



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

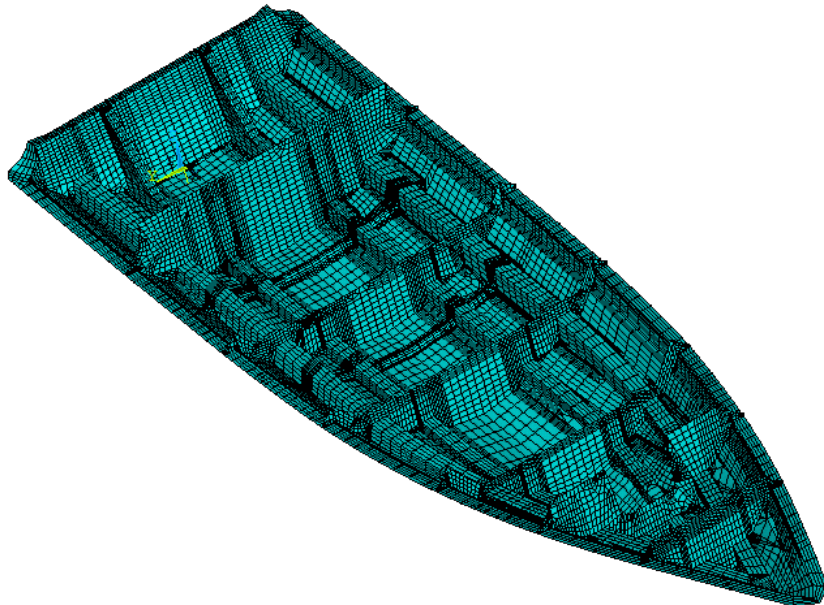
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΟΥ
ΣΚΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ
ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Θ. ΜΕΡΑΣΕΔΟΓΛΟΥ



Επιβλέπων: Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΤΑΧΥΠΛΟΥ
ΣΚΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ
ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Θ. ΜΕΡΑΣΕΔΟΓΛΟΥ

Τριμελής Επιτροπή:

Νικόλαος Γ. Τσούβαλης, Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Γεώργιος Ζαραφωνίτης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εμμανουήλ Σ. Σαμουηλίδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κύριο Νικόλαο Τσούβαλη για την ευκαιρία που μου έδωσε για την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και την πολύτιμη βοήθεια και τις συμβουλές του. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το σύνολο των καθηγητών των οποίων τα μαθήματα διδάχθηκα κατά τη διάρκεια της πενταετούς φοίτησης στην σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Θέλω ακόμα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την κατασκευάστρια εταιρεία «Technohull» και τον κύριο Ιωάννη Ιωάννου που μου εμπιστεύθηκαν τα σχέδια και τις προδιαγραφές του υπό μελέτη σκάφους, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο τη μοντελοποίηση του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος ευχαριστώ και αφιερώνω αυτή τη διπλωματική εργασία στην οικογένειά μου για τη συνεχή υποστήριξη σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στον κατασκευαστικό σχεδιασμό ταχύπλοου σκάφους	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Γενικές πληροφορίες για τα σύνθετα υλικά.....	3
1.2.1 Γενικά περί ινωδών σύνθετων υλικών	3
1.2.2 Πολύστρωτα.....	8
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	12
1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	13

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή του υπό μελέτη σκάφους	17
2.1 Εισαγωγή	17
2.2 Γενικά χαρακτηριστικά του υπό – μελέτη σκάφους.....	18
2.3 Φορτίσεις σκάφους σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα.....	21
2.4 Κατασκευή γάστρας και ενισχύσεων σκάφους.....	22
2.4.1 Κατασκευή γάστρας σκάφους.....	23
2.4.2 Κατασκευή διαμήκων ενισχυτικών	27
2.4.3. Κατασκευή εγκάρσιων φρακτών	31
2.4.4 Κατασκευή καθρέφτη σκάφους	33

Κεφάλαιο 3

Μοντελοποίηση σκάφους με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.....	37
3.1 Εισαγωγή	37
3.2 Προεπεξεργασία σε σχεδιαστικό πρόγραμμα	38
3.2.1 Σχεδίαση σκάφους.....	38
3.2.2 Εισαγωγή σχεδίου στο ANSYS	41
3.3 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων	43
3.3.1 Επιλογή τύπου στοιχείου.....	43
3.3.2 Μηχανικές ιδιότητες υλικών	44
3.3.3 Κατασκευή πλέγματος	48
3.3.4 Τρόποι προσέγγισης στατικού προβλήματος.....	55
3.3.5 Συνοριακές συνθήκες	58
3.3.6 Ορισμός φόρτισης στο ANSYS	63
3.3.7 Μέθοδοι επίλυσης	64
3.3.8 Μοντέλα από τα οποία εξάγονται αποτελέσματα	67

Κεφάλαιο 4

Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	69
4.1 Εισαγωγή	69
4.1.1 Οριοθέτηση σκάφους σε πλάκες και ενισχυτικά.....	71
4.1.2 Αντοχές στρώσεων σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα	72

4.2 Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης – 1 ^ο μοντέλο	74
4.2.1 Μετατοπίσεις στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.....	74
4.2.2 Κατανομή τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.....	78
4.2.3 Έλεγχος αντοχής γάστρας σκάφους.....	80
4.2.4 Έλεγχος αντοχής διαμήκων ενισχυτικών σκάφους.....	87
4.2.5 Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων φρακτών.....	89
4.2.6 Κριτήρια αστοχίας «μέγιστης τάσης» και «Tsai–Wu»	91
4.3 Αποτελέσματα μη–γραμμικής ανάλυσης – 2 ^ο μοντέλο	93
4.3.1 Μετατοπίσεις στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.....	93
4.3.2 Κατανομή τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.....	97
4.3.3 Έλεγχος αντοχής γάστρας σκάφους.....	100
4.3.4 Έλεγχος αντοχής διαμήκων ενισχυτικών σκάφους.....	106
4.3.5 Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων φρακτών.....	108
4.3.6 Κριτήρια αστοχίας «μέγιστης τάσης» και «Tsai – Wu»	111
4.4 Αποτελέσματα με τον συνυπολογισμό αδρανειακών φορτίων – 3 ^ο μοντέλο	114
4.4.1 Μετατοπίσεις στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.....	114
4.4.2 Κατανομή τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων.....	118
4.4.3 Έλεγχος αντοχής γάστρας σκάφους.....	121
4.4.4 Έλεγχος αντοχής διαμήκων ενισχυτικών σκάφους.....	125
4.4.5 Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων φρακτών.....	127
4.4.6 Κριτήρια αστοχίας «μέγιστης τάσης» και «Tsai – Wu»	129

4.5 Δειγματοληπτική σύγκριση των τριών μοντέλων.....	131
4.5.1 Αποτελέσματα 1 ^{ου} μοντέλου	131
4.5.2 Αποτελέσματα 2 ^{ου} μοντέλου	135
4.5.3 Αποτελέσματα 3 ^{ου} μοντέλου	139
4.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μοντέλων	144
4.6 Δοκιμή με πάκτωση στον πλησιέστερο κόμβο του κέντρου μάζας του σκάφους.....	146
4.7 Δοκιμή συνοριακών συνθηκών πλοίου σύμφωνα με τον νηογνώμονα DNV–GL	150
<i>Κεφάλαιο 5</i>	
Συμπεράσματα – παρατηρήσεις	155
<i>Βιβλιογραφία</i>	159

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή στον κατασκευαστικό σχεδιασμό ταχύπλοου σκάφους

1.1 Εισαγωγή

Η προσπάθεια επίτευξης λύσεων χαμηλότερου κόστους και υψηλότερης απόδοσης χαρακτηρίζει κάθε κατασκευαστικό τομέα. Η βασική αυτή επιδίωξη ικανοποιείται με τη μεταβολή ορισμένων παραμέτρων που επηρεάζουν σημαντικά, άμεσα ή έμμεσα, τα μεγέθη αυτά. Μία συνήθης πρακτική οικονομικής και λειτουργικής βελτιστοποίησης μίας κατασκευής είναι η προσπάθεια μείωσης του βάρους της, η οποία αποτέλεσε ανέκαθεν καθοριστικό παράγοντα νέων σχεδιάσεων και τεχνολογικών εξελίξεων.

Οι ναυπηγικές κατασκευές αποτελούν τυπικά παραδείγματα κατασκευών το βάρος των οποίων επηρεάζει σημαντικά την απόδοσή τους. Είτε πρόκειται για πλωτές κατασκευές είτε για πλοία και μικρά σκάφη, η μείωση του βάρους συνεπάγεται πιθανή ελάττωση του κόστους κατασκευής. Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα μεγαλύτερης μεταφορικής ικανότητας, αυξάνοντας έτσι την εμπορική εκμεταλλευσιμότητά τους. Επιπλέον, τα ελαφρύτερα σκάφη έχουν χαμηλότερες απαιτήσεις σε ισχύ, ενώ η πιθανή μείωση της αντίστασης των γαστρών τους οδηγεί σε αύξηση της ταχύτητας. Συνεπώς, η ναυπηγική αποτελεί πεδίο εφαρμογής νέων σχεδιάσεων και τεχνολογιών που συμβάλλουν στην παραγωγή ελαφρύτερων κατασκευών.

Η πρακτική των συγκολλήσεων και η χρήση ενισχυτικών στα ελάσματα των ναυπηγικών κατασκευών συμβάλλουν σημαντικά στη μείωση του βάρους εδώ και πολλά χρόνια. Όμως, η εξέλιξη της τεχνολογίας υλικών χαμηλότερου ειδικού βάρους από εκείνο του παραδοσιακού ναυπηγικού χάλυβα προσέφερε νέες κατασκευαστικές λύσεις. Σύντομα, το αλουμίνιο αντικατέστησε το χάλυβα σε τμήματα σκαφών και πλοίων, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αποτέλεσε το βασικό υλικό κατασκευής. Παρ' όλα αυτά, η μεγάλη ανάπτυξη που γνώρισαν τις τελευταίες δεκαετίες τα σύνθετα υλικά, ιδίως τα ινώδη, διεύρυνε τα περιθώρια μείωσης του βάρους και αύξησης της απόδοσης των σκαφών.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά ή ενισχυμένα με ίνες πλαστικά (Fibre Reinforced Plastics, FRP's) πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των συμβατικών υλικών (χάλυβας, αλουμίνιο, ξύλο). Λόγω του αξιοσημείωτα χαμηλού ειδικού βάρους τους, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της ειδικής αντοχής και της ειδικής δυσκαμψίας, ενώ παράλληλα, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τις σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το χαμηλό κόστος συντήρησης, έχουν οδηγήσει στη διαρκώς αυξανόμενη χρήση των υλικών αυτών σε πλήθος θαλάσσιων, και όχι μόνο, εφαρμογών. Το ναρκαλιευτικό του Σχήματος 1.1 είναι κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από FRP.

Η εκτεταμένη πλέον χρήση των ινωδών σύνθετων υλικών απαιτεί πολύ καλή γνώση της συμπεριφοράς τους υπό ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται ήδη στη ναυπηγική για την εξ' ολοκλήρου κατασκευή σκαφών, ήτοι κατασκευών που συνήθως επιχειρούν υπό δυσμενείς συνθήκες. Οι καταπονήσεις που υφίσταται μία τέτοια κατασκευή είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού της, γεγονός που εν γένει επιδρά στη συμπεριφορά της. Ως εκ τούτου, αλλά και δεδομένων των νέων τρόπων αστοχίας που εισάγει η χρήση των FRP's, η μελέτη της επίδρασης αυτής καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική.



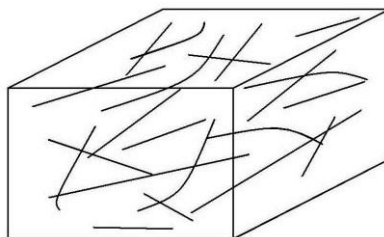
Σχήμα 1.1 : Ναρκαλιευτικό του βρετανικού ναυτικού κατασκευασμένο από FRP.

Η παρούσα διπλωματική εργασία κινείται στα πλαίσια της κατανόησης της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών από ινώδη σύνθετα υλικά και του τρόπου με τον οποίο μοντελοποιούνται σε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Αντικείμενό της μελέτης αποτελεί ο κατασκευαστικός σχεδιασμός ταχύπλοου σκάφους από σύνθετα υλικά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους κανονισμούς του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd's Register». Η μελέτη αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα κατασκευαστικά στοιχεία σκαφών από FRP's, καθώς εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τις περιοχές του σκάφους οι οποίες καταπονούνται περισσότερο.

1.2 Γενικές πληροφορίες για τα σύνθετα υλικά

1.2.1 Γενικά περί ινώδων σύνθετων υλικών

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούν υποκατηγορία των σύνθετων, δηλαδή υλικών τα συνιστώντα μέρη των οποίων έχουν σημαντικά διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες μεταξύ τους. Όπως προκύπτει από την ονομασία τους, αποτελούνται από ένα υλικό, τη μήτρα (matrix), μέσα στην οποία βρίσκονται ίνες (fibres) ενός άλλου υλικού, καταναμημένες με διάφορους τρόπους και προσανατολισμούς, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2. Λόγω κατασκευής, οι ίνες χαρακτηρίζονται από πολύ μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία από το ίδιο το υλικό τους σε άλλη μορφή και είναι αυτές που καθορίζουν εν πολλοίς τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Αντίθετα, η μήτρα λειτουργεί ως μέσο σταθεροποίησης των ινών, το οποίο παράλληλα τις προστατεύει και τις υποστηρίζει. Επιπρόσθετα, μεταφέρει τα φορτία μεταξύ αυτών και τα διασκορπίζει μέσα στο υλικό μέσω διατμητικών τάσεων. Η λειτουργία αυτή έχει μεγάλη σημασία στην περίπτωση θραύσης των ινών, καθώς το φορτίο μεταφέρεται από τη μία πλευρά της σπασμένης ίνας στην άλλη, αλλά και στις γειτονικές ίνες (Τσούβαλης – 1998).



Σχήμα 1.2 : Σχηματική αναπαράσταση ενός ινώδους σύνθετου υλικού.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως μήτρες των ινώδων σύνθετων υλικών είναι ως επί το πλείστον θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, ενώ σε εξειδικευμένες περιπτώσεις γίνεται χρήση θερμοπλαστικών. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις πολυεστερικές, τις εποξικές, τις βινυλεστερικές και τις φαινολικές ρητίνες. Οι πρώτες, ιδίως οι ακόρεστες, είναι οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες σε ναυπηγικές εφαρμογές εξαιτίας του λογικού κόστους, της ευκολίας χρήσης και της καλής συμπεριφοράς που παρουσιάζουν στο θαλάσσιο περιβάλλον. Οι μηχανικές ιδιότητες των ρητινών περιγράφονται στον Πίνακα 1.1 (Τσούβαλης – 1998) όπου γ το ειδικό βάρος, E το μέτρο ελαστικότητας του Young, ν ο λόγος του Poisson, σ_t η αντοχή σε εφελκυσμό, ϵ_t η παραμόρφωση μέχρι τη θραύση σε εφελκυσμό και σ_c η αντοχή σε θλίψη. Οι τιμές κόστους αφορούν το έτος 1995. Οι μηχανικές ιδιότητες των ρητινών είναι αρκετά χαμηλές, καθιστώντας απαραίτητη την ενίσχυσή τους. Στον αντίποδα, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διαβρωτικά περιβάλλοντα και υψηλές θερμοκρασίες.

Πίνακας 1.1 : Τυπικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Ρητίνη	γ	E	ν	σ_t	ϵ_t	σ_c	Κόστος
	gr/cm ³	GPa		MPa	%	MPa	\$/lb
Πολυεστερική (ορθοφθαλκή)	1.23	3.2	0.36	65	2	130	1.05
Πολυεστερική (ισοφθαλκή)	1.21	3.6	0.36	60	2.5	130	1.19
Βινυλεστερική (Derekane 411-45)	1.12	3.4	–	83	5	120	1.74
Εποξική	1.20	3.0	0.37	85	5	130	3.90
Φαινολική	1.15	3.0	–	50	2	–	1.10

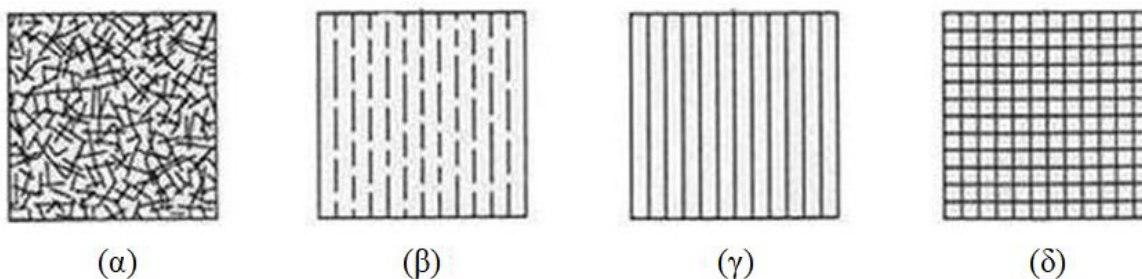
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ενίσχυση του υλικού της μήτρας γίνεται με χρήση ινών ενός άλλου υλικού, δηλαδή ενισχύσεων με μήκος πολύ μεγαλύτερο από τις άλλες διαστάσεις τους. Λόγω της ευθυγράμμισης της κρυσταλλικής τους δομής κατά τη διαδικασία παραγωγής τους, οι ίνες παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία στη διεύθυνση του μήκους τους. Αν και μπορούν να παραλάβουν μόνο εφελκυστικά φορτία, συνεισφέρουν σημαντικά τόσο στην εφελκυστική όσο και στη θλιπτική, την καμπτική και τη διατμητική δυσκαμψία και αντοχή του τελικού υλικού. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυπηγική είναι από γυαλί λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής αντοχής τους, ενώ συνεχώς αυξανόμενη είναι η χρήση ινών άνθρακα και aramid. Τυπικές ιδιότητες των τύπων αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2 (Τσούβαλης - 1998).

Πίνακας 1.2 : Τυπικές ιδιότητες μερικών ενισχυτικών ινών.

Είδος Ίνας	γ	E	ν	σ_t	ϵ_t	α	Κόστος
	gr/cm ³	GPa		MPa	%	10 ⁶ °C	\$/lb
Γυαλί–E	2.55	72	0.2	2400	3.0	5.0	1.1
Γυαλί–S2, –R	2.50	88	0.2	3400	3.5	5.6	5.0
Άνθρακας Υ. Α. (Thornell T–40) υψηλής αντοχής	1.74	297	–	4100	1.4	–	13.3
Άνθρακας Υ. Α. (Thornell T–700) υψηλής αντοχής	1.81	248	–	4500	1.8	–	12.0
Άνθρακας Υ. Α. (Fortafil F–5) υψηλής αντοχής	1.80	345	–	3100	0.9	–0.5	13.3
Άνθρακας Υ. Μ. (P–75S) υψηλού μέτρου ελαστικότητας	2.00	520	–	2100	0.4	–1.2	67.0
Άνθρακας Υ. Μ. β (P–120)	2.18	826	–	2200	0.3	–	720.0
Aramid (Kevlar® 49)	1.45	124	–	2800	2.5	–2.0	20.0

Οι μηχανικές ιδιότητες ενισχυτικών ινών που αναγράφονται στον Πίνακα 1.2 είναι το ειδικό βάρος (γ), το μέτρο ελαστικότητας του Young (E), ο λόγος poisson (ν), η αντοχή σε εφελκυσμό (σ_t), η παραμόρφωση μέχρι την θραύση σε εφελκυσμό (ϵ_t), ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (α) και οι τιμές κόστους όπως είχαν εκτιμηθεί το έτος 1995.

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, η ενίσχυση της μήτρας γίνεται με διάφορους τύπους διάταξης των ινών. Οι βασικές μορφές διάθεσής τους στο εμπόριο είναι το υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM), οι πλεξίδες ινών (rovings), το υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR), τα πεπλεγμένα υφάσματα (woven fabrics, clothes) και τα μονοαξονικά υφάσματα (Uni – Directional rovings, UD). Το υαλοπίλημα είναι ένα «χαλαρό» ύφασμα τυχαίου προσανατολισμού που κατασκευάζεται από κοντές ίνες, συνδεδεμένες μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ειδικού συνδετικού υλικού. Αντίθετα, τα μονοαξονικά υφάσματα προκύπτουν από την παράλληλη σύνδεση πολλών μακρών ινών, προσανατολισμένων σε μία διεύθυνση. Οι πλεξίδες αποτελούνται από περιορισμένο αριθμό παράλληλα συνδεδεμένων μακρών ινών και χρησιμοποιούνται ως έχουν ή συνηθέστερα, πλέκονται κάθετα μεταξύ τους δίνοντας ένα «τραχύ και χοντροκομμένο» ύφασμα (υαλοϋφασμα). Τα υαλοϋφάσματα διακρίνονται σε ισοσταθμισμένα (balanced) και μη, ανάλογα με τον αριθμό των ινών στις δύο διευθύνσεις πλέξης. Όταν ο αριθμός είναι περίπου ίδιος, τα υαλοϋφάσματα καλούνται ισοσταθμισμένα. Τέλος, η πλέξη με απλές ίνες που έχουν υποστεί περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα πεπλεγμένα υφάσματα ή υφάσματα «πυκνής πλέξης». Ορισμένοι τύποι υφασμάτων φαίνονται στα Σχήματα 1.3 έως 1.7.



Σχήμα 1.3 : Τύποι διάταξης ινών: (α) υαλοπίλημα, (β) μονοαξονικό ύφασμα με κοντές ίνες, (γ) μονοαξονικό ύφασμα με μακριές ίνες και (δ) υαλοϋφασμα.



Σχήμα 1.4 : Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM).



Σχήμα 1.5 : Πλεξίδες (rovings).



Σχήμα 1.6 : Υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR).

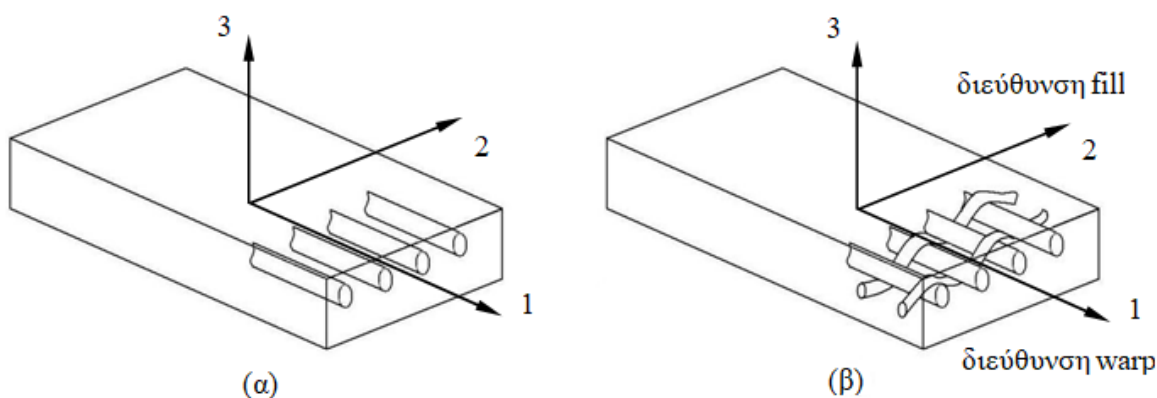


Σχήμα 1.7 : Ύφασμα πυκνής πλέξης (woven fabric, cloth).

Το βασικότερο κατασκευαστικό στοιχείο από ινώδη σύνθετα υλικά είναι η στρώση (lamina), η οποία αποτελεί μία επίπεδη διαμόρφωση ινών σε μία μήτρα. Ο τύπος διάταξης των ινών μπορεί να είναι οποιοσδήποτε από αυτούς που αναφέρονται παραπάνω. Δύο τυπικές στρώσεις, μία μονοαξονική και μία με υαλοϋφασμα, αναπαρίστανται στο Σχήμα 1.8. Κάθε στρώση χαρακτηρίζεται από ένα σύστημα κυρίων αξόνων (1, 2, 3), παράλληλων ή κάθετων στις ίνες. Οι άξονες 1 και 2 βρίσκονται στο επίπεδό της, ενώ ο άξονας 3 είναι κάθετος σε αυτό. Επιπλέον, ο άξονας 1 είναι συνήθως παράλληλος στη διεύθυνση με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες και ο άξονας 2 είναι κάθετος σε αυτήν. Όπως φαίνεται στο ίδιο σχήμα,

σε μία μονοαξονική στρώση, ο άξονας 1 είναι παράλληλος στις ίνες. Στην περίπτωση υαλοϋφάσματος, συμπίπτει με τη λεγόμενη warp διεύθυνση, την παράλληλη στο μήκος του ρολού ενίσχυσης, ενώ η κάθετη σε αυτήν καλείται fill. Επίσης, είναι προφανές ότι οι κύριοι άξονες μίας στρώσης υαλοπιλήματος μπορούν να έχουν οποιαδήποτε διεύθυνση.

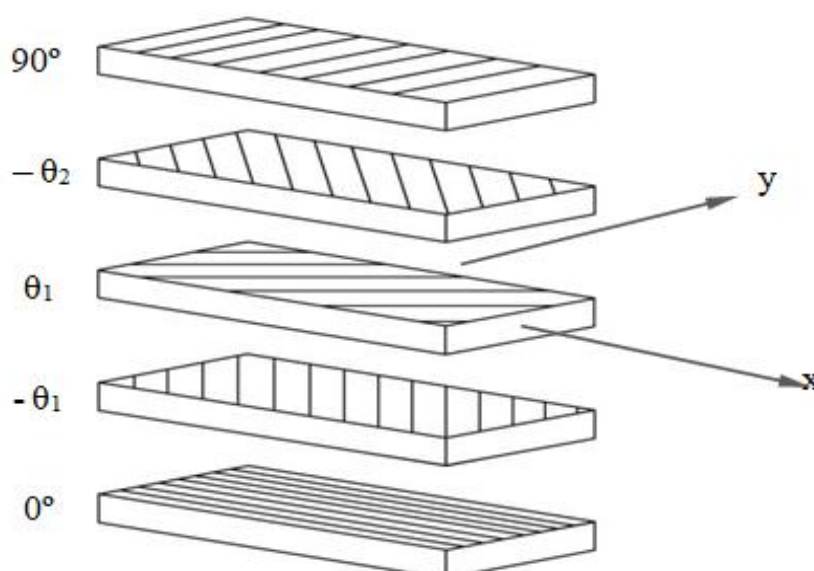
Το σύστημα κυρίων αξόνων μίας στρώσης είναι δυνατόν να μη συμπίπτει με εκείνο των γεωμετρικών αξόνων της. Συνεπώς, ο άξονας 1 μπορεί να σχηματίζει γωνία με τον άξονα x, η οποία είναι θετική αντιστρόφα με τη φορά των δεικτών του ρολογιού. Ο προσανατολισμός των κυρίων αξόνων της στρώσης έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τη φόρτισή της. Ένα φορτίο στη διεύθυνση ενός κύριου άξονα συνεπάγεται την ορθοτροπική συμπεριφορά της, δηλαδή το μέγεθος της παραμόρφωσής της εξαρτάται από τη διεύθυνση της φόρτισης. Αντίθετα, όταν η στρώση φορτίζεται μη παράλληλα με κάποιον από τους κύριους άξονες της παρουσιάζει ανισοτροπικό χαρακτήρα, δηλαδή εκτός της μεταβολής του μεγέθους της παραμόρφωσής της συναρτήσει της διεύθυνσης, παρατηρούνται συζεύξεις έκτασης –διάτμησης και κάμψης – στρέψης. Ως εκ τούτου, ο προσανατολισμός των στρώσεων είναι καθοριστικός παράγοντας της μηχανικής συμπεριφοράς πιο σύνθετων διαμορφώσεων, όπως τα πολύστρωτα.



Σχήμα 1.8 : Σχηματική αναπαράσταση στρώσεων με (α) μονοαξονικές και (β) πεπλεγμένες ίνες (υαλοϋφασμα).

1.2.2 Πολύστρωτα

Η χρήση των ινωδών σύνθετων υλικών προσφέρει ένα ευρύ φάσμα επιλογών όσον αφορά το υλικό μίας κατασκευής. Το φάσμα αυτό διευρύνεται με την κατασκευή πολύστρωτων (laminates), δηλαδή στοιβάδων επάλληλων διαφορετικών στρώσεων από FRP's οι οποίες κολλούνται μεταξύ τους με το υλικό της μήτρας που υπάρχει σε καθεμία από αυτές. Η διαφορετικότητα των στρώσεων συνίσταται συνήθως σε διαφορετικούς τρόπους ενισχύσεων (τύπος διάταξης των ινών, επιφανειακό βάρος ενίσχυσης, προσανατολισμός ινών) παρά σε διαφορετικά υλικά (ινών ή και μήτρας). Στην πράξη, συνηθίζεται η κατασκευή πολύστρωτων από στρώσεις ίδιων ιδιοτήτων και παχών (κανονικά πολύστρωτα), αλλά διαφορετικών προσανατολισμών των ινών τους τόσο μεταξύ των στρώσεων όσο και σε σχέση με τους γεωμετρικούς άξονες του πολύστρωτου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.9 : Ανεπτυγμένη όψη ενός πολύστρωτου με στρώσεις διαφορετικών προσανατολισμών.

Τα πολύστρωτα διακρίνονται βάσει της διεύθυνσης των ινών των στρώσεών τους σε εκείνα με διασταυρούμενες (cross - ply) και εκείνα με διαγώνιες στρώσεις (angle - ply). Στην πρώτη περίπτωση, οι ίνες των στρώσεων ευθυγραμμίζονται με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου, ενώ στη δεύτερη, μία τουλάχιστον στρώση δεν ικανοποιεί τη συνθήκη αυτή. Το πολύστρωτο του Σχήματος 1.9 έχει διαγώνιες στρώσεις. Επιπρόσθετα, ένα πολύστρωτο είναι συμμετρικό όταν για κάθε στρώση στο μισό πάχος του υπάρχει στο άλλο μισό πάχος μία άλλη, συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο στρώση, ίδιου υλικού και προσανατολισμού των ινών. Όταν όμως τα πρόσημα της γωνίας προσανατολισμού σε κάθε ζεύγος συμμετρικών στρώσεων είναι αντίθετα, τότε είναι αντισυμμετρικό. Τα πολύστρωτα των παραπάνω τύπων είναι εν γένει ανισοτροπικά, αλλά με αύξηση του αριθμού των στρώσεών τους (μεγαλύτερου από περίπου οκτώ) τείνουν να αποκτήσουν ορθοτροπικό χαρακτήρα (Τσούβαλης – 1998).

Τα ινώδη σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές ανήκουν στην κατηγορία των πολύστρωτων. Το χαμηλό ειδικό βάρος τους και οι συνεπαγόμενες υψηλές ειδικές ιδιότητες τους (λόγοι των τιμών των ιδιοτήτων προς το βάρος) αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών ναυπηγικών υλικών, καθώς συμβάλλουν στην κατασκευή ελαφρύτερων σκαφών, ανάλογου ή και ανώτερου επιπέδου αντοχής. Τυπικές ιδιότητες ορισμένων πολύστρωτων υλικών, αλλά και μερικών συμβατικών, παρουσιάζονται στους Πίνακες 1.3 και 1.4 (Τσούβαλης – 1998, Naik et al – 2000). Οι ιδιότητες των πολύστρωτων είναι στη διεύθυνση των ινών ή κάθετα σε αυτές. Οι τιμές τους σε άλλες διευθύνσεις μπορεί να είναι σημαντικά μικρότερες εξαιτίας της ανισοτροπικότητας ή συχνότερα, της ορθοτροπικότητας των υλικών αυτών. Το φαινόμενο αυτό αντισταθμίζεται από τη δυνατότητα προσανατολισμού των ενισχυτικών ινών των στρώσεων, άρα και της επίτευξης υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας, στις διευθύνσεις των φορτίων.

Η δυνατότητα παραγωγής ελαφρύτερων κατασκευών, ενισχυμένων εκεί όπου ακριβώς χρειάζεται, συνδυάζεται με έναν αριθμό επιπρόσθετων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν τα πολύστρωτα από FRP's. Μεταξύ αυτών ξεχωρίζουν η μεγάλη αντίσταση σε διαβρωτικά περιβάλλοντα, όπως το θαλάσσιο, και η εξαιρετική συμπεριφορά έναντι χημικών ενώσεων, όπως τα οξειδωτικά μέσα και οι οργανικές ενώσεις. Επιπλέον, τα υλικά αυτά παρέχουν ευελιξία στην κατασκευή, με αποτέλεσμα μεγάλες και πολύπλοκες κατασκευές να αποτελούνται συχνά από ένα κομμάτι. Άλλα σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα επίτευξης χαμηλών τιμών του συντελεστή γραμμικής θερμικής διαστολής, η χαμηλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, η εξαιρετική αντοχή σε κόπωση, η απουσία ραφών και ενώσεων, τα πολύ καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης, η εύκολη επισκευή τους και η μικρή συντήρηση που απαιτούν, ιδίως οι μικρές κατασκευές.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.4, τα πολύστρωτα από FRP's χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας του Young, γεγονός που λειτουργεί άλλοτε ως πλεονέκτημα και άλλοτε ως μειονέκτημα. Η μικρή δυσκαμψία τους ικανοποιεί τις υψηλές απαιτήσεις απορρόφησης ενέργειας σε μία κατασκευή, ενώ δεν εξυπηρετεί σε περιπτώσεις όπου επιτρέπονται μικρές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή, άρα και ολκιμότητα, με αποτέλεσμα η θραύση τους να επέρχεται ουσιαστικά χωρίς προειδοποίηση. Επίσης, μειονεκτήματα των πολύστρωτων είναι η δυσκολία και η μεγάλη διάρκεια της επιθεώρησής τους λόγω των μη σταθερών συνθηκών κατασκευής, η πολυπλοκότητα και οι αυξημένες απαιτήσεις των μεθόδων παραγωγής τους, το φαινόμενο του ερπυσμού, η μειωμένη αντοχή σε τριβή και η ευπάθεια σε φωτιά.

Οι τυπικές ιδιότητες αντοχής πολύστρωτων από FRP's που αναγράφονται στον Πίνακα 1.3 είναι περιεκτικότητα κατ' όγκο σε ίνες (V_f), η αντοχή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση των ινών (σ_{1t}), η αντοχή σε εφελκυσμό σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες (σ_{2t}), η αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση των ινών (σ_{1c}), η αντοχή σε θλίψη σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες (σ_{2c}) και η αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο του πολύστρωτου (τ_{12}). Αντίστοιχα, οι τυπικές ιδιότητες δυσκαμψίας πολύστρωτων από FRP's περιγράφονται στον Πίνακα 1.4 είναι το ειδικό βάρος (γ), το μέτρο ελαστικότητας του Young στην διεύθυνση των ινών (E_1), το μέτρο

ελαστικότητας του Young σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες (E_2), το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο του πολυστρωτου (G_{12}) και ο λόγος του Poisson στο επίπεδο του πολυστρωτου (ν). Στους Πίνακες 1.3 και 1.4, κάθε υλικό carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) με το σύμβολο WG συμβολίζει ότι ανήκει στην σειρά WG με υφάσματα διαφόρων μεγεθών των ινών και πυκνοτήτων της πλέξης (Naik et al – 2000).

Πίνακας 1.3 : Τυπικές ιδιότητες αντοχής πολυστρωτων από FRP's.

Υλικό	V_f	σ_{1t}	σ_{2t}	σ_{1c}	σ_{2c}	τ_{12}
		MPa				
E-glass/polyester (CSM)	0.19	108	108.0	148	148.0	85.0
E-glass/polyester (WR-balanced)	0.34	250	250.0	210	210.0	100.0
E-glass/polyester (UD)	0.43	750	–	600	–	–
E-glass/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR)	0.33	360	360	240	205	98
E-glass/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG06	0.4	315	315	210	210	28
E-glass/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG07	0.4	290	290	196	196	28
E-glass/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG02	0.4	250	250	183	183	28
E-glass/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG08	0.4	230	230	170	170	28
E-glass/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG10	0.4	210	210	120	120	28
E-glass/epoxy ($\pm 45^\circ$ WR)	0.33	185	185	122	122	137
E-glass/epoxy (UD)	0.53	1190	73	1001	159	67
E-glass/epoxy (UD)	0.65	1297	27.8	820	150	39.2
E-glass/epoxy (UD)	0.60	1197	27.7	740	145.0	38.7
E-glass/epoxy (UD)	0.4	798	27.1	480	140	36.8
Carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR)	0.5	625	625	500	500	130
Carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG06	0.4	565	565	420	420	66
Carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG07	0.4	500	500	370	370	66
Carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG02	0.4	405	405	300	300	66
Carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG08	0.4	365	365	255	255	66
Carbon/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR-balanced) WG10	0.4	345	345	240	240	66
Carbon/epoxy ($\pm 45^\circ$ WR)	0.5	240	240	200	200	–
Carbon/epoxy (UD)	0.57	2040	90	1000	148	49
Carbon/epoxy (UD)	0.7	1744	52.6	1650	260	107.8
Carbon/epoxy (UD)	0.65	1622	52	1525	250	106.4
Carbon/epoxy (UD)	0.4	1013	49.5	940	220	100.5
Aramid/epoxy ($0^\circ/90^\circ$ WR)	0.5	517	517	172	172	110
Aramid/epoxy (UD)	0.6	1379	30	276	138	60
Steel (B-quality) Όριο διαρροής σε 0.2% παραμόρφωση.	–	325	325	340	340	190
Aluminium (5083 alloy) Όριο διαρροής σε 0.2% παραμόρφωση.	–	150	150	150	150	87
Marine plywood (mahogany)	–	40	40	25	25	8

Πίνακας 1.4 : Τυπικές ιδιότητες δυσκαμψίας πολύστρωτων από FRP's.

Υλικό	γ	E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}
	gr/cm ³	GPa			
E-glass/polyester (CSM)	1.45	8	8	2.75	0.32
E-glass/polyester (WR-balanced)	1.70	15	15	3.5	–
E-glass/polyester (UD)	1.80	30	–	3.5	–
E-glass/epoxy (0°/90° WR)	1.92	17	17	5	0.24
E-glass/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG06	1.75	22	22	3.91	0.17
E-glass/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG07	1.75	21	21	3.91	0.17
E-glass/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG02	1.75	21	21	3.92	0.17
E-glass/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG08	1.75	20	20	3.92	0.18
E-glass/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG10	1.75	18	18	3.94	0.19
E-glass/epoxy (±45° WR)	1.92	10	10	8	0.70
E-glass/epoxy (UD)	1.92	39	15	4	–
E-glass/epoxy (UD)	2.11	48	15	5.10	0.32
E-glass/epoxy (UD)	2.04	45	13	4.40	0.32
E-glass/epoxy (UD)	1.75	31	8	2.80	0.33
Carbon/epoxy (0°/90° WR)	1.53	70	70	5	–
Carbon/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG06	1.41	53	53	3.79	0.06
Carbon/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG07	1.41	50	50	3.79	0.06
Carbon/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG02	1.41	44	44	3.79	0.06
Carbon/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG08	1.41	38	38	3.79	0.07
Carbon/epoxy (0°/90° WR-balanced) WG10	1.41	29	29	3.79	0.09
Carbon/epoxy (±45° WR)	1.53	18	18	27	–
Carbon/epoxy (UD)	1.57	134	11	5	0.26
Carbon/epoxy (UD)	1.58	162	15	5.70	0.28
Carbon/epoxy (UD)	1.55	151	13	4.90	0.29
Carbon/epoxy (UD)	1.41	94	8	2.80	0.31
Aramid/epoxy (0°/90° WR)	1.33	31	31	2	–
Aramid/epoxy (UD)	1.38	76	5	2	0.34
Steel (B-quality)	7.80	207	207	80	0.33
Aluminium (5083 alloy)	2.80	70	70	26	0.33
Marine plywood (mahogany)	0.60	7	7	1	–

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα πλεονεκτήματα των ινωδών σύνθετων υλικών έναντι των συμβατικών είναι γνωστά από τις πρώτες δεκαετίες του προηγούμενου αιώνα. Η δυνατότητα παραγωγής κατασκευών πολύπλοκων μορφών με μικρότερο κόστος και ικανοποιητική αντοχή οδήγησε από νωρίς (1936) στη χρησιμοποίησή τους στην αεροναυπηγική. Σύντομα, ακολούθησαν η ναυπηγική και η αεροδιαστημική, επιτυγχάνοντας την παραγωγή ελαφρύτερων και αποδοτικότερων τμημάτων των κατασκευών. Η χρήση των FRP's σε ναυπηγικές εφαρμογές χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1950, οπότε πραγματοποιήθηκε μαζική παραγωγή μικρών σκαφών από πολυεστερική ρητίνη με ενίσχυση ινών γυαλιού (Strong – 2002). Έκτοτε παρατηρείται μία τάση αντικατάστασης των παραδοσιακών υλικών από αυτά, με αποτέλεσμα σκάφη από FRP's να περιλαμβάνονται στους στόλους όλων των μεγάλων χωρών. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας το 60% των νηολογημένων στην Ιαπωνία αλιευτικών σκαφών ήταν από πλαστικά ενισχυμένα με ίνες γυαλιού (Glass fibre Reinforced Plastics, GRP's), συμπεριλαμβανομένων σκαφών με μήκος μέχρι 45 m (Τσούβαλης – 1998).

Καθοριστικός παράγοντας της ευρείας και διαρκώς αυξανόμενης χρήσης των ινωδών σύνθετων υλικών είναι η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς κατασκευών από τέτοια υλικά υπό διάφορες συνθήκες φόρτισης που αναμένεται να συναντήσουν κατά τη λειτουργία τους. Ο κατασκευαστικός σχεδιασμός ταχύπλοου σκάφους αποτελεί αντικείμενο ενός μεγάλου αριθμού μελετών, σκοπός των οποίων είναι αρχικά η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μοντελοποιείται το σκάφος, και έπειτα η εξαγωγή αποτελεσμάτων και η σύγκρισή του με τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Προς αυτήν την κατεύθυνση έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για τη μοντελοποίηση διαφόρων σκαφών.

Τέτοια προσπάθεια αποτελεί η δημοσίευση άρθρου τον Δεκέμβριο του 2002 σχετικά με τη μοντελοποίηση motor yacht μήκους 45 m με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων στο ANSYS (Campbell & Jones – 2002). Ακολούθησε αργότερα δημοσίευση που αφορούσε τη μοντελοποίηση catamaran με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Ojeda, Prusty & Salas – 2003), καθώς επίσης και η δημοσίευση που αφορά τη μελέτη trimaran με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (Zamarin – 2003) η οποία εστίασε κυρίως στην καταπόνηση των «φτερών – πηδαλίων» (T-wing/rudder). Εν συνεχεία ακολούθησαν άλλες δημοσιεύσεις, όπως τον Μάρτιο του 2004 μελέτη με την χρήση πεπερασμένων στοιχείων σκάφους «one – off racer-cruiser yacht» μήκους 30 ποδών (30 ft), (Santos, Santos, Duarte & Soares – 2004), καθώς επίσης και τον Νοέμβριο του 2012 ακολούθησε δημοσίευση με θέμα την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων σε σκάφος αναψυχής μήκους 50 ποδών (50 ft) (Alaimo, Milazzo & Tumino – 2012). Τέλος, η πιο πρόσφατη δημοσίευση δημοσιεύτηκε τον Ιανουάριο του 2019 με αντικείμενο την χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε λέμβο NFRP (Natural Fibre Reinforced Polymer), κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά (Renjith & Nair – 2019).

Εκτός από δημοσιεύσεις (papers), αρκετοί ερευνητές έχουν κάνει εκτενείς εργασίες (reports) σχετικά με τον κατασκευαστικό σχεδιασμό σκάφους με την χρήση πεπερασμένων

στοιχείων. Τέτοια εργασία εκπονήθηκε τον Φεβρουάριο του 2012 στην Γένοβα (Katalinić – 2012), όπου ο μελετητής ασχολήθηκε με τις παραμορφώσεις που προκαλούνται στον καθρέφτη του σκάφους λόγω των δυνάμεων που προκαλούνται από τις στηρίξεις των δύο ελικοφόρων αξόνων. Αντίθετα, στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκε συνολικά η καταπόνηση του σκάφους από τις πιέσεις που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd’s Register». Τέλος, τον Φεβρουάριο του 2013, σπουδαστής Σουηδικού πανεπιστημίου εκπόνησε κατασκευαστικό σχεδιασμό ταχύπλοου σκάφους με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων (Razola – 2013), ο οποίος όμως έκανε υδροδυναμική μελέτη σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η κρουστική πίεση στο σκάφος, ενώ στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται η συντηρητική παραδοχή ότι κατά το πλάτος του σκάφους η κρουστική πίεση (slamming pressure) παραμένει σταθερή.

1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στα πλαίσια της μελέτης του κατασκευαστικού σχεδιασμού ενός ταχύπλοου σκάφους. Μέσω αυτής της μελέτης, γίνεται μία προσπάθεια κατανόησης του τρόπου με τον οποίο μοντελοποιείται ένα ταχύπλοο σκάφος με πεπερασμένα στοιχεία, καθώς επίσης διερευνώνται οι απαραίτητες ενέργειες οι οποίες διευκολύνουν τη διαδικασία της μοντελοποίησης. Η μελέτη αυτή αφορά τη γάστρα του σκάφους με τα ενισχυτικά, τις εγκάρσιες φρακτές και τα μπρακέτα του καθρέφτη, χωρίς όμως να μοντελοποιηθεί το κατάστρωμα (deck) του σκάφους, καθώς η μοντελοποίηση του είναι εξαιρετικά απαιτητική λόγω της περίπλοκης διαμόρφωσής του και ξεπερνά το αντικείμενο μελέτης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Το σκάφος που επιλέχθηκε για την παρούσα διπλωματική εργασία είναι το «AQUAVITE – TCH 888» της εταιρείας «Technohull» (ιστοσελίδα : <https://technohull.com>), το οποίο κατασκευάστηκε στις αρχές του 2009 και ανήκει στην κλάση του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd’s Register». Οι πληροφορίες που δόθηκαν για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν το σχέδιο του σκάφους σε ψηφιοποιημένη μορφή (αρχείο .iges), ένα πρόσθετο έγγραφο το οποίο παρείχε όλες τις απαραίτητες λεπτομέρειες για τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάστηκε το σκάφος, όπως οι ενισχύσεις από τις οποίες αποτελείται το σκάφος και η αλληλουχία στρώσεων κάθε κατασκευαστικού στοιχείου, καθώς επίσης και ένα επιπλέον έγγραφο το οποίο παρέχει τα αποτελέσματα από τους κανονισμούς του νηογνώμονα, όπως η πίεση που αναπτύσσεται σε κάθε περιοχή του σκάφους. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν τους κανονισμούς του έτους 2009, συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να επαληθευτούν προκειμένου να διερευνηθεί αν υπάρχει κάποια αλλαγή σε σχέση με τους κανονισμούς του έτους 2018. Με αυτά τα δεδομένα, αναπτύχθηκε μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων το οποίο έδωσε αποτελέσματα μετατοπίσεων, τάσεων και παραμορφώσεων. Για τα αποτελέσματα των τάσεων, έγινε έλεγχος για το αν πληρούν τις προδιαγραφές του νηογνώμονα, και εξήχθησαν τα απαραίτητα συμπεράσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, πραγματοποιήθηκε η εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Στο πλαίσιο αυτό, έγινε αναφορά γενικά στα χαρακτηριστικά των ταχυπλών σκαφών. Εν συνεχεία, ακολούθησε βιβλιογραφική ανασκόπηση και έγινε παράθεση ορισμένων εργασιών που έχουν κατά καιρούς εκπονηθεί σχετικά με τον κατασκευαστικό σχεδιασμό ταχύπλου σκάφους και γενικότερα τη μοντελοποίηση ενός σκάφους, ή ακόμα και πλοίου, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το πρώτο κεφάλαιο έκλεισε με την περιγραφή του σκοπού της διπλωματικής εργασίας.

Στο δεύτερο κεφαλαίο γίνεται αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών, της κατασκευής και αναφέρονται γενικότερα οι πληροφορίες που δόθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρεία για το υπό μελέτη σκάφος. Ειδικότερα σε πρώτο στάδιο, γίνεται κατανοητή η γεωμετρία και η μορφή του σκάφους που μοντελοποιείται. Εν συνεχεία, παρατίθενται τα κύρια χαρακτηριστικά (main particulars) του σκάφους και οι φορτίσεις (pressures) που καταπονούν το σκάφος, οι οποίες έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τον βρετανικό νηογνώμονα. Το δεύτερο κεφάλαιο κλείνει με την περιγραφή της αλληλουχίας στρώσεων από την οποία αποτελείται κάθε κατασκευαστικό στοιχείο του σκάφους, καθώς επίσης και του πάχους των στρώσεων από τις οποίες αποτελείται το σκάφος.

Αντικείμενο του τρίτου κεφαλαίου είναι η κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων μέσω του οποίου θα εξαχθούν αποτελέσματα. Στο πρώτο εδάφιο, γίνεται σύντομη εισαγωγή και περιγραφή του κεφαλαίου. Στο δεύτερο εδάφιο περιγράφεται η προεπεξεργασία του σχεδίου, δηλαδή οι απαραίτητες τροποποιήσεις που εκπονήθηκαν στο αρχικό γεωμετρικό σχέδιο προκειμένου να διευκολυνθεί η διακριτοποίηση του σκάφους σε πεπερασμένα στοιχεία. Στο τρίτο εδάφιο, περιγράφεται η διαδικασία της δημιουργίας μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Ειδικότερα, επιλέγεται κατάλληλος τύπος στοιχείου (element) με το οποίο εν συνεχεία μοντελοποιείται το σκάφος, και ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται. Επιπλέον, περιγράφεται η κατασκευή του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Εφόσον ολοκληρωθεί η περιγραφή της διαδικασίας δημιουργίας πλέγματος, αναλύεται η σημασία του συνυπολογισμού των αδρανειακών φορτίων (inertia relief) κατά την επίλυση του προβλήματος. Έπειτα, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο ορίστηκαν στο ANSYS οι πιέσεις που καταπονούν το σκάφος και περιγράφονται οι συνοριακές συνθήκες που τοποθετήθηκαν στην κατασκευή. Οι συνοριακές συνθήκες είναι κατάλληλες έτσι ώστε να προσομοιάσουν την ύπαρξη του καταστρώματος το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί. Σε κάθε εδάφιο γίνεται εκτενής αναφορά στα προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της μοντελοποίησης, καθώς επίσης και στον τρόπο με τον οποίο επιλύθηκαν αυτά τα προβλήματα. Εν συνεχεία, καταγράφονται οι τρόποι με τους οποίους επιλύθηκε το πρόβλημα, δηλαδή η γραμμική και η μη-γραμμική ανάλυση. Τέλος, περιγράφονται τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν μέσω των οποίων εξάγονται τα αποτελέσματα τα οποία στη συνέχεια θα αξιολογηθούν και θα συγκριθούν με τους κανονισμούς του νηογνώμονα.

Το τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την επίλυση των μοντέλων γραμμικής, μη-γραμμικής ανάλυσης και της λειτουργίας «inertia relief» στα πλαίσια του κατασκευαστικού σχεδιασμού, καθώς επίσης και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Αρχικά, περιγράφονται τα τμήματα του σκάφους για τα οποία εξάγονται αποτελέσματα, τα τμήματα του σκάφους των οποίων τα αποτελέσματα αγνοούνται, καθώς επίσης και οι τιμές της μέγιστης αντοχής και των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων σε εφελκυσμό και θλίψη, τα οποία υπολογίζονται με πολλαπλασιασμό της μέγιστης αντοχής με συντελεστή ασφαλείας ο οποίος προδιαγράφεται σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Έπειτα, παρατίθενται τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης, εν συνεχεία τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης, έπειτα τα αποτελέσματα του μοντέλου που εκτελεί τη λειτουργία «inertia relief» και γίνεται δειγματοληπτική σύγκριση, τόσο μεταξύ των τριών μοντέλων επίλυσης όσο και μεταξύ των αποτελεσμάτων του προγράμματος ANSYS με τις αναπτυσσόμενες τιμές που έχουν εκτιμηθεί από την κατασκευάστρια εταιρεία σε τμήμα του σκάφους. Στο τέλος του κεφαλαίου, παρατίθενται αφενός τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης στην περίπτωση που στο σκάφος τοποθετούταν πάκτωση στον πλησιέστερο του κέντρου βάρους κόμβο ως συνοριακή συνθήκη, αφετέρου τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης στην περίπτωση που στο σκάφος τοποθετούνταν συνοριακές συνθήκες πλοίου στο οποίο έχει μοντελοποιηθεί και το κατάστρωμα, και αποδεικνύεται ότι τα αποτελέσματα σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μη συγκρίσιμα, όπως αναμενόταν εκ των προτέρων.

Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, αρχικά ανακεφαλαιώνονται χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση του σκάφους και επεξηγείται η σημασία ορισμένων βημάτων που είναι καθοριστικά για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έπειτα, αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, αιτιολογούνται και ερμηνεύονται με βάση τη φυσική του προβλήματος. Στο τέλος του πέμπτου κεφαλαίου, γίνεται πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση του προβλήματος της διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Περιγραφή του υπό μελέτη σκάφους

2.1 Εισαγωγή

Το σκάφος «AQUAVITE – TCH 888» της εταιρείας «Technohull» χρησιμοποιήθηκε για μοντελοποίηση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Το σκάφος κατασκευάστηκε στις αρχές του 2009 από τη «Technohull» και κύριο γνώρισμά του είναι η εξαιρετική συμπεριφορά στη θάλασσα και οι υψηλές τελικές ταχύτητες. Επιπλέον, το σκάφος στην αγωνιστική του έκδοση φθάνει τους 70 κόμβους με τοποθέτηση ζεύγους κινητήρων ισχύος 500 ίππων. Το υπό μελέτη σκάφος απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 : Σκάφος «AQUAVITE – TCH 888», ελλιμενισμένο.

Στο «AQUAVITE – 888» δεν υπάρχει δελφινιέρα. Το στρίτσο είναι ευρύχωρο για πολλά μέτρα αλυσίδας και σχοινί, ενώ υπάρχει διαμορφωμένη υποδομή για την εγκατάσταση εργάτη, με την άγκυρα να βγαίνει κάτω από τα μπαλόνια με όκιο. Τα ταμπούκια εμπρός έχουν σχήμα «Π» με ενιαίο χώρο και συνολικά μεγάλη χωρητικότητα σε αντικείμενα. Η κονσόλα είναι τοποθετημένη στη μέση. Ανάμεσα στα χαρακτηριστικά της είναι το αεροδυναμικό της σχήμα, οι μεγάλες ωφέλιμες επιφάνειες για τα όργανα μηχανής και συναφή εξοπλισμό, με τη θέση του κυβερνήτη αριστερά.

Το σκάφος αυτό είναι διαθέσιμο μέχρι και σήμερα στην αγορά, και διακρίνεται για τις εξαιρετικές αγωνιστικές επιδόσεις. Το «AQUAVITE – 888» ανήκει στην κλάση του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd’s Register» και επιλέχθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για να διερευνηθεί κατά πόσο είναι εύκολο να δημιουργηθεί μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων σε ένα σκάφος για την εκτίμηση των καταπονήσεων που μπορεί να υποστεί σε διαφορετικές συνθήκες θάλασσας.

2.2 Γενικά χαρακτηριστικά του υπό – μελέτη σκάφους

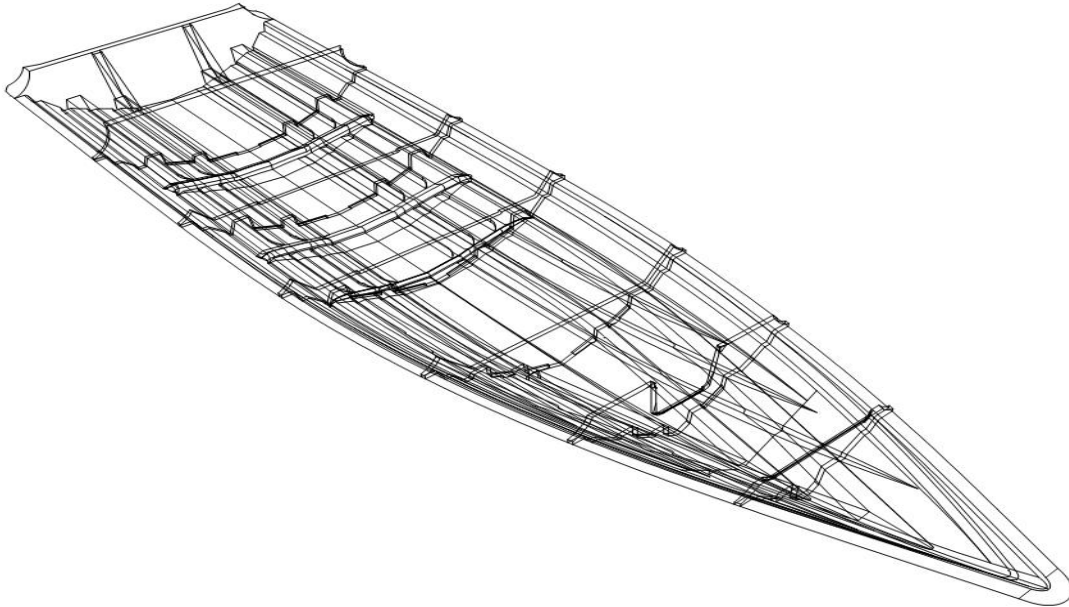
Το σκάφος «AQUAVITE – TCH 888» ανήκει στην κατηγορία των σκαφών πλαναρίσματος (planning hull). Τα κύρια χαρακτηριστικά του σκάφους αναγράφονται στον Πίνακα 2.1. Κύριο γνώρισμα ενός σκάφους πλαναρίσματος είναι η ικανότητά του να εξέχει μεγάλο μέρος της πλώρης του έξω από την επιφάνεια του νερού όταν αναπτύσσει μεγάλες ταχύτητες.

Πίνακας 2.1 : Κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη σκάφους.

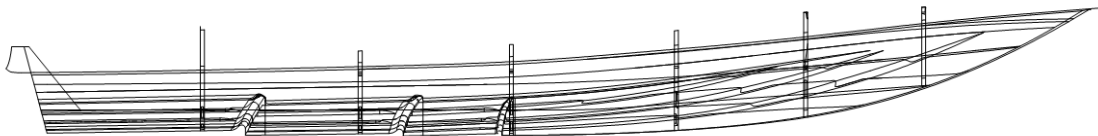
Κύριες Διαστάσεις			
Ολικό Μήκος	Length Overall Approximately	L_{OA} [m]	8.942
Μήκος μεταξύ Καθέτων	Length between Perpendiculars	L_{BP} [m]	7.264
Μήκος Κανονισμών	Rule Length	L_{RULE} [m]	7.064
Μήκος Γραμμής Φόρτωσης ILCC	Load Line Length	L_{ILLC} [m]	7.102
Μήκος στην Ίσαλο	Waterline Length	L_{WL} [m]	6.363
Πλάτος	Breadth	B [m]	2.964
Κοίλο	Depth	D [m]	1.013
Βύθισμα Σχεδίασης	Designed Draft	T_{design} [m]	0.586
Σημαντικό Ύψος Κύματος	Significant Wave Height	H_S [m]	4
Εκτόπισμα	Displacement	Δ [ton]	3.143
Συντελεστής Γάστρας	Block Coefficient	C_B	0.637
Υπηρεσιακή Ταχύτητα	Service Speed	V_s [kn]	30
Μέγιστη Ταχύτητα	Maximum Speed	V_{max} [kn]	70

Το σκάφος έχει εγκριθεί από τον βρετανικό νηογνώμονα «Lloyd’s Register». Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας δόθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρεία τόσο οι προδιαγραφές του νηογνώμονα όσο και λεπτομερείς οδηγίες για την κατασκευή του σκάφους.

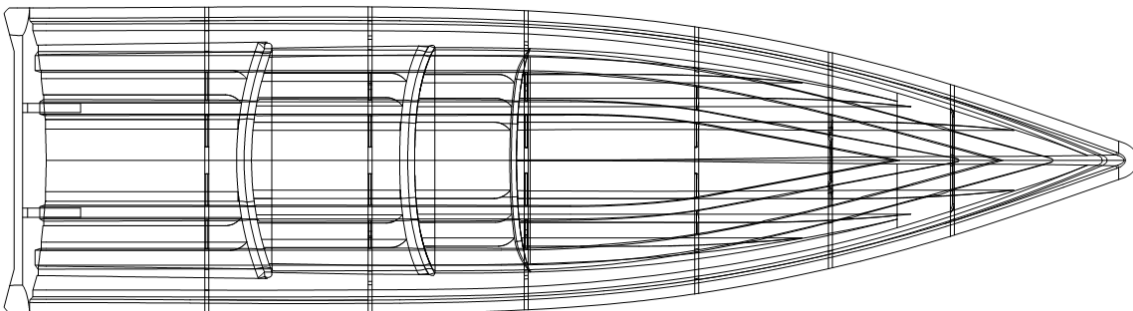
Η γεωμετρία του υπό μελέτη σκάφους φαίνεται στα σχήματα 2.2, 2.3, 2.4 και 2.5 σε τρισδιάστατη όψη, πλάγια όψη, άνοψη και προραία όψη, αντίστοιχα.



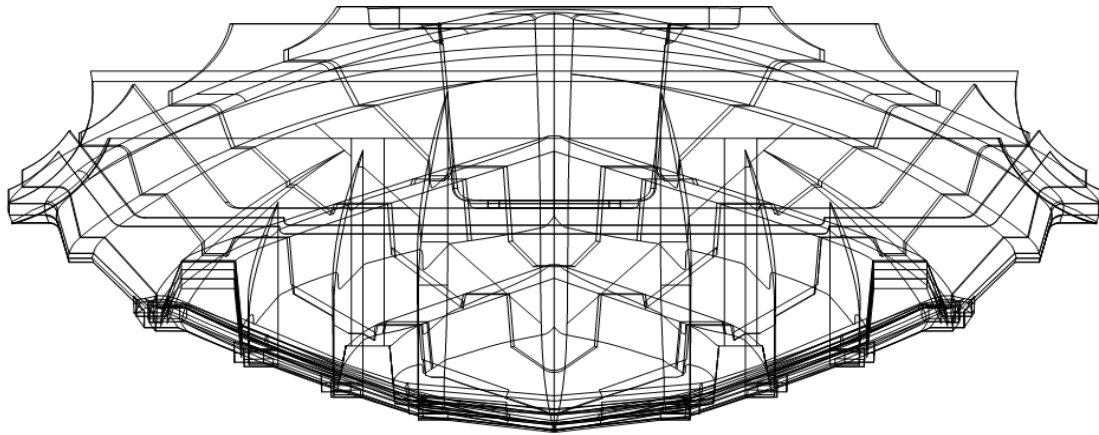
Σχήμα 2.2 : Τρισδιάστατη όψη του υπό μελέτη σκάφους.



Σχήμα 2.3 : Πλάγια όψη του υπό μελέτη σκάφους.



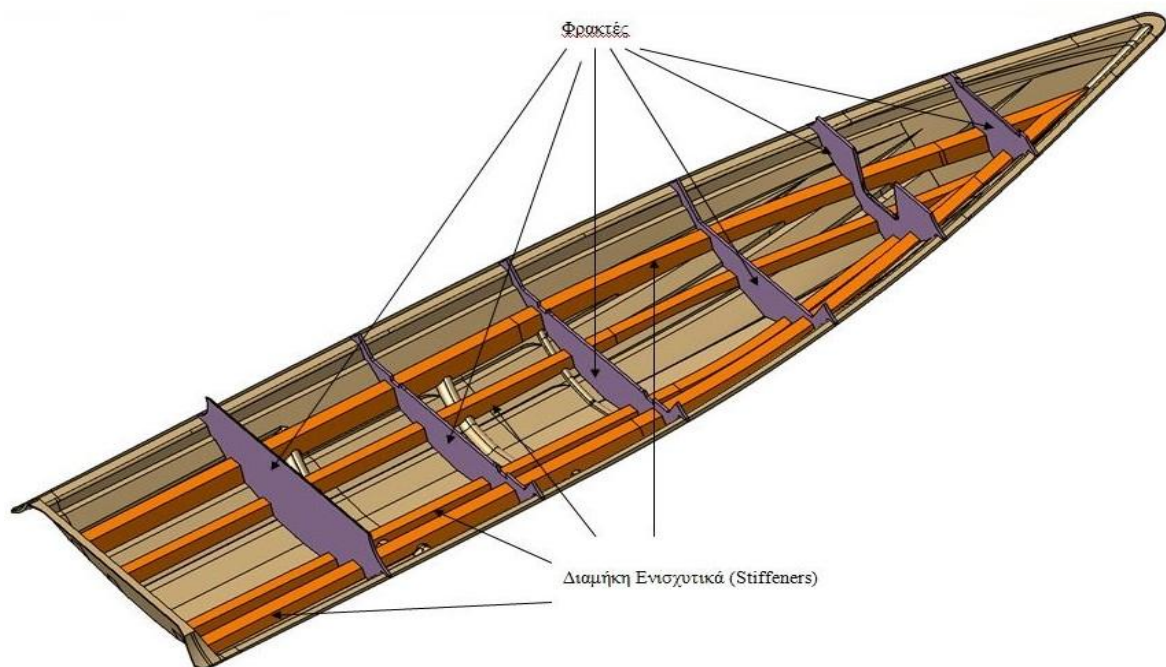
Σχήμα 2.4 : Άνοψη του υπό μελέτη σκάφους.



Σχήμα 2.5 : Πρωραία όψη του υπό μελέτη σκάφους.

Το σκάφος διαθέτει αντιδιαβροχικές λωρίδες (spray – rails), τρία steps στο πρυμναίο τμήμα του πυθμένα τα οποία δρουν και ως εγκάρσια ενισχυτικά, εξωτερικό και εσωτερικό διάμηκες ενισχυτικό (stiffener), μπρακέτα για τη στήριξη του καθρέφτη που εδράζονται στο πέλμα του εσωτερικού ενισχυτικού (transom brackets) και εγκάρσιες φρακτές, οι οποίες χωρίζουν το σκάφος σε 7 περιοχές (sections). Εκτός των παραπάνω, το σκάφος αποτελείται και από το κατάστρωμα (deck), το οποίο ωστόσο δεν μοντελοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

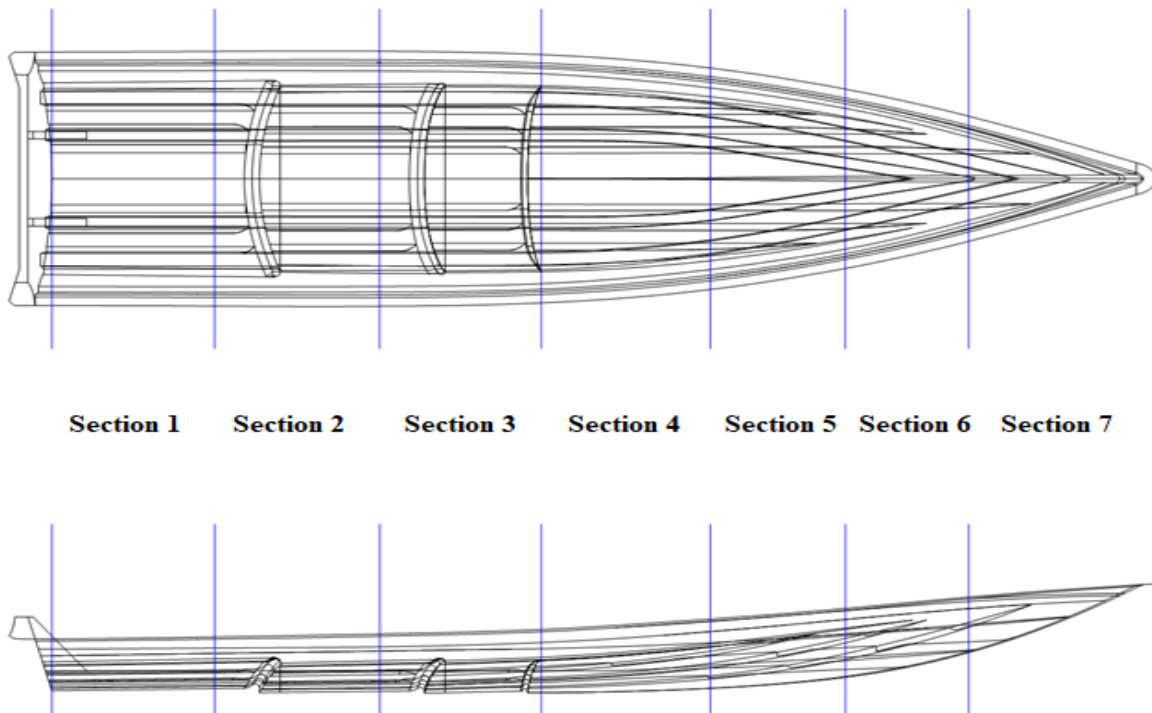
Το κέλυφος της γάστρας, τα διαμήκη ενισχυτικά και οι φρακτές του σκάφους απεικονίζονται στο Σχήμα 2.6 :



Σχήμα 2.6 : Κέλυφος σκάφους, διαμήκη ενισχυτικά και φρακτές.

2.3 Φορτίσεις σκάφους σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα

Οι φορτίσεις έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με το Part 5, Chapter 3, Section 3 των κανονισμών του «Lloyd’s Register – July 2018» και έχουν γίνει υπολογισμοί ξεχωριστά στις διαφορετικές περιοχές (sections) κατά μήκος του πλοίου. Ο διαχωρισμός του σκάφους σε «sections» φαίνεται στο Σχήμα 2.7 και έγινε με γνώμονα τη θέση κατά το μήκος των εγκάρσιων φρακτών.



Σχήμα 2.7 : Διαχωρισμός της γάστρας σε περιοχές (sections).

Οι τιμές των φορτίσεων που υπολογίστηκαν από τον μελετητή της κατασκευάστριας εταιρείας αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 : Πιέσεις στην γάστρα σύμφωνα με τους κανονισμούς του «Lloyd’s Register»

Διαμερίσματα (Sections) κατά μήκος του σκάφους	Πίεση [kN/m ²]
Καθρέφτης	67.215
Section 1	94.848
Section 2	120.200
Section 3	134.429
Section 4	128.482
Section 5	127.552
Section 6	86.017
Section 7	67.215

Οι τιμές των φορτίσεων στα sections 1 έως 7 του σκάφους είχαν υπολογιστεί στις αρχές του έτους 2009, συνεπώς είναι πιθανό να έχουν γίνει αλλαγές στους κανονισμούς και να χρειαστεί εκ νέου υπολογισμός τους. Γι' αυτό κρίθηκε αναγκαίο να επαναυπολογιστούν οι πιέσεις σύμφωνα με τους κανονισμούς του «Lloyd's Register» του έτους 2018 και να συγκριθούν τα αποτελέσματα. Ωστόσο, προέκυψαν οι ίδιες τιμές μεταξύ των κανονισμών των ετών 2009 και 2018, συνεπώς οι υπολογισμένες τιμές κρίνονται αξιόπιστες. Επιπλέον, η τιμή της πίεσης στον καθρέφτη δεν είχε υπολογιστεί από την κατασκευάστρια εταιρεία, συνεπώς κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστεί στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας με όμοιο τρόπο με τον οποίο υπολογίστηκαν οι πιέσεις στα sections 1 έως 7.

2.4 Κατασκευή γάστρας και ενισχύσεων σκάφους

Οι χρησιμοποιούμενες ενισχυτικές ίνες με τις οποίες έχει πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της αντοχής της γάστρας και των ενισχυτικών είναι οι εξής :

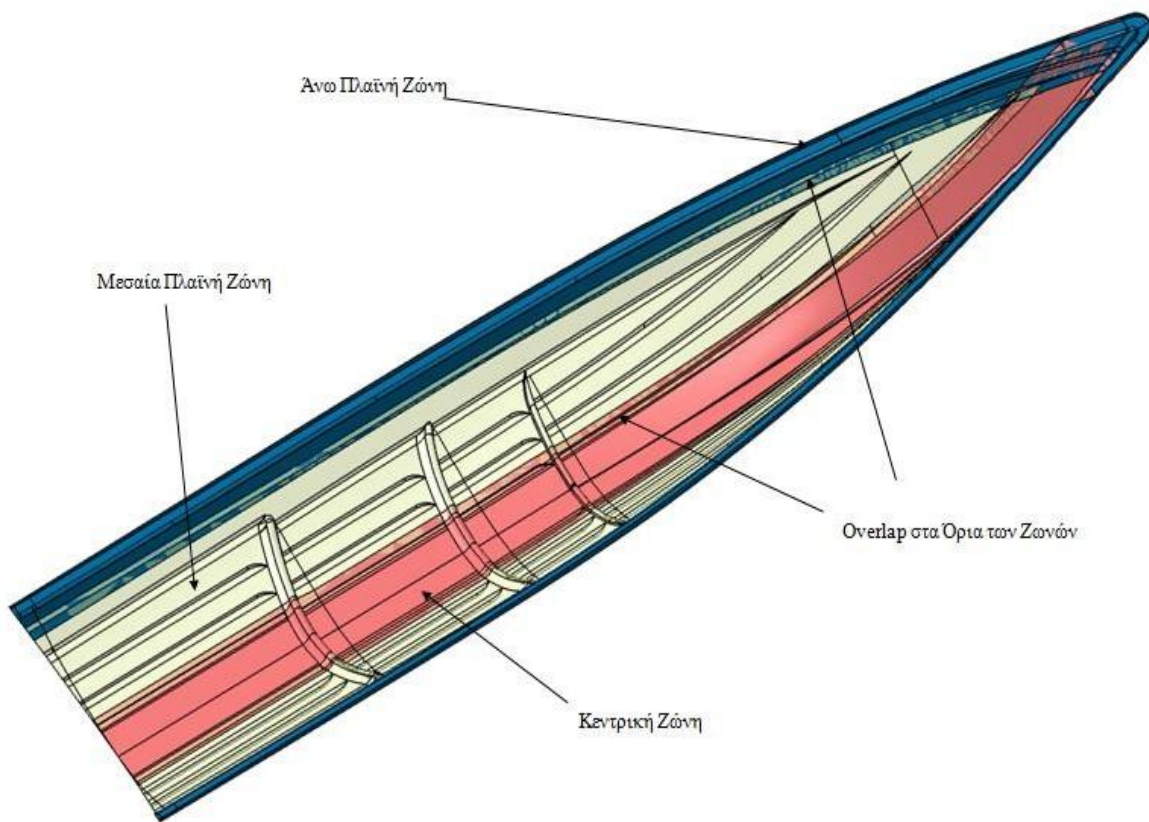
1. 300_CSM : Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 300 gr/m^2
2. 450_CSM : Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 450 gr/m^2
3. 600_CSM : Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 600 gr/m^2
4. 80.30_AG : Συνδυασμένο υαλοϋφασμα 800_WR και 300_CSM (Woven Roving και Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 1110 gr/m^2
5. 600_UDR : Μονοκατευθυντικό υαλοϋφασμα (Uni-Directional) με επιφανειακό βάρος 600 gr/m^2 .

Για τη δημιουργία των πολύστρωτων χρησιμοποιείται πολυεστερική, ορθοφθαλκή ρητίνη «POLYLITE 505 – M888» της εταιρείας «REICHHOLD» με πυκνότητα 1.07 kg/m^3 . Το προτεινόμενο πάχος βαφής του καλουπιού της γάστρας με gelcoat είναι περίπου $750 \mu\text{m}$.

Σε κάθε κατασκευαστικό στοιχείο του σκάφους, τοποθετείται η πρώτη στρώση των ενισχυτικών ινών που προβλέπει το Lay – Up του κατασκευαστικού στοιχείου, η οποία εμποτίζεται από ορθοφθαλκή ρητίνη. Εν συνεχεία, τοποθετείται η επόμενη στρώση ενισχυτικών ινών που προβλέπει το Lay – Up του κατασκευαστικού στοιχείου και γίνεται εκ νέου εμποτισμός με ρητίνη, μέχρι να ολοκληρωθεί το πολύστρωτο.

2.4.1 Κατασκευή γάστρας σκάφους

Η γάστρα χωρίζεται σε τρεις διαμήκειες ζώνες συνολικά στις οποίες εφαρμόζεται το αντίστοιχο lay – up. Οι ζώνες αυτές αποτελούνται από μια κεντρική ζώνη και δύο πλαϊνές (ενδιάμεση και άνω) σε κάθε πλευρά, οι οποίες είναι συμμετρικές ως προς την κεντρική γραμμή (centerline) της γάστρας. Η κεντρική ζώνη οριοθετείται μεταξύ των spray – rails που βρίσκονται αμέσως μετά την κεντρική γραμμή, η ενδιάμεση ζώνη οριοθετείται μεταξύ των προηγούμενων spray – rails και των ανώτερων spray – rails, ενώ η ανώτερη ζώνη περιλαμβάνει τις πολύστρωτες πλάκες που βρίσκονται άνωθεν των ανώτερων spray – rails. Η οριοθέτηση της κεντρικής, της πλαϊνής και της άνω ζώνης απεικονίζεται στο Σχήμα 2.8.



Σχήμα 2.8 : Ορισμός ζωνών με διαφορετικό lay – up.

Πριν την κατασκευή της γάστρας και την τοποθέτηση των στρώσεων, όλη η επιφάνεια του θηλυκού καλουπιού επικαλύπτεται με στρώσεις αποκολλητικού υλικού (κερί). Η επικάλυψη αυτή γίνεται με μεγάλη προσοχή, ώστε να δημιουργηθεί ένα πολύ λεπτό στρώμα. Κατόπιν, η επιφάνεια του καλουπιού βάφεται με ειδικό χρώμα (gel-coat) το οποίο αποτελεί την εξωτερική επιφάνεια του σκάφους. Έπειτα, ακολουθεί η κατασκευή της γάστρας, η οποία γίνεται σε τρεις φάσεις. Στο πρώτο στάδιο, τοποθετείται στρώση υαλοπλήματος 300_CSM στη μία πλευρά του καλουπιού της γάστρας, αρχικά στην κεντρική ζώνη σε όλο της το μήκος (και στα τέσσερα τμήματα, με overlap στα steps), στη συνέχεια στην πλαϊνή ζώνη σε όλο της το μήκος (και στα τέσσερα τμήματα, με overlap στα steps) και τέλος στην επάνω ζώνη σε όλο της το μήκος. Η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω επαναλαμβάνεται σε κάθε στρώση που τοποθετείται. Έπειτα, τοποθετείται υαλοπίλημα 300_CSM στη συμμετρική πλευρά, με τον ίδιο τρόπο που τοποθετήθηκε στην πρώτη πλευρά του σκάφους. Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο και υπάρχει αναμονή μίας ώρας για να ξεκινήσει το δεύτερο στάδιο. Με όμοιο τρόπο, κατά το δεύτερο στάδιο τοποθετείται υαλοπίλημα 450_CSM στη μία πλευρά και υαλοπίλημα 450_CSM στην συμμετρική πλευρά. Έπειτα τοποθετείται συνδυασμένο υαλοϋφασμα 80.30_AG στη μία πλευρά όπου το 800_WR έχει φορά προς το καλούπι και το 300_CSM με φορά προς το εσωτερικό του σκάφους και ομοίως τοποθετείται συνδυασμένο υαλοϋφασμα 80.30_AG στην συμμετρική πλευρά. Έπειτα τοποθετείται υαλοπίλημα 450_CSM στην μία πλευρά, υαλοπίλημα 450_CSM στην συμμετρική πλευρά, και εν συνεχεία τοποθετείται υαλοπίλημα 600_CSM στην μία πλευρά και υαλοπίλημα 600_CSM στην συμμετρική πλευρά. Σε αυτό το σημείο, ολοκληρώνεται το δεύτερο στάδιο και υπάρχει αναμονή μίας ώρας για να ξεκινήσει το τρίτο και τελευταίο στάδιο. Κατά την εκκίνηση του τρίτου σταδίου, τοποθετείται συνδυασμένο υαλοϋφασμα 80.30_AG στην μία πλευρά όπου το 800_WR έχει φορά προς το καλούπι και το CSM με φορά προς το εσωτερικό του σκάφους και ομοίως τοποθετείται συνδυασμένο υαλοϋφασμα 80.30_AG στην συμμετρική πλευρά. Εν συνεχεία τοποθετείται ξανά συνδυασμένο υαλοϋφασμα 80.30_AG στην μία πλευρά και συνδυασμένο υαλοϋφασμα 80.30_AG στην συμμετρική πλευρά του σκάφους. Με το πέρας των τριών σταδίων και την ολοκλήρωση της κατασκευής, η εσωτερική επιφάνεια του σκάφους βάφεται με ειδικό πολυεστερικό χρώμα top-coat και η διαδικασία κατασκευής της γάστρας του σκάφους ολοκληρώνεται.

Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, συμπεραίνεται ότι οι δύο πλαϊνές ζώνες έχουν την ίδια αλληλουχία στρώσεων (lay – up). Η επικάλυψη των στρώσεων στις πλαϊνές ζώνες γίνεται εναλλάξ μεταξύ των συμμετρικών πλευρών, καθώς τοποθετείται μία στρώση στην μία πλευρά και η επόμενη στην συμμετρική της. Συνεπώς, κατά την επικάλυψη των πλαϊνών ζωνών, γίνεται επικάλυψη (overlap) στην κεντρική ζώνη, με συνέπεια η κεντρική ζώνη να είναι ενισχυμένη με περισσότερες στρώσεις από τις πλαϊνές λόγω του overlap.

Η αλληλουχία στρώσεων για την κεντρική ζώνη φαίνεται στον Πίνακα 2.3 :

Πίνακας 2.3 : Αλληλουχία στρώσεων κεντρικής ζώνης.

A/A	Είδος υαλοϋφάσματος	GC (Glass Content)	Πάχος στρώσης [mm]
1	300_CSM	0.3	0.771
2	300_CSM	0.3	0.771
3	300_CSM	0.3	0.771
4	300_CSM	0.3	0.771
5	450_CSM	0.33	1.03
6	450_CSM	0.33	1.03
7	80.30_AG ¹	0.438	1.747
8	80.30_AG	0.438	1.747
9	450_CSM	0.33	1.03
10	450_CSM	0.33	1.03
11	600_CSM	0.33	1.373
12	600_CSM	0.33	1.373
13	80.30_AG	0.438	1.747
14	80.30_AG	0.438	1.747
15	80.30_AG	0.438	1.747
16	80.30_AG	0.438	1.747
Τιμές συνολικού lay – up		0.384	20.429

¹ 80.30_AG: Συνδυασμένο υαλοϋφασμα 800_WR και 300_CSM (Woven Roving και Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 1110 gr/m². Τοποθετείται με το 800_WR έχει φορά προς το καλούπι και το 300_CSM με φορά προς το εσωτερικό του σκάφους.

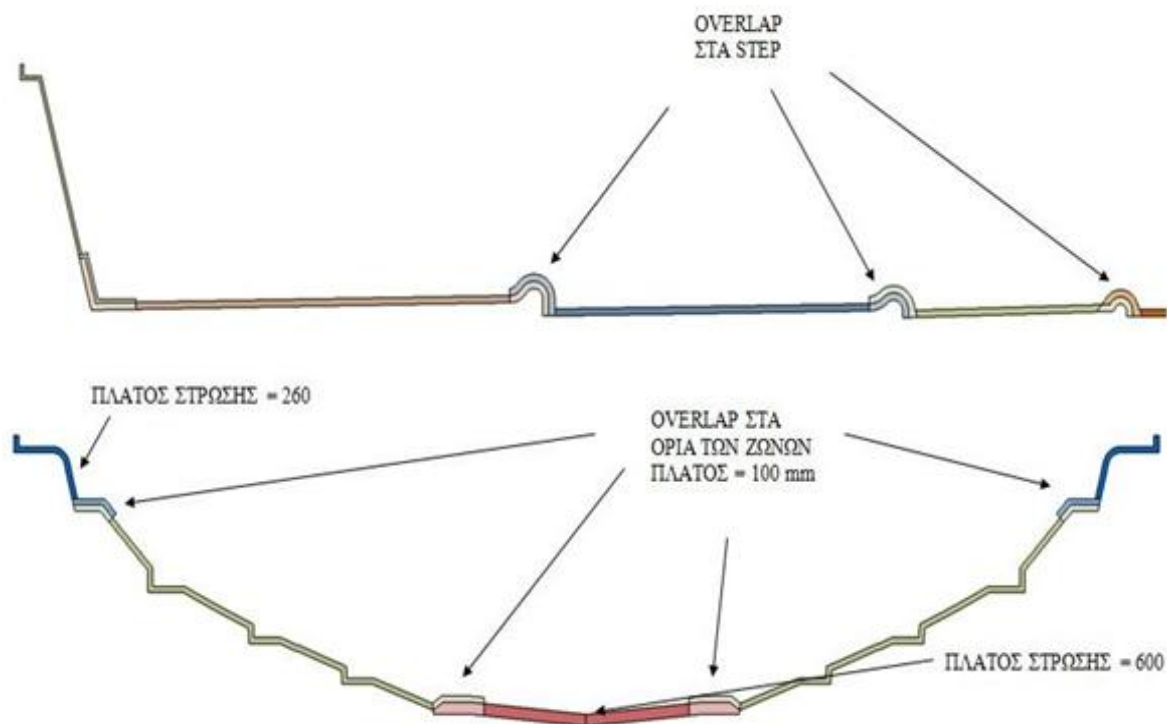
Στον Πίνακα 2.3, η στρώση υπ' αριθμόν 1 τοποθετείται στην πλευρά που εφαρμόζεται το gel coat, ενώ η τελευταία στρώση υπ' αριθμόν 16, τοποθετείται στην εσωτερική επιφάνεια της γάστρας του σκάφους.

