

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Προσομοίωση πειραμάτων προσδιορισμού μέγιστης αντοχής με τη χρήση του
κώδικα Abaqus Implicit**

Επιβλέπων καθηγητής: Μ. Σ. Σαμουηλίδης

Χρήστος Δ. Πολλάλης
ΑΘΗΝΑ 2012

ΘΕΡΜΕΣ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Υποχρέωσή μου είναι αρχικά να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους οι οποίοι στάθηκαν πλάι μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου έως και την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, τον κο Μ. Σ. Σαμουηλίδη καθηγητή του Ε.Μ.Π. στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και επιβλέποντα της εργασίας γιατί μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ σε έναν τομέα υψηλού προσωπικού ενδιαφέροντος (Αντοχή πλοίου) και με τις εύστοχες επισημάνσεις και παρατηρήσεις του βοήθησε στο ξεπέρασμα θεωρητικών αλλά και πρακτικών ζητημάτων.

Ξεχωριστό και ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο για την εκπόνηση της εργασίας διαδραμάτισε ο κος Μιχάλης Τούλιος Λέκτορας της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ο οποίος διαρκώς με καθοδηγούσε στην εκμάθηση του απαιτητικού λογισμικού ABAQUS και στην επίλυση τυχόντων θεωρητικών προβλημάτων.

Καταλυτική η συνεισφορά και του κου Δημήτρη Μουρκογιάννη, Υ.Δ. της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, ο οποίος πάντα πρόθυμος μου προσέφερε τις γνώσεις του σε θέματα που άπτονται του Προγραμματισμού μέσω Η/Υ, βοηθώντας καίρια σε επίλυση ζητημάτων που προέκυπταν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην οικογένειά μου που φρόντιζε διαρκώς για την κάλυψη όλων των πνευματικών και υλικών μου αναγκών, ούτως ώστε απρόσκοπτα να φτάσω ως αυτό το σημείο.

Ευχαριστώ ολόψυχα,
Χρήστος Δ. Πολλάλης
Απρίλιος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	σελίδα
Εισαγωγικά.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: Θεωρητικά στοιχεία.....	3
1.1 Μέγιστη αντοχή. Γενικά-Ιστορικά.....	3
1.2 Μέγιστη αντοχή. Βασικές αρχές.....	5
1.3 Η Μ.Π.Σ στον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής. Γενικά.....	7
1.4 Η Μ.Π.Σ. στον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής. Μη γραμμική ανάλυση.....	8
1.5 Λύση μη γραμμικών προβλημάτων.....	12
1.6 Μέθοδοι μη γραμμικής επίλυσης.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: Προσομοίωση πειραμάτων.....	19
2.1 Παρουσίαση πειράματος Eldeen et al.....	19
2.2 Παρουσίαση πειράματος Hsin-Chuan Kuo et al.....	31
2.3 Σύνοψη κεφαλαίων 2.1-2.2.....	41
2.4 Μοντελοποίηση πειράματος S. Bahey Eldeen et al.....	42
2.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης πειράματος των S. Bahey Eldeen et al.....	45
2.6 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις.....	65
2.7 Μοντελοποίηση-Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραμάτων Hsin-Chuo Kuo et al.....	67
2.8 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις.....	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: Μελέτη μέγιστης αντοχής μέσης τομής πλοίου με βλάβη.....	83
3.1 Στοιχεία της βλάβης στη μέση τομή.....	83
3.2 Μέγιστη αντοχή μέσης τομής με βλάβη.....	85
3.3 Συμπεράσματα-Παρατηρήσεις τρίτου κεφαλαίου.....	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: Συμπεράσματα και ζητήματα περαιτέρω σχετικής μελέτης.....	92
4.1 Συμπεράσματα εργασίας.....	92
4.2 Ζητήματα περαιτέρω σχετικής μελέτης.....	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	93
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

Εισαγωγικά

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Προσομοίωση πειραμάτων προσδιορισμού μέγιστης αντοχής με τη χρήση του κώδικα Abaqus Implicit» πραγματοποιήθηκε στον Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Μ.Σ.Σαμουηλίδη.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση πειραμάτων υπολογισμού μέγιστης αντοχής (ultimate strength) μέσω της χρήσης του λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων **ABAQUS 6.10_2** και η σύγκριση των αριθμητικών με τα πειραματικά αποτελέσματα. Επίσης, η εργασία εξετάζει τεχνικές για τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής δοκών με μη συμμετρικές διατομές, ως οι διατομές πλοίου μετά από βλάβη που προκαλείται από σύγκρουση ή προσάραξη. Όπως προαναφέραμε, το κριτήριο με βάση το οποίο μελετήθηκε τόσο η προσομοίωση των πειραμάτων όσο και η πληγείσα κατασκευή ήταν η μέγιστη αντοχή τους σε κάμψη (Ultimate Strength) μέσω μιας διαδικασίας η οποία θα παρουσιαστεί στην παρούσα εργασία.

Η δομή που θα ακολουθηθεί κατά τη συγγραφή συνίσταται σε τρία (3) βασικά μέρη-κεφάλαια:

- **Κεφάλαιο Πρώτο:** Θεωρητικά στοιχεία.

Παρουσιάζονται ορισμένα βασικά θεωρητικά στοιχεία όσον αφορά την έννοια του κριτηρίου της μέγιστης αντοχής (Ultimate Strength), καθώς επίσης και στοιχεία της μη-γραμμικής ανάλυσης κατασκευών που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της μέγιστης αντοχής. Επίσης, παρουσιάζονται συνοπτικά οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί το λογισμικό **ABAQUS** για την επίλυση των μοντέλων.

- **Κεφάλαιο Δεύτερο:** Προσομοίωση πειραμάτων.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια παρουσίαση των πειραμάτων που μοντελοποιήθηκαν και στη συνέχεια αναπτύσσεται η μέθοδος με την οποία έγινε η μοντελοποίηση και η παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα.

- **Κεφάλαιο Τρίτο:** Υπολογισμός μέγιστης αντοχής μέσης τομής δεύτερου κεφαλαίου σε καταστάσεις βλάβης της γάστρας.

Παρουσιάζεται η διαδικασία ανάλυσης της μέσης τομής που εξετάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, για δύο διαφορετικές γεωμετρίες βλάβης.

- **Κεφάλαιο Τέταρτο:**

Συμπεράσματα και προτάσεις για τις περαιτέρω σχετικές μελέτες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Θεωρητικά στοιχεία

1.1 Μέγιστη Αντοχή (Ultimate Strength) Γενικά-Ιστορικά

Η μέγιστη αντοχή δομικών στοιχείων και κατασκευών είναι η οριακή κατάσταση φόρτισης του στοιχείου ή της κατασκευής, για την οποία το στοιχείο ή η κατασκευή μπορεί να ικανοποιήσει τις συνθήκες στατικής ισορροπίας. Αύξηση της φόρτισης πέραν αυτής της οριακής κατάστασης δεν είναι δυνατή από το στοιχείο ή την κατασκευή σε συνθήκες στατικής ισορροπίας. Η μέγιστη αντοχή καθορίζεται ως επί το πλείστον από το λυγισμό και τη διαρροή όταν υπερισχύουν θλιπτικές τάσεις, και από τη διαρροή όταν υπερισχύουν οι εφελκυστικές τάσεις.

Στις μέρες μας είναι συνηθισμένο να σχεδιάζονται οι κατασκευές ώστε να μην καταρρέουν από λυγισμό ή διαρροή. Ωστόσο μέχρι τα μέσα του 19^{ου} αιώνα το κριτήριο σχεδίασης ήταν η τάση θραύσης του υλικού. Αυτό συνέβαινε εν μέρει, διότι τότε χρησιμοποιούνταν ο σφυρήλατος σίδηρος ως κύριο υλικό στην κατασκευή πλοίων, ο οποίος έχει χαμηλή ολκιμότητα έναντι εφελκυστικών τάσεων, ως και το σκυρόδεμα. Ένας ακόμη λόγος ήταν ότι ακόμα δεν είχε κατανοηθεί το φαινόμενο του λυγισμού και οι συνέπειές του, αν και ήταν γνωστό ότι μια κατασκευή μπορεί να καταρρεύσει από λυγισμό στην πλευρά που θλίβεται κατά την κάμψη μέσα από τις διάσημες δοκιμές κατάρρευσης του **Fairbairn** (ISSC 2006) σε μοντέλα γεφυρών-δοκών το 1845 (Timoshenko, 1953). Στη συνέχεια ακολούθησε ο **Bryan** ο οποίος κατόρθωσε να κατανοήσει θεωρητικά και να υπολογίσει το λυγισμό πλαισίων και χρησιμοποίησε την αντοχή σε λυγισμό ως συνθήκη για να προσδιορίσει το πάχος του πλαισίου. Από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα ήταν συνηθισμένο να θεωρείται ο λυγισμός ως κριτήριο σχεδίασης, ενώ στον αιώνα που διανύουμε εισάγεται το κριτήριο της μέγιστης αντοχής.

Η πρώτη απόπειρα εκτίμησης της μέγιστης αντοχής σε πλοία έγινε από τον **Caldwell (1965)**. Εφάρμοσε τη *Μέθοδο του Άκαμπτου Πλαστικού Μηχανισμού* για να εκτιμήσει τη μέγιστη αντοχή σε δοκό-γάστρα πλοίου.

Ο λυγισμός λήφθηκε υπόψη ελαττώνοντας την τάση διαρροής στα στοιχεία που είχαν υποστεί λυγισμό (ISSC 2006, Committee III.I. *Ultimate Strength*, 5).

Το 1956 υπήρξε το πρώτο άρθρο που αναφερόταν στη *Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων (Turner et al., 1956)*. Αρχικά η μέθοδος αυτή χρησιμοποιούνταν για την ανάλυση της ελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων και συστημάτων. Για να εκτιμηθεί η μέγιστη αντοχή των δομικών στοιχείων και συστημάτων θεωρητικά, είναι αναγκαίο να διενεργηθεί εκτίμηση της αντοχής που θα λαμβάνει υπόψη τόσο το λυγισμό όσο και τη διαρροή.

Τέτοιου είδους ανάλυση αναφέρεται ως *ελαστοπλαστική ανάλυση μεγάλων παραμορφώσεων*.

Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 έγινε δυνατό να διενεργείται τέτοια ανάλυση με τη χρήση της *Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων*. Ωστόσο έπρεπε να περάσει περισσότερο από μία δεκαετία ώστε τα εμπορικά πακέτα που επέτρεπαν την πραγματοποίηση ολοκληρωμένης ανάλυσης, έως το σημείο κατάρρευσης, να χρησιμοποιηθούν ευρέως.

1.2 Μέγιστη Αντοχή (Ultimate Strength)

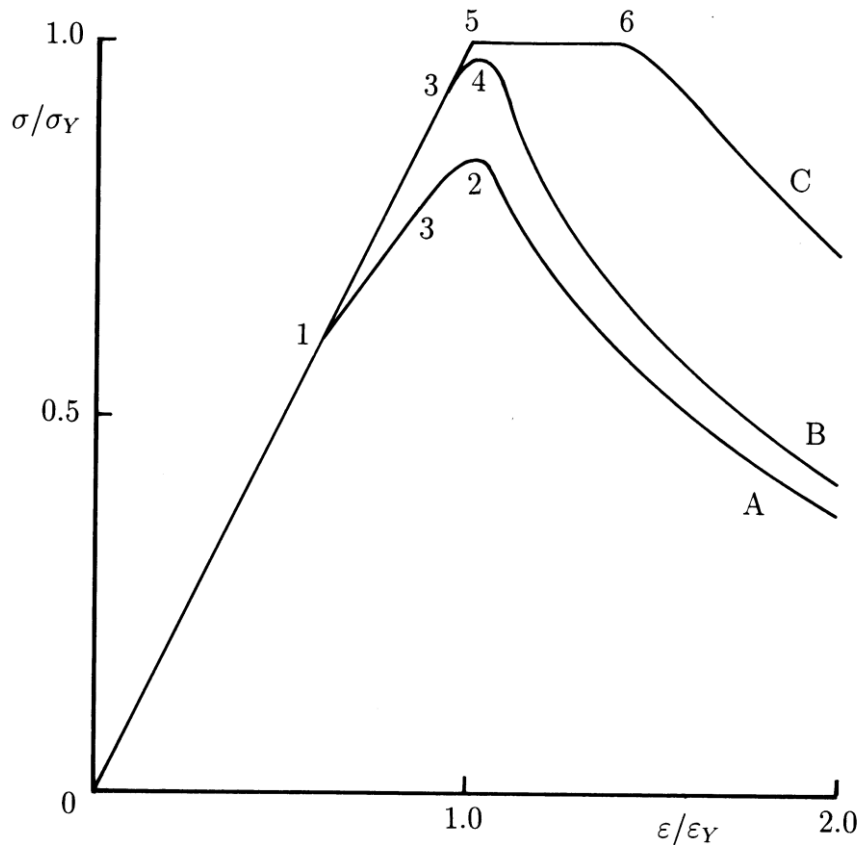
Βασικές Αρχές

Όταν εφαρμόζεται θλιπτική τάση σε ένα δομικό στοιχείο, όπως κολώνες, ελάσματα, ενισχυμένα ελάσματα κ.ά., μέσω εσωτερικών ή εξωτερικών φορτίων, θα εμφανιστεί λυγισμός όταν η τάση φθάσει σε μία συγκεκριμένη κρίσιμη τιμή. Γενικά, η πλευρική παραμόρφωση αυξάνεται με ταχύ ρυθμό μετά την εμφάνιση λυγισμού, η οποία ελαττώνει αιφνίδια την αξονική/ομοεπίπεδη ακαμψία του υπό θλίψη δομικού στοιχείου. Εξαιτίας της πλευρικής παραμόρφωσης δημιουργούνται και θλιπτικές τάσεις λόγω κάμψης εκτός από τις αξονικές/ομοεπίπεδες τάσεις, που προσ αυξάνουν τις προϋπάρχουσες τάσεις λόγω θλίψης. Στην περίπτωση μεταλλικών κατασκευών η τάση λόγω κάμψης επισπεύδει την εμφάνιση διαρροής σε συνδυασμό με την αξονική τάση. Αφότου το πλαστικοποιημένο τμήμα εξαπλώνεται σε κάποια έκταση, η αξονική ακαμψία μηδενίζεται και σ' αυτό το σημείο έχει επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή. Έπειτα από αυτό το σημείο, η ικανότητα παραλαβής φορτίου ελαττώνεται γρήγορα κάτι που εξαρτάται από τη γεωμετρία του υπό κατάρρευση τμήματος και τις συνθήκες φόρτισης.

Στην περίπτωση στοιχείων μίας διάστασης η εγκάρσια παραμόρφωση αυξάνει μετά την εμφάνιση λυγισμού και προκαλείται, ταυτόχρονα με την αξονική καταπόνηση, και καμπτική καταπόνηση που επιταχύνει τη διαρροή στα σημεία της διατομής που βρίσκονται υπό θλίψη. Στην κατάσταση αυτή μειώνεται η ικανότητα του στοιχείου να φέρει θλιπτικά φορτία και το στοιχείο έχει προσεγγίσει τη μέγιστη αντοχή του.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέγιστη αντοχή στοιχείων μίας διάστασης είναι αρκετά ευμετάβλητη σε αρχικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, σε πραγματικές κατασκευές τα άκρα τους συνδέονται κατά κάποιον τρόπο σε άλλα μέρη της κατασκευής οπότε σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει οι συνοριακές συνθήκες να είναι προσεκτικά ορισμένες.

Στην περίπτωση μεταλλικών επιφανειών με μικρότερο λόγο λυγηρότητας, η διαρροή αρχίζει να εμφανίζεται προτού συμβεί λυγισμός του στοιχείου. Αυτή η συμπεριφορά είναι παρόμοια με αυτή των κολώνων, υπό την έννοια ότι και εδώ η αντοχή σε λυγισμό ταυτίζεται με τη μέγιστη αντοχή. Από την άλλη, επιφάνειες με υψηλότερους λόγους λυγηρότητας εμφανίζουν ένα διαφορετικό χαρακτηριστικό. Εδώ ο λυγισμός λαμβάνει χώρα σε ένα ελαστικό εύρος, ενώ η ικανότητα παραλαβής φορτίων μετά το λυγισμό αυξάνει συνοδευόμενη από αύξηση της πλευρικής παραμόρφωσης. Αυτή η αύξηση της ικανότητας παραλαβής φορτίων οφείλεται στην ανάπτυξη μεμβρανικών τάσεων, οι οποίες εμφανίζονται εξαιτίας της μεγάλης παραμόρφωσης. Έπειτα αρχίζει να εμφανίζεται πλαστικότητα, η ακαμψία προοδευτικά μειώνεται και επιτυγχάνεται η μέγιστη αντοχή.



Σχήμα 1.2.1 Σχηματική απεικόνιση της σχέσης μέσης τάσης-μέσης παραμόρφωσης σε ενισχυμένα ελάσματα υπό ομοεπίπεδη φόρτιση

Στο παραπάνω διάγραμμα (ISSC 2006. Committee III.I. *Ultimate Strength*, 8) η καμπύλη A αντιστοιχεί στη σχέση μέσης τάσης-μέσης παραμόρφωσης στην περίπτωση ελαστικού λυγισμού. Στην περίπτωση αυτή ο ελαστικός λυγισμός συμβαίνει στο σημείο 1. Έπειτα, η διαρροή ακολουθεί στο σημείο 3 και ο λυγισμός του ενισχυτικού στο σημείο 2, όπου έχει επιτευχθεί η μέγιστη αντοχή.

Όταν ο λόγος της λυγηρότητας είναι μικρότερος, η σχέση μεταξύ μέσης τάσης-μέσης παραμόρφωσης περιγράφεται από την καμπύλη B. Στην περίπτωση αυτή η πρώτη διαρροή εμφανίζεται στο σημείο 3 και η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται στο σημείο 4 από λυγισμό του ενισχυτικού.

Στην περίπτωση που το πλαίσιο και το ενισχυτικό έχουν αρκετά μικρότερο λόγο λυγηρότητας, η σχέση μεταξύ μέσης τάσης-μέσης παραμόρφωσης ακολουθεί την καμπύλη C. Εδώ, η διαρροή εμφανίζεται στο σημείο 5 ωστόσο δεν παρουσιάζεται πλευρική παραμόρφωση σ' αυτό το σημείο. Στο σημείο 6 είτε το πλαίσιο είτε το ενισχυτικό υφίστανται λυγισμό οπότε η ικανότητα παραλαβής φορτίου μειώνεται με την αύξηση της πλευρικής παραμόρφωσης στο πλαίσιο ή στο ενισχυτικό.

Για τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία ή συστήματα μπορεί να εμφανιστεί παρόμοια συμπεριφορά κάτω από διάφορες συνθήκες φόρτισης. Για να προσομοιωθεί τέτοια συμπεριφορά κατάρρευσης εμπειρικές, αναλυτικές, αριθμητικές και πειραματικές μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν.

Σε κάθε περίπτωση επομένως μεταλλικής κατασκευής η μέγιστη αντοχή, που είναι η μέγιστη ικανότητα παραλαβής φορτίων που εμφανίζουν τα δομικά στοιχεία και συστήματα, επιτυγχάνεται όταν έχει συμβεί πλαστικοποίηση σε μία έκταση της κατασκευής ανεξάρτητα με την ύπαρξη λυγισμού.

Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η ικανότητα των κατασκευών όσο και ο ρόλος που παίζουν οι φορτίσεις σε αυτές έχουν καθαρά στατιστικά χαρακτηριστικά. Για να έχουμε μια πιο ακριβή αξιολόγηση της αντοχής σε πλοία και πλωτές κατασκευές θα πρέπει να εκπονηθεί και **ανάλυση αξιοπιστίας** κάτι στο οποίο δεν θα αναφερθούμε στην παρούσα εργασία.

1.3 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (F.E.M.) στον υπολογισμό της Μέγιστης Αντοχής **Γενικά**

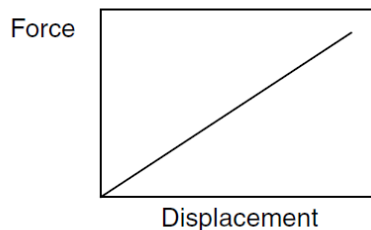
Οι τεχνικές που εφαρμόζονται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων έχουν πια ωριμάσει στις μέρες μας για την εκτίμηση της Μέγιστης Αντοχής δομικών στοιχείων. Πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τη συγκεκριμένη μέθοδο ώστε να προσδιορίσουν τη Μέγιστη Αντοχή ενισχυμένων και μη ενισχυμένων ελασμάτων, όπως οι *Yanagihara, et al (2003)*, *Harada, et al (2004)*, *Hughes, et al (2004)*, *Paik, et al (2003a, 2004a, 2005a)* και αρκετοί άλλοι. Σε αυτές τις εφαρμογές έχουν ληφθεί υπόψη τόσο οι γεωμετρικές μη-γραμμικότητες όσο και οι μη-γραμμικότητες του υλικού. Για τη μη γραμμική ανάλυση που εκτελείται στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων θα μιλήσουμε στη συνέχεια.

1.4 Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (F.E.M.) στον υπολογισμό της Μέγιστης Αντοχής **Μη γραμμική ανάλυση**

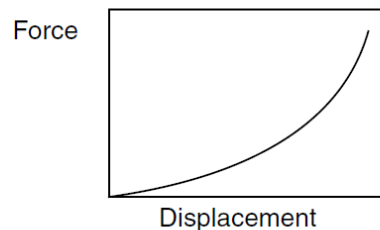
Επειδή η ανάλυση που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της επίλυσης των προβλημάτων είναι μη γραμμική, θεωρούμε σκόπιμο να αναφέρουμε ορισμένα βασικά και απαραίτητα στοιχεία που μας απασχόλησαν σε αυτή τη διαδικασία.

Γραμμική ανάλυση έχουμε όταν υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στην εξασκούμενη φόρτιση και την απόκριση του συστήματος. Παραδείγματος χάριν, αν σε ένα γραμμικό ελατήριο η μετατόπιση είναι 1m όταν ασκείται φορτίο 10N τότε για επιβαλλόμενο φορτίο 20N η μετατόπιση του ελατηρίου θα είναι 2m. Η απόκριση δηλαδή της κατασκευής σε κάθε περίπτωση φόρτισης μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας το διάνυσμα της φόρτισης με το ανάστροφο μητρώο της στιβαρότητας (stiffness matrix) που διατηρείται σταθερό και ανεξάρτητο του επιβαλλόμενου φορτίου.

Σε ένα μη γραμμικό κατασκευαστικό πρόβλημα ωστόσο, η κλίση της καμπύλης εφαρμοζόμενης δύναμης – μετατόπισης και γενικότερα αιτίου - απόκρισης της κατασκευής μεταβάλλεται καθώς αυτή η κατασκευή παραμορφώνεται. Θα πρέπει να είναι ξεκάθαρο ότι σχεδόν όλες οι πραγματικές κατασκευές είναι μη γραμμικές. Η γραμμική ανάλυση είναι συνήθως μια βολική προσέγγιση, επαρκής για τους σχεδιαστικούς σκοπούς. Ένα απλό παράδειγμα μη γραμμικής συμπεριφοράς είναι ένα ελατήριο με μη γραμμική σταθερά, που μεταβάλλεται καθώς το ελατήριο συμπιέζεται ή επιμηκώνεται (Abaqus tutorial. *GET STARTED*, 246-247).



Linear spring.
Stiffness is constant.



Nonlinear spring.
Stiffness is not constant.

Σχήμα 1.4.1 Ποιοτική απεικόνιση της σχέσης ανάμεσα στη δύναμη και στην παραμόρφωση σε ένα ελατήριο με σταθερό μέτρο ελαστικότητας (αριστερά) και σε ένα με μεταβλητό (δεξιά)

Σε μία μη γραμμική ανάλυση λοιπόν, το μητρώο της στιβαρότητας θα πρέπει να δημιουργηθεί και να αναστραφεί αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της ανάλυσης κάνοντάς την πιο «ακριβή υπολογιστικά» σε σχέση με τη γραμμική ανάλυση. Από τη στιγμή οπότε που η απόκριση σε ένα μη γραμμικό σύστημα είναι μη γραμμική συνάρτηση της εξασκούμενης φόρτισης, δεν είναι δυνατή η εύρεση λύσεων με απλή υπέρθεση.

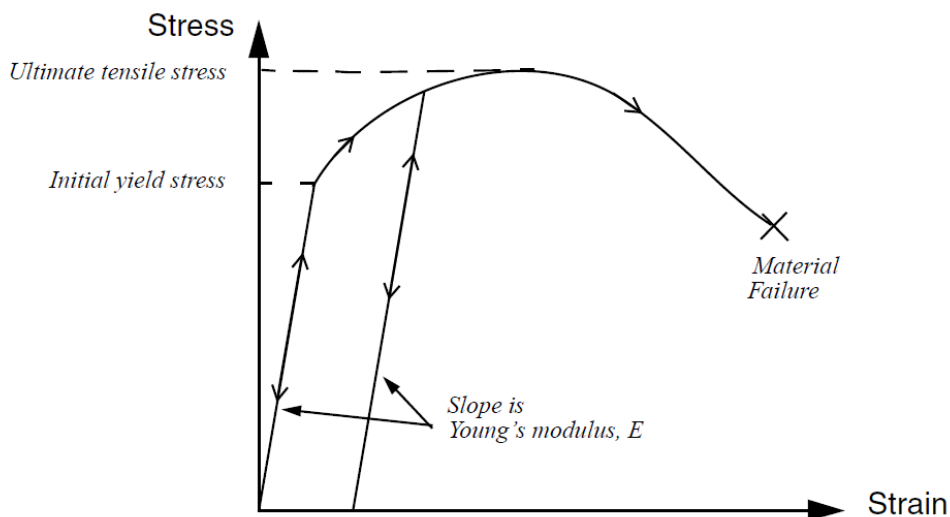
Οι συνήθεις πηγές της μη γραμμικότητας είναι οι:

- Μη γραμμικότητα του υλικού
- Γεωμετρική μη γραμμικότητα
- Συνοριακή μη γραμμικότητα

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις δύο πρώτες που μας απασχόλησαν στις μοντελοποιήσεις της παρούσας εργασίας.

Μη γραμμικότητα του υλικού

Αυτή η πηγή της μη γραμμικότητας είναι η πιο συνηθισμένη και αυτή με την οποία οι περισσότεροι είναι πιο εξοικειωμένοι. Τα περισσότερα υλικά έχουν μία αρκετά γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων για μικρές τιμές της παραμόρφωσης. Για υψηλότερες ωστόσο τιμές της παραμόρφωσης το υλικό διαρρέει και από το σημείο αυτό η απόκριση γίνεται μη-γραμμική και μη αναστρέψιμη. Μία τέτοια συμπεριφορά απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1.4.2 Ποιοτική απεικόνιση τάσης-παραμόρφωσης υλικού που εμφανίζει διαρροή. Η κλίση στο γραμμικό-ελαστικό τμήμα ισούται με το μέτρο ελαστικότητας E του υλικού

Γεωμετρική μη γραμμικότητα

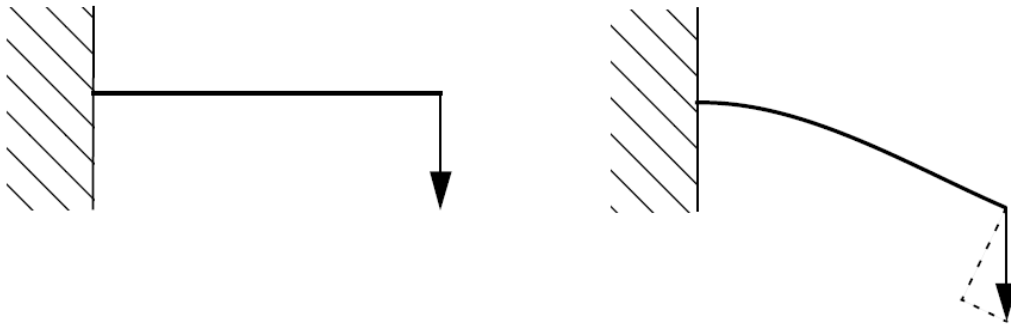
Η πηγή αυτή της μη γραμμικότητας μπορεί να προέλθει όποτε το μέτρο της παραμόρφωσης επηρεάζει την απόκριση της κατασκευής. Αυτό μπορεί να προέλθει από:

1. Μεγάλες μετατοπίσεις ή περιστροφές
2. Αρχικές τάσεις στην κατασκευή
3. Αλλαγή κλίσης μιας επιφάνειας μετά από φόρτιση

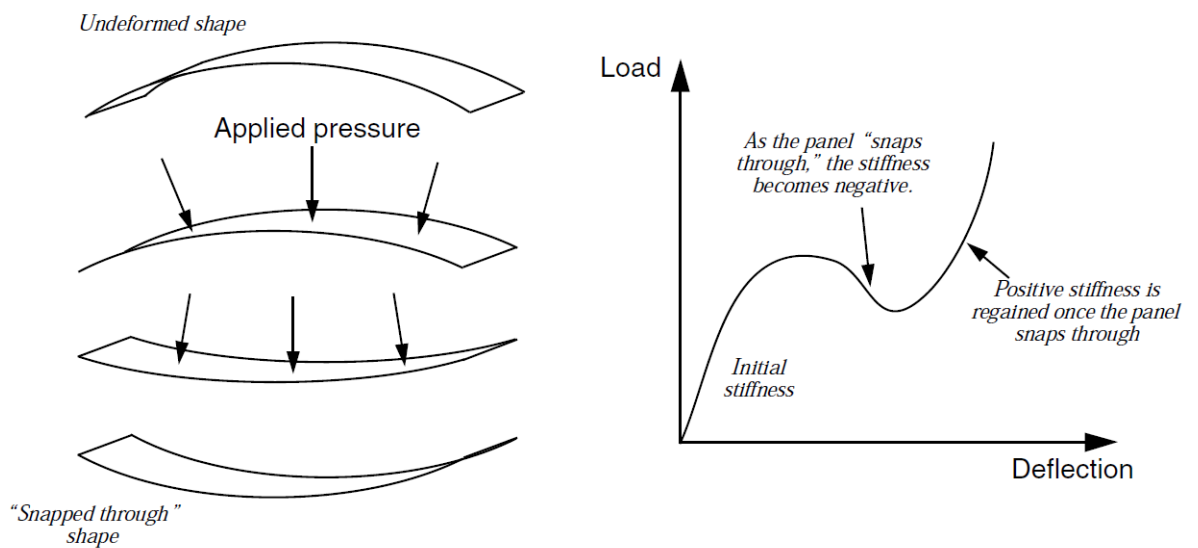
Για παράδειγμα, αν η εκτροπή σε μία δοκό είναι σχετικά μικρή, τότε η συμπεριφορά της παραμένει γραμμική. Ωστόσο, αν η μετατόπιση πάρει μεγαλύτερες τιμές τότε το σχήμα της κατασκευής και η στιβαρότητά της αλλάζουν. Επιπλέον αν το φορτίο δεν παραμένει κάθετο στη δοκό τότε η δράση του επηρεάζεται σημαντικά. Καθώς η δοκός εκτρέπεται, το φορτίο πλέον μπορεί να αναλυθεί σε ένα κάθετο σε αυτή και σε ένα κατά τη διεύθυνση της δοκού. Και οι δύο αυτές συνιστώσες συνεισφέρουν στη μη γραμμική απόκριση της δοκού.

Κάποιος θα ανέμενε ότι μία κατασκευή καθώς αποκτούσε μεγάλες μετατοπίσεις και περιστροφές θα είχε σημαντικές επιδράσεις στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου. Ωστόσο, οι παραμορφώσεις δεν είναι απαραίτητο να είναι μεγάλες σε σχέση με τις διαστάσεις της κατασκευής ώστε η γεωμετρική μη γραμμικότητα να είναι σημαντική. Αν σκεφτούμε την περίπτωση επίπεδου πλαισίου στο οποίο ασκείται πίεση στην επιφάνειά του (βλ. σχήμα 1.4.3), τότε έχουμε μια σημαντική αλλαγή στη στιβαρότητα της κατασκευής. Όταν το πλαίσιο αλλάζει κλίση τότε η στιβαρότητα γίνεται αρνητική. Έτσι, αν και η παραμόρφωση σε σχέση με τις διαστάσεις του πλαισίου είναι μικρή θα υπάρξει μία ουσιώδης γεωμετρική μη γραμμικότητα η οποία θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την προσομοίωση.

Σχήματα με τα οποία γίνεται ευκολότερη η κατανόηση των παραπάνω δίνονται στη συνέχεια (Abaqus tutorial. *GET STARTED*, 247-250).



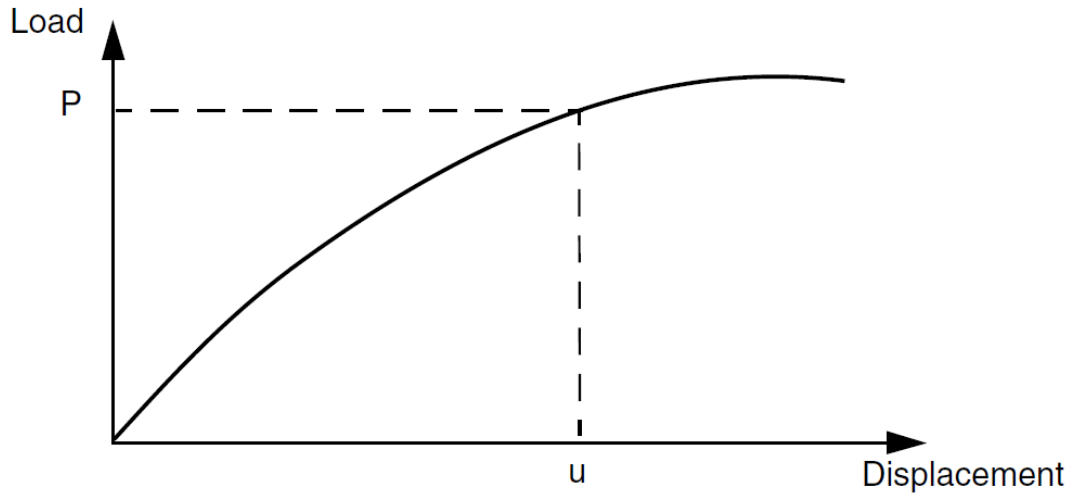
Σχήμα 1.4.3 Η μεγάλη εκτροπή που παρατηρείται στη φόρτιση δοκών και η ανάλυση του φορτίου σε συνιστώσες



Σχήμα 1.4.4 Αλλαγή καμπυλότητας πλαισίου έπειτα από άσκηση πίεσης και αντίστοιχη απεικόνιση της σχέσης φορτίου-παραμόρφωσης. Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια που αλλάζει καμπυλότητα το πλαίσιο, η στιβαρότητα γίνεται αρνητική

1.5 Δύση μη-γραμμικών προβλημάτων

Η μη γραμμική καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης μίας κατασκευής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

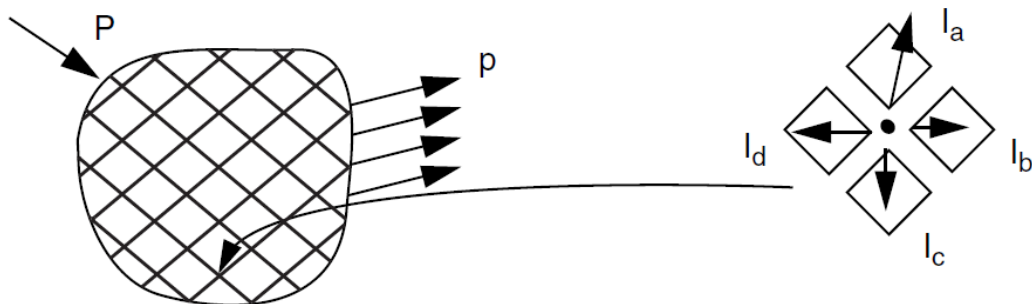


Σχήμα 1.5.1 Μη γραμμική καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης

Σε κάθε περίπτωση, ο σκοπός είναι να καθοριστεί η απόκριση της κατασκευής, καθώς μεταβάλλεται το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο. Αν θεωρήσουμε ως P τα εξωτερικά φορτία και I τα εσωτερικά, τότε σε κάθε κόμβο θα πρέπει να ισχύει η ισότητα, ώστε η κατασκευή να βρίσκεται σε στατική ισορροπία:

$$P-I=0$$

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφέρουμε ότι το εσωτερικό φορτίο I σε κάθε κόμβο προκύπτει από τις τάσεις που ασκούνται στα στοιχεία που περικλείουν το συγκεκριμένο κόμβο.



Σχήμα 1.5.2 Εξωτερικό φορτίο σε μία προσομοίωση

Εσωτερικό φορτίο σε κόμβο

Στη μη γραμμική ανάλυση η λύση δεν μπορεί να επιτευχθεί αντιστρέφοντας μία φορά το σταθερό μητρώο στιβαρότητας. Αντιθέτως η λύση βρίσκεται επιβάλλοντας τα επιθυμητά φορτία σταδιακά και αυξητικά και επιλύοντας τις εξισώσεις στατικής ισορροπίας για κάθε επιβαλλόμενο φορτίο. Έτσι, το *Abaqus/Standard* το οποίο χρησιμοποιήσαμε αποκλειστικά για την προσομοίωση και επίλυση των μοντέλων στην παρούσα εργασία, επιβάλλει το φορτίο «βηματικά» και βρίσκει την προσεγγιστική κατάσταση ισορροπίας στο τέλος κάθε βήματος. Πολλές φορές είναι απαραίτητες περισσότερες από μία επαναλήψεις ώστε να βρεθεί μία ικανοποιητική λύση για κάποια επαύξηση του φορτίου. Τέλος, το άθροισμα όλων αυτών των επαυξητικών αποκρίσεων είναι η προσεγγιστική λύση της μη γραμμικής λύσης, γι'αυτό μπορούμε να πούμε ότι το λογισμικό *Abaqus/Standard* χρησιμοποιεί συνδυασμό επαυξητικών-επαναληπτικών μεθόδων για την εύρεση της μη γραμμικής λύσης (Abaqus tutorial. *GET STARTED*, 250-252).

1,6 Μέθοδοι μη γραμμικής επίλυσης

Μέθοδος Newton

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργούνται στο λογισμικό ABAQUS συνήθως είναι μη-γραμμικά και αφορούν από μερικές μεταβλητές έως κάποιες χιλιάδες. Όσον αφορά τις μεταβλητές αυτές, οι εξισώσεις ισορροπίας λαμβάνονται διακριτοποιώντας την εικονική εξίσωση εργασίας, η οποία μπορεί να γραφεί και ως:

$$F^N(u^M) = 0 \quad (1.1)$$

όπου F^N είναι η συνιστώσα της δύναμης που αναφέρεται στη μεταβλητή N του προβλήματος και u^M η τιμή της μεταβλητής M . Το κύριο πρόβλημα τώρα είναι η επίλυση της (1.1) για τη u^M στην περιοχή ενδιαφέροντος.

Πολλά από τα προβλήματα που επιλύονται με τη βοήθεια του λογισμικού ABAQUS, όπως και οι περιπτώσεις που θα παρουσιασθούν στη συνέχεια, είναι εξαρτώμενα από την πορεία επίλυσης τους γι' αυτό και η λύση πρέπει να βρεθεί από μια σειρά μικρών βημάτων. Στο σημείο αυτό ανακύπτουν δύο ζητήματα: Το πρώτο έχει να κάνει με το πώς επιλύεται η διακριτοποιημένη εξίσωση (1.1) σε κάθε βήμα και το δεύτερο με το πώς επιλέγεται το μέγεθος του βήματος.

Το Abaqus/Standard που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία, γενικά χρησιμοποιεί τη μέθοδο Newton ως μία τεχνική για την επίλυση μη-γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας. Το κίνητρο για αυτήν την επιλογή είναι ο ρυθμός σύγκλισης που εμφανίζει η μέθοδος αυτή σε σχέση με τους ρυθμούς σύγκλισης που λαμβάνονται από άλλες μεθόδους. Η κύρια μορφή της μεθόδου Newton παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Ας υποθέσουμε ότι μετά από την επανάληψη i έχει βρεθεί μία προσεγγιστική λύση u_i^M . Ας υποθέσουμε επίσης ότι c_{i+1}^M είναι η διαφορά της πραγματικής με την προσεγγιστική λύση που βρέθηκε. Η ακριβής τότε λύση της διακριτοποιημένης εξίσωσης (1.1) είναι η εξής:

$$F^N(u_i^M + c_{i+1}^M) = 0 \quad (1.2)$$

Αναπτύσσοντας έπειτα το αριστερό μέρος της (1.2) με το ανάπτυγμα Taylor ως προς την προσεγγιστική λύση u_i^M προκύπτει το εξής:

$$F^N(u_i^M) + \frac{\partial F^N}{\partial u^P}(u_i^M)c_{i+1}^P + \frac{\partial^2 F^N}{\partial u^P \partial u^Q}(u_i^M)c_{i+1}^P c_{i+1}^Q + \dots = 0 \quad (1.3)$$

Αν η προσέγγιση u_i^M είναι αρκετά κοντά στην πραγματική λύση τότε το μέτρο κάθε διαφοράς c_{i+1}^M θα είναι αρκετά μικρό με αποτέλεσμα η σχέση (1.3) να μπορεί να απλοποιηθεί στο παρακάτω γραμμικό σύστημα εξισώσεων:

$$K_i^{NP} c_{i+1}^P = -F_i^N \quad (1.4)$$

όπου ο όρος $K_i^{NP} = \frac{\partial F^N}{\partial u^P}(u_i^M)$ είναι ο Ιακωβιανός πίνακας και $F_i^N = F^N(u_i^M)$. Η νέα προσέγγιση έπειτα είναι $u_{i+1}^M = u_i^M + c_{i+1}^M$ και η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται κατ'αυτόν τον τρόπο.

Η σύγκλιση στη μέθοδο *Newton* μετράται με τον καλύτερο τρόπο όταν διαπιστώνεται ότι οι καταχωρήσεις των F_i^N και c_{i+1}^M είναι εξαιρετικά μικρές. Και τα δύο αυτά κριτήρια ελέγχονται σε μία λύση με τη χρήση του Abaqus/Standard. Επιπλέον το Abaqus/Standard επιστρέφει τις ανώτατες τιμές των υπολοίπων της δύναμης, την επαύξηση της παραμόρφωσης και τις διορθώσεις στην αυξητική παραμόρφωση ώστε ο χρήστης να μπορεί ανά πάσα στιγμή να ελέγχει αυτά τα μεγέθη.

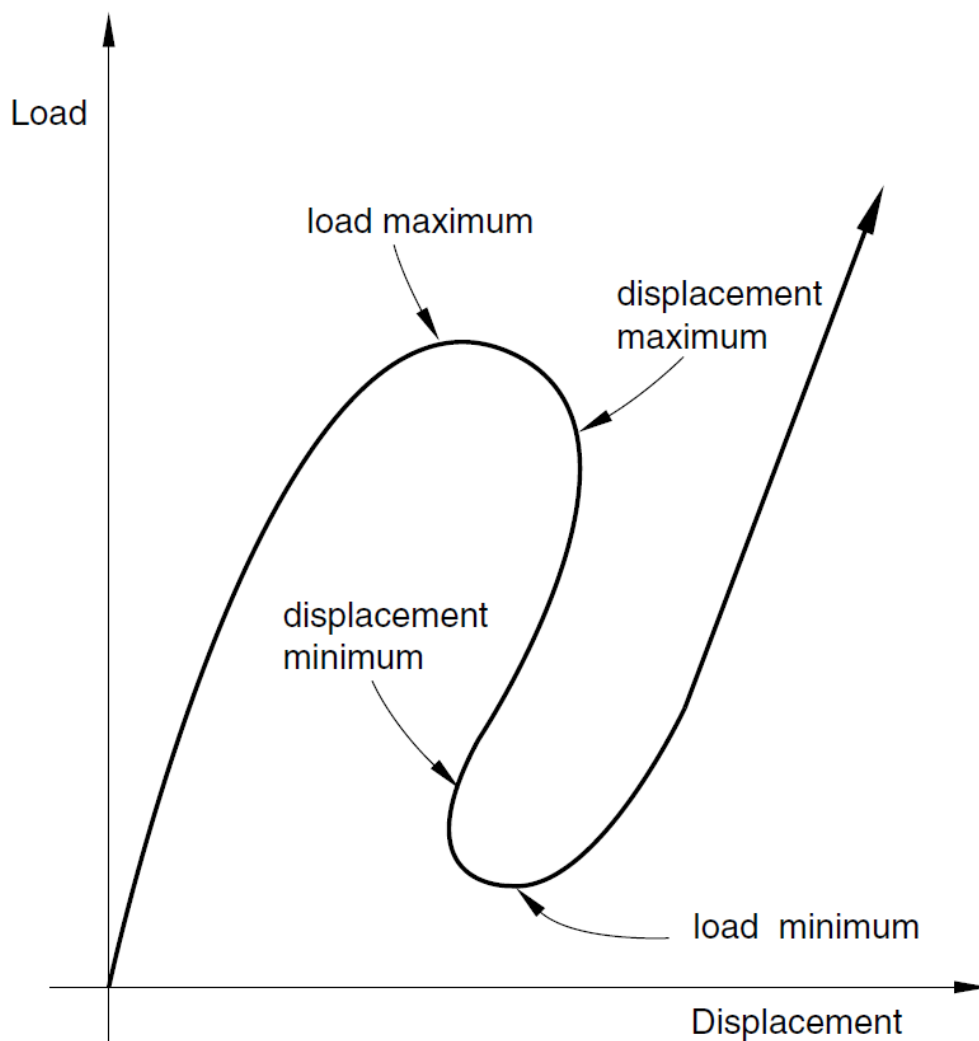
Η μέθοδος *Newton* αποφεύγεται σε μεγάλους κώδικες πεπερασμένων στοιχείων κυρίως για δύο λόγους: πρώτον γιατί η διαμόρφωση του Ιακωβιανού πίνακα είναι δύσκολη κάποιες φορές και δεύτερον διότι η μέθοδος αυτή είναι αρκετά δαπανηρή για κάθε επανάληψη καθότι ο Ιακωβιανός πίνακας πρέπει να αναδημιουργηθεί και να επιλυθεί ξανά για κάθε επανάληψη.

Αν δεν επιθυμείται από το χρήστη η χρήση της μεθόδου *Newton* λόγω του υπολογισμού του Ιακωβιανού πίνακα σε κάθε επανάληψη, μπορεί να γίνει η χρήση άλλων μεθόδων όπως της **τροποποιημένης μεθόδου Newton** (modified Newton) ή της **quasi-Newton μεθόδου**. Στις συγκεκριμένες μεθόδους δεν θα αναφερθούμε στην παρούσα εργασία καθότι δεν χρησιμοποιήθηκαν στην επίλυση των προβλημάτων που θα παρουσιάσουμε στα επόμενα κεφάλαια (Abaqus tutorial. *THEORY*, 107-108).

Τροποποιημένος αλγόριθμος Riks

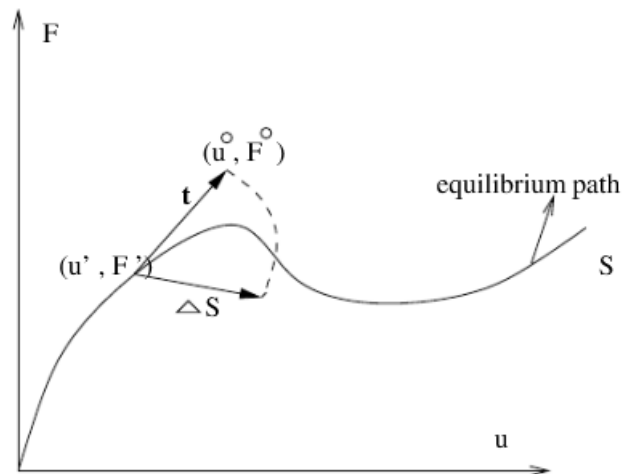
Στο παρόν υποκεφάλαιο θα επιχειρήσουμε να παρουσιάσουμε με συνοπτικό και περιεκτικό τρόπο τα βασικά στοιχεία ενός άλλου αλγορίθμου, πέραν του Newton, που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα εργασία.

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος Riks είναι απαραίτητος σε περιπτώσεις όπου επιθυμούμε την εύρεση λύσεων ισορροπίας σε στατικά μη-γραμμικά προβλήματα τα οποία είναι ασταθή και η απόκριση φορτίου-μετατόπισης έχει τη μορφή του παρακάτω σχήματος κάτι που σημαίνει ότι υπάρχουν περιόδους κατά τη διαδικασία επίλυσης όπου το φορτίο ή/και η μετατόπιση ενδέχεται να ελαττωθούν.



Σχήμα 1.6.1 Σχηματική απεικόνιση της απόκρισης ενός ασταθούς προβλήματος όπου ανά περιόδους το φορτίο ή/και η παραμόρφωση ελαττώνονται

Θεωρούμε ότι όλες οι φορτίσεις είναι ανάλογες και επίσης ότι η απόκριση είναι σχετικά ομαλή (δεν συμβαίνουν απότομες διακλαδώσεις). Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί και εφαρμοστεί σε τέτοιου είδους προβλήματα. Από αυτές η πιο επιτυχής είναι η **τροποποιημένη μέθοδος Riks**. Το νόημα της μεθόδου είναι ότι αναζητείται ένα συγκεκριμένο μονοπάτι ισορροπίας σε έναν χώρο που ορίζεται από τις μεταβλητές των κόμβων και τις παραμέτρους της φόρτισης. Η εξέλιξη της διαδικασίας εύρεσης της λύσης απαιτεί την αλλαγή πορείας στο μονοπάτι ισορροπίας όπου αυτό είναι αναγκαίο. Ο κύριος αλγόριθμος παραμένει η μέθοδος Newton ωστόσο κάθε στιγμή υπολογίζεται και μια πεπερασμένη ακτίνα σύγκλισης. Επιπλέον, σε πολλά από τα υλικά (και πιθανόν τα φορτία) η απόκρισή τους θα είναι εξαρτώμενη από το μονοπάτι της λύσης. Για τους λόγους αυτούς είναι αναγκαίο να περιοριστεί το μέγεθος της επαύξης. Στον αλγόριθμο της **τροποποιημένης μεθόδου Riks** το μέγεθος της επαύξης περιορίζεται μετακινώντας μια δεδομένη απόσταση (η οποία έχει προσδιοριστεί από τον πρότυπο, εξαρτώμενου ρυθμού σύγκλισης, αλγόριθμο επαύξης για στατική περίπτωση του λογισμικού ABAQUS) κατά μήκος της εφαπτόμενης ευθείας στο σημείο επίλυσης, και έπειτα αναζητώντας μια ίση απόσταση στο επίπεδο που περνά από το σημείο που βρέθηκε και είναι κάθετο στην προαναφερθείσα εφαπτομένη. Εδώ η γεωμετρία στην οποία αναφερόμαστε είναι αυτή των μετατοπίσεων, των περιστροφών και των παραμέτρων φόρτισης (Abaqus tutorial. *THEORY*, 123-124). Σχήμα το οποίο επεξηγεί τα παραπάνω δίδεται στη συνέχεια.



