

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΓΑΛΗΣ
ΚΛΙΜΑΚΑΣ**

ΖΗΛΑΚΟΣ Κ. ΗΛΙΑΣ

Επιβλέπων : Καθηγητής Εμμανουήλ Παπαδρακάκης

Αθήνα, Οκτώβριος 2011

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον εγκάρδιο φίλο και συνάδελφο υποψήφιο διδάκτορα Βασίλειο Θ. Καρατζά για την αμέριστη βοήθειά του στη συγγραφή και έλεγχο των προγραμμάτων, τον αναπληρωτή καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Νικόλαο Τσούβαλη για τη βοήθεια και καθοδήγησή του στα ναυπηγικά ζητήματα της παρούσας εργασίας καθώς και τον επιβλέπων καθηγητή κ. Εμμανουήλ Παπαδρακάκη για την επίβλεψη και το συντονισμό της προσπάθειας αυτής.

Πίνακας Περιεχομένων

Λίστα Σχημάτων.....	iii
Λίστα Διαγραμμάτων	iii
Λίστα Πινάκων.....	iii
Λίστα Εικόνων	iv
Εισαγωγή.....	- 1 -
Γεωμετρική Απεικόνιση Προσομοιώματος CAD	- 6 -
Γένεση Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων	- 10 -
Απαιτήσεις Φορτίσεων από τους κανονισμούς CSR.....	- 15 -
Φορτίσεις καταστρώματος λόγω κυματισμού (Green Sea Load).....	- 18 -
Εξεταζόμενες Καταστάσεις Φόρτωσης.....	23
Διόρθωση καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.....	26
Κατασκευή μοντέλου δοκού και εφαρμογή διαδικασίας διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων	29
Κατασκευή κώδικα σε APDL για την εφαρμογή των φορτίων στα στοιχεία δοκού και την εξαγωγή των διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος.....	32
Κατασκευή υπορουτίνας *DLOAD σε κώδικα FORTRAN για την εκτέλεση των σεναρίων φόρτισης των CSR.....	33
Συγκεντρωτική παρουσίαση των Φορτίσεων και Οριακών Συνθηκών σύμφωνα με τους CSR στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων.....	46
Έλεγχος και επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας της υπορουτίνας DLOAD και των APDL και Python scripts	52
Εφαρμογή του κώδικα σε AFRAMX-Tanker για κατάσταση φόρτωσης B1-100% sagging κατά CSR.....	55
Εφαρμογές του εργαλείου & Συμπεράσματα της εργασίας	68
Βιβλιογραφία.....	69

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1 : Κατανομή υδροστατικής πίεσης.	- 16 -
Σχήμα 2 : Κατανομή της μέγιστης (A) και ελάχιστης (B) δυναμικής πίεσης κυματισμού.	- 18 -
Σχήμα 3 : Κατανομή των δυναμικών κυματικών πιέσεων στη γάστρα του πλοίου σε διαφορετικές πλευρές.	- 19 -
Σχήμα 4 : Οι έξι βαθμοί ελευθερίας ενός πλοίου και οι ορισμοί τους.	- 20 -
Σχήμα 5 : Σενάρια δυναμικής φόρτισης φορτωμένων δεξαμενών, ανάλογα με τη διεύθυνση της επιτάχυνσης του πλοίου.	- 21 -
Σχήμα 6 : Σκαρίφημα της δοκού με τις οριακές συνθήκες και κατανομή των διορθωτικών φορτίων.....	27
Σχήμα 7 : Η κατανομή της διατμητικής δύναμης μετά την εφαρμογή των διορθωτικών φορτίων.....	29
Σχήμα 8 : Σχηματική απεικόνιση της συνεργασίας ABAQUS και υπορουτίνας DLOAD.	34
Σχήμα 9 : Στην εικόνα παρουσιάζεται τον ανεξάρτητο σημείο (independent point) καθώς και οι θέσεις εφαρμογής των ελατηρίων.	47
Σχήμα 10 : Σκαρίφημα μοντέλου τριών διαμερισμάτων σε κατάσταση hogging.	51
Σχήμα 11 : Σκαρίφημα του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων. Το γραμμοσκιασμένο τμήμα του μεσαίου διαμερίσματος αποτελεί το τμήμα της κατασκευής που διενεργείται ο έλεγχος των αποτελεσμάτων βάσει των CSR.....	65

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Καμπύλη κατανομής του βάρους του πρυμναίου διαμερίσματος.	31
Διάγραμμα 2 : Η καμπύλη κατανομής βάρους της μεταλλικής κατασκευής ενός προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων.	54
Διάγραμμα 3 : Κατανομή διατμητικών δυνάμεων πριν και μετά τη διόρθωση καθώς και οι επιθυμητές τιμές επίτευξης.	59
Διάγραμμα 4 : Κατανομή των καμπτικών ροπών πριν και μετά τις διορθώσεις.	60

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1 : Δυναμικά σενάρια φόρτισης για τη μελέτη δομικής αντοχής ενός δεξαμενόπλοιου κατά CSR.....	22
Πίνακας 2 : Καταστάσεις φόρτωσης δεξαμενόπλοιων με κεντρική διαμήκη φρακτή.	24
Πίνακας 3 : Οι θέσεις ελέγχου της διατμητικής δύναμης και της καμπτικής ροπής.	26
Πίνακας 4 : Υπολογισμός των επιφανειών διάτμησης για τον προσδιορισμό της ακαμψίας των οριζόντιων και κατακόρυφων ελατηρίων.	49
Πίνακας 5 : Οι οριακές συνθήκες και τα γενικά φορτία που επιβάλλονται στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων.....	50
Πίνακας 6 : Οι τιμές των στατικών φορτίσεων.	57

Πίνακας 7 : Δυναμικές φορτίσεις λόγω κυματισμού.....	57
Πίνακας 8 : Οι τιμές των δυναμικών φορτίσεων των δεξαμενών φορτίου.	57
Πίνακας 9 : Υπολογισμός των διορθωτικών φορτίων που ασκούνται στις θέσεις των νομέων.	59
Πίνακας 10 : Επιθυμητή τιμή επίτευξης και διορθωτικές τιμές διατμητικών δυνάμεων.	59
Πίνακας 11 : Επιθυμητή τιμή επίτευξης και διορθωτικές τιμές καμπτικών ροπών.	60
Πίνακας 12 : Προσδιορισμός θέσης ανεξάρτητων σημείων (Independent Points).	61
Πίνακας 13 : Υπολογισμός της ακαμψίας των ελατηρίων που εφαρμόζονται στα οριζόντια και κατακόρυφα δομικά στοιχεία του πρυμναίου και πρωραίου επιπέδου του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.....	62
Πίνακας 14 : Πληροφορίες σχετικά με το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.	63
Πίνακας 15 : Ιδιότητες χάλυβα υψηλής αντοχής που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.....	63

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1 : Σχέδιο δεξαμενόπλοιου όπου με κόκκινη γραμμοσκίαση διακρίνεται το τμήμα της κατασκευής που μοντελοποιείται.	- 3 -
Εικόνα 2 : Ημιτομές προσομοιώματων τριών διαμερισμάτων διαφορετικών τύπων δεξαμενόπλοιων.....	- 3 -
Εικόνα 3 : Γεωμετρική απεικόνιση μέσης τομής του AFRAMAX Tanker.....	- 7 -
Εικόνα 4 : Γεωμετρική απεικόνιση νομέα του AFRAMAX Tanker.....	- 7 -
Εικόνα 5 : Γεωμετρική απεικόνιση φρακτής και κάθετων εδρών ενίσχυσης του AFRAMAX Tanker.....	- 8 -
Εικόνα 6 : Γεωμετρική απεικόνιση τομής (κάτω) και ολόκληρου (πάνω) του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.....	- 9 -
Εικόνα 7 : Απεικόνιση του αριθμού των στοιχείων στα ενισχυτικά τύπου "T" και του πλήθους των στοιχείων στα τμήματα των ελασμάτων μεταξύ των ενισχυτικών.....	- 11 -
Εικόνα 8 : Περιοχές συνάντησης πλέον των δύο επιφανειών στο γεωμετρικό προσομοίωμα (πάνω) και στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων (κάτω).	- 12 -
Εικόνα 9 : Απεικόνιση των στοιχείων κελύφους, τετράπλευρων και τριγωνικών, με την αρίθμηση των κόμβων και των σημείων ολοκλήρωσης τους.....	- 13 -
Εικόνα 10 : Ορισμός μοναδιαίου διανύσματος και αρίθμηση κόμβων σε τετρακομβικά και τρικομβικά στοιχεία κελύφους στο ABAQUS.	- 13 -
Εικόνα 11 : Σκαρίφημα των διατομών των ενισχυτικών τύπου "T" (αριστερά) και λάμας (δεξιά).	- 14 -
Εικόνα 12 : Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα στοιχεί κελύφους των ελασμάτων των φρακτών ενώ με πράσινο τα στοιχεία δοκού που τις ενισχύουν.	- 14 -
Εικόνα 13 : Εγκάρσια τομή του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων μήκους ≈ 200 mm.	30
Εικόνα 14 : Η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας : OUTER_SHELL.	39
Εικόνα 15 : Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το κατάστρωμα καιρού : WEATHER_DECK (κάτω), ενώ στα σκαριφήματα απεικονίζονται συνδυασμένες κυματικές φορτίσεις γάστρας	

και καταστρώματος σε πρωραίους κυματισμούς (πάνω αριστερά) και σε πλάγιους (πάνω δεξιά).	40
Εικόνα 16 : Τομή του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων και αρίθμηση των δεξαμενών φορτίου.	41
Εικόνα 17 : Τα ελάσματα τις δεξαμενής φορτίου 5P, χωρίς να περιλαμβάνεται το κατάστρωμα.....	41
Εικόνα 18 : Οι επιφάνειες της δεξαμενής 5P (κάτω) που δέχονται δυναμικές πιέσεις λόγω κατακόρυφων επιταχύνσεων (επάνω). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια SURF_VERT_N5_P, ενώ με μπλε η SURF_LBHD_V_N5_P.	42
Εικόνα 19 : Οι επιφάνειες της δεξαμενής 5P (κάτω) που δέχονται δυναμικές πιέσεις λόγω εγκάρσιων επιταχύνσεων (επάνω). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια SURF_LBHD_T_N5_P, ενώ με πράσινο η SURF_TRANS_N5_P.	43
Εικόνα 20 : Οι επιφάνειες της δεξαμενής 5P (κάτω) που δέχονται δυναμικές πιέσεις λόγω διαμηκών επιταχύνσεων (επάνω). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια SURF_TBHD_N5_A_P, με πράσινο η SURF_LONG_N5_P, με μωβ η SURF_TBHD_N5_A_P, ενώ με μπλε η SURF_LBHD_L_N5_P.	44
Εικόνα 21 : Οι επιφάνειες των δεξαμενών φορτίου στις οποίες ασκείται υδροστατική πίεση (κάτω) και σχηματική απεικόνιση της κατάστασης φόρτωσης (επάνω).	45
Εικόνα 22 : Απλοποιημένο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων (αριστερά) καθώς και οριζόντια τομή για την διάκριση των δεξαμενών του (δεξιά).	52
Εικόνα 23 : Κατάσταση φόρτωσης σύμφωνα με CSR (επάνω) και απεικόνιση τάσεων κατά Von Mises στο απλοποιημένο μοντέλο τριών διαμερισμάτων για τη φόρτωση αυτή (κάτω).	53
Εικόνα 24 : Η κατάσταση φόρτωσης κατά CSR που ακολουθήθηκε στο παράδειγμα εφαρμογής του κώδικα.	55
Εικόνα 25 : Γεωμετρικό προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων ενός AFRAMAX Tanker.....	56
Εικόνα 26 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο εσωτερικό του μεσαίου διαμερίσματος του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων ενός AFRAMAX Tanker.	56
Εικόνα 27 : Το ισοδύναμο των τριών διαμερισμάτων μοντέλο δοκού, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.....	58
Εικόνα 28 : Οι άκαμπτες συνδέσεις του πρωραίου (κόκκινο) και πρυμναίου (κίτρινο) ακραίων επιπέδων με τα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία.	61
Εικόνα 29 : Απεικόνιση των ελατηρίων στα οριζόντια και κατακόρυφα δομικά στοιχεία του πρυμναίου και πρωραίου επιπέδου του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.....	61
Εικόνα 30 : Πλοίο σε απόκριση τύπου sagging.	64
Εικόνα 31 : Απαραμόρφωτη (επάνω) και παραμορφωμένη (κάτω) όψη του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων.....	65
Εικόνα 32 : Απαραμόρφωτη (αριστερά) και παραμορφωμένη (δεξιά) όψη τομής του μεσαίου διαμερίσματος του προσομοιώματος με απεικόνιση των τάσεων κατά Von Mises.....	67

Εισαγωγή

Στόχος εκπόνησης της παρούσας εργασίας

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός και κατασκευή ενός πακέτου προγραμματιστικών εργαλείων που σε συνδυασμό με ήδη υπάρχοντα υπολογιστικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, θα παρέχουν στο μελετητή-αναλυτή τη δυνατότητα να εκπονεί άμεσα και με ακρίβεια μία μελέτη δομικής αντοχής ενός πετρελαιοφόρου πλοίου. Η μελέτη αυτή θα πληρεί τις προϋποθέσεις και θα ακολουθεί τις κατευθυντήριες γραμμές που θέτουν και υπαγορεύουν οι νηογνώμονες μέσω των ενοποιημένων δομικών κανονισμών για πετρελαιοφόρα πλοία CSR (**C**ommon **S**tructural **R**ules for oil tankers).

Χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων στη Ναυπηγική

Τα τελευταία χρόνια αρχίζει να γίνεται σταδιακά πιο ορατή η απαίτηση για χρήση υπολογιστικών προγραμμάτων κατά τον σχεδιασμό ναυπηγικών κατασκευών. Η πρώτη εκτενής εφαρμογή προγραμμάτων στο σχεδιασμό έχει γίνει από τα γραφεία μελετών των περισσότερο προηγμένων βιομηχανικών χωρών και αυτών με ναυτική παράδοση.

Σε αρκετές περιπτώσεις οι νηογνώμονες απαιτούν, μαζί με τα σχέδια της κατασκευής, να υποβάλλονται και τα αποτελέσματα υπολογισμών μελετών με μητρωική ανάλυση ή προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων. Η έκταση και το αντικείμενο των απαιτούμενων υπολογισμών εξαρτώνται από το είδος του πλοίου και τις διαστάσεις του. Σκοπός των μελετών αυτών είναι να δειχθεί ότι οι τάσεις σε όλα τα σημεία της κατασκευής κυμαίνονται σε αποδεκτά επίπεδα για συγκεκριμένες καταστάσεις φόρτισης. Για την διευκόλυνση των μελετητών πολλοί νηογνώμονες τώρα διαθέτουν προγράμματα τα οποία καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα υπολογισμών.

Ο νορβηγικός νηογνώμονας είναι ο πρώτος που εισήγαγε τη συστηματική χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την αξιολόγηση συμβατικών εμπορικών πλοίων. Η μεγάλη προσπάθεια που καταβλήθηκε την δεκαετία 1970-80 για την αντιμετώπιση των τεχνολογικών καινοτομιών των νέων τότε πλωτών και μόνιμων δεξαμενών άντλησης πετρελαίου στη Βόρεια Θάλασσα έδωσε τη δυνατότητα στο νηογνώμονα να εδραιώσει μεθόδους και τεχνολογία που βρήκαν εφαρμογή και στην αξιολόγηση των συμβατικών εμπορικών πλοίων. Ο νηογνώμονας έχει εκδώσει, εκτός του κειμένου των Κανονισμών Κατάταξης και Κατασκευής μία σειρά εγχειριδίων στα οποία περιγράφεται με λεπτομέρεια η όλη διαδικασία μελέτης ναυπηγικών κατασκευών με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα προγράμματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να υποβληθούν τα αποκτηθέντα αποτελέσματα κατά την έγκριση των σχεδίων της κατασκευής. Τα εγχειρίδια αυτά αναφέρονται σε διάφορες κατηγορίες πλοίων και περιλαμβάνουν στοιχεία όπως:

- Καταστάσεις φόρτισης
- Διακριτοποίηση
- Γενικές μελέτες αντοχής
- Ειδικές μελέτες αντοχής

Σε κάθε περίπτωση δίνονται σχέσεις υπολογισμού των φορτίων (πιέσεων) σχεδίασης ενώ στο κείμενο που περιγράφεται η διακριτοποίηση δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο διακριτοποίησης, τις οριακές συνθήκες, την αποτελεσματικότητα των συνεργαζομένων ελασμάτων κλπ. Δεν τίθεται περιορισμός ως προς το υπολογιστικό εργαλείο διευκρινίζεται όμως ότι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη τα φαινόμενα κάμψης, διάτμησης, και αξονικών και στρεπτικών μετατοπίσεων.

Από την πρώτη αυτή περίοδο κατά την οποία τα προγράμματα ήταν λίγα και δύσχρηστα, ιδίως για ναυπηγικά προβλήματα, πολλά έχουν αλλάξει μέχρι σήμερα. Πρώτα απ' όλα, η τεχνολογία των υπολογιστών έχει δώσει τη δυνατότητα εκπόνησης μελετών πολύ μεγαλύτερης κλίμακας σε πολύ μικρότερο χρόνο. Οι υπολογιστικοί κώδικες έχουν ταυτόχρονα εξελιχθεί σε τέτοιο σημείο που σήμερα μπορεί να γίνει ένα μεγάλο μέρος της μελέτης με αυτόματες διαδικασίες. Η προετοιμασία των δεδομένων και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που ήταν οι πλέον χρονοβόρες φάσεις μίας μελέτης σήμερα δεν προβάλλουν απαγορευτικούς περιορισμούς από πλευράς χρόνου.

Έχουμε φθάσει λοιπόν στο σημείο που ένας μελετητής που διαθέτει ένα προσωπικό υπολογιστή με πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων να είναι σε θέση να εκπονήσει μία μελέτη που να περιλαμβάνει αρκετές χιλιάδες βαθμούς ελευθερίας σε πολύ λογικά πλαίσια κόστους και χρόνου. Το θέμα που προκύπτει δεν είναι πλέον η διαθεσιμότητα των αναγκαίων εργαλείων (υπολογιστής, λογισμικό) αλλά η κατάρτιση του μελετητή και η ικανότητά του στη σωστή προσομοίωση, στην επιλογή των στοιχείων και άλλων παραμέτρων της μελέτης και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι η σχετική καθυστέρηση της εφαρμογής προηγμένων αριθμητικών μεθόδων σε ναυπηγικά προβλήματα οφείλεται σε ένα βαθμό σε ορισμένες ιδιαιτερότητες των ναυπηγικών κατασκευών. Αυτές είναι:

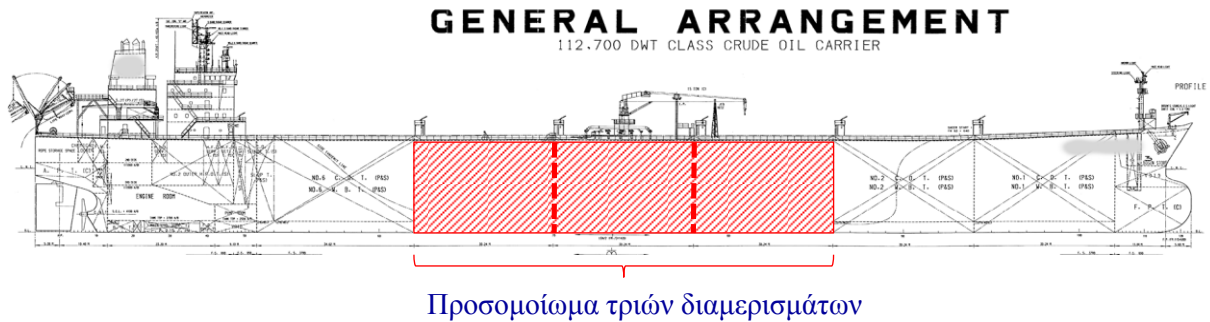
- Το μέγεθος και η πολυπλοκότητά τους
- Η αβεβαιότητα που περιβάλλει τις εξωτερικές φορτίσεις και
- Η μη-γραμμικότητα της απόκρισης της μεταλλικής κατασκευής

Η πολυπλοκότητα της μορφολογίας και η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει τις εξωτερικές φορτίσεις υποχρεώνουν τον μελετητή να προσδιορίσει με σαφήνεια και σε ορισμένες περιπτώσεις να υιοθετήσει απλουστευτικές παραδοχές για το συγκεκριμένο πρόβλημα που θα επιχειρήσει να εξετάσει. Ο ακριβής προσδιορισμός των παραμέτρων μίας ανάλυσης οδηγεί σε μία απλούστευση και εξειδίκευση του γενικού προβλήματος έτσι ώστε η μελέτη να εκπονείται στα πλαίσια των δυνατοτήτων των χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων και του διαθέσιμου χρόνου και κόστους.

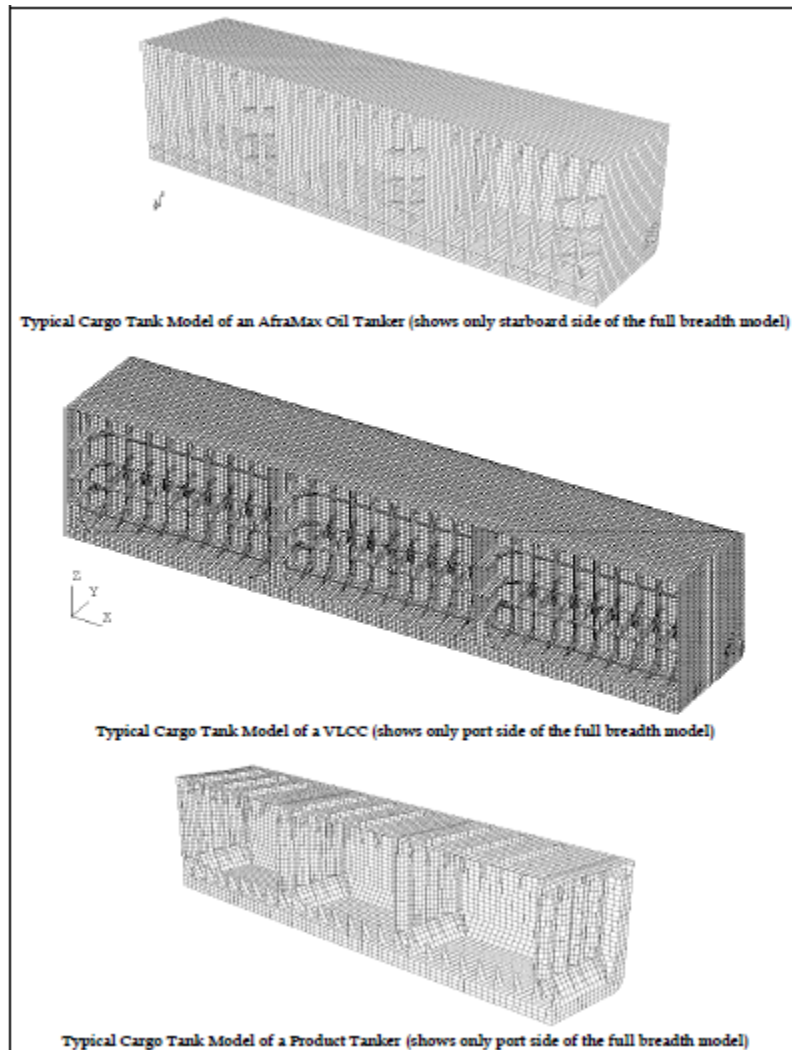
Όσον αφορά τη μη-γραμμικότητα της απόκρισης είναι δυνατόν να εξετασθεί η συμπεριφορά μόνο στη γραμμική περιοχή χωρίς να προχωρήσει η μελέτη στον προσδιορισμό φορτίων ελαστο-πλαστικού λυγισμού και τελικής κατάρρευσης [2]. Μία τέτοια μελέτη αποδίδει στοιχεία σχετικά με τις κατανομές των τάσεων και τις αντίστοιχες μετατοπίσεις, πληροφορίες που είναι πολύ χρήσιμες για την αξιολόγηση της κατασκευής υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Εισαγωγή στις απαιτήσεις των CSR για τη μελέτη δομικής αντοχής δεξαμενόπλοιων

Στα πλαίσια της μελέτης της δομικής αντοχής ενός δεξαμενόπλοιου οι σημερινοί ενοποιημένοι κανονισμοί CSR υπαγορεύουν τη σχεδίαση ενός προσομοιώματος ενός τμήματος του υπό μελέτη πλοίου (Εικόνα 1). Το τμήμα αυτό αντιστοιχεί στα τρία κεντρικά κύτη φορτίου του πλοίου (Εικόνα 2).



Εικόνα 1 : Σχέδιο δεξαμενόπλοιου όπου με κόκκινη γραμμοσκίαση διακρίνεται το τμήμα της κατασκευής που μοντελοποιείται.



Εικόνα 2 : Ημιτομές προσομοιώματων τριών διαμερισμάτων διαφορετικών τύπων δεξαμενόπλοιων.

Στο τμήμα αυτό της κατασκευής επιβάλλονται συγκεκριμένες οριακές συνθήκες, με στόχο να προσεγγίσουν την ύπαρξη κατασκευής πρόωραθεν και πρύμνηθεν του τμήματος αυτού. Εν συνεχεία το προσομοίωμα που έχει σχεδιαστεί υποβάλλεται σε διάφορα σενάρια φόρτισης τα οποία υπαγορεύονται από τους κανονισμούς και μια σειρά αναλύσεων εκτελείται προκειμένου να προκύψουν στοιχεία σχετικά με τις κατανομές των τάσεων, με στόχο την αξιολόγηση της κατασκευής.

Αυτά τα σενάρια φόρτισης διαθέτουν μία πληθώρα μη ομοιόμορφων κατανομών φορτίου οι οποίες ασκούνται σε διάφορα τμήματα της κατασκευής και ποικίλουν ανά σενάριο φόρτωσης και ανά τύπο και διαστάσεις πλοίου. Αυτό ακριβώς το γεγονός καθιστά αναγκαία τη κατασκευή ενός προγράμματος που θα αναλαμβάνει να αναγνωρίζει της επιφάνειες του προσομοιώματος που πρέπει να φορτιστούν, να επιβάλλει σε αυτές της κατάλληλες φορτίσεις και να εκτελεί αυτές τις ενέργειες για κάθε σενάριο φόρτωσης του πλοίου.

Σχεδιασμός του προγραμματιστικού εργαλείου

Τα στάδια εκπόνησης μίας μελέτης δομικής αντοχής ενός δεξαμενόπλοιου με τη χρήση ενός προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων θα μπορούσαν συνοπτικά να συγκεντρωθούν στα εξής :

1. Σχεδιασμός γεωμετρικού προσομοιώματος.
2. Γένεση πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.
3. Εφαρμογή φορτίων και οριακών συνθηκών.
4. Εκτέλεση στατικής ανάλυσης και εκτίμηση αποτελεσμάτων.

Για το 1^ο και 2^ο στάδιο της μελέτης, που αφορούν και ένα αρκετά χρονοβόρο τμήμα μιας μελέτης δομικής αντοχής, είναι εξαιρετικά δύσκολο να παραμετροποιηθούν ώστε να κατασκευαστεί ένας αλγόριθμος αυτόματης σχεδίασης προσομοιωμάτων. Η πληθώρα διαφορετικών τύπων δεξαμενόπλοιων, το είδος της ενίσχυσης (εγκάρσια, διαμήκης, μεικτή), ο τύπος και οι διαστάσεις των ενισχυτικών («Γ», βολβολάμες, λάμες, γωνίες), οι ισαποστάσεις των ενισχύσεων κ.α., είναι μερικοί από τους παράγοντες που καθιστούν την παραμετροποίηση μιας αυτόματης διαδικασίας σχεδίασης εξαιρετικά δύσκολη. Αυτό που επιχειρείται στην παρούσα εργασία είναι μέσα από τη σχεδίαση ενός τέτοιου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων ενός δεξαμενόπλοιου τύπου AFRAMAX Tanker, να προταθούν τεχνικές που σε συνδυασμό με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των σύγχρονων σχεδιαστικών πακέτων να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για ολοκλήρωσης αυτής της διεργασίας.

Όσον αφορά το 3^ο στάδιο της μελέτης είναι το στάδιο που επικεντρώνεται η παρούσα εργασία και έχει ως απώτερο στόχο να παρέχεται στον σχεδιαστή-αναλυτή η δυνατότητα μέσω ενός προγραμματιστικού εργαλείου να εκπονή γρήγορα και με ακρίβεια μια μελέτη δομικής αντοχής ενός πετρελαιοφόρου πλοίου. Αναλυτικότερα ο σκοπός του εργαλείου αυτού είναι να αναλαμβάνει την εφαρμογή των φορτίσεων των κανονισμών κατά CSR στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων για κάθε σενάριο φόρτωσης που επιθυμεί ο μελετητής. Για την επίτευξη του στόχου αυτού απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απρόσκοπτη συνεργασία του προγραμματιστικού αυτού εργαλείου με ένα υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων. Στο πλαίσιο αυτό επιλέχθηκε το εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS με τη υποστήριξη εκτέλεσης υπορουτινών χρήστη (User's Subroutine support). Αυτή η υποστήριξη που προσφέρει το ABAQUS παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα να

κατασκευάσει μια υπορουτίνα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, ώστε κατά την εκτέλεση της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων να καλείται υπορουτίνα για την εκτέλεση μίας ορισμένης διαδικασίας. Το ABAQUS προσφέρει μία μεγάλη ποικιλία από υπορουτίνες χρήστη, όπως υπορουτίνες που παρέχουν τη δυνατότητα στο χρήστη να κατασκευάσει το δικό του νόμο υλικού ή να κατασκευάσει το δικό του στοιχείο. Στην παρούσα εργασία κατασκευάστηκε μία υπορουτίνα DLOAD που επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει και να εφαρμόσει στο προσομοίωμα του μη ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία.

Επιπλέον της υποστήριξης των υπορουτίνων χρηστών το ABAQUS υποστηρίζει και την εκτέλεση προγραμμάτων (scripts) γραμμένα σε γλώσσα προγραμματισμού Python, μία αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού, που μεταξύ πολλών άλλων λειτουργιών που μπορούν να ελεγχθούν, δίνεται επιπλέον η δυνατότητα στο χρήστη να επέμβει στη λειτουργία του ABAQUS/CAE. Συνεπώς ο χρήστης μπορεί να παραμετροποιήσει ή να αυτοματοποιήσει πολλές από τις διεργασίες που εκτελούνται μέσα από αυτό. Στην παρούσα εργασία αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιήθηκε, μέσω ενός κώδικα που κατασκευάστηκε σε Python, για τον υπολογισμό της κατανομής του βάρους της μεταλλικής κατασκευής του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων.

Τέλος το 4^ο στάδιο της μελέτης που αποτελεί και το σημαντικότερο κομμάτι μιας μελέτης δομικής αντοχής, επαφίεται καθαρά πλέον στην κατάρτιση του μελετητή και στην ικανότητά του στη σωστή προσομοίωση, στην επιλογή των στοιχείων και άλλων παραμέτρων της μελέτης και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Στην παρούσα εργασία, που στόχος της δεν είναι η εκπόνηση μιας μελέτης δομικής αντοχής, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα από την ανάλυση ενός σεναρίου φόρτωσης για δεξαμενόπλοιο τύπου AFRAMAX Tanker που αναφέρθηκε πρωτίστως.

