



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική Μελέτη Ιδιοτήτων Σύνθετου Υλικού
Πολυεστερικής Μήτρας Ενισχυμένου με Υαλοπίλημα**

Βλαχόγιαννης Ν. Μιχαήλ
A.M. 51116013

Επιβλέπων Καθηγητής: Ισίδωρος Ιακωβίδης
Λέκτορας

Αθήνα, 2024

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΒΛΑΧΟΓΙΑΝΝΗΣ Ν. ΜΙΧΑΗΛ
Α.Μ.: 51116013

Πειραματική Μελέτη Ιδιοτήτων Σύνθετου Υλικού Πολυεστερικής Μήτρας
Ενισχυμένου με Υαλοπίλημα
(ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ)

Experimental Study of the Properties of a Glass Fiber Reinforced Polyester Matrix Composite
Material
(DIPLOMA THESIS)

Εξεταστική Επιτροπή:

Ιακωβίδης Ισίδωρος
Λέκτορας

Δημητρέλλου Σωτηρία
Αναπλ. Καθηγήτρια

Μαζαράκος Θωμάς
Επικ. Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βλαχόγιαννης Μιχαήλ του Νικολάου, με αριθμό μητρώου 51116013 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών, του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

Ο Δηλών



Βλαχόγιαννης Ν. Μιχαήλ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Ισίδωρο Ιακωβίδη, Λέκτορα του τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, για τη βοήθεια και τον χρόνο που αφιέρωσε στη διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου καθώς και το φιλικό μου περιβάλλον για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	11
Abstract	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	16
1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών	16
1.1 Τα σύνθετα υλικά	16
1.2 Δομικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών	16
1.3 Σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας με ενισχυτικές ίνες.....	17
1.3.1 Ενίσχυση με ίνες γυαλιού	19
1.3.2 Ενισχυτικές ίνες άνθρακα	20
2. Εφαρμογές σύνθετων υλικών σε θαλάσσιο περιβάλλον.....	22
2.1. ΑΠΕ και σύνθετα υλικά στο θαλάσσιο περιβάλλον.....	22
2.2. Σύνθετα Υλικά Ενισχυμένα με Ίνες για Ανανεώσιμη Ενέργεια στη Θάλασσα	22
2.3. Επισκευή Υποβρύχιων Κατασκευών.....	23
2.4. Χρήση σύνθετων υλικών σε πλοία και θαλάσσιες κατασκευές	23
3. Τεχνολογίες παραγωγής κατασκευών από σύνθετα υλικά	26
3.1 Διαδικασία <i>Hand Lay up</i>	26
3.2 Έγχυση υπό κενό	27
3.3 Χύτευση με Συμπύεση.....	28
3.4. Περιέλιξη Νήματος.....	29
3.5. Άλλες μέθοδοι	29
4. Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετων Υλικών.....	30
4.1 Μηχανικές ιδιότητες και κανονισμοί – επισκόπηση	30
4.1.1. Επιθεώρηση κατασκευών από σύνθετα υλικά.....	30
4.1.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά ρητίνης και κανονισμοί.....	31
4.1.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά ενισχύσεων και κανονισμοί.....	31
4.1.4 Γενικός έλεγχος θαλάσσιων κατασκευών	32
4.1.5 Κατασκευή, δοκιμές και επιθεώρηση	32
4.2. Επίδραση του Μήκους Ινών.....	38
4.3 Επίδραση του προσανατολισμού και της συγκέντρωσης ενισχυτικών ινών στις ιδιότητες του σύνθετου.	40
4.4. Ελαστική Συμπεριφορά — Εγκάρσια Φόρτιση.....	43
4.5. Διαμήκης Αντοχή Εφελκυσμού.....	43
4.6. Εγκάρσια Αντοχή Εφελκυσμού.....	44
5. Διεθνή πρότυπα για πειραματικές δοκιμές σε σύνθετα υλικά	45

5.1. Απορρόφηση Νερού	45
5.2. Δοκιμασία απώλειας ρητίνης με καύση (<i>Burn off test</i>)	45
5.3. Υπολογισμός περιεκτικότητας κενού όγκου σε ενισχυμένα πλαστικά.....	46
5.3.4. Πειραματικός προσδιορισμός πυκνότητας σύνθετων υλικών	46
B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	48
6. Κατασκευή δοκιμών και μελέτη των ιδιοτήτων.....	48
6.1 Σκοπός- Στόχοι.....	48
6.2 Πειραματικός εξοπλισμός.....	48
6.3 Διαδικασία κατασκευής δοκιμών	49
6.4 Μέθοδοι ελέγχου δοκιμών	53
6.4.1 Μέτρηση Πάχους.....	53
6.4.2 Δοκιμασία σε μονοαξονικό εφελκυσμό	53
6.4.3 Δοκιμασία σε κάμψη τριών σημείων	54
6.4.4 Δοκιμή καύσης (<i>Burn-off test</i>)	54
6.4.5 Υδατοαπορροφητικότητα.....	55
6.4.6 Μέτρηση πυκνότητας στο νερό	55
7. Μετρήσεις -Αποτελέσματα.....	56
7.1 Υπολογισμός Πάχους Στρώσης.....	56
7.2 Πυκνότητα	59
7.3 Δοκιμασία Εφελκυσμού.....	60
7.4 Δοκιμασία κάμψης τριών σημείων.....	64
7.5 Υδατοαπορροφητικότητα.....	66
7.6 Προσδιορισμός Όγκου των Κενών.....	69
7.7 Αποτελέσματα Δοκιμασίας Καύσης (<i>Burn Off Test</i>).....	70
8. Συμπεράσματα	74
9. Προτάσεις – Μελλοντικές Προοπτικές	76
BΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	78

Περίληψη

Η χρήση των σύνθετων υλικών έχει γνωρίσει μεγάλη ανάπτυξη σε πολλούς σύγχρονους τεχνολογικούς τομείς, όπως ο τομέας των κατασκευών, της ναυπηγικής και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα πιο διαδεδομένα σύνθετα υλικά είναι αυτά με ενίσχυση από ίνες γυαλιού ή ίνες άνθρακα. Οι εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, το χαμηλό βάρος, η αντοχή στη διάβρωση, η μεγάλη ευελιξία σχεδιασμού και πολλοί άλλοι λόγοι έχουν καταστήσει αυτά τα υλικά μια ελκυστική επιλογή για πολλά είδη κατασκευών.

Η παρούσα εργασία αφορά την πειραματική μελέτη των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετου υλικού πολυεστερικής μήτρας ενισχυμένου με ίνες γυαλιού σε μορφή υαλοπίληματος. Η εργασία αποτελείται από εννιά κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αφορά τα σύνθετα υλικά, την δομή και τα χαρακτηριστικά τους. Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί μια παρουσίαση των εφαρμογών των σύνθετων υλικών σε κατασκευές που αφορούν το θαλάσσιο περιβάλλον. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στις διαδικασίες κατασκευής των σύνθετων υλικών. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση των μηχανικών ιδιοτήτων. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα διεθνή πρότυπα βάσει των οποίων έγιναν οι πειραματικές δοκιμές. Στο έκτο και στο έβδομο κεφάλαιο αναλύεται το πειραματικό μέρος της εργασίας και στο όγδοο παρατίθενται τα συμπεράσματα. Τέλος στο ένατο και τελευταίο κεφάλαιο γίνονται προτάσεις και παρουσιάζονται μελλοντικές προοπτικές που μπορούν να προκύψουν με βάση την παρούσα εργασία.

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετα υλικά, Υαλοπίλημα, GRP, Μηχανικές ιδιότητες

Abstract

The use of composite materials has grown significantly across various modern technological fields, such as construction, shipbuilding, and renewable energy systems. The most common composite materials are those reinforced with glass fibers or carbon fibers. Their exceptional mechanical properties, lightweight nature, corrosion resistance, design flexibility, and other advantageous characteristics make them an compelling choice for a wide range of construction applications.

This thesis focuses on the experimental study of the physical and mechanical properties of a polyester matrix composite material reinforced with glass fibers in the form of glass wool. The thesis consists of nine chapters. The first chapter presents the composite materials, their structure, and their characteristics. The second chapter describes various applications of composite materials in constructions related to the marine environment. The third chapter addresses the manufacturing processes of composite materials. The fourth chapter provides an overview of the composite materials' mechanical properties. The fifth chapter presents the international standards based on which the experimental tests were carried out. The sixth and seventh chapters analyze the experimental part of the thesis, and the eighth chapter presents the conclusions. Finally, the ninth chapter presents recommendations and explores future prospects that can be pursued based on the present work.

Key words: Composite materials, Chopped Strand Mat, GRP, Mechanical properties

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας. Οι δυνατότητες που προσφέρουν σε κατασκευαστικούς τομείς είναι μεγάλες και προκύπτουν από το γεγονός ότι ο συνδυασμός διαφορετικών υλικών μπορεί να οδηγήσει σε νέα, που εμφανίζουν βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα επιμέρους υλικά που συνδυάζονται. Βασικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται για κατασκευαστικούς σκοπούς είναι το μικρό ειδικό βάρος, η υψηλή αντοχή και ακαμψία, η ανθεκτικότητα και η αντίσταση στη διάβρωση, ιδιότητες οι οποίες συνοδεύονται από σχετικά χαμηλό κόστος και ευκολία διαμόρφωσης σε πολύπλοκα σχήματα.

Μια σημαντική εφαρμογή των σύνθετων υλικών αφορά την κατασκευή πλοίων και άλλων θαλάσσιων και παράκτιων κατασκευών. Οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών βελτιστοποιούνται με κατάλληλες μεθόδους και τεχνικές ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε κατασκευής.

Η παρούσα εργασία αφορά την πειραματική μελέτη δοκιμίων σύνθετων υλικών πολυεστερικής μήτρας ενισχυμένων με υαλοπίλημα. Χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές κατασκευάστηκαν κατάλληλα δοκίμια σύνθετων υλικών, ενισχυμένα με ίνες γυαλιού, και προσδιορίστηκαν εργαστηριακά ορισμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων αυτών με βάση πρότυπες μεθόδους.

A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών

1.1 Τα σύνθετα υλικά

Τα σύνθετα υλικά προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων διαφορετικών υλικών. Εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες από τα υλικά που συνδυάστηκαν για την κατασκευή τους, τα οποία αποτελούν τις διαφορετικές φάσεις του σύνθετου [1]. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές και σε ποικίλους τομείς της βιομηχανίας. Τα επί μέρους υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ενός σύνθετου, συνδυάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι ιδιότητές τους να μπορούν να αξιοποιηθούν στο έπακρο, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούνται κατά το δυνατόν τα αρνητικά χαρακτηριστικά τους. Η βελτιστοποίηση των ιδιοτήτων κατά τον σχεδιασμό ενός στοιχείου ή εξαρτήματος μιας κατασκευής αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα για την επιλογή αυτών των υλικών έναντι αντίστοιχων συμβατικών. Έτσι, με τη χρήση σύνθετων υλικών, ιδιότητες όπως το βάρος, η αντοχή, η δυσκαμψία και η σκληρότητα μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες σχεδιαστικές απαιτήσεις. Λόγω της ευκολίας με την οποία μπορούν να διαμορφωθούν τα σύνθετα υλικά ώστε να κατασκευαστούν στοιχεία ή εξαρτήματα πολύπλοκου σχήματος, η χρήση τους μπορεί να οδηγήσει σε καλύτερες και οικονομικότερες λύσεις.

1.2 Δομικά χαρακτηριστικά των σύνθετων υλικών

Τα διακριτά συστατικά που αποτελούν ένα σύνθετο υλικό ονομάζονται φάσεις. Η επιλογή των επιμέρους υλικών που αποτελούν κάθε φάση του σύνθετου γίνεται έτσι ώστε να αξιοποιούνται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο οι ιδιότητες των υλικών αυτών. Τα κυριότερα υλικά που αποτελούν τις διακριτές φάσεις ενός σύνθετου ταξινομούνται στις παρακάτω κατηγορίες [2]:

- **Πολυμερή:** Τα πολυμερή είναι υλικά που χαρακτηρίζονται από μικρή πυκνότητα, χαμηλή μηχανική αντοχή και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές θερμοκρασίες. Συνήθως εμφανίζουν ανθεκτικότητα στην προσβολή από χημικά μέσα. Οι μηχανικές τους ιδιότητες συνήθως δεν είναι υψηλές, διακρίνονται όμως από ευκολία παραγωγής και διαμόρφωσης σε κατάλληλα σχήματα και μορφές.

- **Κεραμικά:** Τα κεραμικά σαν υλικά έχουν μεγάλη θερμική σταθερότητα και είναι ανθεκτικά στην τριβή, στη φθορά και στην προσβολή από πολλά χημικά μέσα. Εμφανίζουν υψηλή αντοχή και ακαμψία, ενώ είναι εύθραυστα και μπορούν να διαμορφωθούν με κατάλληλες μεθόδους.
- **Μέταλλα:** Τα μέταλλα ως υλικά έχουν γενικά μεγάλη πυκνότητα. Εμφανίζουν αξιοσημείωτες μηχανικές ιδιότητες, όπως υψηλή σκληρότητα, ολκιμότητα, αντοχή και είναι σχετικά εύκολο να διαμορφωθούν και να συνδεθούν. Τα μέταλλα χρησιμοποιούνται ευρέως στη μηχανολογία λόγω της ολκιμότητας και της αντοχής τους σε ρωγμάτωση.
- **Άνθρακας:** Οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά λόγω των εξαιρετικών ιδιοτήτων τους. Είναι ελαφριές (έχουν μικρό ειδικό βάρος), ανθεκτικές και πολύ ισχυρές σε σχέση με το βάρος τους. Συνήθως ενσωματώνονται σε μια μήτρα, όπως είναι η εποξειδική ρητίνη, για να δημιουργήσουν ένα σύνθετο υλικό που είναι ελαφρύ και ανθεκτικό. Σημειώνεται ευρεία χρήση τους σε πεδία όπως η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, σε αγωνιστικά ποδήλατα, και σε άλλα πεδία όπου η αναλογία αντοχής προς βάρος είναι πολύ σημαντική.

