

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΣΚΑΦΗ: ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ, ΧΩΡΟΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΣΧΕΤΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Διπλωματική Εργασία

Του

Κρασσά Κωνσταντίνου

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

Αθήνα, 16/03/2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μέρος του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών (Σ.Ν.Μ.Μ.) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π.). Αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η εξέταση της λειτουργίας σύγχρονων ναυπηγείων πλαστικών σκαφών. Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας εξετάστηκαν οι χώροι, υποδομές, καθώς και οι παραγωγικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σκαφών από FRP. Επιπλέον, κατασκευάστηκαν δοκίμια, με την βοήθεια του ναυπηγείου της Technohull, των οποίων εξετάστηκε η αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη. Σημειώνεται πως τα δοκίμια αυτά αναπαριστούν ρεαλιστική κατάσταση ταχύπλοου σκάφους. Τέλος τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τις απαιτήσεις των νηογνομόνων. Η παρούσα μελέτη παρουσιάζει αναλυτικά την όλη διαδικασία, αρχής γενομένης, από την κατασκευή των δοκιμίων, τις πειραματικές δοκιμές εφελκυσμού και κάμψης, τα συμπεράσματα που εξάγονται και τέλος, την σύγκριση τους με τις απαιτήσεις των Νηογνομόνων.

Τόσο η προεργασία όσο και η προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας έλαβαν χώρα στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (Ε.Ν.Τ.) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω θερμά το δάσκαλο και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή της Σ.Ν.Μ.Μ. κ. Νικόλαο Τσούβαλη, του οποίου η καθοδήγηση και οι πολύτιμες συμβουλές αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα ως προς την επίτευξη και ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Επίσης, ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω να εκφράσω στο προσωπικό του Ε.Ν.Τ. και συγκεκριμένα στους κυρίους Θανάση Μαρκουλή και Χάρη Ξάνθη για τη σημαντική συμβολή τους στην όλη διαδικασία, από την κατασκευή των δοκιμίων μέχρι και τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών. Η συνεργασία όλων των πιο πάνω αποτέλεσε για μένα ξεχωριστή εμπειρία και καταλυτικό παράγοντα περάτωσης της διπλωματικής μου μελέτης.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννου καθώς και όλο το προσωπικό του υπερσύγχρονου ναυπηγείου της Technohull των οποίων η βοήθεια και καθοδήγηση ήταν καθοριστικής σημασίας για την περάτωση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1.....	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Γενικές πληροφορίες για τα σύνθετα υλικά	7
1.2.1 Γενικά περί ινωδών σύνθετων υλικών	7
1.2.2 Πολύστρωτα.....	12
1.2.3 Κατασκευές Sandwich	17
1.2.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα Σύνθετων Υλικών	20
1.3 Περιγραφή Ναυπηγείου	21
1.3.1 Αποθήκη υλικών	22
1.3.2 Χώρος κατασκευής προτύπων και καλουπιών.....	24
1.3.3 Χώρος προ-κοπής υφασμάτων ενισχυτικών ινών	28
1.3.4 Ξυλουργείο.....	28
1.3.5 Χώροι βαφής gel coat.....	29
1.3.6 Χώροι επιστρώσεων (lamination)	32
1.3.7 Χώρος κοπών (τριμαρίσματος)	34
1.3.8 Χώρος συναρμολόγησης ημιέτοιμων.....	35
1.3.9 Φινιριστήριο	36
1.3.10 Κοπτικά εργαλεία.....	36
1.4 Παραγωγικές διαδικασίες.....	45
1.4.1 Επίστρωση με το χέρι (hand lay- up)	45
1.4.3 RTM (Resign Transfer Moulding)	48
1.4.4 Vacuum infusion	51
1.4.5 Παράγοντες επίδρασης.....	54
1.5 Ποιοτικός έλεγχος	65
Κεφάλαιο 2.....	70
2.1 Εισαγωγή στην πειραματική διαδικασία.....	70
2.2 Κατασκευή δοκιμών.....	70
2.2.1 Παραγωγική διαδικασία	70
2.2.2 Πρότυπα δοκιμών.....	76
2.3 Πειραματική διαδικασία.....	88

Περιεχόμενα

2.3.1 Περιεκτικότητα ιών κατά βάρος.....	88
2.3.2 Μέτρηση πυκνότητας δοκιμίων	90
2.3.3 Πειραματική δοκιμή εφελκυσμού	93
2.3.4 Πειραματική δοκιμή κάμψης	105
Κεφάλαιο 3.....	120
3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με απαιτήσεις Νηογνομόνων	120
3.1.1 Σκοπός εδαφίου.....	120
3.1.2 Εκτίμηση πάχους στρώσεων	120
3.1.3 Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων	124
3.2 Κατασκευαστικές Απαιτήσεις.....	130
3.2.1 Ελάχιστα πάχη.....	131
3.2.2 Δομική Διάταξη.....	155
3.3 Τελικά συμπεράσματα/ Ανακεφαλαίωση.....	160
Βιβλιογραφία	162
DATA SHEETS	165

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή στην κατασκευή πλαστικών σκαφών από FRP

1.1 Εισαγωγή

Η αγορά ταχύπλων σκαφών φτιαγμένων από σύνθετα υλικά αναπτύσσεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς, καθώς η ζήτηση για μεγαλύτερα, γρηγορότερα και ελαφρύτερα σκάφη ολοένα και αυξάνεται. Πλέον μεγάλα σκάφη είναι ικανά να φτάνουν πολύ υψηλές επιδόσεις χάρη στην συνεχή ανάπτυξη της τεχνολογίας των υλικών κατασκευής και του σχεδιασμού, ενώ παράλληλα διαθέτουν πολυτελείς εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους. Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία 30 χρόνια η κατασκευή σκαφών που ξεπερνούν τα 30 μέτρα έχει αυξηθεί ραγδαία ενώ τα τελευταία 5 χρόνια οι παραγγελίες για σκάφη μεγαλύτερα των 50 μέτρων έχουν υπερδιπλασιαστεί. Παρόλο που η πλειοψηφία των σκαφών αφορούν μηχανοκίνητα σκάφη, οι παραγγελίες για ιστιοπλοϊκά έχουν επίσης διπλασιαστεί. Τέτοια σκάφη κατασκευάζονται από χάλυβα, αλουμίνιο και/ή σύνθετα υλικά με τα τελευταία να προσφέρουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα όταν η επίδοση είναι μέρος των σχεδιαστικών στόχων. Στο σχήμα 1.1 φαίνεται ιστιοπλοϊκό φτιαγμένο εξ ολοκλήρου από σύνθετα υλικά.



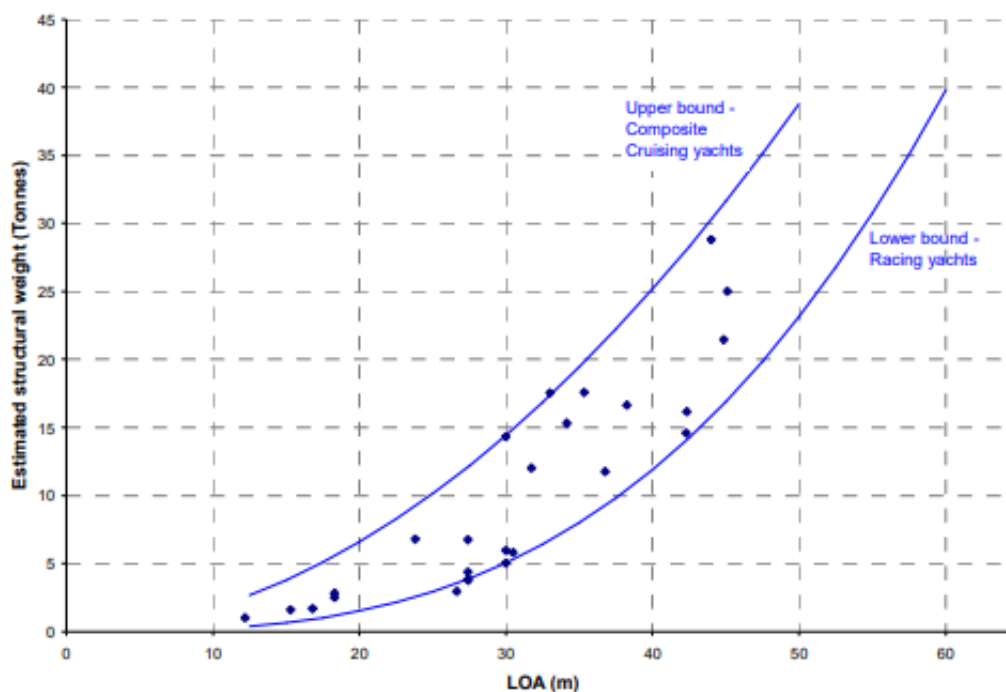
Σχήμα 1.1 Wallygator 2 (1994), 32 μέτρων μικρού εκτοπίσματος, από FRP

Τα ινώδη σύνθετα υλικά ή ενισχυμένα με ίνες πλαστικά (Fibre Reinforced Plastics, FRP's) πλεονεκτούν σημαντικά έναντι των συμβατικών υλικών (χάλυβα, αλουμίνιο, ξύλο) λόγω του αξιοσημείωτα χαμηλού ειδικού βάρους τους, χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της ειδικής αντοχής και της ειδικής δυσκαμψίας, ενώ παράλληλα, παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με τις σχετικά εύκολες διαδικασίες παραγωγής και το χαμηλό κόστος συντήρησης, έχουν οδηγήσει στη διαρκώς αυξανόμενη χρήση των υλικών αυτών σε πλήθος θαλάσσιων, και όχι μόνο, εφαρμογών. Το ναρκαλιευτικό του Σχήματος 1.2 είναι κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από FRP.



Σχήμα 1.2 Ναρκαλιευτικό του βρετανικού ναυτικού κατασκευασμένο από FRP.

Σύμφωνα με τον ναυπηγό και αρχιτέκτονα E Dubois [1], ένα ιστιοπλοϊκό σκάφος 40 μέτρων κατασκευασμένο από αλουμίνιο θα έχει κατασκευαστικό βάρος περίπου 45 τόνους ενώ η ίδια κατασκευή με FRP θα ζυγίζει περίπου 18 με 25 τόνους. Στο σχήμα 1.3 επαληθεύεται η εκτίμηση αυτή για διάφορα σκάφη από FRP ανάλογα με τους διαφορετικούς στόχους κατασκευής τους.



Σχήμα 1.3 σχέση βάρους - LOA

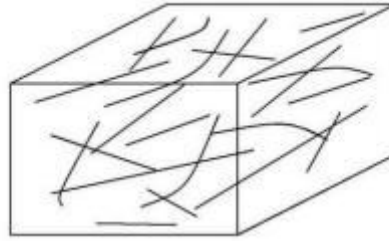
Ο σχεδιασμός και η παραγωγή, τόσο σκαφών πλαναρίσματος όσο και εκτοπίσματος, από σύνθετα υλικά είναι μια πολύπλοκη διαδικασία. Όσο αυξάνεται το μέγεθος και η επίδοση,

τόσο πιο δύσκολη είναι η πρόβλεψη των φορτίων που θα πρέπει να παραλαμβάνουν τα δομικά στοιχεία του σκάφους. Γεννιούνται λοιπόν μερικά πολύ σημαντικά ερωτήματα. Τι είδους πολύστρωτα και υλικά πρέπει να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις ανάγκες κάθε διαφορετικού δομικού στοιχείου; Πώς οι κατασκευές των καταστρωμάτων μπορούν να αντέξουν τα μεγάλα φορτία λόγω κάμψης, εξαιτίας της επίδρασης κυματισμών (hogging & sagging) και παράλληλα να πληρούν τις αισθητικές απαιτήσεις του αρχιτέκτονα; Συνεπώς η εκτεταμένη πλέον χρήση των ινωδών σύνθετων υλικών απαιτεί πολύ καλή γνώση της συμπεριφοράς τους υπό ένα ευρύ φάσμα συνθηκών. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται ήδη στη ναυπηγική για την εξ' ολοκλήρου κατασκευή σκαφών, ήτοι κατασκευών που συνήθως λειτουργούν υπό δυσμενείς συνθήκες. Οι καταπονήσεις που υφίσταται μία τέτοια κατασκευή είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε αστοχία του υλικού της, γεγονός που εν γένει επιδρά στη συμπεριφορά της. Ως εκ τούτου, αλλά και δεδομένων των νέων τρόπων αστοχίας που εισάγει η χρήση των FRP's, η μελέτη της επίδρασης αυτής καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική.

1.2 Γενικές πληροφορίες για τα σύνθετα υλικά

1.2.1 Γενικά περί ινωδών σύνθετων υλικών

Τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι μια υποκατηγορία των σύνθετων υλικών, τα οποία είναι υλικά των οποίων τα συστατικά μέρη διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους όσον αφορά τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, αποτελούνται από ένα υλικό που ονομάζεται μήτρα, η οποία περιέχει ίνες από διαφορετικό υλικό τοποθετημένες σε διαφορετικά μοτίβα και κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Οι ίνες είναι αυτές που ουσιαστικά υπαγορεύουν τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού λόγω του τρόπου κατασκευής τους, ο οποίος τα καθιστά σημαντικά ισχυρότερα και πιο δύσκαμπτα από την αρχική τους ουσία σε άλλη μορφή του σύνθετου υλικού. Αντίθετα, η λειτουργία της ρητίνης είναι να προστατεύει τις ίνες από τα στοιχεία του περιβάλλοντος και τη φθορά, να τις διατηρεί στη θέση τους και να τις στηρίζει έναντι θλιπτικών φορτίων, να παρέχει ακαμψία σε περίπτωση που μια ίνα σπάσει μόνη της και να μεταφέρει τις τάσεις μεταξύ των ινών. Σε περίπτωση θραύσης μιας ίνας, αυτή η τελευταία λειτουργία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη. Το φορτίο μεταφέρεται στη συνέχεια από τη μία πλευρά της σπασμένης ίνας στην άλλη μέσω της μήτρας, καθώς και στις κοντινές ίνες. Οι διατμητικές τάσεις που έχουν δημιουργηθεί στη ρητίνη είναι ο μηχανισμός μεταφοράς του φορτίου. Η ρητίνη καθορίζει σημαντικά τη διαδικασία με την οποία κατασκευάζεται το σύνθετο υλικό, αλλά έχει μικρή επίδραση στην ικανότητα μεταφοράς φορτίου ενός σύνθετου υλικού.



Σχήμα 1.4 Σχηματική αναπαράσταση ενός ινώδους σύνθετου υλικού

Οι μήτρες για τα σύνθετα υλικά ινών αποτελούνται συνήθως από θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και θερμοπλαστικές. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται οι πολυεστερικές, οι εποξειδικές, οι βινυλεστερικές και οι φαινολικές ρητίνες. Λόγω της φτηνής τιμής τους, της απλότητας της χρήσης τους και της ευνοϊκής συμπεριφοράς τους στο θαλάσσιο περιβάλλον, οι πρώτες, και ιδιαίτερα οι ακόρεστες ρητίνες, είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά σε ναυπηγικές εφαρμογές. Σύμφωνα με τον Πίνακα 1.1 [2], τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ρητινών περιλαμβάνουν το ειδικό βάρος, το μέτρο ελαστικότητας του Young, τον λόγο Poisson, την αντοχή σε εφελκυσμό, την παραμόρφωση σε θραύση και την αντοχή σε θλίψη. Οι τιμές αντικατοπτρίζουν τις τιμές που ίσχυαν το 1995. Δεδομένου ότι οι μηχανικές ιδιότητες των ρητινών είναι μάλλον φτωχές, απαιτείται ενίσχυση. Παρόλα αυτά, είναι αρκετά ανθεκτικές σε διαβρωτικές συνθήκες και υψηλές θερμοκρασίες. Οι κανόνες όλων των μεγάλων προτύπων καθορίζουν τα πρότυπα (ISO, ASTM) που πρέπει να χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των ιδιοτήτων των ρητινών προκειμένου να θεωρούνται αποδεκτές, καθώς και τις αντίστοιχες ελάχιστες απαιτούμενες τιμές αυτών των χαρακτηριστικών.

Ο Πίνακας 1.1 εμφανίζει μερικές από τις περισσότερο σημαντικές ιδιότητες των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών ενώ ο πίνακας 1.2 εμφανίζει συνοπτικά τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των τριών βασικών ειδών ρητινών που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγικές εφαρμογές, των πολυεστερικών, των βινυλεστερικών και των εποξικών.

Πίνακας 1.1 : Ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών

Ρητίνη	γ (g/cm ³)	E (GPa)	ν	σ_T (MPa)	ϵ_T (%)	σ_C (MPa)	Σκληρότητα Barcol	Συρρίκνωση (%)
Ορθοφθαλκή Πολυεστερική	1.23	4.1	0.36	48.3	1.0	130	42	8.2
Ισοφθαλκή Πολυεστερική	1.21	3.9	0.36	71.1	2.0	130	46	7.5
Βινυλεστερική	1.12	3.4	–	76-83	4.0-5.0	120	35	–
Εποξική	1.20	3.7	0.37	48-76	5.0-6.0	130	86	0.3

Πίνακας 1.2: Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα ρητινών

Ρητίνη	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Πολυεστερικές	<ul style="list-style-type: none"> • Εύκολες στη χρήση • Το χαμηλότερο κόστος από τις υπάρχουσες ρητίνες 	<ul style="list-style-type: none"> • Μέτριες μηχανικές ιδιότητες • Μεγάλες εκπομπές στυρενίου σε ανοιχτά καλούπια • Σημαντική συρρίκνωση μετά τον πολυμερισμό • Περιορισμένο εύρος gel time
Βινυλεστερικές	<ul style="list-style-type: none"> • Μεγάλη αντοχή σε χημικά και σε περιβαλλοντικές επιδράσεις • Καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις πολυεστερικές 	<ul style="list-style-type: none"> • Απαιτείται μετα-πολυμερισμός για καλύτερες μηχανικές ιδιότητες • Υψηλή περιεκτικότητα σε στυρένιο • Πιο ακριβές από τις πολυεστερικές • Σημαντική συρρίκνωση μετά τον πολυμερισμό
Εποξικές	<ul style="list-style-type: none"> • Υψηλές μηχανικές και θερμικές ιδιότητες • Πολύ καλή αντίσταση στο νερό • Μεγάλοι χρόνοι gel time • Ικανοποιητική συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες (140°C) • Χαμηλή συρρίκνωση μετά τον πολυμερισμό 	<ul style="list-style-type: none"> • Πιο ακριβές από τις βινυλεστερικές • Απαιτείται προσοχή κατά την ανάμιξη της ρητίνης και του σκληρυντή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το υλικό της μήτρας ενισχύεται με ίνες από διαφορετική ουσία, δηλαδή ενισχύσεις των οποίων το μήκος είναι σημαντικά μεγαλύτερο από τις άλλες διαστάσεις τους. Οι ίνες έχουν ιδιαίτερα υψηλή αντοχή και δυσκαμψία κατά τη διεύθυνση του μήκους τους λόγω της ευθυγράμμισης της κρυσταλλικής δομής τους κατά τη διαδικασία κατασκευής. Παρά το γεγονός ότι μπορούν να υποστηρίξουν μόνο εφελκυστικά φορτία, έχουν σημαντική επίδραση στην ακαμψία και την αντοχή του ολοκληρωμένου υλικού σε όλες τις κατευθύνσεις, συμπεριλαμβανομένων του εφελκυσμού, της θλίψης, της κάμψης και της διάτμησης. Λόγω της προσιτής τιμής τους και της εξαιρετικής αντοχής τους, οι ίνες γυαλιού είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες στη ναυπηγική βιομηχανία, ενώ η χρήση των ινών άνθρακα και αραμιδίου αυξάνεται. Στον πίνακα 1.3 (α) & (β) παρατίθενται ορισμένα από τα τυπικά χαρακτηριστικά αυτών των τύπων [2].

Πίνακας 1.3 (α): ιδιότητες ενισχυτικών ινών

Είδος Ίνας	γ (g/cm ³)	E (GPa)	σ_T (MPa)	ϵ_T (%)
Γυαλί-E	2.55	72	1500-3000	1.8-3.2
Γυαλί-S2	2.50	86	3500	4.0
Άνθρακας	1.8-2.1	220-724	1500-4800	0.7-1.7
Άνθρακας (T300)	1.76	230	3530	1.5
Αραμιδικές	1.44-1.47	60-180	2800-4100	1.9-4.0
Βορίου	2.57	400	3600	
Al ₂ O ₃	3.95	379	1380	
SiC	3.00	480	3900	
Βασάλτης	2.67	85	3000	
Λινάρι	1.40	60-80	800-1500	1.2-1.6

Πίνακας 1.3 (β): ιδιότητες ενισχυτικών ινών

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

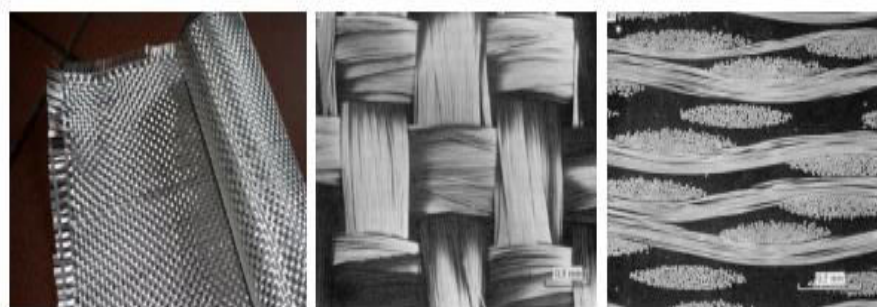
Το ειδικό βάρος (γ), το μέτρο ελαστικότητας Young (E), ο λόγος Poisson (ν), η αντοχή σε εφελκυσμό (σ), η επιμήκυνση σε θραύση σε εφελκυσμό (ϵ), ο συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής (α) και οι τιμές κόστους, όπως προσδιορίστηκαν το 1995, είναι οι μηχανικές παράμετροι των ινών ενίσχυσης που παρατίθενται στον πίνακα 1.3 (β).

Ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, η ενίσχυση της μήτρας γίνεται με διάφορους τύπους διάταξης των ινών. Οι βασικές μορφές διάθεσής τους στο εμπόριο είναι το υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM), οι πλεξίδες ινών (rovings), το υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR), τα πεπλεγμένα υφάσματα (woven fabrics, clothes) και τα μονοαξονικά υφάσματα (Uni - Directional rovings, UD). Το υαλοπίλημα είναι ένα «χαλαρό» ύφασμα τυχαίου προσανατολισμού που κατασκευάζεται από κοντές ίνες, συνδεδεμένες μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός ειδικού συνδετικού υλικού. Αντίθετα, τα μονοαξονικά υφάσματα προκύπτουν από την παράλληλη σύνδεση πολλών μακριών ινών, προσανατολισμένων σε μία διεύθυνση. Οι πλεξίδες αποτελούνται από περιορισμένο αριθμό παράλληλα συνδεδεμένων μακριών ινών και χρησιμοποιούνται ως έχουν ή συνηθέστερα, πλέκονται κάθετα μεταξύ τους δίνοντας ένα «τραχύ και χοντροκομμένο» ύφασμα (υαλοϋφασμα). Τα υαλοϋφάσματα

διακρίνονται σε ισοσταθμισμένα (balanced) και μη, ανάλογα με τον αριθμό των ινών στις δύο διευθύνσεις πλέξης. Όταν ο αριθμός είναι περίπου ίδιος, τα υαλοϋφάσματα καλούνται ισοσταθμισμένα. Τέλος, η πλέξη με απλές ίνες που έχουν υποστεί περιστροφή έχει ως αποτέλεσμα πεπλεγμένα υφάσματα ή υφάσματα «πυκνής πλέξης». Ορισμένοι τύποι υφασμάτων φαίνονται στα Σχήματα 1.5 έως 1.9



Σχήμα 1.5 : Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM).



Σχήμα 1.6 : Υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR).

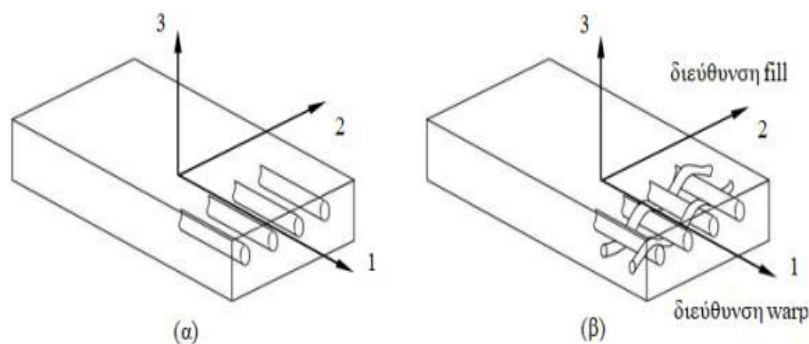


Σχήμα 1.7 : Υφάσματα πυκνής πλέξης. Ίνες γυαλιού (αριστερά και μέσον), ίνες άνθρακα (δεξιά)

Η στρώση (lamina), η οποία είναι μια επίπεδη δομή ινών σε μια μήτρα, είναι το θεμελιώδες τμήμα των σύνθετων υλικών ινών. Οποιαδήποτε από τις προαναφερθείσες διατάξεις ινών είναι δυνατή. Στο Σχήμα 1.8 παρουσιάζονται δύο κοινές στρώσεις, η μια μονοαξονική και μια με υαλοϋφασμα. Κάθε στρώση έχει μια σειρά από πρωταρχικούς άξονες (αριθμημένους 1, 2 και 3) που διατρέχουν παράλληλα ή κάθετα προς τις ίνες. Οι άξονες 1 και 2 είναι στο επίπεδο της στρώσης, ενώ ο άξονας 3 είναι κάθετος. Η κατεύθυνση με τις υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες είναι επίσης συνήθως παράλληλη προς τον άξονα 1 και ο άξονας 2 είναι κάθετος σε αυτόν. Ο άξονας 1 σε ένα μονοαξονικό στρώμα είναι παράλληλος προς τις ίνες, όπως φαίνεται στην ίδια εικόνα.

Στην περίπτωση υαλοϋφάσματος, συμπίπτει με τη λεγόμενη warp διεύθυνση, την παράλληλη στο μήκος του ρολού ενίσχυσης, ενώ η κάθετη σε αυτήν καλείται fill. Επίσης, είναι προφανές ότι οι κύριοι άξονες μίας στρώσης υαλοπλήματος μπορούν να έχουν οποιαδήποτε διεύθυνση.

Το σύστημα κύριων αξόνων ενός στρώματος ενδέχεται να μην ταιριάζει με τους γεωμετρικούς του άξονες. Έτσι, ο άξονας 1 μπορεί να σχηματίζει γωνία με τον άξονα x, η οποία είναι θετική αριστερόστροφη. Κατά τη φόρτιση της στρώσης, ο προσανατολισμός των κύριων αξόνων του στρώματος είναι ιδιαίτερα κρίσιμος. Μια φόρτιση με κύριο άξονα υποδηλώνει ορθοτροπική συμπεριφορά, που σημαίνει ότι το μέγεθος της παραμόρφωσης εξαρτάται από την κατεύθυνση της φόρτισης. Αντίθετα, όταν το στρώμα φορτίζεται μη παράλληλα προς έναν από τους κύριους άξονές του, παρουσιάζει ανισοτροπικό χαρακτήρα, δηλαδή, εκτός από τη μεταβολή του εύρους της παραμόρφωσής του συναρτήσει της διεύθυνσης, παρατηρούνται και συζεύξεις διάτασης-διάτμησης και κάμψης-στρέψης. Ως εκ τούτου, μια αποφασιστική πτυχή είναι ο προσανατολισμός των στρώσεων του πολύστρωτου..

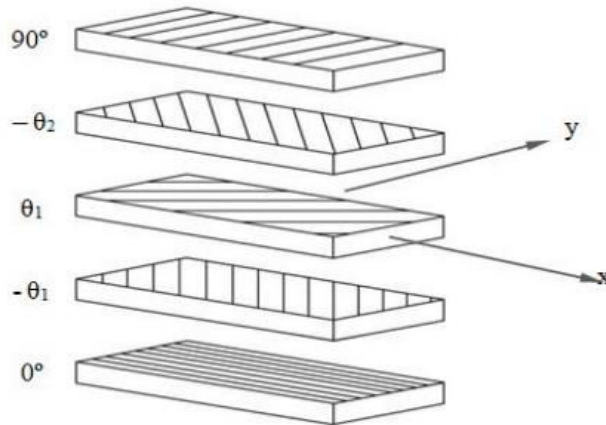


Σχήμα 1.8 : Σχηματική αναπαράσταση στρώσεων με (α) μονοαξονικές και (β) πεπλεγμένες ίνες (υαλοϋφασμα).

1.2.2 Πολύστρωτα

Η χρήση των ινωδών σύνθετων υλικών προσφέρει ένα ευρύ φάσμα επιλογών όσον αφορά το υλικό μίας κατασκευής. Το φάσμα αυτό διευρύνεται με την κατασκευή πολύστρωτων (laminates), δηλαδή στοιβάδων επάλληλων διαφορετικών στρώσεων από FRP's οι οποίες

κολλιούνται μεταξύ τους με το υλικό της μήτρας που υπάρχει σε καθεμία από αυτές. Η διαφορετικότητα των στρώσεων συνίσταται συνήθως σε διαφορετικούς τρόπους ενίσχυσεων (τύπος διάταξης των ινών, επιφανειακό βάρος ενίσχυσης, προσανατολισμός ινών) παρά σε διαφορετικά υλικά (ινών ή και μήτρας). Στην πράξη, συνηθίζεται η κατασκευή πολύστρωτων από στρώσεις ίδιων ιδιοτήτων και παχών (κανονικά πολύστρωτα), αλλά διαφορετικών προσανατολισμών των ινών τους τόσο μεταξύ των στρώσεων όσο και σε σχέση με τους γεωμετρικούς άξονες του πολύστρωτου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.9.

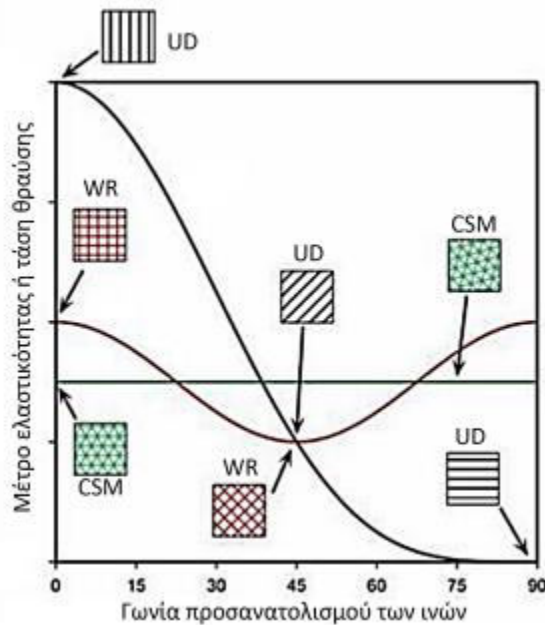


Σχήμα 1.9 : Ανεπτυγμένη όψη ενός πολύστρωτου με στρώσεις διαφορετικών προσανατολισμών.

Τα πολύστρωτα διακρίνονται βάσει της διεύθυνσης των ινών των στρώσεών τους σε εκείνα με διασταυρούμενες (cross – ply) και εκείνα με διαγώνιες στρώσεις (angle - ply). Στην πρώτη περίπτωση, οι ίνες των στρώσεων ευθυγραμμίζονται με τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου, ενώ στη δεύτερη, μία τουλάχιστον στρώση δεν ικανοποιεί τη συνθήκη αυτή. Το πολύστρωτο του Σχήματος 1.9 έχει διαγώνιες στρώσεις. Επιπρόσθετα, ένα πολύστρωτο είναι συμμετρικό όταν για κάθε στρώση στο μισό πάχος του υπάρχει στο άλλο μισό πάχος μία άλλη, συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο στρώση, ίδιου υλικού και προσανατολισμού των ινών. Όταν όμως τα πρόσημα της γωνίας προσανατολισμού σε κάθε ζεύγος συμμετρικών στρώσεων είναι αντίθετα, τότε είναι αντισυμμετρικό. Τα πολύστρωτα των παραπάνω τύπων είναι εν γένει ανισοτροπικά, αλλά με αύξηση του αριθμού των στρώσεών τους (μεγαλύτερου από περίπου οκτώ) τείνουν να αποκτήσουν ορθοτροπικό χαρακτήρα [2].

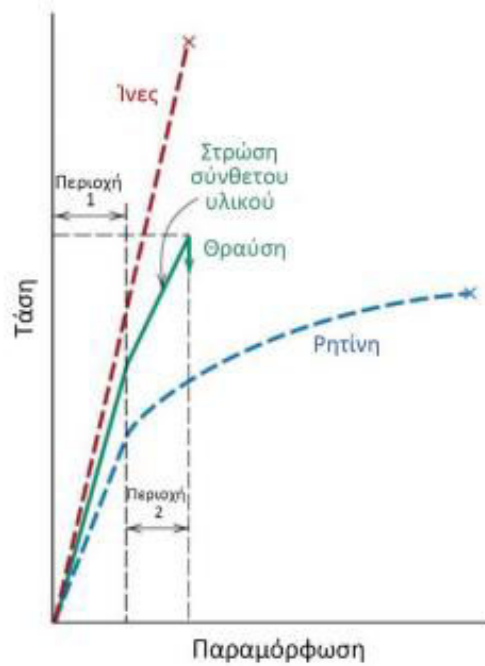
Ο κύριος σκοπός της επίστρωσης επάλληλων στρώσεων είναι η ρύθμιση των αντοχών και των δυσκαμψιών στις διάφορες διευθύνσεις, έτσι ώστε να συμπέσουν με τις διευθύνσεις των φορτίων ενός συγκεκριμένου κατασκευαστικού στοιχείου. Τα πολύστρωτα είναι τα πλέον κατάλληλα για το σκοπό αυτό, αφού οι κύριες διευθύνσεις υλικού κάθε στρώσης μπορούν να προσανατολιστούν ανάλογα με τις ανάγκες. Σαν παράδειγμα, σε ένα πολύστρωτο δέκα μονοαξονικών στρώσεων, έξι από τις στρώσεις μπορούν να προσανατολιστούν προς μια διεύθυνση και οι υπόλοιπες τέσσερις σε γωνία 90° ως προς τη διεύθυνση αυτή. Η αντοχή και η δυσκαμψία σε εφελκυσμό του τελικού πολύστρωτου θα είναι έτσι στη διεύθυνση των έξι στρώσεων περίπου 50% μεγαλύτερη απ’ ότι στην κάθετη προς αυτήν διεύθυνση, ενώ ο λόγος των δυσκαμψιών σε εφελκυσμό στις δύο διευθύνσεις θα είναι περίπου 6:4. Η τιμή όμως του

λόγου των δυσκαμψιών σε κάμψη δεν μπορεί να οριστεί χωρίς να γνωρίζουμε την ακολουθία των στρώσεων, τη σειρά δηλ. με την οποία έγινε η επίστρωσή τους.



Σχήμα 1.10: Ποιοτική μεταβολή της δυσκαμψίας ή της αντοχής συναρτήσει της γωνίας προσανατολισμού των ινών.

Ένα σημαντικό πρόβλημα των πολύστρωτων είναι οι διατμητικές τάσεις μεταξύ των στρώσεων. Οι τάσεις αυτές δημιουργούνται λόγω της τάσης κάθε στρώσης να παραμορφωθεί ανεξάρτητα από τις άλλες, επειδή στη γενική περίπτωση έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (οφειλόμενες σε διαφορετικούς προσανατολισμούς ή σε διαφορετικά υλικά). Οι διατμητικές αυτές τάσεις γίνονται μέγιστες στα άκρα των πολύστρωτων και μπορούν να προκαλέσουν αποχωρισμό των στρώσεων (delamination) στις περιοχές αυτές. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.11, οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων των ενισχυτικών ινών παρουσιάζουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά. Αντίθετα, οι συνήθεις ρητίνες παρουσιάζουν ιξωδοελαστική (viscoelastic) και μερικές φορές ιξωδοπλαστική (viscoplastic) συμπεριφορά, που σημαίνει ότι οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων εξαρτώνται και από το χρόνο, δηλαδή από το ρυθμό επιβολής του φορτίου (πολύ αργός ρυθμός = ερπυσμός). Αφού το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής και της δυσκαμψίας μιας στρώσης παρέχεται από τις ίνες, οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων μιας στρώσης είναι συνήθως σχεδόν γραμμικά ελαστικές. Μια τέτοια σχέση δείχνει η πράσινη καμπύλη στο Σχήμα 1.11 για μια στρώση σύνθετου υλικού με φόρτιση στη διεύθυνση των ινών. Η περιοχή 1 αντιστοιχεί στο τμήμα όπου τόσο η απόκριση της ρητίνης όσο και των ινών είναι γραμμική και επομένως και η απόκριση της στρώσης είναι γραμμική. Η περιοχή 2 αντιστοιχεί στο τμήμα όπου η απόκριση της ρητίνης έχει περάσει στη μη γραμμικότητα και επομένως αλλάζει κάπως η κλίση της καμπύλης της απόκρισης της στρώσης.



Σχήμα 1.11: Σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων για ίνες, ρητίνη και σύνθετο υλικό.

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

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1.5, τα πολύστρωτα από FRP's χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας του Young, γεγονός που λειτουργεί άλλοτε ως πλεονέκτημα και άλλοτε ως μειονέκτημα. Η μικρή δυσκαμψία τους ικανοποιεί τις υψηλές απαιτήσεις απορρόφησης ενέργειας σε μία κατασκευή, ενώ δεν εξυπηρετεί σε περιπτώσεις όπου επιτρέπονται μικρές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα, τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν πλαστική περιοχή, άρα και ολκιμότητα, με αποτέλεσμα η θραύση τους να επέρχεται ουσιαστικά χωρίς προειδοποίηση. Επίσης, μειονεκτήματα των πολύστρωτων είναι η δυσκολία και η μεγάλη διάρκεια της επιθεώρησής τους λόγω των μη σταθερών συνθηκών κατασκευής, η πολυπλοκότητα και οι αυξημένες απαιτήσεις των μεθόδων παραγωγής τους, το φαινόμενο του ερπυσμού, η μειωμένη αντοχή σε τριβή και η ευπάθεια σε φωτιά

Οι τυπικές ιδιότητες αντοχής πολύστρωτων από FRP's που αναγράφονται στον Πίνακα 1.4 είναι περιεκτικότητα κατ' όγκο σε ίνες (Vf), η αντοχή σε εφελκυσμό στη διεύθυνση των ινών (σ_{1t}), η αντοχή σε εφελκυσμό σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες (σ_{2t}), η αντοχή σε θλίψη στη διεύθυνση των ινών (σ_{1c}), η αντοχή σε θλίψη σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες (σ_{2c}) και η αντοχή σε διάτμηση στο επίπεδο του πολύστρωτου (τ_{12}). Αντίστοιχα, οι τυπικές ιδιότητες δυσκαμψίας πολύστρωτων από FRP's περιγράφονται στον Πίνακα 1.4 είναι το ειδικό βάρος (γ), το μέτρο ελαστικότητας του Young στην διεύθυνση των ινών (E_1), το μέτρο ελαστικότητας του Young σε διεύθυνση κάθετη στις ίνες (E_2), το μέτρο διάτμησης στο επίπεδο του πολύστρωτου (G_{12}) και ο λόγος του Poisson στο επίπεδο του πολύστρωτου (ν). Στους Πίνακες 1.3 και 1.4, κάθε υλικό carbon/epoxy (0°/90° WR-balanced) με το σύμβολο WG συμβολίζει ότι ανήκει στην σειρά WG με υφάσματα διαφόρων μεγεθών των ινών και πυκνοτήτων της πλέξης (Naik et al – 2000).

Πίνακας 1.4 : Τυπικές ιδιότητες αντοχής πολύστρωτων από FRP's

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

Πίνακας 1.5 : Τυπικές ιδιότητες δυσκαμψίας πολυστρωτων από FRP's.

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




1.2.3 Κατασκευές Sandwich

Σκοπός του τύπου αυτού των κατασκευών είναι η αύξηση της καμπτικής δυσκαμψίας, η οποία επιτυγχάνεται αυξάνοντας το πάχος της πλάκας, με σχετικά μικρή όμως ταυτόχρονη αύξηση του βάρους. Αυτό επιτυγχάνεται όταν παρεμβάλλεται μια παχιά στρώση ελαφρού υλικού πυρήνα (core material) μεταξύ δύο λεπτών περιβλημάτων από FRP (skins ή faces). Όπως χαρακτηριστικά δείχνει ο Πίνακας 1.6, η παρεμβολή πυρήνα που διπλασιάζει ή τετραπλασιάζει το συνολικό πάχος διατηρώντας όμως το πάχος του FRP σταθερό, έχει ως αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό της δυσκαμψίας και της αντοχής, με μικρή αύξηση του βάρους (μόλις 6%). Οι πλάκες sandwich λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο με εκείνων των μορφοδοκών διατομής I (γιώτα), βασιζόμενες στην αρχή ότι η καμπτική δυσκαμψία αυξάνεται μεταφέροντας μάζα του υλικού μακριά από τον ουδέτερο άξονα. Τα περιβλήματα φέρουν τις καμπτικές τάσεις, ενώ ο πυρήνας φορτίζεται σε θλίψη ακριβώς κάτω από το σημείο εφαρμογής του φορτίου και πάνω από τις στηρίξεις, και μεταφέρει διαμητική φορτία. Κατά την κάμψη των πλακών sandwich αναπτύσσεται μια μεγάλη διαμητική δύναμη

ολίσθησης στο δεσμό μεταξύ των περιβλημάτων και του πυρήνα, η αντοχή του οποίου είναι πολύ σημαντική για την ορθή συμπεριφορά του sandwich.

Η κατασκευή με πλάκες sandwich είναι πιο δύσκολη από εκείνη με ενισχυμένα πολύστρωτα, εξαιτίας των μέτρων που πρέπει να ληφθούν για να εξασφαλιστεί η καλή σύνδεση μεταξύ των περιβλημάτων και του πυρήνα. Όμως, για ίση καμπτική δυσκαμψία, μια πλάκα sandwich και ελαφρύτερη θα είναι, και θα καταλαμβάνει μικρότερο βάθος από ένα ισοδύναμο πολύστρωτο ενισχυμένο με νομείς.

Πίνακας 1.6: Παραδείγματα αύξησης της δυσκαμψίας σε κατασκευές sandwich

			
Σχετική δυσκαμψία	100	700	3700
Σχετική αντοχή	100	350	925
Σχετικό βάρος	100	103	106

Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, οι κατασκευές sandwich χρησιμοποιούνται συχνότερα σε μεγάλες επίπεδες επιφάνειες, όπως τα καταστρώματα, οι φρακτές, οι οροφές των καμπινών και σε άλλες περιοχές, όπου η συμβατική κατασκευή με ενισχυμένα πολύστρωτα (single skin construction) θα ήταν είτε βαρύτερη, είτε θα είχε ως αποτέλεσμα σκάφος με μικρότερους ωφέλιμους χώρους.

Τα υλικά πυρήνα αποτελούν τη βάση των κατασκευών sandwich από σύνθετα υλικά. Ο πυρήνας είναι οποιοδήποτε υλικό μπορεί να κρατήσει απομακρυσμένα μεταξύ τους τα δύο περιβλήματα από FRP και να μεταδίδει διατμητικές δυνάμεις. Τα υλικά πυρήνα ποικίλλουν από φυσικά είδη, όπως το ξύλο balsa και το κόντρα πλακέ θαλάσσης (plywood), μέχρι υψηλής τεχνολογίας κυψελοειδείς και αφρώδεις κατασκευές (honeycomb and foam cores). Ο Πίνακας 1.7 και 1.8 συνοψίζει τις ιδιότητες των κυριότερων υλικών πυρήνα, όπου γ είναι το ειδικό βάρος, σ_t η αντοχή σε εφελκυσμό, σ_c η αντοχή σε θλίψη, τ_u η αντοχή σε διάτμηση και G το μέτρο διάτμησης.

Πίνακας 1.7: Τυπικές ιδιότητες υλικών πυρήνα.

Είδος Πυρήνα	γ (g/cm ³)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	τ_u (MPa)	G (MPa)
Ξύλο balsa	0.112	9.1	8.2	2.2	120
Ξύλο balsa	0.145	12.3	11.9	2.8	151
Divinycell H-80 (PVC)	0.08	1.8	1.2	1.0	30
Divinycell H-100 (PVC)	0.096	2.5	1.8	1.5	45
Airex linear PVC	0.080-0.096	1.4	0.9	1.2	29
Rohacell 100 (PMI foam)	0.111	3.4	2.9	2.4	49
Plywood	0.6	40.0	-	8.0	1000
Φαινολικός κυψελοειδής	0.096	-	7.8	1.4	41

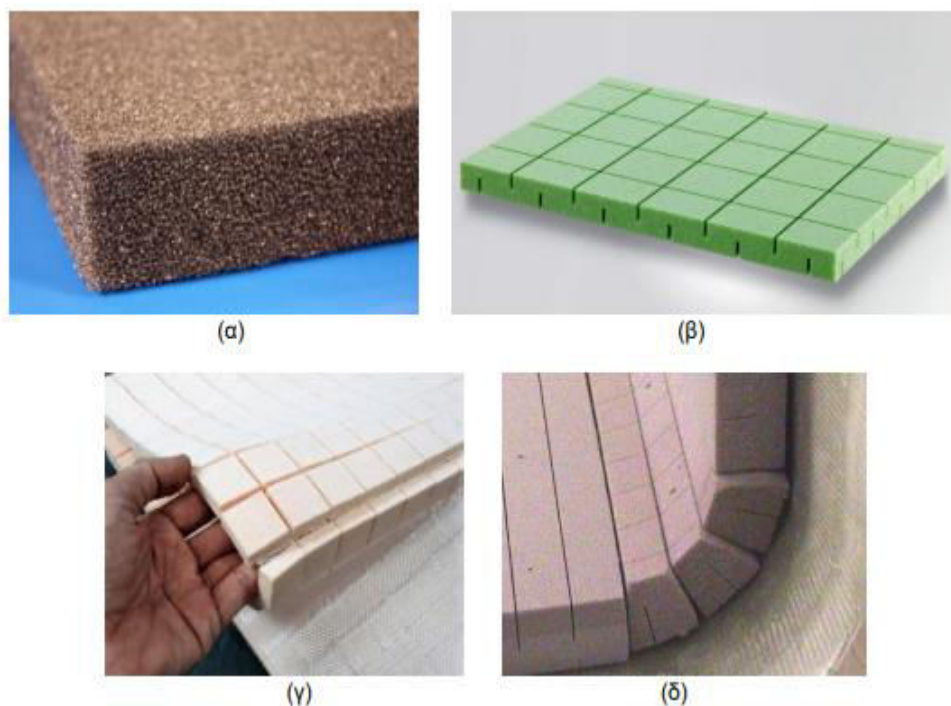
Πίνακας 1.8: Τυπικές ιδιότητες υλικών πυρήνα (foams) [3].

Foam type	Density (kg/m ³)	Modulus			Poisson coefficient ν_{12}, ν_{21}	Breaking stresses		
		Tensile E_1, E_2 (N/mm ²)	Compression E_3 (N/mm ²)	Shear G_{12}, G_{13}, G_{23} (N/mm ²)		Tensile σ_1, σ_2 (N/mm ²)	Compression σ_3 (N/mm ²)	Shear $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{23}$ (N/mm ²) (1)
Linear PVC	50	21	18	8	0,36	0,7	0,3	0,3
	60	29	28	11	0,31	0,9	0,4	0,5
	70	37	38	14	0,27	1,1	0,6	0,7
	80	44	49	18	0,25	1,3	0,7	0,8
	90	52	59	21	0,24	1,4	0,9	1,0
	100	59	69	24	0,23	1,6	1,0	1,2
	110	67	79	27	0,22	1,8	1,2	1,3
	130	82	99	34	0,21	2,2	1,5	1,7
Cross linked PVC	140	89	109	37	0,21	2,4	1,6	1,9
	50	37	40	18	0,02	1,0	0,6	0,6
	60	47	51	22	0,05	1,4	0,8	0,8
	70	57	63	27	0,07	1,8	1,1	1,0
	80	67	75	31	0,08	2,2	1,4	1,1
	90	78	88	36	0,09	2,5	1,7	1,3
	100	88	102	40	0,10	2,9	1,9	1,5
	110	98	116	44	0,11	3,3	2,2	1,6
	130	118	145	53	0,12	3,9	2,8	2,0
	140	129	161	57	0,12	4,3	3,0	2,2
	170	159	209	71	0,13	5,2	3,8	2,7
	190	180	243	79	0,13	5,8	4,4	3,0
SAN	200	190	260	84	0,13	6,1	4,7	3,2
	250	241	352	105	0,14	7,4	6,0	4,1
	50	52	29	13	0,11	0,9	0,4	0,7
	60	65	37	16	0,18	1,2	0,5	0,8
	70	78	44	18	0,20	1,5	0,6	0,9
	80	92	50	21	0,19	1,7	0,8	1,0
	90	107	55	23	0,17	1,9	0,9	1,1
	100	122	60	26	0,15	2,0	1,1	1,2
	110	137	64	29	0,12	2,2	1,2	1,3
	130	168	71	34	0,06	2,5	1,6	1,5
	140	184	74	36	0,03	2,6	1,8	1,6
	170	234	83	43	0,03	2,9	2,4	1,9
PMI	190	268	88	48	0,03	3,1	2,8	2,1
	200	285	90	51	0,03	3,1	3,0	2,1
	50	54	59	21	0,40	1,9	0,8	0,8
	60	69	76	24	0,60	2,1	1,1	1,0
	70	84	94	28	0,60	2,3	1,5	1,2
	80	101	112	33	0,70	2,6	1,9	1,5
	90	119	132	39	0,70	2,9	2,3	1,8
	100	137	152	45	0,70	3,2	2,7	2,1
	110	155	173	52	0,60	3,6	3,2	2,4
	130	195	217	71	0,50	4,5	4,2	3,1
	140	215	239	83	0,40	5,0	4,8	3,5
	170	280	311	131	0,20	6,8	6,7	4,7

(1) τ_{13} and τ_{23} are identical to, respectively, τ_{12} and τ_{11} .
 Note 1: The values given in this Table are for general guidance only.

Ο αφρός PVC (χλωριούχο πολυβινύλιο, polyvinyl chloride) έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα και με επιτυχία σε ναυπηγικές κατασκευές sandwich. Διατίθεται σε ένα εύρος πυκνοτήτων από 45 έως και πάνω από $200 \frac{kg}{m^3}$ και σε αρκετές ποικιλίες, συμπεριλαμβανομένων του «γραμμικού» PVC που έχει μεγάλη ολκιμότητα αλλά χαμηλές μηχανικές ιδιότητες και του PVC «με διασταυρούμενες αλυσίδες» (cross-linked) που έχει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία αλλά είναι σχετικά ψαθυρός. Οι αφροί PVC παρουσιάζουν καλή αντίσταση στη διείσδυση του νερού, καλή θερμική και ηλεκτρική μόνωση και αξιόλογα χαρακτηριστικά απόσβεσης του ήχου και των κραδασμών. Το κυριότερο μειονέκτημά τους

είναι η μείωση της αντοχής και της δυσκαμψίας τους σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Ο αφρός PVC διατίθεται σε μορφή πλακών για την κατασκευή επίπεδων επιφανειών (Σχήμα 1.12α), σε μορφή πλακών με αυλακώσεις για την καλύτερη ροή της ρητίνης και την ένωσή του με τα περιβλήματα (Σχήμα 1.12β), καθώς και σε μορφή μικρών ορθογώνιων τεμαχίων ενωμένων μεταξύ τους μέσω ενός λεπτού υφάσματος, για την καλύτερη προσαρμογή του σε καμπύλες επιφάνειες (Σχήμα 1.12γ και δ).



Σχήμα 1.12: Διάφορες μορφές αφρών PVC.

1.2.4 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα Σύνθετων Υλικών

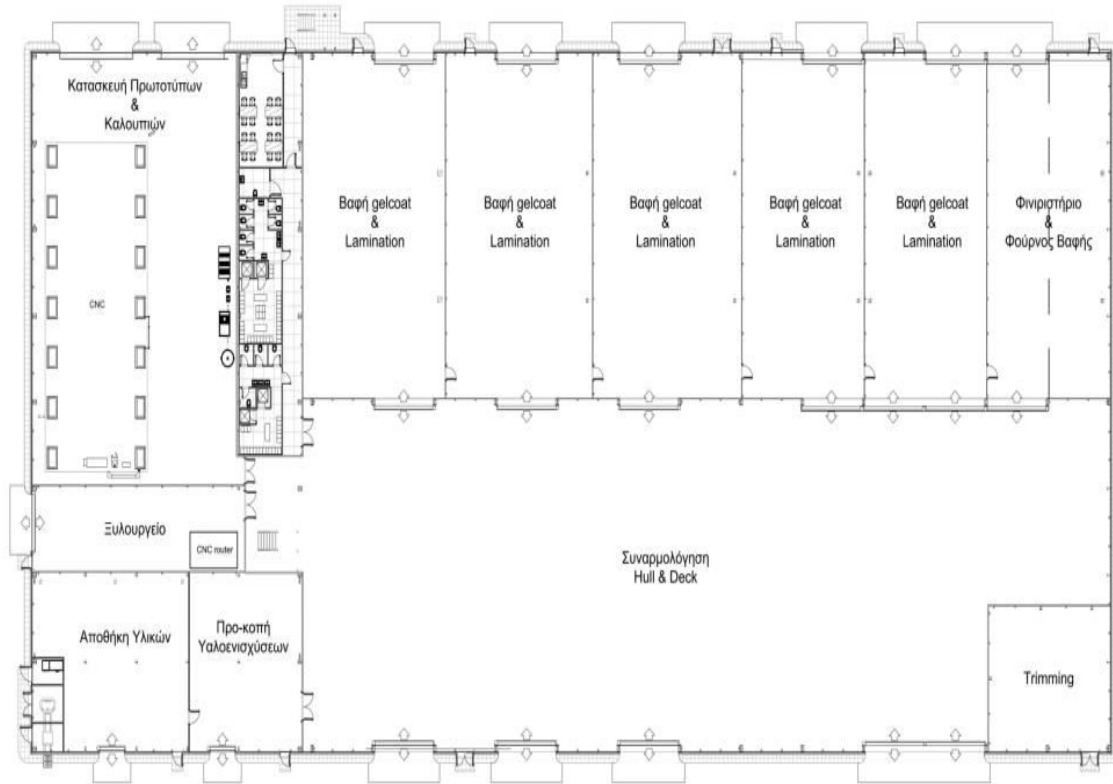
Συνοψίζοντας τα παραπάνω, τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα αλλά και μερικά μειονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 1.9, και είναι απαραίτητο να γνωρίζει ο υπεύθυνος ναυπηγός πριν την διαδικασία του σχεδιασμού και της παραγωγής τους, για την βέλτιστη εκμετάλλευσή τους αλλά και για την αποφυγή λάθος εκτιμήσεων οι οποίες μπορεί να αποβούν μοιραίες από οικονομικής πλευράς αλλά και ασφάλειας.

Πίνακας 1.9 : Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Σύνθετων Υλικών

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μικρό βάρος	Μικρή δυσκαμψία
Αντίσταση στην διάβρωση	Έλλειψη ολκιμότητας
Μικρή συντήρηση	Δυσκολία στην επιθεώρηση
Δυνατότητα προσαρμογής των διευθύνσεων μέγιστης αντοχής και δυσκαμψίας	Ερπυσμός
Μεγαλύτερη ασφάλεια	Αντοχή σε τριβή
Αντίσταση στις χημικές ενώσεις	Ευπάθεια σε βροχή
Ευελιξία στην κατασκευή	Συνδέσεις και εγκατάσταση εξαρτημάτων
Καλές θερμικές ιδιότητες	Μέθοδοι παραγωγής
Καλή συμπεριφορά σε κόπωση	Ελλιπείς μέθοδοι ανακύκλωσης
Απουσία ραφών και συγκολλήσεων	
Ηλεκτρικές ιδιότητες	
Καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης	
Δυσκολότερος εντοπισμός	
Επισκευασιμότητα	
Μικρή δυσκαμψία	

1.3 Περιγραφή Ναυπηγείου

Τα διάφορα βήματα της παραγωγικής διαδικασίας σε ένα ναυπηγείο σκαφών από ενισχυμένο πλαστικό είναι εν γένει διαφορετικής φύσης και έχουν διαφορετικές απαιτήσεις και περιορισμούς (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία, καθαριότητα). Ως εκ τούτου απαιτούν και ιδιαίτερους χώρους με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και οριοθετούν εν τέλει ένα βασικό χωροταξικό σχήμα του ναυπηγείου, στόχος του οποίου πάντοτε είναι η καλύτερη οργάνωση όλων αυτών των εργασιών και η εκτέλεσή τους με την μεγαλύτερη δυνατή τεχνική αρτιότητα. Το Σχήμα 1.13 παρουσιάζει σε κάτοψη τη διάταξη των χώρων ενός σύγχρονου ναυπηγείου σκαφών από FRP στον ελληνικό χώρο, οι οποίοι είναι:



Σχήμα 1.13 : Γενική διάταξη σύγχρονου ναυπηγείου μικρών πλαστικών σκαφών.

1.3.1 Αποθήκη υλικών

Ο χώρος της αποθήκης πρέπει να είναι εντελώς ξεχωριστός από τους υπόλοιπους χώρους της παραγωγής, τόσο για λόγους ασφαλείας, όσο και λόγω συγκεκριμένων απαραίτητων απαιτήσεων που πρέπει να πληρούν οι χώροι αποθήκευσης. Οι λόγοι ασφαλείας που υπαγορεύουν ξεχωριστό χώρο αποθήκης είναι:

- Ύπαρξη ξεχωριστού συστήματος πυρόσβεσης λόγω μεγάλης συγκεντρωμένης ποσότητας επικίνδυνων και εύφλεκτων υλικών (ρητίνες, χρώματα, διαλύτες, καταλύτες κτλ.).
- Πυράντοχη κατασκευή των τοίχων και των διαχωριστικών του χώρου της αποθήκης, άρα διαφορετική κατασκευή από το υπόλοιπο κτίριο. Το περίβλημα της αποθήκης (τοίχοι, οροφή) πρέπει να είναι σε θέση να αποτρέπουν τη διάδοση της φωτιάς σε γειτνιάζοντες χώρους για ορισμένο χρονικό διάστημα (συνήθως 60 λεπτά), ανάλογα με το αποτέλεσμα της μελέτης παθητικής πυρασφάλειας.
- Στους χώρους αποθήκευσης εύφλεκτων υλικών, απαγόρευση ύπαρξης απλών πριζών ρεύματος και μηχανημάτων που μπορούν να προκαλέσουν σπινθήρα
- Πρόσβαση στην αποθήκη μόνο από άτομα με σχετική άδεια (αποθηκάριοι), τα οποία κάνουν και τη διανομή των υλικών. Απαγόρευση πρόσβασης σε όλους τους υπόλοιπους.

Όσον αφορά στις απαιτήσεις για τις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες μέσα στον χώρο της αποθήκης, αυτές είναι:

- Έπαρξη αυτόνομου συστήματος εξαερισμού

- Έπαρξη αυτόνομου συστήματος κλιματισμού, ικανού να διατηρήσει αφενός σταθερή ονομαστική θερμοκρασία 23°C η οποία να μην υπερβαίνει ποτέ τους 30°C, αφετέρου υγρασία κάτω από 75%.

Σύμφωνα με τον DNV στο κεφάλαιο *DNV-RU-SHIP pt.2 ch.3 Non metallic materials* [4], στο εδάφιο για την αποθήκευση των υλικών, πιο συγκεκριμένα αναφέρει:

Κατά την αποθήκευση και την χρήση ακατέργαστων υλικών, πρέπει αυστηρώς να πληρούνται οι προϋποθέσεις και οι οδηγίες του προμηθευτή. Η τοποθέτηση των υλικών πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να είναι ορατές οι ετικέτες του προϊόντος που αναγράφουν την ονομασία αλλά και την ημερομηνία λήξης του κάθε προϊόντος. Τα υλικά των οποίων ο χρόνος αποθήκευσης ξεπερνάει την ημερομηνία λήξης τους πρέπει να αφαιρούνται άμεσα από την αποθήκη.

Όσον αφορά τα ενισχυμένα υλικά, πρέπει να συντηρούνται στεγνά και καθαρά έτσι ώστε να αποφευχθεί πιθανή μόλυνση του ακατέργαστου υλικού τους. Τα υλικά αυτά πρέπει να κρατιούνται κλειστά στην αρχική τους συσκευασία μέχρι την χρήση. Σε περίπτωση που σπάσει/ανοίξει η αρχική τους συσκευασία πρέπει να υπάρξει επιπλέον προστασία κατά την αποθήκευση μετά την χρήση τους, ώστε να αποφευχθεί η πιθανότητα μόλυνσης.

