



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Βελτιστοποίηση μικρού σκάφους από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων »

ΒΟΥΛΓΑΡΗΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

Επιβλέπων Καθηγητής : Δρ. Δημήτριος Δραγατογιάννης

Αθήνα 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

« Βελτιστοποίηση μικρού σκάφους από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων »

Συγγραφέας

Βούλαρης Γρηγόριος

Επιβλέπων Καθηγητής

Δρ. Δημήτριος Δραγατογιάννης

Ημερομηνία Εξέτασης

15/4/2024

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δημήτριος Αθ. Δραγατογιάννης

Εντεταλμένος διδάσκων

ΠΑ.Δ.Α.

Θεοδουλίδης Αλέξανδρος

Επίκουρος Καθηγητής

ΠΑ.Δ.Α.

Ιακωβίδης Ισίδωρος

Λέκτορας

ΠΑ.Δ.Α.

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας

Ο κάτωτι υπογεγραμμένος **Βούλαρης Γρηγόριος** του Γεωργίου, με αριθμό μητρώου 18393015 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι :

« Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια στην οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολο τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών, που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματος μου ».

Ο Δηλών/



Βούλαρης Γρηγόριος

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συνέλαβαν με τη βοήθεια τους για να πραγματοποιηθεί η παρούσα εργασία. Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την ψυχολογική υποστήριξη, καθώς και τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Δημήτριο Δραγατογιάννη για την πολύτιμη βοήθεια, γνώσεις και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *ANSYS* το οποίο διατέθηκε από την εταιρεία *DELTA-MPIS* (Τεχνολογικό Πάρκο Λεύκιππος, www.delta-ms.gr) την οποία και ευχαριστώ.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η αντοχή ενός μικρού σκάφους (<24m) από σύνθετα υλικά ακολουθώντας τους κανονισμούς του Νορβηγικού νηογνώμονα (*DNV*) και στη συνέχεια βελτιστοποιήθηκε η κατασκευή με τη χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων (*Finite Element Method*) με στόχο τη μείωση του βάρους της.

Αρχικά, έγινε μία εκτενής επισκόπηση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (*Finite Element Method*) και των συνθέτων υλικών, δίνοντας έμφαση σε αυτά που χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική μικρών σκαφών. Τα σύνθετα υλικά, τα οποία αναλύονται περαιτέρω είναι αυτά τα οποία στη συνέχεια που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της κατασκευής του σκάφους. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση του σκάφους, συνδυάζοντας το σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros 6* και το *ANSYS*. Αφού ολοκληρώθηκε η μοντελοποίηση, υπολογίστηκαν όλες οι προβλεπόμενες πιέσεις και ροπές, σύμφωνα με τους κανονισμούς του *DNV*. Οι πιέσεις αυτές εισήχθησαν στο *ANSYS*, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αντοχής του σκάφους. Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης αντοχής του σκάφους προτείνεται μια νέα διαστρωμάτωση της κατασκευής της γάστρας του σκάφους και προσθήκη κατάλληλων ενισχυτικών, έτσι ώστε να αυξηθεί η συνολική αντοχή του σκάφους, με παράλληλη μείωση του κόστους κατασκευής και του βάρους του.

Abstract

In this thesis the strength of a small vessel (<24m) made of composite materials was studied following the regulations of the Norwegian classification society (DNV) and then the construction was optimized using the Finite Element Method in order to reduce the weight of the vessel.

Initially, an extensive overview of the Finite Element Method and composite materials was given, with emphasis on those used in small boat building. The composite materials, which are further analyzed, are those which are then used to study the construction of the vessel. The modelling of the vessel was then carried out, combining the design program Rhinoceros 6 and ANSYS. This is, a complex process, quite time consuming, which requires high accuracy, as any error will bring discrepancies in the final results. After the modelling was completed, all predicted pressures and moments were calculated, in accordance with DNV regulations. These pressures were imported into ANSYS in order to carry out the strength check of the vessel. Finally, based on the results of the vessel strength study, a new layering of the hull structure and the addition of appropriate reinforcements is proposed in order to increase the overall strength of the vessel, while reducing its construction cost and weight.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Δήλωση Συγγραφέα Διπλωματικής Εργασίας.....	4
Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
<i>Abstract</i>	7
Λίστα Πινάκων.....	10
Λίστα Εικόνων.....	11
Λίστα Διαγραμμάτων.....	14
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	15
1.1 Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	15
1.2 Υπολογισμοί εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών.....	18
1.3 Βασικές κατηγορίες σύνθετων υλικών.....	19
1.3.1 Ινώδη σύνθετα υλικά.....	19
1.3.2 Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια.....	19
1.3.3 Πολύστρωτα σύνθετα υλικά.....	20
1.3 Ρητίνες.....	20
1.4 Ίνες Ενίσχυσης.....	20
1.4.1 Ίνες Υάλου.....	21
1.4.2 Ίνες άνθρακα και γραφίτη.....	23
1.4.3 Ίνες αραμιδίου.....	23
1.4 Κατασκευές τύπου <i>Sandwich</i>	23
1.5 Ενισχυτικά τύπου Π « <i>Top Hat</i> ».....	24
1.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Σύνθετων Υλικών.....	24
Κεφάλαιο 2 : Σχεδίαση και Μελέτη Αντοχής της κατασκευής.....	26
2.1 Σχεδίαση της κατασκευής.....	26
2.2 Μελέτη της κατασκευής στο πρόγραμμα <i>ANSYS</i>	27
Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή Κανονισμών Νορβηγικού Νηογώμονα.....	37
3.1 Κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους.....	37
3.2 Συντελεστής κυματισμού C_w	37
3.3 Υπολογισμός επιταχύνσεων σκάφους.....	38
3.4 Υπολογισμός πιέσεων στον πυθμένα του σκάφους.....	43
3.5 Υπολογισμός πιέσεων πλευράς.....	45

3.6 Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης	46
3.7 Υπολογισμός των φορτίσεων των <i>girders</i>	48
3.7.1 Crest Landing	48
3.7.2 Hollow Landing.....	50
3.7.3 Υπολογισμός ροπών κάμψης Hogging και Sagging.....	51
Κεφάλαιο 4: Μελέτη Αντοχής αρχικού σκάφους.....	53
4.1 Ορισμός των πιέσεων στην κατασκευή.....	53
4.2 Ορισμός συνοριακών συνθηκών (<i>Boundary conditions</i>)	60
4.3 Αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων.....	61
4.4 Κριτήρια αστοχίας (<i>Failure Criteria</i>)	69
Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση της κατασκευής	72
5.1 Περιγραφή της διαδικασίας.....	72
5.2 Επιτρεπόμενα Όρια τάσεων	72
5.3 Βελτιστοποίηση ως προς τις εγκάρσιες ενισχύσεις.....	73
5.3.1 Αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων μετά το πρώτο βήμα της βελτιστοποίησης	77
5.3.2 Έλεγχος επιτρεπόμενων όριων τάσεων	87
5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την βελτιστοποίηση	88
5.4 Βελτιστοποίηση ως προς την μείωση βάρους και του κόστους κατασκευής.....	91
5.4.1 Αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων μετά το δεύτερο βήμα της βελτιστοποίησης.....	94
5.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την βελτιστοποίηση	103
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις	105
Βιβλιογραφικές Αναφορές	108
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	110

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες σύνθετων υλικών [4]	27
Πίνακας 2: Πάχος ινών του διάμηκες ενισχυτικού	28
Πίνακας 3: Τελικό πάχος κορμού του διάμηκες ενισχυτικού	29
Πίνακας 4: Τελικό πάχος πέλματος του διάμηκες ενισχυτικού	29
Πίνακας 5: Πάχος ινών γάστρας	30
Πίνακας 6: Τελικό πάχος πλευρικών τοιχωμάτων της γάστρας (<i>Side Hull</i>)	30
Πίνακας 7: Τελικό πάχος των τοιχωμάτων του πυθμένα και του <i>chain</i>	31
Πίνακας 8: Τελικό πάχος τοιχωμάτων του καθρέπτη της πρύμνης.....	32
Πίνακας 9: Πάχος ινών καταστρώματος	33
Πίνακας 10: Τελικό πάχος καταστρώματος	34
Πίνακας 11: Πάχος ινών εγκάρσιων φρακτών	35
Πίνακας 12: Τελικό πάχος εγκάρσιων φρακτών	35
Πίνακας 13: Κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους.....	37
Πίνακας 14: Μείωση συντελεστή κυματισμού C_w [6]	38
Πίνακας 15: Συντελεστής k_h τύπου γάστρας [6]	40
Πίνακας 16: Υπολογισμός συντελεστή $CHSLC$ [6]	41
Πίνακας 17: Αποτελέσματα επιταχύνσεων a_n [6].....	42
Πίνακας 18: Αποτελέσματα επιταχύνσεων a_c [6]	43
Πίνακας 19: Πιέσεις στον πυθμένα του πλοίου (<i>Slamming</i>) [6].....	44
Πίνακας 20: Συντελεστής έντασης φορτίου a [6]	47
Πίνακας 21: Υδροστατική πίεση στον πυθμένα του πλοίου [6].....	48
Πίνακας 22: Κατανομή καμπτικής ροπής κατά μήκος του πλοίου [6]	52
Πίνακας 23: Πάχος ινών του εγκάρσιου ενισχυτικού	76
Πίνακας 24: Τελικό πάχος κορμού του εγκάρσιου ενισχυτικού	76
Πίνακας 25: Τελικό πάχος πέλματος του εγκάρσιου ενισχυτικού	76
Πίνακας 26: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων	89
Πίνακας 27: Τιμές υλικών	91
Πίνακας 28 Τελικό πάχος τοιχωμάτων πυθμένα και καθρέπτη πρύμνης.....	91
Πίνακας 29: Τελικό πάχος των τοιχωμάτων του <i>chain</i>	92
Πίνακας 30: Τελικό πάχος πλευρικών τοιχωμάτων της γάστρας (<i>Side Hull</i>).....	92
Πίνακας 31: Διαφοροποιήσεις στο πάχος στρώσεων της γάστρας	92
Πίνακας 32: Συνολικό κόστος σκάφους.....	93
Πίνακας 33: Συνολικό βάρος σκάφους	93
Πίνακας 34: Ποσοστά μείωσης τιμών	93
Πίνακας 35: Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	103

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Γραμμικό στοιχείο με 6 βαθμούς ελευθερίας [2].....	16
Εικόνα 2: Βασικά στοιχεία δύο διαστάσεων [2]	16
Εικόνα 3: 2D στοιχεία υψηλής τάξης με κόμβους στις κορυφές, στα μέσα των ακμών και στο εσωτερικό τους [2]	17
Εικόνα 4: 3D στοιχεία απλής και υψηλότερης τάξης [2]	17
Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων ειδών σύνθετων υλικών [6]	19
Εικόνα 6: <i>Chopped Strand Mat (CSM)</i> [10].....	21
Εικόνα 7: Υαλοϋφασμα (<i>WR</i>) [11].....	22
Εικόνα 8: Ύφασμα πυκνής πλέξης [12]	22
Εικόνα 9: <i>Unidirectional Rovings (UD)</i> [13].....	22
Εικόνα 10: Κατασκευή <i>Sandwich</i> [14].....	23
Εικόνα 11: Ενισχυτικό τύπου Π [6].....	24
Εικόνα 12: Πρόοψη σκάφους (<i>Body Plan</i>).....	26
Εικόνα 13: Πλάγια όψη σκάφους (<i>Sheer Plan</i>).....	26
Εικόνα 14: Κάτοψη σκάφους (<i>Breadth Plan</i>)	26
Εικόνα 15: Τελική μορφή σκάφους στο <i>Rhinoceros 6</i> [15].....	27
Εικόνα 16: Διάμηκες ενισχυτικό	30
Εικόνα 17: Πριν και μετά την μοντελοποίηση	32
Εικόνα 18: Μοντελοποιημένη πλώρη του σκάφους.....	33
Εικόνα 19: Μοντελοποιημένη πρύμνη του σκάφους	33
Εικόνα 20: Μοντελοποιημένο κατάστρωμα του σκάφους.....	34
Εικόνα 21: Μοντελοποιημένες εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.....	35
Εικόνα 22: Διάμηκες ενισχυτικό μαζί με τον αφρό <i>PVC</i>	36
Εικόνα 23: <i>Mesh quality</i>	36
Εικόνα 24: Τελικό μοντέλο του σκάφους.....	36
Εικόνα 25: Ελάχιστα σημαντικά ύψη κύματος H_s (m) [11]	39
Εικόνα 26: Γωνία ανύψωσης πυθμένα β_{cg} [11].....	43
Εικόνα 27: <i>Flare angle a</i> [11]	45
Εικόνα 28: <i>Water plane angle γ</i> [11].....	46
Εικόνα 29: Επιφάνεια <i>AR (Hogging)</i> [11].....	49
Εικόνα 30: Πλάτος b_s της επιφάνειας <i>AR (Hogging)</i> [11].....	49
Εικόνα 31: Επιφάνεια <i>AR (Sagging)</i> [11].....	50
Εικόνα 32: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 10% <i>Long Position</i>	53
Εικόνα 33: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 20% <i>Long Position</i>	53
Εικόνα 34: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 30% <i>Long Position</i>	54
Εικόνα 35: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 40% <i>Long Position</i>	54
Εικόνα 36: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 50% <i>Long Position</i>	54
Εικόνα 37: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 60% <i>Long Position</i>	55
Εικόνα 38: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 70% <i>Long Position</i>	55
Εικόνα 39: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 80% <i>Long Position</i>	55
Εικόνα 40: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 90% <i>Long Position</i>	56

Εικόνα 41: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 100% <i>Long Position</i>	56
Εικόνα 42: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 10% <i>Long Position</i>	56
Εικόνα 43: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 20% <i>Long Position</i>	57
Εικόνα 44: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 30% <i>Long Position</i>	57
Εικόνα 45: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 40% <i>Long Position</i>	57
Εικόνα 46: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 50% <i>Long Position</i>	58
Εικόνα 47: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 60% <i>Long Position</i>	58
Εικόνα 48: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 70% <i>Long Position</i>	58
Εικόνα 49: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 80% <i>Long Position</i>	59
Εικόνα 50: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 90% <i>Long Position</i>	59
Εικόνα 51: Ορισμός πίεσης <i>side</i> στο 100% <i>Long Position</i>	59
Εικόνα 52: Κανονισμός οριακών συνθηκών (<i>DNV</i>) [17].....	60
Εικόνα 53: Ορισμός των οριακών συνθηκών της κατασκευής.....	60
Εικόνα 54: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Front view</i>).....	61
Εικόνα 55: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Top view</i>).....	62
Εικόνα 56: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Bottom view</i>).....	62
Εικόνα 57: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Front view</i>).....	62
Εικόνα 58: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Top view</i>).....	63
Εικόνα 59: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Bottom view</i>).....	63
Εικόνα 60: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Front view</i>).....	63
Εικόνα 61: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Top view</i>).....	64
Εικόνα 62: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Bottom view</i>).....	64
Εικόνα 63: Διατμητική τάση (<i>Front view</i>).....	64
Εικόνα 64: Διατμητική τάση (<i>Top view</i>).....	65
Εικόνα 65: Διατμητική τάση (<i>Bottom view</i>).....	65
Εικόνα 66: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>front view</i>).....	65
Εικόνα 67: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>top view</i>).....	66
Εικόνα 68: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>bottom view</i>).....	66
Εικόνα 69: Μέση κύρια τάση (<i>front view</i>).....	66
Εικόνα 70: Μέση κύρια τάση (<i>top view</i>).....	67
Εικόνα 71: Μέση κύρια τάση (<i>bottom view</i>).....	67
Εικόνα 72: Μέγιστη κύρια τάση (<i>front view</i>).....	67
Εικόνα 73: Μέγιστη κύρια τάση (<i>Top view</i>).....	68
Εικόνα 74: Μέγιστη κύρια τάση (<i>Bottom view</i>).....	68
Εικόνα 75: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>front view</i>).....	68
Εικόνα 76: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>top view</i>).....	69
Εικόνα 77: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>Bottom view</i>).....	69
Εικόνα 78: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>front view</i>).....	69
Εικόνα 79: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>top view</i>).....	70
Εικόνα 80: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>Bottom view</i>).....	70
Εικόνα 81: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> » (<i>front view</i>).....	70
Εικόνα 82: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> » (<i>top view</i>).....	71
Εικόνα 83: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> » (<i>bottom view</i>).....	71
Εικόνα 84: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> ».....	71

Εικόνα 85: Ορθή τάση σχ στην στρώση BD 0/90.....	73
Εικόνα 86: Εικόνα 85: Ορθή τάση συ στην στρώση BD 0/90	73
Εικόνα 87: Εγκάρσια ενισχυτικά του σκάφους	74
Εικόνα 88: Εγκάρσια ενισχυτικά καταστρώματος.....	74
Εικόνα 89: Συνολικές εγκάρσιες ενισχύσεις	75
Εικόνα 90: Εγκάρσιο ενισχυτικό μαζί με τον αφρό (PVC Foam).....	75
Εικόνα 91: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Front view</i>).....	77
Εικόνα 92: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Top view</i>).....	77
Εικόνα 93: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Bottom view</i>)	77
Εικόνα 94: : Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Front view</i>).....	78
Εικόνα 95: : Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Front view</i>).....	78
Εικόνα 96: : Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Top view</i>)	78
Εικόνα 97: : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Bot view</i>).....	79
Εικόνα 98: : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Front view</i>).....	79
Εικόνα 99: : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Top view</i>).....	79
Εικόνα 100: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Bottom view</i>).....	80
Εικόνα 101: Διατμητική τάση (<i>Front view</i>)	80
Εικόνα 102: Διατμητική τάση (<i>Top view</i>)	80
Εικόνα 103: Διατμητική τάση (<i>Bottom view</i>).....	81
Εικόνα 104: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>front view</i>).....	81
Εικόνα 105: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>top view</i>)	81
Εικόνα 106: Μέση κύρια τάση (<i>front view</i>)	82
Εικόνα 107: Μέση κύρια τάση (<i>top view</i>)	82
Εικόνα 108: Μέση κύρια τάση (<i>bottom view</i>)	82
Εικόνα 109: Μέγιστη κύρια τάση (<i>front view</i>).....	83
Εικόνα 110: Μέγιστη κύρια τάση (<i>top view</i>)	83
Εικόνα 111: Μέγιστη κύρια τάση (<i>bottom view</i>)	83
Εικόνα 112: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>front view</i>)	84
Εικόνα 113: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>Top view</i>).....	84
Εικόνα 114: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>Bottom view</i>).....	84
Εικόνα 115: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>Front view</i>).....	85
Εικόνα 116: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>Top view</i>)	85
Εικόνα 117: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>Bottom view</i>).....	85
Εικόνα 118: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> » (<i>Front view</i>)	86
Εικόνα 119: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> » (<i>bottom view</i>)	86
Εικόνα 120: Αποτελέσματα κριτηρίου « <i>Tsai-Wu</i> » (<i>Top view</i>)	86
Εικόνα 121: Ορθή τάση σχ στην στρώση BD 0/90.....	87
Εικόνα 122: Ορθή τάση συ στην στρώση BD 0/90.....	87
Εικόνα 123: Παράδειγμα στοιχείων στα οποία τα αποτελέσματα αγνοούνται.....	88
Εικόνα 124: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Front view</i>).....	94
Εικόνα 125: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Top view</i>).....	94
Εικόνα 126: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (<i>Bottom view</i>)	94
Εικόνα 127: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Front view</i>).....	95
Εικόνα 128: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Top view</i>).....	95

Εικόνα 129: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (<i>Bottom view</i>)	95
Εικόνα 130: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Front view</i>)	96
Εικόνα 131: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Top view</i>)	96
Εικόνα 132: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (<i>Bottom view</i>).....	96
Εικόνα 133: Διατμητική τάση (<i>Front view</i>)	97
Εικόνα 134: Διατμητική τάση (<i>Top view</i>)	97
Εικόνα 135: Διατμητική τάση <i>Bottom view</i>)	97
Εικόνα 136: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>front view</i>).....	98
Εικόνα 137: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>top view</i>)	98
Εικόνα 138: Ελάχιστη κύρια τάση (<i>bottom view</i>)	98
Εικόνα 139: Μέση κύρια τάση (<i>front view</i>)	99
Εικόνα 140: Μέση κύρια τάση (<i>top view</i>)	99
Εικόνα 141: Μέση κύρια τάση (<i>bottom view</i>).....	99
Εικόνα 142: Μέγιστη κύρια τάση (<i>front view</i>)	100
Εικόνα 143: Μέγιστη κύρια τάση (<i>top view</i>)	100
Εικόνα 144: Μέγιστη κύρια τάση (<i>bottom view</i>)	100
Εικόνα 145:Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>front view</i>)	101
Εικόνα 146:Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>Top view</i>).....	101
Εικόνα 147:Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (<i>Bottom view</i>	101
Εικόνα 148: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>top view</i>).....	102
Εικόνα 149:Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (<i>Bottom view</i>).....	102
Εικόνα 150:Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-wu» (<i>Bottom view</i>)	102
Εικόνα 151:Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-wu» (<i>Top view</i>).....	103
Εικόνα 154: Παραμορφώσεις του σκάφους σε 30% πύκνωση	111
Εικόνα 155: Παραμορφώσεις του σκάφους σε 50% πύκνωση	111

Λίστα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Μεταβολή συντελεστή C_w [6]	38
Διάγραμμα 2: Μεταβολή συντελεστή k_n [6]	42
Διάγραμμα 3: Διακύμανση συντελεστή διαμήκους κατανομής [6]	44
Διάγραμμα 4:Μεταβολή συντελεστή κατανομής πίεσης [6].....	47
Διάγραμμα 5: Μεταβολή πλοίου Συντελεστή k_m κατά μήκους του [6]	52
Διάγραμμα 6: Κριτήριο Tsai-Wu πριν την βελτιστοποίηση	90
Διάγραμμα 7: Κριτήριο Tsai- wu μετά την βελτιστοποίηση.....	90
Διάγραμμα 8: Κριτήριο Tsai- wu στο τελικό μοντέλο	104
Διάγραμμα 9: Διάγραμμα σύγκλισης	112

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Στον τομέα της ναυπηγικής βιομηχανίας, η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (*FEM*) έχει φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται και εξετάζονται οι ναυπηγικές κατασκευές. Οι μηχανικοί και κατά συνέπεια οι ναυπηγοί μπορούν να αποκτήσουν απaráμιλλη εικόνα της πολύπλοκης συμπεριφοράς των πλοίων, των πλωτών κατασκευών αλλά και των θαλάσσιων εξαρτημάτων με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Η *FEM* διασφαλίζει την ασφάλεια και την ακεραιότητα των θαλάσσιων περιουσιακών στοιχείων με τη διακριτοποίηση αυτών των πολύπλοκων κατασκευών σε πεπερασμένα στοιχεία και την υποβολή τους σε ακριβείς μαθηματικές προσομοιώσεις. Ανοίγει επίσης το δρόμο για πρωτοποριακούς σχεδιασμούς που διευρύνουν τα όρια της απόδοσης και της αποδοτικότητας στη θάλασσα [1], [2].

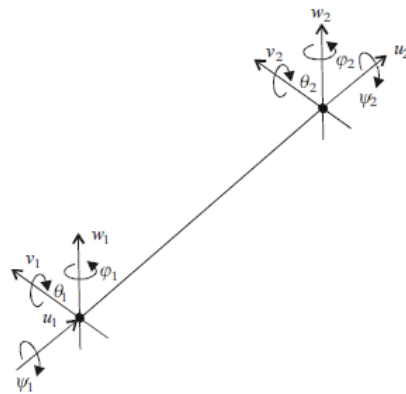
Η κατασκευή μικρών σκαφών αλλάζει ριζικά λόγω των συνθέτων υλικών, τα οποία αποτελούνται από πολυάριθμα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων ινών και ρητινών. Τα σύνθετα υλικά έχουν ανοίξει νέες δυνατότητες για τους ναυπηγούς που επιθυμούν να διευρύνουν τα όρια των επιδόσεων, της αποδοτικότητας και της βιωσιμότητας, συνδυάζοντας την αντοχή, την ανθεκτικότητα και τις ελαφριές ιδιότητες σε ένα ενιαίο, αρμονικό μείγμα. Τα σύνθετα υλικά αποτελούν τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης ναυπηγικής σε μια εποχή όπου η τεχνική καινοτομία είναι υψίστης σημασίας [1], [2].

Οι ναυπηγοί χρησιμοποιήσουν τη *FEM* για να αναλύσουν και να βελτιστοποιήσουν οποιαδήποτε κατασκευή. Τέλος, η *FEM* δίνει τη δυνατότητα στους σχεδιαστές να αξιοποιήσουν στο έπακρο τις ιδιότητες των συνθέτων υλικών μοντελοποιώντας τις διαφορετικές φάσεις τους, εξασφαλίζοντας ότι οι σύνθετες κατασκευές όχι μόνο πληρούν αλλά και υπερβαίνουν τις αυστηρές απαιτήσεις των κανονισμών που ακολουθούν τις αρχές της μηχανικής. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται μέσα από σύγχρονα προγράμματα, όπως το *ANSYS*, με τη χρήση του οποίου εκπονείται το πειραματικό σκέλος της παρούσας μελέτης. Το πρόγραμμα *ANSYS* αποτελεί ένα σύγχρονο περιβάλλον μελέτης, το οποίο έχει καθιερωθεί ως πυλώνας της σύγχρονης μηχανικής, επιτρέποντας την ανάπτυξη βελτιστοποιημένων κατασκευών που είναι αποτελεσματικότερες και αποδοτικότερες, ενώ παράλληλα επιταχύνει σε μεγάλο βαθμό τη διαδικασία ανάπτυξης [1], [2], [3].

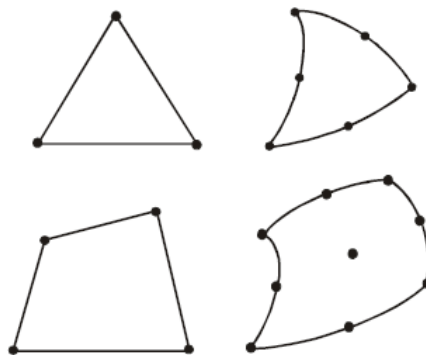
1.1 Η Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία αριθμητική μέθοδο της μηχανικής, επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, με μεγάλο εύρος εφαρμογών. Η διακριτοποίηση αποτελεί τη βάση της μεθόδου, μια διαδικασία κατά την οποία μια κατασκευή υποδιαιρείται σε επιμέρους τμήματα που ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (*elements*) και τα οποία συνδέονται σε κοινά τους σημεία τα οποία ονομάζονται κόμβοι (*nodes*) [2].

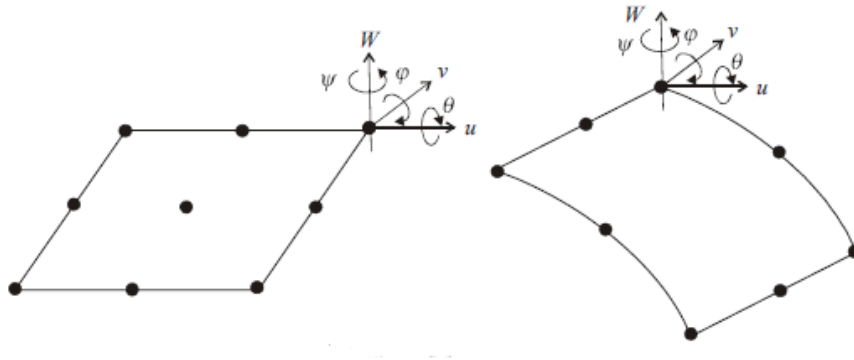
Το πρώτο βήμα εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων περιλαμβάνει τη διαμέριση του σώματος σε ένα σύνολο πεπερασμένων στοιχείων με την επιλογή του κατάλληλου είδους στοιχείων για την ακριβέστερη προσέγγιση. Σε περιοχές απότομης αλλαγής, όπως και σε περιοχές με μεταβαλλόμενη γεωμετρία, επιλέγονται στοιχεία μικρού μεγέθους και ταυτόχρονα υψηλότερης τάξης. Σε περιοχές όπου η γεωμετρία είναι σταθερή χρησιμοποιούνται στοιχεία μεγαλύτερου μεγέθους. Η διακριτοποίηση αποτελεί μία διαδικασία η οποία πραγματοποιείται αυτοματοποιημένα σε εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως το *ANSYS*. Σε αυτό το σημείο θα παρουσιαστούν οι βασικές μορφές των στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Μια απλή μορφή γραμμικού στοιχείου παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, το οποίο έχει 2 κόμβους με συνολικά 6 βαθμούς ελευθερίας [2].



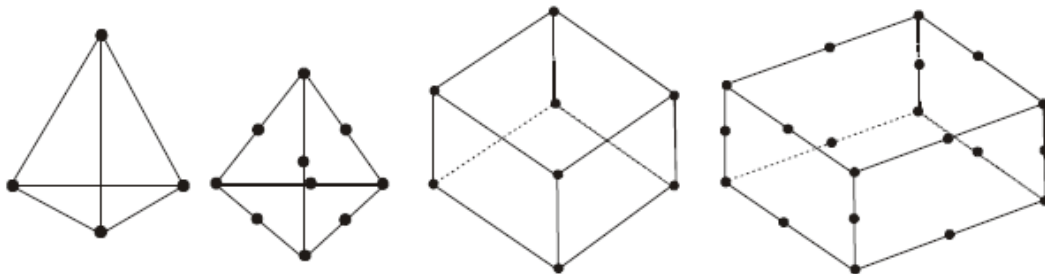
Εικόνα 1: Γραμμικό στοιχείο με 6 βαθμούς ελευθερίας [2]



Εικόνα 2: Βασικά στοιχεία δύο διαστάσεων [2]



Εικόνα 3: 2D στοιχεία υψηλής τάξης με κόμβους στις κορυφές, στα μέσα των ακμών και στο εσωτερικό τους [2]



Εικόνα 4: 3D στοιχεία απλής και υψηλότερης τάξης [2]

Η συνάρτηση μετατόπισης για ένα δισδιάστατο στοιχείο εξαρτάται από τις συντεταγμένες στο επίπεδό του, όπως το επίπεδο $x-y$. Στην περίπτωση του δισδιάστατου ζητήματος, οι συναρτήσεις ορίζονται ως προς τους άγνωστους των κόμβων (μια συνιστώσα x και μια συνιστώσα y). Κάθε μία από αυτές έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιεί επανειλημμένα την ίδια γενική συνάρτηση μετατόπισης. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της μετατόπισης κατά μήκος του σώματος, η προσέγγιση πραγματοποιείται με τη χρήση ενός διακριτού μοντέλου που αποτελείται από έναν αριθμό συνεχών συναρτήσεων, που ορίζονται εντός κάθε πεπερασμένης περιοχής ή πεπερασμένου στοιχείου [2], [3].

Η εξαγωγή του μητρώου ακαμψίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τις παρακάτω τρεις μεθόδους [2]:

- Μέθοδος ισορροπίας (*Direct equilibrium method*)
- Μέθοδοι ενέργειας (*Work or Energy method*)
- Μέθοδος σταθμισμένων υπολοίπων (*Method of weighted residuals*)

Σε αυτό το σημείο διατυπώνονται οι συνολικές εξισώσεις ισορροπίας των κόμβων χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ισορροπίας των επιμέρους στοιχείων που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Οι εξισώσεις για ολόκληρη τη κατασκευή μπορούν να προκύψουν χρησιμοποιώντας τη μέθοδο, γνωστή ως άμεση προσέγγιση δυσκαμψίας, η οποία έχει ως βάση την ισορροπία των δυνάμεων που ασκούνται στους κόμβους. [2].

Η τελική εξίσωση, εκφρασμένη σε μορφή πινάκων δίνεται παρακάτω:

$$\{F\} = \{K\} * \{d\} \quad (1)$$

Όπου:

$\{F\}$: είναι το διάνυσμα των συνολικών δυνάμεων που ασκούνται στους κόμβους

$\{K\}$: είναι ο πίνακας δυσκαμψίας της συνολικής κατασκευής

$\{d\}$: είναι το διάνυσμα των συνολικών μετατοπίσεων των κόμβων

.

Σε αυτό το σημείο πραγματοποιούνται οι κατάλληλες τροποποιήσεις, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη οι οριακές συνθήκες.

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \cdots & K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_{n3} \end{pmatrix} \quad (2)$$

Όπου:

n: είναι ο συνολικός αριθμός των βαθμών ελευθερίας της κατασκευής [2].

Για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων χρησιμοποιούνται οι τιμές των κομβικών μετατοπίσεων που προκύπτουν από την επίλυση του αλγεβρικού συστήματος (4).

1.2 Υπολογισμοί εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών

Γνωρίζοντας τις κομβικές μετατοπίσεις μπορούμε να βρούμε τις μετατοπίσεις σε κάθε σημείο ενός στοιχείου της κατασκευής. Κατά συνέπεια εύκολα υπολογίζονται και οι παραμορφώσεις και οι τάσεις. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι το μοντέλο των μετατοπίσεων εξασφαλίζει τη συνέχεια των μετατοπίσεων από στοιχείο σε στοιχείο, όμως δεν εξασφαλίζει τη συνέχεια των τάσεων. Άρα οι τάσεις που προκύπτουν από τις παραμορφώσεις, δηλαδή από την παραγωγή των μετατοπίσεων χρειάζονται κάποια εξομάλυνση προκειμένου να προσδιορισθεί ένα ομαλό εντατικό πεδίο της κατασκευής [4], [5].

Ως σύνθετο υλικό (*composite material*) αναφέρεται κάθε υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά. Συγκεκριμένα, πρέπει τα υλικά που το αποτελούν να έχουν μεταξύ τους διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, με σκοπό το σύνθετο υλικό να παρουσιάζει μοναδικές ιδιότητες που δεν μπορούν να επιτευχθούν από μονοφασικά υλικά. Συνήθως τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή, δυσκαμψία, αντοχή σε κόπωση, δυσθραυστότητα σε σχέση με τις συνιστώσες τους. Στις μέρες μας τα σύνθετα υλικά έχουν ευρεία εφαρμογή σε κάθε λογής τεχνικό έργο ή κατασκευή και ιδιαίτερα στη ναυπηγική βιομηχανία, καθώς χρησιμοποιούνται για την κατασκευή μικρών γαστρών [6].

1.3 Βασικές κατηγορίες σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά υποδιαιρούνται σε τρεις βασικές κατηγορίες, αναλόγως την μορφή ενίσχυσης τους [6]:

- Ινώδη σύνθετα υλικά
- Σύνθετα υλικά σωματιδίων
- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά



Εικόνα 5: Σχηματική αναπαράσταση των διαφόρων ειδών σύνθετων υλικών [6]

1.3.1 Ινώδη σύνθετα υλικά

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από τη μήτρα (*matrix*) και τις ίνες (*fibers*) ενίσχυσης από διαφορετικό υλικό, οι οποίες έχουν συγκεκριμένη πλέξη και προσανατολισμό ή είναι τυχαία ομοιόμορφα κατανεμημένες. Οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού, καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιότητες των ινών του. Η συνεισφορά της μήτρας είναι να προστατεύει και να σταθεροποιεί τις ίνες αλλά και να μεταφέρει τις τάσεις που ασκούνται μεταξύ των ινών στην ευρύτερη περιοχή του σύνθετου υλικού [6].

1.3.2 Σύνθετα υλικά ενισχυμένα με σωματίδια

Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων αποτελούνται από σωματίδια ενός ή περισσότερων υλικών, τα οποία είναι άτακτα τοποθετημένα μέσα στη μήτρα. Ως σωματίδια μπορούν να θεωρηθούν τα σφαιρίδια, οι κοντές ράβδοι και οι νιφάδες (*flakes*), καθώς έχουν και τις τρεις διαστάσεις τους

όμοιες. Τα σύνθετα υλικά σωματιδίων δεν έχουν κάποια χρήση στη ναυπηγική, συνεπώς δεν θα αναλυθούν περαιτέρω [4], [7].

1.3.3 Πολύστρωτα σύνθετα υλικά

Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά, αποτελούνται από τουλάχιστον δυο σύνθετα υλικά, τα οποία βρίσκονται σε στρώσεις και συνδέονται μεταξύ τους με κατάλληλη επεξεργασία. Οι στρώσεις των σύνθετων υλικών έχουν συνήθως διαφορετικό προσανατολισμό ινών μεταξύ τους, έτσι ώστε να προσδίδουν στο τελικό πολύστρωτο (*laminate*) ορθοτροπικότητα. Για να καταστρωθούν οι εξισώσεις των πολύστρωτων σύνθετων υλικών απαιτείται η κατανόηση των χαρακτηριστικών και των μηχανικών ιδιοτήτων της μήτρας αλλά και των ινών ενίσχυσης. Τέλος, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το κόστος, η ευκολία κατασκευής και η αντοχή τους σε διάφορες συνθήκες. Τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά παίζουν βασικό ρόλο στη ναυπηγική βιομηχανία, συνεπώς τα χαρακτηριστικά τους θα αναλυθούν εκτενώς στη συνέχεια [6].

1.3 Ρητίνες

Οι ρητίνες διακρίνονται στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (*thermosetting resins*) και στις θερμοπλαστικές ρητίνες (*thermoplastic resins*). Πιο αναλυτικά, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες σκληραίνουν μόνιμα κατά την διάρκεια του πολυμερισμού στη φάση της σκλήρυνσης, ενώ οι πιο διαδεδομένες είναι οι πολυεστερικές, οι βινυλεστερικές και οι φαινολικές. Οι θερμοπλαστικές ρητίνες αποτελούν πολυμερή τα οποία όταν θερμανθούν γίνονται εύκαμπτα και σε υψηλότερες θερμοκρασίες ρέουν, λόγω της χαλάρωσης των μοριακών δεσμών. Στη ναυπηγική βιομηχανία είναι αρκετά διαδεδομένες, καθώς χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή μικρών γαστρών [6].

1.4 Ίνες Ενίσχυσης

Οι ίνες αποτελούν μέσο ενίσχυσης σύνθετων υλικών. Προσδίδοντας εξαιρετικό συνδυασμό αντοχής, μείωσης βάρους και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Όταν η ενίσχυση γίνεται με συνεχείς ίνες οι μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού πλησιάζουν πολύ περισσότερο αυτές των ινών, παρά της μήτρας. Έτσι γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των χαρακτηριστικών τους, ενώ η μήτρα αναλαμβάνει να κρατήσει τις ίνες παρατεταμένες και να μεταφέρει το φορτίο. Η απλούστερη περίπτωση είναι όταν οι ίνες είναι ευθυγραμμισμένες και παράλληλες μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση τα υλικά έχουν την μέγιστη δυνατή αντοχή τους κατά την διεύθυνση των ινών, αλλά εμφανίζουν εξαιρετικά μεγάλη ανισοτροπία. Η αντοχή τους περιγράφεται από την *Classic Laminate Theory* και καλύπτεται επαρκώς από τα μοντέλα των *Reuss* και *Halpin-Tsai* για παράλληλη και εγκάρσια φόρτιση αντίστοιχα. Τα υλικά αυτά όταν είναι διατεταγμένα μόνο σε ένα στρώμα είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν στην πράξη λόγω της ανισοτροπίας τους [8], [9].

Οι ίνες ενίσχυσης διακρίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Ίνες υάλου
- Ίνες άνθρακα και γραφίτη
- Ίνες αραμιδίου

1.4.1 Ίνες Υάλου

Οι ίνες υάλου (*glass fibers*) χαρακτηρίζονται για την υψηλή αντοχή τους, την χαμηλή δυσκαμψία τους και το σχετικά χαμηλό τους κόστος. Συγκεκριμένα, στη ναυπηγική βιομηχανία χρησιμοποιούνται επί των πλείστον ίνες γυαλιού τύπου E (σχεδόν 90%). Οι ίνες αυτές έχουν μήκος διαμέτρου 4 – 20 [μm] και ενώνονται μεταξύ τους, για την δημιουργία νημάτων (*strands*) [6].

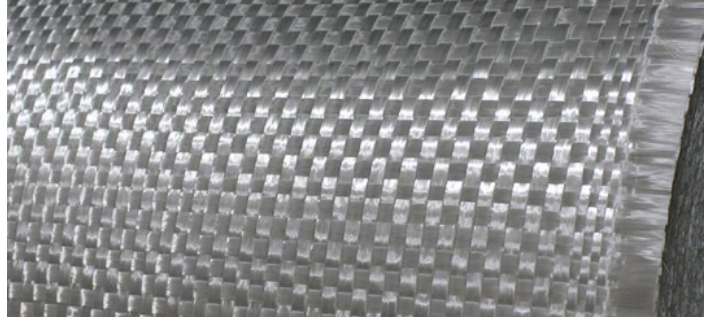
Οι ίνες υάλου διακρίνονται στις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- Υαλοπίλημα (*CSM*), το οποίο είναι κατασκευασμένο από νήματα γυαλιού, τα οποία είναι κομμένα σε μήκος 6 -50 [mm]. Συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ειδικού συνδετικού και δημιουργούν το τελικό ύφασμα, το οποίο έχει διαφορετικό προσανατολισμό ινών. Η βασική τους ιδιότητα είναι το επιφανειακό τους βάρος που κυμαίνεται μεταξύ 300 – 900 [g/m²] [6].



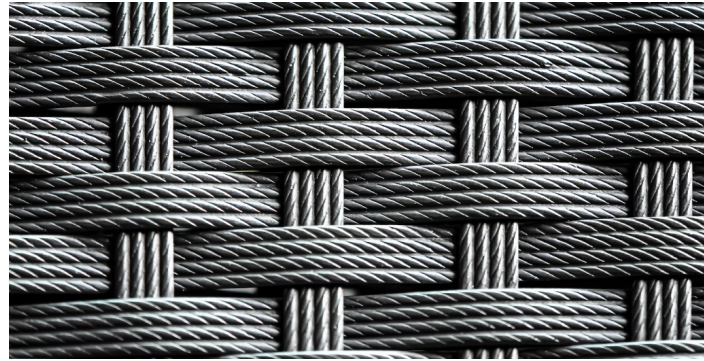
Εικόνα 6: *Chopped Strand Mat (CSM)* [10]

- Πλεξίδες νημάτων (*Rovings*), τα οποία είναι κατασκευασμένα από μη στριμμένα νήματα, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας πλεξίδες [6].
- Υαλοϋφασμα (*Woven Rovings*), τα οποία είναι πλεξίδες νημάτων, όπου τα νήματα είναι κάθετα τοποθετημένα μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα τραχύ και χοντροκομμένο ύφασμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι ανάλογα με τη μορφή πλέξης, διαμορφώνεται η αντοχή του υαλοϋφάσματος, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή. Πιο συγκεκριμένα, έχουν επίπεδη ύφανση αλλά και ισοσταθμισμένη διαμόρφωση αριθμό ινών στις δύο κάθετες μεταξύ τους κατευθύνσεις. Τα επιφανειακά τους βάρος κυμαίνονται μεταξύ 200 – 900 [g/m²] [6].



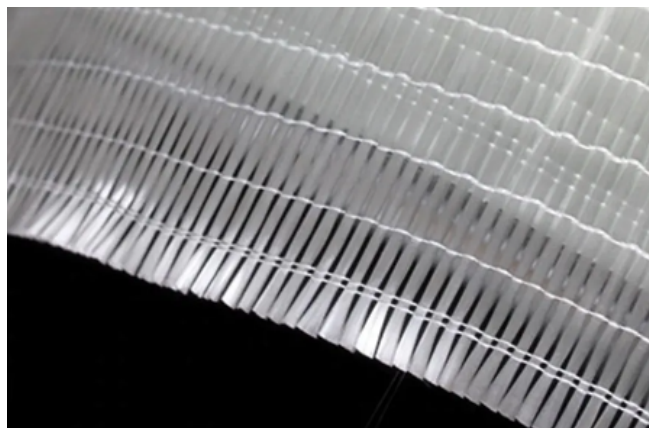
Εικόνα 7: Υαλοϋφασμα (WR) [11]

- Υφάσματα πυκνής πλέξης (*Woven Fabrics*), τα οποία αποτελούνται από απλά υφάσματα τα οποία δεν έχουν υποστεί κάποια περιστροφή. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι είναι πιο ελαφριά από τα υαλοϋφάσματα ($200-340 [g/m^2]$). Πρόκειται για έναν τρόπο ενίσχυσης αρκετά ακριβό αλλά και ποιοτικό συγκριτικά με τους άλλους, ο οποίος χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν μεγάλες απαιτήσεις αντοχής [6].



Εικόνα 8: Ύφασμα πυκνής πλέξης [12]

- Μονοαξονικά υφάσματα (*Unidirectional Rovings*), τα οποία είναι ίνες υάλου, στις οποίες οι παράλληλες ίνες ράβονται ή συγκρατούνται, προσανατολισμένες στην ίδια διεύθυνση. Στη ναυπηγική βιομηχανία βρίσκουν εφαρμογή στην ενίσχυση της πλώρης, της βασικής γραμμής του σκάφους αλλά και στο πέλημα των ενισχυτικών [6].



Εικόνα 9: *Unidirectional Rovings (UD)* [13]

1.4.2 Ίνες άνθρακα και γραφίτη

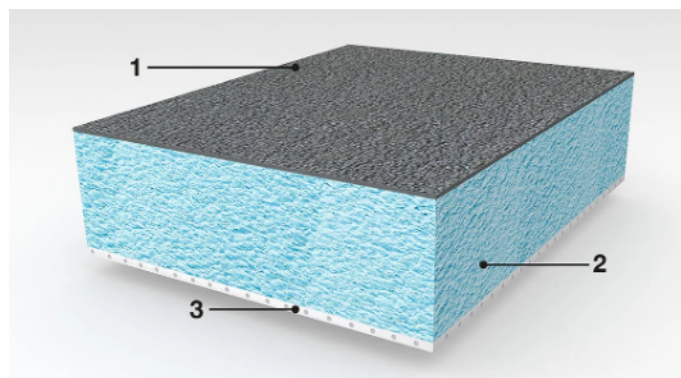
Οι ίνες άνθρακα και γραφίτη διακρίνονται στις ίνες υψηλής αντοχής και στις ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, οι ίνες γραφίτη έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα 99-100% και οι ίνες άνθρακα έχουν περιεκτικότητα σε άνθρακα 80-95%. Στη ναυπηγική δεν έχουν τόσο μεγάλη χρήση, καθώς έχουν τεράστιο κόστος συγκριτικά με τις υπόλοιπες ίνες. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιούνται σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις, όπως η κατασκευή υδροπτερυγίων σε ταχύπλοα σκάφη, καθώς και σε υποβρύχια [6].

1.4.3 Ίνες αραμιδίου

Οι αραμιδικές ίνες (*Kevlar*) ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των πολυμερών ινών και διακρίνονται κυρίως για την υψηλή ειδική αντοχή τους σε εφελκυσμό, η οποία οφείλεται στο χαμηλό ειδικό βάρος τους. Οι συγκεκριμένες ίνες υπερτερούν ενάντια στις απλές σε περιπτώσεις δυναμικών φορτισμένων κατασκευών. Αυτό συμβαίνει διότι, έχουν υψηλό συντελεστή απόσβεσης, καθώς έχουν ιδιαίτερη δομή και μπορούν να δημιουργήσουν υφάσματα πυκνής πλέξης. Όπως είναι εύκολα κατανοητό έχουν σημαντικά μεγαλύτερο κόστος από τις υπόλοιπες ίνες που βρίσκονται στην αγορά [6].

1.4 Κατασκευές τύπου *Sandwich*

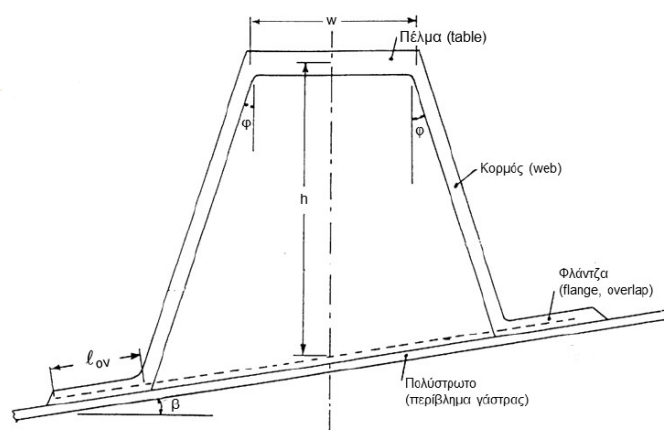
Το σημαντικότερο κομμάτι μίας κατασκευής τύπου *Sandwich* είναι ο πυρήνας, καθώς αποτελεί την βάση της κατασκευής και έχει την δυνατότητα να κρατάει απομακρυσμένα δύο περιβλήματα αλλά και να μεταδίδει τις διατμητικές τάσεις που ασκούνται. Ο πυρήνας μπορεί να είναι κατασκευασμένος από διάφορα υλικά, όπως το ξύλο *balsa*, το κόντρα πλακέ θαλάσσης (*plywood*), κυψελοειδείς (*honeycomb*) και αφρώδεις (*PVC foam*) κατασκευές. Από τους παραπάνω πυρήνες ο πιο διαδεδομένος στη ναυπηγική είναι αφρώδης πυρήνας. Είναι διαθέσιμος σε πυκνότητες 45-200 [kg/m^3] και διακρίνεται για τις ιδιότητες που προσφέρει στην κατασκευή. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει αντίσταση στην διείσδυση του νερού, προσφέρει πολύ καλή θερμική και ηλεκτρική μόνωση, καθώς και απόσβεση του ήχου και των κραδασμών. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι σε θερμοκρασίες 40-60° έχουν προβλήματα, καθώς χάνουν μεγάλο ποσοστό της αντοχής και της ακαμψίας τους. Διατίθενται στην αγορά σε μορφή πλακών, για την κατασκευή επίπεδων αλλά και καμπύλων επιφανειών [4].



Εικόνα 10: Κατασκευή *Sandwich* [14]

1.5 Ενισχυτικά τύπου Π «Top Hat»

Οι προεξοχές τύπου Π (*top hat*), χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση πλακών, που είναι κατασκευασμένες από σύνθετα υλικά και όπως είναι λογικό αποτελούν το πλέον χρησιμοποιημένο είδος ενίσχυσης στα μικρά σκάφη. Κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά και διακρίνονται για την υψηλή αντοχή τους και την κάμψη τους σε συνδυασμό με το χαμηλό τους βάρος. Σχεδιαστικά, έχουν παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες, καθώς το πάχος του πέλματος τους είναι μεγαλύτερο από το πάχος του κορμού, ενώ στο εσωτερικό τους τοποθετείται αφρός (*PVC foam*) [6].



Εικόνα 11: Ενισχυτικό τύπου Π [6]

1.6 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα των Σύνθετων Υλικών

. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι τα εξής [4]:

- **Μικρό ειδικό βάρος:** Όλα τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται για το μικρό τους ειδικό βάρος, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα με τις ενδεικτικές ιδιότητες βασικών σύνθετων υλικών [6].
- **Αντοχή στη διάβρωση:** Αποτελεί μία από τις βασικές αιτίες, που τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται ευρέως στη ναυπηγική βιομηχανία. Αυτό συμβαίνει διότι, είναι ανθεκτικά ιδίως στο θαλασσινό περιβάλλον, καθώς δεν διαβρώνονται και δεν παραμορφώνονται με την πάροδο του χρόνου [6].
- **Εύκολη τοποθέτηση ενίσχυσης:** Κατά τη διάρκεια της κατασκευής της γάστρας, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης ενισχυτικών ινών στις περιοχές όπου χρειάζεται. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, καθώς όπου υπάρχει επιβαλλόμενο φορτίο τοποθετούνται ίνες στην κατάλληλη διεύθυνση [6].

- **Θερμικές ιδιότητες:** Υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν σύνθετα υλικά με μηδενικό συντελεστή θερμικής διαστολής αλλά και μειωμένη θερμική αγωγιμότητα. Η κατασκευή ενός τέτοιου υλικού όπως είναι λογικό έχει υψηλό κόστος, καθώς χρησιμοποιείται σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις [6].

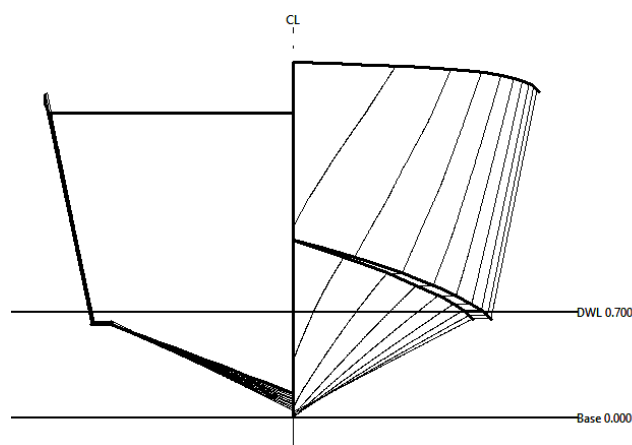
Όπως όλα τα υλικά, έτσι και τα σύνθετα παρουσιάζουν κάποια μειονεκτήματα, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Τα μειονεκτήματά τους είναι τα εξής: [6].

