

Ανάλυση κατασκευής οχηματαγωγού ανοικτού τύπου με πρόγραμμα ΠΣ

1. Εισαγωγή

Τα επιβατηγά-οχηματαγωγά ανοικτού τύπου (*παντόφλες*) αποτελούν ναυπηγικές κατασκευές που συναντάμε σε μεγάλο αριθμό στην Ελλάδα. Σχεδιάζονται και κατασκευάζονται σε ελληνικά ναυπηγεία στις περισσότερες περιπτώσεις. Αποτελούν συνεπώς μια «ελληνικού ενδιαφέροντος» κατηγορία πλοίων, αφού σπάνια συναντώνται σε άλλες χώρες. Τα σκάφη αυτά προορίζονται τόσο για τη μεταφορά επιβατών όσο και οχημάτων. Δρομολογούνται σε πλόες «περιορισμένης έκτασης», δεν εκτελούν δηλαδή ποντοπόρα ταξίδια και συνήθως συναντώνται σε γραμμές πορθμείων π.χ. Ρίο-Αντίρριο, Κέρκυρα-Ηγουμενίτσα κλπ.

Ως προς το σχεδιασμό της μεταλλικής κατασκευής τους παρουσιάζουν ορισμένες ιδιομορφίες, οι οποίες είναι οι εξής:

1. Το κύριο σκάφος αποτελείται από ένα εκτεθειμένο κατάστρωμα αντοχής που στηρίζεται στον πυθμένα με ορθογώνιο δικτύωμα ενισχύσεων Δεν υπάρχουν συνεπώς εσωτερικοί χώροι στάθμευσης οχημάτων.
2. Η επιβίβαση και αποβίβαση των οχημάτων επιτυγχάνεται μέσω ενός προωαίου καταπέλτη.
3. Οι υπερκατασκευές δεν εδράζονται απ' ευθείας στο κατάστρωμα αλλά στηρίζονται σε αυτό με τη βοήθεια υποστλωμάτων (υπερκατασκευές τύπου 'Π') σε όλες τις σύγχρονες σχεδιάσεις. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την χρήση όλου του κύριου καταστρώματος για οχήματα μεγάλου ύψους (φορτηγά, λεωφορεία κλπ).

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφεί η χρήση ενός εμπορικού προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων (*ALGOR*) για τη διερεύνηση της επάρκειας αντοχής των σκαφών αυτής της κατηγορίας. Θα εξετασθεί συγκεκριμένα η απόκριση της μεταλλικής κατασκευής στο σύνολό της υπό την επίδραση ψευδο-στατικού κύματος, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των νηογνομόνων. Από πλευράς περιπτώσεων φόρτισης εξετάστηκαν μία σειρά καταστάσεις για να προσδιορισθεί η δυσμενέστερη. Από αυτές αναφορά θα γίνει σε αυτή, ενώ τα συμπεράσματα της μελέτης περιλαμβάνουν μία σύγκριση με τη συμβατική γραμμική θεωρία δοκών καθώς και λεπτομερείς ελέγχους των εντατικών καταστάσεων σε διάφορες κρίσιμες περιοχές της κατασκευής. Τέλος συνάγονται και ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα αναφο-

ρικά με τους σημερινούς κανονισμούς κατασκευής πλοίων αυτού του τύπου της Επιθεώρησης Εμπορικών Πλοίων του Υ.Ε.Ν.

Το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη αυτή περιγράφεται σε συντομία στο Παράρτημα Γ. Οι αναφορές στη χρήση του προγράμματος δεν υποκαθιστούν με κανένα τρόπο τα σχετικά εγχειρίδια χρήστη που συνοδεύουν το πρόγραμμα. Οι πληροφορίες που δίνονται περιλαμβάνουν όμως ορισμένες χρήσιμες πληροφορίες, καθώς περιγράφεται η χρήση διαφόρων εργαλείων και ολόκληρη η διαδικασία διακριτοποίησης και επαλήθευσης των αποτελεσμάτων.

2. Το Ε/Γ-Ο/Γ Κέρκυρα

2.1 Κύρια χαρακτηριστικά

Το Ε/Γ- Ο/Γ Κέρκυρα ναυπηγήθηκε το 1984 και λειτουργεί στη γραμμή Ηγουμενίτσας-Κέρκυρας. Το 1988 υπέστη μια σημαντική μετασκευή (επιμήκυνση και διαπλάτυνση). Τα κύρια χαρακτηριστικά του περιλαμβάνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1 Ε/Γ-Ο/Γ Κέρκυρα. Κύρια χαρακτηριστικά

Ολικό μήκος	L_{OA}	m	72,50
Μήκος μεταξύ καθέτων	L_{BP}	m	65,00
Πλάτος	B_{mld}	m	15,00
Μέγιστο πλάτος	B_{max}	m	17,10
Κοίλο (νομέας 65)	D	m	3,76
Βύθισμα	T	m	2,75
Ισχύς	BHP	kW	2x1005
Βάρος (άφορτη κατάσταση)	W_s	ton	837
Χωρητικότητα	dwt	ton	847

Κατά το πρώτο στάδιο της μελέτης απαιτείται να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα στοιχεία για:

- Τη διάταξη της κατασκευής και την καμπύλη βάρους σε άφορτη κατάσταση
- Τις φορτίσεις λόγω του θαλασσίου περιβάλλοντος και
- Τους δυνατούς τρόπους φόρτισης και τις επιδράσεις τους στις κατανομές βαρών και άντωσης.

Από τα κατασκευαστικά σχέδια αποκτήθηκε η κατανομή βαρών η οποία δίνεται στον Πίνακα 2.

Για όλα τα θεωρούμενα βάρη είναι γνωστές οι θέσεις των κέντρων βάρους τους τόσο κατά τη διαμήκη όσο και την καθ' ύψος κατεύθυνση, από τη μελέτη ευστάθειας του σκάφους. Για τα όρια των τραπεζίων που αντιστοιχούν στα βάρη αυτά

έχουμε: τα βάρη 4, 5, 6, 7, 8 έχουν όρια γνωστά από τη γενική διάταξη του πλοίου. Τα βάρη του πληρώματος και των εφοδίων θεωρούμε ότι κατανέμονται σε όλο την επιφάνεια του πλοίου. Τα βάρη των ομάδων των επιβατών θεωρούνται ότι κατανέμονται σε όλη την επιφάνεια του αντίστοιχου καταστρώματος. Τα βάρη των οχημάτων (φορτηγών) θεωρούνται ότι κατανέμονται σε όλη την εκμεταλλεύσιμη επιφάνεια του καταστρώματος, που από το σχέδιο της Γενικής Διάταξης προκύπτει ότι εκτείνεται από τον νομέα 2 έως το νομέα 130. Με βάση τα δεδομένα αυτά καταστρώθηκε ο Πίνακας 2.

Στον πίνακα αυτό περιλαμβάνονται όλες οι ομάδες βαρών του σκάφους σε κατάσταση πλήρους φόρτου, με όλα τα στοιχεία της κάθε ομάδας (συμπεριλαμβάνονται και τα βάρη του άφορτου σκάφους). Υπενθυμίζεται ότι τα τραπέζια κάθε βάρους ορίζονται μονοσήμαντα εφόσον είναι γνωστά α) το μέγεθος του βάρους, β) τα όρια μεταξύ των οποίων εκτείνεται και γ) το κέντρο βάρους του (KG , LCG).

Επιβεβαιώθηκε ότι το συνολικό βάρος συμπίπτει με εκείνο που αναγράφεται στη μελέτη ευστάθειας σε κατάσταση πλήρους φόρτου, καθώς επίσης και ότι το κέντρο βάρους συμπίπτει με τη θέση που υπολογίζεται στη μελέτη ευστάθειας: (LCG , KG) = (29,62 m, 4,62 m).

Από όλες τις καταστάσεις που εξετάστηκαν η κρισιμότερη ήταν αυτή με το πλοίο σε κατάσταση πλήρους φόρτου στην κορυφή κύματος.

2.2 Υδροστατικά στοιχεία και καμπύλη φόρτισης

Μετά την κατάρτιση της καμπύλης βαρών έγινε χρήση προγράμματος υπολογισμού των καμπυλών άντωσης και αποκτήθηκαν μέσω των καμπυλών φόρτισης οι κατανομές των καμπτικών ροπών και των τεμνουσών δυνάμεων. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε έδωσε επίσης και τα βυθίσματα σε όλο το μήκος του σκάφους, ανάλογα με το θεωρούμενο ψευδο-στατικό κύμα και την αντίστοιχη κατάσταση φόρτωσης. Οι καταστάσεις αυτές περιγράφονται στο εγχειρίδιο ευστάθειας του σκάφους ενώ οι αντίστοιχες καμπύλες καμπτικών ροπών περιλαμβάνονται στο Σχήμα 1.

3. Η διακριτοποίηση της κατασκευής του Ε/Γ-Ο/Γ Κέρκυρα

3.1 Γενικές παρατηρήσεις

Στο επόμενο στάδιο της μελέτης εκπονήθηκε η αναπαράσταση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου σε μαθηματική μορφή (διακριτοποίηση). Η διαδικασία αυτή ολοκληρώθηκε στα παρακάτω στάδια:

1. Μελέτη των κατασκευαστικών σχεδίων έτσι ώστε να καταστεί απόλυτα σαφής η διάταξη της μεταλλικής κατασκευής του σκάφους. (Στο στάδιο αυτό βοήθησε και ο υπολογισμός του βάρους της μεταλλικής κατασκευής που περιγράφηκε προηγουμένως.)
2. Χρήση του σχεδιαστικού περιβάλλοντος *SD2H* (superdraw II), για την ανάπτυξη του μοντέλου. (Πρόκειται για ένα σύστημα *CAD* με ειδικές δυνατότητες που χρησιμεύουν στην κατασκευή μοντέλου που προορίζεται για ανάλυση με τη ΜΠΣ.)
3. Χρήση του προγράμματος *BEDITH* (beam design editor) και του *SD2H* που επιτρέπει τη μοντελοποίηση ενισχυτικών.
4. Χρήση των αποκωδικοποιητών (decoders) και των επεξεργαστών *SSAP0H* (στατική ανάλυση) και *SSAP9H* (υπολογισμός βάρους του μοντέλου).
5. Απεικόνιση (γραφική αναπαράσταση) των αποτελεσμάτων με το πρόγραμμα *SVIEWH* (superview).

Περισσότερες πληροφορίες για τα προγράμματα αυτά δίνονται στο Παράρτημα Γ, στα εγχειρίδια του προγράμματος καθώς επίσης και το διατιθέμενο *on line help*.

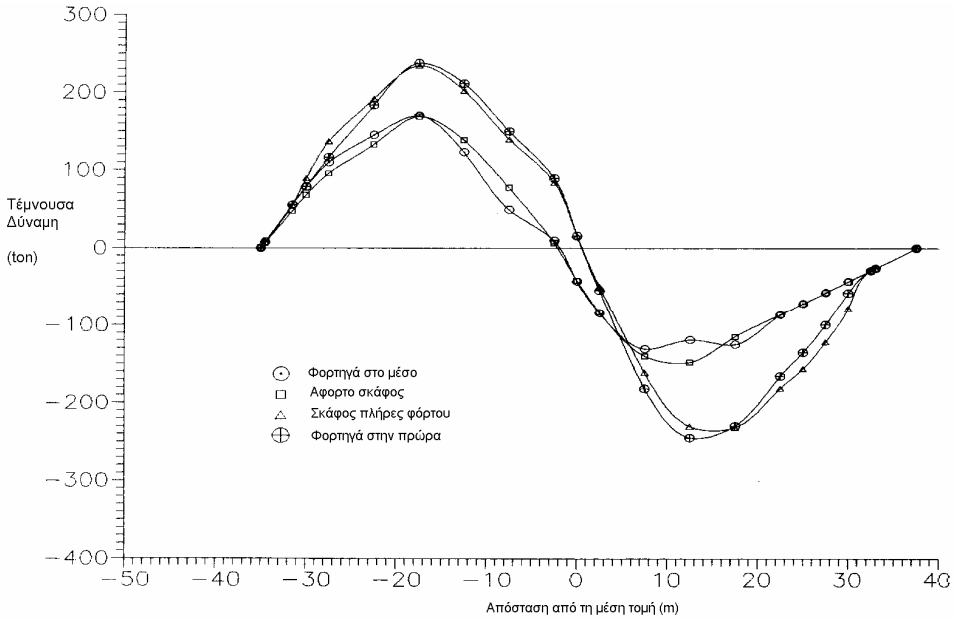
3.2 Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων ανάλυσης μεγάλων μεταλλικών κατασκευών με προγράμματα ΜΠΣ

Σημαντικό ρόλο στην ανάλυση ενός προβλήματος με τη ΜΠΣ κατέχουν:

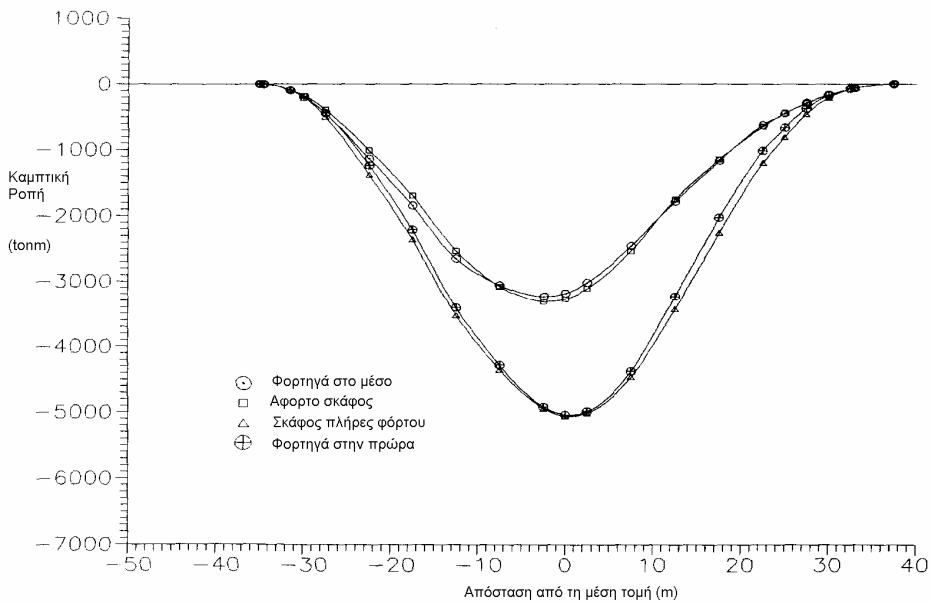
1. Ο χρόνος επεξεργασίας
2. Η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς
3. Ο απαιτούμενος αποθηκευτικός χώρος στο σκληρό δίσκο του Η/Υ

Με τις σημερινές δυνατότητες των προσωπικών Η/Υ οι χρόνοι που απαιτούνται είναι πολύ λογικοί. Για μία κατασκευή μεγάλου εμπορικού πλοίου με 100.000 βαθμούς ελευθερίας είναι θέμα λεπτών η πλήρης επίλυση του προβλήματος.

Τα τρία μεγέθη που αναφέρθηκαν είναι δύσκολο να εκτιμηθούν στα αρχικά στάδια της μελέτης εφόσον εξαρτώνται το ένα από το άλλο, ενώ επηρεάζονται και από τη μέθοδο επίλυσης του συστήματος των εξισώσεων μητρικής ισορροπίας



(α) Τέμνουσα δύναμη



(β) Καμπτική ροπή

Σχήμα 1 Φορτίσεις της κατασκευής στην κορυφή ψευδο-στατικού κύματος

($KU = F$). Τέλος εξαρτώνται και από τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας του μοντέλου, ο οποίος επίσης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί στα αρχικά στάδια.

Εκείνο λοιπόν που προσπαθεί ο χρήστης να επιτύχει είναι να περιορισθεί ο αριθμός των κόμβων του πλέγματος, χωρίς απώλειες ακρίβειας. Στο σημείο αυτό αξίζει να τονισθεί ότι ένα ισχυρό πλεονέκτημα του προγράμματος είναι η χρήση του σκληρού δίσκου ως *εικονική μνήμη* (*virtual memory*), όταν δεν επαρκεί η διαθέσιμη μνήμη επεξεργαστή (*RAM*) για την αποθήκευση των ενδιάμεσων αριθμητικών αποτελεσμάτων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το μέγεθος του μοντέλου περιορίζεται μόνο από το διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο στο δίσκο. Βέβαια το κόστος είναι μια μείωση της ταχύτητας επεξεργασίας της τάξης του 1/15.

Επειδή η διατομή του πλοίου που εξετάζεται είναι συμμετρική ως προς το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο, μπορεί να ληφθεί αυτό υπόψη (Κεφάλαιο 8). Στην παρούσα περίπτωση εξετάστηκαν καταστάσεις φόρτισης επίσης συμμετρικές ως προς το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο. Έτσι διακριτοποιήθηκε το μισό σκάφος με τη χρήση των κατάλληλων συνοριακών συνθηκών.

Στο μοντέλο που αναπτύχθηκε επιβλήθηκαν:

1. Υδροστατικές φορτίσεις (λόγω του θαλάσσιου περιβάλλοντος και των μεταφερόμενων υγρών στο εσωτερικό του σκάφους),
2. Όλα τα μεταφερόμενα βάρη,
3. Το ίδιο βάρος της μεταλλικής κατασκευής (αυτόματος υπολογισμός του προγράμματος).

Κατά τη διακριτοποίηση της μεταλλικής κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι στοιχείων. Για την προσομοίωση των ελασμάτων χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία ελάσματα-κελύφη (*plate/shell elements*) όπου υπάρχουν ελάσματα (γάστρα, κατάστρωμα, υπερκατασκευές) ενώ για την προσομοίωση των ενισχυτικών χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία-δοκοί (*beam elements*).

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει 8.450 κόμβους, 9.268 στοιχεία ελάσματα-κελύφη και 8.942 στοιχεία-δοκούς. Χρειάστηκαν 206 MB ελεύθερα στο σκληρό δίσκο για προσωρινή φύλαξη αποτελεσμάτων σε κάθε τρέξιμο, ενώ τα αρχεία των αποτελεσμάτων κάθε μοντέλου μαζί με τα αρχεία εισόδου που υπάρχουν μόνιμα στο δίσκο μετά από κάθε τρέξιμο καταλαμβάνουν 42,5 MB.