Τα ενισχυμένα υλικά πρέπει να αποθηκεύονται στην ίδια θερμοκρασία και υγρασία με το περιβάλλον στο οποίο τελικά θα κατεργαστούν, εκτός αν η κλάση επιβάλλει κάτι διαφορετικό. Σε περίπτωση που η θερμοκρασία αποθήκευσης δεν είναι η ίδια με το περιβάλλον κατεργασίας του, το υλικό θα πρέπει πρώτα να εγκλιματιστεί στην καινούρια θερμοκρασία και υγρασία, πριν χρησιμοποιηθεί. Ο χρόνος εγκλιματισμού θα πρέπει να είναι επαρκής ανάλογα με το μέγεθος της ενίσχυσης. Για κλειστά πακέτα, ο εγκλιματισμός θα πρέπει να διαρκέσει τουλάχιστον 2 μέρες.

Ρητίνες, gel coats, σκληρυντικά, πρόσθετα κλπ. πρέπει να αποθηκεύονται σύμφωνα με τις οδηγίες των προμηθευτών όσον αφορά τη θερμοκρασία, την διάρκεια ζωής τους κλπ.. Σε περίπτωση που δεν παρέχονται αυτές οι πληροφορίες, τότε πρέπει να αποθηκεύονται σε σκοτεινά, ξηρά δωμάτια με θερμοκρασία μεταξύ των 10-18°C. Η θερμοκρασία των δωματίων αυτών θα πρέπει να καταγράφονται συνεχώς μέσω θερμογράφων. Τα ακατέργαστα υλικά τα οποία αποθηκεύονται σε θερμοκρασίες μικρότερες των 18°C θα πρέπει να εγκλιματιστούν στην θερμοκρασία του εργοτάξιου πριν χρησιμοποιηθούν. Τα δοχεία των ρητινών κτλπ. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή κατά την αποθήκευση τους.

Τα υλικά πυρήνα πρέπει να αποθηκεύονται σε ξηρό περιβάλλον και να προστατεύονται από πιθανή μόλυνση ή μηχανική καταπόνηση. Επιπλέον, πρέπει να αποθηκεύονται σε μέρη με την ίδια θερμοκρασία με το μέρος κατεργασίας τους, εκτός κι αν η κλάση συμφωνεί σε κάτι διαφορετικό.

Τα υλικά πυρήνα θα πρέπει να αποθηκεύονται με τέτοιον τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή εξαγωγή αερίων πριν την χρήση τους, η οποία θα πρέπει να επιτυγχάνεται σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή. Όταν δημιουργούνται καινούριες επιφάνειες στο υλικό, λόγω τριψίματος, κοψίματος ή μηχανικής επεξεργασίας, θα πρέπει να γίνεται εκ νέου εξαγωγή αερίων.

Προ εμποτισμένα υλικά θα πρέπει να αποθηκεύονται σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή. Για προ εμποτισμένα υλικά τα οποία αποθηκεύονται σε συνθήκες κατάψυξης, θα πρέπει να καταγράφεται σε ετικέτα για κάθε ξεχωριστό πακέτο ο χρόνος και η θερμοκρασία στην οποία αυτό χρησιμοποιήθηκε/αποθηκεύτηκε εκτός των φυσιολογικών συνθηκών αποθήκευσης τους.

1.3.2 Χώρος κατασκευής προτύπων και καλουπιών

Η κατασκευή των προτύπων (plugs) απασχολεί εξειδικευμένο προσωπικό, είτε αυτά κατασκευάζονται ως ξυλότυπα (με το χέρι) είτε μετά από κατεργασία σε σύστημα CNC (Σχήμα 1.14). Τα εργαλεία και τα υλικά που απαιτούνται για τις εργασίες αυτές είναι συνήθως πολύ διαφορετικά από εκείνα που υπάρχουν στην υπόλοιπη παραγωγή των σκαφών (εκτός από το τμήμα της κατασκευής των καλουπιών παραγωγής), γεγονός που επιβάλλει πολλές φορές ο χώρος αυτός να έχει δική του ξεχωριστή αποθήκη εργαλείων και υλικών. Στον χώρο αυτό παράγονται σημαντικές ποσότητες σκόνης, ιδιαίτερα στην περίπτωση ύπαρξης συστήματος CNC. Πρέπει λοιπόν αφενός η σκόνη αυτή να μην μεταφέρεται στους υπόλοιπους χώρους της παραγωγής, αφετέρου να υπάρχει συλλογή και κατάλληλη διάθεση των παραγόμενων αποβλήτων (να στέλνονται για ανακύκλωση). Στον χώρο αυτόν τέλος, θα πρέπει να υπάρχει ξεχωριστό δωμάτιο (απόλυτα καθαρό και απομονωμένο) για να εξυπηρετεί τις εξωτερικές βαφές και το γυάλισμα των πρωτοτύπων και των καλουπιών (τελικό φινίρισμα).



Σχήμα 1.14 : Κατασκευή αρσενικού καλουπιού με CNC

Η αρχή λειτουργίας μιας μηχανής CNC (computerized numerical control) είναι η εξής: ο υπολογιστής μέσω μιας διαδικασίας μετατρέπει ένα σχεδιαστικό αρχείο CAM ή CAD σε γλώσσα υπολογιστή και κόβει το αρχικό υλικό (συνήθως φελιζόλ) απλής γεωμετρίας, προσδίδοντάς του την γεωμετρία που έχουμε στο σχέδιο. Με αυτήν την τεχνική δημιουργούνται τα αρσενικά καλούπια από τα οποία με πλαστικοποίηση βγαίνουν και τα θηλυκά, τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σκαφών. Σε ένα σύγχρονο ναυπηγείο πλαστικών σκαφών, τυπική είναι η χρήση 2 μηχανών CNC, με την μια μικρότερων διαστάσεων και με 3 άξονες ελευθερίας να χρησιμοποιείται για μικρά εξαρτήματα. Η δεύτερη έχει μεγαλύτερες διαστάσεις και από αυτήν βγαίνουν όλα τα καλούπια για όλα τα εξαρτήματα του σκάφους (γάστρα, κατάστρωμα κτλ).

Δισδιάστατη κοπή

Στο CNC μικρότερου μεγέθους κόβονται μικρά εξαρτήματα κατευθείαν για το σκάφος, όπως καπάκια, επιφάνειες για ντουλάπια κλπ. Το υλικό που χρησιμοποιείται για αυτά τα εξαρτήματα ονομάζεται king starboard, το οποίο είναι πολυμερές και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρή θερμική διαστολή, καλή αντοχή σε διάβρωση και συνεπώς πολύ καλή συμπεριφορά στην έκθεση του στο περιβάλλον. Αν και είναι σχετικά ακριβό, είναι εύκολα κατεργάσιμο και έχει μειωμένο χρόνο εργασίας συγκριτικά με άλλα υλικά. Αυτός είναι και ο λόγος που χρησιμοποιείται τόσο συχνά σε ναυπηγικές κατασκευές. Στο σχήμα 1.15 και 1.16 φαίνονται η χρήση του King Starboard και τυπικές ιδιότητες του αντίστοιχα.



Σχήμα 1.15 : King Starboard και χρήσεις του

Properties	Units	ASTM	Nominal Values
Density	g/cc	D1505	0.955
Tensile Strength @ Yield	psi	D638	>4,100
Tensile Modulus	psi	D638	255,000
Elongation @ Break	%	D638	>600
Elongation @ Yield	%	D638	9.8
Flexural Modulus	psi	D790	185,000
Flexural Stress @ 5% Strain	psi	D790	3,810
Compressive Properties 10% Strain	psi	D695	4,950
Durometer	Shore D	D2240	68
Tensile Impact	ft.lbs./in. ²	D1822	115
Izod Impact Resistance	ft.lbs./in. ²	D256	1.1
Brittleness Temp.	°C (°F)	D746	<-76°C (<-105°F)
Vicat Softening Temp.	°C (°F)	D1525	123°C (253°F)
Heat Deflection Temp. 66 psi	°C (°F)	D648	75°C (167°F)
Screw and Nail Withdrawal	lbs	D1761	657 & 63
Flammability	Rating	UL94	HB

Σχήμα 1.16 : Τυπικές μηχανικές ιδιότητες και δοκιμές ASTM, για πολυμερές King Starboard

Polymer Type	Deflection Temperature at 0.46 MPa (°C)	Deflection Temperature at 1.8 MPa (°C)	Melting Point (°C)
ABS	98	88	-
ABS + 30% Glass Fiber	150	145	-
Acetal Copolymer	160	110	200
Acetal Copolymer + 30% Glass Fiber	200	190	200
Acrylic	95	85	130
Nylon 6	160	60	220
Nylon 6 + 30% Glass Fiber	220	200	220
Polycarbonate	140	130	-
Polyethylene, HDPE	85	60	130
Polyethylene Terephthalate (PET)	70	65	250
PET + 30% Glass Fiber	250	230	250
Polypropylene	100	70	160
Polypropylene + 30% Glass Fiber	170	160	170
Polystyrene	95	85	-

Σχήμα 1.17 :HDT (°C), διαφόρων τύπου πολυμερών

Ο τρόπος λειτουργίας του δισδιάστατου CNC είναι ο παρακάτω. Το κοπτικό εργαλείο είναι είτε από ατσάλι είτε από καρβίδιο. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά κοπτικά εργαλεία ανάλογα με την φάση της κοπής, συνεπώς και διαφορετικές διαστάσεις. Για τον λόγο αυτόν υπάρχει ένας αισθητήρας της μηχανής, όπου πριν από την κάθε κοπή, σκανάρει το κοπτικό εργαλείο και ο υπολογιστής διαβάσει τις νέες διαστάσεις του κοπτικού εργαλείου. Η κοπή δεν γίνεται ποτέ σε μια διαδρομή του κοπτικού εργαλείου, αλλά σταδιακά. Αυτό συμβαίνει για πολλούς λόγους. Αρχικά η τοποθέτηση του υλικού προς κοπή δεν μπορεί να επιτευχθεί με απόλυτη ακρίβεια στο τραπέζι κοπής. Συνεπώς, σε πρώτη φάση τοποθετείται το υλικό και γίνεται μια αρχική κοπή βάθους 1mm. Έπειτα βιδώνεται το υλικό στο τραπέζι κοπής. Στην συνέχεια γίνονται πολλά περάσματα του υλικού κι ενδιάμεσες αλλαγές κοπτικού εργαλείου, όπου χρειάζεται (εάν χρειάζεται). Οι ενδιάμεσες κοπές γίνονται και για άλλον λόγο. Κοπή του υλικού χωρίς την συγκράτηση του μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του. Γι' αυτόν τον λόγο στην τελευταία κοπή σε κάποια σημεία σηκώνεται το κοπτικό εργαλείο για πολύ λίγο αφήνοντας σημεία συγκράτησης με το «περίσσειμα» του υλικού. Ένας άλλος τρόπος είναι η δημιουργία υποπίεσης ανάμεσα στην βάση και στο υλικό, με μικρές τρύπες που αναρροφούν αέρα, έτσι ώστε να συγκρατείται στην βάση. Αυτή όμως η λύση στην πράξη είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί.

Τρισδιάστατη κοπή

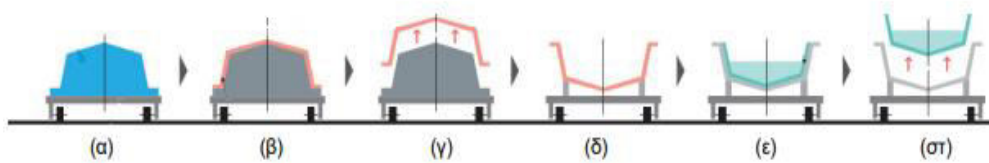
Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το τρισδιάστατο CNC είναι υπεύθυνο για την κατασκευή των καλουπιών. Η δημιουργία καλουπιών είναι μια χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία η οποία περνάει από πολλά στάδια, κατά τα οποία είναι πολύ σημαντικό να αποφευχθούν, όσο γίνεται, τα εργατικά λάθη. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής :

- Αρχικά, από τα σχέδια CAM το CNC κόβει το φελιζόλ δίνοντας του την γεωμετρία που ζητείται. Οι 5 άξονες ελευθερίας δίνουν την δυνατότητα κίνησης του κοπτικού εργαλείου ως προς τους κύριους άξονες X,Y,Z αλλά δίνουν επίσης και την δυνατότητα περιστροφής του. Με αυτόν τον τρόπο, υπάρχει η δυνατότητα να κατασκευαστούν όλων των ειδών οι γεωμετρίες (με καμπυλότητες ή χωρίς) όπως γάστρες, καταστρώματα, καπάκια, πόρτες κλπ.. Ο κύριος λόγος που η τρισδιάστατη κοπή γίνεται σε φελιζόλ είναι η εξοικονόμηση βάρους αλλά και οικονομικοί λόγοι.

- Αφού ολοκληρωθεί η κοπή, σειρά έχει πάστα ρητίνης. Ακολουθίες στρώσεων ενός μείγματος εποξικής ρητίνης περνιούνται πάνω από το φελιζόλ. Η πάστα αυτή έχει κάποιες ουσιαστικές διαφορές από την ρητίνη που χρησιμοποιείται κατά την πλαστικοποίηση. Αρχικά έχει πολύ μεγαλύτερο ιξώδες αλλά και πολύ μεγαλύτερο εξώθερμο. Το τελευταίο έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές, εάν δεν έχουν τηρηθεί οι σωστές αναλογίες στην πάστα ρητίνης, κατά τον πολυμερισμό να διαβρώνει το φελιζόλ έως και 5 πόντους (χαρακτηριστικό παράδειγμα, για πάχος πάστας 3 mm, φτάνει τοπικά τους 115°C, ενώ το φελιζόλ αντέχει μέχρι τους 85°C).

- Εφόσον απλωθεί σωστά η πάστα ρητίνης, και ξαναγεμιστούν τοπικά κενά που έχουν δημιουργηθεί (τα οποία είναι αδύνατον να αποφευχθούν, λόγω του μεγάλου εξώθερμου), τριβεται η εξωτερική επιφάνεια με ειδικά τριβεία ώστε να επιτύχουμε τις επιθυμητές διαστάσεις αλλά και την ομαλότητα που απαιτείται.

- Στην συνέχεια, η φινιρισμένη επιφάνεια βάφεται με gel coat και στην συνέχεια τοποθετούνται ακολουθίες γυαλιών, ώστε να προκύψουν στο τέλος τα θηλυκά καλούπια από τα οποία θα παραχθούν τα τελικά προϊόντα. Τέλος τα θηλυκά καλούπια αναποδογυρίζονται και στηρίζονται σε μεταλλικές βάσεις. Στο σχήμα 1.18 παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής θηλυκών καλουπιών απο αρσενικό.



Σχήμα 1.18 : Κατασκευή θηλυκών καλουπιών από αρσενικό

1.3.3 Χώρος προ-κοπής υφασμάτων ενισχυτικών ινών

Είναι ο χώρος που γίνεται η αρχική κοπή των υφασμάτων των ενισχυτικών ινών με τη χρήση πατρών, ανάλογα με το σχήμα και τις διαστάσεις που απαιτεί η θέση των υφασμάτων στο σκάφος και η συγκεκριμένη ακολουθία στρώσεων στη θέση αυτή. Αμέσως μετά την κοπή γίνεται και η κωδικοποίηση (μαρκάρισμα) των υφασμάτων για να είναι αναγνωρίσιμα. Οι χώροι αυτοί είναι συνήθως μακρόστενοι και διαθέτουν μεγάλου μήκους πάγκους (ανάλογα με το μήκος των σκαφών που παράγονται) και πολλά ράφια ταξινόμησης και αποθήκευσης των κομμένων ομάδων υφασμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τις επιστρώσεις στα καλούπια. Τα υφάσματα είναι σχεδόν πάντα ρολά με πλάτος 1 m – 1.25 m και επειδή πρέπει να μπορούν να εξασφαλίζονται όσο το δυνατόν συνεχή υφάσματα (κυρίως στις γάστρες), χωρίς να υπάρχουν πολλές ενώσεις (overlaps) κατά το μήκος του σκάφους, οι πάγκοι κοπής είναι αναπόφευκτα μακρόστενοι.

1.3.4 Ξυλουργείο

Στον χώρο αυτόν προκατασκευάζονται όλοι οι πυρήνες των κατασκευών sandwich και των διαμήκων και εγκάρσιων ενισχυτικών. Εκεί προκατασκευάζονται επίσης όλες οι ξύλινες εσωτερικές διαμορφώσεις των σκαφών που διαθέτουν χώρους ενδιαίτησης. Σε ναυπηγεία με μεγάλο όγκο παραγωγής υπάρχουν συνήθως ειδικά μηχανήματα (πλάνες, γωνιάστρες, κορδέλες, CNC routers κτλ.). Στο σχήμα 1.19 φαίνεται η χρήση κόντρα πλακέ για την πρύμνη ταχύπλοου σκάφους.



Σχήμα 1.19 : Χρήση κόντρα-πλακέ σε πρύμνη καθρέπτη

1.3.5 Χώροι βαφής gel coat

Στους χώρους βαφής gel coat απαιτούνται σταθερές συνθήκες εξαερισμού και θερμοκρασίας. Το σύστημα εξαερισμού θα πρέπει να έχει κατάλληλα φίλτρα στην έξοδο (φίλτρα άνθρακα), ώστε να μην ρυπαίνεται ο περιβάλλοντας χώρος από το αναδυόμενο στυρένιο. Το σύστημα κλιματισμού πρέπει να είναι ικανό να διατηρεί σταθερή θερμοκρασία στον χώρο για αρκετό χρόνο, επειδή πάντα πριν τη βαφή, τα χρώματα πρέπει να μείνουν στον χώρο αυτόν μαζί με τα καλούπια, ώστε να αποκτήσουν την σωστή θερμοκρασία για να μην υπάρχει πιθανότητα κρυστάλλωσης του gel coat. Κατά τη διάρκεια της βαφής των καλουπιών ο χώρος μένει κενός και μόνο οι βαφείς είναι παρόντες, φορώντας την κατάλληλη προστασία (ειδικές φόρμες προστασίας από χημικά, μάσκες ολόκληρου προσώπου, γάντια κτλ.).



Σχήμα 1.20 : Εξωτερική βαφή gel-coat

Η εξωτερική βαφή με gel coat είναι μια πολύ σημαντική διαδικασία κατά την οποία τα λάθη και οι ατέλειες πρέπει να ελαχιστοποιηθούν όσο το δυνατό περισσότερο, καθώς αυτό είναι ουσιαστικά το τοίχος προστασίας του σύνθετου μας υλικού από το υδάτινο περιβάλλον αλλά και την ατμόσφαιρα. Είναι η πρώτη στρώση που θα περάσει στο καλούπι και πάνω από αυτήν, αφού έχει πολυμεριστεί πλήρως, θα περάσουν οι στρώσεις ινών και ρητίνης του πολύστρωτου.

Αναγκαίες προϋποθέσεις για την ορθή βαφή του gel coat είναι οι εξής :

- Σωστή συναρμογή των ξεχωριστών μερών του καλουπιού και αποφυγή διάκενων μεταξύ αυτών έτσι ώστε να μην υπάρξουν ανωμαλίες και ραφές στην τελική μορφή του σύνθετου.

- Πλήρης καθαρισμός της επιφάνειας του καλουπιού από ακαθαρσίες (σκόνες, τρίχες κλπ.) οι οποίες στην περίπτωση που δεν αφαιρεθούν θα φαίνονται στο τελικό προϊόν.

- Καλό πέρασμα του καλουπιού με αντικολλητικό (κερί) πριν τη βαφή έτσι ώστε στο τέλος να γίνει σωστή αποσύζευξη του σύνθετου από το καλούπι. Σημειώνεται πως σε μερικές επιφάνειες – καλούπια δεν είναι απαραίτητο το πέρασμα με κερί κάθε φορά πριν την βαφή. Διαφέρει από επιφάνεια σε επιφάνεια. Εάν το καλούπι εκτεθεί σε απροστάτευτο περιβάλλον (ήλιος, βροχές κλπ.) είναι απαραίτητο να ξαναπεραστεί με κερί.

- Σωστό πάχος του gel coat. Κυμαίνεται από 650 μm έως 800μm.Ενδεικτική τιμή που προτείνεται είναι τα 700μm. Κάποιες φορές χρησιμοποιείται και πάχος 1 mm.

- Το ποσοστό του καταλύτη κατά την βαφή είναι 2%-2.5%

- Κάτι άλλο πολύ σημαντικό που πρέπει να προσέξουμε κατά την διάρκεια της βαφής είναι ο τρόπος με τον οποίο απλώνεται το gel coat στο καλούπι. Δεν πρέπει να βάφεται τοπικά μέχρι το επιθυμητό πάχος. Αντιθέτως, πρέπει το πάχος να αυξάνεται προοδευτικά και σιγά σιγά παντού στην επιφάνεια του καλουπιού. Με αυτόν τον τρόπο δεν παγιδεύονται φυσαλίδες στυρενίου μέσα στο gel coat καθώς αυτές διαφεύγουν πριν αυτό πολυμεριστεί πλήρως.

Η βαφή του gel coat μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Μια μέθοδος είναι με το χέρι, με την οποία επιτυγχάνεται πολύ καλή ποιότητα κατασκευής αλλά είναι πολύ χρονοβόρα το οποίο είναι πρόβλημα για την παραγωγή. Εναλλακτική μέθοδος είναι με σπρέι, όπου εκεί η παραγωγή είναι πολύ πιο αυτοματοποιημένη αλλά η ποιότητα πολλές φορές είναι χειρότερη από την πρώτη, καθώς υπάρχουν πολλά σημεία όπου το spray δεν είναι ικανό να δώσει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στον πίνακα 1.11 παρουσιάζονται οι ελάχιστες ιδιότητες του Gel Coat σύμφωνα με τον Lloyd's Register [16]

Πίνακας 1.11 : ελάχιστες ιδιότητες Gel Coat (LR) [5]

Properties	Minimum value
Tensile strength (stress at maximum load)	40 N/mm ²
Tensile stress at break	40 N/mm ²
Tensile strain at maximum load	2,5%
Modulus of elasticity in tension	As measured
Flexural strength (stress at maximum load)	80 N/mm ²
Modulus of elasticity in flexure	As measured

Barcol hardness	As measured at full cure
Water absorption	70 mg (max)

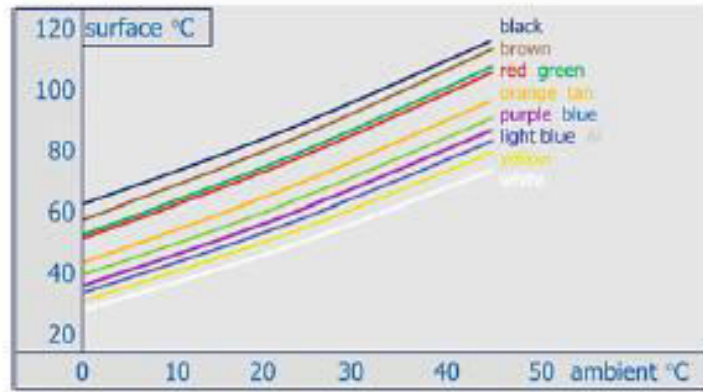
Μια σύγχρονη λύση είναι το airless spray. Μια πολύ ποιοτική μέθοδος βαφής που σε συνδυασμό με την μέθοδο hand lay up, εκεί που είναι απαραίτητο, χαρίζει εξαιρετικό αποτέλεσμα στο gel coat. Κατά την λειτουργία του, το airless spray αντλεί χρώμα από τα δοχεία αποθήκευσης όπου μαζί με διάφορα άλλα συστατικά εκτοξεύεται από τα μπέκ του πιστολιού. Ο καταλύτης βρίσκεται ξεχωριστά σε δοχείο πίεσης (σημείο λειτουργίας: 400-500 bar). Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι πως κατά την απελευθέρωση του μείγματος της πολυεστερικής ρητίνης και χρώματος, ταυτόχρονα κατά το ψεκασμό απελευθερώνεται μαζί και το ακριβές ποσοστό του καταλύτη που θέλουμε, ανάλογα με τις ιδιότητες που ζητάμε. Στο σχήμα 1.21 παρουσιάζεται φωτογραφία του Airless spray.



Σχήμα 1.21 : Airless spray

Σε πολλές περιπτώσεις υπάρχουν σημεία που ακόμα και το airless spray δεν είναι αρκετό για την επίτευξη του επιθυμητού πάχους λόγω της δύσκολης γεωμετρίας ή της γωνίας από την οποία βάφει ο τεχνίτης. Στις περιπτώσεις αυτές ξαναπερνιέται από πάνω δεύτερη στρώση gel coat, με μεγαλύτερο ποσοστό καταλύτη (3.5% - 4.5%) με πινέλο αυτή την φορά. Η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας καταλύτη γίνεται για πιο γρήγορο πολυμερισμό ο οποίος κάνει πιο γρήγορη την παραγωγή. Στο σχήμα 1.22 παρουσιάζεται η επίδραση της θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα στην θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της κατασκευής ανάλογα με το χρώμα βαφής.

Fig. 1 The effect of direct sunlight on the surface temperature of different coloured objects (redrawn from the SP systems design allowable handbook)



Σχήμα 1.22 : θερμοκρασία στην επιφάνεια – χρώμα βαφής

1.3.6 Χώροι επιστρώσεων (lamination)

Στους χώρους αυτούς θα πρέπει επίσης να υπάρχει σταθερή θερμοκρασία και εξαιρισμός, ανεξάρτητα από τη μέθοδο κατασκευής που πραγματοποιείται (hand lay-up ή vacuum infusion ή οποιαδήποτε άλλη παραγωγική διαδικασία επιστρώσεων). Πολλές φορές ο χώρος βαφής και επιστρώσεων είναι κοινός, λόγω κοινών απαιτήσεων, κυρίως εξαιρισμού και θερμοκρασίας. Αν υπάρχει απαίτηση μετα-σκλήρυνσης (post-curing) στα προϊόντα (π.χ. κατασκευές carbon), θα πρέπει να υπάρχει κατάλληλο σύστημα θέρμανσης που να μπορεί να εκτελεί ένα χρονικά προγραμματιζόμενο πρόγραμμα κλιμακούμενης θερμοκρασίας, ανάλογα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των υλικών, ώστε να επιτευχθούν οι μέγιστες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των παραγόμενων προϊόντων.

Αφού πολυμεριστεί πλήρως το gel coat απλώνονται οι πρώτες στρώσεις από ίνες γυαλιού. Οι αρχικές στρώσεις, ξεκινώντας από έξω προς τα μέσα, είναι πάντα γυαλί με μικρό επιφανειακό βάρος ινών, συνήθως CSM για 3 βασικούς λόγους:

1. Το καλούπι και ως συνέπεια το gel coat έχει απότομες εγχοπές και αλλαγές γεωμετρίας. Απαιτούνται λοιπόν, όσο το δυνατόν πιο λεπτές στρώσεις οι οποίες να μπορούν να εισχωρούν αλλά κυρίως να κολλάνε με επιτυχία μαζί με την ρητίνη πάνω στην επιφάνεια του gel coat χωρίς να υπάρχει ο φόβος αποκόλλησης (όπως πχ θα συνέβαινε με την χρήση WR τα οποία είναι πιο παχιά υαλοϋφάσματα)

2. Είναι προφανές πως οι πρώτες στρώσεις που θα μπουν μετά το gel coat θα αποτελούν και την εξωτερική πλευρά του πολύστρωτου. Συνεπώς από αισθητικής πλευράς, ένα WR δεν θα είχε την ίδια αισθητική ποιότητα με ένα CSM.

3. Αφού στρωθεί το gel coat και πολυμεριστεί, ιδανικά πρέπει να τοποθετηθούν οι πρώτες στρώσεις μέσα στις επόμενες 20-40 ώρες. Όσοι περισσότεροι χρόνος περνάει τόσο μειώνονται οι πιθανότητες για επιτυχημένη συνεργασία του gel coat με την γάστρα. Αυτός είναι και ένας από τους λόγους που δεν γίνεται vacuum infusion αμέσως μετά την βαφή (το vacuum infusion θέλει 3 μέρες προετοιμασία τουλάχιστον).

Σημειώνεται ότι στην πραγματικότητα ακόμα και με την επιλογή του CSM για πρώτες στρώσεις, σε επίπεδο μαζικής παραγωγής δεν είναι εφικτή η στρώση των πρώτων γυαλιών στις πρώτες 20-40 ώρες για όλα τα εξάρτημα που βγαίνουν από τα καλούπια. Για να γίνει κάτι τέτοιο θα χρειαζόταν πολύ μεγάλος αριθμός προσωπικού, αλλά ακόμα κι έτσι θα υπήρχαν και άλλα εμπόδια τα οποία κάνουν αυτήν την απαίτηση πολύ δύσκολη στην επίτευξη της. Εν κατακλείδι, δίνεται προτεραιότητα στην γάστρα και το deck των σκαφών, τα οποία αποτελούν και τα σημαντικότερα μέρη της. Στον πίνακα 1.12 φαίνονται οι ελάχιστες τιμές ιδιοτήτων για πολύστρωτα από CSM με 0,3 συγκέντρωση κατά βάρος, σύμφωνα με τον Lloyd's Register.

Πίνακας 1.12: Ρητίνες επίστρωσης, ελάχιστες τιμές ιδιοτήτων για πολύστρωτα από CSM με 0,3 συγκέντρωση κατά βάρος (LR) [5]

Properties	Minimum value
Tensile strength (stress at maximum load)	90 N/mm ²
Secant modulus at 0,25% and 0,5% strain respectively	6,9 kN/mm ²
Compressive strength (stress at maximum load)	125 N/mm ²
Compressive modulus	6,4 kN/mm ²
Flexural strength (stress at maximum load)	160 N/mm ²
Modulus of elasticity in flexure	5,7 kN/mm ²
Apparent interlaminar shear strength (see Note)	18 N/mm ²
Fibre content	As measured (0,3)
Water absorption	70 mg (max)
Note Applicable only to the special test for environmental control resins.	

Σύμφωνα με τον DNV [4] στο κεφάλαιο *DNV-RU-SHIP pt.2 ch.3 Non metallic materials* στο εδάφιο για την διαδικασία επίστρωσης, πιο συγκεκριμένα αναφέρει:

Το υλικό ενίσχυσης πρέπει να εφαρμόζεται με την σειρά (stacking sequence) η οποία έχει υποβληθεί και εγκριθεί.

Η πρώτη στρώση πρέπει να τοποθετηθεί όσο πιο σύντομα γίνεται μετά την εφαρμογή του gel coat. Αυτή η στρώση μπορεί να είναι υαλοπίλημα ή υαλοϋφασμα με μικρό βάρος ανά μονάδα επιφάνειας και υψηλή περιεκτικότητα ρητίνης (π.χ. για ίνες γυαλιού: μέγιστο βάρος $450 \frac{g}{m^2}$ και μέγιστης περιεκτικότητας 30% γυαλιού ανά βάρος).

Εάν η επιφανειακή προστασία επιτυγχάνεται με χρήση gel coat, τότε η επιφάνεια αυτή πρέπει να έχει ομοιόμορφο πάχος μεταξύ 0.4 -0.6 mm, και να επιτυγχάνεται με ικανοποιητική μέθοδο.

Πολύστρωτα φτιαγμένα με εποξική ρητίνη συνήθως δεν έχουν στρώση gel – coat.

Η ρητίνη πρέπει να απλώνεται σε κάθε ξεχωριστή στρώση ενίσχυσης. Θύλακες αερίων και οξυγόνου πρέπει να αφαιρούνται από το πολύστρωτο πριν την επίστρωση καινούριας στρώσης. Το πάτημα κάθε στρώσης με το ρολό, πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στις γωνίες και στις απότομες αλλαγές γεωμετρίας. Το ιξώδες και ο χρόνος τζελαρίσματος της ρητίνης πρέπει να είναι επαρκής ώστε να αποφευχθεί το drain out της ρητίνης σε κάθετες ή επικλινείς επιφάνειες. Τα εργαλεία και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή του πολύστρωτου δεν πρέπει να καταστρέφουν τις ίνες.

Ο χρόνος που απαιτείται ενδιάμεσα σε κάθε ξεχωριστή στρώση ενίσχυσης θα πρέπει να είναι εντός ορίων που επιβάλλει ο προμηθευτής της ρητίνης. Για πολύστρωτα με μεγάλη πάχη απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος ώστε να αποφευχθεί υπέρογκη έκλυση θερμότητας λόγω του μεγάλου εξώθερμου της διαδικασίας.

Το σύστημα για το curing των πολύστρωτων πρέπει να επιλεχτεί λαμβάνοντας υπόψη την αντιδραστικότητα της ρητίνης σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή. Η έκλυση θερμότητας κατά την διάρκεια του curing πρέπει να συγκρατείται σε ασφαλή επίπεδα σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή του υλικού.

Μετά την ολοκλήρωση της επίστρωσης, τα πολυεστερικά πολύστρωτα πρέπει να υποστούν curing για τουλάχιστον 48 ώρες σε θερμοκρασία αέρα με ελάχιστη τιμή 18°C. Σκλήρυνση σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες και μικρότερη χρονική περίοδο είναι αποδεκτή εάν παρακολουθείται ο βαθμός του curing. Για διαφορετικού είδους ρητίνες η ξεκούραση μπορεί να γίνει σύμφωνα με τον συγκεκριμένο κύκλο ξεκούρασης και σύμφωνα με τις οδηγίες του προμηθευτή. Στον πίνακα 1.13 παρουσιάζεται η σχέση του χρόνου του post-curing με την θερμοκρασία για πολυεστερικές ρητίνες.

Πίνακας 1.13: Σχέση post-cure time –θερμοκρασίας για πολυεστερικές ρητίνες

Temperature	20°C	30°C	40°C	80°C	120°C
Post-Cure Time	30 days	14 days	3 days	7 hours	2 hours

1.3.7 Χώρος κοπών (τριμαρίσματος)

Στον χώρο αυτόν παράγονται μεγάλες ποσότητες σκόνης και συνεπώς πρέπει να έχει ισχυρό σύστημα εξαερισμού και σύστημα συγκέντρωσης των αποβλήτων σκόνης, ώστε να απορρίπτονται κατάλληλα και να μην διαχέονται στην ατμόσφαιρα. Δεν είναι απαραίτητο η θερμοκρασία να είναι εντός σταθερών ορίων όπως αυστηρά απαιτείται στους προηγούμενους χώρους, παρά μόνο για τη βελτίωση των συνθηκών εργασίας. Στον χώρο αυτόν γίνεται χρήση ειδικών εργαλείων κοπής όπως ηλεκτρικά ψαλίδια, ψαλίδια αέρος, ψαλίδια «καταρράκτες»

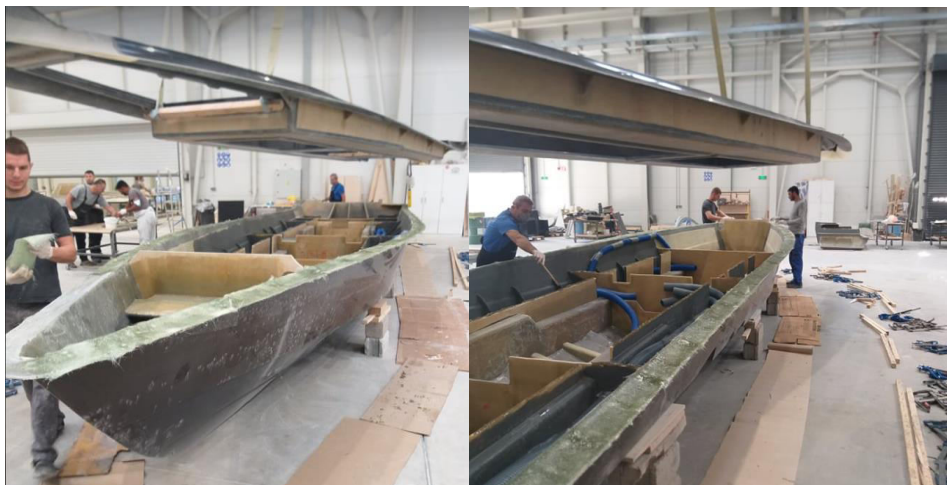
κοπής υφασμάτων, ηλεκτρικοί τροχοί κοπής υφασμάτων κτλ. , όπως φαίνονται στο σχήμα 1.23.



Σχήμα 1.23 : Ηλεκτρικό ψαλίδι , τροχός κοπής υφασμάτων

1.3.8 Χώρος συναρμολόγησης ημιέτοιμων.

Ο χώρος αυτός είναι συνήθως η μεγάλη αίθουσα του ναυπηγείου, όπου ξεκαλουπώνονται όλα τα προϊόντα (είτε είναι μικρά καπάκια είτε γάστρες είτε καταστρώματα) και συναρμολογούνται μεταξύ τους με τη βοήθεια κολλητικών μέσων και πρόσθετων στρώσεων σ.υ. Εδώ συναρμολογείται η γάστρα με το κατάστρωμα σε ένα τελικό προϊόν, για να προκύψει το σκαρί του σκάφους. Στον χώρο αυτόν είναι απαραίτητη η ύπαρξη είτε μίας είτε περισσότερων γερανογεφυρών ικανής ανυψωτικής ικανότητας και ύψους ανάρτησης, για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες μεταφοράς των παραγόμενων σκαφών. Φωτογραφίες του χώρου αυτού παρουσιάζονται στο σχήμα 1.24.



Σχήμα 1.24 : Ένωση γάστρας – deck στον κύριο χώρο σύγχρονου ναυπηγείου

1.3.9 Φινιριστήριο

Στο φινιριστήριο υπάρχουν συνήθως δύο επιμέρους χώροι, ο χώρος προετοιμασίας των προϊόντων (τρίψιμο-στοκάρισμα-τρίψιμο, μόνωση για βάνιμο κτλ.) και ο χώρος βαφής και τελικού γυαλίσματος/φινιρίσματος. Εάν απαιτείται και εξωτερική βαφή των σκαφών, τότε δημιουργείται ξεχωριστό δωμάτιο «φούρνος» ιδανικά εξοπλισμένο με ειδικό σύστημα κλιματισμού και οπωσδήποτε με ειδικό σύστημα εξαερισμού που διατηρεί τον χώρο πάντα σε υπερπίεση με νωπό αέρα μέσω φίλτρων, και σύστημα θέρμανσης μεγάλων απαιτήσεων σε ταχύτητα θέρμανσης για διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας και κατάλληλης υγρασίας. Πληροφορίες σχετικά με την παραγωγή μεγάλων πλοίων από FRP μεγέθους της τάξης των 50 m και τη σχετική οργάνωση ενός ναυπηγείου μπορούν να βρεθούν στο Shenoι-1993β [6]. Όλα τα παραπάνω ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των χώρων παραγωγής σκαφών (θερμοκρασία, υγρασία, απαγωγή σκόνης, κτλ.) προδιαγράφονται και από σχετικούς κανονισμούς Νηογνωμόνων (BV-2021β Sec. 11, Ch. 5, Hull construction and shipyard procedures [3], DNV-2021στ, Part 8, Ch. 2 Construction Procedures [4]), όπου σημαντική πρόσθετη απαίτηση είναι η ύπαρξη από το ναυπηγείο συστήματος ιχνηλασιμότητας (traceability) τόσο των πρώτων υλών, όσο και του εξοπλισμού και της διαδικασίας παραγωγής, από την προμήθεια έως την τοποθέτηση επί του σκάφους.

1.3.10 Κοπτικά εργαλεία

Οι κατηγορίες των κατεργασιών που υφίστανται τα σύνθετα υλικά από GRP είναι οι εξής :

1. Κοπή περιμετρικά του ξεκαλουπωμένου προϊόντος.

Κάθε προϊόν αφού ξεκαλουπωθεί πρέπει να ‘καθαριστεί’ περιμετρικά από τα ξέφτια των υάλων που έχουν προκύψει κατά την επίστρωση μέσα στο καλούπι. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται σαφές όριο του κομματιού και μπορεί να προσαρμοστεί στο συνολικό τελικό προϊόν. Η εργασία αυτή γίνεται με κοπή με μεγάλης διαμέτρου δίσκους (Ø120 και μεγαλύτερους) οι οποίοι στις άκρες τους έχουν επιφάνεια από ζιργκόν (διαμάντι), όπως φαίνονται στα σχήματα 1.25 και 1.26.



Σχήμα 1.25 : Δίσκος κοπής με άκρα από διαμάντι



Σχήμα 1.26 : Δίσκος κοπής με άκρα από διαμάντι και οδοντώσεις

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι εργαλεία είτε αέρος (δουλεύουν με πεπιεσμένο αέρα) είτε ηλεκτρικά. Τα εργαλεία αέρος συνιστώνται για λόγους ασφαλείας του εργαζόμενου, καθώς λειτουργούν μόνο όταν ο εργαζόμενος πατάει τη σκανδάλη, αντιθέτως με τα ηλεκτρικά που δουλεύουν συνεχώς, οπότε σε περίπτωση πτώσης κάποιου εργαλείου μπορεί να αποφευχθεί ο τραυματισμός. Επίσης, λόγω μη χρήσης ηλεκτρικού ρεύματος αποφεύγεται η περίπτωση βραχυκυκλώματος ή ηλεκτροπληξίας. Το μοναδικό πρόβλημα της χρήσης εργαλείων αέρος είναι πως σε περιπτώσεις κοπής πλαστικού υλικού με μεγάλο πάχος μπορεί διαρκώς το εργαλείο να σταματάει να κόβει λόγω έντονης αντίστασης τριβής και σε αυτήν την περίπτωση θα πρέπει να κόβουμε με μικρότερη ταχύτητα, να προσαρμόζουμε την διαδρομή κοπής όπου αυτό είναι δυνατό για να αποφεύγουμε περιοχές με μεγάλο πάχος και να έχουμε αυξημένη πίεση στο δίκτυο αέρα.

Το χαρακτηριστικό των κοπών με αυτά τα εργαλεία είναι πως μπορούμε να πετύχουμε σε σύντομο χρόνο το περιμετρικό καθάρισμα (τριμάρισμα) των προϊόντων, χωρίς ωστόσο να μπορούμε να πετύχουμε κοπές ακολουθώντας διαδρομές με πολλές και μικρές καμπυλότητες ή απότομες γωνίες λόγω του μεγάλου μεγέθους του δίσκου κοπής.

Οι απαιτούμενες ανοχές σε αυτές τις κοπές είναι συνήθως 5-7 mm.

Στην παρακάτω φωτογραφία , στο σχήμα 1.27 φαίνεται μια κακής ποιότητας κοπή σε άνοιγμα σκάφους όπου έχει εσφαλμένα χρησιμοποιηθεί μεγάλος δίσκος κοπής που έχει διαμορφώσει ένα περιμετρικό όριο στην τρύπα με εμφανή λάθη στην κοπή και επίσης είναι πολύ αιχμηρό, ιδίως για την χρήση που προορίζεται (χρήση του εργατή της άγκυρας με τα χέρια σε κάποιες περιπτώσεις).



Σχήμα 1.27 : εσφαλμένη κοπή τρύπας για εργάτη άγκυρας

2. Ακριβείς κοπές προϊόντων και διαμορφώσεις

Για να μπορέσουμε να πετύχουμε ακριβείς κοπές με έντονες γωνίες και καμπυλότητες σε σύνθετα υλικά χρησιμοποιούμε εργαλεία τα οποία είναι πιο μικρά σε διάμετρο αν πρόκειται για δίσκους και μπορούν να ακολουθήσουν δύσκολες διαδρομές. Τέτοια Εργαλεία φαίνονται στις επόμενες φωτογραφίες των σχημάτων 1.28 ,1.29,1.30.



Σχήμα 1.28: Μικρός δίσκος κοπής (εργαλείο αέρος) διαμέτρου $\varnothing 35$, ικανό να κόψει υλικά πάχους $t \leq 5mm$



Σχήμα 1.29: Κοπτικό εργαλείο χειρός με λάμα από ζιργκόν (η λάμα αυτή δεν έχει δοντάκια), με το εργαλείο αυτό μπορούμε να ακολουθήσουμε πολύ δύσκολες γραμμές κοπής, με μοναδικό μειονέκτημα τη μικρή ταχύτητα κοπής. Χρησιμοποιείται για σύνθετα πάχους $t \leq 5mm$



Σχήμα 1.30: Σέγα χειρός με λαμα από ζιργκόν (στην συγκεκριμένη φωτογραφία το ζιργκόν έχει αντικατασταθεί από δοντάκια). Το εργαλείο αυτό είναι συνήθως ηλεκτρικό και μας δίνει τη δυνατότητα να κόψουμε σύνθετα υλικά με σχετικά μεγαλύτερο πάχος από το κοπτικό εργαλείο χειρός με λάμα ($t \leq 8 - 10mm$) αλλά με μεγαλύτερη δυσκολία λόγω του μεγέθους του εργαλείου, του βάρους του και του καλωδίου.

Στις κοπές αυτής της κατηγορίας οι ανοχές είναι αρκετά μεγάλες και μπορούν να φτάσουν και τα 1-2 mm. Το κυριότερο πρόβλημα που εμφανίζεται σε αυτές τις κοπές είναι επειδή τα εργαλεία αυτά έχουν μικρές διαστάσεις των κοπτικών άκρων τους μπορεί εύκολα να σπάσουν ή να μην μπορούν να κόψουν με παραγωγική ταχύτητα (ή πολλές φορές και καθόλου) κάποια σύνθετα υλικά που έχουν μεγάλο πάχος (10 mm και άνω). Το πρόβλημα αυτό υπερνικάται με τη χρήση πρώτα κάποιου μεγαλύτερου εργαλείου (πχ δίσκου κοπής) το οποίο όμως έχει μικρότερη ακρίβεια και έπειτα με τη χρήση του εργαλείου διαμόρφωσης.

Η παρακάτω φωτογραφία, στο σχήμα 1.31 δείχνει ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κοπής σε GRP προϊόν, όπου η γραμμή κοπής έχει έντονες γωνίες και καμπυλότητες.



Σχήμα 1.31: GRP, με έντονες καμπυλότητες

3. Διαμόρφωση λεπτομερειών και περιμετρικών ακμών

Ακόμη και τα μικρά εργαλεία που είδαμε στις προηγούμενες φωτογραφίες δεν μπορούν να κάνουν μερικές διαμορφώσεις κοπών σε πολυεστερικά κομμάτια με καλό αποτέλεσμα. Εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό το σκοπό φαίνονται παρακάτω, στα σχήματα 1.32-1.33.



Σχήμα 1.32: Περιστροφικό εργαλείο (« σβουράκι ») αέρος, το οποίο αποτελείται από πολλά μικρά φύλλα γυαλόχαρτων που περιστρεφόμενα τρίβουν και κόβουν τον πολυεστέρα. Χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση του σόκορου των περιμέτρων κοπής ώστε να μην έχει κοφτερή ακμή, ή για τις ενώσεις δύο ακμών που θέλουμε να έχουν μια μικρή καμπυλότητα (filleting) μεταξύ τους και όχι γωνία.



Σχήμα 1.33 : Άλλα διάφορα άκρα περιστροφικών εργαλείων αέρος.



Σχήμα 1.34 : Κορδέλα γυαλόχαρτου διαφόρων πλατών (10-30 mm) που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που θέλουμε να λειάνουμε ακμές ή να επεξεργαστούμε περιοχές που είναι δύσκολα προσβάσιμες.



Σχήμα 1.35 : Δράπανο για δημιουργία τρυπών για βίδες ή για τρύπημα μεγαλύτερης διαμέτρου (με ποτηροτρύπανα) για τοποθέτηση εξαρτημάτων (π.χ. φώτα, σωληνώσεις κτλ.)

Οι ανοχές των κοπών αυτών είναι αρκετά μεγάλες και πολλές φορές φθάνουν και το 1 mm.

4. Διαμόρφωση εσωτερικών επιφανειών σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά που παράγονται σε ανοιχτό καλούπι με την κλασική μέθοδο επίστρωσης με το χέρι, χρειάζονται συνήθως μια περαιτέρω επεξεργασία της εσωτερικής επιφάνειάς τους (όχι αυτής που βγαίνει γυαλισμένη και βαμμένη με gel coat από το καλούπι). Η επεξεργασία αυτή ποικίλει ανάλογα με το είδος και τη χρήση του συγκεκριμένου προϊόντος και αντίστοιχα ποικίλουν και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται. Σε κάθε περίπτωση ο χρόνος και τα αναλώσιμα υλικά που ξοδεύονται για την περαιτέρω επεξεργασία της εσωτερικής επιφάνειάς μπορεί να μειωθούν με βελτίωση του τρόπου επίστρωσης μέσα στο καλούπι.

4^α. Διαμόρφωση εσωτερικών επιφανειών που πρόκειται να επεξεργαστούν δευτερογενώς

Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι οι επιφάνειες δύο διαφορετικών προϊόντων που ενώνονται (μετά το ξεκαλούπωμα) και σχηματίζουν ένα τελικό προϊόν. Σε αυτήν την περίπτωση οι επιφάνειες που θα επεξεργαστούν δευτερογενώς με επίστρωση ρητίνης και γυαλιού θα πρέπει να είναι καλά τριμμένες ώστε να μπορέσει να φύγει τελείως η κρούστα της ρητίνης που δημιουργείται στην τελευταία στρώση του πολύστρωτου και να «αγριέψει» η επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι ρητίνες έχουν κάποιο χρονικό όριο (wet on wet time) μέσα στο οποίο πρέπει να γίνεται η επίστρωση μιας στρώσης επάνω στην προηγούμενη, ώστε να μπορεί συγκολληθεί σωστά και τα προϊόντα που ξεκαλουπώνονται

συνήθως τον ξεπερνούν αυτόν τον χρόνο. Τέλος, όλες οι εσωτερικές επιφάνειες πρέπει να είναι τριμμένες καλά για να μπορέσουν να βαφτούν εσωτερικά με χρώμα top coat.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για αυτόν τον σκοπό είναι τα εξής:



Σχήμα 1.36 :Τριβείο «χούφτα» αέρος. Προσαρμόζονται επάνω του στρογγυλά γυαλόχαρτα και με περιστροφική, έκκεντρη κίνηση τρίβει και διαμορφώνει την επιφάνεια του σύνθετου



Σχήμα 1.37:Παλμικό τριβείο, το οποίο κινείται παλμικά προς μια διεύθυνση και τρίβει την εσωτερική επιφάνεια του πολύστρωτου.

Τα προβλήματα σε αυτές τις επεξεργασίες είναι κυρίως η σωστή χρήση γυαλόχαρτου και του εργαλείου για να μην υπάρχει έντονη φθορά και «στόμωμα» του γυαλόχαρτου και του εργαλείου από τα υπολείμματα τριβής του σύνθετου υλικού.

Χαρακτηριστική φωτογραφία που δείχνει την μορφή που πρέπει να έχει μια επιφάνεια που πρέπει να επεξεργαστεί δευτερογενώς είναι η παρακάτω, όπου φαίνεται ένα πολυεστερικό κομμάτι που έχει τοποθετηθεί μέσα σε ένα άλλο και πρόκειται να ενωθούν με επίστρωση. Το ένα κομμάτι έχει ήδη επεξεργαστεί και φαίνεται ότι είναι το χρώμα του πιο ανοιχτό και mat σε σχέση με το άλλο προϊόν.



Σχήμα 1.38: Πλαστικοποίηση πρύμνης καθρέπτη

4β. Διαμόρφωση εσωτερικών επιφανειών που πρόκειται να συγκολληθούν

Μια χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι η κόλληση περιμετρικά του καταστρώματος και της γάστρας ενός σκάφους. Σε αυτήν την περίπτωση, η προηγούμενη επεξεργασία δεν αρκεί και πρέπει να γίνει αρκετά μεγαλύτερο αγρίεμα της επιφάνειας συγκόλλησης και των δυο προϊόντων, οπότε χρησιμοποιούνται πιο ισχυρά τριβεία. Ένα τέτοιο εργαλείο περιστροφικό είναι και αυτό που φαίνεται στην φωτογραφία.



Σχήμα 1.39:Περιστροφικό εργαλείο τριβής για επιφάνειες που συγκολλούνται. Το εργαλείο αυτό έχει ένα μεταλλικό άκρο το οποίο το ίδιο έχει άγρια επιφάνεια και άρα δεν χρησιμοποιεί γυαλόχαρτα. Ονομάζεται εργαλείο «πέτρας». Είναι

δύσκολο στη χρήση του, θέλει μεγάλη επιμονή και αρκετά περάσματα επάνω από την επιφάνεια και παράγει πάρα πολύ θόρυβο, ο οποίος προκαλεί δυσφορία στον ίδιο τον εργαζόμενο αλλά και στους γύρω του και άρα απαιτείται η χρήση ειδικών ακουστικών.

Σε όλες τις παραπάνω κατεργασίες σύνθετων υλικών πρέπει να μην ξεχνάμε τα εξής :

A) Να γίνεται χρήση μέσων ατομικής προστασίας από τον εργαζόμενο (φόρμα εργασίας, παππούτσια εργασίας, προστατευτικά γυαλιά, μάσκα, γάντια κτλ.)

B) Να υπάρχει απαγωγή της σκόνης με απορρόφηση.

Γ) Να τηρούνται όλες οι οδηγίες λειτουργίας των εργαλείων όπως προβλέπει ο κατασκευαστής και να γίνεται σωστή χρήση του ενδεδειγμένου εργαλείου για κάθε εργασία.
Λάθος χρήση μπορεί να προκαλέσει τραυματισμό.

1.4 Παραγωγικές διαδικασίες

1.4.1 Επίστρωση με το χέρι (hand lay- up)

Η τεχνική της επίστρωσης με το χέρι, αν και «πρωτόγονη» είναι μια αποτελεσματική μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα για την δημιουργία πρωτότυπων ή σε μικρές παραγωγές. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε αυτήν την τεχνική είναι οι ίνες γυαλιού E και πολυεστερικές ρητίνες, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υλικά με υψηλότερες ιδιότητες. Η ενίσχυση είναι συνήθως σε μορφή υαλοπλήματος (CSM) ή υαλοϋφάσματος (Woven Roving).

Στην πιο συνηθισμένη μορφή της τεχνικής αυτής, χρησιμοποιείται θηλυκό καλούπι το οποίο συνήθως είναι και αυτό φτιαγμένο από GRP, το οποίο έχει φτιαχτεί από αρσενικό πρότυπο και έχει αναποδογυριστεί. Το καλούπι αυτό, στηρίζεται σε ξύλινες ή ατσάλινες βάσεις ώστε να επιτευχθεί η τοπική ενίσχυση του και να αντέχει τα φορτία κατά την διάρκεια της κατεργασίας του. Η επιφάνεια του καλουπιού πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο λεία ώστε να δώσει όσο τον δυνατό καλύτερη τελική ποιότητα στο τελικό προϊόν αλλά και να διευκολύνει το ξεκαλούπωμα. Σε αυτό βοηθάει ένα ειδικό gel coat με «αντικολλητικές ιδιότητες», το οποίο αποτρέπει την ρητίνη να κολλήσει στην επιφάνεια του καλουπιού. Σύνηθες είναι επίσης να χρησιμοποιείται ένα επιφανειακό διαχωριστικό αμέσως μετά την εφαρμογή του gel coat ώστε να αποφευχθεί το φαινόμενο του print-through, των ενισχυτικών ινών, στην εξωτερική επιφάνεια.

Μόλις το gel coat στεγνώσει σε ικανοποιητικό βαθμό, τοποθετούνται οι στρώσεις των ινών, μια τη φορά. Ρητίνη αναμειγμένη με καταλύτη, τοποθετείται και απλώνεται πάνω στη στρώση με την βοήθεια ρολού. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε στρώση μέχρι να επιτευχθεί το ζητούμενο πάχος του πολύστρωτου. Για πολύστρωτα με μεγάλα πάχη, πρέπει να γίνονται απαραίτητα κάποια διαλλείματα ενδιάμεσα, λόγω του υψηλού εξώθερμου

της διαδικασίας. Τοπικές ενισχύσεις μπορούν να γίνουν ώστε να προσδώσουν τοπική ακαμψία και αντοχή, καθώς επίσης τοποθέτηση ειδικών πολυμερών (foams) ή ξύλινων επιθεμάτων (κόντρα – πλακέ) για τον ίδιο λόγο. Αυτή η τεχνική έχει σαν αποτέλεσμα συνήθως πολύστρωτα με 30-35% περιεκτικότητα σε ίνες, για πολύστρωτα απο Chopped Strand Mat. Στο σχήμα 1.33 φαίνεται σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας hand lay up. Στον πίνακα 1.13 παρουσιάζονται τυπικές περιεκτικότητες κατ' όγκο για διαφορετικού τύπου ενισχύσεις , σύμφωνα με τον Lloyd's Register.

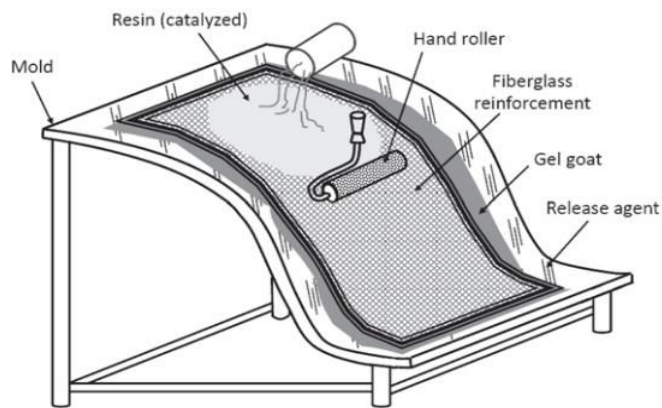
Πίνακας 1.13 : Περιεκτικότητα κατ' όγκο για διαφορετικού τύπου ενισχύσεις (LR) [5]

Reinforcement type	Content by volume nominal values
Unidirectional	0,41
Chopped strand mat	0,17
Woven roving	0,32
Woven cloth	0,32
Composite roving (see Note)	0,28
Gun rovings	0,19
±45° stitched parallel plied roving	0,32
Triaxial parallel plied roving	0,32

Quadriaxial parallel plied roving	0,32
-----------------------------------	------

Note The volume content may be converted to weight fractions by use of the formula: $W_F = V_F D_F / (D_F V_F + D_R V_R)$ where W_F = fibre fraction by weight D_F = density of fibre D_R = density of cured resin V_F = fibre fraction by volume V_R = resin fraction by volume

Το κύριο πρόβλημα αυτής της τεχνικής είναι πως το τελικό προϊόν θα έχει στο τέλος μόνο την μια επιφάνεια της λεία. Η απουσία ελέγχου του τοπικού πάχους, της συγκέντρωσης των ινών, της δημιουργίας κενών και της ποιότητας στην εσωτερική επιφάνεια του τελικού προϊόντος έχει σαν αποτέλεσμα αυτή η τεχνική να χρησιμοποιείται σε κατασκευές χαμηλής μηχανικής καταπόνησης και σε σημεία όπου η ακρίβεια στις διαστάσεις είναι λιγότερο σημαντική. Παρόλο που το αρχικό κεφάλαιο είναι χαμηλό, απαιτούνται πολλές εργατοώρες και ο ποιοτικός έλεγχος της τεχνικής αυτής είναι σχετικά δύσκολος. Η ποιότητα του τελικού προϊόντος εξαρτάται από την ικανότητα του εργάτη. Στο σχήμα 1.40 παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση της τεχνικής Hand Lay up.



Σχήμα 1.40: Σχηματική αναπαράσταση hand lay up

Η τεχνική αυτή παραμένει πολύ σημαντική για μικρές παραγωγές, παρόλο που οι νέοι νόμοι περί εκπομπών βλαβερών ουσιών έχουν οδηγήσει πολλούς παραγωγούς στην εξερεύνηση λύσεων και τεχνικών με χρήση καλουπιών κλειστού τύπου. Η επιστροφή με το χέρι σε ανοιχτά καλούπια χρησιμοποιείται για κατασκευές από ίνες γυαλιού και πολυεστέρα, αλλά υπάρχουν περιβαλλοντικές ανησυχίες λόγω της απελευθέρωσης στυρενίου στην ατμόσφαιρα. Πλέον υπάρχουν καινούριες τεχνικές για την παραγωγή όμοιων τμημάτων με την χρήση καλουπιών κλειστού τύπου, που αποφεύγουν αυτό το φαινόμενο.

Γενικά, κάθε κράτος έχει δική του νομοθεσία σε ότι αφορά την υγεία των εργαζομένων. Οδηγίες έχουν δοθεί για τον έλεγχο και την διατήρηση της ποιότητας του αέρα καθώς επίσης και στα μέγιστα όρια συγκέντρωσης και στον χρόνο έκθεσης σε τοξικές ουσίες. Για παράδειγμα, στο Ηνωμένο Βασίλειο, η μέγιστη συγκέντρωση στυρενίου στον αέρα του ναυπηγείου είναι 100 ppm. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, έχουν επίσης τεθεί όρια για τον έλεγχο των εργαζομένων σε επικίνδυνες χημικές ουσίες. Αυτά τα όρια έχουν αναπτυχθεί από το American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), όπως φαίνονται στο πίνακα 1.13.

