



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

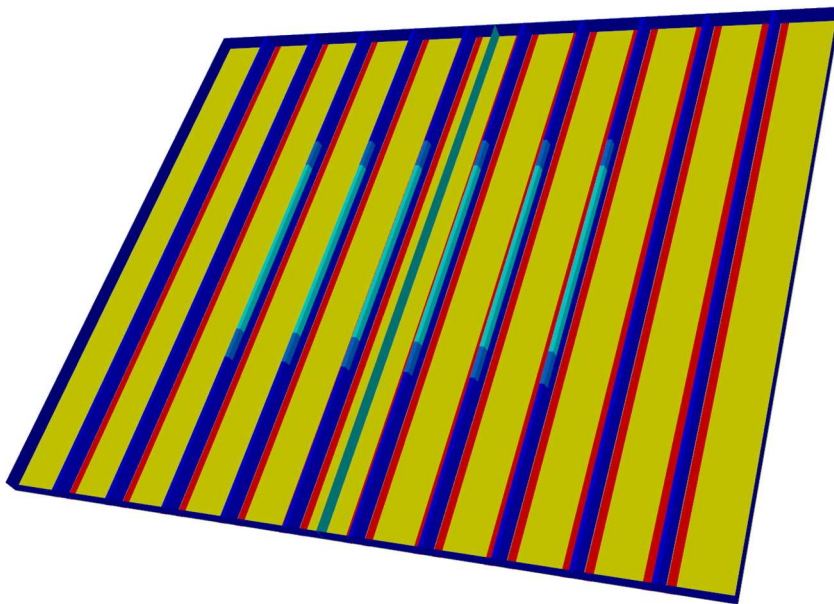
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Διπλωματική εργασία

*Μελέτη αντοχής καλύμματος στομίου κύτους πλοίου χύδην
φορτίου από σύνθετα υλικά*

Κωνσταντίνος Κουτσούκος



Επιβλέπων: Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2018

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Νικόλαου Τσούβαλη, τον οποίο εκτιμώ τόσο σαν επιστήμονα όσο και σαν άνθρωπο. Οφείλω να τον ευχαριστήσω για την εμπιστοσύνη του, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο καθώς και για την καθοδήγησή του σε όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Δεν μπορώ παρά να αναγνωρίσω την υποστήριξή του σε κάθε εμπόδιο που προέκυψε, παρέχοντας πρόθυμα επιπρόσθετο προσωπικό του χρόνο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ακόμη τον Επίκουρο Καθηγητή Χρήστο Παπαδόπουλο για την βοήθεια του παρέχοντάς μου πρόσβαση στον υπολογιστή της Σχολής Ναυπηγών, επιτρέποντάς μου την επίλυση απαραίτητων μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Ευχαριστώ θερμά την Arista Shipping S.A. για την παροχή των αναλυτικών σχεδίων των χαλύβδινων καλυμμάτων στομίων κυτών βάσει των οποίων πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση των καλυμμάτων από σύνθετα υλικά., όπως επίσης και την B&T COMPOSITES για την εκτίμηση του κόστους του καλύμματος από σύνθετα υλικά που σχεδιάστηκε.

Είμαι ευγνώμων στον Αστρινό Παπαδάκη, υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών και στον Ηλία Μπιλάλη, απόφοιτο της Σχολής Ναυπηγών για την υποστήριξή τους, με την εμπειρία και τον χρόνο τους, στην εξοικείωσή μου με τον πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποίησα στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη συνεχή στήριξή τους σε όλη την διαδρομή αυτή.

Περίληψη

Στις μέρες μας τα σύνθετα υλικά έχουν εδραιώσει τη θέση τους στην βιομηχανία και η ανάπτυξή τους πραγματοποιείται με αυξανόμενο ρυθμό, καθώς όλοι οι βασικοί βιομηχανικοί τομείς υιοθετούν τα υλικά αυτά στις διάφορες κατασκευές ή τμήματα αυτών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου τα αγωνιστικά αυτοκίνητα αποτελούνται κατά βάση από σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα. Ποικίλα παραδείγματα υπάρχουν και στην ναυπηγική καθώς το μεγαλύτερο μέρος των σκαφών αναψυχής αποτελούνται από σύνθετα με ίνες γυαλιού (fiberglass). Οι εφαρμογές επεκτείνονται στην αεροναυπηγική, τον αθλητισμό, αλλά και στον στρατό. Αίτια της ραγδαίας αύξησής της χρήσης τους αποτελούν το μειωμένο βάρος τους, η υψηλή μηχανική αντοχή τους και η αντοχή τους σε φθορά και διάβρωση, ενώ το βασικό μειονέκτημα τους εντοπίζεται στο υψηλό κόστος απόκτησής τους.

Τα πρώτα βήματα χρήσης σύνθετων υλικών παρατηρούνται και στον χώρο της εμπορικής ναυτιλίας, όπου παρατηρούνται εφαρμογές που αφορούν τμήματα υπερκατασκευών, τμήματα καταστρωμάτων, σωληνώσεις, καλύμματα στομίων κυτών κ.α. Συγκεκριμένα, η χρήση σύνθετων υλικών για την κατασκευή καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο με λίγες μελέτες να έχουν δημοσιευτεί πάνω στο θέμα, όπως και οι πρακτικές εφαρμογές πάνω σε πλοία.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, μελετάται η επιλογή της αντικατάστασης των συμβατικών χαλύβδινων καλυμμάτων στομίων κυτών ενός πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου από καλύμματα κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Για τον σκοπό αυτό επιλέγεται η μελέτη ενός συγκεκριμένου χαλύβδινου καλύμματος, στην συνέχεια η σχεδίαση ενός καλύμματος από σύνθετα υλικά με τις ίδιες βασικές διαστάσεις και τέλος η σύγκριση των δύο με κριτήρια την μηχανική συμπεριφορά, το βάρος και το κόστος απόκτησής τους.

Η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς και η εξαγωγή αποτελεσμάτων αντοχής και ακαμψίας για τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν πραγματοποιήθηκε με την χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο επιτρέπει την επίλυση σύνθετων προβλημάτων, με περίπλοκες γεωμετρίες, που είναι αδύνατο να λυθούν με την αναλυτική μέθοδο.

Η σχεδίαση ενός καλύμματος στομίου κύτους απαιτεί τον καθορισμό μεγάλου πλήθους παραμέτρων. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν και επιλύθηκαν πολλαπλά μοντέλα, έτσι ώστε να επιτευχθεί τελικά μία σχεδίαση που να ικανοποιεί τα κριτήρια αστοχίας και να οδηγεί σε αισθητή μείωση του βάρους σε σχέση με την κατασκευή από χάλυβα. Το πρώτο μοντέλο που αναπτύχθηκε και αναλύθηκε περιλαμβάνει ενίσχυση με τη μορφή σταθμίδων σε δύο διευθύνσεις. Για την επίτευξη επαρκούς ροπής αδράνειας και την ικανοποίηση των κριτηρίων αστοχίας αποδείχθηκε ότι είναι αναγκαία η τοποθέτηση μεγάλου αριθμού ενισχυτικών και συνεπώς, παρά την ικανοποιητική μηχανική συμπεριφορά της, το εκτιμώμενο βάρος της κατασκευής υπολογίζεται αυξημένο και συνεπώς δεν οδηγεί σε συμφέρουσα επιλογή. Η δεύτερη σχεδιαστική προσέγγιση περιλαμβάνει ενισχυτικά τύπου καπέλου κατά το εγκάρσιο του πλοίου. Στο πρώτο μοντέλο της προσέγγισης αυτής επιλέχθηκε η τοποθέτηση 6 ενισχυτικών ομοιόμορφου πάχους. Τα αποτελέσματά της δεν ήταν αποδεκτά, αλλά ανέδειξαν

τις περιοχές της γεωμετρίας στις οποίες απαιτείται ενίσχυση. Στην συνέχεια μελετήθηκε πλήθος μοντέλων στα οποία τοποθετήθηκε τοπική ενίσχυση με την μορφή τοπικής αύξησης του πάχους, διατηρώντας παράλληλα τον αριθμό των ενισχυτικών στα 6. Ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν βελτιωμένα, δεν πληρούσαν τα κριτήρια αστοχίας. Στα επόμενα μοντέλα που μελετήθηκαν επιλέχθηκε η αύξηση του αριθμού του ενισχυτικού σε 10 και η διατήρηση ομοιόμορφου πάχους σε όλη την έκταση της γεωμετρίας. Όμοια με προηγουμένως, τα αποτελέσματα της ανάλυσης δεν βελτιώθηκαν αρκετά, έτσι ώστε να κριθεί αποδεκτή η σχεδίαση. Η τελική αποδεκτή σχεδίαση επιτεύχθηκε με τον συνδυασμό των παραπάνω, δηλαδή με τοποθέτηση 10 ενισχυτικών και τοπική ενίσχυση με τη μορφή επιπρόσθετου πάχους στις κρίσιμες περιοχές. Στην τελική σχεδίαση τοποθετήθηκε επίσης μια κεντρική σταθμίδα κατά το εγκάρσιο προσομοιάζοντας την ένωση των εγκάρσιων πλευρών δύο όμοιων τμημάτων του καλύμματος. Με τον τρόπο αυτό εξετάστηκε η επιλογή διάσπασης του ενιαίου καλύμματος σε δύο επιμέρους τμήματα, έτσι ώστε να διευκολύνεται το άνοιγμα και το κλείσιμό του κατά την λειτουργία του πάνω στο πλοίο. Στο τέλος πραγματοποιείται σύγκριση αντοχής, βάρους και κόστους της τελικής σχεδίασης με το χαλύβδινο κάλυμμα αναφοράς ώστε να διαπιστωθεί το κατά πόσο είναι συμφέρουσα η αντικατάσταση του τελευταίου με κάλυμμα από σύνθετα υλικά.

Abstract

Nowadays composite materials have established their place in industry and they are growing with increasing pace, as all of the main industrial sectors have adopt composites and use them in plenty structures of parts of them. A typical example is the automotive industry, where many parts of racing cars consist of carbon fiber composite. There is a variety of examples in naval architecture, as well, as the majority of leisure boat is made of fiberglass. The applications expand to aeronautics, sports and military. The reason of this rapid growth is the reduced weight, the high mechanical strength as well as the wear and corrosion resistance, while their main disadvantage is their high construction cost.

The first steps in the use of composite materials are also observed in the merchant marine sector, where application involving superstructures, parts of decks, piping, hatch covers e.t.c are observed. In particular, the use of composite materials for the construction of hatch covers is at an early stage where few studies are published as well as few practical applications on ships.

In this diploma thesis, the option of replacing the conventional steel hatch cover of bulk carriers with hatch cover made of composite material is being considered. For this purpose, it is chosen to study a specific steel hatch cover, then to design a hatch cover made of composite materials with the same basic dimensions and finally to compare the two taking into consideration their mechanical behavior, their weight and their construction cost.

The simulation of mechanical behavior and the extraction of strength and stiffness results for the developed models was accomplished with a program using finite element analysis,

which provides the capability of solving complex models with complex geometries that cannot be solved with the use of the analytical method.

The design of a hatch cover required the definition of a large number of parameters. For this purpose, multiple models have been developed and solved so that a design that meets the failure criteria is achieved and leads to a noticeable weight reduction in relation to the steel construction. The first model that was developed and solved includes the use of flat bar stiffeners in two directions. In order to achieve a sufficient moment of inertia and meet the failure criteria, it has been proven that a large number of stiffeners is necessary and therefore, despite its satisfactory mechanical behavior, the estimated weight of the construction is calculated to be increased and thus the specific design does not lead to an advantageous choice. The second design approach includes hat type stiffeners in the transverse direction of the ship. In the first model of this approach the placement of 6 stiffeners of uniform thickness was chosen. The results were not acceptable, but they highlighted the areas of geometry in which reinforcement is needed. Then, a number of models were considered where local reinforcement was applied in the form of local thickness increase, while maintaining the number of 6 stiffeners. Despite the fact that the results were improved, they did not meet the failure criteria. In the following models that were considered, the increase of the number of stiffeners to 10 was chosen, while maintaining the uniform thickness. Similar to previously, the results of the analysis were not improved enough to achieve an acceptable design. The final acceptable design was achieved by combining the above. In particular, 10 stiffeners were placed, combined with local reinforcement in the form of additional thickness on the critical areas. In the final design, a centered flat bar was also mounted simulating the joint of the transverse sides of 2 separate parts in order to facilitate hatch covers' opening and closing during the operation of the ship. Finally, the final design of the composite hatch cover and the steel hatch cover were compared in terms of strength, weight and cost in order to determine whether the replacement of the steel hatch cover with a composite one is advantageous.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	9
1.1 Σύνθετα υλικά στην ναυπηγική.....	9
1.2 Καλύμματα στομίων κυτών.....	13
1.2.1 Είδη καλυμμάτων στομίων κυτών.....	13
1.2.2 Κανονισμοί.....	17
1.2.3 Εφαρμογές καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά.....	21
1.3 Στόχοι διπλωματικής εργασίας.....	25
Κεφάλαιο 2: Πρώτη προσέγγιση μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία.....	27
2.1 Εισαγωγή στη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων.....	27
2.2 Μελέτη υπάρχοντος καλύμματος από σύνθετα υλικά.....	29
2.2.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	29
2.2.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης.....	33
2.2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και σύγκριση με βιβλιογραφία.....	41
Κεφάλαιο 3: Μελέτη χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους.....	44
3.1 Επιλογή καλύμματος στομίου κύτους για μελέτη.....	44
3.2 Εφαρμογή κανονισμών.....	49
3.3 Υπολογισμός βάρους και ροπής αδράνειας.....	50
Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά.....	53
4.1 Σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με ενίσχυση από σταθμίδες (flat bars).....	53
4.1.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	54
4.1.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης.....	57
4.1.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	60
4.2 Σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με ενισχυτικά τύπου καπέλου.....	62
4.2.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	62
4.2.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης.....	65
4.2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	68
4.3 Βελτίωση σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με 6 ενισχυτικά τύπου καπέλου.....	69
4.3.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	69
4.3.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης.....	72
4.3.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	77
4.4 Βελτίωση σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με 10 ενισχυτικά τύπου καπέλου.....	79
4.4.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	79

4.4.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης.....	85
4.4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	89
4.5 Τελική σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με ενισχυτικά τύπου καπέλου.....	91
4.5.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.....	91
4.5.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης.....	94
4.5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	97
Κεφάλαιο 5: Σύγκριση χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους και σχεδιάσεων με χρήση σύνθετων υλικών.....	100
5.1 Σύγκριση αντοχής και ακαμψίας.....	100
5.2 Σύγκριση βάρους.....	103
5.3 Σύγκριση κόστους.....	103
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	106
6.1 Συμπεράσματα.....	106
6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία.....	108

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σύνθετα υλικά στην ναυπηγική

Τα σύνθετα υλικά διαθέτουν κάποια εμφανή πλεονεκτήματα τα οποία τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά στους περισσότερους βιομηχανικούς κλάδους. Τα βασικότερα από αυτά είναι το μικρό ειδικό βάρος και η υψηλή αντοχή τους. Η αεροναυπηγική έχει εδώ και χρόνια αξιοποιήσει αυτά τα πλεονεκτήματα καθώς από σύνθετα υλικά αποτελείται μεγάλος αριθμός τμημάτων ελικοπτέρων και αεροσκαφών κυρίως πολεμικών, αλλά και πολιτικών. Άλλος ένας κλάδος που χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό σύνθετα υλικά είναι η αυτοκινητοβιομηχανία, με το μεγαλύτερο τμήμα των αγωνιστικών αυτοκινήτων να αποτελείται από σύνθετα υλικά. Σύνθετα παρατηρούνται επίσης στον αθλητισμό, στην αρχιτεκτονική, στις τηλεπικοινωνίες και σε πολλούς άλλους τομείς.

Στην ναυπηγική η χρήση τους περιοριζόταν για χρόνια κυρίως στα μικρά σκάφη αναψυχής, όπου το GRP (glass reinforced polymer ή αλλιώς fiberglass) είναι αδιαμφισβήτητα το επικρατέστερο υλικό κατασκευής γαστρών, αλλά και του μεγαλύτερου μέρους των υπερκατασκευών των ταχυπλόων, ιστιοπλοϊκών σκαφών και θαλαμηγών. Σε πολεμικά πλοία, ο αριθμός των εφαρμογών είναι επίσης αξιοπρόσεκτος καθώς τμήματα καταστρωμάτων, φρακτές, τμήματα υπερκατασκευών, διάφορα καλύμματα, πηδάλια, έλικες, άξονες, ακόμα και ολόκληρες γάστρες για μικρές κορβέτες είναι κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών που ευνοεί την επιλογή τους για πολεμικές εφαρμογές είναι η έλλειψη ηλεκτρομαγνητικής αγωγιμότητας των υλικών αυτών γεγονός που δυσχεραίνει τον εντοπισμό του πλοίου. Στις μέρες μας είναι πρόδηλο το ενδιαφέρον επέκτασης της χρήσης των σύνθετων υλικών στον εμπορικό τομέα και σε μεγαλύτερα πλοία.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή του πρώτου επιβατηγού πλοίου εξ' ολοκλήρου από σύνθετα υλικά χρησιμοποιώντας υλικό σάντουιτς με PVC για τον πυρήνα και ίνες άνθρακα με ρητίνη βινυλεστέρα για το περίβλημα. Συγκεκριμένα το ναυπηγείο Brødrene Aa στο Hyen της Νορβηγίας κατασκεύασε το 2003, για την μεγαλύτερη νορβηγική εταιρία με επιβατηγά πλοία Rodne & Sønner το Rygerkatt (Σχήμα 1.1), ένα καταμαράν 18.5 μέτρων μήκους. Το πλοίο σχεδιάστηκε με δυνατότητα μεταφοράς 62 επιβατών, μέγιστη ταχύτητα 29 κόμβους και λόγω του μειωμένου βάρους πέτυχε αισθητή μείωση στην κατανάλωση καυσίμου. Στην συνέχεια ακολούθησαν και ναυπηγεία από διάφορες χώρες, όπως της Κίνας και της Τουρκίας, με σχεδιάσεις και κατασκευές επιβατηγών πλοίων, κατά βάση τύπου καταμαράν, από σύνθετα υλικά που φτάνουν έως και τα 42 μέτρα μήκος, χωρητικότητα 400 επιβατών και ταχύτητα 40 κόμβων. (compositesworld.com, 2003)



Σχήμα 1.1: Rygerkatt - Rødne Fjord Cruise

Μία ακόμα αξιοσημείωτη εφαρμογή αποτελεί η κατασκευή καταστρώματος αυτοκινήτων αποτελούμενη από χαλύβδινο σκελετό (Σχήμα 1.2) πάνω στον οποίο τοποθετήθηκαν πλάκες από σύνθετο υλικό. Το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιήθηκε έχει τη μορφή σάντουιτς με πυρήνα από PVC και περίβλημα από fiberglass. Το κατάστρωμα κατασκευάστηκε από το ναυπηγείο ULJANIK στην Pula της Κροατίας με σκοπό την τοποθέτησή του σε πλοίο RoRo μήκους 200 μέτρων και μεταφορικής ικανότητας 7000 αυτοκινήτων. Η σχεδίαση πήρε έγκριση από τον γαλλικό νηογνώμονα Bureau Veritas, τηρώντας όλους τους κανονισμούς SOLAS για αξιοπιστία στην κατασκευή και πυρασφάλεια. (Radolović- Rahm, October 2017)

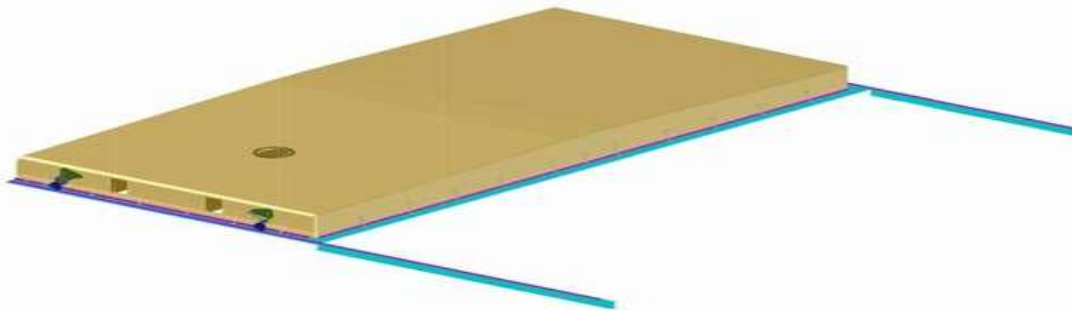


Σχήμα 1.2: Χαλύβδινος σκελετός καταστώματος αυτοκινήτων



Σχήμα 1.3: Τελική κατασκευή καταστώματος αυτοκινήτων

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην κατασκευή καλυμμάτων στομίων κυτών (hatch cover) από σύνθετα υλικά με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα την έγκριση αντικατάστασης όλων των συμβατικών hatch cover με αντίστοιχα από σύνθετα υλικά ενός πλοίου bulk carrier μήκους 220 μέτρων της δανέζικης πλοιοκτήτριας εταιρίας Nordic Bulk Carrier AS το 2014. Η αντικατάσταση εγκρίθηκε επίσης από τον νορβηγικό νηογνώμονα DNV-GL και σε συνεργασία με το SP Technical Research Institute of Sweden διεξήχθη ανάλυση ρίσκου της συγκεκριμένης σχεδίασης. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε από το ναυπηγείο Oshima στην Ιαπωνία. Παρόλο που δεν κατασκευάστηκε στην πράξη, παραμένοντας στο επίπεδο της έρευνας, παρατηρήθηκε αυξανόμενο ενδιαφέρον από το κομβικό αυτό σημείο και μετά, καθώς διεξήχθησαν και συνεχίζουν να διεξάγονται έρευνες πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα. (Hansen, March 2014)



Σχήμα 1.4: Κάλυμμα κύτους από σύνθετα υλικά

Παραδείγματα επιπλέον εφαρμογών από σύνθετα υλικά που έχουν κατασκευαστεί ή βρίσκονται ακόμα σε στάδιο έρευνας και σχεδιασμού αποτελούν τα παρακάτω: τμήματα υπερκατασκευών, σωληνώσεις δεξαμενοπλοίων, τμήματα καταστρωμάτων, άξονες, τοπικές ενισχύσεις ενώσεων γάστρας και υπερκατασκευών κ.α.

Τα βασικά μειονεκτήματα που καθιστούν εμπόδιο στην ταχύτερη διάδοση των σύνθετων υλικών στην ναυπηγική, αλλά και σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή, είναι δύο. Αρχικά, βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλό τους κόστος, που περιλαμβάνει την υψηλή αρχική τιμή των επιμέρους υλικών, αλλά και τη διαδικασία της κατασκευής καθαυτή, η οποία είναι πιο απαιτητική από την αντίστοιχη των συμβατικών υλικών. Βέβαια, παρά το υψηλό αρχικό τους κόστος, η επιλογή τους σε πληθώρα περιπτώσεων κρίνεται συμφέρουσα, δεδομένης της υψηλής μηχανικής αντοχής τους και αντοχής τους σε διάβρωση και φθορά που συνεπάγεται μειωμένο κόστος συντήρησης στον κύκλο ζωής τους, όπως και η δυνατότητα άμεσης και εύκολης επισκευής τυχόν φθορών. Το δεύτερο βασικό μειονέκτημα είναι η έλλειψη επαρκούς τεχνογνωσίας και εμπειρίας στην χρήση σύνθετων σε νέες εφαρμογές, που προκαλεί δισταγμό στην επιλογή τους. Ωστόσο, οι συνεχώς αυξανόμενες κατασκευές από σύνθετα και το ταυτόχρονο ερευνητικό έργο προμηνύουν ότι η διάδοσή τους θα είναι ραγδαία.

1.2 Καλύμματα στομίων κυτών

1.2.1 Είδη hatch cover

Τα καλύμματα στομίων κυτών χρησιμοποιούνται σε διάφορους τύπους εμπορικών πλοίων για την σφράγιση των κυτών φορτίου. Οι χώροι αποθήκευσης του φορτίου οφείλουν να είναι προστατευμένοι από κάθε είδους φθορά που μπορεί να προκληθεί από τις εξωτερικές συνθήκες, αλλά και από τις ποικίλες εργασίες κατά τη λειτουργία ενός πλοίου. Με σκοπό την διατήρηση του φορτίου για μεγάλο χρονικό διάστημα, οι δεξαμενές φορτίου πρέπει να παραμένουν αεροστεγείς και υδατοστεγείς. Συνεπώς, κρίνεται κρίσιμος ο σχεδιασμός και η κατασκευή των καλυμμάτων στομίων κυτών έτσι ώστε να επιτυγχάνεται τόσο η αξιόπιστη μεταφορά του φορτίου, όσο και η αποδοτική διαχείριση αυτού, όπως η φόρτωση και εκφόρτωσή του στο πλοίο. Έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι καλυμμάτων στομίων κυτών, έτσι ώστε να επιλέγεται ο κατάλληλος τύπος καλυμμάτων που καλύπτει τις ανάγκες του κάθε πλοίου ξεχωριστά. Οι πιο βασικοί τύποι παρουσιάζονται παρακάτω. (MacGregor-Cargotec Corporation, February 2010)

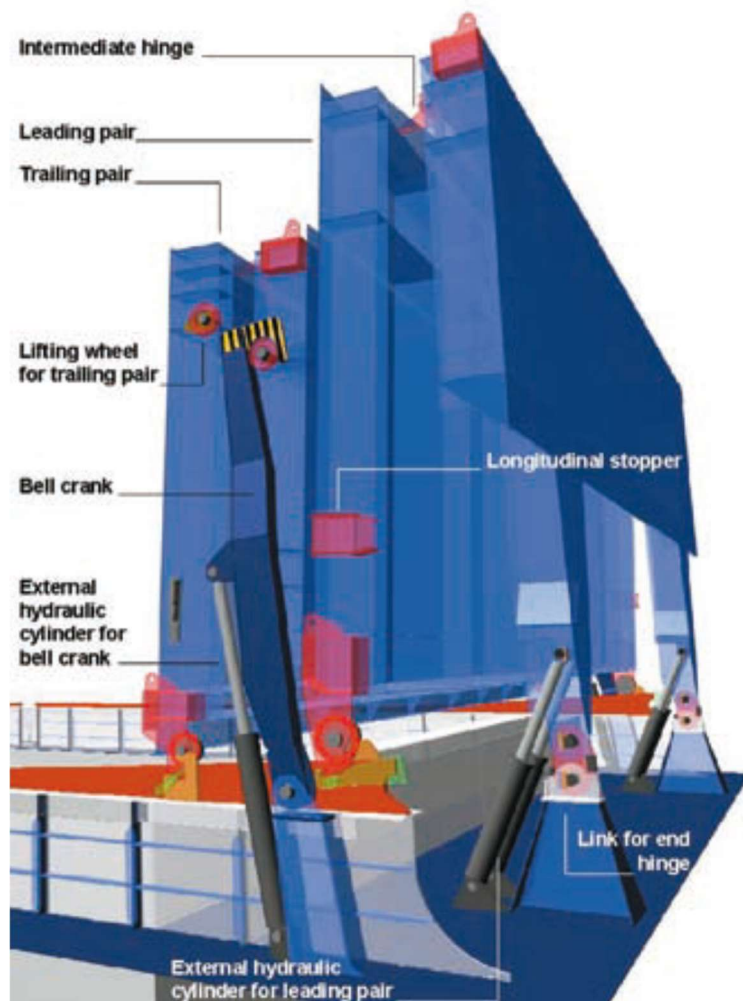
➤ Πτυσσόμενα καλύμματα (folding)



Σχήμα 1.5: Πτυσσόμενα καλύμματα

Τα πτυσσόμενα καλύμματα (Σχήμα 1.5) είναι συχνή επιλογή για πλοία χύδην φορτίου. Ένα κάλυμμα αυτού του τύπου αποτελείται συνήθως από δύο πλάκες που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους με περιστροφικό σύνδεσμο (μεντεσές) σχηματίζοντας ένα πτυσσόμενο ζεύγος. Σε πολλές περιπτώσεις το κάλυμμα αποτελείται από δύο πτυσσόμενα ζεύγη με το ένα να στοιβάζεται στο προωαίο και το άλλο στο πρυμναίο άκρο του στομίου κύτους. Για το άνοιγμα και το κλείσιμο του κάθε πτυσσόμενου ζεύγους χρησιμοποιούνται υδραυλικά έμβολα που είναι τοποθετημένα πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου και συνδέονται απευθείας πάνω στον ενδιάμεσο σύνδεσμο. Το άνοιγμα πραγματοποιείται ανυψώνοντας τη πλάκα που είναι συνδεδεμένη στην προωαία (αντίστοιχα πρυμναία) πλευρά του στομίου κύτους, με την δεύτερη πλάκα του ζεύγους να ακολουθεί μέχρι την όρθια θέση, έχοντας τοποθετημένους τροχούς στο

άκρο της. Οι πλάκες συνήθως ασφαλίζονται με ημιαυτόματους γάντζους, οι οποίοι στερεώνονται πάνω στους τροχούς των άκρων των πλακών. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι πλάκες που συνεργάζονται μεταξύ τους μπορεί να είναι ακόμα και 4 ή 6 σχηματίζοντας μία πτυσσόμενη μονάδα. Στην περίπτωση ταυτόχρονης ύπαρξης μίας πρυμναίας και μίας προραία πτυσσόμενης μονάδας, ο αριθμός των πλακών μπορεί να φτάσει μέχρι και 12. Το πρώτο ζεύγος από τη μονάδα, το οποίο συνδέεται με τις πλευρές του στομίου κύτους, ονομάζεται κύριο ζεύγος, ενώ τα υπόλοιπα ακολουθούντα. Το άνοιγμα του κύριου ζεύγους πραγματοποιείται με τον τρόπο που περιεγράφηκε προηγουμένως. Υπάρχουν δύο εναλλακτικές μέθοδοι χειρισμού των ακολουθούντων ζευγών. Η πρώτη και πιο συνηθισμένη μέθοδος (Σχήμα 1.6) είναι η χρήση επιπλέον υδραυλικού συστήματος, τοποθετημένου πάνω στο κατάστρωμα του πλοίου, με ξεχωριστό υδραυλικό έμβολο (αναφέρεται ως “External hydraulic cylinder for leading pair”) να δρα σε κάθε ενδιάμεσο σύνδεσμο. Η δεύτερη μέθοδος είναι η τοποθέτηση υδραυλικών εμβόλων, συνδέοντας τις πλάκες του καλύμματος μεταξύ τους, που επιβάλλει την απαραίτητη σχετική κίνηση των πλακών.



Σχήμα 1.6: Πτυσσόμενο κάλυμα πολλαπλών πλακών

➤ **Κυλιόμενα καλύμματα (rolling)**



Σχήμα 1.7: Κυλιόμενα καλύμματα

Τα κυλιόμενα καλύμματα (Σχήμα 1.7) προτιμώνται σε μεγαλύτερα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, όπως είναι οι τύποι Panamax και Capesize. Στην πιο διαδεδομένη τους μορφή αποτελούνται από ένα ζεύγος όμοιων πλακών ανά κάλυμμα, οι οποίες ανοίγουν εγκάρσια προς τις πλευρές του πλοίου και συνδέονται κατά μήκος στην μέση του στομίου του κύτους (side rolling). Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται το άνοιγμα ολόκληρης της επιφάνειας του στομίου κύτους, διευκολύνοντας τη φόρτωση και εκφόρτωση του φορτίου. Σε κάποια μεγάλα πλοία μεταφοράς μεταλλευμάτων, τα οποία διαθέτουν επαρκή ελεύθερη επιφάνεια καταστρώματος, συναντάται και ένας τύπος κυλιόμενων καλυμμάτων που αποτελείται από μία μόνο πλάκα, η οποία ανοίγει εγκάρσια είτε προς τη μία, είτε προς την άλλη πλευρά του πλοίου διευκολύνοντας την φόρτωση και εκφόρτωση του φορτίου από την ελεύθερη πλευρά. Το άνοιγμα και κλείσιμο του καλύμματος πραγματοποιείται με μηχανισμό εγκατεστημένο πάνω στο πλοίο. Τα τρία είδη του μηχανισμού αυτού είναι τα ακόλουθα:

- Μηχανισμός με οδοντωτή ράβδο και οδοντωτό τροχό (rack and pinion drive)
Η οδήγηση των πλακών παρέχεται από έναν αργόστροφο υδραυλικό κινητήρα, ο οποίος είναι τοποθετημένος στο κέντρο των εγκάρσιων πλευρών του στομίου κύτους και είναι συνδεδεμένος, μέσω ενός οδοντωτού τροχού, πάνω σε μία οδοντωτή ράβδο εγκατεστημένη πάνω στο κάλυμμα. Η κάθε μία πλάκα του ζεύγους διαθέτει ξεχωριστό μηχανισμό, επιτρέποντας το άνοιγμα και το κλείσιμο της καθεμιάς μεμονωμένα. Το είδος του μηχανισμού αυτού είναι ευέλικτο, ασφαλές και δεν απαιτεί ιδιαίτερη συντήρηση.
- Μηχανισμός με οδοντωτή ράβδο και οδοντωτό τροχό και συρματόσχοινο (rack, pinion and wire drive)
Σε αυτό το είδος ένας μηχανισμός οδοντωτής ράβδου και τροχού τοποθετείται πάνω στη μία από τις δύο πλάκες τους ζεύγους. Η δεύτερη πλάκα οδηγείται ταυτόχρονα με την

πρώτη με χρήση ενός συρματόσχοινου που έχει εγκατασταθεί μόνιμα πάνω της. Το σύστημα των δύο πλακών οδηγείται από έναν υδραυλικό κινητήρα.

- Μηχανισμός με αλυσίδα (chain drive)

Αποτελείται είτε από μία αλυσίδα σε κάθε πλάκα, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα χειρισμού της κάθε πλάκας ξεχωριστά, είτε από μία αλυσίδα και για τις δύο πλάκες, όποτε η κίνηση είναι ταυτόχρονη και για τις δύο πλάκες. Για τον χειρισμό της αλυσίδας χρησιμοποιείται ένας μεσόστροφος υδραυλικός κινητήρας, ο οποίος τοποθετείται στο κατάστρωμα του πλοίου.

Η στήριξη και η ασφάλισή τους γίνεται αυτόματα και ταυτόχρονα με το κλείσιμό τους και επιτυγχάνεται από ένα υδραυλικό σύστημα με οδοντωτούς τροχούς.

➤ **Καλύμματα τύπου Piggy-back/ στοιβασίας**



Σχήμα 1.8: Καλύμματα στοιβασίας

Τα καλύμματα τύπου piggy-back (Σχήμα 1.8) μπορούν να θεωρηθούν υποκατηγορία των κυλιόμενων καλυμμάτων. Χρησιμοποιούνται σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου κυρίως σε περιπτώσεις αδυναμίας επιλογής κάποιου άλλου τύπου λόγω έλλειψης χώρου. Αποτελούνται από δύο πλάκες οι οποίες στην ανοιγμένη θέση στοιβάζονται η μία πάνω στην άλλη επιτρέποντας, με τον τρόπο αυτό, την έκθεση μόνο της μισής επιφάνειας του στομίου, καθώς το στοιβαγμένο ζεύγος δεν έχει την δυνατότητα κίνησης εκτός της επιφάνειας του στομίου κύτους. Συγκεκριμένα, ανυψώνεται με έναν υδραυλικό μηχανισμό η πρώτη πλάκα, έτσι ώστε να κυλήσει η δεύτερη κάτω από αυτή. Οι δύο στοιβαγμένες πλάκες έχουν την δυνατότητα να κινούνται κατά το διάμηκες. Το παραπάνω σύστημα μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για πλάκες του ίδιου καλύμματος, όσο και για ολόκληρα καλύμματα γειτονικών στομιών κυτών. Το σύστημα ανύψωσης αποτελείται από τέσσερα υδραυλικά έμβολα. Αν ο αριθμός των πλακών του καλύμματος ξεπερνά τις δύο, τότε ονομάζεται κάλυμμα στοιβασίας (stacking) και

απαιτείται ιδιαίτερος ανυψωτικός μηχανισμός, με αυτοματοποιημένο σύστημα. Η οδήγηση των πλακών πραγματοποιείται συνήθως με τον μηχανισμό με αλυσίδα, χωρίς να απορρίπτεται η εναλλακτική χρήση των άλλων δύο μηχανισμών, όπως περιεγράφηκαν προηγουμένως.

➤ **Καλύμματα ποντόνια (lift-away)**



Σχήμα 1.9: Καλύμματα ποντόνια

Τα καλύμματα ποντόνια (Σχήμα 1.9) χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships) ή σε μικρά πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carriers) και αποτελούνται από μία ή περισσότερες πλάκες. Τα καλύμματα με μία πλάκα δεν διαθέτουν ενώσεις και κάθε ένα από αυτά αντιστοιχεί σε ένα άνοιγμα κύτους και προορίζονται κυρίως για bulk carrier. Τα καλύμματα με περισσότερες πλάκες προορίζονται κυρίως για ανοίγματα κυτών containership και διαθέτουν ενώσεις μεταξύ τους είτε κατά το διάμηκες είτε εγκάρσια. Το άνοιγμά τους πραγματοποιείται με ανυψωτικά μηχανήματα, όπως οι γερανοί του πλοίου ή του λιμανιού. Η στήριξη και η ασφάλισή τους γίνεται χειροκίνητα με μεταλλικούς συνδέσμους.

1.2.2 Κανονισμοί

Υποχρέωση κάθε εμπορικού πλοίου είναι η συμμόρφωσή του με όλους τους κανονισμούς ενός εγκεκριμένου Νηογνώμονα. Οι κανονισμοί ασφαλείας που έχει καταρτίσει κάθε Νηογνώμονας αφορούν τη ναυπήγηση των πλοίων, τον εξοπλισμό τους και οτιδήποτε άλλο διέπει την λειτουργία τους. Στην προσπάθεια ομογενοποίησης κάποιων βασικών κανονισμών δημιουργήθηκε η Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων (International Association of Classification – IACS).

Η Διεθνής Ένωση Νηογνομόνων (IACS) είναι ένας μη κερδοσκοπικός οργανισμός που απαρτίζεται από δεκατρείς διεθνώς αναγνωρισμένους νηογνώμονες. Σκοπός του IACS είναι η κατάρτιση ελάχιστων τεχνικών απαιτήσεων με σκοπό την ασφάλεια και την περιβαλλοντική προστασία. Οι απαιτήσεις αυτές προδιαγράφονται στους κανονισμούς CSR (Common Structural Rules) στους οποίους περιλαμβάνονται κανονισμοί που αφορούν το σύνολο των πλοίων, αλλά και κανονισμοί που αφορούν τον κάθε τύπο πλοίου ξεχωριστά.

Στους κανονισμούς που αφορούν τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου (bulk carriers) αφιερώνεται ξεχωριστό κεφάλαιο για τα καλύμματα στομίων κυτών. Καθώς η χρήση σύνθετων υλικών για την κατασκευή καλυμμάτων στομίων κυτών είναι αρκετά πρόσφατη, δεν υπάρχουν ακόμα κανονισμοί που να αναφέρονται στην συγκεκριμένη περίπτωση.

Ως βασικό υλικό κατασκευής προδιαγράφεται ο χάλυβας. Η χρήση διαφορετικού υλικού για την κατασκευή καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά εξετάζεται από τον οργανισμό σε κάθε εφαρμογή ξεχωριστά, ελέγχοντας τα κριτήρια που υιοθετήθηκαν κατά τη σχεδίαση, έτσι ώστε να διασφαλίζεται αντοχή και ακαμψία ίση ή μεγαλύτερη σε σχέση με την αντίστοιχη κατασκευή από χάλυβα. Επίσης, λόγω της φύσης του χάλυβα, το οποίο επιδέχεται διάβρωση σε θαλάσσιο περιβάλλον, προδιαγράφεται πρόσθετο πάχος για το κάθε κατασκευαστικό στοιχείο του καλύμματος ξεχωριστά.

Όσον αφορά τα ενισχυτικά προδιαγράφεται η συνέχειά τους κατά το πλάτος και το μήκος του καλύμματος, στον βαθμό που είναι πρακτικά δυνατό. Σε περίπτωση μη συνέχειας, πρέπει να διασφαλίζεται η δυνατότητα μεταφοράς φορτίων σε όλο το μήκος των ενισχυτικών.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις (ορθές και διατμητικές), ορίζονται ως ένα ποσοστό της ελάχιστης τιμής των ορίων διαρροής των υλικών με τα οποία είναι κατασκευασμένα τα διάφορα στοιχεία του καλύμματος στομίου κύτους. Το ποσοστό αυτό είναι διαφορετικό για ορθές και για διατμητικές τάσεις και επίσης εξαρτάται από το είδος της φόρτισης του καλύμματος. Τα είδη της φόρτισης που αναφέρονται είναι τα εξής: εξωτερική πίεση από τη θάλασσα, εσωτερική πίεση λόγω έρματος, πίεση λόγω ομοιόμορφου φορτίου, πίεση ή δυνάμεις από μη ομοιόμορφα φορτία και πίεση λόγω εμπορευματοκιβωτίων (containers). Η φύση και η μέθοδος υπολογισμού των παραπάνω φορτίσεων περιγράφεται στην συνέχεια.

- ***Εξωτερική πίεση από τη θάλασσα***

Η εξωτερική πίεση από τη θάλασσα αναφέρεται στην πίεση που προκύπτει από τα κύματα που ανεβαίνουν πάνω στο πλοίο κατά τη λειτουργία του σε περίπτωση κακοκαιρίας. Η συνολική εξωτερική πίεση αναλύεται στην πίεση P_S στάσιμου νερού πάνω στο κάλυμμα στομίου κύτους, η οποία θεωρείται μηδενική και στην πλευρική πίεση P_W λόγω του κυματισμού, η οποία υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$P_W = P_D - \rho g(z_{HC} - D) \quad (1.1)$$

όπου:

ρ : πυκνότητα θαλασσινού νερού

g : επιτάχυνση της βαρύτητας

Z_{HC} : καθ' ύψος συντεταγμένη του καλύμματος στομίου κύτους μετρούμενη από τον πυθμένα του πλοίου

D : κοίλο του πλοίου

P_D : πίεση του θαλασσινού νερού στο κατάστρωμα (green sea) που υπολογίζεται για διάφορες καταστάσεις φόρτωσης στο κεφάλαιο “External dynamic pressures for strength assessment” (Pt 1, Ch 4, Sec 5, [1.3]) των κανονισμών CSR.

- **Εσωτερική πίεση λόγω έρματος**

Η εσωτερική πίεση λόγω έρματος σε περίπτωση πλήρους φόρτωσης του κύτους με έρμα υπολογίζεται ως το άθροισμα της στατικής πίεσης P_{Is} και της δυναμικής πλευρικής πίεσης P_{Id} . Οι παραπάνω πιέσεις υπολογίζονται βάσει γεωμετρικών χαρακτηριστικών του κύτους και φυσικών ιδιοτήτων του έρματος στα κεφάλαια “Static liquid pressure” (Pt 1, Ch 4, Sec 6, [1.2]) και “Dynamic liquid pressure” (Pt 1, Ch 4, Sec 6, [1.3]) των κανονισμών CSR.

- **Πίεση λόγω ομοιόμορφου φορτίου**

Η πίεση λόγω ομοιόμορφου φορτίου υπολογίζεται ως το άθροισμα της στατικής πίεσης P_{dl-s} και της δυναμικής πίεσης P_{dl-d} . Η στατική πίεση καθορίζεται από τον σχεδιαστή καθώς εξαρτάται αποκλειστικά από τη ποσότητα του ομοιόμορφου φορτίου που πρόκειται να τοποθετηθεί πάνω στο κάλυμμα, αλλά λαμβάνεται πάντα μεγαλύτερη των 10 kN/m^2 . Η δυναμική πίεση υπολογίζεται βάσει του ακόλουθου τύπου.

$$P_{dl-d} = f_{\beta} \frac{a_z}{g} P_{dl-s} \quad (1.2)$$

όπου:

f_{β} : συντελεστής που λαμβάνεται από πίνακα ανάλογα με την θέση του καλύμματος πάνω στο πλοίο

a_z : κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο βάρους του επιβαλλόμενου φορτίου, η οποία υπολογίζεται βάσει της διαμήκου θέσης του καλύμματος και των επιταχύνσεων heave, pitch και roll

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

P_{dl-s} : Η στατική πίεση που αναφέρθηκε προηγουμένως

- **Πίεση ή δυνάμεις από μη ομοιόμορφα φορτία**

Σε αυτή την κατηγορία οι φορτίσεις υπολογίζονται από τον IACS για κάθε περίπτωση ξεχωριστά, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης της πίεσης ή των δυνάμεων μη ομοιόμορφων φορτίων που δεν εμπίπτουν σε κάποια συγκεκριμένη κατηγορία.

- **Πίεση λόγω εμπορευματοκιβωτίων**

Στην περίπτωση μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων πάνω στα καλύμματα στομίων κυτών, οι σημειακές δυνάμεις στις γωνίες των εμπορευματοκιβωτίων καθορίζονται από τον IACS σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά.

Το σημείο επιβολής της πίεσης λόγω κυμάτων στα καλύμματα στομίων κυτών προδιαγράφεται στο μέσο μήκος του καλύμματος κατά το διάμηκες, στο μέσο επίπεδο συμμετρίας του πλοίου κατά το εγκάρσιο και στο πάνω μέρος του καλύμματος καθ' ύψος. Για τις πλευρικές πιέσεις, το σημείο επιβολής υπολογίζεται στο γεωμετρικό κέντρο των πλευρών.

Οι κανονισμοί CSR λαμβάνουν υπόψιν σχεδιάσεις καλυμμάτων στομίων κυτών με ορθογώνιο σχήμα και ενισχυτικά σε μία διεύθυνση ή ενισχυτικά σε δύο διευθύνσεις σε μορφή πλέγματος. Για τον υπολογισμό των τάσεων και τον έλεγχο αντοχής των ενισχυτικών στην περίπτωση τοποθέτησής τους σε μία διεύθυνση, προδιαγράφεται χρήση της αναλυτικής μεθοδολογίας για δοκούς, ενώ στην περίπτωση πλέγματος ενισχυτικών σε δύο διευθύνσεις προδιαγράφεται χρήση της ανάλυσης grillage ή μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Αποκλειστική χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων προδιαγράφεται στην περίπτωση των ενισχυτικών τύπου καπέλου σε μία διεύθυνση.

Οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές της ορθής και της διατμητικής τάσης δίνονται, ανάλογα με το είδος της επιβαλλόμενης φόρτισης, ως ποσοστό του R_{eH} , το οποίο αναφέρεται στο ελάχιστο όριο διαρροής μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Επίσης προδιαγράφεται το ελάχιστο πάχος των ελασμάτων του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο.

$$t = 0.0158F_p b \sqrt{\frac{F_S P_S + F_W P_W}{0.95R_{eH}}} \quad (1.3)$$

όπου:

b: το πλάτος του ελάσματος

F_p : συντελεστής που υπολογίζεται βάσει της μέγιστης ορθής τάσης που υπολογίστηκε και της μέγιστης επιτρεπόμενης ορθής τάσης

F_S, F_W : συντελεστές που εξαρτώνται από το είδος της φόρτισης

P_S, P_W : πίεσης λόγω της θάλασσας

Ως έλασμα ορίζεται η περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών ενισχυτικών και συνεπώς στην περίπτωση της ενίσχυσης με την μορφή πλέγματος, το πλάτος του ελάσματος αντιστοιχεί στην μικρότερη πλευρά του.

Το πάχος δεν πρέπει να είναι μικρότερο των 6 χιλιοστών και του 1% του πλάτους του ελάσματος ($b/100$).

Όσον αφορά τα ενισχυτικά τύπου flat bar, καθορίζεται περιορισμός των διαστάσεων τους, καθώς το ύψος του h_w και το πάχος τους t_w οφείλουν να τηρούν την ακόλουθη σχέση.

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 15 \sqrt{\frac{235}{R_{eH}}} \quad (1.4)$$

όπου:

R_{eH} : το ελάχιστο όριο διαρροής μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των ενισχυτικών.

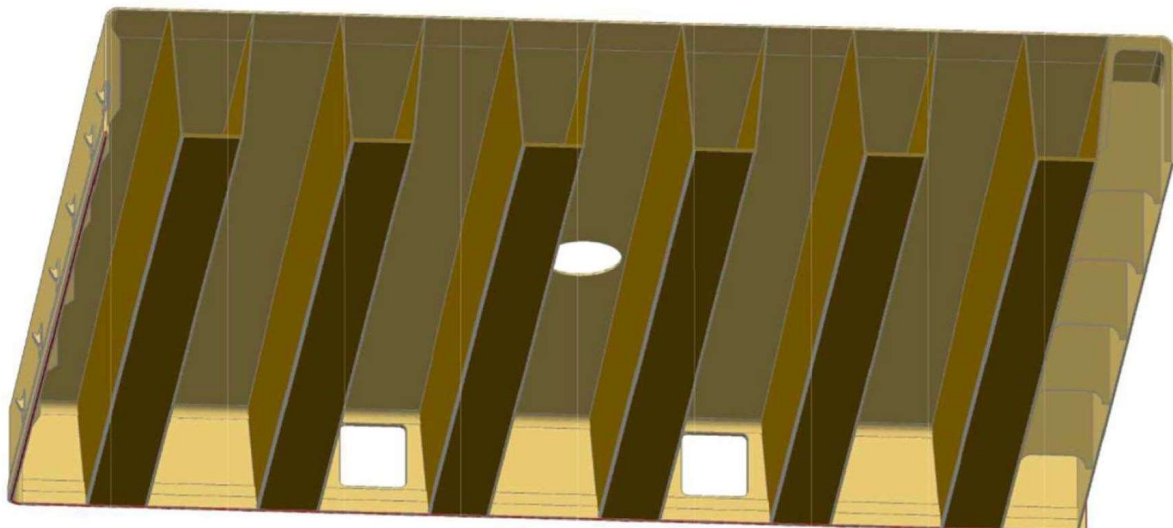
Τέλος παρέχονται τύποι υπολογισμού των ελάχιστων ροπών αντίστασης και εμβαδού διατομής των ενισχυτικών βάσει γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

1.2.3 Εφαρμογές καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων των σύνθετων υλικών στην κατασκευή καλυμμάτων στομίων κυτών έχει εμφανίσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και ήδη υπάρχουν κάποια παραδείγματα της συγκεκριμένης εφαρμογής τόσο σε ερευνητικό επίπεδο, όσο και σε πραγματικές κατασκευές. Στην συνέχεια παρουσιάζονται κάποια από αυτά τα παραδείγματα.

➤ *Oshima Shipbuilding Company/ DNV-GL*

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πρώτη εφαρμογή καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά πραγματοποιήθηκε το 2014 με την έγκριση για αντικατάσταση όλων των καλυμμάτων του πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου “MV Nordic Oshima” της δανέζικης πλοιοκτήτριας εταιρίας Nordic Bulk Carriers AS. Η σχεδίαση πραγματοποιήθηκε από τη Oshima Shipbuilding Company της Ιαπωνίας και ο νορβηγικός νηογνώμονας DNV-GL σε συνεργασία με το SP Technical Research Institute of Sweden ανέλαβαν να διεξάγουν την αξιολόγηση του κινδύνου της σχεδίασης, που περιλάμβανε μεταξύ άλλων και την πυρασφάλεια, καθώς είναι κρίσιμη παράμετρος για κάθε κατασκευή από σύνθετα υλικά. Τηρώντας τους κανονισμούς ασφαλείας SOLAS, που αντιστοιχούν σε καλύμματα από χάλυβα, δόθηκε η έγκριση της σχεδίασης από τον διεθνή οργανισμό IMO, όπως επίσης έγινε δεκτή και από την αρμόδια αρχή της σημαίας του Παναμά.

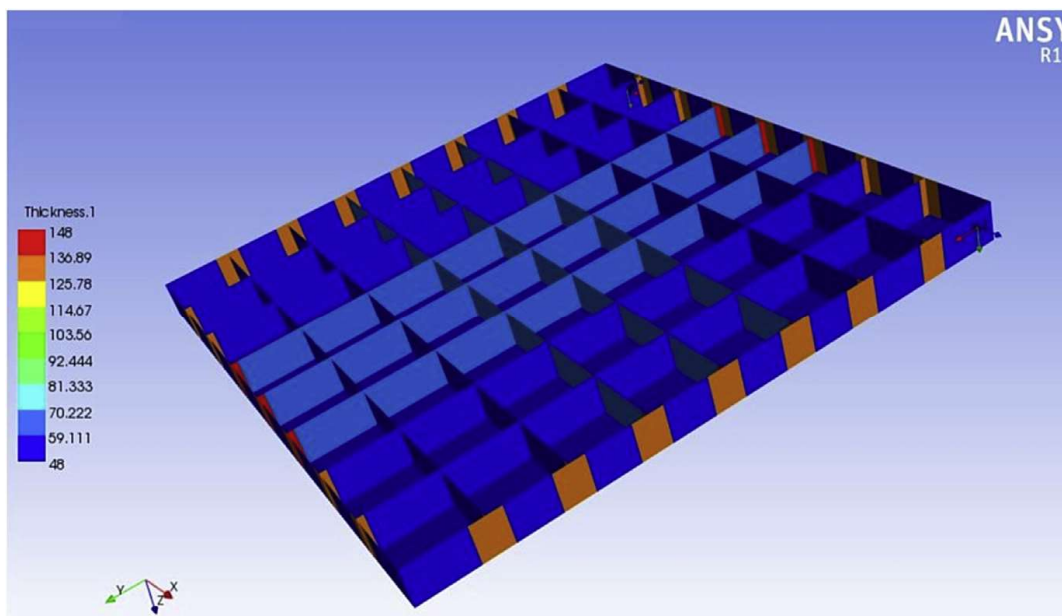


Σχήμα 1.10: Κάλυμμα στομίου κύτους από σύνθετα υλικά

Το αναφερόμενο πλοίο είναι τύπου Panamax, μήκους 220 μέτρων και με 75600 DWT, το οποίο διαθέτει επτά κυλιόμενα καλύμματα διαιρούμενα σε δύο πλάκες το καθένα, με κάθε πλάκα να έχει διαστάσεις 13.2 επί 16.2 μέτρων για το προωαίο κάλυμμα και 8.01 επί 17.1 μέτρων για τα υπόλοιπα έξι καλύμματα. Η σχεδίαση των αντίστοιχων καλυμμάτων από σύνθετα υλικά (Σχήμα 1.10) περιλάμβανε μείωση του ύψους του καλύμματος στα 700 με 800 χιλιοστά (σε σύγκριση με τα 800 με 1000 χιλιοστά του χαλύβδινου), πάχος που κυμαινόταν στα 10 με 30 χιλιοστά και υλικό που αποτελούνταν από ίνες γυαλιού (E-glass) και πολυεστερική ρητίνη. Το τελικό υλικό είχε περιεκτικότητα σε ίνες 55% και μέγιστη αντοχή 220-400 MPa. Η ενίσχυση του πραγματοποιήθηκε με έξι εγκάρσια ενισχυτικά τύπου καπέλου. Με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων και με φορτίσεις που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του DNV-GL επιβεβαιώθηκε ότι η σχεδίαση είναι αποδεκτή. Παρά τα θετικά αποτελέσματα, η σχεδίαση δεν προχώρησε στο στάδιο της κατασκευής. (DNV GL, 2013)

➤ *Μελέτη του Alexandria University και του Arab Academy for Science*

Με αφορμή την προηγούμενη εφαρμογή, ερευνητές από τα ναυπηγικά τμήματα του Alexandria University και του Arab Academy for Science δημοσίευσαν τον Οκτώβριο του 2016 μία μελέτη που είχε ως στόχο την μείωση του βάρους των καλυμμάτων στομίων κυτών κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά.



Σχήμα 1.11: Κάλυμμα στομίου κύτους με απεικόνιση πάχους

Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η πιθανή αντικατάσταση των καλυμμάτων στομίων κυτών ενός πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου, μήκους 228.99 μέτρων και με 82221 DWT, το οποίο διαθέτει επτά κυλιόμενα καλύμματα στομίων κυτών (Σχήμα 1.11) με διαστάσεις 14.52 επί 14.04 μέτρων για το πρώτο (πρωραίο) και 18.08 επί 15.64 μέτρων για τα υπόλοιπα έξι καλύμματα. Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Η φόρτιση που εφαρμόστηκε υπολογίστηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς του IACS και αφορούν ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση στην πάνω πλάκα των καλυμμάτων. Για τα αντίστοιχα καλύμματα από σύνθετα υλικά διατηρήθηκαν οι ίδιες διαστάσεις με τα χαλύβδινα. Η ενίσχυση των καλυμμάτων πραγματοποιείται με διαμήκεις και εγκάρσιες σταθμίδες. Το σύνθετο υλικό που επιλέχθηκε αποτελούνταν από υφάσματα με ίνες γυαλιού (E-glass) σε μια κατεύθυνση και εποξική ρητίνη. Η περιεκτικότητα σε ίνες του τελικού υλικού είναι 60%. Η ανάλυση κατέληξε σε βέλος κάμψης μικρότερο του μέγιστου επιτρεπόμενου, το οποίο ορίστηκε ίσο με το 0.56% της μέγιστης διάστασης του καλύμματος και αποδεκτές τιμές στα κριτήρια αστοχίας Tsai-Wu και Puck που επιλέχθηκαν για την συγκεκριμένη μελέτη. Η συνολική εκτιμώμενη μείωση βάρους υπολογίστηκε 55.68% σε σχέση με τα χαλύβδινα καλύμματα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση κόστους σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των καλυμμάτων στο πλοίο και εκτιμήθηκε ότι το συνολικό κόστος είναι μικρότερο σε σχέση με την χρήση χαλύβδινων καλυμμάτων, παρόλο που το αρχικό κόστος κατασκευής των σύνθετων είναι μεγαλύτερο. (Tawfik- Leheta -Elhewy- Elsayed, 2017)

➤ ***Μελέτη του South China University of Technology και του R&D Center of Guangdong Province***

Μία από τις πρώτες δημοσιεύσεις πάνω στο ίδιο ζήτημα πραγματοποιήθηκε το 2012 στην Κίνα από ερευνητές του ναυπηγικού τμήματος του South China University of Technology και του R&D Center of Guangdong Province. Η δημοσίευση αυτή τοποθετείται χρονικά στην ίδια περίοδο με την εφαρμογή των Oshima/DNV-GL, χωρίς προηγουμένως να υπάρχει κάποια αντίστοιχη σημαντική δημοσίευση πάνω στο θέμα.

Η περίπτωση που μελετήθηκε αφορούσε πλοίο μεταφοράς μεταλλευμάτων 230000 DWT, το οποίο διαθέτει κυλιόμενα καλύμματα στομίων κυτών με διαστάσεις της πάνω πλάκας 16.68 επί 13.6 μέτρων και ύψος 700 χιλιοστών. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε επίσης με την βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Η φόρτιση που εφαρμόστηκε υπολογίστηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς του κινέζικου νηογνώμονα CCS που αφορούσαν χαλύβδινα καλύμματα. Για τον σχεδιασμό των καλυμμάτων από σύνθετα υλικά διατηρήθηκαν όμοιες οι διαστάσεις. Το υλικό που επιλέχθηκε αποτελούταν από ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη και είχε περιεκτικότητα σε ίνες 60%. Υπολογίστηκε μείωση 54% του βάρους των καλυμμάτων στομίων κυτών σε σχέση με τα αντίστοιχα από χάλυβα. Μετά από εκτίμηση κόστους αρχικής κατασκευής υπολογίστηκε ότι η κατασκευή από σύνθετα υλικά κοστίζει 73% παραπάνω από την κατασκευή από χάλυβα. Παρόλα αυτά καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιλογή των σύνθετων υλικών είναι συμφέρουσα καθώς τα συνολικά κόστη υπολογίζονται μικρότερα στο σύνολο της ζωής των καλυμμάτων κατά τη λειτουργία του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψιν την δυνατότητα μεταφοράς περισσότερου φορτίου, την μείωση κατανάλωσης καυσίμου και την μικρότερη απαίτηση για συντήρηση και επισκευή. (Jun Li- Nanhua Wu- Youhong Tang- Chengbi Zhao- Deyu Li- Wei Lin- Fulin Liang, 2012)

➤ ***Lightweight Construction Application at Sea (E-LASS)***

Το E-LASS είναι ένα ευρωπαϊκό δίκτυο το οποίο δημιουργήθηκε το 2013 (πρώην LASS) με σκοπό την ενημέρωση και την ανάδειξη νέων σχεδιάσεων στην ναυπηγική βιομηχανία που στοχεύουν στην μείωση του βάρους των κατασκευών, χρησιμοποιώντας υλικά με μικρό βάρος, ικανά να αντικαταστήσουν τα συμβατικά υλικά της ναυπηγικής. Ανάμεσα στις διάφορες μελέτες, το E-LASS ασχολήθηκε και με την περίπτωση των καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά. Συγκεκριμένα, μελέτησε την περίπτωση κατασκευής διαφόρων τμημάτων ενός μικρού πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου, μεταξύ των οποίων και των καλυμμάτων στομίων κυτών. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε από το ναυπηγείο Kockums AB που εδρεύει στο [Malmö](#) της Σουηδίας.

Η μελέτη στερούνταν αρχικών πληροφοριών για τα προηγούμενα συμβατικά καλύμματα του πλοίου και συνεπώς οι διαστάσεις των καλυμμάτων μετρήθηκαν προσεγγιστικά από το σχέδιο γενικής διάταξης και τελικά θεωρήθηκαν οι διαστάσεις 10.4, 6.5 και 0.4 μέτρα για το μήκος, το πλάτος και το ύψος του καλύμματος αντίστοιχα. Η σχεδίαση με χρήση σύνθετων υλικών περιλάμβανε ενισχυτικά κατά το μήκος. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε, όπως και στις

προηγούμενες εφαρμογές, με τη βοήθεια προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων. Η φόρτιση υπολογίστηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς του νορβηγικού νηογνώμονα DNV-GL. Το μοντέλο που κατασκευάστηκε για την ανάλυση περιλάμβανε μία διαμήκη δοκό που αποτελούσε ένα χαρακτηριστικό τμήμα του συνολικού καλύμματος και συνεπώς τα αποτελέσματα μπορούσαν να αναχθούν για τη συνολική κατασκευή. Οι τιμές που υπολογίστηκαν για τις τάσεις και τα βέλη κάμψης κρίθηκαν ικανοποιητικές καθώς ήταν μικρότερες από τις μέγιστες τιμές που προέκυψαν από τους κανονισμούς. Δεδομένης της έλλειψης πληροφοριών βάρους για τα αρχικά καλύμματα δεν υπήρχε η δυνατότητα σύγκρισης των βαρών με ακρίβεια. Παρόλα αυτά, μετά από εκτιμήσεις η μείωση του βάρους των καλυμμάτων από σύνθετα υλικά εκτιμήθηκε στο 53% του βάρους των χαλύβδινων καλυμμάτων. (Hertzberg, 2009)

1.3 Στόχοι διπλωματικής εργασίας

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την μελέτη της εναλλακτικής κατασκευής καλυμμάτων στομίων κυτών πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου από σύνθετα υλικά. Συγκεκριμένα, μετά από μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς καλυμμάτων από σύνθετα υλικά και διασφάλιση την επαρκούς αντοχής σύμφωνα με τους κανονισμούς και σε σύγκριση με την συμβατική επιλογή του χάλυβα για υλικό κατασκευής, στόχος είναι η μείωση του βάρους της κατασκευής και συνεπώς η ανάδειξη της επιλογής αυτής ως συμφέρουσας στην πράξη.

Η βιομηχανία της ναυτιλίας έχει την τάση συνεχώς να εξελίσσεται και να αναζητά νέους τρόπους αύξησης της απόδοσης μεταφοράς αγαθών μέσω θαλάσσης. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού κρίσιμες παράμετροι είναι η αύξηση της μεταφορικής ικανότητας των πλοίων και η μείωση του κόστους μεταφοράς μέσω της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου. Τα καλύμματα των στομίων κυτών αποτελούν κατασκευαστικά στοιχεία μεγάλου μεγέθους και συνεπώς το βάρος τους είναι ένα υπολογίσιμο τμήμα του συνολικού βάρους (περίπου 3%) του κάθε πλοίου. Με την επιλογή της σχεδίασης των καλυμμάτων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά επιτυγχάνονται οι παραπάνω στόχοι.

Επίσης, η μείωση του βάρους των καλυμμάτων στομίων κυτών επιδρά θετικά και στην βελτίωση της ευστάθειας του πλοίου καθώς τα καλύμματα βρίσκονται σε σχετικά υψηλή κατακόρυφη θέση και το βάρος τους επιδρά αισθητά στη θέση του κατακόρυφου κέντρου βάρους του πλοίου. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα αξιοποίησης μεγαλύτερου τμήματος των χώρων του πλοίου που βρίσκονται σε μεγάλο ύψος ικανοποιώντας πάντα τους απαραίτητους κανονισμούς που αφορούν την ευστάθεια.

Χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών είναι η αυξημένη δυνατότητα σχεδιασμού λόγω της ανισοτροπικής τους συμπεριφοράς. Το γεγονός αυτό, παρότι προσφέρει μεγάλη ευελιξία, απαιτεί εμπειρία πάνω στη συμπεριφορά των σύνθετων υλικών καθώς πολλές παράμετροι πρέπει να καθοριστούν κατά τη σχεδίαση, όπως είναι η επιλογή του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει επιλογή τύπου ινών, επιλογή τύπου ρητίνης, επιλογή κατά όγκο περιεκτικότητας ινών στο τελικό υλικό κ.α. Καθώς οποιαδήποτε κατασκευή

από σύνθετα υλικά αποτελείται από αλληλουχία στρώσεων, πρέπει να καθοριστούν επίσης το πάχος της κάθε στρώσης, το είδος της πλέξης του υφάσματος των ινών κάθε στρώσης, η κατεύθυνση της τοποθέτησής της κ.α.

Είναι φανερό ότι για την επίτευξη της βέλτιστης σχεδίασης απαιτείται πληθώρα δοκιμών. Προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων όπως το ANSYS, παρέχουν την δυνατότητα στον σχεδιαστή της ανάπτυξης μοντέλων προσομοίωσης της κατασκευής καθορίζοντας όλες τις απαραίτητες παραμέτρους και εξάγοντας συγκρίσιμα αποτελέσματα. Για αυτόν τον λόγο, στην συγκεκριμένη διπλωματική αναπτύχθηκαν διάφορα μοντέλα με διαφορετικές σχεδιάσεις το καθένα και εξάγοντας κατάλληλα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν τα αντίστοιχα συμπεράσματα για τα πλεονεκτήματα της κάθε σχεδίασης.

Κεφάλαιο 2: Πρώτη προσέγγιση μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία

2.1 Εισαγωγή στη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων

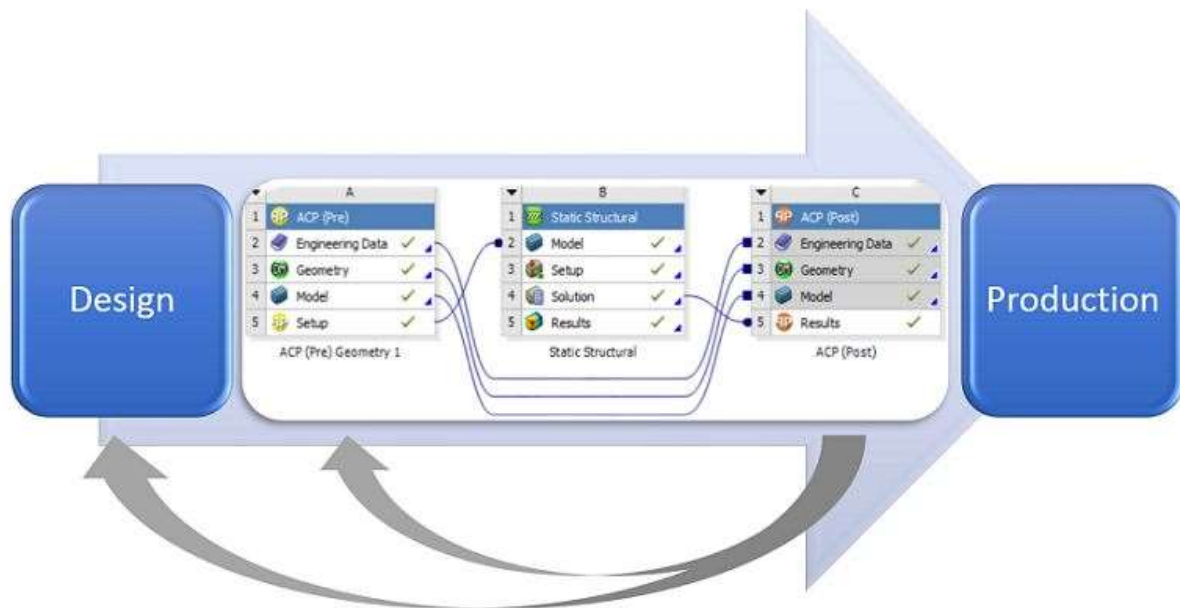
Η σχεδίαση κατασκευαστικών στοιχείων και η ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς τους παραδοσιακά πραγματοποιούνταν με το χέρι. Οι χρησιμοποιούμενες αναλυτικές μέθοδοι, εκτός του ότι είναι χρονοβόρες και εξαντλητικές, περιορίζονται σε απλές γεωμετρίες και αδυνατούν να επιλύσουν πιο περίπλοκα προβλήματα και συνεπώς να δώσουν ακριβή λύση για πραγματικές εφαρμογές.

Το 1956 εισήχθη από τον Turner μία νέα μέθοδος που ονομάστηκε “μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων”. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στον επιμερισμό της συνολικής περίπλοκης γεωμετρίας του προς μελέτη αντικειμένου σε πεπερασμένο αριθμό στοιχείων απλούστερης γεωμετρίας, διαιρώντας με αυτόν τον τρόπο το αρχικό σύνθετο πρόβλημα σε έναν μεγάλο αριθμό απλούστερων προβλημάτων. Η τελική προσεγγιστική λύση προκύπτει με την χρήση κατάλληλων συναρτήσεων παρεμβολής που εφαρμόζονται στους κόμβους που βρίσκονται συνήθως στα όρια των στοιχείων που αναφέρθηκαν. Η ακρίβεια της συγκεκριμένης μεθόδου έχει αποδειχθεί ότι είναι ικανοποιητική και τις περισσότερες φορές συγκρίσιμη με τα πειραματικά αποτελέσματα. Οι βασικοί περιορισμοί για την αύξηση της ακρίβειας της μεθόδου είναι η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς και η χρονική διάρκεια της επίλυσης, οι οποίες αυξάνονται ραγδαία με την αύξηση της επιθυμητής ακρίβειας.

Η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστών έφερε την επανάσταση στην μηχανική, καθιστώντας εφικτή την χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων έχει εδραιωθεί πλέον ως η βασική μέθοδος πρόβλεψης και προσομοίωσης την μηχανικής συμπεριφοράς περίπλοκων κατασκευών. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως το ANSYS, χαίρουν αποδοχής μεταξύ των ερευνητών, των μηχανικών και της βιομηχανίας γενικότερα, καθώς χρησιμοποιούνται από πανεπιστημιακά ιδρύματα, από μελετητικά γραφεία, ακόμα και από διεθνείς οργανισμούς και κυβερνήσεις. Πλέον, αρκετοί κανονισμοί νηογνομώνων προδιαγράφουν τη χρήση τέτοιων προγραμμάτων για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των κατασκευών. (Madenci- Guven, 2015)

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα προσομοίωσης ANSYS Workbench. Το ANSYS Workbench είναι μια φιλική προς τον χρήστη πλατφόρμα που επιτρέπει στους χρήστες τη μοντελοποίηση και την επίλυση μεγάλου εύρους προβλημάτων μηχανικής με την χρήση ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Παρέχει πρόσβαση σε όλες τις ενότητες του ANSYS που αφορούν στην σχεδίαση και ανάλυση σε ένα ολοκληρωμένο γραφικό περιβάλλον. Στο ANSYS Workbench η δόμηση της ανάλυσης πραγματοποιείται επιλέγοντας από την προσφερόμενη εργαλειοθήκη τις κατάλληλες ενότητες για την εκάστοτε μελέτη. Η ανάλυση κατασκευής από σύνθετα υλικά πραγματοποιείται με τη χρήση της ενότητας ACP

(ANSYS Composite PrePost), η οποία υποδιαιρείται στο τμήμα της προεργασίας (ACP Pre) και στο τμήμα της μεταγενέστερης επεξεργασίας (ACP Post).



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα ροής ανάλυσης σε ANSYS Workbench (SAS IP Inc, 2017)

Η προεργασία πραγματοποιείται σε βήματα, όπως φαίνονται και στο Σχήμα 2.1. Αρχικά, στο στάδιο του “Engineering Data” καθορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες για κάθε ένα υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στην συνέχεια. Παρέχεται η δυνατότητα είτε επιλογής υλικού και ιδιοτήτων από μία ενσωματωμένη βιβλιοθήκη, είτε εισαγωγής ενός νέου υλικού με καθορισμό όλων των απαραίτητων ιδιοτήτων του από τον χρήστη. Στο στάδιο του “Geometry” καθορίζεται η γεωμετρία του προς μελέτη αντικειμένου, η οποία είτε σχεδιάζεται στο ενσωματωμένο “Design Modeler” του ANSYS Workbench, είτε εισάγεται από κάποιο συμβατό σχεδιαστικό πρόγραμμα (CAD). Το στάδιο που ακολουθεί είναι το “Model”, στο οποίο πραγματοποιείται η διάσπαση της γεωμετρίας σε στοιχεία (elements) καθορίζοντας την μορφή και τον τύπο των στοιχείων αυτών, αλλά και των αντίστοιχων κόμβων (nodes). Τελευταίο στάδιο της προεργασίας (ACP Pre) αποτελεί το “Setup”. Στο συγκεκριμένο στάδιο πραγματοποιείται ο καθορισμός των ιδιοτήτων των στρώσεων που θα χρησιμοποιηθούν, όπως το υλικό και το πάχος της στρώσης. Στην συνέχεια ορίζονται οι κύριοι άξονες, η σειρά τοποθέτησης των στρώσεων, η κατεύθυνση και ο αριθμός των στρώσεων για κάθε διαφορετικό τμήμα της κατασκευής.

Στην συνέχεια, τα δεδομένα της προεργασίας εισάγονται στην επόμενη ενότητα που αφορά τον τύπο της επιθυμητής ανάλυσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση υλοποιήθηκε στατική ανάλυση και συνεπώς επιλέγεται η ενότητα “Static Structural” από την ενσωματωμένη εργαλειοθήκη του ANSYS. Στην ενότητα αυτή καθορίζονται οι οριακές συνθήκες, η φόρτιση του μοντέλου και η επιθυμητή μορφή της λύσης. Ακολουθεί η επίλυση του μοντέλου και η εμφάνιση των λύσεων με γραφική απεικόνιση.

Τέλος, τα δεδομένα των λύσεων εισάγονται στην ενότητα της μεταγενέστερης επεξεργασίας (ACP Post), όπου υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισής τους με διαφορετικές μορφές για την καλύτερη αξιολόγησή τους, όπως και ο υπολογισμός κριτηρίων αστοχίας.

2.2 Μελέτη υπάρχοντος καλύμματος από σύνθετα υλικά





Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η υλοποίηση μίας ανάλυσης με τη χρήση του ANSYS Workbench που έχει ως σκοπό την σε βάθος κατανόηση της χρήσης του προγράμματος και την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων σε σχέση με μία ήδη υπάρχουσα εφαρμογή. Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε η αναπαραγωγή της μελέτης των Alexandria University και Arab Academy for Science, η οποία αναφέρθηκε προηγουμένως. Προτιμήθηκε η συγκεκριμένη εφαρμογή καθώς αρχικά παρείχε τις περισσότερες απαιτούμενες πληροφορίες, ώστε να καθίσταται δυνατή η αναπαραγωγή του μοντέλου και η σύγκριση των αποτελεσμάτων και δεύτερον για την μελέτη χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο ACP του ANSYS Workbench, όπως και στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

2.2.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η μελέτη που περιγράφεται στην δημοσίευση περιλάμβανε την αντικατάσταση επτά καλυμμάτων στομίων κυτών ενός πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου. Οι διαστάσεις των καλυμμάτων αυτών είναι όμοιες για τα έξι από αυτά και ισούνται με 18.08 επί 15.64 μέτρα, ενώ το ένα από τα καλύμματα έχει διαστάσεις 14.52 επί 14.04 μέτρα. Το μήκος του καλύμματος, δηλαδή η μεγαλύτερη εκ των δύο διαστάσεων αντιστοιχεί στην διαμήκη διεύθυνση του πλοίου. Για τον σκοπό αυτού του κεφαλαίου επιλέχθηκε η μελέτη του τελευταίου καλύμματος, δηλαδή του μικρότερου.

Το υλικό της κάθε στρώσης που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή από σύνθετα υλικά είναι το “E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex” και αποτελείται από συνεχείς ίνες σε μία κατεύθυνση. Η περιεκτικότητα σε ίνες επιλέχθηκε 60%. Καθώς τα σύνθετα υλικά είναι ορθοτροπικά, απαιτείται ο καθορισμός των ιδιοτήτων τους στις τρεις κύριες διευθύνσεις x, y και z. Η μόνη απαιτούμενη ιδιότητα που δεν εξαρτάται από την διεύθυνση είναι η πυκνότητα του υλικού. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του υλικού που περιλαμβάνουν πυκνότητα, μέτρα ελαστικότητας, λόγους Poisson, μέτρα διάτμησης, αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση, όπως επίσης και μέγιστη παραμόρφωση σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση. (Soden- Hintov- Kaddour, 1998)

Πίνακας 2.1: Ιδιότητες E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex

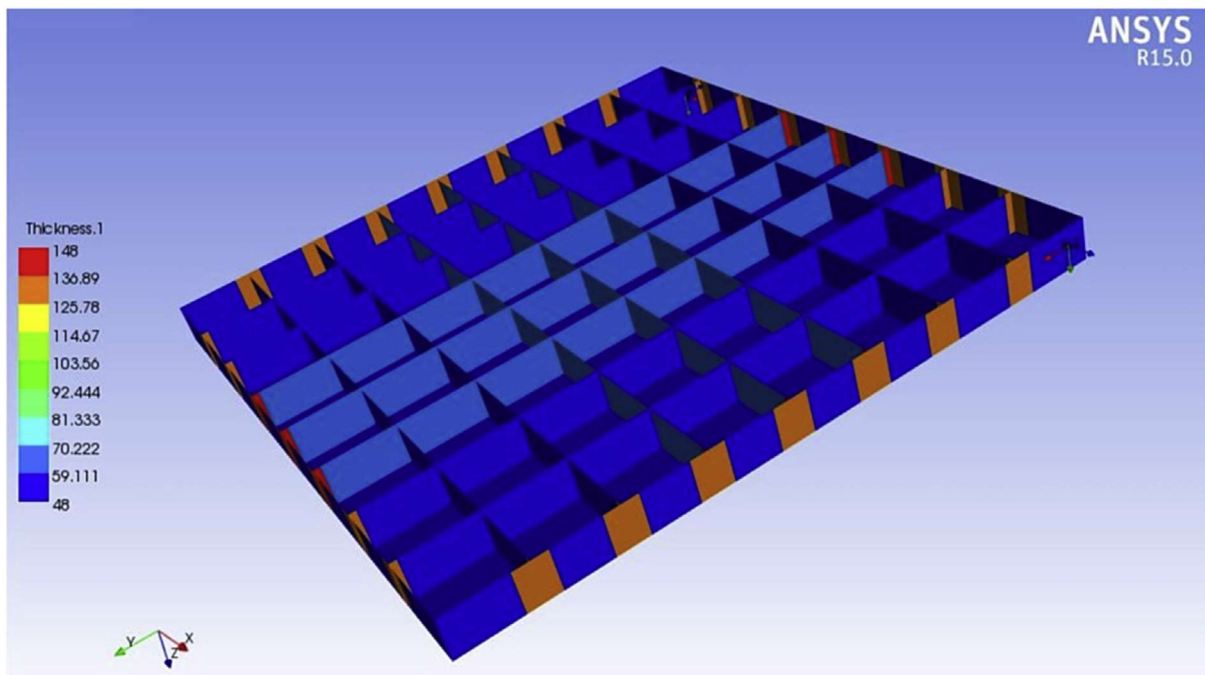
Property	Value	Unit
 Density	1964	kg m ⁻³
 Orthotropic Elasticity		
Young's Modulus X direction	45600	MPa
Young's Modulus Y direction	16200	MPa
Young's Modulus Z direction	16200	MPa
Poisson's Ratio XY	0.278	
Poisson's Ratio YZ	0.4	
Poisson's Ratio XZ	0.4	
Shear Modulus XY	5830	MPa
Shear Modulus YZ	5785.7	MPa
Shear Modulus XZ	5785.7	MPa
 Orthotropic Stress Limits		
Tensile X direction	1280	MPa
Tensile Y direction	40	MPa
Tensile Z direction	40	MPa
Compressive X direction	-800	MPa
Compressive Y direction	-145	MPa
Compressive Z direction	-145	MPa
Shear XY	73	MPa
Shear YZ	42.116	MPa
Shear XZ	73	MPa
 Orthotropic Strain Limits		
Tensile X direction	0.02807	
Tensile Y direction	0.00246	
Tensile Z direction	0.00246	
Compressive X direction	-0.01754	
Compressive Y direction	-0.012	
Compressive Z direction	-0.012	
Shear XY	0.04	
Shear YZ	0.03	
Shear XZ	0.04	

Όσον αφορά στον καθορισμό της γεωμετρίας, η δημοσίευση ήταν ελλιπής σε πληροφορίες για την πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας καθώς αναφέρονται μόνο οι βασικές διαστάσεις του καλύμματος (14.52 x 14.04 m) και τα πάχη σε κάθε στοιχείο του καλύμματος, όπως φαίνονται στον Πίνακα 2.2. Οι διαστάσεις που δεν παρέχονται από την δημοσίευση λήφθηκαν προσεγγιστικά βάσει των σχημάτων που περιλαμβάνονται στη δημοσίευση, όπως το Σχήμα 2.2 και το Σχήμα 2.3 στα οποία φαίνονται όλα τα γεωμετρικά στοιχεία της κατασκευής και το πάχος τους. Βάσει των γνωστών τιμών των διαστάσεων που είναι εμφανείς στα σχήματα, μπορούν να υπολογιστούν με αναλογία προσεγγιστικές τιμές των άγνωστων μεγεθών. Τα μεγέθη αυτά είναι το συνολικό ύψος του καλύμματος και οι διαστάσεις των περιοχών αυξημένου πάχους στην περιοχή των ενώσεων των ενισχυτικών με τις πλευρές του καλύμματος. Στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης και ύστερα από μία επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει την εξαγωγή αποτελεσμάτων για διαφορετικές προσεγγιστικές τιμές των παραπάνω μεγεθών και τη

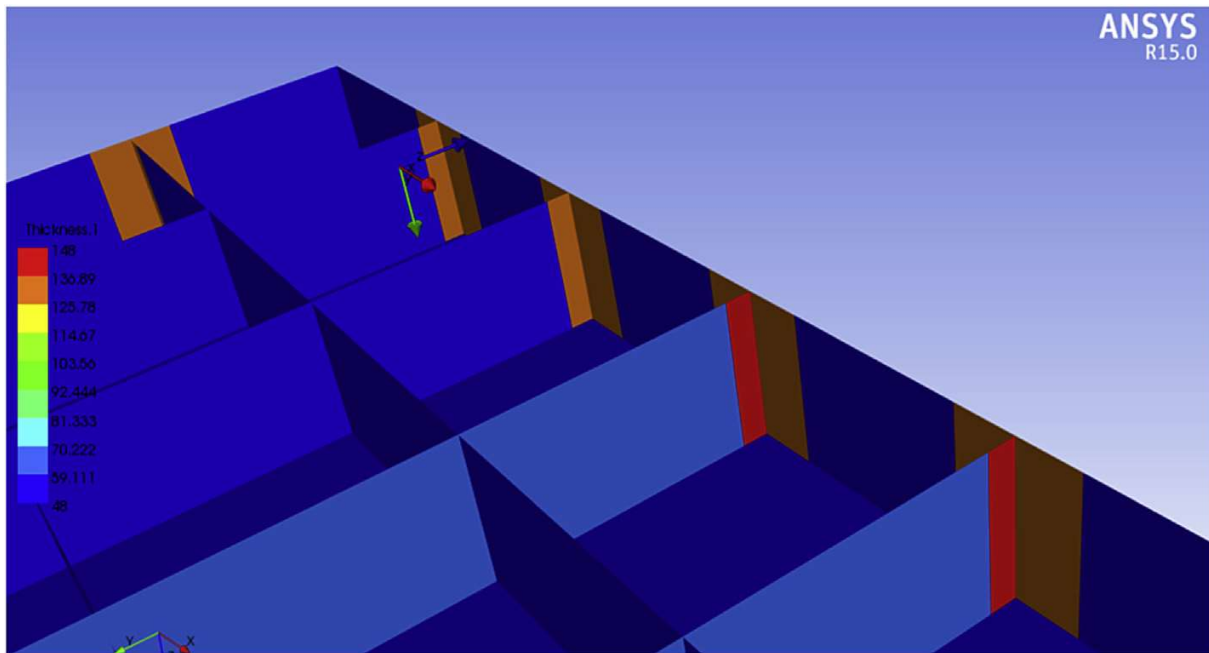
σύγκρισή τους με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρατίθενται στην δημοσίευση, επιτυγχάνεται μία αποδεκτή προσέγγιση της συνολικής γεωμετρίας.

Πίνακας 2.2: Πάχη στοιχείων καλύμματος

Design thickness of hatch cover components.	
Component	Thickness (mm)
Top plate	48
Side plates	56
Stiffener plates Number 1, 2, 6 and 7	56
Stiffener plates Number 3, 4 and 5	68
Reinforcements at the end of stiffener plates Number 1, 2, 6 and 7	136
Reinforcements at the end of stiffener plates Number 3, 4 and 5	148
Reinforcements at sides connections with plate stiffeners	136



Σχήμα 2.2: Συνολική γεωμετρία καλύμματος με απεικόνιση τοπικού πάχους



Σχήμα 2.3: Γεωμετρία ενώσεων ενισχυτικών με πλευρές με απεικόνιση τοπικού πάχους

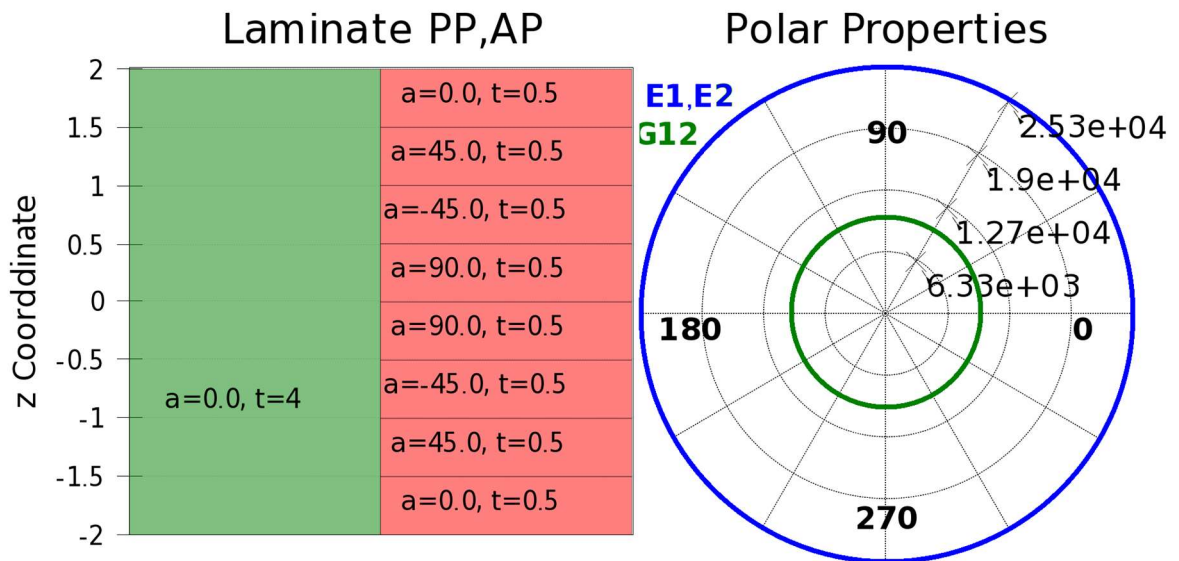
Η αρχική εκτίμηση του ύψους του καλύμματος, σύμφωνα με τη λογική που προαναφέρθηκε, υπολογίστηκε ίση με 0.8 μέτρα. Η περιοχή του αυξημένου πάχους στις πλευρές εκτιμήθηκε ότι εκτείνεται 0.4 μέτρα εκατέρωθεν την ακμής της ένωσης του κάθε ενισχυτικού με τις πλευρές. Τέλος, η περιοχή του αυξημένου πάχους στα ενισχυτικά εκτιμήθηκε ότι καταλαμβάνει 0.2 μέτρα στα άκρα του κάθε ενισχυτικού.

Η ενίσχυση του καλύμματος, όπως φαίνεται και στα Σχήματα 2.2 και 2.3 επιτυγχάνεται με 7 ενισχυτικά κατά το μήκος, δηλαδή κατά την διαμήκη διεύθυνση του πλοίου, και 7 ενισχυτικά κατά το πλάτος του καλύμματος, δηλαδή κατά την εγκάρσια διεύθυνση του πλοίου, τοποθετημένα σε ισαποστάσεις, οι οποίες, με γνωστές τις συνολικές διαστάσεις, υπολογίζονται ίσες με 1.815 μέτρα και 1.755 μέτρα κατά μήκος και κατά πλάτος αντίστοιχα.

Τα παραγόμενα στοιχεία, από την διαδικασία διαχωρισμού της γεωμετρίας (meshing), επιλέχθηκαν να έχουν σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου με διαστάσεις 100 mm. Κάθε στοιχείο διαθέτει 4 κόμβους στις γωνίες του, καθώς η γεωμετρία δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και συνεπώς κρίνεται ότι δεν απαιτείται η χρήση στοιχείων με περισσότερους κόμβους, όπως για παράδειγμα τα στοιχεία με κόμβους τόσο στις 4 γωνίες, όσο και στα μέσα των τεσσάρων πλευρών, δηλαδή συνολικά 8 κόμβους.

Η στρώση με τις ίνες σε μία κατεύθυνση που χρησιμοποιήθηκε έχει πάχος 0.5 mm. Ο προσανατολισμός των στρώσεων του πολύστρωτου ακολουθεί την αλληλουχία $[0/45/-45/90/90/-45/45/0]$ και συνεπώς χαρακτηρίζεται συμμετρικό. Η στρώση των 0° αντιστοιχεί στην διαμήκη διεύθυνση του καλύμματος και κατ' επέκταση στην διαμήκη διεύθυνση του πλοίου. Η αλληλουχία αυτή προσδίδει στο πολύστρωτο μία συμπεριφορά που προσομοιάζει την ιστροπική. Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται το πολύστρωτο με συνολικό πάχος 4 mm, παρουσιάζεται ο παραπάνω προσανατολισμός, όπως επίσης τα μέτρα ελαστικότητας και το

μέτρο διάτμησης του πολύστρωτου σε κάθε διεύθυνση, όπου και καθίσταται εμφανής η σχεδόν ισοτροπική συμπεριφορά (quasi-isotropic), που αναφέρθηκε προηγουμένως.



Σχήμα 2.4: Προσανατολισμός στρώσεων και ιδιότητες πολύστρωτου

Το επιθυμητό πάχος σε κάθε τμήμα της κατασκευής του καλύμματος επιτυγχάνεται με την επανάληψη του παραπάνω πολύστρωτου πάχους 4 mm, το οποίο όπως είναι φυσικό οδηγεί αποκλειστικά σε συνολικά πάχη, τα οποία είναι ακέραια πολλαπλάσια των 4 mm, όπως επιβεβαιώνεται και στον Πίνακα 2.2.

2.2.2 Εκπόνηση στατικής μελέτης

Σύμφωνα με την δημοσίευση, το κάλυμμα στομίου κύτους σχεδιάστηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς Unified Requirements (UR S21) του IACS. Η φόρτιση υπό τη μορφή της ομοιόμορφης πίεσης που προδιαγράφουν οι κανονισμοί αυτοί υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$P = 34.3 + \left(\frac{P_{FP} - 34.3}{0.25} \right) \left(0.25 - \frac{x}{L} \right) \quad (2.1)$$

όπου:

P_{FP} : η πίεση στην προραία κάθετο του πλοίου, η οποία ισούται με $49.1 + (L - 100) a$, με $a = 0.0726$ για πλοία με υπερκατασκευές τύπου B, στην οποία ανήκουν τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου

x/L: ο λόγος της διαμήκους απόστασης από το μέσο του καλύμματος στομίου κύτους μέχρι τη πρωραία κάθετο προς το μήκος του πλοίου.

Τελικά, η φόρτιση με την μορφή ομοιόμορφης πίεσης που εφαρμόστηκε στο κάλυμμα, εισάγοντας ακόμη ένα συντελεστή ασφαλείας 1.5, ισούται με 101708.949 Pa.

Επιπρόσθετα, οι κανονισμοί UR S21 του IACS προδιαγράφουν μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή βέλους κάμψης ίση με το 0.56 % της μέγιστης διάστασης του καλύμματος. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η τιμή του μέγιστου βέλους κάμψης υπολογίζεται ίση με 81.31 mm.