Χαρακτηριστικά του πλοίου

Το πλοίο που χρησιμοποιήθηκε για την σχεδίαση του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων και την εκτέλεση των δοκιμαστικών αναλύσεων είναι ένα δεξαμενόπλοιο τύπου AFRAMAX Tanker με συνολικό DWT=112,700 tns. Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου είναι τα ακόλουθα :

Μήκος μεταξύ καθέτων : $L_{BP} = 239 \text{ m}$

Πλάτος : $B = 44 \text{ m}$

Κοίλο : $D = 21 \text{ m}$

Βύθισμα Σχεδίασης : $T_d = 14.6 \text{ m}$

Βύθισμα Αντοχής : $T_{sc} = 14.6 \text{ m}$

Γεωμετρική Απεικόνιση Προσομοιώματος CAD

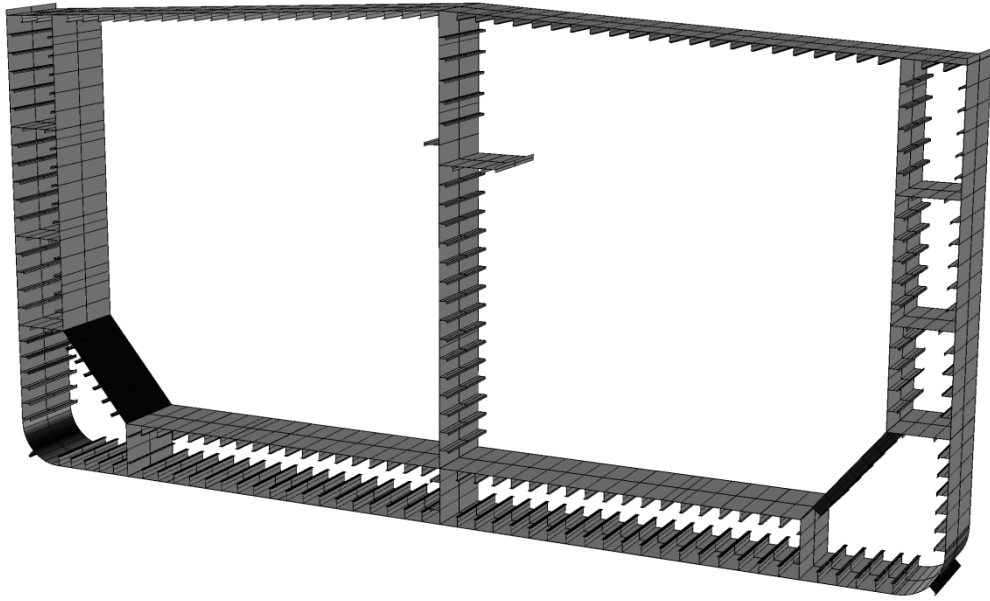
Η γεωμετρική αναπαράσταση μοντέλων μεγάλων κατασκευών συνήθως απαιτεί αρκετό χρόνο. Για αυτόν ακριβώς το λόγο επιχειρήθηκε να μειωθεί όσον το δυνατόν περισσότερο ο χρόνος αυτός με την αξιοποίηση σύγχρονων σχεδιαστικών πακέτων.

Η επικοινωνία των διάφορων σχεδιαστικών πακέτων μεταξύ τους γίνεται μέσω αρχείων αμοιβαίως αναγνωρίσιμα και επεξεργάσιμα. Τέτοια αρχεία όσον αφορά 2D γεωμετρίες είναι αρχεία γραμμών *.dwg, *.dxf, κ.α. ενώ όσον αφορά 3D γεωμετρίες είναι αρχεία επιφανειών όπως *.iges, *.stp, κ.ο.κ. Παρά την ανάπτυξη και προτυποποίηση των αρχείων αυτών, προκειμένου να εξασφαλίζεται η μεταβίβαση της γεωμετρικής πληροφορίας μεταξύ των σχεδιαστικών πακέτων με ακρίβεια, αυτό δεν είναι πάντα επιτεύξιμο, με το πρόβλημα αυτό να κυριαρχεί στα αρχεία επιφανειών. Όσο πιο πολύπλοκη είναι μια γεωμετρία τόσο πιο δύσκολη γίνεται η ακριβείς μετάφραση αυτών των αρχείων από τα σχεδιαστικά πακέτα [3].

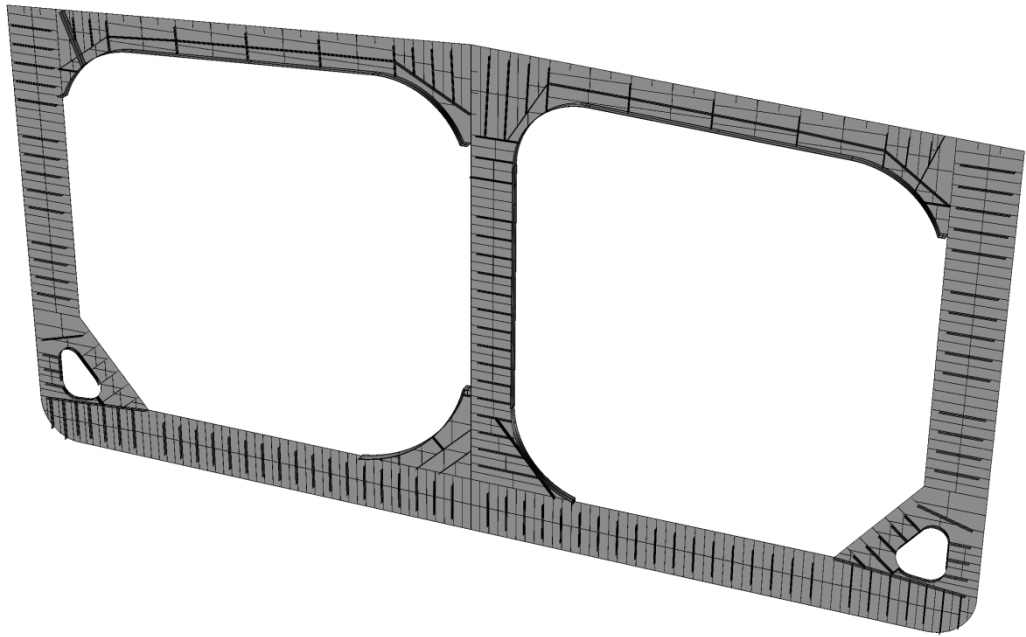
Στην παρούσα εργασία, προκειμένου να αποφευχθεί οποιαδήποτε ανακριβείς μεταφορά δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων επιλέχθηκε η χρήση αρχείων γραμμών *.dxf. Για τη δημιουργία 2D σχεδίων Μέσης Τομής, Νομέων και Φρακτών χρησιμοποιήθηκε το σχεδιαστικό πακέτο Rhinoceros 4.0. Πρόκειται για ένα σχεδιαστικό πακέτο που χρησιμοποιείται ευρέως και στην ναυπηγική λόγω της πληθώρας γεωμετρικών εργαλείων που διαθέτει. Όλα τα παραπάνω ψηφιακά σχέδια δημιουργήθηκαν ακολουθώντας τα πρωτότυπα ναυπηγικά σχέδια του πλοίου.

Στη συνέχεια τα ηλεκτρονικά δυοδιάστατα σχέδια εισήχθησαν στο sketch module του ABAQUS/CAE ώστε να παραχθεί με τη χρήση διαφόρων τεχνικών το τρισδιάστατο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων του πλοίου [4]. Η βασική ιδέα παρουσιάζεται αναλυτικότερα παρακάτω.

Ένας σχεδιαστής μπορεί παράγει τη τρισδιάστατη γεωμετρία ενός πλοίου από δισδιάστατα σχέδια χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως της γεωμετρικής εκβολής (extrusion) και της δημιουργίας τρισδιάστατων επιφανειών (planar surface and loft). Το μέσω τμήμα του πλοίου μπορεί να παραχθεί από τα σχέδια μέσης τομής με γεωμετρική εκβολή των δισδιάστατων σχεδίων της μέσης τομής του πλοίου (Εικόνα 3). Η ίδια τεχνική χρησιμοποιήθηκε σε όλα τα δομικά στοιχεία των Νομέων που έχουν το ίδιο μήκος γεωμετρικής εκβολής (extrusion length). Γενικά η τεχνική της γεωμετρικής εκβολής μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα εκείνα τα δομικά στοιχεία της κατασκευής που δεν έχουν το διάνυσμα του πάχους τους παράλληλο με το διαμήκη άξονα του πλοίου (Εικόνα 4).

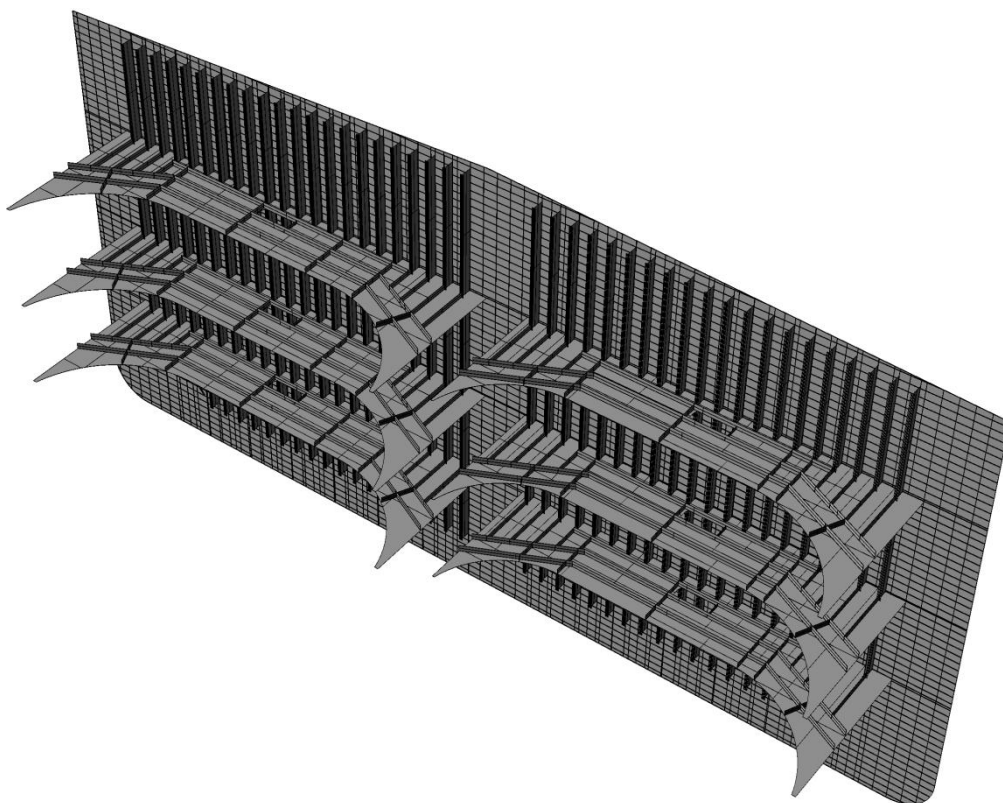


Εικόνα 3 : Γεωμετρική απεικόνιση μέσης τομής του AFRAMAX Tanker.



Εικόνα 4 : Γεωμετρική απεικόνιση νομέα του AFRAMAX Tanker.

Σε αντίθετη περίπτωση επίπεδες επιφάνειες χρησιμοποιήθηκαν για να αναπαραστήσουν δομικά στοιχεία, όπως οι εγκάρσιες έδρες ενίσχυσης των νομέων (transverse plating). Εξαιρεση στη διαδικασία που περιγράφηκε αποτελεί η γεωμετρική αναπαράσταση κάθετων εδρών ενίσχυσης των φρακτών (Bulkhead's Stringers) (Εικόνα 5). Παρά το γεγονός ότι το διάνυσμα πάχους είναι παράλληλο στο διαμήκη άξονα του πλοίου, η τεχνική της γεωμετρικής εκβολής δε χρησιμοποιήθηκε εξαιτίας της γεωμετρικής πολυπλοκότητας. Αντιθέτως για την αναπαράσταση τους έγινε χρήση επίπεδων επιφανειών.

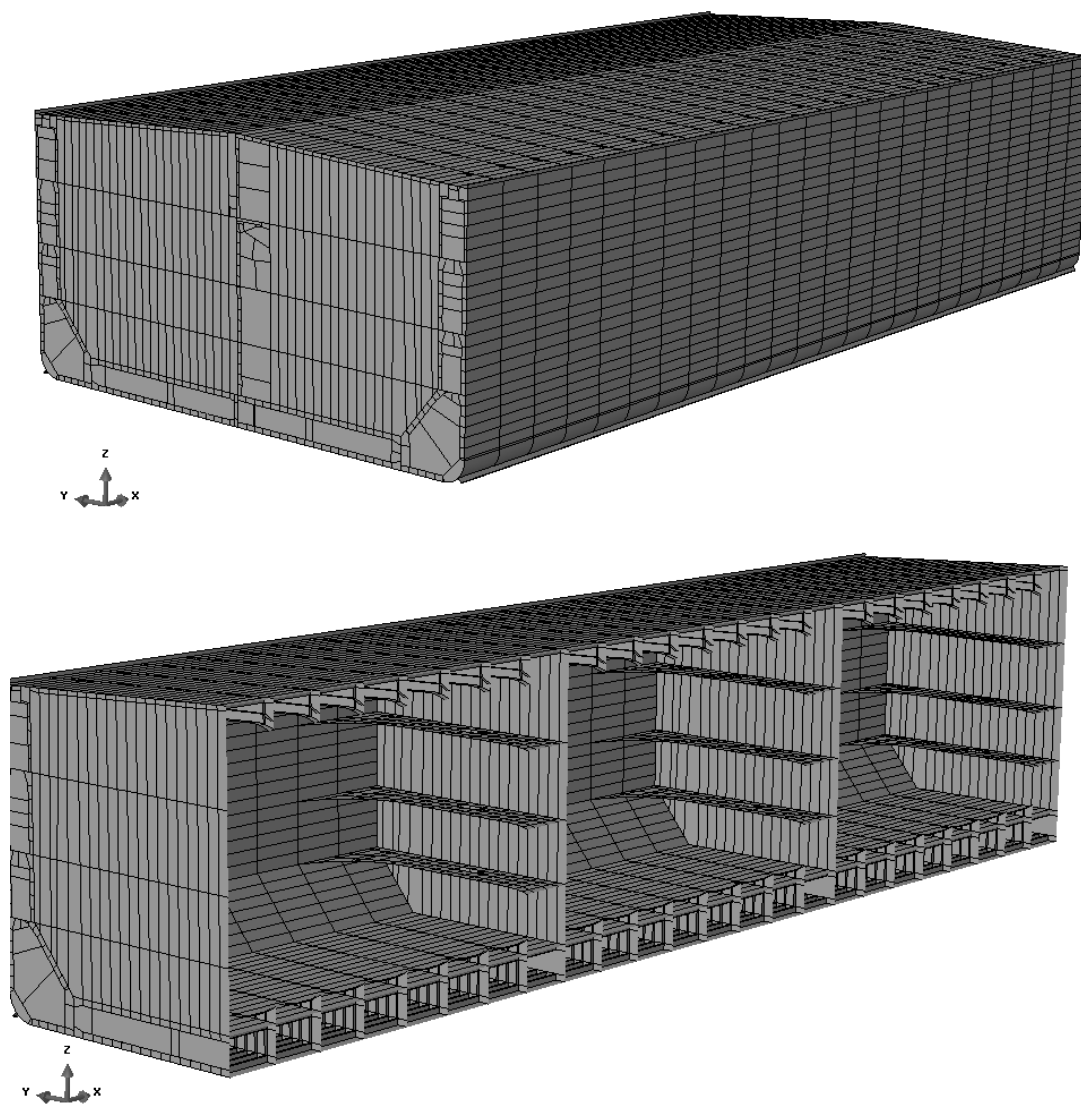


Εικόνα 5 : Γεωμετρική απεικόνιση φρακτής και κάθετων εδρών ενίσχυσης του AFRAMAX Tanker.

Η διαδικασία αναπαράσταση μιας κατασκευής στο ABAQUS/CAE ακολουθεί της αρχές βιομηχανικού σχεδιασμού, βάσει του οποίου κάθε κατασκευή αποτελείται από επιμέρους διακριτά τμήματα τα οποία συναρμολογημένα αναπαριστούν ολόκληρη την κατασκευή. Ομοίως και ένα πλοίο αποτελείται από πολλά γεωμετρικά τμήματα, όπως ενισχυτικά δοκάρια διαφόρων προφίλ ('T', flat bars, bulbs, κ.α.) έδρες και ελάσματα διαφόρων παχών κ.ο.κ., που συναρμολογημένα μας δίνουν ολόκληρη την κατασκευή. Έτσι κάθε γεωμετρικό τμήμα που σχεδιάζεται στο part module του ABAQUS/CAE, εισάγεται έπειτα στο assembly module όπου και πραγματοποιείται και η διαδικασία της συναρμολόγησης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνει πραγματικά επίπονη και εξαιρετικά χρονοβόρα για μία μεγάλη κατασκευή όπως ένα πλοίο, όπου πολυάριθμα κομμάτια πρέπει να προσανατολιστούν και να τοποθετηθούν σωστά ώστε να σχηματιστεί η τελική γεωμετρία. Προκειμένου να απλοποιηθεί αυτή η διαδικασία και να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωσή της, μια προσέγγιση επιλέχθηκε βασισμένη στην παρακάτω παρατήρηση. Η γεωμετρία ενός πλοίου αποτελείται από πολλά επαναλαμβανόμενα γεωμετρικά μοτίβα, όπως είναι το τμήμα της μέσης τομής του πλοίου ή νομείς ή ακόμα και τα κύτη. Εφόσον τέτοια γεωμετρικά μοτίβα αναγνωρισθούν από το

σχεδιαστή, η εντολή Linear Pattern μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αυτή η εντολή επιτρέπει στο σχεδιαστή να τοποθετήσει αντίγραφα ενός γεωμετρικού τμήματος κατά μήκος μίας διεύθυνσης, επιτρέποντας επιπλέον να οριστεί το πλήθος τους καθώς και η ισαπόστασή τους [4].

Με την ολοκλήρωση και της διαδικασίας συναρμολόγησης των γεωμετρικών τμημάτων, η αναπαράσταση τη γεωμετρίας του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων έχει επιτευχθεί (Εικόνα 6).



Εικόνα 6 : Γεωμετρική απεικόνιση τομής (κάτω) και ολόκληρου (πάνω) του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.

Σημειώνεται εδώ το τρισδιάστατο γεωμετρικό προσομοίωμα των τριών διαμερισμάτων αποτελείται από επιφάνειες και όχι από κλειστούς όγκους. Αυτό συμβαίνει διότι ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί είναι στοιχείο κελύφους, όπου η διάσταση του πάχους εισάγεται θεωρητικά στις εξισώσεις του, αλλά δεν απεικονίζεται γεωμετρικά. Η επιλογή των στοιχείων κελύφους μειώνει δραστικά, όχι μόνο το υπολογιστικό κόστος, αλλά και την

πολυπλοκότητα της παραγόμενης γεωμετρίας. Η επιλογή αυτή είναι απόλυτα σύμφωνη με τους CSR.

Με γνώμονα τη μείωση της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας και κατ' επέκταση της δημιουργία όσον το δυνατό πιο δομημένου πλέγματος (structured mesh), αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν στοιχεία δοκού (Timoshenko beam elements) και όχι στοιχεία κελύφους για την αναπαράσταση των κατακόρυφων ενισχυτικών τύπου T των στεγανών φρακτών.

Γένεση Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων

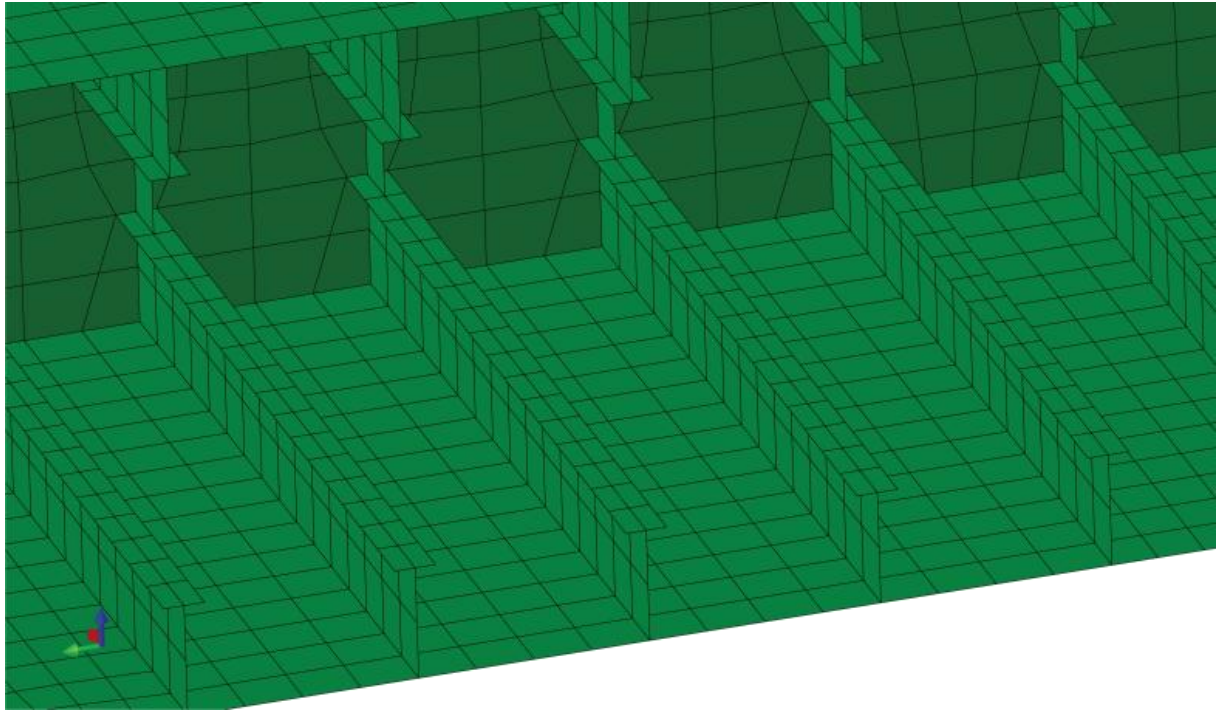
Αυτή η ενότητα αναφέρεται στις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν για την γένεση του πλέγματος του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων καθώς επίσης και στον τύπο των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν. Όσον αφορά τη γένεση του πλέγματος τρεις σημαντικές παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη

- Το μήκος ή το πλήθος των στοιχείων.
- Ο τύπος του πλέγματος, δομημένο ή μη.
- Ο τύπος και η διατύπωση των εξισώσεων του στοιχείου.

Είναι εξαιρετικά σημαντικό για έναν αναλυτή να προσδιορίσει τον υπολογιστικά οικονομικό-αποδοτικό συνδυασμό αυτών των παραμέτρων, χωρίς όμως να διακυβεύεται η ακρίβεια των αναλύσεων. Κάποιες γενικές κατευθυντήριες γραμμές σχετικά με τη μορφή του πλέγματος δίνονται παρουσιάζονται στο παράρτημα Β των CSR [1].

Μήκος Στοιχείων

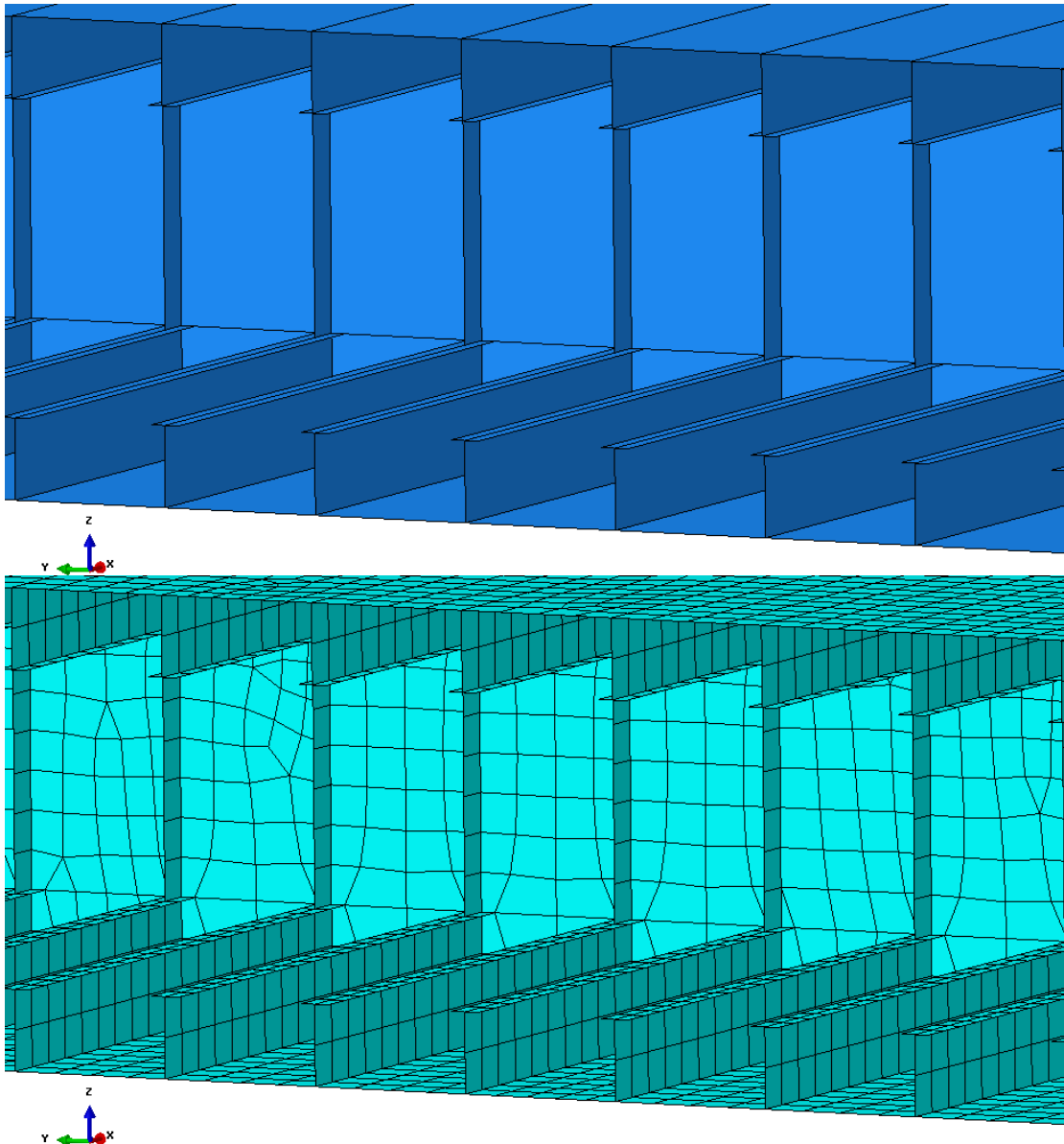
Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια τις παρούσας εργασίας επιλέχθηκε ένα γενικό μήκος στοιχείου περίπου 200 mm για τη γένεση του πλέγματος. Με τη χρήση αυτής της τιμής εξασφαλίζεται ότι το πλέγμα του κορμού καθώς και της φλάντζα των μικρότερων ενισχυτικών τύπου T θα διαθέτουν τουλάχιστον δύο στοιχεία έκαστος (Εικόνα 7), δεδομένου ότι τα ύψη των κορμών των ενισχυτικών της μέσης τομής κυμαίνονται σε ένα εύρος τιμών από 300 mm έως 450 mm, βάσει των σχεδίων. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να ληφθεί υπόψη μια πιθανή κάμψη ή στρέψη του ενισχυτικού. Επιπλέον εξασφαλίζεται ικανός αριθμός στοιχείων (>3) στο πλέγμα των ελασμάτων μεταξύ των ενισχύσεων, επιτρέποντας έτσι σε κάθε τμήμα του ελάσματος να καμφθεί, ελεύθερα.



Εικόνα 7 : Απεικόνιση του αριθμού των στοιχείων στα ενισχυτικά τύπου "T" και του πλήθους των στοιχείων στα τμήματα των ελασμάτων μεταξύ των ενισχυτικών.

Τύπος πλέγματος

Ο κάναβος των πεπερασμένων στοιχείων δημιουργείται επί της γεωμετρικής επιφάνειας του προσομοιώματος. Για να επιτευχθεί πλέγμα με όσο το δυνατόν περισσότερα τετρακομβικά στοιχεία και να αποφευχθεί η χρήση τριγωνικών είναι απαραίτητο να γίνουν αρκετές επιμέρους διαμερίσεις στις αρχικές επιφάνειες του γεωμετρικού μοντέλου. Οι αυτόματοι αλγόριθμοι διαχωρισμού επιφανειών και γένεσης πλεγμάτων που διαθέτουν τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων όπως το ABAQUS, συχνά δυσκολεύονται στην εύρεση των συνόρων των επιφανειών και στην επιτυχή διαμέρισή τους, κυρίως σε περιοχές όπου συναντώνται πλέον των δύο επιφανειών (Εικόνα 8).



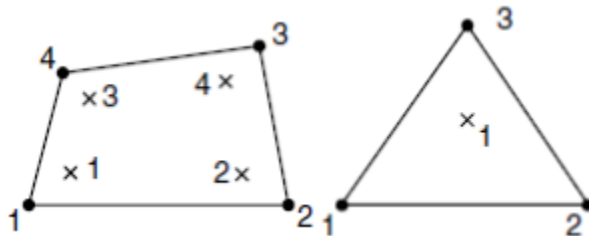
Εικόνα 8 : Περιοχές συνάντησης πλέον των δύο επιφανειών στο γεωμετρικό προσομοίωμα (πάνω) και στο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων (κάτω).

Σε μία κατασκευή με πολυάριθμες εγκάρσιες και διαμήκεις ενισχύσεις όπως το πλοίο, τέτοιες περιοχές συναντώνται συχνά. Οπότε και έγκειται στο σχεδιαστή η κατάλληλη διαμέριση των γεωμετρικών επιφανειών ώστε το πλέγμα που θα προκύψει να εξασφαλίσει το μέγιστο δυνατό αριθμό τετρακομβικών στοιχείων κελύφους. Παράλληλα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αποφυγή ακραίων λόγων πλευρών των στοιχείων και μεγάλες αποκλίσεις από τις 90° γωνιών μεταξύ των πλευρών των στοιχείων, προκειμένου επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάλυση.

Τύπος Στοιχείων

Ο τύπος των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις είναι τετρακομβικά και τρικομβικά στοιχεία κελύφους και αναφέρονται με την κωδική ονομασία S4 και S3 στο εγχειρίδιο του ABAQUS [5]. Τα παραπάνω στοιχεία διαθέτουν έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο, τρεις μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές. Επιπλέον τα τετρακομβικά στοιχεία

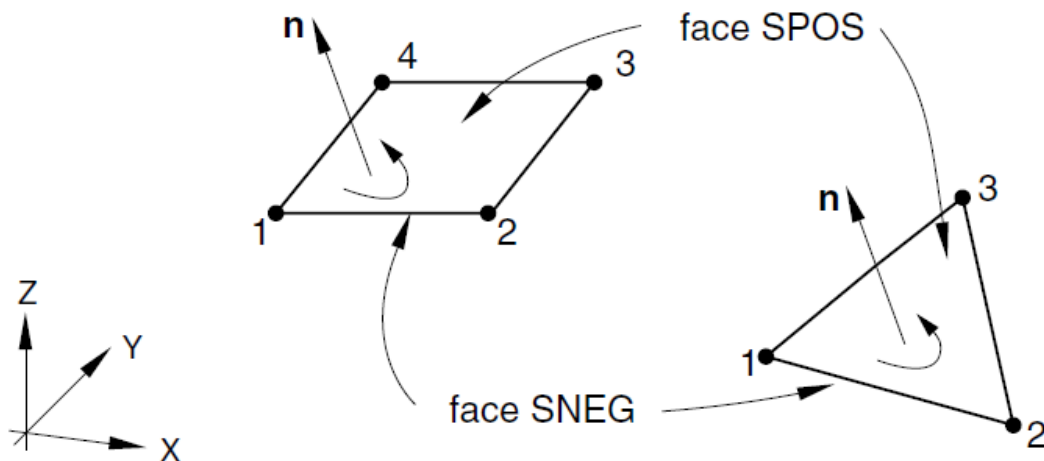
κελύφους είναι στοιχεία πλήρους ολοκλήρωσης, διαθέτοντας έτσι τέσσερα σημεία ολοκλήρωσης στο επίπεδο τους. Αντιθέτως τα τρικομβικά στοιχεία κελύφους διαθέτουν ένα σημείο ολοκλήρωσης στο επίπεδό τους (Εικόνα 9). Σημειώνεται επίσης ότι τα συγκεκριμένα στοιχεία κελύφους μπορούν να λάβουν υπόψη τους μεγάλες παραμορφώσεις και στροφές καθώς και απειροστές μεμβρανικές παραμορφώσεις.