3.3 Διακριτοποίηση της κατασκευής με το πρόγραμμα *ALGOR*

Στο εδάφιο αυτό θα δοθούν λεπτομερείς πληροφορίες για τη χρήση των υποπρογραμμάτων του *ALGOR* κατά την ανάπτυξη του διακριτού μοντέλου της μεταλλικής κατασκευής στο σύνολό της. Ακολουθήθηκε η παρακάτω σειρά διακριτοποίησης των διαφόρων τμημάτων της κατασκευής:

1. Γάστρα
2. Κατάστρωμα αντοχής
3. Διάδρομος επιβατών
4. Διαμήκεις και εγκάρσιες φρακτές

5. Υπερκατασκευές
6. Ενισχυτικά σε όλη την κατασκευή

Η γάστρα, η οποία αποτέλεσε και την περιοχή εκκίνησης της μελέτης, είναι μια τρισδιάστατη επιφάνεια που ορίζεται από τις ναυπηγικές γραμμές του σκάφους. Αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί το εξής τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς:

1. Ο άξονας Ox να συμπίπτει με την βασική γραμμή αναφοράς (baseline) του σκάφους με φορά από την πρύμνη προς την πλώρη.
2. Ο άξονας Oz να έχει κατακόρυφη κατεύθυνση με φορά από κάτω προς τα πάνω.
3. Ο άξονας Oy να έχει τέτοια κατεύθυνση που να σχηματίζει δεξιόστροφο, ορθογώνιο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων με τους άλλους δύο.

Είναι προφανές ότι αφενός μεν το επίπεδο Oxz συμπίπτει με το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας, αφετέρου δε ότι ο άξονας Oy είναι κάθετος σε αυτό. Η αρχή του συστήματος αναφοράς κείται στον άξονα Ox στο σημείο τομής του με την πρυμναία κάθετο του σκάφους.

Κατά την ανάπτυξη του μοντέλου και τη χρήση του προγράμματος *SD2H* διατηρήθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης ενεργοποιημένοι οι διακόπτες *f4|snap:point* και *f3|inp:keyboards+cartesian*. Ο πρώτος διευκολύνει την τοποθέτηση του *mouse* ακριβώς επάνω στο πλησιέστερο ορισμένο σημείο από την τρέχουσα θέση, ενώ ο δεύτερος επιτρέπει την εισαγωγή των καρτεσιανών συντεταγμένων ενός σημείου από το πληκτρολόγιο. Οι κατάλληλες εντολές επιτρέπουν τον οπτικό έλεγχο του μοντέλου από οκτώ (8) προκαθορισμένες όψεις (*views*) ή ακόμα και να ορισθεί κάποια πρόσθετη όψη. Μπορεί επίσης να περιστραφεί (*rotate*) το μοντέλο, ή να γίνει εστίαση (*zoom*) (μεγέθυνση ή σμίκρυνση) σε κάποια περιοχή που ενδιαφέρει. Χρήσιμη είναι και η εντολή *enclose* που εμφανίζει ολόκληρο το μοντέλο στην οθόνη.

Επειδή η ανάλυση με τη ΜΠΣ «αντιλαμβάνεται» μόνο ευθύγραμμα τμήματα τα οποία ορίζουν τα στοιχεία (ακόμα και αν χρησιμοποιηθούν καμπύλες κατά το σχεδιασμό θα προσεγγισθούν από ευθύγραμμα τμήματα στην ανάλυση) δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθούν καμπύλες π.χ. τύπου *spline* κατά το σχεδιασμό (στην παρούσα περίπτωση η γεωμετρία του σκάφους είναι σχετικά απλή και προσεγγίζεται επαρκώς από ευθύγραμμα τμήματα). Έτσι οι μόνες γεωμετρικές οντότητες που χρησιμοποιήθηκαν κατά το σχεδιασμό ήσαν ευθύγραμμα τμήματα. Σημειώνεται ότι ο σχεδιασμός θα μπορούσε να γίνει και στο πρόγραμμα *AUTOCAD* αφού το πρόγραμμα *SD2H* μπορεί να συνεργασθεί και με αρχεία τύπου *dxf*. Ο σχεδιασμός ευθύγραμμων τμημάτων γίνεται από το *menu add:line* με τον ορισμό των δύο άκρων τους είτε από το *mouse* είτε από το πληκτρολόγιο. Υπάρχει και η δυνατότητα χρήσης *polyline*.

Με αυτό τον τρόπο ορίσθηκαν κατ' αρχή οι νομείς του σκάφους, εισάγοντας τις συντεταγμένες του κάθε νομέα μέσω του πληκτρολογίου (όλες οι συντεταγμένες σε μέτρα από την αρχή του συστήματος αναφοράς). Συγκεκριμένα σχεδιάστηκαν οι νομείς στις θέσεις -2, 1, 2,5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 57,5, 60,0 62,5 65,0 65,5 67,5 70 (μέτρα από την πρυμναία κάθετο). Έπειτα σχεδιάστηκαν οι δύο μεγάλες ακμές που εκτείνονται σε όλο το μήκος του σκάφους και η ίσαλος του κυρίου καταστρώματος, τις καμπύλες που ενώνουν τα σημεία του δρύφακτου (παραπέτου) και

τα σημεία στο ύψος του διαδρόμου επιβατών από νομέα σε νομέα. Εξασφαλίστηκε έτσι ότι επιτεύχθηκε με ακρίβεια η περιγραφή της γεωμετρίας της γάστρας αφού κάθε ακμή της αποτελεί υπαρκτή γραμμή του σχεδίου. Πρέπει να τονισθεί ότι τα σημεία τομής δύο γραμμών στο χώρο πρέπει να ορίζονται κατά το σχεδιασμό, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως σημεία αναφοράς κατά την κατασκευή του πλέγματος μεταξύ κλειστών καμπυλών στο χώρο, που ορίζονται μόνο αν υπάρχουν τα σημεία τομής στο περίγραμμά τους.

3.4 Ανάπτυξη πλέγματος με το *ALGOR*. Γενικές παρατηρήσεις.

Το *SD2H* παρέχει διάφορους τρόπους για την κατασκευή του πλέγματος που ορίζει τα όρια των στοιχείων-ελασμάτων. Το πλέγμα μπορεί να ορισθεί μεταξύ τριών σημείων (τριγωνικά στοιχεία), μεταξύ τεσσάρων σημείων, μεταξύ οκτώ σημείων, μεταξύ δύο αντικειμένων και μεταξύ ενός αντικειμένου και δύο σημείων. Ευκολότερος είναι ο ορισμός του πλέγματος μεταξύ τριών ή τεσσάρων σημείων. Υπάρχει η δυνατότητα ορισμού της ισαπόστασης μεταξύ των κόμβων του πλέγματος κατά τις δύο διαστάσεις στις οποίες αυτό απλώνεται (ορίζονται δηλαδή έμμεσα το πλάτος και το μήκος του στοιχείου). Επίσης η ισαπόσταση μπορεί να μεταβάλλεται κατά αριθμητική ή κατά γεωμετρική πρόοδο. Η κατασκευή πλέγματος γίνεται από το *menu construct/mesh*.

Κατά τη δημιουργία του πλέγματος για τον ορισμό των πεπερασμένων στοιχείων ελήφθησαν υπόψη τα εξής:

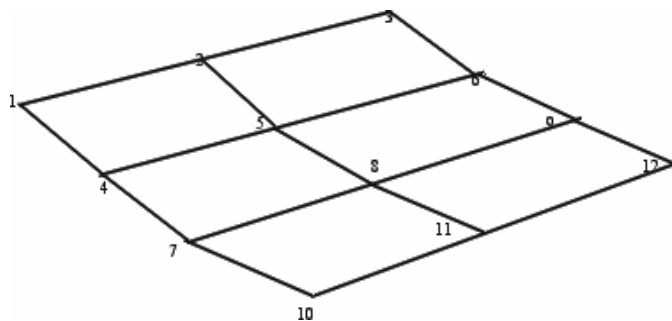
- Σε περιοχές όπου επιδιώκεται μεγάλη ακρίβεια ή εκεί που υπάρχουν ασυνέχειες θα πρέπει το πλέγμα να είναι πυκνότερο ενώ σε περιοχές όπου δεν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια γίνεται χρήση αραιότερου πλέγματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάστηκε να τροποποιηθεί το πλέγμα για να ορισθούν κόμβοι στην ακριβή θέση επιβολής ορισμένων φορτίων. Συνήθως σε περιοχές συγκεντρωμένων φορτίων απαιτείται πύκνωση του πλέγματος για να γίνει ακριβής προσέγγιση του τοπικού πεδίου των τάσεων. Η διαδικασία αυτή όμως δεν ακολουθήθηκε στην παρούσα περίπτωση στο βαθμό που θα μπορούσε να γίνει, διότι αυτό είναι πέραν της μελέτης της ολικής απόκρισης του πλοίου, που συνιστά και το στόχο της μελέτης αυτής. Τέτοιου είδους αναλύσεις μπορούν να γίνουν σε μεταγενέστερο στάδιο (τοπική απόκριση).
- Το πλέγμα πρέπει εξ' αρχής να σχεδιασθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν κόμβοι σε όλα τα σημεία που υπάρχουν ενισχυτικά στο σκάφος. Αυτό αφενός μεν διευκολύνει την εισαγωγή των ενισχυτικών στο μοντέλο, αφετέρου δε συμβάλλει στη σωστή συνεργασία ενισχυτικού-ελάσματος. Αυτή ακριβώς η απαίτηση χρειάστηκε περισσότερο χρόνο κατά την κατασκευή του πλέγματος (κυρίως στη γάστρα) επειδή τα ενισχυτικά δεν έχουν σταθερή ισαπόσταση στις περισσότερες περιοχές του σκάφους, ούτε υπάρχει μεταβολή κατ' αριθμητική ή γεωμετρική πρόοδο. Επιπλέον, ο αριθμός των ενισχυτικών δεν είναι σταθερός κατά μήκος του σκάφους. Έτσι χρειάστηκε ένα μεγάλο μέρος του πλέγματος να σχεδιασθεί με το *mouse* σε στάδια, αφού προηγήθηκε σε κάθε περίπτωση ο προσδιορισμός των θέσεων των κόμβων στο χώρο.

- Σε περιοχές όπου απαιτείται μετάβαση από μικρότερα σε μεγαλύτερα στοιχεία, η μετάβαση πρέπει να γίνεται σταδιακά κάνοντας χρήση τριγωνικών στοιχείων (Κεφάλαιο 7).
- Τριγωνικά στοιχεία θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιούνται για την καλύτερη προσέγγιση περιοχών με πολύπλοκη γεωμετρία, όπως για παράδειγμα το περίγραμμα του καταστρώματος στη σύνδεσή του με τη γάστρα του σκάφους.
- Επειδή το πρόγραμμα κάνει χρήση στοιχείων με τρεις ή τέσσερις κόμβους δεν θα πρέπει να υπάρχουν στοιχεία (ελάσματα-κελύφη) με περισσότερους κόμβους γιατί θα γίνει λάθος κατά την αποκωδικοποίηση του σχεδίου, με συνέπεια τη δημιουργία λάθους στο αρχείο εισόδου για την τελική ανάλυση με τη ΜΠΣ.
- Τα στοιχεία δεν θα πρέπει να παρουσιάζουν εσοχές και μεγάλες αμβλείες ή μικρές οξείες γωνίες, στα πλαίσια βέβαια του δυνατού. Επίσης, ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη *διάμετρο* του κάθε στοιχείου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατό πλησιέστερος στη μονάδα. (Με τον όρο *διάμετρο* εννοείται η απόσταση μεταξύ των κορυφών).
- Θα πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα τόσο κατά την αυτόματη όσο και με τη χρήση του *mouse* δημιουργία του πλέγματος, η από λάθος σύνδεση δύο κόμβων του μοντέλου. Αυτό το λάθος είναι εύκολο να γίνει, ειδικά σε ένα πολύπλοκο τρισδιάστατο μοντέλο. Τέτοια σφάλματα οδηγούν στη δημιουργία ανύπαρκτων στοιχείων ή/και στην απώλεια υπαρκτών. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3 έστω ότι θέλουμε να ενώσουμε τους κόμβους 2 και 8 και ενώνουμε κατά λάθος τους 2 και 11. Τότε προφανώς θα χαθεί το τριγωνικό στοιχείο 2-5-8 θα αντικατασταθεί από το ανύπαρκτο στοιχείο 2-5-8-11. Για το λόγο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και έλεγχος με ισχυρή μεγέθυνση σε τέτοιες περιπτώσεις.
- Τέλος ο χρήστης θα πρέπει να λάβει υπόψη ότι κατά την αυτόματη δημιουργία του πλέγματος με την εντολή *construct\mesh* κατασκευάζονται διπλές γραμμές που πρέπει να μετατρέπονται σε απλές με χρήση της εντολής *construct\clean:duplicates*. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στις οδηγίες χρήσης του προγράμματος.

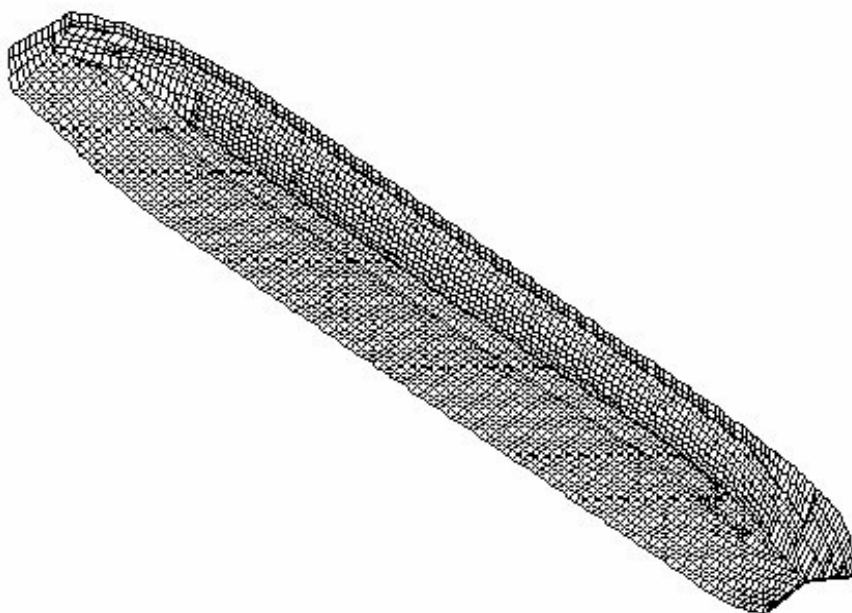
Με βάση λοιπόν αυτές τις γενικές κατευθύνσεις αναπτύχθηκε το πλέγμα για όλα τα τμήματα της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

Ακολουθεί παρουσίαση της εργασίας αυτής για κάθε τμήμα της κατασκευής ακολουθώντας τη σειρά που αναφέρθηκε στο εδάφιο 3.3.

3.4.1 Ανάπτυξη του πλέγματος της γάστρας



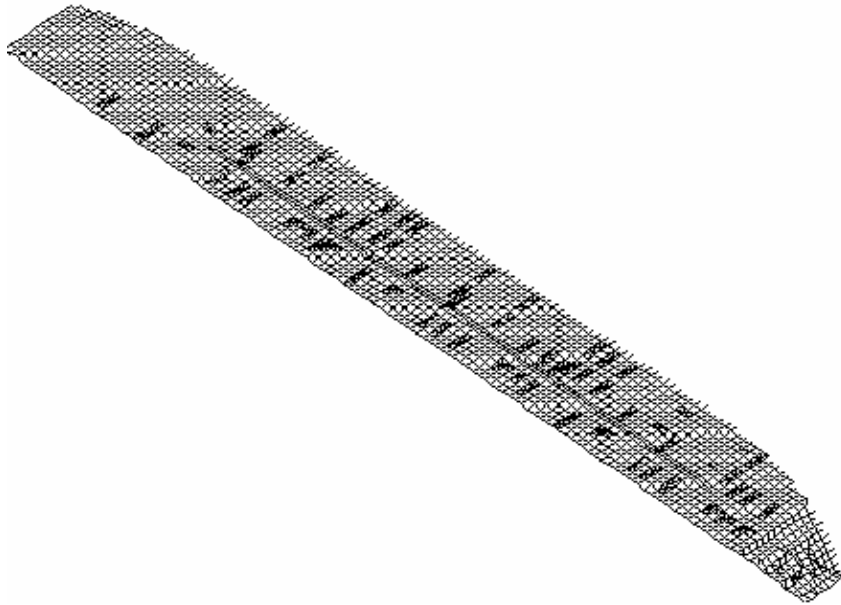
Σχήμα 2 Αρίθμηση κόμβων στα άκρα στοιχείων ελασμάτων



Σχήμα 3 Ισομετρική όψη του πλέγματος της γάστρας

Στην ανάπτυξη του πλέγματος της γάστρας συνέβαλε ο σχεδιασμός των ναυπηγικών γραμμών που είχε προηγηθεί. Μεγάλο μέρος αυτού του πλέγματος δεν ήταν δυνατό να κατασκευαστεί αυτόματα ικανοποιώντας ταυτόχρονα την απαίτηση για ύπαρξη κόμβων στις ακριβείς θέσεις των ενισχυτικών, όπως αυτές προκύπτουν από τα κατασκευαστικά σχέδια του σκάφους. Στη δυσκολία ανάπτυξής του συνέβαλλε επίσης και η τρισδιάστατη μορφή της γάστρας. Στην τελική του μορφή το πλέγμα περιλαμβάνει όλους τους κατασκευαστικούς νομείς του σκάφους (145 συνολικά). Αποκτιέται έτσι μια επαρκώς λεπτομερής αναπαράσταση της επιφάνειας της γάστρας. Στο Σχήμα 3 δείχνεται σε ισομετρική όψη το πλέγμα της γάστρας στην τελική του μορφή, κατάλληλα διαμορφωμένο για να συνδεθεί με τα άλλα τμήματα του μοντέλου (κατάστρωμα, φρακτές, κλπ).