1.3 Σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας με ενισχυτικές ίνες

Τα πλαστικά με ινώδη ενίσχυση (πολυμερή ενισχυμένα με ίνες), γνωστά ως *FRP*, είναι σύνθετα υλικά που αποτελούνται από μήτρα πολυμερούς, ενισχυμένη με ίνες ορισμένου τύπου. Η πολυμερής μήτρα συνήθως είναι εποξειδικό, βινυλεστερικό ή πολυεστερικό θερμοσκληρυνόμενο πλαστικό, αλλά χρησιμοποιούνται και οι ρητίνες φαινόλης-φορμαλδεΐδης (βακελίτης). Τα *FRP* χρησιμοποιούνται συνήθως στην αεροδιαστημική βιομηχανία, την αυτοκινητοβιομηχανία, τη ναυτιλία και τις κατασκευές. Επίσης, συχνά χρησιμοποιούνται για αντιβαλλιστική θωράκιση και σε φιάλες αερίων υπό πίεση, για αυτόνομες αναπνευστικές συσκευές.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενίσχυσης με ίνες, όπως ασυνεχής ή βραχεία (ψιλοκομμένη), συνεχής ή μακρά (μιας κατεύθυνσης) και πλεκτό ύφασμα ή αμφίδρομη ενίσχυση. Οι διαφορετικοί τύποι ενισχυτικών ινών παρέχουν δυνατότητες προσαρμογής των ιδιοτήτων του σύνθετου. Οι μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων *FRP* εξαρτώνται από τον τύπο και τη διάταξη της ενίσχυσης, τον τύπο του πλαστικού, καθώς και τον λόγο

βάρους ενίσχυσης προς πλαστικό. Ορισμένοι από αυτούς τους παράγοντες αλληλοσυνδέονται για να καθορίσουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Οι διαδικασίες μορφοποίησης των σύνθετων υλικών *FRP* ξεκινούν με την τοποθέτηση του προπλάσματος ινών πάνω ή μέσα σε κατάλληλο καλούπι. Το πρόπλασμα ινών μπορεί να είναι ξηρή ή προεμποτισμένη ίνα, που περιέχει ήδη μια μικρή ποσότητα ρητίνης (*prepreg*). Οι ξηρές ίνες διαβρέχονται με ρητίνη είτε με το χέρι είτε γίνεται έγχυση της ρητίνης σε κλειστό καλούπι. Στη συνέχεια, το τεμάχιο σκληραίνεται λόγω της αντίδρασης πολυμερισμού του υλικού της μήτρας, προσδίδοντας στα υλικά της μήτρας και των ινών το επιθυμητό σχήμα από το καλούπι. Μερικές φορές χρησιμοποιείται θέρμανση ή/και πίεση για τη σκλήρυνση της ρητίνης και τη βελτίωση της ποιότητας του τελικού τεμαχίου. Πιο γνωστές διαδικασίες μορφοποίησης των σύνθετων *FRP* είναι η χύτευση με συμπίεση, η περιτύλιξη με άτρακτο και η υγρή επίστρωση. Στον πίνακα 1 δίνονται τα βασικά στοιχεία σύνθετων υλικών και τα χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 1. Τυπικές ιδιότητες ορισμένων γνωστών ενισχυτικών ινών [3].

Υλικό	Εμπορική ονομασία	Πυκνότητα ($10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)	Διάμετρος ίνας (μm)	Συντελεστής Young (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)
Συνεχείς ίνες (Σύρμα)					
Σύρμα γάλυβα υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα		7.8	250	210	2.8
Κοντές ίνες					
$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$ (ασυνεχές)	<i>Saffil</i> (Ηνωμένο Βασίλειο)	2.1	3	280	1.5
Συνεχείς ανόργανες ίνες					
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	<i>FP</i> (ΗΠΑ)	3.9	20	385	1.8
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{B}_2\text{O}_3$ (Μουλίτης)	<i>Nextel480</i> (ΗΠΑ)	3.05	11	224	2.3
$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$	<i>Altex</i> (Ιαπωνία)	3.3	10-15	210	2.0
Βόριο (CVD σε βολφράμιο)	<i>VMC</i> (Ιαπωνία)	2.6	140	410	4.0
Άνθρακας (πρόδρομη ουσία PAN)	<i>T300</i> (Ιαπωνία)	1.8	7	230	3.5
Άνθρακας (πρόδρομη ουσία πίσσας)	<i>Thornel P755</i> (ΗΠΑ)	2.06	10	517	2.1

SiC	<i>Nicalon</i> (Ιαπωνία)	2.6	15	190	2.5-3.3
SiC (χαμηλό O)	<i>Hi-Nicalon</i> (Ιαπωνία)	2.74	14	270	2.8
SiC	<i>Tyranno</i> (Ιαπωνία)	2.4	9	200	2.8
SiC (μονόνημα)	<i>Sigma</i>	3.1	100	400	3.5
Συνεχείς οργανικές ίνες					
Αρωματικό πολυαμίδιο	<i>Kevlar 49</i> (ΗΠΑ)	1.5	12	130	3.6
Πολυαιθυλένιο (UHMW)	<i>Spectra 1000</i> (ΗΠΑ)	0.97	38	175	3.0

1.3.1 Ενίσχυση με ίνες γυαλιού

Οι ενισχυτικές ίνες γυαλιού κατασκευάζονται με έλξη τηγμένου γυαλιού καθώς αυτό διέρχεται μέσα από οπές καθορισμένου μεγέθους. Τα γυάλινα νήματα παράγονται θερμαίνοντας ένα μείγμα διοξειδίου του πυριτίου και αλουμίνας στους 1600 °C περίπου και κατόπιν εξωθώντας το τήγμα μέσα από μία μήτρα, η οποία περιέχει συνήθως οπές διαμέτρου 5 έως 25 μm. Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται επειδή είναι υλικά ανθεκτικά στη διάβρωση και στην υγρασία, ενώ έχουν καλή αντοχή και δυσκαμψία [3]. Προσφέρουν επίσης ηλεκτρική και θερμική μόνωση, καθώς και ηχομόνωση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικό ή πληρωτικό υλικό για την κατασκευή ενισχυμένων υλικών όπως πλαστικών, γύψου και τσιμέντου.

Η διάκριση των ινών γυαλιού σε διαφορετικές μορφές γίνεται ανάλογα με το σχήμα και το μήκος τους. Η βασική διάκριση περιλαμβάνει: συνεχείς ίνες, ίνες σταθερού μήκους και υαλοβάμβακα. Οι πρώτες ύλες για την παραγωγή ινών γυαλιού είναι: χαλαζιακή άμμος, σόδα, αλουμίνα, βορικό οξύ και διάφορα ορυκτά, όπως πυροφυλλίτης, ασβεστόλιθος, δολομίτης, μιραμπιλίτης, φθορίτης κλπ. Μια συνήθης μέθοδος κατασκευής γυάλινων ινών είναι να παραχθεί αρχικά τήγμα και να μορφοποιηθεί σε γυάλινα σφαιρίδια ή ράβδους διαμέτρου 20 mm, οι οποίες στη συνέχεια τήκονται ξανά και μορφοποιούνται σε πολύ λεπτές ίνες διαμέτρου 3 έως 80 μm. Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται κυρίως ως ηλεκτρικά μονωτικά υλικά, υλικά βιομηχανικών φίλτρων, αντιδιαβρωτικά, υλικά ανθεκτικά στην υγρασία, θερμομόνωση, ηχομόνωση και υλικά απορρόφησης κραδασμών. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικό υλικό για την κατασκευή ενισχυμένων πλαστικών ή ενισχυμένου καουτσούκ.

1.3.2 Ενισχυτικές ίνες άνθρακα

Η πρώτη εφαρμογή τους έγινε το 1879 όταν ο *Thomas Edison* στην προσπάθεια του να δημιουργήσει έναν ηλεκτρικό λαμπτήρα κατάφερε με αυτόν τον τρόπο να δημιουργήσει μια πρώτη μορφή από ίνες άνθρακα και βαμβακιού με πολύ μικρή αντοχή. Σήμερα, οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενισχυτικό μέσο σε σύνθετα υλικά, μαζί με κάποιο φέρον υλικό ως μήτρα (*matrix*). Τα ανθρακονήματα κατασκευάζονται κυρίως από πρόδρομες ίνες πολυακρυλονιτριλίου (*PAN*). Οι ίνες *PAN* περνούν πρώτα από διαδικασία οξειδωσης, σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 °C και 300 °C, και στη συνέχεια απανθρακώνονται σε αδρανές περιβάλλον, σε θερμοκρασίες από 700 °C έως 1500 °C. Η μήτρα συνήθως είναι κάποια ρητίνη ενώ το σύνθετο χαρακτηρίζεται ως ενισχυμένο πολυμερές με ίνες άνθρακα (*Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP*). Αυτά τα υλικά αρχικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τμημάτων αεροσκαφών, διαστημοπλοίων, δορυφόρων και αυτοκινήτων [4].

Οι ίνες άνθρακα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη θερμοκρασία θερμικής επεξεργασίας κατά την παραγωγή τους:

- Ίνες άνθρακα. Περιέχουν 80-98% στοιχειακό άνθρακα και παράγονται από ανθρακούχα υλικά σε θερμοκρασίες περίπου 1600 °C.
- Ίνες γραφίτη. Είναι ίνες που περιέχουν τουλάχιστον 98% άνθρακα και παράγονται από ίνες άνθρακα με θερμοκρασίες άνω των 2400 °C.

Οι ίνες τύπου *PAN* διακρίνονται σε τύπο I, II και III. Στον τύπο I ανήκουν ίνες επεξεργασμένες μέχρι τους 1200 °C, στην κατηγορία II από 1000 °C έως 1700 °C, ενώ ο τύπος III περιλαμβάνει ίνες επεξεργασμένες πάνω από τους 1500 °C μέχρι και τους 2800 °C.

Οι ίνες άνθρακα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την αντοχή τους: ίνες υψηλής επίδοσης (*High Performance, HP*) και ίνες συνήθους επίδοσης (*General Performance GP*). Οι ίνες *HP* χωρίζονται σε υψηλής αντοχής εφελκυσμού (*High Tensile, HT-Type* με πυκνότητα $\rho=1.70 \text{ g/cm}^3$ και αντοχή $\sigma > 3 \text{ GPa}$) και σε υψηλού μέτρου ελαστικότητας (*High Modulus HMTtype* με $\rho=1.85 \text{ g/cm}^3$ και μέτρο ελαστικότητας $E > 350 \text{ GPa}$).

Η πιο συνηθισμένη κατηγοριοποίηση των διαφόρων τύπων ινών άνθρακα γίνεται με βάση τις μηχανικές τους ιδιότητες. Έτσι διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες:

- Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικότητας (*ultra-high modulus, UHM*, με μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερο από 450 GPa).
- Υψηλού μέτρου ελαστικότητας (*high modulus, UHM*, με μέτρο ελαστικότητας 350–450 GPa).
- Μέσου μέτρου ελαστικότητας (*intermediate modulus, IM*, με μέτρο ελαστικότητας 200–350 GPa).
- Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας και υψηλής αντοχής σε εφελκυσμό (*high tensile, HT*, με μέτρο ελαστικότητας 30 GPa).
- Υπερ-υψηλής αντοχής εφελκυσμού (*super high tensile, SHT*, με αντοχή σε εφελκυσμό > 4.5 GPa).

Τέλος, μία τελευταία κατηγοριοποίηση των ινών άνθρακα περιλαμβάνει τις ημι-ανθρακούχες ίνες ή αλλιώς μερικώς ανθρακοποιημένες ίνες *PAN (quasi-carbon fiber)*, οι οποίες παράγονται με πυρόλυση οξειδωμένων ινών *PAN* σε θερμοκρασιακό εύρος από 400–950 °C.

Οι συνεχείς ίνες άνθρακα ενσωματωμένες ως ενίσχυση σε μια θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες ανθεκτικότητας σε τριβή, όπως χαμηλό ποσοστό φθοράς σε λειτουργία φθοράς ολίσθησης σε δύσκολες συνθήκες λειτουργίας [5].

2. Εφαρμογές σύνθετων υλικών σε θαλάσσιο περιβάλλον

2.1. ΑΠΕ και σύνθετα υλικά στο θαλάσσιο περιβάλλον

Το θαλάσσιο περιβάλλον προσφέρει τη δυνατότητα αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Οι ΑΠΕ που σχετίζονται με το θαλάσσιο και παράκτιο περιβάλλον περιλαμβάνουν τον άνεμο, την κίνηση του θαλασσινού νερού (παλιρροϊκά ρεύματα και κυματισμός), την ηλιακή ενέργεια, καθώς και την ενέργεια που μπορεί να παραχθεί από την κίνηση.

Η χρήση σύνθετων υλικών σε θαλάσσιες κατασκευές παρέχει ένα σύνολο πλεονεκτημάτων που περιλαμβάνουν το χαμηλό βάρος, την ανθεκτικότητα σε κόπωση και διάβρωση, το χαμηλό κόστος συντήρησης και την ευκολία παραγωγής σύνθετων μορφών χωρίς ραφές. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι εφαρμογές σε κατασκευές για παραγωγή ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα που μπορούν να φέρουν νέες δυνατότητες στο χώρο της θαλάσσιας τεχνολογίας [6,7].

2.2. Σύνθετα Υλικά Ενισχυμένα με Ίνες για Ανανεώσιμη Ενέργεια στη Θάλασσα

Η βιομηχανία ακόμα βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης σε ότι αφορά τις ενεργειακές συσκευές που εκμεταλλεύονται τα παλιρροϊκά ρεύματα. Έχουν αναφερθεί [7,8] τρόποι με τους οποίους τα σύνθετα υλικά και οι κατάλληλες τεχνικές σχεδιασμού που σχετίζονται με τα πτερύγια ανεμογεννητριών, στα πλοία μπορούν να συνεισφέρουν στην παραγωγή ενέργειας. Για να μπορέσει να αξιοποιηθεί στο έπακρο η παλιρροϊκή ενέργεια, έχουν προταθεί τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί (παλιρροϊκό ρεύμα, φράγμα και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) που έχουν τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούν τα κύματα της θάλασσας, για να γίνει αποτελεσματικά η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία και των τριών μηχανισμών βασίζεται κυρίως στη διαφορά της στάθμης των υδάτων, σε υψηλή και χαμηλή παλίρροια με το καθένα να το επιτυγχάνει με διαφορετικό τρόπο. Ο πιο γνωστός είναι το παλιρροϊκό ρεύμα. Σε αυτού του είδους τον μηχανισμό, οι τουρμπίνες δηλαδή, οι παλιρροϊκοί στρόβιλοι τοποθετούνται κάτω από το νερό σε ένα παλιρροιακό ρεύμα. Στην ουσία, πρόκειται για ένα γρήγορο ρεύμα νερού το οποίο δημιουργείται από τις παλίρροιες. Οι στρόβιλοι αυτοί έχουν σχεδιαστεί ώστε να εκμεταλλεύονται τη διπλή κατεύθυνση της ροής του παλιρροιακού ρεύματος ενώ αποδίδουν αποτελεσματικότερα όταν βρίσκονται σε ρηγά νερά. Επειδή το μέγεθος τους είναι αρκετά μεγάλο, υπάρχει περίπτωση να διαταράξουν την παλίρροια που

προσπαθούν να αξιοποιήσουν. Γι' αυτό το λόγο χρειάζεται προσεχτικά μελετημένη εγκατάσταση όπως και σωστή διαχείριση του ρεύματος. Όσον αφορά τη βιομηχανία των πτερυγίων (για ανεμογεννήτριες), έχουν διεξαχθεί εκτενείς πειραματικές μελέτες σχετικά με την επίδραση που έχει η κυκλική φόρτιση, στην υποβάθμιση του σύνθετου υλικού. Ενδεικτικά, αναφέρεται η μελέτη του *Sutherland* [10] που συνοψίζει τη συγκεκριμένη τεχνολογία και περιγράφει τις «βέλτιστες πρακτικές» για την ανάλυση κόπωσης ενός εξαρτήματος ανεμογεννήτριας.