Εικόνα 9 : Απεικόνιση των στοιχείων κελύφους, τετράπλευρων και τριγωνικών, με την αρίθμηση των κόμβων και των σημείων ολοκλήρωσης τους.

Όσον αφορά το πλήθος των σημείων ολοκλήρωσης κατά το πάχος των στοιχείων κελύφους, επιλέχθηκε πέντε. Η μέθοδος ολοκλήρωσης κατά το πάχος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο κανόνας ολοκλήρωσης του Simpson.

Στα στοιχεία κελύφους ορίζονται δύο όψεις στην επιφάνεια τους, μια θετική (SPOS) και μία αρνητική (SNEG) [5]. Η προσήμανση των όψεων ορίζεται βάσει της διεύθυνσης του ορθομοναδιαίου διανύσματος κατεύθυνσης της επιφάνειας, η οποία ακολουθεί τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως απεικονίζεται στο σκαρίφημα Εικόνα 10.

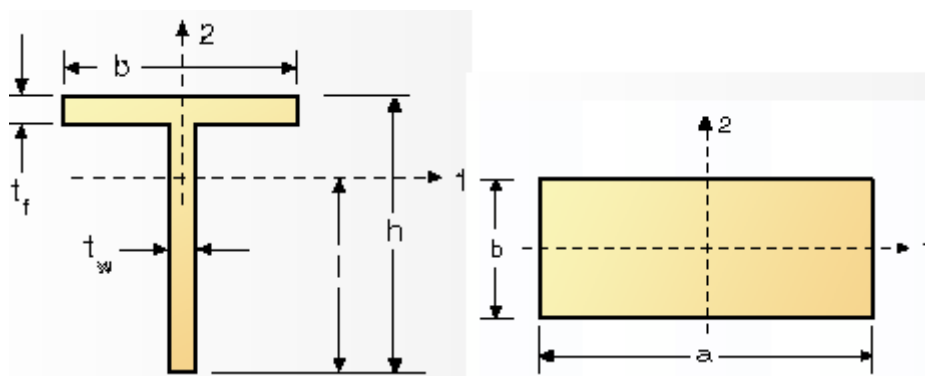


Εικόνα 10 : Ορισμός μοναδιαίου διανύσματος και αρίθμηση κόμβων σε τετρακομβικά και τρικομβικά στοιχεία κελύφους στο ABAQUS.

Η πλειονότητα των φορτίσεων που ασκούνται στο προσομοίωμα των τριών διαμερισμάτων είναι φορτία πίεσης, π.χ. υδροστατική φόρτιση στα εξωτερικά τοιχώματα του πλοίου, φορτίσεις λόγω κυματισμών στις πλευρές και στο κατάστρωμα, πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματα των αμπαριών λόγω του βάρους του φορτίου κ.α. Η θετική κατεύθυνση του ορθομοναδιαίου διανύσματος επιφάνειας ορίζει τη σύμβαση για την εφαρμογή φορτίων πίεσης. Ένα θετικό φορτίο πίεσης που έχει εφαρμοστεί σε ένα στοιχείο κελύφους παράγει ένα

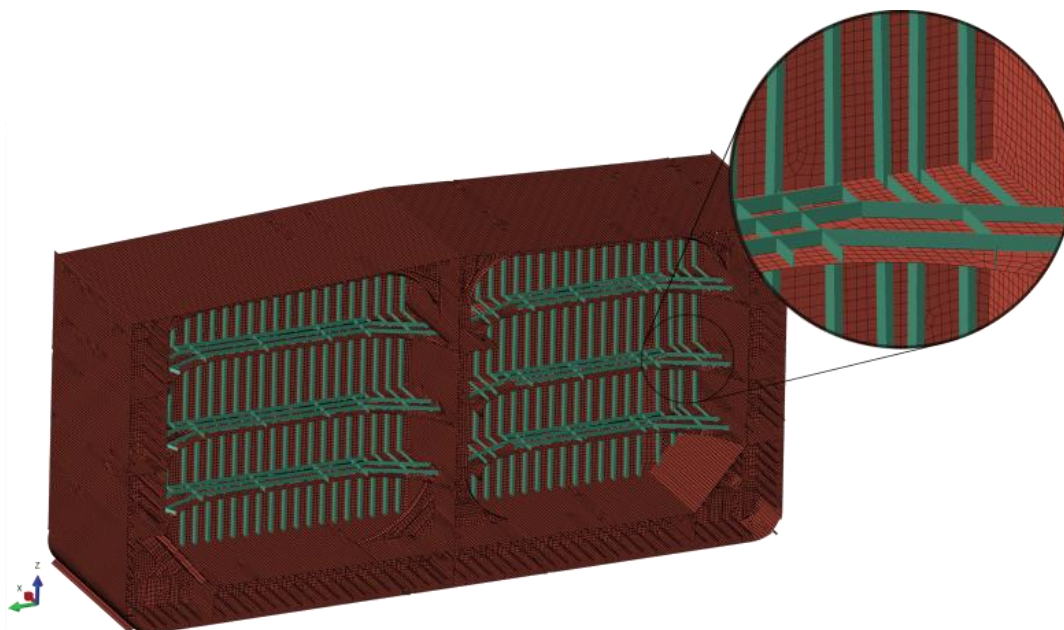
φορτίο που δρα στη θετική κατεύθυνση του ορθομοναδιαίου διανύσματος επιφανείας. Αυτή ακριβώς η σύμβαση κατέστησε απαραίτητο να εξασφαλιστεί ότι όλα τα στοιχεία κελύφους ανά τμήμα του πλοίου (π.χ. γάστρα, αμπάρια κ.α.) όπου θα εφαρμοστούν φορτία πίεσης να διαθέτουν ορθομοναδιαία διανύσματα με κοινές κατευθύνσεις.

Σχετικά με τα στοιχεία δοκού που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση των ενισχύσεων των φρακτών και των εδρών κάθετες σε αυτές, πρόκειται για στοιχεία δοκού Timoshenko και αναφέρονται με την κωδική ονομασία B31 στο εγχειρίδιο του ABAQUS [5]. Πρόκειται για δίκομβα γραμμικά στοιχεία δοκού με ένα σημείο ολοκλήρωσης στη διεύθυνση τους. Οι διατομές που χρησιμοποιήθηκαν για τα στοιχεία αυτά είναι τύπου T (T profile) και ορθογώνια (rectangular profile) για τις λάμες (Εικόνα 11).



Εικόνα 11 :Σκαρίφημα των διατομών των ενισχυτικών τύπου "T" (αριστερά) και λάμας (δεξιά).

Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται ένα τμήμα του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων που περιέχει μια φρακτή και τις κάθετες σε αυτή έδρες. Στην εικόνα είναι ορατό το πλέγμα των στοιχείων κελύφους, χρώματος κόκκινου, ενώ με πράσινο χρώμα εμφανίζονται τα στοιχεία δοκού στα οποία έχει επιλεγθεί να αποτυπωθεί το προφίλ της διατομής τους.



Εικόνα 12 : Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα στοιχεί κελύφους των ελασμάτων των φρακτών ενώ με πράσινο τα στοιχεία δοκού που τις ενισχύουν.

Απαιτήσεις Φορτίσεων από τους κανονισμούς CSR

Σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR για πετρελαιοφόρα πλοία, μία πληθώρα διαφορετικών σεναρίων φόρτισης με πολλούς συνδυασμούς φορτίσεων πρέπει να εκτελεστεί προκειμένου μια μελέτη δομικής αντοχής ενός πλοίου να θεωρηθεί πλήρης. Οι φορτίσεις που εμπεριέχονται σε κάθε σενάριο χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες βάσει της στατικής ή δυναμικής φύσης τους :

- i. στατικές φορτίσεις, όπως το ίδιο βάρος του φορτίου ή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου και
- ii. δυναμικές φορτίσεις, όπως φορτίσεις λόγω κυματισμού ή μετατόπισης του φορτίου εντός των κυτών.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί και να τονιστεί ότι ο δυναμικός χαρακτήρας των φορτίσεων δεν αποδίδεται άμεσα στις αναλύσεις. Απλουστευμένες προσεγγιστικές σχέσεις, χωρίς χρονική εξάρτηση, προτείνονται από τους κανονισμούς και ακολουθούνται και στην παρούσα εργασία.

Τα φορτία που ασκούνται σε ένα πετρελαιοφόρο πλοίο και απαιτούνται στις μελέτες δομικής αντοχής από τους CSR, παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω :

-Βάρος μεταλλικής κατασκευής (Structural weight)

-Βάρος φορτίου και έρματος (Cargo and Ballast weight)

-Στατική υδροστατική πίεση (Static sea pressure)

-Δυναμική πίεση λόγω κυματισμού (Dynamic wave pressure)

-Διαμήκεις και εγκάρσιες καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις που δρουν στη γάστρα του πλοίου (Hull girder vertical bending moment and vertical shear force)

-Φορτίσεις που ασκούνται στις δεξαμενές φορτίου και έρματος (Pressure in cargo and ballast tanks)

Περισσότερες λεπτομέρειες για τις φορτίσεις και τις σχέσεις που τις διέπουν θα δοθούν παρακάτω. Ακολουθεί μια συνοπτική και ενδεικτική παρουσίαση των φορτίσεων που εφαρμόστηκαν στο προσομοίωμα των τριών διαμερισμάτων, προκειμένου να γίνει πιο κατανοητή στον αναγνώστη η φύση και το είδος των φορτίσεων.

Στατική υδροστατική πίεση (Static Sea Pressure)

Η υδροστατική πίεση ασκείται στα εξωτερικά τοιχώματα της γάστρας και έχει την κατανομή που φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 1. Η κατανομή της υδροστατικής πίεσης δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$P_{hys} = \rho_{swg}(T_{LC} - z) , \text{ kN/m}^2$$

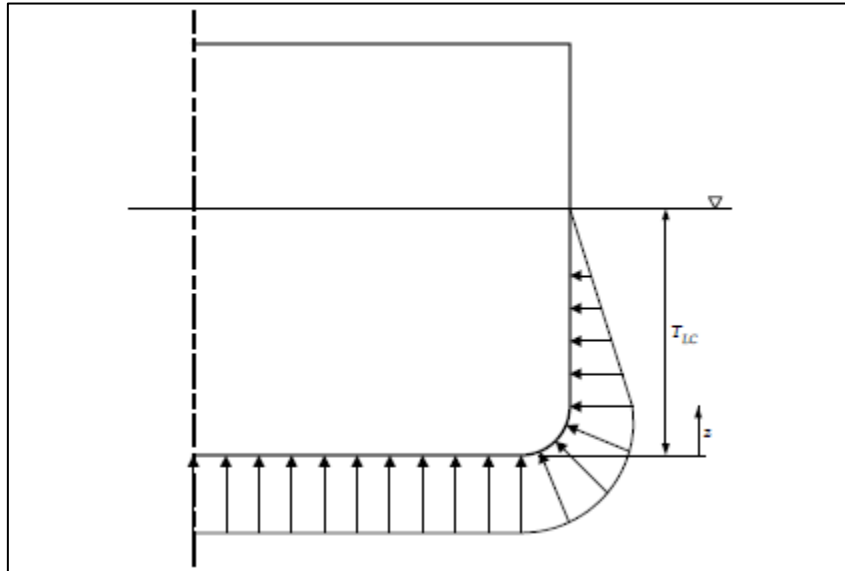
Όπου :

z , η κάθετη συντεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου, σε m, και δεν πρέπει να υπερβαίνει το T_{LC}

ρ_{sw} , πυκνότητα θαλασσινού νερού, 1.025 tonnes/m³

T_{LC} , το βύθισμα στην εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης, σε m

g , επιτάχυνση της βαρύτητας, 9.81m/s²



Σχήμα 1 : Κατανομή υδροστατικής πίεσης.

Δυναμική Πίεση Κυματισμού (Dynamic Wave Pressure)

Η δυναμική πίεση λόγω κυματισμού προκαλείται από το κύμα και την παράλληλη ανύψωση ή μείωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας (Σχήμα 2). Η κατανομή της P_{ex-dyn} λαμβάνεται ως η μεγαλύτερη τιμή από της παρακάτω σχέσεις :

$$P_1 = 2f_{prob}f_{nl-P1} \left[\left(P_{11} + \frac{135B_{local}}{4(B+75)} - 1.2(T_{LC} - z) \right) f_1 + \frac{135B_{local}}{4(B+75)} f_2 \right] \quad \text{kN/m}^2$$

$$P_2 = 26f_{prob}f_{nl-P2} \left[\left(\frac{B_{local}}{8} \theta + f_T C_b \frac{0.25B_{local} + 0.8C_{wv}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_1 + \left(\frac{B_{local}}{8} \theta + f_T C_b \frac{0.25B_{local}}{14} \left(0.7 + \frac{2z}{T_{LC}} \right) \right) f_2 \right] \quad \text{kN/m}^2$$

όπου :

B_{local} , το τοπικό πλάτος του πλοίου στο ύψος της ισάλου, για το συγκεκριμένο εξεταζόμενο βύθισμα, δεν πρέπει να ληφθεί μικρότερο από το 0.5B (όπου B το πλάτος του πλοίου), σε m

θ , η γωνία διατοιχισμού, σε rads

$$P_{II} = (3f_s + 0.8)C_{wv}$$

C_{wn} , συντελεστής κύματος

L , το μήκος του πλοίου σε m

B , το πλάτος του πλοίου σε m

T_{LC} , το βύθισμα του πλοίου στην εξεταζόμενη κατάσταση φόρτωσης, σε m

T_{sc} , το βύθισμα αντοχής του πλοίου, σε m

C_b , ο συντελεστή γάστρας του πλοίου

$$f_1 = f_{lng} - \frac{f_{lng}}{f_V} f_2 + f_2$$

$$f_2 = 0.25 f_V \left(\frac{4|y|}{B_{local}} - 1 \right) \quad \text{για } |y| < 0.25 B_{local}$$

$$f_2 = \begin{cases} 0.25 f_V \left(\frac{4|y|}{B_{local}} - 1 \right), & \text{για } |y| < 0.25 B_{local} \\ f_V \left(\frac{4|y|}{B_{local}} - 1 \right), & |y| \geq 0.25 B_{local} \end{cases}$$

$$f_T = \frac{T_{LC}}{T_{sc}}$$

$$f_s = \begin{cases} C_b + \frac{1.33}{\sqrt{C_b}}, & \text{στην/και πίσω από την πρυμναία κάθετο (A.P.)} \\ C_b, & \text{μεταξύ 0.2L και 0.7L από την πρυμναία κάθετο (A.P.)} \\ C_b + \frac{1.33}{C_b}, & \text{στην/και προστά από την πρωραία κάθετο (F.P.)} \end{cases}$$

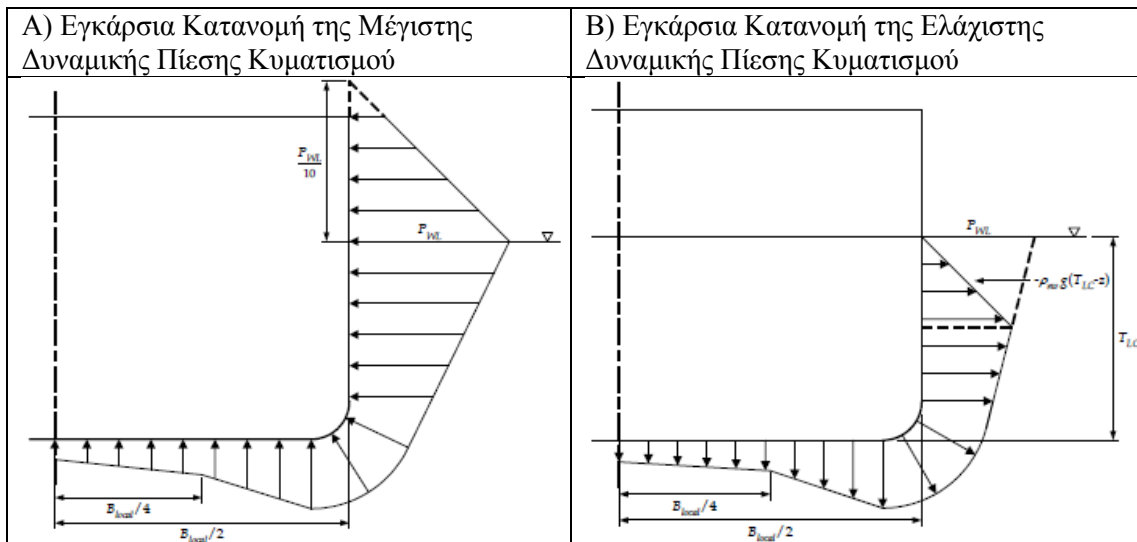
ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή

$$f_{lng} = \begin{cases} 1.0, & \text{στην/και πίσω από την πρυμναία κάθετο (A.P.)} \\ 0.7, & \text{μεταξύ 0.2L και 0.7L από την πρυμναία κάθετο (A.P.)} \\ 1.0, & \text{στην/και προστά από την πρωραία κάθετο (F.P.)} \end{cases}$$

ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή

y , η εγκάρσια συντεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου, σε m

z , η κατακόρυφη συντεταγμένη του σημείου εφαρμογής του φορτίου, σε m



Σχήμα 2 : Κατανομή της μέγιστης (Α) και ελάχιστης (Β) δυναμικής πίεσης κυματισμού.

Φορτίσεις καταστρώματος λόγω κυματισμού (Green Sea Load)

Σε καταστάσεις έντονης θάλασσας το ύψος των κυματισμών δύναται να ξεπερνά το ύψος εξάλλων ενός πλοίου. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με συγκεκριμένες πλεύσεις του πλοίου μπορεί να οδηγήσει σε διαβροχή του καταστρώματος ή ακόμα και σε κρουστικά φορτία προερχόμενα από την εκτόνωση του κύματος επί του καταστρώματος. Η παρακάτω σχέση, αναφέρεται στους κανονισμούς και η κατανομή που προκύπτει προσεγγίζει τη φόρτιση του κυματισμού επί του καταστρώματος καιρού (weather deck) του πλοίου (επιλέγεται η μεγαλύτερη από τις τρεις προκύπτουσες τιμές):

$$P_{wdk} = \begin{cases} f_{1-dk} (f_{op} P_{1-WL} - 10z_{dk-T}), & kN/m^2 \\ 0.8f_{2-dk} (P_{2-WL} - 10z_{dk-T}), & kN/m^2 \\ 34.3, & kN/m^2 \end{cases}$$

όπου :

$$f_{1-dk} = 0.8 + \frac{L}{750}$$

$$f_{2-dk} = 0.5 + \frac{|y|}{B_{wdk}}$$

$$f_{op} = \begin{cases} 1.0, & \text{πρώραθεν και στα } 0.2L \text{ από την πρυμναία κάθετο } A.P. \\ 0.8, & \text{πρύμνηθεν και στην πρυμναία κάθετο } A.P. \end{cases}$$

ενδιάμεσες τιμές λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή

P_{1-WL} , η P_1 πίεση στη σταθερή ίσαλο για το βύθισμα συγκεκριμένης φόρτωσης, σε kN/m^2

P_{2-WL} , η P_2 πίεση στη σταθερή ίσαλο για το βύθισμα συγκεκριμένης φόρτωσης, σε kN/m^2

z_{dk-T} , η απόσταση του καταστρώματος από τη σταθερή ίσαλο για το βύθισμα συγκεκριμένης φόρτωσης, σε m

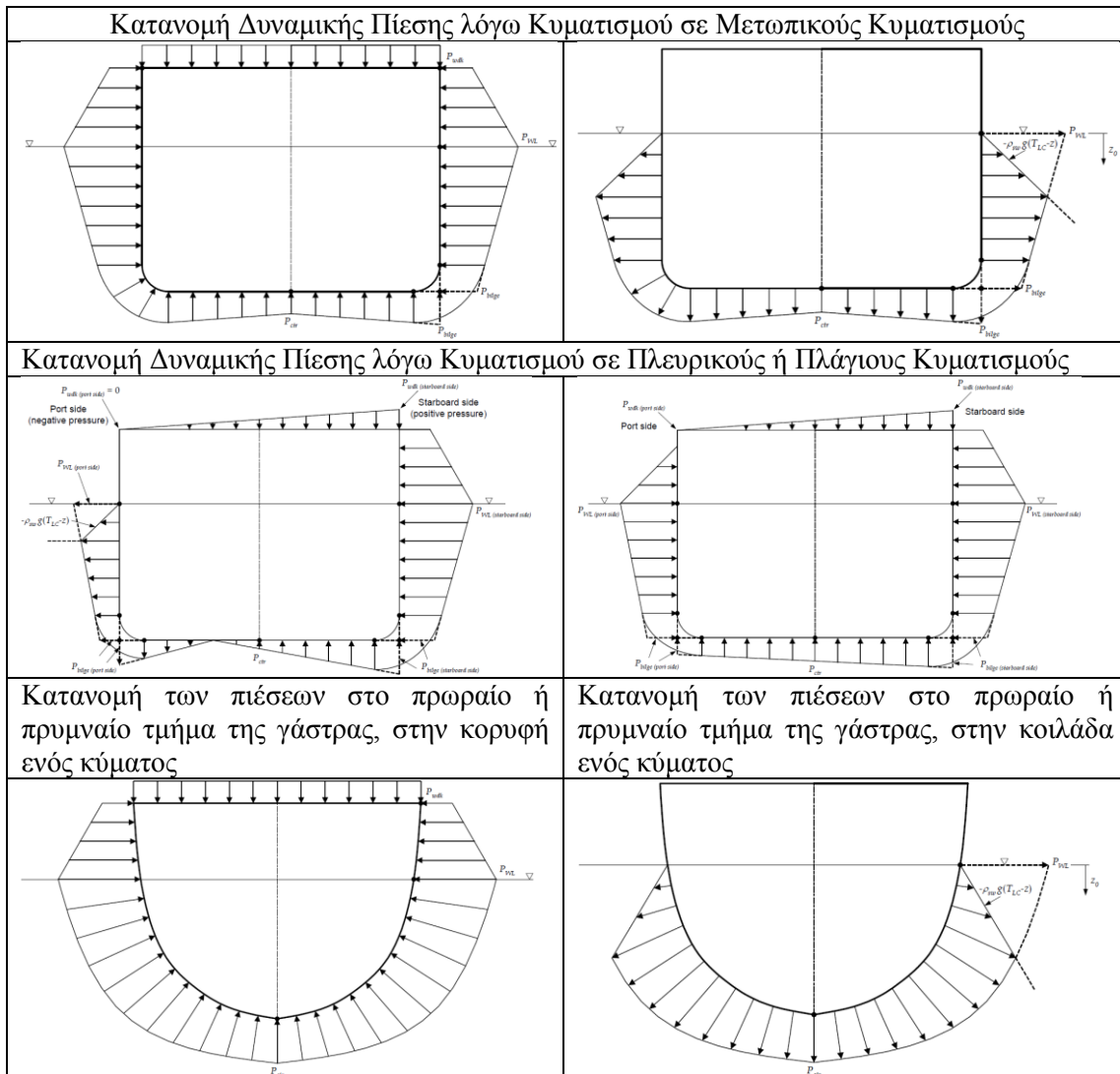
B_{wdk} , το τοπικό πλάτος του πλοίου στην περιοχή του καταστρώματος διαβροχής, σε m

L , το μήκος του πλοίου, σε m

y , η εγκάρσια συντεταγμένη του σημείου εφαρμογής της φόρτισης, σε m

Συνδυασμός των φορτίσεων ανάλογα με την πλευση

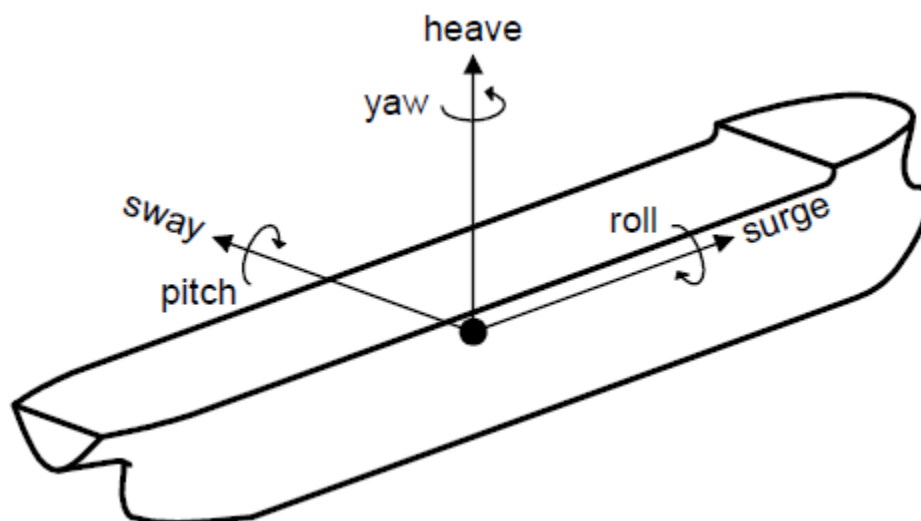
Η πλευση ενός πλοίου σε σχέση με τη διεύθυνση του κυματισμού και τα χαρακτηριστικά του καθορίζει τις φορτίσεις που δέχεται. Διαφορετικά τμήματα της γάστρας ενός πλοίου και με διαφορετικές κατανομές πιέσεων, φορτίζονται όταν το πλοίο ταξιδεύει με πλευρικό κυματισμό από ότι ορθόπρωρο. Ομοίως όταν το πλοίο διέρχεται μέσα από ένα κύμα, κάποιο τμήμα της γάστρας του βρίσκεται στην κορυφή του κύματος ενώ κάποιο άλλο στην κοιλάδα του κύματος. Αυτό συνεπάγεται άμεσα και διαφορετικές κατανομές πιέσεων στα τμήματα της γάστρας του. Συνεπώς η φορτίσεις που δέχεται ένα πλοίο είναι συνδυασμός των φορτίσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Ακολούθως παρουσιάζονται σχήματα με κατανομές των κυματικών φορτίσεων σε διαφορετικές πλευσεις του πλοίου (Σχήμα 3).



Σχήμα 3 : Κατανομή των δυναμικών κυματικών πιέσεων στη γάστρα του πλοίου σε διαφορετικές πλευσεις.

Δυναμικές φορτίσεις στις δεξαμενές (Dynamic Tank Pressure)

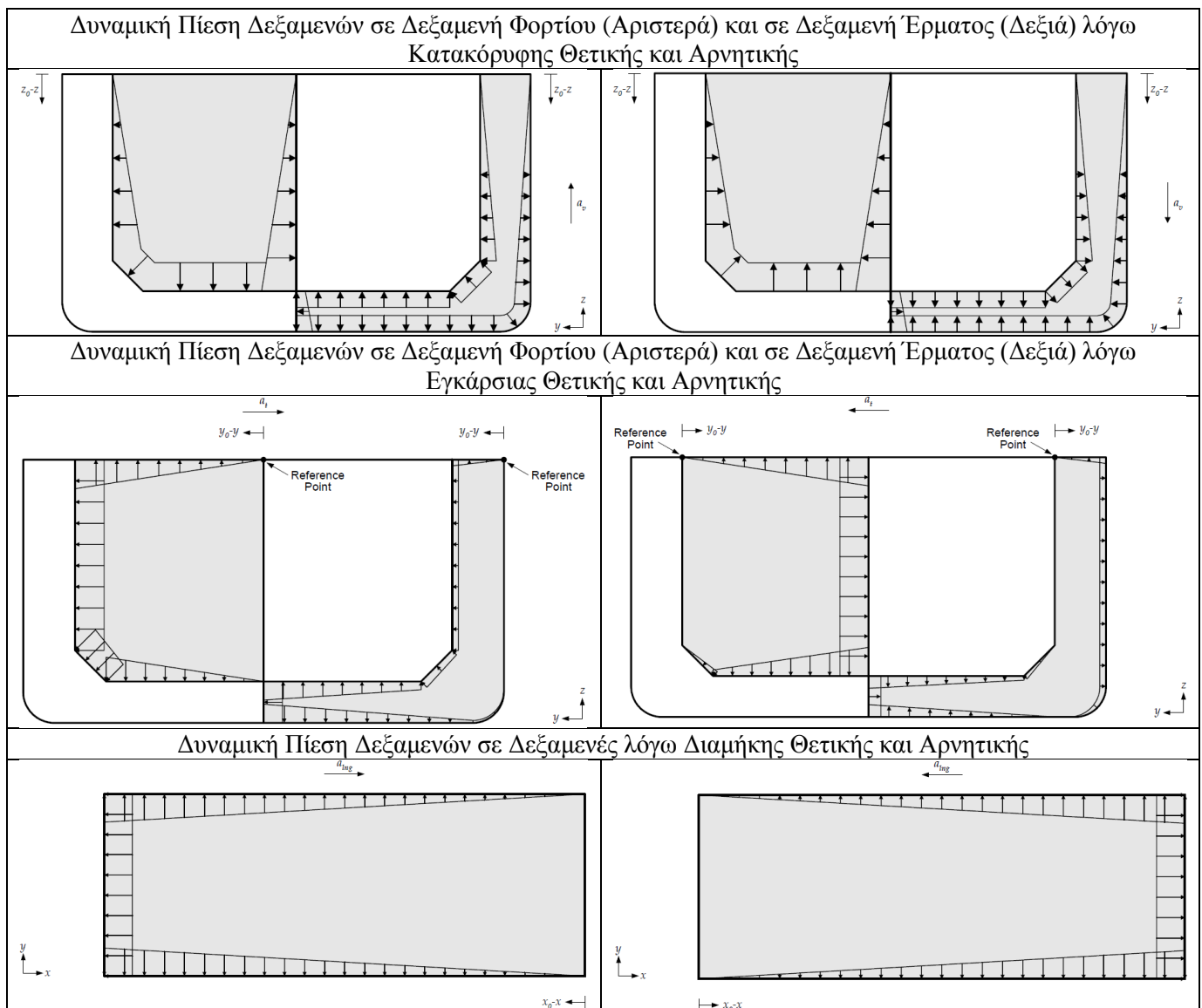
Το πλοίο, όπως και κάθε ελεύθερο σώμα, όταν βρίσκεται στο φυσικό χώρο λειτουργίας του, δηλαδή το θαλάσσιο περιβάλλον, διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές (Σχήμα 4). Ακολούθως έξι είναι και οι αντίστοιχες επιταχύνσεις.



Σχήμα 4 : Οι έξι βαθμοί ελευθερίας ενός πλοίου και οι ορισμοί τους.

Όπως έχει ήδη συζητηθεί, οι φορτίσεις που δέχεται ένα πλοίο καθώς κινείται στα δύο ρευστά (νερό και αέρας) δεν είναι μονάχα στατικές. Έχουν ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα οι δυναμικές φορτίσεις που προκαλούνται άμεσα από τους κυματισμούς, καθώς το κύμα εκτονώνεται στις πλευρές ή στο κατάστρωμα του πλοίου. Όμως ο κυματισμός και ο αέρας μπορούν να επάγουν και έμμεσα δυναμικές φορτίσεις εντός του πλοίου. Δυνατές ριπές αέρα ή έντονη κυματισμοί μπορούν να προκαλέσουν απότομες κινήσεις του πλοίου σε ένα ή παραπάνω από τους βαθμούς ελευθερίας του. Σε ένα πετρελαιοφόρο πλοίο, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απότομη μετατόπιση του φορτίου εντός το δεξαμενών του και κατά συνέπεια σε πρόκληση δυναμικών φορτίσεων στα τοιχώματα των δεξαμενών του.