3.4.2 Ανάπτυξη του πλέγματος του καταστρώματος αντοχής



Σχήμα 4 Ισομετρική όψη του πλέγματος του καταστρώματος αντοχής

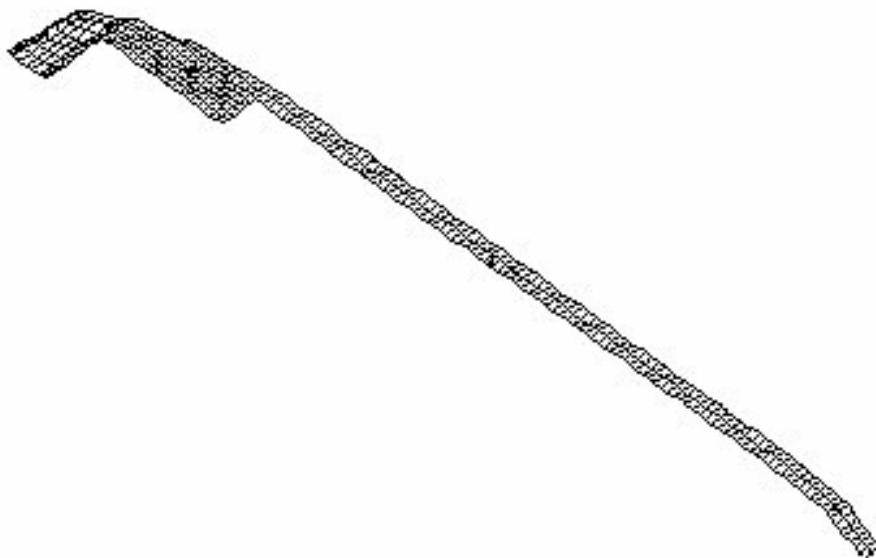
Αφού ολοκληρώθηκε η ανάπτυξη του πλέγματος της γάστρας ακολούθησε αυτή του καταστρώματος αντοχής. Η κυρτότητα του καταστρώματος (περίπου 80 mm στη μέση τομή) οδηγεί και σε αυτή την περίπτωση στην ανάγκη ανάπτυξης τρισδιάστατου πλέγματος.

Στο επόμενο στάδιο, το κατάστρωμα θεωρήθηκε ως μία δεύτερη στρώση της κατασκευής. Η αλλαγή στρώσης (*layer*) επιτυγχάνεται από το μενού *current*. Το βασικό πλεονέκτημα της διακριτοποίησης κατά τμήματα είναι ότι με το διακόπτη *switch\onelayer* μπορεί ο χρήστης να έχει οπτική επαφή μόνο με το τρέχον τμήμα του μοντέλου, απαλλασσόμενος έτσι από τις περιττές γραμμές.

Μία δεύτερη αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά το σχεδιασμό της σύνδεσης γάστρας-καταστρώματος, για την αποφυγή ορισμού λανθασμένων στοιχείων, τα οποία δεν έχουν καμία σχέση με το μοντέλο.

Τέλος πρέπει να ειπωθεί ότι χρειάστηκε πυκνωση του πλέγματος του καταστρώματος στα σημεία που ασκούνται τα βάρη των φορτηγών που μεταφέρει το σκάφος, εφόσον είναι αδύνατο όλα αυτά τα σημεία να συμπέσουν με θέσεις νομέων (που έχουν φυσικά ισαπόσταση 500 mm όπως και στη γάστρα). Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται το πλέγμα του καταστρώματος στην τελική του μορφή.

3.4.3 Ανάπτυξη πλέγματος διαδρόμου επιβατών



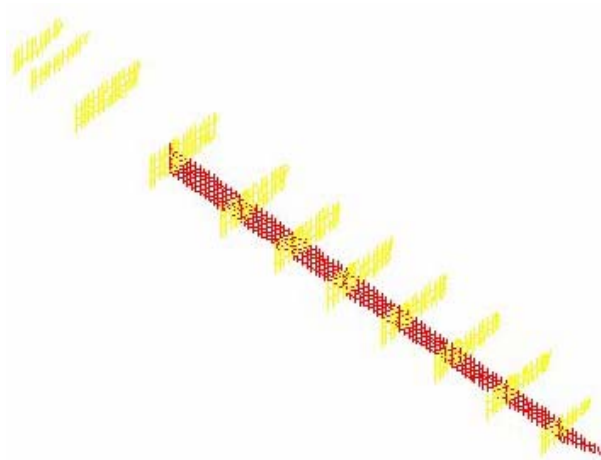
Σχήμα 5 Ισομετρική όψη του πλέγματος του διαδρόμου επιβατών

Το επόμενο τμήμα της μεταλλικής κατασκευής που διακριτοποιήθηκε ήταν ο διάδρομος των επιβατών, που αποτέλεσε επίσης ξεχωριστή στρώση (*layer*). Πρόκειται για ένα διδιάστατο πλέγμα όπως φαίνεται και από τα κατασκευαστικά σχέδια. Στο μοντέλο ελήφθησαν υπόψη και τα συνδεδεμένα μπρακέτα, επειδή προσφέρουν ουσιαστική στήριξη. Στο Σχήμα 5 δείχνεται το αντίστοιχο πλέγμα.

3.4.4 Ανάπτυξη πλεγμάτων των εγκάρσιων και διαμήκων φρακτών

Η επόμενη περιοχή του πλοίου που μοντελοποιήθηκε ήταν αυτή των φρακτών. Η ανάπτυξή τους παρουσίασε συγκεκριμένες δυσκολίες, επειδή το πλέγμα θα πρέπει να έχει τέτοια μορφή ώστε να μπορούν να προστεθούν αφενός μεν τα ενισχυτικά των φρακτών αφετέρου δε να ενωθεί η γάστρα με το κατάστρωμα με τέτοιο τρόπο ώστε να μην δημιουργηθούν κενά στο επίπεδο των φρακτών από εσφαλμένη σύνδεση φρακτής, καταστρώματος και γάστρας. Καταρχήν σχεδιάστηκε η διαμήκης φρακτή που εκτείνεται από την προωαία φρακτή του μηχανοστασίου προς την προωαία κατεύθυνση, σε όλο το μήκος του πλοίου.

Σε συνέχεια οι εγκάρσιες φρακτές έπρεπε να ενωθούν με τη διαμήκη φρακτή σε κατάλληλους κόμβους. Στην οθόνη ήταν ορατά το πλέγμα του καταστρώματος και της γάστρας (για την ένωση των κατάλληλων κόμβων με τις φρακτές) και το πλέγμα της διαμήκου φρακτής. Αυτό έκανε το σχεδιασμό επίπονο διότι οι λεπτομέρειες σύνδεσης στην οθόνη ήσαν δυσδιάκριτες. Απαιτήθηκε μεγέθυνση κατά την πρόσθεση κάθε γραμμής του πλέγματος των φρακτών για να ενωθούν οι σωστοί κόμβοι. Είναι αυτονόητο ότι δεν ήταν εφικτή η χρήση αυτόματης δημιουργίας πλέγματος. Έτσι οι

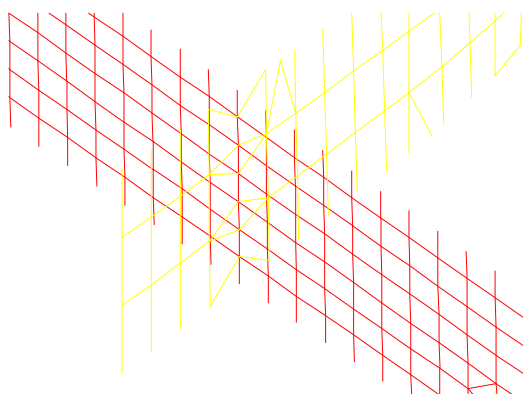


Σχήμα 6 Ισομετρική όψη του πλέγματος εγκάρσιων-διαμήκων φρακτών

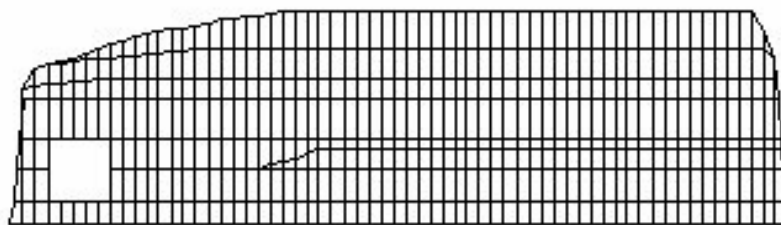
φρακτές σχεδιάστηκαν σταδιακά με το *mouse*. Η διάταξη των φρακτών σε διακριτοποιημένη μορφή περιλαμβάνεται στο Σχήμα 6.

3.4.5 Ανάπτυξη πλέγματος των υπερκατασκευών

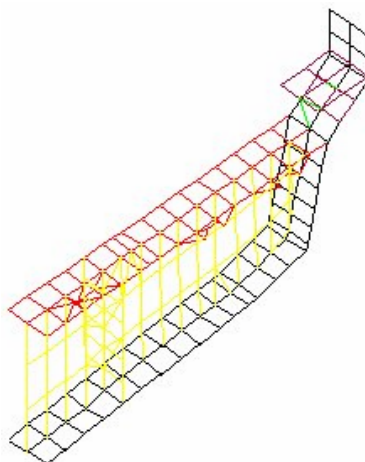
Οι υπερκατασκευές του πλοίου σχεδιάστηκαν σε νέο αρχείο εντελώς αυτόνομα από το υπόλοιπο μοντέλο. Αρχικά σχεδιάστηκαν τα τρία καταστρώματα των υπερκατασκευών (Saloon Deck, Bridge Deck, Fly Deck), στο καθένα από τα οποία δόθηκε ξεχωριστός αριθμός στρώσης (*layer number*). Έπειτα σχεδιάστηκαν τα τοιχώματα μεταξύ των καταστρωμάτων στα οποία στεγάζονται οι χώροι των επιβατών και η γέφυρα. Το σύνολο των υπερκατασκευών συνιστά μια τρισδιάστατη κατασκευή, η οποία όμως αποτελείται από διδιάστατες επιφάνειες (καταστρώματα και πλευρικές επιφάνειες).



Σχήμα 7 Σύνδεση διαμήκους με εγκάρσια φρακτή



Σχήμα 8 Κάτοψη πλέγματος του Saloon Deck

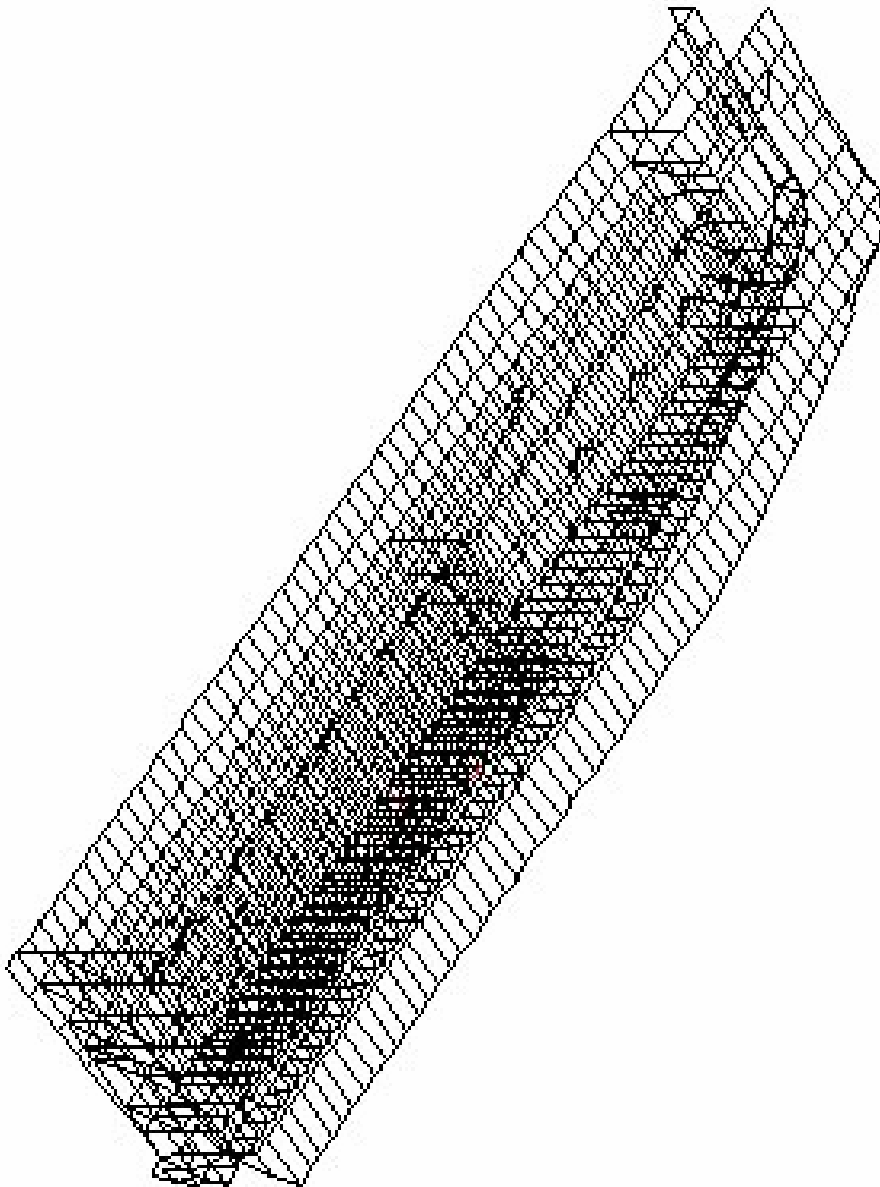


Σχήμα 9 Ισομετρική όψη αντιπροσωπευτικού τμήματος της κατασκευής (εκατέρωθεν εγκάρσιας φρακτής)

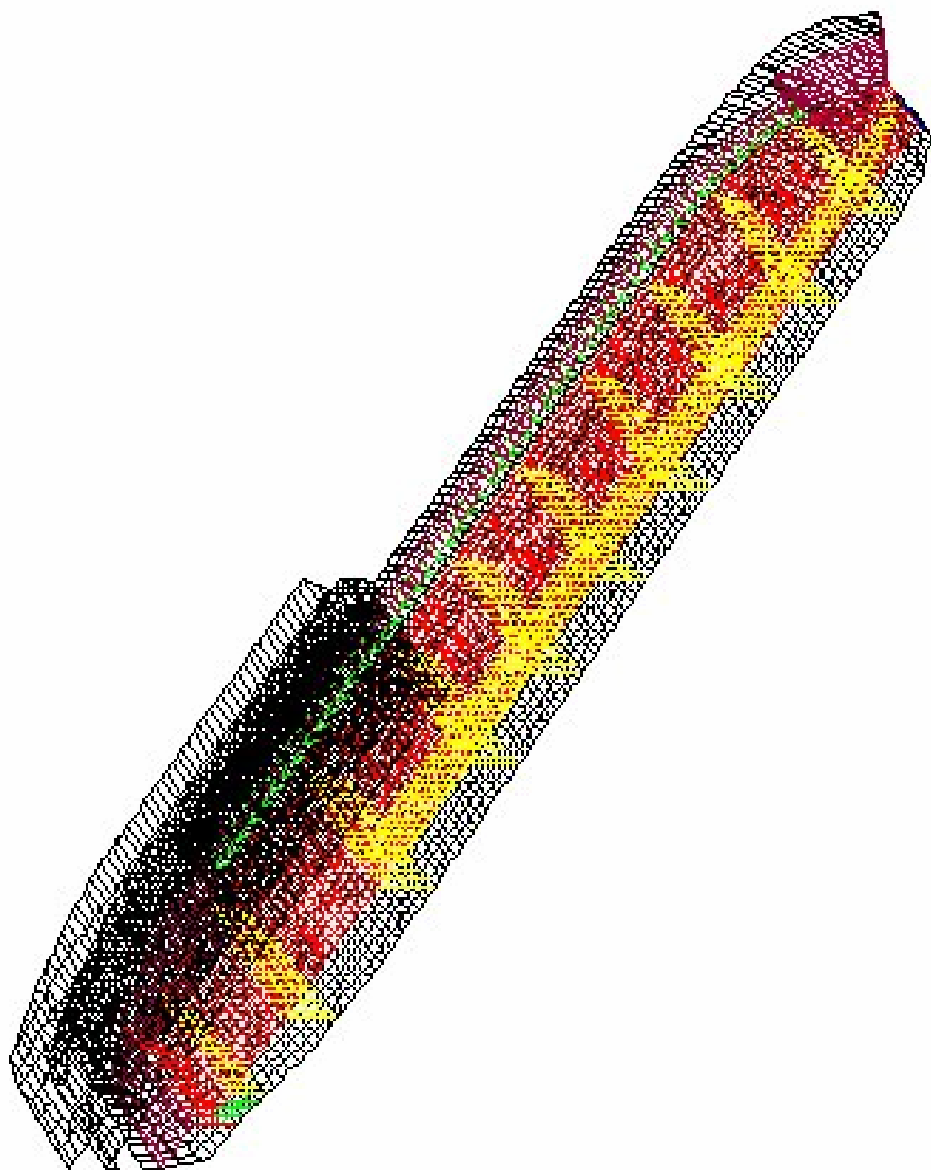
Μετά την αποπεράτωση του σχεδιασμού τα δύο αρχεία ενώθηκαν (κυρίως σκάφος και υπερκατασκευές) με χρήση της εντολής *merge* και σχεδιάστηκε η στήριξη των υπερκατασκευών στο κυρίως σκάφος. Τέλος σχεδιάστηκε και η αποθήκη που βρίσκεται στην πλώρα του σκάφους. Ο καταπέλτης δεν μοντελοποιήθηκε αφού δεν συμβάλλει στη διαμήκη αντοχή του σκάφους. Ενδεικτικά δίνεται η διάταξη του πλέγματος του Saloon Deck (Σχήμα 8).

Στο Σχήμα 10 διακρίνονται η πρωραία αποθήκη, η γάστρα, οι φρακτές, τμήμα του διαδρόμου των επιβατών και το κατάστρωμα αντοχής.

