

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Μελέτη εφαρμογής επιθεμάτων από σύνθετα
υλικά για την αποφυγή λυγισμού καταστρώματος
Bulk Carrier

Διπλωματική εργασία

Δημήτριος Ι. Πειρουνάκης

Επιβλέπων Καθηγητής
Νικόλαος Τσούβαλης



ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	3
2	Λυγισμός.....	7
2.1	Εισαγωγή.....	7
2.2	Καταστάσεις ισορροπίας ελάσματος	7
2.2.1	Μέθοδος ισορροπίας	9
2.2.2	Ενεργειακή μέθοδος	12
2.2.3	Δυναμική μέθοδος	13
2.2.4	Εφαρμογή σε ορθογώνιο έλασμα	13
2.2.5	Λυγισμός λόγω διατμητικών τάσεων	19
2.2.6	Λυγισμός ενισχυμένου ελάσματος	22
2.3	Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	25
3	Επιθέματα.....	27
3.1	Συστατικά ενίσχυσης.....	27
3.1.1	Ίνες Γυαλιού	29
3.1.2	Ίνες άνθρακα	29
3.1.3	Οργανικές ίνες	30
3.1.4	Επιπρόσθετες κατηγορίες ινών.....	30
3.2	Συνδετικό Υλικό – Μήτρα	31
3.2.1	Θερμοπλαστικές μήτρες.....	32
3.2.2	Θερμοσκληρυνόμενες μήτρες	32
3.3	Μέθοδοι εφαρμογής επιθεμάτων	35
3.3.1	Χειροποίητη επάλειψη	35
3.3.2	Κενού.....	35
3.3.3	Έγχυση ρητίνης	35
3.3.4	Προ – εμποτισμένα επιθέματα	36
3.3.5	Παρατηρήσεις.....	36
3.4	Μηχανισμοί αστοχίας επιθεμάτων.....	36
3.5	Μοντελοποίηση σύνθετων υλικών.....	37
4	Μοντελοποίηση του προβλήματος	39
4.1	Εισαγωγή.....	39
4.2	Διεθνής Νομοθεσία	39
4.3	Αιτία φαινομένου λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες ελάσματος του καταστρώματος πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην	40

4.4	Σύστημα συντεταγμένων.....	43
4.5	Σχεδιασμός μοντέλου.....	44
4.6	Υπολογιστικό πλέγμα.....	54
4.6.1	Περιγραφή τύπου στοιχείων πλέγματος.....	56
4.6.2	Χαρακτηριστικά πλέγματος.....	58
4.7	Υλικά	60
4.7.1	Κοινός ναυπηγικός χάλυβας	60
4.7.2	Σύνθετο υλικό επιθεμάτων.....	61
4.8	Μοντελοποίηση σύνθετων υλικών.....	62
4.8.1	Ανάλυση περιπτώσεων	63
4.8.2	Μορφή πεπερασμένων στοιχείων σύνθετων υλικών.....	69
4.9	Υπολογισμός φορτίων και παραδοχές	74
4.9.1	Πιέσεις εξωτερικής επιφάνειας κελύφους.....	78
4.9.2	Υπολογισμός εσωτερικών πιέσεων λόγω ύπαρξης φορτίου.....	85
4.10	Στήριξη μοντέλου	98
5	Επίλυση προβλήματος και αποτελέσματα.....	101
5.1	Προσομοίωση προβλήματος χωρίς την εφαρμογή επιθέματος	102
5.2	Έλεγχος ορθότητας ορισμού προβλήματος	108
5.3	Συγκριτική αξιολόγηση συντελεστή κρίσιμου φορτίου για τις διάφορες περιπτώσεις επιθεμάτων	108
5.3.1	Επιθέματα με $SR = 0.25$	108
5.3.2	Επιθέματα με $SR = 0.50$	113
5.3.3	Επιθέματα με $SR = 1.00$	116
5.4	Συνοπτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων	119
6	Συμπεράσματα	123
7	Βιβλιογραφία.....	127

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2-1:	Καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις σε επίπεδο έλασμα στο οποίο ασκείται καταναμημένο φορτίο στην πάνω επιφάνεια (Ventsel & Krauthammer, 2001).....	10
Σχήμα 2-2:	Κάτοψη επίπεδης πλάκας μήκους a και πλάτους b στην οποία ασκούνται θλιπτικά φορτία q_x	14
Σχήμα 2-3:	Μεταβολή της παραμέτρου λυγισμού K για διάφορες τιμές του λόγου $\varphi = a / b$ των πλευρών της πλάκας (Ventsel & Krauthammer, 2001).....	16
Σχήμα 2-4:	Κάτοψη επίπεδης πλάκας διαστάσεων a και b στην οποία ασκούνται θλιπτικά φορτία, με μία ακμή πακτωμένη, δύο ακμές με απλή στήριξη και μια ακμή ελεύθερη.....	17
Σχήμα 2-5:	Μεταβολή της παραμέτρου λυγισμού K συναρτήσει του λόγου a / b για διάφορους τρόπους στήριξης της πλάκας (Ventsel & Krauthammer, 2001).....	18
Σχήμα 2-6:	Κάτοψη επίπεδης πλάκας μήκους a και πλάτους b στην οποία ασκούνται διατμητικά φορτία $\tau_{xy} = \tau_{yx}$	19
Σχήμα 2-7:	Ενισχυμένο έλασμα το οποίο υπόκεινται σε διαμήκη φόρτιση.....	23
Σχήμα 2-8:	Πραγματικό διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης (α) και μοντελοποίηση του φαινομένου με γραμμική ανάλυση και μη γραμμική ανάλυση (ANSYS Inc., 2014).	26
Σχήμα 3-1:	Κατάταξη υλικού μήτρας, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).....	31
Σχήμα 4-1:	Σήμια εμφάνισης λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες καταστρώματος σε πλοία Χύδην Φορτίου(IACS, 2007).	41
Σχήμα 4-2:	Αναπαράσταση ρόθς τάσεων στο έλασμα του καταστρώματος σε κατάστασεις διαμήκους κάμψης(Getz, 1971)	42
Σχήμα 4-3:	Ορισμός των αξόνων x , y και z καθώς και της φοράς αυτών σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).....	43
Σχήμα 4-4:	Άποψη χώρου φορτίου σε ένα τυπικό bulk carrier (Hughes, 1988).....	44
Σχήμα 4-5:	Ισομετρική άποψη του μοντέλου που αναπτύχθηκε	46
Σχήμα 4-6:	Κάτοψη της εγκάρσιας διασταυρούμενης λωρίδας καταστρώματος και αναπαράσταση του σημείου εφαρμογής του επιθέματος	47
Σχήμα 4-7:	Απεικόνιση διαμήκων ενισχυτικών στο έλασμα του καταστρώματος σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου.....	48
Σχήμα 4-8:	Απεικόνιση του πάχους των μπρακέτων στήριξης της εγκάρσιας λωρίδας καταστρώματος αλλά και της εγκάρσιας φρακτής της ανώτερης ενίσχυσης της φρακτής.....	49

Σχήμα 4-9:	Απεικόνιση πάχους ελασμάτων εγκάρσιας ενίσχυσης της ανώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος και της ανώτερης ενίσχυσης της κυματοειδούς φρακτής.....	49
Σχήμα 4-10:	Αναπαράσταση των διαμήκων στηριγμάτων της διασταυρούμενης λωρίδας καταστρώματος	50
Σχήμα 4-11:	Κυματοειδής φρακτή μοντέλου με ανώτερη και κατώτερη πλευρική ενίσχυση.....	51
Σχήμα 4-12:	Κατώτερη ενίσχυση κυματοειδούς φρακτής	51
Σχήμα 4-13:	Κατώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος	52
Σχήμα 4-14:	Ανώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος.....	53
Σχήμα 4-15:	Δεξαμενή διπυθμένου.....	54
Σχήμα 4-16:	Απεικόνιση δισδιάστατων στοιχείων (ελάσματα) καθώς και μονοδιάστατων (ενισχυτικά).....	55
Σχήμα 4-17:	Απεικόνιση πλέγματος δισδιάστατων και μονοδιάστατων στοιχείων	56
Σχήμα 4-18:	Οπτική αναπαράσταση του δισδιάστατο στοιχείου SHELL 181 όπως μοντελοποιείται στο λογισμικό ANSYS(ANSYS Inc., 2014).....	57
Σχήμα 4-19:	Οπτική αναπαράσταση του μονοδιάστατου στοιχείου Beam 188 όπως μοντελοποιείται στο λογισμικό ANSYS(ANSYS Inc., 2014).....	57
Σχήμα 4-20:	Απεικόνιση της σφαιρικής ζώνης υψηλότερης πυκνότητας του πλέγματος	59
Σχήμα 4-21:	Απεικόνιση πλέγματος ελάσματος εγκάρσιας λωρίδας καταστρώματος	60
Σχήμα 4-22:	Αναπαράσταση 10 στρώσεων πάχους 0,68 mm και προσανατολισμού ινών 0° για επίθεμα με SR 0.25	64
Σχήμα 4-23:	Αναπαράσταση 10 στρώσεων πάχους 0,68 mm και προσανατολισμού ινών 90° για επίθεμα με SR 0.25	65
Σχήμα 4-24:	Αναπαράσταση 8 στρώσεων πάχους 0,85 mm και προσανατολισμού ινών 0° και 90° για επίθεμα με SR 0.25.....	65
Σχήμα 4-25:	Αναπαράσταση 8 στρώσεων πάχους 0,85 mm και προσανατολισμού ινών 45° και -45° για επίθεμα με SR 0.25.....	66
Σχήμα 4-26:	Αναπαράσταση 12 στρώσεων πάχους 0,57 mm και προσανατολισμού ινών 60°, 0° και -60° για επίθεμα με SR 0.25	66
Σχήμα 4-27:	Αναπαράσταση 8 στρώσεων πάχους 0,85 mm και προσανατολισμού ινών 0°, 45°, -45° και 90° για επίθεμα με SR 0.25	67
Σχήμα 4-28:	Απεικόνιση με του προσανατολισμού των ινών για κάθε μια από τις περιπτώσεις που εξετάζεται με τη βοήθεια διανυσμάτων	69
Σχήμα 4-29:	Προεπιλεγμένη προσομοίωση πάχους δισδιάστατων στοιχείων στο λογισμικό Ansys	70

Σχήμα 4-30:	Απεικόνιση διάταξης στοιχείων αναφορικά με την επιφάνεια σχεδίασης για τα στοιχεία του ελάσματος του καταστρώματος	70
Σχήμα 4-31:	Αναπαράσταση στοιχείων του καταστρώματος που θα τοποθετηθεί το επίθεμα	71
Σχήμα 4-32:	Αναπαράσταση τοπικού συστήματος συντεταγμένων για τα πεπερασμένα στοιχεία του επιθέματος	72
Σχήμα 4-33:	Απεικόνιση του πάχους του ελάσματος και του πάχους των στρώσεων του επιθέματος με τα αντίστοιχα πάχη με $SR = 0.50$	73
Σχήμα 4-34:	Αναπαράσταση φοράς εναπόθεσης χάλυβα και επιθέματος στο κατάστρωμα	74
Σχήμα 4-35:	Ορισμός κοιλάδας και κορυφής κύματος για τις περιπτώσεις EDW “H” και EDW “F” (IACS, 2014).	75
Σχήμα 4-36:	Ορισμός των κινήσεων του πλοίου ανάλογα με τη φορά πρόσπτωσης του κυματισμού (IACS, 2014)	75
Σχήμα 4-37:	Κατανομή υδροστατικής πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους(IACS, 2014).....	78
Σχήμα 4-38:	Αναπαράσταση της κατανομής της πίεσης λόγω δυναμικών πιέσεων των κυμάτων στις πλευρές του πλοίου για τις καταστάσεις τύπου “P” σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς του IACS (IACS, 2014).	79
Σχήμα 4-39:	Αναπαράσταση της κατανομής της πίεσης λόγω δυναμικών κυμάτων και η σχετική διορθωτικοί συντελεστές (IACS, 2014).....	81
Σχήμα 4-40:	Μοντελοποίηση κατανομής δυναμικής πίεσης και στις δύο πλευρές του πλοίου	83
Σχήμα 4-41:	Κατανομή υδροστατική πίεσης στο εξωτερικό κέλυφος και στις δύο πλευρές του πλοίου	84
Σχήμα 4-42:	Αναπαράσταση των μεγεθών h_C , h_0 , h_{HPU} και S_0 σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης του χώρου φορτίου σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).....	88
Σχήμα 4-43:	Αναπαράσταση των μεγεθών h_C , h_1 , h_2 , h_{HPL} , ψ , B_H , και b_{IB} σε κατάσταση μερικής φόρτωσης του χώρου φορτίου σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).	89
Σχήμα 4-44:	Σχηματική αναπαράσταση των θλιπτικών δυνάμεων που παρουσιάζονται στις εγκάρσιες λωρίδες καταστρώματος λόγω της ύπαρξης φορτίου στο κύτος(IACS, 1997).....	92
Σχήμα 4-45:	Σχηματική αναπαράσταση των πιέσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του κύτους λόγω ύπαρξης ξηρού φορτίου κατά την πλήρη φόρτωση του κύτους.....	93

Σχήμα 4-46:	Κατανομή της πίεσης στην εσωτερική επιφάνεια του διπυθμένου λόγω της ύπαρξης φορτίου σε MPa.....	94
Σχήμα 4-47:	Κατανομή πίεσης στις κατώτερες πλευρικές δεξαμενές έρματος του από την πλευρά του φορτίου σε MPa	94
Σχήμα 4-48:	Κατανομή πίεσης στην εσωτερική πλευρά του πλοίου σε MPa.....	95
Σχήμα 4-49:	Κατανομή της πίεσης στις δεξαμενές του διπυθμένου σε MPa.....	96
Σχήμα 4-50:	Κατανομή της πίεσης εσωτερικά της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής διπυθμένου σε MPa.....	96
Σχήμα 4-51:	Κατανομή των πιέσεων στο εσωτερικό των ανώτερων πλευρικών δεξαμενών σε MPa	97
Σχήμα 4-52:	Σημεία εφαρμογής πάκτωσης στο μοντέλο στα πλαίσια της στήριξης – Πρωραίο άκρη	99
Σχήμα 4-53:	Σημεία εφαρμογής της πάκτωσης στο μοντέλο στα πλαίσια της πάκτωσης – πρυμναία άκρη	99
Σχήμα 5-1:	Απεικόνιση ολικής παραμόρφωσης λόγω λυγισμού στην εγκάρσια λωρίδα καταστρώματος σε μοντέλο χωρίς επίθεμα	102
Σχήμα 5-2:	Αποτελέσματα παραμορφώσεων για κατάσταση λυγισμού καταστρώματος εγκάρσιων λωρίδων – κάτοψη καταστρώματος.....	103
Σχήμα 5-3:	Υπό κλίμακα αναπαράσταση κυματοειδής κατάστασης λυγισμού στην επιφάνεια του καταστρώματος.....	104
Σχήμα 5-4:	Αναπαράσταση παραμορφώσεων καταστρώματος στη διεύθυνση Z του πλοίου στην κατάσταση λυγισμού	105
Σχήμα 5-5:	Αναπαράσταση παραμορφώσεων καταστρώματος στη διεύθυνση Y του πλοίου στην κατάσταση λυγισμού	105
Σχήμα 5-6:	Αναπαράσταση παραμορφώσεων καταστρώματος στη διεύθυνση X του πλοίου στην κατάσταση λυγισμού	106
Σχήμα 5-7:	Αναπαράσταση διαγράμματος τάσεων Von-Mises για την κατάσταση λυγισμού χωρίς τοποθέτηση επιθέματος από σύνθετα υλικά.....	106
Σχήμα 5-8:	Αναπαράσταση των ορθών τάσεων στην περιοχή του ελάσματος των εγκάρσιων λωρίδων καταστρώματος στη διεύθυνση του άξονα Y.....	107
Σχήμα 5-9:	Αναπαράσταση των ορθών τάσεων στην περιοχή του ελάσματος των εγκάρσιων λωρίδων καταστρώματος στη διεύθυνση του άξονα X.....	107
Σχήμα 5-10:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με SR = 0.25 και προσανατολισμού ινών στις 0°	109
Σχήμα 5-11:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με SR = 0.25 και προσανατολισμού ινών στις 90°	109
Σχήμα 5-12:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με SR = 0.25 και προσανατολισμού ινών στις 0° και 90°	110

Σχήμα 5-13:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις $45^\circ, -45^\circ$	111
Σχήμα 5-14:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις $60^\circ, 0^\circ$ & -60°	112
Σχήμα 5-15:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ & 90°	113
Σχήμα 5-16:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.50$ και προσανατολισμού ινών στις 90°	114
Σχήμα 5-17:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.50$ και προσανατολισμού ινών στις 45° & -45°	115
Σχήμα 5-18:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.50$ και προσανατολισμού ινών στις $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ & 90°	116
Σχήμα 5-19:	Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 0°	117
Σχήμα 5-20:	Απεικόνιση λυγισμού ανώτερης ενίσχυσης εγκάρσιας φρακτής για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 0°	118
Σχήμα 5-21:	Απεικόνιση λυγισμού ανώτερης ενίσχυσης εγκάρσιας φρακτής για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 90°	118
Σχήμα 5-22:	Απεικόνιση λυγισμού ανώτερης ενίσχυσης εγκάρσιας φρακτής για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 0° και 90°	119
Σχήμα 5-23:	Διάγραμμα ποσοστιαίας αύξησης του συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού για κάθε περίπτωση και για κάθε SR	121

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 3-1: Μηχανισμοί αστοχίας επιθεμάτων.....	36
Πίνακας 4-1: Κατασκευαστικά στοιχεία στην περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος	48
Πίνακας 4-2: Βασικά χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος.....	58
Πίνακας 4-3: Βασικές επιλογές κατά τη δημιουργία πλέγματος.....	59
Πίνακας 4-4: Ιδιότητες ναυπηγικού χάλυβα(ANSYS Inc., 2014).....	61
Πίνακας 4-5: Ιδιότητες ινών άνθρακα(Katalinic, et al.)	62
Πίνακας 4-6: Παρουσίαση περιπτώσεων πάχους και προσανατολισμού των επιθεμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος.....	63
Πίνακας 4-7: Ορισμός των συνθηκών φόρτισης, σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς για Πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων του IACS(IACS, 2007).	76
Πίνακας 4-8: Πίνακας τιμών μεταβλητών για τον υπολογισμό των εξωτερικών δυναμικών πιέσεων λόγω κυμάτων στις πλευρές του πλοίου.	82
Πίνακας 4-9: Πυκνότητα φορτίου σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).	85
Πίνακας 4-10: Παρουσίαση μεταβλητών απαραίτητων για τον υπολογισμό των εσωτερικών πιέσεων λόγω φορτίου	87
Πίνακας 4-11: Αποτελέσματα υπολογισμού πιέσεων λόγω ύπαρξης ξηρού χύδην φορτίου στο κύτος.....	90
Πίνακας 4-12: Μετατοπίσεις και περιστροφές ως προς του άξονες x, y και z στους κόμβους πάκτωσης του μοντέλου	98
Πίνακας 5-1: Αύξηση συντελεστή κρίσιμου φορτίου λ με μείωση του εφαρμοσμένου φορτίου.....	108
Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού λ για επιθέματα με $SR = 0.50$	114
Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού λ για επιθέματα με $SR = 1.00$	116
Πίνακας 5-4: Συνοπτικός πίνακας τιμών συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού λ για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε και για κάθε SR	120

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Ειδίκευσης «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη». Στην εργασία εξετάζεται η χρήση υλικών νέας τεχνολογίας για την επίλυση προβλημάτων λυγισμού σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων μέσω του εμπορικού λογισμικού Ansys. Παράλληλα γίνεται παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου του λυγισμού και των διαθέσιμων υλικών ώστε να είναι κατανοητή στον αναγνώστη η συνέχεια της εργασίας.

Στο πλαίσιο της μελέτης πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση του προβλήματος ορίζοντας οριακές συνθήκες που πλησιάζουν όσο το δυνατόν τις πραγματικές συνθήκες επί του πλοίου. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε για διάφορες περιπτώσεις επιθεμάτων με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν το υπό εξέταση φαινόμενο. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν ήταν ενθαρρυντικά όσον αφορά την αύξηση της αντοχής του ελάσματος έναντι λυγισμού με τη χρήση επιθεμάτων.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο για τη διπλωματική εργασία Καθηγητή της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. Νικόλαο Τσούβαλη για την μεγάλη κατανόηση που επέδειξε όλον τον καιρό της συνεργασίας μας αλλά και το γεγονός ότι προσέφερε τη βοήθεια του άμεσα, όποτε, και σε κάθε σημείο που τη ζητούσα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Καθηγητή του Τ.Ε.Ι. της Αθήνας του Τμήματος Ναυπηγών Αλέξανδρο Θεοδουλίδη ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να εργαστώ σε συναφές ερευνητικό έργο, καθοδηγώντας με σημαντικά στα πρώτα βήματα της μελέτης. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Χρήστο Σαββόγλου επιθεωρητή του Lloyd's Register στο τμήμα Αντοχής Ναυπηγικών Κατασκευών για τις συμβουλές που μου παρείχε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

1 Εισαγωγή

Ο λυγισμός είναι ένα ανεπιθύμητο και επικίνδυνο φαινόμενο για κάθε παραμορφώσιμο στερεό. Ένα τέτοιο φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα τόσο σε ακραίες περιπτώσεις που η κατασκευή καταρρέει, όσο και σε επαναλαμβανόμενες καταστάσεις που προκαλείται κόπωση του υλικού και κατά συνέπεια δημιουργία ρωγμών και αστοχίας. Η αστοχία που προκύπτει, δεν οφείλεται σε υπέρβαση της αντοχής του υλικού αλλά σε απώλεια της ευστάθειάς του. Συνεπώς η πρόβλεψη του φαινομένου απαιτεί εξειδικευμένη μελέτη έτσι ώστε να προληφθεί μια μη επιθυμητή κατάσταση.

Οι ναυπηγικές κατασκευές αντιμετωπίζουν σήμερα πολλές περιπτώσεις λυγισμού. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός¹ αλλά και ο IACS² έχουν εκδώσει οδηγίες και κανονισμούς έτσι ώστε να ελέγχεται κάθε κατασκευή έναντι λυγισμού, στα διάφορα ευαίσθητα σημεία. Τα σημεία αυτά είτε είναι προφανή, όπως για παράδειγμα μια κολώνα στήριξης του καταστρώματος, είτε εντοπίζονται εκ του αποτελέσματος, με εμφάνιση αστοχίας και ρωγμών σε διάφορα σημεία της κατασκευής. Ο λυγισμός μπορεί να εμφανιστεί στα διάφορα ενισχυτικά του πλοίου αλλά και σε κάθε λεπτότοιχη κατασκευή.

Οι κατασκευαστές έχουν προσπαθήσει να αποτρέψουν την εμφάνιση του λυγισμού προτείνοντας λύσεις όπως αύξηση της ενίσχυσης ή ακόμα και αλλαγή της γεωμετρίας της κατασκευής έτσι ώστε να αποφεύγονται μη επιθυμητές φορτίσεις. Ένα σημείο στο οποίο έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο του λυγισμού είναι το έλασμα των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος ανάμεσα στα στόμια των κυτών σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου. Το έλασμα στα σημεία αυτά υπόκειται σε θλιπτικά ομοεπίπεδα φορτία προερχόμενα από εγκάρσιες θαλάσσιες φορτίσεις στις πλευρές του πλοίου αλλά και από στρεπτικές φορτίσεις της ναυπηγικής κατασκευής λόγω του θαλάσσιου κυματισμού. Αν και η διαμήκης θλίψη του καταστρώματος εξαιτίας καταστάσεων sagging του πλοίου οδηγεί στην ανάπτυξη πολύ υψηλών θλιπτικών τάσεων στο έλασμα του καταστρώματος, στην περίπτωση ενός πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην, περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό στην περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων, λόγω της ύπαρξης των στομιών των κυτών. Για το λόγο αυτό, η διαμήκης κάμψη του πλοίου δεν λαμβάνεται υπόψη στα πλαίσια της μελέτης που θα ακολουθήσει. Αντίθετα, οι δυναμικές πιέσεις στις πλευρές του πλοίου, λόγω της έντονης πλευρικής κρούσης των θαλάσσιων κυμάτων, οδηγούν σε εμφάνιση λυγισμού στις περιοχές των εγκάρσιων λωρίδων ενώ η στρεπτική καταπόνηση αμελείται. Ο λυγισμός που εμφανίζεται αν και ελάχιστος, λόγω της συχνότητας εμφάνισής του, προκαλεί κόπωση στο υλικό και αστοχία με την πάροδο του χρόνου.

Στα πλαίσια αυτού του προβλήματος έχει πραγματοποιηθεί προσπάθεια από τους κατασκευαστές ώστε να ενισχυθεί η ναυπηγική κατασκευή στα σημεία αυτά. Η χρήση επιπρόσθετων ενισχυτικών αποτελεί μια λύση, ωστόσο σε περίπτωση που το πλοίο είναι ήδη υπάρχον, απαιτείται μια εκτενής, μακροχρόνια και μεγάλου κόστους μετασκευή. Ακόμα δυσκολότερος, αν όχι αδύνατος, σε ήδη υπάρχοντα πλοία είναι ο επανασχεδιασμός του καταστρώματος και δη της εγκάρσιας τομής του πλοίου, έτσι ώστε απορροφάται η ενέργεια των φορτίων της θάλασσας και να μην καταπονείται σε μεγάλο βαθμό η μεταλλική κατασκευή του πλοίου.

¹ IMO

² Διεθνής Ένωση Νηογνωμόνων (International Association of Classification Societies)

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί η εφαρμογή επιθεμάτων από σύνθετα υλικά στις επιφάνειες του καταστρώματος έτσι ώστε να περιοριστεί το φαινόμενο του λυγισμού και να αποφευχθούν οι εκτεταμένες μετασκευές και το μεγάλο κόστος. Για τη μελέτη θα χρησιμοποιηθεί μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων με το οποίο θα ελεγχθεί η επίδραση των επιθεμάτων στο κατάστρωμα έναντι θαλάσσιων φορτίσεων. Η μοντελοποίηση θα εξετάσει διαφορετικές περιπτώσεις τοποθέτησης με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση διαφορετικών επιθεμάτων αλλά και να βρεθεί και μια βέλτιστη λύση.

Με γνώμονα την πληρότητα της εργασίας αλλά και την ενημέρωση του αναγνώστη στα σχετικά θέματα, πραγματοποιείται αρχικά μια ανασκόπηση της θεωρίας του λυγισμού. Αναλύονται τα βασικά τμήματα της θεωρίας του λυγισμού τόσο σε ελάσματα όσο και σε ενισχυμένα ελάσματα έτσι ώστε να τεθούν οι βάσεις για ανάλυση των αποτελεσμάτων που έπονται.

Όπως γίνεται αντιληπτό στις συγκεκριμένες παραγράφους, βασικό κριτήριο σε ένα πρόβλημα μελέτης του λυγισμού είναι ο υπολογισμός του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Ως κρίσιμο φορτίο ορίζεται το φορτίο εκείνο το οποίο αν και πολύ μικρότερο από την αντοχή του υλικού, οδηγεί σε αστάθεια, υπέρμετρες παραμορφώσεις και κατάρρευση της κατασκευής. Για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου ακολουθούνται τρεις μέθοδοι. Η μέθοδος της ισορροπίας, η ενεργειακή μέθοδος και η δυναμική μέθοδος. Ακολουθεί εφαρμογή της θεωρίας επίλυσης ενός προβλήματος ορθογώνιου ελάσματος έτσι ώστε να σχηματιστεί μια θεωρητική σχέση πλησιέστερα στο πρόβλημα που εξετάζεται. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται μια προσπάθεια υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου λυγισμού σε ένα ενισχυμένο έλασμα. Τέλος αναφορικά με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο της μοντελοποίησης ενός φαινομένου λυγισμού με τη χρήση του λογισμικού που θα χρησιμοποιηθεί και συγκεκριμένα του λογισμικού Ansys.

Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τα είδη των διαθέσιμων σύνθετων υλικών στις μέρες μας, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που διέπει η χρήση τους. Γίνεται μια σύντομη περιγραφή των συστατικών ενίσχυσης, των συνδετικών υλικών αλλά και των διάφορων μεθόδων εφαρμογής αυτών. Επίσης περιγράφονται εν συντομία βασικοί μηχανισμοί αστοχίας των επιθεμάτων ενώ τέλος παρουσιάζεται η θεωρητική προσέγγιση μοντελοποίησης των επιθεμάτων με τη βοήθεια του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί. Στο σημείο αυτό της εργασίας τελειώνει και το θεωρητικό μέρος.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη μελέτη του προβλήματος και την αριθμητική επίλυση με τη βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων, είναι η σωστή μοντελοποίηση. Αρχικά παρουσιάζεται η Διεθνής Νομοθεσία που τεκμηριώνει την ύπαρξη και τα αίτια του προβλήματος λυγισμού του καταστρώματος ενώ τίθεται ένα σύστημα αναφοράς σύμφωνα με τη Διεθνή Νομοθεσία έτσι ώστε να διευκολυνθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που θα ακολουθήσει. Στη συνέχεια γίνεται περιγραφή του μοντέλου που αναπτύχθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Design Modeller καθώς και των παραδοχών που ελήφθησαν με σκοπό την απλοποίηση του προβλήματος διατηρώντας παράλληλα την ακρίβεια του αποτελέσματος.

Όπως σε κάθε πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων, η ανάπτυξη του υπολογιστικού πλέγματος αποτελεί ιδιαίτερο μέρος της επίλυσης. Στο σημείο αυτό πραγματοποιείται περιγραφή των εργαλείων αλλά και των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για το σκοπό αυτό. Παρουσιάζονται μεταξύ άλλων τα διάφορα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή

των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο με μεγαλύτερη έμφαση να δίνεται στη μοντελοποίηση των σύνθετων υλικών.

Η παραμετροποίηση της μελέτης αποσκοπεί στον έλεγχο της επίδρασης του προσανατολισμού των ινών του επιθέματος αλλά και της επίδρασης που έχει η επιλογή του πάχους του. Η διερεύνηση του προβλήματος περιλαμβάνει 6 διαφορετικές περιπτώσεις προσανατολισμού των ινών καθώς και 3 διαφορετικά πάχη επιθεμάτων. Για τη μοντελοποίηση των επιθεμάτων από τα σύνθετα υλικά γίνεται χρήση του λογισμικού Ansys ACP.

Το σχεδιασμό του μοντέλου και την κατασκευή του πλέγματος ακολουθεί ο υπολογισμός των διάφορων φορτίσεων της κατασκευής. Αρχικά λαμβάνοντας υπόψη τους διεθνείς κανονισμούς, υπολογίζονται οι πιέσεις στις εξωτερικές επιφάνειες του κελύφους του πλοίου. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τους ίδιους τους κανονισμούς υπολογίζονται και οι εσωτερικές πιέσεις στις δεξαμενές έρματος αλλά και στους χώρους φορτίου του πλοίου. Σκοπός των φορτίσεων είναι να πλησιάσουν όσο το δυνατόν περισσότερο μια πραγματική κατάσταση φόρτωσης έτσι ώστε να μελετηθεί η απόκριση της κατασκευής. Ο ορισμός των οριακών συνθηκών τελειώνει με τον ορισμό των στηρίξεων του μοντέλου. Η επιλογή των σημείων στήριξης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην αλλοιώνει τα αποτελέσματα και να πλησιάζει την πραγματική κατάσταση.

Τον ορισμό όλων των συνθηκών του προβλήματος θα ακολουθήσει η επίλυση του προβλήματος για κάθε μία από τις περιπτώσεις που έχουν παρουσιαστεί. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα πρέπει αρχικά να επιβεβαιώνουν την ύπαρξη του φαινομένου του λυγισμού στο έλασμα του καταστρώματος των εγκάρσιων λωρίδων ανάμεσα στα στόμια των κυτών του πλοίου. Κατά δεύτερον, θα πρέπει να διαπιστωθεί εάν και πόσο η ύπαρξη επιθεμάτων από σύνθετα υλικά επί του καταστρώματος βελτιώνει το φαινόμενο. Η απόδειξη αυτή θα προκύπτει από τη διαπίστωση ότι στην εκάστοτε περίπτωση που εξετάζεται, το κρίσιμο φορτίου λυγισμού αυξάνεται με την τοποθέτηση του επιθέματος.

2 Λυγισμός

2.1 Εισαγωγή

Η μεταλλική κατασκευή του πλοίου πρέπει να χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος κατασκευής και να είναι ασφαλής τόσο κατά τις φυσιολογικές συνθήκες υπηρεσίας του πλοίου όσο και σε περίπτωση ατυχήματος όπως λόγω χάρη πιθανή πρόσκρουση. Ο έλεγχος αντοχής του πλοίου περιλαμβάνει τον καθορισμό όλων των φορτίων που ασκούνται στο πλοίο έτσι ώστε να υπολογιστούν τα ελάχιστα επιτρεπτά όρια αντοχής των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου. Οι υπολογισμοί αυτοί είναι προϊόν συσσωρευμένης γνώσης και εμπειρίας από ομάδες ερευνητών, κατασκευαστών, πλοιοκτητών και νηογνώμωνων.

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται κατά την μελέτη αντοχής ενός πλοίου περιλαμβάνουν υπολογισμούς της διαμήκουσ και εγκάρσιας κάμψης και στρέψης του πλοίου καθώς και διάτμησης τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε καταστάσεις sagging και hogging σε κύμα. Στα φορτία που υπολογίζονται συμπεριλαμβάνεται το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, οι υδροστατικές και υδροδυναμικές πιέσεις του νερού, το βάρος του φορτίου καθώς και τοπικά φορτία λόγω του βάρους του μηχανολογικού εξοπλισμού και άλλων στοιχείων. Οι νηογνώμονες έχουν αναπτύξει ένα σύνολο κανονισμών που υπολογίζουν την κατασκευαστική ακεραιότητα.

Σκοπός της μελέτης αντοχής είναι ο έλεγχος της κατασκευής έναντι κάθε δύναμης, επιτάχυνσης και θερμοκρασιακής μεταβολής οι οποίες προκαλούν την εμφάνιση τάσεων και παραμορφώσεων. Οι φορτίσεις αυτές μπορεί να εμφανίζονται είτε κατά την κανονική λειτουργία είτε σε ακραίες συνθήκες.

Το φαινόμενο του λυγισμού θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στα στοιχεία του πλοίου τα οποία υπόκεινται σε θλιπτικές τάσεις έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλειά τους έναντι λυγισμού. Τέτοια στοιχεία περιλαμβάνουν κολώνες στήριξης του καταστρώματος, διαμήκη ενισχυτικά του πυθμένα και του καταστρώματος, ελάσματα του κελύφους και του καταστρώματος και πολλές φορές σημεία της κατασκευής που με τον καιρό έχουν παρουσιάσει φθορές που οφείλονται στις επιπτώσεις του λυγισμού.

Το πλοίο το οποίο μελετάται στη συγκεκριμένη εργασία είναι χύδην φορτίου. Είναι πλοίο μονού καταστρώματος και μονού κελύφους αν και υπάρχουν σήμερα και πλοία χύδην φορτίου δύο κελυφών. Το 40% του παγκοσμίου στόλου αποτελείται από πλοία τέτοιου τύπου και κυρίως μονού κελύφους. Σύμφωνα με τη SOLAS³, τα πλοία αυτά ορίζονται ως «πλοία κατασκευασμένα με ένα κατάστρωμα, ανώτερες και κατώτερες πλευρικές δεξαμενές στους χώρους φορτίου σχεδιασμένα έτσι ώστε να μεταφέρουν ξηρό χύδην φορτίο».

2.2 Καταστάσεις ισορροπίας ελάσματος

Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια προσπάθεια μελέτης και αποτελεσματικότερης αντιμετώπισης των φαινομένων του λυγισμού που παρουσιάζονται. Η μελέτη του φαινομένου σε θεωρητικό επίπεδο ανοίγει το δρόμο για εφαρμογή της σε μεθόδους πεπερασμένων

³ International Convention for the Safety of Life at Sea είναι η Διεθνής Σύμβαση για την Προστασία της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα.

στοιχείων που θα μπορέσουν να δώσουν λύση σε πολυδιάστατα προβλήματα και να βρουν άμεση εφαρμογή στη βιομηχανία.

Το φαινόμενο λυγισμού ενός κατασκευαστικού στοιχείου εμφανίζεται όταν αυτό υπόκειται σε θλιπτική φόρτιση σε φορτίο αρκετά χαμηλότερο από το σημείο διαρροής του υλικού. Το φορτίο στο οποίο εμφανίζεται το φαινόμενο είναι περισσότερο συνάρτηση της γεωμετρίας και του μέτρου ελαστικότητας του υλικού παρά της αντοχής του υλικού. Το πιο σύνηθες παράδειγμα λυγισμού είναι η κατάρρευση κολώνας κάτω από θλιπτικό φορτίο. Ωστόσο ένα έλασμα που υπόκεινται σε θλιπτική φόρτιση μπορεί εξίσου να καταρρεύσει σε φορτίο που είναι ανάλογο με το πάχος του ελάσματος, το ανυποστήρικτο μήκος, τις οριακές συνθήκες στήριξης και του μέτρου ελαστικότητας του υλικού (Eyres, 2007).

Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση ευστάθειας των ελασμάτων είναι ποιοτικά όμοια με τη θεωρία του Euler για την ανάλυση ευστάθειας κολώνας. Έστω ότι σε ένα ιδεατό, λεπτότοιχο, ελαστικό έλασμα το οποίο αρχικά εκτιμάται ότι είναι άκρως επίπεδο και ότι σε αυτό ασκούνται ομοεπίπεδες θλιπτικές και διατμητικές δυνάμεις με κατεύθυνση προς το κέντρο βάρους του ελάσματος. Η συγκεκριμένη αυτή φόρτιση οδηγεί στην εμφάνιση καμπτικών ή στρεπτικών ροπών καθώς και εγκάρσιων διατμητικών τάσεων με αποτέλεσμα να υπάρχει απουσία παραμορφώσεων του ελάσματος πέραν των ομοεπίπεδων ($u \neq 0$, $v \neq 0$ and $w = 0$).

Μια τέτοια φόρτιση αναφέρεται στη βιβλιογραφία (Ventsel & Krauthammer, 2001) ως αρχική ή επίπεδη διαμόρφωση ισορροπίας. Προκύπτει δηλαδή μια ισορροπία ανάμεσα στα εξωτερικά φορτία που ασκούνται και τις αναπτυσσόμενες τάσεις στο εσωτερικό των ελασμάτων. Ανάλογα με το μέγεθος των φορτίων που ασκούνται, η ισορροπία αυτή μπορεί να είναι ευσταθής ή ασταθής. Μια ισορροπία είναι ευσταθής όταν λόγω μιας απειροελάχιστης απόκλισης από το σημείο ισορροπίας, λόγω κάποιας μικρής για παράδειγμα πλευρικής δύναμης, το παραμορφωμένο έλασμα θα τείνει να επανέλθει στην αρχική του παραμόρφωση. Αντίστροφα μια ισορροπία είναι ασταθής όταν μια ίδια μικρή δύναμη θα οδηγήσει σε ακόμα επιπρόσθετη παραμόρφωση ακόμα και όταν το φορτίο αφαιρεθεί. Σε περίπτωση που το έλασμα παραμείνει στην παραμορφωμένη κατάσταση αφού αφαιρεθεί το επιπρόσθετο φορτίο και δεν οδηγηθεί σε περεταίρω παραμόρφωση, τότε η ισορροπία θεωρείται ουδέτερη και κατά συνέπεια μια ουδέτερη ισορροπία δεν είναι ούτε ευσταθής ούτε ασταθής. (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, Theory of plates and Shells, 1989)

Η μετάβαση από την ευσταθή ισορροπία στην ασταθή ισορροπία αναφέρεται ως λυγισμός ή κατασκευαστική αστάθεια. Το ελάχιστο φορτίο που μπορεί να οδηγήσει σε ασταθή ισορροπία ονομάζεται κρίσιμο φορτίο ή φορτίο λυγισμού. Η έναρξη του φαινομένου εξαρτάται αρκετά από το αρχικό φορτίο έναρξης το οποίο σε περίπτωση που υπερβεί το κρίσιμο θα οδηγήσει γρήγορα σε ακόμα μεγαλύτερες παραμορφώσεις, σε μεγαλύτερες τάσεις και τελικώς σε αστοχία του υλικού. Ένα φορτίο που εκτρέπει το σώμα από την ευσταθή ισορροπία σε περίπτωση που αυξηθεί περεταίρω θα οδηγήσει το σώμα σε ασταθή ισορροπία. Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την μετάβαση από την ευσταθή κατάσταση στην ασταθή κατάσταση, το σώμα περνά και από την ουδέτερη κατάσταση ισορροπίας. Η ουδέτερη κατάσταση ισορροπίας συνδέεται με την ύπαρξη διφασικής παραμόρφωσης δηλαδή αποτελεί τη διαχωριστική γραμμή μεταξύ ευσταθούς και ασταθούς ισορροπίας. Συνεπώς, το κρίσιμο φορτίο λυγισμού μπορεί να αναγνωριστεί ως η διφασική κατάσταση κατά την οποία ευσταθής ισορροπία ή ασταθής ισορροπία μπορεί να επιτευχθεί (Ventsel & Krauthammer, 2001).

Σκοπός της ανάλυσης λυγισμού ελασμάτων και όχι μόνο, είναι η εκτίμηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Η ανάλυση που πραγματοποιείται διακρίνεται σε γραμμική και μη-

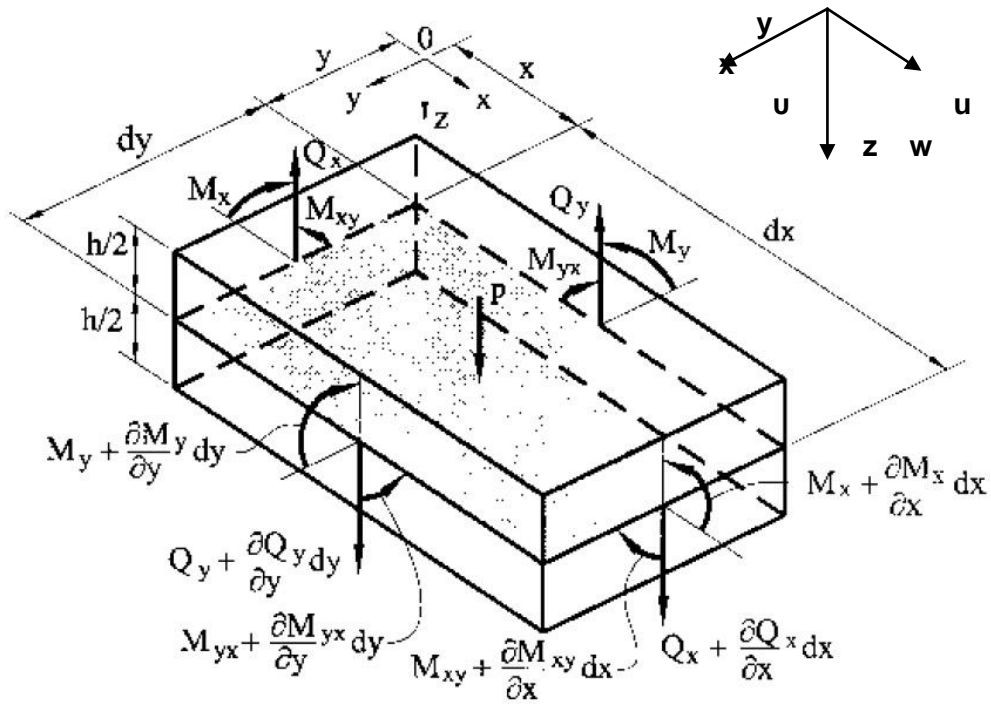
γραμμική. Η γραμμική ανάλυση περιλαμβάνει κάποιες παραδοχές οι οποίες πρέπει να ληφθούν (Ventsel & Krauthammer, 2001):

- Πριν τη φόρτιση, το έλασμα είναι ιδανικά επίπεδο και όλα τα εξωτερικά φορτία ασκούνται στο μέσο επίπεδο του ελάσματος.
- Οι τάσεις που αναπτύσσονται περιγράφονται από εξισώσεις επίπεδης γραμμικής ελαστικότητας και κάθε αλλαγή στις διαστάσεις του ελάσματος πριν το λυγισμό αμελείται.
- Κάθε φορτίο που ασκείται στο έλασμα θεωρείται ότι δεν αλλάζει μέγεθος και φορά κατά τη διάρκεια του φαινομένου.
- Η κάμψη του ελάσματος περιγράφεται από τη σχετική θεωρία του Kirchhoff.

Η γραμμική ανάλυση δίνει τη δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού του κρίσιμου φορτίου λυγισμού ωστόσο δε δίνει καμία πληροφορία για τη συμπεριφορά του ελάσματος έπειτα. Οι μετέπειτα καταστάσεις περιγράφονται από μη γραμμική ανάλυση. Στη γραμμική ανάλυση χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι υπολογισμού. Η μέθοδος ισορροπίας, η ενεργειακή και η δυναμική. Στη συνέχεια παρατίθενται διάφορες μέθοδοι ανάλυσης του φαινομένου του λυγισμού σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Ventsel & Krauthammer, 2001). Η περιγραφή θα είναι αρκετά συνοπτική και σκοπό έχει να εντάξει τον αναγνώστη στη φιλοσοφία επίλυσης του προβλήματος του λυγισμού.

2.2.1 Μέθοδος ισορροπίας

Η μέθοδος ισορροπίας βασίζεται στην βασική εξίσωση παραμόρφωσης ελάσματος όπως διατυπώνεται από τη θεωρία κάμψης ελάσματος του Kirchhoff. Στο σημείο αυτό για να γίνει πιο κατανοητή η περιγραφή του φαινομένου θα διατυπωθούν κάποια θεωρητικά στοιχεία σχετικά με τη σχέση που υπάρχει μεταξύ των καμπτικών ροπών και των διατμητικών δυνάμεων με τις αναπτυσσόμενες τάσεις έτσι ώστε ο συλλογισμός να καταλήξει στη βασική εξίσωση που περιγράφει την παραμόρφωση του ελάσματος. Η επίλυση της εξίσωσης αυτής, με τις κατάλληλες οριακές συνθήκες θα οδηγήσει στον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού (Timoshenko & Goodier, Theory of Elasticity, 1951). Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει το σύστημα αναφοράς καθώς και τις καμπτικές και διατμητικές δυνάμεις που εμφανίζονται σε ένα επίπεδο έλασμα στο οποίο ασκείται ένα κατανεμημένο φορτίο στη μία του επιφάνεια.



Σχήμα 2-1: Καμπτικές ροπές και διατμητικές δυνάμεις σε επίπεδο έλασμα στο οποίο ασκείται καταναμημένο φορτίο στην πάνω επιφάνεια (Ventsel & Krauthammer, 2001)

Σε ένα έλασμα με το σύστημα συντεταγμένων όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-1, οι καμπτικές ροπές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$M_x = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.1)$$

$$M_y = -D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.2)$$

$$M_{xy} = -D(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \quad (2.3)$$

Όπου:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \quad (2.4)$$

Οι διατμητικές δυνάμεις μπορούν να εκτιμηθούν με βάση τις καμπτικές ροπές.

$$Q_x = \frac{\partial M_x}{\partial x} + \frac{\partial M_{xy}}{\partial y} \quad (2.5)$$

$$Q_y = \frac{\partial M_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial M_y}{\partial y} \quad (2.6)$$

Θεωρώντας ότι $M_{xy} = M_{yx}$ και κάνοντας τις κατάλληλες αντικαταστάσεις προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (2.7)$$

Πρόκειται για τη βασική διαφορική εξίσωση για την παραμόρφωση λεπτότοιχου ελάσματος λόγω κάμψης σύμφωνα με τον Kirchhoff. Με τον υπολογισμό της παραμόρφωσης $w(x,y)$ επιλύοντας τη συγκεκριμένη εξίσωση, προκύπτουν και οι καμπτικές καθώς και οι διατμητικές δυνάμεις. Κατά συνέπεια είναι δυνατός και ο υπολογισμός των τάσεων σε απόσταση z από το ενδιάμεσο επίπεδο.

$$\sigma_x = \pm \frac{12M_x}{h^3} z \quad (2.8)$$

$$\sigma_y = \pm \frac{12M_y}{h^3} z \quad (2.9)$$

$$\tau_{xy} = \pm \frac{12M_{xy}}{h^3} z \quad (2.10)$$

Αν υποθέσουμε ότι στο έλασμα ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις N_x, N_y και N_{xy} πέρα από τις πλευρικό φορτίο p τότε η θεμελιώδης εξίσωση κάμψης από τη βασική εξίσωση (2.7) θα λάβει τη μορφή:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(p + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.11)$$

Θεωρώντας ότι τα πλευρικά φορτία και τα ομοεπίπεδα εξωτερικά φορτία N_x, N_y και N_{xy} είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και στα πλαίσια της γραμμικής ανάλυσης λυγισμού τα πλευρικά φορτία τίθενται ίσα με μηδέν. Επομένως η εξίσωση που περιγράφει το γραμμικό λυγισμό γίνεται η ακόλουθη.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.12)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι ομογενής διαφορική εξίσωση η οποία επιλύεται κάνοντας τις αντικαταστάσεις

$$N_x = -\lambda \bar{N}_x, N_y = -\lambda \bar{N}_y \text{ και } N_{xy} = -\lambda \bar{N}_{xy} \quad (2.13)$$

Προκύπτει

$$\nabla^4 w + \frac{\lambda}{D} \left(\overline{N}_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \overline{N}_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2\overline{N}_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (2.14)$$

Όπου

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial x^4} + \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \quad (2.15)$$

Η λύση της εξίσωσης (2.14) δίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες τις εκάστοτε περίπτωσης καθώς βάσει αυτών θα υπολογιστούν οι σταθερές που προκύπτουν από τη λύση. Λύνοντας την ιδιοσυνάρτηση της διαφορικής εξίσωσης ως προς λ θα υπολογίσουμε τις ιδιοτιμές $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ και κατά συνέπεια τις μερικές λύσεις της μερικής διαφορικής εξίσωσης και τη μη μηδενική γενική λύση αυτής. Ο μικρότερος μη μηδενικός αριθμός από αυτές τις ιδιοτιμές ονομάζεται κρίσιμος αριθμός λ_{cr} και οι αντίστοιχες μερικές λύσεις που προκύπτουν, θα αντιστοιχούν στις αντίστοιχες μορφές λυγισμού. Το κρίσιμο φορτίου λυγισμού υπολογίζεται στη συνέχεια πολλαπλασιάζοντας το λ_{cr} και το αντίστοιχο μέγεθος του φορτίου αναφοράς.

2.2.2 Ενεργειακή μέθοδος

Η ολική πιθανή ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα παραμορφώσιμο σώμα Π είναι άθροισμα της πιθανής ενέργειας που απαιτείται για παραμόρφωση U και της ολικής ενέργειας που αποθηκεύεται λόγω των δυνάμεων που ασκούνται πάνω στο σώμα Ω .

$$\Pi = U + \Omega \quad (2.16)$$

Αν θεωρηθεί ότι η ενέργεια στην αρχική μη παραμορφωμένη κατάσταση Π_0 είναι μηδενική, τότε η εξίσωση (2.16) αναπαριστά την κατανομή της ενέργειας καθώς το σώμα υπόκεινται σε εξωτερικές δυνάμεις και μεταβάλλεται από την αρχική κατάσταση στην παραμορφωμένη. Η συνολική ενέργεια είναι το σύνολο του έργου των εσωτερικών και των εξωτερικών δυνάμεων που χρειάζεται το σώμα για να μεταβεί από την παραμορφωμένη κατάσταση στην αρχική.

Οι εξωτερικές δυνάμεις που συμβολίζονται με Ω μπορούν να διαιρεθούν στις εξωτερικές πλευρικές δυνάμεις Ω_p και στις δυνάμεις που ασκούνται στις άκρες του ελάσματος Ω_r .

$$\Omega = \Omega_p + \Omega_r \quad (2.17)$$

Στην ενεργειακή μέθοδο επίλυσης του προβλήματος λυγισμού, η ευσταθής και ασταθής κατάσταση ισορροπίας εξετάζεται μέσω της ενέργειας που αποθηκεύεται στο σύστημα. Η ισορροπία θα είναι ευσταθής, όταν η πιθανή ενέργεια που αποθηκεύεται είναι ελάχιστη συγκριτικά με τις τιμές που θα είχε αν το σώμα βρισκόταν σε ισορροπία. Η ισορροπία είναι ασταθής αν η πιθανή ενέργεια είναι μέγιστη και αντίστοιχα είναι ουδέτερη όταν δεν είναι ούτε μέγιστη ούτε ελάχιστη.

Θεωρώντας ένα έλασμα στο οποίο ασκούνται ομοεπίπεδες δυνάμεις στις άκρες αυτού, εξετάζονται δύο καταστάσεις. Στην πρώτη κατάσταση, κατά την άσκηση των δυνάμεων το έλασμα παραμένει επίπεδο χωρίς να αποκλίνει. Στη δεύτερη κατάσταση στο έλασμα προσδίδεται κάποια αρχική παραμόρφωση. Αν Π_0 και Π είναι οι πιθανές ενέργειες στην επίπεδη και την παραμορφωμένη κατάσταση τότε η ισορροπία είναι:

- Ευσταθής όταν $\Pi_0 < \Pi$
- Ασταθής όταν $\Pi_0 > \Pi$
- Ουδέτερη όταν $\Pi_0 = \Pi$

Η αύξηση που προκύπτει στην πιθανή ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα του ελάσματος όταν σε αυτό ασκούνται ομοεπίπεδες δυνάμεις όταν αυτό μεταβαίνει από μια επίπεδη κατάσταση σε μια παραμορφωμένη μπορεί να αποδοθεί με την ακόλουθη σχέση:

$$\Delta\Pi = \Pi - \Pi_0 = \Delta U_o + U_b + \Delta\Omega_r \quad (2.18)$$

Όπου ΔU_o είναι η αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης της μέσης επιφάνειας του ελάσματος κατά το λυγισμό, U_b είναι η ενέργεια παραμόρφωσης λόγω κάμψης και στρέψης του ελάσματος και $\Delta\Omega_r$ είναι η αύξηση των πιθανών εξωτερικών ομοεπίπεδων δυνάμεων που ασκούνται στο έλασμα. Η ουδέτερη κατάσταση ισορροπίας προκύπτει όταν

$$\Delta\Pi = 0 \quad (2.19)$$

Όπου είναι και το κριτήριο λυγισμού για επίπεδες πλάκες και ελάσματα. Το κρίσιμο φορτίο μπορεί να καθοριστεί από αυτό το κριτήριο με μια επιπρόσθετη συνθήκη που να ορίζει την ελάχιστη τιμή λ . Η εξίσωση (2.14) μπορεί να αναδιατυπωθεί λαμβάνοντας υπόψη την συνθήκη (2.19) και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Ritz, να υπολογιστούν οι κρίσιμες τιμές. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί θεωρώντας ότι όλες οι δυνάμεις είναι ανάλογες μιας ποσότητας λ . Στη συνέχεια με αντικατάσταση αυτών των δυνάμεων στο κριτήριο λυγισμού που αναπαρίσταται από τις εξισώσεις (2.13) προκύπτει μια σχέση της μορφής

$$\Delta\Pi = \Delta\Pi(\lambda, C_1, C_2, \dots, C_n) = 0 \quad (2.20)$$

Όπου C_i ($i = 1, 2, \dots, n$) είναι μη καθορισμένες σταθερές και μπορεί να επιλυθεί λύνοντας το ισοδύναμο σύστημα

$$\frac{\partial\Pi}{\partial C_1} = 0, \frac{\partial\Pi}{\partial C_2} = 0, \dots, \frac{\partial\Pi}{\partial C_i} = 0 \quad (2.21)$$

Το οποίο εν τέλει οδηγεί σε ένα σύστημα γραμμικών διαφορικών εξισώσεων εξισώσεων στο οποίο με παρόμοια διαδικασία με την προηγούμενη μέθοδο δύναται ο υπολογισμός όλων των ιδιοτιμών λ_i από τις οποίες ο μικρότερος αντιστοιχεί στην κρίσιμη ιδιοτιμή λ_{cr} .

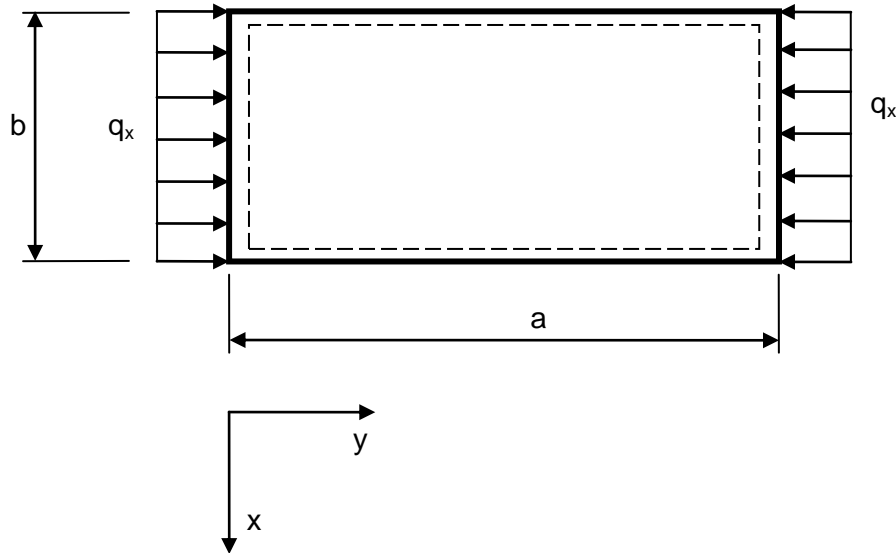
2.2.3 Δυναμική μέθοδος

Πρόκειται για την πιο γενική και καθολική μέθοδο και σχετίζεται με το μαθηματικό πρόβλημα της ευστάθειας στην κίνηση. Η μέθοδος βασίζεται στις μικρές ταλαντώσεις του ελάσματος το οποίο υπόκειται σε ομοεπίπεδες δυνάμεις στα άκρα του. Η μικρότερη τιμή φορτίου που ασκείται και προκαλεί στο έλασμα συντονισμό και κατά συνέπεια υπέρμετρη αύξηση του πλάτους της ταλάντωσης ορίζεται ως η κρίσιμη τιμή του φορτίου.

2.2.4 Εφαρμογή σε ορθογώνιο έλασμα

Για την επίλυση του προβλήματος λυγισμού στην περίπτωση ενός ορθογώνιου ελάσματος θα επιλεγεί η μέθοδος της ισορροπίας. Τα κρίσιμα φορτία μπορούν να υπολογιστούν μέσα

από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (2.11). Όπως έχει αναφερθεί πρόκειται για ομογενή μερική διαφορική εξίσωση με μεταβλητούς συντελεστές. Η εξεύρεση ωστόσο μια αναλυτικής λύσης για το πρόβλημα είναι αδύνατη και για το λόγο αυτό θα πρέπει να ληφθούν ορισμένες παραδοχές. Η φόρτιση καθώς και η απλή έδραση της πλάκας φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2-2: Κάτοψη επίπεδης πλάκας μήκους a και πλάτους b στην οποία ασκούνται θλιπτικά φορτία q_x .