Αντίστοιχα η αλληλουχία στρώσεων των δύο πλάγιων ζωνών του σκάφους φαίνεται στον Πίνακα 2.4 :

Πίνακας 2.4 : Αλληλουχία στρώσεων πλευρικών ζωνών.

A/A	Είδος υαλοϋφάσματος	GC (Glass Content)	Πάχος στρώσης [mm]
1	300_CSM	0.3	0.771
2	300_CSM	0.3	0.771
3	450_CSM	0.33	1.03
4	80.30_AG	0.438	1.747
5	450_CSM	0.33	1.03
6	600_CSM	0.33	1.373
7	80.30_AG	0.438	1.747
8	80.30_AG	0.438	1.747
Τιμές συνολικού lay – up		0.384	10.215

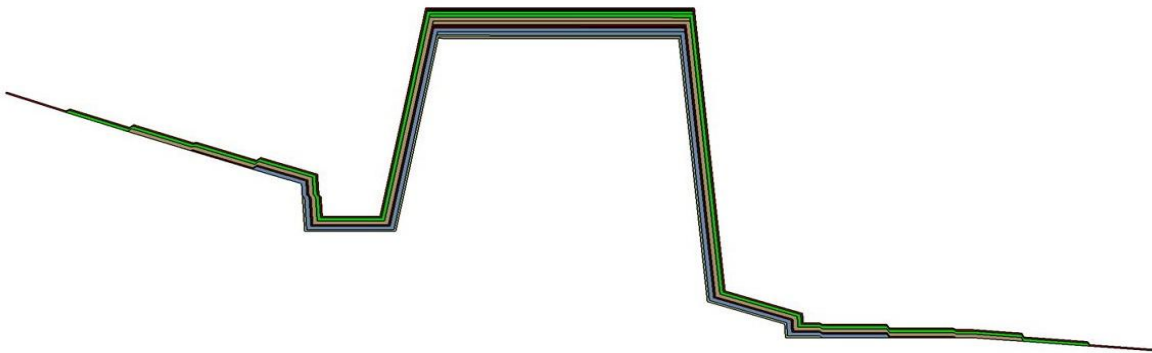
Με τον τρόπο αυτό η κεντρική ζώνη της γάστρας έχει το διπλάσιο lay – up στρώσεων από αυτό της πλαϊνής ζώνης. Αυτό συμβαίνει διότι είναι επιθυμητό να διασφαλιστεί μεγαλύτερη αντοχή στο τμήμα του σκάφους που βρίσκεται κοντά στην τρόπιδα. Τα σημεία στα οποία γίνεται επικάλυψη απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9.



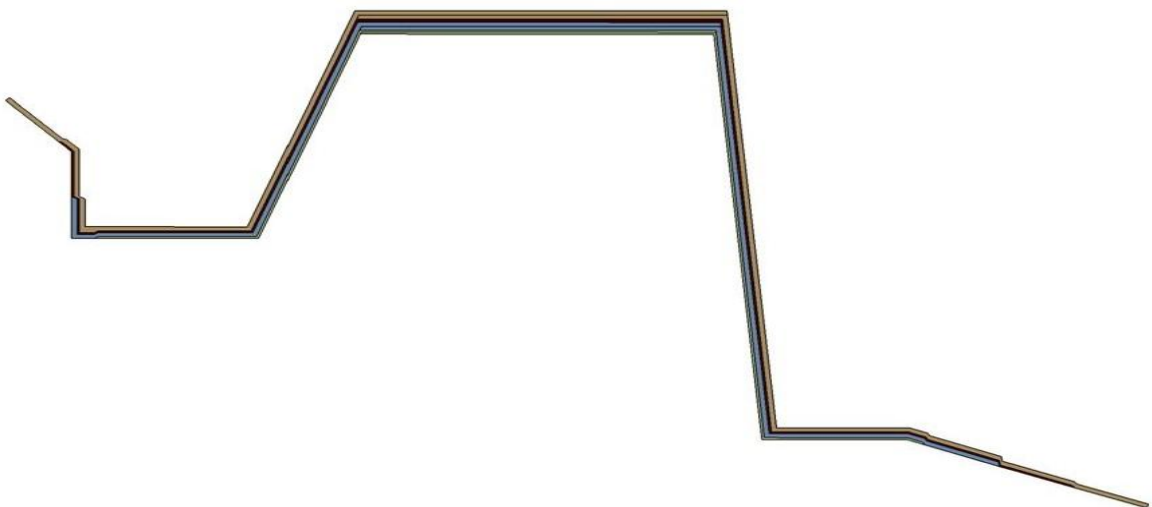
Σχήμα 2.9 : Περιοχές μεταξύ των ζωνών στις οποίες γίνεται επικάλυψη.

2.4.2 Κατασκευή διαμήκων ενισχυτικών

Για τη δημιουργία της μορφής των διαμήκων ενισχυτικών (stiffeners) χρησιμοποιούνται πατρόν τα οποία τοποθετούνται σε μια προκατασκευασμένη φόρμα από 300_CSM. Για την τοποθέτησή τους στη γάστρα χρησιμοποιούνται «οδηγοί – φρακτές» οι οποίες χρησιμεύουν ως «οδηγοί» για τη σωστή τοποθέτηση των ενισχυτικών. Σε άλλα σκάφη όπου ο καθρέφτης κατασκευάζεται από PVC με τη μέθοδο της έγχυσης ρητίνης εν κενώ (infusion), τα ενισχυτικά τοποθετούνται εφόσον έχει τοποθετηθεί ο καθρέφτης. Στην περίπτωση αυτή ο καθρέφτης «φιξάρεται» περιμετρικά με ζώνη από υαλοϋφάσματα όπως περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. Εάν ο καθρέφτης κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας ξύλο κόντρα-πλακέ τότε αρχικά τοποθετούνται τα ενισχυτικά και στη συνέχεια ο καθρέφτης, του οποίου η επιφάνεια καλύπτεται εξ ολοκλήρου με στρώσεις γυαλιών όπως γίνεται και στις φρακτές. Περιμετρικά γίνεται και εκ νέου επικάλυψη με την επιφάνεια της γάστρας. Τα Σχήματα 2.10 και 2.11 απεικονίζουν την αλληλουχία στρώσεων του εσωτερικού και εξωτερικού ενισχυτικού αντίστοιχα.

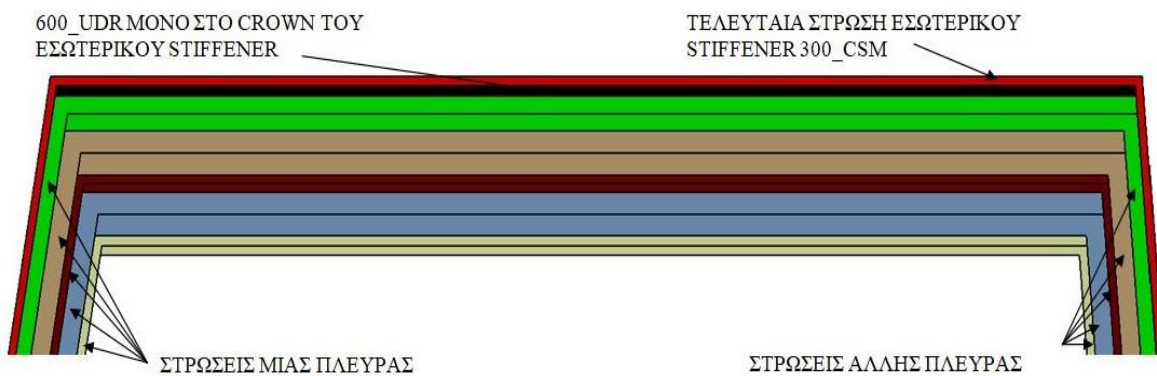


Σχήμα 2.10 : Αλληλουχία στρώσεων στο εσωτερικό ενισχυτικό.

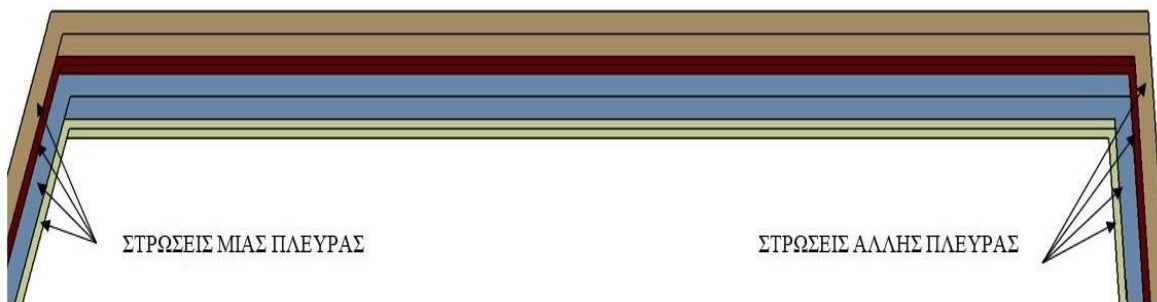


Σχήμα 2.11 : Αλληλουχία στρώσεων στο εξωτερικό ενισχυτικό.

Το lay-up των ενισχυτικών γίνεται με εναλλάξ στρώσεις εκατέρωθεν του ενισχυτικού για κάθε υαλοϋφασμα που τοποθετείται, με επικάλυψη (overlap) στο πέλμα (crown) του διαμήκους ενισχυτικού. Έτσι για παράδειγμα στην πρώτη στρώση ενός διαμήκους ενισχυτικού τοποθετείται από τη μία πλευρά το 300_CSM, το οποίο φθάνει μέχρι το πέλμα του ενισχυτικού και στη συνέχεια εφαρμόζεται η δεύτερη στρώση από την άλλη πλευρά η οποία θα επικαλύπτει την πρώτη στρώση πλήρως στο πέλμα. Εξάιρεση αποτελεί η τελευταία στρώση του εσωτερικού ενισχυτικού η οποία καλύπτει όλη την επιφάνεια του ενισχυτικού. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η επικάλυψη στο πέλμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.12 για το εσωτερικό ενισχυτικό και το Σχήμα 2.13 απεικονίζει την επικάλυψη στο πέλμα του εξωτερικού ενισχυτικού.



Σχήμα 2.12 : Επικάλυψη στο πέλμα του εσωτερικού ενισχυτικού.



Σχήμα 2.13 : Επικάλυψη στο πέλμα του εξωτερικού ενισχυτικού.

Κατά τη τοποθέτηση των ενισχυτικών κάθε υαλοϋφασμα που τοποθετείται στο ενισχυτικό έχει επικάλυψη με το προηγούμενο στη φλάντζα του ενισχυτικού. Το πλάτος της φλάντζας του ενισχυτικού κατά την πρώτη στρώση προτείνεται να έχει πλάτος 50 mm ενώ για κάθε επόμενη στρώση να γίνεται επικάλυψη μήκους 25 mm.

Η αλληλουχία στρώσεων του εσωτερικού και του εξωτερικού ενισχυτικού δεν είναι τα ίδια. Για το εσωτερικό και εξωτερικό ενισχυτικό, η περιγραφή της αλληλουχία στρώσεων που χρησιμοποιείται γίνεται στους Πίνακες 2.5 και 2.6 αντίστοιχα.

Πίνακας 2.5 : Αλληλουχία στρώσεων του εσωτερικού ενισχυτικού.

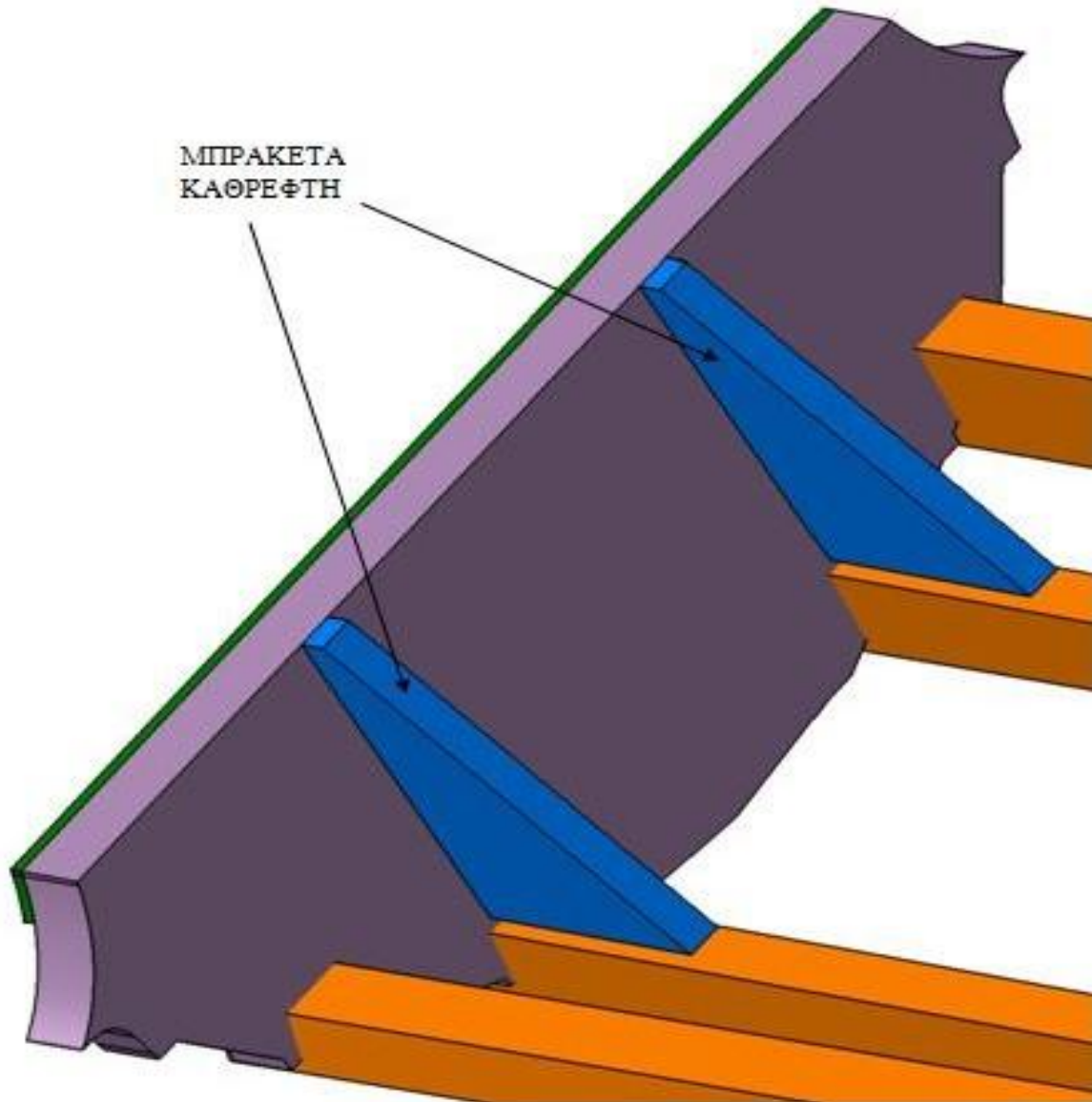
A/A	Στρώσεις	Glass Content	Πάχος στρώσης [mm]	Παρατηρήσεις
1	300_CSM	0.3	0.771	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού.
2	300_CSM	0.3	0.771	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού.
3	80.30_AG	0.438	1.747	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
4	80.30_AG	0.438	1.747	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
5	300_CSM	0.33	0.686	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού.
6	300_CSM	0.33	0.686	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού.
7	80.30_AG	0.438	1.747	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
8	80.30_AG	0.438	1.747	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
10	600_CSM	0.33	1.373	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού.
11	600_CSM	0.33	1.373	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού.
12	600_UDR	0.5	0.795	Τοποθετείται μόνο στο πέλμα του ενισχυτικού.
13	300_CSM	0.33	0.686	Τοποθετείται σε όλη την επιφάνεια του ενισχυτικού.
Τιμές συνολικού πολυστρωτου	0.383	14.129	Πάχος στο πέλμα (crown) του ενισχυτικού (stiffener).	
		7.01	Πάχος στον κορμό (web) του ενισχυτικού (stiffener).	

Πίνακας 2.6 : Αλληλουχία στρώσεων του εξωτερικού ενισχυτικού (stiffener).

A/A	Στρώσεις	Glass Content	Πάχος στρώσης [mm]	Παρατηρήσεις
1	300_CSM	0.3	0.771	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού.
2	300_CSM	0.3	0.771	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού.
3	80.30_AG	0.438	1.747	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
4	80.30_AG	0.438	1.747	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
5	300_CSM	0.33	0.686	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού.
6	300_CSM	0.33	0.686	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού.
7	80.30_AG	0.438	1.747	Στην μία πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
8	80.30_AG	0.438	1.747	Στην άλλη πλευρά του ενισχυτικού, όπου τοποθετείται με το 800_WR προς το καλούπι και το 300_CSM προς τα πάνω.
Τιμές συνολικού πολυστρωτου	0.404	9.902	Πάχος στο πέλμα (crown) του ενισχυτικού (stiffener).	
			Πάχος στον κορμό (web) του ενισχυτικού (stiffener).	
			4.951	

Στους Πίνακες 2.5 και 2.6, η στρώση υπ' αριθμόν 1 τοποθετείται στην εσωτερική επιφάνεια του ενισχυτικού, δηλαδή είναι η πρώτη στρώση που τοποθετείται στο καλούπι, ενώ η τελευταία στρώση τοποθετείται στην εξωτερική επιφάνεια του ενισχυτικού.

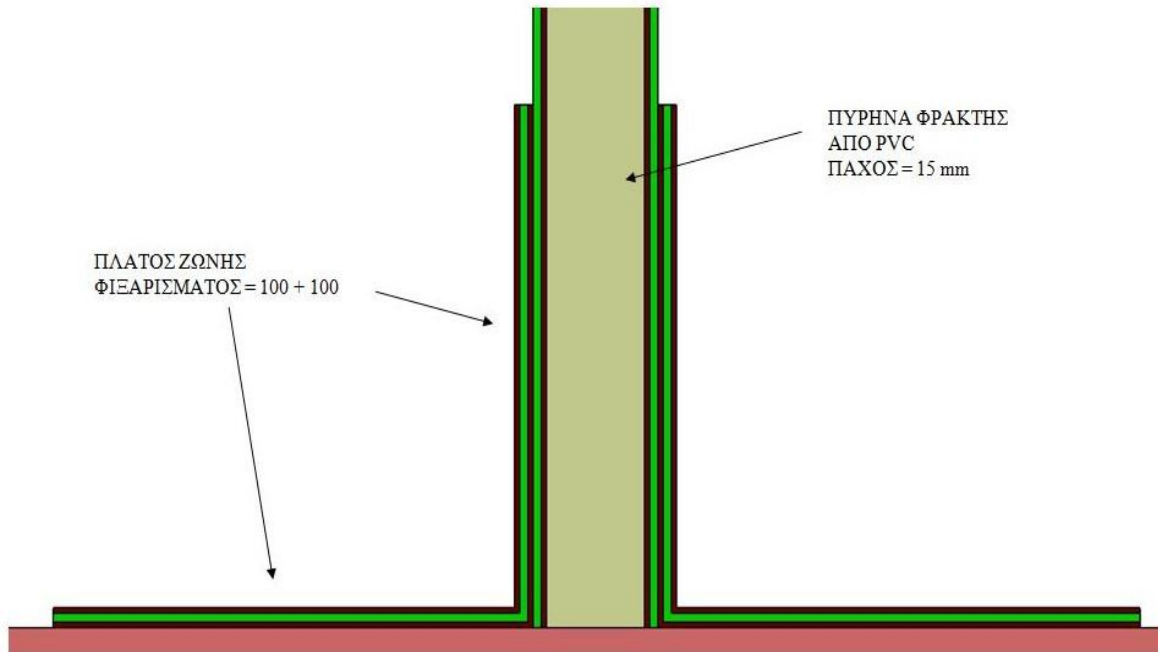
Η αλληλουχία στρώσεων των μπρακέτων είναι ίδια με εκείνη των εσωτερικών ενισχυτικών και γίνεται με εναλλάξ στρώσεις εκατέρωθεν του μπρακέτου, με overlap στο πέλμα του μπρακέτου, σύμφωνα με την ίδια λογική που εφαρμόζεται στο εσωτερικό ενισχυτικό. Στη φλάντζα του μπρακέτου, η οποία βρίσκεται εν μέρει στον καθρέφτη και εν μέρει στη γάστρα, γίνεται επικάλυψη (overlap) μεταξύ των στρώσεων, όπως και στο εσωτερικό ενισχυτικό (stiffener), δηλαδή το πλάτος της φλάντζας για την πρώτη στρώση είναι 50 mm και για κάθε επόμενη συν 25 mm. Τα μπρακέτα θα πρέπει να τοποθετηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε ο κύριος όγκος τους να μη συμπίπτει με τις βίδες στήριξης των κινητήρων στον καθρέφτη. Τα δύο μπρακέτα του καθρέφτη τοποθετούνται στην προωαία επιφάνεια του καθρέφτη και στηρίζονται στα πέλματα των εσωτερικών ενισχυτικών. Τα μπρακέτα του καθρέφτη απεικονίζονται στο Σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14 : Μπρακέτα του καθρέφτη.

2.4.3. Κατασκευή εγκάρσιων φρακτών

Οι φρακτές που τοποθετούνται στη γάστρα κατασκευάζονται σε μορφή sandwich με πυρήνα από αφρό PVC πάχους 15 mm. Σε κάθε πλευρά των φρακτών τοποθετούνται δύο στρώσεις υαλοϋφασμάτων, ένα 450_CSM και ένα 80.30_AG, με την επιφάνεια 800_WR με φορά προς τη φρακτή και την επιφάνεια 300_CSM με φορά προς τα έξω. Η τελική μορφή μιας φρακτής σε τομή φαίνεται στο Σχήμα 2.15. Μετά τη διαμόρφωσή τους στην τελική τους μορφή τοποθετούνται στη γάστρα και για την σταθεροποίησή τους «φιζάρονται» εκατέρωθεν με 3 στρώσεις υαλοϋφασμάτων, 450_CSM, 80.30_AG και 450_CSM. Το «φιζάρισμα» των φρακτών γίνεται τόσο με τη γάστρα όσο και με το κατάστρωμα όπου αυτό είναι δυνατόν. Κάθε υαλοϋφασμα επικαλύπτει την φρακτή και τη γάστρα (ή το κατάστρωμα) κατά 100 mm σύμφωνα με το Σχήμα 2.15.



Σχήμα 2.15 : Πλαϊνή όψη (προφίλ) μίας εγκάρσιας φρακτής του σκάφους.

Στον Πίνακα 2.7 που ακολουθεί περιγράφεται η αλληλουχία στρώσεων των εγκάρσιων φρακτών.

Πίνακας 2.7 : Αλληλουχία στρώσεων των εγκάρσιων φρακτών.

A/A	Σειρά τοποθέτησης	Στρώσεις	Glass Content	Πάχος στρώσης [mm]
1	Εξωτερική επιφάνεια φρακτής	80.30_AG ¹	0.438	1.747
2		450_CSM	0.33	1.03
3	Μέση φρακτής	PVC	–	15
4		450_CSM	0.33	1.03
5	Εξωτερική επιφάνεια φρακτής	80.30_AG	0.438	1.747
Τιμές συνολικού sandwich			0.4	20.552

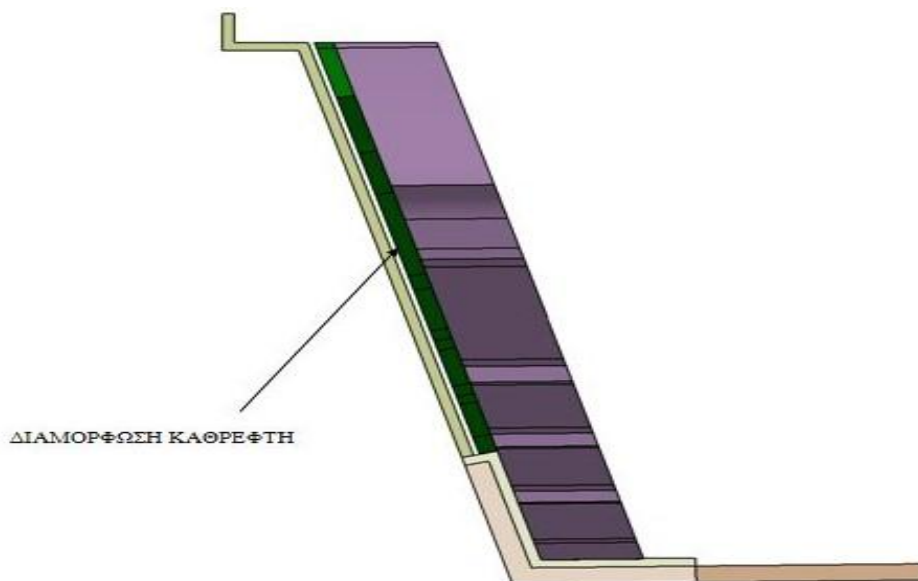
¹ 80.30_AG : Συνδυασμένο υαλοϋφασμα 800_WR και 300_CSM (Woven Roving και Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 1110 gr/m². Τοποθετείται με το 800_WR προς την φρακτή και το 300_CSM προς τα έξω.

2.4.4 Κατασκευή καθρέφτη σκάφους

Η πρυμναία πλευρά της γάστρας στην οποία τοποθετείται ο καθρέφτης έχει την ίδια αλληλουχία στρώσεων με εκείνη της γάστρας στην πλαϊνή ζώνη. Στο όριο μεταξύ της γάστρας και της επικλινούς επιφάνειας όπου τοποθετείται ο καθρέφτης, υπάρχει ζώνη επικάλυψης (overlap) η οποία αποτελείται από το οριζόντιο και το κάθετο τμήμα, καθένα από τα οποία έχει πλάτος 150 mm, όπως απεικονίζεται το Σχήμα 2.16. Λόγω της διαμόρφωσης που σχηματίζεται στο όριο μεταξύ της γάστρας και της επιφάνειας όπου τοποθετείται ο καθρέφτης, θα πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε κατά τη τοποθέτηση του καθρέφτη, η επιφάνειά του να είναι παράλληλη με την επικλινή επιφάνεια της γάστρας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί διαμορφώνοντας κατάλληλα τον καθρέφτη, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.17.



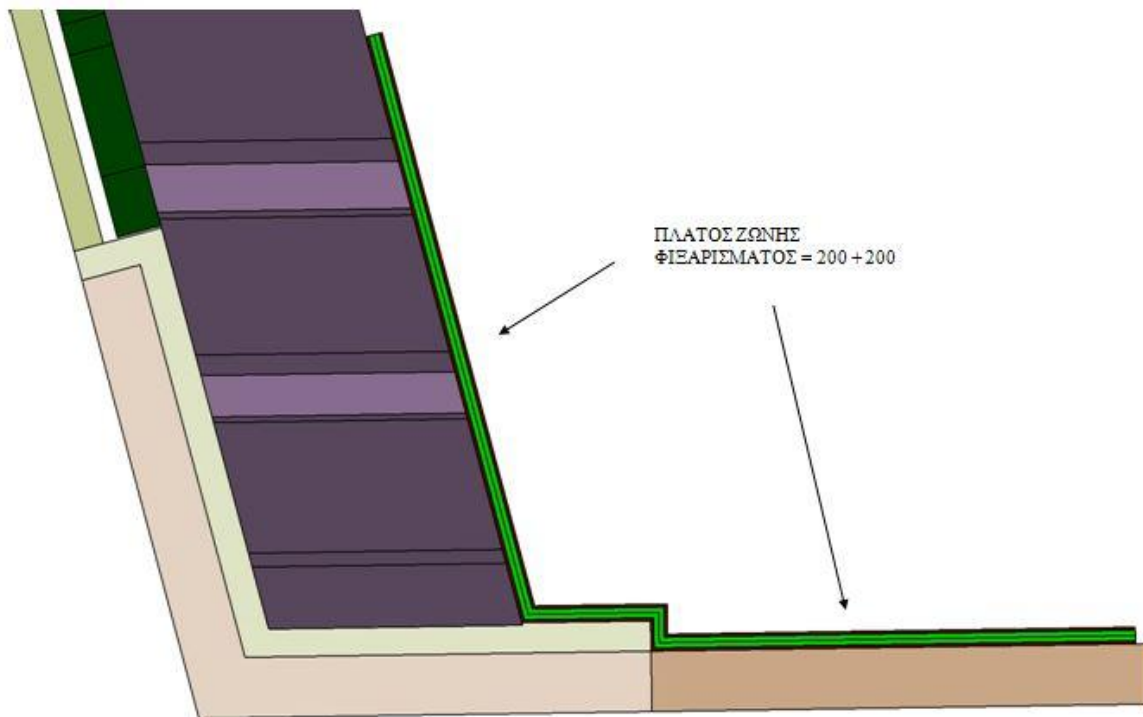
Σχήμα 2.16 : Σημεία επικάλυψης στον καθρέφτη.



Σχήμα 2.17 : Διαμόρφωση καθρέφτη.

Πριν τη τοποθέτηση του καθρέφτη, τοποθετείται εποξική κόλλα σε όλη την κάθετη επιφάνεια της γάστρας και την επιφάνεια του καθρέφτη που θα κολλήσει στη γάστρα και όταν τοποθετηθεί ο καθρέφτης πρέπει να του ασκηθεί πίεση ώστε να κολλήσει σωστά με τη γάστρα. Μετά τη τοποθέτηση της εποξικής κόλλας και το σφίξιμο του καθρέφτη στη γάστρα πρέπει να περάσει κατάλληλος χρόνος για την ολοκλήρωση της διαδικασίας και τη στερεοποίηση της κόλλας, ανάλογα με την εποξική κόλλα που χρησιμοποιείται και τις οδηγίες που έχουν δοθεί από τον κατασκευαστή της κόλλας.

Μετά τη στερεοποίηση της κόλλας χρησιμοποιείται lay-up υαλοϋφασμάτων περιμετρικά του ορίου του καθρέφτη, στην εξωτερική του επιφάνεια, για το «φιξάρισμα» του στη γάστρα. Η ζώνη αυτή προτείνεται να έχει πλάτος συνολικό 400 mm, με 200 mm στον καθρέφτη και 200 mm στην οριζόντια επιφάνεια της γάστρας, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.18.



Σχήμα 2.18 : «Φιξάρισμα» καθρέφτη.

Η αλληλουχία στρώσεων της ζώνης φιξαρίσματος περιγράφεται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.8 : Αλληλουχία στρώσεων «φιξαρίσματος» καθρέφτη.

A/A	Είδος υαλοϋφάσματος	Glass Content	Πάχος στρώσης [mm]
1	450_CSM	0.33	1.03
2	80.30_AG ¹	0.438	1.747
3	80.30_AG ²	0.438	1.747
4	450_CSM	0.33	1.03
Τιμές συνολικού πολύστρωτου		0.4	5.552

¹ 80.30_AG : Συνδυασμένο υαλοϋφασμα 800_WR και 300_CSM (Woven Roving και Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 1110 gr/m². Τοποθετείται με το 800_WR προς το 450_CSM και το 300_CSM προς τα έξω.

² 80.30_AG : Συνδυασμένο υαλοϋφασμα 800_WR και 300_CSM (Woven Roving και Chopped Strand Mat) με επιφανειακό βάρος 1110 gr/m². Τοποθετείται με το 800 WR προς το 300_CSM του 80.30_AG.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μοντελοποίηση σκάφους με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων

3.1 Εισαγωγή

Οι αναλυτικές μέθοδοι προσέγγισης της συμπεριφοράς μίας κατασκευής, ή τμημάτων αυτής, αποτελούν ένα εύχρηστο εργαλείο για κάθε μελετητή. Βάσει των υποθέσεων και των παραδοχών τους, το εκάστοτε πρόβλημα απλοποιείται σημαντικά και κατά συνέπεια, επιλύεται εύκολα και άμεσα. Λόγω όμως των απλοποιήσεων, οι εκτιμήσεις των διαφόρων μεγεθών είναι συχνά χονδρικές, δηλαδή υστερούν σε ακρίβεια, ενώ το πεδίο εφαρμογής των μεθόδων περιορίζεται σε απλές περιπτώσεις. Σε αυτή την περίπτωση, το γεγονός ότι οι αναλυτικές μέθοδοι δεν μπορούν να βγάλουν ακριβή αποτελέσματα είναι εύκολα αντιληπτό από τους νηογνώμονες, οι οποίοι εφαρμόζουν κανονισμούς οι οποίοι συχνά υπερδιαστασιολογούν μεγέθη της κατασκευής του σκάφους, προκειμένου να υπάρχει ασφάλεια έναντι αστοχίας του σκάφους. Επιπλέον, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες είναι δύσκολο να εφαρμοστούν οι αναλυτικές μέθοδοι και να εξάγουν αξιόπιστα αποτελέσματα. Σε αντιδιαστολή με τις αναλυτικές, οι πειραματικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα αξιόπιστες καθώς μέσω αυτών μπορεί να επιτευχθεί η ακριβής αναπαράσταση του προβλήματος. Η εκτεταμένη προετοιμασία όμως που απαιτούν, αλλά και η διάρκεια των πειραμάτων τις καθιστούν ιδιαίτερα χρονοβόρες και αντιοικονομικές. Οι αδυναμίες αυτές των παραπάνω μεθόδων μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά μέσω της μοντελοποίησης της κατασκευής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method, FEM) αποτελεί αριθμητική τεχνική προσέγγισης της απόκρισης μίας κατασκευής. Σύμφωνα με αυτήν, η κατασκευή αναπαρίσταται από ένα σύνολο επιμέρους στοιχείων (elements) που συνδέονται μεταξύ τους με εξισώσεις συνέχειας. Μέσω της επίλυσης των εξισώσεων αυτών, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις ισορροπίας κάθε στοιχείου, μπορούν να υπολογιστούν τα ζητούμενα μεγέθη σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής. Επομένως, η ανάλυση ενός προβλήματος με πεπερασμένα στοιχεία λαμβάνει υπόψη ολόκληρη την κατασκευή και όχι τμήμα αυτής, όπως συμβαίνει με τις αναλυτικές μεθόδους, γεγονός που επιτρέπει τη μελέτη πολύπλοκων κατασκευών. Επιπρόσθετα, η ακρίβεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Μ.Π.Σ.) είναι ικανοποιητική και συχνά συγκρίσιμη εκείνης των πειραματικών μεθόδων και εξαρτάται από τις διάφορες παραμέτρους που υπεισέρχονται κατά την εφαρμογή της. Οι παράμετροι αυτές καθορίζονται βάσει του επιθυμητού συνδυασμού της ακρίβειας και της ταχύτητας της ανάλυσης, με τις αντίστοιχες επιλογές να περιορίζονται από τις δυνατότητες του εκάστοτε υπολογιστή. Σε γενικές γραμμές πάντως, η Μ.Π.Σ. συνδυάζει τη μικρή διάρκεια της ανάλυσης με την υψηλή αξιοπιστία των αντίστοιχων αποτελεσμάτων και συνεπώς, αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για ένα μεγάλο αριθμό μελετών.

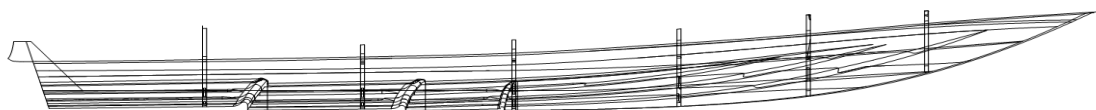
Η ανάλυση ενός προβλήματος με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιείται μέσω κατάλληλων προγραμματιστικών λογισμικών που παρέχουν ένα ευρύ φάσμα επιλογών για τις παραμέτρους αυτής. Τέτοιο προγραμματιστικό λογισμικό είναι το ANSYS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρά την πληθώρα των πακέτων αυτών και ανεξαρτήτως του τύπου του εξεταζόμενου προβλήματος, η διαδικασία επίλυσης είναι εν γένει ίδια και χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια. Αρχικά, στα πλαίσια της μοντελοποίησης (preprocessing), γίνονται όλες οι απαραίτητες ενέργειες που οδηγούν στη δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η επίλυση (solution) του προβλήματος, ενώ η ανάγνωση και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων της πραγματοποιούνται στο στάδιο της μετεπεξεργασίας (postprocessing).

3.2 Προεπεξεργασία σε σχεδιαστικό πρόγραμμα

3.2.1 Σχεδίαση σκάφους

Το στάδιο της προεπεξεργασίας αφορά στον τρόπο με τον οποίο έχει σχεδιαστεί το σκάφος, στη διόρθωση τυχόν σχεδιαστικών λεπτομερειών και στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η εισαγωγή του σχεδίου στο ANSYS. Επιπλέον, επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο διακρίτοποιείται κατάλληλα ώστε να διευκολυνθεί η δημιουργία κατά βάση ορθοκανονικού πλέγματος (mesh) των πεπερασμένων στοιχείων. Το στάδιο της προεπεξεργασίας έλαβε χώρα στο σχεδιαστικό πρόγραμμα «Rhinoceros 6», το οποίο ενδείκνυται για την τρισδιάστατη σχεδίαση.

Στόχος της προεπεξεργασίας σε σχεδιαστικό πρόγραμμα είναι η δημιουργία ενός σχεδίου που αποτελείται εξολοκλήρου από επιφάνειες, διότι όπως αναφέρεται στην συνέχεια, θεωρήθηκε ως βέλτιστη η μοντελοποίηση του σκάφους με «layered shell element», επομένως το σχέδιο τροποποιήθηκε κατάλληλα ώστε να αποτελείται από επιφάνειες στις οποίες προσδίδεται πάχος μέσω του ANSYS ανάλογα με την αλληλουχία στρώσεων της κάθε επιφάνειας όπως περιγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Για τα κατασκευαστικά στοιχεία μεγάλου πάχους, όπως οι εγκάρσιες φρακτές που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.1, σχεδιάστηκε η μέση επιφάνεια τους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.1 : Αρχικό σχέδιο, όπου οι φρακτές απεικονίζονται ως τρισδιάστατο σώμα.

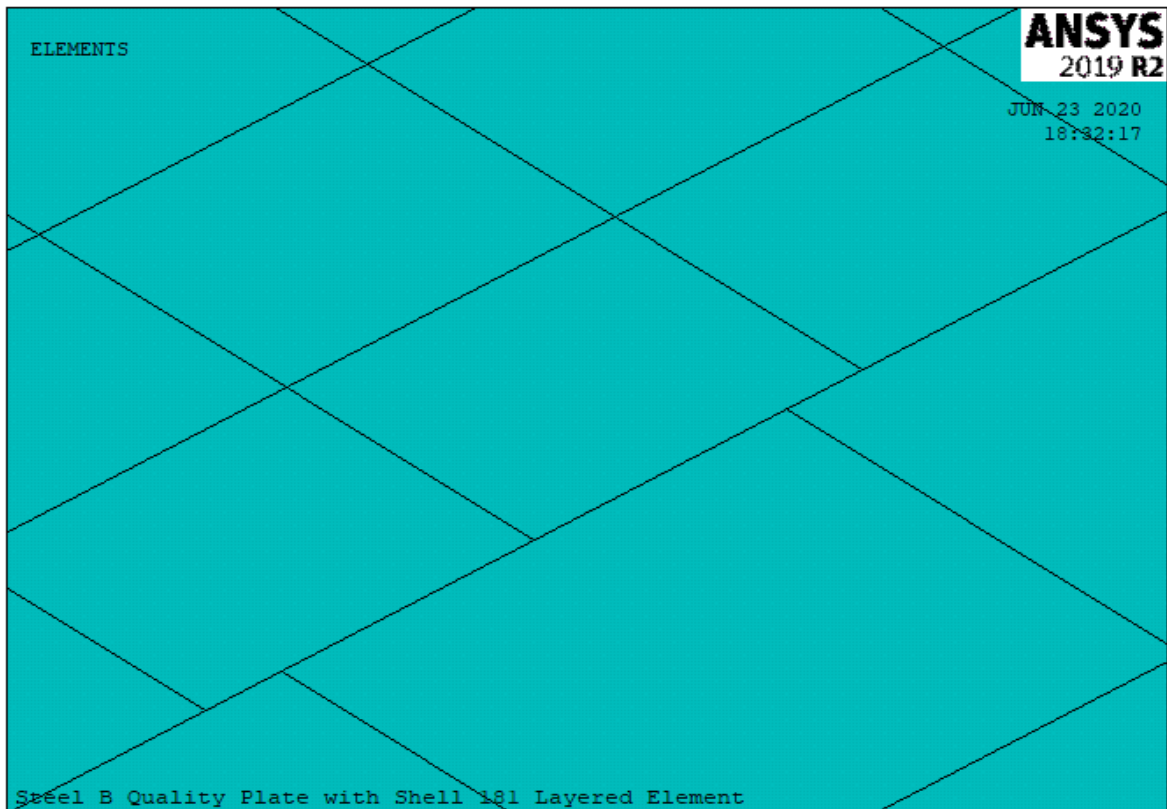


Σχήμα 3.2 : Τροποποιημένο σχέδιο, όπου οι φρακτές απεικονίζονται από τη μέση επιφάνειά τους.

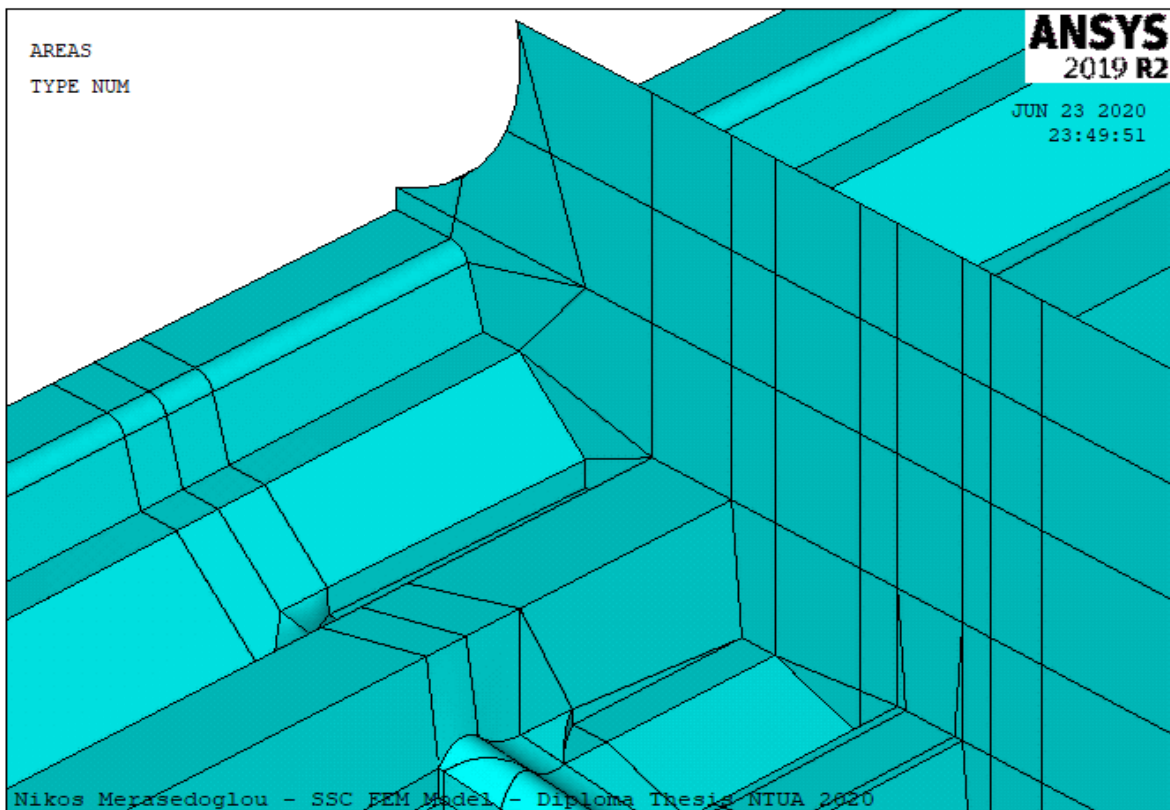
Εν συνεχεία, κρίθηκε αναγκαίος ο έλεγχος του σχεδίου και η διόρθωση τυχόν ατελειών, οι οποίες δημιουργούσαν πρόβλημα στην συνέχεια της μοντελοποίησης. Ειδικότερα, υπήρχαν μεμονωμένες επιφάνειες οι οποίες οπτικά δεν είχαν ελάττωμα, αλλά δεν αναγνωρίζονταν από το ANSYS, λόγω μη ορατών ατελειών που είχε το αρχικό σχέδιο, ενώ άλλες επιφάνειες αναγνωρίζονταν από το ANSYS αλλά δεν ήταν δυνατή η δημιουργία πλέγματος σε αυτές τις επιφάνειες. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται η δυσκολία του μελετητή να ερμηνεύσει τον λόγο για τον οποίο ορισμένες επιφάνειες αδυνατούσαν να εισαχθούν στο ANSYS, δεδομένου ότι δεν έχει σχεδιάσει ο ίδιος το αρχικό σχέδιο και δεν γνωρίζει τον τρόπο με τον οποίο έχουν δημιουργηθεί οι ελαττωματικές επιφάνειες, επομένως δεν είναι εύκολο να ερμηνευθούν τα «errors» που εμφανίζει το ANSYS για το αρχικό σχέδιο. Μοναδικός τρόπος για τη διόρθωση τέτοιων προβλημάτων ήταν η σχεδίαση εκ νέου μεμονωμένα των επιφανειών που δημιουργούσαν εμπόδια στην επίλυση του προβλήματος.

Επιπλέον, ένα είδος αυτοματοποίησης για τη μοντελοποίηση του σκάφους θεωρήθηκε ο διαχωρισμός των επιφανειών σε επιμέρους επιφάνειες μικρότερων διαστάσεων, τόσο για την αποφυγή των ελεύθερων κόμβων, όσο και για τη δημιουργία ορθοκανονικού πλέγματος. Αυτός ο τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος ελεύθερων κόμβων θεωρήθηκε ως ακριβέστερος και συντομότερος σε σχέση με άλλες λύσεις που δοκιμάστηκαν κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, θεωρήθηκε ως ο πιο «αυτοματοποιημένος», καθώς θεωρείται προτιμότερο να αφιερωθεί χρόνος από τον μελετητή στην κατάλληλη τροποποίηση του σχεδίου, από την παράληψη του βήματος αυτού της προεπεξεργασίας και την πιθανή ανακριβή λύση του προβλήματος.

Ελεύθερος θεωρείται ο κόμβος στο σύνορο δύο επιφανειών ο οποίος ανήκει σε μία επιφάνεια αλλά δεν συμπίπτει με τον αντίστοιχο κόμβο της άλλης επιφάνειας. Η ύπαρξη ελεύθερων κόμβων απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Δεδομένου ότι η συνδεσιμότητα γειτονικών element εξασφαλίζεται μέσω των κοινών τους κόμβων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι με την ύπαρξη ελεύθερων κόμβων σε δύο επιφάνειες που έχουν γεωμετρικά κοινό σύνορο δεν γίνεται σωστά η διακριτοποίηση της κατασκευής σε πεπερασμένα στοιχεία. Συνεπώς, η ύπαρξη ελεύθερων κόμβων που οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα, αποφεύγεται με τον διαχωρισμό των επιφανειών σε μικρότερες επιμέρους επιφάνειες οι οποίες έχουν κοινές διαστάσεις μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.3 : Αναπαράσταση ελεύθερων κόμβων στο ANSYS, οι οποίοι πρέπει να αποφεύγονται.

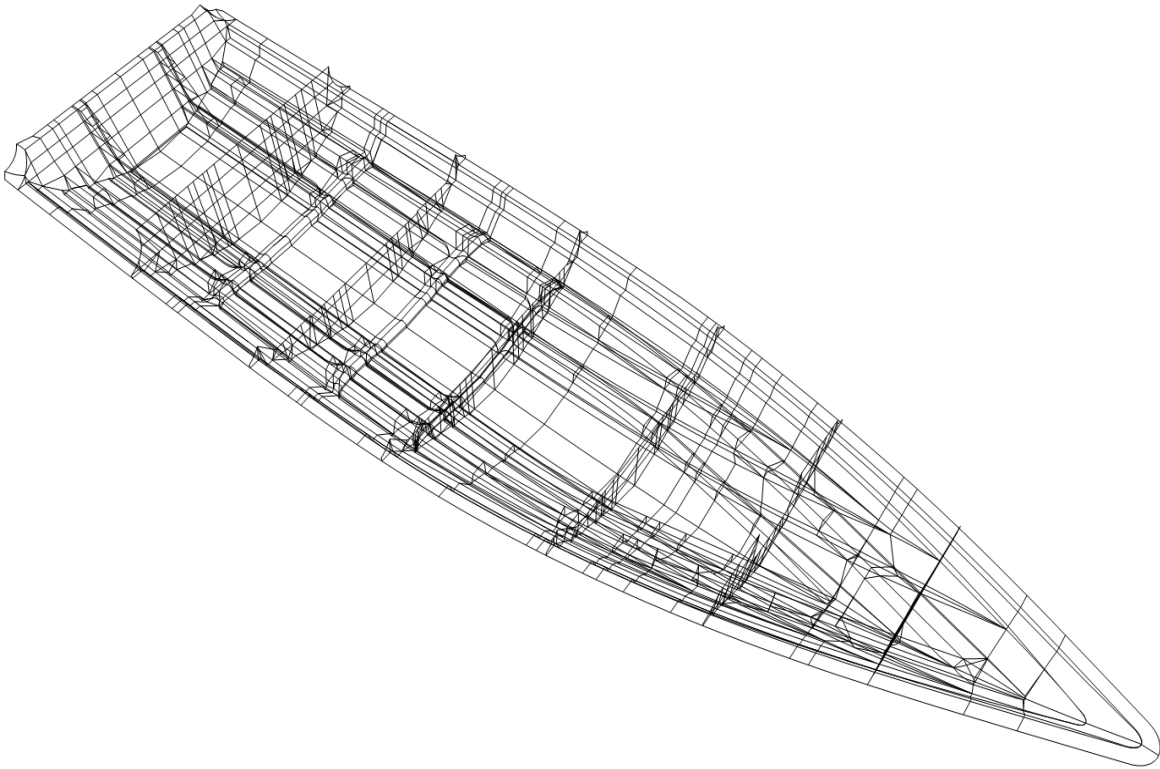


Σχήμα 3.4 : Διαχωρισμός επιφανειών σε μικρότερες για την αποφυγή ελεύθερων κόμβων.

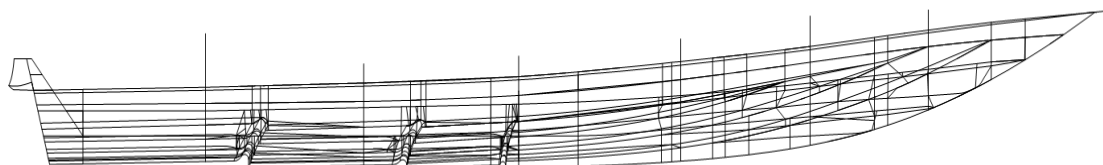
Τέλος, κρίθηκε αναγκαία η ομαδοποίηση των επιμέρους κατασκευαστικών στοιχείων, όπως της γάστρας, των ενισχυτικών, των εγκάρσιων φρακτών και των μπρακέτων του καθρέφτη ξεχωριστά, και η τμηματική εισαγωγή τους στο ANSYS, προκειμένου να είναι ευκολότερος ο ορισμός της αλληλουχίας των στρώσεων ξεχωριστά σε κάθε τμήμα του σκάφους.

3.2.2 Εισαγωγή σχεδίου στο ANSYS

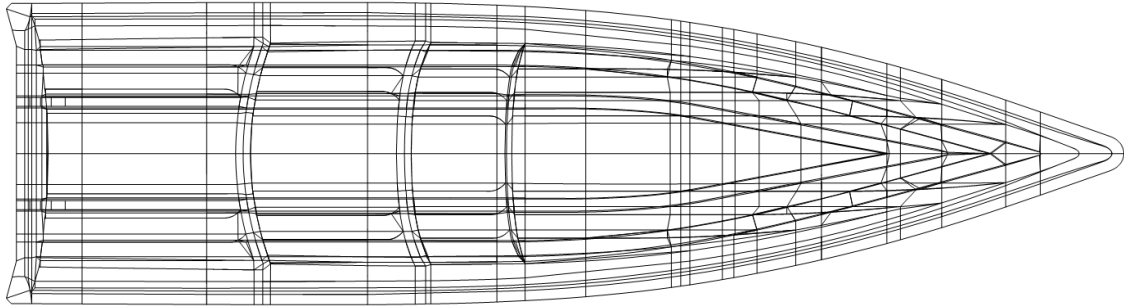
Το σχέδιο του σκάφους που εισήχθη στο ANSYS φαίνεται στα σχήματα 3.5, 3.6, 3.7 και 3.8 σε τρισδιάστατη όψη, πλάγια όψη, άνοψη και προραία όψη, αντίστοιχα :



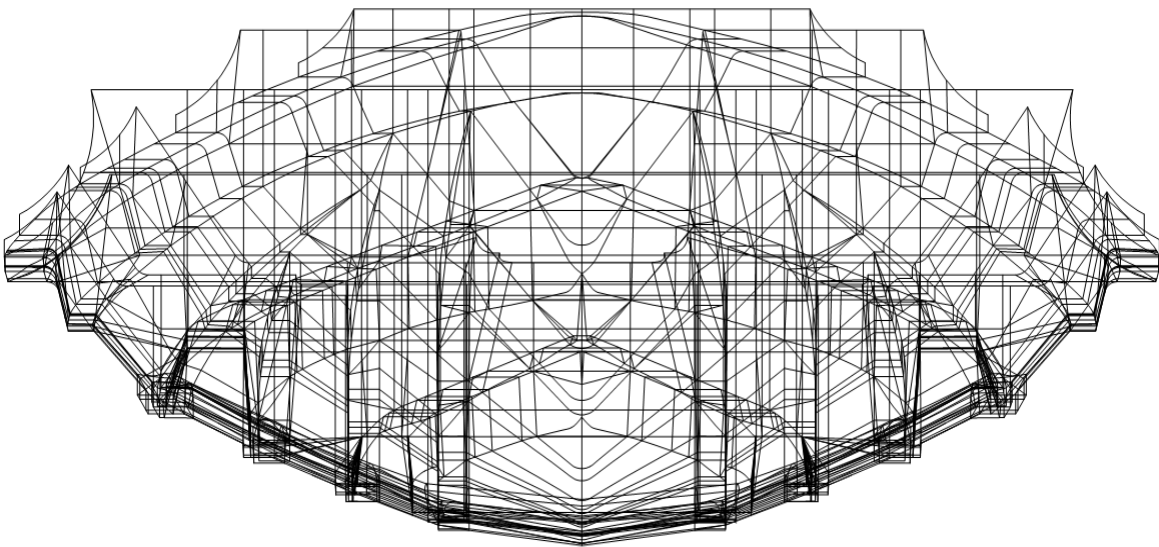
Σχήμα 3.5 : Τρισδιάστατη όψη σχεδίου σκάφους που εισήχθη στο ANSYS.



Σχήμα 3.6 : Πλάγια όψη σχεδίου σκάφους που εισήχθη στο ANSYS.



Σχήμα 3.7 : Άνοψη σχεδίου σκάφους που εισήχθη στο ANSYS.



Σχήμα 3.8 : Πρωραία όψη σχεδίου σκάφους που εισήχθη στο ANSYS.

Βασική ενέργεια του σταδίου της προεπεξεργασίας είναι ο διαχωρισμός της κατασκευής σε επιμέρους κατασκευαστικά στοιχεία, τα οποία εισάγονται ξεχωριστά στο ANSYS, για να είναι ευκολότερο να οριστεί η αλληλουχία στρώσεων σε κάθε ένα κατασκευαστικό στοιχείο ξεχωριστά, αλλά και η επικάλυψη των στρώσεων στο σύνορο των ζωνών. Η αλληλουχία στρώσεων και οι περιοχές στις οποίες έχει γίνει επικάλυψη αναφέρονται στο δεύτερο κεφάλαιο. Ειδικότερα, έγινε εισαγωγή της κεντρικής ζώνης του πυθμένα εκατέρωθεν της τρόπιδας, έπειτα εισήχθη η ενδιάμεση ζώνη του πυθμένα της γάστρας, στην συνέχεια η άνω ζώνη του πυθμένα της γάστρας, η περιοχή επικάλυψης (overlap) μεταξύ της κεντρικής και ενδιάμεσης στρώσης, η περιοχή επικάλυψης της ενδιάμεσης και άνω ζώνης, καθώς επίσης και οι περιοχές επικάλυψης των sections στα steps. Έπειτα, εισάγεται τμηματικά ο κορμός και το πέλμα των μπρακέτων του καθρέφτη, του εσωτερικού και εξωτερικού ενισχυτικού. Τέλος, εισάγονται οι εγκάρσιες φρακτές.

Κατά το πέρας της προεπεξεργασίας, έχει επιτευχθεί η εισαγωγή των επιφανειών που απαρτίζουν το σκάφος στο ANSYS, με βάση τις οποίες δημιουργείται πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων με «layered shell elements» όπως περιγράφεται στα ακόλουθα εδάφια. Οι διαστάσεις του σκάφους μετρώνται σε χιλιοστά [mm].

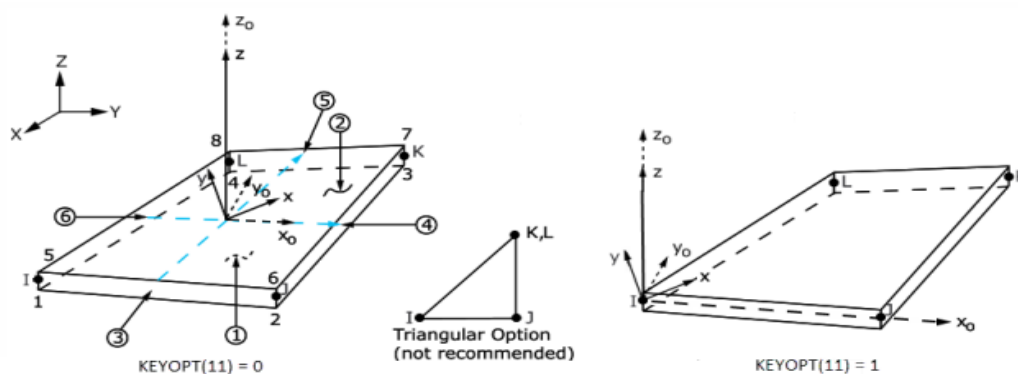
3.3 Δημιουργία μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων

Η δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής αποτελεί το πλέον σημαντικό βήμα για την ανάλυση του σκάφους, καθώς βάσει του μοντέλου αυτού επιλύεται το υπό μελέτη πρόβλημα. Η σημασία του έγκειται στο ότι η ορθότητα και η ακρίβεια της αναπαράστασης της κατασκευής καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων της επίλυσης. Επομένως, το στάδιο που αφορά στην κατασκευή του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων είναι καθοριστικό για την ανάλυση. Στα πλαίσια αυτού, επιλέγεται ο τύπος του στοιχείου που θα χρησιμοποιηθεί, εισάγονται οι μηχανικές ιδιότητες κάθε υλικού και οι στρώσεις της κατασκευής, εισάγεται το γεωμετρικό μοντέλο με βάση το οποίο δημιουργείται ο κάρναβος πεπερασμένων στοιχείων, ορίζονται οι συνοριακές συνθήκες και οι φορτίσεις του σκάφους και τέλος ορίζεται η μέθοδος με την οποία επιλύεται το πρόβλημα (γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση).

3.3.1 Επιλογή τύπου στοιχείου

Το στοιχείο «SHELL181» είναι κατάλληλο για ανάλυση δομών κελύφους λεπτού έως μέτριου πάχους. Το στοιχείο (element) αποτελείται από τέσσερις κόμβους με έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο : μετατοπίσεις στις κατευθύνσεις x, y και z και περιστροφές γύρω από τους άξονες x, y και z. Η ύπαρξη τριγωνικών στοιχείων καλό είναι να αποφεύγεται, και οπουδήποτε είναι αναπόφευκτη η δημιουργία τριγωνικού στοιχείου να χρησιμοποιείται μόνο ως στοιχείο πλήρωσης στην παραγωγή πλέγματος. Το στοιχείο «SHELL181» είναι κατάλληλο για μεγάλες γραμμικές περιστροφές ή και μεγάλες μετατοπίσεις μη-γραμμικής καταπόνησης. Το «SHELL181» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές σε στρώσεις για μοντελοποίηση σύνθετων κελυφών ή κατασκευής σάντουιτς. Η ακρίβεια στη μοντελοποίηση σύνθετων κελυφών διέπεται από τη θεωρία διατμητικών παραμορφώσεων πρώτης τάξης (συνήθως αναφέρεται ως θεωρία κελύφους Mindlin-Reissner). Οι εντολές του στοιχείου «SHELL181» επιτρέπουν τον ορισμό του κελύφους με στρώσεις (ANSYS – 2019).

Στο Σχήμα 3.9 αναπαρίσταται το δισδιάστατο τετρακομβικό στοιχείο «SHELL181» που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση.



x_0 = Element x axis if element orientation (**ESYS**) is not specified.

x = Element x axis if element orientation is specified.

Σχήμα 3.9 : Σχηματική αναπαράσταση του δισδιάστατου στοιχείου «SHELL 181».

Το στοιχείο «SHELL181» επιλέχτηκε διότι πληροί τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για την επίλυση του προβλήματος επίπεδης εντατικής κατάστασης. Παρόμοια χαρακτηριστικά με το «SHELL181» έχει και το στοιχείο «SHELL281». Όμως το στοιχείο «SHELL181» είναι τετρακομβικό, σε αντίθεση με το στοιχείο «SHELL281» το οποίο είναι οκτακομβικό, δηλαδή περιλαμβάνει τους κόμβους του «SHELL181» και έχει πρόσθετους κόμβους στα μέσα των πλευρών του στοιχείου. Το γεγονός ότι το «SHELL281» έχει διπλάσιους κόμβους από το «SHELL181» συνεπάγεται ότι επιβραδύνεται σημαντικά η ταχύτητα της ανάλυσης. Με γνώμονα λοιπόν τον βέλτιστο συνδυασμό ταχύτητας εκτέλεσης του μοντέλου και ακρίβειας, επιλέχτηκε το στοιχείο «SHELL181».

3.3.2 Μηχανικές ιδιότητες υλικών

Εφόσον επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος στοιχείων, η διαδικασία κατασκευής του μοντέλου του σκάφους συνεχίζεται με τον καθορισμό για κάθε χρησιμοποιούμενο υλικό των μηχανικών ιδιοτήτων του. Για το σκοπό αυτό, το ANSYS προσφέρει ορισμένα μοντέλα υλικών που καλύπτουν διάφορες απαιτήσεις, όπως τα γραμμικά ελαστικά και τα μη γραμμικά υλικά (ελαστικά, ανελαστικά, ιξωδοελαστικά). Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια σχετικά με τα πολύστρωτα υλικά, το CSM, το WR και το UDR παρουσιάζουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά και έχουν ορθοτροπικό χαρακτήρα. Επομένως, επιλέγεται το αντίστοιχο μοντέλο υλικών και μέσω αυτού, εισάγονται στην ανάλυση οι μηχανικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων υλικών.

Οι ιδιότητες που απαιτούνται για τον πλήρη καθορισμό του μοντέλου υλικών εξαρτώνται από τον τύπο του. Επομένως, δεδομένης της επιλογής του γραμμικά ελαστικού, ορθοτροπικού μοντέλου, απαιτείται ο ορισμός των μέτρων ελαστικότητας στις διευθύνσεις των γεωμετρικών αξόνων αυτής (E_x , E_y και E_z), των μέτρων διάτμησης στα επίπεδα που ορίζονται από τους παραπάνω άξονες (G_{xy} , G_{yz} και G_{xz}), των αντίστοιχων λόγων Poisson (ν_{xy} , ν_{yz} και ν_{xz}) και του ειδικού βάρους (γ). Τυπικές ιδιότητες των χρησιμοποιούμενων πολύστρωτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. (Τσούβαλης – 1998). Τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 είναι το ειδικό βάρος [γ σε g/cm^3], το μέτρο ελαστικότητας Young στη διεύθυνση των ινών [E_1 σε GPa], το μέτρο ελαστικότητας Young σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες [E_2 σε GPa], το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο του πολύστρωτου [G_{12} σε GPa] και ο λόγος Poisson στο επίπεδο του πολύστρωτου [ν_{12}].

Πίνακας 3.1 : Τυπικές ιδιότητες δυσκαμψίας πολύστρωτων από FRP.

Υλικό	γ	E_1	E_2	G_{12}	ν_{12}
	gr/cm ³	GPa			
E – glass/polyester (CSM)	1.45	8	8	2.75	0.32
E – glass/polyester (WR – balanced)	1.70	15	15	3.5	–
E – glass/polyester (UDR)	1.80	30	–	3.5	–

Για το μονοαξονικό υλικό (UDR), το μέτρο ελαστικότητας κατά το εγκάρσιο E_y λαμβάνεται ίσο με το 1/10 της τιμής του μέτρου ελαστικότητας κατά το διάμηκες E_x , συνεπώς είναι γνωστή η τιμή του.

Συνεπώς, είναι ήδη γνωστές οι μηχανικές ιδιότητες E_x , E_y , G_{xy} και ν_{xy} για τα υλικά CSM, WR και UDR. Ωστόσο, το ANSYS απαιτεί σαν είσοδο τον ορισμό συνολικά εννέα μηχανικών ιδιοτήτων (E_x , E_y , E_z , G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} , ν_{xy} , ν_{yz} και ν_{xz}) για κάθε ορθοτροπικό υλικό. Οι κατά το πάχος μηχανικές ιδιότητες των στρώσεων CSM, WR και UDR δεν υπολογίζονται, αλλά εκτιμώνται.

Επιπλέον, αναμένεται εκ των προτέρων ότι οι κατά το πάχος μηχανικές ιδιότητες δεν θα επηρεάσουν το τελικό αποτέλεσμα, διότι στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας επιλύεται πρόβλημα επίπεδης εντατικής κατάστασης, όπου η διάσταση του πάχους είναι μικρή συγκριτικά με τις διαστάσεις του μήκους και του πλάτους, συνεπώς οι κατά το πάχος αναπτυσσόμενες τάσεις θεωρούνται αμελητέες. Γι' αυτό άλλωστε έχουν επιλεγεί «shell elements» για τη μοντελοποίηση.

Σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του αφρού PVC που χρησιμοποιείται ως πυρήνας του sandwich στον καθρέφτη και στις εγκάρσιες φρακτές, δεν υπήρχε σαφής πληροφορία για τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων και έτσι αυτές εκτιμήθηκαν. Ωστόσο δεν επηρεάζουν σημαντικά το αποτέλεσμα, δεδομένου ότι το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης του αφρού στην διαμήκη, εγκάρσια και κατακόρυφη διεύθυνση είναι τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη των υπολοίπων στρώσεων που χρησιμοποιούνται. Ο αφρός PVC είναι ισοτροπικό υλικό, σε αντίθεση με το CSM, WR και UDR που είναι ορθοτροπικά υλικά. Γι' αυτό το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης του αφρού είναι ίδιο σε όλες τις διευθύνσεις. Συνεπώς, με γνωστό το μέτρο ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης, υπολογίζεται ο λόγος Poisson μέσω της εξίσωσης (3.1) που συνδέει τον λόγο Poisson, το μέτρο ελαστικότητας E και το μέτρο διάτμησης G για ισοτροπικά υλικά.

$$G = \frac{E}{2 \times (\nu + 1)} \quad (3.1)$$

Επομένως, με βάση τα παραπάνω είναι γνωστές οι εννέα ελαστικές ιδιότητες E_x , E_y , E_z , G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} , ν_{xy} , ν_{yz} και ν_{xz} . Ωστόσο, εξίσου σημαντικός είναι και ο ορισμός των ειδικών βαρών των χρησιμοποιούμενων υλικών, μέσω των οποίων εξάγεται το μητρώο μάζας (mass matrix) της κατασκευής το οποίο χρησιμοποιείται στους μετέπειτα υπολογισμούς. Σε ότι αφορά το ειδικό βάρος των χρησιμοποιούμενων υλικών CSM, WR και UDR, υπήρχε επαρκής πληροφορία όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, συνεπώς τηρήθηκαν οι αναγραφόμενες τιμές κατά τη μοντελοποίηση, ήτοι $\gamma=1.45 \text{ gr/cm}^3$ για το CSM, $\gamma=1.7 \text{ gr/cm}^3$ για το WR και $\gamma=1.8 \text{ gr/cm}^3$ για το UDR (Τσούβαλης – 1998). Σε ότι αφορά τον αφρό PVC που χρησιμοποιείται ως πυρήνας στο sandwich του καθρέφτη και των φρακτών, είθισται να χρησιμοποιείται αφρός PVC μεγαλύτερου ειδικού βάρους στον καθρέφτη και τις πρυμναίες φρακτές, τάξεως μεγέθους $\gamma=0.25 \text{ gr/cm}^3$, ενώ στις πρωραίες φρακτές χρησιμοποιείται ελαφρύτερος πυρήνας, τάξεως μεγέθους $\gamma=0.075 \text{ gr/cm}^3$. Επομένως, θεωρήθηκε προτιμότερο να ληφθεί υπόψη η τιμή $\gamma=0.13 \text{ gr/cm}^3$ για τη μοντελοποίηση του αφρού PVC, που αποτελεί ενδιάμεση τιμή των ειδικών βαρών του αφρού PVC που χρησιμοποιείται στο πρυμναίο και πρωραίο τμήμα αντίστοιχα.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί το πόσο σημαντικό είναι τα μεγέθη να ορίζονται σε μονάδες μέτρησης που είναι συμβατές μεταξύ τους, καθώς εάν δεν δοθεί η απαραίτητη προσοχή είναι πολύ εύκολο να προκύψουν λανθασμένα αποτελέσματα από την επίλυση του προβλήματος. Στον Πίνακα 3.2 αναγράφονται οι χρησιμοποιούμενες μονάδες κάθε συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το χρησιμοποιούμενο σύστημα μονάδων είναι το SI (mm), διότι η χρησιμοποιούμενη μονάδα μέτρησης του μήκους είναι τα χιλιοστά [mm] και η χρησιμοποιούμενη μονάδα μέτρησης της δύναμης είναι τα Newton [N]. Επομένως, το ειδικό βάρος εισάγεται στο πρόγραμμα ANSYS σε [tonnes/mm³], οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών εισάγονται σε [MPa]. Συνεπώς τα αποτελέσματα των πιέσεων και των τάσεων είναι σε [MPa] για να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 3.2 : Συστήματα μονάδων μέτρησης.

Μέγεθος	SI	SI (mm)	SI	US Unit (ft)	US Unit (inch)
Μήκος [L]	m	mm	m	ft	inch
Δύναμη [F]	N	N	kN	lbf	lbf
Μάζα [m]	kg	tonne (10 ³ kg)	tonne	slug	lbf s ² /in
Χρόνος [t]	sec	sec	sec	sec	sec
Τάση [σ]	Pa (N/mm ²)	MPa (N/mm ²)	kPa	lbf/ft ²	psi (lbf/in ²)
Ενέργεια [E]	J	mJ (10 ⁻³ J)	kJ	ftlbf	inlbf
Ειδικό βάρος [γ]	kg/m ³	tonne/mm ³	tonne/m ³	slug/ft ³	lbf s ² /in ⁴

Οι εννέα ιδιότητες (E_x , E_y , E_z , G_{xy} , G_{yz} , G_{xz} , V_{xy} , V_{yz} και V_{xz}) και το ειδικό βάρος (γ) που εισάγονται στο πρόγραμμα ANSYS για κάθε ένα από τα τέσσερα χρησιμοποιούμενα υλικά απεικονίζονται στον Πίνακα 3.3. Το CSM και WR είναι ορθοτροπικά υλικά τα οποία έχουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες κατά το διάμηκες και το εγκάρσιο, ενώ το UDR είναι ορθοτροπικό υλικό με μεγαλύτερη αντοχή κατά το διάμηκες σε σχέση με το εγκάρσιο. Ο αφρός PVC ορίζεται ως ισοτροπικό υλικό, συνεπώς μηχανικές ιδιότητες όπως το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης και ο λόγος Poisson που εισάγονται στο ANSYS είναι ίδιες για τις τρεις διευθύνσεις.

Πίνακας 3.3 : Μηχανικές ιδιότητες υλικών που εισάγονται στο ANSYS κατά τη μοντελοποίηση.

	Chopped Strand Mat	Woven Roving	Uni – Directional	Αφρός PVC
	(CSM)	(WR)	(UDR)	
γ [tonnes/mm ³]	1.45×10 ⁻⁹	1.7×10 ⁻⁹	1.8×10 ⁻⁹	1.3×10 ⁻¹⁰
E_x [MPa]	8000	15000	30000	50
E_y [MPa]	8000	15000	3000	50
E_z [MPa]	3000	3000	3000	50
G_{xy} [MPa]	2750	3500	3500	20
G_{yz} [MPa]	1000	1000	1000	20
G_{xz} [MPa]	1000	1000	1000	20
V_{xy}	0.32	0.32	0.25	0.25
V_{yz}	0.32	0.32	0.25	0.25
V_{xz}	0.32	0.32	0.25	0.25

Οι μηχανικές ιδιότητες ορίζονται στο ANSYS μέσω της εντολής «mp» όπου στο πρώτο όρισμα επιλέγεται το είδος της μηχανικής ιδιότητας που ορίζεται, παραδείγματος χάρι ex, στο δεύτερο όρισμα ο αριθμός που χαρακτηρίζει το υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες ορίζονται, και τέλος το τρίτο όρισμα είναι η τιμή που προσδίδεται στην μηχανική ιδιότητα.

3.3.3 Κατασκευή πλέγματος

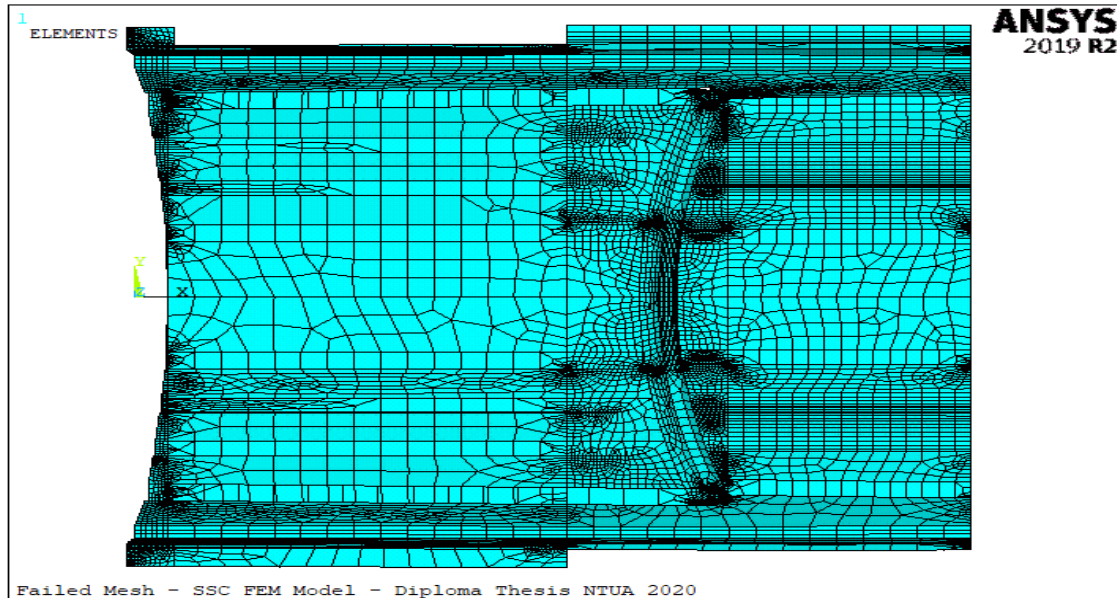
Βασική προϋπόθεση για τη μοντελοποίηση του σκάφους είναι η σωστή εισαγωγή του σχεδίου στο ANSYS, και με βάση το σχέδιο αυτό η δημιουργία του κάρναβου πεπερασμένων στοιχείων. Έπειτα, με βάση τον κάρναβο αυτό και μέσω κατάλληλων ενεργειών, κατασκευάζεται το τελικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στο στάδιο της επίλυσης. Το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να είναι αρκετά πυκνό, προκειμένου να εξαχθούν ακριβή αποτελέσματα, χωρίς να υπάρχει μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Το πλέγμα προτιμάται να αποτελείται από ορθοκανονικά στοιχεία (elements) όπως προβλέπει η θεωρία του στοιχείου που χρησιμοποιείται. Σύμφωνα με τη θεωρία του «SHELL181», προτιμητέα είναι η αποφυγή της χρήσης τριγωνικών στοιχείων, παρά μόνο στις περιοχές όπου δεν μπορεί να αποφευχθεί η χρήση τους, όπως στις περιοχές της πλώρης όπου «στενεύει» η γεωμετρία και οι επιφάνειες παύουν να είναι ορθογώνιες.

Σημαντική επίδραση στην ποιότητα της διακριτοποίησής (meshing) έχει το στάδιο της προεπεξεργασίας που έχει περιγραφεί στο εδάφιο 3.2. Εάν παραλειπόταν η διαδικασία της προεπεξεργασίας σε σχεδιαστικό πρόγραμμα, τότε θα δημιουργούνταν πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10. Τα προβλήματα αυτού του πλέγματος είναι πρώτον η ύπαρξη αρκετών επιφανειών του σκάφους που δεν είχαν διακριτοποιηθεί, συνεπώς το πλέγμα θα είχε «τρύπες», δεύτερον η απουσία κοινών κόμβων σε επιφάνειες με κοινό σύνορο και τρίτον ότι το πλέγμα στα περισσότερα σημεία θα είχε ακανόνιστη μορφή. Το Σχήμα 3.11 παρουσιάζει το πλέγμα που δημιουργήθηκε έπειτα από την προεπεξεργασία, χρησιμοποιώντας τις ίδιες εντολές με το πλέγμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.10.

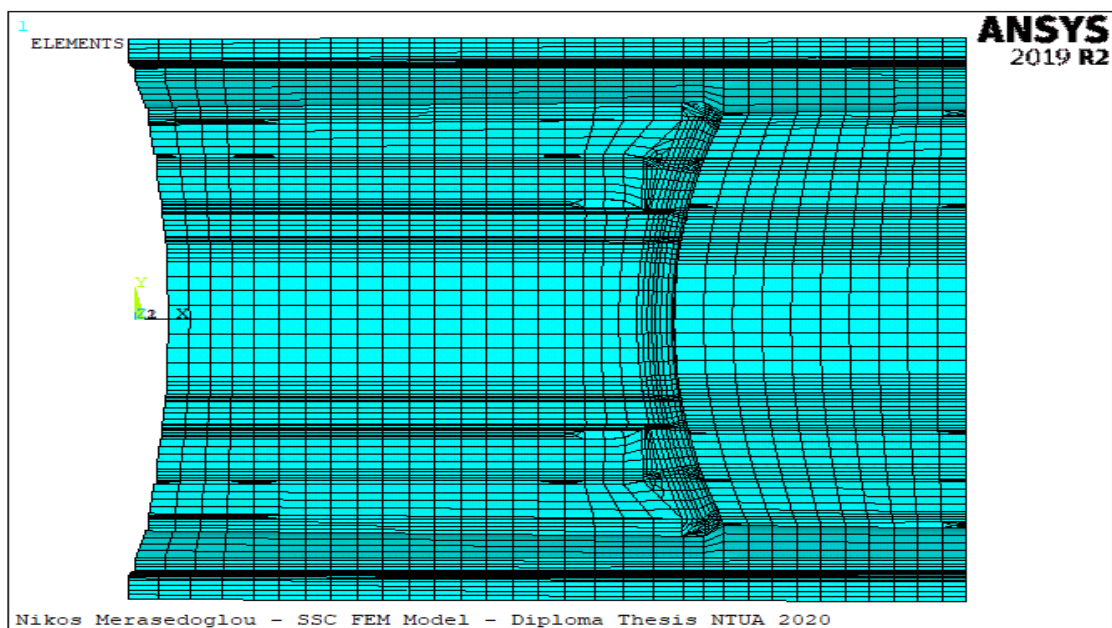
Αφού ολοκληρωθεί το στάδιο της προεπεξεργασίας, γίνεται επιβεβαίωση ότι όλες οι επιφάνειες έχουν διαβαστεί από το πρόγραμμα ANSYS, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται παρατηρώντας τον αριθμό των επιφανειών που έχουν διαβαστεί στο ANSYS και ελέγχοντας αν είναι ο ίδιος σε σχέση με το πλήθος των επιφανειών που αναγνωρίζει το σχεδιαστικό πρόγραμμα. Προτού ξεκινήσει η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες κάθε υλικού όπως αναφέρεται στο εδάφιο 3.3.2. Έπειτα, ορίζεται η κατάλληλη αλληλουχία στρώσεων με τις εντολές «sectype», «secdata» και «secoffset», ενώ ακολουθεί η εντολή «aatt» η οποία συσχετίζει επιφάνειες στις οποίες δεν έχει δημιουργηθεί πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων με χαρακτηριστικά όπως ο τύπος του στοιχείου, η αλληλουχία στρώσεων και το τοπικό σύστημα συντεταγμένων (local coordinate system) που αποδίδονται στα στοιχεία που δημιουργούνται με βάση τις επιλεγμένες επιφάνειες κατά τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων.

Η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος εκπονήθηκε ξεχωριστά για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο. Ειδικότερα, αρχικά διακριτοποιήθηκε η γάστρα του σκάφους χωρίς ενισχυτικά και φρακτές. Το πλέγμα που δημιουργήθηκε απεικονίζεται στο Σχήμα 3.12, στο οποίο φαίνεται ότι τα στοιχεία της πρύμνης και του μέσου του σκάφους είναι ορθοκανονικά, ενώ το προωαίο τμήμα αποτελείται από στοιχεία τα οποία έχουν ακανόνιστη μορφή, λόγω της αλλαγής της γεωμετρίας του σκάφους στην πλώρη. Έπειτα, τοποθετήθηκαν τα διαμήκη ενισχυτικά και τα

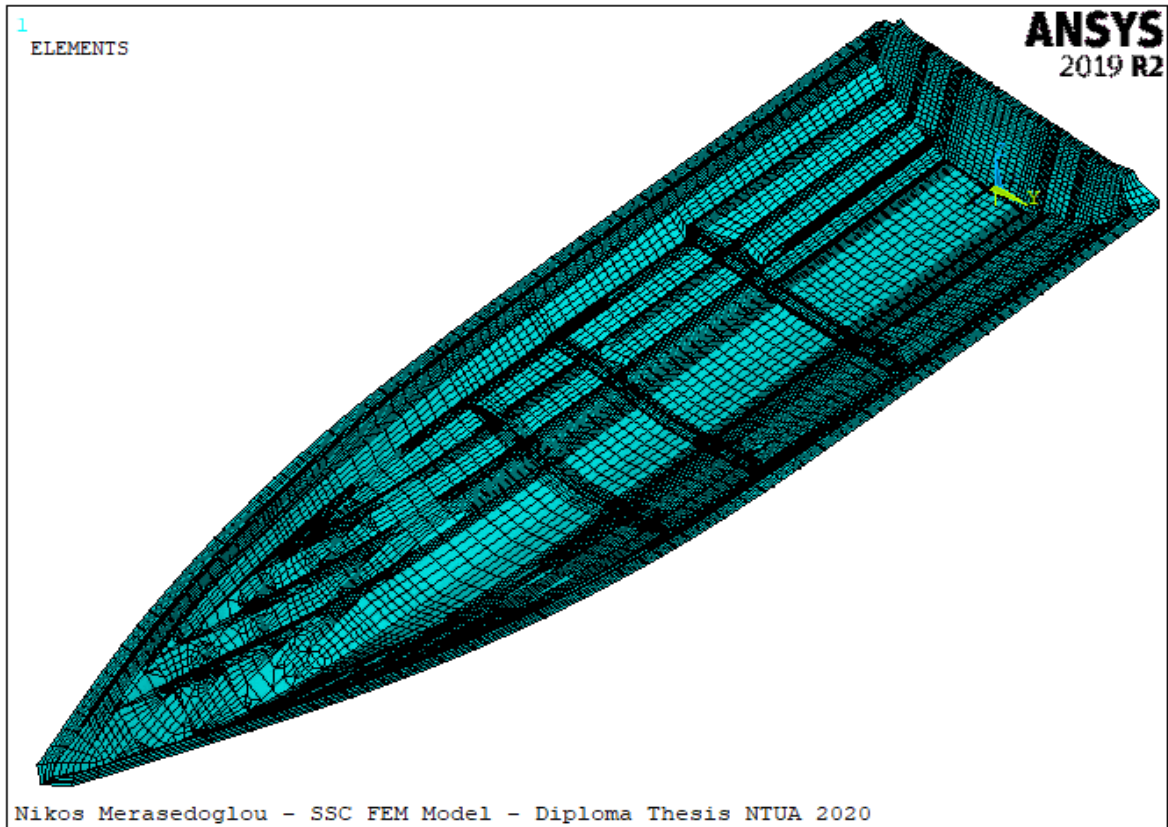
μπρακέτα του καθρέφτη και έγινε εκ νέου έλεγχος, δεδομένου ότι εκτός των άλλων αλλάζει και το πλέγμα της γάστρας το οποίο πρέπει να έχει σε όλα τα σημεία επαφής με τα ενισχυτικά και τις φρακτές κοινούς κόμβους για να εξασφαλιστεί η σύνδεση (connectivity) μεταξύ τους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.13. Τέλος, τοποθετήθηκαν οι εγκάρσιες φρακτές και έγινε έλεγχος στο πλέγμα συνολικά της κατασκευής, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.14. Επιπλέον, το Σχήμα 3.15 απεικονίζει το πλέγμα που δημιουργήθηκε μεμονωμένα στα ενισχυτικά, ενώ το Σχήμα 3.16 το πλέγμα που δημιουργήθηκε στις εγκάρσιες φρακτές.