Στους κανονισμούς CSR οι επιταχύνσεις του πλοίου προσεγγίζονται από αναλυτικές σχέσεις. Ακολούθως εξάγονται σχέσεις που αποδίδουν τις δυναμικές πιέσεις που ασκούνται στα τοιχώματα των δεξαμενών που μεταφέρουν φορτίο ή έρμα, λόγω των κινήσεων του πλοίου. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται σενάρια δυναμικής φόρτισης φορτωμένων δεξαμενών, ανάλογα με τη διεύθυνση της επιτάχυνσης του πλοίου (Σχήμα 5).



Σχήμα 5 : Σενάρια δυναμικής φόρτισης φορτωμένων δεξαμενών, ανάλογα με τη διεύθυνση της επιτάχυνσης του πλοίου.

Κατάστρωση Σεναρίων Φόρτισης

Η πληθώρα των φορτίσεων και των πιθανών συνδυασμών τους κατέστησε απαραίτητο για τους κανονισμούς να καταστήσουν και να προτείνουν ένα αναλυτικό πλάνο σεναρίων φόρτισης. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οκτώ πιθανά σενάρια φόρτισης, τα οποία κατηγοριοποιούνται στις παρακάτω τρεις ομάδες ανάλογα με την διεύθυνση του κυματισμού:

1. Έμπρομη Κυματισμοί (Head Sea)
2. Πλευρικοί Κυματισμοί (Beam Sea)
3. Πλάγιοι Κυματισμοί (Oblique Sea)

Πίνακας 1 : Δυναμικά σενάρια φόρτισης για τη μελέτη δομικής αντοχής ενός δεξαμενόπλοιου κατά CSR.

Wave direction			Head sea				Beam sea		Oblique sea	
Max response			M_{ww} (Sagging)	M_{ww} (Hogging)	Q_{ww} (Sagging)	Q_{ww} (Hogging)	a_v		M_{ww-h} (Hogging)	
Dynamic Load Case			1	2	3	4	5a	5b	6a	6b
Global loads	M_{ww}	f_{mw}	-1.0	1.0	-1.0	1.0	0.0	0.0	0.4	0.4
	Q_{ww}	f_{qw}	1.0	-1.0	1.0	-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	M_{ww-h}	f_{mh}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	-1.0
Accelerations	a_v	f_v	0.5	-0.5	0.3	-0.3	1.0	1.0	-0.1	-0.1
	a_t	f_t	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.6	0.6	0.0	0.0
	a_{lng}	f_{lng}	-0.6	0.6	-0.6	0.6	-0.5	-0.5	0.5	0.5
Dynamic wave pressure for port side	P_{WL}	f_{WL}	-0.3	0.3	0.1	-0.1	1.0	0.4	0.6	0.0
	P_{bilge}	f_{bilge}	-0.3	0.3	0.1	-0.1	1.0	0.4	0.4	0.0
	P_{ctr}	f_{ctr}	-0.7	0.7	0.3	-0.3	0.9	0.9	0.5	0.5
Dynamic wave pressure for starboard side	P_{WL}	f_{WL}	-0.3	0.3	0.1	-0.1	0.4	1.0	0.0	0.6
	P_{bilge}	f_{bilge}	-0.3	0.3	0.1	-0.1	0.4	1.0	0.0	0.4
	P_{ctr}	f_{ctr}	-0.7	0.7	0.3	-0.3	0.9	0.9	0.5	0.5

Κάθε ένα από τα οκτώ σενάρια φόρτισης περιέχει πολλαπλασιαστικούς συντελεστές των μεταβλητών που εμπεριέχονται στις εξισώσεις των φορτίσεων. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται ποιες φορτίσεις θα εφαρμοστούν σε κάθε σενάριο, με τι φορά και με τι ένταση. Συνεπώς διακρίνονται οι εξής κατηγορίες φορτίων ανά σενάριο φόρτισης :

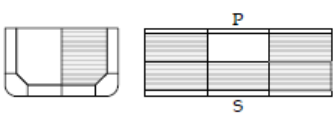
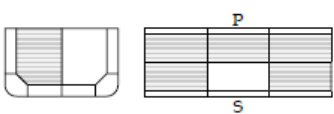
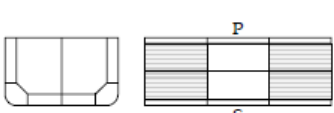
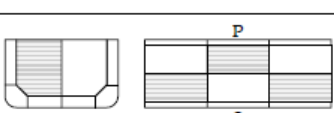
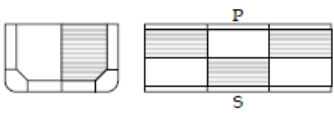
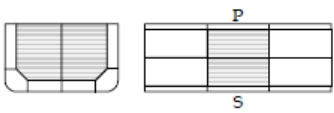
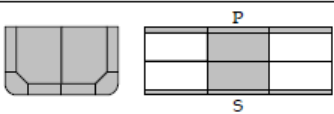
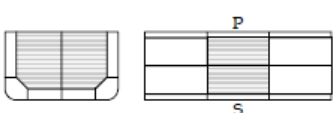
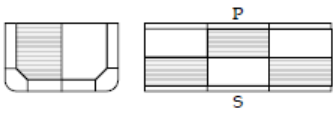
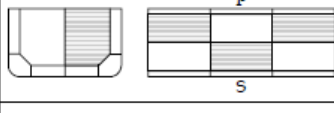
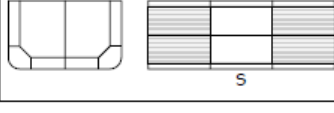
- Γενικές φορτίσεις, που αντιστοιχούν στις δύο ροπές κάμψης (εγκάρσια και διαμήκης) και στις διατμητικές φορτίσεις (Global Loads).
- Επιταχύνσεις (Accelerations). Οι συντελεστές αυτής της κατηγορίας καθορίζουν το μέγεθος και τη φορά των επιταχύνσεων, επηρεάζοντας έτσι άμεσα τις δυναμικές φορτίσεις των δεξαμενών.
- Δυναμική κυματική φόρτιση στην αριστερή πλευρά του πλοίου (Dynamic wave pressure for port side).
- Δυναμική κυματική φόρτιση στη δεξιά πλευρά του πλοίου (Dynamic wave pressure for starboard side).

Εξεταζόμενες Καταστάσεις Φόρτωσης

Ο τρόπος φόρτωσης των δεξαμενών ενός πετρελαιοφόρου πλοίου δεν είναι μοναδικός και δεν ακολουθείται πάντα ο ίδιος. Πολλοί είναι οι παράγοντες που καθορίζουν ποιες δεξαμενές και με ποια σειρά θα φορτωθούν και αν είναι απαραίτητη η χρήση ή όχι έρματος. Δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες είναι η ευστάθεια και η αντοχή. Αυτός ακριβώς είναι και ο λόγος που κάθε πλοίο συνοδεύεται από το πιστοποιημένο «βιβλίο φορτώσεως» του (loading manual). Σε αυτό το βιβλίο αναγράφονται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί φόρτωσης δεξαμενών που δύναται να πραγματοποιηθούν στο πλοίο αυτό. Αυτές οι καταστάσεις φόρτωσης έχουν ελεγχθεί και από πλευράς ευστάθειας αλλά και από πλευράς αντοχής προτού πιστοποιηθούν και καταγραφούν στο βιβλίο φορτώσεως.

Κάτω από αυτό το σκεπτικό στους κανονισμούς CSR συνοψίζονται όλοι πιθανοί συνδυασμοί φόρτωσης των δεξαμενών φορτίου, στο προσομοίωμα τριών αμπαριών, σε έντεκα καταστάσεις φόρτωσης (Πίνακας 2). Ορισμένες από αυτές τις καταστάσεις συμπεριλαμβάνουν και περιπτώσεις ερματισμού των δεξαμενών του διπυθμένου ή/και των δεξαμενών του διπλού τοιχώματος.

Πίνακας 2 : Καταστάσεις φόρτωσης δεξαμενόπλοιων με κεντρική διαμήκη φρακτή.

Loading Pattern	Figure	Still Water Loads			Dynamic load cases		
		Draught	% of Perm. SWBM ⁽²⁾	% of Perm. SWSF ⁽²⁾	Strength assessment (1a)	Strength assessment against hull girder shear loads (1b)	
					Midship region	Forward region	Midship and aft regions
Design load combination S + D (Sea-going load cases)							
B1		0.9 T _{sc}	100% (sag)	See note 3	1	\	\
			100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 4	2, 5a	\	\
B2 ⁽⁶⁾		0.9 T _{sc}	100% (sag)	See note 3	1	\	\
			100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 4	2, 5b	\	\
B3		0.9 T _{sc}	100% (hog)	100% (-ve fwd) See note 5	2	4	2
				100% (-ve fwd) See note 4	5a, 5b, 6a, 6b	\	\
B4		0.6 T _{sc}	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	1, 5a	\	\
B5 ⁽⁶⁾		0.6 T _{sc}	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	1, 5b	\	\
B6		0.6 T _{sc}	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 5	1	3	1
				100% (+ve fwd) See note 4	5a, 5b	\	\
B7 ⁽⁷⁾		T _{hd-em}	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 4	1	\	\
Design load combination S (Harbour and tank testing load cases)							
B8 ⁽⁸⁾		1/3T _{sc}	100% (sag)	100% (+ve fwd) See note 5	Applicable to strength assessment of midship region (see 1(a)) and strength assessment against hull girder shear loads (see 1(b))		
B9 ⁽⁸⁾		1/3T _{sc}	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	Only applicable to strength assessment of midship region (see note 1(a))		
B10 ^(6,8)		1/3T _{sc}	100% (sag)	75% (+ve fwd) See note 4	Only applicable to strength assessment of midship region (see note 1(a))		
B11 ⁽⁸⁾		T _{sc}	100% (Hog)	100% (-ve fwd) See note 5	Applicable to strength assessment of midship region (see 1(a)) and strength assessment against hull girder shear loads (see 1(b))		

Λεπτομερέστερα στην πρώτη στήλη του Πίνακας 2 αναγράφεται ο αύξων αριθμός της κατάστασης φόρτωσης. Στη δεύτερη στήλη απεικονίζεται ένα σκαρίφημα δύο όψεων του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων. Η πρώτη όψη αντιστοιχεί σε εγκάρσια τομή του μοντέλου, ενώ η δεύτερη σε κάτοψη. Ο απώτερος στόχος των σκαριφημάτων είναι να απεικονίσουν την κατάσταση φόρτωσης. Με γκριζα απόχρωση έχουν χρωματιστεί οι περιοχές που έχουν φορτίο, αν πρόκειται για δεξαμενές φορτίου, ή θαλασσινό νερό αν πρόκειται για δεξαμενές έρματος. Διευκρινίζεται ότι τα γράμματα **P** και **S** που εμφανίζονται στις κατόψεις των σκαριφημάτων αντιστοιχούν στις λέξεις **P**ort side(=αριστερά) και **S**tarboard side(=δεξιά), ενώ επίσης σημειώνεται ότι το σκαρίφημα της διατομής αναφέρεται σε παρατηρητή που κοιτάζει από τη πρύμνη προς την πλώρη του πλοίου. Η τρίτη στήλη αναγράφει το βύθισμα του πλοίου στο οποίο αναφέρεται η κάθε κατάσταση φόρτωσης. Η πλειονότητα των αναγραφόμενων βυθισμάτων αναφέρονται σε ποσοστό του βυθίσματος αντοχής και κυμαίνονται σε εύρος από 0,33~0,9 του T_{sc} . Υπενθυμίζεται ότι το βύθισμα είναι μία από τις μεταβλητές που καθορίζουν άμεσα πολλά από τα στατικά φορτία και έμμεσα κάποια δυναμικά φορτία, όπως την υδροστατική πίεση και την δυναμική πίεση λόγω κυματισμού αντίστοιχα. Η τέταρτη και πέμπτη στήλη αναφέρονται στο ποσοστό και την προσήμανση της εφαρμοζόμενης ροπής κάμψης (**S**till **W**ater **B**ending **M**oment) και διατμητικής δύναμης (**S**till **W**ater **S**hear **F**orce) σε ήρεμο νερό, αντίστοιχως. Η τρίτη, τέταρτη και πέμπτη στήλη περιέχουν μεγέθη που ανήκουν στην κατηγορία των στατικών φορτίων ή φορτίων ήρεμου νερού (Still Water Loads). Αντιθέτως οι τρεις τελευταίες στήλες αναγράφουν το σενάριο των δυναμικών φορτίσεων (Dynamic Load Cases). Η επικεφαλίδα της κάθε μιας από τις τρεις τελευταίες στήλες αναφέρεται σε ποια διαμερίσματα εφαρμόζονται τα φορτία. Συνεπώς η έκτη στήλη περιέχει φορτία που εφαρμόζονται μόνο στο μεσαίο διαμέρισμα του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων. Η έβδομη στήλη αναγράφει φορτία που εφαρμόζονται μόνο στο πρωραίο διαμέρισμα, ενώ η όγδοη σε φορτία που εφαρμόζονται στο μεσαίο και στο πρυμναίο διαμέρισμα. Οι αριθμοί που αναγράφονται σε αυτές τις τρεις τελευταίες στήλες αντιστοιχούν στις δυναμικές καταστάσεις φόρτισης που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 1.

Διόρθωση καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων

Σύμφωνα με τους κανονισμούς CSR η κατανομή της καμπτικής ροπής και της διατμητικής δύναμης που εφαρμόζονται στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων πρέπει να αποκτήσουν συγκεκριμένες τιμές ακρότατων (Πίνακας 3). Η διόρθωση των τιμών τους επιτυγχάνεται μέσα από μία διαδικασία, που περιγράφεται αναλυτικότερα παρακάτω, χρησιμοποιώντας τη θεωρία πλοίου-δοκού.

Πίνακας 3 : Οι θέσεις ελέγχου της διατμητικής δύναμης και της καμπτικής ροπής.

Condition	Target			Aft Bkhd		Fore Bkhd	
	BM	SF	Bkhd pos	SF	ΔQ_{aft}	SF	ΔQ_{fwd}
	Hog	-ve	Fore	$-Q_{lavg}$	$-Q_{lavg} - Q_{aft}$	$Q_{lavg} (-ve)$	$Q_{lavg} - Q_{fwd}$
	Hog	-ve	Fore	$-Q_{lavg}$	$-Q_{lavg} - Q_{aft}$	$Q_{lavg} (-ve)$	$Q_{lavg} - Q_{fwd}$
	Sag	+ve	Fore	$-Q_{lavg}$	$-Q_{lavg} - Q_{aft}$	$Q_{lavg} (+ve)$	$Q_{lavg} - Q_{fwd}$
	Sag	+ve	Fore	$-Q_{lavg}$	$-Q_{lavg} - Q_{aft}$	$Q_{lavg} (+ve)$	$Q_{lavg} - Q_{fwd}$

Το τμήμα των τριών διαμερισμάτων του πλοίου θεωρείται ως μία αμφιέριστη δοκός. Στη δοκό αυτή ασκούνται τα παρακάτω τοπικά φορτία :

- i. Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής των τριών διαμερισμάτων.
- ii. Το βάρος του φορτίου και του έρματος.
- iii. Η υδροστατική πίεση, η δυναμική πίεση λόγω κυματισμού και οι φορτίσεις καταστρώματος λόγω κυματισμού.
- iv. Οι δυναμικές φορτίσεις δεξαμενών.

Μετά την εφαρμογή των φορτίων γίνεται ανάλυση της δοκού και η χάραξη των διαγραμμάτων ελευθέρου σώματος. Από τα διαγράμματα διατμητικής δύναμης λαμβάνονται οι τιμές της διατμητικής δύναμης στις θέσεις της πρυμναίας και της προωαίας φρακτής του μεσαίου διαμερίσματος και υπολογίζονται οι διαφορές τους από τις επιθυμητές τιμές επίτευξης.

$$\Delta Q_{aft} = Q_{targ} - Q_{aft}$$

$$\Delta Q_{fwd} = Q_{targ} - Q_{fwd}$$

όπου :

ΔQ_{aft} , η απαιτούμενη διορθωτική τιμή της διατμητικής δύναμης στην πρυμναία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος.

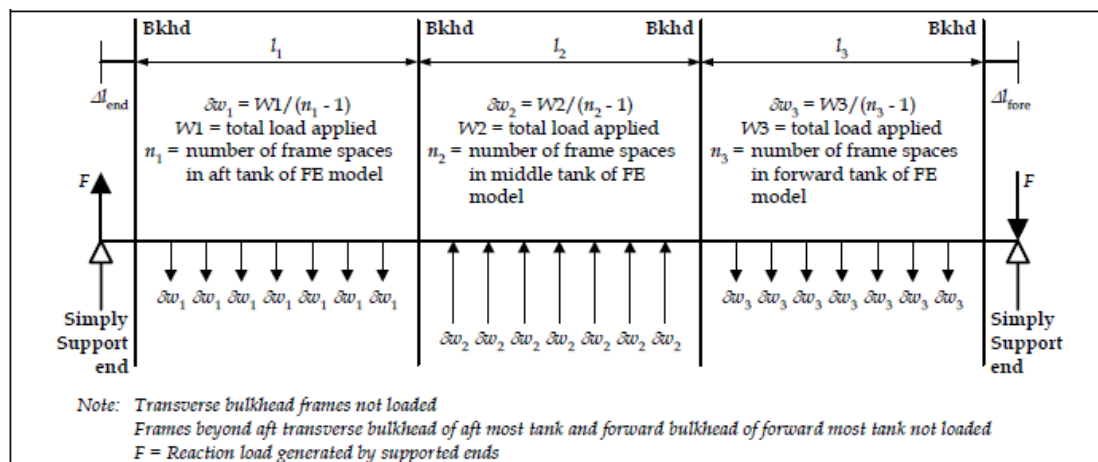
ΔQ_{fwd} , η απαιτούμενη διορθωτική τιμή της διατμητικής δύναμης στην προωαία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος.

Q_{aft} , η τιμή της διατμητικής δύναμης στην πρυμναία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος.

Q_{fwd} , η τιμή της διατμητικής δύναμης στην προωαία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος.

Q_{targ} , η επιθυμητή τιμή επίτευξης της διατμητικής δύναμης στην προωαία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος.

Έπειτα λαμβάνονται η τιμές των αντιδράσεων στις οριακές συνθήκες, τις δύο αρθρώσεις και κατανέμονται στη δοκό βάσει των εξισώσεων που παρουσιάζονται παρακάτω. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ένα σκαρίφημα της δοκού με τις οριακές συνθήκες και την κατανομή των φορτίων.



Σχήμα 6 : Σκαρίφημα της δοκού με τις οριακές συνθήκες και κατανομή των διορθωτικών φορτίων.

$$\delta w_1 = \frac{\Delta Q_{aft}(2l - l_2 - l_3) + \Delta Q_{fwd}(l_2 + l_3)}{(n_1 - 1)(2l - l_1 - 2l_2 - l_3)}$$

$$\delta w_2 = \frac{(W_1 + W_3)}{(n_2 - 1)} = \frac{(\Delta Q_{aft} + \Delta Q_{fwd})}{(n_2 - 1)}$$

$$\delta w_3 = \frac{-\Delta Q_{fwd}(2l - l_1 - l_2) + \Delta Q_{aft}(l_1 + l_2)}{(n_3 - 1)(2l - l_1 - 2l_2 - l_3)}$$

$$F = 0.5 \left(\frac{W_1(l_2 + l_1) + W_3(l_2 + l_3)}{l} \right)$$

όπου :

l_1 , το μήκος του πρυμναίου διαμερίσματος

l_2 , το μήκος του μεσαίου διαμερίσματος

l_3 , το μήκος του προραίου διαμερίσματος

ΔQ_{aft} , η απαιτούμενη διορθωτική τιμή της διατμητικής δύναμης στην πρυμναία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος

ΔQ_{fwd} , η απαιτούμενη διορθωτική τιμή της διατμητικής δύναμης στην προραία φρακτή του μεσαίου διαμερίσματος

F , οι αντιδράσεις στις οριακές συνθήκες, τις δύο αρθρώσεις

W_1 , το συνολικό κατανεμημένο φορτίο που εφαρμόζεται στο πρυμναίο διαμέρισμα

W_2 , το συνολικό κατανεμημένο φορτίο που εφαρμόζεται στο μεσαίο διαμέρισμα

W_3 , το συνολικό κατανεμημένο φορτίο που εφαρμόζεται στο προραίο διαμέρισμα

n_1 , το πλήθος των αποστάσεων μεταξύ των νομέων στο πρυμναίο διαμέρισμα

n_2 , το πλήθος των αποστάσεων μεταξύ των νομέων στο μεσαίο διαμέρισμα

n_3 , το πλήθος των αποστάσεων μεταξύ των νομέων στο προραίο διαμέρισμα

δw_1 , το κατανεμημένο φορτίο στου νομείς του πρυμναίου διαμερίσματος

δw_2 , το κατανεμημένο φορτίο στου νομείς του μεσαίου διαμερίσματος

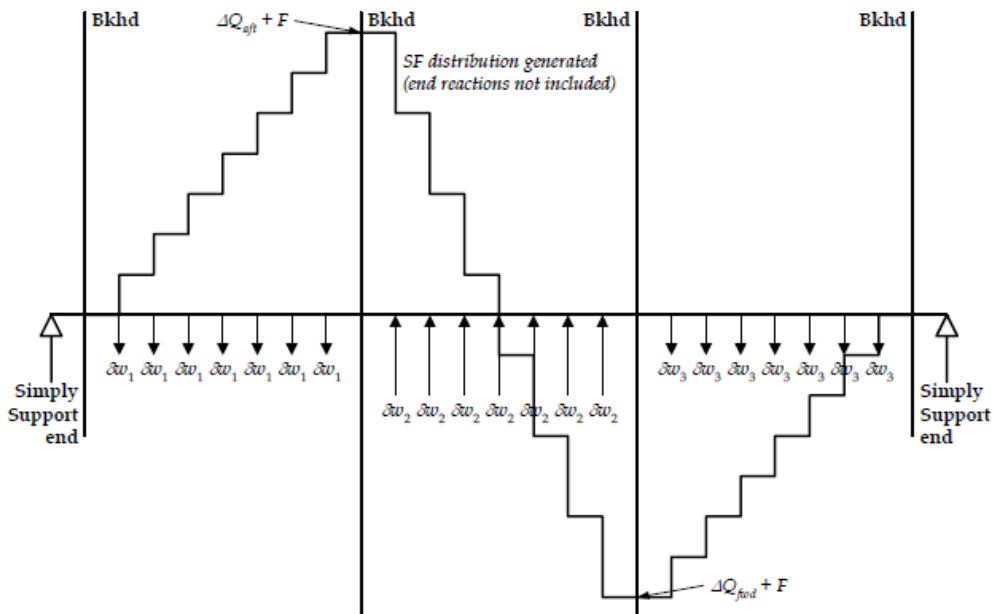
δw_3 , το κατανεμημένο φορτίο στου νομείς του προραίου διαμερίσματος

Δl_{end} , απόσταση μεταξύ της πρυμναίας φρακτής του πρυμναίου διαμερίσματος και της πρυμναίας άκρης του μοντέλου

Δl_{fore} , απόσταση μεταξύ της προραίας φρακτής του προραίου διαμερίσματος και της προραίας άκρης του μοντέλου

l , συνολικό μήκος του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (δοκός) συμπεριλαμβανομένου και τμήματα πέραν των ακραίων φρακτών : $= l_1 + l_2 + l_3 + \Delta l_{end} + \Delta l_{fore}$

Επαναλαμβάνεται η ανάλυση της δοκού με τα νέα κατανεμημένα φορτία και επαναχαράζονται τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος. Στο Σχήμα 7 απεικονίζεται η δοκός με την κατανομή διατμητικής δύναμης. Με τη διαδικασία αυτή επετεύχθη η επιθυμητή ακρότατη τιμή της κατανομής της διατμητικής δύναμης.



Σχήμα 7 : Η κατανομή της διατμητικής δύναμης μετά την εφαρμογή των διορθωτικών φορτίων.

Σχετικά με τη διόρθωση της καμπτικής ροπής, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Από τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος που χαράχθηκαν στην προηγούμενη ανάλυση, λαμβάνεται η ακρότατη τιμή της κατανομής της καμπτικής ροπής. Η τιμή της διαμήκουσ καμπτικής ροπής που τελικά θα εφαρμοστεί και στα δύο άκρα του τρισδιάστατου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων θα είναι η διαφορά μεταξύ της ακρότατης τιμής και της επιθυμητής τιμής επίτευξης. Αναλυτικότερα η παραπάνω τιμή προκύπτει από την εξής διαφορά :

$$M_{v-end} = M_{v-targ} - M_{v-peak}$$

M_{v-end} , η διαμήκης καμπτική ροπή που θα εφαρμοστεί και στις δύο άκρες του τρισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

M_{v-targ} , η απαιτούμενη διαμήκης θετική ροπή κάμψης (hogging) ή αρνητική ροπή κάμψης (sagging)

M_{v-peak} , η μέγιστη ή ελάχιστη τιμή της κατανομής της καμπτικής ροπής εντός της περιοχής του μεσαίου διαμερίσματος

Κατασκευή μοντέλου δοκού και εφαρμογή διαδικασίας διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων

Έχοντας περιγράψει τη διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί βάσει των CSR για την διόρθωση των διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών, στην παρούσα ενότητα θα περιγραφεί η πρακτική εφαρμογή της.

Η ανάπτυξη του μοντέλου δοκού καθώς και σχετικές με αυτό αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος βασίστηκε στη δυνατότητα που διαθέτει για εύκολη και γρήγορη χάραξη διαγραμμάτων ελευθέρου σώματος.

Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για την μοντελοποίηση της δοκού είναι στοιχεία δοκού με κωδική ονομασία BEAM3. Πρόκειται για δίκομβα στοιχεία με 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο : μία μετατόπιση ως προς τη x διεύθυνση μία μετατόπιση ως προς την y διεύθυνση και μία στροφή γύρω από τη z διεύθυνση. Το μήκος το στοιχείων δοκού επιλέχθηκε 200mm όσο ακριβώς και το μήκος των στοιχείων κελύφους στο τρισδιάστατο προσομοίωμα. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίστηκε η ίδια περίπου διαμέριση του μοντέλου στη διαμήκη διεύθυνση, γεγονός που εξυπηρετεί τον υπολογισμό και την εφαρμογή των φορτίων. Επιπλέον εφόσον το μόνο ζητούμενο σε αυτές τις στατικές αναλύσεις δοκού είναι το ισοζύγιο των δυνάμεων και ροπών που δρουν στο μοντέλο, οι ιδιότητες διατομής που επιλέχθηκαν δεν επηρεάζουν την ανάλυση. Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι αρθρώσεις και στα δύο άκρα.

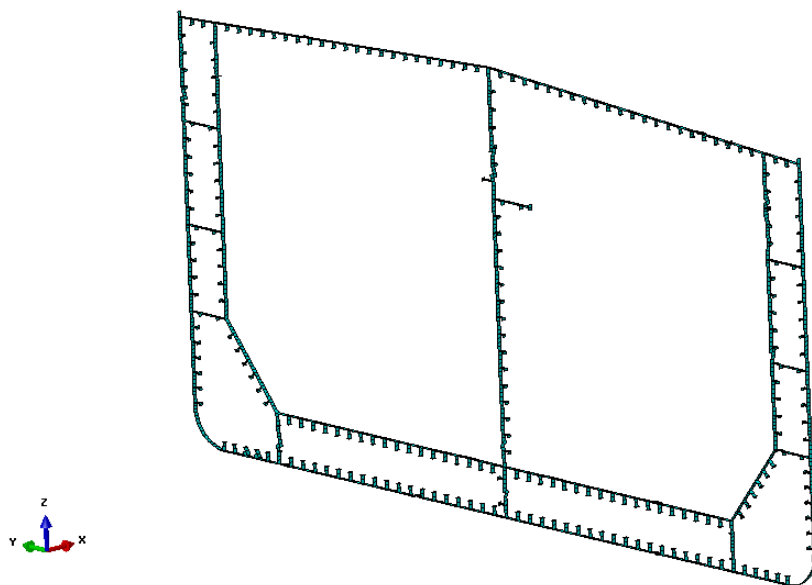
Στη δοκό αυτή ασκούνται τα παρακάτω τοπικά φορτία :

- i. Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής των τριών διαμερισμάτων.
- ii. Το βάρος του φορτίου και του έρματος.
- iii. Η υδροστατική πίεση, η δυναμική πίεση λόγω κυματισμού και οι φορτίσεις καταστρώματος λόγω κυματισμού.
- iv. Οι δυναμικές φορτίσεις δεξαμενών.

Σε αυτή την ενότητα θα περιγραφεί η πρακτική που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των φορτίων αυτών από το τρισδιάστατο μοντέλο και την εφαρμογή τους στο μοντέλο δοκού.

Υπολογισμός του βάρους μεταλλική κατασκευής

Προκειμένου να εξαχθεί η κατανομή βάρους της μεταλλικής κατασκευής από το τρισδιάστατο μοντέλο τριών διαμερισμάτων, η παρακάτω διαδικασία υιοθετήθηκε και εφαρμόστηκε. Εφόσον το τρισδιάστατο μοντέλο αλλά και το μοντέλο δοκού διαθέτουν στοιχεία διάστασης $\approx 200\text{mm}$ κατά τη διαμήκη διεύθυνση του πλοίου, το τρισδιάστατο μοντέλο χωρίστηκε σε εγκάρσια τμήματα μήκους 200mm από τα οποία εξήχθησαν πληροφορίες για τη μάζα τους (Εικόνα 13).



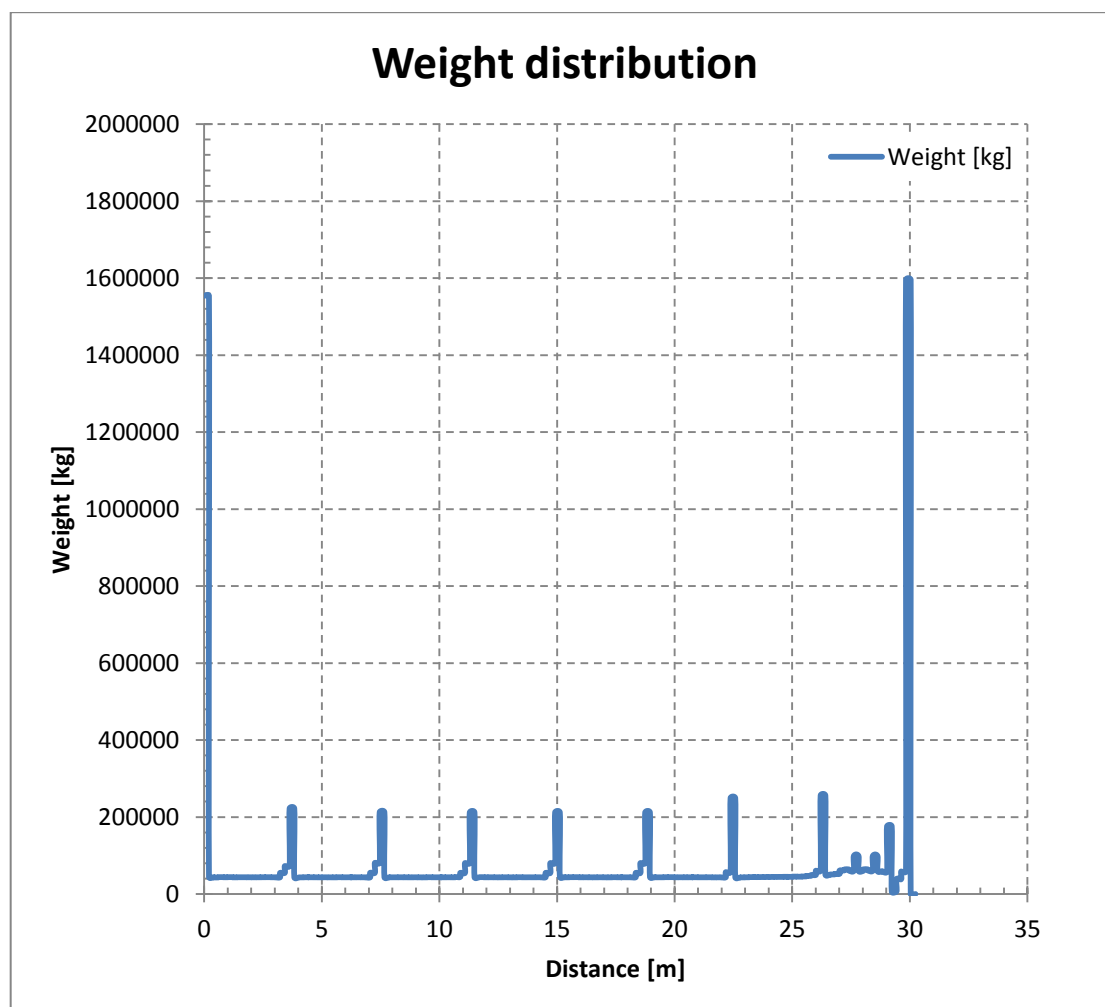
Εικόνα 13 : Εγκάρσια τομή του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων μήκους $\approx 200\text{mm}$.