Σχήμα 1.6.2 Σχηματική απεικόνιση του αλγόριθμου Riks. Οι λύσεις υπολογίζονται πάνω στο τόξο με ακτίνα ΔS . Η πρώτη προσέγγιση της λύσης είναι το σημείο (u^0, F^0)

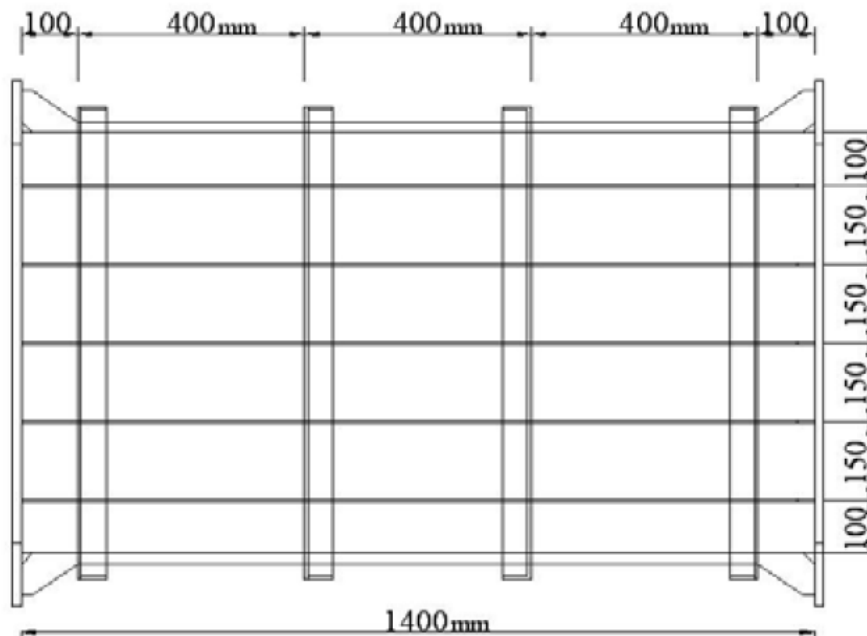
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Προσομοίωση πειραμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό της εργασίας θα εκθέσουμε αρχικά τα πειράματα τα οποία μοντελοποιήσαμε με τη χρήση του λογισμικού ABAQUS και έπειτα θα προβούμε στις εκτιμήσεις και στα συμπεράσματα. Σκοπός μας είναι η ανάπτυξη κατάλληλης μεθόδου μοντελοποίησης (επιλογή κατάλληλων στοιχείων, ορισμός οριακών συνθηκών κ.ά.) η οποία θα δίνει όσο το δυνατόν ακριβέστερα αποτελέσματα τα οποία θα προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό τα πειραματικά. Το μέγεθος που μας απασχολεί κυρίως σε αυτή την ανάλυση είναι η μέγιστη αντοχή (ultimate strength) των μοντέλων σε άθικτη κατάσταση.

2.1 Παρουσίαση πειράματος Eldeen et al [Eldeen S, Garbatov Y, Soares C, PRAD2010]

Το πείραμα αυτό διενεργήθηκε από τους Eldeen et al, και αντικείμενό του είναι η εκτίμηση της αντοχής μιας σχετικά απλής κατασκευής σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με νομείς και ενισχυτικά με βάση το κριτήριο της μέγιστης αντοχής (Ultimate Strength). Μία κατατοπιστική κάτοψη της κατασκευής δίδεται παρακάτω.



Σχήμα 2.1.1 Κάτοψη της γεωμετρίας του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με τα κατασκευαστικά του στοιχεία



Εικόνα 2.1.1 Η πραγματική πειραματική διάταξη

Η κατασκευή η οποία υποβλήθηκε σε κάμψη –four point bending- έχει μήκος 1400mm, πλάτος 800mm και ύψος 600mm. Επιπλέον είχε πέντε (5) ενισχυτικά στο κατάστρωμα σε αποστάσεις που φαίνονται από την κάτοψη που παρατέθηκε παραπάνω, από δύο (2) στα πλαϊνά του ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου σε αποστάσεις 300mm και 500mm από τον πυθμένα και ένα στο κατάστρωμα ακριβώς στο ημιπλάτος. Επιπλέον είχε 4 νομείς σχήματος Γ στις θέσεις που υποδεικνύονται από την κάτοψη. Οι ακριβείς διαστάσεις των κατασκευαστικών στοιχείων φαίνονται παρακάτω.

Στοιχείο	Διάσταση	Μονάδες
Deck plating	4,09	mm
Port Side plating	3,95	mm
Starboard Side plating	3,85	mm
Bottom plating	3,75	mm
Stiffeners	FB 25x4,35	mm
Web frames	Γ 50x50x6,14	mm
Brackets	80x100x3,91	mm

Πίνακας 2.1.1 Παραπάνω φαίνονται οι διαστάσεις των ελασμάτων καταστρώματος, των πλαϊνών, του πυθμένα, των ενισχυτικών, των νομέων και τέλος των αγκώνων

Η εκτέλεση του συγκεκριμένου πειράματος περιλάμβανε την κάμψη του ε λόγω δοκιμίου μέσω ενός μηχανισμού ο οποίος προκαλούσε κάθετη μετατόπιση σε μία υδραυλική πρέσα 700kN και αυτή με τη σειρά της επέβαλε δύο ίσες δυνάμεις σε δύο σημεία κατά μήκος του δοκιμίου που ισαπέχον από τις στηρίξεις ώστε το κατάστρωμα να βρίσκεται σε θλίψη και ο πυθμένας σε εφελκυσμό. Για να αποφευχθεί η επίδραση της διάτμησης, το φορτίο ασκήθηκε σε συγκεκριμένη απόσταση, μακριά από τα άκρα της κατασκευής (σημεία στήριξης).

Το πείραμα διενεργήθηκε σε τρία στάδια φόρτισης. Τα δύο πρώτα στάδια ακολουθήθηκαν από πλήρη αποφόρτιση έτσι ώστε να απαλειφτούν οι εναπομείνουσες τάσεις που προέκυψαν από τις διαδικασίες συγκόλλησης κατά την κατασκευή. Αυτές οι τάσεις λόγω συγκόλλησης μεταξύ των ενισχυτικών και των ελασμάτων δημιουργούν μια ζώνη εφελκυστικών τάσεων στις συγκολλήσεις και μία ζώνη θλιπτικών τάσεων στο κεντρικό τμήμα του ελάσματος. Γι' αυτό και η απαλοιφή των εναπομεινουσών τάσεων είναι πρωτεύουσας σημασίας για την εφαρμοζόμενη εφελκυστική τάση που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να έχουμε διαρροή της κατασκευής. Παρακάτω φαίνονται τα μέγιστα κάθετα φορτία που ασκήθηκαν και η επαγόμενη κάθετη μετατόπιση που προκλήθηκε στο δοκίμιο κατά την εκτέλεση του πειράματος σε κάθε στάδιο φόρτισης.

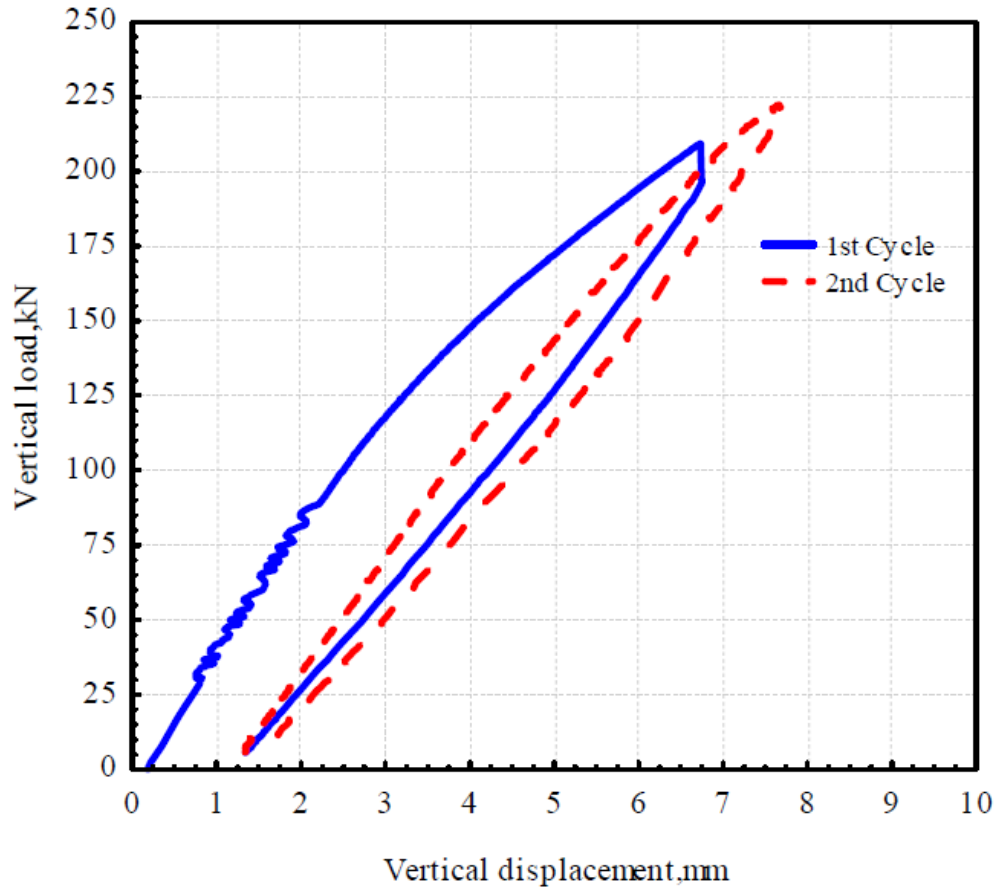
Στάδιο	Φορτίο, kN	Μετατόπιση, mm
1ο	209,24	6,73
2ο	222,18	7,66
3ο (τελευταίο)	580,55	28,57

Πίνακας 2.1.2 Τιμές κάθετης φόρτισης και επαγόμενης κάθετης μετατόπισης κατά τα τρία (3) στάδια φόρτισης

Στη συνέχεια παραθέτουμε το διάγραμμα κάθετης φόρτισης-κάθετης μετατόπισης για τα πρώτα δύο στάδια του πειράματος. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα χρησιμοποιώντας το κριτήριο της διαχέουσας ενέργειας αντιλαμβανόμαστε ότι στο δεύτερο στάδιο φόρτισης η ενέργεια αυτή είναι σημαντικά μικρότερη κάτι το οποίο αντιστοιχεί σε μικρότερη ενέργεια που απελευθέρωσαν οι εναπομείνουσες τάσεις άρα και σε λιγότερες εναπομείνουσες τάσεις. Για την εφαρμογή του κριτηρίου της διαχέουσας ενέργειας είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του ολοκληρώματος

$$\oint \vec{F} \cdot d\vec{z} = E_d$$

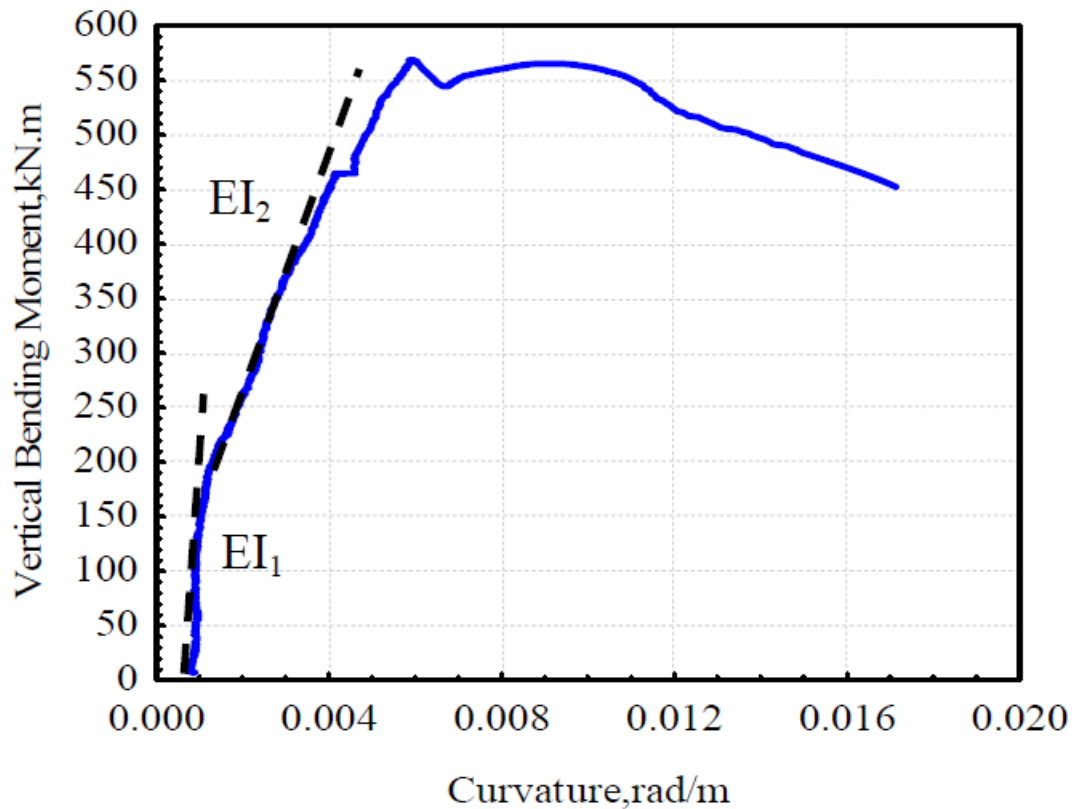
όπου F η κάθετη φόρτιση και dz η επαύξηση της εγκάρσιας μετατόπισης στο σημείο φόρτισης.



Σχήμα 2.1.2 Διάγραμμα κάθετης φόρτισης-κάθετης μετατόπισης για τα δύο πρώτα στάδια. Είναι εμφανής η διαφορά στα εμβαδά που περικλείει η κάθε καμπύλη και απεικονίζουν τη διαχεόμενη ενέργεια

Στο ακριβώς παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το σημείο εκκίνησης τόσο του φορτίου όσο και της μετατόπισης δεν συμπίπτει με το την αρχή των αξόνων (0,0) και αυτό συμβαίνει διότι το βάρος του εξοπλισμού της πειραματικής διάταξης (δοκοί, ενισχύσεις, υδραυλική πρέσα) που χρησιμοποιήθηκε για τη μεταφορά του φορτίου. Το επιπλέον αυτό βάρος είναι 6kN και προσδίδει στην κατασκευή μια επιπλέον παραμόρφωση 0.9mm.

Στη μοντελοποίηση που εκπονήσαμε στην παρούσα εργασία δεν λήφθηκε υπόψη αυτή η πρόσθετη παραμόρφωση της κατασκευής καθότι δεν είχαμε πρόσθετο βάρος λόγω εξοπλισμού αφού ακολουθήθηκε άλλη διαδικασία φόρτισης. Αναλυτικότερα ωστόσο θα αναφερθούμε στο αντίστοιχο κεφάλαιο.



Σχήμα 2.1.4 Πειραματική σχέση Καμπτικής ροπής-Καμπυλότητας

Μορφές Κατάρρευσης

Κατά την εκτέλεση του συγκεκριμένου πειράματος παρατηρήθηκαν διάφορες μορφές κατάρρευσης. Η ολική κατάρρευση συνέβη μετά από ολικό λυγισμό τόσο των ελασμάτων όσο και των ενισχυτικών σαν μία ενότητα. Η μορφή της κατάρρευσης αυτής φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.1.2 Ολική μορφή κατάρρευσης

Η πλευρική λυγισμική παραμόρφωση στον πρώτο τομέα είναι μεγαλύτερη από αυτή στο δεύτερο και στον τρίτο, ενώ η ολική παραμόρφωση δεν είναι συμμετρική με τη μέση τομή της κατασκευής. Αυτός ο τύπος κατάρρευσης είναι δυνατόν να εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή σε φορτίσεις ακόμη και όταν έχει επιτευχθεί ο ολικός λυγισμός ή η μέγιστη αντοχή και ένας μεγάλος πλαστικοποιημένος τομέας έχει διαμορφωθεί κατά μήκος των άκρων του πλαισίου ή μέσα σε αυτό.

Με επιπρόσθετη αύξηση του φορτίου, η παραμόρφωση αυξάνεται βαθμιαία έως ότου να εμφανιστεί η δεύτερη μορφή κατάρρευσης. Αυτή η μορφή κατάρρευσης περιλαμβάνει τρεις υποκατηγορίες που έχουν να κάνουν με τα δομικά στοιχεία τα οποία κάθε φορά συνεισφέρουν σε αυτή τη διαδικασία (έλασμα, ενισχυτικό ή και η ένωσή τους). Το αποτέλεσμα είναι ότι το κέντρο του «κύματος λυγισμού» από το δεύτερο τομέα κατευθύνεται προς τον πρώτο επηρεάζοντας τη συμπεριφορά στον τρίτο όπου πλέον έχει σημαντικά μικρότερη παραμόρφωση.



*Εικόνα 2.1.3 Δεύτερη μορφή κατάρρευσης
Η αστοχία προκαλείται από τα ενισχυτικά*

Κατά τη διάρκεια του τελευταίου βήματος φόρτισης, παρατηρείται μία προοδευτική κατάρρευση η οποία χαρακτηρίζεται από μεγάλη διαφοροποίηση του φορτίου και την παραλαβή μεγάλων παραμορφώσεων εξαιτίας της δημιουργίας πλαστικών κόμβων στην ημιαπόσταση τόσο των ελασμάτων όσο και των ενισχυτικών. Μόνο οι δύο από τους τρεις τομείς επηρεάστηκαν. Αφενός ο δεύτερος ο οποίος παρέλαβε παραμορφώσεις στα ενισχυτικά και αφετέρου ο πρώτος που παρέλαβε στα ελάσματα. Αυτές οι μορφές παραμόρφωσης υποχρέωσαν τον τρίτο τομέα να παραμείνει σχετικά επίπεδος.

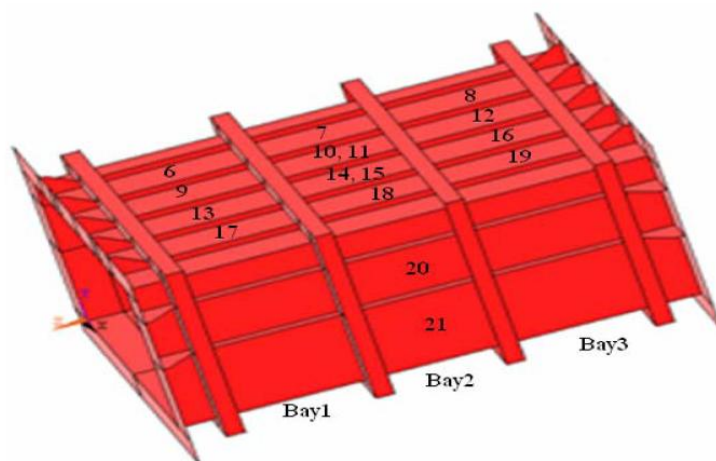


Εικόνα 2.1.4 Προοδεντική κατάρρευση

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι διατομές δεν παρέμειναν επίπεδες σε αυτό το στάδιο της πλαστικότητας και το πρώτο τμήμα της κατασκευής παρουσίασε μεγάλες παραμορφώσεις και περιστροφές στα ενισχυτικά. Οι αξονικές και στροφικές παραμορφώσεις είναι αρκετά σημαντικότερες στο μέσο τόσο των ενισχυτικών όσο και των ελασμάτων του άνω τμήματος και των δύο πλευρών.

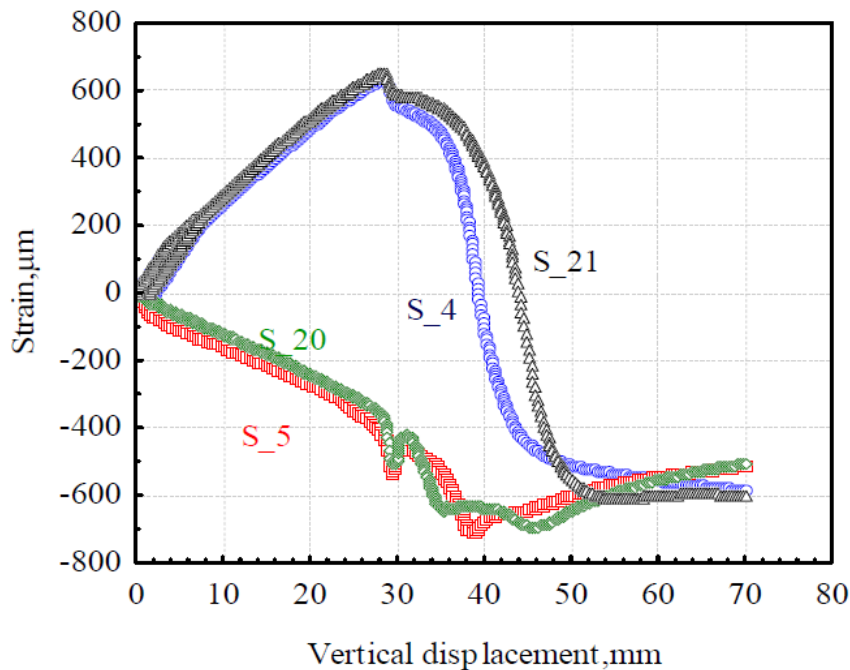
Μετρήσεις παραμορφώσεων

Στην κατασκευή είχαν τοποθετηθεί αρκετά *strain gauges* σε διάφορα σημεία ώστε να ληφθούν μετρήσεις των παραμορφώσεων που παρέλαβε η κατασκευή κατά τη φόρτιση. Οι προσεγγιστικές θέσεις τους (δυστυχώς δεν δίνονται περισσότερα στοιχεία για την ακριβή τους θέση) δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.1.5 Προσεγγιστική θέση των *strain gauges* στην κατασκευή

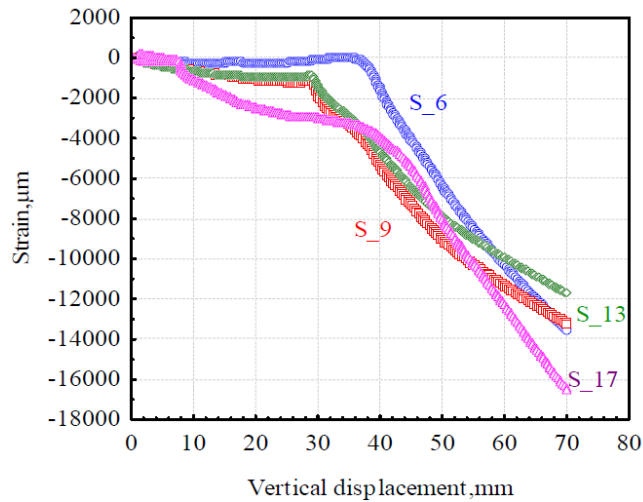
Οι μετρήσεις των *strain gauges* (παραμόρφωση-κάθετη μετατόπιση) τα οποία βρίσκονταν στις πλευρές της κατασκευής και στο μέσον της φαίνονται παρακάτω.



Διάγραμμα 2.1.1 Σχέση παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης στα πλευρικά ελάσματα

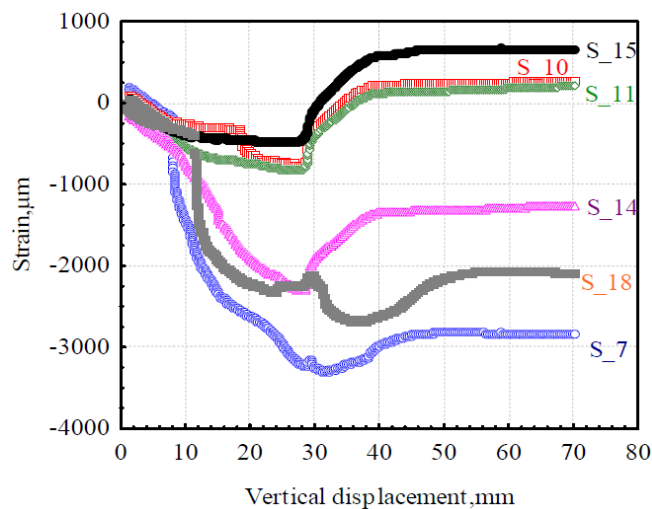
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μέχρι την τιμή 28,57mm της κάθετης μετατόπισης που αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φορτίου, η σχέση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων μεγεθών είναι γραμμική. Επίσης, για τα *strain gauges* S_4 και S_21 παρατηρείται ότι μετά την τιμή των 28mm κάθετης μετατόπισης έχουμε ταχεία πτώση της παραμόρφωσης επειδή βρίσκονται κοντά στον πυθμένα της κατασκευής όπου αρχίζει να εμφανίζεται πλαστικότητα.

Όσον αφορά τα *strain gauges* του πρώτου τμήματος του καταστρώματος, από το σχήμα που θα παραθέσουμε αμέσως μετά φαίνεται ότι τα S_9 και S_13 εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά και η μη γραμμικότητα στη σχέση μεταξύ παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης εμφανίζεται πάλι μετά την τιμή 28.57mm της κάθετης μετατόπισης. Τα *strain gauges* S_6 και S_17 τα οποία είναι τοποθετημένα στο πρώτο τμήμα της κατασκευής προς την πλευρά των πλαϊνών ελασμάτων εμφανίζουν μια κατά κάποιον τρόπο διαφορετική συμπεριφορά στη σχέση παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης. Όσο αυξάνεται το φορτίο τόσο αυξάνεται και η παραμόρφωση και εξαιτίας αυτού εμφανίζονται διάφοροι πλαστικοί κόμβοι στο πλαϊνό (port side) έλασμα που οδηγούν σε αστάθεια και χαμηλότερη παραμόρφωση που καταγράφηκε από το *strain gauge* S_17. Επιπλέον, στο *strain gauge* S_6 καταγράφεται μία μεγαλύτερη αύξηση της παραμόρφωσης κατά την αύξηση της κάθετης μετατόπισης.



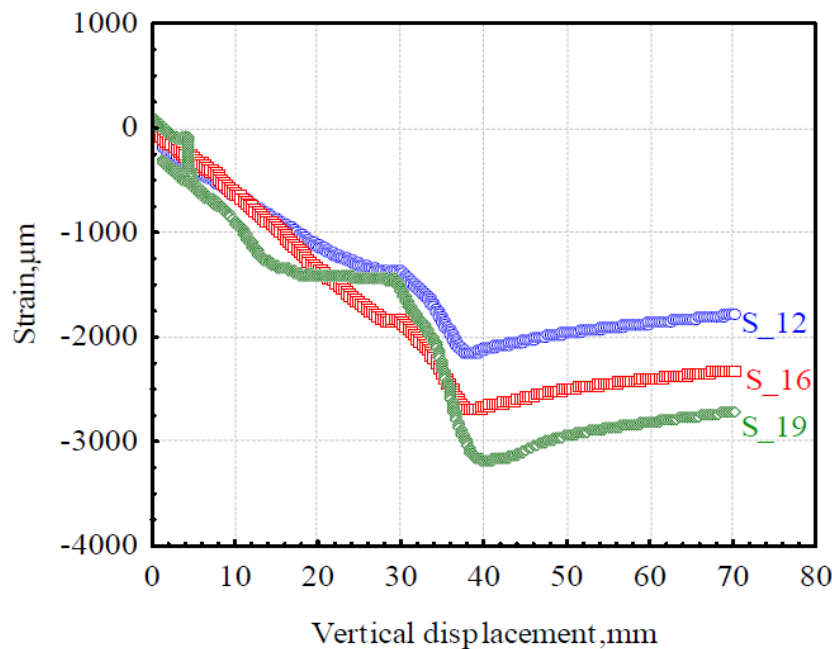
Διάγραμμα 2.1.2 Σχέση παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης στο πρώτο τμήμα του καταστρώματος

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των *strain gauges* από το δεύτερο τμήμα του καταστρώματος παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα. Από αυτό βλέπουμε ότι τα *S_10, 11, 15* παρουσιάζουν μία σχετικά ίδια συμπεριφορά τόσο στη γραμμική όσο και στη μη-γραμμική περιοχή της συμπεριφοράς τους. Η μορφή των αποτελεσμάτων αποδεικνύει και τη μετάβαση στη δεύτερη μορφή της κατάρρευσης, κατά την οποία η κορυφή του κύματος μετάδοσης του λυγισμού μεταφέρεται προς το πρώτο τμήμα της κατασκευής. Τα υπόλοιπα *strain gauges* του συγκεκριμένου τμήματος που απείχαν από το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας της κατασκευής (*centerline*) εμφανίζουν μια παρόμοια συμπεριφορά με τα προαναφερθέντα μετά την τιμή 28,57mm της κάθετης μετατόπισης χωρίς ωστόσο να αποκτούν θετικές τιμές. Για τα *S_7, 18* η συμπεριφορά της παραμόρφωσης, πριν επιτευχθεί η τιμή 28.57mm κάθετης μετατόπισης, εμφανίζει αστάθεια γιατί τα συγκεκριμένα *strain gauges* βρίσκονταν κοντά σε διαμήκη ενισχυτικά τα οποία δεν παραμορφώθηκαν επίπεδα.



Διάγραμμα 2.1.3 Σχέση παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης στο δεύτερο τμήμα του καταστρώματος

Δύο από τα *strain gauges* που βρίσκονται τοποθετημένα στο τρίτο τμήμα του καταστρώματος γύρω από την κεντρική γραμμή (*centerline*), τα *S_12*, *16* δίνουν παρόμοια αποτελέσματα στο γραμμικό και μη-γραμμικό μέρος της συμπεριφοράς παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης. Και σε αυτή την περίπτωση η μη-γραμμικότητα εμφανίζεται από την τιμή 28.57 της κάθετης μετατόπισης ενώ έπειτα η σχέση των δύο αυτών μεγεθών διατηρείται πρακτικά σταθερή όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί. Αυτό εξηγείται λόγω της μετάβασης σε άλλη μορφή κατάρρευσης κατά την οποία το τρίτο τμήμα παραμένει ουσιαστικά επίπεδο. Οι μετρήσεις που λήφθηκαν από το *S_19* δείχνουν μεταξύ των τιμών 30 και 39,5της κάθετης μετατόπισης, μία ελάττωση της αποτελεσματικότητας του ελάσματος που βρίσκεται κοντά στις πλευρές έως την ολοκλήρωση της μετάβασης στη νέα μορφή κατάρρευσης. Μετά από αυτό ακολουθεί και εκείνο την ίδια σταθερή συμπεριφορά με τα προαναφερθέντα.



Διάγραμμα 2.1.4 Σχέση παραμόρφωσης-κάθετης μετατόπισης στο τρίτο τμήμα του καταστρώματος

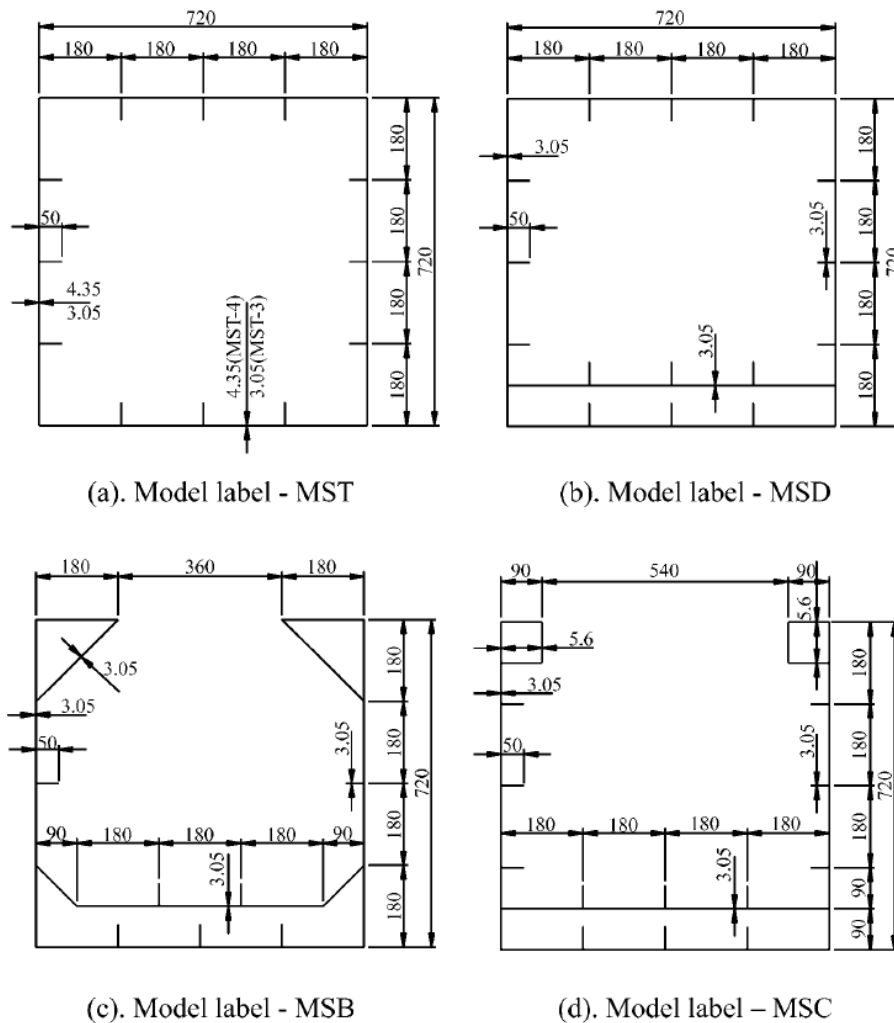
Συμπεράσματα των S. Bahey Eldeen, Y. Garbatov και C. Guedes Soares

Κατά τους συγγραφείς του συγκεκριμένου άρθρου, μέσω της διαδικασίας που ακολουθήθηκε έγινε δυνατή η καταγραφή μετρήσεων μετά την εφαρμογή εξωτερικών δυνάμεων ώστε το δοκάρι να υποστεί καταπόνηση τύπου *four point bending*, σε ορθογώνια παραλληλεπίπεδη κατασκευή με ενισχυτικά και νομείς. Παρουσιάστηκε η σχέση καμπτικής ροπής-καμπυλότητας (βλ.σελ.23) χρησιμοποιώντας

μία μαθηματική έκφραση που βασίζεται στα αποτελέσματα που λήφθηκαν από μετρητές μετατόπισης (*displacement gauges*) οι οποίοι βρίσκονταν στην παραμορφωμένη κατασκευή. Έπειτα, αναλύθηκαν με λεπτομέρεια τόσο οι μορφές κατάρρευσης όσο και τα αποτελέσματα από τους μετρητές παραμόρφωσης (*strain gauges*) σε διάφορα σημεία της κατασκευής. Τέλος, έγινε σύγκριση της πειραματικά μετρούμενης μέγιστης αντοχής (*ultimate strength*) με εμπειρικές μεθόδους αποδεικνύοντας τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων (δεν παρουσιάσαμε το σημείο αυτό του άρθρου διότι δεν μας απασχόλησε κατά τη μοντελοποίηση που θα αναπτύξουμε παρακάτω).

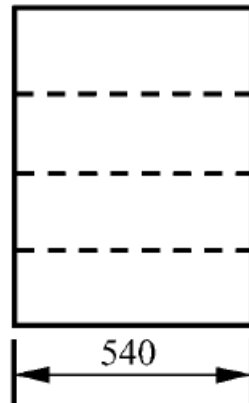
2.2 Παρουσίαση πειράματος Hsin-Chuan Kuo et al [Hsin-Chuan Kuo, Jiang-Ren Chang, 2003]

Το δεύτερο άρθρο των Hsin-Chuan Kuo και Jiang-Ren Chang με το οποίο ασχοληθήκαμε στην παρούσα εργασία εντάσσεται στην ίδια φιλοσοφία με το πρώτο το οποίο παρουσιάσαμε διεξοδικά παραπάνω. Ασχολείται δηλαδή με την εύρεση ενός αξιόπιστου τρόπου για την εκτίμηση της μέγιστης διαμήκου αντοχής ενός τμήματος γάστρας πλοίου. Η απλοποιημένη διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε αναπτύσσεται στο άρθρο ενώ για τον έλεγχο της ακρίβειάς της συγκρίνεται με πειραματικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν έπειτα από αντίστοιχη πειραματική διαδικασία του Nishihara. Τα πειραματικά μοντέλα στα οποία έγινε η εφαρμογή της μεθόδου και τα οποία μοντελοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήματα 2.2.1 Πειραματικά μοντέλα τα οποία μοντελοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία με τη χρήση του λογισμικού ABAQUS

Το μήκος των συγκεκριμένων δοκιμών είναι ίδιο και ίσο με 540mm όπως φαίνεται από την παρακάτω πλαϊνή όψη.



Σχήμα 2.2.2 Πλαϊνή όψη πειραματικών μοντέλων

Είναι εμφανές από το παραπάνω σχήμα ότι τα πειραματικά μοντέλα εκτείνονται σε μήκος μεταξύ δύο νομέων αφού δεν παρατηρείται κάποιος νομέας ούτε στις προσόψεις ούτε στην πλαϊνή όψη.

Τα αρχικά που εμφανίζονται κάτω από τα πειραματικά μοντέλα αναφέρονται σε:

- MST: Model of Ship Tanker (Μοντέλο δεξαμενόπλοιου)
- MSD: Model of Ship Double Bottom (Μοντέλο πλοίου με απύθμενε.
- MSB: Model of Ship Bulk Carrier (Μοντέλο πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην)
- MSC: Model of Container (Μοντέλο πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων)

Τα χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των ανωτέρω μοντέλων παρατίθεντα στον παρακάτω πίνακα.

t(mm) thickness of plate	σ_y(kg/mm²)	E(kg/mm²)	Poisson's ration
3,05	29,3	$2,11 \times 10^4$	0,277
4,35	26,9	$2,12 \times 10^4$	0,281
5,6	32,1	$2,11 \times 10^4$	0,289

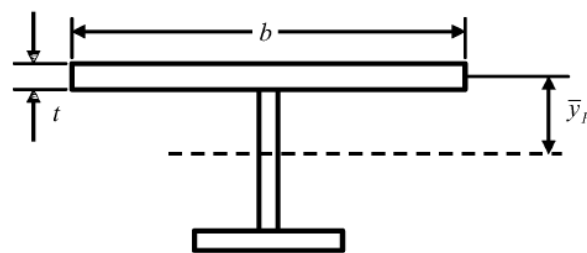
Πίνακας 2.2.1 Ιδιότητες υλικών των πειραματικών μοντέλων

Συνολικά, για τα ανωτέρω μοντέλα και για τις περιπτώσεις sagging/hogging, έχουν γίνει οκτώ (8) είδη φόρτισης τα αποτελέσματα των οποίων παρατίθενται στο άρθρο ωστόσο θα επιλέξουμε να τα παρουσιάσουμε στο μέρος της εργασίας όπου θα αναλύσουμε και τον τρόπο μοντελοποίησης που εφαρμόσαμε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

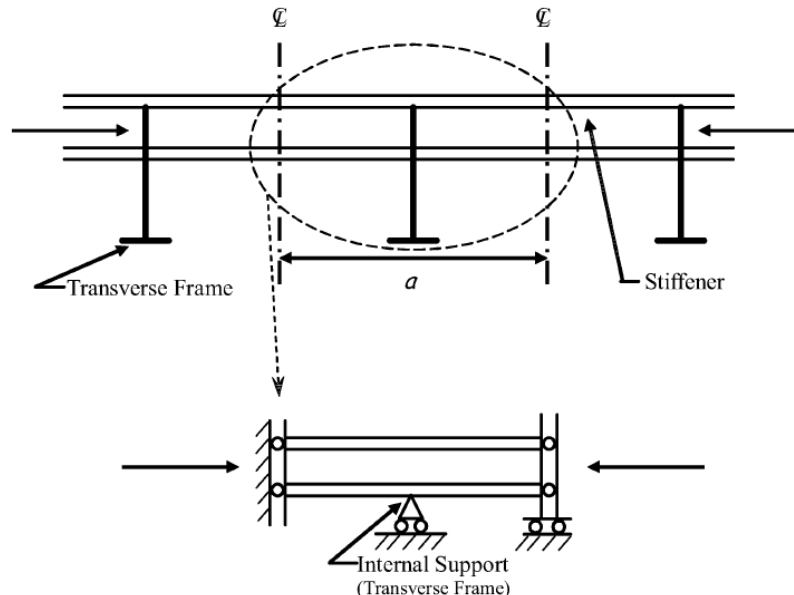
Οι μέθοδοι οι οποίες παρατίθενται στο άρθρο για τον υπολογισμό του συντελεστή μείωσης της μέγιστης αντοχής λόγω λυγισμού παρατίθενται στη συνέχεια.

Μέθοδος του Lin [Lin, Y.T., (1985)]

Ο Lin πρώτος πρότεινε τη μέθοδο της δυναμικής χαλάρωσης για να παράξει το συντελεστή μείωσης της μέγιστης αντοχής ενός ελάσματος με ενισχυτικά και υιοθέτησε το στοιχείο δοκός-κολώνα για να αναλύσει την αντοχή της κατασκευής του πλοίου. Ανάμεσα σε αυτά, το πλάτος του ελάσματος θεωρήθηκε συνεργαζόμενο ενώ η διατομή του ελάσματος με ενισχυτικά, οι συνοριακές συνθήκες απλής στήριξης και τα εφαρμοζόμενα φορτία θωρήθηκαν όπως στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.2.3 Δοκός-κολώνα από έλασμα και ενισχυτικό



Σχήμα 2.2.4 Αναλυτική μορφή διατομής ενισχυμένου ελάσματος και συνοριακών συνθηκών

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών υπολογισμών λήφθηκαν ως συνάρτηση δύο (2) μεταβλητών, του λόγου λυγηρότητας του ενισχυτικού λ και του ελάσματος β αποκλειστικά. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων ο συντελεστής μείωσης λόγω λυγισμού περιέχοντας τις δύο παραμέτρους μπορεί να γραφεί ως:

$$\varphi_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = (c_1 + c_2\lambda_s^2 + c_3\beta^2 + c_4\lambda_s^2\beta^2 + c_5\lambda_s^4)^{-0.5}$$

όπου, $\beta = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$, $\lambda_s = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}}$, σ_u είναι η μέγιστη αντοχή ενισχυμένου ελάσματος, σ_y η μέση τάση διαρροής του συνδυασμού έλασμα-ενισχυτικό, a το μήκος των ενισχυτικών μεταξύ δύο διαδοχικών εγκάρσιων ενισχύσεων, b το πλάτος του ελάσματος, t το πάχος του και r η ακτίνα αδρανείας του συνδυασμού ελάσματος-ενισχυτικού. Οι συντελεστές c_1 έως c_5 παίρνουν τις τιμές $c_1=0.960$, $c_2=0.765$, $c_3=0.176$, $c_4=0.131$ και τέλος $c_5=1.046$.

Μέθοδος του Paik [Paik, J.K. and Mansour A.E, (1995)]

Βασισμένος στη δουλειά του Lin και περισσότερα αριθμητικά δεδομένα ο Paik πρότεινε έναν παρόμοιο τρόπο υπολογισμού για το συντελεστή μείωσης λόγω λυγισμού.

$$\varphi_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = (c_1 + c_2\lambda_s^2 + c_3\beta^2 + c_4\lambda_s^2\beta^2 + c_5\lambda_s^4)^{-0.5}$$

όπου, $c_1=0.995$, $c_2=0.936$, $c_3=0.170$, $c_4=0.188$ και τέλος $c_5=-0.067$.

Μέθοδος του Lee [Lee, J.L., (2000)]

Ακολουθώντας την έρευνα του Lin, ο Lee υιοθέτησε το μοντέλο της δοκού-κολώνας και επιπλέον εφάρμοσε τη μέθοδο του πίνακα των μετατοπίσεων για να ασχοληθεί με τη μη γραμμική εξίσωση ισορροπίας της μεγάλης ελαστοπλαστικής παραμόρφωσης ελάσματος με ενισχυτικά. Σε αυτή την προσπάθεια μία τρίτης τάξης συνάρτηση των μετατοπίσεων υιοθετήθηκε για να εξεταστεί η καμπτική παραμόρφωση από τη θεωρία δοκών του Euler. Έτσι, ο συντελεστής μείωσης λόγω λυγισμού μπορεί να γραφεί από την παρακάτω σχέση.

$$\Phi_u = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{f} (1 + 0.15\beta^2)^{-0.5}$$

όπου, $\begin{cases} f = 1 + 0.209\lambda_s^2 + 0.156\lambda_s^4, & 0 \leq \lambda_s < 1.59 \\ f = \lambda_s^2, & \lambda_s \geq 1.59 \end{cases}$

Μέθοδοι υπολογισμού της μέγιστης διαμήκους αντοχής

Όπως έχουμε αναφέρει και στο πρώτο κεφάλαιο, το πρόβλημα του υπολογισμού της μέγιστης διαμήκους αντοχής γάστρας πλοίου είναι μία ανάλυση μη-γραμμικής ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς των κατασκευαστικών στοιχείων, συνήθως με αρχική ατέλεια και εναπομείνουσες τάσεις. Στις μέρες μας είναι δυνατή η επίλυση τέτοιων προβλημάτων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, ωστόσο η προεργασία που αφορά τη μοντελοποίηση και την αριθμητικό υπολογισμό χρειάζεται μεγάλη δαπάνη σε χρόνο, τέτοιο που μια ταχεία αξιολόγηση για ένα πρωταρχικό στάδιο στη σχεδίαση της γάστρας του πλοίου να είναι μη διαθέσιμη. Από όταν ο Billingsley [Billingsley, D.W., 1980] πρότεινε μια απλουστευμένη υπολογιστική διαδικασία για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος όπως το παραπάνω, πολλοί ερευνητές άρχισαν να αναπτύσσουν απλουστευμένες προσεγγίσεις τις οποίες εξέτασαν σε αρκετά πειραματικά μοντέλα για να διαπιστώσουν την ακρίβεια και την αξιοπιστία τους. Βασισμένες στη θεωρία δοκών αυτές οι έρευνες δημιούργησαν μία σχέση ανάμεσα στη ροπή κάμψης και στην καμπυλότητα, ώστε να γίνει δυνατός ο υπολογισμός της μέγιστης αντοχής γάστρας πλοίου.

Στο παρόν άρθρο που εξετάζουμε ακολουθήθηκε η απλουστευτική διαδικασία του Paik η οποία επιπλέον θεωρεί διαφορετικές τάσεις λυγισμού και διαρροής, διατμητικές τάσεις με σχετιζόμενες καμπτικές ροπές, διατμητικές και αξονικές τάσεις λόγω τυχαίας ροπής για διαφορετικά είδη διατομών πλοίων.

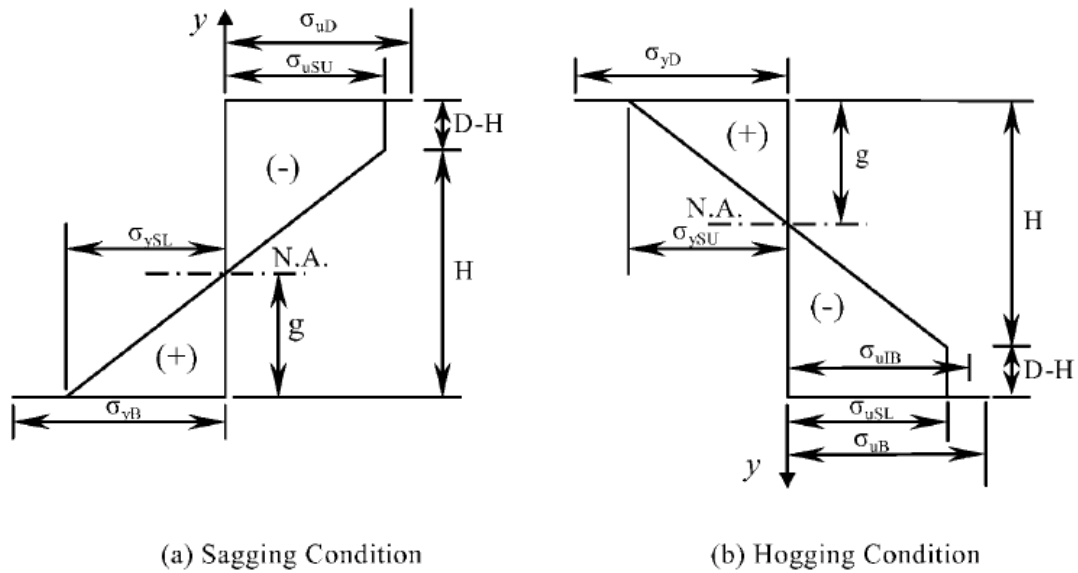
Οι βασικές παραδοχές που επιτρέπουν τη χρήση απλουστευμένων υπολογιστικών διαδικασιών είναι οι εξής:

- Το πλοίο επιπλέει σε όρθια θέση.
- Η διατομή ενός στοιχείου υπολογισμού δεν αλλάζει κατά την εφαρμογή της φόρτισης.
- Τα στοιχεία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους κατά τον υπολογισμό της μέγιστης αντοχής τους.
- Για τους υπολογισμούς των καμπτικών ροπών λαμβάνονται υπόψη μόνο οι κατακόρυφες τάσεις, όπως οι επιδράσεις λόγω λυγισμού και διαρροής ενώ οι επιδράσεις της διάτμησης και της τυχαίας ροπής αφορούν τη διατμητική τάση και τη διατμητική ροή αποκλειστικά.

Επομένως, οι μέθοδοι αυτές για τον υπολογισμό της μέγιστης εγκάρσιας και διαμήκους καμπτικής αντοχής σε sagging και hogging και η μέγιστη αντοχή σε διάτμηση υποθέτοντας κανένα διαμήκη περιορισμό στην κλειστή δομή μίας διατομής πλοίου έχουν επεξεργαστεί και παρουσιάζονται ακολούθως (εδώ θα ασχοληθούμε μόνο με την περίπτωση εγκάρσιας και διαμήκους αντοχής σε καμπτικά φορτία).

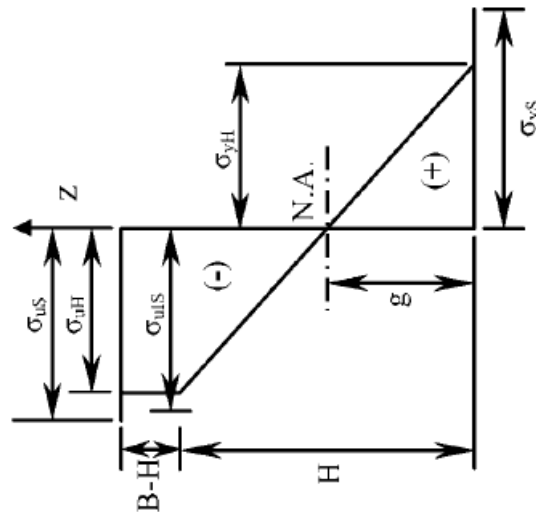
Μέγιστη διαμήκης και εγκάρσια αντοχή σε κάμψη

Βασισμένη στη θεωρία των δοκών, η αντοχή σε κάμψη αφορά μόνο τις κάθετες τάσεις (*normal stresses*). Η κατανομή των τάσεων φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



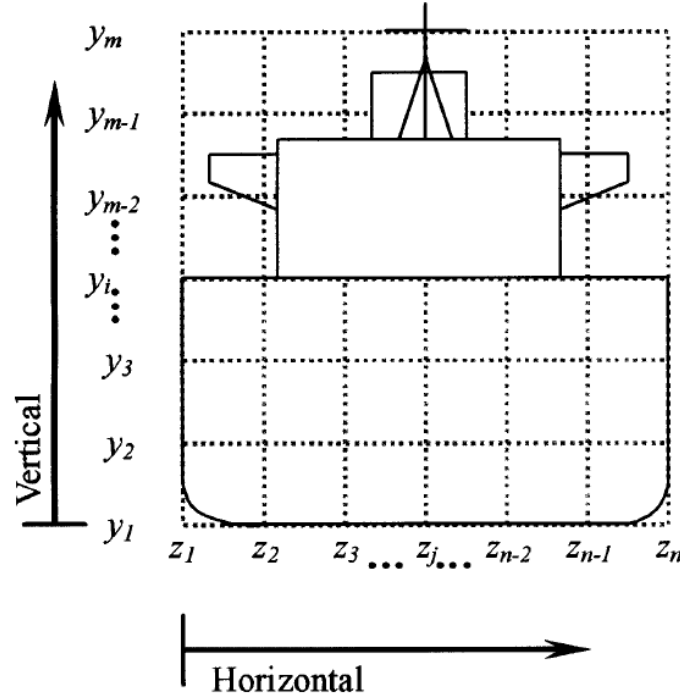
(a) Sagging Condition

(b) Hogging Condition



Σχήματα 2.2.5 Οριζόντια μορφή κάμψης (+) εφελκυστική τάση, (-) θλιπτική τάση)

Το σχετιζόμενο σύστημα συντεταγμένων που περιγράφει τη διατομή του πλοίου είναι το παρακάτω.



Σχήμα 2.2.6 Το σύστημα συντεταγμένων μίας διατομής του πλοίου για τον υπολογισμό των μέγιστων τιμών εγκάρσιας και διαμήκους καμπτικής ροπής

Στο σημείο αυτό επειδή μας ενδιαφέρει η μελέτη της εγκάρσιας καμπτικής ροπής θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τη μέθοδο που υιοθετήθηκε για τον υπολογισμό της τόσο σε κατάσταση hogging όσο και σε κατάσταση sagging.