Μία ακόμα διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε λόγω έλλειψης πληροφοριών είναι το είδος των οριακών συνθηκών που απαιτούνται για τον πλήρη ορισμό της στατικής ανάλυσης που υλοποιήθηκε. Για τον σκοπό αυτό ερευνήθηκαν δύο διαφορετικές επιλογές με την πρώτη να περιλαμβάνει πακτώσεις στις ελεύθερες ακμές των τεσσάρων πλευρών και την δεύτερη να περιλαμβάνει πακτώσεις σε ολόκληρη την έκταση των τεσσάρων πλευρών.

Στην δημοσίευση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται έχουν τη μορφή δύο μεγεθών και συγκεκριμένα του μέγιστου βέλους κάμψης και ενός παράγοντα που ονομάζεται Inverse Reserve Factor (IRF), ο οποίος προκύπτει μετά τον υπολογισμό των κριτηρίων ασφαλείας Tsai Wu και Puck, τα οποία είναι δύο βασικά κριτήρια αστοχίας που χρησιμοποιούνται σε μελέτες κατασκευών από σύνθετα υλικά. Η μεθοδολογία υπολογισμού τους παρουσιάζεται παρακάτω. Ο παράγοντας IRF ορίζεται ως το αντίστροφο του περιθωρίου μέχρι την αστοχία, δηλαδή το αντίστροφο του συντελεστή ασφαλείας (SF: safety factor). Ως επακόλουθο αυτού προκύπτει ότι το πηλίκο της τάσης σε ένα σημείο προς τη τιμή του IRF στο σημείο αυτό ισούται με την τάση αστοχίας. Συνεπώς τιμές του παράγοντα IRF μεγαλύτερες από 1 φανερώνουν αστοχία. Σύμφωνα με τη δημοσίευση, η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης υπολογίστηκε ίση με 67.047 mm και η μέγιστη τιμή του IRF υπολογίστηκε ίση με 0.946.

Πολλά από τα κοινώς χρησιμοποιούμενα κριτήρια αστοχίας για σύνθετα υλικά ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των τετραγωνικών κριτηρίων. Σε αυτήν τη κατηγορία εντάσσεται και το κριτήριο Tsai-Wu, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη αυτή. Η γενική μορφή των τετραγωνικών κριτηρίων εκφράζεται από το ακόλουθο πολυώνυμο f δεύτερης τάξης.

$$f = F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_3^2 + F_{44}\tau_{23}^2 + F_{55}\tau_{13}^2 + F_{66}\tau_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + 2F_{23}\sigma_2\sigma_3 + 2F_{13}\sigma_1\sigma_3 + F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_3\sigma_3 \quad (2.2)$$

Με το γράμμα «σ» συμβολίζονται οι ορθές τάσεις και με το γράμμα «τ» οι διατμητικές. Τα ορίσματα 1, 2 και 3 αναφέρονται στις διευθύνσεις x, y και z αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό του κριτηρίου Tsai-Wu, οι τιμές των συντελεστών F_{ij} και F_I , με $i, j = 1, \dots, 6$ και $I = 1, 2, 3$, προκύπτουν από τους ακόλουθους τύπους.

$$F_{11} = \frac{1}{X_t X_c}$$

$$F_{22} = \frac{1}{Y_t Y_c}$$

$$\begin{aligned}
F_{33} &= \frac{1}{Z_t Z_c} \\
F_{44} &= \frac{1}{S_{yz}^2} \\
F_{55} &= \frac{1}{S_{xz}^2} \\
F_{66} &= \frac{1}{S_{xy}^2} \\
F_1 &= \frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c} \\
F_2 &= \frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c} \\
F_3 &= \frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c}
\end{aligned} \tag{2.3}$$

όπου:

X_t, X_c : οι αντοχές στην διεύθυνση X σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα

Y_t, Y_c : οι αντοχές στην διεύθυνση Y σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα

Z_t, Z_c : οι αντοχές στην διεύθυνση Z σε εφελκυσμό και θλίψη αντίστοιχα

S_{yz}, S_{xz}, S_{xy} : οι αντοχές σε διάτμηση στις διευθύνσεις YZ, XZ και XY αντίστοιχα

Ύστερα από αντικατάσταση των παραπάνω τύπων στον βασικό τύπο, προκύπτει το εξής.

$$\begin{aligned}
f &= \frac{\sigma_1^2}{X_t X_c} + \frac{\sigma_2^2}{Y_t Y_c} + \frac{\sigma_3^2}{Z_t Z_c} + \frac{\tau_{23}^2}{S_{yz}^2} + \frac{\tau_{13}^2}{S_{xz}^2} + \frac{\tau_{12}^2}{S_{xy}^2} + \left(\frac{1}{X_t} - \frac{1}{X_c}\right) \sigma_1 + \left(\frac{1}{Y_t} - \frac{1}{Y_c}\right) \sigma_2 \\
&+ \left(\frac{1}{Z_t} - \frac{1}{Z_c}\right) \sigma_3 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + 2F_{23} \sigma_2 \sigma_3 + 2F_{13} \sigma_1 \sigma_3
\end{aligned} \tag{2.4}$$

Οι τιμές των συντελεστών F_{12} , F_{23} και F_{13} δεν μπορούν να εξαχθούν απευθείας από τύπους συναρτήσεων των μονοαξονικών αντοχών και για τον ακριβή υπολογισμό τους απαιτείται η υλοποίηση πειραματικών δοκιμών με φορτίσεις σε δύο άξονες. Στην πράξη, όπου δεν είναι πάντα δυνατή η εξαγωγή πειραματικών δεδομένων, οι τιμές των παραπάνω συντελεστών υπολογίζονται συναρτήσεων των προηγούμενων γνωστών συντελεστών. Η διαδικασία εκτίμησης των τριών αυτών συντελεστών είναι όμοια και συνεπώς χάριν συντομίας παρουσιάζεται η διαδικασία για τον συντελεστή F_{12} . Η εκτίμηση πραγματοποιείται βάσει του ακόλουθου τύπου.

$$F'_{12} = \frac{F_{12}}{\sqrt{F_{11} F_{22}}} \tag{2.5}$$

Για να διασφαλίζεται ότι το κριτήριο απεικονίζεται σε μία κλειστή επιφάνεια, η τιμή του F_{12}' οφείλει να βρίσκεται εντός του εύρους $-1 < F_{12}' < 1$. Παρόλα αυτά, το εύρος τιμών για συμπεριφορά υλικού με φυσικό νόημα είναι περισσότερο περιορισμένο. Η συχνότερη τιμή, η οποία αποτελεί προεπιλεγμένη τιμή του ACP, είναι η τιμή -1.

Το δεύτερο κριτήριο αστοχίας που χρησιμοποιείται στην μελέτη είναι το κριτήριο Puck. Το κριτήριο αυτό λαμβάνει υπόψιν την αστοχία των ινών και της μήτρας του σύνθετου υλικού ξεχωριστά. Σε μία στρώση με ίνες κατά το μήκος, θεωρείται ότι η αστοχία των ινών προκύπτει λόγω διαμήκων φορτίων, ενώ η αστοχία της μήτρας προκύπτει από συνδυασμό εγκάρσιων και διαμηθικών φορτίσεων. Συνεπώς, το κριτήριο αστοχίας Puck εκφράζεται από τους ακόλουθους τύπους.

- Ίνες: $f_f = \left| \frac{\sigma_1}{X} \right|$ (2.6)

- Μήτρα: $f_m = \left(\frac{\sigma_2}{Y} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S} \right)^2$ (2.7)

$$\begin{aligned} \sigma_1 \geq 0 &\Rightarrow X = X_t \\ \sigma_1 < 0 &\Rightarrow X = X_c \\ \text{όπου } \sigma_2 \geq 0 &\Rightarrow Y = Y_t \\ \sigma_2 < 0 &\Rightarrow Y = Y_c \end{aligned}$$

Η αστοχία προκύπτει όταν οποιοδήποτε από τα f_f , f_m ξεπεράσουν την μονάδα και συνεπώς το κριτήριο αστοχία Puck συνοψίζεται στην παρακάτω συνάρτηση.

$$f = \max(f_f, f_m) \quad (2.8)$$

Οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων για την συγκεκριμένη ανάλυση επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο άξονας X να αντιστοιχεί στο μήκος του καλύμματος, ο άξονας Z να αντιστοιχεί στο πλάτος του καλύμματος και ο άξονας Y στο ύψος του καλύμματος. Το μήκος, το πλάτος και το ύψος του καλύμματος αντιστοιχούν στην διαμήκη, στην εγκάρσια και στην κατακόρυφη διεύθυνση του πλοίου αντίστοιχα.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, λόγω έλλειψης στοιχείων, υλοποιήθηκαν παραπάνω από μία αναλύσεις, μεταβάλλοντας τις άγνωστες παραμέτρους κάθε φορά. Οι άγνωστες αυτές παράμετροι είναι το συνολικό ύψος του καλύμματος στομίου κύτους και το είδος των οριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν κατά την επίλυση. Στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τριών μοντέλων, τα οποία αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα της πορείας διερεύνησης που ακολουθήθηκε. Στο πρώτο μοντέλο (Μοντέλο 1) το ύψος του καλύμματος επιλέχθηκε, σύμφωνα με την εκτίμηση που πραγματοποιήθηκε και περιεγράφηκε προηγουμένως, ύψος καλύμματος 0.8 μέτρα και εφαρμόστηκε πάκτωση στις ελεύθερες ακμές των τεσσάρων πλευρών. Στο δεύτερο μοντέλο (Μοντέλο 2) διατηρήθηκε το ύψος του καλύμματος στα 0.8 μέτρα, όμως διαφοροποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες, εφαρμόζοντας πακτώσεις σε ολόκληρη την έκταση και των τεσσάρων πλευρών. Στο τρίτο και τελευταίο μοντέλο (Μοντέλο 3) επιλέχθηκε μείωση του ύψους του καλύμματος στα 0.75 μέτρα, ενώ

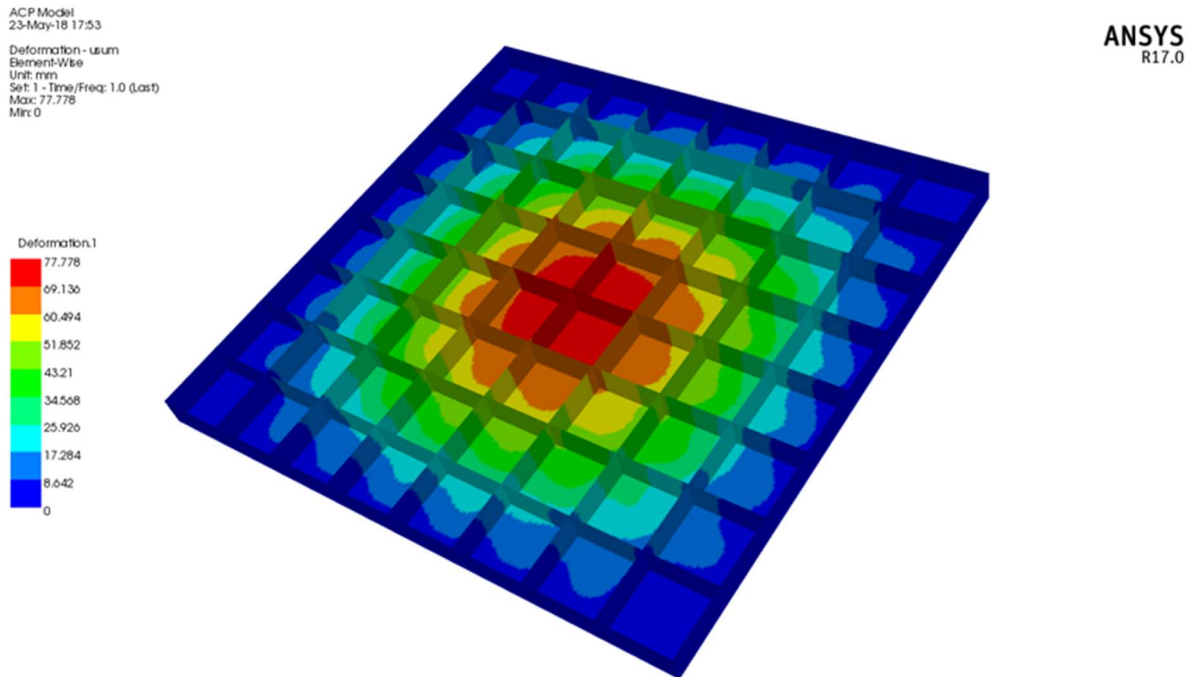
διατηρήθηκαν όμοιες οριακές συνθήκες με το δεύτερο μοντέλο. Ακολουθώντας την μορφή των λύσεων της δημοσίευσης, υπολογίστηκε το μέγιστο βέλος κάμψης και η μέγιστη τιμή του IRF του καλύμματος. Επιπροσθέτως, λόγω πληρότητας και εξασφάλισης της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκαν το μέγιστο βέλος κάμψης, η μέγιστη τιμή του IRF, η μέγιστη ορθή τάση σε δύο διευθύνσεις και η μέγιστη διατμητική τάση στο επίπεδο για κάθε ομάδα από όμοια κατασκευαστικά στοιχεία του καλύμματος. Συγκεκριμένα, αποτελέσματα (Πίνακας 2.3) εξήχθησαν για την πάνω πλάκα του καλύμματος, όπου εφαρμόστηκε και η φόρτιση, όπως επίσης και για τις επιφάνειες παράλληλες στο επίπεδο XY (διαμήκης ενισχυτικά και τοιχώματα) και για τις επιφάνειες παράλληλες στο επίπεδο ZY (εγκάρσια ενισχυτικά και τοιχώματα).

Πίνακας 2.3 Αποτελέσματα Ανάλυσης

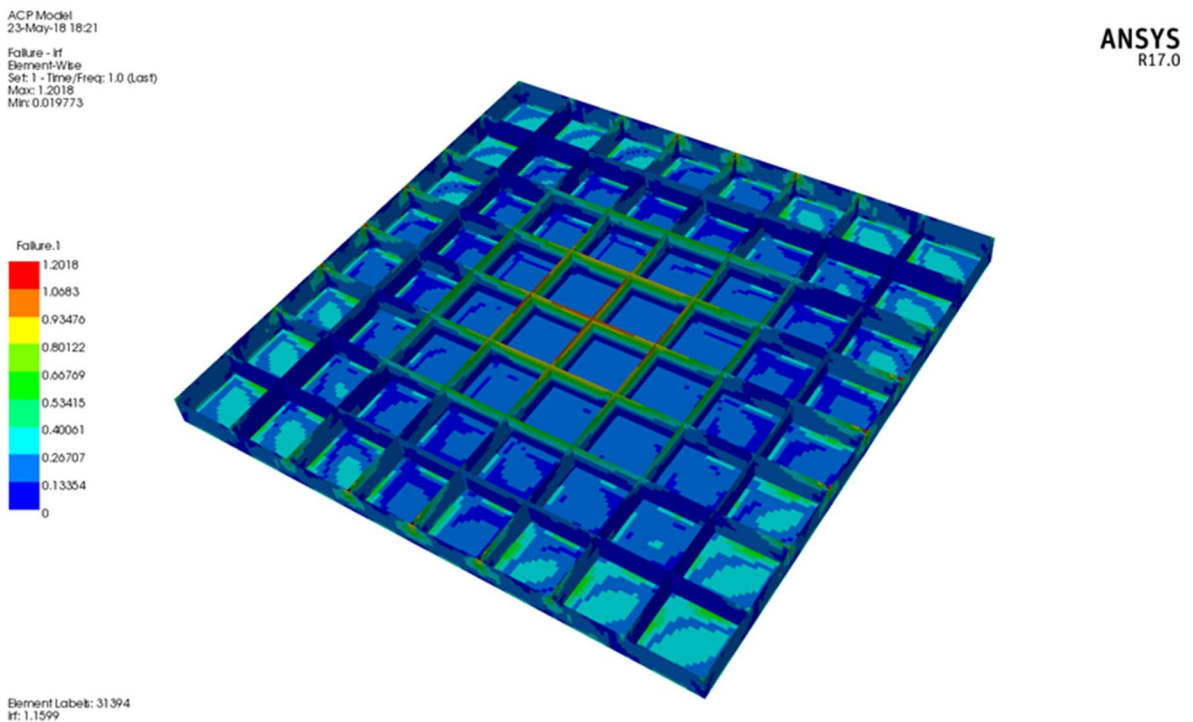
		Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3
Συνολική Γεωμετρία	Μέγιστο βέλος κάμψης $\delta_{y\max}$ (mm)	77.774	60.379	69.920
	Μέγιστο IRF	1.202	1.043	1.150
Πάνω πλάκα	Μέγιστο βέλος κάμψης $\delta_{y\max}$ (mm)	77.774	60.379	69.920
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X $\sigma_{x\max}$ (MPa)	56.8	104.9	109.9
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z $\sigma_{z\max}$ (MPa)	-30.8	26.2	27.0
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XZ $\tau_{xz\max}$ (MPa)	-14.4	-10.3	11.1
	Μέγιστο IRF	0.598	1.043	1.008
Διαμήκη ενισχυτικά και τοιχώματα	Μέγιστο βέλος κάμψης $\delta_{y\max}$ (mm)	75.578	57.86	67.815
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X $\sigma_{x\max}$ (MPa)	50.9	48.4	56.0
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y $\sigma_{y\max}$ (MPa)	-19.6	-85.6	-95.7
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XY $\tau_{xy\max}$ (MPa)	27.9	12.5	13.4
	Μέγιστο IRF	1.160	0.942	1.059
Εγκάρσια ενισχυτικά και τοιχώματα	Μέγιστο βέλος κάμψης $\delta_{y\max}$ (mm)	75.6	57.9	67.8
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z $\sigma_{z\max}$ (MPa)	53.0	50.5	58.3
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y $\sigma_{y\max}$ (MPa)	-19.0	-89.2	-99.8
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά YZ $\tau_{yz\max}$ (MPa)	29.0	-13.1	-14.1
	Μέγιστο IRF	1.202	1.023	1.150

Τα Σχήματα 2.5 έως 2.10 που ακολουθούν παρουσιάζουν την κατανομή του βέλους κάμψης και της τιμής του IRF σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του καλύμματος στομίου κύτους, για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα μοντέλα. Το κάλυμμα απεικονίζεται αντεστραμμένο (η πάνω

πλάκα βρίσκεται στο κάτω μέρος) με σκοπό την εμφάνιση της πλήρους γεωμετρίας των ενισχυτικών. Στην αναπαράσταση χρησιμοποιείται χρωματική κλίμακα και συνεπώς εμφανίζονται οι περιοχές με τις μέγιστες τάσεις του Πίνακα 2.3. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται στην επόμενη ενότητα.



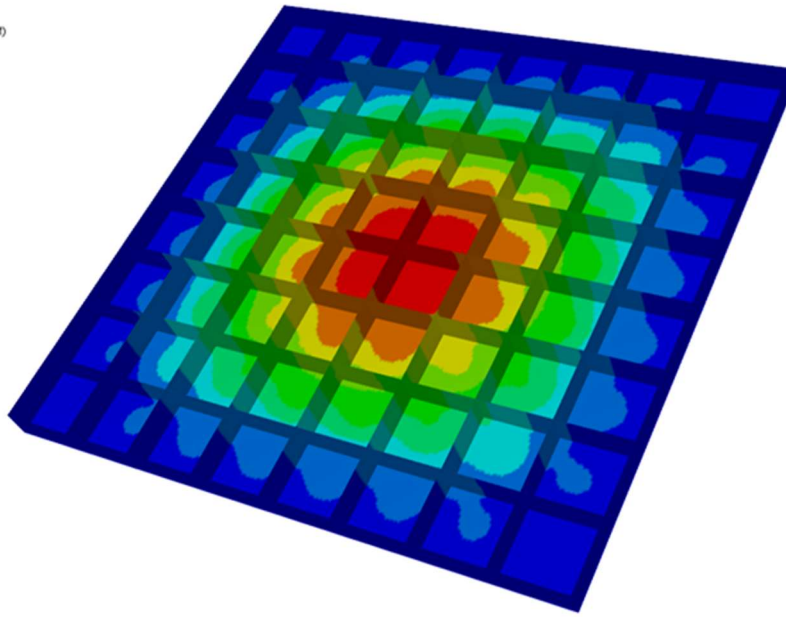
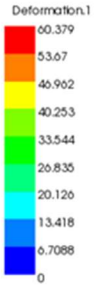
Σχήμα 2.5: Βέλος κάμψης μοντέλου 1



Σχήμα 2.6: IRF μοντέλου 1

ACP Model
23-May-18 18:44
Deformation - y
Element- Wise
Unit: mm
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 60.379
Min: 0

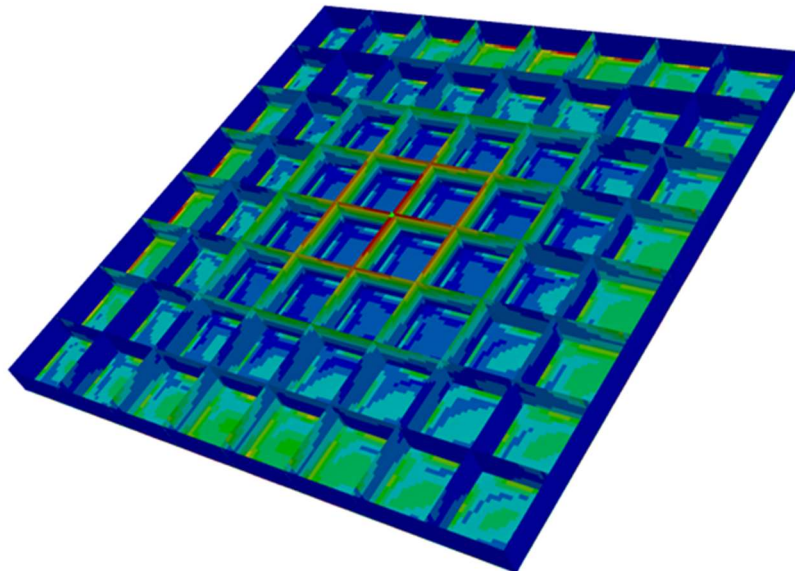
ANSYS
R17.0



Σχήμα 2.7: Βέλος κάμψης μοντέλου 2

ACP Model
23-May-18 18:45
Failure - Irf
Element- Wise
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 1.0433
Min: 0

ANSYS
R17.0

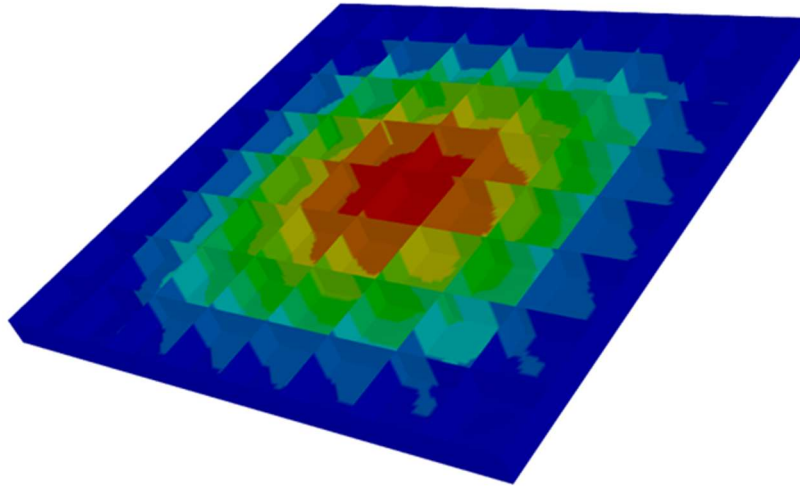
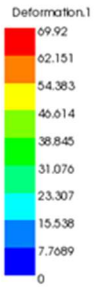


Element Labels: 41328
Irf: 1.0225

Σχήμα 2.8: IRF μοντέλου 2

ACP Model
23-May-18 19:04
Deformation - y
Element-Vis
Unit: mm
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 69.92
Min: 0

ANSYS
R17.0

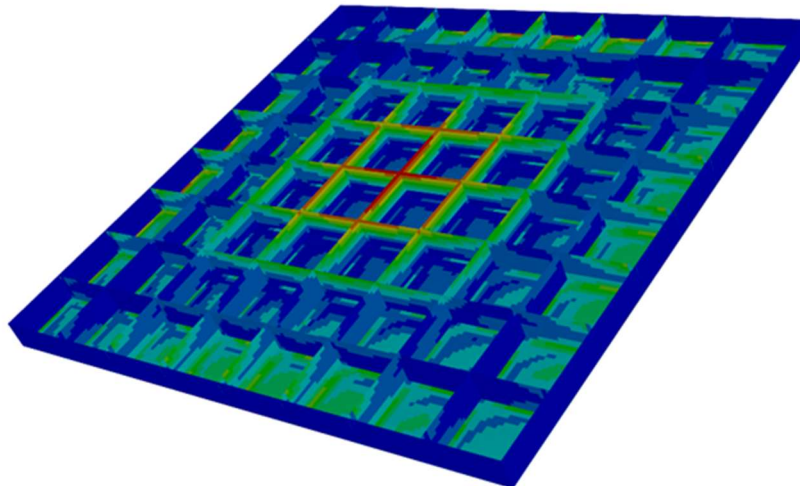


Element Labels: 2439
If: 1.00814

Σχήμα 2.9: Βέλος κάμψης μοντέλου 3

ACP Model
23-May-18 19:00
Failure - If
Element-Vis
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (Last)
Max: 1.1498
Min: 0

ANSYS
R17.0



Element Labels: 2439
If: 1.00814

Σχήμα 2.10: IRF μοντέλου 3

2.2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων και σύγκριση με βιβλιογραφία

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν από την προηγούμενη ανάλυση πραγματοποιείται σύγκριση των τιμών αυτών με τις τιμές των αποτελεσμάτων της δημοσίευσης. Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζεται η σύγκριση αυτή υπολογίζοντας την ποσοστιαία απόκλιση τους.

Πίνακας 1.4: Σύγκριση αποτελεσμάτων ανάλυσης

	Μοντέλο 1		Μοντέλο 2		Μοντέλο 3		Δημοσίευση
	Τιμή	Απόκλιση	Τιμή	Απόκλιση	Τιμή	Απόκλιση	Τιμή
Μέγιστο βέλος κάμψης $d_{y_{max}}$ (mm)	77.774	16%	60.379	-10%	69.920	4%	67.047
Μέγιστο IRF	1.202	27%	1.043	10%	1.150	22%	0.946

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα την ανάλυσης για τα τρία διαφορετικά μοντέλα και συγκρίνοντας τα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της δημοσίευσης εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

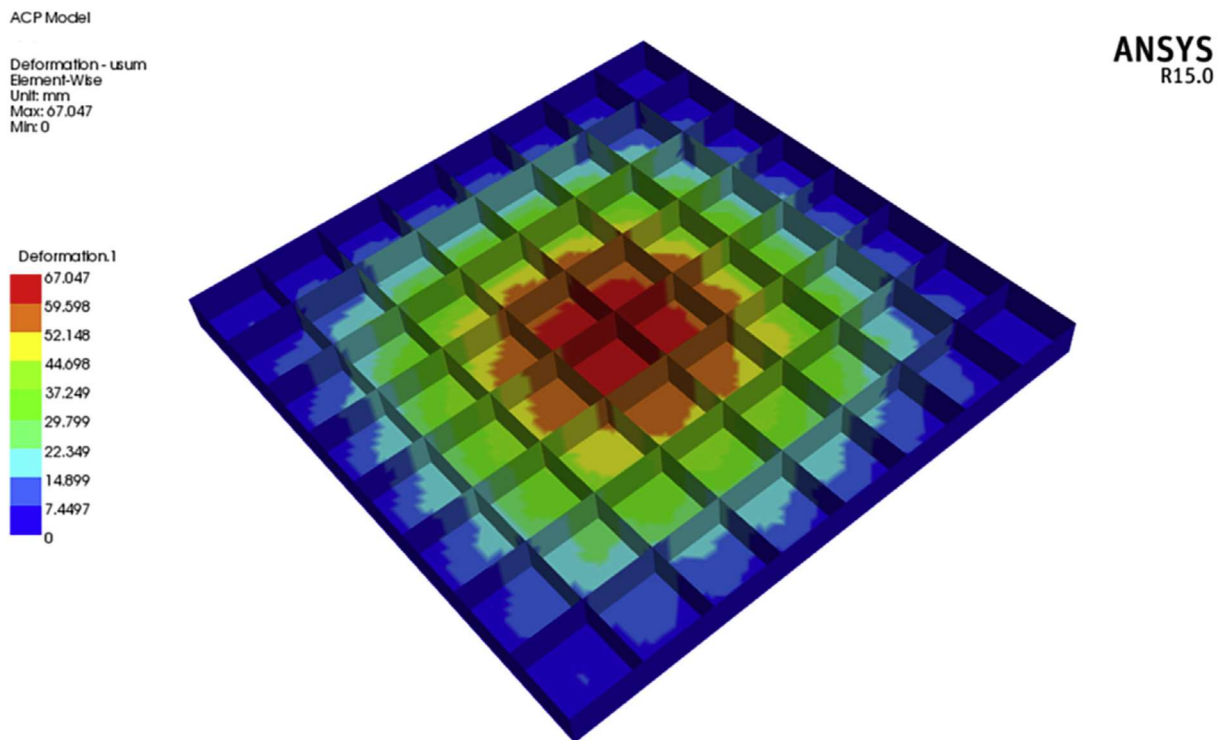
Αρχικά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, στα μοντέλα 2 και 3 εφαρμόστηκαν διαφορετικές οριακές συνθήκες σε σχέση με το μοντέλο 1. Από τις αποκλίσεις που υπολογίστηκαν είναι εμφανές πως τα αποτελέσματα του μοντέλου 1 αποκλίνουν περισσότερο από τις αντίστοιχες τιμές των αποτελεσμάτων της δημοσίευσης και συνεπώς συμπεραίνεται πως οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν στην δημοσίευση έχουν την μορφή πακτώσεων σε όλη την έκταση των τεσσάρων πλευρών.

Η δεύτερη παράμετρος που διερευνήθηκε κατά την ανάλυση των διαφορετικών μοντέλων είναι το συνολικό ύψος του καλύμματος στομίου κύτους. Έχοντας αποκλείσει πλέον το μοντέλο 1, εξετάζονται και συγκρίνονται μεταξύ τους τα μοντέλα 2 και 3. Στο μοντέλο 2 επιλέχθηκε συνολικό ύψος 0.8 μέτρων, ενώ στο μοντέλο 3 επιλέχθηκε συνολικό ύψος 0.75 μέτρων. Εστιάζοντας στις αποκλίσεις που υπολογίστηκαν όσον αφορά στο μέγιστο βέλος κάμψης, παρατηρείται ότι στο μοντέλο 2 υπολογίστηκε βέλος κάμψης μικρότερο κατά 10% , ενώ στο μοντέλο 3 μεγαλύτερο κατά 4% σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της δημοσίευσης. Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το συνολικό ύψος h του καλύμματος στομίου κύτους βρίσκεται ανάμεσα στο εύρος τιμών $0.75 < h < 0.8$ μέτρων. Εξετάζοντας βέβαια τις τιμές των αποκλίσεων για τη μέγιστη τιμή του IRF, παρατηρείται ότι είναι μεγαλύτερες σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή της δημοσίευσης και για τα δύο μοντέλα, με την απόκλιση να αυξάνεται όσο μειώνεται το συνολικό ύψος του καλύμματος.

Τα δεδομένα αυτά οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν επιπλέον διαφορές στην ανάλυση που πραγματοποιείται σε αυτήν την εργασία σε σχέση με την ανάλυση της δημοσίευσης. Οι διαφορές αυτές εντοπίζονται στην προσεγγιστική θεώρηση των διαστάσεων των περιοχών αυξημένου πάχους στα άκρα των ενισχυτικών και στον μη ταυτόσημο διαχωρισμό της γεωμετρίας σε στοιχεία και κόμβους (meshing), καθώς δεν δίνεται καμία πληροφορία για αυτό

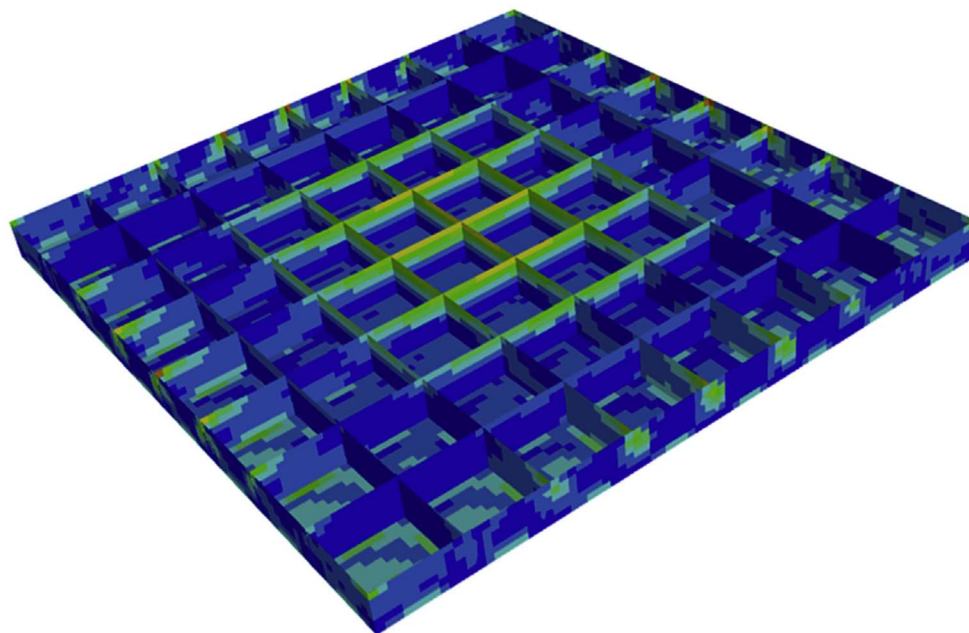
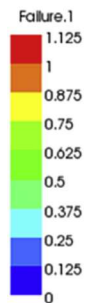
στην δημοσίευση. Οι διαφορές αυτές επηρεάζουν τον υπολογισμό της τιμής του IRF και συνεπώς δικαιολογείται η απόκλιση των τιμών του μέγιστου IRF και στα δύο μοντέλα.

Στα Σχήματα 2.11 και 2.12 παριστάνονται οι κατανομές του βέλους κάμψης και του IRF, όπως αυτές παρατέθηκαν στη δημοσίευση. Συγκρίνοντας τις κατανομές αυτών με τις αντίστοιχες κατανομές των μοντέλων που παρατέθηκαν στη προηγούμενη ενότητα, παρατηρείται ομοιότητα στην μορφή των κατανομών τόσο για το βέλος κάμψης, όσο και για το IRF. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές εμφανίζονται στις ίδιες περιοχές και συνεπώς η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό την ανάλυση της δημοσίευσης.



Σχήμα 2.11: Κατανομή βέλους κάμψης

Failure - Irf
Element-Wise
Max: 0.9455
Min: 0.010001



Σχήμα 2.12: Κατανομή IRF

Κεφάλαιο 3: Μελέτη χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους

3.1 Επιλογή καλύμματος στομίου κύτους για μελέτη

Όπως αναφέρθηκε και στους στόχους της διπλωματικής εργασίας, βασικός σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη της αντικατάστασης των συμβατικών, χαλύβδινων καλυμμάτων στομίων κυτών από καλύμματα στομίων κυτών κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Για τον σκοπό αυτό, η ελληνική εταιρία Arista Shipping παρείχε ολοκληρωμένα σχέδια των καλυμμάτων στομίων κυτών ενός από τα πλοία του στόλου της. Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου πλοίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά πλοίου από Arista Shipping

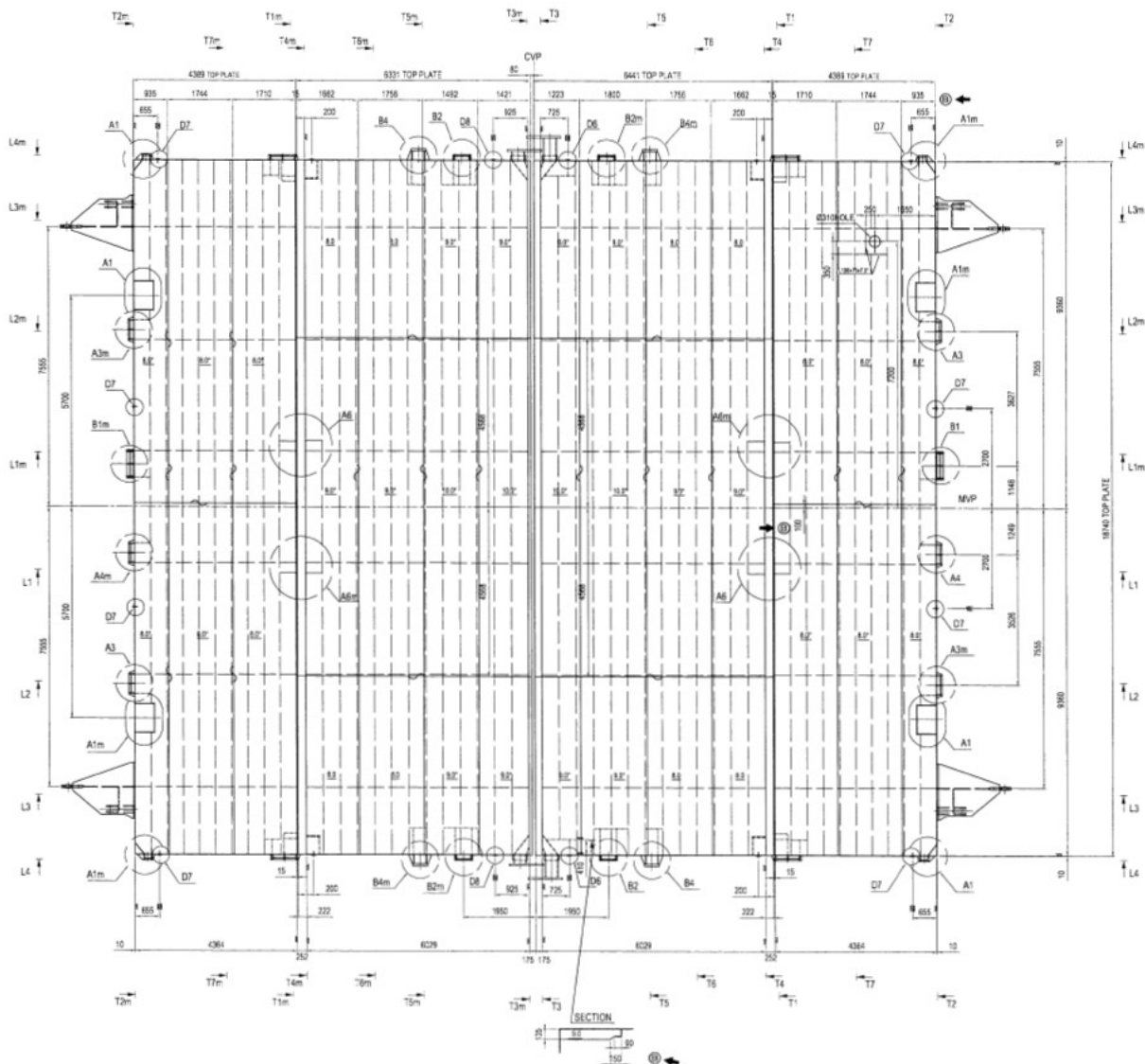
Χαρακτηριστικά Πλοίου	
Τύπος	Supramax Bulkcarrier
DWT	55660
Ολικό Μήκος (m)	187.88
Πλάτος (m)	32.26
Βύθισμα (m)	12.868
Κοίλο (m)	18.30
C_B	0.8494
Ταχύτητα (knots)	14.5

Το πλοίο διαθέτει 5 κύτη φορτίου και συνεπώς 5 καλύμματα στομίων κυτών, τα οποία σχεδιάστηκαν από την εταιρία MacGREGOR. Η συναρμολόγηση των εξαρτημάτων της MacGREGOR και η συνολική κατασκευή των καλυμμάτων υλοποιήθηκε στα ναυπηγεία Hyundai Mipo. Όλα τα καλύμματα είναι πτυσσόμενα (folding type) και αποτελούνται από δύο ζεύγη, δηλαδή συνολικά διαθέτουν 4 τμήματα το καθένα. Κατά το άνοιγμα των καλυμμάτων, το πρώτο ζεύγος στοιβάζεται στη πρυμναία και το άλλο ζεύγος στη πωραία πλευρά του στομίου κύτους. Το πωραίο κάλυμμα στομίου κύτους (hatch cover 1) έχει διαστάσεις 16.4 επί 18.4 μέτρα, ενώ τα υπόλοιπα καλύμματα (hatch cover 1-5) έχουν διαστάσεις 21.32 επί 18.4 μέτρα. Το τρίτο κάλυμμα (hatch cover 3), παρότι διαθέτει ίδιες διαστάσεις με τα καλύμματα 2, 4 και 5, διαθέτει επιπλέον εξαρτήματα, όπως βαλβίδες στην επάνω πλάκα και κάποιες συσκευές πρόσδεσης του καλύμματος στις πλευρές του. Λόγω αυτών των επιπλέον εξαρτημάτων παρατηρούνται μικρές διαφοροποιήσεις και σε κάποια χαλύβδινα κατασκευαστικά στοιχεία, όπως στηρίγματα και ράγες των τροχών κύλισης του καλύμματος. Η αιτία της διαφοροποίησης του τρίτου καλύμματος είναι η ιδιαίτερη σχεδιάσή καθώς προβλέπεται η φόρτωση του με έρμα.

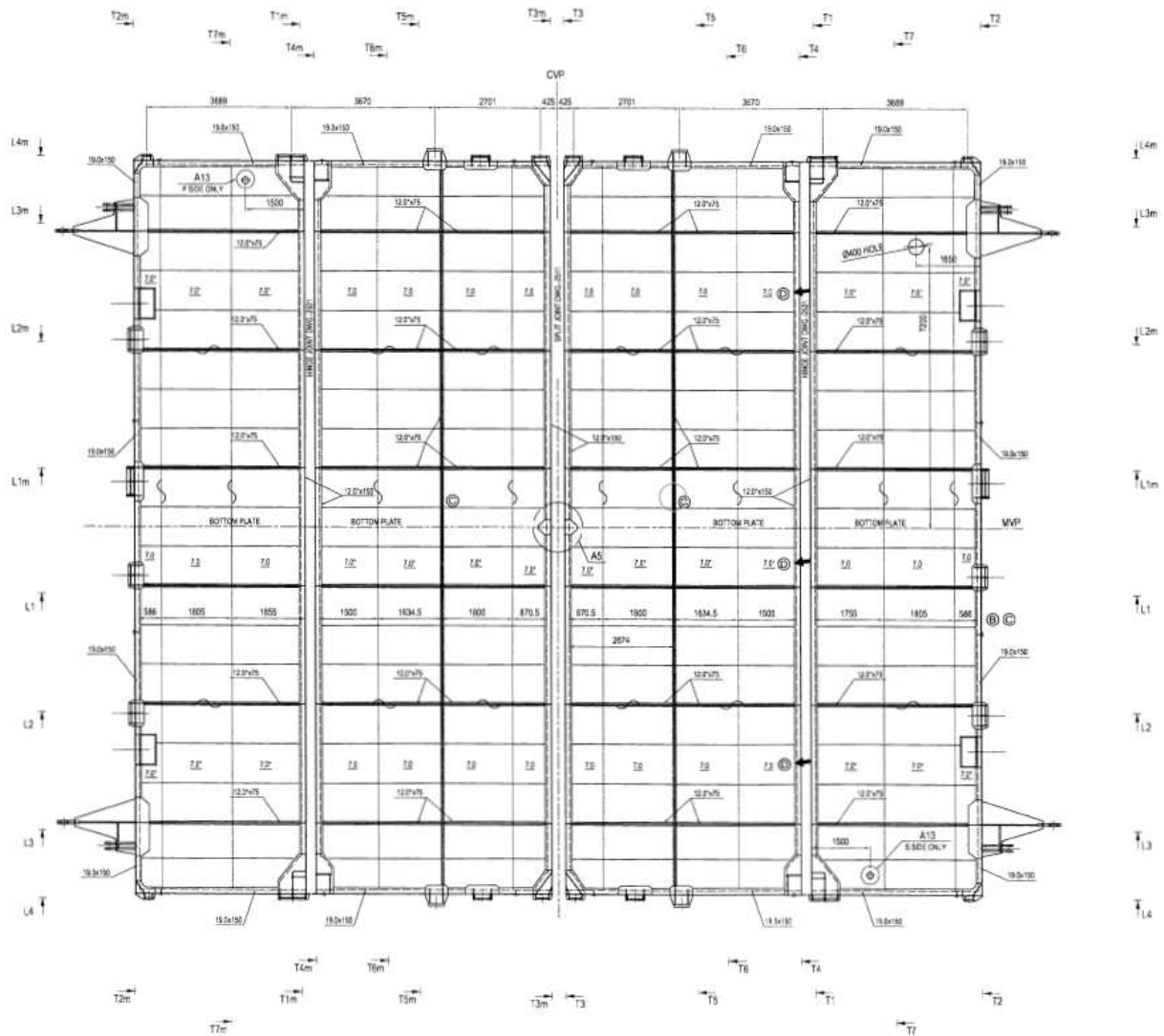
Για την συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιλέχθηκε η μελέτη του δεύτερου καλύμματος στομίου κύτους. Τα βασικά αίτια της επιλογής του δεύτερου καλύμματος αντί των υπολοίπων είναι τα εξής. Αρχικά, το μήκος των καλυμμάτων 2-5 είναι μεγαλύτερο από το μήκος του καλύμματος 1, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, γεγονός που καθιστά τα καλύμματα 2-5

πιο επιρρεπή σε μεγαλύτερες τιμές βέλους κάμψης και συνεπώς η σχεδιάσή τους καθίσταται κρισιμότερη. Επιπλέον, απορρίφθηκε η επιλογή του καλύμματος 3, λόγω των ιδιοτεροτήτων που αναφέρθηκαν προηγουμένως, οι οποίες περιπλέκουν την μελέτη και δυσχεραίνουν την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων. Τέλος, μεταξύ των καλυμμάτων 2,4 και 5, επιλέχθηκε το κάλυμμα 2, λόγω της μεγαλύτερης πίεσης σχεδιασμού που προκύπτει από τους κανονισμούς, η οποία εξαρτάται από την διαμήκη θέση του καλύμματος.