Η εξαγωγή πληροφοριών για τη μάζα (mass properties) ενός προσομοιώματος ή ενός τμήματος του είναι μια δυνατότητα που παρέχεται από το ABAQUS στο χρήστη. Βασικές προϋποθέσεις για τη χρήση αυτής της εντολής είναι να έχουν οριστεί τα πάχη των στοιχείων κελύφους (shell section properties) καθώς και να έχει οριστεί η πυκνότητα του υλικού που χρησιμοποιείται.

Ο υπολογισμός και καταγραφή του βάρους πάνω από 450 τμημάτων του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων, μπορεί να γίνει μια αρκετά κοπιώδης και χρονοβόρα εργασία. Αν επιπλέον συνυπολογιστεί και το μεγάλο μέγεθος του προσομοιώματος, που αρκετές φορές οδηγεί σε διακοπή της λειτουργίας του γραφικού περιβάλλοντος του ABAQUS, η κατασκευή μιας προγραμματιστικής ρουτίνας που θα εκτελεί τη διαδικασία αυτή αυτόματα, καθίσταται απαραίτητη.

Το Abaqus Scripting Interface είναι μια διασύνδεση εφαρμογών προγραμματισμού (Application Programming Interface) για τα μοντέλα και τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται από το Abaqus. Η Abaqus Scripting Interface είναι μια επέκταση της γλώσσας προγραμματισμού Python, μίας αντικειμενοστραφής γλώσσα προγραμματισμού [7]. Χρησιμοποιώντας το Abaqus Interface Scripting μπορεί κανείς να αποκτήσει πρόσβαση στη λειτουργικότητα του ABAQUS / CAE μέσω της κατασκευής προγραμμάτων (scripts).

Συνεπώς κατασκευάστηκε ένα script σε ABAQUS Python, προκειμένου να αυτοματοποιηθεί η εργασία εξαγωγής και καταγραφής της κατανομής του βάρους της μεταλλικής κατασκευής. Η καμπύλη κατανομής του βάρους του πυρναίου διαμερίσματος παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1 : Καμπύλη κατανομής του βάρους του πυρναίου διαμερίσματος.

Βάρος Φορτίου και Έρματος

Για τον υπολογισμό του βάρους του φορτίου καθώς και του θαλάσσιου έρματος, προκειμένου να εφαρμοστούν στο μοντέλο δοκού, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία. Στο τρισδιάστατο προσομοίωμα των τριών διαμερισμάτων αντί του βάρους των υγρών εφαρμόστηκε η υδροστατική πίεση που ασκείται στα τοιχώματα των δεξαμενών που τα περιέχουν. Έπειτα αλλάχθηκε ο τύπος των στοιχείων και από παραμορφώσιμα τρίκομβια και τετράκομβια στοιχεία κελύφους (S3 & S4) επιλέχθηκαν άκαμπτα τρίκομβια και τετράκομβια στοιχεία κελύφους (R3D3 & R3D4), ενώ από παραμορφώσιμα στοιχεία δοκού (B31) άλλαξαν σε άκαμπτα στοιχεία δοκού (RB3D2) [5]. Οι οριακές συνθήκες που επεβλήθησαν ήταν η πάκτωση ενός κόμβου ώστε να αποκλειστούν οι κινήσεις στερεού σώματος.

Συνεπώς αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τη φόρτιση κάθε δεξαμενής φορτίου ή έρματος ώστε να εξαχθεί από τον πακτωμένο κόμβο η κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης. Αυτή η δύναμη κατανεμήθηκε ομοιόμορφα κατά μήκος του αντίστοιχου στοιχείου δοκού στο μοντέλο δοκού.

Υδροστατική Πίεση, Δυναμική Πίεση λόγω κυματισμού, Φορτίσεις Καταστρώματος λόγω Κυματισμού και Δυναμικές Φορτίσεις Δεξαμενών

Αυτές οι φορτίσεις υπολογίστηκαν με την ίδια ακριβώς διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του βάρους φορτίου και έρματος. Το παραμορφώσιμο τρισδιάστατο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων μετατράπηκε σε άκαμπτο αλλάζοντας το είδος των στοιχείων. Ακολουθώς ασκήθηκαν οι φορτίσεις που αντιστοιχούν στην κατάσταση φόρτωσης και στο σενάριο φόρτισης που επιθυμείται να εξεταστεί και διεξήχθησαν οι αντίστοιχες αναλύσεις. Τέλος από τον πακτωμένο κόμβο εξήχθηκε, για την κάθε ανάλυση, η κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης και έπειτα κατανεμήθηκε ομοιόμορφα κατά μήκος του αντίστοιχου στοιχείου δοκού στο μοντέλο δοκού.

Σημειώνεται εδώ ότι για την εφαρμογή των φορτίσεων των σεναρίων φόρτισης και καταστάσεων φόρτωσης στο τρισδιάστατο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων κατασκευάστηκε υπορουτίνα σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN, η οποία καλείται από το ABAQUS κατά τη διάρκεια της ανάλυσης. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την υπορουτίνα θα δοθούν σε παρακάτω ενότητα.

Κατασκευή κώδικα σε APDL για την εφαρμογή των φορτίων στα στοιχεία δοκού και την εξαγωγή των διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα για τις αναλύσεις δοκού επιλέχθηκε το εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ANSYS, κυρίως λόγω της ευκολίας που παρέχει στην χάραξη διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος. Ένα ακόμα προτέρημα που διαθέτει είναι η δυνατότητα αυτοματοποίησης ή παραμετροποίησης μιας διαδικασίας μέσω της γλώσσας προγραμματισμού που διαθέτει, επωνομαζόμενη ως APDL.

Το ακρωνύμιο APDL ερμηνεύεται ως **A**NSYS **P**arametric **D**esign **L**anguage και πρόκειται για μια γλώσσα προγραμματισμού που παρέχει τη δυνατότητα μέσα από την κατασκευή scripts την αυτοματοποίηση διεργασιών στο ANSYS ή ακόμα και το παραμετρικό «στήσιμο ενός μοντέλου». Η APDL υποστηρίζει επιπλέον και αρκετές ακόμα δυνατότητες όπως την επανάληψη εντολών στο γραφικό περιβάλλον, την εκτέλεση μακροεντολών, κλάδους if-then-else, επαναλήψεις do κ.α. [8]

Ένα τέτοιο script κατασκευάστηκε προκειμένου να εξυπηρετηθούν οι αναλύσεις όλων των σεναρίων φόρτισης για τις αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης που υπαγορεύονται από του CSR για το πλοίο-δοκός. Ο απώτερος στόχος είναι μέσα από την επαναληπτική διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, για τη διόρθωση των καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων, να βρεθεί η τελική τιμή της καμπτικής ροπής που πρέπει να εφαρμοστεί στις δύο άκρες του τρισδιάστατου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων.

Εισαγωγή Δεδομένων για τη χρήση του APDL script

Για να διεξαχθούν οι αναλύσεις του πλοίου-δοκού ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει ορισμένα δεδομένα. Η εισαγωγή των δεδομένων πραγματοποιείται σε ένα αρχείο τύπου *.txt και συνοψίζεται στα εξής :

- i. Κατανομή του βάρους μεταλλικής κατασκευής. Η κατανομή αυτή έχει ήδη εξαχθεί από το τρισδιάστατο προσομοίωμα και έχει καταγραφεί σε αρχείο τύπου *.txt κάνοντας χρήση του Python script.
- ii. Βάρος φορτίου και έρματος. Στις αντίστοιχες μεταβλητές του κώδικα APDL ο χρήστης εισάγει τις τιμές του βάρους του φορτίου και του έρματος που έχουν υπολογιστεί με τη διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως.
- iii. Υδροστατική Πίεση, Δυναμική Πίεση λόγω κυματισμού, Φορτίσεις Καταστρώματος λόγω Κυματισμού και Δυναμικές Φορτίσεις Δεξαμενών. Με την ίδια ακριβώς διαδικασία εισάγονται και οι τιμές των αντίστοιχων φορτίσεων.
- iv. Οι τιμές που πρέπει να επιτευχθούν για τη διατμητική δύναμη και την καμπτική ροπή (Q_{larg} & M_{larg}).

Μετά την εισαγωγή των δεδομένων ο κώδικας αναλαμβάνει τη διαμέριση των φορτίων και την εφαρμογή τους στα αντίστοιχα στοιχεία δοκού. Επιπλέον εκτελεί τις αναλύσεις μέχρι την επίτευξη των τιμών-στόχων της διατμητικής δύναμης και χαράζει τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος.

Κατασκευή υπορουτίνας *DLOAD σε κώδικα FORTRAN για την εκτέλεση των σεναρίων φόρτισης των CSR

Εισαγωγή

Μετά την ολοκλήρωση της σύντομης αυτής παρουσίασης των σεναρίων φόρτισης καθώς και των καταστάσεων φόρτωσης για ένα πετρελαιοφόρο πλοίο, είναι ορατό πλέον στον αναγνώστη η αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός εργαλείου που εφαρμόζει αυτές τις φορτίσεις σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων.

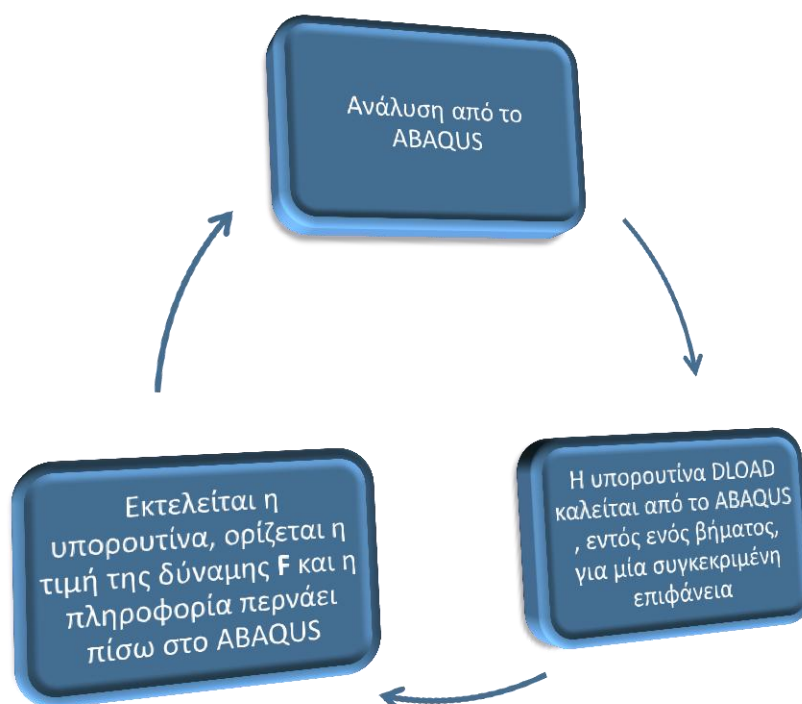
Ένα μεγάλο μέρος της παρούσας εργασίας στοχεύει στην κατασκευή ενός προγραμματιστικού εργαλείου, που θα παρέχει στο σχεδιαστή-αναλυτή τη δυνατότητα να εκπονή μία μελέτη δομικής αντοχής ενός πετρελαιοφόρου πλοίου που ακολουθεί τις επιταγές των CSR. Αναλυτικότερα στόχος αυτού του εργαλείου είναι μετά την κατασκευή του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων, να επιλέγεται μία κατάσταση φόρτωσης και να εκτελείται η ανάλυση.

Βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία του εργαλείου αυτού είναι η συνεργασία του με τον επιλεγμένο επιλύτη των πεπερασμένων στοιχείων. Το εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS επιλέχθηκε για την ανάλυση του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων. Το ABAQUS παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες του να εφαρμόσουν στα μοντέλα τους μη ομοιόμορφα φορτία με τη χρήση της υπορουτίνας DLOAD. Μια τέτοια υπορουτίνα DLOAD γραμμένη σε κώδικα FORTRAN αναπτύχθηκε προκειμένου να ενσωματώσει όλα τα σενάρια φόρτισης και τις καταστάσεις φόρτωσης που υπαγορεύονται από τους CSR και δύναται να εφαρμοστούν σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων ενός πετρελαιοφόρου πλοίου.

Περιγραφή της υπορουτίνας DLOAD

Η υπορουτίνα DLOAD χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή των μη ομοιόμορφων φορτίων πίεσης που προδιαγράφονται από τους CSR στις κατάλληλες επιφάνειες του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων. Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστεί σύντομα η δομή μιας υπορουτίνας DLOAD και οι βασικές αρχές λειτουργίας και συνεργασίας της με τον επιλύτη ABAQUS [6].

Το ABAQUS σε κάποιο βήμα της ανάλυσης (Load Step) καλείται να εφαρμόσει ένα μη ομοιόμορφο φορτίο σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια. Τότε καλείται η υπορουτίνα DLOAD η οποία εκτελείτε και επιστρέφει στο ABAQUS την τιμή της δύναμης F που θα εφαρμοστεί στην επιφάνεια (Σχήμα 8).



Σχήμα 8 : Σχηματική απεικόνιση της συνεργασίας ABAQUS και υπορουτίνας DLOAD.

Είδη μεταβλητών σε μια υπορουτίνα DLOAD

Σε μία υπορουτίνα DLOAD διακρίνονται δύο βασικά είδη μεταβλητών βάσει της διαδρομής της πληροφορίας μεταξύ του ABAQUS και της υπορουτίνας [6] :

- i. Οι μεταβλητές που επιστρέφουν πληροφορία. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών θα χρησιμοποιηθούν περαιτέρω στην ανάλυση των πεπερασμένων στοιχείων.
- ii. Οι μεταβλητές που μεταφέρουν πληροφορία. Οι τιμές αυτών των μεταβλητών δεν επιστρέφουν κάποια πληροφορία πίσω στο ABAQUS, αλλά αντιθέτως μεταφέρουν πληροφορία από αυτό προς την υπορουτίνα.

Σαφέστατα όπως και σε κάθε υπορουτίνα της FORTRAN μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε άλλη μεταβλητή προκειμένου να χρησιμοποιηθεί εντός της υπορουτίνας. Επιπλέον αναφέρεται ότι ισχύουν όλοι οι κανόνες συντακτικού και εντολών που ισχύουν και κατά την κατασκευή μιας οποιασδήποτε υπορουτίνας σε γλώσσα FORTRAN.

Παρακάτω παρουσιάζεται η προγραμματιστική δομή μιας υπορουτίνας DLOAD. Στην πρώτη γραμμή εμφανίζονται τα ορίσματα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

SUBROUTINE DLOAD (F, COORDS, JLTYP, SNAME)

INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'

DIMENSION COORDS (3)

CHARACTER*80 SNAME

...

user coding to define F

...

RETURN

END

Οι μεταβλητές που επιστρέφουν πληροφορία: F

Η μεταβλητή **F** είναι το μέγεθος του κατανεμημένου φορτίου. Οι μονάδες της είναι (μονάδες δύναμης)*(μονάδες μήκους)⁻² όταν πρόκειται για επιφανειακά φορτία, ενώ (μονάδες δύναμης)*(μονάδες μήκους)⁻³ όταν πρόκειται για μαζικές δυνάμεις.

Οι μεταβλητές που περνούν πληροφορία: COORDS, JLTYP, SNAME

Η μεταβλητή **COORDS** είναι ένας πίνακας που περιέχει τις αρχικές συντεταγμένες του σημείου ολοκλήρωσης του φορτίου.

Η μεταβλητή **JLTYP** είναι μια μεταβλητή η τιμή της οποίας καθορίζει τον τύπο του φορτίου για τον οποίο το κάλεσμα της υπορουτίνας DLOAD έχει πραγματοποιηθεί. Ο τύπος του

φορτίου ποικίλει από μαζική δύναμη (body force), σε επιφανειακό φορτίο βασισμένο σε γεωμετρική επιφάνεια (surface-based load) ή σε επιφανειακό φορτίο βασισμένο σε επιφάνεια όψης στοιχείου (element-based surface load). Για επιφανειακό φορτίο βασισμένο σε επιφάνεια όψης στοιχείου (element-based surface load), αυτή η μεταβλητή προσδιορίζει την όψη του στοιχείου για την οποία το κάλεσμα της υπορουτίνας DLOAD έχει γίνει. Αυτή η πληροφορία είναι χρήσιμη όταν πολλά διαφορετικά μη κατανεμημένα φορτία επιβάλλονται ταυτόχρονα στο ίδιο στοιχείο. Στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας η τιμή της μεταβλητής αυτής έχει τεθεί ίση με το μηδέν, τιμή που υποδεικνύει επιφανειακού τύπου φορτίο.

Ένας βασικό λόγος που στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε οι επιφάνειες που θα χρησιμοποιηθούν να βασίζονται στις επιφάνειες των στοιχείων και όχι στις γεωμετρικές επιφάνειες είναι η δυνατότητα ελευθερίας επιλογών στο χρήστη. Πιο συγκεκριμένα ο χρήστης μπορεί να σχεδιάσει το προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων σε ένα οποιοδήποτε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα να εισάγει το πλέγμα του στο ABAQUS και να εκτελέσει την ανάλυση με τη χρήση της υπορουτίνας. Με λίγα λόγια το ABAQUS έχει επιλεγθεί στην παρούσα εργασία ως επιλύτης των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων και όχι ως μοναδικό εργαλείο σχεδίασης του προσομοιώματος.

Η μεταβλητή **SNAME** αποθηκεύει το όνομα της επιφάνειας, όπως έχει οριστεί στο ABAQUS/CAE, όταν πρόκειται για επιφανειακού τύπου φορτία (JLTYP=0).

Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι οι μεταβλητές που παρουσιάστηκαν παραπάνω πρόκειται για τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και στις σχετικές με αυτή αναλύσεις. Αρκετές ακόμα μεταβλητές υποστηρίζονται από την υπορουτίνα DLOAD, αλλά δεν παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία. Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την υπορουτίνα DLOAD, ο αναγνώστη προτρέπεται να ανατρέξει στο εγχειρίδιο User Subroutines Reference Manual του ABAQUS [6].

Δομή της υπορουτίνας DLOAD

Στην παρούσα ενότητα θα επιχειρηθεί να παρουσιαστεί συνοπτικά η δομή της υπορουτίνας, ώστε να γίνει κατανοητή στον αναγνώστη η λειτουργία της και οι δυνατότητες της. Η παρούσα ενότητα δεν αποτελεί επ' ουδενί λόγο εγχειρίδιο χρήση της υπορουτίνας. Στον κώδικα της υπορουτίνας είναι καταχωρημένα σχόλια που αποσκοπούν στο να βοηθήσουν το χρήστη στην κατανόηση των μεταβλητών και στην εισαγωγή των δεδομένων, ενώ παράλληλα κάθε υπολογισμός μεγέθους συνοδεύεται από παραπομπές στην αντίστοιχη ενότητα των κανονισμών CSR.

Εισαγωγή βασικών δεδομένων πλοίου

Ο χρήστης της υπορουτίνας πρέπει προτού την καλέσει στην ανάλυση του να εισάγει ορισμένα βασικά δεδομένα για το πλοίο για το οποίο θα πραγματοποιηθεί η μελέτη δομικής αντοχής με χρήση του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων. Τα περισσότερα από τα δεδομένα αυτά, δυστυχώς, δεν μπορούν να εξαχθούν από τη γεωμετρία του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων, εφόσον έχουν σχέση είτε με γεωμετρικά χαρακτηριστικά ολόκληρου του πλοίου είτε με στοιχεία ευστάθειας του πλοίου. Το γεγονός αυτό κατέστησε αδύνατο το προγραμματισμό αυτόματης εισαγωγής τους και υποχρεωτική την εισαγωγή τους από το χρήστη. Τα δεδομένα αυτά παραθέτονται παρακάτω με τα επεξηγηματικά συνοδευτικά σχόλια:

- Εντός του κλάδου του επιλεγμένου σεναρίου, πάλι μέσω διατυπώσεων if-then-elseif αναγνωρίζεται μέσω της μεταβλητής **SNAME** ο κλάδος φορτίσεων που αντιστοιχεί σε αυτήν την επιφάνεια και για την συγκεκριμένη κατάσταση φόρτωσης.

Ομάδες και ονοματολογία επιφανειών

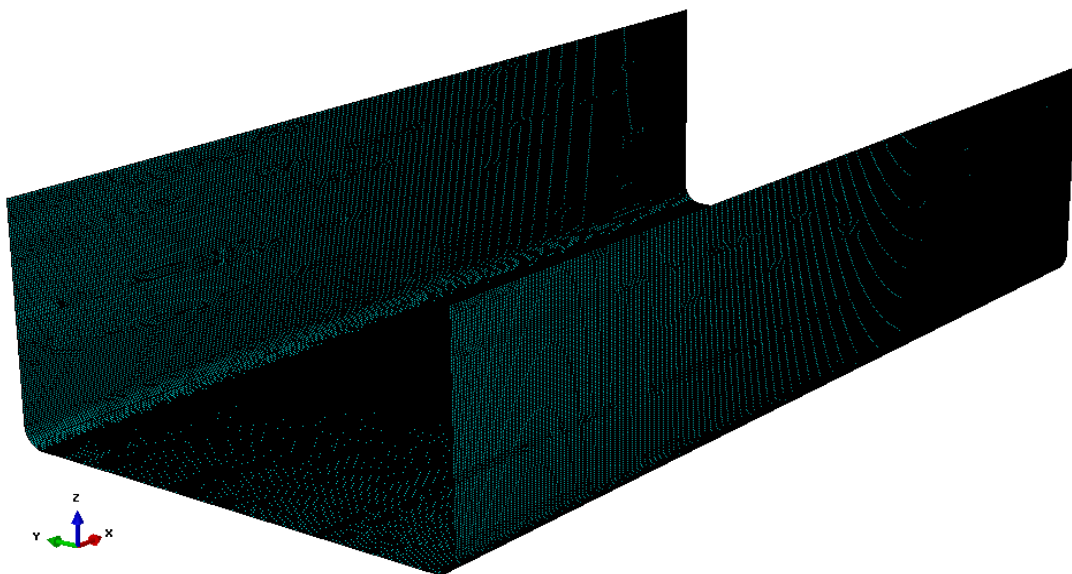
Τρεις βασικές ομάδες επιφανειών διακρίνονται σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων. Ο διαχωρισμός του έγκειται στο είδος των φορτίσεων που δέχονται. Οι τρεις αυτές ομάδες παραθέτονται παρακάτω :

- Οι επιφάνειες της γάστρας του πλοίου, στις οποίες ασκείται η υδροστατική πίεση και οι κυματικές φορτίσεις
- Οι επιφάνειες του καταστρώματος του πλοίου, στις οποίες ασκούνται κυματικές φορτίσεις.
- Οι επιφάνειες των δεξαμενών φορτίου και έρματος, στις οποίες ασκείται η υδροστατική πίεση του ρευστού που φέρουν καθώς και οι δυναμικές φορτίσεις δεξαμενών.

Συνεπώς γίνεται πλέον αντιληπτό ότι σχεδιαστής οφείλει να προσδώσει στις κατάλληλες επιφάνειες του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων συγκεκριμένα ονόματα, προκειμένου να εφαρμοστούν οι αντίστοιχες κατανομές.

Επιφάνειες της Γάστρας : **OUTER SHELL**

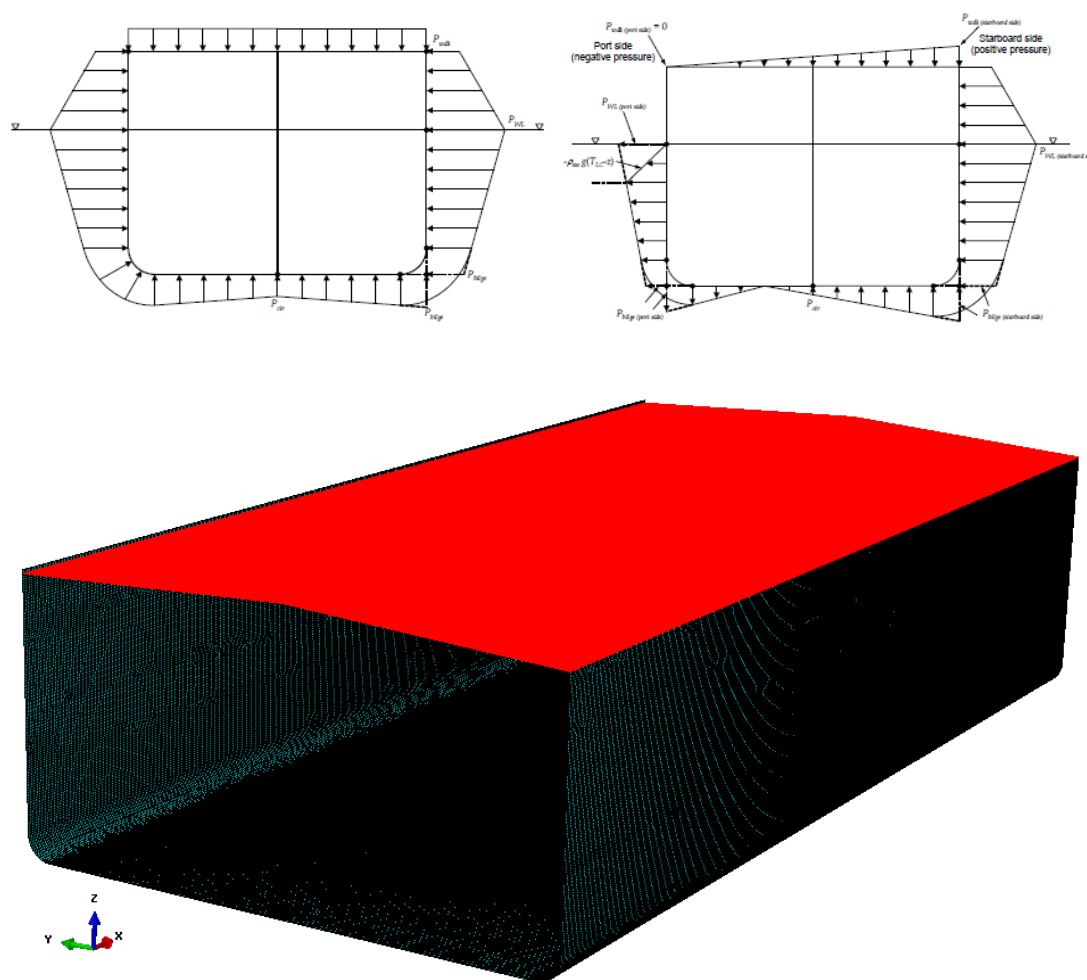
Η επιφάνεια με την ονομασία **OUTER SHELL** αντιστοιχεί στη εξωτερική επιφάνεια της γάστρας του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων (Εικόνα 14). Όπως έχει ήδη αναφερθεί τα στοιχεία κελύφους έχουν δύο όψεις (faces), οι οποίες διαθέτουν προσημάνσεις και καθορίζουν έτσι και τη φορά των φορτίων πίεσης. Οπότε πριν την επιλογή των όψεων των επιφανειών θα ήταν καλό να προηγηθεί μια διόρθωση στην κατεύθυνση των ορθομοναδιαίων διανυσμάτων κατεύθυνση, προκειμένου να έχουν κοινή φορά.



Εικόνα 14 : Η εξωτερική επιφάνεια της γάστρας : **OUTER SHELL**.

Επιφάνειες Καταστώματος : WEATHER DECK

Η επιφάνεια με την ονομασία **WEATHER_DECK** αντιστοιχεί στο κατάστρωμα καιρού, το οποίο υπενθυμίζεται ότι φορτίζεται από φορτία λόγω κυματισμού (green sea loads) (Εικόνα 15).



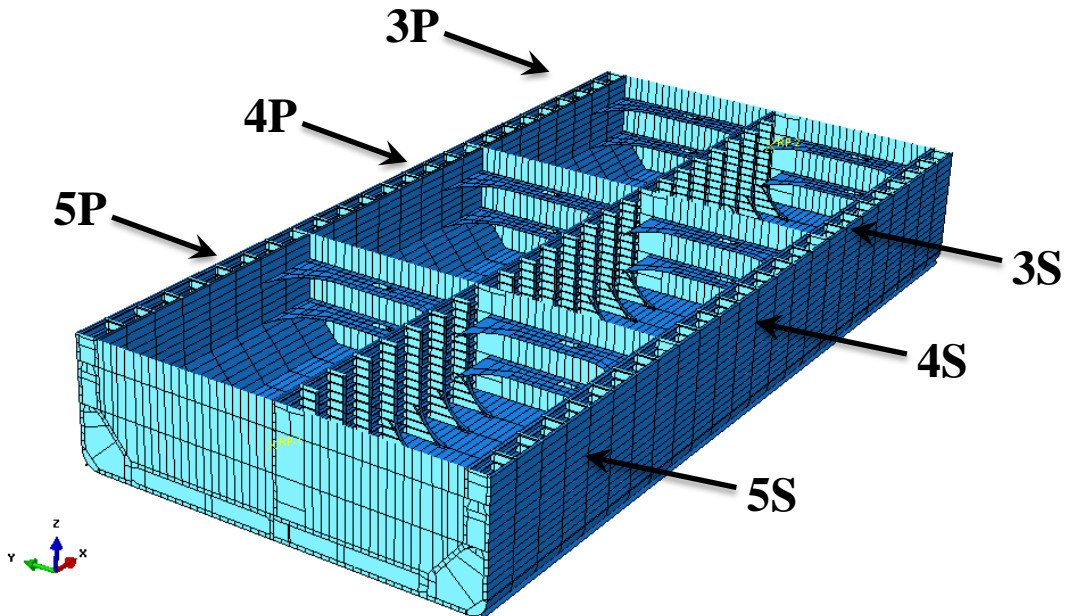
Εικόνα 15 : Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το κατάστρωμα καιρού : **WEATHER_DECK** (κάτω), ενώ στα σκαριφήματα απεικονίζονται συνδυασμένες κυματικές φορτίσεις γάστρας και καταστώματος σε προωραίους κυματισμούς (πάνω αριστερά) και σε πλάγιους (πάνω δεξιά).

Επιφάνειες δεξαμενών φορτίου και έρματος

Προκειμένου να γίνει κατανοητός στον αναγνώστη ο τρόπος με τον οποίο κατηγοριοποιήθηκαν επιφάνειες των δεξαμενών φορτίου μια σύντομη περιγραφή της δομής των αμπαριών ενός δεξαμενόπλοιου με μία διαμήκη κεντρική φρακτή θα ακολουθήσει.