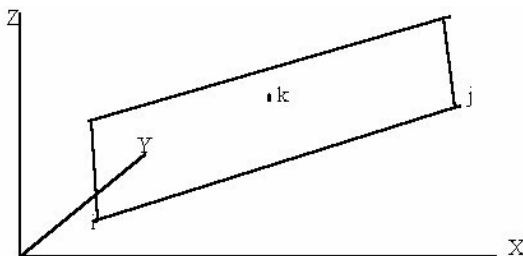
Αφού ολοκληρώθηκε η ανάπτυξη του πλέγματος που ορίζει τα στοιχεία ελάσματα-κελύφη που αντιστοιχούν στα ελάσματα του σκάφους, πρέπει να εισαχθούν στους κατάλληλους κόμβους και οι ενισχύσεις της μεταλλικής κατασκευής. Τα ενισχυτικά εν γένει σχεδιάζονται στο περιβάλλον *SD2H* και κατά το σχεδιασμό τους ακολουθούνται από το *ALGOR* οι εξής συμβάσεις:



Σχήμα 10 Ισομετρική όψη πλέγματος υπερκατασκευών και ελάσματος μεταξύ του παραπέτου και των υπερκατασκευών



Σχήμα 11 Ισομετρική όψη ολόκληρου του πλέγματος του σκάφους



Σχήμα 12 Προσανατολισμός στοιχείου

- Ο αριθμός στρώσης (*layer number*) ορίζει μια ομάδα ενισχυτικών με ίδιες γεωμετρικές ιδιότητες διατομής.
- Ο αριθμός ομάδας (*group number*) ορίζει μια ομάδα ενισχυτικών κατασκευασμένων από το ίδιο υλικό.
- Ο αριθμός χρώματος (*color number*) ορίζει μια ομάδα ενισχυτικών που έχουν ίδιο προσανατολισμό διατομής στο χώρο.
- Κάθε ευθύγραμμο τμήμα που σχεδιάζεται στο *SD2H* αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο-δοκό.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση όλα τα ενισχυτικά είναι χαλύβδινα, οπότε απαιτείται μόνο ένα *group number*. Το χρώμα των ενισχυτικών που χρησιμοποιείται κάθε φορά είναι αντίστοιχο του προσανατολισμού της διατομής. Ο προσανατολισμός της διατομής επιτυγχάνεται με τον ορισμό ενός επιπλέον κόμβου *k*, που μαζί με τους κόμβους *i*, *j* των άκρων του ενισχυτικού ορίζουν το επίπεδο στο οποίο κείται ο (τοπικός) άξονας 2 της διατομής (Σχήμα 12)¹. Ο άξονας 2 είναι προφανώς κάθετος στον άξονα 1 (1 είναι ο άξονας που έχει τη διεύθυνση *i-j*), οπότε ορίζεται πλήρως η θέση του στο χώρο. Τέλος ο άξονας 3 έχει τέτοια κατεύθυνση που σχηματίζει με τους άλλους δύο ένα δεξιόστροφο, τρισορθογώνιο σύστημα καρτεσιανών συντεταγμένων.

Όταν χρησιμοποιείται για παράδειγμα κόκκινο χρώμα για τον προσανατολισμό των ενισχυτικών το πρόγραμμα εγκαθιστά στη θέση του κόμβου *k* ένα σημείο σε απόσταση $0,1 \cdot 10^{40}$, δίνει δηλαδή μία πολύ μεγάλη θετική τιμή στη συντεταγμένη *Z* προσανατολίζοντας έτσι κατάλληλα το διάμηκες επίπεδο της διατομής και κατά συνέπεια το τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε φορά². Παρέχεται επίσης η δυνατότητα ορισμού του κόμβου *k* με απευθείας εισαγωγή των συντεταγμένων του.

Οι γεωμετρικές ιδιότητες των ενισχυτικών που απαιτούνται για τον ορισμό της διατομής εισάγονται στο πρόγραμμα *BEDITH* από το μενού *Add/Mod:sectional*. Η εισαγωγή γίνεται κατά αριθμό στρώσης. Στο πρόγραμμα αυτό ορίζεται επίσης και το υλικό των ενισχυτικών από το μενού *Add/mod:property*.

¹ Κεφάλαιο 7, εδάφιο 4.4

² Κεφάλαιο 7 εδάφιο 4.4

Μετά την αποπεράτωση του σχεδιασμού των ενισχυτικών στους κόμβους του πλέγματος όπου υπάρχουν ενισχυτικά, αφαιρούνται όσες γραμμές δεν αντιστοιχούν σε ενισχυτικά και είναι πλέον έτοιμο το σχέδιο των ενισχυτικών. Στη συνέχεια μεταφερόμαστε στο περιβάλλον *BEDITH* μέσω του μενού *transfer* του *SD2H*, προκειμένου να ορισθούν όλες οι απαραίτητες ιδιότητες των ενισχυτικών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτή η διαδικασία, λόγω του μεγάλου αριθμού των στοιχείων δοκών που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε κατά ομάδες που διευκόλυναν και το σχεδιασμό, και την εισαγωγή των ιδιοτήτων, αλλά και τον έλεγχο που ακολούθησε για την ορθότητα των δεδομένων.

3.4.7 Ιδιότητες των ενισχυτικών

Για όλες τις διατομές των ενισχυτικών το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας. Οι συνήθεις τιμές των ιδιοτήτων του είναι:

Μέτρο ελαστικότητας	N/m ²	0,207x10 ¹²
Λόγος Poisson		0,3
Ειδικό βάρος	N/m ³	78480,0

Οι γεωμετρικές ιδιότητες που υπολογίστηκαν για όλες τις διατομές των ενισχυτικών ήσαν το εμβαδόν της εγκάρσιας διατομής (A), η στρεπτική ακαμψία της διατομής (J_1) και οι ροπές αδράνειας της διατομής ως προς τους άξονες του τοπικού συστήματος αναφοράς (I_2, I_3, I_{23}). Για μη-συμπαγείς κυκλικές διατομές η στρεπτική ακαμψία συμπίπτει με την πολική ροπή αδράνειας και δίνεται από τη σχέση:

$$J = \pi (d_1^4 - d_2^4) / 32 \quad (1)$$

όπου d_1, d_2 είναι η εξωτερική και εσωτερική διάμετρος της διατομής αντίστοιχα. Για ανοικτές διατομές η στρεπτική ροπή κατά Saint Venant δίνεται από τη σχέση:

$$T = GJ \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (2)$$

$$\text{όπου } J = 1/3 \sum l_i t_i^3 \quad (3)$$

Στη σχέση (3) l_i και t_i είναι τα μήκη και τα πάχη των ελασμάτων που αποτελούν τη διατομή. Ορισμένα από τα παραπάνω μεγέθη υπολογίστηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος *SD2H*. Για το σκοπό αυτό σχεδιάστηκαν όλες οι διατομές και με την εντολή *inquire:moment* υπολογίστηκαν οι ροπές I_2, I_3 και I_{23} (ως προς το κεντροβαρικό σύστημα αξόνων), το εμβαδόν της κάθε διατομής και η θέση του κέντρου βάρους σε σχέση με την αρχή του συστήματος σχεδιασμού.

Επειδή το κέντρο βάρους της διατομής του ενισχυτικού δεν συμπίπτει με το έλασμα αλλά είναι σε απόσταση Y από αυτό, η συμπεριφορά της κατασκευής διαφέρει από την πραγματική (το ενισχυμένο έλασμα γίνεται λιγότερο άκαμπτο) όταν δεν ληφθεί υπόψη αυτή η μετατόπιση. Για το λόγο αυτό γίνεται χρήση των συντεταγμένων (*offsets*) στο

μοντέλο. Με αυτό τον τρόπο απαιτείται από το πρόγραμμα να θεωρήσει μια άκαμπτη σύνδεση μεταξύ των κόμβων του ελάσματος και των πραγματικών κόμβων (μετατοπισμένων) που βρίσκεται το κέντρο βάρους της διατομής. Η εντολή ενεργοποιείται από το μενού *Add/Mod:offset* και λειτουργεί ανάλογα με τη χρήση άκαμπτων στοιχείων για άκαμπτη σύνδεση κόμβων. Φυσικά το διάνυσμα της μετατόπισης αυτής έχει μέτρο ίσο με την απόσταση του κέντρου βάρους του ενισχυτικού από το έλασμα, και κατεύθυνση προς την πλευρά του ελάσματος που φέρει την ενίσχυση (Κεφάλαιο 7).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω επιτεύχθηκε η εισαγωγή των ενισχύσεων στη διακριτοποιημένη μορφή της μεταλλικής κατασκευής. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο σχεδιασμός των ενισχυτικών έγινε κατά ομάδες, ενεργοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό αριθμό στρώσης για διαφορετικού τύπου διατομές.

Πίνακας 3 Διατομές ενισχυτικών της μεταλλικής κατασκευής
(Ε/Γ-Ο/Γ Κέρκυρα)

<i>a/a</i>	<i>Διαστάσεις (mm)</i>	<i>Παρατηρήσεις</i>
1	L 150x75x10	Γάστρα του πλοίου (πυθμένας και πλευρές) και στο κατάστρωμα. Εκτείνονται σε όλο το μήκος του πλοίου, ενώ ο αριθμός τους μεταβάλλεται. Πρώρα του νομέα 120 χρησιμοποιούνται ως εγκάρσια ενισχυτικά του καταστρώματος.
2	L 90x60x8	Εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές του σκάφους. Στις εγκάρσιες φρακτές έχουν κατακόρυφη διεύθυνση ενώ στις διαμήκεις φρακτές έχουν περίπου οριζόντια διεύθυνση. Δημιουργούν δακτυλίους (γάστρα, κατάστρωμα, φρακτές).
3	L 75x50x6	Κατά μήκος του διαδρόμου των επιβατών. Κάθε πλευρικός διάδρομος έχει ένα τέτοιο ενισχυτικό σε όλο το μήκος του, ενώ πρύμα του νομέα 20 ο αριθμός των ενισχυτικών αυτών αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση του πλάτους του διαδρόμου.
4	T 350x10+200x15	Πυθμένας και κατάστρωμα που προϋπήρχαν της μετασκευής του σκάφους.
5	T 600x12+250x15	Είναι ένα ισχυρό ενισχυτικό που προστέθηκε μετά τη μετασκευή του σκάφους, το οποίο συνδέει το νέο με το παλιό τμήμα της γάστρας και προσφέρει διαμήκη ακαμψία στο νέο.
6	T 350x12+200x15	Πρόκειται για διαμήκεις δοκούς που προστέθηκαν μετά τη μετασκευή, για την περαιτέρω ενίσχυση του καταστρώματος.
7	T 350x10+180x15	Εγκάρσια ενισχυτικά καταστρώματος και πυθμένα του σκάφους, τα οποία αποτελούν μέρος των ενισχυ-

8	T 350x10+200x15	μένων νομέων που υπάρχουν κατά μήκος του πλοίου Κεντρική σταθμίδα του καταστρώματος. Επειδή είναι συμμετρική περί το δ.κ.ε. ³ εισάγεται η μισή διατομή, δηλαδή 350x5+100x15.
9	T 600x10+200x15	Κεντρική σταθμίδα του πυθμένα. Μοντελοποιήθηκε η μισή διατομή, δηλαδή 600x5+100x15.
10	F.B. 300x10	Λάμα που εκτείνεται κατά μήκος του διαδρόμου επιβατών και βρίσκεται στο εσωτερικό άκρο του.
11	T 300x10+150x12	Τέτοια διατομή έχει το ενισχυτικό στην πρυμναία φρακτή μηχανοστασίου και το πλευρικό τμήμα του νομέα 10 στη γάστρα του πλοίου.
12	T 300x10+120x15	Κατακόρυφες ενισχύσεις στις εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές του πλοίου. Για όσες από αυτές συμπίπτουν με το δ.κ.ε. μοντελοποιείται η μισή διατομή, δηλαδή 300x5+60x15.
13	L 100x50x8	Ενισχυτικά σε διάφορα τμήματα της κατασκευής, δηλαδή στο παραπέτο, πλάι στο διάδρομο επιβατών με κατακόρυφη διεύθυνση, στο Saloon Deck σαν εγκάρσια ενισχυτικά του καταστρώματος και στη φρακτή, στο διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας (νομείς 1-5), πάλι σε κατακόρυφη διεύθυνση.
14	T 350x10+250x16	Εγκάρσιες και διαμήκεις δοκοί με τις οποίες ενισχύεται το Saloon Deck. Για τη διαμήκη δοκό που συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας χρησιμοποιούμε τη μισή διατομή, δηλαδή 350x5 +125x16.
15	T 250x8+100x10	Εγκάρσια και διαμήκη ζυγά ενίσχυσης του Bridge Deck. Για το διάμηκες ζυγό που βρίσκεται στο επίπεδο συμμετρίας χρησιμοποιείται η μισή διατομή, δηλαδή 250x4+50x10.
16	T 200x8+100x10	Κατακόρυφα ενισχυτικά φρακτής μεταξύ Saloon Deck και Bridge Deck. Επίσης μερικά διαμήκη ζυγά του Bridge Deck έχουν την ίδια μορφή διατομής.
17	L 90x65x6	Εγκάρσια ενισχυτικά του καταστρώματος γέφυρας (Bridge Deck).
18	L 60x60x6	Ενισχυτικά του Fly Deck και της φρακτής μεταξύ του Bridge Deck και του Fly Deck.
19	T 200x8+80x10	Νομείς του Fly Deck και κεντρική σταθμίδα του καταστρώματος, (μισή διατομή, 200x4+40x10).
20	T 300x10+150x15	Πλευρά των ενισχυμένων νομέων μεταξύ του κύριου καταστρώματος και του πυθμένα.
21	I 250x16+350x10+250x16	Υποστυλώματα στήριξης των υπερκατασκευών στο κύριο κατάστρωμα.
22	φ 120x5	Υποστυλώματα στήριξης κύριου καταστρώματος στον πυθμένα με λεπτότοιχη κυκλική διατομή.
23	φ 3 ίντσες (76,2 mm)	Υποστυλώματα στήριξης που χρησιμοποιούνται μεταξύ των καταστρωμάτων των υπερκατασκευών, με διάμετρο 3 ιντσών. Μερικές από αυτές συμπίπτουν

³ δ.κ.ε. = διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο (centreline plane)

		με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, οπότε χρησιμοποιούμε τη μισή διατομή (δηλαδή ένα ημικόκλιο).
24	ϕ 80x4	Υποστυλώματα στήριξης μεταξύ Saloon Deck και Bridge Deck στα άκρα του πλάτους του πλοίου.
25	F.B 100x10	Απλές λάμες που υπάρχουν στο έλασμα σύνδεσης μεταξύ παραπέτου και υπερκατασκευών.
26	T 300x12+120x15	Κατακόρυφα ενισχυτικά μεταξύ καταστρώματος και διαδρόμου επιβατών στην πρύμνη του σκάφους
27	F.B. 50x6	Απλή λάμα στο τέλος (καθ' ύψος) του παραπέτου που εκτείνεται σε όλο το μήκος του.
28	L 600x32+300x40	Διαμήκη ζυγά στην περιοχή έδρασης της μηχανής.
29	T 600x10+180x15	Εγκάρσια ενισχυτικά στην έδραση της κύριας μηχανής
30	T 400x16+200x20	Εγκάρσια ενισχυτικά στην περιοχή έδρασης της κύριας μηχανής

Ακολουθεί κατάλογος των διατομών που μοντελοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα αναφέρεται ο τύπος της κάθε διατομής και οι περιοχές του πλοίου στις οποίες έχουν προστεθεί ενισχύσεις του συγκεκριμένου τύπου. Επειδή το ύψος του κορμού των εγκαρσίων ενισχυτικών της έδρασης της μηχανής δεν παραμένει σταθερό, θεωρήθηκε το μέσο ύψος, όπως αυτό προκύπτει από τα κατασκευαστικά σχέδια.

3.4.8 Ελάσματα

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ελάσματα του σκάφους μοντελοποιήθηκαν με ισοτροπικά στοιχεία ελάσματα-κελύφη (*type 6 elements*). Δόθηκαν οι τιμές για το

Πίνακας 4 Πάχη ελασμάτων της κατασκευής

α/α	Στοιχείο κατασκευής	Πάχος (mm)
1	Έλασμα γάστρας μέχρι το κύριο κατάστρωμα	10
2	Έλασμα γάστρας μεταξύ κυρίου καταστρώματος και διαδρόμου επιβατών	8
3	Έλασμα παραπέτου	6
4	Ελάσματα υπερκατασκευών	6
5	Έλασμα γάστρας στην πλώρη	16
6	Έλασμα διαδρόμου επιβατών	8
7	Έλασμα πρυμναίας εγκάρσιας φρακτής	8
8	Πλευρικό έλασμα αποθήκης	8
9	Έλασμα κυρίου καταστρώματος	12
10	Έλασμα διαμήκους φρακτής	8
11	Ελάσματα εγκαρσίων φρακτών	7
12	Έλασμα φρακτής στο επίπεδο συμμετρίας	10
13	Μπρακέτα διαδρόμου επιβατών	10

μέτρο ελαστικότητας, το λόγο Poisson και την πυκνότητα του χάλυβα (ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για τα ενισχυτικά). Το μέτρο διάτμησης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G = E / (2(1 + \nu)) \quad (4)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας και ν ο λόγος του Poisson. Οι υπόλοιπες ελαστικές σταθερές του υλικού υπολογίζονται σύμφωνα με τη θεωρία ελαστικότητας (επίπεδη εντατική κατάσταση). Στη συνέχεια πρέπει να ορισθεί το πάχος των ελασμάτων-στοιχείων. Το πάχος ορίζεται για κάθε στοιχείο με τη βοήθεια του μεγαλύτερου αριθμού που αντιστοιχεί στο χρώμα κάθε πλευράς του στοιχείου. Δηλαδή, το κάθε στοιχείο-έλασμα έχει το πάχος που αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο αριθμό χρώματος από αυτούς που αντιστοιχούν στο χρώμα κάθε πλευράς του στοιχείου. Έτσι, χρωματίζοντας κατάλληλα το πλέγμα των στοιχείων στο *SD2H* μπορούμε να ορίσουμε το πάχος κάθε στοιχείου. Στο συγκεκριμένο μοντέλο τα πάχη των ελασμάτων περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.

