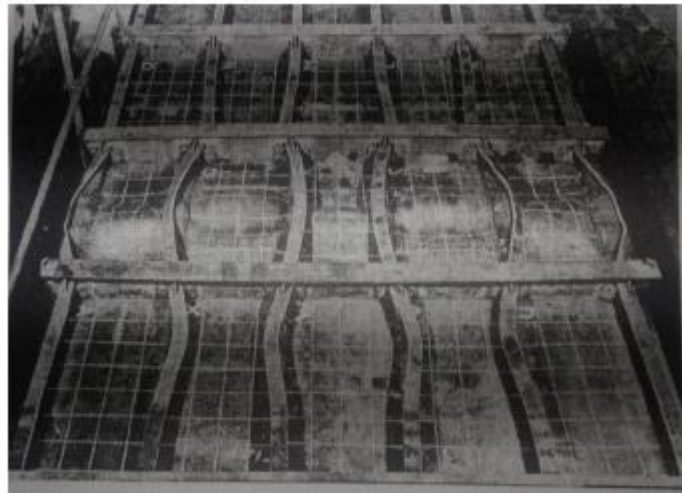
Αυτή η μορφή αστοχίας λαμβάνει χώρα όταν ο λόγος ύψους κορμού προς το πάχος του είναι μεγάλος, και/ή όταν το πέλμα του ενισχυτικού δεν κατορθώνει να παραμείνει ευθύ με αποτέλεσμα ο κορμός του ενισχυτικού να λυγίζει ή να συστρέφεται πλευρικά [Paik et. al. , 2003].



Σχήμα 2. 20 : Τοπική κατάρρευση κορμού του ενισχυτικού.

### 2. 6. 5 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός ενισχυτικού

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



Σχήμα 2. 21 : Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

### 2. 6. 6 Ολική διαρροή

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

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

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο :Παρουσίαση μεθοδολογίας Smith.

### 3. 1 Γενικά

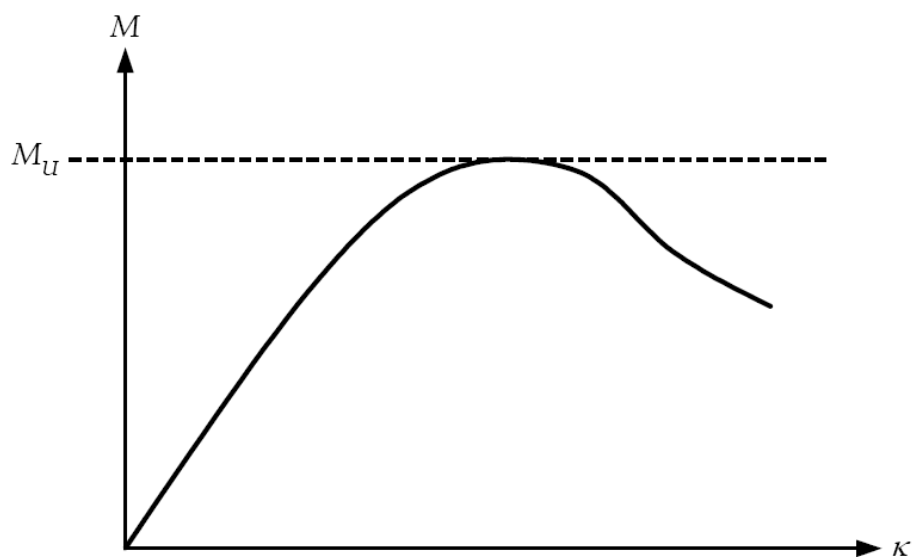
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί η επαναληπτική μέθοδος που προτείνεται από το IACS στους CSR. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της τελικής ροπής κάμψης η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται για υπολογισμούς αντοχής. Η επαυξητική μέθοδος χρησιμοποιεί μια μονοτονικά αύξουσα καμπυλότητα που επιβάλλεται στο εξεταζόμενο πλοίο η οποία μετασχηματίζεται σε αντίστοιχες επιβεβλημένες παραμορφώσεις για το κάθε δομικό στοιχείο του. Τα δομικά στοιχεία που συντελούν τη μέση τομή χωρίζονται σε τρία είδη (ενισχυμένα ελάσματα, γωνίες και πλάκες), το καθένα από το οποίο αντιστοιχίζεται σε μία καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων. Οι καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων προκύπτουν από εμπειρικές σχέσεις σύμφωνα με τους κανονισμούς του CSR, λαμβάνοντας υπ' όψει του διάφορους τρόπους αστοχίας του κάθε στοιχείου.

Από αυτές τις καμπύλες η επιβεβλημένη παραμόρφωση μετασχηματίζεται στην αντίστοιχη τάση. Αφού καθοριστούν όλες οι τάσεις των στοιχείων της μέσης τομής υπολογίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα με ισορροπία δυνάμεων και η αντίστοιχη ροπή κάμψης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για την επόμενη προσαύξηση της καμπυλότητας.

### 3.2 Επαυξητική επαναληπτική διαδικασία που προτείνεται από τον IACS.

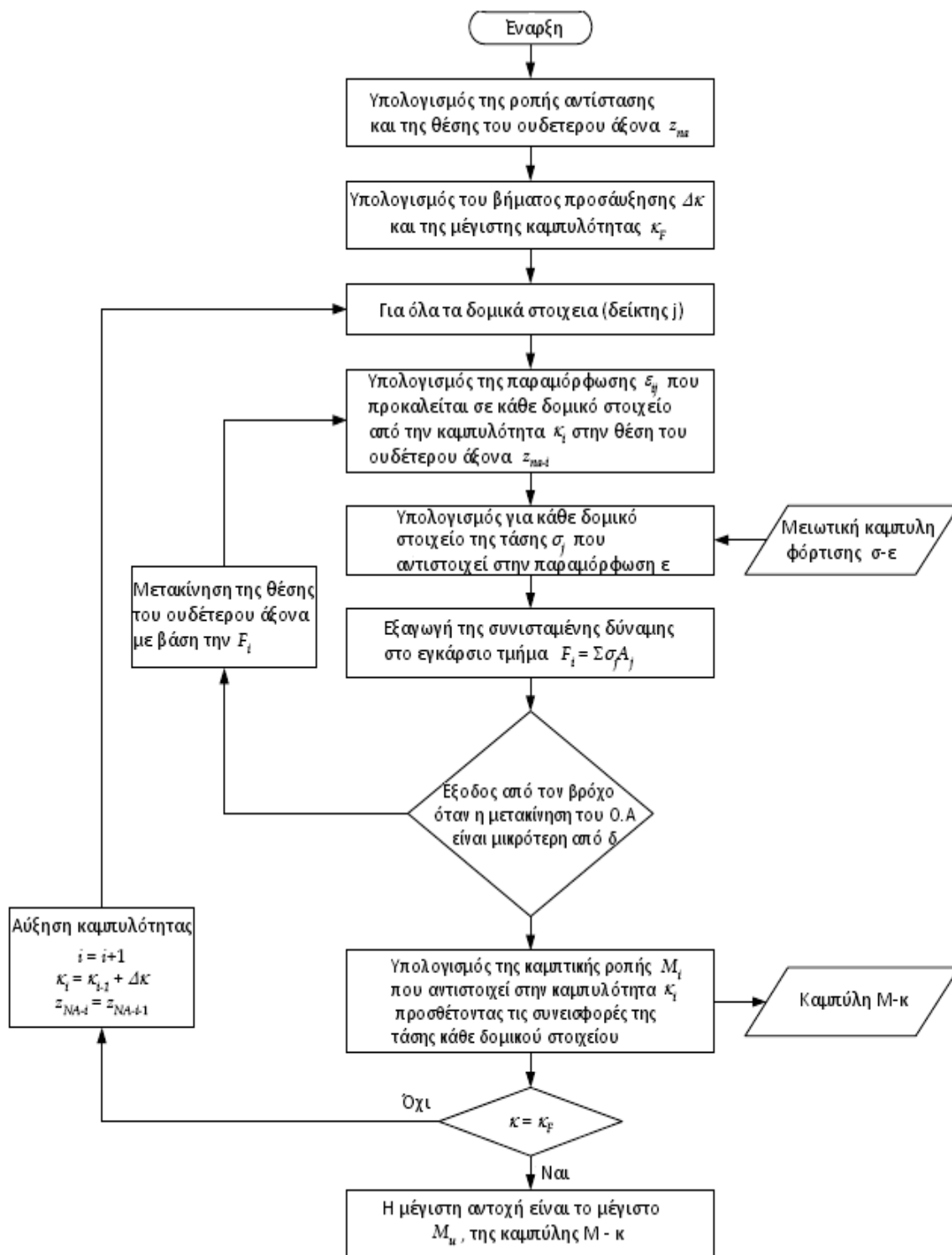
Η βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε ο κώδικας που θα παρουσιασθεί σε επόμενη παράγραφο του παρόντος κεφαλαίου είναι η επαναληπτική προσαυξητική διαδικασία που περιέχεται στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (IACS, CSR 2022). Γι' αυτό το λόγο κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστούν αναλυτικά τα βασικά βήματα της διαδικασίας αυτής.

Στην διαδικασία αυτή η μέγιστη αντοχή  $M_u$  σε διαμήκη κάμψη είναι το μέγιστο της καμπύλης  $M$ - $\kappa$  που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.1.1.



Σχήμα 3.2.1 Καμπύλη ροπής-καμπυλότητας ( $M$ - $\kappa$ )

Η καμπύλη  $M$ - $\kappa$  εξάγεται μέσω της προσαυξητικής επαναληπτικής διαδικασίας. Τα αλγοριθμικά βήματα αυτής της διαδικασίας παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.1.2.



Σχήμα 3. 2. 2 : Αλγόριθμος επαυξητικής διαδικασίας κατά IACS.

Η καμπτική ροπή  $M_i$  που ασκείται στο κατασκευαστικό σώμα του πλοίου λόγω της επιβληθείσας καμπυλότητας υπολογίζεται σε κάθε βήμα της προσαυξητικής διαδικασίας.

Αυτή η επιβληθείσα καμπυλότητα αντιστοιχεί σε μια σχετική γωνία περιστροφής δύο διατομών του κατασκευαστικού σώματος του πλοίου ως προς τον ενεργό οριζόντιο ουδέτερο άξονα, οι οποίες προκαλεί μια αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$  σε κάθε δομικό στοιχείο. Στην κατάσταση sagging, τα δομικά στοιχεία κάτω από τον ουδέτερο άξονα επιμηκύνονται (εφελκύνονται) ενώ τα δομικά στοιχεία πάνω από τον ουδέτερο άξονα βραχύνονται (θλίβονται).

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

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

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

Η παραπάνω προσαυξητική επαναληπτική διαδικασία διατυπώνεται αλγοριθμικά ως εξής:

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

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

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



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

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

$$F_i = \sum (A_j \sigma_j) = 0$$

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

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

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

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

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

$$k_f = \pm 0.003 \frac{M_y}{EI_y}$$

όπου:

$M_y$  : κάθετη καμπτική ροπή στο κατάστρωμα ή στο πυθμένα.

$E$ : μέτρο ελαστικότητας,  $2.06 \times 10^5$  N/mm<sup>2</sup>

$I_y$ -n50: ροπή αδράνειας του κατασκευαστικού σώματος του πλοίου.

ZB-n50, ZD-n50 = Ροπές αντίστασης πυθμένα/καταστρώματος αντίστοιχα.

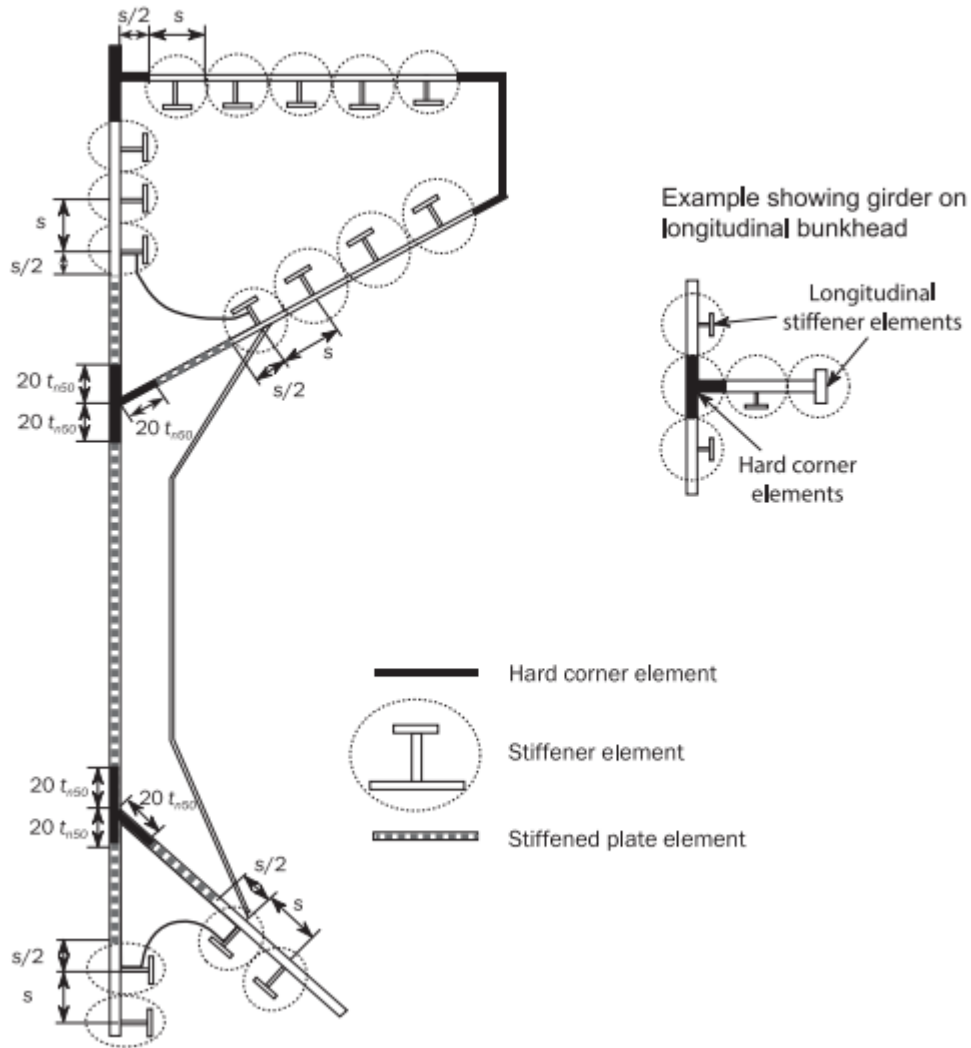


### 3.3 Καμπύλες Τάσεων-Παραμορφώσεων δομικών στοιχείων Μέσης Τομής

Ένα σημαντικό τμήμα της προσαυξητικής επαναληπτικής μεθόδου που θα εφαρμόσουμε για τον υπολογισμό της μέγιστης διαμήκου αντοχής αποτελούν οι καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε την μεθοδολογία για την εξαγωγή των συγκεκριμένων καμπυλών όπως αυτή προτείνεται από τον IACS στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (CSR 2022).

Πριν παρουσιάσουμε τις εξισώσεις που περιγράφουν τις καμπύλες βράχυνσης διαμήκων στοιχείων, θα πρέπει να διευκρινίσουμε για ποια δομικά στοιχεία θα εξάγουμε τις συγκεκριμένες καμπύλες. Ο διαμερισμός της μέσης τομής της γάστρας θα γίνει σύμφωνα με την μεθοδολογία που περιγράφεται στους Κοινούς Δομικούς Κανονισμούς (part 1, Ch. 5, Appendix 2). Η διατομή της μέσης τομής θα διαιρεθεί σε άκαμπτα γωνιακά στοιχεία, ενισχυμένα ελάσματα και σε ενισχυμένες πλάκες. Το καθένα από αυτά τα στοιχεία αστοχεί με διαφορετικό τρόπο, επομένως οι καμπύλες βράχυνσης υπολογίζονται για “κρίσιμες” τάσεις οι οποίες διαφέρουν ανάλογα το είδος του στοιχείου και την αντίστοιχη γεωμετρία του.

Ένα παράδειγμα διαμέρισης μέσης τομής σε δομικά στοιχεία παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 3. 3. 1 : Έκταση κατά μήκος ενισχυμένων ελασμάτων / άκαμπτων γωνιών.

- **Άκαμπτα γωνιακά στοιχεία**

Τα άκαμπτα γωνιακά στοιχεία είναι τα πιο ισχυρά στοιχεία που συνθέτουν την εγκάρσια τομή τα οποία καταρρέουν με ελαστοπλαστική αστοχία. Αποτελούνται από δύο ελάσματα που δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η έκταση του γωνιακού στοιχείου από το σημείο τομής των δύο ελασμάτων λαμβάνεται ίση με  $20t_r$  για εγκάρσιως ενισχυμένο έλασμα και  $0.5s$  για διαμήκως ενισχυμένο έλασμα.

$t_{n50}$  : Καθαρό πάχος, σε mm.

$s$  : Απόσταση μεταξύ διαδοχικών ενισχυτικών, σε m.

- **Ενισχυτικό με συνεργαζόμενο έλασμα**

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

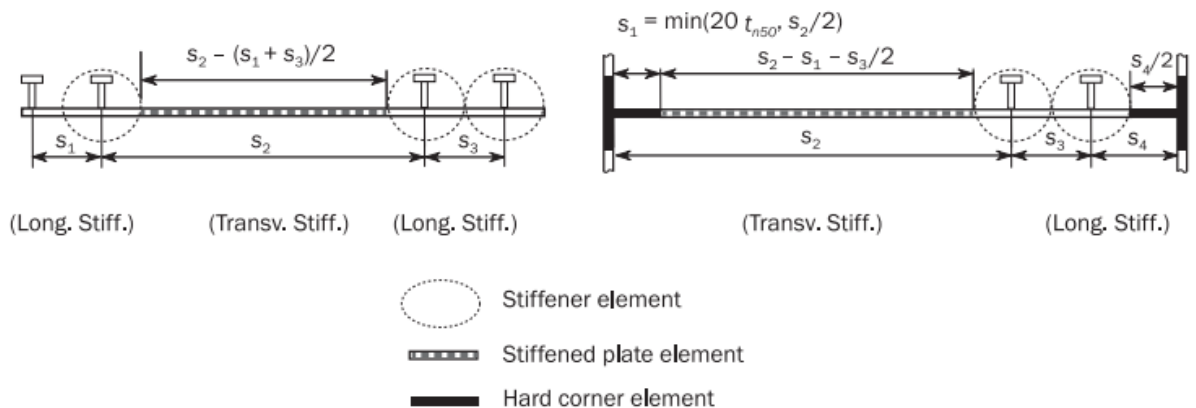
Το πλάτος του συνεργαζόμενου ελάσματος είναι:

- Ίσο με τη μέση απόσταση των ενισχυτικών του ελάσματος όταν τα ελάσματα και στις δύο πλευρές του ενισχυτικού είναι διαμήκως ενισχυμένα, ή

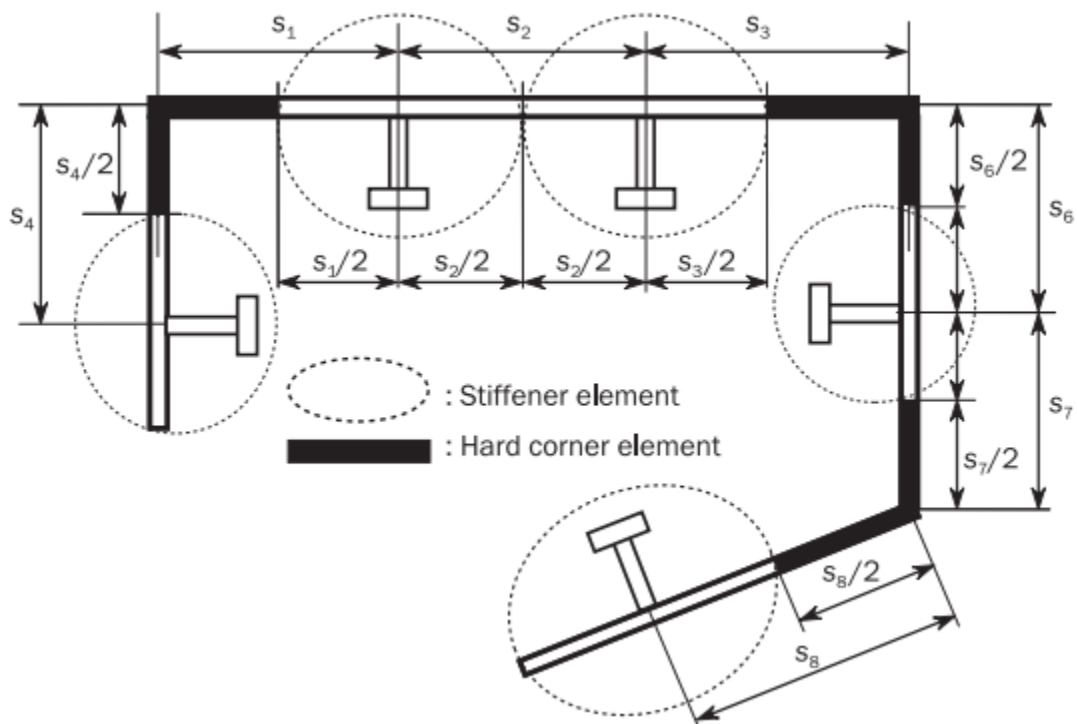
- Ίσο με το πλάτος του διαμήκως ενισχυμένου ελάσματος όταν το έλασμα από τη μία μεριά του ενισχυτικού είναι διαμήκως ενισχυμένο και από την άλλη μεριά εγκαρσίως (Βλ. Σχήμα 3. 5).

- **Ενισχυμένη πλάκα**

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



Σχήμα 3. 3. 2 : Έκταση κατά μήκος ενισχυμένων ελασμάτων / άκαμπτων γωνιών.



Σχήμα 3. 3. 3 : Έκταση κατά μήκος ενισχυμένων ελασμάτων / άκαμπτων γωνιών.

Οι τρόποι αστοχίας των παραπάνω δομικών στοιχείων είναι οι εξής:

Ακαμπτη Γωνία (Hard Corner)	Ελαστο-πλαστική Κατάρρευση
Ενισχυμένο Έλασμα (Stiffened Element)	Ελαστο-πλαστική Κατάρρευση Λυγισμός Δοκού-Κολώνας Στρεπτικός Λυγισμός Λυγισμός Κορμού ενισχυτικού με ή χωρίς φλάντζα
Ενισχυμένη Πλάκα (Plate Element)	Λυγισμός Πλάκας

### 3. 3. 1 Ελαστοπλαστική κατάρρευση δομικών στοιχείων

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

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

όπου:

$R_{eHA}$  : Ισοδύναμη ελάχιστη τάση διαρροής του στοιχείου σε N/mm<sup>3</sup>, η οποία προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$R_{eHA} = \frac{R_{eHp}A_{p-n50} + R_{eHs}A_{s-n50}}{A_{p-n50} + A_{s-n50}} \left( \frac{N}{mm^2} \right)$$

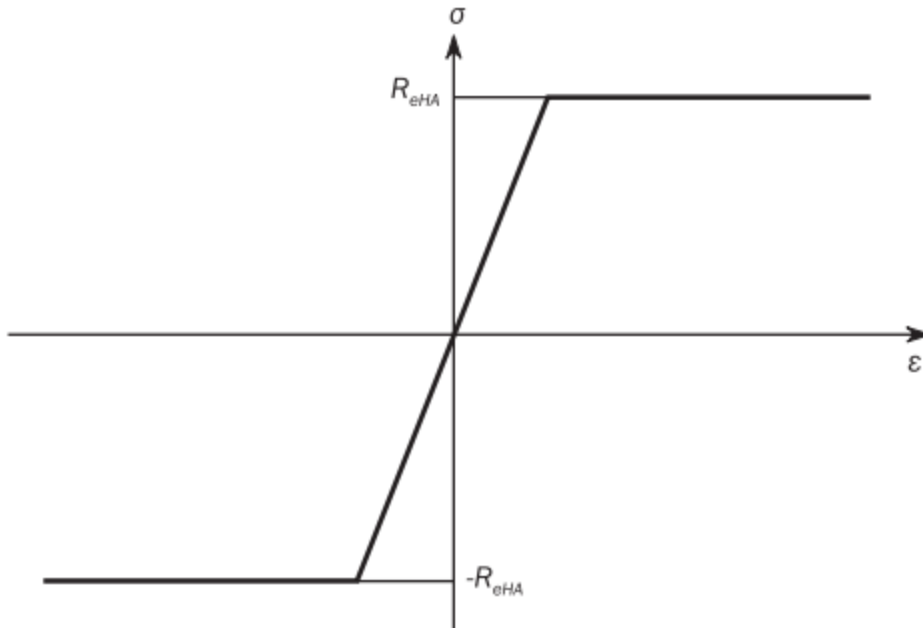
$$\Phi: \text{Συνάρτηση Συσχέτισης} : \Phi = \begin{cases} -1, & \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$$\varepsilon : \text{Σχετική Παραμόρφωση ίση με} : \varepsilon = \frac{\varepsilon_E}{\varepsilon_Y}$$

όπου:

$\varepsilon_E$  : Παραμόρφωση του στοιχείου

$$\varepsilon_Y : \text{Παραμόρφωση διαρροής στο στοιχεία ίση με} : \varepsilon_Y = \frac{R_{eHA}}{E}$$



Σχήμα 3.3.1 : Καμπύλη φόρτισης σε για ελαστοπλαστική κατάρρευση



### 3.3.2 Λυγισμός δοκού κολώνας (Beam-Column Buckling)

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

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

όπου :

$$\Phi: \text{Συνάρτηση συσχέτισης} \quad \Phi = \begin{cases} -1, & \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$\sigma_{C1}$  : Κρίσιμη τάση σε N/mm, ίση με :

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

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

$R_{eHB}$  : Ισοδύναμη ελάχιστη τάση διαρροής του στοιχείου σε Νίππ προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο:

$$R_{eHB} = \frac{R_{eHp} A_{pEI-n50} l_{pE} + R_{eHs} A_{S-n50} l_{sE}}{A_{p-n50} l_{pE} + A_{S-n50} l_{sE}}$$

$A_p, EI$  : Ενεργή επιφάνεια σε  $\text{cm}^2$ , ίση με :

$$A_{pEI-n50} = 10 b_{E1} t_{n50}$$

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

$l_{SE}$  : Απόσταση σε mm μετρούμενη από τον ουδέτερο άξονα του ενισχυτικού με το συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους δε, στην κορυφή του ενισχυτικού

ε: Σχετική παραμόρφωση όπως παραπάνω [3. 3. 3]

$\sigma_{E1}$  : Κρίσιμη τάση λυγισμού κατά Euler σε N/mm<sup>2</sup>, ίση με :

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

$I_E$  : Καθαρή ροπή αδράνειας ενισχυτικών με συνεργαζόμενο έλασμα πλάτους

δει σε cm<sup>4</sup>

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

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

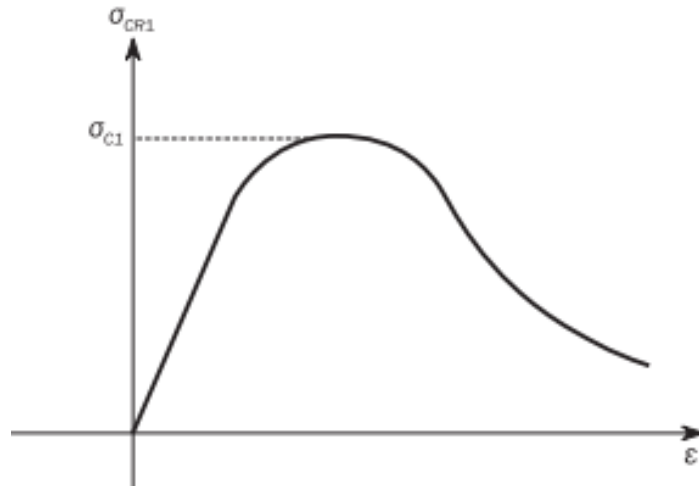
$\beta_E$  : Παράγοντας Λυγηρότητας ίσος με:  $\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_{n50}} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$

$A_{pE}$  : Ενεργή επιφάνεια σε cm του συνεργαζόμενου ελάσματος πλάτους δε, ίση με :

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

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

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



Σχήμα 3. 3. 2. : Καμπύλη φόρτισης σε για λυγισμό δοκού κολώνας

### 3.3.3 Στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (Torsional Buckling)

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη  $\sigma_{CR2}$  του στρεπτοκαμπτικού λυγισμού των κατασκευαστικών στοιχείων που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί (Βλέπε σχήμα 3. 11) :

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

όπου :

$$\Phi: \text{Συνάρτηση συσχέτισης} \quad \Phi = \begin{cases} -1, & \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$\sigma_{C2}$  : Κρίσιμη τάση σε N/mm<sup>2</sup>, ίση με:

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

$\sigma_{E2}$  : Κρίσιμη τάση στρεπτοκαμπτικού λυγισμού κατά Euler σε N/mm<sup>2</sup>, ίση με : $\sigma_{ET}$

$$\sigma_{ET} = \frac{E}{I_p} \left[ \left( \frac{m_{tor} \pi}{l_{tor}} \right)^2 I_w \cdot 10^2 + \frac{1}{2(1+\nu)} I_t + \left( \frac{l_{tor}}{m_{tor} \pi} \right)^2 \varepsilon \cdot 10^{-4} \right]$$

$I_p$  : Καθαρή πολική ροπή αδρανείας του ενισχυτικού σε cm<sup>4</sup>, που σχετίζεται με το σημείο C (Βλέπε σχήμα 3. 10)

$I_t$  : Καθαρή ροπή αδρανείας St. Venant's του ενισχυτικού σε cm<sup>4</sup> (Βλέπε πίνακα 3. 3)

$I_w$  : Καθαρή ροπή αδρανείας τομέως του ενισχυτικού σε cm<sup>4</sup>, που σχετίζεται με το σημείο C (Βλέπε πίνακα 3. 3).

$\nu$  : Μέτρο Poisson.

$l_{tor}$  : Μήκος μακρύτερης πλευράς ελάσματος, σε m.

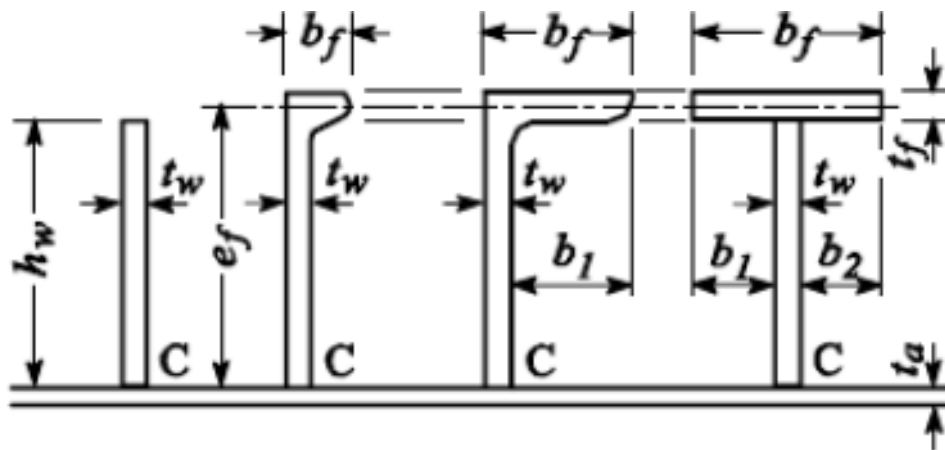
$n_{tor}$  : Αριθμός ημικυμάτων στο μήκος  $l_{tor}$ , στρογγυλοποιημένος στον ακέραιο που ελαχιστοποιεί την προκύπτουσα τάση στρεπτικού λυγισμού.

$\varepsilon$  : Βαθμός στερέωσης, σε  $mm^2$ , ίσος με :

$$\varepsilon = \left( \frac{3b}{tp^3} + \frac{2hw}{tw^3} \right)^{-1} \text{ for bulb, angle, L2, I3 and T profiles}$$

$$\varepsilon = \frac{tp^3}{3b} \text{ for flat bars}$$

	Flat bars <sup>(1)</sup>	Bulb, angle, L2 and T profiles
$I_p$	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \times 10^4}$	$\left( \frac{A_w (e_f - 0.5t_f)^2}{3} + A_f e_f^2 \right) 10^{-4}$
$I_T$	$\frac{h_w t_w^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w} \right)$	$\frac{(e_f - 0.5t_f) t_w^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_w}{e_f - 0.5t_f} \right) + \frac{b_f t_f^3}{3 \cdot 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_f}{b_f} \right)$
$I_{\omega}$	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \times 10^6}$	for bulb, angle and L2 profiles <sup>(2)</sup> : $\frac{A_f^3 + A_w^3}{36 \cdot 10^6} + \frac{e_f^2}{10^6} \left( \frac{A_f b_f^2 + A_w t_w^2}{3} - \frac{(A_f(b_f - 2d_f) + A_w t_w)^2}{4(A_f + A_w)} - A_f d_f (b_f - d_f) \right)$ for T profiles $\frac{b_f^3 t_f e_f^2}{12 \times 10^6}$
<b>(1)</b>	$t_w$ is the net web thickness, in mm. $t_{w,red}$ as defined in [2.3.2] is not to be used in this table.	
<b>(2)</b>	$d_f$ is to be taken as 0 for bulb and angle profiles.	
[RCN1 to 01 JAN 2021]		



Σχήμα 3. 3. 3 : Διαστάσεις των ενισχυτικών

### 3.3.4 Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού με φλάντζα (Web Local Buckling for Flanged Elements)

Η εξίσωση που συνθέτει την καμπύλη  $\sigma_{CR3}$  του τοπικού λογισμού των κατασκευαστικών στοιχείων με φλάντζα που αποτελούν την εγκάρσια τομή του πλοίου, προκύπτει από τον τύπο που ακολουθεί :

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

$$\Phi: \text{Συνάρτηση συσχέτισης} \quad \Phi = \begin{cases} -1, & \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$b_E$  : Ενεργό πλάτος σε m του συνεργαζόμενου ελάσματος

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

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

$\varepsilon$  : Σχετική παραμόρφωση.