2.3. Επισκευή Υποβρύχιων Κατασκευών

Η χρήση ενισχυμένων σύνθετων υλικών, μπορεί να είναι αποτελεσματική τόσο για την κατασκευή όσο και για τη μετασκευή, υπόγειων θαλάσσιων κυλινδρικών στοιχείων. Τα ενισχυμένα με ίνες, σύνθετα υλικά, αποτελούν μια πολύ καλή επιλογή για την επισκευή τέτοιων θερμοπλαστικών σωλήνων λόγω του χαμηλού ειδικού βάρους, της υψηλής αντοχής και ακαμψίας, της καλής αντοχής στη διάβρωση και των εξαιρετικών τους ιδιοτήτων κατά την κόπωση. Όσον αφορά την επισκευή θαλάσσιων ή βυθισμένων θαλάσσιων κατασκευών, διακρίνονται δύο τύποι συστημάτων επισκευής: το ευέλικτο σύστημα υγρής τοποθέτησης (*wet lay-up system*) και το πολυστρωματικό σύστημα (*layered system*), τα οποία εφαρμόζονται στην επισκευή ελαττωματικών σωληνώσεων. Τα συστήματα σύνθετων υλικών τύπου *wet lay-up* περιλαμβάνουν συνήθως κάποιο είδος υαλοβάμβακα ή υφάσματος ινών άνθρακα το οποίο διαποτίζεται επί του πεδίου. Πολλές φορές αυτό το σύστημα περιλαμβάνει προ-εμποτισμένο ύφασμα που ενεργοποιείται κατά την επαφή του με νερό. Τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη στοιχείων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα γεωμετριών, συμπεριλαμβανομένων των οπών, γωνιών, καμπυλών, ακόμη και βαλβίδων [11].

2.4. Χρήση σύνθετων υλικών σε πλοία και θαλάσσιες κατασκευές

Σύνθετα υλικά διαφόρων τύπων χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ορισμένων τύπων πλοίων. Η χρήση τους καλύπτει την πρωτεύουσα δομή του πλοίου, δευτερεύουσες δομές (εσωτερικά καταστρώματα και διαφράγματα, επενδύσεις), υπερκατασκευές και ιστούς [12]. Η εφαρμογή των πολυμερών σύνθετων υλικών σε θαλάσσια συστήματα είναι εδώ και χρόνια στο επίκεντρο εντατικών μελετών, αναδεικνύοντας τα δυνητικά οφέλη που προκύπτουν από την αντικατάσταση διαφόρων εξαρτημάτων, όπως τα κύτη πλοίων, τα πτερύγια προπέλας, τα πτερύγια

ανεμογεννητριών και παλιρροιογεννητριών. Υπάρχουν πολλά οφέλη από τη χρήση σύνθετων υλικών στις θαλάσσιες κατασκευές. Η ορθή χρήση τους επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών μεταλλικών κατασκευών, όπως εξοικονόμηση βάρους, ανθεκτικότητα, αντοχή στη διάβρωση και στην κόπωση. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία επεξεργασίας κλειστών καλουπιών και ιδίως η εισαγωγή των τεχνολογιών κενού έχουν οδηγήσει σε καθαρότερη παραγωγή και υψηλότερη ποιότητα καλουπιών για την κατασκευή στοιχείων του πλοίου από σύνθετα υλικά. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης βελτιωμένων τεχνικών για αποτελεσματική και αξιόπιστη εφαρμογή σύνθετων υλικών σε θαλάσσιες κατασκευές και στη σύνδεση διαφορετικών στοιχείων αυτών [13]. Οι Mouritz & Mathys [14,15] μελέτησαν τη μηχανική συμπεριφορά που εμφανίζουν τα σύνθετα υλικά από πολυεστέρα με ενίσχυση γυαλιού μετά από πυρκαγιά. Η αντοχή των δοκιμών σε εφελκυσμό, συμπίεση και κάμψη βρέθηκε ότι μειώνονται κατά την έκθεση για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στη βιβλιογραφία έχουν επίσης αναφερθεί [16] οι δυνατότητες αξιοποίησης των σύνθετων υλικών στην κατασκευή σκαφών και γενικότερα θαλάσσιου εξοπλισμού και εξαρτημάτων σχετικά με τη σημαντικότητα στη βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού και κατασκευής. Οι Barsotti *et.al.* [17] έχουν δημοσιεύσει μια σύντομη επισκόπηση πρόσφατων βιομηχανικών εξελίξεων στις αξιολογήσεις οριακών καταστάσεων των θαλάσσιων σύνθετων υλικών και στις προσεγγίσεις σχεδιασμού σε σκάφη αναψυχής και πλοία του πολεμικού ναυτικού. Σ' αυτή τη μελέτη περιγράφονται σημαντικά θέματα χρήσης θαλάσσιων σύνθετων υλικών σε υβριδικές τεχνικές σύνδεσης στοιχείων ναυπηγικών κατασκευών. Αυτό είναι αποτέλεσμα των νεότερων εξελίξεων στις διαδικασίες παραγωγής που ακολουθούνται στον βιομηχανικό κατασκευαστικό τομέα καθώς και στα νέου τύπου ενισχυτικά υφάσματα που είναι πλέον διαθέσιμα στην αγορά και εφαρμόζονται στο στάδιο της παραγωγής. Επίσης, σε ένα άλλο άρθρο [18] γίνεται μελέτη σχετικά με τη βιωσιμότητα ενός υδροηλεκτρικού σταθμού με πολύ χαμηλό ύψος, στον οποίο τα κύματα συσσωρεύουν νερό σε μια δεξαμενή στην ακτογραμμή που δημιουργείται από μια απότομη αποκολλημένη ράμπα. Το σύστημα που περιγράφεται θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για περιβάλλον με μικροπαλίρροιας, όπως η Μεσόγειος Θάλασσα, και έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι προστατεύει τις ακτές, τα θαλάσσια τείχη και τα παράκτια περιουσιακά στοιχεία από τη δράση των κυμάτων [18]. Φαινόμενα που αφορούν τις ωκεάνιες παλίρροιας και τη δυνατότητα να

αποδώσουν τεράστια ποσότητα ανανεώσιμης ενέργειας έχει μελετηθεί στο παρελθόν [19]. Οι γεννήτριες παλιρροϊκών ρευμάτων είναι μία από τις βασικές τεχνολογίες για την εξαγωγή και αξιοποίηση αυτού του θαλάσσιου δυναμικού. Για να εξαχθεί μια οικονομικά χρήσιμη ποσότητα ενέργειας, πρέπει συνήθως να αναπτυχθούν εκατοντάδες παλιρροϊκές τουρμπίνες σε μια συστοιχία. Αυτό οδηγεί στο ερώτημα σχετικά με το πως θα πρέπει να διαμορφωθούν αυτές οι τουρμπίνες ώστε να εξάγεται η μέγιστη δυνατή ισχύς.

3. Τεχνολογίες παραγωγής κατασκευών από σύνθετα υλικά

Όσον αφορά την κατασκευή των πλαστικών, που είναι ενισχυμένα με ίνες και τα οποία πληρούν τις προδιαγραφές του σχεδιασμού, οι ίνες θα πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες, εντός της πλαστικής μήτρας. Επίσης, στις περισσότερες περιπτώσεις, όλες οι ίνες πρέπει να προσανατολίζονται σχεδόν στην ίδια κατεύθυνση.

Ακολουθως, εξετάζονται διάφορες τεχνικές μορφοποίησης ενισχυμένων σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιες εφαρμογές.

3.1 Διαδικασία *Hand Lay-up*

Είναι η τοποθέτηση υλικού ενισχυμένου με ίνες και εφαρμογή ρητίνης, χειρωνακτικά στο καλούπι για τη δημιουργία του απαιτούμενου πάχους [20,21]. Η πίεση του χεριού ή του κυλίνδρου απομακρύνει τυχόν παγιδευμένο αέρα. Διακρίνονται συγκεκριμένα βήματα σε αυτήν την διαδικασία. Αρχικά, η επιφάνεια του καλουπιού επεξεργάζεται με αποκολλητικό μέσο απελευθέρωσης για να αποφευχθεί η προσκόλληση του πολυμερούς στην επιφάνεια. Στη συνέχεια, ένα λεπτό πλαστικό φύλλο εφαρμόζεται στο πάνω και στο κάτω μέρος της πλάκας του καλουπιού για να αποκτήσει το προϊόν λεία επιφάνεια. Τα στρώματα του υφαντού οπλισμού κόβονται στα απαιτούμενα σχήματα και τοποθετούνται στην επιφάνεια του καλουπιού. Στη συνέχεια, η ρητίνη αναμιγνύεται με άλλα συστατικά και εγχύεται στην επιφάνεια των ενισχυτικών υφασμάτων που έχουν ήδη τοποθετηθεί στο καλούπι με τη χρήση βοηθητικής βούρτσας για ομοιόμορφη εξάπλωση. Σε επόμενο στάδιο, τα επόμενα στρώματα τοποθετούνται πάνω στο προηγούμενο στρώμα πολυμερούς και πιέζονται με τη χρήση μεταλλικού κυλίνδρου για να απομακρυνθούν τυχόν παγιδευμένες φυσαλίδες αέρα και η περίσσεια του πολυμερούς. Στη συνέχεια το καλούπι κλείνει και η πίεση απελευθερώνεται για να ληφθεί ένα ενιαίο προϊόν. Μετά τη σκλήρυνση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, το καλούπι ανοίγει και το υφαντό σύνθετο υλικό αφαιρείται από την επιφάνεια του καλουπιού.

Οι παραλλαγές της μεθόδου *Hand Lay-up* είναι [22]:

- Χύτευση με σάκο κενού (*Vacuum bag*): χρησιμοποιεί ένα ελαστικό σάκο συμπιεσμένο πάνω από το καλούπι. Εφαρμόζεται κενό μεταξύ του καλουπιού και του σάκου για να συμπιεστεί τη ρητίνη με την επένδυση, προκειμένου να αφαιρεθεί τυχόν παγιδευμένος αέρας. Η ξήρανση γίνεται σε φούρνο.

- Χύτευση σάκου πίεσης: όπως και η χύτευση σάκου κενού, αλλά η πίεση εφαρμόζεται πάνω από στο σάκο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εξαρτήματα μεγαλύτερης διατομής.
- Εφαρμογή χειρωνακτικής επίστρωσης χρησιμοποιώντας φύλλα συμπίεσης (*Sheet Mold Compounding - SMC*): Η ρητίνη που έχει εμποτίσει τα ενισχυτικά υφάσματα πολυμερίζεται με θέρμανση και συσφίγγεται εάν είναι απαραίτητο για περαιτέρω μείωση των θυλάκων αέρα.

Η εφαρμογή της χειρωνακτικής επίστρωσης και των διαφόρων παραλλαγών αυτής απαιτεί ορισμένα εργαλεία και βοηθητικά υλικά, όπως καλούπι, βούρτσες εμποτισμού, ρολά συμπίεσης, αποκολλητικά υλικά και διαλύτες καθαρισμού. Ως αποκολλητικά μέσα χρησιμοποιούνται πλαστικά φύλλα, κεριά, ειδικές ταινίες ή υδρόφοβες ουσίες.

Η ρητίνη λειτουργεί ως η μήτρα του σύνθετου υλικού η οποία συνδέει τα ενισχυτικά φύλλα μεταξύ τους και μεταφέρει τις τάσεις στις ίνες του σύνθετου υλικού. Οι ίνες έχουν σχεδιαστεί και επιλεγεί για να δέχονται και να κατευθύνουν τις ασκούμενες τάσεις. Μερικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία είναι: ακόρεστοι πολυεστέρες, βινυλεστέρες και εποξειδικά πολυμερή.

Υπάρχουν πολλές διαφορετικές ίνες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός σύνθετου υλικού και κάθε υλικό μπορεί να ληφθεί σε διαφορετικές μορφές. Αυτές περιλαμβάνουν ίνες γυαλιού, ανθρακονήματα ή ίνες αραμιδίου. Η μορφή των ενισχυτικών ινών μπορεί να είναι τεμαχισμένο ματ υλικό (τυχαία προσανατολισμένες τεμαχισμένες ίνες ή στροβιλισμένες συνεχείς ίνες) ή υφαντό ύφασμα με πολλές διαφορετικές υφάνσεις και σχέδια ύφανσης για να δώσουν διαφορετικές επιθυμητές ιδιότητες. Επίσης ο προσανατολισμός των ενισχυτικών ινών ακολουθεί τη μελέτη σχεδιασμού της κατασκευής [23–25].

3.2. Έγχυση υπό κενό

Η διαδικασία έγχυσης υπό κενό (*Vacuum infusion*) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί την υποπίεση κενού για να εισάγει τη ρητίνη σε ένα πολυστρωματικό υλικό ενισχυτικών ινών. Τα υλικά τοποθετούνται στεγνά στο καλούπι και το κενό εφαρμόζεται πριν εισαχθεί η ρητίνη. Μόλις επιτευχθεί πλήρες κενό, η ρητίνη διαβιβάζεται στις ενισχύσεις λόγω της διαφοράς πίεσης, μέσω προσεκτικά τοποθετημένων σωλήνων.

3.3. Χύτευση με Συμπίεση

Η χύτευση με συμπίεση (*Compression molding*) είναι μια από τις πιο κοινές τεχνικές επεξεργασίας για την κατασκευή πλαστικών και πολυμερών σύνθετων προϊόντων. Από τις αρχές του εικοστού αιώνα, η διαδικασία *Compression molding* έχει χρησιμοποιηθεί για τη χύτευση θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών (π.χ. φαινολικών και αλκυδικών) και ελαστικού καουτσούκ. Στη διαδικασία χύτευσης με συμπίεση η επιθυμητή ποσότητα υλικού τοποθετείται μεταξύ του άνω και του κάτω τμήματος του καλούπιου και το υλικό στη συνέχεια διαμορφώνεται στο τελικό σχήμα εφαρμόζοντας πίεση στο καλούπι. Η διαδικασία χύτευσης με συμπίεση αποτελείται από τέσσερα βασικά στάδια [26,27]:

- **Προετοιμασία:** Μια ποσότητα υλικού (π.χ. φύλλα *Sheet Molding Compound [SMC]*) τοποθετείται σε προθερμασμένο καλούπι. Αυτό το υλικό ονομάζεται προφόρτιση ή απλά φόρτιση. Οι διαστάσεις προφόρτισης επιλέγονται για να καλύπτουν περίπου το 50% της επιφάνειας του καλούπιου και το βάρος προφόρτισης μετριέται πριν τοποθετηθεί στο καλούπι. Η θέση της προφόρτισης στο καλούπι επηρεάζει την ποιότητα του εξαρτήματος, καθώς επηρεάζει τον προσανατολισμό των ινών, το σχηματισμό πλέξης και το περιεχόμενο κενών.
- **Κλείσιμο καλούπιού:** Αφού γίνει η προφόρτιση στο καλούπι, το επάνω τμήμα του μετακινείται γρήγορα προς τα κάτω για να αγγίξει την επάνω επιφάνεια του υλικού προφόρτισης. Στη συνέχεια, το ανώτερο τμήμα συνεχίζει να κινείται αργά προς τα κάτω (συνήθως με ταχύτητα 5–10 mm/s) για να συμπιέσει την προφόρτιση. Καθώς η πίεση αυξάνεται με το κλείσιμο του καλούπιου, το υλικό προφόρτισης ρέει για να γεμίσει την κοιλότητα του καλούπιου και αναγκάζει τον αέρα να διαφύγει μέσω των άκρων διάτμησης ή των αεραγωγών του καλούπιου. Η ταχύτητα κλεισίματος του καλούπιου και η θερμοκρασία του καλούπιου είναι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας και την ποιότητα του προϊόντος.
- **Ωρίμανση:** Αφού γεμίσει πλήρως η κοιλότητα του καλούπιου με το υλικό προφόρτισης, το καλούπι διατηρείται κλειστό με την πίεση του καλουπώματος να διατηρείται σταθερή για μια προκαθορισμένη χρονική περίοδο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η ρητίνη στερεοποιείται και το υλικό αποκτά

συνοχή και σταθερότητα. Ο χρόνος ωρίμανσης εξαρτάται από τη σύσταση του μείγματος ρητίνης, το πάχος του εξαρτήματος και τη θερμοκρασία καλουπιού.