- **Έλλειψη ολκιμότητας:** Τα σύνθετα υλικά δεν είναι όλκιμα, δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή και η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων τους είναι γραμμική μέχρι τη θραύση. Επομένως, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη όλα τα φορτία κατά τη σχεδίαση. Το γεγονός αυτό μπορεί να επιφέρει περισσότερες δυσκολίες από τις επιπτώσεις της ανισοτροπικότητας [6].
- **Ευπάθεια στη φωτιά:** Όπως είναι λογικό και αναφέρθηκε προηγουμένως, η αντοχή και οι ιδιότητες των ινών σύνθετων υλικών μειώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικές φαινολικές ρητίνες στην κατασκευή, οι οποίες προσδίδουν προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες [6].
- **Αντοχή στη τριβή:** Τα σύνθετα υλικά έχουν αρκετά μικρή αντοχή στην τριβή, συνεπώς είναι ένας παράγοντας που πρέπει πάντα να λαμβάνεται υπόψη όταν γίνεται η επιλογή των υλικών. Συνίσταται προσοχή στην κατασκευή κατασκευών, όπου και υπάρχουν συχνά τριβές [6].
- **Δυσκολία στην επιθεώρηση:** Η επιθεώρηση σε μία κατασκευή από σύνθετα υλικά είναι πιο σύνθετη από αυτές που πραγματοποιούνται σε μεταλλικές κατασκευές. Αυτό συμβαίνει διότι, δεν υπάρχει κάποιο πιστοποιητικό ποιότητας, επομένως πρέπει να πραγματοποιηθεί έλεγχος ολόκληρης της επιφάνειας. Το αποτέλεσμα είναι η έκταση και της εργασίας να είναι αρκετά αυξημένη και πιο χρονοβόρα [6].
- **Σύνδεση και εγκατάσταση εξαρτημάτων:** Πρόκειται για μία αρκετά πιο δύσκολη διαδικασία, από την αντίστοιχη που πραγματοποιείται στα μεταλλικά σκάφη. Ο λόγος είναι ότι απαιτείται προσεκτική σχεδίαση των κατασκευαστικών λεπτομερειών, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος κατασκευής και το ρίσκο της τοπικής αστοχίας [6].
- **Ερπυσμός:** Σε συνθήκες υψηλής και συνεχούς φόρτισης, παρουσιάζεται το φαινόμενο του ερπυσμού. Συμβαίνει, σε σύνθετα υλικά ενισχυμένα από ίνες υάλου και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση καταστάσεων φόρτωσης του σκάφους, για να ελαχιστοποιηθούν οι μόνιμες καμπτικές ροπές στη γάστρα [6].

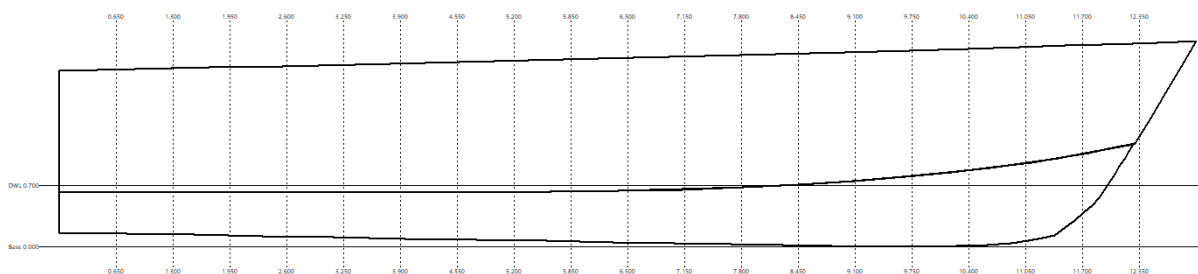
Κεφάλαιο 2 : Σχεδίαση και Μελέτη Αντοχής της κατασκευής

2.1 Σχεδίαση της κατασκευής

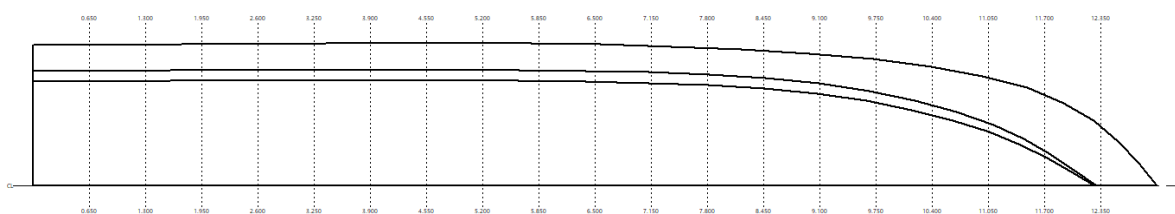
Το ταχύπλοο σκάφος που θα μελετηθεί στην παρούσα διπλωματική, σχεδιάστηκε αναλυτικά στο πρόγραμμα *Rhinoceros 6*. Πρόκειται για ένα υποθετικό σκάφος το οποίο είναι όμοιο με πολλά σκάφη που βρίσκονται στην αγορά. Τα σχέδια του σκάφους που χρησιμοποιήθηκαν για την σχεδίαση τους είναι τα εξής:



Εικόνα 12: Πρόοψη σκάφους (*Body Plan*)

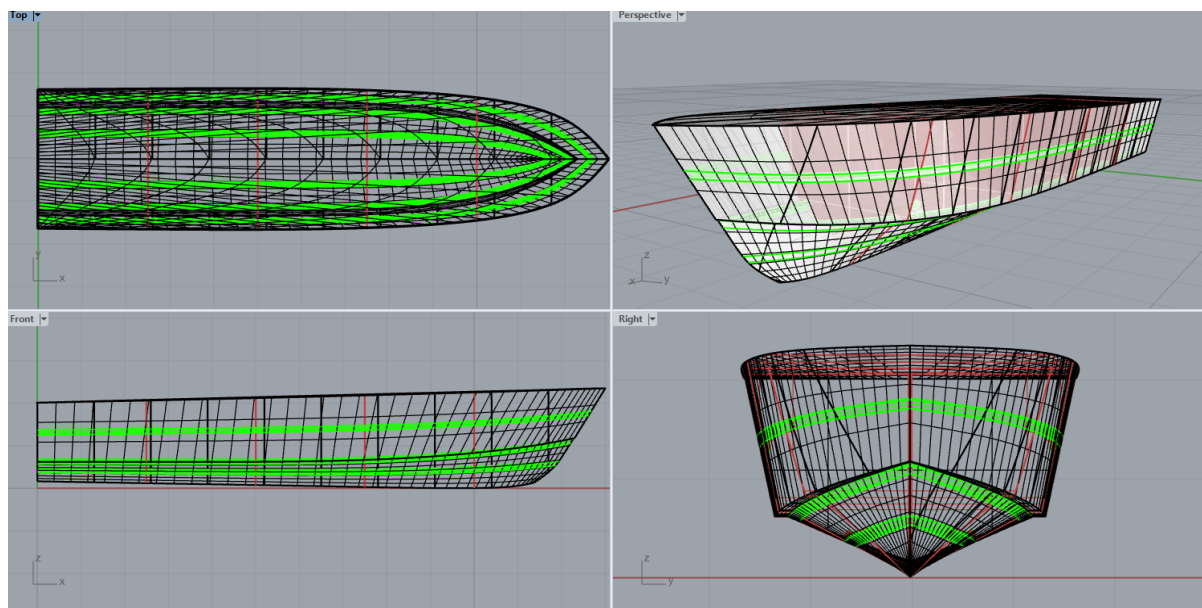


Εικόνα 13: Πλάγια όψη σκάφους (*Sheer Plan*)



Εικόνα 14: Κάτοψη σκάφους (*Breadth Plan*)

Αρχικά, σχεδιάστηκε η γάστρα του σκάφους, ενώ στη συνέχεια οι εγκάρσιες φρακτές, τα διαμήκη ενισχυτικά και τέλος το κατάστρωμα του πλοίου. Το σκάφος έχει μήκος 13 [m] και έχει 4 εγκάρσιες φρακτές και 6 διαμήκη ενισχυτικά *top hat*, τα οποία ισαπέχουν μεταξύ τους.



Εικόνα 15: Τελική μορφή σκάφους στο *Rhinoceros 6* [15]

2.2 Μελέτη της κατασκευής στο πρόγραμμα *ANSYS*

Η μοντελοποίηση και η μελέτη του πλοίου πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα *ANSYS*, το οποίο αποτελεί ένα πρόγραμμα προσομοίωσης το οποίο επιτρέπει στους μηχανικούς να προσομοιώνουν και να αναλύουν σύνθετα φυσικά φαινόμενα, με σκοπό να σχεδιάζουν αλλά και να βελτιστοποιούν σύνθετες κατασκευές. Το συγκεκριμένο σκάφος κατασκευάστηκε αποκλειστικά από σύνθετα υλικά, επομένως το πρώτο βήμα είναι να οριστούν αυτά τα υλικά. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν αναγράφονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1: Ιδιότητες σύνθετων υλικών [6]

Υλικό	<i>CSM</i>	<i>PVC</i>	<i>BD</i>	<i>WR</i>	Μονάδα μέτρησης
Πυκνότητα	1400	80	1600	1500	[kg/m^3]
<i>E1</i>	8200	104	15500	15000	[<i>MPa</i>]
<i>E2</i>	8200	104	15500	15000	[<i>MPa</i>]
<i>E3</i>	1221	104	15500	15000	[<i>MPa</i>]
ν_1	0.3	0.3	0.08	0.32	[-]
ν_2	0.3	0.3	0.13	0.32	[-]
ν_3	0.3	0.3	0.13	0.32	[-]
<i>G1</i>	2950	39	3300	5680	[<i>MPa</i>]
<i>G2</i>	1030	39	2260	5680	[<i>MPa</i>]
<i>G3</i>	130	39	2260	5680	[<i>MPa</i>]

Πίνακας 2: Αντοχή (*Strength*) υλικών

Υλικό	<i>CSM</i>	<i>PVC</i>	<i>BD</i>	<i>WR</i>	Μονάδα μέτρησης
<i>Tensile X direction</i>	112	22	240	230	[MPa]
<i>Tensile Y direction</i>	112	22	240	230	[MPa]
<i>Tensile Z direction</i>	32	15	60	230	[MPa]
<i>Compressive X direction</i>	-141	-2.2	-216	-220	[MPa]
<i>Compressive Y direction</i>	-141	-2.2	-216	-220	[MPa]
<i>Compressive Z direction</i>	-35	-1.5	-54	-220	[MPa]
<i>Shear XY</i>	59	1.35	38	40	[MPa]
<i>Shear YZ</i>	59	1.35	38	40	[MPa]
<i>Shear XZ</i>	21	1.35	15	40	[MPa]

Το σκάφος είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά, οπότε χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο *ACP (Pre)*, το οποίο βρίσκεται στα *Components Systems*. Το *ACP (Pre)* εξειδικεύεται στα σύνθετα υλικά και προσφέρει τη δυνατότητα να δημιουργηθούν σύνθετες στρώσεις. Η διαδικασία που θα ακολουθήσουμε είναι αρκετά σύνθετη, η οποία για να πραγματοποιηθεί επιτυχώς θα πρέπει να χωριστεί το σχέδιο σε επιμέρους τμήματα. Αρχικά, θα μοντελοποιηθούν τα έξι (6) διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους. Σύμφωνα με τους κανονισμούς του *DNV*, τα ενισχυτικά που θα τοποθετηθούν θα πρέπει να είναι της μορφής *top hat*, τα οποία αναλύθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο 3. Τα πάχη των ινών, που χρησιμοποιήθηκαν αναγράφονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3: Πάχος στρώσεων του διάμηκες ενισχυτικού

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης	Μονάδα μέτρησης
1	<i>BD</i>	1.57	[mm]
2	<i>CSM</i>	0.8	[mm]

Τα ενισχυτικά τύπου Π (*top hat*) δεν έχουν το ίδιο πάχος πολύστρωτου στον κορμό και στο πέλμα, καθώς σύμφωνα με τους κανονισμούς το πέλμα τους πρέπει να έχει μεγαλύτερο πάχος από τον κορμό. Επομένως, υπολογίζουμε αρχικά το πάχος του κορμού και στη συνέχεια του πέλματος, όπως φαίνεται αναλυτικά στους δύο παρακάτω πίνακες.

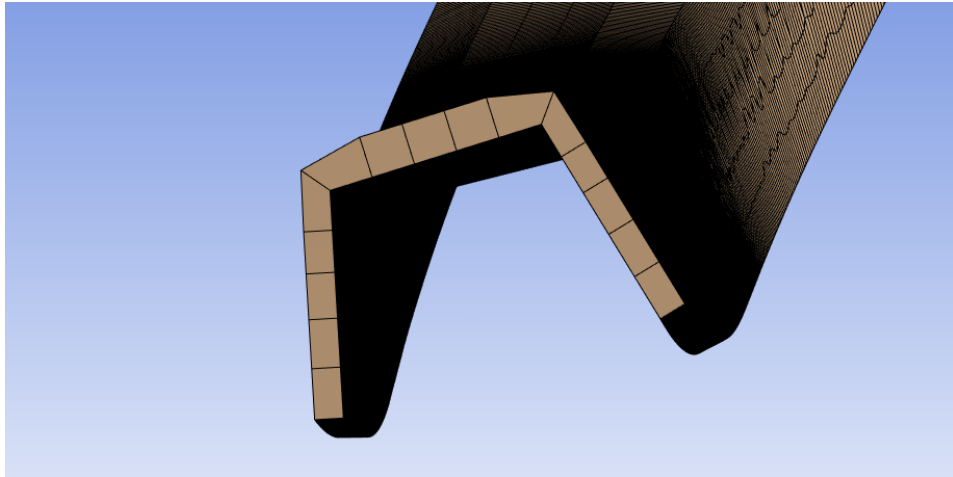
Πίνακας 4: Τελικό πάχος κορμού του διάμηκες ενισχυτικού

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.8
2	<i>BD</i>	1.57
3	<i>CSM</i>	0.8
4	<i>BD</i>	1.57
5	<i>CSM</i>	0.8
6	<i>BD</i>	1.57
7	<i>CSM</i>	0.8
8	<i>BD</i>	1.57
9	<i>CSM</i>	0.8
Τελικό πάχος πολύστρωτου		10.28 [mm]

Πίνακας 5: Τελικό πάχος πέλματος του διάμηκες ενισχυτικού

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.8
2	<i>BD</i>	1.57
3	<i>CSM</i>	0.8
4	<i>BD</i>	1.57
5	<i>CSM</i>	0.8
6	<i>BD</i>	1.57
7	<i>CSM</i>	0.8
8	<i>BD</i>	1.57
9	<i>CSM</i>	0.8
10	<i>BD</i>	1.57
11	<i>CSM</i>	0.8
12	<i>BD</i>	1.57
13	<i>CSM</i>	0.8
Τελικό πάχος πολύστρωτου		15.02 [mm]

Εφόσον, έχουν οριστεί σωστά τα πάχη των ενισχυτικών, ορίζουμε τα *Rossetes*, τα *orient selection sets* και τέλος τα *modeling groups*. Πραγματοποιείται το *Run* και προκύπτει η επιθυμητή μοντελοποίηση των διαμηκών ενισχυτικών, όπως φαίνεται αναλυτικά στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 16: Διάμηκες ενισχυτικό

Εφόσον, ολοκληρώθηκε επιτυχώς η μοντελοποίηση των ενισχυτικών, το επόμενο βήμα είναι η μοντελοποίηση της γάστρας του σκάφους. Η μοντελοποίηση της γάστρας πραγματοποιήθηκε σε 7 διαφορετικά *ACP (Pre)*, έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια στο τελικό μοντέλο, καθώς και καλύτερη ποιότητα πλέγματος (*mesh quality*). Αρχικά μοντελοποιήθηκαν σε 2 *ACP (Pre)* τα πλευρικά τοιχώματα της γάστρας, στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν σε 2 *ACP (Pre)* το *chine* του σκάφους και σε 2 *ACP (Pre)* τα τοιχώματα του πυθμένα της γάστρας. Τέλος, μοντελοποιήθηκε σε 1 *ACP (Pre)* ο καθρέπτης της πρόμνης του σκάφους. Τα πάχη των ινών, που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και το συνολικό πάχος του πολύστρωτου αναγράφονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες. Όπως θα δούμε στους παρακάτω πίνακες η γάστρα δεν έχει παντού το ίδιο πάχος στρώσεων.

Πίνακας 6: Πάχος στρώσεων γάστρας

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης	Μονάδα μέτρησης
1	<i>BD</i>	1.38	[<i>mm</i>]
2	<i>CSM</i>	0.9	[<i>mm</i>]

Πίνακας 7: Τελικό πάχος πλευρικών τοιχωμάτων της γάστρας (*Side Hull*)

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>BD</i>	1.38
7	<i>CSM</i>	0.9
8	<i>BD</i>	1.38

9	<i>CSM</i>	0.9
10	<i>BD</i>	1.38
11	<i>CSM</i>	0.9
12	<i>BD</i>	1.38
13	<i>CSM</i>	0.9
14	<i>BD</i>	1.38
15	<i>CSM</i>	0.9
16	<i>BD</i>	1.38
17	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		20.4 [mm]

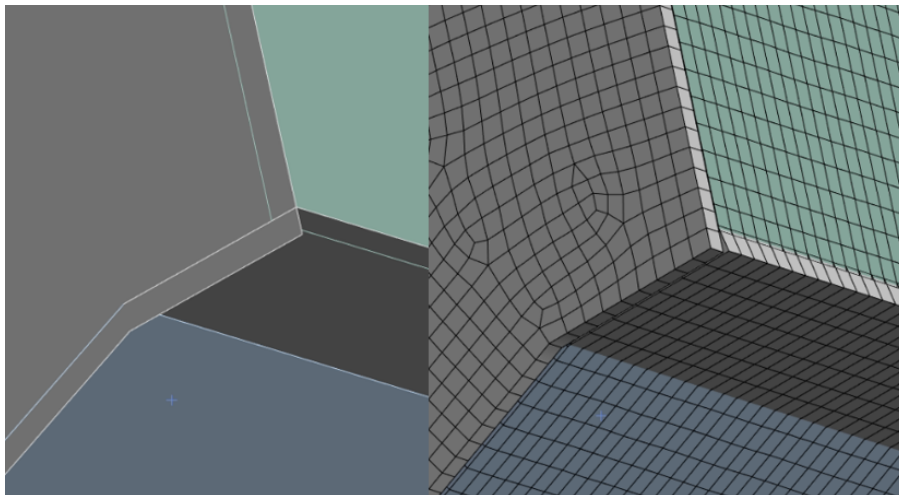
Πίνακας 8: Τελικό πάχος των τοιχομάτων του πυθμένα και του *chine*

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>BD</i>	1.38
7	<i>CSM</i>	0.9
8	<i>BD</i>	1.38
9	<i>CSM</i>	0.9
11	<i>BD</i>	1.38
12	<i>CSM</i>	0.9
13	<i>BD</i>	1.38
14	<i>CSM</i>	0.9
15	<i>BD</i>	1.38
16	<i>CSM</i>	0.9
17	<i>BD</i>	1.38
18	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		20.4 [mm]

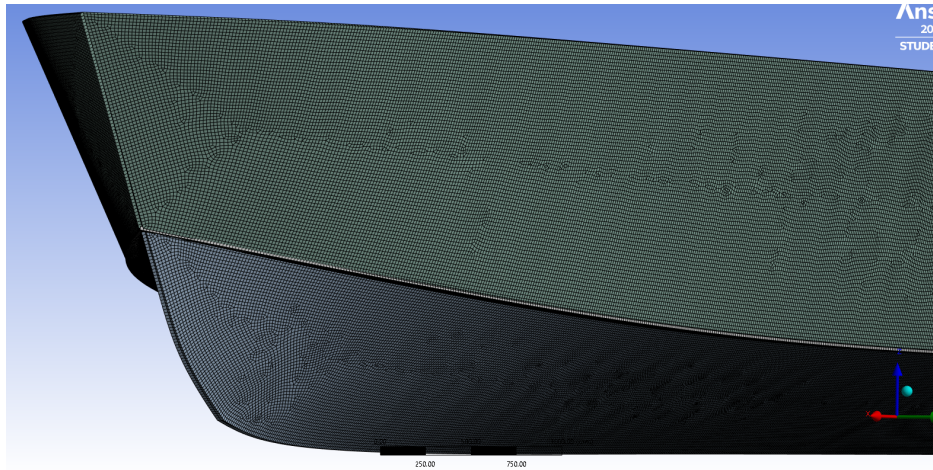
Πίνακας 9: Τελικό πάχος τοιχομάτων του καθρέπτη της πρόμνης

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>BD</i>	1.38
7	<i>CSM</i>	0.9
8	<i>BD</i>	1.38
9	<i>CSM</i>	0.9
10	<i>BD</i>	1.38
11	<i>CSM</i>	0.9
12	<i>BD</i>	1.38
13	<i>CSM</i>	0.9
14	<i>BD</i>	1.38
15	<i>CSM</i>	0.9
16	<i>BD</i>	1.38
17	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		20.04 [mm]

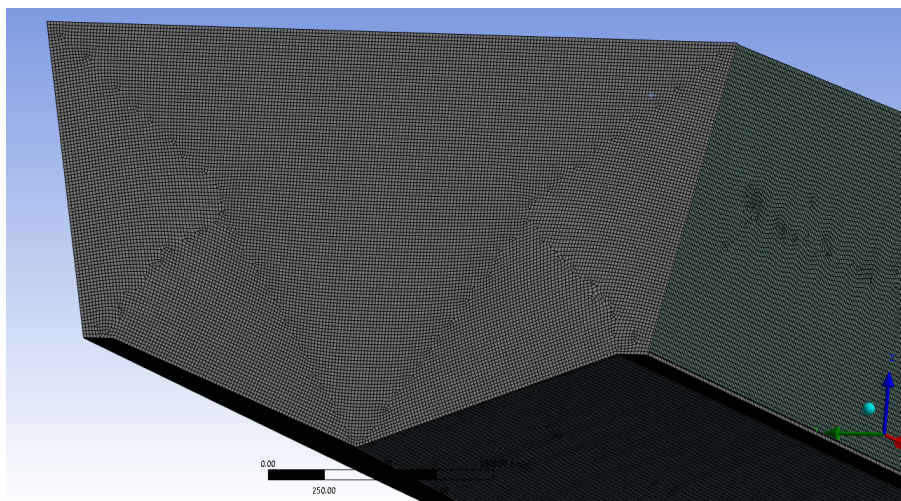
Για να μοντελοποιηθεί σωστά η γάστρα του σκάφους και να εφάπτονται οι επιφάνειες μεταξύ τους χωρίς να έχουν κενά, έχει πραγματοποιηθεί κατάλληλη προεργασία στο σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros 6*.



Εικόνα 17: Πριν και μετά την μοντελοποίηση



Εικόνα 18: Μοντελοποιημένη πλώρη του σκάφους



Εικόνα 19: Μοντελοποιημένη πρύμνη του σκάφους

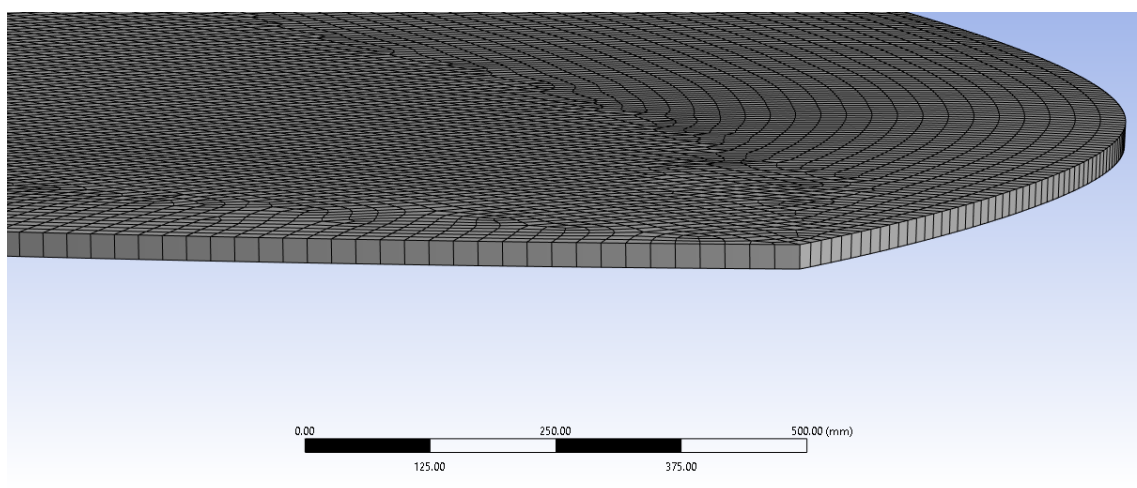
Για την μοντελοποίηση του κύριου καταστρώματος (*main deck*), χρησιμοποιήθηκε μια τυπική κατασκευή *sandwich*, της οποίας ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από αφρό *PVC*. Τα πάχη των ινών, που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και το συνολικό πάχος του πολύστρωτου αναγράφονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 10: Πάχος στρώσεων καταστρώματος

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης	Μονάδα μέτρησης
1	<i>WR</i>	1.1	[<i>mm</i>]
2	<i>CSM</i>	0.9	[<i>mm</i>]
3	<i>PVC</i>	20	[<i>mm</i>]

Πίνακας 11: Τελικό πάχος καταστρώματος

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>CSM</i>	0.9
3	<i>WR</i>	1.1
4	<i>CSM</i>	0.9
5	<i>WR</i>	1.1
6	<i>CSM</i>	0.9
7	<i>WR</i>	1.1
8	<i>CSM</i>	0.9
9	<i>PVC</i>	20
10	<i>CSM</i>	0.9
11	<i>WR</i>	1.1
12	<i>CSM</i>	0.9
13	<i>WR</i>	1.1
14	<i>CSM</i>	0.9
15	<i>WR</i>	1.1
16	<i>CSM</i>	0.9
17	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		35.6 [mm]



Εικόνα 20: Μοντελοποιημένο κατάστρωμα του σκάφους

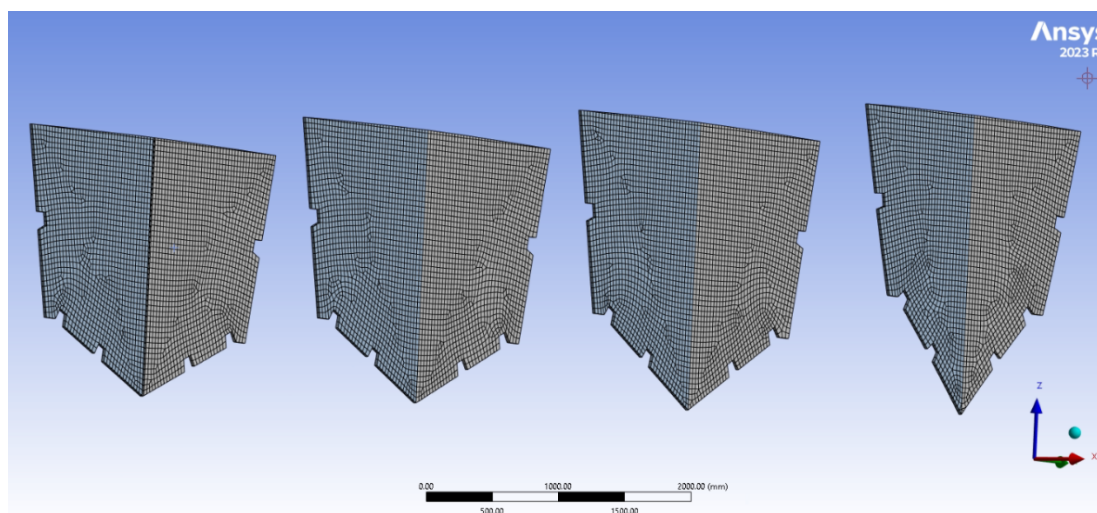
Στη συνέχεια, θα μοντελοποιηθούν οι 4 εγκάρσιες φρακτές τους σκάφους, για τις οποίες θα χρησιμοποιηθεί επίσης κατασκευή *sandwich*, της οποίας ο πυρήνας θα είναι κατασκευασμένος από αφρό *PVC*. Για λόγους ακρίβειας η κάθε φρακτή θα μοντελοποιηθεί σε διαφορετικό *ACP (Pre)*. Οι φράκτες είναι όμοιες και τα πάχη των ινών, που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και το συνολικό πάχος του πολύστρωτου αναγράφονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 12: Πάχος στρώσεων εγκάρσιων φρακτών

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσεων	Μονάδα μέτρησης
1	<i>BD</i>	1.38	[<i>mm</i>]
2	<i>CSM</i>	0.7	[<i>mm</i>]
3	<i>PVC</i>	15	[<i>mm</i>]

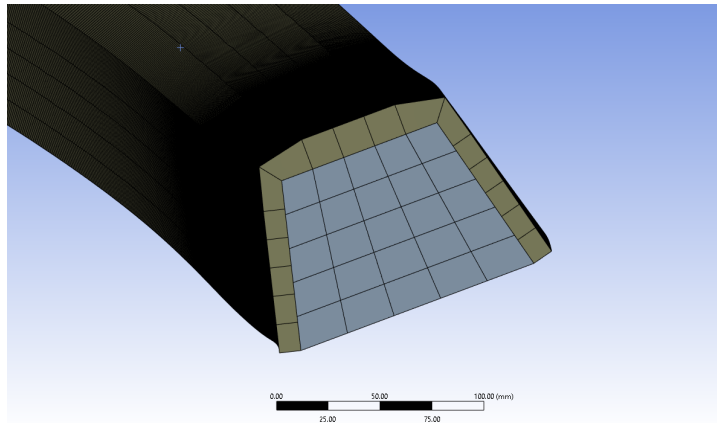
Πίνακας 13: Τελικό πάχος εγκάρσιων φρακτών

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.7
2	<i>CSM</i>	0.7
3	<i>BD</i>	1.38
4	<i>CSM</i>	0.7
5	<i>PVC</i>	15
6	<i>CSM</i>	0.7
7	<i>BD</i>	1.38
8	<i>CSM</i>	0.7
9	<i>CSM</i>	0.7
Τελικό πάχος πολυστρωτου		21.95 [<i>mm</i>]



Εικόνα 21: Μοντελοποιημένες εγκάρσιες φρακτές του σκάφους

Τέλος, θα πρέπει να τοποθετηθεί ο αφρός *PVC* στο εσωτερικό των διαμηκών και εγκάρσιων ενισχυτικών. Αυτό θα γίνει με την δημιουργία μίας απλής γεωμετρίας στο *Rhinoceros 6*, την εισαγωγή της στο *Ansys* ως *Solid* και την κατάλληλη επιλογή του υλικού.

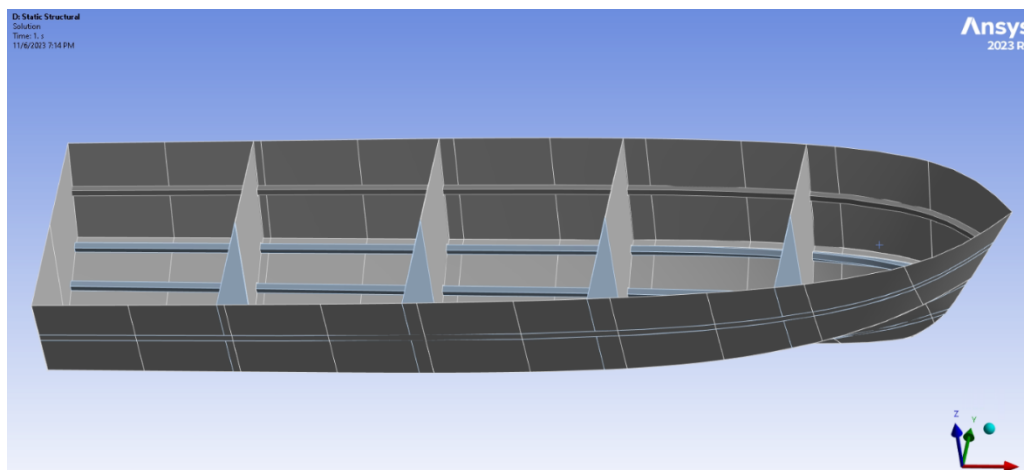


Εικόνα 22: Διάμηκες ενισχυτικό μαζί με τον αφρό PVC

Το τελικό μοντέλο αποτελείται από 18 *ACP (Pre)* και 1 *Mechanical Model*. Το πλέγμα του έχει *average quality = 92.64%* και αποτελείται από 267.813 κόμβους και 174.451 στοιχεία.

Quality	
Check Mes...	Mesh Quality Worksheet
Error Limits	Aggressive Mechanical
Mesh Metric	Element Quality
<input type="checkbox"/> Min	2.437e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.99945
<input type="checkbox"/> Average	0.92644
<input type="checkbox"/> Standar...	0.10722
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	267813
<input type="checkbox"/> Elements	174451

Εικόνα 23: Mesh quality



Εικόνα 24: Τελικό μοντέλο του σκάφους

Κεφάλαιο 3: Εφαρμογή Κανονισμών Νορβηγικού Νηογνώμονα

3.1 Κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους

Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους στον παρακάτω πίνακα. Το σκάφος έχει σχεδιαστεί στο πρόγραμμα *Rhinoceros 6* και η μελέτη του έχει πραγματοποιηθεί στο πρόγραμμα *ANSYS*.

Πίνακας 14: Κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους

ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ		
L =	13	[m]
B =	3.3	[m]
T =	0.7	[m]
Δ =	8.711	[tons]
LCB =	5.219	[m]
VCB =	0.494	[m]
LWL =	11.982	[m]
V =	40	[Knots]
β_{cg} =	20.73	[degrees]
CB =	0.283	[-]
CP =	0.756	[-]
BWL =	2.702	[m]
D =	2.186	[m]
g_o =	9.81	[m/s ²]

Με τη χρήση του *DNV (DNV-RU-HSLC-Pt.1-Ch.3)* θα υπολογιστούν οι συνολικές πιέσεις που ασκούνται κατά μήκος του σκάφους. Το συγκεκριμένο σκάφος έχει συνολικό μήκος 13 μέτρα και μήκος μεταξύ καθέτων 11.982 μέτρα, επομένως ανήκει στην κατηγορία *high speed and light craft*.

3.2 Συντελεστής κυματισμού C_w

Αρχικά, υπολογίζουμε τον συντελεστή κυματισμού C_w χρησιμοποιώντας τους παρακάτω τύπους ανάλογα με το μήκος του πλοίου:

$$C_w = 0.08L * fr \text{ για } L \leq 100 [m] \quad (3)$$

$$C_w = (6 + 0.02L) * fr \text{ για } L > 100 [m] \quad (4)$$

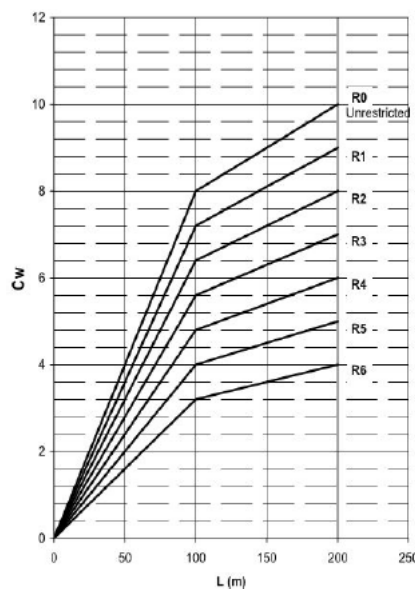
Όπου ο αδιάστατος συντελεστής fr υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 15: Μείωση συντελεστή κυματισμού C_w [11]

<i>Class notation</i>	<i>fr</i>
<i>R0</i>	1
<i>R1</i>	0.9
<i>R2</i>	0.8
<i>R3</i>	0.7
<i>R4</i>	0.6
<i>R5</i>	0.5
<i>R6</i>	0.4

Στη προκειμένη περίπτωση βρισκόμαστε στην κατηγορία *R2*, επομένως ισχύει $fr = 0.8$ [-]

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6) για $L \leq 100m$ προκύπτει ότι $C_w = 0.832$ [-]



Διάγραμμα 1: Μεταβολή συντελεστή C_w [6]

3.3 Υπολογισμός επιταχύνσεων σκάφους

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να οριστεί το προφίλ λειτουργίας του σκάφους (*operating profile*). Αυτό θα πραγματοποιηθεί βάση διαφόρων ταχυτήτων συνδυαστικά με τα σημαντικά ύψη κύματος. Για τον υπολογισμό των ελάχιστων σημαντικών υψών κύματος πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $\frac{V}{\sqrt{L}} \geq 3$.

Στην προκειμένη περίπτωση ισχύει $\frac{V}{\sqrt{L}} = 11.09 \geq 3$.

Επομένως, μπορούμε να προχωρήσουμε στην χρήση του παρακάτω πίνακα που δίνεται από τον νηογνώμονα.

Type and service notation	$H_s(m)$
Passenger, car ferry, cargo craft, crew boats and small service crafts	0.25
Patrol boats, naval and naval support vessels	L < 20 m: 0.5 L > 30 m : 1.5 Linear interpolation for 20 m ≤ L ≤ 30 m

Εικόνα 25: Ελάχιστα σημαντικά ύψη κόματος H_s (m) [16]

Επομένως: **$MIN H_s = 0.25$ [m]**

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός των κατακόρυφων επιταχύνσεων. Αρχικά, υπολογίζουμε την κατακόρυφη επιτάχυνση στο κέντρο βάρους του σκάφους, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο που δίνεται από τον νηογνώμονα.

Για να χρησιμοποιηθεί ο τύπος πρέπει να ισχύει: $\frac{V}{\sqrt{L}} \geq 10.86$

$$a_{cgt} = \frac{8,38g_0 k_\tau}{\left(\frac{L}{\Delta^{1/3}}\right)^{0,35}} \left(\frac{H_{si}}{B_{WL2}} + 0.084 \right) (50 - \beta_{cg}) \ln(F_{Nv}) V_i \sqrt{L} \frac{B_{WL2}^2}{1000\Delta} \quad (m/s^2)$$

Επομένως: (5)

Όπου: $g_0 = 9.81$ [m/s²]

$V_i = 40$ [knots]

$H_{si} = 0.25$ [m]

$B_{WL} = 2.702$ [m]

$$k_\tau = 1.5 - 0.046 * \frac{V}{\sqrt{L}} = 0.989 \quad [-] \quad (6)$$

$$F_{Nv} = 0.5144 * \frac{V}{\sqrt{g_0 * \Delta^{0.333}}} = 4.58 \quad [-] \quad (7)$$

β_{cg} : deadrise angle = 20.73°

k_h : διορθωτικός συντελεστής τύπου γάστρας [-]

Ο συντελεστής k_h υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα που δίνεται από τον νηογνώμονα.

Πίνακας 16: Συντελεστής k_h τύπου γάστρας [11]

<i>Hull type</i>	<i>kh</i>
<i>Mono - Hull, Catamaran</i>	1
<i>Wave piercer</i>	0.9
<i>SES, ACV</i>	0.8
<i>Foil assisted hull</i>	0.7
<i>SWATH</i>	0.7

Βρισκόμαστε στην κατηγορία *Mono-Hull* επομένως σύμφωνα με τον πίνακα ισχύει:

$$k_h = 1 [-]$$

Σύμφωνα με τον νηογνώμονα πρέπει να ισχύουν οι δύο παρακάτω περιορισμοί:

$$\text{Min } a_{cgi} = 1 * g_0 = 9.81 [m/s^2]$$

$$\text{Max } a_{cgi} = 6 * g_0 = 58.86 [m/s^2]$$

Συνεπώς, ισχύει : $a_{cgi} = 40.567 [m/s^2]$

Στη συνέχεια, υπολογίζουμε την κατακόρυφη επιτάχυνση χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο:

$$a_{cg} = C_{HSLC} * C_{RW} * \frac{V}{\sqrt{L}} [m/s^2] \quad (8)$$

Όπου : C_{RW} (*service range coefficient*) = 0.75 [-] για R2

C_{HSLC} = συντελεστής *C-factor* [-]

Ο συντελεστής C_{HSLC} υπολογίζεται από τον παρακάτω πίνακα που δίνεται από τον νηογνώμονα.

Πίνακας 17: Υπολογισμός συντελεστή *CHSLC* [11]

<i>Craft Character</i>	<i>Passenger, car ferry, cargo craft, yacht, service</i>	<i>Patrol</i>
<i>CHSLC</i>	0.24	0.36

Επομένως σύμφωνα με τον πίνακα ισχύει: $C_{HSLC} = 0.24$ [-]

Συνεπώς, ισχύει : $a_{cg} = 1.99$ [m/s^2]

Η διαμήκη (*surge*) επιτάχυνση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$a_{li} = \frac{a_{cg}}{6} = 0.33 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (9)$$

Ενώ ισχύει ο περιορισμός: $a_{li} > 0.25 * g_0 \Rightarrow a_{li} > 2.45$ [m/s^2]

Συνεπώς, ισχύει : $a_l = 2.45$ [m/s^2]

Η εγκάρσια (*transverse*) επιτάχυνση υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$a_t = \left(\frac{2\pi}{T_R} \right)^2 * \theta_r * r_r \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (10)$$

$$\text{Όπου: } r_r = \frac{D}{2} = 1.093 \text{ [m]} \quad (11)$$

$$T_R = \frac{\sqrt{L}}{1.05 + 0.175 * \frac{V}{\sqrt{L}}} = 1.2 \text{ [s]} \quad (12)$$

$$\theta_r = \frac{\pi * h_w}{2L} = 0.06 \text{ [rad]} \quad (13)$$

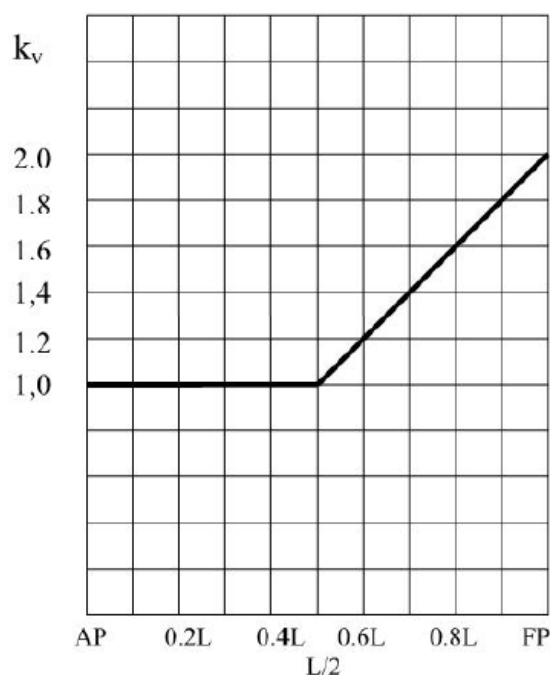
$$h_w = 0.6 * C_W = 0.5 \text{ [m]} \quad (14)$$

Επομένως ισχύει: $a_t = 1.79$ [m/s^2]

Σε αυτό το σημείο θα υπολογιστεί η επιτάχυνση a_v χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο από τον νηογνώμονα:

$$a_v = k_v * a_{cg} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (15)$$

Ο συντελεστής k_v δίνεται από το παρακάτω διάγραμμα και μεταβάλλεται κατά μήκος του πλοίου.



Διάγραμμα 2: Μεταβολή συντελεστή k_v [16]

Συνεπώς, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:

Πίνακας 18: Αποτελέσματα επιταχύνσεων a_n [16]

Συντεταγμένες κατά μήκος του πλοίου	K_v [-]	a_n [m/s^2]
0% -50% Long Position	1	40.56
60% Long Position	1.2	48.68
70% Long Position	1.4	56.79
80% Long Position	1.6	64.9
90% Long Position	1.8	73.02
100% Long Position	2	81.13

Τέλος, εφόσον υπολογίστηκαν όλες οι επιμέρους επιταχύνσεις, καταλήγουμε στην συνολική επιτάχυνση. Υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο που δίνεται από τον νηογνώμονα και είναι μεταβαλλόμενη, καθώς εξαρτάται από την επιτάχυνση a_n .

$$\text{Ισχύει: } a_c = \sqrt{a_v^2 + a_l^2 + a_t^2} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (16)$$

Επομένως, έχουμε:

Πίνακας 19: Αποτελέσματα επιταχύνσεων a_c [16]

Συντεταγμένες κατά μήκος του πλοίου	a_c [m/s^2]
0% -50% Long position	40.68
60% Long position	48.77
70% Long position	56.87
80% Long position	64.97
90% Long position	73.08
100% Long position	81.19

3.4 Υπολογισμός πιέσεων στον πυθμένα του σκάφους

Σε αυτό το σημείο θα πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των πιέσεων που ασκούνται κατά μήκος του πυθμένα του πλοίου (*design slamming pressures*). Θα χρησιμοποιηθούν οι παρακάτω εξισώσεις που δίνονται από τον νηογνώμονα:

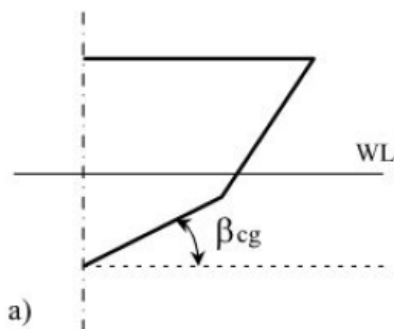
$$p_{sl} = \frac{a_{cg}}{0.14 \cdot A_{ref}} * K_{red} * K_1 * K_\beta \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (17)$$

$$A_{ref} = 0.7 * \frac{\Delta}{T} = 8.71 \text{ [m}^2\text{]} \quad (18)$$

$$K_{red} = 0.445 - 0.35 * \left(\frac{u^{0.75} - 1.7}{u^{0.75} + 1.7} \right) = 0.568 \text{ [-]} \quad (19)$$

$$u = 100 * \frac{n \cdot A}{50 - \beta_{cg}} = 0.757 \text{ [-]} \quad (20)$$

$$K_\beta = \frac{50 - \beta_x}{50 - \beta_{cg}} = 0.922 \text{ [-]} \quad (21)$$



Εικόνα 26: Γωνία ανόψωσης πυθμένα β_{cg} [16]

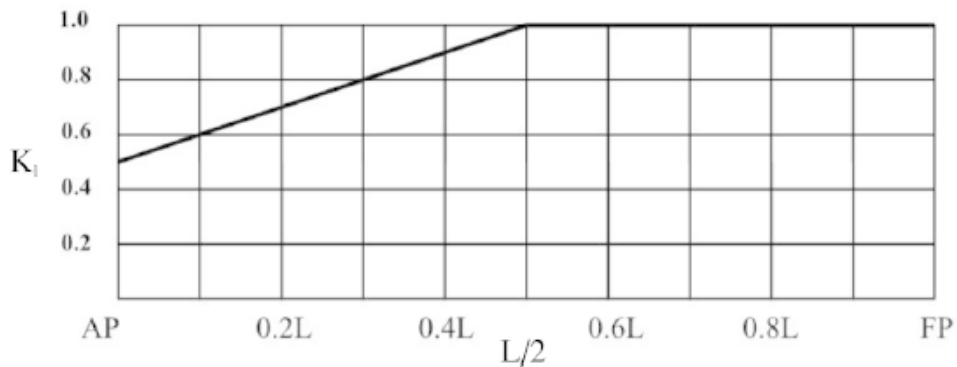
Όπου:

$n = 1$ [-] εφόσον έχουμε *monohull*

$A = spacing * span = 0.066$ [m^2]

$\beta_x = 23^\circ$

$\beta_{cg} = 20.73^\circ$



Διάγραμμα 3: Διακόμανση συντελεστή διαμήκου κατανομής [16]

Ο συντελεστής K_1 όπως φαίνεται και από το διάγραμμα μεταβάλλεται κατά μήκος του πλοίου, επομένως όπως είναι λογικό και η πίεση στο πυθμένα του πλοίου θα είναι και αυτή μεταβαλλόμενη. Πραγματοποιώντας τους υπολογισμούς, καταλήγουμε στα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 20: Πιέσεις στον πυθμένα του πλοίου (Slamming) [16]

Κατά μήκος του πλοίου	K_1 [-]	P_{sl} [KN/m^2]
0% Long Position	0.5	76.01
10% Long Position	0.6	91.2
20% Long Position	0.7	106.71
30% Long Position	0.8	121.61
40% Long Position	0.9	136.81
50% Long position	1	152.01
60% Long Position	1	152.01
70% Long Position	1	152.01
80% Long Position	1	152.01
90% Long Position	1	152.01
100% Long Position	1	152.01

3.5 Υπολογισμός πιέσεων πλευράς

Σε αυτό το σημείο θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό των πιέσεων πλευράς (*Forebody and bow impact pressure*), χρησιμοποιώντας τον παρακάτω τύπο που δίνει από τον νηογνώμονα.

$$P_{sl} = \frac{0.7 * C_L * C_H}{A^{0.3}} \left(0.6 + 0.4 * \frac{V}{\sqrt{L}} * \sin(\gamma) \cos(90^\circ - \alpha) \left(\frac{x}{L} - 0.4 \right) \sqrt{0.4 * \frac{V}{\sqrt{L}} + 0.6} \right)^2 [KN/m^2] \quad (22)$$

Όπου:

$$\frac{V}{\sqrt{L}} < 3$$

A: επιφάνεια εφαρμογής

$$A = spacing * span = 0.066 [m^2]$$

C_L : συντελεστής διόρθωσης μήκους του πλοίου

$$C_L = \frac{250L - L^2}{15000} = 0.21 [-] \quad (23)$$

C_H : συντελεστής διόρθωσης για το κατακόρυφο ύψος από την ίσαλο μέχρι το σημείο αναφοράς

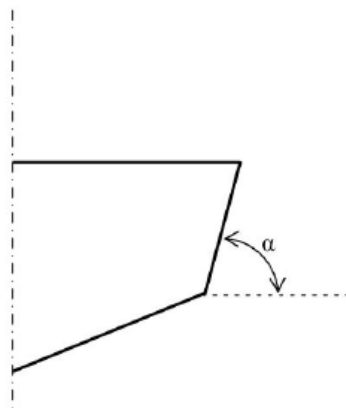
$$C_H = 1 - \frac{0.5}{C_w} * h_o = 1.72 [-] \quad (24)$$

h_o : Είναι η κατακόρυφη απόσταση από την ίσαλο στο βύθισμα T έως το σημείο αναφοράς

$$h_o = 1.25 [m]$$

α : γωνία *flare*, η οποία ορίζεται σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα

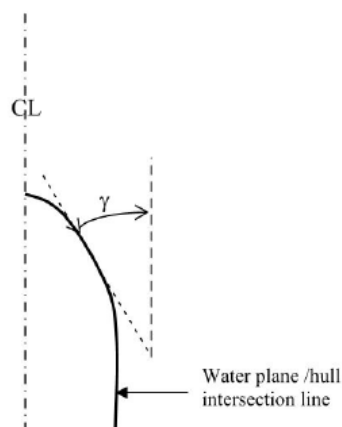
$$\alpha = 78.25^\circ$$



Εικόνα 27: Flare angle α [16]

γ : γωνία *water plane*, η οποία ορίζεται σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα

$$\gamma = 35.07^\circ$$



Εικόνα 28: *Water plane angle* γ [16]

x : η οριζόντια απόσταση από την θέση A.P μέχρι το σημείο αναφοράς

$$x = 11.982 [m]$$

$$a_0 = 3 * \frac{C_W}{L} + C_V * \frac{V}{\sqrt{L}} = 0.41 [m/s^2] \quad (25)$$

$$C_V = \frac{\sqrt{L}}{50} = 0.072 [-] \quad (26)$$

Επομένως ισχύει: $P_{st} = 1.10 [KN/m^2]$

3.6 Υπολογισμός υδροστατικής πίεσης

Σε αυτό το σημείο θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό της υδροστατικής πίεσης που ασκείται στο σκάφος. Η πίεση αυτή ασκείται στον πυθμένα του, στα πλευρικά τοιχώματα αλλά και στο κατάστρωμα. Σύμφωνα με τον νηογνώμονα *DNV* ο υπολογισμός της πραγματοποιείται με την χρήση των δύο παρακάτω τύπων.