### 3.3.5 Τοπικός λυγισμός κορμού ενισχυτικού σκέτης λάμας (Web Local Buckling for Flat-Bar Elements)

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

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

όπου :

$$\Phi = \begin{cases} -1, & \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$\Phi$ : Συνάρτηση συσχέτισης

$\sigma_{CP}$ : Κρίσιμη τάση λυγισμού του συνεργαζόμενου ελάσματος σε N/mm, όπως ορίσθηκε παραπάνω.

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

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

$\sigma_{E4}$ : Κρίσιμη τάση τοπικού λυγισμού κατά Euler σε N/mm<sup>2</sup>, ίση με :

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

$\varepsilon$ : Σχετική παραμόρφωση.



### 3. 3. 6 Λυγισμός μη-ενισχυμένων ελασμάτων (Plate Buckling)

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

$$\sigma_{CR5} = \min \left\{ \frac{R_{eHp} \Phi}{\Phi R_{eHp} \left[ \frac{s}{l} \left( \frac{2.25}{\beta_E} - \frac{1.25}{\beta_E^2} \right) + 0.1 \left( 1 - \frac{s}{l} \right) \left( 1 + \frac{1}{\beta_E^2} \right)^2 \right]} \right\} \quad (59)$$

όπου :

$$\Phi: \text{Συνάρτηση συσχέτισης} \quad \Phi = \begin{cases} -1, & \varepsilon < -1 \\ \varepsilon, & -1 \leq \varepsilon \leq 1 \\ 1, & \varepsilon > 1 \end{cases}$$

$$\beta_E = 10^3 \frac{s}{t_{n50}} \sqrt{\frac{\varepsilon R_{eHp}}{E}}$$

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

l : Μακρύτερη πλευρά του ελάσματος σε m.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> :Πρόγραμμα υπολογισμού Μέγιστης Αντοχής.

### 4.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόγραμμα υπολογισμού Μέγιστης Αντοχής σε μονοτονική φόρτιση επιβαλλόμενης καμπυλότητας. Το πρόγραμμα αποτελείται από έναν κύριο κώδικα και τρεις (3) συναρτήσεις υπολογισμού κμακυλών σ-ε. Το κύριο πρόγραμμα συμπεριλαμβάνει την ανάγνωση του υπολογιστικού φύλλου με όλα τα στοιχεία της μέσης τομής και την διεξαγωγή της επαναληπτικής μεθόδου. Οι συναρτήσεις καλούνται από το κύριο πρόγραμμα και επιστρέφουν τις ελάχιστες καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για καθένα από τα τρία είδη στοιχείων που αποτελούν την μέση τομή του εξεταζόμενου πλοίου.

### 4.2 Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεων (σ-ε)

#### 4.2.1 Συναρτήσεις Υπολογισμού καμπυλών σ-ε

Οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούμε ονομάζονται “SE\_CURVES”, “HC\_CURVES”, “P\_CURVES” για το καθένα από τα αντίστοιχα είδη στοιχείων αντοχής (Stiffened Element-SE, Hard Corner – HC, Plate Element –P ). Δέχονται ως δεδομένα εισαγωγής τις διαστάσεις των δομικών στοιχείων (από το κύριο πρόγραμμα και κατ επέκταση από το υπολογιστικό φύλλο) και επιστρέφουν έναν πίνακα  $2 \times n$  ο οποίος στη πρώτη σειρά περιλαμβάνει τις ελάχιστες τάσεις από τους διάφορους τρόπους αστοχίας και στη δεύτερη σειρά τις τιμές της παραμόρφωσης για την οποία υπολογίζεται η τάση.

Επιλέξαμε να έχουμε σαν δεδομένα επιστροφής τις ελάχιστες μόνο τάσεις διότι οι υπολογισμοί αντοχής από το κύριο πρόγραμμα χρειάζονται μόνο την ελάχιστη καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για κάθε στοιχείο. Οι συναρτήσεις υπολογίζουν τις τάσεις για όλες τις μορφές αστοχίας αλλά επιλέγουν ως τάσεις επιστροφής (output stresses) μόνο τις ελάχιστες κατ’ απόλυτη τιμή.

Όλες οι συναρτήσεις έχουν τη δυνατότητα να παρουσιάσουν γραφικές παραστάσεις των καμπυλών που υπολογίζουν,η οποία χρησιμεύει στη περίπτωση που θέλουμε να ελέγξουμε τα αποτελέσματα των υπολογισμών για κάποιο ενισχυτικό.

### Γενικά δεχόμαστε τις παρακάτω παραδοχές:

- 1) Θλιπτικά φορτία θετικά (+), εφελκυστικά φορτία αρνητικά (-).
- 2) Σύστημα συντεταγμένων : Σωματοπαγές σύστημα πλοίου (x-άξονας κατά το μήκος, y- κατά το πλάτος, z- καθ' ύψος).

- **SE\_CURVES**

Δεδομένα εισαγωγής : πλάτος/πάχος κορμού, πλάτος/πάχος φλάντζας, πλάτος/πάχος ελάσματος, τάση διαρροής, κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους, μήκος (παράλληλο στον x-άξονα), απόσταση κέντρου φλάντζας-κέντρου κορμού (για  $df=0$  έχουμε flat bar, για  $df=l\_flange/2$  έχουμε ενισχυτικό-γωνιά).

Δεδομένα εξαγωγής : Πίνακας 2xn. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει την ελάχιστη τάση που προκύπτει από : λυγισμό στήλης-δοκού, στρεπτικό λυγισμό, λυγισμό ενισχυτικού με φλάντζα ή λυγισμό ενισχυτικού τύπου λάμας (γίνεται αυτόματη αναγνώριση εάν το μήκος της φλάντζας είναι 0). Σε εφελκυστικά φορτία η τάση υπολογίζεται από την τάση ελαστοπλαστική αστοχίας. Η δεύτερη γραμμή περιλαμβάνει τις αντίστοιχες παραμορφώσεις.

- **HC\_CURVES**

Δεδομένα εισαγωγής : πλάτος/πάχος πρώτου ελάσματος, πλάτος/πάχος δεύτερου ελάσματος, τάση διαρροής πρώτου/δεύτερου ελάσματος, κατακόρυφη θέση του κέντρου βάρους.

Δεδομένα εξαγωγής : Πίνακας 2xn. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει την τάση που προκύπτει από ελαστοπλαστική διαρροή (τα hard corners αστοχούν μόνο ελαστοπλαστικά). Η δεύτερη γραμμή περιλαμβάνει τις αντίστοιχες παραμορφώσεις.

- **P\_CURVES**

Δεδομένα εισαγωγής : πλάτος/πάχος ελάσματος, μήκος ελάσματος (παράλληλο στον x-άξονα), τάση διαρροής)

Δεδομένα εξαγωγής : Πίνακας 2xn. Η πρώτη γραμμή περιλαμβάνει την τάση που προκύπτει από λυγισμό πλάκας σε θλιπτικά φορτία και από ελαστοπλαστική αστοχία σε εφελκυσμό. Η δεύτερη γραμμή περιλαμβάνει τις αντίστοιχες παραμορφώσεις.

#### 4. 2. 2 Αποτελέσματα εκτέλεσης των συναρτήσεων για διάφορα δομικά στοιχεία.

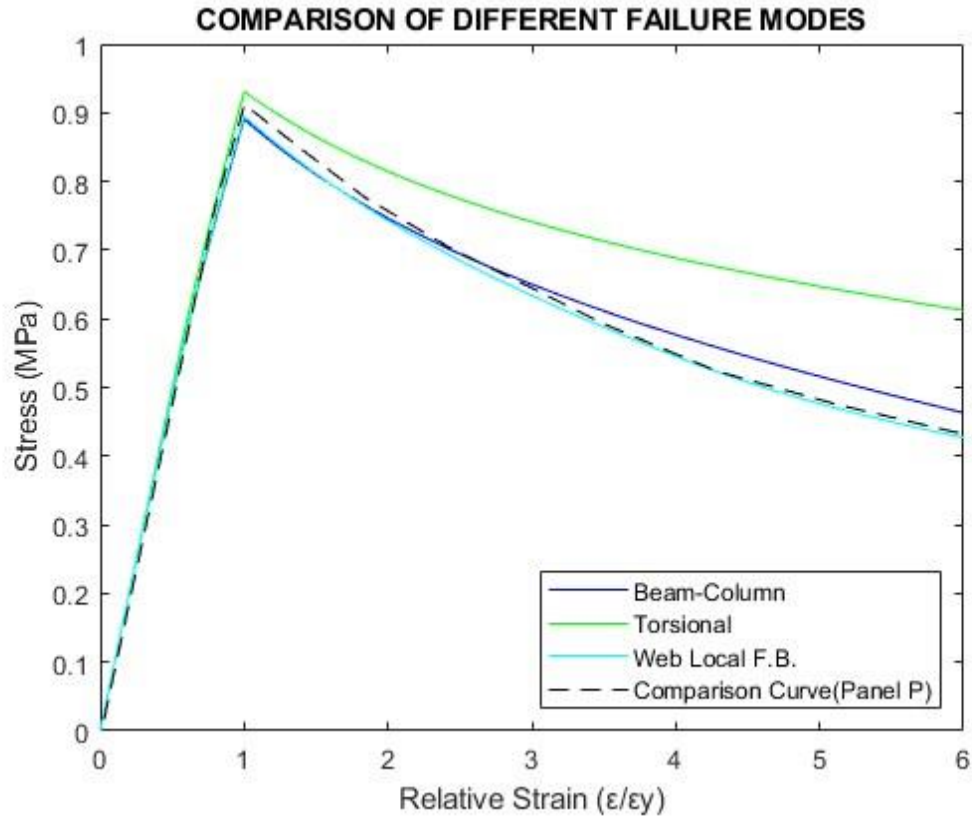
Παρακάτω συγκρίνουμε τις καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  των συναρτήσεων με τις αντίστοιχες από Καναδική αμυντική έρευνα για πολεμικά πλοία. Συγκεκριμένα γίνεται σύγκριση των stiffened elements "P", "S", "H", "J" με τις αντίστοιχες καμπύλες του IACS από την έρευνα.

Προσοχή : Η συνάρτηση SE\_CURVES που επαληθεύεται παρακάτω δημιουργεί τρεις (3) καμπύλες για κάθε είδος ενισχυτικού. Η τελική καμπύλη που επιστρέφει ως output στο κύριο πρόγραμμα μετέπειτα είναι η ελάχιστη εκ των τριών.

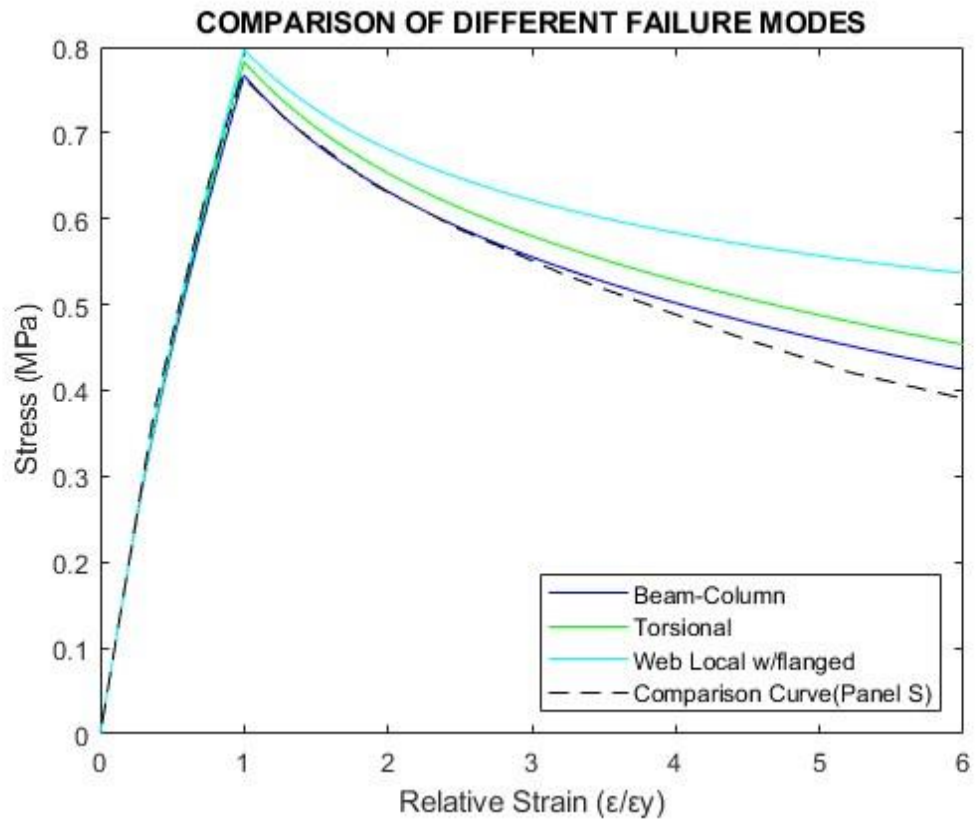
Name	a (mm)	b (mm)	t (mm)	Beam section d×w×t <sub>w</sub> ×t <sub>f</sub> (mm)	$\sigma_{yp}$ (MPa)	$\sigma_{yb}$ (MPa)	$\beta$	$\lambda$	$\gamma$
A	1000	350	9.0	200×140×6.4×8.8 T	350	350	1.589	0.159	0.438
B	2000	350	9.0	200×140×6.4×8.8 T	350	350	1.587	0.318	0.438
C	2000	550	9.0	128×102×6.1×8.4 T	350	350	2.495	0.538	0.243
D	1000	450	9.0	128×102×6.1×8.4 T	350	350	2.041	0.264	0.281
E	2000	550	5.0	76×25×4.4×6.4 T	350	310	4.491	1.038	0.146
F	1000	550	5.0	76.2×25.4×4.4×6.4 T	350	310	4.491	0.519	0.146
G	2000	500	7.0	127×68×4.0×5.2 T	350	350	2.916	0.587	0.194
H	1000	450	9.0	127×68×4.0×5.2 T	350	350	2.041	0.317	0.172
J	457.2	202.7	2.0	38.1×14×1.78×3.3 T	245	245	3.487	0.373	0.211
K	5100	925	23.5	847×180×15×25 A	235.2	313.6	1.317	0.185	0.436
L	5100	925	23.5	549×125×11.5×22 A	235.2	235.2	1.317	0.289	0.288
M	5100	1000	25	830×200×15×33 T	313.6	313.6	1.546	0.198	0.426
N	5220	880	24.5	390×27 FB	392	392	1.411	0.612	0.349
O	860	880	25.5	395×25.5 FB	350	350	1.409	0.097	0.310
P	5100	1000	25	480×32 FB	313.6	313.6	1.546	0.429	0.381
Q	830	830	20	300×90×13×17 A	313.6	313.6	1.604	0.106	0.239
R	830	830	20.5	575×150×12×25 T	313.6	313.6	1.565	0.047	0.378
S	3270	880	14	300×90×13×17 A	313.6	313.6	2.429	0.365	0.306
T	5220	880	18	333×100×9×16 T	352.8	352.8	2.004	0.587	0.225
U	830	820	14	400×150×11×14 T	313.6	352.8	2.263	0.069	0.362

Σχήμα 4. 2. 2. 1 : Διαστάσεις ενισχυτικών της έρευνας

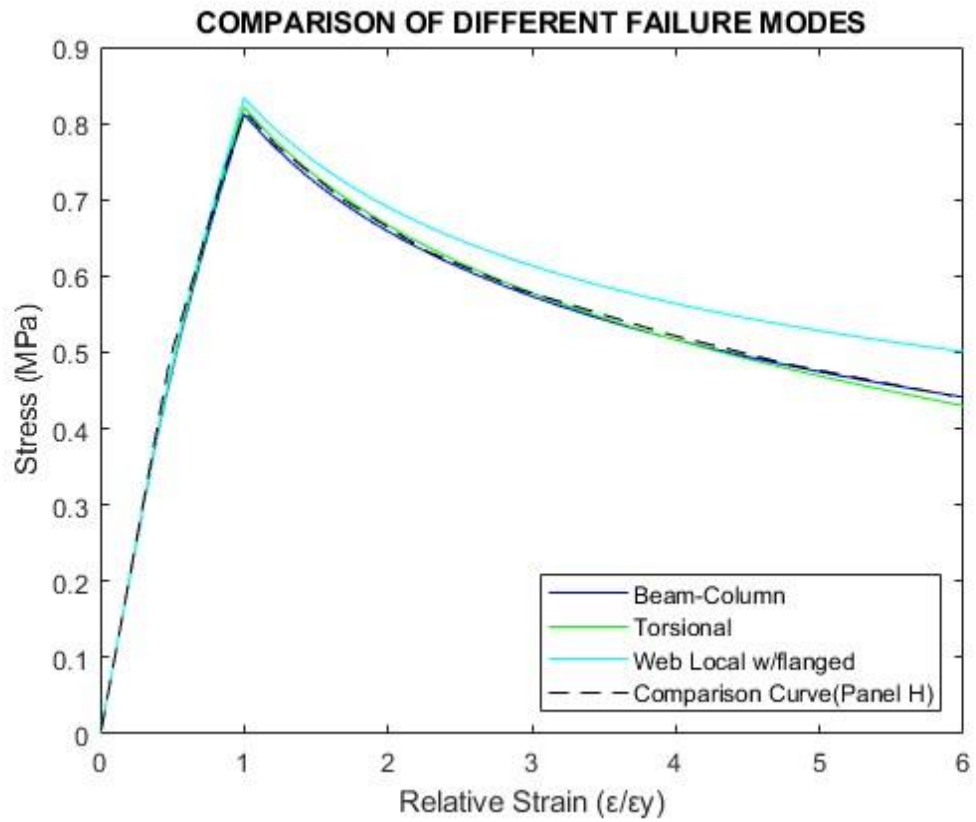
Τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται παρακάτω. (γ-αξονας : Αναπτυσσόμενη τάση  $\sigma/\sigma_{yield}$ , x-αξονας: Παραμόρφωση  $\epsilon/\epsilon_{yield}$ ). Τα αποτελέσματα των συναρτήσεων προσεγγίζουν αρκετά καλά τα αποτελέσματα της μεθόδου IACS της έρευνας.



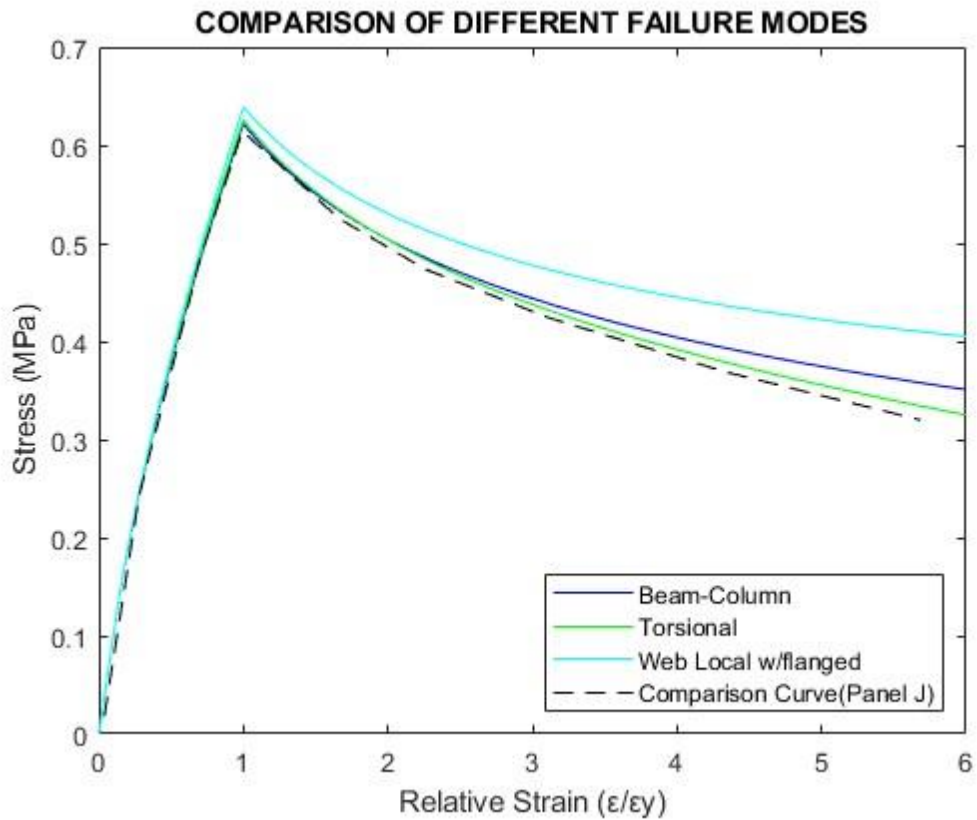
Σχήμα 4. 2. 2. 2 : Αποτελέσματα για Stiffened Element "P" (Flat Bar). Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η καμπύλη από την έρευνα.



Σχήμα 4. 2. 2. 3 :Αποτελέσματα για Stiffened Element "S" (Angle). Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η καμπύλη από την έρευνα.



Σχήμα 4. 2. 2. 4 :Αποτελέσματα για Stiffened Element "H" (T-bar). Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η καμπύλη από την έρευνα.



Σχήμα 4. 2. 2. 5 :Αποτελέσματα για Stiffened Element "J" (T-bar). Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η καμπύλη από την έρευνα.



### 4.3 Κύριος Κώδικας Υπολογισμού Μέγιστης Αντοχής

Όπως προαναφέρθηκε, ο κύριος κώδικας διαβάζει ένα υπολογιστικό φύλλο το οποίο περιλαμβάνει όλες τις διαστάσεις των δομικών στοιχείων της μέσης τομής του πλοίου. Το υπολογιστικό φύλλο έχει 3 καρτέλες για καθένα από τα 3 είδη δομικών στοιχείων.

Αφού γίνει η ανάγνωση των στοιχείων το πρόγραμμα προχωρά σε υπολογισμούς επιφάνειας, ουδέτερου άξονα και ροπής αδράνειας της αρχικής διατομής. Τα μεγέθη αυτά θα χρειαστούν στους επερχόμενους υπολογισμούς της μέγιστης αντοχής. Το εμβαδό της διατομής και αρχική ροπή αδράνειας παραμένουν σταθερά κατά την επαυξητική μέθοδο ενώ η τιμή του ουδέτερου άξονα θα μεταβληθεί κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων

Πρίν ξεκινήσει η επαυξητική μέθοδος καλούνται οι συναρτήσεις υπολογισμού τάσεων παραμορφώσεων για κάθε στοιχείο. Τα αποτελέσματά τους για κάθε είδος ενισχυτικού συγκεντρώνονται σε δύο ξεχωριστά μητρώα τάσεων και παραμορφώσεων (άρα συνολικά 6 πίνακες) οι οποίοι περιέχουν τις αντίστοιχες τάσεις και παραμορφώσεις.

Αφού ολοκληρωθεί η εισαγωγή των καμπύλων σ-ε ξεκινάει ο βρόγχος υπολογισμού της καμπτικής ροπής σύμφωνα με τον αλγόριθμο που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα. Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η επαυξητική διαδικασία υπολογίζεται η μέγιστη ροπή (Ultimate Strength) της μέσης τομής και σχεδιάζονται τα διαγράμματα παρουσίασης αποτελεσμάτων.

Συγκεκριμένα η επαυξητική μέθοδος λειτουργεί ως εξής:

Σχήμα 4.3.1 : Αλγόριθμος λειτουργίας της μονοτονικής μεθόδου Smith.

### 4. 3. 1 Αρχείο εισαγωγής δεδομένων “Elements”

Το αρχείο εισαγωγής έχει όλα τα στοιχεία που χρειάζονται τόσο για τους αρχικούς υπολογισμούς αλλά και για την κλήση των συναρτήσεων σε τρεις καρτέλες-μια για το κάθε είδος στοιχείου.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας προτιμήθηκε η απευθείας εισαγωγή του εμβαδού, του κέντρου βάρους και της ροπής αδράνειας κάθε στοιχείου ώστε το κύριο πρόγραμμα να μπορεί να υπολογίσει ένα μεγαλύτερο εύρος διατάξεων μέσης τομής. Τα στοιχεία αυτά μπορούν να υπολογιστούν με ακρίβεια είτε σε ένα άλλο υπολογιστικό φύλλο ή με σχεδιαστικά προγράμματα (για παράδειγμα από το Autodesk Inventor –όπου η παραμετρική σχεδίαση επιτρέπει εύκολη τροποποίηση των διαστάσεων).

Περαιτέρω διευκρινήσεις για την εισαγωγή των δεδομένων στο υπολογιστικό φύλλο υπάρχουν στην αρχή του κυρίου κώδικα ως σχόλια αλλά και στο ίδιο το φύλλο- όπου αναγράφονται και όλες οι μονάδες μέτρησης. Η επιλογή των μονάδων έγινε σύμφωνα με τους κανονισμούς του IACS.

Ενδεικτικά για το μοντέλο B1S που χρησιμοποιήθηκε από την έρευνα του Shen Li επισυνάπτουμε το αρχείο “Elements” με όλα τα ενισχυτικά:

Is_core(cm)	ts_core(cm)	Is_fl(cm)	ts_fl(cm)	s(m)	t_n50(mm)	ReH(Mpa)	z centre plate(cm)	I//x (m)	df(cm)	z_CG(cm)	Ai(cm2)	Iy(cm4)
5	0.378	0	0	0.15	2.76	273.3	48	0.4986	0	47.2102	5.9778	12.0469
5	0.378	0	0	0.15	2.76	273.3	48	0.4986	0	47.2102	5.9778	12.0469
5	0.378	0	0	0.15	2.76	273.3	48	0.4986	0	47.2102	5.9778	12.0469
5	0.378	0	0	0.15	2.76	273.3	0	0.4986	0	0.7898	5.9778	12.0469
5	0.378	0	0	0.15	2.76	273.3	0	0.4986	0	0.7898	5.9778	12.0469
5	0.378	0	0	0.15	2.76	273.3	0	0.4986	0	0.7898	5.9778	12.0469
5	0.378	0	0	0.16	2.76	273.3	16	0.4986	0	16	6.25384	94.2298
5	0.378	0	0	0.16	2.76	273.3	32	0.4986	0	32	6.25384	94.2298
5	0.378	0	0	0.16	2.76	273.3	16	0.4986	0	16	6.25384	94.2298
5	0.378	0	0	0.16	2.76	273.3	32	0.4986	0	32	6.25384	94.2298

Εικόνα 4. 3. 2 : Το υπολογιστικό φύλλο “Elements” για το μοντέλο B1S (στοιχεία τύπου Stiffened Elements).

length_1(cm)	length_2(cm)	z_CG(cm)	t_1(cm)	t_2(cm)	ReH_1(MPa)	ReH_2(Mpa)	A_hc(cm2)	I_y_HC(cm4)
8	7.5	1.6013	0.276	0.276	273.3	273.3	2.95982	14.5548
8	7.5	1.6013	0.276	0.276	273.3	273.3	2.95982	14.5548
8	7.5	46.3987	0.276	0.276	273.3	273.3	2.95982	14.5548
8	7.5	46.3987	0.276	0.276	273.3	273.3	2.95982	14.5548

Εικόνα 4. 3. 3 : Το υπολογιστικό φύλλο “Elements” για το μοντέλο B1S (στοιχεία τύπου Hard Corner).

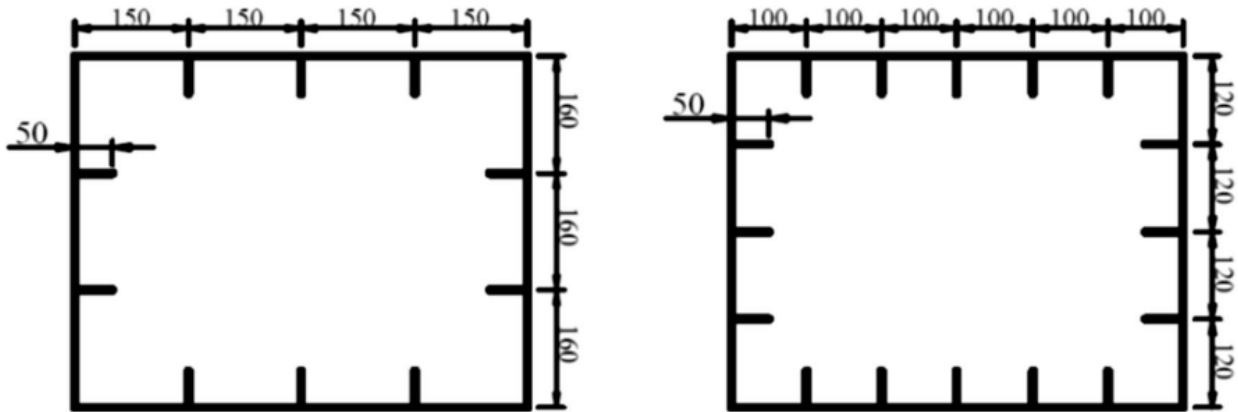
Length(cm)	t(cm)	z_cg(cm)	ReH_plate(Mpa)	Length Parallel X(cm)	fi (rad) (from y-axis)
0	0	0	0	0	0

Εικόνα 4. 3. 4 : Το υπολογιστικό φύλλο “Elements” για το μοντέλο B1S (στοιχεία τύπου Plate Element).

#### 4. 4 Πειραματικά μοντέλα μέσης τομής

Σε αυτό το σημείο κρίνουμε απαραίτητο να παρουσιάσουμε τα μοντέλα μέσης τομής για τα οποία θα εκτελεστούν οι υπολογισμοί μέγιστης αντοχής και θα συγκριθούν με αποτελέσματα από άλλες έρευνες.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται αντιπροσωπεύουν απλά box girders που έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο σε μελέτες μέγιστης αντοχής με μονοτονικό φορτίο αλλά και σε μελέτες για ολιγκυκλική φόρτιση. Συγκεκριμένα τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν είναι τα :B-1S και B-2D (Li S. “An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading”).



Σχήμα 4. 4. 1 : Σχηματική αναπαράσταση των μοντέλων (αριστερά “B-1S”, δεξιά “B-2D”).

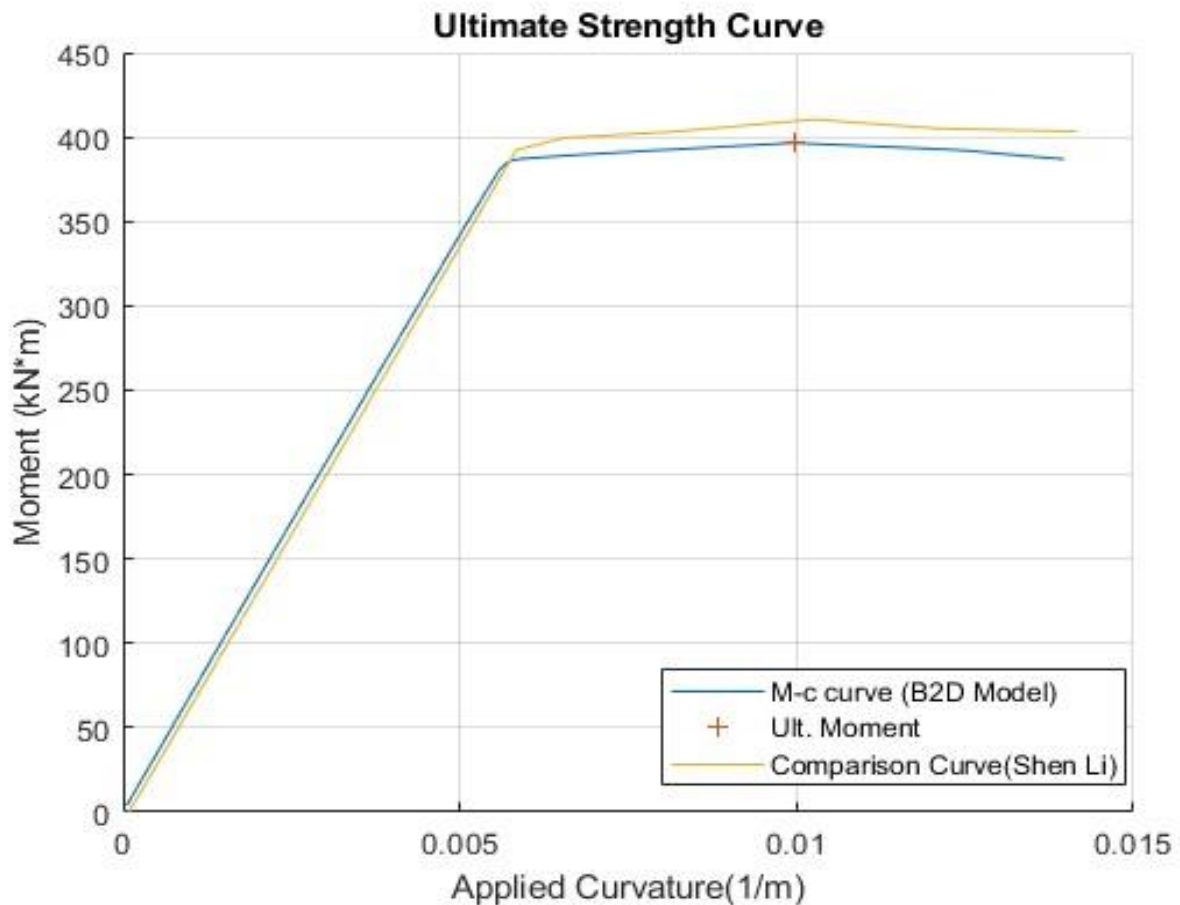
Models	Geometric (mm)					Mechanical characteristics		
	Shell plating			Stiffener		$E$ (GPa)	$E_{st}$ (MPa)	$\sigma_Y$ (MPa)
Parameter	$a$	$l$	$t$	$h_s$	$t_s$			
B-1S	995.3	498.6	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3
HB-1S	1000.8	497.3	2.73	50	2.73	209.3	4212	361.8
B-2S	998.4	494.5	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3
B-1D	999.2	496.4	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3
B-2D	994.5	497.8	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3

Σχήμα 4. 4. 2 : Οι διαστάσεις των μοντέλων.