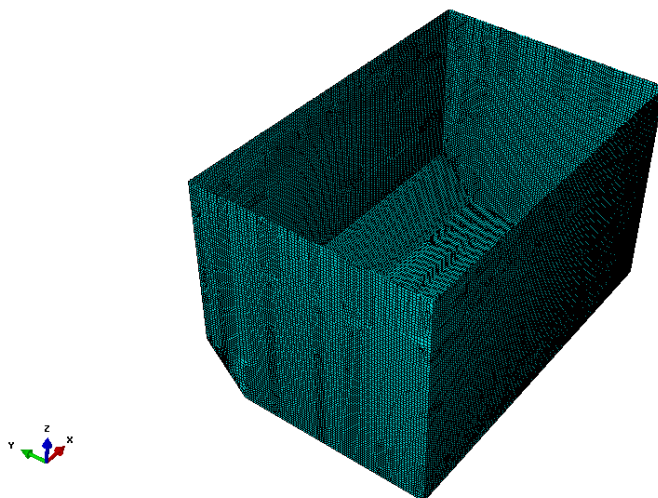
Το προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων ενός δεξαμενόπλοιου με κεντρική φρακτή, διαθέτει 3 αμπάρια (Holds). Το κάθε αμπάρι χωρίζεται από την κεντρική φρακτή σε δύο δεξαμενές φορτίου, μία δεξιά (Starboard) και μία αριστερή (Port). Διευκρινίζεται εδώ, ότι η αρίθμηση των αμπαριών γίνεται με αύξουσα σειρά από την πλώρη προς την πρύμνη, ενώ ο

προσδιορισμός δεξιάς ή αριστερής δεξαμενής φορτίου γίνεται κοιτάζοντας από την πρύμνη προς την πλώρη του πλοίου (Εικόνα 16).



Εικόνα 16 : Τομή του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων και αρίθμηση των δεξαμενών φορτίου.

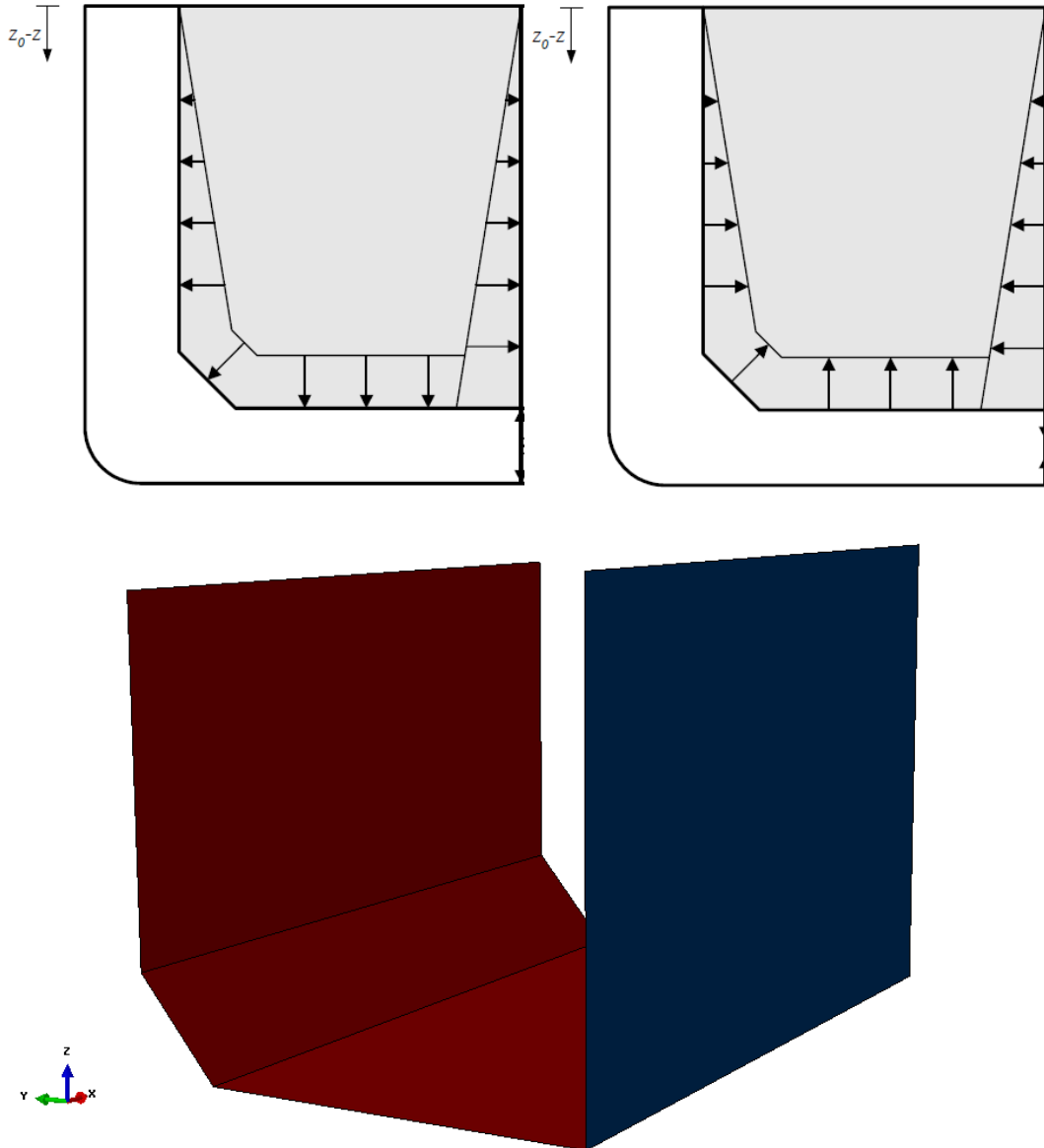
Κάθε δεξαμενή φορτίου φορτίζεται μόνο στην περίπτωση που η κατάσταση φόρτωσης που έχει επιλεγεί να αναλυθεί, θεωρεί ότι διαθέτει φορτίο. Υπενθυμίζεται εδώ ότι οι φορτίσεις που δέχεται μία δεξαμενή φορτίου που διαθέτει φορτίο είναι : η υδροστατική πίεση που ασκείται στα τοιχώματά της και στον πυθμένα της καθώς και δυναμικές πιέσεις. Για την εφαρμογή των δυναμικών φορτίσεων στις δεξαμενές φορτίου, οι εσωτερικές τους επιφάνειες χωρίστηκαν σε οκτώ επιμέρους επιφάνειες, βάσει του είδους τις φόρτισης που δέχονται. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό στον αναγνώστη, παρακάτω θα παρουσιαστούν οι επιφάνειες της δεξαμενής **5P** καθώς και οι δυναμικές φορτίσεις που ασκούνται σε αυτή (Εικόνα 17).



Εικόνα 17 : Τα ελάσματα της δεξαμενής φορτίου **5P**, χωρίς να περιλαμβάνεται το κατάστρωμα.

Επιφάνειες στις οποίες ασκούνται δυναμικές πιέσεις λόγω θετικών ή αρνητικών κατακόρυφων επιταχύνσεων:

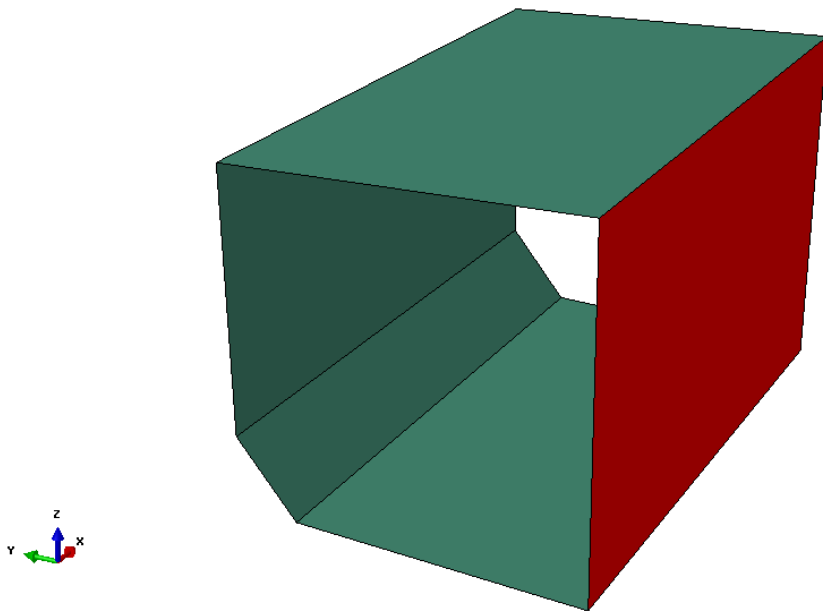
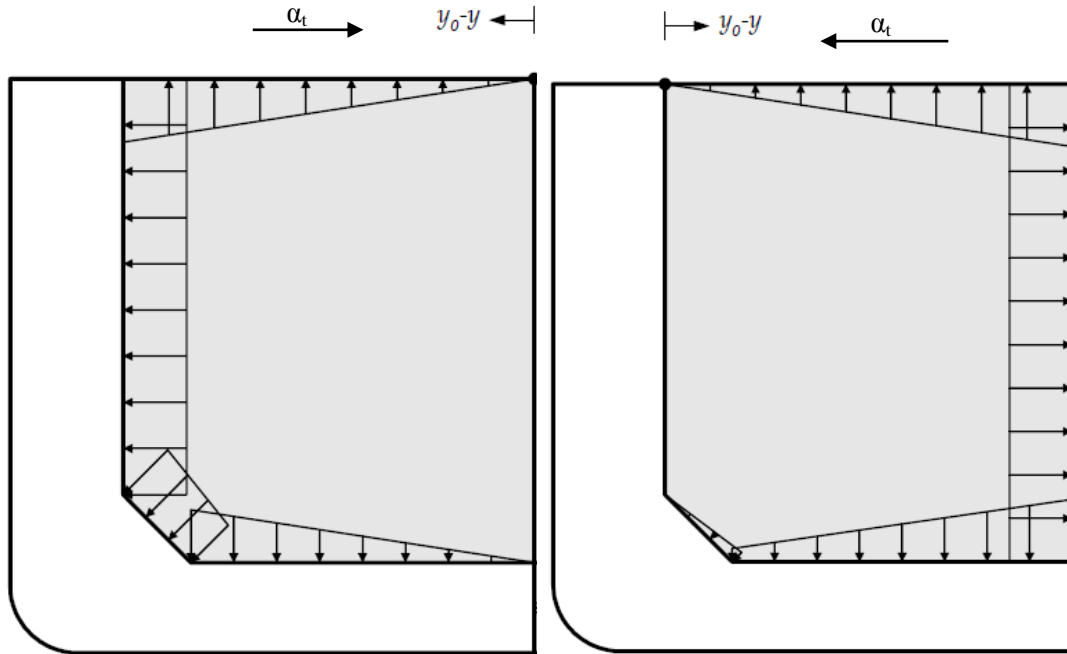
- SURF_VERT_N5_P
- SURF_LBHD_V_N5_P



Εικόνα 18 : Οι επιφάνειες της δεξαμενής **5P** (κάτω) που δέχονται δυναμικές πιέσεις λόγω κατακόρυφων επιταχύνσεων (επάνω). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια **SURF_VERT_N5_P**, ενώ με μπλε η **SURF_LBHD_V_N5_P**.

Επιφάνειες στις οποίες ασκούνται δυναμικές πιέσεις λόγω θετικών ή αρνητικών εγκάρσιων επιταχύνσεων:

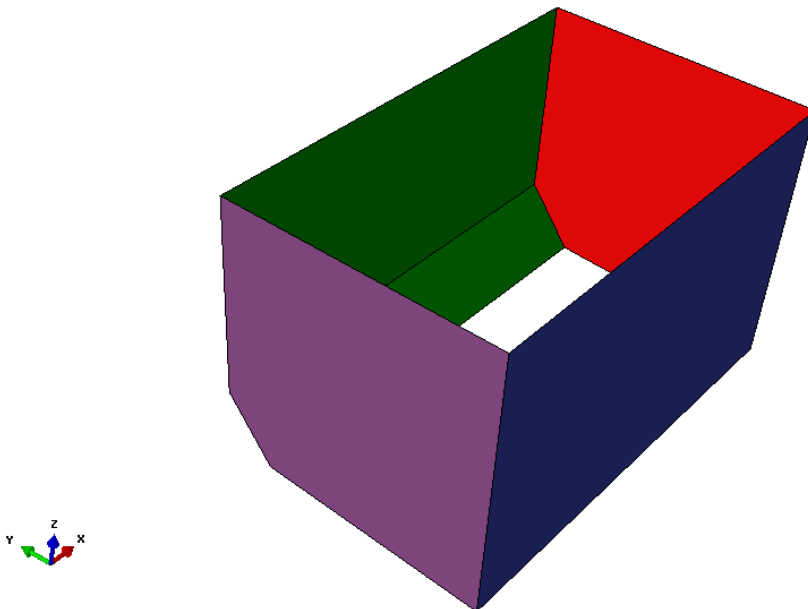
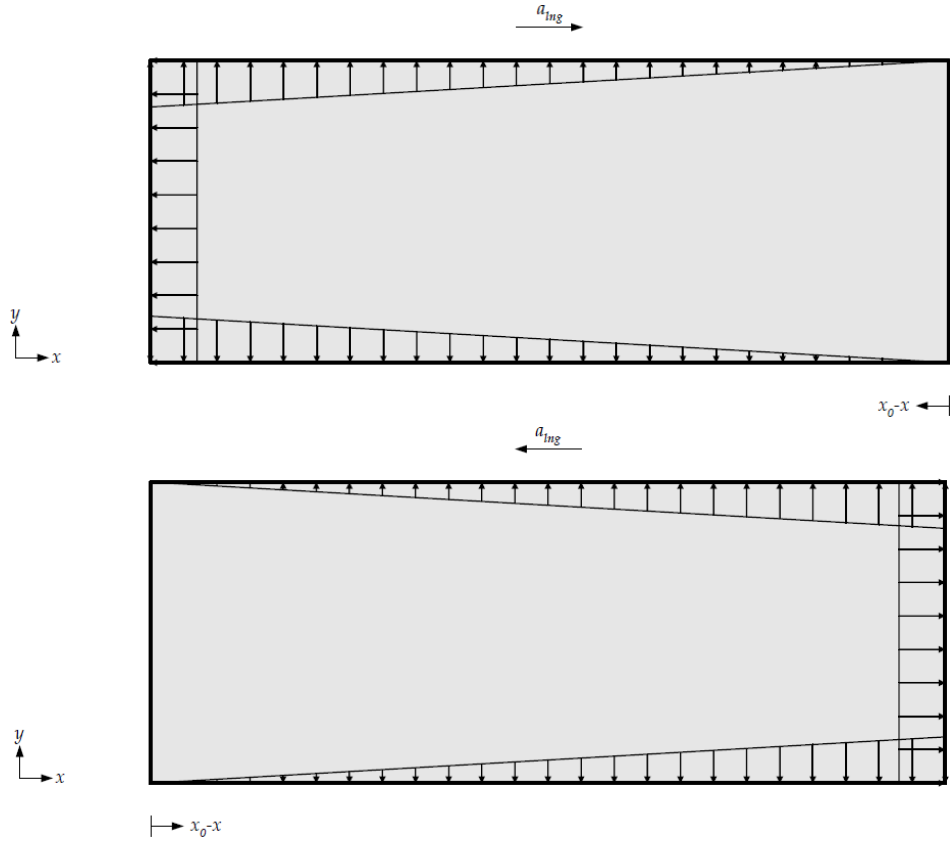
- SURF_TRANS_N5_P
- SURF_LBHD_T_N5_P



Εικόνα 19 : Οι επιφάνειες της δεξαμενής 5P (κάτω) που δέχονται δυναμικές πιέσεις λόγω εγκάρσιων επιταχύνσεων (επάνω). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια SURF_LBHD_T_N5_P, ενώ με πράσινο η SURF_TRANS_N5_P.

Επιφάνειες στις οποίες ασκούνται δυναμικές πιέσεις λόγω θετικών ή αρνητικών διαμηκών επιταχύνσεων:

- SURF_LONG_N5_P
- SURF_TBHD_N5_A_P
- SURF_TBHD_N5_F_P
- SURF_LBHD_L_N5_P

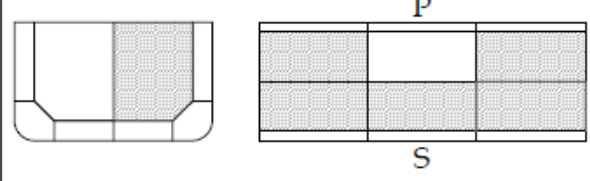


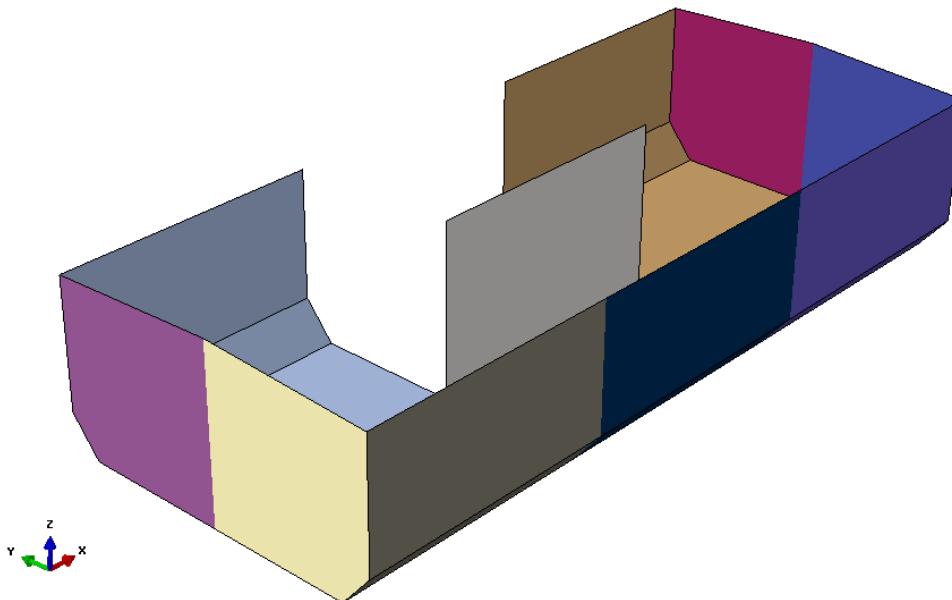
Εικόνα 20 : Οι επιφάνειες της δεξαμενής **5P** (κάτω) που δέχονται δυναμικές πιέσεις λόγω διαμηκών επιταχύνσεων (επάνω). Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η επιφάνεια **SURF_TBHD_N5_A_P**, με πράσινο η **SURF_LONG_N5_P**, με μωβ η **SURF_TBHD_N5_A_P**, ενώ με μπλε η **SURF_LBHD_L_N5_P**.

Επιφάνειες δεξαμενών φορτίου στις οποίες ασκείται υδροστατική φόρτιση λόγω του ρευστού που φέρουν :

➤ **SURF_LOADED_CARGO_TANKS**

Στην Εικόνα 21 παρουσιάζονται οι δεξαμενές στις οποίες ασκείται υδροστατική πίεση λόγω του πετρελαίου που φέρουν. Η κατάσταση φόρτωσης που έχει εφαρμοστεί στο παράδειγμα αυτό είναι η **B1-100% Sagging**, από τον Πίνακα 2 των CSR. Οι διαφορετικές αποχρώσεις στην εικόνα αντιστοιχούν σε διαφορετικές ονομασίες επιφανειών.

B1		$0.9 T_{sc}$	100% (sag)
			100% (hog)



Εικόνα 21 : Οι επιφάνειες των δεξαμενών φορτίου στις οποίες ασκείται υδροστατική πίεση (κάτω) και σχηματική απεικόνιση της κατάστασης φόρτωσης (επάνω).

Συγκεντρωτική παρουσίαση των Φορτίσεων και Οριακών Συνθηκών σύμφωνα με τους CSR στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων

Οι φορτίσεις που ασκούνται στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων χωρίζονται βάσει των CSR σε δύο επιπλέον ομάδες στις τοπικές φορτίσεις (local loads) και στις γενικές φορτίσεις (global loads).

Τοπικές Φορτίσεις

Σχετικά με την πρώτη ομάδα των τοπικών φορτίων που εφαρμόζονται στο προσομοίωμα, περιλαμβάνει τις εξής φορτίσεις :

- υδροστατική πίεση
- βάρος μεταλλική κατασκευής
- δυναμικές πιέσεις λόγω κυματισμών
- δυναμικές πιέσεις δεξαμενών

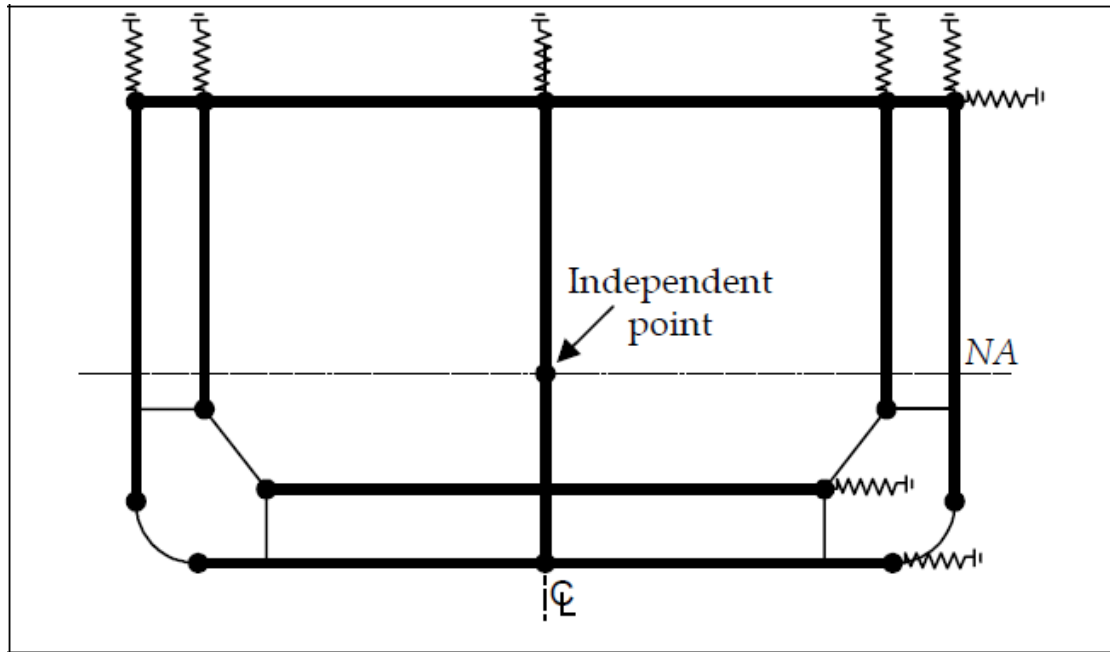
Οι σχέσεις που διέπουν τον υπολογισμό αυτών των φορτίσεων καλύφθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Όσον αφορά τον τρόπο επιβολής τους στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων έχει αναφερθεί ήδη ότι υπεύθυνη για αυτή τη διεργασία είναι η υπορουτίνα DLOAD. Η υπορουτίνα εξασφαλίζει κατά τη διάρκεια της ανάλυσης να επιβάλλει τις παραπάνω φορτίσεις στις κατάλληλες επιφάνειες του προσομοιώματος.

Γενικές Φορτίσεις

Όσον αφορά τη δεύτερη ομάδα εκείνη των γενικών φορτίσεων που εφαρμόζονται στο προσομοίωμα, περιλαμβάνει τις εξής φορτίσεις :

- Εγκάρσιες καμπτικές ροπές
- Διαμήκεις καμπτικές ροπές

Ο τρόπος υπολογισμού και η διαδικασία διόρθωσης των καμπτικών ροπών αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα αυτής εργασίας. Οι τελικές τιμές των καμπτικών ροπών (M_{v-end} & M_{h-end}) που υπολογίστηκαν μέσω αυτής της διορθωτικής διαδικασίας επιβάλλονται στις δύο άκρες του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων. Η κάθε μία από τις προαναφερθείσες ροπές, επιβάλλεται γύρω από ένα σημείο αναφοράς που ανήκει στο εγκάρσιο επίπεδο της πρωραίας και πρυμναίας άκρης του προσομοιώματος, αντιστοίχως και καλείται ανεξάρτητο σημείο (independent point) (Σχήμα 9).



Σχήμα 9 : Στην εικόνα παρουσιάζεται τον ανεξάρτητο σημείο (independent point) καθώς και οι θέσεις εφαρμογής των ελατηρίων.

Το σημείο αυτό προσδιορίζεται από την τομή του κατακόρυφου άξονα που διέρχεται από την κεντρική γραμμή του πλοίου με τον οριζόντιο ουδέτερο άξονα της διατομής της μέσης τομής. Για την εύρεση του ουδέτερου άξονα χρησιμοποιήθηκε ξανά το σχεδιαστικό πακέτο Rhino, στο οποίο είχαν κατασκευαστεί και τα σχέδια μέσης τομής του πλοίου. Τα ήδη υπάρχοντα διδιάστατα σχέδια μέσης τομής τροποποιήθηκαν ώστε οι γραμμές του σχεδίου να αντικατασταθούν με επιφάνειες, όπου το μήκος της επιφάνειας είναι το μήκος της γραμμή και το πλάτος της είναι το πάχος του αντίστοιχου ελάσματος. Έτσι υπολογίστηκε άμεσα η θέση του ουδέτερου άξονα και εν συνεχεία η ακριβής θέση του ανεξάρτητου σημείου.

Έχοντας πλέον προσδιορίσει τις ακριβείς θέσεις των ανεξάρτητων σημείων, γύρω από τα οποία εφαρμόζονται οι καμπτικές ροπές, εισήχθηκαν οι συντεταγμένες τους στο ABAQUS/CAE ως σημεία αναφοράς (**R**eference **P**oints). Το κάθε σημείο ενώθηκε με όλους τους κόμβους που ανήκουν στο εγκάρσιο επίπεδο της πρωράας και πρυμναίας, αντίστοιχα, άκρης του προσομοιώματος μέσω άκαμπτων συνδέσμων (**R**igid **L**inks). Οι άκαμπτες συνδέσεις αποσκοπούν στο να διατηρηθούν οι δύο άκρες του προσομοιώματος επίπεδες κάτω από την επίδραση των καμπτικών ροπών. Η τεχνική αυτή είναι ισοδύναμη με την επιβολή προκαθορισμένων μετατοπίσεων στους κόμβους σύμφωνα με τη θεωρία δοκού. Εν συνεχεία εισάγονται στο ABAQUS/CAE οι διορθωμένες καμπτικές ροπές στα σημεία αυτά, ως συγκεντρωμένα φορτία (Concentrated Loads).

Οριακές Συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο προσομοίωμα των τριών διαμερισμάτων αποσκοπούν στο να προσομοιώσουν την ακαμψία της κατασκευής του πλοίου πλώραθεν και πρύμνηθεν του μοντέλου.

Ακολουθώντας αυτό το σκεπτικό οι CSR προδιαγράφουν την εφαρμογή στοιχείων ελατηρίου (grounded spring elements) στα κύρια οριζόντια και κατακόρυφα δομικά στοιχεία της κατασκευής, στις δύο άκρες του προσομοιώματος (Σχήμα 9).

Αναλυτικότερα δύο ομάδες ελατηρίων εφαρμόζονται στην πρυμαία και στην προραία άκρη του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων :

- i. Πακτωμένα στοιχεία ελατηρίου, δηλαδή ελατήρια με το ένα κόμβο να έχει και τους έξι βαθμούς ελευθερίας δεσμευμένους ενώ διαθέτει ακαμψία στην οριζόντια διεύθυνση. Ο άλλος κόμβος του κάθε ελατηρίου συνδέεται με τους κόμβους του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκονται στα επίπεδα που ορίζουν οι δύο άκρες του προσομοιώματος (Σχήμα 9). Οι κόμβοι αυτοί ανήκουν στα εξής οριζόντια δομικά στοιχεία :
 - Κατάστρωμα
 - Εσωτερικός πυθμένας διπυθμένου
 - Εξωτερικός πυθμένας διπυθμένου
- ii. Πακτωμένα στοιχεία ελατηρίου που διαθέτουν ακαμψία στην κατακόρυφη διεύθυνση. Ο ελεύθερος κόμβος του κάθε ελατηρίου συνδέεται με τους κόμβους του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκονται στα επίπεδα που ορίζουν οι δύο άκρες του προσομοιώματος (Σχήμα 9). Οι κόμβοι αυτοί ανήκουν στα εξής κατακόρυφα δομικά στοιχεία :
 - Κατακόρυφα τμήματα εξωτερικών τοιχωμάτων
 - Κατακόρυφα τμήματα εσωτερικών τοιχωμάτων
 - Διαμήκη κεντρική φρακτή

Υπολογισμός ακαμψίας ελατηρίων

Η ακαμψία, c , του κάθε ελατηρίου που συνδέεται με κάθε κόμβο των οριζόντιων ή κατακόρυφων δομικών στοιχείων στις άκρες του προσομοιώματος δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$c = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \frac{A_{s-net50}}{l_{tk}n} = 0.77 \frac{A_{s-net50}E}{l_{tk}n} \quad N/mm$$

όπου :

$A_{s-net50}$, η διατμητική επιφάνεια του κάθε οριζόντιου ή κατακόρυφου δομικού στοιχείου σε mm^2

ν , ο λόγος Poisson του υλικού


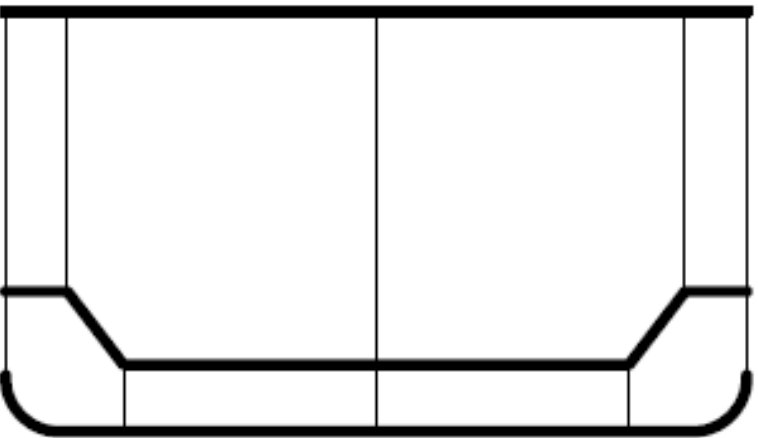
l_{tk} , το μήκος της δεξαμενής φορτίου του μεσαίου διαμερίσματος του προσομοιώματος σε mm

E , το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm^2

n , το πλήθος των κόμβων που θα εφαρμοστούν στοιχεία ελατηρίου για το κάθε οριζόντιο ή κατακόρυφο δομικό στοιχείο

Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται ένα σκαρήφιμα της διατομής με συνοδευτικές επεξηγήσεις για τον υπολογισμό των επιφανειών διάτμησης.

Πίνακας 4 : Υπολογισμός των επιφανειών διάτμησης για τον προσδιορισμό της ακαμψίας των οριζόντιων και κατακόρυφων ελατηρίων.

Υπολογισμός των επιφανειών διάτμησης για τον προσδιορισμό της ακαμψίας των ελατηρίων		
Κατακόρυφα Ελατήρια		
	Εξωτερικά τοιχώματα	Επιφάνεια των εξωτερικών ελασμάτων Συμπεριλαμβανομένου κα των υφάλων (bilge).
	Εσωτερικά τοιχώματα	Επιφάνεια των εσωτερικών ελασμάτων του διπλού τοιχώματος.
	Διαμήκης φρακτή	Επιφάνεια των ελασμάτων της κεντρικής διαμήκης φρακτής συμπεριλαμβανομένου και της κεντρικής σταθμίδας.
	<p>Σημείωση : Όπου τα δομικά στοιχεία δεν είναι κατακόρυφα, η επιφάνεια θα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την προβολή των επιφανειών αυτών στην κατακόρυφη διεύθυνση.</p>	
Οριζόντια Ελατήρια		
	Κατάστρωμα	Επιφάνεια ελασμάτων κυρίου καταστρώματος.
	Εσωτερικό πυθμένας διπυθμένου	Επιφάνεια των ελασμάτων του εσωτερικού πυθμένα του διπυθμένου όπως αυτό απεικονίζεται στο σκαρίφημα.
	Εξωτερικός πυθμένας διπυθμένου	Επιφάνεια των ελασμάτων του εξωτερικού πυθμένα του διπυθμένου όπως αυτό απεικονίζεται στο σκαρίφημα.
	<p>Σημείωση : Όπου τα δομικά στοιχεία δεν είναι οριζόντια, η επιφάνεια θα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την προβολή των επιφανειών αυτών στην οριζόντια διεύθυνση.</p>	

Το σχεδιαστικό πακέτο Rhino χρησιμοποιήθηκε ξανά για τον υπολογισμό των διατμητικών επιφανειών των οριζόντιων και κατακόρυφων δομικών στοιχείων. Τα τροποποιημένα σχέδια της μέσης τομής που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση του ουδέτερου άξονα και το προσδιορισμό ανεξάρτητου σημείου, χρησιμοποιούνται ξανά για τον υπολογισμό των διατμητικών επιφανειών.