Για σημεία αναφοράς μέχρι και την ίσαλο ισχύει:

$$p = \alpha * (10h_0 + (k_s - 1.5 * \frac{h_0}{T}) * C_W) [KN/m^2] \quad (27)$$

Για σημεία αναφοράς πάνω από την ίσαλο ισχύει:

$$p = \alpha * k_s (C_W - 0.67 * h_0) [KN/m^2] \quad (28)$$

Όπου:

$$C_W = 0.832 [-]$$

$$T = 0.7 [m]$$

h_0 : Είναι η κατακόρυφη απόσταση από την ίσαλο στο βύθισμα T έως το σημείο αναφοράς

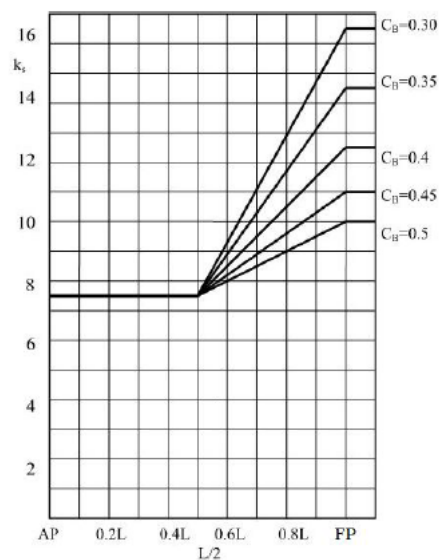
α : συντελεστής έντασης φορτίου [-] , ο οποίος υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 21: Συντελεστής έντασης φορτίου α [16]

<i>Location</i>		<i>General (all types of crafts)</i>
<i>Bottom, side, transom</i>		1
<i>Deck</i>	<i>Weather deck</i>	1
	<i>Weather deck higher than 0.1L above WL</i>	0.8
<i>Deckhouse side</i>		0.8
<i>Front Bulkhead</i>	<i>1st Tier</i>	2
	<i>Other fronts</i>	0.8
<i>End Bulkhead</i>		0.8

k_s : συντελεστής κατανομής πίεσης [-],

ο οποίος μεταβάλλεται σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 4: Μεταβολή συντελεστή κατανομής πίεσης [16]

Θα υπολογισθεί η υδροστατική πίεση στον πυθμένα του πλοίου, η οποία όπως είναι λογικό αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση. Επομένως, θα χρησιμοποιηθεί ο τύπος για τα σημεία αναφοράς μέχρι την ίσαλο και ισχύει:

$$h_0 = 1.25 [m]$$

$$\alpha = 1 [-]$$

Συνεπώς, κάνοντας τους υπολογισμούς προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 22: Υδροστατική πίεση του πλοίου [16]

Συντεταγμένες κατά μήκος του πλοίου	p [KN/m ²]
0% Long Position	16.1
10% Long Position	16.1
20% Long Position	16.1
30% Long Position	16.1
40% Long Position	16.1
50% Long Position	16.1
60% Long Position	17.59
70% Long Position	19.18
80% Long Position	20.59
90% Long Position	22.09
100% Long Position	23.59

3.7 Υπολογισμός των φορτίσεων των *girders*

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί επιτυχώς ο υπολογισμός των συνολικών πιέσεων, θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό των φορτίσεων των *girders* κατά μήκος του σκάφους. Πιο αναλυτικά, πρόκειται για τις περιπτώσεις στις οποίες ο πυθμένας δέχεται κρούσεις σε ταχύτητες, οι οποίες ικανοποιούν τον περιορισμό $\frac{V}{\sqrt{L}} > 3$.

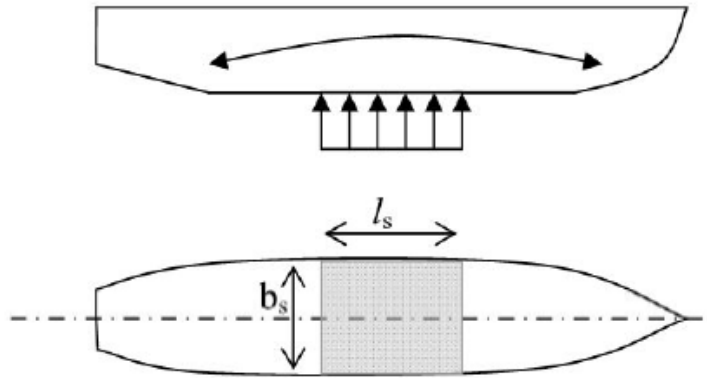
Θα μελετηθούν και θα υπολογισθούν οι δύο παρακάτω περιπτώσεις:

- 1) *Crest Landing*
- 2) *Hollow Landing*

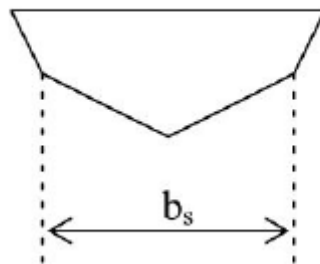
3.7.1 *Crest Landing*

Η περίπτωση *crest landing* εκφράζει την κρούση του πλοίου σε κυματισμό στο μεσαίο τμήμα του, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα που δίνονται από τον νηογνώμονα. Η πίεση σφυρόκρουσης (*slamming*) στον πυθμένα του πλοίου εφαρμόζεται στην επιφάνεια A_R και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$A_R = 0.7\Delta * \frac{\left(1 + 0.2 * \frac{a_{cg}}{g_0}\right)}{T} = 15.91 [m^2], \text{ ισχύει για } \frac{V}{\sqrt{L}} > 3 \quad (29)$$



Εικόνα 29: Επιφάνεια AR (Hogging) [16]



Εικόνα 30: Πλάτος b_s της επιφάνειας AR (Hogging) [16]

Στην συνέχεια, προχωράμε στον υπολογισμό της διαμήκης ροπής κάμψης της μέσης τομής, η οποία υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_B = \frac{\Delta}{2} * (g_0 + a_{cg}) * \left(e_w - \frac{l_s}{4}\right) [kN * m] \quad (30)$$

Όπου:

$$l_s = \frac{A_R}{b_s} = 2.42 [m] \quad (31)$$

$$e_w = 0.25 * L = 3.25 [m] \quad (32)$$

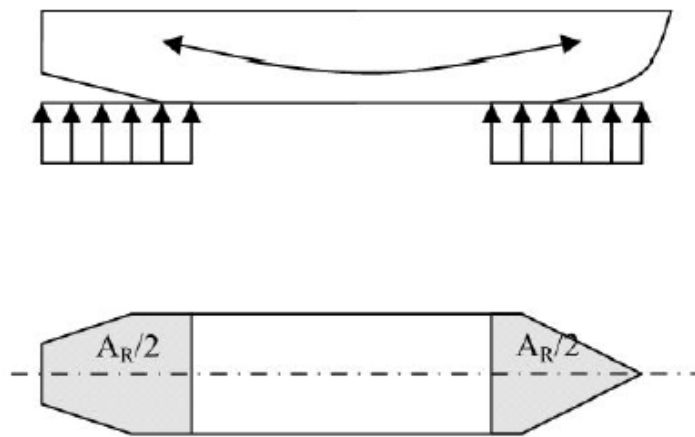
Επομένως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς ισχύει: $M_B = 352.35 [kN * m]$ (*Hogging*)

Και πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $e_w - \frac{l_s}{4} > 0.04L \Rightarrow 2.65 > 0.52$ (Ισχύει)

3.7.2 Hollow Landing

Η περίπτωση *hollos landing* εκφράζει την κρούση του πλοίου σε κυματισμό στο πρυμναίο και στο πρωραίο τμήμα του σκάφους, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα που δίνονται από τον νηογνώμονα. Η πίεση σφυρόκρουσης (*slamming*) στον πυθμένα του πλοίου εφαρμόζεται στην επιφάνεια A_R και δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$A_R = 6.7\Delta * \frac{(1+0.2*\frac{a_{cg}}{g_0})}{T} = 13.64 [m^2], \text{ ισχύει για } \frac{V}{\sqrt{L}} > 3 \quad (33)$$



Εικόνα 31: Επιφάνεια A_R (*Sagging*) [16]

Στην συνέχεια, προχωράμε στον υπολογισμό της διαμήκης ροπής κάμψης της μέσης τομής, η οποία υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$M_B = \frac{\Delta}{2} * (g_0 + a_{cg}) * (e_r - e_w) [kN * m] \quad (34)$$

Όπου:

$$e_w = 0.25 * L = 3.25 [m]$$

e_r : μέση απόσταση από το κέντρο των επιφανειών $\frac{A_R}{2}$ μέχρι το LCG

$$e_r = 4.95 \text{ [m]}$$

Επομένως, σύμφωνα με τους υπολογισμούς ισχύει: $M_B = 373.02 \text{ [kN * m]}$ (*Sagging*)

Και πρέπει να ισχύει ο περιορισμός $e_r - e_w > 0.04L \Rightarrow 1.7 > 0.52$ (Ισχύει)

3.7.3 Υπολογισμός ροπών κάμψης *Hogging* και *Sagging*

Σε αυτό το σημείο θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό των καμπιτικών ροπών του σκάφους, οι οποίες υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους που δίνονται από τον νηογνώμονα DNV:

$$M_{tot} = M_{SW} + M_W \text{ [kN*m]}$$

Όπου:

M_{SW} : ροπή *still water* στην δυσμενέστερη κατάσταση φόρτωσης [kN*m]

$$M_{SW} = 0.11 * C_W * L^2 * B * C_B \text{ [kN*m]} \text{ (για } Hogging) \tag{36}$$

$$M_{SW} = 0 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Sagging)$$

M_W : Ροπή *wave* στο μέσο του πλοίου [kN*m]

$$M_W = 0.19 * C_W * L^2 * B * C_B \text{ [kN*m]} \text{ (για } Hogging) \tag{36}$$

$$M_W = 0.14 * C_W * L^2 * B * (C_B + 0.7) \text{ [kN*m]} \text{ (για } Sagging) \tag{37}$$

Επομένως έχουμε:

$$M_{SW} = 14.44 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Hogging)$$

$$M_{SW} = 0 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Sagging)$$

$$M_W = 24.94 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Hogging)$$

$$M_W = 63.85 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Sagging)$$

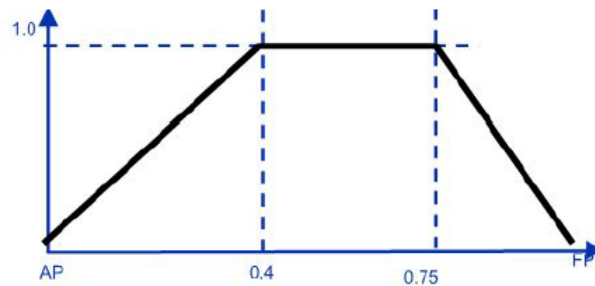
Και

$$M_{tot} = 39.39 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Hogging)$$

$$M_{tot} = 63.85 \text{ [kN*m]} \text{ (για } Sagging)$$

Για να υπολογισθεί η ροπή κάμψης κατά μήκος του πλοίου, χρησιμοποιείται ο παρακάτω συντελεστής k_m .

$$\text{Ισχύει: } M = k_m * M_{tot} [KN * m] \quad (38)$$



Διάγραμμα 5: Μεταβολή πλοίου Συντελεστή k_m κατά μήκος του [6]

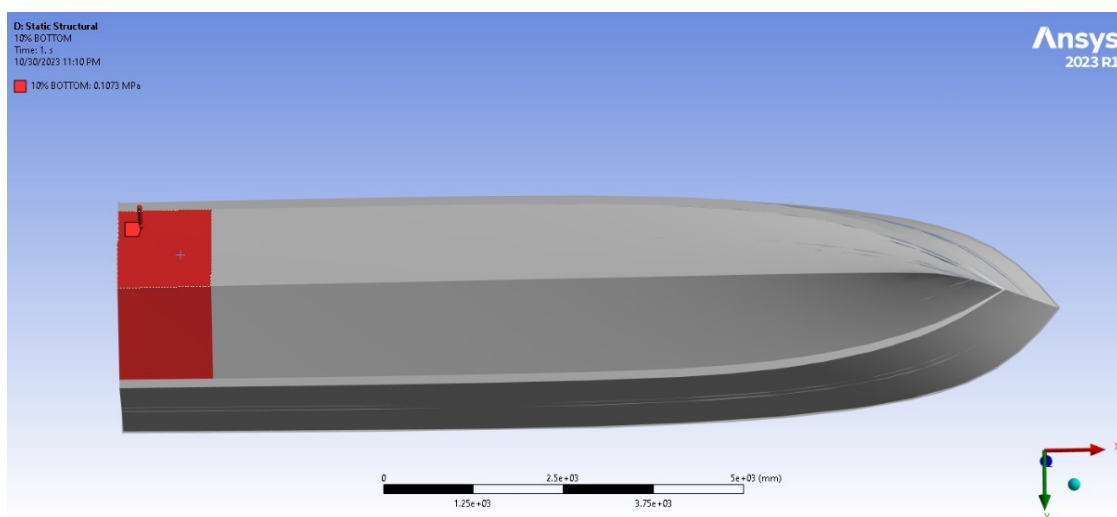
Πίνακας 23: Κατανομή καμπτικής ροπής κατά μήκος του πλοίου [16]

Κατά μήκος του πλοίου	M_{tot} (Hogging) [KN*m]	M_{tot} (Sagging) [KN*m]
0% Long Position	0	0
10% Long Position	9.8475	15.9625
20% Long Position	19.695	31.925
30% Long Position	29.616	48.007
40% Long Position	39.39	63.85
50% Long Position	39.39	63.85
60% Long Position	39.39	63.85
70% Long Position	39.39	63.85
75% Long Position	39.39	63.85
80% Long Position	31.512	51.08
90% Long Position	15.756	25.54
100% Long Position	0	0

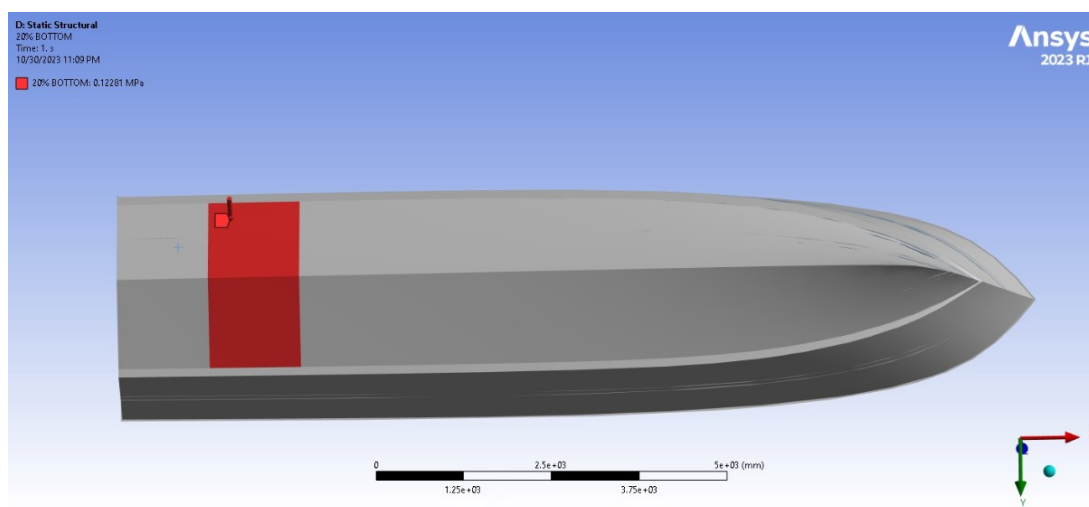
Κεφάλαιο 4: Μελέτη Αντοχής αρχικού σκάφους

4.1 Ορισμός των πιέσεων στην κατασκευή

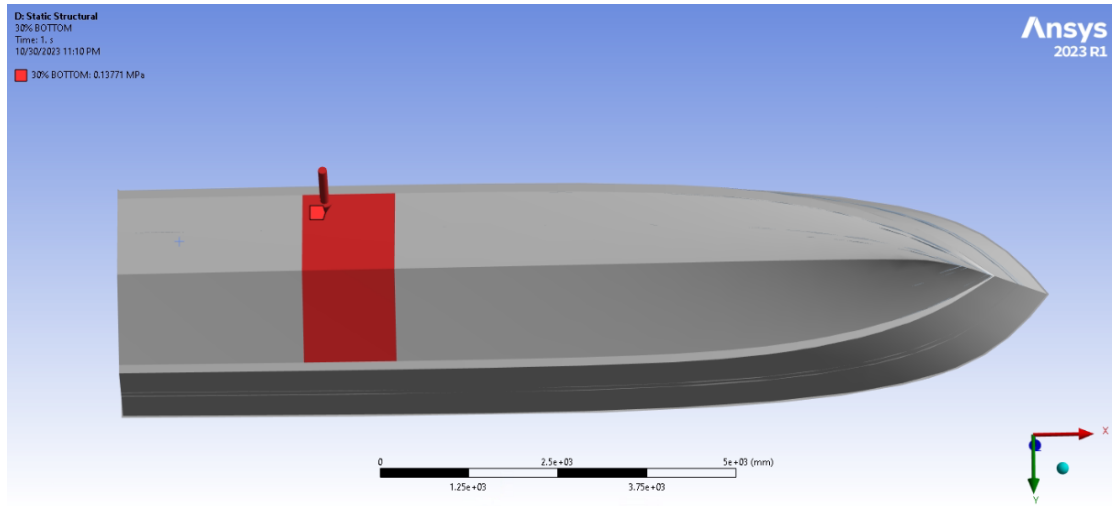
Σε αυτό το σημείο ορίζονται οι πιέσεις, που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο μέσω των κανονισμών των νηογνομόνων του *DNV*. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν οι πιέσεις στον πυθμένα και στα πλευρικά τοιχώματα και κατά μήκος του πλοίου, με συγκεκριμένη ισαπόσταση μεταξύ των νομέων (*frame spacing*). Για τον ορισμό τους όμως στο πρόγραμμα *ANSYS* έγινε η κατάλληλη προεργασία στο σχεδιαστικό πρόγραμμα *Rhinoceros 6*. Επομένως, κάνοντας χρήση της εντολής *split* πραγματοποιήθηκε ο χωρισμός της γάστρας του πλοίου (*Hull*) σε πλάκες. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε αναλυτικά τις όλες πιέσεις που εφαρμόστηκαν στις πλάκες του πλοίου.



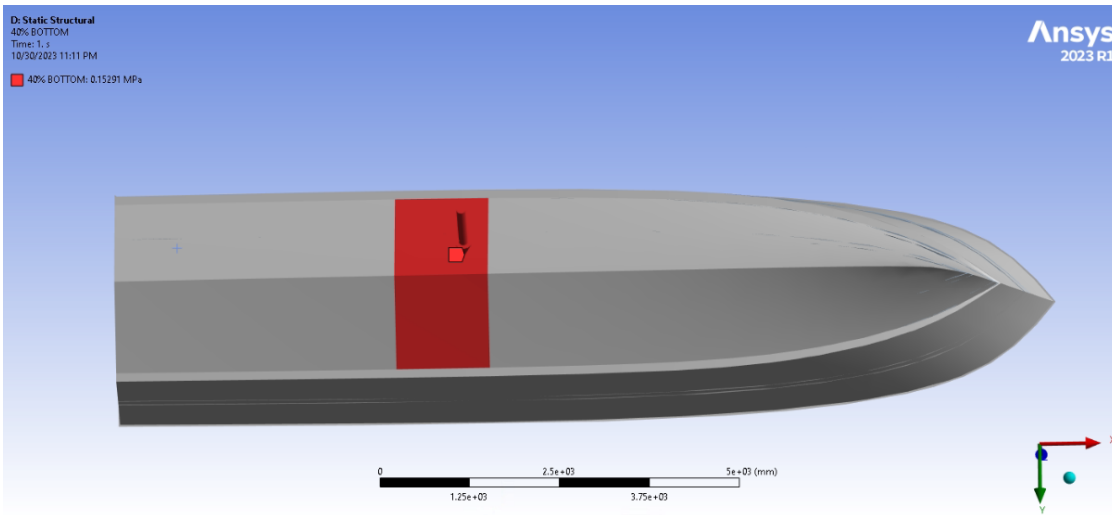
Εικόνα 32: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 10% *Long Position*



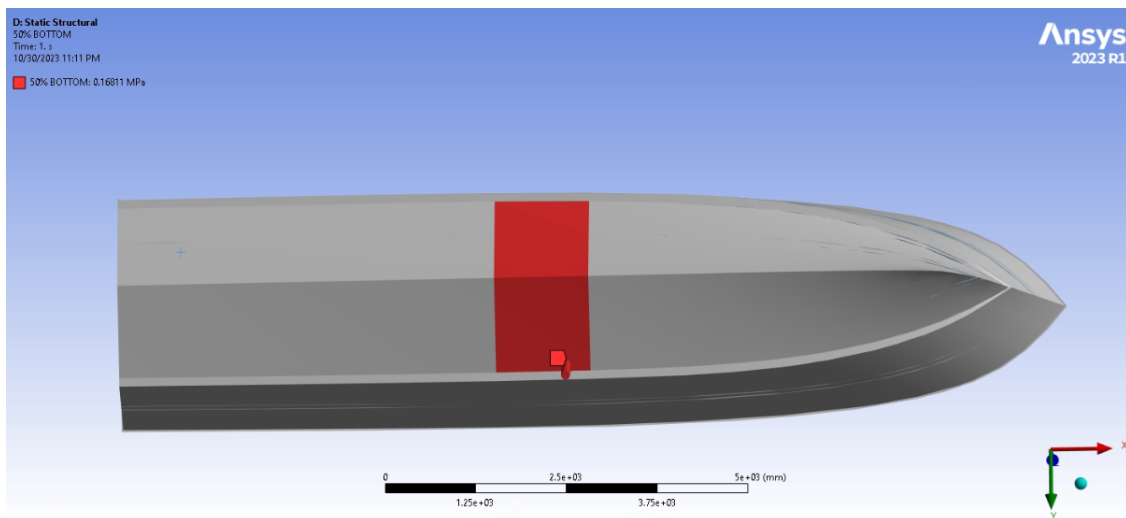
Εικόνα 33: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 20% *Long Position*



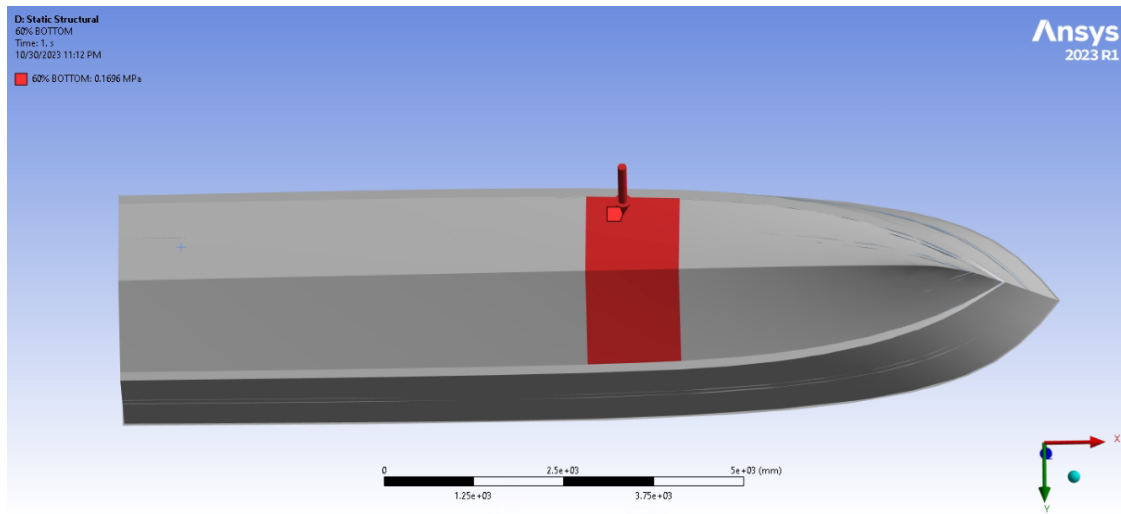
Εικόνα 34: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 30% Long Position



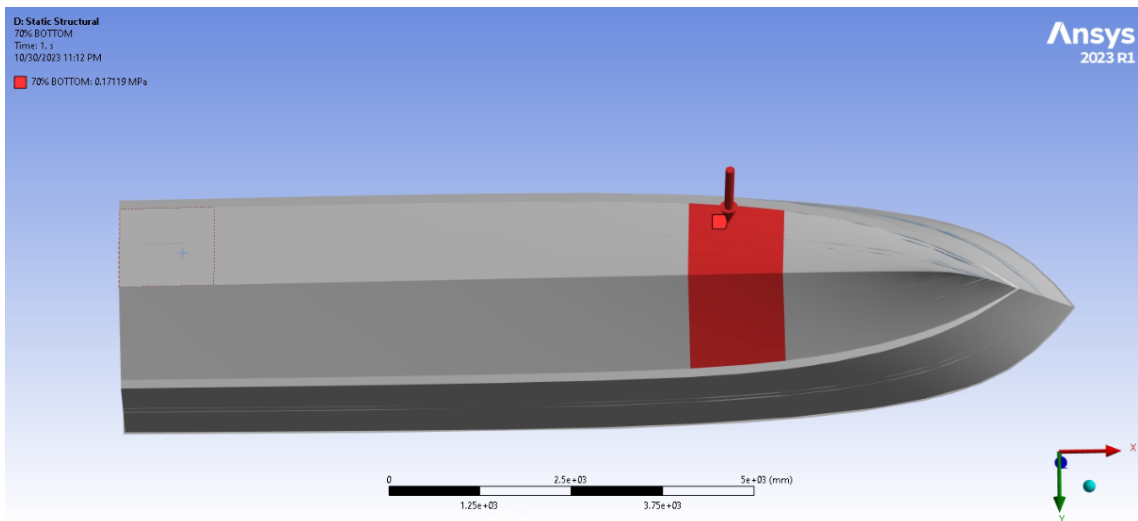
Εικόνα 35: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 40% Long Position



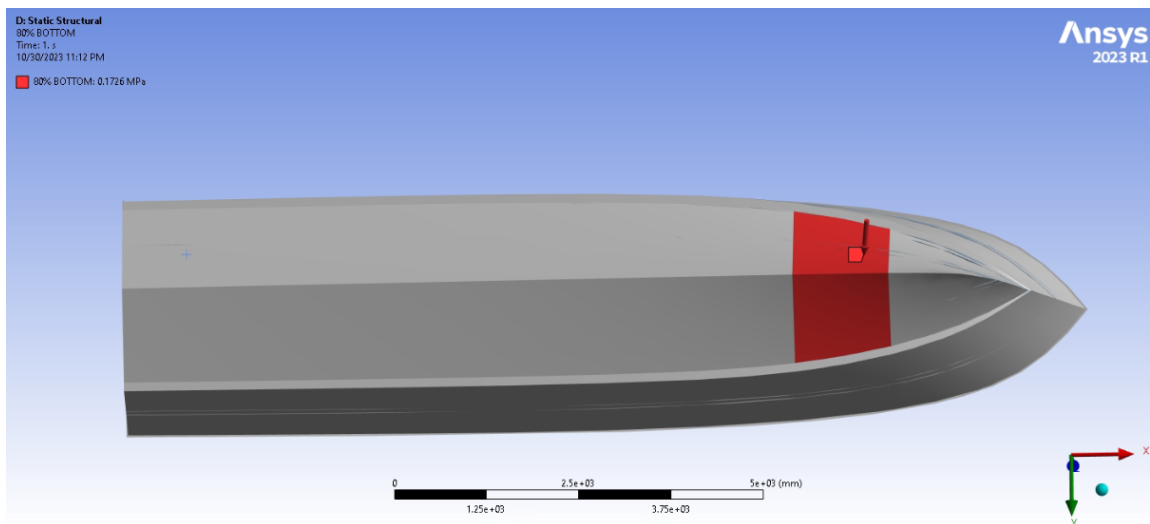
Εικόνα 36: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 50% Long Position



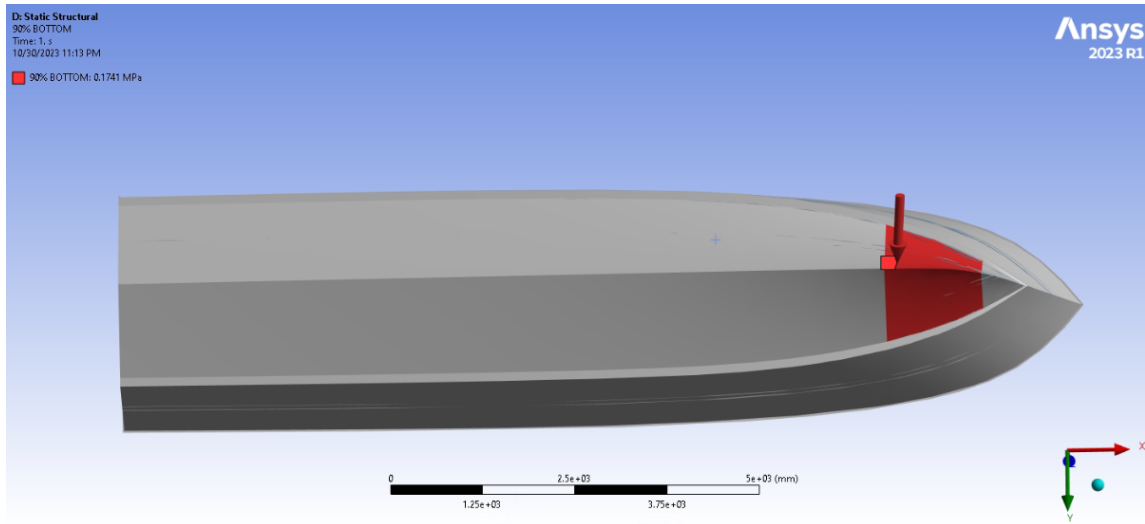
Εικόνα 37: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 60% Long Position



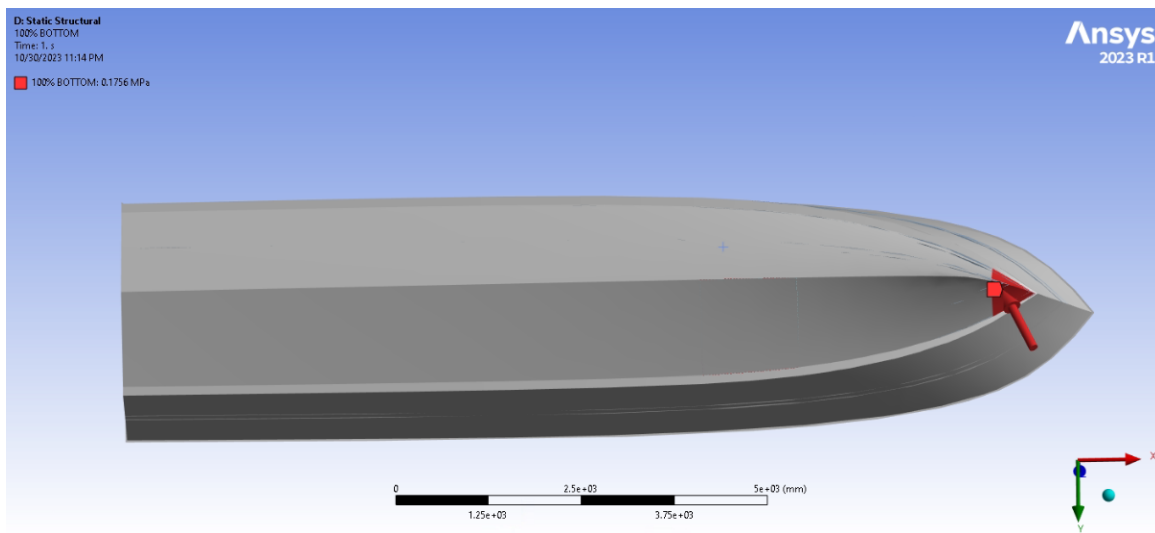
Εικόνα 38: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 70% Long Position



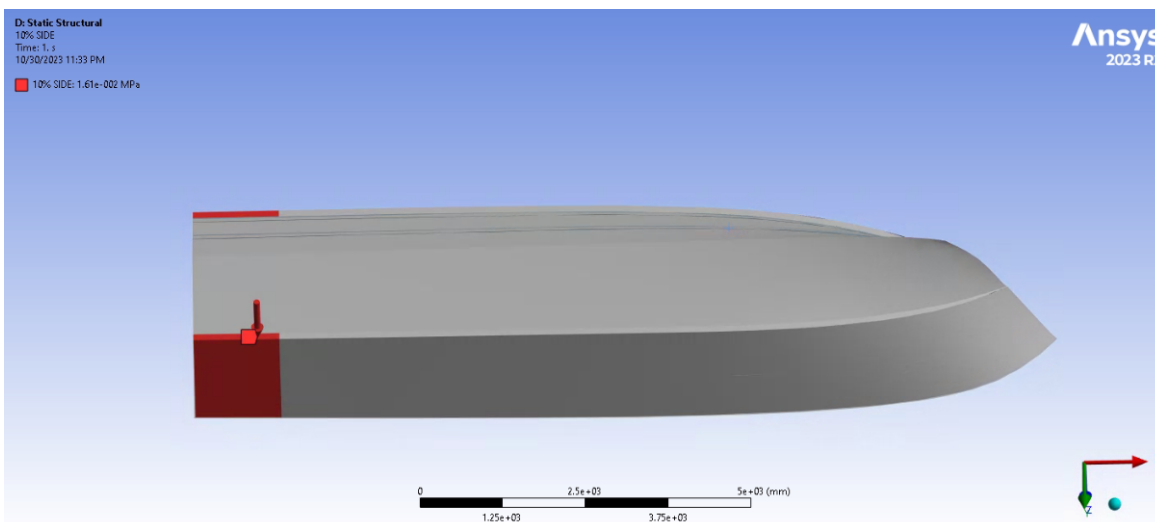
Εικόνα 39: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 80% Long Position



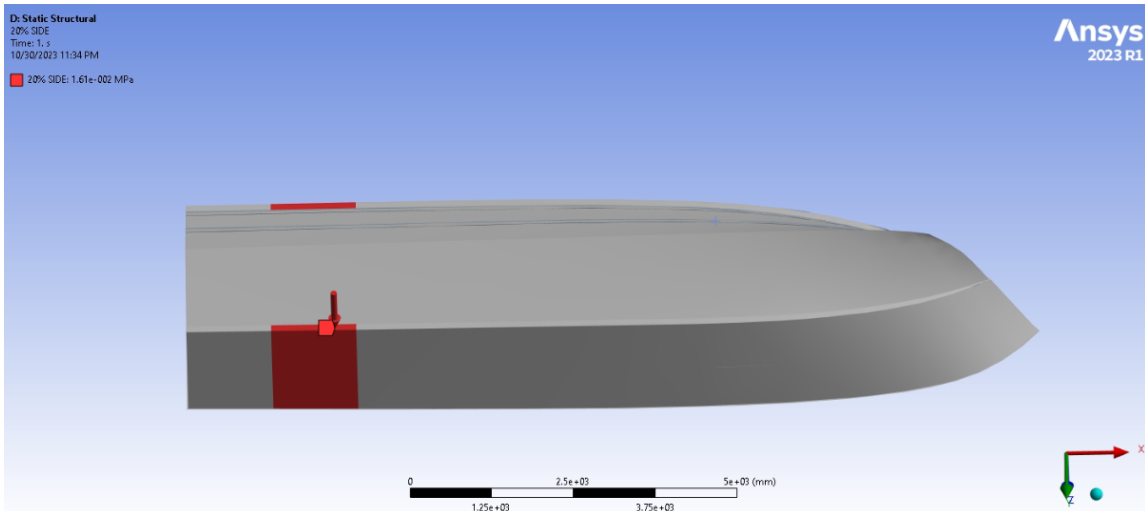
Εικόνα 40: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 90% Long Position



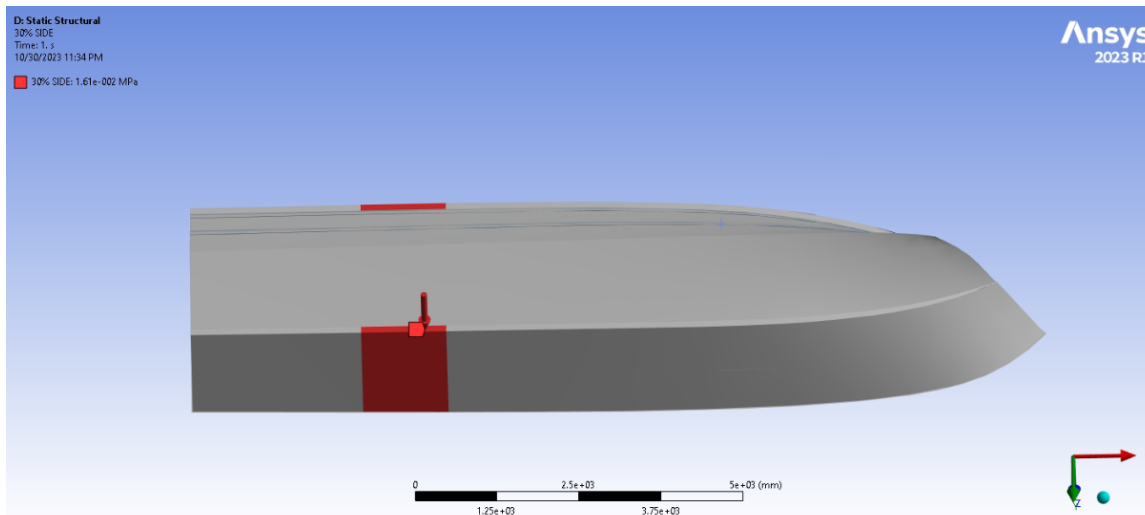
Εικόνα 41: Ορισμός πίεσης πυθμένα στο 100% Long Position



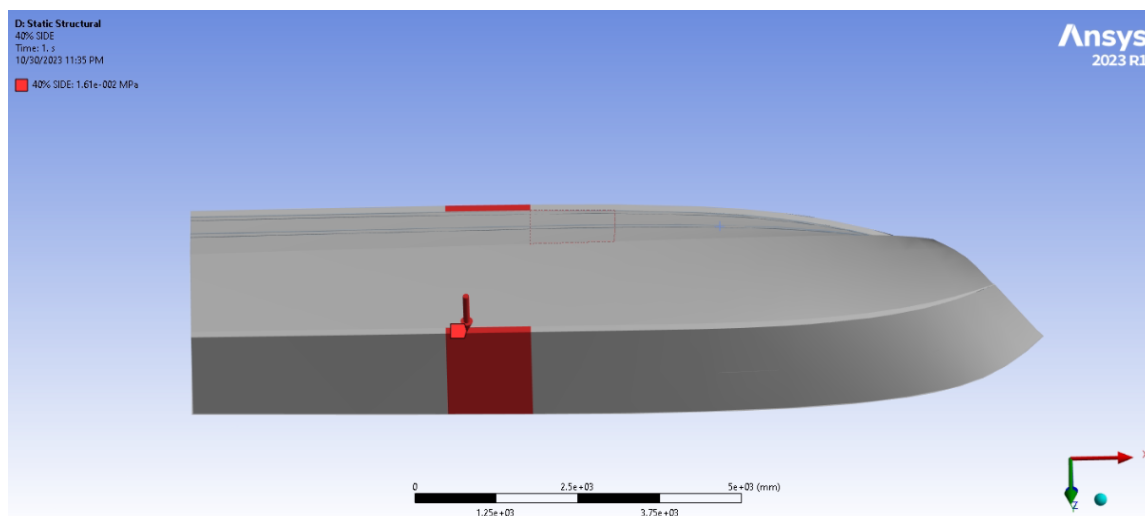
Εικόνα 42: Ορισμός πίεσης side στο 10% Long Position



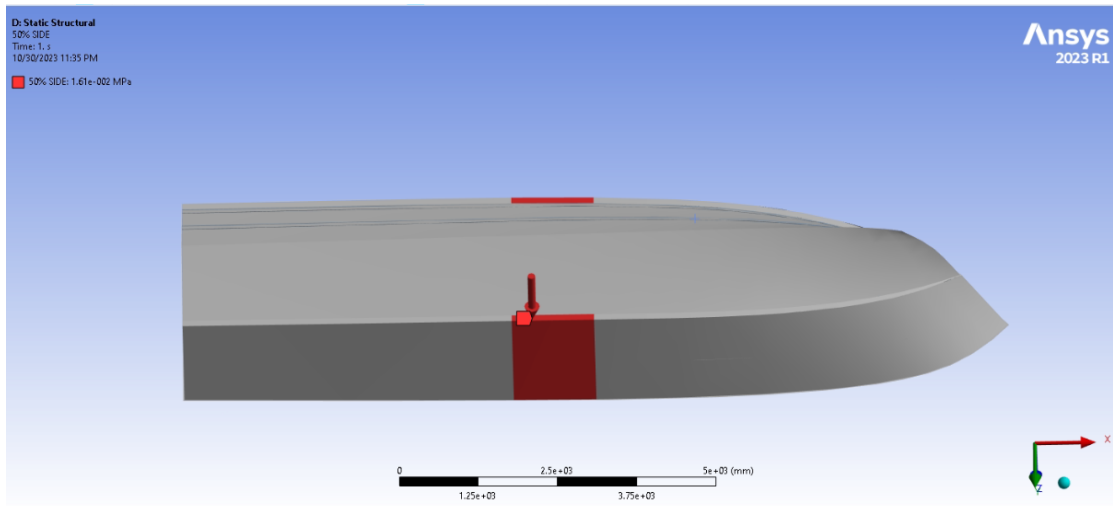
Εικόνα 43: Ορισμός πίεσης side στο 20% Long Position



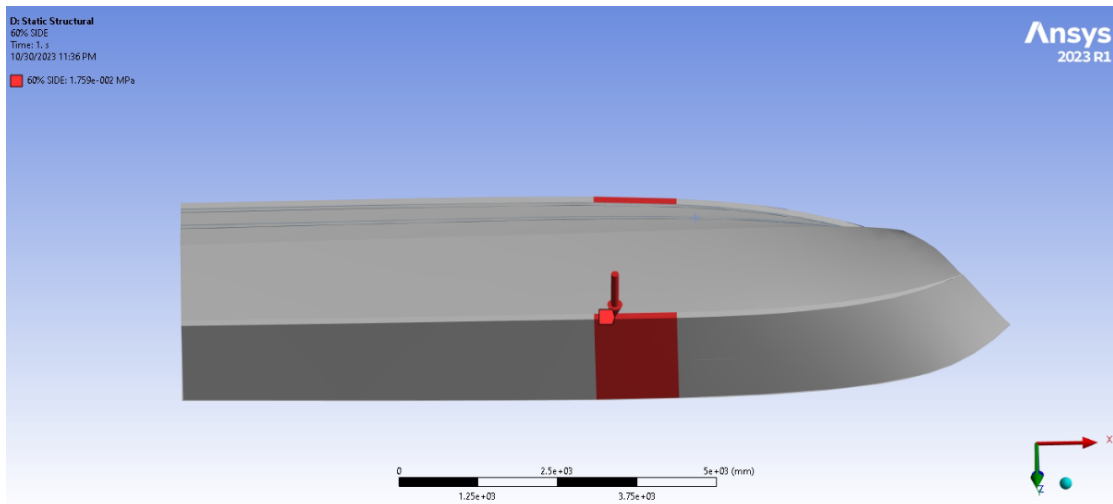
Εικόνα 44: Ορισμός πίεσης side στο 30% Long Position



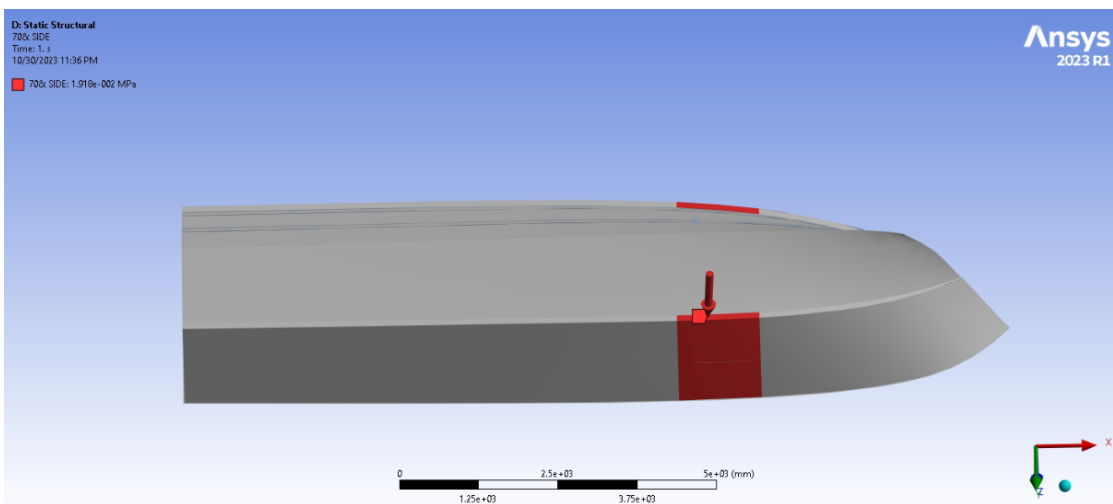
Εικόνα 45: Ορισμός πίεσης side στο 40% Long Position



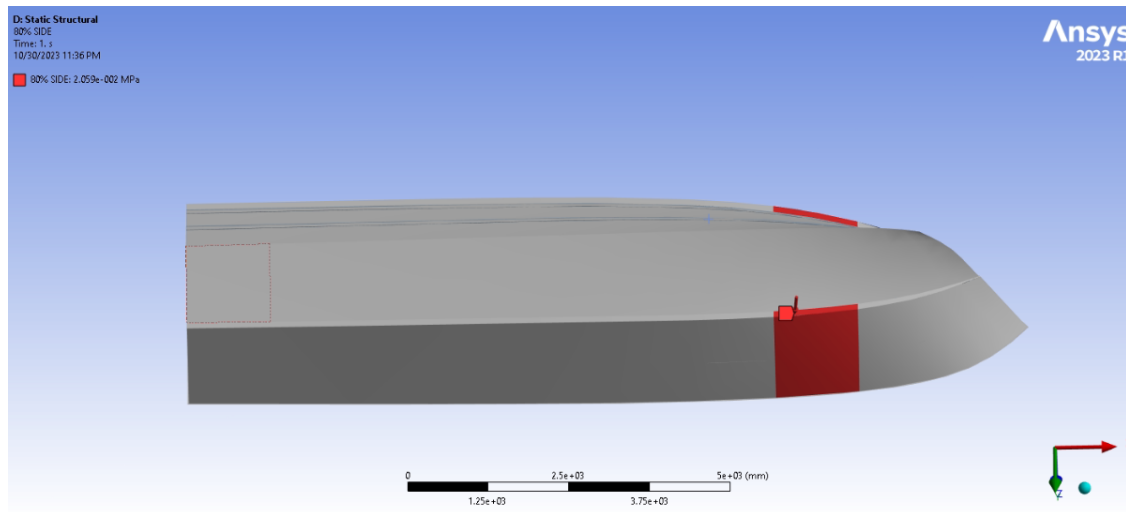
Εικόνα 46: Ορισμός πίεσης side στο 50% Long Position



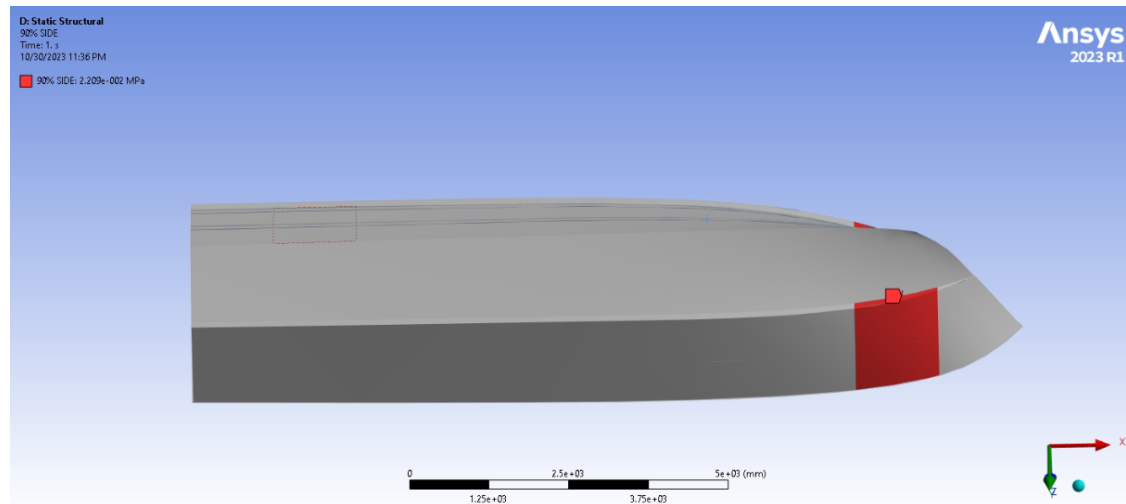
Εικόνα 47: Ορισμός πίεσης side στο 60% Long Position



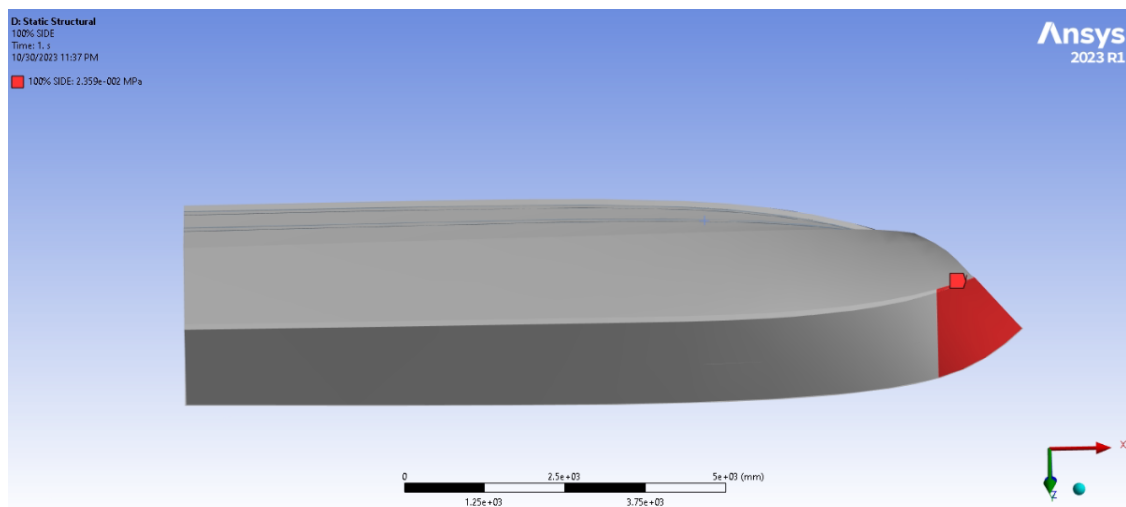
Εικόνα 48: Ορισμός πίεσης side στο 70% Long Position



Εικόνα 49: Ορισμός πίεσης side στο 80% Long Position



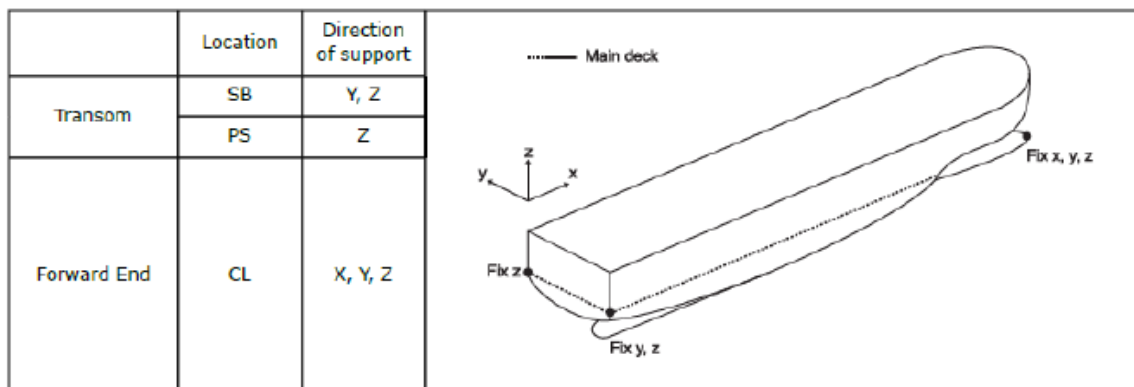
Εικόνα 50: Ορισμός πίεσης side στο 90% Long Position



Εικόνα 51: Ορισμός πίεσης side στο 100% Long Position

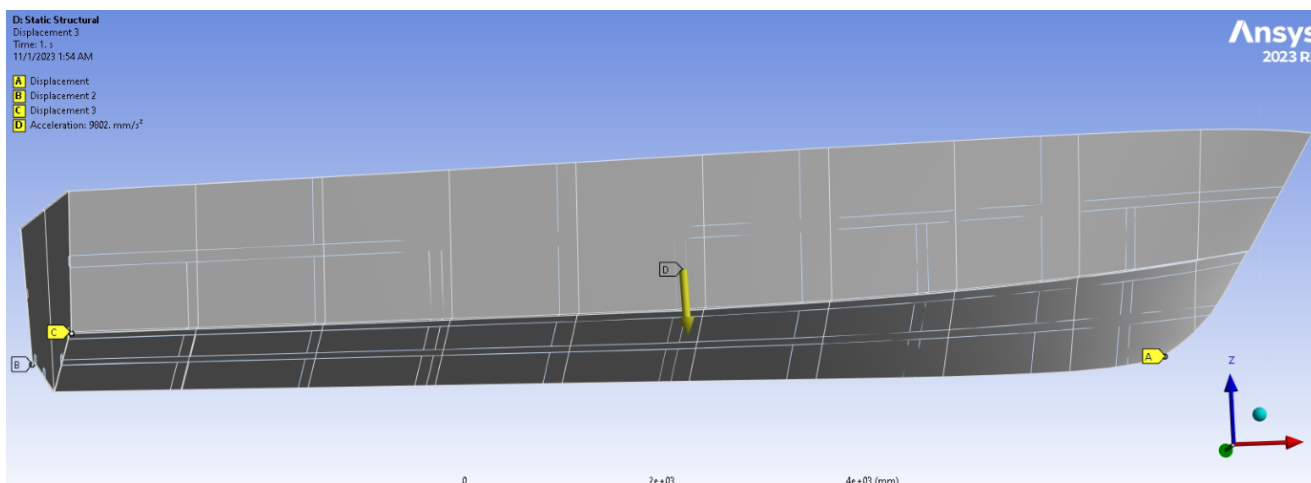
4.2 Ορισμός συνοριακών συνθηκών (Boundary conditions)

Ο ορισμός των συνοριακών συνθηκών πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα *DNVGL* (*DNVGL-CG-0127 Section.2 – Pt.5*), όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Αρχικά, πρέπει να οριστεί ένα σημείο στην πλώρη του σκάφους στο οποίο δεν επιτρέπει τη κίνηση σε κανέναν από τους 3 άξονες (x,y,z) και άλλα 2 σημεία στην πρύμνη του σκάφους. Στο σημείο που ορίζεται στο *SB* επιτρέπεται η κίνηση του μόνο κατά τον άξονα x, ενώ στο σημείο στο *PS* μόνο στους άξονες x, y.