Πίνακας 1.13 : Έκθεση σε βλαβερές ουσίες [7]

Table 3.10. Permissible exposure limits and health hazards of some composite materials [23].			
COMPONENT	PRIMARY HEALTH HAZARD	TLV-TWA	TLV-STEL
Styrene Monomer	Styrene vapours can cause eye and skin irritation. It can also cause systemic effects on the central nervous system.	50 ppm	100 ppm
Acetone	Overexposure to acetone by inhalation may cause irritation of mucous membranes, headache and nausea.	750 ppm	1000 ppm
Methyl Ethyl Keytone (MEK)	Eye, nose and throat irritation.	200 ppm	300 ppm
Polyurethane Resin	The isocyanates may strongly irritate the skin and the mucous membranes of the eyes and respiratory tract.	0.005 ppm	0.02 ppm
Carbon and Graphite Fibres	Handling of carbon & graphite fibres can cause mechanical abrasion & irritation.	10 mg/m ³ *	-
Fibreglass	Mechanical irritation of the eyes, nose and throat.	10 mg/m ³ †	-
Aramid Fibres	Minimal potential for irritation to skin.	5 fibrils/cm ³ ‡	-

* Value for total dust - natural graphite is to be controlled to 2.5 mg/m³.
 † Value for fibrous glass dust - although no standards exist for fibrous glass, a TWA of 15 mg/m³ (total dust) and 5 mg/m³ (respirable fraction) has been established for "particles not otherwise regulated".
 ‡ Acceptable exposure limit established by Du Pont based on internal studies.

- Όριο έκθεσης – μέσος όρος έκθεσης (TLV-TWA), ορίζεται ο μέσος όρος συγκέντρωσης ανά ουσία, όπου στο κανονικό δωρο την ημέρα και στις 40 ώρες την εβδομάδα, δεν επιβαρύνει την υγεία των εργαζομένων.
- Όριο έκθεσης – μικρής διάρκειας έκθεση (TLV-STEL) – η συγκέντρωση στην οποία οι εργαζόμενοι μπορούν να εκτεθούν συνεχόμενα για μικρή χρονική περίοδο (15 λεπτά) χωρίς να υποφέρουν από (1) ενόχληση (2) χρόνια ή μη αναστρέψιμα αναπνευστικά προβλήματα (3) νάρκωση σε βαθμό που αυξάνει την πιθανότητα εργατικού ατυχήματος ή μειώνει την παραγωγικότητα, με δεδομένο ότι το όριο αυτό δεν ξεπερνιέται.
- Όριο έκθεσης – Ανώτατο όριο (TLV-C) - η συγκέντρωση η οποία δεν πρέπει να ξεπερνιέται σε κανένα στάδιο της ημέρας.

1.4.3 RTM (Resign Transfer Moulding)

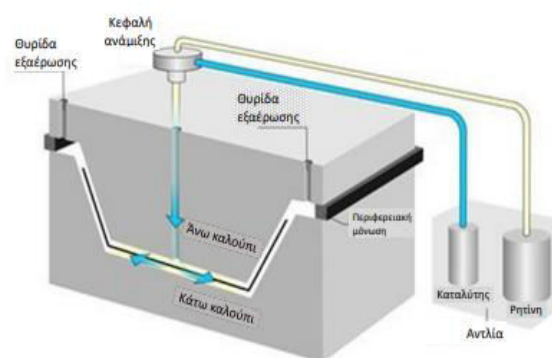
Με την εισαγωγή των προϊόντων από σύνθετα υλικά μετά τον 2ο παγκόσμιο πόλεμο η τεχνική της επίστρωσης με το χέρι αποτελούσε την κύρια μέθοδο κατασκευής τέτοιων προϊόντων. Αυτή η τεχνική επικράτησε όλα αυτά τα χρόνια λόγω της απλότητας της, αλλά και λόγω του χαμηλού κόστους των εργαλείων που χρειάζονται. Παρόλα αυτά, η ποιότητα του τελικού προϊόντος έχει μεγάλη εξάρτηση από την δεξιοτεχνία των εργατών. Ακόμα όμως και στην περίπτωση καλά εκπαιδευμένου προσωπικού, τα προϊόντα αυτά έχουν μόνο την μια

επιφάνεια τους με καθορισμένη γεωμετρία, δεν είναι σωστά ελεγχόμενο το πάχος τους και ως άμεση συνέπεια, δεν υπάρχει σαφής καθορισμός της περιεκτικότητας των ινών στο τελικό προϊόν. Επιπλέον, το υλικό θα περιέχει μεγάλο αριθμό θυλάκων αέρος, ή κενών. Η παραπάνω τεχνική είναι πολύ χρονοβόρα με τις μισθολογικές δαπάνες να αποτελούν το κύριο μέρος του κόστους παραγωγής του προϊόντος. Επιπλέον, σε μια γραμμή παραγωγής, που χρησιμοποιεί αυτήν την τεχνική, θα πρέπει να υπάρχει μεγάλος αριθμός καλουπιών ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή παραγωγικότητα. Με τα χρόνια, έγιναν πολλές προσπάθειες για την βελτίωση της παραγωγικότητας της διαδικασίας και της ποιότητας των προϊόντων.

Η πρώτη προσπάθεια αύξησης της παραγωγικότητας και μείωσης των εξόδων έγινε με την τεχνική του spray lay – up με τα τελικά προϊόντα όμως να έχουν σημαντικά χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες. Η μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων οφείλεται στον τυχαίο προσανατολισμό των ινών, χωρίς να δίνεται έμφαση στις διευθύνσεις των φορτίων που δέχεται το τελικό προϊόν. Έτσι, για την βελτίωση της ποιότητας και την επίτευξη υψηλότερης περιεκτικότητας ινών αναπτύχθηκαν οι ακόλουθες 3 τεχνικές :

1. Bag moulding
2. Drape moulding
3. Autoclave moulding

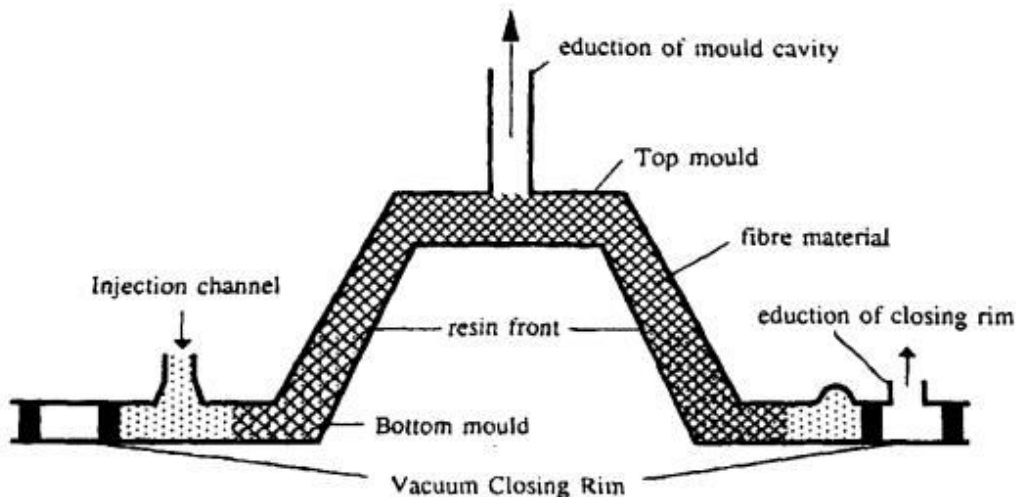
Σε όλες αυτές τις τεχνικές, αμέσως μετά την επίστρωση με το χέρι ή το spray lay up, η περίσσεια ρητίνης απομακρύνεται από το υλικό με την βοήθεια πίεσης. Η ροή της ρητίνης απομακρύνει μαζί της και τα κενά αέρος. Όταν οι γεωμετρικές ανοχές είναι πολύ μικρές, είναι αναγκαία η χρήση 2 καλουπιών. Στο σχήμα 1.41 και σχήμα 1.42 παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου έγχυσης ρητίνης (RTM).



Σχήμα 1.41: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου έγχυσης ρητίνης (RTM)

Στην περίπτωση που απαιτούνται κατασκευές με απόλυτα καθορισμένη γεωμετρία, μικρές γεωμετρικές ανοχές και λείες και ομαλές επιφάνειες παντού, ενδείκνυται η χρήση δύο καλουπιών, ενός αρσενικού και ενός θηλυκού. Μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιούν κλειστό καλούπι είναι η μέθοδος έγχυσης ρητίνης (Resin Transfer Moulding, RTM). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, τοποθετούνται αρχικά στο ανοιχτό καλούπι τα υφάσματα των

ινών ξηρά, χωρίς δηλ. να έχουν εμποτιστεί με ρητίνη. Αφού κλείσει το καλούπι, ρητίνη χαμηλού ιξώδους εγχύεται με πίεση στην ειδικά διαμορφωμένη κοιλότητά του (Σχήμα 1.34). Η ρητίνη εισέρχεται από το κανάλι έγχυσης και ρέει ανάμεσα από τις ίνες εμποτίζοντάς τις, προς τις θυρίδες εξαέρωσης. Καθώς οι ενισχυτικές ίνες ανθίστανται στη ροή αυτή, χρειάζεται μια δύναμη για τη διατήρησή της. Η δύναμη αυτή είναι η διαφορά μεταξύ της πίεσης της ρητίνης στο κανάλι έγχυσης και της πίεσης του αέρα μέσα στο καλούπι.



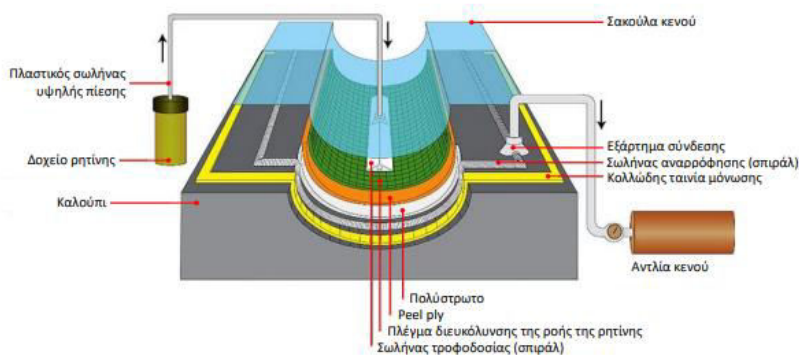
Σχήμα 1.42: Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου έγχυσης ρητίνης (RTM)

Με τη μέθοδο RTM μπορούν να παραχθούν προϊόντα με υψηλές απαιτήσεις ανοχών και λείες εσωτερικές και εξωτερικές επιφάνειες με πολλές εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία. Η περιεκτικότητα κατ' όγκο σε ίνες είναι αρκετά καλή και η περιεκτικότητα σε κενά αέρα χαμηλή. Επιπρόσθετα, μειώνεται αρκετά η εκπομπή των αερίων που παράγονται με άλλες μεθόδους, όπως π.χ. κατά την επίστρωση με το χέρι. Για την επίτευξη μικρών χρόνων πλήρωσης του καλουπιού και για προϊόντα με μεγάλη περιεκτικότητα σε ίνες, απαιτούνται υψηλές τιμές πίεσης. Ως αποτέλεσμα απαιτούνται ανθεκτικά και δύσκαμπτα καλούπια με συνέπεια αυξημένο αρχικό κόστος.

Τελευταίες εξελίξεις πάντως επέτρεψαν την κατασκευή και των ίδιων των καλουπιών από FRP, μειώνοντας αρκετά το κόστος τους και καθιστώντας τη μέθοδο αυτή μια πολύ καλή λύση για τη μαζική παραγωγή ομοειδών τεμαχίων με πολύ καλά χαρακτηριστικά ποιότητας. Αυτό συνέβη συνδυάζοντας την επιβολή εξωτερικής πίεσης στο κανάλι εισόδου με τη δημιουργία υποπίεσης μέσα στο ίδιο το καλούπι. Οι πιέσεις στην παραλλαγή αυτή της μεθόδου είναι πλέον μικρές (1-2 bar), καθιστώντας έτσι εφικτή τη χρήση ελαφρών καλουπιών (RTM light και Vacuum Assisted RTM-VARTM).

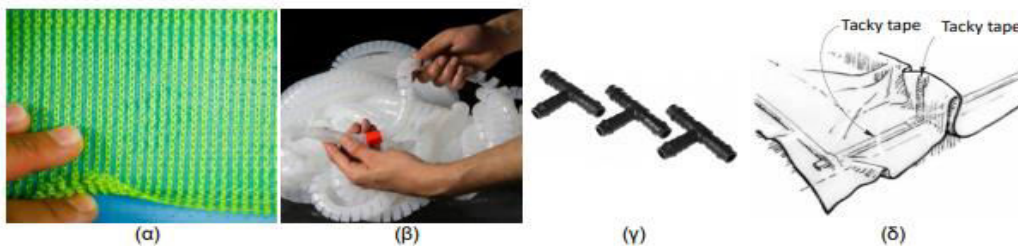
1.4.4 Vacuum infusion

Λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της σε σχέση με τη διαδικασία τοποθέτησης στο χέρι, η μέθοδος έγχυσης υπό κενό έχει κερδίσει πρόσφατα μεγάλη δημοτικότητα για την παραγωγή περυγίων σκαφών από FRP. Τα κατάλληλα υφάσματα ινών εισάγονται αρχικά στο καλούπι σύμφωνα με τις οδηγίες αυτής της μεθόδου, αφού το καλούπι έχει επικαλυφθεί με ένα λεπτό στρώμα αποδέσμευσης, στις στρώσεις και στον προσανατολισμό που καθορίζονται από το δομικό σχέδιο του σκάφους (Σχήμα 1.43). Τα υφάσματα εισάγονται στο καλούπι "στεγνά", δηλαδή χωρίς να έχουν εμποτιστεί με ρητίνη. Στη συνέχεια, ένα εξειδικευμένο σπρέι συγκράτησης, το οποίο είναι χημικά συμβατό με τη ρητίνη που θα χρησιμοποιηθεί, χρησιμοποιείται για τη στερέωση των υφασμάτων στη θέση τους. Στη συνέχεια, πάνω από το τελικό στρώμα υφάσματος ινών, τοποθετούνται με συγκεκριμένη σειρά όλα τα αναλώσιμα της διαδικασίας έγχυσης υπό κενό. Αυτά περιλαμβάνουν τη λεγόμενη στρώση αποκόλλησης (η οποία διευκολύνει την αφαίρεση όλων των στρωμάτων των αναλωσίμων από τη δομή μετά τον πολυμερισμό), το πλέγμα έγχυσης ρητίνης (Σχήμα 1.44α), τις γραμμές αναρρόφησης ρητίνης και τις γραμμές τροφοδοσίας ρητίνης. Οι σωλήνες αυτοί έχουν σχήμα σπείρας (σχήμα 1.44β), επιτρέποντας τη ροή ρητίνης ή αέρα προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση, ανάλογα με το αν είναι σωλήνες αναρρόφησης ή σωλήνες τροφοδοσίας (feed pipes).



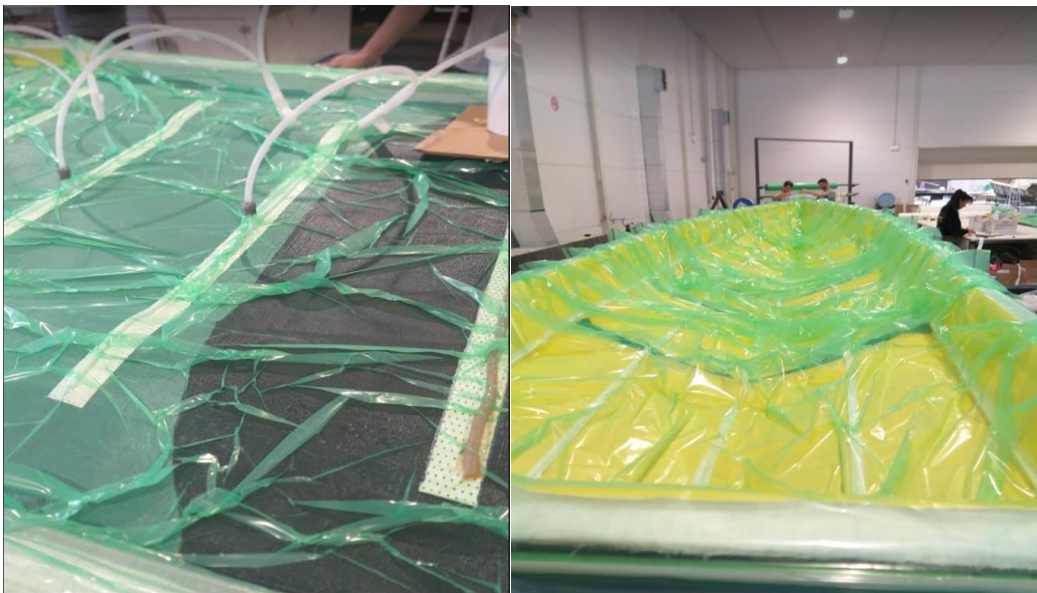
Σχήμα 1.43: Μέθοδος vacuum infusion.

Ολόκληρο το καλούπι καλύπτεται στη συνέχεια από μία διαφανή ελαστική σακούλα, η οποία μονώνεται περιφερειακά με τη βοήθεια μιας κολλώδους ταινίας δύο όψεων (tacky tape, Σχήμα 1.44δ). Όλες οι προηγούμενες διαδικασίες αποτελούν προετοιμασία, η οποία μπορεί να διαρκέσει έως και μερικές ημέρες εάν το σκάφος είναι μεγάλου μεγέθους.



Σχήμα 1.44: Αναλώσιμα

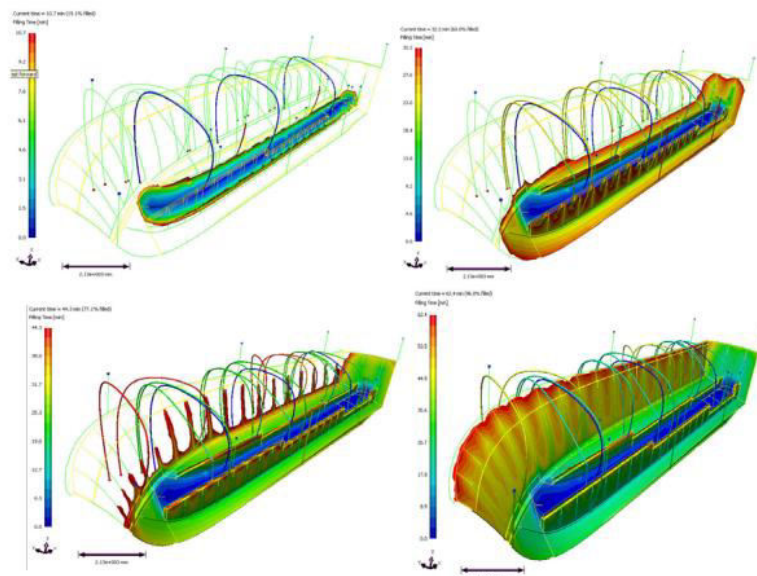
Στο σημείο αυτό μπορεί να αρχίσει η διαδικασία της έγχυσης. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.43, οι σωλήνες αναρρόφησης συνδέονται με μία αντλία κενού, ενώ οι σωλήνες τροφοδοσίας συνδέονται με δοχείο στο οποίο υπάρχει έτοιμη ρητίνη, όπου έχει προστεθεί ήδη ο καταλύτης ή ο σκληρυντής, ανάλογα με το είδος της. Τα δύο συστήματα σωληνώσεων μπορούν να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους ή και όχι. Η λογική της μεθόδου αυτής είναι η αναρρόφηση (μέσω της αντλίας κενού και των γραμμών αναρρόφησης) του αέρα που υπάρχει μεταξύ του καλουπιού και της σακούλας κενού και η συνεπαγόμενη ελεύθερη ροή της ρητίνης από το δοχείο της (μέσω την γραμμών τροφοδοσίας) προς το καλούπι, λόγω της υποπίεσης (-1 bar) που δημιουργείται στον χώρο μεταξύ της σακούλας και του καλουπιού σε σχέση με την ατμοσφαιρική πίεση όπου βρίσκεται το δοχείο ρητίνης. Η διαδικασία ξεκινάει με την αναρρόφηση του αέρα, χωρίς να απελευθερωθούν οι δίοδοι της ρητίνης, μέχρι να συμπιεστούν τελείως από την ατμοσφαιρική πίεση όλα τα υφάσματα και να αφαιρεθεί όλος ο αέρας από μέσα τους. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος για τυχόν ανεπιθύμητες διαρροές με τη βοήθεια ειδικών ευαίσθητων μικρόφωνων. Όταν επιτευχθεί αυτό και έχουμε φτάσει το σχεδόν απόλυτο κενό (-1 bar), απελευθερώνονται οι γραμμές τροφοδοσίας και αφήνουμε τη ρητίνη να εισρεύσει μέσα στο καλούπι, διαποτίζοντας σιγά-σιγά όλα τα υφάσματα των ινών. Δημιουργείται έτσι ένα μέτωπο ρητίνης, το οποίο προχωράει σιγά-σιγά μέχρι να εμποτιστεί όλη η γάστρα. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο Σχήμα 1.45 αριστερά, όπου η σκούρα επιφάνεια είναι εκείνη που έχει ήδη εμποτιστεί με ρητίνη, ενώ στο υπόλοιπο τμήμα τα υφάσματα είναι ακόμη ξηρά.



Σχήμα 1.45: Κατασκευή σκαφών με vacuum infusion.

Σημειώνεται πως η έγχυση της ρητίνης πρέπει να γίνεται προοδευτικά από διαφορετικές θύρες εισαγωγής, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.45 καθώς με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η δημιουργία κενών, επιτυγχάνεται πιο ομαλή ροή και επιταχύνεται η διαδικασία.

Όταν εμποτιστεί όλη η γάστρα και αφήνοντας την αντλία κενού σε λειτουργία, περιμένουμε να πολυμεριστεί η ρητίνη. Σημειώνεται ότι ακριβώς πριν από την αντλία κενού, τοποθετείται ενδιάμεσα στη σωλήνωση αναρρόφησης ένα δοχείο πίεσης (catch pot), στο οποίο συγκρατείται τυχόν περίσσεια ρητίνης έτσι ώστε να μη φτάσει ποτέ στην αντλία. Όταν πολυμεριστεί η ρητίνη, ξεκολλάμε όλα τα αναλώσιμα με τη βοήθεια του reel-ply τραβώντας τα με το χέρι και η γάστρα του σκάφους είναι έτοιμη. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.45, η κατασκευή ενός σκάφους με τη μέθοδο αυτή απαιτεί προσεκτική μελέτη και προετοιμασία, καθώς τα δίκτυα των γραμμών αναρρόφησης και ιδίως εκείνο της τροφοδοσίας θα πρέπει να σχεδιαστούν κατάλληλα και να τοποθετηθούν στρατηγικά μέσα στην επιφάνεια του καλουπιού, έτσι ώστε η ρητίνη, καθώς ρέει, να πάει παντού και να εμποτίσει όλα τα υφάσματα, χωρίς να αφήσει ανεμπότιστες (ξηρές) περιοχές. Για τη μελέτη αυτή υπάρχουν σχετικά εμπορικά λογισμικά, με τα οποία υπολογίζεται επίσης ο χρόνος που απαιτείται για τον πλήρη εμποτισμό της κατασκευής, έτσι ώστε να ρυθμιστεί κατάλληλα και το gel time της ρητίνης, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.46.



Σχήμα 1.46: Simulation of a boat hull infusion using Polyworx™ software clockwise from top left at 10, 32, 44 and 62 minutes (courtesy of DIAB Corporation)



Σχήμα 1.47: Αφαίρεση των αναλώσιμων

Είναι αυτονόητο ότι, εάν τζελάρει η ρητίνη πριν ολοκληρωθεί ο εμποτισμός, δεν θα μπορεί να έχει ροή και θα σταματήσει η διαδικασία. Εάν συμβεί κάτι τέτοιο, δεν υπάρχουν πολλά περιθώρια διόρθωσης και θα πρέπει να απορριφθεί η κατασκευή και να επαναληφθεί η διαδικασία από την αρχή. Σημειώνεται επίσης ότι στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ειδικές ρητίνες με χαμηλό ιξώδες για τη διευκόλυνση της ροής και του εμποτισμού των υφασμάτων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής έναντι της επίστρωσης με το χέρι είναι τα ακόλουθα: – Καλύτερη ποιότητα κατασκευής, αφού η ομοιόμορφη ατμοσφαιρική πίεση αντικαθιστά το πάτημα με το χέρι, έχοντας ως αποτέλεσμα υψηλότερες περιεκτικότητες σε ίνες και μειωμένο αριθμό φυσαλίδων αέρα (και άρα υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες), αποφυγή λαθών και ομοιομορφία στην κατασκευή. – Χρήση των ίδιων καλουπιών που χρησιμοποιούνται και στη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι, χωρίς να απαιτούνται ιδιαίτερες μετατροπές. – Ελαχιστοποίηση των εκπομπών επιβλαβών αναθυμιάσεων κατά τη στερεοποίηση (π.χ. στυρένιο). Ως αντιστάθμισμα, η ανάγκη προσεκτικής μελέτης της διαδικασίας έγχυσης είναι μια πρόσθετη και αρκετά απαιτητική εργασία.

1.4.5 Παράγοντες επίδρασης

1.4.5.1 Προετοιμασία και *post curing*

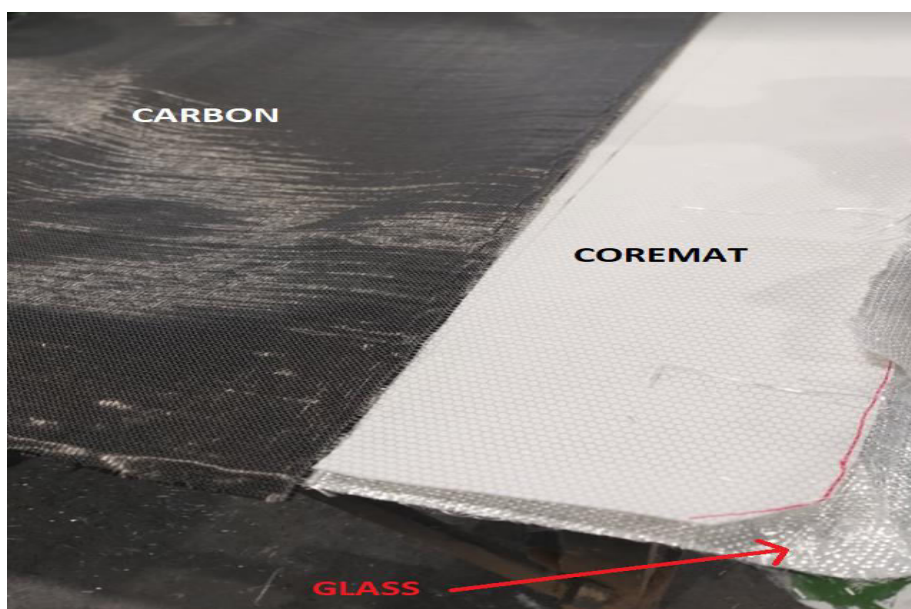
Το vacuum infusion είναι η πλέον εξελιγμένη μέθοδος για κατασκευές από σύνθετα υλικά και χρησιμοποιείται πάρα πολύ στην κατασκευή μικρών σκαφών. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι η πολύ καλή ποιότητα των εξαρτημάτων καθώς και η μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε ίνες (αγγίζει το 65 %), καθώς αφαιρείται η περίσσεια ρητίνης με την βοήθεια της πίεσης.

Εφόσον έχουν στρωθεί τα CSM 300, αρχίζουν και τοποθετούνται υλικά πυρήνα, τα οποία πρακτικά δεν συμμετέχουν στην αντοχή αλλά εμποδίζουν το print through, το φαινόμενο δηλαδή, στο οποίο φαίνονται οι πλέξεις των ινών στην εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής.

Κόβονται και τοποθετούνται κατάλληλα ανάλογα με την γεωμετρία της επιφάνειας και συγκρατούνται στην θέση τους με την βοήθεια κόλας η οποία πρέπει να τοποθετηθεί τόσο ώστε μόνο να συγκρατεί τα υφάσματα στην θέση τους. Εάν μπει παραπάνω από όσο χρειάζεται, θα έχει ως αποτέλεσμα να κλείσουν οι πόροι των υφασμάτων και να μην γίνει σωστά η έγχυση ρητίνης.

Για την ρητίνη έχουμε απαίτηση για μικρότερο ιξώδες από τις άλλες μεθόδους έτσι ώστε να απλώνεται πιο γρήγορα κατά την έγχυση. Επίσης θέλουμε μικρότερο εξώθερμο καθώς θέλουμε να αποφύγουμε την μεγάλη έκλυση θερμότητας κατά την έγχυση. Επιπλέον, απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος πολυμερισμού και για αυτόν τον λόγο στην σύσταση της ρητίνης υπάρχει λιγότερος επιταχυντής. Σύμφωνα με τις παραπάνω απαιτήσεις, ο βινυλεστέρας αποτελεί μια πολύ ικανοποιητική λύση.

Αφού στρωθεί το core material, συνέχεια έχουν οι ίνες άνθρακα. Με την ίδια τεχνική κόβεται και τοποθετούνται κατάλληλα με την επιφάνεια του καλουπιού οι απαιτούμενες στρώσεις ινών άνθρακα. Πάνω από το chine της γάστρας, συνήθως εσωκλείεται και αφρός (foam) για έξτρα δυσκαμψία, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.48. Μέχρι πρόσφατα οι κανονισμοί δεν επέτρεπαν την ύπαρξη αφρού στον πυθμένα της γάστρας (κάτω από το chine) καθώς σε περίπτωση ρήγματος υπάρχει μεγάλη εισχώρηση νερού. Σημειώνεται πως στην πρύμνη δεν προτείνεται η χρήση foam καθώς υπάρχει απαίτηση για μεγαλύτερη δυσκαμψία καθώς φέρνουν το φορτίο των μηχανών. Υλικά όπως κόντρα πλακέ έχουν καλύτερη συμπεριφορά στις απαιτήσεις μας.



Σχήμα 1.48: Τοποθέτηση πανιών για γάστρα



Σχήμα 1.49: Τοποθέτηση Αναλώσιμων

Αφού στρωθούν σωστά τα πανιά όπως έχει μελετήσει ο σχεδιαστής ναυπηγός, σειρά έχει η τοποθέτηση των σωλήνων για την απόθεση της ρητίνης. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην συνδεσμολογία των σωληνώσεων έτσι ώστε να εξασφαλιστεί σταθερή ροή της ρητίνης μέσα σε αυτά. Οι σωληνώσεις έχουν την μορφή σπирάλ δημιουργώντας μικρές εγκοπές περιμετρικά και με αυτόν τον τρόπο περνάει η ρητίνη από τους σωλήνες στα πανιά. Αυτό μας οδηγεί στην απαίτηση οι σωλήνες απόθεσης ρητίνης να μην τοποθετούνται με τρόπο τέτοιο ώστε να υπάρχουν τοπικές παραμορφώσεις. Ο λόγος είναι η απαίτηση για ομοιόμορφο άπλωμα της ρητίνης στις ίνες. Αφού ολοκληρωθούν οι απαιτούμενες στρώσεις που έχουν καθοριστεί από τον ναυπηγό, τοποθετούνται το peel-ply και το infusion mesh . Το peel-ply δίνει καλή επιφάνεια στο πολύστρωτο και βοηθάει στην ομαλή αποκόλληση του δικτιού στο τέλος της διαδικασίας. Το δίχτυ βοηθάει στην καλή ροή της ρητίνης κατά την έγχυση της. Ουσιαστικά δημιουργεί κενό έτσι ώστε να μην κολλάει η ρητίνη και να έχει σταθερή ροή.

Ιδιαίτερη προσοχή κατά την έγχυση ρητίνης, πρέπει να δοθεί στην αποφυγή κενών. Όπως είδαμε και στο σχήμα 1.45, η τροφοδότηση των σωληνώσεων με υλικό πρέπει να γίνεται διαδοχικά και αφού η ρητίνη έχει φτάσει στην επόμενη θύρα εισαγωγής. Όταν υπάρχει ταυτόχρονη τροφοδότηση από όλα τις θύρες εισαγωγής είναι πολύ πιθανό να παγιδευτεί στα ενδιάμεσα σημεία αέρας ο οποίος εμποδίζει την ροή ρητίνης και δημιουργεί κενά αέρα. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε ότι όσο προχωράει η έγχυση ρητίνης και απομακρύνεται από τους σωλήνες τροφοδότησης, τόσο η ταχύτητα έγχυσης μικραίνει. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της στερεοποίησης της ρητίνης. Τα ελαττώματα αυτά είναι πολύ σημαντικό να αποφεύγονται.

Αφού ολοκληρωθεί το vacuum infusion και στερεοποιηθεί η ρητίνη αποκολλάται η σακούλα με το δίχτυ και το peel ply και μένει το πολύστρωτο στο οποίο σε δεύτερη φάση γίνεται το post curing.

Το post curing ή αλλιώς σκλήρυνση είναι μια διαδικασία κατά την οποία θερμαντικές κουβέρτες τοποθετούνται πάνω από το πολύστρωτο με σκοπό να ανεβάσουν την θερμοκρασία του. Αυτό γίνεται με στόχο την αύξηση του HDT (heat deflection temperature, της θερμοκρασίας στην οποία η πλαστική κατασκευή παρουσιάζει παραμορφώσεις υπό την επίδραση φορτίου), των φυσικών ιδιοτήτων και την μείωση της συρρίκνωσης του πολύστρωτου κατά την στερεοποίηση. Είναι γνωστό πως κατά την στερεοποίηση ενός πολύστρωτου υπάρχει συρρίκνωση, η οποία σε μεγάλες επιφάνειες μπορεί να αγγίξει και το χιλιοστό. Ένα χιλιοστό είναι ικανό να οδηγήσει σε ξεκαλούπωμα του εξαρτήματος. Αυτό αποφεύγεται με το curing, αλλά δεν είναι αυτός ο σημαντικότερος λόγος της χρήσης του. Το gel coat του σκάφους κατά την λειτουργία του, ειδικά σε περιόδους καύσωνα, αγγίζει και θερμοκρασίες 120°C. Σε τέτοιες θερμοκρασίες η ρητίνη έχει την τάση να ρευστοποιείται και να ξαναπολυμερίζεται δημιουργώντας παραμορφώσεις. Επίσης πολλές φορές γίνονται ορατές οι εξωτερικές στρώσεις του γυαλιού δημιουργώντας οπτικό πρόβλημα πέρα από το τεχνικό που προαναφέραμε. Αυτά τα προβλήματα γίνονται ακόμα πιο επικίνδυνα στις μαύρες αποχρώσεις του gel coat καθώς όπως γνωρίζουμε έχει αυξημένη θερμοχωρητικότητα. Όλα τα παραπάνω μπορούν να αποφευχθούν αν γίνει σωστό post curing κατά την παραγωγή των εξαρτημάτων πριν την αφαίρεση τους από το καλούπι. Στο σχήμα 1.50 φαίνεται η διαδικασία του post-curing σε καπάκι.

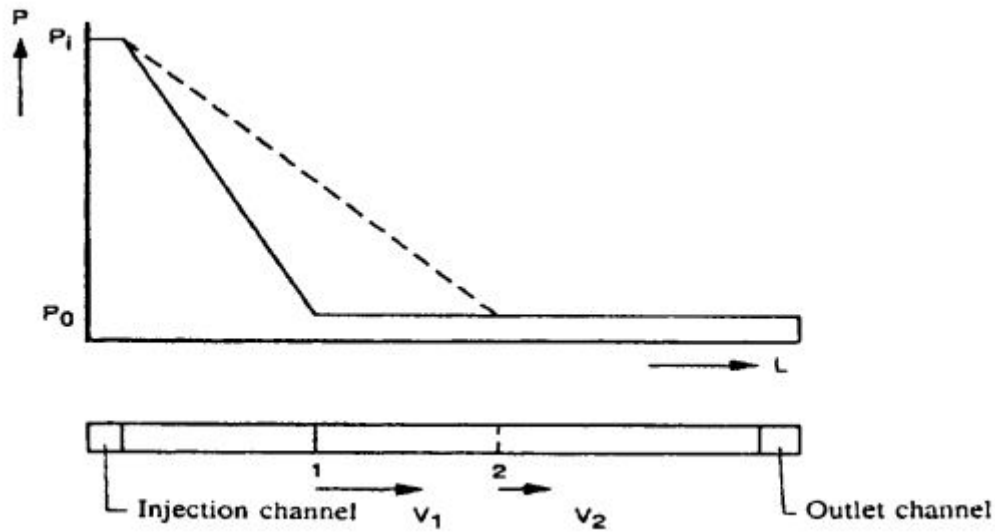


Σχήμα 1.50: Post – curing σε καπάκι

1.4.5.2 Ροή της ρητίνης μεταξύ των δεσμών των ινών

Καθώς το μέτωπο της ροής βρίσκεται ανάμεσα στις θύρες εισαγωγής και εξαγωγής του υλικού, σε κάθε διατομή του εμποτισμένου υλικού μέσα στο καλούπι περνάει ίδιος όγκος

ρητίνης στον ίδιο χρόνο. Καθώς η διαπερατότητα των ινών και το ιξώδες της ρητίνης θεωρούνται σταθερά, η μεταβολή της πίεσης πρέπει να είναι σταθερή (βλέπε σχήμα 1.51)



Σχήμα 1.51: Καμπύλες πίεσης και ταχύτητας του μετώπου ροής σε σχέση με τη θέση του μετώπου της ροής σε κανάλι ευθείας ροής [7]

$$V = \frac{q_x}{\psi} \quad (1)$$

Όπου:

- V η μέση ταχύτητα της ροής
- q_x ο ειδικός όγκος του ρευστού στην διεύθυνση x , και σύμφωνα με τον νόμο του Darcy:

$$q_x = \frac{K}{\mu} * \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

- ψ το πορώδες, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της επιφάνειας των πόρων προς την ολική επιφάνεια
- K η διαπερατότητα λόγω του πορώδους, το οποίο εξαρτάται από το υλικό κατασκευής.
- μ το ιξώδες του ρευστού

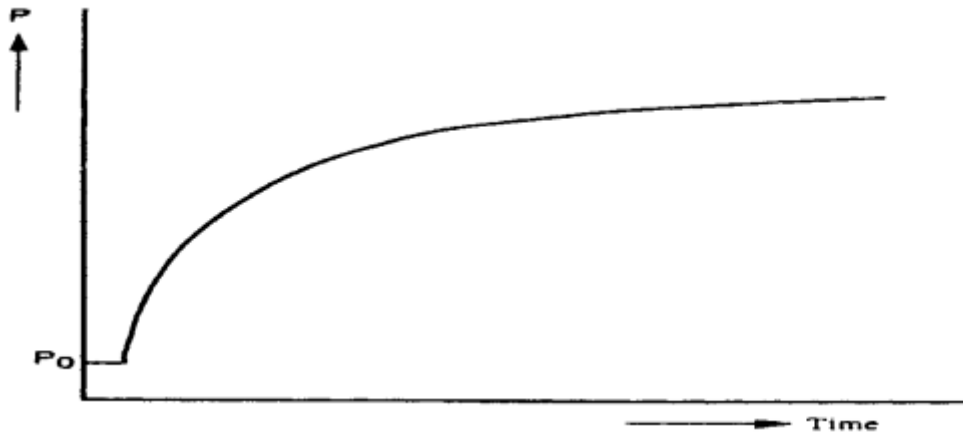
Συνεπώς για να εκτιμήσουμε την ταχύτητα του μετώπου ροής από τις σχέσεις (1) και (2), προκύπτει:

$$V = \frac{k dp}{\mu dx}, k = \frac{K}{\psi} = \frac{1}{C} * \frac{\psi^2}{S^2(1 - \psi)^2} \quad (3), (4)$$

Όπου :

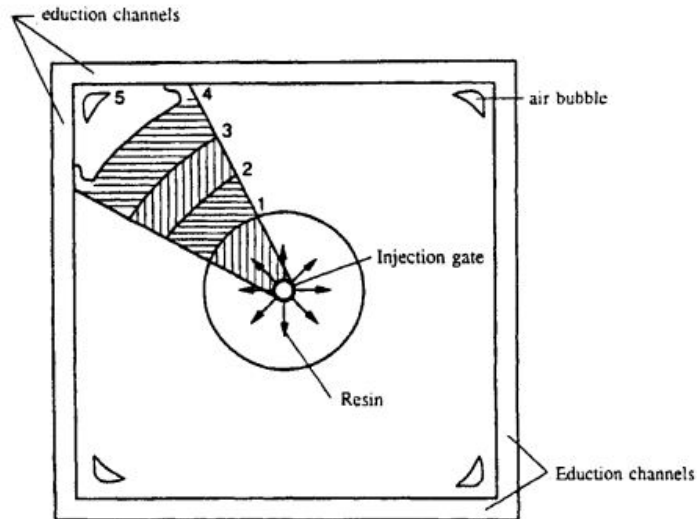
- C αδιάστατη σταθερά, η οποία βρίσκεται πειραματικά
- S η ειδική υγρή επιφάνεια

Όσο λοιπόν το μέτωπο της ροής προχωράει, η απόσταση μεταξύ της θύρας εισαγωγής και του μετώπου της ροής αυξάνεται. Η μεταβολή της πίεσης, καθώς η πίεση έγχυσης και αέρα είναι σταθερές, είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης. Ως συνέπεια, και η ταχύτητα του μετώπου ροής είναι επίσης αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης μεταξύ της θύρας έγχυσης της ρητίνης και του μετώπου της ροής. Εφόσον το μέτωπο της ροής περάσει ένα σταθερό σημείο μέσα στο καλούπι, η πίεση του ρευστού στο σημείο αυτό αυξάνεται, στην αρχή με μεγάλη ταχύτητα και στην συνέχεια με πιο αργό ρυθμό, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



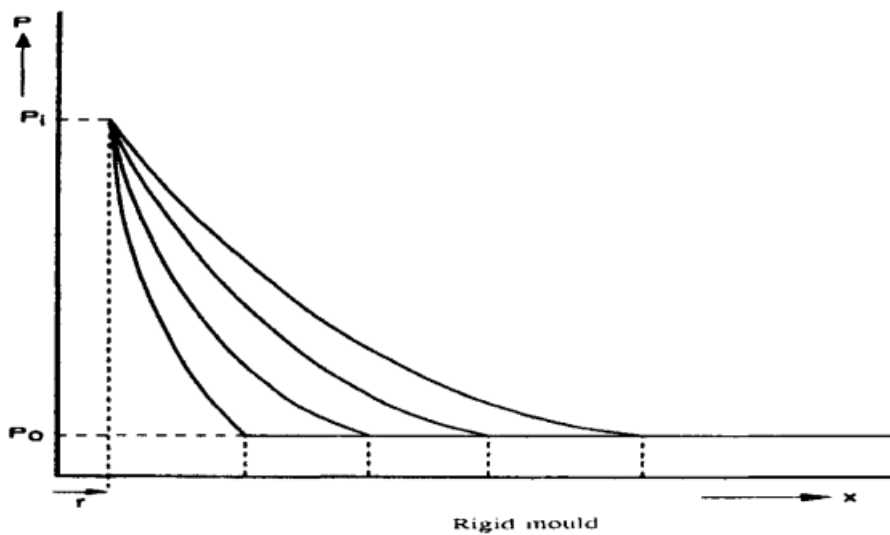
Σχήμα 1.52: Η πίεση του ρευστού σε σταθερό σημείο, κοντά στην θύρα έγχυσης ως συνάρτηση του χρόνου [7]

Στο σχήμα 1.52 δίνεται η καμπύλη της πίεσης σε σταθερό σημείο κοντά στην θύρα εισαγωγής. Αυτό το φαινόμενο επηρεάζεται άμεσα από τον εμποτισμό στις δέσμες των ινών. Ένα δεύτερο απλό παράδειγμα ενός προϊόντος, είναι η κυκλική έγχυση στο κέντρο ενός τετραγωνικού καλουπιού όπου οι θύρες εξαγωγής βρίσκονται στις πλευρές του τετραγώνου του καλουπιού. Το μέτωπο της ροής είναι κυκλικό, όπως φαίνεται στην κάτωψη του καλουπιού, στο σχήμα 1.53. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα του κύκλου, τόσο μεγαλύτερο και το μέτωπο της ροής. Επειδή σε κάθε σημείο της κυκλικής επιφάνειας, που έχει εμποτιστεί, θα πρέπει να περνάει ο ίδιος όγκος ρευστού, η ταχύτητα του ρευστού θα μειωθεί αντιστρόφως ανάλογα με την απόσταση από την θυρίδα έγχυσης.



Σχήμα 1.53: κεντρική έγχυση ρητίνης σε τετραγωνικό καλούπι [7]

Η καμπύλη της πίεσης σε σχέση με την απόσταση από την θυρίδα έγχυσης δίνεται στο σχήμα 1.54. Η μεταβολή της πίεσης στο μέτωπο της ροής είναι μικρότερη συγκριτικά με το προηγούμενο παράδειγμα της ευθείας ροής σε κανάλι, για την ίδια απόσταση. Και στις δύο περιπτώσεις όμως είναι εύκολο να προβλέψουμε την μορφή του μετώπου ροής, έτσι ώστε να επιλέξουμε σωστά την τοποθεσία των θυρών εισαγωγής και εξαγωγής με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παγιδευτούν κενά αέρος.

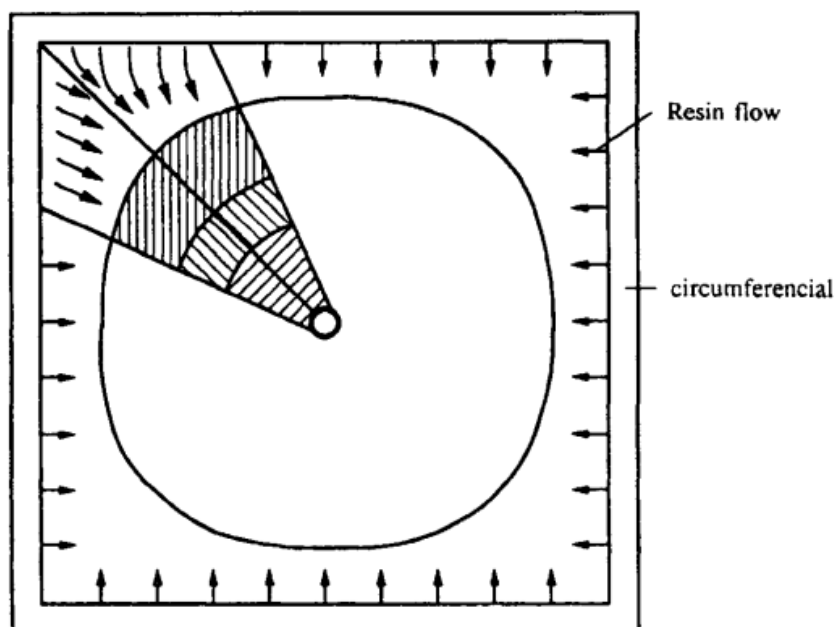


Σχήμα 1.54: Πτώση πίεσης, σε καλούπι μεγάλης ακαμψίας, με κυκλική έγχυση από κεντρική θύρα έγχυσης

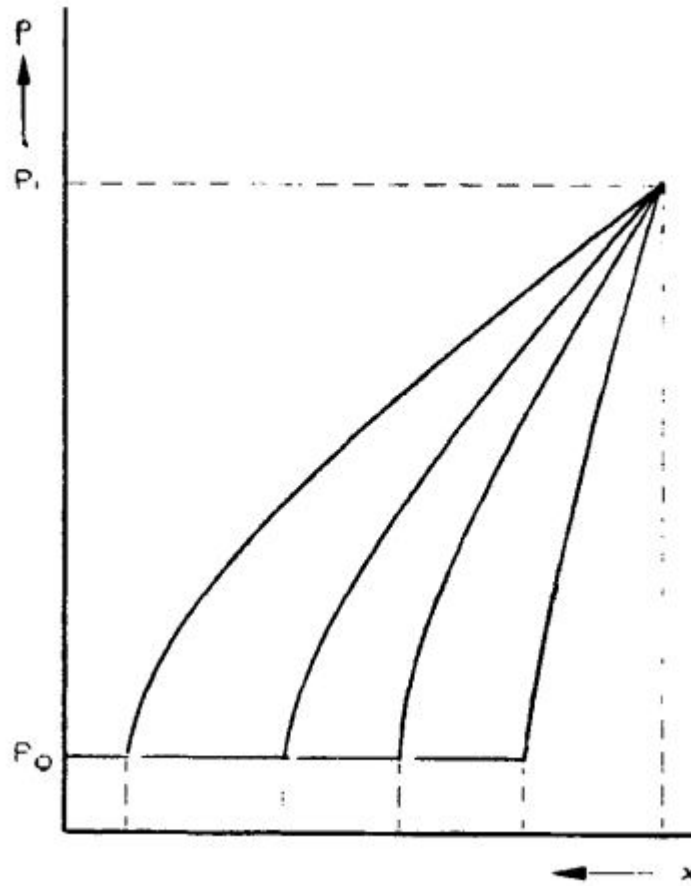
Όταν εμποτίζεται τετραγωνικό καλούπι από το κέντρο του, είναι εύκολο να προβλέψουμε το μέτωπο της ροής μέχρι αυτό να φτάσει στα ακριανά τοιχώματα. Όπως βλέπουμε κι από την κάτοψη του σχήματος 1.53 η ροή θα είναι κυκλική. Από εκείνη την στιγμή και μετά, είναι πολύ δύσκολο να προβλέψουμε την συμπεριφορά της. Από πειράματα, είναι γνωστό πως καθώς τα

πανιά ενίσχυσης δεν εφάπτονται τέλεια στα πλαϊνά τοιχώματα, θα δημιουργηθούν ανοίγματα στην ροή και είναι πιθανό να δημιουργηθούν κενά ακόμα και στις γωνίες του τελικού προϊόντος, όπως παρατηρούμε και στο σχήμα 1.53. Όταν τοποθετούμε τις θύρες εισαγωγής περιμετρικά, στα πλαϊνά τοιχώματα, όπως βλέπουμε στο σχήμα 1.55, πάλι σταδιακά το μέτωπο της ροής είναι κυκλικό.

Στο σχήμα 1.56 δίνεται η καμπύλη της πίεσης. Παρατηρούμε πως σε αυτήν την περίπτωση οι καμπύλες έχουν τα κοίλα κάτω καθώς η ταχύτητα της ρητίνης κοντά στην κεντρική θύρα εξαγωγής είναι υψηλότερη από την ταχύτητα κοντά στις θύρες εισαγωγής. Ο χρόνος εμποτισμού, στην περίπτωση της περιμετρικής έγχυσης είναι μικρότερος συγκριτικά με την κεντρική έγχυση. Είναι προφανές πως για πιο περίπλοκες γεωμετρίες, η πρόβλεψη του μετώπου της ροής είναι μια δύσκολη διαδικασία, συνεπώς και η επιλογή των σωστών σημείων των θυρών.



Σχήμα 1.55: Περιφερειακή έγχυση [7]



Σχήμα 1.56: Περιφερειακή έγχυση, πτώση πίεσης

1.4.5.3 Επιλογή Αντλίας

Η σωστή επιλογή αντλίας για την επίτευξη του κενού μέσα στην σακούλα εμποτισμού είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους της παραπάνω διαδικασίας. Οι αντλίες κενού, μοιάζουν με τους συμπιεστές αέρα, αλλά είναι σχεδιασμένες ώστε να κάνουν την ανάποδη λειτουργία έτσι ώστε ο αέρας να απορροφηθεί από την σακούλα κενού και να απελευθερωθεί στο περιβάλλον. Οι σχεδιαστικές της παράμετροι είναι οι εξής :

1. Δυναμικό πίεσης κενού – Vacuum pressure potential or ‘Hg maximum’
2. Εκτόπισμα της αντλίας σε κυβικά πόδια ανά λεπτό – Displacement in cubic feet per minute (CFM) ή κυβικά μέτρα ανά λεπτο (CMM)
3. Η ιπποδύναμη της αντλίας – Horsepower

Δυναμικό πίεσης κενού

Το μέγιστο επίπεδο υδραργύρου (Hg) μετριέται σε ίντσες υδραργύρου, είναι το μέγιστο επίπεδο κενού που προτείνεται για την αντλία. Αυτό μεταφράζεται σε μέγιστο έργο συμπίεσης που μπορεί να παράξει η αντλία. Για παράδειγμα εάν θέλουμε να φτιάξουμε ένα πολύστρωτο διαστάσεων 0.3 τετραγωνικών μέτρων, κενό πίεσης 508mm Hg θα φορτίσει το πολύστρωτο με δύναμη 6405

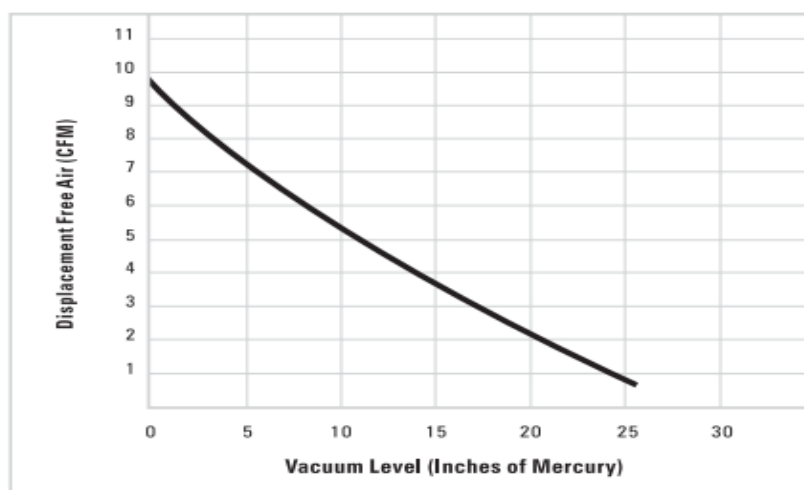
Newton σε όλη την επιφάνεια του πολύστρωτου, ισόνομα κατανεμημένη. Εάν, για παράδειγμα, το πολύστρωτο είχε διαστάσεις 0.1 x 0.2 μέτρα, η ίδια πίεση θα φόρτιζε όλη την επιφάνεια του πολύστρωτου με δύναμη 204,6 kN .

Εκτόπισμα

Ο όγκος αέρα που μπορεί να κινήσει η αντλία, μετρημένο σε κυβικά μέτρα ανά λεπτό CMM, αποτελεί επίσης ένα σημαντικό παράγοντα για την επιλογή της αντλίας. Εάν, στην πραγματικότητα το σύστημα (καλούπι, σακούλα, συνδέσεις) ήταν πλήρως αεροστεγές, τότε κάθε μέγεθος αντλίας θα μπορούσε να αγγίζει την μέγιστη δυνατή πίεση της, ανεξάρτητα του μεγέθους του συστήματος. Πρακτικά όμως κάτι τέτοιο είναι αδύνατον, ειδικά όσο το σύστημα γίνεται μεγαλύτερο και περιπλοκότερο. Όσο μεγαλύτερο είναι λοιπόν το CMM της αντλίας, τόσο πιο κοντά φτάνει στο Hg maximum των προδιαγραφών της, και μπορεί να διατηρεί την τιμή της υποπίεσης αυτής παρά τις μικρές διαρροές του συστήματος. Επιπλέον, μια αντλία μεγάλου εκτοπίσματος μπορεί να φτάσει πιο γρήγορα την πίεση συγκράτησης που θέλουμε. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν ο κύκλος ζωής των συγκολλητικών μέσων είναι περιορισμένος.

Ιπποδύναμη

Η ιπποδύναμη αποτελεί μια ένδειξη της απόδοσης της αντλίας και από μόνη της δεν μας δίνει καμία πληροφορία για το πόσο καλά συνεργάζεται με το σύστημα. Όταν θέλουμε να επιλέξουμε αντλία, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται οι δυο προηγούμενες ενδείξεις και όχι τόσο η ιπποδύναμη. Γενικά όμως, για να πετύχουμε υψηλό εκτόπισμα και υψηλή πίεση κενού, είναι απαραίτητες αντλίες με μεγαλύτερη ιπποδύναμη. Αντλίες που χρησιμοποιούνται σε ναυπηγεία μικρών σκαφών κυμαίνονται από ¼ -2 hp ενώ αντλίες για μεγάλες εφαρμογές σε γραμμές παραγωγής μπορούν να φτάσουν και τους 20 ή 30 hp. Στο σχήμα 1.57 παρουσιάζεται το διάγραμμα χωρητικότητας της αντλίας συναρτήσει του βαθμού κενού.



Σχήμα 1.57: Διάγραμμα χωρητικότητας αντλίας – βαθμός κενού. Παρατηρούμε ότι η ελεύθερη ροή του αέρα μειώνεται όσο το επίπεδο της πίεσης ανεβαίνει.

Επιλογή Αντλίας

Το μέγεθος και το σχήμα του καλουπιού καθώς επίσης και το είδος και η ποιότητα των υλικών από το οποίο θα αποτελείται το τελικό πολύστρωτο, καθορίζουν τις ελάχιστες ανάγκες της αντλίας. Εάν πρόκειται για επίπεδα πάνελ μερικών στρώσεων γυαλιού, επίπεδους καπλαμάδες ή υλικά πυρήνα, 127-152 mm Hg (2.5 -3 psi) πίεσης κενού θα προσφέρει αρκετή δύναμη συγκράτησης για έναν καλό δεσμό μεταξύ των ενισχυτικών ινών. Εάν η επιφάνεια του πάνελ κυμαίνεται μέχρι μερικά τετραγωνικά μέτρα, 1 ή 2 CMM είναι επαρκή με μέγιστο όριο τα 4,26 τετραγωνικά μέτρα. Για μεγαλύτερες εφαρμογές, αντλία εκτοπίσματος 10 CMM είναι αναγκαία. Φτωχές συνδέσεις στο σύστημα ή επιλογή αναλώσιμων που επιτρέπουν την διαφυγή αέρα, έχουν σαν αποτέλεσμα ανάγκη για αντλίες μεγαλύτερης χωρητικότητας, έτσι ώστε να διατηρήσουν την απαιτούμενη συμπίεση. Γενικά όσο πιο αεροστεγές το σύστημα, τόσο μικρότερη αντλία θα χρειαστούμε.

Σε περίπλοκα σχήματα και γεωμετρίες, όπως είναι προφανές, θα χρειαστούμε και μεγαλύτερη παραγωγή πίεσης συγκράτησης. Επιφάνειες με κοιλότητες, πολύστρωτα αποτελούμενα από πολλές στρώσεις, καπλαμάδες και υλικά πυρήνα με μεγάλη ακαμψία χρειάζονται τουλάχιστον πίεση 508-711 mm Hg, για την καλή συγκράτησή τους. Και πάλι, για μικρά πάνελ 1-2 CMM είναι αρκετή χωρητικότητα, εάν το σύστημα είναι αεροστεγές. Για την παραγωγή όμως μεγάλων πάνελ ή γάστρας σκάφους, θα χρειαστεί αντλία μεγέθους τουλάχιστον 10 CMM έτσι ώστε να συγκρατήσει όλες τις στρώσεις δεμένες μαζί. Εν κατακλείδι, η καλύτερη αντλία για μια συγκεκριμένη εφαρμογή θα έχει την μεγαλύτερη δυνατή χωρητικότητα αέρα για την ζητούμενη πίεση και παράλληλα θα λειτουργεί σε ένα λογικό πλαίσιο ιπποδύναμης.

Τύποι αντλίας

Οι αντλίες κενού μπορούν να λειτουργούν με την βοήθεια πιστονιού, περιστροφικού πτερυγίου, τουρμπίνας, διαφράγματος ή βεντούρι. Μπορούν να είναι θετικού ή μη θετικού εκτοπίσματος. Οι αντλίες θετικού εκτοπίσματος μπορούν να λειτουργούν με την βοήθεια λίπανσης, ή και όχι. Οι αντλίες με λιπαντικό επιτυγχάνουν μεγαλύτερες πιέσεις, είναι πιο αποδοτικές και έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Αντίθετα, οι αντλίες χωρίς λιπαντικό, είναι πιο καθαρές, χρειάζονται λιγότερο έλεγχο και συντήρηση και μπορούν εύκολα να επιτύχουν τις απαιτήσεις για πίεση σε ναυπηγικές εφαρμογές. Από του θετικού εκτοπίσματος αντλίες, οι πιο συχνές σε εφαρμογές vacuum infusion είναι αυτές με πιστόνι και περιστροφικό πτερύγιο. Οι αντλίες πιστονιού, μπορούν να επιτύχουν μεγαλύτερες πιέσεις κενού από αυτές με περιστροφικό πτερύγιο, αλλά είναι πιο θορυβώδεις και με πολλές δονήσεις. Οι αντλίες με περιστροφικό πτερύγιο, μπορεί να επιτυγχάνουν μικρότερο εύρος πιέσεων, παρόλα αυτά είναι εντός απαιτήσεων για τέτοιου είδους εφαρμογές ενώ παράλληλα είναι ικανές να μετακινήσουν μεγαλύτερο όγκο αέρα για δεδομένη πίεση. Με άλλα λόγια, αφαιρούν τον αέρα πιο γρήγορα και αντέχουν μεγαλύτερες διαρροές αέρα. Επιπλέον, μετακινούνται πιο εύκολα, κάνουν λιγότερο θόρυβο, χρειάζονται λιγότερη ενέργεια και στοιχίζουν λιγότερο. Στο σχήμα 1.58 παρουσιάζεται αντλία διαφράγματος.