Τα Σχήματα 3.1 έως 3.4 που ακολουθούν είναι τμήματα των κατασκευαστικών σχεδίων του καλύμματος 2 και απεικονίζουν τη συνολική γεωμετρία του καλύμματος 2. Τα καλύμματα αποτελούνται από δύο ορθογώνιες πλάκες (πάνω και κάτω πλάκα) με την πάνω πλάκα να είναι ενισχυμένη με εγκάρσια ενισχυτικά, ενώ την κάτω πλάκα με διαμήκη ενισχυτικά. Η διαμήκης και η εγκάρσια διεύθυνση αντιστοιχούν στην διαμήκη και εγκάρσια διεύθυνση του πλοίου. Στο Σχήμα 3.1 απεικονίζεται η κάτοψη της πάνω πλάκας και στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η κάτοψη της κάτω πλάκας τους καλύμματος.



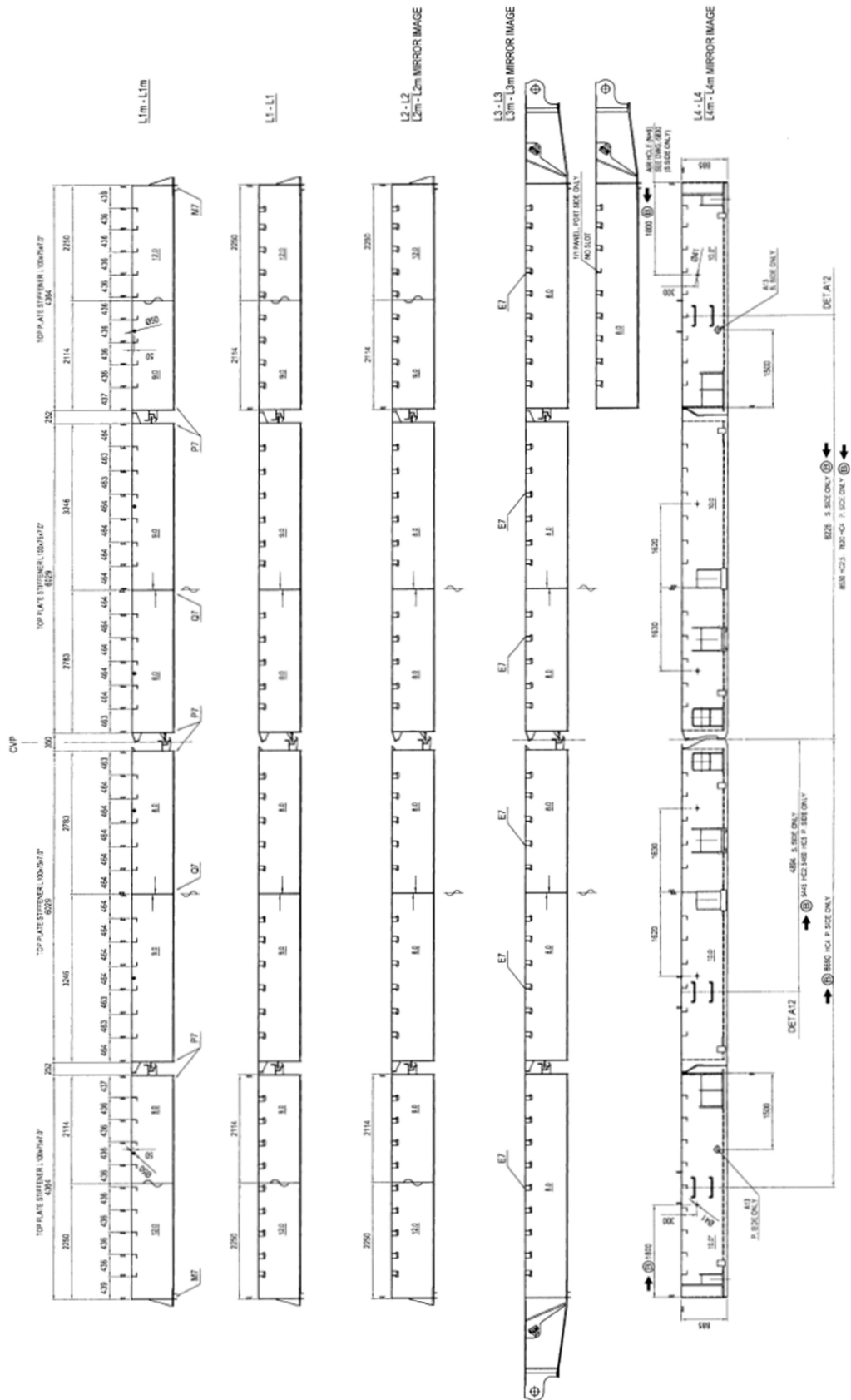
Σχήμα 3.1: Κάτοψη πάνω πλάκας



Σχήμα 3.2: Κάτοψη κάτω πλάκας

Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται οι διαμήκεις τομές του καλύμματος, αποκαλύπτοντας τη μορφή των εγκάρσιων ενισχυτικών. Σε κάθε ένα από τα τέσσερα τμήματα παρατηρείται μία κεντρική σταθμίδα σε όλο το ύψος από τη κάτω έως την πάνω πλάκα. Στην πάνω πλάκα είναι τοποθετημένα μικρά ενισχυτικά τύπου L, τα οποία είναι 40 σε αριθμό. Η κάτω πλάκα δεν διαθέτει ενισχυτικά κατά το εγκάρσιο. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται οι εγκάρσιες τομές του καλύμματος, αποκαλύπτοντας τη μορφή των διαμηκών ενισχυτικών του καλύμματος. Παρατηρούνται 6 σταθμίδες σε όλο το ύψος του καλύμματος, όπως και κατά το εγκάρσιο. Στη κάτω πλάκα είναι τοποθετημένα 12 ενισχυτικά «λάμες». Κατά το διάμηκες δεν υπάρχουν ενισχυτικά στην πάνω πλάκα. Το κάλυμμα είναι συμμετρικό τόσο κατά το διάμηκες, όσο και κατά το εγκάρσιο. Στα Σχήματα 3.1 έως 3.4 αναγράφονται τα πάχη του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με την περιοχή, παρατηρώντας αύξηση του πάχους στην κεντρική περιοχή του καλύμματος. Το βασικό υλικό κατασκευής του καλύμματος είναι

κοινός ναυπηγικός χάλυβας, ενώ χρησιμοποιείται χάλυβας υψηλής αντοχής HT32 και HT36 σε κάποια κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία επισημαίνονται με * και *** αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Τομές κατά το διάμηκες

3.2 Εφαρμογή κανονισμών

Σύμφωνα με τα παρεχόμενα σχέδια του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους, η σχεδίαση υλοποιήθηκε σύμφωνα με τους κανονισμούς του ιταλικού νηογνώμονα Registro Italiano Navale (RINA) και συγκεκριμένα τους κανονισμούς UR-S21 SEA LOAD του IACS. Η φόρτιση που αντιστοιχεί για το κάλυμμα 2 έχει μορφή ομοιόμορφης πίεσης και τιμή που δίνεται στα σχέδια ίση με 34.50 kN/m^2 . Στην συνέχεια, με σκοπό την επαλήθευση της τιμής αυτής, πραγματοποιείται υπολογισμός της ίδιας φόρτισης ακολουθώντας την μεθοδολογία των κανονισμών UR-S21 SEA LOAD του IACS, η οποία παρατίθεται ακολούθως.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς αυτούς, η πίεση σε kN/m^2 στην πάνω πλάκα του καλύμματος στομίου κύτους, για πλοία με μήκος μεγαλύτερο των 100 μέτρων, υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$p = 34.3 + \frac{p_{FP} - 34.3}{0.25} \left(0.25 - \frac{x}{L} \right) \quad (3.1)$$

Η τιμή της παραπάνω εξίσωσης πρέπει να μην είναι μικρότερη του 34.3.

Η πίεση p_{FP} αφορά την πίεση στην προραία κάθετο και υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$p_{FP} = 49.1 + (L - 100)a \quad (3.2)$$

Όπου

L: το μήκος του πλοίου που ισούται με 187.88 μέτρα

a: παράμετρος που εξαρτάται από το είδος εξάλων του πλοίου και για πλοίο τύπου B, όπως το συγκεκριμένο, ισούται με 0.0726

Τελικά, αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές προκύπτει $p_{FP} = 55.48 \text{ kN/m}^2$.

Η απόσταση x ορίζεται ως το μήκος από το κέντρο του καλύμματος ως τη προραία κάθετο του πλοίου. Δεδομένης της έλλειψης αναλυτικών σχεδίων του πλοίου, ο υπολογισμός της απόστασης x πραγματοποιήθηκε με μετρήσεις από φωτογραφίες του πλοίου. Ανάγοντας τις μετρήσεις αυτές βάσει γνωστών διαστάσεων, όπως το μήκος του πλοίου, εξήχθη μία καλή προσέγγιση της τιμής της απόστασης x . Η τιμή αυτή υπολογίστηκε ίση με 46.52 μέτρα.

Αντικαθιστώντας όλες τις τιμές των παραμέτρων στην αρχική εξίσωση προκύπτει τιμή πίεσης p ίση με 34.5 kN/m^2 , επαληθεύοντας με αυτόν τον τρόπο την τιμή που δόθηκε στα σχέδια του καλύμματος.

3.3 Υπολογισμός βάρους και ροπής αδράνειας

Στα παρεχόμενα σχέδια των καλυμμάτων στομίων κυτών δίνονται πληροφορίες για το συνολικό βάρος όλων των στοιχείων που περιλαμβάνονται στα σχέδια. Συγκεκριμένα, δίνεται το συνολικό βάρος των 5 καλυμμάτων στομίων κυτών, όπως επίσης και τα βάρη των επιμέρους συνιστωσών του συνολικού βάρους. Οι συνιστώσες αυτές αποτελούνται από το καθαρό βάρος του χάλυβα του καλύμματος, οι ανοχές των διαφόρων βαρών, το βάρος των βαφών, το βάρος των συγκολλήσεων, τα βάρη των επιπλέον εξαρτημάτων που προστέθηκαν από το ναυπηγείο και τα βάρη των επιπλέον εξαρτημάτων που προστέθηκαν από την MacGREGOR. Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζονται οι τιμές των βαρών αυτών.

The total weight of MCG equipment is approximately 554 tonnes divided as below:

net steel weight of the hatch covers	487 tonnes
tolerances, painting and welding (3 % of the steel weight)	15 tonnes
fittings delivered by the Shipyard	3 tonnes
fittings delivered by MacGREGOR	49 tonnes

Σχήμα 3.5: Βάρη χαλύβδινων καλυμμάτων στομίων κυτών

Στην συγκεκριμένη μελέτη δεν λαμβάνεται υπόψιν το βάρος των επιπλέον εξαρτημάτων που προστίθενται στο κάλυμμα στομίου κύτους, τα οποία μπορεί να είναι σύνδεσμοι, βαλβίδες, σημεία πρόσδεσης, υδραυλικά συστήματα κ.α., καθώς επιδρούν αμελητέα στην μηχανική συμπεριφορά του καλύμματος, ενώ αυξάνουν την πολυπλοκότητα της σχεδίασης καθώς η μοντελοποίησή τους διαθέτει αυξημένο βαθμό δυσκολίας. Επίσης, η μορφή τους εξαρτάται αποκλειστικά από την λειτουργία του καλύμματος στομίου κύτους πάνω στο πλοίο και συνεπώς θα διαφέρουν αρκετά αν προορίζονται για χαλύβδινο κάλυμμα ή αν προορίζονται για ένα κάλυμμα από σύνθετα υλικά. Επίσης, αγνοώντας τα επιπλέον εξαρτήματα δίνεται η δυνατότητα άμεσης σύγκρισης του χαλύβδινου καλύμματος με το κάλυμμα από σύνθετα υλικά που θα μελετηθεί.

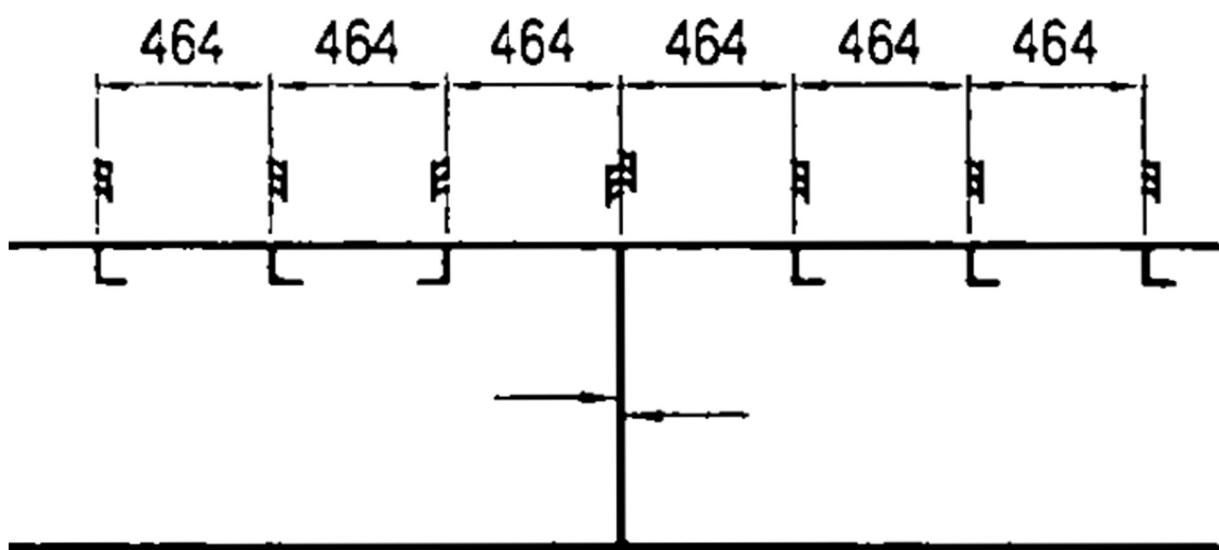
Σύμφωνα με τα παραπάνω, λοιπόν, το συνολικό βάρος των 5 καλυμμάτων, ισούται με 502 τόνους, που προκύπτει από το άθροισμα του καθαρού βάρους του χάλυβα και το βάρος των βαφών, των συγκολλήσεων και των ανοχών των βαρών. Καθώς δεν δίνεται τιμή βάρους για κάθε ένα από τα καλύμματα ξεχωριστά, η εκτίμηση του βάρους του καλύμματος 2 υπολογίζεται αναλογικά με τις διαστάσεις τους ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφεται ακολούθως. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, τα καλύμματα 2-5 διαθέτουν όμοιες διαστάσεις,

ενώ το κάλυμμα 1 διαφέρει από τα υπόλοιπα στην διάσταση του μήκους. Το μήκος του καλύμματος 1 είναι ίσο με 16.4 μέτρα, ενώ το μήκος των υπόλοιπων καλυμμάτων είναι 21.32 μέτρα. Για τον υπολογισμό που ακολουθεί ορίζεται το βάρος του καλύμματος 1 ως W_1 και το βάρος των όμοιων καλυμμάτων 2-5 ως W_2 . Συνεπώς ισχύει ότι:

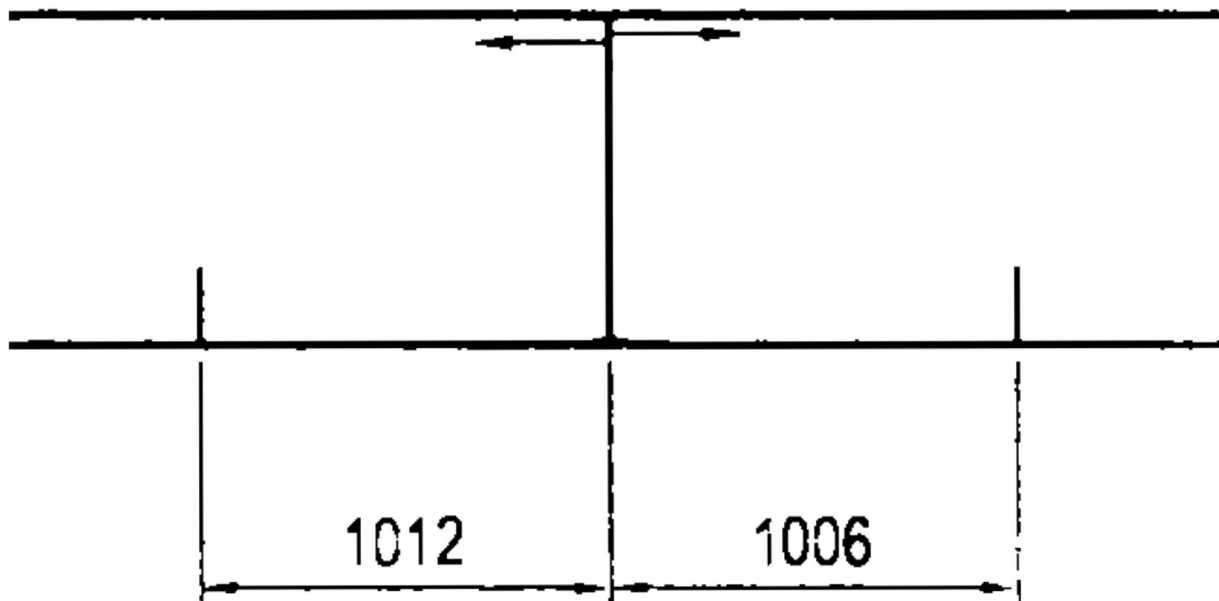
$$\begin{cases} W_1 + 4W_2 = 502 \\ W_1 = \frac{16.4}{21.32} W_2 \end{cases} \Rightarrow W_2 = 105.25 \text{ τόνοι}$$

Κρίσιμη παράμετρος για οποιαδήποτε κατασκευή από σύνθετα υλικά είναι η ακαμψία, καθώς τα σύνθετα υλικά από τη φύση τους δεν διαθέτουν τόσο υψηλή ακαμψία όσο ο χάλυβας. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι κανονισμοί για τα καλύμματα στομίων κυτών προδιαγράφουν μέγιστες τιμές βέλους κάμψης. Για τους λόγους αυτούς κρίνεται αναγκαίος ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας του χαλύβδινου καλύμματος, στην οποία θα βασιστεί η σχεδίαση του αντίστοιχου καλύμματος από σύνθετα υλικά.

Από τα Σχήματα 2.18 και 2.19 παρατηρείται ότι το σύστημα ενίσχυσης του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους σε κάθε διεύθυνση μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα χαρακτηριστικό τμήμα το οποίο επαναλαμβάνεται 6 φορές. Απομονώνοντας τα τμήματα αυτά για την διαμήκη και την εγκάρσια διεύθυνση και υπολογίζοντας την ροπή αδράνειάς τους ως προς διαμήκη και ως προς εγκάρσιο άξονα αντίστοιχα, εξάγεται μία τιμή της ροπής αδράνειας ανά μονάδα μήκους για κάθε διεύθυνση του καλύμματος στομίου κύτους. Τα χαρακτηριστικά τμήματα τις κατασκευής παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.6 και 3.7 που ακολουθούν. Με τη μέθοδο αυτή αρχικά απλοποιείται ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας και δεύτερον διευκολύνεται η μετάβαση της πληροφορίας ροπής αδράνειας προς τη σχεδίαση του καλύμματος από σύνθετα υλικά και η επιλογή της μορφής και των διαστάσεων των ενισχυτικών.



Σχήμα 3.6: Τμήμα εγκάρσιας ενίσχυσης



Σχήμα 3.7: Τμήμα διαμήκου ενίσχυσης

Γνωρίζοντας όλες τις διαστάσεις και τα πάχη των επιμέρους στοιχείων των παραπάνω τμημάτων από τα διαθέσιμα σχέδια, εισάγονται οι γεωμετρίες σε ένα σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD, το οποίο διαθέτει εργαλείο υπολογισμού ροπής αδράνειας και τελικά υπολογίζεται ότι το τμήμα της διαμήκου ενίσχυσης διαθέτει ροπή αδράνειας $9.15 \times 10^9 \text{ mm}^4$ και το τμήμα της εγκάρσιας ενίσχυσης διαθέτει ροπή αδράνειας $9.03 \times 10^9 \text{ mm}^4$. Και τα δύο τμήματα έχουν μήκος 3 μέτρα. Συνεπώς, υπολογίζεται προσεγγιστικά ότι χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους διαθέτει ροπή αδράνειας ανά μήκος περίπου ίση με $3 \times 10^9 \text{ mm}^4/\text{m}$ και στις δύο διευθύνσεις.

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά

4.1 Σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με ενίσχυση από σταθμίδες

Στα πρώτα στάδια της σχεδίασης του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά, το οποίο βασίζεται σε ήδη υπάρχον συμβατικό χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους, συγκεκριμένα στο κάλυμμα 2 των παρεχόμενων σχεδίων από την Arista Shipping, απαιτείται ο καθορισμός των παραμέτρων οι οποίες θα διατηρηθούν όμοιες με το χαλύβδινο και των παραμέτρων που θα διαφοροποιηθούν.

Αρχικά είναι προφανές ότι οι διαστάσεις του συνολικού μήκους και πλάτους του καλύμματος στομίου κύτους οφείλουν να διατηρηθούν ταυτόσημες με το χαλύβδινο κάλυμμα, έτσι ώστε το κάλυμμα από σύνθετα υλικά που σχεδιάζεται να αντικαθιστά το ήδη υπάρχον. Κατά την μελέτη των κανονισμών, αλλά και των σχεδίων δεν παρατηρήθηκε κάποιος περιορισμός, είτε από άποψη αντοχής, είτε για λειτουργικούς λόγους για το συνολικό ύψος του καλύμματος στομίου κύτους και συνεπώς αποτελεί μια από τις παραμέτρους της σχεδίασης που απαιτείται να καθοριστεί.

Η βασική διαφορά στη σχεδίαση του καλύμματος από σύνθετα υλικά σε σχέση με το χαλύβδινο είναι η μορφή του συστήματος ενίσχυσης της πλάκας. Στην συγκεκριμένη εργασία μελετήθηκαν δύο διαφορετικές μορφές ενίσχυσης και συγκεκριμένα η ενίσχυση με σταθμίδες (flat bars) σε δύο διευθύνσεις και η ενίσχυση με ενισχυτικά τύπου καπέλου σε μία διεύθυνση. Σε όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν επιλέχθηκαν ανοιχτές γεωμετρίες, δηλαδή χωρίς τοποθέτηση κάτω πλάκας, σε αντίθεση με την σχεδίαση του αντίστοιχου χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους, το οποίο διαθέτει πάνω και κάτω πλάκα, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι το υλικό της στρώσης του σύνθετου υλικού, το πάχος της στρώσης και ο προσανατολισμός των στρώσεων. Στις ακόλουθες σχεδιάσεις χρησιμοποιήθηκε κατά βάση το ίδιο υλικό στρώσεων με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη που περιεγράφηκε στην ενότητα 2.2, δηλαδή το “E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex”, καθώς η μηχανική συμπεριφορά του αποδείχθηκε ικανοποιητική στην ανάλυση που υλοποιήθηκε στην ενότητα 2.2. Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις υπάρχουσες εφαρμογές καλυμμάτων στομίου κύτους από σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται υλικά τύπου fiberglass, όπως το συγκεκριμένο, συνεπώς αποτελεί μία ασφαλή επιλογή.

Τέλος, η κύρια παράμετρος της σχεδίασης του καλύμματος στομίου κύτους, αλλά και των περισσότερων παρόμοιων σχεδιάσεων, είναι το πάχος του κάθε κατασκευαστικού στοιχείου. Η παράμετρος αυτή καθορίζεται, μετά από μία σειρά επαναλαμβανόμενων αναλύσεων κατά τις οποίες τα εξαγόμενα αποτελέσματα αξιολογούνται έτσι ώστε να μην ξεπερνούν τις επιτρεπόμενες τιμές, αλλά ταυτόχρονα να μην οδηγούν σε υπερδιαστασιολόγηση της κατασκευής.

4.1.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για την μετάβαση από το υπάρχον χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους στην σχεδίαση νέου καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά χρησιμοποιήθηκε ως βασικός πυλώνας η ροπή αδράνειας. Η γεωμετρία του καλύμματος από σύνθετα υλικά σχεδιάστηκε έτσι ώστε η τιμή της ροπής αδράνειάς του να είναι τουλάχιστον ίση με αυτή του χαλύβδινου καλύμματος. Σε αντιστοιχία με την μελέτη του χαλύβδινου καλύμματος, για τον σχεδιασμό των ενισχυτικών και τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας της γεωμετρίας του καλύμματος από σύνθετα υλικά, σχεδιάστηκε ένα αντιπροσωπευτικό τμήμα της κατασκευής για κάθε κατεύθυνση με μήκος ίσο με τα αντίστοιχα τμήματα που μελετήθηκαν για το χαλύβδινο κάλυμμα. Με δεδομένα τα παραπάνω, ο στόχος πλέον είναι η επίτευξη ροπής αδράνειας ίσης ή μεγαλύτερης του 9.15×10^9 και 9.03×10^9 για το διάμηκες και το εγκάρσιο τμήμα αντίστοιχα.

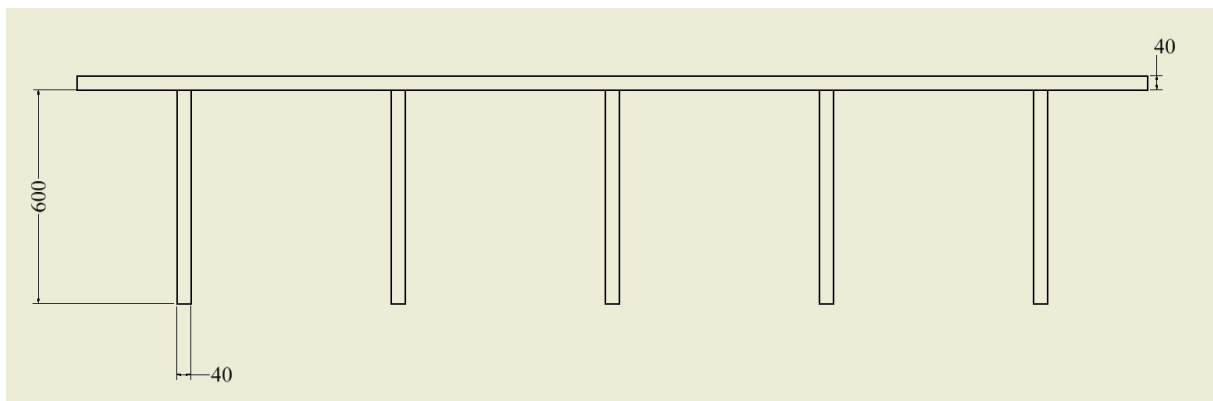
Ως μορφή ενισχυτικών επιλέχθηκαν σταθμίδες (flat bars). Τα αίτια της επιλογής αυτής είναι διάφορα. Αρχικά η συγκεκριμένη μορφή ενίσχυσης είναι η απλούστερη δυνατή καθώς αποτελείται από ένα πλήθος διαμηκών πλακών τοποθετημένων κάθετα στην πάνω πλάκα. Η απλή αυτή μορφή διευκολύνει την σχεδίαση καθώς δεν περιλαμβάνει τον καθορισμό πολλών παραμέτρων, καταλήγοντας συνεπώς σε μοντέλα με όχι ιδιαίτερα υψηλή πολυπλοκότητα. Επίσης, όπως παρουσιάστηκε και προηγουμένως, η μορφή αυτή συναντάται σε ήδη υπάρχουσες εφαρμογές, όπως η εφαρμογή της ενότητας 2.2, γεγονός που διασφαλίζει ότι η σχεδίαση είναι εφικτή.

Από την άλλη μεριά, η χρήση της μορφής των σταθμίδων διαθέτει κάποια μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψιν στην σχεδίαση. Αρχικά, λόγω της γεωμετρίας τους, όπου η μάζα τους είναι ομοιόμορφα κατανομημένη κατά το ύψος (σταθερό πάχος σε όλη τη πλάκα), η ροπή αδράνειας που διαθέτουν δεν είναι η μέγιστη δυνατή δεδομένου του εμβαδού της διατομής τους. Για τον λόγο αυτό, για την επίτευξη επαρκούς ροπής αδράνειας, χρησιμοποιείται μεγάλο πλήθος σταθμίδων. Επιπροσθέτως, λόγω της διαμήκου φύσης της διατομής τους σε συνδυασμό με την μειωμένη ακαμψία των σύνθετων υλικών, η σχεδίαση απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή όσον αφορά το φαινόμενο του λυγισμού. Συνεπώς, το συνολικό ύψος των σταθμίδων σε σχέση με το πάχος τους δεν μπορεί να έχει υψηλές τιμές.

Στο πρώτο στάδιο της σχεδίασης επιλέγεται υλικό, καθορίζονται οι ιδιότητες της κάθε στρώσης και ο προσανατολισμός τοποθέτησης της κάθε στρώσης ξεχωριστά. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη σχεδίαση είναι το “E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex”, οι ιδιότητες του οποίου παρατέθηκαν στο κεφάλαιο 2.2. Η στρώση αποτελείται από ίνες μονής κατεύθυνσης και έχει πάχος 0.5 mm. Όσον αφορά στον προσανατολισμό των στρώσεων, υιοθετήθηκε ο προσανατολισμός της εφαρμογής του κεφαλαίου 2.2, δηλαδή $[0, 45, -45, 90]_s$. Το συμμετρικό πολύστρωτο αυτό αποτελείται από 8 στρώσεις με πάχος 0.5 mm η κάθε μία, δηλαδή συνολικά έχει πάχος 4 mm. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται πως το πάχος σε κάθε κατασκευαστικό στοιχείο της γεωμετρίας επιτυγχάνεται με την επανάληψη του συγκεκριμένου πολύστρωτου και συνεπώς η τιμή του πάχους προκύπτει πολλαπλάσια των 4 mm.

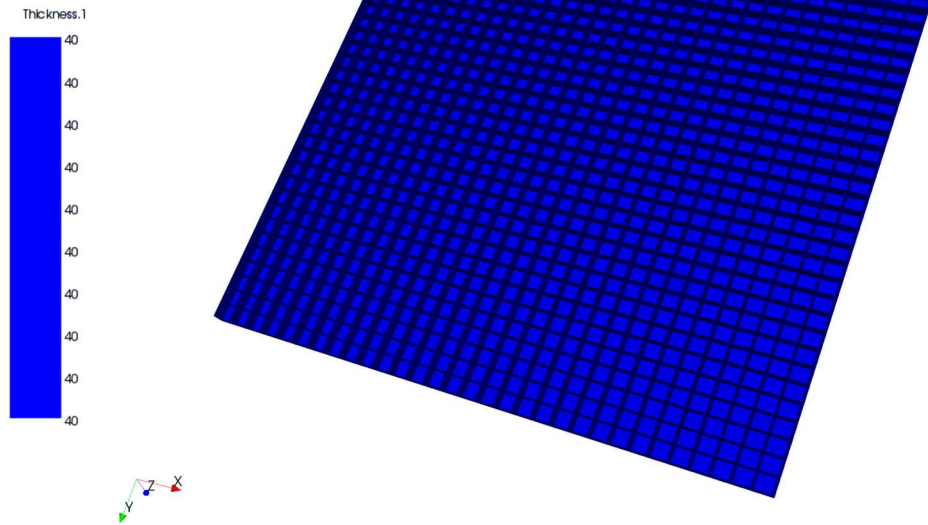
Το πάχος της πάνω πλάκας, των τεσσάρων πλευρικών τοιχωμάτων και των ενισχυτικών επιλέχθηκε αρχικά ίσο με 40 mm, το οποίο συνεπάγεται επανάληψη του πολύστρωτου 10 φορές και συνολικό αριθμό στρώσεων ίσο με 80. Η αρχική τιμή του πάχους που επιλέχθηκε βρίσκεται σε κοντινές τιμές με το πάχος του καλύμματος που μελετήθηκε στην ενότητα 2.2 και συνεπώς κρίνεται πως είναι μια ικανοποιητική πρώτη εκτίμηση για την μελέτη που ακολουθεί. Στην συνέχεια, έχοντας καθορίσει το πάχος, έπεται ο καθορισμός του ύψους των ενισχυτικών. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το συνολικό ύψος h των ενισχυτικών δεν πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το πάχος τους t . Για την συγκεκριμένη σχεδίαση επιλέγεται μία εμπειρική τιμή του λόγου h/t ίση με 15 και συνεπώς προκύπτει ύψος ενισχυτικών ίσο με 600 mm.

Δεδομένης πλέον της γεωμετρίας των ενισχυτικών, απομένει ο υπολογισμός του πλήθους τους, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή ροπή αδράνειας για κάθε κατεύθυνση. Για τον σκοπό αυτή χρησιμοποιήθηκε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD, το οποίο διαθέτει εργαλείο υπολογισμού ροπής αδράνειας. Ύστερα από πλήθος επαναληπτικών δοκιμών, υπολογίστηκε ότι τόσο στο εγκάρσιο, όσο και στο διάμηκες αντιπροσωπευτικό τμήμα, η χρήση 5 ενισχυτικών (Σχήμα 4.1) με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως και για μήκος 3 μέτρων οδηγεί σε ροπή αδράνειας ίση με $9.77 \times 10^9 \text{ mm}^4$ για κάθε μία από τις δύο διευθύνσεις. Η τιμή αυτή υπερβαίνει κατά 6,78 % και 8,19 % τις απαιτούμενες τιμές ροπής αδράνειας κατά το μήκος και κατά το πλάτος αντίστοιχα και συνεπώς θεωρείται αποδεκτή. Καθώς το χαρακτηριστικό τμήμα επαναλαμβάνεται 6 φορές σε κάθε διεύθυνση, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, το κάλυμμα στομίου κύτους διαθέτει 30 ενισχυτικά τύπου σταθμίδας σε κάθε διεύθυνση.



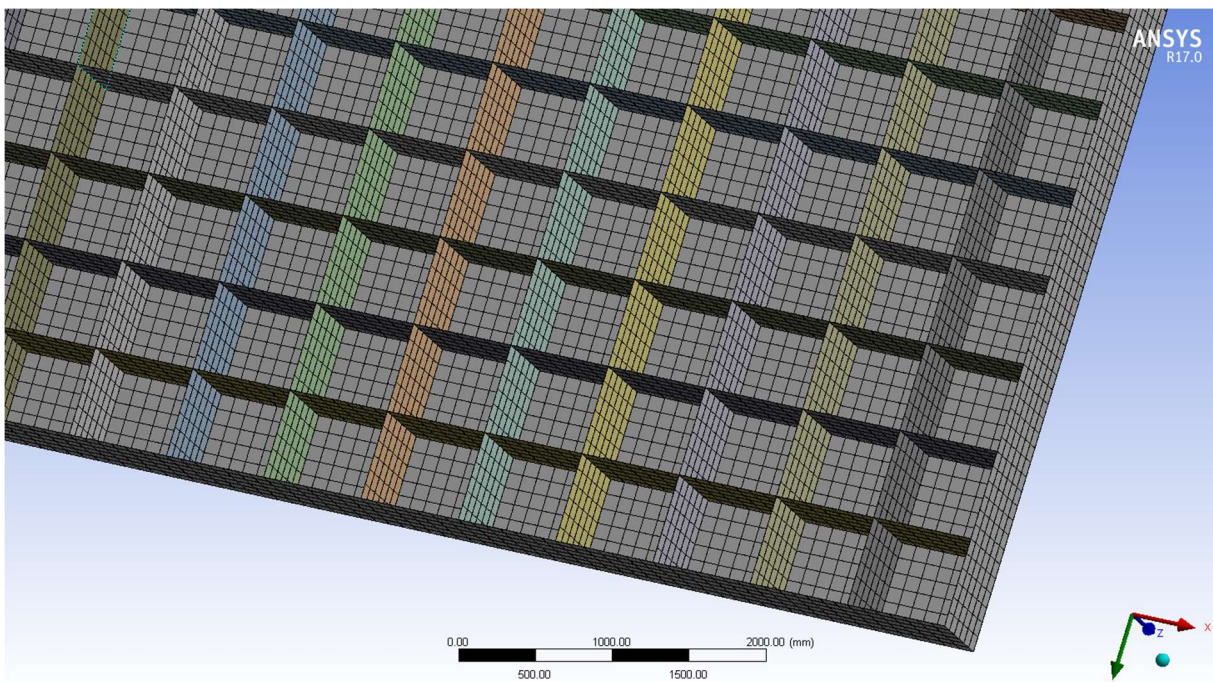
Σχήμα 4.1: Αντιπροσωπευτικό τμήμα κατασκευής

Δεδομένων των διαστάσεων 21.32 x 18.4 m του καλύμματος στομίου κύτους που μελετάται, υπολογίζεται ισαπόσταση ενισχυτικών ίση με 688 mm και 594 mm κατά το μήκος και κατά το πλάτος αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βρίσκονται στην ίδια τάξη μεγέθους με το ύψος των ενισχυτικών, το οποίο είναι 600 mm και σχηματίζουν προσεγγιστικά «κυψέλες» σε μορφή κύβων. Οι τιμές αυτές εμπειρικά κρίνεται ότι είναι αποδεκτές. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται η συνολική γεωμετρία που εισήχθη στο ANSYS.



Σχήμα 4.2: Γεωμετρία καλύμματος στομίου κύτους με σταμίδες

Το επόμενο βήμα της ανάλυσης αποτελεί ο διαχωρισμός της γεωμετρίας σε στοιχεία και ο προσδιορισμός κόμβων (meshing). Ο διαχωρισμός πραγματοποιήθηκε σε τετραγωνικά στοιχεία με μήκος πλευράς 100 ± 10 mm. Το κάθε στοιχείο διαθέτει κόμβους στις 4 γωνίες, αλλά και στα μέσα των πλευρών. Ο συνολικός αριθμός των στοιχείων που δημιουργήθηκαν είναι 117738 και ο αριθμός των κόμβων 342501. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται τμήμα της γεωμετρίας μετά τον διαχωρισμό σε στοιχεία, όπου και καθίσταται εμφανής η μορφή που περιεγράφηκε.



Σχήμα 4.3: Τμήμα γεωμετρίας μετά το meshing

4.1.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης

Για την εκπόνηση της στατικής ανάλυσης του μοντέλου που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, απαιτείται ο καθορισμός της φόρτισης και του είδους των οριακών συνθηκών, όπως επίσης και ο καθορισμός των μορφών των επιθυμητών αποτελεσμάτων που θα εξαχθούν κατά την ανάλυση.

Αρχικά, με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων του υπό σχεδίαση καλύμματος από σύνθετα υλικά με το χαλύβδινο κάλυμμα, η φόρτιση οφείλει να διατηρηθεί όμοια με αυτή που υπολογίστηκε στην ενότητα 2.3 για το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους σύμφωνα με τους κανονισμούς UR-S21 SEA LOAD του IACS. Συγκεκριμένα, η φόρτιση έχει τη μορφή ομοιόμορφης πίεσης σε όλη την έκταση της πάνω πλάκας του καλύμματος, με τιμή 34.5 kN/m^2 .

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν την μορφή πακτώσεων σε όλη την έκταση των τεσσάρων πλευρών του καλύμματος. Δεν υπάρχουν κανονισμοί που να προσδιορίζουν την μορφή των οριακών συνθηκών, ούτε προδιαγράφονται στα σχέδια του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους. Η επιλογή πραγματοποιήθηκε βάσει της μελέτης που υλοποιήθηκε στην ενότητα 2.2, σύμφωνα με την οποία με χρήση της συγκεκριμένης μορφής οριακών συνθηκών εξάγονται αποτελέσματα που συγκλίνουν περισσότερο στην πραγματικότητα.

Επίσης, οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την ανάλυση επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο άξονας X να αντιστοιχεί στο μήκος του καλύμματος, ο άξονας Y να αντιστοιχεί στο πλάτος του καλύμματος και ο άξονας Z να αντιστοιχεί στο ύψος του καλύμματος., όπου το μήκος, το πλάτος και το ύψος του καλύμματος αντιστοιχούν στη διαμήκη, την εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση του πλοίου αντίστοιχα.

Εξήχθησαν αποτελέσματα για τη συνολική γεωμετρία, αλλά και για διάφορες κατηγορίες κατασκευαστικών στοιχείων της κατασκευής ξεχωριστά, τα οποία παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, εξήχθησαν ξεχωριστά αποτελέσματα για την πάνω πλάκα, τις επιφάνειες παράλληλες στο επίπεδο XZ, δηλαδή τα διαμήκη ενισχυτικά και τοιχώματα, και τις επιφάνειες παράλληλες στο επίπεδο YZ, δηλαδή τα εγκάρσια ενισχυτικά και τοιχώματα. Στις δύο τελευταίες κατηγορίες περιλαμβάνονται τόσο τα ενισχυτικά, όσο και οι πλευρές του καλύμματος καθώς παρουσιάζουν όμοια χαρακτηριστικά, δηλαδή όμοιο ύψος, πάχος και διατομή. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για όλες τις παραπάνω κατηγορίες έχουν την μορφή βέλους κάμψης κατά τον άξονα Y, ορθής τάσης σε δύο διευθύνσεις ανάλογα με τη κάθε κατηγορία, διατμητικής τάσης στο επίπεδο ανάλογα με τη κάθε κατηγορία και τιμή του IRF που υπολογίζεται βάσει των κριτηρίων Tsai-Wu και Puck, όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 2.2. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές όλων των αποτελεσμάτων που αναφέρθηκαν.

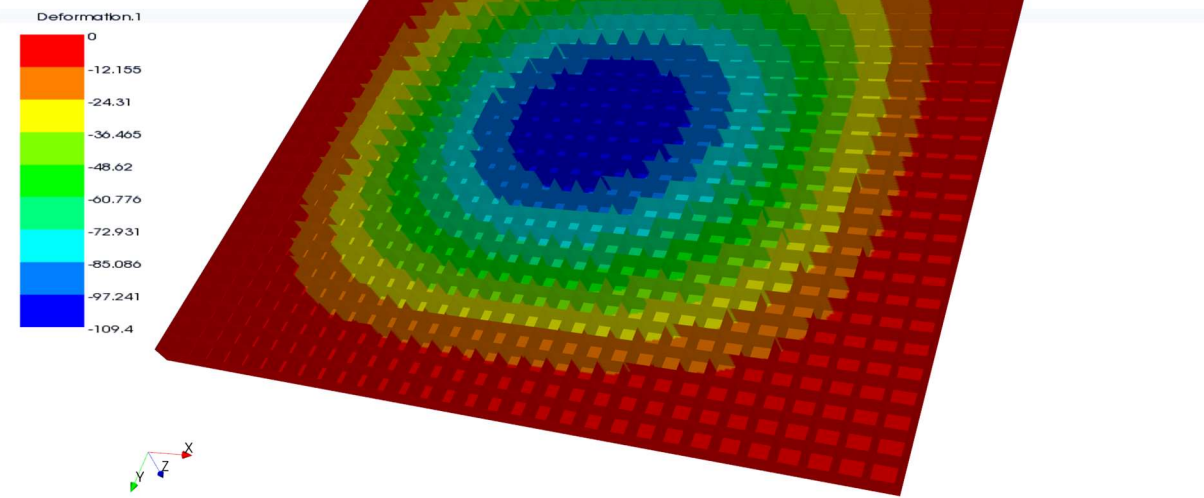
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης

Συνολική Γεωμετρία	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	109.4
	Μέγιστο IRF	0.91889
Πάνω πλάκα	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	109.4
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X σ_{xmax} (MPa)	76.1
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	27.3
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XY $\tau_{xy_{max}}$ (MPa)	-9.9
	Μέγιστο IRF	0.75489
Διαμήκη ενισχυτικά και τοιχώματα	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	109.13
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X σ_{xmax} (MPa)	-174.8
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z σ_{zmax} (MPa)	-59.9
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XZ $\tau_{xz_{max}}$ (MPa)	27.2
	Μέγιστο IRF	0.63895
Εγκάρσια ενισχυτικά και τοιχώματα	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	109.15
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-211.5
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z σ_{zmax} (MPa)	-72.5
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά YZ $\tau_{yz_{max}}$ (MPa)	32.9
	Μέγιστο IRF	0.91889

Στα Σχήματα 4.4 και 4.5 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή του βέλους κάμψης και η κατανομή του IRF σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του καλύμματος στομίου κύτους που σχεδιάστηκε. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται αναδεικνύει τις περιοχές μέγιστων τιμών του κάθε μεγέθους, οι οποίες αναπαρίστανται με μπλε χρώμα για το βέλος κάμψης και κόκκινο χρώμα για το IRF. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται στην επόμενη ενότητα.

ACP Model
10-Jun-18 18:15
Deformation - 1
Element-Wise
Unit: mm
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (last)
Max: 0
Min: -109.4

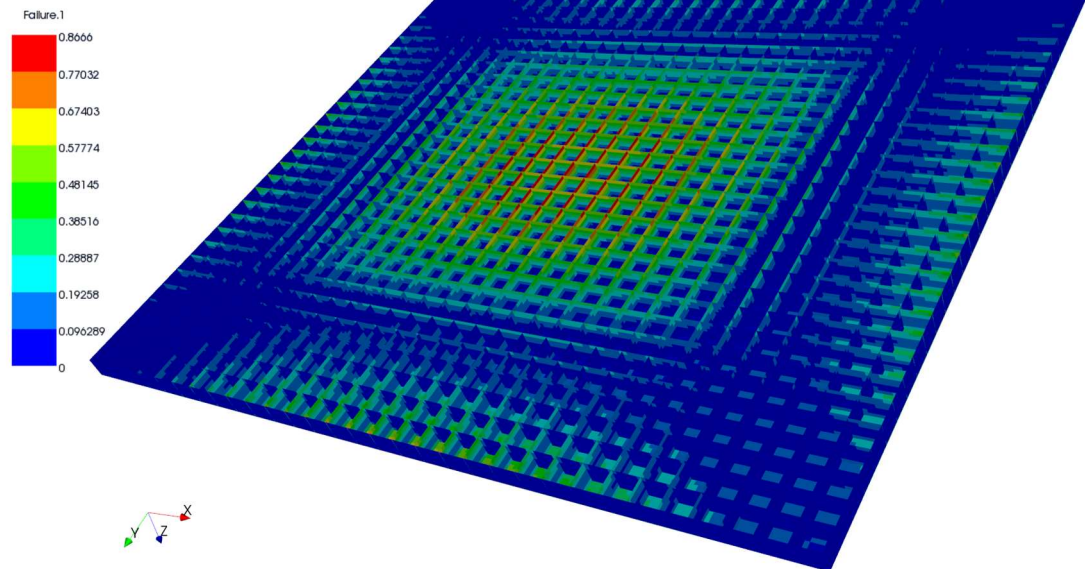
ANSYS
R17.0



Σχήμα 4.4: Κατανομή βέλους κάμψης

ACP Model
10-Jun-18 18:09
Failure - #1
Element-Wise
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (last)
Max: 0.8000
Min: 0

ANSYS
R17.0



Σχήμα 4.5: Κατανομή IRF

4.1.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στην ενότητα αυτή πραγματοποιείται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα και συγκεκριμένα τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 και των Σχημάτων 4.4 και 4.5. Στον Πίνακα 4.1 δίνονται οι μέγιστες τιμές των μεγεθών που υπολογίστηκαν, όμως για την πλήρη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων απαιτούνται πληροφορίες για τη γεωμετρική θέση των μέγιστων τιμών και για την στρώση στην οποία εμφανίζονται. Ο άξονας αναφοράς για την κάθε στρώση ορίζεται κατά το μήκος του εκάστοτε στοιχείου, δηλαδή η στρώση 0° στην πάνω πλάκα αναφέρεται σε διεύθυνση ινών κατά τον άξονα X, όπως και στα διαμήκη ενισχυτικά και τοιχώματα, ενώ στα εγκάρσια ενισχυτικά και τοιχώματα η στρώση 0° αναφέρεται σε διεύθυνση ινών κατά τον άξονα Y.