Με τις παραπάνω πληροφορίες καθορίζονται πλήρως και τα στοιχεία ελάσματα-κελύφη και έτσι είναι δυνατό να επιτελεσθεί η σύνδεσή τους με τα ενισχυτικά (στοιχεία-δοκοί). Προηγουμένως όμως θα κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις.

- Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων λειτουργεί ανεξάρτητα του χρησιμοποιούμενου συστήματος μονάδων και συνεπώς ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει όποιο σύστημα μονάδων επιθυμεί. Πρέπει όμως να δοθεί προσοχή ώστε όλα τα φυσικά μεγέθη που δίνονται να αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο σύστημα για να ληφθούν αποτελέσματα στο ίδιο σύστημα. (Στο συγκεκριμένο παράδειγμα αποφασίσθηκε να χρησιμοποιηθεί το διεθνές σύστημα, SI.)
- Δεν ενδιαφέρει ο προσανατολισμός των στοιχείων-ελασμάτων, επειδή το υλικό είναι ισότροπο. Σε περιπτώσεις ανισότροπων υλικών θα πρέπει να προσεχθεί το θέμα αυτό. Η σειρά ορισμού των κόμβων ορίζει και τον προσανατολισμό των στοιχείων. Περισσότερες πληροφορίες δίνονται στα χειρίδια του προγράμματος.
- Είναι δυνατόν να αλλάξει οποιαδήποτε ιδιότητα (π.χ. χρώμα, στρώση κλπ) ενός αντικειμένου στο *SD2H* από το μενού *modify/update*. Έτσι δεν είναι ανάγκη να ορισθεί το πάχος από την αρχή του σχεδιασμού.

3.5 Αποκωδικοποίηση. Συνδυασμός ελασμάτων με ενισχυτικά

Μετά το σχεδιασμό του πλέγματος στο *SD2H* μέσω του μενού *transfer:stress* ο χρήστης μεταφέρεται σε κατάλληλο περιβάλλον για τον ορισμό των παραμέτρων της στατικής ανάλυσης. Στο στάδιο αυτό καθορίζονται οι ιδιότητες των ελασμάτων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Επιλέχθηκε στατική ανάλυση και από το μενού *decode* επιλέξαμε *all* για να αποκωδικοποιηθούν η γεωμετρία, η φόρτιση (για την οποία θα γίνει αναφορά στο επόμενο εδάφιο) και οι ιδιότητες υλικού. Επίσης οι

διακόπτες *invalid lines* και *invalid regions* τέθηκαν σε ισχύ για την αφαίρεση διπλών γραμμών και την εξάλειψη τυχόν ατελειών στον ορισμό στοιχείων (για παράδειγμα, στοιχεία με κλίση μεγαλύτερη των 20° δεν ορίζονται). Έτσι είναι δυνατόν να αποφευχθούν σφάλματα που διορθώνονται αυτόματα (για παράδειγμα, ένα μικρό ευθύγραμμο τμήμα που ορίστηκε κατά λάθος και δεν έχει σχέση με το υπόλοιπο σχέδιο θα αφαιρεθεί) ή να επισημανθεί η ύπαρξη ατελειών σχεδιασμού και να επιτευχθεί με τη βοήθεια και του *SVIEWH* ο εντοπισμός της ακριβούς θέσης τους ώστε να γίνουν οι κατάλληλες διορθώσεις.

Δίνοντας *run* πραγματοποιείται η αποκωδικοποίηση (*decoding*) του πλέγματος των ελασμάτων. Η διαδικασία αυτή διήρκεσε περίπου 15 λεπτά στον Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε (θα μπορούσε να μη χρησιμοποιηθεί ο διακόπτης *invalid lines* επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία, αν είχε κάνει καθαρισμό διπλών γραμμών στο *SD2H* και ήταν σίγουρος ότι δεν έχουν δημιουργηθεί κοντές γραμμές στο σχέδιό από λάθος). Ο αποκωδικοποιητής πραγματοποιεί και την αρίθμηση των κόμβων του πλέγματος αυτόματα, απαλλάσσοντας το χρήστη από ένα έργο ιδιαίτερα επίπονο στην περίπτωση τρισδιάστατων μοντέλων.

Μεταξύ άλλων, παράγονται και δύο σημαντικά αρχεία, το πρώτο χωρίς προέκταση και το δεύτερο με την προέκταση *sst* (και τα δύο έχουν το όνομα που έχουμε δώσει στο μοντέλο). Το πρώτο είναι το αρχείο εισόδου για την επεξεργασία του μοντέλου από τον επεξεργαστή στατικής ανάλυσης. Έχει μορφή ASCII και είναι προσπελάσιμο από το χρήστη που μπορεί να επέμβει σε αυτό για οποιοδήποτε λόγο (πρόσθεση νέων στοιχείων, διόρθωση σύνδεσης μεταξύ των κόμβων κλπ.) Το δεύτερο είναι αρχείο απαραίτητο για το σχεδιασμό του μοντέλου στο *SVIEWH* όπου κανείς μπορεί να δει υλοποιημένο το μοντέλο του με διάφορους τρόπους που θα περιγραφούν σε άλλο εδάφιο. Το αρχείο αυτό είναι δε απαραίτητο για το συνδυασμό του μοντέλου ελασμάτων με τα ενισχυτικά.

Ανάλογη διαδικασία ακολουθείται και για τα ενισχυτικά. Σώζοντας το αρχείο μιας ομάδας ενισχυτικών από το *BEDITH* (όπου έχουν προστεθεί οι ιδιότητες των ενισχυτικών) λαμβάνονται τα δύο αρχεία που περιγράφηκαν παραπάνω. Για το συνδυασμό των ενισχυτικών με τα ελάσματα γίνεται χρήση της εντολής *COMBSSTH* από το *dos prompt*. Η εντολή αυτή συνδυάζει δύο αρχεία κάθε φορά. Το ένα είναι το κύριο (*root file*) ενώ το άλλο είναι το εξαρτημένο (*graft file*). Φυσικά δημιουργεί και τα δύο αρχεία που αναφέρθηκαν για το συνδυασμένο μοντέλο (του οποίου το όνομα καθορίζει ο χρήστης).

Η διαδικασία αυτή υλοποιείται με τους παρακάτω κανόνες:

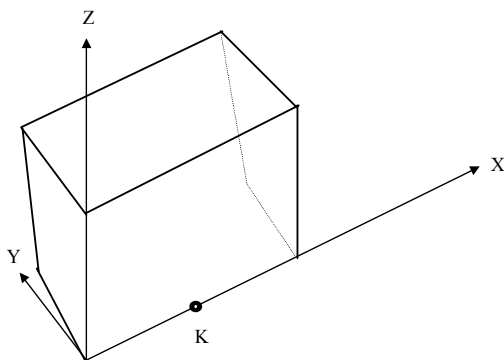
- Πληροφορίες που αφορούν το σύνολο της κατασκευής, όπως για παράδειγμα το είδος της ανάλυσης, λαμβάνονται από το κύριο αρχείο (εφόσον διατίθεται, άλλως από το εξαρτημένο).
- Οι συνοριακές συνθήκες σε κοινούς κόμβους λαμβάνονται πάλι από το κύριο αρχείο ενώ αγνοούνται αυτές του εξαρτημένου. Φυσικά για συνοριακές συνθήκες σε μη κοινούς κόμβους λαμβάνονται υπόψη και τα δύο αρχεία.
- Ροπές και δυνάμεις λαμβάνονται και από τα δύο αρχεία, ενώ εάν υπάρχουν σε κοινούς κόμβους, προστίθενται διανυσματικά.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση η διαδικασία αυτή υλοποιήθηκε για όλες τις ομάδες των ενισχυτικών. Έτσι, αποκτάται ένα αρχείο με το σύνολο των ενισχυτικών. Στη συνέχεια θα πρέπει να γίνει συνδυασμός τους, χρησιμοποιώντας ως κύριο αρχείο το αρχείο των ελασμάτων επειδή αυτό περιέχει τις πληροφορίες που αφορούν το σύνολο της κατασκευής, για παράδειγμα το είδος της ανάλυσης. Αυτό όμως δεν έγινε κατά τη μελέτη αυτή (ούτε είναι υποχρεωτικό να γίνει, διότι εάν τέτοιες πληροφορίες δεν υπάρχουν στο κύριο, και δεν υπάρχουν στο αρχείο των ενισχυτικών που χρησιμοποιήθηκε τελικά σαν κύριο, αναζητούνται στο εξαρτημένο).

Ακολουθώντας τη μεθοδολογία αυτή ο χρήστης υποχρεώνεται να εισάγει και τις συνοριακές συνθήκες στο αρχείο των ενισχυτικών. Επειδή όμως στο μοντέλο υπάρχουν κόμβοι επιπλέον αυτών που έχουν τα ενισχυτικά στους οποίους και θα πρέπει να επιβληθούν συνοριακές συνθήκες, αποφασίστηκε να εισαχθούν όλες οι συνοριακές συνθήκες με επέμβαση στο αρχείο εισόδου του συνδυασμένου μοντέλου μέσω ενός *editor*. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες δίνονται παρακάτω.

4. Στήριξη της κατασκευής και επιβολή εξωτερικών φορτίσεων

4.1 Συνοριακές συνθήκες



Σχήμα 13 Ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων

Ο τρόπος στήριξης του μοντέλου της κατασκευής είναι κεφαλαιώδους σημασίας για τη ΜΠΣ. Είναι δυνατό να προκύψουν λανθασμένα αποτελέσματα λόγω εσφαλμένης στήριξης, δηλαδή λόγω επιβολής ακατάλληλων συνοριακών συνθηκών. Επίσης, η ανεπαρκής στήριξη επιτρέπει τη μετακίνηση ή και την περιστροφή του μοντέλου σαν άκαμπτο σώμα, αποκλείοντας την επεξεργασία του από ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων (Κεφάλαιο 7). Για τους λόγους αυτούς απαιτείται προσοχή κατά την επιβολή των οριακών συνθηκών. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχει καμία δυνατότητα παροχής βοήθειας από το πρόγραμμα πέρα από την περίπτωση κίνησης του μοντέλου ως άκαμπτο σώμα, κατά την οποία υπάρχει σχετικό διαγνωστικό

μήνυμα. Ο προσδιορισμός και εισαγωγή των συνοριακών συνθηκών στα αρχεία εισόδου του προγράμματος αποτελεί λοιπόν αποκλειστική ευθύνη του μηχανικού μελετητή.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα στη βιβλιογραφία παρέχονται πληροφορίες για τις συνοριακές συνθήκες που συνήθως χρησιμοποιούνται. Επειδή έχει διακριτοποιηθεί το μισό σκάφος (αξιοποιώντας την ύπαρξη συμμετρίας ως προς το επίπεδο Oxz) θα πρέπει να επιβληθούν οι κατάλληλες συνθήκες στήριξης σε όλους τους κόμβους που ανήκουν στο επίπεδο Oxz . Οι συνθήκες αυτές προκύπτουν από τη συνέχεια του υλικού της κατασκευής και είναι οι εξής:

- Περιορισμός περιστροφής περί τους άξονες Ox και Oz
- Περιορισμός μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Oy

Οι περιορισμοί αυτοί ισοδυναμούν με περιορισμούς των μετατοπίσεων και των γωνιών περιστροφής των κόμβων του επιπέδου Oxz . Πιο συγκεκριμένα, έστω $Oxyz$ ορθογώνιο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων και έστω K ένας κόμβος της κατασκευής που συμπίπτει με το επίπεδο συμμετρίας Oxz (Σχήμα 13).

Ο τανυστής των στροφών Ω οποιουδήποτε σημείου της κατασκευής δίνεται από τη σχέση:

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial j} - \frac{\partial u_j}{\partial i} \right) \tag{5}$$

όπου

- i, j = μοναδιαία διανύσματα στις διευθύνσεις Ox, Oy
- u_i, u_j = μετατοπίσεις κατά τις διευθύνσεις i και j
- Ω_{ij} = στροφές κάθετα στο επίπεδο $i-j$

Οι περιορισμοί για τον κόμβο K σύμφωνα με αυτούς τους συμβολισμούς διατυπώνονται ως εξής:

Μηδενική μετατόπιση κατά τη διεύθυνση Oy :

$$u_y = 0 \tag{6α}$$

Μηδενική περιστροφή κατά τη διεύθυνση Ox :

$$\omega_{yz} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial u_y}{\partial z} = \frac{\partial u_z}{\partial y} \tag{6β}$$

Μηδενική περιστροφή κατά τη διεύθυνση Oz :

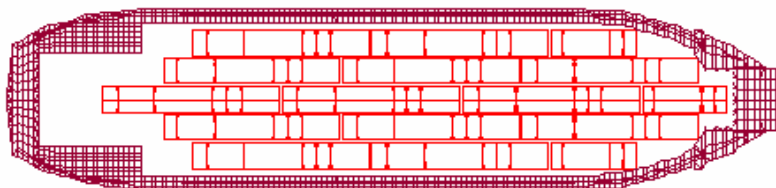
$$\omega_{xy} = 0 \quad \text{ή} \quad \frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (6\gamma)$$

Θα πρέπει επίσης να προστεθούν και συνοριακές συνθήκες σε κάποιους κόμβους του μοντέλου που θα περιορίζουν τη μετακίνησή του σαν άκαμπτο σώμα, δεν θα το επιτρέψουν δηλαδή να περιστραφεί ή και να μετακινηθεί σε απαραμόρφωτη κατάσταση ως προς οποιονδήποτε άξονα. Για το λόγω αυτό επιβάλλονται επιπλέον οι εξής συνθήκες:

- Περιορισμός της κατακόρυφης μετατόπισης κατά τη διεύθυνση Oz δύο κόμβων, στο πρυμναίο και πωραίο άκρο του πλοίου αντίστοιχα.
- Περιορισμός της οριζόντιας μετατόπισης κατά τον άξονα Ox σε ένα κόμβο κοντά στο μέσο του πλοίου στο ύψος του ουδέτερου άξονα.

Το σύνολο αυτό των συνοριακών συνθηκών επιβλήθηκε στο μοντέλο και χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σε όλα τα τρεξίματα που πραγματοποιήθηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορούν να ορισθούν και διαφορετικές συνθήκες στήριξης που να εξασφαλίζουν τη μη-μετάθεση στερεού σώματος εξ' ίσου ικανοποιητικά, καθώςσον μόνο οι συνθήκες συμμετρίας είναι μονοσήμαντα ορισμένες. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι, αναφορικά με τους κόμβους που επιλέχθηκαν, καταβάλλεται προσπάθεια να περιορισθούν όσο δυνατόν οι αντιδράσεις στήριξης. Η επιλογή αυτή είναι ανάλογη της μορφολογίας του μοντέλου. Στη συγκεκριμένη μελέτη ακολουθήθηκαν οι προτεινόμενες από τη βιβλιογραφία θέσεις των κόμβων.

4.2 Φόρτιση



Σχήμα 14 Φορτηγά αυτοκίνητα στο κύριο κατάστρωμα του σκάφους σε κατάσταση πλήρους φόρτου

Στην παρούσα μελέτη έγινε μια προσπάθεια να μοντελοποιηθεί και να ληφθεί υπόψη το σύνολο της στατικής φόρτισης που δέχεται το πλοίο σε διάφορες καταστάσεις φόρτωσης. Αυτό για διάφορες καταστάσεις στατικής ισορροπίας του πλοίου στην κορυφή και στο κοίλο τροχειδούς κύματος και σε ήρεμο νερό, αντίστοιχες με αυτές που περιγράφηκαν στο πρώτο κεφάλαιο. Πρέπει να τονισθεί ότι η φόρτιση σε όλες τις καταστάσεις είναι συμμετρική και επομένως η μελέτη δεν αντιμετωπίζει προβλήματα

μη-συμμετρικής φόρτισης (για παράδειγμα, περιπτώσεις εγκάρσιας κλίσης του σκάφους λόγω κίνησης σε κυματισμούς).

Όσον αφορά το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, αυτό ελήφθη υπόψη ενεργοποιώντας τον κατάλληλο διακόπτη του αποκωδικοποιητή, ο οποίος μέσω της πυκνότητας του χάλυβα και των γεωμετρικών διαστάσεων των στοιχείων μπορεί να εφαρμόσει στους κόμβους κάθε στοιχείου το στατικά ισοδύναμο βάρος που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο. Αμελήθηκαν τα εξής βάρη: βάρος λιπαντικού ελαίου, βάρος πληρώματος και εφοδίων και βάρος καυσίμου ημερήσιας δεξαμενής καταπόνησης, τα οποία ανέρχονται συνολικά σε 3,5 ton.

Αφενός μεν τα βάρη αυτά είναι πολύ μικρά (σε σχέση με το εκτόπισμα, που φθάνει τους 1.684 ton) αφετέρου δεν προκύπτει από το σχέδιο γενικής διάταξης η θέση τους.

Τα υπόλοιπα βάρη που μεταφέρει το σκάφος και τα βάρη μηχανολογικής εγκατάστασης και ενδιαίτησης-εξοπλισμού συμπεριελήφθησαν με βάση ορισμένες παραδοχές.

Στην κατάσταση πλήρους φόρτου το σκάφος μεταφέρει 900 επιβάτες στα καστρώματα των υπερκατασκευών του. Το βάρος των επιβατών προσομοιώθηκε από κομβικές δυνάμεις που υπολογίστηκαν με τις παραδοχές που ακολουθούν (οι δυνάμεις αυτές επιβλήθηκαν στο μοντέλο από το μενού *Add/Fea/:force* του *SD2H* κατά τον ίδιο τρόπο με το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης)

Στην κατάσταση αυτή το φυλλάδιο ευστάθειας δίνει την πληροφορία ότι το σκάφος μεταφέρει φορτηγά αυτοκίνητα συνολικού βάρους 676,5 ton με κέντρο βάρους 36,51 m από την πυρναία κάθετο. Με βάση την πληροφορία αυτή έγινε η παραδοχή ότι μεταφέρονται φορτηγά των παρακάτω δύο τύπων:

- Διαξονικά φορτηγά με τριαξονικό ρυμουλκούμενο όχημα (trailer). Το μέγιστο μικτό βάρος των φορτηγών αυτών ανέρχεται σε 47 ton. Ολικό μήκος = 16,5 m, μέγιστο ύψος = 4 m, μέγιστο πλάτος = 2,5 m.
- Τριαξονικά φορτηγά χωρίς ρυμουλκούμενο όχημα. Το μέγιστο μικτό βάρος των φορτηγών αυτών είναι 25 ton. Το ολικό μήκος τους = 8 m. Το μέγιστο ύψος = 3,005 m, μέγιστο πλάτος = 2,5 m.