Σχήμα 1.58: αντλία διαφράγματος, μοντέλο 07061-40 1/8hp,1.2 CFM,24.0” Hg

1.5 Ποιοτικός έλεγχος

Σύμφωνα με τον νηογνώμονα ABS [8] στο **Generic Rules for Classification, Materials for Hull Construction- Fiber Reinforced Plastics (FRP) 2022, Part 2, Chapter 6, Section 4**, αναφέρεται :

Εφαρμογή

Πρέπει να εφαρμοστεί ένα σύστημα ποιοτικής ασφάλειας σε συνεργασία με την περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής. Στόχος του συστήματος αυτού είναι να μετράει και να καταγράφει την συμβατότητα των σχεδίων που έχουν εγκριθεί, με την περιγραφή της διαδικασίας παραγωγής.

Ορισμοί

Κατασκευή Γάστρας

Στην κατασκευή της γάστρας εμπεριέχεται η κατασκευή της γάστρας, του καταστρώματος, του υποστέγου και όποιας άλλης κατασκευής συμμετέχει στην κατασκευαστική ακεραιότητα του σκάφους, καθώς και στην ανθεκτικότητα του στον καιρό και στην θάλασσα. Συμπεριλαμβάνονται παράθυρα, πόρτες, καταπακτές, πηδάλιο, καρίνα

Standard ποιοτικής ασφάλειας

Οι απαιτήσεις του ABS για την ποιοτική ασφάλεια της κατασκευής της γάστρας για μικρά σκάφη.

Ποιοτική ασφάλεια

Όλες οι δραστηριότητες και οι διαδικασίες που αφορούν την επίτευξη της ποιότητας, συμπεριλαμβανομένων αρχείων και καταγραφών που αποδεικνύουν την επίτευξη της.

Σύστημα ποιοτικής ασφάλειας

Το τμήμα του ναυπηγείου το οποίο αποδίδει ευθύνες, δραστηριότητες, πόρους και αποδείξεις που παρέχουν τις διαδικασίες από τις οποίες τα αποτελέσματα και τα αρχεία αποδεικνύουν την ικανότητα του ναυπηγείου να συμμορφώνεται με τους κανονισμούς.

Περιγραφή της κατασκευαστικής διαδικασίας

Μια περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής, η οποία περιλαμβάνει τις εγκαταστάσεις των κτηρίων, τις διαδικασίες εισαγωγής των υλικών, την διαδικασία των επιστρώσεων, την επιθεώρηση και τις πρότυπες δοκιμές. Ο έλεγχος και η καταγραφή της διαδικασίας κατασκευής υλοποιεί τον ποιοτικό έλεγχο.

Ποιοτικός έλεγχος

Τα μέσα και οι τρόποι που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή και την ρύθμιση της ποιότητας των κατασκευών σύμφωνα με τις απαιτήσεις

Επιθεώρηση

Η διαδικασία μέτρησης, εξέτασης, δοκιμής και σύγκρισης ενός αντικειμένου με τα πλάνα που έχουν εγκριθεί, τα κατασκευαστικά σχέδια, καθώς και τις απαιτήσεις του κατασκευαστή.

Εκτίμηση

Η τελική επιθεώρηση της ποιότητας του συστήματος στις εγκαταστάσεις του κατασκευαστή για να επιβεβαιωθεί πως εγκρίνονται όλες οι απαιτήσεις, καθώς και πως οι εγκαταστάσεις είναι σύμφωνες με την περιγραφή της κατασκευαστικής διαδικασίας, οι οποία έχει εγκριθεί, όπως επίσης και οι διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου.

Έλεγχος

Πιστοποιητικό πως η παραγωγική διαδικασία και ο ποιοτικός έλεγχος συνεχίζουν να είναι το ίδιο αποτελεσματική με την αρχική εκτίμηση

Έλεγχος συστήματος

Έλεγχος από επιθεωρητές του Νηογνώμονα σε συχνή βάση, πάνω στις διαδικασίες, δραστηριότητες και κατοχή των απαραίτητων πιστοποιητικών για την ποιότητα του ναυπηγείου σύμφωνα με τις απαιτήσεις αυτού.

Σχέδιο

Αρχικό Σχέδιο

Τα πλάνα που δείχνουν τις αντοχές, τις διαστάσεις και τις λεπτομέρειες των υλικών, τις παραγωγικής διαδικασίας, καθώς και το σχέδιο ποιοτικής ασφάλειας, οφείλουν να πάρουν έγκριση πριν αρχίσει η παραγωγή τους. Όλες οι τροπολογίες πρέπει να εμπεριέχονται στα πλάνα σχεδίου.

Αναθεωρήσεις

Κάθε αναθεώρηση που γίνεται μετά την έγκριση πρέπει να υποβάλλεται στον υπεύθυνο επιθεωρητή, ο οποίος έχει την ευχέρεια να συμφωνήσει με την αναθεώρηση αυτή ή να απαιτήσει τα σχέδια να επανυποβληθούν για έγκριση. Στην περίπτωση που συμφωνεί, πρέπει να παρέχει το τεχνικό γραφείο το οποίο είναι υπεύθυνο για την έγκριση με τις λεπτομέρειες.

Περιγραφή παραγωγικής διαδικασίας – Ποιοτικός έλεγχος

Η περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας πρέπει να υποβάλλεται για έγκριση στον Νηογνώμονα. Οφείλει να περιέχει πληροφορίες πάνω στις υποδομές και τους χώρους, απόδειξη της κατεργασίας των υλικών, της παραγωγής, της επιθεώρησης και των δοκιμών. Τα σχετικά στάδια της περιγραφής, θα πρέπει να καταγράφονται και να βιντεοσκοποούνται, σύμφωνα με το σχέδιο ποιοτικής ασφάλειας. Θα πρέπει να συμφωνηθεί, σε ποιά στάδια ο επιθεωρητής θα κάνει επίβλεψη της ποιοτικής ασφάλειας και τότε θα κάνει επιθεώρηση από κοντά. Η επιθεώρηση από κοντά, συμπληρώνει αλλά δεν αντικαταστά την τελική επιθεώρηση της κατασκευής.

Πιστοποιητικό ποιοτικής ασφάλειας

Μετά από αίτημα του κατασκευαστή, ο ABS πραγματοποιεί το σχέδιο έγκρισης για το σκάφος που πρόκειται να κατασκευαστεί καθώς επίσης και την επιθεώρηση της περιγραφής της παραγωγικής διαδικασίας και του σχεδίου ποιοτικής ασφάλειας. Μετά την επιτυχή εξασφάλιση αυτών και της απαραίτητης επιθεώρησης από τον επιθεωρητή ώστε να γίνει η πιστοποίηση, παρέχεται το πιστοποιητικό ποιοτικής ασφάλειας.

Το πιστοποιητικό αυτό είναι έγκυρο για έναν χρόνο και ανανεώνεται κάθε χρόνο έπειτα από κατάλληλο έλεγχο.

Όλες οι πληροφορίες και οι λεπτομέρειες που υποβάλλονται από τον κατασκευαστή για έγκριση στο πρόγραμμα ποιοτικής ασφάλειας του ABS [8] μελετώνται λεπτομερώς και δεν προωθούνται σε άλλον οργανισμό χωρίς την γραπτή έγκριση του κατασκευαστή.

Οι κατασκευαστές που παραλαμβάνουν το πιστοποιητικό ποιοτικής ασφάλειας του ABS δημοσιεύονται από τον ABS μαζί με πληροφορίες που αφορούν το σκάφος και την έγκριση του.

Προσωπικό

Πρέπει να οριστεί ένας αντιπρόσωπος του κατασκευαστή, ο οποίος θα έχει την ευθύνη ώστε να πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις. Εκτός και αν έχει συμφωνηθεί διαφορετικά, ο υπεύθυνος της ποιοτικής ασφάλειας δεν θα πρέπει να έχει άλλες ευθύνες. Επιπλέον ο αντιπρόσωπος αυτός έχει την εξουσία να σταματήσει την παραγωγή σε περίπτωση σοβαρού ποιοτικού προβλήματος.

Ο κατασκευαστής οφείλει να έχει επίσης μια ομάδα ανθρώπων υπεύθυνων για την ποιοτική ασφάλεια του ναυπηγείου, των οποίων τα καθήκοντα δεν θα εμπλέκονται με τις προτεραιότητες της παραγωγής. Αυτή η ομάδα θα επιβλέπεται από τον αντιπρόσωπο της ποιοτικής ασφάλειας.

Επίσης προσωπικό των οποίων οι ευθύνες επηρεάζουν την ποιότητα, συμπεριλαμβανομένου και του υπεύθυνου παραγωγής, έχουν συγκεκριμένες ευθύνες και εξουσία να επιβλέπουν, ελέγχουν και να επηρεάζουν την ποιότητα. Κατά την διαδικασία, επιθεωρήσεις μπορούν να γίνονται από τους υπεύθυνους παραγωγής, εφόσον τους επιβλέπει ο αντιπρόσωπος της ποιοτικής ασφάλειας.

Παραγωγή

Τα απαραίτητα σχέδια και οδηγίες πρέπει να είναι διαθέσιμα σε όλο το εργατικό δυναμικό σε όλους τους χώρους εργασίας. Στις οδηγίες πρέπει να συμπεριλαμβάνονται ο έλεγχος του εξοπλισμού και οι μέθοδοι εργασίας.

Όλα τα υλικά, μέρη, γάστρες και καταστρώματα κατά την διάρκεια της παραγωγής πρέπει να αναφέρονται συγκεκριμένα και να βρίσκονται στα σχέδια, στις οδηγίες παραγωγής, κλπ..

Οι εργασίες κατά την διάρκεια των παραγωγικών σταδίων πρέπει να είναι αυστηρά σύμφωνες με την περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας, να καταγράφονται σε αρχεία τα οποία συμπεριλαμβάνονται στην περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας. Το προσωπικό του κατασκευαστή, το οποίο είναι υπεύθυνο για κάθε στάδιο πρέπει να υπογράφει ότι φέρει την ευθύνη της κατασκευής, όταν αυτή ολοκληρώνεται.

Οι χώροι παραγωγής πρέπει να έχουν μέσα έλεγχου της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Οι τιμές αυτές πρέπει να καταγράφονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Οι χώροι εργασίας πρέπει επίσης να διατηρούνται καθαροί και χωρίς σκόνη.

Τα υλικά πρέπει να προμηθεύονται σε καθορισμένες ποσότητες έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται χωρίς καθυστέρηση. Τα υλικά που αποθηκεύονται πριν την χρήση τους θα πρέπει να διατηρούνται σε συνθήκες που να μην οδηγούν σε μόλυνση, όπως απορρόφηση υγρασίας ή αλλοίωση.

Το εργατικό δυναμικό θα πρέπει να έχει πρόσβαση στις οδηγίες πάνω στην προετοιμασία των καλουπιών, στις αναμείξεις της ρητίνης, στις επιστρώσεις, στην ξεκούραση και στο ξεκαλούπωμα.

Ο χρόνος εφαρμογής του gelcoat, των επιστρώσεων και άλλων ευαίσθητων διαδικασιών θα πρέπει να καταγράφεται και να βιντεοσκοπείται η διαδικασία παραγωγής.

Ο εξοπλισμός και τα εργαλεία στην διαδικασία των επιστρώσεων, που χρησιμοποιούνται για την επίστρωση gel coat, εμποτισμό ρητίνης, συστήματα ανάμειξης καταλύτη, εξοπλισμός spray lay-up, συστήματα πεπιεσμένου αέρα κλπ. θα πρέπει να συντηρούνται, να επισκευάζονται και να βαθμονομούνται για την σωστή λειτουργία τους.

Κεφάλαιο 2

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

2.1 Εισαγωγή στην πειραματική διαδικασία

Στο παρόν κεφάλαιο, σκοπός είναι η μελέτη και η κατανόηση της διαδικασίας κατασκευής δοκιμίων, τα οποία αναπαριστούν μια ρεαλιστική κατάσταση σκάφους, καθώς επίσης και η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την πραγματική αντοχή τους. Η μελέτη έγινε στα τρία πιο σημαντικά μέρη του σκάφους: την γάστρα (hull), το κατάστρωμα (deck) και τα διαμήκη ενισχυτικά (longitudinal stiffener / stringer), καθώς αυτά τα σημεία συμμετέχουν ως επι των πλείστον στην αντοχή της κατασκευής και καταπονούνται περισσότερο.

Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα στάδια παραγωγής των αρχικών πάνελ με την λεπτομερή καταγραφή των υλικών και διαδικασιών που χρησιμοποιήθηκαν. Στην συνέχεια αναφέρονται τα πρότυπα δοκιμών που επιλέχθηκαν σύμφωνα με τις προτάσεις των νηογνομόνων ανάλογα το είδος δοκιμής και πολύστρωτου, όπως επίσης και οι τελικές διαστάσεις που επιλέξαμε σύμφωνα με το πρότυπο δοκιμής. Γίνεται αναφορά επίσης στην διαδικασία κοπής, με την βοήθεια τριαξονικού CNC. Τέλος, αναγράφονται αναλυτικά, οι περιγραφές των πειραμάτων και τα αποτελέσματα με στόχο να συγκριθούν με τις ελάχιστες απαιτήσεις των νηογνομόνων.

2.2 Κατασκευή δοκιμίων

2.2.1 Παραγωγική διαδικασία

Τα πολύστρωτα, τα οποία κατασκευάστηκαν στις εγκαταστάσεις της Technohull, αναπαριστούν, όπως αναφέρθηκε, πραγματική κατάσταση σκάφους, δηλαδή το είδος ο αριθμός, η σειρά με την οποία τοποθετήθηκαν οι στρώσεις και ο προσανατολισμός τους ανάλογα με το είδος της κατασκευής (γάστρα, κατάστρωμα, διάμηκες ενισχυτικό) έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή σκαφών που υπάρχουν στην αγορά. Η μέθοδος με την οποία κατασκευάστηκαν και τα 3 πολύστρωτα είναι το vacuum infusion. Παρακάτω δίνονται τα lamination plans για κάθε πολύστρωτο :

Πίνακας 2.1: lamination plans

Lamination plans		
HULL	LONGITUDINAL STIFFENER	DECK
300CSM	450CSM	300CSM
450CSM	60.30 AG	SORIC TF 2.0
SORIC TF 2.0	60.30AG	BIAXIAL 850-225
BIAXIAL 850-225	60.30 AG	450CSM
BIAXIAL 850-225	450CSM	PVC10mm
BIAXIAL 850-225	450CSM	BIAXIAL 850-225
BIAXIAL 850-225		450CSM
450CSM		

όπου :

- Soric TF 2.0: Υλικό πυρήνα, ειδικά σχεδιασμένο για την αποφυγή του «print through» και τοποθετείται μετά την πρώτη στρώση γυαλιών.
- 300CSM: Chopped strand mat 300 gr/m^2
- 450CSM: Chopped strand mat 450 gr/m^2
- Biaxial 850-225: Combined Biaxial roving (0/90) 850 gr/m^2 & Chopped strand mat 225 gr/m^2
- 60.30AG: Combined woven roving (0/90) 600 gr/m^2 & Chopped strand mat 300 gr/m^2
- PVC 10mm: PVC closed shell core material with 60 gr/cm^3 density and 10mm thickness.

Σημειώνεται πως για την παραγωγή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε βινυλεστερική ρητίνη AME 6001 INF-135 με τις παρακάτω ιδιότητες :

Πίνακας 2.2: ιδιότητες ρητίνης από βινυλεστέρα

Property	Value	Unit	Method
Postcured for 24h at 60 °C			
Tensile strength	79	MPa	ASTM D-638
Tensile modulus	3450	MPa	ASTM D-638
Elongation at break	5,2	%	ASTM D-638
Flexural strength	149	MPa	ASTM D-790
Flexural modulus	3620	MPa	ASTM D-790
Heat Deflection temperature*	113	°C	ASTM D-648
* postcured for 24h at 90°C			

Πειραματική Διαδικασία

Για τα δοκίμια του καταστρώματος χρησιμοποιήθηκε αφρός PVC πάχους 10 mm, πυκνότητας 60 kg/m^3 , του οποίου τα μηχανικά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται παρακάτω :

Technical Data Sheet - Aircell HR - HTR

Issue 03/13, Rev.8

Property	Method	Unit	HR 40	HR 45	HR 60	HTR 60	HR 80	HTR 80	HR 100	HR 130	HR 200
Nominal Density	ISO 845	kg/m ³	40	48	60	60	80	80	100	130	200
Compressive Strength	ISO 844	Mpa	0,45	0,66	0,92	0,92	1,36	1,29	1,86	3,07	5,26
Compressive Modulus	ISO 844	Mpa	na	45	69	66	92	88	134	162	296
Compressive Modulus	DIN 53421	N/mm ²	37	48	69	na	97	97	125	160	260
Tensile Strength	ASTM D 1623 B	Mpa	na	1,03	1,54	1,62	1,92	2,11	2,69	4,20	5,27
Tensile Strength	DIN 53571	N/mm ²	0,7	1,10	1,30	na	2,00	2,00	2,70	3,80	6,20
Tensile Modulus	ASTM D 1623 B	Mpa	na	47	65	66	87	86	125	155	287
Tensile Modulus	DIN 53457	N/mm ²	28	35	45	na	66	66	84	115	180
Shear Strength	ISO 1922	Mpa	0,45	0,63	0,90	0,93	1,28	1,30	1,64	2,50	3,67
Shear Modulus	ISO 1922	Mpa	na	14	19	19	27	26	35	47	65
Shear Modulus	ASTM C393	Mpa	13	15	22	na	30	30	38	50	75
Shear Strain	ISO 1922	%	8	10	16	16	23	23	27	30	30
Thermal Conductivity	ISO 8301	W/m.k	0,031	0,031	0,031	0,031	0,033	0,033	0,035	0,039	0,048
Water Absorption	ASTM 272	kg/m ²	0,09	0,09	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,03	0,02
Thermal Bending Stability	DIN 53424	°C	80	80	85	100	85	100	90	95	100

Σχήμα 2.1:Data sheet αφρού PVC

Dimensional data

Properties		TF 1.5	TF 2	TF 3
Thickness	mm	1,5	2,0	3,0
Roll length	m	120	80	50
Roll width	m	1,27	1,27	1,27
Thickness loss at 0,8 bar	%	<25	<25	<25
Max processing temp.	°C	170	170	170
Resin uptake	kg/m ²	0,8	1,0	1,4
Dry weight	g/m ²	90	120	160
Density impregnated	kg/m ³	700	700	700

Σχήμα 2.2 :Data sheets SORIC TF 2

Όλες οι ενισχύσεις είναι από ίνες γυαλιού και η σειρά με την οποία τοποθετούνται είναι από έξω προς τα μέσα για την γάστρα και το κατάστρωμα, ενώ για το διάμηκες ενισχυτικό, από μέσα προς τα έξω.

2.2.1.1 Κοπή υφασμάτων

Η κοπή των υφασμάτων έγινε σε ξεχωριστό χώρο, μακριά από υγρασία και σκόνη, όπου οι ενισχυτικές ίνες μαζί με άλλα αναλώσιμα όπως το peel-ply και το infusion mesh κόβονται στα επιθυμητά μεγέθη ανάλογα με την κατασκευή. Μεγάλα ρολά πλάτους 1,25 m, παράλληλα στην διεύθυνση fill των ενισχυτικών ινών, ξεδιπλώνονται κατά την διεύθυνση warp των ινών ανάλογα με το μήκος των υφασμάτων που χρειάζεται για την κατασκευή. Στην συνέχεια μαρκάρονται και κόβονται με την βοήθεια ηλεκτρικών ψαλιδιών. Οι διαστάσεις των πάνελ που κατασκευάστηκαν ήταν 1000x1250 mm, με την διεύθυνση warp των ινών να είναι η διάσταση 1000 mm και αντίστοιχα η διεύθυνση fill, 1250mm. Αναφέρεται πως για τις ανάγκες των δοκιμών που είχαμε, τα πάνελ ήταν υπερδιαστασιολογημένα, δηλαδή πάνελ μικρότερων διαστάσεων θα κάλυπταν τις ανάγκες μας, παρόλα αυτά κρατήσαμε έναν μεγάλο συντελεστή ασφάλειας σε περίπτωση που θα υπήρχε κάποιο πρόβλημα κατά το vacuum infusion ή κυριότερα κατά την κοπή των δοκιμών.



Σχήμα 2.3: Πρώτη στρώση 300CSM για γάστρα (Hull)

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, κόβονται οι ενισχυτικές ίνες και αναγράφεται πάνω ο αριθμός της στρώσης μαζί με το γράμμα που υποδηλώνει το πάνελ για το οποίο προορίζεται, πχ. H για Hull, D για deck, S για stiffener.

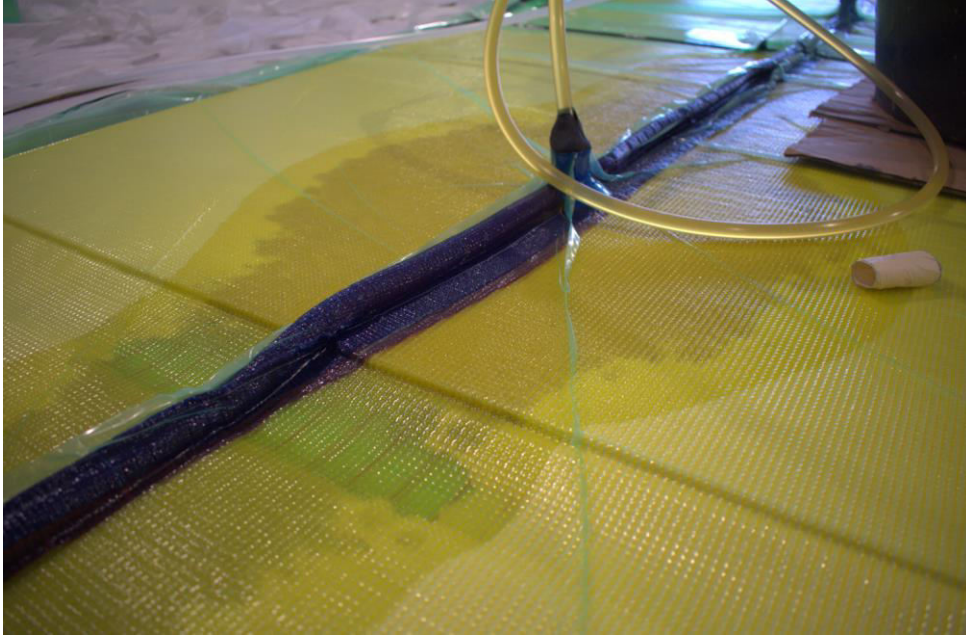


Σχήμα 2.4: Ρολά με διαφορετικές ενισχυτικές ίνες έτοιμες για κοπή.

2.2.1.2 Vacuum Infusion

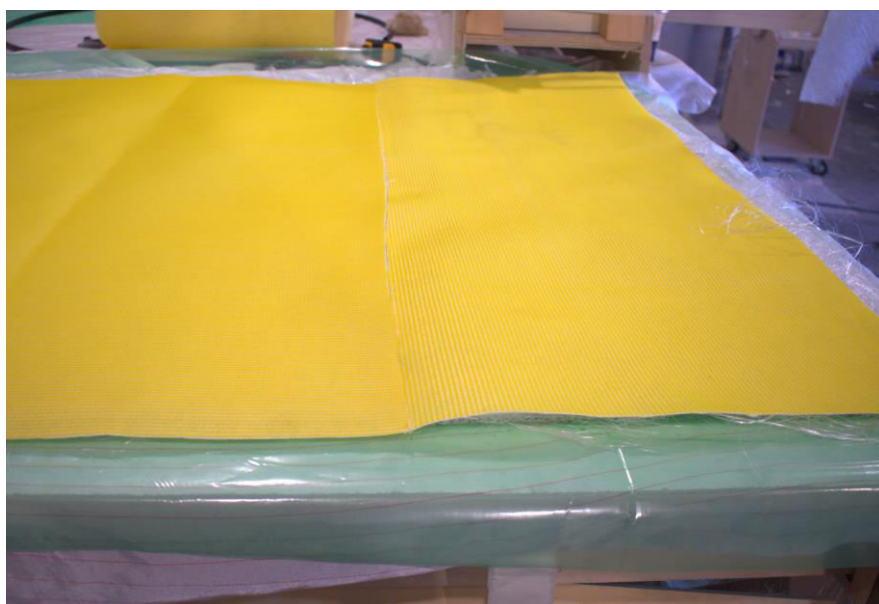
Μετά την κοπή των υφασμάτων σειρά έχει το vacuum infusion. Στην περίπτωση μας, για την κατασκευή των πάνελ δεν χρησιμοποιήθηκε καλούπι λόγω της απλής γεωμετρίας, καθώς επίσης ούτε gel coat καθώς δεν συνεισφέρει στην αντοχή των πολυστρωτων. Η έλλειψη καλουπιού, όμως, εγκυμονεί πολλούς κινδύνους, κυρίως λόγω της τάσης του υλικού προς συρρίκνωση κατά τον πολυμερισμό. Λόγω του υψηλού εξώθερμου, κατά την στερεοποίηση της ρητίνης, αναπτύσσονται θερμικές τάσεις οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα το τελικό προϊόν να αποκτά καμπυλότητες, οι οποίες είναι ανεπιθύμητες. Για τον λόγο αυτό τοποθετήθηκαν κόντρα πλακέ επάνω στα πάνελ αμέσως μετά την έγχυση ρητίνης.

Για την κατασκευή των πάνελ, έγινε κεντρική έγχυση από 2 θύρες εισαγωγής, κατά το διάμηκες κέντρο συμμετρίας. Το μήκος των peel ply και infusion mesh ήταν 3500 mm ενώ το πλάτος τους 1250 mm. Χρησιμοποιήθηκαν 5 κιλά βινυλεστέρα από τα οποία βέβαια δεν κατέληξαν όλα στα τελικά προϊόντα.



Σχήμα 2.5: Κεντρική έγχυση Vacuum Infusion

Σημειώνεται, πως κατά την διαδικασία του Vacuum infusion, πραγματοποιήθηκε πείραμα πάνω στην διεύθυνση προσανατολισμού του infusion mesh, του δίχτυου δηλαδή που βοηθάει στην ροή της ρητίνης κατά την έγχυση της. Σε απομακρυσμένο σημείο, των πάνελ, τοποθετήθηκε το δίχτυ στραμμένο 90 μοίρες με διεύθυνση ροής κατά το εγκάρσιο των πάνελ, παράλληλα με την διεύθυνση fill των ενισχυτικών ινών, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.6. Αυτό έγινε αρχικά για λόγους οικονομίας, όμως απέκτησε ιδιαίτερο ενδιαφέρον στο κατά πόσο κάτι τέτοιο θα άλλαζε την ταχύτητα του μετώπου ροής του ρευστού συγκριτικά με την υπόλοιπη κατασκευή. Όπως ήταν αναμενόμενο, δεν σημειώθηκε κάποια σημαντική διαφορά στην ταχύτητα του μετώπου της ροής.



Σχήμα 2.6: Infusion mesh,στραμμένο 90 μοίρες.

Η πίεση που επιτεύχθηκε από την αντλία αναρρόφησης αέρα ήταν $p = -0,8$ bar, η οποία θεωρείται άκρως ικανοποιητική για δεδομένα vacuum infusion. Ο χρόνος έγχυσης της ρητίνης μετρήθηκε $t_{εγχ} = 45 \text{ min}$. Σημειώνεται πως περιμετρική έγχυση θα είχε σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη ταχύτητα μετώπου ροής και μικρότερο χρόνο έγχυσης, παρόλα αυτά δεν προτιμάται καθώς, με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται κενά αέρα κοντά στους σωλήνες αναρρόφησης, στο κέντρο δηλαδή της κατασκευής.

Η σκλήρυνση των πολύστρωτων έγινε σε συνθήκες περιβάλλοντος για μια εβδομάδα. Δεν χρησιμοποιήθηκαν θερμαντικές κουβέρτες, που στόχο έχουν την αύξηση της heat deflection temperature, την αύξηση δηλαδή των μηχανικών ιδιοτήτων της κατασκευής σε μεγάλες θερμοκρασίες. Αυτό έγινε διότι και στην πραγματικότητα, κατασκευαστικά στοιχεία όπως η γάστρα, το κατάστρωμα και τα ενισχυτικά, δεν είναι δυνατόν λόγω της μεγάλης γεωμετρίας τους να υποβληθούν σε τέτοιο post – curing, και κάτι τέτοιο θα μας έδινε μη ρεαλιστικά αποτελέσματα για τα πειράματα αντοχής. Post curing με θερμαντικές κουβέρτες περιορίζονται σε κατασκευές όπως τα σκιάδια και τα καπάκια των καταστρώματων.

2.2.2 Πρότυπα δοκιμών

Οι δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τις απαιτήσεις και τις προτάσεις των 5 νηογνωμόνων (DNV [9], LR [10], ABS [8], BV [3], RINA [11]) καθώς και του ISO 12215 [12],[13],[14] για single skin laminates (γάστρα, ενισχυτικό) καθώς και για sandwich laminates (κατάστρωμα). Αποφασίστηκε, λόγω των καταπονήσεων που δέχονται τα πολύστρωτα αυτά, να εξεταστεί η αντοχή της γάστρας και του διαμήκους ενισχυτικού σε εφελκυσμό, ενώ η κατασκευή sandwich του καταστρώματος σε κάμψη 3 σημείων. Οι προτάσεις των νηογνωμόνων σχετικά με τα πρότυπα για αυτές τις δοκιμές ανάλογα με το είδος του πολύστρωτου αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 2.3: Πρότυπα δοκιμών που προτείνουν οι κλάσεις

	TENSILE TEST	BENDING TEST
BV	ISO 527/ISO 527-4	ASTM C393
DNV	ISO 527/ISO 527-4	ASTM C393
LR	ISO 527-4	ASTM C393
RINA	ISO 527-4(speed=2mm/min)	ASTM C273
ABS	ASTM D3039/D638	-
ISO-12215	ISO 527-4	ISO 178 (only CSM)

Από τον παραπάνω πίνακα καταλήξαμε στις εξής δοκιμές :

- ISO 527-4 [15] για τις δοκιμές εφελκυσμού που θα πραγματοποιηθούν για τα δοκίμια της γάστρας και του διαμήκους ενισχυτικού.
- ASTM C393 [16] για τις δοκιμές κάμψης που θα πραγματοποιηθούν για τα δοκίμια του καταστρώματος.

- ISO 1172 [17] για την περιεκτικότητα των ινών, που θα πραγματοποιηθούν για όλα τα δοκίμια.
- ISO 1183 [18] για την πυκνότητα των πολυστρωτων, που θα πραγματοποιηθούν για όλα τα δοκίμια.

Εφόσον, επιλέχθηκαν τα τελικά πρότυπα δοκιμών, σειρά έχει η διαστασιολόγηση των τελικών δοκιμών σύμφωνα με τις απαιτήσεις των πρότυπων δοκιμών.

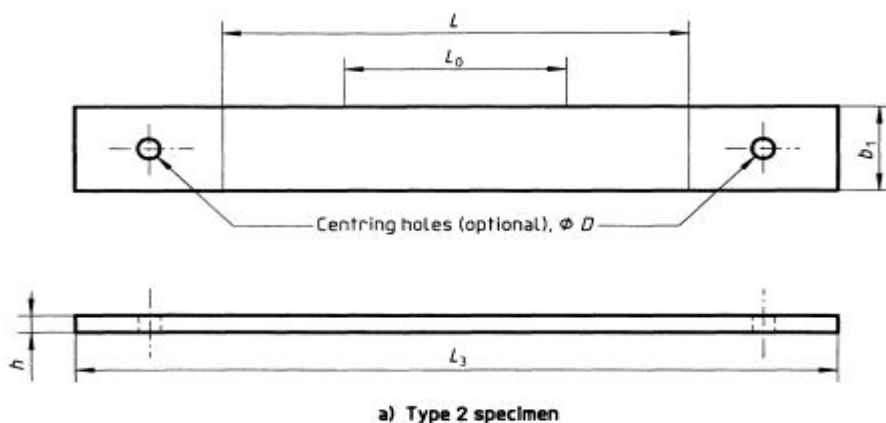
2.2.2.1. ISO 527/4

Το ISO 527-4 [15] είναι ένα πρότυπο που καθορίζει τις συνθήκες δοκιμής και τις διαστάσεις των δοκιμών για δοκιμές εφελκυσμού σε ενισχυμένα πλαστικά. Το πρότυπο καθορίζει έναν αριθμό παραμέτρων, μεταξύ των οποίων:

1. Διαστάσεις δοκιμίου: Το πρότυπο καθορίζει τις διαστάσεις των δοκιμίων, τα οποία μπορεί να είναι είτε τύπου 1A είτε τύπου 1B, ανάλογα με το υλικό που εξετάζεται.
2. Ταχύτητα δοκιμής: Το πρότυπο καθορίζει την ταχύτητα δοκιμής, η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1 και 500 mm/min, ανάλογα με το υλικό που δοκιμάζεται.
3. Θερμοκρασία: Το πρότυπο καθορίζει τη θερμοκρασία στην οποία πρέπει να διεξάγεται η δοκιμή, η οποία συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 23°C και 50°C.
4. Υγρασία: Το πρότυπο καθορίζει τις συνθήκες υγρασίας για τη δοκιμή, οι οποίες συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 30% και 70% σχετικής υγρασίας.
5. Ρυθμός παραμόρφωσης: Το πρότυπο καθορίζει τον ρυθμό παραμόρφωσης, ο οποίος συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 0,001 και 50 mm/mm/min, ανάλογα με το υλικό που εξετάζεται.

Αυτές οι παράμετροι συμβάλλουν στη διασφάλιση ότι οι δοκιμές εφελκυσμού σε πλαστικά διεξάγονται με συνεπή και αξιόπιστο τρόπο, επιτρέποντας την ακριβή σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών.

Όσον αφορά την δοκιμή εφελκυσμού, επιλέξαμε τον τύπο 2 δοκιμίου, το οποίο φαίνεται στο σχήμα 2.7, όπως προτείνουν οι νηογνώμονες, για τον οποίο ισχύουν οι παρακάτω περιορισμοί:



Dimensions in millimetres			
		Type 2	Type 3
L_0	Overall length	≥ 250	≥ 250
	Distance between end tabs	—	150 ± 1
b_1	Width	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$ or $50 \pm 0,5$
h	Thickness	2 to 10	2 to 10
L_0	Gauge length (recommended for extensometers)	50 ± 1	50 ± 1
L	Initial distance between grips	150 ± 1	136 (nominal)
L_T	Length of end tabs	—	≥ 50
h_T	Thickness of end tabs	—	1 to 3
D	Diameter of centring holes	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$

NOTE — Requirements on specimen quality and parallelism are given in clause 6.

Σχήμα 2.7: Περιορισμοί διαστάσεων για τύπου 2 δοκίμιο [15]

Σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς, καταλήξαμε στις εξής διαστάσεις :

Πίνακας 2.4: διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού

L	250 mm
B	25 mm

Σημειώνεται πως οι τρύπες διαμέτρου $\varnothing 3$ επιλέχτηκε να μετατοπιστούν σε απόσταση 12.5mm από τα άκρα του δοκιμίου, αντί για 25 που πρότεινε το ISO 527-4 [15], έτσι ώστε να επηρεάσει όσο το δυνατόν λιγότερο την αντοχή του δοκιμίου, στο κέντρο του. Εάν ήταν δυνατόν, δεν θα γινόντουσαν καθόλου οι τρύπες, παρόλα αυτά κάτι τέτοιο δεν μπορούσε να γίνει, λόγω της κοπής τους από το μηχάνημα CNC, όπως αναφέρεται παρακάτω.

Όσον αφορά τα πάχη των πολύστρωτων, η αρχική εκτίμηση που πήραμε από το ναυπηγείο για την γάστρα και το διάμηκες ενισχυτικό ήταν :

Πίνακας 2.5: Αρχική θεώρηση παχών

	hull	Longitudinal stiffener
Nominal thickness (mm)	9.4	7.8

Συνεπώς, είμαστε εντός ορίων από τους περιορισμούς του πρότυπου. Στην πραγματικότητα τα πραγματικά πάχη των δοκιμών βγήκαν μικρότερα από τις αρχικές εκτιμήσεις. Αυτό συνέβη για 2 λόγους :

1. Στην πραγματικότητα οι δυο πρώτες στρώσεις 300CSM, 450CSM επιστρώνονται με το χέρι πάνω από το gel coat τις πρώτες 20-40 ώρες, αφού το πρώτο πολυμεριστεί. Αυτό οδηγεί σε μικρή αύξηση του πάχους του τελικού πολύστρωτου, καθώς με την τεχνική hand lay up έχουμε μικρότερη περιεκτικότητα ινών.
2. Όσον αφορά το διάμηκες ενισχυτικό, στο αρχικό lamination plan υπήρχε και μια μονοαξονική στρώση 600UDR, η οποία δεν ήταν διαθέσιμη από το ναυπηγείο, οπότε η κατασκευή του έγινε χωρίς αυτή.

Τέλος, το πρότυπο απαιτεί τουλάχιστον 5 δοκίμια ανά δοκιμή. Στην δική μας περίπτωση υπολογίσαμε 7 δοκίμια ανά δοκιμή έτσι ώστε να έχουμε μεγαλύτερο δειγματικό χώρο. Επίσης οι δοκιμές εφελκυσμού θα γίνουν και στις δύο διευθύνσεις (warp & fill) έτσι ώστε να υπολογίσουμε την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας και στις δύο διευθύνσεις.

2.2.2.2 ASTM C393

Για την μελέτη της αντοχής σε κάμψη, του καταστρώματος, επιλέχτηκε το ASTM C393 [16] για κατασκευές sandwich.

Το πρότυπο ASTM C393 είναι μια πρότυπη μέθοδος δοκιμής που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων κάμψης των κατασκευών σάντουιτς. Το πρότυπο καθορίζει έναν αριθμό παραμέτρων, μεταξύ των οποίων:

1. Μέγεθος δοκιμίου: Το πρότυπο καθορίζει τις διαστάσεις του δοκιμίου πάνελ σάντουιτς, το οποίο πρέπει να είναι ορθογώνιο με μήκος τουλάχιστον 150 mm (6 in) και πάχος έως 50 mm (2 in).
2. Μέθοδος φόρτισης: Το πρότυπο καθορίζει τη μέθοδο φόρτισης, η οποία θα πρέπει να είναι ένα σχήμα φόρτισης τριών σημείων, όπου η μύτη φόρτισης τοποθετείται στο κέντρο του δοκιμίου και οι στηρίξεις τοποθετούνται σε σταθερή απόσταση από το κέντρο του δοκιμίου.
3. Ταχύτητα δοκιμής: Το πρότυπο καθορίζει την ταχύτητα δοκιμής, η οποία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 0,01 και 50 mm/min (0,0004 και 2 in/min).

4. Θερμοκρασία και υγρασία: Το πρότυπο καθορίζει τις συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας για τη δοκιμή, οι οποίες πρέπει να κυμαίνονται μεταξύ 10 και 38 °C (50 και 100 °F) και μεταξύ 10 και 90 % σχετικής υγρασίας.

5. Προετοιμασία: Το πρότυπο καθορίζει τις απαιτήσεις προετοιμασίας για το δοκίμιο, το οποίο θα πρέπει να δοκιμάζεται μετά από προετοιμασία για τουλάχιστον 24 ώρες στις καθορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

6. Συλλογή δεδομένων: Το πρότυπο καθορίζει τον τύπο των δεδομένων που πρέπει να συλλέγονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής, συμπεριλαμβανομένου του φορτίου και της μετατόπισης.

Αυτές οι παράμετροι συμβάλλουν στη διασφάλιση ότι οι ιδιότητες επίπεδης κάμψης των κατασκευών σάντουιτς προσδιορίζονται με συνεπή και αξιόπιστο τρόπο, επιτρέποντας την ακριβή σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών μεταξύ διαφορετικών υλικών και εργαστηρίων δοκιμών.

Οι περιορισμοί που διέπουν το πρότυπο αναλυτικότερα, είναι οι εξής :

- Το πλάτος του δοκιμίου πρέπει να είναι $b \geq 2 * t_{tot} = 30 \text{ mm}$, όπου t_{tot} πάχος δοκιμίου.
- Το πλάτος δοκιμίου πρέπει να είναι $b \geq 3 * t_{core} = 30 \text{ mm}$, όπου t_{core} το πάχος του υλικού πυρήνα.
- Σύμφωνα με τον LR [5] για την δοκιμή κάμψης, προτείνονται πλάτη 15 ή 30 mm.
- Το μήκος του δοκιμίου πρέπει να είναι ίσο με το span length + 50 mm

Σύμφωνα με τον εξοπλισμό του ENT (Εργαστήριο Ναυτικής Τεχνολογίας) όπου και έγιναν οι δοκιμές αντοχής, τα όρια του ανυποστήρικτου μήκους (span length) συναρτήσεως των διαμέτρων των κυλινδρικών στηρίξεων (rollers) είναι τα εξής :

- Για Roller Diameter 10 mm έχουμε:

Minimum Span: 22,6 mm

Maximum Span: 289.4 mm

- Για Roller Diameter 20 mm έχουμε:

Minimum Span: 32,6 mm

Maximum Span: 299.4 mm

Για την δοκιμή μας επιλέξαμε Roller Diameter 20 mm με μήκος $L_{ROLLER} = 75 \text{ mm}$ λόγω των μεγάλων διαστάσεων των δοκιμίων. Συνεπώς οι τελικές διαστάσεις σύμφωνα με τους παραπάνω περιορισμούς παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 2.6 :

Πίνακας 2.6: Διαστάσεις δοκιμίων κάμψης

	L (mm)	B (mm)	T (mm)
ASTM C393	350	30	15

Ομοίως με την δοκιμή ISO-527/4 [15] θα χρησιμοποιήσουμε 7 δοκίμια ανά διεύθυνση, δηλαδή 14 στο σύνολο.

2.2.2.3 ISO 1183 & ISO 1172

Το ISO 1183 [18] είναι ένα διεθνές πρότυπο που καθορίζει μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της πυκνότητας στερεών, υγρών και ιξωδών υλικών. Το πρότυπο περιγράφει μια μέθοδο εκτόπισης που περιλαμβάνει τη βύθιση ενός δείγματος του υλικού σε υγρό γνωστής πυκνότητας, τη μέτρηση του όγκου του εκτοπισμένου υγρού και τη χρήση αυτών των τιμών για τον υπολογισμό της πυκνότητας του υλικού. Το πρότυπο παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για τον εξοπλισμό, τις διαδικασίες και τους υπολογισμούς που απαιτούνται για να εξασφαλιστούν ακριβείς και αξιόπιστες μετρήσεις πυκνότητας.

Αντίστοιχα το ISO 1172 [17] είναι το διεθνές πρότυπο που καθορίζει μια μέθοδο για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας κατά βάρος των ινών ενός πολύστρωτου. Σύμφωνα με αυτό, μικρά δοκίμια βάρους από 2-10 gr εισέρχονται σε φούρνο θερμοκρασίας 625 °C, όπου καίγεται η ρητίνη, ενώ το γυαλί παραμένει αμετάβλητο. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να καθορίσουμε εύκολα την περιεκτικότητα του ζυγίζοντας το δοκίμιο πριν και μετά.

Για τις δοκιμές περιεκτικότητας σε ίνες και μέτρησης πυκνότητας, οι απαιτήσεις είναι πιο απλές καθώς τα δοκίμια πρέπει να χαρακτηρίζονται από μικρό μέγεθος και ομοιότητα στο μέγεθος έτσι ώστε οι τιμές των βαρών να μην αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους. Σύμφωνα με τον BV, για τις εν λόγω δοκιμές προτείνονται οι παρακάτω διαστάσεις:

Πίνακας 2.7: Πρότυπα δοκιμών σύμφωνα με τον BV [3] (BUREAU VERITAS)

Panels	Test types - Standards	Quantity of test pieces	Size of test pieces, in mm(1)(2)
Monolithic	Tensile test: ISO 527	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration (7)	Length: 400 Width: <ul style="list-style-type: none"> • 25 where $e < 25$ • 30 where $25 < e < 30$ • 35 where $30 < e < 35$, etc.
	3-point bending test: ISO 14125	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration (7)	Length: 200 Width: <ul style="list-style-type: none"> • 25 where $e < 25$ • 30 where $25 < e < 30$ • 35 where $30 < e < 35$, etc.
	Measurement of density: ISO 1183 Reinforcement content in weight: ISO 1172(3)	4 samples	30 x 30
Sandwich	3-point bending test ISO 14125 (6)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration (7)	Length: 1000(5) Width: $2 \cdot e$
	For both skins: Tensile test: ISO 527, or equivalent (4)	<ul style="list-style-type: none"> • 5 in lengthwise direction of panel • 5 in crosswise direction of panel • 2 test pieces for calibration (7)	Length: 400 Width: <ul style="list-style-type: none"> • 25 where $e < 25$ • 30 where $25 < e < 30$ • 35 where $30 < e < 35$, etc.
	For both skins: Measurement of density: ISO 1183 Reinforcement content in weight: ISO 1172(3)	4 samples	30 x 30
(1) The Society may request additional tests with other sizes of test pieces. (2) e : Thickness, in mm, of the piece under test. (3) For laminate test panels reinforced with carbon and/or para-aramid fibres, the standard ASTM D3171 may be used. (4) Where both skins of the sandwich panel are fairly similar, tensile and density tests may be confined to one of the two skins. (5) The distance between the fixed rollers is to be not less than 600 mm (It is recommended to use a value roughly equal to 800 mm). (6) See [4.2.3] c) (7) For orthotrope panel, test may be confined to one direction of the panel.			

Συνεπώς, για τις δοκιμές μέτρησης πυκνότητας και περιεκτικότητας ινών κατά βάρος κατά ISO 1183 & ISO 1172 διαστασιολογήσαμε τα δοκίμια όπως μας προτείνει ο νηογνώμονας BV, δηλαδή 30x30 mm. Οι δοκιμές απαιτούν τουλάχιστον δύο δοκίμια ανά πρότυπο, και σε περίπτωση απόκλισης μεγαλύτερης του 5%, γίνεται χρήση 3^{ου} δοκιμίου και χρησιμοποιείται ο μέσος όρος και των τριών.

Σύμφωνα με τις παραπάνω απαιτήσεις των πρότυπων δοκιμών, ο συνολικός αριθμός (σε παρένθεση) και οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

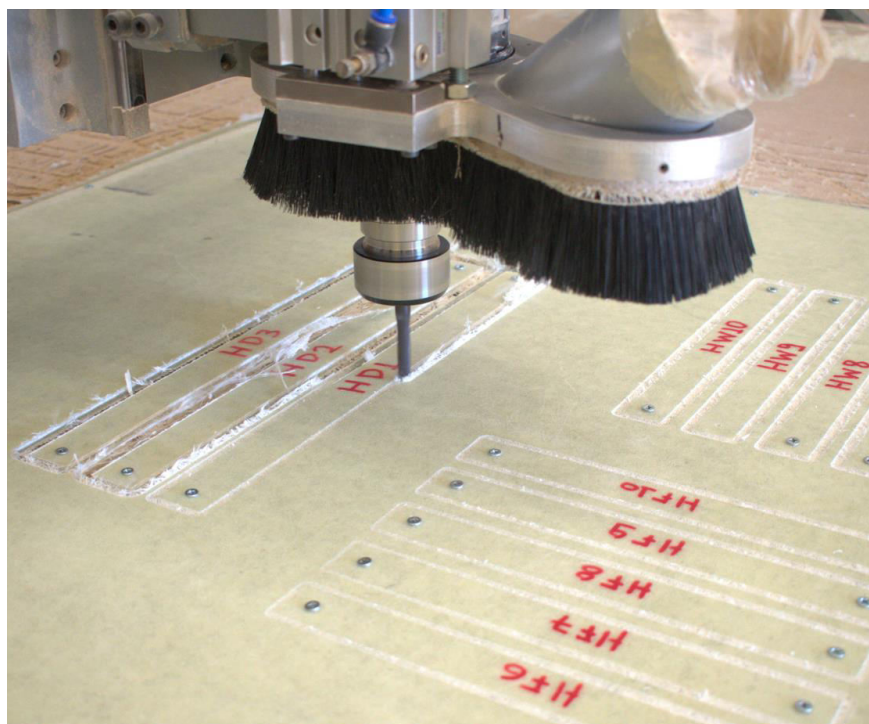
Πίνακας 2.8: Τελικές διαστάσεις

Laminates	(number) x length x width [mm]		
	Hull	Longitudinal stiffener	Deck
Warp	(10)x250x25	(10)x250x25	(10)x350x30
Fill	(10)x250x25	(10)x250x25	(10)x350x30
Density	(5)x30x30	(5)x30x30	(5)x30x30
Fiber content	(5)x30x30	(5)x30x30	(5)x30x30

2.2.2.4 Κοπή δοκιμίων

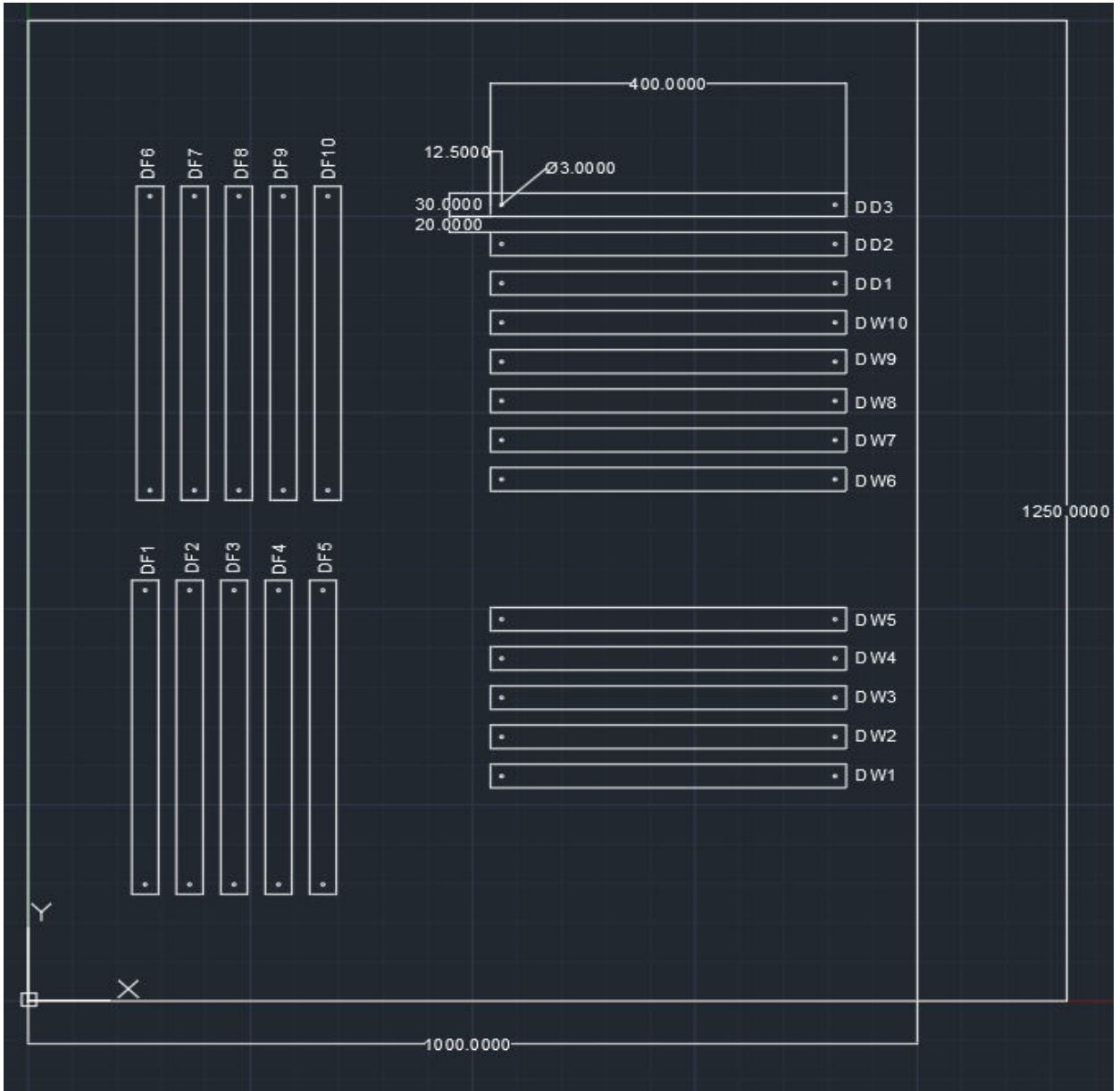
Εφόσον επιλέχθηκαν οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων, το επόμενο στάδιο είναι η κοπή τους. Για την κοπή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τριαξονικό μηχάνημα CNC στο ναυπηγείο πλαστικών σκαφών της Technohull, με την βοήθεια του οποίου γίνονται όλες οι δισδιάστατες κοπές. Το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την χάραξη του προφίλ και την τελική κοπή ήταν από καρβίδιο διαμέτρου $\varnothing 10$, ενώ για τις τρύπες που δημιουργήθηκαν στα δοκίμια χρησιμοποιήθηκε καρβίδιο διαμέτρου $\varnothing 2,5$.

Σημειώνεται πως η δημιουργία οπών ήταν απαραίτητη σε όλα τα δοκίμια, καθώς κατά το στάδιο της τελικής κοπής, το τελικό προϊόν έχει την τάση να αποχωρίζεται βίαια την επιφάνεια κοπής, λόγω της μεγάλης ταχύτητας του κοπτικού εργαλείου. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν οπές διαμέτρου $\varnothing 2,5$ σε απόσταση 15 mm από τα άκρα κάθε δοκιμίου και περάστηκαν βίδες, ώστε να συγκρατούν τα δοκίμια κατά την κοπή τους. Όσον αφορά τα δοκίμια που θα δοκιμαστούν σε εφελκυσμό, οι τρύπες αυτές δεν προκαλούν πρόβλημα στην αντοχή, προτείνονται και από το ISO 527-4 για τύπο 2 δοκιμίου, καθώς η επιφάνεια αυτή συγκρατείται μέσα στις αρπάγες. Για τα δοκίμια του καταστρώματος που θα δοκιμαστούν σε κάμψη 3 σημείων, όπως επίσης και στα δοκίμια για την μέτρηση πυκνότητας και περιεκτικότητας ινών κατά βάρος, έγινε αρχική κοπή στα 400mm κατά το μήκος, και μεταγενέστερη κοπή στο ENT στις επιθυμητές διαστάσεις. Στο σχήμα 2.8 βλέπουμε την διαδικασία κοπής των δοκιμίων της γάστρας.

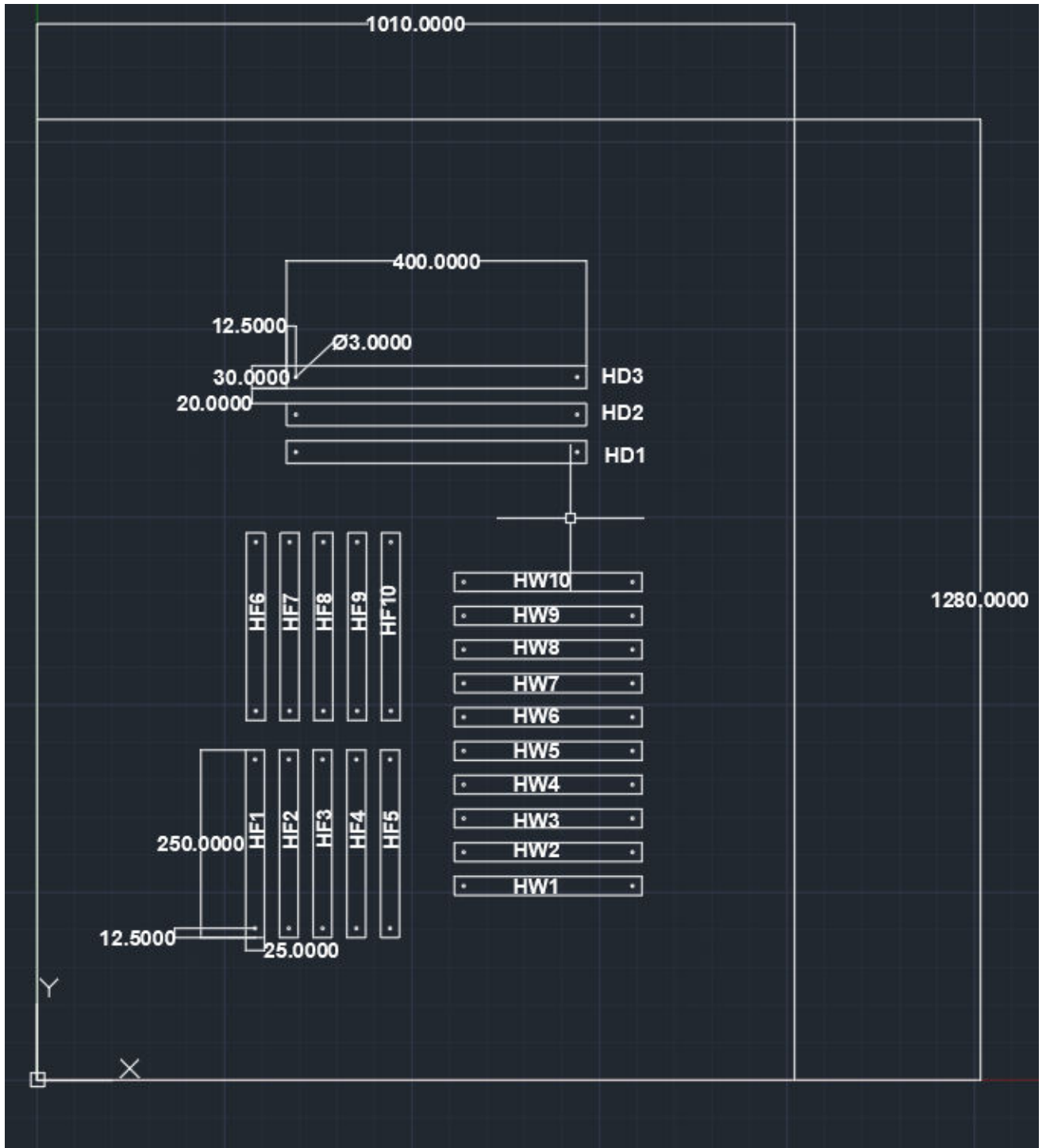


Σχήμα 2.8: Κοπή δοκιμίων με τριαξονικό CNC

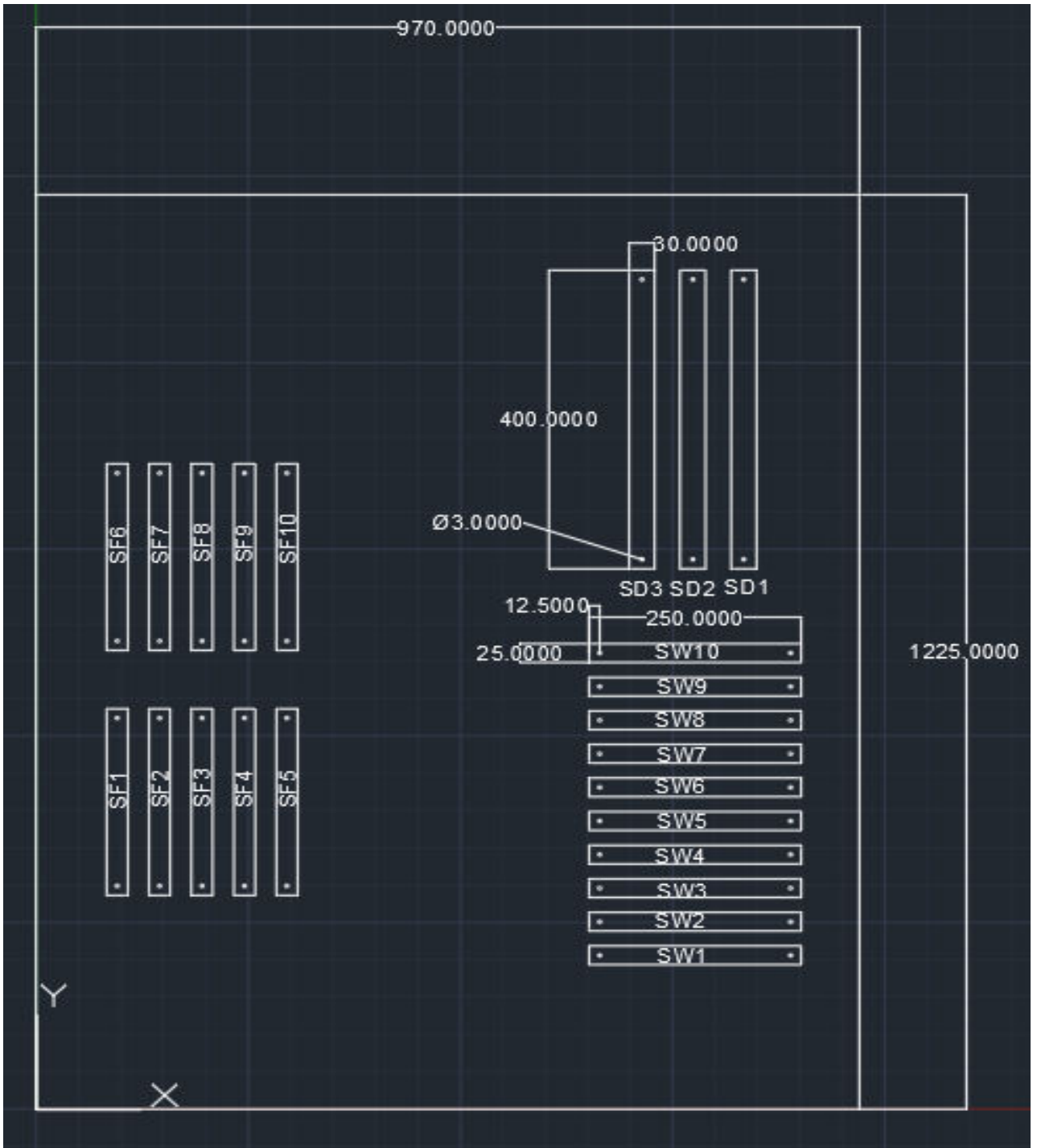
Τα σχέδια έγιναν σε AutoCAD, όπως παρουσιάζονται παρακάτω, και έγιναν import σε Rhino σε μορφή dxf. Το CNC μετατρέπει αυτόματα το σχέδιο από Rhino σε G-code.