Εικόνα 52: Κανονισμός οριακών συνθηκών (DNV) [17]

Για την εφαρμογή των οριακών συνθηκών στο πρόγραμμα *ANSYS* αρχικά ορίζεται η επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9.81 [m/s^2]$, ενώ στη συνέχεια γίνεται η χρήση της οριακής συνθήκης *Inertia Relief*. Τέλος, τοποθετούνται τα 3 σημεία σύμφωνα με τον παραπάνω κανονισμό.



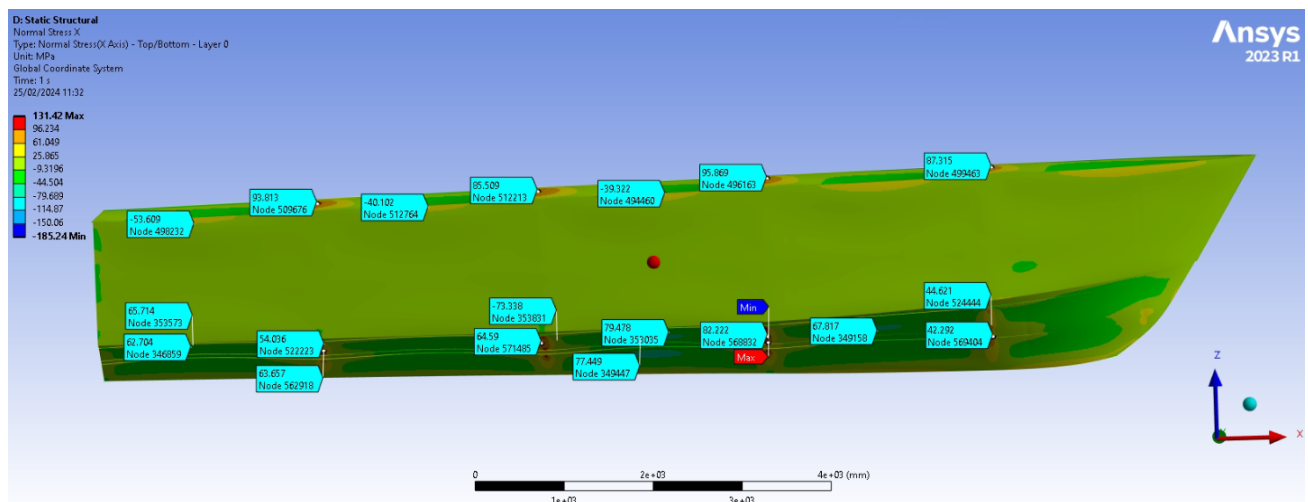
Εικόνα 53: Ορισμός των οριακών συνθηκών της κατασκευής

4.3 Αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων

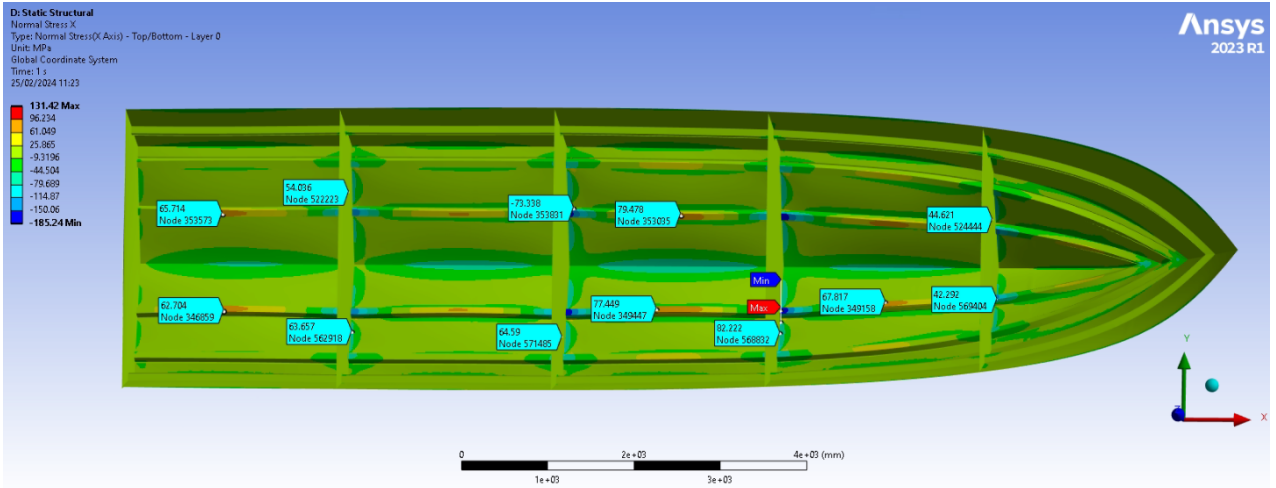
Εφόσον, έχουν οριστεί επιτυχώς όλες οι πιέσεις που ασκούνται στις πλάκες του σκάφους, καθώς και οι οριακές συνθήκες, προχωράμε στην επίλυση του προβλήματος. Θα παρουσιαστούν αναλυτικά τα παρακάτω αποτελέσματα:

- Ορθή τάση κατά τον άξονα x (*Normal stress x*)
- Ορθή τάση κατά τον άξονα y (*Normal stress y*)
- Ορθή τάση κατά τον άξονα z (*Normal stress z*)
- Διατμητική τάση (*Shear stress*)
- Ελάχιστη κύρια τάση (*Minimum principal stress*)
- Μέση κύρια τάση (*Middle principal stress*)
- Μέγιστη κύρια τάση (*Maximum principal stress*)
- Συνολική Παραμόρφωση (*Total deformation*)

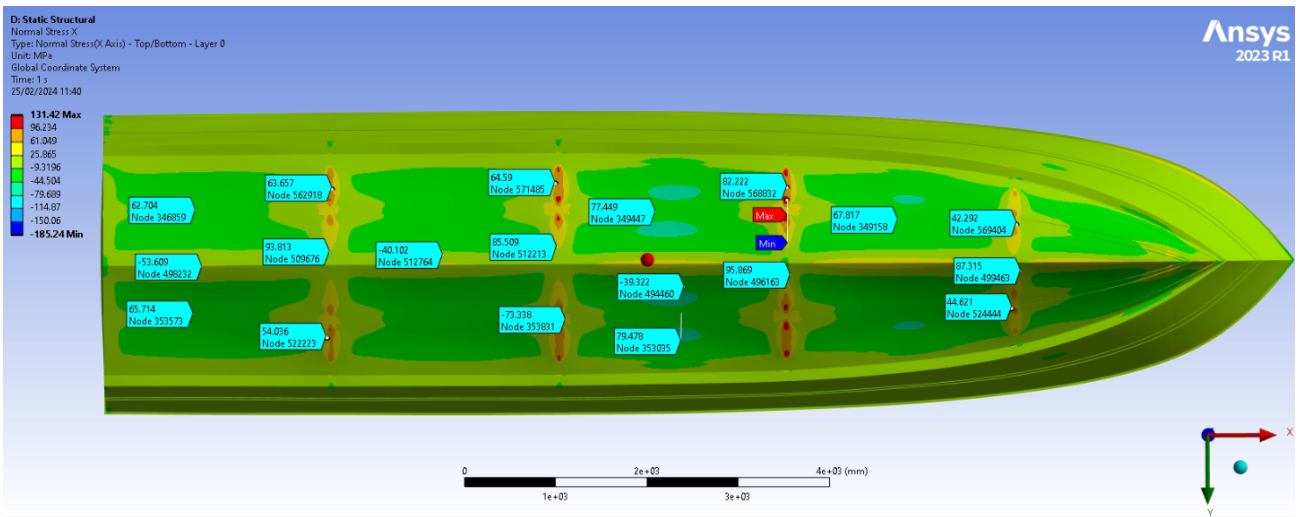
Σκοπός της παρακάτω μελέτης είναι ο έλεγχος της συνολικής αντοχής του σκάφους, έτσι ώστε να ληφθεί η απόφαση για την βελτιστοποίηση του. Συγκεκριμένα, εστιάζουμε στα σημεία που οι τάσεις και οι παραμορφώσεις υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια. Για την πλήρη μελέτη της αντοχής του σκάφους χρησιμοποιήθηκαν δυο βασικά κριτήρια αστοχίας. Το κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης και το κριτήριο αστοχίας «Tsai–Wu», το οποίο χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε κατασκευές από σύνθετα υλικά. Τα 2 αυτά κριτήρια αναλύουν την κατασκευή και δίνουν ως αποτέλεσμα έναν *safety factor* για κάθε *element*. Στις περιπτώσεις που αυτός ο *safety factor* είναι μικρότερος του 1, έχουμε τοπική αστοχία της κατασκευής.



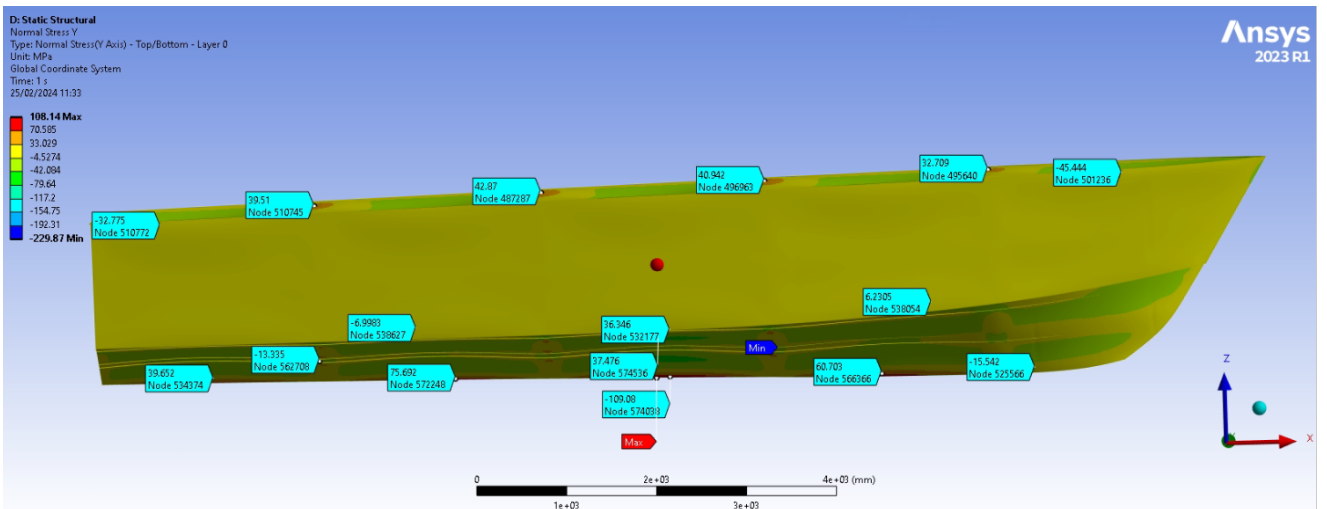
Εικόνα 54: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (*Front view*)



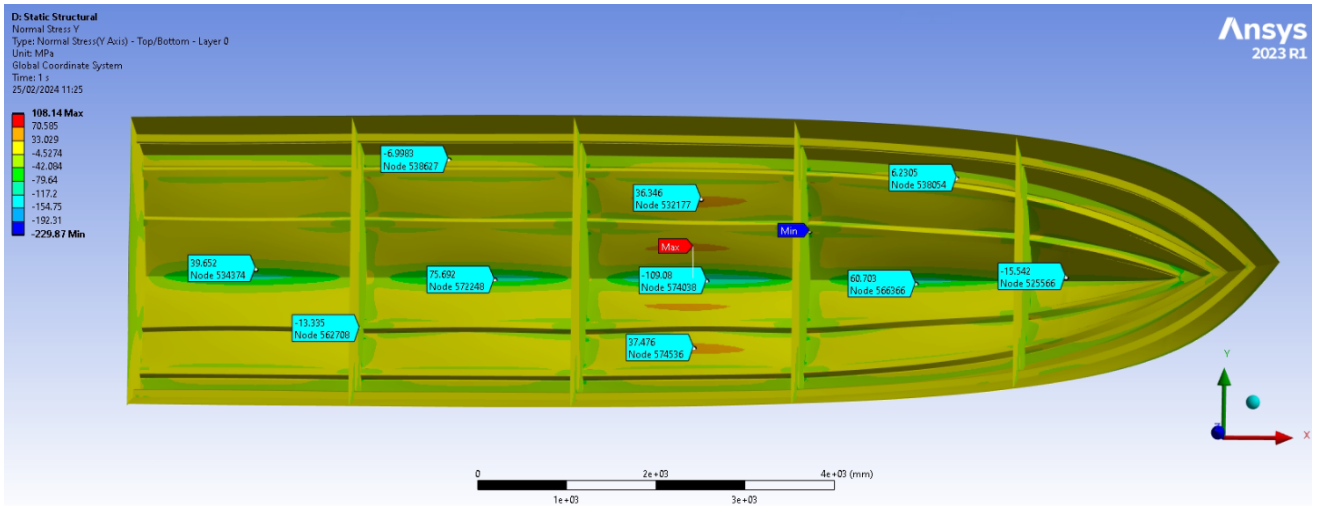
Εικόνα 55: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (Top view)



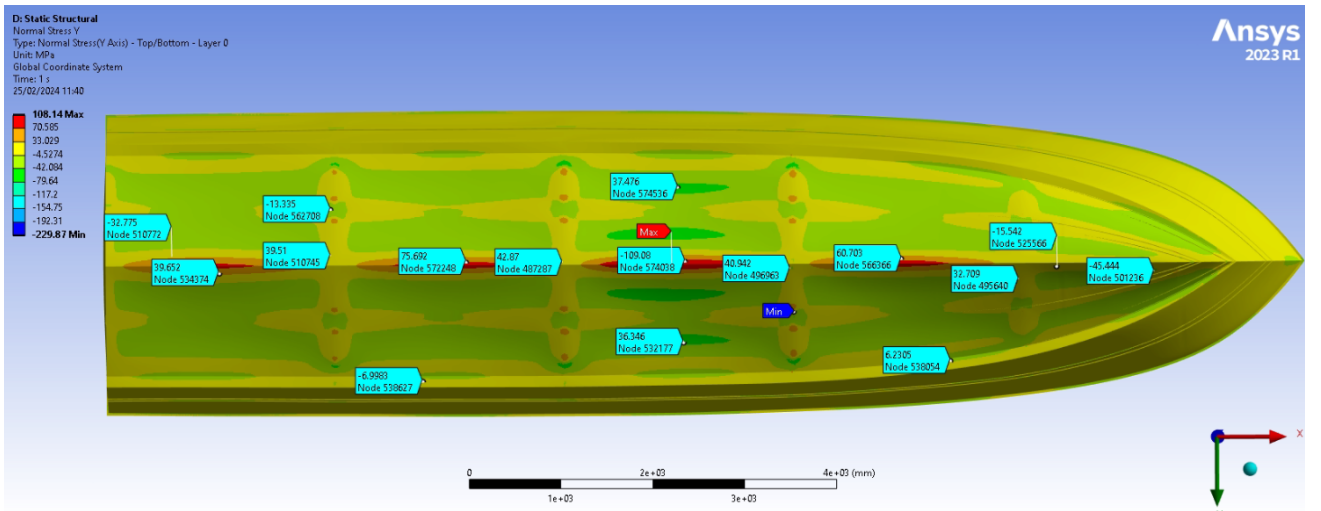
Εικόνα 56: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (Bottom view)



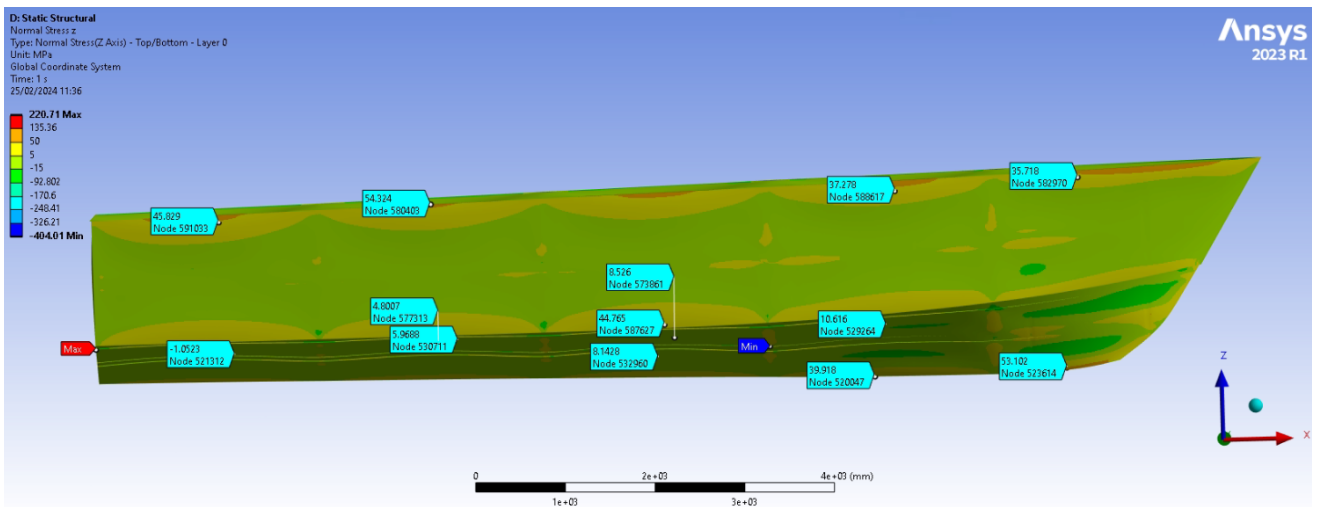
Εικόνα 57: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (Front view)



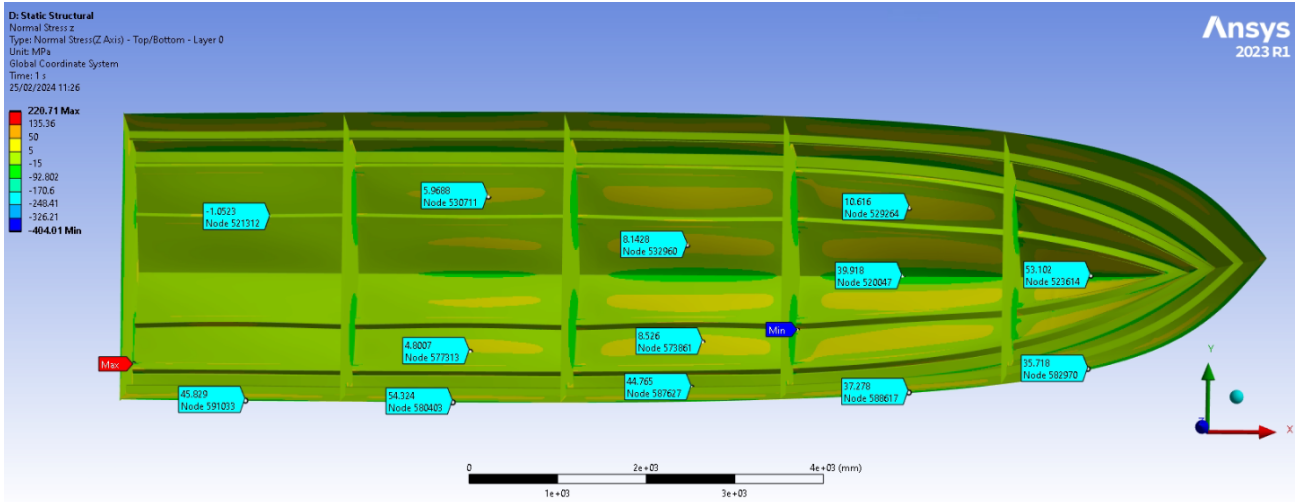
Εικόνα 58: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (Top view)



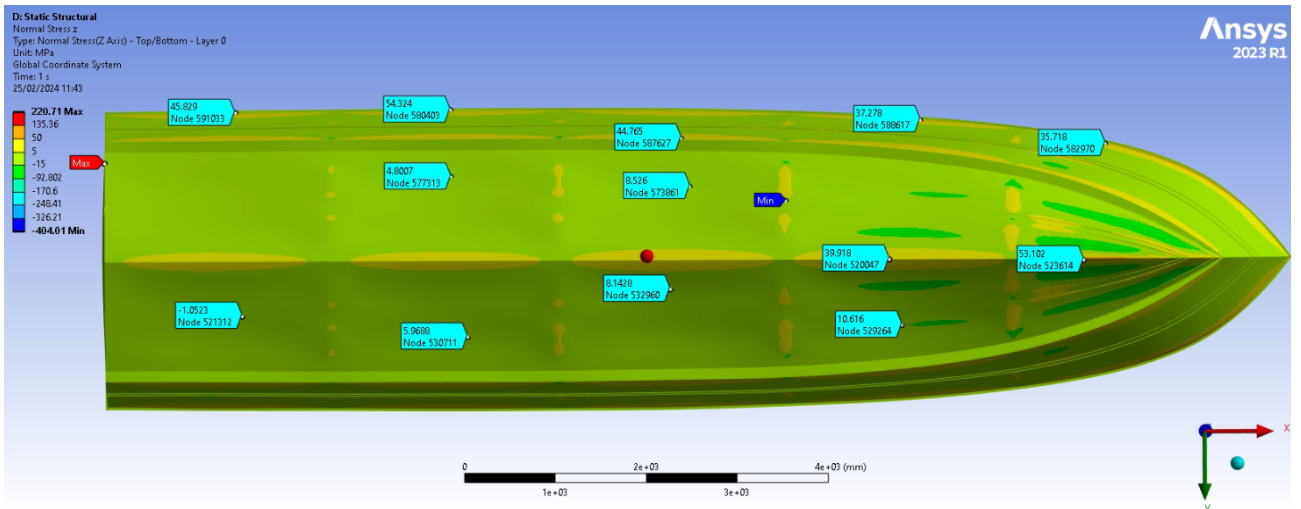
Εικόνα 59: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (Bottom view)



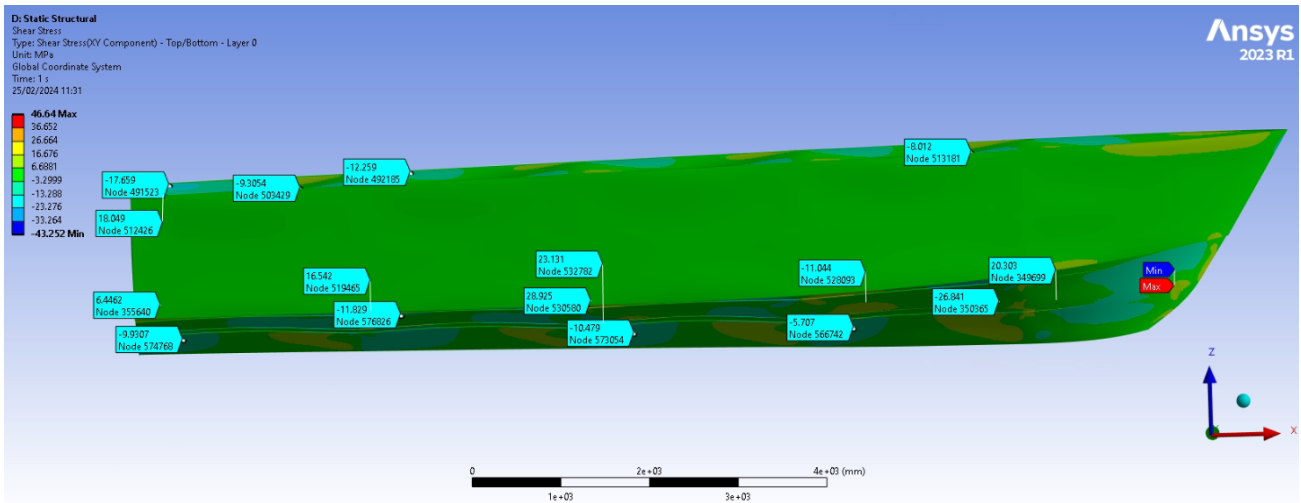
Εικόνα 60: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Front view)



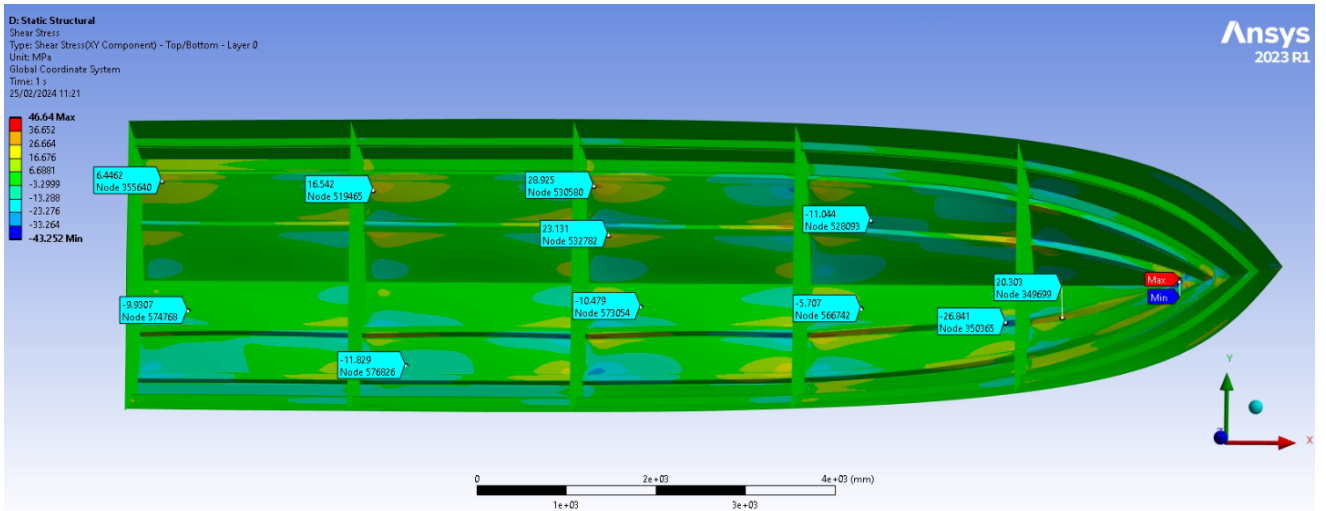
Εικόνα 61: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Top view)



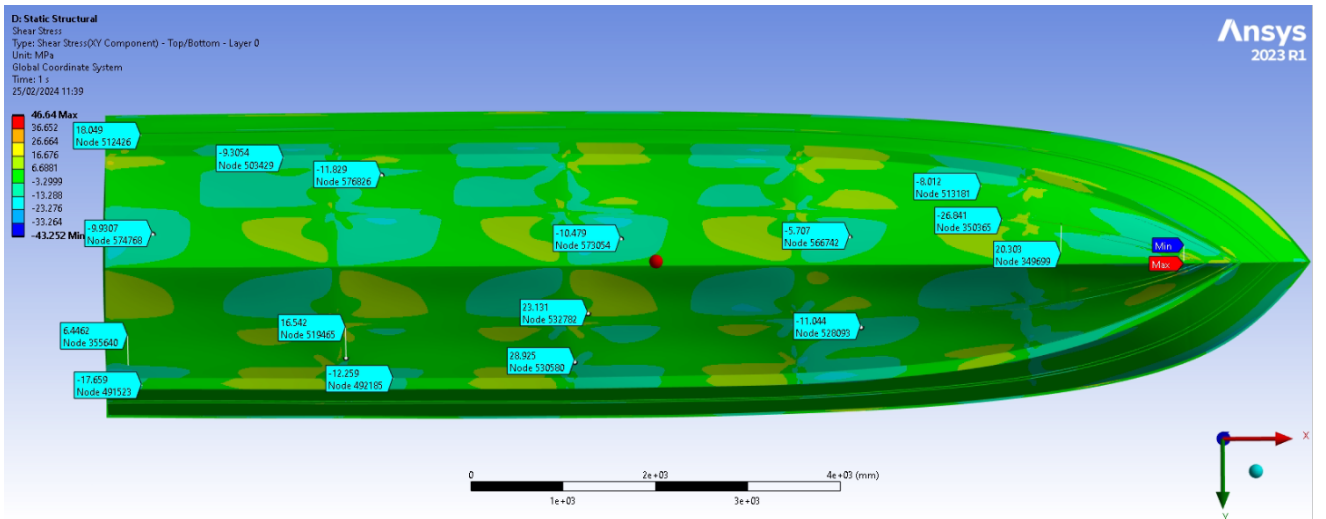
Εικόνα 62: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Bottom view)



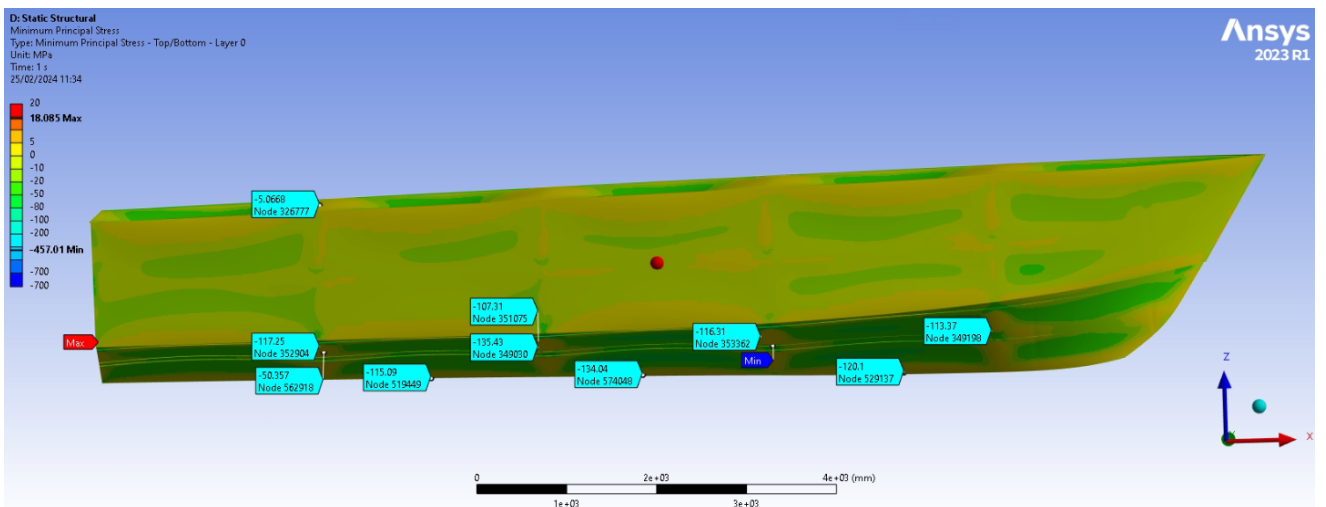
Εικόνα 63: Διατμητική τάση (Front view)



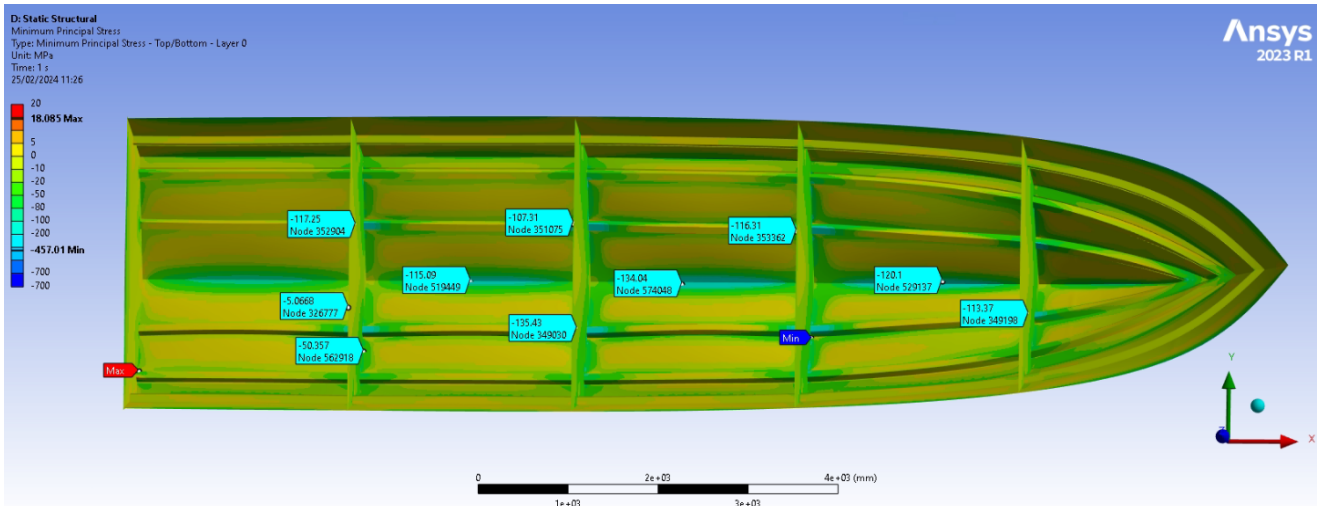
Εικόνα 64: Διατμητική τάση (Top view)



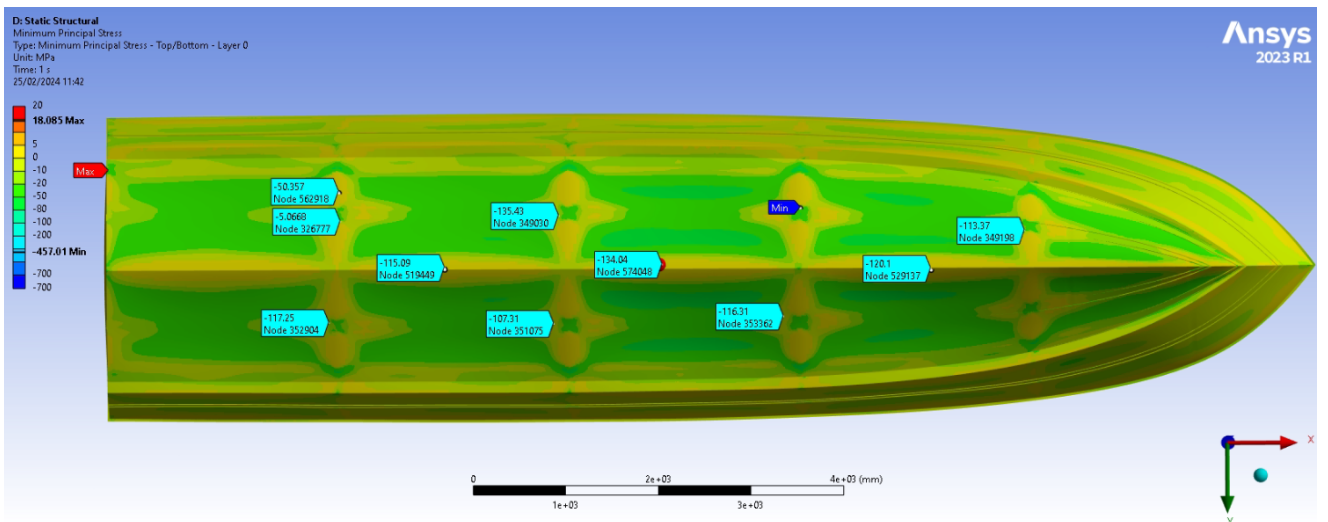
Εικόνα 65: Διατμητική τάση (Bottom view)



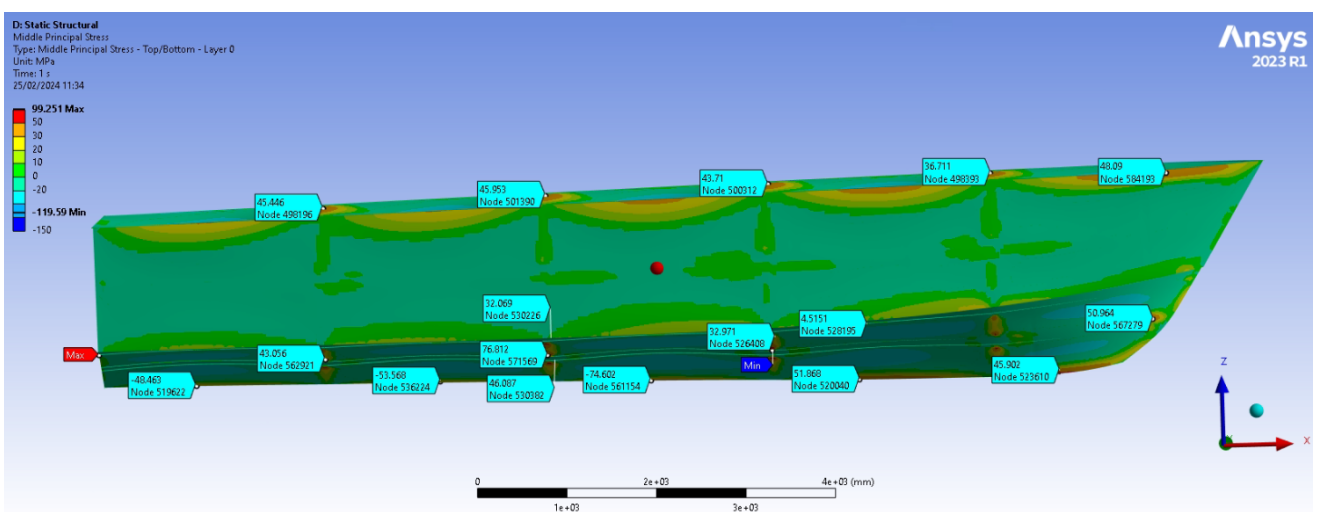
Εικόνα 66: Ελάχιστη κύρια τάση (front view)



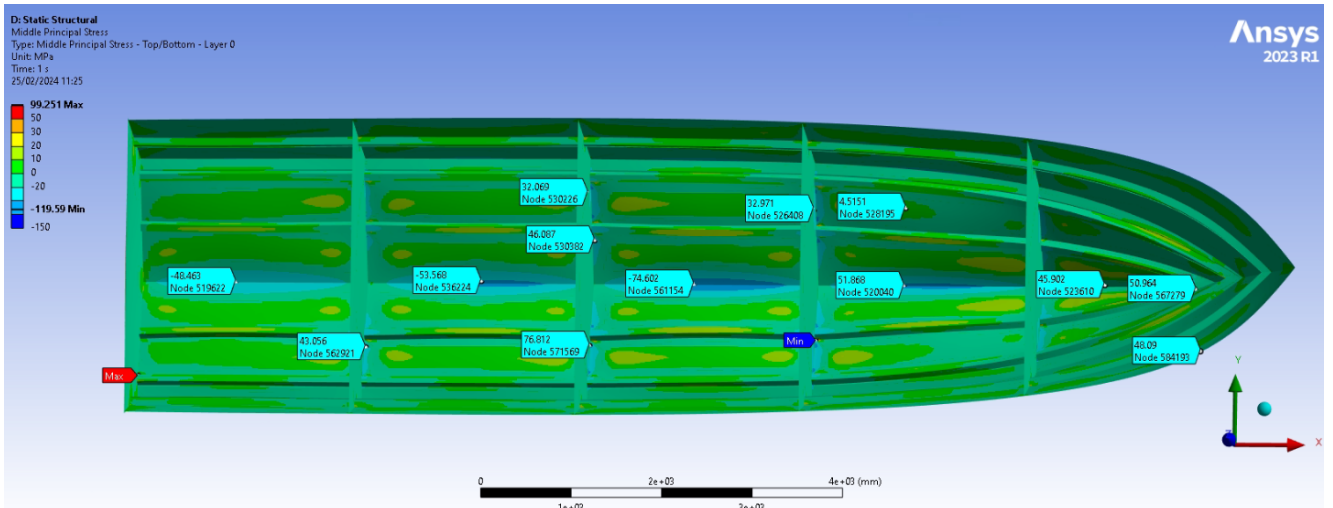
Εικόνα 67: Ελάχιστη κύρια τάση (top view)



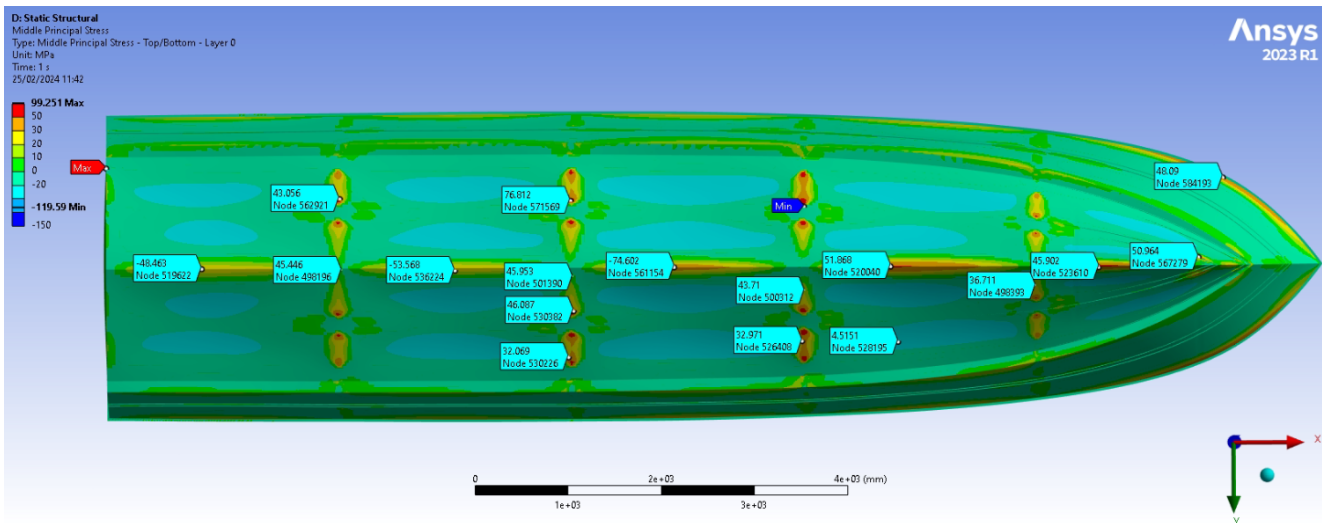
Εικόνα 68: Ελάχιστη κύρια τάση (bottom view)



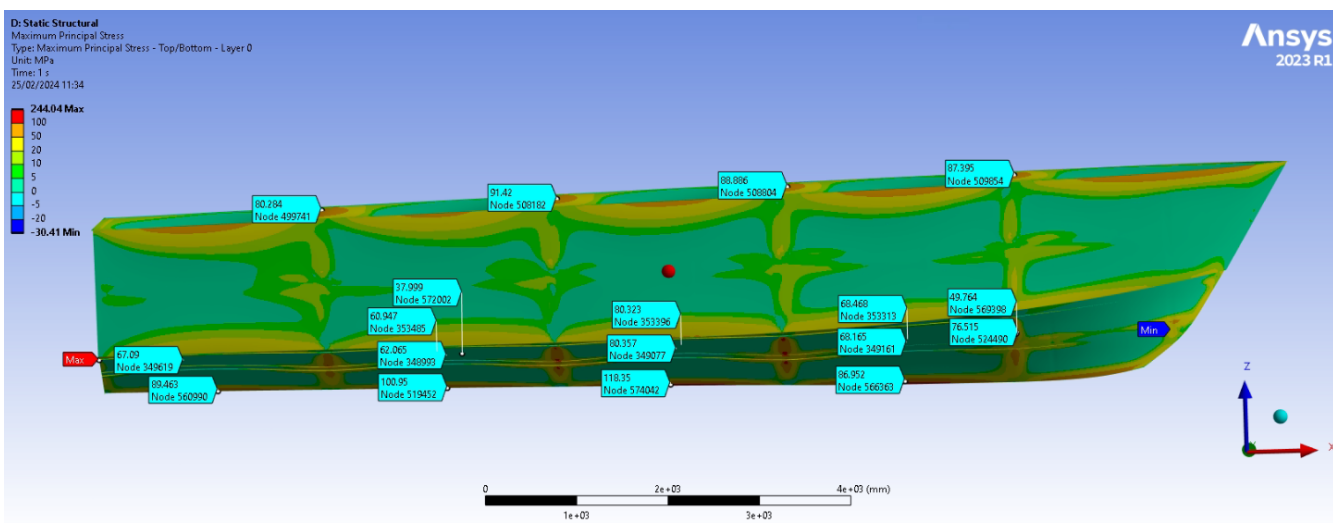
Εικόνα 69: Μέση κύρια τάση (front view)



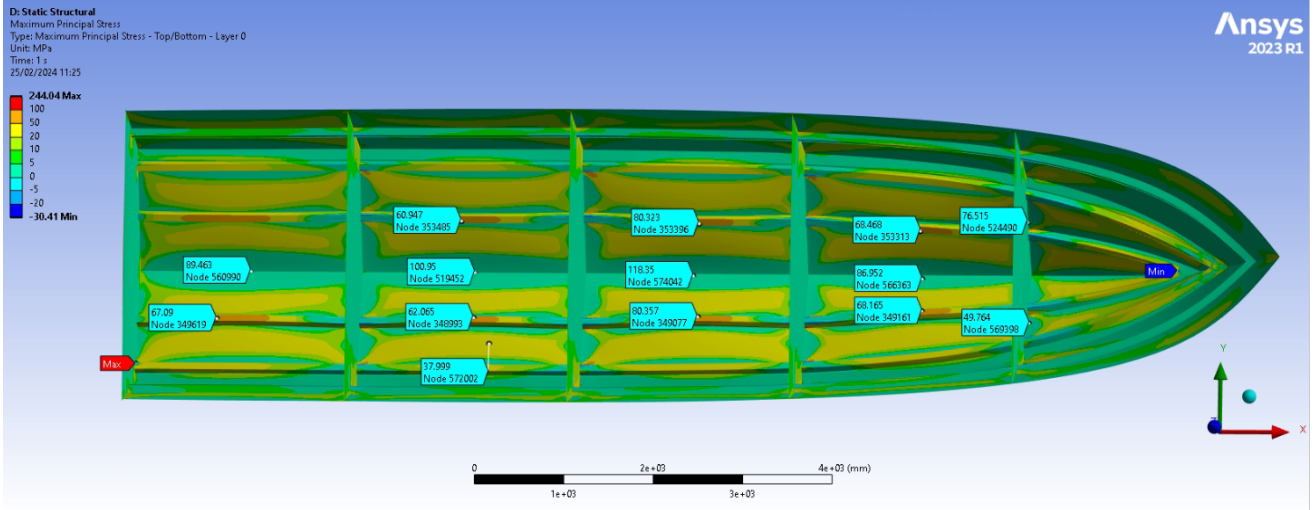
Εικόνα 70: Μέση κύρια τάση (top view)



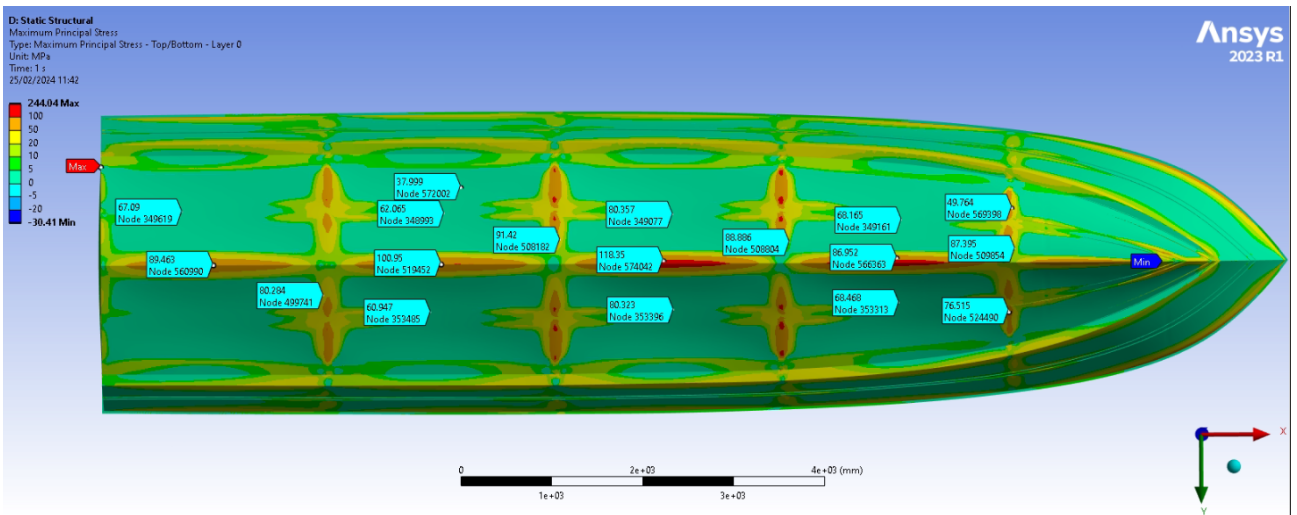
Εικόνα 71: Μέση κύρια τάση (bottom view)



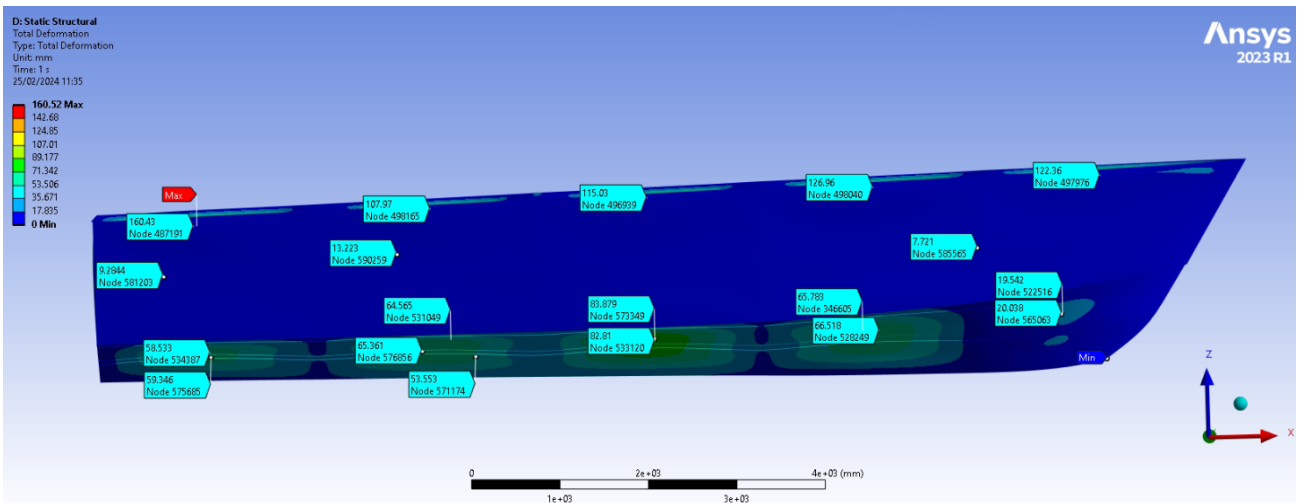
Εικόνα 72: Μέγιστη κύρια τάση (front view)