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται μία επίπεδη πλάκα μήκους a και πλάτους b . Με διακεκομμένη γραμμή συμβολίζεται η απλή έδραση ενώ το θλιπτικό φορτίο που ασκείται συμβολίζεται με q_x .

$$N_x = -q_x \text{ και } N_x = N_{xy} = 0 \quad (2.22)$$

Με τις παραπάνω παραδοχές η διαφορική εξίσωση μετατρέπεται σε

$$D\nabla^4 w + \left(\overline{N_x} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \right) = 0 \quad (2.23)$$

Η επίλυση της συγκεκριμένης διαφορικής εξίσωση μπορεί να αναπαρασταθεί ως άθροισμα άπειρων ημιτονικών όρων γνωστή και ως σειρά Fourier. Υπάρχει φυσικά και η μηδενική λύση η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου το έλασμα δεν έχει υποστεί λυγισμό. Η μη μηδενική λύση θα είναι της μορφής

$$w(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} w_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.24)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.23) προκύπτει το ακόλουθο

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \left[D\pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) - q_x \pi^2 \frac{m^2}{a^2} \right] \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} = 0 \quad (2.25)$$

Η μη μηδενική λύση προκύπτει μηδενίζοντας την παράσταση στην αγκύλη.

$$D\pi^4 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) - q_x \pi^2 \frac{m^2}{a^2} = 0 \quad (2.26)$$

Από την οποία προκύπτει ότι

$$q_x = \frac{\pi^2 D}{b^2} \left(\frac{mb}{a} + \frac{n^2 a}{mb} \right)^2 \quad (2.27)$$

Αν και οι συντελεστές w_{mn} παραμένουν άγνωστοι η εξίσωση (2.27) δίνει τιμές που αντιστοιχούν στα διάφορα $m = 1, 2, \dots$ και $n = 1, 2, \dots$ που αντιστοιχούν στις πιθανές μορφές παραμόρφωσης του ελάσματος. Η μικρότερη τιμή του q_x επιτυγχάνεται με $n = 1$ οπότε και η παραπάνω εξίσωση παίρνει την μορφή:

$$N_x = \frac{\pi^2 D}{b^2} \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (2.28)$$

Ή αντίστοιχα

$$q_x = K \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (2.29)$$

Όπου

$$K = \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right)^2 \quad (2.30)$$

είναι η παράμετρος λυγισμού του φορτίου. Για κάθε τιμή του m , η παράμετρος K εξαρτάται μόνο από το λόγο a / b . Από την εξίσωση (2.29) του φορτίου q_x , η μικρότερη τιμή του φορτίου και κατά συνέπεια το κρίσιμο φορτίο λυγισμού εξαρτάται από τον αριθμό m που αντιστοιχεί στον αριθμό ημικυμάτων στην διαμήκη κατεύθυνση. Για δεδομένο λόγο πλευρών του ελάσματος, το κρίσιμο φορτίο υπολογίζεται λαμβάνοντας έναν αριθμό m τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιεί την παράμετρο λυγισμού K .

$$\frac{dK}{dm} = 2 \left(\frac{mb}{a} + \frac{a}{mb} \right) \left(\frac{b}{a} - \frac{a}{m^2 b} \right) = 0 \quad (2.31)$$

η παραπάνω εξίσωση έχει μοναδική λύση την τιμή $m = \frac{a}{b}$ και επομένως το κρίσιμο φορτίο θα είναι:

$$\min q_x = q_{x,cr} = \frac{4\pi^2 D}{b^2} \quad (2.32)$$

Για τη συγκεκριμένη τιμή του m η παράμετρος του φορτίου λυγισμού γίνεται $K = 4$ και αντιστοιχεί στην κρίσιμη τάση:

$$\sigma_{x,cr} = \frac{N_{x,cr}}{h} = \frac{q_{x,cr}}{h} = \frac{4\pi^2 D}{b^2 h} = \frac{\pi^2 E}{3(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{b}\right)^2 \quad (2.33)$$

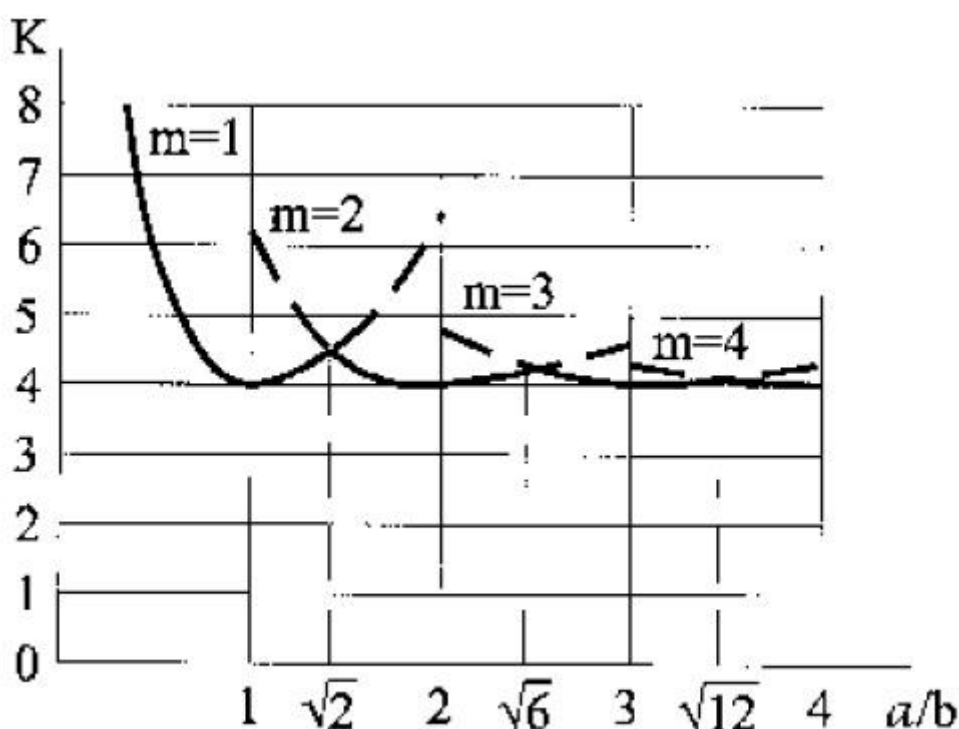
Η κρίσιμη αυτή τιμή επιτυγχάνεται όταν το πλάτος της πλάκας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους της πλάκας και οδηγεί σε υποδιαίρεση της πλάκας σε ορθογώνια τμήματα με μήκος όσο το πλάτος αυτής. Η παράμετρος λυγισμού K είναι συνάρτηση του λόγου $\varphi = a/b$ και υπολογίζεται για διάφορες τιμές του m που αντιστοιχεί στον αριθμό ημικυμάτων. Το κρίσιμο φορτίο θα αντιστοιχεί πάντα σε έναν αριθμό ημικυμάτων όπου ελαχιστοποιεί την παράμετρο λυγισμού. Για παράδειγμα:

Για λόγο $\varphi = 1.5$, που δεν είναι ακέραιος και άρα $K \neq 4$,

προκύπτει $K = 4.34$ για $m = 2$ και συνεπώς το κρίσιμο φορτίο λυγισμού θα υπολογίζεται από την εξίσωση:

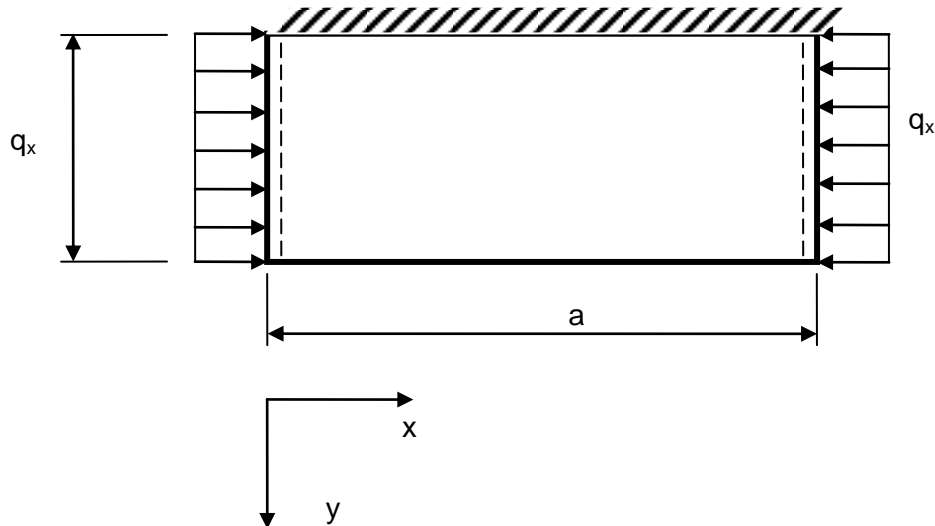
$$q_{x,cr} = 4.34 \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (2.34)$$

Υπό το φορτίο αυτό η πλάκα θα λυγίσει σε δύο ημικύματα ($m = 2$) στη διεύθυνση του φορτίου και σε ένα ημικύμα στην εγκάρσια. Το ακόλουθο σχήμα αναπαριστά την παράμετρο λυγισμού συναρτήσει του λόγου φ για διάφορες τιμές του αριθμού m .



Σχήμα 2-3: Μεταβολή της παραμέτρου λυγισμού K για διάφορες τιμές του λόγου $\varphi = a/b$ των πλευρών τις πλάκας (Ventsel & Krauthammer, 2001).

Η περίπτωση που μελετήθηκε αποτελεί ιδιαίζουσα περίπτωση. Ανάλογα με τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στην επίπεδη πλάκα το αποτέλεσμα θα διαφέρει. Ενδεικτικά αναφέρουμε την περίπτωση όπου η πλάκα πακτώνεται κατά μήκος της μια2 ακμής της διαμήκους πλευράς. Η συγκεκριμένη περίπτωση αναπαρίσταται στο ακόλουθο σχήμα.



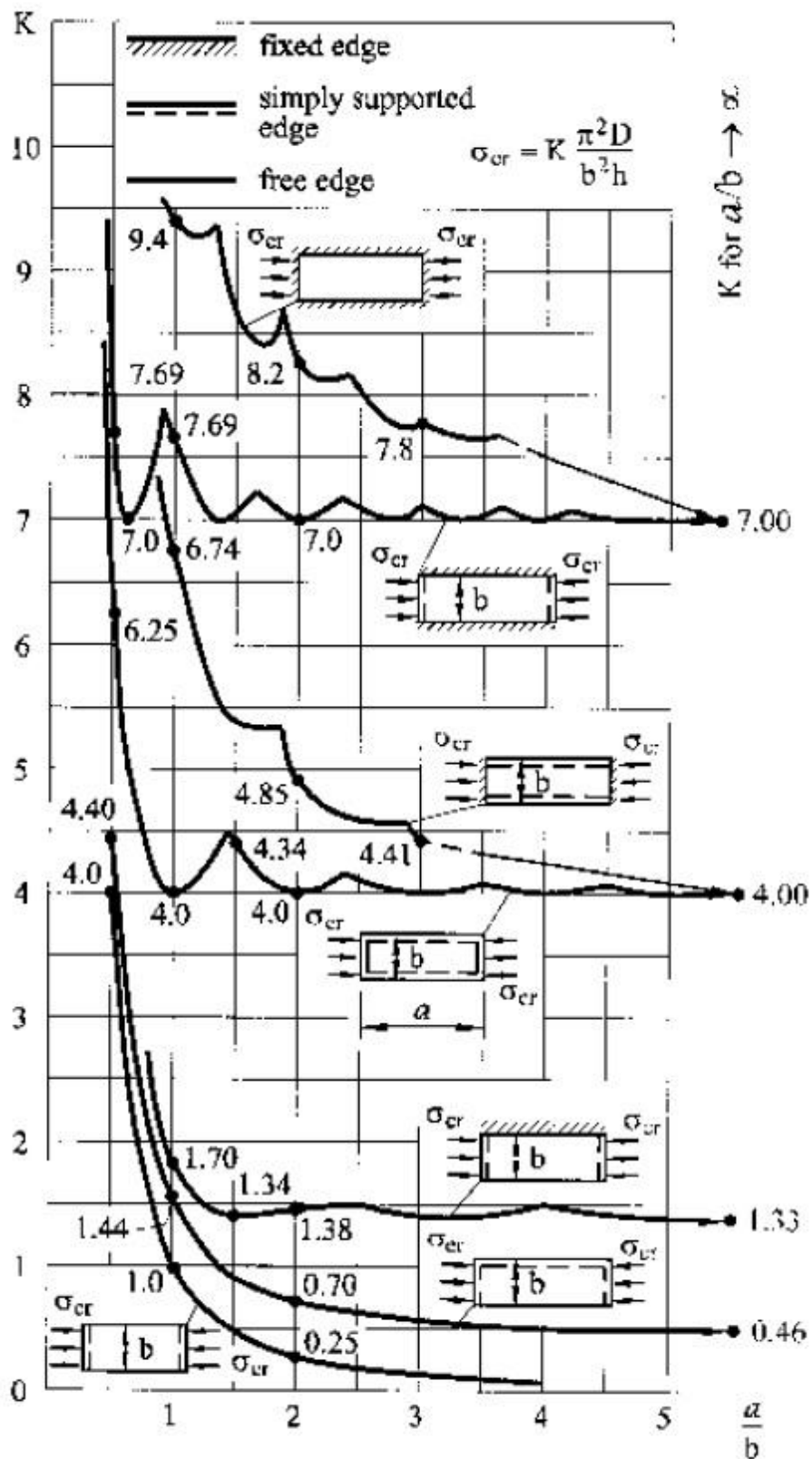
Σχήμα 2-4: Κάτοψη επίπεδης πλάκας διαστάσεων a και b στην οποία ασκούνται θλιπτικά φορτία, με μία ακμή πακτωμένη, δύο ακμές με απλή στήριξη και μια ακμή ελεύθερη.

Στη δεύτερη περίπτωση που εξετάζεται, η πλάκα είναι πακτωμένη στη μία διαμήκη ακμή και ελεύθερη στην άλλη. Στις εγκάρσιες ακμές στις οποίες ασκείται το θλιπτικό φορτίο, η στήριξη είναι απλή. Στη δεύτερη αυτή περίπτωση χρησιμοποιείται η μέθοδος του Levy. Η τελική λύση αποτελεί σύνθεση της γενικής και της ειδικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης (2.11).

Ανάλογα με τον τρόπο στήριξης της πλάκας, η αναλυτική λύση της διαφορικής εξίσωσης παρουσιάζει διαφορετικά αποτελέσματα. Ενδεικτικά παρατίθεται στο Σχήμα 2-5 ένα διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή της παραμέτρου λυγισμού K συναρτήσει του λόγου a / b των πλακών, για διάφορες στηρίξεις της πλάκας.

Μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο τύπος στήριξης των ακμών της πλάκας έχει σημαντική επίδραση πάνω στις τιμές των κρίσιμων φορτίων καθώς και των τρόπων λυγισμού. Για παράδειγμα αποδεικνύεται ότι οι πακτώσεις αυξάνουν την ευστάθεια της πλάκα συγκριτικά με αρθρωτές εδράσεις. Επιπροσθέτως, σε περίπτωση όπου υπάρχουν ελεύθερες ακμές τα κρίσιμα φορτία λυγισμού μειώνονται σημαντικά. Συμπερασματικά, αν οι οριακές συνθήκες στήριξης είναι οτιδήποτε διαφορετικό πέρα από πακτώσεις, τότε ακόμα και για περιπτώσεις απλών φορτίσεων, το μαθηματικό πρόβλημα γίνεται αρκετά πολύπλοκο. Στην παρούσα εργασία, το έλασμα που εξετάζεται αποτελεί μέρος του πλοίου και λόγω της πολυπλοκότητας του σχεδίου οι οριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία δεν είναι ξεκάθαρα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πέρα από την πολυπλοκότητα καθορισμού των οριακών συνθηκών και των φορτίσεων, τα ελάσματα που χρησιμοποιούνται ως κελύφη και καταστρώματα πλοίων είναι περεταίρω ενισχυμένα. Η ύπαρξη των ενισχυτικών, επιβαρύνει ακόμα περισσότερο την

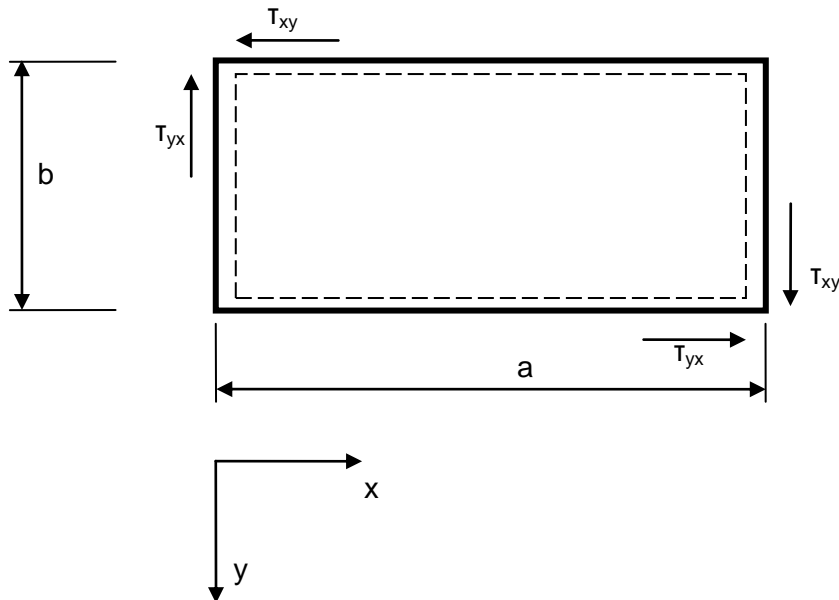
πολυπλοκότητα του προβλήματος. Ο μόνος τρόπος για να επιλυθεί ένα τέτοιο ζήτημα είναι με τη χρήση αριθμητικής μεθόδου επίλυσης.



Σχήμα 2-5: Μεταβολή της παραμέτρου λυγισμού K συναρτήσει του λόγου a/b για διάφορους τρόπους στήριξης της πλάκας (Ventsel & Krauthammer, 2001).

2.2.5 Λυγισμός λόγω διατμητικών τάσεων

Στην περίπτωση που μια πλάκα διαστάσεων $a \times b$ υπόκειται σε διατμητικά φορτία όπως φαίνεται και στο σχήμα το αποτέλεσμα που προκύπτει στην περίπτωση λυγισμού είναι παραμόρφωση με διαγώνια κατεύθυνση.



Σχήμα 2-6: Κάτοψη επίπεδης πλάκας μήκους a και πλάτους b στην οποία ασκούνται διατμητικά φορτία $T_{xy} = T_{yx}$.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (2.11) στην περίπτωση λυγισμού λόγω διατμητικών τάσεων και μόνο, θέτοντας $\sigma_x = \sigma_y = 0$ και εξετάζοντας την περίπτωση όπου η πλάκα είναι απείρου μήκους, μια ακριβής λύση της εξίσωσης (2.11) είναι η:

$$w(x, y) = C_1 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} + C_2 \sin \frac{2\pi x}{a} \sin \frac{2\pi y}{b} \quad (2.35)$$

Όπου C_1 και C_2 είναι δύο άγνωστοι συντελεστές. Η εξίσωση (2.35) ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες με $w = 0$ στα όρια της πλάκας.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι η ενέργεια παραμόρφωσης η οποία αποθηκεύεται σε ένα ελαστικό σώμα λόγω κάμψης και στρέψης δίνεται από τη σχέση:

$$U = \frac{1}{2} \iiint_V \left(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{xz} \gamma_{xz} + \tau_{yz} \gamma_{yz} \right) dV \quad (2.36)$$

Λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη τις παραδοχές του Kirchhoff για κάμψη πλακών, λόγω μικρών αποκλίσεων οι τάσεις σ_z , τ_{xz} και τ_{yz} μπορεί να αμεληθούν. Σε συνδυασμό με το νόμο του Hooke η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$U_b = \iiint_V \left[\frac{1}{2E} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\nu\sigma_x\sigma_y) + \frac{1+\nu}{E} \tau_{xy}^2 \right] dV \quad (2.37)$$

Οι τάσεις συνδέονται με την πλευρική απόκλιση με τις σχέσεις

$$\sigma_x = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.38)$$

$$\sigma_y = \frac{Ez}{1-\nu^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.39)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{Ez}{1+\nu} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (2.40)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.37) προκύπτει η σχέση

$$U_b = \frac{1}{2} \iint_A D \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dA \quad (2.41)$$

Όπου A είναι η επιφάνεια της ενδιάμεσης επιφάνειας της πλάκας.

Η αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης της μέσης επιφάνειας της πλάκας κατά το λυγισμό δίνεται από τη σχέση

$$\Delta U_o = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \tau_{xy} \gamma_{xy}) dV \quad (2.42)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \quad (2.43)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \quad (2.44)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (2.45)$$

Καθώς και για πλάκα πάχους h

$$\sigma_x = \frac{N_x}{h} \quad (2.46)$$

$$\sigma_y = \frac{N_y}{h} \quad (2.47)$$

$$\tau_{xy} = \frac{N_{xy}}{h} \quad (2.48)$$

Με αντικατάσταση και αναγωγή στη μέση επιφάνεια προκύπτει μετά από πράξεις:

$$\Delta U_o = W_e + \frac{1}{2} \iint_{00}^{ba} \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy \quad (2.49)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι ανεξάρτητη από τη γεωμετρία της πλάκας. Επιπροσθέτως, η αύξηση της ενέργειας παραμόρφωσης λόγω ομοεπίπεδων εξωτερικών δυνάμεων είναι ίση με την αρνητική τιμή του έργου που προκύπτει από αυτές τις δυνάμεις.

$$\Delta \Omega_{\Gamma} = -W_e \quad (2.50)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση

$$\Delta \Pi = \Pi - \Pi_o = \Delta U_o + U_b + \Delta \Omega_{\Gamma} \quad (\text{να γίνει αναφορά})$$

Προκύπτει ότι

$$\Delta \Pi = \frac{1}{2} \iint_{00}^{ba} D \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (2.51)$$

$$+ \frac{1}{2} \iint_{00}^{ba} \left[N_x \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + N_y \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + 2N_{xy} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] dx dy$$

που στην περίπτωση που εξετάζουμε η πλάκα υπόκεινται σε:

$$N_{xy} = -q_{xy}, N_x = N_y = 0 \quad (2.52)$$

Επομένως λαμβάνοντας υπόψη και την εξίσωση (2.35) της απόκλισης w καθώς και τις εξισώσεις (2.52) γίνεται:

$$\Delta \Pi = -\frac{\pi^4}{8} Dab \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 (C_1^2 + 16C_2^2) - \frac{32}{9} q_{xy} C_1 C_2 \quad (2.53)$$

Εφαρμόζοντας τις συνθήκες για σταθερή τιμή του $\Delta \Pi$ προκύπτει:

$$\frac{\partial \Delta \Pi}{\partial C_1} = \frac{\partial \Delta \Pi}{\partial C_1} = 0 \Rightarrow \quad (2.54)$$

$$\frac{\pi^4}{4} Dab \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) C_1 - \frac{32}{9} q_{xy} C_2 = 0 \quad (2.55)$$

$$-\frac{32}{9} q_{xy} C_1 + 4\pi^4 Dab \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) C_2 = 0 \quad (2.56)$$

Ο συλλογισμός καταλήγει στη μη ειδική λύση:

$$\pi^8 D^2 a^2 b^2 (a^{-2} + b^{-2})^4 - \left(\frac{32q_{xy}}{9} \right)^2 = 0 \quad (2.57)$$

Που δίνει την ακόλουθη προσεγγίσει όσον αφορά την κρίσιμη διατμητική τάση

$$\tau_{xy,cr} = \pm \frac{9}{32} \pi^4 Dab \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right)^2 \quad (2.58)$$

Σε περίπτωση όπου η πλάκα δεν είναι τετραγωνική, ενδέχεται η κρίσιμη διατμητική τάση να είναι μεγαλύτερη κατά 15%. Ωστόσο η ακρίβεια της λύσης μπορεί να αυξηθεί, προσθέτοντας περισσότερους όρους στη εξίσωση (2.35).

2.2.6 Λυγισμός ενισχυμένου ελάσματος

Εκτός από την πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία των ελασμάτων που τοποθετούνται στα πλοία, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι τα ελάσματα είναι ενισχυμένα. Η σταθεροποίηση των ελασμάτων με ενισχυτικά για την αποφυγή φαινομένων αστάθειας, χρησιμοποιείται ευρέως σε καταστώματα και κελύφη πλοίων, σε πλωτές κατασκευές, γέφυρες και εν γένει κάθε κατασκευή που απαιτεί μεγάλη αντοχή και περιορισμένο βάρος.

Κατά την ανάλυση ενισχυμένων ελασμάτων δύο πιθανοί τρόποι συνήθως εξετάζονται. Στην πρώτη περίπτωση λυγισμού όπου τα ενισχυτικά του ελάσματος έχουν υψηλές τιμές ροπής αδρανείας, θα παρουσιαστεί τοπικός λυγισμός στο έλασμα ανάμεσα στα ενισχυτικά. Στη δεύτερη περίπτωση παρουσιάζεται μια συνολική παραμόρφωση τόσο στο έλασμα όσο και στα ενισχυτικά και αναφέρεται ως πρωτεύων λυγισμός (Ventsel & Krauthammer, 2001). Συνεπώς κατά τη μελέτη ενισχυμένων ελασμάτων η αλληλεπίδραση μεταξύ των ενισχυτικών και των ελασμάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

Λόγω δυνάμεων που δέχεται το πλοίο από το θαλάσσιο περιβάλλον, πολλά από τα ενισχυμένα ελάσματα δέχονται μια σειρά από θλιπτικές δυνάμεις. Λόγω των καμπτικών ροπών καθώς και των αξονικά θλιπτικών δυνάμεων που δέχονται, πολλά από αυτά τα ελάσματα είναι επιρρεπή σε φαινόμενα αστάθειας όπως λυγισμός του ελάσματος ενδιάμεσα από τα ενισχυτικά αλλά και πλαγιοστρεπτικός λυγισμός των ενισχυτικών⁴. Πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι η περίπτωση λυγισμού των ενισχυτικών έχει σοβαρότερες επιπτώσεις για την ακεραιότητα της κατασκευής συγκριτικά με την περίπτωση λυγισμού του ελάσματος (Grondin, Elwi, & Cheng, 1998). Παρόλο που πολλά ελάσματα τα οποία είναι ενισχυμένα από τη μία μεριά έχουν μεγάλη αντοχή σε εγκάρσια φορτία που θέτουν το ενισχυτικό σε καταστάσεις εφελκυσμού, η περίπτωση να υπάρξουν καταστάσεις κάμψης που οδηγούν στην εμφάνιση θλιπτικών φορτίων σε αυτά, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη.

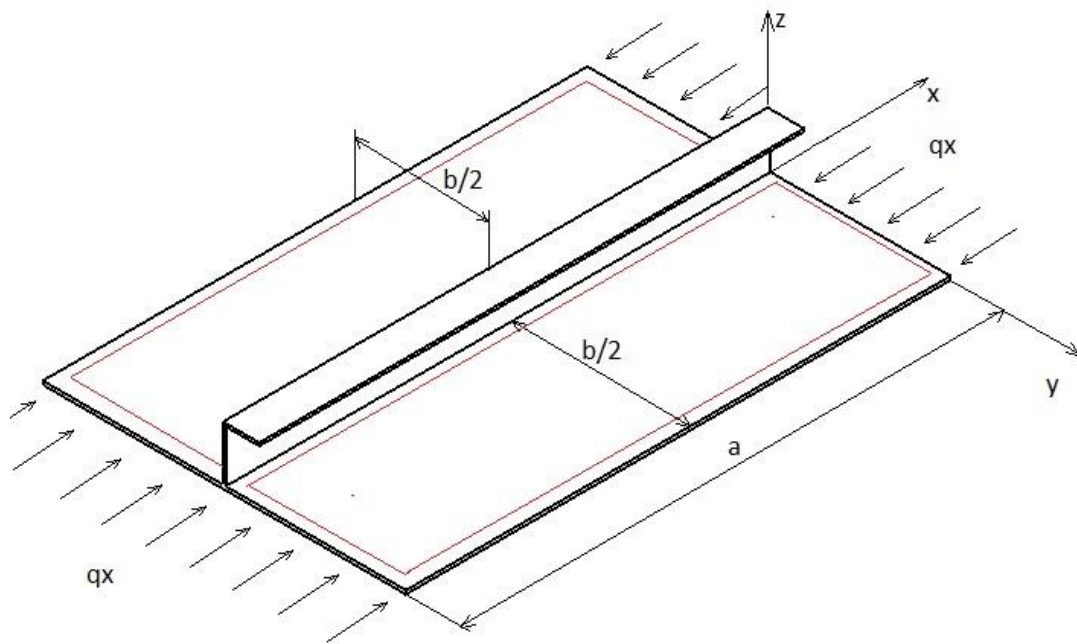
Ο απλούστερος τρόπος προσέγγισης του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η προσομοίωση του ενισχυμένου ελάσματος με απλό έλασμα ορθοτροπικής ελαστικότητας. Η υπόθεση αυτή απαιτεί τα ενισχυτικά του ελάσματος να είναι ισοδύναμα και ομοιόμορφα κατανομημένα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ένα έλασμα με ελαστικότητα E_x και E_y διαφορετικές για την x και y κατεύθυνση και μέτρο διάτμησης G . Ομοίως ο λόγος του Poisson για τη x κατεύθυνση θα είναι ν_x ενώ για την y κατεύθυνση θα συνδέεται μέσω της σχέσης

⁴ Tripping

$$\frac{V_x}{E_x} = \frac{V_y}{E_y} \quad (2.59)$$

Η μέθοδος αυτή είναι ικανοποιητική στην περίπτωση που τα ενισχυτικά είναι τοποθετημένα σε ισαποστάσεις τέτοιες όπου ο αριθμός $1/n$ είναι πολύ μικρότερος από τη μονάδα (n ο αριθμός των ενισχυτικών).

Σε περίπτωση που ο αριθμός των ενισχυτικών είναι μικρός, ο συμβατικός τρόπος μοντελοποίησης υιοθετώντας ένα ορθοτροπικό μοντέλο δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν μέσω τέτοιων υπολογισμών δε θα είναι αξιόπιστα. Στην περίπτωση αυτή λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι τα ενισχυτικά είναι πακτωμένα πάνω στο έλασμα και συνεπώς το συσσωμάτωμα ενισχυτικό – έλασμα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κατασκευαστικό στοιχείο. Με τον τρόπο αυτό θα θεωρηθεί ότι το ενισχυτικό εκτρέπεται και στρέφεται όπως ακριβώς και το έλασμα. Η ακόλουθη διαδικασία περιγράφει τη διαδικασία αναλυτικού υπολογισμού στην περίπτωση ενός ορθογωνικού ελάσματος το οποίο ενισχύεται με ένα μόνο ενισχυτικό.



Σχήμα 2-7: Ενισχυμένο έλασμα το οποίο υπόκειται σε διαμήκη φόρτιση

Η περίπτωση που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-7 περιγράφει ένα ορθογώνιο έλασμα το οποίο διαθέτει ένα ενισχυτικό τοποθετημένο στο μέσον. Δέχεται διαμήκη φόρτιση στη διεύθυνση του x ενώ οι υπόλοιπες ομοεπίπεδες δυνάμεις είναι μηδενικές. Ισχύουν συνεπώς οι εξισώσεις (2.22) και (2.23). Η λύση της διαφορικής εξίσωσης για το ήμισυ της πλάκας θα είναι της μορφής

$$w(x, y) = F(y) \sin \frac{m\pi x}{a} \quad (2.60)$$

Αντικαθιστώντας τη λύση αυτή στη διαφορική εξίσωση, προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση.

$$\frac{d^4 F(y)}{dy^4} - 2\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \frac{d^2 F(y)}{dy^2} + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \left[\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \frac{q_x}{D} \right] F(y) = 0 \quad (2.61)$$

Όπου η λύση του $F(y)$ θα είναι της μορφής:

$$F(y) = C_1 \cosh ay + C_2 \sinh ay + C_3 \cosh by + C_4 \sinh by \quad (2.62)$$

Με

$$a = \sqrt{\mu \left(\mu + \sqrt{\frac{q_x}{D}} \right)}, \beta = \sqrt{\mu \left(\sqrt{\frac{q_x}{D}} - \mu \right)} \text{ και } \mu = \frac{m\pi}{a} \quad (2.63)$$

Από τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος έχουμε:

$$w = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \Big|_{y=b/2} \quad (2.64)$$

Εάν υποθέσουμε ότι το έλασμα κάμπτεται μαζί με το ενισχυτικό τότε λόγω συμμετρίας η μέγιστη παραμόρφωση θα εμφανίζεται στο μέσον της πλάκας στη θέση $y=0$. Συνεπώς μια επιπρόσθετη οριακή συνθήκη θα είναι:

$$\frac{\partial w}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0} \quad (2.65)$$

Όσον αφορά το ενισχυτικό η εξίσωση που περιγράφει την παραμόρφωσή του δίνεται από την παρακάτω σχέση.

$$\left(EI_i \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + q_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2D \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} \right)_{y=0} = 0 \quad (2.66)$$

Και αντικαθιστώντας με $q_x = N_x = \sigma_x A_i$ έχουμε τη σχέση

$$\left(EI_i \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \sigma_x A_i \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2D \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} \right)_{y=0} = 0 \quad (2.67)$$

Όπου I_i και A_i είναι η ροπή αδράνειας και το εμβαδόν της διατομής του ενισχυτικού. Για απλότητα ορίζουμε τις παρακάτω μεταβλητές.

$$\xi = \frac{a}{b}, \gamma = \frac{EI_i}{Db}, \delta = \frac{A_i}{bh}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις λαμβάνουμε ένα ομογενές σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων C_1, C_2, \dots, C_n , το οποίο εξισώνοντάς το με το μηδέν προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση.

$$\left(\frac{1}{ba} \tanh \frac{ba}{2} - \frac{1}{b\beta} \tan \frac{b\beta}{2} \right) \left(\frac{\gamma m^2}{a^2} - K\delta \right) \frac{m^2 \pi^2}{a^2} - 4 \frac{m}{a} \sqrt{K} = 0$$

Όπου

$$K = \frac{\sigma_{x,cr}}{\sigma_{x,E}}$$

Με $\sigma_{x,E}$ να δίνεται από την εξίσωση (2.32) που αντιστοιχεί στην κρίσιμη τάση ορθογωνικής αντοχής χωρίς ενίσχυση. Κάνοντας όλες τις απαραίτητες αντικαταστάσεις προκύπτει:

$$\sigma_{x,cr} = \frac{\pi^2 D (1 + \xi)^2 + 2\gamma}{b^2 h \xi^2 (1 + 2\delta)}$$

Ένας άλλος τρόπος να μελετηθεί η κατάρρευση ενισχυμένων ελασμάτων είναι να αντιμετωπιστεί ως δοκός απλής έδρασης (Grondin, Elwi, & Cheng, 1998).

2.3 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

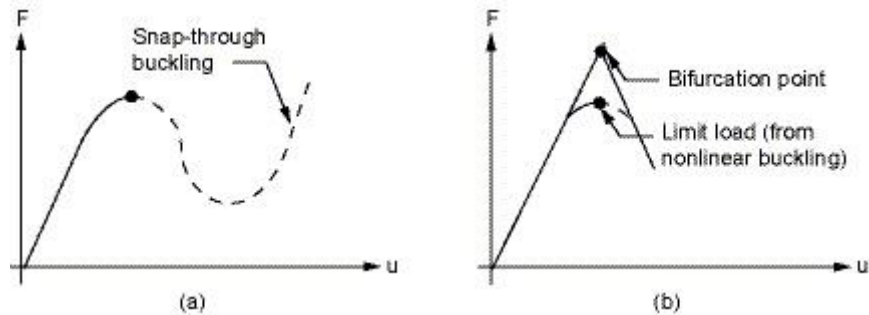
Η μέθοδος της ορθοτροπικής πλάκας που περιγράφεται στο εδάφιο 2.2.6 μπορεί να βοηθήσει στον υπολογισμό του ολικού κρίσιμου φορτίου λυγισμού αλλά να προβλέψει το κρίσιμο φορτίο σε τοπικό επίπεδο καθώς και την αλληλεπίδραση ελάσματος ενισχυτικού σε ομοεπίπεδες θλιπτικές δυνάμεις.

Ο μηχανισμός που επιφέρει το λυγισμό ενισχυμένων πλακών επηρεάζεται σημαντικά από την αρχική μορφή του ελάσματος στην περίπτωση που υπάρχει κάποια κυρτότητα. Στην περίπτωση που τα κοίλα είναι στραμμένα προς την πλευρά των ενισχυτικών, τότε η κατάρρευση πραγματοποιείται σε πολύ μικρότερο φορτίο και μάλιστα με αρκετά απότομο τρόπο. Αντίθετα στην περίπτωση που το κοίλα είναι στραμμένα προς το έλασμα, η κατάρρευση είναι πιο σταδιακή. Παρόλο που έχει συμβεί εκτενής έρευνα τα τελευταία χρόνια στον τομέα του λυγισμού ενισχυμένων ελασμάτων, δεν έχει διατυπωθεί κάποια επιβεβαιωμένη μέθοδος υπολογισμού των κρίσιμων φορτίων, η οποία θα λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμέτρους του προβλήματος και θα μπορεί να προβλέψει σε τοπικό επίπεδο το κρίσιμο φορτίο (Ghavami & Reza Khedmati, 2012).

Η επίλυση του προβλήματος υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου λυγισμού σε ενισχυμένα ελάσματα έχει βασιστεί περισσότερο σε αριθμητικές και σε πειραματικές μεθόδους. Ωστόσο οι αριθμητικές μέθοδοι και συγκεκριμένα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτυγχάνει με τη χρήση Η/Υ μεγάλη ακρίβεια στον τελικό υπολογισμό. Μάλιστα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων δύναται να επιλύσει προβλήματα σύνθετης γεωμετρίας και διαφορετικών φορτίσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη εργασία ως μέσο υπολογισμού του κρίσιμου φορτίου λυγισμού είναι το ANSYS. Πρόκειται για έναν εμπορικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων με αρκετές δυνατότητες που χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα στην αγορά. Προσφέρει τη δυνατότητα πρόβλεψης της θεωρητικής αντοχής έναντι σε λυγισμό μιας ελαστικής κατασκευής. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται αναφέρεται ως γραμμικός λυγισμός. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται και ως Eigenvalue buckling. Σε τέτοιου είδους αναλύσεις επιδιώκεται στην ουσία η εκτίμηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με την εύρεση φορτίων, με τα οποία το μητρώο ακαμψίας του συστήματος γίνεται μοναδιαίο. Η απόκριση του συστήματος συνήθως περιλαμβάνει μια ελάχιστη παραμόρφωση προ του λυγισμού. Αν και πιο ακριβής θεωρείται η χρήση ενός μη γραμμικού μοντέλου για τον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου λυγισμού, οι αναπόφευκτες κατασκευαστικές ατέλειες έχουν μεγάλη επίδραση στην ευστάθεια της κατασκευής και συνεπώς η ακρίβεια στον υπολογισμό του κρίσιμου φορτίου δεν επωφελείται από τη χρήση της μη γραμμικής μεθόδου (Novoselac, Ergic, & Balicevic, 2012).

Η μέθοδος Eigenvalue αντιστοιχεί στη γραμμική ανάλυση λυγισμού και χρησιμοποιείται για να αναλύσει το πρόβλημα της ευστάθειας σε ένα ιδεατό ελαστικό σώμα. Η χαμηλότερη τιμή Eigenvalue που υπολογίζεται με την αριθμητική μέθοδο αντιστοιχεί στο φορτίο λυγισμού. Η μέθοδος αυτή υπολογίζεται πως έχει αρκετά καλά αποτελέσματα σε απλές κατασκευές.



Σχήμα 2-8: Πραγματικό διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης (α) και μοντελοποίηση του φαινομένου με γραμμική ανάλυση και μη γραμμική ανάλυση (ANSYS Inc., 2014).

Ωστόσο όπως φαίνεται και από το Σχήμα 2-8 (b) που αναπαριστά τη γραμμική και μη γραμμική μοντελοποίηση του φαινομένου, υπάρχει σαφής διαφορά ανάμεσα στο τελικό κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Συγκεκριμένα στη γραμμική ανάλυση, το κρίσιμο φορτίο έχει υψηλότερη τιμή από τη μη γραμμική ανάλυση. Αυτό που προβλέπει η γραμμική ανάλυση είναι το θεωρητικό φορτίο λυγισμού (Bifurcation Point). Για παράδειγμα η μελέτη λυγισμού κολώνας με τη βοήθεια της γραμμικής ανάλυσης, θα ταυτίζεται με τους θεωρητικούς υπολογισμούς της κλασσικής ανάλυσης του Euler. Σε πιο σύνθετες κατασκευές το αποτέλεσμα ωστόσο δεν θα είναι τόσο ακριβές (ANSYS Inc., 2014).

Στην παρούσα εργασία, ο υπολογισμός του φορτίου λυγισμού πραγματοποιείται με τη γραμμική ανάλυση. Σκοπός είναι η μελέτη της μεταβολής του κρίσιμου φορτίου λυγισμού πριν και μετά την εφαρμογή του επιθέματος αλλά και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για διάφορες στρώσεις και διευθύνσεις των σύνθετων υλικών. Συνεπώς ο ακριβής υπολογισμός του κρίσιμου φορτίου δεν είναι σημαντικός. Αυτό που είναι σημαντικό είναι ο υπολογισμός της μεταβολής έτσι ώστε να γίνει μια εκτίμηση της επίδρασης που έχει η χρήση ενός επιθέματος σύνθετων υλικών στο συγκεκριμένο φαινόμενο λυγισμού του καταστρώματος.

3 Επιθέματα

Τα επιθέματα που προτείνονται ως λύση στην παρούσα εργασία βασίζονται στην τεχνολογία των σύνθετων υλικών. Ως σύνθετα ορίζονται τα υλικά τα οποία αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά τα οποία ωστόσο μακροσκοπικά είναι ευδιάκριτα μεταξύ τους και διαθέτουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια (Agarwal, Broutman, & Chandrashekhara, 1990). Από τα επιμέρους συστατικά το ένα ονομάζεται συστατικό ενίσχυσης και το δεύτερο μήτρα ή αλλιώς συνδετικό υλικό. Το συστατικό ενίσχυσης προσθέτει στο υλικό τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες ενώ το δεύτερο, που είναι συστατικό συνήθως χαμηλότερης πυκνότητας, εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).

3.1 Συστατικά ενίσχυσης

Ανάλογα με το συστατικό της ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες. Τα ινώδη, τα στρωματικά και τα κοκκώδη. Τα στρωματικά σύνθετα αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις υλικών ενώ η ενίσχυση στα κοκκώδη σύνθετα επιτυγχάνεται με σωματίδια διασκορπισμένα στο υλικό της μήτρας. Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση των ινωδών σύνθετων τα οποία αξιοποιούν τις αυξημένες μηχανικές ιδιότητες συγκεκριμένου τύπου ινών. Ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα, διακρίνονται σε:

- Μονοδιευθυντικά
- Πολυδιευθυντικά

Στην πρώτη κατηγορία, οι ίνες βρίσκονται μέσα στο υλικό στην ίδια διεύθυνση ενώ στη δεύτερη κατηγορία οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Στην περίπτωση των πολυδιευθυντικών ινών οι ίνες μπορεί να έχουν τυχαία διεύθυνση, να βρίσκονται σε πλέξη ύφανσης ή ακόμα να βρίσκονται σε τρισσορθογώνια ύφανση. Τα ινώδη σύνθετα υλικά μπορούν να διακριθούν και σε περεταίρω κατηγορίες ανάλογα με το λόγο μήκους προς τη διάμετρο των ινών. Υπάρχουν ίνες συνεχείς ή μεγάλου μήκους στις οποίες ο λόγος $\ell/d \geq 100$ ενώ στις ασυνεχείς ή κοντές ίνες ο λόγος $\ell/d < 100$. Τέλος υπάρχουν και τα λεγόμενα νηματίδια ή τριχίτες (whiskers) με $d < 100 \mu m$ και $\ell \cong 100 \mu m$ (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).

Τα ινώδη σύνθετα υλικά έχουν μικρό βάρος, είναι πιο δύσκαπτα και έχουν μεγάλη αντοχή. Συγκριτικά με το ακατέργαστο προϊόν από το οποίο προέρχονται έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες λόγω της προνομιακής κατεύθυνσης που έχουν τα μόρια τους κατά μήκος της διεύθυνσης των ινών και λόγω του μειωμένου πλήθους ατελειών που παρουσιάζονται σε μια ίνα σε αντίθεση με το ακατέργαστο υλικό. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι οι ίνες από γυαλί, άνθρακα, οργανικές (Kevlar), βορίου, Silicon Carbide (SiC) αλουμινίου και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται ωστόσο σε πιο εξειδικευμένες εφαρμογές (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).

Εν γένει, υπάρχουν 4 παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού και σχετίζονται με τις ίνες αυτού. Το μήκος των ινών είναι ένας από αυτούς τους

παράγοντες. Ίνες συνεχόμενες και με μεγάλο μήκος τοποθετούνται και προσανατολίζονται ευκολότερα ενώ ίνες βραχύτερες είναι δυσκολότερο να ελεγχθεί η τοποθέτησή τους και συνεπώς να προσανατολιστούν κατάλληλα. Οι ίνες μεγάλου μήκους επιτυγχάνουν υψηλότερη αντοχή σε κρούση, παρουσιάζουν μικρότερη συστολή, διακρίνονται για την καλύτερη τελική ποιότητα επιφανείας. Αντίθετα, οι βραχύτερες ίνες έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλότερου κόστους, του εύκολου χειρισμού τους, ενώ χαρακτηρίζονται για τον ταχύρυθμο τρόπο παραγωγή τους. Επιπρόσθετα λόγω του τρόπου τοποθέτησης αυτών, τυχόν μεμονωμένες κατασκευαστικές ατέλειες απαλείφονται (Kaw, 2006).

Ο προσανατολισμός των ινών είναι και αυτός αρκετά σημαντικός. Σε περίπτωση που οι ίνες έχουν την ίδια διεύθυνση τότε στη διεύθυνση αυτή η αντοχή του υλικού θα παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές. Για το λόγο αυτό γίνεται τοποθέτηση ινών ακόμα και σε άλλες διευθύνσεις έτσι ώστε να βελτιώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού και σε αυτές. Ωστόσο αυτό που είναι σημαντικό να διατυπωθεί είναι ότι για τον ίδιο αριθμό ινών ανά όγκο, ένα πολυδιευθυντικό σύνθετο υλικό δεν μπορεί να πλησιάσει τις μηχανικές ιδιότητες ενός μονοδιευθυντικού υλικού, στη διεύθυνση φυσικά των ινών αυτού (Kaw, 2006).

Η διατομή των ινών έχει κατά βάση κυκλικό σχήμα γεγονός που διευκολύνει τόσο το χειρισμό τους όσο και την παραγωγή τους. Εξαγωνικής διατομής και τετραγωνικής διατομής ίνες είναι δυνατόν να παραχθούν αλλά οι βελτιωμένες μηχανικές συνήθως δεν αντισταθμίζουν την επιπρόσθετη δυσκολία στο χειρισμό αλλά και στην επεξεργασία τους (Kaw, 2006).

Οι μηχανικές ιδιότητες των ινών όπως είναι φυσικό επηρεάζονται άμεσα από το υλικό που έχει επιλεγεί. Το υλικό αυτό είναι επιθυμητό να έχει υψηλή ελαστικότητα αλλά και αντοχή αλλά και φυσικά χαμηλό κόστος. Η τελική επιλογή γίνεται πάντα έπειτα από αξιολόγηση όλων των παραγόντων και των χαρακτηριστικών που είναι επιθυμητό να έχει στο τέλος το σύνθετο υλικό (Kaw, 2006).

Πέρα όμως από τις ίνες, οι τελικές μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού καθορίζονται και από την επιλογή του συνδετικού υλικού, της μήτρας. Παράγοντες της μήτρας που επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητες του υλικού είναι η ικανότητα της μήτρας να συγκρατεί τις ίνες μεταξύ τους, να τις προστατεύει από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, αλλά και από εξωγενή φορτία που εν δυνάμει μπορούν να πληγώσουν και να καταστρέψουν τη συνέχεια των ινών. Αν και από μόνο του το συνδετικό έχει αρκετά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, καταφέρνει να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τις τελικές συνολικές ιδιότητες (Kaw, 2006).

Η αλληλεπίδραση μήτρας και ινών πραγματοποιείται είτε με χημικό, είτε με μηχανικό είτε μέσω κάποιας αντίδρασης. Η χημική διασύνδεση μήτρας και ίνας πραγματοποιείται ανάμεσα στην διεπιφάνεια ίνας και μήτρας. Πολλές ίνες συνδέονται με χημικούς δεσμούς κατευθείαν με το υλικό της μήτρας, ενώ σε άλλες περιπτώσεις απαιτείται η χρήση κάποιου καταλύτη έτσι ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία σχηματισμού του χημικού δεσμού.

Αντίστοιχα, η φυσική τραχύτητα των ινών συνεισφέρει στο να υπάρξει μηχανική σύνδεση μεταξύ μήτρας και ινών. Παράλληλα στην περίπτωση που ο συντελεστής θερμικής διαστολής της μήτρας είναι υψηλότερος από αυτόν της ίνας, και οι θερμοκρασίες κατεργασίας είναι υψηλότερες από τις θερμοκρασίες λειτουργίας, τότε η συστολή του υλικού της μήτρας θα είναι εντονότερη από αυτήν των ινών με αποτέλεσμα να υπάρξει περίσφιξη της μήτρας γύρω από τις ίνες.

Δεσμοί αντίδρασης πραγματοποιούνται όταν τα μόρια των ινών και της μήτρας διαχέονται από το ένα υλικό μέσα στο άλλο. Αυτή η αμφίδρομη διάχυση συνήθως οδηγεί στη δημιουργία

ξεχωριστής στρώσης διεπιφάνειας η οποία έχει και διαφορετικές ιδιότητες και από τα δύο υλικά. Ωστόσο, αν και αυτή η στρώση προσφέρει τη δυνατότητα διασύνδεσης των δυο υλικών, οδηγεί τις περισσότερες φορές στην εμφάνιση ρωγμών στις ίνες. Οι ρωγμές στις ίνες προκαλούν μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων των ινών και συνεπώς του τελικού σύνθετου υλικού.

Ρωγμές και εξασθενημένες κατασκευές οδηγούν πολύ σύντομα στην αστοχία καθώς επηρεάζονται αρνητικά οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών αλλά επίσης επιτρέπουν τη διείσδυση περιβαλλοντικών παραγόντων στο εσωτερικό της κατασκευής. Παράγοντες όπως είναι η υγρασία και διάφορα αέρια.

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι παρόλο που γενικά είναι επιθυμητό να υπάρχει δυνατός δεσμός μεταξύ των ινών και του συνδετικού υλικού, πολλές φορές, η αποσύνδεση, ή οι ασθενείς δεσμοί ωφελούν καθώς προσφέρουν πλεονέκτημα έναντι των ρωγμών. Συγκεκριμένα επιτρέπουν τη μεταφορά τάσεων σε μεγαλύτερο μήκος των ινών με αποτέλεσμα η συσσωρευμένη τάση που εμφανίζεται να διαθλάται σημαντικά. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι σύνθητες στα μεταλλικά υλικά, γεγονός που τους προσφέρει αυξημένη αντοχή ως και 5 φορές περισσότερη σε περίπτωση που υπήρχαν ισχυρότεροι δεσμοί μεταξύ αυτών.

3.1.1 Ίνες Γυαλιού

Η υψηλή αντοχή στη διάβρωση και η σκληρότητα του γυαλιού καθώς και το χαμηλότερο κόστος συγκριτικά με άλλου τύπου ίνες έχει διευρύνει τα πεδία χρήσης του σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών. Η υψηλή αντοχή του οφείλεται στο μικρό αριθμό και μικρό μέγεθος των ατελειών στην επιφάνειά τους. Όλες οι ίνες έχουν παρόμοιες δυσκαμψίες αλλά διαφορετικές τιμές αντοχής και διαφορετικά γενικά αντοχή στις διάφορες περιβαλλοντικές επιδράσεις. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ινών, οι ίνες E-glass που προέρχονται από τη λέξη electrical, έχουν ιδιαίτερες εφελκυστικές ικανότητες και αρκετά υψηλή αντοχή στη χημική διάβρωση. Οι τύπου S-glass και S-2-glass (S=strength) έχουν ακόμα υψηλότερη αντοχή ωστόσο κοστίζουν 3 -4 φορές περισσότερο από τις ίνες E-glass. Οι ίνες D-glass, παίρνουν το όνομά τους από το διηλεκτρικό (D – dielectric) και χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικές εφαρμογές όπως για ενισχύσεις καλωδίων σε υψηλής τάσης μονωτικά και κεραμικά. Ομοίως οι A-glass και AR-glass, alkaline resistant, αλκαλικής αντοχής χρησιμοποιούνται σε επιφάνειες μεμβρανών ή συνδετικών υλικών με μικρό βάρος και οι ίνες R-glass χρησιμοποιούνται μερικές φορές στις διαδικασίες περιέλιξης (Γιάννου, 2012).

Η σύνθεση της ίνας καθώς και το διαβρωτικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται, καθορίζει την αντοχή της. Αποτέλεσμα της διάβρωσης είναι μεταξύ άλλων και η μείωση της εφελκυστικής αντοχής αυτής. Η θερμοκρασία αποτελεί άλλη μια παράμετρο που επηρεάζει και αυτή αρνητικά τις μηχανικές ιδιότητες των ινών αν και για κάποιο εύρος θερμοκρασιών μπορεί να θεωρηθεί σταθερή, ανάλογα με το πολυμερές υλικό που χρησιμοποιείται. Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα δυναμικά φορτία έχουν εξίσου αρνητικό αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες οδηγώντας σύντομα στο φαινόμενο της κόπωσης (Γιάννου, 2012).

3.1.2 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα διακρίνονται για ακόμα μεγαλύτερες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τις ίνες γυαλιού. Έχουν ακόμα μικρότερο βάρος ενώ χαρακτηρίζονται από εξαιρετική αντοχή σε

διάβρωση. Οι τελικές ιδιότητες τους οφείλονται στο ακατέργαστο υλικό και την πορεία που ακολουθείται για την κατασκευή τους. Οι δύο πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στην κατασκευή ινών άνθρακα είναι τα polyacrylonitrile (PAN) και η πίσσα. Σε αντίθεση με τις ίνες γυαλιού είναι περισσότερο άκαμπτες και παρέχουν καλύτερα χαρακτηριστικά κόπωσης στο σύνθετο υλικό μειώνοντας την παραμόρφωση στο πολυμερές συνδετικό υλικό για δεδομένο φορτίο.

Η ταξινόμηση των ινών γίνεται με βάση τη δυσκαμψία και την αντοχή τους. Υπάρχουν ίνες άνθρακα υψηλής δυσκαμψίας (HS = High Stiffness) ίνες, μεσαίου μέτρου ελαστικότητας (IM = Intermediate Modulus), υψηλού μέτρου ελαστικότητας (HM = High Modulus) καθώς και πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας (UHM = Ultra High Modulus) ενώ εν γένει μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την κατασκευή, οποιοσδήποτε συνδυασμός αντοχής και δυσκαμψίας.

Οι ίνες άνθρακα είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού και γι' αυτό το λόγο θα πρέπει να προστατεύονται από διάβρωση εάν το σύνθετο υλικό έρχεται σε επαφή με μέταλλα.

3.1.3 Οργανικές ίνες

Οι ίνες αραμιδίου είναι από τις πιο γνωστές οργανικές ίνες. Είναι γνωστές περισσότερο από τις εμπορικές τους ονομασίες όπως Kevlar. Χαρακτηρίζονται από υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας κατά την αστοχία, το οποίο τις καθιστά ιδανικές για την προστασία έναντι πρόσκρουσης, βαλλιστικών ενεργειών κλπ. Διακρίνονται για τον υψηλό λόγο αντοχής σε εφελκυσμό ως προς το βάρος τους καθώς έχουν αρκετά χαμηλή πυκνότητα.

Επειδή είναι κατασκευασμένες από πολυμερή υλικά έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τα πολυμερή συνδετικά υλικά. Έχουν μικρή θλιπτική αντοχή, υφίστανται ερπυσμό, απορροφούν υγρασία και θα πρέπει να προστατεύονται έναντι της έκθεσης στην ηλιακή ακτινοβολία. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μηχανικές τους ιδιότητες επηρεάζονται σημαντικά από τη θερμοκρασία, με την εφελκυστική αντοχή τους να μειώνεται ως και 80% σε υψηλές θερμοκρασίες συγκριτικά με κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (Γιάννου, 2012).

Στην αγορά διατίθενται και οι ίνες πολυαιθυλενίου οι οποίες έχουν μικρότερη απορροφητικότητα σε υγρασία και μικρότερη πυκνότητα από ίνες αραμιδίου, ωστόσο η μέγιστη θερμοκρασία χειρισμού είναι και αυτή μικρότερη. Επιπρόσθετο πλεονέκτημά τους είναι ότι είναι πολύ διαπερατές σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα (Γιάννου, 2012).

3.1.4 Επιπρόσθετες κατηγορίες ινών

Ως συστατικό ενίσχυσης σε σύνθετα υλικά μπορεί να λειτουργήσουν και ίνες βορίου οι οποίες διαθέτουν υψηλή ακαμψία, υψηλή αντοχή ενώ η μικρή τους πυκνότητα τις καθιστά κατάλληλες για ενισχύσεις σε εξειδικευμένες εφαρμογές, όπως στην αεροδιαστημική. Οι υψηλές ωστόσο ικανότητες που προσφέρουν αντικατοπτρίζονται και με υψηλό κόστος (Γιάννου, 2012).

Παρόμοιες τύπου ίνες είναι και οι ίνες από Silicon Carbide (SiC) και βρίσκουν εφαρμογή ως ενισχύσεις σε μεταλλικές κατασκευές όπως το τιτάνιο. Χαρακτηρίζονται επίσης από υψηλή ακαμψία και αντοχή αλλά δεν προσφέρουν θερμοκρασιακή μόνωση ενώ το κόστος τους παραμένει αρκετά υψηλό (Γιάννου, 2012).

Οι κεραμικές ίνες αποτελούνται κυρίως από οξειδία μετάλλων όπως το αλουμίνιο. Υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα και μικρό κόστος συγκριτικά με τις ίνες βορίου και SiC. Οι κεραμικές ίνες συνεισφέρουν στο να διατηρηθεί η μηχανική αντοχή των μεταλλικών συνδετικών υλικών

σε υψηλά επίπεδα, κατά τη χρήση σε υψηλές θερμοκρασίες οι οποίες αλλοιώνουν τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των μετάλλων (Γιάννου, 2012).

3.2 Συνδετικό Υλικό – Μήτρα

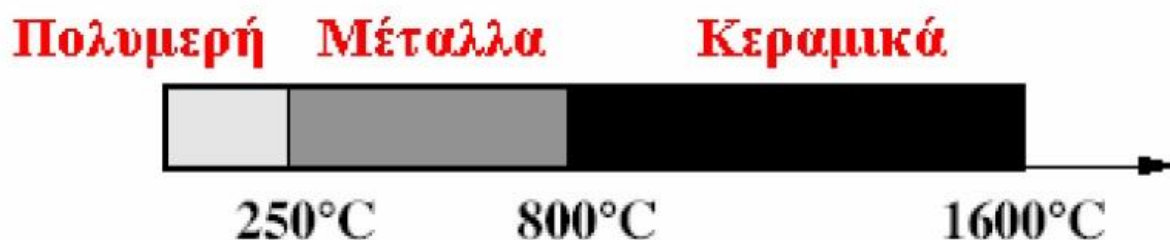
Ο ρόλος του συνδετικού υλικού είναι εξίσου σημαντικός με το ρόλο των συστατικών ενίσχυσης. Σκοπός του συνδετικού υλικού είναι η μεταφορά των μηχανικών φορτίων, στο συστατικό ενίσχυσης, όπως οι ίνες που εξετάστηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Το συνδετικό υλικό, όπως αναφέρεται και η ονομασία του, συγκρατεί τις ίνες μεταξύ τους και τις προστατεύει από τις συνθήκες περιβάλλοντος και τυχόν χημικές προσβολές και φθορές. Η μήτρα, όπως αλλιώς καλείται και το συνδετικό υλικό, πρέπει να περιορίζει την εμφάνιση ρωγμών, και να διατηρεί όσο το δυνατόν καλύτερο επίπεδο συνεργασίας με το συνδετικό υλικό (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).

Μερικές από τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών, όπως η ακαμψία και η αντοχή πολλές φορές εξαρτώνται κυρίως από το συνδετικό υλικό. Για το λόγο αυτό πολλές φορές η επιλογή της μήτρας επηρεάζει περισσότερο τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού από την επιλογή των συστατικών ενίσχυσης (Γιάννου, 2012).

Το υλικό της μήτρας μπορεί να είναι είτε πολυμερές, είτε μεταλλικό είτε κεραμικό. Μήτρες από πολυμερές υλικό αποτελούν τις πιο διαδεδομένες επιλογές καθώς παρέχουν βασικά πλεονεκτήματα όπως, η ευκολία κατασκευής πολύπλοκων τμημάτων, το μικρό κόστος σε εργασία, και η μικρή επένδυση κεφαλαίου (Γιάννου, 2012).

Όποιο και να είναι το υλικό που επιλέγεται, θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα, σχετική ευκαμψία και σημείο τήξης μεγαλύτερο από τη μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να παρουσιαστεί στο κύκλο ζωής του σύνθετου υλικού. Η θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού αποτελεί και καθοριστικό κριτήριο επιλογής υλικού μήτρας. Συνήθως το υλικό της μήτρας έχει πολύ χαμηλότερη αντοχή, πυκνότητα και δυσκαμψία από το υλικό των ινών που χρησιμοποιούνται. Αυτό που είναι απαραίτητο να διαθέτει είναι η όσο το δυνατόν καλύτερη πρόσφυση μεταξύ ινών και μήτρας (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).

Σε περίπτωση που το συνδετικό υλικό (μήτρα) που επιλεγεί είναι πολυμερές, τότε μπορεί να είναι είτε θερμικής διαμόρφωσης (Thermoset) είτε θερμοπλαστικό (Thermoplastic). Η επιλογή του συνδετικού υλικού γίνεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες, την αντοχή σε διάβρωση, και την αντοχή έναντι σε πυρκαγιά.



Σχήμα 3-1: Κατάταξη υλικού μήτρας, ανάλογα με τη θερμοκρασία λειτουργίας του σύνθετου υλικού (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012)

3.2.1 Θερμοπλαστικές μήτρες

Οι θερμοπλαστικές μήτρες είναι στην ουσία πολυμερή, με γραμμικές μοριακές αλυσίδες που διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals. Χαρακτηριστικό των δυνάμεων αυτών είναι ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας λύνονται διατηρώντας όμως την ικανότητα επανασχηματισμού με μείωση της θερμοκρασίας. Η ιδιότητα αυτή δίνει τη δυνατότητα ευκολότερης κατεργασίας του υλικού καθώς αυτό γίνεται «μαλακότερο» και άρα πιο κατεργάσιμο σε υψηλότερες θερμοκρασίες (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012).