- **Απελευθέρωση εξαρτήματος:** Όταν η ρητίνη σκληρυνθεί, το εξάρτημα αφαιρείται από το καλούπι με τη βοήθεια πείρων εκτίναξης. Στη συνέχεια, το εξάρτημα ψύχεται έξω από το καλούπι, ενώ οι επιφάνειες του καλουπιού καθαρίζονται και εφαρμόζεται στις επιφάνειες του καλουπιού κατάλληλος παράγοντας απελευθέρωσης για τον επόμενο κύκλο χύτευσης [27].

3.4. Περιέλιξη Νήματος

Η περιέλιξη νήματος είναι μια διαδικασία κατά οποία οι συνεχείς ενισχυτικές ίνες, τοποθετούνται με ακρίβεια σε ένα προκαθορισμένο σχέδιο, ούτως ώστε να σχηματίσουν ένα κοίλο (συνήθως κυλινδρικό) σχήμα. Οι ίνες εμβαπτίζονται σε ρητίνη και τυλίγονται σε έναν άξονα. Συνήθως, αυτή η περιτύλιξη γίνεται χρησιμοποιώντας έναν αυτοματοποιημένο εξοπλισμό περιέλιξης. Έπειτα και αφού εφαρμοστεί ο κατάλληλος αριθμός στρώσεων, η σκλήρυνση πραγματοποιείται είτε σε φούρνο είτε σε θερμοκρασία δωματίου. Αφού ολοκληρωθεί η σκλήρυνση, αφαιρείται ο άξονας. Χρησιμοποιώντας αυτήν την τεχνική, παρέχεται ένας υψηλός βαθμός ελέγχου ως προς την ομοιομορφία και τον προσανατολισμό της περιέλιξης. Οι εφαρμογές περιέλιξης με νήμα περιλαμβάνουν περιβλήματα από κινητήρες πυραύλων, δεξαμενές αποθήκευσης, καθώς και σωλήνες και δοχεία πίεσης [28,29].

3.5. Άλλες μέθοδοι

Ο προ-εμποτισμός (*Prepreg*) είναι όρος της σύνθετης βιομηχανίας και αφορά τη συνεχή ενίσχυση των ινών, οι οποίες είναι προ-εμποτισμένες με πολυμερή ρητίνη. Αυτό το υλικό παραδίδεται σε μορφή ταινίας στον κατασκευαστή, ο οποίος στη συνέχεια πραγματοποιεί απευθείας την μορφοποίηση. Ως αποτέλεσμα, το προϊόν ωριμάζει πλήρως, χωρίς να απαιτείται προθήκη ρητίνης [30]. Η συγκεκριμένη διαδικασία, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενη σε δομικές εφαρμογές. Υπάρχει μια ακόμα μέθοδος, η *Pultrusion*, μια διαδικασία χύτευσης που χρησιμοποιείται για την κατασκευή αντικειμένων με σταθερή διατομή, όπως ράβδοι, σωλήνες και δοκοί. Βασίζεται στη συνεχή έλξη ινών μέσα από διάφορα στάδια επεξεργασίας. Η μέθοδος *Pultrusion* συνδυάζει τη χρήση θερμοσκληρυνόμενων υλικών και ινών για να δημιουργήσει ανθεκτικά και ελαφριά προϊόντα σε μεγάλη ποσότητα με ακρίβεια [31].

4. Μηχανικές Ιδιότητες Σύνθετων Υλικών

4.1 Μηχανικές ιδιότητες και κανονισμοί – Επισκόπηση

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει δημοσιευθεί σημαντικός αριθμός μελετών που αφορούν τις μηχανικές ιδιότητες και την εφαρμογή σύνθετων υλικών πολυμερούς μήτρας ενισχυμένων με ίνες γυαλιού ή άνθρακα. Ακολούθως παρατίθενται ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Η επίδραση των ιδιοτήτων της επιφάνειας επεξεργασμένων (*sized*) και μη επεξεργασμένων (*unsized*) ινών στην ικανότητα συγκόλλησης αυτών με πολυμερείς μήτρες μελετήθηκε από τον *Dilsil* [32]. Πιο πρόσφατα, ο *Gopal*, [33] ερεύνησε το σχεδιασμό προϊόντων για σύνθετα υλικά προηγμένης τεχνολογίας στον τομέα της αεροδιαστημικής και συνόπισε τις βασικές αρχές σχεδιασμού και ανάπτυξης. Η ανάκτηση ινών άνθρακα από προ-εμποτισμένα σύνθετα (*prepreg*) με την εφαρμογή μεθόδου που χρησιμοποιεί νιτρικό οξύ, και η αξιολόγηση της απόδοσης της μεθόδου μελετήθηκε από τους *Hanaoka et al.* [34]. Οι *Ji et al.* μελέτησαν τις ιδιότητες αντίστασης στη φθορά και την αντοχή σύνθετων πλαισίων σε κρούση με χαμηλή ταχύτητα πρόσκρουσης [35]. Οι *McGowan et al.* δημοσίευσαν μια ανασκόπηση για την υποβάθμιση σύνθετων υλικών που χρησιμοποιούνται σε ανεμογεννήτριες. Η μελέτη εξετάζει την κόπωση και τη διάβρωση σε μεγάλες εγκαταστάσεις [36]. Ο σχεδιασμός θαλάσσιων κατασκευών από σύνθετα υλικά περιγράφεται από τον *Smith* [37]. Επίσης, έχει δημοσιευθεί μια ιστορική επισκόπηση της ανάπτυξης σύνθετων υλικών, στην οποία αναδεικνύονται τα επιτεύγματα της βιομηχανίας [38]. Η σχεδίαση και κατασκευή σκαφών με επίπεδη γάστρα (*planing hull*) περιγράφεται από τους *Cucinotta et al.* [39]. Η μελέτη εστιάζει στην εφαρμογή σύνθετων υλικών σε ναυπηγικές κατασκευές με στόχο τη βελτίωση της υδροδυναμικής τους απόδοσης και της ενεργειακής εξοικονόμησης.

4.1.1. Επιθεώρηση κατασκευών από σύνθετα υλικά

Κατά τον έλεγχο κατασκευών από σύνθετα υλικά, για να γίνει η απαιτούμενη πιστοποίηση, μπορεί να ζητηθεί κάθε χρήσιμη πληροφορία/ένδειξη/έγγραφο που αφορά το είδος και την προέλευση των πρώτων υλών, όπως:

- Δελτίο τεχνικών δεδομένων και χαρακτηριστικών των κύριων πρώτων υλών (ρητίνη, υφάσματα ενίσχυσης και πυρήνες).
- Εγγύηση του κατασκευαστή για τις πρώτες ύλες (σταθερότητα όσον αφορά τη γήρανση σε θαλάσσιο περιβάλλον, ή την αντοχή σε υδρόλυση).
- Τύπος και αναλογία καταλύτη, σκληρυντή και επιταχυντή που συνιστάται από τον κατασκευαστή.
- Συνθήκες εργασίας (ατμόσφαιρα περιβάλλοντος, θερμοκρασία, σχετική υγρασία).
- Πιστοποιητικό έγκρισης τύπου που χορηγείται από αναγνωρισμένο οργανισμό.

Ο έλεγχος στοιχείων της κατασκευής ενός πολύστρωτου, ανάλογα με τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά και τους επίπεδους ελαστικούς συντελεστές, γίνεται μέσω υπολογισμού των συντελεστών ασφαλείας για κάθε στρώση του υλικού [40].

4.1.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά ρητίνης και κανονισμοί

Σε ότι αφορά τα συστήματα ρητίνης και τη διαδικασία του πολυμερισμού στην οποία υποβάλλονται, υπάρχει ένα σύνολο από συγκεκριμένους κανονισμούς που σχετίζονται με τη θερμοκρασία και την ταχύτητα του πολυμερισμού. Υπάρχει ο οδηγός του *Erhard* [41] για τον σχεδιασμό με πλαστικά υλικά, στον οποίο περιγράφονται οι ιδιότητες των πολυμερών, οι διαδικασίες παραγωγής και οι εφαρμογές τους στη βιομηχανία. Σύμφωνα με αυτόν, η θερμοκρασία πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 60 και 150 °C, ανάλογα με το υλικό, ενώ η πυκνότητα των ρητινών είναι συνήθως από 1.20 έως 1.25 g/cm³. Ο πολυμερισμός ξεκινά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εξελίσσεται με μια εξώθερμη αντίδραση που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας. Στην κατασκευή σκαφών χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι πολυεστερικών ρητινών, οι ισοφθαλικές και οι ορθοφθαλικές. Η ισοφθαλική πολυεστερική ρητίνη, έχει καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά και μικρότερη απορρόφηση νερού σε σύγκριση με την ορθοφθαλική, συνεπώς θεωρείται πιο κατάλληλη για ανθεκτικές κατασκευές.

4.1.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά ενισχύσεων και κανονισμοί

Οι ενισχυτικές ίνες πρέπει γενικά να είναι οργανωμένες σε μορφή υφασμάτων ώστε να διευκολύνεται η διαχείρισή τους. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη γραμμική

πυκνότητα του νήματος, η οποία εκφράζεται σε tex (g/km), καθώς επηρεάζει άμεσα την αντοχή του νήματος και συνεπώς τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος.

4.1.4 Γενικός έλεγχος θαλάσσιων κατασκευών

Σε οποιαδήποτε θαλάσσια κατασκευή που αποτελείται από σύνθετα υλικά πρέπει να ελέγχονται όλες οι πλευρικές πιέσεις που ασκούνται [13]. Για παράδειγμα, όταν πρόκειται για ένα πλοίο οι ροπές κάμψης και οι διατμητικές δυνάμεις που προκαλούνται υπολογίζονται σε σχέση με τα ακόλουθα τοπικά πλευρικά φορτία:

- Θαλάσσιες πιέσεις
- Δυνάμεις πρόσκρουσης στον πυθμένα
- Κρουστική πίεση στο πλευρικό κέλυφος
- Εσωτερικές πιέσεις
- Φορτία πάγου στο πλευρικό κέλυφος

Επίσης ισχύουν τα ακόλουθα:

Οι ροπές κάμψης που προκαλούνται από τη θαλάσσια ή την εσωτερική πίεση υπολογίζονται ανά μέτρο πλάτους του ελάσματος. Παράλληλα, οι ροπές κάμψης και οι εγκάρσιες διατμητικές δυνάμεις που προκύπτουν από φορτία κρούσης πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη. Δεδομένου ότι οι κατασκευές γίνονται από σύνθετα υλικά, τα φορτία κρούσης του πυθμένα μπορούν να αυξηθούν μέσω ενός συντελεστή ενίσχυσης, ο οποίος ενσωματώνει την ακαμψία του υλικού. Ειδικότερα, οι ροπές κάμψης που προκαλούνται από την κρουστική πίεση στο πλευρικό κέλυφος πρέπει να υπολογίζονται ανά μέτρο πλάτους του ελάσματος [13].

4.1.5 Κατασκευή, δοκιμές και επιθεώρηση

Σε κάθε βήμα της κατασκευαστικής διαδικασίας υπάρχει συγκεκριμένος κατάλογος με στοιχεία που αφορούν κάθε υλικό. Έτσι, στις πρώτες ύλες πρέπει να υπάρχει [43]:

- Πλήρης κατάλογος όλων των κύριων χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών για την κατασκευή σύνθετου υλικού και να καλύπτεται από τους κανόνες ταξινόμησης των πλοίων.

- Για κάθε κύρια πρώτη ύλη, πληροφορίες όπως όνομα του κατασκευαστή, αναφορά προϊόντος.
- Ειδικές απαιτήσεις από τον προμηθευτή, όπως θερμοκρασίες αποθήκευσης και μέτρηση της υγρασίας, μέγιστη διάρκεια ζωής του προϊόντος, τύπος ελέγχων που πρέπει να διενεργούνται στα εισερχόμενα προϊόντα και ιδιότητες που πρέπει να ελεγχθούν από το ναυπηγείο πριν από τη χρήση, ίδιοι έλεγχοι και δοκιμή για την επαναξιολόγηση ληγμένων προϊόντων.

Για τις συνθήκες αποθήκευσης απαιτούνται [43]:

- Πληροφορίες σχετικά με τους χώρους αποθήκευσης (οι αποθήκες θα πρέπει να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τις μονάδες πλαστικοποίησης για να ελαχιστοποιείται ο χρόνος μεταφοράς των υλικών και η έκθεσή τους σε μεταβολές θερμοκρασίας ή υγρασίας, αναφέροντας τις παραλλαγές των θερμοκρασίας και υγρασία, συνθήκες εξαερισμού, δελτία δεδομένων του προμηθευτή που προσδιορίζουν τις συνθήκες αποθήκευσης, μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται σε περίπτωση παρατυπιών κατά την αποθήκευση, καταγραφή των εγγράφων για τον έλεγχο της άφιξης και αναχώρησης της αποστολής) [43].

Για την προμήθεια πρώτων υλών στις μονάδες πλαστικοποίησης:

- Οι μονάδες πλαστικοποίησης είναι εξειδικευμένοι χώροι ή εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία και την παραγωγή σύνθετων υλικών, ειδικά εκείνων που βασίζονται σε πολυμερή μήτρα (όπως ρητίνες) και ενισχύονται με ίνες (π.χ. ίνες γυαλιού ή άνθρακα) [44].

Συγκεκριμένα, στις μονάδες αυτές πραγματοποιούνται διαδικασίες όπως:

- Εμποτισμός των ινών με ρητίνη.
- Διαστρωμάτωση υλικών για τη δημιουργία πάνελ ή εξαρτημάτων με σύνθετη δομή [45].
- Θερμική ή χημική σκλήρυνση της μήτρας, ώστε να αποκτήσει το τελικό υλικό τις απαραίτητες μηχανικές ιδιότητες.
- Χρήση μεθόδων όπως χύτευση με συμπίεση (*compression molding*), έγχυση ρητίνης υπό κενό (*vacuum infusion*) ή χειρωνακτική επίστρωση (*hand lay-up*) [46].

Οι μονάδες αυτές συχνά περιλαμβάνουν εξοπλισμό και ελεγχόμενες συνθήκες (όπως θερμοκρασία και υγρασία) για να διασφαλίσουν την ποιότητα του παραγόμενου υλικού. Είναι κρίσιμες σε βιομηχανικές εφαρμογές που αφορούν την αεροναυπηγική, τη ναυπηγική και τις κατασκευές [47].

Για την ιχνηλασιμότητα:

- Περιγραφή της διαδικασίας του ναυπηγείου για τη διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας των πρώτων υλών από τη στιγμή της παραλαβής μέχρι το τέλος των εργασιών παραγωγής.

Κατά το στάδιο της προετοιμασίας για τις πρώτες ύλες:

- Μέθοδος για τον έλεγχο, πριν από την παρασκευή, ότι τα τεχνικά συστατικά των συστημάτων ρητίνης έχουν αποθηκευτεί σύμφωνα με τις οδηγίες των προμηθευτών και ότι οι διαδικασίες, η μέθοδος και ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός του ναυπηγείου για τη μέτρηση των διαφόρων συστατικών, ιδίως σε σχέση με τη θερμοκρασία στη μονάδα πλαστικοποίησης.