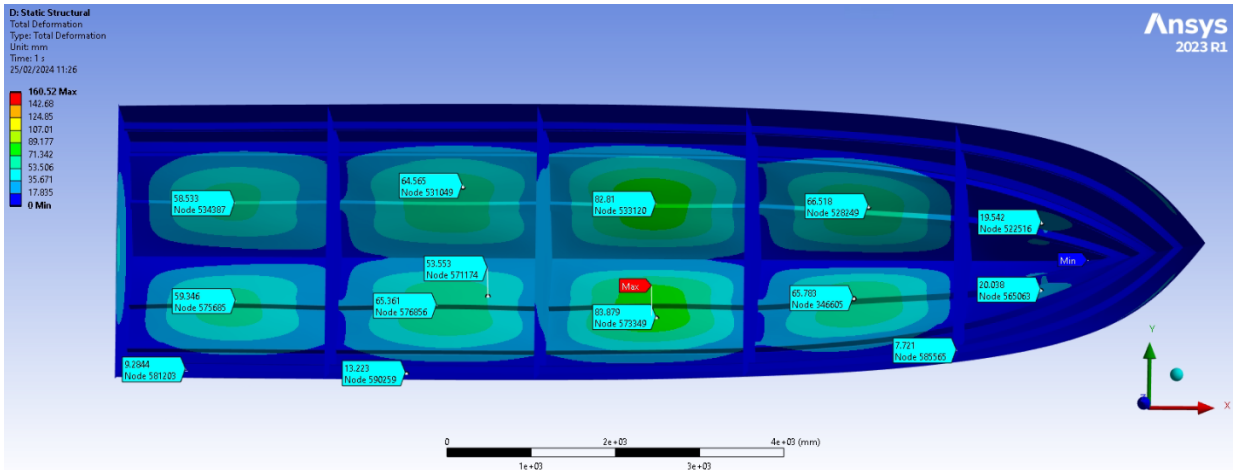
Εικόνα 73: Μέγιστη κύρια τάση (Top view)



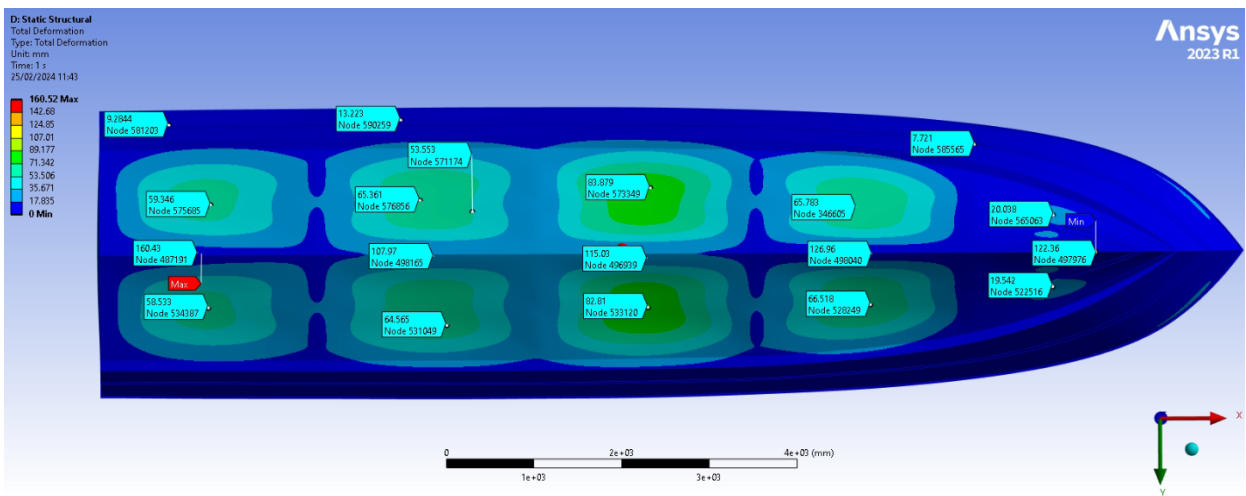
Εικόνα 74: Μέγιστη κύρια τάση (Bottom view)



Εικόνα 75: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (front view)



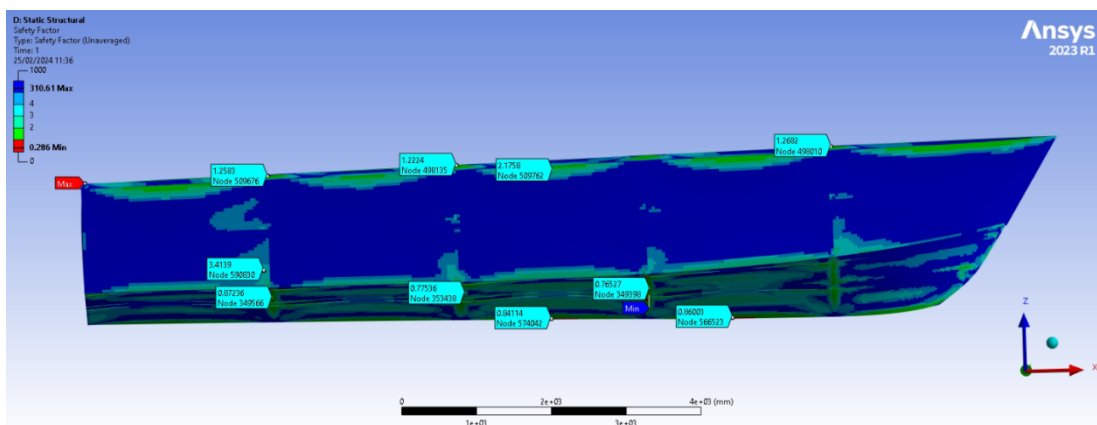
Εικόνα 76: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (top view)



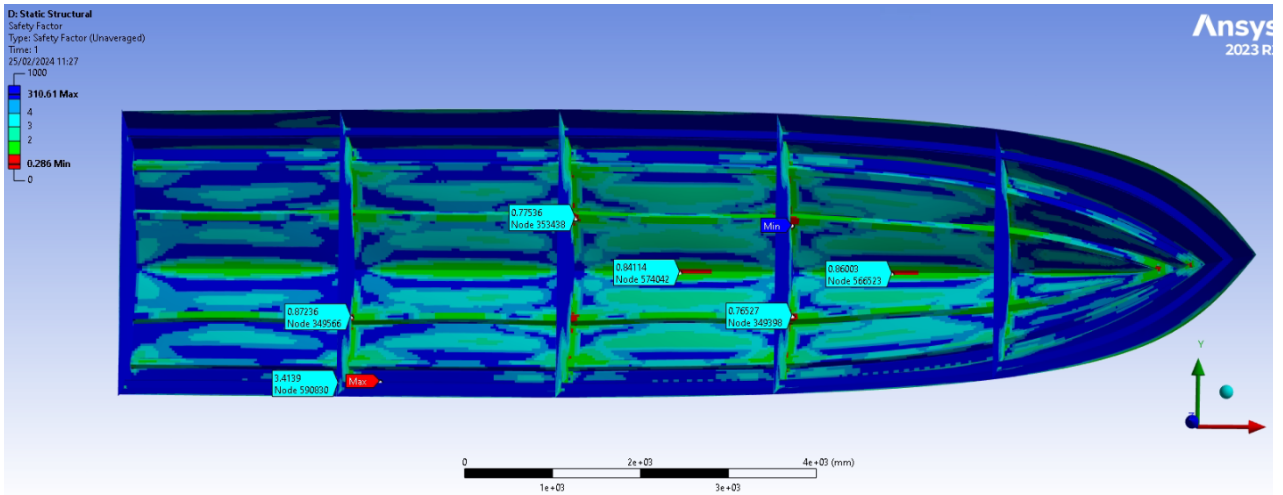
Εικόνα 77: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (Bottom view)

4.4 Κριτήρια αστοχίας (Failure Criteria)

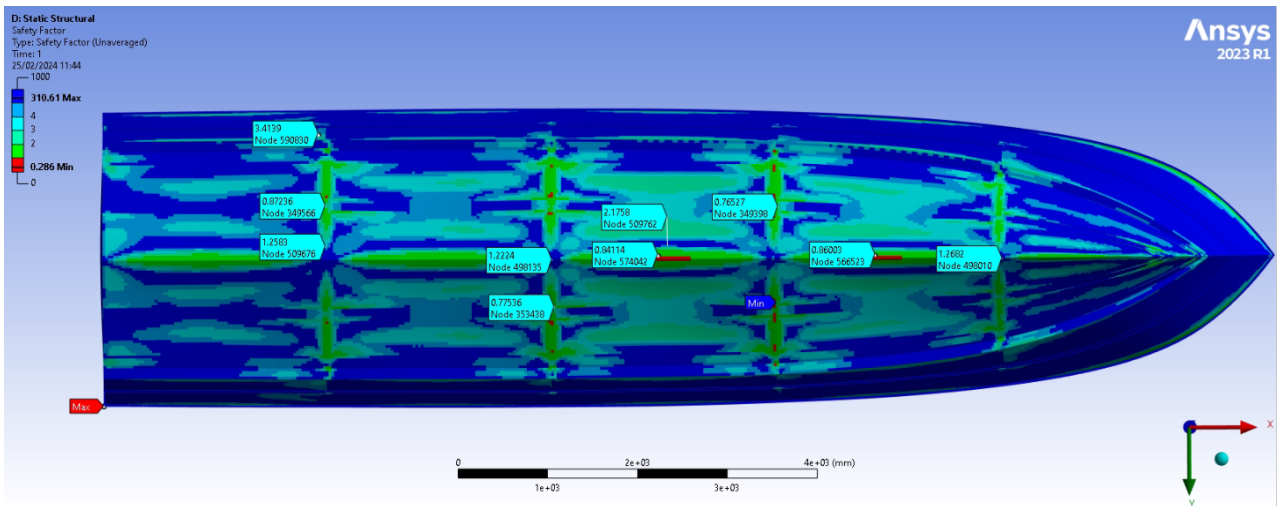
Για να πραγματοποιηθεί ολοκληρωμένα ο έλεγχος αντοχής του σκάφους, εφαρμόζονται στο ANSYS τα δυο παρακάτω κριτήρια αστοχίας, σύμφωνα με τους κανονισμούς του DNV.



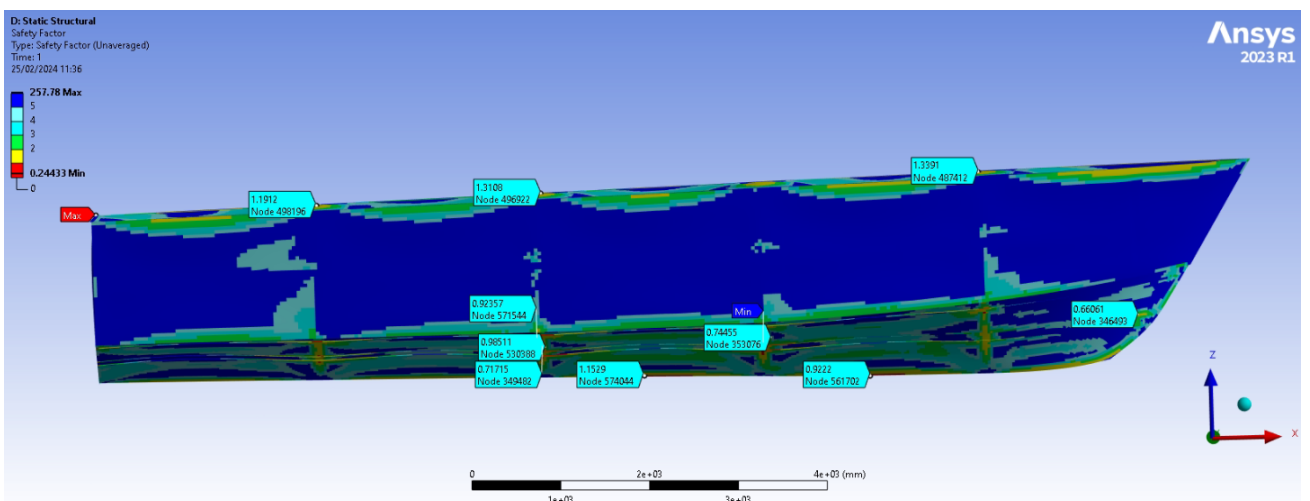
Εικόνα 78: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (front view)



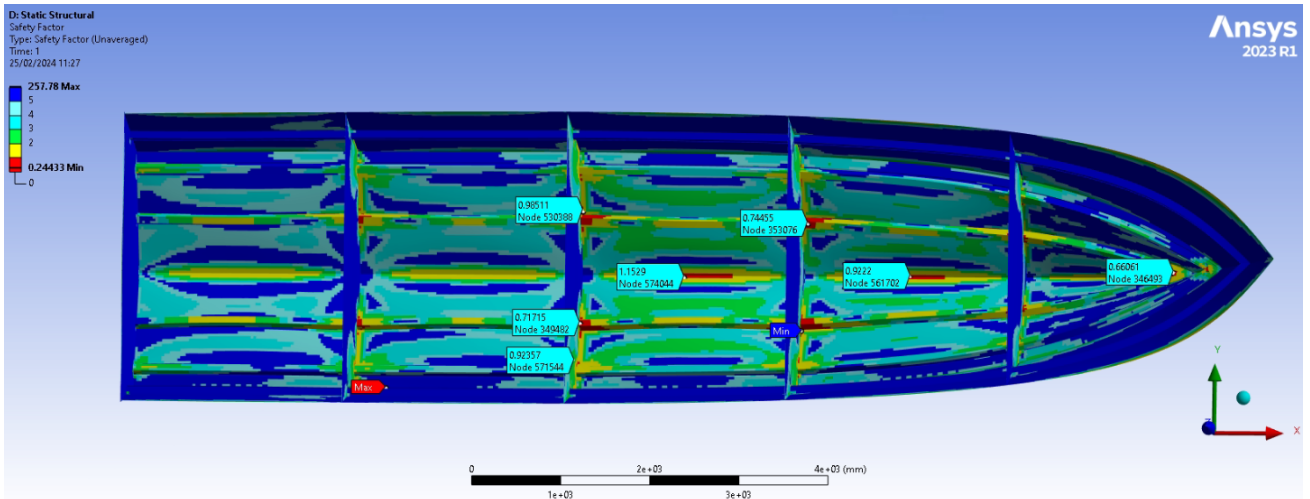
Εικόνα 79: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (top view)



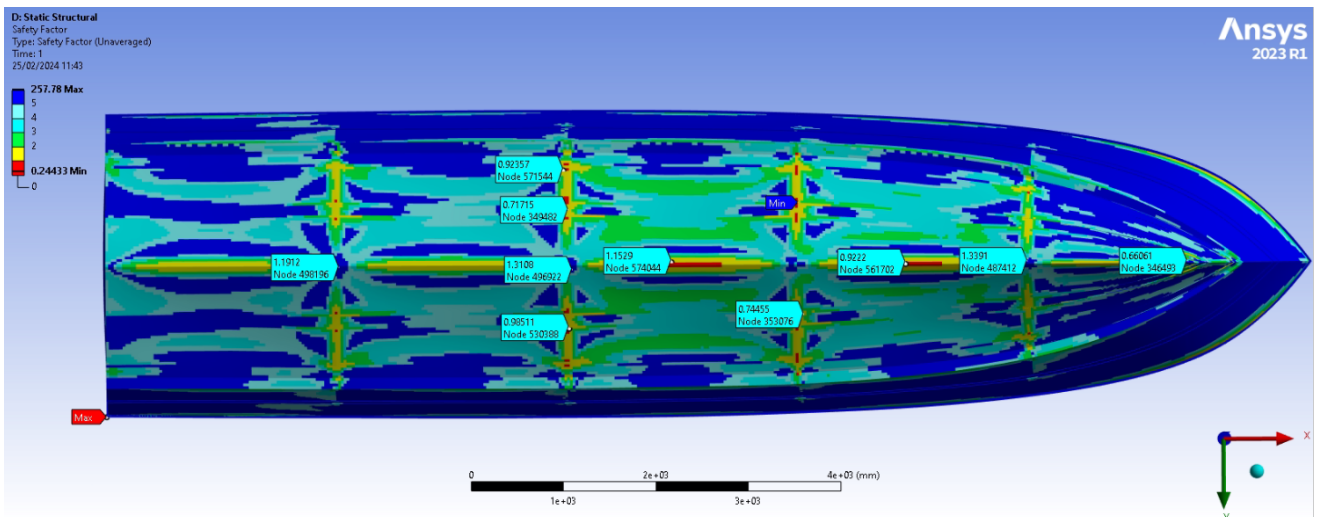
Εικόνα 80: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (Bottom view)



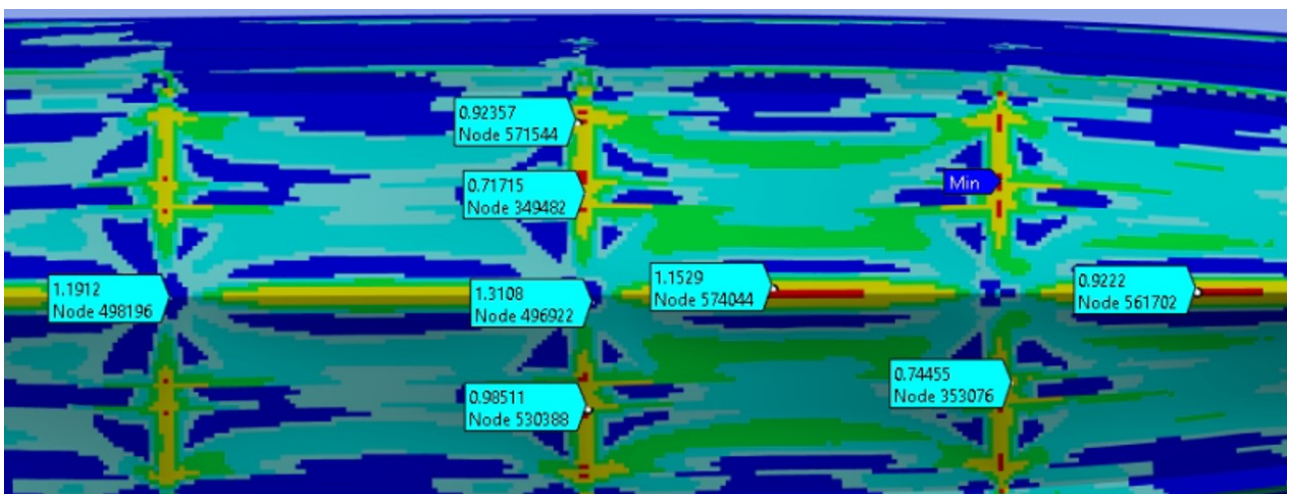
Εικόνα 81: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu» (front view)



Εικόνα 82: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu» (top view)



Εικόνα 83: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu» (bottom view)



Εικόνα 84: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu»

Κεφάλαιο 5: Βελτιστοποίηση της κατασκευής

5.1 Περιγραφή της διαδικασίας

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση του σκάφους, ως προς την αντοχή του αλλά και ως προς το βάρος και το κόστος κατασκευής του. Πρόκειται, για μία αρκετά πολύπλοκη διαδικασία και για αυτό τον λόγο πραγματοποιείται σε δυο βήματα διακριτά. Αρχικά, τοποθετούνται οι απαραίτητες ενισχύσεις εσωτερικά της γάστρας, καθώς όπως παρατηρήθηκε στα παραπάνω αποτελέσματα και τα κριτήρια υπάρχει τοπική αστοχία της κατασκευής. Σκοπός του πρώτου βήματος της βελτιστοποίησης είναι η μείωση των ορθών και διατμητικών τάσεων αλλά και των παραμορφώσεων σε αυτές τις κρίσιμες περιοχές. Εφόσον ολοκληρωθεί το πρώτο βήμα της βελτιστοποίησης, αξιολογούνται τα καινούργια αποτελέσματα που θα προκύψουν για την αντοχή του σκάφους. Συνεχίζοντας στο δεύτερο βήμα της διαδικασίας, πραγματοποιείται μία προσπάθεια να μειωθεί όσο είναι εφικτό το βάρος της συνολικής κατασκευής του πλοίου και το κόστος κατασκευής του. Η μελέτη απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς όπως είναι λογικό μειώνοντας τα πάχη των πολύστρωτων εξωτερικά και εσωτερικά της γάστρας, αυξάνονται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις των πλακών. Τέλος, μετά την ολοκλήρωση και του δεύτερου μέρους της βελτιστοποίησης γίνεται αξιολόγηση των τελικών αποτελεσμάτων, καθώς και η σύγκριση τους με τα αρχικά.

5.2 Επιτρεπόμενα Όρια τάσεων

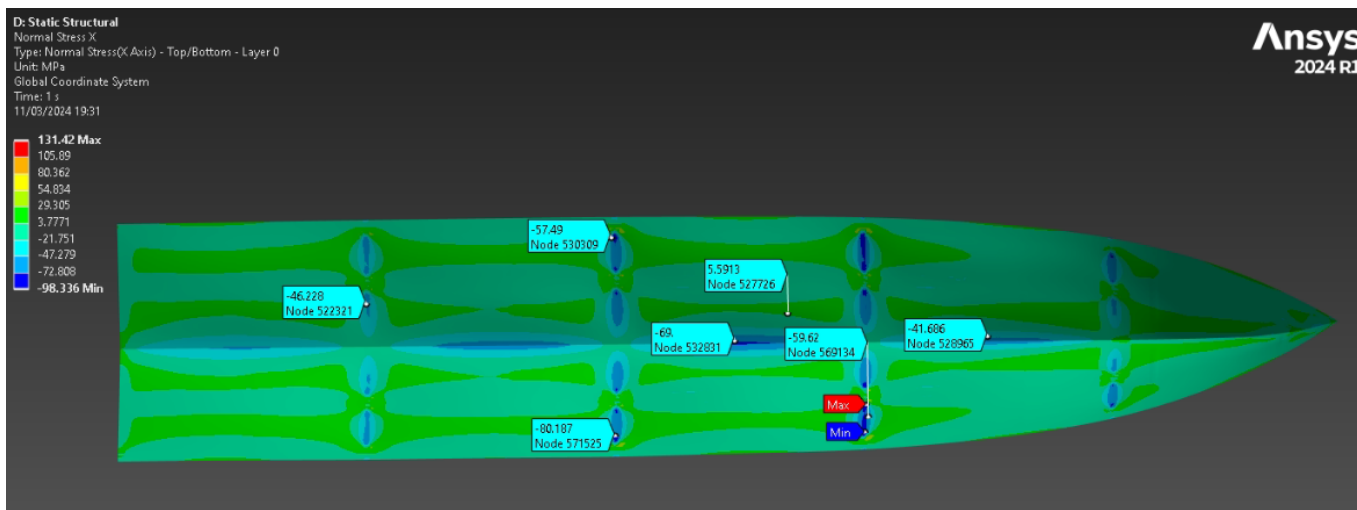
Παρατηρήθηκε ότι υπάρχουν υψηλές τάσεις στις πλάκες του πυθμένα, οι οποίες βρίσκονται ανάμεσα στις εγκάρσιες φρακτές. Η παραπάνω παραδοχή για τις τάσεις επιβεβαιώνεται και από τον βρετανικό νηογνώμονα *Lloyd's Register*. Σύμφωνα με τον κανονισμό Part 5, Chapter 3, Section 3 των κανονισμών του «*Lloyd's Register – July 2022*», πραγματοποιήθηκε μελέτη για τα επιτρεπόμενα όρια των τάσεων στη στρώση BD 0/90, στη κεντρική ζώνη του σκάφους. Ο λόγος που επιλέχθηκε η κεντρική ζώνη, δηλαδή ο πυθμένας του σκάφους, είναι διότι πρόκειται για την δυσμενέστερη περίπτωση. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5 στον πυθμένα η συνολική πίεση αποτελείται από το άθροισμα της πίεσης λόγω σφυρόκρουσης και της υδροστατικής. Οι αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη κατά το διάμηκες και το εγκάρσιο της στρώσης BD 0/90 υπολογίστηκαν σύμφωνα με το παραπάνω κανονισμό, ενώ τα επιτρεπόμενα όρια των τάσεων υπολογίζονται από τις αντοχές κάθε στρώσης πολλαπλασιάζοντάς με το συντελεστή ασφαλείας (stress fraction) ο οποίος αναφέρεται στο *Part 8, Chapter 7, Section 3* των κανονισμών του «*Lloyd's Register – July 2022*». Για το παρόν σκάφος, ο συντελεστής ασφαλείας έχει τη τιμή 0.28 για τις περιοχές που ανήκουν στην ζώνη σφυρόκρουσης. Το BD 0/90, είναι διαξονικό ύφασμα με τις ίνες του κάθετα προσανατολισμένες μεταξύ τους και περιεκτικότητα ινών 60%.

Επομένως ισχύουν τα παρακάτω:

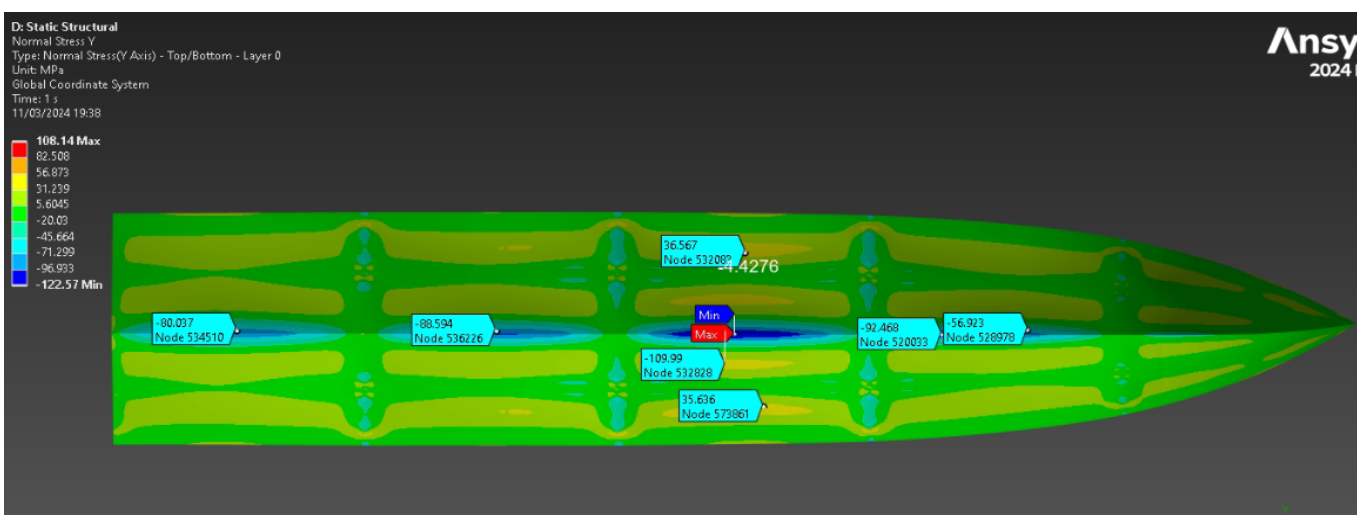
Για τις τάσεις εφελκυσμού έχουμε : $\sigma_{\text{επ}} = (656 * f_c - 89.3) * sf = 85.20 \text{ [MPa]}$

Για τις τάσεις θλίψης έχουμε : $\sigma_{\text{επ}} = (530 * f_c - 72.1) * sf = 68.85 \text{ [MPa]}$

Πραγματοποιώντας, τη μελέτη στη στρώση εξάγουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:



Εικόνα 85: Ορθή τάση σx στην στρώση BD 0/90



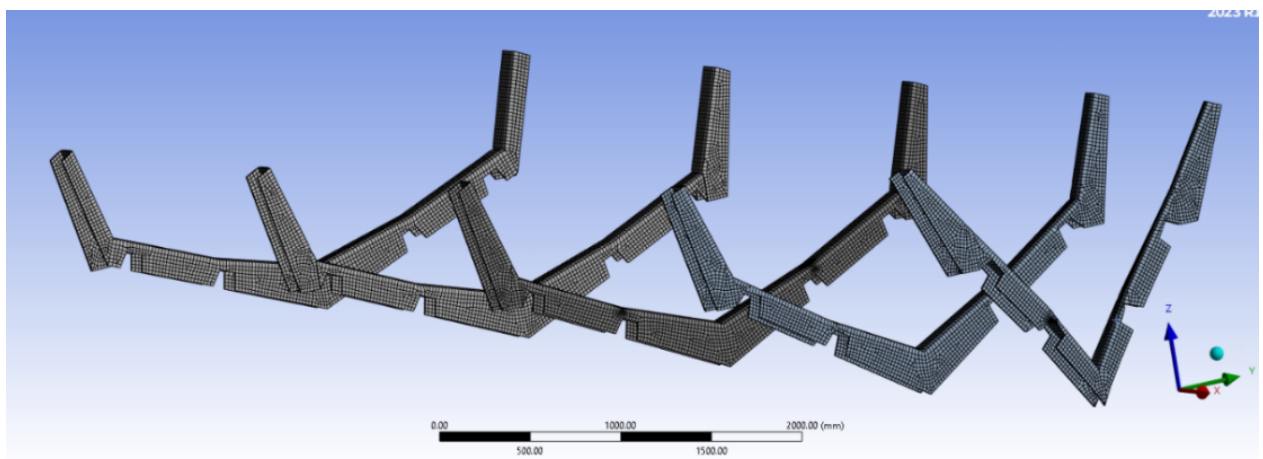
Εικόνα 86: Εικόνα 85: Ορθή τάση σy στην στρώση BD 0/90

Παρατηρούμε ότι τα όρια των τάσεων σx και σy είναι εκτός επιτρεπόμενων ορίων. Επομένως, η βελτιστοποίηση της κατασκευής ως προς την αντοχή κρίνεται απαραίτητη.

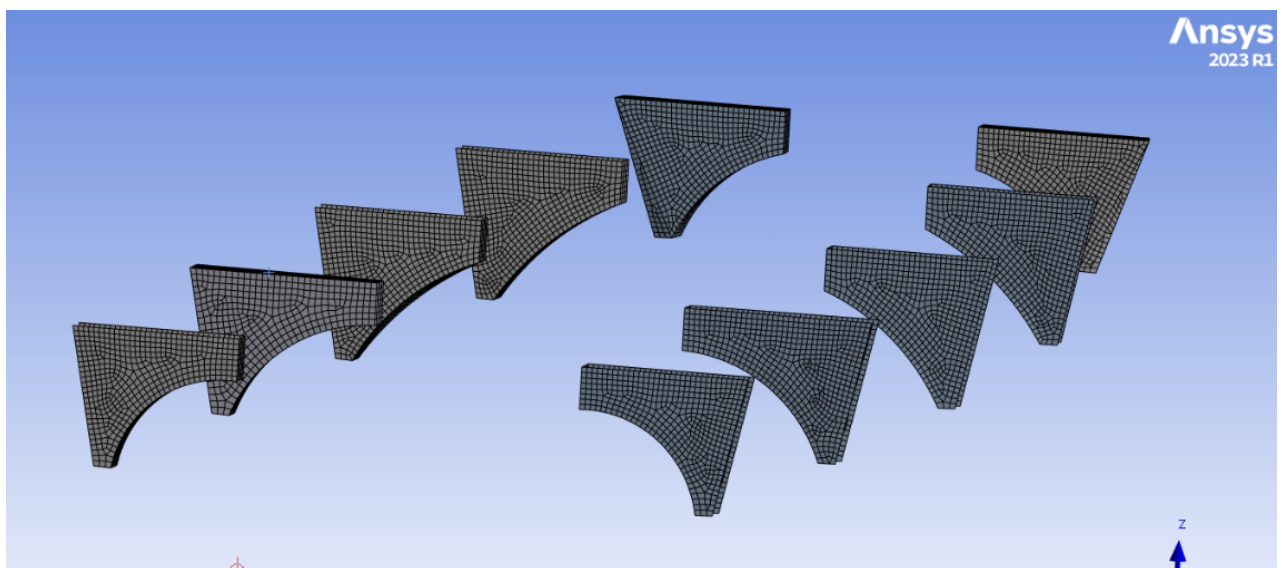
5.3 Βελτιστοποίηση ως προς τις εγκάρσιες ενισχύσεις

Από τα αποτελέσματα των τάσεων και των παραμορφώσεων που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, συμπεραίνουμε υπάρχει περιθώριο βελτιστοποίησης. Πρόκειται, για ένα λογικό αποτέλεσμα καθώς οι φρακτές μεταξύ τους έχουν αρκετά μεγάλες αποστάσεις και δεν παρέχεται η απαραίτητη εγκάρσια στήριξη. Συνεπώς, προχωράμε στην τοποθέτηση 5 εγκάρσιων ενισχυτικών τύπου Π (*Top hat*). Η σχεδίαση τους γίνεται στο πρόγραμμα *Rhinoceros 6* και μοντελοποίηση τους πραγματοποιείται με όμοιο τρόπο με τα υπόλοιπα τμήματα που σκάφους. Η κατασκευή τους είναι παρόμοια με τα διαμήκη ενισχυτικά που τοποθετήθηκαν, επομένως θα έχουν και αυτά μεγαλύτερο πάχος στο πέλμα από ότι στον κορμό τους. Εσωτερικά των ενισχυτικών θα τοποθετηθεί αφρός (*PVC Foam*), ομοίως με τα διαμήκη

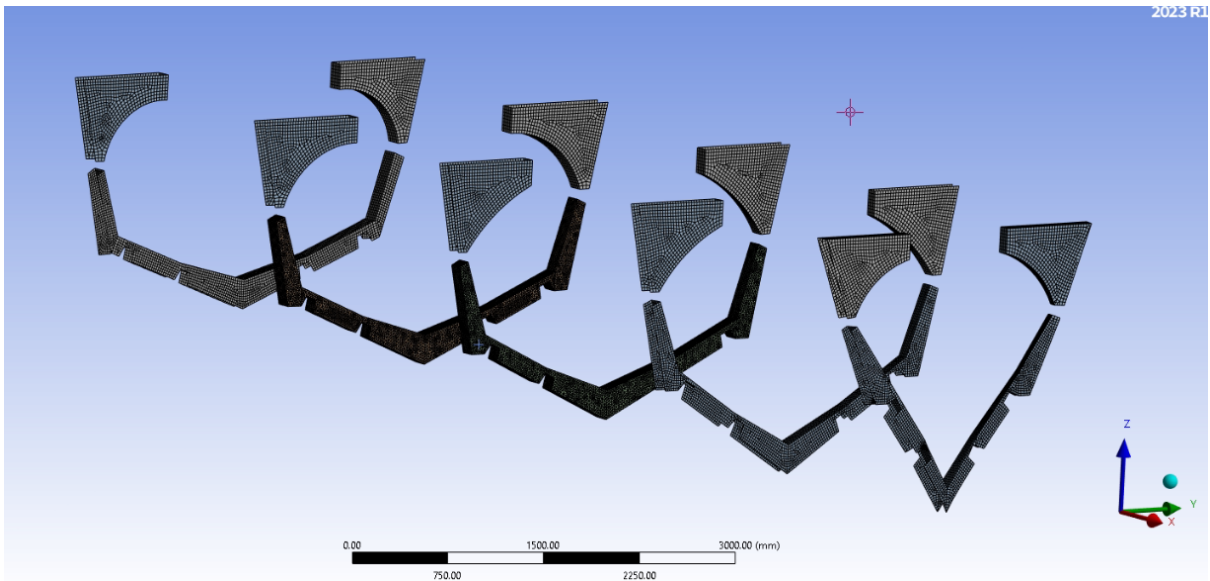
ενισχυτικά. Οι εγκάρσιες αυτές ενισχύσεις αναμένονται να προσδώσουν την απαραίτητη αντοχή στα *side* και *bottom shells* της γάστρας. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα από το προηγούμενο μοντέλο παρατηρήθηκαν μεγάλες παραμορφώσεις στο κατάστρωμα του σκάφους. Για να μειωθούν αυτές οι παραμορφώσεις, είναι απαραίτητο τα εγκάρσια ενισχυτικά που σχεδιάστηκαν αρχικά, να προεκταθούν μέχρι το κατάστρωμα αλλάζοντας τη γεωμετρία τους. Η προέκταση τους, θα είναι και αυτή της μορφής τύπου Π (*top hat*), έχοντας στο εσωτερικό αφρό (*PVC Foam*), καθώς και τις ίδιες διαστάσεις στο πάχος των στρώσεων.



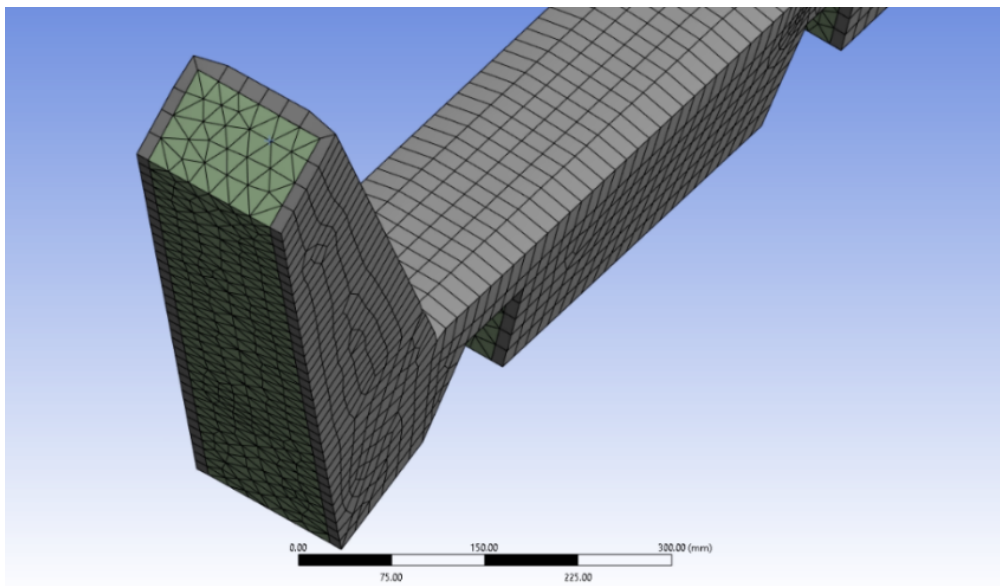
Εικόνα 87: Εγκάρσια ενισχυτικά του σκάφους



Εικόνα 88: Εγκάρσια ενισχυτικά καταστρώματος



Εικόνα 89: Συνολικές εγκάρσιες ενισχύσεις



Εικόνα 90: Εγκάρσιο ενισχυτικό μαζί με τον αφρό (PVC Foam)

Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται αναλυτικά τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι στρώσεις των πολύστρωτων.

Πίνακας 24: Πάχος στρώσεων του εγκάρσιου ενισχυτικού

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης	Μονάδα μέτρησης
1	<i>BD</i>	1.38	[mm]
2	<i>CSM</i>	0.9	[mm]

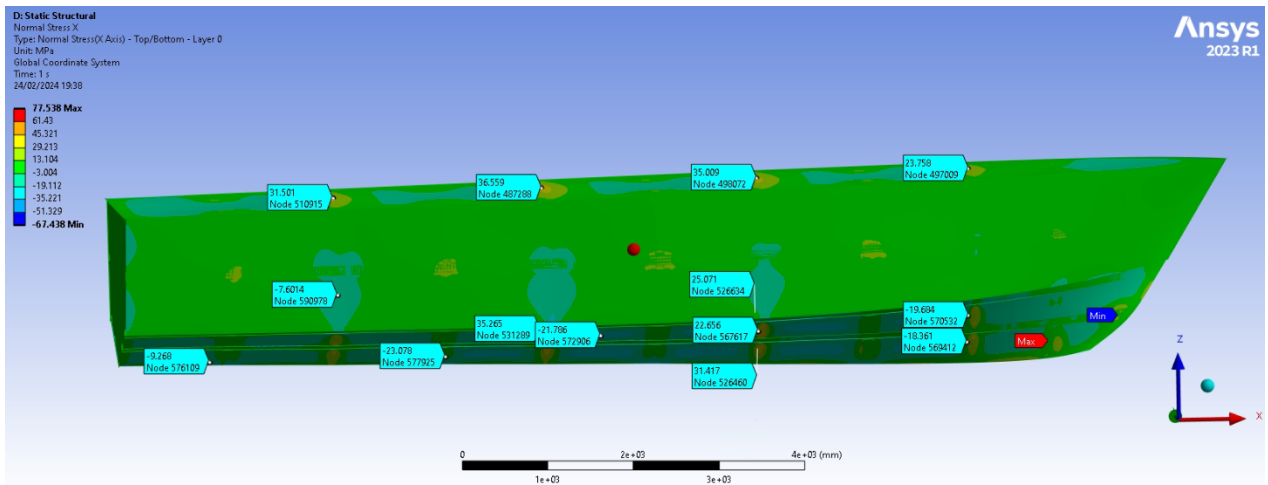
Πίνακας 25: Τελικό πάχος κορμού του εγκάρσιου ενισχυτικού

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>BD</i>	1.38
7	<i>CSM</i>	0.9
8	<i>BD</i>	1.38
9	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		10.28 [mm]

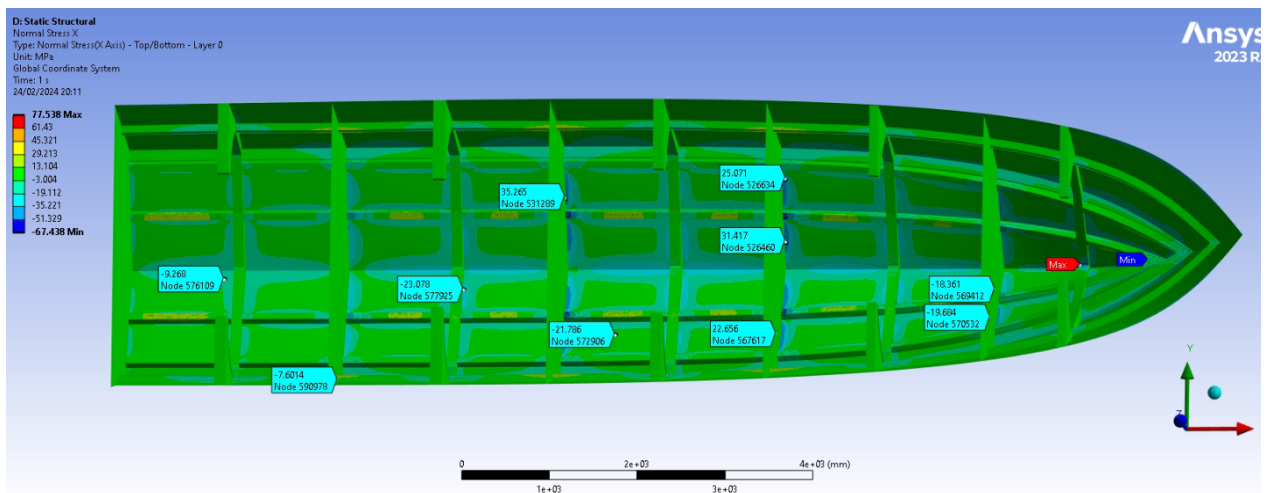
Πίνακας 26: Τελικό πάχος πέλματος του εγκάρσιου ενισχυτικού

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσης
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>BD</i>	1.38
7	<i>CSM</i>	0.9
8	<i>BD</i>	1.38
9	<i>CSM</i>	0.9
10	<i>BD</i>	1.38
11	<i>CSM</i>	0.9
12	<i>BD</i>	1.38
13	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		15.02 [mm]

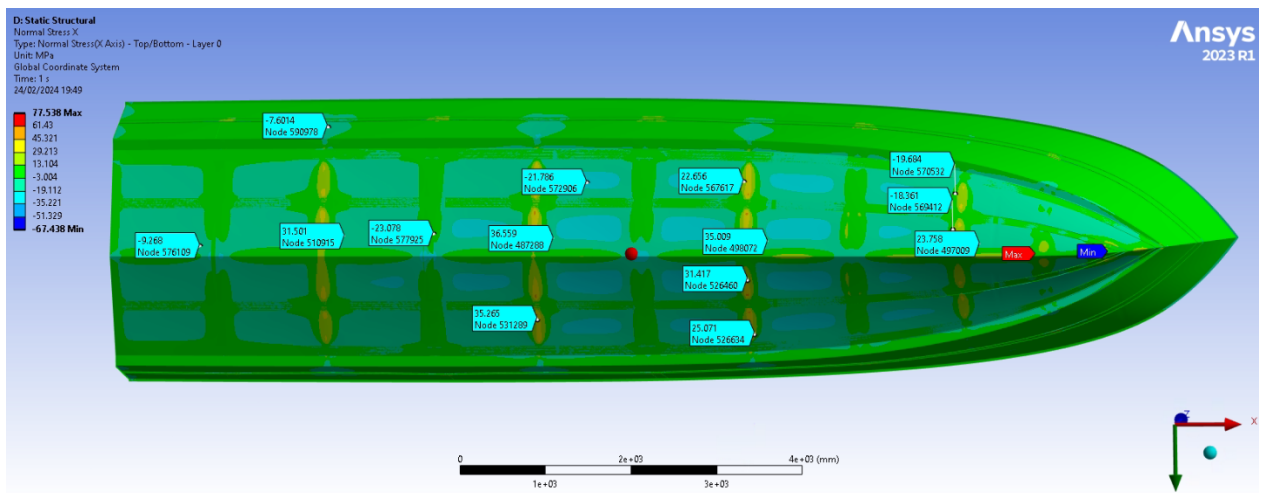
5.3.1 Αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων μετά το πρώτο βήμα της βελτιστοποίησης



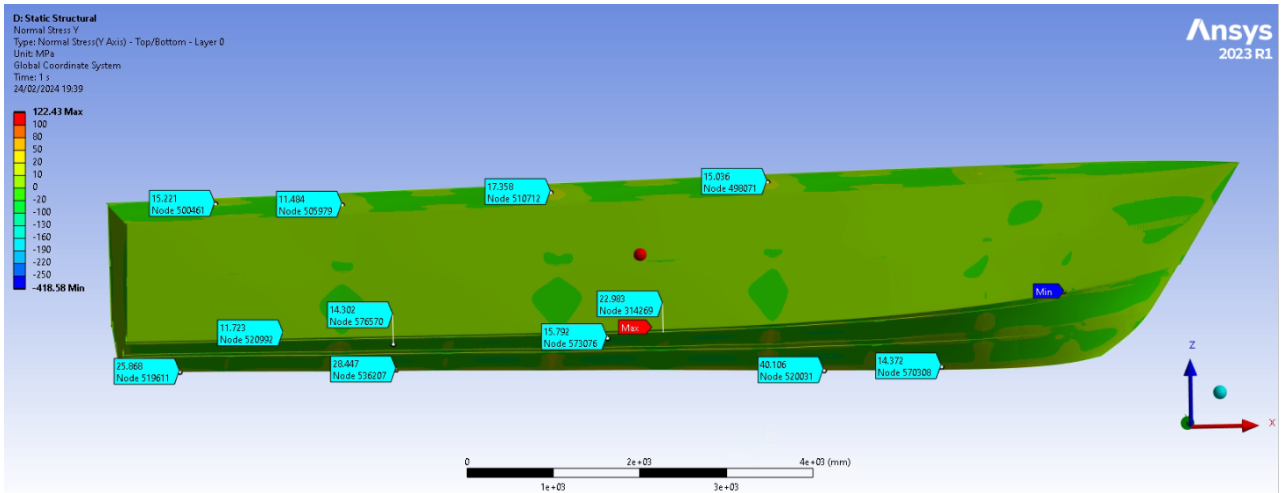
Εικόνα 91: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (Front view)



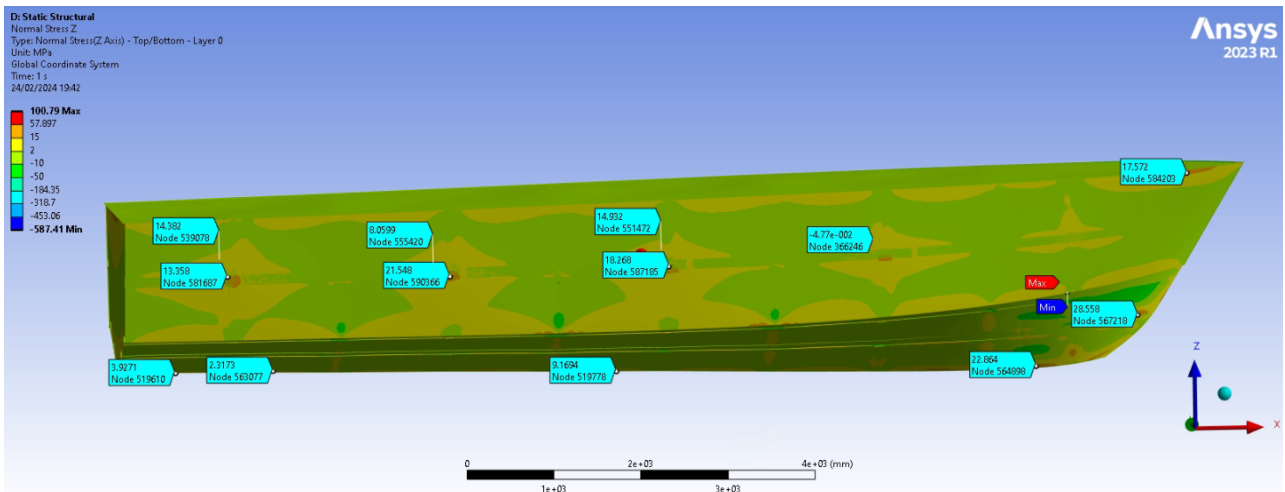
Εικόνα 92: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (Top view)



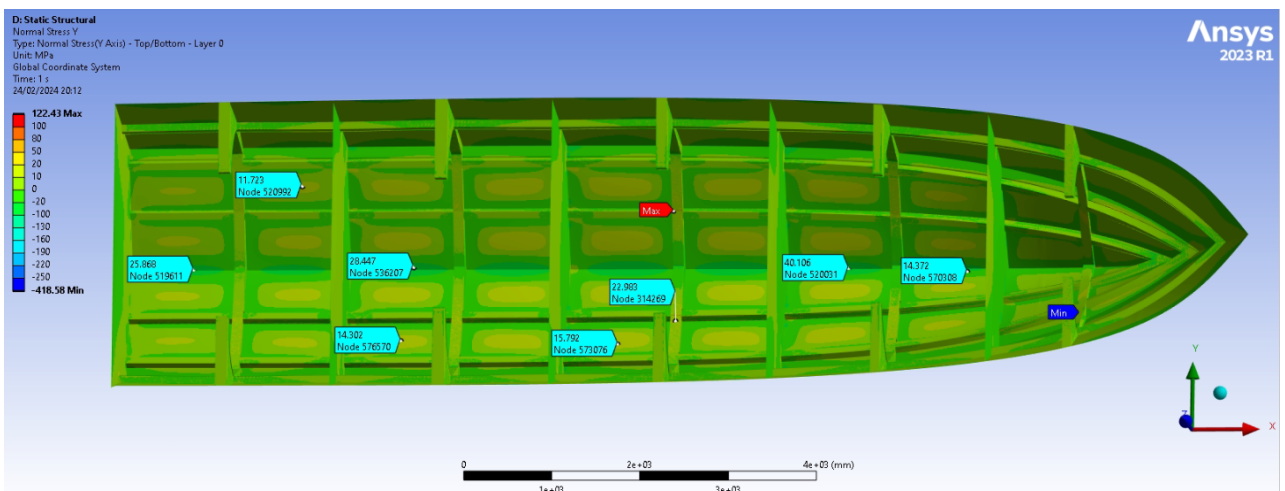
Εικόνα 93: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (Bottom view)



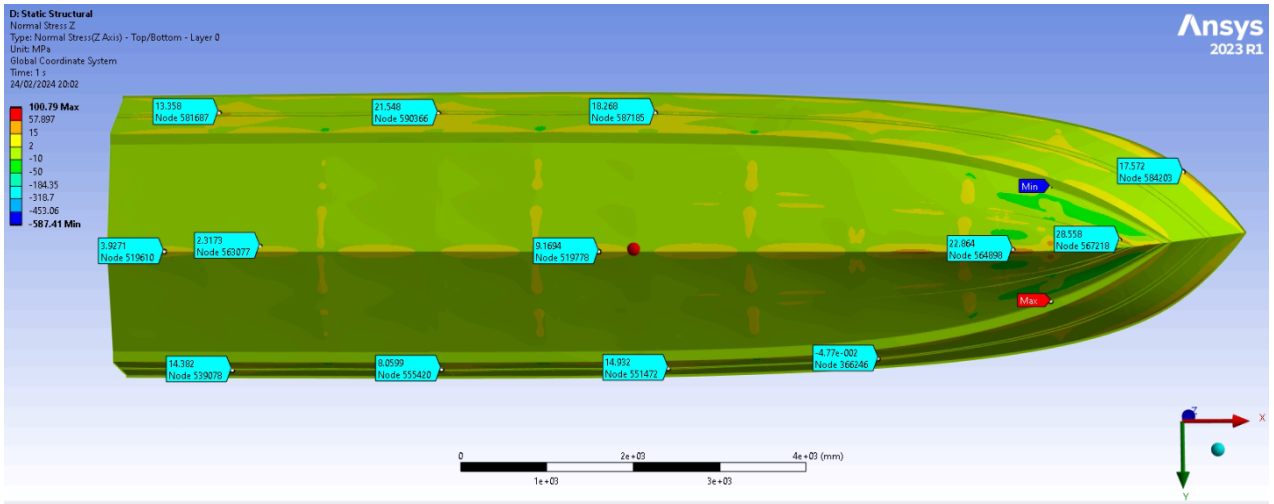
Εικόνα 94: : Ορθή τάση κατά τον άξονα y (Front view)