Το χαμηλό κόστος των συγκεκριμένων υλικών τα καθιστά ευρείας κατανάλωσης. Ως ενδεικτικά υλικά αναφέρονται οι μήτρες πολυαιθυλενίου (PE) και πολυστυρενίου (PS). Σε κάθε περίπτωση όμως, όποιο και να είναι το τελικό υλικό που θα επιλεγεί, απαιτείται μείωση της κολλώδους συμπεριφοράς αυτών στις υψηλές θερμοκρασίες κατεργασίας. Η διευκόλυνση της ροής και η αύξηση της κατεργασιμότητας αποτελούν σημαντική προτεραιότητα ώστε να διευκολύνεται ο εμποτισμός των συστατικών ενίσχυσης, και να μειώνονται οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις που συνήθως οδηγούν σε καταστροφή με τη σειρά τους των ινών του σύνθετου υλικού, στη φάση φυσικά της κατεργασίας (Γιάννου, 2012).

Όπως και σε κάθε διαθέσιμο υλικό, η τελική επιλογή εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής. Το Polyether ether-ketone (PEEK) αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα θερμοπλαστικά υλικά το οποίο διακρίνεται για την υψηλή του αντοχή έναντι θραύσης, χαρακτηριστικό το οποίο του προσδίδει υψηλή αντοχή έναντι μηχανικής φθοράς.

3.2.2 Θερμοσκληρυνόμενες μήτρες

Ομοίως πρόκειται για οργανικές ενώσεις πολυμερών και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που απαιτούνται ακόμα καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή διαθέτουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος, από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά πολυμερή, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του πλήθους των διαμοριακών δεσμών με αποτέλεσμα τα υλικά να γίνονται σκληρότερα και ψαθυρότερα (Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών, 2012). Στην αγορά διατίθενται τρία θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή:

- Πολυεστερικές ρητίνες
- Βινυλεστερικές
- Εποξειδικές ρητίνες
- Φαινολικές ρητίνες

Συνήθως στο εμπόριο το υλικό που χρησιμοποιείται ως μήτρα αναφέρεται ως σύστημα ρητίνης στο αρχικό στάδιο πριν τον πολυμερισμό του, δηλαδή τη διαδικασία στερεοποίησης. Ενώ αναφέρεται ως συνδετικό υλικό αφού πλέον έχει στερεοποιηθεί. Αρχικά ως σύστημα ρητίνης, έχει πολύ χαμηλό ιξώδες ώστε να διευκολύνεται ο εμποτισμός των συνδετικών υλικών με επιτυχία μέσα σε αυτό. Η ιδιότητα αυτή των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών διευκολύνει σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διαδικασία παραγωγής ενώ το κόστος παραμένει χαμηλά.

Πολλές από τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες έχουν περιορισμένο χρόνο που μπορεί να μείνουν ακατέργαστες. Καθώς με τον καιρό πολυμερίζονται και χάνουν τις ιδιότητες τους. Ο

χρόνος τον οποίο είναι επιτρεπτό να παραμείνουν ακατέργαστες αναφέρεται χαρακτηριστικά ως Self life. Ενώ κατά τη διαδικασία κατεργασίας, ο διαθέσιμος χρόνος μέχρι τη στιγμή που η αύξηση του ιξώδους δεν θα επιτρέπει την κατεργασία, ονομάζεται Pot life ή gel time (Γιάννου, 2012).

Ανάλογα με τον καταλύτη που έχει επιλεγεί και την εκάστοτε φυσικά ρητίνη, ο χρόνος στερεοποίησης κυμαίνεται από μερικά λεπτά ως ώρες, ενώ μπορεί να πραγματοποιηθούν σε κανονικές συνθήκες ή σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται είναι εξώθερμες, πολλές φορές αστραπιαίες, και οδηγούν στην αύξηση του ιξώδους της ρητίνης σε σημείο που μπορεί πλέον να χαράσσεται με κάποιο αιχμηρό αντικείμενο. Υπάρχουν διαφορετικά συστήματα στερεοποίησης (curing) ωστόσο το τελικό αποτέλεσμα δεν επηρεάζεται παρά μόνο η διαδικασία εφαρμογής και αποθήκευσης της ρητίνης. Μια επιπρόσθετη παράμετρος που χρειάζεται προσοχή είναι η συρρίκνωση του συνδετικού υλικού μετά το πέρας της διαδικασίας στερεοποίησης. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ογκομετρική συρρίκνωση μπορεί να κυμαίνεται από 4% για εποξειδικές ρητίνες και 8% για πολυεστέρες. Η συρρίκνωση αυτή δε συνοδεύεται και από συρρίκνωση των ινών με αποτέλεσμα την εμφάνιση εσωτερικών τάσεων, πιθανώς τη ρηγμάτωση αυτών αλλά και την απόκλιση από την αρχική τους θέση. Είναι προφανές ότι οι τελικές διαστάσεις επηρεάζονται όπως και η επιφανειακή τραχύτητα (Γιάννου, 2012).

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι συνηθέστερες ρητίνες που εμφανίζονται σήμερα στην αγορά είναι οι πολυεστερικές, οι βινυλεστερικές, οι φαινολικές, και οι εποξειδικές. Χαρακτηριστικά να αναφερθεί ότι βινυλεστερικές έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή ενώ οι πολυεστερικές μέτρια και ενισχύονται συνήθως με ίνες γυαλιού. Οι εποξειδικές θεωρούνται υψηλής απόδοσης με πολύ υψηλή μηχανική αντοχή, με θερμοκρασίας λειτουργίας ως και 200 °C ενώ χρησιμοποιούνται σε προηγμένες εφαρμογές όπως η αεροναυπηγική. Τέλος οι φαινολικές ρητίνες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες, η μέγιστη θερμοκρασία των οποίων φτάνει του 400°C. Στη συνέχεια θα γίνει αναλυτική περιγραφή της εκάστοτε ρητίνης.

• Πολυεστερικές ρητίνες

Οι πολυεστερικές ρητίνες βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις ναυπηγικές κατασκευές λόγω της ευκολίας τους κατά τη χρήση, του σχετικά λογικού κόστους, και της καλής συμπεριφοράς τους απέναντι στο θαλάσσιο περιβάλλον. Πρόκειται για ακόρεστα πολυμερή τα οποία με τη διαδικασία του πολυμερισμού μεταβαίνουν από την υγρή φάση στην στερεή όταν τεθούν υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Η σύνθεση ρητινών πολυεστέρα αποτελείται από ακόρεστους πολυεστέρες οι οποίοι είναι διαλυμένοι σε ένα ενεργό μονομερές, όπως το στυρένιο ή το vinyl toluene. Το τελευταίο μονομερές προσφέρει μεγαλύτερη θερμική απόδοση έναντι του στυρενίου. Γενικά, ο λόγος των κορεσμένων προς τα ακόρεστα συστατικά, ελέγχει το βαθμό της αντίδρασης και επιπλέον καθορίζει την ακαμψία του τελικού προϊόντος (Γιάννου, 2012).

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες πολυεστέρων, οι ορθοφθαλικού τύπου και οι ισοφθαλικού τύπου. Οι ισοφθαλικές ρητίνες έχουν υψηλότερη μηχανική αντοχή έναντι των ορθοφθαλικών. Επιπρόσθετα έχουν μέτρια αντοχή σε διάβρωση σε θερμοκρασίες μικρότερες των 82°C ενώ μπορεί να είναι ευλύγιστες ή άκαμπτες. Λόγω του υψηλότερου μοριακού βάρους, οι άκαμπτες ισοφθαλικές ρητίνες έχουν υψηλότερη χημική αντοχή. Έχουν μεγάλη αντοχή σε διάβρωση από το νερό, καλή αντοχή σε βενζίνη, λάδια, ασθενή οξέα, αλκάλια κ. α. Συνθέσεις ισοφθαλικών ρητινών με βρώμιο επιβραδύνουν την καύση σε περίπτωση πυρκαγιάς. Αντίθετα, οι ορθοφθαλικές ρητίνες είναι γνωστές και ως ρητίνες γενικής χρήσης

και δε χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικές εφαρμογές επειδή έχουν χαμηλή μηχανική αντοχή και διάβρωση.

Να σημειωθεί ότι υπάρχουν στο εμπόριο και ρητίνες με βάση το χλώριο που χρησιμοποιούνται ωστόσο σε θερμοκρασίες έως 176°C, με καλή αντοχή σε οξέα και υπεροξειδία, καλή αντοχή σε διαλυτικά μέσα, αλλά χαμηλή αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον. Η μηχανική αντοχή τους είναι μέτρια, αντισταθμίζεται όμως από τη μεγάλη πυραντοχή που τις χαρακτηρίζει.

• Βινυλεστερικές ρητίνες

Πρόκειται για ρητίνες με υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις πολυεστερικές, κατάλληλες για λειτουργία μέχρι 121°C, με μεγάλη αντοχή σε οξέα, βάσεις, διαλυτικά μέσα ενώ αυτές που περιέχουν και βρώμιο, έχουν μεγαλύτερη πυραντοχή. Η μοριακή τους δομή είναι παρόμοια με αυτή των πολυεστέρων, με μόνη διαφορά ότι οι αντιδράσεις στις μοριακές αλυσίδες πραγματοποιείται στις άκρες. Με αυτόν τον τρόπο όλο το μήκος της αλυσίδας είναι διαθέσιμο να απορροφήσει κρουστικά φορτία και εν γένει τα καθιστά ανθεκτικότερα έναντι μηχανικής αντοχής από τις πολυεστερικές ρητίνες. Επιπρόσθετα, τα μόρια βινυλεστέρα, διαθέτουν λιγότερες ομάδες εστέρων, γεγονός που τα καθιστά ανθεκτικότερα και έναντι του νερού καθώς και πολλών άλλων χημικών (Cripes).

Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό των βινυλεστερικών ρητινών είναι η δυνατότητα τους να συρρικνώνονται περισσότερο κατά τη φάση του πολυμερισμού. Παράλληλα, οι δεσμοί που αναπτύσσονται τόσο με το συστατικό ενίσχυσης όσο και με τις επιφάνειες είναι σαφώς ισχυρότεροι μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες αποκόλλησης. Ωστόσο σε περίπτωση ανυπαρξίας ειδικών προσθέτων, είναι ευαίσθητες στην ηλιακή ακτινοβολία όπως και οι πολυεστέρες.

Όσον αφορά το κόστος, πρέπει να σημειωθεί ότι οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι σαφώς ακριβότερες από τις πολυεστερικές.

• Εποξειδικές ρητίνες

Όσον αφορά τη σύνθεσή τους οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούνται από μόρια τα οποία περιέχουν κατά μέσο όρο πάνω από μια εποξειδική ομάδα ανά μόριο. Πρόκειται για ρητίνες πολύ υψηλού κόστους, που βρίσκουν κατά κύριο λόγο εφαρμογή στην αεροναυπηγική. Χρησιμοποιούνται ως συγκολλητικό μέσο (adhesive) σε κατασκευές κυψελών για αεροσκάφη, στο σκελετό των αεροσκαφών κ.α. Τις υψηλές μηχανικές τους ιδιότητες, τη μεγάλη αντοχή τους σε διάβρωση και τη δυνατότητά τους να αναπτύξουν εξαιρετικά ισχυρούς δεσμούς με άλλα σώματα ως συγκολλητικά, τις καθιστά κατάλληλες για χρήση στην περίπτωση των επιθεμάτων που μελετάται στην παρούσα εργασία.

Οι συνθήκες λειτουργίας των εποξειδικών υλικών κυμαίνονται και σε υψηλότερες θερμοκρασίες της τάξεως των 125°C και 175°C. Με τη βοήθεια προσθέτων στις βασικές εποξειδικές ρητίνες μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο η σκληρότητα της ρητίνης.

• Ρητίνες Φαινόλης

Οι ρητίνες φαινόλης έχουν μικρή πυραντοχή αλλά μικρή παραγωγή καπνού κατά την καύση συγκριτικά με άλλες ρητίνες χαμηλότερου κόστους. Το χαρακτηριστικό αυτό βρίσκει έδαφος σε εφαρμογές που η περιορισμένη εκπομπή καπνού είναι πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό.

3.3 Μέθοδοι εφαρμογής επιθεμάτων

Η χρήση των σύνθετων υλικών ως λύση επισκευής επιβάλλει τη γνώση τόσο της τεχνικής και των υλικών που χρησιμοποιούνται όσο και των πιθανών τρόπων αστοχίας που μπορεί να λάβουν χώρα. Για την εφαρμογή των επιθεμάτων υπάρχουν πολλές τεχνικές διαθέσιμες κάθε μια με τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι βασικές μέθοδοι εφαρμογής επιθεμάτων είναι:

- Χειροποίητη επάλειψη
- Έγχυση ρητίνης
- Κενού
- Προ – εμποτισμένα επιθέματα

3.3.1 Χειροποίητη επάλειψη

Στην μέθοδο αυτή γίνεται επάλειψη της επιφάνειας όπου θα εγκατασταθεί το επίθεμα με gel coat μαζί με τοποθέτηση του release film. Στη συνέχεια τοποθετούνται οι υφασμένες ίνες με περίσσεια προσοχής έτσι ώστε να γίνει σωστός προσανατολισμός αυτών. Τέλος ρητίνη απλώνεται στην επιφάνεια ομοιόμορφα με το χέρι με τη βοήθεια ενός κατάλληλου εργαλείου – ρολού έτσι ώστε το πάχος να είναι ισόποσα καταμερισμένο στην επιφάνεια του επιθέματος και να πληρώνεται κάθε πιθανό κενό. Στην συνέχεια η ρητίνη πολυμερίζεται λόγω έκθεσής της στη θερμότητα του περιβάλλοντος και στην υπεριώδη ακτινοβολία αυτού.

3.3.2 Κενού

Σκοπός της τεχνικής αυτής είναι η βελτίωση της ποιότητας συγκριτικά με τη χειροποίητη επάλειψη. Η τεχνική προϋποθέτει τη χρήση ενός καλύμματος το οποίο τοποθετείται πάνω από το επίθεμα καλύπτοντάς το πλήρως ενώ παράλληλα σφραγίζεται αεροστεγώς με την επιφάνεια έδρασης του επιθέματος. Στη συνέχεια ο αέρας που είναι εγκλωβισμένος ανάμεσα στο κάλυμμα και την επιφάνεια έδρασης αφαιρείται με αποτέλεσμα το επίθεμα να υπόκειται πλέον εξολοκλήρου στην εξωτερική ατμοσφαιρική πίεση 1 atm. Αυτή η ομοιόμορφα κατανεμημένη πίεση αναγκάζει ολόκληρη τη ρητίνη να απλωθεί ομοιόμορφα και να πληρώσει με επιτυχία κάθε κενό που τυχόν να υπάρχει. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τη χρήση ρητινών ακόμα υψηλότερου ιξώδους σε αντίθεση με την τεχνική επάλειψης με το χέρι.

3.3.3 Έγχυση ρητίνης

Πρόκειται για τη διαδικασία κατά την οποία ένα πορώδες υλικό καλύπτεται με έναν εύκαμπτο μανδύα ο οποίος συνδράμει στη δημιουργία συνθηκών κενού στο πορώδες υλικό που περιβάλλει όπως και στην περίπτωση της τεχνικής καλύμματος κενού. Ο μανδύας τοποθετείται κατάλληλα και σφραγίζεται περιμετρικά ώστε να αποτρέπεται η διέλευση αέρα. Η διαφορά ανάμεσα στην τεχνική καλύμματος κενού και στην τεχνική έγχυσης ρητίνης έγκειται στο γεγονός ότι η έγχυση της ρητίνης στη δεύτερη περίπτωση έπεται της δημιουργίας συνθηκών κενού. Ο αέρας αφαιρείται και τη θέση καταλαμβάνει η ρητίνη. Το πορώδες υλικό μπορεί να είναι υαλοϋφάσματα, υφάσματα αραμιδίου, κυψελωτός αφρός κλειστού τύπου κλπ. Η ρητίνη που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να είναι θερμοσκληρυντικού ή θερμοπλαστικού τύπου. Η ρητίνη διαβρέχει σε σύντομο χρονικό διάστημα όλη την επιφάνεια του επιθέματος χωρίς να εμφανίζονται φυσαλίδες και περισσεύματα.

3.3.4 Προ – εμποτισμένα επιθέματα

Η συγκεκριμένη τεχνική περιλαμβάνει ίνες σύνθετων υλικών οι οποίες είναι ήδη εμβαπτισμένες σε κάποια εποξειδική ρητίνη. Η ρητίνη ωστόσο αυτή δεν είναι πολυμερισμένη αρκετά με αποτέλεσμα το επίθεμα να είναι εύκαμπτο – εύπλαστο και να μπορεί να τοποθετηθεί εύκολα σε κάποια επιφάνεια. Για το λόγο αυτό τα επιθέματα συνήθως αποθηκεύονται σε χαμηλές θερμοκρασίες έτσι ώστε να προστατεύονται από πολυμερισμό. Ο πολυμερισμός είναι η διαδικασία μετάβασης της ρητίνης από την αρχική υγρή μορφή της σε μια στερεή μορφή.

3.3.5 Παρατηρήσεις

Από τις διάφορες μεθόδους κατασκευής επιθεμάτων, η μέθοδος του κενού οδηγεί σε προϊόντα με υψηλότερη ακαμψία και αντοχή σε υψηλές τάσεις συγκριτικά με τη μέθοδο επάλειψης με το χέρι. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει ως άμεση συνέπεια από το γεγονός ότι ο λόγος βάρους ινών και βάρους μήτρας είναι υψηλότερος. Ωστόσο, όπως είναι αναμενόμενο, η μέθοδος προεμποτισμένων επιθεμάτων (pre-preg) επιτυγχάνει τις μεγαλύτερες επιδόσεις μηχανικής αντοχής.

3.4 Μηχανισμοί αστοχίας επιθεμάτων

Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους ένα επίθεμα από σύνθετα υλικά μπορεί να αστοχήσει. Κατά την κατασκευή του επιθέματος και την εναπόθεσή του στο σημείο ενδιαφέροντος, παρουσιάζονται πολλές ατέλειες και ελαττώματα. Ο Πίνακας 3-1 συνοψίζει τα περισσότερα ελαττώματα που μπορεί να παρουσιαστούν σε ένα υλικό.

Πίνακας 3-1: Μηχανισμοί αστοχίας επιθεμάτων

Μέρος του επιθέματος	Ατέλεια
Μέταλλο	Ρωγμή μετάλλου
	Διάβρωση μετάλλου
Διεπιφάνεια μετάλλου – συγκολλητικού υλικού	Αποκόλληση συγκολλητικού υλικού - Μετάλλου
Συγκολλητικό υλικό	Ρωγμές συγκολλητικού υλικού
	Σχηματισμένες κοιλότητες στο εσωτερικό του συγκολλητικού υλικού
Συγκολλητικό υλικό – σύνθετο υλικό	Αποκόλληση συγκολλητικού υλικού – σύνθετου υλικού
Σύνθετο υλικό	Ρωγμές στο υλικό της μήτρας του σύνθετου υλικού
	Αποκόλληση στο εσωτερικό του σύνθετου υλικού
	Αστοχία των ινών του σύνθετου υλικού
	Σχηματισμένες κοιλότητες στο εσωτερικό των σύνθετων υλικών
	Λάθος προσανατολισμός των ινών

Οι ρωγμές που παρουσιάζονται από την πλευρά του μετάλλου δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις ρωγμές που εμφανίζονται στα άλλα μέρη του επιθέματος. Πρόκειται για ρωγμές των οποίων το άκρο της ρωγμής βρίσκεται προς το εσωτερικό του μετάλλου ενώ η ανοικτή πλευρά καλύπτεται από το επίθεμα. Η ρωγμή μπορεί να παρουσιαστεί στο μέταλλο για διάφορους λόγους συμπεριλαμβανομένης και της κόπωσης του υλικού από επαναλαμβανόμενες φορτίσεις λυγισμού. Η εμφάνιση ρωγμής στη μεταλλική επιφάνεια επιταχύνει τις διαδικασίες αποκόλλησης του συγκολλητικού υλικού από τη μεταλλική επιφάνεια.

Αστοχίες, προβλήματα συνεκτικότητας και συγκολλησιμότητας του υλικού είναι από τα βασικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται στα συγκολλητικά υλικά. Οι ρωγμές αποτελούν αρκετά πιθανές περιπτώσεις αστοχίας του συνδετικού υλικού και μπορούν να λάβουν χώρα σε οποιοδήποτε σημείο αυτού. Συνήθως παρουσιάζονται με διεύθυνση παράλληλη με το επίθεμα, ωστόσο, μπορεί να παρουσιαστούν και εγκάρσια σε οποιοδήποτε σημείο. Πέρα όμως από το συνδετικό υλικό, ρωγμές μπορεί να παρουσιαστούν και στο σύνθετο υλικό, είτε στο υλικό της μήτρας, είτε με καταστροφή των ινών είτε με αποκόλληση του συνδετικού υλικού με το συγκολλητικό υλικό.

Πέρα όμως από τις ρωγμές, παρουσιάζεται κατά την παρασκευή των επιθεμάτων το πρόβλημα εγκλωβισμού φυσαλίδων αέρα στο εσωτερικό αυτών. Τα κενά αυτά αέρος σχηματίζουν προβλήματα ασυνέχειας και συνεπώς αποτελούν εστίες συγκέντρωσης τάσεων.

Ο ρόλος του συνδετικού υλικού είναι η μεταφορά των τάσεων από τη μεταλλική επιφάνεια στο επίθεμα. Ο βασικός λόγος αστοχίας του υλικού είναι εμφάνιση ρωγμών στο εσωτερικό του κυρίως λόγω των υψηλών τάσεων που εμφανίζονται. Τόσο από πειραματικά δεδομένα όσο και στην πράξη έχει αποδειχθεί ότι κατά την αστοχία του συνδετικού υλικού ένα μέρος αυτού παραμένει στη μεταλλική επιφάνεια και ένα μέρος στην μεριά του επιθέματος επιδεικνύοντας έτσι την αδυναμία του υλικού να παρέχει την απαιτούμενη συνεκτικότητα. Σε πολλές περιπτώσεις αστοχίας κατά την αποκόλληση οι ίνες του σύνθετου υλικού μπορεί να παρασυρθούν από το τμήμα που αποκολλάται και κατά συνέπεια ένα μέρος να μείνει προσκολλημένο στη μία επιφάνεια και ένα μέρος προσκολλημένο στην αποκολλημένη. Ενδεχομένως, πολλές ίνες θα συνεχίσουν να «γεφυρώνουν» τις δύο αποκολλημένες επιφάνειες, μεταφέροντας κάποιο φορτίο. Ωστόσο σε κάθε περίπτωση η συγκόλληση θα θεωρείται ότι έχει αστοχήσει (Echtermeyer, 2012).

Η αποκόλληση του συνδετικού υλικού μπορεί να συμβεί τόσο από την πλευρά του μετάλλου όσο και από την πλευρά του σύνθετου υλικού. Στην περίπτωση που η αποκόλληση πραγματοποιηθεί από την πλευρά του μετάλλου τότε η μεταλλική επιφάνεια εκτίθεται στο περιβάλλον με αποτέλεσμα να διαβρώνεται. Με παρόμοιο τρόπο στην περίπτωση που η αποκόλληση πραγματοποιηθεί από την πλευρά του σύνθετου υλικού, τότε η πλευρά του σύνθετου υλικού εκτίθεται στο περιβάλλον ενώ ο μηχανισμός αποκόλλησης παραμένει ο ίδιος (Karatzas & Tsouvalis, 2010).

3.5 Μοντελοποίηση σύνθετων υλικών

Η κλασική θεωρία σύνθετων υλικών παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά αυτών. Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών εξαρτώνται από το υλικό που επιλέγεται κάθε φορά. Οι τιμές αυτών των ιδιοτήτων είναι αρκετά χρήσιμες καθώς είναι ανεξάρτητες το φορτίο και τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται κάθε φορά (Ansys Inc., 2013).

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία των σύνθετων υλικών, θέτονται ορισμένες βασικές παραδοχές:

- Κάθε στρώση θεωρείται ότι είναι ιδεατά συνδεδεμένη με τις υπόλοιπες και μόνο κατόπιν εξειδικευμένης διερεύνησης μελετάται το φαινόμενο της αποκόλλησης των σύνθετων υλικών.
- Οι ιδιότητες των υλικών διατηρούνται σταθερές σε όλο το πάχος της στρώσης
- Η παραμόρφωση μελετάται στην ελαστική περιοχή
- Οι ίνες του σύνθετου υλικού που είναι κάθετες σε εγκάρσια τομή του σύνθετου, παραμένουν κάθετες έπειτα από κάμψη του σύνθετου υλικού
- Οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι ομοεπίπεδες
- Το τελικό πάχος του σύνθετου υλικού θα πρέπει να είναι πολύ μικρότερο συγκριτικά με το πάχος των άλλων διαστάσεων όπως το μήκος και το πλάτος του σύνθετου υλικού.

4 Μοντελοποίηση του προβλήματος

4.1 Εισαγωγή

Για τη μελέτη του φαινομένου λυγισμού στο κατάστρωμα του πλοίου που εξετάζεται χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων ANSYS Workbench. Η μοντελοποίηση του προβλήματος με τη χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή περιλαμβάνει ορισμένα βήματα τα οποία πρέπει να πραγματοποιηθούν. Αν και η χρήση παρόμοιων λογισμικών παρέχει ανεξάντλητες δυνατότητες και προσφέρει απτά αποτελέσματα σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, υποθάλλει ωστόσο τον κίνδυνο εξαγωγής λανθασμένων αποτελεσμάτων και κατά συνέπεια παραπλανητικών συμπερασμάτων.

Τα βήματα που ακολουθούνται διακρίνονται εν γένει στα εξής:

- Σχεδιασμός του μοντέλου
- Κατασκευή πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων
- Εφαρμογή οριακών συνθηκών
- Επιλογή αλγορίθμου επίλυσης
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων και εκτέλεση εναλλακτικών περιπτώσεων.

Στα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν θα γίνει περιγραφή των βημάτων με σκοπό να γίνει κατανοητή στον αναγνώστη η ακριβής διαδικασία που ακολουθήθηκε. Όπως σε κάθε μελέτη πεπερασμένων στοιχείων υπεισέρχονται πολλές παραδοχές οι οποίες φυσικά παρατίθενται αναλυτικά έτσι ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί σαφέστερα η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων.

Το πλοίο που μοντελοποιείται είναι πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου με τις εξής κύριες διαστάσεις:

- Ολικός μήκος $L = 292 \text{ m}$
- Πλάτος $B = 45 \text{ m}$
- Κοίλο $D = 24.7 \text{ m}$
- Βύθισμα $T = 16.5 \text{ m}$
- 180,000 TDW

4.2 Διεθνής Νομοθεσία

Για την επίλυση του προβλήματος με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, εκτός από την επιλογή της γεωμετρίας του πλοίου που θα μοντελοποιηθεί, είναι απαραίτητο να οριστούν ορθά και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος καθώς και τα φορτία που θα ασκούνται σε αυτό. Η διαδικασία αυτή ίσως αποτελεί και τη σημαντικότερη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Όσο σωστή και να είναι η σχεδίαση της γεωμετρίας, όσο σωστά και να έχει γίνει η μοντελοποίηση, ένα λανθασμένα ορισμένο πρόβλημα θα αποφέρει και λανθασμένα αποτελέσματα. Στο εδάφιο αυτό, θα πραγματοποιηθεί περιγραφή όλων των οριακών συνθηκών αλλά και των φορτίων που έχουν επιλεγεί για να προκύψει μια λύση.

Οι υπολογισμοί των δυνάμεων που ασκούνται στο μοντέλο έχουν υπολογιστεί σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς που έχει εκδώσει ο IACS συγκεκριμένα για τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων. Το Δεκέμβριο του 2005 υιοθετήθηκαν από τον IACS οι Κοινοί Κανόνες και Κανονισμοί για δεξαμενόπλοια και πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων. Στους κανονισμούς αυτούς υπάγονται όλα τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων που βρίσκονται σε κλάση και η ημερομηνία του συμφωνητικού κατασκευής του πλοίου έχει

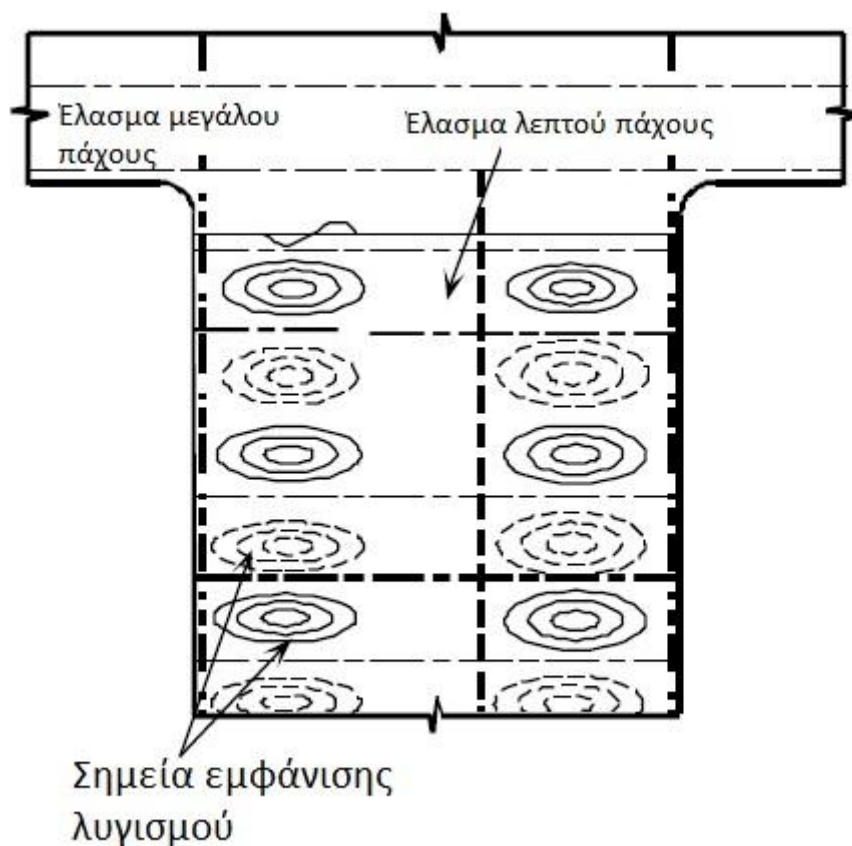
οριστεί μετά την 1 Απριλίου 2006. Τα πλοία αυτά ενδέχεται να είναι είτε μονού είτε διπλού κελύφους, απεριόριστης ακτοπλοΐας με ολικό μήκος άνω των 90 μέτρων.

Οι Κοινοί Κανόνες και Κανονισμοί αποτέλεσαν ένα μεγάλο βήμα προς τα εμπρός όσον αφορά τη θέσπιση κανονισμών σε διεθνές επίπεδο. Για πρώτη φορά ενοποιήθηκαν οι κανόνες αντοχής που διέπουν την κατασκευή πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίων και δεξαμενοπλοίων. Οι κανόνες που προέκυψαν αποτέλεσαν απόρροια όλης της συσσωρευμένης γνώσης όλων των νηογνωμόνων που συμμετέχουν στον IACS, ενώ παράλληλα με την κοινή χρήση των κανονισμών ενισχύεται η διαύγεια στα θέματα της αντοχής.

4.3 Αιτία φαινομένου λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες ελάσματος του καταστρώματος πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην

Παράλληλα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς ο IACS έχει εκδώσει με τη μορφή Συστάσεων⁵ τις Οδηγίες για Επιθεωρήσεις, Εκτιμήσεις και Επισκευές Μεταλλικής Κατασκευής Πλοίων μεταφοράς Χύδην Φορτίου (IACS, 2007). Στις οδηγίες αυτές γίνεται σαφής αναφορά στο πρόβλημα το οποίο εξετάζεται στην παρούσα εργασία και συγκεκριμένα στο φαινόμενο του λυγισμού των εγκάρσιων λωρίδων ελάσματος του καταστρώματος (cross deck plating). Σύμφωνα με τις συγκεκριμένες οδηγίες το σημείο αυτό του πλοίου υπόκειται σε εγκάρσιες θλιπτικές δυνάμεις λόγω των πιέσεων που δέχεται η πλευρά του πλοίου ως αποτέλεσμα σφυρόκρουσης από κύματα που προσπίπτουν σε αυτήν. Οι δυναμικές αυτές πιέσεις σε συνδυασμό με τη στρεπτική καταπόνηση που δέχεται το πλοίο λόγω της ύπαρξης του κύματος, οδηγούν στην εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού. Στο σχήμα που ακολουθεί, αναπαρίσταται η κάτοψη του ελάσματος του καταστρώματος και ενδεικτικά σημεία εμφάνισης του φαινομένου.

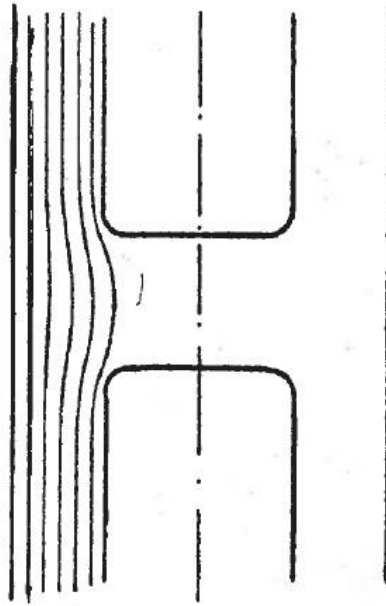
⁵ IACS Recommendations



Σχήμα 4-1: Σημεία εμφάνισης λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες καταστρώματος σε πλοία Χύδην Φορτίου(IACS, 2007).

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζονται τα σημεία που εμφανίζεται κατά κύριο λόγο το φαινόμενο του λυγισμού. Σύμφωνα με το σχήμα, τα σημεία του λυγισμού περιορίζονται ανάμεσα στα ενισχυτικά. Γι' αυτό το λόγο πολλές φορές προτείνεται ως μέτρο αντιμετώπισης του προβλήματος, η επιπρόσθετη ενίσχυση του καταστρώματος. Στην παρούσα εργασία είναι επιθυμητή, η μελέτη της επίδρασης επιθεμάτων από σύνθετα υλικά στη μείωση του φαινομένου του λυγισμού και όχι η επίδραση επιπρόσθετων ενισχυτικών. Για το λόγο αυτό, η χρήση επιπρόσθετων ενισχυτικών δεν θα εξεταστεί, και μάλιστα κατά τη μοντελοποίηση της γεωμετρίας, θα γίνει αφαίρεση αρκετών από τα εγκάρσια ενισχυτικά που προβλέπονται στα κατασκευαστικά σχέδια έτσι ώστε να διευκολυνθεί η παρουσία του προβλήματος.

Αν και οι τάσεις που αναπτύσσονται στο έλασμα του καταστρώματος λόγω διαμήκους κάμψεως του πλοίου σε καταστάσεις sagging και hogging είναι πολύ υψηλές, στην περίπτωση ενός πλοίου μεταφοράς φορτίων χύδην στις περιοχές των εγκάρσιων λωρίδων καταστρώματος μπορούν να αμεληθούν. Η παραδοχή αυτή οφείλεται στην ύπαρξη ασυνέχειας στο έλασμα του καταστρώματος και συγκεκριμένα στην ύπαρξη του μεγάλου μεγέθους στομίων των κυτών. Η περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων, δε συνεισφέρει στη διαμήκη αντοχή του πλοίου. Υπάρχει μια «νεκρή ζώνη» τάσεων πρύμνηθεν και πλώραθεν από τα στόμια των κυτών (Getz, 1971). Η περιοχή ενδιαφέροντος στην παρούσα εργασία στην οποία παρουσιάζεται ο λυγισμός, βρίσκεται σε αυτές τις περιοχές της εγκάρσιας λωρίδας του καταστρώματος.



Σχήμα 4-2: Αναπαράσταση ροής τάσεων στο έλασμα του καταστρώματος σε καταστάσεις διαμήκους κάμψης (Getz, 1971)

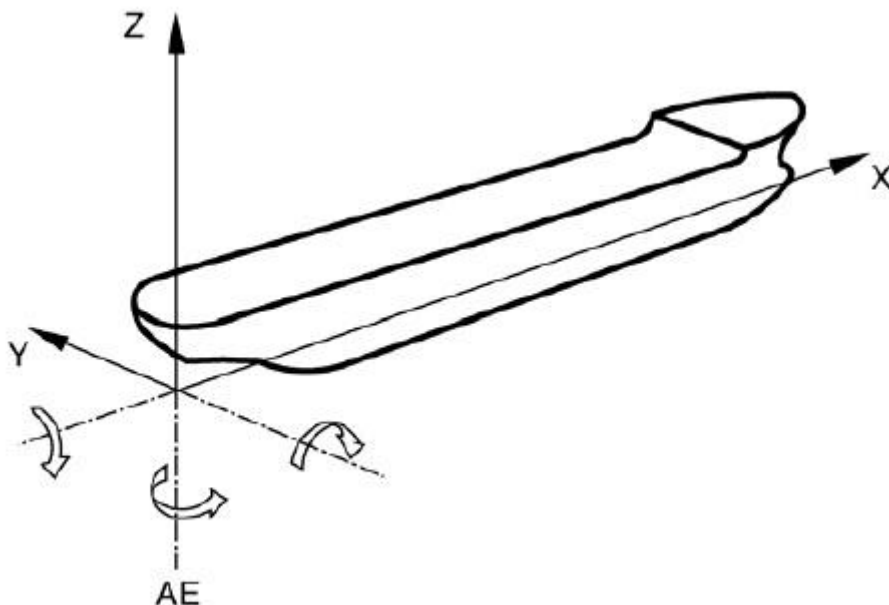
Κάθε άνοιγμα στο έλασμα του καταστρώματος προκαλεί διαταραχή στη ροή των τάσεων προκαλώντας κατά τόπους συγκέντρωση τάσεων. Λόγω της κάμψης του καταστρώματος, η ροή των τάσεων αναγκάζεται να διέλθει από το έλασμα που απομένει περιμετρικά του ανοίγματος όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 4-2. Μάλιστα οι περιοχές που βρίσκονται πλησιέστερα στο άνοιγμα, με εξαίρεση των περιοχών των εγκάρσιων λωρίδων, καταπονούνται περισσότερο συγκριτικά με τις περιοχές που βρίσκονται σε απόσταση από το άνοιγμα (Hopkinson, Gupta, & Sefcsik, 2002).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι, τα τελευταία χρόνια, η σχεδίαση των πλοίων έχει εξελιχτεί αρκετά με γνώμονα προβλήματα όπως αυτό του λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες του καταστρώματος. Το πλοίο, είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε η ίδια του η γεωμετρία να μετριάξει το φαινόμενο του λυγισμού, αποτρέποντας τη μεταφορά ομοεπίπεδων θλιπτικών δυνάμεων στα ελάσματα του καταστρώματος. Έχοντας υπόψη όλα αυτά, και με στόχο τη διευκόλυνση της μοντελοποίησης του προβλήματος, έγινε ταυτόχρονα και περιορισμένη χρήση ενισχυτικών στο σημείο ενδιαφέροντος.

4.4 Σύστημα συντεταγμένων

Για τους υπολογισμούς που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια, πολλές φορές είναι απαραίτητη η χρήση συντεταγμένων x , y , z έτσι ώστε να είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός του εκάστοτε σημείου επί του πλοίου. Η επιλογή του καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων θα πρέπει σε κάθε πλοίο να πραγματοποιείται με την ίδια φιλοσοφία ούτως ώστε να μπορούν να εφαρμόζονται ορθώς οι κανονισμοί.

Η επιλογή των αξόνων γίνεται με βάση τις υποδείξεις των Κοινών Κανόνων και Κανονισμών του IACS. Ως αρχή των αξόνων ορίζεται η τομή του επιπέδου συμμετρίας του πλοίου, της γραμμής βάσεως και του πλέον προμναίου σημείου του πλοίου. Ως άξονας των x επιλέγεται ο διαμήκης άξονας. Ως άξονας των y επιλέγεται ο εγκάρσιος άξονας ενώ ως άξονας των z επιλέγεται ο κατακόρυφος άξονας. Στο σχήμα που ακολουθεί γίνεται αναπαράσταση του ορισμού των αξόνων.

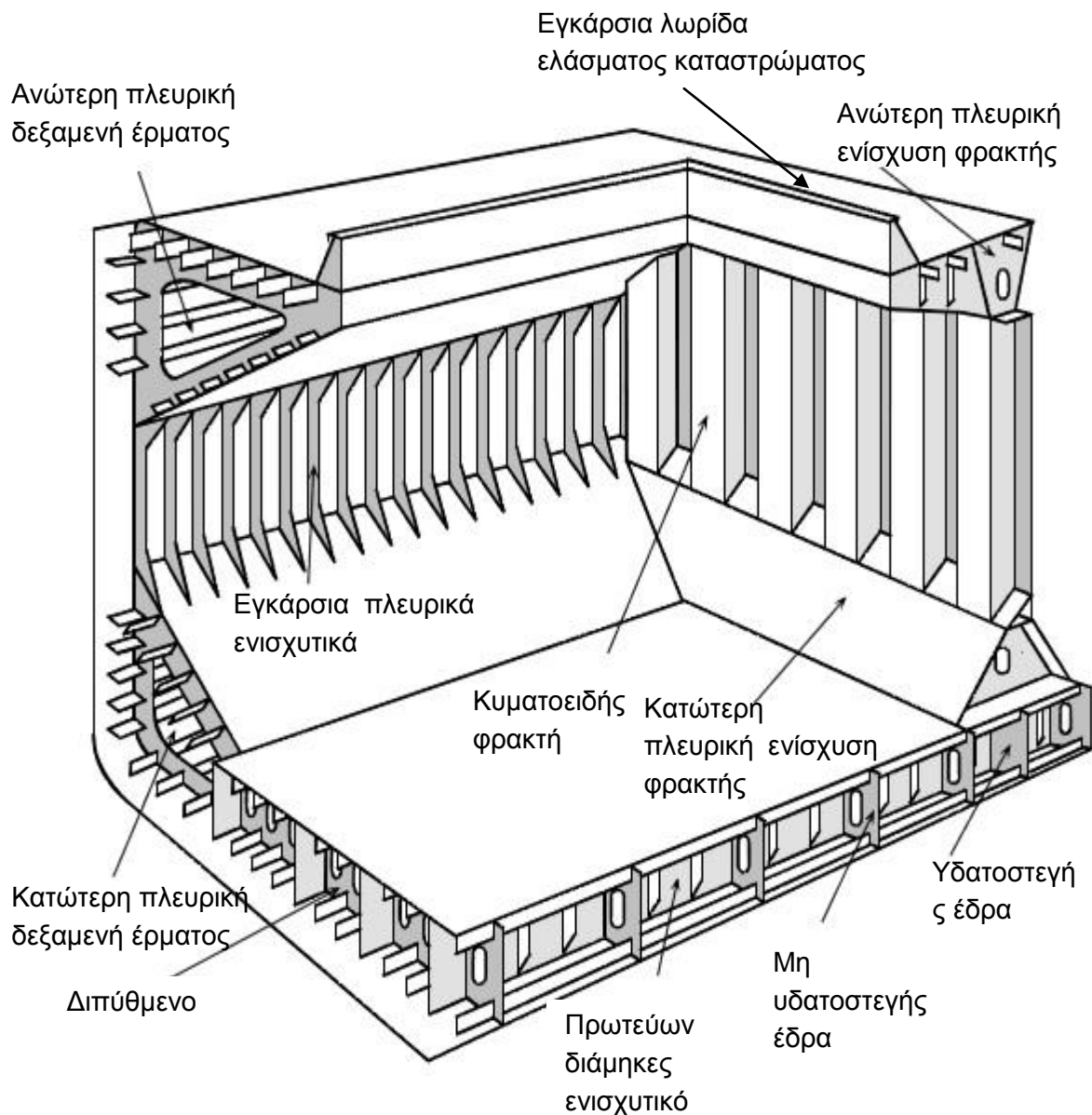


Σχήμα 4-3: Ορισμός των αξόνων x , y και z καθώς και της φοράς αυτών σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).

4.5 Σχεδιασμός μοντέλου

Ο σχεδιασμός του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ANSYS και συγκεκριμένα του πρόσθετου λογισμικού που αυτό περιλαμβάνει το Design Modeller. Φυσικά για λόγους απλότητας μοντελοποιήθηκε μόνο ένα τμήμα του πλοίου και όχι ολόκληρο το πλοίο. Το μοντέλο θα πρέπει να περιλαμβάνει το κυρίως κατάστρωμα του πλοίου μεταφοράς χύδην φορτίου και συγκεκριμένα στις εγκάρσιες λωρίδες ελάσματος στο κατάστρωμα (cross deck).

Το σημείο στο πλοίο που επιλέχθηκε να μοντελοποιηθεί βρίσκεται στη μέση τομή του πλοίου. Μια τυπική μορφή του bulk carrier σε αυτό το σημείο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Σχήμα 4-4: Άποψη χώρου φορτίου σε ένα τυπικό bulk carrier (Hughes, 1988)

Το Σχήμα 4-4 παρουσιάζει μια τυπική μορφή των κατασκευαστικών στοιχείων ενός bulk carrier. Στο σχήμα διακρίνεται η κυματοειδής φρακτή καθώς και η ανώτερη και κατώτερη ενίσχυση αυτής (Lower & Upper Stool). Η κατώτερη ενίσχυση της φρακτής εδράζεται πάνω στο διπύθμενο ενώ η ανώτερη στηρίζει την εγκάρσια λωρίδα ελάσματος στο κατάστρωμα. Διακρίνονται επίσης τα ελάσματα του πυθμένα και του διπυθμένου, οι έδρες του πυθμένα καθώς και τα πρωτεύοντα και δευτερεύοντα διαμήκη ενισχυτικά. Τέλος ο χώρος του φορτίου οριοθετείται από την ανώτερη και την κατώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος και φυσικά από το πλευρικό έλασμα μαζί με τα εγκάρσια ενισχυτικά του.

Η κυματοειδής φρακτή έχει το πλεονέκτημα ότι απαλλάσσεται από τη χρήση ενισχυτικών, καθώς την απαραίτητη ακαμψία την προσφέρει η χαρακτηριστική διαμόρφωσή της. Επιπρόσθετα διευκολύνει σημαντικά τις διαδικασίες φορτοεκφόρτωσης καθώς και τον καθαρισμό από υπολείμματα φορτίου συγκριτικά με τις ενισχυμένες φρακτές (Tagart, 1980). Ένα επιπρόσθετο χαρακτηριστικό των κυματοειδών φρακτών είναι το γεγονός ότι έχουν περιορισμένη ακαμψία στη διεύθυνση του σχηματισμένου κύματος. Για την αντιμετώπιση αυτής της ανεπάρκειας, η χρήση ενός ενισχυτικού στη διεύθυνση του κύματος θα αύξανε την ακαμψία της φρακτής ωστόσο θα δημιουργούσε προβλήματα κατά τη διαχείριση του φορτίου (Tagart, 1980).

Οι ανώτερες και οι κατώτερες δεξαμενές καθώς και οι δεξαμενές διπυθμένων χρησιμεύουν ως δεξαμενές έρματος. Η κλίση της κεκλιμένης πλευράς των ανώτερων πλευρικών δεξαμενών, συνεισφέρει στον περιορισμό της μετατόπισης του φορτίου εν πλω γεγονός που θα έθετε σε κίνδυνο την ευστάθεια του πλοίου. Σε πλοία μεταφοράς σιταριού, λαμβάνεται υπόψη η ελεύθερη επιφάνεια του φορτίου και για το σκοπό αυτό τοποθετούνται πολλές φορές ειδικά χωρίσματα έτσι ώστε να περιορίζεται το φαινόμενο αυτό. Οι χώροι φορτίου χωρίζονται σε επιμέρους χώρους σε αριθμούς που είναι ανάλογοι του μήκους του πλοίου και του τύπου του φορτίου (Shama, 2013).

Τα τελευταία χρόνια, νέοι διεθνείς κανονισμοί έχουν βελτιώσει σημαντικά το σχεδιασμό των πλοίων μεταφοράς χύδην φορτίου έτσι ώστε να αυξάνεται η ασφάλεια και να διευκολύνεται η επιθεώρηση και η συντήρηση. Εκτός από διπύθμενα σχεδιάζονται και με διπλά κελύφη έτσι ώστε να προστατεύεται η εισροή νερού στο χώρο του φορτίου σε περίπτωση εμφάνισης κάποιου ρήγματος εξαιτίας κάποιας πιθανής αστοχίας του υλικού είτε στην περίπτωση πρόσκρουσης.

Στα μεγάλα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, υιοθετείται διαμήκης ενίσχυση και μάλιστα γίνεται χρήση εδρών με μέγιστη ισαπόσταση 2.5 m έτσι ώστε να διαθέτει το κατάστρωμα διπυθμένου την απαραίτητη αντοχή απέναντι στα φορτία μεγάλου βάρους που μεταφέρονται. Σε πολλά πλοία τέτοιου τύπου τοποθετούνται και επιπρόσθετες ενισχύσεις πέρα από τη συμβατική, γι' αυτόν ακριβώς το λόγο. Η διαμήκης ενίσχυση μπορεί να εντοπίζεται και στις ανώτερες και κατώτερες δεξαμενές ενώ δε λείπουν και τα πρωτεύοντα εγκάρσια ενισχυτικά για επιπρόσθετη ενίσχυση. Μερικά από τα εγκάρσια ενισχυτικά αντικαθίστανται συνήθως από φρακτές έτσι ώστε να οριοθετούνται και οι δεξαμενές φορτίου (Shama, 2013).

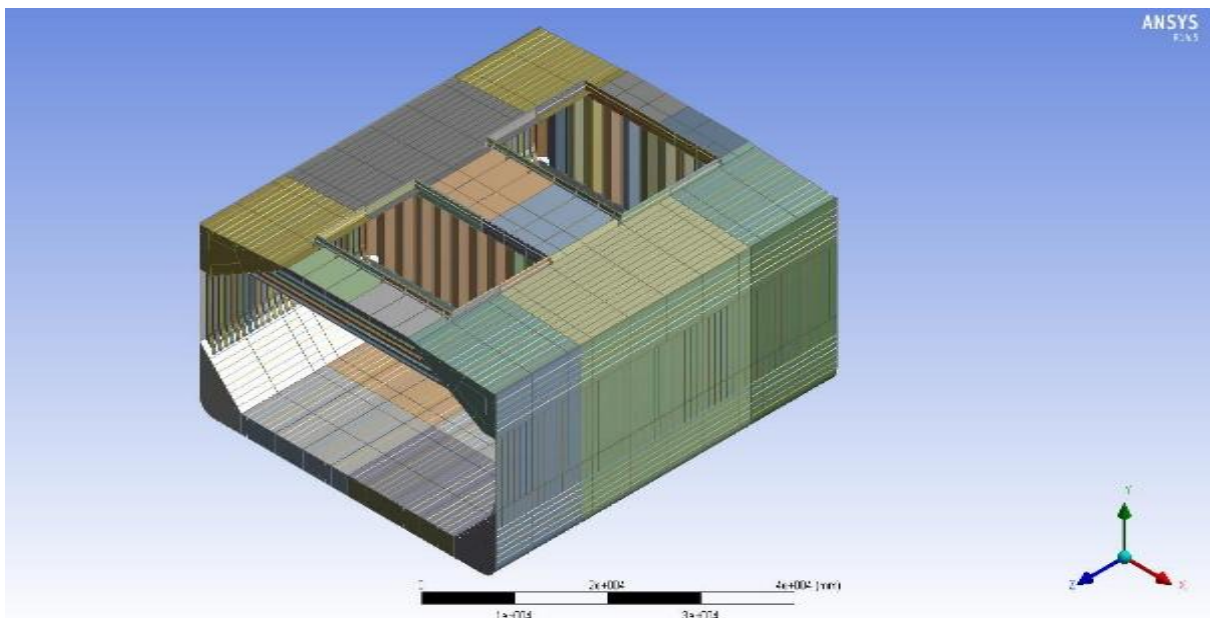
Στα πλαίσια της εργασίας το μοντέλο που θα σχεδιαστεί με τη βοήθεια H/Y δεν θα περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που περιγράφονται εν συντομία στα παραπάνω εδάφια. Συγκεκριμένα θα μοντελοποιηθεί τμήμα του πλοίου που περιλαμβάνει δύο κύτη πρώραθεν και πρύμνηθεν της μέσης τομής του πλοίου. Το τμήμα αυτό θα περιλαμβάνει στο μέσον του, την υπό εξέταση εγκάρσια λωρίδα καταστρώματος ενώ στα άκρα του θα περιορίζεται στις εγκάρσιες φρακτές του φορτίου. Ο λόγος που επιλέγεται ένα μικρότερο μοντέλο έναντι ενός μεγάλου είναι το αυξημένο υπολογιστικό κόστος. Η μελέτη του φαινομένου του λυγισμού σε

ελάσματα μικρού μεγέθους, απαιτεί τη χρήση στοιχείων ακόμα μικρότερου μεγέθους έτσι ώστε να σχηματιστεί ένα αρκετά πυκνό πλέγμα ιδιαίτερα στην περιοχή λυγισμού.

Η επιλογή του τμήματος του πλοίου είναι τέτοια ώστε να διευκολύνεται ο καθορισμός των οριακών συνθηκών. Η μοντελοποίηση έως τις εγκάρσιες φρακτές αποτελεί μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση του μοντέλου, καθώς οι φρακτές αποτελούν ισχυρά σημεία ενίσχυσης των πλευρών του πλοίου. Συνεπώς, η θεώρηση πάκτωσης στα άκρα του μοντέλου, προσφέρει την απαραίτητη στήριξη του μοντέλου ενώ παράλληλα δεν επιφέρει σημαντική αλλοίωση των αποτελεσμάτων.

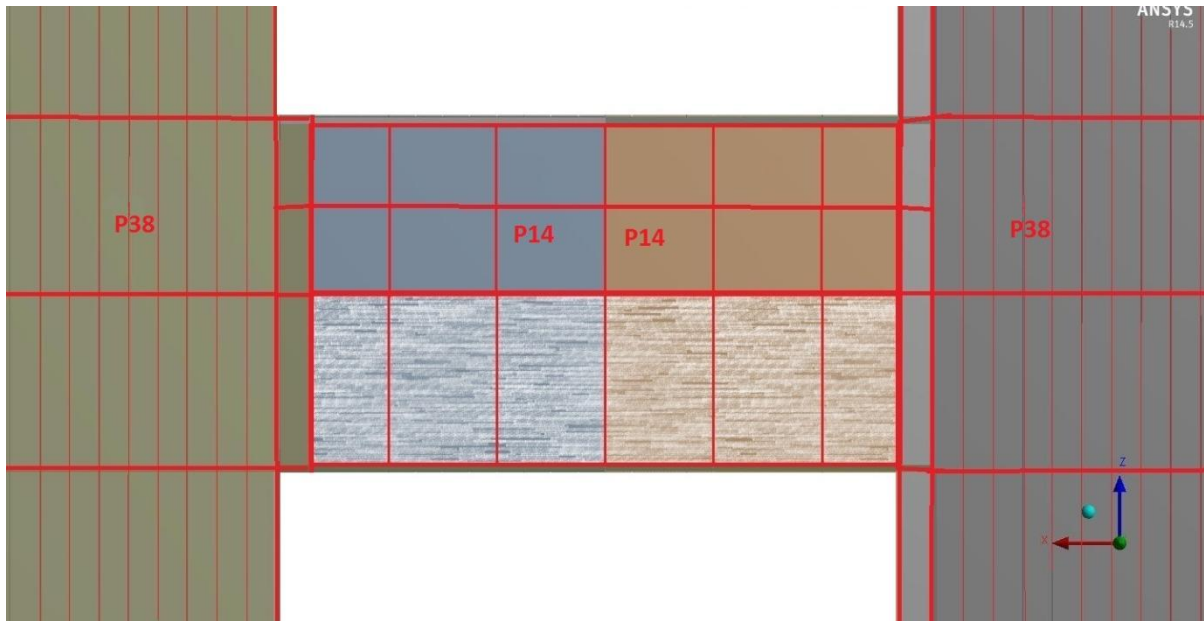
Ο σχεδιασμός του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Design Modeler. Το λογισμικό αυτό είναι μέρος του λογισμικού Ansys με το οποίο πραγματοποιήθηκε η μελέτη. Προσφέρει τη δυνατότητα μοντελοποίησης ελασμάτων με χρήση δισδιάστατων στοιχείων. Το πάχος των ελασμάτων καθορίζεται στη συνέχεια σαν ιδιότητα του εκάστοτε ελάσματος που του προσφέρει την κατάλληλη ροπή αντίστασης και συνεπώς ακαμψία.

Τα σχήματα που ακολουθούν αποσκοπούν στο να δώσουν στον αναγνώστη μια εικόνα του μοντέλου που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 4-5: Ισομετρική άποψη του μοντέλου που αναπτύχθηκε

Το Σχήμα 4-5 αναπαριστά ολόκληρο το μοντέλο – τμήμα πλοίου που αναπτύχθηκε με τη χρήση του λογισμικού Design Modeler. Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα, το μοντέλο περιλαμβάνει τα δύο κύτη του πλοίου με αρχή και πέρας τις δύο εγκάρσιες κυματοειδείς φρακτές του φορτίου ενώ είναι σχεδιασμένο σε όλο το ύψος του. Η επιλογή του τμήματος του πλοίου που επιλέγεται είναι τέτοια ώστε να περιλαμβάνει στο μέσον της ολόκληρη την εγκάρσια λωρίδα του καταστρώματος η οποία θα μελετηθεί έναντι λυγισμού. Η εμφάνιση του λυγισμού αναμένεται να παρουσιαστεί στην κεντρική εγκάρσια λωρίδα καταστρώματος στην οποία και προβλέπεται η τοποθέτηση του επιθέματος και η συγκριτική αξιολόγηση διάφορων εκδοχών του επιθέματος. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται με ακρίβεια το σημείο που τοποθετείται το επίθεμα.



Σχήμα 4-6: Κάτοψη της εγκάρσιας διασταυρούμενης λωρίδας καταστρώματος και αναπαράσταση του σημείου εφαρμογής του επιθέματος

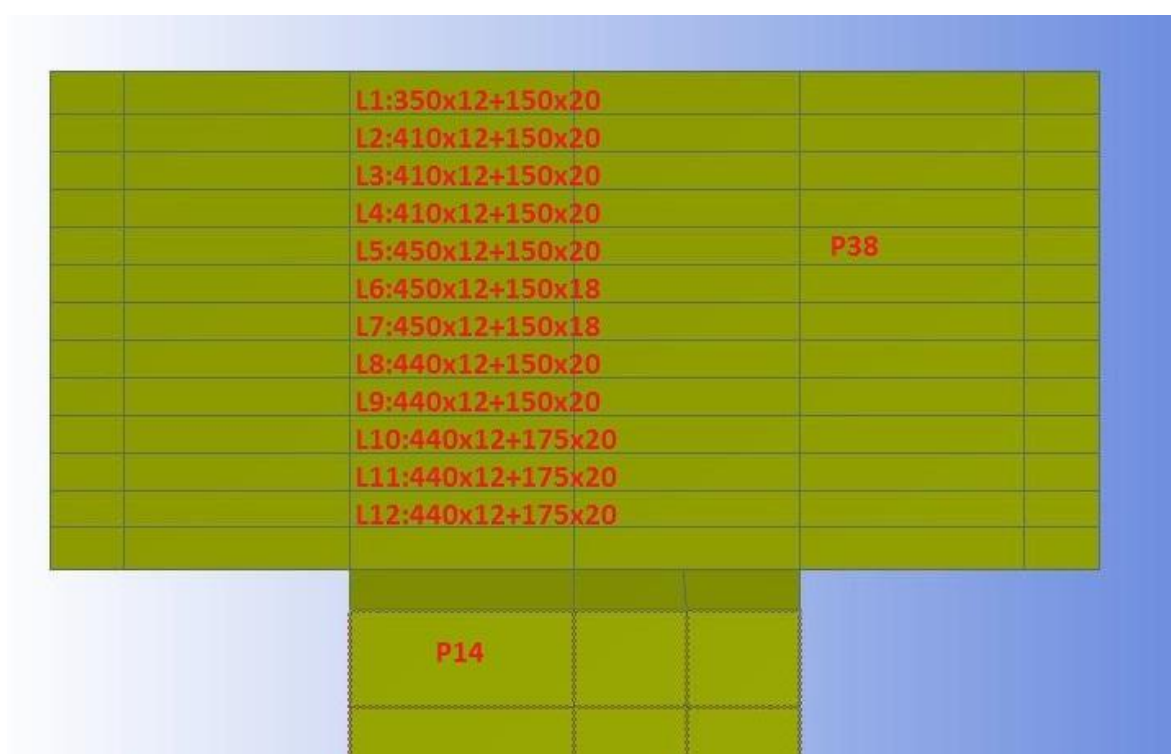
Το Σχήμα 4-6 παρουσιάζει γραμμοσκιασμένο το ακριβές σημείο τοποθέτησης του επιθέματος. Με κόκκινο χρώμα αποτυπώνονται οι ενισχυτικές δοκοί που βρίσκονται κάτω από τα ελάσματα. Η επιλογή του σημείου, αλλά και της επιφάνειας που καλύπτει το επίθεμα καθορίζεται από την ενίσχυση του καταστρώματος στο σημείο αυτό. Όπως έχει αναφερθεί, στο σημείο αυτό του καταστρώματος, για να διευκολυνθεί η εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού, και εφόσον η μελέτη έχει μόνο συγκριτικό χαρακτήρα, έχουν αφαιρεθεί πολλά από τα διαμήκη δευτερεύοντα ενισχυτικά που υπάρχουν στην πραγματικότητα. Τα ενισχυτικά που έχουν απομείνει είναι η ανώτερη εγκάρσια ενίσχυση της φρακτής και τα μπρακέτα στήριξης της εγκάρσιας λωρίδας του καταστρώματος όπως φαίνονται στο Σχήμα 4-10. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη διάταξη, η μεγαλύτερη ανυποστήρικτη επιφάνεια ελασμάτων εντοπίζεται στο σημείο που έχει τοποθετηθεί το επίθεμα. Η περιοχή αυτή του καταστρώματος εξαιτίας της μεγάλης ανυποστήρικτης επιφάνειας αναμένεται να παρουσιάσει λυγισμό.