Μέγιστη εγκάρσια καμπτική ροπή σε κατάσταση sagging M_{vus}

Η κάθετη τάση σ_x για τον υπολογισμό της εγκάρσιας καμπτικής ροπής σε κατάσταση sagging είναι:

$$\sigma_x = \begin{cases} \sigma_{yB}, \text{ για } y = y_1 = 0 \text{ (εξωτερικός πυθμένας)} \\ -\frac{1}{H} [(\sigma_{usU} + \sigma_{ySL})y - H\sigma_{ySL}], \text{ για } 0 \leq y < H \\ -\sigma_{usU}, \text{ για } H \leq y < D \\ -\frac{1}{H} [(\sigma_{usU} + \sigma_{ySL})y_i - \sigma_{ySL}], \text{ για } y = y_i, i = 2, 3 \dots (m-1) \\ -\sigma_{uD} \end{cases}$$

Στην οποία σχέση σ_{yB} απεικονίζει τη μέση τάση διαρροής του εξωτερικού πυθμένα και σ_{uD} τη μέγιστη τάση λυγισμού του καταστρώματος.

Επιπλέον, το σ_{ySL} εκφράζει την τάση διαρροής ενός στοιχείου μεταξύ του πυθμένα και του ουδέτερου άξονα, ενώ το σ_{uSU} τη θλιπτική τάση ενός στοιχείου μεταξύ του καταστρώματος και του ουδέτερου άξονα. Είναι γνωστό επίσης ότι $\int \sigma_x dA = 0$ κάτι που σημαίνει ότι το άθροισμα των κάθετων φορτίων εξαιτίας των κάθετων τάσεων που ασκούνται στην κατασκευή ισούται με μηδέν και επομένως η θέση του ουδέτερου άξονα βρίσκεται από τη σχέση

$$g = \frac{\sigma_{ySL} \cdot H}{\sigma_{uSU} + \sigma_{ySL}}$$

ενώ το ύψος H βρίσκεται από τη σχέση

$$H = C_1 D + \sqrt{C_1^2 D^2 + 2C_2 D}.$$

Οι τιμές των C_1 , C_2 δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$C_1 = \frac{(\sigma_{uD} A_{ym} + \sigma_{uSU} \sum_{j=1}^n A_{zj} - \sigma_{yB} A_{y1} - \sigma_{ySL} \sum_{i=2}^{m-1} A_{yi})}{(\sigma_{uSU} + \sigma_{ySL}) \sum_{j=1}^n A_{zj}}$$

$$C_2 = \frac{\sum_{i=2}^{m-1} A_{yi} y_i}{\sum_{j=1}^n A_{zj}}$$

Στις παραπάνω σχέσεις y_i , z_j , A_{yi} , A_{zj} απεικονίζουν τις συντεταγμένες των οριζοντίων και κάθετων στοιχείων και την αντίστοιχη επιφάνειά τους και D κοίλο της διατομής. Τελικά η μέγιστη καμπτική ροπή σε κατάσταση sagging δίδεται από τον παρακάτω τύπο.

$$M_{VS} = A_{ym} \sigma_{uD} (D - g) + \frac{1}{H} (\sigma_{uSU} + \sigma_{ySL}) \left[\sum_{i=2}^{m-1} A_{yi} (g y_i - y_i^2) \right] +$$

$$\sigma_{ySL} \left[\sum_{i=2}^{m-1} A_{yi} (y_i - g) \right] - \frac{1}{2D} \left(\sum_{j=1}^n A_{zj} \right) (D - H) (D + H - 2g) \sigma_{uSU} - A_{y1} \sigma_{yB} \cdot g - \frac{H}{6D} \left(\sum_{j=1}^n A_{zj} \right) [(2H - 3g) \sigma_{uSU}$$

$$- (H - 3g) \sigma_{ySL}]$$

Μέγιστη εγκάρσια καμπτική ροπή σε κατάσταση hogging M_{Vuh}

Και στην περίπτωση hogging η κάθετη τάση σ_x μπορεί να εκφραστεί ως

$$\sigma_x = \begin{cases} \sigma_{yD}, \text{για } y = y_m = 0 \text{ (στο κατάστρωμα)} \\ -\frac{1}{H}[(\sigma_{uSL} + \sigma_{ySU})y - H\sigma_{ySU}], \text{για } 0 \leq y < H \\ -\sigma_{uSL}, \text{για } H \leq y \leq D \\ -\frac{1}{H}[(\sigma_{uSL} + \sigma_{ySU})y_i - H\sigma_{ySU}], \text{για } y = y_i \text{ } i = 3, 4 \dots (m-1) \\ -\sigma_{u/B}, \text{για } y = y_2 \text{ (εσωτερικός πυθμένας)} \\ -\sigma_{uB}, \text{για } y = y_1 \text{ (εξωτερικός πυθμένας)} \end{cases}$$

Στην παραπάνω σχέση σ_{yD} είναι η μέση τάση διαρροής του καταστρώματος και $\sigma_{u/B}$, σ_{uB} εκφράζουν τη μέγιστη τάση λυγισμού του εσωτερικού και εξωτερικού πυθμένα αντίστοιχα. Επιπλέον, η σ_{ySU} εκφράζει την τάση διαρροής ενός τυχαίου στοιχείου μεταξύ του καταστρώματος και του ουδέτερου άξονα και η σ_{uSL} τη θλιπτική τάση ενός τυχαίου στοιχείου μεταξύ του εσωτερικού πυθμένα και του ουδέτερου άξονα. Η θέση του ουδέτερου άξονα μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$g = \frac{\sigma_{ySU} \cdot H}{\sigma_{uSL} + \sigma_{ySU}}$$

ενώ το ύψος H βρίσκεται από τη σχέση

$$H = C_1 D + \sqrt{C_1^2 D^2 + 2C_2 D}$$

Οι τιμές των C_1 , C_2 δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$C_1 = \frac{(\sigma_{uB}A_{y_1} + \sigma_{u/B}A_{y_2+\sigma_{uSL}} \sum_{j=1}^n A_{z_j} - \sigma_{yD}A_{ym} - \sigma_{ySU} \sum_{i=3}^{m-1} A_{y_i})}{(\sigma_{uSL} + \sigma_{yUL}) \sum_{j=1}^n A_{z_j}}$$

$$C_2 = \frac{\sum_{i=3}^{m-1} A_{y_i}(D - y_i)}{\sum_{j=1}^n A_{z_j}}$$

Επομένως, ο τύπος για τον υπολογισμό της μέγιστης εγκάρσιας ροπής κάμψης σε κατάσταση hogging είναι ο κάτωθι

$$\begin{aligned}
 M_{Vuh} = & A_{y_1} \sigma_{uB} (D - g) + A_{y_2} \sigma_{uB} (D - y_2 - g) \\
 & - \frac{1}{H} (\sigma_{uSL} + \sigma_{ySU}) \left\{ \sum_{i=4}^{m-1} A_{y_i} [g(D - y_i) - (D - y_i)^2] \right\} \\
 & - \sigma_{ySU} \left[\sum_{i=3}^{m-1} A_{y_i} (D - y_i - g) \right] - A_{y_m} \sigma_{yD} \cdot g \\
 & - \frac{1}{2D} \left(\sum_{j=1}^n A_{z_j} \right) (D - H)(D + H - 2g) \sigma_{uSL} \\
 & - \frac{H}{6D} \left(\sum_{j=1}^n A_{z_j} \right) [(2H - 3g) \sigma_{uSL} - (H - 3g) \sigma_{ySU}]
 \end{aligned}$$

Επιπλέον ο Lin πρότεινε μία εμπειρική μέθοδο για τον υπολογισμό της μέγιστης εγκάρσιας καμπτικής ροπής σε κατάσταση sagging και hogging. Η εμπειρική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε επίσης στο άρθρο αυτό για σύγκριση.

$$\begin{cases} \frac{M_{Vus}}{M_p} = -0.172 + 1.548\varphi_u - 0.368\varphi_u^2, \text{για κατάσταση sagging} \\ \frac{M_{Vuh}}{M_p} = 0.003 + 1.459\varphi_u - 0.461\varphi_u^2, \text{για κατάσταση hogging} \end{cases}$$

Στις παραπάνω σχέσεις φ_u είναι ο συντελεστής μείωσης λόγω λυγισμού στον ποίο αναφερθήκαμε παραπάνω.

Συμπεράσματα των Hsin-Chuan Kuo και Jiang-Ren Chang

Η σύγκριση των τιμών λυγισμικής αντοχής με πειραματικά δεδομένα και δημοσιευμένη βιβλιογραφία έδειξε ικανοποιητική σύγκλιση και περιορισμούς στη χρήση των μεθόδων αυτών σε κατασκευές πλοίων. Η σύγκριση με ανάλογα πειραματικά δεδομένα για την προσέγγιση της μέγιστης αντοχής σε κάμψη (sagging και hogging) μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή [**Hsin-Chuan Kuo et al, 2003 CONCLUSIONS**]. Οι μέθοδοι αυτές, εφαρμοζόμενες μέσω ενός αριθμητικού προγράμματος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μια γρήγορη εκτίμηση της διαμήκους αντοχής ενός πλοίου ειδικά σε προκαταρκτικά στάδια της διαδικασίας σχεδιάσής τους εξαιτίας της απλότητάς της.

2.3 Σύνοψη κεφαλαίων 2.1-2.2

Στα υποκεφάλαια 2.1-2.2 επιχειρήσαμε να παρουσιάσουμε τα άρθρα των αναφερόμενων ερευνητών με επαρκή λεπτομέρεια, ώστε ο αναγνώστης να γνωρίζει εκ των προτέρων τα πειράματα που εκπονήθηκαν και τις θεωρητικές μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της μέγιστης αντοχής των κατασκευών που εξετάστηκαν. Το γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι το θέμα της διαμήκους αντοχής των πλοίων απασχολεί ιδιαίτερα τους επιστήμονες ανά τον κόσμο ενώ για την απάντηση σε αυτό το ζήτημα υπάρχουν διαφόρων ειδών προσεγγίσεις (πειραματικές, αριθμητικές, εμπειρικές) κάθε μία από τις οποίες παρουσιάζουν συγκεκριμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ωστόσο.

Εμείς στη συνέχεια όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω θα ασχοληθούμε με την αριθμητική προσέγγιση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (F.E.M.) και μέσα από τη συγκεκριμένη μεθοδολογία μοντελοποίησης που θα αναπτύξουμε θα συγκρίνουμε την αποδοτικότητά της με τις ήδη αναφερθείσες προσεγγίσεις.

2.4 Μοντελοποίηση πειράματος των S. Bahey Eldeen et al

Στο παρόν υποκεφάλαιο της εργασίας θα παρουσιάσουμε βήμα προς βήμα (αναλυτικότερα βλ. *Παράρτημα Α*) τη μέθοδο που ακολουθήθηκε για την μοντελοποίηση - προσομοίωση του πειράματος που περιγράφεται στο πρώτο άρθρο (βλ. κεφ.2.1) με τη χρήση του προγράμματος **ABAQUS/cae**. Υπάρχουν διαφορές στη διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος σε σχέση με το πραγματικό πείραμα καθώς εφαρμόστηκε συμμετρική φόρτιση (περιστροφή) στα δύο άκρα της κατασκευής και όχι four point bending.

Λίγα λόγια για το πρόγραμμα ABAQUS/cae

Το ABAQUS/cae είναι ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον που παρέχει μια απλή και εύχρηστη διεπιφάνεια για δημιουργία, εκτέλεση, έλεγχο και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από τις προσομοιώσεις Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit. Το ABAQUS/cae είναι χωρισμένο σε ενότητες, η κάθε μία εκ των οποίων είναι ένα λογικό βήμα στη διαδικασία της μοντελοποίησης: ορισμός γεωμετρίας, ορισμός ιδιοτήτων των υλικών, κατασκευή πλέγματος. Καθώς γίνεται η μετάβαση από ενότητα σε ενότητα, κατασκευάζεται το μοντέλο από το οποίο το ABAQUS/cae παράγει ένα αρχείο input το οποίο στη συνέχεια εκτελείται στο περιβάλλον ανάλυσης Abaqus/Standard ή Abaqus/Explicit. Το περιβάλλον ανάλυσης διενεργεί την ανάλυση, στέλνει πληροφορίες στο ABAQUS/cae που επιτρέπουν τον έλεγχο της προόδου της διαδικασίας και τέλος, παράγει μία βάση δεδομένων (output database). Τελικά χρησιμοποιείται η ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) του ABAQUS/cae (ή το ξεχωριστό πρόγραμμα ABAQUS/Viewer) για να διαβαστεί η βάση δεδομένων και να μπορέσουν να διαβαστούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Στο σημείο αυτό και επειδή αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο θα ήταν καλό να αναφέρουμε μερικά βασικά στοιχεία για τα προγράμματα Abaqus/Standard και Abaqus/Explicit. Το Abaqus/Standard είναι ένα γενικού σκοπού πρόγραμμα ανάλυσης το οποίο μπορεί να επιλύσει ένα μεγάλο εύρος γραμμικών και μη-γραμμικών προβλημάτων περιλαμβάνοντας τη στατική, δυναμική, θερμική και ηλεκτρική απόκριση των δομικών στοιχείων. Το Abaqus/Standard επιλύει ένα σύστημα εξισώσεων «σιωπηρά» σε κάθε βήμα επίλυσης, ενώ σε αντίθεση το Abaqus/Explicit υλοποιεί μία λύση κατά την την έννοια του χρόνου σε μικρά χρονικά βήματα χωρίς να επιλύει το αντίστοιχο σύστημα εξισώσεων σε κάθε βήμα επιλύοντας τις δυναμικές εξισώσεις ισορροπίας χωρίς να απαιτείται κάθε φορά η δημιουργία του γενικού μητρώου στιβαρότητας. Επιπλέον, το Abaqus/Explicit είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης ειδικού σκοπού, το οποίο χρησιμοποιεί μία ρητή, δυναμική διατύπωση πεπερασμένων στοιχείων. Είναι κατάλληλη για τη μοντελοποίηση σύντομων και παροδικών δυναμικών φαινομένων και επίσης είναι αρκετά αποτελεσματική σε έντονα μη-γραμμικά προβλήματα που σχετίζονται και με την αλλαγή της επιφάνειας επαφής δύο σωμάτων που αλληλεπιδρούν.

Όσον αφορά την επιλογή ανάμεσα στο Abaqus/Standard και στο Abaqus/Explicit για διάφορες αναλύσεις ανάλογα με τις απαιτήσεις της ανάλυσης μπορούμε να κρίνουμε ποιο από τα δύο είναι καταλληλότερο. Υπάρχουν συγκεκριμένα στατικά ή ημι-στατικά προβλήματα (όπως για παράδειγμα οι μοντελοποιήσεις διαδικασιών διαμόρφωσης υλικών όπου έχουμε την αλλαγή των επιφανειών επαφής) που μπορούν να επιλυθούν με οποιοδήποτε από τα δύο προγράμματα. Τυπικά, αυτά είναι προβλήματα που θα μπορούσαν να επιλυθούν με το Abaqus/Standard όμως είναι πιθανό να υπάρχει δυσκολία σύγκλισης εξαιτίας επαφής ή συνθετότατα των ιδιοτήτων των υλικών, με συνέπεια να έχουμε μεγάλο αριθμό επαναλήψεων. Τέτοιου είδους ανάλυση είναι αρκετά δαπανηρή στο Abaqus/Standard επειδή σε κάθε επανάληψη χρειάζεται να επιλυθεί ένα σύστημα από γραμμικές εξισώσεις. Ενώ λοιπόν το Abaqus/Standard πρέπει να πραγματοποιήσει επαναλήψεις για να καθορίσει τη λύση ενός μη-γραμμικού προβλήματος, το Abaqus/Explicit καθορίζει τη λύση χωρίς επαναλήψεις αλλά επάγοντας άμεσα την κινηματική κατάσταση από το προηγούμενο βήμα. Ακόμη και αν μία δεδομένη ανάλυση χρειάζεται πολλά χρονικά διαστήματα χρησιμοποιώντας την άμεση (explicit) μέθοδο, η ανάλυση σε Abaqus/Explicit είναι πιο αποτελεσματική αν η ίδια ανάλυση σε Abaqus/Standard απαιτεί αρκετές επαναλήψεις. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της ανάλυσης σε Abaqus/Explicit είναι ότι απαιτεί σημαντικά μικρότερη μνήμη και χώρο στο δίσκο σε σχέση με το Abaqus/Standard για την ίδια ανάλυση.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι όλες οι αναλύσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούν το πρόγραμμα Abaqus/Standard για την εύρεση της λύσης ικανοποιώντας τις σχέσεις στατικής ισορροπίας..

Διαδικασία μοντελοποίησης

Στο παρόν εδάφιο δεν θα επεκταθούμε με λεπτομέρεια στη διαδικασία της μοντελοποίησης (η οποία παρατίθεται στο παράρτημα Α) αλλά θα αναφέρουμε με συντομία τους βασικούς άξονες στους οποίους κινηθήκαμε.

Καταρχάς μία διαδικασία μοντελοποίησης ξεκινά πάντοτε με την υλοποίηση των προς ανάλυση αντικειμένων. Στην περίπτωσή μας το αντικείμενο προς μελέτη είναι η μέση τομή που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η οποία αποτελείται από τρεις κατηγορίες συστατικών μερών:

1. Το εξωτερικό περίβλημα (πλευρικά ελάσματα, κατάστρωμα και πυθμένας).
2. Τους νομείς.
3. Τα διαμήκη ενισχυτικά.

Για τη σχεδίαση και την υλοποίηση των αντικειμένων 1, 3 ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στο *Παράρτημα Α* σελ. 1-5. Για τη διαδικασία σχεδίασης και υλοποίησης του αντικειμένου 2 ο αναγνώστης παραπέμπεται στο *Παράρτημα Α* σελ. 5-9.

Αφότου σχεδιαστεί ένα αντικείμενο από τις τρεις παραπάνω κατηγορίες έπειτα μπορεί να γίνει η συναρμογή τους, μία διαδικασία η οποία περιγράφεται αναλυτικά στο *Παράρτημα Α* σελ. 5-10.

Αφού ολοκληρωθεί η υλοποίηση της κατασκευής έπειτα, στα διάφορα στοιχεία της θα πρέπει να προσδώσουμε ιδιότητες υλικού (τάση διαρροής, μέτρο ελαστικότητας, λόγο Poisson, πυκνότητα) και πάχος διατομής. Στην παρούσα μοντελοποίηση ως υλικό της κατασκευής ορίστηκε ο κοινός χάλυβας ενώ τα πάχη των διατομών ορίστηκαν με βάση τον πίνακα της σελίδας 19. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης διαδικασίας στο λογισμικό ABAQUS.cae δίνεται στο *Παράρτημα Α* σελ. 11-14. Ακολούθως θα πρέπει να διακριτοποιήσουμε την επιφάνεια του αντικειμένου μας, δημιουργώντας ένα πλέγμα σε κάθε ξεχωριστό αντικείμενο από το οποίο αποτελείται και κάνοντας συγχώνευση των διαφορετικών πλεγμάτων προσέχοντας να μην δημιουργηθούν «διπλοί κόμβοι» ή κόμβοι που δεν μπορούν να συγχωνευτούν. Λεπτομερώς αυτή η διαδικασία αναλύεται στο *Παράρτημα Α* σελ. 15-22. Στη συνέχεια θα πρέπει να οριστούν τα βήματα ανάλυσης που περιλαμβάνει η μοντελοποίηση. Στην παρούσα περίπτωση υπάρχει μόνο ένα βήμα ανάλυσης (πέραν του αρχικού/Initial) στο οποίο εφαρμόζεται ολόκληρη η φόρτιση. Για την περαιτέρω κατανόηση των προηγούμενων παραπέμπουμε τον αναγνώστη στο *Παράρτημα Α* σελ. 22-29. Η τεχνική με βάση εφαρμόσαμε τη φόρτιση-περιστροφή στην κατασκευή κατά τη μοντελοποίηση περιελάμβανε τη δημιουργία *Αλληλεπιδράσεων (Interactions)*. Στην περίπτωσή μας δημιουργήσαμε τον περιορισμό της σύζευξης (coupling constrain) δύο σημείων εκατέρωθεν της κατασκευής κατά το διάμηκες και σε ίσες αποστάσεις από αυτήν, με τους ακραίους κόμβους της κατασκευής. Με μία διαδικασία που περιγράφεται λεπτομερώς στο *Παράρτημα Α* σελ. 30-31 έγινε δυνατή η εφαρμογή περιστροφής στην κατασκευή. Τέλος, στα δύο αυτά σημεία ελέγχου του περιορισμού της σύζευξης ορίστηκαν οριακές συνθήκες (Boundary Conditions) τόσο στο αρχικό βήμα (Initial Step) οι οποίες μεταφέρονται και στα επόμενα βήματα, όσο και στο βήμα ανάλυσης στο οποίο εφαρμόσαμε την περιστροφή. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στο *Παράρτημα Α* σελ. 32-33.

2.5 Παρουσίαση αποτελεσμάτων μοντελοποίησης πειράματος των S. Bahey Eldeen et al

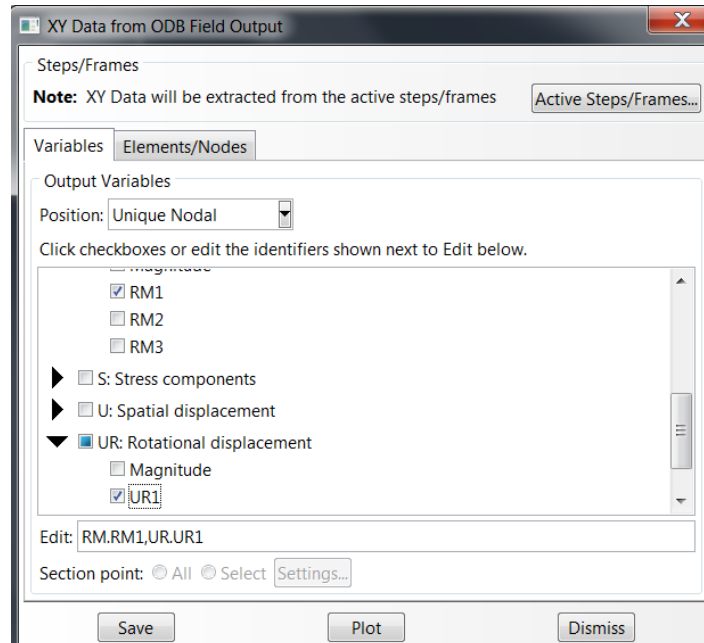
Στο παρόν κεφάλαιο της εργασίας θα παραθέσουμε ορισμένα διαγράμματα τα οποία προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση της απόκρισης της κατασκευής. Επίσης, ο αναγνώστης θα έχει την ευκαιρία να διαπιστώσει τις πολυάριθμες λειτουργίες της ενότητας της αστικοποίησης (Visualization module) μέρος των οποίων χρησιμοποιήσαμε για την εξαγωγή των ζητούμενων αποτελεσμάτων. Το αρχείο που δημιουργείται μετά το πέρας μιας ανάλυσης έχει τη μορφή *.odb* οπότε μπορούμε είτε να το επιλέξουμε με διπλό πάτημα του αριστερού πλήκτρου του ποντικιού είτε από τη διαδοχή των ενοτήτων στο περιβάλλον του ABAQUS/cae να μεταβούμε στην ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) για να εισέλθουμε στη βάση δεδομένων που προέκυψαν από την ανάλυσή μας (output database).

Όπως έχει γίνει κατανοητό από τα προηγούμενα κεφάλαια εμάς μας ενδιέφερε να προσδιορίζουμε τη μέγιστη ή τελική αντοχή της κατασκευής μας. Αυτό υποδεικνύεται από τη μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει. Συνεπώς, το πρώτο διάγραμμα το οποίο θα παραθέσουμε είναι αυτό της καμπτικής ροπής (bending moment) – περιστροφής (rotation) και από αυτό να προσδιορίσουμε το μέγιστο σημείο της. Από τη μορφή που έχει αυτή η καμπύλη μπορούμε να βγάλουμε και άλλα χρήσιμα συμπεράσματα όπως για παράδειγμα την ταχύτητα κατάρρευσης κ.ά. Το κάθε διάγραμμα ή ομάδα διαγραμμάτων που θα παραθέτουμε θα συνοδεύεται από μίας σύντομης περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή του και από εικόνες της τελικής παραμορφωμένης κατάστασης με κάποια σύντομα σχόλια για τη μορφή της.

Διάγραμμα καμπτικής ροπής- περιστροφής

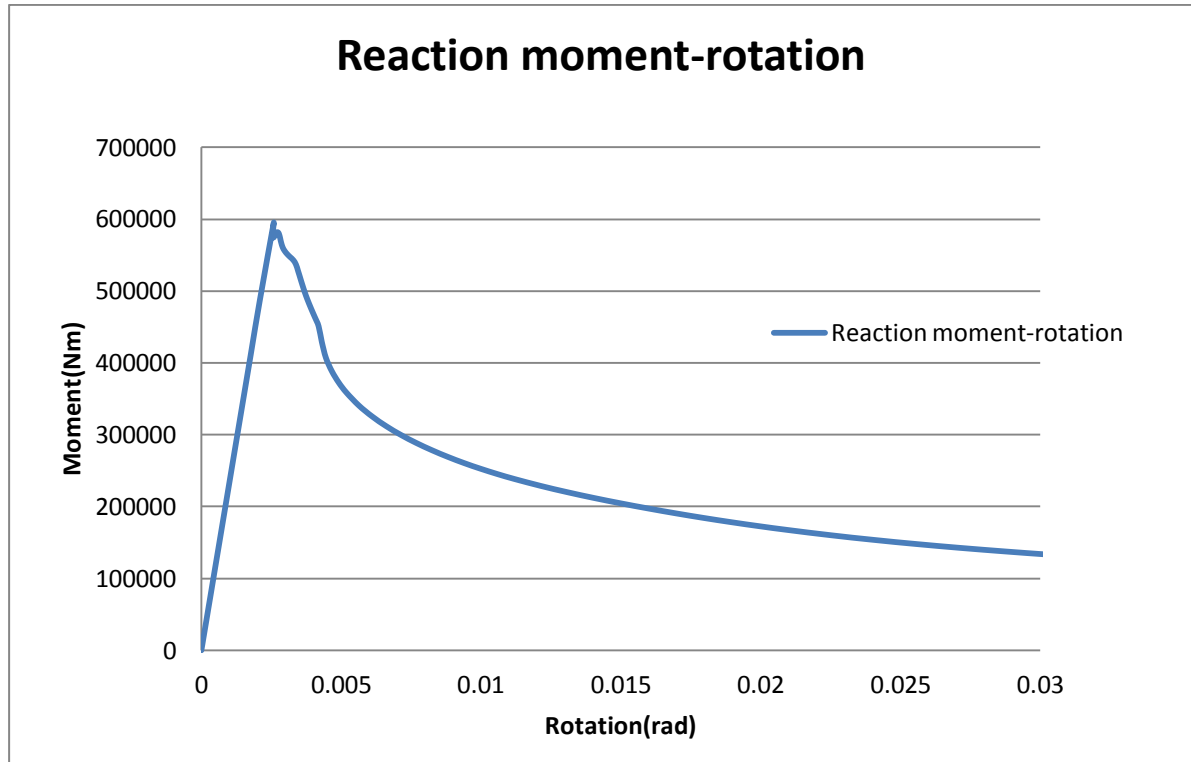
Βρισκόμενοι στο περιβάλλον της ενότητας της οπτικοποίησης (Visualization module) του ABAQUS/cae από την κύρια γραμμή επιλογών επιλέγουμε **Tools→ X,Y data→ Create→ ODB field output→ Continue**. Προτού συνεχίσουμε και επειδή την καμπτική ροπή θα τη μετρήσουμε στο ένα από τα δύο σημεία (λόγω ισορροπίας και μικρής κατακόρυφης δύναμης) όπου έχει γίνει η σύζευξη θα πρέπει πρώτα να τα εμφανίσουμε στην περιοχή του παραμορφωμένου μοντέλου. Αυτό γίνεται επιλέγοντας **View→ ODB display options→** καρτέλα **Entity Display→ Show coupling constraints→ OK**. Έτσι λοιπόν εμφανίζονται τα σημεία όπου έχει εφαρμοστεί ο περιορισμός της σύζευξης. Συνεχίζοντας από το σημείο στο οποίο σταματήσαμε προηγουμένως, αφότου επιλέξουμε **Continue** εμφανίζεται ένα παράθυρο στο οποίο πρέπει να επιλέξουμε τις επιθυμητές μεταβλητές εξόδου που μας ενδιαφέρουν κάθε στιγμή όπως επίσης και το σημείο του μοντέλου στο οποίο αυτές εμφανίζονται.

Στη δική μας περίπτωση τα επιθυμητά μεγέθη είναι τα RM1 (αντιδρώσα ροπή γύρω από τον άξονα 1, βλ.σελ.73) και UR1 (περιστροφή γύρω από τον άξονα 1, βλ.σελ.73) τα οποία τα επιλέγουμε από την παρακάτω λίστα της καρτέλας Variables (μεταβλητές).



Εικόνα 2.5.1 Επιλογή των επιθυμητών δεδομένων εξόδου RM1, UR1

Στην καρτέλα Elements/Nodes επιλέγοντας Edit Selection αφού έχουμε επιλέξει Pick from viewport μπορούμε να επιλέξουμε το ένα από τα δύο σημεία στα οποία έχει εφαρμοστεί ο περιορισμός της σύζευξης. Αφού γίνει αυτό, στην περιοχή κάτω από την επιλογή Edit Selection θα εμφανιστεί το μήνυμα "1 Nodes selected". Δεν μένει τίποτε άλλο παρά να πατήσουμε Save και αυτομάτως θα παραχθούν τα επιθυμητά δεδομένα που αποθηκεύονται στο διαχειριστή δεδομένων (XY Data Manager). Τέλος, από εκεί μπορούμε να τα πάρουμε και με το πρόγραμμα Microsoft Excel να δημιουργήσουμε τα αντίστοιχα διαγράμματα. Παρακάτω ακολουθεί το διάγραμμα καμπτικής ροής – περιστροφής.



Διάγραμμα 2.5.1 Διάγραμμα αντιδρώσας ροπής-περιστροφής

Η μέγιστη τιμή της αντιδρώσας ροπής και η γωνία για την οποία αυτή προέκυψε είναι:

$$M_{\max}=587.5\text{kNm}$$

$$\theta_{M=\max}=0,00257\text{rad}$$

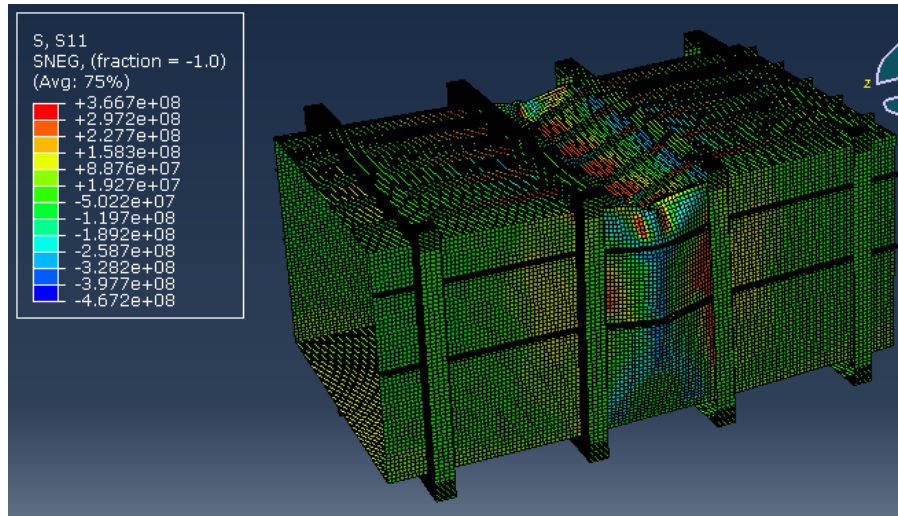
Από τη μορφή του διαγράμματος παρατηρούμε μια έντονη κατάρρευση της κατασκευής μετά από γωνία 0,00257rad πράγμα το οποίο οφείλεται στον έντονο λυγισμό του ελάσματος καταστρώματος και στο λυγισμό των ενισχυτικών καταστρώματος. Επιπλέον, όπως θα φανεί και από τις εικόνες που θα παραθέσουμε στη συνέχεια από την τελική κατάσταση της κατασκευής, παρατηρείται και η περιστροφή των ενισχυτικών καταστρώματος (tripping) κάτι το οποίο μπορεί να προκαλέσει απότομη και έντονη αδυναμία στην κατασκευή κατά την παραλαβή φορτίων. Στο σημείο αυτό να υπενθυμίσουμε ότι ο αλγόριθμος επίλυσης είναι ο Riks, το είδος των στοιχείων S4R, ενώ οι συνοριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν είναι αφενός η ελευθερία περιστροφής γύρω από τον άξονα X από τη μία πλευρά και η μετακίνηση κατά το διαμήκη άξονα και η ελευθερία περιστροφής γύρω από τον άξονα X από την άλλη πλευρά για να αποφευχθεί η δημιουργία αξονικών φορτίων. Ως υλικό έχει επιλεγθεί ο κοινός χάλυβας με:

$$\nu=0,3$$

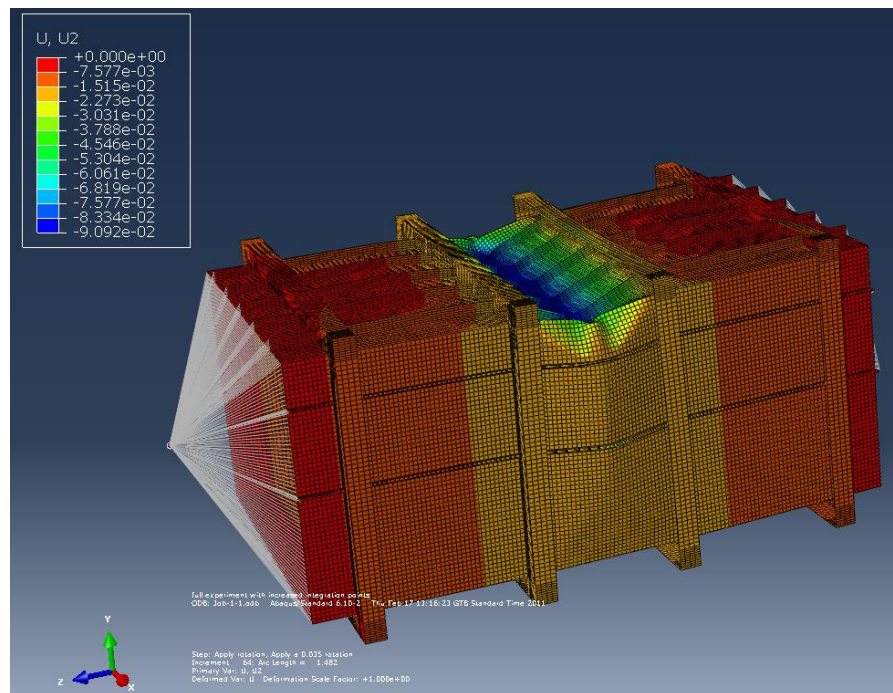
$$E=2,07 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$\sigma_y=245 \times 10^6 \text{ Pa}$$

Όταν αφήσαμε ελεύθερη την κίνηση κατά τον άξονα Υ σε ένα από τα δύο σημεία ελέγχου (U2) δεν παρατηρήθηκε καμία αλλαγή στα αποτελέσματα.

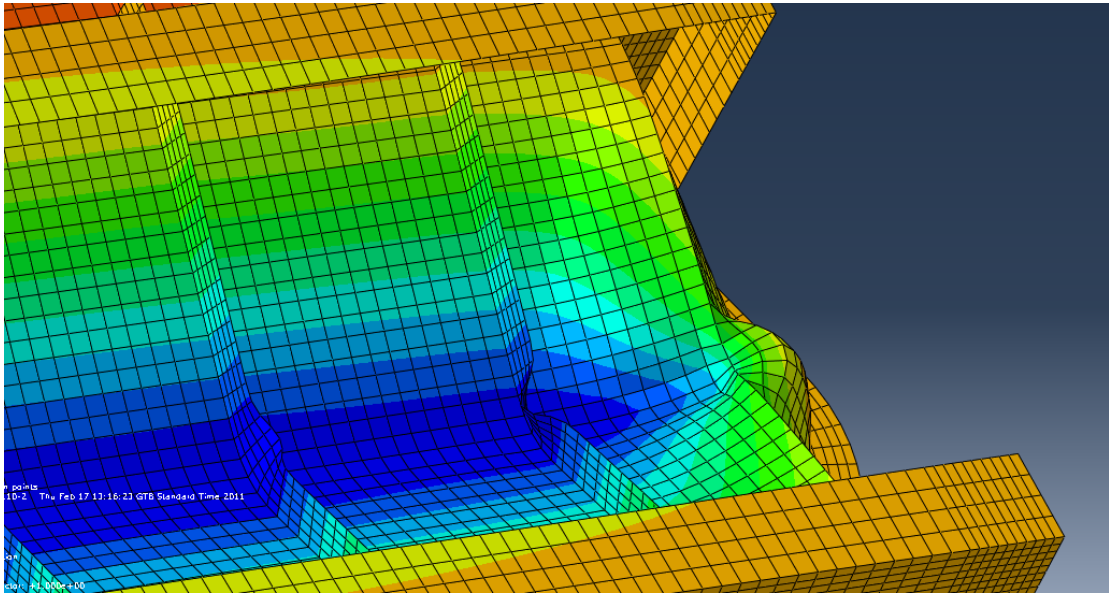


Εικόνα 2.5.2 Κατανομή ορθών τάσεων (σ_{11}) στην κατασκευή. Διακρίνεται η έντονη καταπόνηση της μέσης τομής

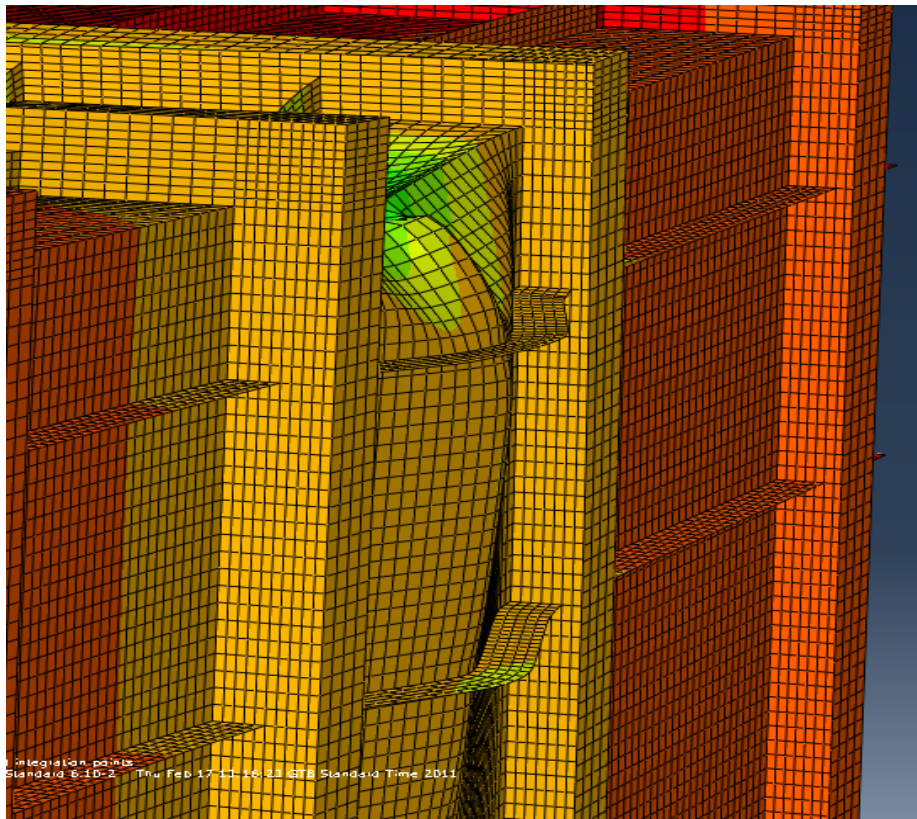


Εικόνα 2.5.3 Στο παρόν σχήμα φαίνεται η κατανομή των κάθετων μετατοπίσεων στο σώμα της κατασκευής. Παρατηρούμε πάλι την έντονη υποχώρηση του καταστρώματος στην περιοχή της μέσης τομής

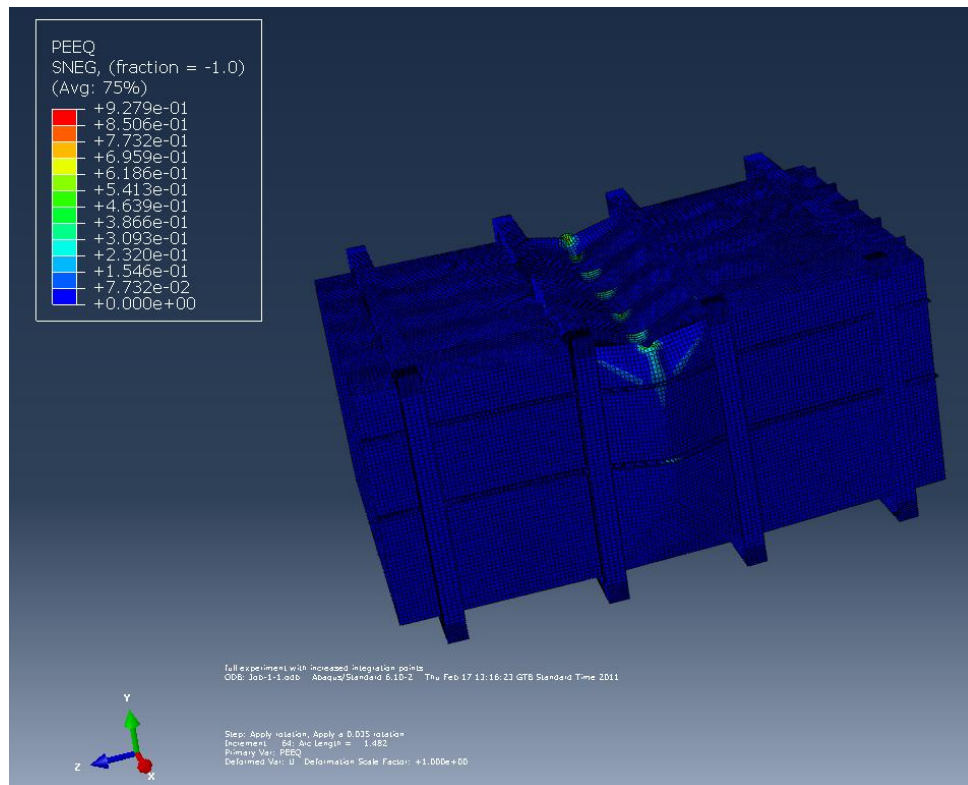
Από τις δύο εικόνες που παραθέσαμε παραπάνω φαίνεται ο έντονος λυγισμός του ελάσματος του καταστρώματος ενώ λεπτομερέστερα για την κατάσταση των ενισχυτικών μπορούμε να διακρίνουμε στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.5.4 Έντονος πλευρικός λυγισμός και περιστροφή (tripping) των ενισχυτικών καταστρώματος στην περιοχή της μέσης τομής.



Εικόνα 2.5.5 Παρατηρούμενος λυγισμός και στα πλαϊνά ελάσματα με έντονη παραμόρφωση στην περιοχή της μέσης τομής



Εικόνα 2.5.6 Κατανομή της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης. Αρκετά μεγάλη τιμή παρατηρείται στο μέσο της κατασκευής .

Για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα επαναλάβαμε την ανάλυση και με τη χρήση των S4 στοιχείων. Τόσο η μορφή της καμπύλης, όσο και η τιμή της μέγιστης αντιδρώσας ροπής παρέμειναν ίδιες κάτι το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στην παρούσα ανάλυση, η χρήση στοιχείων με περισσότερα σημεία ολοκλήρωσης δεν μας οδηγεί σε κάποια άλλη ακριβέστερη λύση.

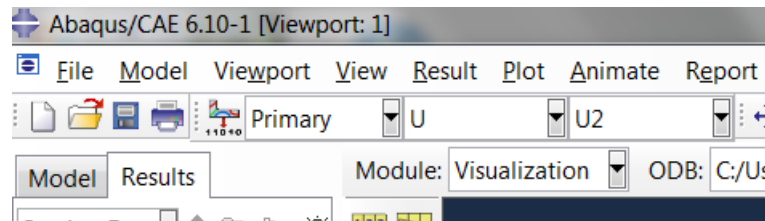
Για να έχουμε μία καλύτερη εupoτεία της κάθετης μετατόπισης, θα παραθέσουμε στη συνέχεια το διάγραμμα *κάθετων μετατοπίσεων – μήκος κατασκευής* στο οποίο φαίνεται η έντονη κάθετη μετατόπιση του καταστρώματος, ειδικά στη μέση τομή, σε σχέση με την κάθετη μετατόπιση του πυθμένα.

Διάγραμμα κάθετης μετατόπισης κατά μήκος του μοντέλου

Προτού παρουσιάσουμε το διάγραμμα, όπως και προηγούμενα θα αναφερθούμε με συντομία στη διαδικασία εξαγωγής του μέσα από τη βάση δεδομένων εξόδου που προέκυψε από την ανάλυσή μας.

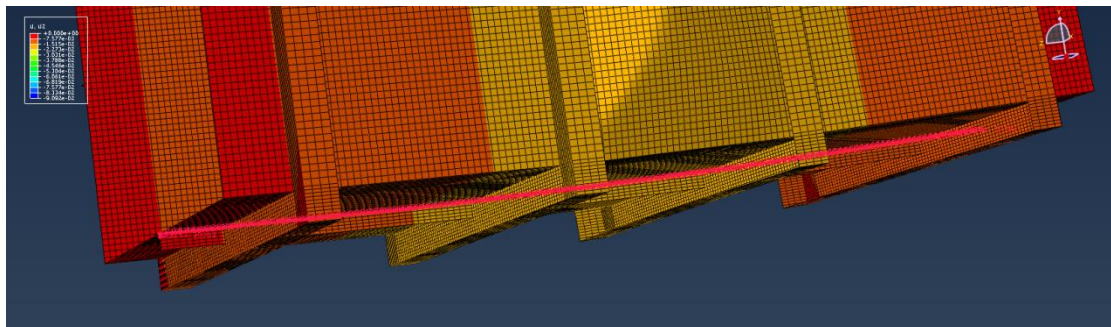
Στην περίπτωση όπου επιθυμούμε την εξαγωγή των αποτελεσμάτων ενός μεγέθους κατά το μήκος μίας διάστασης του μοντέλου χρησιμοποιούμε την εντολή **Path** η οποία βρίσκεται στον κατάλογο επιλογών **Tools**. Η διαδικασία που ακολουθούμε είναι: **Tools**→**Path**→**Create**→ (δίνουμε το επιθυμητό όνομα στο **Path** ή αφήνουμε το προεπιλεγμένο) **Edge list**→**Continue**.

Στο παράθυρο που εμφανίζεται στη συνέχεια επιλέγουμε **Add Before...** ή **Add After...** (δεν έχει σημασία τι θα επιλέξουμε διότι δεν έχουμε δημιουργήσει άλλο **Path** έως τώρα). Εδώ να τονίσουμε ότι αφού επιθυμούμε να δημιουργήσουμε το διάγραμμα των κάθετων μετατοπίσεων θα πρέπει να τις έχουμε επιλέξει στις ετικέτες των εμφανιζόμενων μεγεθών. Η παρακάτω εικόνα θα βοηθήσει στην κατανόηση της προηγούμενης φράσης.



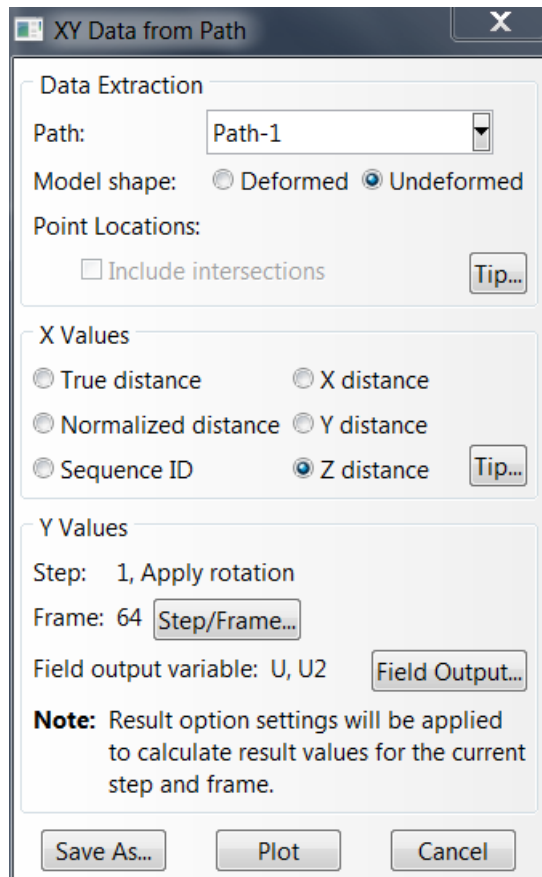
Εικόνα 2.5.7 Ως επιλεγμένο μέγεθος προς εμφάνιση είναι το U2 (κάθετη μετατόπιση)

Στη συνέχεια και αφού έχουμε εκτελέσει τις παραπάνω ενέργειες, θα πρέπει να επιλέξουμε το επιθυμητό **Path** στο μοντέλο μας. Αυτό γίνεται, αφού επιλέξουμε “by shortest distance” στην επιλογή *Select edges to be inserted into the path* στο κάτω μέρος της οθόνης, με απλή επιλογή της αρχής και του τέλους του **Path**. Για καλύτερη κατανόηση παραπέμπουμε στην αμέσως επόμενη εικόνα.

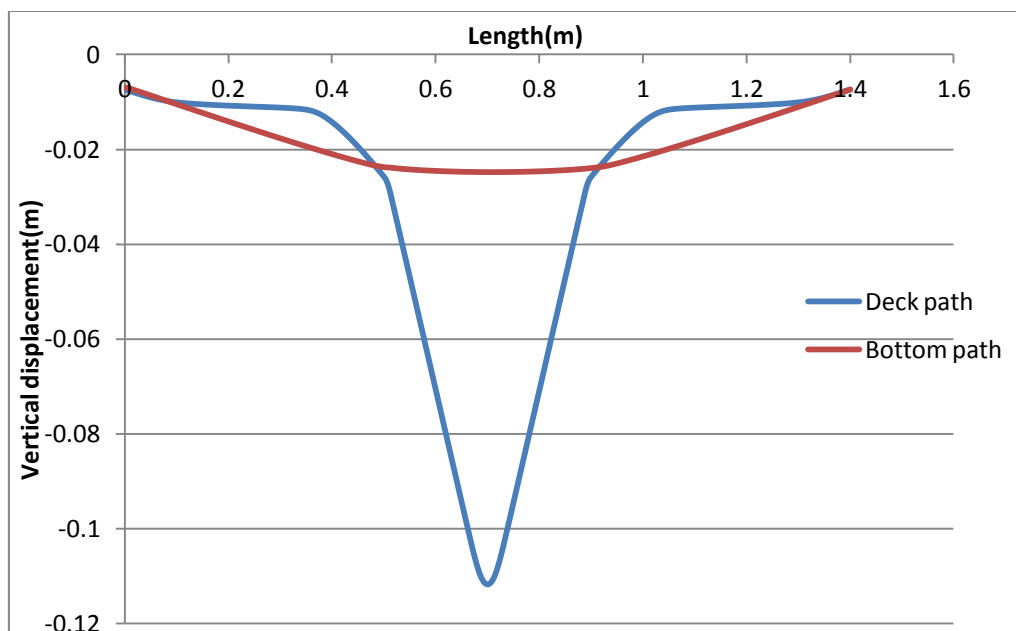


Εικόνα 2.5.8 Path κατά το μήκος του κεντρικού ενισχυτικού στον πυθμένα

Αφού δημιουργήσουμε με τον ίδιο τρόπο ένα δεύτερο **Path** κατά μήκος του κεντρικού ενισχυτικού του καταστρώματος, για να λάβουμε τα αποτελέσματα ακολουθούμε την ίδια διαδικασία με αυτή της σελίδας 75 μόνο που αυτή τη φορά μετά τις επιλογές **Tools**→ **XY data**→ **Create** από τη λίστα που εμφανίζεται επιλέγουμε **Path**→ **Continue**. Θα εμφανιστεί έπειτα ένα παράθυρο στο οποίο θα πρέπει να διαλέξουμε ένα από τα δύο **Paths** που έχουμε δημιουργήσει και τον άξονα ο οποίος θα παίξει το ρόλο του OX άξονα των ανεξάρτητων μεταβλητών που στη δική μας περίπτωση είναι ο διαμήκης άξονας της κατασκευής Z. Στην επόμενη σελίδα φαίνεται το εν λόγω παράθυρο. Αφού επιλέξουμε **Save As**→ **OK** τα δεδομένα του **Path** αποθηκεύονται στο *XY Data Manager* απ’όπου και μπορούν να εξαχθούν στο πρόγραμμα Microsoft Excel και να γίνει το αντίστοιχο διάγραμμα.