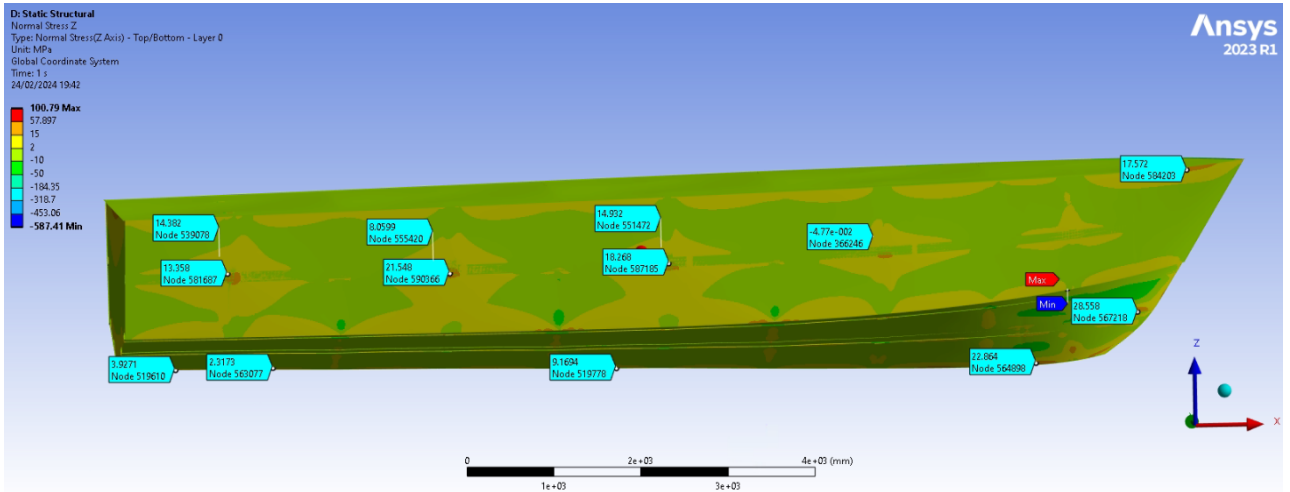
Εικόνα 95: : Ορθή τάση κατά τον άξονα y (Front view)



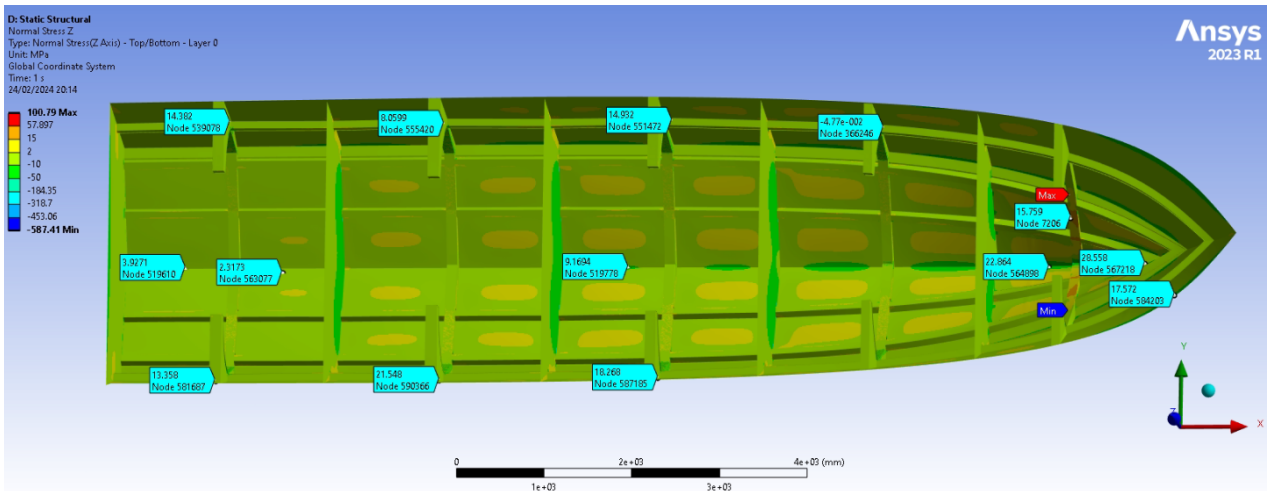
Εικόνα 96: : Ορθή τάση κατά τον άξονα y (Top view)



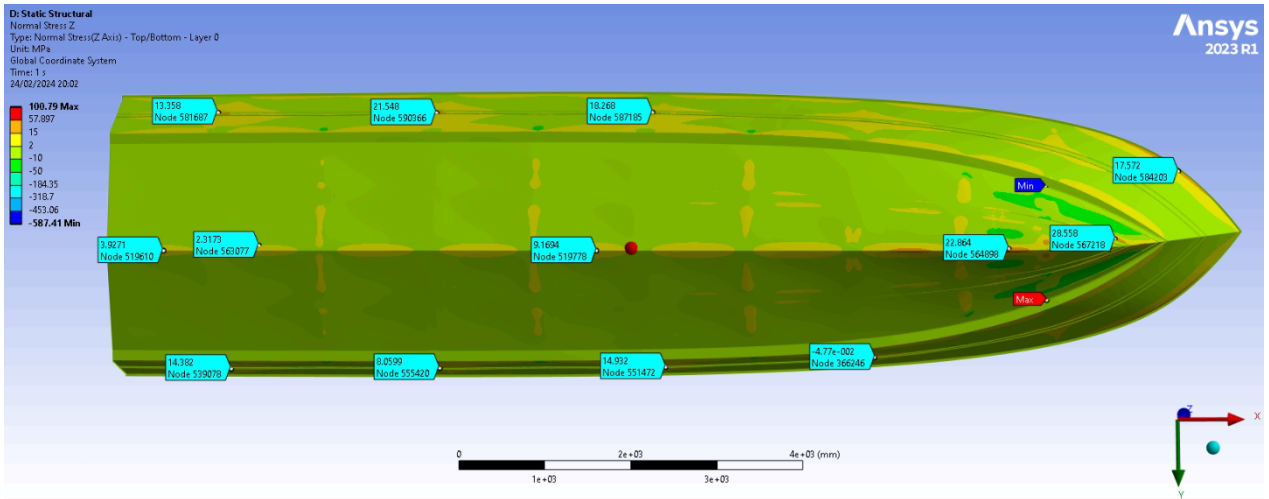
Εικόνα 97: : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Bot view)



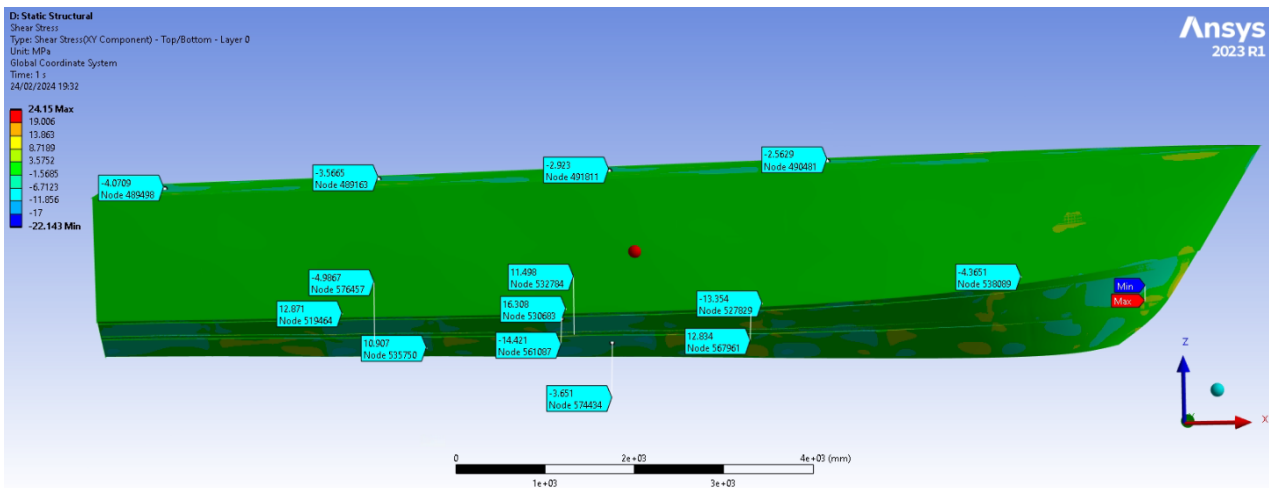
Εικόνα 98: : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Front view)



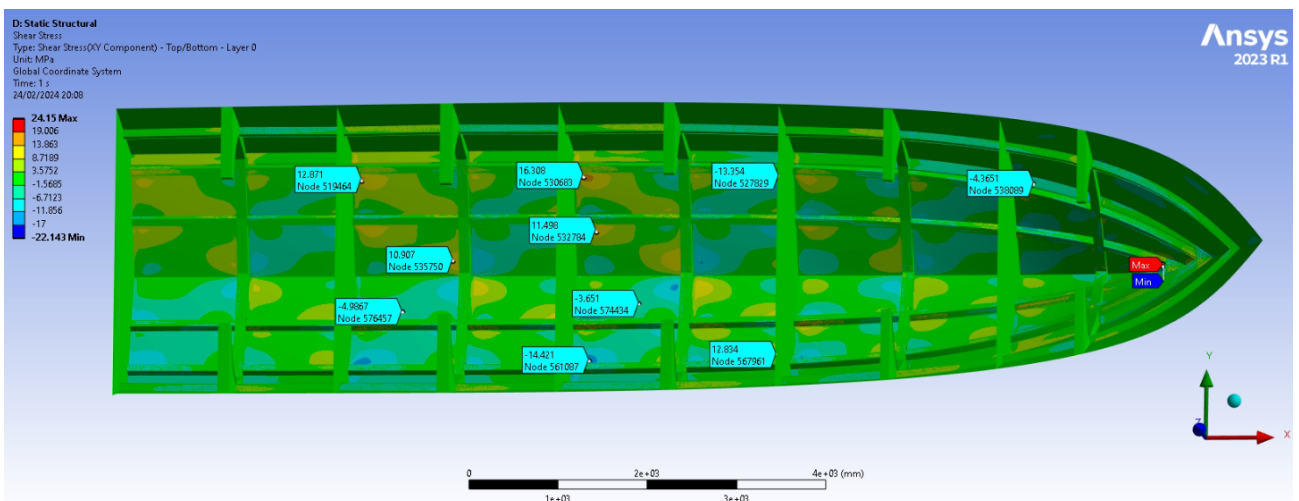
Εικόνα 99: : Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Top view)



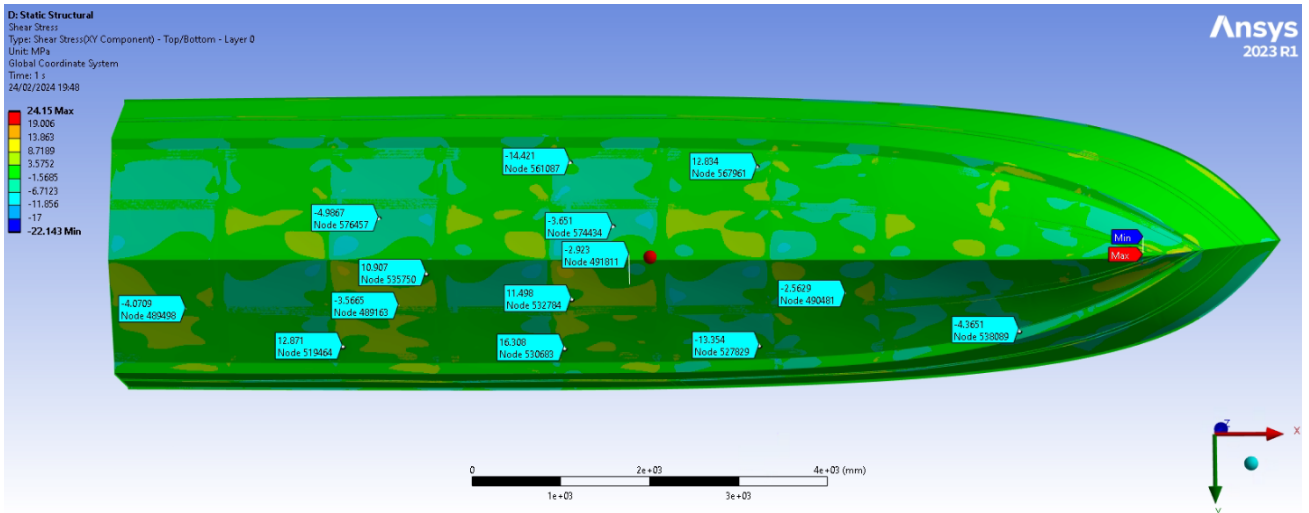
Εικόνα 100: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Bottom view)



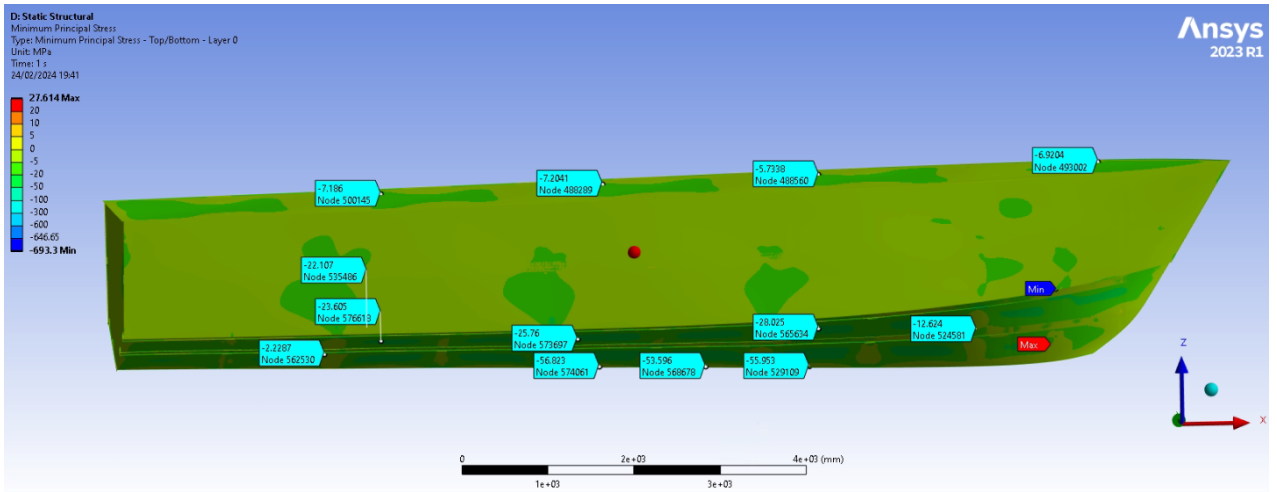
Εικόνα 101: Διατμητική τάση (Front view)



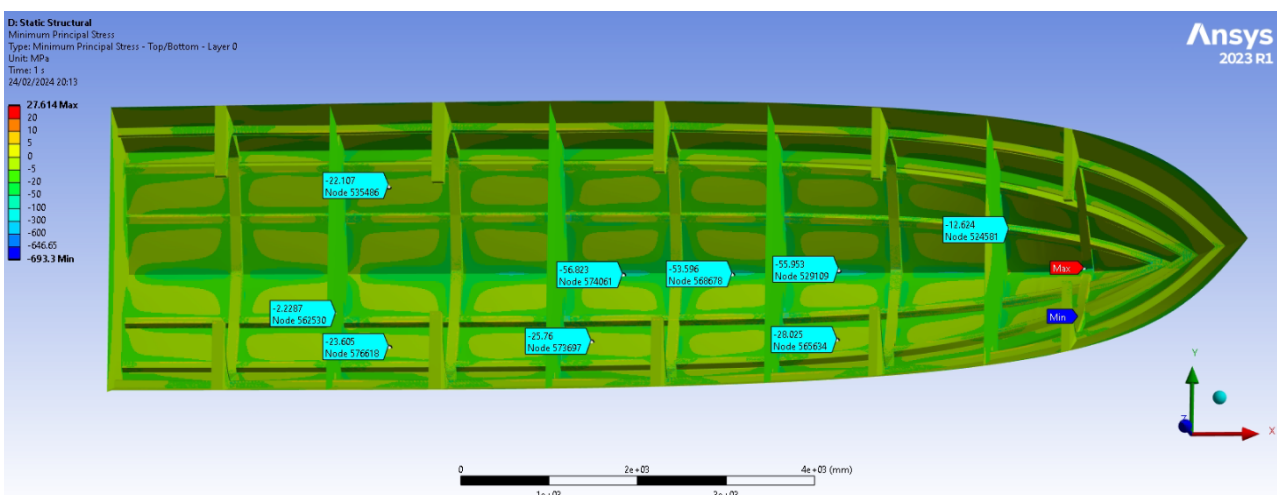
Εικόνα 102: Διατμητική τάση (Top view)



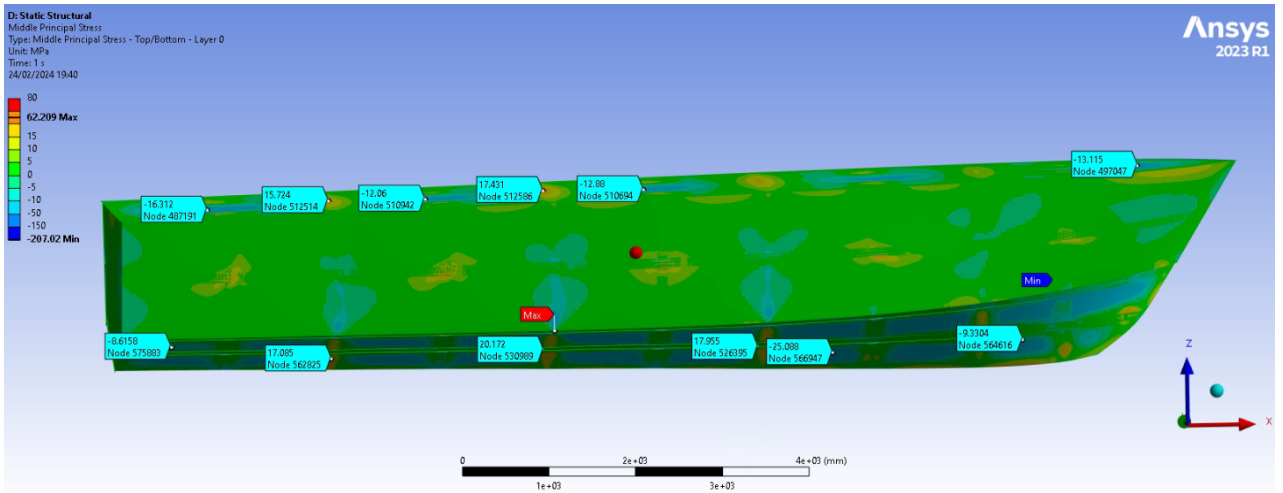
Εικόνα 103: Διαμητική τάση (*Bottom view*)



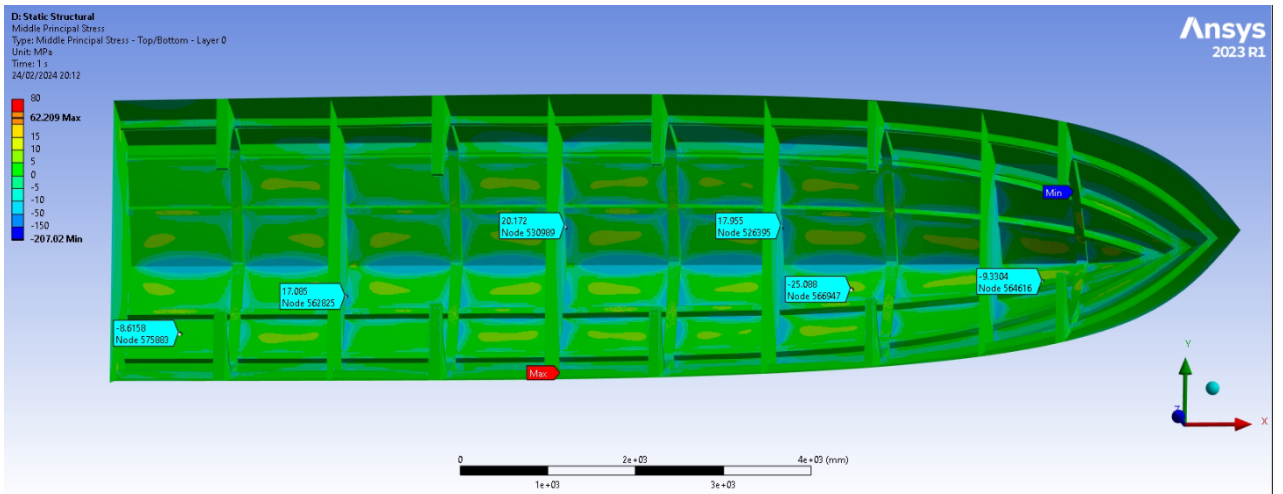
Εικόνα 104: Ελάχιστη κύρια τάση (*front view*)



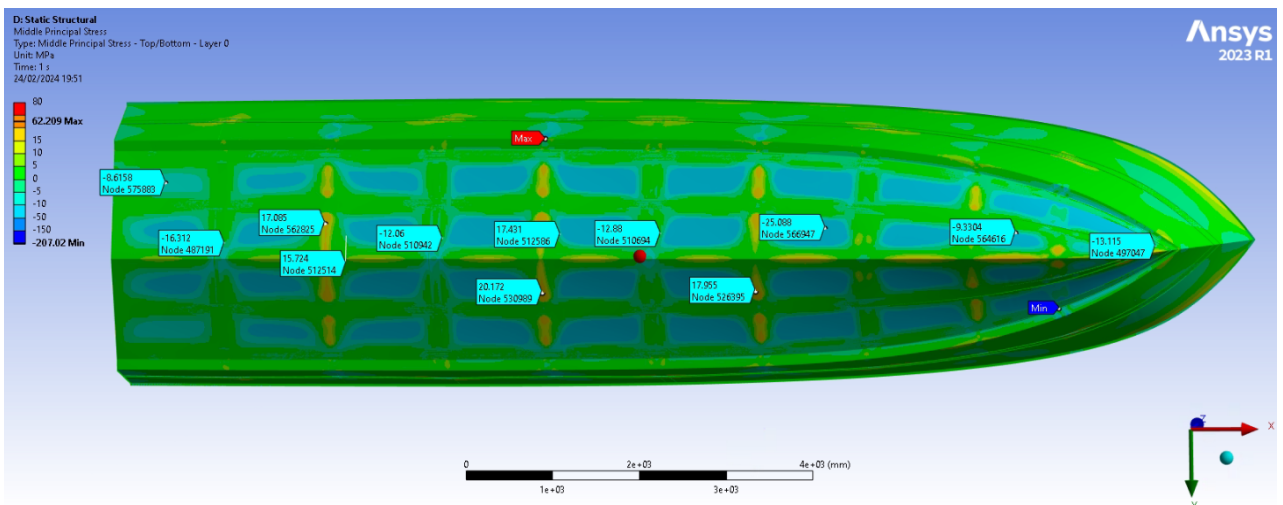
Εικόνα 105: Ελάχιστη κύρια τάση (*top view*)



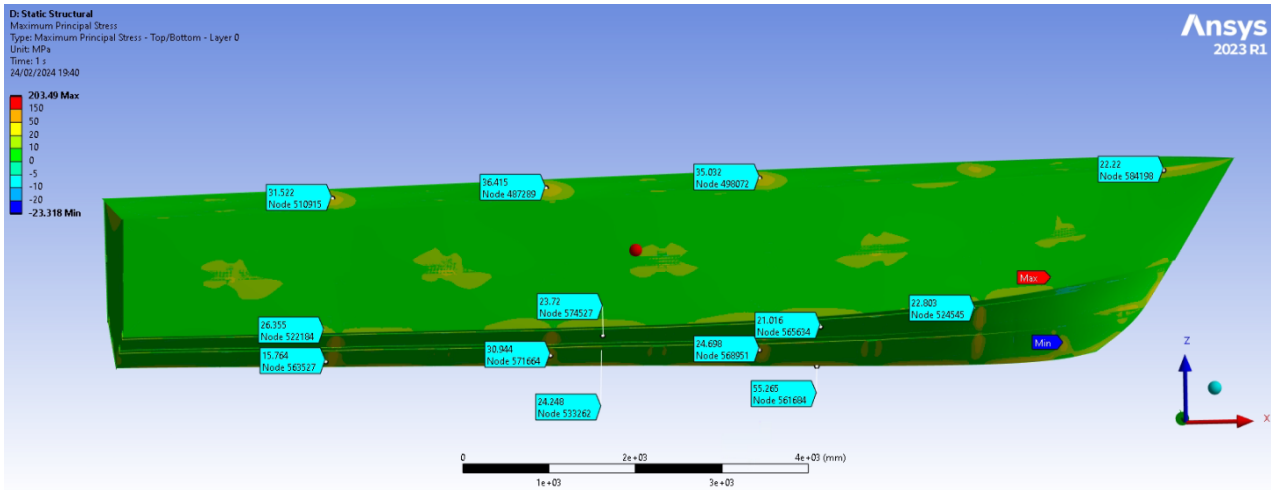
Εικόνα 106: Μέση κύρια τάση (front view)



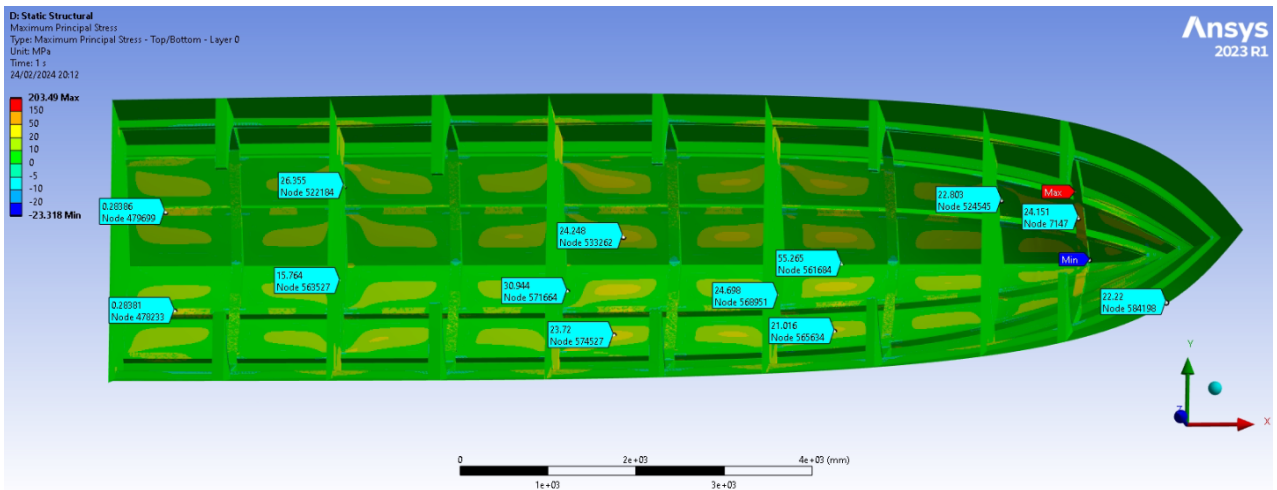
Εικόνα 107: Μέση κύρια τάση (top view)



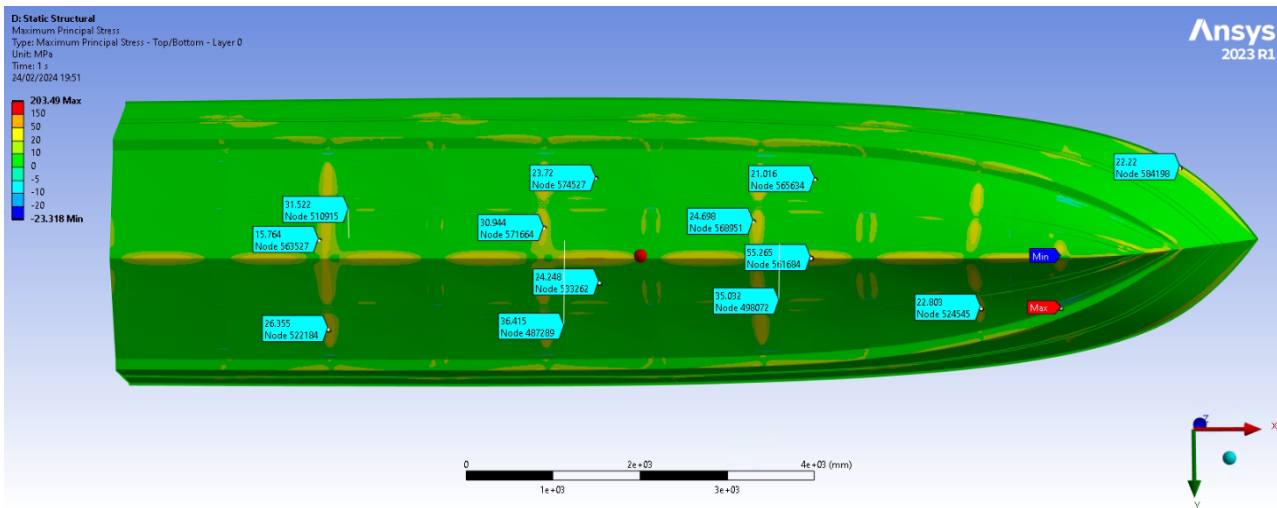
Εικόνα 108: Μέση κύρια τάση (bottom view)



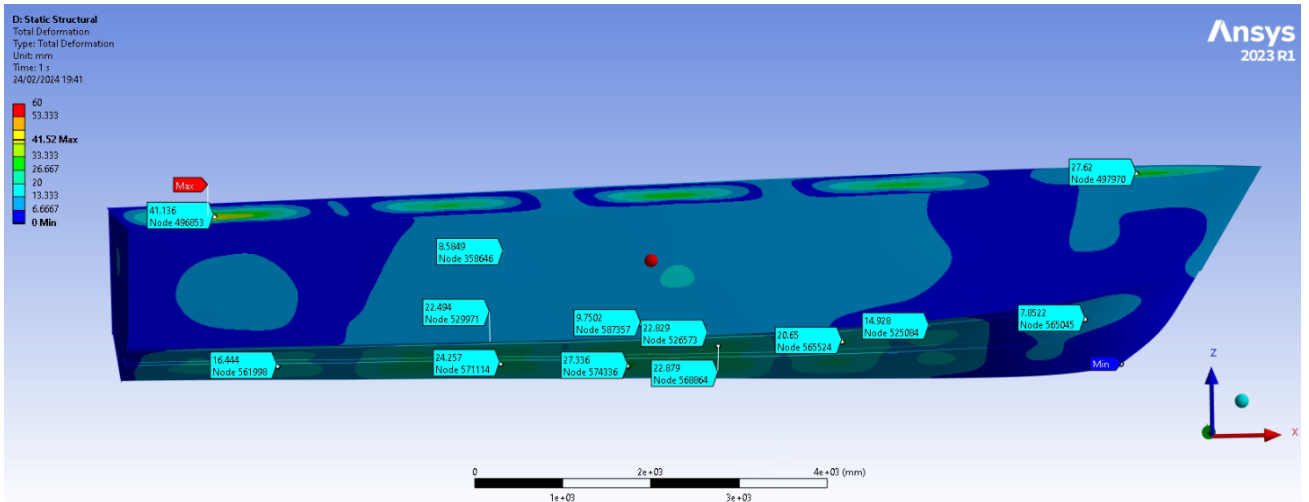
Εικόνα 109: Μέγιστη κύρια τάση (front view)



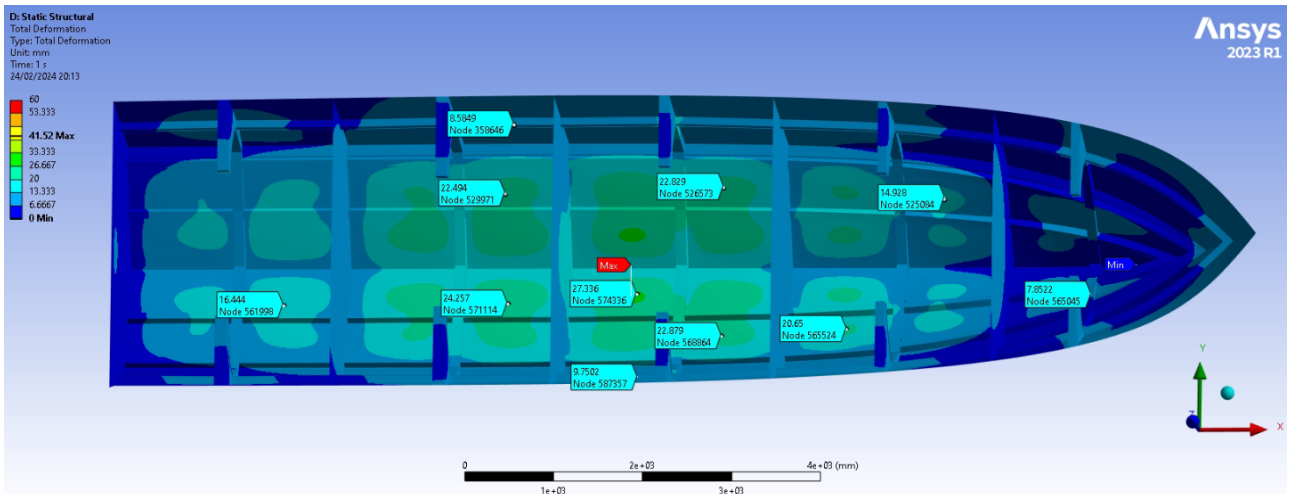
Εικόνα 110: Μέγιστη κύρια τάση (top view)



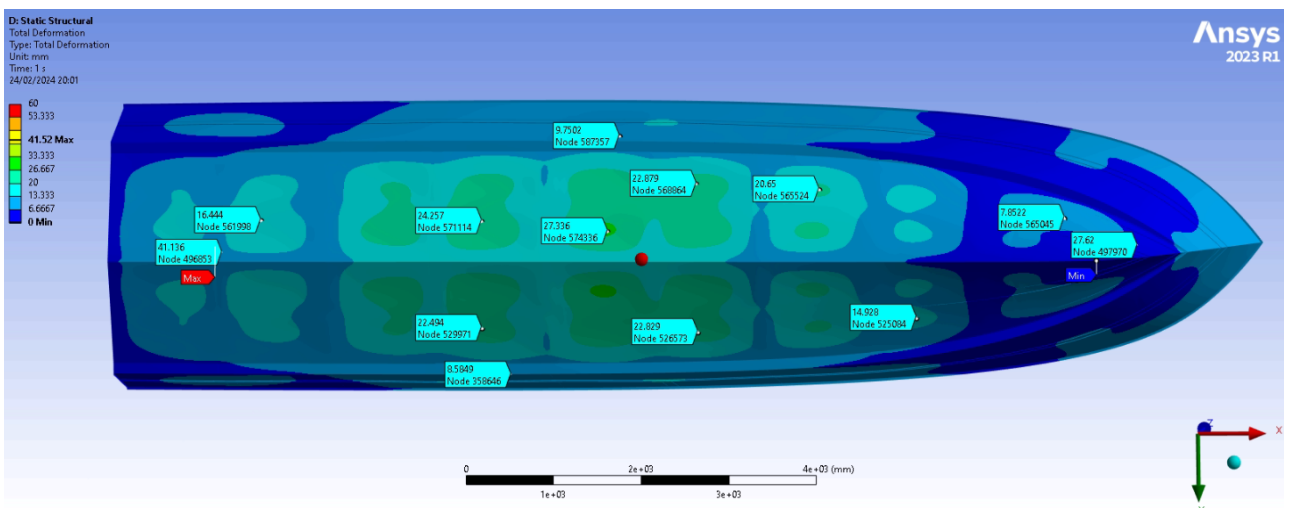
Εικόνα 111: Μέγιστη κύρια τάση (bottom view)



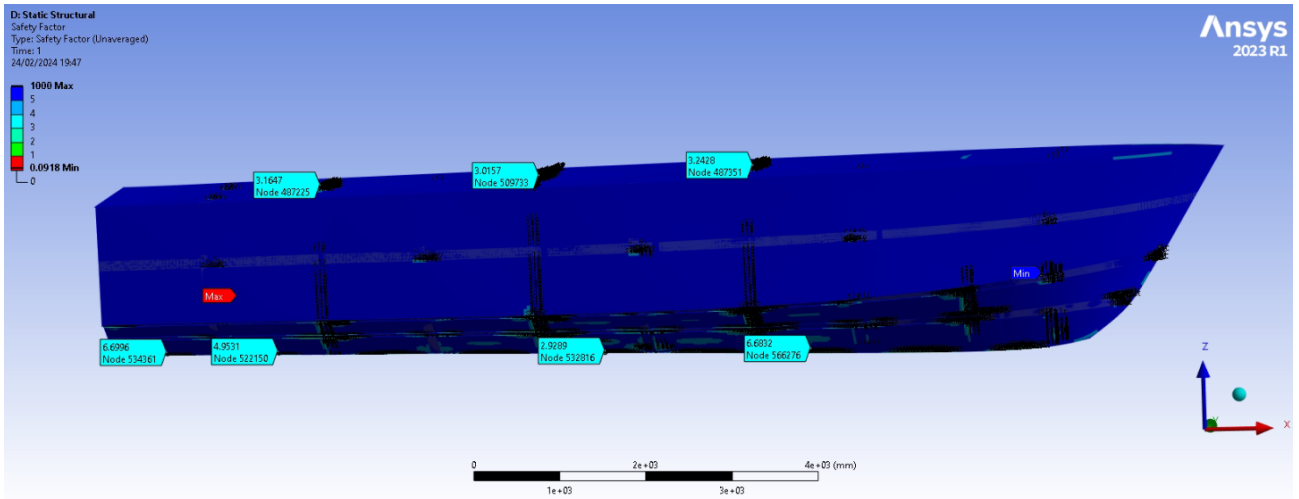
Εικόνα 112: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (*front view*)



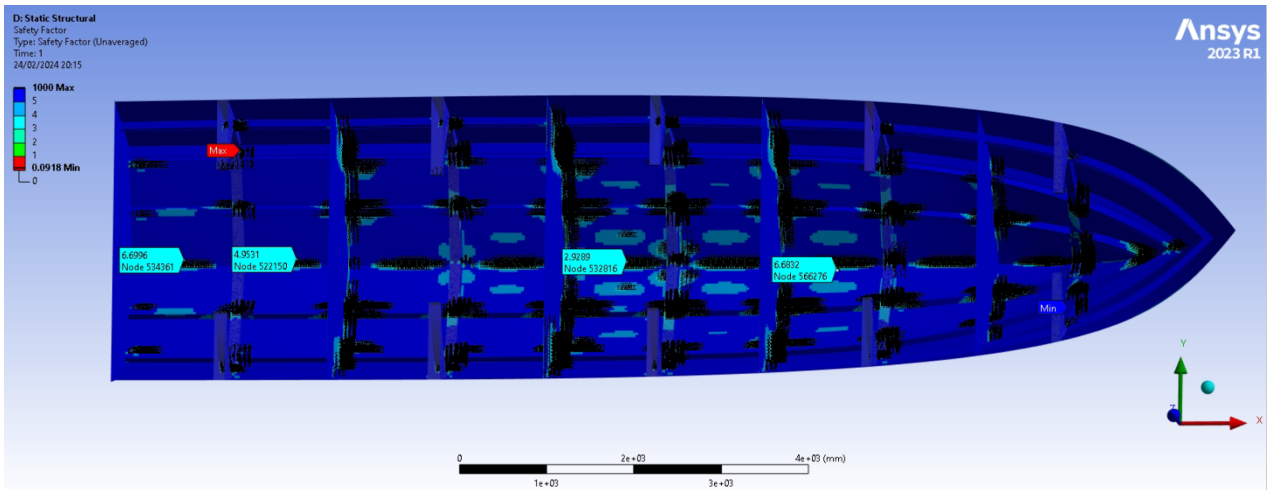
Εικόνα 113: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (*Top view*)



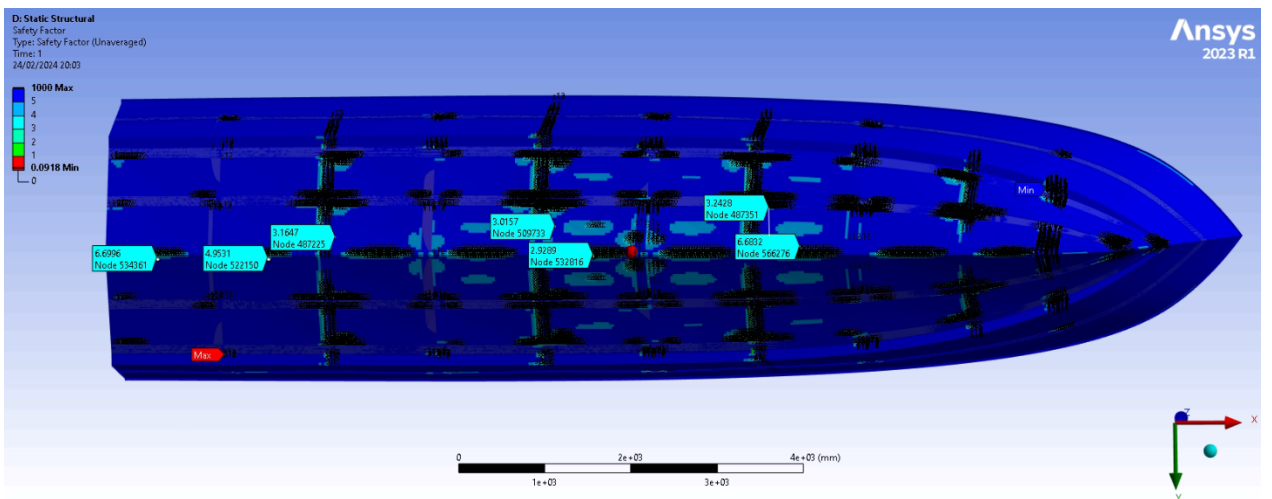
Εικόνα 114: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (*Bottom view*)



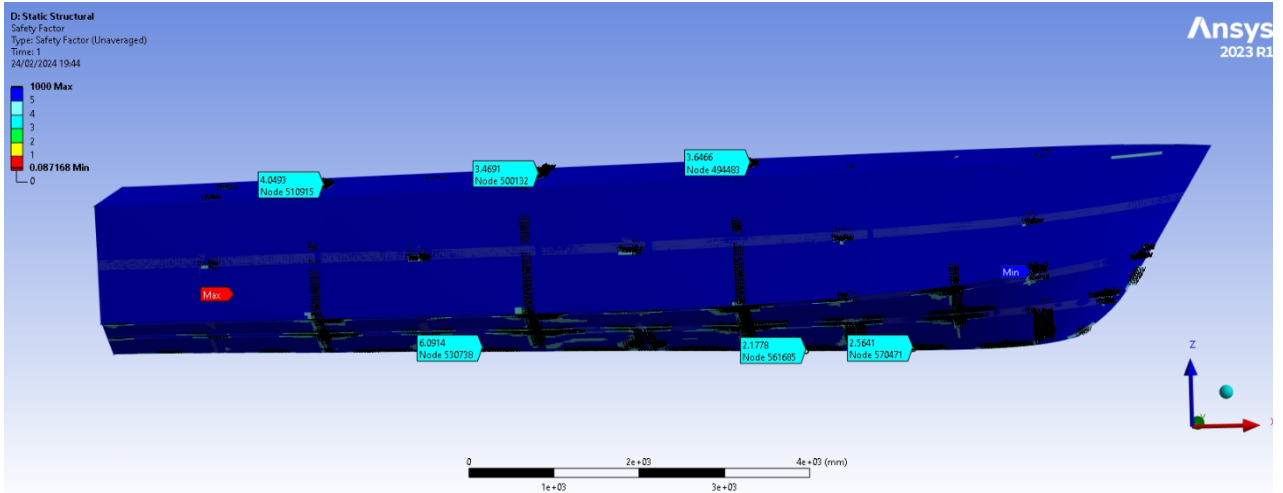
Εικόνα 115: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (Front view)



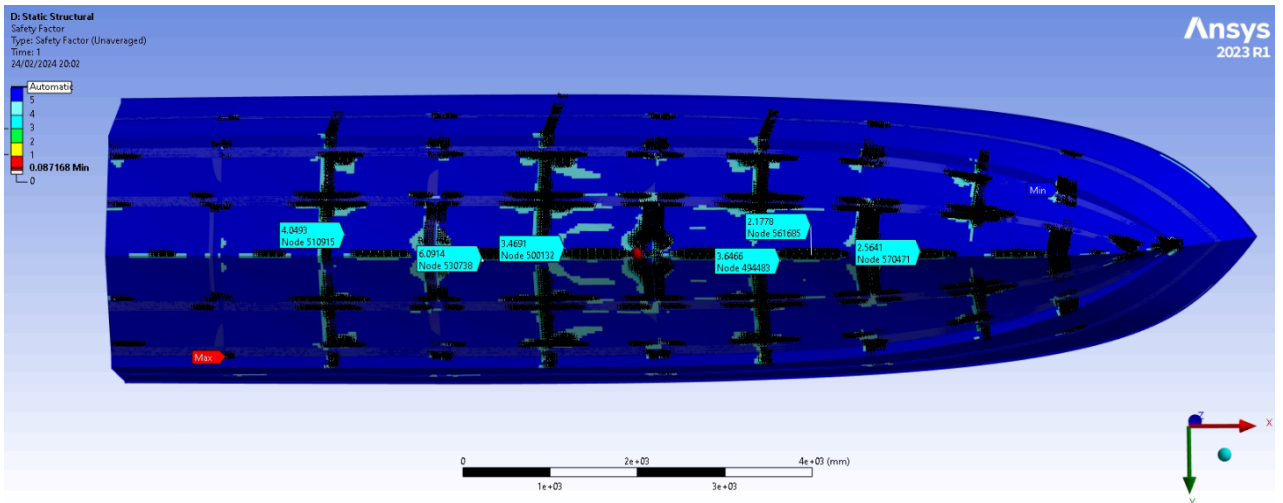
Εικόνα 116: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (Top view)



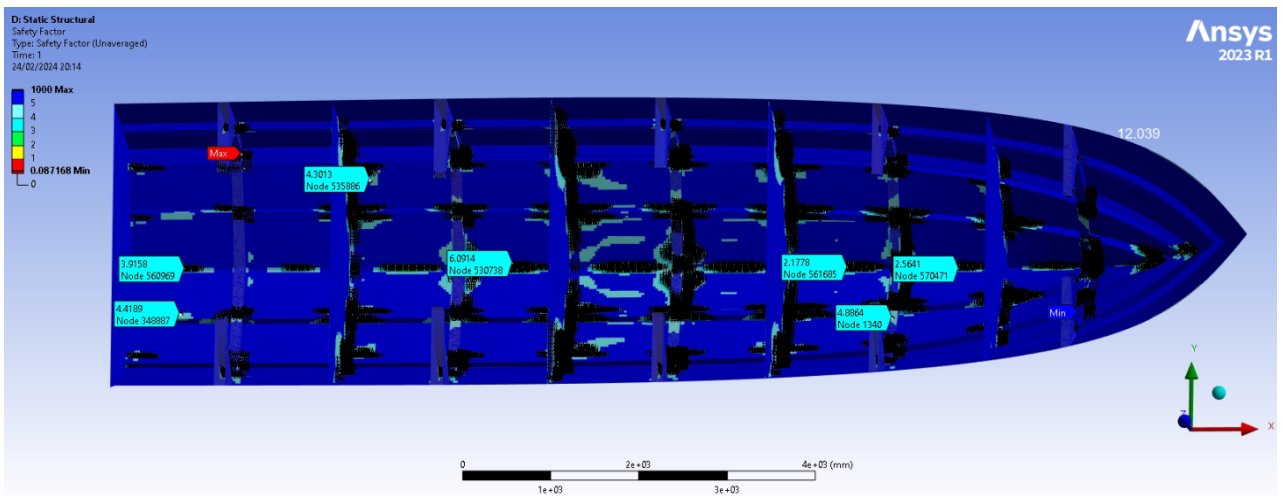
Εικόνα 117: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (Bottom view)



Εικόνα 118: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu» (Front view)



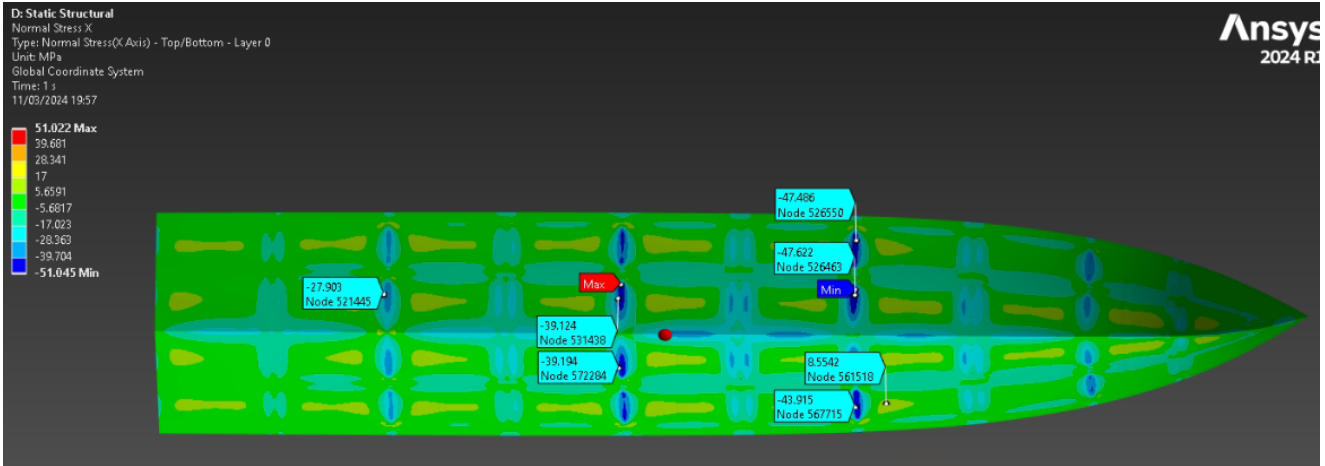
Εικόνα 119: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu» (bottom view)



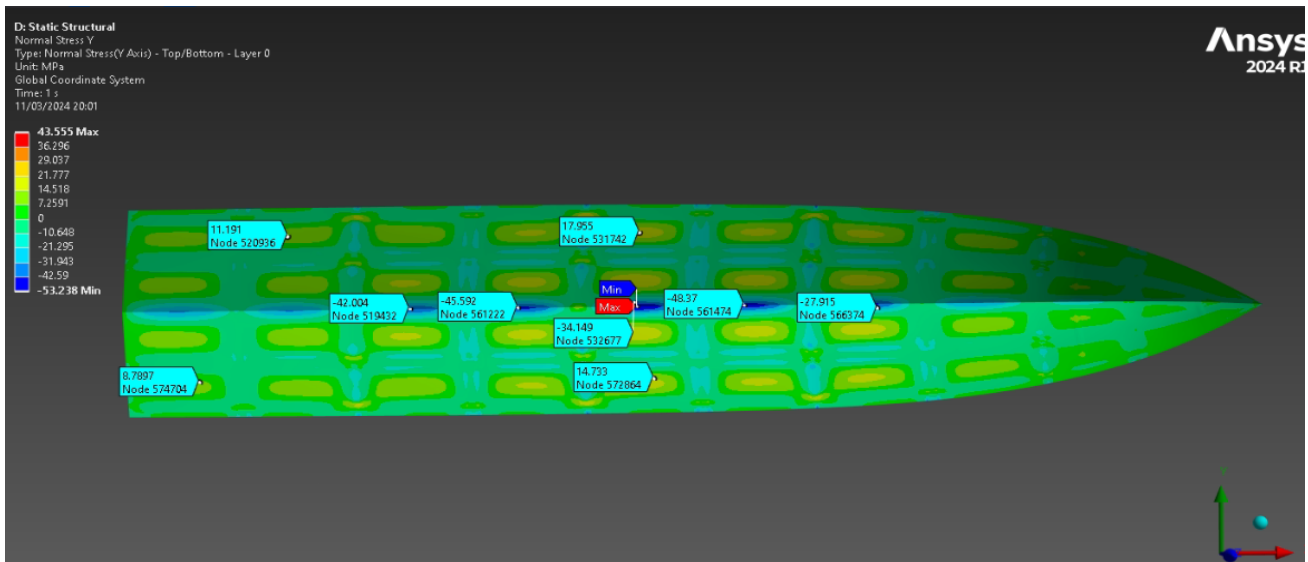
Εικόνα 120: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-Wu» (Top view)

5.3.2 Έλεγχος επιτρεπόμενων ορίων τάσεων

Εφόσον, έχουν τοποθετηθεί τα εγκάρσια ενισχυτικά επιτυχώς πραγματοποιείται έλεγχος για την στρώση BD 0/90, για την οποία στο προηγούμενο μοντέλο τα όρια των τάσεων ήταν μεγαλύτερα από τα επιτρεπτά.