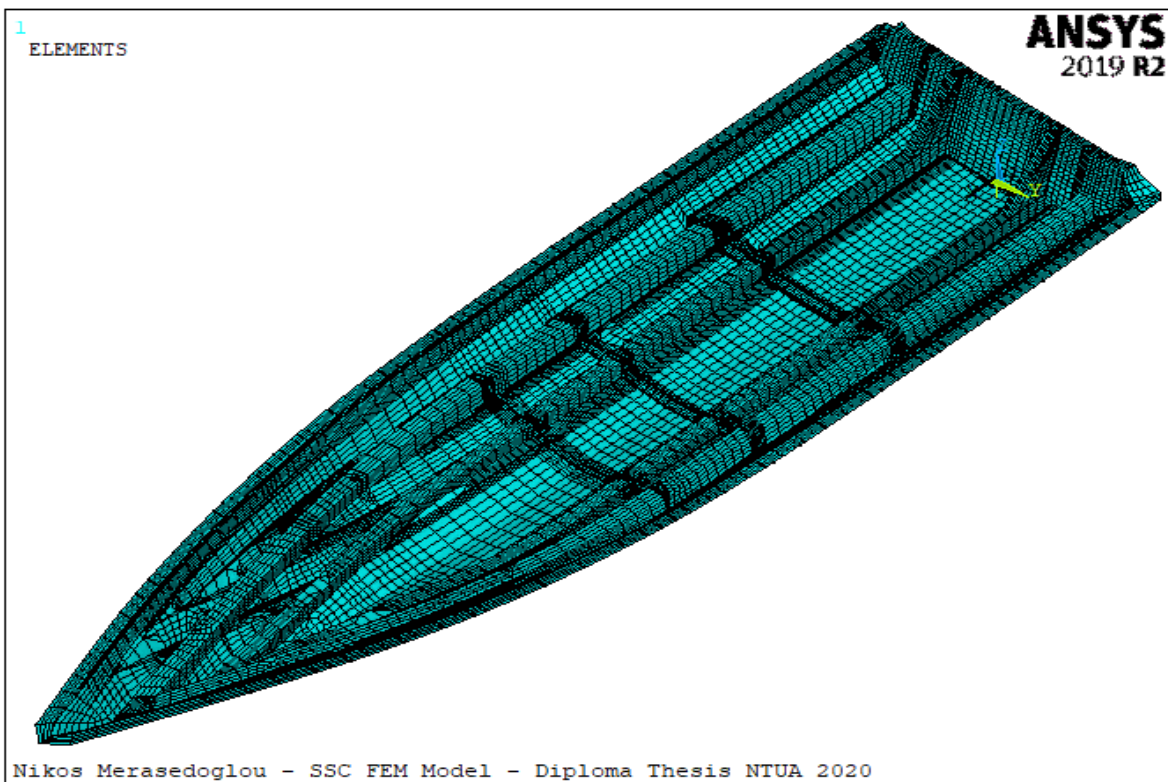
Σχήμα 3.10 : Πλέγμα στα sections 1 και 2 χωρίς προεπεξεργασία.



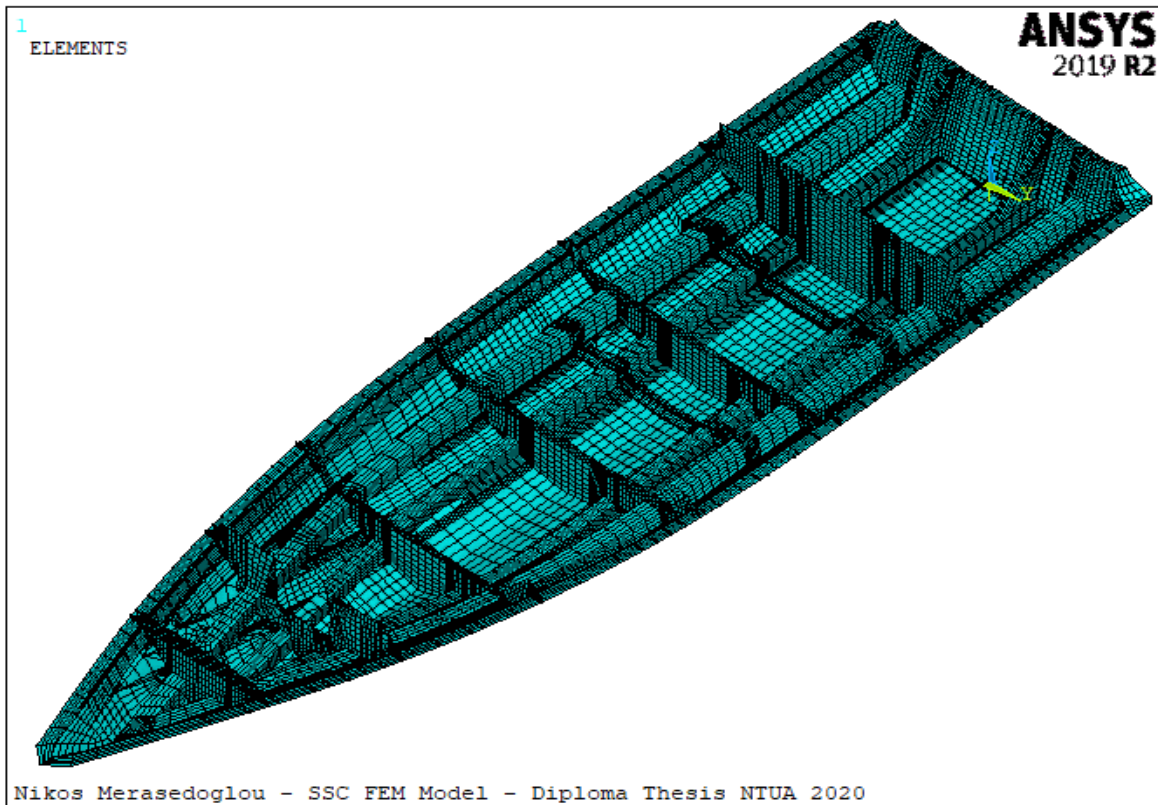
Σχήμα 3.11 : Πλέγμα στα sections 1 και 2 έπειτα από την προεπεξεργασία.



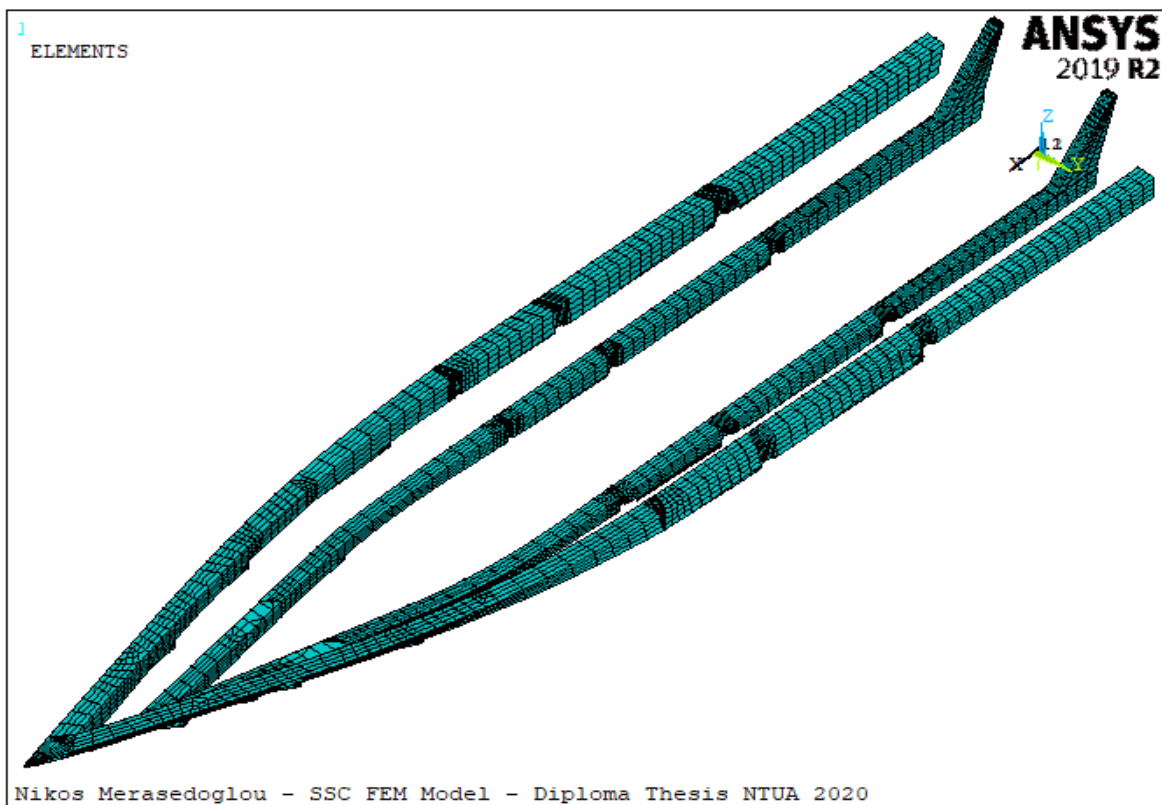
Σχήμα 3.12 : Πλέγμα γάστρας σκάφους προτού τοποθετηθούν ενισχυτικά και φρακτές.



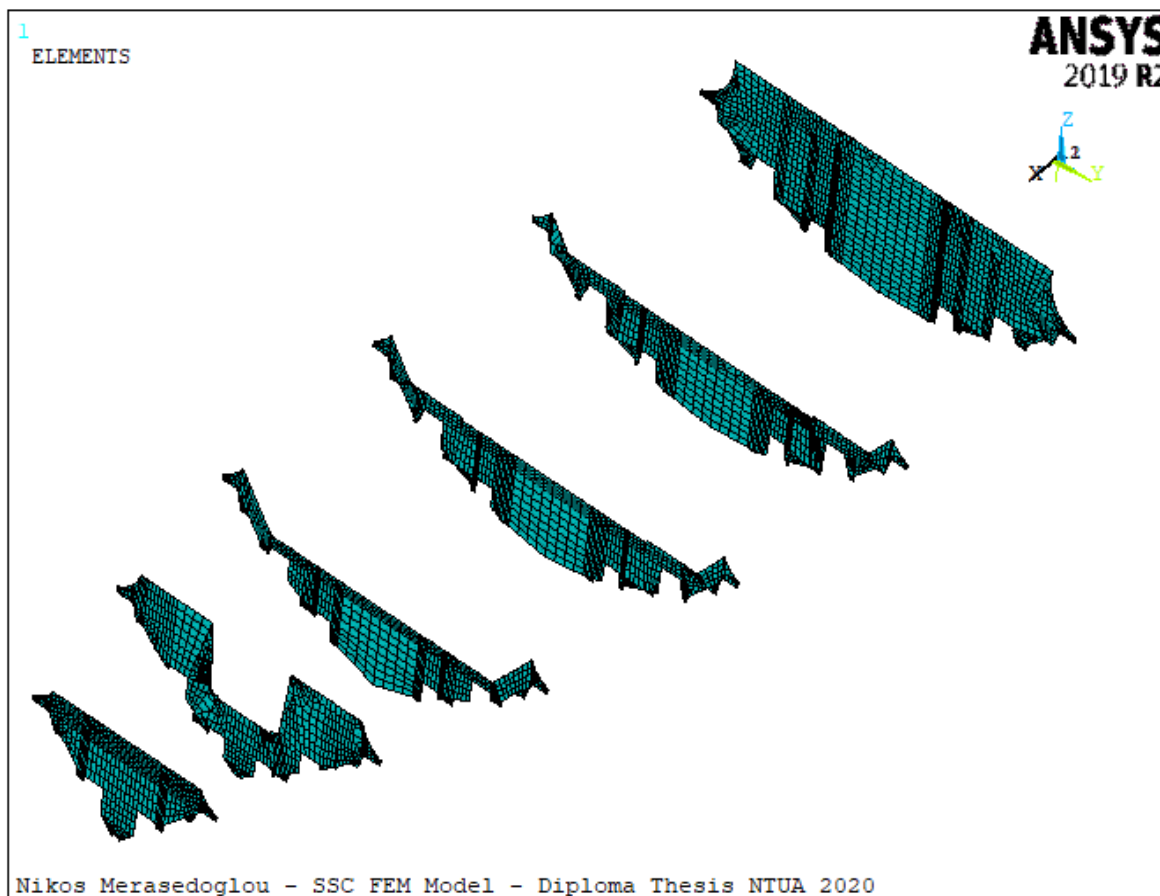
Σχήμα 3.13 : Πλέγμα γάστρας σκάφους με διαμήκη ενισχυτικά πριν τοποθετηθούν οι φρακτές.



Σχήμα 3.14 : Συνολικό πλέγμα σκάφους με διαμήκη ενισχυτικά και εγκάρσιες φρακτές.



Σχήμα 3.15 : Πλέγμα στα διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους.

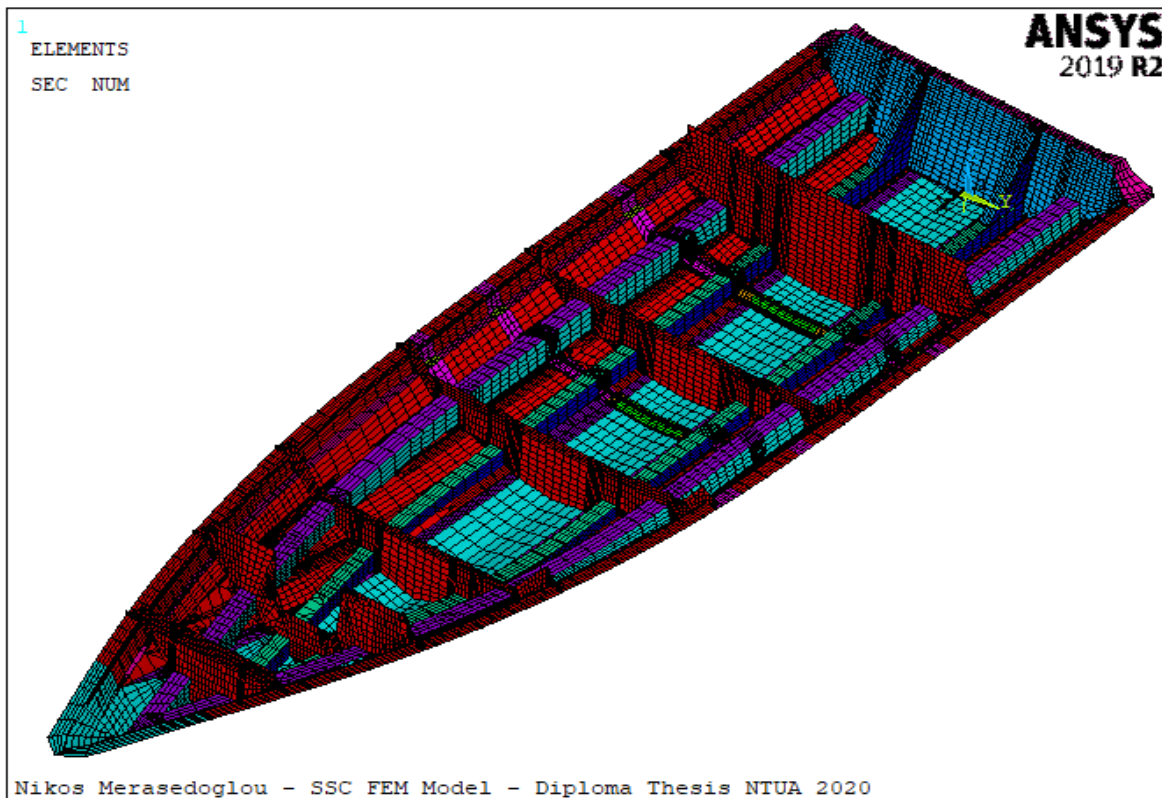


Σχήμα 3.16 : Πλέγμα στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.

Όπως παρατηρείται στα Σχήματα 3.12 και 3.13, το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργείται στο πρυμναίο και στο μεσαίο τμήμα αποτελείται εν γένει από ορθοκανονικά στοιχεία. Τα ορθοκανονικά στοιχεία που δημιουργούνται στην πρύμνη έχουν διαστάσεις περίπου 80mm×60mm. Ίδιας τάξης μεγέθους είναι και τα τριγωνικά στοιχεία που δημιουργούνται στην πλώρη του σκάφους.

Η διακριτοποίηση των επιφανειών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της εντολής «amesh», αφού προηγηθεί η εντολή «lesize» η οποία ορίζει σε πόσες υποδιαίρεσεις θα διαχωριστούν οι γραμμές που περιβάλλουν κάθε επιφάνεια ξεχωριστά (ANSYS – 2019). Ο αριθμός των επιθυμητών υποδιαίρεσεων γίνεται βάσει του επιθυμητού συνδυασμού της ακρίβειας και της ταχύτητας της ανάλυσης, αλλά και των απαιτήσεων σχετικά με ορισμένους σχεδιαστικούς περιορισμούς για τα τελικά, τρισδιάστατα στοιχεία. Η διακριτοποίηση των γραμμών πραγματοποιείται ανεξάρτητα από την εντολή μέσω της οποίας δημιουργείται στη συνέχεια ο επιφανειακός κάρναβος. Η κατασκευή του τελικού μοντέλου ολοκληρώνεται με την ένωση των κοινών κόμβων των στρώσεων μέσω της εντολής «nummrg», οπότε εξασφαλίζεται η συμφωνία μεταξύ αυτών και προκύπτει ενιαίος κάρναβος.

Αφού ολοκληρωθεί το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, γίνεται έλεγχος για την ορθότητα του πλέγματος που έχει δημιουργηθεί. Αρχικά ελέγχεται ότι έχουν εισαχθεί σωστά όλες οι επιφάνειες και ότι σε όλες τις επιφάνειες έχουν δημιουργηθεί στοιχεία. Ακολούθως, ελέγχεται ότι κάθε κατασκευαστικό στοιχείο έχει τη σωστή αλληλουχία στρώσεων, όπως προδιαγράφεται στο δεύτερο κεφάλαιο. Αυτός ο έλεγχος μπορεί να γίνει είτε εκτελώντας την εντολή «slist» για κάθε ενότητα (entity), είτε με οπτικό έλεγχο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.17, στο οποίο απεικονίζονται με διαφορετικά χρώματα οι αλληλουχίες στρώσεων για κάθε περιοχή ξεχωριστά. Στο Σχήμα 3.17 διακρίνεται η κεντρική, η ενδιάμεση και η άνω ζώνη, τα σημεία επικάλυψης μεταξύ των ζωνών και μεταξύ των steps, οι εγκάρσιες φρακτές και ο καθρέφτης στα οποία σχηματίζεται sandwich, καθώς επίσης οι κορμοί και τα πέλατα του εσωτερικού και του εξωτερικού ενισχυτικού και των μπρακέτων του καθρέφτη, κατασκευαστικά στοιχεία τα οποία έχουν διαφορετική αλληλουχία στρώσεων μεταξύ τους, όπως αναφέρεται στο δεύτερο κεφάλαιο.



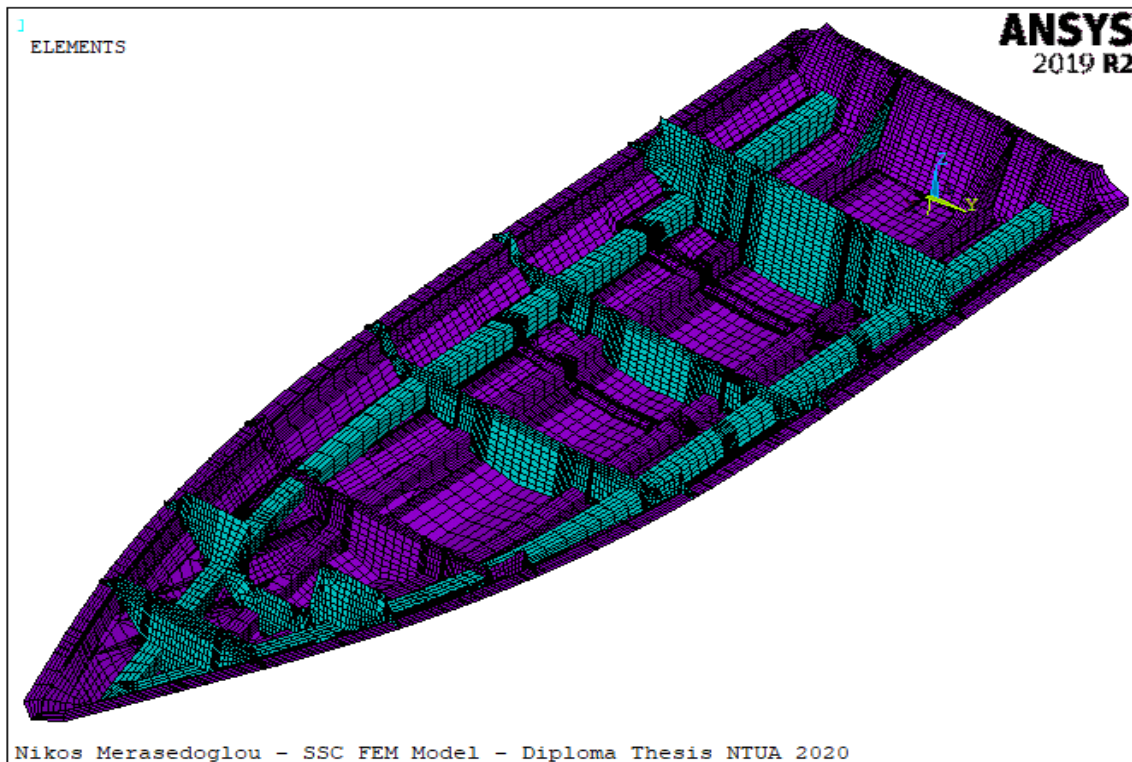
Σχήμα 3.17 : Διαφορετικές αλληλουχίες στρώσεων (entities) κατά μήκος του σκάφους.

Έπειτα ελέγχεται ότι το τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου είναι σε συμφωνία με εκείνο των γειτονικών στοιχείων του σκάφους. Αρχικά, βασική προϋπόθεση είναι ο κάθετος στο επίπεδο του στοιχείου άξονας του τοπικού συστήματος αναφοράς κάθε στοιχείου να έχει φορά προς το εσωτερικό του σκάφους. Η φορά του κάθετου άξονα του συστήματος αναφοράς επηρεάζει τόσο τη σειρά με την οποία τοποθετούνται οι στρώσεις όσο

και το επίπεδο στο οποίο ασκούνται οι πιέσεις που καταπονούν το σκάφος. Συνεπώς, είναι απαραίτητο ο κάθετος άξονας σε όλα τα στοιχεία να έχει κοινή φορά ή προς το εσωτερικό ή ως προς το εξωτερικό του σκάφους. Στην περίπτωση που το στοιχείο «SHELL181» έχει φορά προς το εσωτερικό του σκάφους, τότε η άνω επιφάνεια απεικονίζεται με γαλάζιο χρώμα και η κάτω επιφάνεια με μωβ. Αντίθετα, στην περίπτωση που το στοιχείο «SHELL181» έχει φορά προς το εξωτερικό του σκάφους, τότε η άνω επιφάνεια απεικονίζεται με μωβ χρώμα και η κάτω επιφάνεια με γαλάζιο. Εν προκειμένω, έχει επιλεγεί όλα τα στοιχεία να έχουν φορά προς το εσωτερικό του σκάφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.14 όπου όλα τα στοιχεία έχουν γαλάζιο χρώμα. Πρόβλημα θα υπήρχε στην περίπτωση που ορισμένα στοιχεία είχαν φορά προς το εσωτερικό του σκάφους και τα υπόλοιπα είχαν αντίθετη φορά, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.18. Η ασυμφωνία αυτή μεταξύ των στοιχείων επιδιορθώνεται με χρήση της εντολής «areverse», η οποία αντιστρέφει τη φορά του κάθετου άξονα των στοιχείων που έχουν επιλεγεί. Η εκτέλεση αυτής της εντολής δημιουργεί κοινό προσανατολισμό προς το εσωτερικό του σκάφους, ή αλλιώς κοινό χρώμα γαλάζιο στα στοιχεία όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 3.12 έως 3.14.

Τέλος, γίνεται έλεγχος για τη διεύθυνση του διαμήκους άξονα του τοπικού συστήματος αναφοράς, ο οποίος είναι επιθυμητό να έχει την ίδια διεύθυνση με τον διαμήκη άξονα του γενικευμένου καρτεσιανού συστήματος αναφοράς όλου του σκάφους. Ο διαμήκης άξονας x του τοπικού συστήματος αναφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντικό να συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα του γενικευμένου καρτεσιανού συστήματος αναφοράς στα στοιχεία όπου χρησιμοποιείται μονοαξονικό υλικό (UDR) το οποίο έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες κατά τον διαμήκη άξονα σε σχέση με τον εγκάρσιο, όπως στα στοιχεία του πέλματος του εσωτερικού ενισχυτικού και του πέλματος του μπρακέτου του καθρέφτη όπου χρησιμοποιείται UDR. Τα υπόλοιπα υλικά που χρησιμοποιούνται έχουν ίδιες μηχανικές ιδιότητες κατά το διαμήκη και τον εγκάρσιο άξονα. Το τοπικό σύστημα κάθε στοιχείου προδιαγράφεται από την εντολή «local», ενώ με την εντολή «esys» επιλέγεται το σύστημα αναφοράς που επιθυμείται να ενεργοποιηθεί για την ανάλυση. Σε περίπτωση που έχει οριστεί ο διαμήκης άξονας x και ο κατακόρυφος άξονας z , ο εγκάρσιος άξονας y ορίζεται από τον κανόνα του δεξιού χεριού.

Συνεπώς, μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, κάθε στοιχείο έχει τοπικό σύστημα αναφοράς (local coordinate system) τέτοιο ώστε ο άξονας x του τοπικού συστήματος αναφοράς του στοιχείου να έχει την ίδια διεύθυνση με τον διαμήκη άξονα του γενικευμένου καρτεσιανού συστήματος αναφοράς (global cartesian coordinate system) του σκάφους, ο κάθετος άξονας z του τοπικού συστήματος αναφοράς του στοιχείου να έχει φορά προς το εσωτερικό του σκάφους και ο άξονας y του τοπικού συστήματος αναφοράς του στοιχείου να προκύπτει σύμφωνα με τον κανόνα του δεξιού χεριού, δεδομένου ότι έχουν οριστεί οι άξονες x και z του τοπικού συστήματος αναφοράς.



Σχήμα 3.18 : Λάθος μοντελοποίηση. Ο μη κοινός προσανατολισμός του κάθετου άξονα z των στοιχείων απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα elements.

3.3.4 Τρόποι προσέγγισης στατικού προβλήματος

Αφού ολοκληρωθεί ο ορισμός της αλληλουχίας στρώσεων σε κάθε περιοχή του σκάφους και η διαδικασία δημιουργίας πλέγματος (preprocessing), ακολουθεί ο ορισμός των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών για να επιλυθεί το πρόβλημα (solution). Το αντικείμενο ενδιαφέροντος στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της κατασκευής ως προς την αντοχή της, συνεπώς το πρόβλημα θεωρείται στατικό. Βασικό ζήτημα για την επίλυση του προβλήματος είναι ο βέλτιστος τρόπος με τον οποίο μπορεί να προσομοιαστεί το θαλάσσιο περιβάλλον και ο τρόπος με τον οποίο ισορροπεί στην θάλασσα το σκάφος, στο πρόγραμμα ANSYS.

Βασικό ζήτημα είναι αν το πρόβλημα χρειάζεται να αντιμετωπιστεί ως στατικό ή ως «ψευδοστατικό». Ειδικότερα, είναι διαφορετικό μια κατασκευή να στηρίζεται σε κάποια σημεία και να μην είναι ελεύθερη να αναπτύξει επιταχύνσεις, όπως παραδείγματος χάρη μια πακτωμένη δοκός, και διαφορετικό μια κατασκευή να ισορροπεί και να είναι ελεύθερη να αναπτύξει επιταχύνσεις, όπως το σκάφος στη θάλασσα. Επομένως, εκ πρώτης όψεως, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς η επίδραση της αδράνειας που έχει η κατασκευή στην καταπόνηση από τις στατικές πιέσεις που ορίζουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα, βάσει των οποίων έχουν γίνει οι υπολογισμοί και είναι εξ ορισμού «ισοδύναμες» με τις πραγματικές κρουστικές φορτίσεις που δέχεται η κατασκευή. Ο συνυπολογισμός αυτός γίνεται μέσω της λειτουργίας «inertia relief» που παρέχει το ANSYS.

Η λειτουργία «inertia relief» του προγράμματος ANSYS εκτελείται μέσω της εντολής «irlf». Η εντολή «irlf» καθορίζει ότι το πρόγραμμα υπολογίζει τις απαιτούμενες επιταχύνσεις για να αντισταθμίσει τα εφαρμοζόμενα φορτία (ανακούφιση αδράνειας). Οι περιορισμοί μετατόπισης στη δομή πρέπει να είναι οι ελάχιστοι δυνατοί, δηλαδή μόνο εκείνοι που είναι απαραίτητοι για την αποτροπή της κίνησης ελεύθερου σώματος (avoid rigid body motion : 3 περιορισμοί χρειάζονται για μια 2-D δομή και 6 για μια 3-D δομή). Το άθροισμα των δυνάμεων αντίδρασης στα σημεία περιορισμού θα πρέπει να είναι μηδέν. Αυτό συμβαίνει διότι στην περίπτωση που τίθεται σε λειτουργία το «inertia relief», τα φορτία που καταπονούν την κατασκευή εξουδετερώνονται από τα αδρανειακά φορτία και όχι από τους κόμβους στους οποίους επιβάλλονται συνοριακές συνθήκες. Οι επιταχύνσεις υπολογίζονται από τα μητρώα μάζας των στοιχείων, που προκύπτουν μέσω των ειδικών βαρών που έχουν οριστεί για κάθε στοιχείο ξεχωριστά, και από τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της μάζας (όπως το ειδικό βάρος) πρέπει να εισάγονται. Μπορούν να υπολογιστούν τόσο οι μεταφορικές όσο και οι περιστροφικές επιταχύνσεις (ANSYS – 2019). Αυτή η επιλογή ισχύει μόνο για τη στατική ανάλυση (antype, static). Επιπλέον, η λειτουργία «inertia relief» μπορεί να εκτελεστεί και να επιλυθεί μόνο μέσω της γραμμικής ανάλυσης.

Επιπλέον, η χρήση της λειτουργίας του «inertia relief» δεν ενδείκνυται για μοντέλα που λαμβάνουν υπόψη τους συνοριακές συνθήκες συμμετρίας, όπως η μοντελοποίηση του μισού μόνο σκάφους και η αντικατάσταση του συμμετρικού μέρους με συνοριακές συνθήκες, για αξονοσυμμετρικά μοντέλα, δηλαδή μοντέλα που είναι συμμετρικά ως προς έναν εκ των αξόνων x,y και z, και για μοντέλα που χρησιμοποιούν συνδυασμό δισδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων (συνδυασμός 2-D και 3-D element). Ωστόσο, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δεν παραβιάζεται κάποια από τις δύο παραπάνω συστάσεις, δεδομένου ότι εισάγεται και μοντελοποιείται ολόκληρο το σκάφος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, το μοντέλο είναι συμμετρικό ως προς το διάμηκες επίπεδο xz και όχι ως προς κάποιον εκ των αξόνων x, y και z, ενώ για τη δημιουργία πλέγματος χρησιμοποιείται μόνο το στοιχείο «SHELL181», συνεπώς αποφεύγεται ο συνδυασμός δισδιάστατου και τρισδιάστατου στοιχείου.

Η εντολή «irlf» έχει τρία πιθανά ορίσματα. Το όρισμα «irlf,0» δεν λαμβάνει υπόψη τα αδρανειακά φορτία κατά τη διάρκεια των υπολογισμών. Το όρισμα «irlf,1» αντισταθμίζει τα φορτία που καταπονούν την κατασκευή με τα αδρανειακά φορτία που προκύπτουν από τις επιταχύνσεις της κατασκευής. Τέλος, το όρισμα «irlf,-1» προκαθορίζει το μητρώο μάζας μόνο για συνοπτική εκτύπωση, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τα αδρανειακά φορτία, συνεπώς και το μητρώο μάζας της κατασκευής, στους υπολογισμούς. Σε περίπτωση που δεν εκτελεστεί η εντολή «irlf», το default όρισμα που χρησιμοποιείται είναι το «irlf,0», δηλαδή by default δεν συνυπολογίζονται τα αδρανειακά φορτία. Επομένως, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, δεν απασχολεί το όρισμα «irlf,-1» και θα μελετηθούν «irlf,0» και «irlf,1». Δεδομένα για τη μάζα και την αδράνεια της κατασκευής, όπως η συνολική μάζα, το κέντρο μάζας και το μητρώο μάζας της κατασκευής, τυπώνονται και λαμβάνονται μέσω της εντολής «irlist».

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρατίθενται αποτελέσματα τόσο χωρίς όσο και με την χρήση της λειτουργίας «inertia relief», τα οποία συγκρίνονται μεταξύ τους και εξάγεται συμπέρασμα για τον βέλτιστο τρόπο μοντελοποίησης. Εκ πρώτης όψεως, αναμένεται η χρήση της λειτουργίας «inertia relief» να προσομοιάζει καλύτερα το πρόβλημα, διότι όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική αναζήτηση, η λειτουργία του «inertia relief» ενδείκνυται να χρησιμοποιηθεί σε ανωστικές επιφάνειες, όπως το σκάφος ή το πτερύγιο του αεροπλάνου. Παρ' όλα αυτά, τεκμηριωμένη απάντηση θα ληφθεί στο τέλος του τέταρτου κεφαλαίου, όπου συγκρίνονται τα αποτελέσματα των διαφορετικών μοντέλων.

3.3.5 Συνοριακές συνθήκες

Βασικό μειονέκτημα της μελέτης σκάφους, και γενικότερα πλοίου, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι ότι είναι ανέφικτο να προσομοιαστούν με ακρίβεια οι διαφορετικές καταστάσεις θάλασσας στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Συνεπώς, οι συνοριακές συνθήκες μεταβάλλονται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και τη μορφή καταπόνησης του σκάφους. Γενικός κανόνας είναι να περιοριστούν οι συνοριακές συνθήκες σε όσο το δυνατόν λιγότερους κόμβους, προκειμένου το μοντέλο να μην είναι αρκετά δύσκαμπτο για να παρατηρηθούν οι παραμορφώσεις που αναπτύσσει το σκάφος.

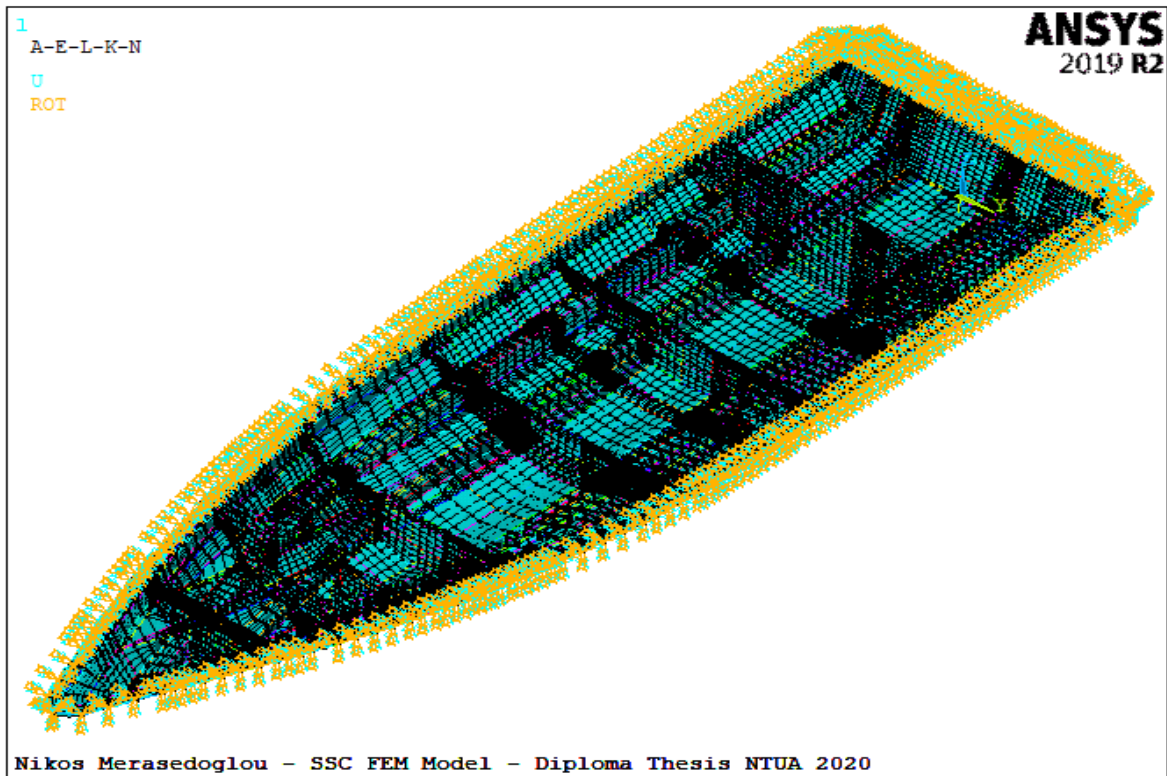
Αρχικά έγινε βιβλιογραφική αναζήτηση και δοκιμάστηκαν οι συνοριακές συνθήκες που προτείνει ο νηογνώμονας «DNV – GL» για την στήριξη ενός πλοίου που μοντελοποιείται με πεπερασμένα στοιχεία (DNV – GL – 2015). Ο νηογνώμονας DNV–GL προτείνει τρεις περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών. Η πρώτη περίπτωση αφορά τον περιορισμό των μετατοπίσεων UX, UY και UZ στο πρυμναίο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με την ίσαλο επιφάνεια (point A), τον περιορισμό της μετατόπισης UY στο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με το κατάστρωμα (point B) και τον περιορισμό των μετατοπίσεων UY και UZ στο πωραίο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με την ίσαλο επιφάνεια (point C). Η δεύτερη περίπτωση αφορά τον περιορισμό της μετατόπισης UZ σε σημείο του bilge της πρυμναίας φρακτής και του συμμετρικού του ως προς τη μέση τομή, τον περιορισμό της μετατόπισης UY στο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με την πρυμναία φρακτή και τον περιορισμό των μετατοπίσεων UX, UY και UZ στο σημείο τομής της κεντρικής ζώνης με την πωραία φρακτή. Τέλος, η τρίτη περίπτωση αφορά τον περιορισμό της μετατόπισης UY στο σημείο τομής εκ των αριστερών του κύριου καταστρώματος με τον καθρέφτη της πρύμνης, τον περιορισμό των μετατοπίσεων UY και UZ στο σημείο τομής εκ των δεξιών του κύριου καταστρώματος με τον καθρέφτη της πρύμνης και τον περιορισμό των μετατοπίσεων UX, UY και UZ στο πιο μπροστινό σημείο του βολβού που ανήκει στην κεντρική γραμμή. Το παράδοξο της τρίτης περιπτώσεως είναι ότι οι περιορισμοί των μετατοπίσεων σημείων δεν είναι συμμετρική ως προς την κεντρική γραμμή του πλοίου (centerline).

Ωστόσο, τα αποτελέσματα της δοκιμής των συνοριακών συνθηκών που προτείνει ο νηογνώμονας «DNV – GL» ήταν αδόκιμα, όπως φαίνεται στο εδάφιο 4.7 του τέταρτου κεφαλαίου, διότι αφενός στην παρούσα διπλωματική εργασία έπρεπε να ληφθούν πρόσθετες συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να προσομοιαστεί το κατάστρωμα το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί, αφετέρου οι συνοριακές αυτές συνθήκες αφορούσαν πλοίο και όχι μικρό σκάφος πλαναρίσματος, το οποίο ενδεχομένως να είχε σαν αποτέλεσμα σημαντικές διαφορές στις συνοριακές συνθήκες που λαμβάνονται.

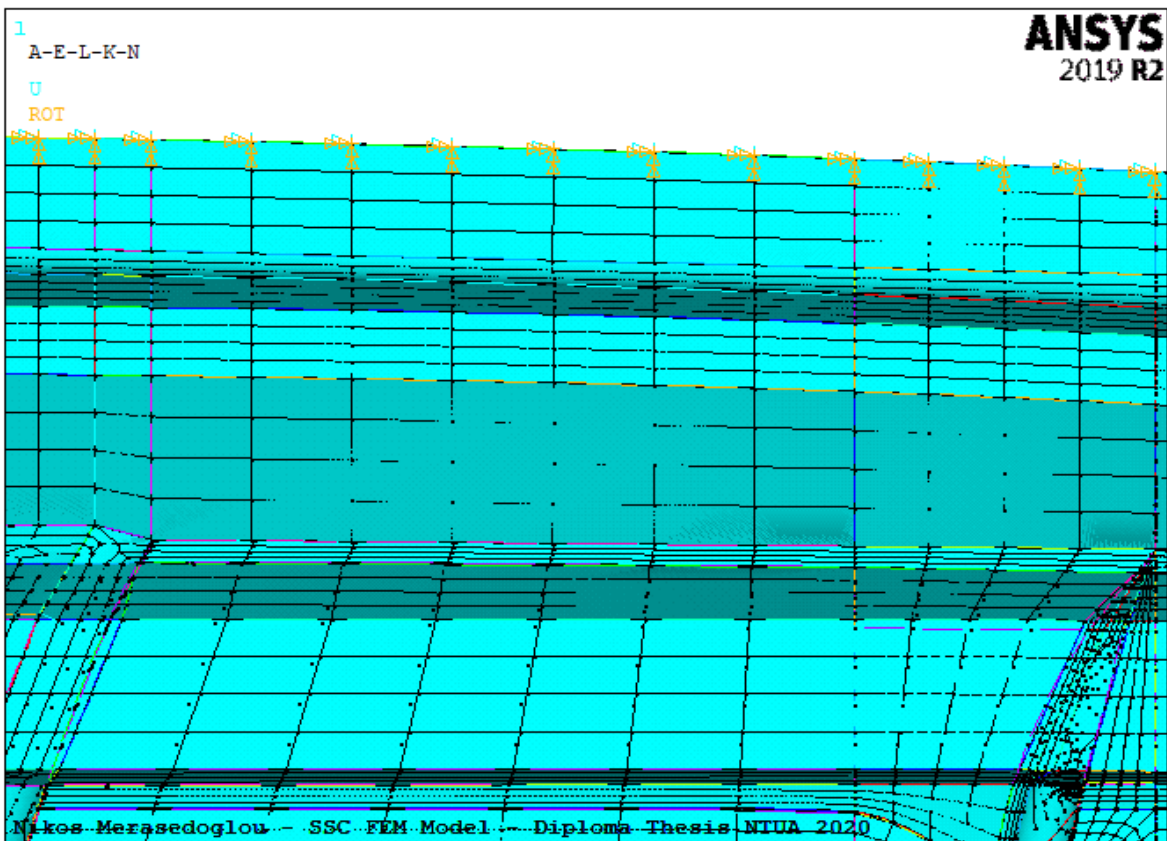
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, βασικό ζητούμενο ήταν να οριστούν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να περιοριστεί η μετακίνηση του σκάφους ως ελεύθερο σώμα κατά τον διαμήκη, τον εγκάρσιο και τον κατακόρυφο άξονα, καθώς επίσης να περιοριστούν και οι περιστροφές του σκάφους ως προς τους αντίστοιχους άξονες. Επιπλέον, επιλέγονται οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να προσομοιαστεί η ύπαρξη του καταστρώματος (deck), το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, και παρατηρώντας από παλαιότερες μελέτες ότι το βέλος κάμψης είναι αμελητέο (τάξη μεγέθους 1 mm) στα ανώτερα σημεία της γάστρας στα οποία «κουμπώνει» το κατάστρωμα, θεωρήθηκε ότι για τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πρέπει να τοποθετηθούν κατάλληλες συνοριακές συνθήκες έτσι ώστε να προσομοιαστεί η ύπαρξη καταστρώματος, το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί.

Στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιηθεί το «inertia relief», ως καταλληλότερες συνοριακές συνθήκες θεωρήθηκαν οι πακτώσεις περιμετρικά στους κόμβους που βρίσκονται περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους. Το Σχήμα 3.20 απεικονίζει σε τρισδιάστατη όψη τους κόμβους στους οποίους έχουν επιβληθεί πακτώσεις περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους, ενώ μέρος εκείνων των κόμβων απεικονίζονται και στο Σχήμα 3.21 σε μεγέθυνση (zoom in). Η επιβολή πάκτωσης στους κόμβους σημαίνει περιορισμό των 6 βαθμών ελευθερίας τους UX, UY, UZ, ROTX, ROTY και ROTZ.



Σχήμα 3.20 : Πακτωμένοι κόμβοι περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους.

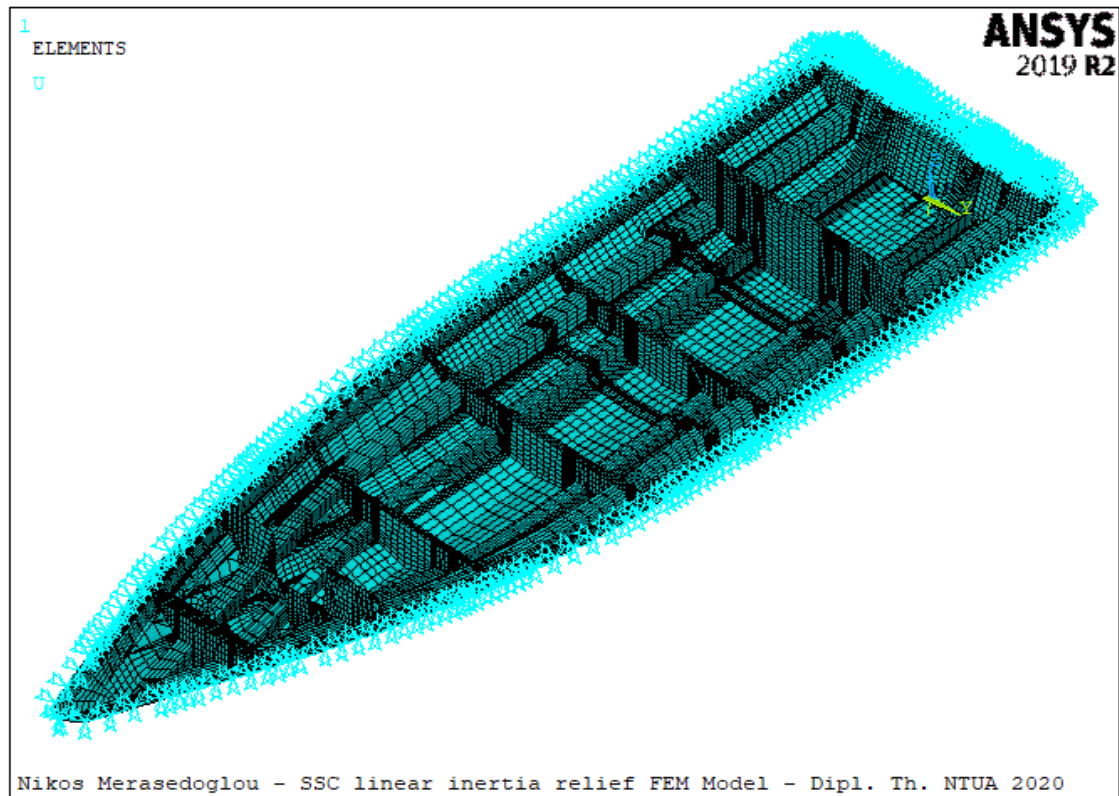


Σχήμα 3.21 : «Zoom in» στους κόμβους που έχουν τοποθετηθεί πακτώσεις στο κοίλο του σκάφους.

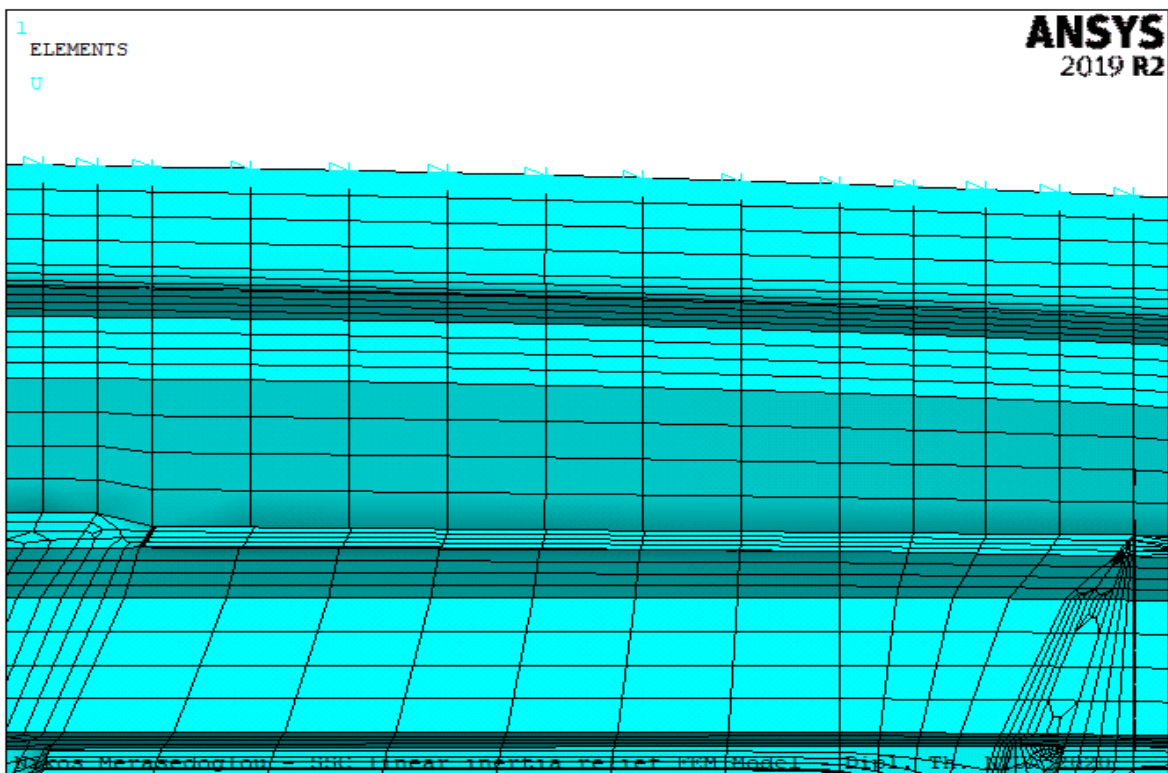
Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί το «inertia relief», προτιμάται να περιοριστούν περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους μόνο οι βαθμοί ελευθερίας UX, UY και UZ, όπου κατά την ολοκλήρωση της επίλυσης το άθροισμα των αδρανειακών φορτιών σε κάθε διεύθυνση στους κόμβους που έχουν επιβληθεί συνοριακές συνθήκες είναι ίσο με μηδέν, αντί να τοποθετηθούν πακτώσεις όπως στην περίπτωση που δεν χρησιμοποιείται το «inertia relief». Με αυτό τον τρόπο, το άθροισμα των «reaction forces» (αδρανειακά φορτία) σε κάθε διεύθυνση στους κόμβους που έχουν επιβληθεί συνοριακές συνθήκες είναι μηδενικό. Σε περίπτωση που είχαν τοποθετηθεί πακτώσεις περιμετρικά του σκάφους κατά τη λειτουργία του «inertia relief», τότε το άθροισμα των «reaction moments» σε κάθε διεύθυνση στους κόμβους που έχουν επιβληθεί συνοριακές συνθήκες θα ήταν μη μηδενικό, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι δεν εφαρμόζεται σωστά η λειτουργία του «inertia relief».

Δεδομένου ότι οι συνοριακές συνθήκες που ορίζονται είναι ο περιορισμός των βαθμών ελευθερίας UX, UY και UZ στους κόμβους περιμετρικά στο κοίλο της γάστρας, παραβιάζεται η σύσταση της λειτουργίας «inertia relief» να χρησιμοποιείται ο ελάχιστος δυνατός αριθμός κόμβων στους οποίους ορίζονται συνοριακές συνθήκες. Ο λόγος που παραβιάστηκε η παραπάνω σύσταση είναι η ανάγκη να περιοριστούν οι μετατοπίσεις περιμετρικά του σκάφους, προκειμένου να προσομοιαστεί κατάλληλα το πρόβλημα και η ύπαρξη καταστρώματος. Ιδεατά λοιπόν, θα έπρεπε να τοποθετηθούν συνοριακές συνθήκες σε μόνο έναν κόμβο, αυτόν που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του σκάφους. Η δυσκολία σε αυτή την περίπτωση όμως είναι ότι το κέντρο βάρους του σκάφους είναι σημείο το οποίο δεν ανήκει στην γεωμετρία του σκάφους. Αυτό το λογικό συμπέρασμα παρατηρείται και στην περίπτωση του παρόντος σκάφους, όπου το κέντρο μάζας της κατασκευής αντιστοιχεί στο σημείο $\{x=3312.6\text{mm}, y=0\text{mm}, z=311.27\text{mm}\}$, ωστόσο ο κόμβος του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που είναι πλησιέστερος στο κέντρο μάζας της κατασκευής έχει συντεταγμένες $\{x=3356.4\text{mm}, y=0\text{mm}, z=21.239\text{mm}\}$, ο οποίος έχει αισθητή απόσταση από το κέντρο μάζας της κατασκευής, κυρίως ως προς τον κατακόρυφο άξονα z. Επιπλέον, λόγω της μη μοντελοποίησης του καταστρώματος, το σκάφος αποτελεί ανοικτή και όχι κλειστή διατομή, συνεπώς είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί στα ελεύθερα και ανυποστήρικτα άκρα του στο κοίλο. Επομένως, η τοποθέτηση συνοριακών συνθηκών μόνο στο κέντρο βάρους της κατασκευής δεν δύναται να εφαρμοστεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Το Σχήμα 3.22 απεικονίζει σε τρισδιάστατη όψη τους κόμβους στους οποίους έχουν περιοριστεί οι βαθμοί ελευθερίας UX, UY και UZ περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους, ενώ μέρος εκείνων των κόμβων απεικονίζονται και στο Σχήμα 3.23 σε μεγέθυνση.



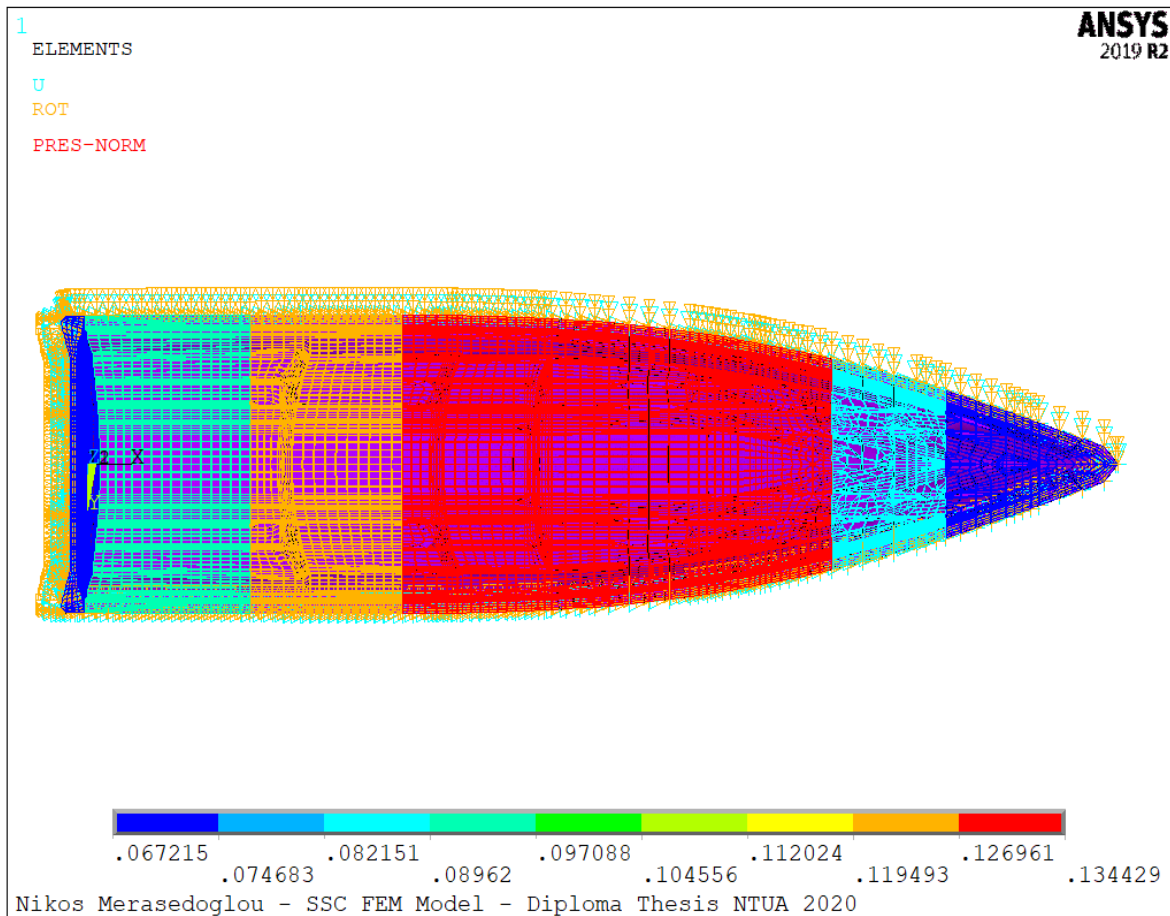
Σχήμα 3.22 : Περιορισμός β.ε. UX, UY και UZ περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους, με χρήση «inertia relief».



Σχήμα 3.23 : «Zoom in» στους κόμβους που έχουν περιοριστεί, με χρήση «inertia relief»..

3.3.6 Ορισμός φόρτισης στο ANSYS

Αφού επιβληθούν οι περιορισμοί του μοντέλου βάσει των παραπάνω οριακών συνθηκών του προβλήματος, επιβάλλονται τα φορτία από τα οποία καταπονείται το σκάφος. Εν γένει, τα ταχύπλοα σκάφη καταπονούνται κυρίως από κρουστικά φορτία. Για το υπό μελέτη σκάφος, τα φορτία είναι οι πιέσεις οι οποίες έχουν υπολογιστεί από την κατασκευάστρια εταιρεία και οι τιμές τους έχουν επαληθευτεί, όπως περιγράφεται στο εδάφιο 2.3. Οι πιέσεις αυτές εφαρμόζονται στην εξωτερική επιφάνεια της γάστρας του σκάφους με φορά προς το εσωτερικό του σκάφους και διεύθυνση κατά την έννοια του πάχους κάθε ελάσματος, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.24. Οι πιέσεις αυτές έχουν υπολογιστεί θεωρώντας ολόκληρη την γάστρα που μοντελοποιήθηκε ως πυθμένα (bottom shell), ακόμα και περιοχών οι οποίες θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως πλευρικές (side shell) στις οποίες τα κρουστικά φορτία είναι αρκετά μικρότερα σε σχέση με τον πυθμένα. Συνεπώς, η θεώρηση του σκάφους συνολικά ως πυθμένα σημαίνει ότι η μελέτη είναι στην ασφαλή πλευρά (on the safe side), ωστόσο ενδεχομένως να οδηγήσει σε συντηρητικά αποτελέσματα, όπως παρατηρείται στο τέταρτο κεφάλαιο.



Σχήμα 3.24 : Φορτίσεις στην εξωτερική επιφάνεια του σκάφους.

Οι τιμές των φορτίσεων που εισάγονται στο πρόγραμμα ANSYS αναγράφονται στον Πίνακα 3.4 και εισάγονται σε [MPa]. Οι κανονισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για να υπολογιστούν οι τιμές των πιέσεων αναγράφονται στο εδάφιο 2.3.

Πίνακας 3.4 : Πιέσεις στην γάστρα σύμφωνα με τους κανονισμούς του «Lloyd’s Register».

Διαμερίσματα (Sections) κατά μήκος του σκάφους	Πίεση [MPa]
Καθρέφτης	0.067215
Section 1	0.094848
Section 2	0.120200
Section 3	0.134429
Section 4	0.128482
Section 5	0.127552
Section 6	0.086017
Section 7	0.067215

3.3.7 Μέθοδοι επίλυσης

Τελευταίο βήμα της μοντελοποίησης είναι η επίλυση του προβλήματος και η μέθοδος με την οποία θα επιλυθεί το πρόβλημα. Η επίλυση του προβλήματος στο πρόγραμμα ANSYS μπορεί να γίνει είτε γραμμικά, είτε μη γραμμικά (nonlinear analysis, N – L). Σε κάθε μία από τις δύο αναλύσεις εφαρμόζεται ένα «κριτήριο αστοχίας» (failure criteria) προκειμένου να διαπιστωθεί αν υπάρχει αστοχία των στρώσεων. Η διαφοροποίηση μεταξύ της γραμμικής και της μη-γραμμικής ανάλυσης είναι ότι η γραμμική ανάλυση δεν λαμβάνει υπόψη τις μεγάλες παραμορφώσεις. Στο παρόν πρόβλημα, αναμένονται τα αποτελέσματα της γραμμικής να είναι συγκρίσιμα με τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης, διότι από τη φύση του προβλήματος δεν αναμένονται υψηλές παραμορφώσεις στις πολύστρωτες πλάκες του σκάφους.

Στα πλαίσια της μη γραμμικής ανάλυσης εφαρμόζεται η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων, οπότε η προσέγγιση του προβλήματος γίνεται σε βήματα. Έτσι, η επιβαλλόμενη φόρτιση κατακερματίζεται σε τμήματα, καθένα από τα οποία επιβάλλεται στο μοντέλο ανά βήμα. Σε κάθε βήμα, μέσω της μεθόδου Newton – Raphson, επιχειρείται η σύγκλιση των κριτηρίων που έχουν τεθεί, ενώ μετά την ολοκλήρωση αυτού, το μητρώο δυσκαμψίας κάθε τμήματος του σκάφους (entity) προσαρμόζεται στη νέα παραμορφωμένη κατάσταση, ώστε να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο βήμα. Εν γένει, ο αριθμός των βημάτων της ανάλυσης θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος, ώστε να επιτυγχάνεται με ακρίβεια η σύγκλιση, αλλά και αρκετά μικρός, ώστε να μην αυξάνεται ιδιαίτερα ο υπολογιστικός χρόνος. Ως εκ τούτου, μέσω της εντολής «deltim», το αρχικό μέγεθος των βημάτων ορίζεται ίσο με 0.05, ενώ παράλληλα, γίνεται μία κατάλληλη ρύθμιση, ώστε εφόσον είναι δυνατόν, να αυξάνεται αυτόματα το μέγεθος των βημάτων και κατ' επέκταση, να μειώνεται η διάρκεια της επίλυσης. Προς το σκοπό αυτό, το μέγιστο όριο για το μέγεθος των βημάτων ορίζεται ίσο με 0.1, ενώ το ελάχιστο ορίζεται ίσο με 0.01.

Εκτός της εντολής με την οποία καθορίζεται ο αριθμός των απαραίτητων βημάτων, υπάρχουν και άλλες εντολές της μη-γραμμικής ανάλυσης που επιταχύνουν σημαντικά την διαδικασία. Αρχικά, εκτελείται η εντολή «antype,0,» η οποία ορίζει ότι η ανάλυση που ακολουθεί είναι στατική, όπως και στην γραμμική ανάλυση. Εν συνεχεία, χρησιμοποιείται η εντολή «nlgeom,1» η οποία ορίζει ότι επιλύεται το πρόβλημα λαμβάνοντας μεγάλες παραμορφώσεις (0=OFF, 1=ON). Ειδικότερα, το φορτίο που έχει οριστεί νωρίτερα στο πρόβλημα, διαχωρίζεται σε στοιχειώδη τμήματα και σε κάθε βήμα της ανάλυσης προστίθεται μέρος του φορτίου, μέχρι να συμπληρωθεί το συνολικό φορτίο, όπως έχει οριστεί στο πρόβλημα. Έπειτα, χρησιμοποιείται η εντολή «time,1» για την περίπτωση που η κατασκευή υπόκειται σε περισσότερα του ενός φορτία και είναι επιθυμητό τα φορτία αυτά να εφαρμόζονται ξεχωριστά. Στην περίπτωση που ασκείται μόνο ένα φορτίο, όπως η πίεση του σκάφους στην παρούσα εργασία, το «time,1» αρκεί. Στην συνέχεια εκτελείται η εντολή «autots,1» η οποία δίνει τη δυνατότητα στο ANSYS να αυξομειώνει το βήμα κατά περίπτωση ώστε να μειωθεί ο χρόνος της ανάλυσης χωρίς προβλήματα σύγκλισης.

Η εντολή αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι όσο μεγαλύτερα είναι τα τμήματα στα οποία χωρίζεται το φορτίο, τόσο πιο γρήγορη θα είναι η ανάλυση. Ωστόσο σε κάποιο βήμα ενδεχομένως να μην επιτευχθεί σύγκλιση με συνέπεια η ανάλυση να σταματήσει νωρίτερα από το επιθυμητό σημείο. Αντίθετα, όσο μικρότερα είναι τα τμήματα τόσο πιο εύκολο είναι να επιτευχθεί σύγκλιση, ωστόσο η ανάλυση επιβραδύνεται σημαντικά.

Εν συνεχεία, χρησιμοποιείται η εντολή «`deltim,0.05,0.01,0.1`» η οποία ορίζει το μέγεθος των βημάτων, όπως έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω. Ισοδύναμη είναι η εντολή «`nsubst`» η οποία ορίζει τον αριθμό των substeps (τμημάτων) στα οποία θα κατανεμηθεί το φορτίο. Το πρώτο όρισμα είναι ο αριθμός των τμημάτων που θεωρητικά είναι επαρκής στο δεδομένο πρόβλημα. Η δεύτερη τιμή είναι ένας μέγιστος αριθμός τμημάτων και η τρίτη ο ελάχιστος, όπως ακριβώς και στην εντολή «`deltim`». Τα ορίσματα των εντολών «`deltim`» και «`nsubst`» είναι αντίστροφα μεταξύ τους στις αντίστοιχες θέσεις. Με την χρήση της εντολής «`autots,1`» ο αριθμός των βημάτων θα αυξομειώνεται μεταξύ του ελάχιστου και του μέγιστου ορίσματος, έως ότου να βρεθεί σύγκλιση. Η επιλογή των τιμών στα ορίσματα γίνεται με κριτήριο τον χρόνο και την επίτευξη σύγκλισης και συνήθως αποφασίζονται μετά από δοκιμές. Εάν είχε χρησιμοποιηθεί η εντολή «`autots,0`», το ANSYS θα διάβαζε μόνο το πρώτο όρισμα της εντολής «`deltim`». Έπειτα, χρησιμοποιείται η εντολή «`outrres,all,all`» με την οποία επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο το ANSYS αποθηκεύει τα αποτελέσματα. Το πρώτο πεδίο ορίζει τα αποτελέσματα που αποθηκεύονται, ενώ το δεύτερο πεδίο ορίζει «πόσο συχνά» (ανά πόσα βήματα) θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα. Ακολούθως, εκτελείται η εντολή «`!nrsch,1`» η οποία ενεργοποιεί μέθοδο που υποβοηθά τη μέθοδο Newton – Raphson με την οποία επιλύεται το πρόβλημα. Τέλος, χρησιμοποιείται η εντολή «`neqit,30`» με την οποία ορίζεται ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που γίνονται μέχρι τη σύγκλιση. Η εντολή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, δεδομένου ότι το «`default number`» του προγράμματος ANSYS είναι 15 επαναλήψεις, συνεπώς υποβοηθά τη διαδικασία σύγκλισης και εύρεσης λύσης. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, τόσο περισσότερο δίνεται η δυνατότητα στο πρόγραμμα να συγκλίνει όταν δεν υπάρχει σύγκλιση, αλλά αντίστοιχα τόσο καθυστερεί την ανάλυση.

Τα αποτελέσματα της μη γραμμικής ανάλυσης διαβάζονται με ανάλογο τρόπο με την γραμμική ανάλυση, αφού προηγουμένως έχει επιλεγεί το κατάλληλο βήμα της ανάλυσης. Εν προκειμένω, η μη-γραμμική ανάλυση ολοκληρώνεται χωρίς να διακοπεί, συνεπώς διαβάζονται τα αποτελέσματα του τελευταίου βήματος. Σε κάθε ένα από τα δύο είδη ανάλυσης, η επίλυση ολοκληρώνεται όταν εμφανιστεί η ένδειξη «`solution is done`» (η λύση ολοκληρώθηκε) στο γραφικό περιβάλλον του προγράμματος ANSYS.

Τέλος, αφού ολοκληρωθεί η γραμμική και η μη-γραμμική ανάλυση, εφαρμόζεται το «κριτήριο αστοχίας» (`failure criteria`). Τα προκαθορισμένα (`default`) κριτήρια που διαθέτει το πρόγραμμα ANSYS είναι το «κριτήριο μέγιστης τάσης», το «κριτήριο μέγιστης παραμόρφωσης», το «κριτήριο Tsai – Wu» και το «αντίστροφο κριτήριο Tsai – Wu». Τα παραπάνω κριτήρια εφαρμόζονται στο παρόν μοντέλο, ωστόσο αξιολογείται μόνο το «κριτήριο μέγιστης τάσης» και το «κριτήριο Tsai – Wu», διότι το σκάφος ελέγχεται ως προς την αντοχή του στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Η εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων εκτελείται μέσω της εντολής «`prnsol,s,fail`», αφού πρώτα οριστούν οι αντοχές σε όλες τις διευθύνσεις κάθε χρησιμοποιούμενου υλικού μέσω της εντολής «`fc`».

3.3.8 Μοντέλα από τα οποία εξάγονται αποτελέσματα

Συνθέτοντας τις πληροφορίες που παρατίθενται στο τρίτο κεφάλαιο, παρατηρείται ότι υπάρχουν ποικίλοι τρόποι προσέγγισης του προβλήματος με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως, κρίθηκε βέλτιστο να επιλυθούν τρία διαφορετικά μοντέλα, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο με τον οποίο εξισορροπούνται τα ασκούμενα φορτία (συνοριακές συνθήκες σε κόμβους ή «inertia relief») και ως προς τη μέθοδο επίλυσης του στατικού προβλήματος (γραμμική ή μη-γραμμική ανάλυση).

Το πρώτο μοντέλο αφορά την επίλυση του στατικού προβλήματος με γραμμική ανάλυση, χρησιμοποιώντας ως συνοριακές συνθήκες πακτώσεις στους κόμβους που βρίσκονται περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους και χωρίς να συνυπολογίζονται τα αδρανειακά φορτία (μη χρήση της λειτουργίας του «inertia relief»). Το δεύτερο μοντέλο αφορά την επίλυση του στατικού προβλήματος, με μη-γραμμική ανάλυση, χρησιμοποιώντας ως συνοριακές συνθήκες πακτώσεις στους κόμβους που βρίσκονται περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους και χωρίς να συνυπολογίζονται τα αδρανειακά φορτία (μη χρήση της λειτουργίας του «inertia relief»), όπως προηγουμένως. Το τρίτο μοντέλο αφορά την επίλυση του στατικού προβλήματος, με γραμμική ανάλυση, χρησιμοποιώντας ως συνοριακές συνθήκες τον περιορισμό των βαθμών ελευθερίας UX, UY και UZ στους κόμβους που βρίσκονται περιμετρικά στο κοίλο του σκάφους και συνυπολογίζοντας τα αδρανειακά φορτία (χρήση της λειτουργίας του «inertia relief»).

Από τα παραπάνω τρία μοντέλα εξάγονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα και συγκρίνονται με τις τιμές που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Ωστόσο, χάριν πληρότητας της διπλωματικής εργασίας, εκτελέστηκαν δύο επιπλέον μοντέλα. Το πρώτο πρόσθετο μοντέλο αφορά την περίπτωση που στο σκάφος τοποθετούνταν πάκτωση στον πλησιέστερο του κέντρου βάρους κόμβο ως συνοριακή συνθήκη, προκειμένου να ικανοποιηθεί η σύσταση της λειτουργίας «inertia relief» για χρήση του ελάχιστου δυνατού αριθμού κόμβων στους οποίους ορίζονται συνοριακές, η οποία παραβιάζεται στα τρία προηγούμενα μοντέλα. Το δεύτερο πρόσθετο μοντέλο αφορά την περίπτωση που στο σκάφος τοποθετούνταν συνοριακές συνθήκες που προτείνει ο νηογνώμονας «DNV – GL». Ωστόσο, όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εδάφιο 3.3.5, οι συνοριακές συνθήκες που ορίζονται στα δύο πρόσθετα μοντέλα παρουσιάζουν αδυναμίες στον τρόπο με τον οποίο μοντελοποιείται το σκάφος στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Επομένως, τα αποτελέσματα των δύο πρόσθετων μοντέλων αναμένονται εκ των προτέρων αδόκιμα και μη εφαρμόσιμα για τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

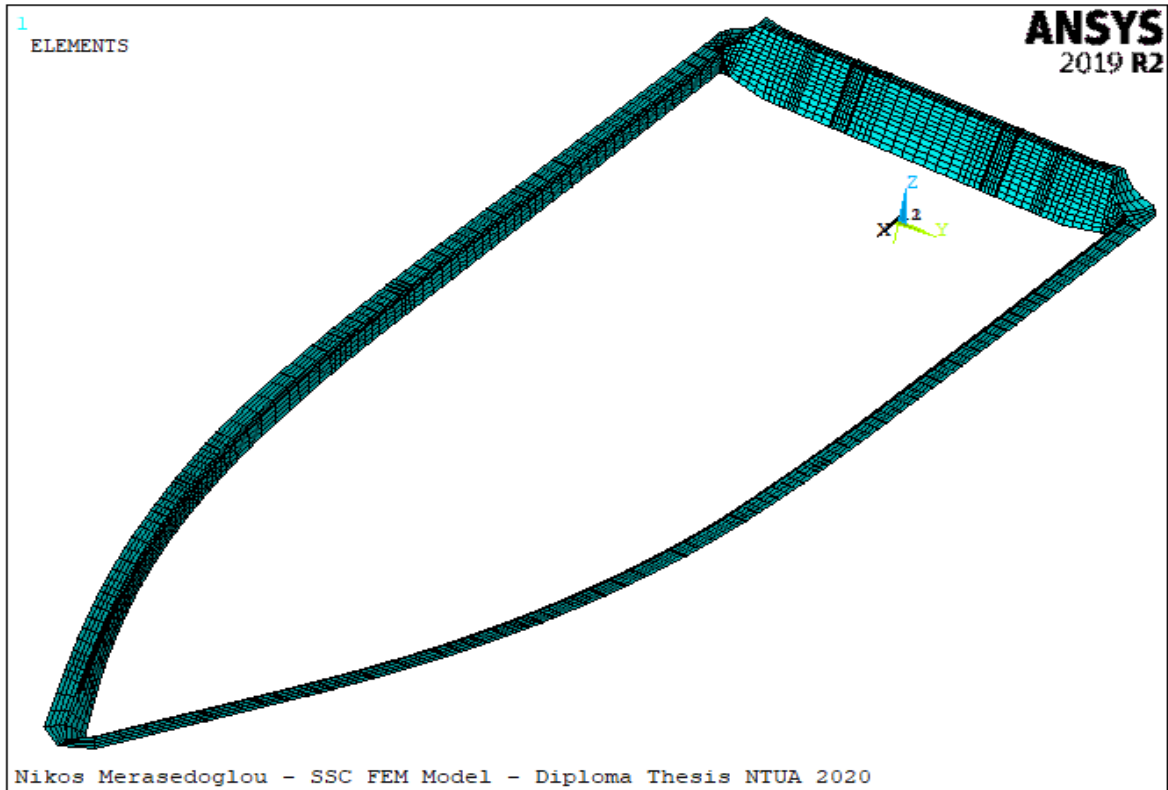
Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

4.1 Εισαγωγή

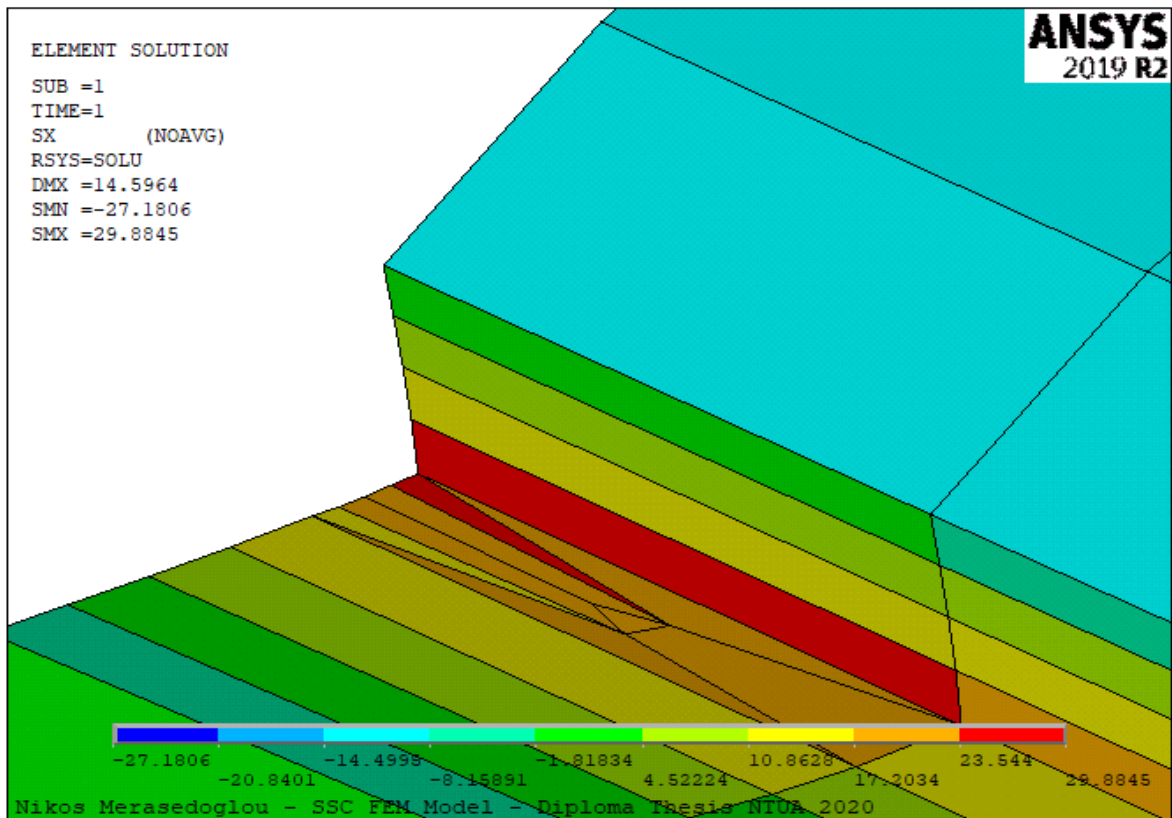
Το κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει την επίλυση των μοντέλων γραμμικής και μη-γραμμικής ανάλυσης στα πλαίσια του κατασκευαστικού σχεδιασμού, καθώς επίσης και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Αρχικά, περιγράφονται τα τμήματα του σκάφους για τα οποία εξάγονται αποτελέσματα, καθώς επίσης και οι τιμές της μέγιστης αντοχής και των μέγιστων επιτρεπόμενων ορίων σε εφελκυσμό και θλίψη. Έπειτα, παρατίθενται τα αποτελέσματα του 1^{ου}, του 2^{ου} και του 3^{ου} μοντέλου αντίστοιχα. Χάριν συντομίας, στο παρόν κεφάλαιο ονομάζεται ως 1^ο το μοντέλο γραμμικής ανάλυσης με συνοριακές συνθήκες πακτώσεις στους κόμβους περιμετρικά του κοίλου της γάστρας, ως 2^ο ονομάζεται το μοντέλο μη-γραμμικής ανάλυσης με συνοριακές συνθήκες πακτώσεις στους κόμβους περιμετρικά του κοίλου της γάστρας και ως 3^ο ονομάζεται το μοντέλο το οποίο συνυπολογίζει τα αδρανειακά φορτία που αναπτύσσει το σκάφος, χρησιμοποιεί σαν συνοριακές συνθήκες περιορισμό των βαθμών ελευθερίας UX, UY και UZ στους κόμβους περιμετρικά του κοίλου της γάστρας και επιλύεται με γραμμική ανάλυση.

Κατά τη δημιουργία των τριών μοντέλων για τον κατασκευαστικό σχεδιασμό του σκάφους, ορίζονται περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας στους κόμβους περιμετρικά της γάστρας προκειμένου να προσομοιαστεί η ύπαρξη καταστρώματος το οποίο θα συνεισέφερε πρόσθετη αντοχή στην κατασκευή. Έτσι τοποθετήθηκαν πακτώσεις στους κόμβους περιμετρικά της γάστρας, εκεί όπου τοποθετείται το κατάστρωμα, λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή ότι περιμετρικά του σκάφους αναπτύσσονται μικρές τιμές βέλους κάμψης. Στις γειτονικές περιοχές των κόμβων που εφαρμόζονται οι συνοριακές συνθήκες αναμένονται υψηλές τιμές τοπικών τάσεων λόγω των πακτώσεων, οι οποίες αγνοούνται. Η γειτονική περιοχή στην οποία αγνοούνται τα αποτελέσματα λόγω των πακτώσεων είναι, ως επί το πλείστον, η άνω ζώνη του σκάφους, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.

Επιπλέον, υπάρχουν μεμονωμένα στοιχεία (συνήθως πολύ μικρά και «κακής» γεωμετρίας) στα οποία εμφανίζονται αρκετά υψηλότερες τάσεις σε σχέση με γειτονικά στοιχεία, πράγμα το οποίο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Παράδειγμα τέτοιων στοιχείων απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Οι υψηλές τιμές σε αυτά τα στοιχεία είναι «τεχνητές» και προκύπτουν από τον τρόπο με τον οποίο δημιουργείται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Συνήθως τέτοιου είδους ανωμαλίες παρουσιάζονται στα σημεία αλλαγής της γεωμετρίας, όπως στα spray – rails και τα steps του σκάφους, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. 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.



Σχήμα 4.1 : Περιοχή του σκάφους όπου αγνοούνται τα αποτελέσματα των τάσεων.