Η διαμόρφωση της περιοχής των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος καθορίζει τα σημεία του ελάσματος στα οποία είναι πιθανότερο να εμφανιστεί λυγισμός. Στο Σχήμα 4-6 αναπαρίστανται με κόκκινο χρώμα όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία της περιοχής του καταστρώματος. Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει τα σημαντικότερα πάχη ελασμάτων στην περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων έτσι ώστε να δοθεί μια εικόνα της ναυπηγικής κατασκευής στον αναγνώστη.

Πίνακας 4-1: Κατασκευαστικά στοιχεία στην περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος

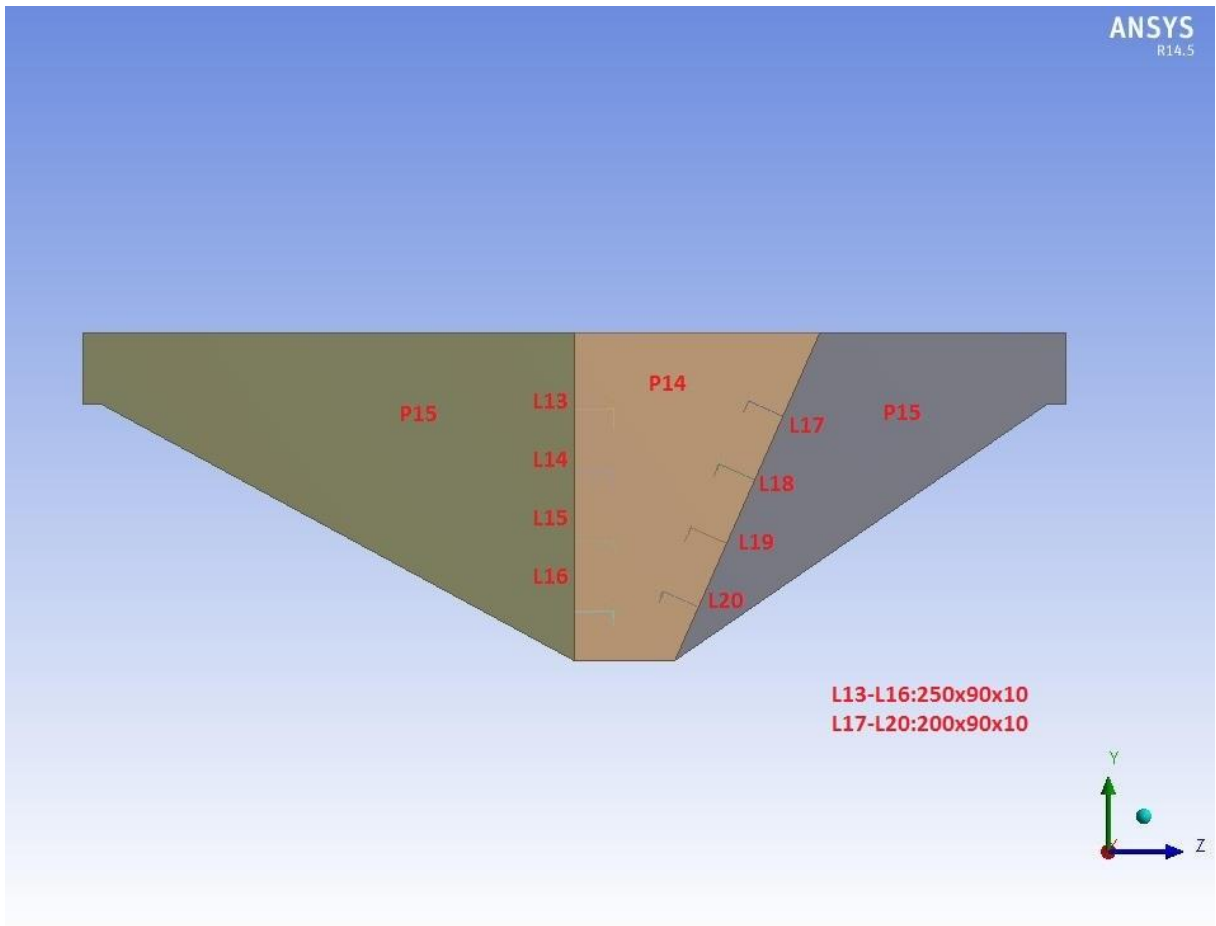
Πάχος ελάσματος καταστρώματος στην περιοχή ενδιαφέροντος	14mm
Πάχος ελάσματος ανώτερης ενίσχυσης της φρακτής	14mm
Πάχος εγκάρσιων ενισχυτικών ελασμάτων της ανώτερης ενίσχυσης φρακτής	14 mm
Πάχος μπρακέτων ενίσχυσης εγκάρσιων λωρίδων ελάσματος	15mm
Πάχος ελάσματος καταστρώματος εκτός εγκάρσιων λωρίδων	38mm
Πάχος εγκάρσιων ενισχυτικών ανώτερων πλευρικών δεξαμενών	18 mm

Ο παραπάνω Πίνακας συνοψίζει τα πάχη των ελασμάτων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται τα διαμήκη ενισχυτικά του καταστρώματος όπως διατυπώνονται στα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου.

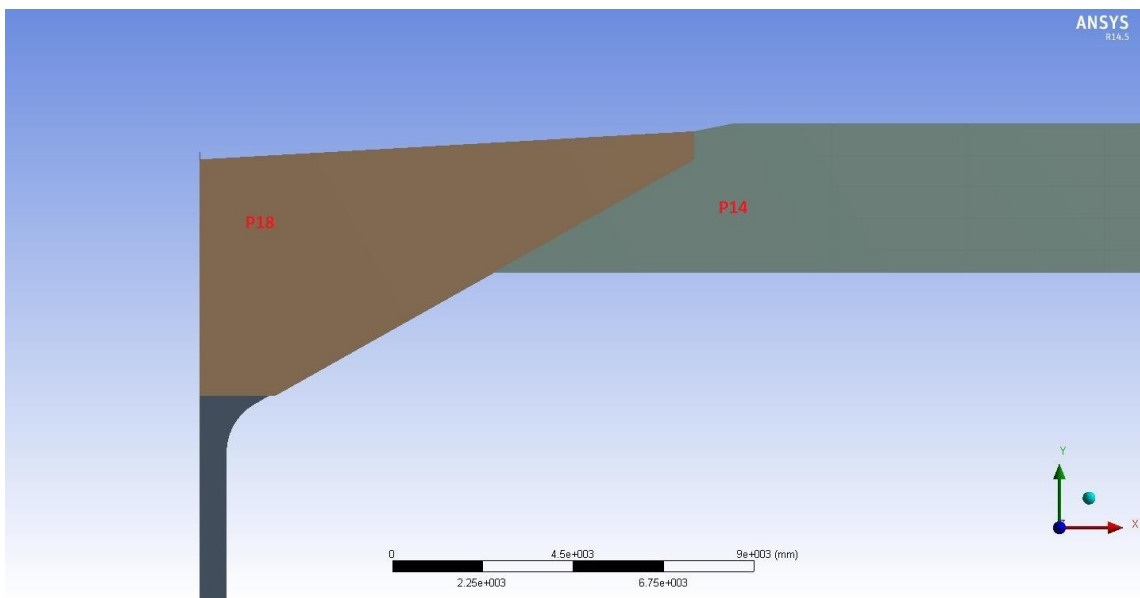


Σχήμα 4-7: Απεικόνιση διαμήκων ενισχυτικών στο έλασμα του καταστρώματος σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου.

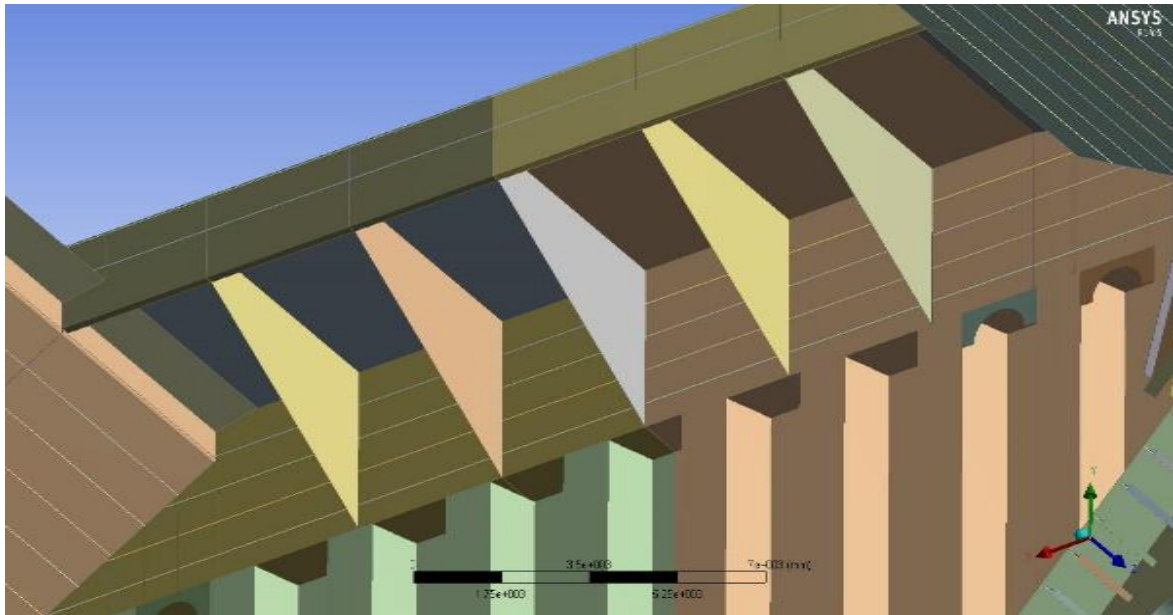
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται επίσης η μεγάλη μεταβολή του πάχους των ελασμάτων του καταστρώματος. Στην πραγματικότητα η μεταβολή του πάχους γίνεται βαθμιαία ωστόσο για λόγους απλότητας της γεωμετρίας στην παρούσα εργασία έχει αμεληθεί. Τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουν τα διαμήκη και εγκάρσια ενισχυτικά της ανώτερης ενίσχυσης της φρακτής καθώς και το πάχος της εγκάρσιας ενίσχυσης της ανώτερης πλευρικής δεξαμενή έρματος.



Σχήμα 4-8: Απεικόνιση του πάχους των μπρακέτων στήριξης της εγκάρσιας λωρίδας καταστρώματος αλλά και της εγκάρσιας φρακτής της ανώτερης ενίσχυσης της φρακτής



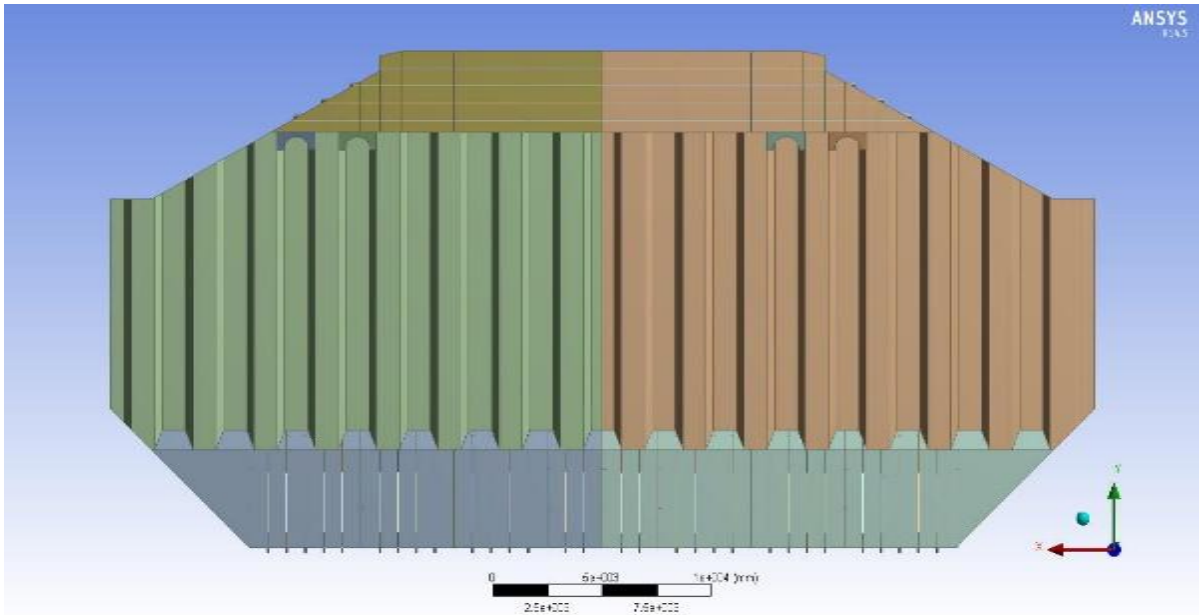
Σχήμα 4-9: Απεικόνιση πάχους ελασμάτων εγκάρσιας ενίσχυσης της ανώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος και της ανώτερης ενίσχυσης της κυματοειδούς φρακτής



Σχήμα 4-10: Αναπαράσταση των διαμήκων στηριγμάτων της διασταυρούμενης λωρίδας καταστρώματος

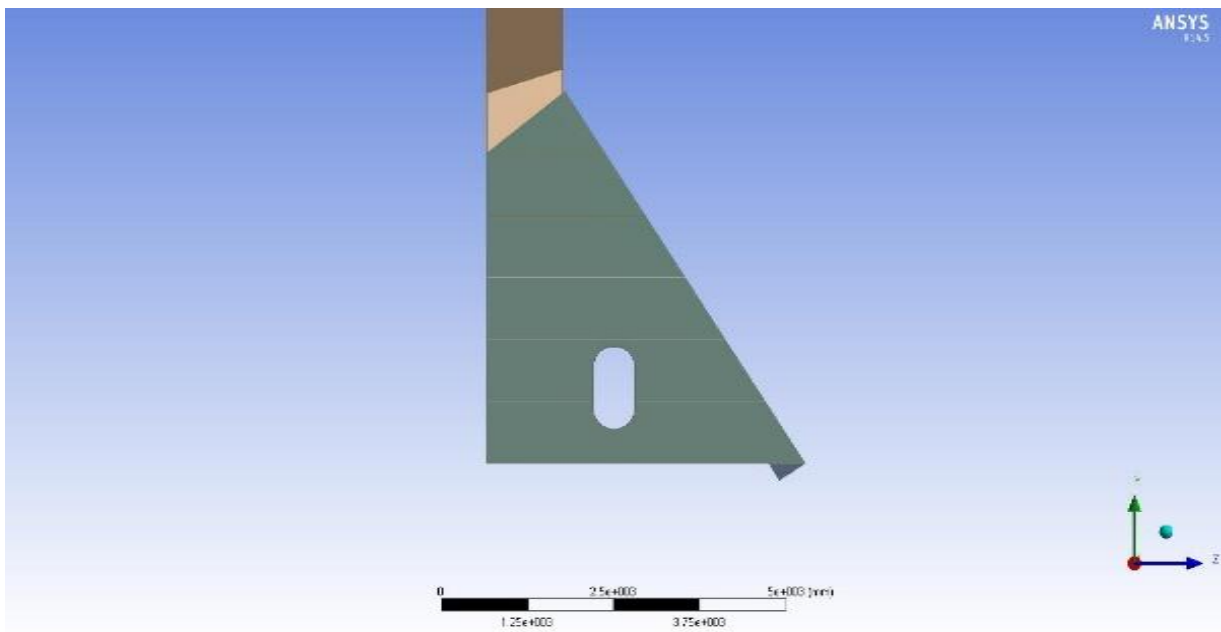
Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου, η διαμόρφωση της ανώτερης εγκάρσιας ενίσχυσης της φρακτής χωρίζει το έλασμα του καταστρώματος σε δύο άνισες επιφάνειες. Όπως είναι λογικό, η εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού ευνοείται στην περίπτωση που η ανυποστήρικτη επιφάνεια είναι μεγαλύτερη. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το ανυποστήρικτο τμήμα ελάσματος αποτελεί ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με διαστάσεις $500 \times 250 \text{ mm}$. Η μεγάλη διάσταση έχει την κατεύθυνση του άξονα των X (κάθετη στην κυματοειδή φρακτή) ενώ η μικρή διάσταση έχει την κατεύθυνση του άξονα των Y (Παράλληλη με την κυματοειδή φρακτή). Η ιδιαιτερότητα αυτή των διαστάσεων των ανυποστήρικτων ελασμάτων επηρεάζει την κατανομή των αναπτυσσόμενων ορθών και διατμητικών τάσεων στο έλασμα όπως παρουσιάζεται και σε επόμενη παράγραφο.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα σημεία του μοντέλου, αυτά με το περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζονται στα επόμενα σχήματα.



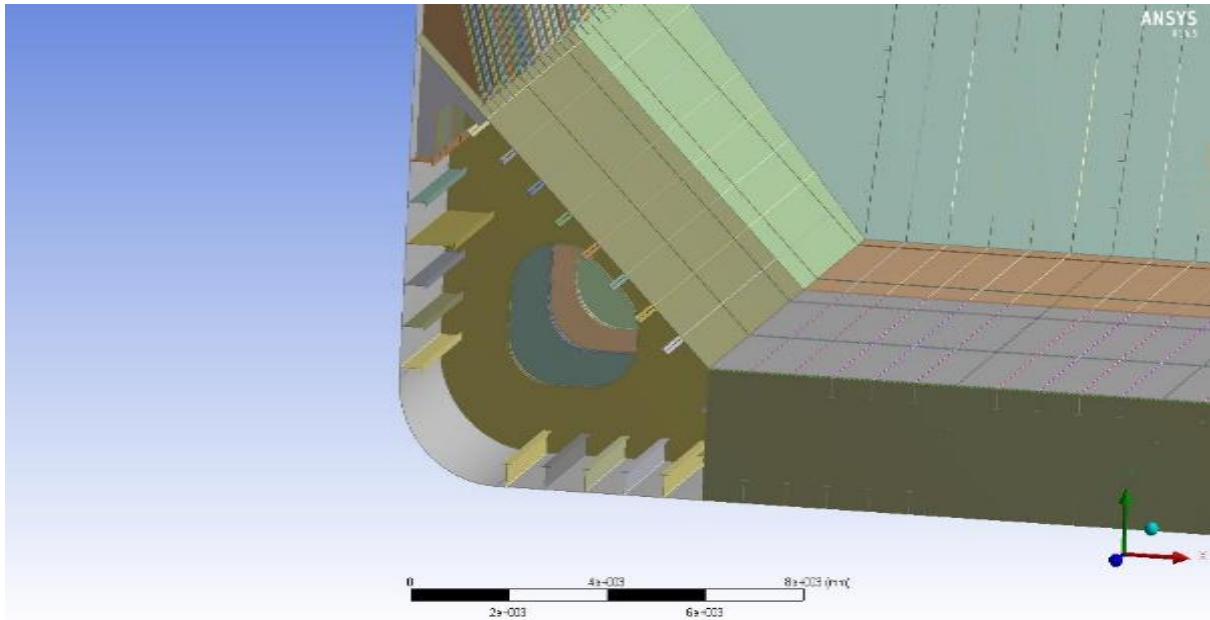
Σχήμα 4-11: Κυματοειδής φρακτή μοντέλου με ανώτερη και κατώτερη πλευρική ενίσχυση

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η κυματοειδής φρακτή του μοντέλου καθώς και η ανώτερη και η κατώτερη πλευρική ενίσχυση της φρακτής. Επειδή ο ρόλος της εγκάρσιας φρακτής στο συγκεκριμένο φαινόμενο είναι καθοριστικός όσον αφορά την εγκάρσια αντοχή και απόκριση του μοντέλου στις πλευρικές πιέσεις, η μοντελοποίηση της φρακτής ακολουθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου. Οι παραδοχές που έχουν ληφθεί αφορούν την ακριβή απεικόνιση της γεωμετρίας της φρακτής και συγκεκριμένα την απλούστευση του κυματισμού της φρακτής ώστε να διευκολυνθεί η κατασκευή του υπολογιστικού πλέγματος. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η ενίσχυση της κατώτερης ενίσχυσης της φρακτής.



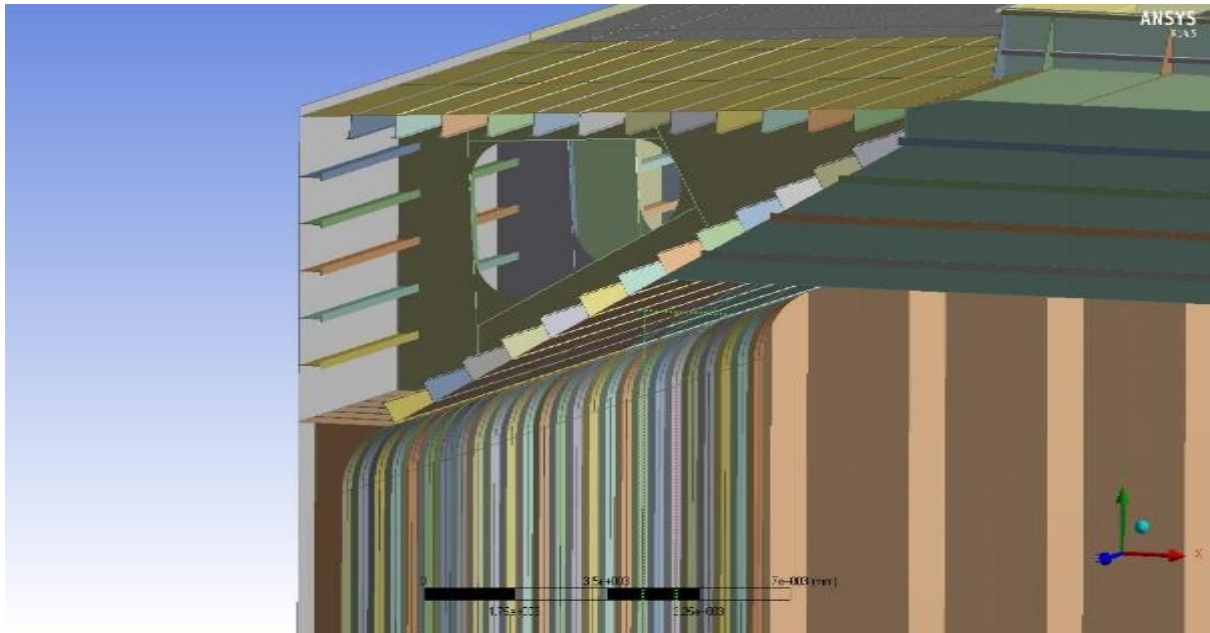
Σχήμα 4-12: Κατώτερη ενίσχυση κυματοειδούς φρακτής

Στο Σχήμα 4-12 αναπαρίσταται ολόκληρη η ενίσχυση της κατώτερης κυματοειδούς φρακτής. Παρατηρείται η ύπαρξη εγκάρσιων ενισχυμένων φρακτών καθώς και περιμετρικών εγκάρσιων ενισχυτικών. Επίσης παρατηρείται η ύπαρξη των διαμήκων ενισχυτικών στη διεύθυνση τη κατώτερης ενίσχυσης της φρακτής. Η ενίσχυση ακολουθεί τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου. Το επόμενο σχήμα απεικονίζει την κατώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος.



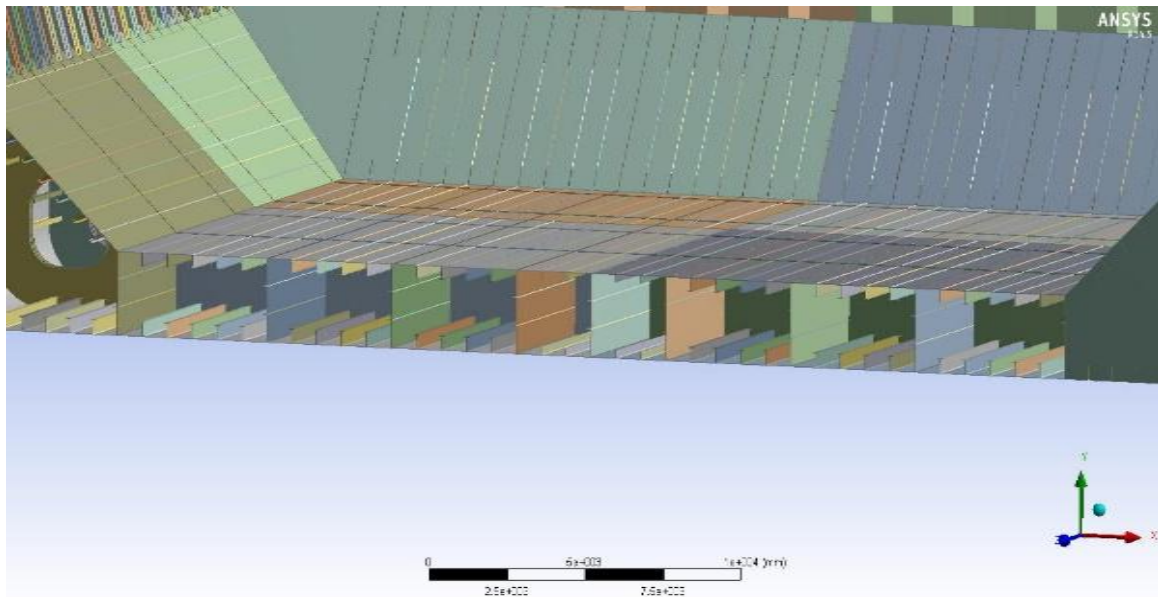
Σχήμα 4-13: Κατώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα η κατώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος ενισχύεται τόσο από διαμήκη ενισχυτικά όσο και από εγκάρσια. Στο σημείο όπου βρίσκεται η κυματοειδής φρακτή, η εγκάρσια ενίσχυση είναι στεγανή φρακτή σε αντίθεση με τα υπόλοιπα. Το σχήμα απεικονίζει επίσης και τα διάφορα στηρίγματα που ενισχύουν περαιτέρω την ακαμψία της δεξαμενής. Επιπρόσθετα απεικονίζονται και τα διαμήκη ενισχυτικά τα οποία συνεισφέρουν στη διαμήκη αντοχή της δεξαμενής και συνεπώς του πλοίου.



Σχήμα 4-14: Ανώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος

Το παραπάνω σχήμα απεικονίζει τα κατασκευαστικά στοιχεία της ανώτερης πλευρικής δεξαμενή έρματος. Όπως και στην περίπτωση της κατώτερης πλευρικής δεξαμενή, έτσι και εδώ διακρίνονται εγκάρσιες ενισχύσεις και εγκάρσιες υδατοστεγείς φρακτές οι οποίες συμπίπτουν στο σημείο της κυματοειδούς φρακτής. Επιπρόσθετα διακρίνονται και οι διαμήκειες ενισχύσεις σε κάθε πλευρά της δεξαμενή. Η σωστή μοντελοποίηση της ενίσχυσης είναι σημαντική σε αυτό το σημείο του μοντέλου καθώς είναι υπεύθυνη για τη μεταφορά των πλευρικών δυναμικών πιέσεων λόγω κυματισμού. Οι δυνάμεις που ασκούνται εγκάρσια στο μοντέλο, το θλίβουν προκαλώντας τη θλίψη του καταστρώματος. Είναι σημαντικό η μεταφορά των πιέσεων στο εσωτερικό του μοντέλου να πραγματοποιείται με τον ακριβέστερο τρόπο ώστε να αναπαραχθεί το φαινόμενο του λυγισμού όπως περιγράφεται στη βιβλιογραφία. Τέλος στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η δεξαμενή του διπτυθμένου.



Σχήμα 4-15: Δεξαμενή διπυθμένου

Στο Σχήμα 4-15 αναπαρίσταται η δεξαμενή του διπυθμένου. Για λόγους απλότητας έχουν παραλειφθεί κάποια από τα κατασκευαστικά στοιχεία που προβλέπουν τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου. Ωστόσο η μοντελοποίηση είναι τέτοια ώστε να βρίσκεται στην ασφαλή πλευρά του σχεδιασμού. Εξάλλου η περιοχή του διπυθμένου έχει βασικό ρόλο να συγκρατεί το βάρος του φορτίου που θα μεταφερθεί καθώς και τις εξωτερικές υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται. Σε κάθε περίπτωση το μοντέλο που αναπτύχθηκε κατάφερε να ανταπεξέλθει κάτω από τη φόρτιση που του επιβλήθηκε.

4.6 Υπολογιστικό πλέγμα

Η κατασκευή του πλέγματος είναι από τα πλέον σημαντικά βήματα κατά την πορεία επίλυσης ενός προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων. Ο σχεδιασμός ενός πλέγματος θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε:

- Η επιλογή ακόμα μικρότερου μεγέθους στοιχείων να μην αλλάζει το αποτέλεσμα
- Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων να είναι τέτοιος ώστε η μνήμη του υπολογιστή που επιλύουμε το πρόβλημα να είναι επαρκής.
- Η γεωμετρία των στοιχείων να είναι τέτοια ώστε να διευκολύνεται η σύγκλιση και τα ορθά αποτελέσματα

Στα πλαίσια της εργασίας η επιλογή της πυκνότητας του πλέγματος ήταν τέτοια ώστε επιπροσθέτως:

- Να μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα σε εύλογο χρονικό διάστημα
- Να επιλεγθούν δισδιάστατα και μονοδιάστατα στοιχεία για μείωση του υπολογιστικού κόστους

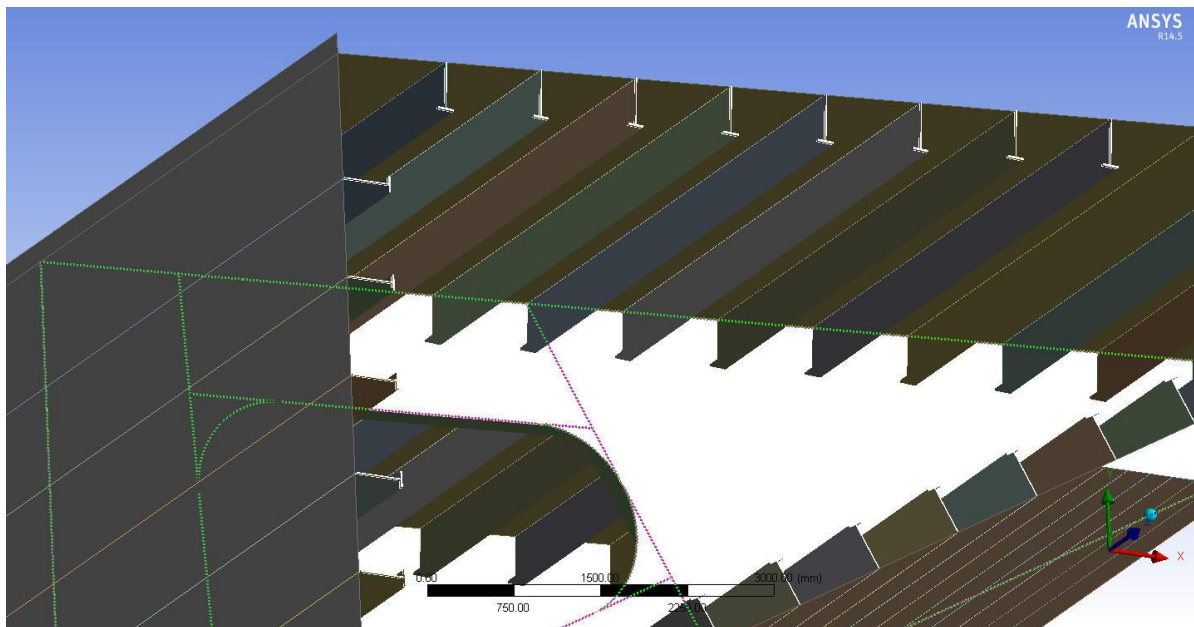
Τα στοιχεία σχηματίζονται μέσω υπολογιστικού αλγόριθμου που παρέχει το λογισμικό Ansys. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι αν και η έκταση του μοντέλου είναι περιορισμένη, αυτή δεν επαρκεί ώστε να επέλθει η επίλυση του συστήματος σε εύλογο χρονικό διάστημα. Χρειάζεται ο σχεδιασμός του μοντέλου να στηριχτεί σε δισδιάστατα στοιχεία⁶ και όχι σε

⁶ SHELL ELEMENTS

τρισεπίστας⁷. Ένα δισδιάστατο στοιχείο διαθέτει λιγότερους υπολογιστικούς κόμβους με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός εξισώσεων που απαιτείται στο τέλος για να επιλυθεί το σύστημα αγνώστων να είναι σαφώς μικρότερος. Από τη φύση της η κατασκευή χαρακτηρίζεται ως λεπτότοιχη, δηλαδή πρόκειται για κατασκευή στην οποία η μία διάσταση είναι αμελητέα μπροστά στις άλλες δύο. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ευνοϊκό καθώς μπορεί να προσομοιωθεί ως δισδιάστατη επιφάνεια διευκολύνοντας ακόμα περισσότερο την επίλυση του προβλήματος (Καρύδης, 2001).

Ομοίως η μοντελοποίηση των ενισχυτικών πραγματοποιείται με μονοδιάστατα στοιχεία. Η ιδιαίτερη ωστόσο διαμόρφωση της διατομής κάθε ενισχυτικού δεν έχει παραβλεφθεί. Αντίθετα, το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα σχεδιασμού κάθε διατομής ενισχυτικού η οποία είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας του ενισχυτικού και συνεπώς των μηχανικών ιδιοτήτων του.

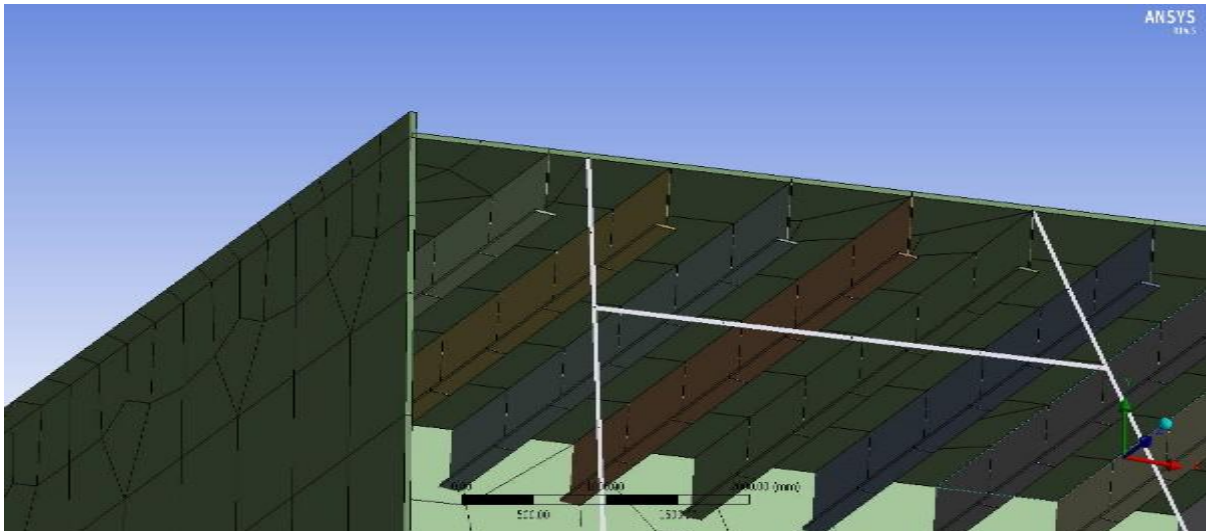
Τόσο η διατομή κάθε ενισχυτικού όσο και το πάχος του κάθε ελάσματος της κατασκευής, καθορίζεται στη φάση σχεδίασης του μοντέλου. Στα σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται τα στοιχεία του πλέγματος ελασμάτων αλλά και των διαμήκων ενισχυτικών.



Σχήμα 4-16: Απεικόνιση δισδιάστατων στοιχείων (ελάσματα) καθώς και μονοδιάστατων (ενισχυτικά)

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ένα από τα ενισχυμένα ελάσματα του μοντέλου. Το συγκεκριμένο ενισχυμένο έλασμα όπως και κάθε άλλο παρόμοιο τέτοιο έλασμα, αποτελείται από δύο τύπους σωμάτων. Το δισδιάστατο έλασμα και το μονοδιάστατο ενισχυτικό. Το ενισχυτικό, αν και παρουσιάζεται ως δισδιάστατη επιφάνεια στην ουσία είναι μονοδιάστατο σώμα. Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται το ίδιο ενισχυμένο έλασμα, ωστόσο απεικονίζεται και το πλέγμα με τα στοιχεία.

⁷ SOLID ELEMENTS



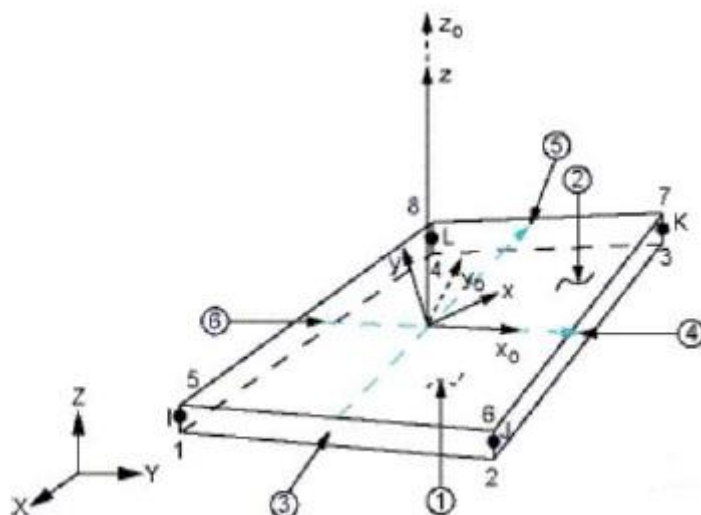
Σχήμα 4-17: Απεικόνιση πλέγματος δισδιάστατων και μονοδιάστατων στοιχείων

Στο Σχήμα 4-17 απεικονίζονται τα πεπερασμένα ενός ενισχυμένου ελάσματος που αποτελεί τμήμα της κατασκευής. Από το σχήμα είναι ευδιάκριτο το πάχος του ελάσματος αφού στα δισδιάστατα στοιχεία έχει αποδοθεί οπτικά η διάσταση του πάχους. Αντίθετα συγκριτικά με το Σχήμα 4-16 τα στοιχεία των ενισχυτικών αποδίδονται οπτικά με τη μονοδιάστατη μορφή τους. Είναι σημαντικό ωστόσο να τονιστεί ότι τα μονοδιάστατα στοιχεία διατηρούν την ροπή αδρανείας που έχει το ενισχυτικό για την εκάστοτε διατομή του. Ακολουθεί ακριβής περιγραφή των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο που αναπτύχθηκε.

4.6.1 Περιγραφή τύπου στοιχείων πλέγματος

Όπως εκτενώς έχει περιγραφεί στις παραπάνω παραγράφους, για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος δισδιάστατων στοιχείων και ένας τύπος μονοδιάστατων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο τύπος SHELL 181 και BEAM 188 για τα δισδιάστατα και τα μονοδιάστατα στοιχεία αντίστοιχα.

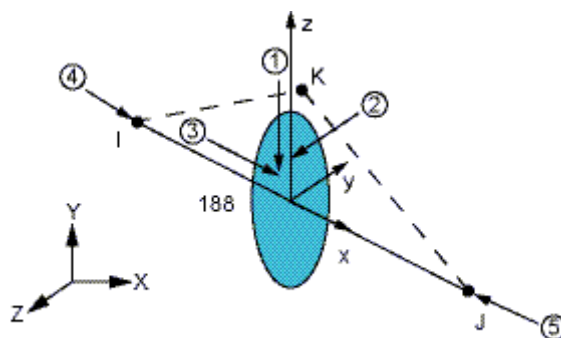
Τα στοιχεία SHELL 181 είναι κατάλληλα για αναλύσεις λεπτότοιχων κατασκευών καθώς και για ανάλυση στοιχείων που αποτελούνται από στρώσεις διαφορετικών μεταξύ τους υλικών. Τα χαρακτηριστικά αυτά τα καθιστούν ιδανικά για τη μελέτη του παρόντος προβλήματος. Στο Σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται το συγκεκριμένο στοιχείο.



Σχήμα 4-18: Οπτική αναπαράσταση του δισδιάστατου στοιχείου SHELL 181 όπως μοντελοποιείται στο λογισμικό ANSYS(ANSYS Inc., 2014)

Όπως γίνεται αντιληπτό και από το Σχήμα 4-18 το στοιχείο αποτελείται από τέσσερις κόμβους με έξι βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο. Τις μετατοπίσεις προς τους άξονες x , y , και z καθώς και τις περιστροφές προς τους αντίστοιχους άξονες. Είναι κατάλληλο για γραμμικά ή μη γραμμικά προβλήματα που απαιτούν μεγάλες επιμηκύνσεις.

Αν και ο συγκεκριμένος τύπος στοιχείου επιτρέπει τη χρήση τριγωνικών στοιχείων, είναι επιθυμητό ο αριθμός αυτών να είναι όσο το δυνατόν τετράπλευρος.



Σχήμα 4-19: Οπτική αναπαράσταση του μονοδιάστατου στοιχείου Beam 188 όπως μοντελοποιείται στο λογισμικό ANSYS(ANSYS Inc., 2014)

Το μονοδιάστατο στοιχείο Beam 188 είναι κατάλληλο για μοντελοποίηση ραβδόμορφων στοιχείων μεγάλου σχετικά πάχους. Βασίζεται στην θεωρία του Timoshenco για ράβδους ενώ μοντελοποιεί και χαρακτηριστικά παραμορφώσεων λόγω διάτμησης. Αποτελείται από δύο κόμβους καθένας από τους οποίους έχει έξι βαθμούς ελευθερίας. Τρεις μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές για κάθε έναν κόμβο. Η στρέψη του μονοδιάστατου φορέα είναι επίσης διαθέσιμη και ανεμπόδιστη. Πρόκειται για στοιχεία κατάλληλα για γραμμικές μετατοπίσεις και περιστροφές καθώς και μη γραμμικές μεγάλες παραμορφώσεις. Στοιχεία όπως το μέτρο διάτμησης, η επιφάνεια και η ροπή αδράνειας της διατομής μπορούν να ορισθούν.

4.6.2 Χαρακτηριστικά πλέγματος

Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητη η περιγραφή των χαρακτηριστικών του πλέγματος που χρησιμοποιήθηκε. Κατά την κατασκευή του πλέγματος σκοπός ήταν η διατήρηση ενός μικρού αριθμού στοιχείων αλλά παράλληλα και η αποφυγή δημιουργίας τριγωνικών στοιχείων με οξείες γωνίες με δυσμενείς επιπτώσεις στην ικανότητα σύγκλισης και επίτευξης ορθής επίλυσης. Για τη διατήρηση του μικρού αριθμού στοιχείων ήταν απαραίτητη η επιλογή στοιχείων μεγάλου μεγέθους.

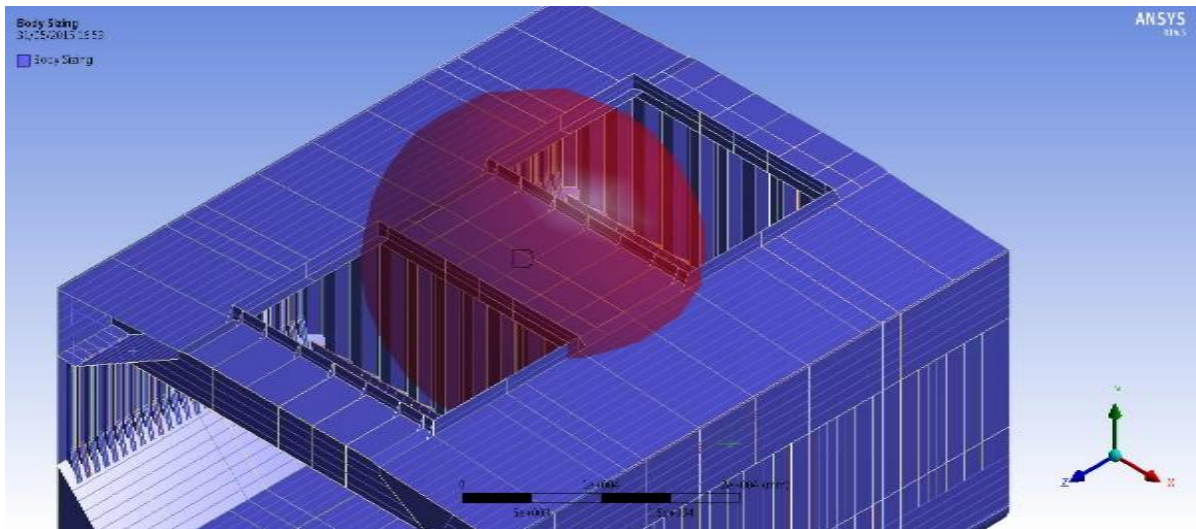
Το αρνητικό αποτέλεσμα που έχει η επιλογή στοιχείων μεγάλου μεγέθους είναι το γεγονός ότι επηρεάζεται αρνητικά η ικανότητα σύγκλισης αλλά και η ακρίβεια της λύσης. Ως αντιστάθμιση του συγκεκριμένου προβλήματος επιλέχθηκε ως λύση η δημιουργία μιας «ζώνης ενδιαφέροντος». Καθότι η ουσία της προσομοίωσης ήτοι η μελέτη του φαινομένου λυγισμού στο έλασμα των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος, επιλέχθηκε μια τρισδιάστατη περιοχή η οποία περιλαμβάνει τη λωρίδα του καταστρώματος και στην οποία η πυκνότητα του πλέγματος και άρα ο αριθμός των στοιχείων, είναι αυξημένη. Σε περιοχές εκτός της ζώνης αυτής το μέγεθος των επιλεγμένων στοιχείων θα διατηρείται υψηλότερο σε σημείο όπου δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα της λύσης σημαντικά. Η μετάβαση από την περιοχή εντός της ζώνης στην περιοχή εκτός της ζώνης θα πραγματοποιείται σταδιακά και ομαλά ώστε να μην επηρεάζεται η λύση. Ο ρυθμός αλλαγής του μεγέθους έχει επιλεγεί αυτόματα από το ίδιο το λογισμικό. Ακολουθεί ο πίνακας με τα βασικά στοιχεία του πλέγματος.

Πίνακας 4-2: Βασικά χαρακτηριστικά υπολογιστικού πλέγματος

Αριθμός στοιχείων	65875
Αριθμός κόμβων	100450
Συνολική μάζα μοντέλου	5061,1 tn

Ο παραπάνω πίνακας περιλαμβάνει τον αριθμό των στοιχείων που σχηματίζουν το μοντέλο καθώς και τον αριθμό των κόμβων. Όπως γίνεται αντιληπτό, ο αριθμός των κόμβων είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των στοιχείων καθώς κάθε στοιχείο διαθέτει τέσσερις κόμβους. Πολλοί κόμβοι ωστόσο είναι κοινοί για τα γειτονικά στοιχεία με αποτέλεσμα εν τέλει η διαφορά μεταξύ του αριθμού των στοιχείων και του αριθμού των κόμβων να μην είναι και τόσο μεγάλη. Η συνολική μάζα του μοντέλου υπολογίζεται, λαμβάνοντας υπόψη τα επιμέρους πάχη των ελασμάτων αλλά και των διατομών των ενισχυτικών που έχουν επιλεγεί.

Ο καθορισμός της ζώνης υψηλότερης πυκνότητας του πλέγματος καθορίζεται με την εντολή “Sphere of Influence”. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο ορισμός ενός τοπικού συστήματος συντεταγμένων. Στο παρόν πρόβλημα επιλέγεται θέση του συγκεκριμένου τοπικού συστήματος το κέντρο του ελάσματος της εγκάρσιας λωρίδας καταστρώματος. Στη συνέχεια επιλέγεται μια ακτίνα η οποία λαμβάνοντας υπόψη την αρχή των αξόνων του τοπικού συστήματος συντεταγμένων, καθορίζει το σφαιρικό χώρο που αποτελεί τη ζητούμενη ζώνη αυξημένης πυκνότητας. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται η συγκεκριμένη σφαιρική ζώνη.



Σχήμα 4-20: Απεικόνιση της σφαιρικής ζώνης υψηλότερης πυκνότητας του πλέγματος

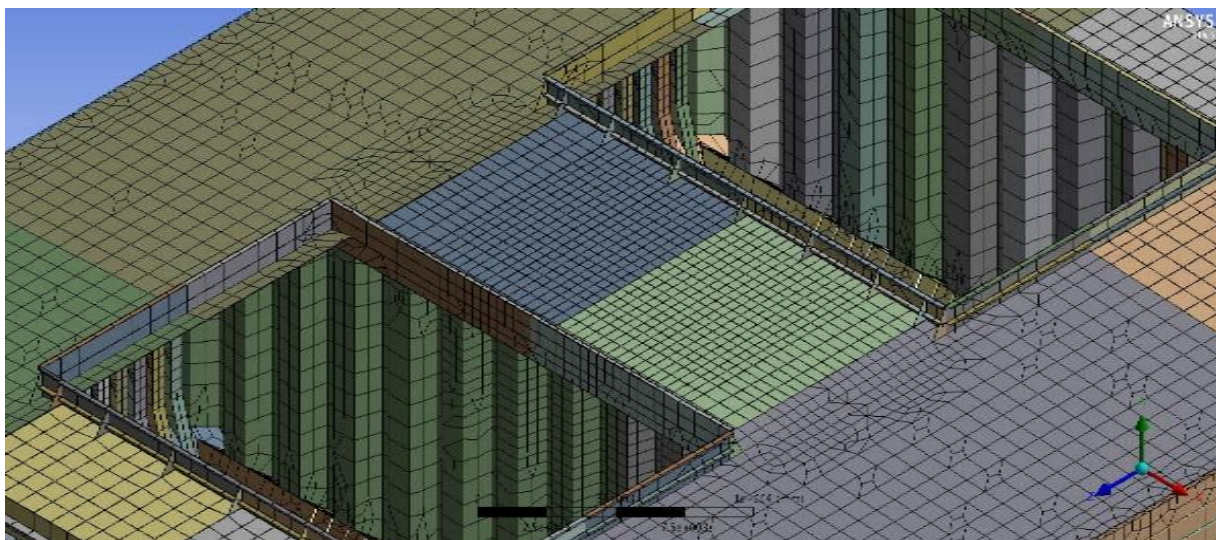
Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η ζώνη στην οποία το μέγεθος των στοιχείων είναι μικρότερο. Η περιοχή περιλαμβάνει όλη την εγκάρσια λωρίδα καταστρώματος καθώς και μέρος της ανώτερης ενίσχυσης της φρακτής αλλά και της ίδιας της φρακτής. Σκοπός είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν ακριβέστερων αποτελεσμάτων στο συγκεκριμένο σημείο ενδιαφέροντος. Ο Πίνακας που ακολουθεί περιγράφει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4-3: Βασικές επιλογές κατά τη δημιουργία πλέγματος

Μέγιστη διάσταση στοιχείων εκτός ζώνης ενδιαφέροντος	1500 mm
Μέγιστη διάσταση στοιχείων εντός ζώνης ενδιαφέροντος	500 mm
Ελάχιστο μήκος ακμών	0.10 mm
Ενδιάμεσοι κόμβοι	Απαλοιφή

Ο Πίνακας 4-3 παρουσιάζει τις επιλεγμένες ρυθμίσεις ως προς τη δημιουργία του πλέγματος. Είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στο μέγεθος των στοιχείων εντός και εκτός της ζώνης ενδιαφέροντος.

Όπως έχει αναφερθεί, η ορθογωνικότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται όχι μόνο επιταχύνει τη σύγκλιση αλλά συνεισφέρει και στο να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό φαίνεται χρήσιμη η ανάπτυξη όσο το δυνατόν καλύτερου πλέγματος στην περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος. Για να επιτευχθεί αυτό στο παρόν μοντέλο γίνεται χρήση, της εντολής “Mapped Face Meshing” του λογισμικού Ansys. Με την εντολή αυτή ορίζονται συγκεκριμένες επιφάνειες που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένα στοιχεία. Στη συνέχεια το λογισμικό προσπαθεί να κατασκευάσει ένα πλέγμα μόνο από ορθογώνια στοιχεία. Ωστόσο στην προκειμένη περίπτωση η γεωμετρία της επιφάνειας διευκολύνει την ενέργεια αυτή καθώς πρόκειται για ορθογώνιο έλασμα το οποίο μπορεί εύκολα να υποδιαιρεθεί σε μικρότερα ορθογώνια στοιχεία. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται το πλέγμα των ελασμάτων του καταστρώματος στο οποίο και θα παρουσιαστεί το φαινόμενο του λυγισμού.



Σχήμα 4-21: Απεικόνιση πλέγματος ελάσματος εγκάρσιας λωρίδας καταστρώματος

Στο Σχήμα 4-21 απεικονίζεται το πλέγμα που κατασκευάστηκε με την εντολή “Mapped Face Meshing” του Ansys. Λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 4-6 και το σημείο όπου θα τοποθετηθεί το επίθεμα, θα ορισθούν τα στοιχεία εκείνα του πλέγματος τα οποία θα μοντελοποιήσουν τόσο το χάλυβα όσο και το επίθεμα. Η μοντελοποίηση του επιθέματος πραγματοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού ACP του Ansys. Πρόκειται για ένα πρόσθετο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί από το ίδιο το Ansys και αποσκοπεί στο να βοηθήσει στη μοντελοποίηση των σύνθετων υλικών. Ο τρόπος μοντελοποίησης των σύνθετων υλικών περιγράφεται στο εδάφιο 4.8.

Η επόμενη παράγραφος περιγράφει τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος και τις ιδιότητές τους.

4.7 Υλικά

Συνολικά στο μοντέλο θα χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά υλικά. Το πρώτο είναι ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας που χρησιμοποιείται κατά κόρον στη ναυτιλία. Το δεύτερο είναι το υλικό του επιθέματος που στην προκειμένη περίπτωση είναι οι ίνες άνθρακα. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά οι ιδιότητες των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν.

4.7.1 Κοινός ναυπηγικός χάλυβας

Ο κοινός ναυπηγικός χάλυβας χρησιμοποιείται σε κάθε κατασκευαστικό στοιχείο του πλοίου, τόσο στα ελάσματα όσο και στα διάφορα ενισχυτικά. Οι χάλυβες γενικά αποτελούν κράματα σιδήρου – άνθρακα Fe – C με περιεκτικότητα σε άνθρακα μικρότερη από 1.5% κ.β. Πολύ χάλυβες ωστόσο, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή για την οποία προορίζονται, αποτελούνται και από επιπρόσθετες προσμίξεις μετάλλων που τους προσφέρουν και άλλες ιδιότητες.

Στην ναυπηγική χρησιμοποιούνται κυρίως χάλυβες συνήθους αντοχής με σύσταση σε άνθρακα 0.23%, ενώ περιέχουν και άλλα στοιχεία όπως το μαγγάνιο το πυρίτιο, το φώσφορο, το θείο και άλλες ποσότητες οι οποίες βρίσκονται σε αρκετά μικρότερη

συγκέντρωση. Η συγκέντρωση σε άνθρακα έχει σημαντική επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες τους χάλυβα. Αυξάνοντας τη συγκέντρωση σε άνθρακα, αυξάνεται η μηχανική αντοχή του άνθρακα αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται η ψαθυρότητα του υλικού και μειώνεται η ολκιμότητα. Επιπλέον προσθέτοντας στοιχεία όπως αλουμίνιο, βανάδιο νικέλιο, αυξάνεται περαιτέρω η μηχανική αντοχή των χάλυβων, αλλά και οι αντοχή τους σε ακραίες θερμοκρασίες (Φωτόπουλος, 2010).

Λεπτομέρειες σχετικά με τη μικροδομή και τη σύσταση του συγκεκριμένου χάλυβα δεν παρουσιάζονται καθώς θεωρείται ότι ξεφεύγουν από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Αντιθέτως στον παρακάτω πίνακα αποτυπώνονται οι μηχανικές ιδιότητες του συγκεκριμένου χάλυβα όπως ορίζονται στο λογισμικό μοντελοποίησης Ansys. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι το συγκεκριμένο υλικό στα πλαίσια της μοντελοποίησης στο πρόγραμμα Ansys θεωρείται ισότροπο. Δηλαδή θεωρείται ότι όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη που του προσδίδουν τις μηχανικές ιδιότητες έχουν τις ίδιες τιμές ανεξάρτητα από τη διεύθυνση που μελετάται. Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες που είναι απαραίτητες για τη μελέτη αποτυπώνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-4: Ιδιότητες ναυπηγικού χάλυβα(ANSYS Inc., 2014)

Πυκνότητα	7850 Kg / m ³
Μέτρο Ελαστικότητας	200 000 MPa
Μέτρο διάτμησης	76923 MPa
Λόγος Poisson	0.3
Τάση ορίου διαρροής	235 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό	460 MPa

4.7.2 Σύνθετο υλικό επιθεμάτων

Στην παράγραφο 3.1.2 γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των ινών άνθρακα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις μέρες μας ως συστατικά ενίσχυσης σύνθετων υλικών. Αν και υπάρχει πληθώρα διαφορετικών υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συστατικά ενίσχυσης σε σύνθετα υλικά, στην παρούσα εργασία μελετώνται οι ίνες άνθρακα.

Το γεγονός ότι το υλικό ενίσχυσης αποτελείται από μονοδιευθυντικές ίνες έχει άμεση επίδραση στις μηχανικές του ιδιότητες. Σε αντίθεση με το χάλυβα στον οποίο οι μηχανικές ιδιότητες είναι ίδιες ανεξάρτητα από την διεύθυνση που εξετάζεται, στην περίπτωση των ινών άνθρακα, οι μηχανικές ιδιότητες μεγιστοποιούνται στη διεύθυνση των ινών. Ενώ αντιθέτα ελαχιστοποιούνται στην κάθετη διεύθυνση αυτών. Για το λόγο αυτό, για να επιτευχθεί η απαραίτητη μοντελοποίηση του υλικού, θα ορισθεί ένα ανισότροπο υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες θα διαφέρουν από διεύθυνση σε διεύθυνση.

Στον παρακάτω πίνακα θα παρουσιαστούν οι μηχανικές ιδιότητες των ινών που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη μοντελοποίηση του συστατικού ενίσχυσης ανάλογα με την διεύθυνση του υλικού. Οι τιμές των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού προέρχονται από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Co-Patch⁸ έτσι όπως παρατίθενται από τους M. Katalinic, D. Frank, A. Klanac, G. Risso, E. Rodriguez, M.K. Chryssanthopoulos and Y. Zhang.

⁸ Composite Patch Repair for Marine and Civil Engineering Infrastructure, FP7 European Programme

Πίνακας 4-5: Ιδιότητες ινών άνθρακα(Katalinic, et al.)

Μέτρο Ελαστικότητας κατά X	102600 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας κατά Y	7600 MPa
Μέτρο Ελαστικότητας κατά Z	7600 MPa
Μέτρο διάτμησης κατά XY	4500 MPa
Μέτρο διάτμησης κατά XZ	4500 MPa
Μέτρο διάτμησης κατά YZ	2836 MPa
Λόγος Poisson κατά XY	0.488
Λόγος Poisson κατά XZ	0.0361
Λόγος Poisson κατά YZ	0.34

Από κατασκευαστική άποψη, το σύνθετο υλικό χρησιμοποιεί ως μήτρα βινυλεστερική ρητίνη, ενώ ως μέθοδος παρασκευής χρησιμοποιείται η έγχυση με τη μέθοδο του κενού. Η ίδια η ρητίνη χρησιμοποιείται και ως συγκολλητικό υλικό μεταξύ του επιθέματος και του ελάσματος του καταστρώματος. Ωστόσο το συνδετικό υλικό ανάμεσα στις διάφορες στρώσεις των ινών άνθρακα αλλά και μεταξύ του επιθέματος και του ελάσματος του καταστρώματος, δεν μοντελοποιείται. Ο λόγος είναι ότι στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, η μελέτη του συγκολλητικού υλικού έχει έννοια μόνο στην περίπτωση που θα εξεταστεί η συγκολλησιμότητα των υλικών αλλά και η πιθανότητα αποκόλλησης του επιθέματος από το μεταλλικό έλασμα. Στην συγκεκριμένη εργασία αυτό ξεφεύγει από τα όρια της μελέτης ενώ παράλληλα αυξάνει και το υπολογιστικό κόστος.