## 4. 5 Αποτελέσματα εκτέλεσης κώδικα μέγιστης Αντοχής

### 4. 5. 1 Μοντέλο “B-2D”

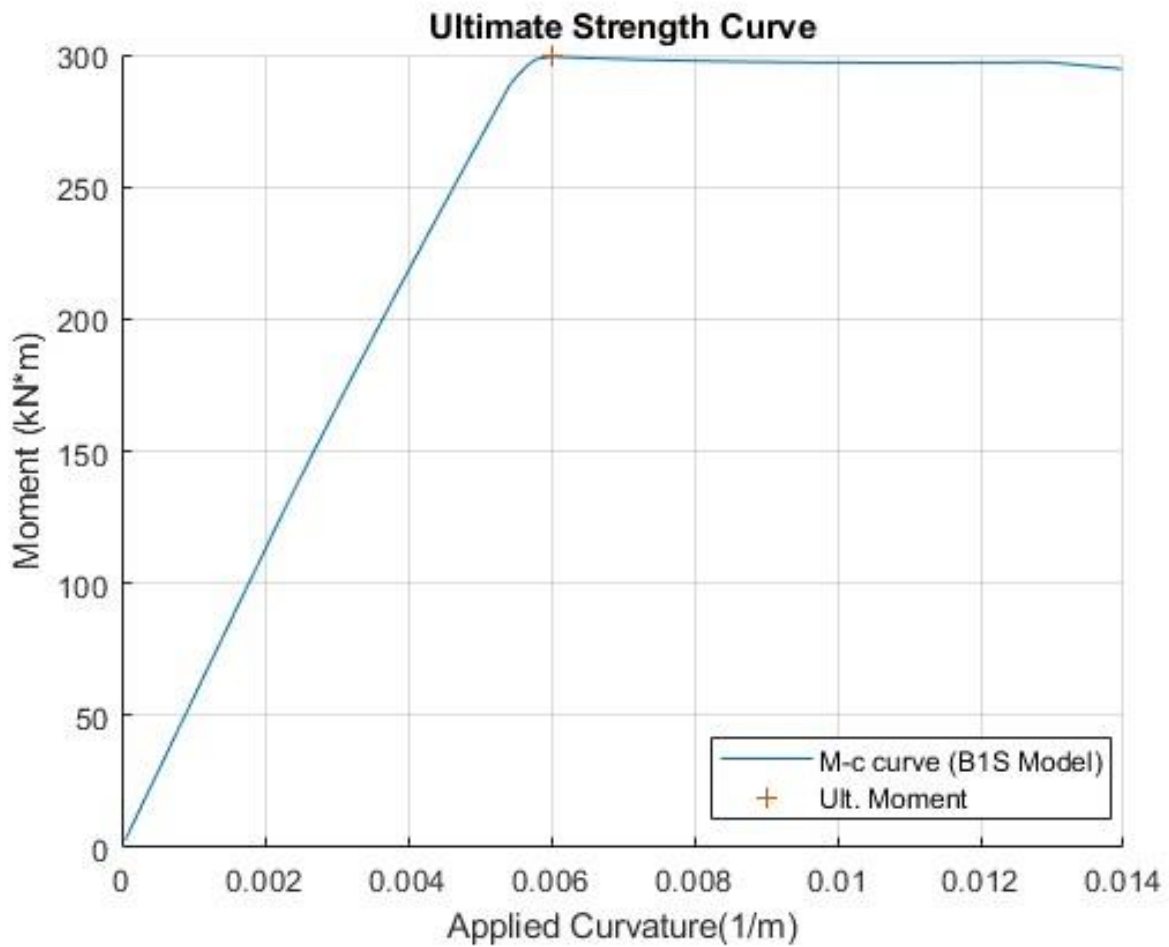
Η παρακάτω εικόνα παριστάνει τη καμπύλη μέγιστης ροπής του μοντέλου B-2D υποβαλλόμενου σε μονοτονικό φορτίο. Με μπλέ είναι η καμπύλη ροπής που παρήχθη από το πρόγραμμα και με πορτοκαλί η αντίστοιχη καμπύλη από την έρευνα του Shen Li. Τα αποτελέσματα συγκλίνουν ικανοποιητικά ενώ οι μικρές διαφοροποιήσεις οφείλονται κυρίως στη μέθοδο εισαγωγής της καμπύλης σύγκρισης – η οποία έγινε με χειροκίνητο σκανάρισμα σημείων.



Εικόνα 4. 5. 1 : Η καμπύλη μέγιστης αντοχής για το μοντέλο B2D.

#### 4. 5. 2 Μοντέλο “B-1S”

Στο μοντέλο αυτό δεν έχουμε καμπύλη σύγκρισης αποτελεσμάτων, επομένως παρουσιάζουμε μόνο τα αποτελέσματα του προγράμματος Ultimate Strength.



Εικόνα 4. 5. 1 : Η καμπύλη μέγιστης αντοχής για το μοντέλο B1S.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : Εφαρμογή βηματικής – επαναληπτικής μεθόδου (Smith) στην ολικοκυκλική φόρτιση

### 5.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μετατροπή της μεθόδου Smith της προηγούμενης ενότητας από μονοτονική φόρτιση (όπως ορίζεται στον IACS) σε πολυκυκλική. Η μετατροπή στηρίζεται σε παρατηρήσεις που έγιναν από την έρευνα του Shen Li με τίτλο «*Progressive collapse analysis of ship hull girders subjected to extreme cyclic bending*».

Η μέθοδος στηρίζεται στην ίδια διαδικασία με την υπάρχουσα μέθοδο του IACS ως προς τον υπολογισμό της ροπής κάμψης με την σημαντική διαφορά ότι οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των στοιχείων αλλάζουν όταν αλλάξει η φορά της επιβαλλόμενης καμπυλότητας. Οι αλλαγές αυτές συνοψίζονται σε δύο κανόνες :

- Τον κανόνα ανανέωσης, ο οποίος ανανεώνει τα σημεία από τα οποία σχεδιάζεται η νέα καμπύλη σ-ε.
- Τον κανόνα απόκρισης, ο οποίος σχεδιάζει την ανανεωμένη καμπύλη.

Οι ανανεωμένες καμπύλες λαμβάνουν υπ' όψη τις αλλαγές που υφίστανται τα στοιχεία που αποτελούν τη μέση τομή ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες και με αυτόν τον τρόπο επιτρέπουν τη δημιουργία της καμπύλης ροπής-καμπυλότητας για εναλλασσόμενο φορτίο από sagging σε hogging και αντίστροφα.



## 5.2 Παρουσίαση της μελέτης του Shen Li et. al. - An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading

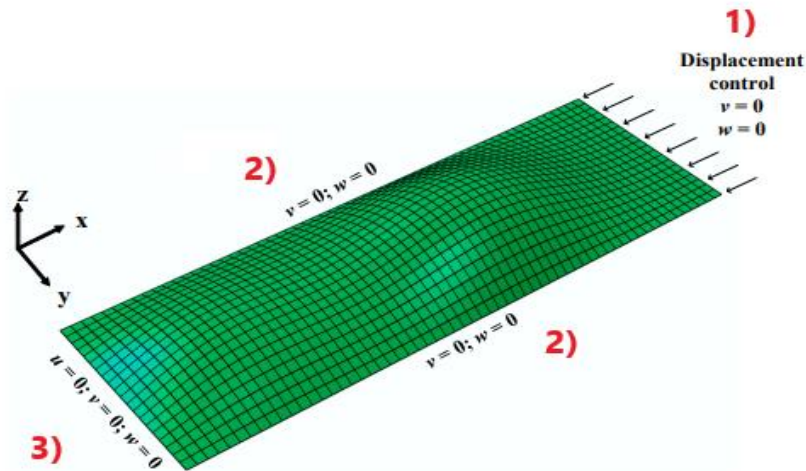
### 5.2.1 Γενικά

Τα διάφορα πορίσματα που εξήχθησαν από την έρευνα προέκυψαν από ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε μη ενισχυμένες πλάκες με διάφορους λόγους γεωμετρικών διαστάσεων (λόγος πλάτους—μήκους, λυγηρότητα κλπ) και για επιβαλλόμενη εναλλασσόμενη παραμόρφωση από 1 έως 2 φορές την παραμόρφωση διαρροής.

Οι συνοριακές συνθήκες και οι γεωμετρικοί περιορισμοί που εισήχθησαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

Ακμή	Γεωμετρικός Περιορισμός	Συμβ.
Ακμή Φόρτισης	Μηδενική στροφή κατά $\gamma$ / Μηδενική μετατόπιση $z$	(1)
Πλευρικές Ακμές	Μηδενική στροφή κατά $\gamma$ / Μηδενική μετατόπιση $z$	(2)
Ακμη Εδρασης	Μηδενική στροφή κατά $\gamma$ / Μηδενική μετατόπιση κατά $z$ /Μηδενική μετατόπιση κατά $x$ .	(3)

Πίνακας 5. 2. 1 : Οι διάφοροι περιορισμοί που εισάγονται κατά την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων



Εικόνα 5. 2. 2: Οι οριακές συνθήκες του μοντέλου κατά την μελέτη FEA. (Li, S. , Hu, Z. , & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading. ). Με κόκκινο αντιστοιχίζονται οι περιορισμοί του πίνακα 5. 2. 1.

Σύμφωνα με τον γράφοντα της έρευνας, η μελέτη πεπερασμένων στοιχείων ενσωματώνει και τα φαινόμενα σκλήρυνσης του δοκιμίου σε εναλλασσόμενη φόρτιση αλλά και το φαινόμενο Bauschinger. Σημειώνουμε ότι με τον όρο κυκλική σκλήρυνση εννοούμε το φαινόμενο όπου οι μέγιστες τάσεις αυξάνονται κατά την υποβολή του δοκιμίου σε εναλλασσόμενη φόρτιση ίδιου πλάτους, ενώ το φαινόμενο Bauschinger εκφράζει την μείωση της τάσης διαρροής του μετάλλου όταν αντιστρέφεται η επιβολή του φορτίου.

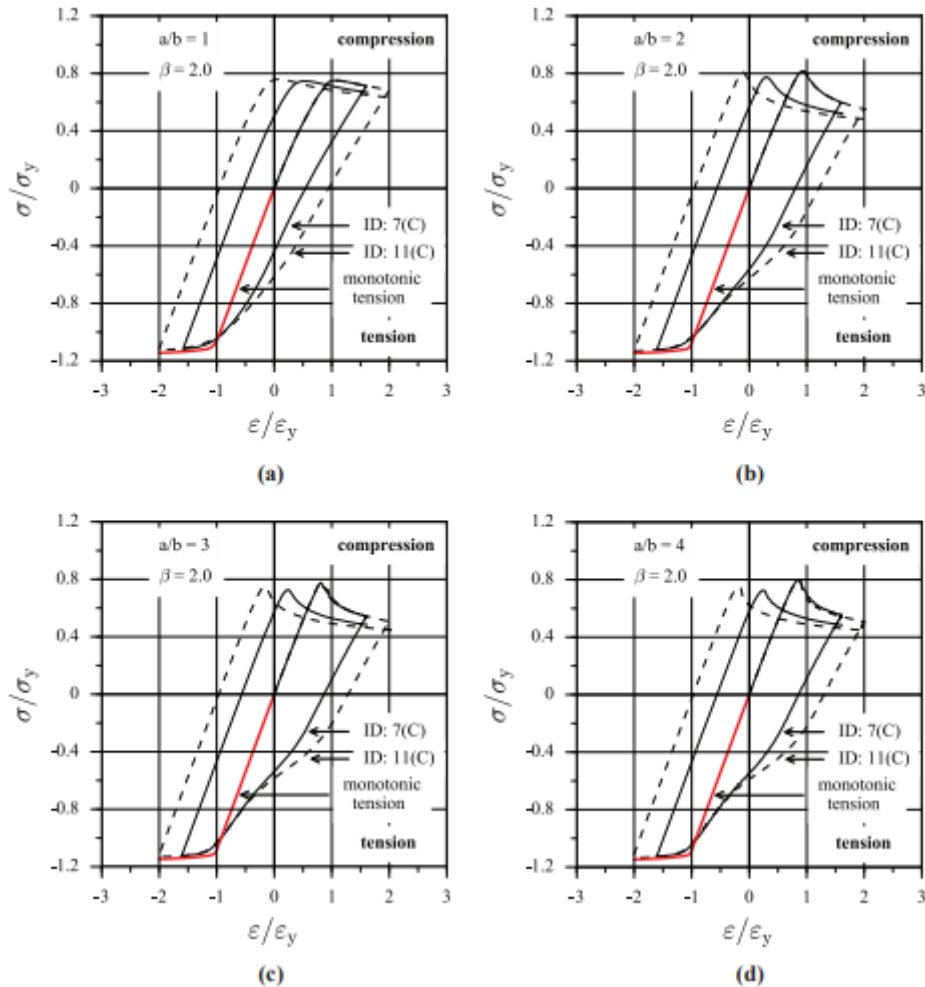
Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στον ορισμό του χρόνου ώστε να απαλειφθούν τα φαινόμενα αδρανείας (άρα να έχουμε μια στατική λύση σε κάθε χρονική στιγμή), αλλά και να μην γίνει πολύ μεγάλος ο υπολογιστικός όγκος όταν μελετηθεί αργότερα η πολυκυκλική συμπεριφορά.

### 5. 2. 2 Μονοκυκλική Φόρτιση. Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων

Αρχικά παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για μονοκυκλική φόρτιση (με την έννοια μονοκυκλική εννοούμε  $1+1/4$  επανάληψη της φόρτισης). Στην εικόνα 5. 1. 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα κυκλικής φόρτισης υπό σταθερό πλάτος, με αρχική θλιπτική φόρτιση (θετικές τάσεις). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για διάφορους λόγους διαστάσεων ( $a/b$ ) από 1 έως 4.

Η φόρτιση ξεκινάει από το σημείο (0,0) και ακολουθεί τη μαύρη καμπύλη. Κατά την επαναφόρτιση από θλίψη σε εφελκυσμό η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων αποκτά κλίση η οποία είναι μικρότερη από το μέτρο ελαστικότητας του υλικού η οποία ενισχύεται όσο αυξάνεται ο λόγος μήκους/πλάτους.

Εάν δεν έχει υπάρξει προηγούμενη εφαρμογή εφελκυσμού η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων ακολουθεί με πολύ καλή προσέγγιση την καμπύλη μονοτονικής φόρτισης σε εφελκυσμό (η οποία φαίνεται με κόκκινο χρώμα στο σχήμα).



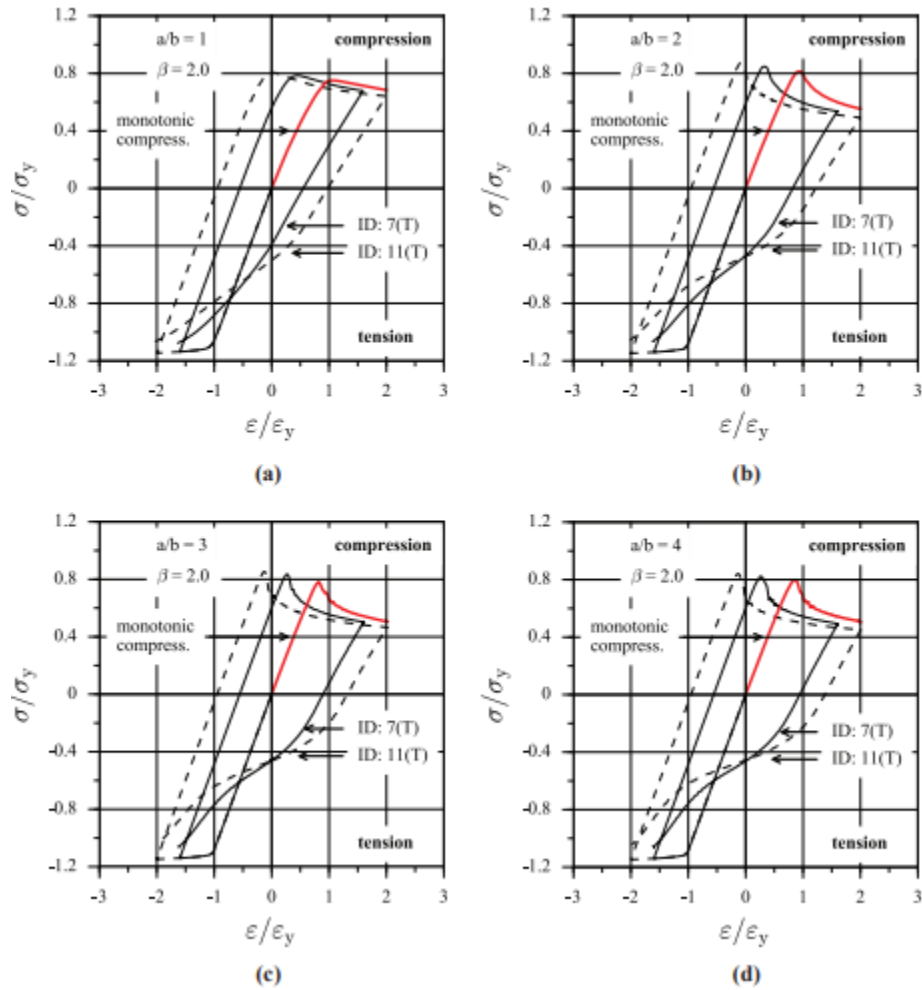
Εικόνα 5. 2. 3 : Καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  για ελάσματα (μονοκυκλική φόρτιση – αρχικά θλίψη). (Li, S. , Hu, Z. , & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading. )

Αντίστοιχα, στο σχήμα 5. 2. 4, όπου η φόρτιση ξεκινάει από εφελκυσμό (αρνητικές τάσεις), το σημείο μέγιστης θλιπτικής τάσης αλλάζει καθώς η μέγιστη τάση αυξάνεται ελαφρώς ενώ ως προς την παραμόρφωση μετατοπίζεται αριστερά όσο το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης (δηλαδή το σημείο όπου η καμπύλη τέμνει την  $\sigma=0$ ). Αυτό πιθανότατα συμβαίνει διότι οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων της μελέτης του Shen Li συμπεριλαμβάνουν και το φαινόμενο της κυκλικής σκλήρυνσης του υλικού.

Κατά την αποφόρτιση από εφελκυσμό το μέτρο ελαστικότητας είναι ίδιο με το μέτρο του Young, άσχετα από την παραμόρφωση όπου ξεκινά η αποφόρτιση, ακριβώς διότι οι πλαστικές

παραμορφώσεις διατηρούνται και η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την αποφόρτιση είναι ελαστική.

Στην αντίστοιχη θλιπτική αποφόρτιση, το μέτρο ελαστικότητας είναι σχεδόν σταθερό.

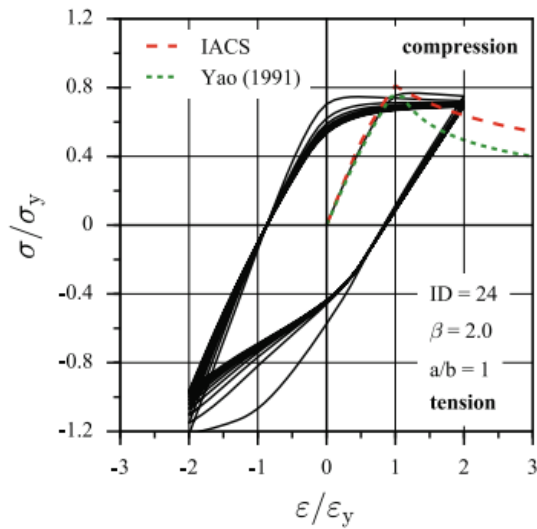


Σχήμα 5. 2. 4 : Καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  για ελάσματα (μονοκυκλική φόρτιση – αρχικά εφελκυσμός). (Li, S. , Hu, Z. , & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading. )

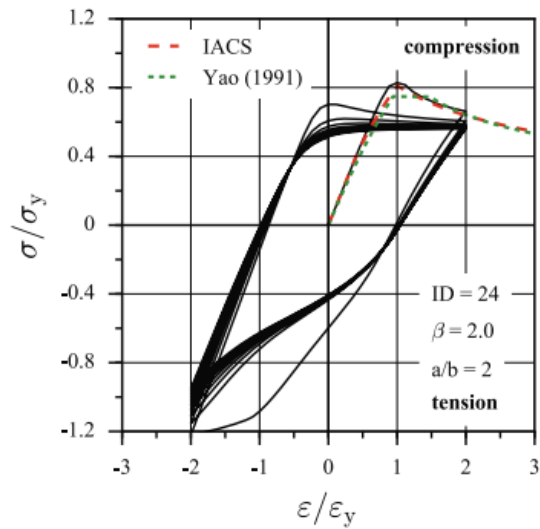
### 5. 2. 3 Πολυκυκλική Φόρτιση. Καμπύλες τάσεων - παραμορφώσεων

Κατά την πολυκυκλική απόκριση παρατηρούμε ότι υπάρχει σύγκλιση της μέγιστης θλιπτικής τάσης μετά από 3 κύκλους φόρτισης η οποία ωστόσο δεν είναι απόλυτη. Στον εφελκυσμό παρατηρείται γραμμική μείωση της αναπτυσσόμενης τάσης στην μέγιστη παραμόρφωση οδηγώντας σε μείωση του μέτρου ελαστικότητας.

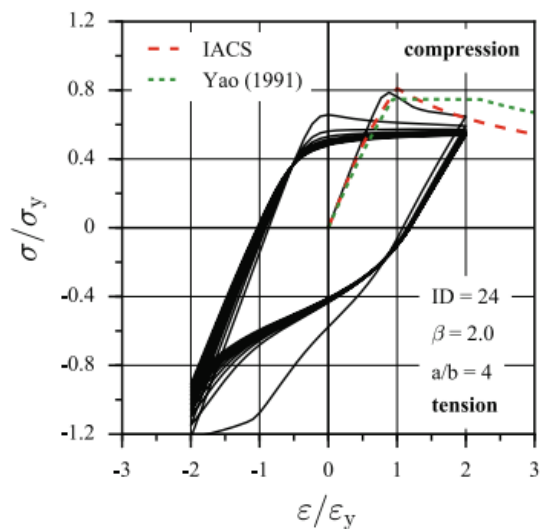
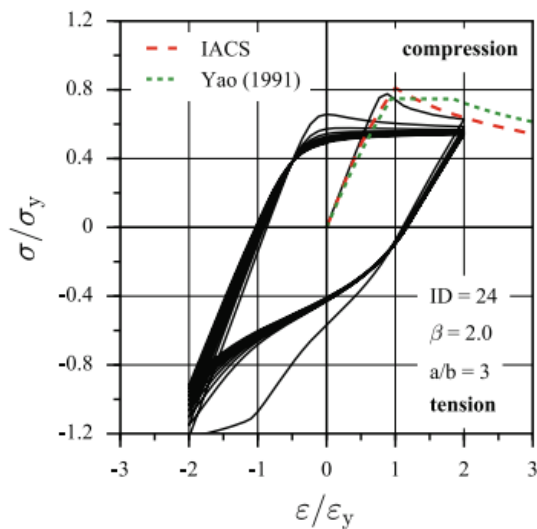
Επίσης παρατηρείται ότι η μέγιστη θλιπτική τάση βρίσκεται πολύ κοντά με την τάση αποφόρτισης σε θλίψη που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι κατά τη διαρροή η κλίση της καμπύλης  $\sigma$ - $\epsilon$  είναι σχεδόν μηδενική.



(a)



(b)



Σχήμα 5. 1. 4 : Πολυκυκλική Απόκριση για μη ενισχυμένα ελάσματα. (Li, S. , Hu, Z. , & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading)

#### 5. 2. 4 Κανόνας Απόκρισης

Ο κανόνας απόκρισης έχει σκοπό την δημιουργία καμπυλών  $\sigma$ - $\epsilon$  στον εκάστοτε κύκλο φόρτισης οι οποίες να προσεγγίζουν τις καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  παρατηρήθηκαν στη παραπάνω μελέτη. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές παραδοχές του κανόνα απόκρισης σε θλίψη και εφελκυσμό:

- Θλίψη

1) Η απόκριση όταν δεν έχει επιβληθεί προηγούμενη θλίψη είναι παρόμοια με εκείνη για μονοτονική φόρτιση.

2) Στις επόμενες θλιπτικές φορτίσεις η απόκριση είναι τμηματικά γραμμική. Πριν το σημείο μέγιστης τάσης ακολουθεί τη γραμμή : σημείο μόνιμης παραμόρφωσης -> σημείο μέγιστης τάσης. Μετά το σημείο μέγιστης τάσης η καμπύλη διατηρεί σταθερή κλίση(μη μηδενική).

- Εφελκυσμός

1)Τμηματικά γραμμική απόκριση.

2)Αν δεν έχει γίνει προηγούμενη αποφόρτιση σε εφελκυσμό η καμπύλη ακολουθεί τη πορεία: σημείο μόνιμης παραμόρφωσης σε θλίψη -> σημείο μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό.

3) Αν δεν έχει γίνει προηγούμενη αποφόρτιση σε εφελκυσμό η καμπύλη ακολουθεί τη πορεία: σημείο μόνιμης παραμόρφωσης σε θλίψη -> σημείο εφελκυστικής αποφόρτισης -> σημείο μέγιστης τάσης.

4)Αρχική ελαστικότητα ίση με το μέτρο Young και αρχικό όριο διαρροής ίσο με το όριο διαρροής του υλικού.

5)Μετά τη μέγιστη τάση -> ελαστικότητα μηδενική

### 5. 2. 5 Κανόνας Ανανέωσης

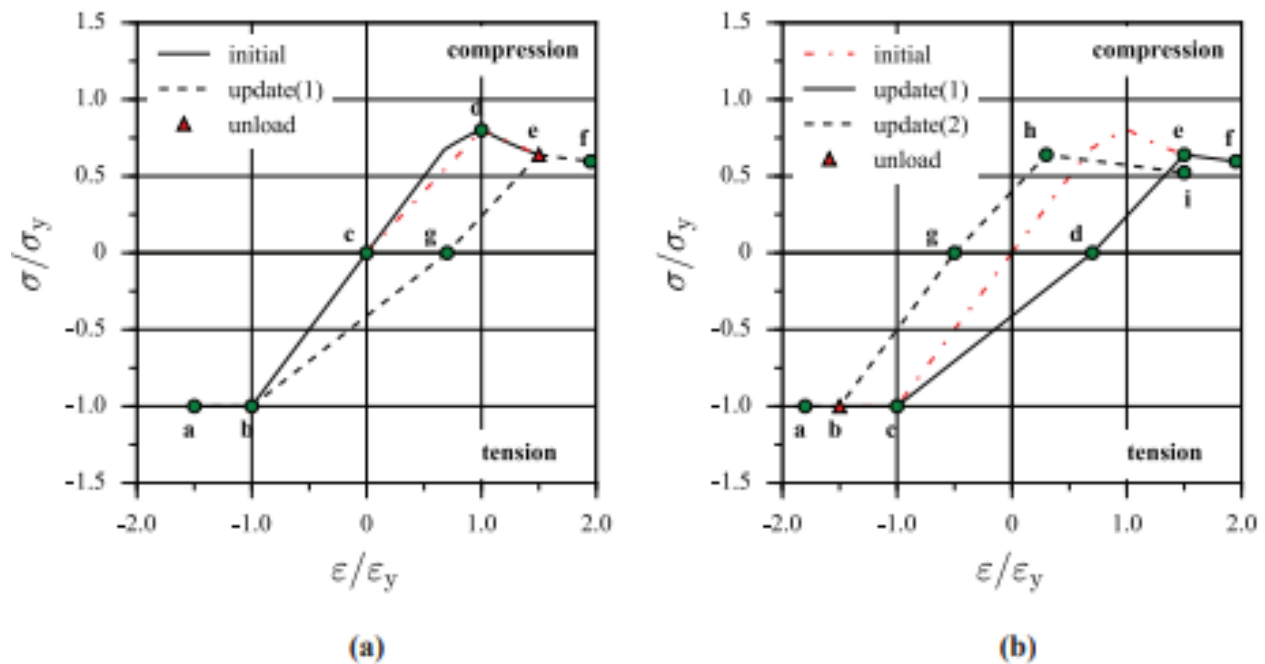
Όταν αλλάξει η φορά της προσαύξησης της παραμόρφωσης ενεργοποιείται ο κανόνας ανανέωσης ο οποίος αλλάζει τα δεδομένα που επεξεργάζεται ο κανόνας απόκρισης. Συγκεκριμένα:

- 1) Η ελαστικότητα μετά την θλιπτική αποφόρτιση αλλάζει  $k = \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right) E$ , όπου  $\sigma_u$  η τάση αποφόρτισης,  $\sigma_y$  η τάση διαρροής.
- 2) Η ελαστικότητα μετά την ελαστική αποφόρτιση είναι ίση με το μέτρο του Young.
- 3) Βάσει αυτών των ελαστικοτήτων βρίσκουμε το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης είτε σε εφελκυσμό ή σε θλίψη.
- 4) Κατά την θλιπτική αποφόρτιση το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης μένει ίδιο εάν η επιβαλλόμενη παραμόρφωση είναι μικρότερη από την παραμόρφωση της μέγιστης τάσης.
- 5) Εάν δεν αλλάζει το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης σταματάει η ενημέρωση και η καμπύλη παραμένει ίδια με την προηγούμενη.
- 6) Στην θλιπτική αποφόρτιση υπολογίζεται η νέα ελαστικότητα σε περιοχή μετά την απόλυτη τάση ως:  $k = \varphi_1 * \frac{\sigma_u - \sigma_{unload}}{\epsilon_u - \epsilon_{unload}}$
- 7) Εάν η θλιπτική αποφόρτιση γίνει μετά τη μέγιστη τάση, το σημείο μέγιστης τάσης παίρνει τις συντεταγμένες του σημείου αποφόρτισης.
- 8) Η μέγιστη τάση σε εφελκυσμό μετά την θλιπτική αποφόρτιση αλλάζει σύμφωνα με τον παράγοντα μείωσης  $\phi_2$ .
- 9) Κατά την εφελκυστική αποφόρτιση, τα κρίσιμα σημεία της θλιπτικής απόκρισης (3 σημεία) παραμένουν ίδια εκτός από το σημείο μέγιστης παραμόρφωσης που αλλάζει βάσει του σημείου μόνιμης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό.



### 5.3 Σχηματική Αναπαράσταση δημιουργίας καμπύλης $\sigma$ - $\epsilon$ σύμφωνα με τους κανόνες απόκρισης/ανανέωσης.

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία δημιουργίας των καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων, παρουσιάζεται μια σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας των καμπυλών αυτών βήμα-βήμα. Καθένα από τα ζεύγη εικόνων του σχήματος 5. 3. 1 και 5. 3. 2 απεικονίζουν τη δημιουργία της καμπύλης  $\sigma$ - $\epsilon$  για ένα δοκίμιο που φορίζεται μονοκυκλικά, στην εικόνα 5. 3. 1 με αρχική φόρτιση θλιπτική και στο σχήμα 5. 3. 2 με αρχική φόρτιση εφελκυστική. Οι ανανεώσεις που υφίσταται η καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  σε καθεμία περίπτωση μονοκυκλικής φόρτισης είναι δύο (2), όπως θα αναλυθεί και παρακάτω (initial -> update(1) -> update (2) ).



Σχήμα 5. 3. 1 Σχηματική αναπαράσταση του κανόνα ανανέωσης/απόκρισης για δομικά στοιχεία αρχικά σε θλίψη. (Li, S. , Hu, Z. , & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading).

- Σχήμα 5.3.1 a

Το δοκίμιο φορτίζεται θλιπτικά ακολουθώντας την μονοτονική καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων (καμπύλη "initial") έως ότου ξεπεράσει το σημείο μέγιστης τάσης (πορεία c-d-e). Στο σημείο e γίνεται αποφόρτιση (unloading point), επομένως υπολογίζεται το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης g με κλίση ίση με την κλίση c-d.

Η κλίση e-f υπολογίζεται από τον κανόνα ανανέωσης 6 (για χρήση σε επόμενο κύκλο).

Αφού δεν υπάρχει προηγούμενη φόρτιση σε εφελκυσμό, τα κρίσιμα σημεία της εφελκυστικής απόκρισης παραμένουν ίδια. Άρα η απόκριση σε εφελκυσμό ακολουθά τη πορεία : σημείο μόνιμης παραμόρφωσης-σημείο μέγιστης παραμόρφωσης (g ->b ->a). Άρα η νέα καμπύλη σ-ε είναι η a-b-g-e-f. Αυτή τη καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων θα χρησιμοποιήσει το δοκίμιο κατά τη φόρτιση του σε εφελκυσμό.