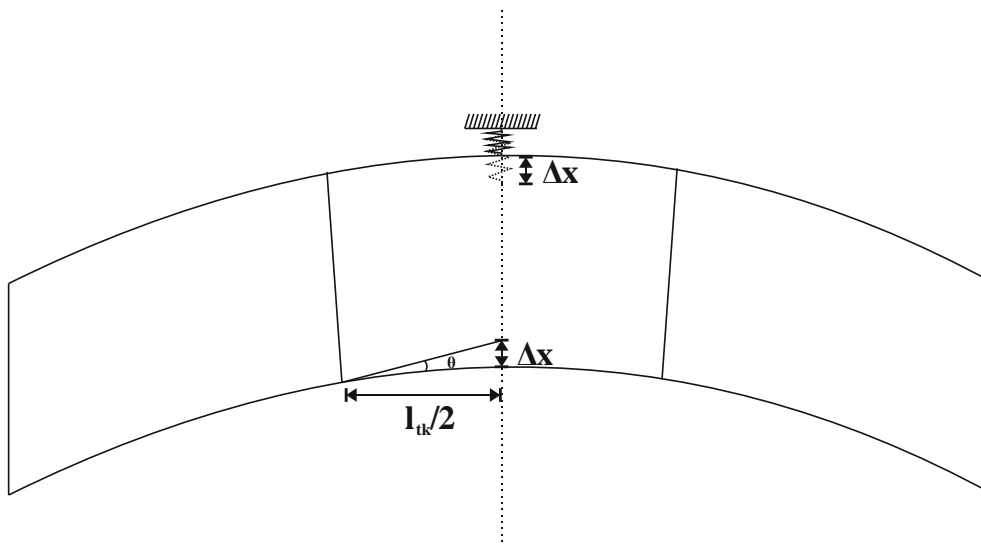
Στον Πίνακα 5 συγκεντρώνονται όλες οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο προσομοίωμα των τριών διαμερισμάτων καθώς και τα γενικά φορτία.

Πίνακας 5 : Οι οριακές συνθήκες και τα γενικά φορτία που επιβάλλονται στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων.

Location	Translation			Rotation		
	δ_x	δ_y	δ_z	θ_x	θ_y	θ_z
Aft End						
Aft end (all longitudinal elements)	RL	-	-	-	RL	RL
Independent Point aft end, see Figure B.2.13	Fix	-	-	-	M_{0-end}	M_{8-end}
Deck, inner bottom and outer shell	-	Springs	-	-	-	-
Side, inner skin and longitudinal bulkheads	-	-	Springs	-	-	-
Fore End						
Fore end (all longitudinal elements)	RL	-	-	-	RL	RL
Independent point fore end, see Figure B.2.13	-	-	-	-	M_{0-end}	M_{8-end}
Deck, inner bottom and outer shell	-	Springs	-	-	-	-
Side, inner skin and longitudinal bulkheads	-	-	Springs	-	-	-
Where:						
-	no constraint applied (free)					
RL	nodal points of all longitudinal elements rigidly linked to independent point at neutral axis on centreline					

Ερμηνεία χρήσης ελατηρίων ως οριακές συνθήκες

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η χρήση των ελατηρίων ως οριακές συνθήκες και ο υπολογισμός της ακαμψίας τους, παρατίθεται το Σχήμα 10 και οι σχέσεις υπολογισμού της ακαμψίας. Στο σκαρίφημα παρουσιάζεται το μοντέλο τριών διαμερισμάτων σε παραμορφωμένη κατάσταση μετά τη δράση καμπτικής ροπής (hogging).



Σχήμα 10 : Σκαρίφημα μοντέλου τριών διαμερισμάτων σε κατάσταση hogging.

Η σχέση που συνδέει δύναμη με μετατόπιση σε ένα ελατήριο είναι η ακόλουθη :

$$F = k \cdot \Delta x \Rightarrow k = \frac{F}{\Delta x}$$

Ενώ η διατμητική τάση στη διατομή υπολογίζεται από τη σχέση :

$$\tau = G \cdot \gamma \Rightarrow \frac{F}{A} = G \cdot \frac{\Delta x}{\frac{l_{tk}}{2}} \Rightarrow F = 2 \cdot G \frac{\Delta x \cdot A}{l_{tk}}$$

Αντικαθιστώντας την τελευταία έκφραση της δύναμης στη σχέση της ακαμψίας προκύπτει η ακαμψία του ελατηρίου ισούται με :

$$k = 2 \cdot G \cdot \frac{A}{l_{tk}}$$

Επιπλέον για ιστροπικά υλικά, η σχέση που συνδέει το μέτρο διάτμησης με το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson είναι η ακόλουθη :

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Οπότε αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση για το μέτρο διάτμησης στην τελευταία σχέση της ακαμψίας του ελατηρίου και αντικαθιστώντας το λόγο του Poisson με την τιμή που αντιστοιχεί στο χάλυβα ($\nu=0.3$) προκύπτει ότι :

$$k = \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \frac{A}{l_{tk}} = 0,77 \cdot \frac{A \cdot E}{l_{tk}}$$

που αντιστοιχεί στην σχέση ακαμψίας ελατηρίου που προδιαγράφουν οι κανονισμοί CSR.

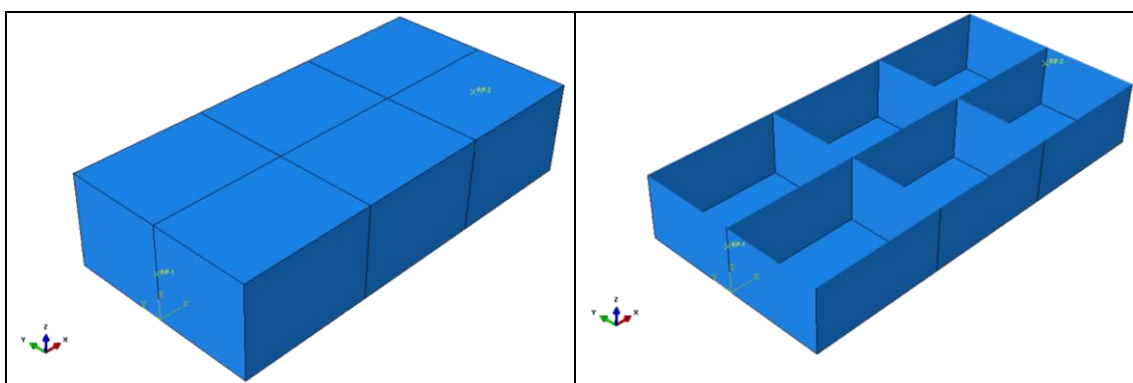
Έλεγχος και επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας της υπορουτίνας DLOAD και των APDL και Python scripts

Έλεγχος λειτουργίας υπορουτίνας DLOAD

Ο έλεγχος της υπορουτίνας και των APDL και Python scripts, προκειμένου να θεωρηθούν αξιόπιστα εργαλεία για τη μελέτη δομικής αντοχής του πλοίου ήταν απαραίτητος. Για αυτόν ακριβώς το σκοπό καταστάθηκε ένα πλάνο ελέγχου των υπολογισμών και της λειτουργίας τους προτού εφαρμοστούν σε ένα πραγματικό προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων ενός πετρελαιοφόρου πλοίου.

Αρχικώς κατασκευάστηκε ένα λογιστικό φύλλο στο οποίο προγραμματίστηκαν όλες φορτίσεις που ασκούνται σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων για όλες τις καταστάσεις φόρτωσης. Στην ουσία ο χρήστης εισάγει ορισμένα βασικά δεδομένα του προς εξέταση πλοίου καθώς και της συντεταγμένες του σημείου που θέλει να υπολογίσει την τιμή κάθε φόρτισης.

Προκειμένου να συγκριθούν οι τιμές των φορτίσεων μεταξύ του λογιστικού φύλλου και της υπορουτίνας DLOAD, ώστε να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματική λειτουργία της, κατασκευάστηκε ένα απλοποιημένο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων. Το μοντέλο αυτό πρόκειται για ένα κουτί τετραγωνικής διατομής, χωρισμένο σε έξι δεξαμενές φορτίου, όπως ακριβώς και σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων με κεντρική φρακτή (Εικόνα 22).

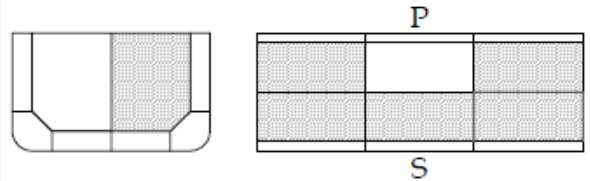


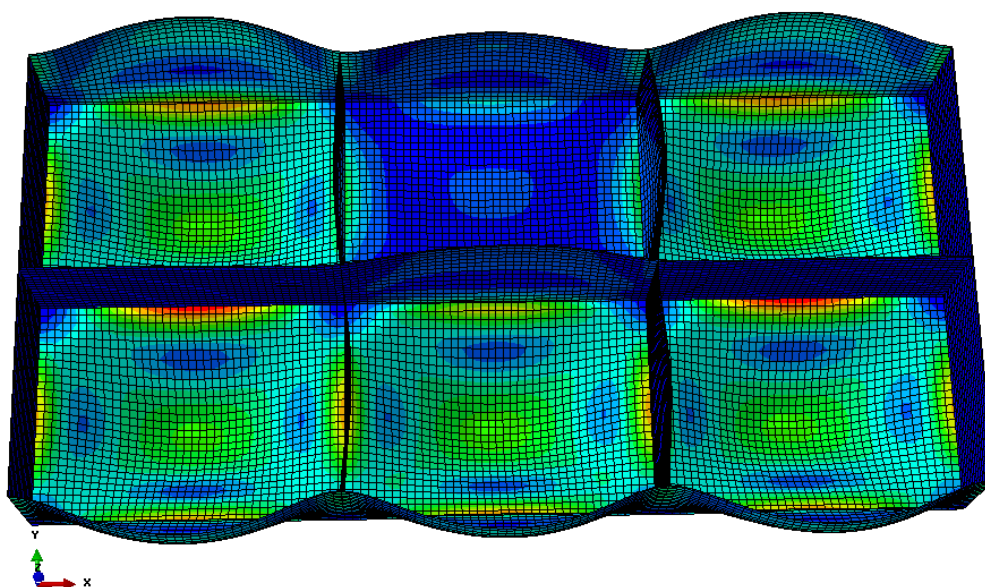
Εικόνα 22 :Απλοποιημένο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων (αριστερά) καθώς και οριζόντια τομή για την διάκριση των δεξαμενών του (δεξιά).

Η απλοποιημένη του μορφή διευκόλυνε τους χειροκίνητους υπολογισμούς και κυρίως το κόστος της ανάλυσης για το κάθε σενάριο φόρτισης. Το απλοποιημένο προσομοίωμα αντιμετωπίστηκε ακριβώς όπως και ένα πραγματικό προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων όσον αφορά της φορτίσεις και της οριακές συνθήκες.

Για να επιτευχθεί ο έλεγχος της υπορουτίνας DLOAD, τροποποιήθηκε ο κώδικάς της ώστε να καταγράφει σε ένα αρχείο *.txt κατά τη διάρκεια της ανάλυσης τα ονόματα των επιφανειών που φορτίζονται, τις συντεταγμένες των σημείων φόρτισης και τέλος τις τιμές των φορτίσεων. Αναλυτικότερα στο αρχείο αυτό καταγράφονται μέσω της μεταβλητής **SNAME** το όνομα της επιφάνειας που φορτίζεται, ακολούθως μέσω του διανύσματος **COORDS** οι συντεταγμένες του κάθε σημείου φόρτισης και τέλος μέσω της μεταβλητής **F** η τιμή της εφαρμοζόμενης δύναμης. Σημειώνεται ότι στο αρχείο αυτό, περάν των ορισμάτων της υπορουτίνας, καταγράφονται μέσω βοηθητικών μεταβλητών, εκτός της συγκεντρωτικής δύναμης **F** και οι επιμέρους φορτίσεις.

Για τη σύγκριση των κατανομών μεταξύ της υπορουτίνας DLOAD και του λογιστικού φύλλου, επιλέχθηκαν τιμές ακρότατων των κατανομών, αλλαγής κλίσεις των καμπυλών των κατανομών καθώς και κάποιες ενδεικτικές ενδιάμεσες τιμές. Τέλος ελέγχθηκε και ποιοτικά η παραμορφωμένη όψη του απλοποιημένου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων αν συμφωνεί με την αναμενόμενη μορφή. Στην Εικόνα 23 παρουσιάζεται η παραμορφωμένη όψη του απλοποιημένου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων για κατάσταση φόρτωσης B1, όπως αυτή προδιαγράφεται από τους κανονισμούς CSR. Στο μοντέλο απεικονίζονται οι τάσεις κατά von Mises και μπορεί διακριθεί η κατάσταση φόρτωση στις πέντε από τις έξι δεξαμενές φορτίου. Ο πυθμένας στην κεντρική δεξιά δεξαμενή καθώς και στις δεξαμενές των ακραίων διαμερισμάτων έχει παραμορφωθεί λόγω της φόρτωσης. Το ίδιο συμβαίνει και στη διαμήκη φρακτή του κεντρικού διαμερισματος η οποία έχει παραμορφωθεί λόγω της φόρτωσης της δεξιάς κεντρική δεξαμενής.

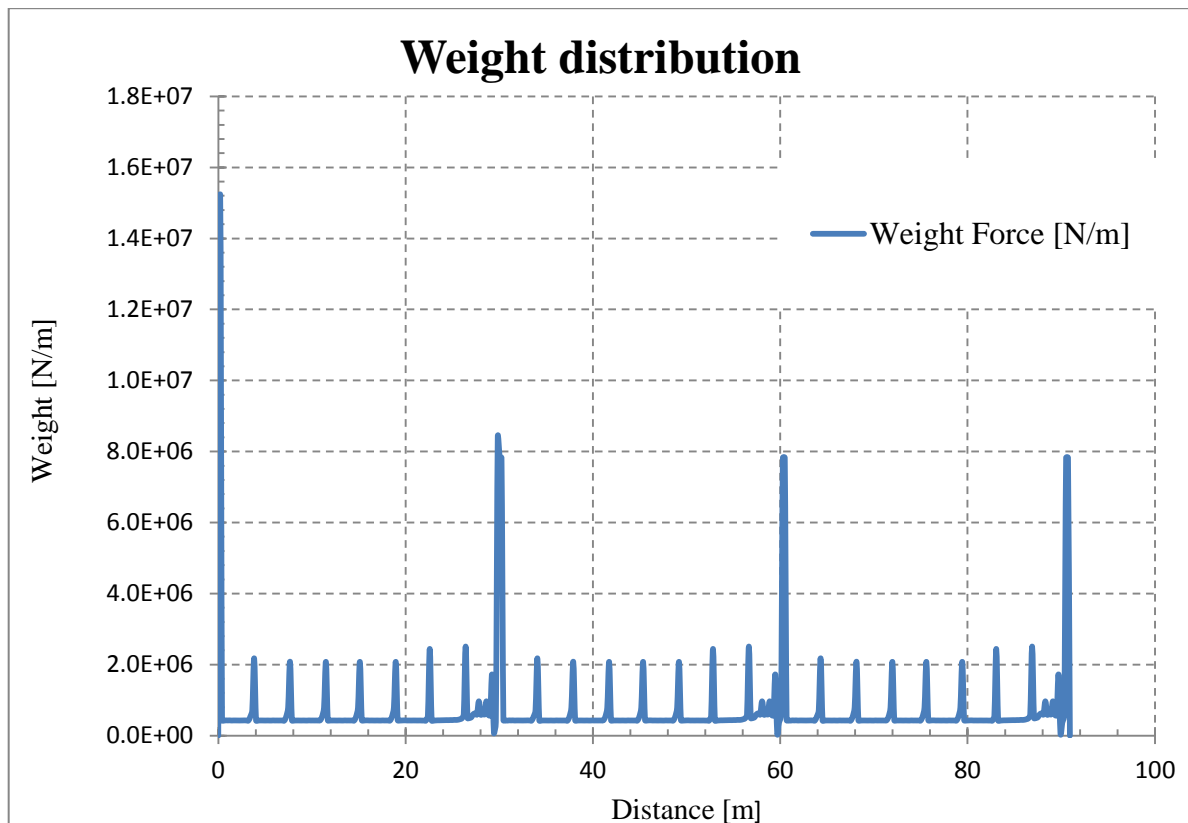
B1		$0.9 T_{sc}$	100% (sag)
			100% (hog)



Εικόνα 23 : Κατάσταση φόρτωσης σύμφωνα με CSR (επάνω) και απεικόνιση τάσεων κατά Von Mises στο απλοποιημένο μοντέλο τριών διαμερισμάτων για τη φόρτωση αυτή (κάτω).

Έλεγχος λειτουργίας Python script

Για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του Python script που κατασκευάστηκε για τον υπολογισμό τους βάρους μεταλλικής κατασκευής του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων καθώς και για την εύρεση της καμπύλης βάρους, χρησιμοποιήθηκε το λογιστικό φύλλο. Μέσω του ABAQUS/CAE υπολογίστηκε η τιμή του συνολικού βάρους τη μεταλλικής κατασκευής. Έπειτα καταγράφηκε το βάρος της μεταλλικής κατασκευής ανά τμήματα των 200mm, όσο δηλαδή και το μήκος του στοιχείου του προσομοιώματος και χαράχθηκε η καμπύλη του βάρους (Διάγραμμα 2). Η διαδικασία επαναλήφθηκε κάνοντας χρήση του Python script και επιβεβαιώθηκε η σύμπτωση των καμπυλών. Τέλος υπολογίστηκε το συνολικό άθροισμα του βάρους των τμημάτων της μεταλλικής κατασκευής με χρήση του Python script και συγκρίθηκε με την τιμή του συνολικού βάρους του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων. Η υπολογισθείσα διαφορά δεν ξεπερνάει το 1% του συνολικού βάρους του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων.



Διάγραμμα 2 : Η καμπύλη κατανομής βάρους της μεταλλικής κατασκευής ενός προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων.

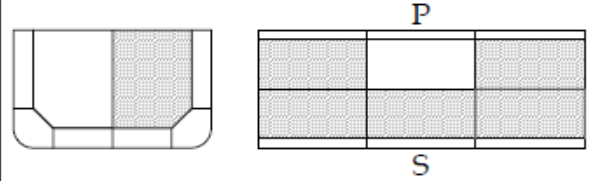
Έλεγχος λειτουργίας APDL script

Η διαδικασία ελέγχου ολοκληρώνεται με τον έλεγχο των αποτελεσμάτων που προκύπτουν με τη χρήση του APDL script, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διεργασία διόρθωσης των καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων που ασκούνται στο προσομοίωμα τριών

διαμερισμάτων. Μέσω αυτού του script κατασκευάζεται το ισοδύναμο προσομοίωμα του πλοίου-δοκού, εφαρμόζονται τα τοπικά φορτία στα στοιχεία δοκού εκτελείται η διεργασία διόρθωσης των καμπτικών ροπών και χαράσσονται τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος.

Προκειμένου να ελεγχθεί στο σύνολο της η διαδικασία αυτή, πραγματοποιήθηκε εξολοκλήρου χειροκίνητα με τη χρήση του λογιστικού φύλλου και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα των κατανομών καθώς και τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος.

Εφαρμογή του κώδικα σε AFRAMX-Tanker για κατάσταση φόρτωσης B1-100% sagging κατά CSR

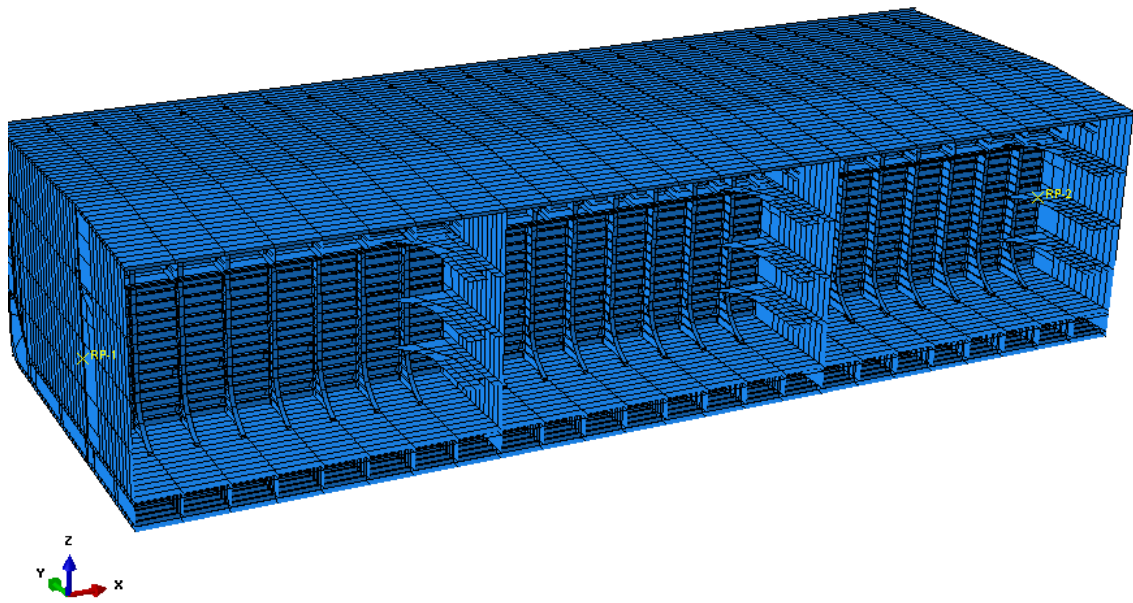
B1		$0.9 T_{sc}$	100% (sag)
			100% (hog)

Εικόνα 24 : Η κατάσταση φόρτωσης κατά CSR που ακολουθήθηκε στο παράδειγμα εφαρμογής του κώδικα.

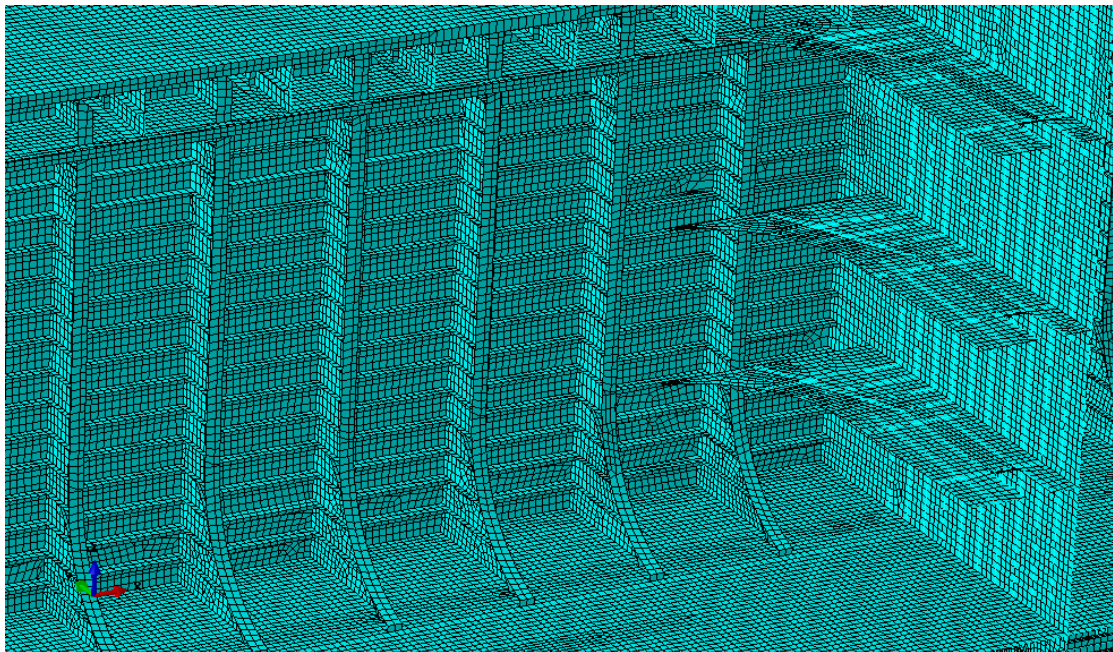
Στην παρούσα ενότητα αυτή της εργασίας θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τη χρήση της υπορουτίνας DLOAD και των Python και APDL scripts σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων του πετρελαιοφόρου πλοίου τύπου AFRAMAX. Επιπλέον θα παρουσιαστεί σταδιακά και συνοπτικά όλη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ολοκλήρωση της ανάλυσης αυτής της κατάστασης φόρτωσης (**Εικόνα 24**). Για περισσότερες λεπτομέρειες σε επιμέρους ζητήματα, προτρέπεται ο αναγνώστης να τις αναζητήσει στις επιμέρους ενότητες αυτής της εργασίας.

1^ο Στάδιο : Κατασκευή του γεωμετρικού προσομοιώματος καθώς και του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων

Στο στάδιο αυτό σχεδιάζεται το γεωμετρικό μοντέλο των τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX tanker (Εικόνα 25) και ακολούθως το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων (Εικόνα 26). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την κατασκευή του γεωμετρικού μοντέλου μπορούν να βρεθούν στη ενότητα «Γεωμετρική Απεικόνιση Προσομοιώματος CAD», ενώ σχετικά με το πλέγμα στην ενότητα «Γένεση Πλέγματος Πεπερασμένων Στοιχείων».



Εικόνα 25 : Γεωμετρικό προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων ενός AFRAMAX Tanker.



Εικόνα 26 : Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στο εσωτερικό του μεσαίου διαμερίσματος του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων ενός AFRAMAX Tanker.

2^ο Στάδιο : Υπολογισμός των φορτίσεων στο τρισδιάστατο άκαμπτο προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων

Σε αυτό το στάδιο υπολογίστηκαν οι φορτίσεις που ασκούνται στο σενάριο φόρτωσης B1-100 % sagging στο άκαμπτο προσομοίωμα ώστε να εφαρμοστούν στο μοντέλο πλοίου-δοκού για να ακολουθηθεί η διαδικασία διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.

Αρχικώς χρησιμοποιείται το Python script για την εξαγωγή της καμπύλης βάρους της μεταλλική κατασκευής του προσομοιώματος (περισσότερες λεπτομέρειες στην ενότητα : «Κατασκευή μοντέλου δοκού και εφαρμογή διαδικασίας διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων- Υπολογισμός του βάρους μεταλλική κατασκευής»). Έπειτα έγινε

αλλαγή στον τύπο των στοιχείων από παραμορφώσιμα στοιχεία κελύφους σε άκαμπτα στοιχεία κελύφους και δεσμεύονται οι β.ε. ενός κόμβου για την αποφυγή κινήσεων στερεού σώματος στο προσομοίωμα (περισσότερες λεπτομέρειες στην ενότητα : «Κατασκευή μοντέλου δοκού και εφαρμογή διαδικασίας διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων -Βάρος Φορτίου και Έρματος). Ακολούθως ορίζονται στο ABAQUS/CAE οι επιφάνειες του προσομοιώματος που θα ασκηθούν τα μη ομοιόμορφα φορτία. Εκτελούνται οι αναλύσεις με χρήση του ABAQUS και της υπορουτίνας DLOAD και υπολογίζονται οι τιμές των συνολικών φορτίσεων (Πίνακας 6, Πίνακας 7, Πίνακας 8). Επιπλέον υπολογίζονται και οι ανηγμένες ως προς το μήκος τιμές των μεγεθών αυτών, ώστε να εφαρμοστούν ως φορτία γραμμής στα στοιχεία δοκού.

Πίνακας 6 : Οι τιμές των στατικών φορτίσεων.

STATIC LOADS	
HYDROSTATIC PRESSURE	2.18E+07
SLICE LENGTH	3.78
SLICE BREADTH	44
HP/LENGTH	5.77E+06
CARGO WEIGHT FORCE	-5.40E+07
SLICE LENGTH	7.56
SLICE BREADTH	4.40E+01
CARGO/LENGTH	-7.14E+06

Πίνακας 7 : Δυναμικές φορτίσεις λόγω κυματισμού.

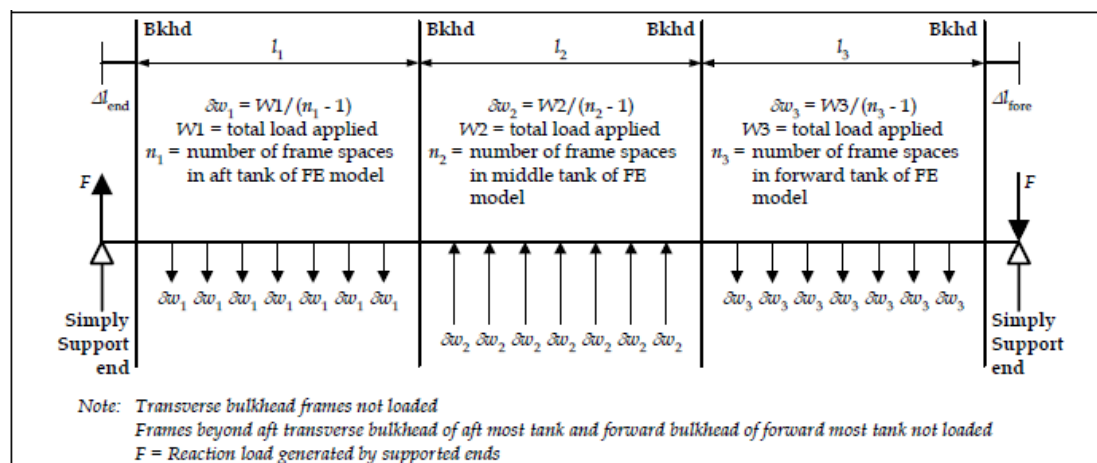
DYNAMIC LOADS	
Scenario 1	
GREEN SEA LOADS [N]	0.00000
GREEN SEA LOADS [N/m]	0.00000
DYNAMIC WAVE LOADING [N]	5.25982E+08
DYNAMIC WAVE LOADING [N/m]	5.79786E+06

Πίνακας 8 : Οι τιμές των δυναμικών φορτίσεων των δεξαμενών φορτίου.

DYNAMIC TANK PRESSURE [N]		DYNAMIC TANK PRESSURE [N/m]	
HOLD N5	1.22E+08	HOLD N5	4.04E+06
HOLD N4S	6.06E+07	HOLD N4S	2.00E+06
HOLD N3	1.22E+08	HOLD N3	4.04E+06

3^ο Στάδιο: Διόρθωση καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων. Χρήση του μοντέλου πλοίου-δοκού

Στο στάδιο αυτό ακολουθείται η διαδικασία διόρθωσης διατμητικών δυνάμεων και καμπτικών ροπών. Αρχικώς κατασκευάστηκε στο ANSYS το μοντέλο πλοίου-δοκού, που είναι το ισοδύναμο μοντέλο των τριών διαμερισμάτων κατά CSR (Εικόνα 27). Το μοντέλο δοκού διαθέτει 450 στοιχεία δοκού με μήκος $\approx 200\text{mm}$. Οι οριακές συνθήκες που επιβάλλονται στο μοντέλο είναι αρθρώσεις στα δύο άκρα του.