Σχήμα 2.9 : Σχέδιο δοκιμίων καταστρώματος



Σχήμα 2.10 : Σχέδιο δοκιμίων γάστρας



Σχήμα 2.11 : Σχέδιο δοκιμίων ενισχυτικών

Η ονοματολογία των δοκιμών έγινε ως εξής :

$HW_i, \mu \epsilon \iota = 10$: δοκίμια της γάστρας με την μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στην διεύθυνση Warp των ινών.

$HF_i, \mu \epsilon \iota = 10$: δοκίμια της γάστρας με την μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στην διεύθυνση Fill των ινών.

$HD_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια της γάστρας τα οποία προορίζονται για τις δοκιμές καύσης και μέτρησης πυκνότητας.

$HGC_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια της γάστρας τα οποία κάηκαν για την μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες

$HGC_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια της γάστρας τα οποία κάηκαν για την μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες

$HDN_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια της γάστρας για την μέτρηση πυκνότητας.

$SW_i, \mu \epsilon \iota = 10$: δοκίμια των ενισχυτικών με την μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στην διεύθυνση Warp των ινών.

$SF_i, \mu \epsilon \iota = 10$: δοκίμια των ενισχυτικών με την μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στην διεύθυνση Fill των ινών.

$SD_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια των ενισχυτικών τα οποία προορίζονται για τις δοκιμές καύσης και μέτρησης πυκνότητας.

$SGC_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια των ενισχυτικών τα οποία κάηκαν για την μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες

$SDN_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια των ενισχυτικών για την μέτρηση πυκνότητας.

$DW_i, \mu \epsilon \iota = 10$: δοκίμια του καταστρώματος με την μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στην διεύθυνση Warp των ινών.

$DF_i, \mu \epsilon \iota = 10$: δοκίμια του καταστρώματος με την μεγάλη τους πλευρά παράλληλη στην διεύθυνση Fill των ινών.

$DD_i, \mu \epsilon \iota = 3$: δοκίμια του καταστρώματος τα οποία προορίζονται για τις δοκιμές καύσης και μέτρησης πυκνότητας.

DGC_i , με $i = 3$: δοκίμια του καταστρώματος τα οποία κάηκαν για την μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες

DDN_i , με $i = 3$: δοκίμια του καταστρώματος για την μέτρηση πυκνότητας.

2.3 Πειραματική διαδικασία

2.3.1 Περιεκτικότητα ινών κατά βάρος

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η μέτρηση της περιεκτικότητας των ινών έγινε σύμφωνα με το ISO-1172 [17]. Απαραίτητη προϋπόθεση για την μέτρηση αυτή είναι το μικρό μέγεθος των δοκιμίων έτσι ώστε να αποφευχθεί όσο το δυνατόν γίνεται η απελευθέρωση καπνού από την καύση της ρητίνης. Το πρότυπο προτείνει δοκίμια των οποίων το βάρος κυμαίνεται από 2-1 gr. Για αυτόν τον λόγο τα δοκίμια για τη μέτρηση αυτή τελικά κόπηκαν στις εξής διαστάσεις:

Πίνακας 2.9: Διαστάσεις δοκιμίων για καύση

Specimens	Length [mm]	Width [mm]
Hull		
HGC1	13.6	29.9
HGC2	14.1	29.7
HGC3	12.1	29.3
Stiffener		
SGC1	13.8	29.9
SGC2	14.3	29.8
SGC3	14.2	29.6
Face 1		
DGC1	15.1	29.5
DGC2	13.1	29.4
DGC3	13.3	29.7
Face 2		
DGC1	15.1	30.1
DGC2	13.2	30.1
DGC3	13.0	30.2

Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο :

$$M_{GLASS} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Όπου,

m_1 : η μάζα του δοχείου, σε γραμμάρια,

m_2 : η μάζα του δοχείου + το ξηρό δοκίμιο, σε γραμμάρια

m_3 : η μάζα του δοχείου + το δοκίμιο μετά την καύση του, σε γραμμάρια.

Όσον αφορά την κατασκευή sandwich του καταστρώματος, διαχωρίστηκαν τα faces από τον πυρήνα, με μηχανικό τρόπο, τριφτηκαν οι επιφάνειες και κήηκαν ξεχωριστά. Επίσης στο Face 1 (άνω περίβλημα) του καταστρώματος και στα δοκίμια της γάστρας συμπεριλήφθηκε στους υπολογισμούς η ύπαρξη core material (SORIC TF 2) του οποίου το βάρος υπολογίστηκε από τις διαστάσεις του σε συνδυασμό με το ξηρό επιφανειακό του βάρος σύμφωνα με τα data sheets του υλικού.

Συνεπώς σε αυτήν την περίπτωση ο παραπάνω τύπος έχει την ακόλουθη μορφή:

$$M_{GLASS} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_{core} - m_1} \times 100 \quad (2.2)$$

Όπου

$$m_{core} = L_{spec} * B_{spec} * dry\ weight\ of\ core \quad (2.3)$$

Παρακάτω φαίνεται ο πίνακας με τους αναλυτικούς υπολογισμούς:

Πίνακας 2.10: Αποτελέσματα

Specimens	Cuble number	m_1 [gr]	m_2 [gr]	m_3 [gr]	m_{core} [gr]	Glass Content [%]	Mean [%]	C.V. [%]
Hull							62.1	0.8
HGC1	15	77.5	80.9	79.6	0.05	62.6		
HGC2	8	76.4	79.2	78.5	0.05	61.9		
HGC3	16	76.55	79.6	78.38	0.04	61.6		
Stiffener							66.8	2.3
SGC1	7	77.9	81.0	80.0	-	67.4		
SGC2	10	83.4	85.8	85.0	-	65.0		
SGC3	11	78.1	80.4	79.7	-	68.0		
Face 1							44.7	1.4
DGC1	3	76.7	78.4	77.4	0.05	45.3		
DGC2	4	77.4	78.9	78.1	0.05	44.00		
DGC3	13	77.8	79.2	78.45	0.05	44.7		
Face 2							66.1	2.9
DGC1	22	34.5	35.3	35.0	-	67.5		
DGC2	ΓΓ	33.3	34.2	33.9	-	64.8		
DGC3	80	40.8	41.8	41.3	-	-		

Σύμφωνα με την μέθοδο παραγωγής τους (vacuum infusion), τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά σε αυτά που αναμέναμε (60-65 %). Όπως βλέπουμε, τα μόνα δοκίμια τα οποία αποκλίνουν από τις παραπάνω τιμές, είναι αυτά του Face 1 από τα δοκίμια του καταστρώματος, καθώς και το DGC3 μόνο από το Face 2 (κάτω περίβλημα). Αυτή η απόκλιση μπορεί να αποδοθεί στις εξής αιτίες.

1. Παρατηρούμε ότι στα διαμήκη ενισχυτικά όπου δεν υπάρχει soric ή αφρός PVC η περιεκτικότητα των ενισχυτικών ινών είναι σημαντικά μεγαλύτερη και στα τρία δοκίμια. Αυτό συμβαίνει διότι περίσσεια ρητίνης εισέρχεται στο υλικό πυρήνα (soric) των οποίων το πάχος είναι σημαντικά μεγαλύτερο συγκριτικά με αυτό των ενισχυτικών ινών με αποτέλεσμα το βάρος την ρητίνης να είναι μεγαλύτερο στις περιπτώσεις αυτές.
2. Όσον αφορά το δοκίμιο DGC3 του Face 2 η μεγάλη απόκλιση των τιμών του σε σχέση με τα υπόλοιπα 2 μας οδηγεί στο συμπέρασμα ενδεχόμενου ελαττωματικού στοιχείου κατά την κατασκευή ή (πιο πιθανό) πιθανή αφαίρεση ενισχυτικών ινών κατά την αποκόλληση του από τον αφρό PVC. Σημειώνεται ότι τα περιβλήματα αφαιρέθηκαν από τον πυρήνα για την μέτρηση της περιεκτικότητας και πυκνότητας, συνεπώς το δοκίμιο αυτό δεν θα συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς.



Σχήμα 2.12 : Ενισχυτικές ίνες μετά την καύση των δοκιμίων

2.3.2 Μέτρηση πυκνότητας δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η μέτρηση της πυκνότητας έγινε σύμφωνα με το ISO-1183 [18]. Σύμφωνα με αυτό, δοκίμια βάρους τουλάχιστον 1 gr ζυγίζονται στον αέρα και στο νερό. Στην συνέχεια, η πυκνότητα υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$\rho_s = \frac{m_{S,A} \times \rho_{IL}}{m_{S,A} - m_{S,IL}} \quad (2.4)$$

Όπου,

$m_{S,A}$: η μάζα του δοκιμίου στον αέρα, [gr]

$m_{S,IL}$: η μάζα του δοκιμίου στο νερό , [gr]

ρ_{IL} : η πυκνότητα του νερού στους 23°C, $\rho_{IL} = 0,9965 \text{ gr/cm}^3$

Όσον αφορά τα δοκίμια με υλικό πυρήνα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής σχέσεις:

$$d_{FRP} = \frac{W_{FRP}}{V_{FRP}} \quad (2.5)$$

$$W_{FRP} = W_{TOT} - W_{CORE} \quad (2.6)$$

Όπου $W_{CORE} = L_{spec} * B_{spec} * dry\ weight\ of\ core$ (2.7), από τα data sheets.

$$V_{FRP} = V_{TOT} - V_{CORE} \quad (2.8)$$

Όπου V_{TOT} και V_{CORE} γνωστά από τις διαστάσεις των δοκιμίων οι οποίες δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.11: Διαστάσεις δοκιμίων για μέτρηση πυκνότητας

Specimens	Length [mm]	Width [mm]	Thickness [mm]	V_{TOT} [mm ³]	V_{CORE} [mm ³]
Hull					
HDN1	22.1	30.2	6.7	4457.7	998
HDN2	23.2	31.1	6.2	4497.0	1084.5
HDN3	24.9	30.1	6.2	4670.9	1126.4
Stiffener					
SDN1	-	-	-	-	-
SDN2	-	-	-	-	-
SDN3	-	-	-	-	-
Face 1					
DDN1	23.0	29.6	4.0	2702.5	1021.1
DDN2	25.3	29.4	3.7	2743.3	1119.2
DDN3	25.3	29.5	3.8	2800.3	1117.1
Face 2					
DDN1	22.5	30	2.5	1696.5	-
DDN2	25.4	30.3	2.1	1612.0	-
DDN3	25.2	30.1	1.8	1381.8	-

Πίνακας 2.12: Αποτελέσματα

Specimens	M air [gr]	M water [gr]	Water density [gr/cm^3]	Total density [gr/cm^3]	FRP density [gr/cm^3]	MEAN [gr/cm^3]	C.V.[%]
Hull						1.6	15.4
HDN1	5.4	1.5	1	1.4	1.5		
HDN2	5.5	1.6	1	1.4	1.6		
HDN3	6.1	2.0	1	1.5	1.7		
Stiffener						1.8	1.7
SDN1	4.6	2.1	1	1.8	1.8		
SDN2	4.1	1.8	1	1.8	1.8		
SDN3	4.1	1.8	1	1.7	1.7		
Face 1						1.6	
DDN1	2.5	0.3	1	1.1	1.4		32.6
DDN2	2.9	0.4	1	1.2	1.7		
DDN3	2.7	0.2	1	1.1	1.5		
Face 2						1.5	
DDN1	1.6	0.6	1	1.5	1.5		
DDN2	1.9	0.7	1	1.5	1.5		2.7
DDN3	1,7	0.6	1	1.5	1.5		

Όπως βλέπουμε και συγκριτικά με τους πίνακες 2.13, 2.14, οι τιμές είναι εντός ορίων με τις αποδεκτές τιμές καθώς κυμαίνονται μεταξύ του 1.5-1.8 gr/cm^3 . Παρατηρούμε πως στα δοκίμια με υλικό πυρήνα το βάρος τους στο νερό είναι σημαντικά μικρότερο από τα υπόλοιπα καθώς και η αρχική εκτίμηση πυκνότητας, στην οποία δεν λαμβάνουμε υπόψη την ύπαρξη του. Η πραγματική τιμή της πυκνότητας του σύνθετου (FRP Density, πίνακας 2.9) η οποία υπολογίστηκε με την χρήση των σχέσεων (2.6) με (2.9), είναι αποδεκτή. Στο σχήμα 2.13 φαίνονται τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για την μέτρηση πυκνότητας.

Πίνακας 2.13: Τυπικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών

Ρητίνη	γ (g/cm^3)	E (GPa)	ν	σ_T (MPa)	ϵ_T (%)	σ_c (MPa)	Σκληρότητα Barcol	Συρρίκνωση (%)
Ορθοφθαλκή Πολυεστερική	1.23	4.1	0.36	48.3	1.0	130	42	8.2
Ισοφθαλκή Πολυεστερική	1.21	3.9	0.36	71.1	2.0	130	46	7.5
Βινυλεστερική	1.12	3.4	–	76-83	4.0-5.0	120	35	–
Εποξική	1.20	3.7	0.37	48-76	5.0-6.0	130	86	0.3

Πίνακας 2.14: Τυπικές μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων από FRP

Υλικό	V _F	γ (g/cm ³)	E ₁ (GPa)	E ₂ (GPa)	G ₁₂ (GPa)	σ _{1T} (MPa)	σ _{2T} (MPa)	τ ₁₂ (MPa)
E-glass/polyester (CSM)	0.19	1.45	8	8	2.75	108	108	85
E-glass/polyester (WR)	0.34	1.70	15	15	3.5	250	250	100
E-glass/polyester (UD)	0.43	1.80	30	-	3.5	750	-	-
E-glass/epoxy (0°/90° WR)	0.33	1.92	17	17	5	360	360	98
E-glass/epoxy (±45° WR)	0.33	1.92	10	10	8	185	185	137
E-glass/epoxy (UD)	0.53	1.92	39	15	4	1190	73	67
Carbon/epoxy (0°/90° WR)	0.50	1.53	70	70	5	625	625	130
Carbon/epoxy (±45° WR)	0.50	1.53	18	18	27	240	240	-
Carbon/epoxy (UD)	0.57	1.57	134	11	5	2040	90	49
Aramid/epoxy (0°/90° WR)	0.50	1.33	31	31	2	517	517	110
Aramid/epoxy (UD)	0.60	1.38	76	5	2	1379	30	60
Steel (B-quality)	-	7.80	207	207	80	325 ^a	325 ^a	190 ^a
Aluminium (5083 alloy)	-	2.80	70	70	26	150 ^a	150 ^a	87 ^a
Marine plywood	-	0.60	7	7	1	40	40	8

^a όριο διαρροής σε 0.2% παραμόρφωση

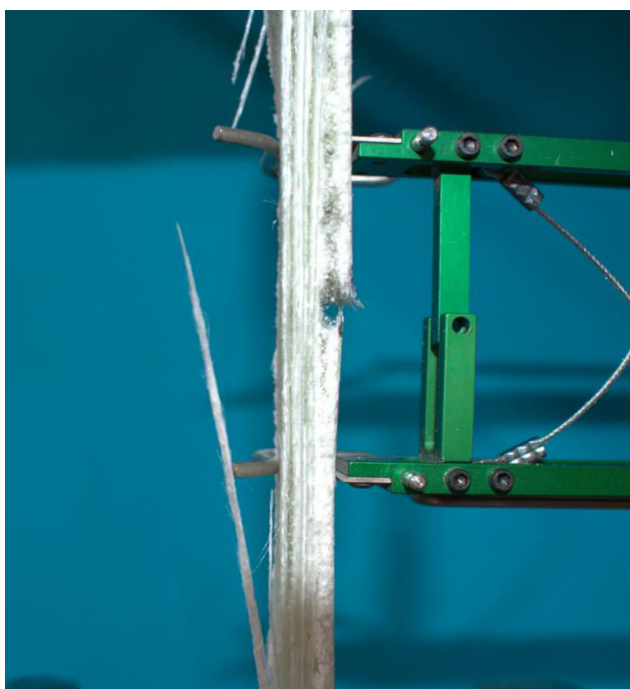


Σχήμα 2.13: δοκίμια για μέτρηση πυκνότητας

2.3.3 Πειραματική δοκιμή εφελκυσμού

Η διαδικασία των δοκιμών έλαβε χώρα στο Ε.Ν.Τ. και χρησιμοποιήθηκε υδραυλική μηχανή δοκιμών της MTS με μέγιστη δυνατότητα τα 250 kN. Οι δοκιμές έγιναν όπως

καθορίζει το ISO_527-4 [15] για δοκίμια ‘τύπου 2’ όπως αναφέρονται στο εν λόγω πρότυπο. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε κατακόρυφα. Αρχικά έγινε ευθυγράμμιση κατά την κατακόρυφο και έπειτα στερεώθηκε κλείνοντας την κάτω αρπάγη. Στη συνέχεια, έκλεισε και η πάνω αρπάγη αφού μεταφέρθηκε χειροκίνητα στο σωστό ύψος από τον χειριστή. Τέλος, τοποθετήθηκε το επιμηκυνσιόμετρο, τέθηκε σε λειτουργία απορροφητήρας για αποφυγή εισπνοής πολύ μικρών σωματιδίων και ξεκίνησε η δοκιμή μέχρι να σπάσει το δοκίμιο. Το σχήμα 3.14 που ακολουθεί δείχνει την τοποθέτηση του δοκιμίου. Η ταχύτητα που εφαρμόστηκε ήταν 2 mm/min, ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας $f=1$ Hz.



Σχήμα 3.14: δοκίμιο γάστρας σε δοκιμή εφελκυσμού

2.3.3.1 Πειραματικά αποτελέσματα

Στο εδάφιο αυτό παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών υπό μορφή γραφημάτων, αρχικά «Τάσης – Παραμόρφωσης» και έπειτα ακολουθούν πίνακες που δείχνουν την μέγιστη αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας και των 28 δοκιμών που εξετάστηκαν (7 δοκίμια για κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις).

2.3.3.2 Γραφήματα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ)

Οι μετρήσεις που πάρθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος εφελκυσμού και χρησιμοποιήθηκαν για τη κατασκευή των γραφημάτων είναι η δύναμη – F (KN) και η παραμόρφωση - ϵ (σε microstrains). Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 2.9 και αφού το εμβαδόν της εκάστοτε διατομής είχε ήδη μετρηθεί, υπολογίστηκαν οι τάσεις που χρειάζονται

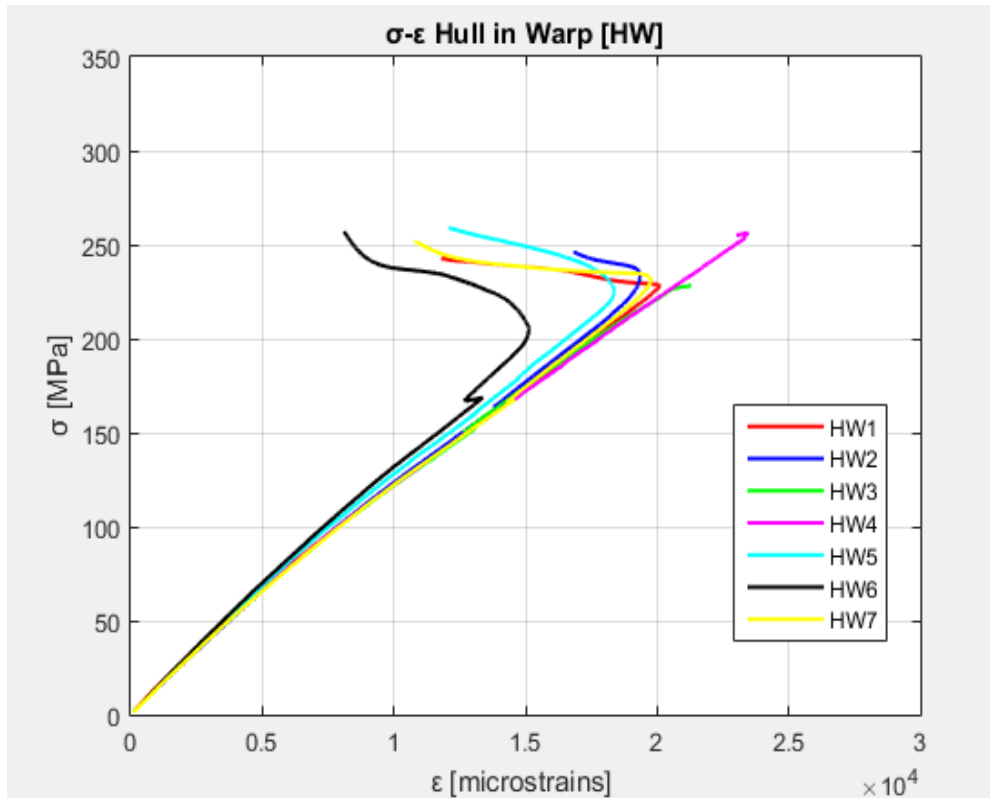
για τη δημιουργία των γραφημάτων. Στον πίνακα 2.12 αναγράφονται τα εμβαδά διατομής όλων των δοκιμίων.

$$\sigma = F/A \quad (2.9)$$

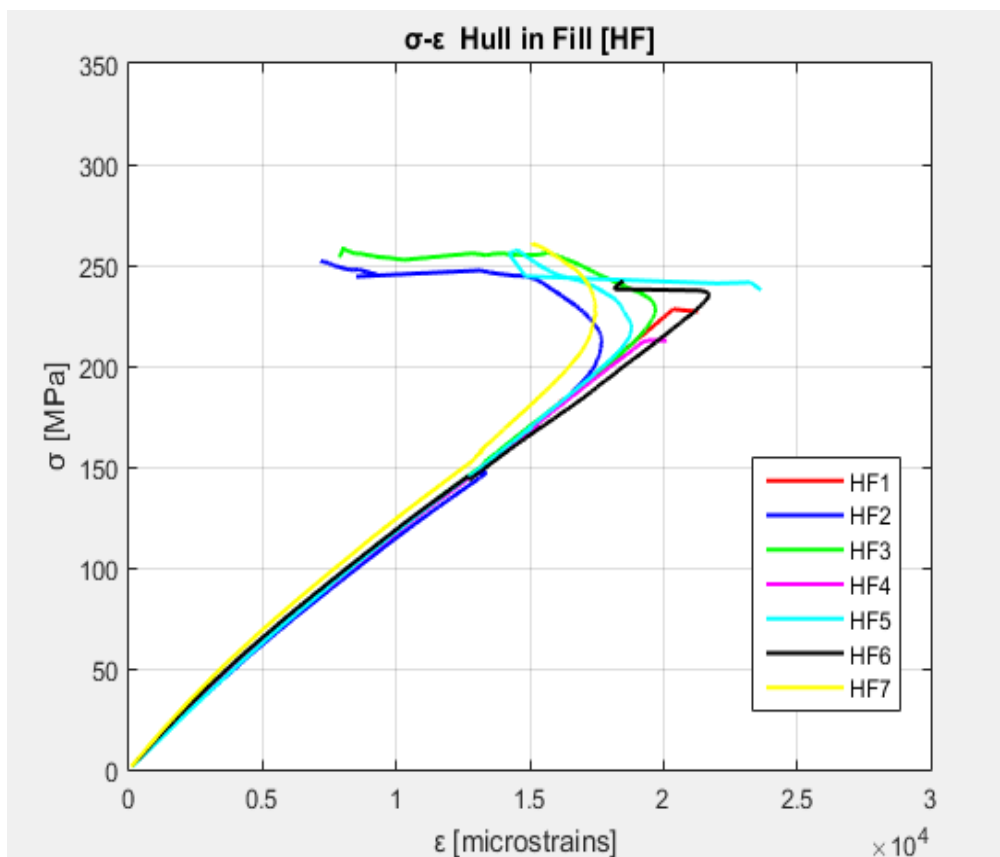
Έπειτα αποτυπώθηκαν τα ζεύγη τιμών τάσης – παραμόρφωσης και για τα 7 δοκίμια του ίδιου σεναρίου στον ίδιο ηλεκτρονικό καμβά. Ακολουθούν τα 4 γραφήματα, όσες δηλαδή και οι συνολικές περιπτώσεις

Πίνακας 2.15: Διαστάσεις δοκιμίων εφελκυσμού

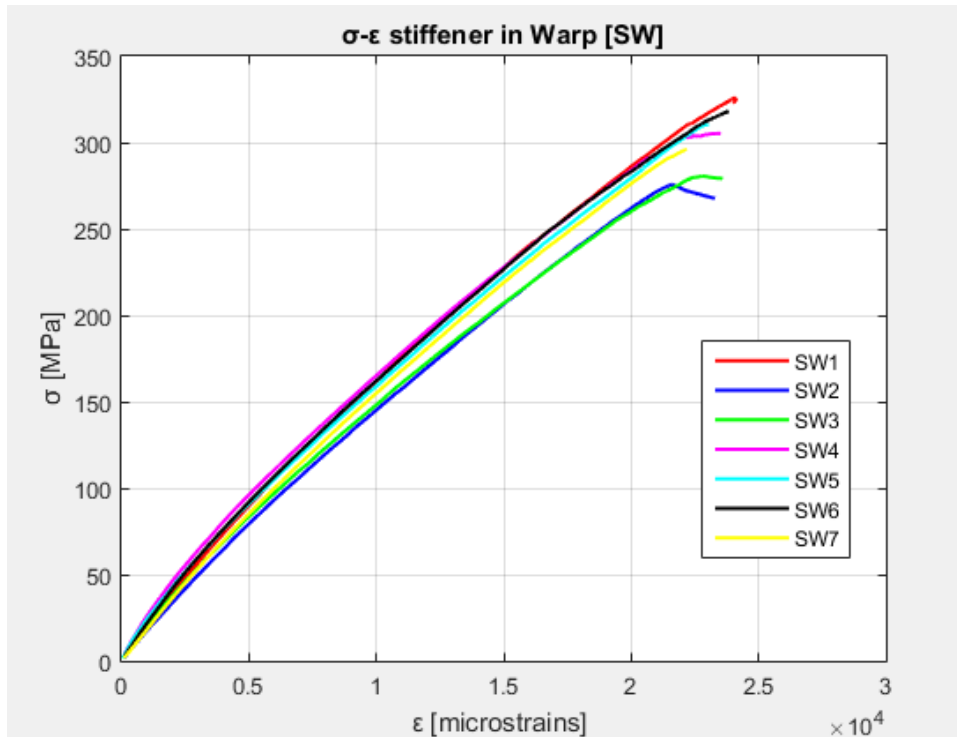
ISO-527/4	WIDTH	THICKNESS	AREA
SPECIMENS	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm²</i>
HW1	24.8	6.6	164.0
HW2	24.8	6.3	156.5
HW3	24.8	6.5	160.0
HW4	24.8	6.3	154.8
HW5	24.8	6.3	156.2
HW6	24.8	6.4	158.8
HW7	24.7	6.6	162.4
HF1	25.0	6.4	160.4
HF2	25.1	6.5	164.0
HF3	25.3	6.3	160.0
HF4	25.2	6.5	163.0
HF5	25.3	6.3	160.0
HF6	25.1	6.5	162.0
HF7	25.1	6.4	160.1
SW1	24.8	3.6	89.3
SW2	24.9	3.8	93.4
SW3	24.8	3.8	93.4
SW4	24.9	3.5	87.1
SW5	25.0	3.5	87.4
SW6	25.0	3.5	86.7
SW7	24.9	3.7	91.6
SF1	25.1	3.8	95.2
SF2	24.9	3.7	90.7
SF3	24.9	3.7	91.6
SF4	25.1	3.8	95.3
SF5	24.9	3.7	93.2
SF6	25.6	3.7	95.7
SF7	25.0	3.7	92.5



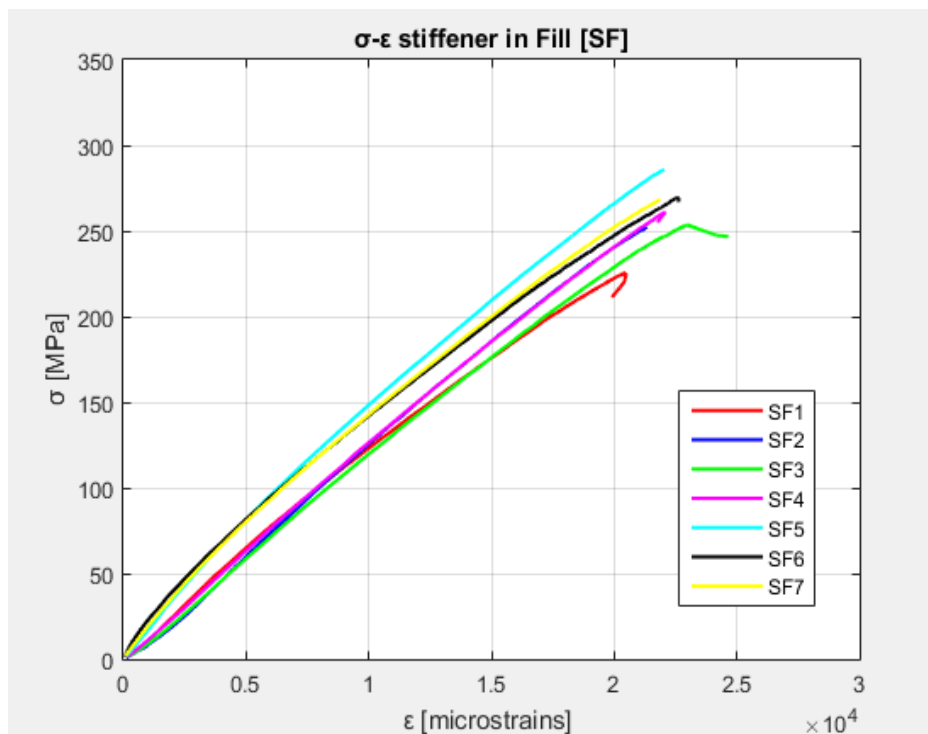
Σχήμα 2.15: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια HW.



Σχήμα 2.16: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια HF.



Σχήμα 2.17: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια SW.



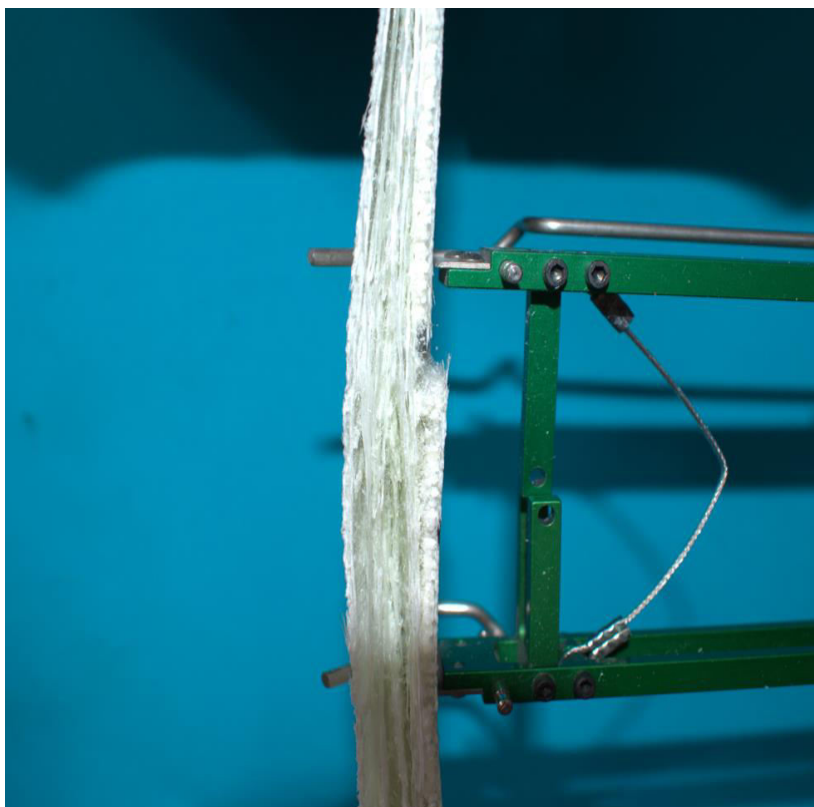
Σχήμα 2.18: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια SF.

Πίνακας 2.16: Τάση θραύσης σ_B δοκιμίων εφελκυσμού [MPa]

Specimens	1	2	3	4	5	6	7	MEAN	S.D.	C.V
HW	252.9	251.7	248.5	256.4	267.1	267.1	254.6	256.9	7.4	2.9%
HF	246.7	240.7	246.7	242.2	246.7	243.7	246.7	244.8	2.6	1.1%
SW	326.1	275.8	280.5	305.4	310.5	318.1	296.2	301.8	18.7	6.2%
SF	226	252.5	253.4	261.1	285.7	269.5	268.6	259.5	18.6	7.2%

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

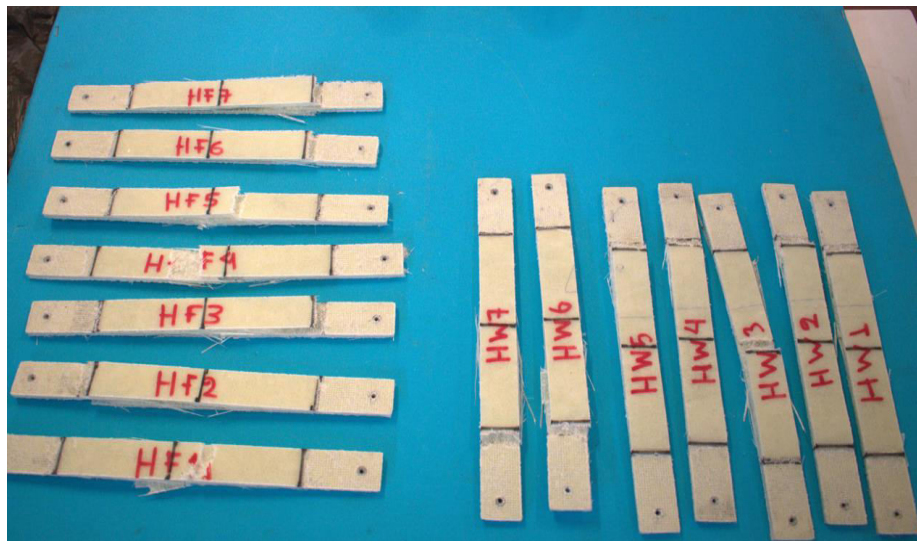
1. Παρατηρούμε πως για τα δοκίμια της γάστρας HW & HF στα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης μετά τα 200 MPa υπάρχει μείωση της μετρούμενης παραμόρφωσης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα δοκίμια αυτά δεν είναι συμμετρικά. Όπως γνωρίζουμε από τη θεωρία των σύνθετων υλικών, όταν ένα πολύστρωτο δεν είναι συμμετρικό, υπάρχει σύνδεση έκτασης-κάμψης, με αποτέλεσμα τα πολύστρωτα να κάμπτονται κατά τον εφελκυσμό και να δημιουργούνται καμπυλότητες πριν τη θραύση του δοκιμίου. Τοπικές αστοχίες ινών δημιουργούν ολίσθηση στο εξτενσιόμετρο με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται ένδειξη αρνητικής παραμόρφωσης, όπως παρατηρούμε και στο **Σχήμα 2.17**.



Σχήμα 2.19: Δοκίμιο HW5 μετά την θραύση του.

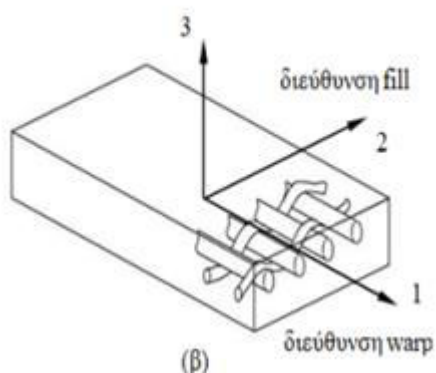
Πιο συγκεκριμένα, στα δοκίμια HW3, HF1, HF4, HF5 όπου η θραύση έγινε στο κέντρο του δοκιμίου παρατηρήθηκε έντονη ολίσθηση του εξτενσιόμετρου, αποτέλεσμα της μεγάλης

καμπυλότητας στην περιοχή που μετράγαμε την παραμόρφωση. Αντίθετα στα υπόλοιπα δοκίμια όπου η αστοχία έγινε κοντά στις ρίζες των δοκιμίων, είχαμε πιο ομαλή συμπεριφορά.



Σχήμα 2.20: θραύση δοκιμίων γάστρας

2. Όπως αναμέναμε, οι ιδιότητες των δοκιμίων στην διεύθυνση fill είναι ελαφρώς μειωμένες αλλά πολύ κοντά σε σχέση με τις ιδιότητες των δοκιμίων στην διεύθυνση Warp. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του είδους πλέξης των woven roving. Αυτό συμβαίνει παρόλο που ο αριθμός των ινών είναι ο ίδιος και στις δύο διευθύνσεις, γιατί ενώ οι ίνες στη διεύθυνση warp παραμένουν ευθείες, εκείνες στη διεύθυνση fill πλέκονται γύρω από τις πρώτες, με αποτέλεσμα να χάνουν μέρος των δυνατοτήτων τους (βλέπε Σχήμα 3.18).



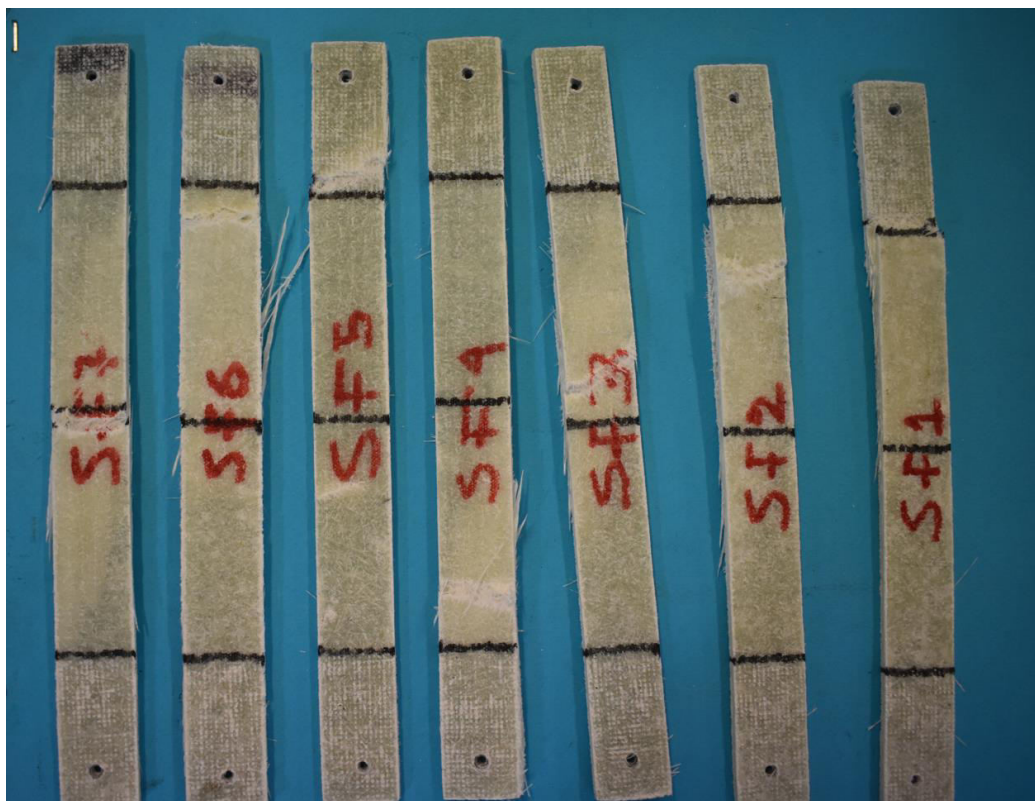
Σχήμα 2.21: πλέξη woven roving

3. Ενώ ούτε τα δοκίμια των διαμήκων ενισχυτικών είναι συμμετρικά, δεν παρατηρείται κάμψη των δοκιμίων κατά τον εφελευσμό τους. Αυτό συμβαίνει διότι ανατρέχοντας στο lamination plan τους, βλέπουμε πως είναι πολύ κοντά στη συμμετρία με αποτέλεσμα να έχουν ψευδοσυμμετρική συμπεριφορά. Σημειώνεται πως για την έντονη κάμψη των δοκιμίων της γάστρας οφείλεται το υλικό πυρήνα, το οποίο ενώ έχει μεγάλο πάχος συγκριτικά με τις ενισχυτικές ίνες (1,5 mm), δεν παραλαμβάνει σχεδόν καθόλου εφελευστικό φορτίο λόγω των χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων του, αυξάνοντας την ανισοτροπικότητα του.

4. Παρατηρούμε πως στα αποτελέσματα των ενισχυτικών υπάρχει μεγαλύτερη διασπορά συγκριτικά με τα δοκίμια της γάστρας, καθώς και μεγαλύτερη μείωση της αντοχής στην διεύθυνση fill. Αιτία αυτού, είναι η ελλατωματική διαδικασία του vacuum infusion στο πάνελ των ενισχυτικών. Όπως παρατηρούμε και στο **Σχήμα 2.19**, υπήρξε έντονη τοπική συρρίκνωση κατά τον πολυμερισμό του πάνελ, με αποτέλεσμα σε πολλά δοκίμια να δημιουργήθηκαν εκκεντρότητες. Αν και η κοπή των δοκιμίων έγινε στοχευμένα σε σημεία που το φαινόμενο δεν ήταν τόσο έντονο, ο συντελεστής διακύμανσης των μετρήσεων δεν μπόρεσε να πέσει κάτω από το 6%, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.13.



Σχήμα 2.22: πάνελ ενισχυτικών πριν την κοπή από CNC με αποτέλεσμα την δημιουργία εκκεντρων δοκιμίων.



Σχήμα 2.23: Τρόπος αστοχίας των δοκιμίων SF

5. Η αντοχή στα δοκίμια των ενισχυτικών είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτήν της γάστρας. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του υλικού πυρήνα (Soric TF 2.0) στα τελευταία, καθώς αυξάνει σημαντικά την επιφάνεια της διατομής, ενώ παράλληλα δεν προσφέρει στην αντοχή του υλικού.

2.3.3.3 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας

Στο υποεδάφιο αυτό υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας των 28 διαφορετικών δοκιμίων με τη χρήση της εξίσωσης που ακολουθεί [19] :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (2.10)$$

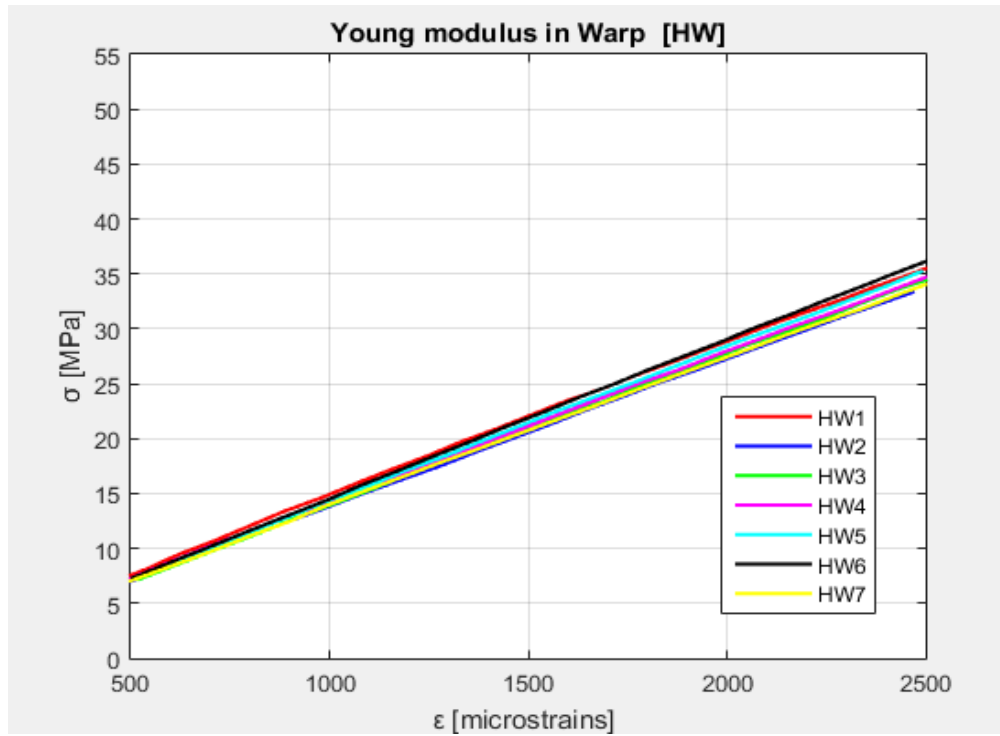
Στα γραφήματα «Τάσης – Παραμόρφωσης» του υποεδαφίου 3.3.3.2 πραγματοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή (προσαρμογή) για το διάστημα της καμπύλης 500-2500 microstrains όπως προνοεί το ISO_527-4. Η κλίση λοιπόν της ευθείας που δημιουργήθηκε αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας το οποίο υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$E = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (2.11)$$

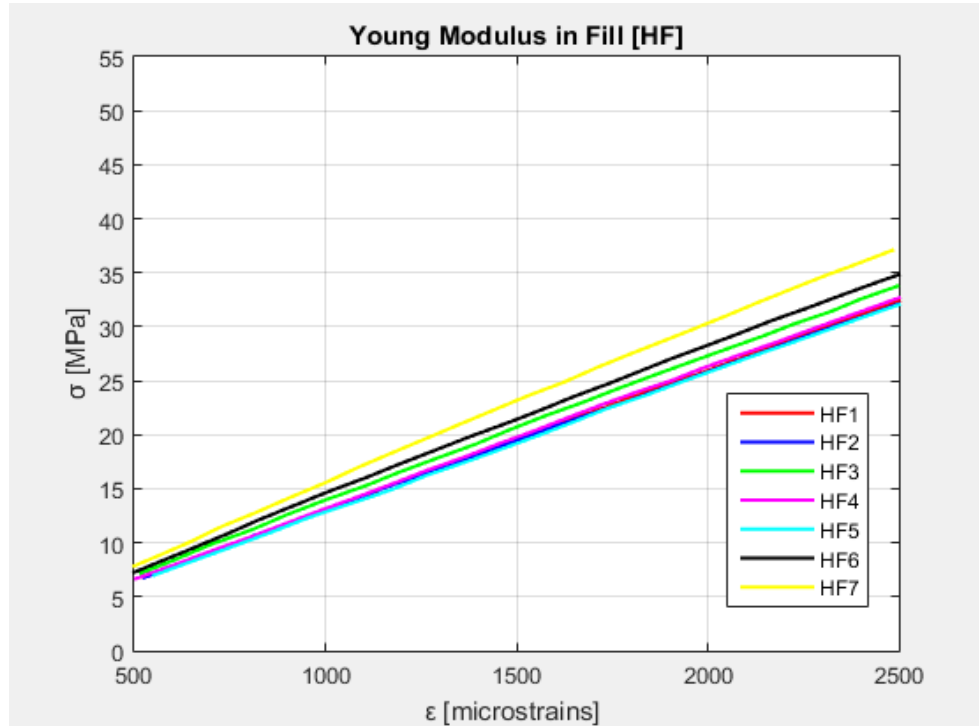
Όπου

σ_1 η τάση που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση $\varepsilon_1 = 500$ microstrains

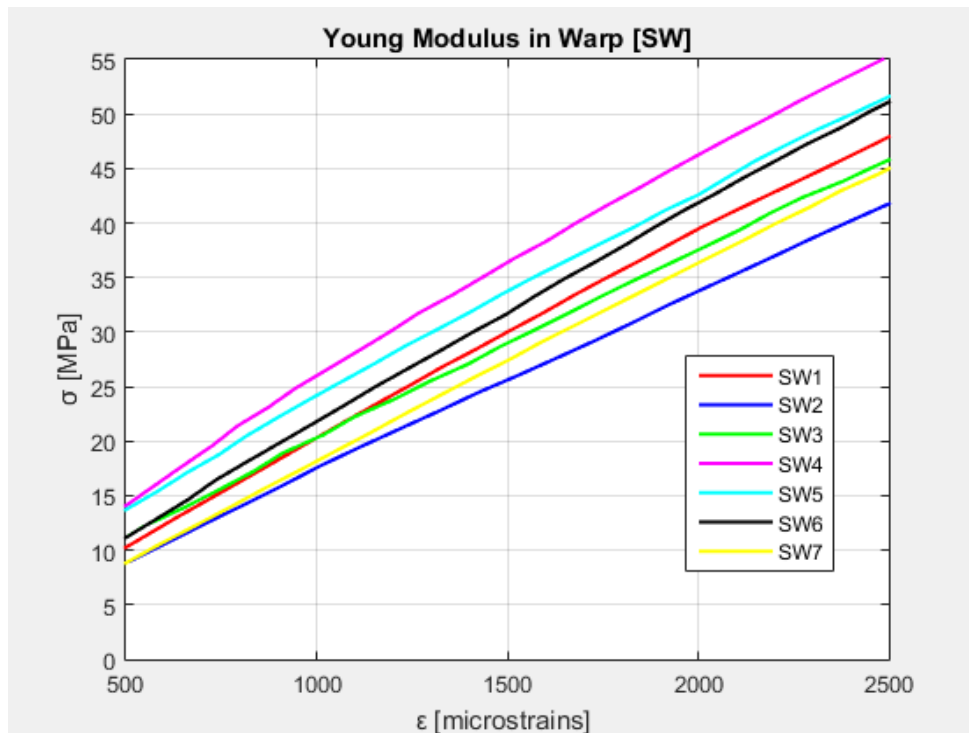
σ_2 η τάση που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση $\varepsilon_2 = 2500$ microstrains



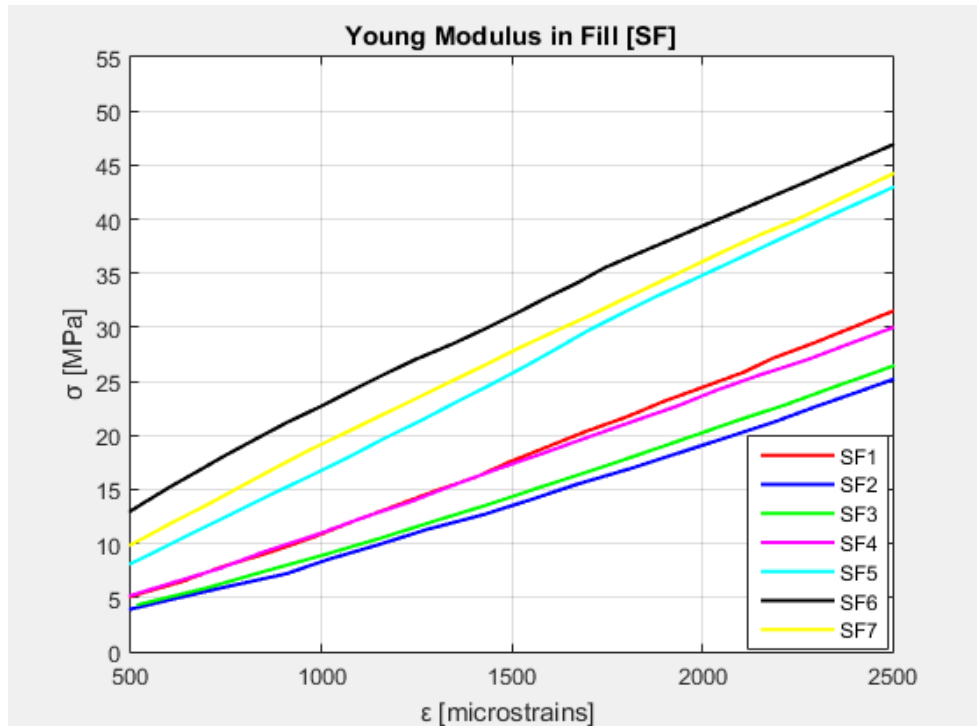
Σχήμα 2.24: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ε) για τα 7 δοκίμια HW στην περιοχή 500-2500 microstrains.



Σχήμα 2.25: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια HF στην περιοχή 500-2500 microstrains



Σχήμα 2.26: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια SW στην περιοχή 500-2500 microstrains.



Σχήμα 2.27: Γράφημα Τάσης (σ) – Παραμόρφωσης (ϵ) για τα 7 δοκίμια SF στην περιοχή 500-2500 microstrains.

Πίνακας 2.17: Μέτρο ελαστικότητας E δοκίμων εφελκυσμού [GPa]

Specimens	1	2	3	4	5	6	7	MEAN	S.D.	C.V.
HW	14.1	13.4	13.8	13.7	14.1	14.5	13.5	13.9	0.37	2.7%
HF	12.9	12.8	13.5	13.0	12.8	13.9	14.9	13.4	0.76	5.7%
SW	19.2	16.5	17.8	22.1	20.2	20.6	18.2	19.2	1.9	10%
SF	13.5	11.7	12.0	12.8	17.4	18.6	17.2	14.7	2.9	19.8%

Συγολιασμός αποτελεσμάτων

1. Όπως παρατηρήσαμε και στα αποτελέσματα της τάσης θραύσης, η διακύμανση των αποτελεσμάτων είναι σημαντικά μεγαλύτερη για τα δοκίμια των ενισχυτικών και στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας, γεγονός το οποίο είναι απόρροια των έκκεντρων δοκιμίων που δημιουργήθηκαν κατά την παραγωγική διαδικασία. Αυτό γίνεται ακόμα πιο σαφές εάν κοιτάξουμε τις κλίσεις των ευθειών στα Σχήματα 2.24 και 2.25, οι οποίες καλύπτουν ένα πολύ μεγαλύτερο εύρος τιμών συγκριτικά με τα διαγράμματα που αφορούν τα δοκίμια της γάστρας (βλέπε Σχήμα 3.22 και 3.23).

2. Για τα δοκίμια της γάστρας το μέτρο ελαστικότητας είναι σχεδόν ίδιο και στις 2 διευθύνσεις, όπως αναμέναμε, με την διεύθυνση fill να έχει λίγο μικρότερο μέτρο

ελαστικότητας λόγω του είδους της πλέξης, όπως αναφέραμε και στο προηγούμενο εδάφιο. Στην περίπτωση των διαμήκων ενισχυτικών η διεύθυνση fill έχει σημαντικά μικρότερο μέτρο ελαστικότητας λόγω της ελαττωματικής παραγωγικής διαδικασίας.

3. Το μέτρο ελαστικότητας για τα διαμήκη ενισχυτικά είναι μεγαλύτερο από αυτό της γάστρας εξαιτίας της ύπαρξης του υλικού πυρήνα στα τελευταία, το οποίο δεν συνεισφέρει στη δυσκαμψία.

2.3.4 Πειραματική δοκιμή κάμψης

2.3.4.1 Περιγραφή πειράματος

Για το πείραμα της κάμψης χρησιμοποιήθηκαν τρεις κύλινδροι (rollers) διαμέτρου 20 mm. Οι δύο κύλινδροι τοποθετήθηκαν στα σημεία στήριξης (supports) και ο άλλος στο κέντρο του δοκιμίου. Η δοκιμή κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιείται για να ερευνηθεί την καμπτική συμπεριφορά των δοκιμίων και για τον καθορισμό της αντοχής σε κάμψη, καθώς και όλες τις σχετικές τάσεις, βέλη κάμψης και παραμορφώσεις. Το δοκίμιο, που στηρίζεται ως αμφιέριστη δοκός, εκτρέπεται σε ένα σταθερό ποσοστό μέχρι να αστοχήσει ή μέχρι η παραμόρφωση να φθάσει σε κάποια προκαθορισμένη τιμή. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, μετρούνται η δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο και η κατακόρυφη μετατόπιση στο κέντρο χρησιμοποιώντας ένα αυτόματο σύστημα καταγραφής που παράγει πλήρεις καμπύλες κάμψης φορτίου/μετατόπισης ή τάσης/παραμόρφωσης για αυτήν την λειτουργία. Η ταχύτητα που εφαρμόστηκε ήταν 5mm/min, ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας $f=1$ Hz.