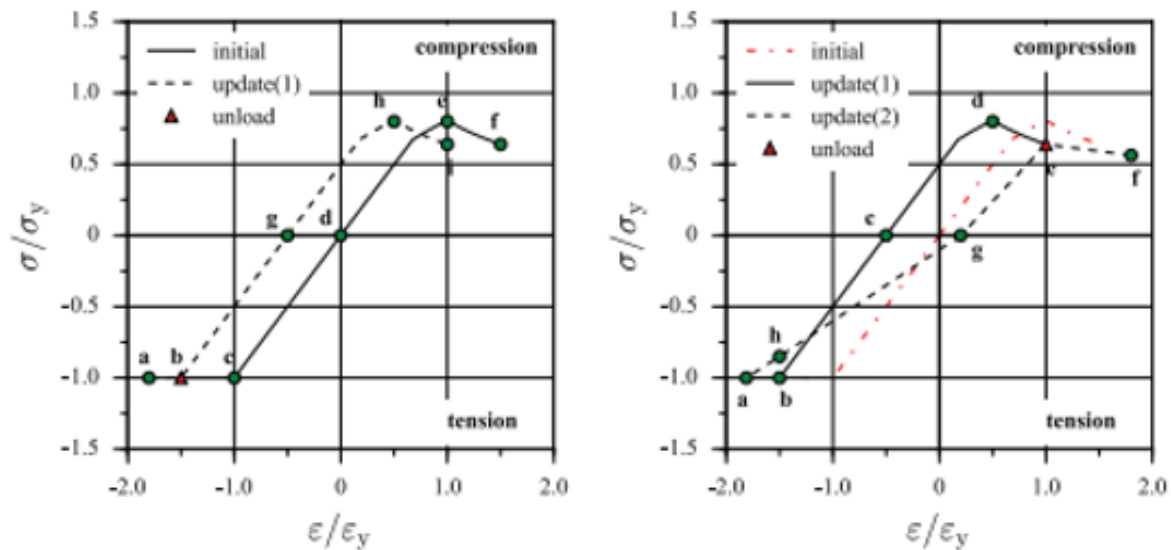
- Σχήμα 5.3.1 b

Το δοκίμιο φορτίζεται σε εφελκυσμό ακολουθώντας τη προαναφερθείσα καμπύλη σ-ε και αποφόρτιζεται στο σημείο b, επομένως ενεργοποιείται ο κανόνας ανανέωσης.

Αρχικά υπολογίζεται το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης (σημείο g) με κλίση ίση με το μέτρο Young (κανόνας ανανέωσης 2).

Εδώ υπάρχει προηγούμενη φόρτιση σε θλίψη, άρα ο κανόνας απόκρισης είναι : σημείο μόνιμης παραμόρφωσης -> σημείο μέγιστης τάσης -> σημείο μέγιστης παραμόρφωσης.

Επομένως έπειτα υπολογίζεται το σημείο μέγιστης τάσης (σημείο h), το οποίο έχει ίδια τάση με το σημείο μέγιστης τάσης της προηγούμενης θλιπτικής φόρτισης (σημείο e) και κλίση ίση με τη κλίση του τμήματος d-e. Το σημείο μέγιστης παραμόρφωσης βρίσκεται από τον κανόνα ανανέωσης 6. Άρα η καμπύλη ανανεώνεται ως b-g-h-i.



Σχήμα 5. 3. 2 : Σχηματική αναπαράσταση του κανόνα ανανέωσης/απόκρισης για δομικά στοιχεία αρχικά σε εφελκυσμό. (Li, S. , Hu, Z. , & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading)

- Σχήμα 5. 3. 2 a

Αρχική φόρτιση σε εφελκυσμό, ακολουθείται η αρχική καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  (d-c-a). Γίνεται αποφόρτιση στο σημείο b όπου και ενεργοποιείται ο κανόνας ανανέωσης, υπολογίζεται το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης g με ελαστικότητα ίση με την ελαστικότητα του υλικού.

Αφού δεν υπάρχει προηγούμενη θλιπτική αποφόρτιση η καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  ακολουθά την αρχική καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων, μετατοπισμένη όσο το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης (από d-e-f σε g-h-i). Επίσης το πλάτος της εφελκυστικής παραμόρφωσης αλλάζει (κανόνας ανανέωσης 9, f->i).

Επομένως η νέα καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  είναι η a-b-g-h-i.

- Σχήμα 5. 3. 2 b

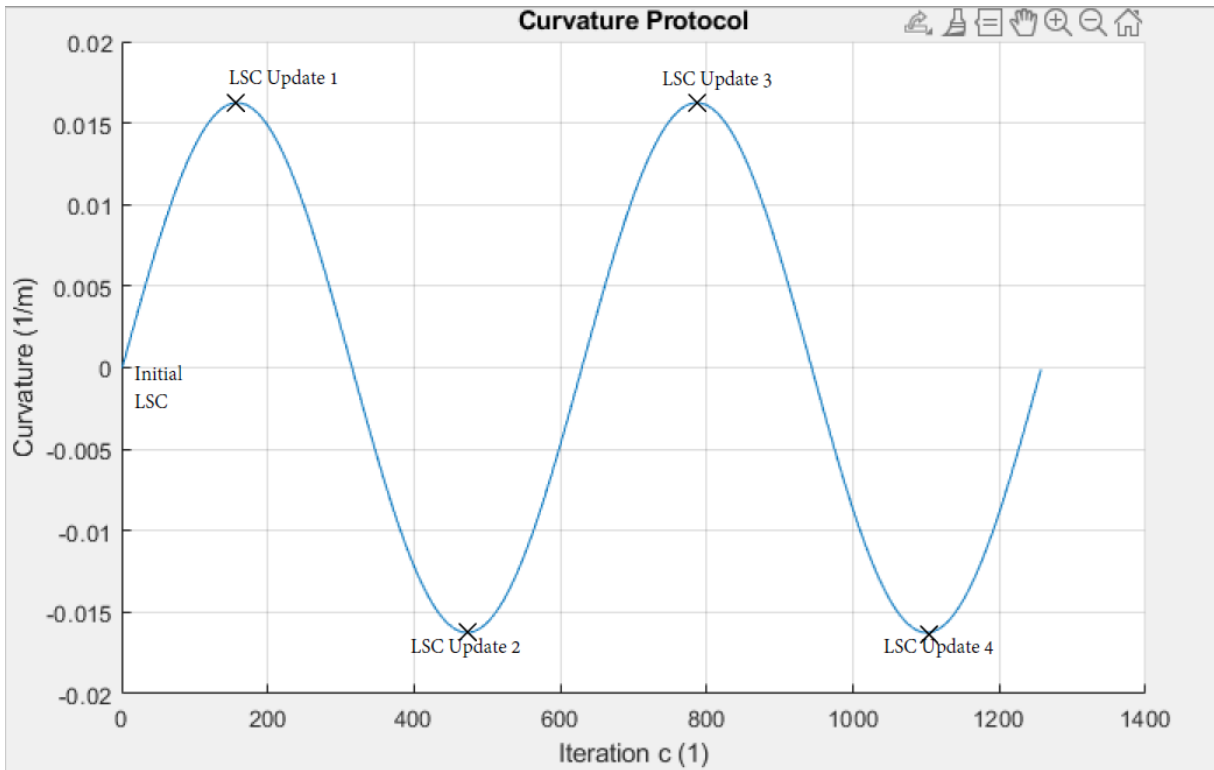
Το δοκίμιο ακολουθεί αυτή τη καμπύλη έως ώστου αποφορτιστεί σε θλίψη (σημείο e) όπου πάλι ενεργοποιείται ο κανόνας ανανέωσης,βρίσκεται το σημείο g με τον κανόνα ανανέωσης 1 και το σημείο f. Λόγω του κανόνα ενημέρωσης 8 γίνεται μείωση της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά  $\phi_2$  (b->h ) επομένως το νέο σημείο μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό είναι το a, το οποίο είναι προέκταση του σημείου h. Αρα η νέα καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$  είναι η a-h-g-e-f.

## 5.4 Παρουσίαση του Κώδικα Ολιγοκυκλικής Φόρτισης.

Χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες παρατηρήσεις και τη μέθοδο Smith για μονοτονική φόρτιση καταστρώθηκε ο αλγόριθμος του προγράμματος για ολιγοκυκλική φόρτιση. Το πρόγραμμα δέχεται ένα πρωτόκολλο επιβαλλόμενης καμπυλότητας ως ένα από τα δεδομένα εισαγωγής και είτε αναγνωρίζει αυτόματα τα τοπικά του ακρότατα ή εισάγονται χειροκίνητα. Η αναγνώριση αυτή χρησιμεύει ώστε να εντοπισθεί σε ποιιά επανάληψη θα ενεργοποιηθεί ο κανόνας ανανέωσης και συνεπώς η μετατροπή της καμπύλης τάσεων παραμορφώσεων για κάθε στοιχείο.

Σημειώνουμε ότι το πρόγραμμα ολιγοκυκλικής φόρτισης είναι παρόμοιο με το πρόγραμμα μονοτονικής φόρτισης ως προς τον υπολογισμό του αρχικού ουδέτερου άξονα, της αρχικής ροπής αδράνειας αλλά και ως προς την εκτίμηση της καμπτικής ροπής. Η ειδοποιός διαφορά είναι ότι πλέον υπάρχει εντός του while loop μια ανανέωση των καμπυλών σ-ε ακριβώς πριν τον υπολογισμό της καμπτικής ροπής και ότι πλέον χρησιμοποιούνται ενοποιημένοι πίνακες διαστάσεων που περιέχουν όλα τα στοιχεία της διατομής (και όχι ξεχωριστοί πίνακες για το κάθε είδος ενισχυτικού).

Για παράδειγμα, έστω ότι η επιβαλλόμενη καμπυλότητα που επιλέγεται έχει ημιτονική μορφή (θετικά ροπή sagging, αρνητικά hogging). Σε κάθε ακρότατο ενεργοποιείται ο κανόνας ανανέωσης (βλέπε τα σημεία με “x”). Οι καμπύλες σ-ε των στοιχείων θα τροποποιηθούν και θα χρησιμοποιηθούν μέχρι την επόμενη ανανέωση. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει τις ανανεώσεις που θα λάβουν χώρα σε ένα ημιτονικό φορτίο καμπυλότητας που εκτείνεται από 0 έως 4π. Μέχρι να ενεργοποιηθεί η πρώτη ανανέωση οι χρησιμοποιούμενες καμπύλες είναι οι αρχικές που παράγονται από την μεθοδολογία του IACS για μονοτονικό φορτίο.



Σχήμα 5. 4. 1 : Ενδεικτικό πρωτόκολλο επιβαλλόμενης καμπυλότητας. Μόλις αναγνωριστεί το τοπικό μέγιστο γίνεται ανανέωση των καμπυλών σ-ε, οι οποίες χρησιμοποιούνται μέχρι την επόμενη ανανέωση.

Μόλις ενεργοποιηθεί ο κανόνας ανανέωσης διακρίνουμε δύο βασικές περιπτώσεις :

Το εκάστοτε στοιχείο να βρίσκεται σε εφελκυσμό ή σε θλίψη. Το σημείο πάνω στην προϋπάρχουσα καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων όπου εκτελείται η ανανέωση θα θεωρηθεί σαν το σημείο αποφόρτισης-καθώς στην αμέσως επόμενη προσαύξηση της καμπυλότητας οι προκύπτουσες τάσεις/παραμορφώσεις θα είναι ελαφρώς μικρότερες κατ' απόλυτη τιμή. Επομένως με το που γίνει αναγνώριση εάν το στοιχείο βρίσκεται σε εφελκυσμό ή θλίψη ο αλγόριθμος προχωρά στον υπολογισμό των νέων σημείων σύμφωνα με τις παρατηρήσεις του κανόνα ενημέρωσης και του κανόνα απόκρισης.

Ωστόσο η καθεμία από αυτές τις δύο περιπτώσεις (εφελκυσμός/θλίψη) εμπεριέχει από δύο υποπεριπτώσεις ανάλογα με το εάν το στοιχείο έχει υποστεί παρόμοια φόρτιση σε προηγούμενο κύκλο και μια ακόμα περίπτωση εάν το σημείο αποφόρτισής του βρίσκεται πριν το σημείο μέγιστης τάσης (οπότε η καμπύλη δε χρειάζεται ανανέωση σύμφωνα με τον κανόνα ανανέωσης 5 ). Επομένως έχουμε  $2 \times (2+1) = 6$  περιπτώσεις. Οι περιπτώσεις αυτές μπορούν να αναπαρασταθούν στο διάγραμμα ροής στην εικόνα 5. 4. 2.

Παρακάτω παρουσιάζεται ο αλγόριθμος της επαναληπτικής διαδικασίας μαζί με τον αλγόριθμο Απόκρισης/Ανανέωσης :

Σχήμα 5. 4. 2 : Διάγραμμα ροής του προγράμματος ολιγοκυκλικής φόρτισης.

Αναλυτικότερες παρατηρήσεις ως προς τη δομή του κώδικα:

- Οι ανανεωμένες καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων σχεδιάζονται από 5 σημεία σχεδιασμού τα οποία ονομάζονται στον κώδικα p1. . . p5. Τα σημεία αυτά αποτελούν πίνακες 1X2 στοιχείων με το πρώτο στοιχείο να είναι η εκάστοτε παραμόρφωση και το δεύτερο η αντίστοιχη τάση.
- Τα σημεία p1. . . p5 λαμβάνουν τιμές από σημεία που έχουν κάποια φυσική σημασία για το κάθε στοιχείο (όπως πχ το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό). Αυτό γίνεται για να μπορέσει να υπάρξει ευκολότερος έλεγχος της λειτουργίας των κανόνων απόκρισης/ανανέωσης και να μην "χάνεται" ο χειριστής σε σημεία που δεν γνωρίζει τη φυσική τους σημασία.
- Οι ανανεωμένες καμπύλες προκύπτουν ως άθροισμα των πινάκων ανανεωμένων καμπυλών για στοιχεία σε εφελκυσμό και για στοιχεία σε θλίψη. Καθένας από αυτούς τους δύο πίνακες περιέχει τις νέες συντεταγμένες των σημείων μόνο για τα στοιχεία που είναι στην αντίστοιχη φόρτιση ενώ για τα υπόλοιπα περιέχει μηδενικά. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να ελέγξουμε γρηγορότερα το ποιο στοιχείο βρίσκεται σε εφελκυσμό/θλίψη κάθε φορά.
- Οι πίνακες των μεγεθών που χρησιμοποιούνται γενικά είναι τρισδιάστατοι. Η πρώτη διάσταση (γραμμή) αντιστοιχεί στο καθένα από τα στοιχεία της μέσης τομής, η δεύτερη διάσταση (στήλη) στις τιμές που μας ενδιαφέρουν (για παράδειγμα μπορεί να είναι

συντεταγμένες παραμόρφωσης-τάσης ή ένας δείκτης) και η τρίτη διάσταση (σελίδα) την ανανέωση που υφίσταται ο εκάστοτε πίνακας.

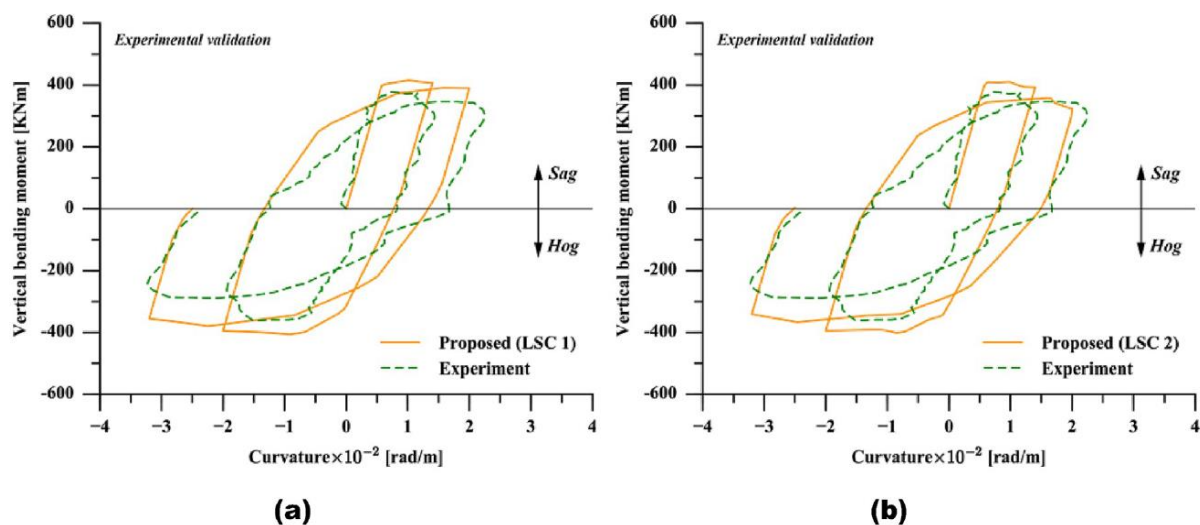
- Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στις αδιαστατοποιημένες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται. Στον κώδικα χρησιμοποιείται αποκλειστικά η αδιάστατη παραμόρφωση  $\epsilon/\epsilon_y$  (παραμόρφωση/παραμόρφωση διαρροής) επομένως οποιαδήποτε μεταβλητή εμπεριέχει τη παραμόρφωση πρέπει να αδιαστατοποιηθεί. Για παράδειγμα, η κλίση της καμπύλης  $\sigma-\epsilon$  για ένα στοιχείο δεν είναι ίση με το μέτρο ελαστικότητας  $E$  αλλά ίση με την τάση διαρροής (συμβολισμένη κατά IACS “ $ReH$ ”) –ώστε σε παραμόρφωση  $\epsilon/\epsilon_y = 1$  η προκύπτουσα τάση να είναι ίση με τη τάση διαρροής.
- Στο πρόγραμμα έγινε η εξής προσέγγιση: Τα στοιχεία που αρχικά φορτίζονται σε εφελκυσμό κατά την πρώτη ενημέρωση τους μόνο πρέπει να μετατοπίσουν την αρχική καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για θλίψη (δηλαδή την παραγόμενη από τους κανονισμούς του IACS) αριστερά μέχρι το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό. Επειδή η αρχική καμπύλη έχει πολλά περισσότερα σημεία από τις καμπύλες ανανέωσης προσεγγίζεται σαν ένα ευθύγραμμο τμήμα με σημεία : σημείο μόνιμης παραμόρφωσης σε εφελκυσμό->σημείο μέγιστης αρχικής τάσης σε θλίψη-> σημείο μέγιστης παραμόρφωσης.

Η παραδοχή αυτή ενδέχεται να επηρεάσει τις αναπτυσσόμενες τάσεις σε μια διατομή αφότου γίνει η πρώτη αποφόρτίσή της (επομένως τα μισά στοιχεία της βρίσκονται σε αρχικό εφελκυσμό και τείνουν να φορτιστούν θλιπτικά). Επομένως, στα στοιχεία αυτά ενδέχεται να υπερεκτιμήσουμε την αναπτυσσόμενη τάση και κατά συνέπεια – την αναπτυσσόμενη καμπτική ροπή.

## 5.5 Αποτελέσματα Εκτέλεσης Κώδικα

### 5.5.1 Γενικά

Κατόπιν της δημιουργίας του αλγορίθμου έγινε η εκτέλεση του προγράμματος για το μοντέλο B-2D που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα του Shen Li με τίτλο «*Progressive collapse analysis of ship hull girders subjected to extreme cyclic bending*». Συγκεκριμένα στην εικόνα 5.5.1 φαίνεται η παραγόμενη καμπύλη ροπής καμπυλότητας για το μοντέλο B2-D που περιγράφηκε στο κεφάλαιο της μονοτονικής φόρτισης (Fig. 17 στην έρευνα του Shen).

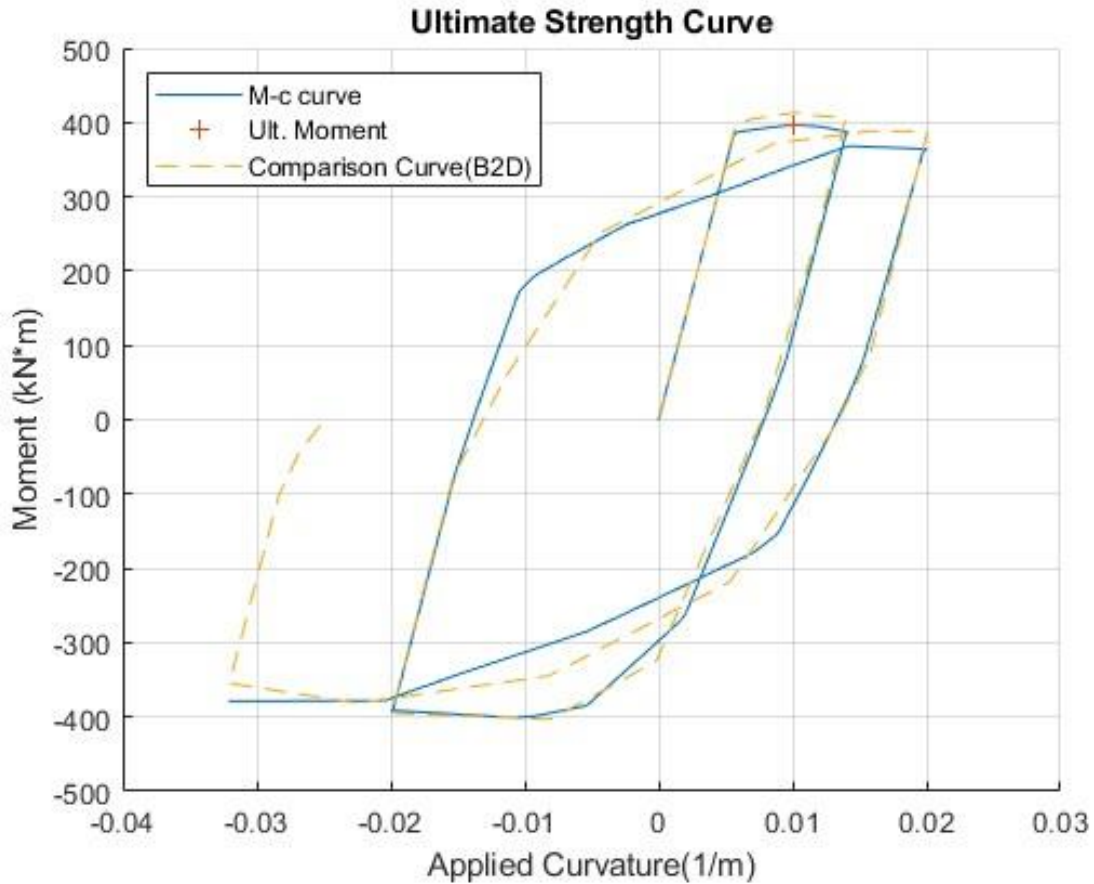


Εικόνα 5.5.1 : Καμπύλη M-χ για το μοντέλο B2-D. (Li, S., Hu, Z., & Benson, S. (2020). Progressive collapse analysis of ship hull girders subjected to extreme cyclic bending.)

Η σύγκριση γίνεται με το αριστερό διάγραμμα που χρησιμοποιεί τις αρχικές καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων LSC-1 που προκύπτουν από τη μεθοδολογία του IACS (οι καμπύλες LSC-2 προκύπτουν από μελέτες πεπερασμένων στοιχείων). Συγκεκριμένα η LSC-1 είναι η καμπύλη σ-ε που παράγεται από την μεθοδολογία που υπάρχει στους CSR και χρησιμοποιήθηκε από το πρόγραμμα ολιγοκυκλικής φόρτισης, ενώ η LSC-2 συμπεριλαμβάνει και φαινόμενα σκλήρυνσης του υλικού κατά την εναλλαγή του φορτίου. Η εισαγωγή τους γίνεται με πρόγραμμα σκαναρίσματος εικόνας και λήψης συντεταγμένων σημείων.



Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου ολογοκυκλικής κόπωσης συμφωνούν ικανοποιητικά με τα αποτελέσματα της αρχικής έρευνας. Παρατηρούμε κάποιες μικρές αποκλίσεις ως προς την μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή και μια υπερεκτίμηση της ροπής στις μικρότερες κατ' απόλυτη τιμή καμπυλότητες.



Σχήμα 5. 5. 2 : Καμπύλη ροπής-καμπυλότητας για το μοντέλο B2D. Με μπλέ χρώμα φαίνεται η καμπύλη του προγράμματος Μέγιστης Αντοχής και με κίτρινο χρώμα η καμπύλη του πειράματος του Shen Li.

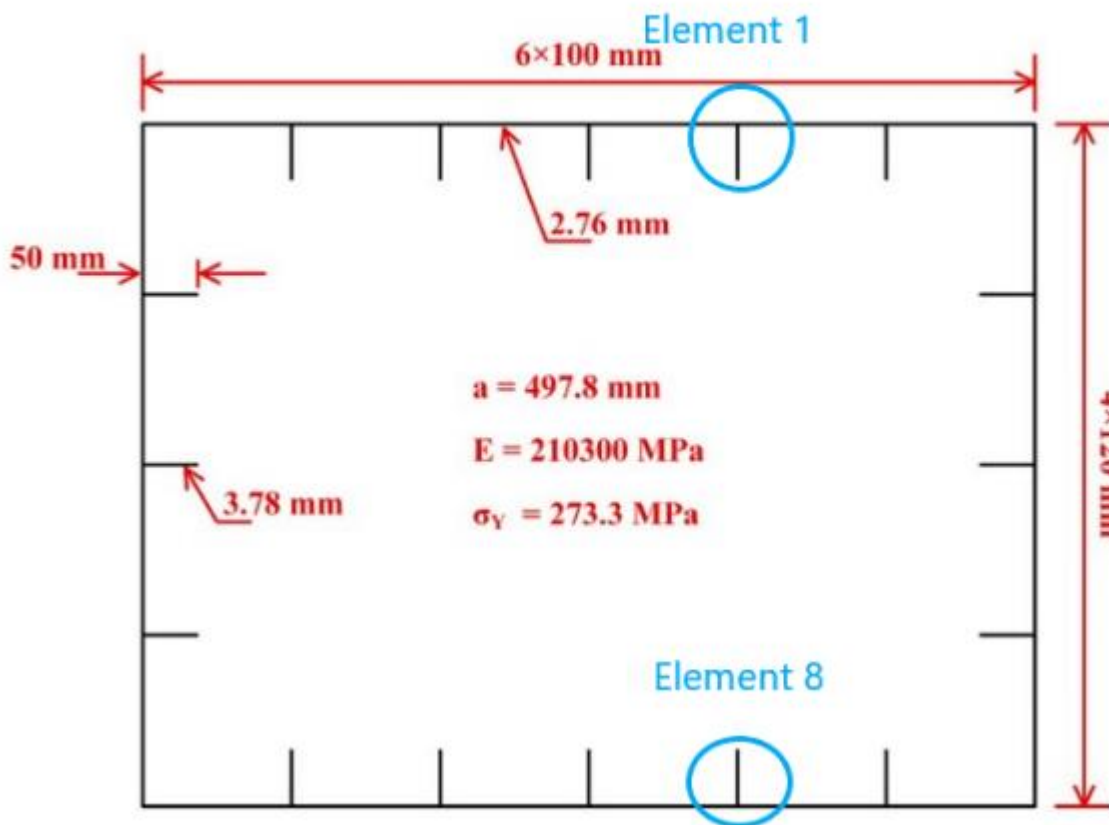
### 5. 5. 2 Σχολιασμός Αποκλίσεων

Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται σε τρεις βασικές αιτίες:

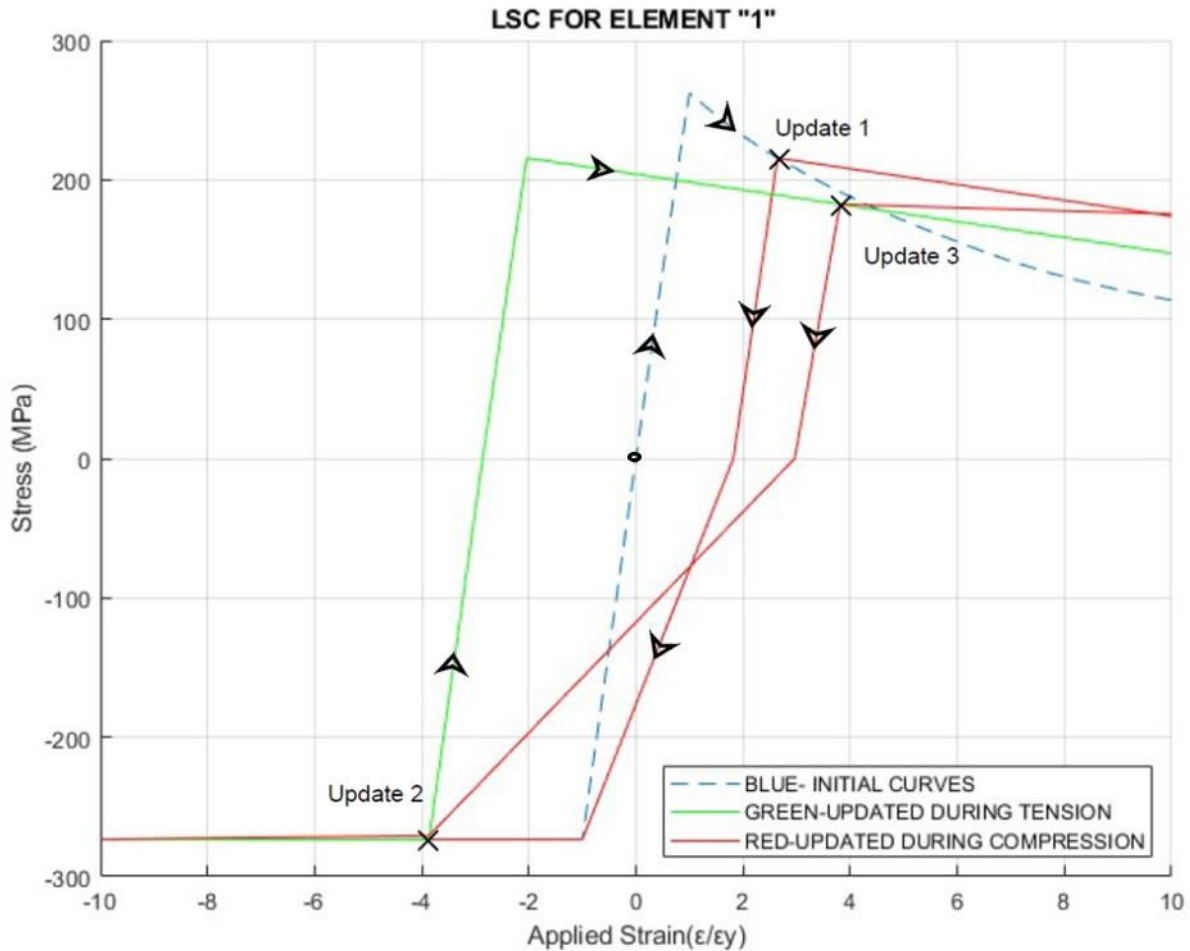
1. Πρώτον, ο συντελεστής μείωσης της κλίσης μετά την αποφόρτιση σε θλίψη ( $\phi_1$ ) και ο συντελεστής μείωσης της μέγιστης τάσης σε εφελκυσμό ( $\phi_2$ ) φαίνεται ότι επηρεάζουν την καμπύλη ως προς τις τιμές που θα λάβει κοντά στις μέγιστες καμπυλότητες (διότι εκεί οι τάσεις στα στοιχεία φτάνουν μεγαλύτερες απόλυτες τιμές). Ο συντελεστής αυτοί έχουν προκύψει από παρατήρηση του ερευνητή και πιθανότατα να διαφέρουν ανάλογα με τις γεωμετρικές ιδιότητες του κάθε στοιχείου.
2. Δεύτερον, το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε χρησιμοποιεί μια προσέγγιση της αρχικής καμπύλης  $\sigma$ - $\epsilon$  στα στοιχεία που αρχικά φορτίζονται σε εφελκυσμό. Η προσέγγιση αυτή ενδέχεται να επηρεάζει την καμπύλη ροπών όταν τα στοιχεία αυτά ξεπερνούν την μέγιστη τάση τους σε θλίψη – ενώ από την άλλη δεν γνωρίζουμε εάν ο γράφων της έρευνας χρησιμοποίησε κάποια παρόμοια προσέγγιση.
3. Τρίτον, τα μοντέλα B2D που χρησιμοποιήθηκαν από τη μελέτη του γράφοντος ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφορές με την έρευνα, διότι υπάρχει μόνο ένα σκαρίφημα του μοντέλου χωρίς να γνωρίζουμε με ακρίβεια όλες τις διαστάσεις του. Για παράδειγμα, το μήκος των ενισχυτικών δεν γνωρίζουμε εάν μετράται από την εξωτερική ή την εσωτερική πλευρά του συνεργαζόμενου ελάσματος-επομένως επιλέχθηκε από τον γράφων οι διαστάσεις να μετρώνται από το μέσο των ελασμάτων του shell του μοντέλου. Οι διαφορές μπορεί να είναι αμελητέες ως προς το εμβαδό, αλλά όχι τόσο ως προς τη ροπή αδράνειας της μέσης τομής.

### 5. 5. 3 Διαγράμματα Τάσεων Παραμορφώσεων

Ως προς τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης των στοιχείων που απαρτίζουν τη μέση τομή, έχουμε τη δυνατότητα να σχεδιάσουμε την κάθε καμπύλη σε κάθε βήμα ανανέωσης σε ένα κοινό διάγραμμα. Στο πρώτο διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες σ-ε για ένα στοιχείο που βρίσκεται πάνω από τον ουδέτερο άξονα (επομένως υφίσταται αρχική θλίψη) και στο δεύτερο διάγραμμα για ένα στοιχείο που βρίσκεται κάτω από τον ουδέτερο άξονα και υφίσταται αρχικά εφελκυσμό. Οι αρχικές καμπύλες τάσης παραμόρφωσης φαίνονται με μπλέ γραμμή, ενώ οι υπόλοιπες (3) καμπύλες είναι αυτές που παρήχθησαν από τους κανόνες ανανέωσης/απόκρισης.