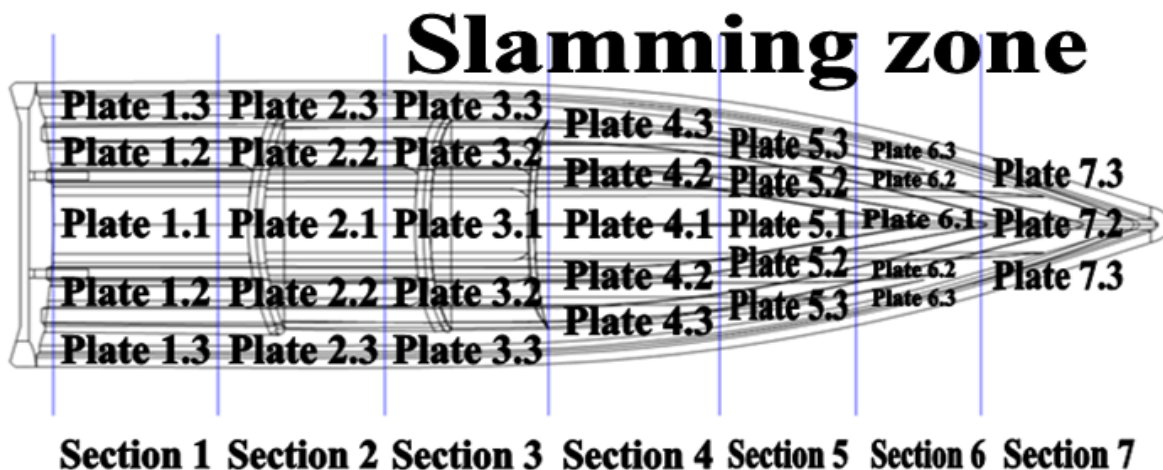


Σχήμα 4.2 : Παράδειγμα στοιχείων στα οποία τα αποτελέσματα αγνοούνται.

Ακολούθως, γίνεται δειγματοληπτική σύγκριση των τριών μοντέλων, ήτοι της γραμμικής και μη-γραμμικής ανάλυσης με συνοριακές συνθήκες πακτώσεις στους κόμβους περιμετρικά της γάστρας και του μοντέλου το οποίο συνυπολογίζει τα αδρανειακά φορτία που αναπτύσσει το σκάφος, και εξάγεται συμπέρασμα για το ποιο από τα μοντέλα προσομοιάζει καλύτερα το παρόν πρόβλημα. Τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα από δύο επιπλέον μοντέλα. Το ένα μοντέλο αφορά την επίλυση του προβλήματος με πάκτωση στον κόμβο που βρίσκεται πιο κοντά στο κέντρο μάζας της κατασκευής, ενώ το δεύτερο μοντέλο αφορά την επίλυση του προβλήματος με χρήση των συνοριακών συνθηκών που προτείνει ο νηογνώμονας DNV–GL. Στη συνέχεια εξηγούνται τόσο οι λόγοι για τους οποίους τα μοντέλα αυτά δεν έχουν εφαρμογή στον τρόπο με τον οποίο έχει μοντελοποιηθεί το σκάφος στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όσο και οι προϋποθέσεις που θα έπρεπε να πληρούνται για να μπορούν να εφαρμοστούν στο παρόν πρόβλημα.

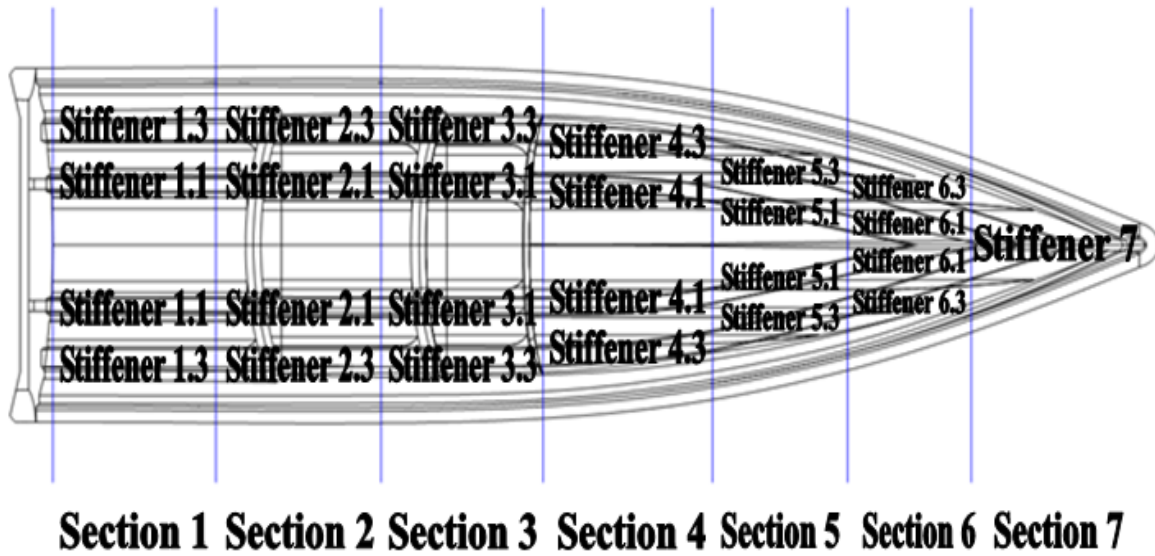
4.1.1 Οριοθέτηση σκάφους σε πλάκες και ενισχυτικά

Ως plate 1.1 ονομάζεται το σύνολο των πλακών που ανήκουν στην κεντρική ζώνη του section 1, ενώ plate 1.2 είναι το σύνολο των πλακών που ανήκουν στην ενδιάμεση ζώνη του section 1 και plate 1.3 το σύνολο των πλακών που ανήκουν στην ανώτερη ζώνη του section 1. Με όμοιο τρόπο ονομάζονται οι πλάκες στα section 2,3,4,5 και 6. Το section 7 αποτελείται από το plate 7.2 που είναι το σύνολο των πλακών που ανήκουν στην κεντρική ζώνη του section 7 και το plate 7.3 το σύνολο των πλακών που ανήκουν στην ανώτερη ζώνη του section 7. Το section 7 αποτελεί την προραία περιοχή του σκάφους όπου η γεωμετρία «στενεύει», συνεπώς δεν υπάρχει ενδιάμεση ζώνη. Η οριοθέτηση των plates απεικονίζεται στο Σχήμα 4.3, όπου φαίνεται ότι τα sections 3,4,5,6 και 7 ανήκουν στην ζώνη σφυρόκρουσης (slamming zone), ενώ τα sections 1 και 2 όχι. Οι περιοχές που ανήκουν στο «slamming zone» έχουν καθοριστεί σύμφωνα με το Part 8, Chapter 7, Section 1 των κανονισμών του «Lloyd’s Register – July 2018».



Σχήμα 4.3 : Οριοθέτηση των plates σε κάθε περιοχή του σκάφους.

Τα διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους ονομάστηκαν με όμοιο τρόπο με τις πλάκες του σκάφους. Ως stiffener 1.1 ονομάζεται το εσωτερικό διάμηκες ενισχυτικό του section 1, ενώ ως stiffener 1.3 ονομάζεται το εξωτερικό διάμηκες ενισχυτικό του section 1. Με όμοιο τρόπο ονομάζονται τα διαμήκη ενισχυτικά στα section 2,3,4,5 και 6. Το stiffener 7 αναφέρεται στο μέρος του εξωτερικού διαμήκους ενισχυτικού που ανήκει στο section 7, καθώς το εσωτερικό ενισχυτικό δεν εκτίνεται έως το section 7, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4 : Οριοθέτηση των stiffeners σε κάθε περιοχή του σκάφους.

4.1.2 Αντοχές στρώσεων σύμφωνα με τους κανονισμούς του νηογνώμονα

Οι αντοχές σε εφελκυσμό (ultimate tensile strength) και θλίψη (ultimate compressive strength) κατά το διάμηκες και το εγκάρσιο κάθε στρώσης υπολογίστηκαν σύμφωνα με το Part 8, Chapter 3, Section 1 των κανονισμών του «Lloyd's Register – July 2018», ενώ τα επιτρεπόμενα όρια των τάσεων (allowable strength) υπολογίζονται από τις αντοχές κάθε στρώσης πολλαπλασιάζοντάς τες με συντελεστή ασφαλείας (stress fraction) ο οποίος προδιαγράφεται στο Part 8, Chapter 7, Section 3 των κανονισμών του «Lloyd's Register – July 2018». Για το παρόν σκάφος, ο συντελεστής ασφαλείας έχει τη τιμή 0.28 για τις περιοχές που ανήκουν στην ζώνη σφυρόκρουσης (slamming zone), ενώ έχει τη τιμή 0.25 στις υπόλοιπες περιοχές. Οι αντοχές και τα επιτρεπόμενα όρια απεικονίζονται στους Πίνακες 4.1 έως 4.4 για την στρώση 300_CSM με περιεκτικότητα ινών 30%, για τις στρώσεις 300_CSM, 450_CSM και 600_CSM με περιεκτικότητα ινών 33%, για την στρώση 800_WR με περιεκτικότητα ινών 50% και για την στρώση 600_UDR με περιεκτικότητα ινών 50%. Οι τιμές αυτές ισχύουν τόσο για τη γάστρα του σκάφους, όσο και για τα ενισχυτικά, τις εγκάρσιες φρακτές και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

Πίνακας 4.1 : Αντοχές στρώσεως 300_CSM με περιεκτικότητα ινών 30% (MPa).

	Ultimate Strength	Allowable Strength	
	Everywhere	Slamming Zone	Elsewhere
Longitudinal tensile strength	85	23.8	21.25
Longitudinal compressive strength	- 117	- 32.76	- 29.25
Transverse tensile strength	85	23.8	21.25
Transverse compressive strength	- 117	- 32.76	- 29.25
Ultimate shear strength	62	-	-

Πίνακας 4.2 : Αντοχές στρώσεων 300_CSM, 450_CSM και 600_CSM με ποσοστό ινών 33% (MPa).

	Ultimate Strength	Allowable Strength	
	Everywhere	Slamming Zone	Elsewhere
Longitudinal tensile strength	91	25.48	22.75
Longitudinal compressive strength	- 121.5	- 34.02	- 30.375
Transverse tensile strength	91	25.48	22.75
Transverse compressive strength	- 121.5	- 34.02	- 30.375
Ultimate shear strength	64.4	-	-

Πίνακας 4.3 : Αντοχές στρώσεως 800_WR με περιεκτικότητα ινών 50% (MPa).

	Ultimate Strength	Allowable Strength	
	Everywhere	Slamming Zone	Elsewhere
Longitudinal tensile strength	190	53.2	47.5
Longitudinal compressive strength	- 147	- 41.16	- 36.75
Transverse tensile strength	190	53.2	47.5
Transverse compressive strength	- 147	- 41.16	- 36.75
Ultimate shear strength	78	-	-

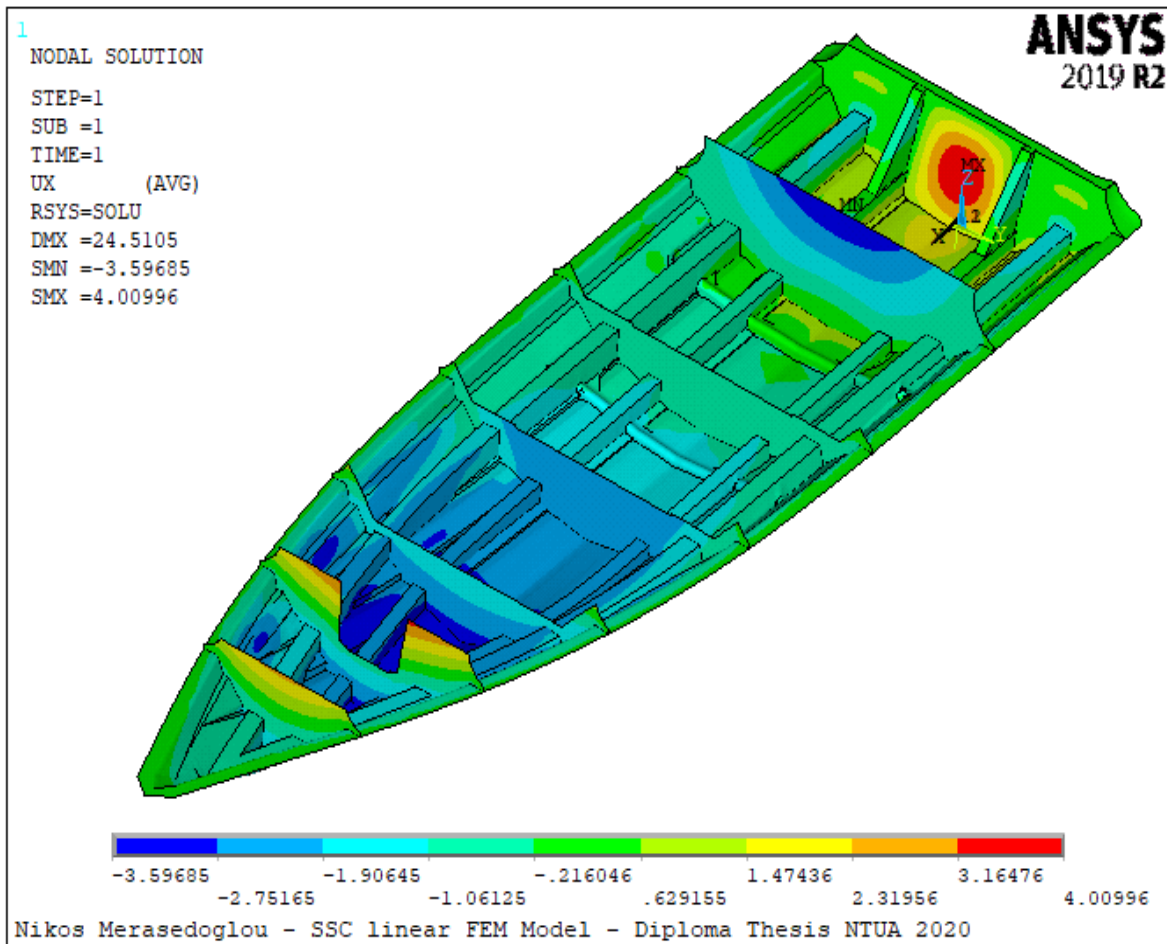
Πίνακας 4.4 : Αντοχές στρώσεως 600_UDR με περιεκτικότητα ινών 50% (MPa).

	Ultimate Strength	Allowable Strength	
	Everywhere	Slamming Zone	Elsewhere
Longitudinal tensile strength	238.7	66.836	59.675
Longitudinal compressive strength	- 192.9	- 54.012	- 48.225
Transverse tensile strength	12.6	3.528	3.15
Transverse compressive strength	- 36.1	- 10.108	- 9.025
Ultimate shear strength	13.25	-	-

4.2 Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης – 1^ο μοντέλο

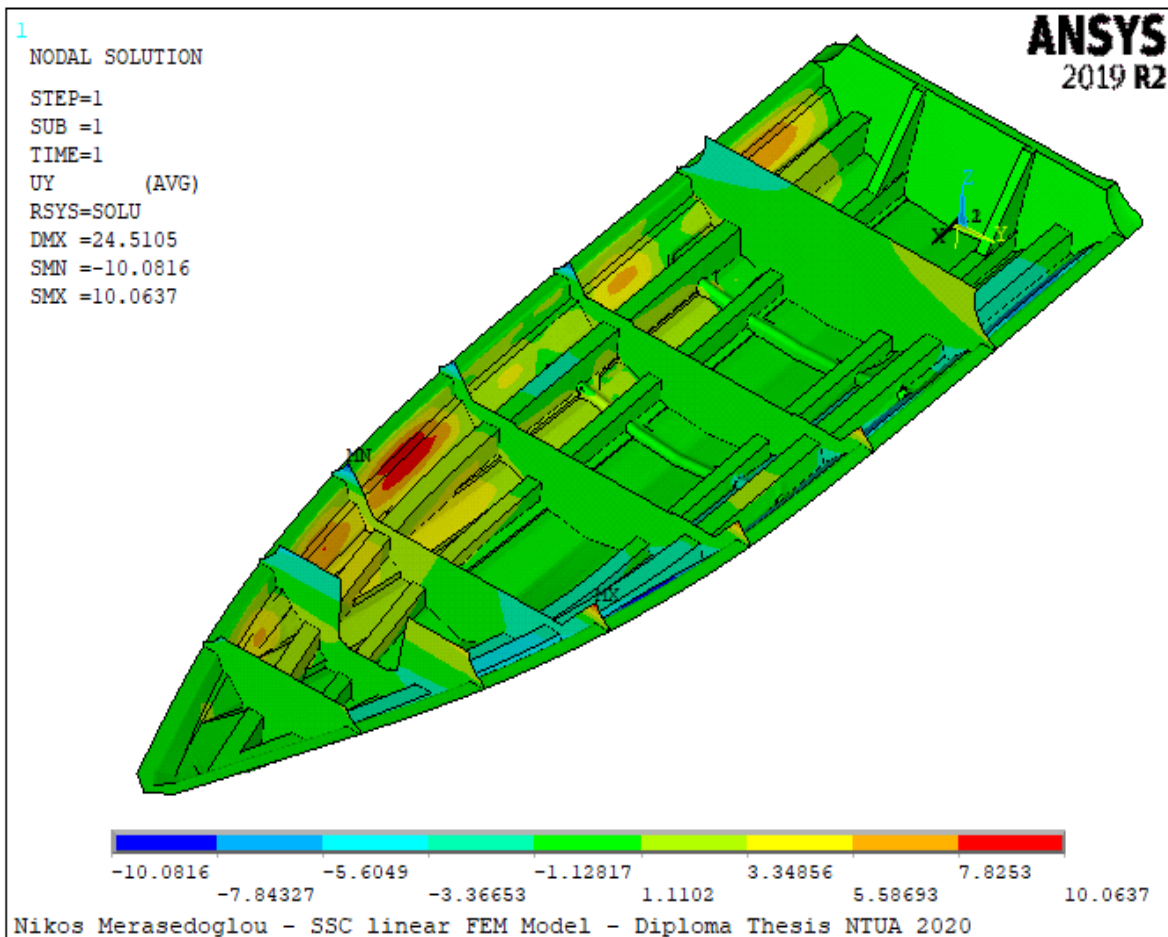
4.2.1 Μετατοπίσεις στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

Οι μετατοπίσεις (displacements) UX, UY, UZ και η συνολική μετατόπιση USUM έχουν υπολογιστεί και απεικονίζονται στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (global cartesian coordinate system). Οι μετατοπίσεις αυτές απλώς δίνουν μια πρώτη εκτίμηση για τον τρόπο με τον οποίο καταπονείται το σκάφος. Η μετατόπιση UX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5, η μετατόπιση UY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.6 και 4.7 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα, η μετατόπιση UZ κατά τον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.8 και 4.9 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα, ενώ η συνολική μετατόπιση USUM απεικονίζεται στα Σχήματα 4.10 και 4.11 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα.

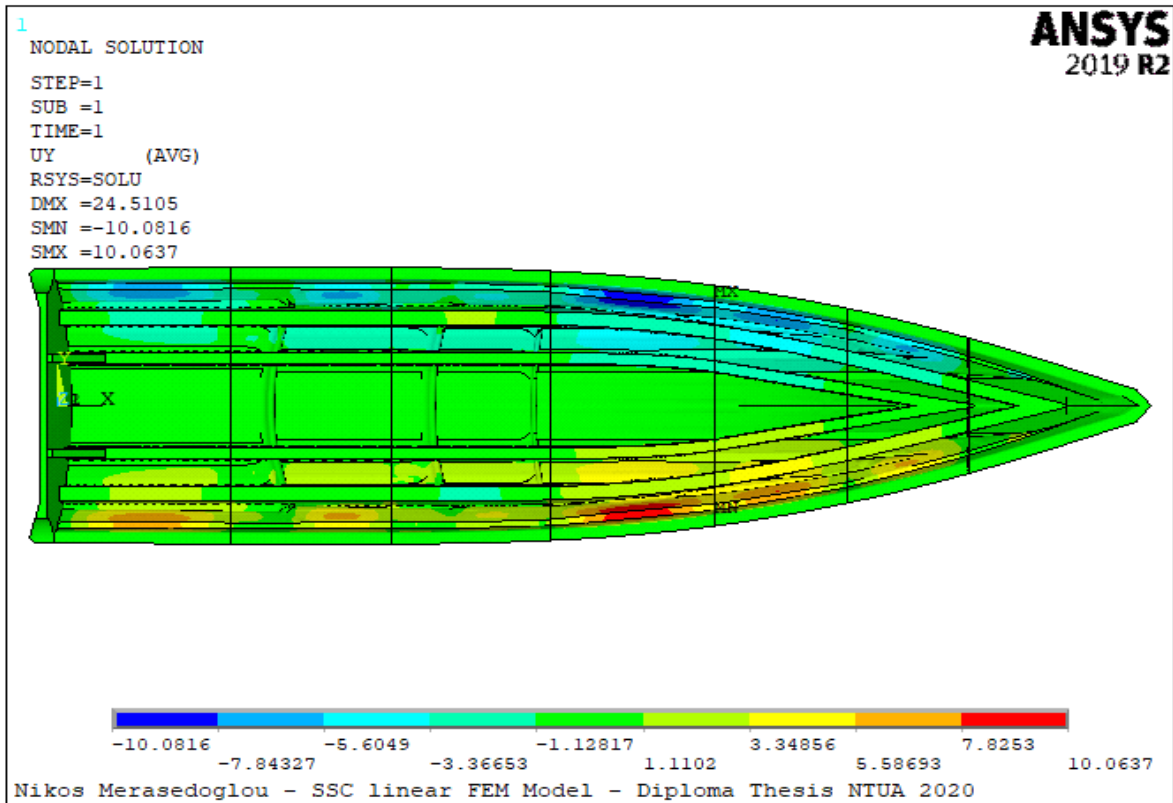


Σχήμα 4.5 : Μετατόπιση UX ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

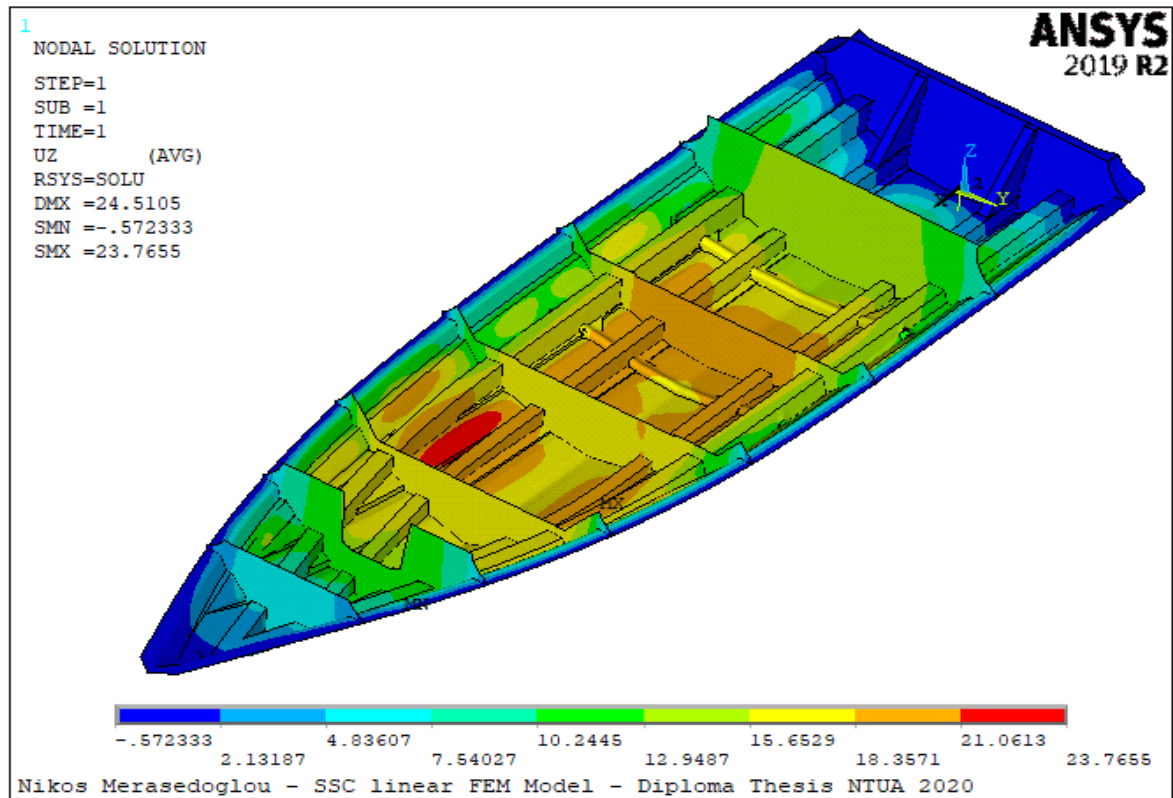
Παρατηρείται ότι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή μετατόπισης UX εμφανίζονται σε δύο εκ των εγκάρσιων φρακτών. Οι μεγάλες τιμές μετατόπισης κατά τον διαμήκη άξονα του γενικευμένου συστήματος συντεταγμένων που παρουσιάζονται στους κόμβους των εγκάρσιων φρακτών και του καθρέφτη, οφείλονται στις εξωτερικές πιέσεις που ασκούνται στην εξωτερική επιφάνεια της γάστρας οι οποίες προκαλούν θλιπτικά φορτία στο ελεύθερο άκρο των φρακτών. Αποτέλεσμα του θλιπτικού φορτίου που ασκείται στα ελεύθερα άκρα των φρακτών είναι οι φρακτές να καταπονούνται σε λυγισμό, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοίλου στο μέσο των φρακτών, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5. Παρατηρείται ότι η δεύτερη προωαία φρακτή αναπτύσσει τα κοίλα της προς την πρύμνη, ενώ η πρυμναία φρακτή αναπτύσσει τα κοίλα της με φορά προς την πλώρη. Η φορά που θα έχουν τα κοίλα που αναπτύσσονται σε κάθε φρακτή καθορίζεται από τον τρόπο ενίσχυσης και τους γεωμετρικούς περιορισμούς του σκάφους.



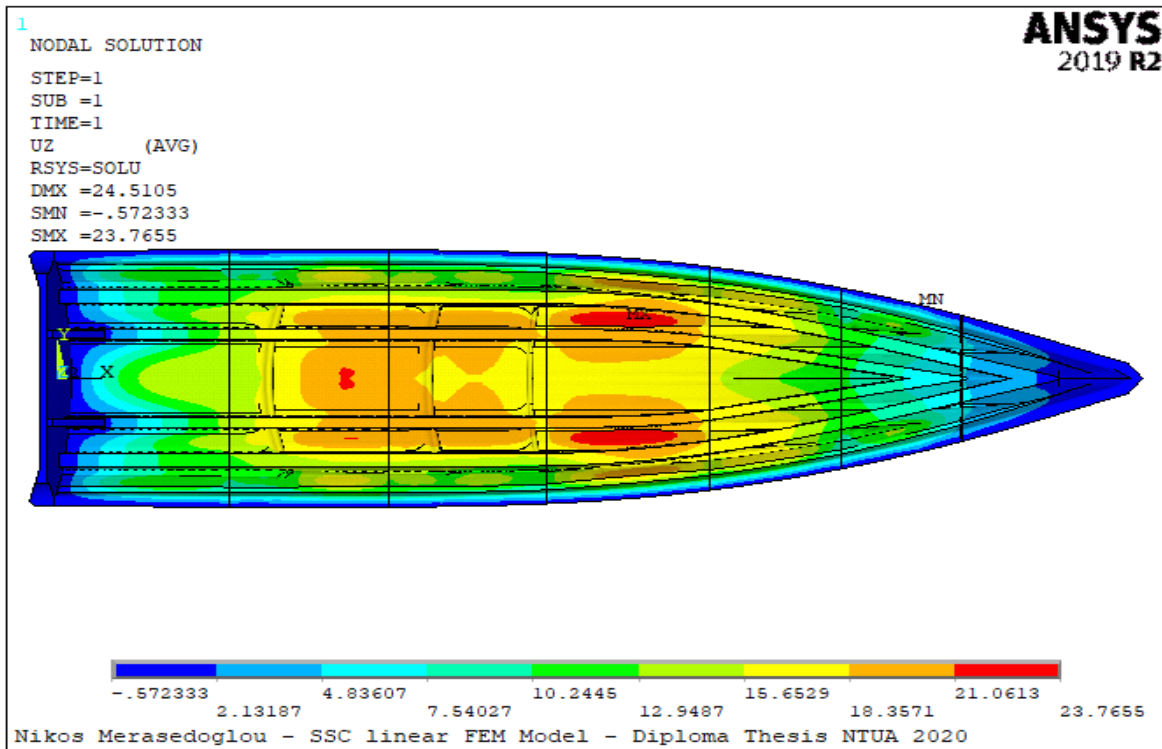
Σχήμα 4.6 : Τρισδιάστατη όψη μετατόπισης UY στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



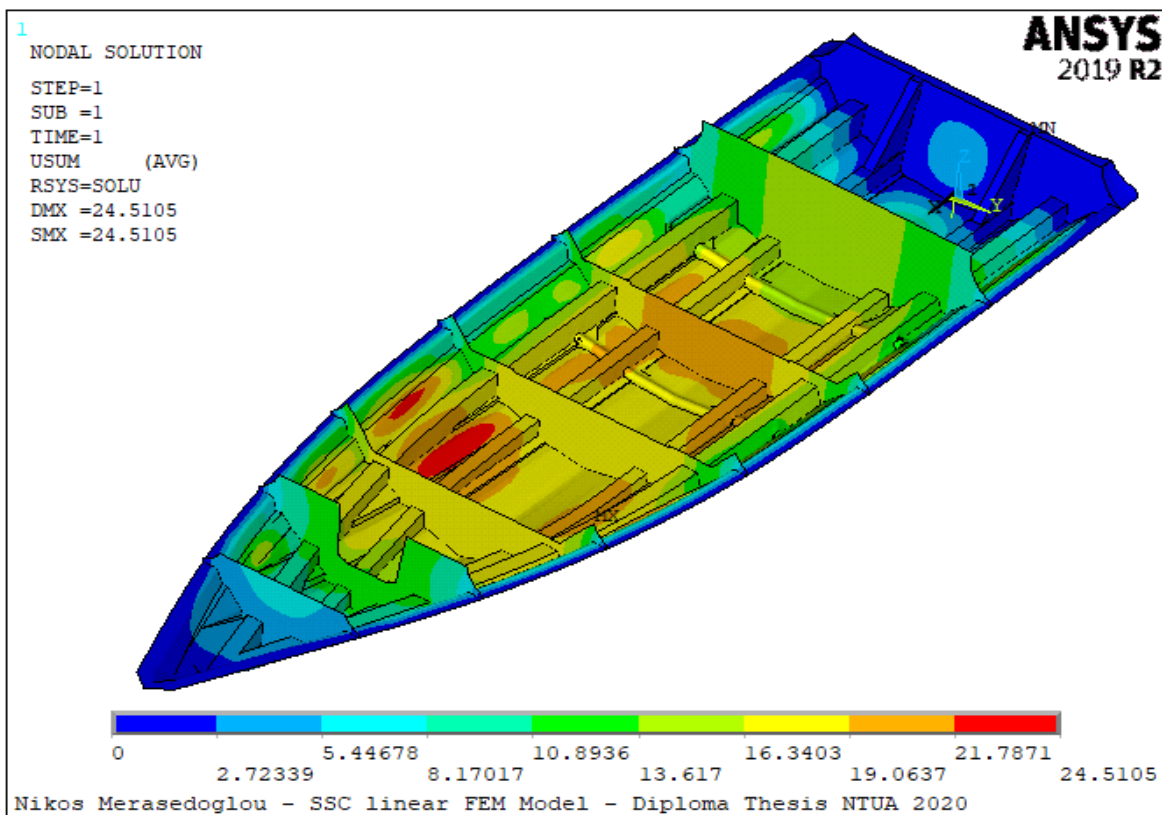
Σχήμα 4.7 : Ανοψη μετατόπισης UY στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



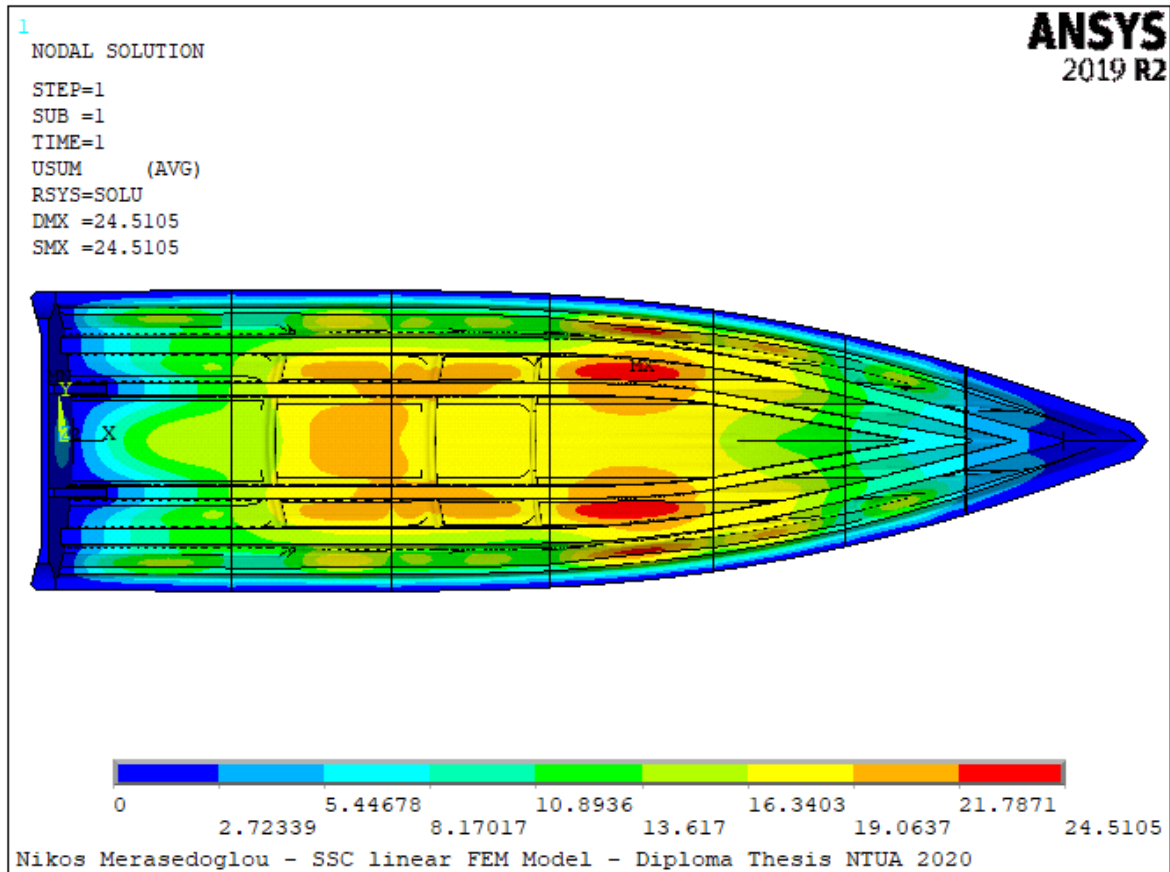
Σχήμα 4.8 : Τρισδιάστατη όψη μετατόπισης UZ στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.9 : Άνοψη μετατόπισης UZ στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.10 : Τρισδιάστατη όψη συνολικής μετατόπισης USUM ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

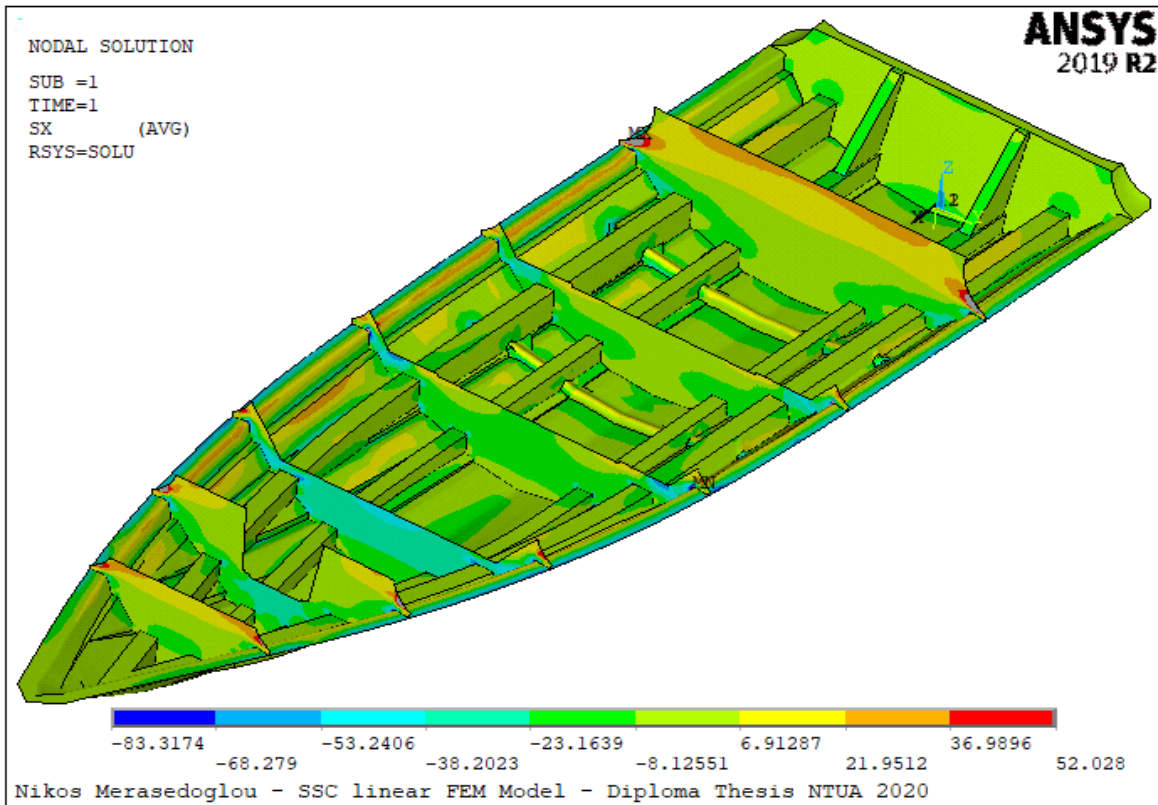


Σχήμα 4.11 : Άνοψη συνολικής μετατόπισης USUM ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

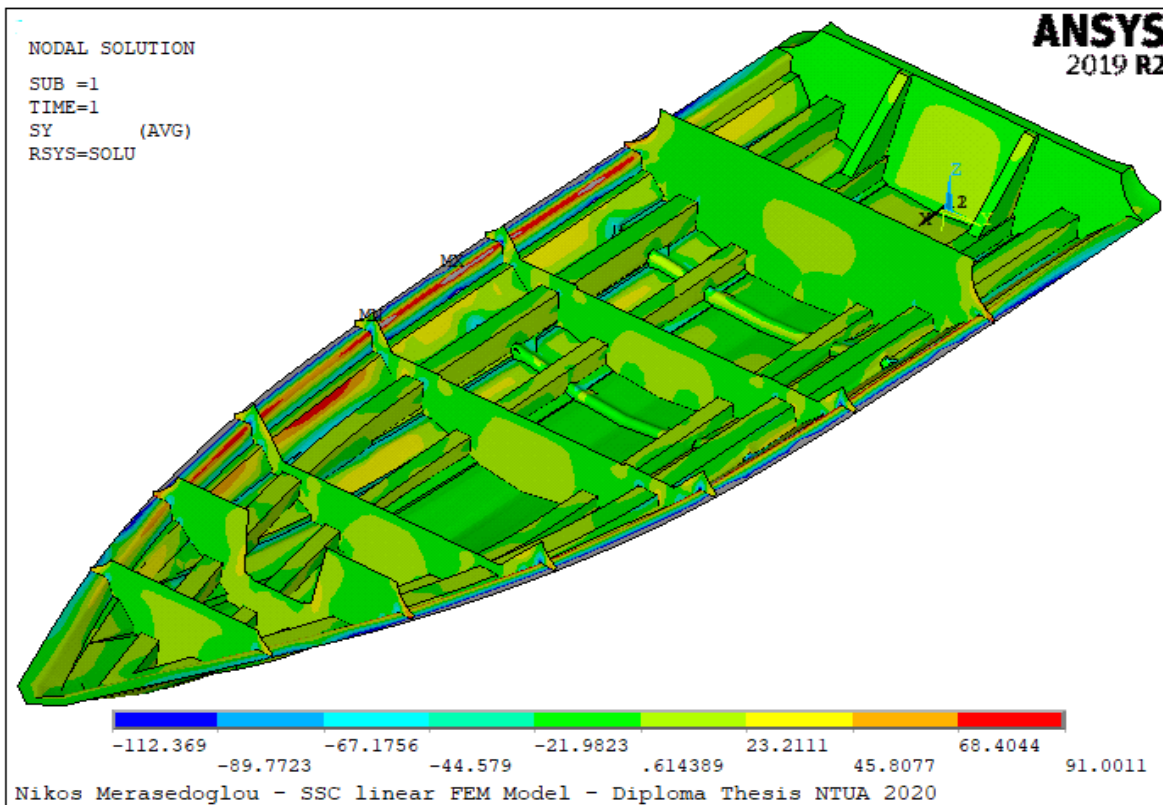
Τα Σχήματα 4.5 έως 4.11 των μετατοπίσεων UX, UY, UZ και της συνολικής μετατόπισης USUM αντίστοιχα δείχνουν ότι τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης είναι συμμετρικά ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας xz του σκάφους, όπως αναμένεται εκ των προτέρων από τη συμμετρία του προβλήματος.

4.2.2 Κατανομή τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων

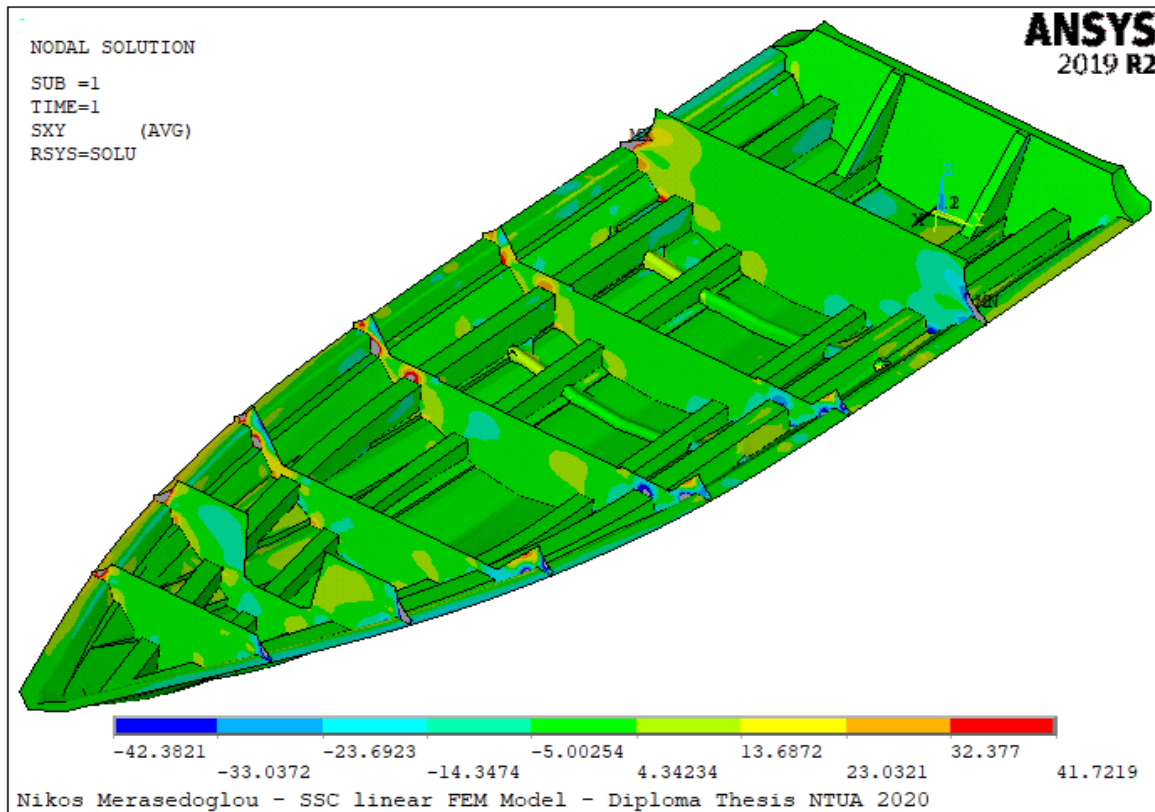
Οι τάσεις (stresses) SX, SY και SXY έχουν υπολογιστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου (local coordinate system) και απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη. Υπενθυμίζεται ότι ο προσανατολισμός των αξόνων του τοπικού συστήματος αναφοράς που έχει κάθε στοιχείο περιγράφεται στην τελευταία παράγραφο του εδαφίου 3.3.3 της παρούσας εργασίας. Η κατανομή της τάσης SX απεικονίζεται στο Σχήμα 4.12, η κατανομή της τάσης SY απεικονίζεται στο Σχήμα 4.13, ενώ η διατμητική τάση SXY απεικονίζεται στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.12 : Κατανομή τάσης SX ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.13 : Κατανομή τάσης SY ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

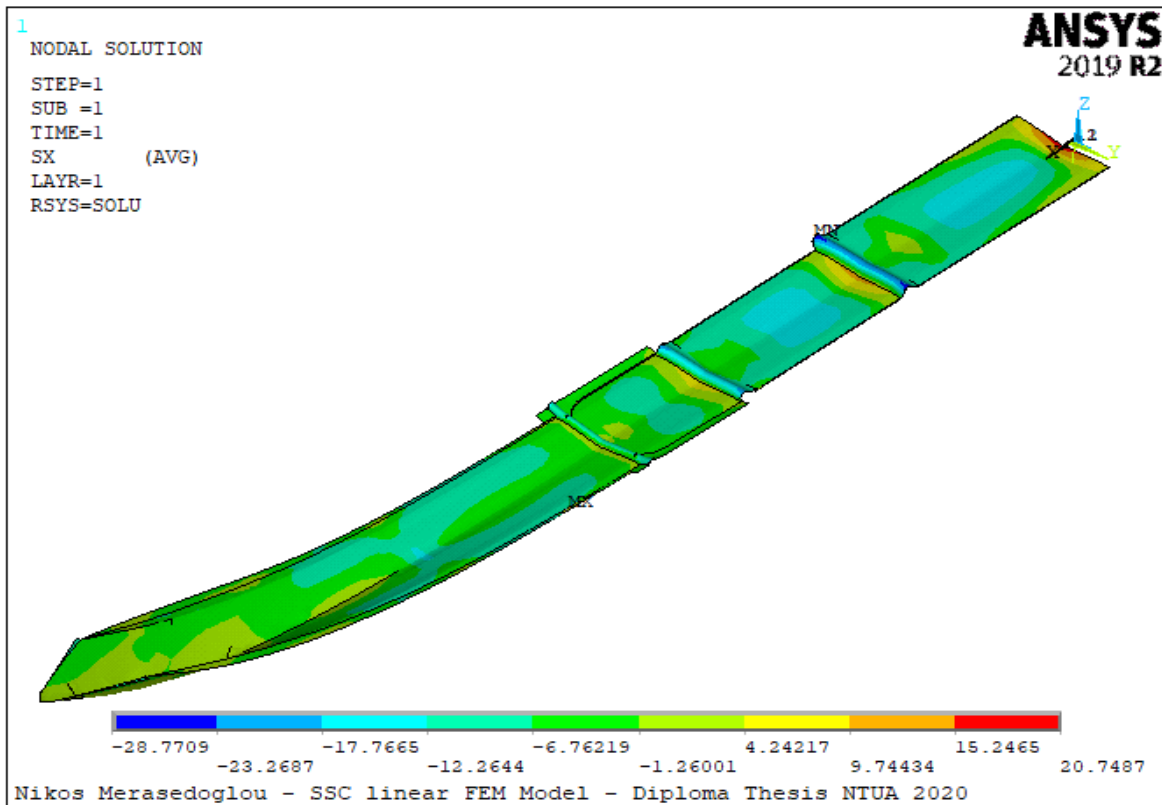


Σχήμα 4.14 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

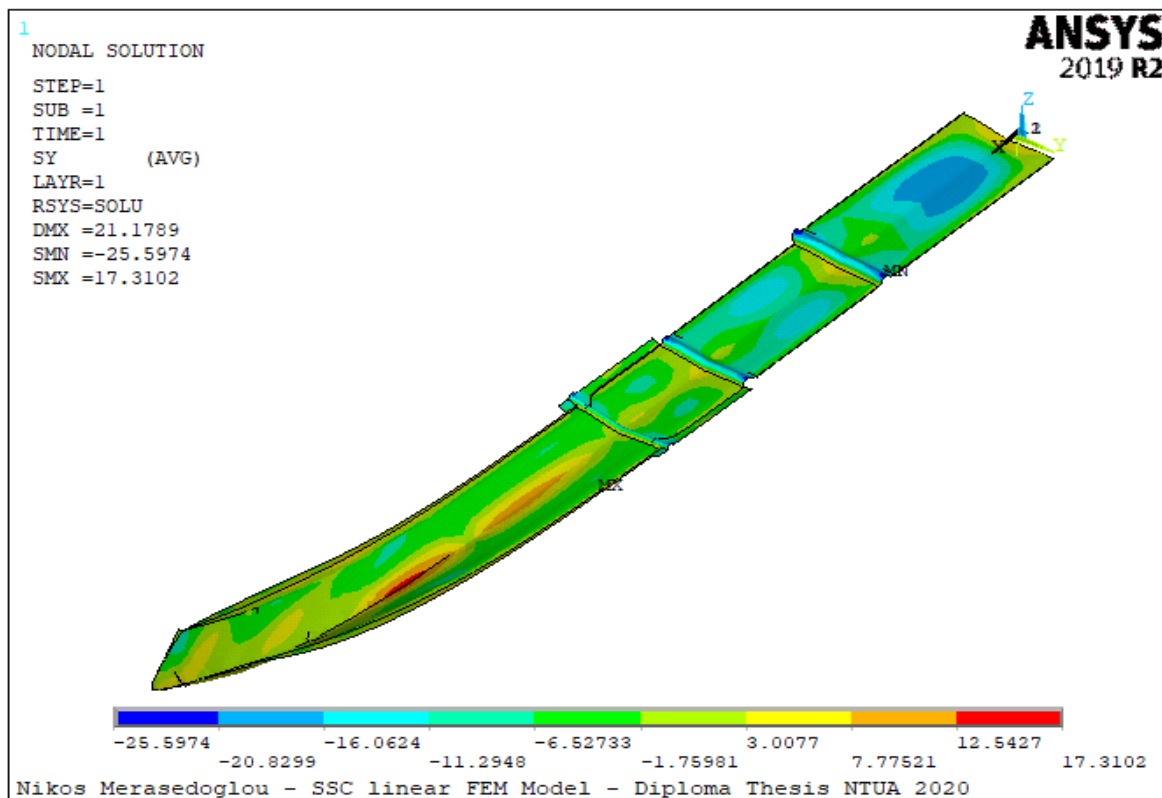
Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που αναγράφονται στις χρωματικές κλίμακες των Σχημάτων 4.12, 4.13 και 4.14 αφορούν την στρώση εκείνη που αναπτύσσει τη μέγιστη τάση συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρώσεις του πολύστρωτου (layer,0), με εξαίρεση τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων στα οποία τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, συνεπώς αγνοούνται.

4.2.3 Έλεγχος αντοχής γάστρας σκάφους

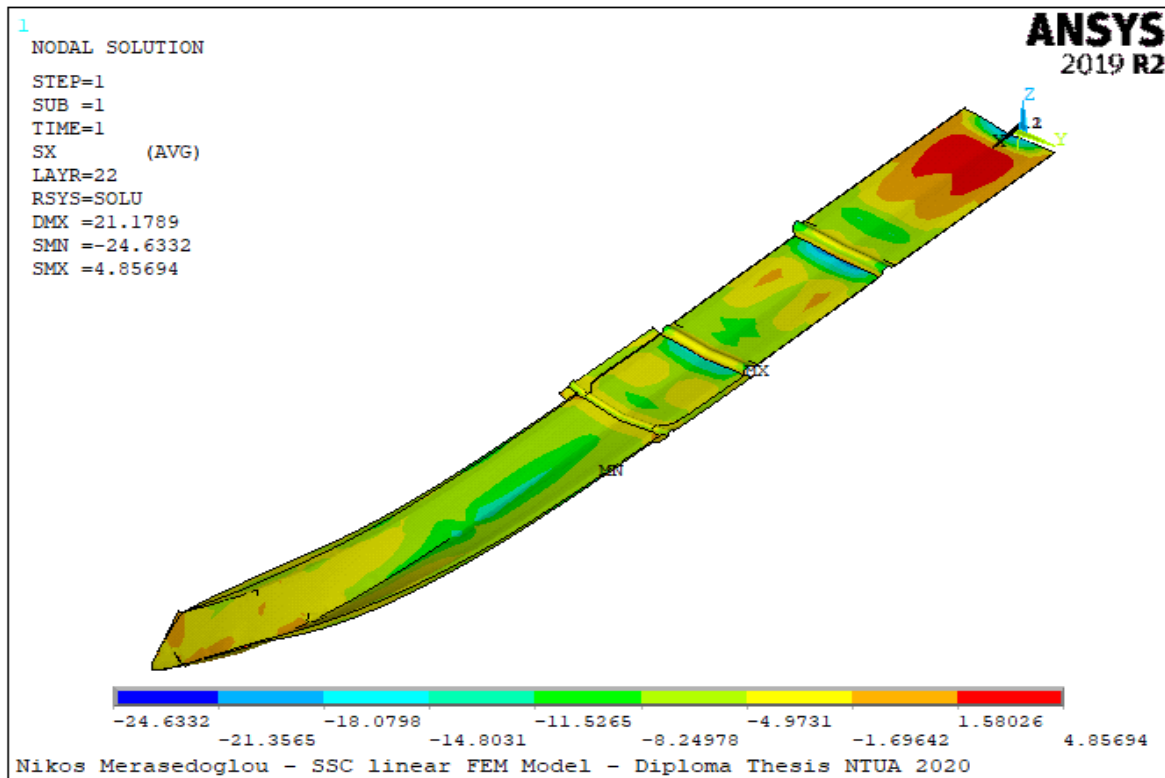
Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της γραμμικής ανάλυσης έγινε ξεχωριστά σε κάθε ζώνη (κεντρική, ενδιάμεση και ανώτερη) η οποία έχει διαφορετική αλληλουχία στρώσεων με τις υπόλοιπες, δεδομένου ότι οι στρώσεις μίας ζώνης είναι κοινές σε κάθε section. Σε ότι αφορά την κεντρική ζώνη, ήτοι τα plates 1_1, 2_1, 3_1, 4_1, 5_1, 6_1 και 7_2, έγινε έλεγχος των τάσεων σε κάθε στρώση ξεχωριστά και παρατηρήθηκε ότι οι τάσεις σε όλες τις στρώσεις είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Ομοίως για τη ζώνη επικάλυψης μεταξύ κεντρικής και ενδιάμεσης ζώνης, καθώς επίσης και οι επικαλύψεις στα steps είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Τα Σχήματα 4.15 και 4.16 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY της εξωτερικής στρώσης του σκάφους στην κεντρική ζώνη, ενώ τα Σχήματα 4.17 και 4.18 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY αντίστοιχα της εσωτερικής στρώσης του σκάφους στην κεντρική ζώνη επίσης.



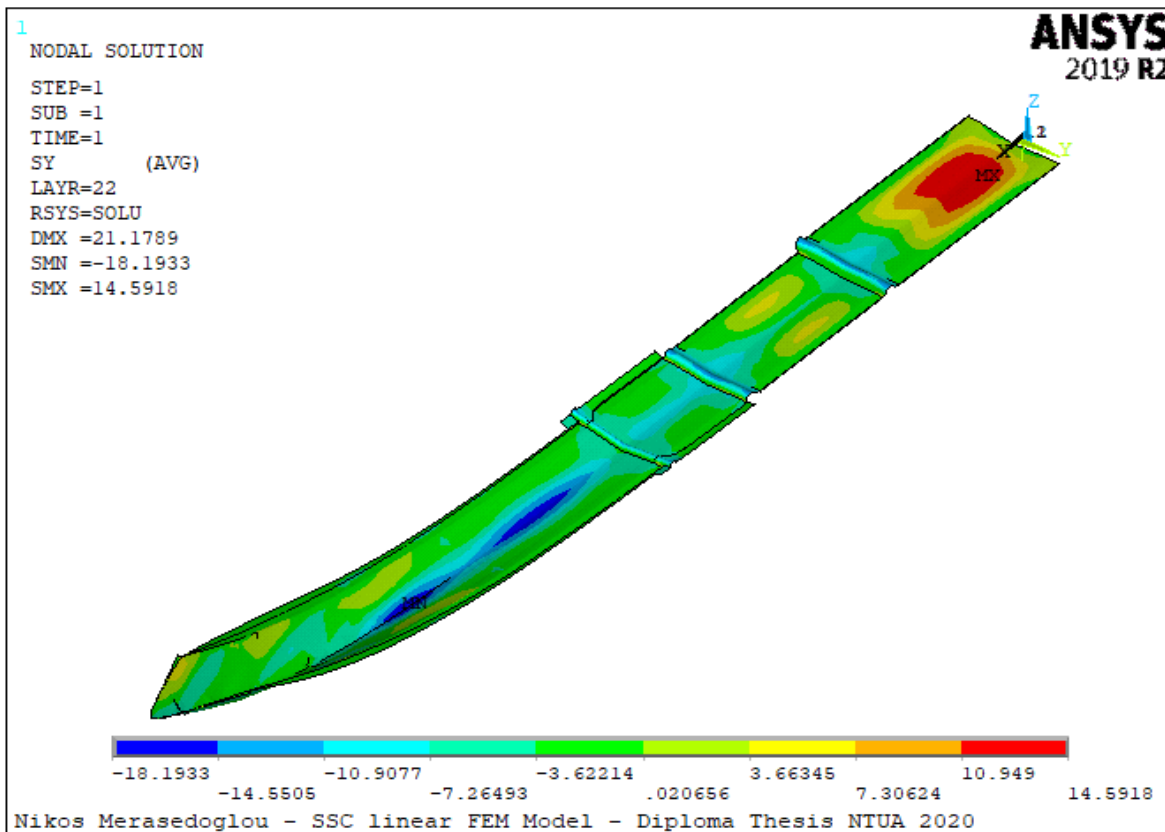
Σχήμα 4.15 : Κατανομή τάσης SX εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.16 : Κατανομή τάση SY εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.17 : Κατανομή τάσης SX εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.18 : Κατανομή τάση SY εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.

Σε ότι αφορά τόσο τον διαμήκη όσο και τον εγκάρσιο άξονα της πλαϊνής ζώνης, δηλαδή τα plates 1_2, 2_2, 3_2, 4_2, 5_2, 6_2 και 7_3, παρατηρείται αστοχία στη τελευταία στρώση του plate 4_2 η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του σκάφους, όπου η αναπτυσσόμενη τάση SY υπερβαίνει για πολύ λίγο το όριο αντοχής της στρώσης ($SY_{\text{tensile}} = 91.0011 \text{ MPa} > \text{Ultimate strength} = 91 \text{ MPa}$). Η μέγιστη τιμή της αναπτυσσόμενης τάσης SY που υπερβαίνει το όριο αντοχής απεικονίζεται στο Σχήμα 4.22. Υπενθυμίζεται ότι το σημείο του plate 4_2 στο οποίο παρατηρείται αστοχία, το σκάφος παρουσιάζει μέγιστο βέλος κάμψης, συνεπώς αυτή είναι η περιοχή που το σκάφος «πονάει» περισσότερο από την ασκούμενη πίεση.

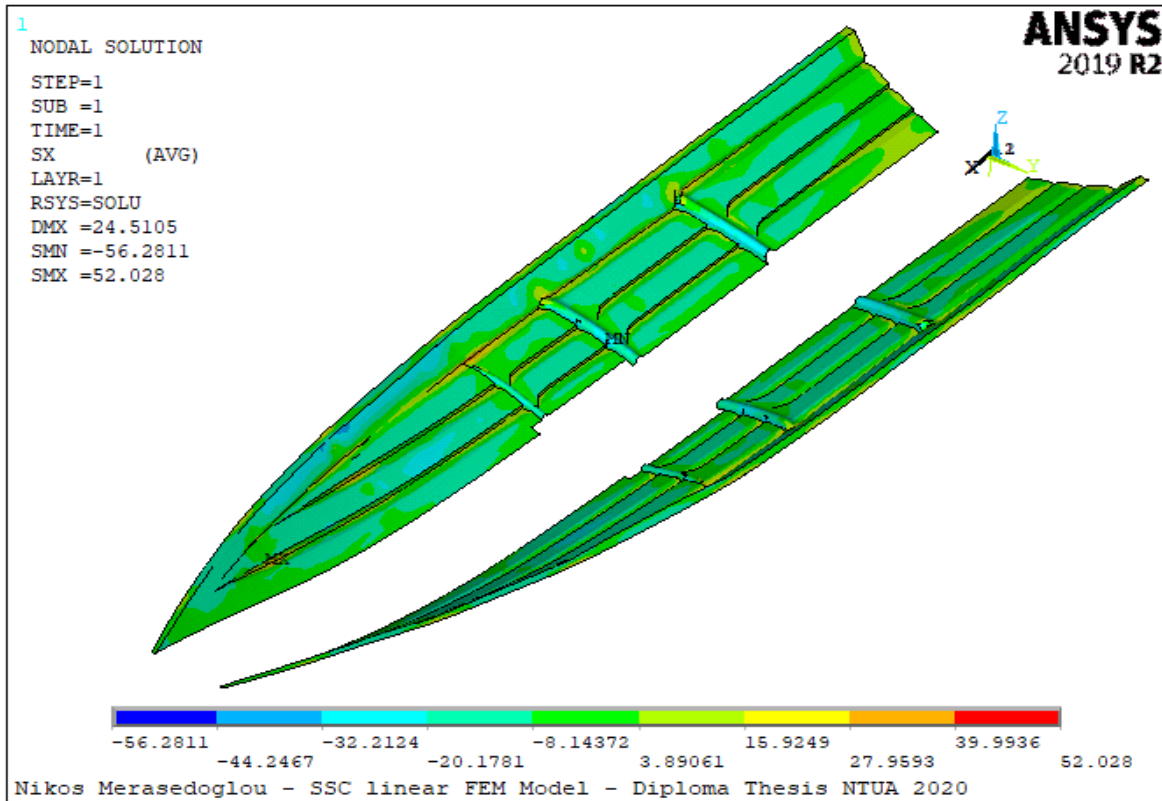
Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις SX και SY στις τέσσερις εξωτερικές στρώσεις (300_CSM, 300_CSM, 450_CSM και 800_WR) των plates 3_2, 4_2 και 5_2 υπερβαίνουν το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο θλίψης (allowable compressive strength), ενώ οι τέσσερις εσωτερικές στρώσεις (800_WR, 300_CSM, 800_WR και 300_CSM) των plates 3_2, 4_2 και 5_2 υπερβαίνουν το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο εφελκυσμού (allowable tensile strength) κατά τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα που προδιαγράφεται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Η περιοχή που παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές τάσεων είναι η ανώτερη πλάκα της ενδιάμεσης ζώνης του section 4, ήτοι plate 4_2, το οποίο παρουσιάζει την μέγιστη μετατόπιση κατά τον εγκάρσιο και κατακόρυφο άξονα του γενικευμένου καρτεσιανού συστήματος αναφοράς, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.5 – 4.11. Στο ανώτερο έλασμα του plate 4_2, εκτός από τις τέσσερις εξωτερικές και τις τέσσερις εσωτερικές στρώσεις που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια, υπερβαίνει και η πέμπτη από το εξωτερικό προς το εσωτερικό στρώση το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο θλίψης κατά τον εγκάρσιο άξονα.

Ενδεικτικά, στην πρώτη στρώση στο εξωτερικό του plate 4_2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $SY_{\text{compressive}} = -112.365 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -32.76 \text{ MPa}$ και μέγιστη εφελκυστική τάση $SY_{\text{tensile}} = 84.4319 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 23.8 \text{ MPa}$, ενώ στην εσωτερική στρώση του plate 4_2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $SY_{\text{compressive}} = -87.4437 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -34.02 \text{ MPa}$ και εφελκυστική τάση $SY_{\text{tensile}} = 91.0011 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 25.48 \text{ MPa}$.

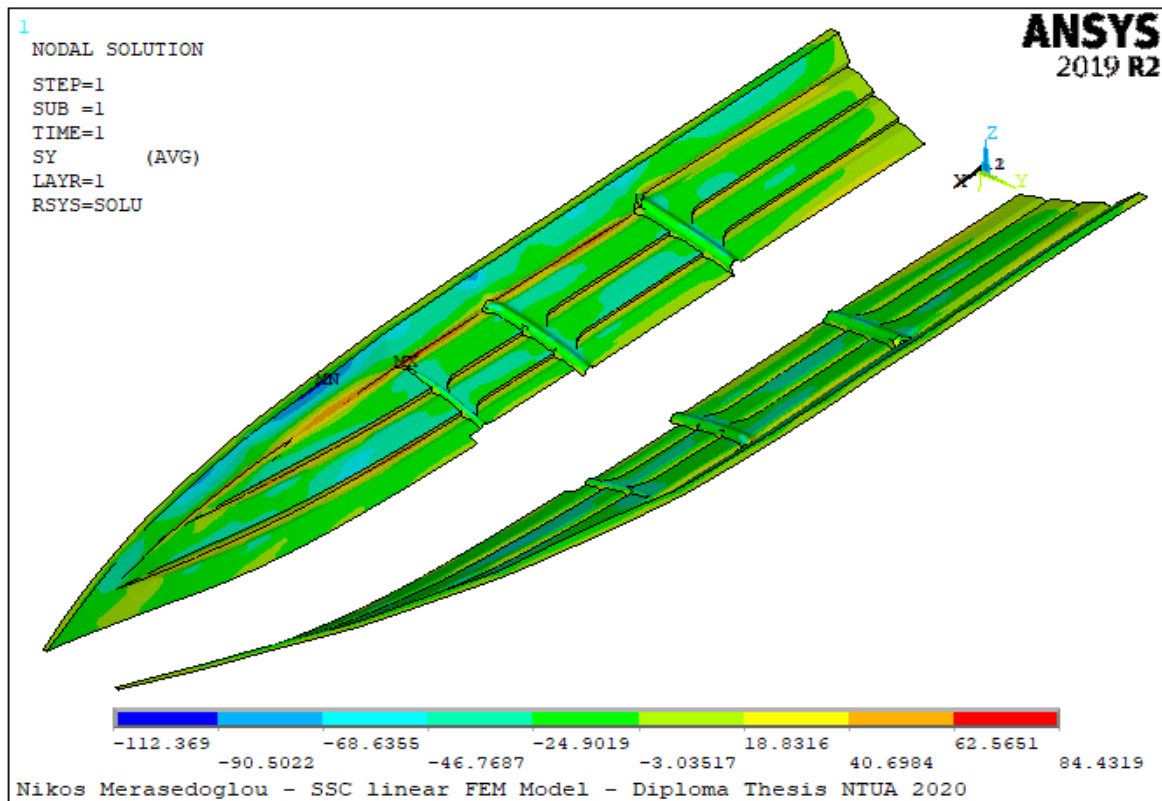
Τα Σχήματα 4.19 και 4.20 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY της εξωτερικής στρώσης του σκάφους, η οποία έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα και αποτελείται από 300_CSM περιεκτικότητας σε ίνες 0.3, ενώ τα Σχήματα 4.21 και 4.22 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY αντίστοιχα της εσωτερικής στρώσης του σκάφους, η οποία αποτελείται από 300_CSM περιεκτικότητας σε ίνες 0.33, συνεπώς η εσωτερική στρώση έχει μεγαλύτερη αντοχή και επιτρεπόμενα όρια τάσης σε σχέση με την εξωτερική. Όπως φαίνεται από τα Σχήματα 4.19 – 4.22, παρατηρείται ότι η εξωτερική και η εσωτερική στρώση υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια του νηογνώμονα (allowable stress) και όχι την αντοχή της κάθε στρώσης (ultimate stress). Οι παρατηρήσεις για την αντοχή της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους αφορούν επιπλέον την περιοχή επικάλυψης της ενδιάμεσης με την άνω ζώνη, καθώς επίσης και τις περιοχές επικάλυψης των steps που ανήκουν στην ενδιάμεση ζώνη.

Έλεγχος αντοχής δεν πραγματοποιήθηκε στην άνω ζώνη του σκάφους, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η άνω ζώνη είναι η περιοχή κοντά στην οποία έχουν επιβληθεί πακτώσεις περιμετρικά του σκάφους, συνεπώς τα αποτελέσματα στα γειτονικά στοιχεία (elements) είναι αναξιόπιστα και δεν μπορούν να συγκριθούν με τις απαιτήσεις του νηογνώμονα.

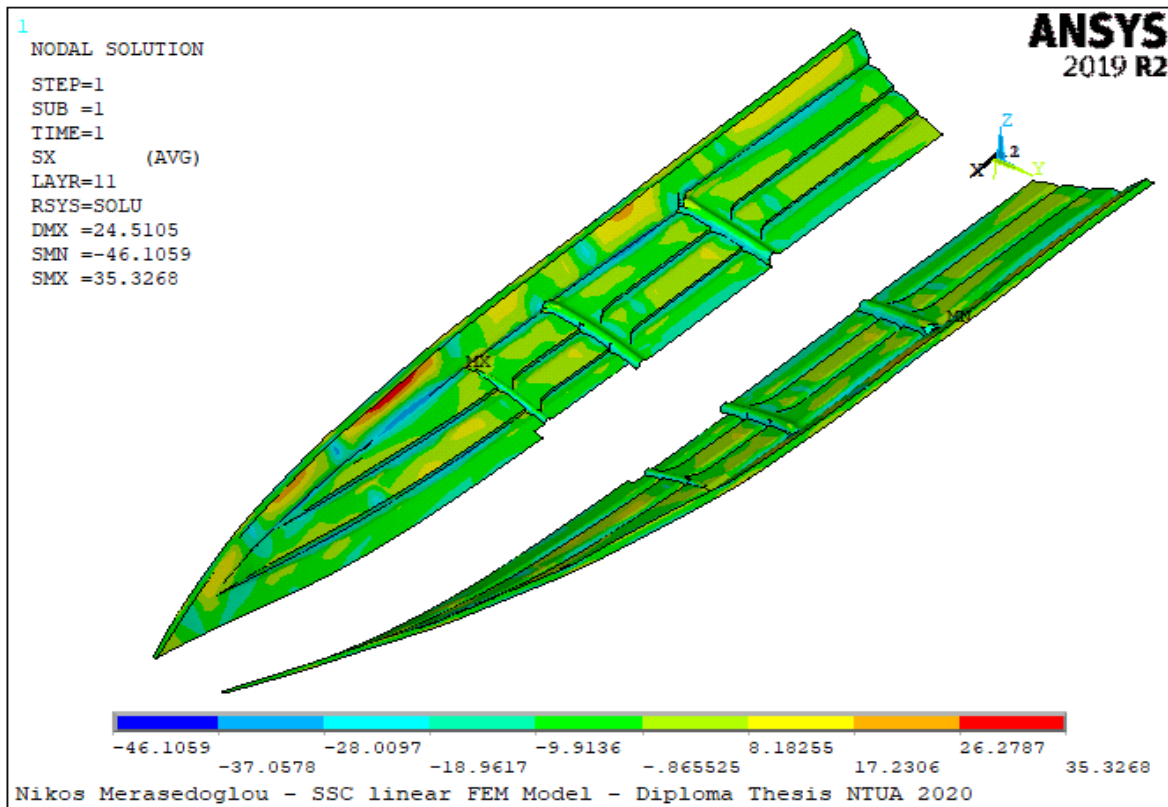
Σχετικά με τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκάφος, παρατηρείται στο Σχήμα 4.14 ότι σε όλο το σκάφος οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις είναι εντός των ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα, συνεπώς δεν υπήρχε ανάγκη για λεπτομερέστερη διερεύνηση της αντοχής του σκάφους σε διατμητικές τάσεις.



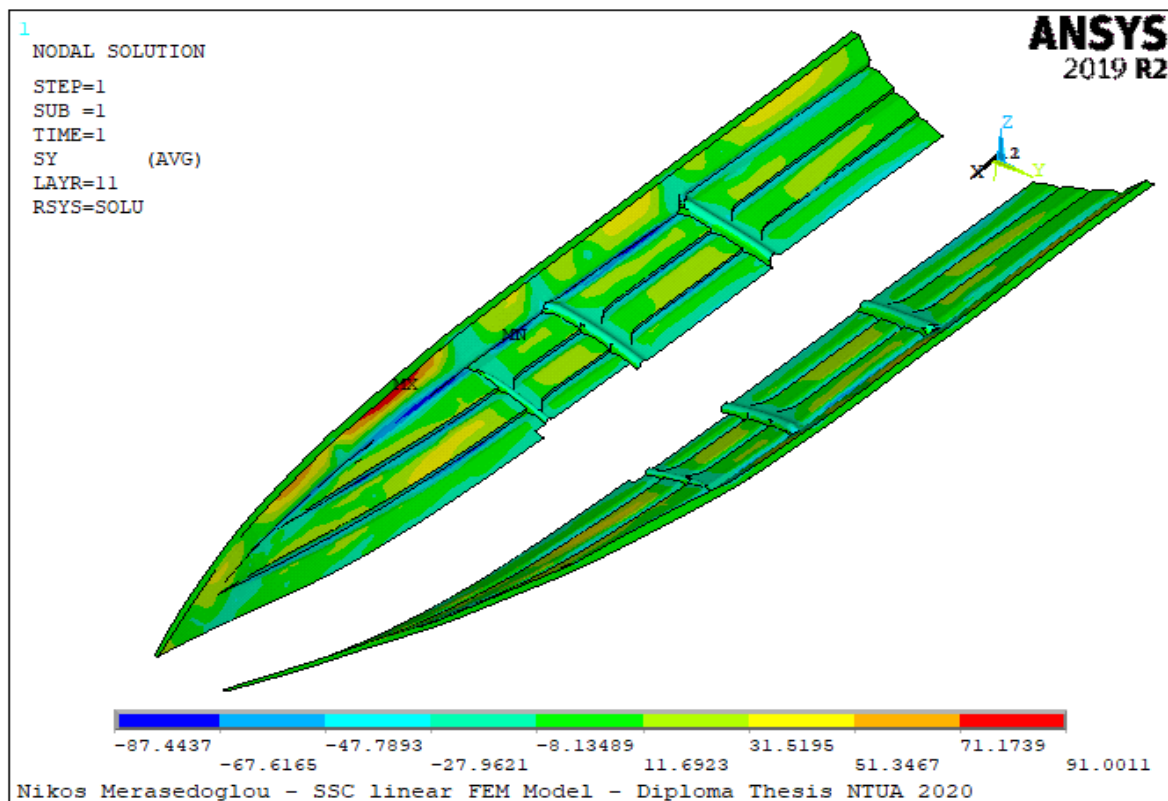
Σχήμα 4.19 : Κατανομή τάσης SX εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.



Σχήμα 4.20 : Κατανομή τάσης SY εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.



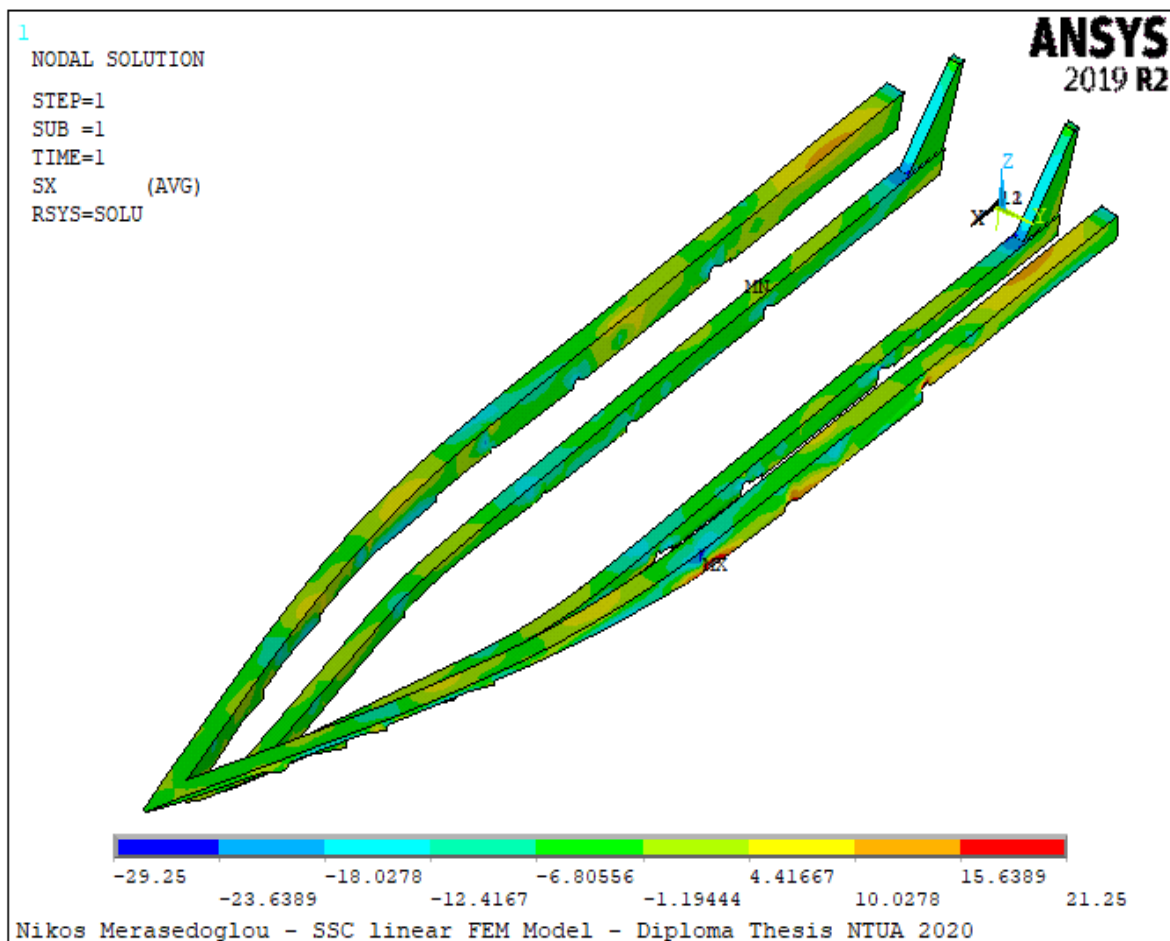
Σχήμα 4.21 : Κατανομή τάσης SX εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.



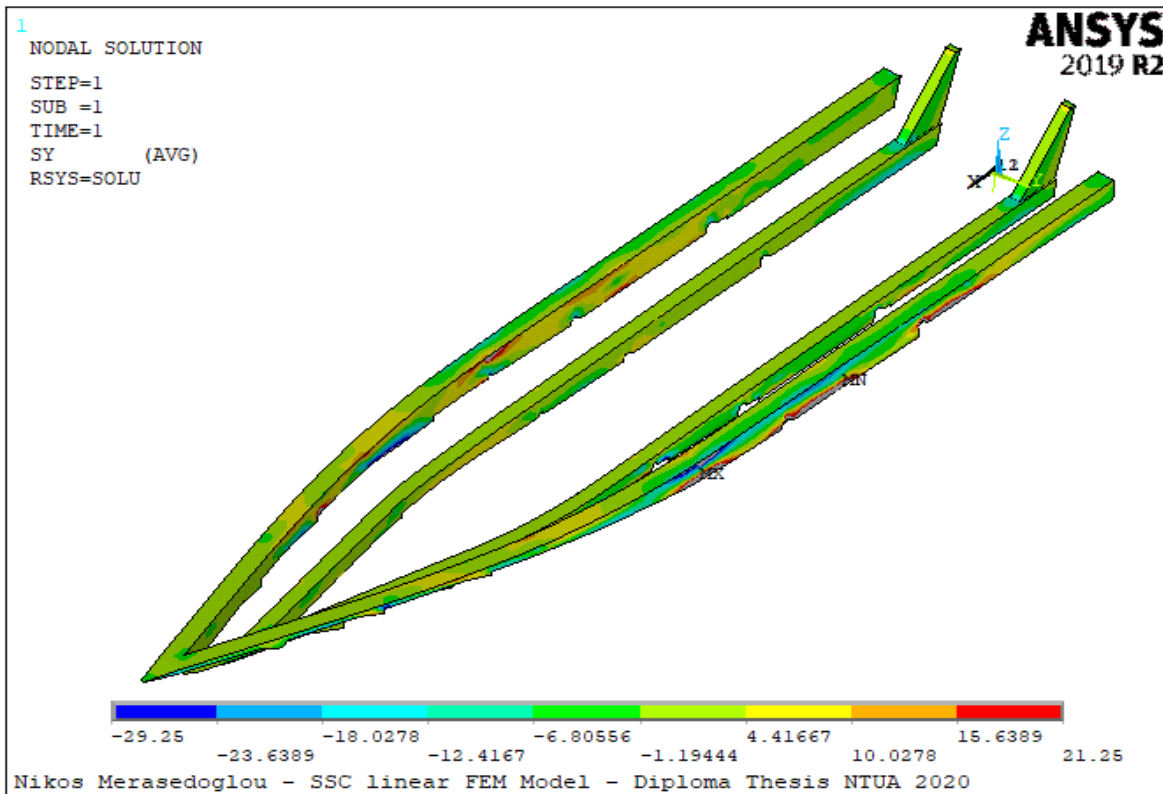
Σχήμα 4.22 : Κατανομή τάσης SY εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.

4.2.4 Έλεγχος αντοχής διαμήκων ενισχυτικών σκάφους

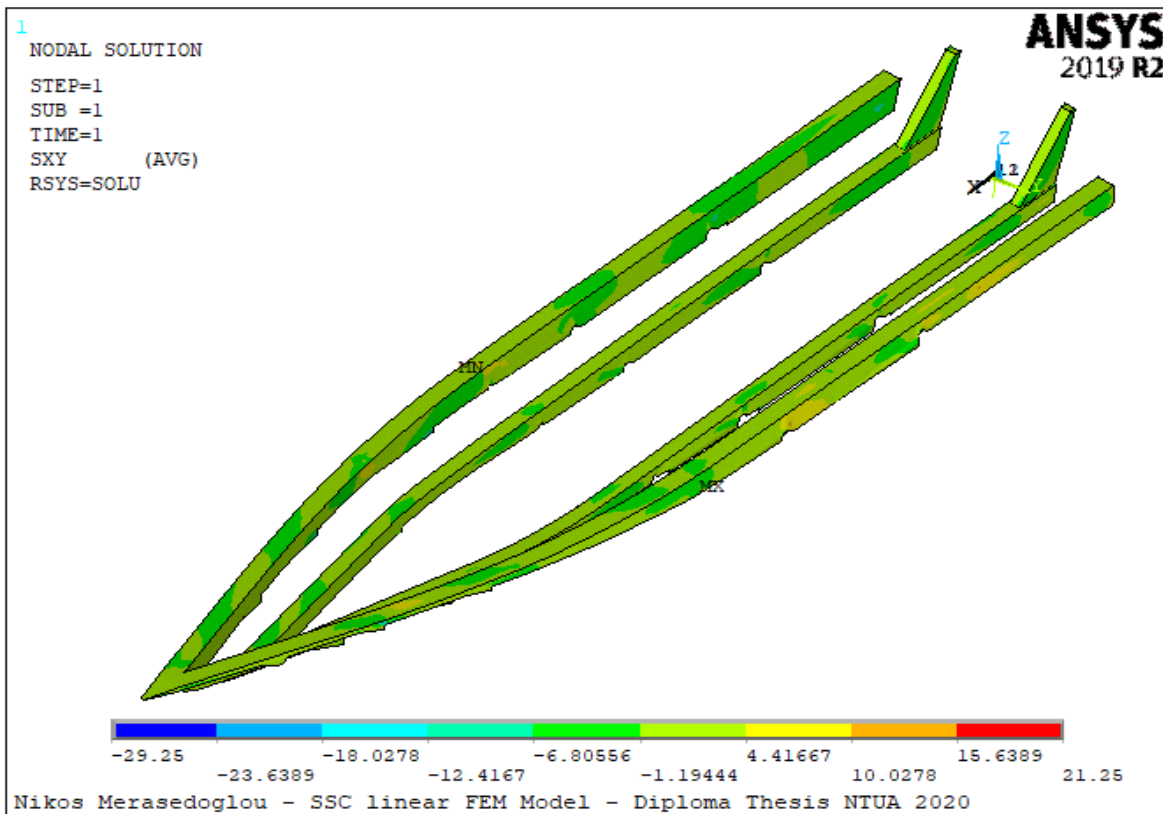
Ο έλεγχος στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη έγινε με όμοιο τρόπο με τον έλεγχο της γάστρας του σκάφους. Ειδικότερα, ελέγχθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις τόσο στον κορμό όσο και στο πέλαμα του εσωτερικού και εξωτερικού ενισχυτικού, καθώς επίσης και στα μπρακέτα του καθρέφτη τα οποία έχουν την ίδια αλληλουχία στρώσεων με το εσωτερικό ενισχυτικό. Το Σχήμα 4.23 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SX, το Σχήμα 4.24 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY και το Σχήμα 4.25 απεικονίζει την κατανομή της διαμηκτικής τάσης SXY. Τα επιτρεπόμενα όρια της στρώσης με τη μικρότερη αντοχή έχουν οριστεί ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή στις χρωματικές κλίμακες που αναγράφονται στα Σχήματα 4.23, 4.24 και 4.25 (user specified), ώστε να απεικονιστούν με χρώμα «γκρίζο» οι περιοχές στις οποίες οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Το συμπέρασμα του ελέγχου ήταν ότι τα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη πληρούν τις απαιτήσεις του νηογνώμονα για τις μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις (allowable stresses), επομένως πληρούνται και οι απαιτήσεις για την αντοχή της κάθε στρώσης. Το συμπέρασμα αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.23 – 4.25.