Σχήμα 2.28: Διάταξη πειράματος κάμψης

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 393 [16], η κάμψη 3 σημείων γίνεται με στόχο τον υπολογισμό των καμπτικών τάσεων που αναπτύσσονται στα περιβλήματα της κατασκευής sandwich όπως επίσης και της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στο υλικό πυρήνα, για το δεδομένο φορτίο, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις :

$$\sigma = (P * L) / 2t(d + c)b \quad (2.12)$$

$$\tau = P / (d + c)b \quad (2.13)$$

Όπου,

σ : η καμπτική τάση που αναπτύσσεται στο κάθε περίβλημα, MPa

τ : η διατμητική τάση που αναπτύσσεται στον πυρήνα, MPa

t : πάχος περιβλήματος, mm

L : μήκος στήριξης, mm

d : πάχος sandwich, mm

c : πάχος πυρήνα, mm

b : πλάτος sandwich, mm

Επιπρόσθετα, μετρώντας το βέλος κάμψης στο μέγιστο φορτίο, μπορούμε να υπολογίσουμε την καμπτική δυσκαμψία των δοκιμίων, σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$\Delta = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4U}$$

Όπου λύνοντας ως προς D,

$$D = (PL^3)/(48(\Delta - PL/4U)) \quad (2.14)$$

Όπου,

D : καμπτική δυσκαμψία του δοκιμίου, $N * mm^2$

Δ : βέλος κάμψης, mm

U : διατμητική ακαμψία του δοκιμίου, N, η οποία δίνεται από την σχέση :

$$U = \frac{G(d + c)^2 b}{4c} \quad (2.15)$$

G : Το μέτρο διάτμησης του υλικού πυρήνα, σε MPa

Για την μεγαλύτερη εγκυρότητα των αποτελεσμάτων υπολογίστηκαν οι τιμές των καμπτικών τάσεων στα περιβλήματα και της δυσκαμψίας του sandwich, σύμφωνα και με τους παρακάτω τύπους, που προτείνει το πρότυπο ASTM D7249 [20] :

$$F^{u1} = \frac{P_{max} * (S - L)}{4b} * \frac{(a - \bar{y})}{\left[t_1 * (a - \bar{y})^2 + \frac{E_2}{E_1} t_2 \bar{y}^2 \right]} \quad (2.16)$$

$$F^{u2} = \frac{P_{max} * (S - L)}{4b} * \frac{(\bar{y})}{\left[t_1 * (a - \bar{y})^2 + \frac{E_2}{E_1} t_2 \bar{y}^2 \right]} \quad (2.17)$$

$$a = c + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \quad (2.18)$$

$$\bar{y} = \frac{at_1}{t_1 + \frac{E_2}{E_1} t_2} \quad (2.19)$$

a = απόσταση μεταξύ των μεσαίων επιπέδων άνω και κάτω περιβλημάτων, mm

b = πλάτος του δοκιμίου, mm

c = υπολογιζόμενο πάχος πυρήνα, mm ($c = d - 2t$)

d = μετρούμενο συνολικό πάχος sandwich, mm

E_1 = εκτιμώμενο μέτρο ελαστικότητας του άνω περιβλήματος, MPa

E_2 = εκτιμώμενο μέτρο ελαστικότητας του κάτω φύλλου

F^{u1} = τάση στο άνω περίβλημα, MPa (psi),

F^{u2} = τάση στο κάτω περίβλημα, MPa (psi),

L = απόσταση μεταξύ επιβαλλόμενων δυνάμεων, mm (in.) ($L = 0$ για φόρτιση 3 σημείων)

P_{max} = μέγιστη δύναμη κατά την αστοχία την αστοχία, N (lb),

S = μήκος στήριξης, mm

t_1 = ονομαστικό πάχος άνω περιβλήματος, mm (in.),

t_2 = ονομαστικό πάχος κάτω περιβλήματος, mm

\bar{y} = απόσταση από τον ουδέτερο άξονα του sandwich σε σχέση με το μεσαίο επίπεδο του κάτω περιβλήματος, mm

$$D^{F,nom} = \frac{(S - L) * d}{4} * \left(\frac{P^{3000} - P^{1000}}{(\varepsilon_{1_{3000}} - \varepsilon_{1_{1000}}) + (\varepsilon_{2_{3000}} - \varepsilon_{2_{1000}})} \right) \quad (2.20)$$

$\varepsilon_{1_{3000}}$ = η παραμόρφωση του άνω περιβλήματος, πιο κοντά στα 3000 microstrains

$\varepsilon_{1_{1000}}$ = η παραμόρφωση του άνω περιβλήματος, πιο κοντά στα 1000 microstrains

ε_{23000} = η παραμόρφωση του κάτω περιβλήματος, πιο κοντά στα 3000 microstrains

ε_{21000} = η παραμόρφωση του κάτω περιβλήματος, πιο κοντά στα 1000 microstrains

P^{3000} = το φορτίο που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση ε_{13000}

P^{1000} = το φορτίο που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση ε_{11000}

Οι παραμορφώσεις που χρησιμοποιήθηκαν υπολογίστηκαν με βάση το πρότυπο ASTM D790 [21], συναρτήσεως του βέλους κάμψης, στο σημείο επιβολής φορτίου όπως φαίνεται στον παρακάτω τύπο :

$$\varepsilon_f = 6 * \Delta * \frac{d}{L^2} \quad (2.21)$$

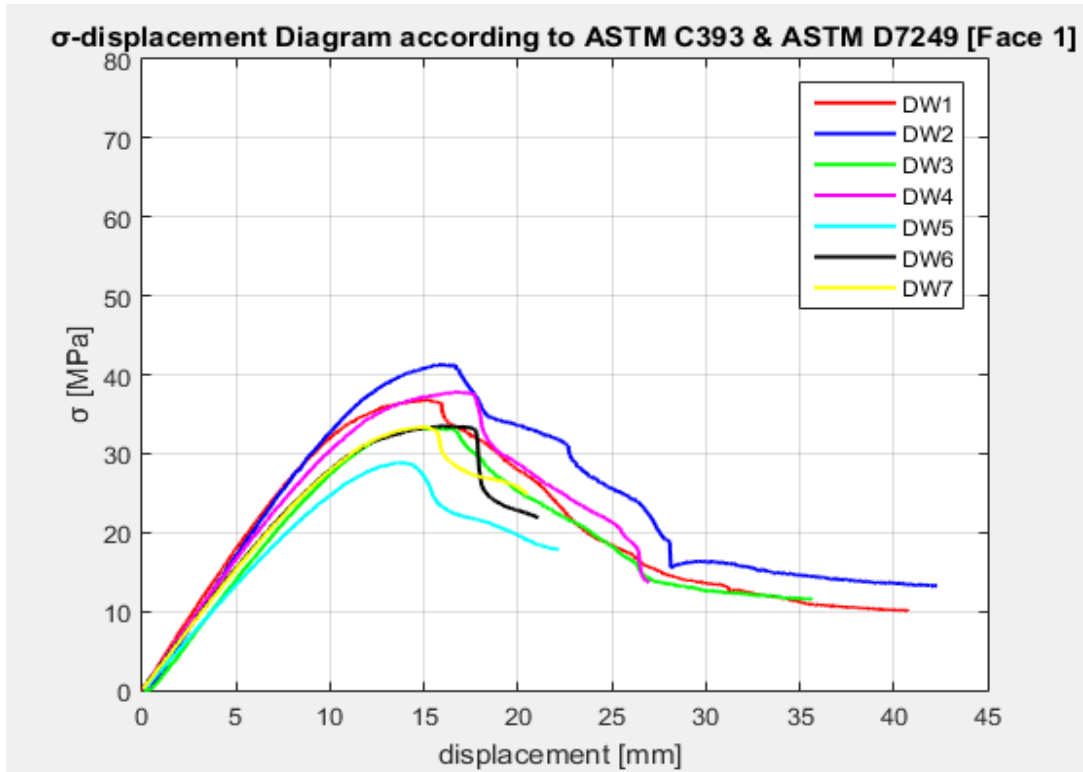
Συνεπώς για μέτρο διάτμησης χρησιμοποιούμε την τιμή $G = 22 \text{ MPa}$. Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να υπενθυμίσουμε πως ο στόχος του υλικού πυρήνα είναι η αύξηση της καμπτικής δυσκαμψίας της κατασκευής, με μικρή αύξηση του πάχους. Το υλικό πυρήνα είναι υπεύθυνο για την μεταφορά των διατμητικών τάσεων ενώ τα περιβλήματα παραλαμβάνουν τις καμπτικές τάσεις.

2.3.4.2 Αποτελέσματα

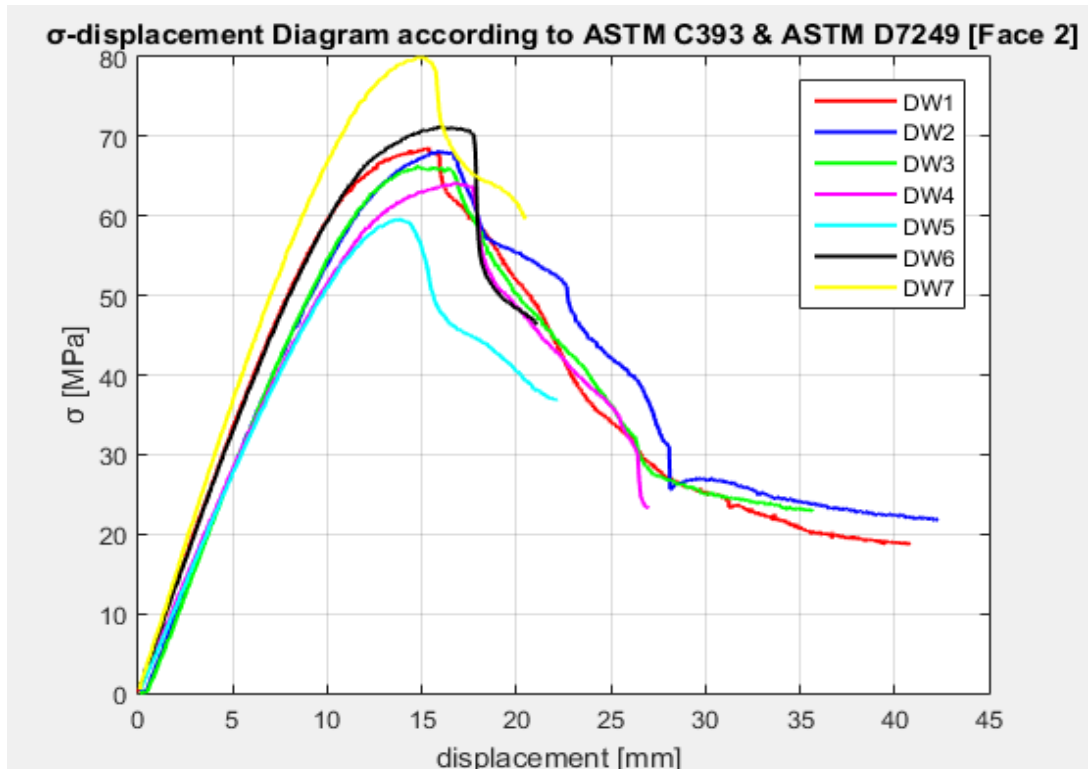
Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα κάμψης, καθώς και τα διαγράμματα των καμπτικών τάσεων στα περιβλήματα και των διατμητικών τάσεων στο υλικό πυρήνα συναρτήσεως του βέλους κάμψης. Σημειώνεται πως οι τιμές των τάσεων λόγω κάμψης στα περιβλήματα καθώς και της δυσκαμψίας των δοκιμίων επαληθεύτηκαν με το πρότυπο ASTM D7249 [20].

Πίνακας 2.18: Διαστάσεις δοκιμίων [mm]

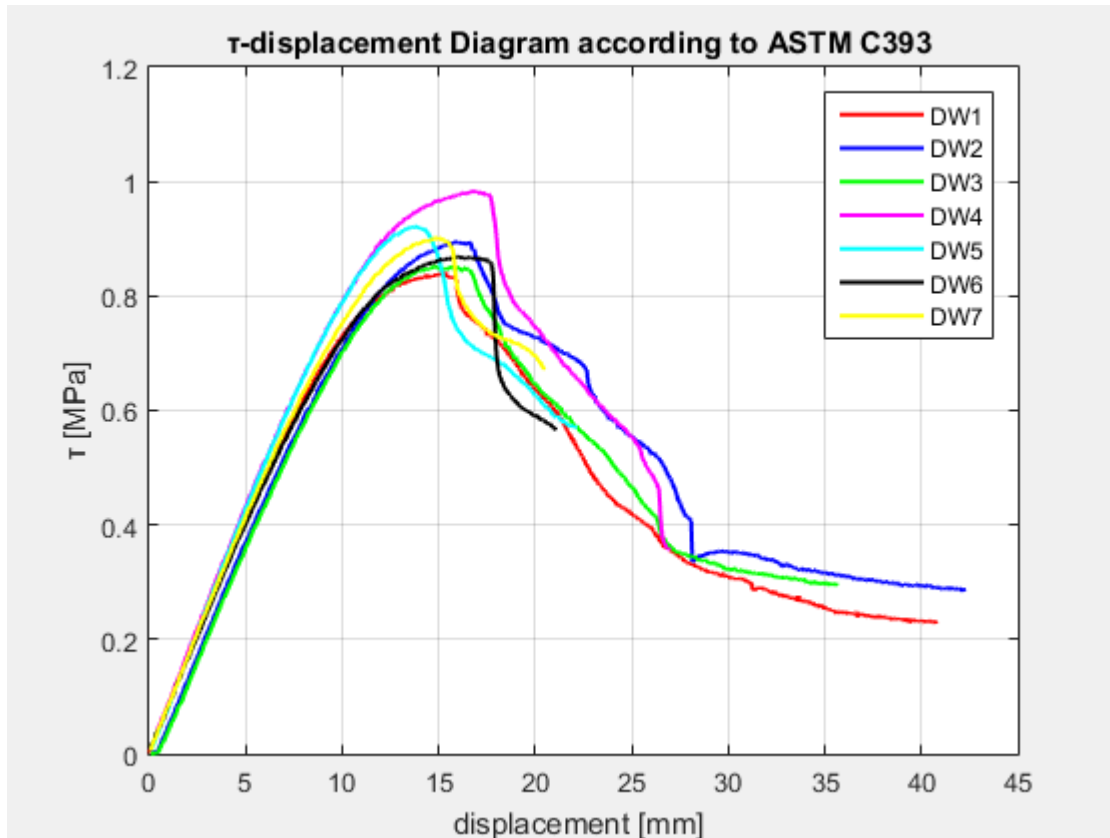
specimens	b	t_1	t_2	c	d
DW1	30.6	3.4	1.8	9.1	14.3
DW2	30.6	3.3	2.0	9.4	14.6
DW3	30.5	3.8	1.9	8.9	14.6
DW4	29.6	3.9	2.3	8.1	14.3
DW5	30.6	4.8	2.3	7.3	14.4
DW6	30.4	3.9	1.8	9.0	14.7
DW7	30.4	4.1	1.7	8.6	14.4
DF1	30.4	3.8	2.3	9.1	15.2
DF2	30.6	3.9	2.2	8.6	14.6
DF3	30.4	3.9	2.5	8.5	14.9
DF4	30.7	3.6	2.2	9.1	14.9
DF5	30.7	3.5	2.1	9.1	14.8
DF6	30.3	3.5	1.8	9.5	14.8
DF7	30.2	3,6	2.3	8.6	14.6



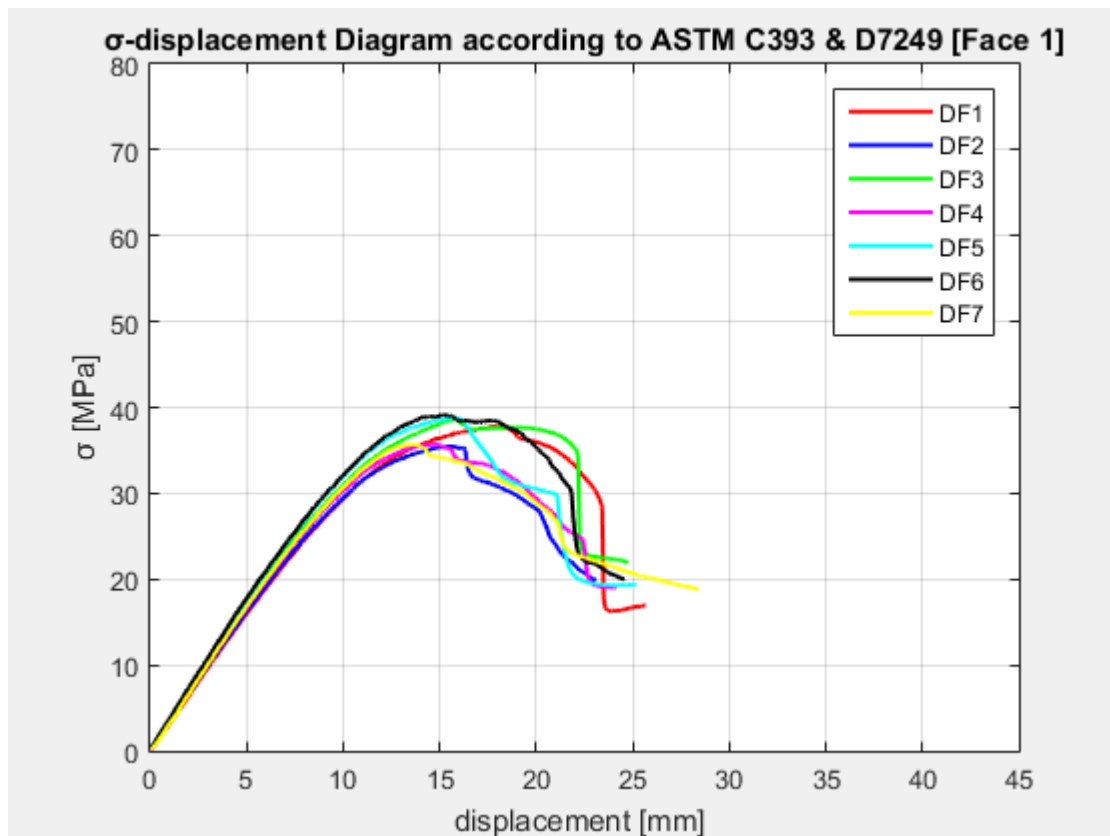
Σχήμα 2.29: Διάγραμμα σ - βέλους κάμψης για το face 1 των δοκιμών DW



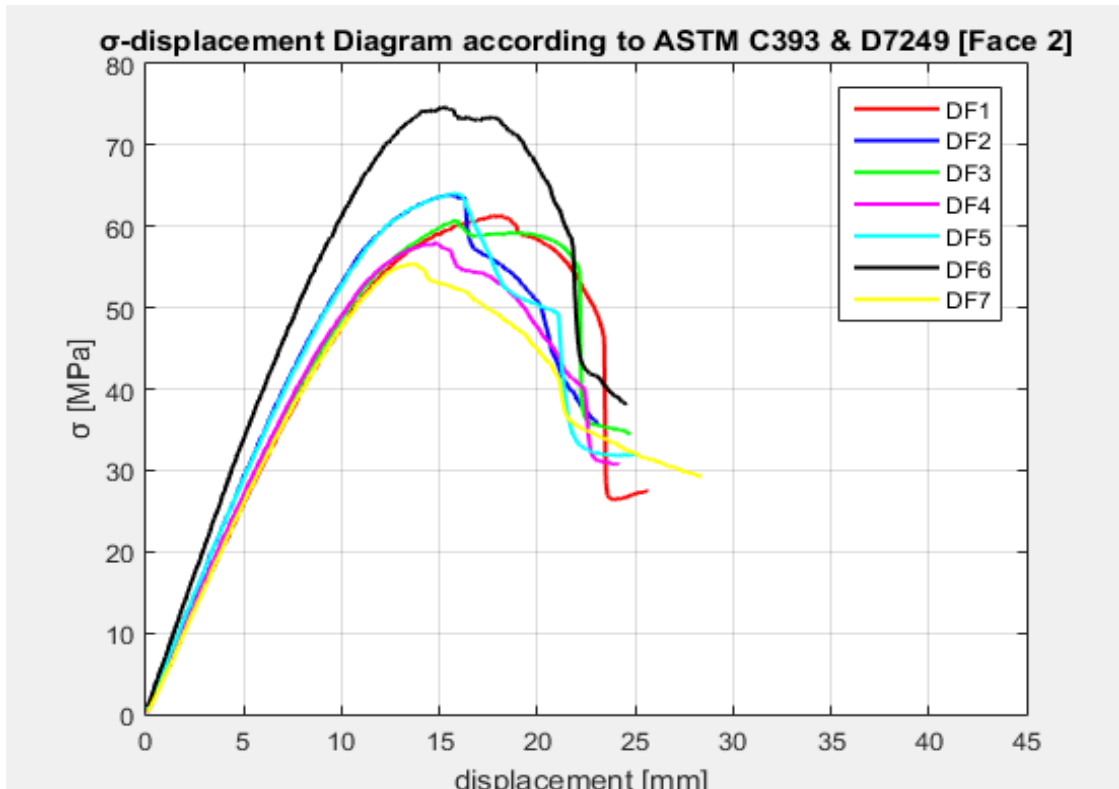
Σχήμα 2.30: Διάγραμμα σ - βέλους κάμψης για το face 2 των δοκιμών DW



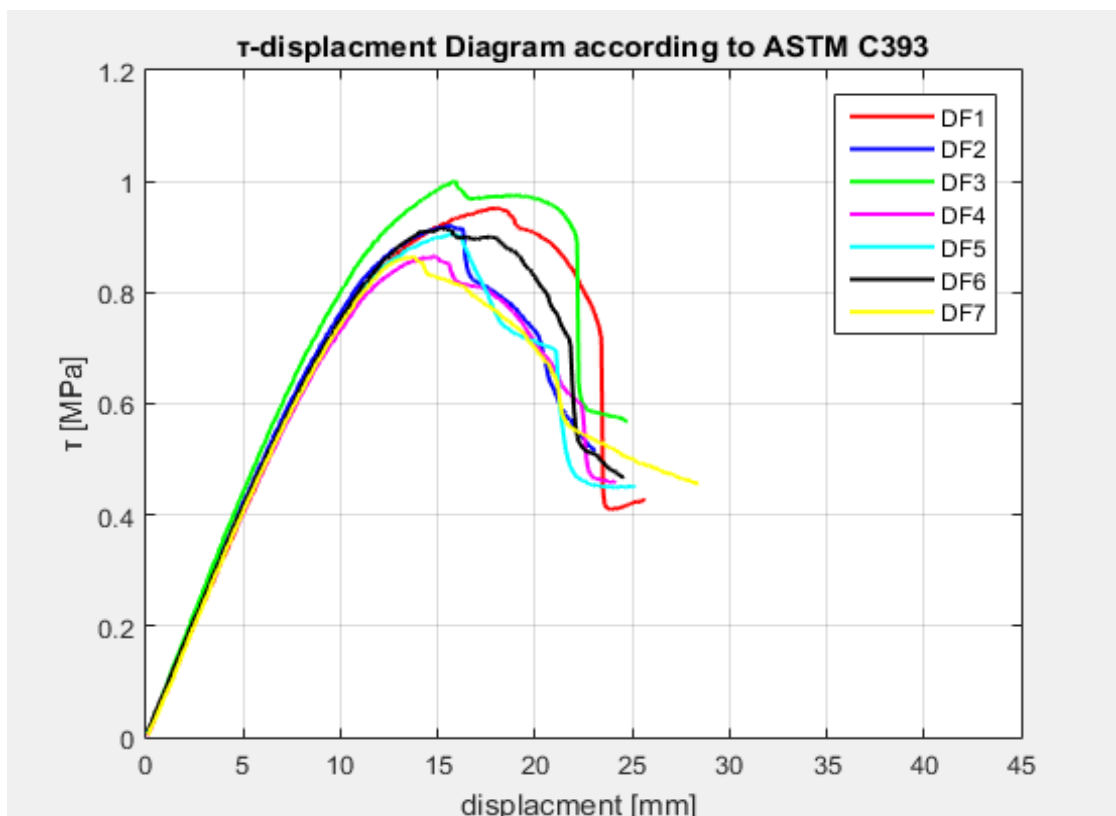
Σχήμα 2.31: Διάγραμμα τ - βέλους κάμψης για το υλικό πυρήνα των δοκιμών DW



Σχήμα 2.32: Διάγραμμα σ- βέλους κάμψης για το face 1 των δοκιμών DF



Σχήμα 2.33: Διάγραμμα σ - βέλους κάμψης για το face 2 των δοκιμών DF



Σχήμα 2.34: Διάγραμμα τ - βέλους κάμψης για του υλικού πυρήνα των δοκιμών DF

Πίνακας 2.19: Αποτελέσματα

specimens	P [N]	σ_1 [MPa]	σ_2 [MPa]	τ [MPa]	Δ [mm]
DW1	602.9	36.9	68.6	0.84	15.4
DW2	657.6	41.3	68.1	0.89	16.0
DW3	611.2	33.3	66.2	0.85	14.8
DW4	651.8	37.8	64.1	0.98	16.7
DW5	609.8	28.8	59.6	0.92	13.7
DW6	627.1	33.5	71.3	0.86	16.0
DW7	628.6	33.4	80.0	0.90	14.8
DF1	704.3	37.8	61.3	0.95	18.1
DF2	654.5	35.5	63.9	0.91	15.6
DF3	711.6	38.7	60.8	1.00	15.9
DF4	636.0	35.8	58.0	0.86	14.8
DF5	663.0	38.8	64.0	0.90	15.7
DF6	673.3	39.2	74.7	0.91	15.2
DF7	603.9	35.7	55.4	0.86	13.7

Πίνακας 2.20: Αποτελέσματα

specimens	U [kN]	D [$N \cdot m^2$]
DW1	10.2	35.9
DW2	10.3	33.1
DW3	10.5	31.8
DW4	10.1	32.7
DW5	10.8	32.9
DW6	10.5	32.7
DW7	10.2	33.2
DF1	10.9	34.5
DF2	10.6	33.8
DF3	10.7	37.0
DF4	10.7	34.9
DF5	10.5	34.7
DF6	10.4	34.7
DF7	10.4	32.5

Πίνακας 2.18: Αποτελέσματα

	Direction	MEAN	S.D.	C.V. [%]
P [N]	WARP	627.0	21.1	3.4
	FILL	663.8	37.6	5.7
σ1 [MPa]	WARP	35.0	4	11.5
	FILL	37.3	1.6	4.4
σ2 [MPa]	WARP	68.3	6.4	9.4
	FILL	62.6	6.2	9.9
τ [MPa]	WARP	0.89	0.05	5.4
	FILL	0.92	0.05	5.2
Δ [mm]	WARP	15.4	1.0	6.5
	FILL	15.6	1.3	8.4
U [kN]	WARP	10.4	0.3	2.4
	FILL	10.6	0.2	1.8
D [N * m^2]	WARP	33.2	1.3	3.9
	FILL	34.6	1.4	3.9

Όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας των περιβλημάτων, υπολογίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7249 [20] σύμφωνα με τους εξής υπολογισμούς :

$$E_{f1} = \frac{\sigma_{13000} - \sigma_{11000}}{\left[(\varepsilon_{13000} - \varepsilon_{11000}) \left(\frac{c + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2}}{c + t_1 + t_2} \right) \right]} \quad (2.22)$$

$$E_{f2} = \frac{\sigma_{23000} - \sigma_{21000}}{\left[(\varepsilon_{23000} - \varepsilon_{21000}) \left(\frac{c + \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2}}{c + t_1 + t_2} \right) \right]} \quad (2.23)$$

Πίνακας 2.21: Αποτελέσματα

Specimens	Direction	E_f [GPa]	C.V %
Face 1	Warp	4.3	10.5
	Fill	4.4	4.2
Face 2	Warp	8.4	10.6
	fill	7.4	7.0

2.3.4.3 Αποτελέσματα

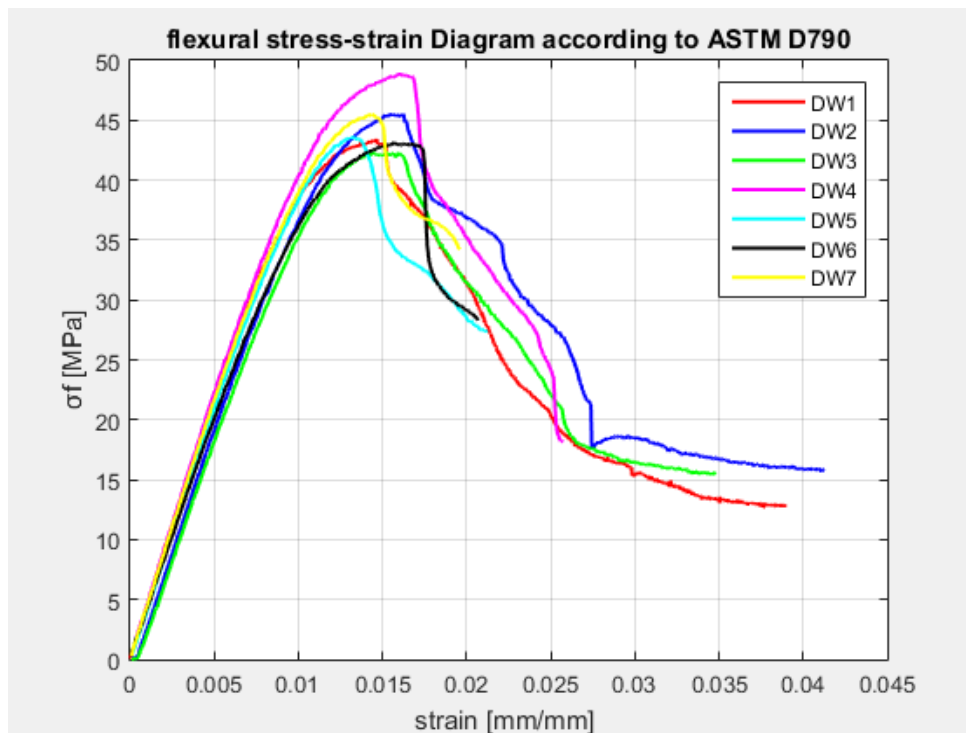
Το πρότυπο ASTM D790 [21] χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη καθώς και της αντοχής σε κάμψη των δοκιμίων. Αντίθετα με το πρότυπο ASTM C393 [16], το πρώτο υπολογίζει τις μηχανικές ιδιότητες της συνολικής κατασκευής ως ενιαία δοκό, σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους :

$$\sigma_f = \left(\frac{3PL}{2bd^2} \right) * \left(1 + 6 * \left(\frac{\Delta}{L} \right)^2 - 4 * \left(\frac{d}{L} \right) * \left(\frac{\Delta}{L} \right) \right) \quad (2.22)$$

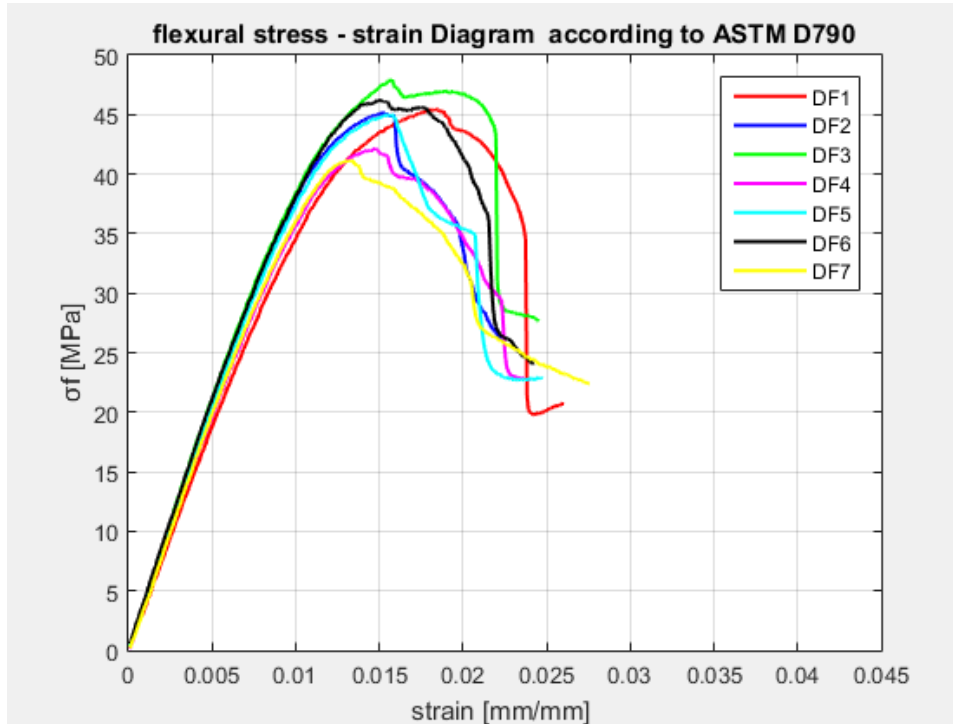
Όπου ο όρος $\left(1 + 6 * \left(\frac{\Delta}{L} \right)^2 - 4 * \left(\frac{d}{L} \right) * \left(\frac{\Delta}{L} \right) \right)$ είναι για δοκίμια με λόγο Span / Depth >16

$$E_b = \frac{L^3 m}{4 * b * d^3} \quad (2.23)$$

$m = \frac{p^{3000} - p^{1000}}{\Delta^{3000} - \Delta^{1000}}$, από τις καμπύλες φορτίου – κατακόρυφης μετατόπισης.



Σχήμα 2.35: Διάγραμμα σ_f - παραμόρφωσης των δοκιμίων DW



Σχήμα 2.36: Διάγραμμα σ_f - παραμόρφωσης των δοκιμίων DF

Πίνακας 2.22: Αποτελέσματα

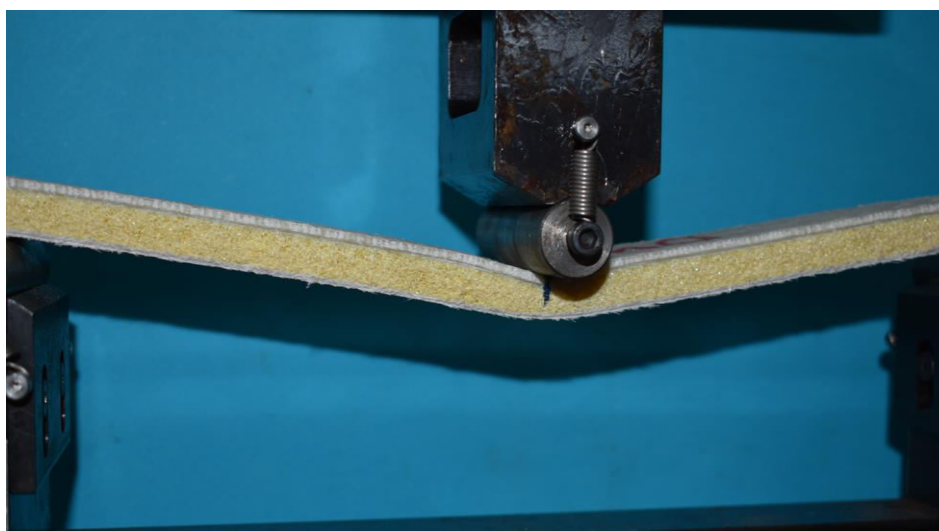
Specimens	Flexural strength σ_f [MPa]	Flexural Modulus E_b [GPa]
DW1	43.5	4.8
DW2	45.5	4.1
DW3	42.3	4.0
DW4	48.8	4.5
DW5	43.6	4.3
DW6	43.1	4.0
DW7	45.5	4.5
DF1	45.0	3.9
DF2	44.9	4.2
DF3	47.6	4.4
DF4	42.0	4.1
DF5	44.7	4.2
DF6	45.6	4.2
DF7	42.5	4.2

Πίνακας 2.23: Αποτελέσματα

		MEAN	C.V. [%]
Flexural strength σ_f [MPa]	WARP	44.60	4.97
	FILL	44.88	4.37
Flexural Modulus E_b [GPa]	WARP	4.32	6.73
	FILL	4.18	4.16

2.3.4.4 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

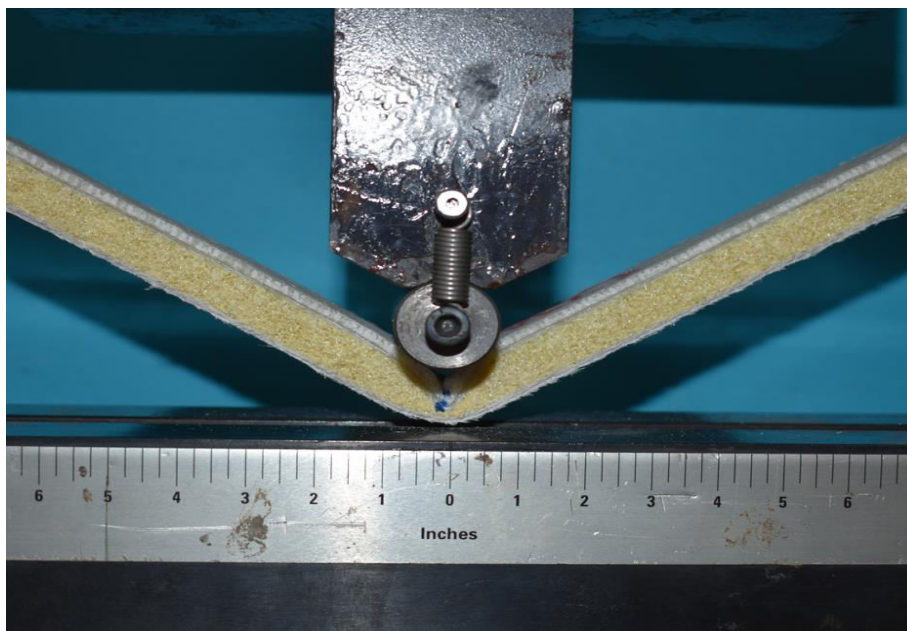
1. Παρατηρούμε πως οι μηχανικές ιδιότητες και στις δυο διευθύνσεις είναι πολύ κοντά, με αυτές στη fill διεύθυνση να είναι ελάχιστα μεγαλύτερες. Σε αντίθεση με το πείραμα εφελκυσμού, όπου λόγω της πλέξης των woven – roving, οι μηχανικές ιδιότητες στην fill διεύθυνση είναι χαμηλότερες, παρατηρούμε πως στην κάμψη δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο.



Σχήμα 2.37: Πτύχωση του άνω περιβλήματος σε δοκιμή κάμψης.

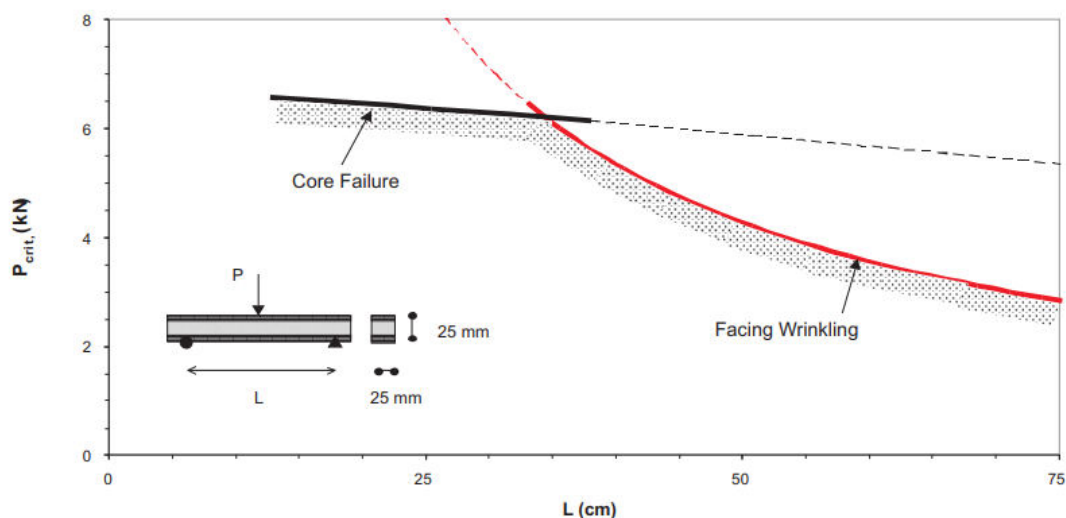
2. Από τα διαγράμματα τάσης-βέλους κάμψης παρατηρούμε ότι τα δοκίμια αποκλίνουν από την γραμμική συμπεριφορά μετά την μέγιστη επιβολή φορτίου $P=630-660$ N. Αυτό σημαίνει πως για τιμές ίσες και μικρότερες του μέγιστου φορτίου τα δοκίμια συνεχίζουν να παραμορφώνονται με μόνιμα ελαττώματα.

3. Ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων είναι πιο περίπλοκος σε σύγκριση με τα πειράματα εφελκυσμού, καθώς στο μέγιστο φορτίο οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο υλικό πυρήνα αγγίζουν την διατμητική αντοχή του αφρού (από τα data sheets του υλικού), ενώ σχεδόν ταυτόχρονα παρατηρείται πτύχωση του άνω περιβλήματος που υπόκειται σε θλίψη, στο σημείο επιβολής φορτίου, λόγω της συγκέντρωσης τάσεων.



Σχήμα 2.38: Πτύχωση του άνω περιβλήματος σε δοκιμή κάμψης.

Στο παρακάτω διάγραμμα, Σχήμα 2.39 φαίνεται η εξάρτηση του τρόπου αστοχίας κατασκευής sandwich, από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δοκιμίου και του φορτίου, σύμφωνα με την δημοσίευση του κ.Ε. Ε. Γδούτου και του Mr. I. M. Daniel. Failure modes of composite sandwich beams [22].



Σχήμα 2.39: Εξάρτηση τρόπου αστοχίας από γεωμετρικά χαρακτηριστικά δοκιμίου [22]

Βλέπουμε οτι σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, για το δικό μας μήκος στήριξης $L=300\text{mm}$ συμβαίνει πρώτα η αστοχία του υλικού πυρήνα, για φορτίο πολύ κοντά στο μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο που μετρήθηκε από τα πειράματα. Παρόλα αυτά, η περιοχή στην οποία βρισκόμαστε είναι πολύ κοντά στο σημείο τομής των καμπυλών, και συνεπώς

στην ζώνη μετάβασης του τρόπου αστοχίας. Επιπλέον αυτή η μελέτη αφορά δοκίμια με πλάτος και πάχος, $b=25\text{mm}$, $t=25\text{ mm}$, ενώ στην περίπτωση μας οι διαστάσεις είναι $b=30\text{ mm}$, $t=15\text{ mm}$. Για τον λόγο αυτόν, είναι απαραίτητη περαιτέρω μελέτη.

Από τα data sheet του αφρού PVC, ορίζεται η αντοχή στην διάτμηση $\tau = 0,9\text{MPa}$. Η αντοχή στην διάτμηση που μετρήθηκε πειραματικά είναι $\tau = 0.89\text{MPa}$ και $\tau = 0.92\text{MPa}$, για την Warp και Fill διεύθυνση αντίστοιχα.

Από τα διαγράμματα των τάσεων για το άνω περίβλημα, η μέγιστη τάση κάμψης που αναπτύσσεται είναι $\sigma_1 = 36.15\text{ MPa}$. Σύμφωνα με την παραπάνω δημοσίευση, για άκαμπτη – τέλεια πλαστική κατασκευή, η τοπική τάση κάμψης στην άνω επιφάνεια του περιβλήματος δίνεται από την σχέση :

$$\sigma_{fb} = \frac{PL}{4b * h_f(h_f + h_c)} = 20.25\text{ MPa} \quad (2.24)$$

Όπου,

h_f : : πάχος περιβλήματος

h_c : πάχος πυρήνα

Αστοχία στο περίβλημα συμβαίνει όταν το άθροισμα του $\sigma_1 + \sigma_{fb} = 56.4\text{ MPa}$ ξεπεράσει την αντοχή του περιβλήματος σε θλίψη. Σύμφωνα με τον νηογνώμονα Lloyds Register , από τα σχήματα 2.40 και 2.41 για πολύστρωτα από ίνες γυαλιού, με περιεκτικότητα ινών κατά βάρος $V_f = 44.56\%$ η αντοχή σε θλίψη είναι ίση με $\sigma_c = 101.2\text{ MPa} > 56.4\text{ MPa}$. Συνεπώς συμπεραίνουμε πως η αστοχία έγινε στο υλικό πυρήνα.

Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (GPa)	$15.0 W_F + 2.0$	(min 6.9)
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	$200 W_F + 25$	(min 90)
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (GPa)	$40.0 W_F - 6$	(min 6.4)
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	$150 W_F + 72$	(min 125)
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (GPa)	$33.4 W_F^2 + 2.2$	(min 5.7)
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	$502 W_F^2 + 106.8$	(min 160)
Συνεπίπεδο μέτρο διάτμησης (GPa)	$1.7 W_F + 2.24$	
Αντοχή σε συνεπίπεδη διάτμηση (MPa)	$80 W_F + 38$	
Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (MPa)	$22.0 - 13.5 W_F$	(min 18)

Σχήμα 2.40: Μηχανικές ιδιότητες CSM , LR [5]

Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (GPa)	$30 W_F - 0.5$
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	$400 W_F - 10$
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (GPa)	$40.0 W_F - 6$
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	$150 W_F + 72$
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (GPa)	$33.4 W_F^2 + 2.2$
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	$502 W_F^2 + 106.8$
Συνεπίπεδο μέτρο διάτμησης (GPa)	$1.7 W_F + 2.24$
Αντοχή σε συνεπίπεδη διάτμηση (MPa)	$80 W_F + 38$
Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (MPa)	$22.0 - 13.5 W_F$

Σχήμα 2.41: Μηχανικές ιδιότητες WR, LR [5]

Κεφάλαιο 3

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΝΗΟΓΝΩΜΟΝΩΝ

3.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με απαιτήσεις Νηογνωμόνων

3.1.1 Σκοπός εδαφίου

Στόχος του παρόντος εδαφίου είναι η σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις ελάχιστες απαιτήσεις των νηογνωμόνων για τις μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων, έτσι ώστε να αποφανθεί εάν τα δοκίμια έχουν κατασκευαστεί με επαρκείς μηχανικές ιδιότητες για την σωστή λειτουργία τους.

Οι DNV [4] [9] [23], ABS [8], Lloyd's Register (LR) [10] [24], RINA [11] και BV [3] είναι όλοι νηογνώμονες που παρέχουν πιστοποίηση και τεχνικές υπηρεσίες για διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων, υπεράκτιων και ναυτιλιακών. Οι εν λόγω οργανισμοί έχουν ορίσει συγκεκριμένα πρότυπα και απαιτήσεις για τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πλοίων, κατασκευών και εξοπλισμού. Τα σύνθετα υλικά έχουν κερδίσει σημαντική προσοχή στη ναυτιλιακή και υπεράκτια βιομηχανία λόγω του υψηλού λόγου αντοχής προς βάρος, της αντίστασης στη διάβρωση και της ανθεκτικότητάς τους. Αυτές οι ιδιότητες τα καθιστούν ιδανικά για διάφορες εφαρμογές, όπως γάστρες, καταστρώματα και άλλα δομικά στοιχεία πλοίων και υπεράκτιων πλατφορμών. Για να διασφαλιστεί η ασφάλεια και η αξιοπιστία αυτών των εφαρμογών, οι νηογνώμονες όπως οι DNV, ABS, LR, RINA και BV έχουν θεσπίσει ειδικές απαιτήσεις για τη χρήση σύνθετων υλικών. Οι απαιτήσεις αυτές περιλαμβάνουν τη δοκιμή και την πιστοποίηση των υλικών και τη διασφάλιση ότι πληρούν τα απαραίτητα πρότυπα για τις επιδόσεις, την αντοχή και την ανθεκτικότητα.

Ως εκ τούτου, η σύγκριση των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με τις απαιτήσεις αυτών των εταιρειών ταξινόμησης είναι ζωτικής σημασίας για τον προσδιορισμό της καταλληλότητάς τους για θαλάσσιες και υπεράκτιες εφαρμογές. Είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις βιομηχανίες πληρούν τα πρότυπα που έχουν θέσει οι εν λόγω εταιρείες για να εγγυηθούν την ασφάλεια, την αξιοπιστία και τη συμμόρφωσή τους με τους κανονισμούς.

3.1.2 Εκτίμηση πάχους στρώσεων

Τα πολύστρωτα είναι σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με τη διαστρωμάτωση δύο ή περισσότερων φύλλων υλικού μεταξύ τους, συνήθως με συγκολλητική ρητίνη. Το πάχος των πολύστρωτων παίζει κρίσιμο ρόλο στον καθορισμό της αντοχής, της ανθεκτικότητας και της

απόδοσής τους. Διαφορετικές βιομηχανίες και εφαρμογές έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για το πάχος των ελασμάτων που χρησιμοποιούνται στα προϊόντα τους.

Οι νηογνώμονες, όπως οι DNV, ABS, LR, RINA και BV παρέχουν κανονισμούς και πρότυπα για τη χρήση των σύνθετων υλικών σε διάφορες βιομηχανίες. Οι εν λόγω κλάσεις, έχουν θεσπίσει κανόνες για το ελάχιστο πάχος των πολύστρωτων που χρησιμοποιούνται στη ναυτιλία, την υπεράκτια και άλλες βιομηχανίες. Αυτοί οι κανόνες διασφαλίζουν ότι τα ελάσματα που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις βιομηχανίες είναι αρκετά ισχυρά και ανθεκτικά ώστε να αντέχουν στις σκληρές συνθήκες στις οποίες εκτίθενται.

Για παράδειγμα, στη ναυτιλιακή βιομηχανία, ο ABS [8] απαιτεί το ελάχιστο πάχος των πολύστρωτων που χρησιμοποιούνται στα κύτη και τα καταστρώματα να είναι τουλάχιστον 6 mm. Ο Lloyd's Register [5] ορίζει ότι το ελάχιστο πάχος των ελάσματος που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή θαλάσσιων κατασκευών πρέπει να είναι τουλάχιστον 3 mm.

Στον κλάδο των υπεράκτιων κατασκευών, ο RINA [11] και ο BV [3] έχουν θεσπίσει ειδικές κατευθυντήριες γραμμές για το ελάχιστο πάχος των ελασμάτων που χρησιμοποιούνται στις υπεράκτιες κατασκευές. Για παράδειγμα, ο RINA [11] απαιτεί το ελάχιστο πάχος των ελάσματος που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υπεράκτιων πλατφορμών να είναι τουλάχιστον 6mm, ενώ ο BV ορίζει ελάχιστο πάχος 5mm για την ίδια εφαρμογή.

Εκτός όμως από τις απαιτήσεις του συνολικού πάχους, οι νηογνώμονες μας παρέχουν πληροφορίες και για το πάχος της εκάστοτε στρώσης ανάλογα με το επιφανειακό της βάρος, το είδος της ενίσχυσης καθώς και την περιεκτικότητα της στρώσης σε ίνες. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιαστής ναυπηγός μπορεί να προβλέψει κατά το πρωταρχικό στάδιο μελέτης της κατασκευής, το πάχος κάθε στρώσης καθώς και το τελικό πάχος του πολύστρωτου, και συνεπώς να καθορίσει τον ελάχιστο αριθμό στρώσεων για την ικανοποίηση των κριτηρίων σχεδιασμού. Παρακάτω φαίνονται οι τύποι αυτοί :

i) Κανονισμοί ABS: Οι κανονισμοί του Αμερικανικού Νηογνώμονα [8] ορίζουν το λεγόμενο «βασικό πολύστρωτο», το οποίο αποτελείται από εναλλασσόμενες στρώσεις CSM και WR από γυαλί τύπου E και πολυεστερική ρητίνη, κατασκευάζεται με τη μέθοδο Hand Lay-Up και έχει επιφανειακό βάρος ενισχυτικών ινών γυαλιού ανά ζεύγος στρώσεων ίσο με 1272 g/m^2 και ελάχιστη περιεκτικότητα κατά βάρος σε γυαλί ίση με 35% (0.35). Οι κανονισμοί αυτοί λοιπόν προτείνουν, όσον αφορά στις στερεοποιημένες στρώσεις CSM από ίνες γυαλιού και πολυεστερική ρητίνη, ότι το πάχος μιας τέτοιας στρώσης έχει μια μέση τιμή ίση με 0.25mm ανά 100 g/m^2 επιφανειακό βάρος του CSM (δηλ. μια στρώση CSM 450 g/m^2 έχει πάχος 1.125 mm). Αντίστοιχα, το πάχος μιας στρώσης WR από τα ίδια υλικά είναι κατά μέσο όρο ίσο με 0.12mm ανά 100 g/m^2 επιφανειακό βάρος της ενίσχυσης. Για πολύστρωτα όμοια με το βασικό πολύστρωτο αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα κατά βάρος σε γυαλί από το 35%, το μέσο πάχος του πολύστρωτου δίνεται από τη σχέση:

$$t = \frac{0.35M}{1272} * \left(\frac{305}{f_g} - 2.69 \right) \quad (3.1)$$

όπου t το πάχος του πολύστρωτου σε mm, M το επιφανειακό βάρος των ενισχυτικών ιών γυαλιού όλου του πολύστρωτου σε g/m^2 και f_g η επί τοις εκατό περιεκτικότητα κατά βάρος των ιών γυαλιού ενός ζεύγους στρώσεων από το CSM και το WR που θα χρησιμοποιηθούν (σε ποσοστιαία μορφή, δηλ. για περιεκτικότητα 40%, στη σχέση πρέπει να εισαχθεί η τιμή 40).

ii) Κανονισμοί BV, DNV, LR και RINA: Οι κανονισμοί των τεσσάρων αυτών Νηογνωμόνων έχουν κοινό ορισμό του πάχους μιας στρώσης σ.υ. με μικρές διαφοροποιήσεις. Συγκεκριμένα, οι BV και DNV ([3], [4]), προτείνουν την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του πάχους μιας στρώσης,:

$$t = \frac{M \left(\frac{1}{\rho_F} + \frac{1 - W_F}{W_F \rho_R} \right)}{1000} \quad (3.2)$$

όπου t το πάχος της στρώσης σε mm, M το επιφανειακό βάρος των ενισχυτικών ιών της στρώσης σε g/m^2 , W_F η περιεκτικότητα κατά βάρος της στρώσης σε ίνες (σε δεκαδική μορφή), ρ_R η πυκνότητα της στερεοποιημένης ρητίνης σε g/cm^3 και ρ_F η πυκνότητα των ενισχυτικών ιών σε g/cm^3 . Οι κανονισμοί του RINA ([11]) λαμβάνουν επιπρόσθετα υπόψη την τυχόν ύπαρξη κενών αέρα και έτσι η παραπάνω σχέση γίνεται

$$t = \frac{M}{1 - V_0} \left(\frac{1}{\rho_F} + \frac{1 - W_F}{W_F \rho_R} \right) \quad (3.3)$$

όπου V_0 η κατ' όγκο περιεκτικότητα της στρώσης σε κενά αέρα (σε δεκαδική μορφή), ενώ οι κανονισμοί του LR [5] περιέχουν την παρακάτω έκφραση της ίδιας σχέσης, όπου τα διάφορα σύμβολα είναι τα ίδια.

$$t = \frac{M \left[\frac{\rho_F}{W_F} - (\rho_F - \rho_R) \right]}{1000 * \rho_F * \rho_R} \quad (3.4)$$

Στην περίπτωση χρήσης των παραπάνω μεθόδων για τον υπολογισμό του πάχους ολόκληρου του πολύστρωτου, δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η στρώση του gel coat, εάν υπάρχει τέτοια. Το πρότυπο ISO-12215-5 [14] περιέχει πρόσθετες σχέσεις εκτίμησης του πάχους μιας στρώσης σ.υ. συναρτήσεως του επιφανειακού βάρους της ενίσχυσης και της περιεκτικότητας κατά βάρος σε ίνες, οι οποίες είναι οι εξής:

Για ίνες γυαλιού τύπου E:

$$t = \frac{M}{3.072} * \left(\frac{2.56}{W_F} - 1.36 \right) \quad (3.5)$$

Σύγκριση Νηογνωμόνων

όπου t το πάχος της στρώσης σε mm, M το επιφανειακό βάρος των ενισχυτικών ινών της στρώσης σε kg/m^2 και W_F η περιεκτικότητα κατά βάρος της στρώσης σε ίνες (σε δεκαδική μορφή). Οι παραπάνω σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αντίστροφα, για την εκτίμηση της περιεκτικότητας κατά βάρος σε ίνες όταν είναι γνωστό το πάχος.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα πάχη που υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον ABS και το ISO 12215 [14] για κάθε στρώση και συγκρίνονται με το πραγματικό πάχος των πολύστρωτων τα οποία μετρήθηκαν με ψηφιακό παχύμετρο.

Πίνακας 3.1: Αποτελέσματα

HULL	ISO 12215	ABS	
CSM300	0,27	0,18	mm
CSM450	0,40	0,27	mm
SORIC TF 2.0	1,5	1,5	mm
BIAXIAL 850-225	0,99	0,65	mm
BIAXIAL 850-225	0,99	0,65	mm
BIAXIAL 850-225	0,99	0,65	mm
BIAXIAL 850-225	0,99	0,65	mm
CSM450	0,40	0,27	mm
TOTAL THICKNESS	6,54	4,86	mm

Πίνακας 3.2: Αποτελέσματα

HULL	ISO 12215	ABS	REAL THICKNESS
THICKNESS	6.54	4.86	6.35
ERROR	3%	23.4%	

Πίνακας 3.3: Αποτελέσματα

STIFFENER	ISO 12215	ABS	
CSM450	0,36	0,27	mm
60.30AG	0,72	0,55	mm
60.30AG	0,72	0,55	mm
60.30AG	0,72	0,55	mm
CSM450	0,36	0,51	mm
CSM450	0,36	0,23	mm
TOTAL THICKNESS	3,25	2,67	mm

Πίνακας 3.4: Αποτελέσματα

STIFFENER	ISO 12215	ABS	REAL THICKNESS
THICKNESS	3.26	2.67	3.59
ERROR	9.4%	25.68%	

Πίνακας 3.5: Αποτελέσματα

DECK	ISO 12215	ABS	
CSM300	0,42	0,34	mm
SORIC TF 2.0	1,5	1,5	mm
BIAXIAL 850-225	1,56	1,22	mm
CSM450	0,64	0,23	mm
PVC10	10	10	mm
BIAXIAL	0,89	0,56	mm
CSM450	0,36	0,23	mm
TOTAL THICKNESS	15,40	14,11	mm

Πίνακας 3.6: Αποτελέσματα

DECK	ISO 12215	ABS	REAL THICKNESS
THICKNESS	15.40	14.11	14.65
ERROR	5.13%	3.67%	

3.1.3 Μηχανικές ιδιότητες πολύστρωτων

3.1.3.1 single skin

Οι κανονισμοί του ABS [8] δεν αναφέρουν συγκεκριμένο τρόπο υπολογισμού των ιδιοτήτων υαλοπλήματος και υαλοϋφάσματος. Παρέχουν μόνο ελάχιστες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών πολυεστέρα και διάφορων ειδών ινών κατασκευασμένων με τη μέθοδο Hand Lay-Up, χωρίς όμως να προσδιορίζεται το είδος της πλέξης των ινών. Σύμφωνα με τον ABS, οι ελάχιστες ιδιότητες των πολύστρωτων δίνονται στον παρακάτω πίνακα με βάση το είδος ενίσχυσης τους.

Πίνακας 3.6: Μηχανικές ιδιότητες σύμφωνα με τον ABS [8]

	<i>Basic Laminate</i> <i>N/mm²</i>	<i>"S" Glass</i> <i>N/mm²</i>	<i>Kevlar</i> <i>N/mm²</i>	<i>Carbon</i> <i>N/mm²</i>
Flexural Strength, <i>F</i>	172	450	230	500
Flexural Modulus, <i>E_f</i>	7580	18000	22000	43800
Tensile Strength, <i>T</i>	124	357	386	425
Tensile Modulus, <i>E_t</i>	6890	18800	22700	43800
Compressive Strength, <i>C</i>	117	299	142	284
Compressive Modulus, <i>E_c</i>	6890	18000	22500	43700

Σύμφωνα με τους κανονισμούς του BV [3], οι ελαστικές σταθερές (μέτρα ελαστικότητας και αντοχές) των CSM υπολογίζονται από συγκεκριμένες μαθηματικές εκφράσεις,

συναρτήσει των ιδιοτήτων των ινών και της ρητίνης. Οι κανονισμοί αναφέρουν επίσης ως τυπικές περιεκτικότητες κατά βάρος σε ίνες, για τη μέθοδο Hand Lay-Up από 25 έως 35% (ίνες γυαλιού μόνο), για τη μέθοδο Vacuum Infusion 30% για ίνες γυαλιού, 55% για ίνες άνθρακα και 50% για αραμιδικές ίνες. Για τις ελαστικές σταθερές παρέχονται εξισώσεις βασιζόμενες στη μικρομηχανική, συναρτήσει των ιδιοτήτων των ινών και της ρητίνης. Παρακάτω φαίνεται ο σχετικός πίνακας με τις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις.

Πίνακας 3.7: Θεωρητικές παραμορφώσεις θραύσης κατά BV [3] [%]

		Strains		Reinforcement fibre type						
				E Glass	R Glass	HS Carbon	IM Carbon	HM Carbon	Para-aramid	
Reinforcement fabric type	Unidirectionals	Tensile	ϵ_{brt1}	2,70	3,10	1,20	1,15	0,70	1,70	
			ϵ_{brt2}	0,53	0,44	1,00	0,80	0,50	0,80	
		Compression	ϵ_{brc1}	1,80	1,80	0,85	0,65	0,45	0,35	
			ϵ_{brc2}	1,55	1,10	2,30	2,30	2,10	2,00	
		Shear	γ_{br12}	1,80	1,50	1,60	1,70	1,80	2,00	
			$\gamma_{br13}, \gamma_{br1L2}$	1,80	1,50	1,60	1,70	1,80	2,00	
			$\gamma_{br23}, \gamma_{br1L1}$	2,50	1,80	1,90	1,85	1,80	2,90	
		Woven rovings	Tensile	ϵ_{brt1}	1,80	2,30	1,00	0,80	0,45	1,40
				ϵ_{brt2}	1,80	2,30	1,00	0,80	0,45	1,40
	Compression		ϵ_{brc1}	1,80	2,50	0,85	0,80	0,50	0,42	
			ϵ_{brc2}	1,80	2,50	0,85	0,80	0,50	0,42	
	Shear		γ_{br12}	1,50	1,50	1,55	1,60	1,85	2,30	
			$\gamma_{br13}, \gamma_{br1L2}$	1,80	1,80	1,55	1,60	1,85	2,90	
			$\gamma_{br23}, \gamma_{br1L1}$	1,80	1,80	1,55	1,60	1,85	2,90	
	Chopped strand mats		Tensile	ϵ_{brt1}	1,55	NA	NA	NA	NA	NA
				ϵ_{brt2}	1,55	NA	NA	NA	NA	NA
		Compression	ϵ_{brc1}	1,55	NA	NA	NA	NA	NA	
			ϵ_{brc2}	1,55	NA	NA	NA	NA	NA	
		Shear	γ_{br12}	2,00	NA	NA	NA	NA	NA	
			$\gamma_{br13}, \gamma_{br1L2}$	2,15	NA	NA	NA	NA	NA	
			$\gamma_{br23}, \gamma_{br1L1}$	2,15	NA	NA	NA	NA	NA	

Note 1:
NA = Not applicable.

Οι κανονισμοί του DNV [4] δεν αναφέρουν ούτε θεωρητικούς τρόπους υπολογισμού ούτε αποδεκτές τιμές ιδιοτήτων ούτε για CSM, ούτε για WR. Οι κανονισμοί για ταχύπλοα σκάφη [4] παρέχουν θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού των ελαστικών ιδιοτήτων των CSM και WR με βάση τη μικρομηχανική και τις ιδιότητες των ινών και της ρητίνης.