Εικόνα 2.5.9 Παράθυρο για την εξαγωγή των δεδομένων ενός Path με ανεξάρτητη μεταβλητή το μήκος της κατασκευής



Διάγραμμα 2.5.2 Διακύμανση των κάθετων μετατοπίσεων κατά τη διάσταση του μήκους του μοντέλου σε κατάστρωμα (μπλε καμπύλη) και πυθμένα (κόκκινη καμπύλη). Είναι προφανής η διαφορά της μέγιστης κάθετης μετατόπισης μεταξύ των δύο.

Το παραπάνω διάγραμμα σε διαφορετικές στιγμές της φόρτισης θα μας χρησιμεύσει αργότερα για την εξαγωγή του διαγράμματος *καμπτική ροπή – καμπυλότητα* ώστε να το παραβάλλουμε με το αντίστοιχο που έχει προκύψει από τη διενέργεια του πειράματος.

Στη συνέχεια, και για να ελέγξουμε την κλίση της ευθείας της καμπύλης *καμπτική ροπή – περιστροφή* στην ελαστική περιοχή, υποβάλλαμε σε κάμψη την ίδια κατασκευή χωρίς τους τέσσερις νομείς. Με χρήση των αναλυτικών σχέσεων για τον υπολογισμό του ουδέτερου άξονα και της ροπής αδράνειας της διατομής προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα, τα οποία και παραθέτουμε στον από κάτω πίνακα.

	No of items	angle (rad)			Thickness (mm)	Length (m)	Surface (m ²)	Height y (m)	A*y (m ³)	Steiner (m ⁴)	I _{xx} (m ⁴)
Deck plating	1	0	3	1	4.09	0.8000	0.003272	0.598	1.957E-03	1.170E-03	4.56E-09
Bottom plating	1	0	3	1	3.75	0.8000	0.003000	0.002	5.625E-06	1.055E-08	3.52E-09
Port side plating	2	1.57	1	3	3.95	0.5922	0.004678	0.300	1.403E-03	4.205E-04	1.37E-04
Starboard side plating	2	1.57	1	3	3.85	0.5922	0.004560	0.300	1.368E-03	4.104E-04	1.33E-04
Deck stiffeners	5	1.57	1	3	4.35	0.0250	0.000544	0.613	3.330E-04	2.040E-04	2.83E-08
Bottom stiffeners	1	1.57	1	3	4.35	0.0250	0.000109	-0.013	-1.359E-06	1.699E-08	5.66E-09
Side stiffeners (at 300)	2	0	3	1	4.35	0.0250	0.000218	0.300	6.525E-05	1.958E-05	3.43E-10
Side stiffeners (at 500)	2	0	3	1	4.35	0.0250	0.000218	0.500	1.088E-04	5.438E-05	3.43E-10
Young's modulus MPa	207.000						0.016597	0.316	5.238E-03	2.279E-03	2.700E-04
Bending stiffness N·m ²	185.360.726										0.000895

Neutral Axis (m)	0,316
Ιολικη (m ⁴)	0,000895
E*I (Nm ²)	185265000

Για να συγκρίνουμε την τιμή της κλίσης της καμπύλης (EI) που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία με αυτή της καμπύλης ροπής – περιστροφής εφαρμόσαμε την εξίσωση της ελαστικής γραμμής η οποία μας δίνει το βέλος κάμψης κατά μήκος της δοκού.

$$w = [(\theta_1 + \theta_2)L + 2(w_1 + w_2)]\left(\frac{x}{L}\right)^3 - [(2\theta_1 + \theta_2)L + 3(w_1 - w_2)]\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \theta_1 x + w_1$$

Επειδή στην περίπτωσή μας, λόγω των συνοριακών συνθηκών που έχουμε επιβάλλει, $\theta_1 = -\theta_2$ και $w_1 = w_2 = 0$ ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης θα απαλειφτεί ενώ μετά τις πράξεις στους υπόλοιπους όρους θα προκύψει ότι:

$$w = -(\theta_1 L)\left(\frac{x}{L}\right)^2 + \theta_1 x$$

Όμως γνωρίζουμε ότι:

$$-EI \frac{d^2 w}{dx^2} = M$$

Άρα,

$$\frac{2\theta_1}{L} EI = M \quad (I)$$

Τελικά, επιλέγοντας ένα ζεύγος τιμών (M, θ_1) μπορώ να υπολογίσω το γινόμενο EI . Ως τέτοιο επιλέγω το (53196.8, 0.000228155) και από τη σχέση (I) προκύπτει ότι:

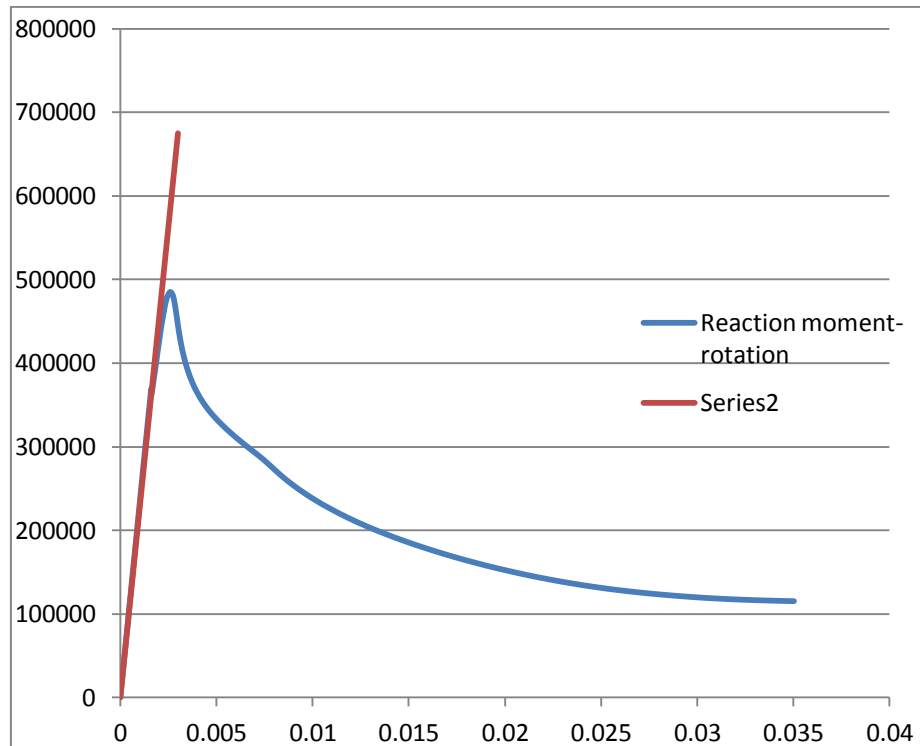
$$EI = 1.63212552e8 \text{ Nm}^2$$

Αν θεωρήσουμε τις τιμές που έχουμε ορίσει στο πρόγραμμα για το E και την τιμή του I που υπολογίσαμε παραπάνω, το γινόμενο EI προκύπτει:

$$EI = 1.85265000e8 \text{ Nm}^2$$

Από τη σύγκριση των δύο τιμών για την κλίση της καμπύλης προκύπτει αρκετά καλή συμφωνία με απόκλιση $\sigma = \frac{1.82565000e8 - 1.63212552e8}{1.85265000e8} \times 100\% = 10.6\%$.

Συνεπώς, η κλίση της καμπύλης που προέκυψε κατά την επιβολή της περιστροφής παρουσιάζει μία μικρή διαφορά στην ελαστική περιοχή σε σχέση με αυτή που αναμέναμε. Η καμπύλη *καμπτικής ροπής – περιστροφή* που προέκυψε για την κατασκευή χωρίς νομείς είναι η παρακάτω.



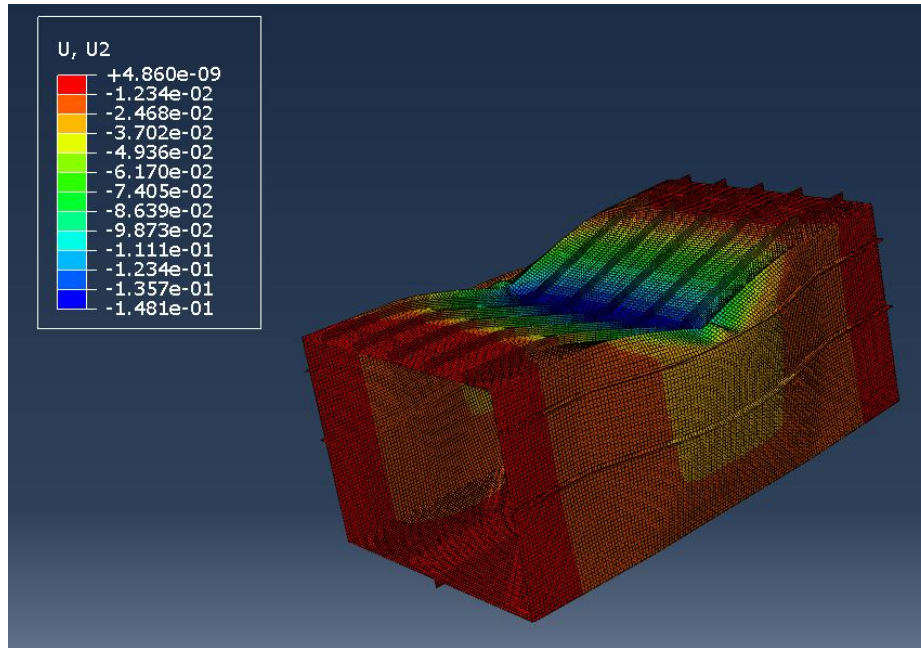
Διάγραμμα 2.5.3 Με κόκκινο χρώμα είναι η ευθεία που προέκυψε από τον αναλυτικό υπολογισμό του EI

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε την ταύτιση των καμπυλών στην ελαστική περιοχή που προέκυψαν αφενός από τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης (μπλε χρώμα) και αφετέρου από τον αναλυτικό υπολογισμό του EI (κόκκινο χρώμα). Η μέγιστη ροπή και η γωνία περιστροφής για την οποία αυτή προέκυψε είναι:

$$M_{\max}=484.8\text{kNm}$$

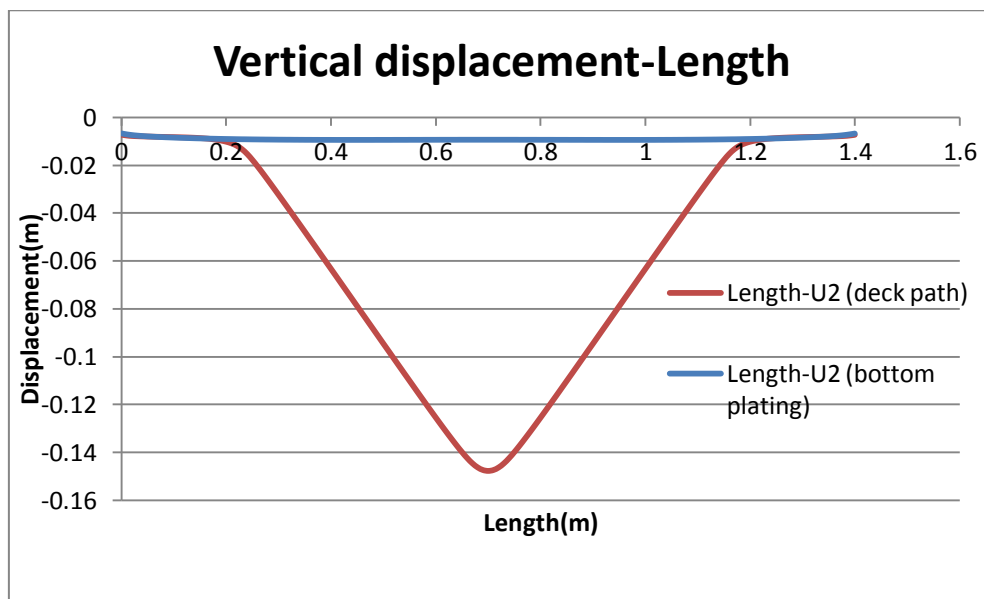
$$\theta_{M=M_{\max}}=0.0026\text{rad}$$

Η διαφορά στη μέγιστη ροπή σε σχέση με την κατασκευή **με** νομείς είναι εμφανής (βλ. σελ. 77). Η δε γωνία περιστροφής για την οποία έχουμε τη μέγιστη ροπή είναι πρακτικά η ίδια (βλ. σελ. 77). Από εδώ βγάζουμε συμπέρασμα για τη συνεισφορά που έχει η ύπαρξη των νομέων στη μέγιστη αντοχή της κατασκευής. Εικόνες από την τελικά παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής **χωρίς** νομείς δίδονται παρακάτω.

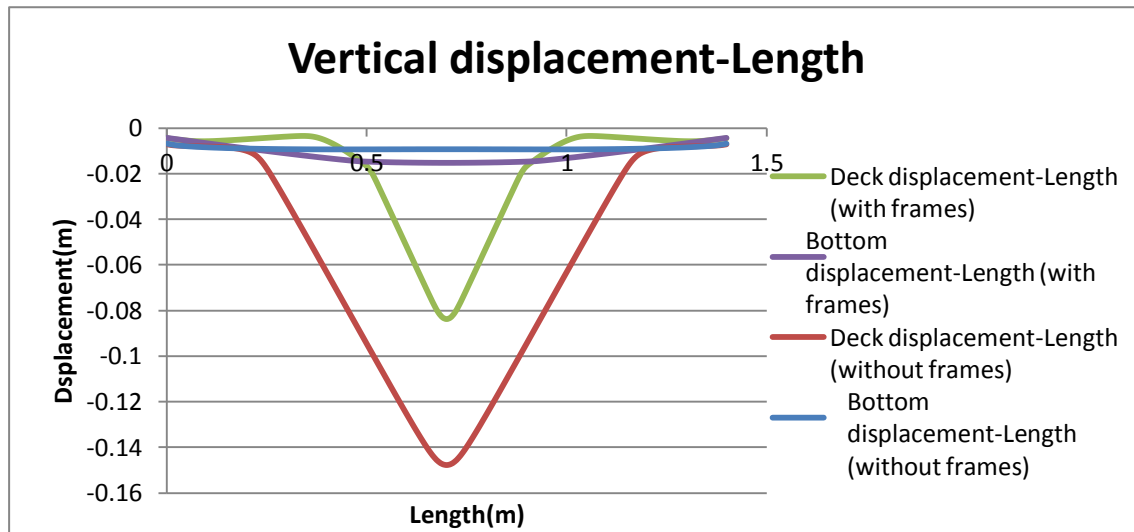


Εικόνα 2.5.10 Κατανομή της κάθετης μετατόπισης U_2 . Παρατηρείται ο έντονος λυγισμός των ενισχυτικών και του ελάσματος του καταστρώματος

Στην παραπάνω εικόνα, συγκρίνοντάς τη με την αντίστοιχη εικόνα της σελίδας 78 η οποία δείχνει την κατανομή της κάθετης μετατόπισης στην κατασκευή **με** νομείς, παρατηρούμε την εμφανώς μεγαλύτερη μέγιστη παραμόρφωση του καταστρώματος στη δεύτερη περίπτωση και αντίθετα τη μικρότερη παραμόρφωση του πυθμένα. Αυτό θα φανεί ευκρινέστερα στο αμέσως επόμενο διάγραμμα όπου φαίνεται η διακύμανση της κάθετης μετατόπισης κατά μήκος των κεντρικών ενισχυτικών καταστρώματος και πυθμένα στην κατασκευή **χωρίς** νομείς όπως είχε γίνει και για την κατασκευή **με** νομείς.



Διάγραμμα 2.5.4 Διακύμανση της κάθετης μετατόπισης κατά το μήκος των κεντρικών ενισχυτικών καταστρώματος (κόκκινη καμπύλη) και πυθμένα (μπλε καμπύλη)



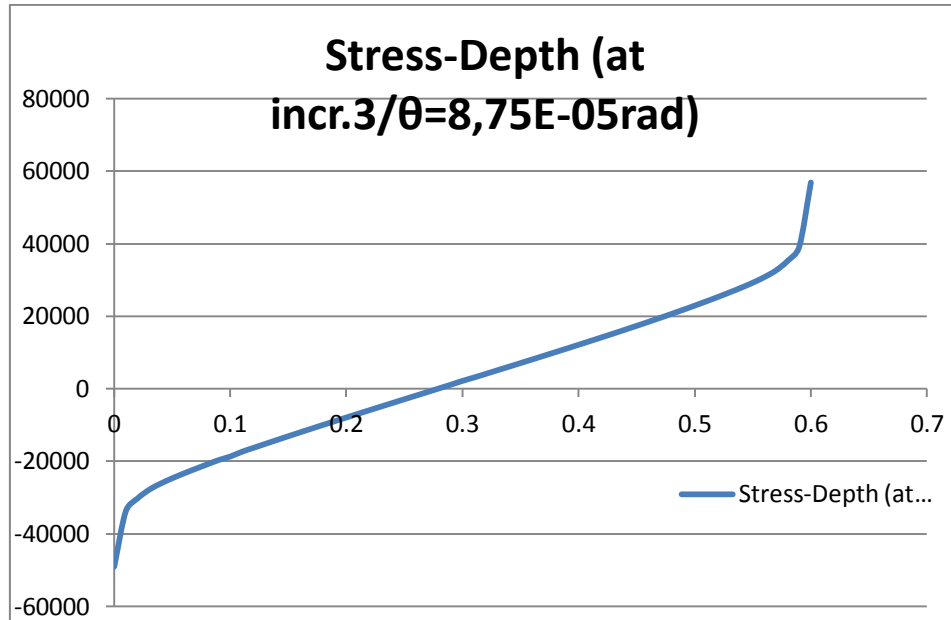
Διάγραμμα 2.5.5 Κοινό διάγραμμα κατακόρυφων μετατοπίσεων – μήκους κατασκευής για τις κατασκευές με και χωρίς νομείς

Παρατηρούμε στο διάγραμμα 2.4.4, που αφορά την κατασκευή **χωρίς** νομείς, ότι όλη την παραμόρφωση την παραλαμβάνει ουσιαστικά το κατάστρωμα ενώ αυτό σε σχέση με την κατασκευή **με** νομείς αρχίζει να παραμορφώνεται νωρίτερα. Στην κατασκευή **χωρίς** νομείς η παραμόρφωση του καταστρώματος εντοπίζεται μεταξύ των θέσεων $L=0.2\text{m}$ και $L=1.2\text{m}$ ενώ στην κατασκευή **με** νομείς μεταξύ των θέσεων $L=0.4\text{m}$ και $L=1.00\text{m}$. Επιπλέον, με βάση τη διακύμανση της μέσης τάσης (ολοκλήρωμα των τάσεων κατά το πάχος) κατά το ύψος της κατασκευής σε ορισμένες τυχαίες στιγμές της ανάλυσης έγινε δυνατή η δημιουργία του διαγράμματος της μετακίνησης του ουδέτερου άξονα. Το σημείο που κάθε φορά είναι η θέση του ουδέτερου άξονα δίδεται από τη θέση Y όπου παρατηρούμε μηδενισμό των ορθών τάσεων. Η μετάβαση σε οποιαδήποτε στιγμή της διαδικασίας φόρτισης γίνεται από την ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) επιλέγοντας **Result**→ **Step/Frame...**→ **επιθυμητό Increment**→ **OK**. Για το ζήτημα που εξετάζουμε εδώ επιλέχθηκαν οι στιγμές *inc.3* ($\theta=8.75E-05\text{rad}$), *inc.5* ($\theta=0,00023\text{rad}$), *inc.8* ($\theta=0,00083\text{rad}$), *inc.12* ($\theta=0,0026\text{rad}$), *inc.15* ($\theta=0,00261\text{rad}$), *inc.20* ($\theta=0,0029\text{rad}$), *inc.24* ($\theta=0,0033\text{rad}$), *inc.28* ($\theta=0,0036\text{rad}$), *inc.31* ($\theta=0,0039\text{rad}$), *inc.35* ($\theta=0,0043\text{rad}$), *inc.40* ($\theta=0,0056\text{rad}$), *inc.44* ($\theta=0,0071\text{rad}$), *inc.50* ($\theta=0,011\text{rad}$), *inc.54* ($\theta=0,014\text{rad}$), *inc.60* ($\theta=0,02\text{rad}$) και *inc.64* ($\theta=0,026\text{rad}$). Στο σημείο αυτό θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τη διαδικασία μόνο για το *Increment 3* αφού η ίδια επαναλαμβάνεται και για τα υπόλοιπα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως επιλέγουμε **Result**→ **Step/Frame...**→ **Increment 3**→**OK** για να μεταβούμε στη συγκεκριμένη στιγμή της ανάλυσης.

Έπειτα δημιουργούμε ένα *Path* όπως έχουμε εξηγήσει παραπάνω (βλ. σελ. 80-82) αυτή τη φορά κατά το ύψος της κατασκευής σε όποιο από τα τέσσερα άκρα επιθυμούμε.

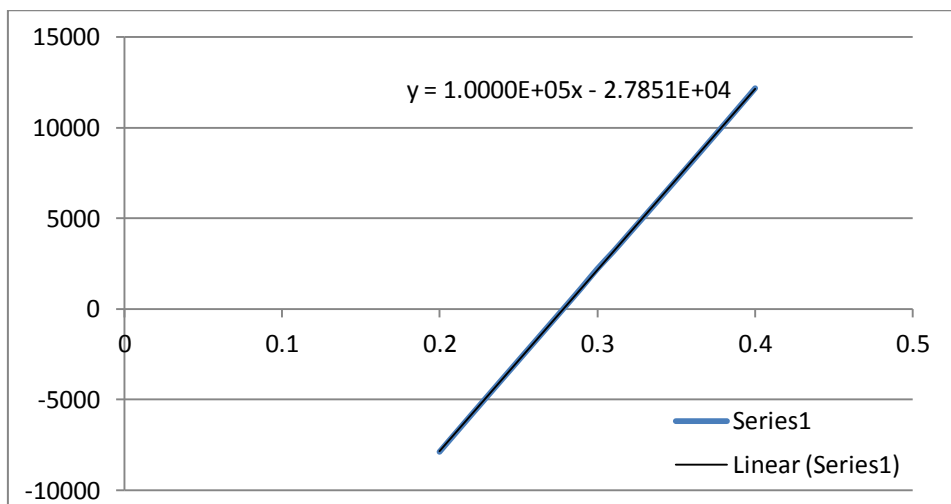
Με τις γνωστές πλέον διαδικασίες και αφού στην καρτέλα επιθυμητού μεγέθους έχουμε επιλέξει SF1 επεξεργαζόμαστε τα αποτελέσματα με τη χρήση του προγράμματος Microsoft Excel. Το διάγραμμα κατανομής των ορθών δυνάμεων κατά το πάχος της διατομής για τη συγκεκριμένη στιγμή *incr.3* φαίνεται αμέσως κάτω.



Διάγραμμα 2.5.6 Κατανομή της μέσης τάσης SF1 κατά το ύψος για το *incr.3*

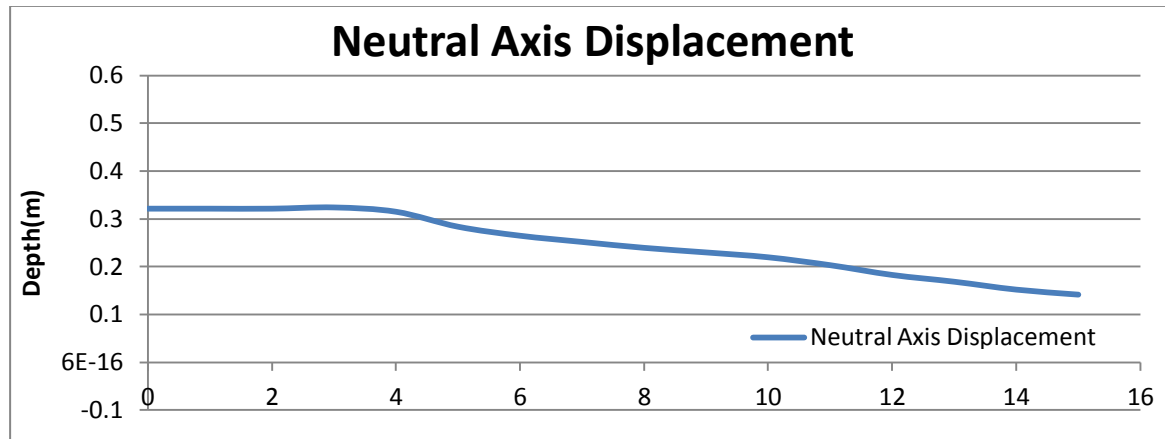
Έπειτα απομονώσαμε το τμήμα της καμπύλης εκατέρωθεν του άξονα O_x και προσθέσαμε τη γραμμική τάση πρώτου βαθμού. Από την εξίσωσή της τέλος, επιλύουμε ως προς x για y=0 και βρίσκουμε τη θέση του ουδέτερου άξονα.

Στο παρόν παράδειγμα επειδή το *Path* είχε οριστεί με αρχή το κατάστρωμα η πραγματική θέση του ουδέτερου άξονα προκύπτει αν αφαιρέσουμε την τιμή που θα βρούμε από το κοίλο D=0.6m.



Διάγραμμα 2.5.7 Γραμμή τάσης (trend line) πρώτου βαθμού και η εξίσωσή της

Επιλύοντας την εξίσωση της γραμμής τάσης $y = 1.00e^5 \cdot x - 2.7851e^4$ για $y=0$ βρίσκουμε ότι $x = 0.27851$. Η θέση του ουδέτερου άξονα λοιπόν είναι: $y_{n.a.} = 0.6 - 0.27851 = 0.32149m$. Η τιμή αυτή εκφράζει τη θέση του ουδέτερου άξονα στην ελαστική περιοχή αφού ακόμα δεν έχουμε μεταβεί στην ελαστοπλαστική περιοχή. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες δεκαπέντε στιγμές της φόρτισης καταλήγουμε στο αμέσως παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.5.8 Μεταβολή της κατακόρυφης θέσης του ουδέτερου άξονα

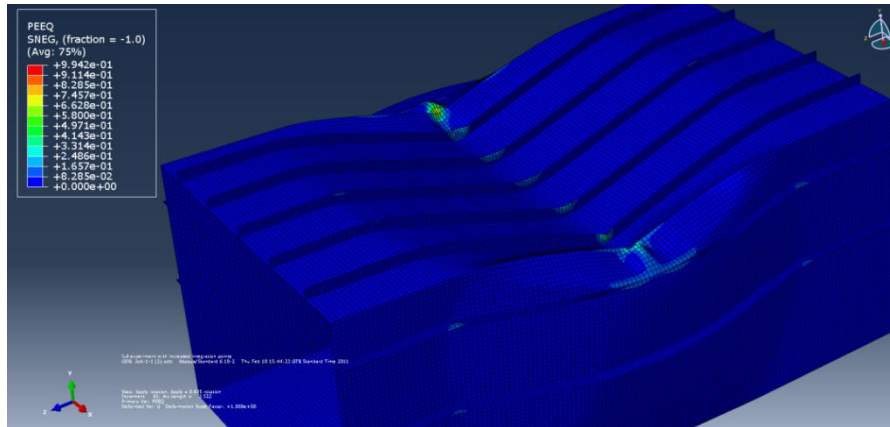
Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα, ο ουδέτερος άξονας μεταφέρεται προς τα κάτω, διότι έχουμε θλίψη του καταστρώματος και ολική κατάρρευσή του από λυγισμό.

Για το λόγο αυτό πρέπει να αυξηθεί το εμβαδόν των στοιχείων υπό θλίψη για να μην εμφανιστούν αξονικά φορτία. Η τελική θέση καθώς και η ολική μετατόπιση του ουδέτερου άξονα δίνονται παρακάτω.

$$y_{n.a.τελική} = 0,142m$$

$$\delta y_{n.a.} = 0.321 - 0.142 = 0.179m$$

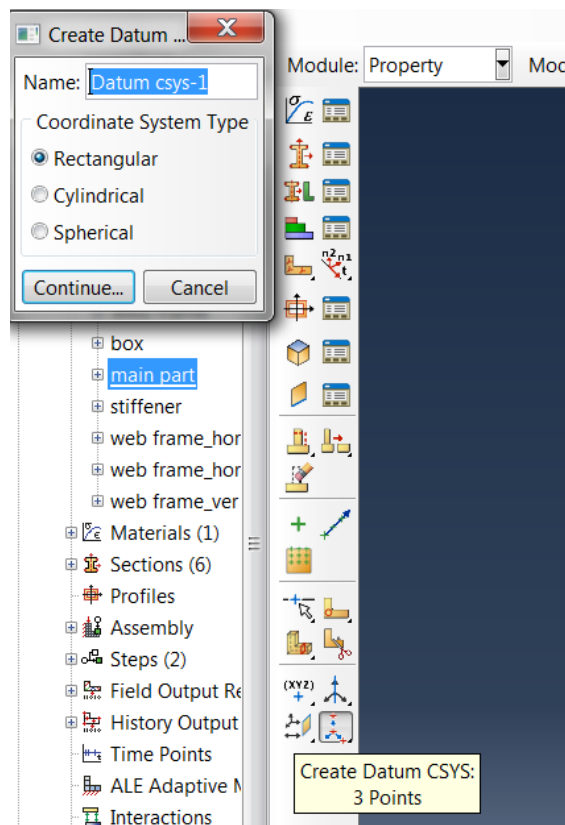
Παρατίθεται εν συνεχεία εικόνα από την τελική παραμορφωμένη κατάσταση της κατασκευής όπου εμφανίζεται η έντονη ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση του καταστρώματος.



Εικόνα 2.5.11 Ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση στο κατάστρωμα της κατασκευής χωρίς νομείς

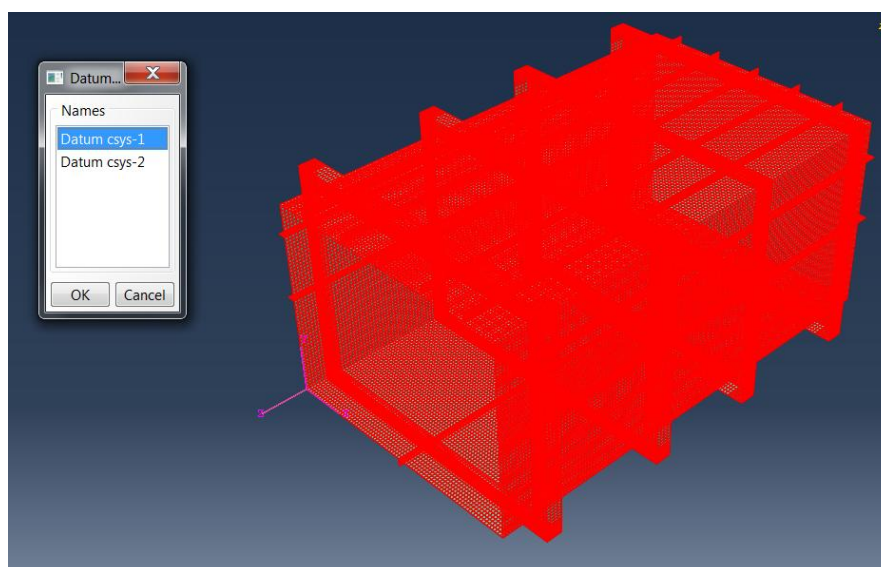
Ανάλυση τάσεων

Το τελευταίο μέρος της ανάλυσης που μας απασχόλησε κατά τη μοντελοποίηση προτού περάσουμε στα συμπεράσματα σε σχέση με το πραγματικό πείραμα, είναι η ανάλυση των τάσεων. Για την ανάλυσή μας χρησιμοποιήσαμε τα μεγέθη του ολοκληρώματος των τάσεων στη διατομή (SF: Section Forces) και των ορθών τάσεων (S11). Στο σημείο αυτό να επισημάνουμε ότι για να μπορέσει το λογισμικό να μας δώσει τα αποτελέσματα για την ορθή τάση, θα πρέπει να έχουμε εφαρμόσει εκτός του καθολικού προσανατολισμού (Global Orientation) και ένα σωματοπαγή προσανατολισμό (Material Orientation). Για τον ορισμό ενός σωματοπαγούς προσανατολισμού από την ενότητα *Ιδιότητες* (Property module) επιλέγουμε το εικονίδιο “Create Datum CSYS: 3 Points” και με βάση τις οδηγίες που δίνονται από το ίδιο το πρόγραμμα στο κάτω μέρος της οθόνης ορίζουμε το επίπεδο X-Y. Στη συνέχεια θα πρέπει να εφαρμόσουμε αυτό το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων στην κατασκευή μας. Αυτό γίνεται επιλέγοντας “Assign Material Orientation” από τα εικονίδια της ίδιας ενότητας, επιλέγοντας το σύστημα συντεταγμένων που έχουμε ήδη δημιουργήσει και ορίζοντας τον άξονα του κάθετου διανύσματος (normal) στην επιφάνεια. Η επιλογή του άξονα για το κάθετο διάνυσμα στην επιφάνεια μπορεί να αλλάξει τον προσανατολισμό και των X-Y αξόνων. Παρακάτω παραθέτουμε εικόνες για να γίνουν τα παραπάνω κατανοητά στον αναγνώστη.

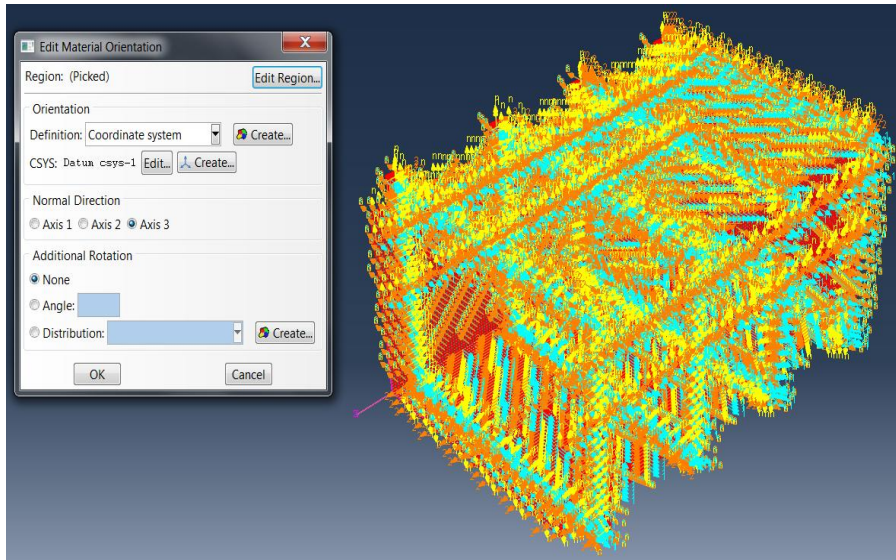


Εικόνα 2.5.12 Εικονίδιο δημιουργίας συστήματος συντεταγμένων

Αφού ορίσουμε το επιθυμητό σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων, επιλέγοντας “Datum CSYS List” στην κάτω δεξιά πλευρά του περιβάλλοντος εργασίας επιλέγουμε το σύστημα συντεταγμένων που μόλις προσδιορίσαμε.



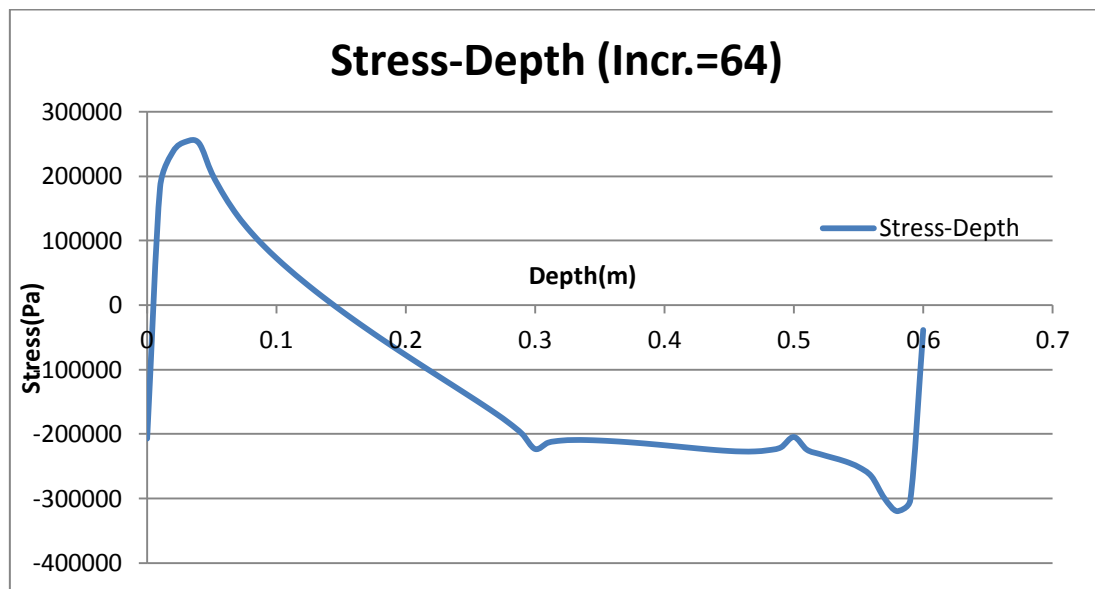
Εικόνα 2.5.13 Επιλογή επιθυμητού σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων



Εικόνα 2.5.14 Επιλογή άξονα κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια κάθε στοιχείου.
Στην κατασκευή απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα

Αφού λοιπόν εξηγήσαμε τη διαδικασία ορισμού σωματοπαγούς συστήματος συντεταγμένων στην κατασκευή, θα περάσουμε στο κυρίως μέρος της παρούσας ενότητας, το οποίο είναι η παρουσίαση της εντατικής κατάστασης που διαμορφώθηκε σε επιλεγμένες στιγμές της διαδικασίας επιβολής της περιστροφής.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η κατανομή των ορθών τάσεων σε Pa κατά το ύψος στη μέγιστη περιστροφή στην κατασκευή με νομείς.



Διάγραμμα 2.5.9 Διάγραμμα ορθών τάσεων κατά το ύψος

Από το συγκεκριμένο διάγραμμα μπορούμε να λάβουμε τη μέγιστη τιμή της θλιπτικής τάσης η οποία είναι:

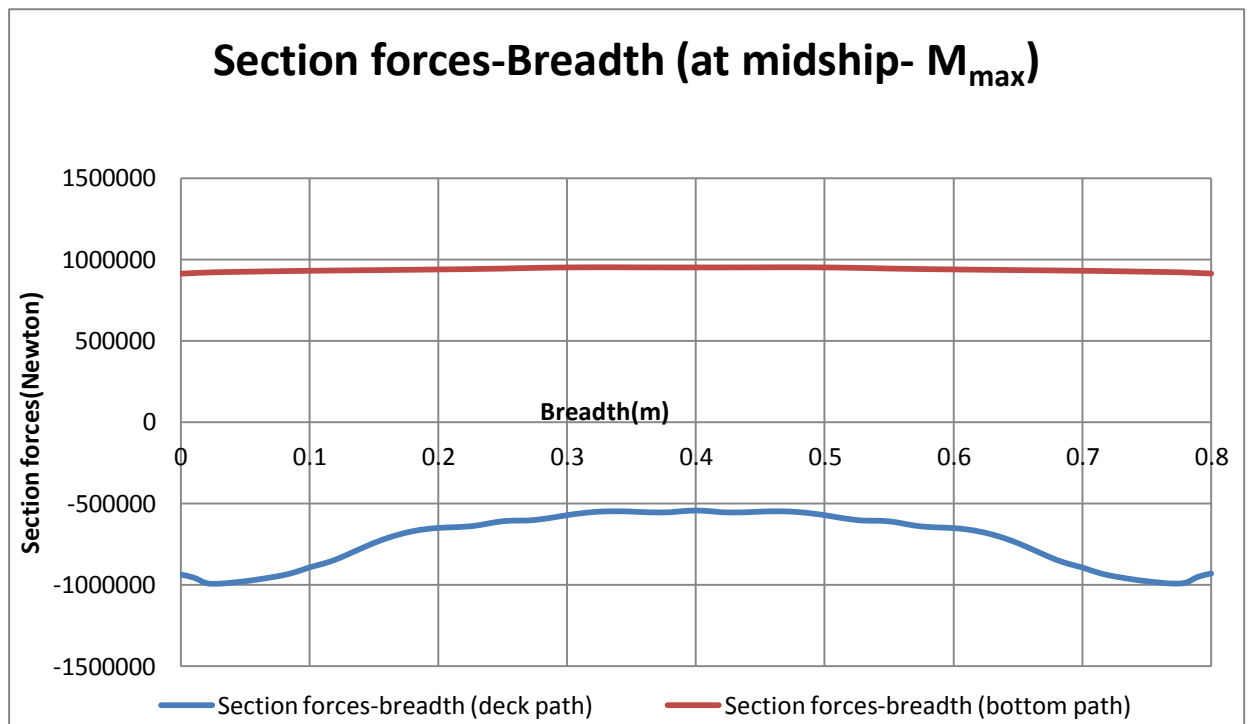
$$\sigma_{max} = -320,3MPa \text{ σε ύψος,} \\ H=0.58m \text{ από τον πυθμένα}$$

Η μέγιστη τιμή της εφελκυστικής τάσης είναι

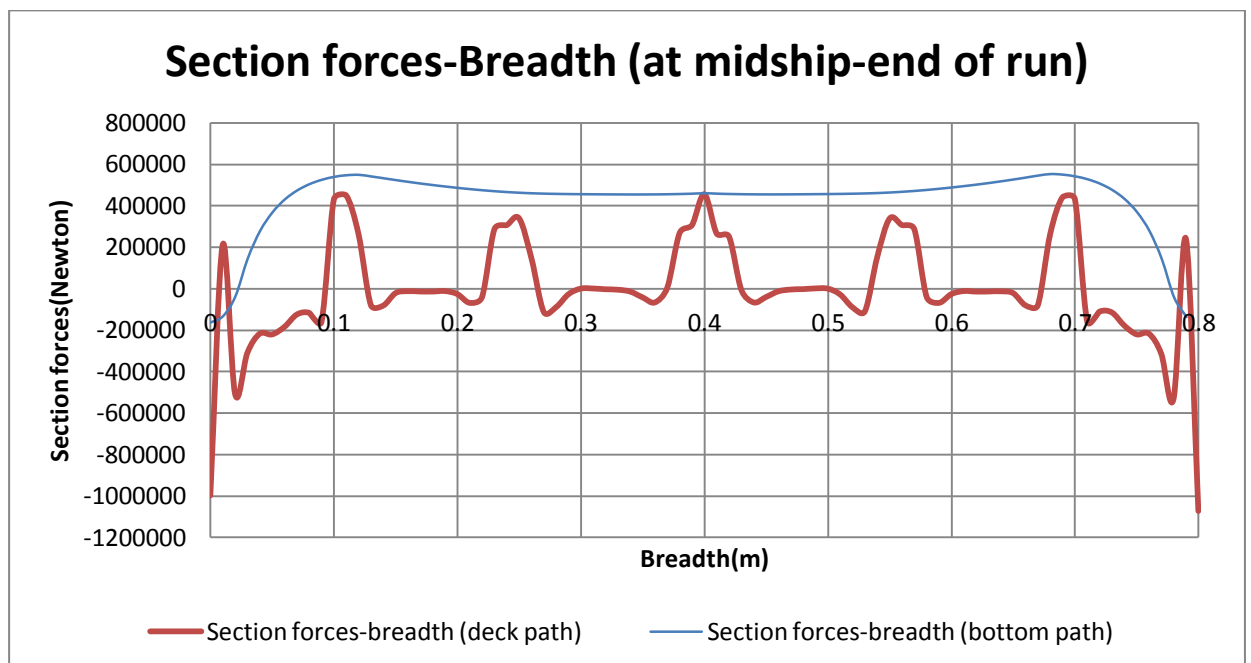
$$\sigma_{max} = 253.3MPa \text{ σε ύψος} \\ H = 0.03m \text{ από τον πυθμένα}$$

Αφού επιβάλαμε τέτοια περιστροφή ώστε να προσομοιάζουμε κατάσταση sagging είναι αναμενόμενες οι θέσεις των μέγιστων τάσεων (θλιπτικής και εφελκυστικής). Προφανώς και οι δύο μέγιστες τάσεις στο τέλος επιβολής της φόρτισης έχουν υπερβεί το όριο διαρροής του υλικού που ορίστηκε $\sigma_{yield}=245MPa$.

Στη συνέχεια θα ήταν καλό να φανεί η κατά το πλάτος διακύμανση των τάσεων στο κατάστρωμα και τον πυθμένα αντίστοιχα σε δύο διαφορετικές στιγμές. Αφενός στη μέγιστη επιβαλλόμενη περιστροφή και αφετέρου κατά τη στιγμή όπου ασκείται η μέγιστη ροπή στην κατασκευή. Η ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας το μέγεθος της συνολικής δύναμης στη διατομή.



Διάγραμμα 2.5.10 Διακύμανση των συνολικών δυνάμεων κατά το πλάτος της κατασκευής στη μέση τομή του καταστρώματος (μπλε καμπύλη) και του πυθμένα (κόκκινη καμπύλη) τη στιγμή όπου εφαρμόζεται η μέγιστη αντιδρώσα ροπή



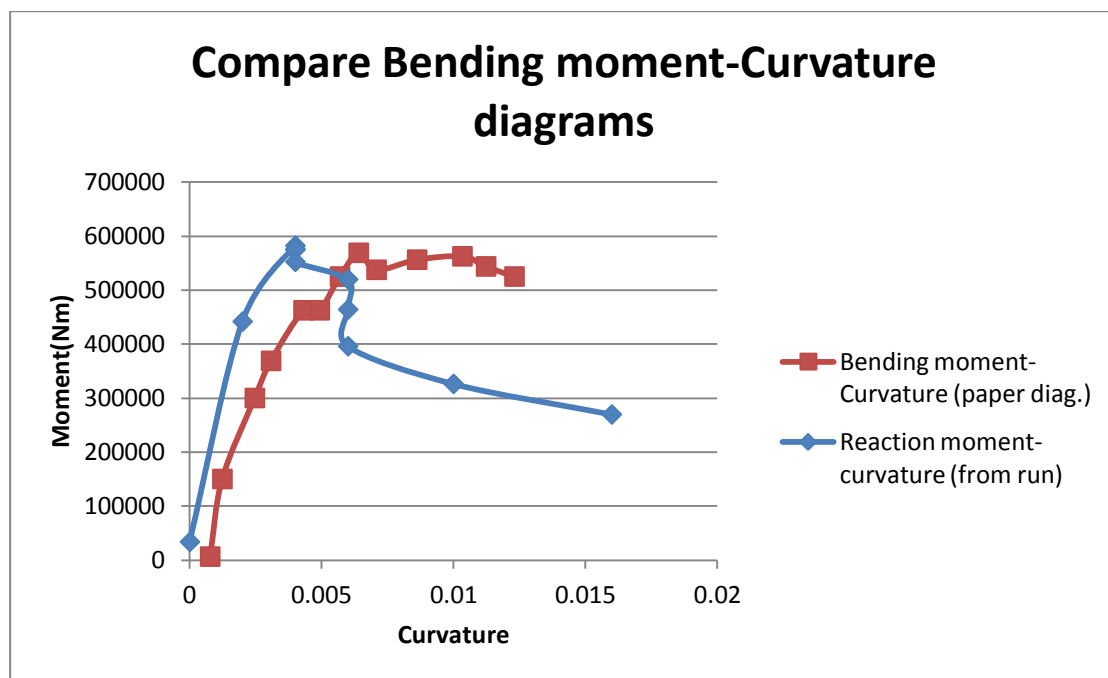
Διάγραμμα 2.5.11 Διακύμανση των συνολικών δυνάμεων κατά το πλάτος της κατασκευής στη μέση τομή του καταστρώματος (κόκκινη καμπύλη) και του πυθμένα (μπλε καμπύλη) στο τέλος της ανάλυσης

Στα προηγούμενα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται οι συνολικές δυνάμεις σε *Newton* που εφαρμόζονται κατά το πλάτος στη μέση τομή του καταστρώματος και του πυθμένα της κατασκευής σε δύο διαφορετικές στιγμές. Στο μεν πρώτο διάγραμμα αναφερόμαστε στο τέλος της ανάλυσης ενώ στο δεύτερο στη στιγμή όπου εμφανίζεται η μέγιστη αντιδρώσα καμπτική ροπή. Στην πρώτη περίπτωση παρατηρούμε ομοιόμορφες εφελκυστικές δυνάμεις στον πυθμένα με μία μικρή διακύμανση περί τα 500kN με μία τάση αύξησης προς τα άκρα της κατασκευής, ενώ στο κατάστρωμα υπάρχει μία έντονη διακύμανση θλιπτικών αλλά και εφελκυστικών δυνάμεων η οποία παίρνει τη μέγιστη τιμή της στα άκρα της κατασκευής όπου έχουμε θλιπτική δύναμη μέτρου 1000kN. Αν θυμηθούμε την εικόνα του καταστρώματος στα άκρα του (βλ. σελ. 79) τότε τα παραπάνω αποτελέσματα είναι λογικά και αναμενόμενα. Στη δεύτερη περίπτωση παρατηρούμε μία εμφανώς πιο εξομαλυμένη μορφή τόσο στον πυθμένα όσο και στο κατάστρωμα. Συγκεκριμένα στον πυθμένα υπάρχει σταθερή σχεδόν τιμή σε όλο το πλάτος περί τα 1000kN, ενώ στο κατάστρωμα απομακρυνόμενοι από τα άκρα υπάρχει ελάττωση από τα 1000kN στα 500kN περίπου. Μπορούν να εντοπιστούν διαφορές μεταξύ των δύο αυτών στιγμών όσον αφορά την κατανομή των ολικών δυνάμεων στη διατομή. Μια πρώτη είναι η ελάττωσή τους στην περιοχή του πυθμένα περίπου κατά 50%. Παρότι ο πυθμένας εφελκύεται και δεν επηρεάζει την κατάρρευση της κατασκευής είναι ενδεικτική η μείωση για την ελάττωση της ικανότητάς του κατά την παραλαβή φορτίων. Στο κατάστρωμα δε, το κοινό μεταξύ των δύο διαγραμμάτων είναι ότι η μέγιστη δύναμη παραμένει πάντοτε στα άκρα και δεν μεταβάλλεται η τιμή της. Από την άλλη παρατηρείται έντονη αλλαγή στη μορφή της διακύμανσης των δυνάμεων κατά το πλάτος, οι οποίες σε ορισμένα τμήματα παρουσιάζονται και ως εφελκυστικές.

2,6 Συμπεράσματα- Παρατηρήσεις

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων σε σχέση με το πραγματικό πείραμα, πρώτο ζήτημα το οποίο εξετάστηκε ήταν η σύγκριση των διαγραμμάτων *καμπτικής ροπής – καμπυλότητας*. Για το συγκεκριμένο διάγραμμα που προέκυψε από τη μοντελοποίηση που αναπτύξαμε παραπάνω ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

Με τον τρόπο που εξηγήσαμε προηγουμένως (βλ. σελ. 80-82) δημιουργήσαμε Paths στον πυθμένα, τα οποία απεικονίζουν τη διακύμανση της κάθετης μετατόπισης σε σχέση με το μήκος της κατασκευής (βέλος κάμψης) σε διάφορες στιγμές της επιβολής περιστροφής. Αυτές οι καμπύλες έχουν παραβολοειδή μορφή και μπορούν να απεικονιστούν με ένα πολώνυμο δευτέρας τάξεως ως προς το μήκος x . Παραγωγίζοντας τέλος, την εξίσωση αυτή δύο φορές προκύπτει η καμπυλότητα, διότι ως γνωστόν $\kappa = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$, ένας σταθερός αριθμός σε όλο το μήκος της κατασκευής. Ακολουθεί το κοινό διάγραμμα *καμπτικής ροπής - καμπυλότητας* του πραγματικού πειράματος (προέκυψε από ψηφιοποίηση) και της μοντελοποίησης.