Σχήμα 4.23 : Κατανομή τάσης SX στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.



Σχήμα 4.24 : Κατανομή τάσης SY στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

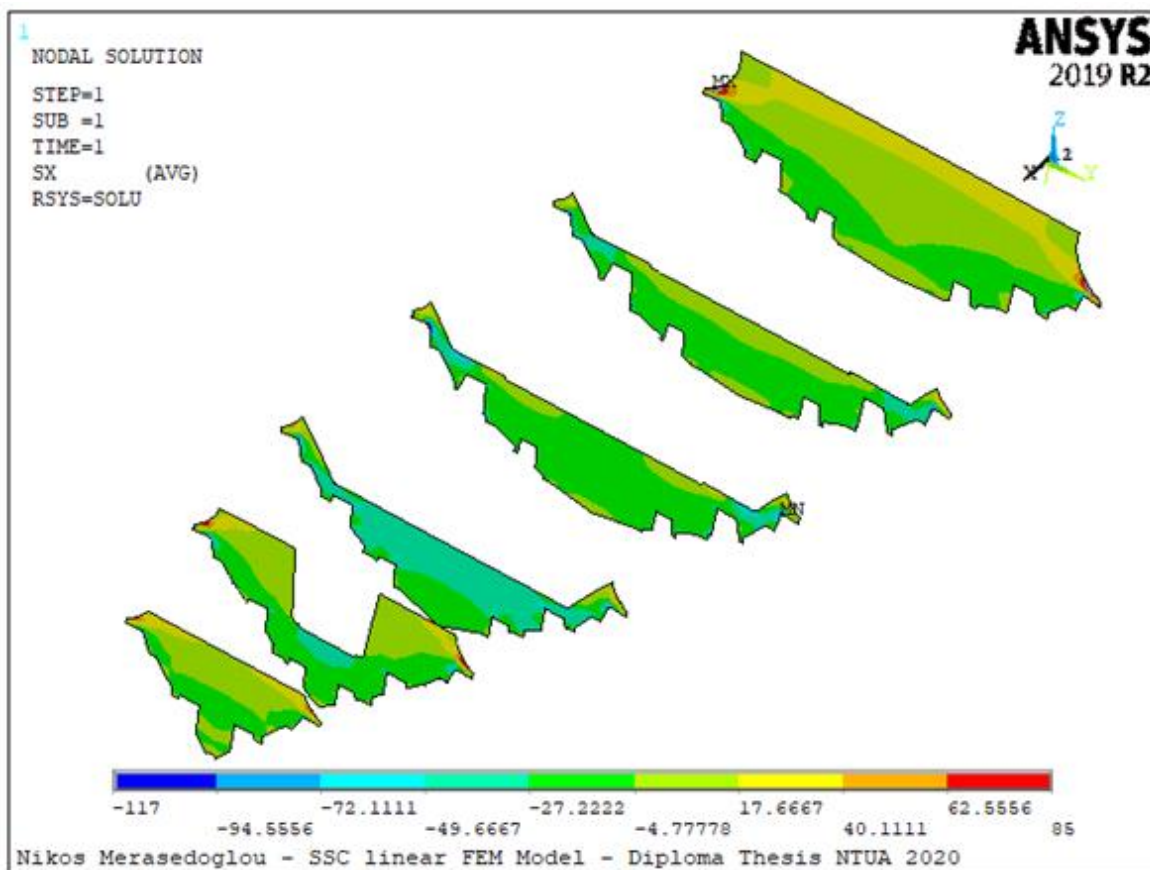


Σχήμα 4.25 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY στα ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

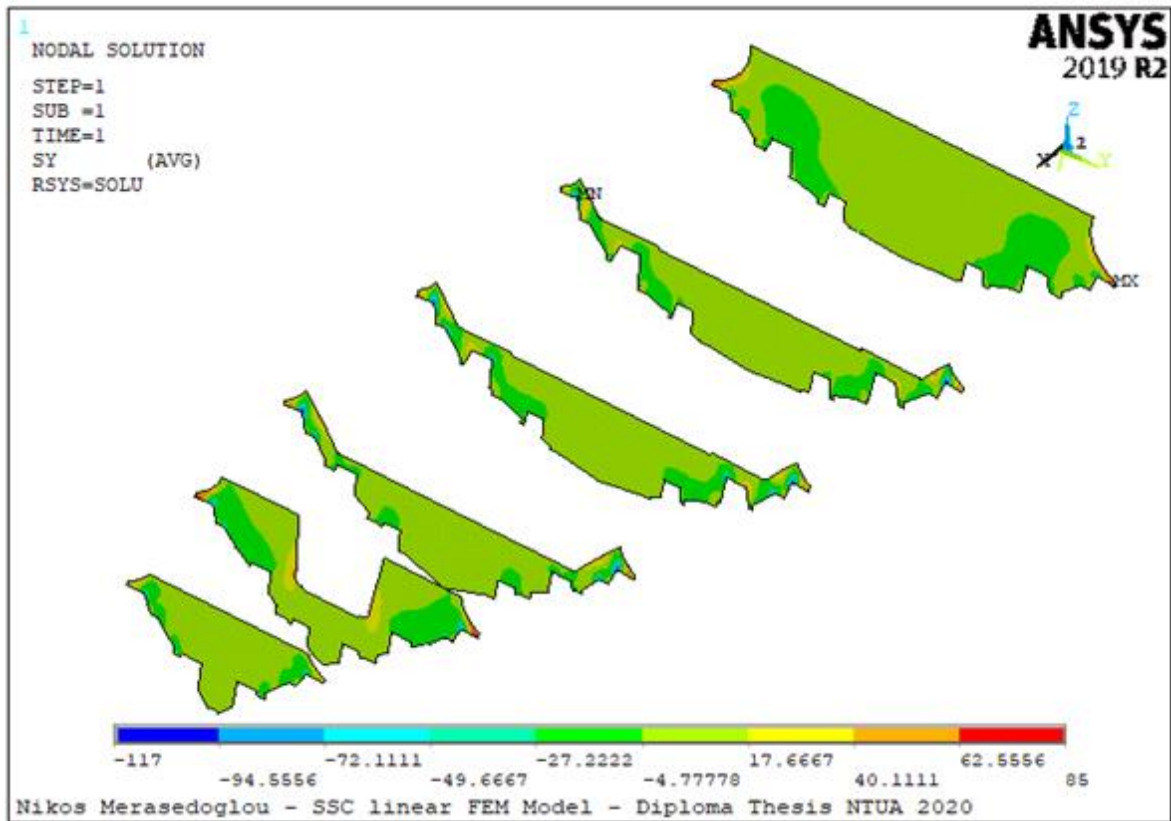
4.2.5 Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων φρακτών

Ο έλεγχος στις εγκάρσιες φρακτές έγινε με όμοιο τρόπο με τον έλεγχο της γάστρας και τα διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους. Το Σχήμα 4.26 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SX, το Σχήμα 4.27 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY και το Σχήμα 4.28 απεικονίζει την κατανομή της διαμητικής τάσης SXY. Η αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη της πιο αδύναμης στρώσης έχει οριστεί ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα στις χρωματικές κλίμακες που αναγράφονται στα Σχήματα 4.26, 4.27 και 4.28, ώστε να απεικονιστούν με χρώμα «γκρίζο» οι περιοχές στις οποίες υπάρχει αστοχία.

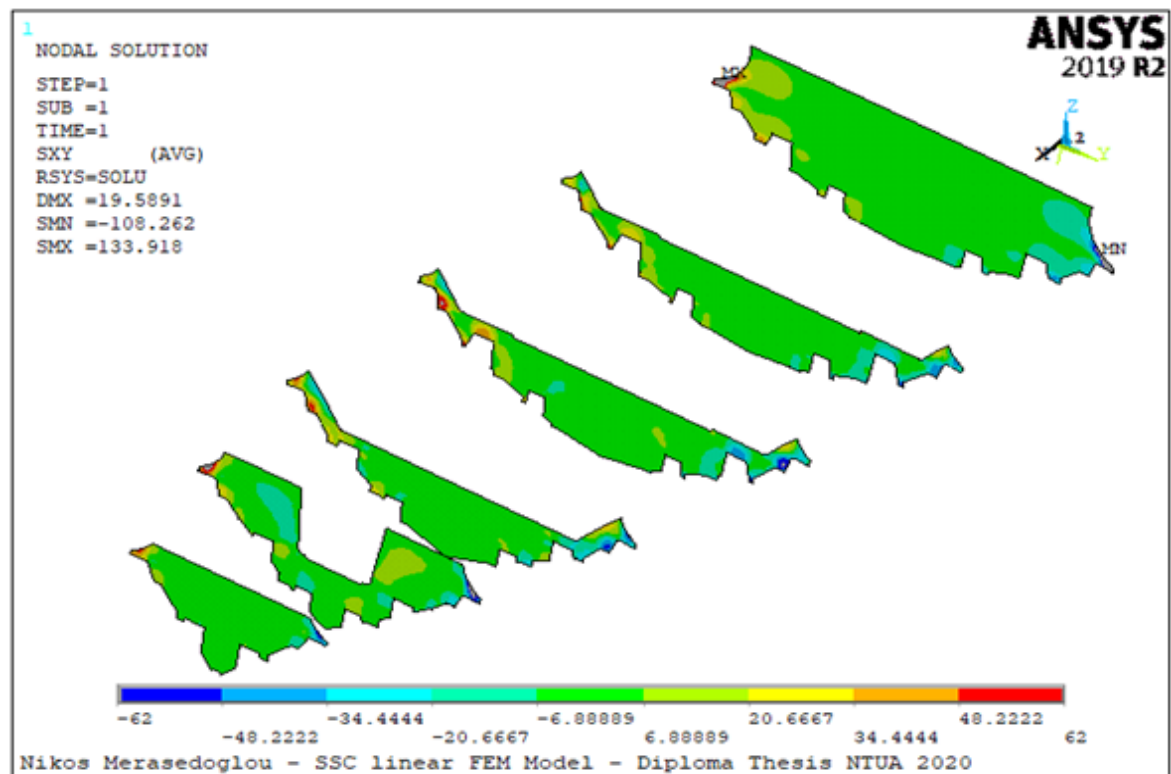
Το συμπέρασμα του ελέγχου ήταν ότι για τις εγκάρσιες φρακτές πληρούνται οι απαιτήσεις για την αντοχή της κάθε στρώσης. Το συμπέρασμα αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.26 – 4.28. Μοναδικές περιοχές αστοχίας αποτελούν εκείνες που βρίσκονται γειτονικά των κόμβων που έχουν πακτωθεί, συνεπώς τα αποτελέσματα σε αυτές τις περιοχές δεν θεωρούνται αξιόπιστα και αγνοούνται, όπως έχει σημειωθεί στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 4.26 : Κατανομή τάσης SX στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.



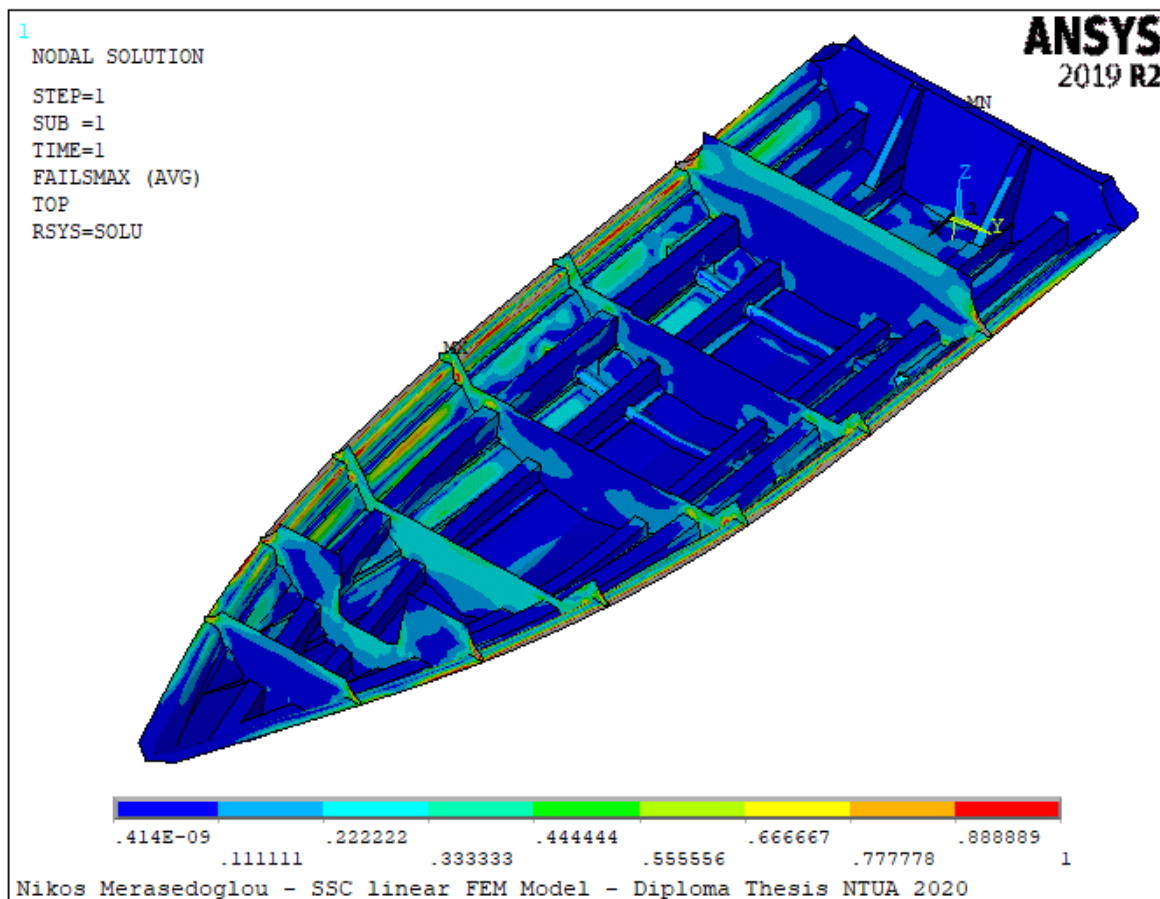
Σχήμα 4.27 : Κατανομή τάσης SY στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.



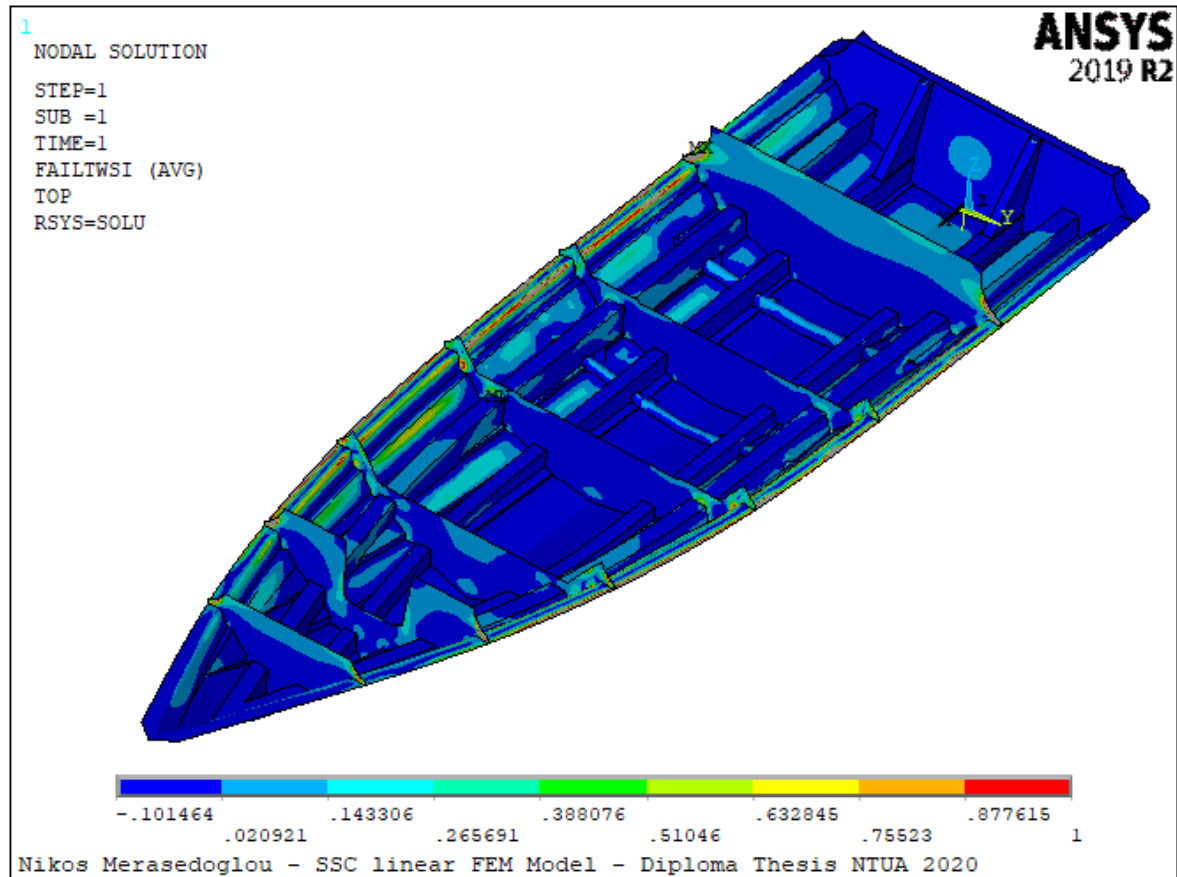
Σχήμα 4.28 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.

4.2.6 Κριτήρια αστοχίας «μέγιστης τάσης» και «Tsai-Wu»

Για την πληρότητα του ελέγχου αντοχής, εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα ANSYS κριτήρια αστοχίας (failure criteria), λαμβάνοντας ως δεδομένα τις αντοχές για κάθε στρώση σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση για τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd's Register». Ως κριτήριο αστοχίας επιλέχθηκε το «κριτήριο μέγιστης τάσης» (maximum stress) και το «κριτήριο Tsai-Wu» (Tsai-Wu strength index). Τα αποτελέσματα για το κριτήριο μέγιστης τάσης απεικονίζονται στο Σχήμα 4.29, ενώ τα αποτελέσματα για το κριτήριο «Tsai-Wu» απεικονίζονται στο Σχήμα 4.30. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που αναγράφονται στις χρωματικές κλίμακες των Σχημάτων 4.29 και 4.30 αφορούν την στρώση στην οποία το κριτήριο αναπτύσσει τη μέγιστη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρώσεις του πολύστρωτου (layer,0).



Σχήμα 4.29 : Κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης.



Σχήμα 4.30 : Κριτήριο αστοχίας «Tsai – Wu».

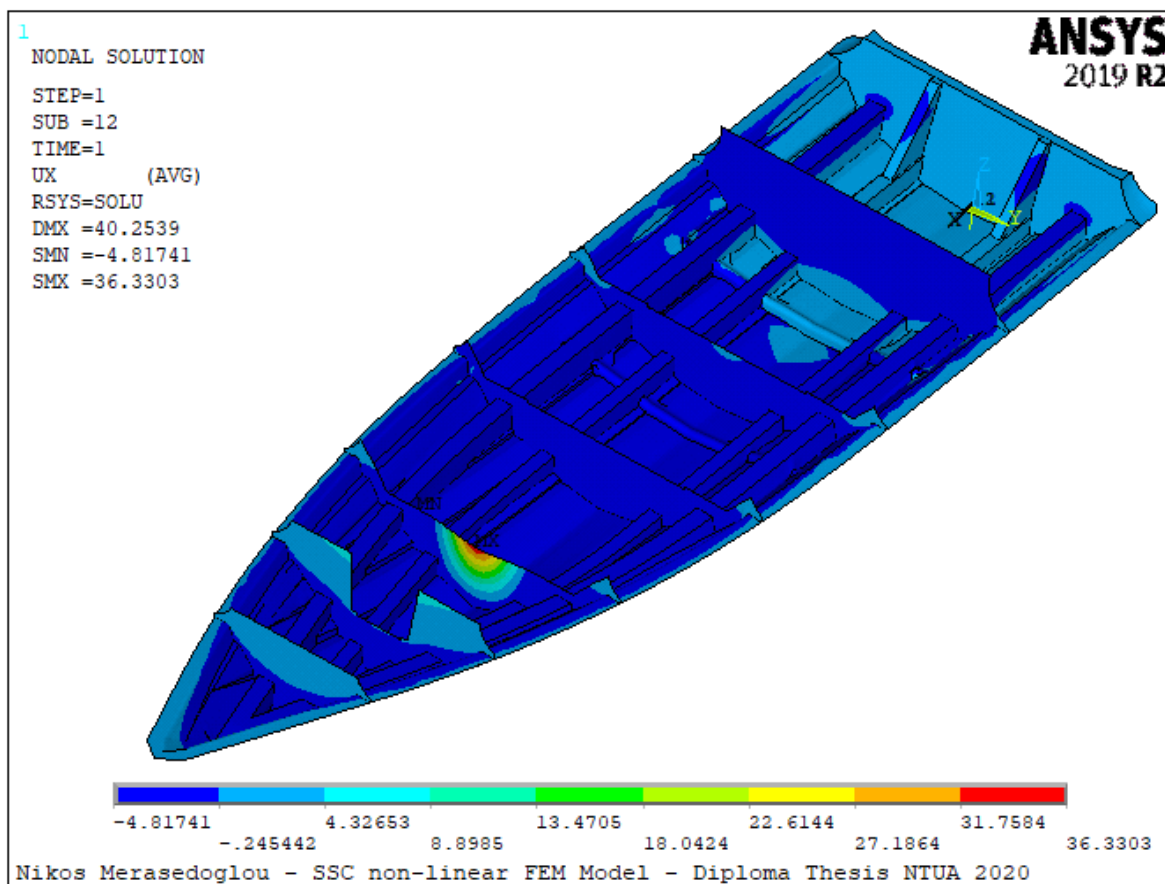
Παρατηρείται ότι το κριτήριο μέγιστης τάσης και «Tsai–Wu» είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Οι μόνοι κόμβοι που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια είναι οι γειτονικοί των κόμβων όπου έχουν επιβληθεί πακτώσεις και απεικονίζονται σκαριφηματικά με χρώμα γκρίζο. Ωστόσο, έχει αναφερθεί στην εισαγωγή του τέταρτου κεφαλαίου ότι τα αποτελέσματα στους κόμβους αυτούς αγνοούνται, συνεπώς μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια ότι το σκάφος πληροί τα κριτήρια αστοχίας, σύμφωνα με το ANSYS.

4.3 Αποτελέσματα μη-γραμμικής ανάλυσης – 2^ο μοντέλο

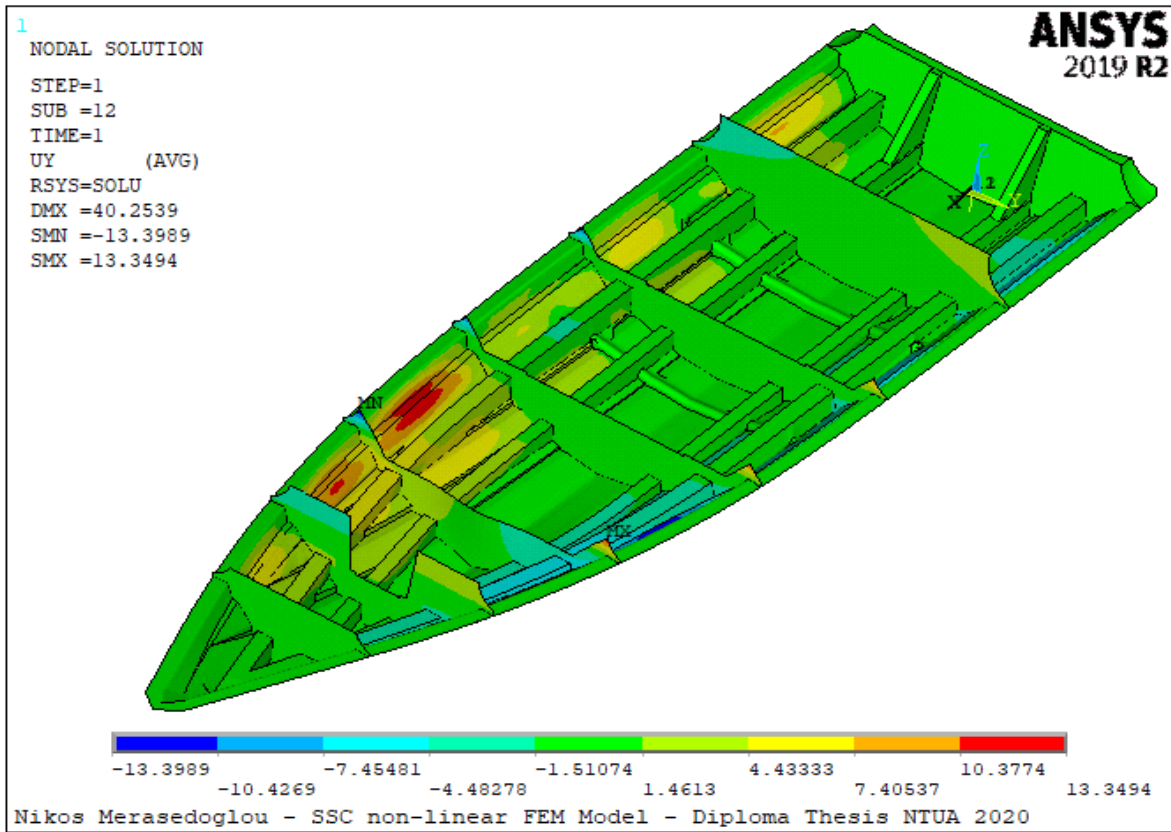
Το 2^ο μοντέλο επιλύθηκε με μη-γραμμική ανάλυση, προκειμένου να συγκριθούν τα αποτελέσματά του με τα αντίστοιχα του 1^{ου} μοντέλου. Τα αποτελέσματα του 2^{ου} μοντέλου διαβάζονται με ανάλογο τρόπο με αυτά του 1^{ου} μοντέλου, αφού προηγουμένως έχει επιλεγεί το κατάλληλο βήμα της ανάλυσης. Εν προκειμένω, η μη-γραμμική ανάλυση ολοκληρώνεται χωρίς να διακοπεί, συνεπώς διαβάζονται τα αποτελέσματα του τελευταίου βήματος.

4.3.1 Μετατοπίσεις στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

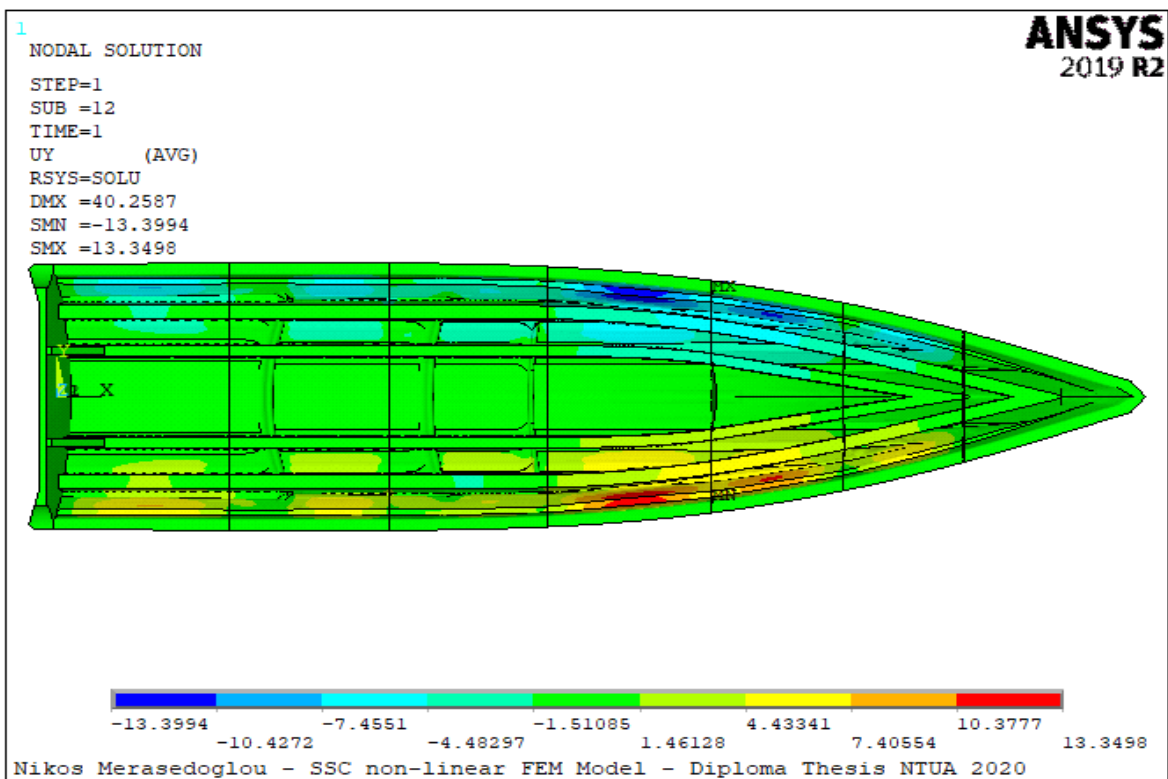
Οι μετατοπίσεις UX, UY, UZ και η συνολική μετατόπιση USUM έχουν υπολογιστεί και απεικονίζονται στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι μετατοπίσεις δίνουν μια πρώτη εκτίμηση για τον τρόπο με τον οποίο καταπονείται το σκάφος. Η μετατόπιση UX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.31, η μετατόπιση UY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.32 και 4.33 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα, η μετατόπιση UZ κατά τον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.34 και 4.35 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα, ενώ η συνολική μετατόπιση USUM απεικονίζεται στα Σχήματα 4.36 και 4.37 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα.



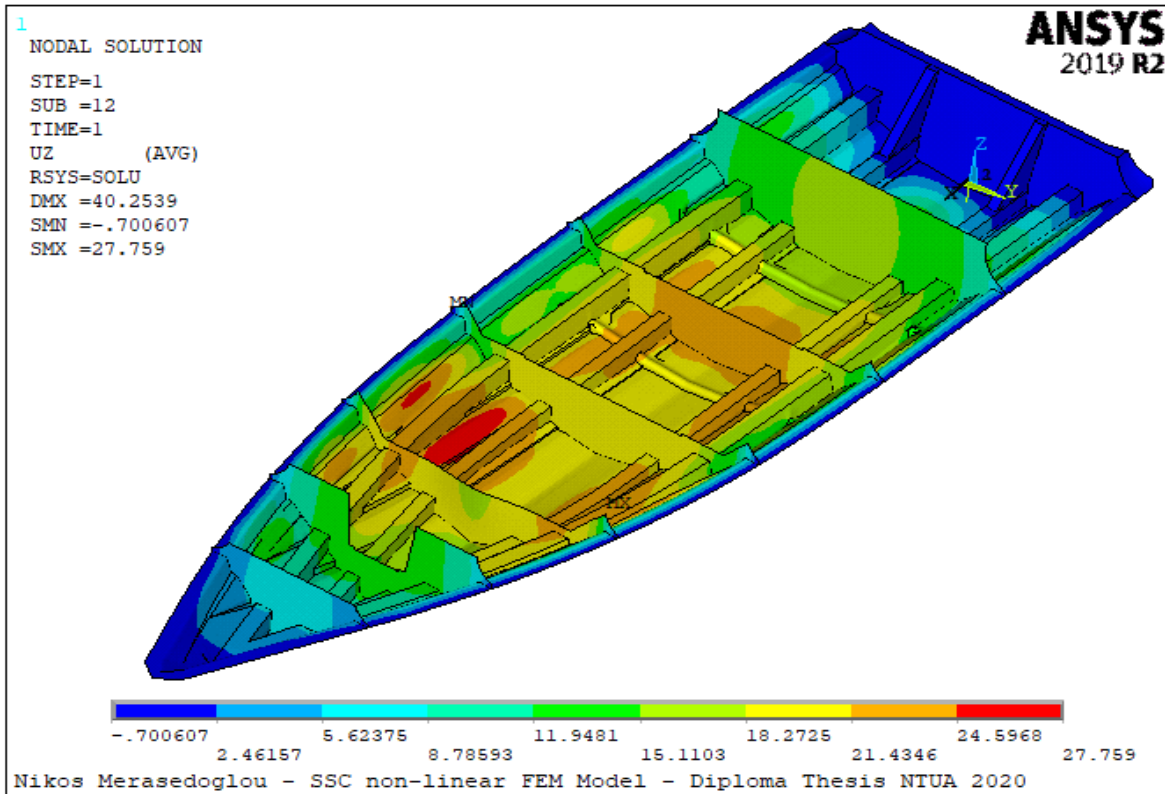
Σχήμα 4.31 : Μετατόπιση UX ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



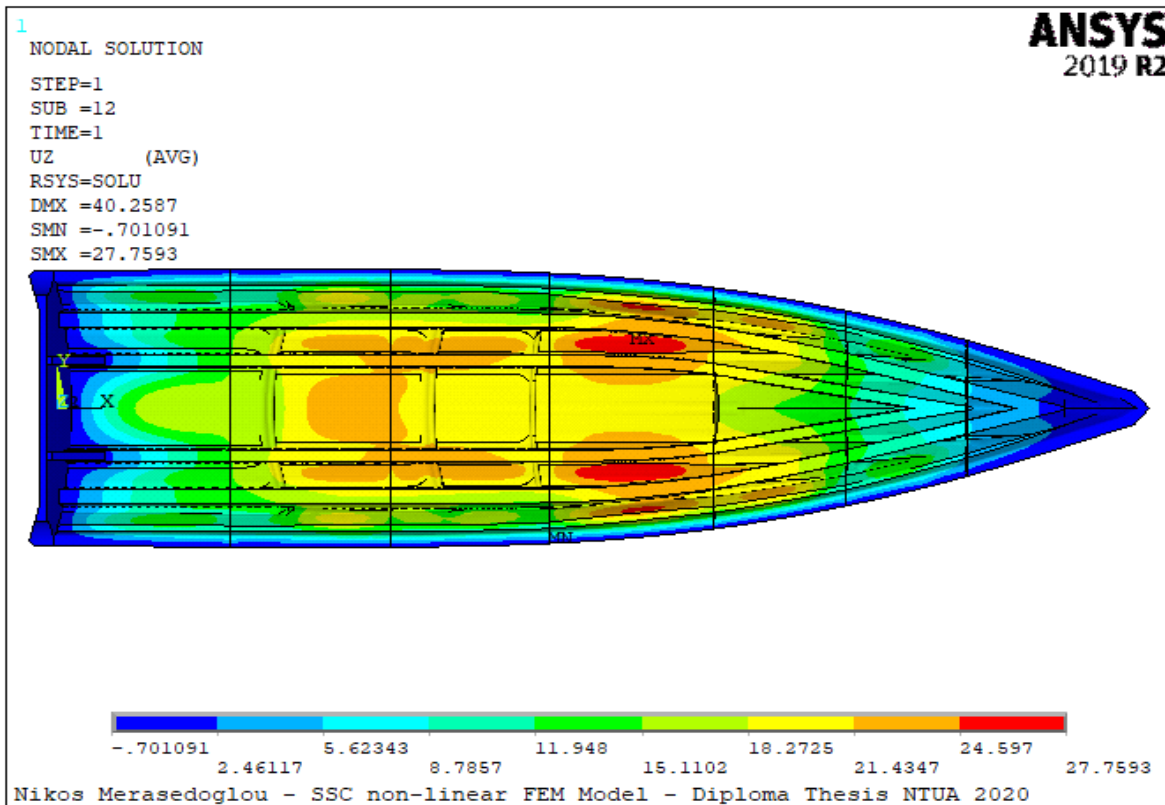
Σχήμα 4.32 : Τρισδιάστατη όψη μετατόπισης UY στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



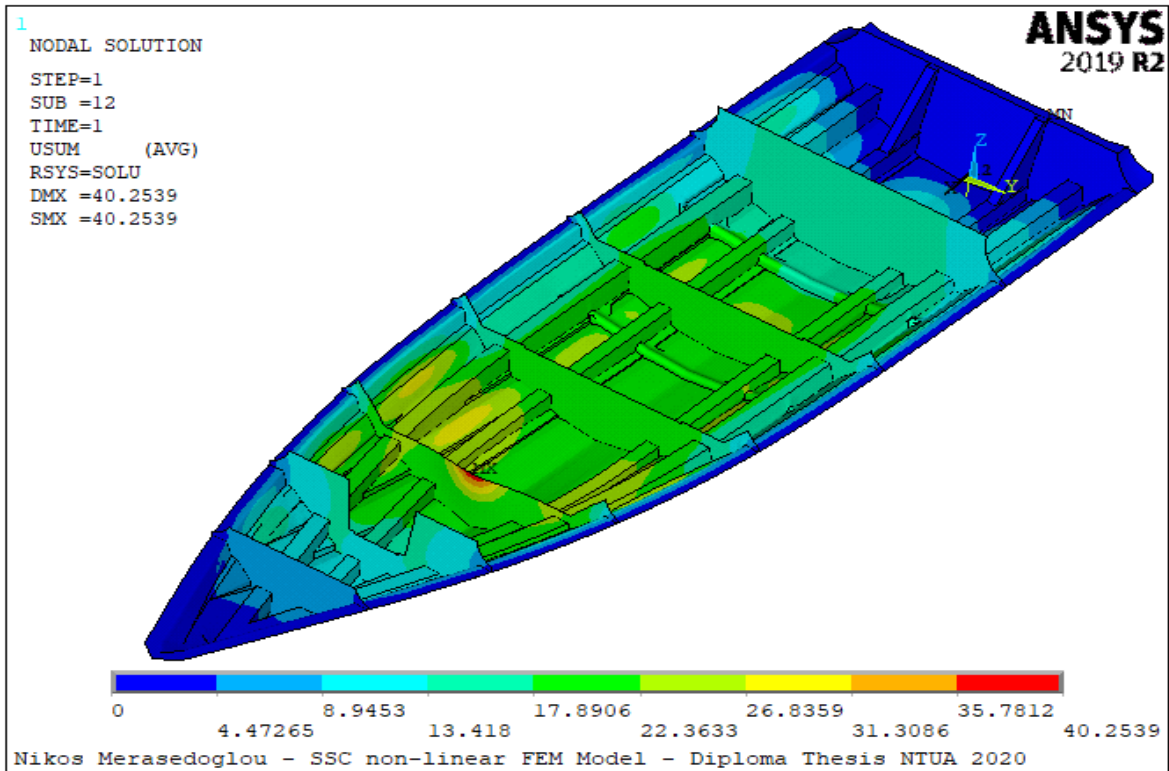
Σχήμα 4.33 : Άνοψη μετατόπισης UY στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



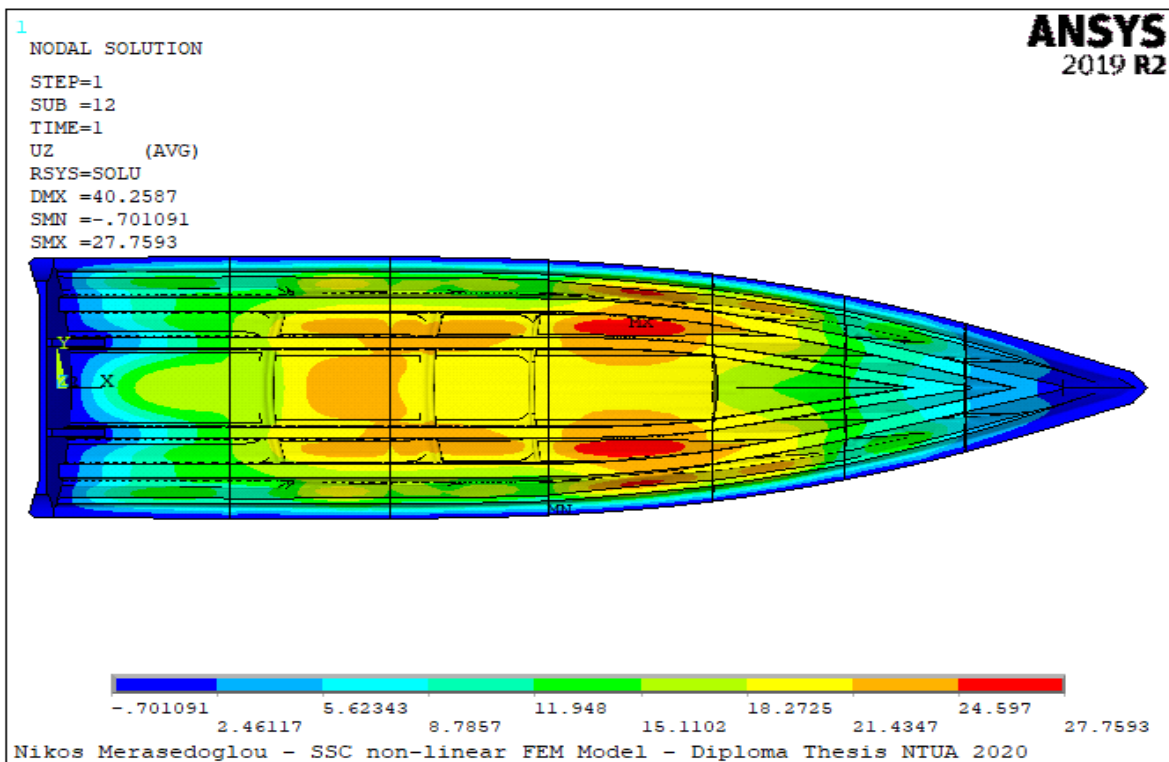
Σχήμα 4.34 : Τρισδιάστατη όψη μετατόπισης UZ στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.35 : Άνοψη μετατόπισης UZ στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.36 : Τρισδιάστατη όψη συνολικής μετατόπισης USUM στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



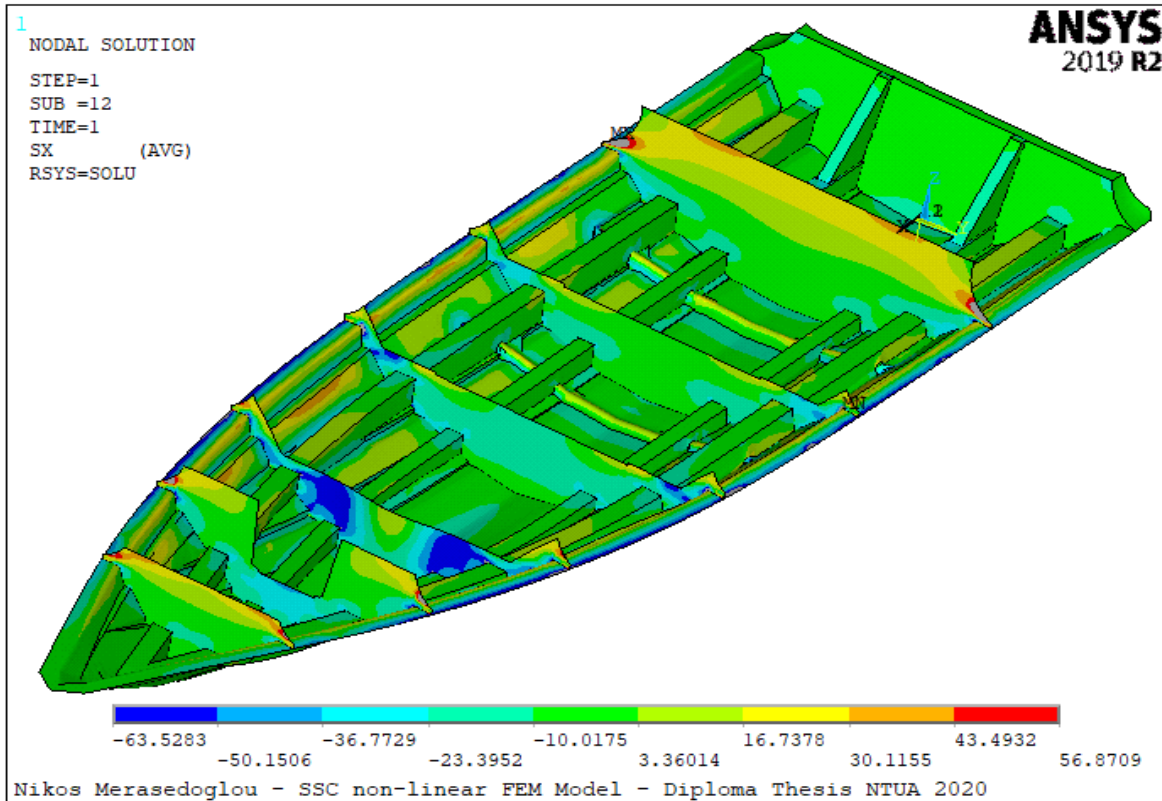
Σχήμα 4.37 : Άνοψη συνολικής μετατόπισης USUM ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Συγκρίνοντας το 1^ο με το 2^ο μοντέλο, παρατηρείται σημαντική διαφορά στην μετατόπιση UX, η οποία απεικονίζεται στα Σχήματα 4.5 και 4.31. Η μόνη διαφορά που παρουσιάζουν είναι στην τρίτη, από πλώρα προς πρύμα, εγκάρσια φρακτή, όπου σύμφωνα με την γραμμική ανάλυση έχει μικρή διαμήκη μετατόπιση, ενώ σύμφωνα με τη μη-γραμμική ανάλυση έχει μεγάλη εμπροθη διαμήκη μετατόπιση. Αυτή η διαφοροποίηση συμβαίνει διότι κατά την εκτέλεση της μη-γραμμικής ανάλυσης, επιλέχθηκε να ληφθούν υπόψη οι μεγάλες μετατοπίσεις.

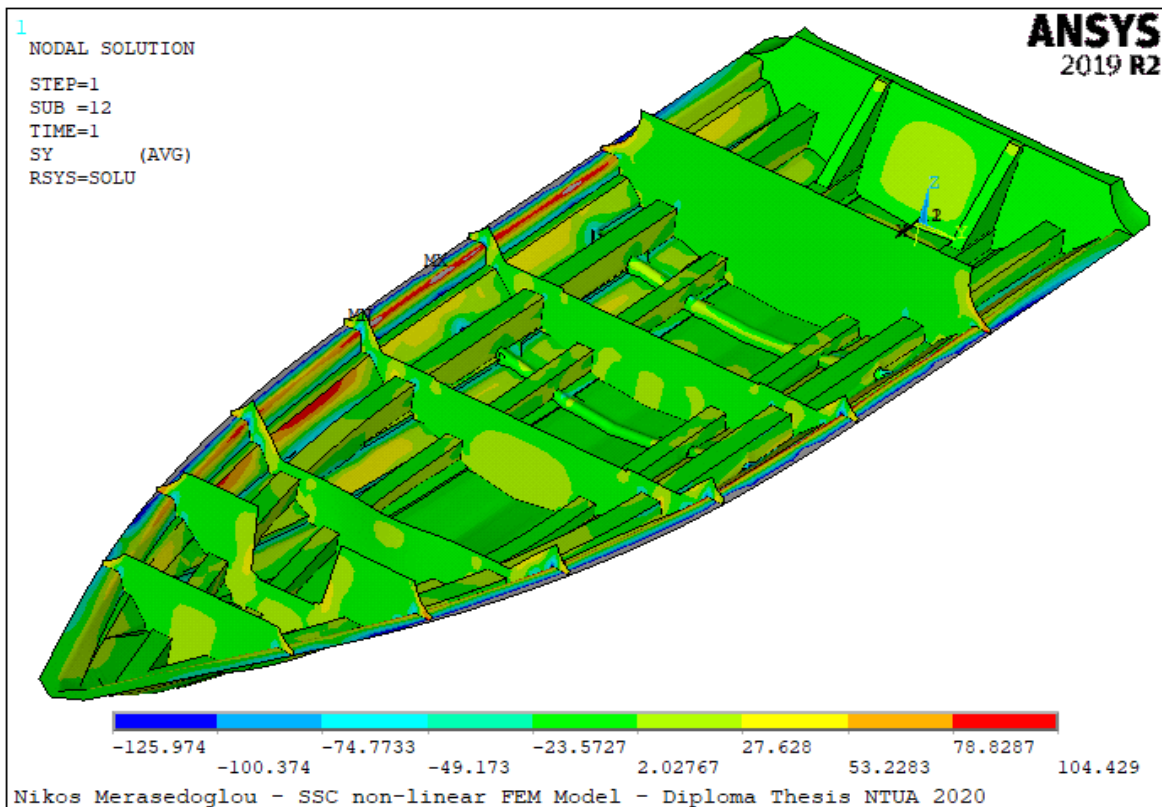
Με εξαίρεση τη διαμήκη μετατόπιση UX των κόμβων, η εγκάρσια μετατόπιση UY, η κατακόρυφη μετατόπιση UZ και η συνολική μετατόπιση USUM κατά το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς είχαν όμοια αποτελέσματα μεταξύ γραμμικής και μη-γραμμικής ανάλυσης. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων επίλυσης, στην περίπτωση της περιμετρικής πάκτωσης του σκάφους, είχαν ίδια κατανομή, δηλαδή εμφάνισαν μέγιστες και ελάχιστες τιμές μετατοπίσεων στην ίδια περιοχή, αλλά οι τιμές μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης είχαν μικρή ποσοστιαία απόκλιση. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα της γραμμικής με ποσοστό της τάξεως του 10%. Η απόκλιση των ελαχίστων και μέγιστων τιμών οφείλεται, όπως και στην μετατόπιση UX, στο γεγονός ότι η μη-γραμμική ανάλυση κατά την επίλυση του προβλήματος λαμβάνει υπόψη τις μεγάλες μετατοπίσεις, ενώ η γραμμική ανάλυση όχι.

4.3.2 Κατανομή τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων

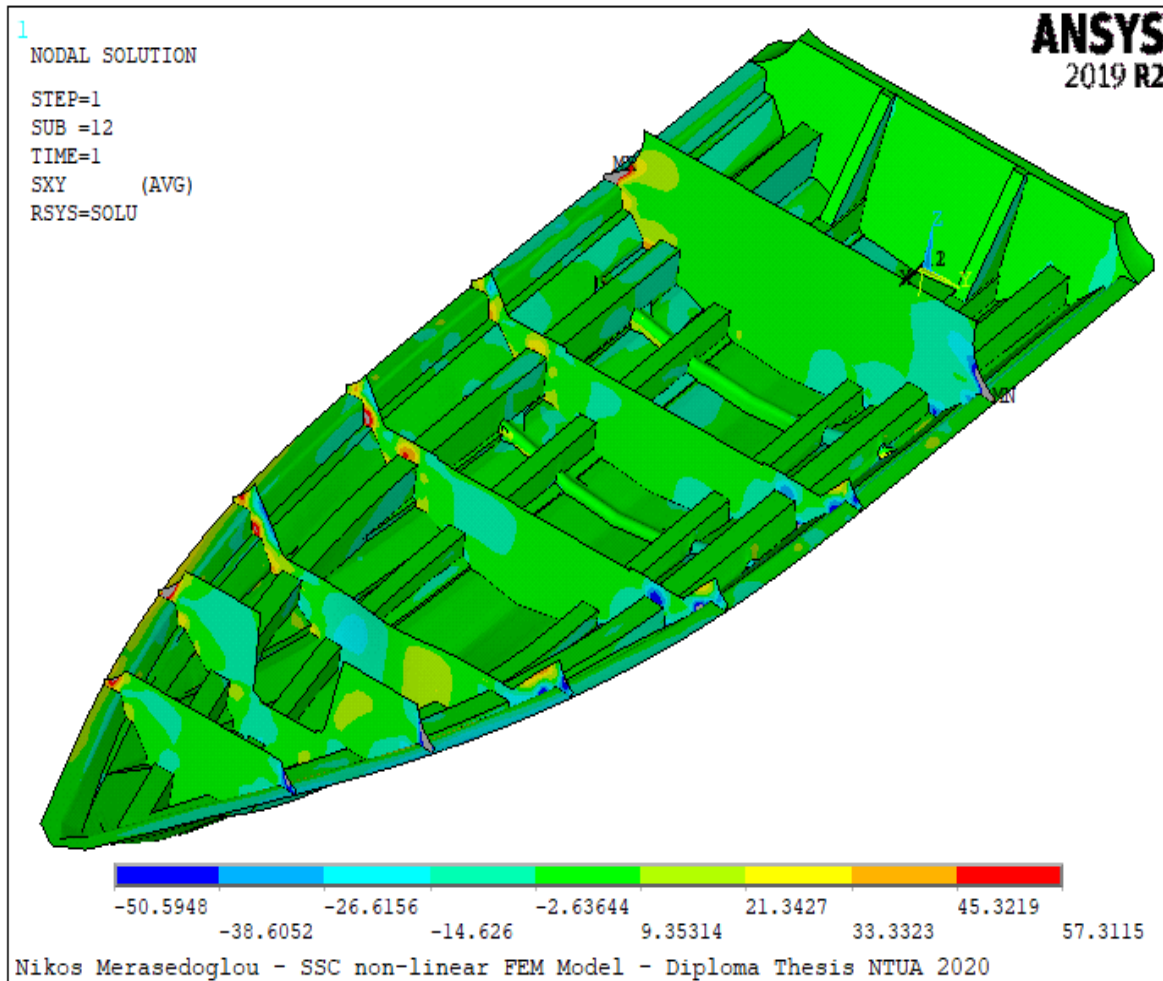
Οι τάσεις SX, SY και SXY έχουν υπολογιστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου και απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη. Υπενθυμίζεται ότι ο προσανατολισμός των αξόνων του τοπικού συστήματος αναφοράς που έχει κάθε στοιχείο περιγράφεται στην τελευταία παράγραφο του εδαφίου 3.3.3 της παρούσας εργασίας. Η κατανομή της τάσης SX απεικονίζεται στο Σχήμα 4.38, η κατανομή της τάσης SY απεικονίζεται στο Σχήμα 4.39, ενώ η διατμητική τάση SXY απεικονίζεται στο Σχήμα 4.40.



Σχήμα 4.38 : Κατανομή τάσης SX ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.39 : Κατανομή τάσης SY ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.



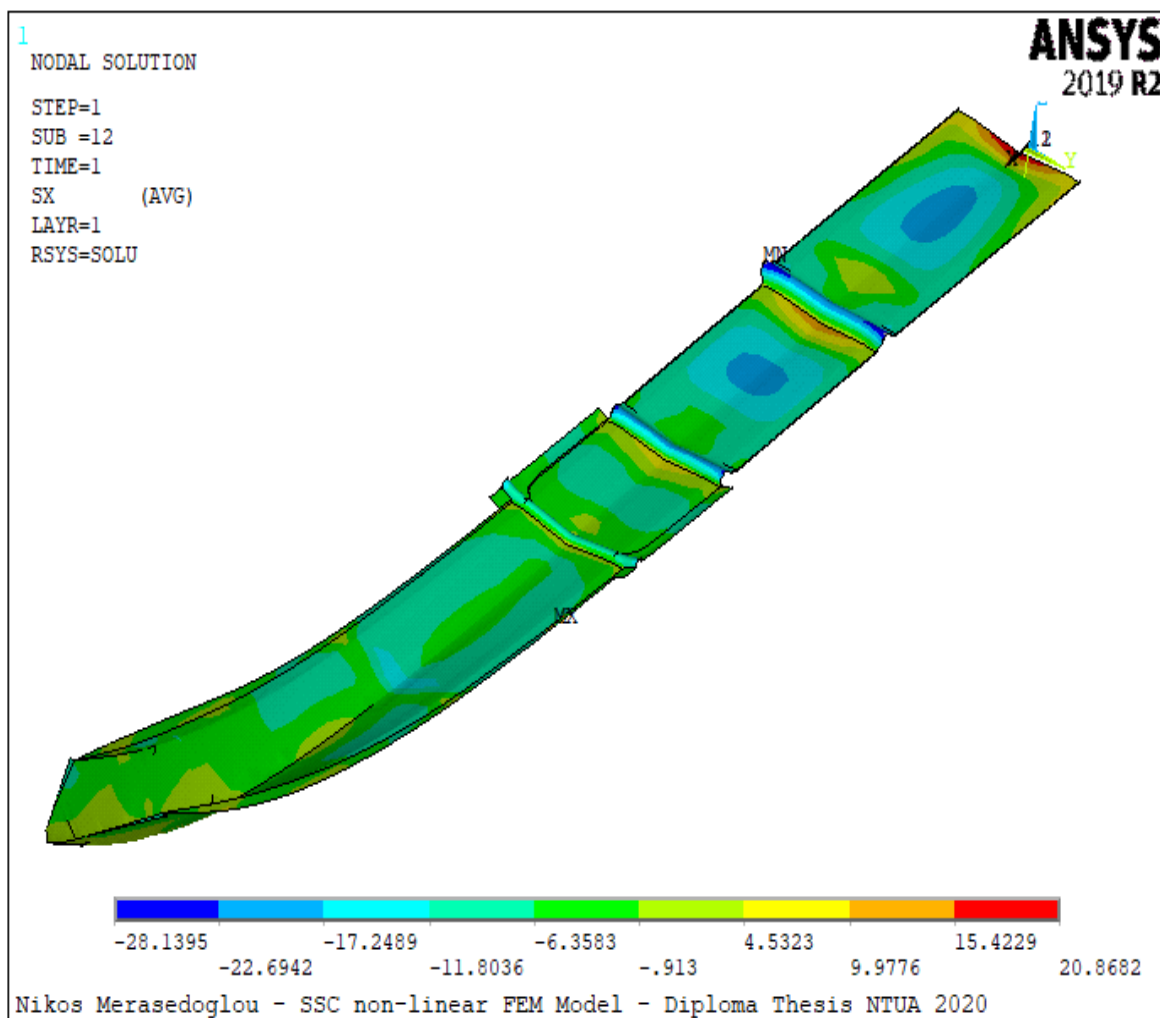
Σχήμα 4.40 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που αναγράφονται στις χρωματικές κλίμακες των Σχημάτων 4.38, 4.39 και 4.40 αφορούν την στρώση εκείνη που αναπτύσσει τη μέγιστη τάση συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρώσεις του πολύστρωτου (layer,0), με εξαίρεση τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων στα οποία τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, συνεπώς αγνοούνται.

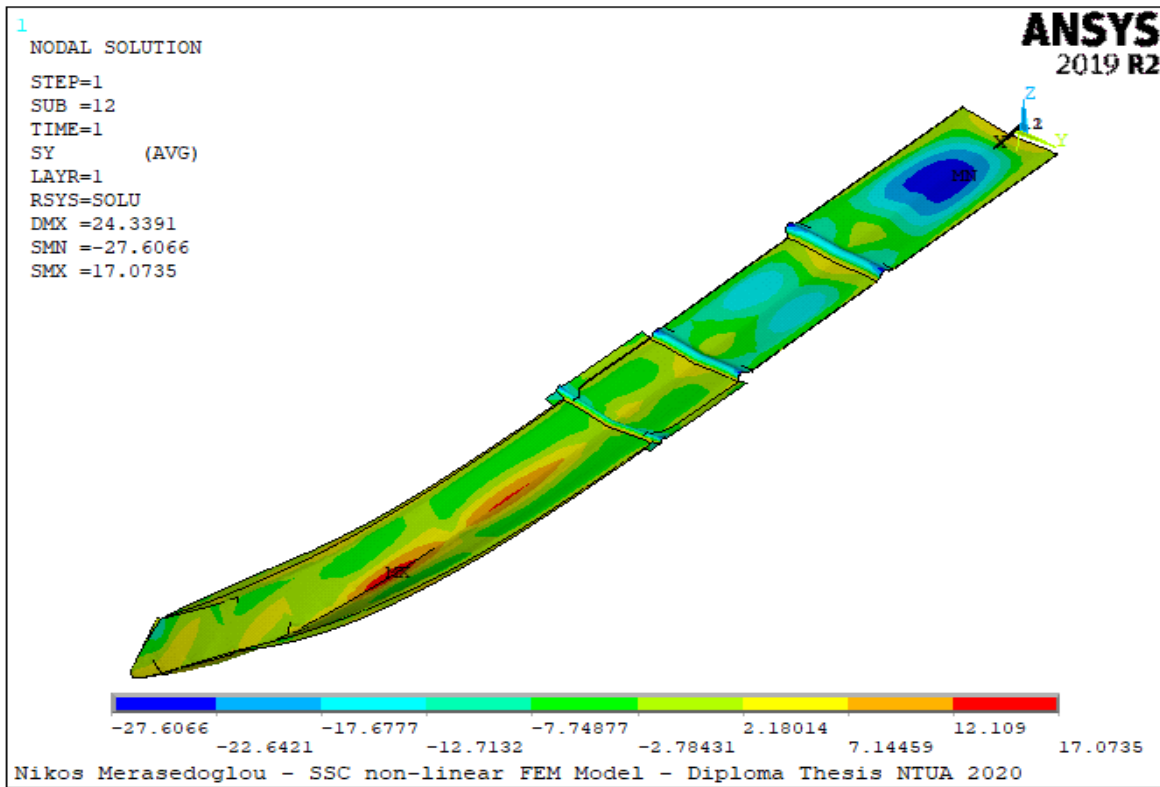
Εν γένει, τα αποτελέσματα μεταξύ γραμμικής και μη-γραμμικής ανάλυσης του μοντέλου στο οποίο τοποθετούνται πακτώσεις περιμετρικά του σκάφους για τις τάσεις SX, SY και SXY είναι κοντινά, όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα. Ειδικότερα, οι κατανομές των τάσεων είναι ίδιες μεταξύ των δύο αναλύσεων. Ωστόσο οι τιμές του 2^{ου} μοντέλου είναι μεγαλύτερες από αυτές του 1^{ου} μοντέλου, συνεπώς τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης είναι πιο συντηρητικά σε σχέση με αυτά της γραμμικής ανάλυσης.

4.3.3 Έλεγχος αντοχής γάστρας σκάφους

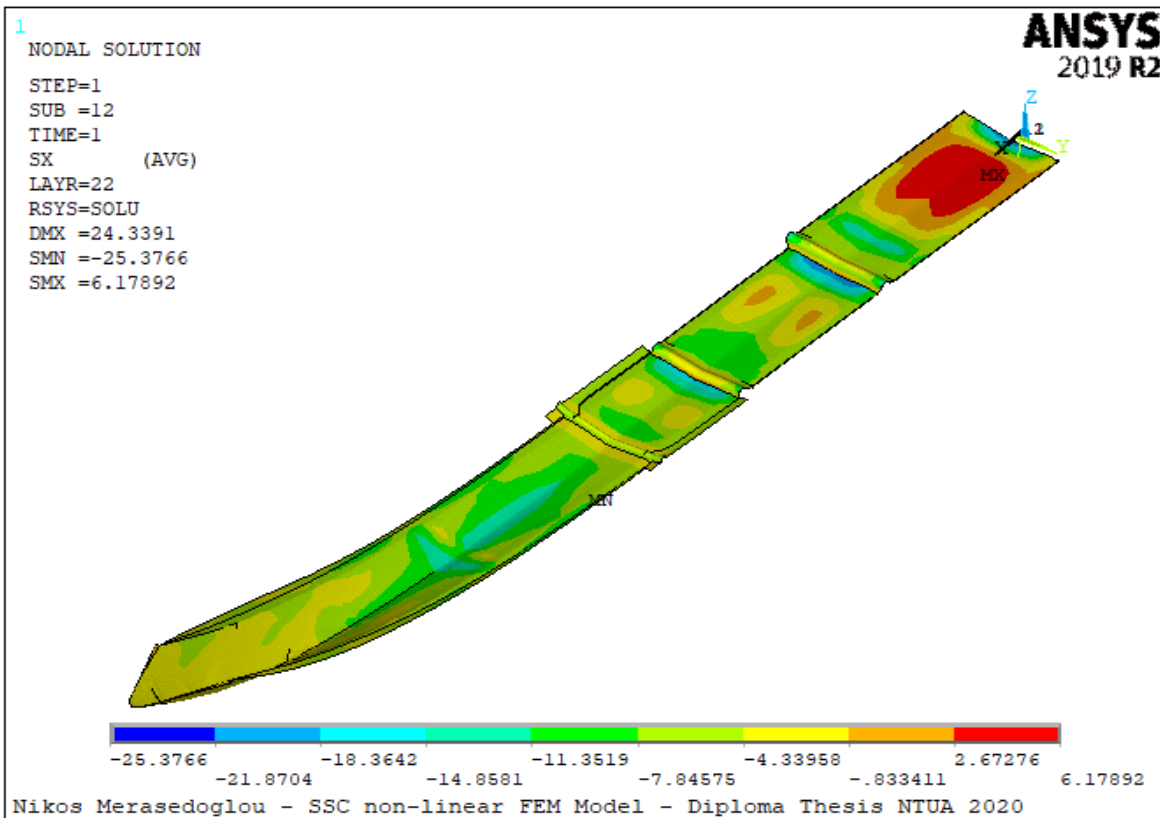
Όπως και στην περίπτωση της γραμμικής ανάλυσης, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μη-γραμμικής ανάλυσης έγινε ξεχωριστά σε κάθε ζώνη η οποία έχει διαφορετική αλληλουχία στρώσεων με τις υπόλοιπες, δεδομένου ότι οι στρώσεις μιας ζώνης είναι κοινές σε κάθε section. Σε ότι αφορά την κεντρική ζώνη, ήτοι τα plates 1_1, 2_1, 3_1, 4_1, 5_1, 6_1 και 7_2, έγινε έλεγχος σε κάθε στρώση ξεχωριστά και παρατηρήθηκε ότι όλες οι στρώσεις είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Ομοίως για τη ζώνη επικάλυψης μεταξύ κεντρικής και ενδιάμεσης ζώνης, καθώς επίσης και οι επικαλύψεις στα steps είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Τα Σχήματα 4.41 και 4.42 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY της εξωτερικής στρώσης της κεντρικής ζώνης του σκάφους, ενώ τα Σχήματα 4.43 και 4.44 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY αντίστοιχα της εσωτερικής στρώσης της κεντρικής ζώνης του σκάφους.



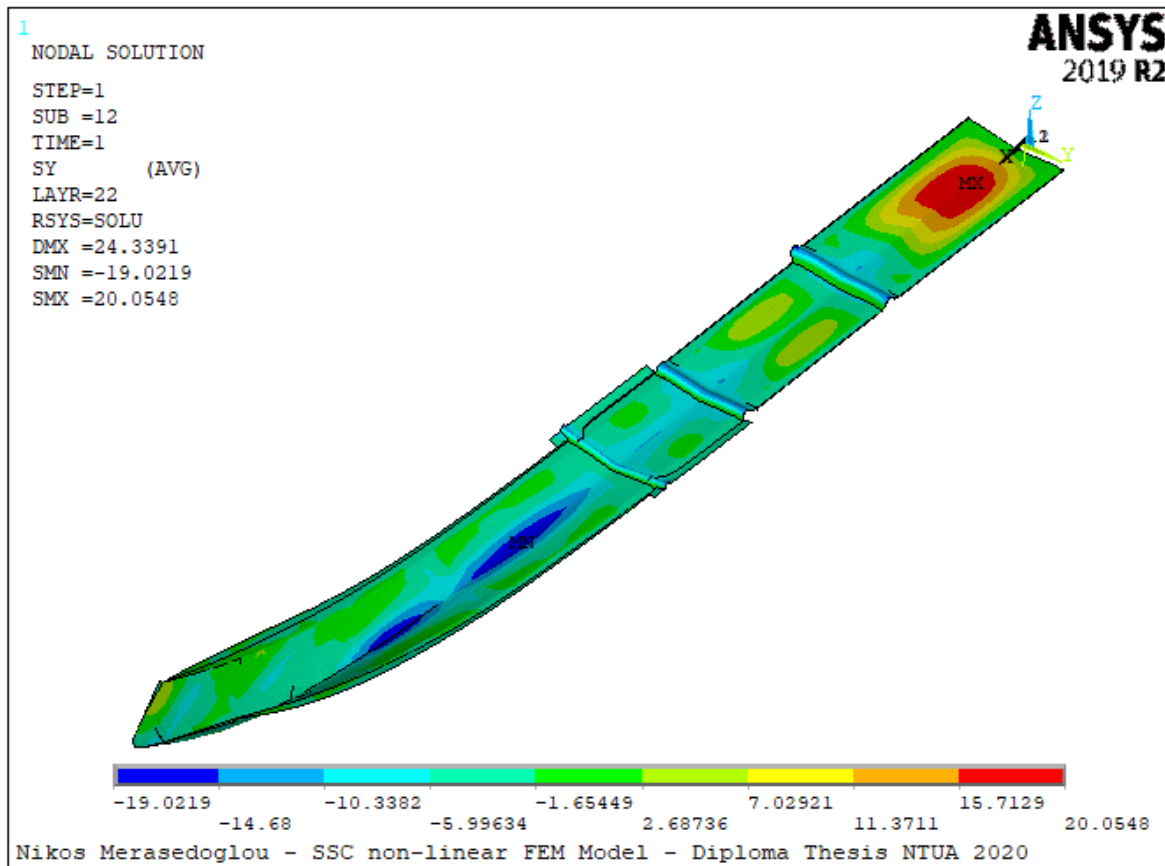
Σχήμα 4.41 : Κατανομή τάσης SX εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.42 : Κατανομή τάση SY εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.43 : Κατανομή τάσης SX εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.44 : Κατανομή τάσης SY εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην κεντρική ζώνη.

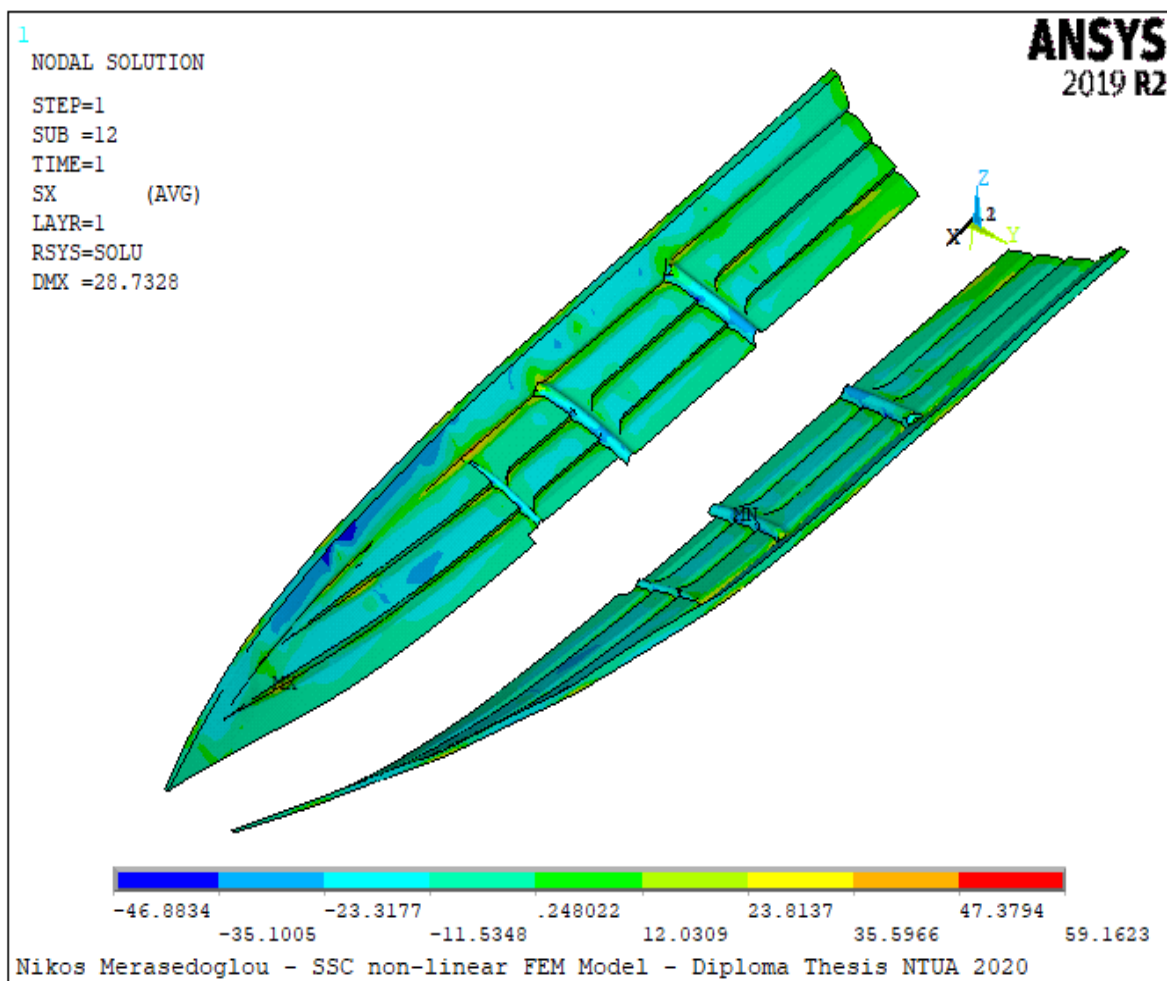
Σε ότι αφορά τις στρώσεις που υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες τιμές που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα, τόσο στον διαμήκη όσο και στον εγκάρσιο άξονα της ενδιάμεσης ζώνης, δηλαδή τα plates 1_2, 2_2, 3_2, 4_2, 5_2, 6_2 και 7_3, αστοχεί η τελευταία στρώση η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του plate 4_2 ($SY_{\text{tensile}} = 104.429 \text{ MPa} > \text{Ultimate tensile strength} = 91 \text{ MPa}$), η οποία επίσης αστοχούσε σύμφωνα με το 1^ο μοντέλο, με μόνη διαφορά ότι στο 1^ο μοντέλο η αναπτυσσόμενη τάση SY ήταν μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη του 2^{ου} μοντέλου ($104.429 \text{ MPa} > 91.0011 \text{ MPa}$), επομένως το 1^ο μοντέλο υπερέβαινε λιγότερο το όριο αντοχής σε σχέση με το 2^ο μοντέλο. Βασική διαφοροποίηση μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} μοντέλου είναι ότι σύμφωνα με το 2^ο μοντέλο αστοχεί η πρώτη εξωτερική στρώση στο plate 4_2 ($SY_{\text{tensile}} = 95.1114 \text{ MPa} > \text{Ultimate tensile strength} = 85 \text{ MPa}$ και $SY_{\text{compressive}} = -125.974 \text{ MPa} < \text{Ultimate compressive strength} = -117 \text{ MPa}$), η οποία δεν αστοχούσε σύμφωνα με το 1^ο μοντέλο. Υπενθυμίζεται ότι το σημείο στο οποίο παρατηρείται αστοχία ανήκει στο plate 4_2 όπου το σκάφος παρουσιάζει μέγιστο βέλος κάμψης, συνεπώς αυτή είναι η περιοχή που το σκάφος «πονάει» περισσότερο από την ασκούμενη πίεση, συνεπώς είναι εμφανής η επίδραση των υψηλών παραμορφώσεων στον τρόπο με τον οποίο εξάγονται τα αποτελέσματα των τάσεων, καθώς σε αυτή την περιοχή η μη-γραμμική ανάλυση του 2^{ου} μοντέλου λαμβάνει υπόψη τις υψηλές παραμορφώσεις, ενώ το 1^ο μοντέλο της γραμμικής ανάλυσης όχι.

Σύμφωνα με το 2^ο μοντέλο της μη-γραμμικής ανάλυσης, οι στρώσεις στις οποίες οι αναπτυσσόμενες τάσεις ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια είναι οι ίδιες με τις στρώσεις που ξεπερνούν τα επιτρεπόμενα όρια σύμφωνα με το 1^ο μοντέλο της γραμμικής ανάλυσης, δηλαδή οι τέσσερις εξωτερικές στρώσεις (300_CSM, 300_CSM, 450_CSM και 800_WR) και οι τέσσερις εσωτερικές στρώσεις (800_WR, 300_CSM, 800_WR και 300_CSM) που εντοπίζονται στα plates 3_2, 4_2 και 5_2, όπως και στο 1^ο μοντέλο. Οι μέγιστες υπερβάσεις των επιτρεπόμενων ορίων εντοπίζονται στην πρώτη στρώση στο εξωτερικό του plate 4_2 όπου αναπτύσσεται θλιπτική τάση $S_{Y_{compressive}} = -125.974 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -32.76 \text{ MPa}$ και μέγιστη εφελκυστική τάση $S_{Y_{tensile}} = 95.1114 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 23.8 \text{ MPa}$, ενώ στην εσωτερική στρώση του plate 4_2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $S_{Y_{compressive}} = -95.3474 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -34.02 \text{ MPa}$ και εφελκυστική τάση $S_{Y_{tensile}} = 104.429 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 25.48 \text{ MPa}$.

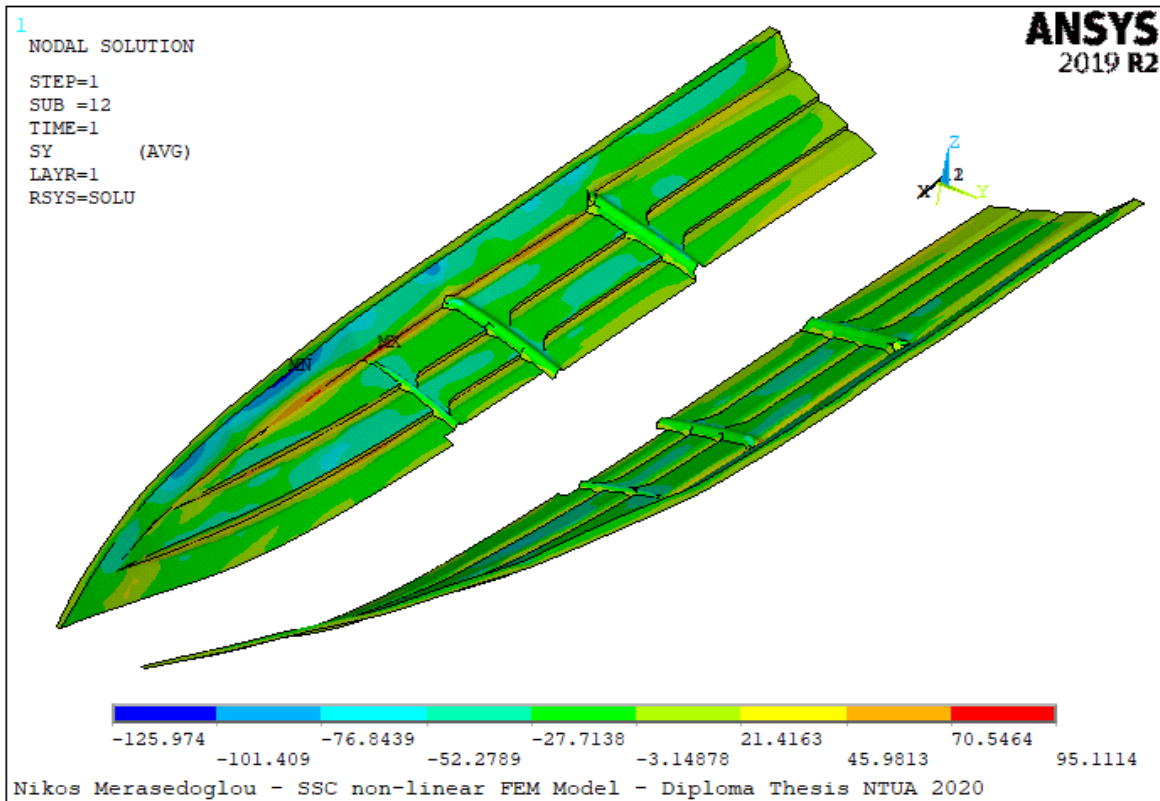
Τα Σχήματα 4.45 και 4.46 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και SY της εξωτερικής στρώσης του σκάφους, η οποία έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα και αποτελείται από 300_CSM περιεκτικότητας σε ίνες 0.3, ενώ τα Σχήματα 4.47 και 4.48 απεικονίζουν την κατανομή των τάσεων SX και εγκάρσιο αντίστοιχα της εσωτερικής στρώσης του σκάφους, η οποία αποτελείται από 300_CSM περιεκτικότητας σε ίνες 0.33, συνεπώς η εσωτερική στρώση έχει μεγαλύτερη αντοχή και επιτρεπόμενα όρια τάσης σε σχέση με την εξωτερική. Οι παρατηρήσεις για την αντοχή της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους αφορούν επιπλέον την περιοχή επικάλυψης της ενδιάμεσης με την άνω ζώνη, καθώς επίσης και τις περιοχές επικάλυψης των steps που ανήκουν στην ενδιάμεση ζώνη.

Έλεγχος αντοχής δεν πραγματοποιήθηκε στην άνω ζώνη του σκάφους, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η άνω ζώνη είναι η περιοχή κοντά στην οποία έχουν επιβληθεί πακτώσεις περιμετρικά του σκάφους, συνεπώς τα αποτελέσματα στα γειτονικά στοιχεία (elements) είναι αναξιόπιστα και δεν μπορούν να συγκριθούν με τις απαιτήσεις του νηογνώμονα.

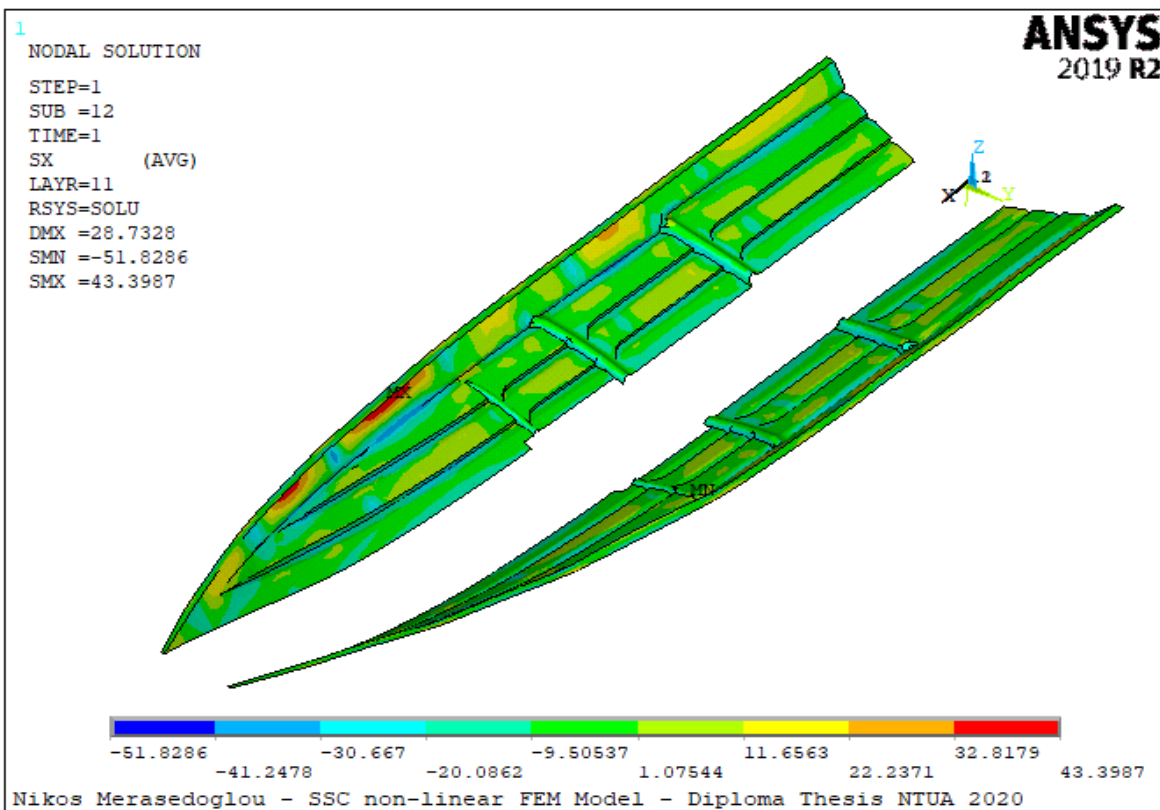
Σχετικά με τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκάφος, παρατηρείται στο Σχήμα 4.40 ότι σε όλο το σκάφος οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις είναι εντός των ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα, συνεπώς δεν υπήρχε ανάγκη για λεπτομερέστερη διερεύνηση της αντοχής του σκάφους σε διατμητικές τάσεις.