Για τις ίνες:

- Η διαδικασία ταυτοποίησης, επιθεώρησης και κοπής των υφασμάτων ακολουθεί συγκεκριμένα βήματα, με στόχο την εξασφάλιση της ποιότητας και την αποφυγή προβλημάτων, όπως η συμύκνωση, λόγω διακυμάνσεων της θερμοκρασίας. Πριν την κοπή, κάθε παρτίδα υφάσματος επιθεωρείται προσεκτικά για να εντοπιστούν τυχόν ατέλειες, ενώ η κοπή πραγματοποιείται σε ξεχωριστό χώρο από τη μονάδα πλαστικοποίησης για να αποφευχθούν επιπτώσεις από θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Ιδιαίτερη προσοχή δίδεται στη διαχείριση της θερμοκρασίας και υγρασίας για την πρόληψη της συμύκνωσης νερού από την υγρασία, η οποία θα μπορούσε να επηρεάσει την ποιότητα του υλικού. Επιπλέον, κάθε παρτίδα υφάσματος επισημαίνεται με κωδικούς για να εξασφαλιστεί η ιχνηλασιμότητά της, επιτρέποντας τη συνεχόμενη παρακολούθηση της προέλευσης και της ποιότητας των υλικών καθ' όλη τη διάρκεια της.

Υλικά πυρήνα για σάντουιτς:

- Τα υλικά πυρήνα για σάντουιτς, όπως το *Nomex*, απαιτούν ειδική προσοχή και χειρισμό για να διασφαλιστεί η ποιότητα και η ασφάλεια κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, μεταφοράς και επεξεργασίας τους. Όπως και τα υφάσματα ινών, τα υλικά πυρήνα, π.χ. οι κυψελωτοί πυρήνες, θα πρέπει να επιθεωρούνται για ατέλειες πριν τη χρήση. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στην αποφυγή σκόνης κατά την επεξεργασία αυτών των υλικών, καθώς η σκόνη μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος, δημιουργώντας ανωμαλίες ή μειώνοντας την αποτελεσματικότητα της συγκόλλησης των διαφορετικών φάσεων. Για την αποφυγή σχηματισμού σκόνης και τη διασπορά των ινών *Nomex*, οι χώροι επεξεργασίας πρέπει να διαθέτουν επαρκή εξαερισμό και να τηρούνται αυστηρές διαδικασίες καθαρισμού. Επίσης, η χρήση προστατευτικών μέτρων, όπως μάσκες ή φίλτρα, από το προσωπικό είναι απαραίτητη για την αποφυγή εισπνοής σκόνης και τη διατήρηση της υγιεινής του εργασιακού περιβάλλοντος [48].

Για τα συγκολλητικά:

Οι ίδιες πληροφορίες όπως και για τα συστήματα ρητίνης και οι προδιαγραφές των προμηθευτών σχετικά με το μέγιστο χρόνο που παρέρχεται μεταξύ της προετοιμασίας και της εφαρμογής των συγκολλητικών. Το καλούπι για την κατασκευή θαλάσσιων κατασκευών είναι μια προκατασκευασμένη δομή που χρησιμοποιείται ως βάση ή μήτρα για τη διαμόρφωση και παραγωγή σύνθετων υλικών, όπως πολυεστερικά ή εποξειδικά σύνθετα ενισχυμένα με ίνες γυαλιού ή άνθρακα [49].

Για το χρησιμοποιούμενο καλούπι και τα υλικά κατασκευής του, όπως και τα μέσα αποθήκευσης:

- Για την αποφυγή της συμπύκνωσης που προκαλείται από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μεταξύ του χώρου αποθήκευσης και του εργαστηρίου του καλουπιού, είναι σημαντικό να διασφαλίζεται ότι τα υλικά αποθηκεύονται και μεταφέρονται σε κατάλληλες συνθήκες. Η απότομη αλλαγή θερμοκρασίας μπορεί να οδηγήσει σε υγρασία και συμπύκνωση στην επιφάνεια των υλικών, κάτι που θα επηρεάσει την ποιότητα της επεξεργασίας. Γι' αυτό, τα υλικά πρέπει να προθερμαίνονται σταδιακά πριν τη χρήση και να αφήνονται να προσαρμοστούν στις θερμοκρασίες του εργαστηρίου για να αποφευχθεί η

δημιουργία συμπυκνωμένων υδρατμών. Όσον αφορά τη διαδικασία προετοιμασίας, είναι απαραίτητο να διασφαλίζεται η συμβατότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, όπως ο παράγοντας αποκόλλησης και το *gel-coat*, για να αποφευχθούν αντιδράσεις ή ασυμβατότητες. Επιπλέον, πρέπει να τηρούνται αυστηρά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ της εφαρμογής του παράγοντα αποκόλλησης και του *gel-coat*, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή πρόσφυση και η αποτελεσματικότητα της επικάλυψης χωρίς προβλήματα.

- Το περιβάλλον πλαστικοποίησης. Το περιβάλλον πλαστικοποίησης πρέπει να διατηρείται εντός συγκεκριμένων ορίων θερμοκρασίας και υγρασίας για την επιτυχή διεξαγωγή της διαδικασίας. Οι ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες και η υγρασία παρακολουθούνται συνεχώς με κατάλληλα όργανα μέτρησης. Εάν οι τιμές ξεπερνούν τα καθορισμένα όρια, απαιτούνται τροποποιήσεις στη διαδικασία πλαστικοποίησης για να διασφαλιστεί η καλή ποιότητα του αποτελέσματος. Επίσης, λαμβάνονται προφυλάξεις για την αποφυγή της παρουσίας σκόνης στο χώρο εργασίας, καθώς η σκόνη μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διαδικασία και την ποιότητα των υλικών.
- Διαδικασία πλαστικοποίησης. Οι εργασίες πλαστικοποίησης απαιτούν επίσης αυστηρό έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως οι ελάχιστες και μέγιστες θερμοκρασίες και η υγρασία. Οι κατάλληλες συνθήκες για την πλαστικοποίηση περιλαμβάνουν συγκεκριμένα όρια θερμοκρασίας και υγρασίας, τα οποία πρέπει να παρακολουθούνται. Εάν η θερμοκρασία ή η υγρασία υπερβαίνουν τα επιτρεπτά όρια, πρέπει να τροποποιείται κατάλληλα η διαδικασία κατασκευής, για να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Επιπλέον, λαμβάνονται κατάλληλες προφυλάξεις, όπως η χρήση φίλτρων αέρα, εξαερισμού και προστατευτικών καλύψεων, για να αποφευχθεί η παρουσία σκόνης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, έτσι ώστε να διατηρείται καθαρός ο χώρος εργασίας και να μην επηρεάζεται η ποιότητα των υλικών και της κατασκευής.

Σχετικά με την κατασκευή του περιβλήματος απαιτείται να γίνονται τα εξής:

- Περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθείται στο χώρο του ναυπηγείου για να διασφαλιστεί ότι η κατασκευή πληροί τις απαιτήσεις και είναι σύμφωνη με τα σχέδια έγκρισης.
- Παροχή πληροφοριών σχετικά με τις κύριες εργασίες σύνδεσης του κύτους με το κατάστρωμα (προετοιμασία της επιφάνειας προς συγκόλληση, χρησιμοποιούμενα μέσα και προϊόντα, μέσα διασφάλισης της πίεσης επαφής).

Σε ότι αφορά εσωτερικές δομές στο χώρο των εγκαταστάσεων:

- Οι κύριες εργασίες εγκατάστασης της εσωτερικής δομής και του αντικολλητού καλουπιού περιλαμβάνουν μια σειρά από προσεκτικά συντονισμένες διαδικασίες, οι οποίες διασφαλίζουν την ποιότητα και την ακεραιότητα του τελικού προϊόντος. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της πλαστικοποίησης της γάστρας και της τοποθέτησης του αντικολλητού καλουπιού είναι κρίσιμος για την εξασφάλιση σωστής εφαρμογής των υλικών και την αποφυγή παραμορφώσεων. Συνήθως, ο χρόνος αυτός επιλέγεται με βάση τη διαδικασία πολυμερισμού, και πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η γάστρα έχει σταθεροποιηθεί επαρκώς πριν από την τοποθέτηση του καλουπιού.
- Η διαδικασία επικάλυψης των διαφραγμάτων και ενισχυτικών περιλαμβάνει μια σειρά βημάτων που διασφαλίζουν την σωστή εφαρμογή των υλικών και την ακεραιότητα του τελικού προϊόντος. Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της επικάλυψης του κύτους και της τοποθέτησης των διαφραγμάτων και των ενισχυτικών είναι κρίσιμος, καθώς πρέπει να διασφαλίζεται ότι το κύτος έχει σταθεροποιηθεί ακόμα και πριν την ολοκλήρωση της αντίδρασης πολυμερισμού. Κατά την τοποθέτηση των διαφραγμάτων και των ενισχυτικών, το τοπικό έλασμα προετοιμάζεται με βάση την απαιτούμενη αντοχή και τη συμπεριφορά του υπό πολυμερισμό, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η σωστή εφαρμογή και θέση των εξαρτημάτων.
- Η προετοιμασία για την πλαστικοποίηση των διαφραγμάτων και ενισχυτικών περιλαμβάνει καθαρισμό και τοπική προετοιμασία των επιφανειών, ώστε να εξασφαλιστεί καλή πρόσφυση με τα υλικά πλαστικοποίησης. Για την πλαστικοποίηση, χρησιμοποιούνται εποξειδικές ή πολυεστερικές ρητίνες, οι

οποίες παρέχουν αντοχή και ανθεκτικότητα, καθώς και καλή σύνδεση με το κύτος και τα υπόλοιπα εξαρτήματα της κατασκευής [50].

4.2. Επίδραση του Μήκους Ινών

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός σύνθετου υλικού, που είναι ενισχυμένο με ίνες, δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες της ίνας, αλλά και από τον βαθμό στον οποίο ένα εφαρμοζόμενο φορτίο μεταδίδεται στις ίνες (από τη φάση της μήτρας).

Μία πολύ κρίσιμη παράμετρος που επηρεάζει την έκταση αυτής της μετάδοσης είναι η δύναμη του δεσμού στην επιφάνεια, μεταξύ των φάσεων της ίνας και της μήτρας. Συγκεκριμένα, υπό την εφαρμογή μιας τάσης, αυτός ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας περιορίζεται στα άκρα των ινών, προκαλώντας ένα μοτίβο παραμόρφωσης στη μήτρα. Δηλαδή, δεν υπάρχει αποτελεσματική μετάδοση φορτίου από τη μήτρα προς τα άκρα της ίνας.

Ο προσδιορισμός του κρίσιμου μήκους (*critical length*) της ίνας, είναι απαραίτητος για την αποτελεσματική ενίσχυση και ακαμψία του σύνθετου υλικού. Το κρίσιμο μήκος l_c εξαρτάται από τη διάμετρο της ίνας d και από την τελική (ή εφελκυστική) αντοχή της σ_f^* . Επίσης, εξαρτάται από την αντοχή του δεσμού ίνας-μήτρας (ή την αντοχή της μήτρας σε διάτμηση) τ_c σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (1) :

$$l_c = \frac{\sigma_f^* d}{2\tau_c} \quad (1)$$

Αυτό το κρίσιμο μήκος της ίνας συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 20 και 150 φορές τη διάμετρο αυτής. Αυτή η παρατήρηση βασίζεται σε συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα και θεωρητικές εκτιμήσεις, οι οποίες εξαρτώνται από την ποιότητα της σύνδεσης, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και τις συνθήκες φόρτισης. Η αναλογία μήκους προς διάμετρο ίνας αποτελεί μια γενική εκτίμηση που προκύπτει από την πειραματική ανάλυση και τη θεωρητική μοντελοποίηση των σύνθετων υλικών. Επιπροσθέτως, όταν μια τάση σ_f^* , εφαρμόζεται σε μια ίνα η οποία έχει ακριβώς το ίδιο κρίσιμο μήκος, προκύπτει το προφίλ της τάσης. Αυτό σημαίνει, ότι το μέγιστο φορτίο της ίνας επιτυγχάνεται μόνο στο αξονικό κέντρο της. Καθώς αυξάνεται το μήκος της ίνας l , η ενίσχυση των ινών γίνεται ακόμα πιο αποτελεσματική.

Η εξίσωση (1) προκύπτει από την μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών, συγκεκριμένα από τη θεωρία της μεταφοράς φορτίου στις ίνες ενισχυμένων ρητινών. Αναλυτικά είναι:

1. l_c (κρίσιμο μήκος): Το μήκος της ίνας πάνω από το οποίο η ίνα μπορεί να μεταφέρει φορτίο αποτελεσματικά χωρίς να αποκοπεί από τη μήτρα (ρητίνη).
2. σ_f^* (τελική ή εφελκυστική αντοχή της ίνας): Η μέγιστη αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό, δηλαδή η μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει η ίνα χωρίς να σπάσει.
3. τ_c (αντοχή του δεσμού ίνας-μήτρας): Η αντοχή του δεσμού μεταξύ της ίνας και της μήτρας (ρητίνης), η οποία καθορίζει την ικανότητα μετάδοσης φορτίου από τη μήτρα στην ίνα.

Από τη μηχανική ανάλυση των σύνθετων υλικών, προκύπτει η εξίσωση (1), στην οποία:

- Η διάμετρος της ίνας (d) επηρεάζει το κρίσιμο μήκος, διότι μεγαλύτερες ίνες μπορούν να μεταφέρουν μεγαλύτερο φορτίο, άρα απαιτούν μικρότερο κρίσιμο μήκος.
- Η αντοχή του δεσμού ίνας-μήτρα (τ_c) καθορίζει την ικανότητα του υλικού να αντέχει την παραμόρφωση και τη μεταφορά φορτίου. Αν ο δεσμός είναι ισχυρότερος, τότε το κρίσιμο μήκος μειώνεται.
- Η τελική αντοχή της ίνας σ_f^* είναι σημαντική διότι καθορίζει πόσο φορτίο μπορεί να αντέξει η ίνα πριν σπάσει.

Οι ενισχυτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα πολύστρωτα υλικά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

A. Συνεχείς ίνες: Αν το μήκος της ίνας l είναι πολύ μεγαλύτερο από ένα κρίσιμο μήκος l_c (συνήθως $l > 15 l_c$), τότε οι ίνες θεωρούνται συνεχείς. Αυτό σημαίνει ότι οι ίνες είναι αρκετά μεγάλες ώστε να μεταφέρουν αποτελεσματικά το φορτίο από τη μήτρα προς όλο το μήκος τους χωρίς να σπάσουν ή να αποκοπούν. Για αυτές τις ίνες, η μεταφορά φορτίου είναι ομαλή και αποτελεσματική, και οι ίνες ενισχύουν σημαντικά το σύνθετο υλικό.

B. Ασυνεχείς ίνες: Αν το μήκος της ίνας είναι μικρότερο από το κρίσιμο μήκος l_c τότε οι ίνες θεωρούνται ασυνεχείς. Αυτό σημαίνει ότι οι ίνες δεν είναι αρκετά μεγάλες για να μεταφέρουν το φορτίο αποτελεσματικά, καθώς το φορτίο δε μεταφέρεται πλήρως από τη μήτρα στην ίνα λόγω του μικρού μήκους της. Σε αυτή την περίπτωση, η μήτρα που είναι μια θερμοσκληρυνόμενη ρητίνη περιβάλλει την ίνα χωρίς να υπάρχει ουσιαστική μετάδοση τάσης (φορτίου), και η ενίσχυση που προσφέρεται από τις ίνες είναι πολύ μικρή [3].

4.3 Επίδραση του προσανατολισμού και της συγκέντρωσης ενισχυτικών ινών στις ιδιότητες του σύνθετου.