Η τιμή του μέγιστου βέλους κάμψης εμφανίζεται στο κέντρο της πάνω πλάκας. Ο λόγος μέγιστου βέλους κάμψης προς το μήκος της μικρότερης πλευράς ισούται με $1/168$. Η τιμή αυτή ικανοποιεί επαρκώς την εμπειρική μέγιστη τιμή του $1/50$ και βέβαια μπορεί να θεωρηθεί υπερδιαστασιολογημένη.

Η τιμή του μέγιστου IRF εμφανίζεται στην ελεύθερη ακμή στο μέσο των κεντρικών εγκάρσιων ενισχυτικών. Η κρίσιμη στρώση έχει προσανατολισμό 90° . Η τιμή 0.91889 που εμφανίζεται σε αυτά τα σημεία κρίνεται αποδεκτή καθώς είναι μικρότερη της μονάδας, αλλά χωρίς μεγάλο περιθώριο ασφαλείας. Για τον λόγο αυτό, δεν είναι δυνατή η μείωση της ακαμψίας με σκοπό την άρση της υπερδιαστασιολόγησης λόγω βέλους κάμψης καθώς αυτό θα οδηγούσε σε περαιτέρω αύξηση των τάσεων και συνεπώς υπέρβαση της μονάδας για την τιμή του IRF, δηλαδή σε αστοχία της σχεδίασης.

Μελετώντας την πάνω πλάκα ξεχωριστά παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των τάσεων κατά X και κατά Y εμφανίζονται στην μέση της μεγάλης πλευράς σε στρώσεις με προσανατολισμό 90° και 0° αντίστοιχα και συγκεκριμένα στις πιο απομακρυσμένες στρώσεις κατά Z από τον ουδέτερο άξονα. Η διατμητική τάση εμφανίζεται στην μέση της μικρής πλευράς σε στρώση με προσανατολισμό 45° , η οποία είναι η πιο απομακρυσμένη κατά Z στρώση από τον ουδέτερο άξονα. Καθώς η τιμή της διατμητικής τάσεις είναι μικρή σε σχέση με τις άλλες δύο ορθές τάσεις, είναι αναμενόμενο ότι η μέγιστη τιμή του IRF να εμφανίζεται στην ίδια θέση με τις ορθές τάσεις, δηλαδή στο μέσο της μεγάλης πλευράς στην στρώση που εμφανίζεται και η μέγιστη ορθή τάση κατά X. Βέβαια η τιμή 0.75489 απέχει από τις κρίσιμες τιμές που οδηγούν σε αστοχία, δηλαδή την μονάδα, και συνεπώς δεν υπάρχουν ιδιαίτερα κρίσιμα σημεία στη πάνω πλάκα για αυτή τη σχεδίαση.

Στις επιφάνειες κατά X, όπως είναι αναμενόμενο, η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης εντοπίζεται στο μέσο και των δύο κεντρικών ενισχυτικών και έχει τιμή λίγο μικρότερη της ολικά μέγιστης καθώς στο γεωμετρικό κέντρο του καλύμματος, όπου εμφανίζεται η ολικά μέγιστη τιμή βέλους κάμψης, δεν είναι τοποθετημένο κάποιο ενισχυτικό. Οι περιοχές που εμφανίζουν μέγιστες τάσεις είναι δύο. Η πρώτη εντοπίζεται στις άκρες των δύο κεντρικών ενισχυτικών, στην ένωση με τις πλευρές και η δεύτερη εντοπίζεται στην περιοχή του μέγιστου βέλους κάμψης, όπως περιεγράφηκε προηγουμένως. Στην πρώτη περιοχή παρατηρούνται ελάχιστα μεγαλύτερες τιμές τάσεων σε σχέση με την δεύτερη με τις κρίσιμες στρώσεις να έχουν

προσανατολισμό 0°, 90° και 45° για τις ορθές τάσεις κατά X, τις ορθές τάσεις κατά Y και τις διατμητικές τάσεις αντίστοιχα. Αντιθέτως, η μέγιστη τιμή του IRF εντοπίζεται στην δεύτερη περιοχή, το οποίο φαίνεται να αντιτίθεται με τα αποτελέσματα των τάσεων. Παρόλα αυτά δικαιολογείται παρατηρώντας πως τα σημεία που παρουσιάζουν μέγιστες τιμές IRF βρίσκονται στην περιοχή τομής των ενισχυτικών σε δύο διευθύνσεις. Σε κάθε περίπτωση η τιμή 0.63895 του IRF σε αυτά τα σημεία καθιστά τη σχεδίαση ασφαλή έναντι αστοχίας.

Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν και τα εγκάρσια ενισχυτικά και τοιχώματα, καθώς η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης εντοπίζεται στο αντίστοιχο σημείο με την προηγούμενη κατηγορία και έχει παρόμοια μέγιστη τιμή. Οι τάσεις, ενώ εντοπίζονται επίσης σε αντίστοιχες περιοχές και στρώσεις, έχουν υψηλότερες τιμές και συνεπώς οδηγούν σε μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου IRF, το οποίο είναι και το ολικό μέγιστο, όπως αναφέρθηκε και στην αρχή.

Αφού μελετήθηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης και διαπιστώθηκε ότι η σχεδίαση ικανοποιεί τα κριτήρια αστοχίας, ακολουθεί ο υπολογισμός του βάρους της κατασκευής, έτσι ώστε να διαπιστωθεί αν η μείωση του βάρους, σε σχέση με το αντίστοιχο χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους, είναι σημαντική έτσι ώστε η επιλογή της αντικατάστασης του χαλύβδινου καλύμματος με κάλυμμα από σύνθετα υλικά να είναι συμφέρουσα.

Ο υπολογισμός του βάρους του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά που μελετήθηκε σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.2 γνωρίζοντας τη συνολική γεωμετρία του καλύμματος και την πυκνότητα του υλικού που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 4.2: Υπολογισμός βάρους

Κάλυμμα στομίου κύτους από σύνθετα υλικά	
Μήκος (mm)	21320
Πλάτος (mm)	18400
Ύψος (mm)	600
Πάχος (mm)	40
Αριθμός ενισχυτικών	30
Όγκος (mm ³)	43245312000
Πυκνότητα (kg/m ³)	1964.00
Βάρος (tons)	84.93

Συγκρίνοντας την τιμή αυτή με την τιμή του βάρους του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους από τα διαθέσιμα σχέδια, η οποία είναι 105.25 τόνοι, υπολογίζεται ότι η μείωση είναι 19.3 %. Η μείωση αυτή θεωρείται μικρή και συνεπώς δεν δικαιολογεί την επιλογή αντικατάστασης του χαλύβδινου καλύμματος με το συγκεκριμένο κάλυμμα από σύνθετα υλικά που σχεδιάστηκε σε αυτή την ενότητα. Τα αίτια αυτού του αποτελέσματος είναι διάφορα. Αρχικά, το βασικό αίτιο είναι η επιλογή των ενισχυτικών τύπου σταθμίδων, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως προσφέρουν μικρή ροπή αδράνειας σε σχέση με τον όγκο τους και συνεπώς οδηγούν στην τοποθέτηση μεγάλου αριθμού ενισχυτικών για την ικανοποίηση της απαίτησης σε ροπή αδράνειας. Επιπλέον, η μείωση του συνολικού ύψους από 800 mm σε 600 mm, οδήγησε σε μείωση της ροπής αδράνειας του κάθε ενισχυτικού ξεχωριστά με αποτέλεσμα

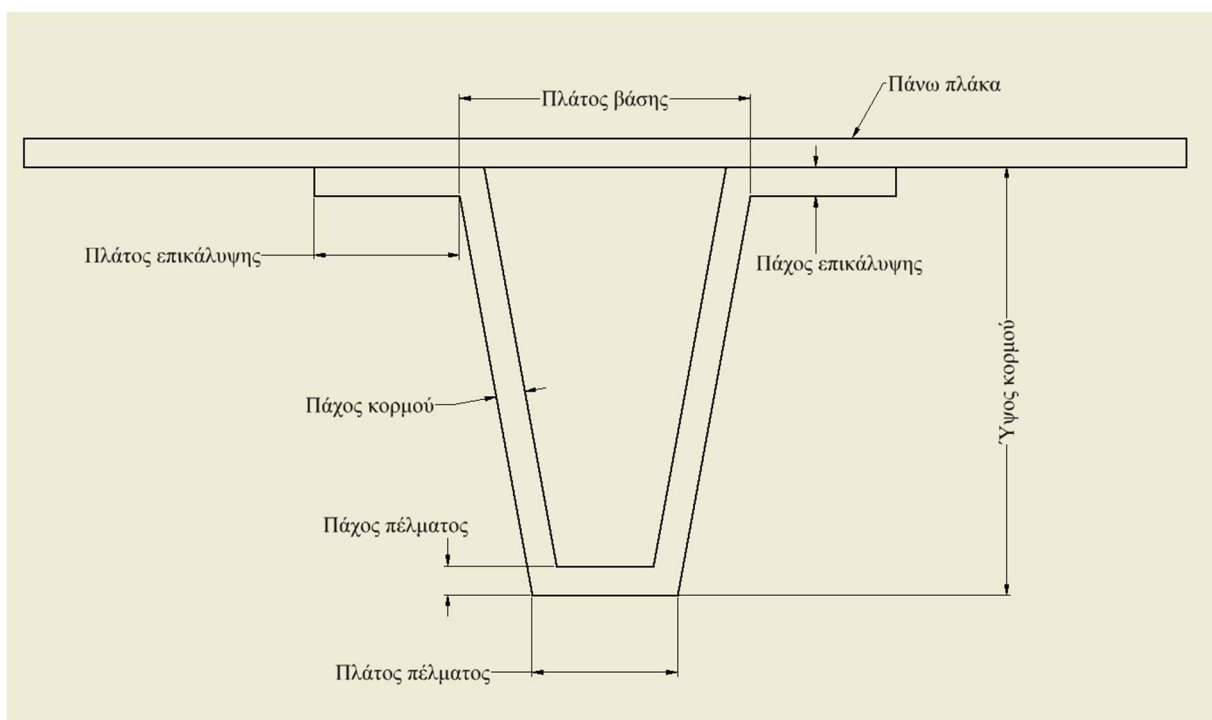
την ανάδειξη της ανάγκης τοποθέτησης περισσότερων ενισχυτικών, που οδηγούν αναπόφευκτα σε αύξηση του βάρους της κατασκευής. Τέλος, αίτιο αποτελεί, επίσης, η αυστηρή επιλογή του αρχικού κριτηρίου, το οποίο προϋποθέτει επίτευξη ίσης ροπής αδράνειας με το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους.

Στην επόμενη ενότητα μελετάται η σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με διαφορετική μορφή ενισχυτικών και συγκεκριμένα με ενισχυτικά τύπου καπέλου.

4.2 Σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με ενισχυτικά τύπου καπέλου

4.2.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στην συγκεκριμένη ενότητα μελετάται η σχεδίαση του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά με χρήση ενισχυτικών τύπου καπέλου. Τα ενισχυτικά τύπου καπέλου, η μορφή των οποίων αποτυπώνεται στο Σχήμα 4.6, χρησιμοποιούνται ευρέως σε σκάφη αναψυχής, αλλά και σε άλλες ναυπηγικές κατασκευές από σύνθετα υλικά. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν είναι η ευκολία της κατασκευής, αλλά και η μείωση του ανυποστήρικτου μήκους των επιφανειών στα οποία τοποθετούνται, λόγω του πλάτους της βάσης τους. Σε σχέση με τα ενισχυτικά τύπου σταθμίδων, που μελετήθηκαν σε προηγούμενη ενότητα, προσφέρουν αυξημένη ροπή αδράνειας, λόγω του πέλματος τους, το οποίο βρίσκεται στην μέγιστη δυνατή απόσταση από τον ουδέτερο άξονα της διατομής τους.



Σχήμα 4.6: Διατομή ενισχυτικών τύπου καπέλου

Στην συγκεκριμένη σχεδίαση επιλέχθηκε η τοποθέτηση ενισχυτικών τύπου καπέλου μόνο κατά την εγκάρσια διεύθυνση . Οι βασικές αιτίες αυτής της επιλογής είναι αρχικά η ύπαρξη αντίστοιχων εφαρμογών καλυμμάτων στομίων κύτων στις οποίες χρησιμοποιούνται επίσης ενισχυτικά τύπου καπέλου κατά την εγκάρσια διεύθυνση και συνεπώς διασφαλίζεται ότι η σχεδίαση αυτή δυνητικά οδηγεί σε αποδεκτά αποτελέσματα. Επίσης, η τοποθέτηση ενισχυτικών και στις δύο διευθύνσεις θα οδηγούσε σε αύξηση της πολυπλοκότητας τόσο στην σχεδίαση και ανάλυση του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, όσο και στην κατασκευή του καλύμματος στομίου κύτους στην πράξη. Τέλος, η τοποθέτηση ενισχυτικών κατά το εγκάρσιο επιτρέπει τον εγκάρσιο διαχωρισμό του καλύμματος σε δύο τμήματα χωρίς να διακόπτεται το μήκος των ενισχυτικών.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.1.3, η απαίτηση της επίτευξης ροπής αδράνειας του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά με τιμή ίση ή μεγαλύτερη της τιμής της ροπής αδράνειας του χαλύβδινου καλύμματος κύτους αποτέλεσε μία από τις αιτίες που οδήγησαν σε αύξηση του βάρους της σχεδίασης της ενότητα 4.1. Συνεπώς για την συγκεκριμένη σχεδίαση μεταβλήθηκε η απαιτούμενη τιμή της ροπής αδράνειας του καλύμματος από σύνθετα υλικά στην μισή της τιμής της ροπής αδράνειας του χαλύβδινου.

Στο πρώτο στάδιο της σχεδίασης της μορφής των ενισχυτικών καθορίζεται η μορφή της διατομής των ενισχυτικών τύπου καπέλου, δηλαδή καθορίζονται οι τιμές των παραμέτρων που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 3.6. Ύστερα από πλήθος σχεδιάσεων σε σχεδιαστικό πρόγραμμα CAD, επιλέχθηκαν οι τιμές των παραμέτρων αυτών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Οι συγκεκριμένες διαστάσεις οδηγούν σε διατομή ενισχυτικού τύπου καπέλου που προσομοιάζει στην τυπική μορφή που συναντάται στις περισσότερες αντίστοιχες εφαρμογές και συνεπώς αποτελεί μια ικανοποιητική αρχική προσέγγιση.

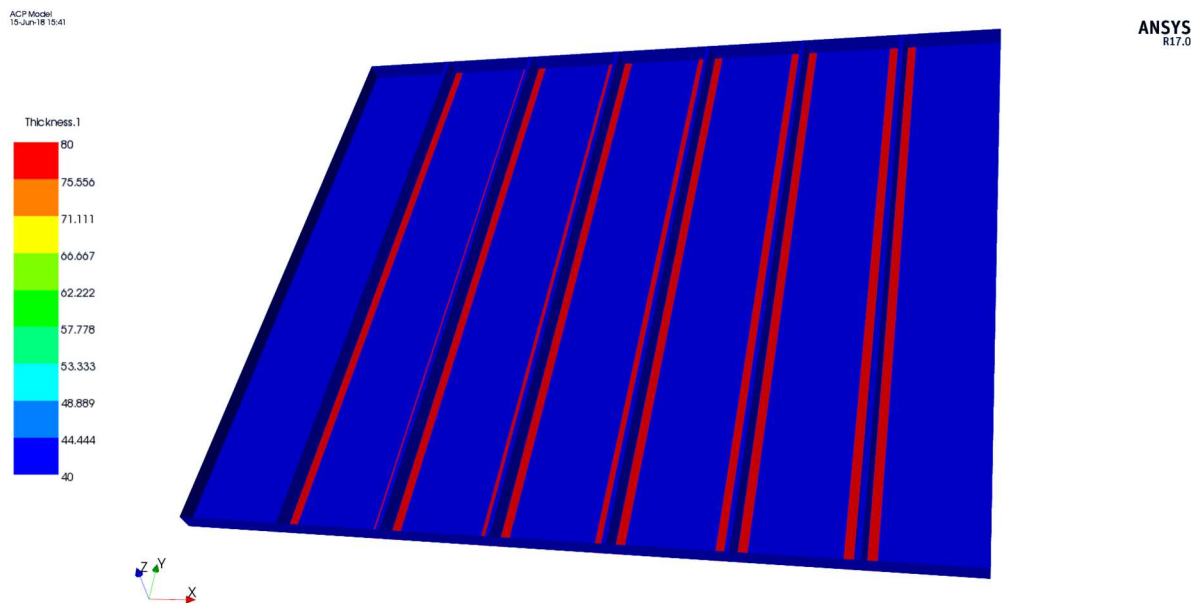
Πίνακας 4.3: Διαστάσεις διατομής ενισχυτικών τύπου καπέλου

Πλάτος βάσης (mm)	400
Πλάτος πέλματος (mm)	200
Ύψος κορμού (mm)	550
Πλάτος επικάλυψης (mm)	200
Πάχος πέλματος (mm)	40
Πάχος κορμού (mm)	40
Πάχος επικάλυψης (mm)	40

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.3 το πάχος σε κάθε τμήμα των ενισχυτικών, όπως και το πάχος της πάνω πλάκας επιλέχθηκε ίσο με 40 mm. Το είδος, το πάχος και ο προσανατολισμός των στρώσεων διατηρήθηκαν ίδια με την ενότητα 2.2 και συνεπώς ο αριθμός των στρώσεων σε κάθε σημείο του καλύμματος ισούται με 80.

Με δεδομένη πλέον την πλήρη γεωμετρία του κάθε ενισχυτικού απομένει ο καθορισμός του πλήθους των ενισχυτικών που θα τοποθετηθούν έτσι ώστε να επιτευχθεί η απαίτηση ροπής αδράνειας. Συγκεκριμένα, όπως και στην σχεδίαση του καλύμματος στομίου κύτους με σταθμίδες που μελετήθηκε στην ενότητα 4.1, ο υπολογισμός της συνολικής ροπής αδράνειας

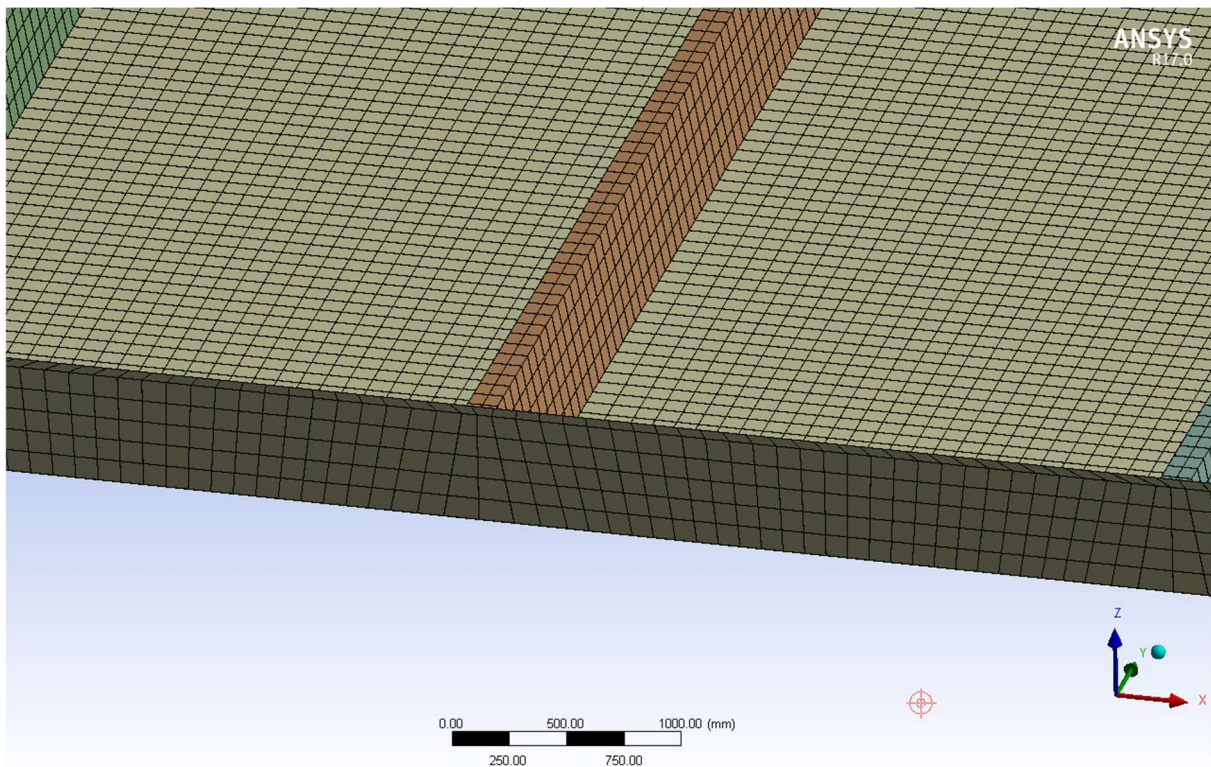
του καλύμματος απλοποιείται στον υπολογισμό της ροπής αδράνειας ενός αντιπροσωπευτικού τμήματος της κατασκευής μήκους 3 μέτρων, το οποίο για το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους υπολογίστηκε να έχει ροπή αδράνειας ίση με $9.03 \times 10^9 \text{ mm}^4$. Συνεπώς, ως απαίτηση ροπής αδράνειας του υπό σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους επιλέχθηκε η μισή της παραπάνω τιμής. Με τη χρήση του εργαλείου υπολογισμού ροπής αδράνειας του προγράμματος CAD που χρησιμοποιήθηκε, η ροπή αδράνειας του αντίστοιχου αντιπροσωπευτικού τμήματος που διαθέτει ένα ενισχυτικό τύπου καπέλου με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που περιεγράφηκαν προηγουμένως υπολογίστηκε ίση με $5.06 \times 10^9 \text{ mm}^4$. Η τιμή αυτή αποτελεί το 56.02 % της τιμής του αντιπροσωπευτικού τμήματος του χαλύβδινου και συνεπώς θεωρείται αποδεκτή τιμή για πρώτη προσέγγιση της σχεδίασης. Καθώς, όπως αναφέρθηκε και στον κεφάλαιο 2.3, το αντιπροσωπευτικό τμήμα αποτελεί το 1/6 της συνολικής διάστασης του καλύμματος σε κάθε διεύθυνση, συνεπάγεται πως το συνολικό πλήθος των ενισχυτικών τύπου καπέλου που τοποθετούνται ισούται με 6 και η ισαπόσταση αυτών υπολογίζεται ίση με 3.045 m. Στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζεται η συνολική γεωμετρία του καλύμματος στομίου κύτους, που περιεγράφηκε προηγουμένως, όπως αυτή εισήχθη στο ANSYS. Με τη χρήση χρωματικής κλίμακας αναπαρίσταται το πάχος σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του καλύμματος. Στο συγκεκριμένο μοντέλο δίνεται η ονομασία <<Μοντέλο 1>>, καθώς αποτελεί το πρώτο μεταξύ πλήθους μοντέλων που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 4.7: Γεωμετρία καλύμματος με ενισχυτικά τύπου καπέλου (Μοντέλο 1)

Τα στοιχεία στα οποία διαχωρίστηκε η συνολική γεωμετρία έχουν σχήμα παραλληλογράμμου με πλευρές $70 \pm 20 \text{ mm}$. Στο μεγαλύτερο τμήμα της γεωμετρίας τα στοιχεία έχουν τετραγωνικό σχήμα και όμοιες διαστάσεις. Οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται κάποιες παραμορφώσεις της μορφής των στοιχείων, αποκλίνοντας από το τετραγωνικό, βρίσκονται στις

επιφάνειες των πλευρών και συγκεκριμένα στις ενώσεις των ενισχυτικών. Κάθε στοιχείο διαθέτει 4 κόμβους στις 4 γωνίες του και κόμβους στα μέσα της κάθε πλευράς του, δηλαδή συνολικά 8 κόμβους. Στο Σχήμα 4.8 φαίνεται τμήμα της γεωμετρίας του καλύμματος μετά τον διαχωρισμό της σε στοιχεία και είναι εμφανής η μορφή του σε κάθε περιοχή.



Σχήμα 4.8: Διαχωρισμός γεωμετρίας σε στοιχεία

4.2.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης

Το μοντέλο που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, όπως και το μοντέλο του κεφαλαίου 4.1 έχει σκοπό την σύγκριση και αντικατάσταση του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους με το υπό σχεδίαση κάλυμμα στομίου κύτους από σύνθετα υλικά. Συνεπώς, η φόρτιση που εφαρμόζεται στην ανάλυση οφείλει να είναι ίδια με τη φόρτιση που προδιαγράφεται από τους κανονισμούς UR-S21 SEA LOAD του IACS για το χαλύβδινο κάλυμμα, δηλαδή 34.5 kN/m^2 .

Οι οριακές συνθήκες, όπως και στο μοντέλο με τις σταθμίδες, επιλέγεται να έχει τη μορφή πακτώσεων σε όλη την έκταση των τεσσάρων πλευρών. Η αιτία της επιλογής αυτής αναλύθηκε στην ενότητα 2.2.

Οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την ανάλυση επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο άξονας X να αντιστοιχεί στο μήκος του καλύμματος, ο άξονας Y να αντιστοιχεί στο πλάτος του καλύμματος και ο άξονας Z να αντιστοιχεί στο ύψος του

καλύμματος. Το μήκος, το πλάτος και το ύψος του καλύμματος αντιστοιχούν στην διαμήκη, στην εγκάρσια και στην κατακόρυφη διεύθυνση του πλοίου αντίστοιχα.

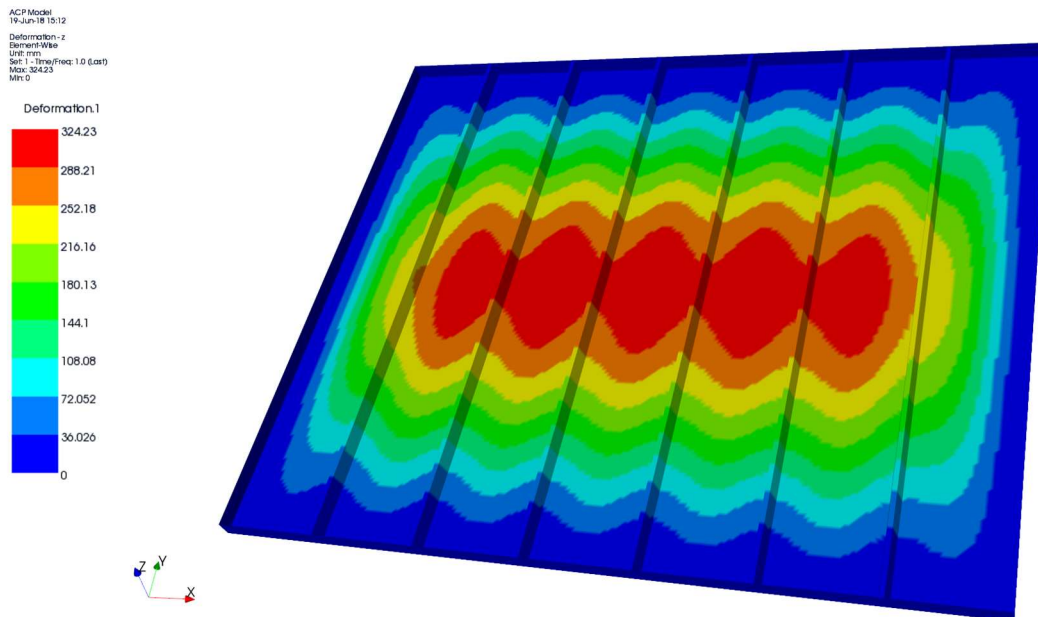
Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Τα αποτελέσματα αυτά εξήχθησαν για την συνολική γεωμετρία, αλλά και για τμήματα αυτής. Συγκεκριμένα, εξήχθησαν ξεχωριστά αποτελέσματα για την πάνω πλάκα του καλύμματος και για τα ενισχυτικά τύπου καπέλου.. Τα αποτελέσματα για όλες τις παραπάνω κατηγορίες έχουν την μορφή βέλους κάμψης κατά τον άξονα Z, μέγιστη τιμή του IRF βάσει των κριτηρίων Tsai-Wu και Puck, ορθών τάσεων σε δύο διευθύνσεις (X και Y για την πάνω πλάκα, Y και Z για τα ενισχυτικά) και διατμητικών τάσεων στο επίπεδο XY για την πάνω πλάκα και στο επίπεδο YZ για τα ενισχυτικά. Το μοντέλο αυτό ονομάζεται «Μοντέλο 1» καθώς αποτελεί το πρώτο από μία σειρά μοντέλων, τα οποία μετά από πλήθος μορφοποιήσεων οδηγούν στην τελική αποδεκτή λύση. Στις ενότητες που ακολουθούν αναλύονται όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν.

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα Μοντέλου 1

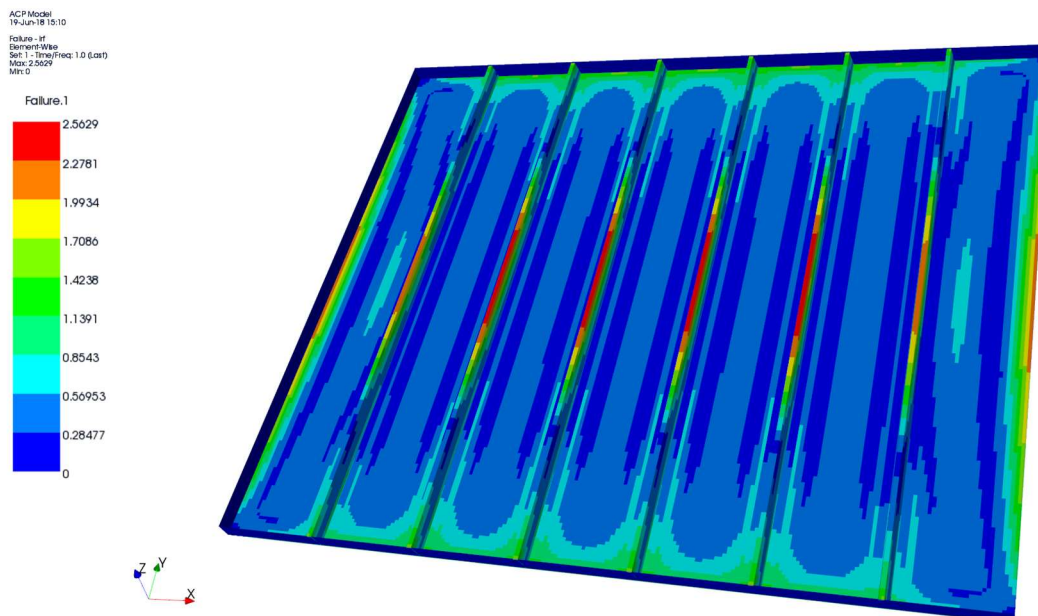
Μοντέλο 1		
Συνολική Γεωμετρία	Μέγιστο βέλος κάμψης dz_{max} (mm)	324.23
	Μέγιστο IRF	2.5629
Πάνω πλάκα	Μέγιστο βέλος κάμψης dz_{max} (mm)	324.23
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X σ_{xmax} (MPa)	-296.5
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-97.9
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XY τ_{xy}max (MPa)	-36.0
	Μέγιστο IRF	2.1124
Ενισχυτικά τύπου καπέλου	Μέγιστο βέλος κάμψης dz_{max} (mm)	297.85
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-655.4
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z σ_{zmax} (MPa)	-224.1
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά YZ τ_{yz}max (MPa)	95.0
	Μέγιστο IRF	2.5629

Στα Σχήματα 4.9 και 4.10 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή του βέλους κάμψης και η κατανομή του IRF σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του καλύμματος στο μίση κύτους που σχεδιάστηκε, το οποίο είναι το μέγιστο σε κάθε σημείο ανεξάρτητα στρώσης . Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται αναδεικνύει τις περιοχές μέγιστων τιμών του κάθε μεγέθους, οι

οποίες αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα. Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται στην επόμενη ενότητα.



Σχήμα 4.9: Κατανομή βέλους κάμψης



Σχήμα 4.10: Κατανομή IRF

4.2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στην συγκεκριμένη ενότητα αναλύονται τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, δηλαδή οι μέγιστες τιμές του Πίνακα 4.4 και τα Σχήματα 4.9 και 4.10. Σε συμφωνία με την ενότητα 4.1 διατηρείται η συνθήκη ότι η στρώση με προσανατολισμό 0° αντιστοιχεί σε ίνες παράλληλες με τον άξονα X (δηλαδή κατά το διάμηκες του πλοίου) για την πάνω πλάκα, ενώ για τα ενισχυτικά αντιστοιχεί σε ίνες παράλληλες στο μήκος τους, δηλαδή με τον άξονα Y (δηλαδή κατά το εγκάρσιο του πλοίου).

Αρχικά, η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης εμφανίζεται στο κέντρο του καλύμματος και συγκεκριμένα στην πάνω πλάκα, καθώς δεν υπάρχει ενισχυτικό στο κέντρο του καλύμματος δεδομένου του άρτιου πλήθους και της ισαπόστασης των ενισχυτικών. Συνεπώς η ολικά μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης ισούται με 324.23 mm και αντιστοιχεί περίπου στο $1/57$ της μικρότερης διάστασης του καλύμματος. Η τιμή αυτή κρίνεται αποδεκτή καθώς είναι λίγο μικρότερη από την εμπειρική τιμή του $1/50$.

Η μέγιστη τιμή του IRF εμφανίζεται στην μέση των δύο κεντρικών ενισχυτικών και συγκεκριμένα στο πέλμα και σε στρώση με προσανατολισμό 90° . Όπως είναι εμφανές και από το Σχήμα 3.10, η σχεδίαση παρουσιάζει αστοχία, δηλαδή τιμή του IRF μεγαλύτερη της μονάδας, στη μέση όλων των ενισχυτικών, συγκεκριμένα στη περιοχή του πέλματος, όπως επίσης και στην μέση της μικρής πλευράς της πάνω πλάκας. Με αυτά τα δεδομένα, η σχεδίαση κρίνεται μη αποδεκτή. Αξίζει όμως η περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση της σχεδίασης στα μοντέλα που ακολουθούν.

Μελετώντας ξεχωριστά την πάνω πλάκα, παρατηρείται ότι οι μέγιστες τιμές των ορθών τάσεων κατά X και κατά Y, όπως και η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης στο επίπεδο XY εμφανίζονται στο μέσο της μικρής πλευράς και όπως είναι προφανές στο ίδιο σημείο παρατηρείται και η μέγιστη τιμή του IRF. Οι κρίσιμες στρώσεις έχουν προσανατολισμό 0° , 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση αντίστοιχα, ενώ η κρίσιμη στρώση για το IRF έχει προσανατολισμό 90° . Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι εμφανής η αναγκαιότητα βελτίωσης της σχεδίασης σε αυτή τη περιοχή.

Στα ενισχυτικά οι περιοχές στις οποίες εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις και συνεπώς και οι μέγιστες τιμές του IRF είναι δύο. Αρχικά, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η περιοχή με τη μέγιστη τιμή του IRF βρίσκεται στο πέλμα των κεντρικών ενισχυτικών. Η δεύτερη περιοχή είναι στα άκρα των κεντρικών ενισχυτικών και συγκεκριμένα στην ένωση τους με τις πλευρές. Και στις δύο αυτές περιοχές παρουσιάζονται τιμές του IRF μεγαλύτερες της μονάδας και συνεπώς αστοχία. Οι στρώσεις με τις κρίσιμες τιμές των τάσεων και του IRF έχουν προσανατολισμό αντίστοιχο με την πάνω πλάκα, δηλαδή 0° για την ορθή τάση κατά X, 90° για την ορθή τάση κατά Z και το IRF και 45° για την διατμητική τάση.

Συνολικά, παρατηρείται ότι η περιοχή με τις μεγαλύτερες τιμές τάσεων και IRF εντοπίζεται στα ενισχυτικά και όχι στην πάνω πλάκα. Βάσει του γεγονότος αυτού συμπεραίνεται ότι, παρά τη μεγάλη τιμή της ισαπόστασης των ενισχυτικών που υπολογίστηκε, τα ενισχυτικά παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των τάσεων. Παρόλα αυτά, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, απαιτείται βελτίωση της σχεδίασης τόσο στην πάνω πλάκα, όσο και στα

ενισχυτικά. Για τον λόγο αυτό δεν έχει αξία ο υπολογισμός του βάρους της συγκεκριμένης σχεδίασης καθώς δεν θεωρείται αποδεκτή και δεν μπορεί να συγκριθεί με το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους.

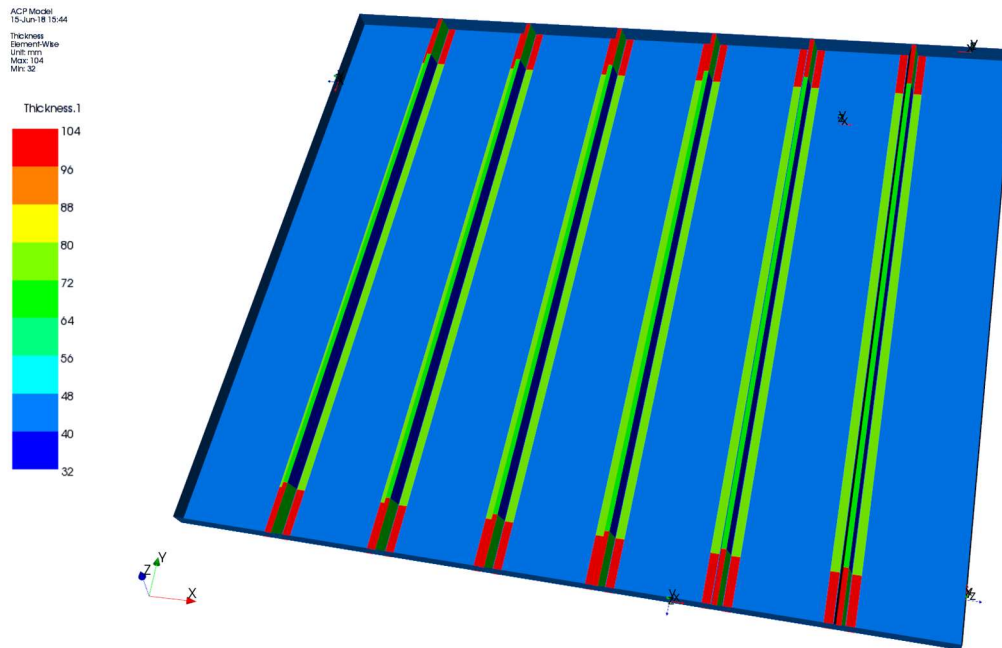
4.3 Βελτίωση σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με 6 ενισχυτικά τύπου καπέλου

4.3.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης του καλύμματος στομίου κύτους με 6 ενισχυτικά και ομοιόμορφο πάχος 40 mm σε όλα τα σημεία της γεωμετρίας, διαπιστώθηκε ότι η συγκεκριμένη σχεδίαση δεν ήταν αποδεκτή και συνεπώς δημιουργήθηκε η ανάγκη βελτίωση της. Στην συγκεκριμένη ενότητα μελετάται η βελτίωση της σχεδίασης που έχει κεντρικό άξονα την διατήρηση του αριθμού των ενισχυτικών και την ενίσχυση, δηλαδή αύξηση πάχους, στις περιοχές που παρατηρήθηκε ότι πάσχει η προηγούμενη σχεδίαση. Συγκεκριμένα, οι κρίσιμες αυτές περιοχές εντοπίζονται στο μέσο των κεντρικών ενισχυτικών, συγκεκριμένα στη περιοχή του πέλματος, στα άκρα των ενισχυτικών στην περιοχή της ένωσης με τις πλευρές και σε μικρότερο βαθμό στα μέσα των πλευρών της πάνω πλάκας.

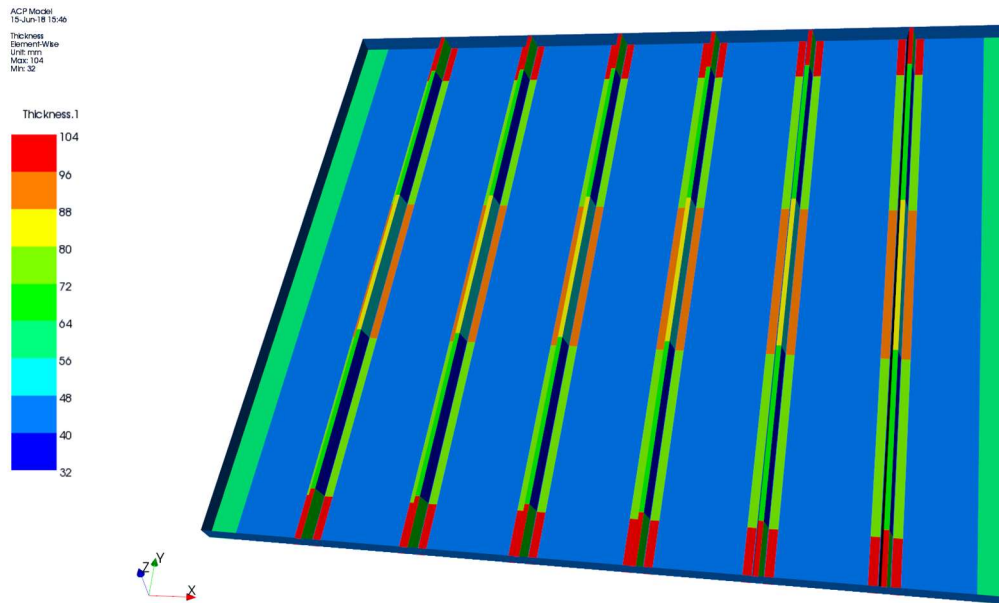
Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκαν και υλοποιήθηκαν 3 διαφορετικά μοντέλα, τα οποία ονομάζονται «Μοντέλο 2», «Μοντέλο 3» και «Μοντέλο 4» σε συνέχεια του «Μοντέλου 1» που μελετήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Κάθε ένα από τα μοντέλα αυτά δημιουργήθηκε μετά την επίλυση του προηγούμενου, συνεπώς η σχεδίαση του καθενός αποτελεί προσπάθεια βελτίωσης του προηγούμενου με σκοπό την τελικά αποδεκτή λύση. Σε όλα τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό με την ενότητα 2.2, όπως και η ίδια μορφή, πάχος και προσανατολισμός των στρώσεων. Στη συνέχεια περιγράφονται ξεχωριστά οι μορφοποιήσεις του κάθε μοντέλου.

Στο Μοντέλο 2 προστέθηκε επιπλέον πάχος στο πέλμα καθενός από τα 6 ενισχυτικά, έτσι ώστε το τελικό πάχος να έχει τιμή 64 mm, δηλαδή 128 στρώσεις. Η μορφοποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε καθώς είναι γνωστό από τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας ότι η περιοχή του πέλματος εμφάνιζε αστοχία. Για τον ίδιο λόγο, επιπλέον πάχος 32 mm ή 64 στρώσεων προστέθηκε στα δύο άκρα όλων των ενισχυτικών των ενισχυτικών καλύπτοντας 1.5 m κατά το μήκος τους σε κάθε άκρο τους. Τέλος, με σκοπό την διατήρηση του βάρους σε κατά το δυνατό χαμηλές τιμές, αφαιρέθηκε πάχος από τον κορμό όλων των ενισχυτικών με την τελική τιμή του πάχους στους κορμούς να ισούται με 32 mm ή 64 στρώσεις. Η επιλογή της μείωσης του πάχους στους κορμούς των ενισχυτικών πραγματοποιήθηκε βάσει των αποτελεσμάτων του μοντέλου της προηγούμενης ενότητας, σύμφωνα με τα οποία στους κορμούς υπάρχει περιθώριο ασφάλειας έναντι αστοχίας. Όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατηρήθηκαν όμοια με το Μοντέλο 1. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η τελική γεωμετρία του καλύμματος, μετά τις μορφοποιήσεις που περιεγράφηκαν, όπως εισήχθη στο ANSYS. Η χρωματική κλίμακα παρουσιάζει το πάχος σε κάθε σημείο της γεωμετρίας.



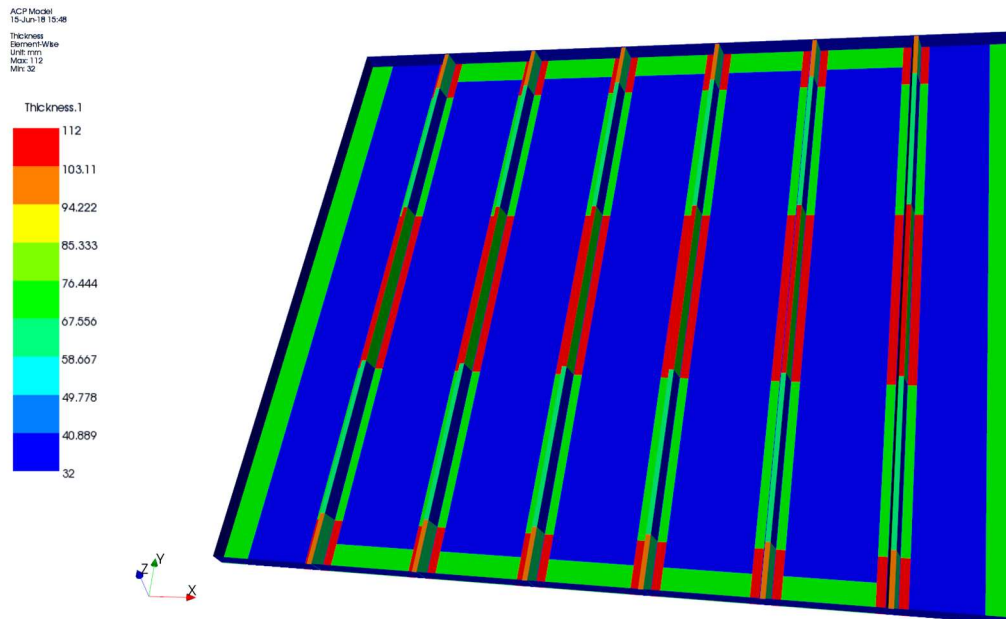
Σχήμα 4.11: Γεωμετρία Μοντέλου 2 με αναπαράσταση πάχους

Στο Μοντέλο 3 προστέθηκε επιπλέον πάχος στο κεντρικό τμήμα όλων των ενισχυτικών το οποίο καταλαμβάνει 5 m του μήκους των ενισχυτικών. Το επιπλέον αυτό πάχος έχει τιμή 20 mm που αντιστοιχεί σε 40 επιπλέον στρώσεις. Η ενίσχυση στην περιοχή αυτή επιλέχθηκε καθώς σε αυτή την περιοχή εμφανίστηκαν οι μεγαλύτερες τιμές του IRF τόσο στο μοντέλο 1, όσο και στο μοντέλο 2. Αναλυτικά αποτελέσματα για το κάθε μοντέλο ξεχωριστά παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Δεύτερη και τελευταία τροποποίηση είναι η προσθήκη ενίσχυσης στο εσωτερικό της πάνω πλάκας κατά μήκος των δύο πλευρών παράλληλων με τον άξονα Y. Το πάχος που προστέθηκε σε αυτές τις περιοχές έχει επίσης τιμή 20 mm και αντιστοιχεί σε 40 στρώσεις. Οι ενισχύσεις έχουν την μορφή διαμηκών λωρίδων καταλαμβάνοντας όλο το μήκος της πλευράς και με πλάτος 0.8 m. Η τιμή του IRF στις περιοχές αυτές, παρόλο που δεν είναι η ολικά μέγιστη, ξεπερνά την μονάδα και συνεπώς οδηγεί σε αστοχία και συνεπώς απαιτείται βελτίωση στη σχεδίαση τους. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην επιλογή αυτής της ενίσχυσης. Όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά διατηρήθηκαν όμοια με τα προηγούμενα μοντέλα. Στο Σχήμα 4.12 παρουσιάζεται η τελική γεωμετρία του καλύμματος, μετά τις μορφοποιήσεις που περιεγράφηκαν, όπως εισήχθη στο ANSYS.