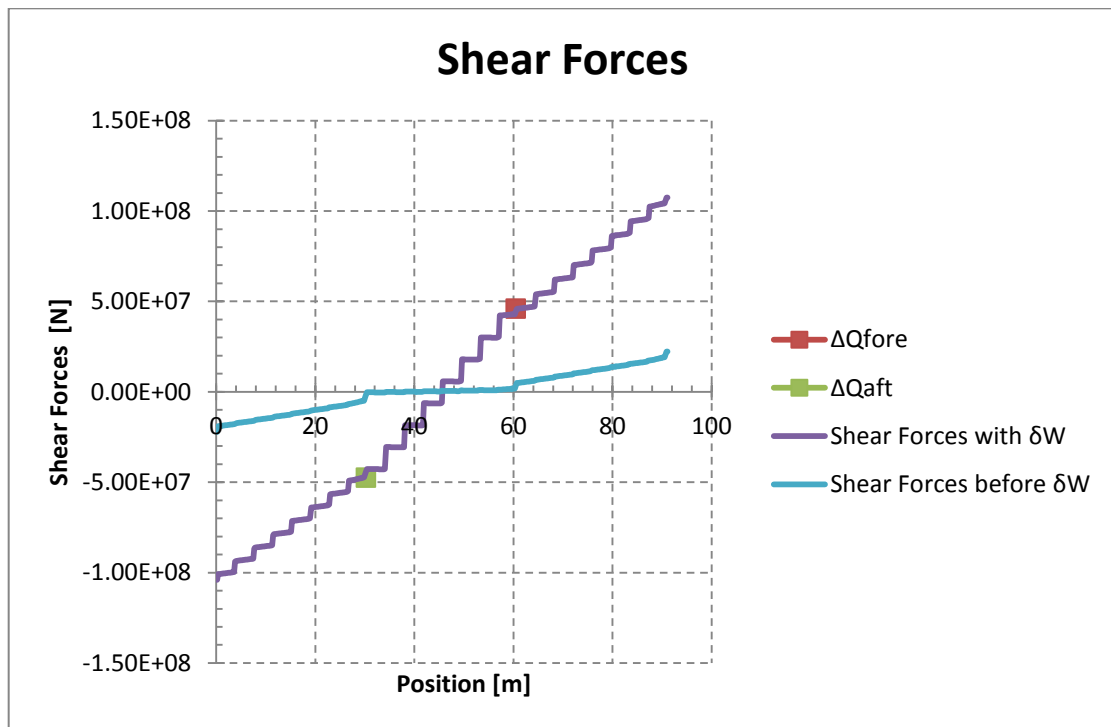
Εικόνα 27 : Το ισοδύναμο των τριών διαμερισμάτων μοντέλο δοκού, που χρησιμοποιείται στη διαδικασία διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.

Έπειτα με τη χρήση του APDL script εφαρμόζονται στα στοιχεία δοκού οι αντίστοιχες φορτίσεις του σεναρίου φόρτωσης που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Εν συνεχεία εφαρμόζονται τα διορθωτικά φορτία στις θέσεις των νομέων (Πίνακας 9) προκειμένου να επιτευχθούν οι τιμές τις διατμητικής δύναμης (Πίνακας 10). Τέλος ολοκληρώνονται οι αναλύσεις, χαράσσονται τα διαγράμματα ελευθέρου σώματος (Διάγραμμα 3, Διάγραμμα 4) και υπολογίζεται η τιμή τις καμπτικής ροπής που θα ασκηθεί στα δύο άκρα του τρισδιάστατου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker (Πίνακας 11). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη διαδικασία διόρθωσης μπορούν να βρεθούν στην ενότητα : «Κατασκευή μοντέλου δοκού και εφαρμογή διαδικασίας διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων», ενώ όσον αφορά το APDL script στην ενότητα : «Κατασκευή κώδικα σε APDL για την εφαρμογή των φορτίων στα στοιχεία δοκού και την εξαγωγή των διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος».

Πίνακας 9 : Υπολογισμός των διορθωτικών φορτίων που ασκούνται στις θέσεις των νομέων.

δw_1	- 7.012E+06	----->	W_1	-4.908E+07	$\delta w_1 / \text{ELEM. LENGTH}$	- 3.478E+07
δw_2	- 1.335E+07	----->	W_2	-9.344E+07	$\delta w_2 / \text{ELEM. LENGTH}$	- 6.622E+07
δw_3	- 6.338E+06	----->	W_3	-4.436E+07	$\delta w_3 / \text{ELEM. LENGTH}$	- 3.144E+07
			Check	0.000E+00		

Τέλος ολοκληρώνονται οι αναλύσεις, χαράσσονται τα διαγράμματα ελεύθερου σώματος (Διάγραμμα 3, Διάγραμμα 4) και υπολογίζεται η τιμή τις καμπτικής ροπής που θα ασκηθεί στα δύο άκρα του τρισδιάστατου προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τη διαδικασία διόρθωσης μπορούν να βρεθούν στην ενότητα : «Κατασκευή μοντέλου δοκού και εφαρμογή διαδικασίας διόρθωσης καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων», ενώ όσον αφορά το APDL script στην ενότητα : «Κατασκευή κώδικα σε APDL για την εφαρμογή των φορτίων στα στοιχεία δοκού και την εξαγωγή των διαγραμμάτων ελεύθερου σώματος».



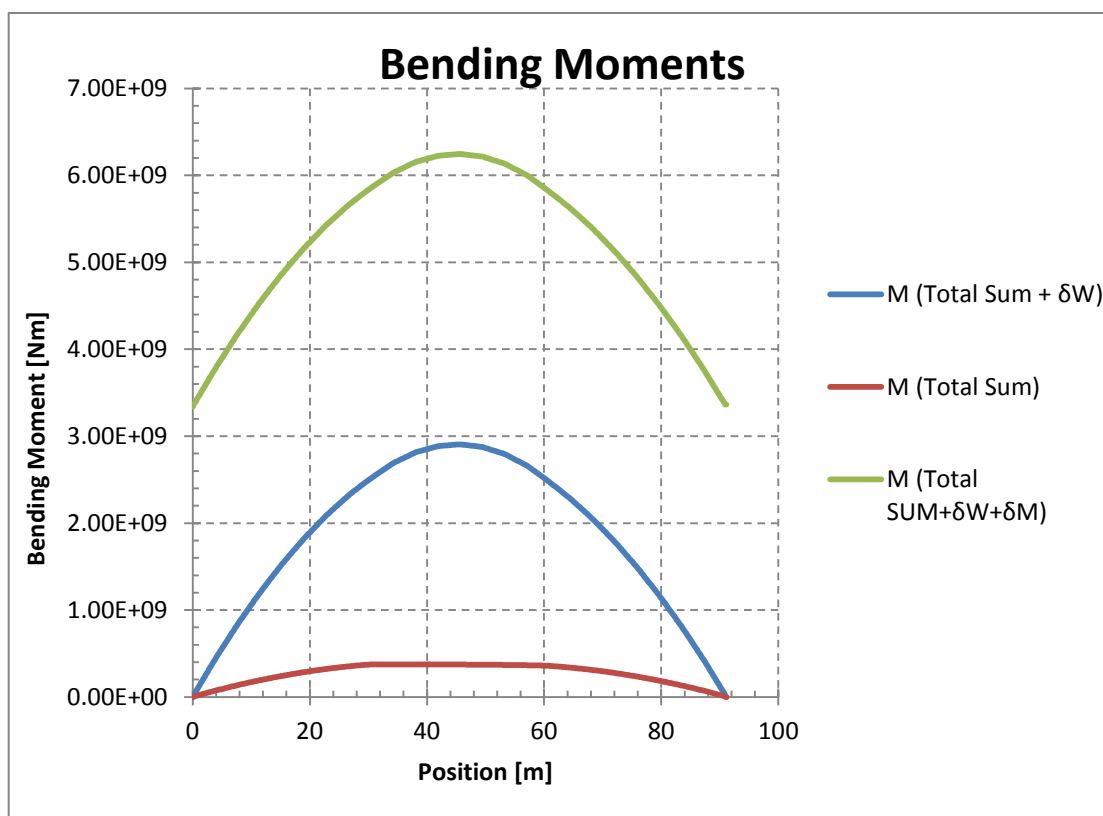
Διάγραμμα 3 : Κατανομή διατμητικών δυνάμεων πριν και μετά τη διόρθωση καθώς και οι επιθυμητές τιμές επίτευξης.

Πίνακας 10 : Επιθυμητή τιμή επίτευξης και διορθωτικές τιμές διατμητικών δυνάμεων.

	Q_{target}	4.42E+07
ΔQ_{fwd}	$Q_{\text{target}} - Q_{\text{fwd}}$	4.59E+07
ΔQ_{aft}	$-Q_{\text{target}} - Q_{\text{aft}}$	-4.75E+07

Πίνακας 11 : Επιθυμητή τιμή επίτευξης και διορθωτικές τιμές καμπτικών ροπών.

	M_{target}	-6.24E+09
ΔM	$M_{target} - M_{(SUM+\delta W)}$	-3.34E+09



Διάγραμμα 4 : Κατανομή των καμπτικών ροπών πριν και μετά τις διορθώσεις.

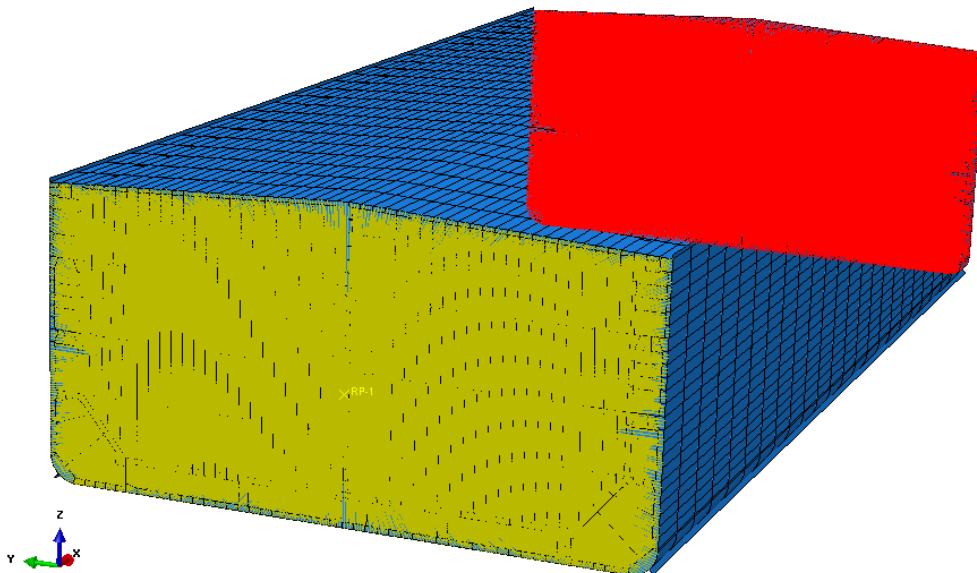
4^ο Στάδιο : Εφαρμογή γενικών φορτίων και οριακών συνθηκών

Στο τελευταίο στάδιο προετοιμασίας, πριν την ανάλυση, του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker πραγματοποιείται η εφαρμογή των γενικών φορτίων καθώς και επιβολή των οριακών συνθηκών.

Τα γενικά φορτία που ασκούνται στο μοντέλο, είναι οι καμπτικές ροπές που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο και εφαρμόζονται στα δύο ανεξάρτητα σημεία (independent points) στην πρωραία και πρυμναία άκρη του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων (Πίνακας 12). Τα σημεία αυτά ενώνονται με άκαμπτες συνδέσεις (Rigid Links) με όλους τους κόμβους του προσομοιώματος που ανήκουν στα πρωραία και πρυμναία επίπεδα των άκρων του προσομοιώματος αντίστοιχα (Εικόνα 28).

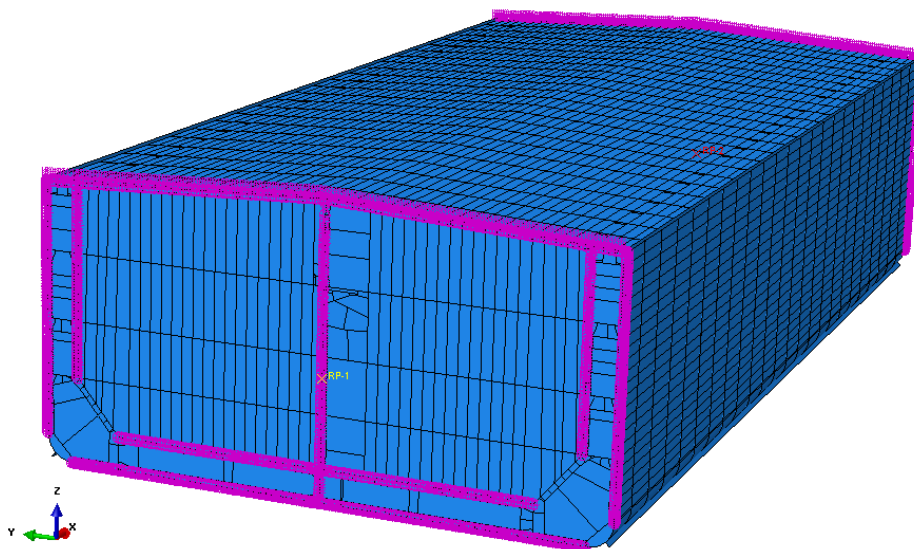
Πίνακας 12 : Προσδιορισμός θέσης ανεξάρτητων σημείων (Independent Points).

Independent Point	
First moment of Areas cross section (y) [m ³]	54.5742585
Area of cross-section [m ²]	5.91209195
Y coordinate of Independent Point	9.230955635



Εικόνα 28 : Οι άκαμπτες συνδέσεις του προραίου (κόκκινο) και πρυμναίου (κίτρινο) ακραίων επιπέδων με τα αντίστοιχα ανεξάρτητα σημεία.

Τέλος ακολούθησε ο υπολογισμός της ακαμψίας των ελατηρίων και η εφαρμογή τους στους κόμβους των οριζόντιων και κατακόρυφων δομικών στοιχείων του προραίου και πρυμναίου επιπέδου (Εικόνα 29 και Πίνακας 13).



Εικόνα 29 : Απεικόνιση των ελατηρίων στα οριζόντια και κατακόρυφα δομικά στοιχεία του πρυμναίου και προραίου επιπέδου του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.

Πίνακας 13 : Υπολογισμός της ακαμψίας των ελατηρίων που εφαρμόζονται στα οριζόντια και κατακόρυφα δομικά στοιχεία του πρυμναίου και πωραίου επιπέδου του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.

Vertical						
Structural Member	Area [m ²]	Number of Nodes		Spring Stiffness c [N/mm]		Spring Stiffness c [N/m]
Outer Skin	0.37315	113	----->	17405411.14	----->	17405411136
Inner Skin	0.320282955	116	----->	14553086.86	----->	14553086856
Longitudinal Bulkhead	0.33188625	117	----->	14951428.29	----->	14951428285
Horizontal						
Structural Member	Area [m ²]	Number of Nodes		Spring Stiffness c [N/mm]		Spring Stiffness c [N/m]
Deck	0.754744405	216	----->	18417277.62	----->	18417277625
Outer Bottom	0.82701	234	----->	18628341.35	----->	18628341346
Inner Bottom	0.68365	241	----->	14951888.83	----->	14951888831

Υπενθυμίζεται η σχέση υπολογισμού της ακαμψίας του κάθε ελατηρίου :

$$c = \left(\frac{E}{1 + \nu} \right) \frac{A_{s-net50}}{l_{tk} n} = 0.77 \frac{A_{s-net50} E}{l_{tk} n} \quad N/mm$$

όπου :

$A_{s-net50}$, η διαμητική επιφάνεια του κάθε οριζόντιου ή κατακόρυφου δομικού στοιχείου σε mm²

ν , ο λόγος Poisson του υλικού

l_{tk} , το μήκος της δεξαμενής φορτίου του μεσαίου διαμερίσματος του προσομοιώματος σε mm

E , το μέτρο ελαστικότητας του υλικού σε N/mm²

n , το πλήθος των κόμβων που θα εφαρμοστούν στοιχεία ελατηρίου για το κάθε οριζόντιο ή κατακόρυφο δομικό στοιχείο

5^ο Στάδιο : Ανάλυση του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων και αποτελέσματα

Στο τελευταίο στάδιο, εκτελείται η ανάλυση στο ABAQUS με χρήση της υπορουτίνας DLOAD. Το είδος της ανάλυσης που εκτελείται είναι στατική γραμμική ανάλυση (linear static analysis). Ο άμεσος επιλύτης γραμμικών εξισώσεων στο ABAQUS/Standard :

- χρησιμοποιεί τη μέθοδο αραιής, άμεσης, απαλοιφής κατά Gauss (sparse, direct, Gauss elimination method) και
- συχνά αντιπροσωπεύει το πιο χρονοβόρο κομμάτι μίας ανάλυσης (ειδικά σε μεγάλα προσομοιώματα). Η αποθήκευση των εξισώσεων απασχολεί το μεγαλύτερο μέρος του χώρου του σκληρού δίσκου κατά τη διαδικασία των υπολογισμών.

Στον Πίνακα 14 φαίνεται ο τύπος, το σχήμα, η τάξη και το πλήθος των στοιχείων καθώς και το πλήθος των κόμβων του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος.

Πίνακας 14 : Πληροφορίες σχετικά με το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker.

Element Type	Element Shape	Geometric Order	Number of Elements
Beam Element : B33	Line	Linear	22785
Shell Element : S4	Quadrilateral	Linear	1302405
Shell Element : S3	Triangular	Linear	12892
Total Number of Elements		1,338,082	
Total Number of Nodes		1,268,363	

Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση ήταν γραμμικό ιστροπικό υλικό με τις μηχανικές ιδιότητες του ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής AH-32, όπως ακριβώς απεικονίζεται και στα πρωτότυπα σχέδια του πλοίου (Πίνακας 15).

Πίνακας 15 : Ιδιότητες χάλυβα υψηλής αντοχής που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Ιδιότητες Χάλυβα AH-32			
Ιδιότητα	Μέγεθος	Τιμή	Μονάδες
Μέτρο Ελαστικότητας	E	206	GPa
Λόγος Poisson	ν	0.3	-
Πυκνότητα	ρ	7856	kg/m ³

Το χρονικό κόστος της ανάλυσης αυτής ήταν $\approx 3 \frac{1}{2}$ ώρες και πραγματοποιήθηκε σε desktop PC με τις εξής προδιαγραφές :

- Number of CPUs : 1
- Number of Cores : 4
- Type of CPU : Intel Core 2 Extreme CPU X9650 @ 3.00 GHz
- Installed RAM : 8.00 GB

Η έκδοση του ABAQUS που ανέλαβε την εκτέλεση του Python script και την επίλυση των εξισώσεων των πεπερασμένων στοιχείων του τρισδιάστατου προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων καθώς και η έκδοση του ANSYS που ανέλαβε την επίλυση του πλοίου-δοκού και την εκτέλεση του APDL script, αναφέρονται παρακάτω :

- ABAQUS Version : 6.10-2
- ANSYS Version : 12 SP1

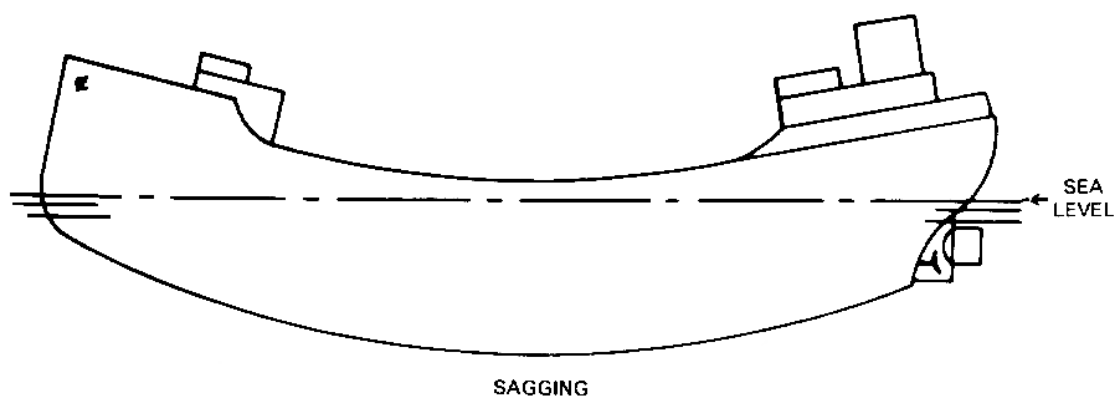
, ενώ η έκδοση της FORTRAN που ανέλαβε την εκτέλεση της υπορουτίνας είναι η παρακάτω :

- FORTRAN Compiler Version : 11.1.054

Αποτελέσματα της ανάλυσης

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν συνοπτικά αποτελέσματα της διεξαχθείσας ανάλυσης στο προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker για κατάσταση φόρτωσης B1-100% sagging.

Η κατάσταση φόρτωσης και το σενάριο φόρτισης που εφαρμόστηκαν στο πλοίο υπαγορεύουν μία γενική απόκριση του πλοίου (global response) τύπου sagging. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε θλίψη του καταστρώματος και εφελκυσμό του πυθμένα (Εικόνα 30).



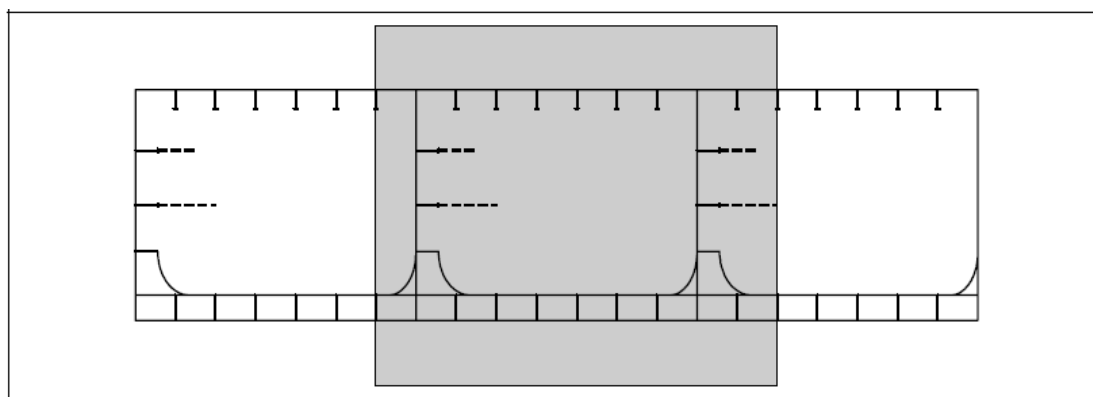
Εικόνα 30 : Πλοίο σε απόκριση τύπου sagging.

Συνεπώς η αναμενόμενη απόκριση του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker είναι sagging. Στην Εικόνα 31 απεικονίζεται η παραμορφωμένη όψη του προσομοιώματος η οποία αντιστοιχεί σε απόκριση σε κάμψη τύπου sagging.



Εικόνα 31 : Απαραμόρφωτη (επάνω) και παραμορφωμένη (κάτω) όψη του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων.

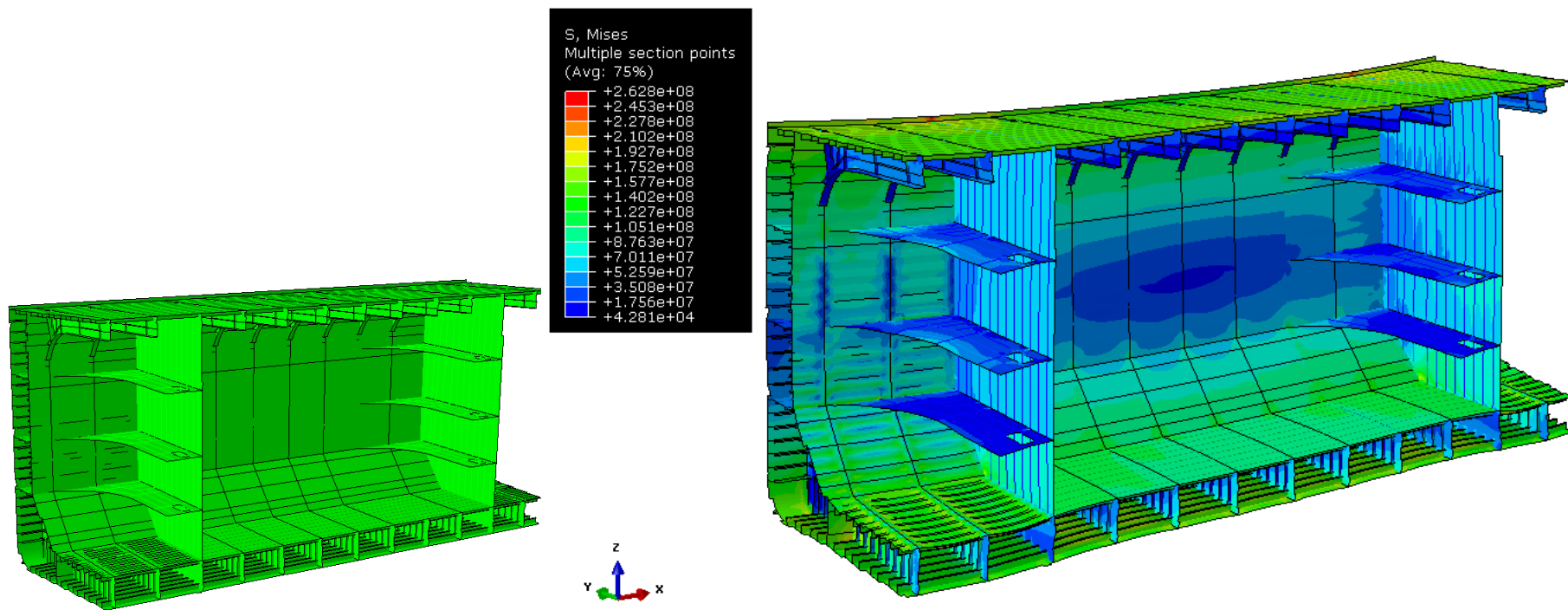
Οι κανονισμοί CSR υπαγορεύουν τον έλεγχο των αποτελεσμάτων στο μεσαίο διαμέρισμα του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων, όπως αυτό φαίνεται στο σκαρίφημα στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11 : Σκαρίφημα του προσομοιώματος τριών διαμερισμάτων. Το γραμμοσκιασμένο τμήμα του μεσαίου διαμερίσματος αποτελεί το τμήμα της κατασκευής που διενεργείται ο έλεγχος των αποτελεσμάτων βάσει των CSR.

Ακολουθώντας τις κατευθυντήριες γραμμές των κανονισμών CSR παρουσιάζεται η τομή του προσομοιώματος των τριών διαμερισμάτων του AFRAMAX Tanker με απεικόνιση των τάσεων κατά Von Mises στην παραμορφωμένη όψη του προσομοιώματος (Εικόνα 32). Η γενική απόκριση της κατασκευής είναι τύπου sagging ενώ η μέγιστη εμφανιζόμενη τιμή

τάσης δε ξεπερνάει τα 263 MPa ($< \sigma_y=315$ MPa). Η τιμή αυτή παρουσιάζεται σε δύο περιοχές συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή του καταστρώματος, ενώ η γενική κατανομή των τάσεων στο τμήμα της κατασκευής δε ξεπερνάει τα 160 MPa.



Εικόνα 32 : Απαραμόρφωτη (αριστερά) και παραμορφωμένη (δεξιά) όψη τομής του μεσαίου διαμερίσματος του προσομοιώματος με απεικόνιση των τάσεων κατά Von Mises.

Εφαρμογές του εργαλείου & Συμπεράσματα της εργασίας

Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση του εργαλείου αυτού δεν περιορίζεται αυστηρά στην εξυπηρέτηση μελετητών που εκπονούν μελέτες δομικής αντοχής δεξαμενόπλοιων. Η δυνατότητα που προσφέρει να εφαρμόζει τις φορτίσεις που δέχεται ένα πλοίο στο θαλάσσιο περιβάλλον σε κατάσταση λειτουργίας το καθιστούν χρήσιμο και σε ερευνητικές εφαρμογές. Ενδεικτικά παρουσιάζονται παραδείγματα χρήσης του εργαλείου αυτού σε άλλες εφαρμογές :

- Στη μελέτη επισκευών κατασκευαστικών λεπτομερειών πλοίου που έχουν ρωγματοωθεί, με τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά [12].
- Στην εκτίμηση της υπολειπόμενης δομικής αντοχής ενός δεξαμενόπλοιου μετά από συμβάντα ατυχήματος, όπως προσάραξη ή πρόσκρουση [13].
- Στη μελέτη διερεύνησης κατάλληλων περιοχών για την τοποθέτηση συστήματος αισθητήρων σε ένα δεξαμενόπλοιο για τον έλεγχο των τάσεων και των παραμορφώσεων.

Επιπλέον η σχεδίαση του εργαλείου αυτού έχει γίνει με τρόπο που επιτρέπει στο χρήστη να χρησιμοποιηθεί και σε μη γραμμικές αναλύσεις εισάγοντας έτσι για παράδειγμα στο προσομοίωμά του μη γραμμικό υλικό ή μη γραμμικές οριακές συνθήκες (contacts).

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής έγινε κατανοητό ότι είναι εφικτή η κατασκευή ενός προγραμματιστικού εργαλείου που ενσωματώνει τις επιταγές των κανονισμών CSR και σε συνεργασία με ένα υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων εκπονεί τις απαραίτητες αναλύσεις μιας μελέτης δομικής αντοχής ενός δεξαμενόπλοιου. Συνεπώς με την ολοκλήρωση της εφαρμογής αυτής παρέχεται η δυνατότητα στο μελετητή-ερευνητή να εφαρμόζει όλες τις θαλάσσιες και μη φορτίσεις, που προβλέπονται από τους CSR για ένα δεξαμενόπλοιο σε κατάσταση λειτουργίας, σε ένα προσομοίωμα τριών διαμερισμάτων.

Το θέμα που πλέον ανακύπτει δεν είναι η διαθεσιμότητα των αναγκαίων εργαλείων (υπολογιστής, λογισμικό) αλλά η κατάρτιση του μελετητή και η ικανότητά του στη σωστή προσομοίωση, στην επιλογή των στοιχείων και άλλων παραμέτρων της μελέτης και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Βιβλιογραφία

- [1] IACS, Common Structural Rules for Double Hull Tankers, in, International Association of Classification Societies, 2010.
- [2] Καρύδης Πέτρος, Υπολογιστικές μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές, Ε.Μ.Π., 2001
- [3] Letcher John, The Principles of Naval Architecture Series: The Geometry of Ships, SNAME, 2009.
- [4] ABAQUS. 2010. CAE User's Manual, Version 6.10-2 Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence: RI, USA.
- [5] ABAQUS. 2010. Theory Manual, Version 6.10-2 Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence: RI, USA.
- [6] ABAQUS. 2010. Abaqus User Subroutines Reference Manual, Version 6.10-2 Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence: RI, USA.
- [7] ABAQUS. 2010. Abaqus Scripting User's Manual, Version 6.10-2 Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence: RI, USA.
- [8] ANSYS. 2010. APDL Programmer's Guide, Version 13.1 ANSYS, Inc., USA.
- [9] Παπαδρακάκης Μανόλης, «Σημειώσεις Ανάλυσης Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Ε.Μ.Π., 1996.
- [10] Μ. Σαμουηλίδης ,«Σημειώσεις Αντοχής Πλοίου», Ε.Μ.Π., 2007.
- [11] J. K. Paik, A. K. Thayamballi, "Ship Shaped Offshore Installations. Design, Building and Operation", N.Y. 2007
- [12] Αυγουλάς Α. Ευάγγελος-Ιωάννης, Αριθμητική μελέτη επισκευής κατασκευαστικής λεπτομέρειας πλοίου νε χρήση επιθέματος απο σύνθετα υλικά, Ε.Μ.Π., 2011
- [13] Zilakos I.K., Karatzas V.A., Chatzidouros E.V., Papazoglou V.J., Simulation of External Application of SuSy devices on an Aframax Tanker that has been Structurally Compromised, RINA Conference, 2011.