Εικόνα 121: Ορθή τάση σ_x στην στρώση BD 0/90



Εικόνα 122: Ορθή τάση σ_y στην στρώση BD 0/90

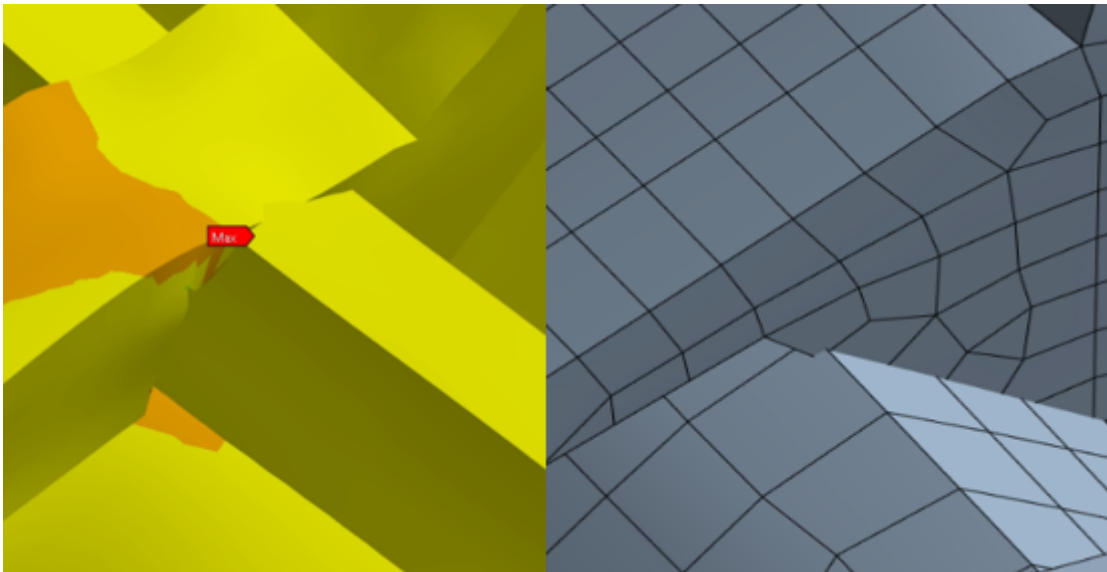
Παρατηρούμε ότι πλέον οι ορθές τάσεις σ_x και σ_y βρίσκονται εντός επιτρεπόμενων ορίων:

- $\sigma_x(\max) = 51.022 < \sigma_{x\epsilon\pi} = 85.2$ [MPa]
- $\sigma_x(\min) = -51.045 > \sigma_{x\epsilon\pi} = -68.85$ [MPa]
- $\sigma_y(\max) = 43.555 < \sigma_{y\epsilon\pi} = 85.2$ [MPa]
- $\sigma_y(\min) = -53.238 > \sigma_{y\epsilon\pi} = -68.85$ [MPa]

5.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την βελτιστοποίηση

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω αποτελέσματα η τοποθέτηση των εγκάρσιων ενισχυτικών είχε σπουδαία επίδραση στην κατασκευή. Όπως παρατηρούμε, από το κριτήριο μέγιστης τάσης και το κριτήριο «Tsai-Wu» η τοπική αστοχία έχει μειωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό. Αυτό, επιβεβαιώνεται και από τον κανονισμό του *Lloyd's Register*, σύμφωνα με τον οποίο τα όρια των τάσεων είναι πλέον μέσα στη επιτρεπτά όρια. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μείωση των ορθών και των διατμητικών τάσεων, καθώς και μείωση των παραμορφώσεων εσωτερικά και εξωτερικά της γάστρας.

Κατά την μοντελοποίηση της κατασκευής παρατηρήθηκε ότι σε κάποια σημεία στο σκάφος τοπικά, υπάρχουν συγκεντρώσεις τάσεων οι οποίες αγνοούνται. Αυτό συμβαίνει λόγω κακής ποιότητας πλέγματος τοπικά καθώς μία επιφάνεια εισέρχεται ελάχιστα μέσα στην άλλη. Οι υψηλές τιμές σε αυτά τα στοιχεία είναι «τεχνητές» και προκύπτουν από τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι τα αποτελέσματα στα στοιχεία αυτά είναι μη ρεαλιστικά, γι' αυτό και αγνοούνται και δεν αξιολογούνται.



Εικόνα 123: Παράδειγμα στοιχείων στα οποία τα αποτελέσματα αγνοούνται

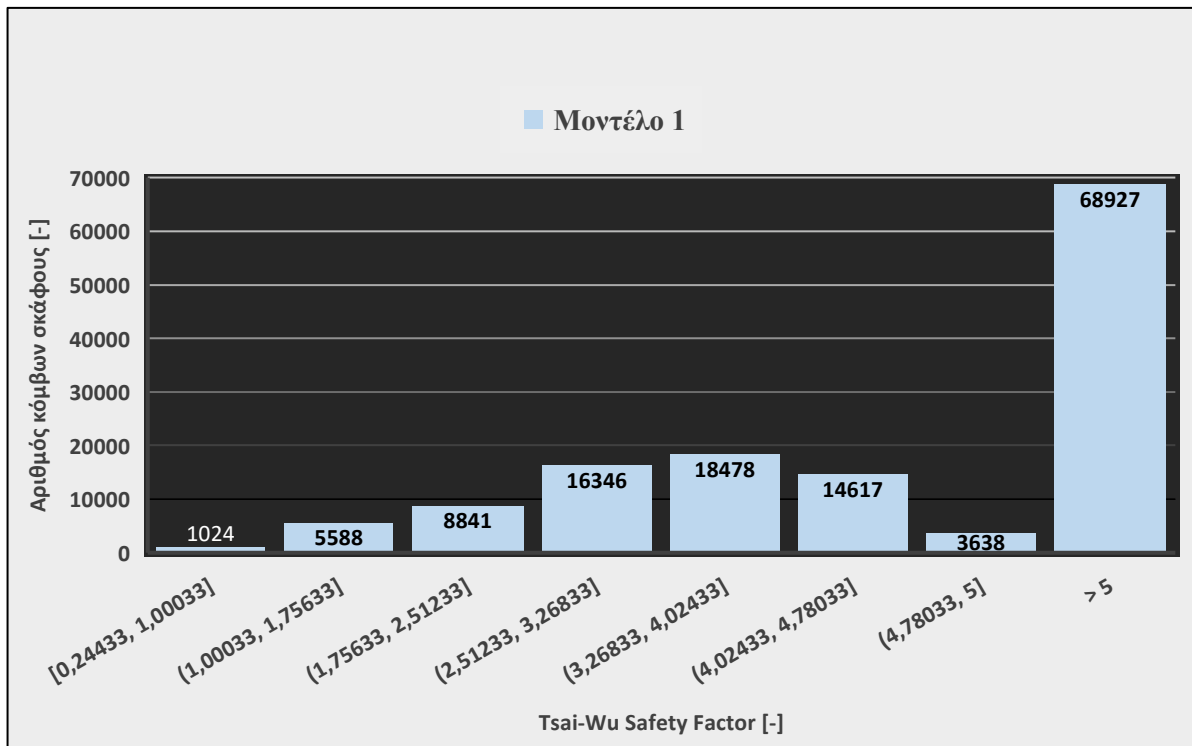
Οι διαφοροποιήσεις στις μέγιστες και ελάχιστες τιμές των αποτελεσμάτων φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 27: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

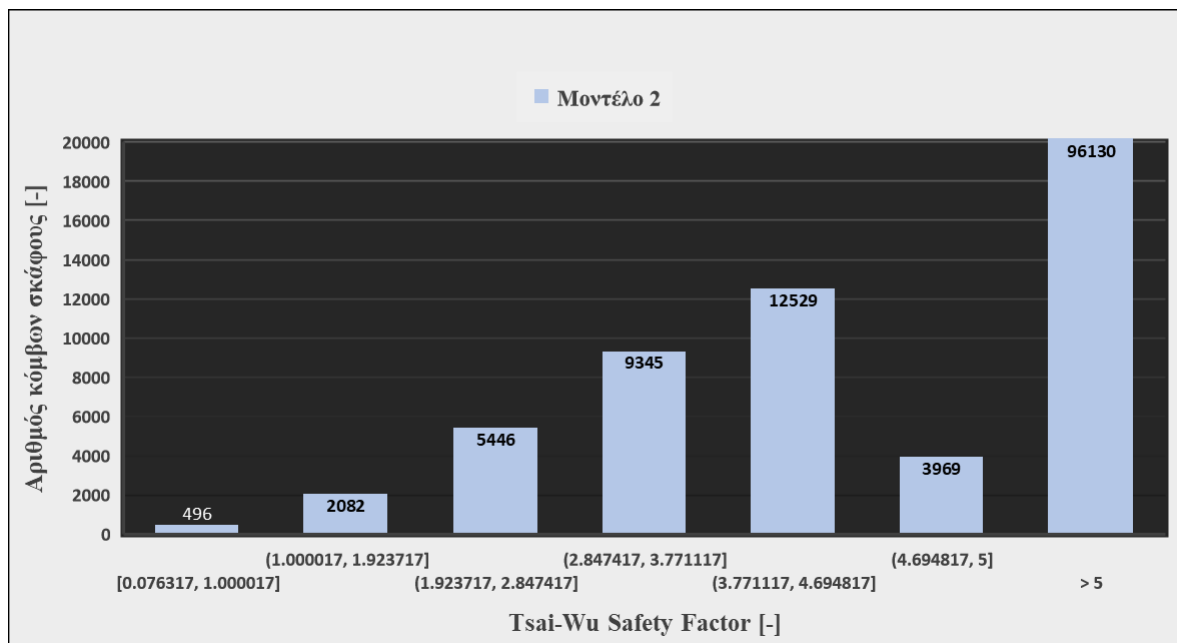
		<i>Max</i>	<i>Min</i>	Μονάδα μέτρησης
Διατμητική τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	46.542	-43.161	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	24.15	-22.103	[MPa]
Ορθή τάση κατά x	Πριν τη βελτιστοποίηση	131.07	-184.84	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	77.538	-67.438	[MPa]
Ορθή τάση κατά y	Πριν τη βελτιστοποίηση	108.02	-120.2	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	72.43	-73.726	[MPa]
Ορθή τάση κατά z	Πριν τη βελτιστοποίηση	120.71	-130.24	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	68.794	-64.852	[MPa]
Ελάχιστη κύρια τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	18.085	-20.22	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	27.614	-28.57	[MPa]
Μέση κύρια τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	79.251	-75.893	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	52.209	-55.759	[MPa]
Μέγιστη κύρια τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	131.07	-30.41	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	77.02	-23.318	[MPa]
Συνολική Παραμόρφωση	Πριν τη βελτιστοποίηση	160.52	0	[mm]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	41.52	0	[mm]

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι οι συνολικές παραμορφώσεις έχουν μειωθεί ικανοποιητικό βαθμό σε όλο το εύρος του πλοίου. Πιο συγκεκριμένα, τα σημεία που θα μας ενδιέφερε να μειωθούν ήταν στις πλάκες του πυθμένα, καθώς υπήρχαν πολλά σημεία αστοχίας. Όπως ήταν αναμενόμενο με την προσθήκη των εγκάρσιων ενισχυτικών, η τοπική αστοχία σε αυτά τα σημεία εξαλείφθηκε. Τέλος, η μέγιστη παραμόρφωση ασκείται στο κατάστρωμα του σκάφους (*main deck*), η οποία με την διαδικασία της βελτιστοποίησης μειώνεται στα 41.52 [mm]. Αξίζει να σημειωθεί, ότι δεν υπάρχει τοπική αστοχία στο κατάστρωμα, παρόλο που οι παραμορφώσεις στο κατάστρωμα είναι μεγάλες συγκριτικά με τις υπόλοιπα μέρη του σκάφους. Αυτό συμβαίνει, διότι η ισαπόσταση μεταξύ των φρακτών είναι 2.5 [m], συνεπώς η μέγιστη παραμόρφωση 41.52 [mm] είναι αποδεκτή.

Όλοι οι παραπάνω ισχυρισμοί επαληθεύονται από το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης και το κριτήριο «*Tsai-Wu*».



Διάγραμμα 6: Κριτήριο Tsai-Wu πριν την βελτιστοποίηση



Διάγραμμα 7: Κριτήριο Tsai-wu μετά την βελτιστοποίηση

Παρατηρούμε ότι πριν την βελτιστοποίηση του σκάφους υπάρχει τοπική αστοχία στα 1024 από τα 137.459 στοιχεία (0.0726%), ενώ μετά από αυτήν υπάρχει σε 496 από τα 164.147 στοιχεία (0.00334%). Επομένως, υπάρχει ένα ποσοστό μείωσης της τοπικής αστοχίας της τάξης του 53.93%, το οποίο είναι αρκετά ικανοποιητικό.

5.4 Βελτιστοποίηση ως προς την μείωση βάρους και του κόστους κατασκευής

Εφόσον ολοκληρώθηκε επιτυχώς η βελτιστοποίηση ως προς τις εγκάρσιες ενισχύσεις του σκάφους, σε αυτό το σημείο πραγματοποιείται η βελτιστοποίηση του ως προς το βάρος του και το κόστος κατασκευής του. Για να γίνει αυτό, αρχικά ορίζονται στο πρόγραμμα *ANSYS* οι τιμές όλων των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή. Για να γίνει αυτό πραγματοποιείται η κατάλληλη έρευνα κόστους του κάθε υλικού ξεχωριστά. Οι τιμές των όλων των υλικών αναγράφονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 28: Τιμές υλικών [8] [13]

Υλικά	Τιμές	Μονάδα μέτρησης
<i>CSM 300</i>	4.59	[\$/m ²]
<i>BD 0/90</i>	12	[\$/m ²]
<i>Woven Roving</i>	9.57	[\$/m ²]
<i>PVC Foam</i>	5	[\$/m ²]

Η βελτιστοποίηση του σκάφους αφορά μόνο στην γάστρα του σκάφους και όχι στα ενισχυτικά και τις φρακτές του, καθώς μετά από πολλές δοκιμές, παρατηρήθηκε ότι η αστοχία είναι αναπόφευκτη εάν μειωθεί το πάχος των στρώσεων τους. Το ίδιο ισχύει και για το κύριο κατάστρωμα του πλοίου, καθώς παρατηρήθηκε ότι η μείωση του πάχους του προκαλεί τάσεις μεγαλύτερες από τα επιτρεπτά όρια. Δεν πραγματοποιήθηκε κάποια αλλαγή στα πάχη των στρώσεων των υλικών, αλλά μόνο στον αριθμό των στρώσεων. Οι διαμορφώσεις του πάχους των στρώσεων παρουσιάζονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 29 Τελικό πάχος τοιχωμάτων πυθμένα και καθρέπτη πρόμνης

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσεων
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>BD</i>	1.38
7	<i>CSM</i>	0.9
8	<i>BD</i>	1.38
9	<i>CSM</i>	0.9
11	<i>BD</i>	1.38
12	<i>CSM</i>	0.9
13	<i>BD</i>	1.38
14	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		14.58 [mm]

Πίνακας 30: Τελικό πάχος των τοιχωμάτων του *chain*

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσεων
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>CSM</i>	0.9
7	<i>BD</i>	1.38
8	<i>CSM</i>	0.9
9	<i>BD</i>	1.38
10	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		10.92 [mm]

Πίνακας 31: Τελικό πάχος πλευρικών τοιχωμάτων της γάστρας (*Side Hull*)

A/A	Υλικό	Πάχος στρώσεων
1	<i>CSM</i>	0.9
2	<i>BD</i>	1.38
3	<i>CSM</i>	0.9
4	<i>BD</i>	1.38
5	<i>CSM</i>	0.9
6	<i>CSM</i>	0.9
7	<i>BD</i>	1.38
8	<i>CSM</i>	0.9
9	<i>BD</i>	1.38
10	<i>CSM</i>	0.9
Τελικό πάχος πολύστρωτου		10.92 [mm]

Πίνακας 32: Διαφοροποιήσεις στο πάχος στρώσεων της γάστρας

Κομμάτια γάστρας	Πριν	Μετά	Μονάδα μέτρησης
<i>Chine</i>	20.04	10.92	[mm]
<i>Bottom hull</i>	20.04	14.58	[mm]
<i>Side hull</i>	20.04	10.92	[mm]
<i>Aft</i>	20.04	14.58	[mm]
<i>Deck</i>	35.9	35.9	[mm]

Οι παραπάνω διαφοροποιήσεις στο πάχος στρώσεων της γάστρας επιφέρουν τις παρακάτω αλλαγές στο κόστος του βάρους, καθώς και στο συνολικό βάρος του. Στους παρακάτω πίνακες αναγράφονται αναλυτικά οι τιμές βάρους και κόστους για όλα το αρχικό σκάφος και για τα δύο βήματα της βελτιστοποίησης. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της εντολής (“*sensor*”), η οποία πραγματοποιείται μέσα από το *ACP (Pre)*.

Πίνακας 33: Συνολικό κόστος σκάφους

Κομμάτια σκάφους	Αρχικό σκάφος	1 ^ο βήμα βελτιστοποίησης	2 ^ο βήμα βελτιστοποίησης	Μονάδα μέτρησης
<i>Side hull</i>	5459	5459	2729,5	[\$]
<i>Chine</i>	401	401	273	[\$]
<i>Bottom hull</i>	4346	4346	3259.5	[\$]
<i>Transom</i>	673.67	673.67	515.8	[\$]
<i>Main deck</i>	4191	4191	4191	[\$]
<i>Transverse Bulkheads</i>	940	940	940	[\$]
<i>Longitudinal Stiffeners</i>	1518	1518	1518	[\$]
<i>Transverse Stiffeners</i>	0	1085	1085	[\$]
Total cost	17.528,67	18.613,67	15.511,8	[\$]

Πίνακας 34: Συνολικό βάρος σκάφους

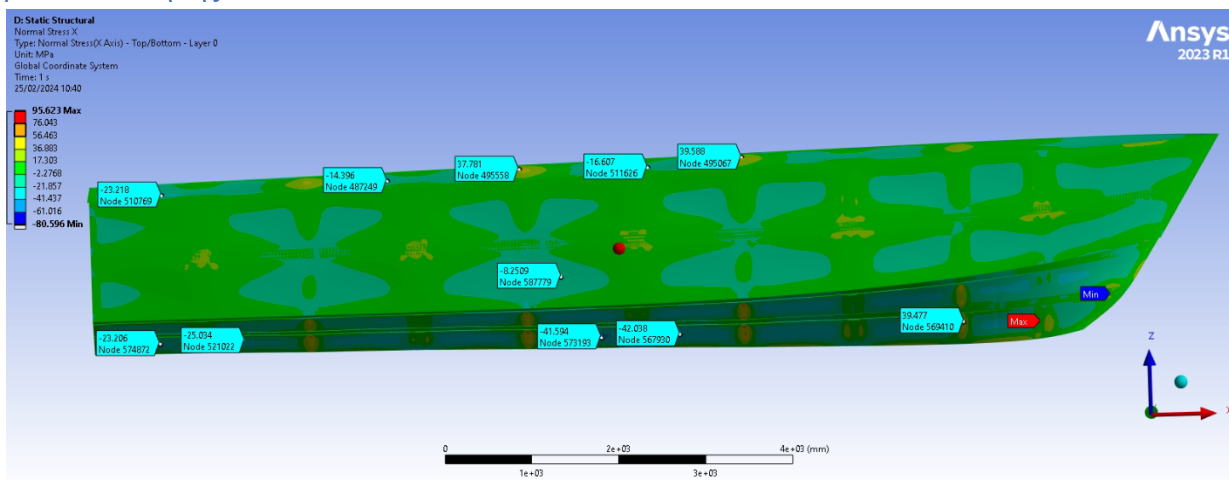
Κομμάτια σκάφους	Αρχικό σκάφος	1 ^ο βήμα βελτιστοποίησης	2 ^ο βήμα βελτιστοποίησης	Μονάδα μέτρησης
<i>Side hull</i>	1.18738	1.18738	0.5936	[tons]
<i>Chine</i>	0.08728	0.08728	0.04728	[tons]
<i>Bottom hull</i>	0.94538	0.94538	0.7286	[tons]
<i>Transom</i>	0.14642	0.14642	0.1182	[tons]
<i>Main deck</i>	0.943	0.943	0.943	[tons]
<i>Transverse Bulkheads</i>	0.19716	0.19716	0.19716	[tons]
<i>Longitudinal Stiffeners</i>	0.34236	0.34236	0.34236	[tons]
<i>Transverse Stiffeners</i>	0	0.2231	0.2231	[tons]
Total weight	3,8489	4,072	3,1933	[tons]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά μείωσης του κόστους αλλά και του βάρους, τα οποία αφορούν το 2^ο βήμα της βελτιστοποίησης.

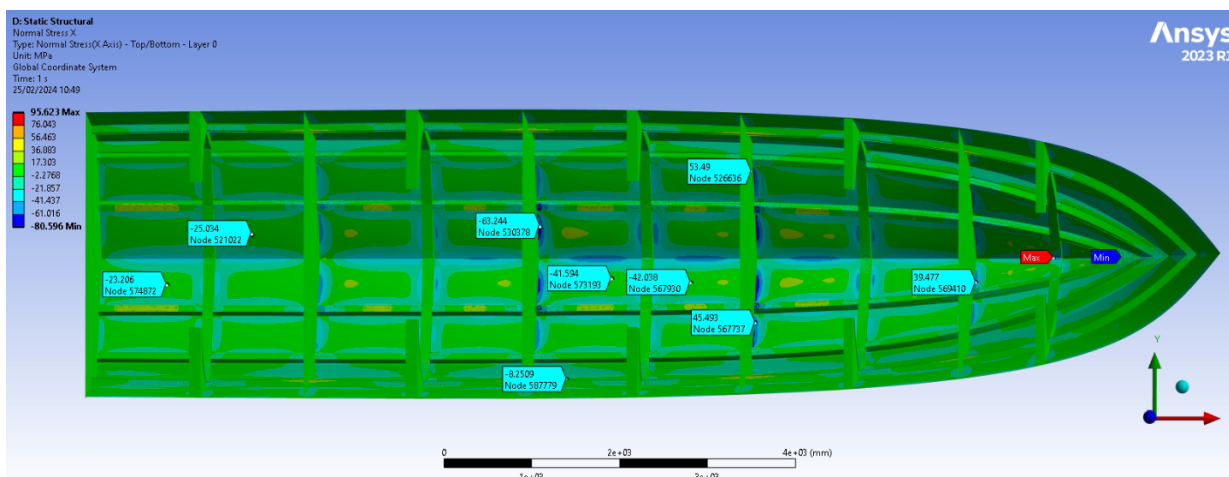
Πίνακας 35: Ποσοστά μείωσης τιμών

	Ποσοστό μείωσης κόστους	Ποσοστό μείωσης βάρους
Για τη γάστρα	27.64%	26.55%
Για το σκάφος	16.67%	21.58%

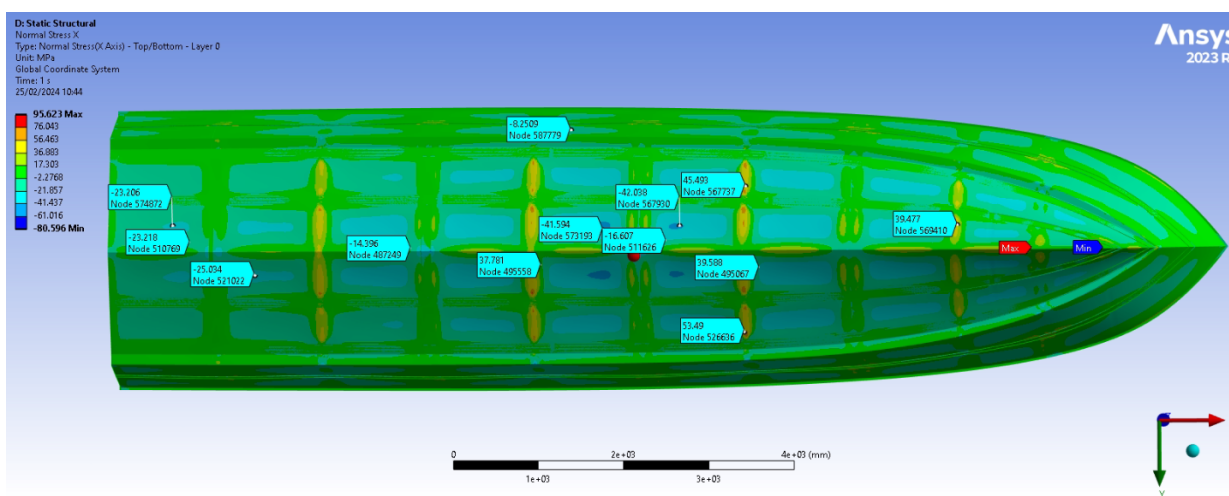
5.4.1 Αποτελέσματα τάσεων και παραμορφώσεων μετά το δεύτερο βήμα της βελτιστοποίησης



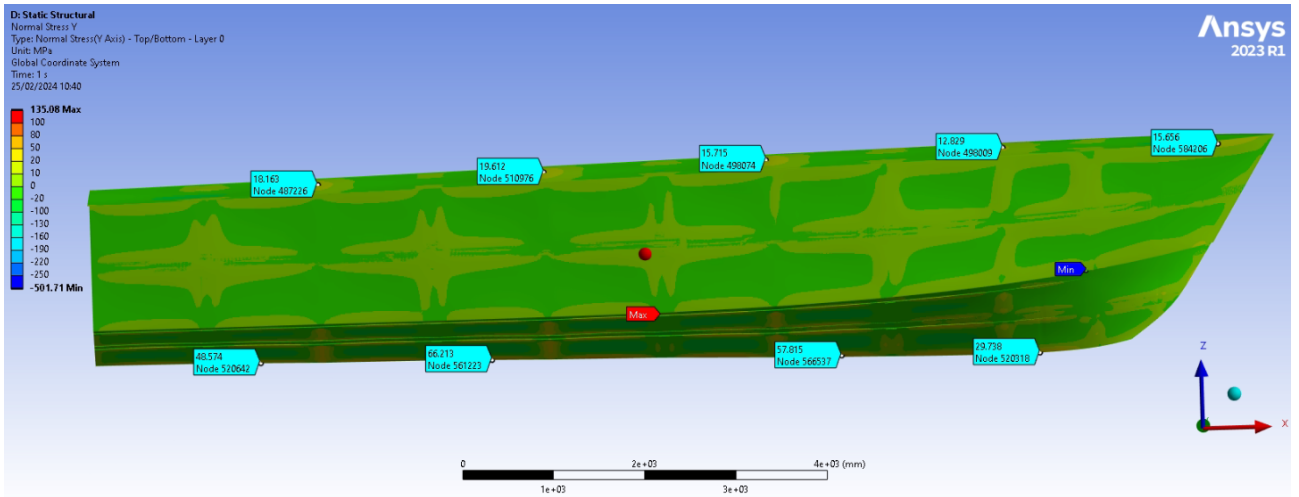
Εικόνα 124: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (*Front view*)



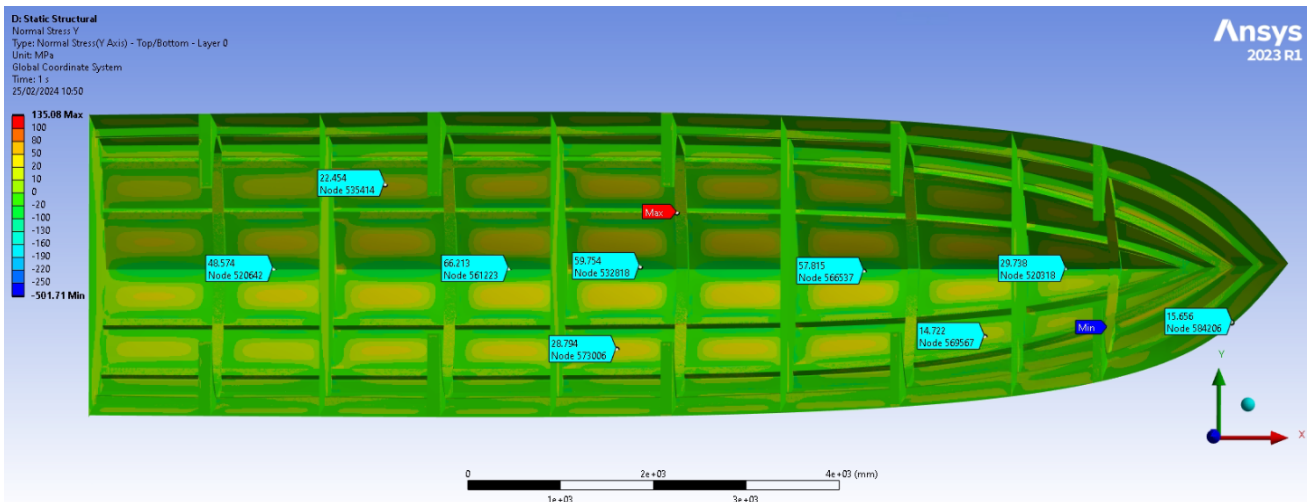
Εικόνα 125: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (*Top view*)



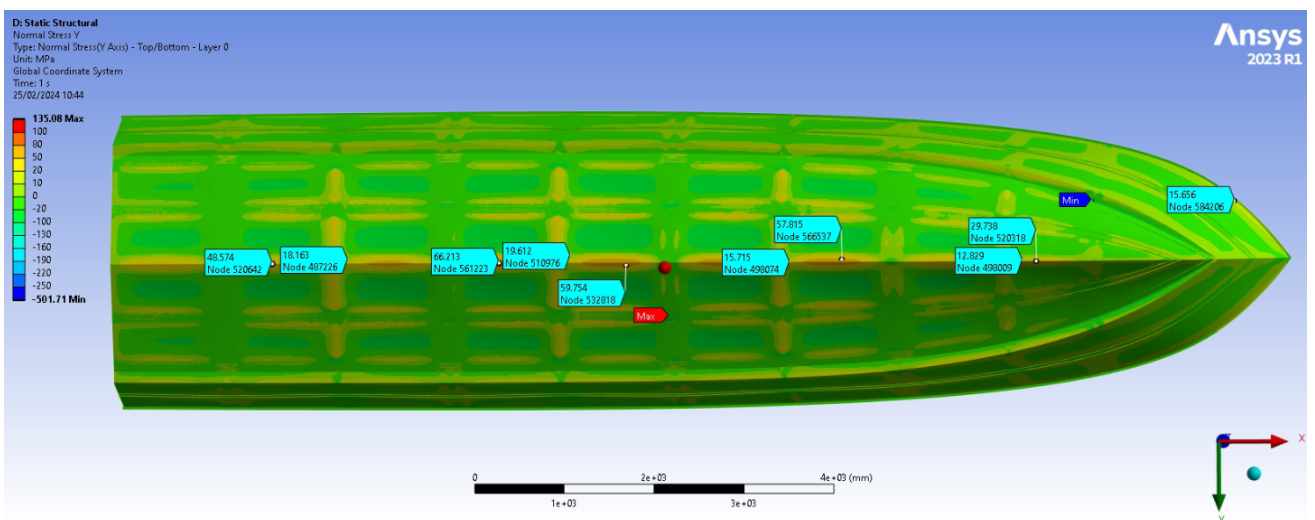
Εικόνα 126: Ορθή τάση κατά τον άξονα x (*Bottom view*)



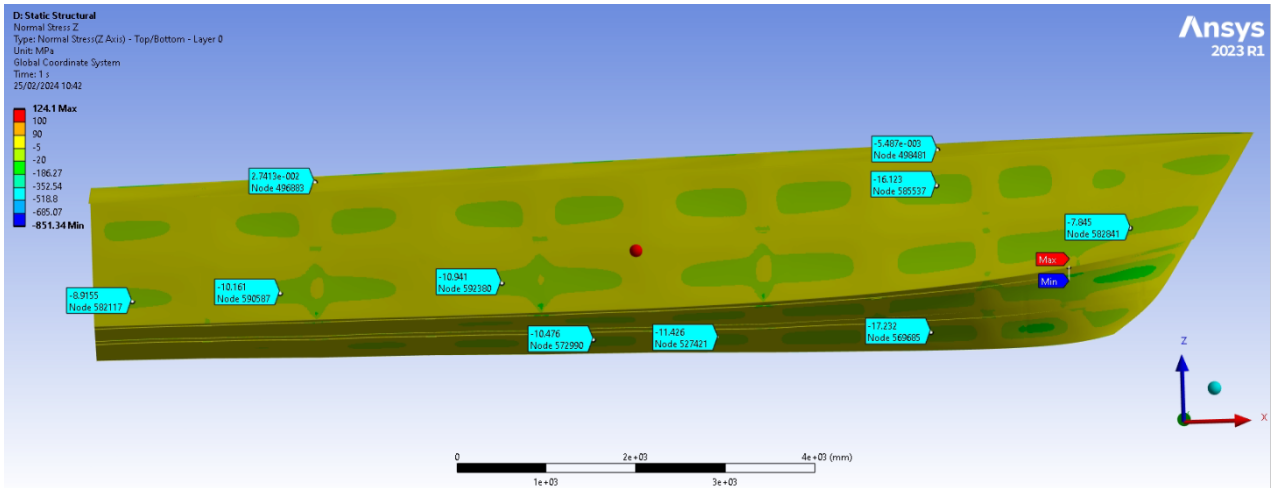
Εικόνα 127: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (*Front view*)



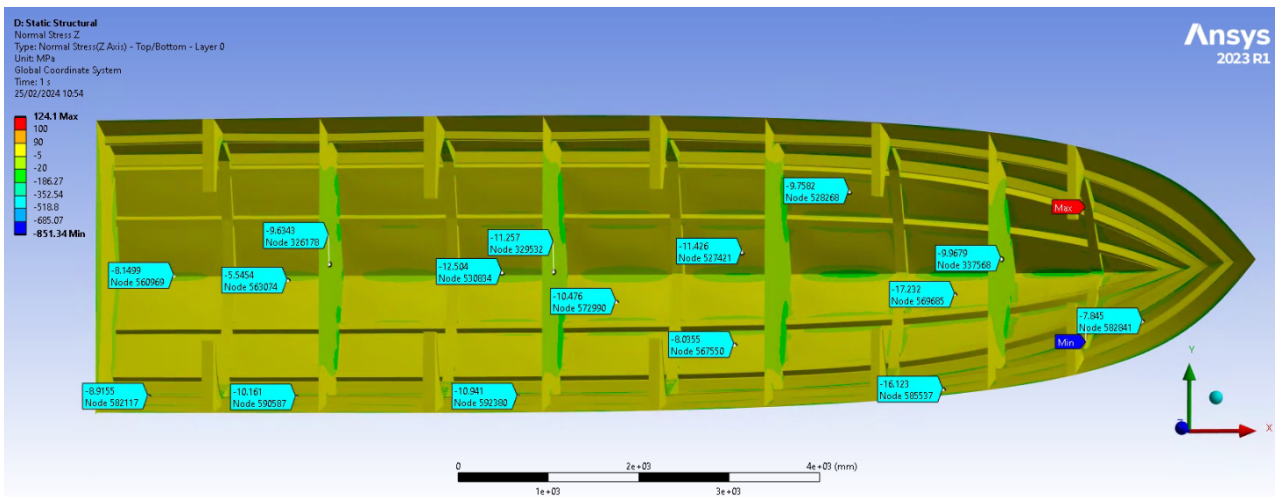
Εικόνα 128: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (*Top view*)



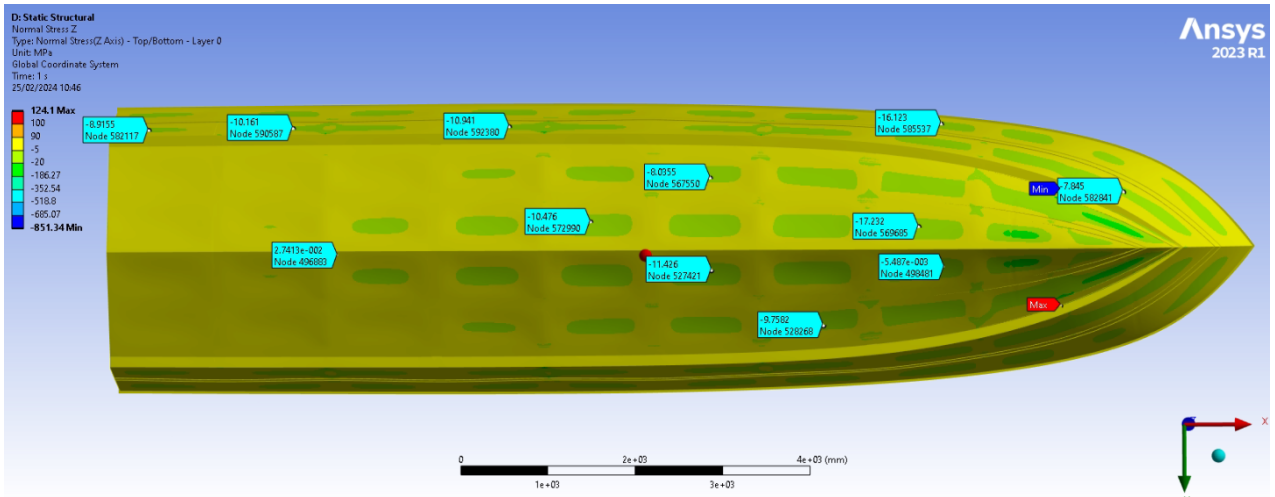
Εικόνα 129: Ορθή τάση κατά τον άξονα y (*Bottom view*)



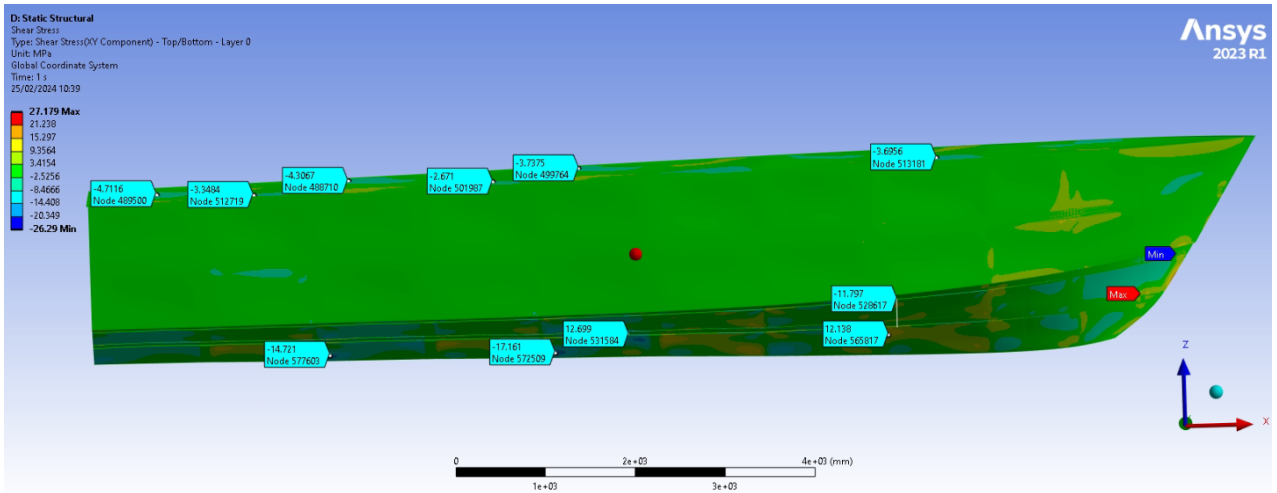
Εικόνα 130: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Front view)



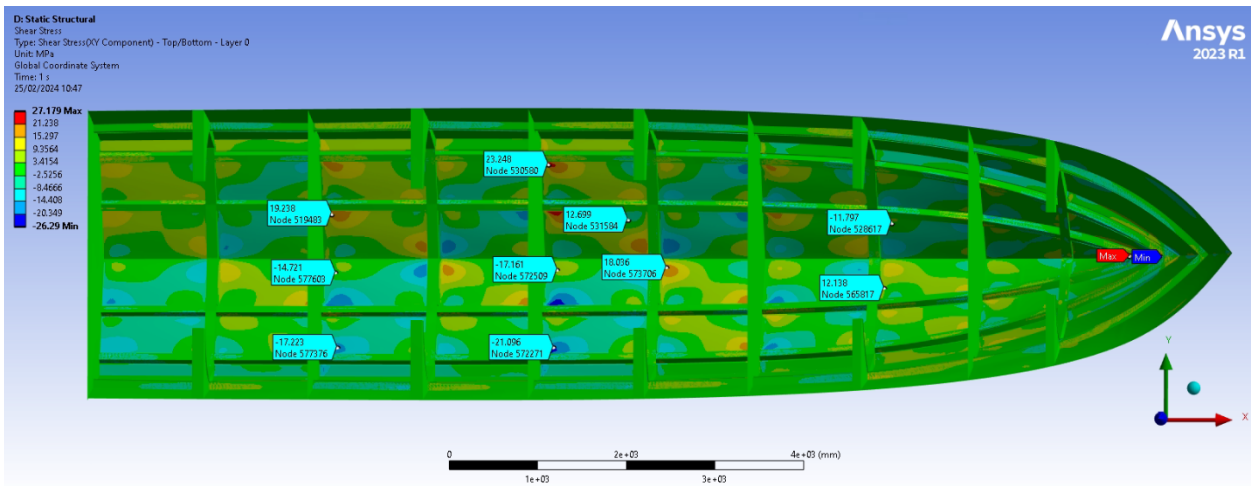
Εικόνα 131: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Top view)



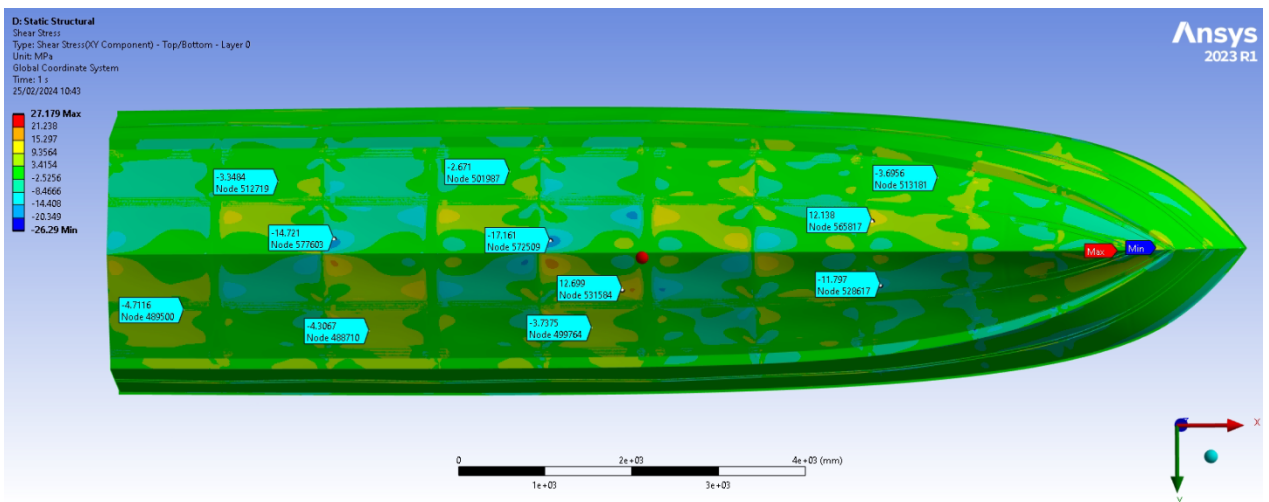
Εικόνα 132: Ορθή τάση κατά τον άξονα z (Bottom view)



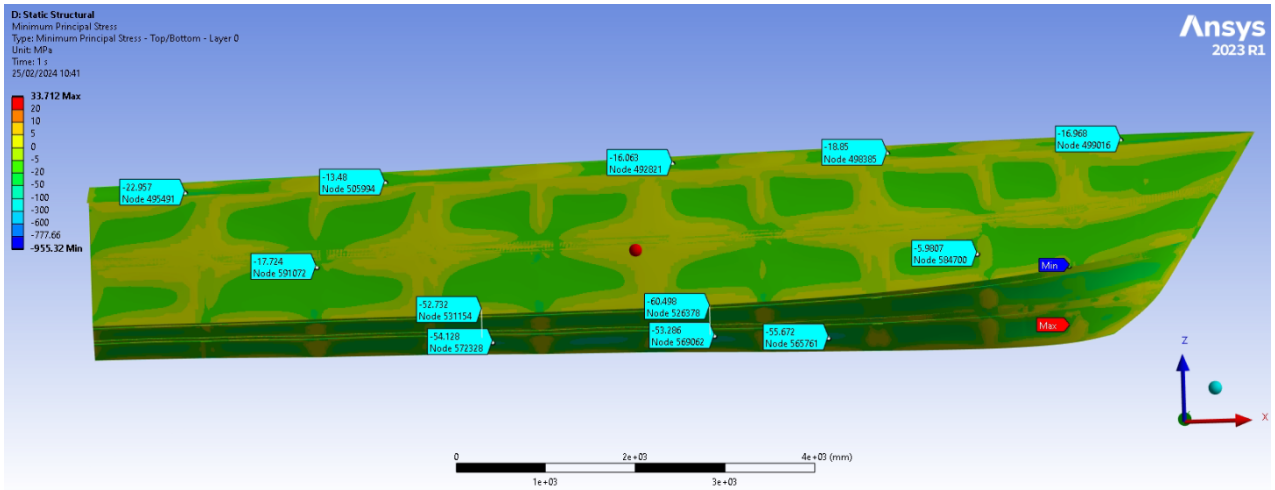
Εικόνα 133: Διατμητική τάση (Front view)



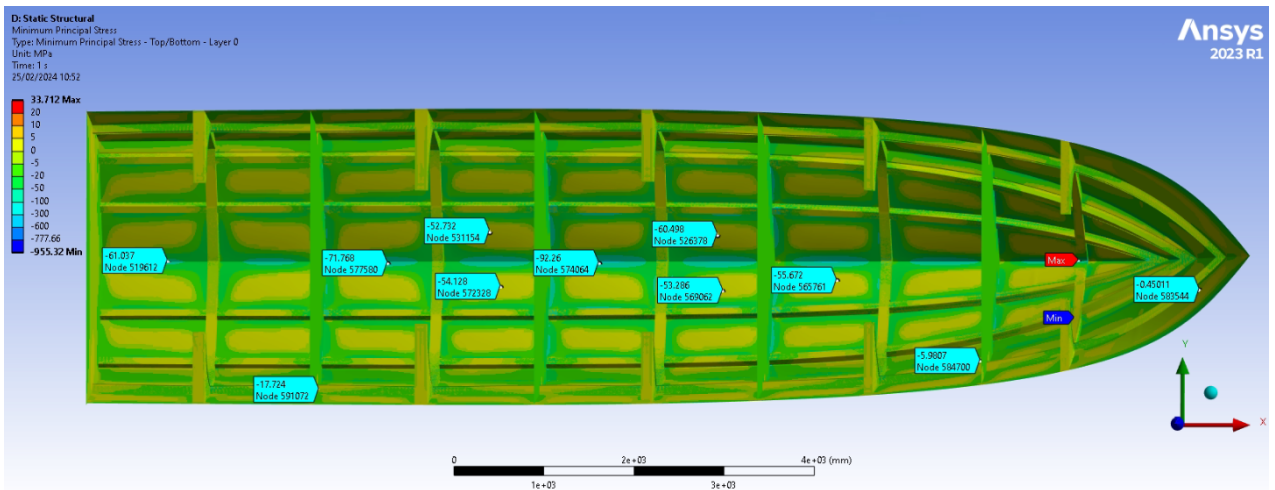
Εικόνα 134: Διατμητική τάση (Top view)



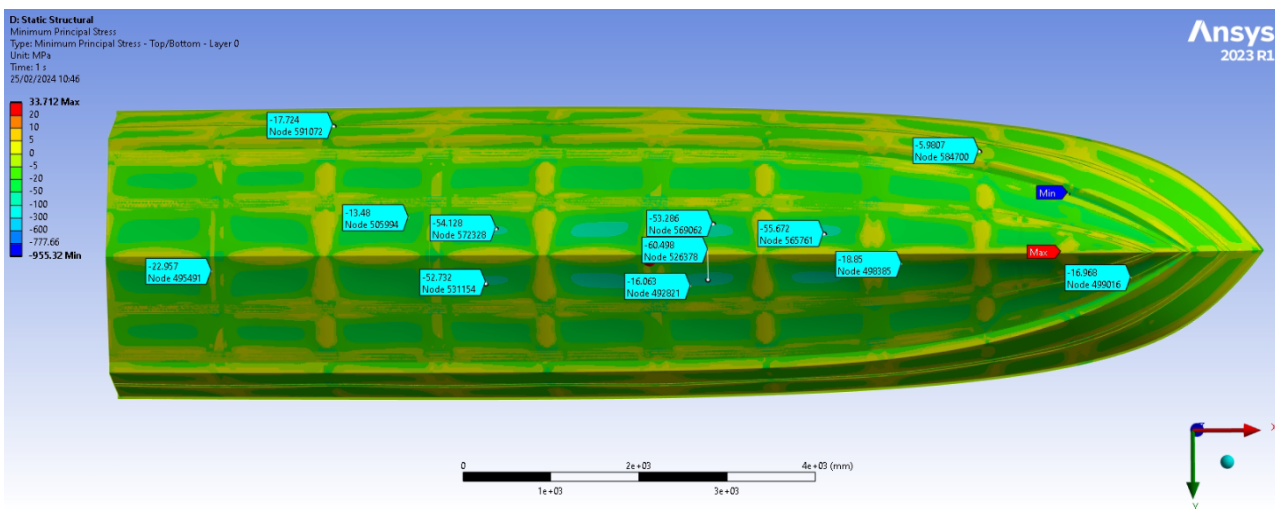
Εικόνα 135: Διατμητική τάση Bottom view)



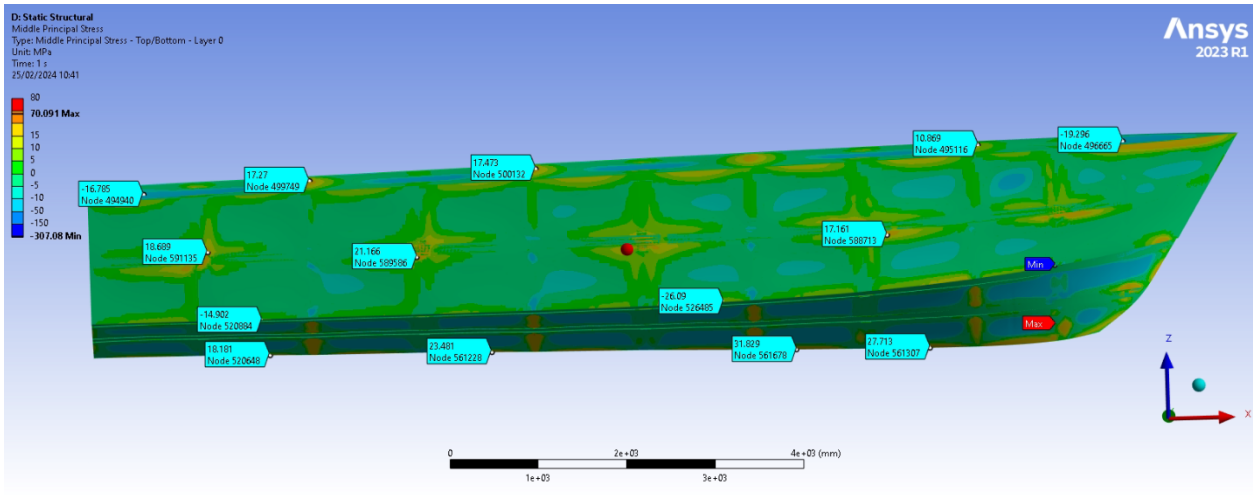
Εικόνα 136: Ελάχιστη κύρια τάση (front view)



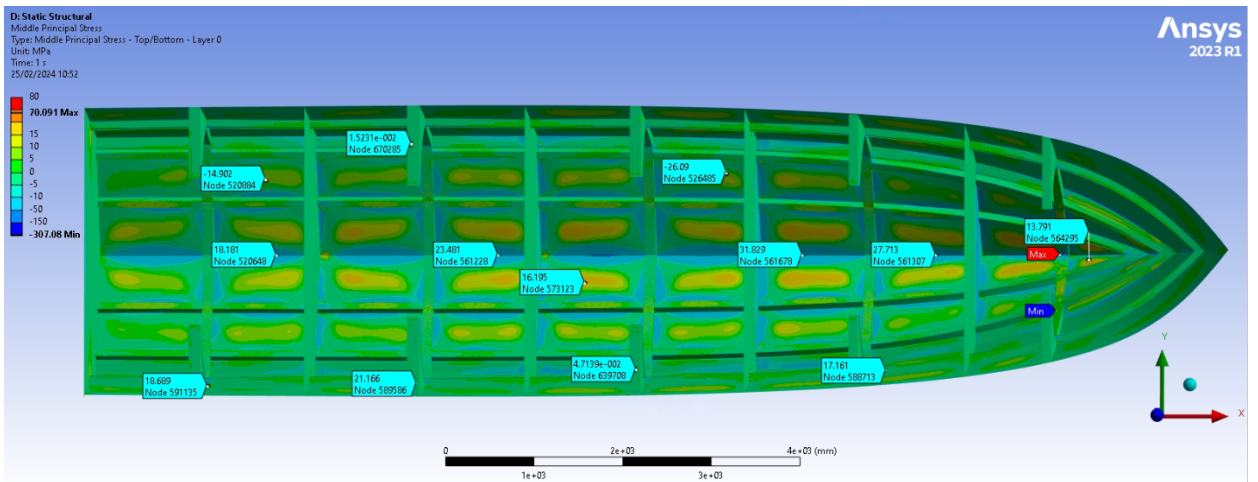
Εικόνα 137: Ελάχιστη κύρια τάση (top view)