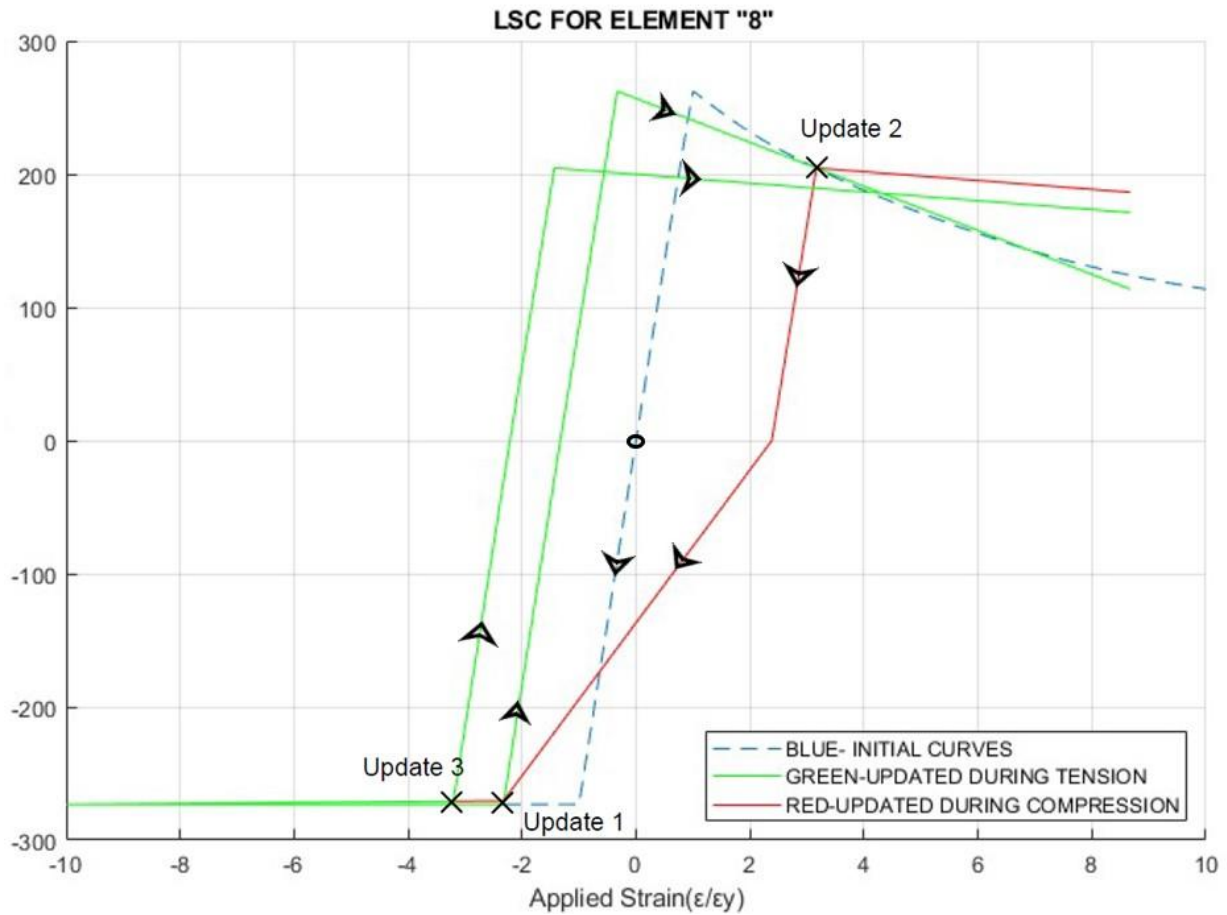


Σχήμα 5. 5. 3 : Οι θέσεις των υπό μελέτη ενισχυτικών (τυχαία κατά την εγκάρσια διεύθυνση).



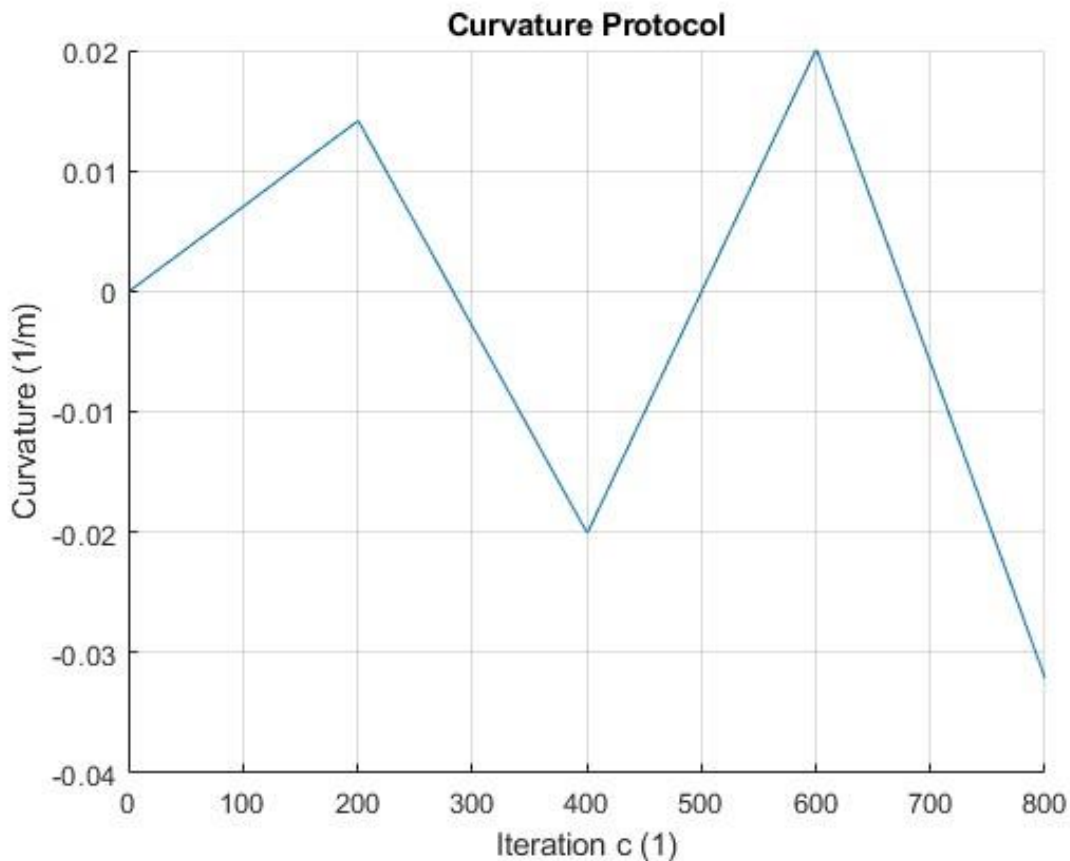
Σχήμα 5. 5. 4 : Καμπύλες σ-ε για ενισχυτικό “Stiffened Element” πάνω στο κατάστρωμα (48cm πάνω από το base plane).

Στην εικόνα 5. 5. 4 βλέπουμε τις παραγόμενες καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για ένα ενισχυτικό στην άνω ακμή του υπό μελέτη box girder. Η πορεία φόρτισης του υλικού φαίνεται με μαύρα βελάκια ενώ με “X” συμβολίζονται τα σημεία όπου ενεργοποιείται ο κανόνας ανανέωσης. Ομοια αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 5. 5. 3. 2 για ένα αντίστοιχο ενισχυτικό στην κάτω ακμή.



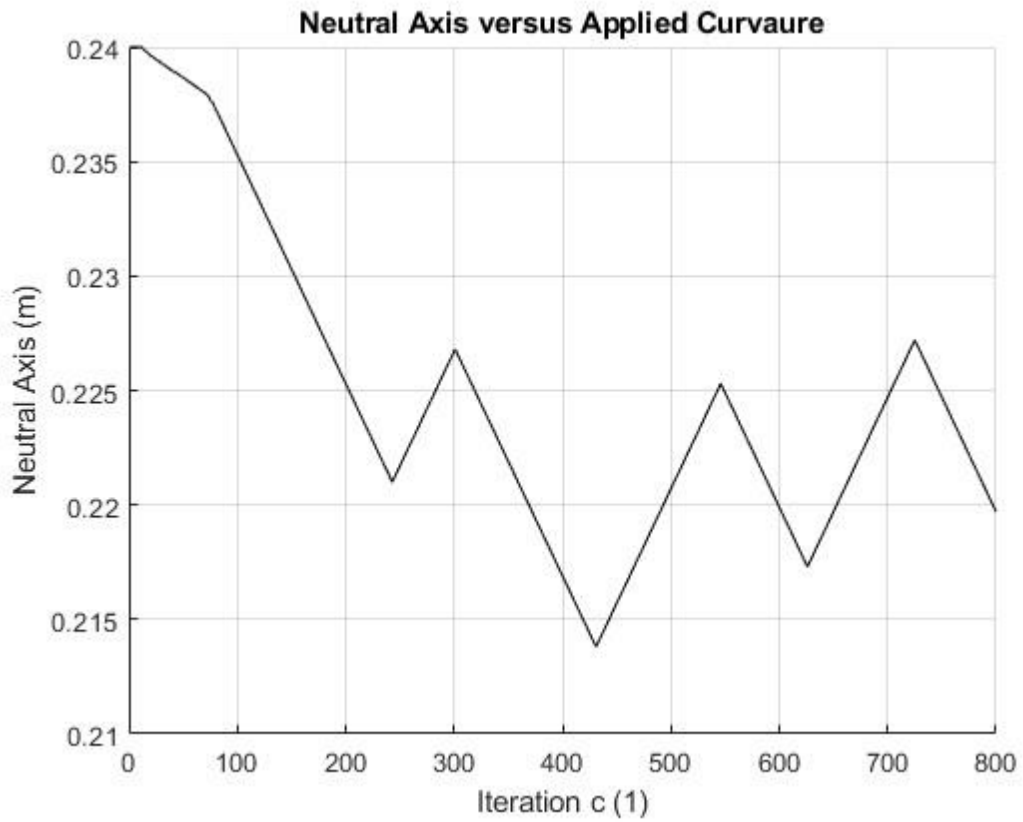
Σχήμα 5. 5. 5 : Καμπύλες σ-ε για ενισχυτικό “Stiffened Element” στον πυθμένα (πάνω στο base plane).

Στο σχήμα 5. 5. 5 φαίνεται το πρωτόκολλο καμπυλότητας που επιβλήθηκε στη διατομή του δοκιμίου (είναι παρόμοιο με τη καμπυλότητα της έρευνας).



Σχήμα 5. 5. 6 : Επιβαλλόμενη καμπυλότητα συναρτήσει των βημάτων προσαύξησης της επαυξητικής διαδικασίας.

Τέλος, στο σχήμα 5. 5. 6 απεικονίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα συναρτήσει των βημάτων προσαύξησης. Η θέση του ουδέτερου άξονα ξεκινά από τα 0. 24 μέτρα (δηλαδή πάνω στο κεντροειδές της διατομής) και μετατοπίζεται ανάλογα με τη συνισταμένη δύναμη που ασκείται πάνω στη διατομή.



Σχήμα 5. 5. 7 : Θέση καθ' ύψος του ουδέτερου άξονα συναρτήσσει της επιβαλλόμενης καμπυλότητας.

## 5. 6 Μελέτη επίδρασης συντελεστών μείωσης τάσης και ελαστικότητας επαναφόρτισης.

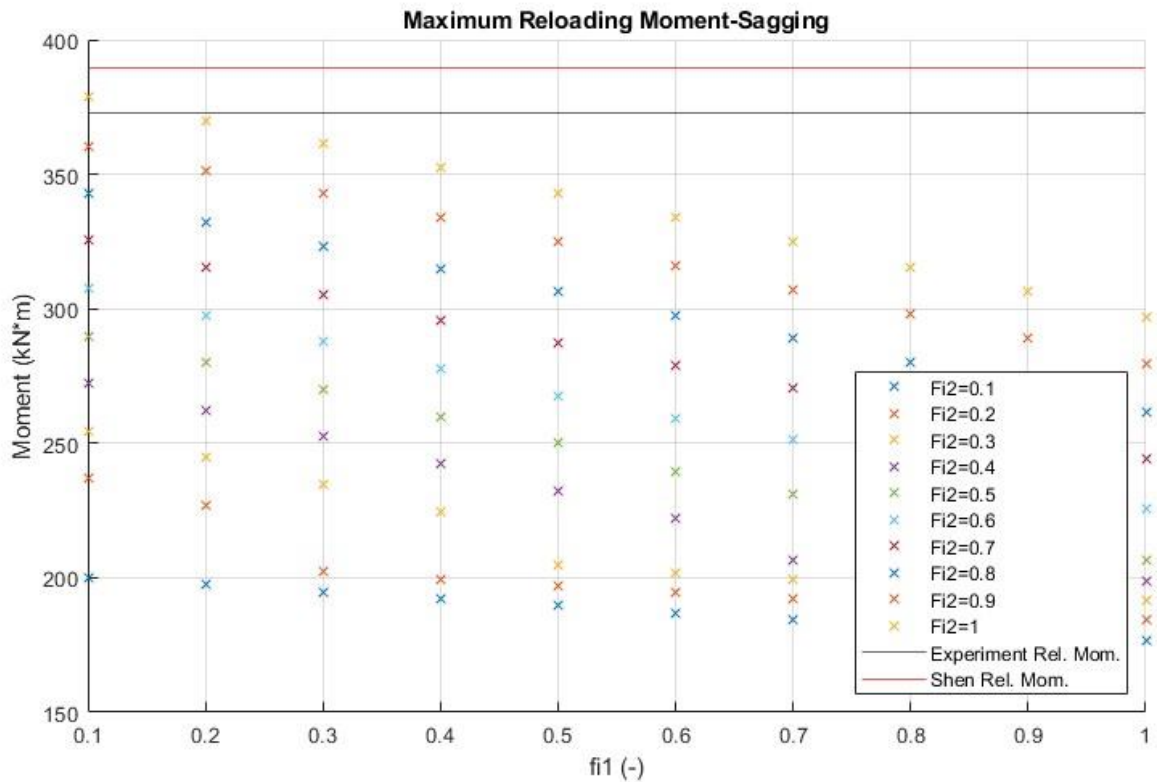
Παρακάτω γίνεται μια μελέτη της επίδρασης του συντελεστή μείωσης ελαστικότητας μετά της μέγιστη τάση ( $\phi_1$ ) και του συντελεστή μείωσης εφελκυστικής τάσης ( $\phi_2$ ). Οι συντελεστές αυτοί λαμβάνουν στην έρευνα του Shen αυθαίρετες τιμές οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα που συγκρίνονται είναι η μέγιστη ροπή επαναφόρτισης σε εφελκυσμό και θλίψη συναρτήσει των συντελεστών αυτών, λαμβανόμενων τιμών από 0 έως 1.

Η φυσική σημασία των συντελεστών μείωσης τάσης και ελαστικότητας επαναφόρτισης σχετίζεται με την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του εκάστοτε ενισχυτικού. Ο συντελεστής  $\phi_1$  δείχνει πόσο γρήγορα μειώνονται οι τάσεις μετά την τάση διαρροής και ο συντελεστής  $\phi_2$  πόσο μειώνεται η μέγιστη τάση επαναφόρτισης σε εφελκυσμό.

Η σωστή επιλογή των τιμών  $\phi_1$  και  $\phi_2$  μπορεί να γίνει συναρτήσει μιας βάσης δεδομένων για διάφορα υλικά και ενισχυτικά, κάτι το οποίο ξεφεύγει από το πεδίο της παρούσας έρευνας.

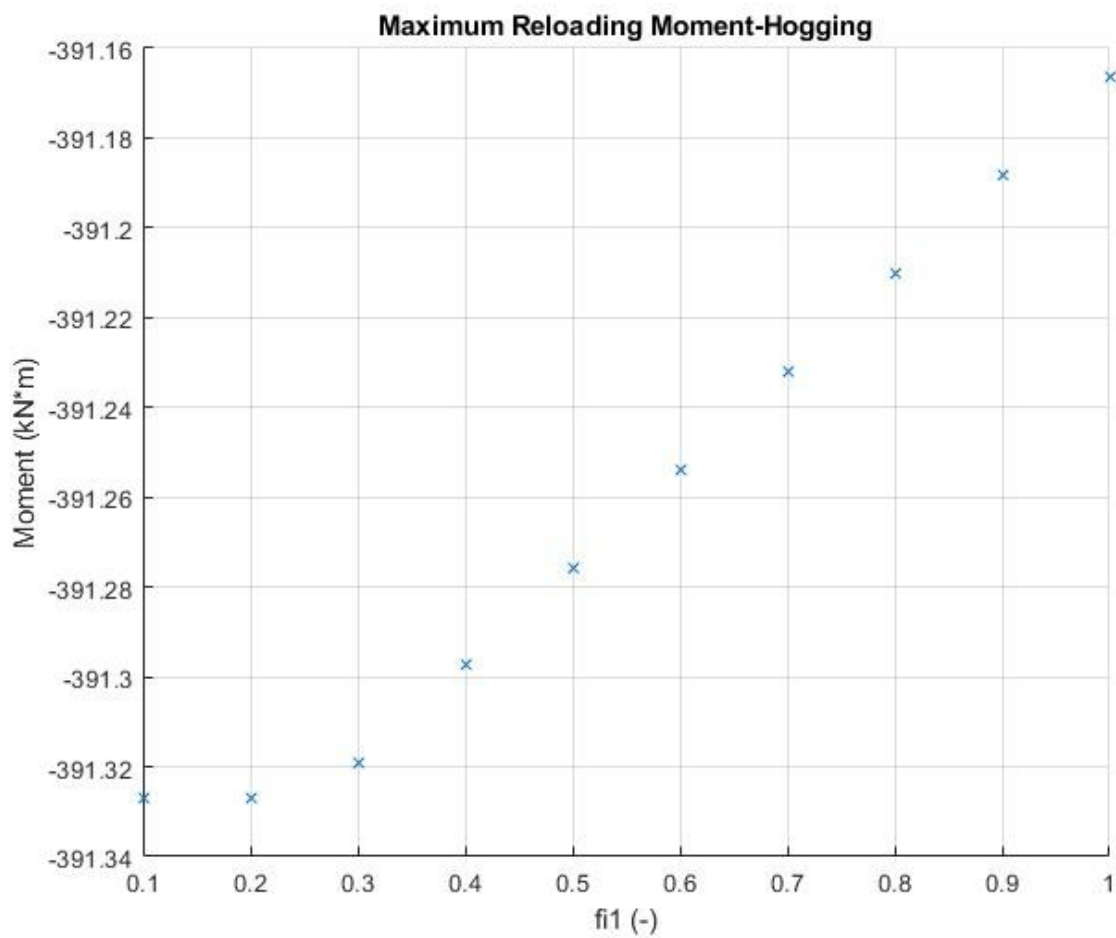




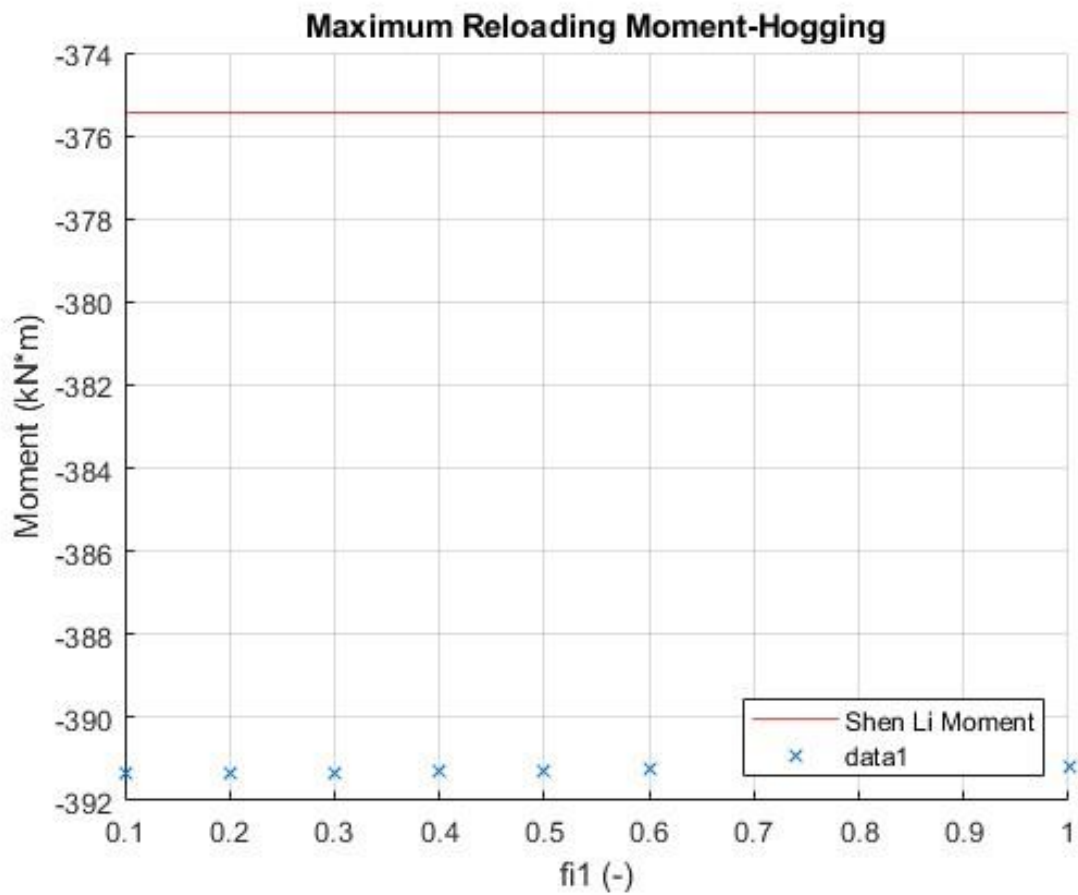
Εικόνα 5. 6. 1 : Μέγιστη ροπή επαναφόρτισης sagging συναρτήσει του συντελεστή  $\phi_1$  και  $\phi_2$ .

Παρατηρούμε ότι η τιμή των συντελεστών  $\phi_1$  και  $\phi_2$  ενδέχεται να προκαλέσει σημαντικές αποκλίσεις στα αποτελέσματα του κώδικα. Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνονται με συνεχείς γραμμές οι τιμές της ροπής επαναφόρτισης από τη μελέτη του Shen Li και από μελέτη πεπερασμένων στοιχείων.

Αντίστοιχα τα αποτελέσματα για ροπή hogging παρουσιάζονται παρακάτω. Σημειώνουμε ότι η τιμή της ροπής hogging εξαρτάται μόνο από την τιμή του συντελεστή  $\phi_1$ . Παρατηρούμε ότι η επίδραση του συντελεστή στη ροπή επαναφόρτισης hogging είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη σε sagging



Εικόνα 5.6.2 :Απεικόνιση της ροπής επαναφόρτισης συναρτήσει των συντελεστών  $\phi_1$  και  $\phi_2$ .



Εικόνα 5.6.2 :Απεικόνιση της ροπής επαναφόρτισης συναρτήσει των συντελεστών  $\phi_1$  και  $\phi_2$  και σε σύγκριση με τη ροπή επαναφόρτισης που υπολογίζει ο Shen Li.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : Μελέτη Πεπερασμένων Στοιχείων – Σύγκριση και επαλήθευση αποτελεσμάτων.

### 6.1 Γενικά

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προσπάθεια επαλήθευσης των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από το πρόγραμμα υπολογισμού καμπτικής ροπής με χρήση του λογισμικού Abaqus. Η επαλήθευση γίνεται σε δύο στάδια :

- Στο πρώτο στάδιο σχεδιάζεται το ενισχυμένο έλασμα που παρουσιάζεται στη μελέτη του Paik : «*Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels*» και συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα της έρευνας. Η μελέτη αυτή γίνεται για να επιβεβαιωθεί η σωστή σχεδίαση και μοντελοποίηση του φαινομένου του λυγισμού με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.
- Στο δεύτερο στάδιο γίνεται μοντελοποίηση του ενισχυμένου ελάσματος του box girder B2D όπου και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της καμπτικής ροπής και της ορθής τάσης με τα αντίστοιχα της έρευνας του Shen Li και του υπολογιστικού προγράμματος που αναπτύχθηκε από την έρευνα.

Πρίν προχωρήσουμε στη μοντελοποίηση γίνεται μια σύντομη παρουσίαση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων που εφαρμόστηκε με το λογισμικό ABQUS.

## 6.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων - Θεωρία

Η Ανάλυση Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Analysis - FEA) είναι ένα ισχυρό εργαλείο υπολογιστικής μηχανικής που χρησιμοποιείται για την ανάλυση πολύπλοκων συστημάτων μηχανικής. Είναι μια αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων διαιρώντας ένα συνεχές πεδίο σε ένα πεπερασμένο αριθμό υποπεδίων, γνωστών ως πεπερασμένα στοιχεία. Τα πεπερασμένα στοιχεία συνδέονται στα διακριτά σημεία, γνωστά ως κόμβοι, σχηματίζοντας ένα δίκτυο. Οι κυριαρχούσες εξισώσεις του συστήματος προσεγγίζονται στο εσωτερικό κάθε πεπερασμένου στοιχείου χρησιμοποιώντας συναρτήσεις βάσης, επιτρέποντας στις εξισώσεις να λυθούν αριθμητικά. Αυτή η διαδικασία είναι γνωστή ως Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method - FEM).

Ένα πλήρες υπολογιστικό περιβάλλον για την ανάλυση μίας μηχανολογικής κατασκευής με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (ΜΠΣ) εμφανίζει τρία διακριτά μέρη (βλ. Σχήμα 12).

### I. Προ-επεξεργασία (pre-processing)

Αφορά στην εισαγωγή όλων εκείνων των δεδομένων που απαιτούνται για τη μελέτη της κατασκευής, δηλαδή:

- Γεωμετρική περιγραφή της κατασκευής
- Διακριτοποίηση της κατασκευής
- Δήλωση ιδιοτήτων υλικού της κατασκευής
- Δήλωση στηρίξεων
- Δήλωση φορτίσεων

Η γεωμετρική περιγραφή της κατασκευής επιτυγχάνεται μέσω της σχεδίασης αυτής. Με τον όρο 'διακριτοποίηση της κατασκευής', ισοδύναμα με τον όρο 'δημιουργία πλέγματος', εννοούμε τη διαίρεση της κατασκευής σε πλήθος στοιχείων με πεπερασμένες γεωμετρικές διαστάσεις (Πεπερασμένα Στοιχεία - ΠΣ). Ο τύπος των ΠΣ αποτελεί επιλογή του χρήστη. Επομένως, η προ-επεξεργασία είναι ουσιαστικά ένα σχεδιαστικό περιβάλλον, στο οποίο προσομοιώνεται η προς μελέτη κατασκευή. Το προϊόν αυτής της προσομοίωσης καλείται 'μμοντέλο'

### II. Ανάλυση (Analysis)

Σε αυτό το τμήμα λαμβάνει χώρα ο υπολογισμός όλων των ποσοτήτων ενδιαφέροντος, όπως κομβικές μετατοπίσεις, τάσεις, παραμορφώσεις, ιδιοσυχνότητες, κοκ.

### III. Μετά-επεξεργασία (post-processing)

Σε αυτό το τμήμα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ο πλέον συνήθης τρόπος παρουσίασης είναι μέσω χρωματικής απεικόνισης. Αυτό σημαίνει ότι η κατανομή της ποσότητας ενδιαφέροντος, π. χ. τάση, εμφανίζεται ως κατανομή χρωμάτων σε όλη της έκταση της κατασκευής σύμφωνα με μία χρωματική κλίμακα. Επιπροσθέτως, είναι δυνατή η παρουσίαση αποτελεσμάτων είτε με τη μορφή γραφημάτων, είτε με τη μορφή πινάκων είτε ως περιεχόμενο κάποιου αρχείου δεδομένων.

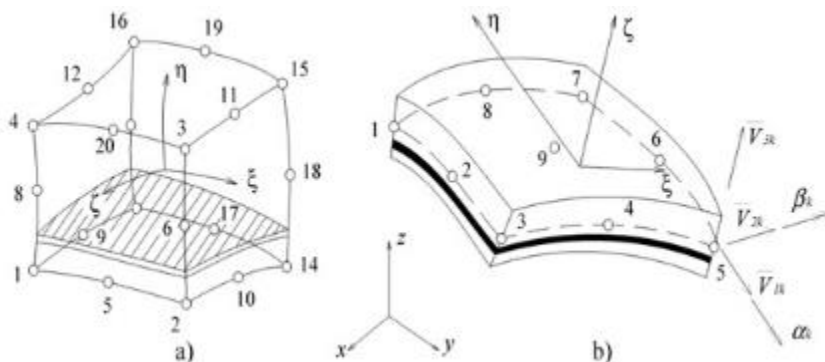
Το λογισμικό Abaqus δίνει στο χρήστη ένα μεγάλο εύρος δυνατοτήτων για ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα μηχανικής, ηλεκτρομαγνητικών μοντέλων και μοντέλων ρευστομηχανικής.

Επιλέγεται να παρουσιαστούν επιγραμματικά οι ιδιότητες που επιλέγονται να εισαχθούν στη παρούσα εργασία :

#### 1) Σχεδίαση

Το λογισμικό Abaqus επιτρέπει στον χρήστη να σχεδιάσει παραμετρικά το μοντέλο του είτε με διδιάστατη ή με τρισδιάστατη σχεδίαση. Στη παρούσα μελέτη επιλέγεται η σχεδίαση μοντέλου που θα εμπεριέχει shell elements (στοιχεία κέλυφους) καθώς τα ενισχυτικά που θα μοντελοποιηθούν παρακάτω έχουν πολύ μικρό πάχος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις.

Τα στοιχεία κέλυφους είναι προσεγγίσεις των στερεών στοιχείων που απαιτούν λιγότερους κόμβους κατά τη διακριτοποίηση, οδηγώντας σε μικρότερο υπολογιστικό κόστος και αυξημένη ακρίβεια αποτελεσμάτων για λεπτότοιχες κατασκευές.



Εικόνα 6. 2. 1 : Στερεό στοιχείο (solid element) στοιχείο κέλυφους (shell element).

Τα στοιχεία κέλυφους χρησιμοποιούνται σε κατασκευές όπου οι διατημικές δυνάμεις έχουν αμελητέα επίδραση και προσφέρουν μεγαλύτερη ευστάθεια στο σύστημα καθώς είναι

δυσκολότερο να δημιουργήσουν σφάλματα αρνητικής Ιακωβιανής (δηλαδή να παραμορφωθούν τόσο ώστε η εσωτερική τους επιφάνεια να γίνει εξωτερική). Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί σε κόμβους που δέχονται μεγάλες παραμορφώσεις (πχ. κατά τον λυγισμό) και να προκαλέσει αστάθεια κατά την επίλυση.

## 2) Διακριτοποίηση (meshing)

Το Abaqus δίνει τη δυνατότητα διακριτοποίησης του μοντέλου σε τετραεδρικά και τριεδρικά στοιχεία κέλυφους. Στα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν στις μελέτες παρακάτω χρησιμοποιούνται τα στοιχεία S4R. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν συμβατικά στοιχεία τάσεων-παραμορφώσεων (συμβ. "S"), τεσσάρων κόμβων (συμβ. "4"), με απλή ολοκλήρωση (reduced integration, "R").

Η έννοια της απλής ολοκλήρωσης αναφέρεται στην μέθοδο όπου εκτελείται η ολοκλήρωση για την επίλυση του συστήματος των μερικών διαφορικών εξισώσεων.

## 3) Επιλυτής (solver)

Ο επιλυτής που χρησιμοποιείται εξαρτάται από την φύση του προβλήματος και τις παραδοχές που γίνονται. Το πρόβλημα του λυγισμού είναι ένα έντονα μη γραμμικό φαινόμενο στο οποίο εμφανίζονται μεγάλες παραμορφώσεις σε μικρό χρονικό διάστημα. Επομένως επιλέγεται να εκτελεστεί δυναμική ανάλυση του προβλήματος.

Στην παρούσα ανάλυση χρησιμοποιείται επιλυτής "dynamic implicit".

Η διαφορική εξίσωση που επιλύεται είναι :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{f(t)\}$$

Όπου οι πίνακες [M], [C], [K] είναι οι πίνακες μάζας, απόσβεσης και ακαμψίας και η εξίσωση  $f(t)$  είναι το χρονικά εξαρτώμενο φορτίο. Ο επιλυτής χρησιμοποιεί την μέθοδο Newmark-β για την επίλυση του συστήματος σε κάθε προσαύξηση του step time.

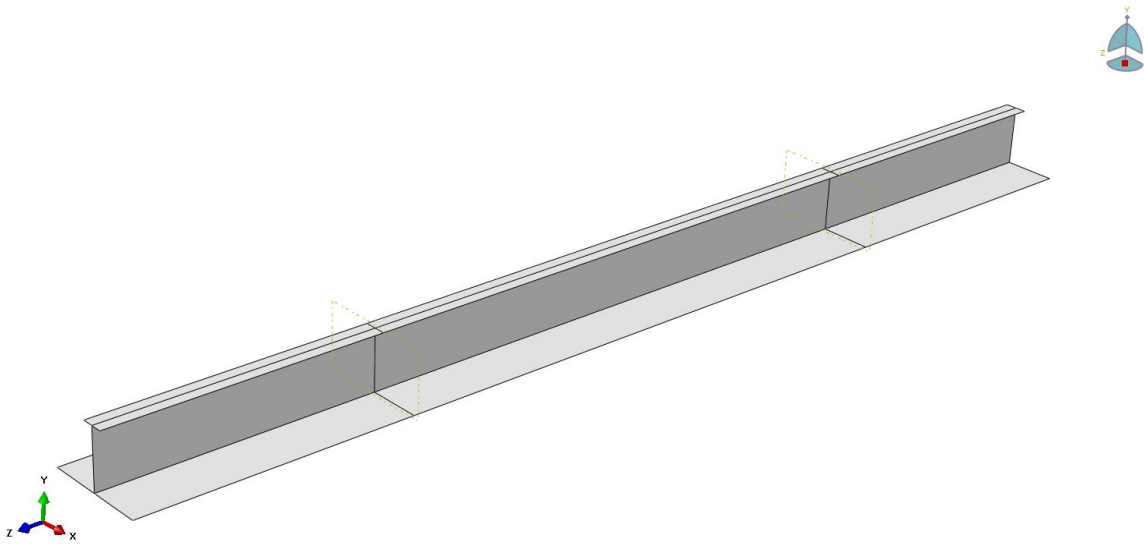
Εντός του επιλυτή επιλέγεται να συμπεριληφθεί η γεωμετρική μη-γραμμικότητα (non linear geometry) της κατασκευής. Η γεωμετρική μη-γραμμικότητα προκύπτει όταν οι παραμορφώσεις της κατασκευής είναι αρκετά μεγάλες ώστε να διαφοροποιήσουν την κατανομή των εσωτερικών δυνάμεων εντός των στοιχείων της – επομένως κρίνεται απαραίτητη στην μελέτη του φαινομένου του λυγισμού.