Ο προσανατολισμός των ινών, η συγκέντρωσή τους καθώς και η κατανομή τους, έχουν όλες σημαντική επίδραση τόσο στην αντοχή όσο και σε άλλες ιδιότητες των σύνθετων υλικών που είναι ενισχυμένα με ίνες. Όσο αφορά τον προσανατολισμό, υπάρχουν δύο ειδών ευθυγραμμίσεις: 1) μια παράλληλη ευθυγράμμιση του διαμήκους άξονα των ινών, σε μία μόνο κατεύθυνση και 2) μια εντελώς τυχαία ευθυγράμμιση. Οι συνεχείς ίνες είναι συνήθως ευθυγραμμισμένες, ενώ οι ασυνεχείς ίνες μπορεί να είναι ευθυγραμμισμένες, τυχαία προσανατολισμένες ή μερικώς προσανατολισμένες. Καλύτερες ιδιότητες του σύνθετου υλικού, επιτυγχάνονται όταν η κατανομή των ινών είναι ομοιόμορφη.

Στη συνέχεια, αναφέρονται ορισμένα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως η συμπεριφορά σε εφελκυσμό και η ελαστική συμπεριφορά σύνθετων υλικών, με συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ενισχυτικές ίνες.

- **Εφελκυστική Τάση**

Η εφελκυστική τάση σε σύνθετα υλικά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως: η συμπεριφορά τάσης-παραμόρφωσης των συστατικών, οι μηχανικές ιδιότητες της ίνας και της μήτρας (το υλικό που συγκρατεί τις ίνες), καθώς και το κλάσμα όγκου της ίνας και της μήτρας. Το ποσοστό κάθε υλικού (ίνας και μήτρας) στο σύνθετο επηρεάζει τη συνολική απόδοση της κατασκευής.

Η απόκριση του υλικού αλλάζει ανάλογα με την κατεύθυνση του φορτίου ή της τάσης σε σχέση με την ευθυγράμμιση των ινών. Επιπλέον, τα σύνθετα υλικά με ευθυγραμμισμένες ίνες έχουν ανισότροπες ιδιότητες και χαρακτηρίζονται ως ορθοτροπικά υλικά. Οι ιδιότητές τους εξαρτώνται από την κατεύθυνση κατά την οποία

προσδιορίζονται. Συνήθως, αρχικά μελετάται η κατάσταση στην οποία η τάση εφαρμόζεται κατά μήκος της ευθυγράμμισης των ινών, δηλαδή κατά τη διαμήκη κατεύθυνση. Σε αυτή την περίπτωση, το υλικό παρουσιάζει τη μέγιστη αντοχή του, γιατί η ευθυγράμμιση των ινών λειτουργεί αποτελεσματικά στην ανάληψη του φορτίου. Γίνεται μια υπόθεση σχετικά με τη συμπεριφορά της τάσης έναντι της παραμόρφωσης, για τις δύο φάσεις (ίνα και μήτρα), που παριστάνεται σχηματικά. Σε αυτό το στάδιο επεξεργασίας, η ίνα θεωρείται ότι είναι εντελώς εύθραυστη ενώ η φάση της μήτρας είναι αρκετά όλκιμη. Επίσης, η αντοχή θραύσης, για ίνα και μήτρα ορίζονται ως σ_f^* και σ_m^* αντίστοιχα, καθώς και οι παραμορφώσεις θραύσης ϵ_f^* και ϵ_m^* . Συνήθως θεωρείται ότι $\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$.

- **Ελαστική Συμπεριφορά — Διαμήκης Φόρτιση**

Εξετάζεται η ελαστική συμπεριφορά ενός συνεχούς και προσανατολισμένου σύνθετου υλικού, κατά την κατεύθυνση της ευθυγράμμισης των ινών. Πρώτον, υποτίθεται ότι ο δεσμός της διεπιφάνειας μεταξύ ίνας-μήτρας είναι πολύ ισχυρός, έτσι ώστε η παραμόρφωση τόσο της μήτρας όσο και των ινών, να είναι η ίδια. Αυτό χαρακτηρίζεται ως ισοπαραμορφωσιακή κατάσταση (*isostrain*). Υπό αυτές τις συνθήκες, το συνολικό φορτίο που υφίσταται το σύνθετο υλικό F_c , είναι ίσο με το άθροισμα των φορτίων που μεταφέρονται από τη φάση της μήτρας F_m και από τη φάση της ίνας F_f , όπως φαίνεται από την εξίσωση 2:

$$F_c = F_m + F_f \quad (2)$$

Ο ορισμός της ορθής τάσης χρησιμοποιείται για την αντικατάσταση των ασκούμενων δυνάμεων στην εξίσωση 2, οπότε προκύπτει η παρακάτω εξίσωση 3:

$$\sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \quad (3)$$

και στη συνέχεια, διαιρώντας με τη συνολική επιφάνεια της διατομής, του σύνθετου υλικού A_c , προκύπτει η εξίσωση 4:

$$\sigma_c = \sigma_m \frac{A_m}{A_c} + \sigma_f \frac{A_f}{A_c} \quad (4)$$

όπου τα A_m/A_c και A_f/A_c είναι τα κλάσματα εμβαδού, των φάσεων μήτρας και ίνας, αντίστοιχα. Εάν τα μήκη της φάσης του σύνθετου υλικού, της μήτρας αλλά και της ίνας, είναι όλα ίσα μεταξύ τους, το A_m/A_c είναι ισοδύναμο με το κλάσμα όγκου της

μήτρας V_m και ομοίως, για τις ίνες $V_f = A_f/A_c$. Επομένως, η Εξίσωση 4 μπορεί να γραφεί ως:

$$\sigma_c = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f \quad (5)$$

Η προηγούμενη παραδοχή μιας ισοπαραμορφωσιακής κατάστασης (*isostrain*), σημαίνει ότι οι παραμορφώσεις του υλικού της μήτρας, της ενίσχυσης και του σύνθετου υλικού έχουν την ίδια τιμή (βλ. εξίσωση 6).

$$\epsilon_c = \epsilon_m = \epsilon_f \quad (6)$$

και από αυτήν, προκύπτει η εξίσωση 7:

$$\frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} V_m + \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} V_f \quad (7)$$

Επιπλέον, εάν όλες οι παραμορφώσεις (σύνθετου υλικού, μήτρας και ινών) είναι ελαστικές, τότε $\sigma_c/\epsilon_c = E_c$, $\sigma_m/\epsilon_m = E_m$ και $\sigma_f/\epsilon_f = E_f$. Σε αυτή την περίπτωση, E είναι οι συντελεστές ελαστικότητας για τις αντίστοιχες φάσεις. Από την εξίσωση 7 προκύπτει μια έκφραση για το μέτρο της ελαστικότητας E_{cl} , ενός συνεχούς και ευθυγραμμισμένου σύνθετου υλικού, ως προς την κατεύθυνση της ευθυγράμμισης των ενισχυτικών ινών (εξίσωση 8).

$$E_{cl} = E_m V_m + E_f V_f \quad (8)$$

Δεδομένου ότι το σύνθετο υλικό αποτελείται μόνο από τις φάσεις μήτρας και ίνας, ισχύει $V_m + V_f = 1$. Έτσι, το E_{cl} είναι ίσο με τον σταθμισμένο μέσο όρο, του κλάσματος (του όγκου) των συντελεστών ελαστικότητας. Άλλες ιδιότητες, συμπεριλαμβανομένης της πυκνότητας, έχουν επίσης αυτή την εξάρτηση από τα κλάσματα όγκου. Μπορεί επίσης να φανεί (για τη διαμήκη κατεύθυνση), ότι ο λόγος του φορτίου που μεταφέρεται από τις ίνες, σε σχέση με αυτόν που μεταφέρεται από τη μήτρα, είναι:

$$\frac{F_f}{F_m} = \frac{E_f V_f}{E_m V_m} \quad (9)$$

4.4. Ελαστική Συμπεριφορά — Εγκάρσια Φόρτιση

Ένα συνεχές και προσανατολισμένο από ίνες σύνθετο υλικό σε μια κατασκευή, μπορεί να μελετηθεί και κατά την εγκάρσια κατεύθυνση. Αυτό σημαίνει ότι το φορτίο εφαρμόζεται σε γωνία 90° , προς την κατεύθυνση της ευθυγράμμισης των ινών. Για αυτή την κατάσταση, η τάση σ στην οποία εκτίθενται τόσο το σύνθετο υλικό όσο και οι δύο φάσεις, είναι η ίδια και αποτυπώνεται ως

$$\sigma_c = \sigma_m = \sigma_f = \sigma \quad (10)$$

Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ισοτασική κατάσταση (*isostress*). Επίσης, η τάση ή η παραμόρφωση ολόκληρου του υλικού ϵ_c προκύπτει ότι είναι:

$$\epsilon_c = \epsilon_m V_m + \epsilon_f V_f \quad (11)$$

αλλά, αφού $\epsilon = \sigma/E$,

$$\frac{\sigma}{E_{ct}} = \frac{\sigma}{E_m} V_m + \frac{\sigma}{E_f} V_f \quad (12)$$

όπου E_{ct} είναι το μέτρο ελαστικότητας κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Η εξίσωση 12 γίνεται:

$$\frac{1}{E_{ct}} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_f}{E_f} \quad (13)$$

η οποία μετασχηματίζεται στην εξίσωση 14:

$$E_{ct} = \frac{E_m E_f}{V_m E_f + V_f E_m} = \frac{E_m E_f}{(1 - V_f) E_f + V_f E_m} \quad (14)$$

4.5. Διαμήκης Αντοχή Εφελκυσμού

Ο τρόπος λειτουργίας ενός ενισχυμένου, σύνθετου υλικού, εξαρτάται από τις ιδιότητες της ίνας και της μήτρας, καθώς και από τη φύση και την αντοχή που έχουν οι δεσμοί διεπαφής τους. Υποθέτοντας ότι $\epsilon_f^* < \epsilon_m^*$, που είναι και η πιο συνηθισμένη περίπτωση, οι ίνες θα αστοχήσουν πριν από τη φάση της μήτρας. Δηλαδή, μόλις σπάσουν οι ίνες, το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου τους μεταφέρεται στη μήτρα. Σε αυτήν την περίπτωση, η εξίσωση 5 μπορεί να προσαρμοστεί για τη διαμήκη αντοχή του σύνθετου υλικού σ_{cl}^* , στην ακόλουθη εξίσωση 15:

$$\sigma_{cl}^* = \sigma_m'(1 - V_f) + \sigma_f^* V_f \quad (15)$$

όπου, σ_m' είναι η τάση στη μήτρα (σε περίπτωση αστοχίας της ίνας) και όπως προηγουμένως, το σ_f^* είναι η αντοχή της ίνας σε εφελκυσμό.

4.6. Εγκάρσια Αντοχή Εφελκυσμού

Οι αντοχές των συνεχών και μονής κατεύθυνσης, ινωδών, σύνθετων υλικών, είναι εξαιρετικά ανισότροπες. Τέτοιου είδους σύνθετα υλικά είναι συνήθως σχεδιασμένα για να χρησιμοποιούνται κατά μήκος της διαμήκου κατεύθυνσης (κατεύθυνση υψηλότερης αντοχής). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας κατασκευής μπορεί επίσης να προκύψουν εγκάρσια φορτία εφελκυσμού. Υπό αυτές τις συνθήκες, μπορεί να εκδηλωθεί πρόωρη αστοχία, διότι η εγκάρσια αντοχή είναι συνήθως εξαιρετικά χαμηλή.

5. Διεθνή πρότυπα για πειραματικές δοκιμές σε σύνθετα υλικά

5.1. Απορρόφηση Νερού (Υδατοαπορροφητικότητα)

Η δοκιμή απορρόφησης νερού σε υλικά περιλαμβάνει διάφορους τύπους εμβάπτισης, ανάλογα με τις ιδιότητες του δείγματος και τον στόχο της μέτρησης. Ακολουθείται το πρότυπο *ASTM D570: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics*. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι η εμβάπτιση 24 ωρών, όπου τα δείγματα βυθίζονται σε απεσταγμένο νερό στους $23 \pm 1^\circ\text{C}$ για 24 ώρες. Στο τέλος, απομακρύνεται η επιφανειακή υγρασία και ζυγίζονται με ακρίβεια 0.001 g. Για δείγματα μικρού πάχους (πάχος $1/16$ της ίντσας ή μικρότερο), απαιτείται χρήση φιάλης ζύγισης. Η εμβάπτιση 2 ωρών ακολουθεί την ίδια διαδικασία, αλλά με μειωμένη διάρκεια, ενώ χρησιμοποιείται κυρίως για υλικά με υψηλό ρυθμό απορρόφησης ή δείγματα με μικρό πάχος.

Η επαναλαμβανόμενη εμβάπτιση συνδυάζει μέτρηση μετά από 2 ώρες και 24 ώρες, ενώ η μακροχρόνια εμβάπτιση προορίζεται για τον υπολογισμό της μέγιστης απορρόφησης νερού (κορεσμός). Στη μακροχρόνια μέθοδο, τα δείγματα ζυγίζονται ξανά μετά από μία εβδομάδα και κάθε δύο εβδομάδες, έως ότου η αύξηση βάρους μειωθεί κάτω από 1% της συνολικής αύξησης ή 5 mg. Όταν επιτευχθεί αυτή η σταθεροποίηση, το δείγμα θεωρείται κορεσμένο. Οι δοκιμές αυτές βοηθούν στον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας των υλικών σε συνθήκες υγρασίας και νερού.

5.2. Δοκιμασία απώλειας ρητίνης με καύση (*Burn off test*)

Η δοκιμή γίνεται χρησιμοποιώντας ένα χωνευτήριο (από πλατίνα ή πορσελάνη) χωρητικότητας περίπου 30 mL και ηλεκτρικό φούρνο που διατηρεί σταθερή θερμοκρασία $565 \pm 28^\circ\text{C}$ ($1050 \pm 50^\circ\text{F}$). Οι συνθήκες της δοκιμής εκτελούνται σε τυπικό εργαστηριακό περιβάλλον με την ίδια θερμοκρασία και υγρασία, εκτός αν καθορίζεται διαφορετικά.

Η διαδικασία ξεκινά με τη θέρμανση του χωνευτηρίου στους 500-600 °C για τουλάχιστον 10 λεπτά. Στη συνέχεια, το χωνευτήριο ψύχεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, σε ξηραντήρα και ζυγίζεται με ακρίβεια ± 1.0 mg. Έπειτα, το δείγμα τοποθετείται στο χωνευτήριο, το οποίο ζυγίζεται ξανά. Ακολουθεί θέρμανση του χωνευτηρίου και του δείγματος με λύχνο *Bunsen*, μέχρι το περιεχόμενο να αναφλεγεί, διατηρώντας ομοιόμορφη καύση. Μετά την πλήρη καύση, το χωνευτήριο και το υπόλειμμα θερμαίνονται στον φούρνο στους $565 \pm 28^\circ\text{C}$ ($1050 \pm 50^\circ\text{F}$) μέχρι να

απομακρυνθεί όλο το εύφλεκτο υλικό. Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει ψύξη του χωνευτηρίου σε θερμοκρασία δωματίου, ζύγιση με ακρίβεια ± 1.0 mg μέχρι σταθερού βάρους.

5.3. Υπολογισμός περιεκτικότητας κενού όγκου σε ενισχυμένα πλαστικά

Το πρότυπο που χρησιμοποιείται σε αυτήν την διαδικασία είναι το *ASTM D3171: Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*. Η διαδικασία στηρίζεται κυρίως σε δύο βασικές μετρήσεις: την πυκνότητα της ρητίνης και του σύνθετου υλικού, καθώς και την πυκνότητα του υλικού ενίσχυσης.