4.8 Μοντελοποίηση σύνθετων υλικών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μοντελοποίηση των σύνθετων υλικών πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια το λογισμικού ACP του Ansys. Πρόκειται για ένα πρόσθετο εργαλείο του Ansys το οποίο διευκολύνει σημαντικά τη διαδικασία μοντελοποίησης των σύνθετων υλικών και μάλιστα προσφέρει εργαλεία οπτικής απεικόνισης αυτών. Στη συνέχεια της παρούσας παραγράφου, θα παρουσιαστεί λεπτομερώς όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Στην περίπτωση του ναυπηγικού χάλυβα, η μόνη παράμετρος που μπορεί να μεταβληθεί στο μοντέλο είναι το πάχος του ελάσματος αλλά και η διατομή των ενισχυτικών. Ωστόσο, αυτές οι παράμετροι είναι αυστηρά καθορισμένες από τα κατασκευαστικά σχέδια του πλοίου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μεταβληθεί στα πλαίσια της μελέτης. Εξάλλου στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά της κατασκευής έναντι λυγισμού με χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά και όχι με μεταβολή των κατασκευαστικών στοιχείων του πλοίου.

Το σύνθετο υλικό ενδείκνυται για παραμετρική μελέτη καθώς τόσο το πάχος του όσο και η διεύθυνση των ινών άνθρακα μπορούν να μεταβληθούν. Επιπρόσθετα, οι πιθανές περιπτώσεις είναι ακόμα περισσότερες εφόσον κάθε επίθεμα μπορεί να αποτελείται από περισσότερες από μια στρώσεις με διαφορετική διεύθυνση ινών.

Ο λόγος ακαμψίας SR^9 ορίζεται ως ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας του επιθέματος επί το πάχος του επιθέματος προς το μέτρο ελαστικότητας του ελάσματος επί το πάχος του ελάσματος.

⁹ Stiffness Ratio

$$SR = \frac{E_p t_p}{E_s t_s} \quad (4.1)$$

Για $SR = 1$, η ακαμψία του επιθέματος είναι ίση με την ακαμψία του χάλυβα, στη διεύθυνση φυσικά της μέγιστης ακαμψίας τους σύνθετου υλικού. Μεταβάλλοντας την παράμετρο SR , θα διερευνηθεί η συμπεριφορά του ελάσματος και κατά συνέπεια της κατασκευής για τις διάφορες τιμές του συντελεστή. Θεωρώντας κάθε φορά σταθερό SR , θα διερευνηθεί επίσης και η απόκριση της κατασκευής για διαφορετικό προσανατολισμό των στρώσεων του επιθέματος. Όσον αφορά τις στρώσεις, ο αριθμός αυτών θα κυμαίνεται από 8 έως 12 έτσι ώστε οι αλληπάλληλες στρώσεις να διατηρούν τη συμμετρία τους.

Επιλύοντας την εξίσωση (4.1) ως προς t_p προκύπτει:

$$t_p = \frac{E_s t_s SR}{E_p} \quad (4.2)$$

4.8.1 Ανάλυση περιπτώσεων

Με τη βοήθεια της εξίσωσης (4.2) μπορεί να υπολογισθεί το πάχος του επιθέματος για το εκάστοτε SR . Στη συγκεκριμένη εργασία θα εξεταστούν τρεις διαφορετικές τιμές του SR , 0.25, 0.50 και 1.00. Ο πίνακας που ακολουθεί παρουσιάζει όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν στα πλαίσια της εργασίας για το εκάστοτε πάχος και προσανατολισμό των επιθεμάτων.

Πίνακας 4-6: Παρουσίαση περιπτώσεων πάχους και προσανατολισμού των επιθεμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση του προβλήματος

	Es [MPa]	200000								
	Ep [MPa]	102600								
	ts [mm]	14								
	SR	0.25			0.5			1		
	tp [mm]	6.82			13.65			27.29		
	# Στρώσεις	8	10	12	8	10	12	8	10	12
	tp πάχος στρώσης [mm]	0.85	0.68	0.57	1.71	1.37	1.14	3.41	2.73	2.27
Περίπτωση 1	$[0^\circ]_{10}$		•			•			•	
Περίπτωση 2	$[90^\circ]_{10}$		•			•			•	
Περίπτωση 3	$[(0^\circ/90^\circ)_2]_s$	•			•			•		
Περίπτωση 4	$[(45^\circ/-45^\circ)_2]_s$	•			•			•		
Περίπτωση 5	$[(60^\circ/0^\circ/-60^\circ)_2]_s$			•			•			•
Περίπτωση 6	$[(0^\circ/45^\circ/-45^\circ/90^\circ)]_s$	•			•			•		

Ο Πίνακας 4-6 συνοψίζει όλες τις βασικές περιπτώσεις που θα εξεταστούν στα πλαίσια διερεύνησης του φαινομένου λυγισμού στο έλασμα του καταστρώματος εγκάρσιων λωρίδων. Γνωρίζοντας το μέτρο ελαστικότητας E_s του ναυπηγικού χάλυβα, το μέτρο ελαστικότητας του

επιθέματος, το πάχος του ελάσματος του καταστρώματος και υποθέτοντας το συντελεστή SR, μπορούμε να υπολογίσουμε από την εξίσωση (4.2) το ισοδύναμο πάχος του επιθέματος t_p .

Για να εξεταστεί η επίδραση του προσανατολισμού των ινών άνθρακα του επιθέματος, το επίθεμα θα χωριστεί σε έναν συγκεκριμένο αριθμό στρώσεων, τέτοιο ώστε να διατηρείται η συμμετρία του επιθέματος. Εξάλλου ο καθορισμός των στρώσεων συνάδει και με την διαδικασία παρασκευής του επιθέματος. Το πάχος των στρώσεων θα καθορίζεται από τον εκάστοτε αριθμό στρώσεων και το πάχος του επιθέματος ανάλογα με το SR που έχει επιλεγεί. Η σχέση που καθορίζει το πάχος της κάθε στρώσης θα είναι

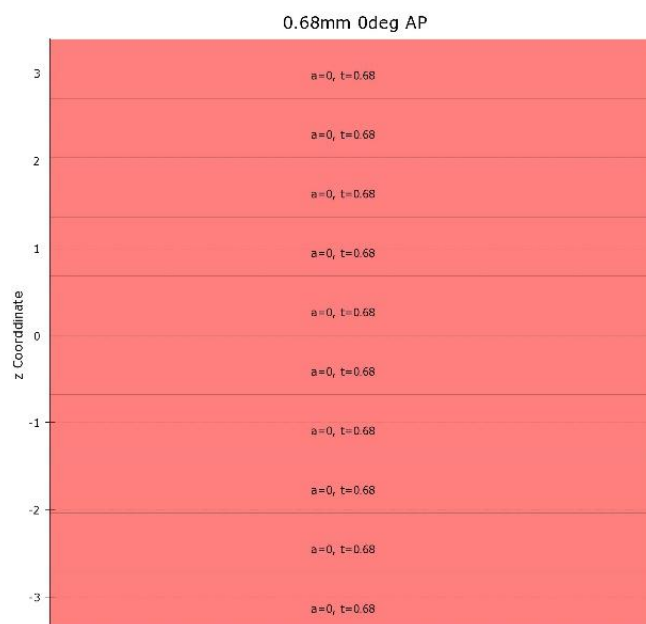
$$t_{p,i} = \frac{t_p}{n} \quad (4.3)$$

Όπου « n » ο αριθμός των στρώσεων

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι θα εξεταστούν για τρία διαφορετικά SR, έξι διαφορετικές περιπτώσεις προσανατολισμού των ινών του άνθρακα. Οι μοίρες που αναγράφονται έχουν ως άξονα αναφοράς τον άξονα των X όπως ορίζεται στην παράγραφο 4.4. Για να διατηρηθεί η συμμετρία του επιθέματος αλλά και ο ίσος αριθμός στρώσεων για κάθε προσανατολισμό των ινών, είναι απαραίτητο ο συνολικός αριθμός των στρώσεων να αναπροσαρμοστεί κατάλληλα ανάλογα με τον αριθμό των διαφορετικών διευθύνσεων που επιλέγονται. Φυσικά το πάχος της κάθε στρώσης θα πρέπει επαναυπολογιστεί έτσι ώστε το συνολικό πάχος του επιθέματος να μην υπερβαίνει το SR που έχει ορισθεί.

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι στρώσεις του επιθέματος, το πάχος της κάθε στρώσης και ο προσανατολισμός των ινών άνθρακα σύμφωνα με το σύστημα αναφοράς του πλοίου. Σύμφωνα με τις περιπτώσεις που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-6, θα εξεταστούν στη συγκεκριμένη εργασία 18 διαφορετικά επιθέματα.

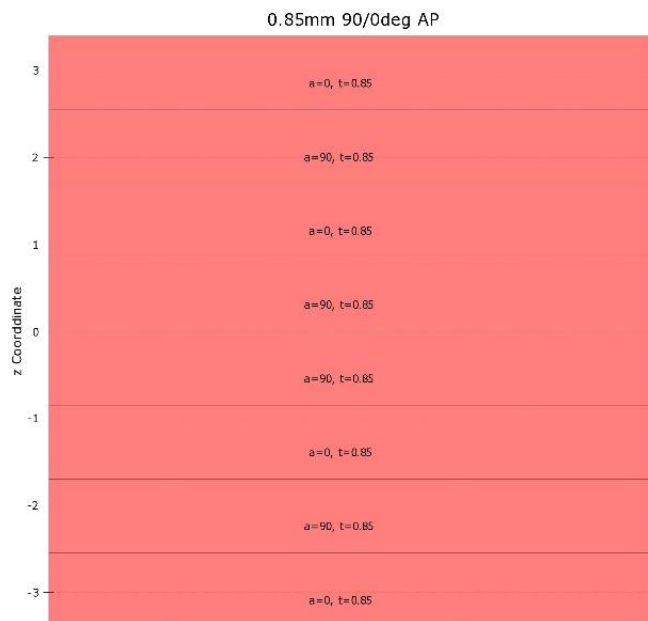
Στα σχήματα που ακολουθούν με « α » συμβολίζεται η γωνία των ινών άνθρακα ως προς τον άξονα αναφοράς X του πλοίου και με « t » συμβολίζεται το πάχος της εκάστοτε στρώσης.



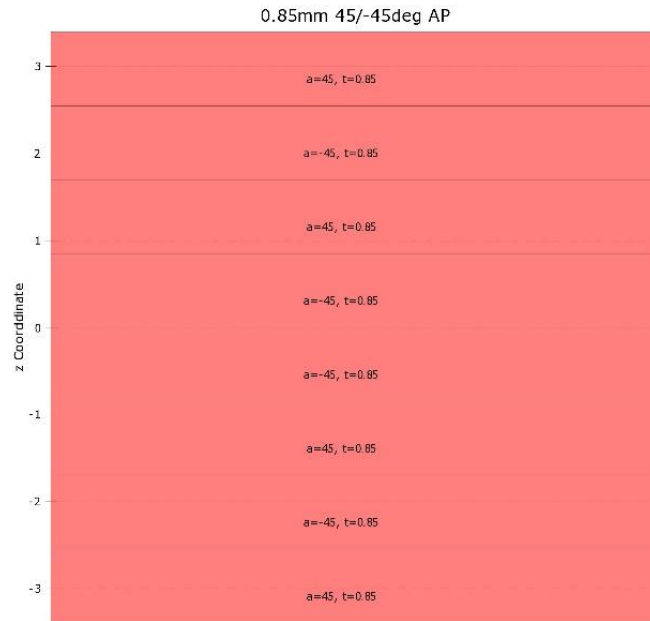
Σχήμα 4-22: Αναπαράσταση 10 στρώσεων πάχους 0,68 mm και προσανατολισμού ινών 0° για επίθεμα με SR 0.25



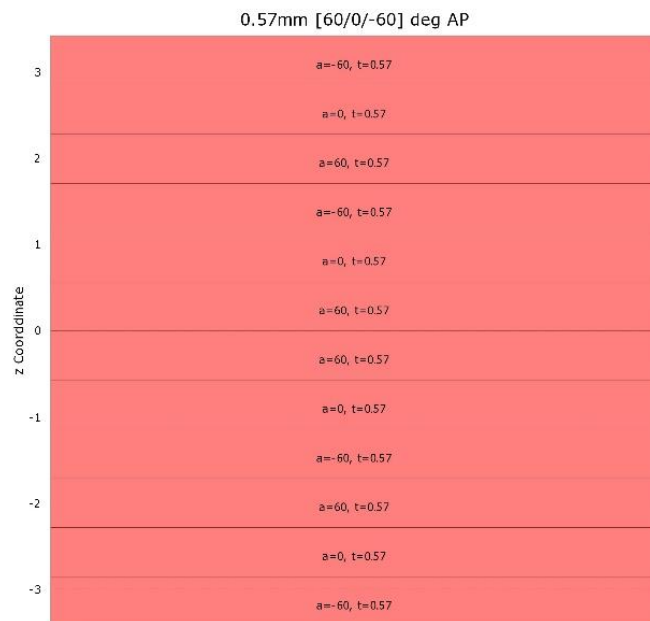
Σχήμα 4-23: Αναπαράσταση 10 στρώσεων πάχους 0,68 mm και προσανατολισμού ινών 90° για επίθεμα με SR 0.25



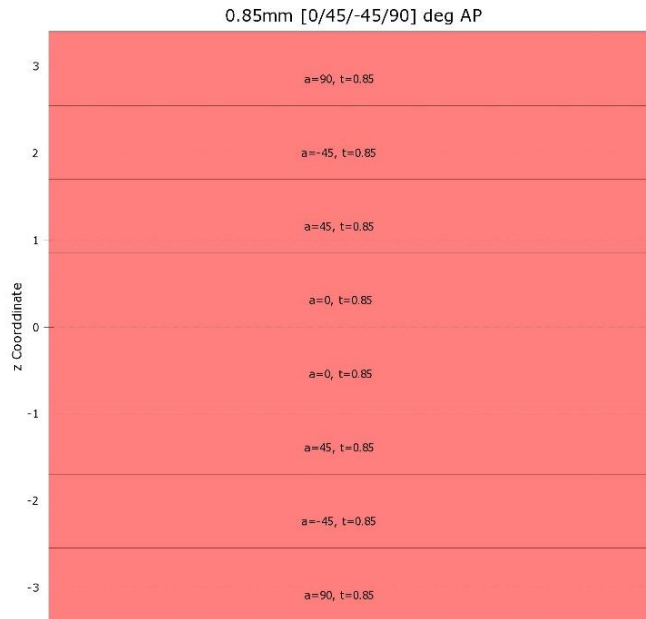
Σχήμα 4-24: Αναπαράσταση 8 στρώσεων πάχους 0,85 mm και προσανατολισμού ινών 0° και 90° για επίθεμα με SR 0.25



Σχήμα 4-25: Αναπαράσταση 8 στρώσεων πάχους 0,85 mm και προσανατολισμού ινών 45° και -45° για επίθεμα με SR 0.25



Σχήμα 4-26: Αναπαράσταση 12 στρώσεων πάχους 0,57 mm και προσανατολισμού ινών 60°, 0° και -60° για επίθεμα με SR 0.25



Σχήμα 4-27: Αναπαράσταση 8 στρώσεων πάχους 0,85 mm και προσανατολισμού ινών 0°, 45°, -45° και 90° για επίθεμα με SR 0.25

Από το Σχήμα 4-22 έως το Σχήμα 4-27 αναπαρίστανται για $SR = 0.25$ όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί αριθμών στρώσεων και προσανατολισμού που θα εξεταστούν στα πλαίσια της εργασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν και ο συνολικός αριθμός των στρώσεων μεταβάλλεται, το συνολικό πάχος του επιθέματος παραμένει σταθερό και ίσο με το πάχος του επιθέματος που προκύπτει για $SR = 0.25$. Στην προκειμένη περίπτωση, $t_p = 6.82$ mm.

Ωστόσο, αυτό που μεταβάλλεται σημαντικά είναι οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του επιθέματος ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών. Στις πρώτες δύο περιπτώσεις στις οποίες όλες οι ίνες άνθρακα έχουν κοινό προσανατολισμό, η αντοχή του σύνθετου γίνεται μέγιστη στη διεύθυνση προσανατολισμού των ινών. Μάλιστα η αντοχή του επιθέματος θα είναι μεγαλύτερη από κάθε άλλη περίπτωση που εξετάζεται καθώς όλες οι ίνες συνεισφέρουν στο μέγιστο.

Στις περιπτώσεις 3 και 4 στις οποίες οι στρώσεις των υλικών τοποθετούνται σε δυο διαφορετικές γωνίες, η αντοχή του επιθέματος θα μεγιστοποιείται στην εκάστοτε διεύθυνση αλλά θα είναι μικρότερη σε μέγεθος συγκριτικά με την περίπτωση που όλες οι ίνες είχαν την ίδια διεύθυνση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνολικός αριθμός των ινών μοιράζεται στις δύο πλέον διευθύνσεις. Το αποτέλεσμα αυτό είναι ακόμα πιο αισθητό στις επόμενες περιπτώσεις όπου γίνεται χρήση ακόμα περισσότερων διευθύνσεων.

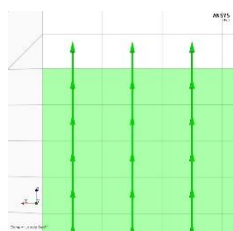
Στις τελευταίες περιπτώσεις 5 και 6 που εξετάστηκαν, ο προσανατολισμός των στρώσεων λαμβάνει τρεις και τέσσερις διευθύνσεις αντίστοιχα. Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, ο αριθμός των στρώσεων πρέπει να επαναπροσαρμοστεί έτσι ώστε να διατηρηθεί η συμμετρία στο επίθεμα αλλά και ο ίδιος αριθμός στρώσεων για την εκάστοτε διεύθυνση. Στις περιπτώσεις αυτές οι μέγιστες τιμές αντοχής του επιθέματος θα είναι ακόμα μικρότερες κατά απόλυτη τιμή, ωστόσο καθώς αυξάνεται ο αριθμός των διαφορετικών διευθύνσεων, το σύνθετο υλικό προσφέρει υψηλότερη αντοχή σε περισσότερες διευθύνσεις. Η τελευταία περίπτωση 6 αποτελεί την πλέον ομοιόμορφη περίπτωση στην οποία καταχρηστικά μπορεί να ειπωθεί ότι προσδίδονται στο ανισότροπο υλικό χαρακτηριστικά αντοχής που πλησιάζουν το ισότροπο.

Η συγκεκριμένη παραμετροποίηση αποσκοπεί στη διερεύνηση της επίδρασης του προσανατολισμού των ινών στο κρίσιμο φορτίο λυγισμού. Ανάλογα με το λόγο μήκους των πλευρών του ορθογωνικού ελάσματος του καταστρώματος, η ανάπτυξη των τάσεων λόγω παραμόρφωσης στην κατάσταση λυγισμού θα διαφέρει ανάλογα με τη διεύθυνση. Αν οι διαφορές είναι μεγάλες, τότε αναμένεται ένα άκρως ανισότροπο επίθεμα¹⁰ να αποφέρει μεγαλύτερη αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού βελτιώνοντας την αντοχή του καταστρώματος έναντι λυγισμού. Στην περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες στο έλασμα τάσεις παρουσιάζουν μια ομοιόμορφη συμπεριφορά τότε αναμένεται τα επιθέματα των περιπτώσεων 5 και 6 να έχουν τη βέλτιστη επίδραση.

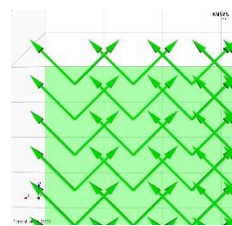
Από το Σχήμα 4-22 έως Σχήμα 4-27 αναπαρίστανται οι έξι διαφορετικές περιπτώσεις επιθεμάτων με $SR = 0.25$ που εξετάζονται. Τα πάχη κάθε στρώσης που απεικονίζονται στα παραπάνω σχήματα αφορούν το συγκεκριμένο SR που έχει επιλεχθεί. Για τις υπόλοιπες τιμές SR που εξετάζονται, η αλληλουχία και ο προσανατολισμός των επιθεμάτων είναι όμοιος, ενώ το μόνο που διαφέρει είναι το πάχος της εκάστοτε στρώσης. Για το λόγο αυτό η αλληλουχία των στρώσεων και τα υπόλοιπα SR που εξετάζονται, παραλείπεται.

Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίστανται οι διευθύνσεις των ινών για κάθε μία περίπτωση που εξετάζεται.

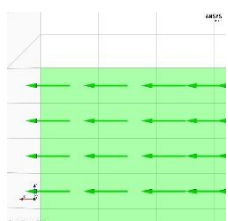
¹⁰ Περιπτώσεις 1 και 2



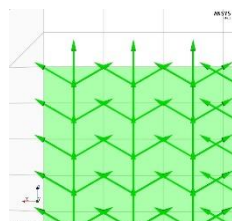
Περίπτωση 1



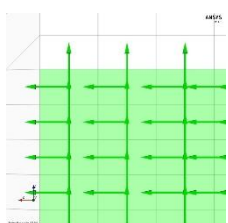
Περίπτωση 4



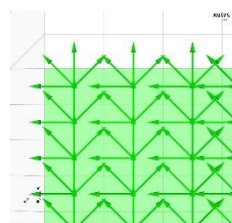
Περίπτωση 2



Περίπτωση 5



Περίπτωση 3



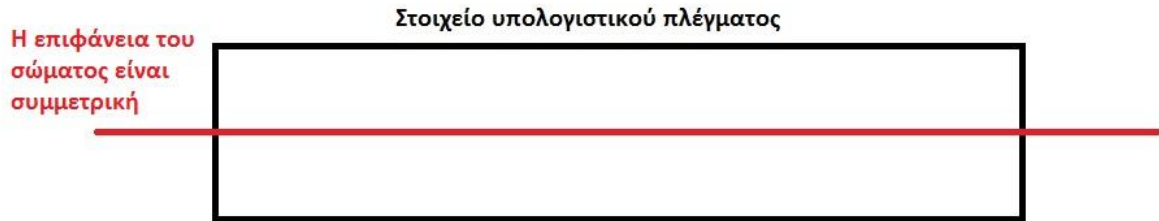
Περίπτωση 6

Σχήμα 4-28: Απεικόνιση με του προσανατολισμού των ινών για κάθε μια από τις περιπτώσεις που εξετάζεται με τη βοήθεια διανυσμάτων

Το Σχήμα 4-28 αναπαριστά τον προσανατολισμό των ινών των στοιχείων που αντιστοιχεί σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που θα εξεταστούν. Το σχήμα αποτελεί κάτοψη του καταστρώματος, ενώ με τα πράσινα βέλη απεικονίζεται η φορά των ινών.

4.8.2 Μορφή πεπερασμένων στοιχείων σύνθετων υλικών

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, στο παρόν υπολογιστικό μοντέλο γίνεται χρήση δισδιάστατων στοιχείων. Στην περίπτωση της μεταλλικής κατασκευής κάθε τέτοιο στοιχείο αναπαριστά ένα μόνο υλικό, αυτό του ναυπηγικού χάλυβα. Ως προεπιλογή το λογισμικό Ansys μοντελοποιεί το πάχος των στοιχείων θεωρώντας ως επίπεδο συμμετρίας την επιφάνεια που έχει σχεδιαστεί. Στο παρακάτω σχήμα αποτυπώνεται μια τομή ενός στοιχείου με κάποιο πάχος t και την επιφάνεια συμμετρίας.



Σχήμα 4-29: Προεπιλεγμένη προσομοίωση πάχους δισδιάστατων στοιχείων στο λογισμικό Ansys

Στην περίπτωση που το μόνο υλικό της κατασκευής είναι ο χάλυβας, όλα τα δισδιάστατα σώματα που έχουν σχεδιαστεί θα αποκτούν το συμμετρικό πάχος που απεικονίζεται στο Σχήμα 4-29. Ωστόσο η ύπαρξη και του υλικού του επιθέματος απαιτεί ιδιαίτερες επιλογές όσον αφορά τη μοντελοποίηση του πάχους των στοιχείων. Μάλιστα η κατανομή του πάχους των δύο υλικών άνωθεν και κάτωθεν της επιφάνειας του σώματος πρέπει να είναι τέτοια ώστε να υπάρχει συνέχεια σε όλα τα γειτονικά στοιχεία του χάλυβα είτε περιλαμβάνουν το επίθεμα είτε όχι.

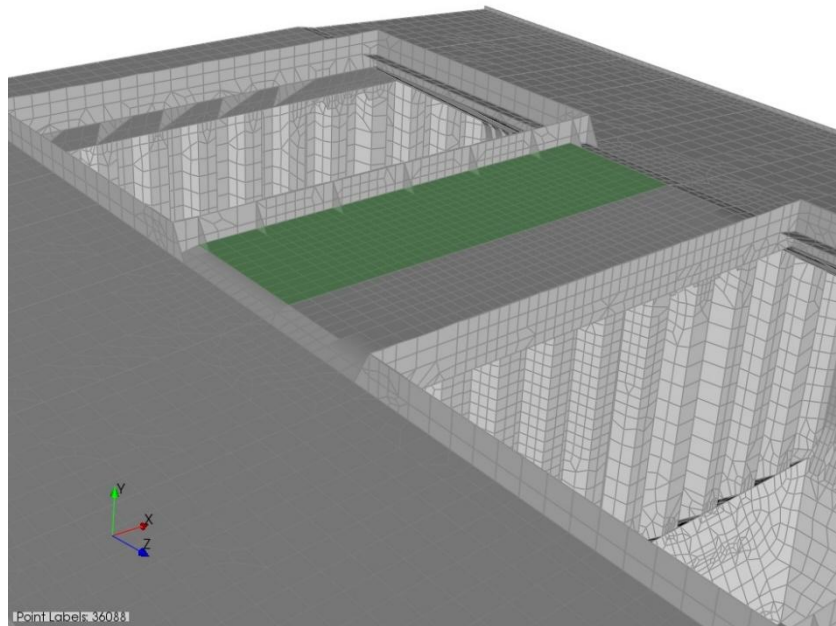
Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να μεταβληθεί η προεπιλογή του λογισμικού και να οριστεί κοινή φορά πρόσδοσης του πάχους. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται η συνέχεια στα στοιχεία του καταστρώματος. Στο σχήμα που ακολουθεί αποτυπώνεται ένα σκαρίφημα τομής του πάχους των στοιχείων αλλά και του πάχους του επιθέματος αναφορικά με την επιφάνεια σχεδιασμού του καταστρώματος.



Σχήμα 4-30: Απεικόνιση διάταξης στοιχείων αναφορικά με την επιφάνεια σχεδίασης για τα στοιχεία του ελάσματος του καταστρώματος

Στο παραπάνω σχήμα με κόκκινο χρώμα αναπαρίστανται η επιφάνεια που έχει σχεδιαστεί με τη βοήθεια του λογισμικού Design Modeller. Στη συνέχεια επιλέγεται το πάχος του ελάσματος να προσδοθεί άνωθεν της επιφάνειας σχεδίασης. Το επίθεμα από σύνθετα υλικά θα πρέπει να τοποθετηθεί άνωθεν του ελάσματος όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα. Η τοποθέτηση των δύο υλικών με τη σωστή διακριτή σειρά είναι απαραίτητη καθώς καθορίζει την τελική ροπή αντίστασης της διατομής του συνεργαζόμενου μέσου ελάσματος – επιθέματος. Για να πραγματοποιηθεί σωστή οριοθέτηση των υλικών τα στοιχεία που περιλαμβάνουν και το επίθεμα, ορίζονται με τη βοήθεια του λογισμικού ACP.

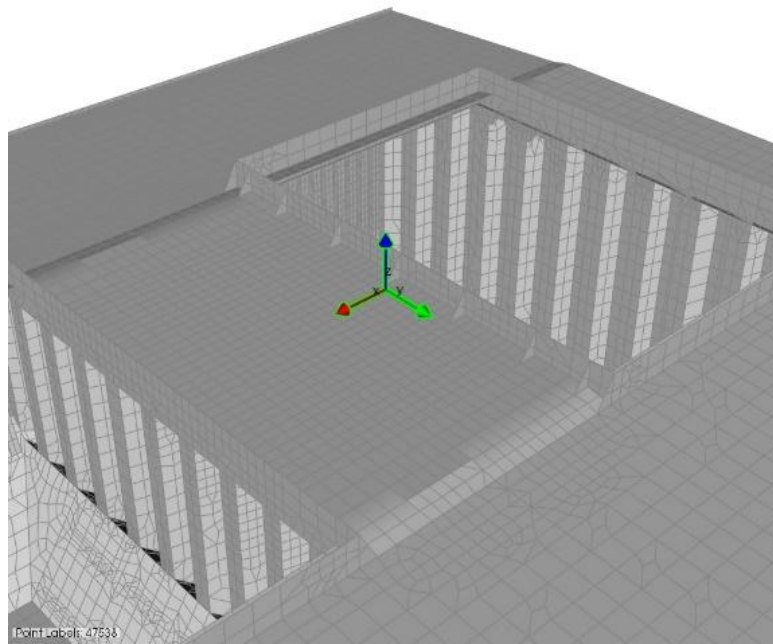
Αρχικά επιλέγονται τα στοιχεία στα οποία θα τοποθετηθεί το επίθεμα. Λαμβάνοντας υπόψη το Σχήμα 4-6, επιλέγονται τα αντίστοιχα στοιχεία. Το σχήμα που ακολουθεί αναπαριστά την επιλογή των αντίστοιχων στοιχείων του ελάσματος μέσω του λογισμικού ACP.



Σχήμα 4-31: Αναπαράσταση στοιχείων του καταστρώματος που θα τοποθετηθεί το επίθεμα

Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζεται το κατάστρωμα του μοντέλου ενώ παράλληλα διακρίνονται και τα στοιχεία του πλέγματος. Με πράσινο χρώμα ορίζονται τα στοιχεία εκείνα του πλέγματος που θα τοποθετηθεί το επίθεμα. Οι λόγοι εφαρμογής του επιθέματος στη συγκεκριμένη περιοχή έχουν αναφερθεί ήδη στο εδάφιο 4.5.

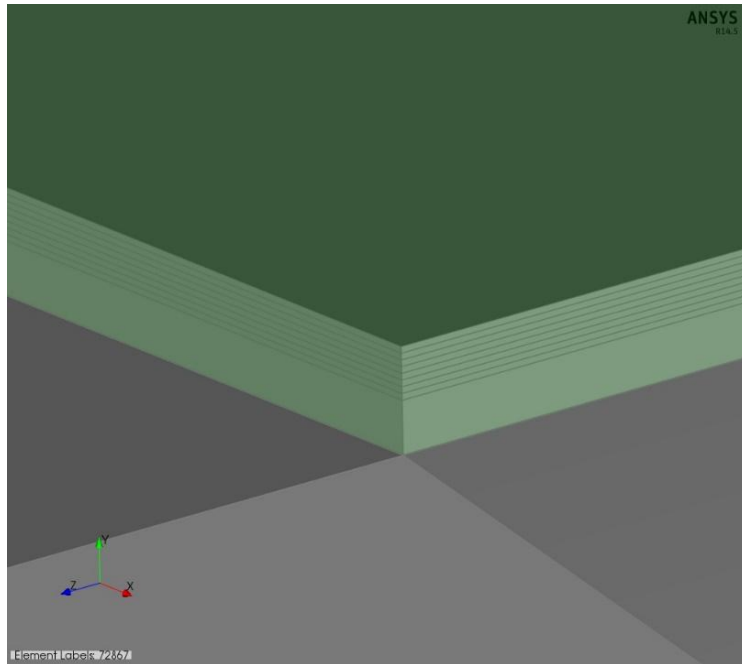
Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να ορισθεί το τοπικό σύστημα συντεταγμένων για τα στοιχεία του πλέγματος που έχουν επιλεγθεί. Το συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων θα χρησιμεύσει τόσο στον καθορισμό της φοράς εναπόθεσης των στρώσεων του χάλυβα και του επιθέματος αλλά και στον καθορισμό του άξονα αναφοράς των X που καθορίζει τη διεύθυνση των ινών άνθρακα του επιθέματος. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται το συγκεκριμένο σύστημα συντεταγμένων.



Σχήμα 4-32: Αναπαράσταση τοπικού συστήματος συντεταγμένων για τα πεπερασμένα στοιχεία του επιθέματος

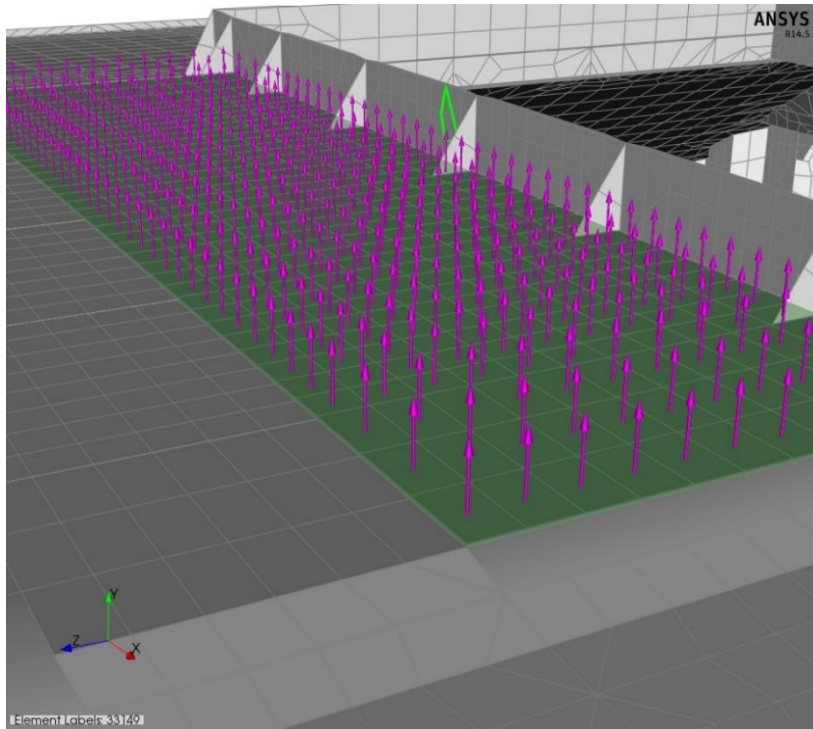
Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4-32, το σύστημα συντεταγμένων είναι τέτοιο ώστε ο άξονας των X, Y και Z να ταυτίζεται με τον διαμήκη, εγκάρσιο και κατακόρυφο άξονα X,Y και Z όπως ορίζονται στην παράγραφο 4.4. Με το κόκκινο βέλος αναπαρίσταται ο X άξονας, με το μπλε ο Z κατακόρυφος άξονας και με το πράσινο ο Y εγκάρσιος άξονας.

Έχοντας ορίσει το σύστημα των συντεταγμένων, ακολουθεί ο ορισμός της φοράς εναπόθεσης των υλικών. Αυτό πραγματοποιείται με τον ορισμό των "Oriented Element Sets". Ως φορά εναπόθεσης ορίζεται η προς τη θετική φορά του άξονα Z, όπως έχει ορισθεί από το τοπικό σύστημα συντεταγμένων. Η φορά αυτή εναρμονίζεται με την φορά του πάχους που θα έχουν τα στοιχεία σε όλο το υπόλοιπο μοντέλο. Με αυτόν τον τρόπο θα επιτευχθεί συνέχεια και ομοιόμορφη ροπή αδρανείας σε όλο το έλασμα του καταστρώματος. Στο σχήμα παρουσιάζεται μια άποψη των στοιχείων στην περιοχή του επιθέματος.



Σχήμα 4-33: Απεικόνιση του πάχους του ελάσματος και του πάχους των στρώσεων του επιθέματος με τα αντίστοιχα πάχη με $SR = 0.50$

Στο Σχήμα 4-33 μπορεί να διακριθεί τόσο το έλασμα όσο και οι στρώσεις του επιθέματος. Όπως απεικονίζεται και στο σχήμα, το μεγαλύτερο πάχος του ελάσματος αντιστοιχεί στο υλικό του ναυπηγικού χάλυβα. Οι στρώσεις άνωθεν του χάλυβα συνθέτουν την αλληλουχία των στρώσεων του σύνθετου υλικού. Η περίπτωση που απεικονίζεται, στο σχήμα αντιστοιχεί στην περίπτωση επιθέματος με $SR = 0.50$ που αντιστοιχεί σε συνολικό πάχος επιθέματος ίσο με $t_p = 13.65$ mm που είναι σχεδόν ίσο με το πάχος του ελάσματος στην περιοχή αυτή και το οποίο είναι ίσο με $t_s = 14$ mm. Στο σχήμα, οι επιφάνειες που απεικονίζονται γύρω από τα στοιχεία είναι οι επιφάνειες σχεδίασης του μοντέλου. Παρατηρείται ότι το πάχος των στοιχείων έχει δοθεί προς την πάνω μεριά του καταστρώματος.



Σχήμα 4-34: Αναπαράσταση φοράς εναπόθεσης χάλυβα και επιθέματος στο κατάστρωμα

Στο παραπάνω σχήμα με τα χρωματιστά βέλη απεικονίζεται η φορά εναπόθεσης των στρώσεων όπως έχει ορισθεί κατά τη μοντελοποίηση. Η ίδια φορά αντιστοιχεί και στο υπόλοιπο κατάστρωμα έτσι ώστε να διατηρείται η συνέχεια αυτού.

4.9 Υπολογισμός φορτίων και παραδοχές

Στο τμήμα του πλοίου που έχει μοντελοποιηθεί, τρία είναι τα σημαντικότερα φορτία τα οποία ασκούνται.

- Το βάρος της μεταλλικής κατασκευής
- Η πίεση στην εξωτερική επιφάνεια λόγω της υδροστατικής πίεσης
- Στιγμασία φορτία πίεσης στο κέλυφος του πλοίου λόγω δυναμικών θαλάσσιων φορτίων
- Η πίεση στην εσωτερική επιφάνεια των δεξαμενών φορτίου από το ίδιο το φορτίο.

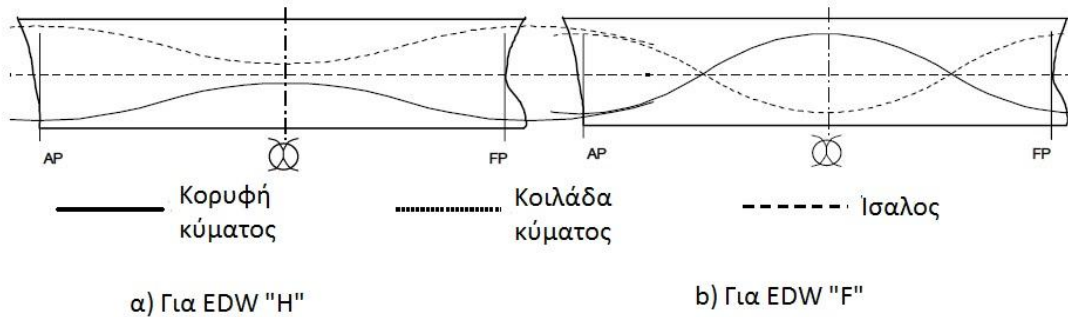
Τα δυναμικά φορτία αναφέρονται κυρίως σε κύματα τα οποία εν δυνάμει προσκρούουν στο πλοίο και προκαλούν υπέρμετρη αύξηση της πίεσης σε αυτό. Για τον υπολογισμό της πίεσης εξαιτίας των δυναμικών φορτίων των κυμάτων έγινε χρήση των Κοινών Κανόνων και Κανονισμών όπως έχουν διατυπωθεί από τον IACS.

Για τον υπολογισμό των δυναμικών πιέσεων, οι Κοινοί Κανόνες και Κανονισμοί εξετάζουν διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με την κατάσταση δυναμικής φόρτισης του πλοίου. Ανάλογα με την φορά πρόσπτωσης του κυματισμού του πλοίου καθώς και τη σχετική κίνηση του πλοίου ορίζονται τέσσερεις τύποι προσπιπτόντων κυματισμών.

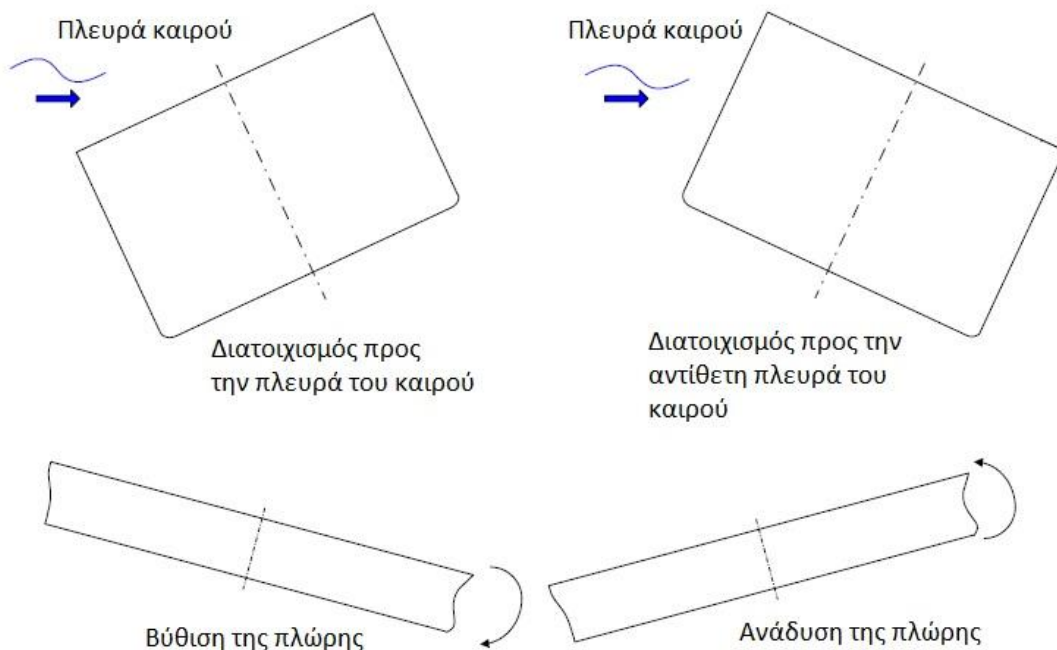
1. Προσπίπτοντες συνθήεις κυματισμοί στην πλήρη του πλοίου που μεγιστοποιούν την εγκάρσια καμπτική ροπή (EDW¹¹ “H”)

¹¹ Equivalent Design Wave είναι σύμφωνα με τον IACS το Ισοδύναμο Κύμα

2. Ακολουθούντες συνήθεις κυματισμοί που μεγιστοποιούν την εγκάρσια καμπτική ροπή του πλοίου (EDW "F")
3. Συνήθεις κυματισμοί που μεγιστοποιούν το διατοιχισμό του πλοίου (EDW "P")
4. Συνήθεις κυματισμοί που μεγιστοποιούν την υδροστατική πίεση στην ίσαλο γραμμή του πλοίου (EDW "P")



Σχήμα 4-35: Ορισμός κοιλάδας και κορυφής κύματος για τις περιπτώσεις EDW "H" και EDW "F" (IACS, 2014).



Σχήμα 4-36: Ορισμός των κινήσεων του πλοίου ανάλογα με τη φορά πρόσπτωσης του κυματισμού (IACS, 2014)

Ανάλογα με τις κινήσεις του πλοίου όπως ορίζονται από το Σχήμα 4-36 και τον τύπο του ισοδύναμου κύματος, ορίζονται και οι περιπτώσεις φόρτισης. Συνεπώς ανάλογα με τον εκάστοτε συνδυασμό κύματος και κίνησης του πλοίου μεταβάλλεται και η επίδραση των

φορτίων στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Σύμφωνα με πίνακα που παρατίθεται στους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς του IACS, οι περιπτώσεις συνοψίζονται στις ακόλουθες.

Πίνακας 4-7: Ορισμός των συνθηκών φόρτισης, σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς για Πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων του IACS(IACS, 2007).

Σενάριο Φόρτισης	H1	H2	F1	F2	R1	R2	P1	P2
EDW	“H”		“F”		“R”		“P”	
Διεύθυνση πρόσπτωσης κυματισμού	Πρωραία		Πρυμναία		Πλάγια (καιρός από την αριστερή πλευρά πλοίου)		Πλάγια (καιρός από την αριστερή πλευρά πλοίου)	
Επίδραση	Μέγιστη καμπτική ροπή		Μέγιστη καμπτική ροπή		Μέγιστη γωνία διατοιχισμού		Μέγιστη εξωτερική πίεσης επιφανείας	
	Sagging	Hogging	Sagging	Hogging	(+)	(-)	(+)	(-)

Ο Πίνακας 4-7 αναφέρεται στις διάφορες περιπτώσεις φόρτισης που μπορεί να δεχθεί το πλοίο. Σύμφωνα με τον IACS, ανάλογα με τη διεύθυνση πρόσπτωσης του κυματισμού επιτυγχάνεται κάθε φορά και διαφορετικό αποτέλεσμα φόρτισης. Στις πρώτες δύο περιπτώσεις “H” και “F” που αναφέρονται σε ακολουθούντες και προσπίπτοντες κυματισμούς στην πλώρη και αντίστοιχα στην πρύμνη του πλοίου το αποτέλεσμα της φόρτισης είναι να μεγιστοποιείται η καμπτική ροπή του πλοίου. Αυτό συμβαίνει γιατί το πλοίο υπόκειται σε αλληπάλληλες καταστάσεις Sagging και Hogging οι οποίες οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα.

Οι περιπτώσεις “R” και “P” αφορούν διευθύνσεις κυμάτων που προσπίπτουν στις πλευρές του πλοίου. Η διαφορά ανάμεσά τους στηρίζεται στην κίνηση του πλοίου και συγκεκριμένα στο διατοιχισμό αυτού. Στην κατάσταση “R” η συχνότητα διατοιχισμού του πλοίου συμπίπτει με τη συχνότητα του κύματος με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται το φαινόμενο του διατοιχισμού. Το φαινόμενο αυτό, αν και αρκετά επικίνδυνο καθώς μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση της μέγιστης γωνίας ανατροπής του πλοίου, δεν θα μελετηθεί στην παρούσα εργασία. Αντίθετα, η κατάσταση που έχει ενδιαφέρον είναι η κατάσταση “P” η οποία μεγιστοποιεί την πίεση στην πλευρά του πλοίου. Σύμφωνα με τις Οδηγίες του IACS (IACS, 2007), αυτή η μέγιστη πίεση λόγω της πρόσπτωσης των κυμάτων και της κίνησης του πλοίου οδηγεί σε εγκάρσια θλίψη του καταστρώματος η οποία οδηγεί στο λυγισμό των εγκάρσιων λωρίδων.

Για τον υπολογισμό των τελικών πιέσεων που εφαρμόζονται στο πλοίο, οι Κοινοί Κανόνες και Κανονισμοί του IACS παρέχουν μια σειρά από εμπειρικές σχέσεις. Οι σχέσεις αυτές θα αναπτυχθούν στις ακόλουθες παραγράφους. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι οι τιμές των φορτίων που θα υπολογιστούν ενδεχομένως να μην οδηγήσουν σε λυγισμό. Ο λόγος είναι ότι κάθε νεότευκτο πλέον πλοίο είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να μην παρουσιάζει φαινόμενα λυγισμού στις φορτίσεις που ορίζουν οι κανονισμοί. Για να διευκολυνθεί η εμφάνιση λυγισμού στο έλασμα των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος, θα πρέπει οι πιέσεις που θα εφαρμοστούν να αυξηθούν. Μάλιστα για να διευκολυνθεί η εμφάνιση του λυγισμού σε αυτό το σημείο η μοντελοποίηση της γεωμετρίας του πλοίου έχει αρκετά απλουστευθεί, απαλείφοντας αρκετές ενισχύσεις. Ο λόγος για τον οποίο έχει επιλεγεί ο

συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού των εξωτερικών πιέσεων, είναι διότι αποτελεί έναν αξιόπιστο τρόπο υπολογισμού της τάξης μεγέθους της πίεσης που θα ασκηθεί στις εξωτερικές επιφάνειες του πλοίου.

Κατά τον υπολογισμό των πιέσεων στις εσωτερικές επιφάνειες του κελύφους, σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των πιέσεων που προκύπτουν από δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης. Η πρώτη κατάσταση αφορά την περίπτωση κατά την οποία ο μέγιστος όγκος του κύτους έχει πληρωθεί ενώ η δεύτερη κατάσταση φόρτωσης αφορά την περίπτωση κατά την οποία ένα μέρος του κύτους έχει πληρωθεί καθώς το βάρος του φορτίου έχει ξεπεράσει πλέον το μέγιστο επιτρεπόμενο σύμφωνα με το Εγχειρίδιο φόρτωσης του πλοίου. Η υπέρβαση του μέγιστου επιτρεπόμενου φορτίου οφείλεται στο γεγονός ότι η πυκνότητα του μεταφερόμενου φορτίου είναι αρκετά υψηλή.

Σύμφωνα με το «Εγχειρίδιο Φόρτωσης» του υπό μελέτη πλοίου το μέγιστο επιτρεπόμενο φορτίο στα συγκεκριμένα δύο κύτη που εξετάζονται είναι 37400 t. Η μοντελοποίηση μιας κατάστασης στην οποία μεταφέρεται το μέγιστο δυνατό φορτίο, αν και εφικτή, οδηγεί σε υπολογιστικές δυσκολίες. Συγκεκριμένα, λόγω των υψηλών πιέσεων που παρατηρούνται στο διπύθμενο και λόγω της φύσης της στήριξης του μοντέλου όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, η προσομοίωση εμφανίζει λυγισμό σε σημεία του πλοίου διαφορετικά από τα επιθυμητά. Αν και η ενίσχυση του καταστρώματος έχει περιορισθεί με σκοπό να διευκολύνει την εμφάνιση του λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες του καταστρώματος, οι υψηλές πιέσεις λόγω του μεταφερόμενου φορτίου αποτρέπουν την εκδήλωση του φαινομένου στο κατάστρωμα.

Για το λόγο αυτό, επιλέγεται ελαφρά φόρτωση του κύτους ούτως ώστε να αποφεύγονται ακραίες τιμές πιέσεων οι οποίες οδηγούν στην εμφάνιση λυγισμού σε διαφορετικά σημεία επί του κύτους. Στους υπολογισμούς των πιέσεων που θα ακολουθήσουν θεωρείται ότι η πυκνότητα του φορτίου είναι 1 t/m^3 ενώ το κύτος έχει πληρωθεί στο μέγιστο δυνατό σημείο. Οι πιέσεις που υπολογίζονται σε αυτήν την κατάσταση φόρτωσης αν και υψηλές, είναι αρκετά περιορισμένες ώστε να μην επηρεάζουν το επιθυμητό αποτέλεσμα, που είναι και η εμφάνιση του λυγισμού στο κατάστρωμα του πλοίου.

Συνοψίζοντας, στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου ασκούνται διάφορα φορτία και στην παρούσα μελέτη μοντελοποιούνται αυτά που σύμφωνα με τη βιβλιογραφία συνεισφέρουν περισσότερο στην εμφάνιση του φαινομένου λυγισμού στο κατάστρωμα.

Στα εδάφια που θα ακολουθήσουν θα γίνει υπολογισμός των πιέσεων που θα εφαρμοστούν στις επιφάνειες της μεταλλικής κατασκευής και οι οποίες διακρίνονται στις εσωτερικές πιέσεις και στις εξωτερικές πιέσεις. Οι εξωτερικές πιέσεις οφείλονται πρωτίστως στην ύπαρξη του θαλάσσιου νερού. Είτε λόγω στατικών φαινομένων είτε λόγω δυναμικών φαινομένων οι πιέσεις αυτές εφαρμόζονται στην εξωτερική πλευρά του κελύφους του πλοίου. Στην περίπτωση των στατικών πιέσεων ο υπολογισμός γίνεται απλούστερα με τη βοήθεια του νόμου της υδροστατικής πίεσης. Ωστόσο, στην περίπτωση των δυναμικών φαινομένων επιλέγεται η χρήση κανονισμών έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί μια εκτίμηση των μεγεθών.

Όσον αφορά τις εσωτερικές πιέσεις λόγω της ύπαρξης φορτίου, ο υπολογισμός που ακολουθεί θα εξαρτηθεί από τη φύση του φορτίου. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι σε υγρή μορφή, τότε οι πιέσεις στις επιφάνειες μπορούν να υπολογιστούν με τη βοήθεια του νόμου της υδροστατικής πίεσης. Αντίθετα, για την μοντελοποίηση ξηρού φορτίου θα πρέπει να αξιοποιηθούν οι διεθνείς κανονισμοί.

4.9.1 Πιέσεις εξωτερικής επιφάνειας κελύφους

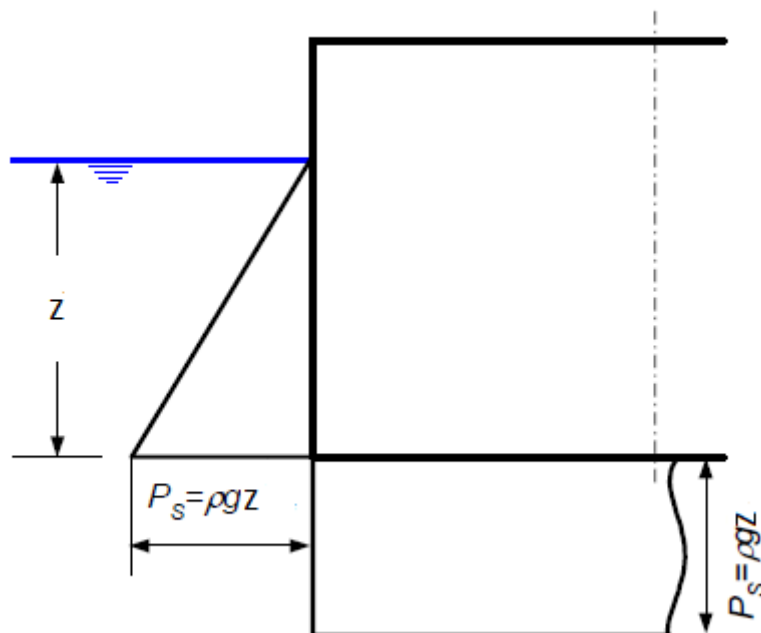
Οι πιέσεις που ασκούνται στην εξωτερική επιφάνεια του πλοίου οφείλονται στην παρουσία του νερού. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς των Κοινών Κανόνων και κανονισμών, οι πιέσεις αυτές διακρίνονται στις στατικές πιέσεις και στις δυναμικές πιέσεις. Οι στατικές πιέσεις αφορούν την υδροστατική πίεση που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους και οφείλεται στο γεγονός ότι το πλοίο βρίσκεται βυθισμένο στο νερό. Η σχέση που συνδέει την υδροστατική και τη δυναμική πίεση με την πίεση p που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια του πλοίου είναι σχετικά απλή.

$$p = p_s + p_w \quad (4.4)$$

Όπου p_s είναι η υδροστατική πίεση και p_w είναι η δυναμική πίεση.

$$p_s = \rho g z \quad (4.5)$$

Όπου z είναι η εκάστοτε απόσταση της ισάλου από τη βασική γραμμή του πλοίου, η οποία είναι θετική για φορά από το κατάστρωμα προς την τρόπιδα. Πρέπει να σημειωθεί φυσικά ότι τα σημεία του πλοίου που βρίσκονται άνω της ισάλου, με $z < 0$, έχουν μηδενική υδροστατική πίεση. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται η κατανομή της υδροστατικής πίεσης όπως υπαγορεύει η άνωθεν σχέση.



Σχήμα 4-37: Κατανομή υδροστατικής πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους(IACS, 2014)

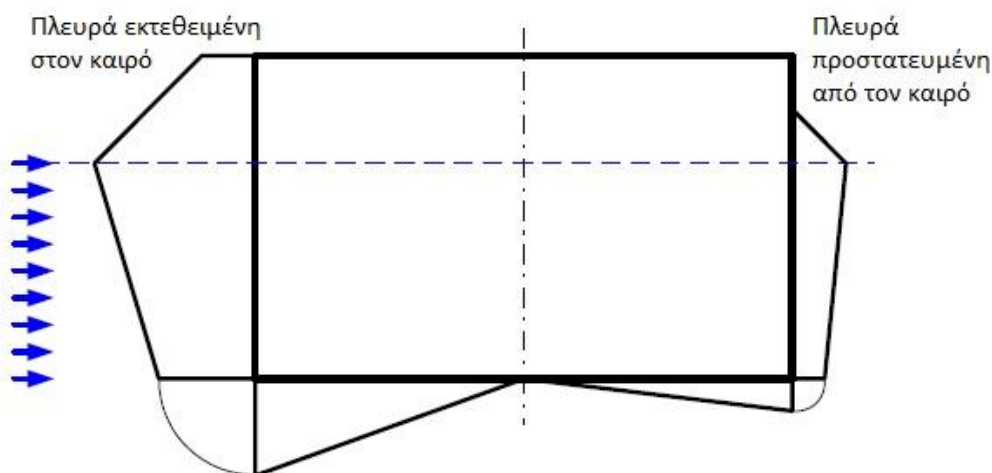
Στο παραπάνω σχήμα αναπαρίσταται μια τυπική τομή ενός πλοίου καθώς και το ύψος της ισάλου. Η υδροστατική πίεση ασκείται στην επιφάνεια κάτω από την ίσαλο γραμμή, με μέγιστη τιμή στον πυθμένα. Η γραμμική σχέση που συνδέει την πίεση με την απόσταση z είναι χαρακτηριστική.

Όπως αναφέρθηκε και στο Εδάφιο 4.9 η περίπτωση που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η κατάσταση “P” και συγκεκριμένα η κατάσταση “P1” όπως ορίζονται οι καταστάσεις φόρτισης στους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς του IACS. Αν ως p_p οριστεί η υδροδυναμική πίεση λόγω κυματισμού τότε σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς οι υπολογισμοί έχουν ως εξής:

$$p_w = p_p \quad (4.6)$$

$$p_w = p_p / 3 \quad (4.7)$$

Η εξίσωση (4.6) αφορά την πλευρά του πλοίου που είναι εκτεθειμένη στον καιρό, ενώ η εξίσωση (4.7) αφορά την πλευρά που προστατεύεται από τον καιρό. Στο ακόλουθο σχήμα, περιγράφεται η σχετική κατάσταση.



Σχήμα 4-38: Αναπαράσταση της κατανομής της πίεσης λόγω δυναμικών πιέσεων των κυμάτων στις πλευρές του πλοίου για τις καταστάσεις τύπου “P” σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς του IACS (IACS, 2014).

Η Πίεση στην εξωτερική επιφάνεια του πλοίου προστίθεται στην υπάρχουσα υδροστατική πίεση. Παρατηρείται ότι σύμφωνα με τους κανονισμούς, η μέγιστη τιμή υπολογίζεται στο ύψος της ισάλου, ενώ η τιμή της πίεσης φθίνει γραμμικά ως το ύψος του καταστρώματος αλλά και ως το μέγιστο βάθος του πυθμένα. Παρατηρείται επίσης σε αντίθεση με την υδροστατική πίεση που υπολογίστηκε από την εξίσωση (4.5) ότι η κατανομή της πίεσης στον πυθμένα είναι άνισα κατανεμημένη και μάλιστα μηδενίζεται στο κέντρο αυτού. Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί, ότι οι τιμές των πιέσεων στην πλευρά που είναι προστατευμένη από τον καιρό είναι σαφώς μικρότερες. Συγκεκριμένα η πίεση μηδενίζεται στα μέσα των εξάλλων. Σύμφωνα με τους κανονισμούς η δυναμική πίεση υπολογίζεται ως:

$$p_p = 4.5 f_p f_{nl} C \sqrt{\frac{L + \lambda - 125}{L}} \left(2 \frac{|z|}{T_{Lci}} + 3 \frac{|2y|}{B} \right) \quad (4.8)$$

Όπου f_{nl} και f_p είναι συντελεστές που αντιστοιχούν στα εξής επίπεδα πιθανότητας:

- $f_{nl} = 0.65$ για πιθανότητα 10^{-8} το φαινόμενο να μην ακολουθήσει γραμμική συμπεριφορά
- $f_{nl} = 1$ για πιθανότητα 10^{-4} το φαινόμενο να έχει γραμμική συμπεριφορά
- $f_p = 1$ για μελέτες αντοχής που εξετάζουν φορτία με πιθανότητα να συμβούν 10^{-8}
- $f_p = 0.5$ για μελέτες αντοχής που εξετάζουν φορτία με πιθανότητα να 10^{-4}

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένη μελέτης είναι επιθυμητό να εξεταστεί η δυσμενέστερη περίπτωση. Συνεπώς θα θεωρηθεί ότι το φαινόμενο έχει γραμμική συμπεριφορά και ότι εξετάζει τα υψηλότερα φορτία που μπορούν να εμφανιστούν.