## 6.3 Συγκριτική μελέτη με τα αποτελέσματα του Paik

### 6.3.1 Σχεδίαση Μοντέλου Paik

Στην έρευνα του Paik : «*Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels*» παρουσιάζεται ένα πρότυπο μοντέλο ελάσματος πυθμένα στο οποίο εφαρμόζεται διαξονική φόρτιση και εξωτερική πίεση.

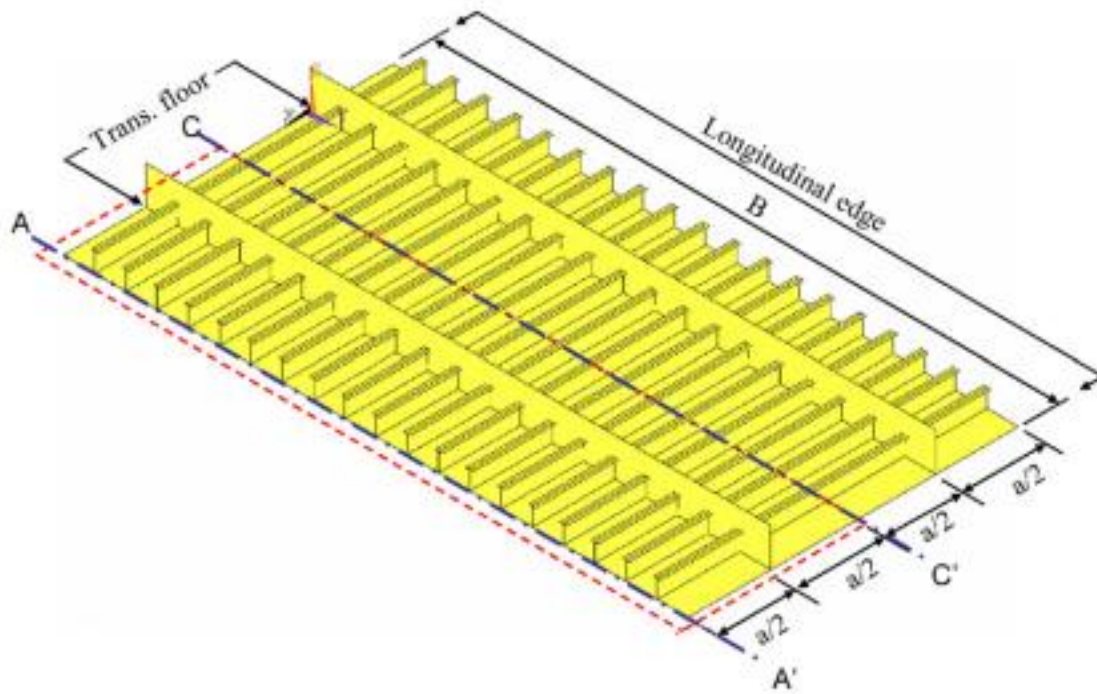
Η μελέτη της παρούσας εργασίας περιορίζεται στην περίπτωση της μονοαξονικής φόρτισης και δίχως εξωτερική πίεση στο έλασμα, η μόνη φόρτιση που ασκείται στο μοντέλο είναι η θλιπτική κατά την φορά των ενισχυτικών που φέρει.



Εικόνα 6. 3. 1. : Το προς μελέτη μοντέλο.

Η μελέτη πεπερασμένων στοιχείων διεξάγεται σε ένα απομονωμένο στοιχείο ενισχυμένης πλάκας (ενισχυτικό και συνεργαζόμενο έλασμα) και όχι σε ολόκληρο το εικονιζόμενο μοντέλο. Η έκταση του μοντέλου είναι κατά  $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$  της απόστασης μεταξύ των floors και το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ελαστικό – τέλεια πλαστικό.





Εικόνα 6. 3. 2. : Ονομασία πλευρών, αξόνων και συνοριακές συνθήκες Paik et al : «Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels».

Οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόζονται είναι :

Ακμή	Περιορισμός
Διαμήκεις ακμές	$y, x-R, z-R$
Ακμή φόρτισης	$y-R, z-R, x$ από 0 έως 0.1 μέτρα
Σταθερή ακμή	$y-R, z-R, x$

Οι γεωμετρικοί περιορισμοί που επιβάλλονται είναι :

- Στα floors : Παράλληλη μετατόπιση όλων των στοιχείων κατά τον  $x$ -άξονα.
- Στην ακμή φόρτισης : Παράλληλη μετατόπιση όλων των στοιχείων κατά τον  $x$ -άξονα.

Εισαγωγή Αρχικών Παραμορφώσεων.

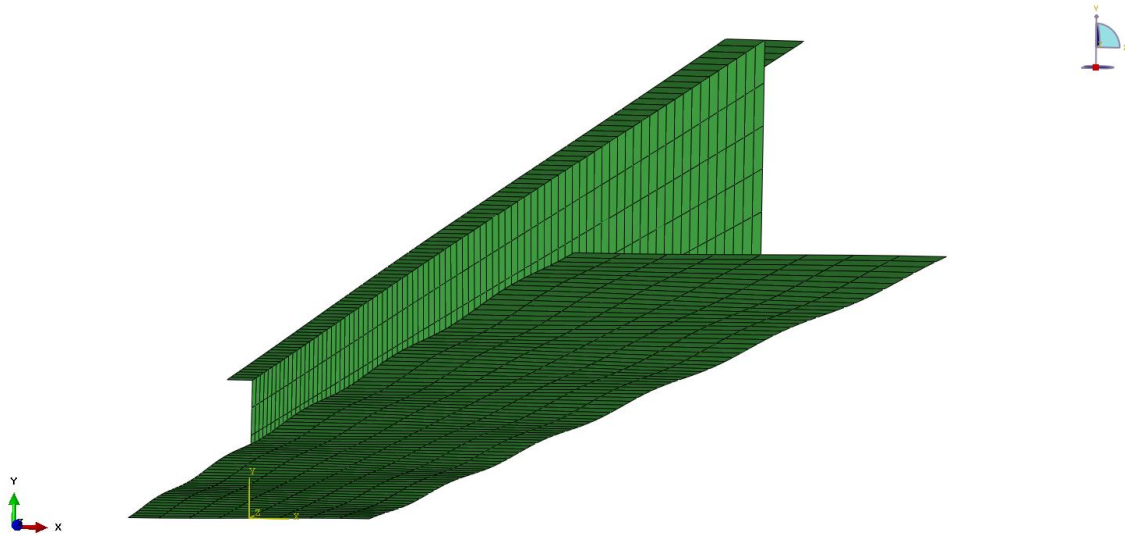
Το μοντέλο του Paik εμπεριέχει και αρχικές ατέλειες οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικότερα στη μελέτη του Zhang με τίτλο : «*Buckling and ultimate capability of plates and stiffened panels in axial compression*»

Οι ατέλειες χωρίζονται σε 3 κατηγορίες :

- Παραμόρφωση Δοκού-Κολώνας : Αφορά όλο το μοντέλο – πλάκα και συνεργαζόμενο ενισχυτικό.
- Παραμόρφωση Πλάκας : Αφορά μόνο τη πλάκα.
- Πλάγια παραμόρφωση Ενισχυτικού : Αφορά μόνο το ενισχυτικό – κορμό και φλάντζα.

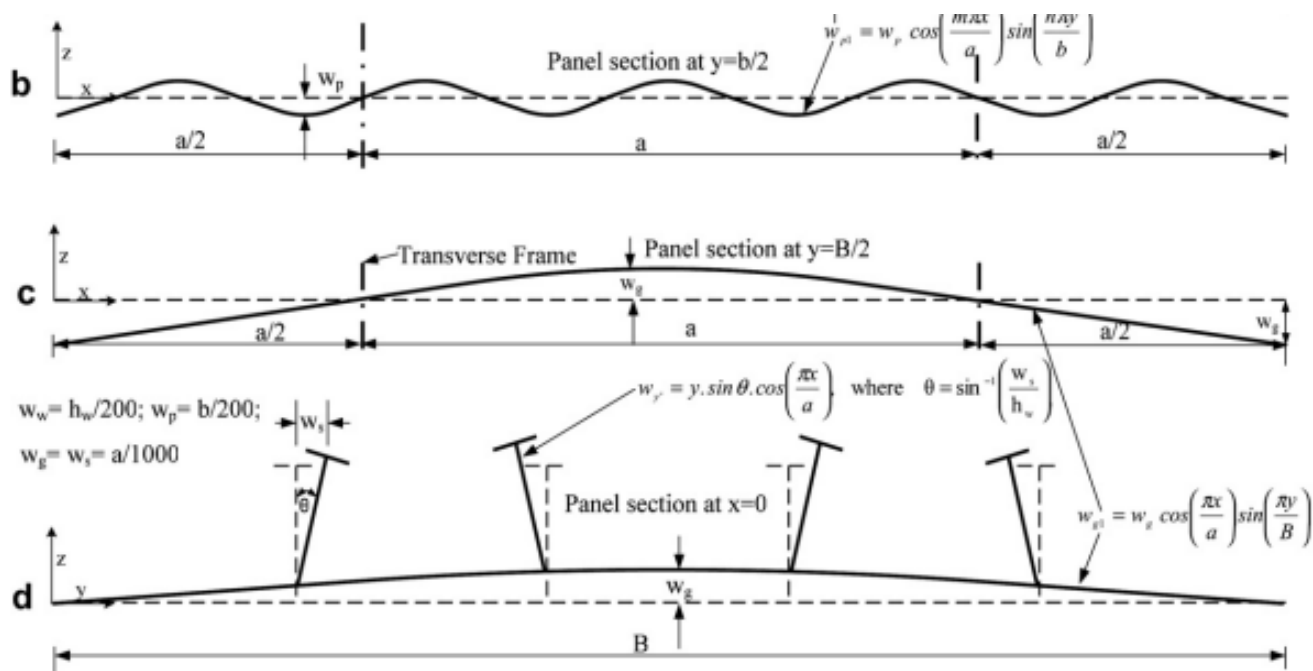


Εικόνα 6. 3. 3 : Αρχικές ατέλειες στο μοντέλο.



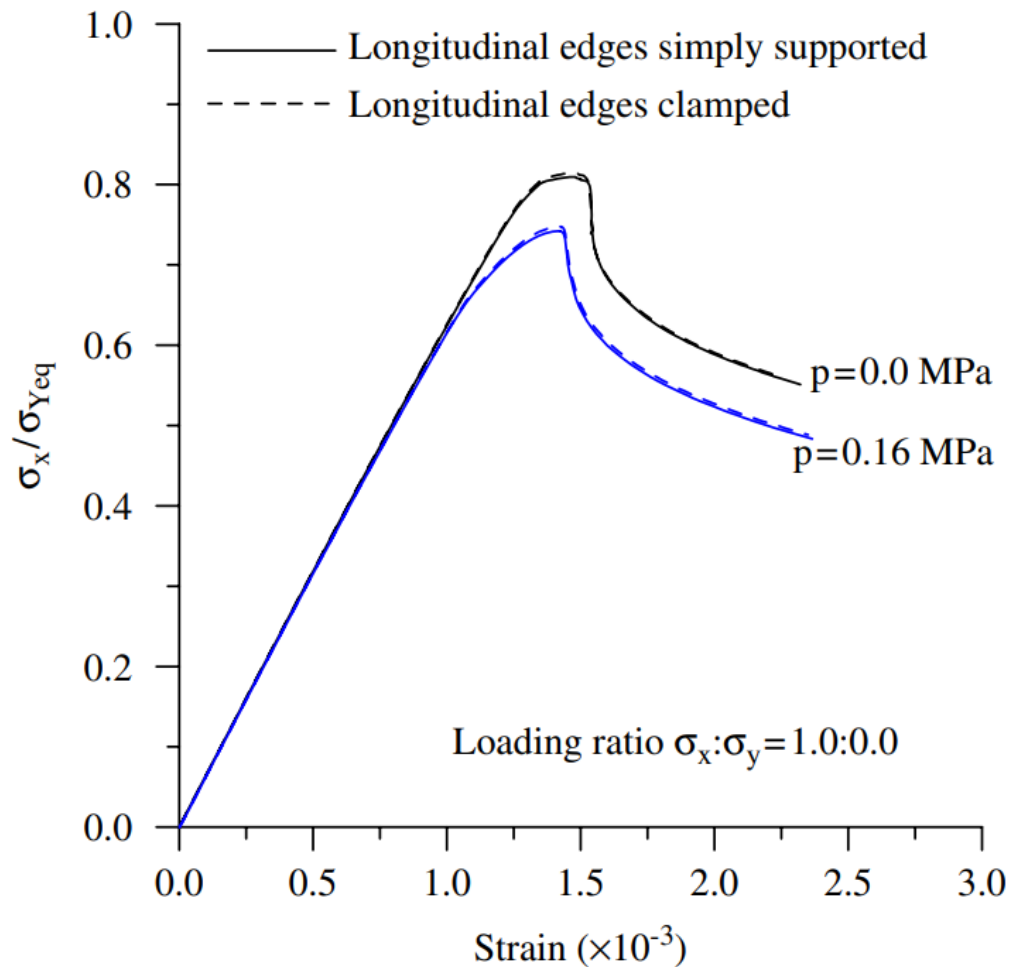
Εικόνα 6. 3. 4 : Αρχικές ατέλειες στο μοντέλο.

Οι εξισώσεις που σχηματίζουν τις ατέλειες του μοντέλου περιγράφονται παρακάτω :



Εικόνα 6. 3. 5 Αρχικές ατέλειες μοντέλου. Zhang et. al : «*Buckling and ultimate capability of plates and stiffened panels in axial compression*».

Το στοιχείο ενισχυμένου ελάσματος δέχεται επιβεβλημένη θλίψη κατά 2.5 χιλιοστά απ' όπου και εξάγεται η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων.



Εικόνα 6. 2. 5 : Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για το δοκίμιο ενισχυμένου ελάσματος με και χωρίς εξωτερική πίεση πυθμένα. Paik et al : «Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part II stiffened panels».

Η καμπύλη αυτή περιλαμβάνει αδιαστατοποίηση της αναπτυσσόμενης τάσης δια την τάση διαρροής (315 MPa) ενώ η παραμόρφωση είναι αδιάστατη.

Ακολουθώντας ακριβώς τα ίδια βήματα με αυτά που παρουσιάστηκαν στην μελέτη του Paik δημιουργείται το μοντέλο στο Abaqus. Οι διαστάσεις, το υλικό, οι ατέλειες και οι γεωμετρικοί περιορισμοί παραμένουν ίδιοι. Περιληπτικά η διαδικασία είναι η εξής :

- 1) Σχεδίαση της εγκάρσιας τομής του μοντέλου και δημιουργία extrusion.
- 2) Δημιουργία υλικού που θα χρησιμοποιηθεί ( Ελαστικό – τέλεια πλαστικό με όριο διαρροής  $\sigma_y = 315 \text{ MPa}$  και  $E = 205.8 \text{ GPa}$ ).
- 3) Δημιουργία κατάλληλων section-εισαγωγή πάχους σε πλάκα / κορμό / φλάντζα.
- 4) Επιλογή step. Χρησιμοποιείται επιλυτής dynamic implicit με quasi-static analysis ώστε να παραλείψουμε τα αδρανειακά φαινόμενα κατά την παραμόρφωση του μοντέλου. Για να λάβουμε σωστά αποτελέσματα ο λόγος κινητικής ενέργειας προς δυναμική ενέργεια πρέπει να είναι αρκετά μικρός (της τάξης του 0.1 )
- 5) Δημιουργία mesh. Επιλογή στοιχείων S4R (four node shell elements) για 3 διαφορετικά μεγέθη mesh-αρίσματος.
- 6) Εισαγωγή των γεωμετρικών περιορισμών στα στοιχεία (nodes).
- 7) Εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο. Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση εισάγεται ως οριακή συνθήκη που επιβάλλεται γραμμικά κατά το step time.
- 8) Δημιουργία αρχείου inp με την εντολή Write Input.
- 9) Από το αρχείο αυτό διαχωρίζονται τα στοιχεία του ενισχυτικού και της πλάκας στα οποία εισάγονται οι αρχικές ατέλειες. Οι νέες συντεταγμένες των παραμορφωμένων στοιχείων εισάγονται στο ίδιο αρχείο inp (overwrite) και γίνεται εκ νέου import του μοντέλου.
- 10) Εκτελούμε τη προσομοίωση στο παραμορφωμένο μοντέλο.
- 11) Απεικονίζουμε την αναπτυσσόμενη δύναμη κατά την διαμήκη διεύθυνση και την αντίστοιχη μετατόπιση για το κεντρικό στοιχείο της πλάκας κατά την ακμή φόρτισης. Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε Excel και σχεδίαση διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης.

Η μόνη διαφορά είναι στη επιλογή του κατάλληλου mesh για το πείραμα, όπου και εκτελείται μια σύντομη μελέτη σύγκλισης mesh (mesh convergence study).

Επιλέγονται mesh με μεγέθη στοιχείων :

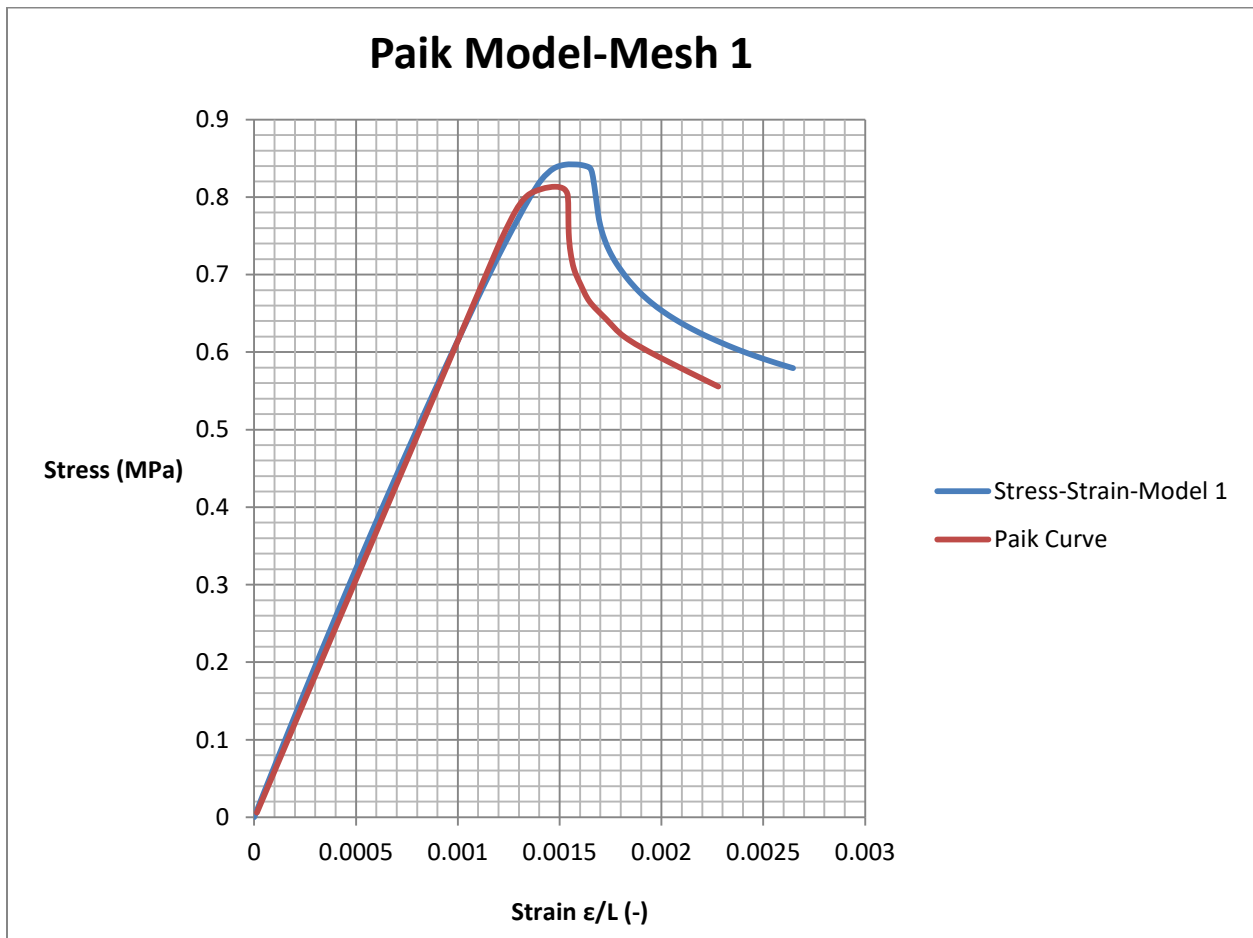
- 1) 0.15 μέτρα (Mesh-1)
- 2) 0.10 μέτρα (Mesh-2)
- 3) 0.03 μέτρα (Mesh-3)
- 4) 0.02 μέτρα (Mesh-4)

Παρατηρούμε ότι σε όλα τα διαγράμματα η αστοχία παρατηρείται πολύ κοντά στη τιμή της παραμόρφωσης που προβλέπει ο Paik και όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων το σημείο αστοχίας τείνει να ταυτιστεί με το σημείο της καμπύλης σύγκρισης.

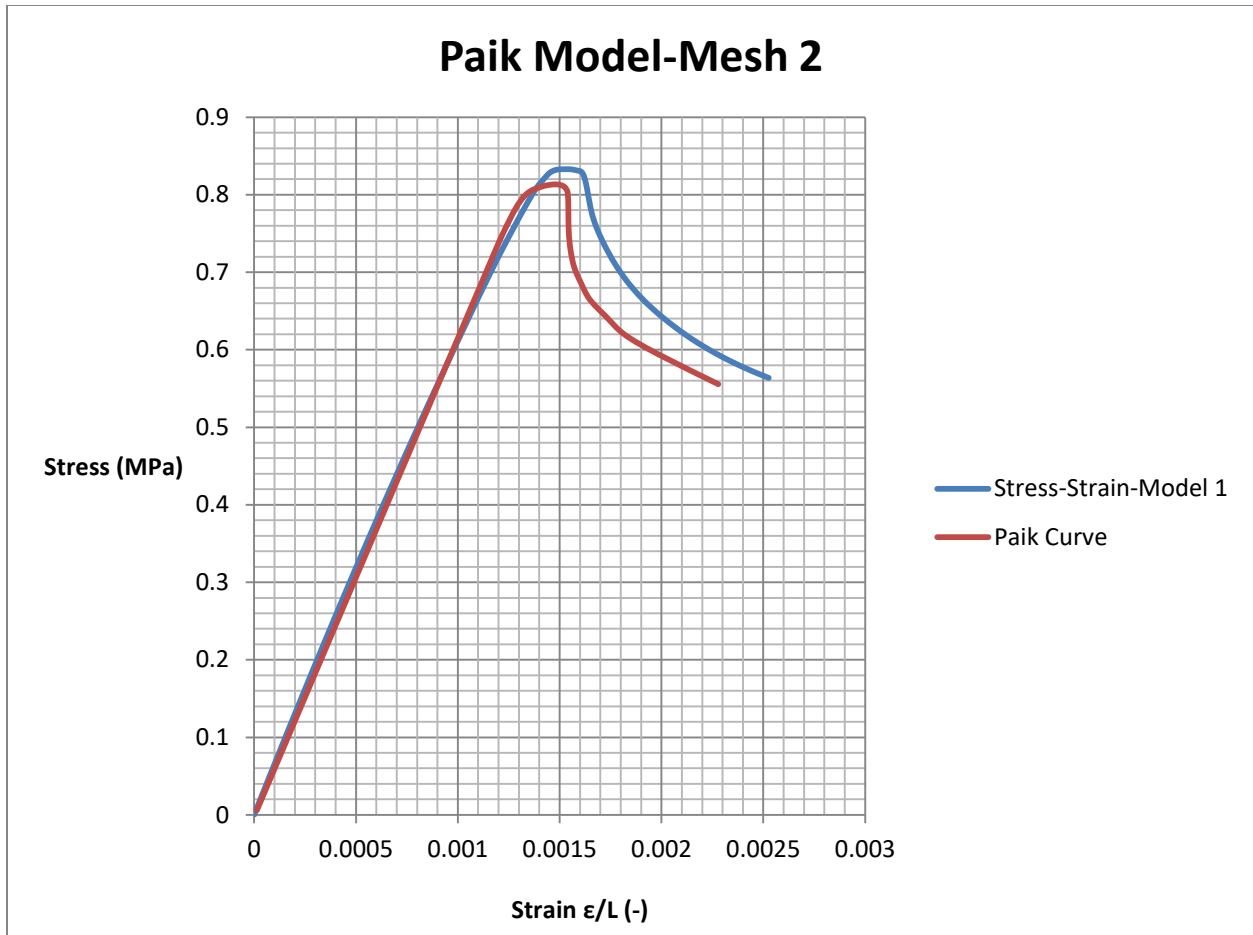
Ωστόσο παρατηρούμε αποκλίσεις στις αναπτυσσόμενες τάσεις μετά την εκδήλωση του λυγισμού οι οποίες και πάλι μειώνονται όσο μειώνουμε το μέγεθος των στοιχείων.

### 6.3.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων στο μοντέλο σε σύγκριση με το μοντέλο του Paik φαίνονται παρακάτω.

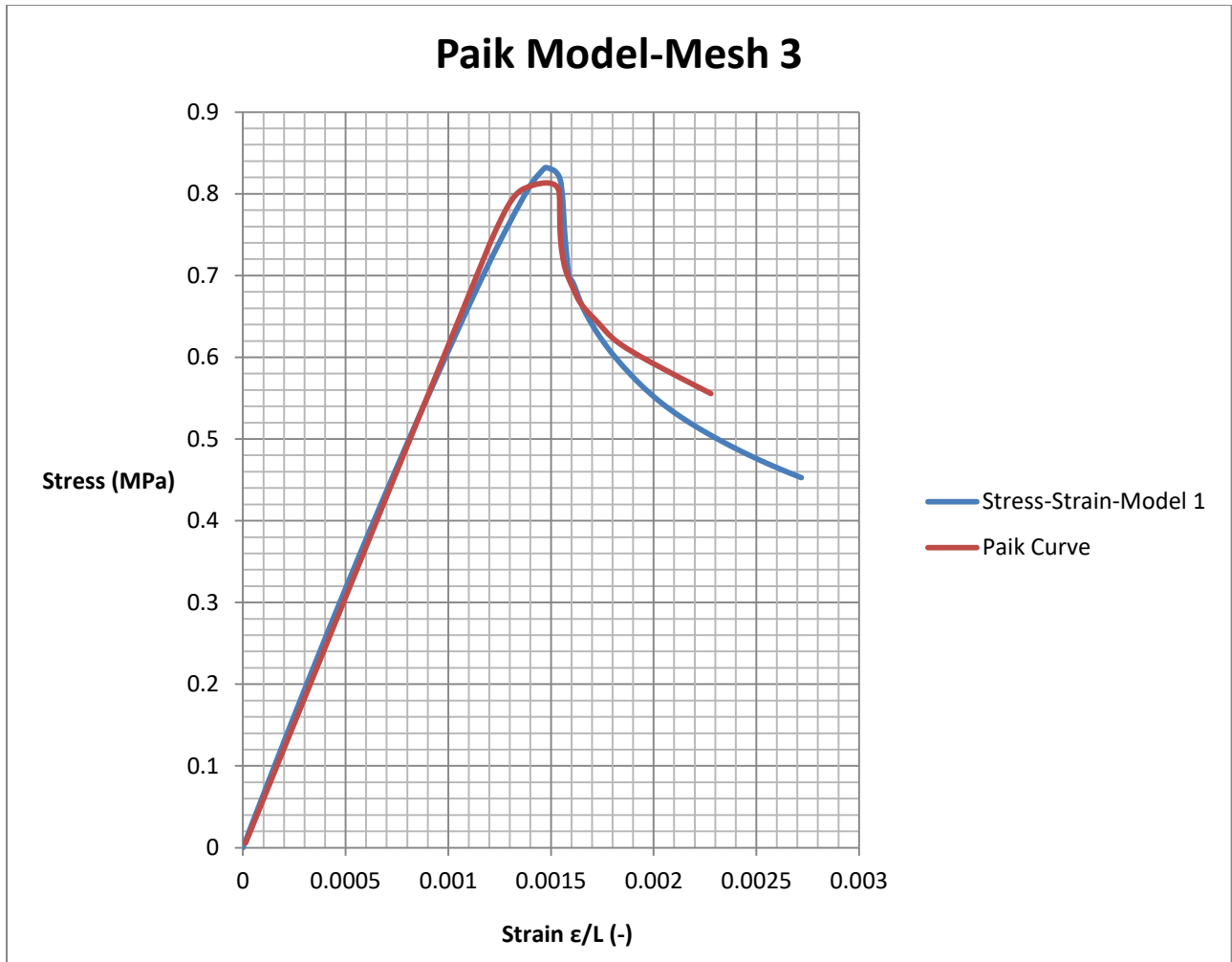


Εικόνα 6. 2. 1 : Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου στο Abaqus με την έρευνα του Paik. Mesh Size : 0.15 m

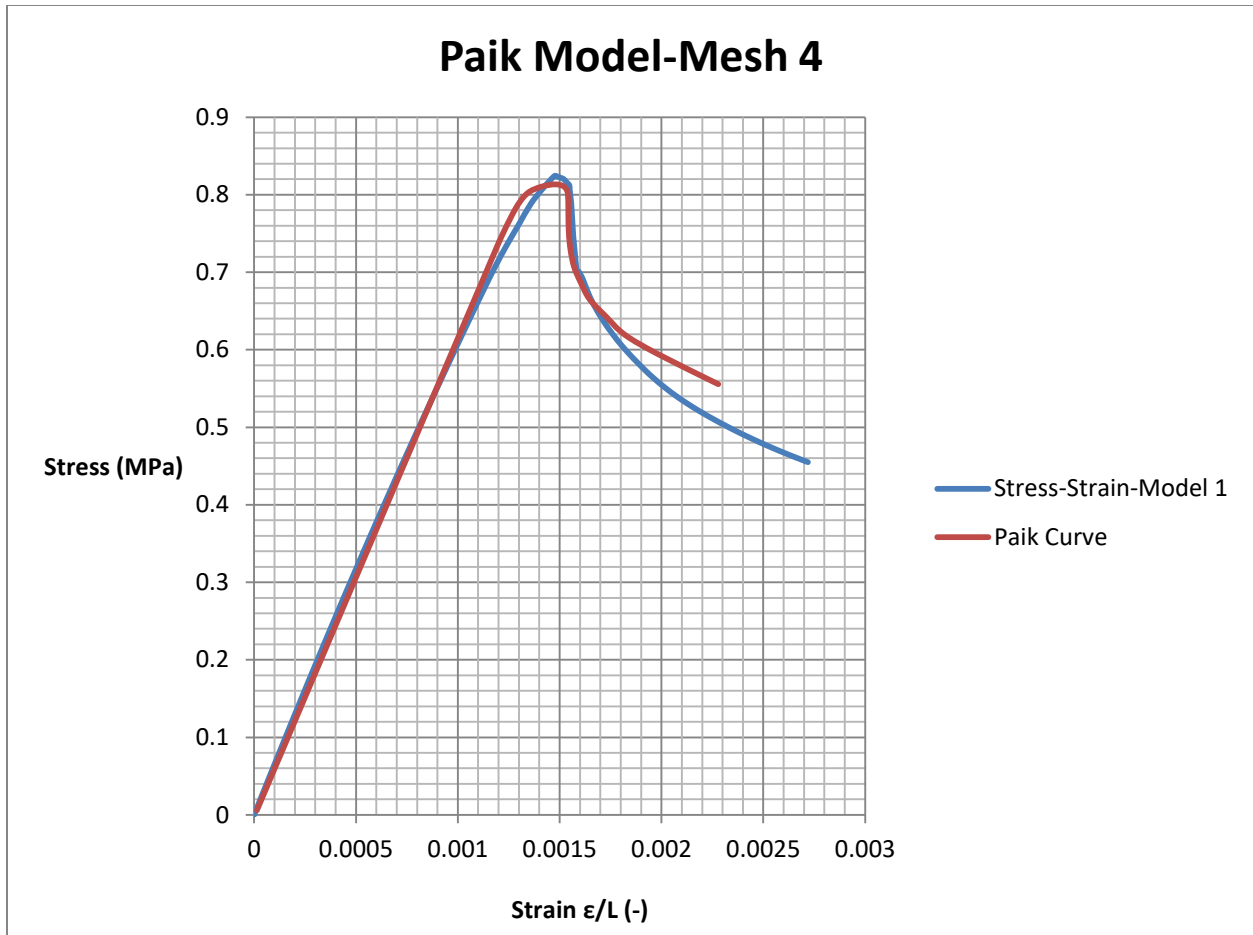


Εικόνα 6. 2. 2: Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου στο Abaqus με την έρευνα του Paik. Mesh Size : 0.1 m