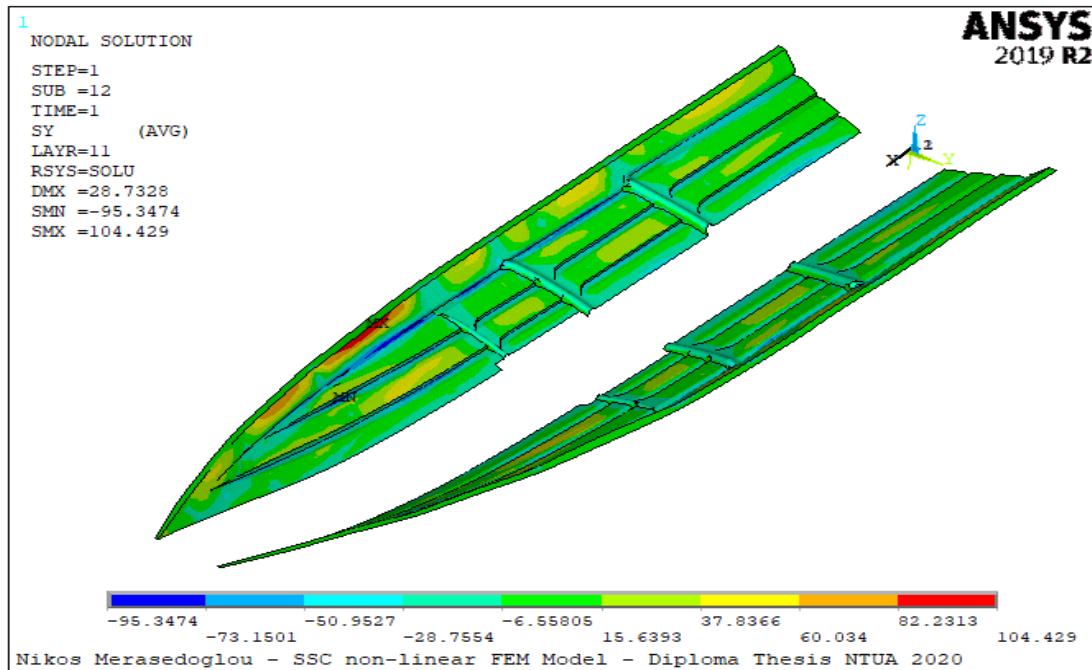
Σχήμα 4.45 : Κατανομή τάσης SX εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.



Σχήμα 4.46 : Κατανομή τάσης SY εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.



Σχήμα 4.47 : Κατανομή τάσης SX εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.

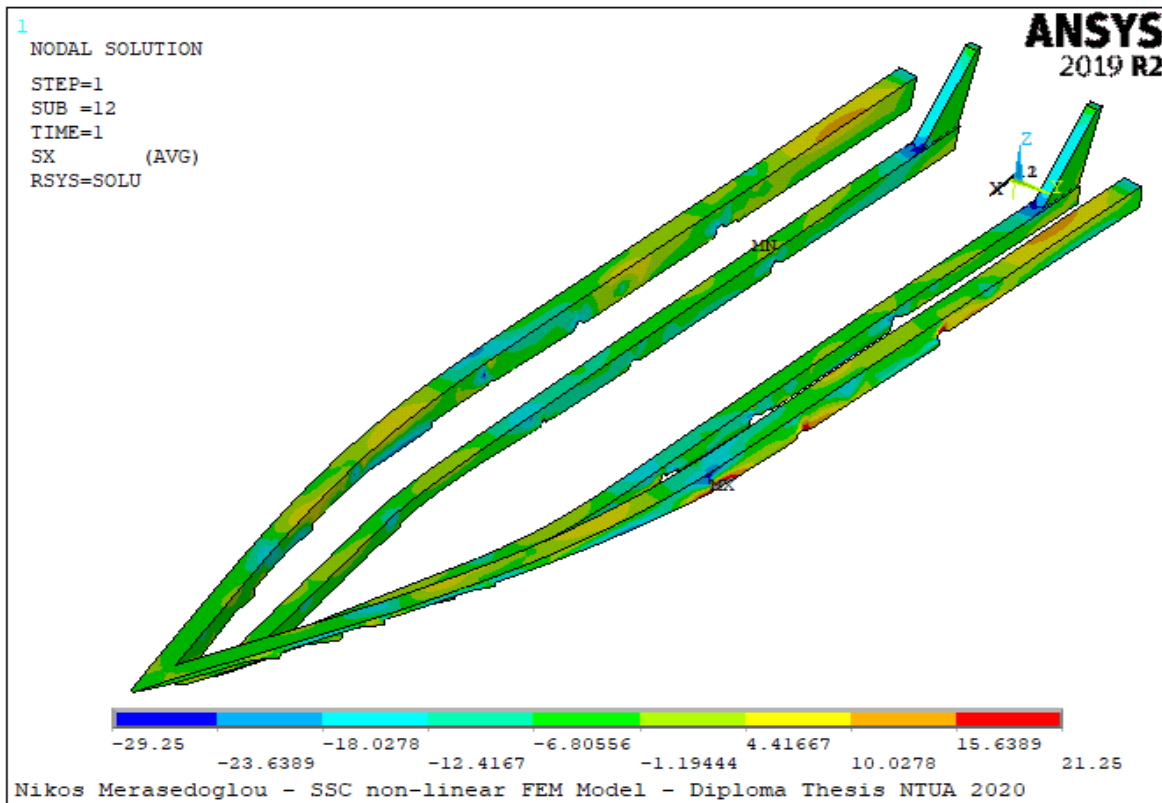


Σχήμα 4.48 : Κατανομή τάσης SY εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.

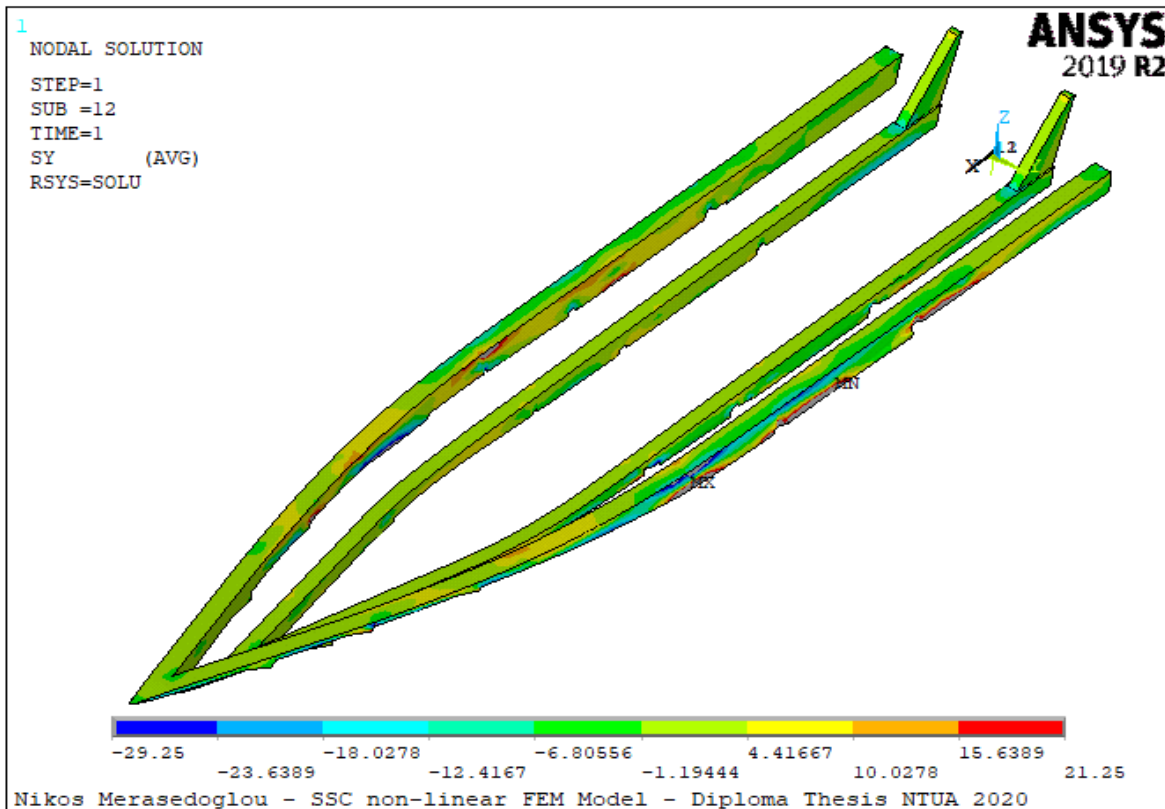
4.3.4 Έλεγχος αντοχής διαμήκων ενισχυτικών σκάφους

Ο έλεγχος στα διαμήκη ενισχυτικά έγινε με όμοιο τρόπο με τον έλεγχο της γάστρας του σκάφους. Ειδικότερα, ελέγχθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις τόσο στον κορμό όσο και στο πέλαμα του εσωτερικού ενισχυτικού, καθώς επίσης και στα μπρακέτα του καθρέφτη τα οποία έχουν την ίδια αλληλουχία στρώσεων με το εσωτερικό ενισχυτικό. Το Σχήμα 4.49 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SX, το Σχήμα 4.50 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY και το Σχήμα 4.51 απεικονίζει την κατανομή της διατμητικής τάσης SXY. Τα επιτρεπόμενα όρια της στρώσης με τη μικρότερη αντοχή έχουν οριστεί ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή στις χρωματικές κλίμακες που αναγράφονται στα Σχήματα 4.49, 4.50 και 4.51, ώστε να απεικονιστούν με χρώμα «γκρίζο» οι περιοχές στις οποίες οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα.

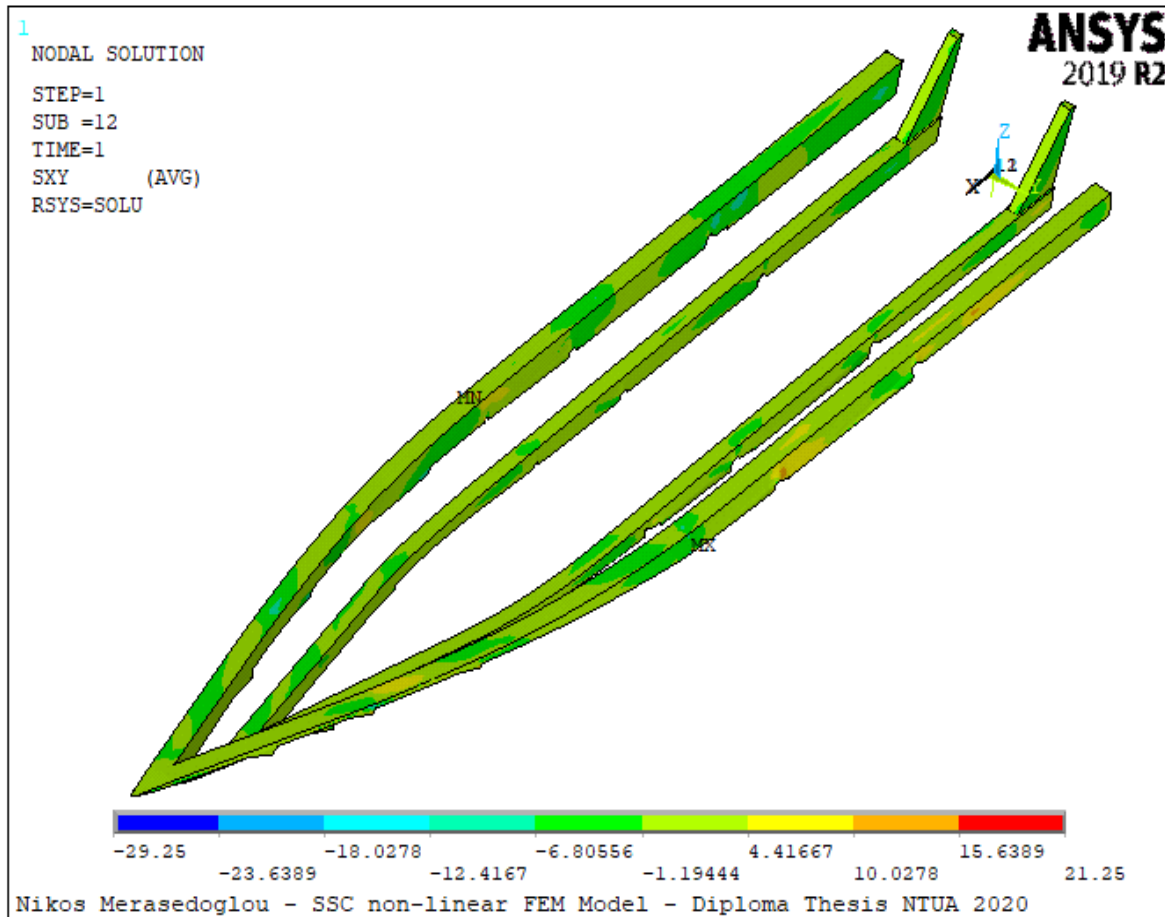
Το συμπέρασμα του ελέγχου ήταν ότι τα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη πληρούν τις απαιτήσεις του νηογνώμονα για τις μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις (allowable stresses), επομένως πληρούνται και οι απαιτήσεις για την αντοχή της κάθε στρώσης. Επομένως, σε ότι αφορά την αντοχή των ενισχυτικών, τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης συμφωνούν με αυτά της γραμμικής ανάλυσης. Μοναδική περιοχή που σύμφωνα με το Σχήμα 4.50 είναι η περιοχή του εξωτερικού κορμού του εξωτερικού ενισχυτικού γειτονικά του προωραίου step. Οι υψηλές τιμές τάσης όμως σε αυτή την περιοχή οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο έχουν δημιουργηθεί τα στοιχεία του πλέγματος, επομένως δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη, όπως έχει επεξηγηθεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου. Το συμπέρασμα αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.49 – 4.51.



Σχήμα 4.49 : Κατανομή τάσης SX στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.



Σχήμα 4.50 : Κατανομή τάσης SY στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

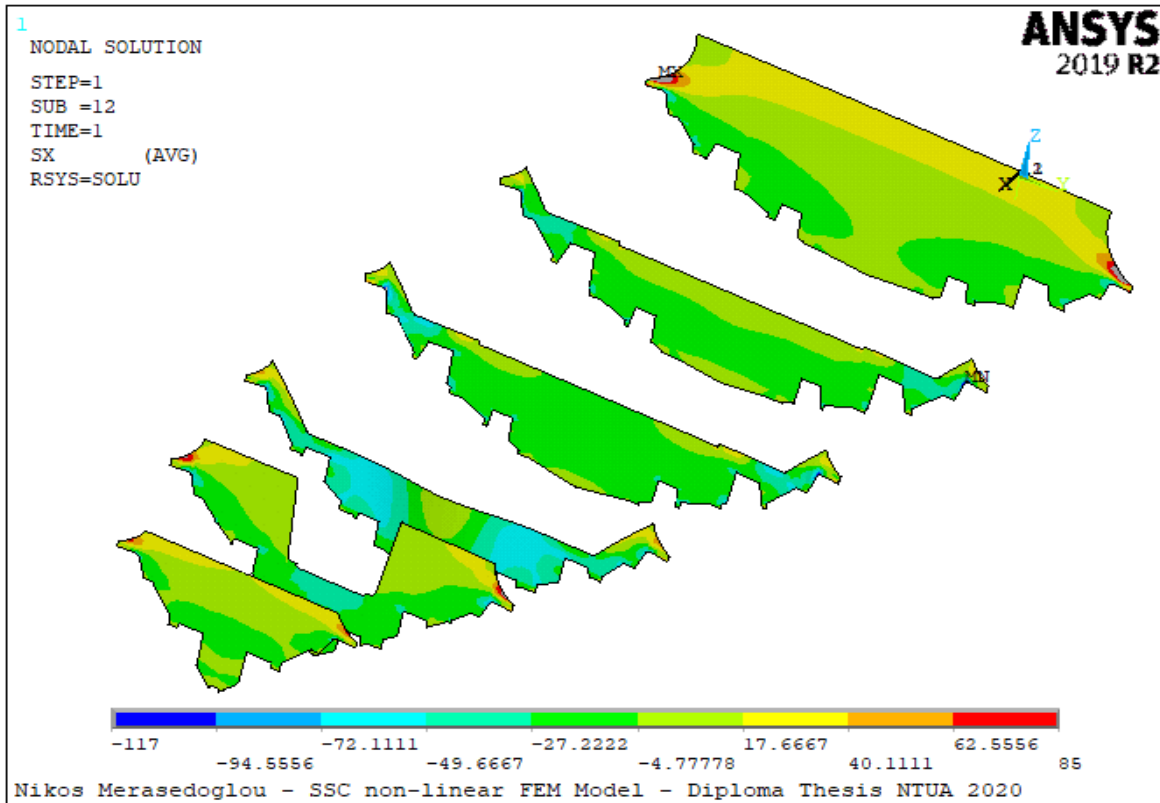


Σχήμα 4.51 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY στα ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

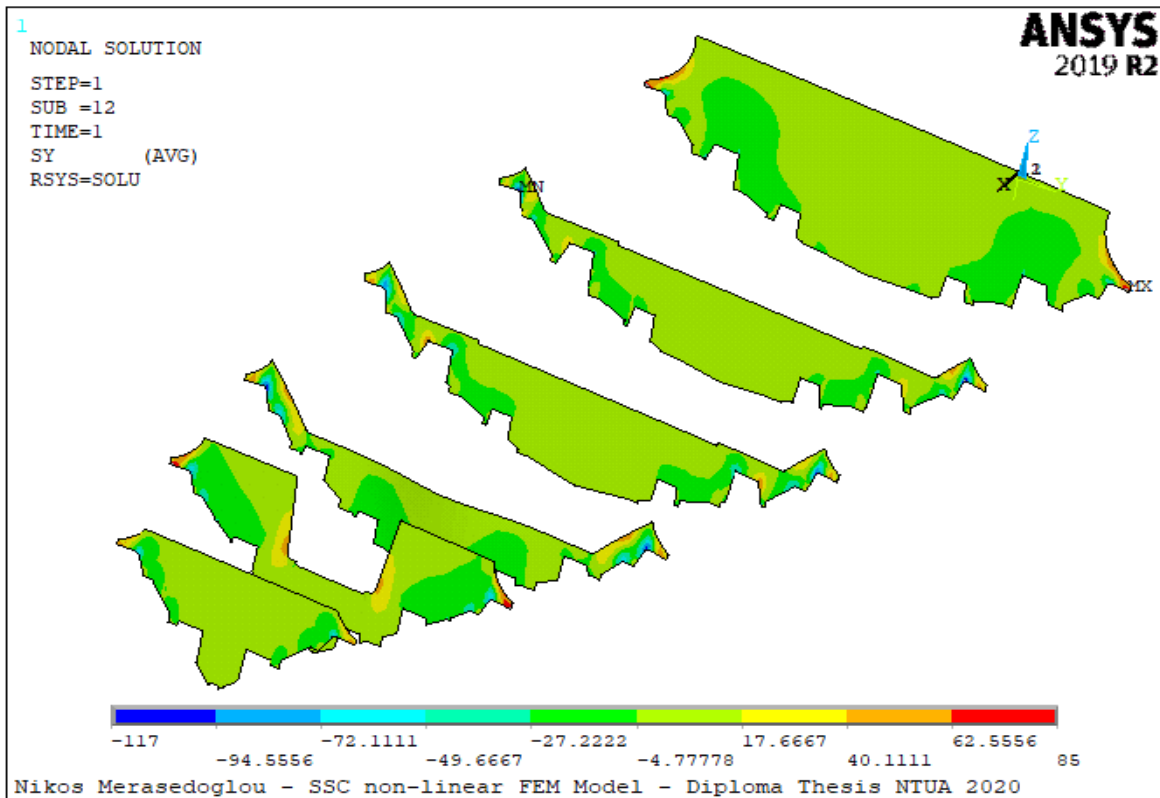
4.3.5 Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων φρακτών

Ο έλεγχος στις εγκάρσιες φρακτές έγινε με όμοιο τρόπο με τον έλεγχο της γάστρας και τα διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής συμφωνούν με τα αποτελέσματα της γραμμικής ανάλυσης. Το Σχήμα 4.52 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SX, το Σχήμα 4.53 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY και το Σχήμα 4.54 απεικονίζει την κατανομή της διατμητικής τάσης SXY. Η αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη της πιο αδύναμης στρώσης έχει οριστεί ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα στις χρωματικές κλίμακες που αναγράφονται στα Σχήματα 4.52, 4.53 και 4.54, ώστε να απεικονιστούν με χρώμα «γκρίζο» οι περιοχές στις οποίες υπάρχει αστοχία.

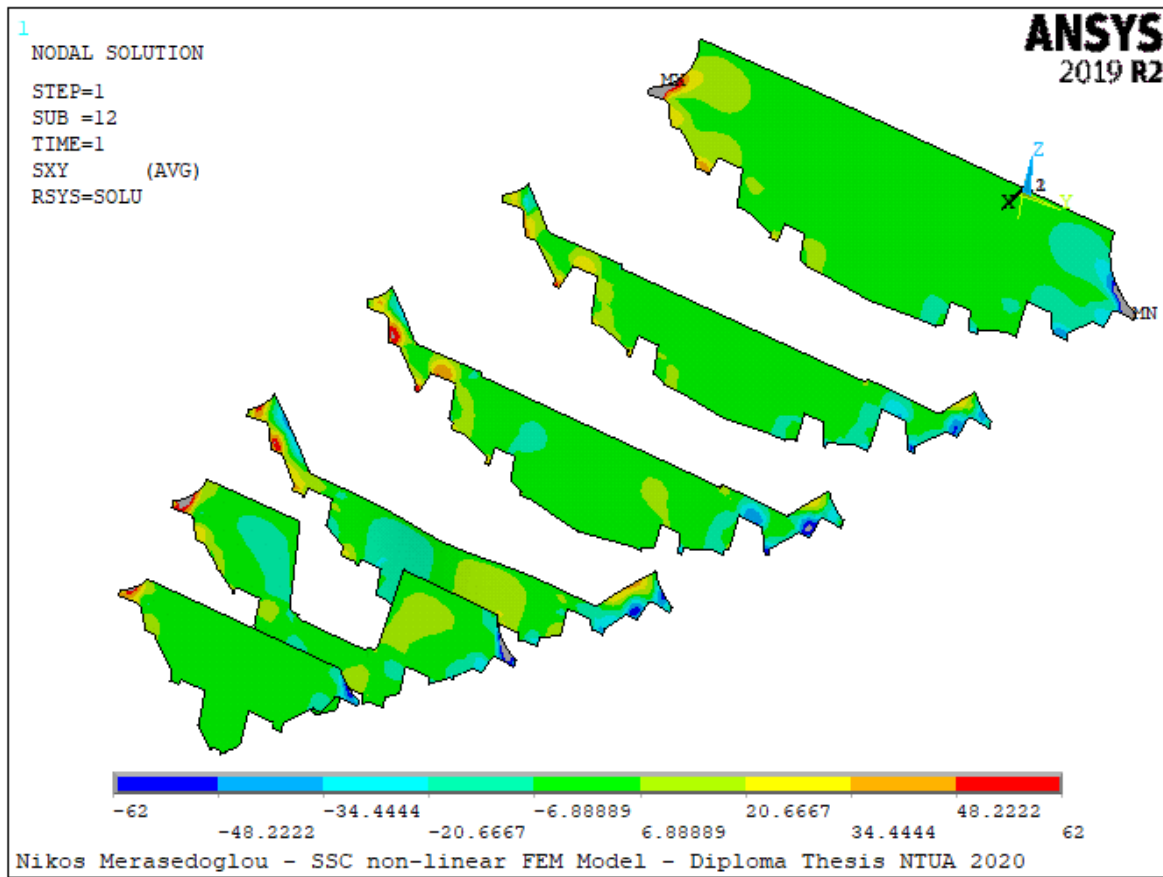
Το συμπέρασμα του ελέγχου ήταν ότι για τις εγκάρσιες φρακτές πληρούνται οι απαιτήσεις για την αντοχή της κάθε στρώσης. Το συμπέρασμα αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.52 – 4.54. Μοναδικές περιοχές αστοχίας αποτελούν εκείνες που βρίσκονται γειτονικά των κόμβων που έχουν πακτωθεί, συνεπώς τα αποτελέσματα σε αυτές τις περιοχές δεν θεωρούνται αξιόπιστα και αγνοούνται, όπως έχει σημειωθεί στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 4.52 : Κατανομή τάσης SX στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.



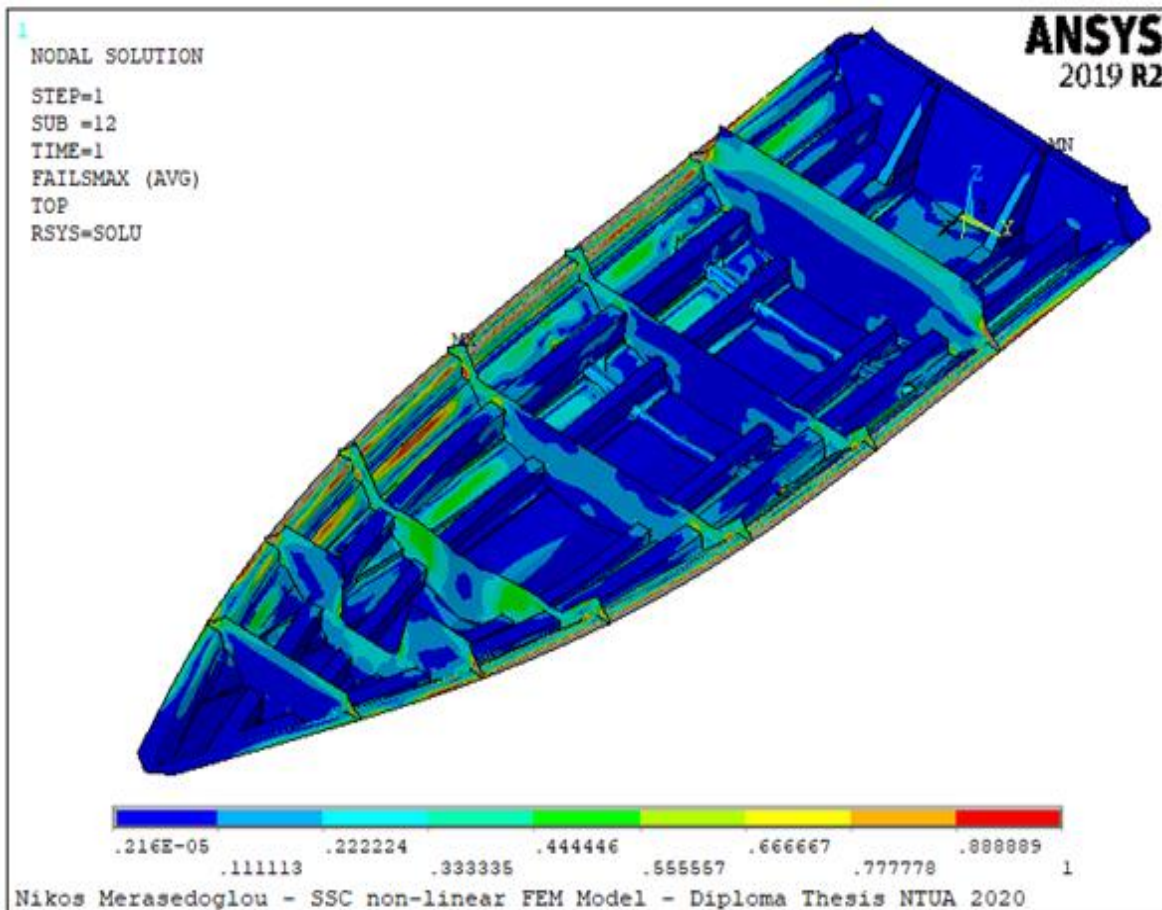
Σχήμα 4.53 : Κατανομή τάσης SY στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.



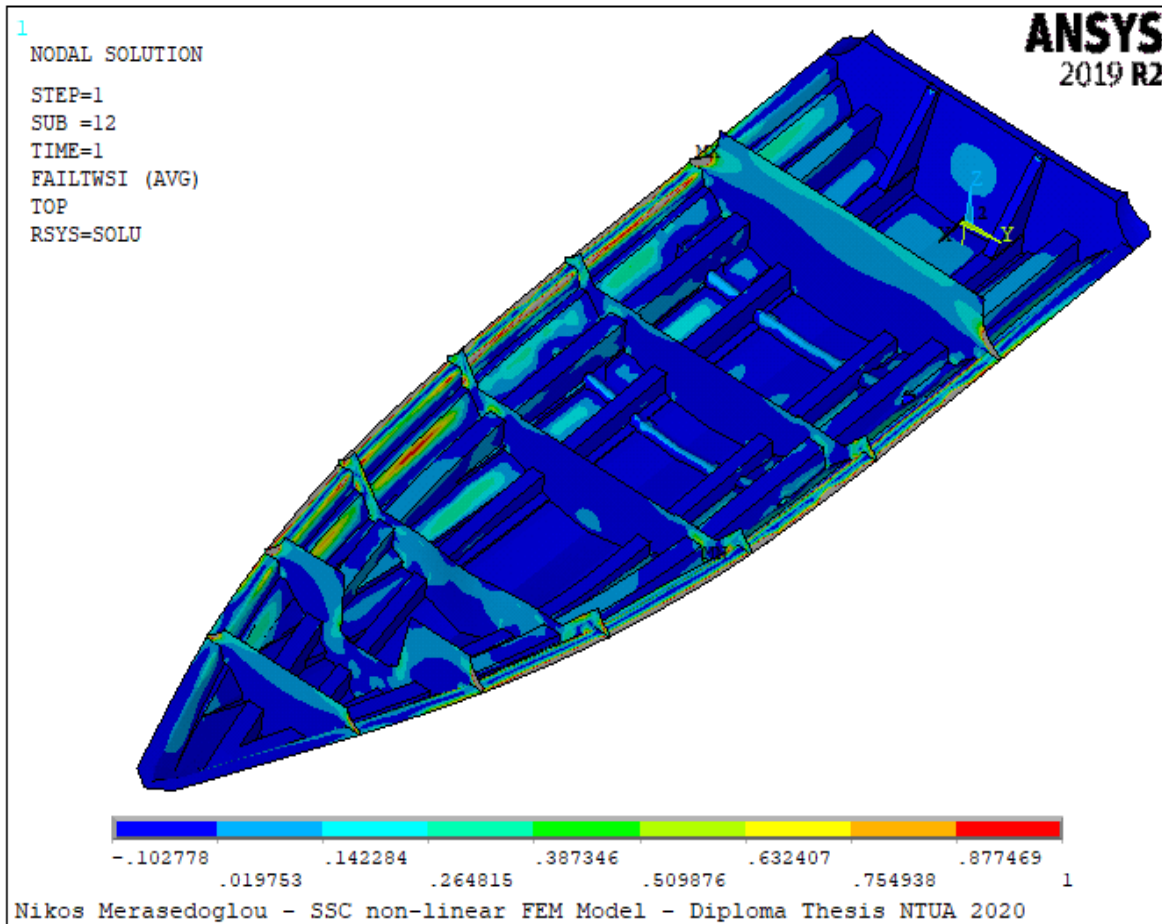
Σχήμα 4.54 : Κατανομή διατμητικής τάσης S_{XY} στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.

4.3.6 Κριτήρια αστοχίας «μέγιστης τάσης» και «Tsai – Wu»

Όπως στην γραμμική ανάλυση, έτσι και στην μη-γραμμική ανάλυση εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα ANSYS κριτήρια αστοχίας (failure criteria), λαμβάνοντας ως δεδομένα τις αντοχές για κάθε στρώση σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση για τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd's Register». Ως κριτήριο αστοχίας επιλέχθηκε το «κριτήριο μέγιστης τάσης» (maximum stress) και το «κριτήριο Tsai-Wu» (Tsai-Wu strength index). Τα αποτελέσματα για το κριτήριο μέγιστης τάσης απεικονίζονται στο Σχήμα 4.55, ενώ τα αποτελέσματα για το κριτήριο «Tsai-Wu» απεικονίζονται στο Σχήμα 4.56. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που αναγράφονται στις χρωματικές κλίμακες των Σχημάτων 4.55 και 4.56 αφορούν την στρώση στην οποία το κριτήριο αναπτύσσει τη μέγιστη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρώσεις του πολύστρωτου.

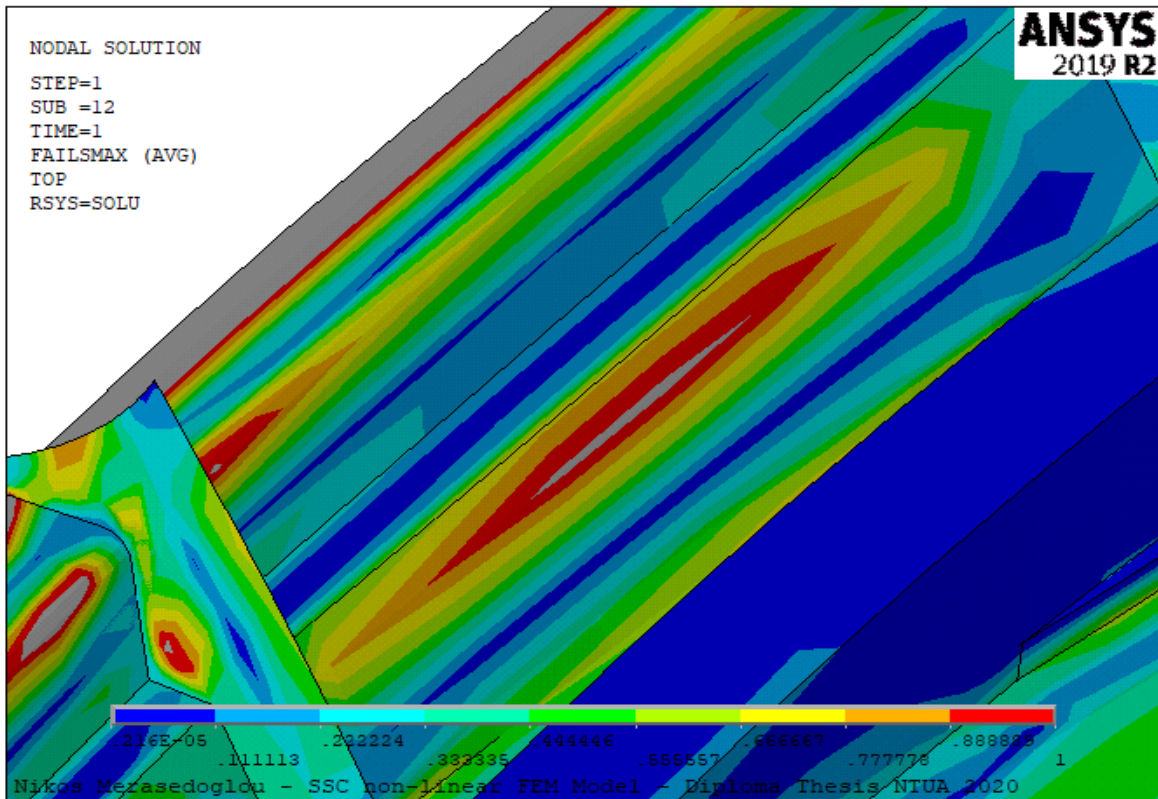


Σχήμα 4.55 : Κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης.

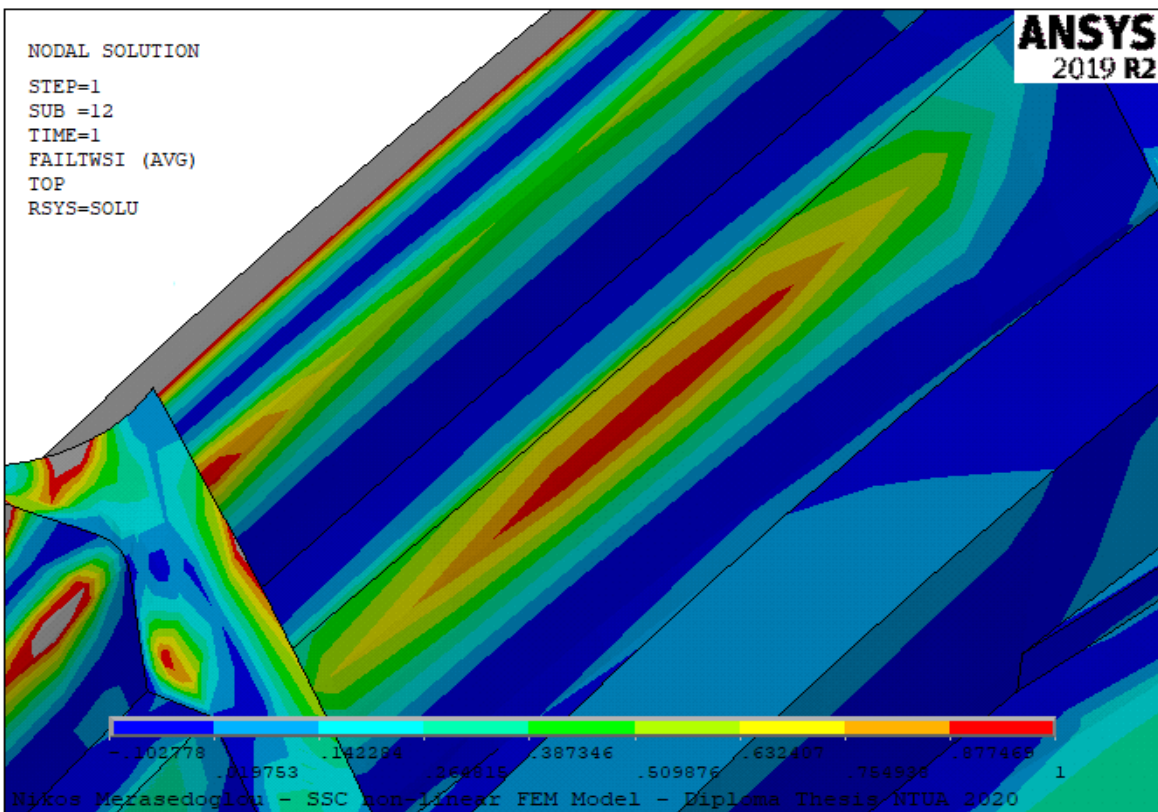


Σχήμα 4.56 : Κριτήριο αστοχίας «Tsai – Wu».

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα των κριτηρίων, παρατηρείται ότι σύμφωνα με την μη-γραμμική ανάλυση και το κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης, όλες οι περιοχές πληρούν το κριτήριο με μοναδική εξαίρεση το ανώτερο τμήμα του plate 4.2, στο οποίο παρατηρήθηκε αστοχία της τελευταίας στρώσης η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του σκάφους, όπως αναγράφεται στο εδάφιο 4.3.3. Συνεπώς, η αστοχία που παρατηρήθηκε σε αυτό το έλασμα του plate 4.2 συμφωνεί με το κριτήριο μέγιστης τάσης. Ωστόσο, σύμφωνα με το κριτήριο «Tsai–Wu» παρατηρείται ότι όλες οι πλάκες είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων αντοχής των στρώσεων. Το ανώτερο έλασμα του plate 4.2 το οποίο δεν πληροί το κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης απεικονίζεται στα Σχήματα 4.57 και 4.58 σε μεγέθυνση για το κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης και το κριτήριο αστοχίας «Tsai–Wu» αντίστοιχα.



Σχήμα 4.57 : Κριτήριο αστοχίας «μέγιστης τάσης» στο ανώτερο έλασμα του plate 4.2.



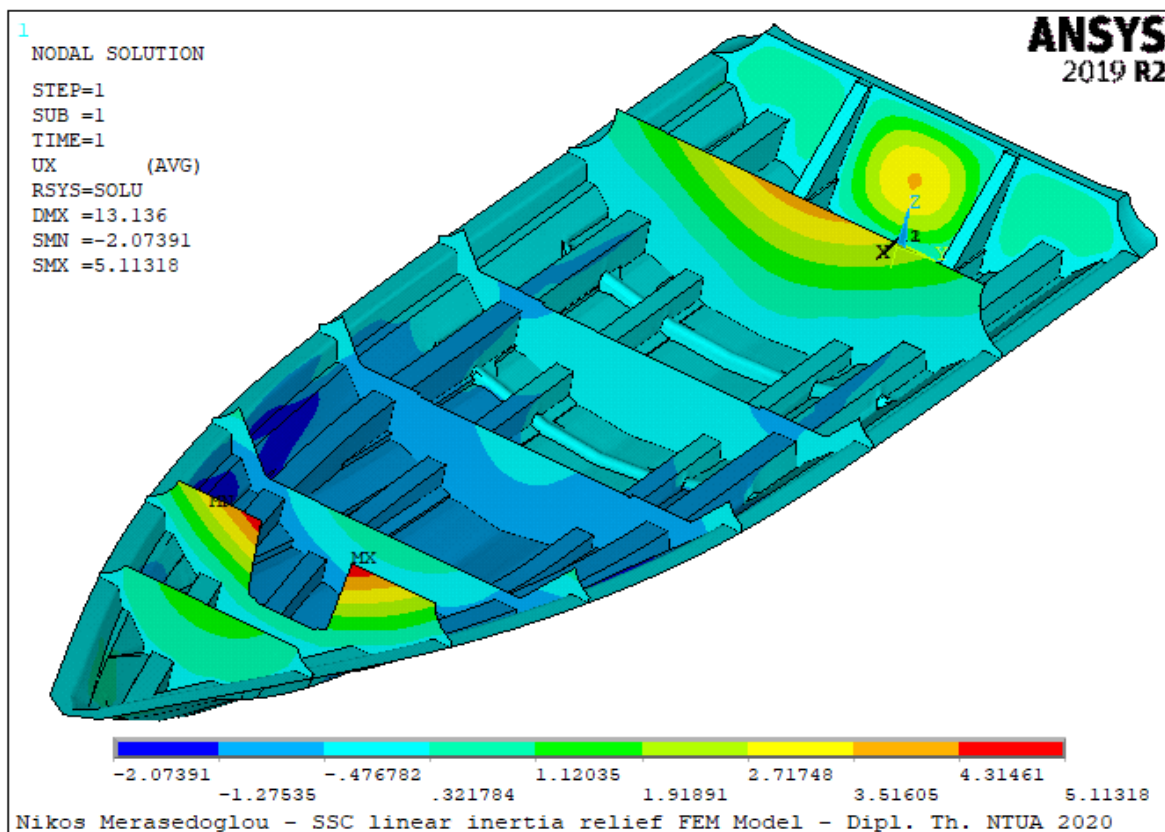
Σχήμα 4.58 : Κριτήριο αστοχίας «Tsai – Wu» στο ανώτερο έλασμα του plate 4.2.

4.4 Αποτελέσματα με τον συνυπολογισμό αδρανειακών φορτίων – 3^ο μοντέλο

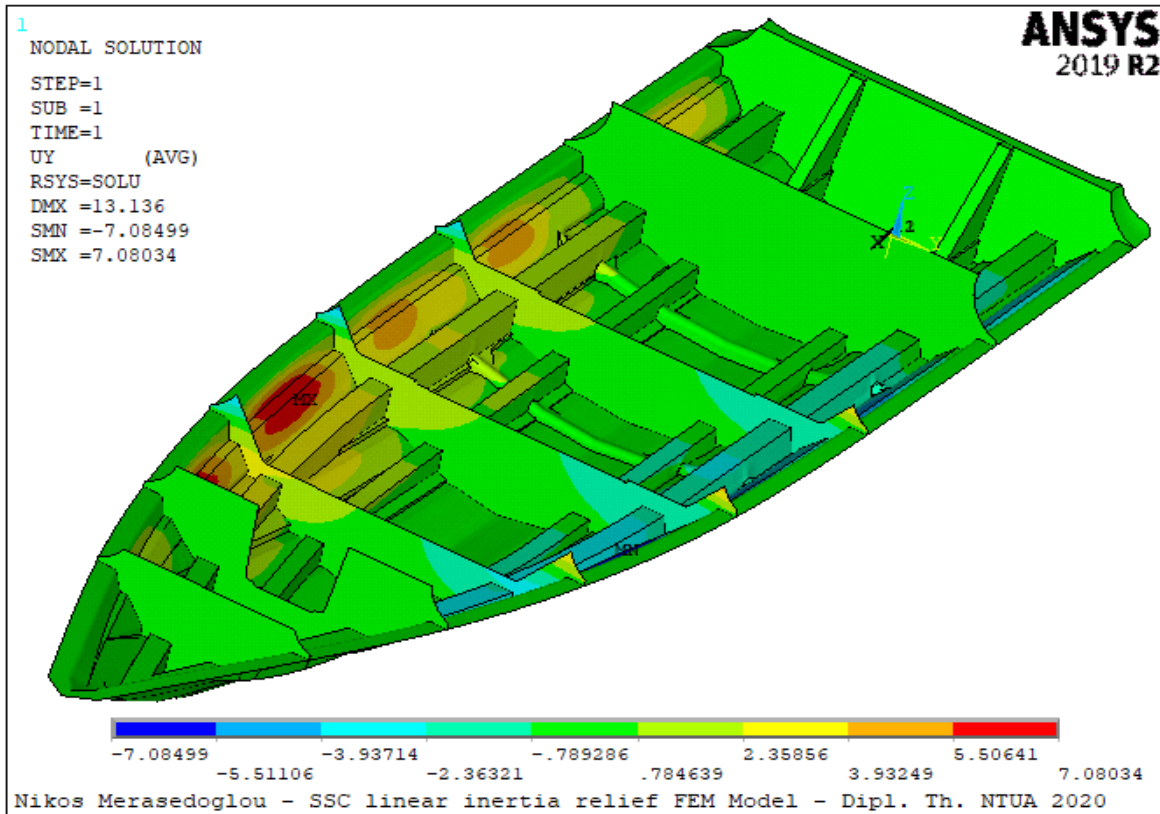
Κατά τον δεύτερο τρόπο επίλυσης του στατικού προβλήματος, οι κρουστικές πιέσεις που ασκούνται στο εξωτερικό του σκάφους εξισορροπούνται από τα αδρανειακά φορτία της κατασκευής και όχι από τις συνοριακές συνθήκες που έχουν τοποθετηθεί στο σκάφος. Σε αυτήν την περίπτωση, τα αποτελέσματα αφορούν μόνο τη γραμμική ανάλυση, καθώς η λειτουργία «inertia relief» του ANSYS δεν δύναται να εκτελεστεί σε μοντέλο με μη γραμμικότητες (nonlinearities).

4.4.1 Μετατοπίσεις στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων

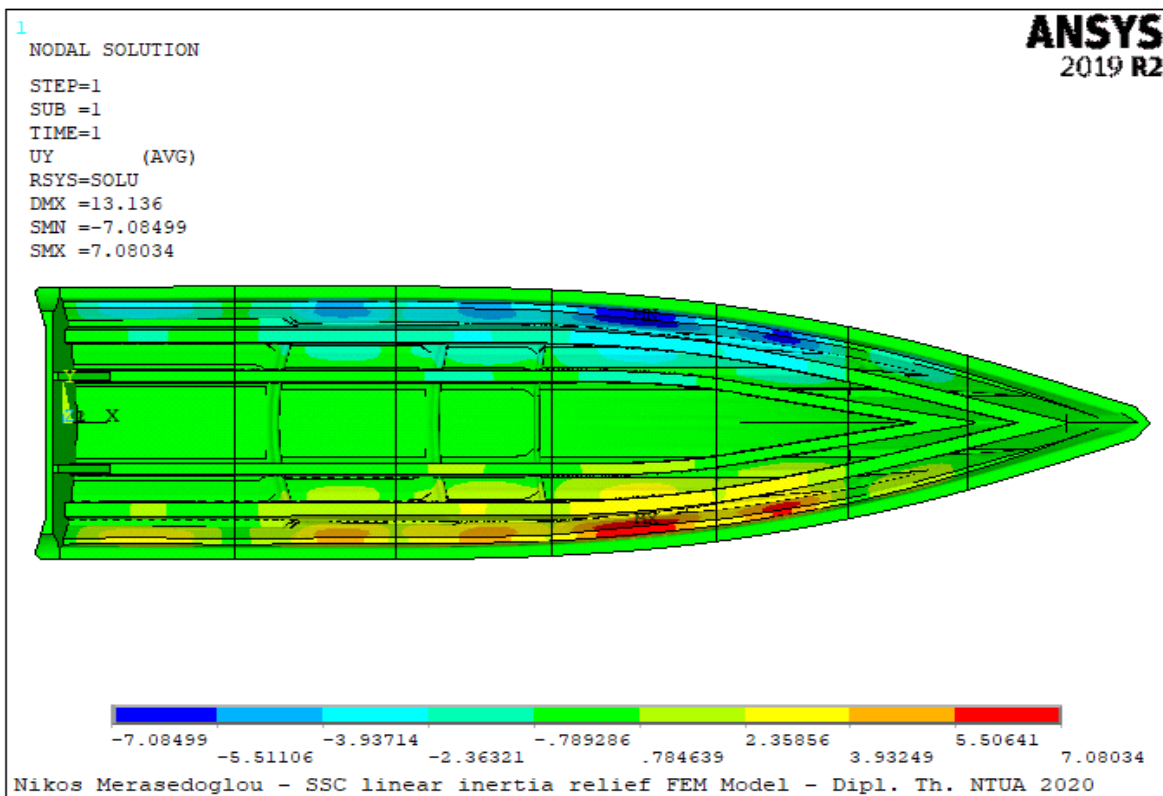
Οι μετατοπίσεις UX, UY, UZ και η συνολική μετατόπιση USUM έχουν υπολογιστεί και απεικονίζονται στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι μετατοπίσεις δίνουν μια πρώτη εκτίμηση για τον τρόπο με τον οποίο καταπονείται το σκάφος. Η μετατόπιση UX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.59, η μετατόπιση UY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.60 και 4.61 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα, η μετατόπιση UZ κατά τον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.62 και 4.63 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα, ενώ η συνολική μετατόπιση USUM απεικονίζεται στα Σχήματα 4.64 και 4.65 σε τρισδιάστατη όψη και άνοψη αντίστοιχα.



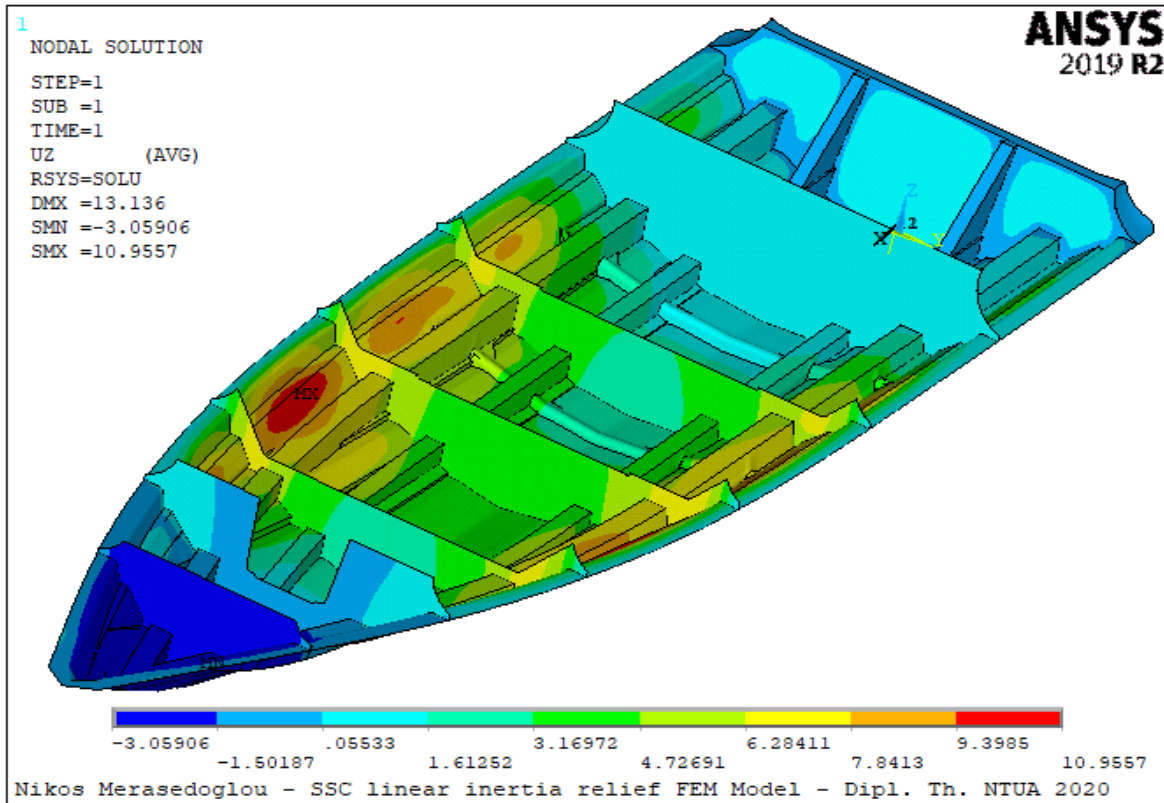
Σχήμα 4.59 : Μετατόπιση UX ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



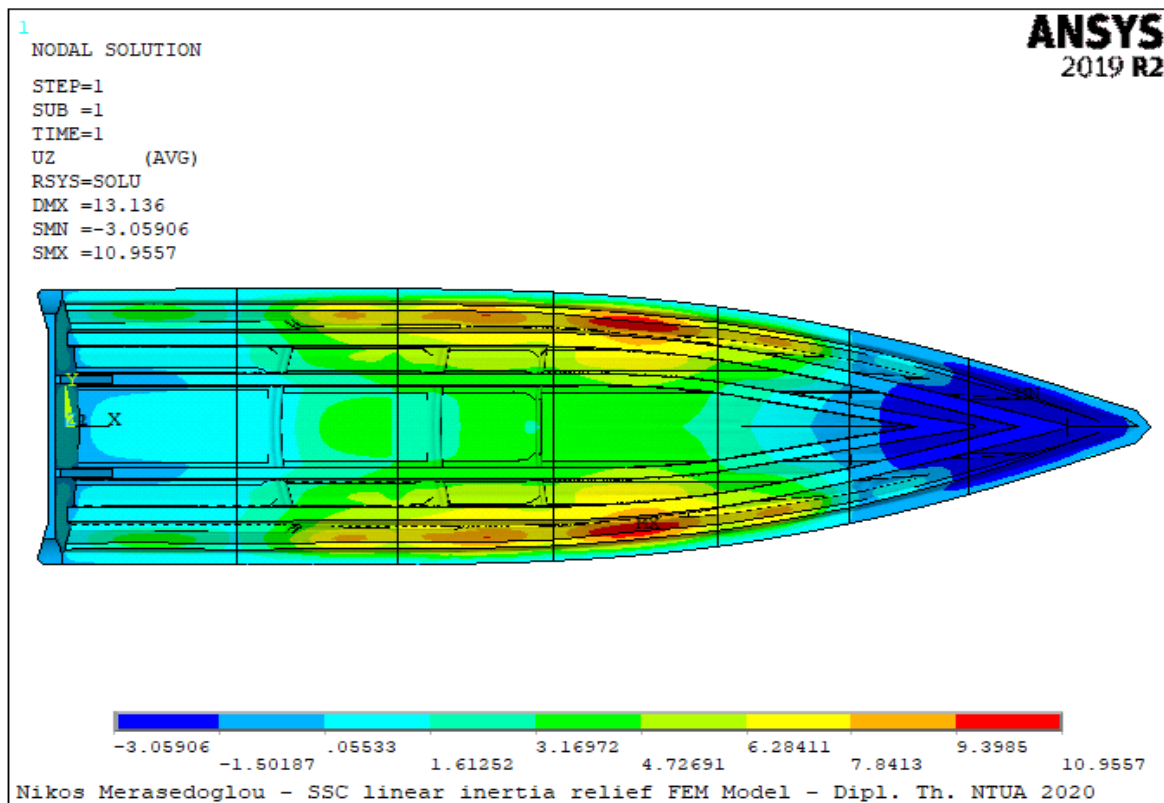
Σχήμα 4.60 : Τρισδιάστατη όψη μετατόπισης UY στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



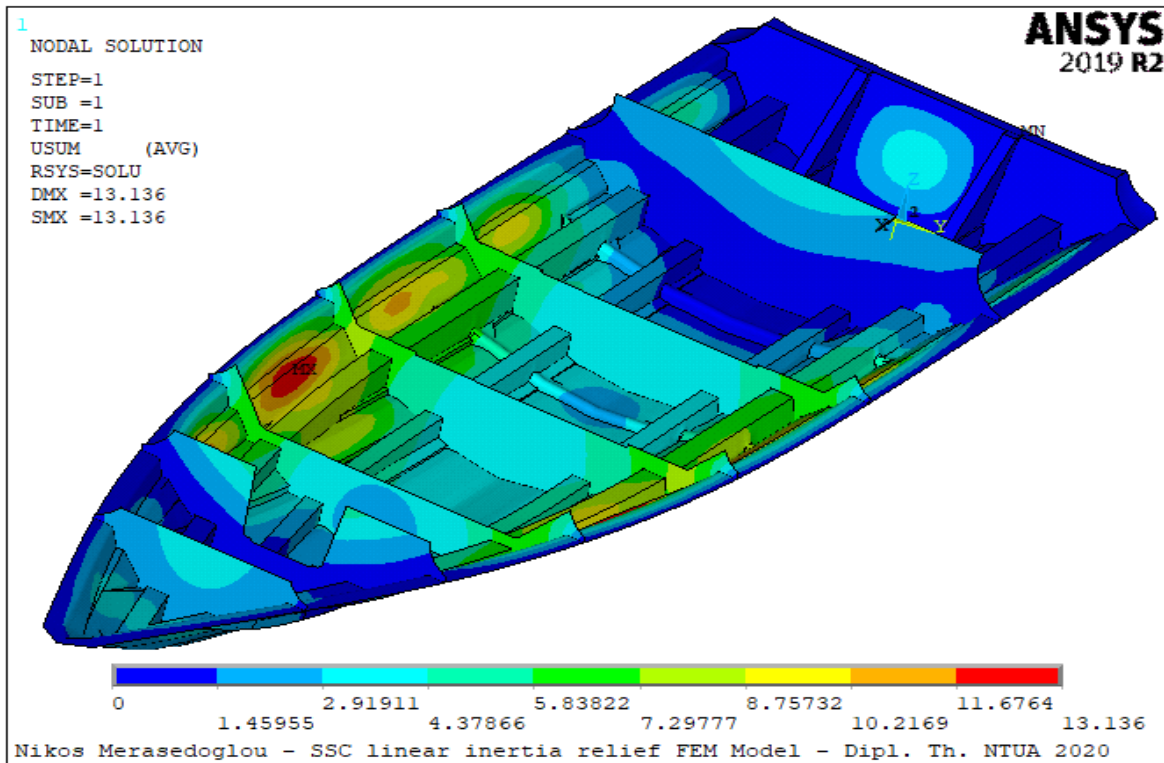
Σχήμα 4.61 : Άνοψη μετατόπισης UY στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



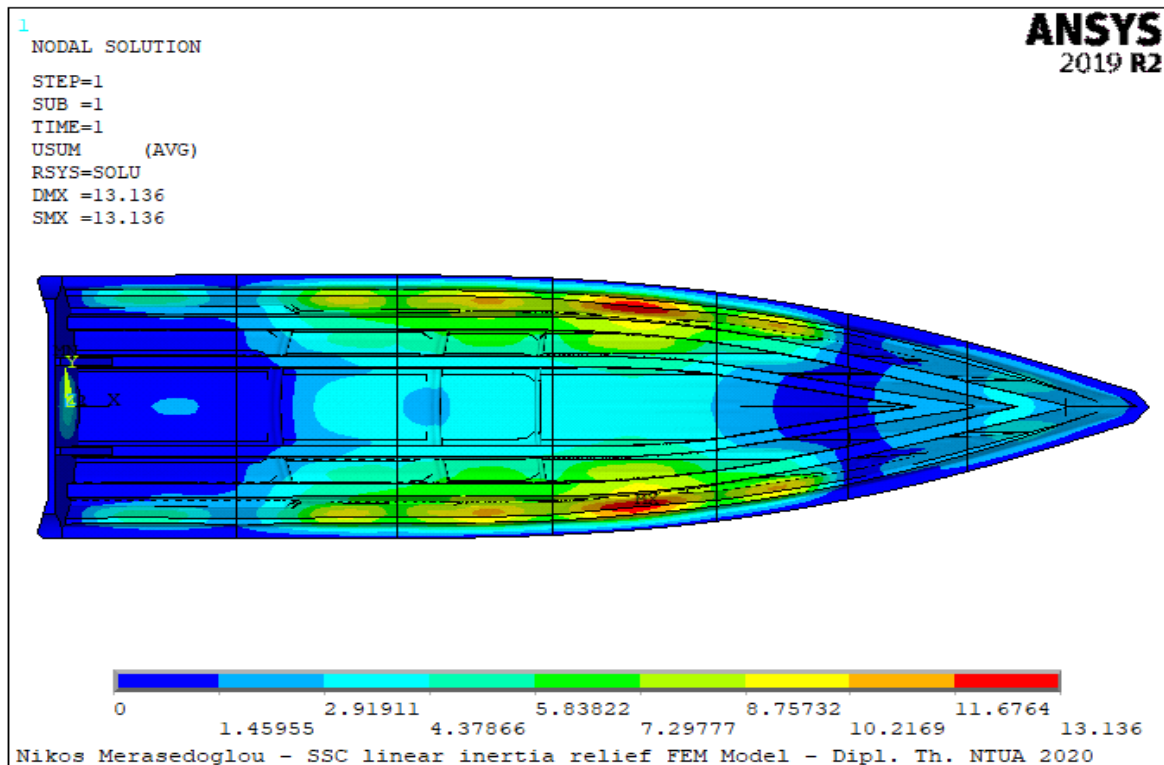
Σχήμα 4.62 : Τρισδιάστατη όψη μετατόπισης UZ στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.63 : Άνοψη μετατόπισης UZ στο γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.64 : Τρισδιάστατη όψη συνολικής μετατόπισης USUM στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



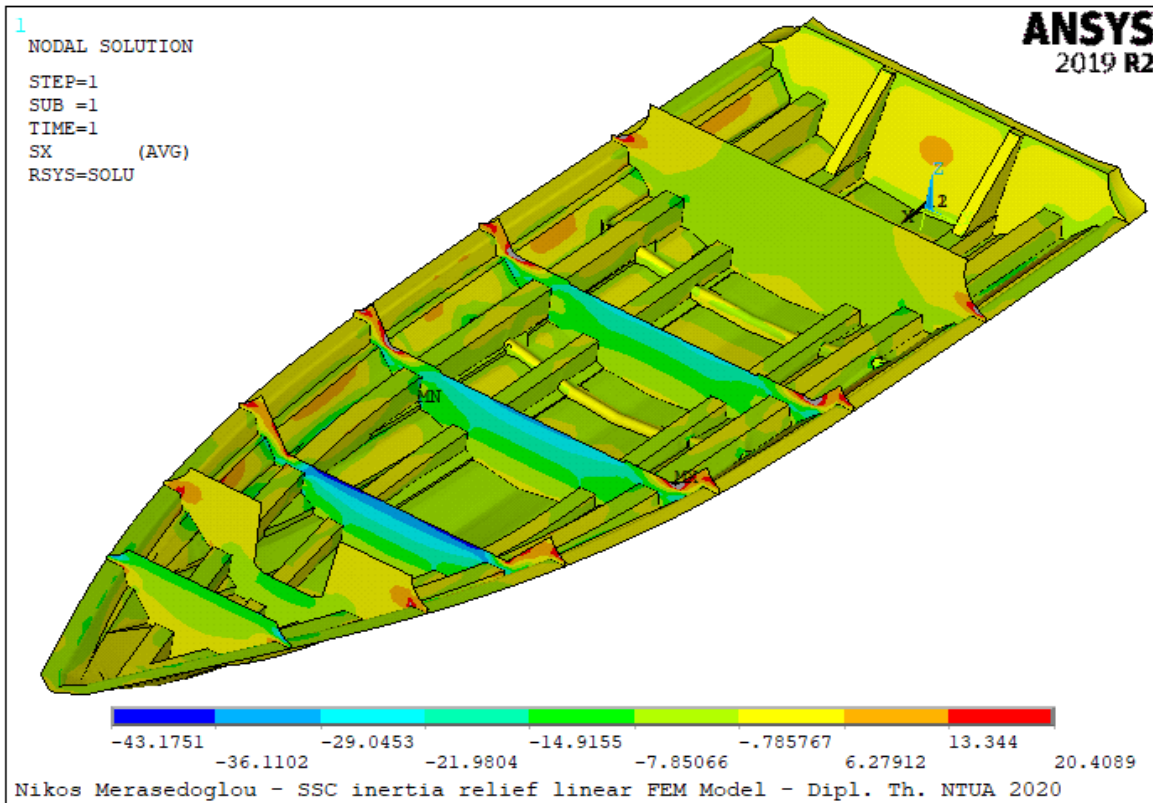
Σχήμα 4.65 : Άνοψη συνολικής μετατόπισης USUM ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

Συγκρίνοντας το 3^ο μοντέλο γραμμικής ανάλυσης που συνυπολογίζει τα αδρανειακά φορτία (inertia relief) με το 1^ο και το 2^ο μοντέλο περιμετρικής πάκτωσης του σκάφους, παρατηρείται διαφοροποίηση στην μετατόπιση UX, η οποία απεικονίζεται στα Σχήματα 4.5, 4.31 και 4.59. Ειδικότερα, το μοντέλο που συνυπολογίζει το «inertia relief» παρουσιάζει παρόμοια κατανομή μετατόπισης UX με το μοντέλο γραμμικής ανάλυσης περιμετρικής πάκτωσης, ωστόσο στο μοντέλο «inertia relief» η μέγιστη μετατόπιση UX παρατηρείται στην δεύτερη, από πλώρα προς τα πρύμα, εγκάρσια φρακτή, ενώ στο μοντέλο γραμμικής ανάλυσης περιμετρικής πάκτωσης του σκάφους η μέγιστη μετατόπιση UX. Ωστόσο, τα αποτελέσματα στα ελεύθερα άκρα των φρακτών δεν μπορούν να αξιολογηθούν με βεβαιότητα σε καμία από τις παραπάνω αναλύσεις, δεδομένου ότι στο σύνορο των φρακτών υπάρχει η γεωμετρία του καταστρώματος η οποία εμποδίζει σε μεγάλο βαθμό τη μετατόπιση των ελεύθερων άκρων των φρακτών και δεν έχει μοντελοποιηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

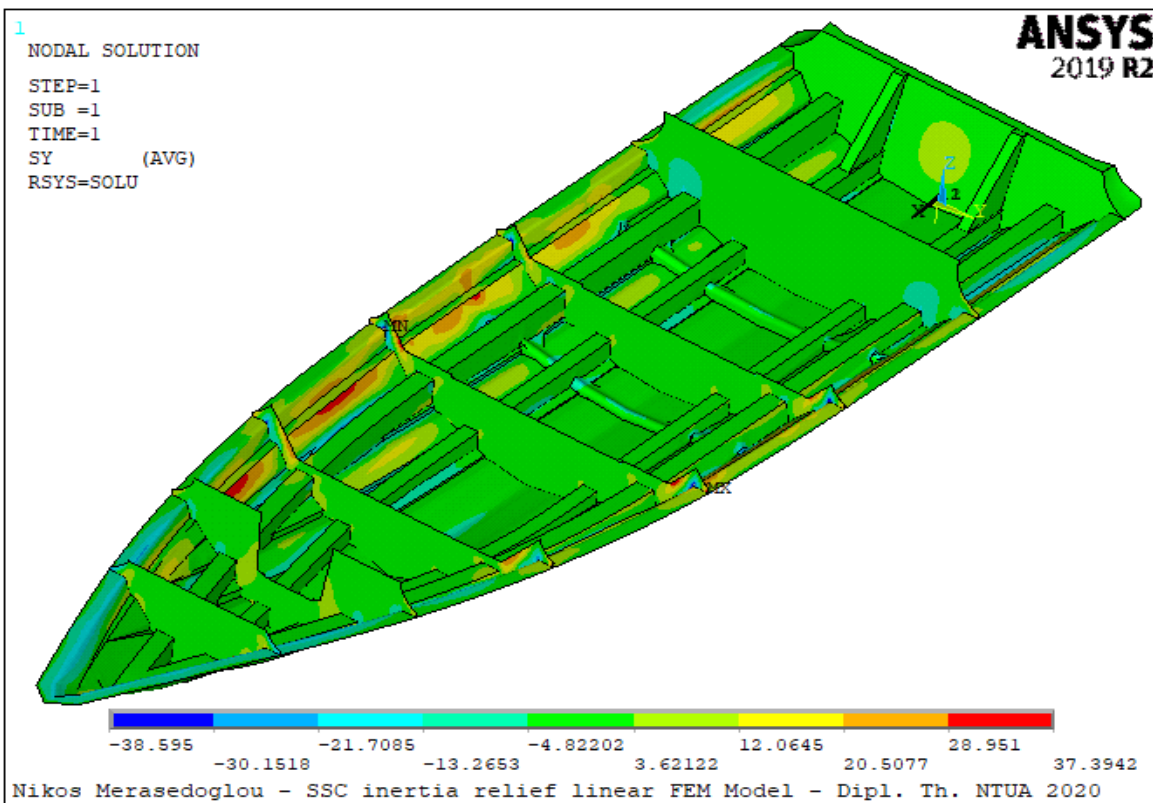
Με εξαίρεση τη διαμήκη μετατόπιση UX των κόμβων, η εγκάρσια μετατόπιση UY, η κατακόρυφη μετατόπιση UZ και η συνολική μετατόπιση USUM κατά το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς είχαν όμοια αποτελέσματα μεταξύ των τριών μοντέλων επίλυσης. Ειδικότερα, τα αποτελέσματα των τριών μοντέλων είχαν ίδια κατανομή, δηλαδή εμφάνισαν μέγιστες και ελάχιστες τιμές μετατοπίσεων στην ίδια περιοχή, αλλά οι τιμές μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης είχαν μικρή απόκλιση. Η απόκλιση των ελαχίστων και μέγιστων τιμών οφείλεται, όπως και στην μετατόπιση UX, τόσο στην επίδραση των αδρανειακών φορτίων.

4.4.2 Κατανομή τάσεων στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων

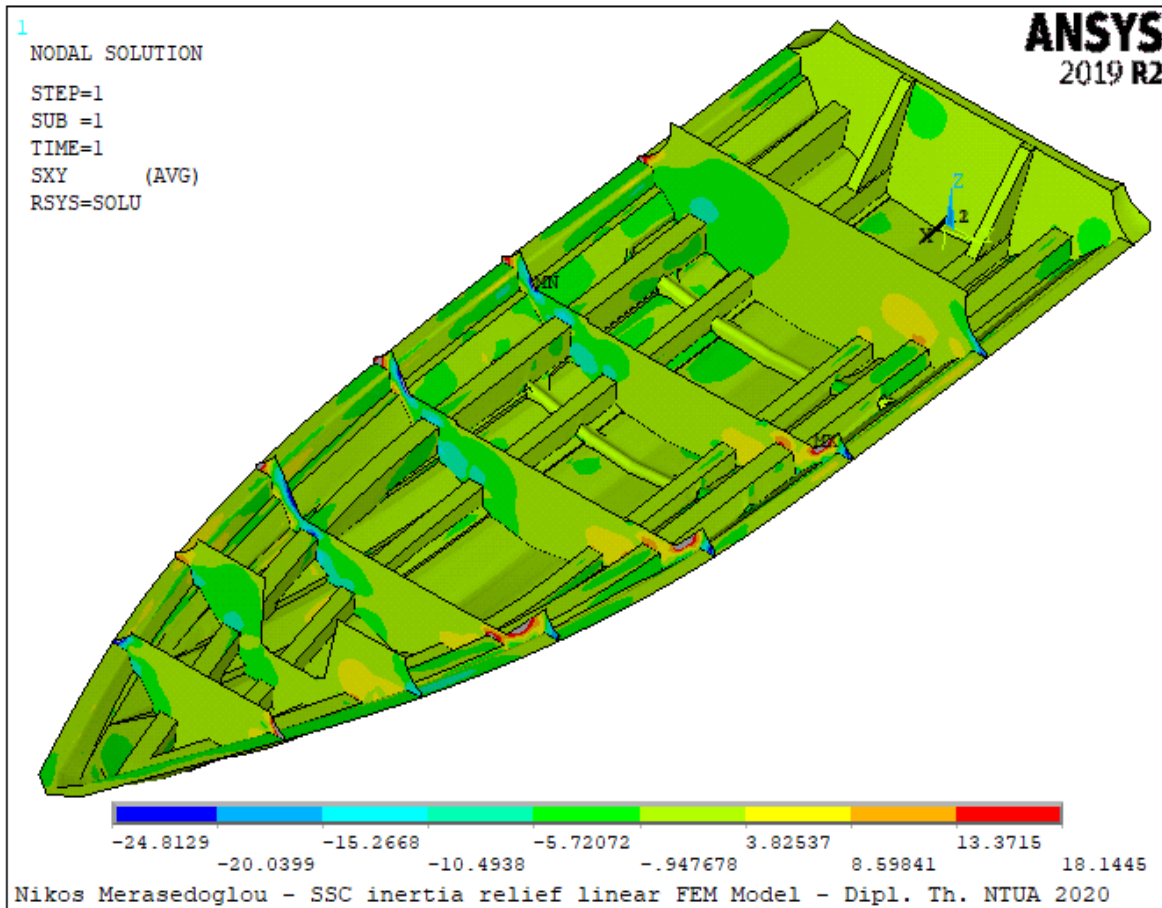
Οι τάσεις SX, SY και SXY έχουν υπολογιστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου και απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη. Υπενθυμίζεται ότι ο προσανατολισμός των αξόνων του τοπικού συστήματος αναφοράς που έχει κάθε στοιχείο περιγράφεται στην τελευταία παράγραφο του εδαφίου 3.3.3 της παρούσας εργασίας. Η κατανομή της τάσης SX απεικονίζεται στο Σχήμα 4.66, η κατανομή της τάσης SY απεικονίζεται στο Σχήμα 4.67, ενώ η διατμητική τάση SXY απεικονίζεται στο Σχήμα 4.68.



Σχήμα 4.66 : Κατανομή τάσης SX ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.67 : Κατανομή τάσης SY ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.



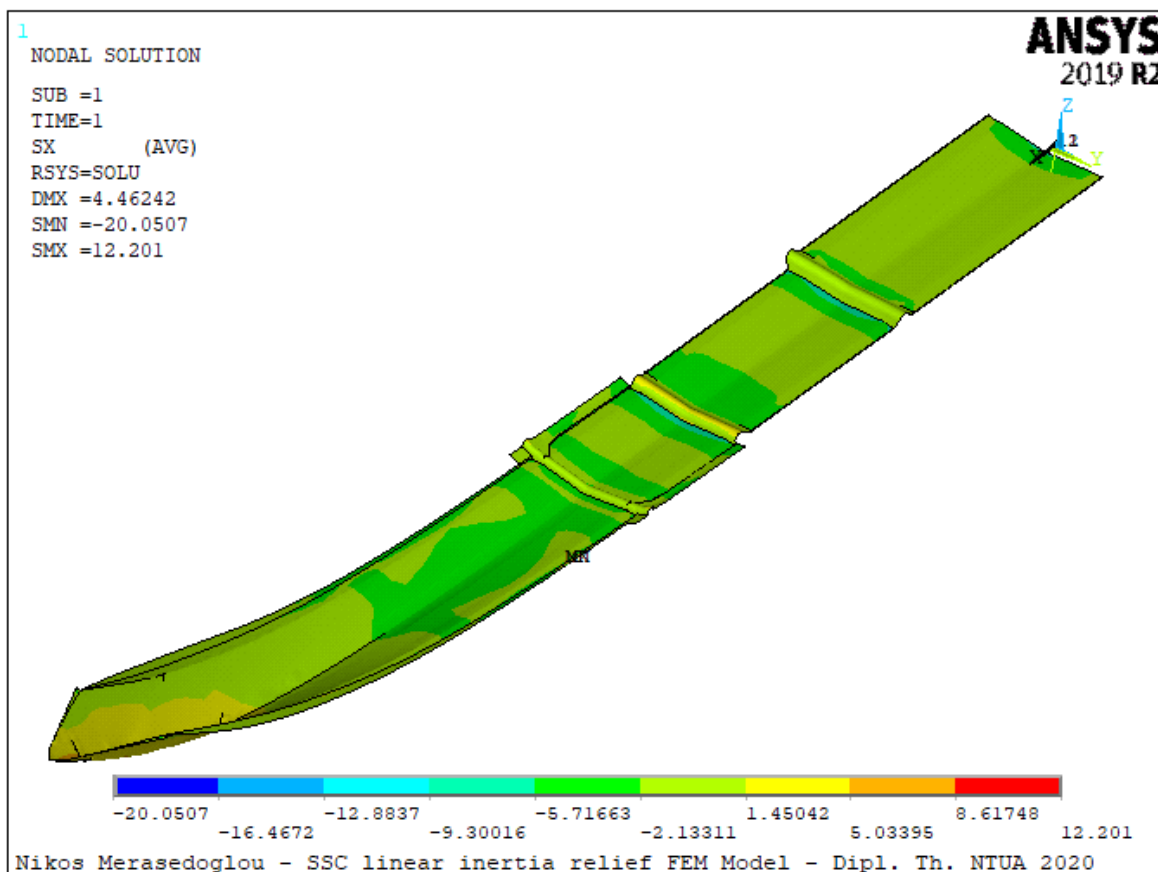
Σχήμα 4.68 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων.

Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που αναγράφονται στις χρωματικές κλίμακες των Σχημάτων 4.66, 4.67 και 4.68 αφορούν την στρώση εκείνη που αναπτύσσει τη μέγιστη τάση συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρώσεις του πολύστρωτου (layer,0), με εξαίρεση τα σημεία συγκέντρωσης τάσεων στα οποία τα αποτελέσματα δεν θεωρούνται αξιόπιστα, όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου, συνεπώς αγνοούνται.

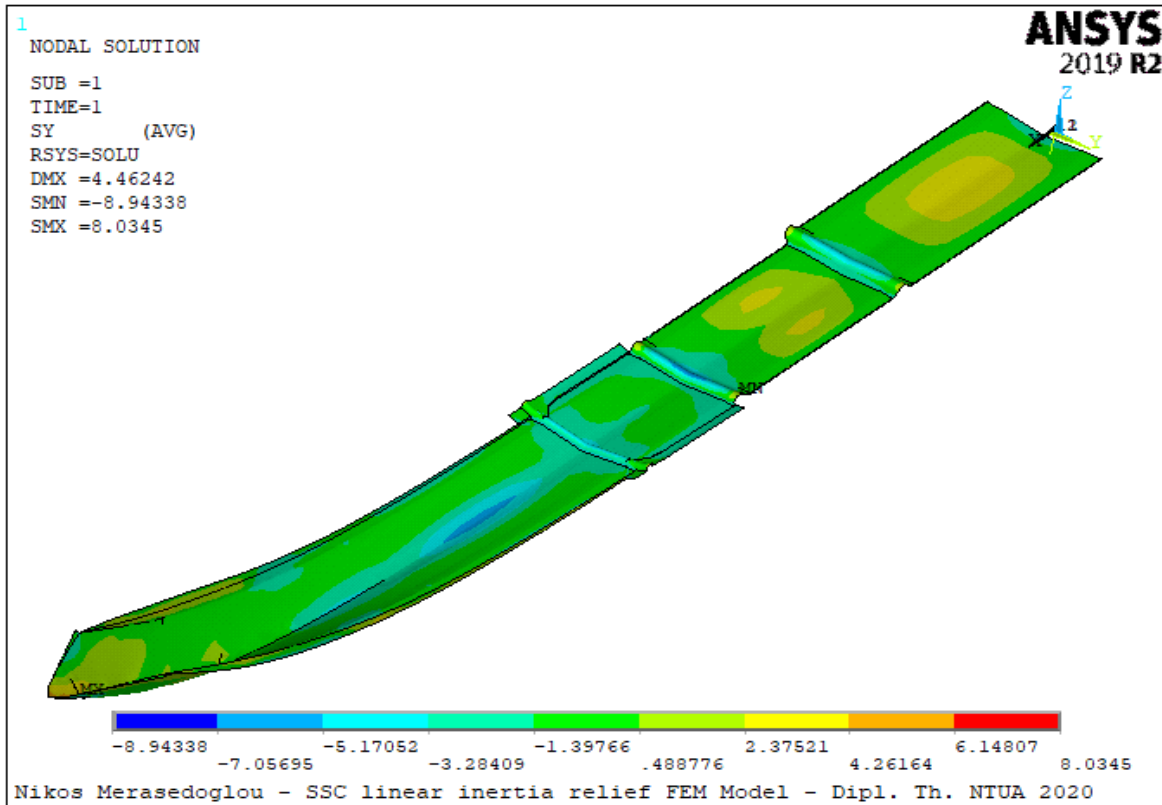
Εν γένει, τα αποτελέσματα του 3^{ου} μοντέλου για τις τάσεις SX, SY και SXY είναι μικρότερα (σχεδόν τα μισά) από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του 1^{ου} και του 2^{ου} μοντέλου, όπως φαίνεται από τα παραπάνω σχήματα. Ειδικότερα, οι κατανομές των τάσεων είναι ίδιες μεταξύ του 1^{ου} και του 2^{ου} μοντέλου, ωστόσο οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές αναπτυσσόμενων μετατοπίσεων είναι αισθητά μικρότερες στην περίπτωση του 3^{ου} μοντέλου όπου συνυπολογίζονται τα αδρανειακά φορτία (inertia relief) σε σχέση με τις περιπτώσεις περιμετρικής πάκτωσης του σκάφους. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση του «inertia relief», οι ασκούμενες στο σκάφος κρουστικές πιέσεις παραλαμβάνονται με ομοιόμορφο τρόπο σε όλο το σκάφος, ενώ στην περίπτωση της περιμετρικής πάκτωσης όπου αγνοούνται οι διεγέρσεις λόγω της αδράνειας της κατασκευής, οι αναπτυσσόμενες κρουστικές πιέσεις παραλαμβάνονται μόνο από τους πακτωμένους κόμβους, επιτρέποντας στο υπόλοιπο σκάφος την ανάπτυξη υψηλότερων τάσεων.

4.4.3 Έλεγχος αντοχής γάστρας σκάφους

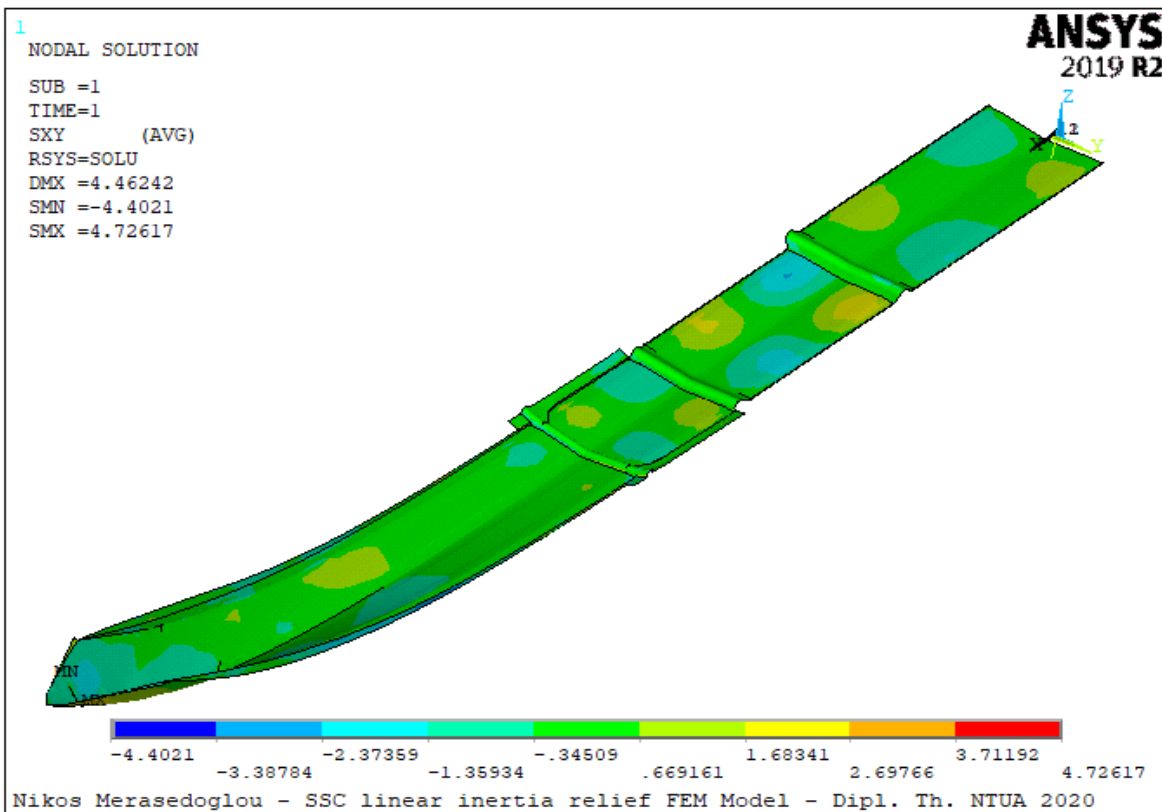
Όπως και στην περίπτωση της γραμμικής και της μη-γραμμικής ανάλυσης της πάκτωσης περιμετρικά του σκάφους, έτσι και στο μοντέλο γραμμικής ανάλυσης συνυπολογισμού των αδρανειακών φορτίων η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε ξεχωριστά σε κάθε ζώνη η οποία έχει διαφορετική αλληλουχία στρώσεων με τις υπόλοιπες, δεδομένου ότι οι στρώσεις μιας ζώνης είναι κοινές σε κάθε section. Σε ότι αφορά την κεντρική ζώνη, ήτοι τα plates 1_1, 2_1, 3_1, 4_1, 5_1, 6_1 και 7_2, έγινε έλεγχος σε κάθε στρώση ξεχωριστά και παρατηρήθηκε ότι όλες οι στρώσεις είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Ομοίως για τη ζώνη επικάλυψης μεταξύ κεντρικής και ενδιάμεσης ζώνης, καθώς επίσης και οι επικαλύψεις στα steps είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Το Σχήμα 4.69 απεικονίζει την κατανομή των τάσεων SX της κεντρικής ζώνης του σκάφους, το Σχήμα 4.70 απεικονίζει την κατανομή των τάσεων SY της κεντρικής ζώνης του σκάφους και το Σχήμα 4.71 απεικονίζει την κατανομή των διατμητικών τάσεων SXY της κεντρικής ζώνης του σκάφους.