Ο συντελεστή λ ορίζεται ως:

$$\lambda = \left(0.2 + 0.4 \frac{T_{LC}}{T_S} \right) L \quad (4.9)$$

- y είναι η εγκάρσια απόσταση σε μέτρα από το επίπεδο συμμετρίας του πλοίου
- z είναι η απόσταση από τη βασική γραμμή του πλοίου, θετική προς το κατάστρωμα
- T_{LC} είναι το βύθισμα του πλοίου στη μέση τομή αυτού
- T_S είναι το μέγιστο βύθισμα του πλοίου
- B είναι το πλάτος του πλοίου στη μέση τομή
- L το ολικό μήκος του πλοίου
- C είναι παράμετρος του κύματος με:

$$C = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100} \right)^{1.5} \quad (4.10)$$

για $90 \leq L < 300m$

ή

$$C = 10.75 \quad (4.11)$$

για $300 \leq L \leq 350m$

Ωστόσο μετά τον υπολογισμό της υδροδυναμική πίεσης, σύμφωνα με τους κανονισμούς, απαιτείται κάποια διόρθωση. Στην περίπτωση που εξετάζεται, η υδροδυναμική πίεση πάνω από την ίσαλο γραμμή $P_{w,c}$ δίνεται σε kN/m^2 από τη σχέση:

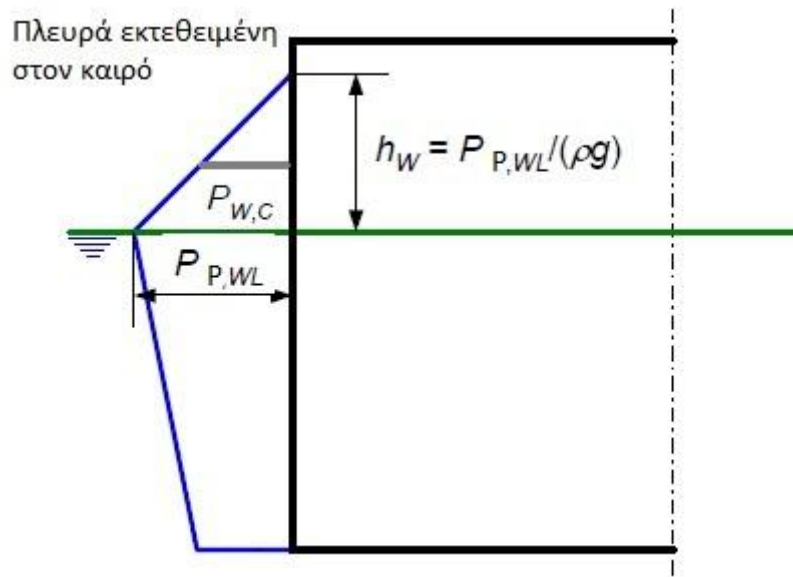
$$P_{w,c} = P_{p,wL} + \rho g (T_{LCi} - z) \quad (4.12)$$

$$\text{για } T_{LCi} \leq z \leq h_w + T_{LCi}$$

όπου $P_{p,wL}$ είναι η υδροδυναμική πίεση στην ίσαλο όπως υπολογίζεται στην εξίσωση, ενώ,

$$h_w = \frac{P_{p,wL}}{\rho g} \quad (4.13)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί, η περιγραφή των ανωτέρω, γίνεται πιο κατανοητή



Σχήμα 4-39: Αναπαράσταση της κατανομής της πίεσης λόγω δυναμικών κυμάτων και η σχετική διορθωτικοί συντελεστές (IACS, 2014).

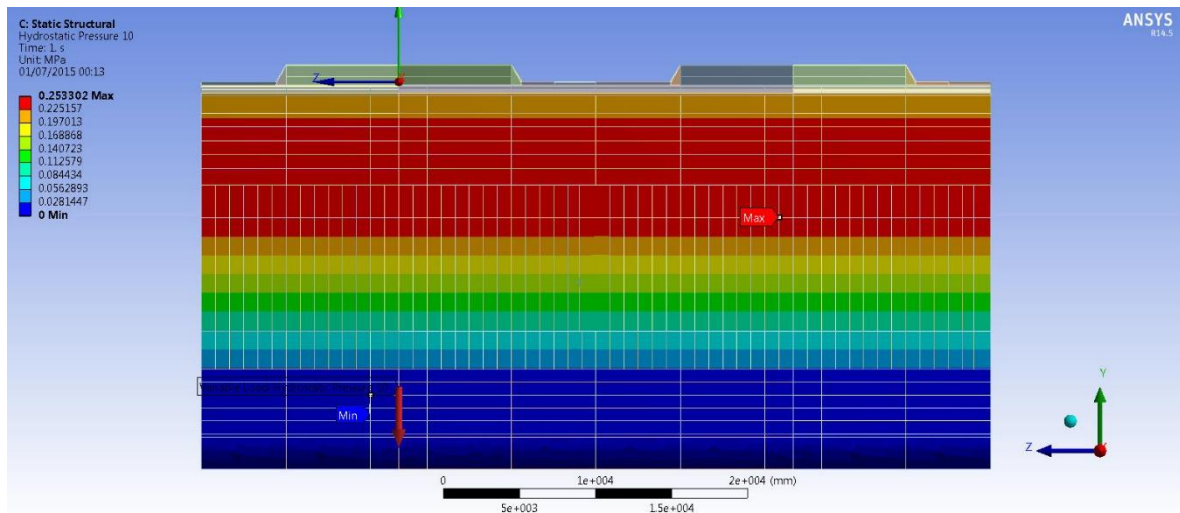
Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα, η υδροδυναμική πίεση που υπολογίζεται σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς από την εξίσωση (4.8) διορθώνεται κατάλληλα όπως αναφέρθηκε. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή της παρουσιάζεται ακριβώς στην ίσαλο ενώ η τιμής της φθίνει σταδιακά καθώς αυξάνεται η απόσταση από την βασική γραμμή. Μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχει η πιθανότητα η τιμή αυτή να μηδενίζεται νωρίτερα πριν το κυρίως κατάστρωμα.

Στην περίπτωση του πλοίου που εξετάζεται στην παρούσα εργασία οι διάφορες τιμές των μεγεθών και των συντελεστών έχουν ως εξής:

Πίνακας 4-8: Πίνακας τιμών μεταβλητών για τον υπολογισμό των εξωτερικών δυναμικών πιέσεων λόγω κυμάτων στις πλευρές του πλοίου.

Μέγεθος	Τιμή	Παρατηρήσεις
f_P	1	Η τιμή αφορά την πιθανότητα εμφάνισης δυσμενών φορτίων. Η περίπτωση που θα εξετάσουμε αφορά την δυσμενέστερη δυνατή, επομένως η τιμή που επιλέγεται είναι η τιμή 1.
f_{nl}	1	Ομοίως με το συντελεστή f_P , ο συντελεστής f_{nl} σχετίζεται με τη μη γραμμικότητα του φαινομένου. Επειδή μελετάται η δυσμενέστερη περίπτωση η τιμή που επιλέγεται είναι 1.
B	45 m	Είναι το μέγιστο πλάτος του πλοίου στην ίσαλο.
L	292 m	Είναι το ολικό μήκος του πλοίου.
z_{WL}	16.5 m	Είναι η απόσταση της ισάλου από την βασική γραμμή.
T_{CLi}	18.5 m	Πρόκειται για το βύθισμα του πλοίου στο σημείο "i" που εξετάζεται. Στη μέση τομή που εξετάζουμε, το βύθισμα συμπίπτει με τη μέγιστη τιμή βυθίσματος του πλοίου T_S
T_S	18.5 m	Ορίζεται ως η μέγιστη τιμή βυθίσματος.
λ	178.2	Το μήκος κύματος
y	22.5 m	Η απόσταση της πλευρά από το επίπεδο συμμετρίας του πλοίου σε μέτρα.
z	16.5	Η απόσταση από τη βασική γραμμή προς το καταστρώμα σε m.
h_w	25.62 m	Το ύψος από την ίσαλο γραμμή όπου επιδρούν οι πιέσεις.
$P_{P,WL}$	0.253 MPa	Πίεση στο ύψος της ισάλου. Αποκτά τη μέγιστη τιμή.
$P_{P,Z}$	0.200 MPa	Πίεση στο ύψος του καταστρώματος. Υπολογίζεται από την πίεση στην ίσαλο γραμμή μειωμένη κατά την απαραίτητη διόρθωση
$P_{P,below WL}$	0.1 MPa	Είναι η πίεση κοντά στο μέγιστο βύθισμα του πλοίου

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 4-39 αλλά και από τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-8, κατά τη μοντελοποίηση της δυναμικής πίεσης που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους, θα ορισθεί μια γραμμικά μεταβαλλόμενη πίεση από το κατάστρωμα έως την ίσαλο με μέγιστη τιμή στην ίσαλο και στην συνέχεια μια γραμμικά μεταβαλλόμενη πίεση από τον πυθμένα έως την ίσαλο με μέγιστη πίεση πάλι στην ίσαλο. Οι κατανομές των πιέσεων φαίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4-40: Μοντελοποίηση κατανομής δυναμικής πίεσης και στις δύο πλευρές του πλοίου

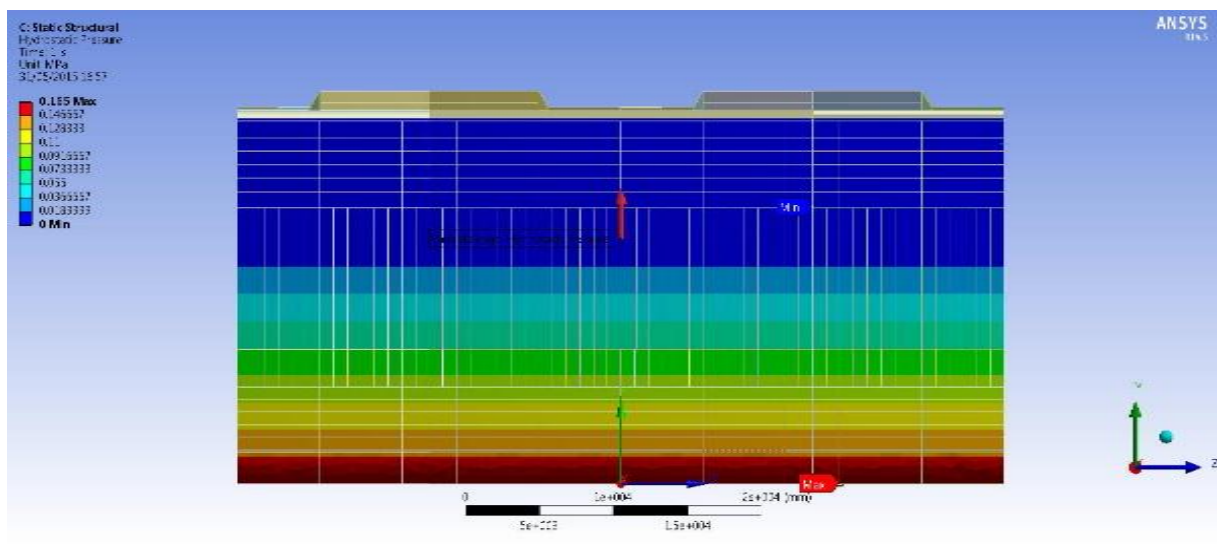
Το παραπάνω σχήμα αναπαριστά την κατανομή της πίεσης στην πλευρά του πλοίου. Η μεταβολή της πίεσης είναι γραμμική και αποκτά μέγιστη τιμή στο ύψος της ισάλου με τιμή 0.253 MPa. Η πίεση φθίνει τόσο προς την κατεύθυνση του καταστρώματος όσο και προς την κατεύθυνση του πυθμένα. Στο ύψος του καταστρώματος η τιμή της πίεσης λαμβάνει την τιμή 0.200 MPa όπως προκύπτει από τους κοινούς κανόνες και κανονισμούς. Αντίθετα η ελάχιστη πίεση προς την κατεύθυνση του πυθμένα λαμβάνει μηδενική τιμή πριν το μέγιστο βάθος του πυθμένα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι για να περιοριστούν τα φορτία μόνο σε αυτά που βρίσκονται πλησιέστερα στο κατάστρωμα και να αποφευχθεί η φόρτιση της κατασκευής σε σημεία που οδηγούν στην εμφάνιση λυγισμού σε περιοχές χωρίς κάποιο ενδιαφέρον στο πλαίσιο της συγκεκριμένης εργασίας. Στο παραπάνω σχήμα με κόκκινο χρώμα αναπαριστάται η μέγιστη τιμή τις πίεσης και με μπλε χρώμα η ελάχιστη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η κατανομή της πίεσης έχει εφαρμοστεί και στις δύο πλευρές του πλοίου, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με αυτό που ορίζουν οι κανονισμοί. Ο έλεγχος της κατασκευής έναντι λυγισμού με χρήση των πιέσεων που προκύπτουν από τους υπολογισμούς που προβλέπουν οι Κοινός Κανόνες και Κανονισμοί, θα αποδείξει ότι η κατασκευή είναι ασφαλής έναντι λυγισμού καθώς είναι σχεδιασμένη για αυτό το σκοπό. Με άλλα λόγια, εφαρμόζοντας την πίεση που προβλέπουν οι κανονισμοί, δεν θα παρουσιαστεί λυγισμός όπως είναι επιθυμητό. Για αυτό το σκοπό επιλέγεται στην παρούσα εργασία να εφαρμοστεί η ίδια κατανομή δυναμικής πίεσης, και από τις δύο πλευρές του πλοίου ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η εμφάνιση λυγισμού λυγισμός στο σημείο ενδιαφέροντος.

Η κατανομή της πίεσης λόγω υδροστατικών πιέσεων στην επιφάνεια του κελύφους είναι σχετικά απλούστερη διαδικασία. Το λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα μοντελοποίησης υδροστατικών πιέσεων με ορισμό των εξής παραγόντων:

- Διεύθυνση της επιτάχυνσης της βαρύτητας
- Μέτρο της επιτάχυνσης της βαρύτητας που στην περίπτωση μας λαμβάνεται η τιμή 9.81 m/s^2 .
- Θέση της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού. Στο παρόν πρόβλημα λαμβάνεται το ύψος της ισάλου.
- Πυκνότητα του υγρού. Λαμβάνεται ίση με την πυκνότητα της θάλασσας $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρατηρείται η κατανομή της υδροστατικής πίεσης στην πλευρά του πλοίου.



Σχήμα 4-41: Κατανομή υδροστατική πίεσης στο εξωτερικό κέλυφος και στις δύο πλευρές του πλοίου

Γίνεται αντιληπτό από το άνωθεν σχήμα ότι η υδροστατική πίεση που ασκείται στην εξωτερική επιφάνεια του κελύφους, στις δύο πλευρές του πλοίου και γίνεται μέγιστη στο βάθος του πυθμένα ενώ μηδενίζεται στην ίσαλο. Ομοίως με την περίπτωση των δυναμικών πιέσεων, στο παραπάνω σχήμα με κόκκινο χρώμα αναπαριστάται η μέγιστη τιμή της πίεσης ενώ με μπλε η ελάχιστη. Να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή της διατηρείται και στον πυθμένα του πλοίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η υδροστατική πίεση που ασκείται στην επιφάνεια του πυθμένα όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς είναι της τάξης των $0,165 \text{ MPa}$ έχει φορά πάντα κάθετη στην επιφάνεια του κελύφους και διεύθυνση όπως είναι φυσικό προς το εσωτερικό του πλοίου. Η κατανομή αυτή της πίεσης, σε συνδυασμό με τη στήριξη του μοντέλου στα άκρα, οδηγεί την κατασκευή σε κατάσταση hogging. Κατά την επίλυση του προβλήματος παρατηρήθηκε ότι η κατάσταση αυτή οδηγεί σε εμφάνιση λυγισμού σε διαφορετικά από τα επιθυμητά φορτία όπως οι πλευρές του πλοίου αλλά και ο χώρος του φορτίου.

4.9.2 Υπολογισμός εσωτερικών πιέσεων λόγω ύπαρξης φορτίου

Στην παρούσα εργασία και στο συγκεκριμένο μοντέλο που εξετάζεται επιλέγεται να μελετηθεί η κατάσταση κατά την οποία το πλοίο μεταφέρει φορτίο. Όπως είναι φυσικό μια κατάσταση φόρτωσης, αν και πιο σύνθετη να υπολογιστεί, αυξάνει σημαντικά τα φορτία που ασκούνται στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Σκοπός είναι η προσομοίωση όλων των φορτίων που συνδράμουν θετικά στην εμφάνιση κατάστασης λυγισμού στο κατάστρωμα. Στο προηγούμενο εδάφιο πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των εξωτερικών πιέσεων που ασκούνται στη μεταλλική κατασκευή του πλοίου. Οι εξωτερικές αυτές πιέσεις οφείλονται τόσο στις υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται λόγω της θάλασσας που περιβάλλει το πλοίο όσο και στις υδροδυναμικές πιέσεις που οφείλονται στην κρούση κυμάτων στην πλευρά του πλοίου. Σε κάθε περίπτωση, για τον υπολογισμό των πιέσεων και την εκτίμηση της τάξης μεγέθους αυτών, χρησιμοποιήθηκαν οι Κοινοί Κανόνες και Κανονισμοί όπως αυτοί περιγράφονται στο εδάφιο 4.2.

Για τον υπολογισμό των εσωτερικών πιέσεων υπάρχουν δύο δυνατότητες. Η πρώτη δυνατότητα περιλαμβάνει την περίπτωση όπου το φορτίο που είναι επιθυμητό να μοντελοποιηθεί είναι υγρό. Στην περίπτωση αυτή το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού της υδροστατικής πίεσης σε κάθε σημείο του χώρου του φορτίου. Το μόνο που είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό είναι ο ορισμός της στάθμης του υγρού στο χώρο του φορτίου και η πυκνότητα του υγρού.

Η δεύτερη δυνατότητα περιλαμβάνει τον υπολογισμό των πιέσεων μέσω εφαρμογής των Κοινών Κανόνων και Κανονισμών. Στη συνέχεια θα ακολουθήσει αναλυτικά ο υπολογισμός των εσωτερικών πιέσεων που οφείλονται στην απόθεση φορτίου ξηρού τύπου.

Για τον υπολογισμό των πιέσεων θα χρησιμοποιηθούν οι Κοινοί Κανόνες και κανονισμοί όπως διέπουν την κατασκευή πλοίων μεταφοράς φορτίων σε χύδην μορφή. Σύμφωνα με τους κανονισμούς η πυκνότητα του ξηρού φορτίου ορίζεται σε t/m^3 ενώ η τιμή που θα επιλεγεί ως πυκνότητα στους παρακάτω υπολογισμούς καθορίζεται σύμφωνα με τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-9 για πλοία με ολικό μήκος άνω των 150 m. Για πλοία με ολικό μήκος κάτω των 150 m η πυκνότητα του φορτίου λαμβάνεται ως η μέγιστη πυκνότητα φορτίου όπως αυτή ορίζεται στο εγχειρίδιο φόρτωσης του πλοίου. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι τα πλοία μεταφοράς φορτίου χύδην κατατάσσονται σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς σε:

- **BC – A:** Αφορά πλοία τα οποία είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν φορτία ξηρού τύπου πυκνότητας άνω του $1 t/m^3$ με καθορισμένους χώρους φορτίου κενούς στο μέγιστο βύθισμα επιπρόσθετα των απαιτήσεων BC – B.
- **BC – B:** Αφορά πλοία τα οποία είναι σχεδιασμένα να μεταφέρουν φορτία ξηρού τύπου πυκνότητας άνω του $1 t/m^3$ με όλους του χώρους φορτίου πλήρεις επιπρόσθετα των απαιτήσεων BC – C.
- **BC – C:** Αφορά πλοία μεταφοράς φορτίων ξηρού τύπου πυκνότητας $1.0 t/m^3$.

Πίνακας 4-9: Πυκνότητα φορτίου σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).

Τύπος φόρτωσης	Πυκνότητα ρ_c	
	BC – A, BC – B	BC – C
Χώρος φορτίου πλήρης ως το κατάστρωμα	$\text{Max}(M_H / V_H), 1)$	1
Χώρος φορτίου μη πλήρης ως το κατάστρωμα	3	
(1) Εκτός αν καθορίζεται διαφορετικά από το σχεδιαστή του πλοίου		

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, η πυκνότητα ρ_c του φορτίου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ανάλογα με την κατηγορία BC-A, BC-B και BC-C στην οποία ανήκει το πλοίο σε συνδυασμό με το αν χώρος φορτίου είναι πλήρης ή όχι. Για πλοία που ανήκουν στις κατηγορίες BC-A και BC-B και στην περίπτωση πλήρους φόρτωσης επιλέγεται ως πυκνότητα η μέγιστη τιμή μεταξύ των λόγων M_H/V_H και της τιμής 1 tn/m^3 . Όπου M_H είναι η μάζα του φορτίου σε τόνους και V_H είναι ο όγκος του κύτους σε m^3 . Αντίθετα στα πλοία τύπου BC-C η πυκνότητα ρ_c ορίζεται ίση με 1 tn/m^3 . Σε περίπτωση που η πυκνότητα του φορτίου είναι πολύ μεγάλη και η πλήρωση του κύτους υπερβαίνει το επιτρεπόμενο από το εγχειρίδιο φόρτωσης φορτίο, τότε η πυκνότητα λαμβάνει την τιμή 3. Στην παρούσα εργασία θα ληφθεί υπόψη κατάσταση πλήρους φόρτωσης με πυκνότητα $\rho_c = 1 \text{ tn/m}^3$. Ο λόγος που επιλέγεται η πλήρωση του κύτους και όχι η μερική πλήρωση είναι ότι επιτυγχάνεται με αυτόν τον τρόπο μια ομαλότερη κατανομή του φορτίου. Το γεγονός αυτό αποτρέπει τη συγκέντρωση φορτίων που ενδεχομένως οδηγήσουν σε φαινόμενα λυγισμού σε μη επιθυμητά σημεία.

Για τους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν είναι απαραίτητος ο ορισμός συγκεκριμένων μεγεθών. Πολλά από αυτά τα μεγέθη έχουν ήδη ορισθεί. Για λόγους πληρότητας της εργασίας, στη συνέχεια θα παρουσιαστεί ο τρόπος υπολογισμού των εσωτερικών πιέσεων τόσο στην περίπτωση πλήρους φόρτισης του κύτους όσο και στην περίπτωση μερικής φόρτωσης.

Πίνακας 4-10: Παρουσίαση μεταβλητών απαραίτητων για τον υπολογισμό των εσωτερικών πιέσεων λόγω φορτίου

ρ_c :	Πυκνότητα του ξηρού φορτίου όπως ορίστηκε στον παραπάνω πίνακα σε t/m^3
M_H :	Συνολική μάζα του φορτίου που θα φορτωθεί στο χώρο του φορτίου σε t
V_H :	ο όγκος του χώρου φορτίου σε m^3
K_C :	<p>Συντελεστής που σχετίζεται με την κλίση των επιφανειών του χώρου φορτίου και είναι ίσος με</p> $K_C = \cos^2 a + (1 - \sin \psi) \sin^2 a$ <p>για επιφάνειες όπως το διπύθμενο, οι κατώτερες πλευρικές δεξαμενές έρματος, την κατώτερη πλευρική ενίσχυση της φρακτής και τις εγκάρσιες και διαμήκεις φρακτές.</p> <p>$K_C = 0$ Για τις ανώτερες πλευρικές δεξαμενές έρματος, την ανώτερη πλευρική ενίσχυση της φρακτής και τις επιφάνειες καταστρωμάτων</p>
α :	Γωνία που σχηματίζει η εκάστοτε επιφάνεια του χώρου φορτίου με το οριζόντιο επίπεδο σε μοίρες
ψ :	<p>Η γωνία απόθεσης του φορτίου ως προς το οριζόντιο επίπεδο σε μοίρες. Σε περίπτωση που δεν έχει πραγματοποιηθεί αναλυτικός υπολογισμός ενδεικτικά δίνονται οι ακόλουθες τιμές:</p> <p>$\psi = 30^\circ$ γενικός κανόνας $\psi = 35^\circ$ για μεταλλεύματα σιδήρου $\psi = 25^\circ$ για μεταλλεύματα τσιμέντου</p>
h_c :	Η απόσταση από την επιφάνεια του διπυθμένου ως το ανώτερο σημείο του φορτίου σε μέτρα
h_{DB} :	Είναι το ύψος του διπυθμένου σε m
h_{LS} :	Μέσο ύψος της κατώτερης πλευρικής ενίσχυσης της φρακτής (Lower stool) σε m
B_H :	Μέσο πλάτος του χώρου φορτίου σε m
l_H :	Μήκος του χώρου φορτίου σε m
b_{IB} :	Πλάτος του διπυθμενου σε m
x, y, z :	Οι συντεταγμένες x, y, z όπως ορίστηκαν στην παράγραφο 4.4

Ο υπολογισμός των πιέσεων στις εσωτερικές επιφάνειες λόγω φορτίου εξαρτάται όπως έχει αναφερθεί και από την πληρότητα του χώρου φόρτωσης. Στην περίπτωση που κατά τον υπολογισμό θεωρηθεί ότι ο χώρος φορτίου είναι πλήρης, τότε γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές.

Το τελικό ύψος h_c φόρτωσης ορίζεται ως: $h_c = h_{HPU} + h_0$

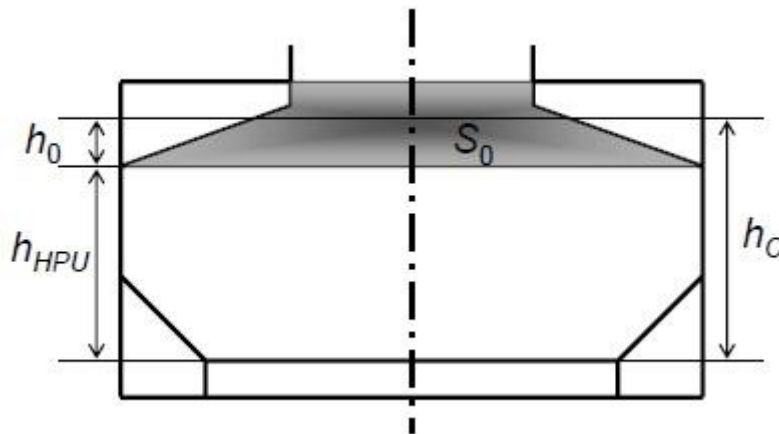
όπου h_{HPU} είναι η απόσταση από το διπύθμενο έως την αρχή της ανώτερης δεξαμενής έρματος και h_0 το θεωρητικό ύψος κορυφής του έρματος. Ο υπολογισμός του h_0 λαμβάνει

υπόψη τη γεωμετρία του χώρου ανάμεσα στις ανώτερες πλευρικές δεξαμενές έρματος και των καλυμμάτων των στομιών των κυτών. Συγκεκριμένα:

$$h_0 = \frac{S_A}{B_H} \quad (4.14)$$

$$S_A = S_0 + \frac{V_{HC}}{\ell_H} \quad (4.15)$$

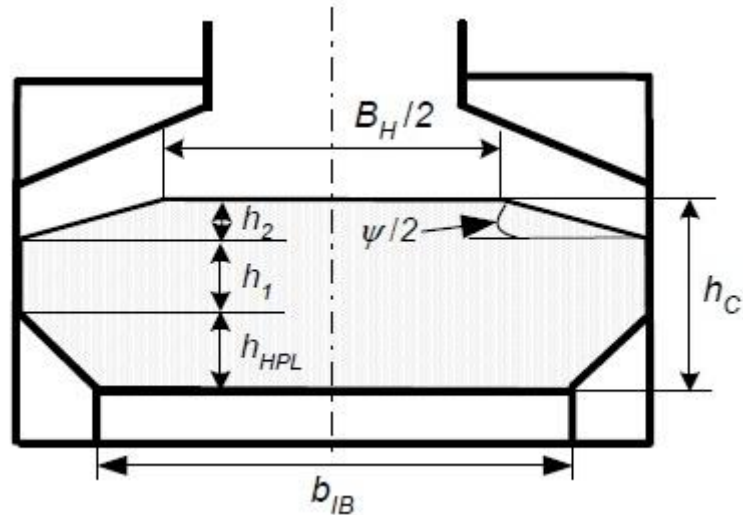
όπου V_{HC} είναι ο όγκος που περικλείεται από τα στόμια των κυτών, ℓ_H είναι το μήκος των κυτών και S_0 είναι η γραμμοσκιασμένη επιφάνεια στο Σχήμα 4-42. Στην περίπτωση αυτή το φορτίο θεωρείται ότι σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια στην κορυφή του φορτίου παράλληλη με το κάλυμμα του στομιού του κύτους.



Σχήμα 4-42: Αναπαράσταση των μεγεθών h_C , h_0 , h_{HPU} και S_0 σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης του χώρου φορτίου σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).

Στο παραπάνω σχήμα αναπαρίσταται η εγκάρσια τομή του πλοίου και τα διάφορα ύψη. Γραμμοσκιασμένη αναπαρίσταται η επιφάνεια S_0 ενώ ορίζεται και η απόσταση h_0 και h_{HPU} .

Στην περίπτωση που η φόρτωση του κύτους δεν είναι πλήρης, τότε είναι αναγκαίο να οριστούν και επιπρόσθετες παράμετροι. Το φορτίο θεωρείται ότι αποτίθεται σχηματίζοντας μια γωνία απόθεσης ψ ανάλογα με τον τύπο του φορτίου. Η ελεύθερη επιφάνεια του φορτίου θα αποτελείται από δύο μέρη. Το ένα μέρος θα σχηματίζει μια επίπεδη επιφάνεια παράλληλη με τον πυθμένα του κύτους εκτεινόμενη σε απόσταση $B_H/4$ από το επίπεδο συμμετρίας του πλοίου. Το δεύτερο μέρος, θα σχηματίζει γωνία $\psi/2$. Το Σχήμα 4-43 αναπαριστά τα συγκεκριμένα μεγέθη.



Σχήμα 4-43: Αναπαράσταση των μεγεθών h_C , h_1 , h_2 , h_{HPL} , ψ , B_H , και b_{IB} σε κατάσταση μερικής φόρτωσης του χώρου φορτίου σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς (IACS, 2014).

Το τελικό ύψος h_C υπολογίζεται από την απόσταση της επιφάνειας του διπυθμένου ως την ανώτερη επίπεδη επιφάνεια το φορτίου. Τα επιμέρους ύψη h_1 , h_2 και h_{HPL} ορίζονται ως εξής:

h_{HPL} : Το ύψος της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος από την επιφάνεια του διπυθμένου. Σε περίπτωση που απουσιάζει η κατώτερη πλευρική δεξαμενή, θα λαμβάνεται ίση με το 0.

h_1 : Πρόκειται για κατακόρυφη απόσταση σε m, αρχομένη από το πέρας της κατώτερης πλευρικής φρακτής έως το ύψος του τελευταίου σημείου επαφής του φορτίου με την πλευρά του πλοίου. Στο Σχήμα 4-43 φαίνεται καθαρά η εν λόγω διάσταση. Η σχέση που δίνεται από τους κανονισμούς για τον υπολογισμό του h_1 είναι η ακόλουθη

$$h_1 = \frac{M}{\rho_C B_H \ell_H} - \frac{B_H + b_{IB}}{2B_H} h_{HPL} - \frac{3}{16} B_H \tan \frac{\psi}{2} + \frac{V_{TS}}{B_H \ell_H} \quad (4.16)$$

όπου

M : Η συνολική μάζα του μερικού πλέον φορτίου σε t

V_{TS} : Ο συνολικός όγκος της κατώτερης πλευρικής ενίσχυσης της εγκάρσιας φρακτής που βρίσκεται στο εσωτερικό του κύτους

h_2 : Απόσταση σε m, του τελευταίου σημείου επαφής του φορτίου στην πλευρά του πλοίου έως το ανώτερο σημείο του φορτίου όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-43.

$$h_2 = \frac{B_H}{4} \tan \frac{\psi}{2}, \text{ για } 0 \leq |y| \leq \frac{B_H}{4}$$

$$h_2 = \left(\frac{B_H}{2} - |y| \right) \tan \frac{\psi}{2}, \text{ για } \frac{B_H}{4} \leq |y| \leq \frac{B_H}{2} \quad (4.17)$$

Έχοντας υπολογίσει όλα τα επιμέρους μεγέθη, η πίεση ανά μονάδα επιφάνειας [KN/m²] που οφείλεται στην ύπαρξη του φορτίου υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση.

$$p_{CS} = \rho_C g K_C (h_C + h_{DB} - z) \quad (4.18)$$

Ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζει η εκάστοτε επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το φορτίο, επιλέγεται και μια διαφορετική τιμή του συντελεστή K_C . Η τελική τιμή της πίεσης υπολογίζεται από τη μεταβλητή z που σχετίζεται με την απόσταση του σημείου που εξετάζεται από τη βασική γραμμή του πλοίου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη ανάλυση, και για το συγκεκριμένο πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου περιλαμβάνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4-11: Αποτελέσματα υπολογισμού πιέσεων λόγω ύπαρξης ξηρού χύδην φορτίου στο κύτος

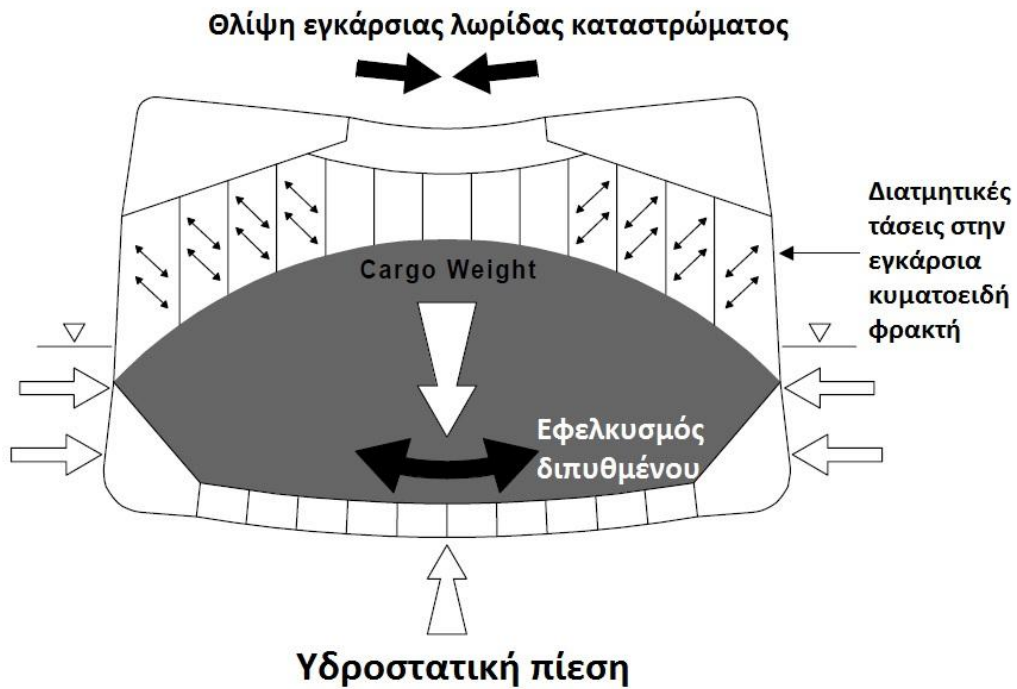
Μέγεθος	Τιμή	Παρατηρήσεις
ρ_C	1 ή 3 tn/m ³	Η τιμή της πυκνότητας του φορτίου όπως ορίζει ο Πίνακας 4-9 ανάλογα με τον τρόπο φόρτωσης
L	292 m	Το ολικό μήκος του πλοίου
B	45 m	Το πλάτος του πλοίου στη μέση τομή και στο σημείο όπου εξετάζεται
T	16.5 m	Το βύθισμα του πλοίου
g	9.81 m/s ²	Η επιτάχυνση της βαρύτητας
M_H	37400 t	Η μέγιστη μάζα φόρτωσης του πλοίου σύμφωνα με το εγχειρίδιο φόρτωσης του πλοίου
V_H	22400 m ³	Όγκος του κύτους
α_{hopper}	40,68 deg	Γωνία που σχηματίζει η κεκλιμένη επιφάνεια της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος με το οριζόντιο επίπεδος
α_{stool}	49 deg	Γωνία που σχηματίζει η κεκλιμένη επιφάνεια της κατώτερης πλευρικής ενίσχυσης της εγκάρσιας φρακτής με το οριζόντιο επίπεδος
α_{wing}	59.4 deg	Γωνία που σχηματίζει η κεκλιμένη επιφάνεια της ανώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος με το οριζόντιο επίπεδος
α_{side}	90 deg	Γωνία που σχηματίζει η πλευρά του πλοίου με το οριζόντιο επίπεδος
$K_{C, \text{Hopper}}$	0.738659	Συντελεστής κλίσης της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος

Μέγεθος	Τιμή	Παρατηρήσεις
$K_{C,Stool}$	0.715207	Συντελεστής κλίσης της κατώτερης πλευρικής ενίσχυσης της εγκάρσιας φρακτής
$K_{C,Wing}$	0	Συντελεστής κλίσης της ανώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος
$K_{C,Side}$	0.5	Συντελεστής κλίσης της πλευράς του πλοίου
ψ	30 deg	Γωνία απόθεσης του φορτίου
B_H	41 m	Μέσο πλάτος του κύτους
l_H	26.4 m	Μήκος του κύτους στο διάμηκες του πλοίου
b_{IB}	25 m	Πλάτος του διπυθμένου
h_{LS}	3.66 m	Ύψος της κατώτερης εγκάρσιας ενίσχυσης της φρακτής
h_{DB}	2.25 m	Ύψος διπυθμένου
S_0	211 m ²	Γραμμοσκιασμένη επιφάνεια όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-42
S_A	222.7 m ²	
h_{HPU}	15.04 m	Διάσταση όπως αναφέρεται στο Σχήμα 4-42
h_{HPL}	7.1 m	Διάσταση όπως αναφέρεται στο Σχήμα 4-43
V_{TS}	140 m ³	Όγκος που καταλαμβάνει η κατώτερη πλευρική ενίσχυση της φρακτής στο χώρο του κύτους

Με βάση τις τιμές των μεγεθών που ορίζει ο Πίνακας 4-11 υπολογίζονται τελικά τα ύψη h_c :

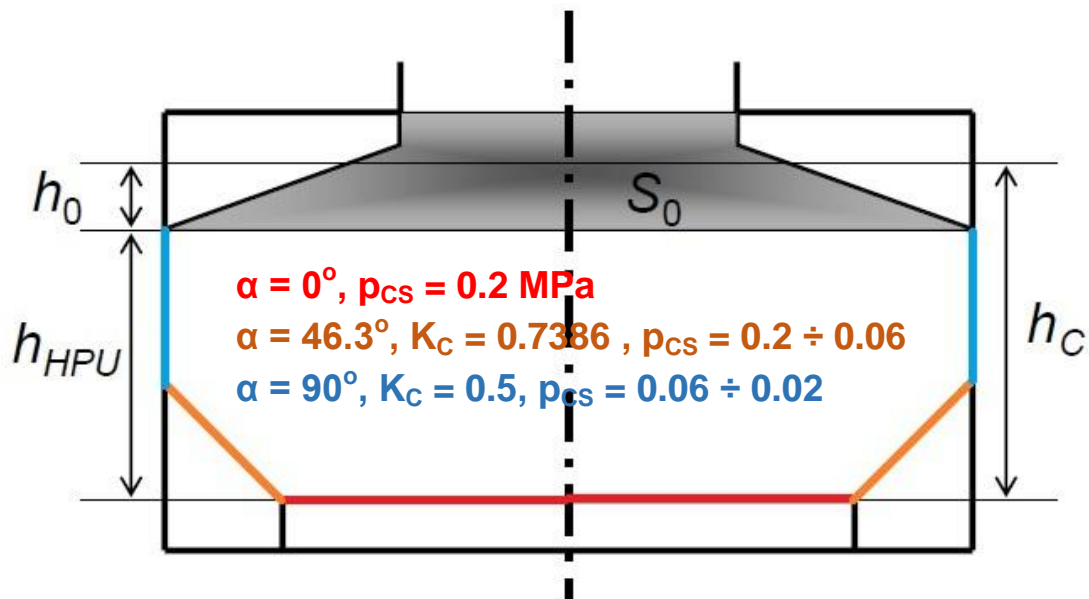
- $h_c = 13.84$ m στην περίπτωση μερικής φόρτωσης του κύτους και $\rho_c = 3$ tn/m³
- $h_c = 20,47$ m στην περίπτωση ολικής φόρτωσης του κύτους και $\rho_c = 1$ tn/m³

Στο σημείο αυτό όπως ήδη έχει αναφερθεί, επιλέγεται ως φόρτιση η πλήρωση του κύτους με φορτίο πυκνότητας $\rho_c = 1$ tn/m³. Όπως είναι λογικό το φορτίο ασκεί πίεση από το εσωτερικό του πλοίου στο εξωτερικό αυτού. Αποτέλεσμα αυτής της πίεσης, σε συνδυασμό με την υδροστατική πίεση είναι μια συνισταμένη δύναμη που ουσιαστικά θλίβει τη λωρίδα του καταστρώματος όπως παρουσιάζει και το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 4-44: Σχηματική αναπαράσταση των θλιπτικών δυνάμεων που παρουσιάζονται στις εγκάρσιες λωρίδες καταστρώματος λόγω της ύπαρξης φορτίου στο κύτος(IACS, 1997).

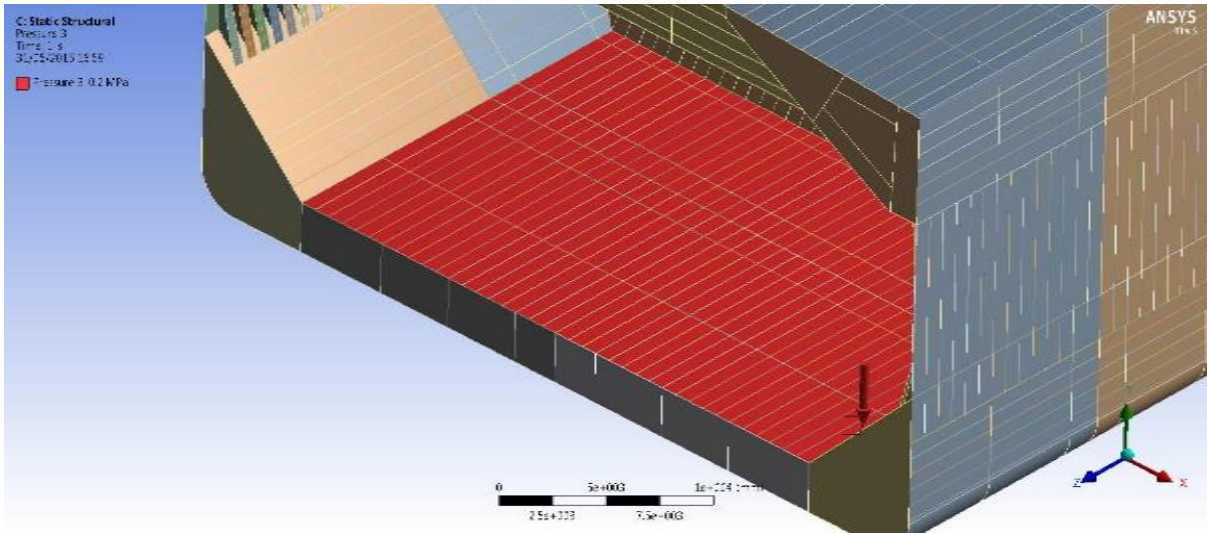
Το παραπάνω σχήμα αναπαριστά σχηματικά τις φορτίσεις που εμφανίζονται σε μια ναυπηγική κατασκευή λόγω ύπαρξης φορτίου. Στο σχήμα παρουσιάζεται η περίπτωση μερικής φόρτωσης του κύτους, ωστόσο η αναπαράσταση έχει ποιοτικό χαρακτήρα. Ομοίως και στην περίπτωση πλήρους φόρτωσης, οι μεγάλες τιμές πιέσεων στον πυθμένα του κύτους συγκριτικά με τις πιέσεις στις πλευρές του κύτους θα επιφέρουν παρόμοιο αποτέλεσμα. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή των πιέσεων όπως υπολογίστηκε σύμφωνα με τους Κοινούς Κανόνες και Κανονισμούς στην περίπτωση της πλήρους φόρτωσης. Με κόκκινο χρώμα διακρίνεται η περιοχή του διπυθμένου, με πορτοκαλί χρώμα η περιοχή της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος και με μπλε χρώμα οι πλευρές του πλοίου. Σύμφωνα με τους κανονισμούς η πίεση στις επιφάνειες των ανώτερων πλευρικών δεξαμενών είναι μηδενική καθώς η τιμή του συντελεστή $K_c = 0$ για τις συγκεκριμένες επιφάνειες.



Σχήμα 4-45: Σχηματική αναπαράσταση των πιέσεων που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του κύτους λόγω ύπαρξης ξηρού φορτίου κατά την πλήρη φόρτωση του κύτους.

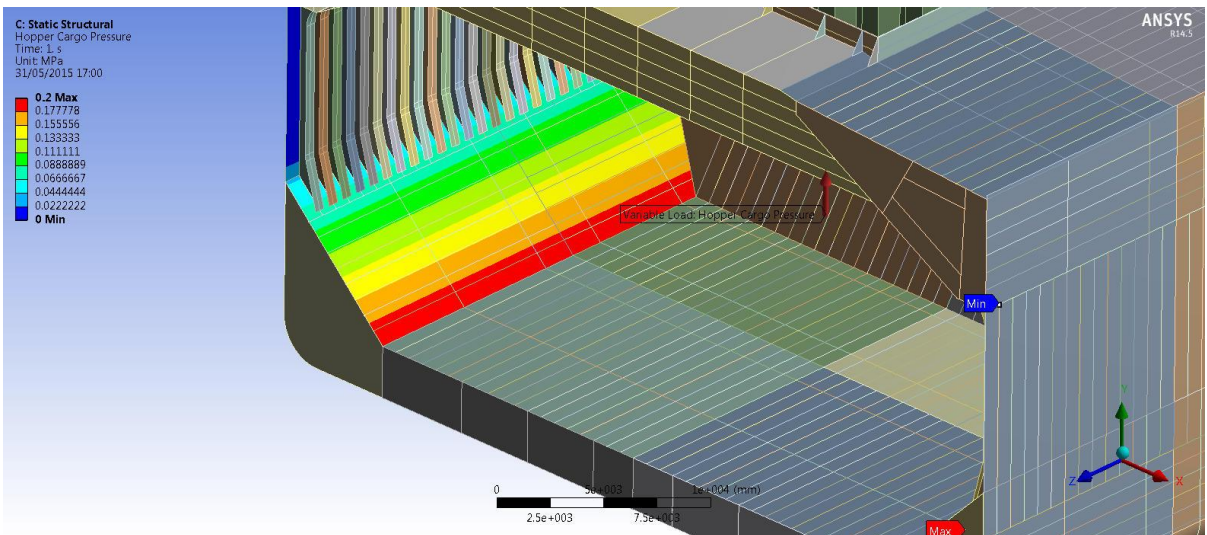
Από το παραπάνω σχήμα είναι παρατηρούνται τρεις διαφορετικές περιοχές πιέσεων εντός του χώρου φορτίου. Η δυσμενέστερη περιοχή είναι όπως ήταν αναμενόμενο, η περιοχή του διπυθμένου. Η μηδενική κλίση του ελάσματος είναι και η δυσμενέστερη και οδηγεί σε πιέσεις της τάξης των 0.2 MPa. Ομαλότερη γίνεται η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος καθώς τόσο η κεκλιμένη επιφάνεια, όσο και το γεγονός ότι βρίσκεται μακριά από το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας οδηγεί σε αρκετά χαμηλότερες πιέσεις. Οι μικρότερες πιέσεις εντοπίζονται στις πλευρές του πλοίου. Με τη μέγιστη τιμή να βρίσκεται στο κατώτερο σημείο του πλευρικού κελύφους και την ελάχιστη, στο ανώτερο σημείο.

Ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση των πιέσεων όπως μοντελοποιήθηκαν με τη βοήθεια του λογισμικού Ansys.



Σχήμα 4-46: Κατανομή της πίεσης στην εσωτερική επιφάνεια του διπυθμένου λόγω της ύπαρξης φορτίου σε MPa

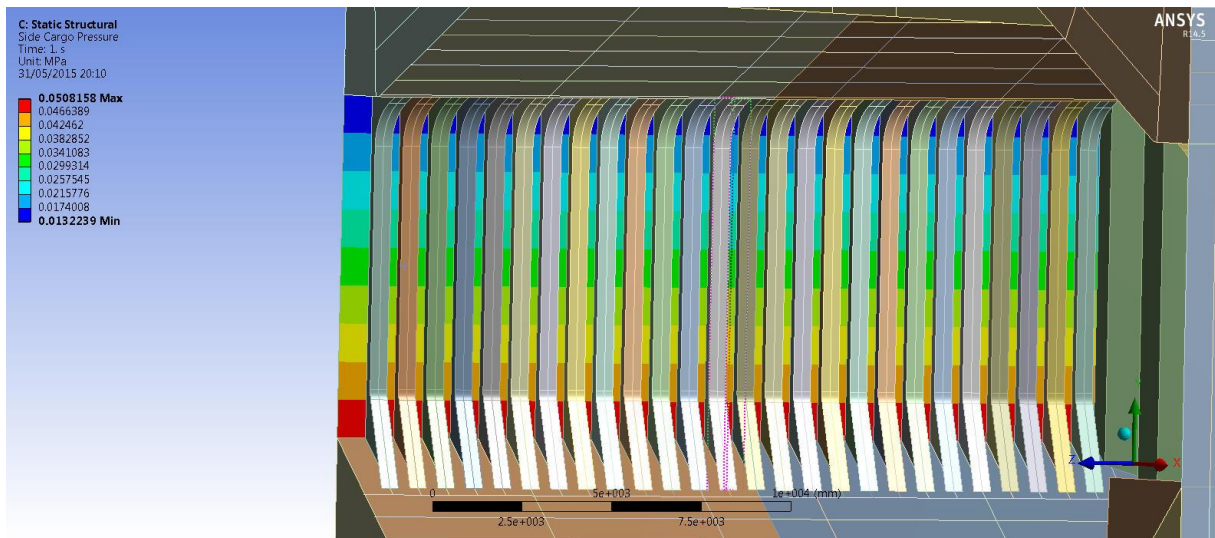
Η πίεση της επιφάνειας του διπυθμένου υπολογίζεται σύμφωνα με τους παραπάνω υπολογισμούς για την περίπτωση πλήρους φόρτωσης του κύτους στην τιμή 0.2 MPa η οποία εφαρμόζεται σε όλη την επιφάνεια του διπυθμένου. Με κόκκινο χρώμα αναπαρίσταται στο σχήμα η περιοχή του διπυθμένου που εφαρμόζεται η πίεση. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά την κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος.



Σχήμα 4-47: Κατανομή πίεσης στις κατώτερες πλευρικές δεξαμενές έρματος του από την πλευρά του φορτίου σε MPa

Το παραπάνω σχήμα αναπαριστά την κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος από την εσωτερική πλευρά το φορτίου. Οι πιέσεις έχουν υπολογιστεί με βάση τους διεθνείς κανόνες και κανονισμούς του IACS και κυμαίνονται από 0.2 MPa έως 0.06 MPa. Οι τιμές της πίεσης μεταβάλλονται γραμμικά πάνω στην κεκλιμένη επιφάνεια της δεξαμενής όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4-47. Η μεταβολή επηρεάζεται τόσο από το γεγονός ότι αυξάνεται η απόσταση από το επίπεδο συμμετρίας του

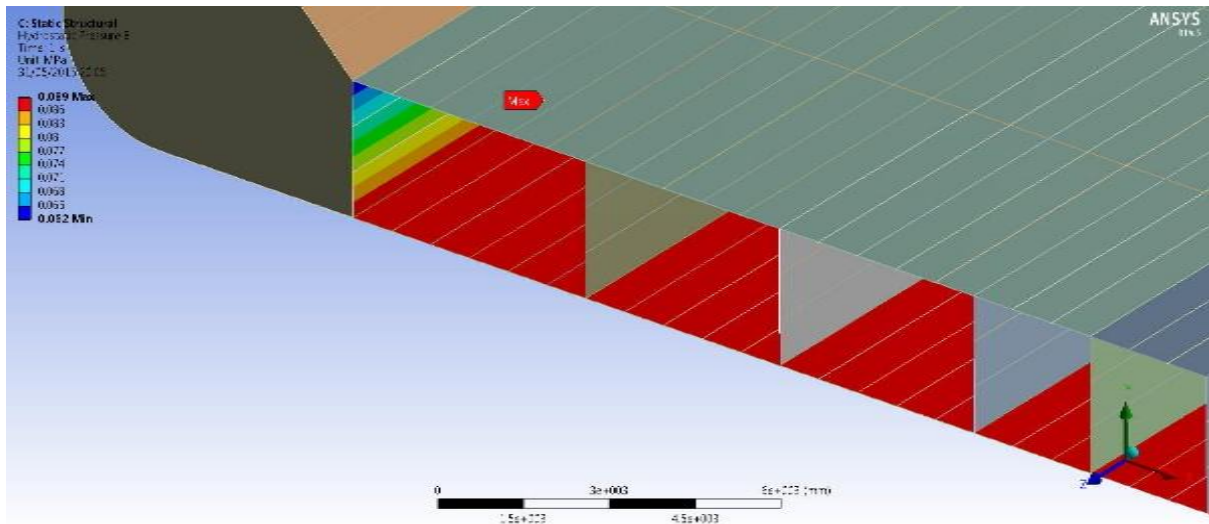
πλοίου όσο και από το γεγονός ότι η επιφάνεια είναι κεκλιμένη και συνεπώς η ασκούμενη πίεση μειώνεται.



Σχήμα 4-48: Κατανομή πίεσης στην εσωτερική πλευρά του πλοίου σε MPa

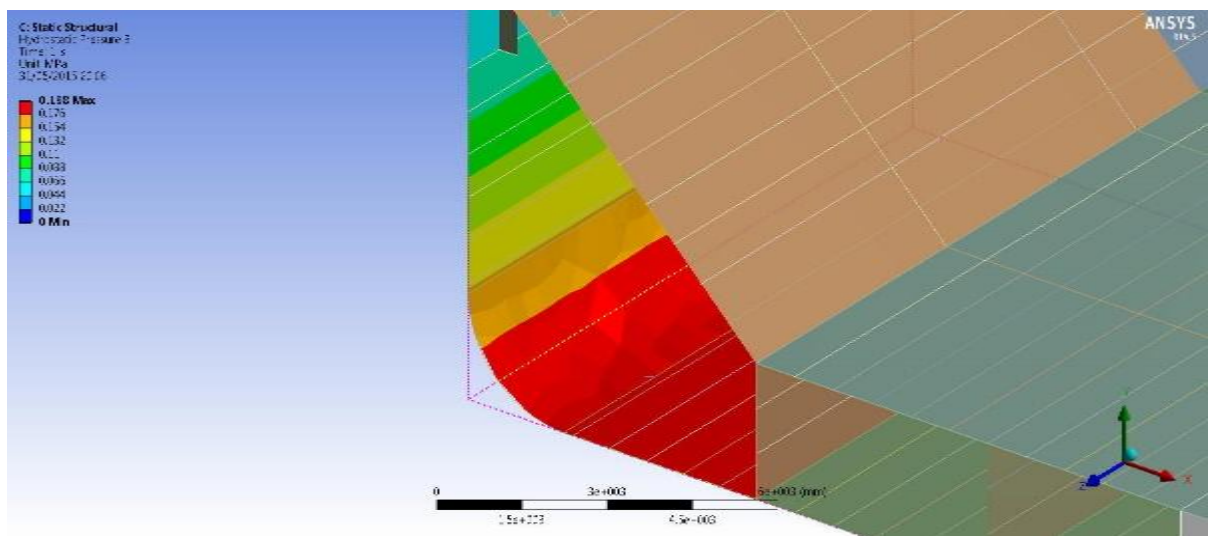
Η πίεση σε αυτό το σημείο του κύτους λόγω του φορτίου είναι και η μικρότερη. Αποτελεί συνέχεια των πιέσεων που ασκούνται στην επιφάνεια της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής και φτάνουν μέχρι το σημείο όπου αρχίζει η ανώτερη πλευρική δεξαμενή έρματος. Η πίεση μειώνεται γραμμικά καθώς αυξάνει η απόσταση από τη βασική γραμμή του πλοίου και κυμαίνεται από την τιμή των 0,06 MPa έως 0,02MPa. Να σημειωθεί ότι οι πιέσεις του φορτίου στις εγκάρσιες κυματοειδείς φρακτές δεν έχουν μοντελοποιηθεί.

Στα σχήματα που ακολουθούν αναπαρίστανται οι κατανομές των πιέσεων στις εσωτερικές επιφάνειες των δεξαμενών έρματος όπως έχουν ορισθεί. Οι δεξαμενές θεωρούνται ότι είναι πλήρεις. Η πλήρωση των δεξαμενών με έρμα αποτελεί παραδοχή στα πλαίσια μοντελοποίησης του προβλήματος. Ο λόγος που επιλέγεται ταυτόχρονα η πλήρωση των δεξαμενών έρματος μαζί με την πλήρωση των χώρων φορτίου είναι η αποφυγή φαινομένων λυγισμού σε σημεία διαφορετικά από την εγκάρσια λωρίδα καταστρώματος. Συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί λόγω της ύπαρξης της υδροστατικής πίεσης σε συνδυασμό με την πάκτωση του μοντέλου στα άκρα το μοντέλο οδηγείται σε κατάσταση hogging. Η κατάσταση αυτή οδηγεί στην εμφάνιση καταστάσεων λυγισμού σε διαφορετικά σημεία από τα επιθυμητά και συγκεκριμένα στις πλευρές του πλοίου. Η πλήρωση των δεξαμενών με έρμα αποσκοπεί στην αποδέσμευση του μοντέλου, στο πλαίσιο της μελέτης, από προβλήματα εμφάνισης λυγισμού σε ελάσματα εκτός ενδιαφέροντος.



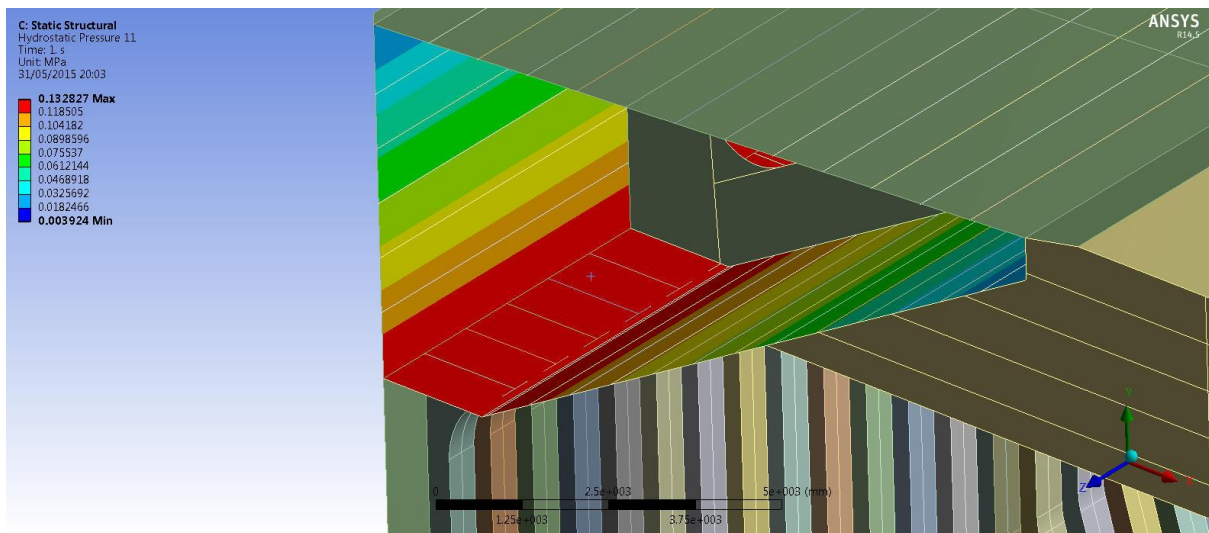
Σχήμα 4-49: Κατανομή της πίεσης στις δεξαμενές του διπυθμένου σε MPa

Η πίεση που ασκείται στον πυθμένα του πλοίου καθώς και στα ελάσματα των κατώτερων πλευρικών δεξαμενών έρματος υπολογίζεται θεωρώντας υδροστατική πίεση στα εκάστοτε τοιχώματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πιέσεις στις διαμήκεις φρακτές αμελούνται καθώς η πίεση ασκείται και από τις δύο πλευρές και συνεπώς αναιρείται. Οι πιέσεις κυμαίνονται από 0.02 MPa έως ελάχιστη πίεση τη μηδενική στην άνωθεν πλευρά του διπυθμένου. Ακολουθεί η κατανομή της πίεσης στο εσωτερικό της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής.



Σχήμα 4-50: Κατανομή της πίεσης εσωτερικά της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής διπυθμένου σε MPa

Ομοίως και το παραπάνω σχήμα αναπαριστά την κατανομή της πίεσης στο εσωτερικό της κατώτερης πλευρικής δεξαμενής έρματος. Η πίεση μοντελοποιείται θεωρώντας υδροστατική πίεση στις επιφάνειες του κελύφους του πλοίου καθώς και στις επιφάνειες των ελασμάτων από την πλευρά του φορτίου και των δεξαμενών του διπυθμένου. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι πιέσεις στις επιφάνειες των εγκάρσιων φρακτών δε λαμβάνονται υπόψη καθώς αυτές αλληλοεξουδετερώνονται. Οι πιέσεις κυμαίνονται από μέγιστη πίεση 0.198 MPa έως ελάχιστη πίεση τη μηδενική. Στο επόμενο σχήμα ακολουθεί η κατανομή των πιέσεων στο εσωτερικό των ανώτερων πλευρικών δεξαμενών.