Διάγραμμα 2.6.1 Κοινό διάγραμμα καμπτικής ροπής – καμπυλότητας

Από τα παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι υπάρχει συμφωνία στη μέγιστη καμπτική ροπή που μπορεί να παραλάβει η κατασκευή ωστόσο υπάρχουν ορισμένες αξιοσημείωτες διαφορές τις οποίες και θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε.

1. Στην καμπύλη που προέκυψε από τη μοντελοποίηση παρατηρείται απότομη κατάρρευση μετά από καμπυλότητα $\kappa = 0,006 \frac{1}{m}$ σε σχέση με την καμπύλη που προέκυψε από το πραγματικό πείραμα. Αυτό είναι πιθανόν να προέκυψε

από το ότι η κατασκευή μας δεν είχε αγκώνες (brackets) ή εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου επιβολής της περιστροφής. Για την τελευταία περίπτωση δεν υπήρχε άλλη δυνατότητα καθότι τα λεπτομερή σχέδια του μηχανισμού φόρτισης μας εστάλησαν καθυστερημένα.

2. Τα σημεία εκκίνησης των διαγραμμάτων δεν είναι ίδια και αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το ότι στην πειραματική κατασκευή έχει επιβληθεί κάθετη μετατόπιση 0,9mm λόγω του βάρους του εξοπλισμού, ενώ επίσης έχουν προηγηθεί δύο κύκλοι φόρτισης για τη χαλάρωση των τάσεων συγκόλλησης.

Τελικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι παρότι τα στοιχεία που είχαμε από το άρθρο ήταν ελλιπή για την πραγματοποίηση μίας ολοκληρωμένης μοντελοποίησης και απόλυτα σύμφωνη με το πραγματικό πείραμα, έχουμε τη δυνατότητα σωστής εκτίμησης της μέγιστης αντοχής μίας κατασκευής. **Όσο περισσότερο θα προσεγγίζουμε στην πραγματική διαδικασία του πειράματος και στις τεχνικές του λεπτομέρειες, τόσο θα έχουμε ορθότερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων.**

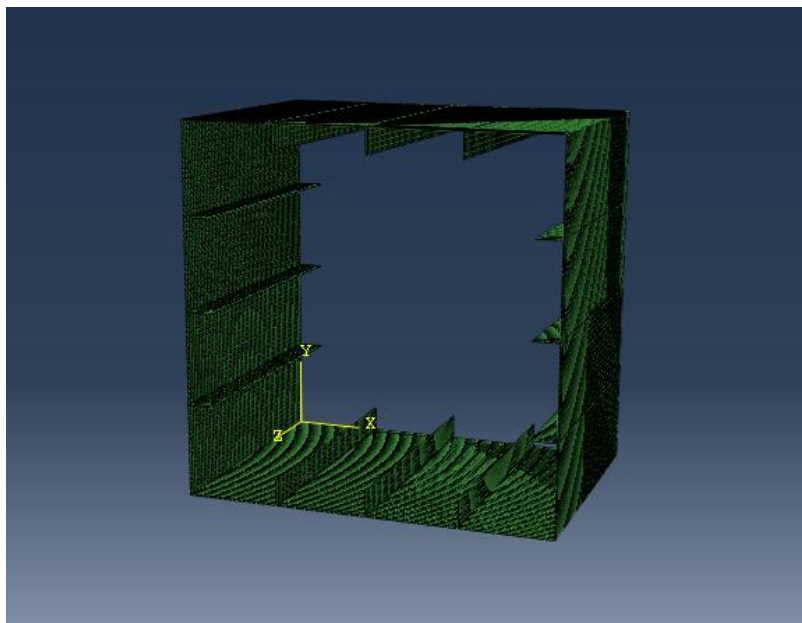
2.7 Μοντελοποίηση-Παρουσίαση αποτελεσμάτων πειραμάτων δεύτερου άρθρου Hsin-Chuan Kuo et al

Στο παρόν κεφάλαιο δεν θα αναπτύξουμε λεπτομερώς τη διαδικασία μοντελοποίησης καθότι είναι ίδια με αυτή που εφαρμόστηκε για τη μοντελοποίηση του πειράματος του πρώτου άρθρου και περιγράφηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 2,3. Εδώ απλώς θα αναφέρουμε επιγραμματικά τις ιδιότητες των υλικών της διατομής, το είδος των στοιχείων του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκαν και τις διαστάσεις του πλέγματος. Η παρουσίαση αυτή θα γίνει για τα τέσσερα είδη διατομών (MSTanker, MSDoublebottom, MSBulkcarrier, MSContainership) σε κατάσταση φόρτισης sagging και hogging. Τέλος, θα γίνει η σύγκριση με τα αποτελέσματα του άρθρου μετά από ένα σύντομο σχολιασμό τους. Όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως (βλ.σελ.31) το μήκος είναι κοινό και για τα τέσσερα είδη των διατομών και ίσο με 540mm χωρίς την παρουσία νομέων.

2.7.1 Διατομή Tanker (MSTanker)

Όπως παρατηρούμε από τη σελίδα 30 σχήμα (a) η διατομή του δεξαμενόπλοιου αποτελείται από ελάσματα $D=B=720\text{mm}$ με τρία ενισχυτικά σε κάθε πλευρά σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, ύψους $h=50\text{mm}$. Για τη συγκεκριμένη διατομή έγιναν δύο μοντελοποιήσεις η μεν πρώτη με καθολική διατομή $t_1=3,05\text{mm}$ (MST-3) και η δεύτερη $t_2=4,35\text{mm}$ (MST-4).

Παρακάτω παρατίθεται η εικόνα της διατομής MST υλοποιημένη στο λογισμικό ABAQUS/cae.



Εικόνα 2.7.1 Μέση τομή δεξαμενοπλοίου (MST)

Ιδιότητες υλικών και διατομών

Για τις διατομές MST-3, MST-4 όπως ορίστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ορίστηκαν οι παρακάτω ιδιότητες υλικού.

MST-3:

t(mm) thickness of plate	σ_y (kg/mm ²)	E(kg/mm ²)	Poisson's ration
3,05	29,3	$2,11 \times 10^4$	0,277

MST-4:

t(mm) thickness of plate	σ_y (kg/mm ²)	E(kg/mm ²)	Poisson's ration
4,35	26,9	$2,12 \times 10^4$	0,281

Για την εφαρμογή των παραπάνω ιδιοτήτων στη διατομή έγινε η ίδια διαδικασία η οποία περιγράφεται στις σελίδες 52-56, δύο φορές που αντιστοιχούν στις δύο διαφορετικές διατομές MST-3, MST-4.

Χαρακτηριστικά – γεωμετρία πλέγματος

Στην περίπτωση των απλών διατομών που συζητάμε στο παρόν κεφάλαιο, χρησιμοποιήσαμε τα γνωστά τετραεδρικά στοιχεία S4R (Reduced Integration) στα οποία έχουμε αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2,3 (βλ. σελ. 61-63). Η τοποθέτηση των ακραίων σημείων στις ακμές της κατασκευής και των ενισχυτικών για τη δημιουργία του πλέγματος έγινε σε ίσες αποστάσεις $d=0.010m$ (global seeding). Έτσι λοιπόν τα στοιχεία που προέκυψαν είναι τετραγωνικά πλευράς $a=0.010m$.

Η διαδικασία φόρτισης που ακολουθήθηκε (rotation control) είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.3 (βλ. σελ. 71-74) οπότε κρίνεται σκόπιμο να μην αναλυθεί ξανά σε αυτό το εδάφιο. Η εικόνες της τελικά παραμορφωμένης κατάστασης της διατομής σε sagging και hogging καθώς και οι μέγιστες ροπές που επιτεύχθηκαν δίδονται στην αμέσως επόμενη ενότητα. Τέλος να αναφέρουμε πως ως αλγόριθμοι στατικής επίλυσης χρησιμοποιήθηκαν οι *Newton* και *Riks* ανάλογα με τις δυσκολίες που εμφανίζονταν κατά τη διαδικασία επίλυσης.

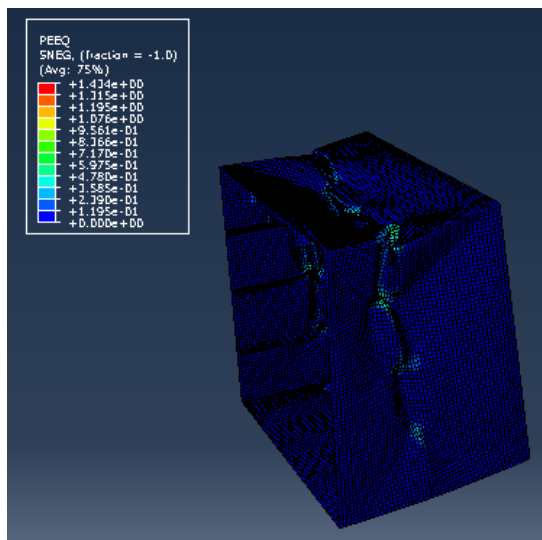
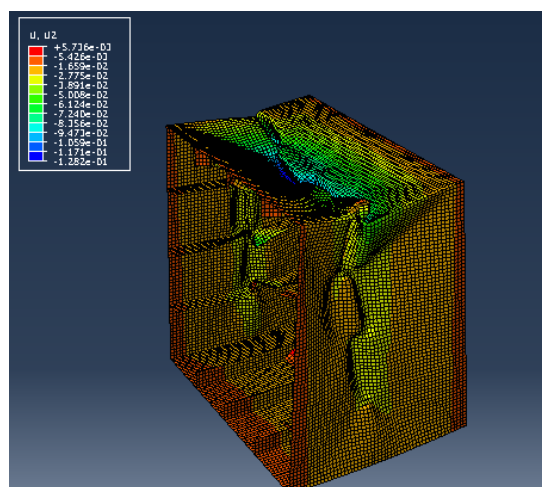
Αποτελέσματα ανάλυσης διατομών MST-3, MST-4

MST-3: Sagging/Hogging

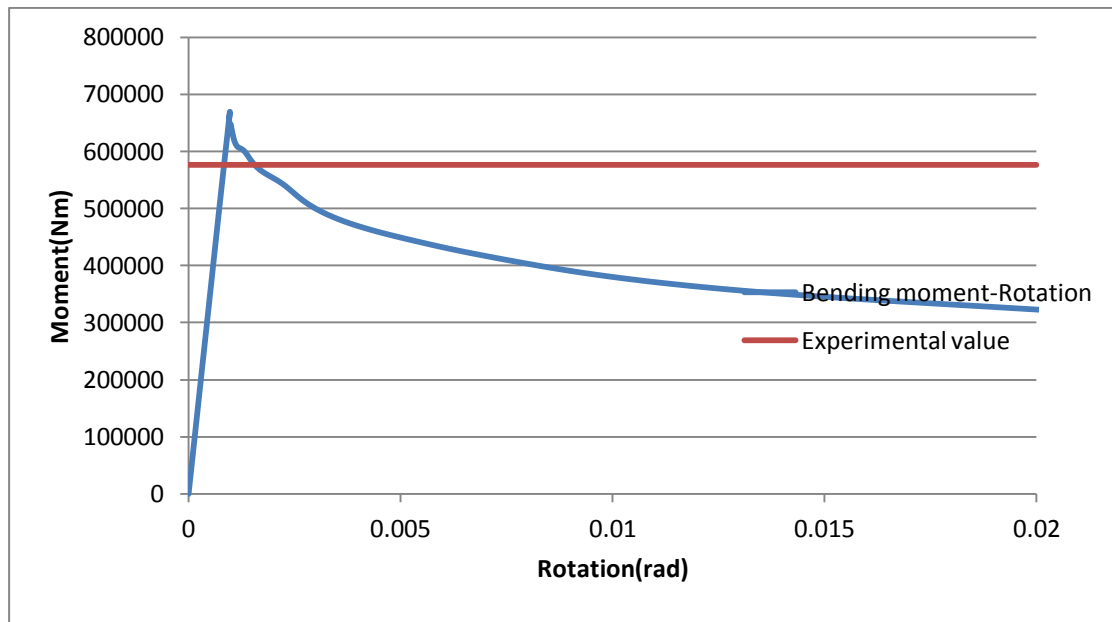
$M_{\max}=670.02\text{kNm}$

$\theta_{M=M_{\max}}=0,000975\text{rad}$

Θα δίνονται εικόνες για την κάθε διατομή στην τελική, παραμορφωμένη κατάσταση της.



Εικόνες 2.7.2 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MST-3 σε κατάσταση sagging



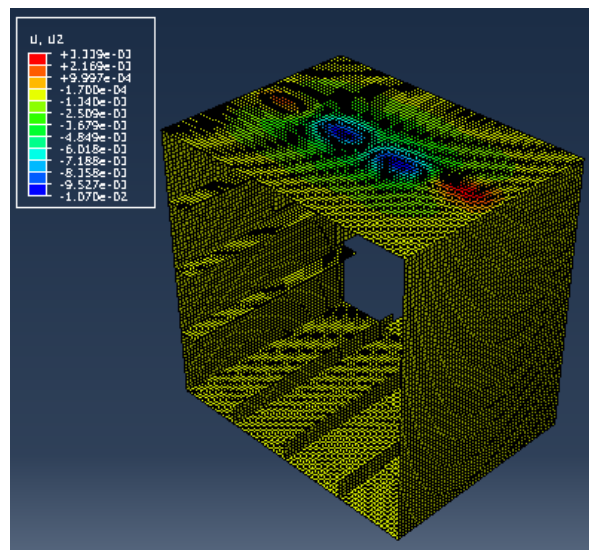
Διάγραμμα 2.7.1 Σχέση καμπτικής ροπής – περιστροφής για τη διατομή MST-3

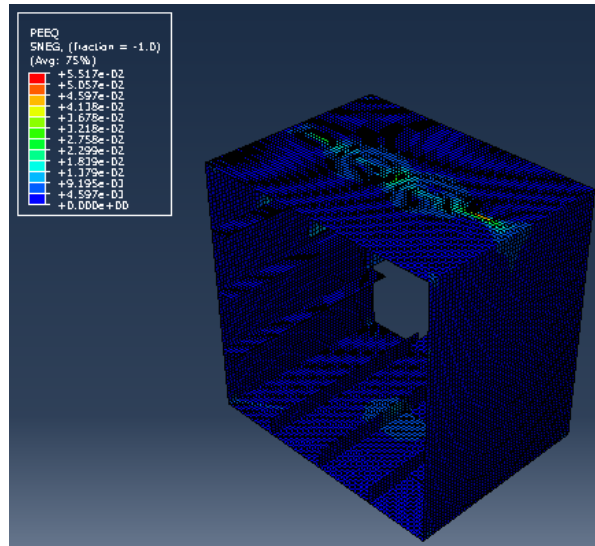
Λόγω συμμετρικής διατομής παραλείπονται οι εικόνες για την περίπτωση hogging αφού προκύπτουν ίδιες μόνο που σε αυτή την περίπτωση θα έχουμε θλίψη του πυθμένα.

MST-4: Sagging/Hogging

$$M_{\max}=1031.94\text{kNm}$$

$$\theta_{M=M_{\max}}=0,001511\text{rad}$$



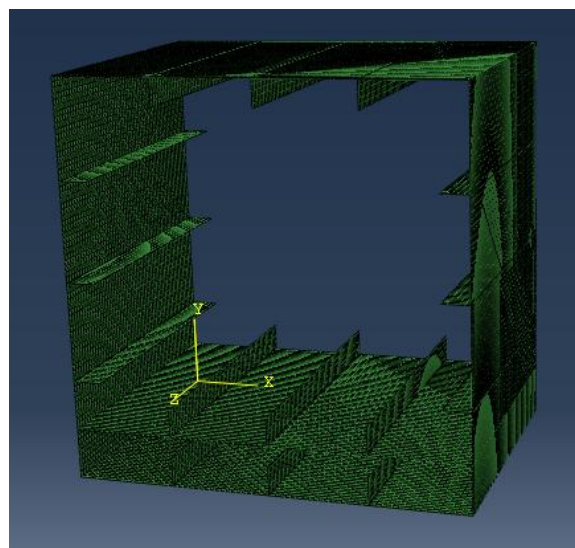


Εικόνες 2.7.3 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MST-4 σε κατάσταση sagging

Για τον ίδιο λόγο που αναφέραμε στην αρχή της προηγούμενης σελίδας δεν παραθέτουμε τις εικόνες της τελικής παραμορφωμένης κατάστασης της διατομής σε hogging.

2.7.2 Διατομή Tanker με διπύθμενο (MSD)

Η διατομή αυτή δεν διαφέρει σε κάτι άλλο από τη διατομή που μόλις εξετάσαμε στην ενότητα 2,6,1 παρά μόνο στο γεγονός ότι έχει ένα κατάστρωμα εσωτερικού πυθμένα σε απόσταση $d=90\text{mm}$ από τον εξωτερικό πυθμένα με τρία επιπλέον διαμήκη ενισχυτικά σε αυτό (βλ. σχήμα b σελ.30). Οι διαστάσεις της διατομής (μήκος, πλάτος, κοίλο) παραμένουν ίδιες με πριν όπως και το ύψος των ενισχυτικών. Η διατομή υλοποιημένη στο λογισμικό ABAQUS.cae φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Εικόνα 2.7.4 Μέση τομή δεξαμενοπλοίου με διπύθμενο (MSD)

Δεν θα σταθούμε ιδιαίτερα στα χαρακτηριστικά και τη γεωμετρία του πλέγματος στο παρόν αλλά και στα επόμενα μοντέλα αφού ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με αυτή για το πλέγμα των διατομών MST-3, MST-4 (βλ.σελ.97/“Χαρακτηριστικά-γεωμετρία πλέγματος”).

Ιδιότητες υλικών και διατομών

Σε όλη τη διατομή (ελάσματα και ενισχυτικά) οι ιδιότητες της διατομής ορίστηκαν οι παρακάτω.

t(mm) thickness of plate	$\sigma_y(\text{kg/mm}^2)$	E(kg/mm ²)	Poisson's ration
3,05	29,3	$2,11 \times 10^4$	0,277

Αποτελέσματα ανάλυσης διατομής MSD

MSD: Sagging

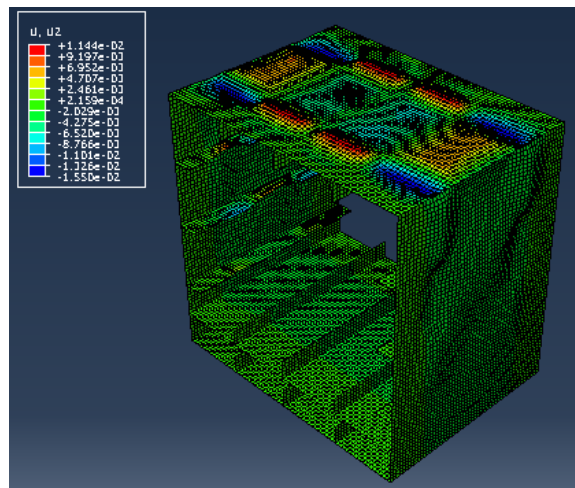
$M_{\max}=727.40\text{kNm}$

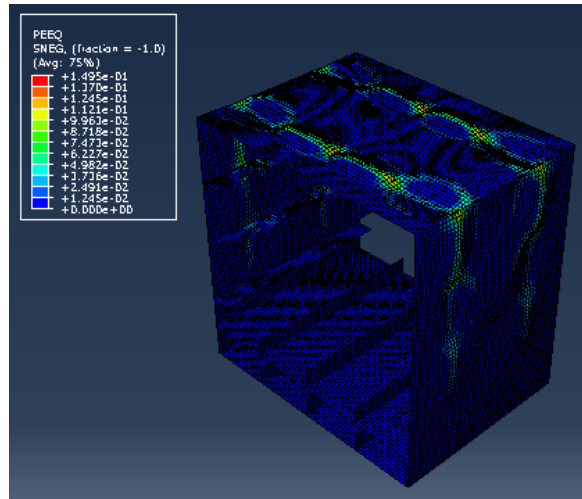
$\theta_{M=M_{\max}}=0.000914\text{rad}$

MSD: Hogging

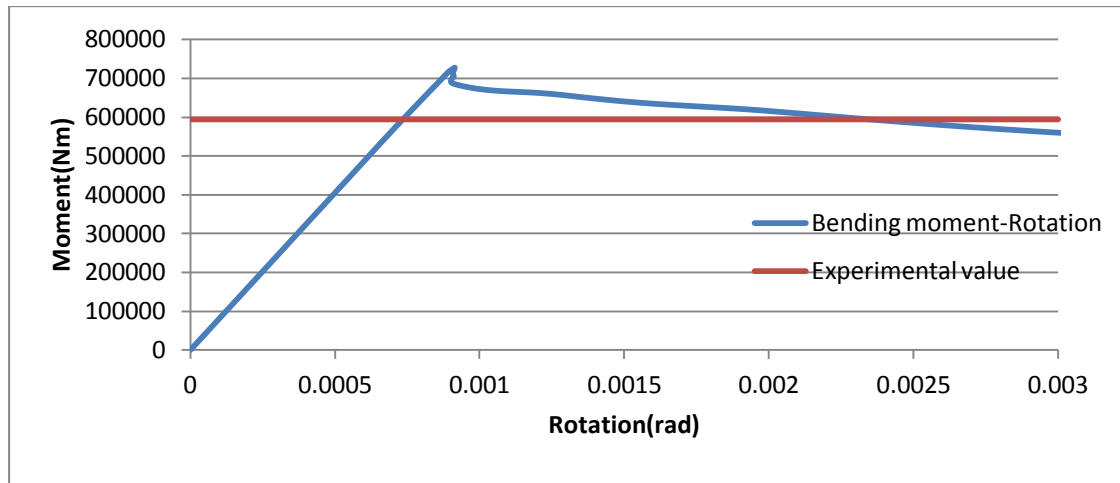
$M_{\max}=886.81\text{kNm}$

$\theta_{M=M_{\max}}=0.001763\text{rad}$

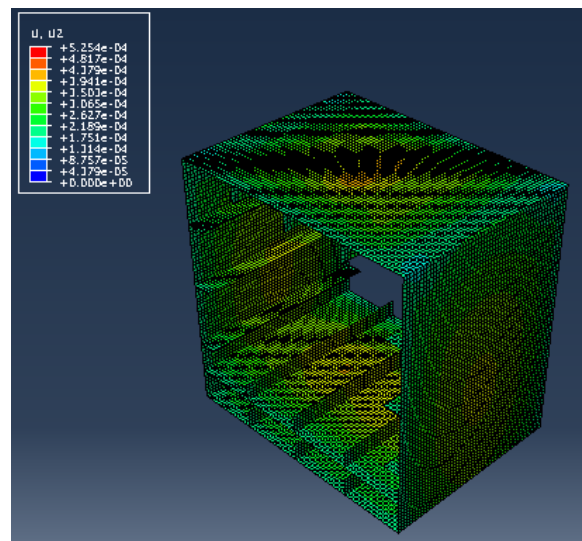




Εικόνες 2.7.5 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MSD σε κατάσταση sagging



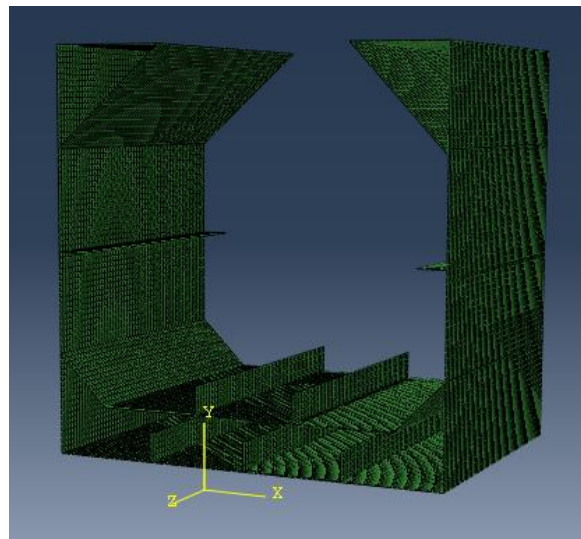
Διάγραμμα 2.7.2 Σχέση καμπτικής ροπής – περιστροφής για τη διατομή MSD σε κατάσταση sagging



Εικόνα 2.7.6 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση για τη διατομή MSD σε κατάσταση hogging

2.7.3 Διατομή Bulk Carrier (MSB)

Η διατομή ενός πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην προσιδιάζει στη διατομή του σχήματος (c) της σελίδας 30. Ο εσωτερικός πυθμένας είναι κεκλιμένος κοντά στα πλαϊνά ελάσματα, ενώ υπάρχουν δύο κεκλιμένες διαμήκεις φρακτές στο κοίλο οι οποίες οριοθετούν τις άνω δεξαμενές έρματος (top wing tanks). Οι συντεταγμένες των ανυψώσεων του πυθμένα και των κλίσεων των φρακτών μπορούν να εξαχθούν εύκολα από το εν λόγω σχήμα. Προκύπτει συνεπώς η διατομή που φαίνεται αμέσως παρακάτω.



Εικόνα 2.7.7 Μέση τομή πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (MSB)

Ιδιότητες υλικών και διατομών

Σε αυτή τη μοντελοποίηση όπως και στην προηγούμενη (MSD) σε όλες τις διατομές της κατασκευής (ελάσματα και ενισχυτικά) ορίστηκε το ίδιο υλικό και πάχος διατομής.

t(mm) thickness of plate	$\sigma_y(\text{kg/mm}^2)$	E(kg/mm ²)	Poisson's ration
3,05	29,3	2,11x10 ⁴	0,277

Αποτελέσματα ανάλυσης διατομής MSB

MSB: Sagging

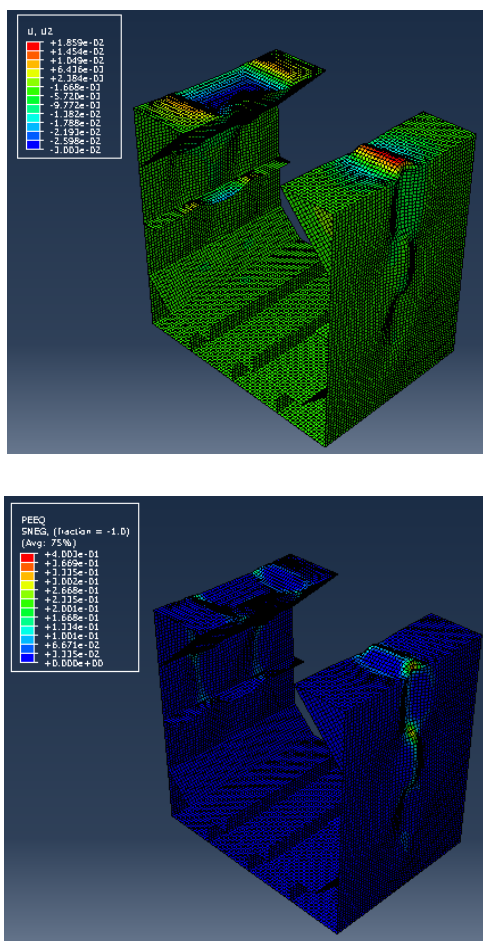
$$M_{\max}=610.14\text{kNm}$$

$$\theta_{M=M_{\max}}=0.000889\text{rad}$$

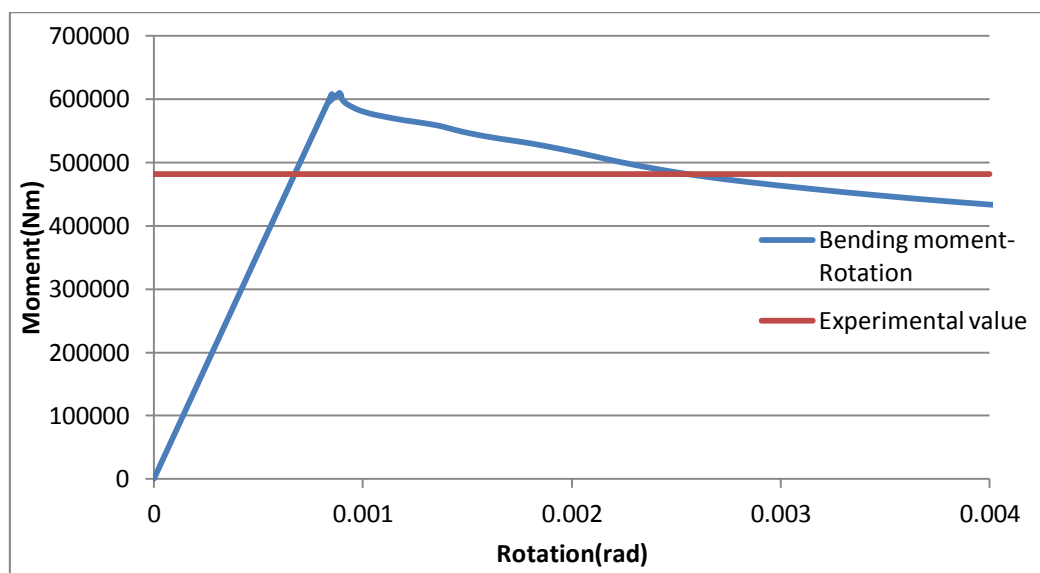
MSB: Hogging

$$M_{\max}=797.61\text{kNm}$$

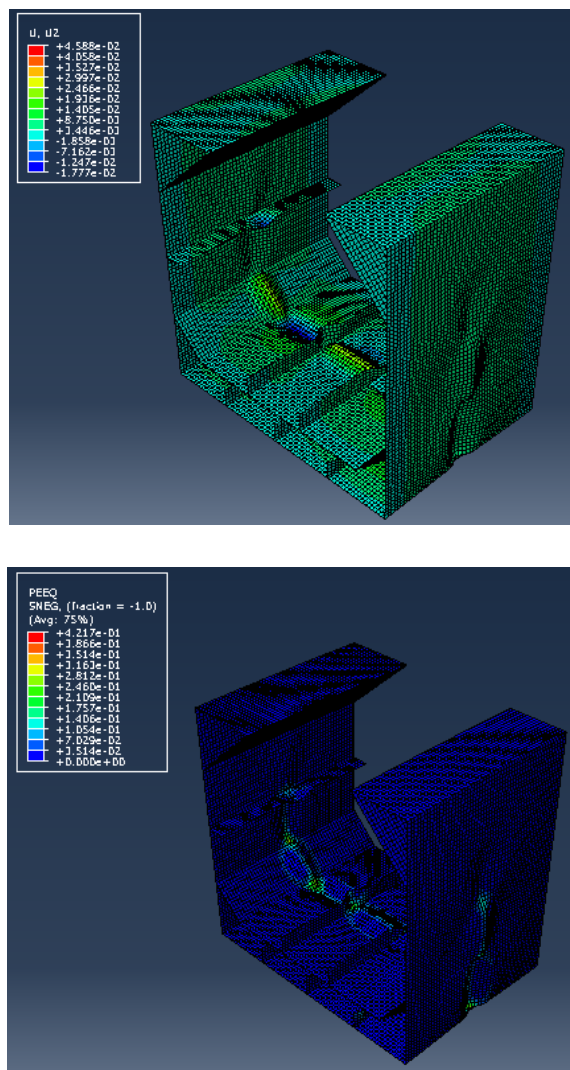
$$\theta_{M=M_{\max}}=0.001513\text{rad}$$



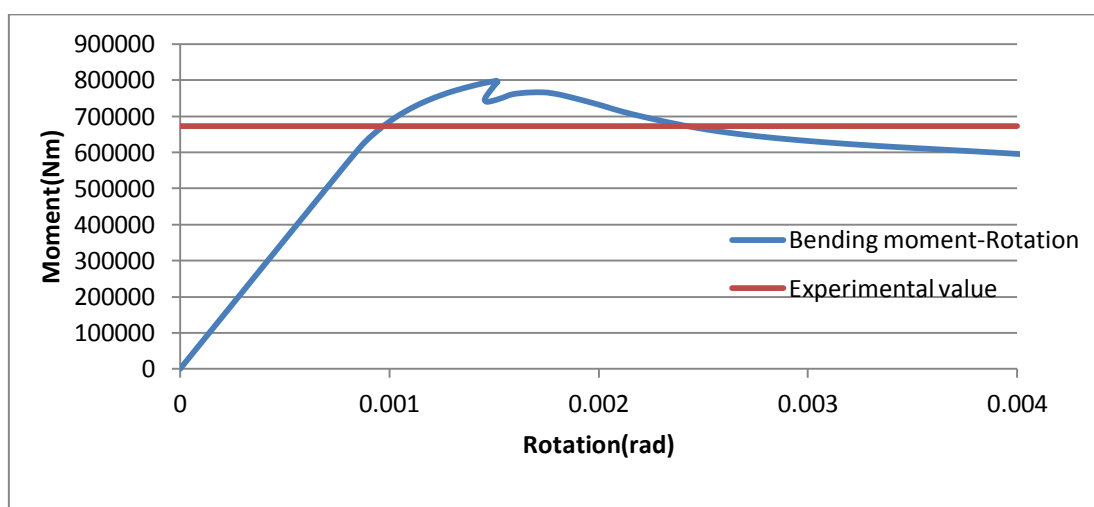
Εικόνες 2.7.8 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MSB σε κατάσταση sagging



Διάγραμμα 2.7.3 Σχέση καμπτικής ροπής – περιστροφής για τη διατομή MSB σε κατάσταση sagging



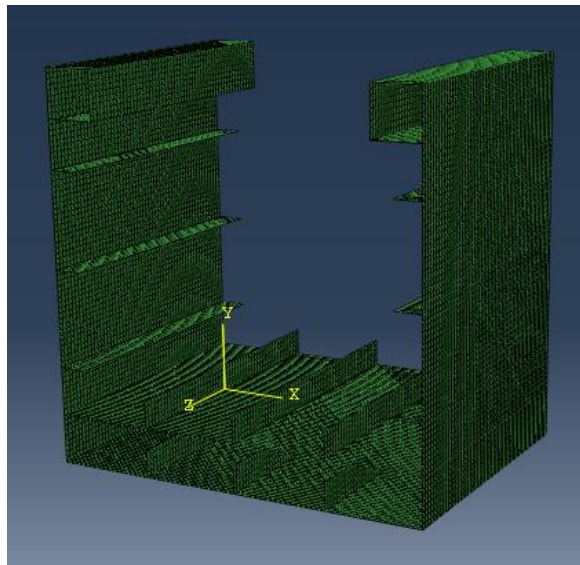
Εικόνες 2.7.9 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MSB σε κατάσταση hogging



Διάγραμμα 2.7.4 Σχέση καμπτικής ροπής – περιστροφής για τη διατομή MSB σε κατάσταση hogging

2.7.4 Διατομή Containership (MSC)

Η διατομή ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων περιγράφεται από το σχήμα (d) της σελίδας 30. Υπάρχει και εδώ εσωτερικός πυθμένας ενώ το κατάστρωμα διακόπτεται για να δημιουργηθεί χώρος για την είσοδο του container. Σχηματίζεται δε εσοχή για να μην αφήνεται διάδοος διαφυγής του container σε περίπτωση απότομης κλίσης του πλοίου. Οι εσοχές αυτές λόγω έλλειψης μεγάλου τμήματος του καταστρώματος αλλά και για το λόγο που αναφέραμε μόλις προηγουμένως πρέπει να είναι ενισχυμένες σε σχέση με την υπόλοιπη διατομή. Η διατομή όπως υλοποιήθηκε στο λογισμικό ABAQUS.cae φαίνεται στη συνέχεια.



Εικόνα 2.7.10 Μέση τομή Containership (MSC)

Ιδιότητες υλικών και διατομών

Όπως αναφέραμε παραπάνω στην περίπτωση αυτή δημιουργήθηκαν δύο διατομές. Η μία για τα ελάσματα των δύο τετραγωνικών εσοχών και η άλλη για την υπόλοιπη διατομή μαζί με τα ενισχυτικά. Οι ιδιότητες των υλικών και τα πάχη των διατομών δίδονται παρακάτω.

Για τις τετραγωνικές εσοχές:

t(mm) thickness of plate	$\sigma_y(\text{kg/mm}^2)$	E(kg/mm ²)	Poisson's ration
5,60	32,1	$2,11 \times 10^4$	0,289

Για την υπόλοιπη μέση τομή:

t(mm) thickness of plate	$\sigma_y(\text{kg/mm}^2)$	E(kg/mm ²)	Poisson's ration
3,05	29,3	$2,11 \times 10^4$	0,277

Αποτελέσματα ανάλυσης διατομής MSC

MSC: Sagging

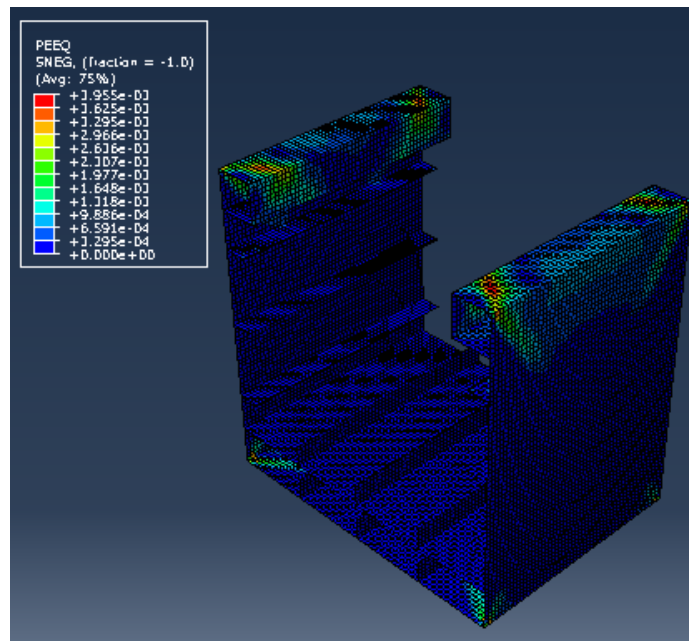
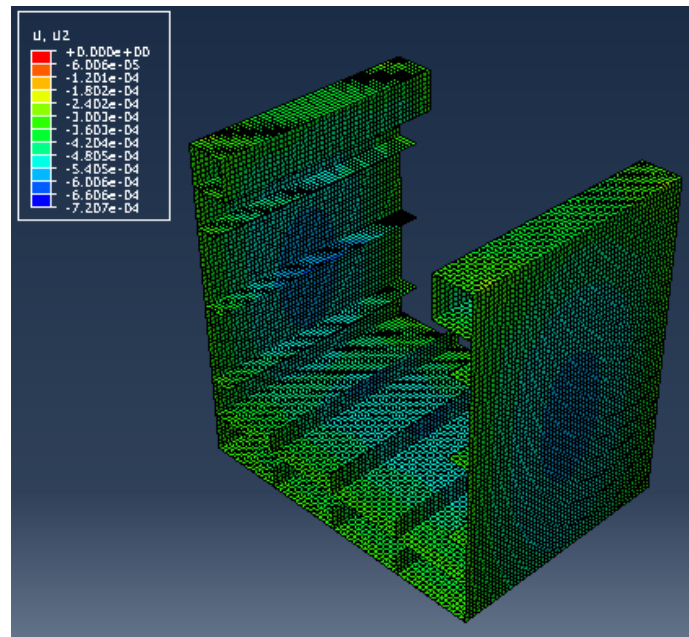
$M_{\max}=1020.0\text{kNm}$

$\theta_{M=M_{\max}}=0.001607\text{rad}$

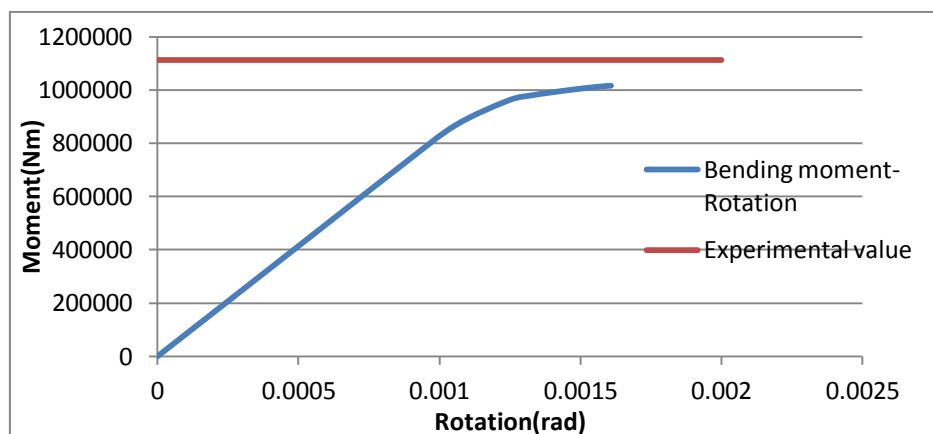
MSC: Hogging

$M_{\max}=937.40\text{kNm}$

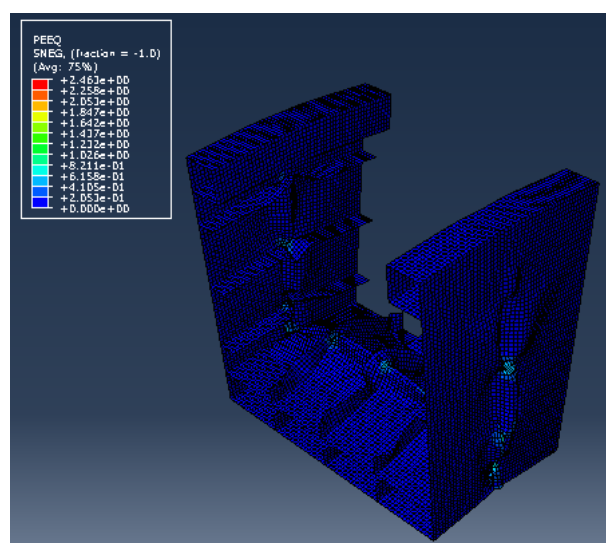
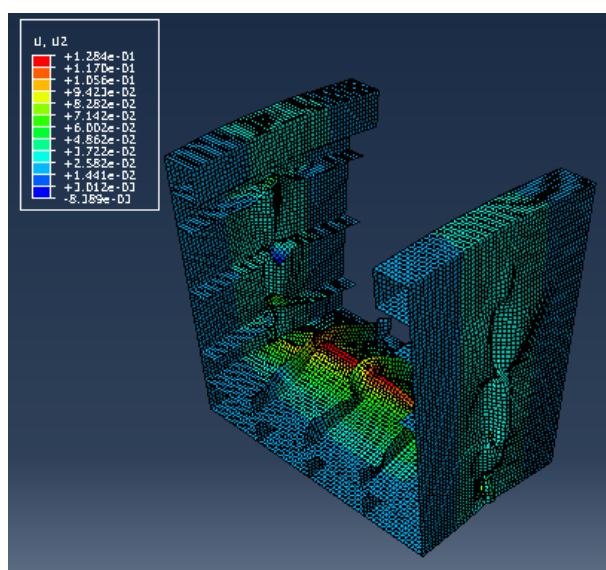
$\theta_{M=M_{\max}}=0.001403\text{rad}$



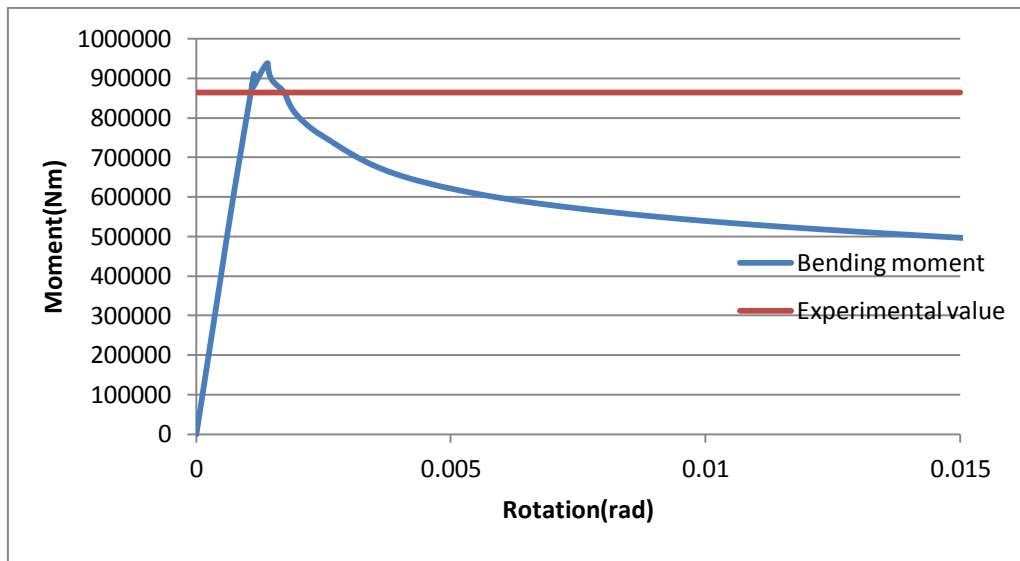
Εικόνες 2.7.11 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MSC σε κατάσταση sagging



Διάγραμμα 2.7.5 Σχέση καμπτικής ροπής – περιστροφής για τη διατομή MSC σε κατάσταση sagging



Εικόνες 2.7.12 Μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση (πάνω) και ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση (κάτω) για τη διατομή MSC σε κατάσταση hogging



Διάγραμμα 2.7.6 Σχέση καμπτικής ροπής – περιστροφής για τη διατομή MSC σε κατάσταση hogging

2.8 Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Από τα αποτελέσματα των τεσσάρων διαφορετικών μοντελοποιήσεων που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη ενότητα για τις περιπτώσεις των διατομών πλοίου μεταφοράς ξηρού φορτίου χύδην (MSB) και δεξαμενόπλοιου με εσωτερικό πυθμένα (MSD) παρατηρούμε μεγαλύτερη μέγιστη καμπτική ροπή (μέγιστη αντοχή) σε κατάσταση hogging και σε μεγαλύτερη γωνία περιστροφής αφού με την παρουσία του διπύθμενου ενισχύεται η περιοχή του πυθμένα σε θλίψη. Στην περίπτωση της διατομής δεξαμενόπλοιου χωρίς εσωτερικό πυθμένα (MST) δεν παρατηρείται διαφορά μεταξύ των μέγιστων ροπών σε sagging και hogging λόγω συμμετρίας της διατομής. Τέλος, στην περίπτωση της διατομής πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (MSC) παρατηρείται ελαφρώς αυξημένη μέγιστη καμπτική ροπή σε κατάσταση sagging σε σχέση με την αντίστοιχη μέγιστη ροπή σε κατάσταση hogging στις ίδιες περίπου γωνίες περιστροφής και το γεγονός αυτό εκτιμάται στο ότι οι τετραγωνικές εσοχές του καταστρώματος αποτελούνται από ενισχυμένες διατομές σε σχέση με την υπόλοιπη κατασκευή. Για να γίνουν οι συγκρίσεις και με τα αποτελέσματα των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν στη δημοσίευση παραθέτουμε τον παρακάτω συγκεντρωτικό πίνακα.

Ονομασία διατομής	Πειραματικά δεδομένα[ton-m]	Beghin[ton-m]	Present[ton-m]	Beghin/Experiment	Present/Experiment	Dissertation [ton-m]	Dissertation/Experiment
MST-1 sag/hog	94.5	110	109.95	1.164	1.163	105.2	1.113
MST-2 sag/hog	58.8	58.9	58.97	1.001	1.003	68.3	1.162
MSD-sagging	60.5	97.3	97.96	1.608	1.619	74.15	1.226
MSD-hogging	85.5	97.3	97.96	1.138	1.146	90.4	1.057
MSB-sagging	49.1	86.6	88.03	1.764	1.793	62.2	1.267
MSB-hogging	68.5	86.6	88.03	1.264	1.285	81.31	1.187
MSC-sagging	113.5	104.2	103.9	.918	.915	103.98	.916
MSC-hogging	88	104.2	103.9	1.184	1.181	95.56	1.086

Πίνακας 2.8.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων της δημοσίευσης και της παρούσας εργασίας τα οποία είναι σημειωμένα με κίτρινο χρώμα

Στον πίνακα της προηγούμενης σελίδας φαίνεται ξεκάθαρα ότι η μεθοδολογία που εφαρμόσαμε στην παρούσα εργασία παράγει ακριβέστερα αποτελέσματα στη συντριπτική πλειοψηφία των διατομών και των καταστάσεων φόρτισης σε σχέση με τα πειραματικά. Επίσης, τα αριθμητικά δεδομένα βρίσκονται σε αρκετά καλή σύγκλιση με τα πειραματικά οπότε μία εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να δώσει μία καλή εκτίμηση της μέγιστης αντοχής μίας διατομής. Ωστόσο, το πείραμα ως στοιχείο της ερευνητικής διαδικασίας και μελέτης είναι πάντοτε σημαντικό διότι επιπλέον προκύπτουν οι πραγματικές μορφές κατάρρευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Μελέτη μέγιστης αντοχής μέσης τομής πλοίου με ρήγμα

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτύξουμε τα αποτελέσματα και τις παρατηρήσεις μας έπειτα από τη μοντελοποίηση της μέσης τομής πλοίου που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2,1 αυτή τη φορά ωστόσο με κάποιο ρήγμα (απώλεια διατομής) το οποίο προήλθε από μία υποθετική σύγκρουση με άλλο πλοίο. Στοιχεία του συγκεκριμένου ρήγματος καθώς και της τεχνικής που ακολουθήσαμε για τη δημιουργία του παραθέτουμε στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

3.1 Στοιχεία του ρήγματος στη μέση τομή

Το υποθετικό σενάριο το οποίο υλοποιήσαμε είναι η σύγκρουση μεταξύ της υπό μελέτης μέσης τομής και ενός πλοίου με γωνία κλίσης πρώραθεν $\varphi=30^\circ$. Η σύγκρουση με την υπό μελέτη μέση τομή έγινε στο πλευρικό της έλασμα κατά 40% καθ' ύψος έκταση από το κατάστρωμα και εισχώρηση του ρήγματος στο έλασμα καταστρώματος με γωνία $\varphi=30^\circ$. Η διαμήκης έκτασή του εντοπίζεται μεταξύ δύο διαδοχικών νομέων. Έτσι λοιπόν οι διαστάσεις του ρήγματος είναι οι εξής.