Για την πυκνότητα της ρητίνης και του σύνθετου, χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι:

1. Προσδιορισμός σε κομμάτια σκληρυμένης ρητίνης χωρίς φυσαλίδες.
2. Προσδιορισμός της πυκνότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο.
3. Μέτρηση πίεσης υπό συνθήκες που προσομοιώνουν αυτές της σκλήρυνσης του σύνθετου υλικού.

Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πιστοποιημένες μετρήσεις πυκνότητας που παρέχει ο κατασκευαστής της ρητίνης, εφόσον συνοδεύονται από κατάλληλη τεκμηρίωση για κάθε παρτίδα.

Κατά την προετοιμασία της δοκιμής, τα δείγματα φέρονται σε θερμοκρασία 23 ± 2 °C (73.4 ± 3.6 °F) και σχετική υγρασία $50 \pm 5\%$ για τουλάχιστον 40 ώρες πριν από τη δοκιμή. Σε περίπτωση αποκλίσεων στα αποτελέσματα, εφαρμόζονται αυστηρότερα όρια ανοχής: ± 1 °C (± 1.8 °F) για τη θερμοκρασία και $\pm 2\%$ για τη σχετική υγρασία. Οι δοκιμές διεξάγονται σε τυπικές εργαστηριακές συνθήκες με τις ίδιες παραμέτρους θερμοκρασίας και υγρασίας, εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά στις αντίστοιχες μεθόδους.

5.3.4. Πειραματικός προσδιορισμός πυκνότητας σύνθετων υλικών

Η προετοιμασία του δείγματος περιλαμβάνει τη διασφάλιση ότι οι άκρες και οι επιφάνειες είναι λείες, με την αφαίρεση ασαφών ακρών και φυσαλίδων αέρα. Σε πορώδη δείγματα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στεγανωτικό υλικό γνωστής πυκνότητας. Για τον υπολογισμό του όγκου, πραγματοποιούνται μετρήσεις των διαστάσεων με μικρόμετρο, ενώ ο όγκος υπολογίζεται από τους μέσους όρους των διαστάσεων,

εξασφαλίζοντας σφάλματα που δεν υπερβαίνουν το 0.6% για μικρά δείγματα και το 0.2% για μεγάλα. Στη ζύγιση στον αέρα, η μάζα του δείγματος ζυγίζεται με ακρίβεια ± 0.1 mg, ενώ για τη ζύγιση σε νερό, το δείγμα αναρτάται σε κατάλληλο σύρμα στερέωσης και βυθίζεται πλήρως σε νερό (σε θερμοκρασία 23 ± 2 °C). Προσδιορίζεται η μάζα του αιωρούμενου δείγματος αφού έχουν αφαιρεθεί τυχόν φυσαλίδες αέρα. Η πυκνότητα υπολογίζεται διαιρώντας τη μάζα με τον όγκο του δείγματος. Για την επαλήθευση των δεδομένων, τα αποτελέσματα συγκρίνονται με ακριβή πρότυπα δεδομένα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τουλάχιστον δύο δείγματα σε κάθε δοκιμή. Το πρότυπο που ακολουθείται στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το *ISO 2787* που αφορά τη μέτρηση πυκνότητας στερεών υλικών μέσω της μεθόδου του υπολειπόμενου όγκου ή της ζύγισης σε νερό (μέθοδος *Archimedes*) [45].

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

6. Κατασκευή δοκιμίων και μελέτη των ιδιοτήτων

6.1 Σκοπός- Στόχοι

Ο στόχος της πειραματικής εργασίας ήταν η κατασκευή δοκιμίων από πολυεστέρα, ενισχυμένα με υαλοπίλημα και η μελέτη της συμπεριφοράς τους σε διάφορες δοκιμασίες με βάση προηγούμενη μελέτη [51]. Η κατασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Υλικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών του ΠΑ.Δ.Α. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τρόποι κατεργασίας για την κατασκευή των δοκιμίων. Οι δοκιμασίες που έγιναν ήταν οι εξής: μέτρηση πυκνότητας, απορρόφηση ύδατος, εφελκυσμός, κάμψη τριών σημείων και καύση.

6.2 Πειραματικός εξοπλισμός

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν:

Ως συνεχής φάση χρησιμοποιήθηκε ορθοφθαλικός πολυεστέρας *EXTRAPOL GP-2000* γενικής χρήσης για ναυπηγικές κατασκευές σε συνδυασμό με καταλύτη *MEKP* για την αντίδραση πολυμερισμού.

Ως υλικό ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε υαλοϋφασμα (*fiber glass*) *MAT-450*. Στον πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά του χαρακτηριστικά.

Πίνακας 2. Βασικά χαρακτηριστικά fiber glass MAT-450.

ΤΥΠΟΣ	ΒΑΡΟΣ (gr/m^2)	ΠΑΧΟΣ (mm)	ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΡΗΤΙΝΗΣ (kg/m^2)	ΠΑΧΟΣ ΜΕΤΑ ΤΟΝ ΕΜΠΟΤΙΣΜΟ (mm)
MAT-450	450	0.6	1.0	1.0

Για την εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω όργανα:

Για τη δοκιμασία σε εφελκυσμό και κάμψη χρησιμοποιήθηκε συσκευή *PHYWE* (*Material Testing Unit 17571.00*). Στην Εικόνα 1 που ακολουθεί φαίνεται η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 1. Συσκευή *PHYWE* (*Material Testing Unit 17571.00*)

Για την μέτρηση της πυκνότητας, την απορρόφηση και την δοκιμασία της καύσης χρησιμοποιήθηκε αναλυτικός ζυγός (ακρίβειας ± 0.0001 g).

6.3 Διαδικασία κατασκευής δοκιμών

Η κατασκευή των δοκιμών πραγματοποιήθηκε με ορθοφθαλικό πολυεστέρα *EXTRAPOL GP-2000* και υαλοϋφασμα ως μέσο ενίσχυσης. Στις Εικόνες 2 και 3 απεικονίζονται τα παραπάνω υλικά κατασκευής.



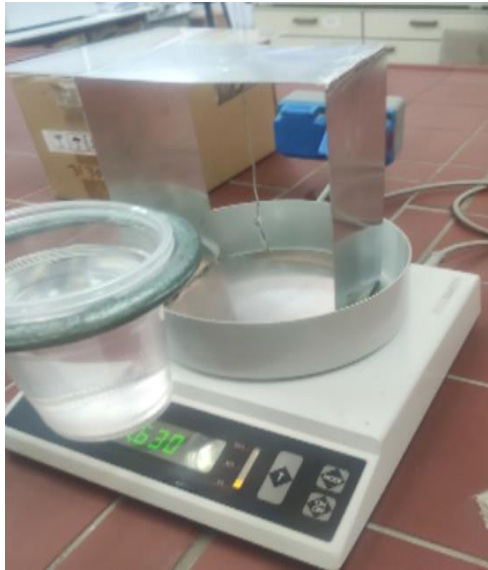
Εικόνα 2. Ορθοφθαλικός πολυεστέρας *EXTRAPOL GP-2000*.



Εικόνα 3. Υαλοϋφασμα (*fiber glass*) MAT-450.

Για κάθε περίπτωση κατασκευάστηκαν δοκίμια με διαστάσεις $2.5\text{ cm} \times 46\text{ cm}$ με το πάχος να διαφέρει ανάλογα με τον αριθμό στρώσεων (1, 2, 4, 8). Με την ολοκλήρωση του πολυμερισμού τα δοκίμια κόπηκαν σε μικρότερα κομμάτια ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε πειράματος.

Για τη δοκιμασία του εφελκυσμού χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια με διαστάσεις $13\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$. Τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν στην κάμψη τριών σημείων είχαν διαστάσεις $12\text{ cm} \times 1.8\text{ cm}$. Για την μέτρηση της απορρόφησης ύδατος τα δοκίμια είχαν διαστάσεις $7.6\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$. Τέλος για την μέτρηση της πυκνότητας και την δοκιμασία της καύσης χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μικρών διαστάσεων στις απαιτήσεις των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω δοκιμασίες (γάντζος βύθισης, χωνευτήρια). Στην Εικόνα 4 φαίνεται η διάταξη με το γάντζο ανάρτησης για τη μέτρηση της πυκνότητας και στην Εικόνα 5 τα πορσελάνινα χωνευτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμασία καύσης.



Εικόνα 4. Διάταξη για μέτρηση της πυκνότητας



Εικόνα 5. Χωνευτήρια πορσελάνης κατά τη δοκιμασία καύσης των δοκιμίων.

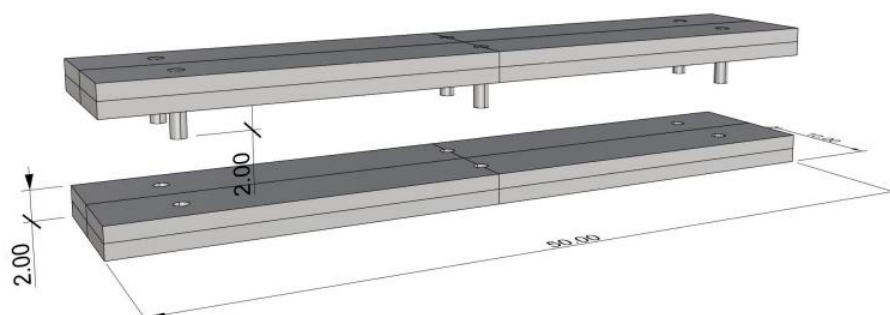
Οι μέθοδοι κατασκευής των δοκιμίων αναφέρονται ακολούθως:

Κατασκευάστηκαν τέσσερα δοκίμια με την μέθοδο της χειρωνακτικής επίστρωσης (*hand-lay up*) σε συνθήκες περιβάλλοντος. Ο αριθμός των στρώσεων ήταν μία, δύο, τέσσερις και οκτώ αντίστοιχα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6. Στο εξής τα παραπάνω δοκίμια θα αναφέρονται ως H1, H2, H4 και H8 αντίστοιχα.



Εικόνα 6. Κατασκευή δοκιμίων με 1 έως 8 στρώσεις με τη μέθοδο *Hand-lay up*.

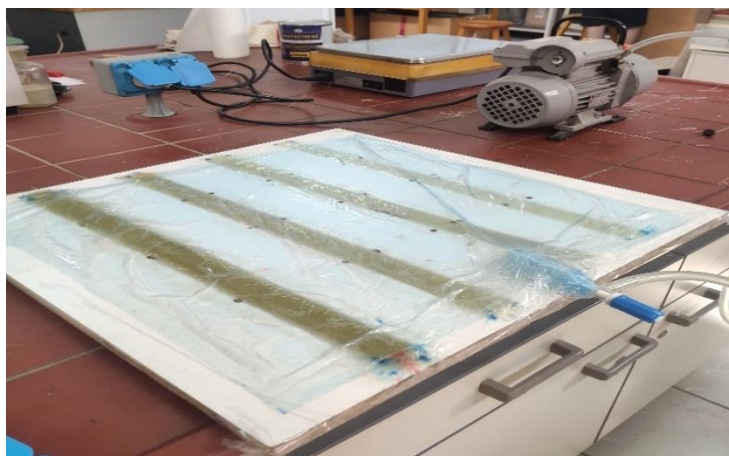
Κατασκευάστηκαν ακόμη τέσσερα δοκίμια με την μέθοδο της συμπίεσης (*compression*) σε συνθήκες περιβάλλοντος βιδώνοντας μια ξύλινη επιφάνεια ίδιων διαστάσεων και χαρακτηριστικών πάνω από τα δοκίμια ώστε να ασκείται σταθερή πίεση $0.6 - 0.7 \text{ MPa}$ καθ' όλη τη διάρκεια του πολυμερισμού της ρητίνη. Στο εξής θα αναφέρονται ως C1, C2, C4 και C8 ανάλογα και με τον αριθμό στρώσεων ρητίνης και υαλοπιλήματος που χρησιμοποιήθηκε. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται το σχέδιο της ξυλοκατασκευής που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των παραπάνω δοκιμίων και την εφαρμογή της πίεσης κατά τη μέθοδο *compression*.



Εικόνα 7. Σχέδιο ξυλοκατασκευής που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων C1, C2, C4 και C8.

Τέλος κατασκευάστηκαν άλλα τέσσερα δοκίμια με την μέθοδο της δημιουργίας κενού αέρος σε σάκο (*vacuum bag*) σε συνθήκες περιβάλλοντος. Με τη βοήθεια ελαστικής μεμβράνης και σφραγιστικής ταινίας δημιουργήθηκε ένα περιβάλλον κενού αέρος μέσα στο οποίο βρίσκονταν τα δοκίμια κατά τη διάρκεια της αντίδρασης

πολυμερισμού. Στην συνέχεια με τη χρήση ηλεκτρικής αντλίας κενού αφαιρέθηκε ο αέρας, οπότε στα δοκίμια ασκούσαν εξωτερική πίεση ίση με 1 atm (0.1 MPa) κατά τη διάρκεια της αντίδρασης πολυμερισμού της ρητίνης. Με αυτόν τον τρόπο κατασκευάστηκαν τα δοκίμια V1, V2, V4 και V8.



Εικόνα 8. Διαδικασία κατασκευής δοκιμίων με την μέθοδο *Vacuum bag*.

6.4 Μέθοδοι ελέγχου δοκιμίων

6.4.1 Μέτρηση Πάχους

Η μέτρηση του πάχους πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους. Αρχικά οι πρώτες μετρήσεις έγιναν με χρήση αναλογικού παχυμέτρου με ακρίβεια $\pm 0.05 \text{ mm}$. Επιπλέον με τα αποτελέσματα της δοκιμασίας καύσης (*Burn-off test*) και χρήση διάφορων εξισώσεων, που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια της εργασίας, υπολογίστηκε το πάχος των δοκιμίων.

6.4.2 Δοκιμασία σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Στην συγκεκριμένη δοκιμασία μετρήθηκε η εφελκυστική δύναμη με την χρήση δυναμόμετρου ακριβείας $\pm 0.01 \text{ KN}$, ενώ για την μέτρηση της παραμόρφωσης των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό επιμηκυσιόμετρο με ακρίβεια $\pm 0.1 \text{ mm}$. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις $13 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ και δοκιμάστηκαν αυτά με δύο και τέσσερεις στρώσεις, καθώς σε αυτά με μία και οκτώ στρώσεις δεν μπόρεσαν να ληφθούν αποτελέσματα λόγω του πάχους τους [ASTM D 3039]. Στην

Εικόνα 9 παρουσιάζεται η διάταξη *PHYWE* με το δυναμόμετρο και το επιμηκυνσιόμετρο που χρησιμοποιήθηκαν στην παραπάνω δοκιμασία.



Εικόνα 9. Διάταξη *PHYWE* για τη δοκιμασία μονοαξονικού εφελκυσμού.

6.4.3 Δοκιμασία σε κάμψη τριών σημείων

Τα δοκίμια που ήταν κατασκευασμένα από οκτώ στρώσεις (H8, V8, C8) υποβλήθηκαν σε δοκιμασία της κάμψης τριών σημείων. Με την χρήση δυναμόμετρου ακριβείας ± 0.01 KN μετρήθηκε η μέγιστη καμπτική δύναμη, η οποία ασκούνταν στο μέσο και στα άκρα των δοκιμίων και τα οδήγησε σε θραύση. Ανάλογα με το σημείο στο οποίο συνέβη η θραύση αλλά και με τον τύπο της τα τρία δοκίμια χαρακτηρίστηκαν με γράμματα του λατινικού αλφαβήτου που τα περιγράφουν, όπως προκύπτει από το αντίστοιχο πρότυπο [ASTM D790].