Σχήμα 4-51: Κατανομή των πιέσεων στο εσωτερικό των ανώτερων πλευρικών δεξαμενών σε MPa

Στο παραπάνω σχήμα αναπαρίσταται η κατανομή των πιέσεων λόγω της ύπαρξης έρματος στο εσωτερικό των ανώτερων πλευρικών δεξαμενών. Ομοίως και σε αυτήν την περίπτωση, οι πιέσεις που ασκούνται στις εγκάρσιες φρακτές δε λαμβάνονται υπόψη καθώς αλληλοεξουδετερώνονται. Όλες οι δεξαμενές θεωρούνται πληρωμένες με αποτέλεσμα οι υδροστατικές πιέσεις που εμφανίζονται να κυμαίνονται από τη μέγιστη τιμή των 0.133 MPa έως το μηδέν.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι τόσο στις κατώτερες όσο και στις ανώτερες πλευρικές δεξαμενές, οι πιέσεις που ασκούνται στις εσωτερικές επιφάνειες του μοντέλου είναι περισσότερο αυξημένες από το κανονικό. Συγκεκριμένα έχει θεωρηθεί ότι οι συγκεκριμένες δεξαμενές μεταφέρουν υγρό πυκνότητας 2 tn/m^3 . Η παραδοχή αυτή απαιτείται καθώς σε περίπτωση που δεν υπάρχουν αυτού του μεγέθους οι πιέσεις, οι εξωτερικές πιέσεις από την υδροστατική πίεση οδηγούν στην ανάπτυξη πολύ ισχυρών τάσεων στο μοντέλο με αποτέλεσμα κατά την επίλυση να εμφανίζεται λυγισμός στις επιφάνειες των δεξαμενών και όχι στο σημείο του καταστρώματος που είναι και το επιθυμητό. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η υδροστατική πίεση οδηγεί το μοντέλο σε κατάσταση hogging καθώς το μέγεθος της υδροστατικής πίεσης στον πυθμένα του μοντέλου είναι της τάξης των 0.165 MPa. Για το λόγο αυτό η πλήρωση των δεξαμενών με θαλάσσιο έρμα πυκνότητας 1.025 tn/m^3 δεν επαρκούσε για να αποτρέψει τις δυσμενείς επιπτώσεις της κατάστασης hogging.

Με την εφαρμογή υψηλότερων πιέσεων στο εσωτερικό των δεξαμενών αναιρείται η δράση της υδροστατικής πίεσης στο βαθμό που επιτρέπει τη μελέτη του λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες του καταστρώματος. Στην πράξη, λυγισμός λόγω πιέσεων σε άλλα σημεία του πλοίου, είναι φυσιολογικό να παρουσιαστεί ταυτόχρονα. Ωστόσο λόγω της φύσης του λογισμικού, η επίλυση του προβλήματος παύει τη στιγμή που εμφανιστεί σε οποιοδήποτε σημείο κάποιας μορφής λυγισμός. Συνεπώς είναι αδύνατον να μελετηθεί ταυτόχρονα ο λυγισμός των πλευρών του πλοίου αλλά και του καταστρώματος. Γι' αυτό το λόγο ακολουθείται μια προσπάθεια εφαρμογής φορτίων με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται λυγισμός σε στοχευμένα σημεία. Εξάλλου η μελέτη έχει συγκριτικό χαρακτήρα και για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο να ληφθούν οι συγκεκριμένες παραδοχές έτσι ώστε να διασφαλιστεί η εμφάνιση λυγισμού στις περιοχές των εγκάρσιων λωρίδων σε κάθε περίπτωση.

4.10 Στήριξη μοντέλου

Εκτός από τη φόρτιση του μοντέλου, απαιτείται και κατάλληλη στήριξη η οποία αποτελεί μια από τις βασικότερες οριακές συνθήκες που πρέπει να ορισθούν στο μοντέλο. Η στήριξη θα πρέπει να οδηγεί στην ανάπτυξη τάσεων που είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερες στην πραγματικότητα.

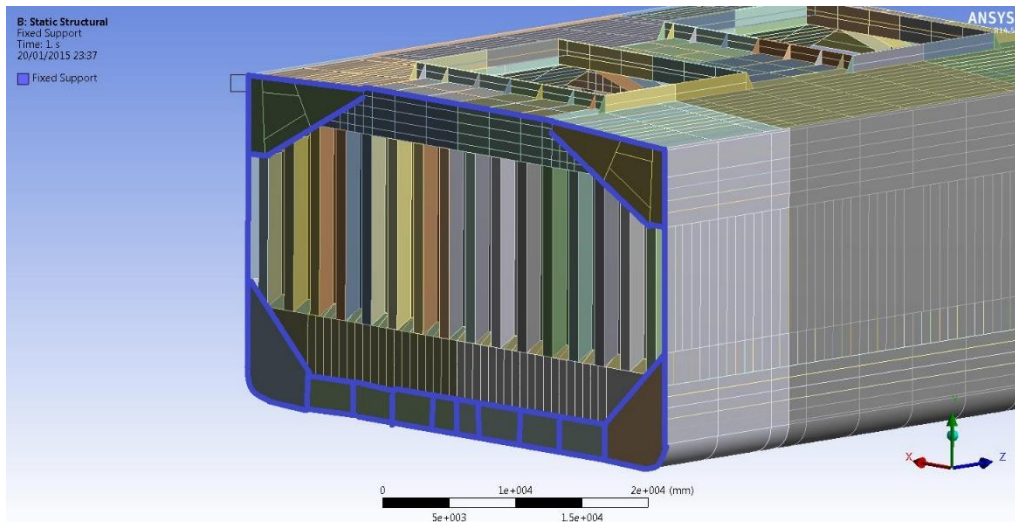
Στο συγκεκριμένο μοντέλο η στήριξη θεωρείται πάκτωση και ορίζεται σε όλες τις ελεύθερες ακμές του μοντέλου στα δύο άκρα. Ο σχεδιασμός του μοντέλου είναι τέτοιος έτσι ώστε τα άκρα αυτού να συμπίπτουν με τις εγκάρσιες φρακτές του φορτίου. Η πάκτωση μηδενίζει κάθε μετατόπιση και περιστροφή στους κόμβους του πλέγματος στους οποίους εφαρμόζεται.

Πίνακας 4-12: Μετατοπίσεις και περιστροφές ως προς του άξονες x, y και z στους κόμβους πάκτωσης του μοντέλου

$U_x = 0$
$U_y = 0$
$U_z = 0$
$R_x = 0$
$R_y = 0$
$R_z = 0$

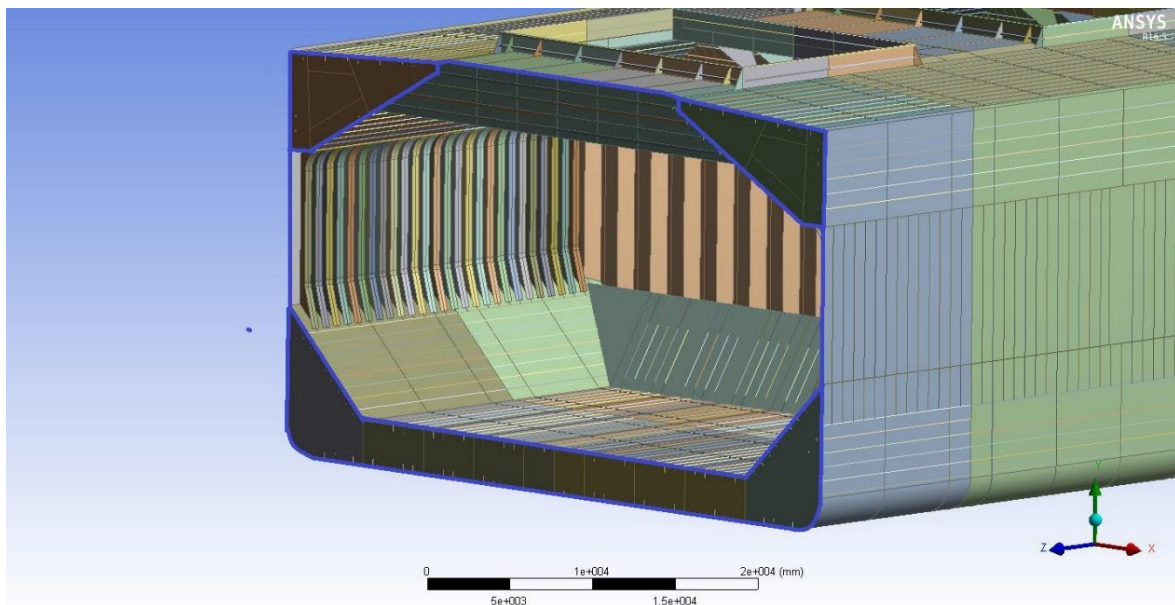
Οι δυναμικές πιέσεις που ασκούνται στις πλευρές του πλοίου τείνουν να συμπιέσουν τις πλευρές του πλοίου προς το εσωτερικό προκαλώντας έτσι θλίψη στο κατάστρωμα. Στα σημεία που βρίσκονται οι εγκάρσιες φρακτές, οι παραμορφώσεις λόγω συμπίεσης περιορίζονται σημαντικά σε βαθμό μάλιστα που μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες. Για το λόγο αυτό επιλέγονται ως σημεία στήριξης τα άκρα του μοντέλου που συμπίπτουν με τη θέση των φρακτών και προσφέρουν μια πιο ρεαλιστική στήριξη.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι κανονισμοί των νηογνωμόνων, προβλέπουν συγκεκριμένο τρόπο στήριξης μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων κατά τη μελέτη της ολικής αντοχής του πλοίου. Μάλιστα σε περίπτωση που το μοντέλο αποτελεί τμήμα μέρους του πλοίου, τότε η προσθήκη καμπτικών ροπών στα άκρα του μοντέλου είναι απαραίτητη. Η συγκεκριμένη πρακτική δεν κρίνεται ωστόσο σκόπιμη στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Ο λόγος είναι η φύση του προβλήματος που εξετάζεται το οποίο εμφανίζεται κατά την εγκάρσια θλίψη του καταστρώματος, λόγω σφυρόκρουσης των πλευρών του πλοίου από κύματα. Τα σχήματα που ακολουθούν αναπαριστούν τα σημεία που έχει ορισθεί στο μοντέλο η πάκτωση.



Σχήμα 4-52: Σημεία εφαρμογής πάκτωσης στο μοντέλο στα πλαίσια της στήριξης – Πρωραίο άκρη

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι ακμές στο μοντέλο που ορίζεται η πάκτωση. Ουσιαστικά πρόκειται για τα σημεία που διακόπτεται η συνέχεια του πλοίου. Όλοι οι κόμβοι του πλέγματος τίθενται υπό τους περιορισμούς που παρουσιάζει ο Πίνακας 4-12. Το επόμενο σχήμα παρουσιάζει την πρυμναία άκρη του μοντέλου και τα αντίστοιχα σημεία πάκτωσης.



Σχήμα 4-53: Σημεία εφαρμογής της πάκτωσης στο μοντέλο στα πλαίσια της πάκτωσης – πρυμναία άκρη

Στο παραπάνω σχήμα αναπαρίστανται με μπλε χρώμα τα σημεία της πάκτωσης στην πρυμναία άκρη του μοντέλου. Ομοίως και σε αυτή την πλευρά του μοντέλου, οι κόμβοι του πλέγματος τίθενται υπό τους περιορισμούς που ορίζει ο Πίνακας 4-12. Παρατηρείται ότι σε αυτή την πλευρά έχει μοντελοποιηθεί και η εγκάρσια φρακτή του φορτίου. Ωστόσο η στήριξη ορίζεται μόνο στα σημεία όπου διακόπτεται η συνέχεια του σκάφους και όχι στις επιφάνειες τις φρακτής.

5 Επίλυση προβλήματος και αποτελέσματα

Το τελευταίο μέρος της συγκεκριμένης εργασίας περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος, την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και την ανάλυση αυτών. Η μέχρι τώρα ανάλυση αποσκοπούσε στην κατανόηση και τη σωστή μοντελοποίηση του προβλήματος λαμβάνοντας υπόψη όλες τις σημαντικές παραμέτρους που διέπουν το συγκεκριμένο πρόβλημα. Η σωστή κατανόηση του προβλήματος είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη σωστή μοντελοποίηση αυτού αλλά και για τη σωστή επεξήγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Για την επίλυση του μοντέλου θα χρησιμοποιηθεί ο Direct Solver που χρησιμοποιεί το λογισμικό Ansys. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο λογισμικό για την επίλυση του φαινομένου του λυγισμού, είναι απαραίτητη η επίλυση του στατικού προβλήματος πρώτα. Το λογισμικό, λαμβάνοντας υπόψη τις οριακές συνθήκες και τις φορτίσεις που έχουν ορισθεί, επιλύει αρχικά το πρόβλημα με σκοπό τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων που εμφανίζονται στο μοντέλο.

Στη συνέχεια λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία της παραγράφου 2.3 επιλύει το πρόβλημα αποσκοπώντας στην εύρεση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Πρέπει να σημειωθεί ότι το λογισμικό ως αποτέλεσμα παρουσιάζει το συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού¹² ο οποίος ουσιαστικά αποτελεί το ποσοστό του συνολικού φορτίου που ασκείται στο μοντέλο, και για το οποίο εμφανίζεται λυγισμός.

$$\lambda = \frac{q_{cr}}{q} \quad (4.19)$$

Όπως θα γίνει αντιληπτό στη συνέχεια, η τιμή λ του συγκεκριμένου συντελεστή κυμαίνεται από 0,068 έως 0,19. Πρόκειται για πολύ μικρές τιμές ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το σύνολο των φορτίων που έχουν ασκηθεί στο μοντέλο είναι πολύ υψηλότερο από αυτό που προβλέπουν οι Κοινοί Κανόνες και Κανονισμοί. Η εφαρμογή δυναμικής πίεσης και από τις δύο πλευρές του μοντέλου αποτελεί μια κατάσταση η οποία δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα ωστόσο ωφελεί στο να παρουσιαστεί λυγισμός ξεκάθαρα στην περιοχή των εγκάρσιων λωρίδων. Το ίδιο ισχύει και για την παράλληλη εφαρμογή φορτίων στο κύτος και στις δεξαμενές έρματος. Ωστόσο στο πλαίσιο της μελέτης έγινε προσπάθεια να προσομοιωθεί μια όσο το δυνατόν πλησιέστερη στην πραγματικότητα κατάσταση μεταφέροντας στο πρόβλημα όλες τις πιθανές φορτίσεις και στηρίξεις που μπορεί να εμφανιστούν στην πραγματικότητα.

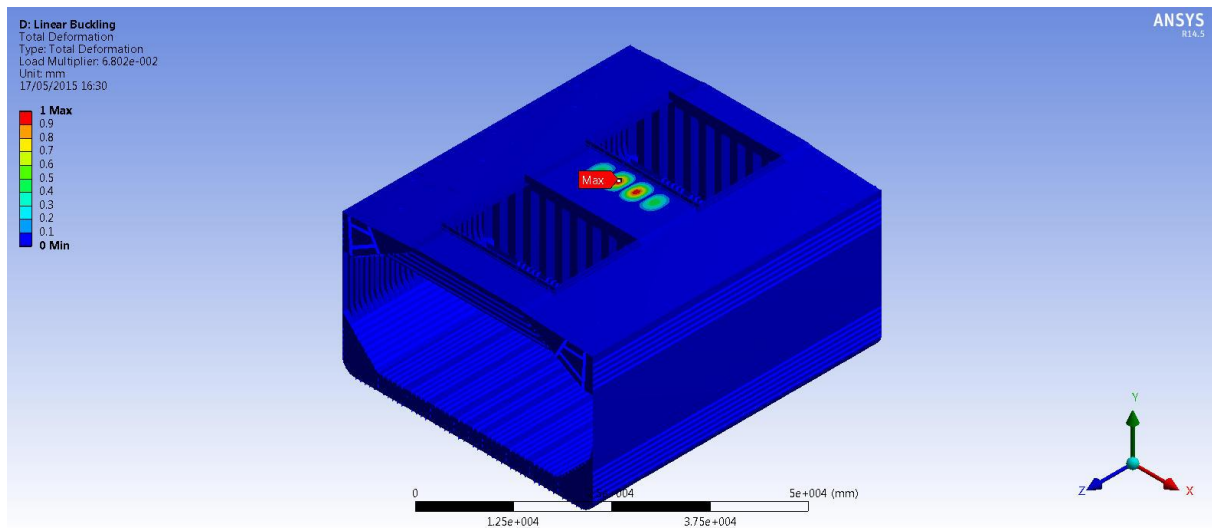
Λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος, ένα βασικό μέρος της δυσκολίας είναι η επίτευξη λυγισμού στο συγκεκριμένο σημείο του καταστρώματος. Εξαιτίας των πολλαπλών φορτίσεων, σύνηθες αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση λυγισμού σε σημεία του μοντέλου εκτός ενδιαφέροντος. Για το λόγο αυτό το πρώτο μέρος της επίλυσης του προβλήματος αποσκοπεί στην επιβεβαίωση ότι το πρόβλημα είναι ορθώς ορισμένο, και τα αποτελέσματα είναι επιθυμητά. Με την επιβεβαίωση ότι το μοντέλο και το πρόβλημα είναι ορθώς ορισμένο, ακολουθεί η προσομοίωση όλων των περιπτώσεων που παρουσιάστηκαν εδάφιο 4.8.1.

¹² Load multiplier. Αυθαίρετα στην παρούσα εργασία ορίζεται ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου ως λ

5.1 Προσομοίωση προβλήματος χωρίς την εφαρμογή επιθέματος

Στην παράγραφο αυτή πραγματοποιείται επίλυση του προβλήματος χωρίς να έχει τοποθετηθεί στο μοντέλο κάποιο επίθεμα από σύνθετα υλικά. Σκοπός είναι η επιβεβαίωση ότι στο μοντέλο εμφανίζεται λυγισμός στο κατάστρωμα των εγκάρσιων λωρίδων όπως ακριβώς προβλέπει η θεωρία.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα πρώτα αποτελέσματα που προέκυψαν ορίζοντας τα φορτία και τις στηρίξεις που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.



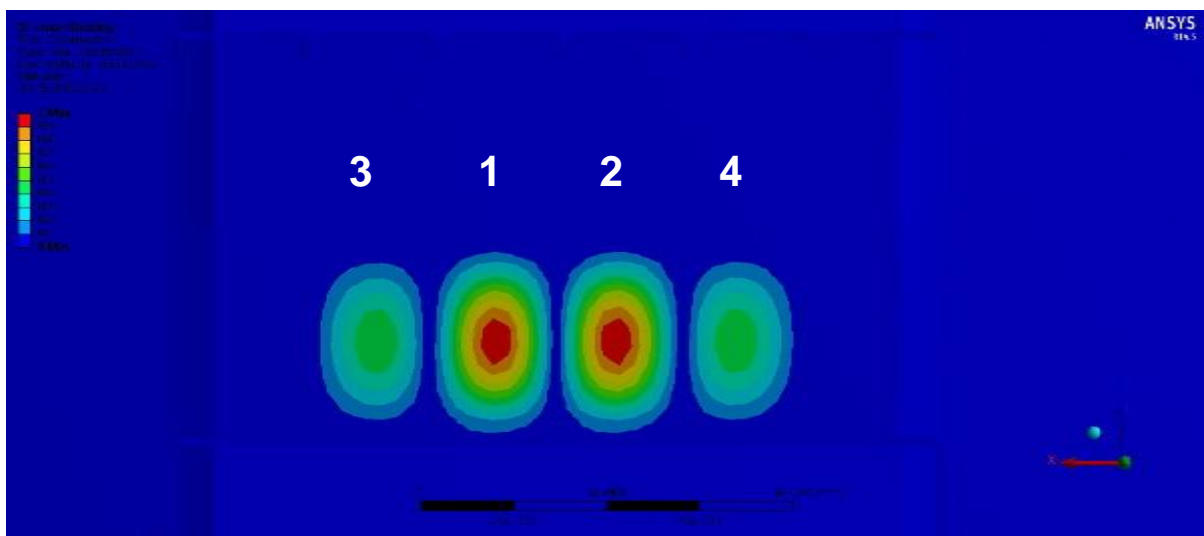
Σχήμα 5-1: Απεικόνιση ολικής παραμόρφωσης λόγω λυγισμού στην εγκάρσια λωρίδα καταστρώματος σε μοντέλο χωρίς επίθεμα

Στο παραπάνω σχήμα, παρουσιάζεται μια ολική άποψη του μοντέλου που σχεδιάστηκε. Με τη βοήθεια των χρωματικής κλίμακας απεικονίζονται τα σημεία πάνω στο μοντέλο που εμφανίζεται ο λυγισμός. Η κατάσταση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5-1 περιγράφει την κατάσταση λυγισμού όπως ακριβώς προέκυψε με επίλυση του μοντέλου χωρίς κάποιο επίθεμα από σύνθετα υλικά με τις οριακές συνθήκες σύμφωνα με τα εδάφια 4.9 και 4.10. Στο μοντέλο ασκείται η υδροστατική πίεση από τη θάλασσα, η δυναμική πίεση από τη θάλασσα λόγω κυματισμού καθώς και οι πιέσεις λόγω ξηρών και υγρών φορτίων

Η μέγιστη τιμή αναπαρίσταται με κόκκινο χρώμα και αντιστοιχεί στην τιμή 1 mm ενώ η ελάχιστη τιμή αντιστοιχεί στο μπλε χρώμα και είναι η μηδενική¹³. Από τα αποτελέσματα που προκύπτουν αυτό με τη μεγαλύτερη σημασία είναι η τιμή Load Multiplier. Πρόκειται για το ποσοστό του συνολικού φορτίου που ασκείται στο μοντέλο για το οποίο εμφανίζεται λυγισμός. Για μοντέλο, χωρίς κάποιο επίθεμα, μόνο με τη μεταλλική κατασκευή έτσι ακριβώς όπως προβλέπουν τα κατασκευαστικά σχέδια ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου είναι $\lambda=0.06802$. Ισοδύναμα μπορεί να διατυπωθεί ότι $\lambda = 0.068$. η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή είναι υπερβολικά μικρή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο μοντέλο έχουν εφαρμοστεί περισσότερα φορτία από αυτά που προβλέπουν οι κανονισμοί. Συγκεκριμένα οι δυναμικές πιέσεις λόγω κυμάτων έχουν εφαρμοστεί και στις δύο πλευρές του πλοίου ενώ

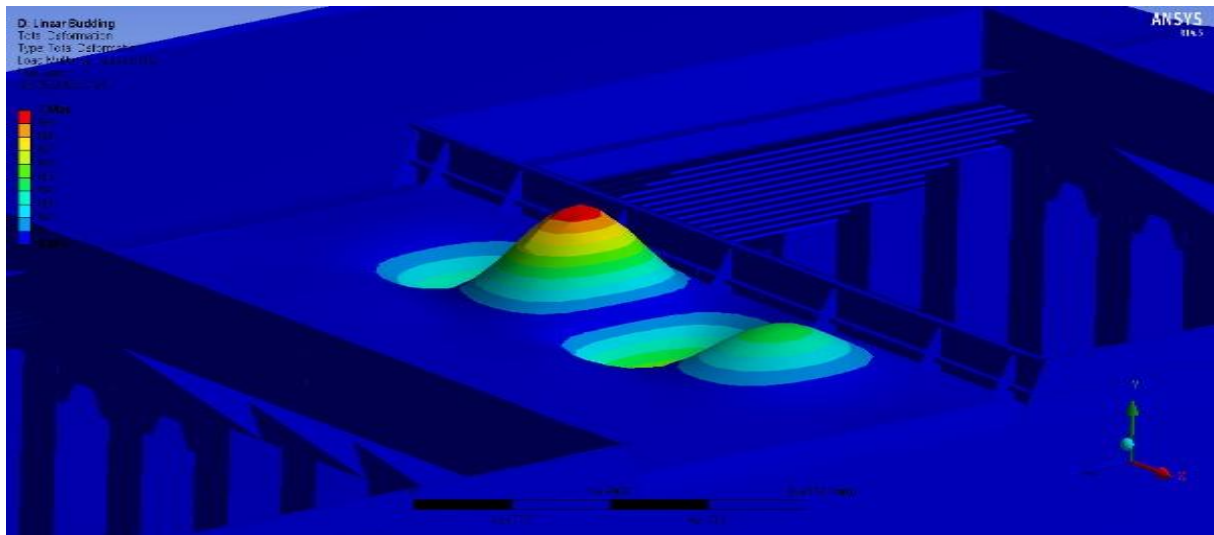
¹³ Σε ένα τέτοιο σχήμα ολικής παραμόρφωσης, η μέγιστη τιμή στην περίπτωση που εξετάζεται ο λυγισμός θα είναι πάντα 1 mm καθώς το λογισμικό παύει να στο σημείο αυτό να εξετάζει περαιτέρω το φαινόμενο και παρουσιάζει τα αποτελέσματα.

έχει γίνει παράλληλη πλήρωση των δεξαμενών έρματος και των χώρων φορτίου. Οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτές της παραδοχές ήταν τρεις. Πρώτον ότι οι πιέσεις που προβλέπουν οι κανονισμοί δεν θα επέφεραν κάποιο φαινόμενο λυγισμού στο κατάστρωμα των εγκάρσιων λωρίδων του πλοίου καθώς το ίδιο το πλοίο είναι σχεδιασμένο να αντέχει σε τέτοιου είδους φορτίσεις. Δεύτερον ότι η εφαρμογή της υδροστατικής πίεσης σε συνδυασμό με τις πακτώσεις στα άκρα του μοντέλου οδήγησε σε μια κατάσταση hogging η οποία παρεμπόδιζε τη μελέτη οδηγώντας την κατασκευή σε λυγισμό σε διαφορετικά σημεία της κατασκευής. Τρίτον ότι έγινε προσπάθεια να διευκολυνθεί η εμφάνιση του λυγισμού στις εγκάρσιες λωρίδες του καταστρώματος με ταυτόχρονη αφαίρεση ενισχύσεων και αύξηση των ομοεπίπεδων θλιπτικών δυνάμεων έτσι ώστε να μπορέσει να διερευνηθεί αξιόπιστα η επίδραση των επιθεμάτων. Στα σχήματα που ακολουθούν παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα όπως προέκυψαν.



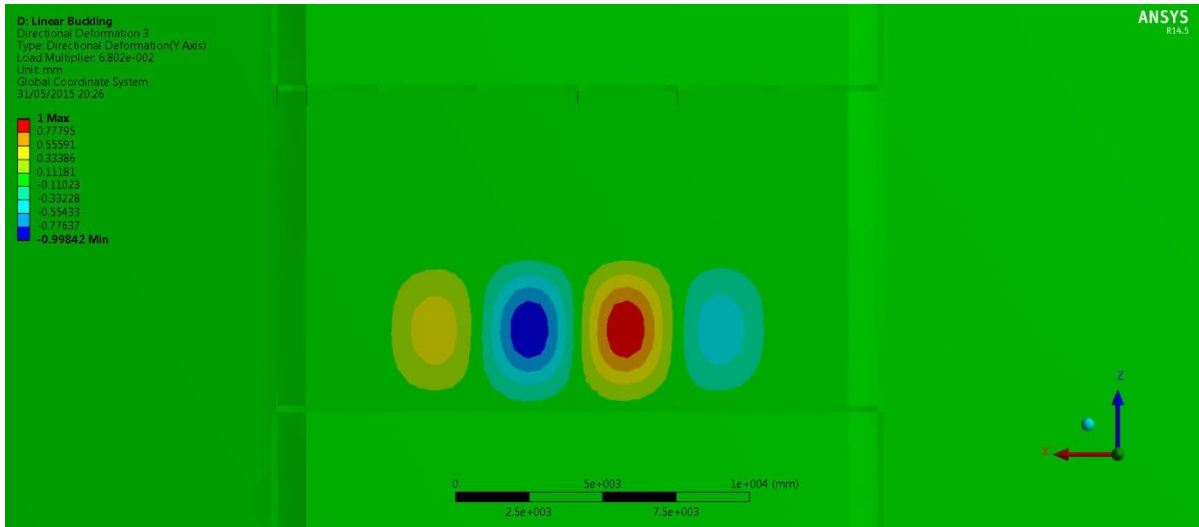
Σχήμα 5-2: Αποτελέσματα παραμορφώσεων για κατάσταση λυγισμού καταστρώματος εγκάρσιων λωρίδων – κάτοψη καταστρώματος

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα παραμορφώσεων αλλά περιορισμένο στο σημείο που παρατηρείται ο λυγισμός. Στο συγκεκριμένο σχήμα, είναι ευδιάκριτη η κατάσταση λυγισμού η οποία συμβαίνει στις ανυποστήρικτες επιφάνειες των ελασμάτων όπως ακριβώς προβλέπει η θεωρία. Η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στα δύο ελάσματα που βρίσκονται πλησιέστερα στο επίπεδο συμμετρίας του πλοίου (Ελάσματα 1 & 2). Ενώ στα ελάσματα 3 & 4 η μέγιστη παραμόρφωση είναι μικρότερη όπως προβλέπει και η θεωρία. Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται η κυματοειδής παραμόρφωση που προκύπτει.



Σχήμα 5-3: Υπό κλίμακα αναπαράσταση κυματοειδής κατάστασης λυγισμού στην επιφάνεια του καταστρώματος

Στο Σχήμα 5-3 παρουσιάζεται η παραμόρφωση του καταστρώματος λόγω λυγισμού υπό κλίμακα. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται η κυματοειδής παραμόρφωση λόγω λυγισμού και συγκεκριμένα τα όρη και οι κοιλάδες που εμφανίζονται στη διεύθυνση Z του πλοίου σύμφωνα με το σύστημα συντεταγμένων που έχει ορισθεί. Η συγκεκριμένη παραμόρφωση έχει προκύψει για Buckling mode = 1. Παρατηρείται ότι για Buckling modes > 1 το αποτέλεσμα δε διαφέρει από το παραπάνω και για αυτό το λόγο δεν θα εξεταστούν στην παρούσα εργασία. Πρέπει να σημειωθεί ότι το παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η ολική παραμόρφωση του ελάσματος. Στα ακόλουθα σχήματα θα παρουσιαστεί η παραμόρφωση στις τρεις κύριες διευθύνσεις.



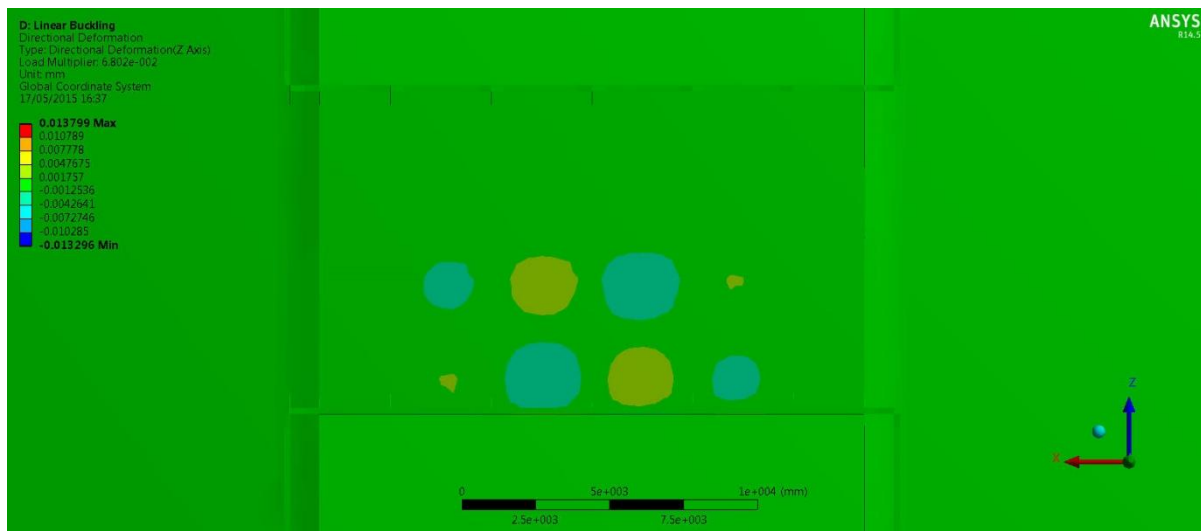
Σχήμα 5-4: Αναπαράσταση παραμορφώσεων καταστρώματος στη διεύθυνση Z του πλοίου στην κατάσταση λυγισμού

Όπως γίνεται αντιληπτό από το παραπάνω σχήμα η παραμόρφωση στη συγκεκριμένη διεύθυνση μοιάζει αρκετά με την ολική παραμόρφωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κατακόρυφη στο έλασμα παραμόρφωση είναι και η μεγαλύτερη. Ακολουθεί η παραμόρφωση στη διεύθυνση Y.



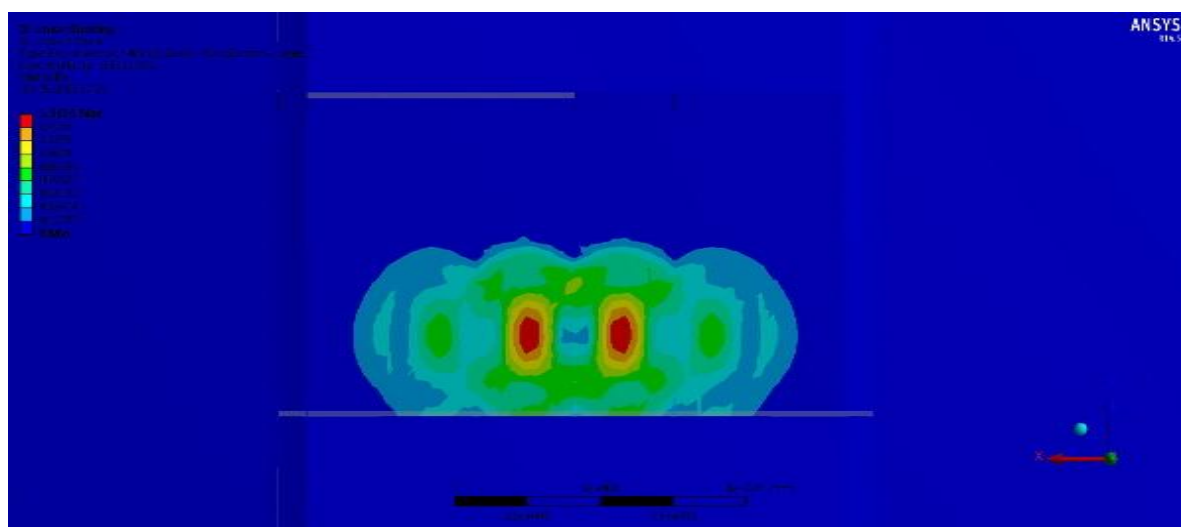
Σχήμα 5-5: Αναπαράσταση παραμορφώσεων καταστρώματος στη διεύθυνση Y του πλοίου στην κατάσταση λυγισμού

Το παραπάνω σχήμα περιγράφει την κατάσταση παραμόρφωσης στη διεύθυνση Y του πλοίου. Παρατηρείται ότι οι παραμορφώσεις σε αυτή τη διεύθυνση είναι αμελητέες σύμφωνα με το διάγραμμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγάλη διάσταση του ανυποστήρικτου ελάσματος είναι παράλληλη με τον άξονα των X στον οποίο όπως παρατηρείται και στο παρακάτω σχήμα η παραμορφώσεις είναι εντονότερες.



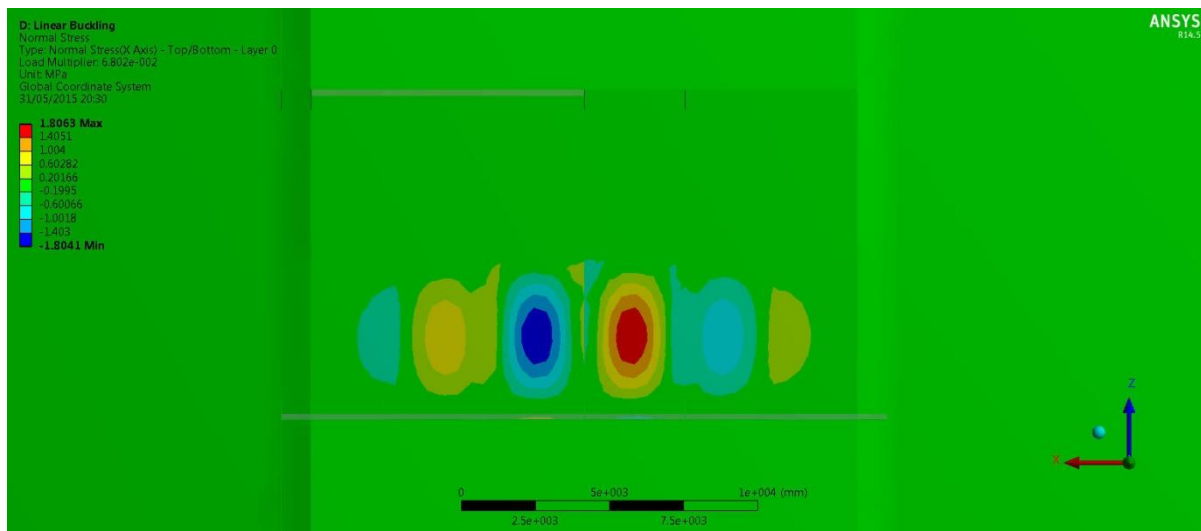
Σχήμα 5-6: Αναπαράσταση παραμορφώσεων καταστρώματος στη διεύθυνση X του πλοίου στην κατάσταση λυγισμού

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω σχήμα οι παραμορφώσεις στη διεύθυνση του άξονα των X είναι κατά βάση πιο αισθητές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγάλη πλευρά του ανυποστήρικτου ελάσματος είναι στη διεύθυνση των X με αποτέλεσμα η παραμόρφωση να είναι πιο έντονη. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι παραμορφώσεις προς αυτή τη διεύθυνση επεκτείνονται και σε γειτονικά ελάσματα, πέραν των βασικών 1,2,3 και 4.



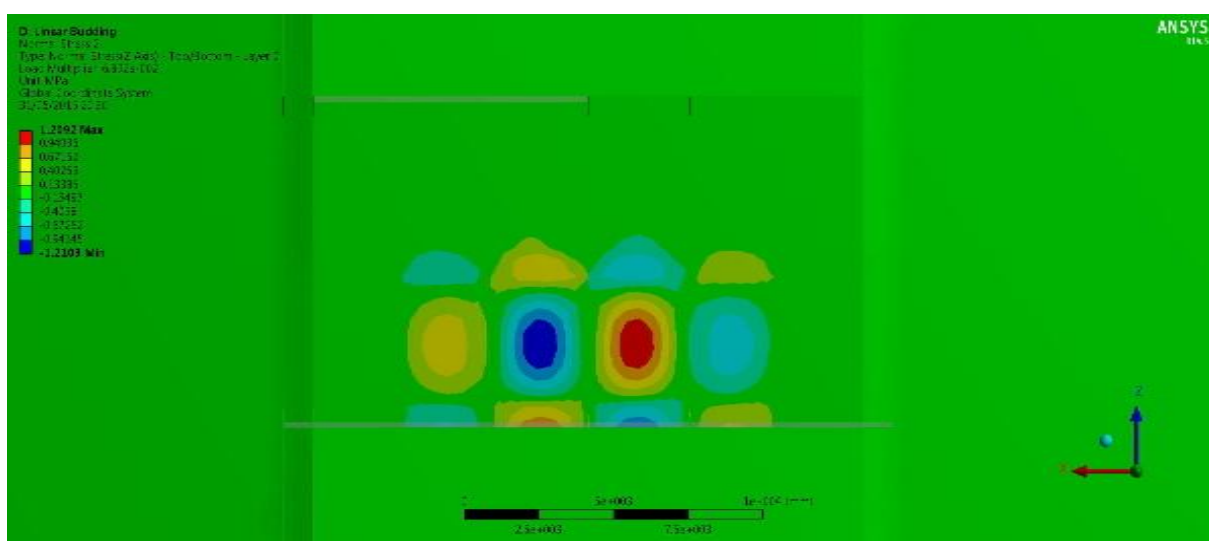
Σχήμα 5-7: Αναπαράσταση διαγράμματος τάσεων Von-Mises για την κατάσταση λυγισμού χωρίς τοποθέτηση επιθέματος από σύνθετα υλικά.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται η κατανομή των τάσεων Von-Mises όπως προέκυψε κατά την επίλυση του μοντέλου. Όπως είναι αναμενόμενο, η ανάπτυξη των τάσεων εμφανίζεται στην περιοχή του ελάσματος που εμφανίζεται ο λυγισμός. Στα ακόλουθα σχήματα θα παρουσιαστεί το διάγραμμα των τάσεων για τις διευθύνσεις X και Y.



Σχήμα 5-8: Αναπαράσταση των ορθών τάσεων στην περιοχή του ελάσματος των εγκάρσιων λωρίδων καταστρώματος στη διεύθυνση του άξονα Y

Όπως παρατηρείται από το σχήμα των τάσεων στη διεύθυνση του άξονα των Y οι τάσεις λαμβάνουν την τιμή του 1.8 MPa. Οι μεγαλύτερες τιμές βρίσκονται στα ελάσματα 1 και 2 με τα ελάσματα 3 και 4 να ακολουθούν. Η συγκεκριμένη κατανομή των τάσεων ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα που θα προκύψουν για τις εκάστοτε διευθύνσεις των ινών άνθρακα που θα εξεταστούν στη συνέχεια.



Σχήμα 5-9: Αναπαράσταση των ορθών τάσεων στην περιοχή του ελάσματος των εγκάρσιων λωρίδων καταστρώματος στη διεύθυνση του άξονα X

Το παραπάνω σχήμα παρουσιάζει την κατανομή των τάσεων στη διεύθυνση του άξονα X. Οι τάσεις σε αυτή τη διεύθυνση έχουν μέγιστη τιμή 1.292 MPa, τιμή μικρότερη από την περίπτωση της διεύθυνσης Y που εξετάστηκε στο Σχήμα 5-8. Από το αποτέλεσμα αυτό μπορούμε να υποθέσουμε ότι η τοποθέτηση των ινών παράλληλα στη διεύθυνση Y αναμένεται να ωφελήσει περισσότερο την κατασκευή καθώς σε αυτή τη διεύθυνση οι τάσεις που αναπτύσσονται είναι υψηλότερες σύμφωνα με το Σχήμα 5-9.

5.2 Έλεγχος ορθότητας ορισμού προβλήματος

Για να επιβεβαιωθεί ότι το μοντέλο είναι ορθώς ορισμένο, θα πραγματοποιηθεί ο ακόλουθος έλεγχος. Θα πραγματοποιηθεί καταχρηστική μείωση όλων των φορτίων στο μισό. Για παράδειγμα η μείωση των υδροστατικών πιέσεων κατά το ήμισυ, μπορεί να επιτευχθεί, μειώνοντας την πυκνότητα του νερού στο μισό. Αντίστοιχα, οι πιέσεις λόγω φορτίου στις εσωτερικές επιφάνειες των κυτών, αλλά και στις εσωτερικές επιφάνειες των δεξαμενών έρματος, θα μειωθούν επίσης κατά το ήμισυ. Θεωρητικά το αποτέλεσμα θα είναι να διπλασιαστεί ο συντελεστής φορτίου λυγισμού, που υπολογίζεται μέσω του λογισμικού Ansys. Ο διπλασιασμός του συντελεστή αποτελεί επιβεβαίωση του ορθού ορισμού του προβλήματος, και της ορθής απόκρισης του λυτή.

Η μείωση όλων των φορτίων κατά το ήμισυ οδήγησε σε $\lambda = 0.136$ που είναι διπλάσιος συγκριτικά με το προηγούμενο συντελεστή. Συνοπτικά έχουμε:

Πίνακας 5-1: Αύξηση συντελεστή κρίσιμου φορτίου λ με μείωση του εφαρμοσμένου φορτίου

λ	Τιμή
Μοντέλο χωρίς επίθεμα με πλήρες φορτίο	0.68
Μοντέλο χωρίς επίθεμα με το μισό φορτίο	0.137

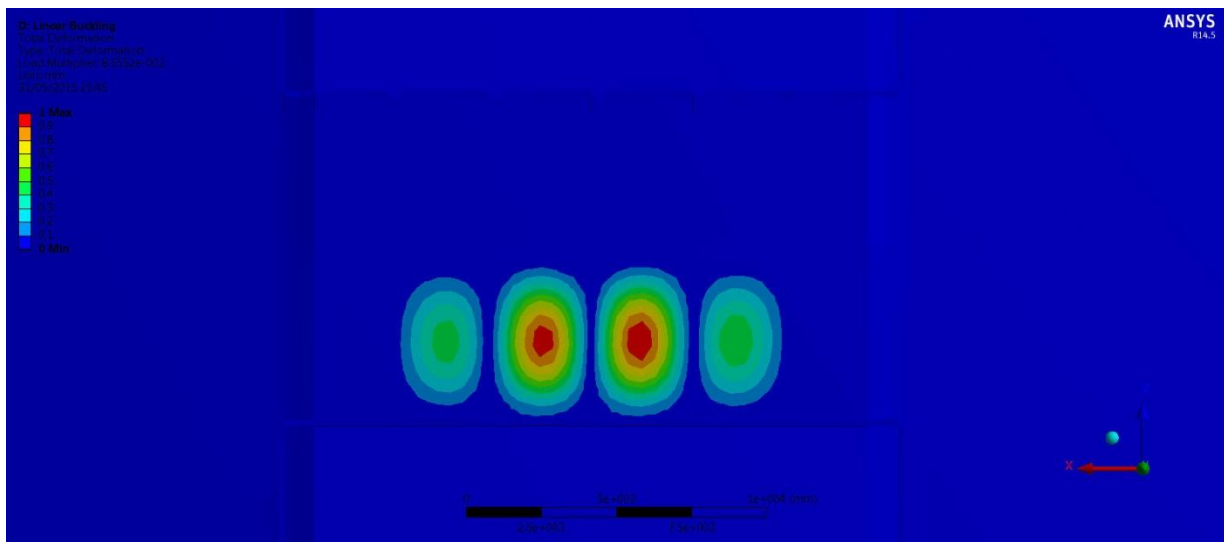
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζει ο Πίνακας 5-1 με τη μείωση των ασκούμενων στο μοντέλο φορτίων κατά 50% παρουσιάστηκε όπως ήταν αναμενόμενο διπλασιασμός και του συντελεστή κρίσιμου φορτίου. Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει την ορθότητα στον ορισμό του μοντέλου.

5.3 Συγκριτική αξιολόγηση συντελεστή κρίσιμου φορτίου για τις διάφορες περιπτώσεις επιθεμάτων

Στην παράγραφο αυτή θα πραγματοποιηθεί η επίλυση του προβλήματος για κάθε μία από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν στο εδάφιο 4.8.1. Σκοπός είναι να μελετηθεί η επίδραση του προσανατολισμού των ινών αλλά και του SR δεδομένης της φόρτισης και των οριακών συνθηκών που έχουν δοθεί στο μοντέλο. Το μέγεθος που έχει τη μεγαλύτερη σημασία να αναλυθεί είναι ο συντελεστής φορτίου λυγισμού λ . Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα υπό μορφή πινάκων που θα περιλαμβάνουν το συντελεστή λ . Παράλληλα θα παρουσιαστούν και τα διαγράμματα ολικής παραμόρφωσης για κάθε ένα αποτέλεσμα έτσι ώστε να δοθεί μια εκτίμηση της μορφής του λυγισμού αλλά και των σημείων της κατασκευής που πλήττει.

5.3.1 Επιθέματα με $SR = 0.25$

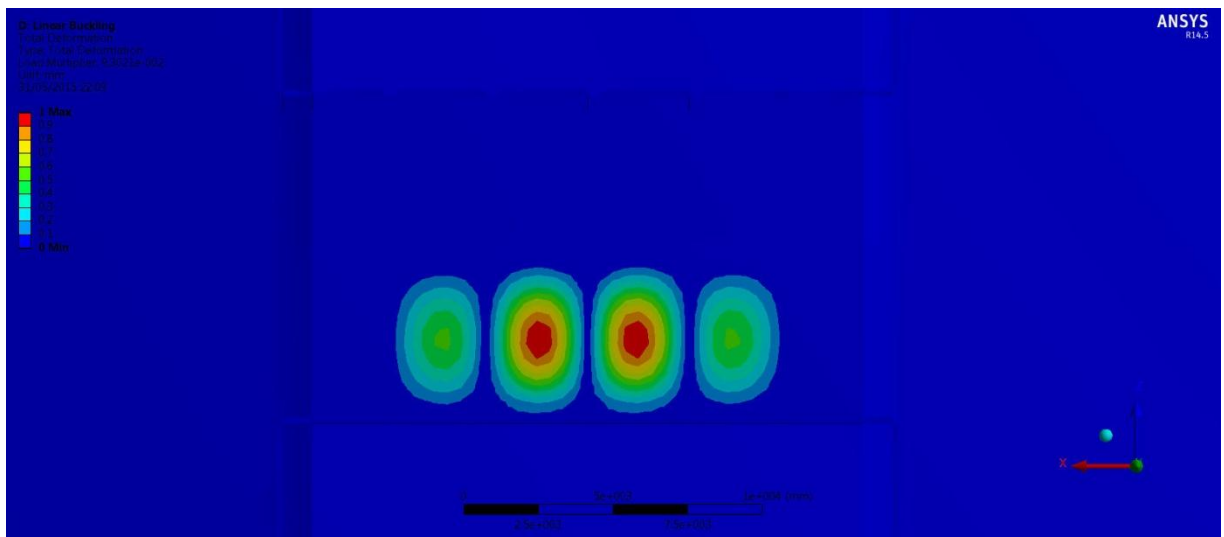
Όπως έχει ήδη περιγραφεί θα εξεταστούν για το συγκεκριμένο SR, έξι διαφορετικές περιπτώσεις. Σε κάθε μια από τις περιπτώσεις που ακολουθούν θα παρουσιαστεί το σημείο της κατασκευής που εμφανίζεται το φαινόμενο και ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λυγισμού λ . Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο προσανατολισμός των ινών παρουσιάζεται σε μοίρες με άξονα αναφοράς τη διεύθυνση X του πλοίου.



Σχήμα 5-10: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις 0° .

Στο παραπάνω σχήμα αναπαρίσταται η κατάσταση λυγισμού για επίθεμα με $SR = 0.25$ και διεύθυνση προσανατολισμού των ινών στις 0° . Το πάχος του επιθέματος που υπολογίζεται για το συγκεκριμένο SR είναι 6.82 mm ενώ συνολικά χρησιμοποιούνται στο συγκεκριμένο επίθεμα 10 στρώσεις ινών άνθρακα με πάχος έκαστο $0,68 \text{ mm}$. Ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λυγισμού που επιτυγχάνεται είναι $\lambda_{0.25/0} = 0.086$.

Παρατηρούμε ότι αν και ο λυγισμός έχει παρουσιαστεί στο ίδιο ακριβώς σημείο του ελάσματος, ο συντελεστής λ είναι αυξημένος. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται αύξηση κατά 26% συγκριτικά με την κατάσταση χωρίς κάποιο επίθεμα. Ακολουθεί η περίπτωση επιθέματος με το ίδιο SR και προσανατολισμό ινών στις 90° .

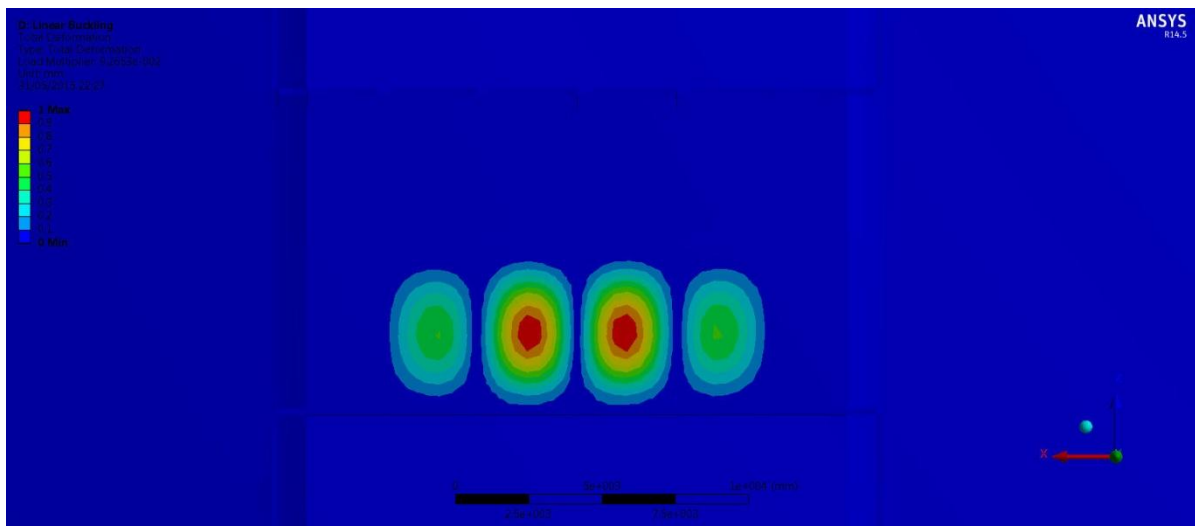


Σχήμα 5-11: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις 90° .

Στο Σχήμα 5-11 παρουσιάζεται η κατάσταση λυγισμού του ελάσματος στο οποίο έχει τοποθετηθεί επίθεμα με $SR = 0.25$ και διεύθυνση προσανατολισμού στις 90° . Η κατάσταση αντιστοιχεί στην περίπτωση 2 που περιλαμβάνει τη χρήση 10 στρώσεων ινών πάχους $0,68$

mm έκαστη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι ο λυγισμός αν και εμφανίζεται στα ίδια ακριβώς σημεία του ελάσματος, εμφανίζει συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού $\lambda_{0,25/90} = 0.093$. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση 1 που εξετάστηκε για $SR = 0.25$, που σημαίνει ότι το φορτίο που απαιτείται για να εμφανιστεί λυγισμός στο μοντέλο, είναι μεγαλύτερο και άρα είναι δυσκολότερο να εμφανιστεί λυγισμός με αυτόν τον προσανατολισμό των ινών.

Το αποτέλεσμα αυτό έρχεται να επιβεβαιώσει την αρχική εκτίμηση που είχε προκύψει κατά τη μελέτη λυγισμού χωρίς τη χρήση κάποιου επιθέματος. Στο εδάφιο 5.1 παρατηρήθηκε ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο έλασμα στη διεύθυνση Y, δηλαδή τη διεύθυνση των 90° ήταν υψηλότερες από τις τάσεις στη διεύθυνση των 0° που αντιστοιχεί στην περίπτωση 1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το κατάστρωμα, λόγω της φόρτισης στην οποία υπόκειται, θλίβεται προς την κατεύθυνση Y αλλά και στο γεγονός ότι η μεγάλη πλευρά του ορθογώνιου ελάσματος είναι παράλληλη με τη διεύθυνση X. Στην περίπτωση 2 η διεύθυνση Y ταυτίζεται με τη διεύθυνση των 90° που σχηματίζουν οι ίνες άνθρακα, και συνεπώς η αντοχή του ελάσματος προς τη διεύθυνση αυτή μεγιστοποιείται. Η αύξηση του συντελεστή λ συγκριτικά με την περίπτωση όπου δεν υπάρχει κάποιο επίθεμα είναι 37%. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση των ινών σε αυτή την κατεύθυνση είναι σχεδόν 11% περισσότερη από την τοποθέτηση των ινών στις 0° .

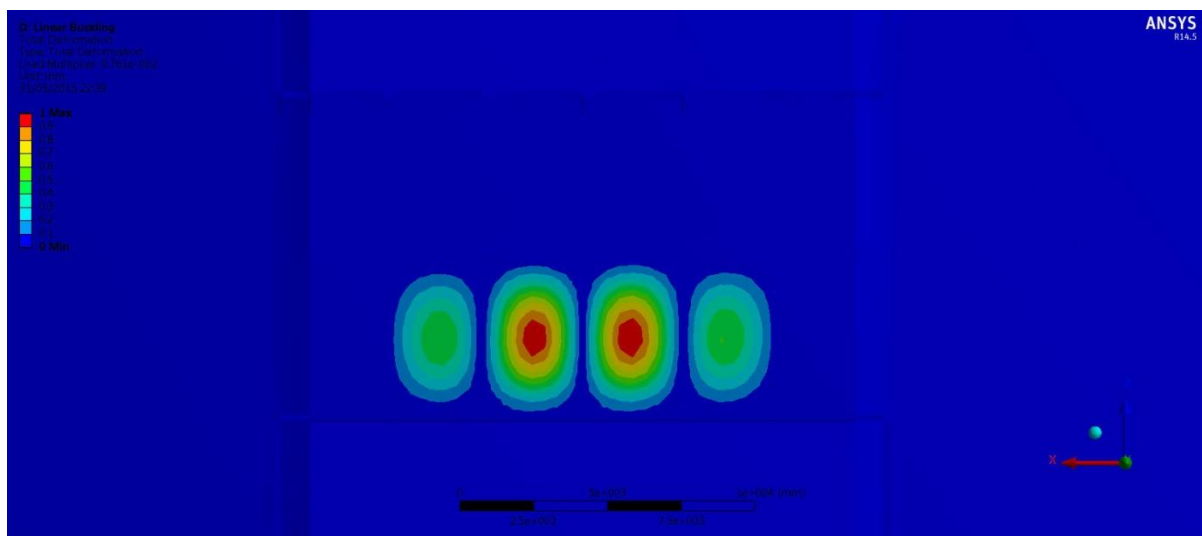


Σχήμα 5-12: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις 0° και 90° .

Στη συγκεκριμένη περίπτωση 3, τα αποτελέσματα της οποίας απεικονίζονται στο Σχήμα 5-12, γίνεται χρήση αλληπάλληλων στρώσεων ινών στις 0° και στις 90° . Το σύνολο των στρώσεων είναι 10 με πάχος 0,68 mm που αντιστοιχεί σε $SR = 0.25$. Το συγκεκριμένο επίθεμα που ουσιαστικά αποτελεί συνδυασμό των προηγούμενων περιπτώσεων, επιτυγχάνει συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού $\lambda_{0,25/90} = 0.092$. Η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση τοποθέτησης των ινών στις 0° αλλά ελάχιστα μικρότερη από την περίπτωση τοποθέτησης των ινών στις 90° . Η χρήση ινών σε δύο κατευθύνσεις προσφέρει περισσότερο ομοιόμορφη κατανομή του μέτρου ελαστικότητας του επιθέματος ωστόσο η αντοχή του επιθέματος προς την κατεύθυνση των 90° μειώνεται. Η μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι πλέον λιγότερες στρώσεις είναι προσανατολισμένες στη διεύθυνση των 90° , και συνεπώς η αντοχή του επιθέματος προς τη διεύθυνση των 90° είναι

υποδεέστερη συγκριτικά την περίπτωση 2 στην οποία όλες οι ίνες είχαν την ίδια διεύθυνση των 90° . Οι στρώσεις που είναι προσανατολισμένες στη διεύθυνση των 0° , αν και συνεισφέρουν σε κάποιο βαθμό στην αντοχή του επιθέματος, λόγω του προσανατολισμού τους δεν συνεισφέρουν ισόποσα. Βέβαια θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαφορά ανάμεσα στην περίπτωση 2 και 3 είναι αρκετά μικρή και μάλιστα μπορεί να θεωρηθεί και αμελητέα, αν λάβουμε υπόψη τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η χρήση ενός επιθέματος με περισσότερο ομοιόμορφο μέτρο ελαστικότητας.

Συμπερασματικά να αναφερθεί ότι επιτυγχάνεται αύξηση του συντελεστή λ κατά 35% συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς κάποιο επίθεμα. Στις ακόλουθες περιπτώσεις που θα εξεταστούν, αναμένεται ότι η χρήση ινών με ακόμα περισσότερες διευθύνσεις αναμένεται να αυξήσει περαιτέρω το συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού. Ακολουθεί η επίλυση και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την περίπτωση 4.