Ύψος ρήγματος: $d = 0.40 \cdot D = 0.40 \cdot 0.60 = 0.240m$

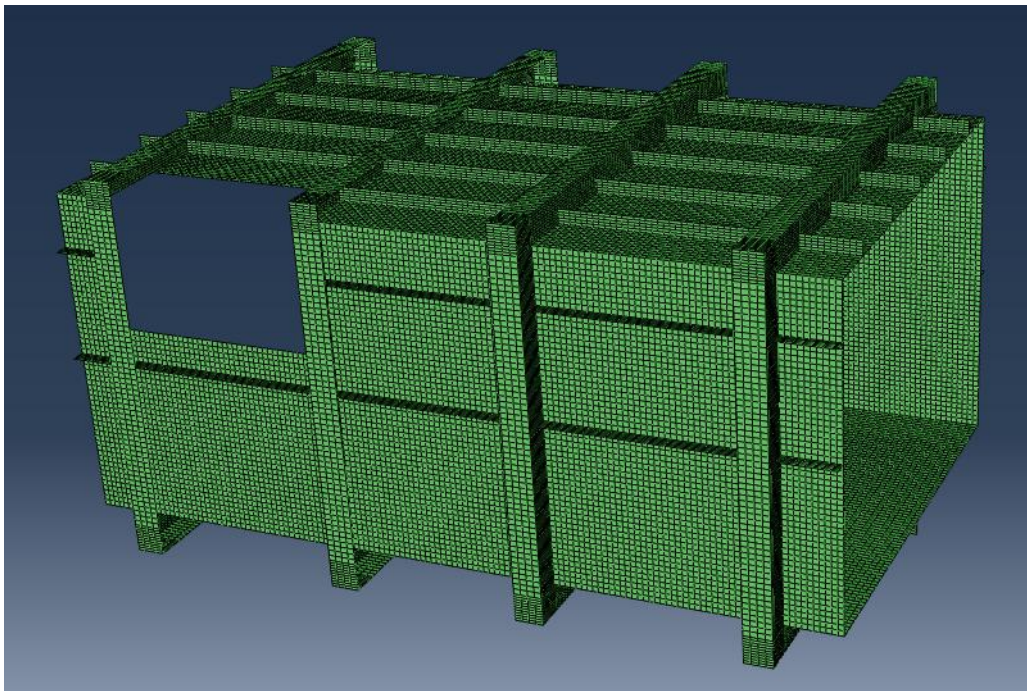
Έκταση ρήγματος: $l = 0.400m$

Εισχώρηση ρήγματος: $b = d \cdot \tan\theta = d \cdot \tan 30^\circ = 0.1386m \cong 0.14m$

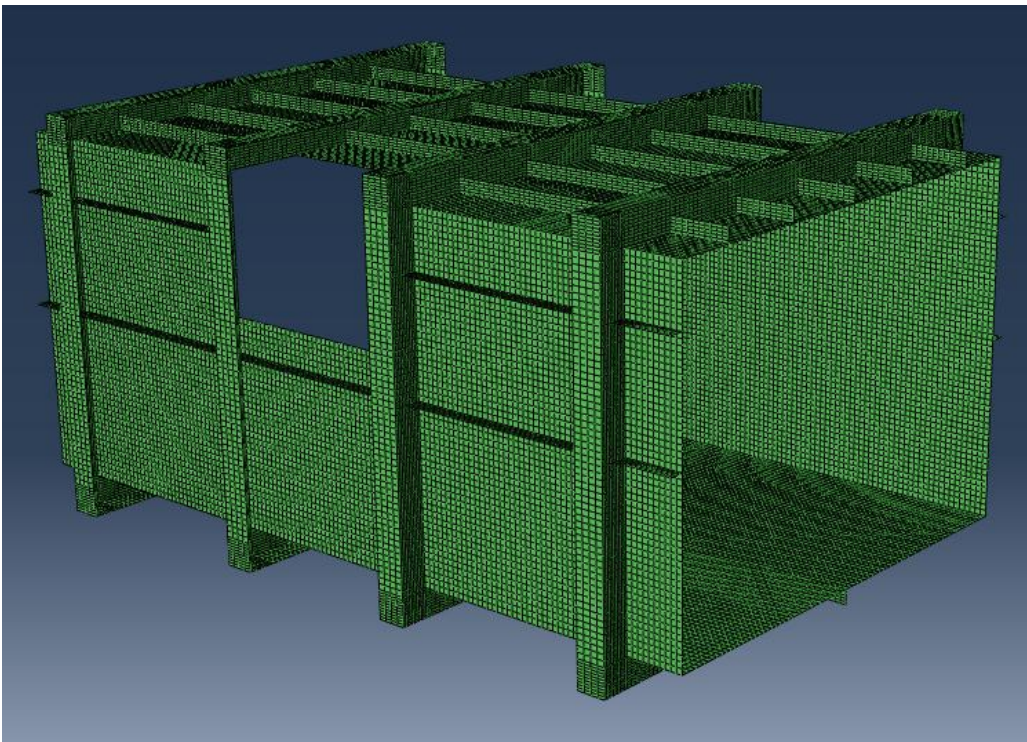
Τα σενάρια που μελετήθηκαν ήταν τα παρακάτω δύο.

- Ρήγμα στο κεντρικό τμήμα της υπό μελέτη μέσης τομής.
- Ρήγμα στο ακραίο τμήμα της υπό μελέτη μέσης τομής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειώσουμε ότι η μελέτη την οποία πραγματοποιήσαμε δεν αφορά το δυναμικό φαινόμενο της σύγκρουσης των δύο πλοίων αλλά την απομένουσα στατική αντοχή της μέσης τομής. Άρα το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και σε αυτή την περίπτωση είναι το ABAQUS/Standard και αλγόριθμος επίλυσης ο *Static, Riks*. Εικόνες της μέσης τομής στις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις ρήγματος δίδονται αμέσως παρακάτω.



Εικόνα 3.1.1 Μέση τομή πλοίου με ρήγμα στο ακραίο τμήμα της μεταξύ δύο διαδοχικών νομέων



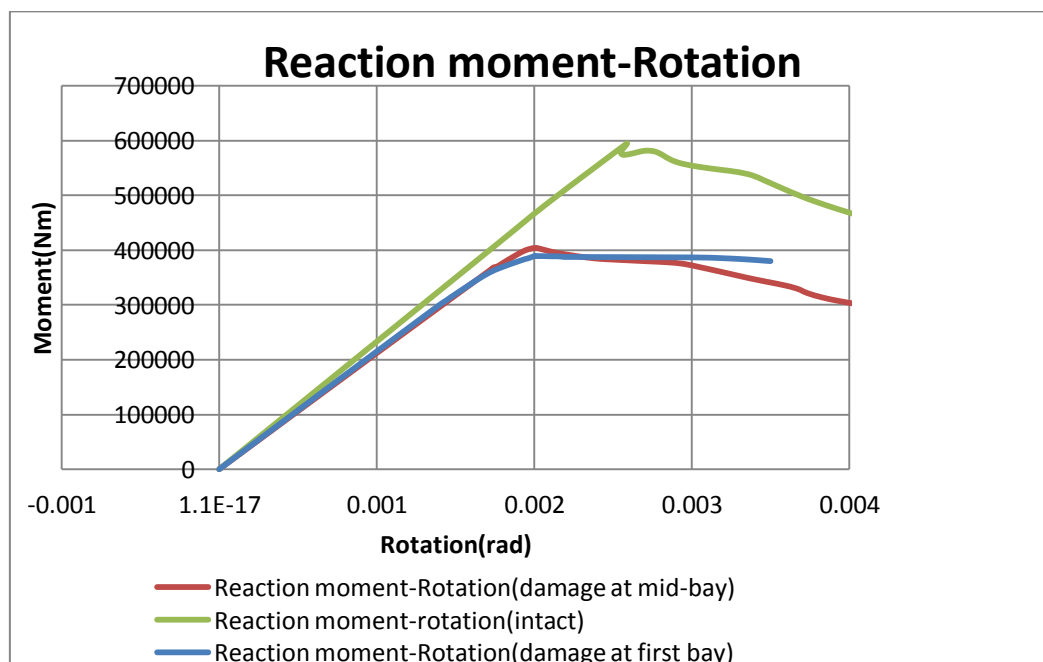
Εικόνα 3.1.2 Μέση τομή πλοίου με ρήγμα στο κεντρικό τμήμα της μεταξύ δύο διαδοχικών νομέων

Η διαδικασία δημιουργίας της βλάβης έγινε στο περιβάλλον του ABAQUS.cae μέσω της ενότητας *Πλέγμα (mesh module)* και ακολουθώντας την εξής πορεία:

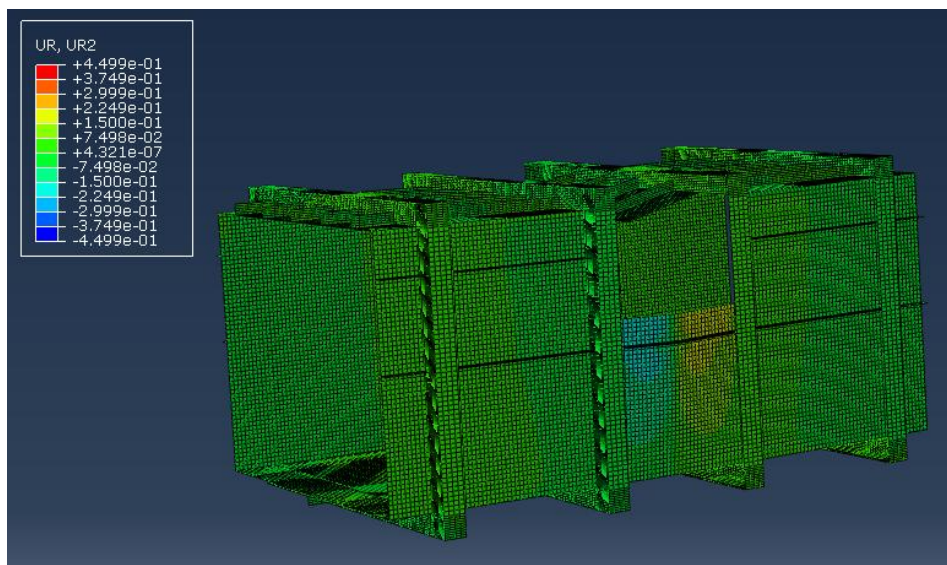
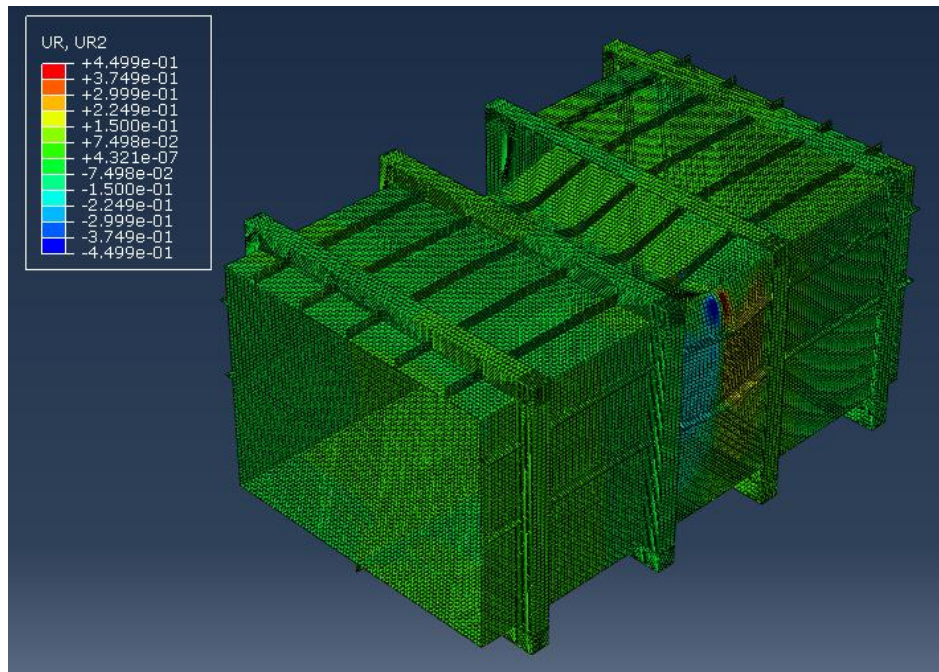
Mesh (από την κύρια γραμμή επιλογών)→ **Edit...** (από την καρτέλα επιλογών)→ **Element** (διότι επιθυμούμε την αφαίρεση στοιχείων)→ **Delete**→ Αφαίρεση των επιθυμητών στοιχείων.

3.2 Μέγιστη αντοχή μέσης τομής με ρήγμα

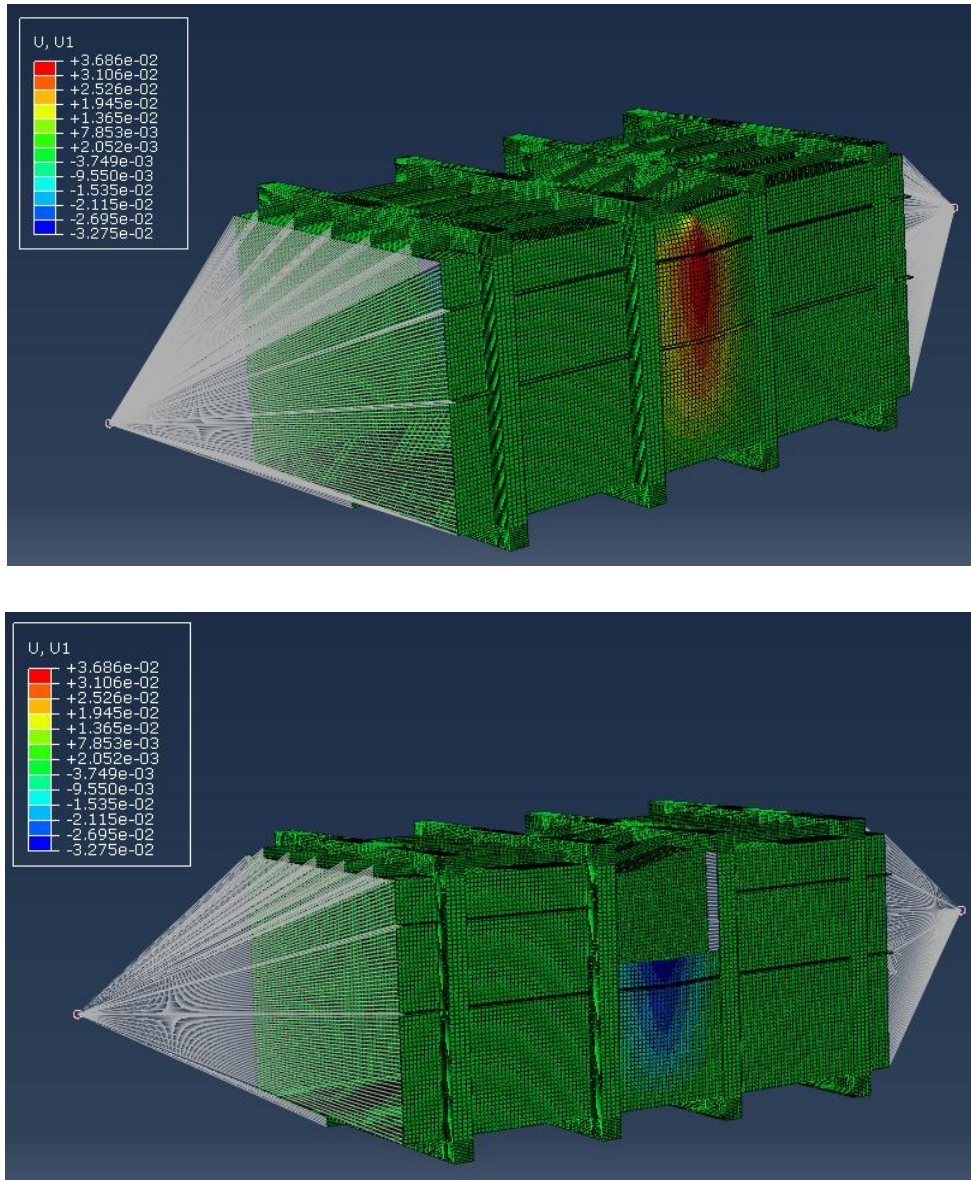
Πρώτο ζήτημα το οποίο μας απασχόλησε στη μελέτη των διατομών με κάποιο ρήγμα είναι η μέγιστη αντοχή που θα είχαν μετά τη σύγκρουση. Και στις περιπτώσεις αυτές εφαρμόσαμε τις ίδιες συνοριακές συνθήκες που είχαμε εφαρμόσει και στην περίπτωση της άθικτης μέσης τομής (με τη διαφορά ότι στην κατασκευή με κεντρικό ρήγμα πραγματοποιήσαμε δύο μοντελοποιήσεις τη μία φορά με ελευθερία περιστροφής κατά τον άξονα **y** και την άλλη όχι για να εντοπίσουμε την επίδραση της συγκεκριμένης οριακής συνθήκης), δηλαδή στον έναν κόμβο ελεύθερη η περιστροφή γύρω από τον άξονα **x** (UR1) και η μεταφορά κατά το διαμήκη άξονα **z** (U3) και στον άλλο κόμβο ελεύθερη μόνο η περιστροφή γύρω από τον άξονα **x**. Με αυτή την επιλογή οριακών συνθηκών είναι φανερό ότι θα προκύψει και μία ροπή γύρω από τον άξονα **y** στην περίπτωση που η περιστροφή γύρω από αυτόν τον άξονα δεν είναι ελεύθερη, επειδή πλέον δεν έχουμε συμμετρική διατομή. Το αποτέλεσμα για τις βεβλαμμένες κατασκευές (ρήγμα στο κεντρικό τμήμα, ρήγμα στο ακραίο τμήμα) και της άθικτης για τη ροπή γύρω από τον άξονα **x** (διαμήκης αντοχή) δίνεται στο παρακάτω κοινό διάγραμμα. Στην περίπτωση ρήγματος στον ακραίο τομέα επειδή εμφανιζόταν τέμνουσα δύναμη, για να εξαλειφθεί η επίδρασή της, αφαιρέσαμε τον περιορισμό κατά την κατακόρυφο (U2).



Διάγραμμα 3.2.1 Κοινό διάγραμμα καμπτικής ροπής-περιστροφής για τα τρία είδη διατομών (άθικτη, κεντρικό ρήγμα, ακραίο ρήγμα)



Εικόνες 3.2.1 Κατανομή της περιστροφής κατά τον άξονα Y των στοιχείων στις δύο πλευρές της κατασκευής στην περίπτωση ελευθερίας περιστροφής κατά τον άξονα Y



Εικόνες 3.2.2 Κατανομή της μετατόπισης κατά τον άξονα X των στοιχείων στις δύο πλευρές της κατασκευής με κεντρικό ρήγμα στην περίπτωση ελευθερίας περιστροφής κατά τον άξονα Y

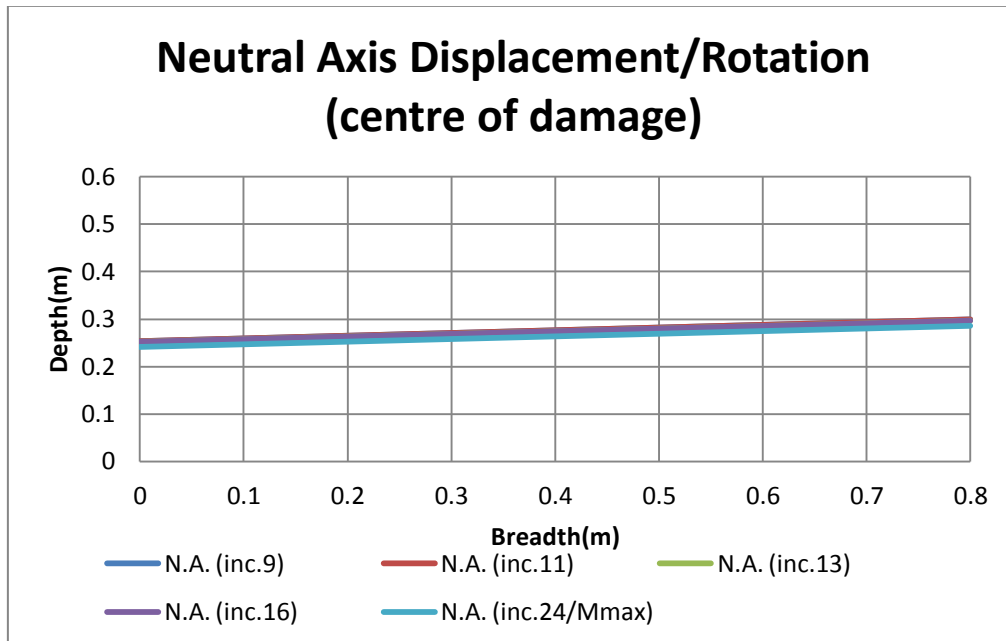
Στο διάγραμμα 3.2.1 παρατηρούμε ότι μέγιστη αντοχή εμφανίζει η άθικτη διατομή, ενώ μεταξύ των δύο διατομών με ρήγμα μεγαλύτερη αντοχή έχει εκείνη με το ρήγμα στο ακραίο τμήμα, ωστόσο μετά από γωνία περίπου $\theta=0,0025\text{rad}$ η διατομή με ακραίο ρήγμα εμφανίζει ταχύτερη κατάρρευση. Οι τιμές των μέγιστων ροπών των τριών διατομών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Να τονίσουμε εδώ ότι για τη μέση τομή με κεντρικό ρήγμα ως μέγιστη αντοχή έχει ληφθεί η περίπτωση κατά την οποία υπάρχει ελευθερία περιστροφής γύρω από τον άξονα y στο ένα σημείο ελέγχου. Η τιμή της μέγιστης ροπής γύρω από τον άξονα x στην περίπτωση όπου δεν υπάρχει ελευθερία περιστροφής γύρω από τον άξονα y είναι $M_{\max}=396.1\text{kNm}$ δηλαδή μία διαφορά της τάξης $\delta = \frac{404116-396100}{404116} \times 100\% = 2.0\%$. Άρα η επίδραση του

περιορισμού της περιστροφής κατά τον άξονα y έχει μεν επίδραση στην τιμή της μέγιστης διαμήκουσ αντοχής αλλά μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

MS	$M_{max}(Nm)$	$\theta_{M=M_{max}}(rad)$	Moment/Moment _{intact}
Intact	587500	0.00257	1
Mid-bay damage	404116	0.002005	0.688
First-bay damage	389419	0.002205	0.663

Πίνακας 3.2.1 Συγκριτικός πίνακας για τη μέγιστη αντοχή των τριών διατομών

Για την περίπτωση του κεντρικού ρήγματος δημιουργήσαμε το διάγραμμα μετατόπισης-περιστροφής του ουδέτερου άξονα σε δύο διαφορετικές θέσεις του ρήγματος (στο κέντρο του και στην άκρη του) για πέντε διαφορετικές στιγμές της φόρτισης. Ο ουδέτερος άξονας εκτός του ότι μεταφέρεται περιστρέφεται επίσης γιατί η διατομή είναι ασύμμετρη και βρίσκεται μεταξύ της κατεύθυνσης της ροπής M και της κατεύθυνσης του κύριου άξονα με τη μικρότερη ροπή αδράνειας.



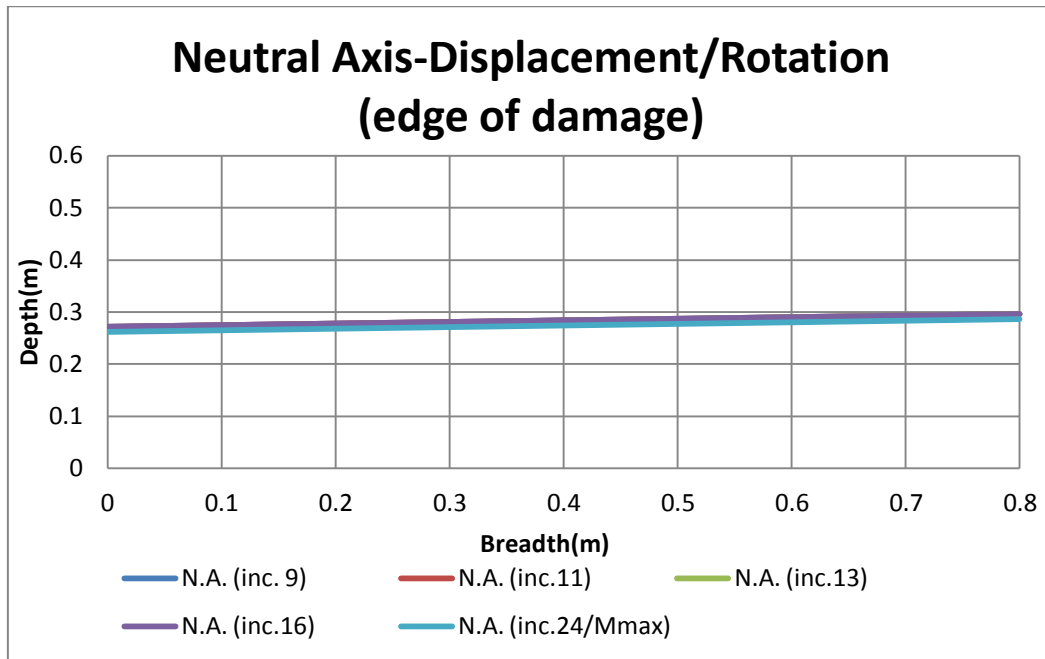
Διάγραμμα 3.2.2 Διάγραμμα μετατόπισης-περιστροφής ουδέτερου άξονα στο κέντρο της βλάβης σε πέντε διαφορετικές στιγμές

Στο άκρο $b=0.8m$ του διαγράμματος θεωρούμε ότι βρίσκεται το ρήγμα. Η γωνία στροφής του ουδέτερου άξονα φαίνεται από τον παρακάτω πίνακα.

Inc. 9	$\tan\phi_1=$	0.058133	$\phi_1=$	3.27°
Inc. 11	$\tan\phi_2=$	0.05795	$\phi_2=$	3.32°
Inc. 13	$\tan\phi_3=$	0.055595	$\phi_3=$	3.18°
Inc. 16	$\tan\phi_4=$	0.055605	$\phi_4=$	3.18°
Inc. 24(M_{max})	$\tan\phi_5=$	0.055658	$\phi_5=$	3.19°

Πίνακας 3.2.2 Γωνία ουδέτερου άξονα με την οριζόντιο στις πέντε διαφορετικές στιγμές στο κέντρο του ρήγματος

Στο άκρο του ρήγματος η μετατόπιση και περιστροφή του ουδέτερου άξονα για πέντε διαφορετικές στιγμές δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 3.2.3 Διάγραμμα μετατόπισης-περιστροφής ουδέτερου άξονα στο άκρο του ρήγματος σε πέντε διαφορετικές στιγμές

Inc. 9	$\tan\phi_1=$	0.031431	$\phi_1=$	1.8°
Inc. 11	$\tan\phi_2=$	0.031752	$\phi_2=$	1.82°
Inc. 13	$\tan\phi_3=$	0.032294	$\phi_3=$	1.85°
Inc. 16	$\tan\phi_4=$	0.030495	$\phi_4=$	1.75°
Inc. 24(M_{max})	$\tan\phi_5=$	0.030206	$\phi_5=$	1.73°

Πίνακας 3.2.3 Γωνία ουδέτερου άξονα με την οριζόντιο στις πέντε διαφορετικές στιγμές στο άκρο του ρήγματος

Από τους δύο πίνακες στους οποίους φαίνεται η μεταβολή της γωνίας του ουδέτερου άξονα με την οριζόντιο παρατηρούμε ότι μεγαλύτερη κλίση έχει στο κέντρο του ρήγματος.

Τέλος, να σημειώσουμε ότι και για τις δύο περιπτώσεις με ρήγμα της γάστρας δεν παρατηρήθηκε στρεπτική ροπή που να χρήζει αναφοράς.

3.3 Συμπεράσματα - παρατηρήσεις τρίτου κεφαλαίου

Από το διάγραμμα 3.2.1 της σελίδας 85 μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι δεν έχει μεγάλη σημασία για την τιμή της μέγιστης αντοχής των κατασκευών με ρήγμα, η θέση του ρήγματος (κεντρικό ή ακραίο τμήμα) καθότι η διαφορά μεταξύ των μέγιστων διαμήκων ροπών είναι $\delta_M = \frac{404116-389419}{404116} \times 100\% = 3.6\%$. Επιπλέον παρατηρήσαμε ότι για την κατασκευή με κεντρικό ρήγμα δεν υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά στην τιμή της μέγιστης διαμήκου ροπής όταν επιτρέπεται ή όχι η περιστροφή κατά τον άξονα Y. Τέλος, για την περίπτωση του κεντρικού ρήγματος παρουσιάστηκαν δύο διαγράμματα της θέσης του ουδέτερου άξονα για δύο διαφορετικά σημεία κατά το διάμηκες της βεβλαμμένης διατομής, όπου παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη κλίση και χαμηλότερο τελικό κατακόρυφο ύψος εμφανίζει στο κέντρο του ρήγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

Συμπεράσματα και ζητήματα περαιτέρω σχετικής μελέτης

4.1 Συμπεράσματα εργασίας

Τα γενικά συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε από την εργασία που εκπονήσαμε είναι πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων και συγκεκριμένα η χρήση του κώδικα Abaqus Implicit που χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά στις μοντελοποιήσεις που διενεργήσαμε, με τετραεδρικά-τετραγωνικά στοιχεία πλευράς $\alpha=10\text{mm}$, μειωμένης ολοκλήρωσης μπορεί να προσδιορίσει με σχετικά καλή ακρίβεια τη μέγιστη αντοχή μίας κατασκευής συγκρίνοντάς την πάντοτε με πειραματικά δεδομένα και λοιπές αριθμητικές μεθόδους τις οποίες διαθέτουμε. Παρέχει ένα σύνολο δυνατοτήτων για ενδελεχή μελέτη των μορφών κατάρρευσης, των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή. Ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην επιλογή των οριακών συνθηκών καθότι η αλλαγή τους ενδέχεται να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα, γι'αυτό και πρέπει κάθε φορά να αναφέρεται η επιλογή που έχει γίνει κατά τον ορισμό τους. Επίσης, για την περίπτωση διατομών με ρήγμα, όταν διαμέσω της εφαρμογής των οριακών συνθηκών δεν επεβλήθησαν περιορισμοί στη στροφή γύρω από τον οριζόντιο και τον εγκάρσιο άξονα και την αξονική μετατόπιση, η οριζόντια καμπτική ροπή και η στρεπτική ροπή που αναπτύχθηκαν ήταν αμελητέες.

4.2 Ζητήματα προς περαιτέρω σχετική μελέτη

Ένα ζήτημα προς περαιτέρω σχετική μελέτη θα μπορούσε να είναι η διερεύνηση της μέγιστης αντοχής σε διάτμηση κατά την περίπτωση της μέσης τομής με ρήγμα στο κεντρικό τμήμα για διάφορες οριακές συνθήκες και η επίδραση που θα είχε στις αναπτυσσόμενες μέγιστες τάσεις. Επιπλέον, θα ήταν σκόπιμη η ακριβής μοντελοποίηση του πειράματος των *Eldeen et al* όσον αφορά στο μηχανισμό επιβολής της φόρτισης και στο μηχανισμό στήριξης της κατασκευής και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της μέγιστης αντοχής, των μορφών κατάρρευσης και των αναπτυσσόμενων παραμορφώσεων σε επιλεγμένα σημεία της μέσης τομής που αναφέρονται προσεγγιστικά στη δημοσίευση. Τέλος, και εκτός των πλαισίων της παρούσας εργασίας, έγινε μία αρχική προσπάθεια να υπολογισθεί η μέγιστη αντοχή σε μέση τομή πραγματικού πλοίου με τη χρήση του Implicit κώδικα βρίσκοντας την τιμή της μέγιστης αντοχής αλλά μη μπορώντας να συνεχίσει την επίλυση του προβλήματος στη μεταλυγισμική περιοχή. Σκοπός μίας επόμενης διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να είναι ο συνδυασμός Implicit και Explicit κώδικα για τη συνέχεια της επίλυσης στη μεταλυγισμική περιοχή.

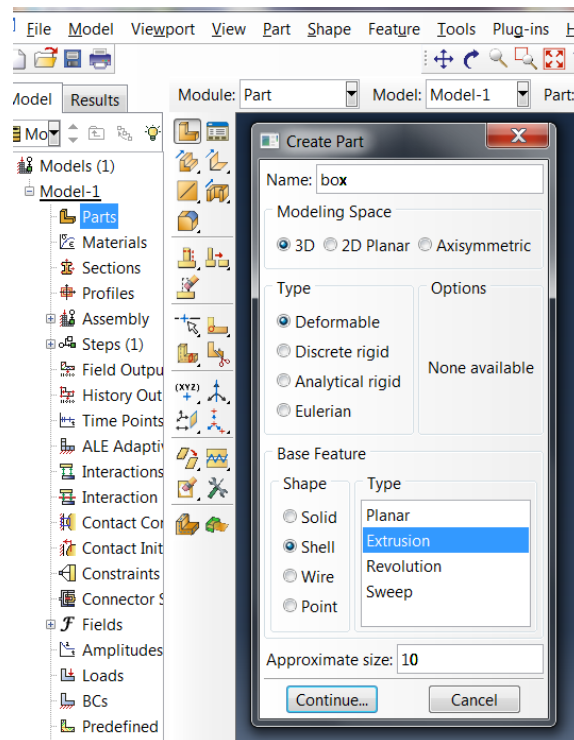
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Λεπτομερής παρουσίαση της διαδικασίας μοντελοποίησης του πειράματος των S. Bahey Eldeen et al

Σχεδίαση επιμέρους τμημάτων της κατασκευής και συναρμογή τους

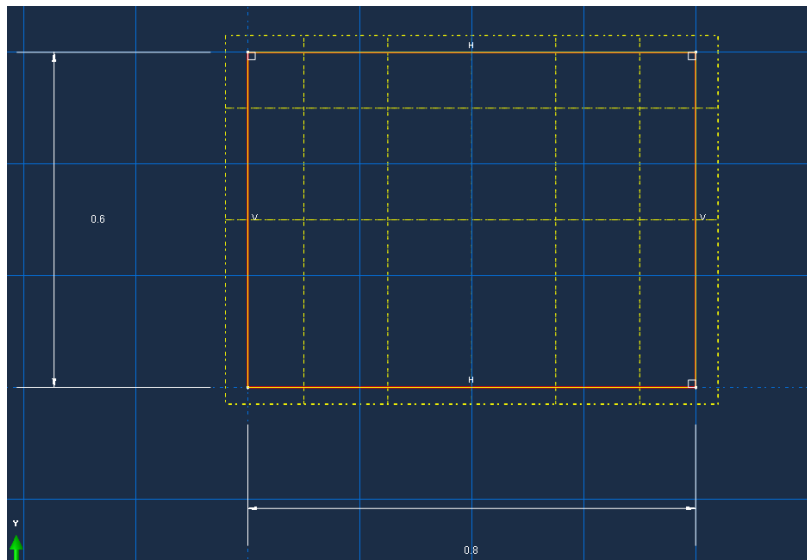
Αρχικά, η διαδικασία της μοντελοποίησης πρέπει να ξεκινήσει από τη σχεδίαση των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής. Για εμάς τα επιμέρους τμήματα είναι το κυρίως ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο διαστάσεων 1,4m x 0.8m x 0.6m. Σε αυτό το σημείο πρέπει να γίνει η επισήμανση ότι το ABAQUS.cae δεν παρέχει τη δυνατότητα προεπιλογής μονάδων μέτρησης αλλά αφήνει στο χρήστη το δικαίωμα να εργαστεί στο επιθυμητό σύστημα μονάδων. Εμείς επιλέξαμε να σχεδιάσουμε τα τμήματα σε μέτρα οπότε την ανάλογη έκφραση θα έχουν και τα αποτελέσματα. Επιπλέον το ABAQUS.cae προσφέρει μία αρκετά εύχρηστη περιοχή σχεδίασης που θυμίζει άλλα συνηθισμένα προγράμματα CAD. Για να εισέλθουμε για πρώτη φορά στο περιβάλλον σχεδίασης και να ορίσουμε ένα αντικείμενο κατά σειρά εκτελούμε τις ενέργειες:

Από το δέντρο επιλογών και βρισκόμενοι στην ενότητα Part (Module Part), στα αριστερά της κύριας οθόνης επιλέγουμε Part (διπλό αριστερό πλήκτρο ποντικιού) → 3D (γιατί το αντικείμενο και η ανάλυση που θα διενεργήσουμε στη συνέχεια είναι στις τρεις διαστάσεις) → Deformable (καθότι το αντικείμενο επιθυμούμε να παραμορφώνεται) → Shell (γιατί το αντικείμενό μας θα αποτελείται από στοιχεία ελάσματος και Extrusion στο δεξί μενού γιατί θα προκύψει τρισδιάστατο από προβολή) → και τέλος στην περιοχή που πρέπει να οριστεί το Approximate Size (προσεγγιστικό μέγεθος), με βάση το μέγεθος του αντικειμένου που γνωρίζουμε από πριν θέτουμε ένα μέγεθος για την περιοχή σχεδίασης. Δηλαδή αν η μέγιστη διάσταση στο XY επίπεδο του αντικειμένου μας είναι 1.4m τότε μία κατάλληλη τιμή θα είναι 10. Η περιοχή σχεδίασης εμφανίζεται αμέσως μόλις επιλέξουμε Continue.



Διαδικασία ενεργειών για την έναρξη σχεδίασης του κύριου μέρους της κατασκευής (box)

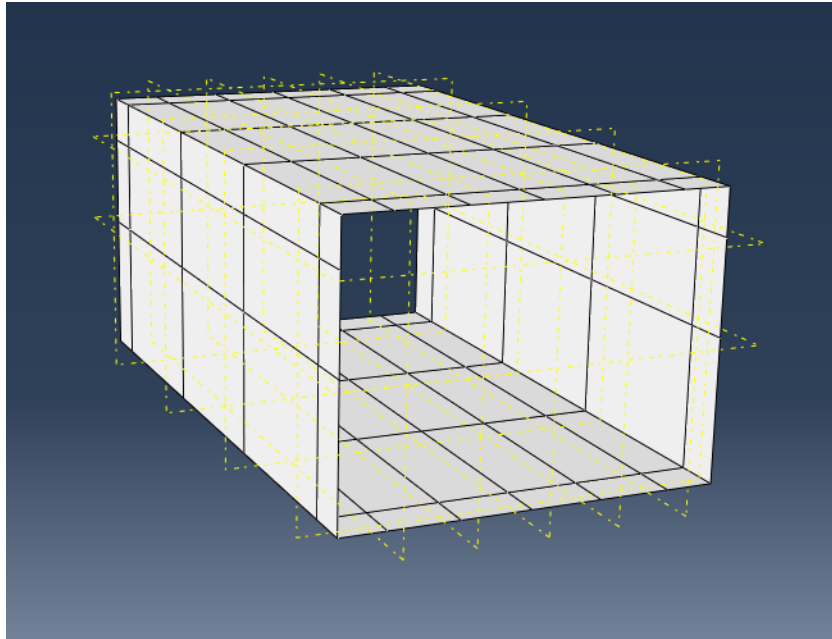
Στην συνέχεια γίνεται αυτόματη είσοδος στην περιοχή σχεδίασης όπου με απλές και συνήθεις εντολές μπορούμε να σχεδιάσουμε το επιθυμητό αντικείμενο. Η σχεδίαση του ορθογωνίου παραλληλογράμμου που θα αποτελέσει το κύριο μέρος της κατασκευής φαίνεται στη συνέχεια.



Σχεδίαση του κύριου μέρους της κατασκευής (box). Με διακοπτόμενες γραμμές φαίνονται οι θέσεις των ενισχυτικών και το μέγεθος των νομέων

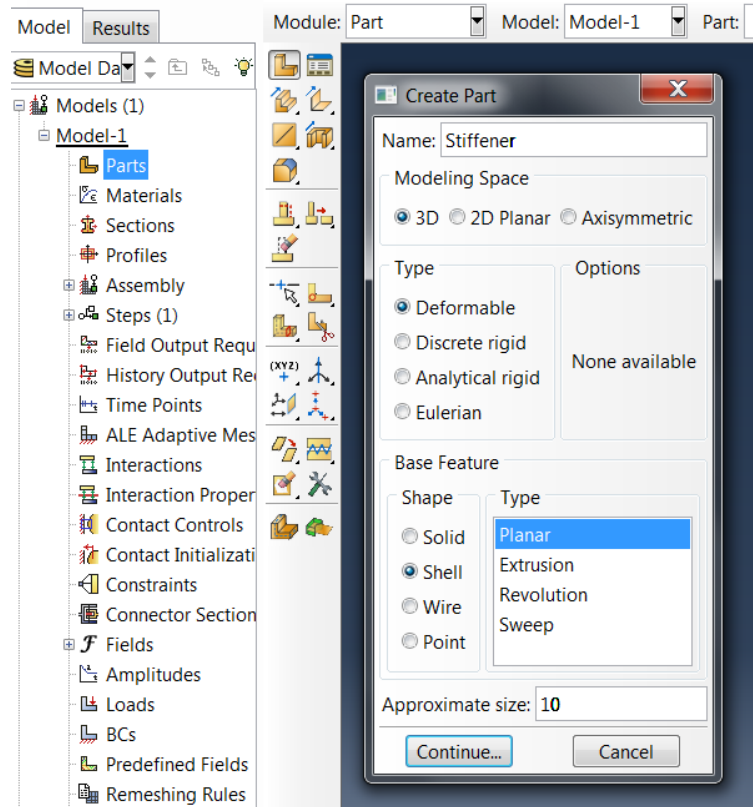
Στο παραπάνω σχέδιο φαίνονται οι διαστάσεις του κύριου μέρους της κατασκευής (box) στο XY επίπεδο (πλάτος-ύψος) 0.8m και 0.6m αντίστοιχα. Με την προβολή στο

επίπεδο Z κατά 1.4m τελικά παράγεται το επιθυμητό αντικείμενο που φαίνεται παρακάτω.



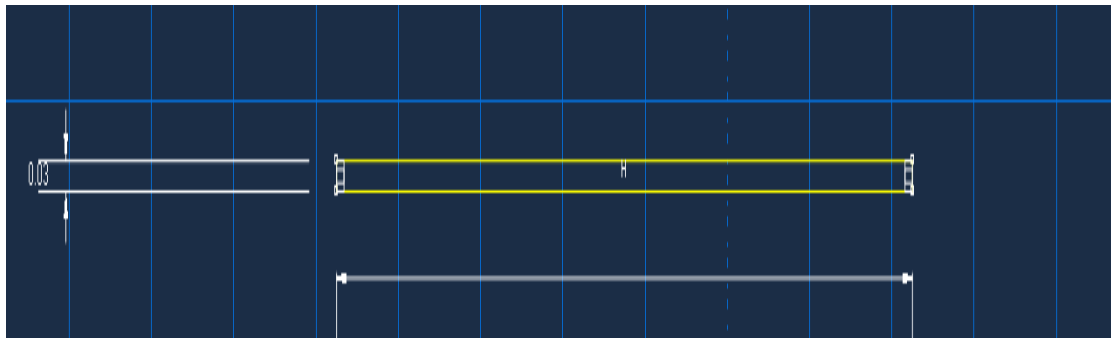
Το κύριο μέρος της κατασκευής σε τρεις (3) διαστάσεις

Για τη σχεδίαση των ενισχυτικών, επειδή η μία τους διάσταση είναι σημαντικά μικρότερη από τις άλλες δύο, για τον ορισμό του αντικειμένου επιλέγεται η εναλλακτική planar (επίπεδο) από τις επιλογές που παρέχει η επιλογή shell. Δηλαδή κάνουμε τις ίδιες ενέργειες όπως και προηγουμένως με τη μόνη αυτή διαφορά.



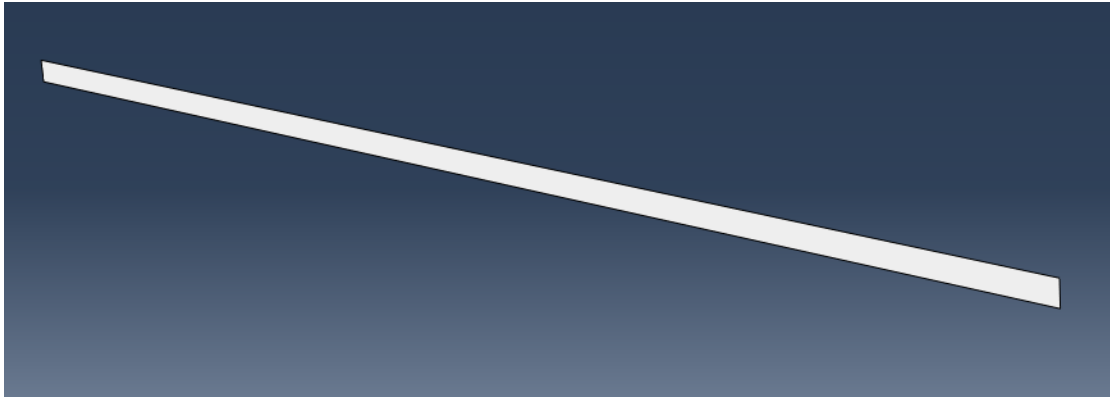
Διαδικασία επιλογών για τη σχεδίαση τρισδιάστατου, επίπεδου στοιχείου ελάσματος

Η σχεδίαση των ενισχυτικών αποτελεί ιδιαίτερα εύκολη διαδικασία καθώς χρειάζεται η σχεδίαση ενός ορθογωνίου παραλληλογράμμου με τις επιθυμητές διαστάσεις.



Σχεδίαση ορθογωνίου παραλληλογράμμου με μήκος 1.4m και ύψος 0.025m

Η τελική μορφή του ενισχυτικού φαίνεται αμέσως παρακάτω όπου παρατηρείται αυτό που είπαμε προηγουμένως, ότι δηλαδή οι δύο διαστάσεις του είναι σημαντικά μεγαλύτερες από την τρίτη (πάχος).



Τελική μορφή του ενισχυτικού στις τρεις διαστάσεις

Για το στοιχείο (web frame-νομέας) δεν θα επεκταθούμε στη διαδικασία σχεδιάσής του αλλά σε μία άλλη δυνατότητα του ABAQUS.cae αυτή της συναρμογής διαφορετικών αντικειμένων μεταξύ τους. Ο κάθε νομέας έχει μορφή Γ και αποτελείται ουσιαστικά από δύο πλαίσια κάθετα μεταξύ τους. Στην παρούσα περίπτωση επιλέξαμε να σχεδιάσουμε ξεχωριστά το κάθε στοιχείο και μετά να προχωρήσουμε στη συναρμογή τους. Το ένα από τα δύο πλαίσια του νομέα σχεδιάστηκε με την επιλογή της προβολής (Extrusion) ενώ τα δύο στοιχεία ουσιαστικά που αποτελούν το δεύτερο τμήμα του νομέα (ανά δύο ίδια τα απέναντι στοιχεία των νομέων) σχεδιάστηκαν ως επίπεδα (planar). Στη συνέχεια έγινε η συναρμογή τους και τέλος, η συναρμογή των δύο πλαισίων του νομέα.

Η συναρμογή επιμέρους αντικειμένων γίνεται στην ενότητα Assembly, όπου παρέχεται μία σχετικά εύκολη διαδικασία επιλογών. Παρακάτω θα παρουσιάσουμε την πορεία που ακολουθήσαμε για την δημιουργία του νομέα.

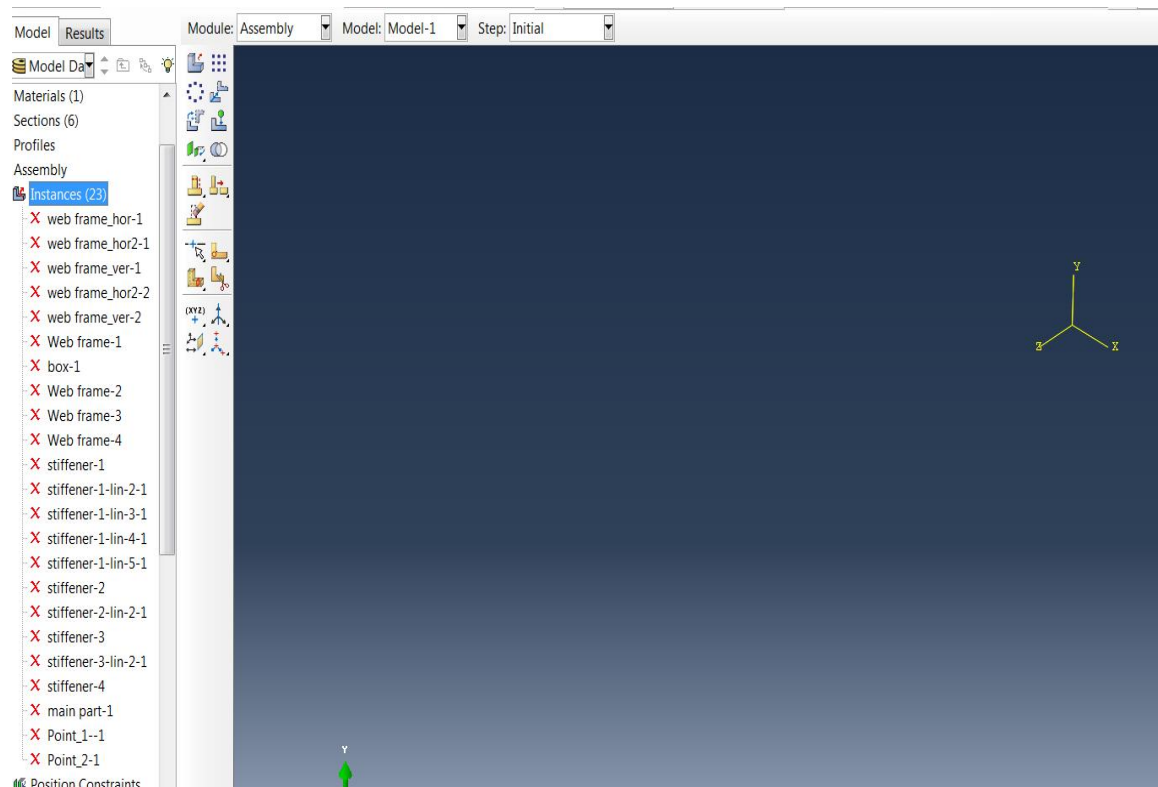
Το πρώτο πράγμα που χρειάζεται να κάνουμε είναι να προσθέσουμε τις απεικονίσεις των πραγματικών αντικειμένων (Create part instances). Αυτό γίνεται διότι ουσιαστικά στην ενότητα Assembly ο χρήστης δεν εργάζεται με το αντικείμενο καθεαυτό αλλά με μία απεικόνισή του. Επιπλέον οι ενότητες *Αλληλεπίδραση (Interaction)* και *Φόρτιση (Load)* λειτουργούν πάνω στο συναρμολογημένο αντικείμενο, επομένως σε απεικονίσεις των πραγματικών αντικειμένων σε αντίθεση με την ενότητα *Πλέγμα (Mesh)* η οποία μπορεί να λειτουργεί είτε στο συναρμολογημένο αντικείμενο είτε σε ένα ή περισσότερα πραγματικά, συστατικά του μέρη. Στο σημείο αυτό υπάρχουν δύο επιλογές για το χρήστη. Υπάρχει η δυνατότητα η απεικόνιση του πραγματικού αντικειμένου να είναι *εξαρτημένη (dependent)* ή *ανεξάρτητη (independent)*.

Στην περίπτωση που επιλεγεί η εξαρτημένη απεικόνιση ενός αντικειμένου τότε αυτό σημαίνει ότι μοιράζεται τη γεωμετρία και το πλέγμα με το πραγματικό αντικείμενο. Το αποτέλεσμα είναι να γίνεται δυνατή η δημιουργία πλέγματος επί του αντικειμένου αλλά όχι επί της απεικόνισής του. Για παράδειγμα, όταν κατασκευάζεται το πλέγμα σε ένα αντικείμενο, το ABAQUS.cae εφαρμόζει το ίδιο πλέγμα σε όλες τις εξαρτημένες απεικονίσεις του αντικειμένου αυτού. Οι περισσότερες ενέργειες τροποποίησης της γεωμετρίας δεν είναι επιτρεπτές σε μία εξαρτημένη απεικόνιση, ωστόσο λειτουργίες που δεν επηρεάζουν τη γεωμετρία του επιτρέπονται, όπως για

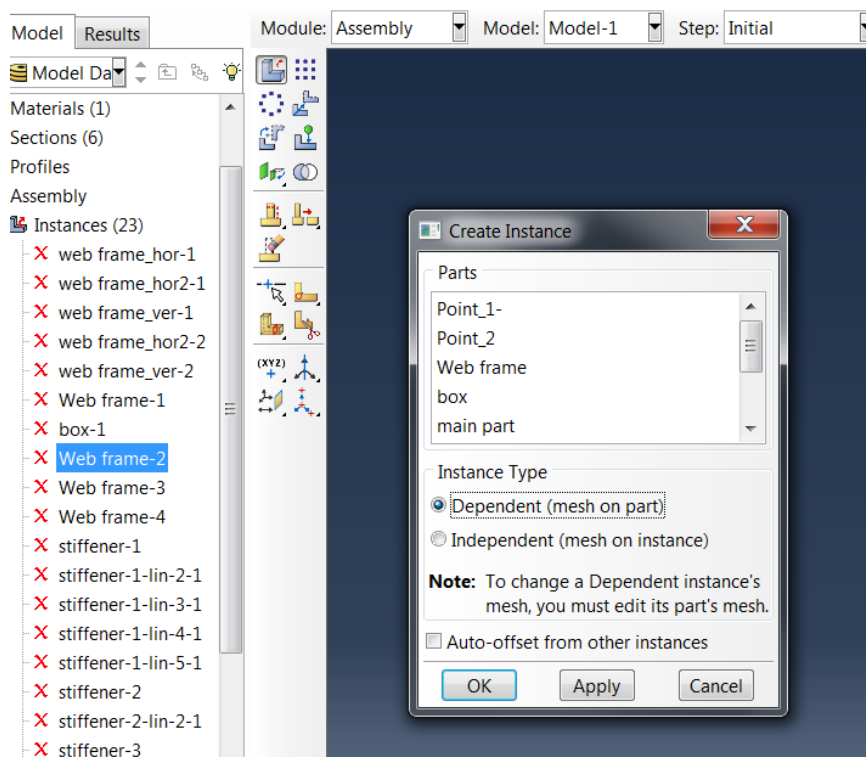
παράδειγμα η εφαρμογή φορτίσεων και συνοριακών συνθηκών. Σε περίπτωση που έχει δημιουργηθεί το πλέγμα σε ένα αντικείμενο τότε μπορεί να δημιουργηθεί μόνο εξαρτημένη απεικόνισή του. Επιπροσθέτως, δεν μπορεί να γίνει αλλαγή των ιδιοτήτων ενός πλέγματος σε μία εξαρτημένη απεικόνιση, ωστόσο οι ιδιότητες του πλέγματος μπορούν να αλλαχθούν στο αρχικό αντικείμενο και το ABAQUS.cae τις μεταφέρει και στην απεικόνισή του. Τα πλεονεκτήματα μιας εξαρτημένης απεικόνισης αντικειμένου (dependent part instance) είναι ότι έχουν μικρότερες απαιτήσεις σε μνήμη και χρειάζεται η δημιουργία του πλέγματος σε ένα αντικείμενο μόνο μία φορά.