Σχήμα 4.12: Γεωμετρία Μοντέλου 3 με αναπαράσταση πάχους

Στο Μοντέλο 4, επιλέχθηκαν τρεις επιπλέον τροποποιήσεις. Οι δύο πρώτες τροποποιήσεις που υλοποιήθηκαν αφορούν την αύξηση του πάχους της ενίσχυσης στις ίδιες περιοχές με το μοντέλο 3. Συγκεκριμένα, στην περιοχή του μέσου των ενισχυτικών, η ενίσχυση με έκταση 5 m τροποποιήθηκε έτσι ώστε το προστιθέμενο πάχος να έχει τιμή 40 mm, δηλαδή 80 επιπλέον στρώσεις. Επίσης, το ίδιο πάχος ενίσχυσης επιλέχθηκε και στις ενισχύσεις της πάνω πλάκας στις περιοχές των πλευρών παράλληλων με τον άξονα Y. Η αύξηση του πάχους αυτή επεξηγείται σε επόμενη ενότητα, όπου παρουσιάζονται, αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα του κάθε μοντέλου που μελετήθηκε ξεχωριστά. Τέλος, ενίσχυση προστέθηκε και σε ακόμα μία περιοχή της πάνω πλάκας και συγκεκριμένα στην πλευρά παράλληλη στον άξονα X. Ομοίως με την ενίσχυση της πλευράς στην άλλη διεύθυνση, η ενίσχυση έχει την μορφή λωρίδων με πλάτος 0.8 m. Στην περίπτωση αυτή, όμως, δεν εκτείνονται σε όλο το μήκος της πλευράς, αλλά περιορίζονται ανάμεσα στα ενισχυτικά, δηλαδή χωρίς να προσθέτουν πάχος στις περιοχές των επικαλύψεων των ενισχυτικών, όπως αυτές ορίστηκαν στην ενότητα 4.2. Η επιλογή της ενίσχυσης αυτής πραγματοποιήθηκε λόγω της παρατήρησης τιμών του IRF πάνω από την μονάδα στις περιοχές της διαμήκους πλευράς της πάνω πλάκας ανάμεσα στα ενισχυτικά. Στο Σχήμα 4.13 παρουσιάζεται η τελική γεωμετρία του καλύμματος, μετά τις μορφοποιήσεις που περιεγράφηκαν, όπως εισήχθη στο ANSYS.



Σχήμα 4.13: Γεωμετρία Μοντέλου 4 με αναπαράσταση πάχους

Η γεωμετρία που εισάγεται στο ANSYS έχει την μορφή επιφανειών για όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Η μορφή των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν είναι shell elements. Το πάχος σε κάθε τμήμα της κατασκευής μοντελοποιείται προσδίδοντας πάχος σε κάθε ένα από τα shell elements και δεν εξαρτάται από τον διαχωρισμό της γεωμετρίας σε στοιχεία. Συνεπώς, η διαδικασία του διαχωρισμού (meshing) είναι ίδια για κάθε σχεδίαση η οποία διαφέρει μόνο κατά το πάχος των διάφορων τμημάτων. Συνεπώς, για τα μοντέλα 2,3 και 4 ο διαχωρισμός της γεωμετρίας σε στοιχεία και ο καθορισμός της μορφής των κόμβων είναι όμοιος με αυτόν που περιεγράφηκε στην ενότητα 4.2 για το μοντέλο 1.

4.3.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης

Σε αντιστοιχία με τα μοντέλα που έχουν μελετηθεί σε προηγούμενες ενότητες, η φόρτιση που εφαρμόζεται κατά την εκπόνηση της συγκεκριμένης ανάλυσης έχει τη μορφή ομοιόμορφης πίεσης στην πάνω πλάκα του καλύμματος στομίου κύτους και η τιμή της ισούται με 34.5 kN/m^2 .

Επίσης, όμοιες διατηρούνται και οι οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο μοντέλο, οι οποίες έχουν την μορφή πακτώσεων σε όλη την έκταση των επιφανειών των τεσσάρων πλευρών.

Οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την ανάλυση επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο άξονας X να αντιστοιχεί στο μήκος του καλύμματος κ, ο άξονας Y να αντιστοιχεί στο πλάτος του καλύμματος και ο άξονας Z να αντιστοιχεί στο ύψος του

καλύμματος, που συμπίπτουν με τη διαμήκη, την εγκάρσις και την κατακόρυφη διεύθυνση του πλοίου.

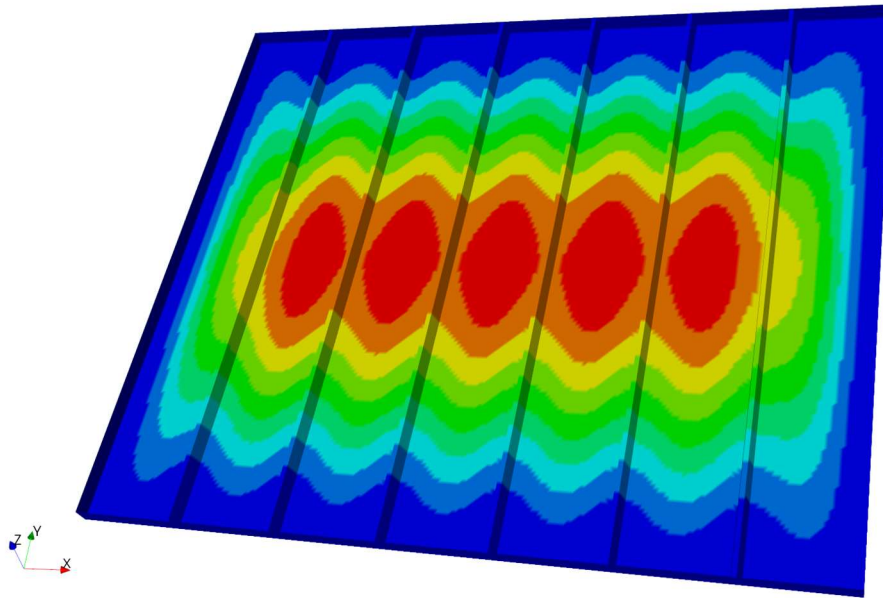
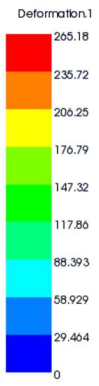
Για λόγους σύγκρισης επίσης τα αποτελέσματα έχουν την ίδια μορφή με τα αποτελέσματα που εξήχθησαν στην ενότητα 4.2 και παρουσιάζονται για τα μοντέλα 2,3 και 4 στον Πίνακα 4.5. Σε κάθε κατηγορία, για την οποία εξάγονται διαφορετικά αποτελέσματα, συμπεριλαμβάνονται και οι αντίστοιχες ενισχύσεις, δηλαδή στην πάνω πλάκα συμπεριλαμβάνονται οι ενισχύσεις στις πλευρές της, ενώ στα ενισχυτικά συμπεριλαμβάνονται οι ενισχύσεις στη μέση και στα άκρα των ενισχυτικών.

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης Μοντέλων 2,3 και 4

		Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
Συνολική Γεωμετρία	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	265.18	232.59	210.66
	Μέγιστο IRF	2.231	2.1654	2.3709
Πάνω πλάκα	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	265.18	232.59	210.66
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X σ_{xmax} (MPa)	-266.1	-170.1	-151.8
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-87.9	-57.7	-50.5
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XY $\tau_{xy_{max}}$ (MPa)	-32.3	20.8	-18.0
	Μέγιστο IRF	1.8775	1.216	1.0667
Ενισχυτικά τύπου καπέλου	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	236.38	209.64	190.66
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-420.5	-397.8	-385.8
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z σ_{zmax} (MPa)	-141.2	-136.4	-132.3
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά YZ $\tau_{yz_{max}}$ (MPa)	67.6	63.3	59.9
	Μέγιστο IRF	2.231	2.1654	2.3709

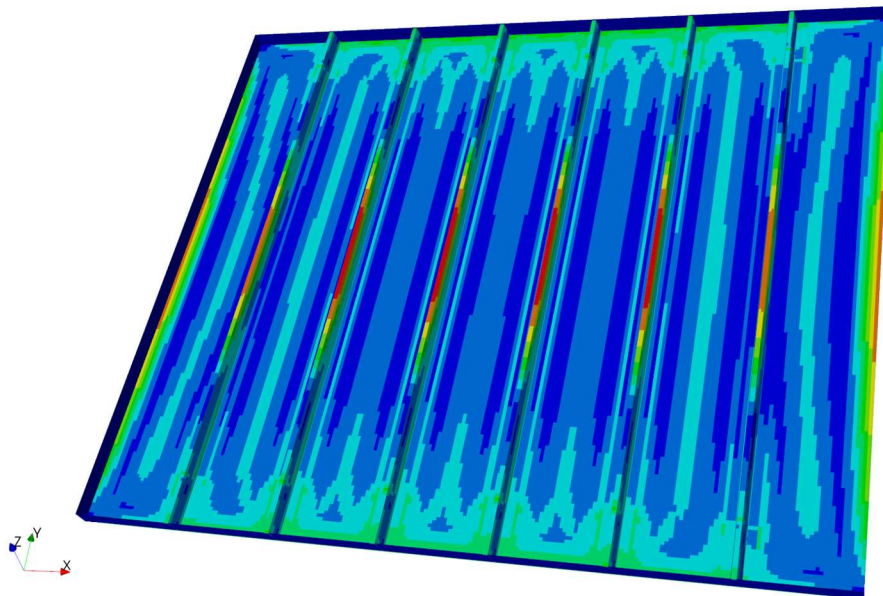
Στα Σχήματα 4.14 έως 4.19 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή του βέλους κάμψης και η κατανομή του IRF σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του καλύμματος στομίου κύτους των μοντέλων 2, 3 και 4. Τα αποτελέσματα σχολιάζονται στην ενότητα που ακολουθεί. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται αναδεικνύει τις περιοχές μέγιστων τιμών του κάθε μεγέθους, οι οποίες αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα.

ACP Model
17-Jul-18 17:20
Deformation - 1
Element-Wise
Unit: mm
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (car)
Max: 265.18
Min: 0



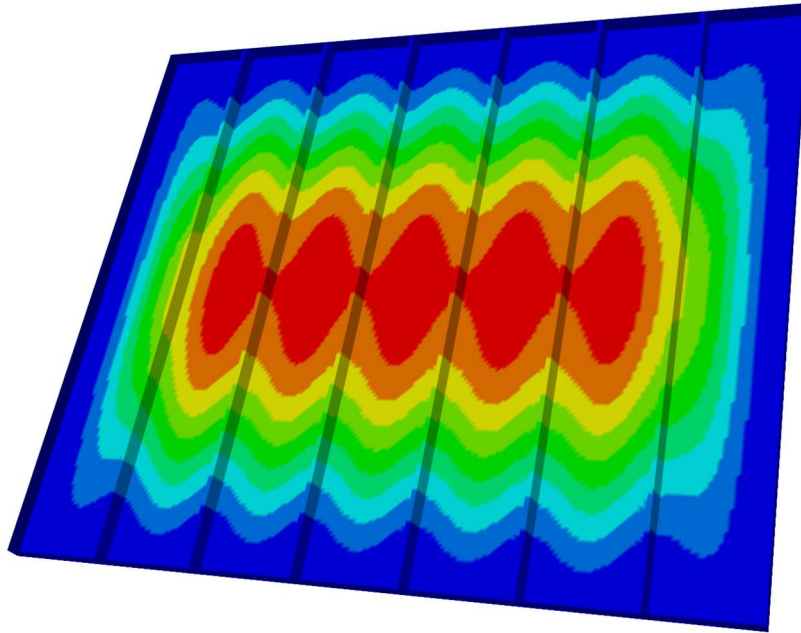
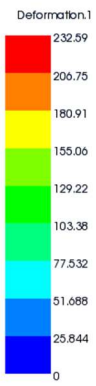
Σχήμα 4.14: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 2

ACP Model
17-Jul-18 16:59
Failure - 1
Element-Wise
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (car)
Max: 2.231
Min: 0



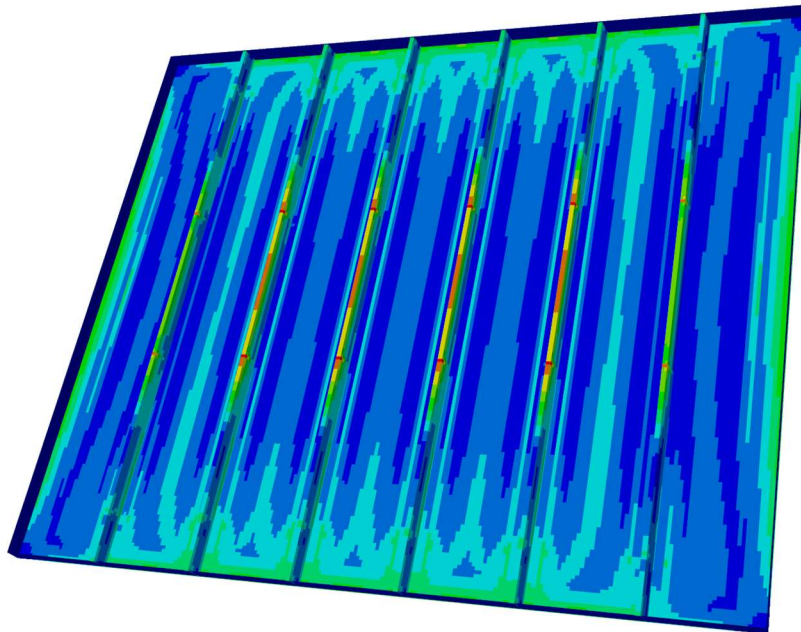
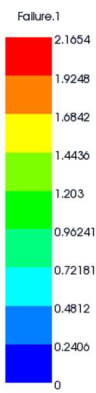
Σχήμα 4.15: Κατανομή IRF Μοντέλου 2

ACP Model
19-Jun-18 17:26
Deformation -1
Element-Wise
Unit: mm
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (cart)
Max: 232.59
Min: 0



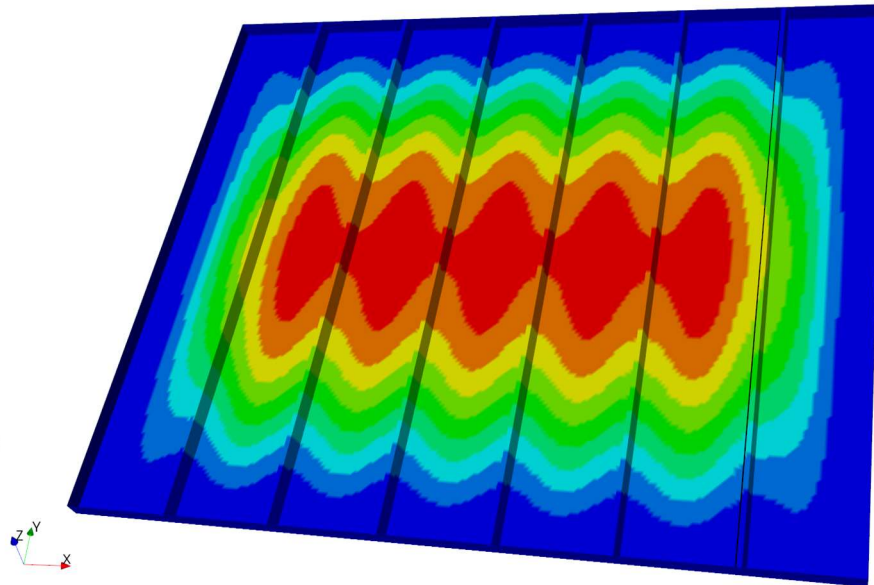
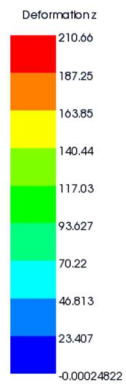
Σχήμα 4.16: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 3

ACP Model
19-Jun-18 17:25
Failure -1f
Element-Wise
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (cart)
Max: 2.1654
Min: 0



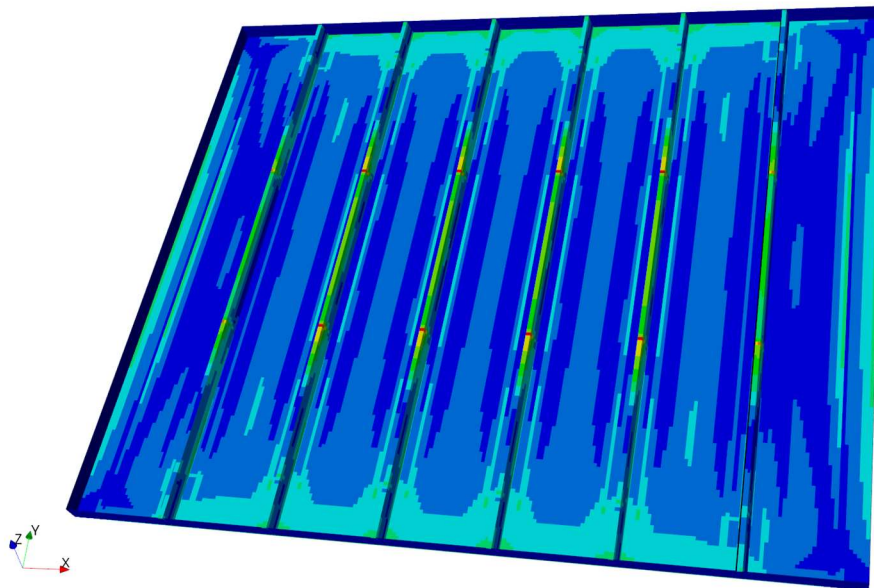
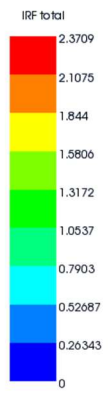
Σχήμα 4.17: Κατανομή IRF Μοντέλου 3

ACP Model
19-Jun-18 18:26
Deformation - z
Element-Wise
Unit: mm
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (car)
Max: 210.66
Min: -0.00024822



Σχήμα 4.18: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 4

ACP Model
19-Jun-18 18:04
Failure - IFR
Element-Wise
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (car)
Max: 2.3709
Min: 0



Σχήμα 4.19: Κατανομή IFR Μοντέλου 4

4.3.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στις προηγούμενες ενότητες περιγράφηκε η πορεία κατασκευής μοντέλων για την βελτίωση της αρχικής σχεδίασης του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά που μελετήθηκε στην ενότητα 4.1 και παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μοντέλων αυτών. Στα μοντέλα αυτά ακολουθήθηκε κοινή κατεύθυνση για τη βελτίωση της σχεδίασης, η οποία είναι η διατήρηση της ίδιας βασικής γεωμετρίας, δηλαδή η ίδια μορφή και ο ίδιος αριθμός ενισχυτικών και η ενίσχυση με τη μορφή επιπρόσθετου πάχους τοπικά σε περιοχές οι οποίες εμφανίζουν μη αποδεκτές τιμές των κριτηρίων αστοχίας, δηλαδή τιμές IRF μεγαλύτερες της μονάδας. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα, το κάθε μοντέλο δημιουργήθηκε μετά την ανάλυση και εξαγωγή αποτελεσμάτων του προηγούμενου και συνεπώς οι κρίσιμες αυτές περιοχές προκύπτουν από το προηγούμενο μοντέλο από αυτό που μελετάται κάθε φορά. Σε γενικές γραμμές οι περιοχές που εμφανίζουν αστοχία είναι κοινές σε όλα τα μοντέλα. Συγκεκριμένα, η περιοχή με τις μεγαλύτερες τιμές IRF εντοπίζεται στο κέντρο του καλύμματος και ακριβέστερα στο πέλαμα των ενισχυτικών. Επιπλέον κρίσιμες περιοχές εντοπίζονται στα άκρα των κεντρικών ενισχυτικών, δηλαδή στις ενώσεις με τις πλευρές, όπως επίσης και στα μέσα των πλευρών της πάνω πλάκας του καλύμματος στομίου κύτους.

Στην συνέχεια, αξιολογούνται τα αποτελέσματα των πινάκων και των σχημάτων που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα για όλα τα μοντέλα, συγκρίνοντας επίσης μεταξύ τους αντίστοιχα αποτελέσματα για το κάθε μοντέλο. Το σύστημα αξόνων διατηρήθηκε κοινό για όλα τα μοντέλα και ίδιο με το μοντέλο της ενότητας 4.2 και συνεπώς ο άξονας X αντιστοιχεί στο διάμηκες του πλοίου, ο άξονας Y αντιστοιχεί στο εγκάρσιο του πλοίου και ο άξονας Z στο κατακόρυφο του πλοίου. Επίσης, διατηρείται όμοια η σύμβαση για τον προσανατολισμό των στρώσεων, έτσι ώστε για την πάνω πλάκα η στρώση με προσανατολισμό 0° να αντιστοιχεί στον άξονα X, για τα ενισχυτικά και τις παράλληλες σε αυτά πλευρές η στρώση με προσανατολισμό 0° αντιστοιχεί στον άξονα Y, ενώ για τις κάθετες στα ενισχυτικά πλευρές η στρώση με προσανατολισμό 0° αντιστοιχεί στον άξονα X. Ακόμα, σε συμφωνία με το μοντέλο της ενότητας 4.2, τα αποτελέσματα που εξήχθησαν έχουν την μορφή βέλους κάμψης, ορθών τάσεων σε δύο διευθύνσεις, διατμητικής τάσης και τιμής IRF βάσει των κριτηρίων αστοχίας Tsai-Wu και Puck και εξήχθησαν ξεχωριστά για την πάνω πλάκα και για τα ενισχυτικά.

Βασική παράμετρος για κάθε κατασκευή από σύνθετα υλικά αποτελεί το βέλος κάμψης και συνεπώς δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην μέγιστη τιμή τους βέλους κάμψης όλων των μοντέλων που μελετήθηκαν. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης, η οποία εμφανίζεται στο κέντρο της πάνω πλάκας και στα τρία μοντέλα, μειώνεται από μοντέλο σε μοντέλο. Για την αξιολόγηση της τιμής του μέγιστου βέλους κάμψης υπολογίζεται, όπως και στα μοντέλα που έχουν μελετηθεί σε προηγούμενες ενότητες, ο λόγος μέγιστου βέλους κάμψης προς την μικρότερη διάσταση του καλύμματος. Για τα μοντέλα 2,3 και 4 ο λόγος αυτός υπολογίστηκε ίσος με 1/71.8, 1/79.1 και 1/87.3 αντίστοιχα. Οι τρεις παραπάνω τιμές παρουσιάζονται βελτιωμένες σε σχέση με το Μοντέλο 1 και εμπειρικά κρίνονται αποδεκτές. Συνεπώς δεν μπορεί να απορριφθεί κάποια από τις τρεις σχεδιάσεις βάσει αυτού. Επίσης, όπως αναμενόταν,

η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης μειώνεται με την προσθήκη ενίσχυσης στη μέση των κεντρικών ενισχυτικών, αλλά και των υπόλοιπων μορφών ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκαν.

Παρόλα αυτά, για τον καθορισμό της αστοχίας της κατασκευής εξετάζονται οι μέγιστες τιμές του IRF που υπολογίστηκαν για το κάθε μοντέλο. Παρατηρείται ότι και στα τρία μοντέλα που μελετήθηκαν, η μέγιστη τιμή του IRF, παρότι βελτιωμένη σε σχέση με το Μοντέλο 1, ξεπερνάει την μονάδα καθιστώντας και τις τρεις σχεδιάσεις μη αποδεκτές. Στο Μοντέλο 2 η μέγιστη τιμή του IRF εμφανίζεται στην μέση των κεντρικών ενισχυτικών στην περιοχή του πέλματος και καταλαμβάνει μεγάλη έκταση κατά το μήκος των ενισχυτικών όμοια με τη μορφή που παρατηρήθηκε στο Μοντέλο 1. Για τον λόγο αυτό τα μοντέλα που ακολούθησαν ενισχύθηκαν στην περιοχή αυτή. Παρά την ενίσχυση, όμως, η μέγιστη τιμή του IRF μειώθηκε ελάχιστα στο Μοντέλο 3, ενώ παρουσίασε μικρή αύξηση στο Μοντέλο 4. Ενδιαφέρον βέβαια παρουσιάζει ότι η περιοχή εμφάνισης της μέγιστης τιμής του IRF τόσο στο Μοντέλο 3, όσο και στο Μοντέλο 4 εντοπίζεται στο πέλμα των κεντρικών ενισχυτικών και συγκεκριμένα στο σημείο αλλαγής του πάχους λόγω της ενίσχυσης και καταλαμβάνει μικρή έκταση. Οι παρατηρήσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μέγιστη τιμή του IRF στο σημείο αυτό οφείλονται σε συγκεντρώσεις τάσεων λόγω απότομης αλλαγής γεωμετρίας, δηλαδή απότομη αύξηση πάχους. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί την αύξηση της μέγιστης τιμής του IRF στο Μοντέλο 4 σε σχέση με το Μοντέλο 3, καθώς στο πρώτο χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερη τιμή πάχους ενίσχυσης. Η κρίσιμη στρώση και στα τρία μοντέλα είναι η ίδια και έχει προσανατολισμό 90° . Βέβαια, στις περιοχές γύρω από τα σημεία που παρουσιάζουν συγκέντρωση τάσεων, η τιμή του IRF, παρότι μειωμένη, παραμένει μεγαλύτερη της μονάδας καθιστώντας την σχεδίαση μη αποδεκτή ακόμα και στην περίπτωση όπου οι συγκεντρώσεις τάσεων θα μπορούσαν να αγνοηθούν.

Καθώς η σχεδίαση και για τα τρία μοντέλα έχει απορριφθεί, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για την πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά ξεχωριστά πραγματοποιείται για την βαθύτερη διερεύνηση των αιτίων της αστοχίας και την βελτίωση της σχεδίασης του κάθε τμήματος της κατασκευής στα μοντέλα που θα μελετηθούν στα επόμενα κεφάλαια, έτσι ώστε τελικά να επιτευχθεί η τελική αποδεκτή σχεδίαση.

Αρχικά, μελετάται η πάνω πλάκα. Οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης που εμφανίζονται στην πάνω πλάκα αντιστοιχούν στις ολικά μέγιστες τιμές και συνεπώς έχουν καλυφθεί ήδη στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της συνολικής γεωμετρίας σε προηγούμενη παράγραφο. Οι μέγιστες τάσεις, ορθές και διατμητική, που εμφανίζονται στη πάνω πλάκα του κάθε μοντέλου παρουσιάζουν μείωση από μοντέλο σε μοντέλο και εμφανίζονται σε όλα τα μοντέλα περίπου στην ίδια περιοχή και συγκεκριμένα στην μέση της μικρής πλευράς. Στα μοντέλα 3 και 4 βέβαια η περιοχή με τις μέγιστες τάσεις εντοπίζεται ακριβέστερα στο σημείο μεταβολής του πάχους λόγω της ενίσχυσης που χρησιμοποιήθηκε κατά το μήκος της μικρής πλευράς της πάνω πλάκας. Το φαινόμενο αυτό είναι αντίστοιχο με αυτό που περιεγράφηκε προηγουμένως για την μέγιστη τιμή του IRF στα μοντέλα 3 και 4 και οφείλεται σε συγκεντρώσεις τάσεων. Σε όλα τα μοντέλα οι κρίσιμες στρώσεις έχουν προσανατολισμό 0° , 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση κατά XY αντίστοιχα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέγιστη τιμή του IRF καθώς παρουσιάζει αισθητή μείωση από μοντέλο σε

μοντέλο πλησιάζοντας την μονάδα στο Μοντέλο 4. Η θέση της μέγιστης τιμής του IRF βέβαια δεν παραμένει ίδια για όλα τα μοντέλα. Αναλυτικά, στο Μοντέλο 2 η θέση της μέγιστης τιμής του IRF παρατηρείται στο μέσο της μικρής πλευράς και σε στρώση με προσανατολισμό 90°. Αντιθέτως, στα Μοντέλα 3 και 4 η μέγιστη τιμή του IRF, παρουσιάζοντας αισθητή πτώση, εντοπίζεται στο μέση της μεγάλης πλευράς και σε στρώση με προσανατολισμό 0°. Η διαφοροποίηση αυτή οφείλεται στην ενίσχυση της μικρής πλευράς που χρησιμοποιήθηκε στα Μοντέλα 3 και 4. Σε κάθε περίπτωση βέβαια, οι μέγιστες τιμές του IRF στην πάνω πλάκα σε όλα τα μοντέλα ξεπερνούν την μονάδα και οδηγούν σε αστοχία της κατασκευής και συνεπώς σε μη αποδεκτή σχεδίαση.

Στην συνέχεια μελετώνται ξεχωριστά τα ενισχυτικά. Οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης των ενισχυτικών ακολουθούν την ίδια μορφή με την πάνω πλάκα, καθώς μειώνονται από μοντέλο σε μοντέλο. Λόγω της τοποθέτησης άρτιου πλήθους ενισχυτικών, δεν υπάρχει σε κανένα από τα μοντέλα κάποιο ενισχυτικό στο κέντρο του υπό σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους, όπου και παρατηρούνται οι ολικά μέγιστες τιμές βέλους κάμψης. Συνεπώς, λόγω αυτού είναι αναμενόμενο ότι οι μέγιστες τιμές βέλους κάμψης στα ενισχυτικά να είναι μικρότερες από τις ολικά μέγιστες, όπως παρατηρείται και από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν για όλα τα μοντέλα. Οι μέγιστες τάσεις, ορθές και διατμητική, παρουσιάζουν μείωση από μοντέλο σε μοντέλο, με την μεγαλύτερη μείωση να παρατηρείται από το Μοντέλο 1 στο Μοντέλο 2. Αιτία αποτελεί η ενίσχυση στα άκρα των ενισχυτικών που εισήχθη στο Μοντέλο 2 και διατηρήθηκε και για τα επόμενα 2 μοντέλα. Στην περιοχή αυτή παρατηρούνται οι μέγιστες τάσεις για όλα τα μοντέλα. Σε όλα τα μοντέλα οι κρίσιμες στρώσεις έχουν προσανατολισμό 0°, 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση κατά XY αντίστοιχα, όπως ήταν αναμενόμενο.

Συνολικά, παρατηρείται πως η βασική σχεδίαση που υιοθετήθηκε από όλα τα μοντέλα που μελετήθηκαν σε αυτή την ενότητα, με τις όποιες διαφοροποιήσεις σε κάθε μοντέλο, κρίνεται μη αποδεκτή και συνεπώς απαιτείται διαφοροποίηση στην προσέγγιση της βελτίωσης της αρχικής σχεδίασης. Για τον λόγο αυτό κρίνεται ότι δεν έχει αξία ο υπολογισμός βάρους και η σύγκριση αυτού με το βάρος του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους. Στα κεφάλαια που ακολουθούν μελετώνται επιπλέον μοντέλο με τη χρήση περισσότερων από 6 ενισχυτικών.

4.4 Βελτίωση σχεδίασης καλύμματος στομίου κύτους με 10 ενισχυτικά τύπου καπέλου

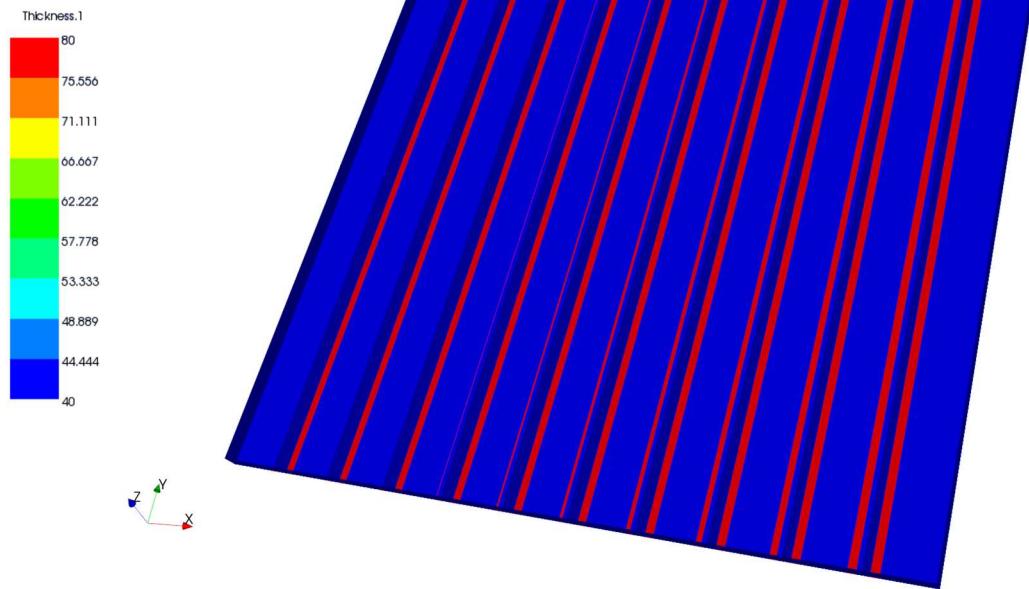
4.4.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνεται η μελέτη τριών επιπλέον μοντέλων στομίων κυτών από σύνθετα υλικά με τη χρήση ενισχυτικών τύπου καπέλου. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην αρχική σχεδίαση του μοντέλου που μελετήθηκε στην ενότητα 4.1 και έχουν ως σκοπό την βελτίωση αυτού με τελικό στόχο την επίτευξη αποδεκτής σχεδίασης. Στο προηγούμενο κεφάλαιο μελετήθηκε η περίπτωση διατήρησης του πλήθους των ενισχυτικών, δηλαδή έξι

ενισχυτικά, και η πρόσθεση ενισχύσεων με τη μορφή επιπρόσθετου πάχους στις περιοχές που παρατηρήθηκε αστοχία. Η προσέγγιση αυτή δεν κατέληξε σε αποδεκτή σχεδίαση και συνεπώς στα μοντέλα που μελετώνται σε αυτό το κεφάλαιο ακολουθείται διαφορετική προσέγγιση. Συγκεκριμένα, στα τρία μοντέλα που μελετώνται αυξήθηκε το πλήθος των ενισχυτικών στα 10 ενισχυτικά και αποφεύχθηκαν οι τοπικές ενισχύσεις πάχους σε συγκεκριμένες περιοχές του καλύμματος. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε μετά την παρατήρηση πως και στα τρία μοντέλα του κεφαλαίου 4.3, η περιοχή με τις μέγιστες τιμές IRF, δηλαδή οι περιοχές που οδηγούν σε αστοχία πρώτες, βρίσκονται στα ενισχυτικά. Βέβαια, παρατηρήθηκαν, επίσης, περιοχές με κρίσιμες τιμές του IRF στην πάνω πλάκα. Με την αύξηση του πλήθους των ενισχυτικών και συνεπώς την επαγόμενη αύξηση της ακαμψίας της συνολικής κατασκευής, θεωρείται πως οι περιοχές αυτές θα εξαλειφθούν. Το πλήθος των ενισχυτικών επιλέχθηκε και σε αυτή την περίπτωση άρτιο. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε με την προοπτική διαχωρισμού του καλύμματος στοίμιου κύτους κατά το εγκάρσιο σε δύο τμήματα, καθώς στην πράξη η τμηματοποίηση αυτή διευκολύνει το χειρισμό του καλύμματος, δηλαδή το άνοιγμα και το κλείσιμο, κατά τη λειτουργία του πλοίου.

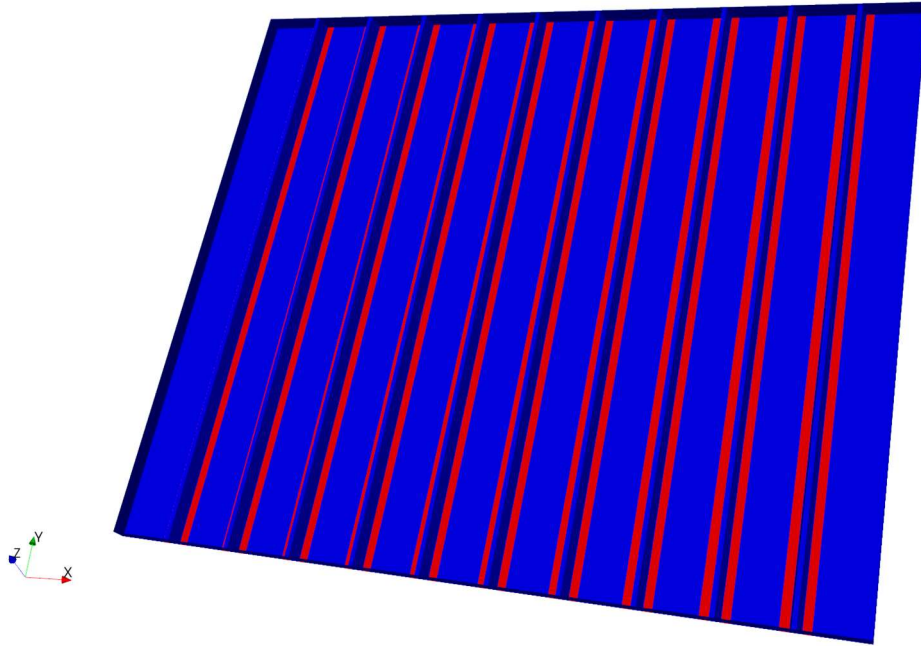
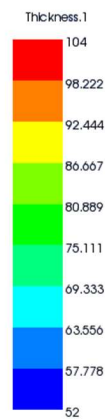
Σε συνέχεια της αρίθμησης των μοντέλων της προηγούμενης ενότητας, τα τρία μοντέλα που μελετήθηκαν ονομάζονται «Μοντέλο 5», «Μοντέλο 6» και «Μοντέλο 7». Όπως και τα μοντέλα της προηγούμενης ενότητας, κάθε μοντέλο δημιουργήθηκε μετά την ολοκλήρωση της μελέτης για το προηγούμενο μοντέλο και συνεπώς οι τροποποιήσεις του κάθε μοντέλου σε σχέση με το προηγούμενο βασίζονται στα αποτελέσματα της ανάλυσης του προηγούμενου μοντέλου. Τα αποτελέσματα και η αξιολόγηση αυτών για κάθε μοντέλο ξεχωριστά θα παρουσιαστούν στις επόμενες ενότητες. Σε όλα τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε το ίδιο υλικό με την ενότητα 2.2, όπως και η ίδια μορφή, πάχος και προσανατολισμός των στρώσεων. Στη συνέχεια περιγράφονται ξεχωριστά οι μορφοποιήσεις του κάθε μοντέλου.

Το Μοντέλο 5 αποτελεί το πρώτο στάδιο βελτίωσης, με τη χρήση 10 ενισχυτικών τύπου καπέλου, μετά το Μοντέλο 1 και συνεπώς διατηρεί κοινά όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Μοντέλου 1, όπως τις βασικές διαστάσεις του μήκους, πλάτους και ύψους του καλύμματος, τη μορφή του κάθε ενισχυτικού, όπως επίσης και το πάχος που παραμένει 40 mm σε κάθε σημείο του καλύμματος. Το πάχος αυτό αντιστοιχεί σε 80 στρώσεις. Στο Σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η γεωμετρία του καλύμματος, όπως εισήχθη στο ANSYS. Η χρήση της χρωματικής κλίμακας παρουσιάζει το συνολικό πάχος του κάθε σημείου της γεωμετρίας. Οι περιοχές με διπλάσιο πάχος, δηλαδή 80 mm, προκύπτουν λόγω της επικάλυψης του ενισχυτικού στην πάνω πλάκα, όπως αυτή ορίστηκε στο κεφάλαιο 4.1.



Σχήμα 4.20: Γεωμετρία Μοντέλου 5 με αναπαράσταση πάχους

Το Μοντέλο 6 διατηρήθηκε όμοιο με το Μοντέλο 5 σε όλα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που περιεγράφηκαν προηγουμένως, εκτός από το ομοιόμορφο πάχος το οποίο αυξήθηκε από 40 mm και 80 στρώσεις σε 52 mm και 104 στρώσεις σε όλα τα σημεία της γεωμετρίας του υπό σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους. Σε αναλογία με το Μοντέλο 5, οι περιοχές των επικαλύψεων των ενισχυτικών στην πάνω πλάκα του καλύμματος, το συνολικό πάχος ισούται με το διπλάσιο του ομοιόμορφου πάχους των 52 mm, δηλαδή ισούται με 104 mm και 208 στρώσεις. Στο Σχήμα 4.21 παρουσιάζεται η γεωμετρία του καλύμματος στομίου κύτους του Μοντέλου 6, στο οποίο είναι εμφανής η ομοιότητα με τη γεωμετρία του Μοντέλου 5, διαφέροντας μόνο στις τιμές της χρωματικής κλίμακας του πάχους.



Σχήμα 4.21: Γεωμετρία Μοντέλου 6 με αναπαράσταση πάχους

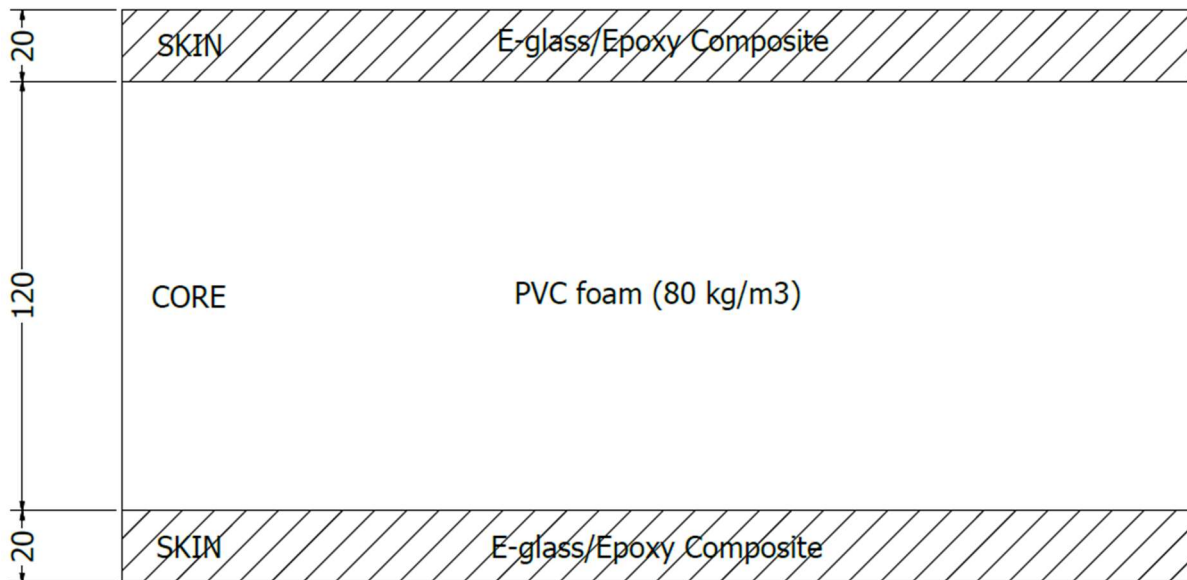
Στον τελευταίο μοντέλο της ενότητας, δηλαδή στο Μοντέλο 7, τροποποιήθηκε η κατασκευή της πάνω πλάκας του καλύμματος στοίμιου κύτους, η οποία σε όλα τα μοντέλα που προηγήθηκαν αποτελούνταν από πολλαπλές στρώσεις του ίδιου υλικού. Στο συγκεκριμένο μοντέλο η πάνω πλάκα αποτελείται από σύνθετο υλικό τύπου σάντουιτς. Το σύνθετο υλικό τύπου σάντουιτς αποτελείται από ένα υλικό μικρής πυκνότητας και αντοχής στον πυρήνα και περιβλήματα σύνθετου υλικού με ίνες. Στο συγκεκριμένο μοντέλο το υλικό που επιλέχθηκε για τον πυρήνα είναι αφρός PVC με πυκνότητα 80 kg/m^3 . Οι αναλυτικές ιδιότητες του αφρού PVC που δίδονται στον Πίνακα 4.6, λήφθηκαν από την ενσωματωμένη βιβλιοθήκη υλικών του ANSYS.