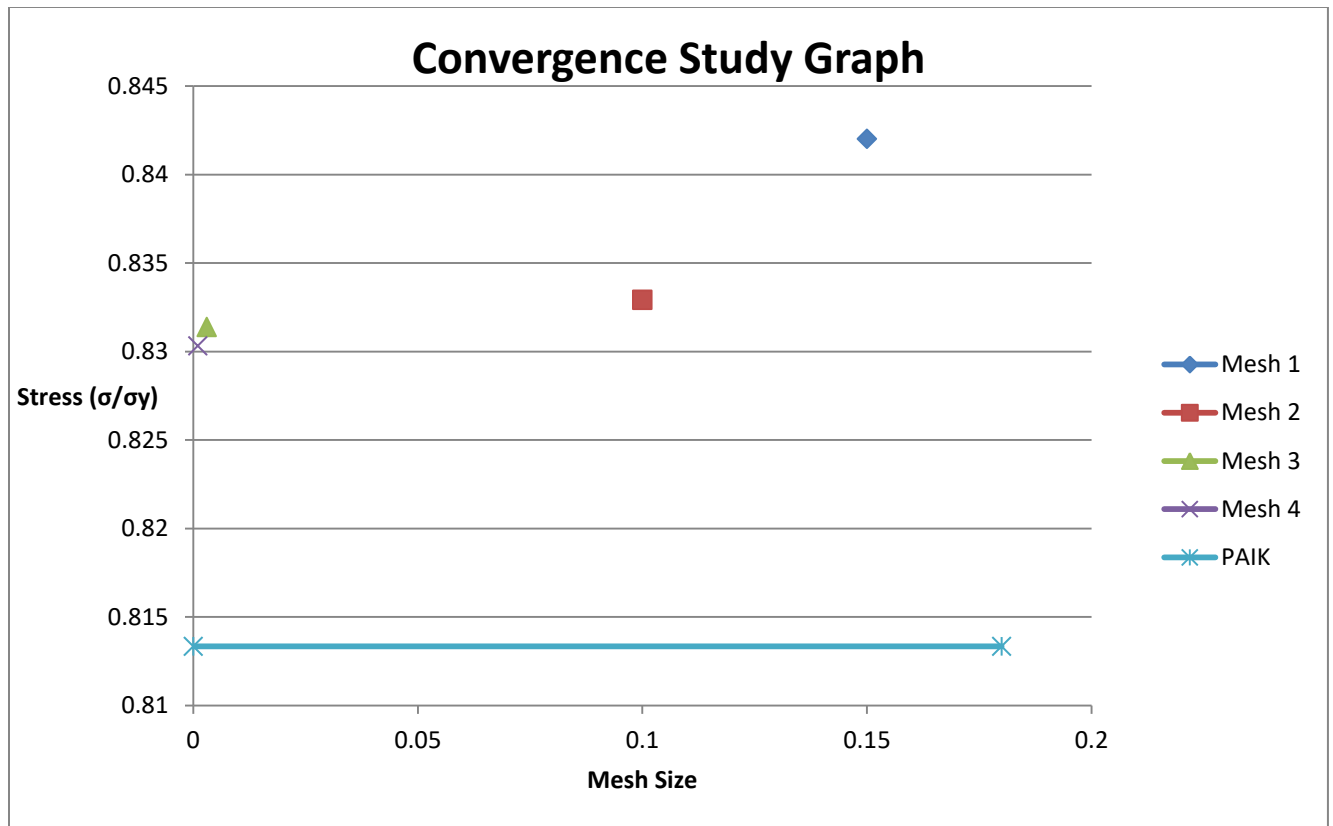




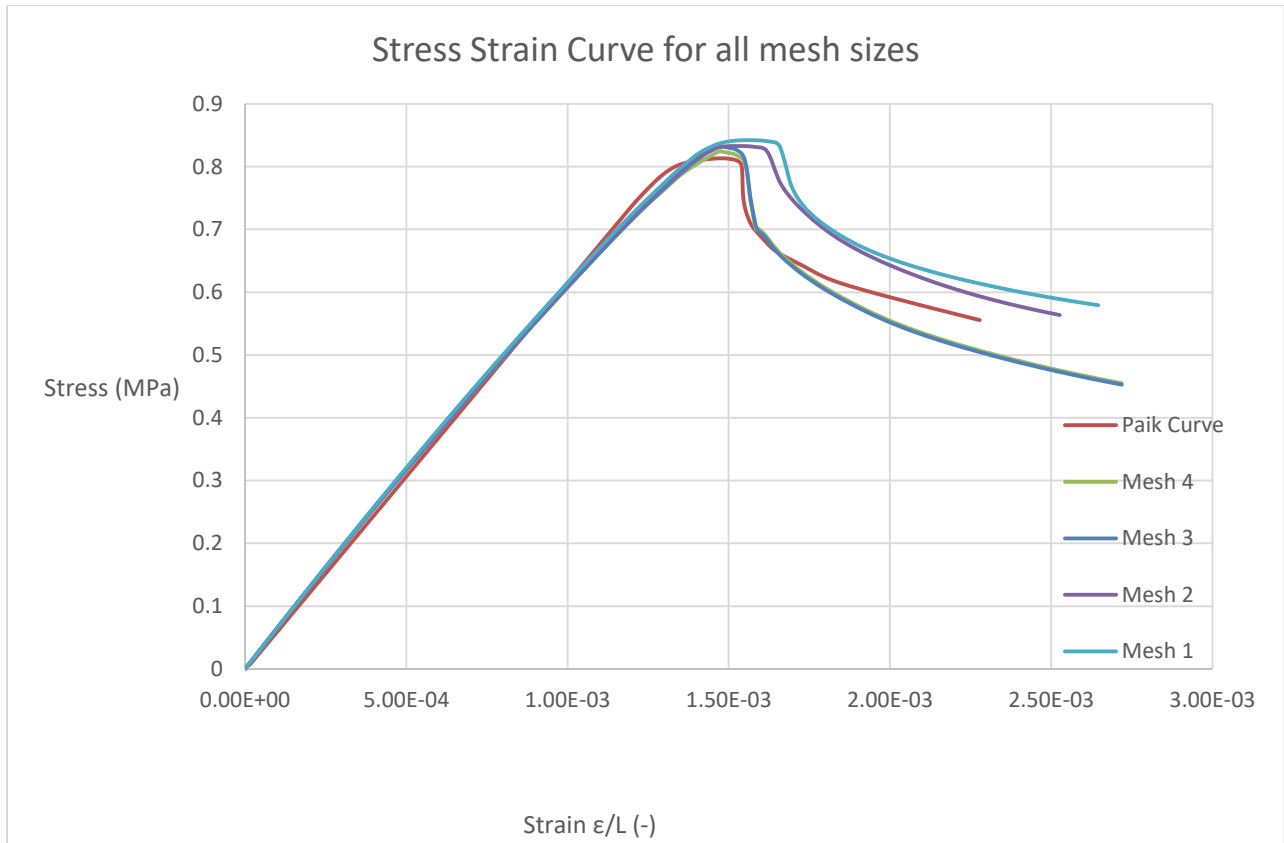
Εικόνα 6. 2. 3 : Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου στο Abaqus με την έρευνα του Paik. Mesh Size : 0. 03 m



Εικόνα 6. 2. 4 : Σύγκριση αποτελεσμάτων μοντέλου στο Abaqus με την έρευνα του Paik. Mesh Size : 0. 02 m



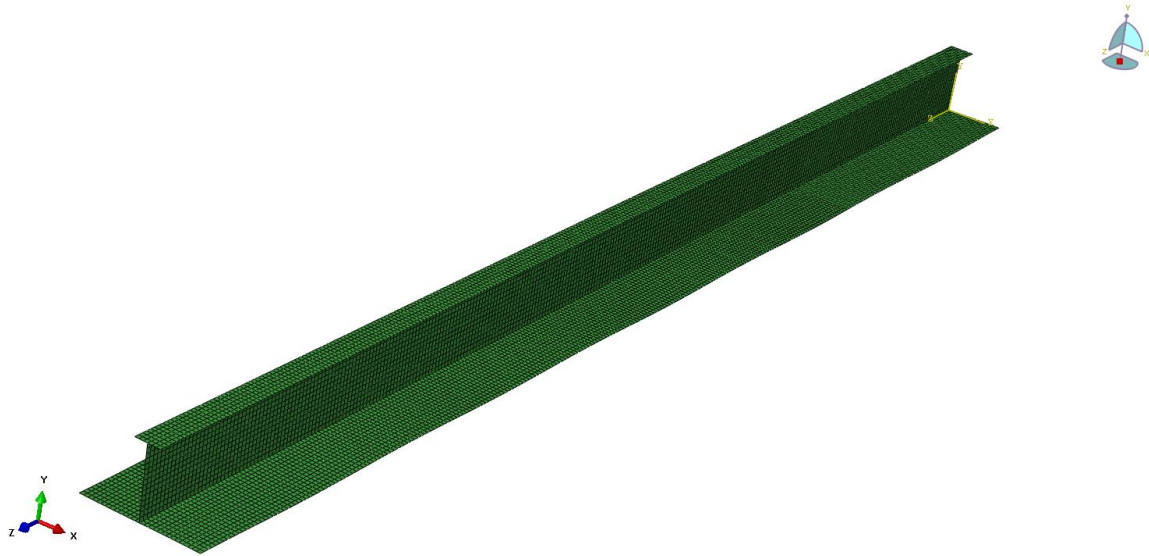
Εικόνα 6. 2. 5 : Σύγκριση μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης των μοντέλων στο Abaqus με την έρευνα του Paik.



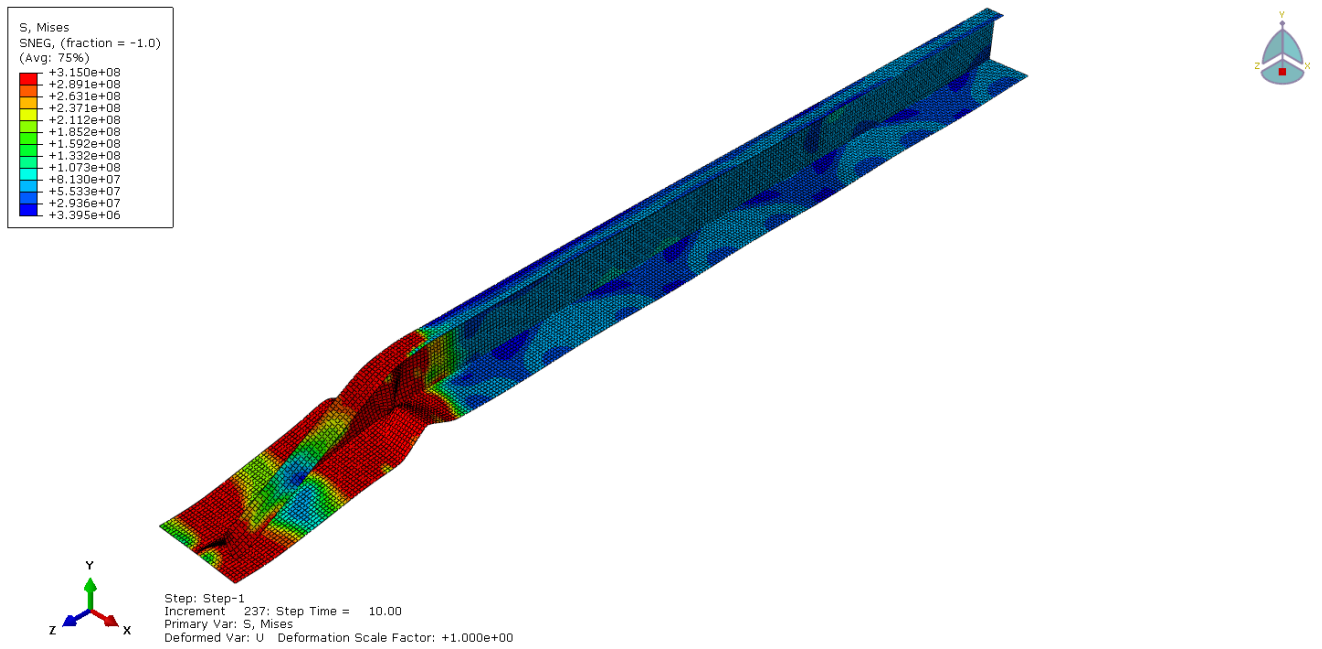
*Εικόνα 6. 2. 6 :Οι διάφορες καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων σε ένα διάγραμμα.*

Από τα παραπάνω διαγράμματα επιλέγουμε την προσομοίωση με mesh size 0. 03 μέτρα (Mesh-3) διότι συνδυάζει επαρκή ακρίβεια αποτελεσμάτων και υπολογιστικού κόστους.

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα ενισχυμένα ελάσματα όπως σχεδιάστηκαν στο πρόγραμμα:



Εικόνα 6. 3. 4 : Το προς μελέτη μοντέλο.



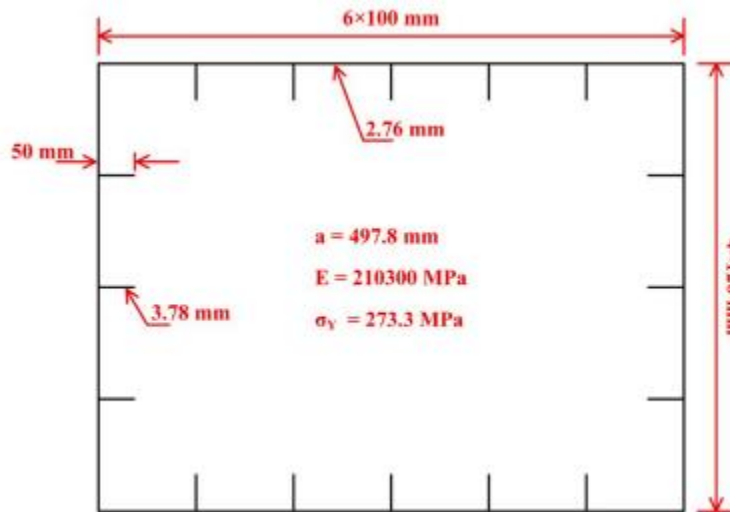
Εικόνα 6. 3. 5 : Αποτελέσματα της ανάλυσης.

## 6. 5 Συγκριτική μελέτη με τα αποτελέσματα του Shen Li

### 6. 5. 1 Σχεδίαση μοντέλου Shen Li

Τα συμπεράσματα της προηγούμενης συγκριτικής μελέτης θα χρησιμοποιηθούν και στην μελέτη πεπερασμένων στοιχείων για το στοιχείο ενισχυμένου ελάσματος της έρευνας του Shen : *“An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading”*.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στη παραπάνω μελέτη είναι το box girder B2D που παρουσιάστηκε στην ενότητα 4. 4 Πειραματικά μοντέλα σύγκρισης.



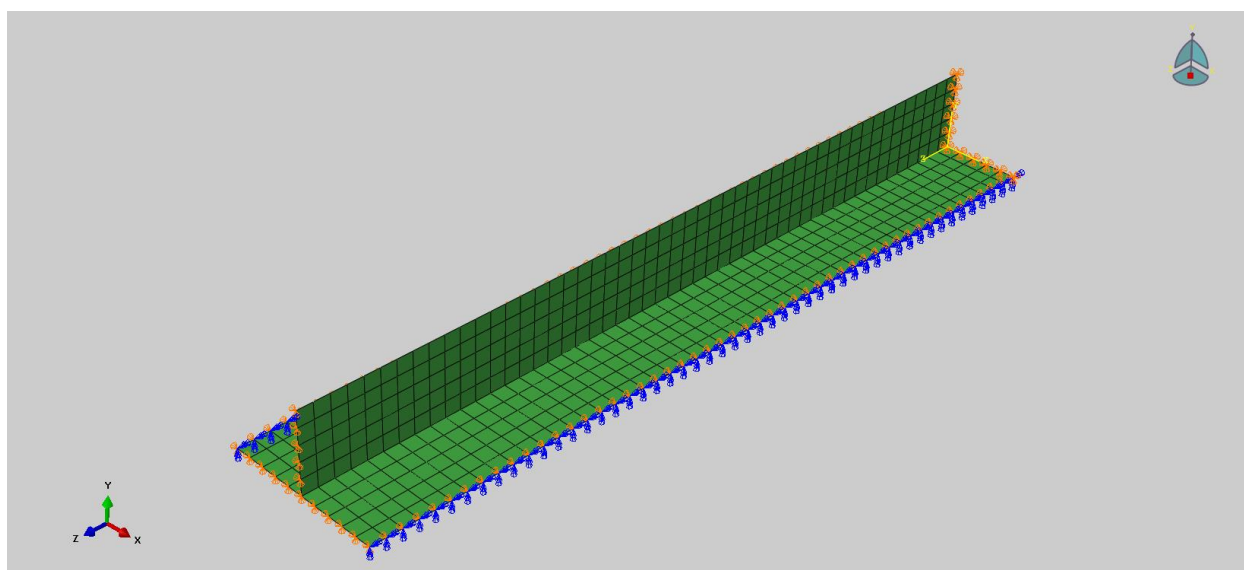
Εικόνα 6. 5. 1 : Το μοντέλο τετραγωνικής διατομής B2D

Models	Geometric (mm)					Mechanical characteristics		
	Shell plating			Stiffener		$E$ (GPa)	$E_{st}$ (MPa)	$\sigma_Y$ (MPa)
Parameter	$a$	$l$	$t$	$h_s$	$t_s$			
B-1S	995.3	498.6	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3
HB-1S	1000.8	497.3	2.73	50	2.73	209.3	4212	361.8
B-2S	998.4	494.5	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3
B-1D	999.2	496.4	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3
B-2D	994.5	497.8	2.76	50	3.78	210.3	5123	273.3

Εικόνα 6. 5. 2 : Το μοντέλο τετραγωνικής διατομής B2D.

Από το παραπάνω μοντέλο εξετάζονται τα στοιχεία ενισχυμένου ελάσματος ως προς την καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων. Η μελέτη θα διεξαχθεί για δύο πρότυπα δοκίμια :

- 1) Ένα απλό μοντέλο με έκταση όση ορίζεται από τις διαστάσεις του μοντέλου B2D (single bay model).
- 2) Ένα εκτεταμένο μοντέλο που συμπεριλαμβάνει δύο σταθμίδες (floors) κατά το μήκος του ( $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$  bay model).



Εικόνα 6. 5. 3 : Μοντέλο Ενισχυμένου ελάσματος και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες (half bay model).

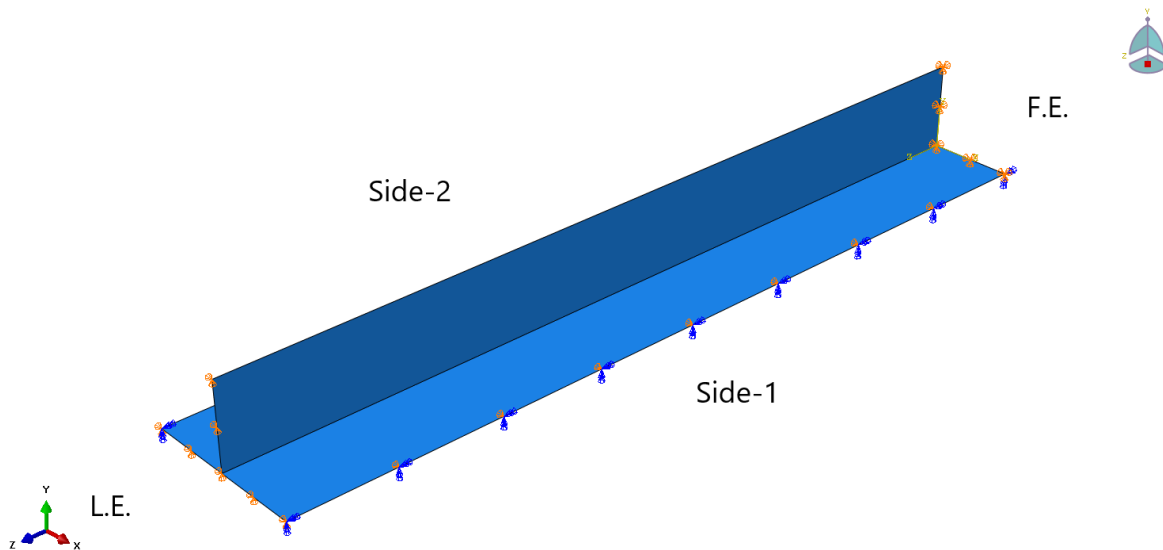
Στο μοντέλο του Shen χρησιμοποιείται υλικό με τις παρακάτω ιδιότητες :

Ελαστική Συμπεριφορά	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_y$ (MPa)			
	207,000	0.3	285			
Πλαστική Συμπεριφορά	C1(MPa)	$\gamma_1$	C2(MPa)	$\gamma_2$	C3(MPa)	$\gamma_3$
	13,921	765	4240	52	1573	14
Ισοτροπική Σκλήρυνση	Qinf (MPa)	B				
	25.6	4.4				

Πίνακας 6. 5. 4 : Μηχανικές ιδιότητες του υλικού.

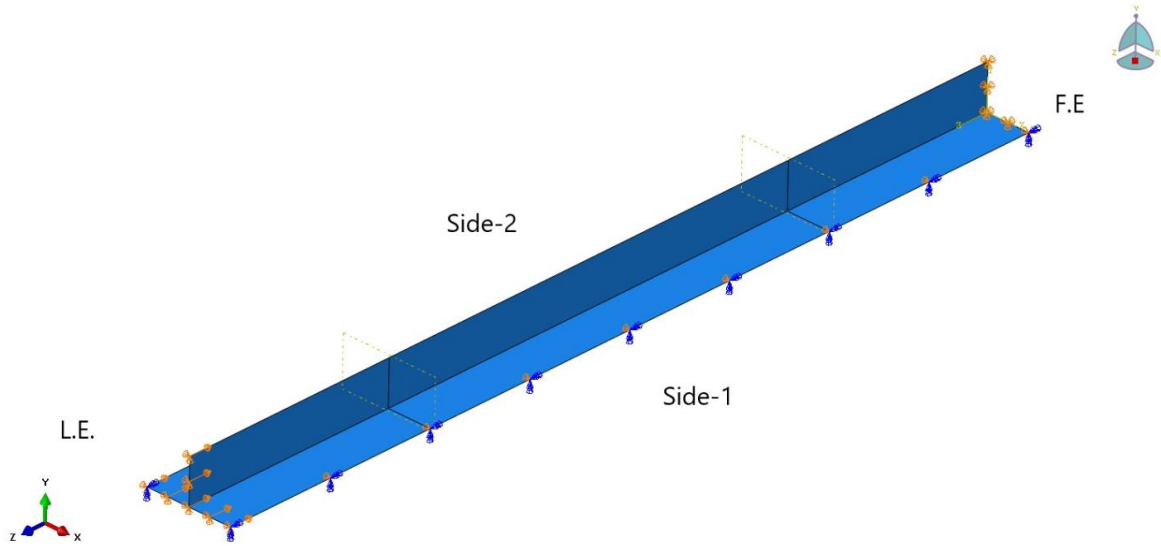
Οι οριακές συνθήκες που εισάγονται είναι ίδιες με τις συνθήκες που ορίστηκαν από τον Shen :

Ακμή	Περιορισμός
Side-1, Side -2	$y, x-R, z-R$
L. E. (Load Edge)	$x, y, z$ εναλλασσόμενο
F. E. (Fixed Edge)	$x, y, z$



Εικόνα 6. 5. 5 : Οριακές συνθήκες (half bay model).





Εικόνα 6. 5. 6 : Οριακές συνθήκες ( ½ + 1 + ½ bay model).

Οι γεωμετρικοί περιορισμοί που επιβάλλονται είναι :

- Στα floors : Παράλληλη μετατόπιση όλων των στοιχείων κατά τον x-άξονα.
- Στην ακμή φόρτισης : Παράλληλη μετατόπιση όλων των στοιχείων κατά τον x-άξονα.

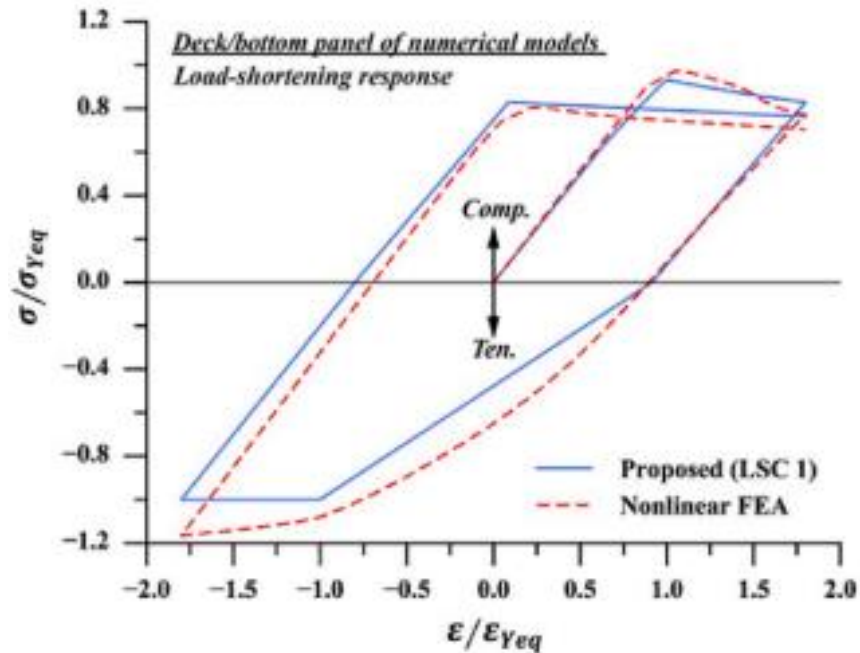
Οι γεωμετρικές ατέλειες που εισάγονται είναι ίδιες με τις αντίστοιχες στο μοντέλο της συγκριτικής μελέτης. Οι ατέλειες χωρίζονται σε 3 κατηγορίες :

- Παραμόρφωση Δοκού-Κολώνας : Αφορά όλο το μοντέλο – πλάκα και συνεργαζόμενο ενισχυτικό.
- Παραμόρφωση Πλάκας : Αφορά μόνο τη πλάκα.
- Πλάγια παραμόρφωση Ενισχυτικού : Αφορά μόνο το ενισχυτικό – κορμό και φλάντζα.

Η επιβαλλόμενη φόρτιση είναι εναλλασσόμενη σταθερού πλάτους. Επιλέγουμε να εισάγουμε πλάτος παραμόρφωσης που ίσο με το διπλάσιο της αδιάστατης παραμόρφωσης διαρροής. Το πλάτος υπολογίζεται ως :

$$\varepsilon = 2 * \varepsilon_{yield} = 2 * \frac{\varepsilon_{true}}{L_{total}} = 2 * \frac{\sigma_{yield}}{E * L_{total}}$$

Ο λόγος που επιλέγεται αυτή η εναλλασσόμενη παραμόρφωση είναι διότι μπορούμε με αυτόν τον τρόπο να ελέγξουμε τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων με τα αντίστοιχα που υπάρχουν στην έρευνα του Shen Li:



Εικόνα 6. 4. 6 : Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων για ενισχυτικό ενισχυμένου ελάσματος του μοντέλου B2D.

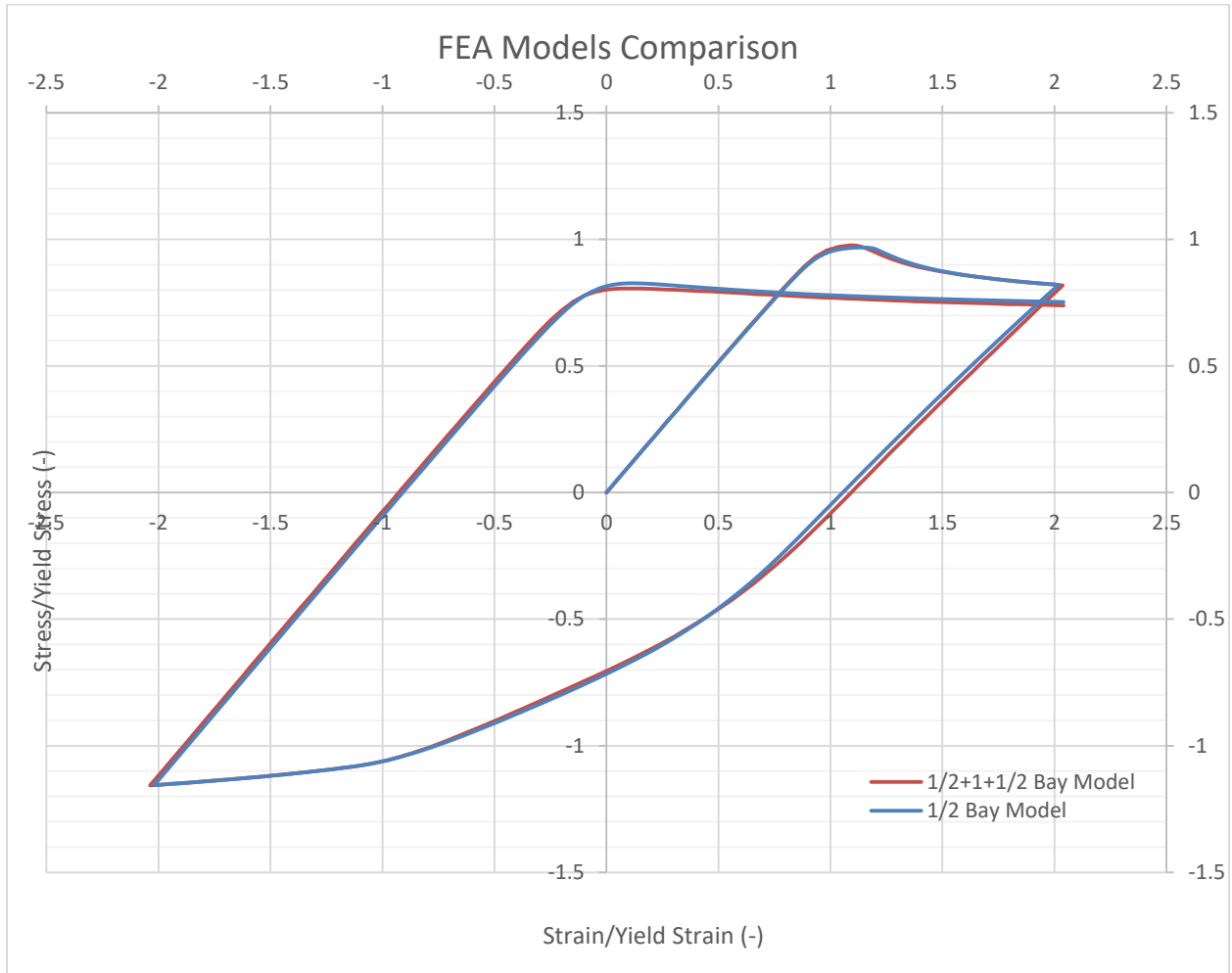
Η διαδικασία σχεδιασμού είναι παρόμοια με τη διαδικασία της συγκριτικής μελέτης :

- 1) Αρχικά σχεδιάζεται το μοντέλο στο λογισμικό του Abaqus.
- 2) Εισάγεται το υλικό του χάλυβα που θα χρησιμοποιηθεί. Οι μηχανικές του ιδιότητες είναι ίδιες με τις ιδιότητες που χρησιμοποίησε ο Shen.
- 3) Δημιουργία κατάλληλων section-εισαγωγή πάχους σε πλάκα / κορμό / φλάντζα.
- 4) Επιλογή step. Χρησιμοποιείται επιλυτής dynamic implicit με quasi-static analysis ώστε να παραλείψουμε τα αδρανειακά φαινόμενα κατά την παραμόρφωση του μοντέλου.
- 5) Δημιουργία mesh. Επιλογή στοιχείων S4R (four node shell elements) για μέγεθος mesh κοντά στο μέγεθος που επέλεξε ο Shen Li (διαστάσεις 10x10 mm).
- 6) Εισαγωγή των γεωμετρικών περιορισμών στα στοιχεία (nodes).
- 7) Δημιουργία Amplitude για την επιβολή της παραμόρφωσης. Η η επιβαλλόμενη φόρτιση θα είναι γραμμικά εναλλασσόμενη, ενώ κατά τη διάρκεια του step time (10 χρονικές μονάδες) επιθυμούμε να πραγματοποιηθούν 1+1/4 περίοδοι.