Όλα τα μεγάλα φορτηγά χωράνε κάτω από τις υπερκατασκευές τύπου *Π* του πλοίου, που έχουν ύψος από το κατάστρωμα 4,3 m. Ο αριθμός των φορτηγών, το βάρος που μεταφέρει το κάθε ένα και η θέση που βρίσκεται πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου επιλέχθηκαν έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Το συνολικό βάρος των φορτηγών να ισούται με 676,5 ton ($676,5/2 = 338,25$ ton).
- Το κέντρο βάρους των φορτηγών να βρίσκεται σε απόσταση 36,51 m από την πυρναία κάθετο
- Τα φορτηγά να χωράνε στο πλοίο.

Αφού καθορίστηκαν οι θέσεις των φορτηγών που ικανοποιούν τα παραπάνω κριτήρια, έγινε μια κατάλληλη τοπική τροποποίηση στο πλέγμα του καταστρώματος

ώστε να εισαχθούν στις σωστές θέσεις οι κομβικές δυνάμεις που αντιστοιχούν στα βάρη των οχημάτων.

Στην κατάσταση αυτή το σκάφος μπορεί να μεταφέρει συνολικά 13 μεγάλα και 3 μικρότερα φορτηγά. Η στοιβασία των οχημάτων στο κύριο κατάστρωμα φαίνεται στο Σχήμα 14, στο οποίο έχουν σχεδιασθεί τα ορθογώνια μέγιστου πλάτους και ολικού μήκους και οι θέσεις των αξόνων κάθε φορτηγού με το αποτύπωμα των ελαστικών σε κάτοψη. Τα φορτηγά έχουν τοποθετηθεί κατά συμμετρικό τρόπο ως προς το διάμηκες κατακόρυφο επίπεδο συμμετρίας του σκάφους.

5. Προκαταρκτικός έλεγχος του μοντέλου

5.1 Γενικά

Στο στάδιο αυτό θα περιγραφούν οι έλεγχοι που προηγήθηκαν των τρεξιμάτων του μοντέλου. Στη ΜΠΣ τέτοιου είδους έλεγχοι μας επιτρέπουν να επιβεβαιώσουμε τη σωστή μοντελοποίηση της κατασκευής, να εντοπισθούν και να διορθωθούν τυχόν σφάλματα πριν γίνει η επεξεργασία της διακριτοποιημένης κατασκευής.

Οι συνήθεις έλεγχοι αφορούν:

- Τη γεωμετρία της κατασκευής. Ο έλεγχος αυτός επιτρέπει την εποπτεία τόσο των κόμβων του μοντέλου όσο και του τρόπου σύνδεσής τους για το σχηματισμό των πεπερασμένων στοιχείων.
- Τις ιδιότητες των πεπερασμένων στοιχείων (υλικό, γεωμετρικές ιδιότητες).
- Τις οριακές συνθήκες.
- Τη φόρτιση. Ελέγχεται το διάνυσμα κάθε δύναμης και ο κόμβος στον οποίο έχει επιβληθεί.

Προφανώς, όσο μεγαλύτερο και πιο πολύπλοκο είναι το μοντέλο τόσο δυσκολότερος είναι και ο έλεγχος. Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία που περιγράφηκε εξαρτάται και από τις ευκολίες που παρέχει το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση για παράδειγμα, το πρόγραμμα επιτρέπει όλους (ή σχεδόν όλους) τους ελέγχους που προαναφέρθηκαν μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον, κάνοντας την εργασία αυτή πιο προσιτή στο χρήστη. Απόπειρα ελέγχου μέσα από τα αρχεία εισόδου (για το σύνολο της κατασκευής) είναι αν όχι απαγορευτική, τουλάχιστον επίπονη, χρονοβόρα και αμφίβολων αποτελεσμάτων για μεγάλα μοντέλα (π.χ. το αρχείο εισόδου στην περίπτωσή μας έχει 41.000 γραμμές). Σε τέτοιου είδους έλεγχο καταφεύγει κανείς όταν δεν μπορεί να εντοπίσει την αιτία του λάθους μέσα από γραφικό περιβάλλον για κάποιο συγκεκριμένο σημείο του μοντέλου.

5.2 Έλεγχος γεωμετρίας

Η γεωμετρία του μοντέλου ελέγχεται από το περιβάλλον *SVIEWH*. Αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση να έχει προηγηθεί η αποκωδικοποίησή του, ενώ ο χρήστης έχει στη διάθεσή του μία σειρά επιλογών. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι ορατή η

διακριτοποιημένη κατασκευή από οποιαδήποτε όψη, επίσης ότι μπορεί να γίνει μεγέθυνση ή σμίκρυνση σε οποιαδήποτε περιοχή θέλει ο χρήστης, και ότι η κατασκευή μπορεί να περιστραφεί περί οποιονδήποτε άξονα κλπ. Μπορούν επίσης προσωρινά να αφαιρεθούν τμήματα που δεν έχουν άμεσο ενδιαφέρον και να γίνουν πολλών ειδών ρυθμίσεις σχετικά με τα χρώματα απεικόνισης.

Ο χρήστης μπορεί κατ' αρχή, μέσα από το μενού *inquire/node B.C.* χρησιμοποιώντας τους διακόπτες *get* ή *find* να δει τον κόμβο που είναι πλησιέστερος στην τρέχουσα θέση του *mouse* ή να εντοπίσει ένα συγκεκριμένο κόμβο δίνοντας τον αντίστοιχο αριθμό. Στην οθόνη εμφανίζονται πληροφορίες σχετικές με τον κόμβο, όπως ο αριθμός που αντιστοιχεί σε αυτόν, οι συντεταγμένες του ως προς το γενικό σύστημα αναφοράς και τέλος οι οριακές συνθήκες (αν υπάρχουν) που έχουν επιβληθεί σε αυτόν. Έτσι μπορούν να εντοπισθούν για παράδειγμα κόμβοι τοποθετημένοι σε εσφαλμένη θέση.

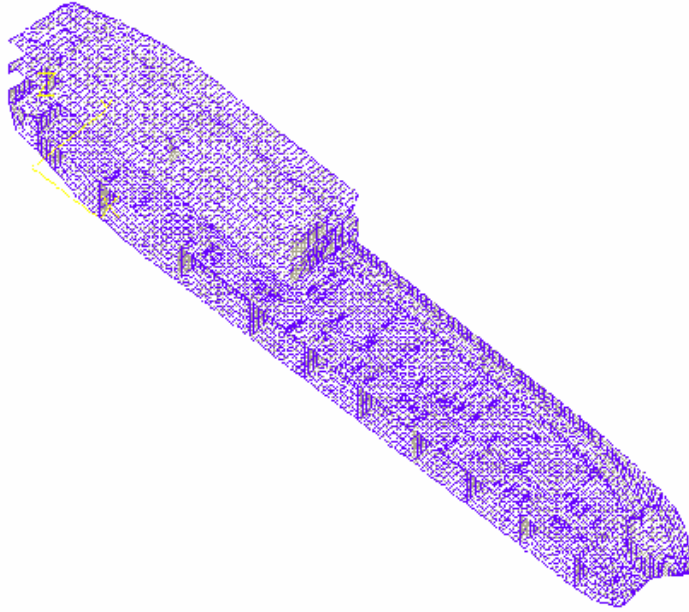
Στη συνέχεια ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει μια τρισδιάστατη απεικόνιση του μοντέλου, δηλαδή να δει κατάλληλα χρωματισμένα τα στοιχεία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρόγραμμα διαθέτει δύο μεθόδους απεικόνισης για τη διαδικασία αυτή.

Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην τεχνική των «κρυμμένων γραμμών» (*hidden lines*) και ενεργοποιείται από το μενού *Stress-di/Hidden l.* Σύμφωνα με αυτή το μοντέλο σχεδιάζεται έτσι ώστε να φαίνονται μόνο οι γραμμές εκείνες του πλέγματος που είναι ορατές με το ανθρώπινο μάτι, ανάλογα με την οπτική γωνία.

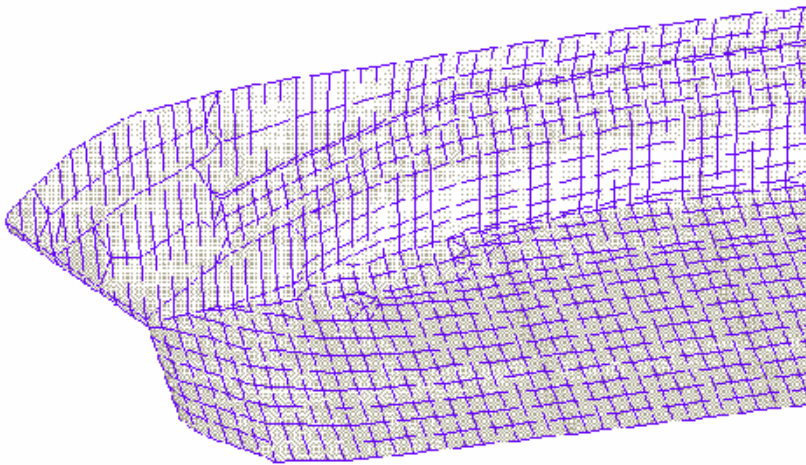
Η δεύτερη μέθοδος βασίζεται στην τεχνική «σκίασης» (*light*) και ενεργοποιείται από το μενού *Stress-di/Light.* Η τεχνική αυτή μπορεί να ειπωθεί ότι αποδίδει μια πιο εξελιγμένη και ρεαλιστική απεικόνιση της διακριτοποιημένης κατασκευής. Σύμφωνα με αυτή το μοντέλο, πέρα από το κρύψιμο των μη ορατών γραμμών, φωτίζεται ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης μιας πηγής φωτός σε κάθε στοιχείο. Υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης τόσο της θέσης όσο και της έντασης και του χρώματος της πηγής φωτός.

Επιπλέον υπάρχουν και οι διακόπτες *Shrink* και *Solid di.* Ο πρώτος επιτρέπει την απεικόνιση με τέτοιο τρόπο, ώστε να υπάρχει κενό μεταξύ των στοιχείων, κάνοντάς τα πιο ευδιάκριτα. Ο δεύτερος κάνει χρωματισμό κάθε στοιχείου με ένα χρώμα χωρίς να «εξομαλύνει» τη σκίαση από στοιχείο σε στοιχείο (δεν κάνει *dithering*). Με τις τεχνικές αυτές, αν κάποιο στοιχείο μεταξύ τριών ή τεσσάρων κόμβων δεν υπάρχει τότε δε χρωματίζεται και δημιουργείται μια νοητή οπή στο σχέδιο, γεγονός που διευκολύνει τον εντοπισμό τέτοιου λάθους (Κεφάλαιο 7).

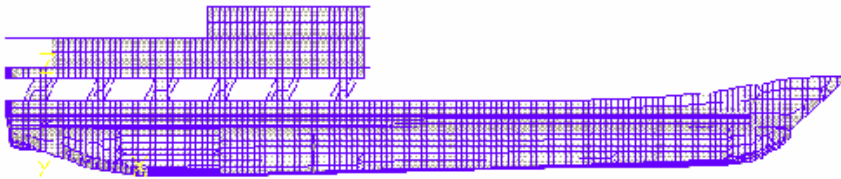
Τέλος χρήσιμη είναι και η εντολή εμφάνισης της αρίθμησης των κόμβων ή των στοιχείων του πλέγματος. Αυτή ενεργοποιείται από το μενού *Options/General: nodenumb* ή *elenumbr* και μας επιτρέπει να εντοπίσουμε σφάλματα, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις που υπάρχουν δύο κόμβοι πολύ κοντά ο ένας στον άλλο, ενώ θα έπρεπε να υπήρχε μόνο ένας, δίνοντας δύο αριθμούς για «ένα» κόμβο. Τα παραπάνω αφορούν τις βασικές λειτουργίες του προγράμματος που διευκολύνουν την εκπόνηση των ελέγχων του μοντέλου ενώ άλλες περιγράφονται στα εγχειρίδια χρήσης του προγράμματος. Ο έμπειρος μελετητής εισάγει τους ελέγχους και συνδυασμούς τους που κρίνει απαραίτητους.



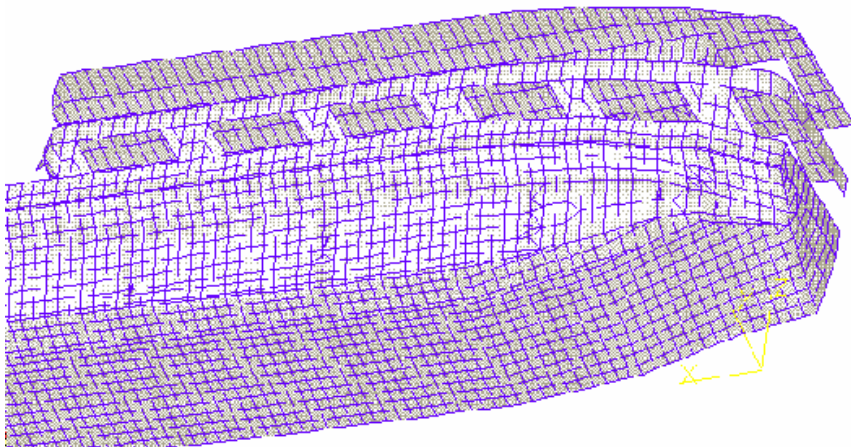
Σχήμα 15 Ισομετρική όψη του μοντέλου με την τεχνική *Light*



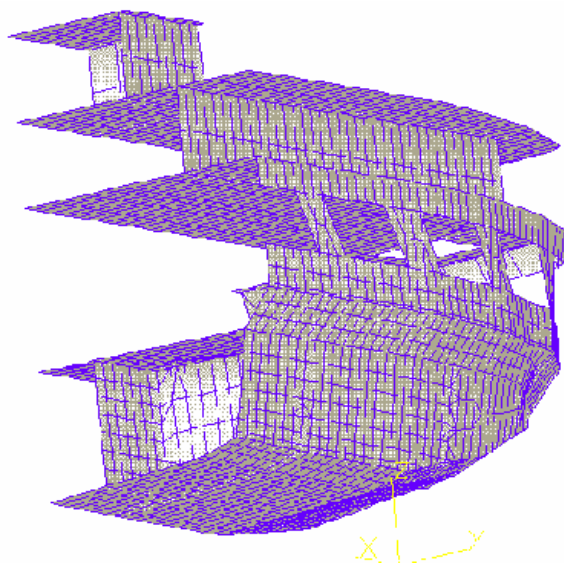
Σχήμα 16 Όψη του προωραίου τμήματος της γάστρας με την τεχνική *Light*



Σχήμα 17 Πλάγια όψη του μοντέλου με την τεχνική *Light*



Σχήμα 18 Όψη της πρύμνης με την τεχνική *Light*



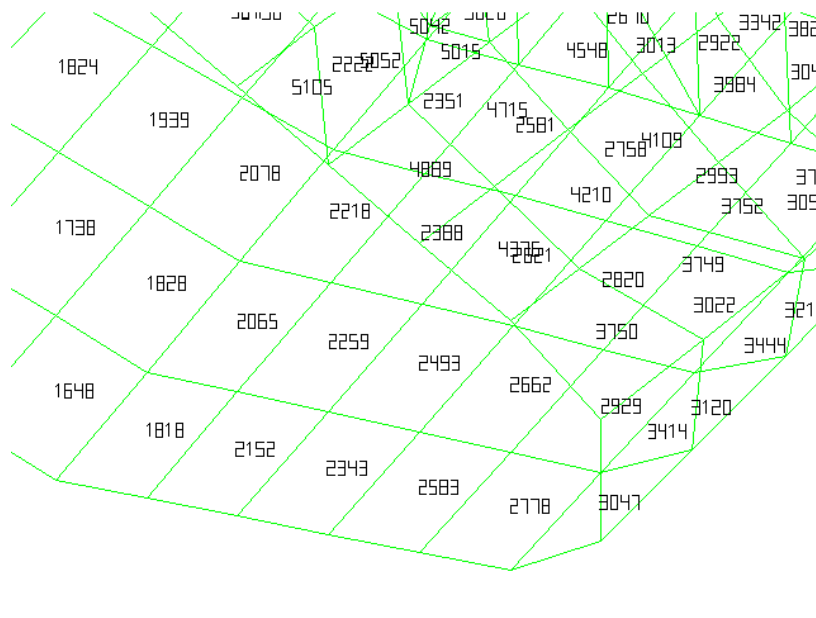
Σχήμα 19 Τομή του σκάφους στο πρυμναίο μέρος
(διακρίνονται τα τρία καταστρώματα των υπερκατασκευών)

Στην περίπτωση που εντοπισθεί κάποιο σφάλμα στο μοντέλο, πρέπει να επακολουθήσει η διόρθωση, αφού βέβαια γίνει κατανοητή η πηγή του. Διορθώσεις γίνονται με δύο τρόπους:

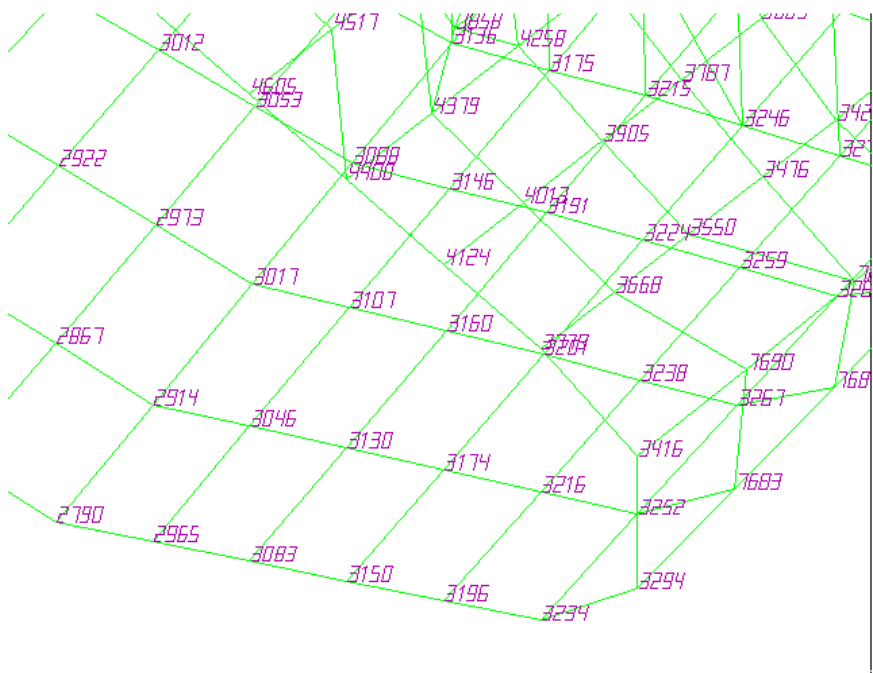
- Με επέμβαση στο αρχείο εισόδου με κάποιον editor.
- Με επανασχεδιασμό της περιοχής στο *SD2H* και εκ νέου αποκωδικοποίηση και έλεγχος στο *SVIEWH*.