Όσον αφορά την ανεξάρτητη απεικόνιση αντικειμένου (independent part instance), αποτελεί μία αντιγραφή της γεωμετρίας του πραγματικού αντικειμένου. Δεν είναι δυνατή η κατασκευή πλέγματος σε ένα αντικείμενο από το οποίο δημιουργήθηκε μια ανεξάρτητη απεικόνιση, ωστόσο μπορεί να δημιουργηθεί πλέγμα στην ίδια την απεικόνιση. Επιπλέον σε μία ανεξάρτητη απεικόνιση είναι δυνατές οι περισσότερες λειτουργίες που αφορούν τη γεωμετρία. Τα μειονεκτήματα των ανεξάρτητων απεικονίσεων είναι ότι καταναλώνουν περισσότερη μνήμη και επιπλέον κάθε ανεξάρτητη απεικόνιση αντικειμένου πρέπει να διακριτοποιηθεί ξεχωριστά. Τέλος, να αναφέρουμε πως δεν είναι δυνατή η δημιουργία εξαρτημένης και ανεξάρτητης απεικόνισης του ίδιου αντικειμένου. Αν επιλεγεί η μία από τις δύο θα πρέπει να ακολουθηθεί σε όλη τη διαδικασία συναρμογής για ένα αντικείμενο. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν εξαρτημένες απεικονίσεις των αντικειμένων για να έχουμε τα οφέλη που συζητήθηκαν παραπάνω.

Μέσα από το περιβάλλον του ABAQUS.cae τα όσα περιγράψαμε ανωτέρω φαίνονται με εικόνες στην επόμενη σελίδα.

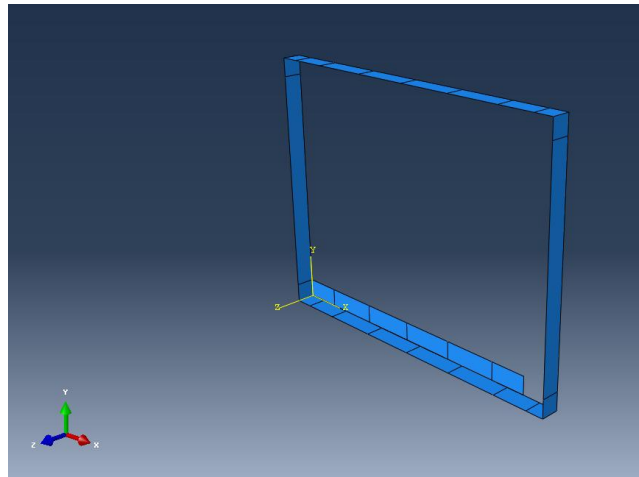


Το περιβάλλον της ενότητας Assembly. Στα αριστερά φαίνονται όλες οι απεικονίσεις των αντικειμένων που τη στιγμή αυτή είναι suppressed (υπάρχουν αλλά δεν φαίνονται)

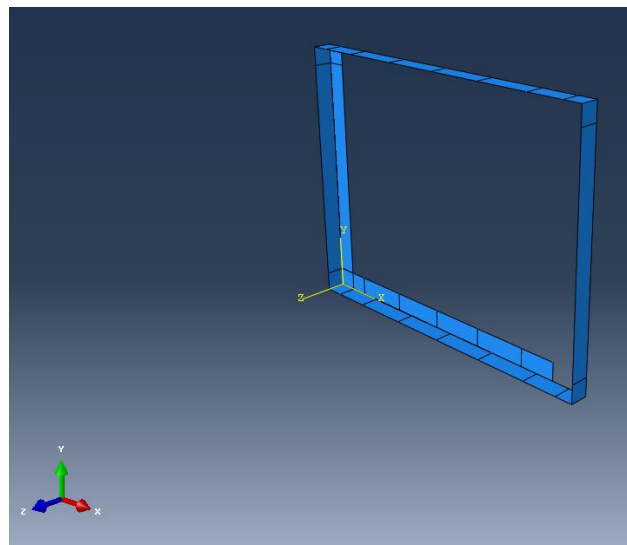


Μενού δημιουργίας απεικόνισης των αντικειμένων τα οποία βρίσκονται σε λίστα στην άσπρη επιφάνεια. Διακρίνεται η επιλογή για δημιουργία εξαρτημένης απεικόνισης αντικειμένου (dependent part instance)

Όταν τοποθετηθούν οι επιθυμητές απεικονίσεις των αντικειμένων μπορεί να γίνει η περιστροφή τους γύρω από επιθυμητό άξονα (rotate instance), η μεταφορά τους στο γενικό σύστημα συντεταγμένων (global coordinate system) από τη θέση που βρίσκονται στην επιθυμητή θέση (translate instance), δημιουργία κυκλικών ή γραμμικών συστοιχιών του ίδιας απεικόνισης (Linear/Radial pattern) ενώ τέλος, αφού οι απεικονίσεις των αντικειμένων βρίσκονται στην επιθυμητή θέση, γίνεται η ένωση (Merge/Cut instances) ώστε πλέον να έχουμε την ενιαία απεικόνιση. Στο τελικό αυτό στάδιο πρέπει να προσέξουμε ώστε να ορίσουμε την κατάλληλη τιμή ανοχής (tolerance) στην απόσταση δύο κόμβων ώστε τελικά στο κοινό τους σημείο πλέον να υπάρχει ένας κοινός κόμβος. Μπορούμε να τα δούμε καλύτερα αυτά στις επισυναπτόμενες εικόνες τη διαδικασία συναρμογής του νομέα και του τελικού, ολοκληρωμένου αντικειμένου.

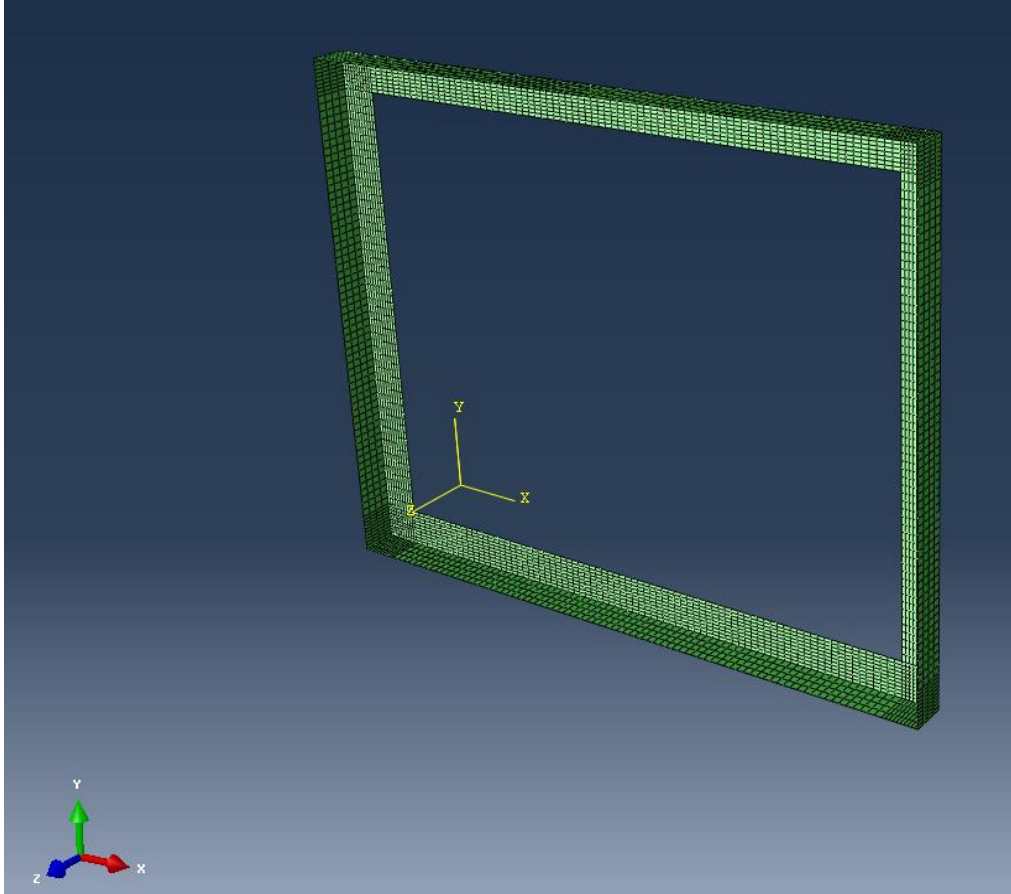


Εδώ έχουν προστεθεί η απεικόνιση του πλαισίου που έχει δημιουργηθεί από προβολή (extrusion) και η μία από τις δύο οριζόντιες πλευρές του εσωτερικού πλαισίου



Στο σημείο αυτό έχει προστεθεί και η απεικόνιση της μίας εκ των δύο κάθετων πλευρών του εσωτερικού πλαισίου

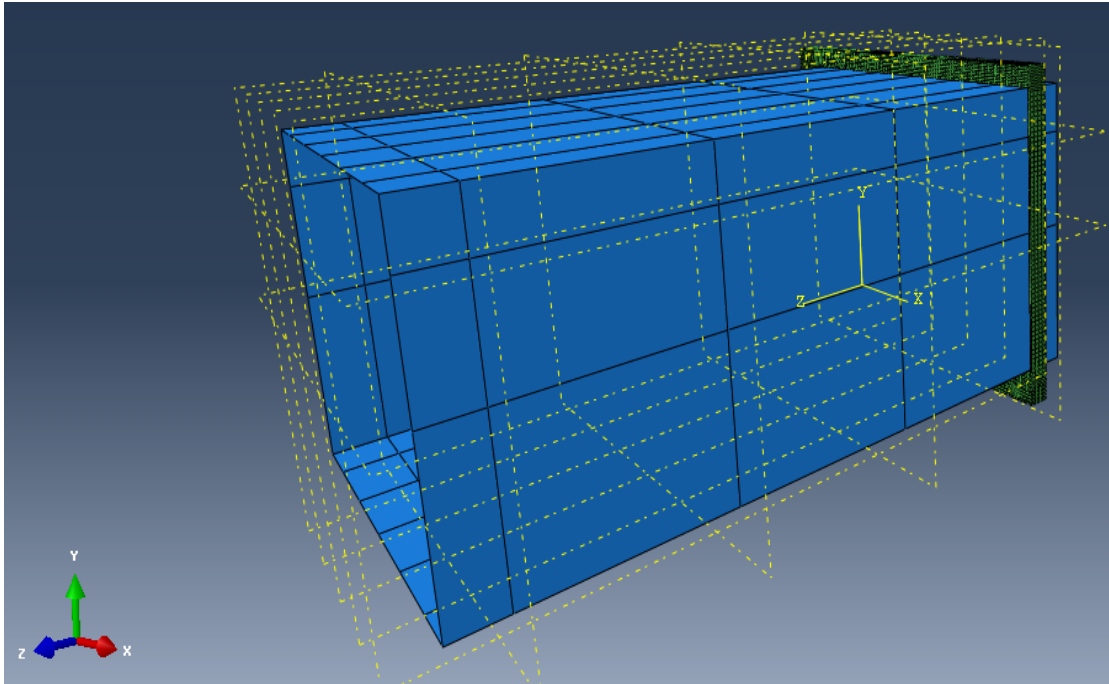
Το τελικό αντικείμενο «νομέας» που προέκυψε από συναρμολόγηση των απεικονίσεων του εξωτερικού πλαισίου με τις απεικονίσεις των πλευρών του εσωτερικού πλαισίου φαίνεται στην αμέσως επόμενη εικόνα.



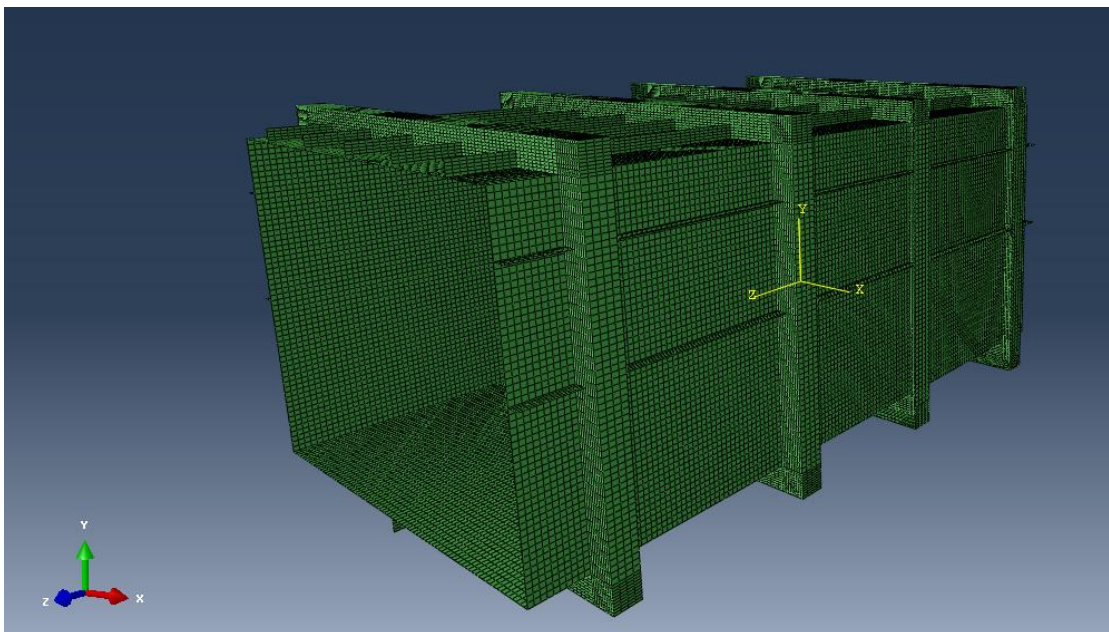
Το αντικείμενο «νομέας» (web frame)

Από την παραπάνω εικόνα φαίνεται το πλέγμα το οποίο έχει δημιουργηθεί στα αρχικά αντικείμενα και με τη συναρμολόγηση φαίνεται και στην τελική απεικόνιση. Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί η μορφή Γ του νομέα.

Για την ολοκλήρωση του τελικού αντικειμένου είναι σαφές ότι αφού ολοκληρώθηκε η δημιουργία του αντικειμένου «νομέας» αρκεί η προσθήκη ενός στην επιθυμητή θέση και μετά η εφαρμογή της εντολής *Linear pattern* ώστε να προστεθούν με γραμμική συστοιχία οι επόμενοι τρεις κατά τον άξονα του μήκους του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου και σε απόσταση 400mm ο καθένας. Επίσης, προστέθηκαν και οι απεικονίσεις των ενισχυτικών με το ίδιο τρόπο που αναφέραμε παραπάνω. Στην αμέσως επόμενη εικόνα φαίνεται η προσθήκη της απεικόνισης «box» μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας του αντικειμένου «νομέας».



Προσθήκη της απεικόνισης του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου μετά τη δημιουργία του νομέα



Τελικό αντικείμενο προς μελέτη. Σε αυτό φαίνονται οι τέσσερις νομείς κατά το διάμηκες, τα πέντε ενισχυτικά του καταστρώματος, το ένα ενισχυτικό του πυθμένα και τα δύο ενισχυτικά που υπάρχουν σε κάθε μία από τις πλευρές

Ορισμός ιδιοτήτων υλικών και διατομών

Στο ABAQUS.cae οι επιθυμητές ιδιότητες των υλικών και των διατομών ορίζονται στην ενότητα *Ιδιότητα (Property)*. Εκεί δημιουργούνται τα επιθυμητά υλικά και τους δίνονται οι αντίστοιχες ιδιότητες, ενώ στη συνέχεια καθορίζονται οι διατομές με το επιθυμητό πάχος και υλικό και τέλος αυτές εφαρμόζονται στα αντικείμενα που έχουν σχεδιασθεί. Αρχικά λοιπόν, και στην περίπτωση τη δική μας μέσα από τη δημοσίευση έπρεπε να αντλήσουμε πληροφορίες για τις ιδιότητες του υλικού ή έστω για το υλικό καθεαυτό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του πειραματικού δοκιμίου. Αυτό δεν κατέστη δυνατό καθότι δεν αναφέρονταν αυτές οι πληροφορίες οπότε με την καθοδήγηση των κΣαμουηλίδη και κΤούλιου αποφασίσθηκε η μοντελοποίηση να γίνει με τις ιδιότητες του κοινού χάλυβα. Ως γνωστόν αυτές είναι:

Τάση διαρροής $\sigma_y=245 \times 10^6 \text{ Pa}$

Μέτρο ελαστικότητας $E=2,07 \times 10^{11} \text{ Pa}$

Λόγος Poisson $\nu=0.3$

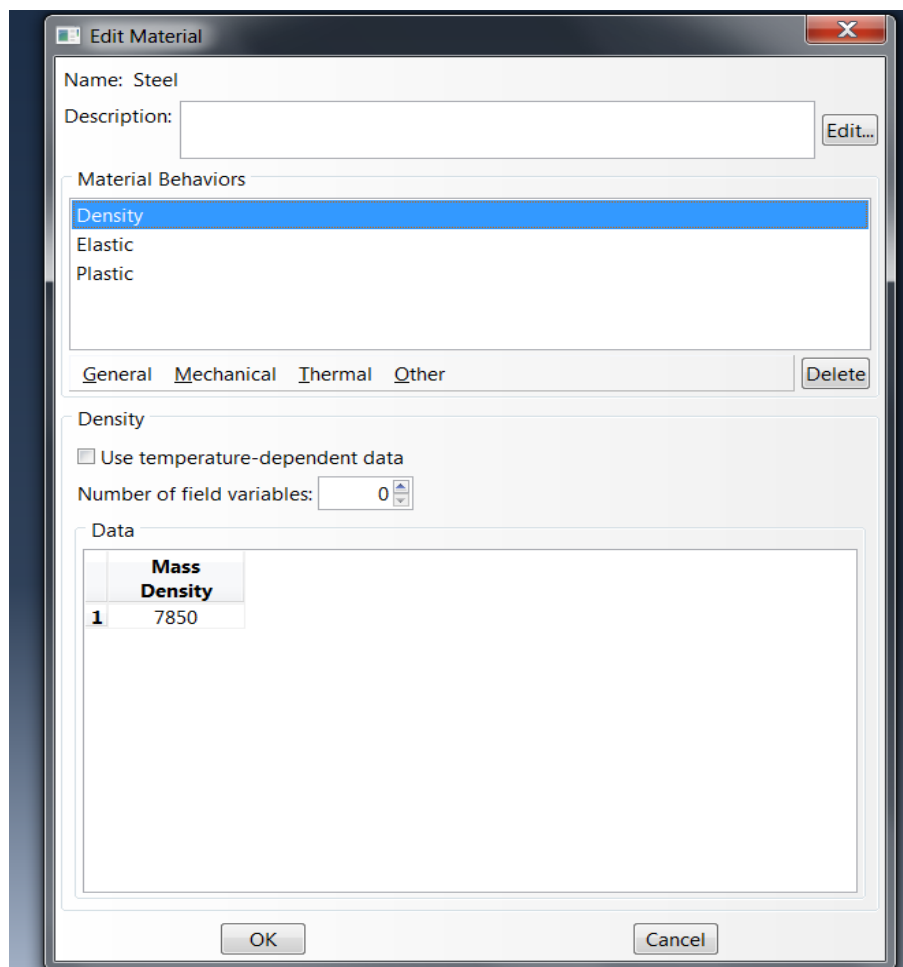
Ο ορισμός ενός υλικού πραγματοποιείται με επιλογή του αντίστοιχου εικονιδίου (Create Material) από την παλέτα εικονιδίων της ενότητας *Ιδιότητα (Property)*. Το λογισμικό ABAQUS όπως προείπαμε έχει τη δυνατότητα ανάλυσης διαφόρων ειδών προβλημάτων (μηχανικά, ηλεκτρικά, θερμικά, κ.ά.) γι'αυτό και η δυνατότητα ορισμού ιδιοτήτων περιλαμβάνει πολλές εναλλακτικές. Στην περίπτωσή μας όπου θα διενεργήσαμε στατική, μη-γραμμική ανάλυση χρειάστηκε να ορίσουμε τα ανωτέρω τρία μεγέθη.

Η διαδικασία ορισμού που θα φανεί παρακάτω και με βοηθητικές εικόνες, περιελάμβανε τα εξής στάδια:

- Ορισμό των ελαστικών μεγεθών, δηλαδή του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson. Αυτό έγινε μέσα από τις επιλογές **Mechanical** → **Elasticity** → **Elastic** και έπειτα κάτω από τις αντίστοιχες θέσεις εισάγουμε τις τιμές για τα δύο αυτά μεγέθη.
- Επειδή μελετήσαμε τη συμπεριφορά της κατασκευής και στη μη-γραμμική περιοχή έπρεπε να εισάγουμε την τάση διαρροής του υλικού και την αντίστοιχη πλαστική παραμόρφωση για την οποία ισχύει, αφού έχουμε υποθέσει υλικό γραμμικό, απόλυτα πλαστικό. Η διαδικασία των επιλογών αυτή τη φορά είναι **Mechanical** → **Plasticity** → **Plastic**. Έπειτα πρέπει στο αντίστοιχο κελί να εισάγουμε την τάση διαρροής που αναγράφεται προηγουμένως και την πλαστική παραμόρφωση για την οποία ισχύει η αντίστοιχη τάση διαρροής. Έτσι χρειάζεται η εισαγωγή δύο ζευγών όπου στο θα διευκρινίζεται το εύρος της πλαστικής συμπεριφοράς.

- Τέλος, χωρίς να είναι αναγκαίο, υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί και η πυκνότητα του υλικού (7850 kg/m^3 στην περίπτωση του κοινού χάλυβα) η οποία πρέπει να έχει οριστεί αν επιθυμούμε από το λογισμικό να μας εμφανίσει τα στοιχεία της διατομής (ροπές ως προς τους κύριους άξονες, κέντρο βάρους κ.ά.). Η διαδικασία για τον ορισμό της πυκνότητας είναι η ακόλουθη: **General** → **Density** και στο κελί εισάγουμε την επιθυμητή τιμή.

Στο σημείο αυτό πρέπει να κάνουμε την εξής επισήμανση: Οι τιμές των μεγεθών που προείπαμε (σ_y , E , ρ) πρέπει να συμφωνούν με το σύστημα μονάδων που έχουμε επιλέξει. Στη δική μας περίπτωση επιλέξαμε τη σχεδίαση των αντικειμένων σε μέτρα άρα και οι τιμές των παραπάνω μεγεθών θα πρέπει να συμφωνούν με αυτή την επιλογή ώστε να λάβουμε τις τάσεις σε Pascal. Για παράδειγμα αν είχαμε σχεδιάσει την κατασκευή σε χιλιοστά τότε η τάση διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας θα δίνονταν σε MPa (N/mm^2) ώστε και τις τάσεις από την ανάλυση να τις λάβουμε σε MPa. Αντίστοιχη μεταβολή θα υποστεί και η τιμή της πυκνότητας.



Πίνακας ορισμού του υλικού και των ιδιοτήτων του. Στην παρούσα εικόνα φαίνεται η τιμή της πυκνότητας σε kg/m^3

Name: Steel
Description:

Material Behaviors

Density
Elastic
Plastic

General Mechanical Thermal Other

Elastic

Type:

☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Moduli time scale (for viscoelasticity):

☐ No compression
☐ No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	207000000000	0.3

Στην εικόνα αυτή φαίνονται τα μεγέθη που ορίζουν την ελαστική συμπεριφορά του υλικού, το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson

Name: Steel
Description:

Material Behaviors

Density
Elastic
Plastic

General Mechanical Thermal Other

Plastic

Hardening:

☐ Use strain-rate-dependent data
☐ Use temperature-dependent data

Number of field variables:

Data

	Yield Stress	Plastic Strain
1	245000000	0
2	245000000	10

Ορισμός της πλαστικής περιοχής

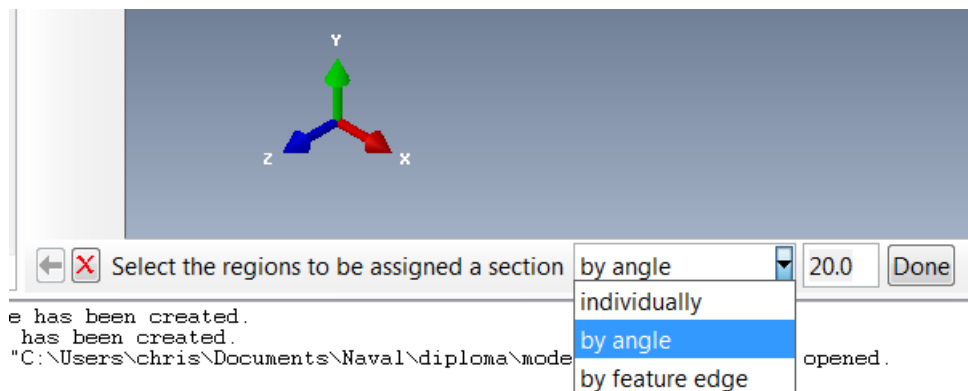
Από τη στιγμή που έχουν δημιουργηθεί τα επιθυμητά υλικά για της ανάγκες της μοντελοποίησης με τις αντίστοιχες ιδιότητές τους, θα πρέπει να γίνει η δημιουργία των ξεχωριστών διατομών που διακρίνονται στην κατασκευή (Create Section) οι οποίες ορίζονται από το υλικό κατασκευής τους και το πάχος. Στην περίπτωση μας το υλικό όλων των διατομών είναι ο κοινός χάλυβας. Από τα δεδομένα του πειράματος γνωρίζουμε ότι υπάρχουν έξι (6) διαφορετικές σε πάχος διατομές οι οποίες είναι οι παρακάτω:

1. Διατομή ελάσματος καταστρώματος με πάχος 4,09mm
2. Διατομή ελάσματος πυθμένα με πάχος 3,75mm
3. Διατομή ελάσματος πλευράς Port με πάχος 3,95mm
4. Διατομή ελάσματος πλευράς Starboard με πάχος 3.85mm
5. Διατομή ενισχυτικών με πάχος 4,35mm
6. Διατομή ελάσματος πλαισίων νομέων με πάχος 6,14mm

Η δημιουργία μίας διατομής αποτελεί ιδιαίτερα απλή διαδικασία, αφού μετά την επιλογή του εικονιδίου Create section αρκεί να εισάγουμε την τιμή του πάχους ελάσματος (shell thickness value) στις μονάδες που συμφωνούν με το σύστημα που εφαρμόζεται από την αρχή και να επιλεγεί το υλικό στην περιοχή Material. Εδώ όπως προείπαμε δεν υπάρχει καμμία δυσκολία καθώς το ένα και μοναδικό υλικό είναι ο κοινός χάλυβας (Steel). Τέλος, μας παρέχεται η δυνατότητα να επιλέξουμε τον αριθμό σημείων ολοκλήρωσης για τη διατομή (Thickness integration points).

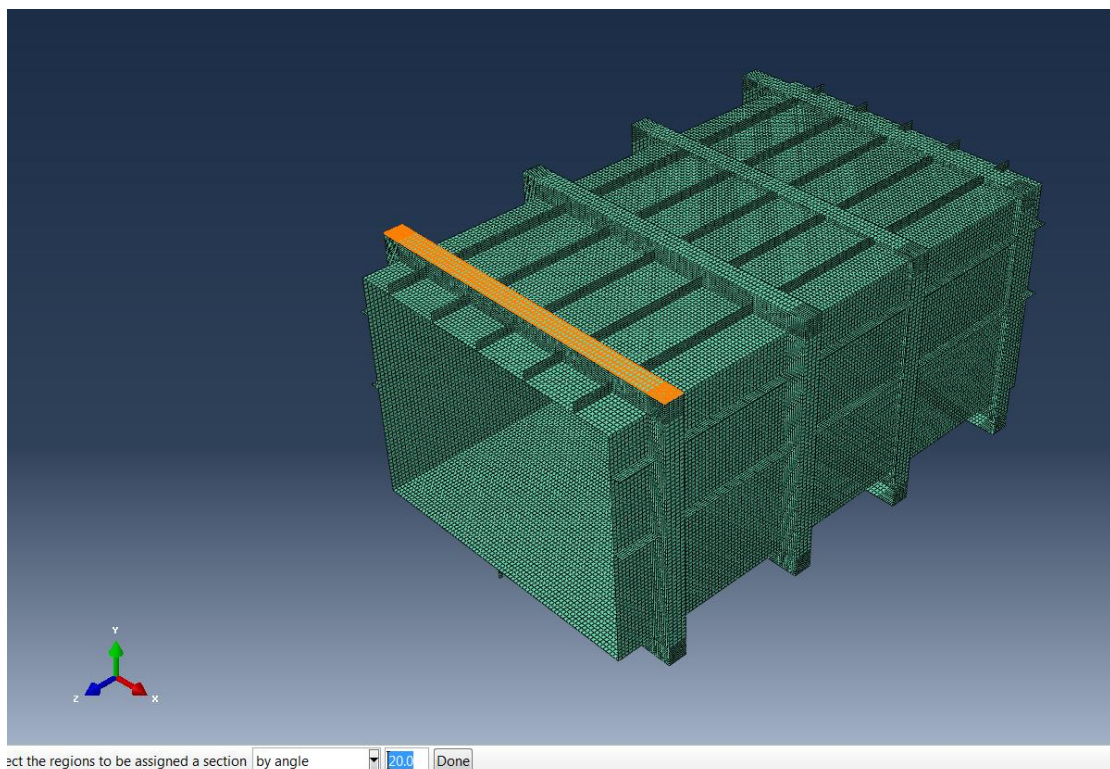
Τα **σημεία ολοκλήρωσης** της διατομής μαζί με το κέντρο του στοιχείου (element centroid) και τους κόμβους, είναι οι τρεις θέσεις στις οποίες μπορούν να εγγραφούν οι μεταβλητές της διατομής στη βάση δεδομένων. Η προεπιλεγμένη δυνατότητα που παρέχει το λογισμικό ABAQUS είναι η εγγραφή στα σημεία ολοκλήρωσης. Το λογισμικό εγγράφει μόνο τα δεδομένα στα σημεία ολοκλήρωσης στη βάση δεδομένων. Η μεταφορά των αποτελεσμάτων από τα σημεία ολοκλήρωσης σε κάποια άλλη επιθυμητή θέση στο Abaqus/Standard και στο Abaqus/Explicit γίνεται μέσω υπολογισμού μετά την διαδικασία ανάλυσης (Postprocessing calculator). Περισσότερα ώστε να κατανοηθεί ο ρόλος των σημείων ολοκλήρωσης θα παρατεθούν στην ενότητα **Ορισμός πλέγματος (mesh)**.

Αφού γίνουν οι παραπάνω διαδικασίες μετά θα πρέπει η διατομή που δημιουργήθηκε να εφαρμοστεί σε κάποιο τμήμα της κατασκευής. Αυτό το σημείο επίσης δεν περιέχει κάποια δυσκολία αφού με το εικονίδιο Assign Section της ενότητας *Ιδιότητα (Property)* και έχοντας εμφανίσει το επιθυμητό αντικείμενο επιλέγουμε το κάθε διαφορετικό τμήμα προσέχοντας ώστε στην περιοχή εντολών μετά το κείμενο “*Select the regions to be assigned a section*” να είναι επιλεγμένο “*by angle*”. Αυτό βοηθάει στην εφαρμογή διατομών σε μεγάλα μοντέλα τα οποία έχουν ομάδες στοιχείων με ίδιο προσανατολισμό.



Επιλογή που βοηθάει στην εφαρμογή ιδιοτήτων σε ομάδες ομοειδών στοιχείων με κοινό προσανατολισμό

Παρακάτω φαίνεται αυτή η δυνατότητα που παρέχει η επιλογή *by angle* για την επιλογή τμημάτων της κατασκευής που βρίσκονται υπό την ίδια γωνία. Να επισημάνουμε εδώ ότι η εφαρμογή ιδιοτήτων έγινε αφότου είχε διακριτοποιηθεί η διατομή, στη συναρμολογημένη μορφή της.



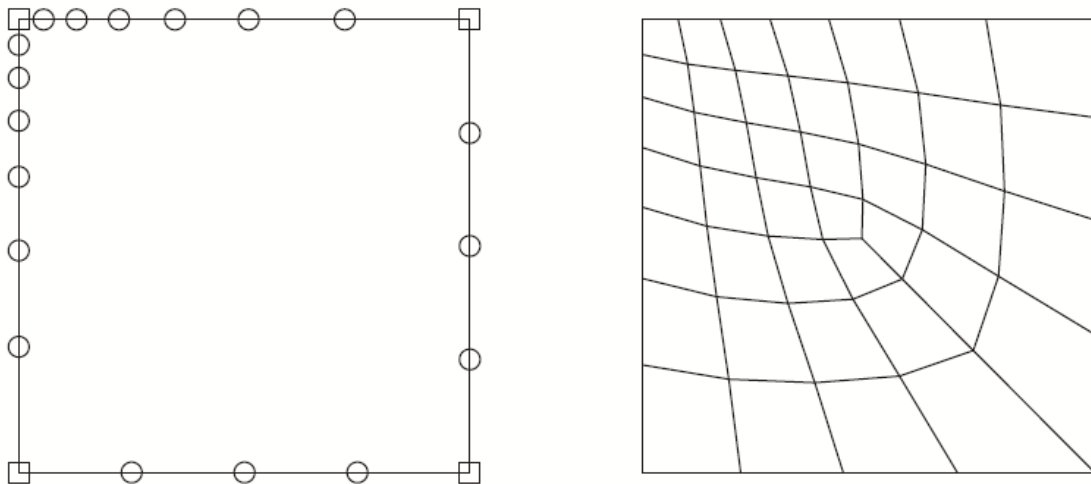
Εδώ φαίνεται ότι έχει επιλεγεί η άνω πλευρά του πρώτου νομέα. Με τον ίδιο τρόπο επιλέγονται όλα τα υπόλοιπα τμήματα της κατασκευής

Αφού περιγράψαμε τη διαδικασία κατασκευής του αντικειμένου και τον ορισμό ιδιοτήτων, στη συνέχεια θα περιγράψουμε τη διαδικασία δημιουργίας πλέγματος η οποία μπορεί και να έχει προηγηθεί της διαδικασίας ορισμού ιδιοτήτων.

Ορισμός πλέγματος

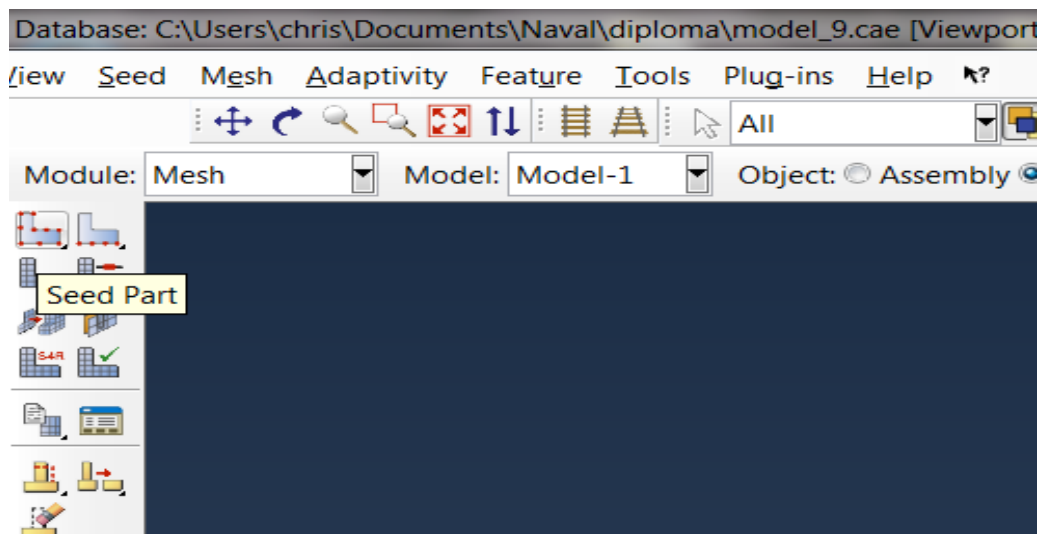
Όπως έχουμε αναφέρει και παραπάνω, κατά τη δημιουργία του συναρμολογημένου αντικειμένου έχουμε επιλέξει ώστε οι απεικονίσεις των επιμέρους τμημάτων να είναι εξαρτημένες (dependent part instances). Εξαιτίας αυτού, αρκεί μοναχά η δημιουργία πλέγματος σε καθένα από τα ξεχωριστά αντικείμενα ούτως ώστε και το τελικό αντικείμενο να είναι διακριτοποιημένο. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η παρακάτω.

Η πυκνότητα του πλέγματος καθορίζεται από τον αριθμό των σημείων (*seeds*) που ορίζουμε κατά μήκος των άκρων του κάθε αντικειμένου. Στα σημεία αυτά ορίζονται οι θέσεις των ακραίων κόμβων (*nodes*) των στοιχείων. Από το κάτωθι σχήμα γίνεται κατανοητός ο ρόλος των σημείων αυτών στην τελική μορφή του πλέγματος που δημιουργείται.

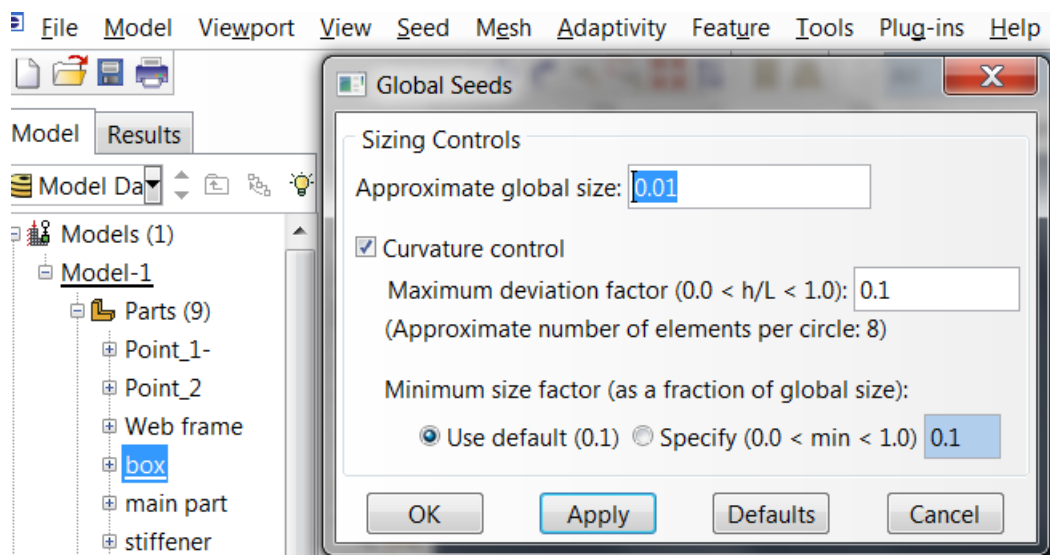


Πλέγμα που δημιουργήθηκε έπειτα από ορισμό διαφορετικού αριθμού σημείων στις απέναντι πλευρές.

Στο περιβάλλον του λογισμικού ABAQUS.cae ο ορισμός των ακραίων αυτών σημείων (*seeds*) γίνεται μέσα από την ενότητα *Πλέγμα (Mesh module)*. Εδώ να σημειώσουμε ότι η απόσταση μεταξύ αυτών των σημείων καθορίζεται από το χρήστη και ως συνέπεια έχει τη δημιουργία διαφορετικού μεγέθους πλέγματος ανάλογα με τις απαιτήσεις ακρίβειας που ζητούνται. Στη συνέχεια παραθέτουμε τη διαδικασία που ακολουθείται ώστε να οριστεί πλέγμα σε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα της κατασκευής. Ωστόσο, προηγουμένως πρέπει να τονίσουμε ότι παρέχεται η δυνατότητα ορισμού ενός καθολικού μεγέθους πλέγματος σε ένα αντικείμενο ή η εναλλαγή του μεγέθους σε διάφορα τμήματα τα οποία έχουμε προηγουμένως καθορίσει με τη διαδικασία *Partition*.

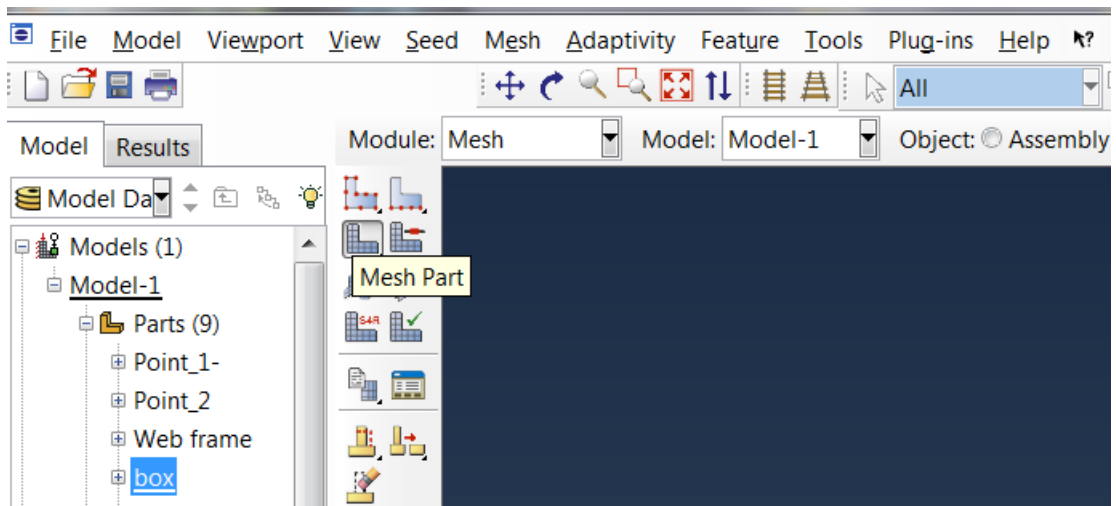


Επιλογή η οποία μας επιτρέπει τον καθολικό ορισμό του μεγέθους του πλέγματος σε ολόκληρο το αντικείμενο

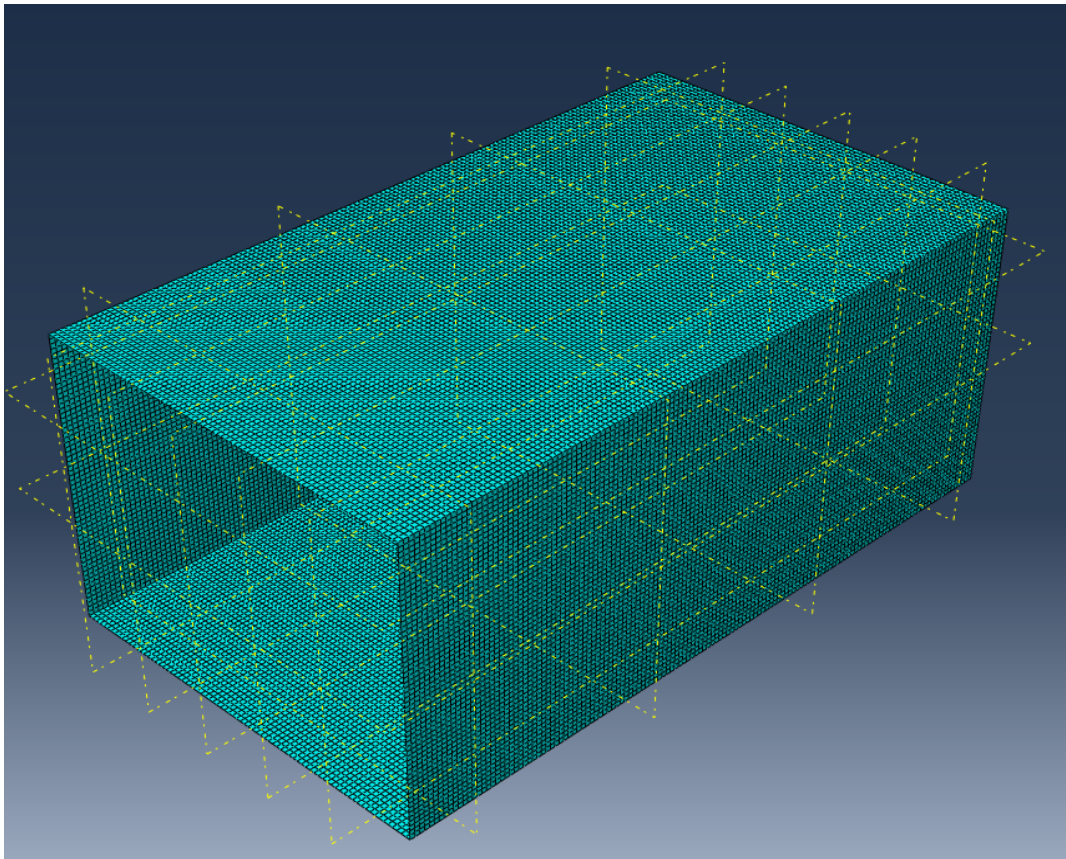


Παράθυρο μέσα από το οποίο μπορούμε να ορίσουμε την καθολική απόσταση των ακραίων σημείων σε όλο το αντικείμενο. Εδώ αυτή η απόσταση έχει οριστεί 0.01m

Στη συνέχεια, με την επιλογή του εικονιδίου *Mesh Part* το λογισμικό ABAQUS.cae δημιουργεί αυτόματα το πλέγμα σε όλο το αντικείμενο. Μερικές ακόμα εικόνες που περιγράφουν αυτή τη διαδικασία μέσα από το περιβάλλον του λογισμικού δίνονται στην επόμενη σελίδα.

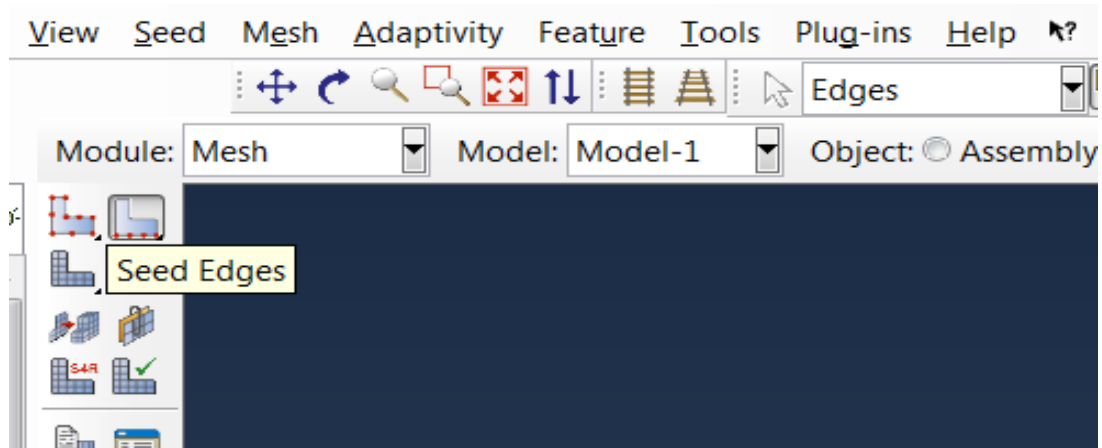


Εικονίδιο με το οποίο γίνεται αυτόματα η δημιουργία του πλέγματος αφού έχουμε ορίσει πρώτα ακραία σημεία (seeds)



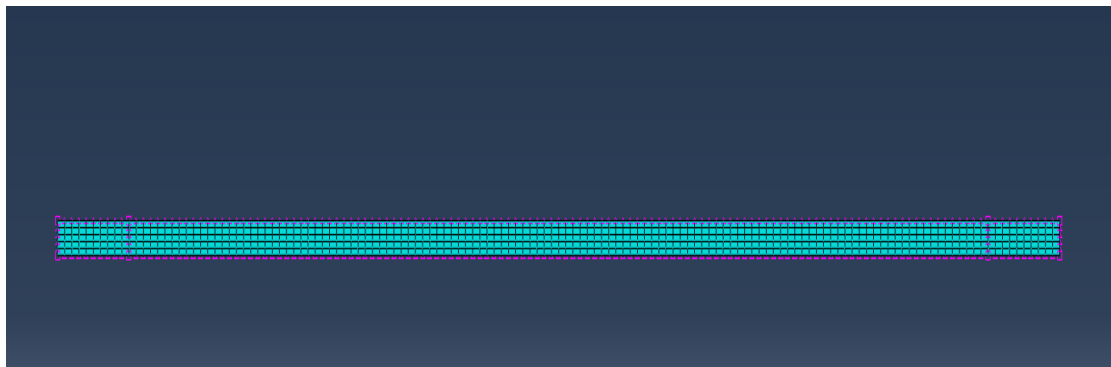
Τελική εικόνα του διακριτοποιημένου ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου. Όλα τα στοιχεία είναι τετράγωνα πλευράς 0.01m

Στην περίπτωση όπου κατά μήκος μίας ακμής θέλουμε να μεταβάλλουμε το μέγεθος των στοιχείων ή όταν σε ένα αντικείμενο θέλουμε να κατασκευάσουμε πλέγμα στις δύο διαστάσεις του, τότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε το εικονίδιο *Seed edges*. Με τον τρόπο αυτό και επιλέγοντας τις επιθυμητές ακμές μπορούμε να μεταβάλλουμε την πυκνότητα του πλέγματος. Για περισσότερη κατανόηση προσθέτουμε κάποιες εικόνες στη συνέχεια.



Επιλογή με την οποία μπορούμε να μεταβάλλουμε την πυκνότητα πλέγματος σε διάφορα τμήματα του αντικειμένου

Η επόμενη εικόνα αφορά ένα από τα ενισχυτικά της κατασκευής όπου κατά τη διαμήκη διεύθυνση η διάσταση των στοιχείων είναι 0.01m και κατά την εγκάρσια 0.005m.