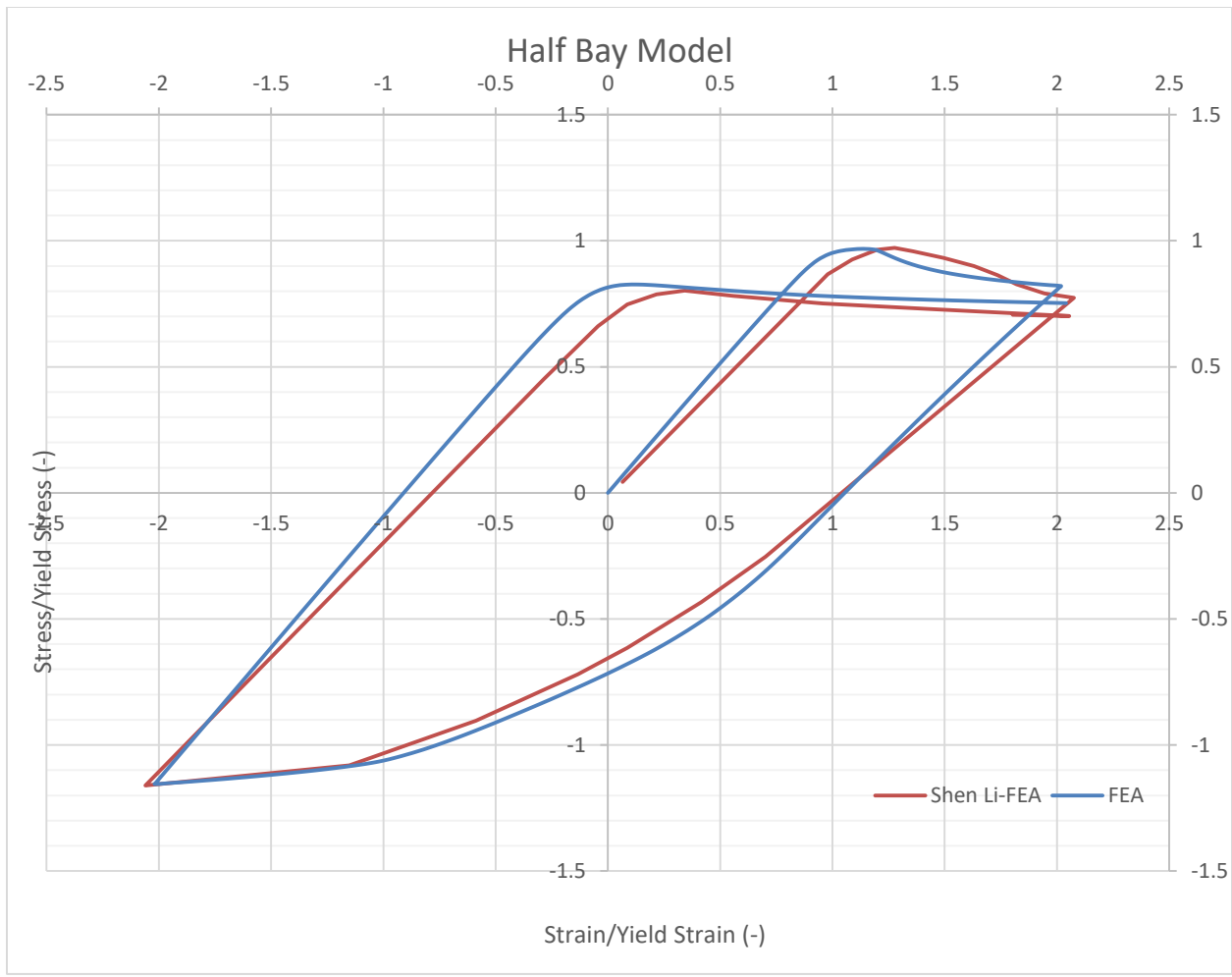
- 8) Εισαγωγή των οριακών συνθηκών στο μοντέλο. Η επιβαλλόμενη παραμόρφωση εισάγεται ως οριακή συνθήκη που επιβάλλεται κατά το step time.
- 9) Δημιουργία αρχείου inp με την εντολή Write Input.
- 10) Από το αρχείο αυτό διαχωρίζονται τα στοιχεία του ενισχυτικού και της πλάκας στα οποία εισάγονται οι αρχικές ατέλειες. Οι νέες συντεταγμένες των παραμορφωμένων στοιχείων εισάγονται στο ίδιο αρχείο inp (overwrite) και γίνεται εκ νέου import του μοντέλου.
- 11) Εκτελούμε τη προσομοίωση στο παραμορφωμένο μοντέλο.
- 12) Απεικονίζουμε την αναπτυσσόμενη δύναμη κατά την διαμήκη διεύθυνση και την αντίστοιχη μετατόπιση για το κεντρικό στοιχείο της πλάκας κατά την ακμή φόρτισης. Εξαγωγή αποτελεσμάτων σε Excel και σχεδίαση διαγράμματος τάσης παραμόρφωσης.

## 6. 5. 2 Αποτελέσματα

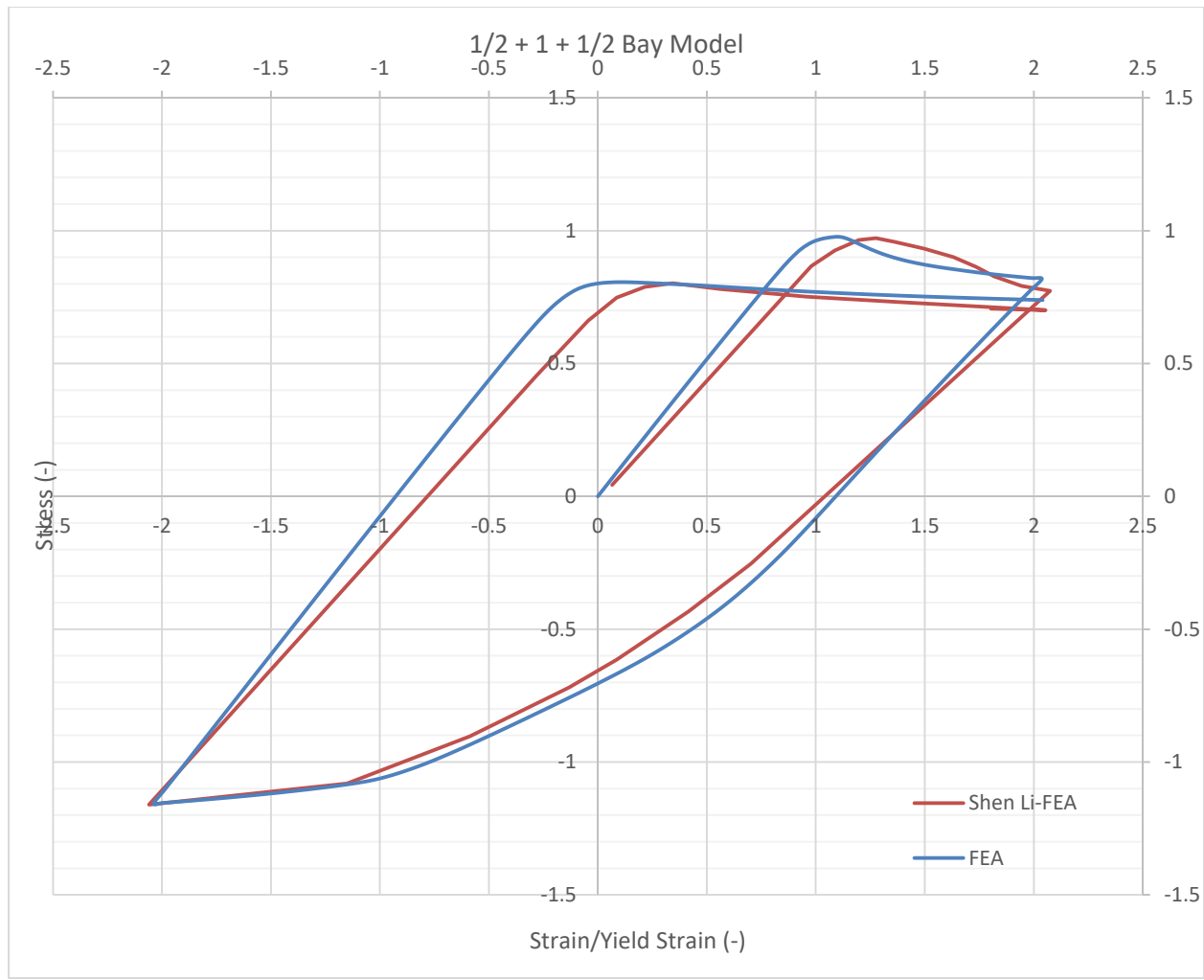
Τα αποτελέσματα που εξάγονται από τα δύο μοντέλα παρουσιάζονται παρακάτω :



Εικόνα 6. 4. 7 : Καμπύλη Τάσεων – Παραμορφώσεων για τα δύο μοντέλα



Εικόνα 6. 4. 8 : Καμπύλη Τάσεων – Παραμορφώσεων για το μοντέλο half bay.



Εικόνα 6. 4. 9 : Καμπύλη Τάσεων – Παραμορφώσεων για το μοντέλο  $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$  bay.

Τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων συμφωνούν τόσο μεταξύ τους όσο και με τα αποτελέσματα πεπερασμένων στοιχείων της μελέτης του Shen Li. Ωστόσο παρουσιάζονται κάποιες αποκλίσεις ειδικά στην επαναφόρτιση από εφελκυσμό σε θλίψη. Ο Shen δεν παρέχει περισσότερες λεπτομέρειες ώστε να διερευνηθεί περισσότερο η απόκλιση αυτή ( είδος και παράμετροι επιλυτή, χρονική διάρκεια προσομοίωσης κλπ).

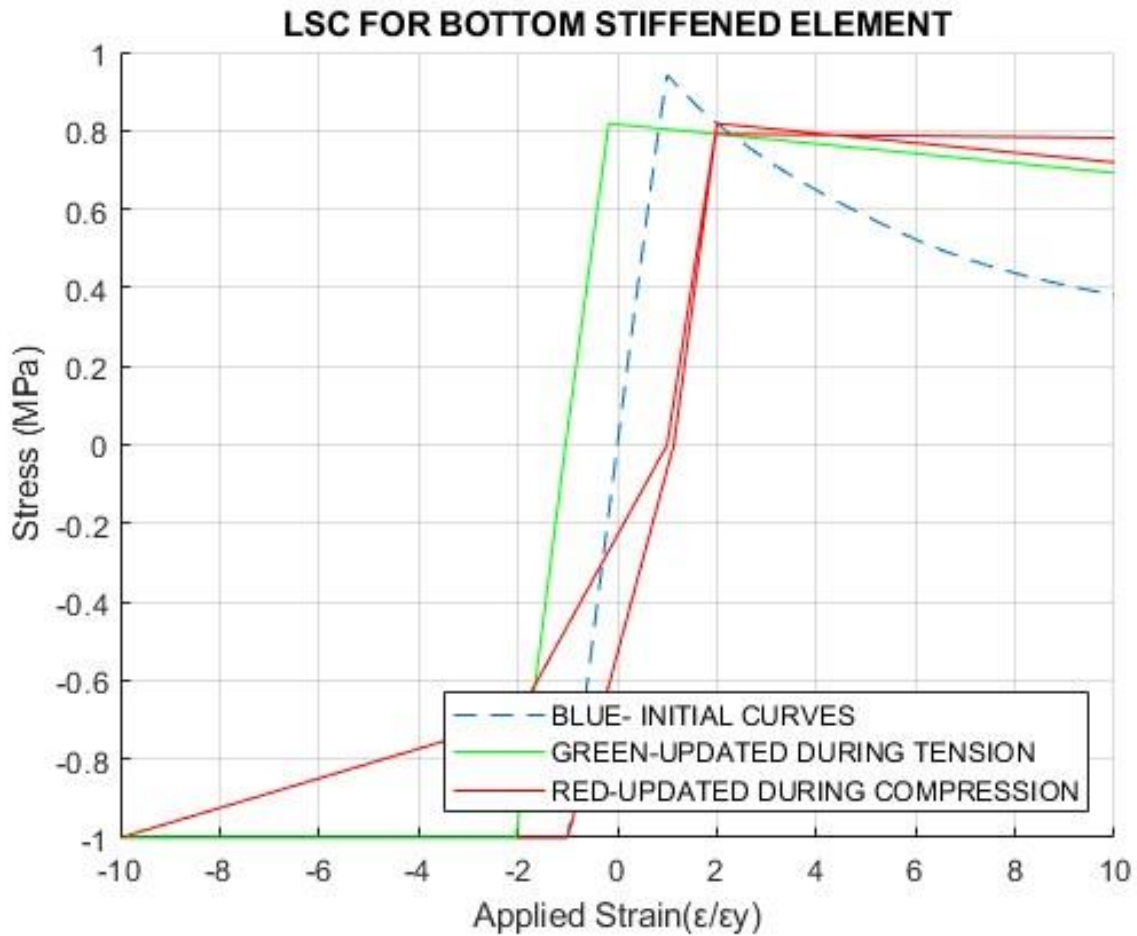
## 6. 6 Σύγκριση με την καμπύλη τάσεων -παραμορφώσεων του προγράμματος Ultimate Strength.

Αφού επικυρώθηκε η ορθότητα των αποτελεσμάτων της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων, θα γίνει μια σύγκριση με την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων που παράγεται από τον αλγόριθμο Ultimate Strength.

Στο πρόγραμμα εισάγεται ολόκληρη η διατομή του box-girder B2D και επιλέγεται πρωτόκολλο καμπυλότητας που θα παράξει τις ίδιες επιβαλλόμενες παραμορφώσεις στο κατάστρωμα ή στον πυθμένα. Η καμπυλότητα συνδέεται με τις παραμορφώσεις με την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon = c * (z - z_{NA})$$

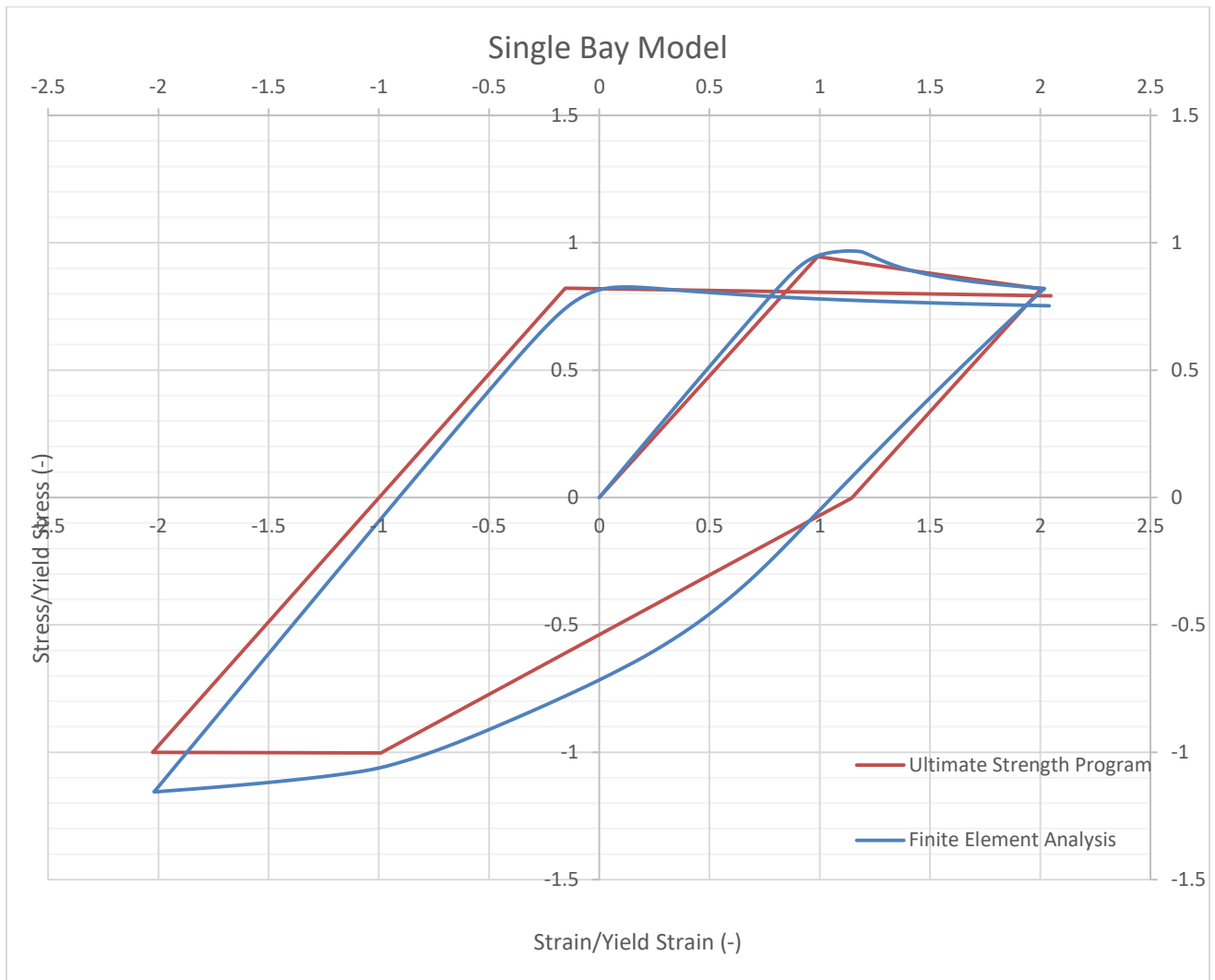
Επιλέγεται να σχεδιαστεί η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων για ένα ενισχυτικό πυθμένα. Το αποτέλεσμα που λαμβάνουμε από το πρόγραμμα είναι :



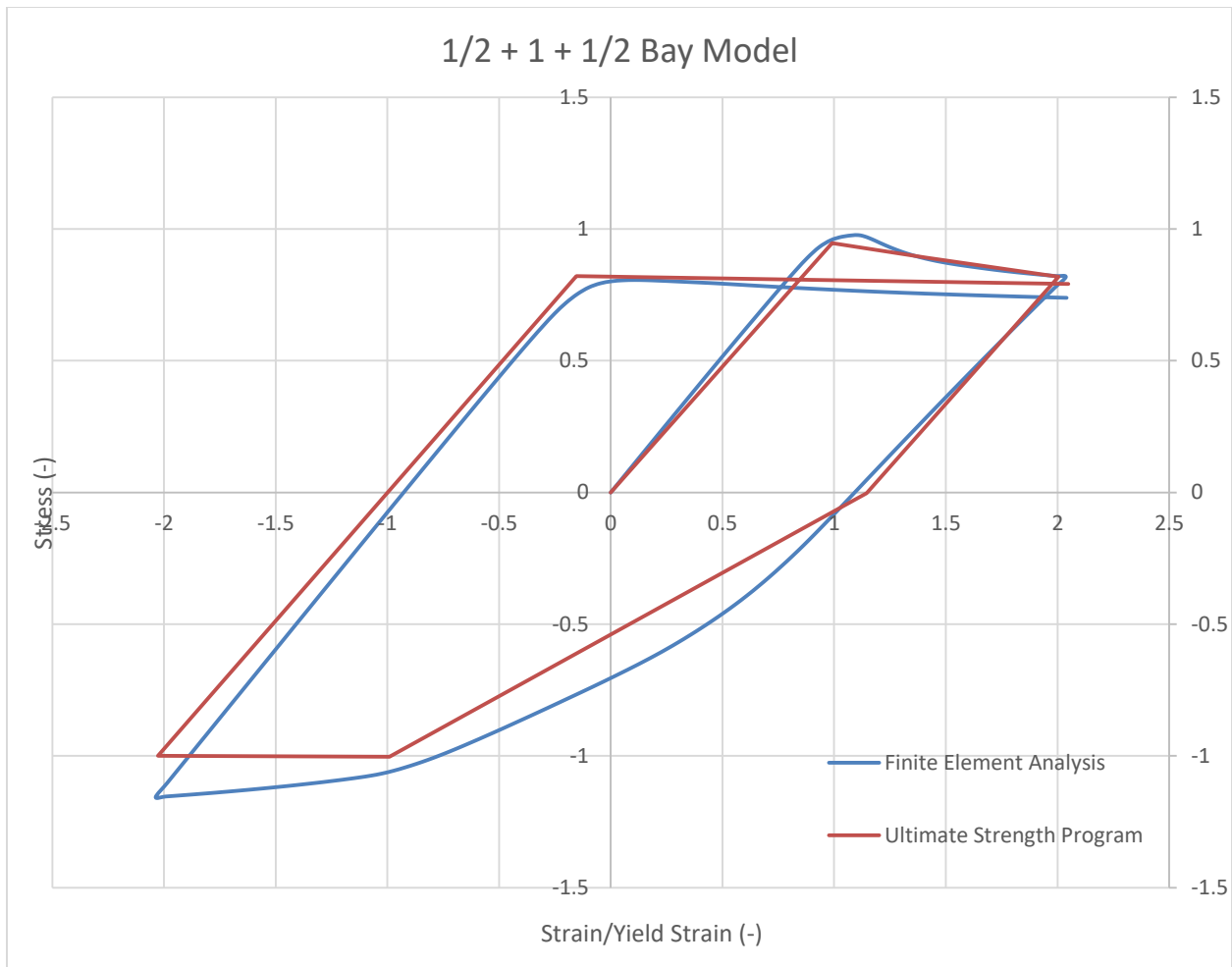
Εικόνα 6. 5. 1. : Καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων όπως εξάγεται από το πρόγραμμα Ultimate Strength.

Τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τον κώδικα σε σύγκριση και με τα δύο μοντέλα είναι τα εξής:





Εικόνα 6. 5. 2. : Σύγκριση αποτελεσμάτων με το μοντέλο single bay.



Εικόνα 6. 5. 3. : Σύγκριση αποτελεσμάτων με το μοντέλο  $\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$  bay.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την μελέτη αποτελεσμάτων είναι :

- Στα θλιπτικά φορτία : Πολύ καλή ακρίβεια αποτελεσμάτων
- Κατά την επαναφόρτιση από θλίψη σε εφελκυσμό : Η ακρίβεια μειώνεται διότι ο αλγόριθμος δεν μπορεί να προβλέψει το κυρτό τμήμα της καμπύλης σ-ε που υπολογίζουν τα πεπερασμένα στοιχεία – αντίθετα προσεγγίζει την καμπύλη σ-ε ως ευθεία γραμμή από το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης στο σημείο διαρροής σε εφελκυσμό.
- Η μέγιστη τάση κατά την εφελκυστική επαναφόρτιση δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή 1 (δηλαδή την τιμή της τάσης διαρροής) καθώς δεν προσομοιώνεται από το πρόγραμμα το φαινόμενο της σκλήρυνσης του υλικού.
- Η μη πρόβλεψη της σκλήρυνσης του υλικού έχει την συνέπεια να υπολογισθεί διαφορετικό σημείο αποφόρτισης σε εφελκυσμό και επομένως να προκαλέσει διαφοροποιήσεις στον μετέπειτα υπολογισμό της τάσης κατά την επαναφόρτιση σε θλίψη.
- Η κλίση της καμπύλης σ-ε κατά την επαναφόρτιση από εφελκυσμό σε θλίψη δεν είναι ακριβώς ίση με το όριο ελαστικότητας  $E$  όπως παρατηρήθηκε από τον Shen Li.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα

### 7.1 Εισαγωγή - Ανασκόπηση της εργασίας

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, η εργασία έχει σκοπό την ανάπτυξη ενός προγράμματος υπολογισμού της καμπτικής ροπής μιας πρότυπης μέσης τομής σε εναλλασσόμενο φορτίο το οποίο ξεπερνά το όριο ελαστικότητας των κατασκευαστικών στοιχείων της. Η μέθοδος αποτελεί έναν εμπειρικό τρόπο πρόβλεψης της αναπτυσσόμενης τάσης και καμπτικής ροπής βασισμένη σε παρατηρήσεις.

Το πρόγραμμα μέγιστης αντοχής βασίσθηκε στην ισχύουσα μέθοδο Smith και δέχθηκε τροποποίηση του αλγόριθμου δημιουργίας των καμπλών τάσεων-παραμορφώσεων προκειμένου να συμπεριλάβει τα φαινόμενα της εναλλασσόμενης φόρτισης και της σκλήρυνσης του υλικού.

Οι τροποποιήσεις του αλγόριθμου στηρίχθηκαν πάνω σε παρατηρήσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Τα αποτελέσματα του προγράμματος συγκρίθηκαν με αποτελέσματα από άλλους ερευνητές, ενώ στο τέλος ακολούθησε και μια συγκριτική μελέτη πεπερασμένων στοιχείων πάνω σε μοντέλα ενισχυμένων ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα και τη βιβλιογραφία.

## 7.2 Συμπεράσματα της εργασίας

Η ανάπτυξη του προγράμματος και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλους ερευνητές και με διαφορετικές υπολογιστικές μεθόδους μας οδηγεί στα παρακάτω συμπεράσματα:

A) Ως προς την δημιουργία των καμπυλών σ-ε για τα δομικά στοιχεία (σε σύγκριση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από μελέτη πεπερασμένων στοιχείων):

1. Οι καμπύλες σ-ε για ενισχυμένα ελάσματα με αναλογία μήκους/πλάτους πλάκας από 4 έως 5 λαμβάνουν τιμές αρκετά κοντά στις τιμές της μελέτης πεπερασμένων στοιχείων.
2. Στα θλιπτικά φορτία : Πολύ καλή ακρίβεια αποτελεσμάτων
3. Κατά την επαναφόρτιση από θλίψη σε εφελκυσμό : Η ακρίβεια μειώνεται διότι ο αλγόριθμος δεν μπορεί να προβλέψει το κυρτό τμήμα της καμπύλης σ-ε που υπολογίζουν τα πεπερασμένα στοιχεία – αντίθετα προσεγγίζει την καμπύλη σ-ε ως ευθεία γραμμή από το σημείο μόνιμης παραμόρφωσης στο σημείο διαρροής σε εφελκυσμό.
4. Η μέγιστη τάση κατά την εφελκυστική επαναφόρτιση δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή 1 (δηλαδή την τιμή της τάσης διαρροής) καθώς δεν προσομοιώνεται από το πρόγραμμα το φαινόμενο της σκλήρυνσης του υλικού.
5. Η μη πρόβλεψη της σκλήρυνσης του υλικού έχει την συνέπεια να υπολογισθεί διαφορετικό σημείο αποφόρτισης σε εφελκυσμό και επομένως να προκαλέσει διαφοροποιήσεις στον μετέπειτα υπολογισμό της τάσης κατά την επαναφόρτιση σε θλίψη.
6. Η κλίση της καμπύλης σ-ε κατά την επαναφόρτιση από εφελκυσμό σε θλίψη δεν είναι ακριβώς ίση με το όριο ελαστικότητας  $E$  όπως παρατηρήθηκε από τον Shen Li.

B) Ως προς το πρόγραμμα υπολογισμού της καμπύλης μέγιστης αντοχής σε ολιγοκυκλική φόρτιση.

1. Τα αποτελέσματα του προγράμματος έρχονται σε συμφωνία με το πρόγραμμα που ανέπτυξε ο Shen Li στην έρευνά του.
2. Στο πρόγραμμα εισάγονται δύο αυθαίρετοι συντελεστές . Ο συντελεστής μείωσης τάσης σε εφελκυσμό ( $\phi_2$ ), ο οποίος μειώνει το την εφελκυστική τάση διαρροής σε κάθε εναλλαγή της φόρτισης και ο συντελεστής μείωσης κλίσης μετά τη μέγιστη θλιπτική τάση ( $\phi_2$ ) , ο οποίος μειώνει τη κλίση της καμπύλης σ-ε με από το σημείο μέγιστης θλιπτικής τάσης έως το σημείο μέγιστης θλιπτικής παραμόρφωσης. Ο συντελεστής μείωσης τάσης σε εφελκυσμό ( $\phi_2$ ) και ιδιαίτερα ο συντελεστής μείωσης κλίσης μετά την μέγιστη θλιπτική τάση ( $\phi_1$ ) επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της καμπύλης ροπής – καμπυλότητας. Η επιλογή ενός σωστού ζεύγους τιμών μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων κοντά στις μέγιστες φορτίσεις.

3. Απαιτείται πειραματική επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων του προγράμματος σε περισσότερα μοντέλα μέσης τομής.
4. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων του προγράμματος καμπτικής ροπής επηρεάζεται άμεσα από τις καμπύλες σ-ε που αποδίδονται στα κατασκευαστικά στοιχεία.

### 7.3 Προτάσεις για μελλοντική εργασία και βελτίωση

Υπάρχουν διάφορες προτάσεις για βελτίωση που ενδέχεται να αυξήσουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων οι οποίες ξεφεύγουν από το πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

- Αρχικά, ο υπολογισμός των καμπυλών σ-ε μπορεί να γίνει με χρήση περισσότερων σημείων αντί για τα 5 σημεία που χρησιμοποιεί το παρόν πρόγραμμα. Τα σημεία αυτά μπορεί να είναι ανάμεσα στα σημεία με φυσική σημασία και να ενισχύουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων όπως για παράδειγμα στην παρατήρηση 2 της Ενότητας 6.5.
- Μπορεί να διεξαχθεί αναλυτικότερη μελέτη της επίδρασης των συντελεστών μείωσης ροπής / κλίσης  $\phi_1$  και  $\phi_2$  ώστε να σχηματιστεί μια βάση δεδομένων από την οποία θα επιλέγεται το ζεύγος τιμών που θα φέρει τα ακριβέστερα αποτελέσματα.
- Μπορεί να διερευνηθεί η συσχέτιση των συντελεστών  $\phi_1$  και  $\phi_2$  με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και με τα χαρακτηριστικά του υλικού που χρησιμοποιείται.
- Θα μπορούσε να εισαχθεί το φαινόμενο της σκλήρυνσης του μετάλλου κατά την ολιγοκυκλική φόρτιση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ή με εμπειρικούς υπολογισμούς που θα μετατοπίζουν τα σημεία των καμπυλών σ-ε ή με χρήση συντελεστών κλίσης κατά την εφελκυστική επαναφόρτιση. Στο παρόν πρόγραμμα η αναπτυσσόμενη τάση δεν μπορεί να ξεπεράσει την τιμή της μονάδας – επομένως αφού η καμπύλη σ-ε λάβει εφελκυστική παραμόρφωση ίση με 1 η κλίση γίνεται μηδενική.
- Ως προς το πρόγραμμα καμπτικής ροπής θα μπορούσε να προστεθούν περισσότερες ανανεώσεις της καμπύλης σ-ε των κατασκευαστικών στοιχείων της μέσης τομής. Μεγαλύτερη συχνότητα ανανεώσεων σε έναν κύκλο φόρτισης θα μπορούσε να διευκολύνει την ανάθεση μιας καμπύλης σ-ε που θα αντιπροσωπεύει καλύτερα τις ιδιότητες του στοιχείου στην περιοχή που φορτίζεται.
- Το πρόγραμμα θα μπορούσε να υπολογίζει την ακριβή θέση του ουδέτερου άξονα κατά την διάρκεια των προσαυξήσεων της καμπυλότητας. Ακριβέστερος υπολογισμός ουδέτερου άξονα (και όχι με μετατοπίσεις κατά κάποιο βήμα ) θα οδηγούσε σε καλύτερο υπολογισμό των αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων και κατά συνέπεια της καμπτικής ροπής.

Εν κατακλείδι, το πρόγραμμα υπολογισμού καμπτικής ροπής παρέχει μια ικανοποιητική προσέγγιση της καμπτικής ροπής ολιγοκυκλική κόπωσης. Η βελτίωση του αλγόριθμου ώστε να παρέχει ακριβή αποτελέσματα για μεγαλύτερο εύρος δομικών στοιχείων και υλικών

δύναται να τον καταστήσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τη κατασκευαστική μελέτη της μέσης τομής ενός πλοίου σε προμελετητικό στάδιο.



## Βιβλιογραφία

- Cui, H. wei, & Yang, P. (2018). Ultimate strength and failure characteristics research on steel box girders under cyclic-bending moments. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 23(4), 926–936. <https://doi.org/10.1007/s00773-017-0521-3>
- IACS. (2022). *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers*.
- Kawamura, Y., Nishimoto, M., & Sumi, Y. (n.d.). \* \* \* \* A Study on a Method for Maintenance of Ship Structures Considering Remaining Life Benefit.
- Komoriyama, Y., Tanaka, Y., Ando, T., Hashizume, Y., Tatsumi, A., & Fujikubo, M. (2018). EFFECTS OF CUMULATIVE BUCKLING DEFORMATION FORMED BY CYCLIC LOADING ON ULTIMATE STRENGTH OF STIFFENED PANEL. <http://www.asme.org/about-asme/terms-of-use>
- Li, S., Hu, Z., & Benson, S. (2019). An analytical method to predict the buckling and collapse behaviour of plates and stiffened panels under cyclic loading. *Engineering Structures*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109627>
- Li, S., Hu, Z., & Benson, S. (2020). Progressive collapse analysis of ship hull girders subjected to extreme cyclic bending. *Marine Structures*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102803>
- Response of plates and stiffened panels under pressure and cyclic biaxial loading, S. Fanourgakis & E.S. Samuelides in *Advances in the Analysis and Design of Marine Structures*, 2023
- Effect of low cycle/high amplitude loads on the moment carrying capacity of a ship's hull, M. Preventas, S. Fanourgakis, M.S. Samuelides, in *Developments in the Analysis and Design of Marine Structures*, 2021
- Paik, J. K., Kim, B. J., & Seo, J. K. (2008). Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part I-Unstiffened plates. *Ocean Engineering*, 35(2), 261–270. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.08.004>
- Ringsberg, J. W., Darie, I., Nahshon, K., Shilling, G., Vaz, M. A., Benson, S., Brubak, L., Feng, G., Fujikubo, M., Gaiotti, M., Hu, Z., Jang, B. S., Paik, J. K., Slagstad, M., Tabri, K., Wang, Y., Wiegard, B., & Yanagihara, D. (2021). The ISSC 2022 committee III.1-Ultimate strength benchmark study on the ultimate limit state analysis of a stiffened plate structure subjected to uniaxial compressive loads. *Marine Structures*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2021.103026>
- Smith, M. J. (2010). *DEFENCE DÉFENSE & Defence Research and Development Canada Recherche et développement pour la défense Canada A load shortening curve library for longitudinally stiffened panels Defence R&D Canada-Atlantic*.

- Tatsumi, A., Htoo Ko, H. H., & Fujikubo, M. (2020). Ultimate strength of container ships subjected to combined hogging moment and bottom local loads, Part 2: An extension of Smith's method. *Marine Structures*, 71, 102738. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2020.102738>
- Wang, C., Wu, J., & Wang, D. (2018). Numerical investigation of three-dimensional hull girder ultimate strength envelope for an ultra large container ship. *Ocean Engineering*, 149, 23–37. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.001>
- Yao, T., & Nikolov, I. (1990). *Buckling/Plastic Collapse of Plates under Cyclic Loading*.
- Zhang, S., & Khan, I. (2009). Buckling and ultimate capability of plates and stiffened panels in axial compression. *Marine Structures*, 22(4), 791–808. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2009.09.001>