Είναι προφανές ότι ο δεύτερος τρόπος είναι ασφαλέστερος και ευκολότερος (αλλά πιο χρονοβόρος), ενώ ο πρώτος πιο δύσκολος και μπορεί να ελεγχθεί μόνο μετά την ανάλυση του μοντέλου από τον επεξεργαστή στατικής ανάλυσης. Συνιστάται να χρησιμοποιείται ο δεύτερος τρόπος διόρθωσης. Ακολουθούν σχήματα που διασαφηνίζουν όσα αναφέρθηκαν και δείχνουν τμήμα της γεωμετρίας του μοντέλου που σχεδιάστηκε.

Ακολούθως έγινε ο έλεγχος των ιδιοτήτων των στοιχείων από το μενού όπου ορίζονται οι ιδιότητες αυτές (με το μοντέλο στο περιβάλλον του *SD2H* και εκτελώντας την εντολή *transfer:Stress*). Ο έλεγχος αυτός γίνεται και μέσω του αρχείου εισόδου. Ορισμένες ιδιότητες κάθε στοιχείου-ελάσματος είναι επίσης ορατές στο *SVIEWH*. Αυτό επιτυγχάνεται με την εντολή: *Inquire/Ele inq/plate: Get* ή *Find*, που δίνει τις ιδιότητες του στοιχείου που επιλέγεται ή ανευρίσκει το στοιχείο που αντιστοιχεί στον αριθμό που ορίζει ο χρήστης. Στην οθόνη εμφανίζονται (μεταξύ άλλων) το πάχος του ελάσματος και οι αριθμοί των κόμβων που το ορίζουν. Αυτή είναι μια ικανοποιητική μέθοδος επιβεβαίωσης του πάχους κάθε στοιχείου αφού ο ορισμός πάχους με βάση τα χρώματα είναι ως ένα βαθμό επισφαλής, ειδικά σε περιοχές σύνδεσης ελασμάτων με διαφορετικά πάχη.



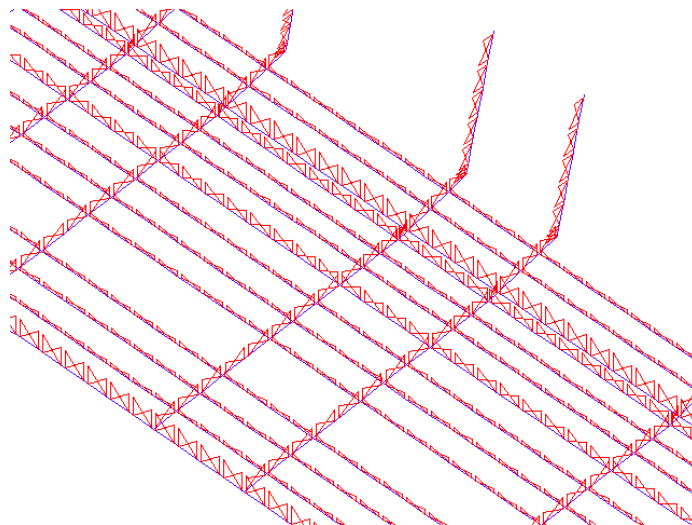
(α) Αρίθμηση στοιχείων ελασμάτων-κελυφών (εντολή *element*)



(β) Αρίθμηση κόμβων (εντολή *nodenumb*)

Σχήμα 20 Αρίθμηση στοιχείων και κόμβων

5.3 Έλεγχος των ιδιοτήτων των στοιχείων



Σχήμα 21 Τα *offsets* των ενισχυτικών του πυθμένα και των νομέων

Για τα στοιχεία-δοκούς οι έλεγχοι των ιδιοτήτων γίνονται από το περιβάλλον *BEDITH*. Συγκεκριμένα, ο χρήστης επιλέγει από τα μενού την εντολή *Add/MOD/property* ή *sectional* ή *offset* και είναι πλέον ορατές οι ιδιότητες υλικού, οι γεωμετρικές ιδιότητες της διατομής και το διάνυσμα της μετατόπισης του κέντρου βάρους αντίστοιχα. Σφάλματα μπορούν να διορθωθούν σε αυτό το στάδιο. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε για όλες τις ομάδες ενισχυτικών.

Πολύ χρήσιμη είναι η γραφική απεικόνιση των *offsets* που επιτελείται αυτόματα από το πρόγραμμα και επιτρέπει την εποπτεία της διεύθυνσης και του μέτρου του διανύσματος μετατόπισης (Σχήμα 21).

5.4 Έλεγχος του βάρους της μεταλλικής κατασκευής

Με δεδομένο το αρχείο εισόδου και πριν τεθεί σε λειτουργία ο επεξεργαστής της στατικής ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκε ο επεξεργαστής *SSAP9H*. Ο επεξεργαστής αυτός μπορεί να υπολογίσει το βάρος του μοντέλου κάνοντας χρήση της πυκνότητας του υλικού (χάλυβα) και της γεωμετρία (όγκο) των στοιχείων που το αποτελούν. Επίσης δίνει και τη θέση του κέντρου βάρους της διακριτοποιημένης κατασκευής. Για τη συγκεκριμένη μελέτη, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής (για $\rho_{st}=78480 \text{ N/m}^3$) υπολογίσθηκε ίσο με $(2,96)(10^6) \text{ N}$ ($=301,5 \text{ ton}$) ενώ ο όγκος χάλυβα ήταν ίσος με $37,69 \text{ m}^3$. Τέλος η διαμήκης θέση του κέντρου βάρους (*LCG*) ήταν 27,46 m από την πρυμναία κάθετο.

Σύμφωνα με το εδάφιο 1, το βάρος της μεταλλικής κατασκευής που είχε εκτιμηθεί για την ίδια πυκνότητα χάλυβα ήταν $647/2=323,5 \text{ ton}$ (μισό σκάφος) ενώ η διαμήκης θέση του κέντρου βάρους (*LCG*) ήταν 27,65 m από την πρυμναία κάθετο.

Παρατηρείται μία απόκλιση στο συνολικό βάρος, η οποία αποδίδεται στους εξής λόγους:

1. Στην διακριτοποιημένη κατασκευή δεν έχουν ληφθεί υπόψη τα μπρακέτα, τα οποία υπολογίστηκε ότι συμβάλλουν κατά περίπου 4,5% του συνολικού βάρους.
2. Δεν έχουν επίσης συμπεριληφθεί οι πλευρές των υπερκατασκευών (ενισχυμένα ελάσματα) στις περιοχές όπου δεν υπάρχουν ρέλια καθώς επίσης και τα ρέλια (συνολικά 2,6 ton).

Έτσι η απόκλιση περιορίζεται στο 1,3%, ποσοστό που κρίνεται ικανοποιητικό. Σε ότι αφορά το LCG προκύπτει ικανοποιητική σύμπτωση καθώς τα πρόσθετα βάρη που αναφέρθηκαν παραπάνω δεν επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τη θέση του κέντρου βάρους, αφού είναι σε σημαντικό ποσοστό ομοιόμορφα κατανομημένα σε όλη την μεταλλική κατασκευή. Συμπεραίνομε λοιπόν ότι το αποτέλεσμα από το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολύ κοντά στην αρχική εκτίμηση, γεγονός που δικαιώνει τις παραδοχές που έγιναν στο αρχικό στάδιο της μελέτης. Επί πλέον, κρίνεται ότι η διακριτοποίηση της κατασκευής είναι ικανοποιητική.

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να αναφέρουμε και την αλλαγή στην τιμή του ειδικού βάρους του χάλυβα που τελικά χρησιμοποιήθηκε. Πράγματι στο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε η τιμή 84145 N/m^3 που αντιστοιχεί σε συνολικό βάρος της μεταλλικής κατασκευής 323,5 ton, όσο δηλαδή είχε αρχικά εκτιμηθεί χάριν σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

5.5 Λοιποί έλεγχοι

Στο περιβάλλον του *SVIEWH* μπορούμε να ελέγξουμε αν έχουν εισαχθεί οι κατάλληλες οριακές συνθήκες στους κόμβους που επιθυμούμε. Αυτό γίνεται με την εντολή *inquire/Node BC: highlight* η οποία φωτίζει τους κόμβους στους οποίους έχουν επιβληθεί οριακές συνθήκες. Με το διακόπτη *value* καθορίζεται το είδος των οριακών συνθηκών που επιθυμούμε να δούμε σε κάθε περίπτωση. Με τον τρόπο αυτό διαπιστώθηκε ότι οι οριακές συνθήκες έχουν εισαχθεί σωστά.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι το ίδιο το πρόγραμμα επιτελεί ένα στοιχειώδη έλεγχο που αφορά την επάρκεια ή όχι των οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα, αν οι οριακές συνθήκες που έχουν επιβληθεί δεν περιορίζουν την κίνηση ως άκαμπτο σώμα, διακόπτεται η επεξεργασία και εμφανίζεται κατάλληλο μήνυμα. Φυσικά αυτό σε καμία περίπτωση δε σημαίνει ότι αν δεν προκύψει διακοπή οι οριακές συνθήκες είναι σωστές.

Χρήσιμη επίσης είναι και η εντολή *inquire/stats* που εμφανίζει τον αριθμό και τα είδη των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο *SVIEWH* μπορεί κανείς να δει και τις κομβικές δυνάμεις με την εντολή *inquire/force*. Στην παρούσα περίπτωση έγινε έλεγχος μόνο των δυνάμεων που επιβλήθηκαν στη διακριτοποιημένη κατασκευή με χρήση εντολών του *SD2H* (βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης, φορτηγών, επιβατών και πόσιμου νερού). Οι υπόλοιπες δυνάμεις (για παράδειγμα τα υδροστατικά φορτία) δεν ήταν δυνατό να εμφανισθούν στην οθόνη επειδή το πρόγραμμα δεν μπορεί να δημιουργήσει αρχεία τύπου *~sst* τα

οποία περιέχουν μεγάλο αριθμό κομβικών δυνάμεων. Αναγκαστικά λοιπόν ο έλεγχος των δυνάμεων αυτών γίνεται μετά από την επεξεργασία της διακριτοποιημένης κατασκευής με τη μέθοδο που περιγράφεται στο επόμενο εδάφιο.

Στο σημείο αυτό παραθέτουμε τα παρακάτω ενδεικτικά αποτελέσματα από το πρόγραμμα υπολογισμού των υδροστατικών φορτίων, για την περίπτωση πλοίου σε ήρεμο νερό σε κατάσταση πλήρους φόρτου:

- Συνολική εγκάρσια υδροστατική δύναμη (για μισή κατασκευή) ίση με 167,65 ton
- Συνολική κατακόρυφη υδροστατική δύναμη ίση με 834,09 ton (το εκτόπισμα του μισού σκάφους για την κατάσταση αυτή είναι 842 ton (απόκλιση 0,95 %)

6. Έλεγχοι των αποτελεσμάτων

6.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων μετά την επεξεργασία ενός μοντέλου από κάποιο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων είναι ένα από τα σημαντικότερα στάδια στη μελέτη ενός προβλήματος με τη μέθοδο αυτή. Ο μελετητής μηχανικός πρέπει να ελέγξει τα παρακάτω:

1. Αν τα αποτελέσματα είναι λογικά: π.χ. είναι οι τάσεις στα όρια ελαστικότητας αν κάνουμε ανάλυση στην ελαστική περιοχή; Είναι οι μετατοπίσεις της σωστής τάξης μεγέθους; Είναι ρεαλιστική η μορφή του παραμορφωμένου μοντέλου;
2. Να γίνει εξακρίβωση της ακρίβειας της λύσης. Λέμε ότι η λύση έχει συγκλίνει όταν πυκνώνοντας το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνονται αποτελέσματα που δεν διαφέρουν σημαντικά από τα προηγούμενα. Το πόσο αποδεκτή είναι η σύγκλιση εξαρτάται από την ακρίβεια που επιδιώκεται. Για να διαπιστωθεί η σύγκλιση με αυτό τον τρόπο απαιτούνται μετατροπές στο πλέγμα και ανάλογα τρεξίματα.

Ειδικά στην συγκεκριμένη περίπτωση μια τέτοια διαδικασία είναι πολυδάπανη και απαιτεί πολύ χρόνο, τόσο για τη μετατροπή του πλέγματος όσο και για την επεξεργασία του μοντέλου. Επίσης οι απαιτήσεις σε μνήμη γίνονται ακόμα μεγαλύτερες. Αυτά είναι προφανή αφού το μοντέλο είναι μεγάλο και περίπλοκο.

Το ίδιο το πρόγραμμα έχει έναν «εκτιμητή ακρίβειας» για τα μεγέθη των τάσεων, ο οποίος δίνει μια εικόνα του κατά πόσο έχει επιτευχθεί σύγκλιση ή όχι. Παράλληλα έγιναν και έλεγχοι ακρίβειας της λύσης, που πρέπει να γίνονται σε όλες τις μελέτες. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφέρονται παρακάτω.

Αφού λοιπόν γίνει η μελέτη ακρίβειας της λύσης, τίθεται ένα ακόμα ερώτημα:

- Έχει συγκλίνει το πρόγραμμα στη σωστή λύση;
- Αν ναι, ποια είναι τα όρια εφαρμογής της λύσης αυτής; σε ποιες παραδοχές στηρίζεται;

Προφανώς η απάντηση εξαρτάται από τον τρόπο διακριτοποίησης του προβλήματος, από την επαφή του μελετητή με το αντικείμενο που εξετάζει κλπ. Για να δοθούν απαντήσεις σε τέτοια ερωτήματα, πρέπει να γίνουν εκτιμήσεις των αποτε-

λεσμάτων με μεθόδους διαφορετικές από τη ΜΠΣ. Ο ασφαλέστερος τρόπος για μια τέτοια εκτίμηση είναι το πείραμα. Συνήθως τα πειράματα κοστίζουν, οπότε αναγκάζεται κανείς να καταφύγει σε απλουστευτικές θεωρίες και να συγκρίνει τα αποτελέσματα.

Είναι προφανές ότι σε όλη τη διαδικασία του ελέγχου χρειάζονται γνώσεις που μόνο ο μηχανικός μελετητής διαθέτει.

Επιστρέφοντας στο μοντέλο μας, έγινε προσπάθεια πραγματοποίησης όλων των σταδίων ελέγχου που περιγράφηκαν. Ακολουθεί μία αναλυτικότερη περιγραφή στις επόμενες παραγράφους.

6.2 Ποιοτικές παρατηρήσεις

Με τη βοήθεια των επιλογών του *SVIEWH* στα μενού *Displaced* και *Stress di* υπάρχει η δυνατότητα της γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων. Για την κατάσταση πλήρους φόρτου σε ήρεμο νερό τα αποτελέσματα έχουν την εξής εικόνα:

- Το παραμορφωμένο σκάφος προσομοιάζει με παραμορφωμένη δοκό της οποίας η άνω ίνα εφελκύεται (κατάστρωμα) ενώ η κάτω ίνα (πυθμένας) θλίβεται. Αυτή η μορφή παραμόρφωσης είναι ρεαλιστική και αναμενόμενη, από τη θεώρηση του σκάφους ως δοκό.
- Εξετάζοντας τις μετατοπίσεις των κόμβων κατά τη διεύθυνση $+Oz$, βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή για το κυρίως σκάφος είναι της τάξης των 7,6 mm με φορά προς τα άνω. Επίσης βλέπουμε ότι οι μέγιστες τιμές προκύπτουν στην περιοχή της μέσης τομής, ενώ όσο πλησιάζουμε στα άκρα τα βέλη κάμψης ελαττώνονται, για να μηδενισθούν στις περιοχές που έχουν επιβληθεί οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με την αναμενόμενη μορφή κάμψης του πλοίου. Στις υπερκατασκευές παρουσιάζονται μεγαλύτερες μετατοπίσεις, της τάξης των 1-2 cm, με φορά προς τα κάτω. Το γεγονός αυτό οφείλεται κατά ένα μέρος στην παραδοχή κατανομής όλου του βάρους ενδιαίτησης και εξοπλισμού στις υπερκατασκευές.
- Παρατηρώντας τις μετατοπίσεις στην κατεύθυνση $+Oy$, βλέπουμε ότι η μέγιστη τιμή τους είναι της τάξης των 7,2 mm με φορά $+Oy$, και εμφανίζεται σε μία περιοχή του παραπέτου κατά μήκος του διαδρόμου επιβατών. Σε όλο το υπόλοιπο σκάφος οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες, χωρίς αισθητές διακυμάνσεις.
- Παρατηρώντας τέλος τις μετατοπίσεις κατά τον άξονα $+Ox$, βλέπουμε ότι έχουμε μια μέγιστη τιμή 4,6 mm.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετατοπίσεις αναφέρονται ως προς την αρχική θέση των κόμβων και δεν είναι σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων. Συγκριτικά με το μέγεθος του σκάφους, οι τιμές που αναφέρθηκαν κυμαίνονται σε λογικά όρια.