Σχήμα 4.69 : Κατανομή τάσης SX στην κεντρική ζώνη.



Σχήμα 4.70 : Κατανομή τάσης SY στην κεντρική ζώνη.



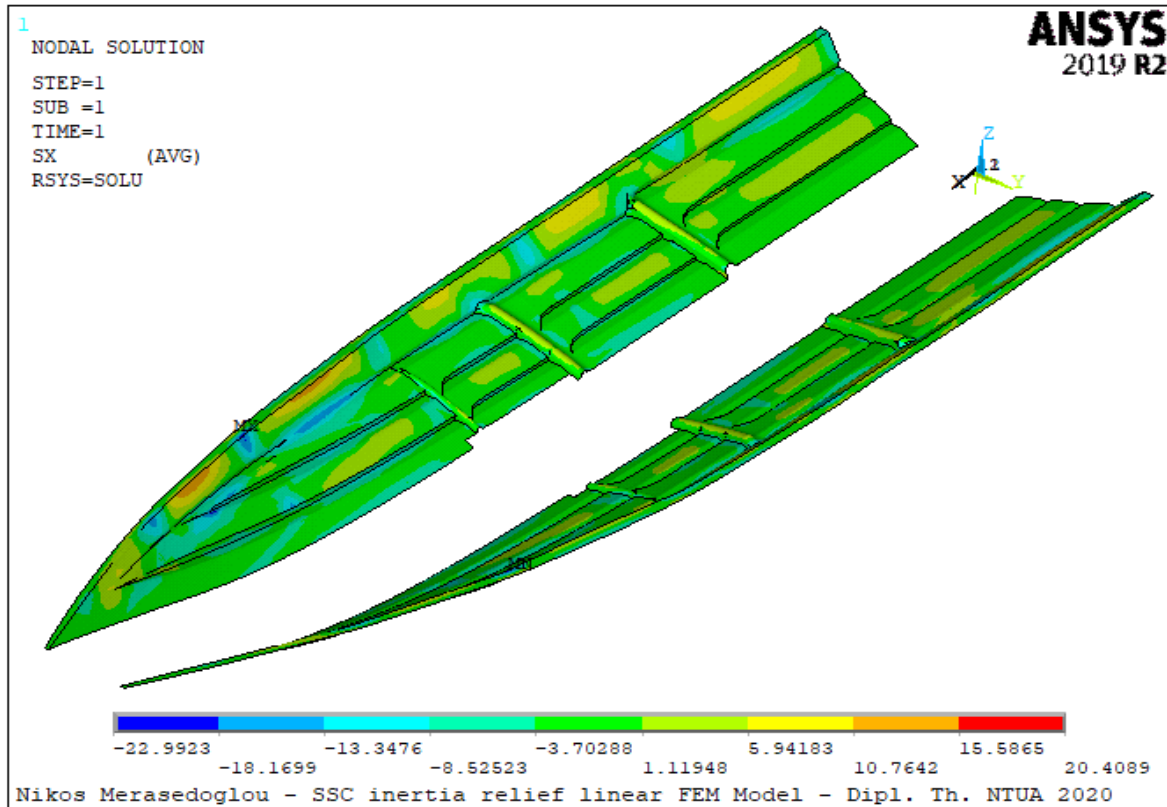
Σχήμα 4.71 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY στην κεντρική ζώνη.

Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 4.69 έως 4.70 για την κεντρική ζώνη του σκάφους, καθ' όλο το μήκος της κεντρικής ζώνης οι αναπτυσσόμενες τιμές τάσεων είναι κατά πολύ μικρότερες των επιτρεπόμενων ορίων, επομένως πληρούν τις απαιτήσεις του νηογνώμονα.

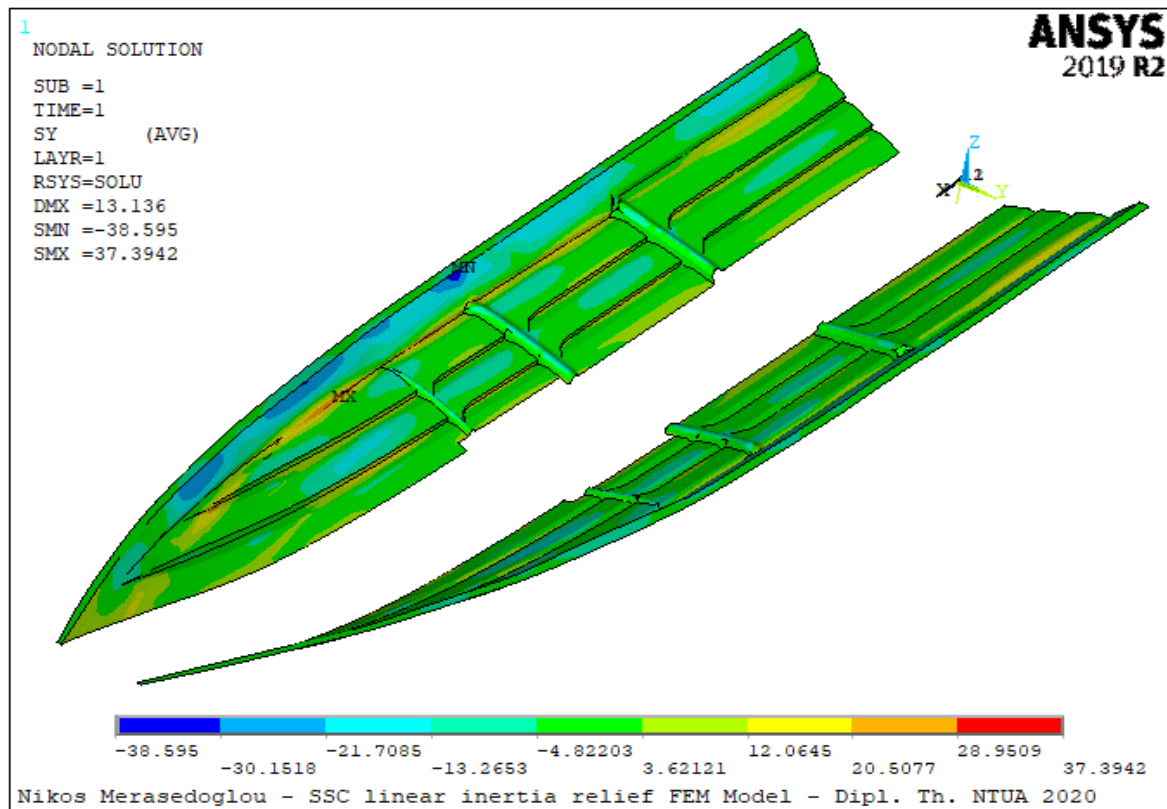
Το Σχήμα 4.72 απεικονίζει την κατανομή της μέγιστης τιμής των τάσεων SX που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση του πολύστρωτου της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους, το Σχήμα 4.73 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY στην εξωτερική στρώση της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους και το Σχήμα 4.74 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY στην εσωτερική στρώση της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους.

Σε ότι αφορά τον έλεγχο αντοχής στην ενδιάμεση ζώνη του σκάφους, δηλαδή τα plates 1_2, 2_2, 3_2, 4_2, 5_2, 6_2 και 7_3, παρατηρείται από τα Σχήματα 4.72 έως 4.74 ότι σε καμία από τις στρώσεις οι αναπτυσσόμενες τάσεις δεν υπερβαίνουν τις αντοχές που έχουν εκτιμηθεί από τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Επιπλέον, παρατηρείται στο Σχήμα 4.72 ότι η μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση SX είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα για την στρώση 300_CSM που έχει τη μικρότερη αντοχή, συνεπώς συμπεραίνεται ότι η αναπτυσσόμενη τάση SX είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων κάθε στρώσης ξεχωριστά. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει με τη τάση SY, καθώς υπάρχουν στρώσεις των πλακών της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους στις οποίες η αναπτυσσόμενη τάση SY υπερβαίνουν τις επιτρεπόμενες τιμές που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Ειδικότερα, οι αναπτυσσόμενες τάσεις SY που υπερβαίνουν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εφελκυσμού και θλίψης εντοπίζονται στις πρώτες τέσσερις στρώσεις (300_CSM, 300_CSM, 450_CSM και 800_WR) στο plate 3_2, το plate 4_2 και το plate 5_2 στο εξωτερικό του σκάφους και στις δύο εσωτερικές στρώσεις (800_WR και 300_CSM) στο plate 4_2 και το plate 5_2. Ενδεικτικά, στην πρώτη στρώση στο εξωτερικό του plate 3_2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $SY_{compressive} = -38.595 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -32.76 \text{ MPa}$, στην πρώτη στρώση στο εξωτερικό του plate 4_2 αναπτύσσεται μέγιστη εφελκυστική τάση $SY_{tensile} = 37.3942 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 23.8 \text{ MPa}$, ενώ στην εσωτερική στρώση του plate 4_2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $SY_{compressive} = -34.7604 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -34.02 \text{ MPa}$ και εφελκυστική τάση $SY_{tensile} = 32.2342 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 25.48 \text{ MPa}$. Οι παραπάνω τιμές τάσεων παρατηρούνται στα Σχήματα 4.73 και 4.74, ενώ τα επιτρεπόμενα όρια αναγράφονται στον Πίνακα 4.1.

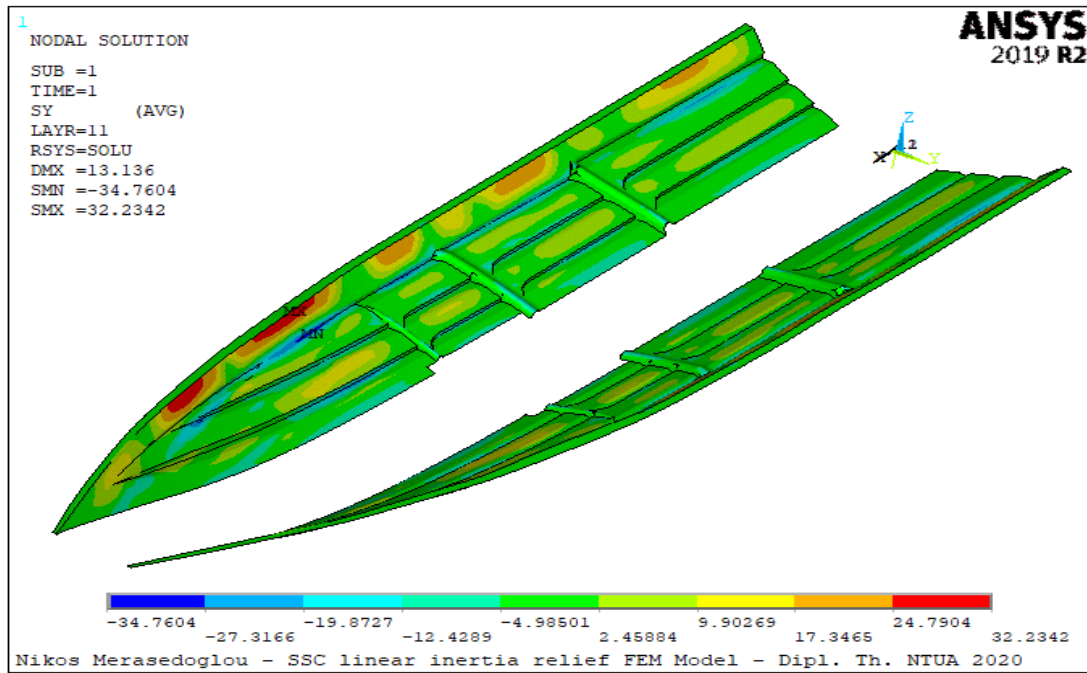
Έλεγχος αντοχής δεν πραγματοποιήθηκε στην άνω ζώνη του σκάφους, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί στην εισαγωγή του κεφαλαίου, η άνω ζώνη είναι η περιοχή κοντά στην οποία έχουν επιβληθεί πακτώσεις περιμετρικά του σκάφους, συνεπώς τα αποτελέσματα στα γειτονικά στοιχεία (elements) είναι αναξιόπιστα και δεν μπορούν να συγκριθούν με τις απαιτήσεις του νηογνώμονα. Σχετικά με τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκάφος, παρατηρείται στο Σχήμα 4.68 ότι σε όλο το σκάφος οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις είναι εντός των ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα, συνεπώς δεν υπήρχε ανάγκη για λεπτομερέστερη διερεύνηση της αντοχής του σκάφους σε διατμητικές τάσεις.



Σχήμα 4.72 : Κατανομή μέγιστης τάσης SX στην ενδιάμεση ζώνη.



Σχήμα 4.73 : Κατανομή τάσης SY της εξωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.

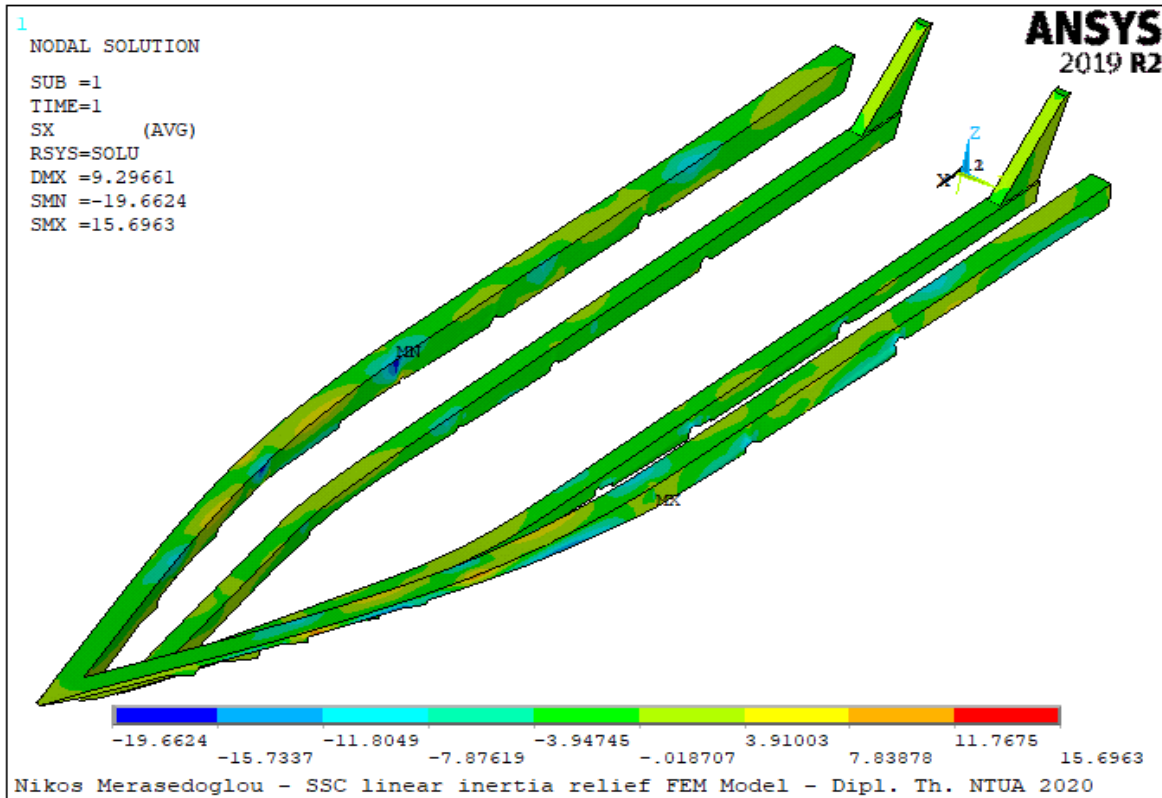


Σχήμα 4.74 : Κατανομή τάσης SY της εσωτερικής στρώσης 300_CSM στην ενδιάμεση ζώνη.

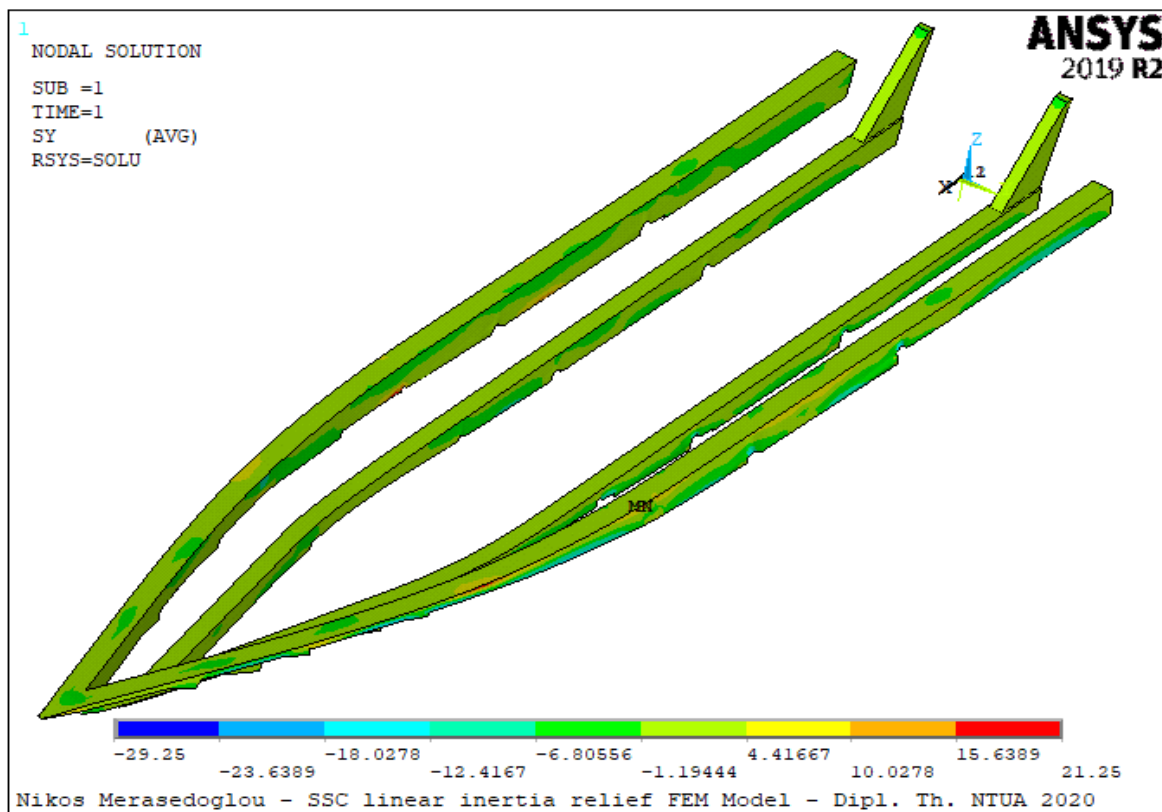
4.4.4 Έλεγχος αντοχής διαμήκων ενισχυτικών σκάφους

Ο έλεγχος στα διαμήκη ενισχυτικά έγινε με όμοιο τρόπο με τον έλεγχο της γάστρας του σκάφους. Ειδικότερα, ελέγχθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις τόσο στον κορμό όσο και στο πέλαμα του εσωτερικού ενισχυτικού, καθώς επίσης και στα μπρακέτα του καθρέφτη τα οποία έχουν την ίδια αλληλουχία στρώσεων με το εσωτερικό ενισχυτικό. Το Σχήμα 4.75 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SX, το Σχήμα 4.76 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY και το Σχήμα 4.77 απεικονίζει την κατανομή της διατμητικής τάσης SXY. Τα επιτρεπόμενα όρια της στρώσης με τη μικρότερη αντοχή έχουν οριστεί ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή στις χρωματικές κλίμακες που αναγράφονται στα Σχήματα 4.75, 4.76 και 4.77, ώστε να απεικονιστούν με χρώμα «γκρίζο» οι περιοχές στις οποίες οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι εκτός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα.

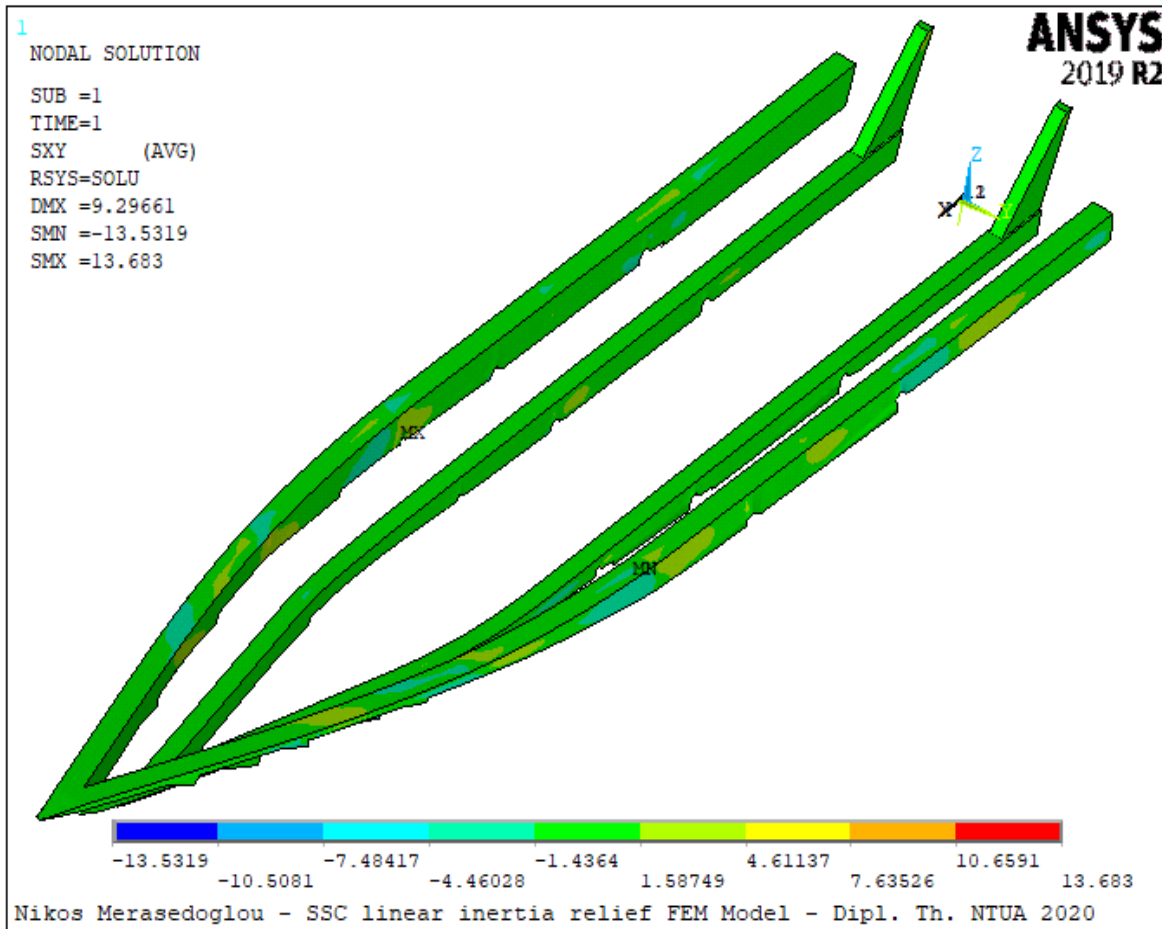
Το συμπέρασμα του ελέγχου ήταν ότι τα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη πληρούν τις απαιτήσεις του νηογνώμονα για τις μέγιστες επιτρεπόμενες τάσεις, επομένως πληρούνται και οι απαιτήσεις για την αντοχή της κάθε στρώσης. Επομένως, σε ότι αφορά την αντοχή των ενισχυτικών, τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής ανάλυσης συμφωνούν με αυτά της γραμμικής ανάλυσης. Μοναδική περιοχή που σύμφωνα με το Σχήμα 4.50 είναι η περιοχή του εξωτερικού κορμού του εξωτερικού ενισχυτικού γειτονικά του προωραίου ster. Οι υψηλές τιμές τάσης όμως σε αυτή την περιοχή οφείλονται στον τρόπο με τον οποίο έχουν δημιουργηθεί τα στοιχεία του πλέγματος, επομένως δεν μπορούν να ληφθούν υπόψη, όπως έχει επεξηγηθεί στην εισαγωγή του παρόντος κεφαλαίου. Το συμπέρασμα αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.75 – 4.77.



Σχήμα 4.75 : Κατανομή τάσης SX στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.



Σχήμα 4.76 : Κατανομή τάσης SY στα διαμήκη ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

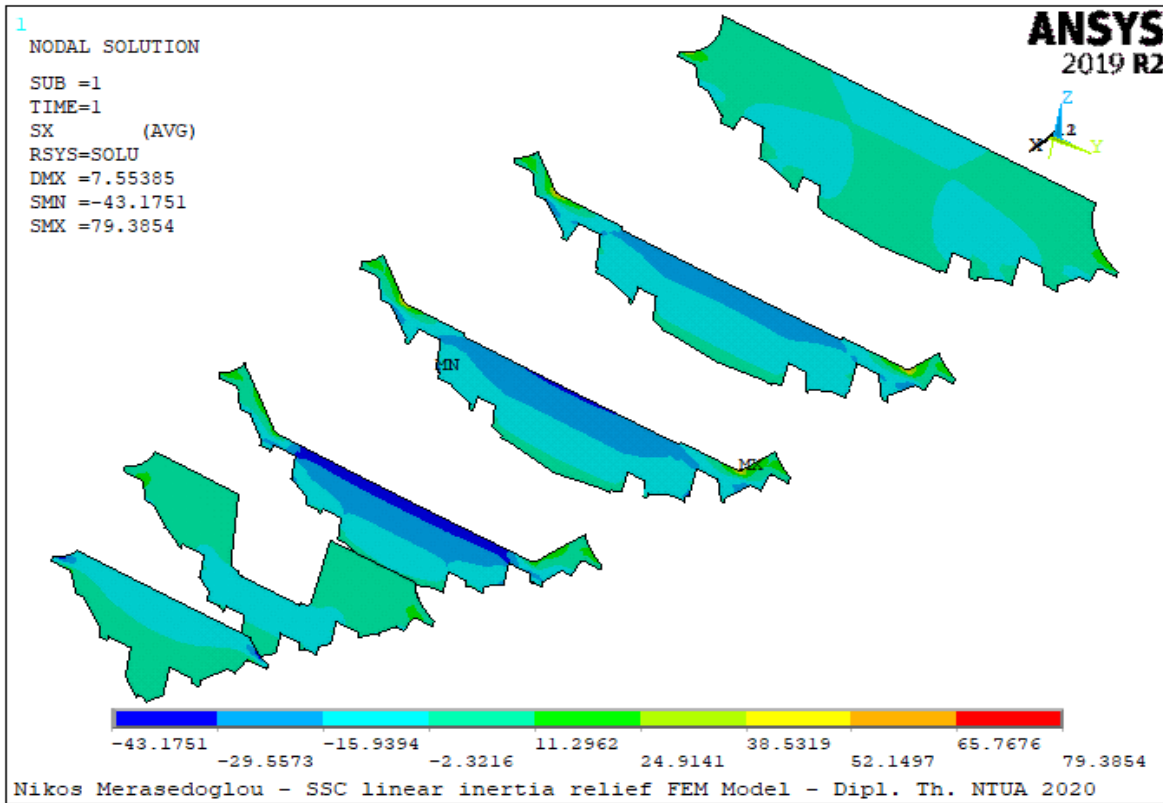


Σχήμα 4.77 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY στα ενισχυτικά και τα μπρακέτα του καθρέφτη.

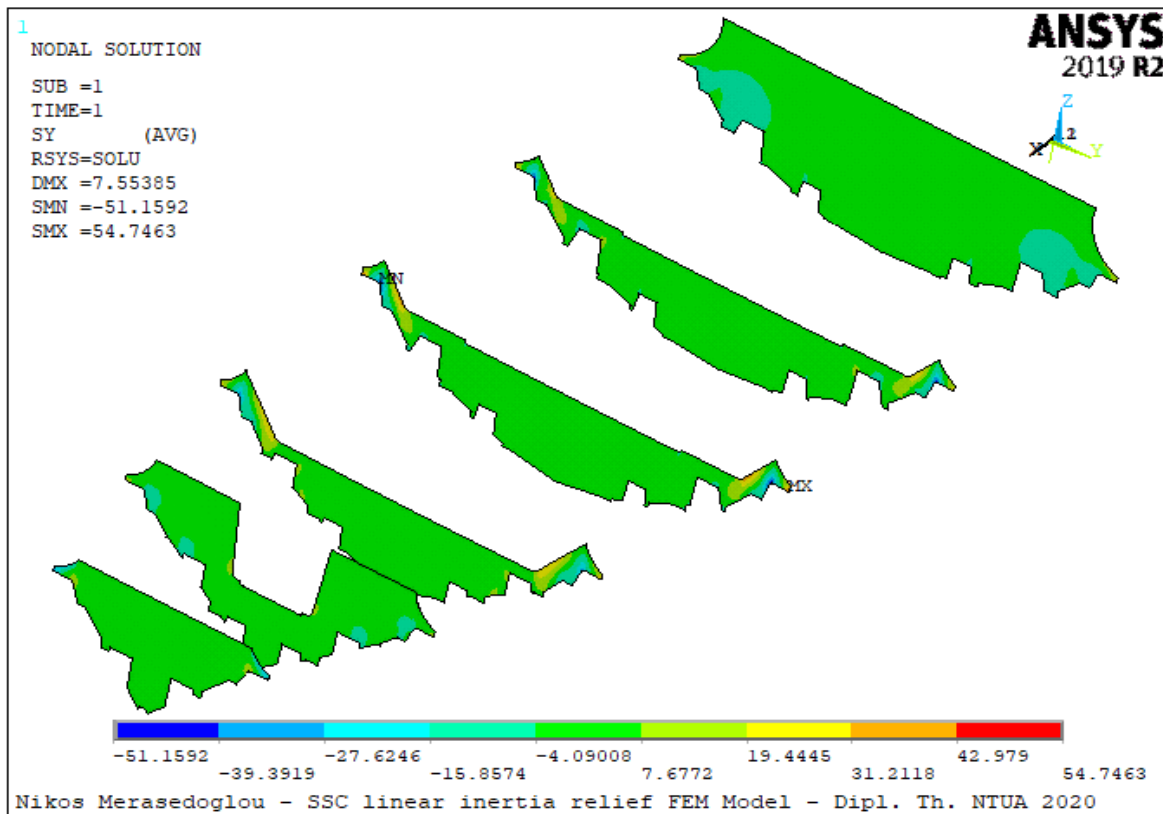
4.4.5 Έλεγχος αντοχής εγκάρσιων φρακτών

Ο έλεγχος στις εγκάρσιες φρακτές έγινε με όμοιο τρόπο με τον έλεγχο της γάστρας και τα διαμήκη ενισχυτικά του σκάφους. Σε αυτή την περίπτωση, τα αποτελέσματα του μοντέλου που συνυπολογίζει τα αδρανειακά φορτία συμφωνούν με τα αποτελέσματα της γραμμικής και της μη-γραμμικής ανάλυσης όπου τοποθετούνται πακτώσεις στους κόμβους περιμετρικά του σκάφους. Το Σχήμα 4.78 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SX, το Σχήμα 4.79 απεικονίζει την κατανομή της τάσης SY και το Σχήμα 4.80 απεικονίζει την κατανομή της διατμητικής τάσης SXY. Η αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη της πιο αδύναμης στρώσης έχει οριστεί ως μέγιστη και ελάχιστη τιμή αντίστοιχα στις χρωματικές κλίμακες που αναγράφονται στα Σχήματα 4.78, 4.79 και 4.80, ώστε να απεικονιστούν με χρώμα «γκρίζο» οι περιοχές στις οποίες υπάρχει αστοχία.

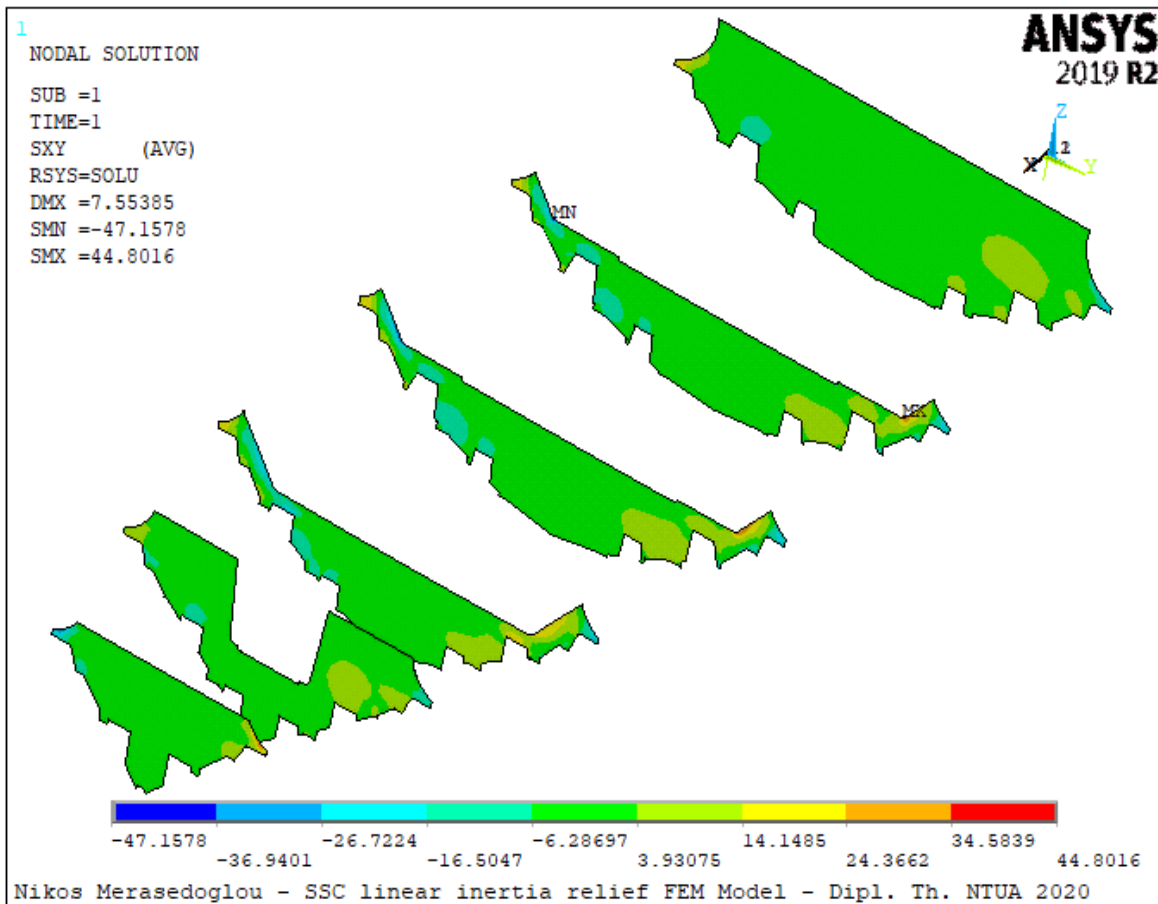
Το συμπέρασμα του ελέγχου ήταν ότι για τις εγκάρσιες φρακτές πληρούνται οι απαιτήσεις για την αντοχή της κάθε στρώσης. Το συμπέρασμα αυτό παρατηρείται στα Σχήματα 4.78 έως 4.80. Μοναδικές περιοχές αστοχίας αποτελούν εκείνες που βρίσκονται γειτονικά των κόμβων που έχουν πακτωθεί, συνεπώς τα αποτελέσματα σε αυτές τις περιοχές δεν θεωρούνται αξιόπιστα και αγνοούνται, όπως έχει σημειωθεί στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 4.78 : Κατανομή τάσης SX στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.



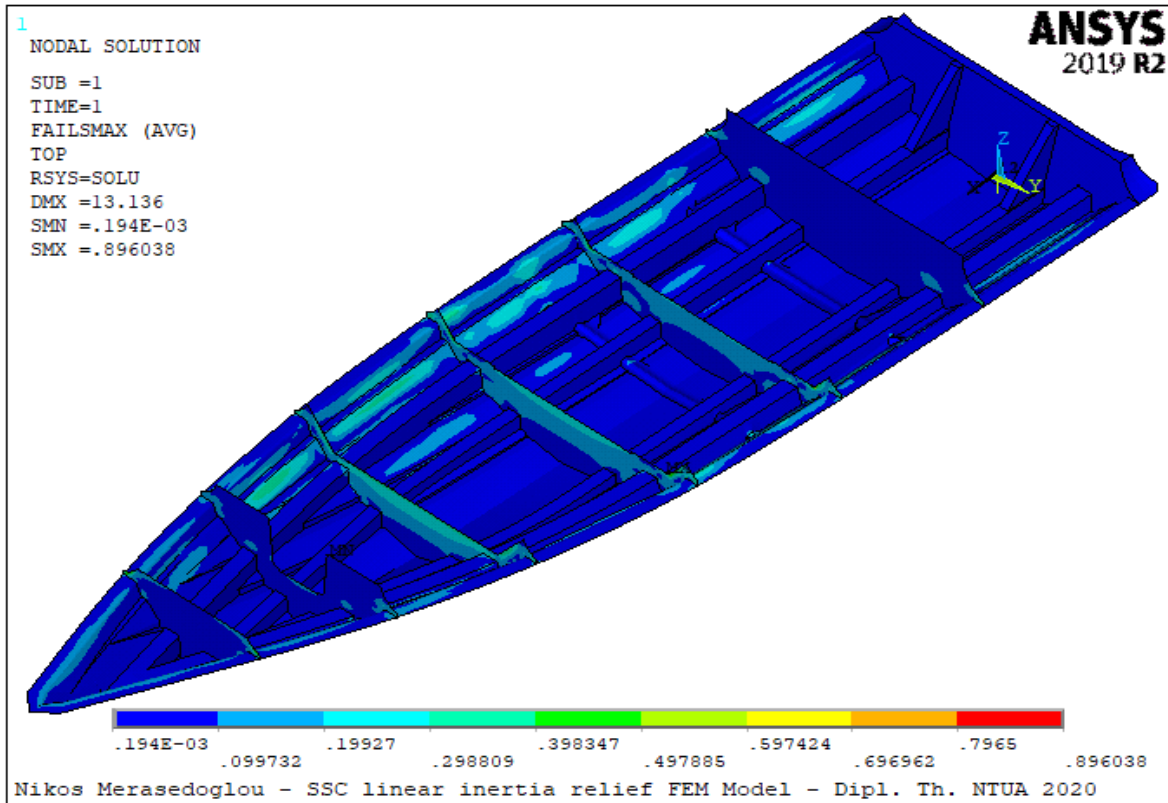
Σχήμα 4.79 : Κατανομή τάσης SY στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.



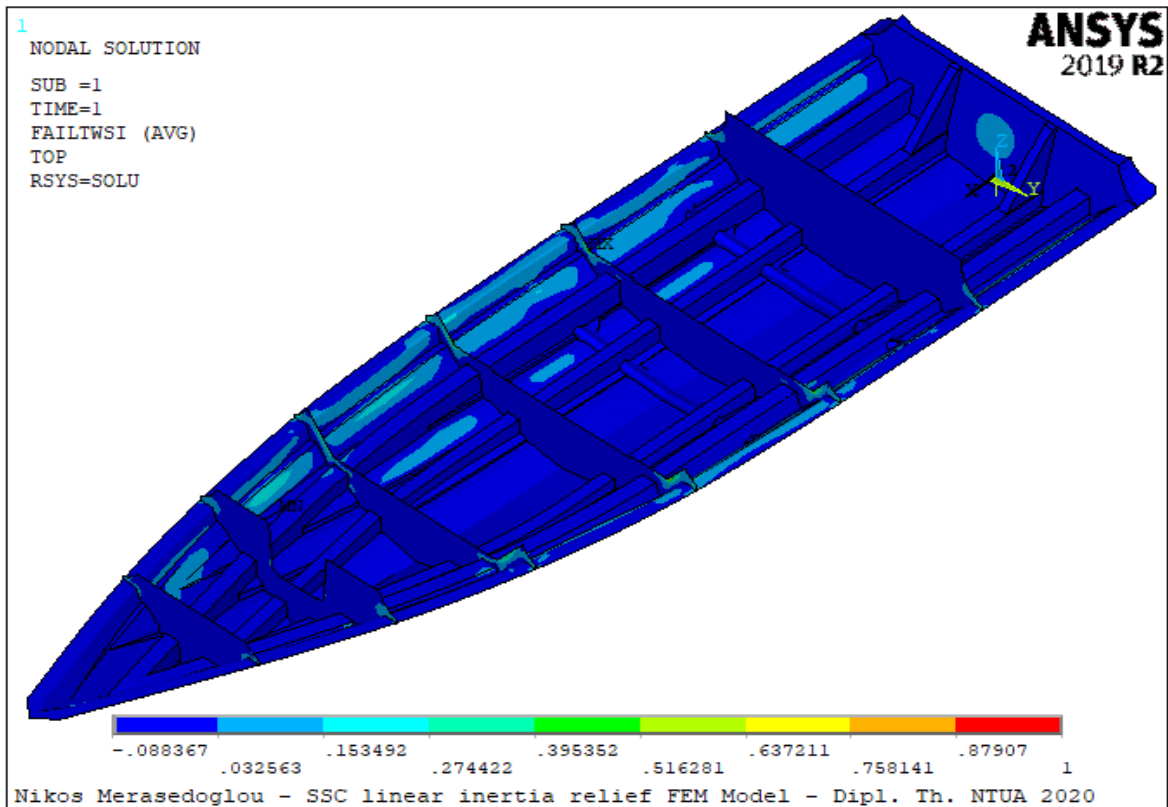
Σχήμα 4.80 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY στις εγκάρσιες φρακτές του σκάφους.

4.4.6 Κριτήρια αστοχίας «μέγιστης τάσης» και «Tsai – Wu»

Όπως στην γραμμική ανάλυση, έτσι και στην μη-γραμμική ανάλυση εφαρμόστηκαν στο πρόγραμμα ANSYS κριτήρια αστοχίας (failure criteria), λαμβάνοντας ως δεδομένα τις αντοχές για κάθε στρώση σε εφελκυσμό, θλίψη και διάτμηση για τον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα που έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τους κανονισμούς του βρετανικού νηογνώμονα «Lloyd's Register». Ως κριτήριο αστοχίας επιλέχθηκε το «κριτήριο μέγιστης τάσης» (maximum stress) και το «κριτήριο Tsai-Wu» (Tsai-Wu strength index). Τα αποτελέσματα για το κριτήριο μέγιστης τάσης απεικονίζονται στο Σχήμα 4.81, ενώ τα αποτελέσματα για το κριτήριο «Tsai-Wu» απεικονίζονται στο Σχήμα 4.82. Στα Σχήματα 4.81 και 4.82 παρατηρείται ότι τα κριτήρια μέγιστης τάσης και Tsai-Wu ικανοποιούνται, συνεπώς δεν υπάρχει αστοχία σε καμία από τις τρώσεις του σκάφους. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές που αναγράφονται στις χρωματικές κλίμακες των Σχημάτων 4.81 και 4.82 αφορούν την στρώση στην οποία το κριτήριο αναπτύσσει τη μέγιστη τιμή συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρώσεις του πολύστρωτου.



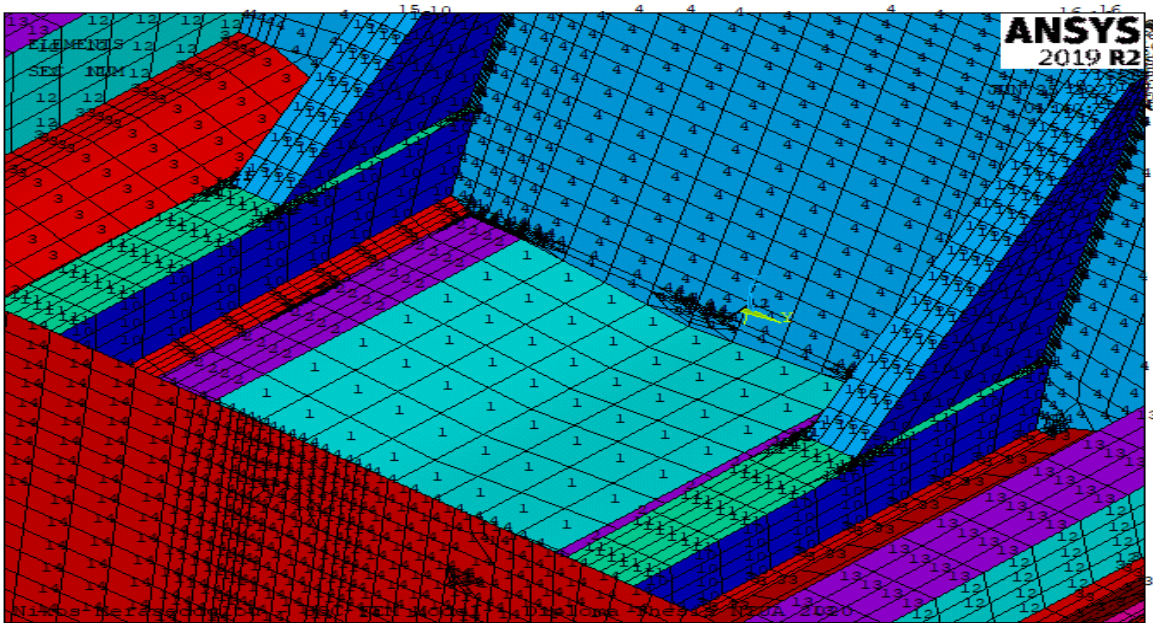
Σχήμα 4.81 : Κριτήριο αστοχίας μέγιστης τάσης.



Σχήμα 4.82 : Κριτήριο αστοχίας «Tsai – Wu».

4.5 Δειγματοληπτική σύγκριση των τριών μοντέλων

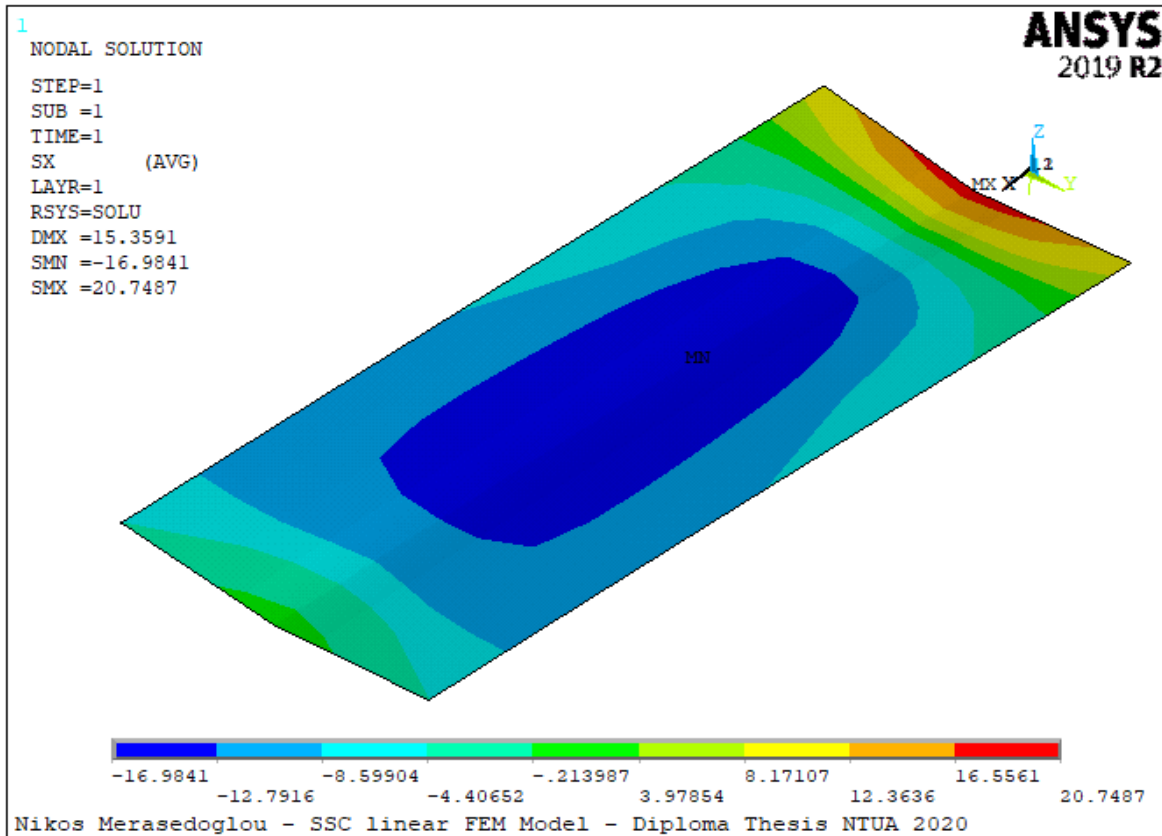
Δειγματοληπτικά έγινε σύγκριση των τριών μοντέλων στο plate 1_1 του Section 1, προκειμένου να βρεθεί το μοντέλο του οποίου τα αποτελέσματα είναι πλησιέστερα με τα επιτρεπόμενα όρια που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Το plate 1_1 απεικονίζεται στο Σχήμα 4.83 και αποτελείται από τα στοιχεία που αναγράφουν τον αριθμό «1». Με αυτόν τον τρόπο ξεχωρίζουν από τα στοιχεία των γειτονικών plates που αναγράφουν διαφορετικό αριθμό. Η ίδια διαδικασία εκπονήθηκε για όλο το σκάφος, προκειμένου να εξαχθούν τα συμπεράσματα που αναγράφονται στα εδάφια 4.2 και 4.3 σχετικά με τις στρώσεις που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια των κανονισμών του νηογνώμονα.



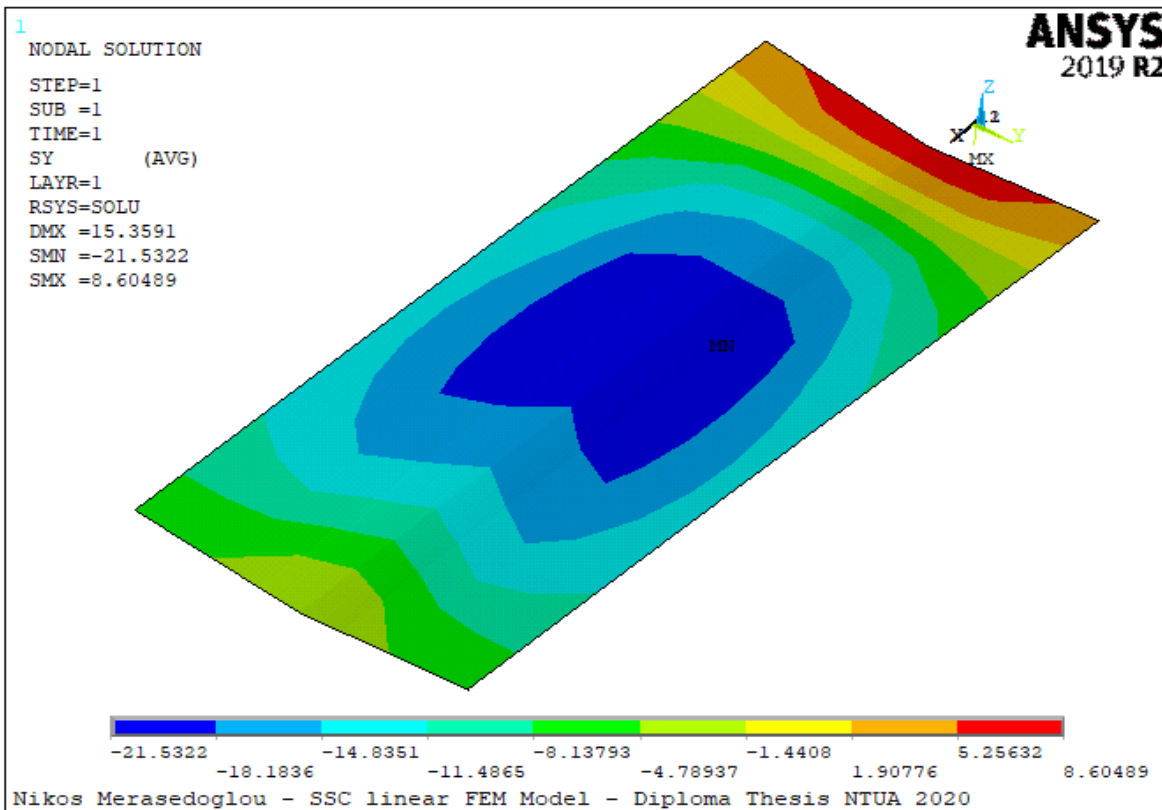
Σχήμα 4.83 : Σχηματική απεικόνιση του plate 1_1 σε σχέση με το υπόλοιπο σκάφος.

4.5.1 Αποτελέσματα 1^{ου} μοντέλου

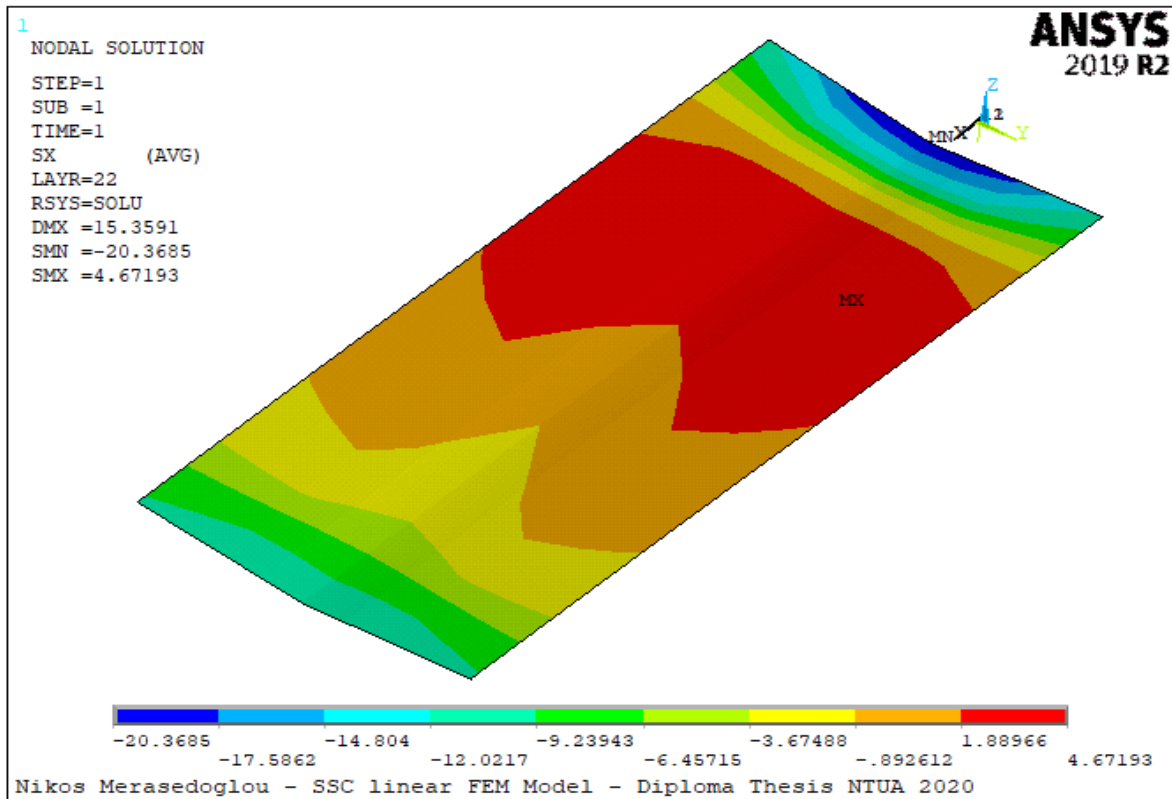
Οι τάσεις SX, SY και SXY για το plate έχουν υπολογιστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου με τη μέθοδο της γραμμικής ανάλυσης και απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη στα Σχήματα 4.84 έως 4.89. Η κατανομή της τάσης SX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.84 και 4.86 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα, η κατανομή της τάσης SY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.85 και 4.87 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα, ενώ η διατμητική τάση SXY κατά το επίπεδο που σχηματίζει ο διαμήκης με τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.88 και 4.89 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα.



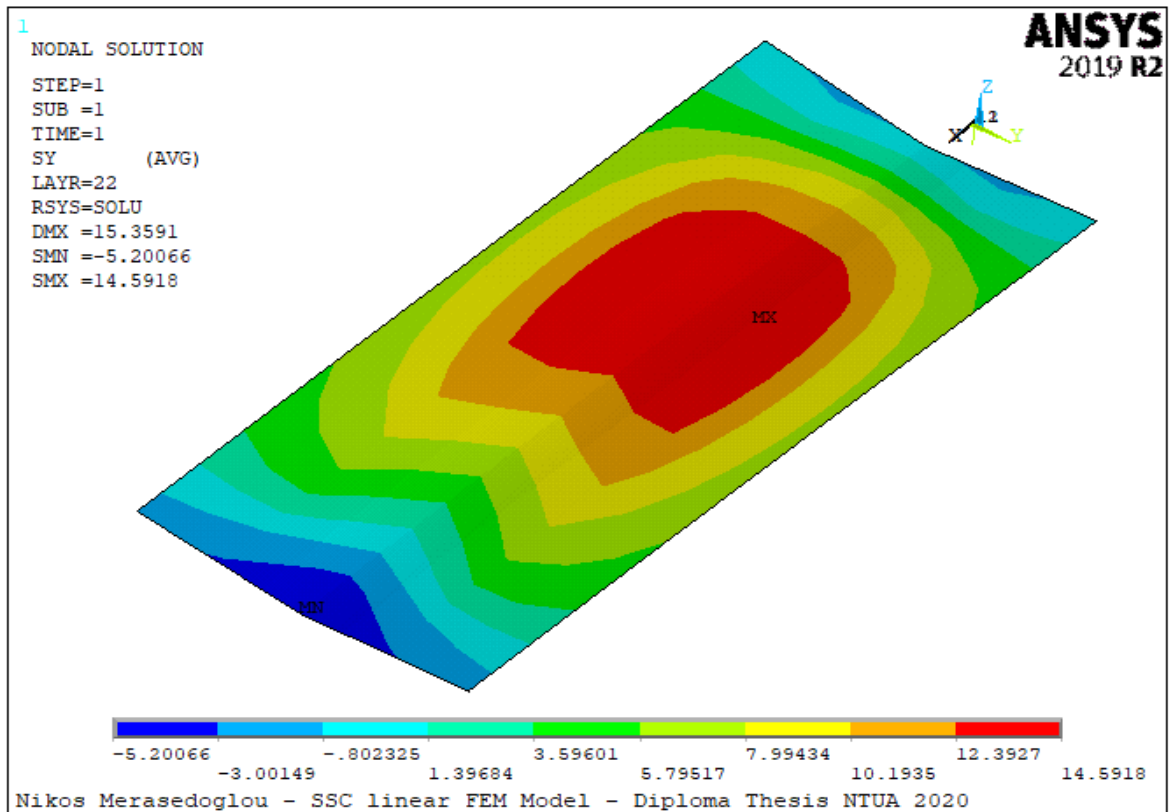
Σχήμα 4.84 : Κατανομή τάσης SX του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



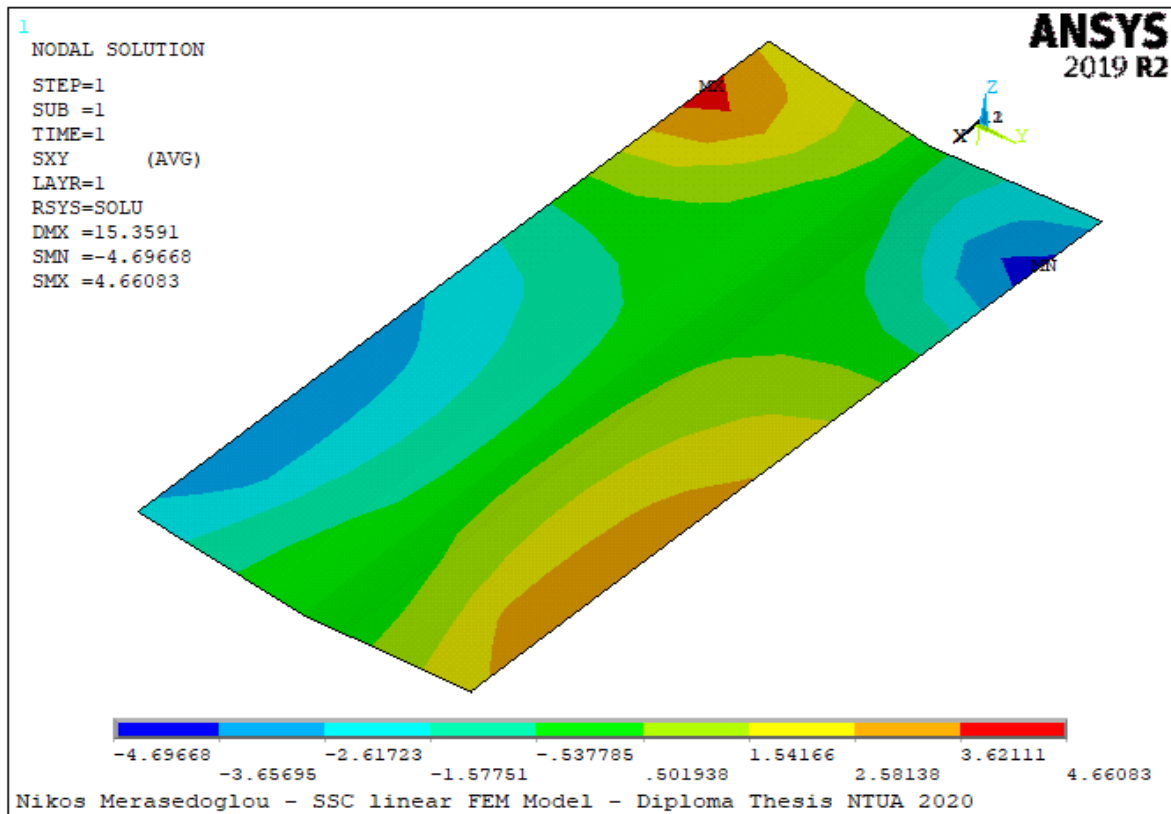
Σχήμα 4.85 : Κατανομή τάσης SY του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



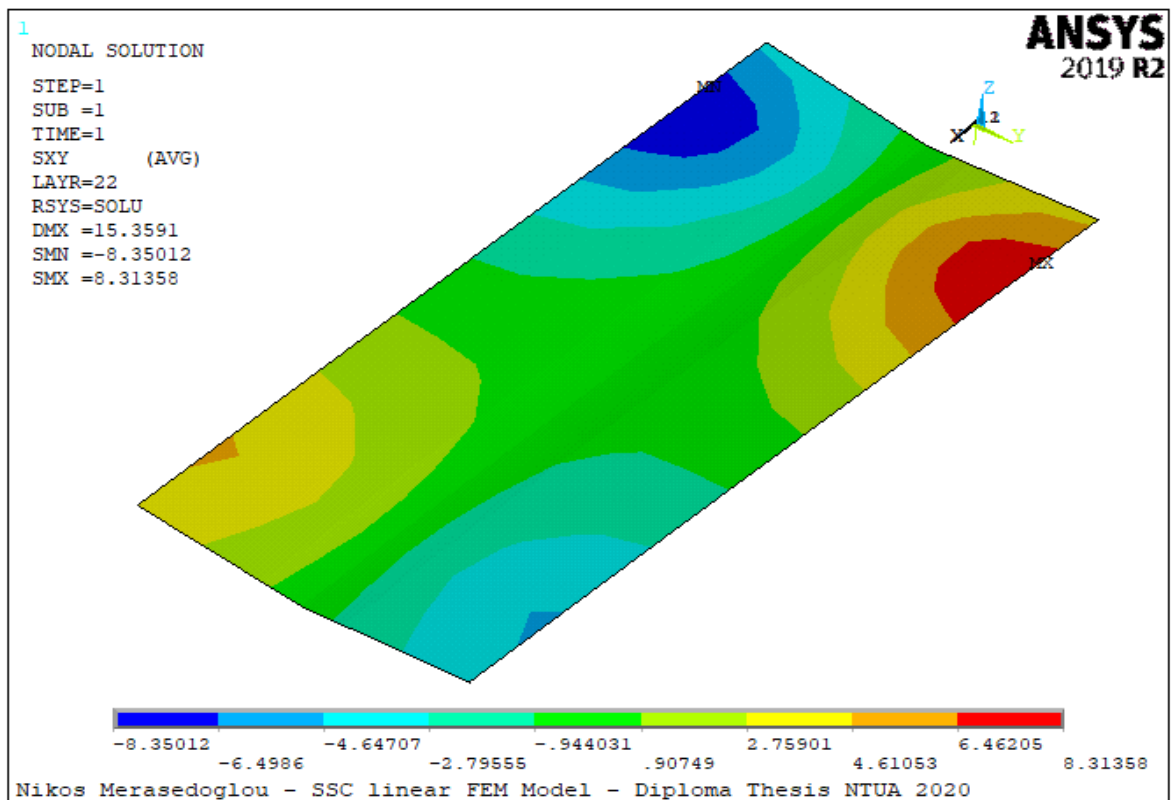
Σχήμα 4.86 : Κατανομή τάσης SX του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.



Σχήμα 4.87 : Κατανομή τάσης SY του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.



Σχήμα 4.88 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



Σχήμα 4.89 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.

Η στρώση με τη μικρότερη επιτρεπόμενη αντοχή είναι η 300_CSM με περιεκτικότητα σε ίνες γυαλιού 30% που τοποθετείται στην εξωτερική επιφάνεια του σκάφους, της οποίας οι αντοχές φαίνονται στις εξισώσεις (4.1) – (4.3) :

$$\text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.1)$$

$$\text{Allowable compressive strength} = - 29.25 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

$$\text{Ultimate shear strength} = 62 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Συνεπώς, αν οι μέγιστες τάσεις κάθε στρώσης που έχουν υπολογιστεί από το ANSYS πληρούν τους κανονισμούς του νηογνώμονα για την στρώση με τη μικρότερη αντοχή, τότε κάθε μία στρώση ξεχωριστά θα ικανοποιεί τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Παρατηρείται λοιπόν από τις εξισώσεις (4.4) – (4.8) για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του plate 1_1 ότι οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται σύμφωνα με το ANSYS στο plate 1_1 είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα :

$$SX_{\text{tensile}} = 20.7487 \text{ MPa} < \text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.4)$$

$$SX_{\text{compressive}} = -20.3685 \text{ MPa} > \text{Allowable compressive strength} = - 29.25 \text{ MPa} \quad (4.5)$$

$$SY_{\text{tensile}} = 14.5918 \text{ MPa} < \text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.6)$$

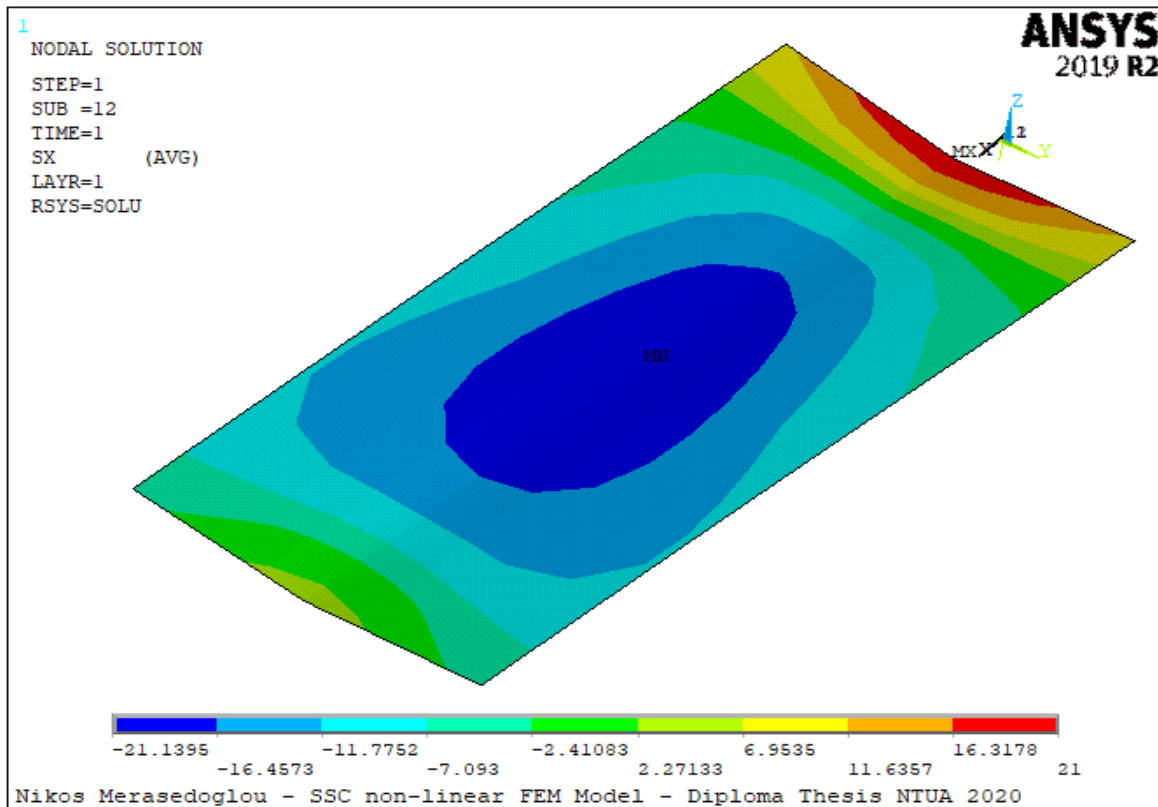
$$SY_{\text{compressive}} = -21.5322 \text{ MPa} > \text{Allowable compressive strength} = - 29.25 \text{ MPa} \quad (4.7)$$

$$|SXY_{\text{maximum}}| = 8.31358 \text{ MPa} < \text{Ultimate shear strength} = 62 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

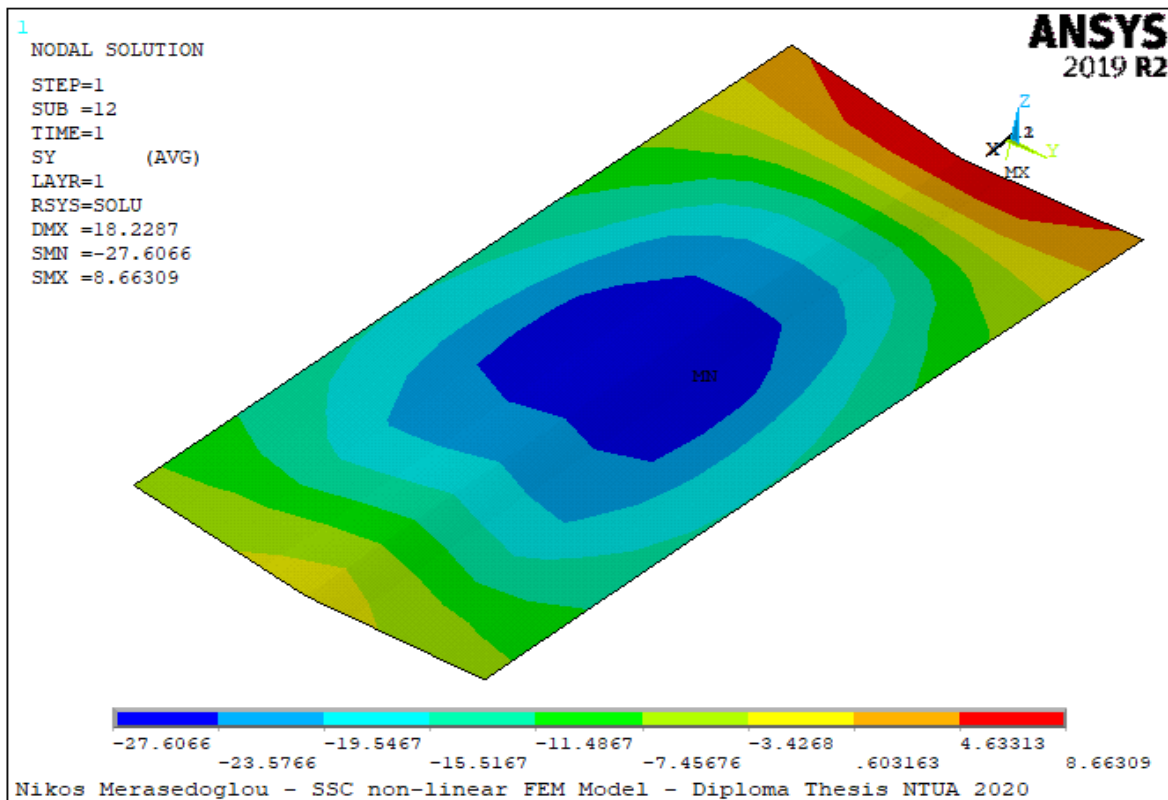
Τα αποτελέσματα που αναγράφονται παραπάνω αφορούν την πρώτη και τη τελευταία στρώση του πολύστρωτου. Οι αντίστοιχες τιμές για όλες τις στρώσεις του πολύστρωτου αναγράφονται στον Πίνακα 4.5 στο εδαφίου 4.5.4 που ακολουθεί, όπου φαίνεται ότι οι τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων που υπολογίζονται από το 1^ο μοντέλο είναι μικρότερες από τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα όρια σε κάθε στρώση του plate 1_1.

4.5.2 Αποτελέσματα 2^ο μοντέλου

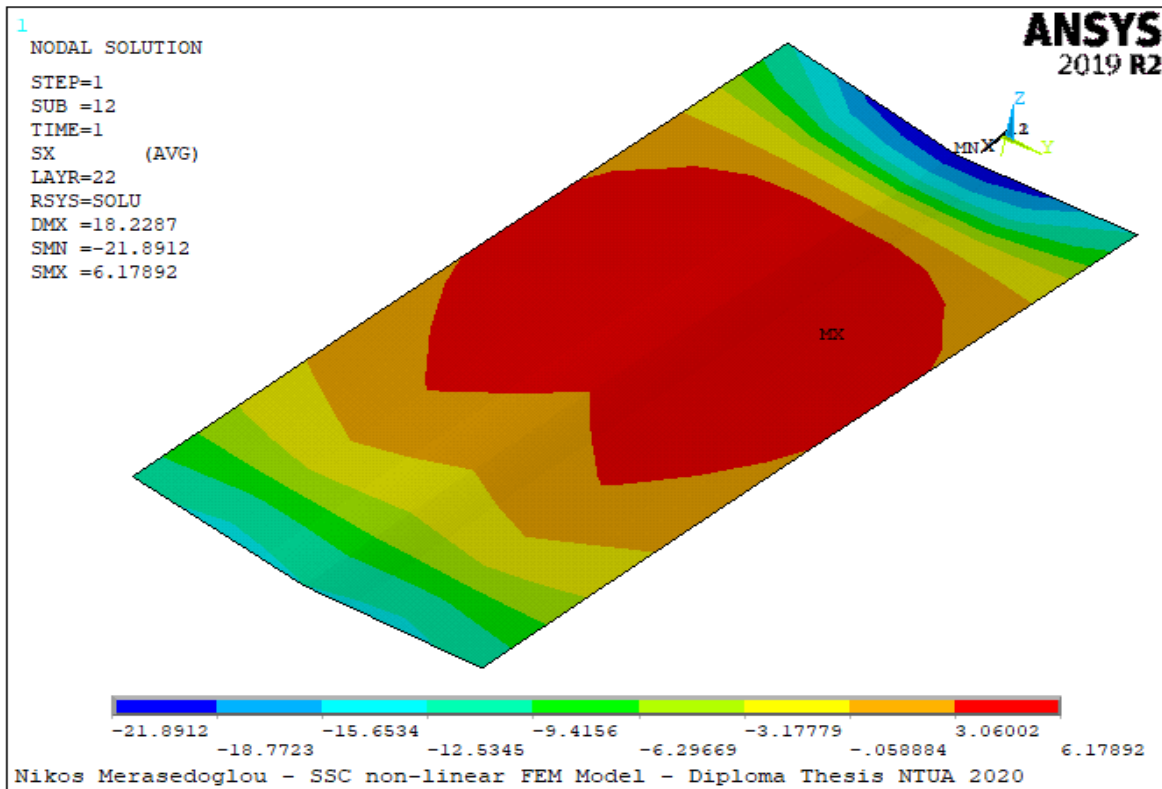
Οι τάσεις SX, SY και SXY για το plate έχουν υπολογιστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου με τη μέθοδο της μη-γραμμικής ανάλυσης και απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη στα Σχήματα 4.90 έως 4.95. Η κατανομή της τάσης SX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.90 και 4.92 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα, η κατανομή της τάσης SY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.91 και 4.93 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα, ενώ η διατμητική τάση SXY κατά το επίπεδο που σχηματίζει ο διαμήκης με τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.94 και 4.95 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα.



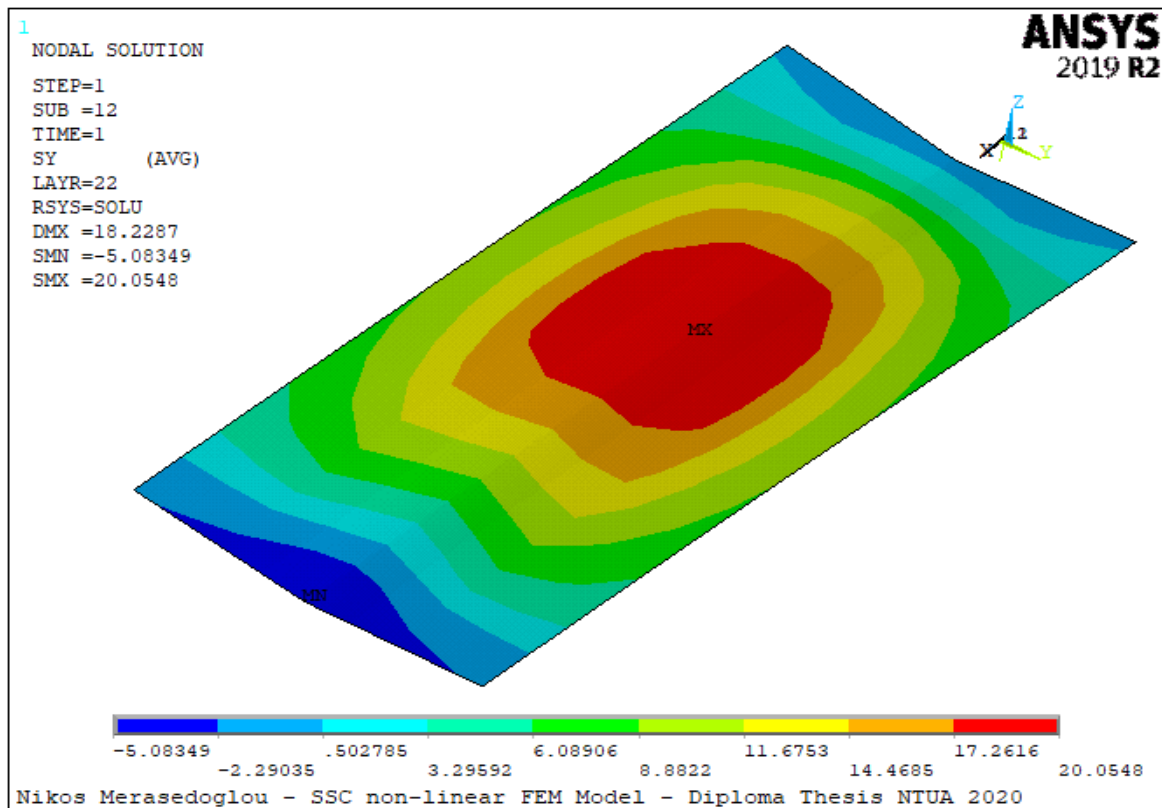
Σχήμα 4.90 : Κατανομή τάσης SX του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



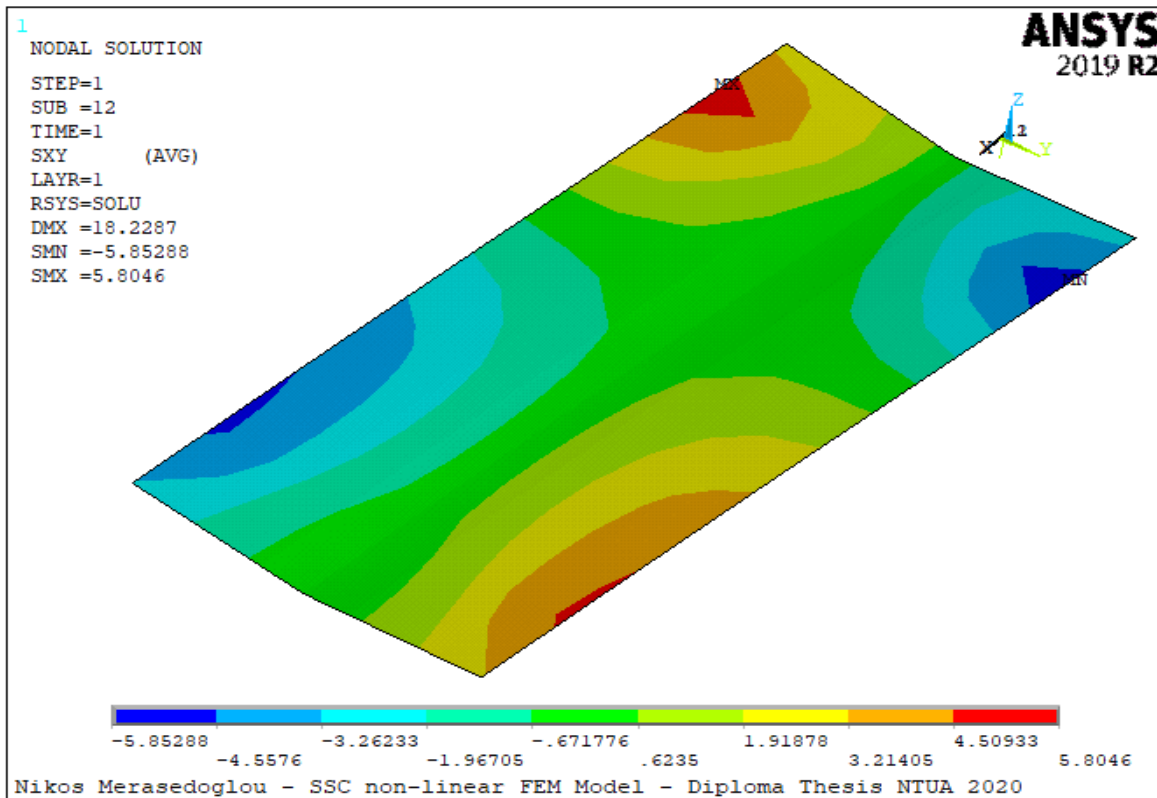
Σχήμα 4.91 : Κατανομή τάσης SY του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



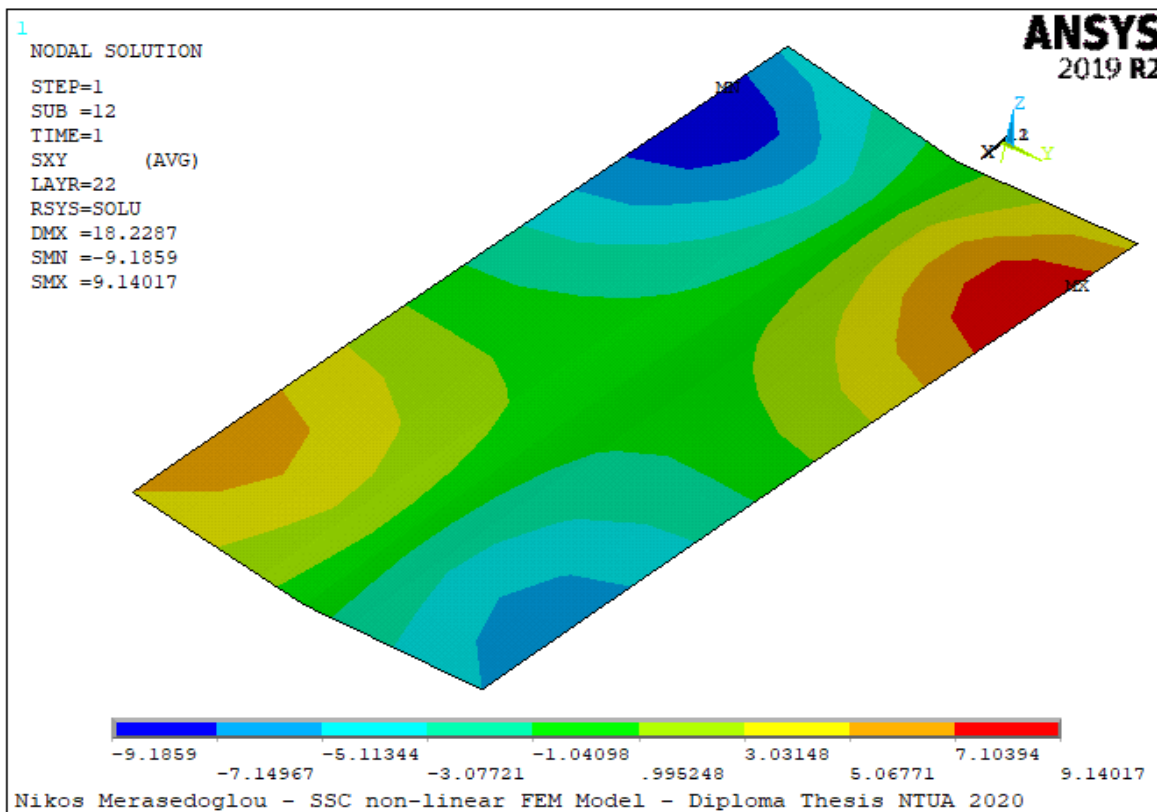
Σχήμα 4.92 : Κατανομή τάσης SX του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.