Στους κανονισμούς του LR [5] παρέχεται μια πολύ απλούστερη μέθοδος υπολογισμού των ιδιοτήτων ενός τυπικού πολύστρωτου από CSM. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, οι ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές των ελαστικών σταθερών για ένα πολύστρωτο με στρώσεις CSM και WR από πολυεστέρα και ίνες γυαλιού υπολογίζονται συναρτήσει της περιεκτικότητας κατά βάρος σε ίνες WF, στο σχήμα 3.1 και 3.2, ως εξής (σε παρένθεση οι ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές για ίνες γυαλιού και WF = 30%):

Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (GPa)	$15.0 W_F + 2.0$	(min 6.9)
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	$200 W_F + 25$	(min 90)
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (GPa)	$40.0 W_F - 6$	(min 6.4)
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	$150 W_F + 72$	(min 125)
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (GPa)	$33.4 W_F^2 + 2.2$	(min 5.7)
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	$502 W_F^2 + 106.8$	(min 160)
Συνεπίπεδο μέτρο διάτμησης (GPa)	$1.7 W_F + 2.24$	
Αντοχή σε συνεπίπεδη διάτμηση (MPa)	$80 W_F + 38$	
Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (MPa)	$22.0 - 13.5 W_F$	(min 18)

Σχήμα 3.1: Μηχανικές ιδιότητες CSM ,LR [5]

Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (GPa)	$30 W_F - 0.5$
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	$400 W_F - 10$
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (GPa)	$40.0 W_F - 6$
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	$150 W_F + 72$
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (GPa)	$33.4 W_F^2 + 2.2$
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	$502 W_F^2 + 106.8$
Συνεπίπεδο μέτρο διάτμησης (GPa)	$1.7 W_F + 2.24$
Αντοχή σε συνεπίπεδη διάτμηση (MPa)	$80 W_F + 38$
Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (MPa)	$22.0 - 13.5 W_F$

Σχήμα 3.2: Μηχανικές ιδιότητες WR ,LR [5]

Σύμφωνα με τις εξισώσεις που μας παρέχει ο LR οι ελάχιστες τιμές για τα δοκίμια που χρησιμοποιήσαμε φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.8:

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα σύμφωνα με τον LR , [5]

HULL	CSM	WR	ΜΟΝΑΔΕΣ
modulus of elasticity in tension	11.3	18.1	GPa
tensile strength	149.1	238.2	MPa
modulus of elasticity in flexure	15.1	15.1	GPa
flexural strength	300.1	300.1	MPa
compressive strength	129.8	129.8	MPa
compressive modulus	18.8	18.8	GPa
interlaminar shear strength	13.6	13.6	MPa
water absorption	70	70	mg
poisson ratio	0,238	0.24	
shear modulus of elasticity	3.3	3.3	GPa

STIFFENER	CSM	WR	ΜΟΝΑΔΕΣ
modulus of elasticity in tension	12.0	19.5	GPa
tensile strength	158.7	257.3	MPa
modulus of elasticity in flexure	17.1	17.1	GPa
flexural strength	330.9	330.9	MPa
compressive strength	139.0	139.0	MPa
compressive modulus	20.7	20.7	GPa
interlaminar shear strength	13.0	13.0	MPa
water absorption	70	70	mg
poisson ratio	0.24	0.24	
shear modulus of elasticity	3.4	3.4	GPa

Σύγκριση Νηογνωμόνων

DECK (FACE 1)	CSM	WR	ΜΟΝΑΔΕΣ
modulus of elasticity in tension	8.7	12.9	GPa
tensile strength	114.3	168.6	MPa
modulus of elasticity in flexure	8.9	8.9	GPa
flexural strength	206.9	206.9	MPa
compressive strength	101.9	101.9	MPa
compressive modulus	11.9	11.9	GPa
interlaminar shear strength	16.0	16.0	MPa
water absorption	70	70	mg
poisson ratio	0.24	0.24	
shear modulus of elasticity	3.0	3.0	GPa

DECK (FACE 2)	CSM	WR	ΜΟΝΑΔΕΣ
modulus of elasticity in tension	11.9	19.3	GPa
tensile strength	157.3	254.5	MPa
modulus of elasticity in flexure	16.8	16.8	GPa
flexural strength	326.3	326.3	MPa
compressive strength	137.6	137.6	MPa
compressive modulus	20.5	20.4	GPa
interlaminar shear strength	13.1	13.1	MPa
water absorption	70	70	mg
poisson ratio	0.24	0.24	
shear modulus of elasticity	3.4	3.4	GPa

Αντίστοιχες με τις παραπάνω εξισώσεις για τις ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές των ελαστικών σταθερών στρώσεων σ.υ. ανεξαρτήτως πλέξης και είδους ινών και ρητίνης δίνονται και από τους κανονισμούς του RINA [11] και είναι οι εξής (σε παρένθεση οι ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές):

Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό (GPa)	$37 W_F - 4.75$	(min 6.35)
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	$1278 W_F^2 - 510 W_F + 123$	(min 85)
Μέτρο ελαστικότητας σε θλίψη (GPa)	$40.0 W_F - 6$	(min 6.0)
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	$150 W_F + 72$	(min 117)
Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη (GPa)	$33.4 W_F^2 + 2.2$	(min 5.2)
Αντοχή σε κάμψη (MPa)	$502 W_F^2 + 107$	(min 152)
Συνεπίπεδο μέτρο διάτμησης (GPa)	$1.7 W_F + 2.24$	(min 2.75)
Αντοχή σε συνεπίπεδη διάτμηση (MPa)	$80 W_F + 38$	(min 62)
Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (MPa)	$22.5 - 17.5 W_F$	(min 17)

Σχήμα 3.3: Μηχανικές ιδιότητες, RINA [11]

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα σύμφωνα με τον RINA , [11]

HULL	CSM/WR	ΜΟΝΑΔΕΣ
modulus of elasticity in tension	18.2	GPa
tensile strength	298.7	MPa
STIFFENER	CSM/WR	ΜΟΝΑΔΕΣ
modulus of elasticity in tension	19.9	GPa
tensile strength	352.8	MPa

3.1.3.2 Sandwich laminates

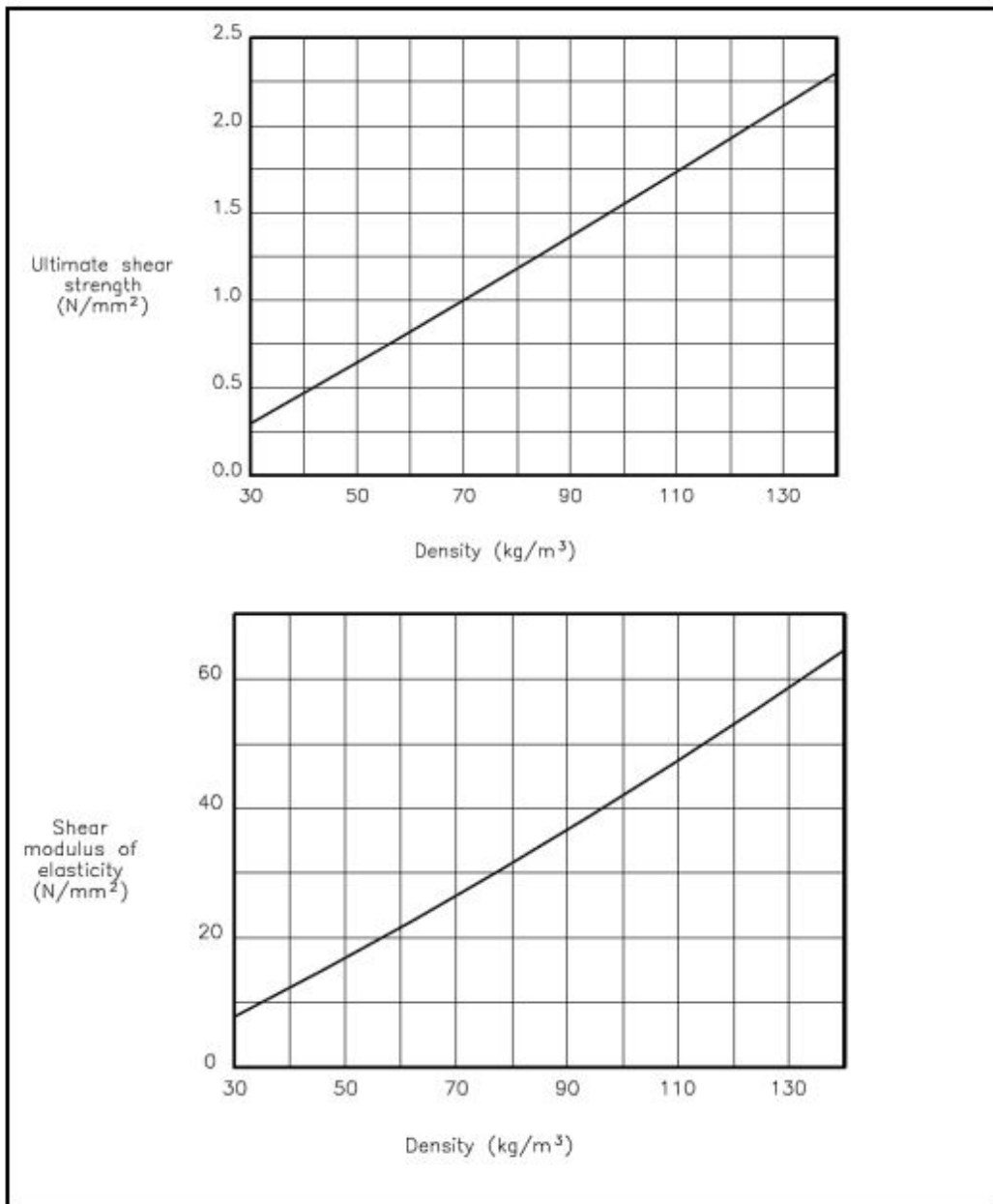
Όσον αφορά τα υλικά πυρήνα οι αποδεκτές τιμές των νηογνωμόνων για αφρό PVC ορίζονται από τον BV [3] και τον RINA [11], στον Πίνακα 3.10 και στο Σχήμα 3.4, ενώ οι απαιτήσεις των LR [5] και ABS [8] στους Πίνακες 3.11 και 3.12 αντίστοιχα.

Πίνακας 3.10: Μηχανικές ιδιότητες Core Material [BV]

Foam type	Density (kg/m ³)	Modulus			Poisson coefficient ν_{12}, ν_{21}	Breaking stresses		
		Tensile E_1, E_2 (N/mm ²)	Compression E_3 (N/mm ²)	Shear G_{12}, G_{13}, G_{23} (N/mm ²)		Tensile σ_1, σ_2 (N/mm ²)	Compression σ_3, σ_2 (N/mm ²)	Shear $\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{21}$ (N/mm ²) (1)
Linear PVC	50	21	18	8	0,36	0,7	0,3	0,3
	60	29	28	11	0,31	0,9	0,4	0,5
	70	37	38	14	0,27	1,1	0,6	0,7
	80	44	49	18	0,25	1,3	0,7	0,8
	90	52	59	21	0,24	1,4	0,9	1,0
	100	59	69	24	0,23	1,6	1,0	1,2
	110	67	79	27	0,22	1,8	1,2	1,3
	130	82	99	34	0,21	2,2	1,5	1,7
Cross linked PVC	140	89	109	37	0,21	2,4	1,6	1,9
	50	37	40	18	0,02	1,0	0,6	0,6
	60	47	51	22	0,05	1,4	0,8	0,8
	70	57	63	27	0,07	1,8	1,1	1,0
	80	67	75	31	0,08	2,2	1,4	1,1
	90	78	88	36	0,09	2,5	1,7	1,3
	100	88	102	40	0,10	2,9	1,9	1,5
	110	98	116	44	0,11	3,3	2,2	1,6
	130	118	145	53	0,12	3,9	2,8	2,0
	140	129	161	57	0,12	4,3	3,0	2,2
	170	159	209	71	0,13	5,2	3,8	2,7
	190	180	243	79	0,13	5,8	4,4	3,0
200	190	260	84	0,13	6,1	4,7	3,2	
250	241	352	105	0,14	7,4	6,0	4,1	
SAN	50	52	29	13	0,11	0,9	0,4	0,7
	60	65	37	16	0,18	1,2	0,5	0,8
	70	78	44	18	0,20	1,5	0,6	0,9
	80	92	50	21	0,19	1,7	0,8	1,0
	90	107	55	23	0,17	1,9	0,9	1,1
	100	122	60	26	0,15	2,0	1,1	1,2
	110	137	64	29	0,12	2,2	1,2	1,3
	130	168	71	34	0,06	2,5	1,6	1,5
	140	184	74	36	0,03	2,6	1,8	1,6
	170	234	83	43	0,03	2,9	2,4	1,9
	190	268	88	48	0,03	3,1	2,8	2,1
PMI	200	285	90	51	0,03	3,1	3,0	2,1
	50	54	59	21	0,40	1,9	0,8	0,8
	60	69	76	24	0,60	2,1	1,1	1,0
	70	84	94	28	0,60	2,3	1,5	1,2
	80	101	112	33	0,70	2,6	1,9	1,5
	90	119	132	39	0,70	2,9	2,3	1,8
	100	137	152	45	0,70	3,2	2,7	2,1
	110	155	173	52	0,60	3,6	3,2	2,4
	130	195	217	71	0,50	4,5	4,2	3,1
140	215	239	83	0,40	5,0	4,8	3,5	
170	280	311	131	0,20	6,8	6,7	4,7	

(1) τ_{13} and τ_{23} are identical to, respectively, τ_{12} and τ_{11} .

Note 1: The values given in this Table are for general guidance only.



Σχήμα 3.4 : Μηχανικές ιδιότητες Core Material [RINA]

Πίνακας 3.11: Μηχανικές ιδιότητες Core Material [LR]

Material	Apparent density kg/m ³	Strength (stress at maximum load) (N/mm ²)			Modulus of elasticity (N/mm ²)	
		Tensile	Compressive	Shear	Compressive	Shear
Polyurethane	96	0,85	0,60	0,50	17,20	8,50
Polyvinylchloride	60					

Πίνακας 3.12: Μηχανικές ιδιότητες Core Material [ABS]

Material	Density		Minimum Shear Strength		
	kg/m ³	lb/ft ³	N/mm ²	kgf/mm ²	psi
Balsa, end-grain	104	6.5	1.6 ⁽¹⁾	0.16 ⁽¹⁾	225 ⁽¹⁾
Balsa, end-grain	144	9	2.5 ⁽¹⁾	0.25 ⁽¹⁾	360 ⁽¹⁾
PVC, crosslinked	180	5	0.9	0.09	122
PVC, crosslinked	100	6.25	1.4	0.14	200
PVC, linear ⁽²⁾	80–96	5–6	1.2	0.12	170

3.1.3.3 Σύγκριση Νηογνωμόνων με πειραματικές μετρήσεις

Στους πίνακες 3.13 και 3.14 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων όπως μετρήθηκαν στο κεφάλαιο 2 και συγκρίνονται με τις απαιτήσεις των Νηογνωμόνων.

Πίνακας 3.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων με απαιτήσεις Νηογνωμόνων για single skin laminates

Single skin laminates	Mechanical Properties	Direction	Tensile Test	LR [CSM]	LR [WR]	ABS [CSM]	RINA
HULL	σ_B [MPa]	Warp	259.9	149.1	238.2	172.0	298.7
		Fill	244.8	149.1	238.2	172.0	298.7
	E [GPa]	Warp	13.9	11.3	18.1	6.9	18.2
		Fill	13.4	11.3	18.1	6.9	18.2
STIFFENER	σ_B [MPa]	Warp	301.8	158.7	257.3	172.0	352.8
		Fill	259.5	158.7	257.3	172.0	352.8
	E [GPa]	Warp	19.2	12.0	19.5	6.9	19.9
		Fill	14.7	12.0	19.5	6.9	19.9

Πίνακας 3.14: Σύγκριση αποτελεσμάτων με απαιτήσεις Νηογνωμόνων για sandwich laminates

Sandwich Laminates	Mechanical Properties	Direction	Bending Test	LR	BV	RINA	ABS
DECK	Shear stress [MPa]	Warp	0.89	0.5	0.8	0.8	0.9
		Fill	0.92	0.5	0.8	0.8	0.9
	Shear modulus [GPa]	Warp	22	8.5	22	22	-
		Fill	22	8.5	22	22	-

Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών που εξετάστηκαν σε εφελκυσμό, παρατηρείται πως ικανοποιούν τις απαιτήσεις των περισσότερων νηογνωμόνων, με εξαίρεση

τον RINA, καθώς επίσης και τον LR (WR) στις απαιτήσεις του μέτρου ελαστικότητας. Αυτό οφείλεται στους εξής λόγους.

1. Οι απαιτήσεις των νηογνωμόνων δεν λαμβάνουν υπόψη τους την ύπαρξη υλικού πυρήνα, το οποίο υπήρχε στα δοκίμια της γάστρας και μειώνει την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας τους, καθώς αυξάνει σημαντικά το πάχος του δοκιμίου χωρίς να συμβάλλει στην αντοχή του πολύστρωτου (χαμηλές μηχανικές ιδιότητες).
2. Στα δοκίμια των ενισχυτικών, προβλεπόταν η ύπαρξη μονοαξονικής στρώσης η οποία θα αύξανε σημαντικά την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας στην Warp διεύθυνση.
3. Ο RINA παρέχει ένα αρκετά συντηρητικό σύνολο απαιτήσεων.

Τα δοκίμια του καταστρώματος ικανοποιούν όλες τις ελάχιστες απαιτήσεις των νηογνωμόνων.

3.2 Κατασκευαστικές Απαιτήσεις

Η δομική διάταξη ενός πλοίου ή μιας θαλάσσιας κατασκευής είναι μια κρίσιμη πτυχή του σχεδιασμού του, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα εξαρτήματα και συστήματα του πλοίου θα τοποθετηθούν και θα διασυνδεθούν μεταξύ τους για να διασφαλιστεί η ασφαλής και αποτελεσματική λειτουργία. Μια καλά σχεδιασμένη δομική διάταξη μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα, την ευελιξία και τις επιδόσεις του σκάφους, ενώ παράλληλα ενισχύει την ασφάλεια και την άνεση του πληρώματος και των επιβατών. Οι νηογνώμονες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παροχή κατευθυντήριων γραμμών και προτύπων για τη δομική διάταξη, τα οποία μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος του σκάφους, καθώς και το προβλεπόμενο επιχειρησιακό περιβάλλον. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα διερευνήσουμε τους κανονισμούς δομικής διάταξης που παρέχονται από πέντε μεγάλους νηογνώμονες (LR [5] [10], ABS [8], BV [3], DNV-GL [9] και RINA [11]), συγκρίνοντας τους κανόνες και τις συστάσεις τους και εντοπίζοντας τυχόν ομοιότητες ή διαφορές. Θα συζητήσουμε επίσης τη σημασία της προσεκτικής αξιολόγησης και σύγκρισης αυτών των κανόνων προκειμένου να διασφαλιστεί μια ασφαλής και αποτελεσματική δομική διάταξη για ένα συγκεκριμένο πλοίο.

Το αντικείμενο του παρόντος θέματος είναι να παράσχει μια επισκόπηση των κανονισμών και των κατευθυντήριων γραμμών για τη δομική διάταξη στη ναυπηγική. Αυτό περιλαμβάνει την εξέταση των διαφόρων παραγόντων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό της δομικής διάταξης ενός πλοίου ή μιας θαλάσσιας κατασκευής, όπως η προβλεπόμενη χρήση του πλοίου, το μέγεθος και το περιβάλλον λειτουργίας. Το αντικείμενο καλύπτει επίσης τις διάφορες απαιτήσεις σχεδιασμού και τα πρότυπα που θέτουν οι νηογνώμονες, με έμφαση στους LR, ABS, BV, DNV-GL και RINA. Επιπλέον, το πεδίο εφαρμογής αυτού του θέματος περιλαμβάνει τον εντοπισμό των ομοιοτήτων και των διαφορών στους κανονισμούς δομικής διάταξης κάθε νηογνώμονα, καθώς και την

αξιολόγηση των πρακτικών επιπτώσεων αυτών των κανονισμών στο σχεδιασμό, την κατασκευή και τη λειτουργία των ναυπηγικών κατασκευών. Στόχος είναι η παροχή μιας ολοκληρωμένης κατανόησης των απαιτήσεων και των συστάσεων δομικής διάταξης για τους ναυπηγούς αρχιτέκτονες και τους ναυπηγούς μηχανικούς, βοηθώντας τους να δημιουργήσουν αποδοτικούς, ασφαλείς και αποτελεσματικούς σχεδιασμούς για ένα ευρύ φάσμα σκαφών αναψυχής.

3.2.1 Ελάχιστα πάχη

Οι LR, ABS, BV, DNV-GL και RINA είναι όλοι εξέχοντες νηογνώμονες που παρέχουν πρότυπα και κατευθυντήριες γραμμές για την κατασκευή και τη λειτουργία πλοίων και υπεράκτιων κατασκευών. Μία από τις κρίσιμες πτυχές των κατευθυντήριων γραμμών τους είναι οι ελάχιστες απαιτήσεις πάχους για διάφορα εξαρτήματα των πλοίων. Οι ελάχιστες απαιτήσεις πάχους καθορίζονται με βάση την προβλεπόμενη χρήση, το μέγεθος και τον τύπο του πλοίου ή της υπεράκτιας κατασκευής. Αυτές οι κατευθυντήριες γραμμές είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της δομικής ακεραιότητας και της ασφάλειας του πλοίου ή της υπεράκτιας κατασκευής κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ζωής του.

Οι LR, ABS, BV, DNV-GL και RINA έχουν το δικό τους μοναδικό σύνολο απαιτήσεων ελάχιστου πάχους που επικαιροποιούνται συνεχώς ώστε να αντικατοπτρίζουν τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις και τα πρότυπα του κλάδου. Οι οδηγίες αυτές καλύπτουν διάφορα δομικά στοιχεία, όπως πλάκες κύτους, καταστρώματα, διαφράγματα και υπερκατασκευές.

Η συμμόρφωση με αυτές τις ελάχιστες απαιτήσεις πάχους είναι απαραίτητη για την απόκτηση πιστοποίησης ταξινόμησης από τους εν λόγω οργανισμούς, η οποία είναι υποχρεωτική για την ασφαλή και νόμιμη λειτουργία των πλοίων και των υπεράκτιων κατασκευών. Οι νηογνώμονες διεξάγουν επίσης τακτικές επιθεωρήσεις για να διασφαλίσουν ότι τα πλοία και οι υπεράκτιες κατασκευές εξακολουθούν να πληρούν αυτές τις απαιτήσεις καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργικής τους ζωής.

3.2.1.1 ABS

Ο ABS [8] δίνει ένα ολοκληρωμένο σύνολο προτάσεων και εμπειρικών τύπων για τον προσδιορισμό του ελάχιστου πάχους των κατασκευών. Συγκεκριμένα προσδιορίζει τα πάχη των κατασκευών, single skin & sandwich για περιπτώσεις όπου τα πολύστρωτα έχουν τις ίδιες αλλά και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες στις διευθύνσεις Warp & Fill.

Σύμφωνα με το εδάφιο του ABS, Rules for Building and Classing High Speed Craft 2022 - Part 3, Hull Construction and Equipment, Part 3, Chapter 2, Section 3

Το κέλυφος, τα καταστρώματα και τα διαφράγματα μπορεί να είναι είτε μονοκόμματα είτε σάντουιτς. Όταν χρησιμοποιούνται και τα δύο, πρέπει να επιτυγχάνεται κατάλληλη μετάβαση μεταξύ τους με ελάχιστο λόγο κωνικότητας 12:1.

Το πολύστρωτο πυθμένα (bottom shell) πρέπει να εκτείνεται μέχρι την καρίνα ή την άνω στροφή του upper bilge turn. Μεταξύ της επένδυσης του πυθμένα και του πλευρικού

κελύφους πρέπει να επιτυγχάνεται κατάλληλη μετάβαση. Το πάχος του κελύφους κατά μήκος της καρίνας πρέπει να είναι 50% μεγαλύτερο και κατά μήκος των αντηρίδων (shaft struts) του άξονα και των σκελετών (skegs) πρέπει να είναι 100% μεγαλύτερο από το πάχος που απαιτείται από την παράγραφο 3-2-3/5.5.1 ή την 3-2-3/5.5.2, ανάλογα με την περίπτωση. Το πάχος του σωλήνα του bow thruster πρέπει να είναι ισοδύναμο με το πάχος του περιβάλλοντος κελύφους.

Τα πολύστρωτο του κελύφους, του καταστρώματος ή του διαφράγματος μπορεί να είναι ενισχυμένο στην warp και fill διεύθυνση (με ουσιαστικά ίδιες αντοχές και ελαστικές ιδιότητες στους δύο κύριους άξονες του κελύφους, του καταστρώματος ή του διαφράγματος στο επίπεδο) ή μονής κατεύθυνσης (με διαφορετικές αντοχές ή ελαστικές ιδιότητες στους δύο κύριους άξονες των πάνελ του κελύφους, του καταστρώματος ή του διαφράγματος). Οι γωνίες ή οι ταινίες πλαστικοποίησης πρέπει να έχουν ουσιαστικά τις ίδιες αντοχές και ελαστικές ιδιότητες με το έλασμα πλαστικοποίησης που συγκολλάται και γενικά πρέπει να είναι σύμφωνες με το τμήμα 3-2-6.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το βασικό πολύστρωτο που αναφέρεται στο μέρος 2, κεφάλαιο 6 ή άλλο εγκεκριμένο πολύστρωτο από ίνες γυαλιού, αραμιδίου ή άνθρακα σε ματ, wove, roving, ύφασμα, πλεκτό ύφασμα ή μονής κατεύθυνσης ενισχυτικά στρώματα. Η ισοδύναμη αντοχή και το πάχος άλλου πολύστρωτου βάσης εκτός από το E-γυαλί πρέπει να αξιολογείται σε πρόγραμμα στοίβαξης πολύστρωτου με βάση την αστοχία της πρώτης στρώσης. Για το κέλυφος και το κατάστρωμα πρέπει να τοποθετηθεί επαρκής αριθμός στρώσεων με το στημόνι στον άξονα 0° (διαμήκη). Οι διευθύνσεις του στημονιού και της πλήρωσης πρέπει να ευθυγραμμίζονται παράλληλα με τις αντίστοιχες ακμές των πλαισίων του κελύφους και του καταστρώματος όσο το δυνατόν πιο κοντά. Ανάλογα με την κατευθυντικότητα και τον προσανατολισμό των ινών αυτών των στρώσεων, μπορεί να απαιτούνται ή να επιτρέπονται άλλες στρώσεις στον άξονα 90° (εγκάρσιος). Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ενισχυτικές στρώσεις σε άλλους άξονες, όπως +45° (διαγώνιος), όταν εγκρίνονται.

Όταν η αντοχή και η δυσκαμψία στους δύο κύριους άξονες του πάνελ είναι διαφορετικές, πρέπει να εξετάζεται η κάμψη του πάνελ σε καθέναν από τους κύριους άξονες του πάνελ. Βλέπε 3-2-3-3/5.5.2 και 3-2-3/5.7.2.

Το πάχος της επένδυσης του κελύφους, του καταστρώματος ή του διαφράγματος δεν πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό που δίνουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

5.5.1(a) All Plating

$$t = sc \sqrt{\frac{pk}{1000\sigma_a}} \text{ mm} \quad (3.6)$$

5.5.1(b) All Plating

$$t = sc^3 \sqrt{\frac{pk_1}{1000k_2E_f}} \text{ mm} \quad (3.7)$$

5.5.1(c) Strength deck and shell

$$t = k_3(c_1 + 0.26 * L)\sqrt{q_1} \text{ mm} \quad (3.8)$$

Το L γενικά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από 12,2 m (40 ft).

5.5.1(d) Strength deck and bottom shell

$$t = \frac{s}{k_b} \sqrt{\frac{0.6\sigma_{uc}}{E_C}} \sqrt{\frac{SM_R}{SM_A}} \text{ mm} \quad (3.9)$$

Πού

s = η απόσταση των διαμήκων δοκών του κελύφους ή του καταστρώματος ή των δοκών υπερκατασκευής, του καταστρώματος ή των διαφραγμάτων, σε mm. Πρέπει πάντα να είναι η μικρότερη διάσταση των μη υποστηριζόμενων πλακών.

c = συντελεστής καμπυλότητας της πλάκας κατά τη διεύθυνση παράλληλη προς το s , που δίνεται από $(1 - A/s)$, αλλά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερος από 0,70

A = απόσταση, σε mm, μετρούμενη κάθετα από το μήκος χορδής, s , στο υψηλότερο σημείο του καμπύλου τόξου της πλάκας μεταξύ των άκρων των πλαισίων.

p = πίεση σχεδιασμού που δίνεται στο τμήμα 3-2-2

k ή k_1 = συντελεστής που μεταβάλλεται ανάλογα με το λόγο των πλευρών των πλακών, δίνεται στο σημείο 3-2-3/1.3.1 (Πίνακας 3.15)

$k_b = 2,5$ με διαμήκη διαμόρφωση

= 2,5 με εγκάρσια διαμόρφωση και λόγο διαστάσεων 1,0

= 1,0 με εγκάρσια διαμόρφωση και λόγο διαστάσεων 2,0 έως 4,0

σ_α = τάση σχεδιασμού που δίδεται στο 3-2-3/5.5.1 (Πίνακας 3.16)

k_2 = για την επένδυση πυθμένα: 0,015 για περιπολικά σκάφη και παρόμοια υπηρεσιακά σκάφη, 0,01 για άλλα σκάφη

= για πλευρική επένδυση: 0,020 για περιπολικά σκάφη και παρόμοια υπηρεσιακά σκάφη, 0,015 για άλλα σκάφη

= για τις υπερκατασκευές και τα μέτωπα των καταστρωμάτων: 0,025

= για άλλες επενδύσεις: 0.010

E_F = συντελεστής κάμψης του ελάσματος, σε MPa, κατά τη διεύθυνση παράλληλη προς s

$$q_1 = 170/F \text{ (15,5/F, 25,000/F)}$$

L = μήκος σκάφους, σε m, όπως ορίζεται στο 3-1-1/3

$$c_1 = 5,7 \text{ mm}$$

$k_3 = 1,2$ για δομή κάτω κελύφους

= 1,0 για τη δομή του πλευρικού κελύφους και του καταστρώματος

E_C = θλιπτικό μέτρο ελαστικότητας σε MPa

F = ελάχιστη αντοχή σε κάμψη του ελάσματος, σε MPa

σ_{uc} = ελάχιστη θλιπτική αντοχή του ελάσματος, σε MPa

SM_R = απαιτούμενο μέτρο διατομής γάστρας-δοκού που δίνεται στο τμήμα 3-2-1

SM_A = προτεινόμενο μέτρο διατομής της γάστρας-δοκού της μεσόβαθρης διατομής

Πίνακας 3.15 : Aspect ratio Coefficient for Isotropic Plates

Aspect Ratio Coefficient for Isotropic Plates

ℓ/s	k	k_1
> 2.0	0.500	0.028
2.0	0.497	0.028
1.9	0.493	0.027
1.8	0.487	0.027
1.7	0.479	0.026
1.6	0.468	0.025
1.5	0.454	0.024
1.4	0.436	0.024
1.3	0.412	0.021
1.2	0.383	0.019
1.1	0.348	0.017
1.0	0.308	0.014

Note: s = shorter edge of plate panel, in mm (in.)

ℓ = longer edge of plate panel, in mm (in.)

Intermediate values may be determined by linear interpolation.

Πίνακας 3.16: Τάσεις σχεδίασης για FRP crafts

Design Stresses for FRP, σ_u

Bottom Shell	$0.33\sigma_u$
Side Shell	$0.33\sigma_u$
Decks	$0.33\sigma_u$
Superstructure and Deckhouses – Front, Sides, Ends, and Tops	$0.33\sigma_u$
Tank Bulkheads	$0.33\sigma_u$
Watertight Bulkheads	$0.33\sigma_u$

Για ελάσματα μονής επιδερμίδας:

σ_u = ελάχιστη αντοχή σε κάμψη, σε MPa

Για ελάσματα σάντουιτς:

σ_u = για το εξωτερικό κέλυφος ή κατάστρωμα, ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό, σε MPa

σ_u = για την εσωτερική επιφάνεια του κελύφους ή του καταστρώματος, ελάχιστη αντοχή σε θλίψη, σε MPa

σ_u = για διαφράγματα, μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό ή θλίψη, σε MPa

Σημείωση: Το σ_u πρέπει να επαληθεύεται από τα εγκεκριμένα αποτελέσματα των δοκιμών. Βλέπε τμήμα 2-6-5.

Με διαφορετικές ιδιότητες στους άξονες 0° και 90°

Για ελάσματα με διαφορετικές αντοχές και ελαστικές ιδιότητες στους άξονες 0° και 90°, όπου η αντοχή είναι μικρότερη ή η δυσκαμψία μεγαλύτερη στη διεύθυνση της πλάκας κάθετα στο s, το πάχος δεν πρέπει να είναι επίσης μικρότερο από αυτό που δίνουν οι ακόλουθες εξισώσεις:

(a)

$$t = sc \sqrt{\frac{p * k_s}{1000\sigma_{as}}} \quad mm \quad (3.10)$$

(b)

$$t = sc \sqrt{\frac{p * k_s}{1000\sigma_{al}}} * \sqrt[4]{\frac{E_l}{E_s}} \quad mm \quad (3.11)$$

Όταν

k_s, k_l = συντελεστής για το λόγο διαστάσεων των πλακών, που δίνεται στον Πίνακα 3.17, 3-2-3/5.5.2 β) Πίνακας 3.17

σ_{as} = τάση σχεδιασμού, που δίνεται στον 3-2-3/5.5.1(δ) ΠΙΝΑΚΑΣ 3.16, με βάση τις ιδιότητες αντοχής στη διεύθυνση παράλληλα προς s

E_s = μέτρο κάμψης του ελάσματος, σε MPa, στη διεύθυνση παράλληλη προς s

σ_{al} = τάση σχεδιασμού, που δίνεται στον 3-2-3/5.5.1(δ) ΠΙΝΑΚΑΣ 3.16, με βάση τις ιδιότητες αντοχής στη διεύθυνση κάθετα προς s

E_l = μέτρο κάμψης του πολύστρωτου, σε MPa στη διεύθυνση κάθετα προς s

s, c και p όπως ορίζονται στο σημείο 3-2-3/5.5

Πίνακας 3.17:

Aspect Ratio Coefficient for Isotropic Plates

$(\ell/s)^4 \sqrt{E_s/E_\ell}$	k_s	k_ℓ
> 2.0	0.500	0.342
2.0	0.497	0.342
1.9	0.493	0.342
1.8	0.487	0.342
1.7	0.479	0.342
1.6	0.468	0.342
1.5	0.454	0.342
1.4	0.436	0.342
1.3	0.412	0.338
1.2	0.383	0.333
1.1	0.348	0.323
1.0	0.308	0.308

Σάντουιτς πολύστρωτο

Πολύστρωτο με ουσιαστικά ίδια αντοχή και ακαμψία σε κάμψη στους άξονες 0° και 90°

Γενικά, το εξωτερικό και εσωτερικό περίβλημα πρέπει να είναι παρόμοιες ως προς τη διάστρωση και ως προς την αντοχή και τις ελαστικές ιδιότητες. Θα δοθεί ιδιαίτερη προσοχή όταν αυτό δεν συμβαίνει. Γενικά, single skin πολυστρωτο πρέπει να χρησιμοποιείται στην καρίνα και στα εξαρτήματα της γάστρας, όπως οι άξονες, τα πτερύγια και τα πηδάλια, καθώς και στα εξαρτήματα καταστρώματος, στις βιδωτές συνδέσεις και σε άλλες περιοχές με συγκεντρωμένα τοπικά φορτία.

Το μέτρο διατομής και η ροπή αδράνειας ως προς τον ουδέτερο άξονα μιας λωρίδας από πάνελ σάντουιτς πλάτους 1 cm (1 in.) δεν πρέπει να είναι μικρότερα από αυτά που δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

(a)

$$SM_0 = \frac{(sc)^2 pk}{6 * 10^5 \sigma_{\alpha o}} \quad cm^3 \quad (3.12)$$

(b)

$$SM_i = \frac{(sc)^2 pk}{6 * 10^5 \sigma_{\alpha i}} \quad cm^3 \quad (3.13)$$

(c)

$$I = \frac{(sc)^3 pk_1}{120 * 10^5 k_2 * E_{tc}} \quad cm^4 \quad (3.14)$$

όπου

SM_0 = απαιτούμενο μέτρο διατομής, σε cm^3 , στο εξωτερικό περίβλημα.

SM_i = απαιτούμενο μέτρο διατομής, σε cm^3 , στο εσωτερικό κέλυφος.

I = απαιτούμενη ροπή αδράνειας, σε cm^4

$\sigma_{\alpha o}$ = τάση σχεδιασμού, για το εξωτερικό κέλυφος, που δίνεται στον 3-2-3/5.5.1(δ) ΠΙΝΑΚΑΣ 3.16, με βάση την αντοχή του εξωτερικού κελύφους κατά τη διεύθυνση παράλληλη προς το s.

$\sigma_{\alpha i}$ = τάση σχεδιασμού, για το εσωτερικό κέλυφος, που δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.16 3-2-3/5.5.1(δ), με βάση την αντοχή του εσωτερικού κελύφους κατά τη διεύθυνση παράλληλη προς το s.

$$E_{tc} = 0.5(E_c + E_t)$$

E_c = μέσος όρος των συντελεστών θλίψης του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβλήματος, σε MPa

E_t = μέσος όρος των συντελεστών εφελκυσμού του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβλήματος, σε MPa

$s, c, p, k, k1$ και $k2$ όπως ορίζονται στο σημείο 3-2-3/5.5.

Πολύστρωτα με διαφορετική αντοχή σε κάμψη και ακαμψία στους άξονες 0° και 90°

Όταν η αντοχή είναι μικρότερη ή η δυσκαμψία μεγαλύτερη στη διεύθυνση κάθετα στο s , το μέτρο διατομής και η ροπή αδράνειας ως προς τον ουδέτερο άξονα μιας λωρίδας σάντουιτς, πλάτους 1 cm (1 in.), πρέπει επίσης να μην είναι μικρότερα από αυτά που δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

(a) In direction parallel to s

$$SM_0 = \frac{(sc)^2 pks}{6 * 10^5 \sigma_{aso}} \quad cm^3 \quad (3.15)$$

(b) In direction parallel to ℓ

$$SM_0 = \frac{(sc)^2 pkl}{6 * 10^5 \sigma_{alo}} * \sqrt{\frac{E_l}{E_s}} \quad cm^3 \quad (3.16)$$

(c) In direction parallel to s

$$SM_i = \frac{(sc)^2 pks}{6 * 10^5 \sigma_{asi}} \quad cm^3 \quad (3.17)$$

(d) In direction parallel to ℓ

$$SM_i = \frac{(sc)^2 pkl}{6 * 10^5 \sigma_{ali}} * \sqrt{\frac{E_l}{E_s}} \quad cm^3 \quad (3.18)$$

(e) In direction parallel to s

$$I = \frac{(sc)^2 pk_1}{120 * 10^5 k_2 * E_s} \quad cm^4 \quad (3.19)$$

Πού

SM_0 = απαιτούμενο μέτρο διατομής, σε cm^3 , στο εξωτερικό κέλυφος.

SM_i = απαιτούμενο μέτρο διατομής, σε cm^3 , στο εσωτερικό κέλυφος.

k_l, k_s = τροποποιημένος συντελεστής για το λόγο διαστάσεων των πλακών, που δίνεται στο 3-2-3/5.5.2(β) ΠΙΝΑΚΑΣ 5.

σ_{aso} = τάση σχεδιασμού, για το εξωτερικό κέλυφος, που δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑΣ 3.16, με βάση τις ιδιότητες αντοχής στη διεύθυνση παράλληλη προς το s .

σ_{alo} = τάση σχεδιασμού, για το εξωτερικό κέλυφος, που δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.16, με βάση τις ιδιότητες αντοχής στη διεύθυνση κάθετα στο s .

σ_{asi} = τάση σχεδιασμού για το εσωτερικό κέλυφος, που δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.16, με βάση τις ιδιότητες αντοχής στη διεύθυνση παράλληλη προς το s .

σ_{ali} = τάση σχεδιασμού, για το εσωτερικό κέλυφος, που δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.16, με βάση τις ιδιότητες αντοχής στη διεύθυνση κάθετα προς το s .

$$E_s = 0,5(E_{ts} + E_{cs})$$

$$E_l = 0,5(E_{tl} + E_{cl})$$

E_{ts}, E_{cs} = αντίστοιχα, μέσος όρος των εφελκυστικών μέτρων ελαστικότητας του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβλήματος και μέσος όρος των θλιπτικών μέτρων ελαστικότητας του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβλήματος, σε N/mm^2 κατά τη διεύθυνση παράλληλη προς s .

E_{tl}, E_{cl} = αντίστοιχα, μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας εφελκυσμού των εσωτερικών και εξωτερικών περιβλημάτων και μέσος όρος των μέτρων ελαστικότητας θλίψης των εσωτερικών και εξωτερικών περιβλημάτων, σε MPa σε διεύθυνση παράλληλη προς l .

Τα s, c, p, k_1, k_2 και E_{tc} είναι όπως ορίζονται στο σημείο 3-2-3/5.5.

Διατμητική αντοχή

Το πάχος του πυρήνα και του σάντουιτς δεν πρέπει να είναι μικρότερο από αυτό που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση. Ιδιαίτερη προσοχή θα δίνεται όταν προτείνονται πυρήνες διαφορετικοί από αυτούς του Μέρους 2, Κεφάλαιο 6. Βλέπε επίσης 3-2-3-3/5.7.5 για το ελάχιστο πάχος της περιβλήματος.

$$\frac{d_0 + d_c}{2} = \frac{vps}{1000\tau} \quad mm \quad (3.20)$$

όπου

d_0 = συνολικό πάχος του σάντουιτς, εκτός του gel coat, σε mm

d_c = πάχος πυρήνα, σε mm

ν = συντελεστής που μεταβάλλεται ανάλογα με τον λόγο διαστάσεων των πλακών, δίνεται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.19. Όταν οι ελαστικές ιδιότητες των περιβλημάτων είναι διαφορετικές στους κύριους άξονες, το ν πρέπει να λαμβάνεται τουλάχιστον 0,5.

s = μικρότερη διάσταση της πλάκας, σε mm

p = πίεση σχεδιασμού, σε kPa, όπως ορίζεται στο τμήμα 3-2-2.

τ = τάση σχεδιασμού, σε MPa όπως ορίζεται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.20

Όπου οι πυρήνες είναι χαραγμένοι για τη διευκόλυνση της τοποθέτησης, οι χαραγές πρέπει να γεμίζονται με στόκο ή ρητίνη.

Η πυκνότητα των πυρήνων από αφρώδες πολυβινυλοχλωρίδιο στην επένδυση του κελύφους δεν πρέπει να είναι μικρότερη από αυτή που δίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 3.18: Density of polynivil chloride foam cores

<i>Location</i>	<i>Density kg/m³ (lbs/ft³)</i>	<i>Minimum Density kg/m³ (lbs/ft³)</i>
Bottom forward of 0.4L _{WL} ; V ≥ 25 kts	4d _c (6.4d _c)	120 (7.5)
Bottom forward of 0.4L _{WL} ; V < 25 kts	4d _c (6.4d _c)	100 (6.25)
elsewhere; V ≥ 25 kts	3d _c (4.8d _c)	100 (6.25)
elsewhere; V < 25 kts	3d _c (4.8d _c)	80 (5.00)
Side forward 0.4L _{WL}	2.5d _c (4.0d _c)	100 (6.25)
elsewhere	2.0d _c (3.2d _c)	80 (5.00)

Πίνακας 3.19: Συντελεστής ν , διαμητρικής τάσης για FRP Sandwich Panels

<i>Plate Panel Aspect Ratio ℓ/s</i>	<i>ν</i>
> 2.0	0.500
2.0	0.500
1.9	0.499
1.8	0.499
1.7	0.494
1.6	0.490
1.5	0.484
1.4	0.478
1.3	0.466
1.2	0.455
1.1	0.437
1.0	0.420

s = shorter edge of plate panel, in mm (in.)

ℓ = longer edge of plate panel, in mm (in.)

Note: Values of ν less than 0.5 may be used only where the inner and outer skins have essentially the same strength and elastic properties in the 0° and 90° axes.

Πίνακας 3.20: Διατμητική τάση σχεδίασης για υλικά πυρήνα

<i>Core Material</i>	<i>Design Core Shear Strength</i>
Balsa Wood	$0.3\tau_u$
PVC*	$0.4\tau_u$

* May be taken as $0.55\tau_u$ where sheer elongation exceeds 40%.

τ_u = minimum core shear strength, in N/mm² (kgf/mm², psi)

1

Σταθερότητα του περιβλήματος

Η τάση λυγισμού του περιβλήματος σ_c , που δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση, πρέπει γενικά να είναι τουλάχιστον $2,0\sigma_{ai}$ και $2,0\sigma_{ao}$

$$\sigma_c = 0.6 \sqrt[3]{E_S * E_{CC} * G_{CC}} \quad (3.21)$$

Πού

E_S = μέτρο θλίψης των περιβλημάτων, σε MPa, στον άξονα 0° και 90° στο επίπεδο του πλαισίου

E_{CC} = μέτρο θλίψης του πυρήνα, σε MPa, κάθετα στα δέρματα

G_{CC} = μέτρο διάτμησης του πυρήνα, σε MPa, κατά τη διεύθυνση παράλληλα προς το φορτίο

Ελάχιστο πάχος περιβλήματος

Μετά την εκπλήρωση όλων των άλλων απαιτήσεων, τα πάχη των περιβλημάτων πολύστρωτων που συμμορφώνονται με τις βασικές απαιτήσεις του μέρους 2, κεφάλαιο 6 πρέπει γενικά να μην είναι μικρότερα από αυτά που δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$t_{os} = 0.35k_3 (C_1 + 0.26L) \quad \text{mm} \quad (3.22)$$

$$t_{is} = 0.25k_3 (C_1 + 0.26L) \quad \text{mm} \quad (3.23)$$

όπου

t_{os} = πάχος του εξωτερικού περιβλήματος, σε mm

t_{is} = πάχος του εσωτερικού περιβλήματος, σε mm

$k_3 = 1.2$ Κάτω κέλυφος

= 1,0 Πλευρικό κέλυφος και κατάστρωμα

$C_1 = 5,7$ mm

L = μήκος σκάφους, σε m, όπως ορίζεται στο 3-1-1/3, το οποίο γενικά δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από 12,2 m.

Πλάκες που υπόκεινται σε συγκεκριμένα ωφέλιμα φορτία

Για όλες τις πλάκες που υπόκεινται σε συγκεκριμένο ωφέλιμο φορτίο πρέπει να διενεργείται ανάλυση πρώτων αρχών. Οι μέγιστες τάσεις και παραμορφώσεις στις πλάκες αυτές δεν πρέπει να υπερβαίνουν τις τάσεις που δίνονται στον ΠΙΝΑΚΑ 3.21

Πίνακας 3.21: Όριο τάσεων – παραμορφώσεων

		Steel	Aluminum	FRP	
				σ	δ
Human Load		---	---	$0.33\sigma_u$	$0.01s$
Helicopter Decks ⁽²⁾	Overall Dist. Loading	$0.60\sigma_y$	$0.6\sigma_{yw}$	See Note 1	See Note 1
	Landing Impact Loading	σ_y	σ_{yw}	See Note 1	See Note 1
	Stowed Aircraft Loading	σ_y	σ_{yw}	See Note 1	See Note 1

σ_y = όριο διαρροής του χάλυβα σε MPa

σ_{yw} = όριο διαρροής συγκολλημένου αλουμινίου σε MPa

s = απόσταση μεταξύ των πλαισίων Για ελάσματα μονής επιδερμίδας:

σ_u = ελάχιστη αντοχή σε κάμψη, σε MPa

Για ελάσματα σάντουιτς:

σ_u = για το εξωτερικό κέλυφος ή κατάστρωμα, ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό, σε MPa

σ_u = για το εσωτερικό κέλυφος ή κατάστρωμα, ελάχιστη αντοχή σε θλίψη, σε MPa

σ_u = για διαφράγματα, μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό ή θλίψη, σε MPa

Σημειώσεις:

σ_u πρέπει να επαληθεύεται από τα εγκεκριμένα αποτελέσματα των δοκιμών. Βλέπε τμήμα 2-6-5

1 Τα σύνθετα υλικά θα εξεταστούν ειδικά για χρήση σε αυτή τη θέση.

2 Το ελάχιστο πάχος της πλάκας δεν πρέπει γενικά να είναι μικρότερο από αυτό που προκύπτει από τα ακόλουθα:

Πίνακας 3.22: Ελάχιστα πάχη πλακών

<i>Beam Spacing</i>	t_s	t_{al}
460 mm (18 in.)	4.0 mm (0.16 in.)	$0.9t_s\sqrt{Q}$
610 mm (24 in.)	5.0 mm (0.20 in.)	$0.9t_s\sqrt{Q}$
760 mm (30 in.)	6.0 mm (0.24 in.)	$0.9t_s\sqrt{Q}$

t_s = απαιτούμενο πάχος χάλυβα

t_{al} = απαιτούμενο πάχος για αλουμίνιο

Q = συντελεστής υλικού όπως ορίζεται στο 3-2-1/1.1

3.2.1.2 DNV

Αντίθετα από τον ABS, ο DNV [9] δεν παρέχει απαιτήσεις για ελάχιστα πάχη. Στο εδάφιο DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.4 Hull structural design, fibre composite and sandwich constructions αναφέρεται στο ελάχιστο επιφανειακό βάρος ενίσχυσης που θα πρέπει να ικανοποιείται για διαφορετικά δομικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα :

Single skin

Το επιφανειακό βάρος ενίσχυσης για single skin πολύστρωτα, γενικά δεν πρέπει να είναι μικρότερο από :

$$W = W_0 (1 + k (L - 20)) \text{ for } L > 20 \text{ m} \quad (3.24)$$

$$W = W_0 \text{ for } L \leq 20 \text{ m} \quad (3.25)$$

όπου:

W = βάρος ενίσχυσης, ανά μονάδα επιφάνειας, g/m^2

W_0 = πίνακας 3.15

k = πίνακας 3.18

L = μήκος μεταξύ των καθέτων.

Πίνακας 3.23: Ελάχιστο επιφανειακό βάρος single skin

<i>Structural member</i>	W_0 (g/m^2)	k
Hull bottom, side and transom below deepest WL or chine whichever is higher	4200	0.025
Hull side and transom above deepest WL or chine whichever is higher	4200	0.025
Stem and keel to 0.01 L from centreline	7500	0.025
Chine and transom corners to 0.01 L from chine edge	5800	0.025
Bottom aft in way of rudder, shaft braces, and shaft penetrations	6600	0.025
Weather deck not intended for cargo	4200	0.0
Cargo deck	5400	0.013
Accommodation deck	2900	0.0
Structural/watertight bulkheads/double bottom	4200	0.0
Tank bulkheads	4500	0.0
Other bulkheads	2500	0.0
Superstructures and deckhouses	4200	0.013

Ο Πίνακας 3.23 ισχύει για τα πολύστρωτα που κατασκευάζονται από γυαλί ή/και άνθρακα. Η ελάχιστη επιφανειακή μάζα των πολύστρωτων που κατασκευάζονται από άλλους τύπους οπλισμού υπόκειται σε ειδική εξέταση.

Σάντουιτς

Η μάζα των περιβλημάτων σε δομικά πάνελ σάντουιτς δεν πρέπει κανονικά να είναι μικρότερη από:

$$W \geq W_0 (1 + k (L-20)) \text{ for } L > 20 \text{ m} \quad (3.26)$$

$$W = W_0 \text{ for } L \leq 20 \text{ m} \quad (3.27)$$

Για κάθε περίβλημα:

W = βάρος ενίσχυσης, ανά μονάδα επιφάνειας, g/m^2

W_0 = που δίνονται στον πίνακα 3.24 (για οπλισμούς από μικτά υλικά το W_0 μπορεί να βρεθεί με γραμμική παρεμβολή στον πίνακα σύμφωνα με το σχετικό ποσοστό κάθε υλικού σε σχέση με το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας)

k = πίνακας 3.24

L = μήκος μεταξύ καθέτων.

Πίνακας 3.24: Ελάχιστον επιφανειακό βάρος περιβλημάτων [9]

	W_o (g/m ²)		k
	Glass	Carbon/ Aramid	
Hull bottom, side and transom below deepest WL or chine whichever is the higher	2400	1600	0.025
Hull side, and transom above deepest WL or chine whichever is higher	1600	1100	0.025
Hull bottom and side, inside of hull	1600	1100	0.013
Stem and keel, (width to be defined)	6000	4000	0.025
Weather deck (not for cargo)	1600	1100	0.0
Wet deck	1600	1100	0.0
Cargo deck	3000	2000	0.013
Accommodation deck, if adequately protected	1200	800	0.0
Accommodation deck, other	1600	1100	0.0
Decks, underside skin	750	500	0.0
Tank bulkheads/double bottom	1600	1100	0.0
Structural bulkheads	1200	800	0.0
Watertight bulkheads	1600	1100	0.0
Superstructure and deckhouse, outside	1200	800	0.013
Inside void spaces without normal access	750	500	0.0

The minimum mass of reinforcement of sandwich skin laminates fabricated from other types of reinforcements are subject to special consideration.

3.2.1.3 LR (Lloyd's Register)

Ο Lloyd's Register [5], παρέχει ένα πολύ ολοκληρωμένο σύνολο προτάσεων όσον αφορά τις ελάχιστες απαιτήσεις για τα πάχη των πολύστρωτων για ποικίλες δομικές διατάξεις. Στο εδάφιο Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft, July 2022, Part 8, Chapter 3, section 2 συγκεκριμένα αναφέρει :

Προσδιορισμός ιδιοτήτων και τάσεων για πολύστρωτα μονής επιδερμίδας

Η εκτίμηση του πάχους του μονόφλοιου πολύστρωτου που απαιτείται για τη μεταφορά της ροπής κάμψης που αναφέρεται στο Pt 8, Κεφ. 3, 1.9 Ελάσματα πλάκας και σάντουιτς 1.9.1, πρέπει να προσδιορίζεται από:

$$t = 0.146 * b^3 * \sqrt{\frac{p}{E_{tp}}} \quad mm \quad (3.28)$$

Πού

p = πίεση σχεδιασμού σε kN/m², όπως υπολογίζεται στο Pt 5 Κριτήρια σχεδιασμού και φορτίου για το κατάλληλο στοιχείο

b = μη υποστηριζόμενο πλάτος πάνελ, σε mm

E_{tp} = μέτρο εφελκυσμού του ελάσματος της πλάκας, σε MPa

Μηχανικές ιδιότητες για σάντουιτς κατασκευές

Για την εφαρμογή των διαφόρων τύπων που αφορούν τη χρήση της κατασκευής σάντουιτς, έχουν γίνει οι ακόλουθες παραδοχές:

(α) τα πολύστρωτα σάντουιτς φέρουν την πλειονότητα του φορτίου κάμψης,

(β) ο πυρήνας φέρει την πλειονότητα του διατμητικού φορτίου,

(γ) η αρχική εκτίμηση του πάχους των επιφανειών από το Pt 8, Κεφ. 3, 1.14 Μηχανικές ιδιότητες των ελασμάτων σάντουιτς 1.14.2 βασίζεται στην οριακή συνθήκη για τη θεωρία των λεπτών επιφανειών:

Πάχος πυρήνα/ Μέσο πάχος επένδυσης $\geq 5,77$

(δ) τα δέρματα σάντουιτς έχουν περίπου ίσο πάχος (δηλ. το πάνελ είναι ισορροπημένης ή περίπου ισορροπημένης κατασκευής), με το πάχος της εξωτερικής επένδυσης σάντουιτς να μην είναι μεγαλύτερο από:

$$t_{outer} = 1,33 t_{inner} \text{ (εξαιρουμένου του gel coat και των μη δομικών υλικών).}$$

1.14.2. Μια εκτίμηση των παχών των επιφανειών σάντουιτς και του πυρήνα που απαιτούνται για τη μεταφορά της ροπής κάμψης του κανόνα μπορεί να προσδιοριστεί από τον ακόλουθο τύπο. Ο επακόλουθος σχεδιασμός πρέπει στη συνέχεια να ελεγχθεί με βάση τα άλλα κριτήρια που απαιτούνται από τους κανόνες.

$$t_s = \varphi_1 * k_s * b^3 \sqrt{\frac{p}{E_{tps}}} \text{ mm} \quad (3.29)$$

Πού

$\varphi_1=0,0214$ για τα εσωτερικά περιβλήματα

$\varphi_1=0,0286$ για τα εξωτερικά περιβλήματα

$\varphi_1=0,1440$ για το πάχος του πυρήνα

k_s = συντελεστής διόρθωσης του λόγου διαστάσεων του ελάσματος σάντουιτς, όπως ορίζεται στο Pt 8, Κεφ. 3, 1.14 Μηχανικές ιδιότητες ελάσματος σάντουιτς 1.14.9

E_{tps} = το μέτρο εφελκυσμού του ελάσματος της πλάκας σάντουιτς, όπως καθορίζεται από το Pt 8, Κεφ. 3, Μηχανικές ιδιότητες ελάσματος σάντουιτς 1.14.4, σε MPa.

Πάχος πολύστρωτου μονής επιδερμίδας (single skin)

Τα ελάχιστα πάχη των πολύστρωτων μονής επιδερμίδας, όπως προσδιορίζονται από τα αντίστοιχα τμήματα των Κανόνων, πρέπει να διορθώνονται για τον τύπο του σκάφους, ανεξάρτητα από τη χρησιμοποιούμενη ενίσχυση. Το διορθωμένο ελάχιστο πάχος των πλαϊνών, του πυθμένα, του υπέρθυρου, του υγρού καταστρώματος, του καταστρώματος οχημάτων και των καταστρωμάτων καιρού πρέπει να προσδιορίζεται από:

Ελαστομερή φύλλα μονής επιδερμίδας:

$$t_T = \omega * t_{min} \quad (3.30)$$

Πού

ω = Συντελεστής διόρθωσης τύπου υπηρεσίας που δίνεται στον Πίνακα 3.25 Συντελεστής διόρθωσης τύπου υπηρεσίας (ω)

t_T = Ελάχιστο πάχος κανόνα διορθωμένο για τον τύπο σκάφους, σε mm

t_{min} = Βασικό ελάχιστο πάχος ελάσματος κανόνα, σε mm.

Πίνακας 3.25: Συντελεστής Διόρθωσης

Service type notation	ω
Cargo	1,1
Passenger	1,00
Patrol	1,00
Pilot	1,1
Yacht	1,00
Workboat - Motor fishing vessel	1,2

Όλα τα ελάχιστα πάχη του ελάσματος τόσο για τα στοιχεία ενίσχυσης όσο και για τα στοιχεία ελάσματος μονής επιδερμίδας βασίζονται σε υποτιθέμενη περιεκτικότητα σε ίνες, f_c , 0,5. Όταν η περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος, f_c , είναι μικρότερη από 0,5, τα απαιτούμενα ελάχιστα πάχη προσδιορίζονται από:

:

$$t_{fc} = t_{0.5} * (1.65 - 1.3f_c) \text{ mm} \quad (3.31)$$

Πού

t_{fc} = ελάχιστο πάχος σε πραγματική περιεκτικότητα σε ίνες του ελάσματος, σε mm

$t_{0.5}$ = βασικό ελάχιστο πάχος ελάσματος σε περιεκτικότητα σε ίνες, κατά βάρος, 0,5

Η εξίσωση στο Pt 8, Κεφ. 3, 2.4 Πάχος ελάσματος ελάσματος μονής επιδερμίδας αφορά ελάσματα πολυεστέρα "E" από γυαλί. Άλλα ελάσματα θα εξετάζονται σε βάση ισοδυναμίας.

Ελάχιστη ενίσχυση περιβλημάτων σε ελάσματα σάντουιτς

Η ελάχιστη ποσότητα οπλισμού σε ελάσματα μονής επιδερμίδας, τα οποία σχηματίζουν την εσωτερική και την εξωτερική επιδερμίδα των πολύστρωτων σάντουιτς, δίνεται στον πίνακα 3.18. η ελάχιστη ποσότητα ενίσχυσης στα περιβλήματα πολύστρωτων σάντουιτς με βάση μια υποτιθέμενη περιεκτικότητα σε ίνες, f_c , 0,5. Η διορθωμένη ελάχιστη ποσότητα οπλισμού, W_T , πρέπει να προσδιορίζεται από:

$$W_T = \omega * K_L * K_V * W_{min} \quad (3.32)$$

Πού

ω = Συντελεστής διόρθωσης τύπου λειτουργίας, βλέπε Pt 8, Κεφ. 3, 2.5 Ελάχιστος οπλισμός του περιβλήματος σε ελάσματα σάντουιτς 2.5.2

K_L = Συντελεστής διόρθωσης μήκους μοσχεύματος, βλέπε Pt 8, Κεφ. 3, 2.5 Ελάχιστος οπλισμός περιβλήματος σε ελάσματα σάντουιτς 2.5.3

K_V = Συντελεστής διόρθωσης όγκου ινών, βλέπε Pt 8, Κεφ. 3, 2.5 Ελάχιστη ενίσχυση του περιβλήματος σε ελάσματα σάντουιτς 2.5.4

Πίνακας 3.26: Ελάχιστο βάρος ενίσχυσης για περιβλήματα sandwich [5]

Panel location	Minimum amount of reinforcement, W_{min} (g/m ²)		Sandwich skin length factor, f_{LS}
	Glass	Carbon/Aramid	
Integral tanks, fluid barrier skin	3650	2700	0,0
Hull bottom, outer skin	3650	2700	0,33
Hull bottom, inner skin	2850	2100	0,33
Side shell, outer skin	3250	2400	0,33
Side shell, inner skin	2450	1950	0,33
Inner bottom, outer skin	3650	2700	0,33
Inner bottom, inner skin	2850	2100	0,33

Double bottom plate floor	1650	1300	0,0
Watertight bulkhead	1650	1300	0,0
Deep tanks, exterior skin	2450	1950	0,0
Deep tanks, fluid barrier skin	3250	2400	0,0
Strength/weather deck, outer skin	2450	1950	0,33
Strength/weather deck, inner skin	1650	1300	0,0
Lower deck/within deckhouse, accommodation decks	1650	1300	0,0
Cargo deck, outer skin	2450	1950	0,0
Cargo deck, inner skin	1650	1300	0,0
Superstructure sides	1650	1300	0,0
Superstructure front	2050	1500	0,0
Superstructure aft	1650	1300	0,0
Superstructure top	1650	1300	0,0
Coach roof	1650	1300	0,0
Machinery casings	2050	1500	0,0
Bulwarks	1650	1300	0,0

Note The minimum amount of reinforcement in hybrid laminates will be individually considered on an equivalence basis. See Pt 8, Ch 3, 2.9 Sheathing 2.9.2.