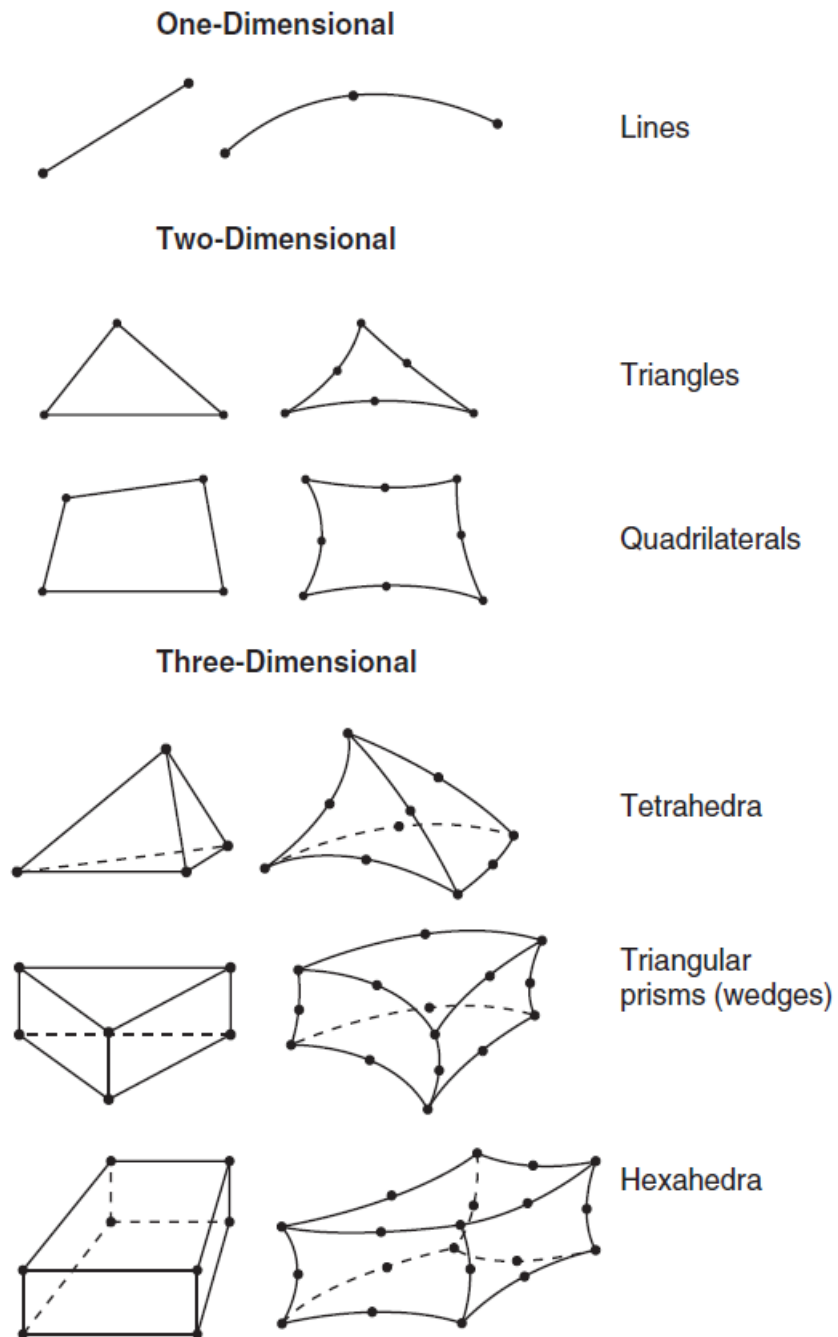


Ενισχυτικό το οποίο έχει διακριτοποιηθεί με τετραεδρικά στοιχεία μήκους 0.01m και ύψους 0.005m

Για την ολοκλήρωση της παρούσας ενότητας θα αναφερθούμε στον τύπο των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση. Το λογισμικό ABAQUS παρέχει τη δυνατότητα χρησιμοποίησης των παρακάτω τύπων στοιχείων:

- Στοιχεία μίας διάστασης.
- Στοιχεία δύο διαστάσεων και
- Στοιχεία τριών διαστάσεων.

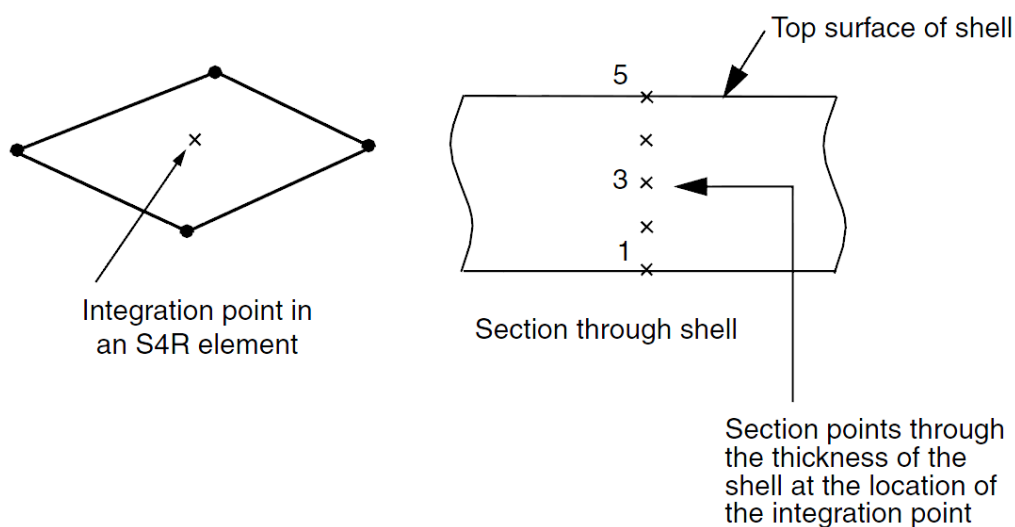
Παρακάτω φαίνονται ορισμένα παραδείγματα τέτοιων στοιχείων.



Σχήματα στοιχείων

Ο τύπος των στοιχείων μπορεί να αλλάχθει εάν βρισκόμενοι στην ενότητα *Πλέγμα* από βασική μπάρα εργαλείων επιλέξουμε **Mesh→ Element Type**. Επίσης, από την ίδια ενότητα, με την επιλογή **Mesh→ Controls** μπορούμε να αλλάξουμε το σχήμα των στοιχείων. Κάθε τμήμα του πλέγματος έχει έναν ή περισσότερους τύπους στοιχείων ανατεθειμένους από προεπιλογή. Κάθε τύπος στοιχείου αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σχήμα στοιχείου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτό το τμήμα. Για παράδειγμα ένα τμήμα πλέγματος σε αντικείμενο-έλασμα (shell) έχει, τυπικά, τετραεδρικούς ή τριγωνικούς τύπους στοιχείων ανατεθειμένους από προεπιλογή. Ωστόσο παρέχεται στο χρήστη να αλλάξει αυτή την επιλογή για κάθε στοιχείο το οποίο είναι τοπολογικά ισοδύναμο με το σχήμα του ανατεθειμένου στοιχείου στο συγκεκριμένο τμήμα. Έτσι λοιπόν, μπορεί να επιλεγεί η διακριτοποίηση ενός τμήματος ελάσματος μόνο με τριγωνικά στοιχεία και να αγνοηθεί η ανάθεση των τετραεδρικών στοιχείων.

Στην παρούσα εργασία, από τη στιγμή που όλα τα αντικείμενα είναι κατασκευασμένα ως ελάσματα χρησιμοποιήθηκαν αναλόγως με την περίπτωση τα τετραεδρικά στοιχεία *S4* και *S4R* για τα οποία θα αναφέρουμε συνοπτικά ορισμένα χαρακτηριστικά. Το πρώτο γράμμα του ονόματος μας δείχνει σε ποια οικογένεια ανήκει το συγκεκριμένο στοιχείο. Στην περίπτωσή μας το γράμμα “S” υποδεικνύει ότι πρόκειται για ένα στοιχείο ελάσματος (Shell). Ο αριθμός που υπάρχει στο όνομα του στοιχείου δείχνει τον αριθμό των κόμβων του στοιχείου. Εδώ το “4” μας λέει ότι πρόκειται για 4-κομβικά στοιχεία. Η διαφορά μεταξύ *S4* και *S4R* έγκειται στο ότι το στοιχείο *S4* είναι πλήρης ολοκλήρωσης (full integration-με τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης στην επιφάνεια του στοιχείου), ενώ το *S4R* είναι μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration-με ένα σημείο ολοκλήρωσης στην επιφάνεια του στοιχείου). Με την παρακάτω εικόνα γίνεται πιο κατανοητή αυτή η διαφορά.



Σημεία ολοκλήρωσης κατά το πάχος της διατομής (thickness integration points) σε ένα στοιχείο S4R

Η επιλογή ανάμεσα σε αυτούς τους δύο τύπους στοιχείων γίνεται με βάση την επιθυμητή ακρίβεια των υπολογισμών. Πρέπει ωστόσο να έχουμε κατά νου ότι η μετάβαση από *S4R* σε *S4* αυξάνει το μέγεθος του μοντέλου και την απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ και τον απαιτούμενο χρόνο. Τέλος, θα πρέπει να είμαστε ιδιαίτερα προσεκτικοί ώστε μετά τη συναρμογή των ξεχωριστών αντικειμένων σε ενιαίο, να μην παρατηρούνται διπλοί κόμβοι ή «κόμβοι στον αέρα» στα σημεία ένωσης κοινών αντικειμένων κάτι το οποίο το έχουμε αναφέρει και παραπάνω (βλ. σελίδα 49). Αυτό μπορεί να δημιουργήσει περαιτέρω αστάθεια του τελικού αντικειμένου και λανθασμένα αποτελέσματα εξαιτίας αυτού.

Ορισμός βήματος (step)

Κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης ορίζονται ένα ή περισσότερα βήματα ανάλυσης. Η ακολουθία των βημάτων παρέχει ένα βολικό τρόπο για τη σύλληψη αλλαγών στη φόρτιση και στις συνοριακές συνθήκες της μοντελοποίησης, αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν τα διάφορα αντικείμενα μεταξύ τους. Επιπλέον, τα βήματα επιτρέπουν την αλλαγή στη διαδικασία της ανάλυσης, την εξαγωγή δεδομένων και διάφορους ελέγχους. Μπορούν επίσης να οριστούν βήματα για τον ορισμό γραμμικής διαταραχής. Μπορεί να γίνει αλλαγή της διαδικασίας ανάλυσης ενός υπάρχοντος βήματος με την επιλογή **replace**. Πρωτού περιγράψουμε τις συγκεκριμένες επιλογές που έχουν γίνει στην παρούσα εργασία στην ενότητα αυτή, θα ήταν χρήσιμο να αναφέρουμε κάποια βασικά για την έννοια του βήματος στην ανάλυση.

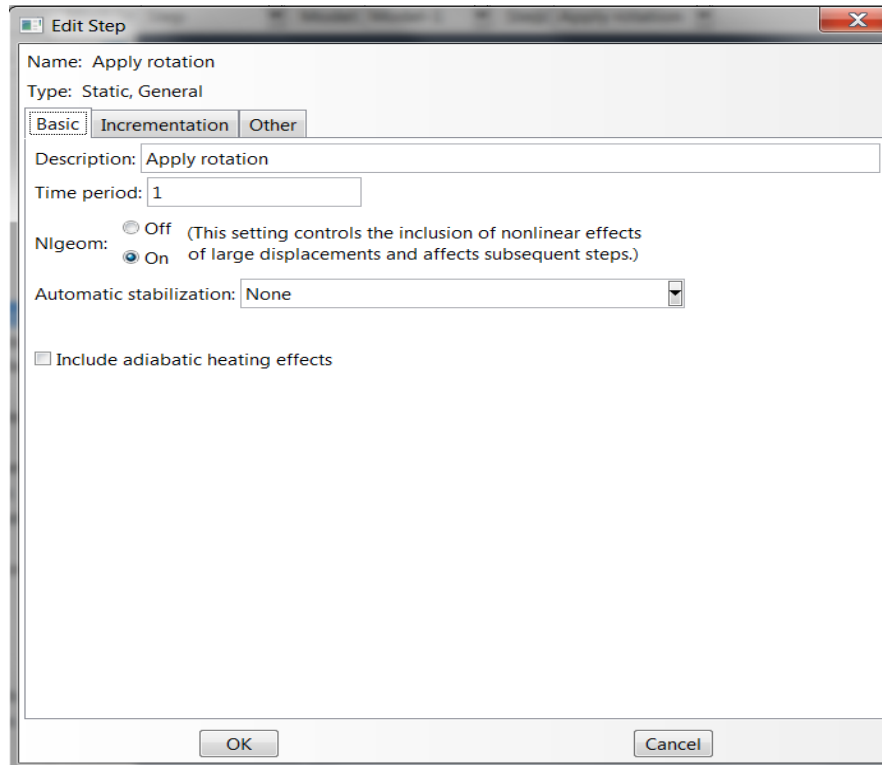
Μία μοντελοποίηση σε ABAQUS/CAE χρησιμοποιεί δύο τύπους βημάτων:

- **Initial (αρχικό):** Το ABAQUS/CAE δημιουργεί αυτόματα το ειδικό βήμα *Initial* στη βηματική ακολουθία. Το ABAQUS/CAE δημιουργεί μόνο ένα *Initial step* για μία μοντελοποίηση και δεν μπορεί να μετονομαστεί, να μορφοποιηθεί, να αντικατασταθεί, να αντιγραφεί ή να διαγραφεί. Το αρχικό αυτό βήμα μας επιτρέπει να ορίσουμε συνοριακές συνθήκες, προκαθορισμένα πεδία και αλληλεπιδράσεις που είναι εφαρμόσιμες στις αρχές της ανάλυσης. Για παράδειγμα, εάν μία συνοριακή συνθήκη ή μία αλληλεπίδραση εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, είναι συνήθως βολικό αυτή η κατάσταση να εφαρμοστεί στο αρχικό βήμα (*Initial step*).
- **Analysis step (βήμα ανάλυσης):** Το αρχικό βήμα ακολουθείται από ένα ή περισσότερα βήματα ανάλυσης (*analysis step*). Κάθε βήμα ανάλυσης συνοδεύεται από μια συγκεκριμένη διαδικασία που ορίζει το είδος της ανάλυσης που θα εκτελεστεί κατά τη διάρκεια του βήματος, όπως για παράδειγμα μία στατική ανάλυση τάσεων ή μία ανάλυση παροδικής διάδοσης θερμότητας. Μπορεί η διαδικασία ανάλυσης να αλλαχθεί από βήμα σε βήμα σύμφωνα με έναν ευνόητο τρόπο, έτσι ώστε να έχουμε μεγάλη ευελιξία στη διενέργεια αναλύσεων.

Από τη στιγμή που η κατάσταση του μοντέλου (τάσεις, παραμορφώσεις, θερμοκρασίες κτλ) επικαιροποιείται μέσα από τα γενικά βήματα ανάλυσης, η επίδραση της προηγούμενης αλληλουχίας πάντοτε περιλαμβάνεται στην απόκριση για κάθε νέο βήμα. Δεν υπάρχει όριο στον αριθμό των βημάτων ανάλυσης που μπορούμε να ορίσουμε αλλά υπάρχουν περιορισμοί στην ακολουθία των βημάτων.

Όταν επιλέξουμε **Step→ Create** από την κύρια γραμμή επιλογών εμφανίζεται μία περιοχή επιλογών **Create Step** στην οποία μπορούμε να καθορίσουμε το είδος της διαδικασίας για το βήμα που δημιουργούμε. Παρόμοια, αν γίνει η επιλογή **Step→ Replace** από την κύρια γραμμή επιλογών, θα εμφανιστεί μία περιοχή **Replace Step** μέσα από την οποία μπορούμε να καθορίσουμε το είδος μιας νέας διαδικασίας για ένα υπάρχον βήμα. Στη δική μας περίπτωση και με βάση τα θεωρητικά στοιχεία που έχουμε παραθέσει στο πρώτο κεφάλαιο, οι διαδικασίες που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση ανάλογα με τις δυσκολίες που εμφανίστηκαν ήταν η γενική στατική μη γραμμική διαδικασία (*Static, General*) και η γενική μη γραμμική διαδικασία *Riks* (*Static, Riks*). Η κάθε μία από τις προαναφερόμενες διαδικασίες χρησιμοποιεί έναν από τους δύο αλγόριθμους επίλυσης που περιγράφηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Η μεν πρώτη χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο *Newton* ενώ η δεύτερη τον αλγόριθμο *Riks*. Στην παρούσα μοντελοποίηση ορίστηκε μόνο ένα βήμα φόρτισης όπου εφαρμόστηκε η μέγιστη περιστροφή παρότι στο πραγματικό πείραμα υπήρχαν τρία. Αυτό έγινε διότι κατά την κατασκευή του μοντέλου στο περιβάλλον ABAQUS/CAE δεν προέκυψαν παραμένουσες τάσεις συγκόλλησης, η ελάττωση των οποίων ήταν ο λόγος των δύο κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης κατά την εκτέλεση του πραγματικού πειράματος. Για τον ορισμό των βηματικών διαδικασιών είναι απαραίτητος ο καθορισμός κάποιων παραμέτρων τις οποίες θα παρουσιάσουμε παρακάτω με εικόνες μέσα από το περιβάλλον ABAQUS/CAE.

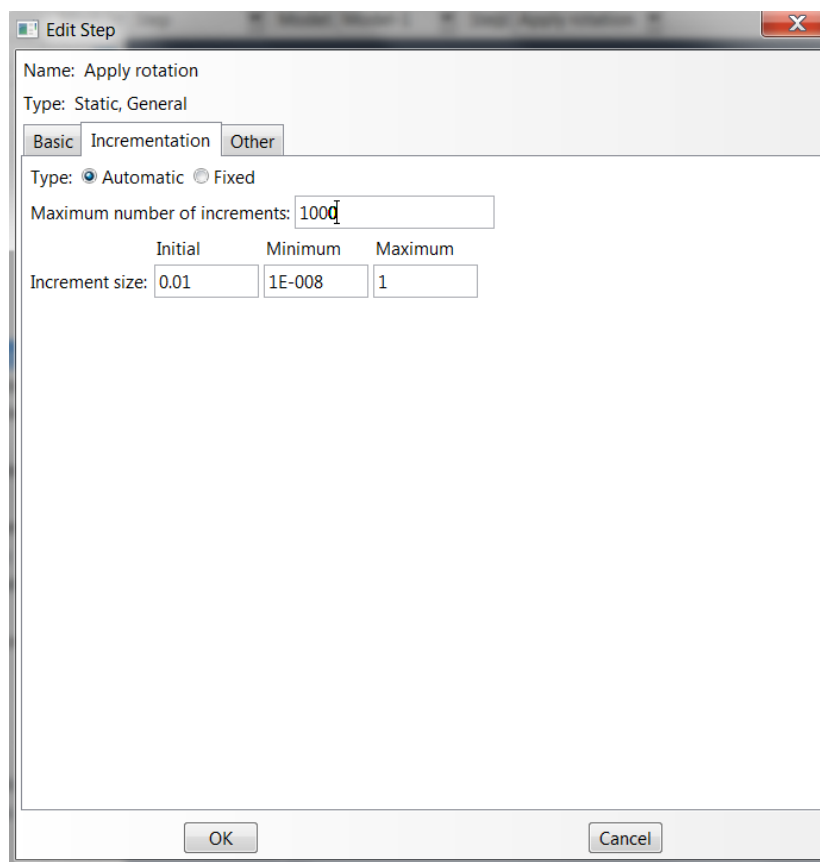
Για τη βηματική γενική στατική μη γραμμική διαδικασία



Στην καρτέλα αυτή (Basic) του παραθύρου που εμφανίζεται πρέπει να προσέξουμε ώστε η επιλογή NLgeom να είναι στο On

Η επιλογή NLgeom, όπως άλλωστε μπορούμε να διακρίνουμε και από την παραπάνω εικόνα, σε ένα βήμα καθορίζει εάν το λογισμικό Abaqus θα προσμετρά τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες σε αυτό το βήμα. Η επιλογή NLgeom είναι προεπιλεγμένη στο On στο Abaqus/Explicit και στο Off στο Abaqus/Standard γι'αυτό και θα πρέπει να την επιλέξει ο χρήστης σε περίπτωση που επιθυμεί η ανάλυση να είναι μη γραμμική. Η αλληλουχία των βημάτων και η τρέχουσα επιλογή NLgeom καθορίζουν εάν αυτή η επιλογή μπορεί να αλλάξει σε ένα συγκεκριμένο βήμα. Για παράδειγμα, εάν το λογισμικό Abaqus ήδη προσμετρά τις γεωμετρικές μη γραμμικότητες, η επιλογή NLgeom είναι τοποθετημένη στο On για όλα τα ακολουθούντα βήματα και αυτή η επιλογή δεν μπορεί να αλλάξει. Εάν επιτρέπεται, οι παρακάτω τρόποι μας επιτρέπουν να αλλάξουμε την επιλογή NLgeom.

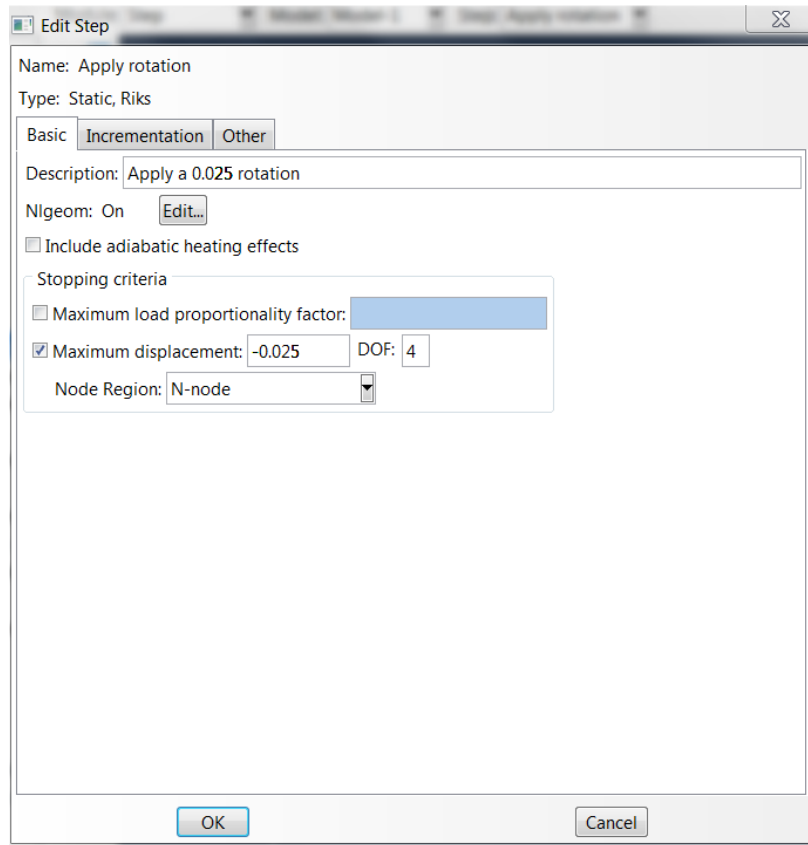
- Στην καρτέλα Basic και στην επιλογή NLgeom επιλέγουμε Off.
- Επιλέγουμε Step → NLgeom από την κύρια γραμμή επιλογών.
- Επιλέγουμε NLgeom στο διαχειριστή βημάτων (Step manager).



Καρτέλα Incrementation του παραθύρου Edit Step

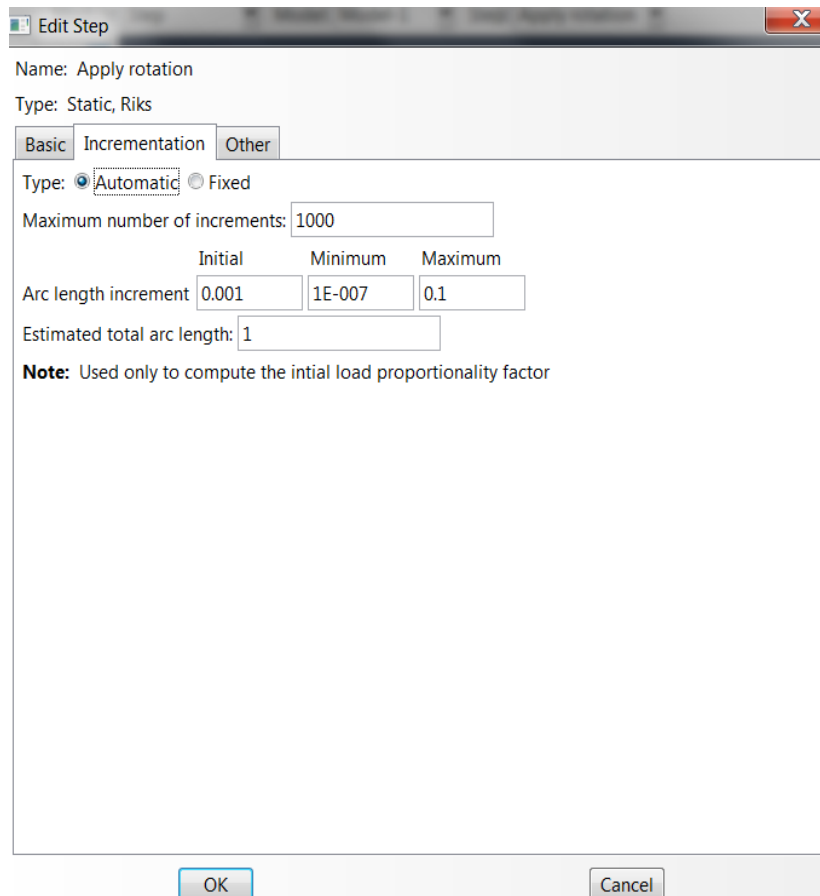
Στην καρτέλα Incrementation καθορίζουμε το μέγιστο αριθμό προσανξήσεων για την ολοκλήρωση του βήματος, τον οποίο εισάγουμε έτσι ώστε να επιτρέπει στο λογισμικό να επιτύχει τη σύγκλιση (εδώ έχει οριστεί στις 1000 προσανξήσεις). Επίσης, καθορίζουμε την αρχική, τη μέγιστη και την ελάχιστη προσανξήση φορτίου πέρα από την οποία το λογισμικό θα διακόψει τη διαδικασία ως μη συγκλίνουσα. Την ελάχιστη τιμή καλό είναι να την ορίσουμε αρκετά μικρή ώστε να μη διακόπτεται η διαδικασία επίλυσης αρκετά σύντομα και να δώσουμε τη δυνατότητα στο λογισμικό σε σημεία όπου συναντά προβλήματα σύγκλισης να ελαττώνει αρκετά την επαύξηση φορτίου ώστε να μπορέσει να τα ξεπεράσει (τέτοια σημεία για παράδειγμα είναι όταν στοιχεία της διατομής εμφανίζουν έντονο λυγισμό). Η επιλογή *Automatic* δίνει τη δυνατότητα στο λογισμικό να καθορίζει μόνο του την επαύξηση φορτίου μεταξύ των μέγιστων και ελάχιστων ορίων. Εάν είχαμε επιλέξει την εναλλακτική *Fixed* θα έπρεπε να εισάγουμε εμείς μια μόνιμη επαύξηση φορτίου πάνω ή κάτω από την οποία δεν θα μπορούσε να μεταβεί το πρόγραμμα πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν θα του παρείχαμε τη δυνατότητα ελάττωσης σε σημεία δυσκολίας σύγκλισης. Στην καρτέλα *Other* τουλάχιστον σε αυτή την εργασία δεν πραγματοποιήσαμε κάποια αλλαγή οπότε θεωρείται σκόπιμο να μην την εξετάσουμε.

Για τη βηματική γενική μη γραμμική διαδικασία *Riks*



Καρτέλα *Basic* του παραθύρου *Edit Step*

Στην περίπτωση ου θέλουμε να ορίσουμε μια γενική μη γραμμική διαδικασία *Riks* στο παράθυρο *Edit Step* παρατηρούνται ορισμένες διαφορές σε σχέση με πριν. Εδώ θα πρέπει να θέσουμε κριτήριο τέλους το οποίο για εμάς ορίζεται ως η μέγιστη αρνητική περιστροφή γύρω από τον άξονα *xx* να είναι -0.025rad . Αυτό το καθορίζει η τιμή που βάζουμε στην περιοχή **Maximum Displacement** και στην περιοχή **Degree Of Freedom**. Στο λογισμικό *Abaqus* ο βαθμός ελευθερίας τέσσερα (4) αντικατοπτρίζει την περιστροφή γύρω από τον άξονα ένα (1), δηλαδή το *xx*. Στην περιοχή **Node Region** έχουμε εισάγει το σημείο *N-node* στο οποίο είναι «δεμένα» οι ακραίοι κόμβοι της κατασκευής όπου ασκείται η αρνητική περιστροφή. Αυτό γίνεται με μια τεχνική που θα περιγραφεί σε επόμενο εδάφιο. Το σημείο αυτό έχει οριστεί ως *set* με το όνομα *N-node* για τη δική μας ευκολία, όπως και το σημείο *P-node* το οποίο είναι το αντίστοιχο σημείο στο οποίο εφαρμόζεται η θετική περιστροφή. Τα *sets* στοιχείων ή κόμβων δημιουργούνται για την ομαδοποίηση στοιχείων (elements) ή κόμβων (nodes) τα οποία έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά (λ.χ. μια ίδια φόρτιση) ή θέλουμε να εξετάσουμε ενιαία τη συμπεριφορά τους.



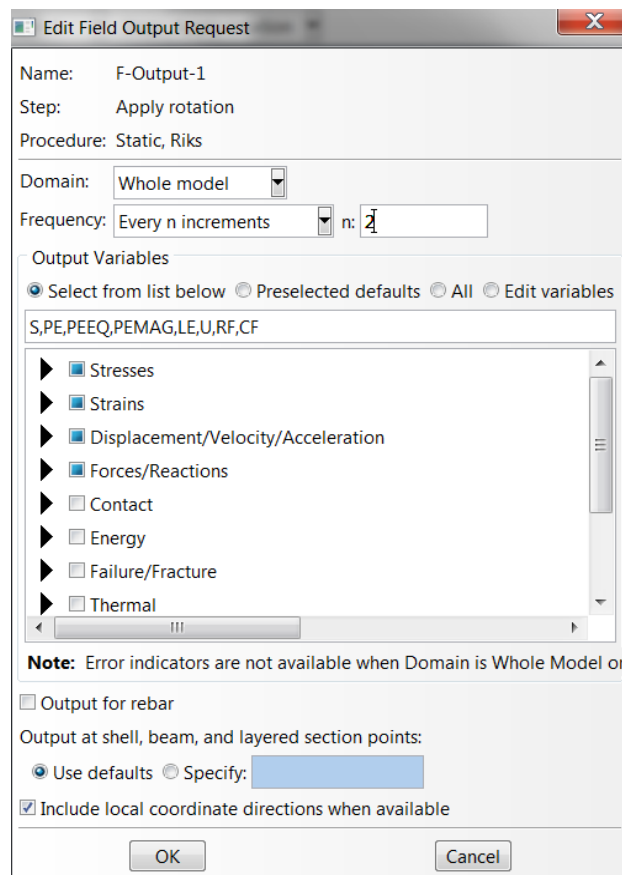
Καρτέλα Incrementation του παραθύρου Edit Step

Εδώ δεν αλλάζουν πολλά σε σχέση με την περίπτωση της γενικής στατικής φόρτισης απλώς δεν μιλάμε πλέον για επαυξήσεις φορτίου αλλά για επαυξήσεις στο μήκος τόξου της καμπύλης απόκρισης (βλ. σελ 15). Εδώ χρειάστηκε να περιορίσουμε και την τιμή του μέγιστου μήκους καθώς για αδιευκρίνιστους λόγους παρουσιαζόταν απότομη αύξηση ή μείωσή του. Η μείωση μπορεί να συμβεί εάν στην προσπάθεια του λογισμικού να επιλύσει το πρόβλημα βρει προσωρινά κάποιο ισοδύναμο μονοπάτι το οποίο βρίσκεται σε μικρότερο φορτίο ή παραμόρφωση απ'ότι βρίσκεται τη δεδομένη στιγμή. Αυτό σημαίνει αναστροφή της φόρτισης ώστε να επιλύσει προβλήματα κατά την προσπάθεια σύγκλισης στην επιθυμητή λύση. Για να κατανοηθεί αυτό καλύτερα παραπέμπουμε τον αναγνώστη στο διάγραμμα της σελίδας 15.

Στην ίδια ενότητα (Step module) μπορούμε να καθορίσουμε το είδος και το πλήθος των μεταβλητών που θα περιέχονται στη βάση δεδομένων, καθώς το λογισμικό Abaqus έχει τη δυνατότητα υπολογισμού ενός μεγάλου πλήθους μεταβλητών. Αυτό ορίζεται μέσα από τις επιλογές **field output** και **history output**. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε κάποια βασικά για τις δύο αυτές έννοιες ενώ θα παρουσιάσουμε και τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ τους.

Field output

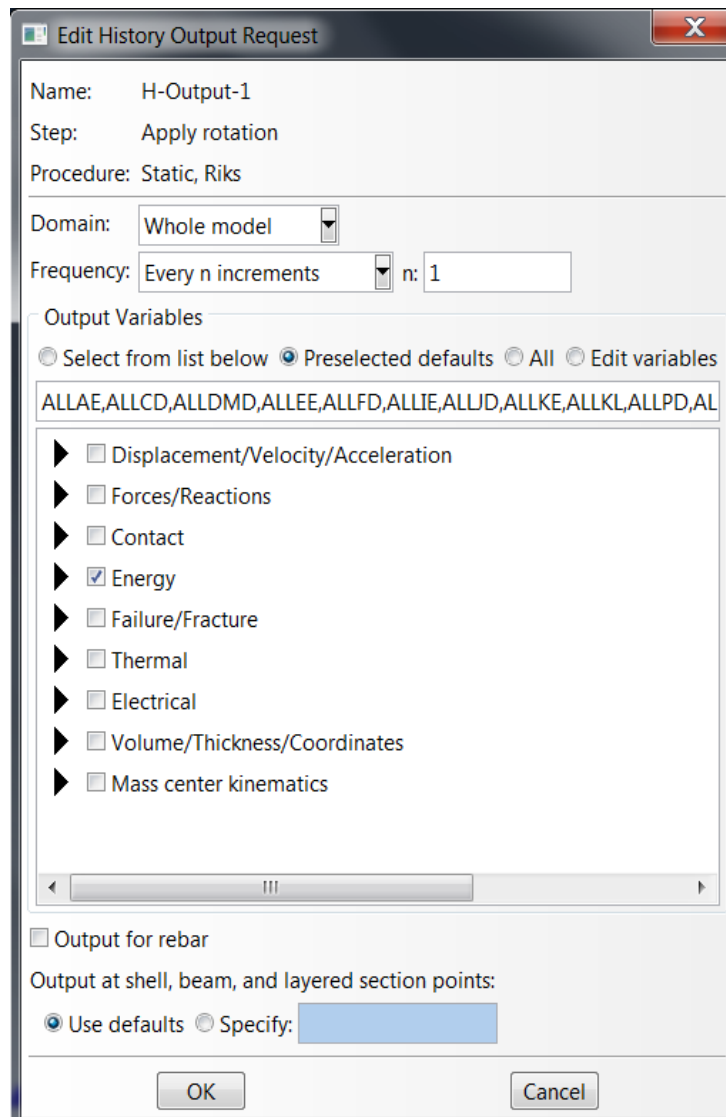
Το λογισμικό Abaqus δημιουργεί αποτελέσματα με βάση τα δεδομένα τα οποία είναι διασκορπισμένα στο σύνολο του μοντέλου ή σε ένα μέρος του. Στις περισσότερες περιπτώσεις μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) ώστε να δούμε αυτή την παραγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας το παραμορφωμένο σχήμα, το περίγραμμα κτλ. Η ποσότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων πεδίου που μας δίνει το λογισμικό Abaqus είναι συνήθως μεγάλη. Ως αποτέλεσμα ζητάμε από το λογισμικό να γράφει τα αποτελέσματα στη βάση δεδομένων σε χαμηλό ρυθμό, για παράδειγμα μετά από ένα βήμα ή στο τέλος της ανάλυσης. Όταν δημιουργούμε ένα αίτημα αποτελεσμάτων πεδίου (field output request), μπορούμε να καθορίσουμε τη συχνότητα εξαγωγής σε χρονικά διαστήματα ίσης απόστασης ή σύμφωνα με ένα σύνολο χρονικών σημείων. Για μια αναλυτική διαδικασία σε Abaqus/Standard μπορούμε εναλλακτικά να καθορίσουμε τη συχνότητα εξαγωγής με βάση τις προσauξήσεις (increments) ή μπορούμε να ζητήσουμε αποτελέσματα μετά την τελευταία προσauξηση σε κάθε βήμα. Αμέσως παρακάτω παραθέτουμε μια εικόνα από την μοντελοποίηση που συζητάμε στο παρόν κεφάλαιο ώστε να γίνουν πιο κατανοητά τα παραπάνω.



Στο παρόν αίτημα αποτελεσμάτων έχουμε επιλέξει ώστε το λογισμικό να γράφει στη βάση δεδομένων αποτελέσματα κάθε δύο επauξήσεις (increments). Από κάτω φαίνονται οι μεταβλητές που επιθυμούμε να εγγραφούν στη βάση δεδομένων

History output

Το λογισμικό Abaqus παράγει τα αποτελέσματα της χρονικής ιστορίας (history output) βάσει των δεδομένων σε συγκεκριμένα σημεία του μοντέλου. Στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η ενότητα της οπτικοποίησης (Visualization module) για την απεικόνιση αυτών των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα X-Y. Ο ρυθμός εξαγωγής των αποτελεσμάτων εξαρτάται από το πώς επιθυμεί ο χρήστης να τα χρησιμοποιήσει, ενώ μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος. Στην παρούσα μοντελοποίηση δεν ασχοληθήκαμε με την ανάλυση των αποτελεσμάτων της χρονικής ιστορίας, οπότε το μόνο που θα προσθέσουμε είναι η εικόνα από το περιβάλλον Abaqus που διαφέρει και ως προς τις μεταβλητές που μπορούν να ζητηθούν ως εξαγόμενα αποτελέσματα.



Αίτημα χρονικής ιστορίας των ενεργειών. Ωστόσο δεν χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία αφού δεν έγινε ενεργειακή ανάλυση

Ορισμός Αλληλεπιδράσεων (Interactions)

Μεταξύ άλλων σε αυτή την ενότητα μπορούμε να ορίσουμε μηχανικές και θερμικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε διάφορα τμήματα του μοντέλου ή μεταξύ τμημάτων του μοντέλου και διαφόρων παρελκόμενων, αναλυτικοί περιορισμοί μεταξύ τμημάτων του μοντέλου κ.ά. Στην παρούσα εργασία για να μοντελοποιήσουμε την κάμψη, αρχικά ορίσαμε δύο σημεία εκατέρωθεν της κατασκευής με συντεταγμένες

$X_1=0.4m$

$Y_1=0.321m$

$Z_1=-0.2m$

και

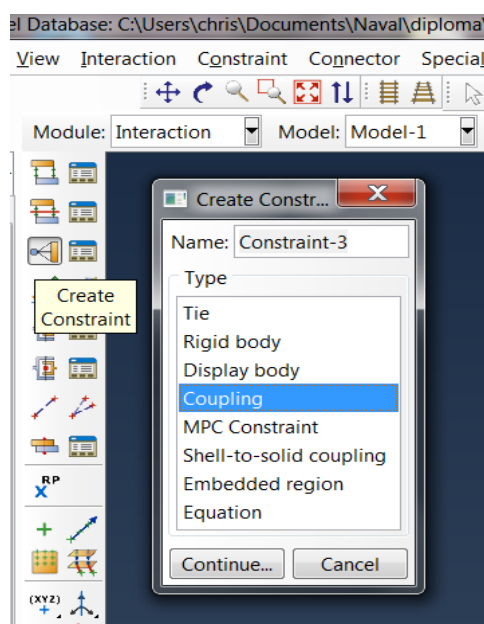
$X_2=0.4m$

$Y_2=0.321m$

$Z_2=1.6m$

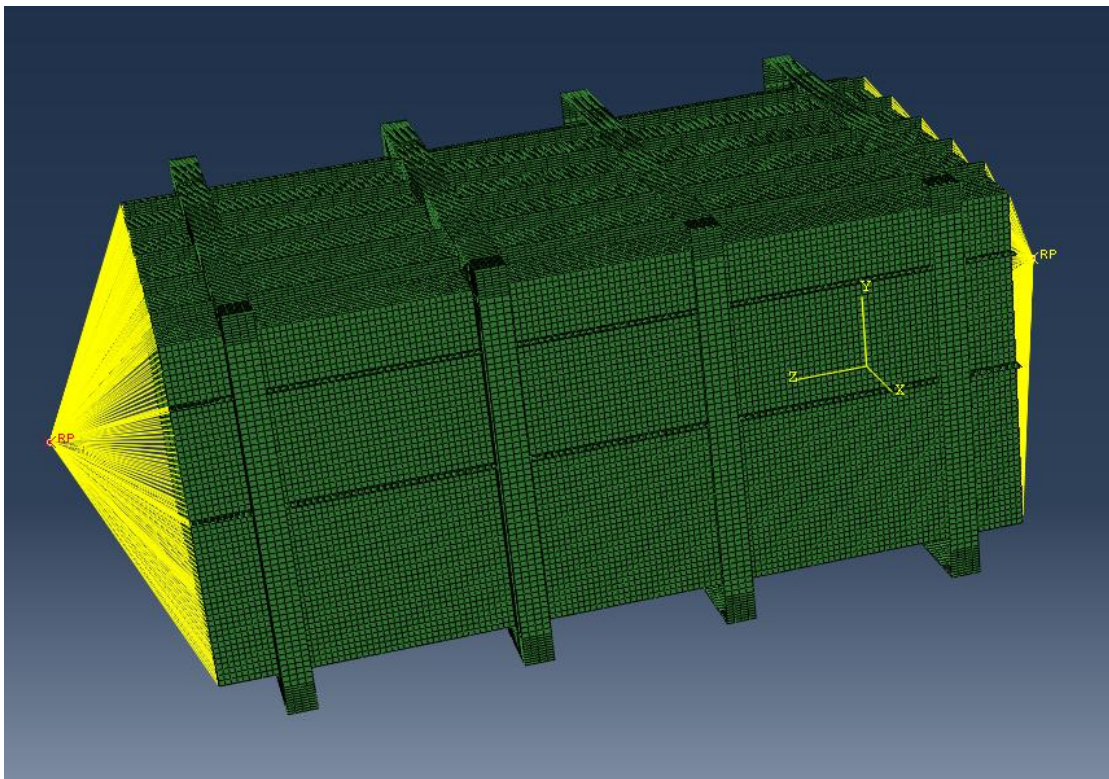
Αυτό που θα πρέπει να προσέξουμε είναι τα σημεία αυτά να βρίσκονται στις συντεταγμένες $(X,Y)=(0.4, 0.321)$ του κέντρου μάζας της κατασκευής και σε απόσταση ίση (αλλά αδιάφορη) από τις δύο πλευρές της κατασκευής. Εδώ έχουμε ορίσει αυτή την απόσταση στα 0.2m. Μετά τον ορισμό των δύο αυτών σημείων τα προσθέτουμε στην ενότητα Συναρμογή (Assembly) ως δύο ξεχωριστές απεικονίσεις (Part Instances). Αυτά τα σημεία θα χρησιμοποιηθούν για τη σύζευξη σε αυτά των ακραίων κόμβων των στοιχείων που βρίσκονται στις δύο πλευρές. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση του περιορισμού (Constrain) της σύζευξης (Coupling). Η διαδικασία που ακολουθήσαμε παρατίθεται στη συνέχεια.

Στην ενότητα Αλληλεπίδραση (Interaction module) επιλέγουμε το εικονίδιο **Create Constrain** (δημιουργία περιορισμού), ενώ από το παράθυρο επιλογών που εμφανίζεται επιλέγουμε **Coupling** (σύζευξη) και Continue.



Εκκίνηση ορισμού του περιορισμού της σύζευξης (Coupling Constrain)

Η συνέχεια δεν παρουσιάζει κάποια δυσκολία καθώς το λογισμικό μας δίνει τις κατάλληλες οδηγίες για τη δημιουργία του περιορισμού. Αρχικά, στην επιλογή **“Choose type of region”** εναλλακτική **Geometry** ώστε μετά να επιλέξουμε το ένα από τα δύο σημεία που δημιουργήσαμε προηγουμένως ως σημείο ελέγχου (Constrain Control Point). Δεν επιλέγουμε Mesh διότι το σημείο αυτό δεν βρίσκεται στο πλέγμα. Έπειτα, από τις δύο εναλλακτικές επιλέγουμε **Node Region** διότι επιθυμούμε τη σύζευξη στο σημείο ελέγχου των ακραίων κόμβων του πλέγματος. Έτσι, η διαδικασία ολοκληρώνεται και ο περιορισμός έχει δημιουργηθεί. Το ίδιο κάνουμε και με το άλλο σημείο ελέγχου που έχουμε δημιουργήσει. Για να γίνει πιο αντιληπτό το αποτέλεσμα στον αναγνώστη παραθέτουμε μία εικόνα από το περιβάλλον του λογισμικού που δείχνει οπτικοποιημένα αυτόν τον περιορισμό.



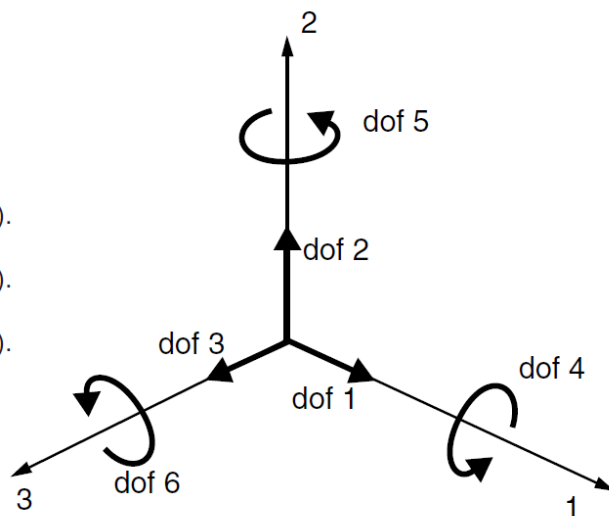
Οπτικοποιημένη μορφή του περιορισμού της σύζευξης (Coupling Constrain). Εδώ φαίνονται τα δύο σημεία ελέγχου, στα οποία έχουν συζευχθεί οι ακραίοι κόμβοι των δύο πλευρών

Η χρησιμότητα του παραπάνω περιορισμού θα γίνει πιο αντιληπτή στα αμέσως παρακάτω μέρος του παρόντος κεφαλαίου **Ορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions)**.

Ορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundary Conditions)

Στις κατασκευαστικές αναλύσεις, οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόζονται σε εκείνα τα τμήματα του μοντέλου όπου οι μετατοπίσεις και οι περιστροφές είναι γνωστές. Αυτά τα τμήματα μπορούν να περιορισθούν ώστε να παραμένουν σταθερά (δηλαδή να έχουν μηδενικές μετατοπίσεις ή/και περιστροφές) κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ή να έχουν καθορισμένες μη μηδενικές μετατοπίσεις ή/και περιστροφές. Στο μοντέλο το οποίο κατασκευάσαμε και παρουσιάζουμε σε αυτό το κεφάλαιο, οι συνοριακές συνθήκες εφαρμόστηκαν στα σημεία ελέγχου του περιορισμού σύζευξης. Στο ένα από τα δύο σημεία (N-node) εφαρμόστηκε πλήρης πάκτωση ενώ στο άλλο (P-node) σταθερές κρατήθηκαν οι μετατοπίσεις στους άξονες **X,Y** και οι περιστροφές γύρω από τους άξονες **Y,Z**. Οι διευθύνσεις γύρω από τις οποίες είναι δυνατή η κίνηση του μοντέλου ονομάζονται βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom). Οι συμβάσεις που χρησιμοποιούνται από το λογισμικό ABAQUS για τις ονομασίες των περιστροφικών και μεταφορικών βαθμών ελευθερίας δίδονται στο παρακάτω σχήμα.

- 1 Translation in the 1-direction (U1).
- 2 Translation in the 2-direction (U2).
- 3 Translation in the 3-direction (U3).
- 4 Rotation about the 1-direction (UR1).
- 5 Rotation about the 2-direction (UR2).
- 6 Rotation about the 3-direction (UR3).



Ονομασίες των έξι βαθμών ελευθερίας που χρησιμοποιεί το λογισμικό ABAQUS

Στο ένα από τα δύο σημεία ελέγχου αφήσαμε ελεύθερη τη μετατόπιση κατά τον άξονα **Z** (διαμήκης άξονας της κατασκευής) ώστε να μην εμφανιστούν αξονικά φορτία και ως αποτέλεσμα να έχουμε καθαρή κάμψη. Για τον ίδιο λόγο είναι σταθερή η μετατόπιση κατά τον άξονα **Y** και στα δύο σημεία ελέγχου ώστε να έχουμε αλληλοεξουδετέρωση των ροπών που δημιουργούνται από τις κάθετες αντιδράσεις. Η τιμή της περιστροφής **UR1** καθορίστηκε ως συνοριακή συνθήκη στο βήμα **Apply rotation**, με τιμή ίση και αντίθετη στα δύο σημεία ελέγχου και μέτρο 0.025rad. Οι ακραίοι κόμβοι των πλευρών αφού είναι συζευγμένοι με τα σημεία ελέγχου, επί της ουσίας προσλαμβάνουν την ίδια περιστροφή με αυτά.

Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μία αντιδρώσα ροπή λόγω της περιστροφής την οποία και μπορούμε να μετρήσουμε στο καθένα από τα σημεία ελέγχου. Αυτός ο τρόπος επιλέχθηκε αφού πρώτα έγιναν επανειλημμένες προσπάθειες για την εύρεση της λύσης με απευθείας εφαρμογή ροπής. Με τον τρόπο αυτό δεν καταφέραμε να φτάσουμε στην επίλυση διότι όταν κάποια στοιχεία της κατασκευής υπέστησαν λυγισμό το φορτίο δεν μπορούσε να μειωθεί αλλά αυξανόταν μέχρι την επίτευξη της ροπής που ζητούσαμε και έτσι η κατασκευή κατέρρεε γρήγορα. Η μέθοδος της εφαρμογής περιστροφής μας επέτρεψε να βρούμε τη μέγιστη ροπή της κατασκευής αφού όταν εκείνη άρχιζε να υφίσταται λυγισμό και να μειώνεται η αντοχή της το πρόγραμμα από μόνο του ελάττωνε τη ροπή ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή περιστροφή. Μπορούμε να την αντιληφθούμε καλύτερα αυτή τη διαδικασία σκεφτόμενοι την περίπτωση άσκησης εφελκυσμού σε κυλινδρικό δοκίμιο. Με τη πρώτη μέθοδο (stress control), όταν θα δημιουργηθεί «ο λαιμός» οι τάσεις στο σημείο εκείνο θα αυξηθούν ραγδαία αφού θα έχει μειωθεί το εμβαδόν της διατομής με αποτέλεσμα τη γρήγορη θραύση του δοκιμίου. Εάν ωστόσο εφαρμόσουμε τη μέθοδο της επαύξησης της παραμόρφωσης (strain control), όταν δημιουργηθεί λαιμός θα μειωθούν οι τάσεις για την επίτευξη της καθορισμένης παραμόρφωσης. Με τον τρόπο αυτό το δοκίμιο δεν θα υποστεί θραύση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. S. Bahey Eldeen, Y. Garbatov and C. Guedes Soares. "Experimental Assessment of the Ultimate Strength of a Box Girder Subjected to four point Bending Moment, " PRADS2010 (2010).
2. Hsin-Chuan Kuo and Jiang-Ren Chang. "A simplified approach to estimate the ultimate longitudinal strength of a ship hull," *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 11, No. 3, pp. 130-148 (2003).
3. Billingsley, D.W., "Hull Girder Response to Extreme Bending Moments," In *Proceedings, 5th Star Symposium*, SNAME, Coronado, pp. 51-63 (1980).
4. Caldwell, J. B. (1965). "Ultimate Longitudinal Strength." Trans. RINA, Vol. 107, pp 411-430.
5. Lin, Y.T., "Ship Longitudinal Strength," *Ph.D. Dissertation*, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Glasgow, Scotland (1985).
6. Paik, J.K. and Mansour A.E., "A Simple Formulation for Predicting the Ultimate Strength of Ships," *J. Marine Sci. Technol., Trans.*, SNAJ, Vol. 1, pp. 52-62 (1995).
7. Beghin, D., Jastrzebski, T., and Taczala, M., "Renault Computer Code for Evaluation of the Ultimate Longitudinal Strength of Hull Girder," In *Proceedings, International Symposium on Practical Design of Ships and Mobile Units*, PRADS95, pp. 2.832-2.843 (1995).
8. Μ. Παπαδρακάκης. "Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων, " Εκδόσεις Παπασωτηρίου, σσ.7-24 (2001).
9. Π.Α.Καρύδης. "Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Θέματα τοπικής αντοχής. " Εκδόσεις Ε.Μ. Πολυτεχνείου, σσ.45-51, 59-62 (2009).
10. Abaqus tutorial, "GET STARTED, " Simulia, pp. 246-252.
11. Abaqus tutorial, "THEORY, " Simulia, pp. 107-108, 123-124.
12. Lee, J.L., "Estimation of Ultimate Longitudinal Strength and Risk Assessment for Ship Hull," *Master Thesis*, Department of System Engineering and Naval Architecture, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan (2000).