Σχήμα 4.93 : Κατανομή τάσης SY του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.



Σχήμα 4.94 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



Σχήμα 4.95 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.

Συνεπώς, αν οι μέγιστες τάσεις κάθε στρώσης που έχουν υπολογιστεί από το ANSYS πληρούν τους κανονισμούς του νηογνώμονα για την στρώση με τη μικρότερη αντοχή, τότε κάθε μία στρώση ξεχωριστά θα ικανοποιεί τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Παρατηρείται λοιπόν από τις εξισώσεις (4.9) – (4.13) για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του plate 1_1 ότι οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται σύμφωνα με το ANSYS στο plate 1_1 είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα :

$$SX_{\text{tensile}} = 21 \text{ MPa} < \text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.9)$$

$$SX_{\text{compressive}} = -21.8912 \text{ MPa} > \text{Allowable compressive strength} = -29.25 \text{ MPa} \quad (4.10)$$

$$SY_{\text{tensile}} = 20.0548 \text{ MPa} < \text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.11)$$

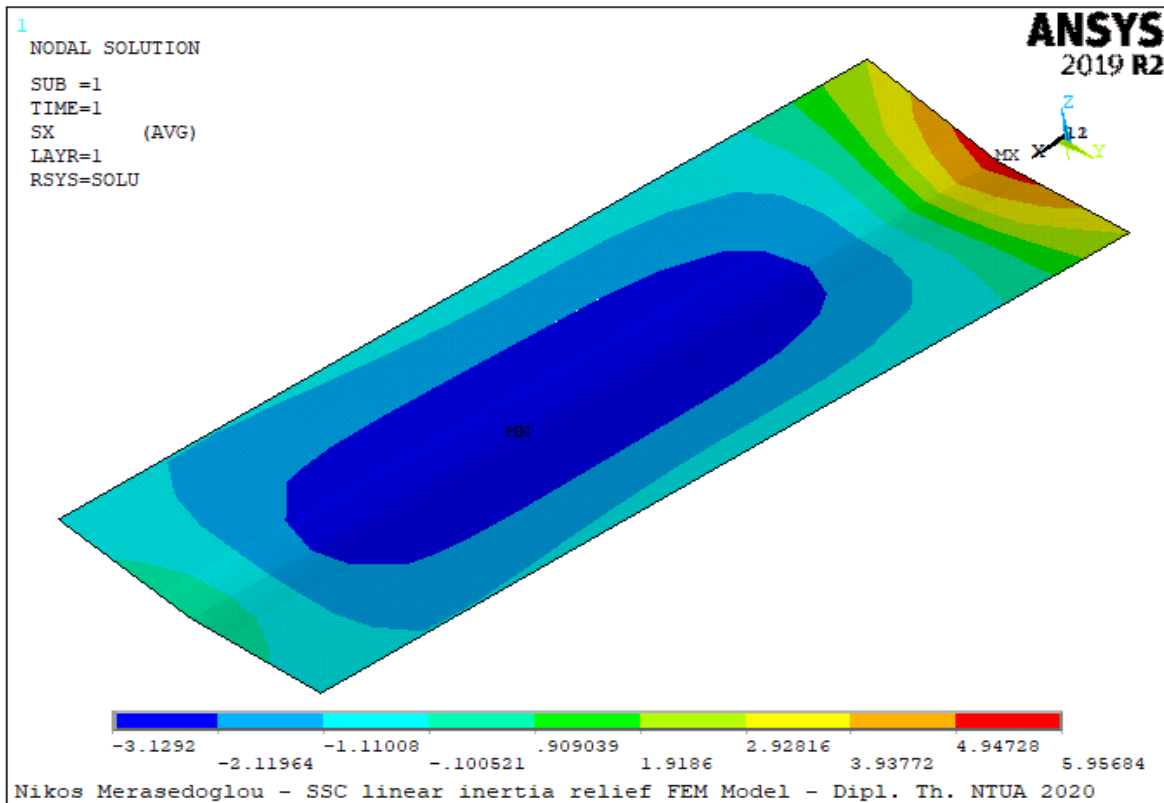
$$SY_{\text{compressive}} = -27.6066 \text{ MPa} > \text{Allowable compressive strength} = -29.25 \text{ MPa} \quad (4.12)$$

$$|SXY_{\text{maximum}}| = 9.1859 \text{ MPa} < \text{Ultimate shear strength} = 62 \text{ MPa} \quad (4.13)$$

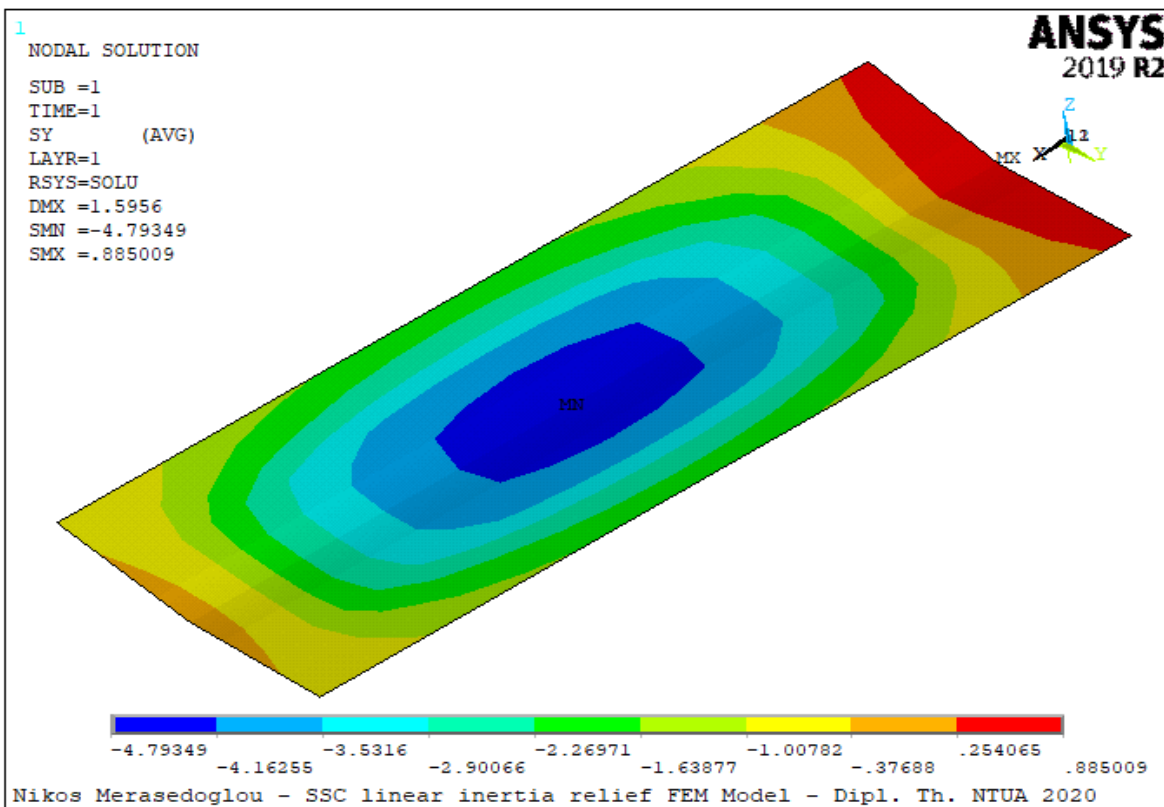
Τα αποτελέσματα που αναγράφονται παραπάνω αφορούν την πρώτη και τη τελευταία στρώση του πολύστρωτου. Οι αντίστοιχες τιμές για όλες τις στρώσεις του πολύστρωτου αναγράφονται στον Πίνακα 4.5 στο εδαφίου 4.5.4 που ακολουθεί, όπου φαίνεται ότι οι τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων που υπολογίζονται από το 2^ο μοντέλο είναι μικρότερες από τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα όρια σε κάθε στρώση του plate 1_1.

4.5.3 Αποτελέσματα 3^{ου} μοντέλου

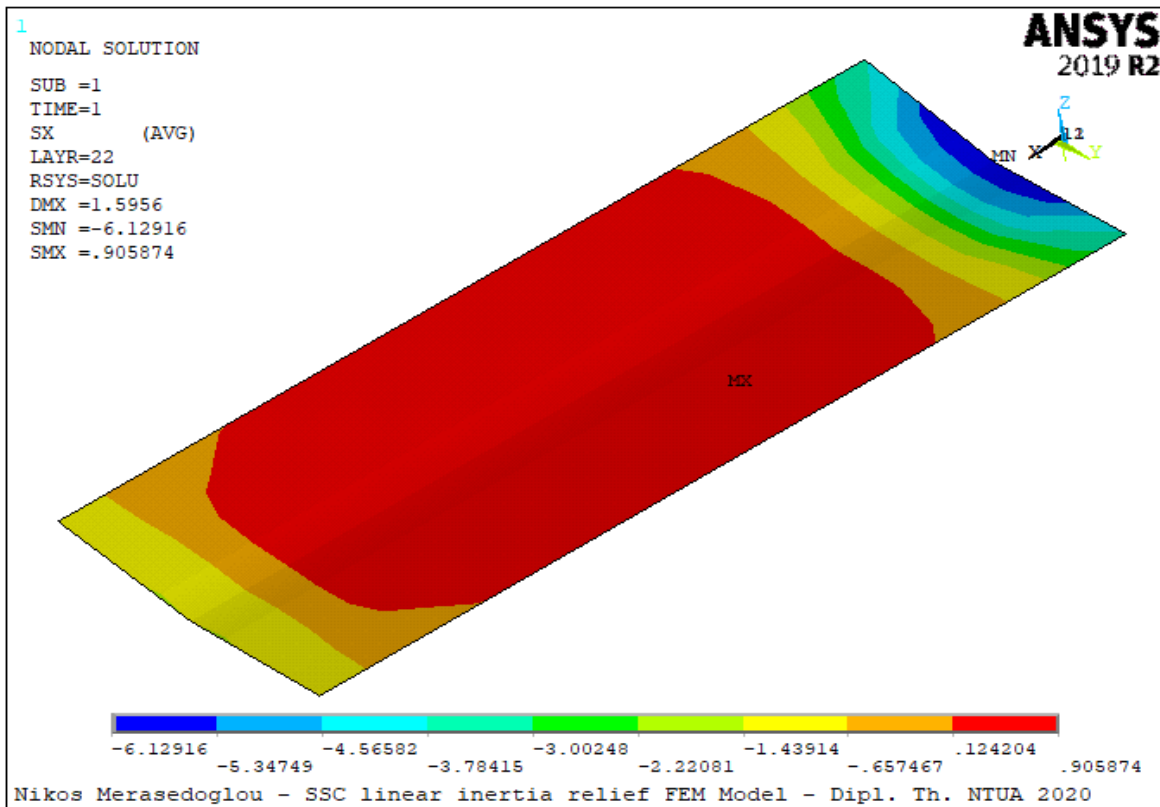
Οι τάσεις SX, SY και SXY για το plate έχουν υπολογιστεί στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων κάθε στοιχείου συνυπολογίζοντας τα αδρανειακά φορτία που εξισορροπούν τις κρουστικές πιέσεις που καταπονούν την κατασκευή (inertia relief) και απεικονίζονται σε τρισδιάστατη όψη στα Σχήματα 4.96 έως 4.101. Η κατανομή της τάσης SX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.96 και 4.98 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα, η κατανομή της τάσης SY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.97 και 4.99 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα, ενώ η διατμητική τάση SXY κατά το επίπεδο που σχηματίζει ο διαμήκης με τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στα Σχήματα 4.100 και 4.101 για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του πολύστρωτου αντίστοιχα.



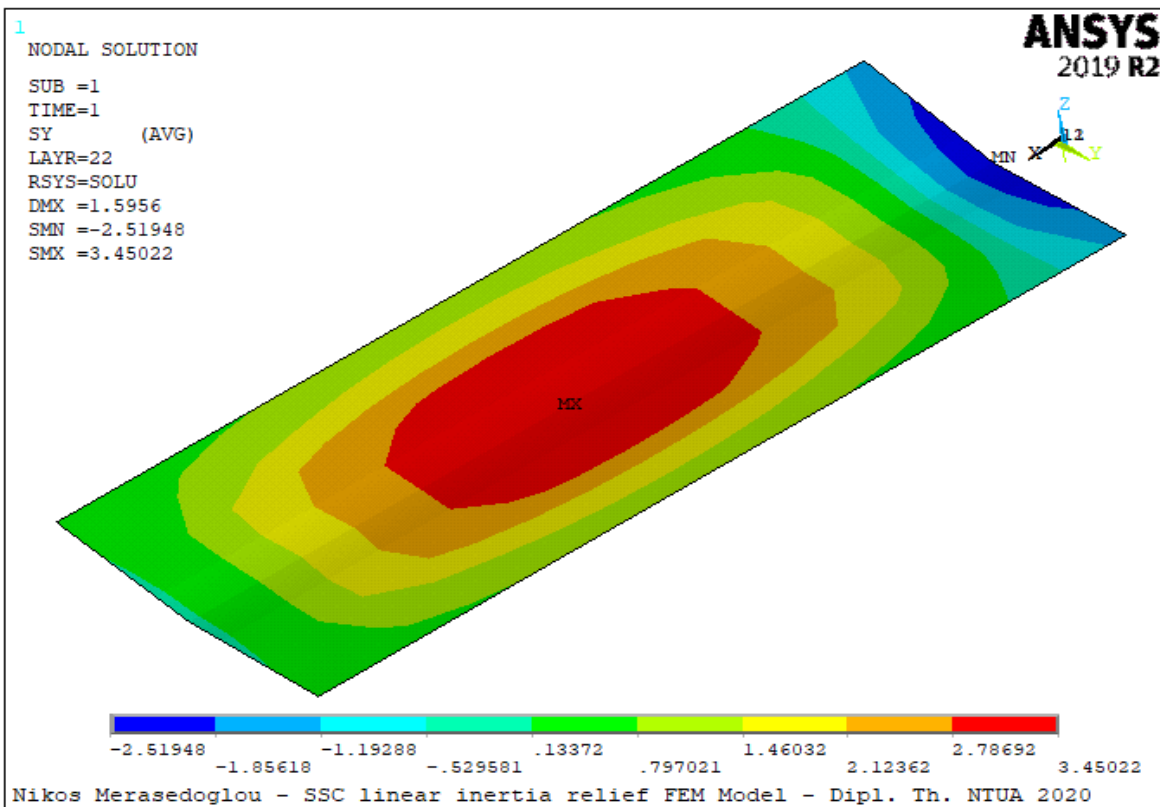
Σχήμα 4.96 : Κατανομή τάσης SX του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



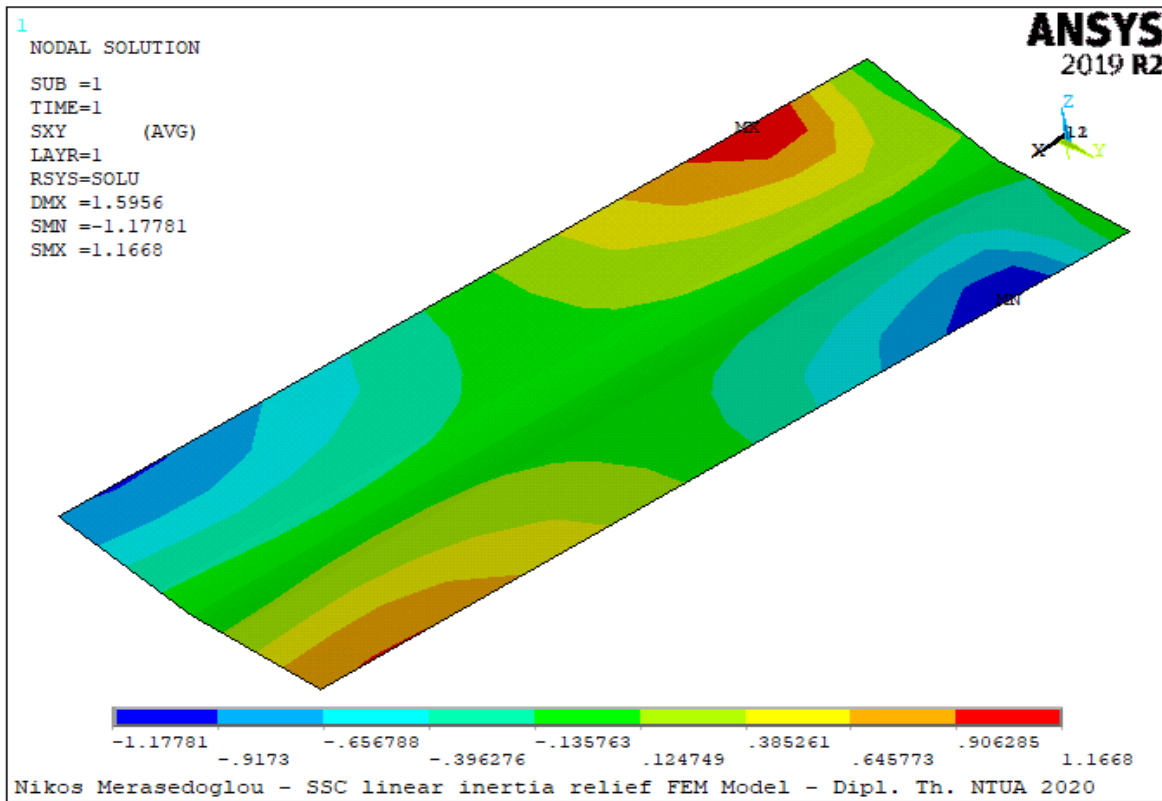
Σχήμα 4.97 : Κατανομή τάσης SY του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



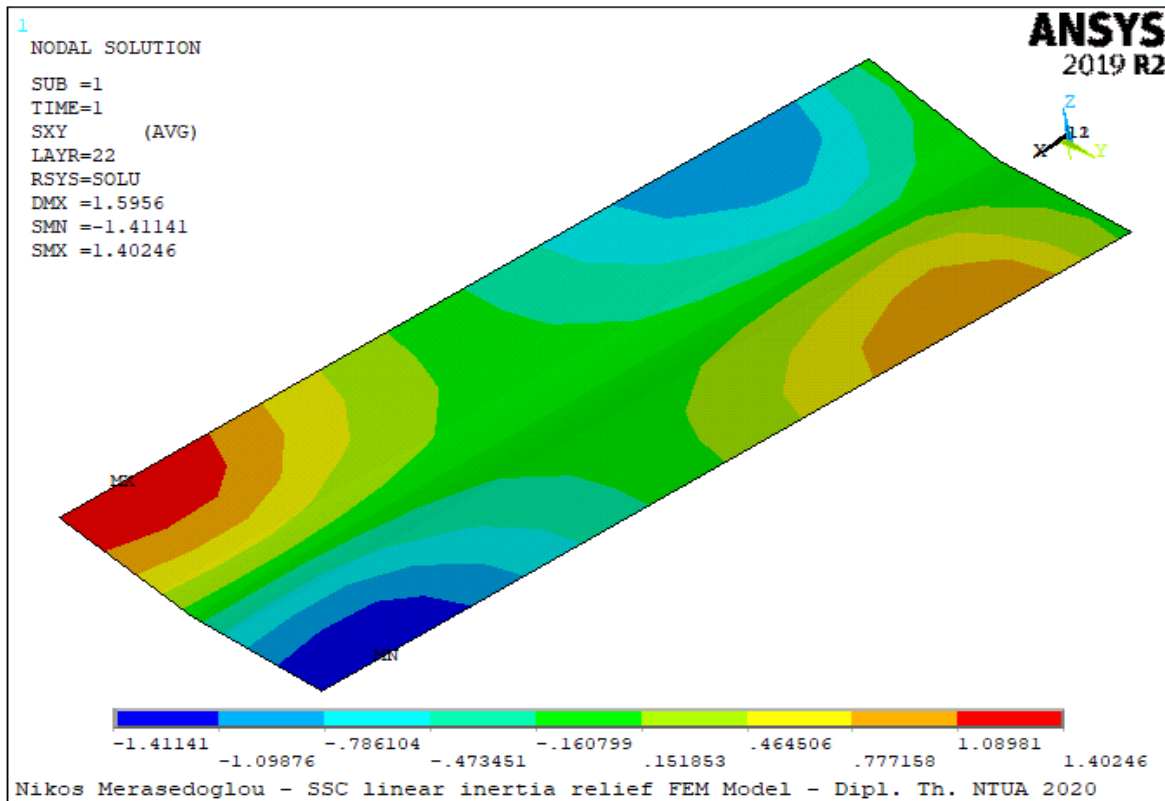
Σχήμα 4.98 : Κατανομή τάσης SX του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.



Σχήμα 4.99 : Κατανομή τάσης SY του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.



Σχήμα 4.100 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY του plate 1_1 στην εξωτερική στρώση.



Σχήμα 4.101 : Κατανομή διατμητικής τάσης SXY του plate 1_1 στην εσωτερική στρώση.

Συνεπώς, αν οι μέγιστες τάσεις κάθε στρώσης που έχουν υπολογιστεί από το ANSYS πληρούν τους κανονισμούς του νηογνώμονα για την στρώση με τη μικρότερη αντοχή, τότε κάθε μία στρώση ξεχωριστά θα ικανοποιεί τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Παρατηρείται λοιπόν από τις εξισώσεις (4.14) – (4.18) για την εξωτερική και εσωτερική στρώση του plate 1_1 ότι οι μέγιστες τάσεις που αναπτύσσονται σύμφωνα με το ANSYS στο plate 1_1 είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα :

$$SX_{\text{tensile}} = 5.96 \text{ MPa} < \text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.14)$$

$$SX_{\text{compressive}} = -6.13 \text{ MPa} > \text{Allowable compressive strength} = -29.25 \text{ MPa} \quad (4.15)$$

$$SY_{\text{tensile}} = 3.45 \text{ MPa} < \text{Allowable tensile strength} = 21.25 \text{ MPa} \quad (4.16)$$

$$SY_{\text{compressive}} = -4.79 \text{ MPa} > \text{Allowable compressive strength} = -29.25 \text{ MPa} \quad (4.17)$$

$$|SXY_{\text{maximum}}| = 1.4 \text{ MPa} < \text{Ultimate shear strength} = 62 \text{ MPa} \quad (4.18)$$

Τα αποτελέσματα που αναγράφονται παραπάνω αφορούν την πρώτη και τη τελευταία στρώση του πολύστρωτου. Οι αντίστοιχες τιμές για όλες τις στρώσεις του πολύστρωτου αναγράφονται στον Πίνακα 4.5 στο εδαφίου 4.5.4 που ακολουθεί, όπου φαίνεται ότι οι τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων που υπολογίζονται από το 3^ο μοντέλο είναι μικρότερες από τα αντίστοιχα επιτρεπόμενα όρια σε κάθε στρώση του plate 1_1.

4.5.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων των τριών μοντέλων

Τα αποτελέσματα της γραμμικής και της μη-γραμμικής ανάλυσης για το plate 1.1 έχουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους, με τη μη-γραμμική ανάλυση να υπερεκτιμά τα αποτελέσματα των τάσεων σε σχέση με τη γραμμική ανάλυση όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.60 – 4.71. Αυτό συμβαίνει διότι στο plate 1.1 υπάρχουν μικρότερες παραμορφώσεις σε σχέση με το υπόλοιπο σκάφος, συνεπώς για το plate 1.1 είναι αμελητέα η επίδραση των υψηλών παραμορφώσεων που λαμβάνει υπόψη της η μη-γραμμική ανάλυση. Ωστόσο, τα μοντέλα γραμμικής και μη-γραμμικής ανάλυσης υπολογίζουν αισθητά μεγαλύτερες τιμές τάσεων από το μοντέλο «inertia relief». Επιπροσθέτως, ο τρόπος που σύμφωνα με το ANSYS καταπονείται το plate 1.1 είναι λογικός από μηχανική σκοπιά. Ειδικότερα, όταν κάμπτεται ένα πολύστρωτο, οι στρώσεις που είναι κοντά στο κυρτό τμήμα του πολύστρωτου εφελκύνονται και οι στρώσεις που βρίσκονται κοντά στο κοίλο τμήμα θλίβονται. Εν προκειμένω, το plate 1_1 εμφανίζει τα κοίλα προς το εσωτερικό του σκάφους, συνεπώς αναμένεται οι στρώσεις που βρίσκονται στο εσωτερικό του σκάφους να καταπονούνται από εφελκυσμό και οι στρώσεις στο εξωτερικό του σκάφους να καταπονούνται από θλίψη. Επομένως τα αποτελέσματα του ANSYS για το plate 1_1 επαληθεύονται από τους νόμους της μηχανικής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ANSYS για τα τρία μοντέλα επίλυσης αναγράφονται στον Πίνακα 4.5 μαζί με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Ο όρος «actual stress» που αναγράφεται στον Πίνακα 4.5 περιγράφει την εκτίμηση, μέσω απλοποιημένων τύπων, του νηογνώμονα για τις πραγματικές τάσεις που αναπτύσσονται σε κάθε στρώση του σκάφους. Στον Πίνακα 4.5, η στρώση υπ' αριθμόν 1 είναι η στρώση που έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα, ενώ η στρώση υπ' αριθμόν 22 είναι η τελευταία στρώση η οποία βρίσκεται στο εσωτερικό του σκάφους.

Πίνακας 4.5 : Αποτελέσματα τριών μοντέλων και αντοχές νηογνώμονα.

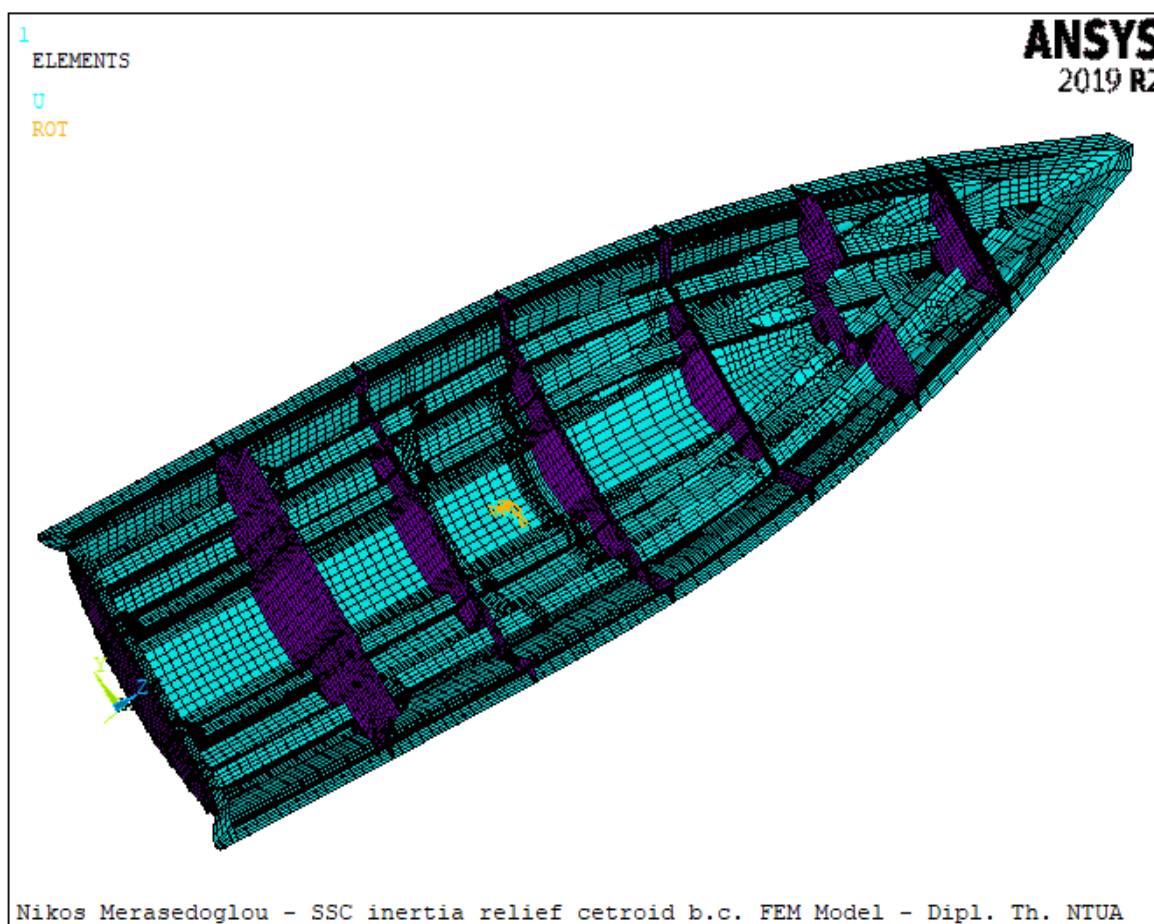
A/A	Στρώσεις	Actual Stress	1 ^ο μοντέλο Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης	2 ^ο μοντέλο Αποτελέσματα μη-γραμμικής ανάλυσης	3 ^ο μοντέλο Αποτελέσματα «inertia relief»	Allowable Stress	Ultimate Stress
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	300_CSM	7.662	20.7487	20.8682	5.95684	21.25	85
2	300_CSM	7.126	19.1971	20.5	5.50078	21.25	85
3	300_CSM	6.589	17.6455	19.4902	5.04471	21.25	85
4	300_CSM	6.052	16.094	17.8012	4.58865	21.25	85
5	450_CSM	5.898	14.5424	16.1122	4.13258	22.75	91
6	450_CSM	5.132	12.4697	13.8558	3.52331	22.75	91
7	800_WR	9.109	19.4942	21.749	5.46384	47.5	190
8	300_CSM	3.577	8.43282	9.46139	2.33672	22.75	91
9	800_WR	6.398	12.9024	14.5732	3.52623	47.5	190
10	300_CSM	2.278	4.91718	5.63432	1.30333	22.75	91
11	450_CSM	1.768	3.36563	3.94533	0.847264	22.75	91
12	450_CSM	1.002	1.29286	1.68896	0.237996	22.75	91
13	600_CSM	-0.813	-0.465059	-0.567412	-0.055209	-30.375	-121.5
14	600_CSM	-1.871	-7.91984	-8.73918	-2.08134	-30.375	-121.5
15	800_WR	-5.227	-15.819	-17.3766	-4.95495	-36.75	-147
16	300_CSM	-3.217	-9.82157	-10.419	-3.08604	-30.375	-121.5
17	800_WR	-7.844	-22.0981	-23.5277	-6.83875	-36.75	-147
18	300_CSM	-4.563	-13.3372	-14.2371	-4.09073	-30.375	-121.5
19	800_WR	-10.461	-28.69	-30.7034	-8.72255	-36.75	-147
20	300_CSM	-5.909	-16.8529	-18.0641	-5.09577	-30.375	-121.5
21	800_WR	-13.077	-33.2818	-35.8792	-10.6371	-36.75	-147
22	300_CSM	-7.254	-20.3685	-21.8912	-6.12916	-30.375	-121.5

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 4.5, με την χρήση της δυνατότητας «inertia relief» τα αποτελέσματα του μοντέλου πλησιάζουν σε μεγάλο βαθμό τις εκτιμήσεις του νηογνώμονα (actual stress). Αντιθέτως, στην περίπτωση μη χρησιμοποίησης της λειτουργίας «inertia relief» (γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση) τα αποτελέσματα αποκλίνουν αισθητά, καθώς στην περίπτωση που δεν συνυπολογίζονται τα αδρανειακά φορτία υπερεκτιμώνται οι αναπτυσσόμενες τάσεις του σκάφους. Επομένως επιβεβαιώνεται η αρχική εκτίμηση που έγινε στο τρίτο κεφάλαιο ότι η χρήση της λειτουργίας «inertia relief» προσομοιάζει καλύτερα τη φυσική του προβλήματος στο πρόγραμμα ANSYS.

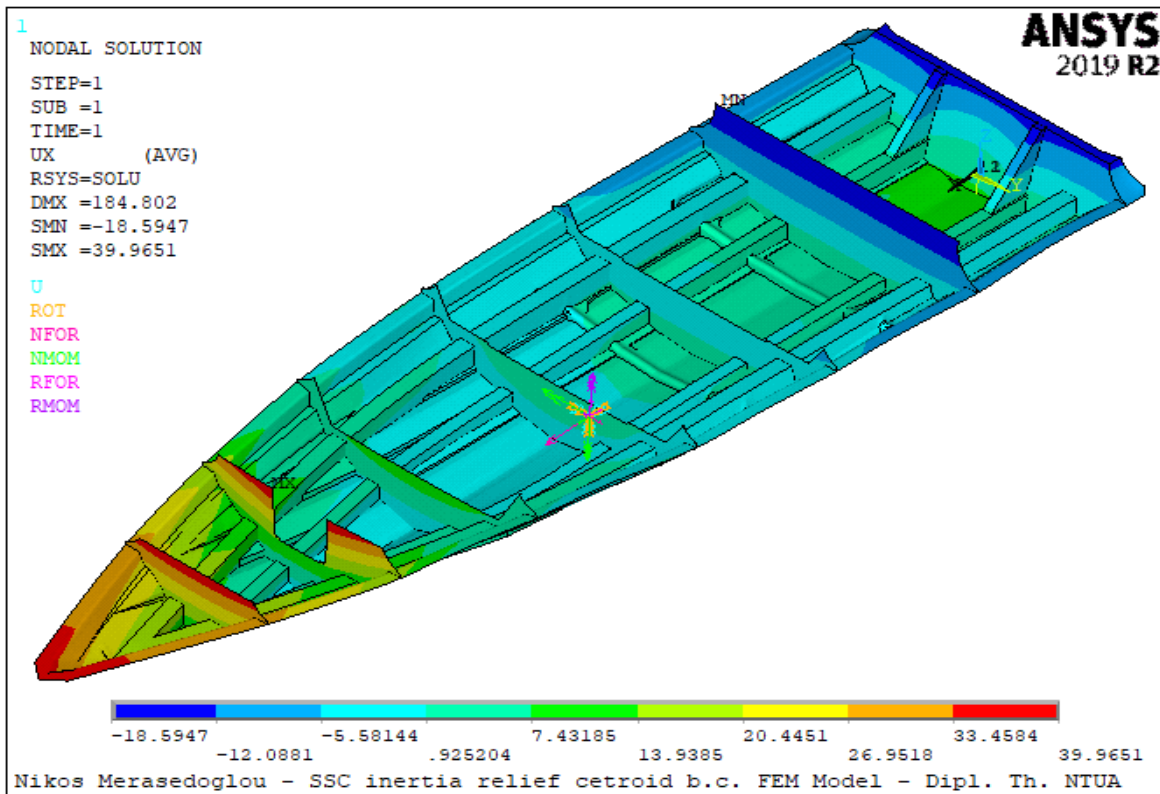
4.6 Δοκιμή με πάκτωση στον πλησιέστερο κόμβο του κέντρου μάζας του σκάφους

Κατά την εκτέλεση του τρίτου μοντέλου, όπου εφαρμόζεται η λειτουργία «inertia relief» με περιορισμό των βαθμών ελευθερίας UX, UY και UZ στους κόμβους περιμετρικά στο κοίλο της γάστρας ως συνοριακές συνθήκες, παραβιάζεται η σύσταση για την χρήση της λειτουργίας «inertia relief» να χρησιμοποιείται ο ελάχιστος δυνατός αριθμός κόμβων στους οποίους τοποθετούνται συνοριακές συνθήκες. Ο λόγος που παραβιάστηκε η παραπάνω σύσταση είναι η ανάγκη να περιοριστούν οι μετατοπίσεις περιμετρικά του σκάφους, προκειμένου να προσομοιαστεί κατάλληλα το πρόβλημα και η ύπαρξη του καταστρώματος. Όπως ήδη έχει αναφερθεί στο εδάφιο 3.3.7 στο οποίο περιγράφονται οι συνοριακές συνθήκες που τοποθετούνται για την επίλυση του προβλήματος, ιδεατά θα έπρεπε να τοποθετηθούν συνοριακές συνθήκες σε μόνο έναν κόμβο, αυτόν που αντιστοιχεί στο κέντρο βάρους του σκάφους. Η δυσκολία σε αυτή την περίπτωση όμως είναι ότι το κέντρο βάρους του σκάφους που μοντελοποιήθηκε (χωρίς το κατάστρωμα) είναι σημείο το οποίο δεν ανήκει στην γεωμετρία του σκάφους. Στην περίπτωση του παρόντος σκάφους το κέντρο μάζας της κατασκευής αντιστοιχεί στο σημείο $\{x=3312.6\text{mm}, y=0\text{mm}, z=311.27\text{mm}\}$, ωστόσο ο κόμβος του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων που είναι πλησιέστερος στο κέντρο μάζας της κατασκευής έχει συντεταγμένες $\{x=3356.4\text{mm}, y=0\text{mm}, z=21.239\text{mm}\}$, ο οποίος έχει αισθητή απόσταση από το κέντρο μάζας της κατασκευής, κυρίως όπως προς τον κατακόρυφο άξονα z. Επιπλέον, λόγω της μη μοντελοποίησης του καταστρώματος, το σκάφος αποτελεί ανοικτή και όχι κλειστή διατομή, συνεπώς είναι ελεύθερο να παραμορφωθεί στα ελεύθερα και ανυποστήρικτα άκρα του.

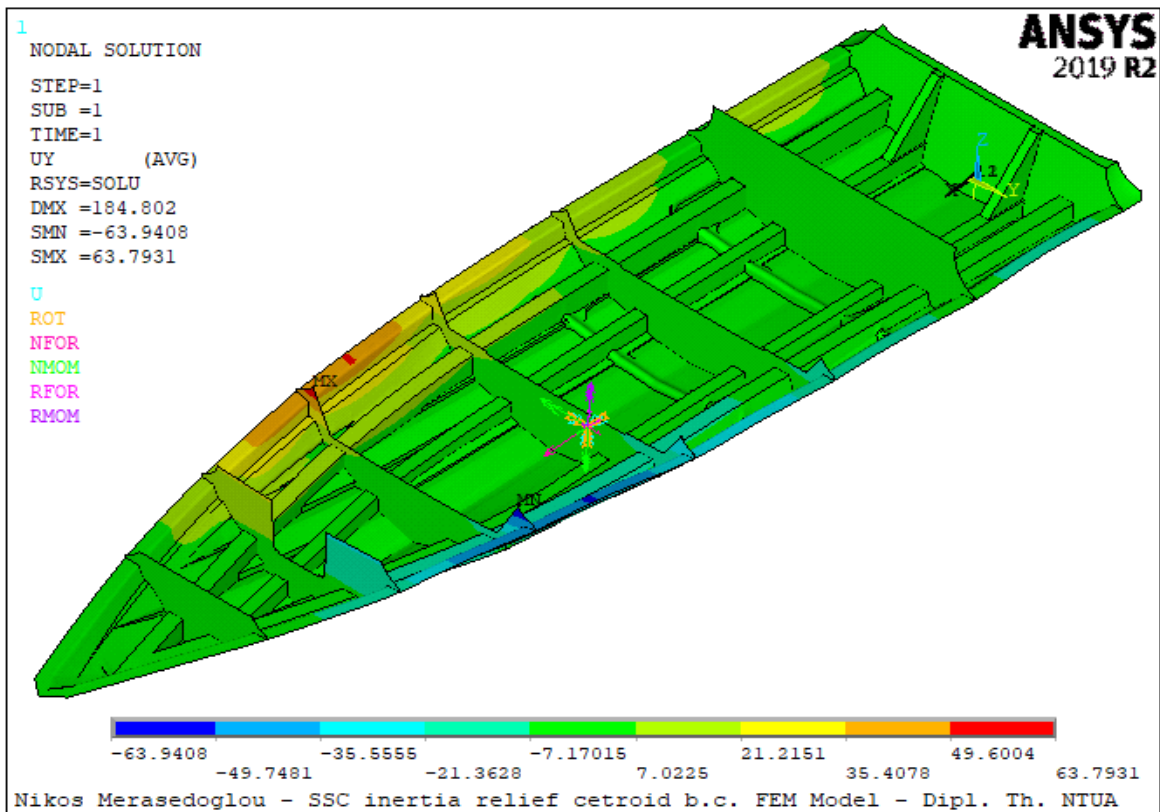
Επομένως, αναμένεται εκ των προτέρων ότι τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής είναι αδόκιμα και μη ρεαλιστικά. Ωστόσο, χάριν πληρότητας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, εκτελέστηκε μοντέλο με χρήση πάκτωσης στον πλησιέστερο του κέντρου μάζας κόμβο ως συνοριακή συνθήκη. Ο κόμβος του σκάφους στον οποίο τοποθετήθηκε πάκτωση ως συνοριακή συνθήκη απεικονίζεται στο Σχήμα 4.102. Η μετατόπιση UX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.103, η μετατόπιση UY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.104, η μετατόπιση UZ κατά τον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.105, ενώ η συνολική μετατόπιση USUM απεικονίζεται στο Σχήμα 4.106. Παρομοίως, μη ρεαλιστικά αποτελέσματα εξάγονται από την χρήση των υπόλοιπων δύο περιπτώσεων συνοριακών συνθηκών. Εξ ου και η εφαρμογή πακτώσεων στους ανώτερους κόμβους περιμετρικά του σκάφους ως συνοριακές συνθήκες, όπου με αυτόν τον τρόπο προσομοιάζεται η ύπαρξη του καταστρώματος το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.



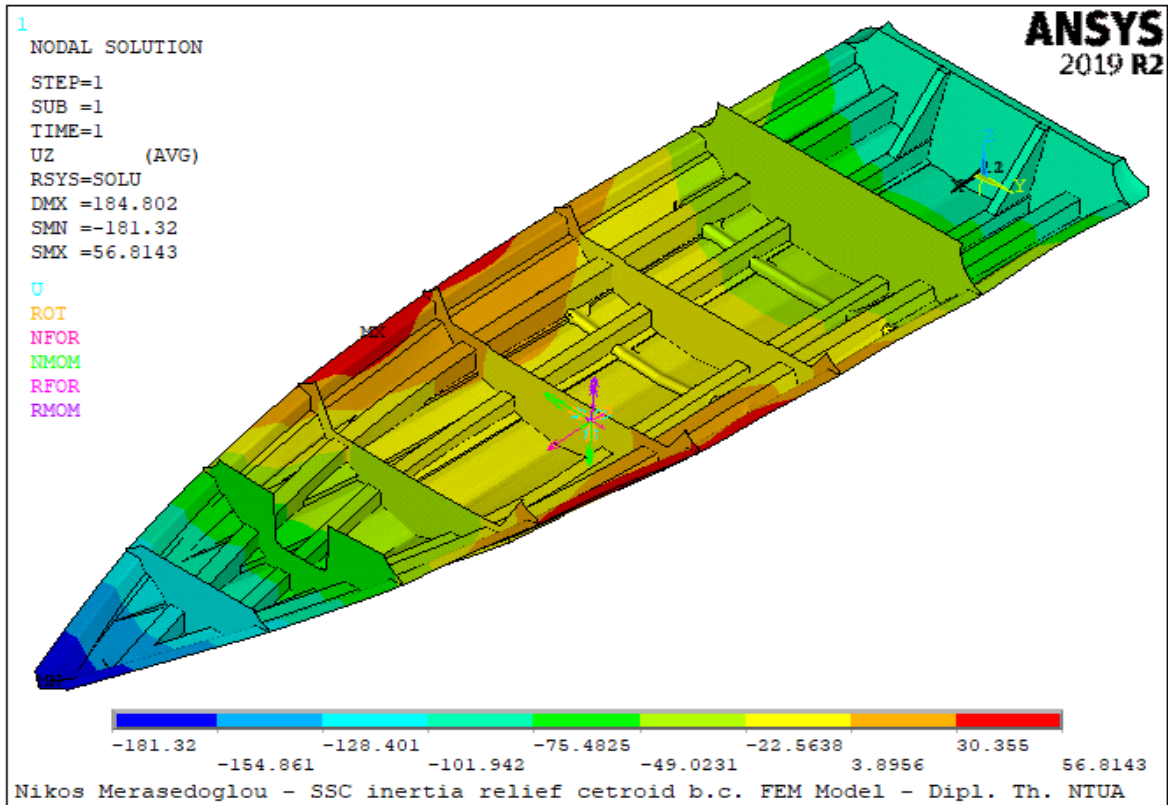
Σχήμα 4.102 : Πλησιέστερος στο κέντρο βάρους κόμβος, ο οποίος πακτώνεται.



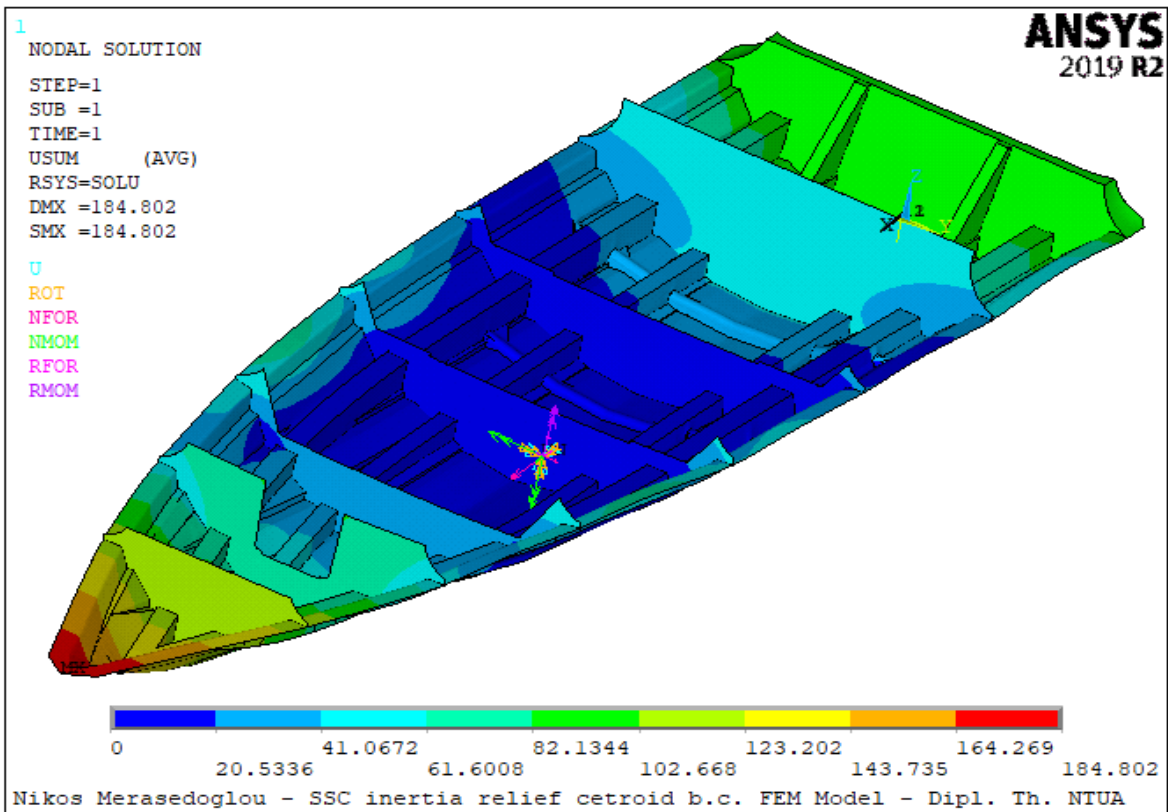
Σχήμα 4.103 : Μετατόπιση UX ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.104 : Μετατόπιση UY ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.105 : Μετατόπιση UZ ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.

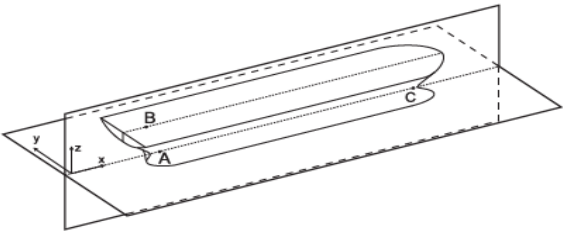


Σχήμα 4.106 : Συνολική μετατόπιση USUM ως προς το γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.

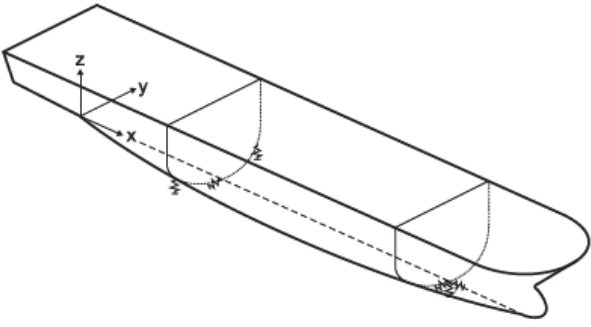
4.7 Δοκιμή συνοριακών συνθηκών πλοίου σύμφωνα με τον νηογνώμονα DNV–GL

Κατά τη βιβλιογραφική αναζήτηση σχετικά με τις συνοριακές συνθήκες που έχουν εφαρμοστεί σε αντίστοιχα προβλήματα μοντελοποίησης σκαφών, παρατηρήθηκε ότι ο νηογνώμονας DNV–GL προτείνει την εφαρμογή τριών περιπτώσεων συνοριακών συνθηκών. Βέβαια, αυτές οι συνοριακές συνθήκες αφορούσαν την στήριξη ποντοπόρων πλοίων, επομένως ήταν εξαρχής πολύ πιθανό να μην μπορούσαν να εφαρμοστούν στο παρόν πρόβλημα. Ωστόσο, θεωρήθηκε χρήσιμη η δοκιμή των συνοριακών συνθηκών που προτείνει ο νηογνώμονας DNV–GL προκειμένου να αξιολογηθεί αν είναι δυνατή η εφαρμογή τους σε ταχύπλοο σκάφος.

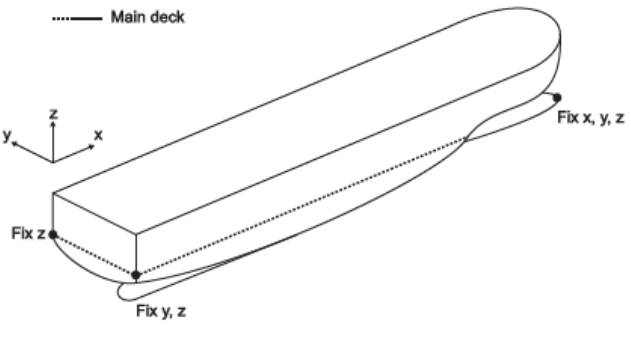
Ο νηογνώμονας DNV–GL προτείνει τρεις περιπτώσεις συνοριακών συνθηκών. Η πρώτη περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 4.107 και αφορά τον περιορισμό των μετατοπίσεων UX, UY και UZ στο πρυμναίο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με την ίσαλο επιφάνεια (point A), τον περιορισμό της μετατόπισης UY στο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με το κατάστρωμα (point B) και τον περιορισμό των μετατοπίσεων UY και UZ στο πωραίο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με την ίσαλο επιφάνεια (point C). Η δεύτερη περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 4.108 και αφορά τον περιορισμό της μετατόπισης UZ σε σημείο του bilge της πρυμναίας φρακτής και του συμμετρικού του ως προς τη μέση τομή, τον περιορισμό της μετατόπισης UY στο σημείο τομής της κεντρικής γραμμής με την πρυμναία φρακτή και τον περιορισμό των μετατοπίσεων UX, UY και UZ στο σημείο τομής της κεντρικής ζώνης με την πωραία φρακτή. Τέλος, η τρίτη περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 4.109 και αφορά τον περιορισμό της μετατόπισης UY στο σημείο τομής εκ των αριστερών του κύριου καταστρώματος με τον καθρέφτη της πρύμνης, τον περιορισμό των μετατοπίσεων UY και UZ στο σημείο τομής εκ των δεξιών του κύριου καταστρώματος με τον καθρέφτη της πρύμνης και τον περιορισμό των μετατοπίσεων UX, UY και UZ στο πιο μπροστινό σημείο του βολβού που ανήκει στην κεντρική γραμμή. Το παράδοξο της τρίτης περιπτώσεως είναι ότι οι περιορισμοί των μετατοπίσεων σημείων δεν είναι συμμετρική ως προς την κεντρική γραμμή του πλοίου (centerline).

	Location	Direction of support	
Aft End	WL, CL (point A)	X, Y, Z	
	CL, Upper deck (point B)	Y	
Forward End	WL, CL (point C)	Y, Z	

Σχήμα 4.107 : 1^η περίπτωση συνοριακών συνθηκών που προτείνει ο νηογνώμονας DNV – GL.

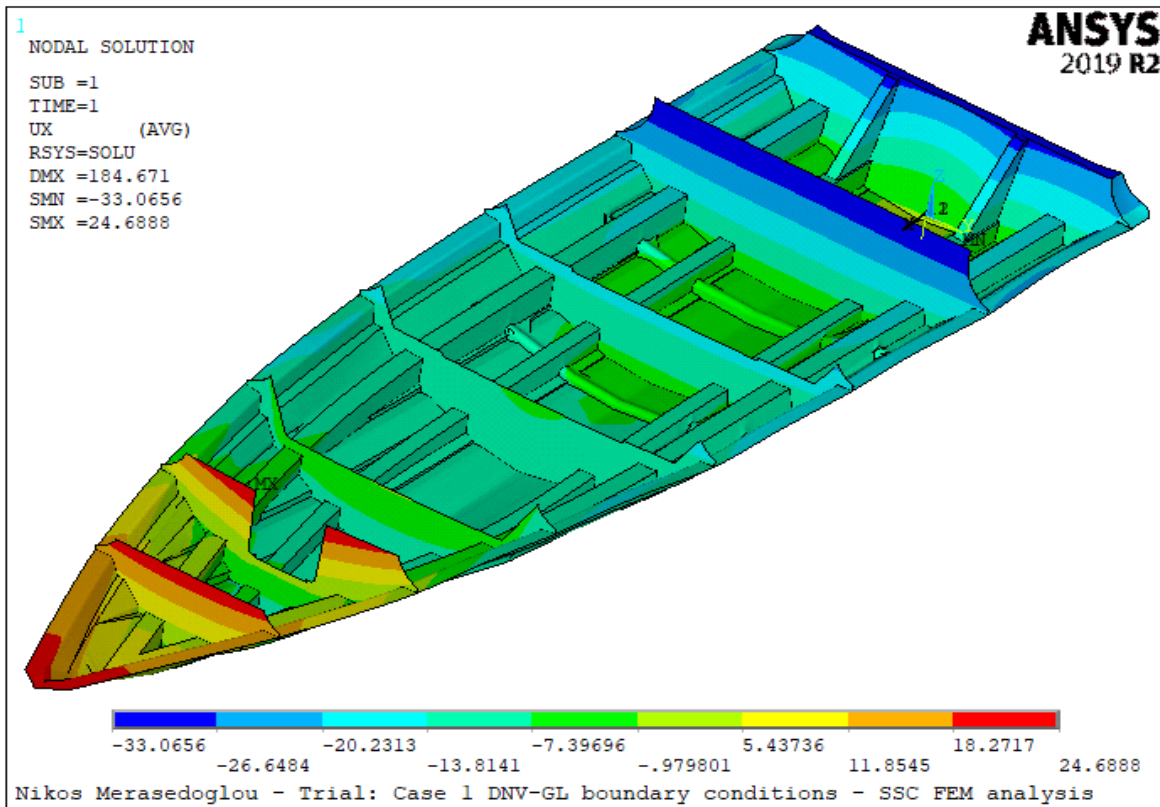
	Location	Direction of support	
Engine room Front Bulkhead	SB	Z	
	CL	Y	
	PS	Z	
Collision Bulkhead	CL	X	
	CL	Y	
	CL	Z	

Σχήμα 4.108 : 2^η περίπτωση συντοριακών συνθηκών που προτείνει ο νηογνώμονας DNV – GL.

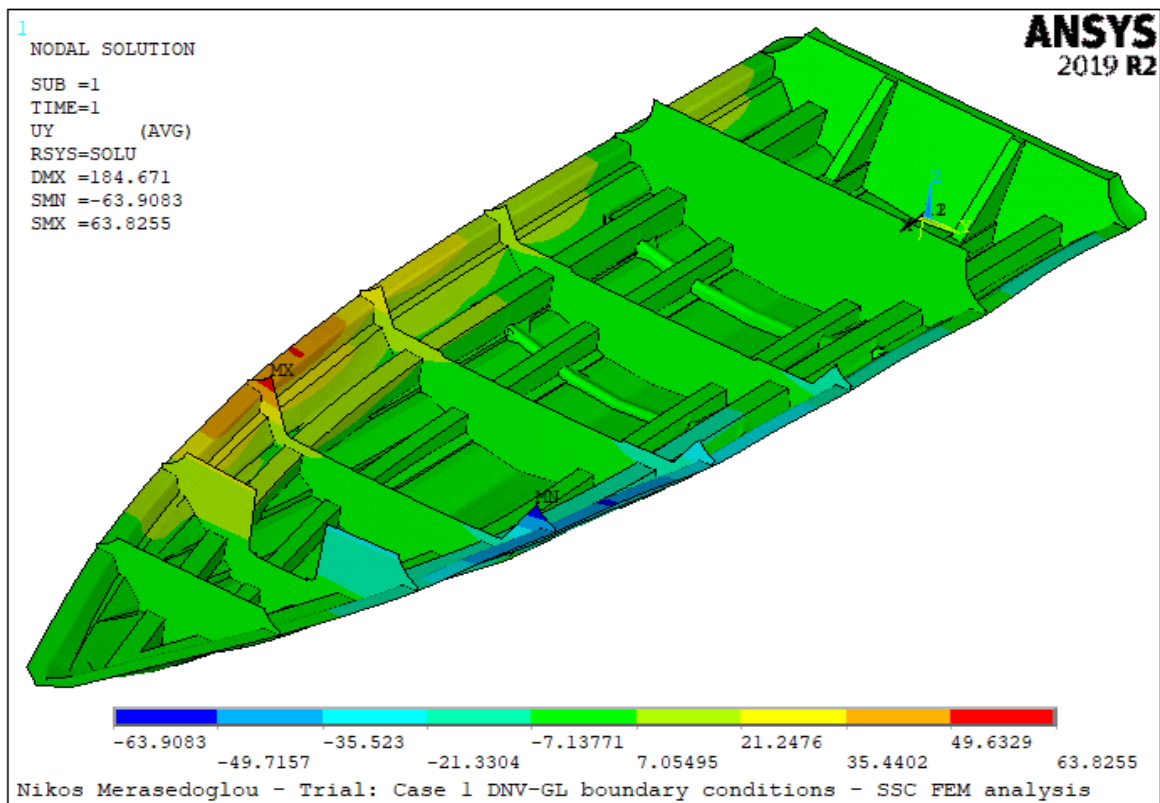
	Location	Direction of support	
Transom	SB	Y, Z	
	PS	Z	
Forward End	CL	X, Y, Z	

Σχήμα 4.109 : 3^η περίπτωση συντοριακών συνθηκών που προτείνει ο νηογνώμονας DNV – GL.

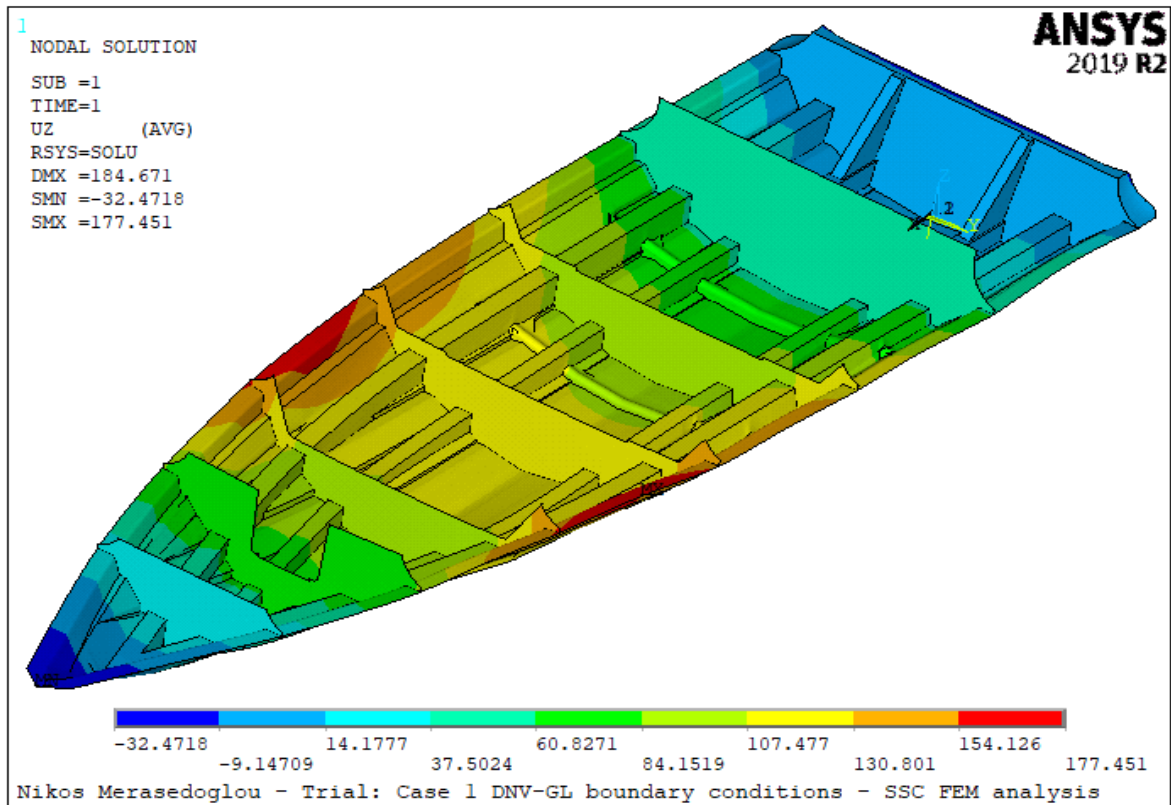
Για την εφαρμογή κάθε μιας από τις τρεις περιπτώσεις συντοριακών συνθηκών, εφαρμόστηκε γραμμική ανάλυση, καθώς η μη-γραμμική ανάλυση αποτελούσε μια πολύωρη διαδικασία η οποία δεν ολοκληρώθηκε σε καμία εκ των τριών περιπτώσεων. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή κάθε μιας από τις τρεις συντοριακές συνθήκες για το σκάφος ήταν αδόκιμα και μη-ρεαλιστικά, συνεπώς κρίθηκε αδύνατη η εφαρμογή τους σε αυτό το πρόβλημα. Ενδεικτικά απεικονίζονται τα αποτελέσματα της πρώτης περίπτωσης στα Σχήματα 4.110 – 4.113 σε τρισδιάστατη όψη στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς. Ειδικότερα για την πρώτη περίπτωση, η μετατόπιση UX κατά τον διαμήκη άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.110, η μετατόπιση UY κατά τον εγκάρσιο άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.111, η μετατόπιση UZ κατά τον κατακόρυφο άξονα απεικονίζεται στο Σχήμα 4.112, ενώ η συνολική μετατόπιση USUM απεικονίζεται στο Σχήμα 4.113. Παρομοίως, μη ρεαλιστικά αποτελέσματα εξάγονται από την χρήση των υπόλοιπων δύο περιπτώσεων συντοριακών συνθηκών. Εξ ου και η εφαρμογή πακτώσεων στους ανώτερους κόμβους περιμετρικά του σκάφους ως συντοριακές συνθήκες, όπου με αυτόν τον τρόπο προσομοιάζεται η ύπαρξη του καταστρώματος το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία.



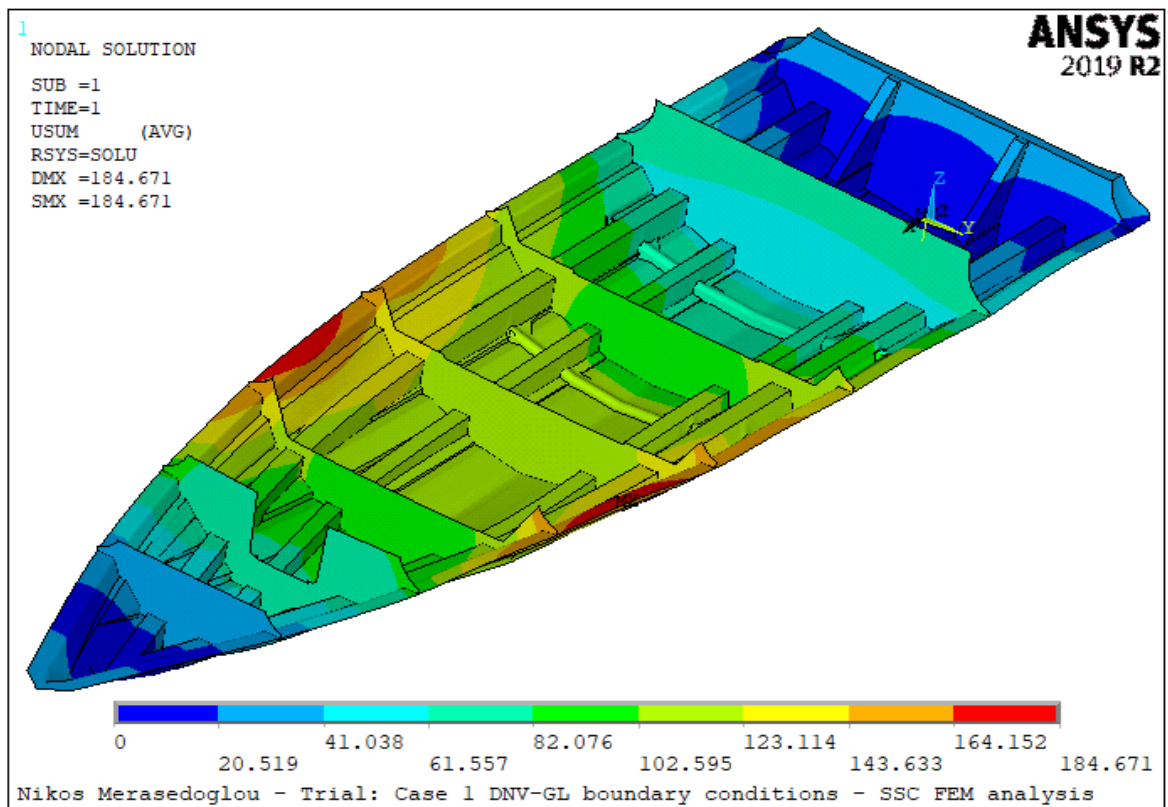
Σχήμα 4.110 : Μετατόπιση UX ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.111 : Μετατόπιση UY ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.112 : Μετατόπιση UZ ως προς το γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4.113 : Συνολική μετατόπιση USUM ως προς το γενικευμένο σύστημα συντεταγμένων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Συμπεράσματα – παρατηρήσεις

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η κατανόηση της διαδικασίας με την οποία μοντελοποιείται ένα μικρό σκάφος πλαναρίσματος με πεπερασμένα στοιχεία. Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, περιγράφηκαν λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά και η κατασκευή του υπό μελέτη σκάφους. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία και όλες οι απαραίτητες ενέργειες που οδήγησαν στη δημιουργία του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρατίθενται τα αποτελέσματα της γραμμικής, της μη-γραμμικής ανάλυσης και της χρήσης της λειτουργίας «inertia relief» για τις μετατοπίσεις κατά UX, UY και UZ στο γενικευμένο καρτεσιανό σύστημα αναφοράς, τις τάσεις SX, SY και SXY κατά το τοπικό σύστημα αναφοράς, τα κριτήρια αστοχίας και τέλος γίνεται σύγκριση των τάσεων με τα επιτρεπόμενα όρια που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα. Στο τέλος του τέταρτου κεφαλαίου, παρουσιάζονται δύο ακόμα μέθοδοι, οι οποίες δεν μπορούν να εφαρμοστούν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας και εξηγούνται οι προϋποθέσεις υπό τις οποίες θα μπορούσαν να είχαν εφαρμοστεί. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο, αρχικά ανακεφαλαιώνονται χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση του σκάφους και εξηγείται η σημασία ορισμένων βημάτων που είναι καθοριστικά για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Έπειτα, αξιολογούνται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, αιτιολογούνται και ερμηνεύονται με βάση τη φυσική του προβλήματος. Στο τέλος του πέμπτου κεφαλαίου, γίνεται πρόταση για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος της διπλωματικής εργασίας.

Αρχικά, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σε ότι αφορά την «αυτοματοποίηση» της διαδικασίας δημιουργίας μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ενός σκάφους. Γίνεται λοιπόν σαφής η σπουδαιότητα της προεπεξεργασίας και της κατάλληλης τροποποίησης του σχεδίου σε σχεδιαστικό πρόγραμμα πριν γίνει η εισαγωγή (import) του σχεδίου στο πρόγραμμα ANSYS. Εάν παραληφθεί αυτό το βήμα, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα σε κάποιες περιοχές να μην υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων, δηλαδή θα υπάρχουν «κενά» στο πλέγμα.

Έπειτα, προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα σε οτιδήποτε αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από καθένα από τα τρία μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν. Αρχικά, από τη σύγκριση του 1^{ου} με το 2^ο μοντέλο, παρατηρείται ότι υπάρχει μικρή απόκλιση στα αποτελέσματα μεταξύ της γραμμικής και της μη-γραμμικής ανάλυσης. Ωστόσο, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του 1^{ου} και του 2^{ου} μοντέλου με τους κανονισμούς του νηογνώμονα, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι σε ορισμένες στρώσεις είναι οριακά χαμηλότερες από την αντοχή της στρώσης, που σημαίνει ότι αυτά το 1^ο και το 2^ο μοντέλο υπερεκτιμούν τις πραγματικές τάσεις που αναπτύσσονται στο σκάφος σε σχέση με το 3^ο μοντέλο που λαμβάνει υπόψη αδράνεια της κατασκευής, του τα αποτελέσματα αυτού του μοντέλου είναι πιο κοντά στις προδιαγραφές του νηογνώμονα. Επομένως, συμπεραίνεται ότι το 3^ο μοντέλο, που αξιοποιεί τη λειτουργία «inertia relief», εξάγει ρεαλιστικότερα αποτελέσματα σε σχέση με το 1^ο και το 2^ο μοντέλο, το οποίο σημαίνει ότι ο συνυπολογισμός των αδρανειακών φορτίων μέσω προσομοιάζει καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο το σκάφος ισορροπεί στη θάλασσα και είναι ελεύθερο να αναπτύξει επιταχύνσεις.

Σε ότι αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του 3^{ου} μοντέλου με τους κανονισμούς του νηογνώμονα, παρατηρείται ότι καθ' όλο το μήκος του σκάφους δεν υπάρχει αστοχία των στρώσεων. Ειδικότερα, οι αναπτυσσόμενες τιμές τάσεων είναι πολύ μικρότερες από τις αντοχές που προδιαγράφονται από τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Επιπλέον, οι αναπτυσσόμενες τάσεις σε αυτήν την περίπτωση ήταν εντός των επιτρεπόμενων ορίων. Μοναδική εξαίρεση είναι οι αναπτυσσόμενες τάσεις SY που υπερβαίνουν τα μέγιστα επιτρεπόμενα όρια εφελκυσμού και θλίψης που προδιαγράφουν οι κανονισμοί του νηογνώμονα στις πρώτες τέσσερις στρώσεις του plate 3.2, του plate 4.2 και του plate 5.2 στο εξωτερικό του σκάφους και στις δύο εσωτερικές στρώσεις του plate 4.2 και του plate 5.2 της ενδιάμεσης ζώνης του σκάφους.

Ενδεικτικά, στην πρώτη στρώση στο εξωτερικό του plate 3.2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $SY_{compressive} = -38.595 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -32.76 \text{ MPa}$, στην πρώτη στρώση στο εξωτερικό του plate 4.2 αναπτύσσεται μέγιστη εφελκυστική τάση $SY_{tensile} = 37.3942 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 23.8 \text{ MPa}$, ενώ στην εσωτερική στρώση του plate 4.2 αναπτύσσεται θλιπτική τάση $SY_{compressive} = -34.7604 \text{ MPa} < \text{Allowable compressive strength} = -34.02 \text{ MPa}$ και εφελκυστική τάση $SY_{tensile} = 32.2342 \text{ MPa} > \text{Allowable tensile strength} = 25.48 \text{ MPa}$. Στις υπόλοιπες στρώσεις όπου η αναπτυσσόμενη τάση SY υπερβαίνει τα επιτρεπόμενα όρια, παρατηρείται ότι η διαφορά μεταξύ της αναπτυσσόμενης τάσης SY και του μέγιστου επιτρεπόμενου ορίου είναι μικρότερη σε σχέση με την εξωτερική και την εσωτερική στρώση, πράγμα το οποίο είναι λογικό, διότι λόγω της κάμψης που υφίστανται οι πλάκες της ενδιάμεσης ζώνης, αναμένονται να αναπτυχθούν μεγάλες τάσεις στις στρώσεις που είναι απομακρυσμένες από τον ουδέτερο άξονα. Εν προκειμένω, η μέγιστη απόκλιση παρουσιάζεται στην πρώτη και τη τελευταία στρώση του πολύστρωτου.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα του 3^{ου} μοντέλου θα ήταν πλησιέστερα στα επιτρεπόμενα όρια εάν είχε μοντελοποιηθεί στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων το βάρος των εσωτερικών φορτίων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας έχουν μοντελοποιηθεί 0.72 τόνοι, που είναι το βάρος της κατασκευής του κελύφους του σκάφους, ενώ το συνολικό εκτόπισμα (Δ) του σκάφους είναι 3.143 τόνοι. Συνεπώς, υπάρχουν 2.423 τόνοι φορτίου που αποτελούν το deadweight (DWT) και μέρος του lightship (LS) και βρίσκονται στο εσωτερικό του σκάφους, οι οποίοι θα εξισορροπούσαν μεγάλο μέρος των εξωτερικών κρουστικών πιέσεων που καταπονούν το σκάφος στην περίπτωση που είχαν μοντελοποιηθεί. Συνεπώς, η μη μοντελοποίηση των εσωτερικών βαρών αποτελεί μια επιπλέον συντηρητική προσέγγιση, η οποία δικαιολογεί τις αυξημένες τιμές τάσεων που προέκυψαν κατά τη μοντελοποίηση. Επιπλέον, υψηλές τιμές αναπτυσσόμενων τάσεων παρατηρήθηκαν στις πλάκες που βρίσκονται κοντά στους κόμβους της ανώτερης ζώνης όπου έχουν οριστεί ως συνοριακές συνθήκες περιορισμοί των βαθμών ελευθερίας UX, UY και UZ στους κόμβους που βρίσκονται στο κοίλο περιμετρικά του σκάφους, για να προσομοιάσουν την ύπαρξη του καταστρώματος το οποίο δεν έχει μοντελοποιηθεί, συνεπώς το μοντέλο σε αυτή την περιοχή είναι πιο δύσκαμπτο. Σε περίπτωση που είχε μοντελοποιηθεί η κατασκευή του καταστρώματος, ενδεχομένως οι συνοριακές συνθήκες να ήταν διαφορετικές, συνεπώς οι αναπτυσσόμενες τάσεις θα ήταν μικρότερες σε σχέση με τις τάσεις που υπολογίστηκαν στο 3^ο μοντέλο.

Επιπροσθέτως παρατηρείται από τα αποτελέσματα του τέταρτου κεφαλαίου ότι οι κανονισμοί του νηογνώμονα προδιαγράφουν αυστηρούς συντελεστές ασφάλειας, διότι οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις έχουν πολλές απλουστεύσεις και παραδοχές οι οποίες υποτιμούν την πραγματική τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που αναπτύσσεται υπολογίζει με ικανοποιητική ακρίβεια τη τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων. Συνεπώς οι τιμές αυτές μπορούν να συγκριθούν απευθείας με την αντοχή κάθε στρώσης, χωρίς προηγουμένως να ληφθεί αυστηρός συντελεστής ασφάλειας ο οποίος περιορίζει κατά πολύ τα επιτρεπόμενα όρια.

Το ζητούμενο της διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος αντοχής του σκάφους και η σύγκριση με τους κανονισμούς του νηογνώμονα. Εάν ήταν ζητούμενο να γίνουν κατάλληλες τροποποιήσεις στο σκάφος έτσι ώστε όλες οι στρώσεις να είναι εντός των επιτρεπόμενων ορίων, τότε αυτές οι τροποποιήσεις θα ήταν αφενός να τοποθετηθούν περισσότερες στρώσεις στην ενδιάμεση ζώνη του σκάφους, η οποία είναι λιγότερο ενισχυμένη σε σχέση με τη ζώνη που είναι κοντά στην τρόπιδα, αφετέρου να χρησιμοποιηθούν στρώσεις με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ίνες γυαλιού έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερη αντοχή και το σκάφος να είναι πιο ανθεκτικό. Παραδείγματος χάρη, ορισμένες στρώσεις CSM από το lay – up της κατασκευής θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από στρώσεις WR, οι οποίες έχουν περισσότερη αντοχή, συνεπώς μεγαλώνουν τα επιτρεπόμενα όρια της στρώσης.

Πρόταση για μελλοντική εργασία αποτελεί η εκπόνηση υπολογισμών με χρήση αναλυτικών μεθόδων, προκειμένου να υπάρχει ένα επιπλέον μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων. Επιπλέον, θα μπορούσε εκτός του σκάφους με τις ενισχύσεις και τις φρακτές να μοντελοποιηθεί και το κατάστρωμα του σκάφους, καθώς επίσης να ληφθούν υπόψη, εκτός από τις εξωτερικές πιέσεις που καταπονούν το σκάφος, και η κατά το μήκος κατανομή βάρους του εξοπλισμού του σκάφους, όπως το βάρος της μηχανολογικής εγκατάστασης ή το βάρος εξοπλισμού (outfit) του σκάφους. Τέλος, αφού ληφθούν υπόψη τα παραπάνω, θα μπορούσε να γίνουν προτάσεις βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια, όπως η μείωση του βάρους της γάστρας του σκάφους και η απαλοιφή περιττών στρώσεων, ή η χρήση ελαφρύτερων στρώσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας έχει μοντελοποιηθεί μέρος του βάρους του lightship και δεν έχει μοντελοποιηθεί το deadweight, το οποίο θα εξισορροπούσε μεγάλο μέρος των εξωτερικών κρουστικών πιέσεων που καταπονούν το σκάφος στην περίπτωση που είχαν μοντελοποιηθεί. Επιπροσθέτως, στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας δεν έχει μοντελοποιηθεί ο αφρός PVC που αποτελεί τον πυρήνα των διαμήκων ενισχυτικών και των μπρακέτων του καθρέφτη. Στην περίπτωση που είχε μοντελοποιηθεί θα είχε μικρή, συγκριτικά με τα υπόλοιπα κατασκευαστικά στοιχεία, συνεισφορά στην αντοχή του σκάφους.

Τα παραπάνω αποτελέσματα και συμπεράσματα συμβάλλουν σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση του κατασκευαστικού σχεδιασμού ενός ταχύπλοου σκάφους, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τον βέλτιστο τρόπο με τον οποίο μπορεί να μοντελοποιηθεί ένα σκάφος, ακόμα και πλοίο, με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Πλέον δεν είναι λίγοι οι νηογνώμονες που απαιτούν οι μελέτες σκαφών και πλοίων να συνοδεύονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του σκάφους με πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον, η τεχνογνωσία που αναφέρεται στην παρούσα διπλωματική εργασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για το είδος και την αλληλουχία στρώσεων που ενδείκνυνται να εφαρμοσθούν σε ένα σκάφος προκειμένου να είναι ασφαλές από πλευράς αντοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

Τσούβαλης, Ν. Γ. (1998). Σημειώσεις για το μάθημα Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά. Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Διεθνής

Alaimo, A., Milazzo, A. & Tumino, D. (2012). Modal and Structural FEM Analysis of a 50 ft Pleasure Yacht. Applied Mechanics and Materials Vols. 215–216 pp 692–697.

ANSYS. (2015). ANSYS Mechanical APDL Structural Analysis Guide. Canonsburg.

ANSYS. (2011). ANSYS Parametric Design Language Guide. Canonsburg.

Barbero, E. J. (2014). Finite Element Analysis of Composite Materials using ANSYS. Taylor & Francis Group, LLC.

Campbell, D. & Jones B. (2002). Finite Element Analysis of Composite Boats. High Performance Yacht Design Conference, Auckland.

Decolon, C. (2004). Analysis of Composite Structures. Hermes Science Publications, Paris.

DNV–GL. (2015). Finite element analysis. Oslo, Norway.

Hollaway, L. (1994). Handbook of polymer composites for engineers. Woodhead Publishing LTD.

Lloyd’s Register. (2018). Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft. U.K.

Ojeda, R., Prusty, B. G. & Salas M. (2003). Finite Element Investigation on the Static Response of a Composite Catamaran under Slamming Loads. Ocean Engineering, Elsevier.

Renjith, R. & Nair, R. P. (2019). Structural Analysis of NFRP Composite Boat Hull Using Finite Element Method. Journal of Offshore Structure and Technology, Volume 6, Issue 1.

Santos, F. S., Santos, J. M., Duarte, F. & Soares, C.G. (2004). Finite element analysis of a 30ft one-off racer-cruiser yacht. International Symposium on yacht design and production.

Shenoi, R. A. & Wellicome, J. F. (1993). Composite Materials in Maritime Structures, Volume 1. Cambridge University Press, U.K.

Shenoi, R. A. & Wellicome, J. F. (1993). Composite Materials in Maritime Structures, Volume 2. Cambridge University Press, U.K.

- Ship Structure Committee. (1997). SSC-403 Design Guide for Marine Applications of Composites. United States Coast Guard.
- Ship Structure Committee. (1997). SSC-449 Hydrodynamic pressures and Impact Loads. United States Coast Guard.
- Ship Structure Committee. (1997). SSC-471 Structural Load Prediction. United States Coast Guard.
- Smith Jr., F. A. & Hopkins, P. M. Non-linear Internal Loads Modeling Methods. Proceedings of AHS International 62nd Annual Forum - Vertical Flight: Leading through Innovation – Proceedings, Vol. III, 2006, pp. 1436-1455.
- Soares, C. G. (2009). Analysis and Design of Marine Structures. CRC Press
- Strong, A.B. (2002). History of Composite Materials – opportunities and necessities. Brigham Young University.
- Teneketzis, L. & Argyris, J. (1998). Finite Element Analysis for Composite Structures. Springer Netherlands.
- Tsai, W. S. (1992). Theory of Composites Design. Think Composites, Dayton Ohio USA.
- Young, W. C. & Budynas, R. G. (2002). Roark's Formulas for Stress and Strain. McGraw-Hill.
- Zerken, D. & Battley, M. (2016). Foundations of Fibre Composites. Stockholm.