- Στη συνέχεια αποκτήθηκαν διαγράμματα κατανομών των ορθών τάσεων, οι οποίες είναι εφελκυστικές στο κατάστρωμα (θετικό πρόσημο) και θλιπτικές στον πυθμένα

(αρνητικό πρόσημο), γεγονός που είναι συμβατό με τον τρόπο παραμόρφωσης του σκάφους.

- Τέλος αναφέρεται ενδεικτικά ότι η ισοδύναμη τάση κατά von Mises είναι της τάξης των 8 N/mm^2 και 15 N/mm^2 στο κατάστρωμα και στον πυθμένα του πλοίου αντίστοιχα στην περιοχή της μέσης τομής. Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν ότι οι τάσεις είναι ελαστικές, αφού για κοινό ναυπηγικό χάλυβα $\sigma_0 = 245 \text{ N/mm}^2$. Επίσης είναι αναμενόμενο στον πυθμένα να προκύπτουν υψηλότερες τάσεις συγκριτικά με το κατάστρωμα, αφού ο ουδέτερος άξονας είναι πλησιέστερος στο κατάστρωμα. Επιπλέον, στον πυθμένα ασκούνται και υδροστατικές πιέσεις.

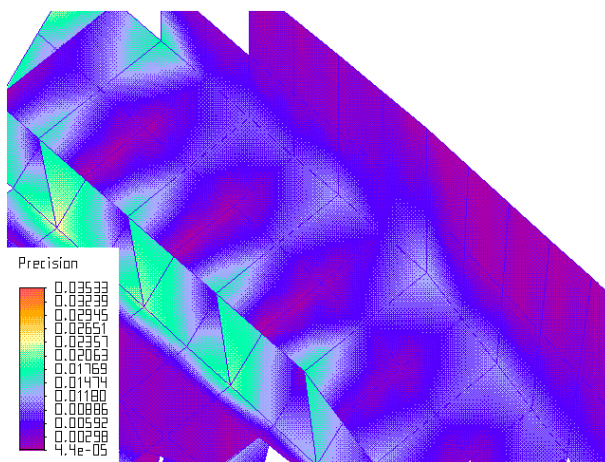
6.3 Ακρίβεια των αποτελεσμάτων

Πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων είναι η εντολή *Stress di/Post/Precision*. Με τη βοήθεια αυτής της εντολής, ο χρήστης έχει στη διάθεσή του ένα γράφημα που δίνει τιμές της ακρίβειας των αποτελεσμάτων (τάσεων) σε κάθε σημείο του μοντέλου. Η ακρίβεια υπολογίζεται με βάση το σκεπτικό ότι κάθε στοιχείο δίνει μία τιμή τάσης σε κάθε κόμβο που το ορίζει. Έτσι σε κόμβους που συντρέχουν πολλά στοιχεία έχουμε μια διαφορετική τιμή τάσης που αντιστοιχεί σε κάθε ένα από αυτά. Η ακρίβεια στον κόμβο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Precision = 0,5 (\sigma_{max} - \sigma_{min}) / \sigma_{VMmax} \quad (7)$$

όπου:

- σ_{max} = μέγιστη τιμή τάσης που αντιστοιχεί στον κόμβο
- σ_{min} = ελάχιστη τιμή τάσης στον κόμβο
- σ_{VMmax} = μέγιστη τιμή ισοδύναμης τάσης κατά von Mises για το σύνολο του μοντέλου



Σχήμα 22 Γράφημα ακρίβειας υπολογισμού τάσεων (ισομετρική όψη)

Σύμφωνα με το δείκτη αυτό, εάν $Precision = 0,1$ και $\sigma_{VMmax} = 150$, τότε διαφορές τάσης μικρότερες από 15 δεν έχουν νόημα για τη συγκεκριμένη περιοχή (κόμβο). Το Σχήμα 22 περιλαμβάνει γράφημα ακρίβειας για μία περιοχή της διακριτοποιημένης κατασκευής. Το γράφημα δείχνει ότι οι τάσεις υπολογίζονται με ακρίβεια της τάξης του 3% της τιμής της μέγιστης σύνδεσης του διαδρόμου επιβατών με το κατάστρωμα τάσης κατά von Mises, στα σημεία σύνδεσης των μπρακέτων του διαδρόμου επιβατών με τη γάστρα.

Σε άλλες περιοχές της κατασκευής η ακρίβεια υπολογισμού των τάσεων είναι μικρότερη, ιδιαίτερα σε αυτές όπου παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων. Για παράδειγμα, στην ένωση των υπερκατασκευών με το δρύφακτο η ακρίβεια είναι 17% της μέγιστης τάσης κατά von Mises. Αυτό οφείλεται στη γωνία που σχηματίζεται στη σύνδεση. Γενικά, η αποδοχή της ακρίβειας όπως αυτή ορίζεται εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και το σκοπό της μελέτης.

Πέραν από τη χρήση του ίδιου του προγράμματος για την εκτίμηση της ακρίβειας, έγιναν και ορισμένοι συμπληρωματικοί ανεξάρτητοι έλεγχοι. Στο σημείο αυτό αναφέρονται ορισμένα στοιχεία για τις κομβικές δυνάμεις που είναι απαραίτητα για την κατανόηση των ελέγχων αυτών.

Σε κάθε κόμβο του μοντέλου επιβάλλονται οι εξωτερικές δυνάμεις, π.χ. το βάρος της μεταλλικής κατασκευής, τα βάρη των οχημάτων, οι υδροστατικές πιέσεις, κ.ά. Σε κάθε κόμβο αναπτύσσονται επίσης αντιδράσεις που εξισορροπούν την κατασκευή. Αυτές προκύπτουν από την τιμή της παράστασης $-KU$, όπου K και U είναι το μητρώο ακαμψίας της κατασκευής και το διάνυσμα των μετατοπίσεων και στροφών των κόμβων αντίστοιχα. Γνωρίζοντας τις μετατοπίσεις και τις στροφές από την επεξεργασία του μοντέλου με τη ΜΠΣ υπολογίζονται άμεσα οι αντιδράσεις σε κάθε κόμβο (με πίσω αντικατάσταση).

Τέλος σε κάθε κόμβο υπάρχουν και οι εναπομένουσες δυνάμεις οι οποίες προκύπτουν από την άθροιση των εφαρμοσμένων δυνάμεων με τις αντιδράσεις. Είναι προφανές ότι οι εναπομένουσες δυνάμεις πρέπει να είναι ίσες με τις εφαρμοσμένες δυνάμεις. Εκεί στηρίζεται και ο πρώτος έλεγχος. Με την εντολή *Stress di/Post/React* μπορούμε να πάρουμε τις τιμές για οποιεσδήποτε από τις τρεις προαναφερθείσες κατηγορίες κομβικών δυνάμεων. Τυπώνοντας σε αρχεία τις εφαρμοσμένες και τις εναπομένουσες δυνάμεις, μπορούμε να τις αθροίσουμε (χωριστά για κάθε κατεύθυνση) και να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα. Αυτή η διαδικασία έγινε για την κατάσταση πλήρους φόρτου και τα αποτελέσματα ήσαν ικανοποιητικά. Πιο συγκεκριμένα:

$$\Sigma(\text{applied force})_{Zi} - \Sigma(\text{residual force})_{Zi} \approx -0,01 \text{ ton}$$

$$\Sigma(\text{applied force})_{Xi} - \Sigma(\text{residual force})_{Xi} \approx 0 \text{ ton}$$

$$\Sigma(\text{applied force})_{Yi} - \Sigma(\text{residual force})_{Yi} \approx 0 \text{ ton}$$

Τα αθροίσματα κατά τις τρεις κατευθύνσεις είναι λοιπόν πρακτικά τα ίδια, όπως και θα πρέπει. Είναι επίσης προφανές ότι οι αντιδράσεις θα πρέπει να είναι τέτοιες ώστε το διανυσματικό άθροισμά τους να είναι ίσο με το μηδέν, αφού το σώμα ισορροπεί στην τελική κατάσταση (παραμορφωμένο λόγω των φορτίων που έχουν

επιβληθεί). Αθροίζοντας τις κομβικές αντιδράσεις αποκτήθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

$$\Sigma (\text{reaction force})_{x_i} = -0,000004 \text{ ton}$$

$$\Sigma (\text{reaction force})_{y_i} = -0,007 \text{ ton}$$

$$\Sigma (\text{reaction force})_{z_i} = -0,007 \text{ ton}$$

Βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα αυτά είναι ικανοποιητικά και συνεπώς οι έλεγχοι ακρίβειας είναι επίσης ικανοποιητικοί.

6.4 Αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα συγκριθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία που ακολουθήθηκε στο πρώτο εδάφιο σε συνδυασμό με τη θεωρία απλής κάμψης με τα αποτελέσματα που έδωσε η ΜΠΣ. Η κατάσταση φόρτισης που επιλέχθηκε για τη σύγκριση είναι αυτή του κενού σκάφους σε ήρεμο νερό, για να αποφευχθούν επιδράσεις του διαφορετικού τρόπου προσομοίωσης των φορτίων που μεταφέρει το σκάφος.

Το ύψος του ουδέτερου άξονα βρίσκεται σε απόσταση 2,20 m από τη βασική γραμμή αναφοράς. Το πρόγραμμα δείχνει ότι οι ορθές διαμήκεις τάσεις (σ_x) μηδενίζονται σε απόσταση 2,59 m από τη βασική γραμμή αναφοράς, όπου βρίσκεται ο ουδέτερος άξονας της διατομής. Παρατηρείται λοιπόν μία απόκλιση η οποία οφείλεται και στο γεγονός ότι στη διακριτοποιημένη κατασκευή λαμβάνονται υπόψη και οι υδροστατικές φορτίσεις στον πυθμένα. Η συνολική ορθή διαμήκης τάση στην κατασκευή του πυθμένα αυξάνεται τότε, καθόσον προστίθενται διανυσματικά οι πρωτεύουσες τάσεις λόγω της διαμήκους κάμψης με τις δευτερεύουσες λόγω τοπικής κάμψης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόστασης του ουδέτερου άξονα της διατομής από τη βασική γραμμή αναφοράς (πυθμένας).

Από τη μελέτη αντοχής γνωρίζουμε ότι για την πιο αδύνατη εγκάρσια τομή (σε απόσταση 46 m από την πρυμναία κάθετο), οι ροπές αντίστασης του πυθμένα και του καταστρώματος είναι ίσες με 530.843 cm³ και 532.475 cm³ αντίστοιχα. Επίσης, από τα αποτελέσματα του προγράμματος υπολογισμού των διαμήκων καμπτικών ροπών είναι γνωστό ότι η ροπή κάμψης ισούται με 1246 tonm για την ίδια απόσταση από την πρυμναία κάθετο. Η θεωρία απλής κάμψης δίνει συνεπώς τα παρακάτω αποτελέσματα (σε παρενθέσεις τα αποτελέσματα με το πρόγραμμα ΠΣ):

$$\begin{aligned} \sigma_B &= -23 \text{ N/mm}^2 & (-16,5 \text{ N/mm}^2) \\ \sigma_D &= +22,95 \text{ N/mm}^2 & (+8,0 \text{ N/mm}^2) \end{aligned}$$

Κάνοντας χρήση της κατανομής των ορθών τάσεων που προέκυψε από τη ΜΠΣ υπολογίστηκε και η ροπή κάμψης στη συγκεκριμένη διατομή από τη σχέση:

$$M = \int_A \sigma_x z dA = \Sigma \sigma_{xi} z_i A_i \quad (8)$$

Πίνακας 5 Σύγκριση διαμήκων τάσεων (ΜΠΣ και θεωρία δοκών)

Περιοχή πλοίου	Κατάσταση φόρτισης	ΜΠΣ (N/mm^2)	Θεωρία κάμψης δοκών (N/mm^2)
Πυθμένας	Κοίλο	+9,0	+2,32
	Κορυφή	-30,9	-30,1
Κατάστρωμα αντοχής	Κοίλο	-5,0	-2,31
	Κορυφή	+16,0	+30,0

όπου:

- A = επιφάνεια της εγκάρσιας τομής του πλοίου
 σ_x = διαμήκης ορθή τάση
 Z = απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της διατομής

Αντικαθιστώντας, προέκυψε ότι $M = 829$ tonm. Για μια πληρέστερη εικόνα, παραθέτουμε αποτελέσματα για πλοίο στην κορυφή και στο κοίλο κύματος (για την ίδια εγκάρσια τομή) στους Πίνακες 5 και 6.

Για το πλοίο σε κοίλο κύματος, η ροπή κάμψης είναι $-125,4$ tonm, ενώ σε κορυφή κύματος, είναι ίση με 1.629 tonm.

Η ροπή κάμψης στο κοίλο κύματος, που προκύπτει από την ολοκλήρωση των τάσεων ισούται με -578 tonm, ενώ στην κορυφή κύματος ισούται με 1705 tonm. Παρατηρούμε ότι στη δεύτερη περίπτωση μεταξύ των δύο μεθόδων υπάρχει απόκλιση των αποτελεσμάτων. Επίσης βλέπουμε ότι, ενώ η θεωρία απλής κάμψης δίνει σχεδόν την ίδια τιμή τάσης για τον πυθμένα και το κατάστρωμα, η ΜΠΣ δίνει διαφορετικές τιμές. Αυτό αποδίδεται στην επίδραση των δευτερευουσών και των τριτεουσών τάσεων που αναπτύσσονται στον πυθμένα (λόγω υδροστατικής φόρτισης), οι οποίες όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, προστίθενται στην πρωτεύουσα τάση του πλοίου για να υπολογισθεί η συνολική τάση στον πυθμένα. Στη διακριτοποιημένη κατασκευή τα φαινόμενα αυτά λαμβάνονται υπόψη, σε αντίθεση με τη θεωρία απλής κάμψης του πλοίου ως δοκός. Άλλες πηγές αποκλίσεων των αποτελεσμάτων είναι επίσης ότι:

- Η θεωρία απλής κάμψης των δοκών δίνει αποδεκτά αποτελέσματα για τις πρωτεύουσες τάσεις για πλοία με $L/B < 7$. Στην παρούσα περίπτωση όμως $L/B = 3,8$ και συνεπώς θα προκύψουν αποκλίσεις από την ακριβή τιμή όταν χρησιμοποιηθεί η απλή θεωρία κάμψης των δοκών.
- Η θεώρηση των φορτίων που ακολουθήθηκε στο πρώτο εδάφιο (μονοδιάστατη κατανομή) είναι διαφορετική αυτής που ακολουθήθηκε στη ΜΠΣ.
- Η θεωρία της απλής κάμψης των δοκών δεν λαμβάνει υπόψη φαινόμενα αλληλεπίδρασης μεταξύ των κατασκευαστικών στοιχείων ούτε και την υστέρηση διάτμησης.

6.5 Έλεγχος φόρτισης

Εκτός από τους ελέγχους που προαναφέρθηκαν, έγινε έλεγχος και της φόρτισης του μοντέλου. Συγκεκριμένα, ύστερα από την επεξεργασία του μοντέλου μπορούμε, αποκρύβοντας συγκεκριμένα στοιχεία με την εντολή *options\hide ele*, να αποθηκεύσουμε σε συγκεκριμένο αρχείο τις κατακόρυφες συνιστώσες των εφαρμοζόμενων (εξωτερικών) δυνάμεων αριστερά από οποιαδήποτε εγκάρσια τομή κατά μήκος του πλοίου.

Αθροίζοντας έτσι όλες τις δυνάμεις σε συγκεκριμένες αποστάσεις από την πρυμναία κάθετο, αποκτάται η τέμνουσα δύναμη για την αντίστοιχη εγκάρσια τομή. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε για δέκα οκτώ (18) εγκάρσιες τομές κατά μήκος του σκάφους για την κατάσταση κενού σκάφους σε ήρεμο νερό.

Οι τιμές που αποκτήθηκαν ακολουθώντας αυτή τη μεθοδολογία συγκρίνονται με την κατανομή των τεμνουσών δυνάμεων που προέκυψε για την αντίστοιχη κατάσταση με τη βοήθεια του Σχήματος 1.

Παρατηρούμε ότι υπάρχει ικανοποιητική σύμπτωση των αποτελεσμάτων, γεγονός που δείχνει ότι η φόρτιση του μοντέλου είναι σωστή. Η καμπύλη των τεμνουσών δυνάμεων δε μηδενίζεται όπως θα έπρεπε στο προωραίο άκρο. Αυτό οφείλεται στη μικρή απόκλιση του εκτοπίσματος που δίνει το πρόγραμμα υδροστατικών καμπυλών από την πραγματική τιμή του. Για την επαλήθευση αυτού παρατίθενται οι παρακάτω τιμές (σε ton):

Βάρος μεταλλικής κατασκευής	647,00	646,6
Βάρος ενδιάτισης-εξοπλισμού	59,00	58,966
Βάρος μηχανολογικής εγκατάστασης	131,00	131
Εκτόπισμα	837,00	836,566

Η πρώτη στήλη περιλαμβάνει τις τιμές των βαρών που εκτιμήθηκαν στο πρώτο στάδιο της μελέτης και δίνουν το εκτόπισμα του άφορτου σκάφους. Η δεύτερη στήλη αφορά τις αντίστοιχες τιμές που αποκτήθηκαν με άθροιση των κομβικών δυνάμεων που επιβλήθηκαν στο μοντέλο. Το υδροστατικό πρόγραμμα έδωσε εκτόπισμα 827,76 τόνους για αυτή την κατάσταση. Παρατηρούμε ότι υπάρχει διαφορά 8,8 ton από το βάρος του άφορτου σκάφους που δίνουν οι κομβικές δυνάμεις στο μοντέλο. Τόση ακριβώς είναι και η τιμή της τέμνουσας δύναμης στο προωραίο άκρο του πλοίου.

Βιβλιογραφία

1. Μπικάκη Γ. *Στατική μελέτη επιβατηγού-οχηματαγωγού ανοικτού τύπου με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1996.