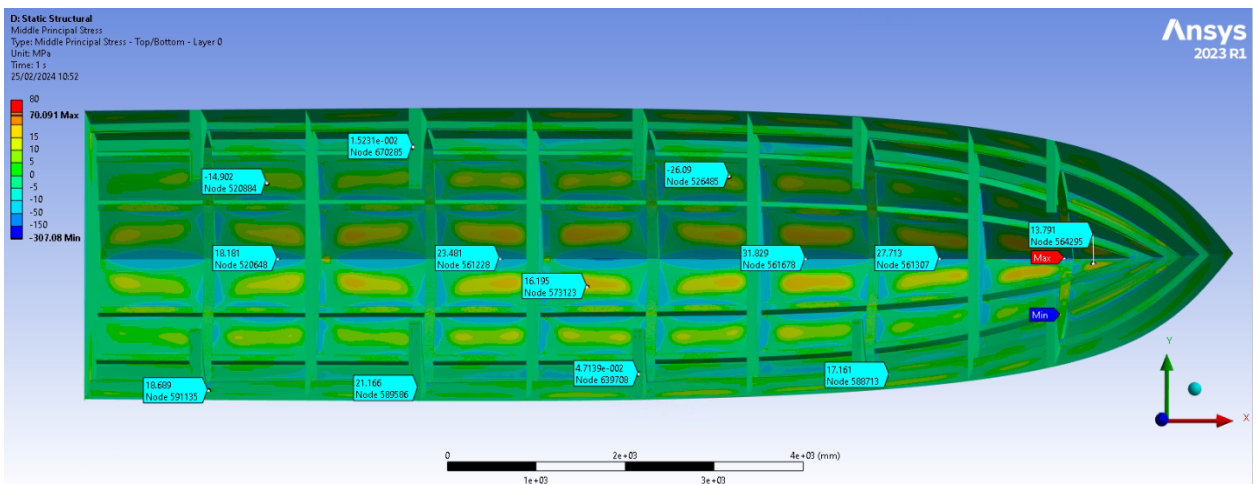
Εικόνα 138: Ελάχιστη κύρια τάση (bottom view)



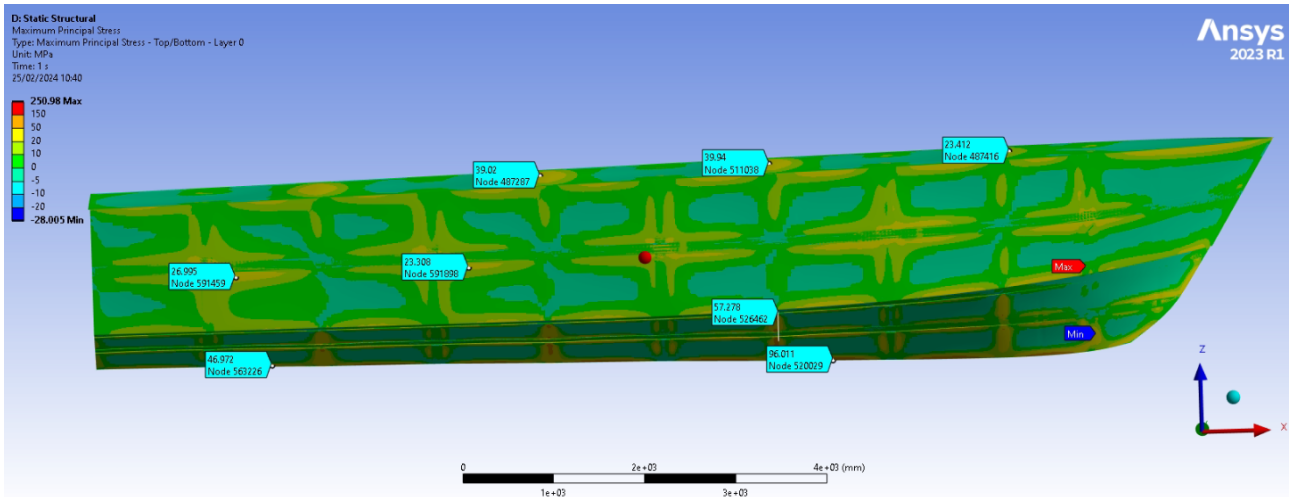
Εικόνα 139: Μέση κύρια τάση (front view)



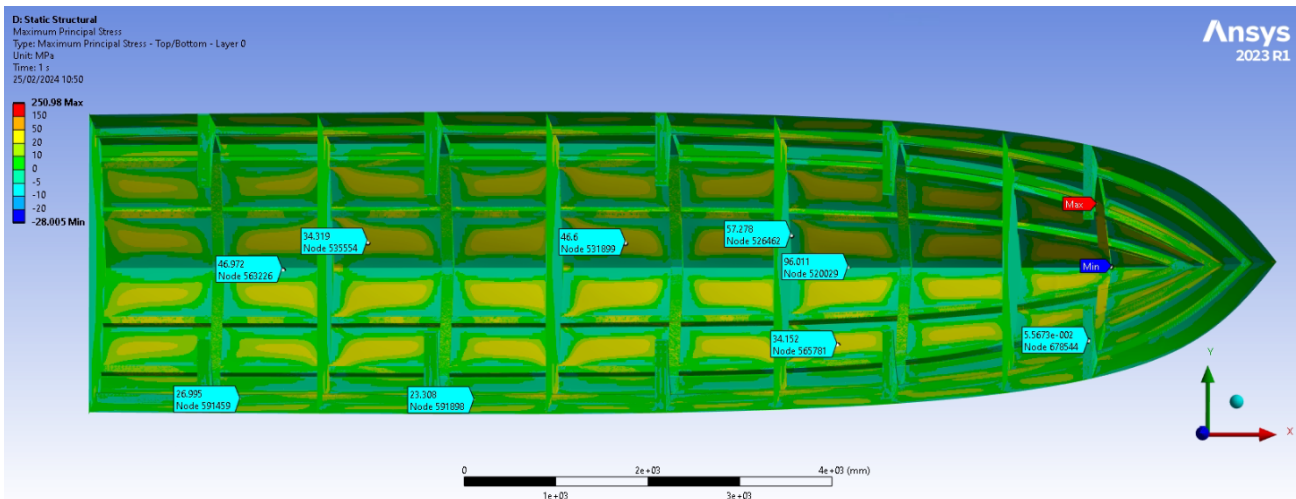
Εικόνα 140: Μέση κύρια τάση (top view)



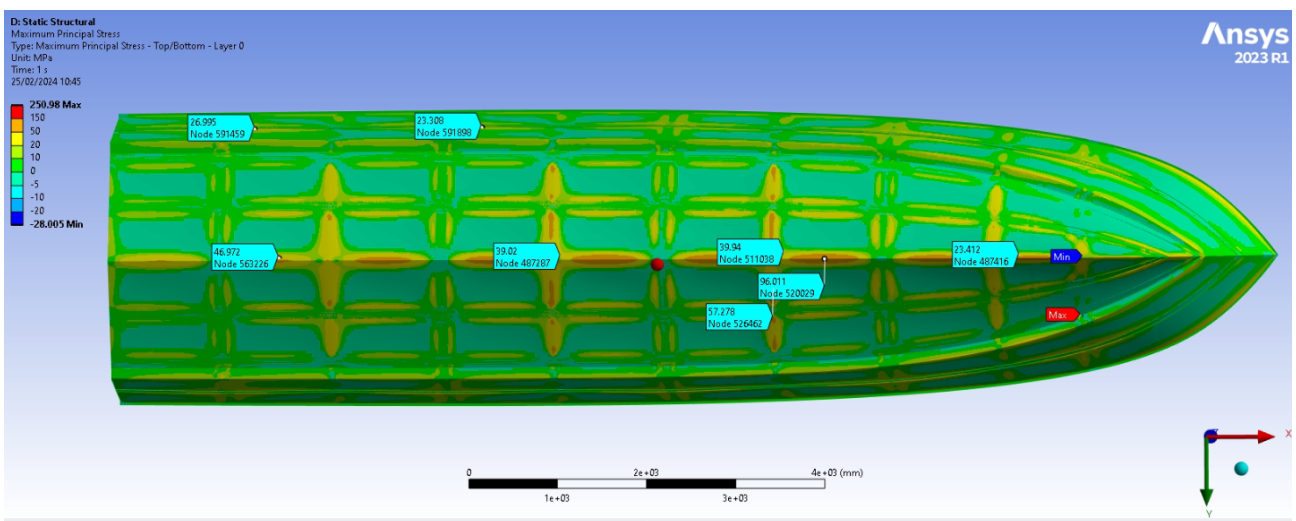
Εικόνα 141: Μέση κύρια τάση (bottom view)



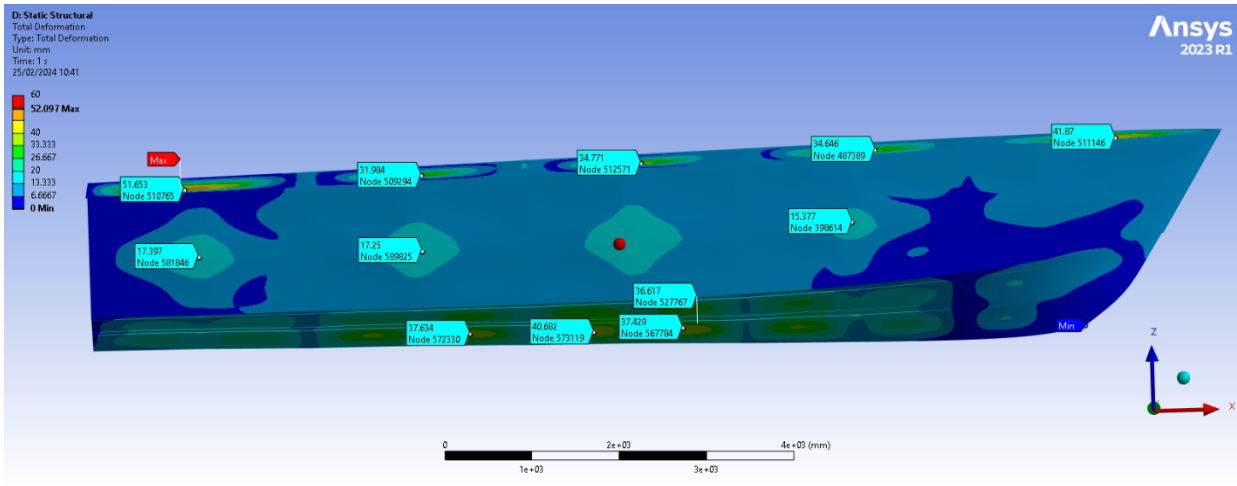
Εικόνα 142: Μέγιστη κύρια τάση (front view)



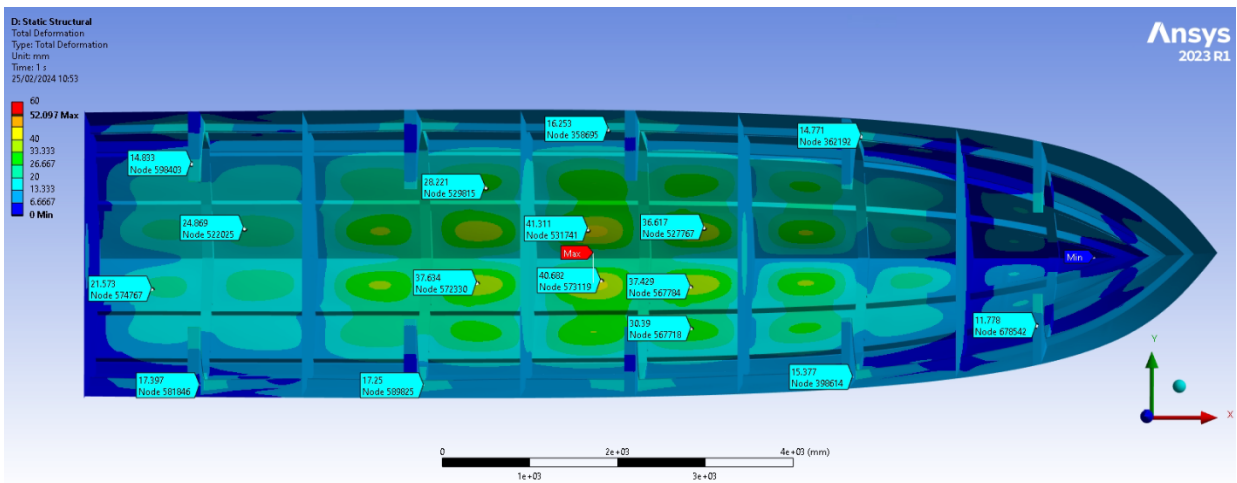
Εικόνα 143: Μέγιστη κύρια τάση (top view)



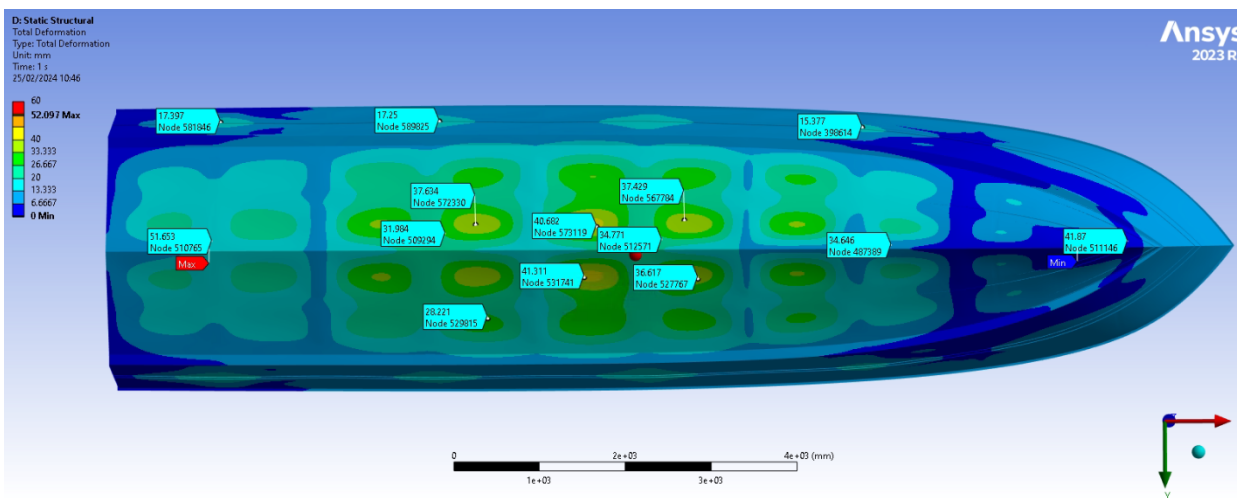
Εικόνα 144: Μέγιστη κύρια τάση (bottom view)



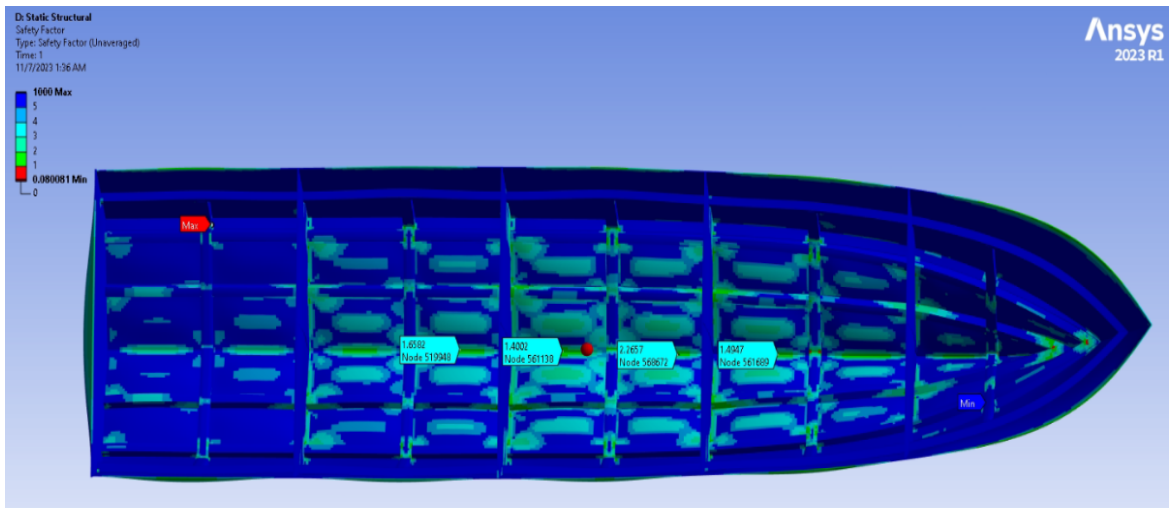
Εικόνα 145: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (*front view*)



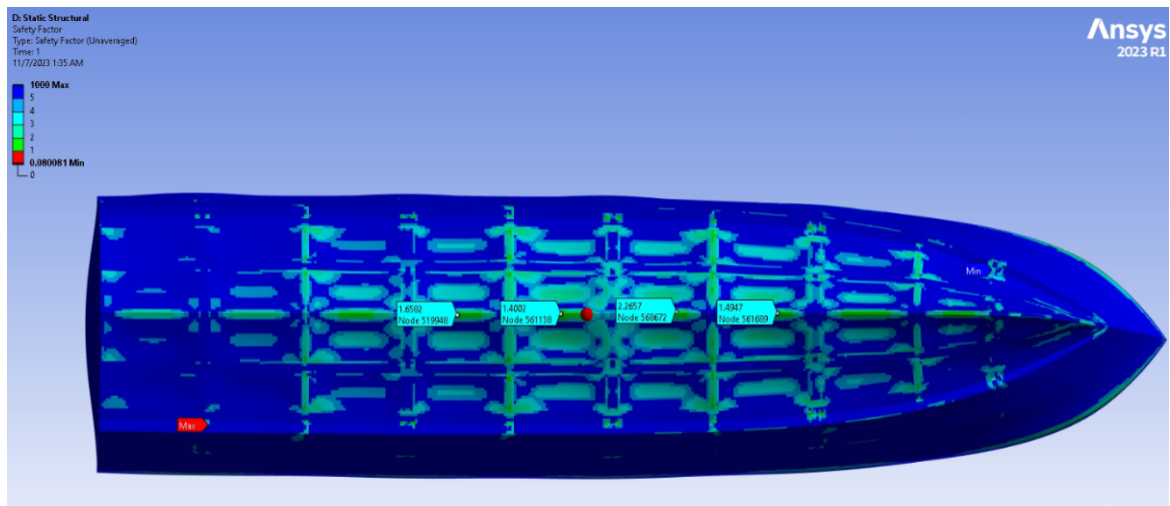
Εικόνα 146: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (*Top view*)



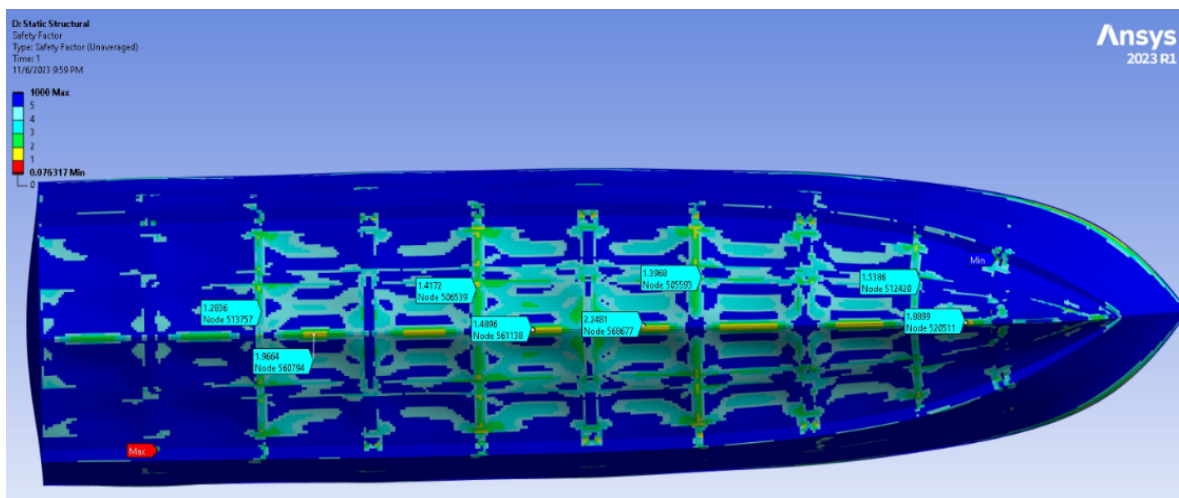
Εικόνα 147: Αποτελέσματα συνολικής παραμόρφωσης (*Bottom view*)



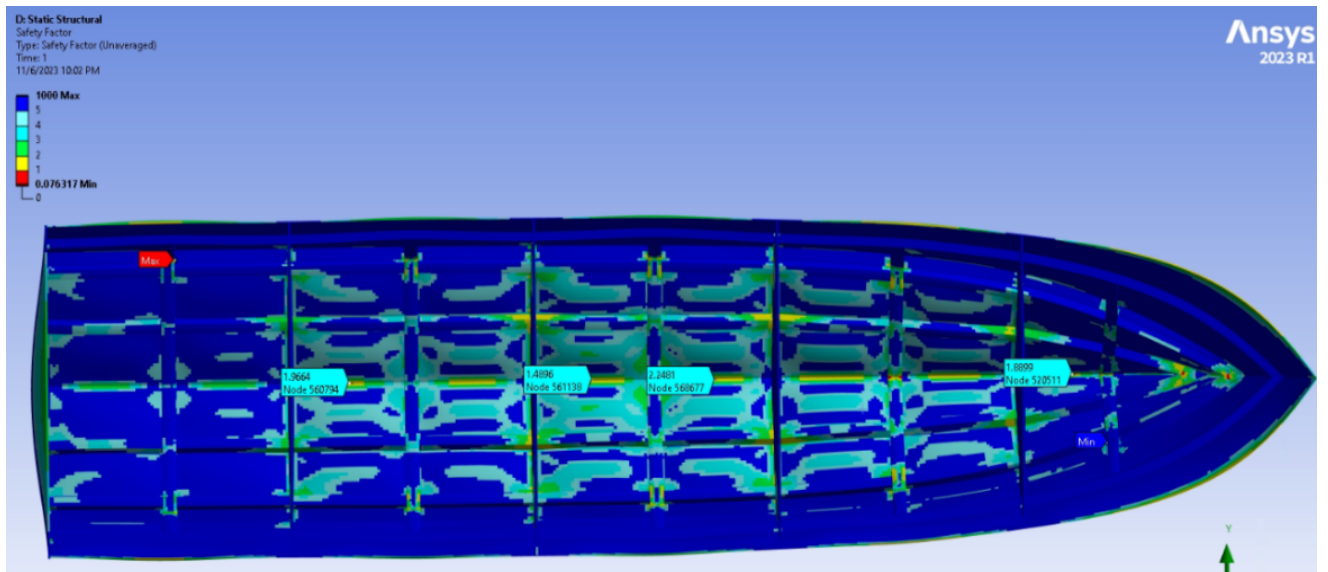
Εικόνα 148: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (top view)



Εικόνα 149: Αποτελέσματα κριτηρίου μέγιστης τάσης (Bottom view)



Εικόνα 150: Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-wu» (Bottom view)



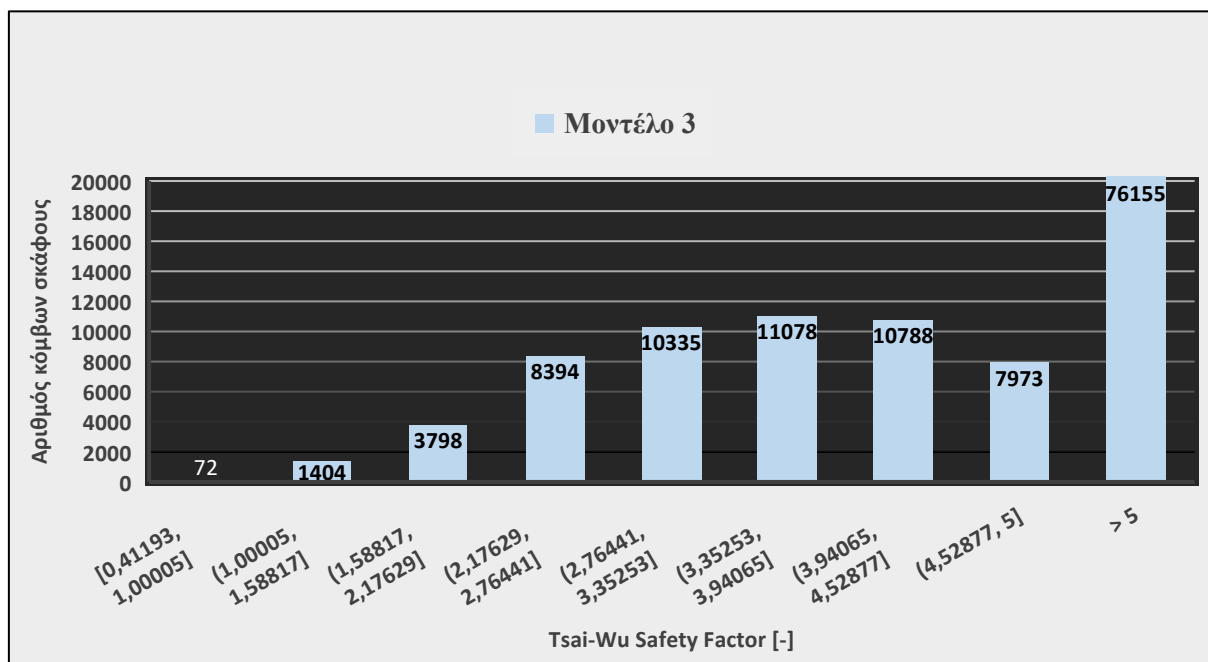
Εικόνα 151:Αποτελέσματα κριτηρίου «Tsai-wu» (Top view)

5.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων πριν και μετά την βελτιστοποίηση

Πίνακας 36: Σύγκριση αποτελεσμάτων

		<i>Max</i>	<i>Min</i>	Μονάδα μέτρησης
Διατμητική τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	24.15	-22.103	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	25.246	-23.175	[MPa]
Ορθή τάση κατά x	Πριν τη βελτιστοποίηση	77.538	-67.438	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	82.223	-71.335	[MPa]
Ορθή τάση κατά y	Πριν τη βελτιστοποίηση	72.43	-73.726	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	79.893	-78.539	[MPa]
Ορθή τάση κατά z	Πριν τη βελτιστοποίηση	68.794	-64.852	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	69.132	-67.458	[MPa]
Ελάχιστη κύρια τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	27.614	-28.57	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	29.305	-30.45	[MPa]
Μέση κύρια τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	52.209	-55.759	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	54.136	-57.277	[MPa]
Μέγιστη κύρια τάση	Πριν τη βελτιστοποίηση	77.02	-23.32	[MPa]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	82.223	-24.604	[MPa]
Συνολική Παραμόρφωση	Πριν τη βελτιστοποίηση	41.52	0	[mm]
	Μετά τη βελτιστοποίηση	52.1	0	[mm]

Παρατηρούμε, ότι οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές της διατμητικής τάσης (*Shear stress*) και την ορθής τάσης κατά τον άξονα y (*normal stress x*) αυξάνονται ελάχιστα. Αναλυτικά, παρατηρούμε ότι σε όλες τις πλάκες του πλοίου αλλά και στα ενισχυτικά οι διατμητικές τάσεις έχουν παραμείνει σχεδόν ίδιες. Ομοίως, το ίδιο προκύπτει για την ορθή τάση κατά τον άξονα x (*normal stress y*), καθώς όπως είναι αναμενόμενο οι τιμές της αυξάνονται ελάχιστα σε όλο το εύρος της κατασκευής. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι οι συνολικές παραμορφώσεις έχουν μειωθεί σε ικανοποιητικό βαθμό σε όλο το μήκος του πλοίου. Τέλος, η μέγιστη παραμόρφωση ασκείται στο κατάστρωμα του σκάφους (*main deck*), η οποία με την διαδικασία της βελτιστοποίησης αυξάνεται ελάχιστα κατά 10.58[mm]. Η αντοχή του σκάφους επαληθεύεται από το κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης και το κριτήριο «*Tsai-Wu*»



Διάγραμμα 8: Κριτήριο Tsai- Wu στο τελικό μοντέλο

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Προτάσεις

Τα σύνθετα υλικά, διακρίνονται για την υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, την αντοχή στη διάβρωση αλλά και την ευελιξία σχεδιασμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, με την διαδικασία της βελτιστοποίησης, προσφέρεται η δυνατότητα μείωσης του βάρους και του κόστους, τα οποία οδηγούν σε βελτιωμένη αποδοτικότητα καυσίμου και αυξημένη χωρητικότητα ωφέλιμου καυσίμου. Επιπλέον, η δυνατότητα προσαρμογής των σύνθετων υλικών, δίνει την δυνατότητα να δημιουργούνται καινοτόμα σχήματα γάστρας, τα οποία βελτιώνουν την υδροδυναμική και τις επιδόσεις της ταχύτητας και της ευελιξίας. Ανεξάρτητα από τα οικονομικά οφέλη η βελτιστοποίηση των σκαφών από σύνθετα υλικά, οδηγεί σε μείωση των εκπομπών των ρύπων. Με αυτό τον τρόπο προστατεύεται το περιβάλλον, ανοίγοντας το δρόμο για ένα πιο πράσινο και αποδοτικό μέλλον στις θάλασσες.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιήθηκε η σχεδίαση, η μελέτη αλλά και η βελτιστοποίηση ενός σκάφους, το οποίο ανήκει στην κατηγορία *high speed craft*. Σκοπός της διπλωματικής, ήταν η μελέτη της αντοχής του σκάφους ως προς την τοπική αστοχία των υλικών και στη συνέχεια οι πιθανές βελτιστοποιήσεις που μπορούν να υλοποιηθούν. Η σχεδίαση της γάστρας του αλλά και η τοποθέτηση των ενισχυτικών και των εγκάρσιων φρακτών πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα *Rhinoceros 6*, ενώ στη συνέχεια η μοντελοποίηση του έγινε στο πρόγραμμα *ANSYS*. Η μοντελοποίηση του ήταν μία σύνθετη διαδικασία, καθώς το σκάφος είναι εξ'ολοκλήρου κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά. Για το λόγο αυτό, το σκάφος χωρίστηκε σε 25 τμήματα, τα οποία μοντελοποιήθηκαν διακριτά σε 28 *ACP (Pre)* και 2 *mechanical model* του *ANSYS*. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν να μεγιστοποιηθεί η ποιότητα του πλέγματος της τελικής κατασκευής, για να υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στα τελικά αποτελέσματα και να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα. Στη συνέχεια ορίστηκαν οι πιέσεις που ασκούνται στις πλάκες της γάστρας, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες. Για τον υπολογισμό των πιέσεων χρησιμοποιήθηκαν οι κανονισμοί του *DNV (DNV-RU-HSLC-Pt.1-Ch.3)*. Η διαδικασία υπολογισμού των πιέσεων παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5. Επιπλέον, στο κεφάλαιο 5 έχουν υπολογιστεί οι καμπτικές ροπές κατά μήκος του πλοίου στις καταστάσεις *Hogging* και *Sagging*, οι οποίες δεν χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, αλλά επαληθεύουν την ορθότητα των αποτελεσμάτων των κανονισμών του *DNV*. Για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών, χρησιμοποιούνται ομοίως οι κανονισμοί του *DNV*. Προχωρώντας στην λύση του προβλήματος τα αποτελέσματα που μας ενδιαφέραν στη παρούσα μελέτη είναι οι ορθές τάσεις στους άξονες *x, y, z*, η διαμητική τάση καθώς και οι παραμορφώσεις σε όλο το εύρος της σκάφους. Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε η χρήση του κριτηρίου αστοχίας μέγιστης τάσης και του κριτηρίου αστοχίας «*Tsai-Wu*». Στα πρώτα αποτελέσματα παρατηρήθηκε αστοχία της κατασκευής σε πολλά σημεία της γάστρας και συγκεκριμένα στο κατάστρωμα του σκάφους και στις πλάκες του πυθμένα. Μάλιστα σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας «*Tsai-Wu*» παρατηρήθηκε τοπική αστοχία σε 1024 στοιχεία του σκάφους. Μετά από διαφορετικές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι οι τάσεις που οδηγούν στην αστοχία, προκύπτουν διότι οι 4 εγκάρσιες φρακτές δεν παρέχουν την απαραίτητη ενίσχυση που απαιτείται. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητο το 1^ο βήμα της βελτιστοποίησης του σκάφους να

είναι η τοποθέτηση 5 εγκάρσιων ενισχυτικών τύπου Π (*top hat*). Με την τοποθέτηση αυτών των ενισχυτικών παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση στην αντοχή του σκάφους, καθώς μειώθηκαν αισθητά οι τάσεις και οι παραμορφώσεις στο κατάστρωμα και στις πλάκες του πυθμένα του σκάφους. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, σε αυτά τα τμήματα του σκάφους να μην υπάρχει πλέον τοπική αστοχία. Μάλιστα σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας «*Tsai-Wu*» παρατηρήθηκε τοπική αστοχία σε 496 στοιχεία του σκάφους. Πρόκειται για μείωση της αστοχίας κατά 53.93%, το οποίο επαληθεύει την αποτελεσματικότητα των εγκάρσιων ενισχυτικών. Όπως είναι λογικό η τοποθέτηση αυτών των ενισχυτικών είχε άμεση επίδραση στο κόστος αλλά και στο βάρος του σκάφους. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητο το 2^ο βήμα της βελτιστοποίησης να αφορά την μείωση του κόστους και του βάρους του σκάφους, σε συνδυασμό με τη διατήρηση της αντοχής του. Για να επιτευχθεί η παραπάνω βελτιστοποίηση επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί μικρή μείωση του πάχους του πολύστρωτου του σκάφους, όπου αυτό είναι εφικτό. Μετά από πολλές δοκιμές παρατηρήθηκε ότι αυτή η μείωση δεν μπορεί να γίνει στις ενισχύσεις του σκάφους ούτε στο κατάστρωμα του, καθώς η αστοχία είναι αναπόφευκτη. Επομένως, η μείωση του πάχους του πολύστρωτου πραγματοποιήθηκε στη γάστρα του σκάφους. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είχαν μικρές επιδράσεις στις τάσεις και στις παραμορφώσεις. Μάλιστα σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας «*Tsai-Wu*» παρατηρήθηκε τοπική αστοχία σε 72 στοιχεία του σκάφους. Παρατηρούμε ότι παρόλο που μειώθηκε το πάχος των στρώσεων στην γάστρα του σκάφους, η αντοχή του παρέμεινε σταθερή. Συγκεκριμένα, έχουμε συνολική μείωση του κόστους κατασκευής της τάξης του 16.67% και συνολική μείωση του βάρους της τάξης του 21.58.

Για περαιτέρω μελέτη προτείνεται η βελτιστοποίηση ως προς την ανάλυση πρόσκρουσης και σύγκρουσης, η οποία αποτελεί μία σημαντική πτυχή της κατασκευαστικής αξιοπιστίας. Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στην ενίσχυση της ικανότητας του πλοίου να αντέχει και να ελαχιστοποιεί τις ζημιές από συγκρούσεις (προσάραξη ή πρόσκρουση σε πλωτά αντικείμενα). Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης, όπως η FEM, για την προσομοίωση διαφόρων σεναρίων σύγκρουσης και την αξιολόγηση της δομικής ακεραιότητας του πλοίου. Με την προσεκτική επιλογή σύνθετων υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες αντοχής στην πρόσκρουση, τη βελτιστοποίηση του κατασκευαστικού σχεδιασμού του πλοίου και την ενσωμάτωση χαρακτηριστικών απορρόφησης ενέργειας, τα πλοία μπορούν να ενισχυθούν ώστε να απορροφούν και να διαχέουν αποτελεσματικά την ενέργεια πρόσκρουσης, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο καταστροφικής αστοχίας [19].

Ακόμα μία πρόταση που μπορεί να υλοποιηθεί είναι η βελτιστοποίηση της ανάλυσης κραδασμών, το οποίο επικεντρώνεται στον μετριασμό των επιπτώσεων των δυναμικών φορτίσεων και ταλαντώσεων που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τόσο τη δομική ακεραιότητα όσο και τον εξοπλισμό του πλοίου. Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιούνται εξελιγμένες τεχνικές μοντελοποίησης και προσομοίωσης για να προβλεφθούν και να αναλυθούν οι δονήσεις σε όλη τη δομή του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι δονήσεις του κινητήρα, οι κινήσεις που προκαλούνται από τη θάλασσα και τα λειτουργικά φορτία. Με την κατάλληλη επιλογή σύνθετων υλικών με προσαρμοσμένες ιδιότητες απόσβεσης και τη διεξαγωγή διεξοδικών βελτιστοποιήσεων, η ευαισθησία του πλοίου σε δονήσεις μπορεί να μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, η ενσωμάτωση εξαρτημάτων απορρόφησης

κραδασμών και συστημάτων απομόνωσης μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την ανθεκτικότητα του πλοίου στις ταλαντώσεις, εξασφαλίζοντας μια ομαλότερη και πιο άνετη επιχειρησιακή εμπειρία για τα μέλη του πληρώματος, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τον κίνδυνο κόπωσης ή βλάβης σε κρίσιμα συστήματα. Αυτή η ολοκληρωμένη βελτιστοποίηση της ανάλυσης κραδασμών συμβάλλει στη συνολική απόδοση και μακροζωία των πλοίων από σύνθετα υλικά, παρέχοντας μια ισορροπημένη λύση για την ομαλή λειτουργία του σκάφους [20].

Τέλος, προτείνεται η βελτιστοποίηση του σκάφους ως προς τη φιλικότητα στο περιβάλλον. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση σύνθετων υλικών φιλικών προς το περιβάλλον. Χρησιμοποιώντας σύνθετα υλικά που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ή ανακυκλωμένη πρώτη ύλη, δίνεται η δυνατότητα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τα παραδοσιακά υλικά κατασκευής. Τα σύνθετα υλικά βιολογικής προέλευσης, για παράδειγμα, μπορούν να προέρχονται από φυτικές ίνες ή γεωργικά απόβλητα, προσφέροντας μια ανανεώσιμη εναλλακτική λύση σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Επιπλέον, τα ανακυκλωμένα σύνθετα υλικά, που συχνά προέρχονται από μεταβιομηχανικά απόβλητα, συμβάλλουν στη μείωση των αποβλήτων και προωθούν την κυκλική οικονομία [21].

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] J. Iqbal, Modeling and Simulation of Ship Structures Using Finite Element Method, 2018.
- [2] D. L. Logan, A First Course in the Finite Element Method, Chris Carson, 2007.
- [3] Χ. Γ. Προβατίδης, Πεπερασμένα στοιχεία στην ανάλυση κατασκευών, Τζιόλα, 2023.
- [4] Ι. ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ, Ε. ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ, ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ 1, 2005.
- [5] Σ. Η. Κουτσούκος, Κατασκευαστικός σχεδιασμός πρωραίου τμήματος yacht σύμφωνα με το πρότυπο ISO 12215-5, βελτιστοποίηση της κατασκευής με εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, 2023.
- [6] Ν. Γ. Τσούβαλης, Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά (Σημειώσεις), Αθήνα, 1998.
- [7] «CASTRO composites,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.castrocompositesshop.com/en/fibre-reinforcements/1518-450-gm2-powder-glass-chopped-strand-mat-csm.html>. [Πρόσβαση 4 11 2023].
- [8] «FIBREGLAST,» [Ηλεκτρονικό]. Available: https://www.fibreglast.com/product/Woven_Roving_223. [Πρόσβαση 4 11 2023].
- [9] «ACP Composites,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://store.acpcomposites.com/woven-fabric-style-guide>. [Πρόσβαση 8 11 2023].
- [10] «Dymriton,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.dymriton.com/stitched-fiber-glass-chop-mat-triaxial-biaxial-fiberglass-glass-mat/unidirectional-fiberglass-tape-fabric/>. [Πρόσβαση 16 4 2024].
- [11] «LAMILUX,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.lamilux.com/composites/service/sandwich-panel-configurator.html>. [Πρόσβαση 8 11 2023].
- [12] «Rhino3D Rhino 6 for Windows and Mac,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.rhino3d.com/>. [Πρόσβαση 4 11 2023].
- [13] D. AS, DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.1 Design principles, design loads, 2021.

- [14] D. GL, DNVGL-CG-0127 Finite element analysis, 2015.
- [15] «Polyestershoppen,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://polyestershoppen.com/glasvezel/rovingweefsel-800-gr-m2-389.html>. [Πρόσβαση 4 11 2023].
- [16] W. Qiu, H. Liu, S. Zong, J. Wang και Z. Gao, «Crashworthiness Optimization Method of Ship Structure under Multi-Working Conditions,» *Journal of Marine Science and Engineering*, p. 22, 2023.
- [17] X. Shi, D. Li, A. Zhang και J. Zhang, «Study on vibration characteristics of ship mining system under composite load,» p. 10, 2022.
- [18] Z. M. Kamble, «Green Composites: Types, Properties and Manufacturing Process,» 2021.
- [19] «ANSYS, Engineering Simulation Software,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.ansys.com/>. [Πρόσβαση 4 11 2023].
- [20] N. Kumbhare, R. Moheimani και H. Dalir, «Analysis of Composite Structures in Curing Process for Shape Deformations and Shear Stress: Basis for Advanced Optimization,» *Journal of Composites Science*, p. 19, 2021.
- [21] L. Register, Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft., 2022.
- [22] Ν. Γκέρτσος, ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΟΥ ΤΑΧΥΠΛΟΥΥ ΣΚΑΦΟΥΣ, Αθήνα, 2020.
- [23] Α. Γαλάνης, Μελέτη αντοχής του πρωαίου καταστρώματος και ενισχυτικών απο σύνθετη κατασκευή (τυπου Sandwich) με χρήση της Μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων για την τοποθέτηση γερανού, 2023.
- [24] C. A. Charitidis και D. A. Dragatogiannis, "Finite element analysis, stress-strain distribution and size effects rise during nanoindentation of welded aluminum alloy." *International Journal of Structural Integrity* 4, 78-90., 2013.
- [25] P. Kavouras, D. A. Dragatogiannis, D. I. Batsouli και C. A. Charitidis, "Effect of local microstructure on the indentation induced damage of a fiber reinforced composite." *Polymer Testing* 61 197-204., 2017.
- [26] Κ. Παπαχρήστος, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΜΕ ΦΥΛΛΙΔΙΑ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ, 2022.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Για την επαλήθευση των αποτελεσμάτων, που εξάγονται από το πρόγραμμα *ANSYS*, υπάρχουν οι παρακάτω μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

Validation method

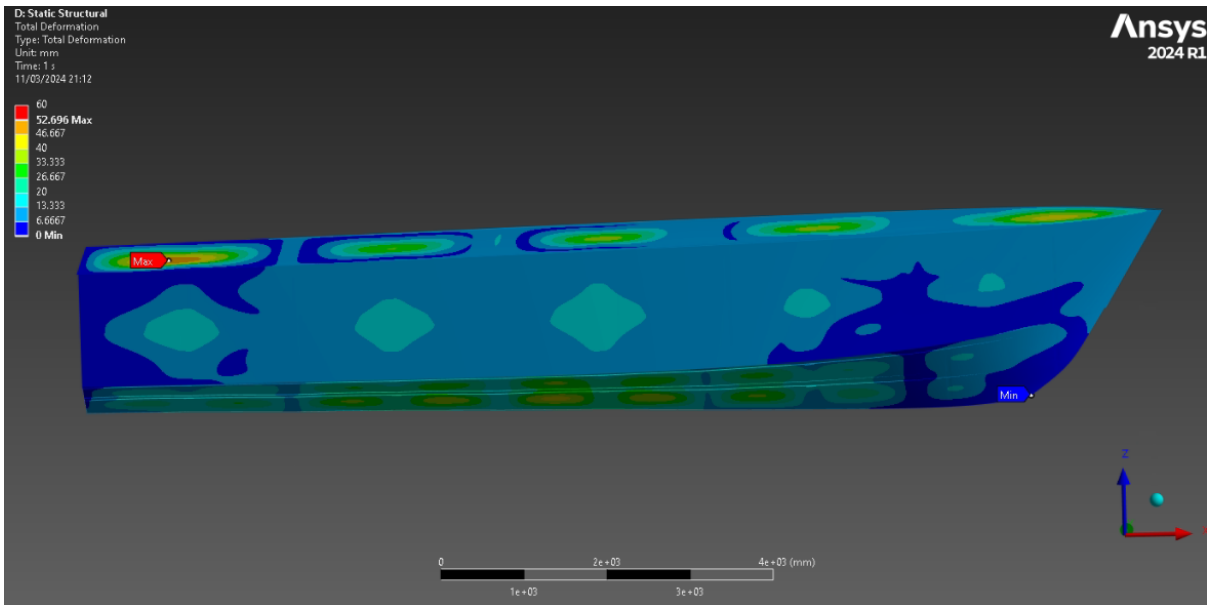
Πρόκειται, για μία μέθοδο η οποία πραγματοποιείται μέσω μίας διαδικασίας επαναληπτικών πειραμάτων. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, απαιτείται η κατασκευή ενός μοντέλου. Σκοπός της διαδικασίας είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το *ANSYS* με τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Στη παρούσα διπλωματική δεν χρησιμοποιήθηκε αυτή η μέθοδος, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής του συγκεκριμένου μοντέλου.

Verification method

Πρόκειται για μία μέθοδο που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων που εξάγονται από μία μελέτη. Επιπλέον, αξιολογεί την ορθότητα σχεδιασμού της κατασκευής και διασφαλίζει ότι τα αποτελέσματα της μελέτης είναι σωστά. Στην προκειμένη περίπτωση, η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε μέσω του *ANSYS*. Επομένως, έγινε πύκνωση του πλέγματος της κατασκευής, έτσι ώστε να παρατηρηθεί εάν υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Η πύκνωση πραγματοποιήθηκε στο τελικό βελτιστοποιημένο μοντέλο σε 2 βήματα:

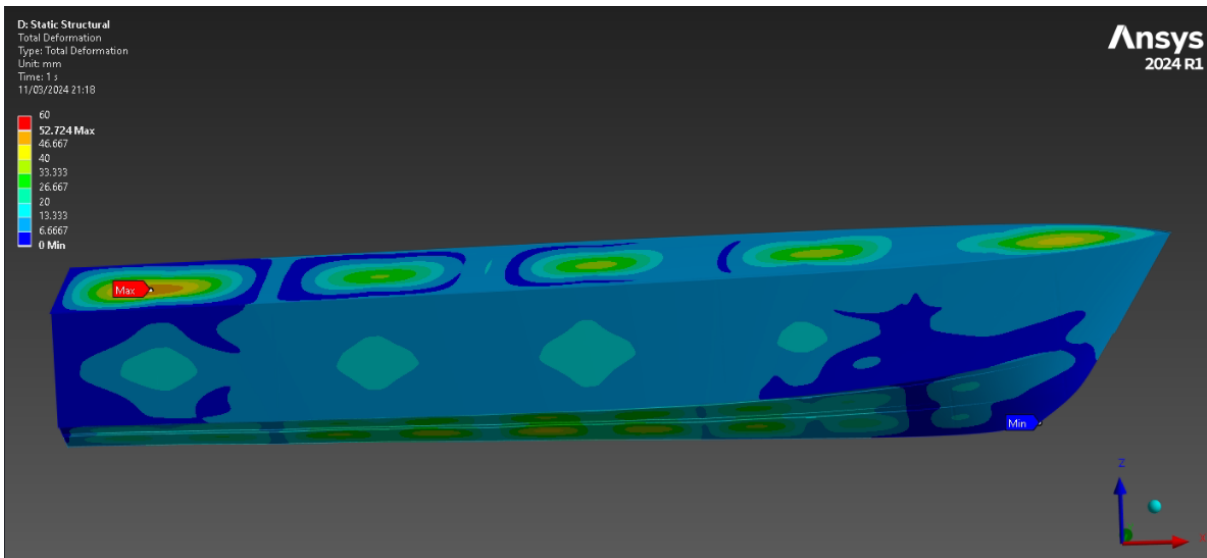
- Πύκνωση του πλέγματος κατά 30%
- Πύκνωση του πλέγματος κατά 50%

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, για λόγους ακρίβειας αποτελεσμάτων και ποιότητα πλέγματος, το σκάφος έχει χωριστεί σε 33 *ACP (Pre)*, τα οποία απαρτίζουν τα 33 κομμάτια του σκάφους. Επομένως, για την ορθή πύκνωση του πλέγματος, μειώθηκε το *element size* και στα 33 *ACP (Pre)*. Επομένως θα εξεταστεί η δυσμενέστερη περίπτωση που είναι η πύκνωση του πλέγματος κατά 30%. Το πλέγμα του σκάφους έχει μέγεθος στοιχείων 30 [mm], επομένως μειώθηκε στα 21 [mm]. Πραγματοποιούμε την πύκνωση του πλέγματος και παρατηρούμε ότι η μέγιστη παραμόρφωση στο σκάφος είναι 52.69 [mm].



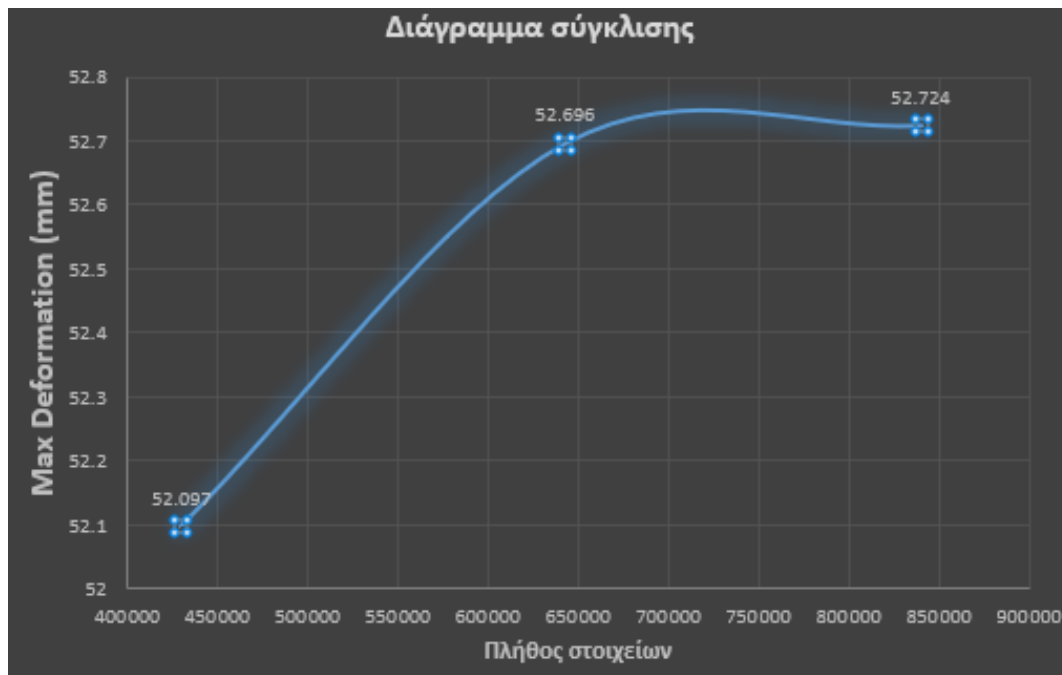
Εικόνα 152: Παραμορφώσεις του σκάφους σε 30% πύκνωση

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται πύκνωση του πλέγματος κατά 50%, επομένως το μέγεθος των στοιχείων θα μειωθεί στα 15 [mm].



Εικόνα 153: Παραμορφώσεις του σκάφους σε 50% πύκνωση

Παρατηρούμε ότι η παραμορφώσεις του σκάφους είναι σχεδόν παρόμοιες με την προηγούμενη πύκνωση και μάλιστα οι διαφορές είναι μικρότερες από 1%. Συνεπώς, καταλήγουμε στο ότι υπάρχει σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Επομένως, καταλήγουμε στην ορθότητα των αποτελεσμάτων που εξάγονται από το πρόγραμμα ANSYS.



Διάγραμμα 9: Διάγραμμα σύγκλισης

Στην παρούσα διπλωματική, ο έλεγχος αντοχής του σκάφους αλλά και των ενισχυτικών έχει πραγματοποιηθεί με τη χρήση των κριτηρίων μέγιστης τάσης και «*Tsai-Wu*». Τα συγκεκριμένα κριτήρια σχετίζονται με την αντοχή των σύνθετων υλικών και ορίζονται μέσα από το πρόγραμμα *ANSYS*. Πρόκειται για μία έγκυρη και αξιόπιστη μέθοδο ελέγχου αντοχής κατασκευών από σύνθετα υλικά. Μάλιστα σε άλλες διπλωματικές εργασίες έχει αποδεχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του *ANSYS* σύμφωνα με το κριτήριο ISO 12215-5:2019 [5].