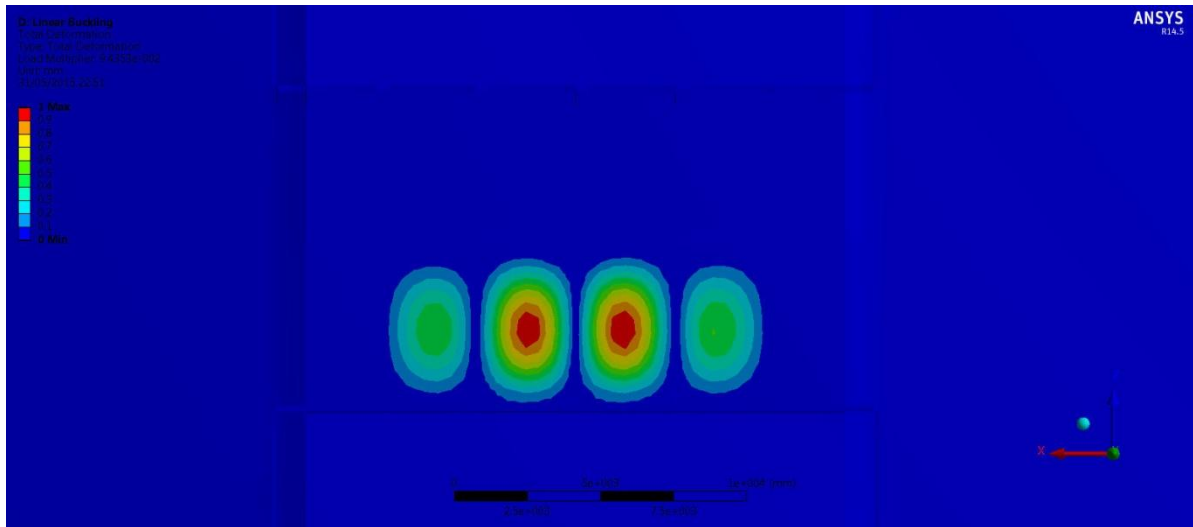


Σχήμα 5-13: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις $45^\circ, -45^\circ$

Στην περίπτωση 4 εξετάζεται η τοποθέτηση των ινών άνθρακα με προσανατολισμό στις 45° και στις -45° . Όμοια και με την προηγούμενη περίπτωση 3 χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές διευθύνσεις ινών τοποθετημένες σε δέκα αλληπάλληλες στρώσεις ινών άνθρακα. Οι δύο διευθύνσεις των ινών σχηματίζουν και σε αυτήν την περίπτωση ορθή γωνία, ωστόσο δεν είναι παράλληλες σε κανέναν από τους άξονες X και Y αλλά σχηματίζουν γωνία 45° και -45° αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λυγισμού να λάβει την τιμή $\lambda_{0,25/45,-45} = 0.098$, μεγαλύτερη από κάθε άλλη περίπτωση που εξετάστηκε. Αυτό συμβαίνει διότι η διαγώνιος κάθε ορθογωνίου ελάσματος, είναι μεγαλύτερη από κάθε άλλη διεύθυνση και κατά συνέπεια οι παραμορφώσεις προς αυτή τη διεύθυνση είναι ακόμα μεγαλύτερες. Επομένως οι ίνες άνθρακα απορροφούν τις παραμορφώσεις αυτές στο μέγιστο δυνατό βαθμό.

Το αποτέλεσμα αυτό προκύπτει παρόλο που ο προσανατολισμός των ινών δεν ταυτίζεται με τη διεύθυνση της φόρτισης, αλλά πλησιάζει περισσότερο τη διεύθυνση της μέγιστης παραμόρφωσης του ελάσματος, επιτυγχάνοντας ακόμα καλύτερα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα επιτυγχάνεται αύξηση της τάξης του 44% συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς κάποιο επίθεμα, ενώ επιτυγχάνεται 9% περισσότερη αντοχή συγκριτικά με την καλύτερη έως

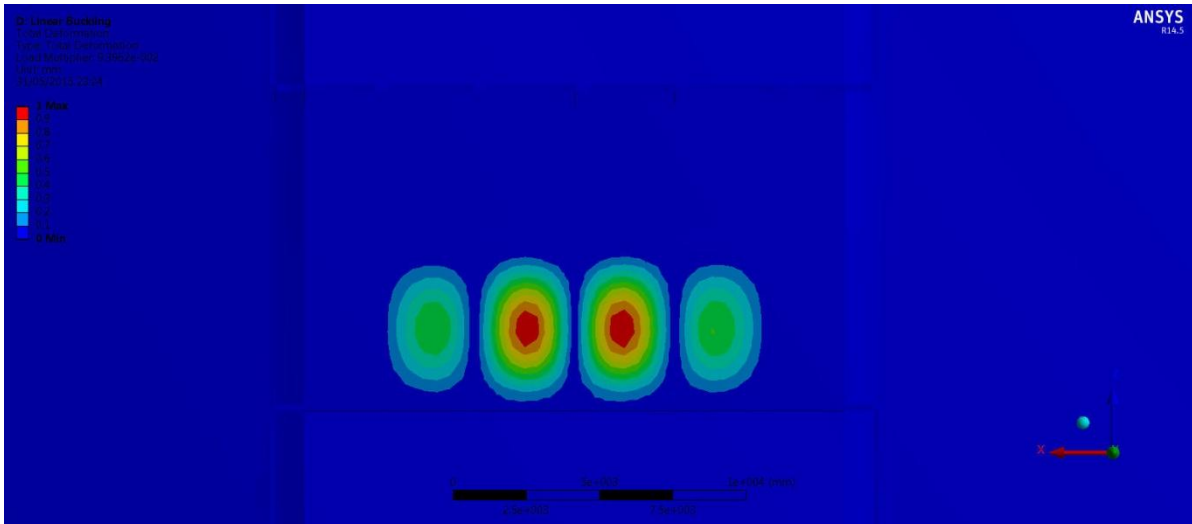
τώρα περίπτωση 2 των 90° που εξετάστηκε. Στο ακόλουθο σχήμα θα εξεταστεί η περίπτωση 5 που περιλαμβάνει τη χρήση ινών σε τρεις διευθύνσεις.



Σχήμα 5-14: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις 60°, 0° & -60°

Ακόμα και σε αυτήν την περίπτωση ο λυγισμός εμφανίζεται στο ίδιο σημείο του ελάσματος του καταστρώματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ομοιομορφία του μέτρου ελαστικότητας είναι μεγαλύτερη και επιτυγχάνεται συντελεστής $\lambda_{0,25/60_0_-60} = 0.095$. Η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή είναι περισσότερο αυξημένη συγκριτικά με τις περιπτώσεις τοποθέτησης των ινών σε μια διεύθυνση, ωστόσο δεν υπερβαίνει την τιμή του συντελεστή λ στην περίπτωση 4 που αντιστοιχεί σε προσανατολισμό 45° και -45°. Ο λόγος είναι ότι αν και επιτυγχάνεται ακόμα πιο ομοιόμορφη κατανομή του μέτρου ελαστικότητας, η αύξηση της αντοχής του επιθέματος στοχευμένα στη διεύθυνση των διαγωνίων του ελάσματος επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα. Το επίθεμα που χρησιμοποιείται και σε αυτήν την περίπτωση έχει $SR = 0.25$. Να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο επίθεμα διατηρεί το συνολικό πάχος $t_p = 6.82$ mm ωστόσο πλέον για να διατηρήσει τη συμμετρία στις στρώσεις και να αποτελείται δηλαδή από τον ίδιο αριθμό στρώσεων για κάθε έναν προσανατολισμό, ο συνολικός αριθμός των στρώσεων αυξάνεται στις 12.

Θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι επιτυγχάνεται αύξηση του συντελεστή λ κατά 40% συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς κάποιο επίθεμα. Η περίπτωση 6 που θα ακολουθήσει περιλαμβάνει τη χρήση επιθέματος ακόμα περισσότερων διευθύνσεων.



Σχήμα 5-15: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.25$ και προσανατολισμού ινών στις 0° , 45° , -45° & 90°

Το παραπάνω σχήμα αφορά την περίπτωση 6 που είναι και η τελευταία περίπτωση που εξετάζεται. Περιλαμβάνει τη χρήση 8 στρώσεων με τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς. Αν και ο συνολικός αριθμός των στρώσεων είναι μειωμένος, το συνολικό πάχος του επιθέματος παραμένει σταθερό. Ο αριθμός των στρώσεων μειώνεται έτσι ώστε να διατηρείται η συμμετρία στο επίθεμα.

Όπως παρατηρείται και στο σχήμα, η περιοχή που εμφανίζεται ο λυγισμός ταυτίζεται με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Συγκριτικά με την περίπτωση 5 των τριών διευθύνσεων η τιμή του κρίσιμου συντελεστή φορτίου δε μεταβάλλεται και παραμένει $\lambda_{0,25/0-45-90-135} = 0.095$. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι η χρήση ακόμα περισσότερων διευθύνσεων ινών δεν συνεισφέρει στην αύξηση του συντελεστή λ . Συνεπώς αν και η χρήση επιθεμάτων τριών και τεσσάρων διευθύνσεων είναι καλύτερη από τις περιπτώσεις που χρησιμοποιείται μια μόνο διεύθυνση, είναι και πάλι υποδεέστερη συγκριτικά με την χρήση δύο διευθύνσεων προσανατολισμένων στις διευθύνσεις των 45° και -45° που εξετάστηκε από την περίπτωση 4. Επιπροσθέτως, μπορεί το μέτρο ελαστικότητας να αποκτά την πλέον ομοιόμορφη τιμή του, οι στρώσεις των ινών που δε συμπίπτουν στη διεύθυνση των 45° και των -45° δε συνεισφέρουν εξίσου στην αντοχή του ελάσματος όπως προκύπτει. Στις περιπτώσεις που θα ακολουθήσουν θα εξεταστούν οι ίδιες περιπτώσεις, με τη μόνη διαφορά ότι το επίθεμα θα έχει πάχος $t_p = 13,65$ mm που αντιστοιχεί σε $SR = 0.50$.

5.3.2 Επίθεμα με $SR = 0.50$

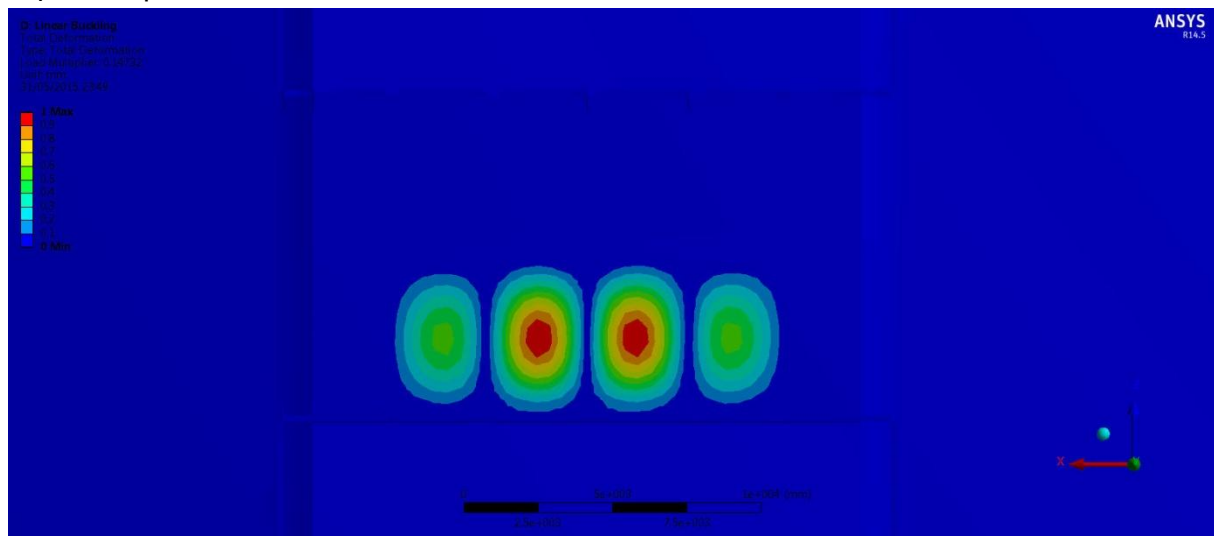
Ο πίνακας που ακολουθεί περιλαμβάνει τα αποτελέσματα του κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού λ που αντιστοιχούν σε πάχος επιθέματος για $SR = 0.50$.

Πίνακας 5-2: Αποτελέσματα κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού λ για επιθέματα με SR = 0.50

	λ
Περίπτωση 1	0.119
Περίπτωση 2	0.147
Περίπτωση 3	0.146
Περίπτωση 4	0.165
Περίπτωση 5	0.157
Περίπτωση 6	0.158

Όμοια και με τις προηγούμενες περιπτώσεις παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά στον κρίσιμο συντελεστή φορτίου. Η ελάχιστη τιμή του συντελεστή λ επιτυγχάνεται στην περίπτωση 1 στην οποία υπάρχει μόνο μια διεύθυνση των ινών και αυτή είναι η διαμήκης. Αντίθετα η αύξηση του συντελεστή λ στην διεύθυνση των 90° που αντιστοιχεί στην εγκάρσια είναι πολύ μεγαλύτερη καθώς συμπίπτει με την φορά του θλιπτικού φορτίου. Στην περίπτωση 3 που αφορά επίθεμα δύο διευθύνσεων με διευθύνσεις στις 0° και στις 90° ο συντελεστής λ αυξάνεται ακόμα περισσότερο αλλά δεν ξεπερνά τον μέγιστο συντελεστή που επιτυγχάνεται με διευθύνσεις ινών στις 45° και στις -45°. Οι τελευταίες δύο περιπτώσεις 5 και 6 επιτυγχάνουν εξίσου καλά αποτελέσματα, καλύτερα από τις περιπτώσεις 1, 2 και 3 αλλά και αυτές δεν πετυχαίνουν μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή λ από την περίπτωση 4.

Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίσταται το αποτέλεσμα που αντιστοιχεί στην περίπτωση 2.

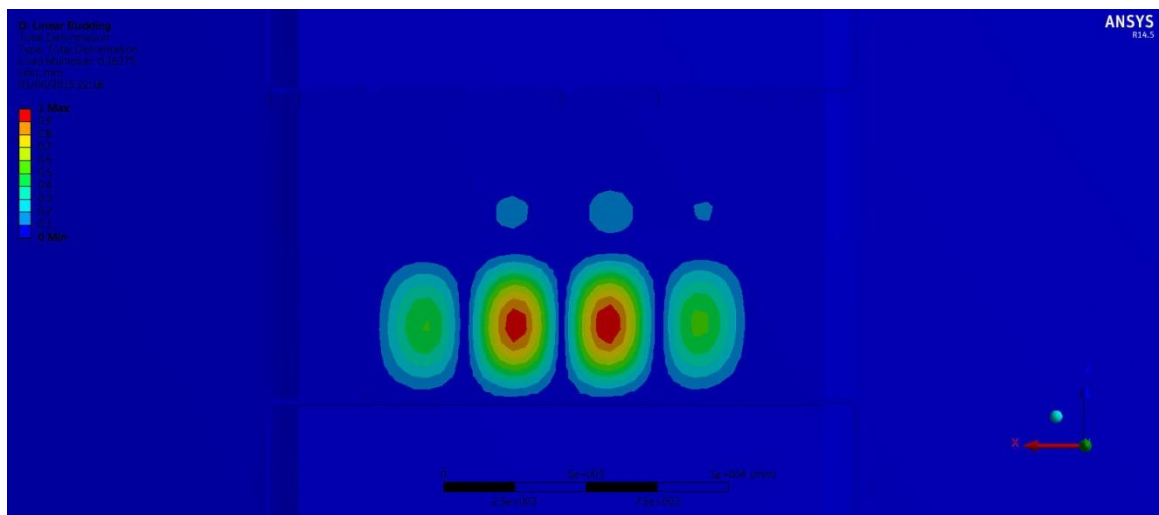


Σχήμα 5-16: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με SR = 0.50 και προσανατολισμού ινών στις 90°

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω σχήμα τα σημεία στα οποία εμφανίζεται ο λυγισμός παραμένουν τα ίδια. Ωστόσο η τιμή του κρίσιμου συντελεστή φορτίου $\lambda_{0.50/90} = 0.147$ είναι σαφώς μεγαλύτερη συγκριτικά με τις περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε επιθέματα με SR = 0.25. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρουσιάζεται αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού κατά 117%, τιμή πολύ μεγαλύτερη από κάθε άλλη περίπτωση που εξετάστηκε.

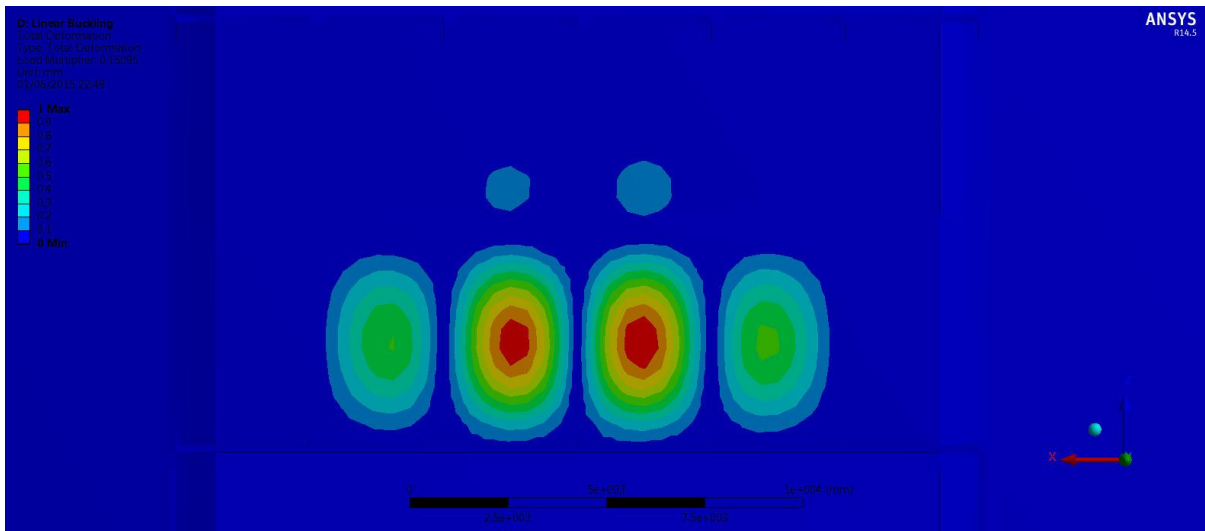
Στις υπόλοιπες περιπτώσεις που εξετάστηκαν η συμπεριφορά έναντι λυγισμού είναι πανομοιότυπη με τις περιπτώσεις που αντιστοιχούσαν σε SR = 0.25. Όπως παρουσιάζει και ο συνοπτικός τελικός Πίνακας 5-4, όλες οι τιμές του συντελεστή λ που επιτυγχάνονται είναι ακόμα μεγαλύτερες για SR = 0.50. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ακαμψία

και η αντοχή του επιθέματος με υψηλότερο SR οδηγεί στην εμφάνιση λυγισμού σε ακόμα υψηλότερα φορτία. Από τις έξι περιπτώσεις που εξετάστηκαν η τελευταία περίπτωση 4 παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται ο μεγαλύτερος συντελεστής κρίσιμου φορτίου $\lambda_{13,65\text{mm}/45_{-45}} = 0.165$, οδηγώντας σε αύξηση του συντελεστή λυγισμού λ κατά 143%. Ωστόσο όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα ο λυγισμός έχει επεκταθεί και σε περισσότερα ελάσματα του καταστρώματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγάλη ακαμψία του επιθέματος αυξάνει αρκετά την ακαμψία του ελάσματος στα σημεία του επιθέματος με αποτέλεσμα σημεία του καταστρώματος λιγότερο ενισχυμένα να έρχονται σε συνθήκες αστάθειας και να εκδηλώνεται και σε αυτά λυγισμός. Να σημειωθεί ότι στα νέα σημεία που εκδηλώνεται λυγισμός δεν έχει τοποθετηθεί κάποιο επίθεμα. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά το αποτέλεσμα της περίπτωση 4.



Σχήμα 5-17: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 0.50$ και προσανατολισμού ινών στις 45° & -45°

Όπως παρουσιάζεται και στο παραπάνω σχήμα, ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λ που έχει επιτευχθεί είναι μεγαλύτερος από κάθε άλλη περίπτωση που εξετάστηκε. Από το σχήμα όμως παρατηρείται ότι η παραμόρφωση έχει επεκταθεί και σε επιπρόσθετα σημεία του καταστρώματος στα οποία δεν έχει τοποθετηθεί κάποιο επίθεμα. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι τα ελάσματα δεξιά του επιπέδου συμμετρίας του πλοίου παρουσιάζουν μια σχετικά λίγο μεγαλύτερη παραμόρφωση συγκριτικά με τα ελάσματα αριστερά του επιπέδου συμμετρίας στο πλοίο. Ακολουθεί η παραμόρφωση του καταστρώματος που αντιστοιχεί στην περίπτωση 6 που εξετάζεται και περιλαμβάνει τη χρήση οκτώ στρώσεων επιθεμάτων με διευθύνσεις ινών στις 0° , 45° , -45° & 90° .



Σχήμα 5-18: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επιθέματα με $SR = 0.50$ και προσανατολισμού ινών στις $0^\circ, 45^\circ, -45^\circ$ & 90°

Όπως παρατηρείται στο παραπάνω σχήμα, με την τοποθέτηση επιθέματος με $SR = 0.50$ και τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις ινών άνθρακα, ο λυγισμός επεκτείνεται και σε περισσότερα ελάσματα. Αυτό συμβαίνει γιατί η αύξηση της ακαμψίας του επιθέματος είναι αρκετή ώστε να επιφέρει τέτοια αύξηση του κρίσιμου φορτίου που οδηγεί στην αστάθεια και άλλα σημεία της κατασκευής. Στην περίπτωση 6 για $SR = 0.50$, η τιμή του κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού είναι $\lambda_{0,50/0_45_45-90} = 0.158$. Η αύξηση του συντελεστή υποδηλώνει αύξηση 133% του κρίσιμου φορτίου λυγισμού συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς τη χρήση κάποιου επιθέματος.

5.3.3 Επιθέματα με $SR = 1.00$

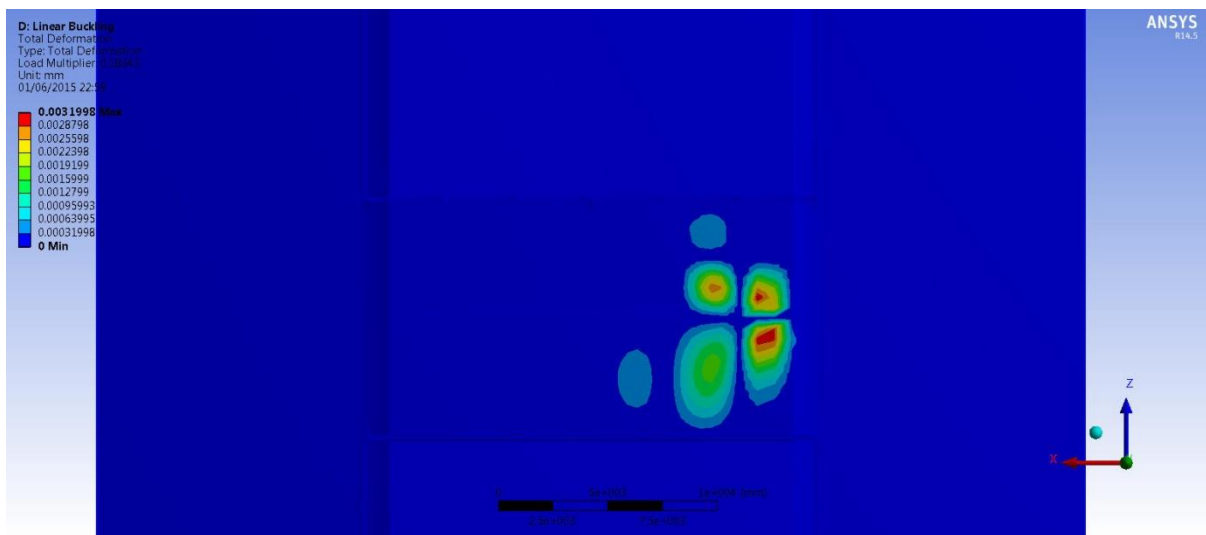
Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για επιθέματα με $SR = 1.00$ παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού λ για επιθέματα με $SR = 1.00$

	λ
Περίπτωση 1	0.163
Περίπτωση 2	0.196
Περίπτωση 3	0.188
Περίπτωση 4	0.187
Περίπτωση 5	0.188
Περίπτωση 6	0.189

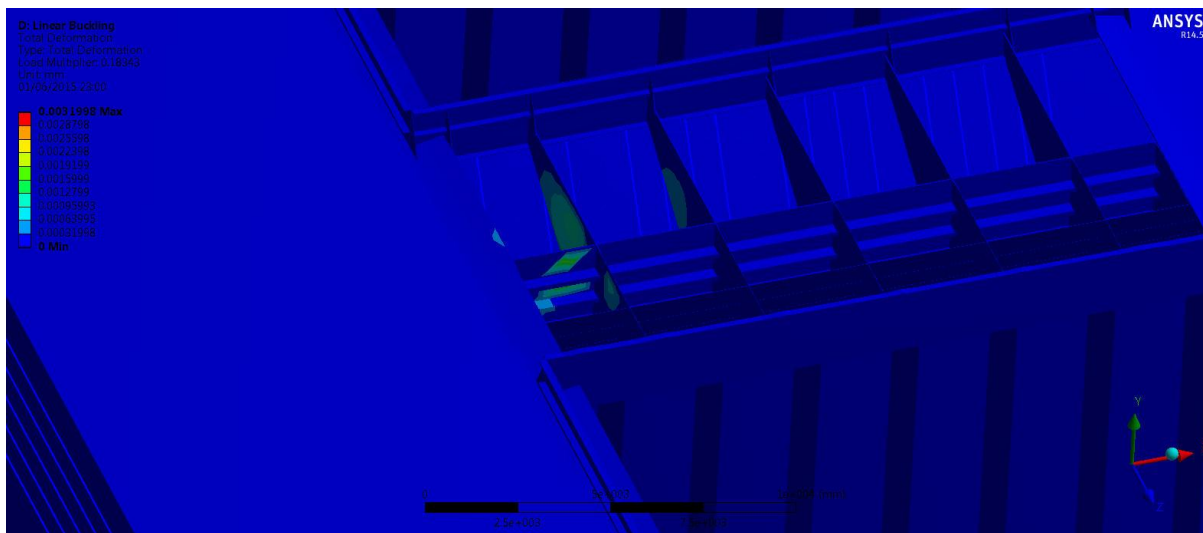
Όπως παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα, ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λυγισμού λ , στην περίπτωση χρήσης επιθέματος με $SR = 1.00$ είναι περισσότερο αυξημένος από κάθε άλλη περίπτωση που εξετάζεται. Ωστόσο σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις η μεταβολή του συντελεστή λ σε συνάρτηση με τη διεύθυνση των ινών του επιθέματος παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά.

Όπως και στις περιπτώσεις που αντιστοιχούσαν σε $SR = 0.25$ και 0.50 παρουσιάζεται μια σημαντική αύξηση του κρίσιμου συντελεστή φορτίου από την τιμή $\lambda_{1,00/0} = 0.163$ στην τιμή $\lambda_{1,00/90} = 0.196$. Η μεταβολή αυτή επιβεβαιώνει όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις που εξετάστηκαν, τη μεγάλη βελτίωση έναντι λυγισμού που επιφέρει ο προσανατολισμός των ινών στις 90° έναντι των 0° . Ωστόσο, πέρα από την αύξηση του κρίσιμου συντελεστή φορτίου λ , αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, είναι τα σημεία στα οποία εμφανίζεται ο λυγισμός όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



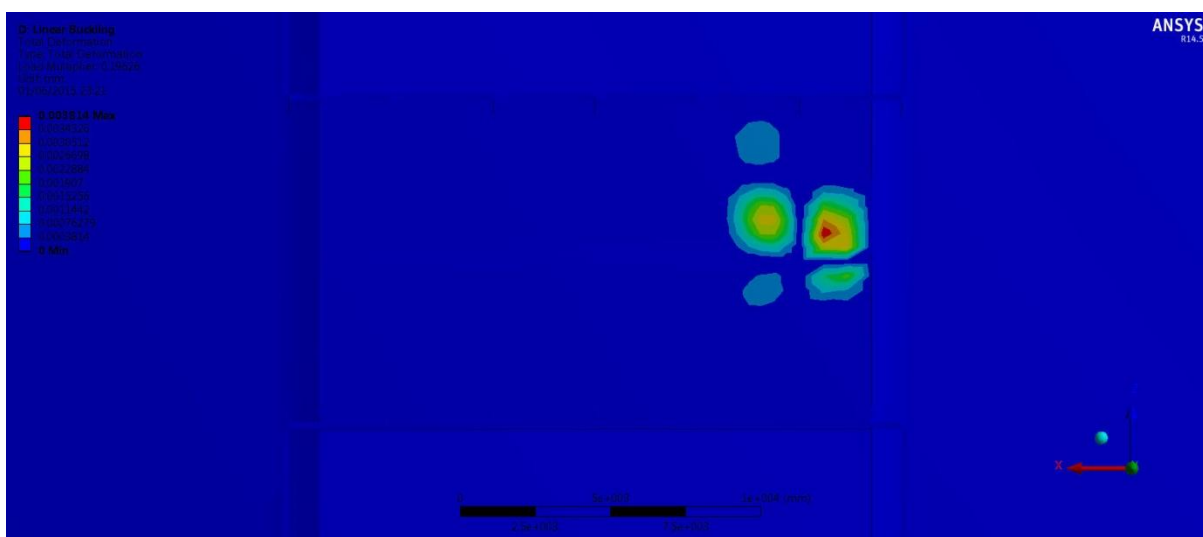
Σχήμα 5-19: Απεικόνιση λυγισμού ελάσματος καταστρώματος για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 0°

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται η κατάσταση λυγισμού του καταστρώματος με τη χρήση επιθέματος με $SR = 1.00$ που αντιστοιχεί σε πάχος επιθέματος $t_p = 27.29$ mm και έχει με προσανατολισμό των ινών στις 0° , όπως ακριβώς αντιστοιχεί στην περίπτωση 1. Παρατηρώντας το σχήμα η παραμορφωμένη κατάσταση έχει εντελώς διαφοροποιηθεί. Ο λυγισμός πλέον έχει μετατεθεί σε διαφορετικά σημεία του ελάσματος του καταστρώματος ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται ότι έχει περιοριστεί δεξιά από το επίπεδο συμμετρίας του πλοίου. Στο παρακάτω Σχήμα 5-20 παρουσιάζεται η γεωμετρία της ανώτερης ενίσχυσης της εγκάρσιας φρακτής με την επίλυση του προβλήματος. Η αύξηση της ακαμψίας του συνεργαζόμενου ελάσματος και επιθέματος είναι τόσο μεγάλη ώστε πλέον οι παραμορφώσεις λόγω λυγισμού δεν παρουσιάζονται μόνο στην περιοχή του ελάσματος του καταστρώματος αλλά και στην περιοχή της ανώτερης εγκάρσιας ενίσχυσης της φρακτής.



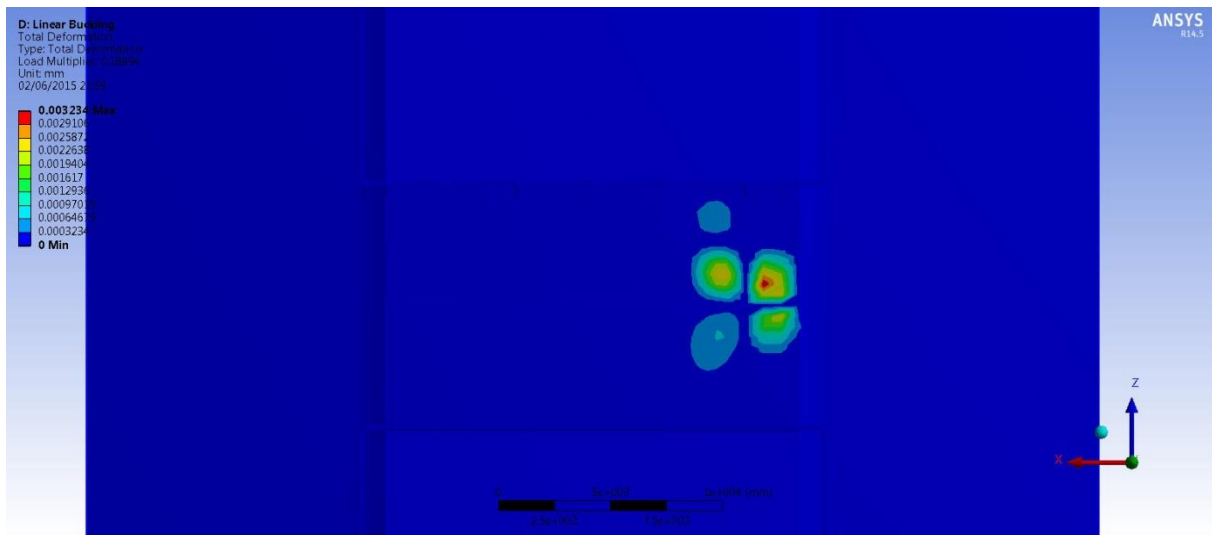
Σχήμα 5-20: Απεικόνιση λυγισμού ανώτερης ενίσχυσης εγκάρσιας φρακτής για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 0°

Ο λόγος που εμφανίζεται το φαινόμενο αυτό είναι ότι το SR του επιθέματος είναι πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα το έλασμα του καταστρώματος να ενισχύεται σε τέτοιο βαθμό που το απαιτούμενο φορτίο για την εμφάνιση λυγισμού να μεγαλώνει τόσο ώστε να εμφανιστεί λυγισμός και σε άλλο σημείο της κατασκευής στο οποίο εμφανίζονται θλιπτικές φορτίσεις. Το σημείο στην ανώτερη ενίσχυση της εγκάρσιας φρακτής που εμφανίζεται ο λυγισμός καταδεικνύει το πλέον ασταθές σημείο της κατασκευής. Η πλευρά στην οποία εμφανίζεται είναι τυχαίο γεγονός που προκύπτει κατά την αριθμητική επίλυση του προβλήματος καθότι η κατασκευή είναι συμμετρική. Τέλος να σημειωθεί ότι αν και ο λυγισμός δεν περιορίζεται στα σημεία του ελάσματος του καταστρώματος, η μέγιστη τιμή παραμόρφωσης εμφανίζεται σε αυτό. Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει το λυγισμό όπως προέκυψε για διεύθυνση ινών στις 90° .



Σχήμα 5-21: Απεικόνιση λυγισμού ανώτερης ενίσχυσης εγκάρσιας φρακτής για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 90°

Το αποτέλεσμα που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα είναι αναμενόμενο. Η τοποθέτηση των ινών στη διεύθυνση των 90° αυξάνει ακόμα περισσότερο την ακαμψία του επιθέματος έναντι της φόρτισης που δέχεται με αποτέλεσμα να εξαλείφεται πλήρως ο λυγισμός από τα ελάσματα του καταστρώματος που έχει τοποθετηθεί το επίθεμα. Στη συγκεκριμένη φόρτιση όπως έχει αποδειχθεί έως τώρα. Ο κρίσιμος συντελεστής φορτίου λαμβάνει την τιμή $\lambda_{1,00/90} = 0.196$ που είναι και η υψηλότερη που έχει έως τώρα παρατηρηθεί. Στην ακόλουθη περίπτωση 3 που θα εξεταστεί, γίνεται χρήση δύο διευθύνσεων ινών στις 0° και στις 90° .



Σχήμα 5-22: Απεικόνιση λυγισμού ανώτερης ενίσχυσης εγκάρσιας φρακτής για επίθεμα με $SR = 1.00$ και προσανατολισμού ινών στις 0° και 90°

Όπως παρατηρείται και από το παραπάνω σχήμα, η τιμή του κρίσιμου συντελεστή φορτίου λυγισμού μειώνεται στην τιμή $\lambda_{1,00/0-90} = 0.1881$. Η μείωση αυτή δε συνάδει με την έως τώρα συμπεριφορά που έχει παρατηρηθεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, η ακαμψία του επιθέματος είναι τόσο μεγάλη που εμφανίζονται πλέον στην κατασκευή και άλλα σημεία τα οποία είναι ασταθή. Όπως προκύπτει και από την εξέταση των άλλων περιπτώσεων 4, 5 και 6, η συμπεριφορά των σημείων αυτών είναι ανεξάρτητη από το είδος του επιθέματος παρουσιάζοντας έτσι λυγισμό στο ίδιο κάθε φορά φορτίο. Στις περιπτώσεις αυτές αν και το επίθεμα αποκτά μεγαλύτερη ακαμψία, ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λυγισμού παραμένει σταθερός και συγκλίνει στην τιμή 0.1880 όπως παρουσιάζει και ο Πίνακας 5-3.

5.4 Συνοπτική αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται συνολικά όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν στις διάφορες περιπτώσεις που εξετάστηκαν στα τρία διαφορετικά SR που μελετήθηκαν.

Πίνακας 5-4: Συνοπτικός πίνακας τιμών συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού λ για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε και για κάθε SR

unpatched		λ = 0.068					
Patched		SR = 0.25		SR = 0.5		SR = 1.00	
		λ	% Αύξηση	λ	% Αύξηση	λ	% Αύξηση
Περίπτωση 1	[0°] ₁₀	0.086	+ 26%	0.119	+ 75%	0.163	+ 140%
Περίπτωση 2	[90°] ₁₀	0.093	+ 37%	0.147	+ 117%	0.196	+ 189%
Περίπτωση 3	[(0°/90°) ₂] _s	0.092	+ 35%	0.146	+ 114%	0.188	+ 177%
Περίπτωση 4	[(45°/-45°) ₂] _s	0.098	+ 44%	0.165	+ 143%	0.187	+ 175%
Περίπτωση 5	[(60°/0°/-60°) ₂] _s	0.095	+ 40%	0.157	+ 130%	0.188	+ 177%
Περίπτωση 6	[(0°/45°/-45°/90°) ₂] _s	0.095	+ 40%	0.158	+ 133%	0.189	+ 177%

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι ο συντελεστής κρίσιμου φορτίου λυγισμού λ παρουσιάζει δύο διαφορετικές συμπεριφορές ανάλογα φυσικά το Stiffness Ratio που επιλέγεται. Για SR = 0.25 και 0.50 ο συντελεστής λ επιτυγχάνει τη μεγαλύτερη τιμή του στην περίπτωση 4 που αντιστοιχεί σε επιθέματα με ίνες δύο προσανατολισμών στις 45° και στις -45°. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι σε αυτή τη διεύθυνση, οι ίνες πλησιάζουν σε μεγάλο βαθμό τις διαγωνίους του ορθογωνίου ελάσματος στις οποίες παρατηρείται και η μεγαλύτερη επίπεδη παραμόρφωση.

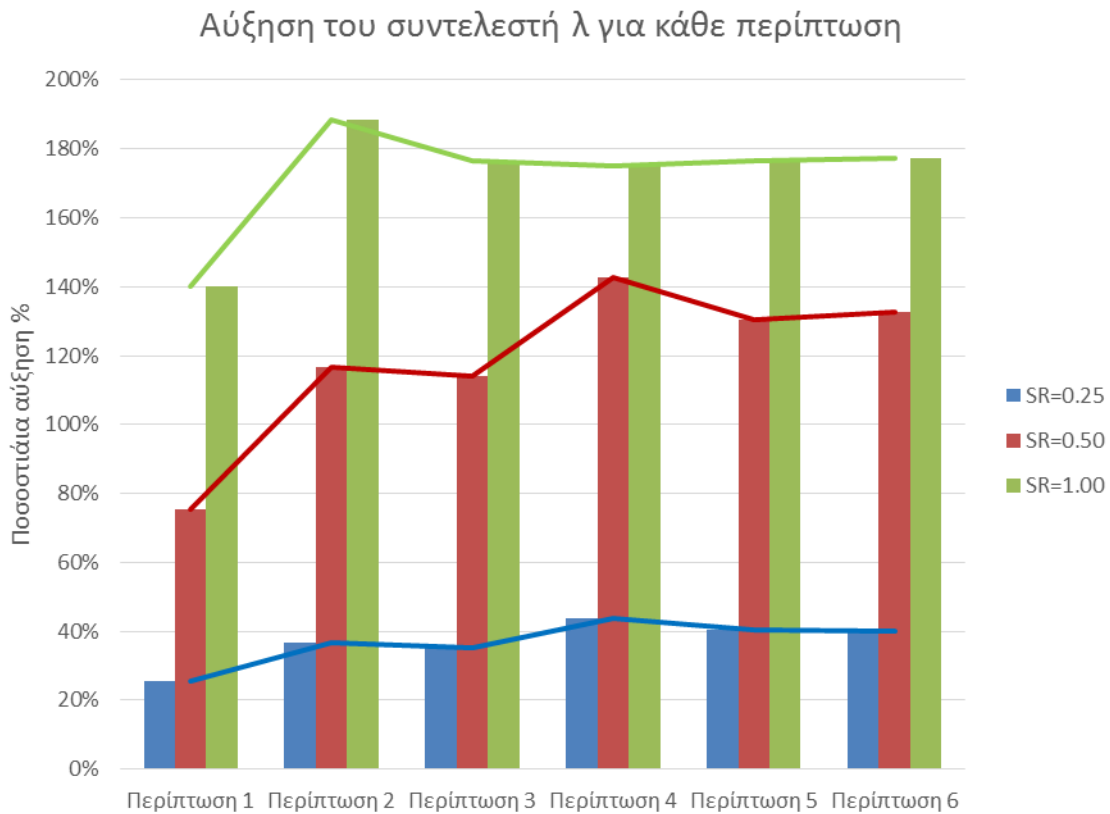
Ανάμεσα στις περιπτώσεις 1 και 2 που αντιστοιχούν σε προσανατολισμό των ινών στις 0° και στις 90° η τοποθέτηση των ινών σε γωνία 90° παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι η διεύθυνση των 90° συμπίπτει με την εγκάρσια διεύθυνση Y του πλοίου που λόγω της φύσεως της φόρτισης παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανάπτυξη τάσεων όπως αποδεικνύεται και από το Σχήμα 5-8. Ο προσανατολισμός των ινών σε αυτή τη διεύθυνση απορροφά σε μεγαλύτερο βαθμό τις αναπτυσσόμενες τάσεις επιτυγχάνοντας καλύτερη τιμή συγκριτικά με την τοποθέτηση των ινών στις 0°.

Η περίπτωση 3 αντιστοιχεί σε χρήση επιθέματος με δύο διευθύνσεις, ωστόσο ο προσανατολισμός των ινών στις 0° και στις 90° δεν επιφέρει την ίδια αύξηση του συντελεστή λ με την περίπτωση 4 στην οποία ο προσανατολισμός των ινών είναι στις 45° και στις -45°. Ομοίως και οι περιπτώσεις 5 και 6 δεν επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα από την περίπτωση 4. Αν και χρησιμοποιούνται περισσότερες των δύο διευθύνσεις, η ομοιόμορφη κατανομή του μέτρου ελαστικότητας δεν επιφέρει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Η δεύτερη συμπεριφορά που παρουσιάζεται αντιστοιχεί στα επιθέματα με SR = 1. Σε αυτά το μεγάλο πάχος οδηγεί σε πολύ μεγάλη ακαμψία, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζεται λυγισμός στα σημεία του ελάσματος των εγκάρσιων λωρίδων στα οποία έχει τοποθετηθεί το επίθεμα. Ο λυγισμός πλέον εμφανίζεται σε διαφορετικά σημεία του μοντέλου και γίνεται ανεξάρτητος από τον τύπο του επιθέματος που επιλέγεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι για SR = 1.00 παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή λ. Η εμφάνιση αστάθειας σε διαφορετικά σημεία του μοντέλου παρουσιάζεται και για τιμές SR = 0.50 ωστόσο είναι αρκετά πιο περιορισμένη. Αποτελεί όμως μια αρχική ένδειξη ότι η περαιτέρω αύξηση του SR θα μεταφέρει το λυγισμό και σε διαφορετικά σημεία.

Οι περιπτώσεις που αντιστοιχούν τόσο σε τιμές του SR = 0.50 όσο και σε τιμές για SR = 1.00 είναι περισσότερο περιπτώσεις που εξετάστηκαν στα πλαίσια διερεύνησης του

προβλήματος χωρίς να αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα. Στην πράξη το πάχος του επιθέματος που επιλέγεται είναι τέτοιο που να κυμαίνεται στην περιοχή του $SR = 0.25$. Το παρακάτω σχήμα αναπαριστά την ποσοστιαία μεταβολή του συντελεστή λ κρίσιμου φορτίου συναρτήσει των περιπτώσεων και του SR του επιθέματος.



Σχήμα 5-23: Διάγραμμα ποσοστιαίας αύξησης του συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού για κάθε περίπτωση και για κάθε SR

Το παραπάνω γράφημα αποτελεί προσπάθεια απεικόνισης της ποσοστιαίας αύξησης του συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς την τοποθέτηση επιθέματος. Στο διάγραμμα με μπλε χρώμα αναπαρίστανται οι περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε $SR=0.25$, με κόκκινο χρώμα στις περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε $SR=0.50$ και με πράσινο χρώμα οι περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε $SR=1.00$. Από το σχήμα είναι ξεκάθαρη τόσο η μεγάλη διαφορά που επιτυγχάνεται με την αύξηση του SR , αλλά και η διαφοροποίηση που επιτυγχάνεται με τη μεταβολή του προσανατολισμού των ινών.

Για $SR=0.25$ και 0.50 η μέγιστες τιμές εμφανίζονται στην περίπτωση 4 που αντιστοιχεί στην τοποθέτηση ινών σε δύο διευθύνσεις και συγκεκριμένα στις 45° και στις -45° . Αντίθετα για $SR=1.00$ η μέγιστη περίπτωση αντιστοιχεί στην περίπτωση 2 και για τις επόμενες περιπτώσεις 3, 4, 5 και 6, η ποσοστιαία αύξηση του συντελεστή λ παραμένει σχεδόν σταθερή, γεγονός που μεταφράζεται ως σταθερή τιμή του κρίσιμου συντελεστή φορτίου.

Από το σχήμα επίσης παρατηρείται η πολύ μεγάλη διαφορά μεγέθους ανάμεσα στις περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε $SR=0.25$ και $SR=0.50$. Μάλιστα η βελτίωση που επιτυγχάνεται για επιθέματα με $SR=0.50$ είναι σε πολλές περιπτώσεις τριπλάσια. Αντίθετα για $SR=1.00$ η αύξηση του κρίσιμου φορτίου λυγισμού δεν ακολουθεί τον ίδιο ρυθμό αλλά

φθίνει καθώς εμφανίζονται στην κατασκευή άλλα σημεία, τα οποία είναι ασταθή σε υψηλότερα φορτία. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι από μια τιμή του SR και πάνω, η περαιτέρω αύξηση της ακαμψίας του επιθέματος, εκτός από το ότι αυξάνει το κόστος του επιθέματος, αν και εξαλείφει το φαινόμενο του λυγισμού στα ελάσματα του καταστρώματος στα οποία έχει τοποθετηθεί το επίθεμα, οδηγεί στην εμφάνιση του λυγισμού σε άλλα σημεία της κατασκευής.

Εξετάζοντας τις περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε $SR=0.25$ και 0.50 προκύπτει το συμπέρασμα:

- Η τοποθέτηση των ινών σε μία διεύθυνση, πρέπει να γίνεται στην εγκάρσια διεύθυνση Y καθότι σε αυτήν επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με την διαμήκη διεύθυνση X.
- Η χρήση περισσότερων από δύο διευθύνσεων, αν και βελτιώνει τα αποτελέσματα δεν επιτυγχάνει τα βέλτιστα και συνεπώς θα πρέπει να αποφεύγεται για να μειωθεί η δυσκολία τοποθέτησης των επιθεμάτων.
- Τα βέλτιστα αποτελέσματα επιτυγχάνονται με την τοποθέτηση των ινών σε δύο διευθύνσεις οι οποίες σχηματίζουν γωνία 45° και -45° από το διαμήκη άξονα X του πλοίου. Οι διευθύνσεις αυτές συμπίπτουν με τις διαγωνίους του ελάσματος το οποίο υπόκεινται σε λυγισμό.
- Η αύξηση του SR από ένα σημείο και πάνω μπορεί να εξαλείφει το λυγισμό στο έλασμα που έχει τοποθετηθεί το επίθεμα ωστόσο η αστάθεια μεταφέρεται σε άλλα σημεία της κατασκευής.

6 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη χρήση επιθεμάτων από σύνθετα υλικά ως μέσο περιορισμού του φαινομένου λυγισμού στα ελάσματα των εγκάρσιων λωρίδων του καταστρώματος σε πλοία μεταφοράς χύδην φορτίων. Όπως παρουσιάστηκε πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο προκαλείται από τα θλιπτικά φορτία που δέχονται οι πλευρές του πλοίου λόγω της κρούσης των κυμάτων. Ο λυγισμός που εμφανίζεται αν και δεν είναι μεγάλος σε απόλυτη τιμή παραμόρφωσης, ωστόσο εμφανίζεται περιοδικά με αποτέλεσμα να επέρχεται αστοχία του υλικού λόγω κόπωσης.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται η βασική θεωρία του λυγισμού. Σκοπός είναι να τεθούν οι βάσεις για την κατανόηση του φαινομένου αλλά και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με τους τύπους των επιθεμάτων από σύνθετα υλικά αλλά και τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η τοποθέτηση αλλά και μια πιθανή αστοχία. Σκοπός των συγκεκριμένων παραγράφων ήταν να δημιουργηθεί μια συνοπτική εικόνα στον αναγνώστη σχετικά με τα διαθέσιμα υλικά και την τεχνολογία των σύνθετων υλικών.

Το επόμενο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση του προβλήματος. Αρχικά παρουσιάστηκε η φύση και τα αίτια του προβλήματος με παράλληλη παρουσίαση της διεθνής νομοθεσίας που αναφέρεται στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Για τη μελέτη του φαινομένου πραγματοποιήθηκε μελέτη πεπερασμένων στοιχείων με τη χρήση του λογισμικού Ansys. Η σχεδίαση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Design Modeller, το οποίο εργαλείο σχεδίασης του Ansys.

Ένα από τα πλέον σημαντικά σημεία της μελέτης είναι ο ορισμός των οριακών συνθηκών και των φορτίων που θα ασκούνται στο μοντέλο. Με τη βοήθεια των κανονισμών του IACS, υπολογίστηκε μια εκτίμηση του μεγέθους των φορτίων που θα ασκούνται στην κατασκευή. Σκοπός είναι να εφαρμοστούν στο ανεπτυγμένο μοντέλο όλα εκείνα τα φορτία τα οποία συμβάλουν στην εμφάνιση λυγισμού στο κατάστρωμα. Παρουσιάστηκαν συνεπώς αναλυτικά οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή των συγκεκριμένων φορτίων.

Σε επόμενη παράγραφο, παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μοντελοποίηση των επιθεμάτων. Στην ίδια παράγραφο, ορίστηκαν και οι περιπτώσεις που θα εξεταστούν και οι οποίες περιλαμβάνουν μεταβολή του πάχους του επιθέματος και του προσανατολισμού των ινών. Σκοπός της συγκεκριμένης παραμετροποίησης είναι να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά την επίδραση της διεύθυνσης των ινών στο επίθεμα, αλλά και της μεταβολής του πάχους ενός επιθέματος.

Το τελευταίο μέρος της εργασίας αφορά την επίλυση του προβλήματος, την εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Αρχικά πραγματοποιήθηκε επίλυση του προβλήματος χωρίς να έχει υπάρξει κάποια τοποθέτηση ενός επιθέματος. Ο λόγος ήταν να επιβεβαιωθεί ότι οι συγκεκριμένες οριακές συνθήκες που ορίστηκαν στο μοντέλο, αλλά και ο ίδιος ο σχεδιασμός του μοντέλου παρουσιάζει όντως λυγισμό στο έλασμα του καταστρώματος, όπως προβλέπει και η θεωρία. Με την επίλυση του προβλήματος χωρίς επίθεμα το αποτέλεσμα ήταν θετικό, παρουσιάζοντας λυγισμό, στα αναμενόμενα σημεία.

Σε επόμενο βήμα, ελέγχθηκε η ορθότητα του μοντέλου που αναπτύχθηκε. Ο τρόπος ελέγχου περιλάμβανε τη μείωση των φορτίων που ασκούνται στο μοντέλο κατά το ήμισυ. Γνωρίζοντας το συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού πριν τη μείωση των φορτίων και την τιμή του συντελεστή μετά τη μείωση του φορτίου, επαληθεύτηκε ότι η τιμή διπλασιάζεται. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς ενώ το κρίσιμο φορτίο λυγισμού παραμένει σταθερό, τα

φορτία μειώνονται κατά το ήμισυ, προκαλώντας έτσι τη μείωση του συντελεστή κρίσιμου φορτίου κατά 50%.

Παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του κρίσιμου συντελεστή λυγισμού που προέκυψε ήταν πολύ μικρές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο μοντέλο ασκήθηκαν περισσότερα φορτία από το κανονικό ενώ ταυτόχρονα αφαιρέθηκαν πολλές ενισχύσεις από το κατάστρωμα οι οποίες συμβάλλουν στην αποτροπή του φαινομένου του λυγισμού.

Στις επόμενες και τελευταίες παραγράφους πραγματοποιήθηκε η επίλυση του μοντέλου, ελέγχοντας κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν για τρία διαφορετικά πάχη επιθεμάτων. Εξετάζοντας τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι στην περίπτωση που η διεύθυνση των ινών ήταν μία, η τοποθέτηση των ινών στις 90° από το διαμήκη άξονα X του πλοίου, οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με την περίπτωση που το μονοδιευθυντικό επίθεμα τοποθετούνταν παράλληλα με τον άξονα των X . Αντίθετα η τοποθέτηση των ινών σε διεύθυνση 0° προς τον ίδιο άξονα δεν επέφερε τόσο καλά αποτελέσματα. Γενικά παρατηρήθηκε ότι η χρήση μιας διεύθυνσης για την τοποθέτηση των ινών είχε τα χειρότερα αποτελέσματα.

Στις περιπτώσεις που εξετάστηκε η τοποθέτηση δύο διευθύνσεων των ινών, προέκυψε ότι η τοποθέτηση των ινών σε γωνία 45° με το διαμήκη άξονα του πλοίου και κάθετων μεταξύ τους είχε καλύτερα αποτελέσματα από την τοποθέτηση των ινών με διευθύνσεις παράλληλες με τον εγκάρσιο και διαμήκη άξονα του πλοίου. Μάλιστα η τοποθέτηση στις δύο διευθύνσεις των 45° και -45° είχε τα καλύτερα αποτελέσματα από κάθε άλλη περίπτωση που εξετάστηκε και προτείνεται ως βέλτιστη λύση.

Η τοποθέτηση των ινών σε περισσότερες εκ των δύο διευθύνσεις, αν και επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα από τα μονοδιευθυντικά επιθέματα ωστόσο δεν ξεπερνά τις τιμές του συντελεστή λ που επιτυγχάνονται στην περίπτωση των δύο διευθύνσεων και συγκεκριμένα στην περίπτωση στην οποία οι ίνες τοποθετούνται σχηματίζοντας γωνία 45° με το διαμήκη άξονα των X . Η χρήση συνεπώς περισσότερων εκ των δύο διευθύνσεων σύμφωνα με τα αποτελέσματα δεν προτείνεται καθώς αυξάνει σημαντικά τη δυσκολία εναπόθεσης του επιθέματος χωρίς να επιτυγχάνει τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Ένα επιπρόσθετο σημείο που παρατηρήθηκε είναι η αναμενόμενη μεγάλη επίδραση του πάχους του επιθέματος. Με την αύξηση του πάχους επιτυγχάνεται και μεγάλη αύξηση του συντελεστή Stiffness Ratio. Όσο μεγαλύτερο το πάχος του επιθέματος τόσο μεγαλύτερο και το SR. Μάλιστα παρατηρήθηκε ότι σε πολύ υψηλές τιμές του SR, η υψηλή ακαμψία του ελάσματος του καταστρώματος, οδηγούσε στην εμφάνιση λυγισμού σε διαφορετικά σημεία του μοντέλου. Η αύξηση του SR από ένα σημείο και πάνω δε βελτιώνει το συντελεστή κρίσιμου φορτίου λυγισμού λόγω της εμφάνισης λυγισμού σε διαφορετικά σημεία του μοντέλου.

Εν κατακλείδι μπορεί να διατυπωθεί ότι το κρίσιμο φορτίου λυγισμού επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από το SR ειδικά για μικρές τιμές του $SR < 0.50$ ενώ για τιμές $SR > 0.50$ αν και η επίδραση του SR είναι θετική, είναι ωστόσο μικρότερη. Μάλιστα, θα πρέπει να αποφεύγεται από ένα σημείο και μετά γιατί οδηγεί την εμφάνιση λυγισμού σε άλλα σημεία του πλοίου τα οποία ενδεχομένως και να είναι πιο κρίσιμα για τη μηχανική αντοχή της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι αρκετά ενθαρρυντικά όσον αφορά την επιλογή επιθεμάτων ως λύση προβλημάτων λυγισμού σε ελάσματα καταστρώματος. Τα θετικά αποτελέσματα που προέκυψαν, σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος μια μετασκευής και το μικρό χρόνο που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια μετασκευή σε ένα ήδη υπάρχων πλοίο,

καθιστούν τη λύση των επιθεμάτων αρκετά βιώσιμη. Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων με την εφαρμογή των επιθεμάτων στην πράξη ενδεχομένως να οδηγήσει σε περαιτέρω μελέτες εφαρμογών στις οποίες τα σύνθετα υλικά θα μπορούσαν να βελτιώσουν ή και να αντιμετωπίσουν παραπλήσια προβλήματα.

7 Βιβλιογραφία

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (1990). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. New York: Wiley - Interscience .
- Ansys Inc. (2013). ANSYS Composite PrepPost User's Guide. Canonsburg.
- ANSYS Inc. (2014). Ansys Manual.
- Cripps, D. (n.d.). *Vinylester Resins*. Ανάκτηση από NET Composites: <http://www.netcomposites.com/guide/vinylester-resins/9>
- Echtermeyer, A. T. (2012). *Evaluation of current and new methods for monitoring crack growth in the patch-substrate bond*.
- Eyres, D. J. (2007). *Ship Construction*. Burlington,: Butterworth-Heinemann.
- Getz, J. R. (1971). *Longitudinal Strength of the Hull Girder*. University of Michigan - College of Engineering, Naval Architecture and Marine Engineering, Michigan.
- Ghavami, K. A., & Reza Khedmati, M. A. (2012). Nonlinear Large Deflection Analysis of Stiffened Plates. Στο *Finite Element Analysis - Applications in Mechanical Engineering*.
- Grondin, G. Y., Elwi, A. E., & Cheng, J. R. (1998). *Buckling of stiffened steel plates - a parametric study*. ELSEVIER.
- Hopkinson, J. J., Gupta, M., & Sefcsik, P. (2002). *Compensation for Openings in Primary Ship Structure*. U.S. Department of Commerce. Springfield: National Technical Information Service.
- Hughes, O. F. (1988). *Ship Structural Design, A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach*. New Jersey: The Society of Naval Archetects and Marine Engineers.
- IACS. (2014). *Common Structural Rules for Bulk Carriers*. IMO.
- IACS. (1997). *Guidance and Information on Bulk Cargo Loading and Discharging to Reduce the Likelihood of Over-stressing the Hull Structure*. International Association of Classification Societies.
- IACS. (2007). *Guidelines for Surveys, Assessment and Repair of Hull Structure*. IACS.
- Karatzas, V. A., & Tsouvalis, N. G. (2010). *Composite Materials Characterization Tests*. Athens: NTUA.
- Katalinic, M., Frank, D., Klanc, A., Risso, G., Rodriguez, E., Chryssanthopoulos, M. K., και συν. *Report with the parametric study results*.
- Kaw, K. A. (2006). *Mechanics of Composite Materials*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Leissa, A. W. (1985). *Buckling of Laminated Composite Plates and Shell Panels*. Ohio: Air Force Wright Aeronautical Laboratories.
- Novoselac, S., Ergic, T., & Balicevic, P. (2012). Linear and nonlinear buckling and post buckling analysis of a bar with the influence of imperfections. *Portal of Scientific Journals of Croatia* , 19 (3).
- Okumoto, Y., Takeda, Y., Mano, M., & Okada, T. (2009). *Design of Ship Hull Structures - A practical guide for Engineers*. Berlin: Springer.
- Shama, M. (2013). *Buckling of Ship Structure*. Alexandria: Springer.
- Structural Stability Research Council. (2009). *Plate Stability Guide*. SSRC.
- Tagart, R. (1980). *Ship Design and Construction*. (R. Taggart, Επιμ.) The Society of Naval Architects and Marine Engineers.
- Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (1951). *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill Book Company.

Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1989). *Theory of plates and Shells*. McGraw-Hill Book Company.

Ventsel, E., & Krauthammer, T. (2001). *Thin Plates and Shells - Theory, Analysis and Applications*. New York: Marcel Dekker, Inc.

Γιάννου, Μ. (2012). *Σύγχρονες Εξελίξεις στην Τεχνολογία των Σύνθετων Υλικών*. Αθήνα: ΕΜΠ.

Καρύδης, Π. (2001). *Υπολογιστικές μέθοδοι και εφαρμογές σε λεπτότοιχες κατασκευές*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σαμουηλίδης, Ε. (2010). *Αντοχή Πλοίου*. Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ.

Σημειώσεις μαθήματος- Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών. (2012, 11 22). Ανάκτηση από Εκπαιδευτικό Υλικό για το μάθημα Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών: <http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/>

Φωτόπουλος, Ν. (2010). *Μελέτη μετωπικών συγκολήσεων ναυπηγικού χάλυβα DH36 Με τις μεθόδους GMAW και FCAW*. Αθήνα: ΕΜΠ.