Πολύστρωτο κελύφους

Πλάκα καρίνας:

Το πλάτος, b_k , και το πάχος, t_k , των πλακών της καρίνας δεν πρέπει να λαμβάνονται μικρότερα από:

$$b_k = 7 * L_R + 340 \text{ mm} \quad (3.33)$$

$$t_k = \sqrt{k_t} (5 * L_R^{0.45}) \text{ mm} \quad (3.34)$$

Όπου,

$$k_t = 152 / \sigma_f$$

L_R = Rule length, in metres,

σ_f = τελική αντοχή σε κάμψη του υλικού της πλάκας καρίνας, σε N/mm²

Σε καμία περίπτωση το πάχος της καρίνας δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το πάχος της παρακείμενης επένδυσης του κάτω κελύφους.

Πλάκα πλώρης :

Το πάχος της προωραίας πλάκας, t_s , δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από αυτό που δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$t_s = \sqrt{k_t} * (0.29 * L_R + 9) \text{ mm} \quad (3.35)$$

Σε καμία περίπτωση το πάχος του στελέχους της πλάκας δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από το πάχος της επένδυσης του παρακείμενου πλευρικού κελύφους.

Κάτω μέρος (πυθμένας):

Ελάχιστο πάχος από την εξίσωση: (3.28)

Σε καμία περίπτωση το ελάχιστο πάχος του πολύστρωτου μονής επιδερμίδας δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από 5,5 mm.

Για όλους τους τύπους σκαφών, το ελάχιστο πάχος του κελύφους πυθμένα, όπως απαιτείται από το Pt 8, Κεφ. 3, 3.4 Πυθμένας 3.4.3 και το Pt 8, Κεφ. 3, 3.4 Πυθμένας 3.4.5, πρέπει να εκτείνεται μέχρι τη γραμμή του chine ή 150 mm πάνω από την ίσαλο γραμμή του στατικού φορτίου, όποιο από τα δύο είναι μεγαλύτερο.

Πλευρά:

Ελάχιστο πάχος από την εξίσωση: (3.28)

Σε καμία περίπτωση το ελάχιστο πάχος της επένδυσης μονής επιδερμίδας δεν πρέπει να λαμβάνεται μικρότερο από 5 mm.

Skeg :

Το πάχος της επένδυσης του skeg δεν πρέπει, γενικά, να είναι μικρότερο από το πάχος της καρίνας στον πυθμένα ή από το 1,5 πλάσιο του πάχους του κάτω κελύφους στις πλευρές, όποιο από τα δύο είναι μεγαλύτερο, βλέπε επίσης Pt 8, Κεφ. 3, 5.10 Κατασκευή skeg.

3.2.1.4 RINA

Οι απαιτήσεις του RINA [11] είναι σε απλούστερη μορφή από τις υπόλοιπες κλάσεις, καθώς δεν χρησιμοποιεί εμπειρικούς τύπους για τον προσδιορισμό των ελάχιστων απαιτήσεων του πάχους. Αντίθετα στο εδάφιο, Rules for Pleasure Yachts 2022 - Part B 1.7.2022, Chapter 4, παρουσιάζει πίνακα με τα ελάχιστα επιτρεπόμενα πάχη για single skin και sandwich κατασκευές ανάλογα με την δομική διάταξη της κατασκευής. Πιο συγκεκριμένα, οι ελάχιστες επιτρεπόμενες τάσεις σχεδίασης και τα ελάχιστα πάχη προσδιορίζονται από τους ακόλουθους Πίνακες 3.27, 3.28 :

Πίνακας 3.27: Ελάχιστες τάσεις [11]

Member	Allowable stresses	
	1	2
Keel, bottom plating	0,4 σ	0,8 σ
Side plating	0,4 σ	0,8 σ
Deck plating	0,4 σ	0,8 σ
Bottom longitudinals	0,6 σ_t	0,9 σ_t
Side longitudinals	0,5 σ_t	0,9 σ_t
Deck longitudinals	0,5 σ_t	0,9 σ_t
Floors and girders	0,4 σ_t	0,8 σ_t
Frames and reinforced side stringers	0,4 σ_t	0,8 σ_t
Reinforced beams and deck girders	0,4 σ_t	0,8 σ_t
<p>Note 1: σ(N/mm²): the ultimate bending strength for single-skin laminates; the lesser of the ultimate tensile strength and the ultimate compressive strength for sandwich type laminates. In this case the shear stress in the core is to be no greater than 0,5 R_s, where R_s is the ultimate shear strength of the core material; σ_t(N/mm²): the ultimate tensile strength of the laminate.</p>		

Πίνακας 3.28: Ελάχιστα πάχη [11]

Member	Single-skin laminate	Sandwich laminate (1)
Keel, bottom plating	5,5	4,5/3,5
Side plating	5	4/3
Inner bottom plating	5	4,5/3,5
Strength deck plating	4	3/2
Lower deck plating	3	2/2
Subdivision bulkhead plating	2,5	2/2
Tank bulkhead plating	4,5	4/3
Side superstructures	2,5	2/2
Front superstructures	3	2,5/2,5
Girders-floors	-	2/2
Any stiffeners	-	2 (2)
(1) The first value refers to the external skin, the second refers to the internal skin		
(2) Intended to refer to the thickness of the layers encapsulating the core		

3.2.1.5 BV (BUREAU VERITAS)

Ο Bureau Veritas (BV) [3] στο εδάφιο HULL IN COMPOSITE, PLYWOOD, AND HIGH DENSITY POLYETHYLENE MATERIALS, 2022, χρησιμοποιεί εμπειρικούς τύπους συναρτήση του φορτίου σχεδιασμού για την γενική περίπτωση και για πλευρικό κέλυφος που υπόκειται σε πίεση κρούσης, καθώς επίσης και των διαστάσεων της πλάκας που υπόκειται στα φορτία αυτά, με στόχο τον προσδιορισμό του ελάχιστου πάχους της. Αντίθετα με τον DNV και τον LR δεν παρέχει πληροφορίες για το ελάχιστον επιφανειακό βάρος ενίσχυσης, καθώς επίσης δεν παρέχει πληροφορίες για την περίπτωση πλακών sandwich. Πιο συγκεκριμένα αναφέρει :

Σύμβολα

λ : Συντελεστής επίδρασης γήρανσης που λαμβάνεται ίσος με: $\lambda = 1,05$

μ : Συντελεστής αναλογίας διαστάσεων του στοιχειώδους πάνελ πλάκας, ίσος με:

$$\mu = 1,21 * \sqrt{1 + 0,33 * \left(\frac{s}{l}\right)^2} - 0,69 * \frac{s}{l} \leq 1 \quad (3.36)$$

όπου:

l : Μήκος, σε m, της μακρύτερης πλευράς της πλάκας.

s : Μήκος, σε m, της κοντύτερης πλευράς της πλάκας.

m : Συντελεστής κατάστασης του ακραίου δυσκαμψίας, όπως ορίζεται στο section 7, [4.1.2] α)

R : Εφελκυστική τάση διαρροής του HDPE, σε MPa, όπως ορίζεται στο [2.2].

Γενική περίπτωση

Κατά κανόνα, το πάχος της επένδυσης που υπόκειται σε πλευρική πίεση (θαλάσσια ή εσωτερική πίεση και κρούση πυθμένα) δεν πρέπει να είναι μικρότερο από από την τιμή που προκύπτει, σε mm, από τον ακόλουθο τύπο:

$$t = 22.4 * \lambda * \mu * s \sqrt{\frac{p}{\sigma_{locam}}} \quad (3.37)$$

όπου:

s : Μήκος, σε m, της κοντύτερης πλευράς της πλάκας.

p :

- τοπικές πιέσεις στη θάλασσα ή εσωτερικές πιέσεις, σε kPa, όπως ορίζονται στο σημείο 1, [1.1.2] β)
- πίεση κτυπήματος πυθμένα για κύτος πλάνης, p_{sl} , σε kPa, όπως ορίζεται στο σημείο 1, [1.1.2] β) υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη τιμή του K_{2min} ίση με 0,5

σ_{locam} : Τοπική επιτρεπόμενη τάση κάμψης, σε MPa , όπως ορίζεται στο [1.3], σε σχέση με τον τύπο του φορτίου.

Πάνελ του πλευρικού κελύφους υπό πίεση κρούσης

Κατά κανόνα, το πάχος της επένδυσης του πλευρικού κελύφους που υποβάλλεται σε κρουστική πίεση δεν πρέπει να είναι μικρότερο από την τιμή που προκύπτει, σε mm, από τους ακόλουθους τύπους:

- εάν $s < 0,6$ m

$$t = 17.3 \sqrt{\frac{1}{l_{ssi}}} \lambda n_p \mu s \sqrt{\frac{p}{\sigma_{locam}}} \quad (3.38)$$

- εάν $s > 0,6$ m

$$t = 17.3 \sqrt{\frac{1.5s^2 - 0.18}{l_{ssi}s}} \lambda n_p \mu \sqrt{\frac{p}{\sigma_{locam}}} \quad (3.39)$$

όπου:

s : Μήκος, σε m, της κοντύτερης πλευράς της πλάκας

l_{ssi} : Μήκος, σε m, ίσο με: $l_{ssi} = 0,6 (1 + s) \leq l$

p : Πίεση, σε kN/m², που πρέπει να λαμβάνεται ίση με: $p = C_p * P_{ssmin}$

P_{ssmin} : Πίεση κρούσης στο πλευρικό κέλυφος, σε kN/m², όπως ορίζεται στο section 1, [1.1.2] β)

C_p : Συντελεστής πίεσης ίσος με: $C_p = -0.98s^2 + 0.3s + 0.95 \geq 0.8$

n_p : Συντελεστής που λαμβάνεται ίσος με: $n_p = 0,80$

σ_{locam} : Τοπική επιτρεπόμενη τάση κάμψης, σε MPa, όπως ορίζεται στο [1.3].

Κανόνας ελάχιστου πάχους

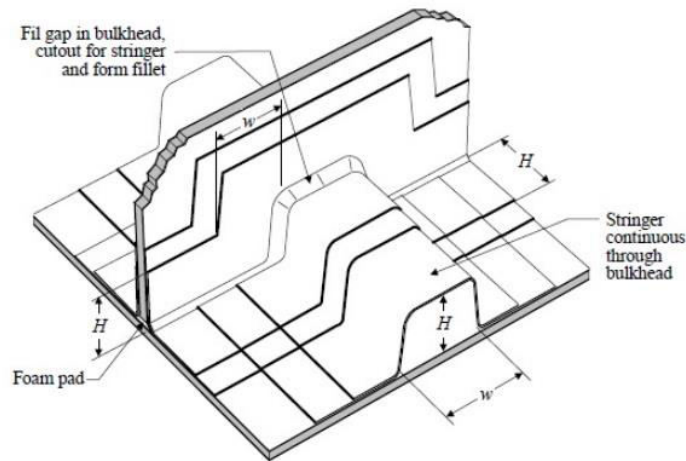
Κατά κανόνα, τα πάχη, σε mm, των πλακών που υπολογίζονται σύμφωνα με το παρόν τμήμα δεν πρέπει να είναι μικρότερα από 10 mm.

3.2.2 Δομική Διάταξη

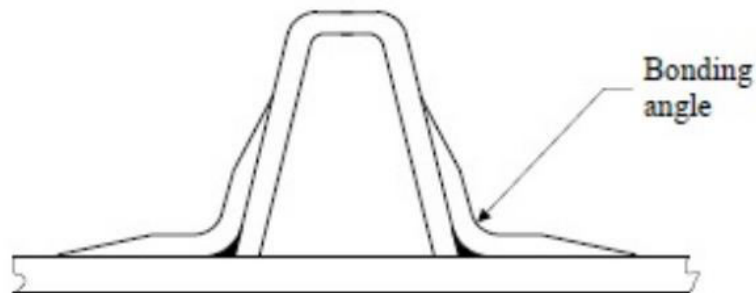
Μετά την εξέταση των κανονισμών δομικής διάταξης των νηογνωμόνων, είναι προφανές ότι υπάρχουν πολλές ομοιότητες και κάποιες διαφορές στις απαιτήσεις. Όλοι οι νηογνώμονες εστιάζουν στην ασφάλεια και διασφαλίζουν ότι η δομική διάταξη των σκαφών από FRP είναι σχεδιασμένη ώστε να αντέχει στις δυνάμεις και καταπονήσεις που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία.

Μία από τις σημαντικότερες απαιτήσεις σε όλες τις κλάσεις είναι η χρήση διαμηκών και εγκάρσιων ενισχυτικών για τη στήριξη της δομής της γάστρας. Απαιτείται επίσης συνήθως η ύπαρξη ενισχυμένων πλαισίων σε καίριες περιοχές του σκάφους, όπως το κατάρτι, την καρίνα, τον χώρο του μηχανοστασίου και τα μεγάλα ανοίγματα στο κατάστρωμα. Η ροπή αντίστασης αυτών των διαμηκών και εγκάρσιων ενισχυτικών και στηρίξεων πρέπει να πληροί μια ορισμένη τιμή για να εξασφαλιστεί ότι είναι αρκετά ισχυρά ώστε να στηρίζουν το βάρος του σκάφους και να αντέχουν τις εξωτερικές δυνάμεις. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται και από τις πέντε κλάσεις, στην σωστή σύνδεση διαμηκών ενισχυτικών και εγκάρσιων διαφραγμάτων, στην σωστή ευθυγράμμιση τους καθώς και στην χρήση μπρακέτων, όπου αυτά χρειάζονται. Σε γενικές γραμμές, όλοι οι νηογνώμονες παρέχουν συγκεκριμένες πληροφορίες σχετικά με τις κεντρικές ενισχύσεις (center girder), τις εγκάρσιες και διαμήκειες ενισχύσεις. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένες διαφορές στο επίπεδο λεπτομέρειας που παρέχεται. Υπάρχουν ορισμένες διαφορές στις απαιτήσεις μεταξύ των νηογνωμόνων, ιδίως στους τύπους που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αναγκαίας ροπής αντίστασης των ενισχύσεων. Για παράδειγμα, ο ABS [8] απαιτεί διαφορετικό τύπο για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης

των ενισχυμένων πλαισίων σε σύγκριση με τον RINA [11] και τον DNV [9]. Ωστόσο, οι διαφορές στους τύπους είναι σχετικά μικρές και δεν επηρεάζουν σημαντικά τις συνολικές απαιτήσεις της δομικής διάταξης. Επιπλέον, ο ABS [8] παρέχει λεπτομερείς απαιτήσεις για το σχεδιασμό των διαμήκων ενισχυτικών και απαιτεί η κατασκευή τους να εκτείνεται συνεχόμενα μέσα από τα διαφράγματα, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.24. Επίσης το πάχος της γωνίας σύνδεσης (bonding angle) δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το πάχος του πέλματος των ενισχυτικών, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.25.



Σχήμα 3.5: Σύνδεση διαφράγματος με διαμήκες ενισχυτικό ,ABS[8]

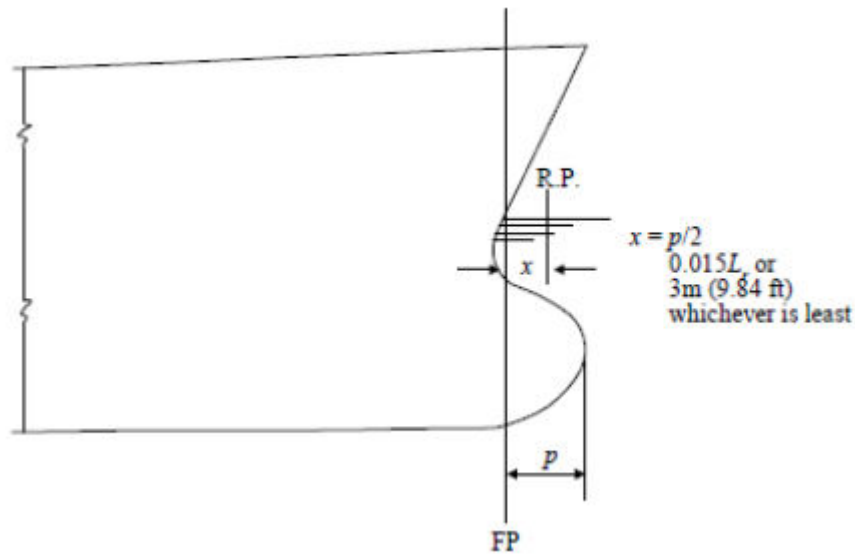


Σχήμα 3.6: Σύνδεση ενισχυτικού με γάστρα , ABS [8]

Ο DNV [9] παρέχει επίσης λεπτομερείς απαιτήσεις για το σχεδιασμό των κεντρικών ενισχυτικών, συμπεριλαμβανομένης της καθοδήγησης σχετικά με τον αριθμό και το μέγεθος των απαιτούμενων ενισχυτικών. Ο LR [5] παρέχει λεπτομερείς απαιτήσεις για την απόσταση μεταξύ των ενισχύσεων, το μέγεθος και το υλικό τους. Ο DNV [9] παρέχει επίσης λεπτομερείς απαιτήσεις για τις αποστάσεις και το μέγεθος των ενισχυτικών, αλλά δεν καθορίζει απαιτήσεις για το υλικό. Σύμφωνα με αυτόν, τα διαφράγματα πρέπει να είναι διατεταγμένα και σχεδιασμένα ώστε να ανταποκρίνονται στις γενικές και τοπικές απαιτήσεις

αντοχής. Πρέπει να μεταφέρουν και να κατανέμουν τα πλευρικά φορτία σχεδιασμού στην γάστρα και το κατάστρωμα, να παραλαμβάνουν δυνάμεις αντίδρασης από τα διαμήκη ενισχυτικά και να φέρουν επαρκή ανακούφιση αντιστάθμισης τάσεων γύρω από τις εγχοπές. Ο ABS [8] παρέχει καθοδήγηση για το μέγεθος και το υλικό των ενισχυτικών καθώς και για το είδος της σύνδεσης των ενισχυτικών με τα διαφράγματα, αλλά δεν παρέχει συγκεκριμένες απαιτήσεις για την μεταξύ τους απόσταση. Ο LR [5] έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις για τη ροπή αντίστασης τους, την απόσταση μεταξύ τους και την πρόσδεσή τους στη γάστρα. Η ροπή αντίστασης των ενισχυτικών υπολογίζεται με τη χρήση εμπειρικού τύπου που λαμβάνει υπόψη του την πίεση αντοχής και την απόσταση μεταξύ ενισχυτικών. Ο LR [5] απαιτεί ότι η απόσταση των ενισχυτικών δεν υπερβαίνει 1,2 φορές το ύψος των ενισχυτικών ή τα 2 μέτρα, όποιο από τα δύο είναι μικρότερο. Η σύνδεση των ενισχυτικών στη γάστρα για σκάφη από FRP πρέπει να γίνεται με πλαστικοποίηση. Ο RINA [11], παρέχει ένα πιο γενικό σύνολο απαιτήσεων στο οποίο γίνεται αναφορά στην χρήση ενός κεντρικού ενισχυτικού, ενώ επισημαίνει πως για πλάτος πατώματος μεγαλύτερο των 6 μέτρων, απαιτείται η χρήση πρόσθετων διαμηκών ενισχυτικών ώστε η απόσταση αυτών από την κεντρική ενίσχυση και το πλαϊνό κέλυφος να μην υπερβαίνει τα 3 μέτρα. Όμοιες κατευθυντήριες γραμμές με τον RINA [11], δίνει και ο BV [3]. Όλοι οι νηογνώμονες αναφέρουν πως στην περίπτωση πλαϊνών ενισχυτικών (side girders), αυτά θα πρέπει να στηρίζονται σε εγκάρσιους νομείς ή διαφράγματα.

Όλοι οι νηογνώμονες προβλέπουν τη χρήση ενισχυμένων διαφραγμάτων, τα οποία είναι εγκάρσιες κατασκευές με μεγαλύτερη αντοχή από τα συνήθη διαφράγματα. Χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν και να κατανέμουν τα πλευρικά φορτία σχεδιασμού στην γάστρα και το κατάστρωμα, να παραλαμβάνουν δυνάμεις αντίδρασης από τα διαμήκη ενισχυτικά. Όλοι οι νηογνώμονες παρέχουν τύπους για τον υπολογισμό της ροπής αντίστασης των ενισχυμένων διαφραγμάτων. Σύμφωνα με τον ABS [8], τα ενισχυμένα διαφράγματα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με οριζόντιες ενισχύσεις, οι οποίες δεν απαιτούνται από τις άλλες εταιρείες. Ο Lloyd's Register [5] απαιτεί ότι σε σκάφη με μήκος $L > 100$ m, τα ενισχυμένα διαφράγματα πρέπει να βρίσκονται τουλάχιστον στο 25% και 75% του μήκους. Ο RINA, αντίθετα, απαιτεί ενισχυμένα διαφράγματα να τοποθετούνται κατά μήκος μεγάλων ανοιγμάτων στο κατάστρωμα καιρού, στο μηχανοστάσιο και σε ιστιοφόρα σκάφη. Για σκάφη μεγαλύτερα των 15 μέτρων, ο ABS [8] αναφέρει ότι είναι απαραίτητη η χρήση διαφραγμάτων σύγκρουσης (collision bulkhead) σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από $0,05L$ ή 10 μέτρων (όποιο είναι μικρότερο) πίσω από το σημείο αναφοράς, το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 3.21.



Σχήμα 3.7: Διάφραγμα σύγκρουσης ,ABS [8]

Όμοια απαίτηση για το διάφραγμα σύγκρουσης αναφέρει και ο RINA [11], ενώ ο LR [5] δεν δίνει πληροφορίες για την θέση στην οποία πρέπει να βρίσκεται, αντιθέτως ορίζει τις απαιτήσεις αντοχής του. DNV [9] και BV [3] δεν κάνουν ξεχωριστή αναφορά στα διαφράγματα σύγκρουσης.

Όλοι οι νηογνώμονες απαιτούν τοπική ενίσχυση στο χώρο του μηχανοστασίου. Πιο συγκεκριμένα, ο LR [5] αναφέρει τις ελάχιστες μηχανικές ιδιότητες των ενισχυτικών πλακών στον χώρο που εκτείνεται το μηχανοστάσιο, για single skin και sandwich κατασκευές, καθώς επίσης και ανάλογα τον τύπο του σκάφους (εκτοπίσματος και μη εκτοπίσματος). Επιπλέον απαιτεί τον καθορισμό της αντοχής για κάθε στρώση της ενίσχυσης. Σε καμία περίπτωση το πάχος single skin πλακών δεν πρέπει να είναι μικρότερο των 3 mm. Διαφορετική προσέγγιση έχει ο ABS, ο οποίος απαιτεί ο κατασκευαστής να κάνει ξεχωριστή μελέτη ώστε οι ενισχύσεις του μηχανοστασίου να έχουν την απαιτούμενη δυσκαμψία ώστε να αντέχουν στις χειρίστες συνθήκες λειτουργίας. Κακή ευθυγράμμιση του άξονα, τοπικές παραμορφώσεις και δονήσεις πρέπει να ληφθούν υπόψιν. Παρόμοια μελέτη σεναρίων προτείνει και ο BV, ο οποίος κάνει αναφορά και στην επιλογή εδράνων στήριξης. Τα έδρανα στήριξης της μηχανής πρέπει να είναι τοποθετημένα πάνω σε διαμήκη ενισχυτικά. Ξεχωριστό εδάφιο παρέχει ο LR για τις στηρίξεις της μηχανής όπως επίσης και ο ABS. Εκτεταμένη μελέτη κάνει και ο RINA για τον χώρο του μηχανοστασίου, του οποίου οι κανονισμοί είναι παρόμοιοι με τους υπόλοιπους, επιπρόσθετα όμως παρέχει πληροφορίες και για την χρήση διπύθμενου όπως επίσης και για την διάταξη ανθρωποθυρίδων και ανοιγμάτων για τον σωστό έλεγχο και την επιθεώρηση του μηχανοστασίου.

Όσον αφορά τις δεξαμενές, ο ABS κάνει ξεχωριστή αναφορά για κατασκευές δεξαμενών από σύνθετα υλικά. Σύμφωνα με αυτόν, οι δεξαμενές καυσίμων και νερού προτείνεται να μην είναι μέρος της συνολικής κατασκευής αλλά να τοποθετούνται ξεχωριστά. Όταν κάτι τέτοιο

δεν είναι εφικτό, οι δεξαμενές πρέπει να αποτελούνται από single skin πολύστρωτα, με μόνη εξαίρεση την άνω επιφάνεια της δεξαμενής, η οποία μπορεί να είναι φτιαγμένη και από sandwich. Σε περίπτωση που οι δεξαμενές είναι μέρος της κατασκευής τα ενισχυτικά δεν πρέπει να διαπερνάνε τα όρια της δεξαμενής. Επιπλέον, αναφέρει πως όλες οι εσωτερικές επιφάνειες των δεξαμενών οφείλουν να είναι ενισχυμένες με Chopped Strand Mat επιφανειακού βάρους 600 g/m^2 ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις αντοχής. Ειδική βαφή πρέπει να χρησιμοποιείται για την αποφυγή ανάφλεξης στην περίπτωση εύφλεκτων υγρών ενώ στην περίπτωση αποθήκευσης Fresh Water πρέπει να χρησιμοποιείται μη τοξική ρητίνη ως βαφή. Διαφορετική προσέγγιση έχει ο LR, ο οποίος παρουσιάζει απαιτήσεις μόνο για την περίπτωση των δεξαμενών ως μέρος της ολικής κατασκευής (integral/deep tank). Πιο συγκεκριμένα, αναφέρει πως τα διαφράγματα (bulkheads) των δεξαμενών μπορούν να είναι είτε από κατασκευές sandwich, είτε single skin κατασκευές. Στην πρώτη περίπτωση, δεν απαιτείται η ύπαρξη ενισχυτικών, ενώ στην δεύτερη είναι αναγκαία η ύπαρξη κάθετων ή οριζόντιων ενισχυτικών σε κοντινές μεταξύ τους αποστάσεις. Περαιτέρω μελέτη αντοχής απαιτεί ο LR καθώς προτείνει αναλυτικούς τύπους για τον υπολογισμό των καταπονήσεων που δέχονται οι δεξαμενές, σύμφωνα με την πίεση σχεδίασης. Αναφέρεται επίσης ότι το ελάχιστο πάχος των δεξαμενών από single skin κατασκευή δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 4.5 mm. Αναφορά στις δεξαμενές δεν γίνεται από τον DNV και τον BV καθώς ούτε από τον RINA.

Ένα από τα σημαντικότερα μέρη των κανονισμών σε όλους τους νηογνώμονες είναι η ανάγκη για τακτικές επιθεωρήσεις και έρευνες ώστε να διασφαλίζεται ότι η δομική διάταξη του σκάφους εξακολουθεί να συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις. Αυτό περιλαμβάνει τακτικές επιθεωρήσεις κατά τη διάρκεια της κατασκευής και σε τακτά χρονικά διαστήματα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του σκάφους.

Ιδιαίτερη προσοχή, από όλους τους νηογνώμονες, δίνεται επίσης στα ανοίγματα, τις τρύπες και τις απότομες ακμές της κατασκευής καθώς έχουν την τάση να μειώνουν την αντοχή της. Όλοι οι νηογνώμονες επισημαίνουν πώς οι οπές πρόσβασης και φωτισμού πρέπει να έχουν κατάλληλη ακτίνα και να τοποθετούνται ανάλογα με τις ανάγκες, μακριά από περιοχές συγκέντρωσης φορτίου ή υψηλών τάσεων. Όλες οι εκτεθειμένες ακμές με τη μορφή κοπών ή οπών στα ελάσματα FRP μονής επιδερμίδας πρέπει να σφραγίζονται με ρητίνη.

Άλλο ένα πολύ σημαντικό δομικό στοιχείο των σκαφών είναι το κατάστρωμα. Ο LR αναφέρει πολύ αναλυτικά τις απαιτήσεις αντοχής και ενίσχυσης του κύριου καταστρώματος, του καταστρώματος αντοχής (strength deck) όπως επίσης και του καταστρώματος καιρού (weather deck), για τις περιπτώσεις που τα παραπάνω συμπίπτουν ή και όχι. Επίσης παρέχει πληροφορίες και για τα εσωτερικά καταστρώματα. Ιδιαίτερη σημασία δίνει επίσης στην σύνδεση του καταστρώματος με την γάστρα. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρει πως οι συνδέσεις της γάστρας με το κατάστρωμα πρέπει, γενικά, να είναι βιδωτές και υπερδεσμευμένες. Πρέπει επίσης να χρησιμοποιείται κατάλληλο στεγανοποιητικό υλικό. Παρόμοιες απαιτήσεις έχει και ο ABS ο οποίος απαιτεί το πάχος της φλάτζας (καταστρώματος και γάστρας) να είναι ίδιο με

την υπόλοιπη κατασκευή. Σύμφωνα με τον BV, οι συγκολλητικές συνδέσεις δομικών στοιχείων εξετάζονται με άμεσο υπολογισμό λαμβάνοντας υπόψη τη διατμητική δύναμη που ασκείται στις συγκολλητικές συνδέσεις, την επιφάνεια της σύνδεσης, τα χαρακτηριστικά των συγκολλητικών συνδέσεων και τον συντελεστή ασφαλείας που ορίζονται από την κλάση. Παρόμοιες απαιτήσεις με τον BV παρουσιάζει και ο DNV ο οποίος επισημαίνει την σημασία μελέτης των δεσμών για πιθανή συγκέντρωση φορτίων.

Συμπερασματικά, όλοι οι οργανισμοί παρέχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις, με τον ABS και τον LR να παρέχουν ένα πιο ολοκληρωμένο σύνολο απαιτήσεων συγκριτικά με τους υπόλοιπους 3. Ιδιαίτερα ο LR, δίνει μεγάλη έμφαση στον καθορισμό της αντοχής κάθε δομικού στοιχείου ξεχωριστά παρέχοντας ένα σύνολο εμπειρικών τύπων πλήρως ορισμένων και εξειδικευμένων ανάλογα την περίπτωση. BV και DNV παρέχουν στον σχεδιαστή ναυπηγό ένα πλήρες οδηγό απαιτήσεων ο οποίος δίνει έμφαση στα σημαντικότερα δομικά στοιχεία του σκάφους, παράλληλα όμως προτείνουν ειδική μελέτη περιπτώσεων, όπου αυτή χρειάζεται. Τέλος ο RINA, προσφέρει μια γενικότερη εικόνα κανονισμών όσον αφορά την δομική διάταξη του σκάφους, εστιάζοντας στα καίρια σημεία, τα οποία όμως είναι πλήρως ορισμένα.

3.3 Τελικά συμπεράσματα/ Ανακεφαλαίωση

Από τα παραπάνω, είναι φανερό πως ο Lloyd's Register παρέχει την πιο ολοκληρωμένη σειρά απαιτήσεων, στις περισσότερες πτυχές που αναφέραμε. Όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων, οι εμπειρικοί τύποι που προτείνει ο LR, είναι πολύ κοντά στις πραγματικές ιδιότητες των δοκιμών που μετρήσαμε, κατά την πειραματική διαδικασία. Επίσης, όσον αφορά τις απαιτήσεις ελαχίστων παχών, παρέχει ένα σύνολο προσεγγιστικών τύπων για single skin και sandwich πολύστρωτα, ενώ συμπληρωματικά παρουσιάζει και πίνακες ελάχιστης ενίσχυσης ανάλογα το κατασκευαστικό μέρος του σκάφους. Επιπλέον, παρέχει μια πολύ αναλυτική εικόνα αναφορικά με τις δομικές διατάξεις για τα πλαστικά σκάφη, εκτοπίσματος και πλαναρίσματος, δίνοντας μεγάλη έμφαση στις απαιτήσεις αντοχής και ασφάλειας της κατασκευής.

Ο ABS, όσον αφορά τις απαιτήσεις ελαχίστων παχών, παρέχει πληροφορίες με βάση εμπειρικούς τύπους για single skin και sandwich κατασκευές για περιπτώσεις πολύστρωτων με ίδιες αλλά και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες στις διευθύνσεις warp και fill, αντίθετα όμως παρέχει λίγες πληροφορίες σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων. Σχετικά με τα πάχη των στρώσεων, η προσέγγιση του έχει μικρή απόκλιση από τις πραγματικές τιμές, παρόλα αυτά προτείνεται η χρήση του ISO-12215 καθώς το σφάλμα του τελευταίου είναι σημαντικά μικρότερο. Παρόμοιες πληροφορίες με τον LR, παρέχει για την δομική διάταξη της κατασκευής, με χρήση κατάλληλων σχημάτων, όπου αυτά είναι απαραίτητα, για την σωστή κατανόηση των κανονισμών από τον σχεδιαστή ναυπηγό.

Ο DNV, αναφορικά με την απαίτηση ελαχίστων παχών περιορίζεται σε πίνακες ελάχιστης ενίσχυσης, ενώ λίγες πληροφορίες δίνει για τις ελάχιστες μηχανικές ιδιότητες των πολύστρωτων, καθώς προτείνουν θεωρητικές σχέσεις υπολογισμού των ιδιοτήτων σύμφωνα

με την μικρομηχανική των υλικών. Επιπλέον, οι απαιτήσεις για την δομική διάταξη των κατασκευών συγκριτικά με τον LR και τον ABS είναι πιο γενικές και εστιάζουν στα πιο καίρια σημεία.

Ο BV χρησιμοποιεί μόνο εμπειρικούς τύπους για τον προσδιορισμό των ελάχιστων παχών, για 2 μόνο περιπτώσεις, ενώ έχει παρόμοια προσέγγιση με τον DNV αναφορικά με τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των πολύστρωτων. Επιπρόσθετα όμως, παρέχει πίνακα με τις ελάχιστες παραμορφώσεις θραύσης τους. Παρόμοιες πληροφορίες με τον DNV, παρουσιάζει και στο εδάφιο της δομικής διάταξης καθώς συγκριτικά με τους LR και ABS θεωρείται ελλιπής.

Τέλος ο RINA παρέχει το πιο ελλιπές σύνολο απαιτήσεων το οποίο όμως είναι αρκετά ξεκάθαρο για τον σχεδιαστή ναυπηγό, δίνοντας έμφαση στα πιο καίρια σημεία. Επιπλέον, παρέχει εμπειρικούς τύπους, παρόμοιους με του LR, για την μέτρηση ιδιοτήτων ανάλογα με την περιεκτικότητα των πολύστρωτων σε ίνες, τα οποία όμως περιορίζονται μόνο για πολύστρωτα από Chopped Strand Mat. Όσον αφορά τις απαιτήσεις ελαχίστων παχών, παρέχει πίνακα με απαιτήσεις παχών ανάλογα το κατασκευαστικό μέρος, χωρίς την χρήση προσεγγιστικών τύπων, ο οποίος όμως είναι αρκετά ξεκάθαρος για τον σχεδιαστή ναυπηγό. Οι απαιτήσεις δομικής διάταξης είναι παρόμοιοι με του BV και του DNV.

Βιβλιογραφία

[1] Dubois E., “Superyachts”, Sailing Yacht Design Practice edited by Claughton, Wellicome & Shenoι, 1998.

[2] Νικόλαος Γ. Τσούβαλης (1998). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα.

[3] *NR546 hull in composite, plywood and high density polyethylene materials Marine & Offshore*. Available at: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr546-hull-composite-plywood-and-high-density-polyethylene-materials> (Accessed: March 16, 2023).

[4] DNV. (2022). *DNV-RU-SHIP Pt.2 Ch.3 Non-Metallic Materials*, 67.

[5] Lloyd's Register. (2022). *Rules and Regulations for the Classification of Special Service Craft*, 1198.

[6] Shenoι. (1993). *Composite materials in maritime structures, volume 2*. Cambridge University Press.

[7] Shenoι. (1993). *Composite materials in maritime structures, volume 1*. Cambridge University Press.

[8] *American Bureau of Shipping. (2022). Rules for Building and Classing High Speed Craft 2022. Part 3, Hull Construction and Equipment*.

[9] DNV. (2022). *DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.4 Hull Structural Design, Fibre Composite and Sandwich Constructions*, 69.

[10] Lloyd's Register. (2022). *Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, July 2022*, 511.

[11] RINA. (2022). *RES6 Rules for Pleasure Yachts 2022 - Part B*, 298.

[12] BS EN ISO 12215-1:2000. (n.d.). Small craft - hull construction and scantlings. *Part 1: Materials: Thermosetting Resins, Glass-Fibre Reinforcement, Reference Laminate*.

[13] BS EN ISO 12215-2:2002. (2002). Small craft - hull construction and scantlings. *Part 2: Materials: Core Materials for Sandwich Construction, Embedded Materials*.

- [14] EN ISO 12215-4:2002. (2002). Small craft - hull construction and scantlings. *Small Craft - Hull Construction and Scantlings - Part 4: Workshop and Manufacturing (ISO 12215-4:2002)*.
- [15] ISO527-4 (1997). Plastics – Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites, Copenhagen.
- [16] *Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by Beam Flexure*. C393/C393M. (n.d.). Retrieved May 6, 2023, from https://www.astm.org/c0393_c0393m-20.html
- [17] *ISO 1172:1996*. ISO. (2021, October 5). Retrieved May 6, 2023, from <https://www.iso.org/standard/5750.html>
- [18] *ISO 1183-1:2019*. ISO. (2019, May 1). Retrieved May 6, 2023, from <https://www.iso.org/standard/74990.html>
- [19] Δημήτρης Ι. Παντελής(2008). Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Παπασωτηρίου, Ελλάδα. Παπανικολάου Γ, Μουζάκης Δ (2007). Σύνθετα Υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Ελλάδα.
- [20] *Standard test method for facesheet properties of sandwich constructions by long beam flexure*. D7249/D7249M. (n.d.). Retrieved May 6, 2023, from https://www.astm.org/d7249_d7249m-20.html
- [21] *Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. D790. (n.d.). Retrieved May 6, 2023, from <https://www.astm.org/standards/d790>
- [22] (PDF) *failure modes of composite sandwich beams - researchgate (no date)*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/226587789_Failure_Modes_of_Composite_Sandwich_Beams (Accessed: March 16, 2023).
- [23] DNV. (2022). *DNV-RU-HSLC Pt.3 Ch.1 Design Principles, Design Loads*, 44.
- [24] ISO527-1 (1996). Plastics – Determination of tensile properties. Part 1: General Principles, Copenhagen
- [25] Martin R. Tant Hugh L. N. McManus, Martin E. Rogers (1995). *High-Temperature Properties and Applications of Polymeric Materials*, American Chemical Society, U.S.A.
- [26] Northam G. Burton, Ransone Philip O, Schwind Francis A, Rivers H. Kevin (1999). *CarbonCarbon Piston Architectures*, NASA, US.
- [27] A.H. Cardon, G. Verchery (1985). *Mechanical Characterisation of Load Bearing FibreComposite Laminates*, Elsevier Applied Science Publishers, London-New York.

[28] Carlos J Hilado (1990). *Flammability Handbook for Plastics*, Technomic Publishing Company, U.S.A

[29] Mangalgi (1999). *Composite Materials for Aerospace Applications*, Aeronautical Development Agency, India

[30] Alshahrani H, Ahmed A. Study on Flexural Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic Sandwich Composites Using Liquid Thermoplastic Resin. *Polymers* (Basel). 2022 Sep 27;14(19):4045. doi: 10.3390/polym14194045. PMID: 36235992; PMCID: PMC9570787.

[31] Bardoutsos A. (2020), *Study & Comparison of Classification Societies' Rules and Regulations on Metallic Material, Composite Materials & Design Loads of Small Crafts*, Diploma Thesis, School of Naval Architecture and Marine Engineering, National Technical University of Athens.

[32] *West system epoxy - marine grade resins & hardeners* (no date). Available at: <https://www.westsystem.com/wp-content/uploads/VacuumBag-7th-Ed.pdf> (Accessed: March 17, 2023).

DATA SHEETS



PRODUCT INFORMATION

OC® FABRICS
OC® AGIMAT FABRICS
(0°/90° + MAT)

PRODUCT DESCRIPTION

OC® Agimat Fabrics are a commonly used form of composite reinforcement composed of woven roving and chopped roving stitch-bonded into one fabric. This construction takes advantage of the bi-directional (0°/90°) reinforcement of woven roving plus the isotropic (360°) reinforcement of chopped glass fiber to provide excellent wet-out and conformability. The chopped glass fiber can be provided in the form of a pre-made mat or directly chopped (binderless) roving. The input fibers are designed to give controlled wet-out and excellent laminate properties.

PRODUCT APPLICATION

OC Agimat Fabrics offer excellent stiffness and impact resistance for cost-sensitive structural laminates. By combining woven roving and chopped glass, lay-up time, print-through, and resin usage are reduced leading to savings in labor and material costs. Stitch-bonding a binderless mat allows the fabric to maintain physical integrity when saturated with resin yet still retain the conformability required for fast laminate build-up; stitch-bonding with a pre-made mat yields a stiffer fabric with improved cutting and handling properties. The fabric delivers cost-effective solutions to your competitive reinforcement challenges, particularly large parts such as boat hulls and high-durability laminates such as underground storage vessels.

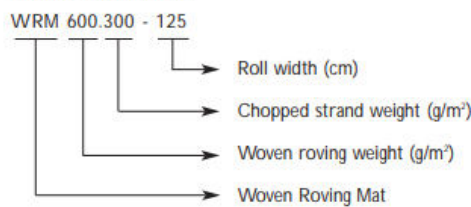
FEATURES

- ECONOMICAL, MULTI-USE FABRIC, FAST WET-OUT
- MULTI-DIRECTIONAL REINFORCEMENT
- RETAINS CONFORMABILITY EVEN WHEN RESIN SATURATED
- COMBINATION OF WOVEN ROVING AND CHOPPED STRAND MAT IN ONE FABRIC
- AVAILABLE IN A VARIETY OF WIDTHS AND WEIGHTS

BENEFITS

- LOWER FINISHED PART COST
- ENHANCED FATIGUE AND OFF-AXIS PROPERTIES
- IMPROVED HANDLING AND DURABILITY
- FAST, EFFICIENT LAMINATE THICKNESS BUILD-UP
- OFFERS DESIGN FLEXIBILITY FOR WIDE RANGE OF APPLICATIONS

PRODUCT NOMENCLATURE





KNYTEX® FABRICS
OC® AGIMAT FABRICS (0°/90° + MAT)

PHYSICAL PROPERTIES / AVAILABLE PRODUCTS

FAMILY	PRODUCT DESCRIPTION	PRODUCT CERTIFICATE			TOTAL WEIGHT (g/m ²)	WEIGHT UNIFORMITY (g/m ²)				STANDARD ROLL				
		DNV	LLOYD	GERM. LLOYD		YARN	ROVING	KNIT	WEIGHT (KG)	LENGTH (M)	WIDTH (MM)			
Agimat	WRM-300.300/125 cm	-	x	x	660	175	-	175	-	10	300	42	50	1250
	WRM-500.300/125 cm	x	x	x	832	288	-	234	-	10	300	39	37	1250
	WRM-500.450/125 cm	x	x	x	982	288	-	234	-	10	450	46	37	1250
	WRM-600.300/125 cm	x	x	x	910	288	-	312	-	10	300	42	37	1250
	WRM-600.300TW/125 cm	-	-	-	910	288	-	312	-	10	300	42	37	1250
	WRM-600.450/125 cm	x	x	x	1060	288	-	312	-	10	450	49	37	1250
	WRM-800.300/125 cm	x	x	x	1110	400	-	400	-	10	300	52	37	1250
	WRM-800.300TW/125 cm	-	-	-	1110	400	-	400	-	10	300	69	50	1250
	WRM-800.450/125 cm	x	x	x	1260	400	-	400	-	10	450	42	27	1250
	WRM-900.300/125 cm	x	x	x	1257	479	-	468	-	10	300	42	27	1250
WRM-1200.300TW/125 cm	-	-	-	1510	624	-	576	-	10	300	47	25	1250	
Agimat	WRM-150.600.150/125 cm	x	-	-	910	288	-	312	-	10	300	42	37	1250
(2 sides)	WRM-300.500.300/125 cm	x	-	-	1132	288	-	234	-	10	600	52	37	1250

SAMPLE MECHANICAL PROPERTIES

Sample Mechanical Properties of Laminate based on **WRM 800.300** (49% glass content by weight).

	WARP MEAN	WEFT MEAN
Tensile (ISO 527-4)		
Strength	245 MPa	220 MPa
Modulus	13.4 GPa	12.9 GPa
Flexural (ISO 14.125)		
Strength	352 MPa	341 MPa
Modulus	9.9 GPa	9.7 GPa



COMPOSITE SOLUTIONS



OWENS CORNING
WORLD HEADQUARTERS
ONE OWENS CORNING PARKWAY
TOLEDO, OHIO 43659
1.800.GETPINK
www.owenscorning.com/composites

OWENS CORNING LATIN AMERICA
AV. DAS NAÇÕES UNIDAS, 17.891-30. AND.
CEP - 04795-100
SÃO PAULO, BRAZIL
55.11.5514.7900

EUROPEAN OWENS CORNING
FIBERGLAS S. A.
CHAUSSEE DE LA HULPE, 166
B-1170 BRUSSELS
BELGIUM
32.2.674.82.11

OWENS CORNING ASIA/PACIFIC
HANOI BUILDING 3F
1-2-9 SHIKAKOEN, MINATO-KU
TOKYO, 105-0011 - JAPAN
81.3.5733.1671

This information and data contained herein is offered solely as a guide in the selection of a reinforcement. The information contained in this publication is based on actual laboratory data and field test experience. We believe this information to be reliable, but do not guarantee its applicability to the user's process or assume any responsibility or liability arising out of its use or performance. The user agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial compounds when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting results, we make no warranty of any kind, express or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this data sheet shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code or insurance regulation.

THE PINK PANTHER™ & © 2003 United Artists Corp. All rights reserved. The color PINK is a registered trademark of Owens Corning.
Pub No. 58502-B December 2003 Copyright © 2003 Owens Corning



Lantor Soric®TF

- The cost effective solution for closed mould processes
- Is used as core material, infusion medium and/or print blocker
- Is a pressure stable polyester nonwoven and compatible with all regular types of resin, including Polyester, Vinylester, Phenolic and Epoxy
- Is suitable for closed mould processes, including Infusion, RTM Light, RTM Heavy

Applications Lantor Soric®TF

- Marine: hulls, decks, and structures of boats and yachts
- Transportation: parts and panels of cars, trailers, trucks and RV's
- Mass transit: interior and exterior of trains, light rail and buses
- Leisure: kayaks, surfboards, pools and tubs
- Industrial: cladding panels, fans, containers and tanks
- Wind Energy: nacelle covers and spinners

The information contained in this document has been compiled in good faith by Lantor BV, but nevertheless no representation or warranty is given as to the accuracy or completeness of the (technical) information provided herein. Lantor BV can not be held liable of any damages arising from any (printing) errors or omissions in this information. Lantor BV reserves the right to make changes with respect to the information provide at any time without further notice.

Dimensional data

Properties		TF 1.5	TF 2	TF 3
Thickness	mm	1,5	2,0	3,0
Roll length	m	120	80	50
Roll width	m	1,27	1,27	1,27
Thickness loss at 0,8 bar	%	<25	<25	<25
Max processing temp.	°C	170	170	170
Resin uptake	kg/m ²	0,8	1,0	1,4
Dry weight	g/m ²	90	120	160
Density impregnated	kg/m ³	700	700	700

Typical mechanical properties of Lantor Soric®TF* impregnated with unsaturated polyester resin

Mechanical properties	unit	value	test method
Flexural strength	MPa	19	ASTM D790
Flexural modulus	MPa	1500	ASTM D790
Tensile strength across layers	MPa	7	ASTM C297
Compression strength: 10% strain	MPa	4	ISO 844
Shear strength	MPa	7	ASTM C273-61
Shear modulus	MPa	34	ASTM C273-61

*Soric®TF 2

Information

PO box 45 - 3900 AA
 Verlaat 22 - 3901 RG
 Veenendaal
 The Netherlands
 T +31(0) 318 537 111
 composites@lantor.com

enabling performance
www.lantor.com



V0.0/04.2015



Aircell HR - HTR

Aircell HR - HTR is a partially cross-linked, structural cellular PVC foam, ideal for composite sandwich structures. Compatible with most resin systems; polyester, vinylester, phenolic or epoxy. **Aircell** can be processed at room temperature or at any temperature below 80°C. Developed for the marine industry, windmills, transport and composite applications in general. **Aircell** can be supplied in different sheets, either rigid or flexible, to be adapted to different surface shapes. For series production **Aircell** can also be supplied in kit form to reduce processing time and wastage.

Technical Data Sheet - Aircell HR - HTR

Issue 03/13, Rev.6

Property	Method	Unit	HR 40	HR 45	HR 60	HTR 60	HR 80	HTR 80	HR 100	HR 130	HR 200
Nominal Density	ISO 845	kg/m3	40	48	60	60	80	80	100	130	200
Compressive Strength	ISO 844	Mpa	0,45	0,66	0,92	0,92	1,36	1,29	1,86	3,07	5,26
Compressive Modulus	ISO 844	Mpa	na	45	69	66	92	88	134	162	296
Compressive Modulus	DIN 53421	N/mm2	37	48	69	na	97	97	125	160	260
Tensile Strength	ASTM D 1623 B	Mpa	na	1,03	1,54	1,62	1,92	2,11	2,69	4,20	5,27
Tensile Strength	DIN 53571	N/mm2	0,7	1,10	1,30	na	2,00	2,00	2,70	3,80	6,20
Tensile Modulus	ASTM D 1623 B	Mpa	na	47	65	66	87	86	125	155	287
Tensile Modulus	DIN 53457	N/mm2	28	35	45	na	66	66	84	115	180
Shear Strength	ISO 1922	Mpa	0,45	0,63	0,90	0,93	1,28	1,30	1,64	2,50	3,67
Shear Modulus	ISO 1922	Mpa	na	14	19	19	27	26	35	47	65
Shear Modulus	ASTM C393	Mpa	13	15	22	na	30	30	38	50	75
Shear Strain	ISO 1922	%	8	10	16	16	23	23	27	30	30
Thermal Conductivity	ISO 8301	W/m.k	0,031	0,031	0,031	0,031	0,033	0,033	0,035	0,039	0,048
Water Absorption	ASTM 272	kg/m2	0,09	0,09	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,03	0,02
Thermal Bending Stability	DIN 53424	°C	80	80	85	100	85	100	90	95	100

Density tolerance $\pm 10\%$. Continuous operating temperature is -200°C to 70°C. Maximum processing temperature is dependent on time and the pressure applied, but can be processed up to 80°C. Material can be heat treated for higher temperature resistance of 100°C. For higher temperatures or any other issue, please contact MEL Composites for assistance.



Aircell is a Trade Mark of MEL Composites



Materiales Estructurales Ligeros, S.L. - Camí del Mig, 5 - 08340 - Vilassar de Mar (BCN) SPAIN. Tel: + 34 93 741 54 54 Fax: + 34 93 799 46 00 www.melcomposites.com



This data sheet may be subjected to revision and change as the data is derived from testing and long experience. The data provided is for the nominal density, is average data and should be treated as such. Calculations based on this data should be verified by actual tests. The data is furnished without liability for the company and does not constitute a warranty or representation in respect of the material or its use.

Technical Datasheet



AME™ 6001 INF-135 Premium Marine Resin Infusion

AME 6001 INF-135 Infusion resin is a high performance 100% epoxy vinyl ester resin, that have both excellent processability and superior mechanical properties. AME 6001 INF-135 resin utilizes the proven history of resilience, blister resistance, excellent fatigue life and toughness of AME 6000 resins with new technology that further increases strength and improves surface profile for the boat builder that demands faultless, long lasting performance.

Greater Resistance to Fatigue Failure
 Excellent Surface Profiles with Low Shrink
 Increased Hydrolysis Resistance
 Exceeds ISO 12215-1 Type "A" mechanical requirements
 Exceeds DNV Grade "1" mechanical requirements

Typical liquid resin properties

Property	Value	Unit	Method
Viscosity, cone & plate at 25 °C	170	mPas	ISO 2884
Styrene content	39	%	SFS 4864
Density	1,1	kg/dm3	ISO 2811

Gelttime with different peroxides at 20°C

Peroxide	1,25 %	1,5 %	2,0 %	
Trigonox 249	240	135	85	Minutes
Norox MCP-75	185	115	75	Minutes
Curox CM-75	185	115	75	Minutes

Typical cured resin properties

Property	Value	Unit	Method
Postcured for 24h at 60 °C			
Tensile strength	79	MPa	ASTM D-638
Tensile modulus	3450	MPa	ASTM D-638
Elongation at break	5,2	%	ASTM D-638
Flexural strength	149	MPa	ASTM D-790
Flexural modulus	3620	MPa	ASTM D-790
Heat Deflection temperature*	113	°C	ASTM D-648
* postcured for 24h at 90°C			

Application and use

AME 6001 INF-135 resin is especially recommended for marine applications using the infusion process. AME 6001 INF-135 is designed as a premium resin for high performance off-shore motor and sailing yachts, that remain in the water for an extended period of time.



* Registered service mark of the American Chemistry Council. © Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.
 Responsible Care* Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

Technical Datasheet



AME™ 6001 INF-135 Premium Marine Resin Infusion

For more information on curing characteristics of AME 6001 INF-135 infusion resin and peroxide levels for optimal curing, please contact your Ashland representative.

Certificates and approvals

AME 6001 INF-135 resin is approved by Lloyd's Register for Special Service Craft.

The manufacturing, quality control and distribution of products, by Ashland Performance Materials, are complying with one or more of the following programs or standards: Responsible Care, ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001.

Handling and storage

It is highly recommended that all material is stored at stable temperature under 25 °C preferably indoors, and away from sunlight. Prolonged storage outside of recommended conditions can influence liquid resin properties like viscosity and gel time. It is also strongly recommended to mix resin thoroughly before use. Shelf life of AME 6001 INF-135 is three (3) months.

Notice

All information presented herein is believed to be accurate and reliable, and is solely for the user's consideration, investigation and verification. The information is not to be taken as an express or implied representation or warranty for which Ashland assumes legal responsibility. Any warranties, including warranties of merchantability, fitness for use or non-infringement of intellectual property rights of third parties, are herewith expressly excluded.

Since the user's product formulations, specific use applications and conditions of use are beyond the control of Ashland, Ashland makes no warranty or representation regarding the results which may be obtained by the user. It shall be the sole responsibility of the user to determine the suitability of any of the products mentioned for the user's specific application.

Ashland requests that the user reads, understands and complies with the information contained herein and the current Material Safety Data Sheet.



* Registered service mark of the American Chemistry Council. © Registered trademark and ™ trademark of Ashland Inc.
Responsible Care® Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.



E6-CR

E20

Emulsion Chopped Strand Mats
For Hand Lay-up

E6CR E20 Emulsion Chopped Strand Mat is made of randomly distributed chopped E6CR glass strands held together by an emulsion binder.

E6CR E20 is suitable to reinforce unsaturated polyester, vinyl ester, epoxy and phenolic resins.

E6CR E20 is designed mainly for use in the hand lay-up process and also suitable for use in filament winding and continuous laminating processes. Its end-use applications include boats, bath equipment, automotive parts, chemical corrosion resistant pipes, tanks, cooling towers and building components.



Product Features

- ⊙ Good conformability
- ⊙ Good wet-through and fast wet-out in resins, rapid air lease, reducing rolling out time and increasing productivity
- ⊙ Low resin consumption
- ⊙ High mechanical strength of parts
- ⊙ Superior acid corrosion resistance

Packaging

Each Emulsion Chopped Strand Mat is wound onto a paper tube which has an inside diameter of 90mm. The roll outside diameter is approximately 265mm. Each roll is wrapped up in plastic film and then packed in a cardboard box. The rolls are stacked horizontally or vertically onto pallets. All pallets are stretch wrapped and strapped to maintain stability during transport.

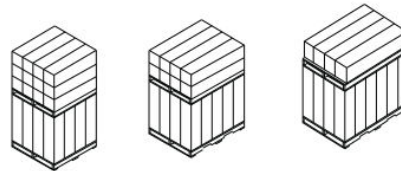
Product Specifications

Property	Area Weight (%)	Moisture Content (%)	Size Content (%)	Breakage Strength (N)
Methods	ISO 3374	ISO 3344	ISO1887	ISO 3342
E6CRMC225	±7.5	≤0.20	4.4(±31%)	≥80
E6CRMC300	±7.5	≤0.20	4.0(±31%)	≥100
E6CRMC375	±7.5	≤0.20	3.8(±31%)	≥120
E6CRMC450	±7.5	≤0.20	3.7(±31%)	≥140
E6CRMC600	±7.5	≤0.20	3.5(±31%)	≥160
E6CRMC900	±7.5	≤0.20	3.3(±31%)	≥200

Size	1040		1270		1524	
	Length, m	Weight, kg	Length, m	Weight, kg	Length, m	Weight, kg
E6CRMC225	119.7	28	119.7	34	119.7	41
E6CRMC300	96.2	30	96.2	37	96.2	44
E6CRMC375	76.9	30	76.9	37	76.9	44
E6CRMC450	79.1	37	79.1	45	79.1	54
E6CRMC600	59.3	37	59.3	45	59.3	54
E6CRMC900	39.5	37	39.5	45	39.5	54

Storage

Unless otherwise specified, powder chopped strand mats should be stored in a cool, dry, water-proof area. It is recommended that the room temperature and humidity be always maintained at 15°C to 35°C and 35% to 65% respectively.



JUSHI GROUP CO., LTD.

版权所有 © 巨石集团有限公司 巨石集团有限公司注册商标

Add: Tongxiang Economic Development Zone, Zhejiang 314500, PRC International Sales: +86-573-88181026 Fax: +86-573-88181058
 Domestic Sales: +86-573-88181016 Fax: +86-573-88136222 Customer Service: +86-573-88181017 Fax: +86-573-88181388
 Http://www.jushi.com E-mail: info@jushi.com


Technical Datasheet - METYX Composite Reinforcements

PRODUCT CODE	4200669
PRODUCT NAME	LTM850/225 E06B-0/90 BX EG-36-1270mm
PRODUCT DESCRIPTION	
CUSTOMER CODE	
CUSTOMER ID	

REINFORCEMENT CONSTRUCTION		
LAYER	FIBER TYPE	AREA WEIGHT
1	0°	1200 TEX
2	0°	2400 TEX
3	90°	2400 TEX
4	CSM	2400 TEX
5	STITCH	PES
6		
7		
8		
9		
* Measurement method based on ISO 3374 .		TOTAL* 1.081 gr/m ² (±%5)

OTHER PORPERTIES		ROLL INFO	
Stitch Gauge	6 Stitches/inch	Roll Width	127 cm
Stitch Type	Tricot	Roll Weight	66 kg
Stitch Length	2,85mm	Roll Length	49 m
Pilot Yarn / Position	--	Core Diameter	3 inc(76.2cm)

Resin Compatibility	Loss on Ignition	Moisture Content
Vinylester, Epoxy, Polyester resins	-	Max.%0,20 by weight (ISO 3344)

Packaging	All rolls are wrapped with polyethylene bags; placed in pallet boxes or in single cardboard boxes or in pyramid style on pallets.
Labelling	Each roll is labelled on the inner side of the core, on the bag or on the cardboard boxes including a unique reference number for its traceability.
Storage	Store at %40-70 relative humidity and 18-30°C temperature range. Recommended to be brought to working area 24 hrs prior to use.

System Certification	Product Certification
ISO 9001; 14001; 45001; 27001	DNV-GL Approved

Orhanlı Mh. Gülsüm Sok. No:14, 34956, Tuzla İstanbul – TÜRKİYE
 Phone : +90-216-394-32 Fax : +90-216-394-32 Web : www.metyx.com