Πίνακας 4.6: Ιδιότητες αφρού PVC

Property	Value	Unit
Density	80	kg m^{-3}
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
Young's Modulus	102	MPa
Poisson's Ratio	0.3	
Bulk Modulus	$8.5\text{E}+07$	Pa
Shear Modulus	39.231	MPa

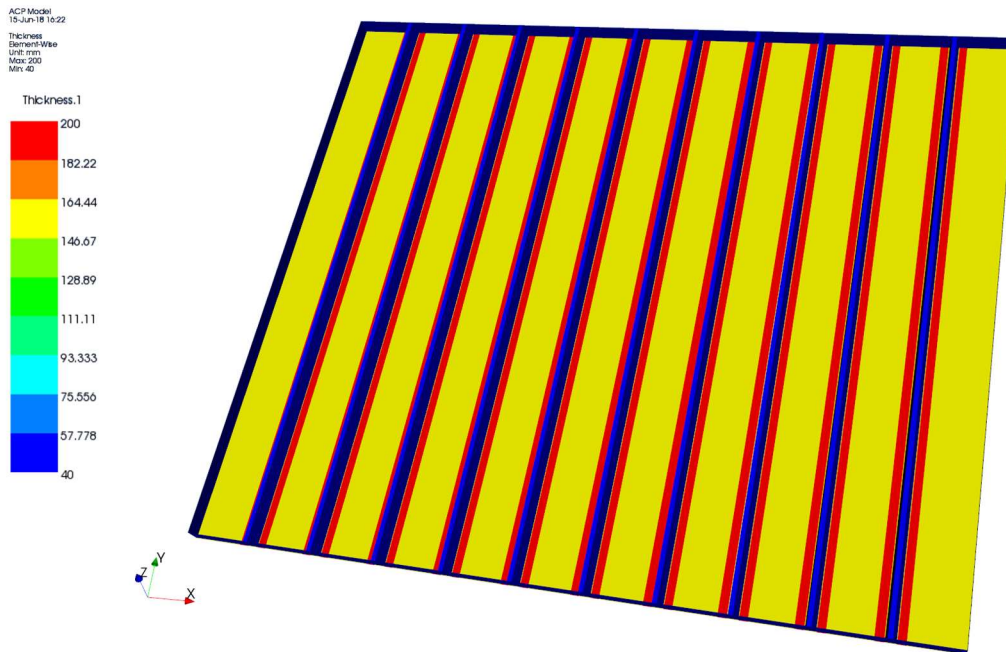
Στο Σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η τομή κατά το πάχος ενός τμήματος της πάνω πλάκας του Μοντέλου 7, παρουσιάζοντας την μορφή της κατασκευής από υλικό τύπου σάντουιτς και το πάχος του πυρήνα (core) και των περιβλημάτων (skin), που χρησιμοποιήθηκε. Το σύνθετο υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα περιβλήματα είναι το “E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex”,

το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τα υπόλοιπα τμήματα τις κατασκευής του Μοντέλου 7, αλλά και όλων των μοντέλων καλυμμάτων από σύνθετα υλικά που μελετήθηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία. Με τη χρήση σύνθετου υλικού τύπου σάντουιτς επιτυγχάνεται η αύξηση της ακαμψίας της πάνω πλάκας και συνεπώς ολόκληρης της κατασκευής, χωρίς να αυξάνεται τόσο το βάρος της πάνω πλάκας, λόγω της μειωμένης πυκνότητας του υλικού του πυρήνα σε σχέση με το υλικό των περιβλημάτων.



Σχήμα 4.22: Τμήμα τομής πάνω πλάκας από υλικό σάντουιτς

Το ολικό μήκος και πλάτος του καλύμματος, το πλήθος, η μορφή και οι διαστάσεις των ενισχυτικών διατηρήθηκαν όμοια με το Μοντέλο 5. Επισημαίνεται ότι το πάχος στις πλευρές και σε όλα τα σημεία των ενισχυτικών έχει τιμή 40 mm. Λόγω της αύξησης του πάχους της πάνω πλάκας, δεδομένης της χρήσης υλικού σάντουιτς, το συνολικό ύψος του καλύμματος αυξήθηκε σε σχέση με τα προηγούμενα μοντέλα και τελικά ισούται με 0.71 m. Στο Σχήμα 4.23 παρουσιάζεται η συνολική γεωμετρία του καλύμματος του Μοντέλου 7 όπως εισήχθη στο ANSYS, μετά από όλες τις τροποποιήσεις που περιγράφηκαν.



Σχήμα 4.23: Γεωμετρία Μοντέλου 7 με αναπαράσταση πάχους

Ο διαχωρισμός της γεωμετρίας σε στοιχεία και ο καθορισμός της μορφής των κόμβων πραγματοποιήθηκε όμοια με την αντίστοιχη διαδικασία των μοντέλων της ενότητας 4.3. Το σχήμα, το μέγεθος και η διάταξη των στοιχείων, όπως και η μορφή των κόμβων παραμένει όμοια με τα Μοντέλα 2, 3 και 4 καθώς η μόνη διαφορά είναι το πλήθος των ενισχυτικών τα οποία έχουν ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Επίσης, όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η γεωμετρία που εισάγεται στο ANSYS έχει τη μορφή επιφανειών και συνεπώς τα στοιχεία στα οποία διαχωρίζεται είναι τύπου shell elements. Το πάχος προκύπτει από ορισμό τιμών πάχους σε κάθε στοιχείο και για τον λόγο αυτόν ο διαχωρισμός της γεωμετρίας σε στοιχεία δεν εξαρτάται από το πάχος σε κάποιο σημείο της γεωμετρίας, οδηγώντας στην ίδια μορφή του mesh για τα Μοντέλα 5, 6 και 7.

4.4.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης

Στα μοντέλα της ενότητας αυτής, όπως και σε όλα τα μοντέλα που σχεδιάστηκαν εφαρμόζεται η ίδια φόρτιση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφόρων μοντέλων και σε σχέση με το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους, η αντικατάσταση του οποίου μελετάται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Συνεπώς, εφαρμόζεται η φόρτιση που προέκυψε από την εφαρμογή των κανονισμών UR-S21 SEA LOAD του IACS για το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους, έχει την μορφή ομοιόμορφης πίεσης και τιμή που ισούται με 34.5 kN/m^2 .

Αντίστοιχα, οι οριακές συνθήκες που εφαρμόστηκαν και στα τρία μοντέλα του κεφαλαίου αυτού έχουν την μορφή πακτώσεων σε όλη την έκταση των τεσσάρων πλευρών. Η επιλογή αυτή μελετήθηκε στο κεφάλαιο 2.2.

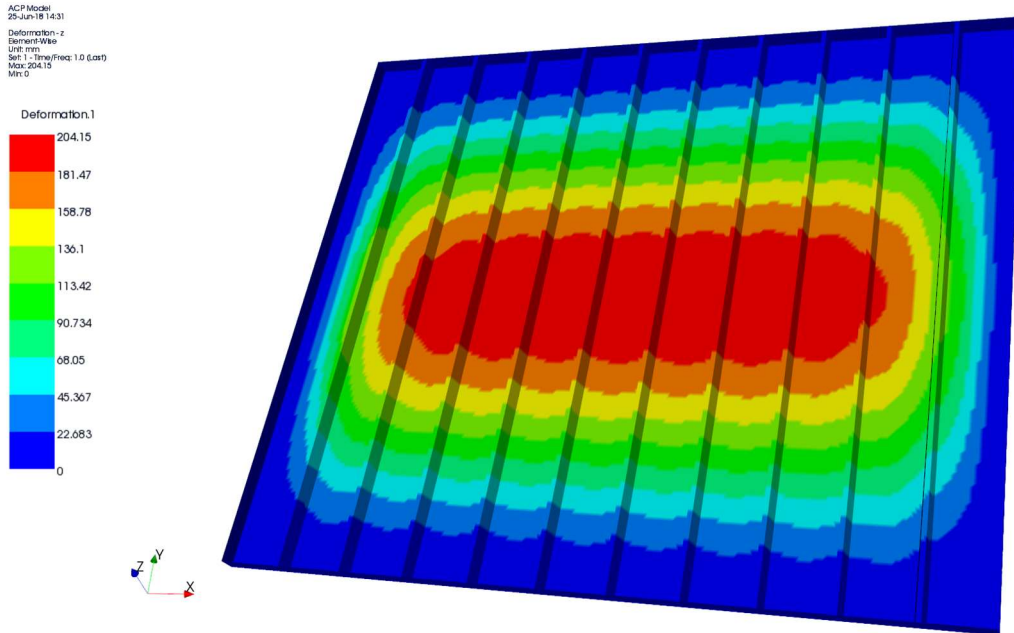
Οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την ανάλυση επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο άξονας X να αντιστοιχεί στη διαμήκη διεύθυνση του πλοίου, ο άξονας Y να αντιστοιχεί στην εγκάρσια διεύθυνση του πλοίου και ο άξονας Z να αντιστοιχεί στη κατακόρυφη διεύθυνση του πλοίου.

Ακολουθώντας την ίδια λογική με την ενότητα 4.3, στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα για τα Μοντέλα 5, 6 και 7. Εξήχθησαν αποτελέσματα, με τη μορφή βέλους κάμψης, ορθών τάσεων σε δύο διευθύνσεις, διατμητικής τάσης και τιμής IRF βάσει των κριτηρίων Tsai-Wu και Puck, τόσο για την συνολική γεωμετρία, όσο και για την πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά ξεχωριστά.

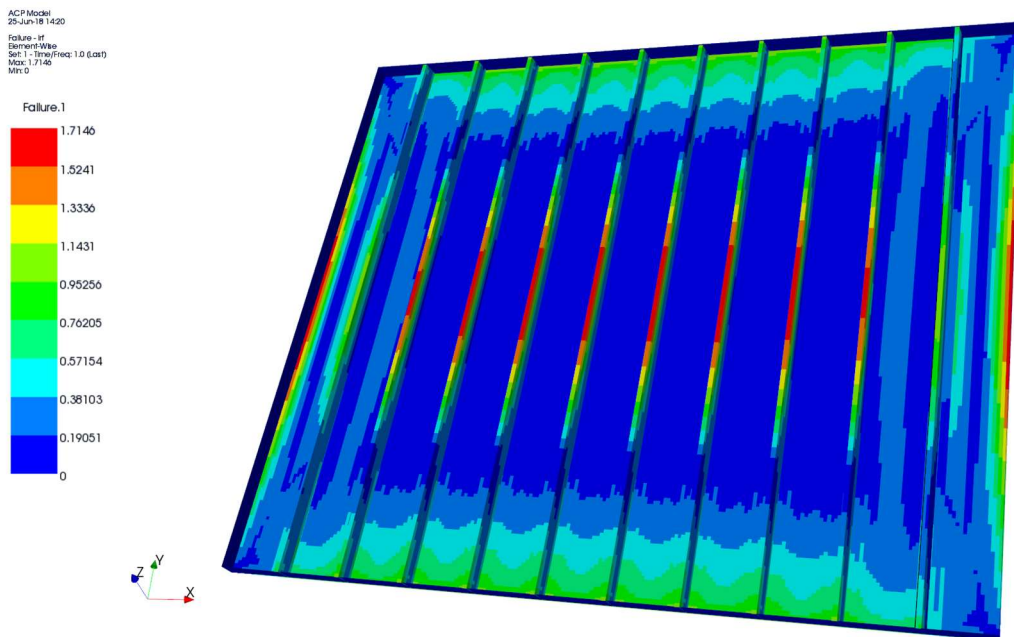
Πίνακας 4.7: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης Μοντέλων 5, 6 και 7

		Μοντέλο 5	Μοντέλο 6	Μοντέλο 7
Συνολική Γεωμετρία	Μέγιστο βέλος κάμψης dz_{max} (mm)	204.15	151.08	159.37
	Μέγιστο IRF	1.7146	1.3239	1.3337
Πάνω πλάκα	Μέγιστο βέλος κάμψης dz_{max} (mm)	204.15	151.08	159.37
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X $\sigma_{x_{max}}$ (MPa)	-242.3	-182.6	-113.7
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y $\sigma_{y_{max}}$ (MPa)	-80.0	-61.4	-39.7
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XY $\tau_{xy_{max}}$ (MPa)	-29.4	-22.3	-14.1
	Μέγιστο IRF	1.7146	1.3239	0.92171
Ενισχυτικά τύπου καπέλου	Μέγιστο βέλος κάμψης dz_{max} (mm)	201.69	149.94	158.29
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y $\sigma_{y_{max}}$ (MPa)	-424.9	-326.1	-371
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z $\sigma_{z_{max}}$ (MPa)	-145.5	-111.8	-127.1
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά YZ $\tau_{yz_{max}}$ (MPa)	61.7	47.0	53.4
	Μέγιστο IRF	1.6659	1.27	1.3337

Στα Σχήματα 4.24 έως 4.29 που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή του βέλους κάμψης και η κατανομή του IRF σε κάθε σημείο της γεωμετρίας του καλύμματος στομίου κύτους των μοντέλων 5, 6 και 7. Η χρωματική κλίμακα που χρησιμοποιείται αναδεικνύει τις περιοχές μέγιστων τιμών του κάθε μεγέθους, οι οποίες αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα.

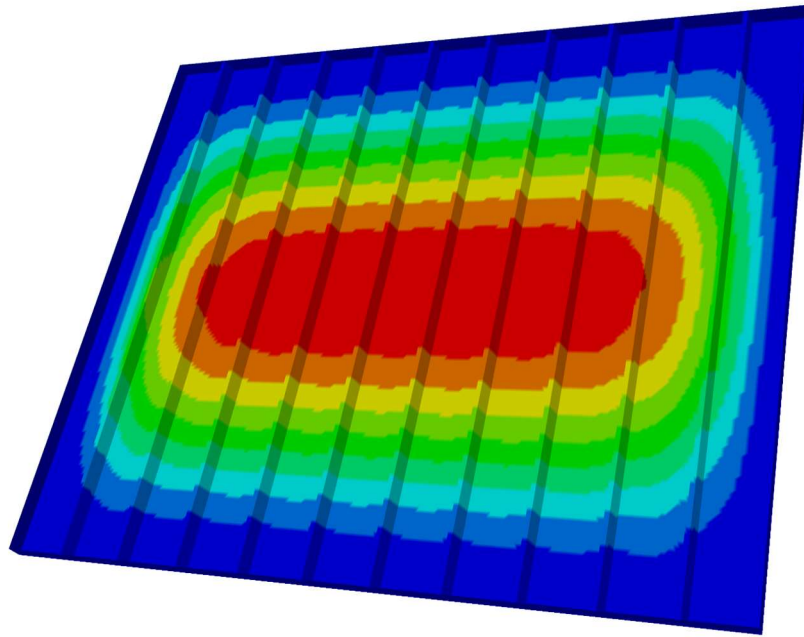
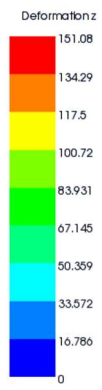


Σχήμα 4.24: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 5



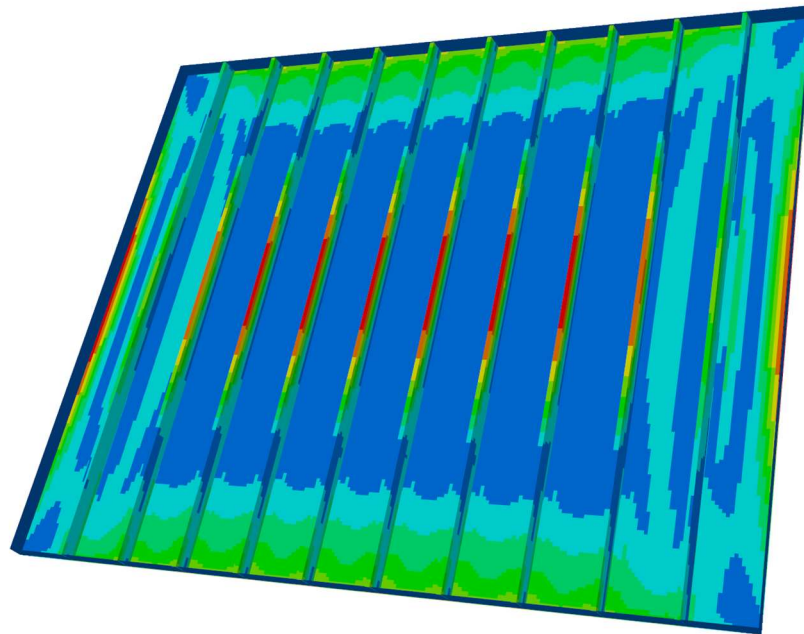
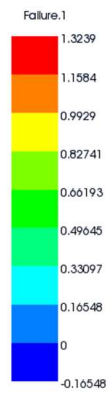
Σχήμα 4.25: Κατανομή IRF Μοντέλου 5

ACP Model
25-Jul-18 15:01
Deformation - z
Element-Wise
Unit: mm
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (last)
Max: 151.08
Min: 0



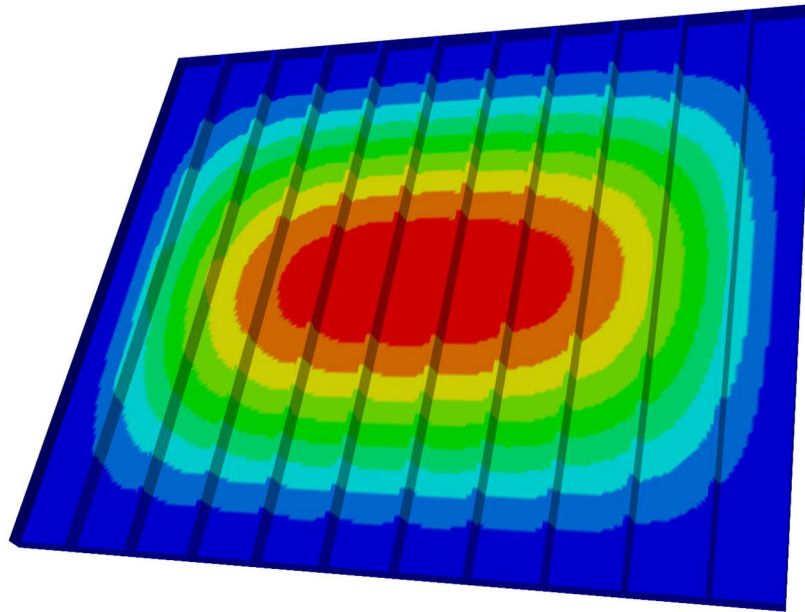
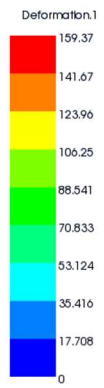
Σχήμα 4.26: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 6

ACP Model
25-Jul-18 15:00
Failure - 1F
Element-Wise
Set: 1 - Time/Freq: 1.0 (last)
Max: 1.3239
Min: 0



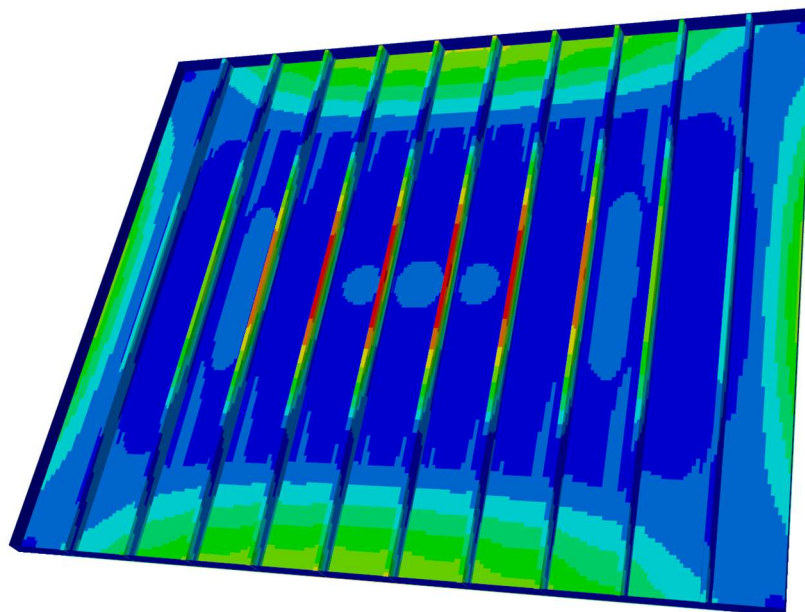
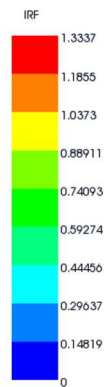
Σχήμα 4.27: Κατανομή IRF Μοντέλου 6

ACP Model
20-Jul-18 15:49
Deformation - I
Element-Wise
Unit: mm
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (case)
Max: 159.37
Min: 0



Σχήμα 4.28: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 7

ACP Model
20-Jul-18 15:48
Failure - I1
Element-Wise
Set 1 - Time/Freq: 1.0 (case)
Max: 1.3337
Min: 0



Σχήμα 4.29: Κατανομή IRF Μοντέλου 7

4.4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου περιγράφηκε η δημιουργία τριών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων και υλοποιήθηκε η στατική ανάλυση αυτών. Κατά την στατική ανάλυση των τριών μοντέλων εξήχθησαν αποτελέσματα τα οποία παρουσιάστηκαν σε πίνακες και σχήματα. Στην ενότητα αυτή μελετώνται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα αυτά. Κατά την αξιολόγηση συγκρίνονται τα αποτελέσματα των τριών μοντέλων μεταξύ τους και κρίνεται αν οδηγούν σε αποδεκτή σχεδίαση.

Η σχεδίαση των μοντέλων που αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται στο Μοντέλο 1 της ενότητας 4.1 και έχει ως στόχο την βελτίωση της σχεδίασης αυτού. Οι βασικές διαστάσεις του Μοντέλου 1, δηλαδή το συνολικό μήκος και πλάτος του καλύμματος, διατηρούνται ίδιες. Η μορφή και οι διαστάσεις των ενισχυτικών και των πλευρών του καλύμματος διατηρούνται όμοιες με το Μοντέλο 2 της ενότητας 4.3, καθώς στο Μοντέλο 1 χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό είδος ενισχυτικών και συγκεκριμένα ενισχυτικά τύπου σταθμίδων. Η διαφοροποίηση σε σχέση με τα μοντέλα της ενότητας 4.3 εντοπίζεται στην χρήση μεγαλύτερου πλήθους ενισχυτικών και συγκεκριμένα 10 ενισχυτικά. Η χρήση περισσότερων ενισχυτικών έχει ως στόχο την αύξηση της ακαμψία της συνολικής κατασκευής, αλλά βασίζεται και στην παρατήρηση πως οι μέγιστες τάσεις και οι μεγαλύτερες τιμές του IRF εντοπίζονται στα ενισχυτικά. Με την αύξηση της συνολικής ακαμψίας της κατασκευής, πιθανολογείται και η μείωση των τάσεων και στις κρίσιμες περιοχές της πάνω πλάκας, οι οποίες εντοπίζονται στα μέσα των πλευρών της.

Η σύμβαση για τον προσανατολισμό των στρώσεων διατηρήθηκε όμοια με όλα τα προηγούμενα μοντέλα που μελετήθηκαν και συνεπώς στην πάνω πλάκα και στις διαμήκεις πλευρές, οι στρώσεις με προσανατολισμό 0° αντιστοιχούν στον άξονα X, δηλαδή στο διάμηκες του πλοίου, ενώ στα ενισχυτικά και παράλληλες σε αυτά πλευρές, οι στρώσεις με προσανατολισμό 0° αντιστοιχούν στον άξονα Y, δηλαδή στο εγκάρσιο του πλοίου. Στην συνέχεια αξιολογούνται τα αποτελέσματα των τριών μοντέλων για τη συνολική γεωμετρία, αλλά και για την πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά ξεχωριστά.

Αρχικά, η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης σε όλα τα μοντέλα εντοπίζεται στο κέντρο της κατασκευής και συγκεκριμένα στο μέσο της πάνω πλάκας, καθώς στο κέντρο της κατασκευής δεν είναι τοποθετημένα κάποιο ενισχυτικό, λόγω του άρτιου πλήθους και της ισαπόστασης των ενισχυτικών. Λόγω της αυξημένης ακαμψίας, που αναφέρθηκε και προηγουμένως, οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης για όλα τα μοντέλα της ενότητας είναι αρκετά μειωμένες σε σχέση με τη μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης του Μοντέλου 1. Σε αντιστοιχία με τα προηγούμενα μοντέλα, υπολογίζεται ο λόγος μέγιστου βέλους κάμψης προς την μικρότερη διάσταση του καλύμματος, ο οποίος ισούται με 1/90.1, 1/121.8 και 1/115.5 για τα Μοντέλα 5, 6 και 7 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αποδεκτές σε σχέση με εμπειρικές τιμές του λόγου αυτού. Η ελάχιστη τιμή του μέγιστου βέλους κάμψης εμφανίζεται στο Μοντέλο 2. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς το Μοντέλο 6 διαθέτει πάχος 52 mm σε σχέση με το Μοντέλο 5 που διαθέτει 40 mm πάχος. Στο Μοντέλο 7 παρατηρείται ελάχιστα αυξημένη τιμή του μέγιστου βέλους κάμψης σε σχέση με το Μοντέλο 6, παρά την χρήση υλικού σάντουιτς στην πάνω πλάκα, λόγω του πάχους των 40 mm στα ενισχυτικά.

Η παράμετρος βάσει της οποίας κρίνεται αν η σχεδίαση είναι αποδεκτή είναι η τιμή του μέγιστου IRF, που υπολογίζεται βάσει των κριτηρίων Tsai-Wu και Puck. Οι μέγιστες τιμές του IRF παρουσιάζονται μειωμένες σε σχέση με το Μοντέλο 1, με τα Μοντέλα 6 και 7 να εμφανίζουν παρόμοιες τιμές, οι οποίες είναι οι ελάχιστες που έχουν παρατηρηθεί σε όλα τα μοντέλα του υπό σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους που έχουν μελετηθεί σε αυτό και στα προηγούμενα κεφάλαιο. Παρόλα αυτά, οι τιμές αυτές ξεπερνούν την μονάδα και συνεπώς κρίνεται πως η σχεδίαση και των τριών αυτών μοντέλων δεν είναι αποδεκτή και απαιτείται τροποποίηση. Στην συνέχεια μελετώνται ξεχωριστά η πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά και αξιολογούνται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα για τα τρία μοντέλα.

Η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης στην πάνω πλάκα αντιστοιχεί στην ολική μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης της διατομής, η οποία μελετήθηκε προηγουμένως. Οι μέγιστες τάσεις και για τα τρία μοντέλα εμφανίζονται στην μέση της μικρής πλευράς και αντιστοιχούν σε στρώσεις με προσανατολισμό 0° , 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση στο επίπεδο XY αντίστοιχα. Οι τάσεις εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με το Μοντέλο 1, με το Μοντέλο 6 να εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά από το Μοντέλο 5, αλλά και τα δύο αυτά μοντέλα να οδηγούν σε αστοχία καθώς οι μέγιστες τιμές του IRF τους ξεπερνούν την μονάδα και επίσης αντιστοιχούν στις ολικά μέγιστες για τα μοντέλα αυτά. Στο Μοντέλο 7 οι τάσεις έχουν μικρότερη τιμή από τα δύο προηγούμενα μοντέλα, αλλά η μέγιστη τιμή του IRF δεν ξεπερνάει την μονάδα και συνεπώς θεωρείται αποδεκτή. Με το δεδομένο αυτό, γίνεται αντιληπτό πως η επιλογή χρήσης υλικού σάντουιτς για την κατασκευή της πάνω πλάκας του υπό σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους κρίνεται εύστοχη. Σε όλες τις περιπτώσεις η κρίσιμη στρώση έχει προσανατολισμό 90° .

Μελετώντας ξεχωριστά τα ενισχυτικά, παρατηρείται παρόμοια εικόνα όσον αφορά τις μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης των τριών μοντέλων σε σχέση με τις μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης στην πάνω πλάκα. Βέβαια, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, καθώς στο κέντρο της κατασκευής δεν υπάρχει ενισχυτικό, οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης εμφανίζονται ελάχιστα μειωμένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τις πάνω πλάκας. Οι τάσεις, ορθές και διατμητική, εμφανίζεται να μειώνονται σε σχέση με τα μοντέλα των προηγούμενων κεφαλαίων, με τις ελάχιστες να εντοπίζονται στο Μοντέλο 6. Οι κρίσιμες στρώσεις και σε αυτήν την περίπτωση έχουν προσανατολισμό 0° , 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση στο επίπεδο XY αντίστοιχα, σε όλα τα μοντέλα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει οι μέγιστες τιμές του IRF των ενισχυτικών των τριών μοντέλων, καθώς στο Μοντέλο 7 η μέγιστη τιμή του IRF στα ενισχυτικά αντιστοιχεί στην ολική μέγιστη τιμή της κατασκευής, γεγονός που δικαιολογείται λόγω της ενισχυμένης κατασκευής της πάνω πλάκας με τη χρήση υλικού σάντουιτς. Βέβαια, και τα τρία αυτά μοντέλα παρουσιάζουν αστοχία στα ενισχυτικά, δεδομένων των μέγιστων τιμών του IRF που ξεπερνούν την μονάδα.

Συνολικά, συμπεραίνεται πως η σχεδίαση και των τριών μοντέλων κρίνεται μη αποδεκτή. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα των μοντέλων παρουσίασαν βελτιωτική τάση και η χρήση υλικού σάντουιτς για την κατασκευή της πάνω πλάκας φαίνεται να εύστοχη. Στο επόμενο κεφάλαιο, με την εμπειρία από όλες τις διαφορετικές σχεδιάσεις ως τώρα, προκύπτει η τελικά

αποδεκτή σχεδίαση, η οποία διαθέτει χαρακτηριστικά και από τις δύο διαφορετικές προσεγγίσεις των ενότητων 4.3 και 4.4.

4.5 Τελική σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους με ενισχυτικά τύπου καπέλου

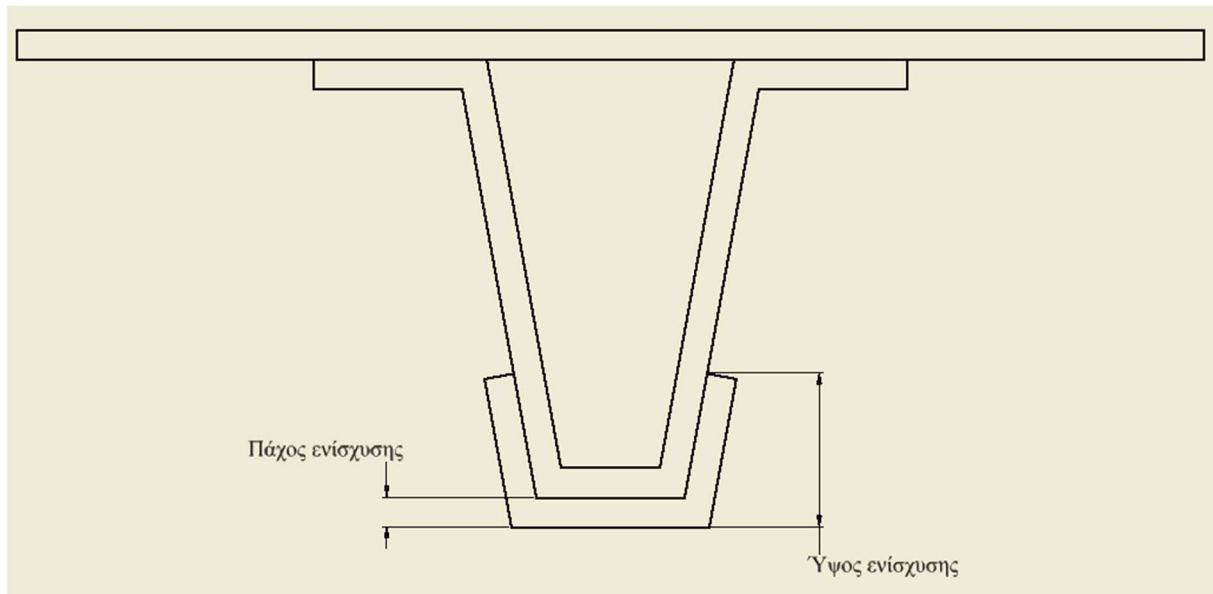
4.5.1 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η δημιουργία των δύο τελευταίων μοντέλων στομίου κύτους από σύνθετα υλικά, τα οποία αποτελούν την τελική σχεδίαση του υπό σχεδίαση καλύμματος. Βασικός άξονας στη σχεδίαση όλων των μοντέλων που προηγήθηκαν είναι η διατήρηση των κύριων διαστάσεων του καλύμματος, που προκύπτουν από το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους, το οποίο έχει μήκος 21.32 μέτρα και πλάτος 18.4 μέτρα. Στις ενότητες 4.3 και 4.4 μελετήθηκαν μοντέλα με διαφορετικές προσεγγίσεις όσον αφορά την προσπάθεια βελτίωσης της σχεδίασης, χωρίς τελικά να επιτευχθεί ο τελικός στόχος της αποδεκτής σχεδίασης. Παρόλα αυτά, μέσα από την μελέτη όλων αυτών των μοντέλων, αναδείχθηκαν κάποια χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσίασαν καλή συμπεριφορά και συνεπώς συμπεριλαμβάνονται στην τελική σχεδίαση, η οποία περιγράφεται αναλυτικότερα στην συνέχεια. Υιοθετώντας τα βέλτιστα χαρακτηριστικά από τα διάφορα μοντέλα και έχοντας πλέον γνώση των σημείων που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή κατά τη σχεδίαση, δημιουργήθηκαν τα μοντέλα της συγκεκριμένης ενότητας, τα οποία οδηγούν σε τελικά αποδεκτή λύση, όπως θα γίνει φανερό στις επόμενες ενότητες, όπου θα πραγματοποιηθεί η στατική ανάλυση των μοντέλων και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

Σε συνέχεια της ονοματολογίας των μοντέλων των προηγούμενων ενότητων, τα μοντέλα μελετώνται στην ενότητα αυτή ονομάζονται «Μοντέλο 8» και «Μοντέλο 9». Όμοια με όλα τα προηγούμενα μοντέλα η στρώση του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα της ενότητας αποτελείται από το υλικό “E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex”, διαθέτει ίνες σε μία διεύθυνση και πάχος 0.5 mm. Διατηρήθηκε, ακόμη, ο προσανατολισμός των στρώσεων κατά το πάχος του πολύστρωτου, ο οποίος ακολουθεί την αλληλουχία $[0, 45, -45, 90]_s$. Ακολουθώντας, περιγράφεται αναλυτικά η σχεδίαση του κάθε μοντέλου.

Από τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας παρατηρήθηκε πως στο Μοντέλο 7 επιτεύχθηκε αποδεκτή σχεδίαση για την πάνω πλάκα, καθώς η μέγιστη τιμή του IRF στην πάνω πλάκα δεν ξεπερνούσε την μονάδα. Η επιτυχία της σχεδίασης οφείλεται στην χρήση σύνθετου υλικού τύπου σάντουιτς με πυρήνα, πάχους 120 mm, από αφρό PVC πυκνότητας 80 kg/m^3 και περιβλήματα με πάχος 20 mm το καθένα από το υλικό “E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex”. Συνεπώς, η πάνω πλάκα του Μοντέλου 8 σχεδιάστηκε όμοια με τη πάνω πλάκα του Μοντέλου 7. Όμοια διατηρήθηκαν επίσης η βασική γεωμετρία και το πλήθος των ενισχυτικών τύπου καπέλου, όπως και το ύψος και το πάχος των πλευρών. Η περιοχή στην οποία παρατηρήθηκε αστοχία στο Μοντέλο 7 εντοπίστηκε στο κεντρικό τμήμα των ενισχυτικών και ιδιαίτερα των 6 μεσαίων ενισχυτικών. Για την βελτίωση της σχεδίασης στην περιοχή αυτή υιοθετήθηκε η

ενίσχυση με την μορφή επιπρόσθετου πάχους, η οποία χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα της ενότητας 4.3. Συγκεκριμένα, προστέθηκε πάχος στο κεντρικό τμήμα του 3^{ου} έως και του 8^{ου} ενισχυτικού καλύπτοντας το πέλαμα και μέρος του ύψους του ενισχυτικού. Η μορφή της ενίσχυσης και οι παράμετροι αυτής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.30, στο οποίο απεικονίζεται η τομή ενός ενισχυτικού στην περιοχή της ενίσχυσης.

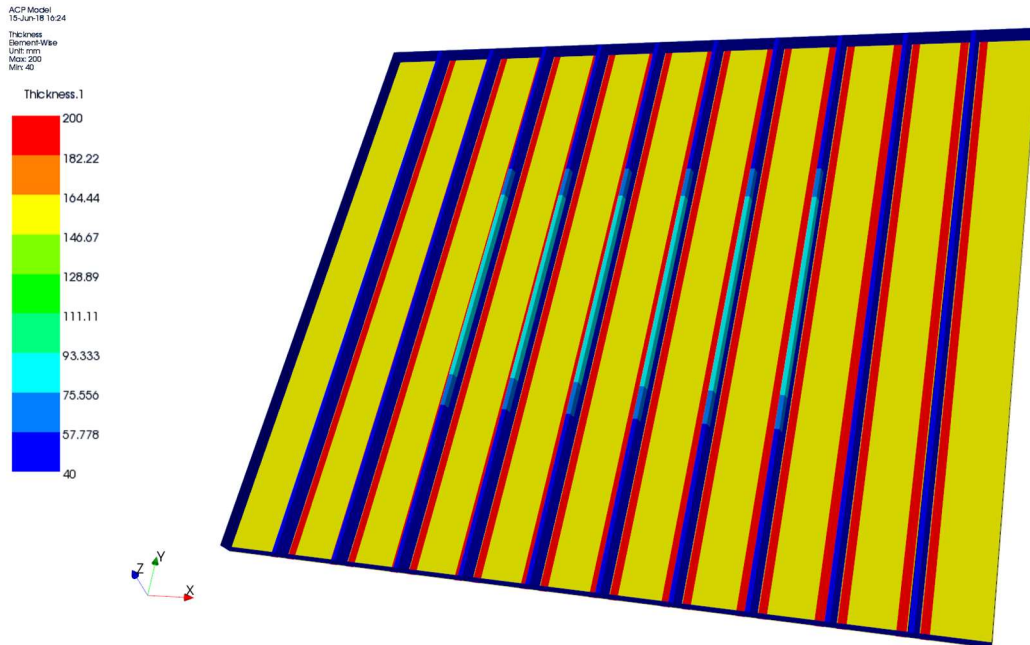


Σχήμα 4.30: Διατομή ενισχυτικού στην περιοχή της ενίσχυσης

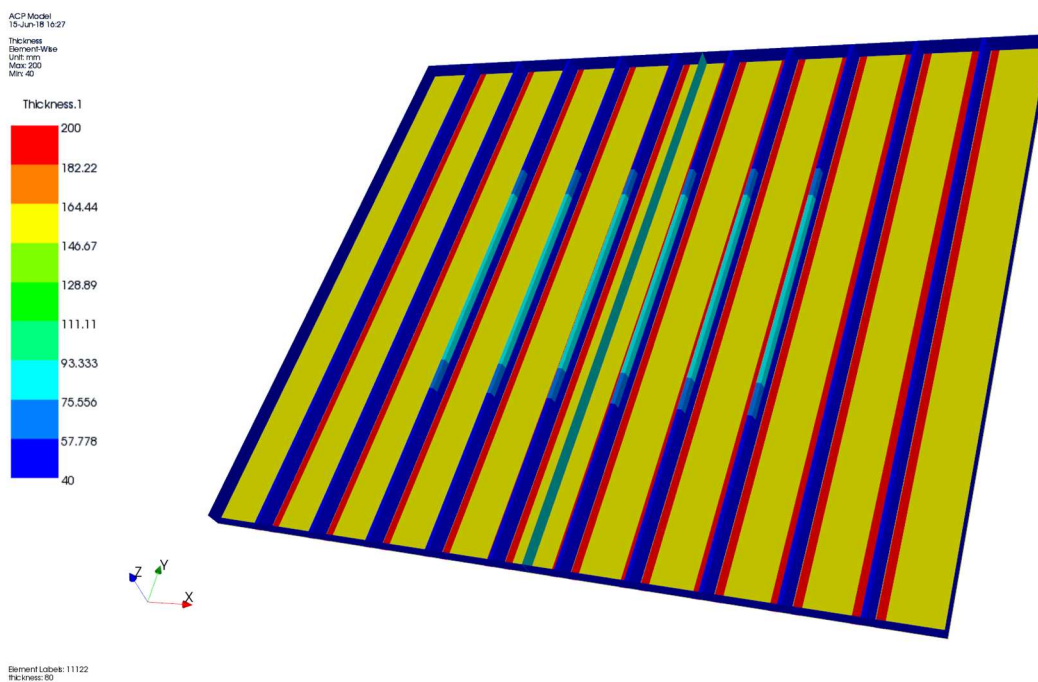
Στα έξι μεσαία ενισχυτικά προστέθηκε ενίσχυση της παραπάνω μορφής σε δύο περιοχές. Αρχικά, ενίσχυση μήκους 11.8 m και πάχους 40 mm, δηλαδή 80 στρώσεων, προστέθηκε στο κεντρικό τμήμα των ενισχυτικών. Επίσης εκατέρωθεν των δύο άκρων της ενίσχυσης προστέθηκε επιπλέον ενίσχυση μήκους 1 m σε κάθε πλευρά και πάχους 20 mm, δηλαδή 40 στρώσεων. Οι δύο ενισχύσεις έχουν κοινό ύψος, το οποίο ισούται με 0.2 m. Σκοπός και των δύο ενισχύσεων είναι η μείωση των κρίσιμων τιμών IRF που εμφανίζονται στα σημεία αυτά κατά την ανάλυση του Μοντέλου 7. Η δεύτερη ενίσχυση που τοποθετήθηκε στα άκρα της πρώτης ενίσχυσης έχει ως σκοπό την αποφυγή απότομης μεταβολής πάχους, η οποία θα δημιουργούσε συγκεντρώσεις τάσεων στα σημεία αυτά, όπως έγινε αντιληπτό στα Μοντέλα 3 και 4.

Στο Μοντέλο 9 διατηρήθηκε απαράλλακτη η συνολική γεωμετρία του Μοντέλου 8 και προστέθηκε μία εγκάρσια σταθμίδα στο μέσο του μήκους του καλύμματος, η οποία έχει ύψος όμοιο με τις πλευρές, δηλαδή 550 mm και πάχος 80 mm, δηλαδή διπλάσιο των πλευρών. Η σταθμίδα αυτή έχει ως σκοπό την μοντελοποίηση του εγκάρσιου διαχωρισμού του καλύμματος σε δύο όμοια καλύμματα. Η διπλάσια τιμή του πάχους σε σχέση με τις πλευρές έχει ως στόχο την μοντελοποίηση της άκαμπτης ένωσης των δύο εγκάρσιων εσωτερικών πλευρών, πάχους 40 mm η κάθε μία, των δύο όμοιων καλυμμάτων. Με τον τρόπο αυτόν εξετάζεται η περίπτωση καλύμματος που αποτελείται από δύο όμοια τμήματα με το ένα να ανοίγει στο πρωταίο και το άλλο στο πρυμναίο τμήμα του στομίου κύτους. Βέβαια, η σύμβαση της απόλυτα άκαμπτης

ένωσης των δύο πλευρών δεν ανταποκρίνεται πλήρως στην πραγματικότητα. Παρόλα αυτά αποτελεί μια καλή προσέγγιση για το βάθος της ανάλυσης που εξετάζεται σε αυτήν την εργασία. Στα Σχήματα 4.31 και 4.32 παρουσιάζεται η γεωμετρία των Μοντέλων 8 και 9, όπως αυτή εισήχθη στο ANSYS, με την χρωματική κλίμακα να αναπαριστά το πάχος σε κάθε σημείο.



Σχήμα 4.31: Γεωμετρία Μοντέλου 8 με αναπαράσταση πάχους



Σχήμα 4.32: Γεωμετρία Μοντέλου 9 με αναπαράσταση πάχους

4.5.2 Εκπόνηση στατικής ανάλυσης

Κατά αναλογία με όλα τα μοντέλα που έχουν ήδη μελετηθεί η φόρτιση που εφαρμόστηκε κατά την στατική ανάλυση των μοντέλων της ενότητας επιλέχθηκε ίση με αυτή που υπολογίστηκε για το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους σύμφωνα με τους κανονισμούς UR-S21 SEA LOAD του IACS, οι οποίοι προδιαγράφουν ομοιόμορφη πίεση στην πάνω πλάκα του καλύμματος στομίου κύτους και ισούται με 34.5 kN/m^2 .

Όμοιο με τα προηγούμενα μοντέλα διατηρείται, επίσης, το είδος των οριακών συνθηκών που εφαρμόστηκαν στα μοντέλα της ενότητας, δηλαδή εφαρμόστηκαν πακτώσεις σε όλη την έκταση και των τεσσάρων πλευρών του καλύμματος στομίου κύτους.

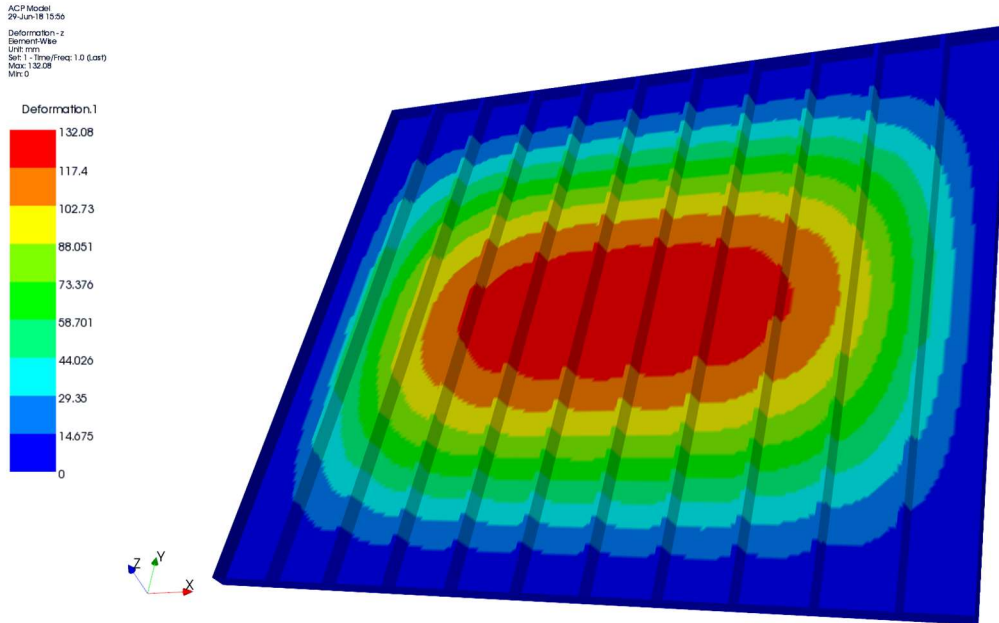
Στον Πίνακα 4.8 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των μεγεθών που υπολογίστηκαν κατά την στατική ανάλυση. Τα μεγέθη αυτά έχουν την μορφή βέλους κάμψης και IRF για τη συνολική γεωμετρία, αλλά και για την πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά ξεχωριστά. Για την πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά υπολογίστηκαν επίσης και ορθές τάσεις σε δύο διευθύνσεις και διατμητική τάση στο επίπεδο.

Οι άξονες του συστήματος συντεταγμένων που χρησιμοποιήθηκε και σε αυτή την ανάλυση επιλέχθηκαν έτσι ώστε ο άξονας X να αντιστοιχεί στη διαμήκη διεύθυνση πλοίου, ο άξονας Y να αντιστοιχεί στην εγκάρσια διεύθυνση του πλοίου και ο άξονας Z να αντιστοιχεί στην κατακόρυφη διεύθυνση του πλοίου.

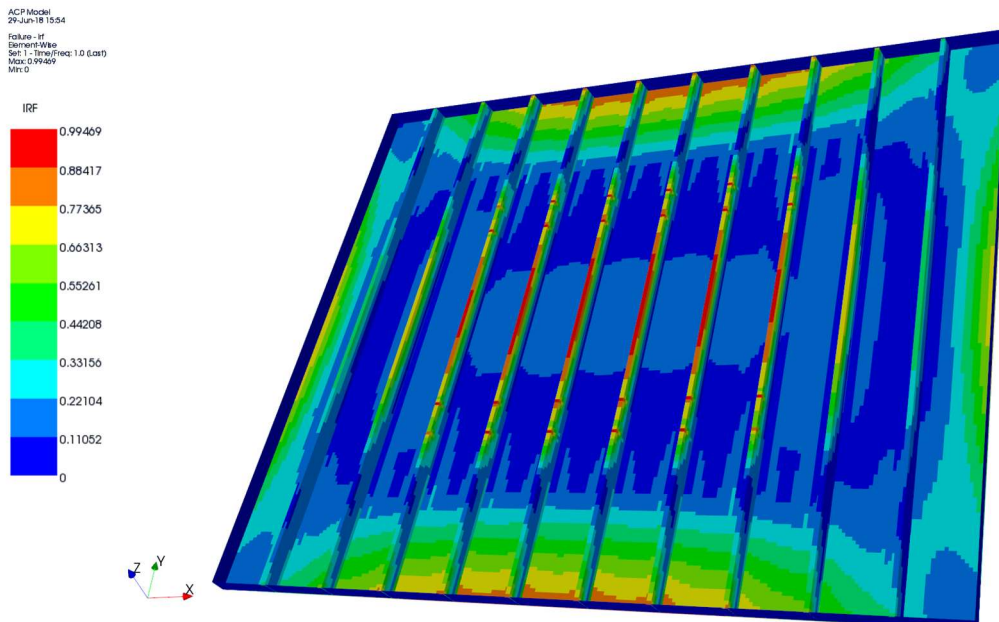
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα στατικής ανάλυσης Μοντέλων 8 και 9

		Μοντέλο 8	Μοντέλο 9
Συνολική Γεωμετρία	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	132.08	121.97
	Μέγιστο IRF	0.99469	0.90591
Πάνω πλάκα	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	132.08	121.97
	Μέγιστη ορθή τάση κατά X σ_{xmax} (MPa)	-108.9	-108.9
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-38.0	-38.0
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά XY τ_{xymax} (MPa)	-13.5	-13.5
	Μέγιστο IRF	0.88146	0.82994
Ενισχυτικά τύπου καπέλου	Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	131.08	121.38
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Y σ_{ymax} (MPa)	-342.2	-322.38
	Μέγιστη ορθή τάση κατά Z σ_{zmax} (MPa)	-117.2	-110.1
	Μέγιστη διατμητική τάση κατά YZ τ_{yzmax} (MPa)	49.2	47.2
	Μέγιστο IRF	0.99469	0.90591

Στα Σχήματα 4.33 έως 4.36 παρουσιάζονται οι κατανομές του βέλους κάμψης και του IRF για τα δύο μοντέλα σε κάθε σημείο της γεωμετρίας. Η χρωματική κλίμακας χρησιμοποιήθηκε για την απεικόνιση της τιμής του κάθε μεγέθους σε κάθε σημείο της γεωμετρίας, αναδεικνύοντας τις περιοχές με μέγιστες τιμές με κόκκινο χρώμα.

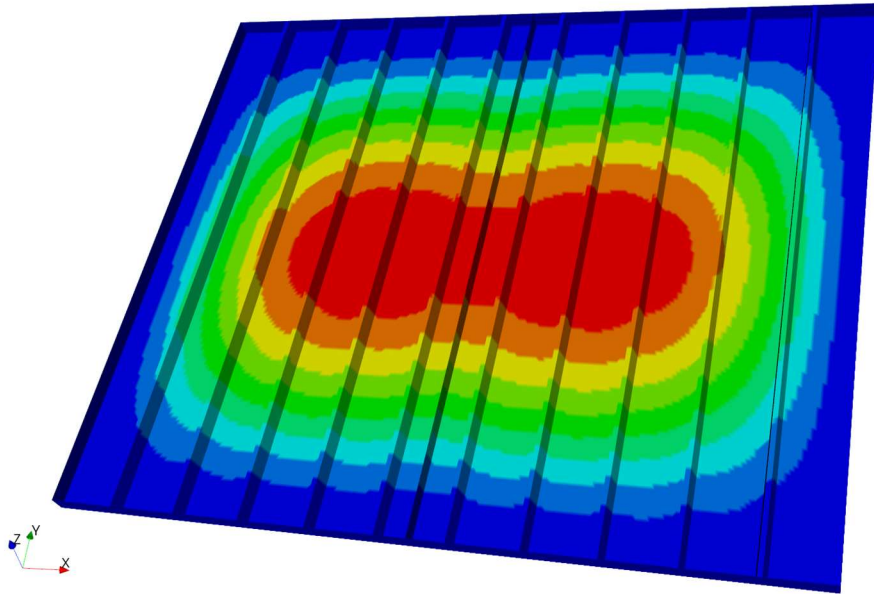
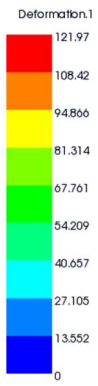


Σχήμα 4.33: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 8



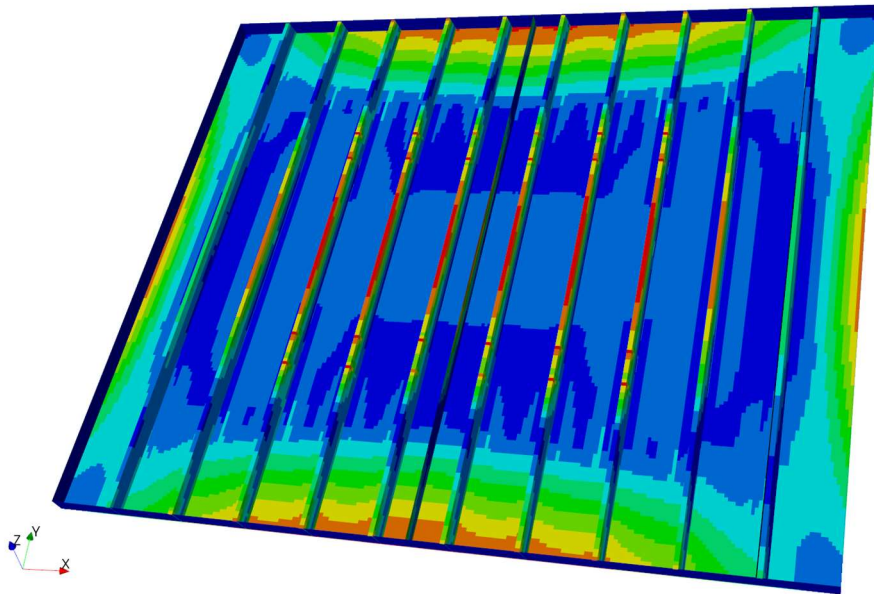
Σχήμα 4.34: Κατανομή IRF Μοντέλου 8

ACP Model
29-Jun-18 16:25
Deformation - 1
Element-Wise
Unit: mm
Set: 1 - Type/Freq: 1.0 (cart)
Max: 121.97
Min: 0



Σχήμα 4.35: Κατανομή βέλους κάμψης Μοντέλου 9

ACP Model
29-Jun-18 16:18
Failure - IF
Element-Wise
Set: 1 - Type/Freq: 1.0 (cart)
Max: 0.90591
Min: 0



Σχήμα 4.36: Κατανομή IRF Μοντέλου 9

4.5.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Μετά τον πέρας της δημιουργίας των δύο μοντέλων του κεφαλαίου αυτού και την υλοποίηση της στατικής ανάλυσης, εξήχθησαν αποτελέσματα με αποδεκτές τιμές σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν οριστεί καθιστώντας την σχεδίαση ικανοποιητική. Στην συγκεκριμένη ενότητα αναλύονται και αξιολογούνται σε μεγαλύτερο βάθος τα αποτελέσματα αυτά, δίνοντας έμφαση στις περιοχές της γεωμετρίας και τις στρώσεις με τις μέγιστες τιμές του κάθε μεγέθους.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, όπως και για τα μοντέλα των προηγούμενων κεφαλαίων, πραγματοποιείται ξεχωριστά για την πάνω πλάκα και τα ενισχυτικά, αλλά και για την συνολική γεωμετρία. Διατηρείται επίσης η σύμβαση του προσανατολισμού των στρώσεων με την στρώση με προσανατολισμό 0° να αντιστοιχεί στον άξονα X για την πάνω πλάκα και τις πλευρές κατά X, ενώ αντιστοιχεί στον άξονα Y για τα ενισχυτικά και τις πλευρές κατά Y.

Μελετώντας τις μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης των Μοντέλων 8 και 9, παρατηρείται ότι οι λόγοι μέγιστου βέλους κάμψης προς το μήκος της μικρότερης πλευράς του καλύμματος υπολογίζονται ίσοι με 1/139.3 και 1/150.85 για τα Μοντέλα 8 και 9 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές υπερκαλύπτουν την εμπειρική κρίσιμη τιμή και συνεπώς θεωρούνται αποδεκτές.

Σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και αναλύθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, τα Μοντέλα 8 και 9 εμφάνισαν μέγιστες τιμές IRF μικρότερης της μονάδας και συνεπώς αποφεύγεται η περίπτωση της αστοχίας και συμπεραίνεται πως η σχεδίαση τους είναι αποδεκτή. Αξίζει, βέβαια, να επισημανθεί η περιοχή στην οποία εντοπίζονται αυτές οι μέγιστες τιμές, η οποία είναι κοινή και για τα δύο μοντέλα. Όπως έγινε φανερό και από τα Μοντέλα 3 και 4, όπου χρησιμοποιήθηκε παρόμοια μορφή ενίσχυσης στο μεσαίο τμήμα των κεντρικών ενισχυτικών, τα σημεία των πελμάτων των ενισχυτικών στα άκρα της ενίσχυσης εμφανίζουν συγκέντρωση τάσεων και συνεπώς υψηλές τιμές IRF, λόγω της απότομης αλλαγής πάχους που εμφανίζεται από την προσθήκη της ενίσχυσης. Το φαινόμενο αυτό περιορίστηκε στα Μοντέλα 8 και 9 με την τοποθέτηση επιπρόσθετης ενίσχυσης στα άκρα της προηγούμενης, αλλά με μικρότερο πάχος, επιτυγχάνοντας σταδιακή και ομαλότερη μείωση του πάχους. Με τον τρόπο αυτό, οι τιμές του IRF στις περιοχές αυτές, παρότι διατηρούνται οι ολικά μέγιστες, δεν ξεπερνούν την μονάδα. Επίσης, όπως αναμενόταν, η στρώση με τις μέγιστες τιμές IRF και για τα δύο μοντέλα έχει προσανατολισμό 90° .

Στην συνέχεια μελετάται η πάνω πλάκα ξεχωριστά. Η μέγιστη τιμή του βέλους κάμψης αντιστοιχεί στην ολικά μέγιστη και συνεπώς αναλύθηκε προηγουμένως. Το ενδιαφέρον εντοπίζεται στην περιοχή εμφάνισης του μέγιστου βέλους κάμψης, καθώς ενώ στο Μοντέλο 8 εντοπίζεται στο κέντρο της πάνω πλάκας, όπως σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα, στο Μοντέλο 9 εντοπίζεται στην περιοχή ανάμεσα στο 4° και στο 5° ενισχυτικό και στην συμμετρική αυτής κατά τον άξονα Y, δηλαδή ανάμεσα στο 6° και στο 7° ενισχυτικό. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην προσθήκη της κεντρικής σταθμίδας κατά Y, η οποία προσδίδει ροπή αδράνειας στην περιοχή του κέντρου, μειώνοντας επίσης το ανυποστήρικτο μήκος της πλάκας, καθώς τοποθετείται σε απόσταση από τα διπλανά ενισχυτικά που ισούται με το μισό τις ισαπόστασης αυτών. Υπενθυμίζεται πως η κεντρική σταθμίδα προσομοιάζει την άκαμπτη ένωση των δύο

πλευρών των επιμέρους καλυμμάτων, γεγονός που δεν αντιστοιχεί πλήρως στην πραγματικότητα, αλλά αποτελεί ικανοποιητική προσέγγιση για το βάθος της ανάλυσης που στοχεύει η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. Επίσης, οι μέγιστες τιμές των τάσεων και του IRF της πάνω πλάκα διατηρούνται αρκετά μικρότερες από τις κρίσιμες τιμές, αποδεικνύοντας και στα μοντέλα αυτά πως η χρήση υλικού σάντουιτς για την πάνω πλάκα συμβάλει εξαιρετικά στην επίτευξη της τελικά αποδεκτής σχεδίασης. Οι μέγιστες τιμές των τάσεων εντοπίζονται στην μέση της μικρής πλευράς και οι στρώσεις στις οποίες εμφανίζονται έχουν προσανατολισμό 0° , 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση στο επίπεδο XY αντίστοιχα.

Ακολουθώς μελετώνται ξεχωριστά τα ενισχυτικά. Η κατανομή του βέλους κάμψης και οι περιοχές με τις μέγιστες τιμές παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα με την πάνω πλάκα, με τις μέγιστες τιμές να είναι λίγο μικρότερες από τις μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης στην πάνω πλάκα, γεγονός που δικαιολογείται λόγω της γεωμετρίας της σχεδίασης, όπως έχει διευκρινιστεί και σε προηγούμενες ενότητες. Στο Μοντέλο 8 οι μέγιστες τιμές βέλους κάμψης εμφανίζεται στο 5° και στο 6° ενισχυτικό, ενώ στο Μοντέλο 9 εμφανίζεται στο 4° και στο 6° , το οποίο οφείλεται επίσης στην τοποθέτηση της κεντρικής σταθμίδας, όπως επεξηγήθηκε προηγουμένως. Οι στρώσεις με τις μέγιστες τάσεις, όπως είναι φυσικό, έχουν προσανατολισμό 0° , 90° και 45° για την ορθή τάση κατά X, την ορθή τάση κατά Y και την διατμητική τάση στο επίπεδο XY αντίστοιχα και στα δύο μοντέλα. Οι μέγιστες τιμές του IRF των ενισχυτικών αντιστοιχούν στις ολικά μέγιστες και συνεπώς έχουν αναλυθεί προηγουμένως.

Μετά το πέρας της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και την ανάδειξη του Μοντέλου 9 ως την τελικά αποδεκτή σχεδίαση, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην αξιολόγηση της σχεδίασης ως προς την επίτευξη του αρχικού στόχου, ο οποίος αφορά την μείωση του βάρους των καλυμμάτων στομίων κυτών με χρήση σύνθετων υλικών αντί για χάλυβα. Για το υπολογισμό του συνολικού βάρους, η κατασκευή αναλύθηκε στα επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία της, δηλαδή την πάνω πλάκα, τις πλευρές και τα ενισχυτικά, το βάρος των οποίων υπολογίστηκε δεδομένων των διαστάσεων και του υλικού κατασκευής. Αναλυτικότερα, το βάρος της πάνω πλάκα αποτελείται από το βάρος του πυρήνα PVC και των περιβλημάτων από E-glass/Epoxy του υλικού σάντουιτς το οποίο επιλέχθηκε στην συγκεκριμένη σχεδίαση. Το βάρος των πλευρών αποτελείται από το βάρος των τεσσάρων εγκάρσιων πλευρών και των δύο διαμηκών πλευρών. Τέλος, το βάρος των ενισχυτικών αναλύεται στο βάρος των ενισχυτικών με ομοιόμορφο πάχος 40 mm, δηλαδή χωρίς την προσθήκη ενισχύσεων και στα βάρη των ενισχύσεων, όπως αυτές περιεγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα. Ο Πίνακας 4.9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα των υπολογισμών αυτών και την τιμή του συνολικού βάρους που προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους βαρών.

Πίνακας 4.9: Υπολογισμός βάρους

Βάρος καλύμματος από σύνθετα υλικά		
Πυκνότητα PVC (ton/mm ³)		8.00E-11
Πυκνότητα E-glass/Epoxy (ton/mm ³)		1.96E-09
Βάρος πάνω πλάκας (tons)	Πυρήνας	3.77
	Περιβλήματα	30.82
Βάρος πλευρών (tons)	Εγκάρσιες	3.18
	Διαμήκεις	1.84
Βάρος ενισχυτικών (tons)	Χωρίς ενίσχυση	24.83
	Ενίσχυση 20 mm	0.34
	Ενίσχυση 40 mm	2.28
	Σύνολο	67.06

Κεφάλαιο 5: Σύγκριση χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους και σχεδιάσεων με χρήση σύνθετων υλικών

Η τιμή του βάρους που υπολογίστηκε αντιστοιχεί στο 63.71% του βάρους του αντίστοιχου καλύμματος από σύνθετα υλικά, συνεπώς η σχεδίαση κρίνεται επιτυχημένη, τόσο από μηχανικής πλευράς καθώς ικανοποιεί τα κριτήρια αντοχής, όσο και από πλευρά μείωσης βάρους, γεγονός που καθιστά συμφέρουσα την επιλογή της συγκεκριμένης σχεδίασης.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, με σκοπό την αντικατάσταση των χαλύβδινων καλυμμάτων στομίων κυτών με αντίστοιχα καλύμματα από σύνθετα υλικά, μελετήθηκε πλήθος διαφορετικών σχεδιάσεων με διαφορετικά χαρακτηριστικά η κάθε μια από αυτές, στοχεύοντας στην επίτευξη μιας σχεδίασης που να ικανοποιεί τα κριτήρια αντοχής και ακαμψίας, αλλά και να οδηγεί σε μία κατασκευή με αισθητά μειωμένο βάρος σε σχέση με την συμβατική κατασκευή από χάλυβα. Κατά την εκκίνηση της σχεδίασης, με την έλλειψη σαφούς εικόνας για την ακριβή μορφή της γεωμετρίας, επιλέχθηκε η μελέτη σχεδιάσεων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Καθώς οι βασικές διαστάσεις του καλύμματος οφείλουν να συμφωνούν με το κάλυμμα αναφοράς, οι παράμετροι που απαιτούν καθορισμό αφορούν την μορφή των ενισχύσεων και το πάχος σε κάθε σημείο της γεωμετρίας. Τελικά, οι δύο βασικές μορφές που μελετήθηκαν διαφοροποιούνταν στην μορφή των ενισχυτικών με την πρώτη να περιλαμβάνει ενισχυτικά τύπου σταθμίδων σε δύο διευθύνσεις και η δεύτερη ενισχυτικά τύπου καπέλου σε μία διεύθυνση. Πλήθος μοντέλων επιλύθηκαν για κάθε μία από αυτές τις μορφές. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύνοψη των βέλτιστων σχεδιάσεων των δύο μορφών και πραγματοποιείται σύγκριση με το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους που επιλέχθηκε ως αναφορά. Συγκεκριμένα επιλέγεται η σύγκριση του χαλύβδινου καλύμματος με το μοντέλο με τις σταθμίδες της ενότητας 4.1 και το μοντέλο 9 της ενότητας 4.5. Η σύγκριση πραγματοποιείται με κριτήριο την αντοχή, το βάρος, αλλά και το κόστος της κάθε κατασκευής.

5.1 Σύγκριση αντοχής και ακαμψίας

Στην συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιείται μελέτη και σύγκριση αντοχής και ακαμψίας ανάμεσα στο χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους και στα αντίστοιχα καλύμματα από σύνθετα υλικά τα οποία σχεδιάστηκαν σε αυτήν την διπλωματική εργασία. Κρίσιμο σημείο για την επιτυχή σύγκρισή τους αποτελεί η κατανόηση και η παρουσίαση των διαφορετικών μηχανικών ιδιοτήτων των βασικών υλικών των κατασκευών. Τα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένο το κάλυμμα στομίου κύτους αναφοράς είναι ο μαλακός χάλυβας Grade A και ο χάλυβας υψηλής αντοχής HT32, ενώ για τα καλύμματα που σχεδιάστηκαν επιλέχθηκε ως κύριο υλικό το σύνθετο υλικό E-glass fibers Silenka, 1200 tex, ενώ σε κάποια από τα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε αφρός PVC. Στον Πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι βασικές ιδιότητες των υλικών αυτών, αναδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο τις διαφορές τους ως προς την μηχανική συμπεριφορά. Καθώς τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν ορθοτροπική συμπεριφορά απαιτείται ο καθορισμός του μέτρου ελαστικότητας και των αντοχών τους σε δύο διευθύνσεις, σε αντίθεση με τον

μαλακό χάλυβα, τον χάλυβα υψηλής αντοχής και τον αφρό PVC, τα οποία παρουσιάζουν ισοτροπική συμπεριφορά και συνεπώς αρκεί ο καθορισμός μίας μόνο τιμής για τα αντίστοιχα μεγέθη.

Πίνακας 5.1: Μηχανικές ιδιότητες βασικών υλικών

		Μαλακός Χάλυβας Grade A	Χάλυβας Υψηλής Αντοχής HT32	E-Glass fibers, Silenka, 1200 tex	Αφρός PVC
Πυκνότητα (tons/m ³)	ρ	7.8	7.85	1.964	0.08
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	E_1	210	210	45.6	0.102
	E_2			16.2	
Μέτρο διάτμησης (GPa)	G_{12}	80	80	5.83	0.039
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	X_T	400-500	440-590	1280	2.2
	Y_T			40	
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	X_C	400-500	440-590	800	2.2
	Y_C			145	
Αντοχή σε διάτμηση (MPa)	S_{12}	400-500	440-590	73	1.35
Ειδική εφελκυστική αντοχή (MPa m ³ /tons)	X_T/ρ	51-64	56-75	652	28
Λόγος Poisson	ν_{12}	0.3	0.3	0.278	0.3

Ο αφρός PVC, όπως είναι εμφανές και από τις τιμές των αντοχών του Πίνακα 5.1, δεν συνεισφέρει στην αντοχή, αλλά χρησιμοποιείται για την αύξηση της ροπής αδράνειας της κατασκευής καθώς αποτελεί τον πυρήνα του υλικού σάντουιτς που επιλέχθηκε σε κάποια από τα μοντέλα που μελετήθηκαν. Παρόλα αυτά παρατίθενται οι ιδιότητες του για λόγους πληρότητας.

Ο μαλακός χάλυβας και ο χάλυβας υψηλής αντοχής παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, με τον δεύτερο να διαθέτει υψηλότερη αντοχή και συνεπώς χρησιμοποιείται για την τοπική ενίσχυση της κατασκευής του καλύμματος αναφοράς, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3.

Ιδιαίτερη έμφαση οφείλει να δοθεί στην σύγκριση του μαλακού χάλυβα και του σύνθετου υλικού E-glass fibers Silenka, 1200 tex, τα οποία αποτελούν τα δύο βασικά υλικά του συμβατικού και του υπό σχεδίαση καλύμματος αντίστοιχα. Παρατηρώντας τις τιμές των μέτρων ελαστικότητας και διάτμησης των δύο υλικών καθίσταται εμφανής η αισθητά μειωμένη ακαμψία του σύνθετου υλικού σε σχέση με τον χάλυβα, το οποίο είναι αναμενόμενο σύμφωνα με την θεωρία που αφορά το σύνολο των σύνθετων υλικών και αιτιολογεί την ιδιαίτερη έμφαση που δίνεται στην ακαμψία των κατασκευών από σύνθετα υλικά. Όσον αφορά τις τιμές των αντοχών του σύνθετου υλικού διαπιστώνεται η έντονη ισοτροπική συμπεριφορά του, καθώς οι τιμές των αντοχών στην διεύθυνση 1 είναι αισθητά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές στην διεύθυνση 2. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει την ανάγκη τοποθέτησης πολλαπλών στρώσεων σε διαφορετικές διευθύνσεις προσεγγίζοντας με τον τρόπο αυτό την ισοτροπική συμπεριφορά.

Μελετώντας συγκεκριμένα την εφελκυστική αντοχή του σύνθετου στην διεύθυνση 1 παρατηρείται ιδιαίτερα υψηλή τιμή, η οποία είναι σχεδόν διπλάσια της αντίστοιχης εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα. Επιπρόσθετα, το ενδιαφέρον εστιάζεται στην μικρή πυκνότητα του σύνθετου υλικού σε σχέση με την πυκνότητα του χάλυβα. Ο συνδυασμός υψηλής αντοχής και χαμηλής πυκνότητας του σύνθετου υλικού, ο οποίος εκφράζεται μέσω της υψηλής ειδικής αντοχής του, αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών σε σχέση με συμβατικά υλικά, όπως ο χάλυβας.

Αφού πλέον έχουν γίνει αισθητές οι διαφορές των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής των καλυμμάτων που υπόκεινται σε σύγκριση, απομένει η απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων που σχεδιάστηκαν και του χαλύβδινου καλύμματος αναφοράς. Τα δύο μεγέθη που παρουσιάζουν την συνολική εικόνα των μοντέλων, όσον αφορά την αντοχή και την ακαμψία τους, είναι το μέγιστο βέλος κάμψης και η μέγιστη τιμή του IRF. Το IRF, όπως έχει επεξηγηθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, υπολογίζεται βάσει των κριτηρίων Tsai-Wu και Puck, τα οποία είναι κριτήρια αστοχίας που αναφέρονται σε κατασκευές από σύνθετα υλικά. Με την επίτευξη τιμής IRF μικρότερη της μονάδας σε όλη την έκταση της κατασκευής συμπεραίνεται η αποφυγή αστοχίας της. Τιμές IRF αρκετά μικρότερες της μονάδας οδηγούν σε υψηλούς συντελεστές ασφαλείας της κατασκευής και συνεπώς σε υπερδιαστασιολόγησή της, το οποίο συνεπάγεται άσκοπη αύξηση του βάρους της. Συνεπώς, αποδεκτές μέγιστες τιμές IRF μπορεί να θεωρηθούν τιμές κοντά στο 0.9, χωρίς να ξεπερνούν την μονάδα. Καθώς χρησιμοποιείται μόνο για κατασκευές από σύνθετα υλικά και λόγω του σχετικά περιορισμένου εύρους αποδεκτών μέγιστων τιμών, το IRF δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων μεταξύ των μοντέλων που σχεδιάστηκαν και του χαλύβδινου καλύμματος. Το μέγεθος το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε κάποια συγκρίσιμα αποτελέσματα είναι το βέλος κάμψης. Η σύγκριση μπορεί να πραγματοποιηθεί μεταξύ του μέγιστου επιτρεπόμενου βέλους κάμψης του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους, η τιμή του οποίου υπολογίζεται σύμφωνα με τους κανονισμούς UR21 REV5 του IACS, σύμφωνα με τους οποίους έχει σχεδιαστεί συνολικά το συγκεκριμένο χαλύβδινο κάλυμμα. Συγκεκριμένα, προδιαγράφεται μέγιστη τιμή βέλους κάμψης ίση με το 0,56 % της μέγιστης διάστασης του καλύμματος. Στη περίπτωση αυτή προκύπτει μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή βέλους κάμψης που ισούται με 119.4 mm. Στον Πίνακα 5.2 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές του βέλους κάμψης και IRF των υπό σύγκριση μοντέλων.

Πίνακας 5.2: Σύγκριση μοντέλων από σύνθετα υλικά

	Μοντέλο με σταθμίδες	Μοντέλο 9 κεφ 4.5 (Τελική Σχεδίαση)
Μέγιστο βέλος κάμψης d_{zmax} (mm)	109.4	121.97
Μέγιστο IRF	0.91889	0.90591

Παρατηρώντας τις τιμές του μέγιστους βέλους κάμψης των δύο μοντέλων, διαπιστώνεται πως το μοντέλο με τις σταθμίδες της ενότητας 4.1 είναι μικρότερο κατά 8.4 % και το μοντέλο 9 της ενότητας 4.5 είναι μεγαλύτερο κατά 2.15 % σε σχέση με την επιτρεπόμενη τιμή του χαλύβδινου καλύμματος. Για τα καλύμματα από σύνθετα υλικά δεν απαιτείται ικανοποίηση των κανονισμών σύμφωνα με τους οποίους υπολογίστηκε η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή βέλους κάμψης για το χαλύβδινο κάλυμμα. Παρόλα αυτά, η μικρή απόκλιση του μέγιστου βέλους κάμψης από την τιμή αυτή θεωρείται θετικό αποτέλεσμα καθώς συνεπάγεται παρόμοια συμπεριφορά του καλύμματος, εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του πάνω στο πλοίο.

5.2 Σύγκριση βάρους

Μετά το πέρας της σύγκρισης αντοχής και ακαμψίας του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους με τα καλύμματα από σύνθετα υλικά που σχεδιάστηκαν κατά την διάρκεια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας το ενδιαφέρον εστιάζεται στην σύγκριση του βάρους του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους που υπολογίστηκε στο κεφάλαιο 3 βάσει των διαθέσιμων σχεδίων, του βάρους του μοντέλου που μελετήθηκε στην ενότητα 4.1 και του βάρους του μοντέλου 9 της ενότητας 4.5. Οι τιμές των βαρών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Σύγκριση βάρους

	Βάρος (tons)
Χαλύβδινο κάλυμμα	105.25
Μοντέλο με σταθμίδες	84.93
Μοντέλο 9 κεφ. 4.5 (Τελική Σχεδίαση)	67.06

Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 5.3, υπολογίζεται πως το βάρος του μοντέλου της ενότητας 4.1 και του μοντέλου 9 της ενότητας 3.5 αποτελούν αντίστοιχα το 80.74 % και 63.71 % του βάρους του χαλύβδινου καλύμματος. Συνεπώς, συμπεραίνεται ότι αξιοσημείωτη μείωση βάρους σημειώνεται μόνο στο μοντέλο 9 της ενότητας 4.5 και συνεπώς, παρά την αποδεκτή μηχανική συμπεριφορά του, το μοντέλο της ενότητας 4.1 δεν οδηγεί σε συμφέρουσα επιλογή.

5.3 Σύγκριση κόστους

Όπως έχει γίνει πλέον σαφές στα διάφορα στάδια της διπλωματικής εργασίας, το τελικό κόστος είναι βασικό κριτήριο σύμφωνα με το οποίο συμπεραίνεται αν η σχεδίαση ενός καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά είναι συμφέρουσα σε σχέση με την επιλογή ενός συμβατικού καλύμματος. Συγκεκριμένα, απαιτείται μελέτη για το κατά πόσο είναι

οικονομικά συμφέρουσα η σχεδίαση αυτή δεδομένης της μείωσης του βάρους, η οποία μελετήθηκε στην ενότητα 5.2.

Αναμενόμενη είναι η αύξηση του τελικού κόστους του καλύμματος από σύνθετα υλικά καθώς κατά κανόνα οι κατασκευές από σύνθετα υλικά συνοδεύονται από αυξημένο αρχικό κόστος πρώτης ύλης, αλλά και κατασκευαστικό κόστος καθώς περιλαμβάνει διαδικασία κατασκευής αυξημένης πολυπλοκότητας σε σχέση με τις κατασκευές από χάλυβα.

Στο στάδιο αυτό απαραίτητη είναι η γνώση του κόστους του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους αναφοράς. Καθώς δεν είναι διαθέσιμη η συγκεκριμένη πληροφορία απαιτείται προσεγγιστικός υπολογισμός του κόστους. Η διαδικασία του υπολογισμού που ακολουθήθηκε βασίζεται στην δημοσίευση (Li et al, 2012) και είναι η ακόλουθη. Αρχικά, υπολογίζεται το κόστος της συνολικής ποσότητας του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε. Μια αντιπροσωπευτική τιμή ελάσματος χάλυβα μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι 700 €/ton. Το συνολικό βάρος του καλύμματος υπολογίστηκε ίσο με 105.25 τόνους και συνεπώς το κόστος του χάλυβα υπολογίζεται ίσο με 73,675 €. Στην συνέχεια, υπολογίζεται το συνολικό κόστος μέσω ενός συντελεστή, ο οποίος αντιστοιχεί στο ποσοστό του κόστους χάλυβα επί του συνολικού κόστους. Η τιμή του συντελεστή επιλέγεται, σύμφωνα με τη δημοσίευση (Li et al, 2012), ίση με 0.43 και συνεπώς το συνολικό κόστος του χαλύβδινου καλύμματος υπολογίζεται ίσο με 171,1337 €.

Παρόμοια διαδικασία υπολογισμού ακολουθείται και κατά την εκτίμηση του κόστους του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά που σχεδιάστηκε. Βέβαια, στην συγκεκριμένη περίπτωση ο υπολογισμός του κόστους του υλικού είναι πιο περίπλοκος καθώς το σύνθετο υλικό αποτελείται από τη σύνθεση ινών και ρητίνης σε συγκεκριμένη αναλογία. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ως επιπλέον υλικό ο αφρός PVC, το κόστος του οποίου οφείλει να συνυπολογιστεί. Οι μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να κατασκευαστεί κάποιο αντικείμενο από σύνθετα υλικά είναι πολλές. Η πιο απλή, συνηθισμένη και παράλληλα οικονομική μέθοδος, καθώς περιλαμβάνει μικρό αριθμό εργαλείων και αναλωσίμων, είναι η επίστρωση με το χέρι (hand lay-up method) και συνεπώς επιλέγεται για την συγκεκριμένη μελέτη. Σύμφωνα με τη δημοσίευση (Haffner, 2002), αναφερόμενη στη μέθοδο hand lay-up, το ποσοστό του κόστους των υλικών επί του συνολικού κόστους της κατασκευής ισούται με 31%. Με δεδομένο το ποσοστό αυτό απομένει η εκτίμηση του κόστους των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν. Οι τιμές ανά βάρος των ινών γυαλιού και της εποξικής ρητίνης λήφθηκαν σύμφωνα με πρόσφατες ενδεικτικές τιμές της ελληνικής αγοράς, προδιαγράφοντας 8000 € ανά τόνο για τα υφάσματα με ίνες γυαλιού και 2800 € ανά τόνο για την εποξική ρητίνη. Το κόστος του σύνθετου υλικού προκύπτει από το άθροισμα του κόστους των ινών και του κόστους της ρητίνης. Για τον υπολογισμό των κοστών αυτών απαιτείται η γνώση των αντίστοιχων βαρών τους. Η διαδικασία υπολογισμού των βαρών αυτών είναι η ακόλουθη.

Αρχικά, το συνολικό βάρος του σύνθετου υλικού (χωρίς το βάρος του αφρού PVC) προκύπτει βάσει των υπολογισμών βάρους του κεφαλαίου 3.5 ίση με 63.29 τόνους. Με γνωστή την πυκνότητα του υλικού προκύπτει όγκος σύνθετου υλικού ίσος με 32.23 m³ και με κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες V_f ίση με 0.6 προκύπτει όγκος ινών 19.34 m³ και όγκος ρητίνης 12.89 m³. Από τις ιδιότητες των υλικών που εισήχθησαν στα μοντέλα του ANSYS, λαμβάνονται πυκνότητα ινών και ρητίνης ίσες με 2.5 ton/m³ και 1.16 ton/m³ για τις ίνες και για την ρητίνη

αντίστοιχα. Βάσει των όγκων και των πυκνοτήτων αυτών προκύπτει το βάρος των ινών και της ρητίνης που ισούνται με 48.34 και 14.95 τόνοι αντίστοιχα.

Μία αντιπροσωπευτική τιμή ανά τετραγωνικό μέτρο αφρού PVC με πάχος 120 mm μπορεί να θεωρηθεί η τιμή 240 €/m², σύμφωνα πάλι με ενδεικτικές τιμές της ελληνικής αγοράς. Οι επιθυμητές διαστάσεις του αφρού PVC ισούνται με τις συνολικές διαστάσεις του καλύμματος. Συνυπολογίζοντας τον συντελεστή 0.31, όπως αυτό περιεγράφηκε προηγουμένως, η εκτίμησης του κόστους του καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά που σχεδιάστηκε παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.4.

Πίνακας 4.4: Κόστη υλικών

Κόστος υφάσματος με ίνες γυαλιού (€)	386,709
Κόστος εποξικής ρητίνης (€)	41,868
Κόστος PVC (€)	94,149
Συνολικό κόστος σύνθετου υλικού (€)	522,726
Συνολικό Κόστος (€)	1,686,212

Επίσης, εκτίμηση κόστους της τελικής σχεδίασης του καλύμματος στομίου κύτους πραγματοποιήθηκε και από κατασκευαστή σύνθετων υλικών, δίνοντας εκτιμώμενη τιμή 2.2 εκατομμυρίων €. Ο μέσος όρος την εκτιμώμενης τιμής από τον κατασκευαστή και της τιμής της παραπάνω μεθόδου είναι 1.94 εκατομμύρια € και αντιστοιχεί σε αύξηση 1034 % σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή κόστους του χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους. Είναι εμφανές πως το κόστος της αρχικής επένδυσης είναι ιδιαίτερα αυξημένο, το οποίο όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως είναι αναμενόμενο. Το γεγονός αυτό όμως δεν καθιστά αυτόματα απαγορευτική την επιλογή των σύνθετων υλικών, καθώς σημασία έχει το κόστος στο σύνολο της ζωής του καλύμματος. Συγκεκριμένα, η μείωση του βάρους του καλύμματος προσφέρει την δυνατότητα αύξησης της μεταφορικής ικανότητας του πλοίου και μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, τα οποία επιφέρουν κέρδη για το πλοίο σε βάθος χρόνου. Προσεγγιστικά υπολογίζεται πως η αντικατάσταση των 5 συμβατικών καλυμμάτων του πλοίου που μελετήθηκε με καλύμματα από σύνθετα υλικά της μορφής του μοντέλου 9, δηλαδή της τελικής σχεδίασης, οδηγεί σε μείωση του βάρους και συνεπώς σε αύξηση μεταφορική ικανότητας ίση με 320 τόνους. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί η αισθητή μείωση του κόστους συντήρησης και επισκευής του καλύμματος καθώς τα σύνθετα υλικά δεν επηρεάζονται από διάβρωση και είναι ανθεκτικότερα σε φθορά σε σχέση με τον χάλυβα. Όλα τα στοιχεία αυτά αναδεικνύουν την ανάγκη εκτίμησης του κόστους στον κύκλο ζωής του καλύμματος για να αποφανθεί είναι συμφέρουσα η επιλογή των σύνθετων υλικών για την κατασκευή καλυμμάτων στομίων κυτών.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία

6.1 Συμπεράσματα

Μετά το πέρας της μελέτης όλων των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύχθηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους τόσο μεταξύ τους, όσο και με μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές που προέκυψαν από την εφαρμογή των κανονισμών για το χαλύβδινο κάλυμμα στομίου κύτους των διαθέσιμων σχεδίων, εξήχθη μια τελική σχεδίαση καλύμματος από σύνθετα υλικά, η οποία ικανοποιούσε τις απαιτήσεις της αρχικής σχεδίασης όσον αφορά την ακαμψία, την αντοχή, την μείωση του βάρους και το επαγόμενο κόστος. Στο κεφάλαιο αυτό συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν κατά τη διάρκεια της εργασίας.

- Η επιλογή κατάλληλων οριακών συνθηκών κατά την εκπόνηση της στατικής ανάλυσης του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι κρίσιμης σημασίας για την επίτευξη αποτελεσμάτων που να προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Στα συγκεκριμένα μοντέλα, η χρήση οριακών συνθηκών με μορφή πακτώσεων στις τέσσερις πλευρές του καλύμματος αποδείχθηκε, βάσει των αποτελεσμάτων, ότι προσομοιάζει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική περίπτωση, σε αντίθεση με την χρήση οριακών συνθηκών με μορφή πακτώσεων στις ελεύθερες ακμές των τεσσάρων πλευρών, όπου παρουσιάζεται αισθητή απόκλιση.
- Η σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά με ενισχυτικά τύπου σταθμίδων σε δύο διευθύνσεις απαιτεί τοποθέτηση μεγάλου αριθμού ενισχυτικών και συνεπώς μικρής ισαπόστασης σε κάθε διεύθυνση έτσι ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής ακαμψία και να ικανοποιούνται τα κριτήρια αστοχίας που τέθηκαν. Συνεπώς, η σχεδίαση αυτή καταλήγει σε κατασκευή με ιδιαίτερα αυξημένο βάρος, δηλαδή μικρή μείωση βάρους σε σχέση με το αντίστοιχο χαλύβδινο κάλυμμα, έτσι ώστε τελικά να μην είναι συμφέρουσα η επιλογή αυτή.
- Η σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά με ενισχυτικά τύπου καπέλου σε μία διεύθυνση αποδείχθηκε ότι οδηγεί σε αποδεκτές λύσεις τόσο από άποψη ακαμψίας και αντοχής, όσο και από άποψη μείωσης βάρους και εκτιμώμενου κόστους. Συμπληρωματικά, συμπεραίνεται ότι είναι επαρκής η τοποθέτηση ενισχυτικών, κατάλληλης μορφής, σε μία μόνο διεύθυνση μειώνοντας έτσι την πολυπλοκότητα της κατασκευής.

- Η τοπική ενίσχυση, με την μορφή επιπρόσθετου πάχους, περιοχών του μοντέλου που εμφανίζονται κρίσιμες τιμές τάσεων κατά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της στατικής ανάλυσης των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων, συμπεραίνεται ότι είναι αποτελεσματική καθώς οι τάσεις και το βέλος κάμψης εμφανίζονται μειωμένα μετά την τοποθέτηση της ενίσχυσης. Παρόλα αυτά, ιδιαίτερη προσοχή οφείλει να δοθεί στην απότομη αύξηση του τοπικού πάχους που οδηγεί αναπόφευκτα σε συγκεντρώσεις τάσεων στα σημεία αυτά με τελικά τα αντίθετα από τα επιθυμητά αποτελέσματα. Για την επίτευξη μεγάλης αύξησης του πάχους σε μία περιοχή αποδείχθηκε ότι είναι αποτελεσματική η σταδιακή αύξηση του πάχους με δύο βαθμίδες ενίσχυσης, έτσι ώστε να η μεταβολή του πάχους να πραγματοποιείται ομαλότερα.
- Συνολικά συμπεραίνεται ότι είναι δυνατή η επίτευξη επαρκούς ακαμψίας σε κατασκευές από σύνθετα υλικά, ισοδύναμα με κατασκευές από χάλυβα, παρά την θεωρητική μειωμένη ακαμψία των σύνθετων υλικών σε σχέση με τον χάλυβα.
- Επιτεύχθηκε σχεδίαση καλύμματος στομίου κύτους από σύνθετα υλικά με βάρος που υπολογίστηκε ίσο με το 63.71% του αντίστοιχου χαλύβδινου καλύμματος στομίου κύτους, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα την επιλογή αντικατάστασης των συμβατικών καλυμμάτων στομίων κυτών με καλύμματα από σύνθετα υλικά.
- Το εκτιμώμενο αρχικό κόστος της απόκτησης ενός καλύμματος από σύνθετα υλικά υπολογίστηκε 1034 % μεγαλύτερο από το κόστος απόκτησης ενός χαλύβδινου καλύμματος. Η τιμή αυτή υπολογίστηκε για το κάλυμμα που μελετήθηκε στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και πιθανώς διαφέρει ανάλογα με τις διαστάσεις και το μέγεθος του καλύμματος. Παρόλα αυτά αποτελεί μια αντιπροσωπευτική τιμή της διαφοράς του κόστους των δύο επιλογών. Το αυξημένο αρχικό κόστος αντισταβάζεται με το μειωμένο κόστος συντήρησης, επισκευής ή αντικατάστασης της κατασκευής από σύνθετα υλικά καθώς είναι ανθεκτικότερη σε φθορά και δεν επηρεάζεται από το διαβρωτικό περιβάλλον σε αντίθεση με την κατασκευή από χάλυβα.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική εργασία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις για μελλοντική εργασία. Οι προτάσεις αυτές αφορούν θέματα τα οποία δεν ήταν δυνατόν να καλυφθούν στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είτε επειδή υπερβαίνουν το βάθος μελέτης μια διπλωματικής εργασίας είτε λόγω έλλειψης χρήσιμων στοιχείων.

- Λεπτομερέστερη ανάλυση με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων και η μελέτη περισσότερων φαινομένων, όπως του λυγισμού.
- Επιλογή στρώσης σύνθετου υλικού με διαφορετική πλέξη υφάσματος ινών, όπως για παράδειγμα πλέξη Woven Rovin,
- Σχεδίαση και ανάπτυξη μοντέλων με την χρήση διαφορετικών σύνθετων υλικών καθώς στην συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά σύνθετο υλικό με ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη. Συγκεκριμένα, ενδιαφέρον εμφανίζει η μελέτη της σχεδίασης με σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα, καθώς διαθέτει βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, αλλά συνοδεύεται από υψηλότερο κόστος σε σχέση με το υλικό που χρησιμοποιήθηκε.
- Λεπτομερής μελέτη του κόστους της κατασκευής που θα λαμβάνει υπόψιν περισσότερες παραμέτρους όσον αφορά το κόστος στον κύκλο ζωής του καλύμματος, όπως τα κέρδη από τη μεταφορά περισσότερου φορτίου, το μειωμένο κόστος επισκευής ή αντικατάστασης τους κ.α.
- Μελέτη για το κατά πόσο είναι συμφέρουσα η αντικατάσταση διαφορετικών τύπων καλυμμάτων στομίων κυτών, όπου πιθανόν προκύπτουν επιπλέον φορτίσεις, όπως για παράδειγμα καλύμματα πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships).

Βιβλιογραφία

Δημοσιεύσεις και Βιβλία

- E-LASS Conference (2017). *DESIGN OF CAR DECKS WITH COMPOSITE PANELS INTRODUCED ON A 7000 CARS CARRIER*
- Haffner, Sascha M., (2002). *Cost Modeling and Design for Manufacturing Guidelines for Advanced Composite Fabrication (PhD Thesis). Massachusetts Institute of Technology (MIT).*
- Ragnar E. Hansen (2014). *GRP hatch covers for large seagoing ships*
- Tommy Hertzberg (2009). *LASS, Lightweight Construction Applications at Sea*
- Albert W. Horsmon, Jr. (1994). *Composite for Large Ships*
- Li, Jun, Wu, Nanhua, Tang, Youhong, Zhao, Chengbi, Li, Deyu, Lin, Wei, Liang, Fulin (2012). *Application of Composite Materials to Large Marine Hatch Cover, vols. 560e561. Advanced Materials Research*
- Erdogan Madenci, Ibrahim Guven (2015). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*
- P. D. Soden, M. J. Hintov & A. S. Kaddour (1998). *LAMINA PROPERTIES, LAY-UP CONFIGURATIONS AND LOADING CONDITIONS FOR A RANGE OF FIBRE-REINFORCED COMPOSITE LAMINATES*
- Basem E. Tawfik, Heba Leheta, Ahmed Elhewy, Tarek Elsayed (2017). *Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials*
- Tae-Sub Um, Myung-Il Roh (2015). *Optimal dimension design of a hatch cover for lightening a bulk carrier*
- Τσούβαλης, Ν. (1998). *Ανάλυση και Σχεδίαση από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ*

Ιστοσελίδες

- www.compositesworld.com
- rodne.no
- www.macgregor.com
- jloncomposite.en.made-in-china.com