6.4.4 Δοκιμή καύσης (Burn-off test)

Η δοκιμή σε καύση έγινε για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ρητίνη, ενίσχυση αλλά και για τον προσδιορισμό του όγκου των κενών των δοκιμίων. Για καθεμία από τις μεθόδους κατασκευής (*Hand-lay up*, *Compression*, *Vacuum bag*) χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια με γνωστή μάζα, τα οποία αρχικά ξηράνθηκαν για 1 ώρα στους $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ και υποβλήθηκαν σε δοκιμασία καύσης στον ειδικό φούρνο του εργαστηρίου, που απεικονίζεται στην Εικόνα 10, για 50 min στους $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Με το πέρας της διαδικασίας της καύσης τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας \pm

0.0001 g ώστε να προσδιοριστούν τα αντίστοιχα ποσοστά απώλειας μάζας [ASTM D 3171].

6.4.5 Υδατοαπορροφητικότητα

Η δοκιμασία της απορρόφησης διήρκησε συνολικά 30 ημέρες, καθώς έγινε ζύγιση των δοκιμίων 24 ώρες μετά την έναρξη της δοκιμής, καθώς και με την συμπλήρωση μίας, δύο, τριών και τεσσάρων εβδομάδων. Πιο συγκεκριμένα, δοκίμια διαστάσεων 2.5 cm × 7.6 cm αφού ξηράνθηκαν, ζυγίστηκαν αρχικά σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας ± 0.0001 g και στη συνέχεια βυθίστηκαν σε δοχεία με απιονισμένο νερό, παρέμειναν εκεί και πραγματοποιήθηκαν ζυγίσεις στα παραπάνω χρονικά διαστήματα [ASTM D 570].

6.4.6 Μέτρηση πυκνότητας στο νερό

Η συγκεκριμένη δοκιμασία πραγματοποιήθηκε ώστε να μετρηθεί η πυκνότητα των δοκιμίων. Για τον πειραματικό προσδιορισμό της πυκνότητας, κατασκευάστηκε ειδική κατασκευή από αλουμίνιο όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. Με τη χρήση αναλυτικού ζυγού ακριβείας ± 0.0001 g μετρήθηκε η μάζα του γάντζου ανάρτησης εκτός και εντός του απιονισμένου νερού και η μάζα των δοκιμίων εκτός νερού αλλά και βυθισμένα στο νερό [ASTM D 792].

7. Μετρήσεις -Αποτελέσματα

7.1 Υπολογισμός Πάχους Στρώσης

Ο υπολογισμός του πάχους της κάθε στρώσης έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα. Παρακάτω παρατίθενται οι έξι διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους υπολογίστηκε το πάχος στρώσης και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

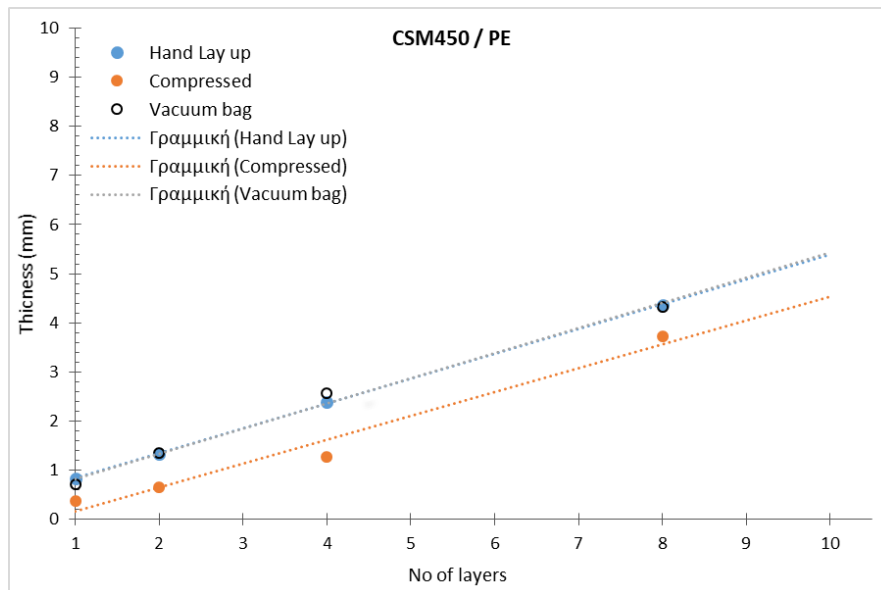
1. Μέτρηση του πάχους

Με την χρήση μικρομέτρου μετρήθηκε το πάχος των δώδεκα δοκιμίων, οπότε προέκυψαν τα αποτελέσματα που δίνονται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Πάχη δοκιμίων με την χρήση μικρομέτρου.

Specimen	Thickness (mm)
H1	0.834
H2	1.330
H4	2.386
H8	4.370
C1	0.378
C2	0.650
C4	1.266
C8	3.718
V1	0.708
V2	1.362
V4	2.560
V8	4.324

Με χρήση των παραπάνω δεδομένων υπολογίστηκε το πάχος της κάθε στρώσης για καθεμία από τις τρεις μεθόδους κατεργασίας. Για την μέθοδο *hand lay-up* υπολογίστηκε πως το πάχος στρώσης είναι $0.66 \text{ mm} \pm 0.11 \text{ mm}$. Το πάχος στρώσης για τα δοκίμια που είχαν κατασκευαστεί με την μέθοδο της συμπίεσης (*compressed*) υπολογίστηκε $0.37 \text{ mm} \pm 0.06 \text{ mm}$. Τέλος η μέθοδος του σάκου κενού (*vacuum bag*) έδωσε αποτέλεσμα $0.64 \text{ mm} \pm 0.06 \text{ mm}$.



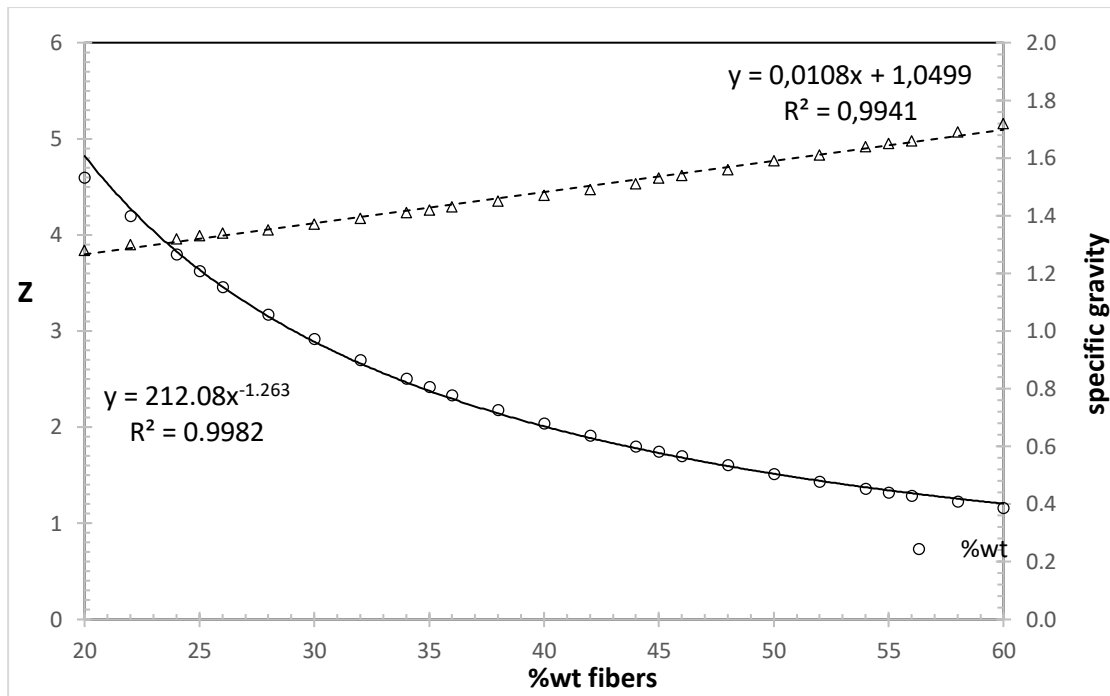
Εικόνα 10. Σύγκριση πάχους δοκιμίων ανάλογα τον αριθμό στρώσεων και την μέθοδο κατασκευής.

2. Owens Corning

Στην συνέχεια υπολογίστηκε το πάχος στρώσης με τον τύπο *Owens–Corning*:

$$t = \frac{W \times Z \times 25,4}{30500} \text{ (mm)} \quad (16)$$

Με την βοήθεια του διαγράμματος της Εικόνας 11 βρέθηκε η τιμή του Z και το πάχος στρώσης για το *hand lay-up* υπολογίστηκε $0.652 \text{ mm} \pm 0.07 \text{ mm}$, ενώ για τις μεθόδους *compressed* και *vacuum bag* το πάχος στρώσης βρέθηκε αντίστοιχα $0.488 \text{ mm} \pm 0.001 \text{ mm}$ και $0.669 \text{ mm} \pm 0.09 \text{ mm}$.



Εικόνα 11. Διάγραμμα Owens–Corning για την εύρεση του Z και ειδικού βάρους.

3. Ιαπωνικός Νηογνώμονας (NKK)

Ο ιαπωνικός νηογνώμονας για τον υπολογισμό του πάχους στρώσης αναφέρει τον εξής τύπο:

$$t = \frac{W}{1000 \times \varepsilon_f \times \varepsilon_m} \times \left[\frac{\varepsilon_f}{f_{wtf}} - (\varepsilon_f - \varepsilon_m) \right] \text{ (mm)} \quad (17)$$

Με χρήση αυτού του τύπου για την μέθοδο *hand lay-up* υπολογίστηκε το πάχος 0.618 mm \pm 0.07 mm, για τα δοκίμια κατασκευασμένα με την μέθοδο *compressed* το πάχος στρώσης βρέθηκε 0.444 mm \pm 0.05 mm. Ενώ το πάχος στρώσης για την μέθοδο κατεργασίας *vacuum bag* είναι 0.647 mm \pm 0.09 mm.

4. Lloyds

Σύμφωνα με τον Lloyds για να υπολογιστεί το πάχος στρώσης εφαρμόζεται ο τύπος:

$$t = \frac{W}{3072} \times \left[\frac{\varepsilon_f}{f_{wtf}} - 1 \right] \text{ (mm)} \quad (18)$$

Τα δοκίμια με μέθοδο κατεργασίας *hand lay-up* έχουν πάχος στρώσης $0.651 \text{ mm} \pm 0.07 \text{ mm}$. Η τεχνική του *compressed* δίνει ως αποτέλεσμα $0.472 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ και του *vacuum bag* $0.671 \text{ mm} \pm 0.09 \text{ mm}$.

5. Τύπος πυκνότητας

$$t = \frac{W}{\rho_f} \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (19)$$

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο υπολογίστηκε το πάχος στρώσης για *hand lay-up* $0.398 \text{ mm} \pm 0.03 \text{ mm}$, για *compressed* $0.312 \text{ mm} \pm 0.03 \text{ mm}$ και για *vacuum bag* $0.411 \text{ mm} \pm 0.04 \text{ mm}$.

6. Bureau Veritas

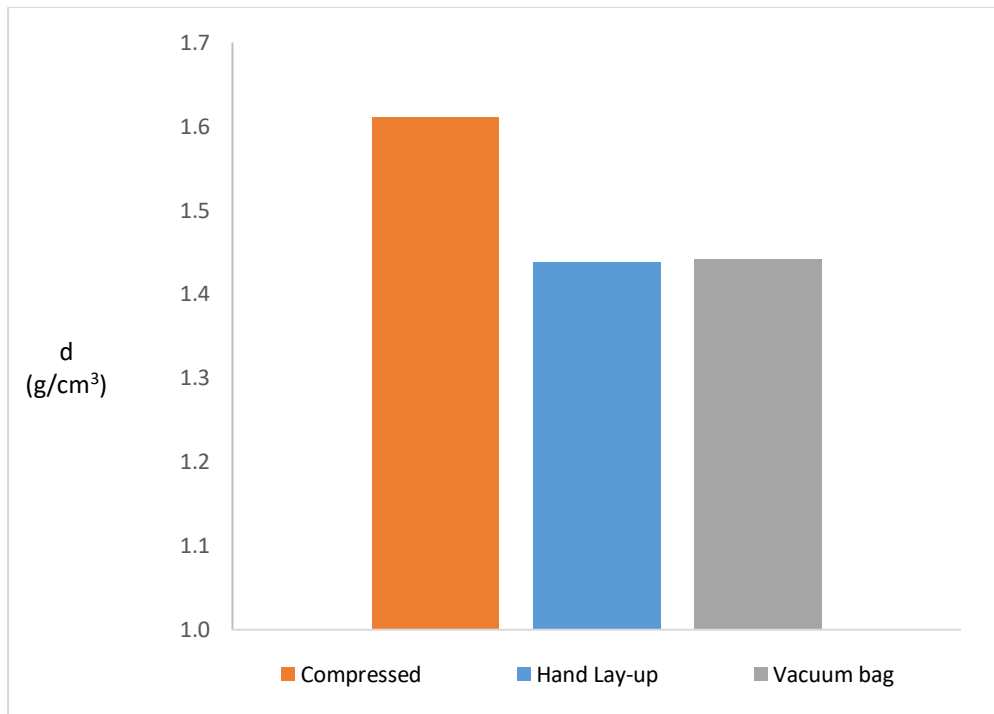
Ο *BV* προτείνει τον παρακάτω τύπο για τον υπολογισμό του πάχους στρώσης:

$$t = \frac{W}{1000} \times \left(\frac{1}{\rho_f} + \frac{1-w_f}{w_f \times \rho_m} \right) \text{ (mm)} \quad (20)$$

Το πάχος στρώσης για την μέθοδο κατεργασίας *hand lay-up* με χρήση της σχέσης του *BV* βρέθηκε $0.618 \text{ mm} \pm 0.07 \text{ mm}$. Τέλος για τις μεθόδους *compressed* και *vacuum bag* τα αποτελέσματα για το πάχος στρώσης είναι $0.444 \text{ mm} \pm 0.05 \text{ mm}$ και $0.647 \text{ mm} \pm 0.09 \text{ mm}$ αντιστοίχως.

7.2 Πυκνότητα

Η πυκνότητα των δοκιμίων μετρήθηκε με δυο τρόπους, πειραματικά με βύθιση στο νερό και υπολογιστικά όπως προσδιορίστηκε από τις διαστάσεις των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν απεικονίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 12.



Εικόνα 12. Σύγκριση της πυκνότητας για τις τρεις μεθόδους καταργασίας δοκιμίων.

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της Εικόνας 12, η μέθοδος κατασκευής των δοκιμίων υπό πίεση (*Compressed*) δίνει υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα, της τάξεως 1.6 g/cm^3 . Οι μέθοδοι *Hand-lay up* και *Vacuum bag* εμφανίζουν παρόμοια πυκνότητα με τιμή 1.45 g/cm^3 .

7.3 Δοκιμασία Εφελκυσμού

Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης (σ - ε) που προέκυψαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη δοκιμασία μονοαξονικού εφελκυσμού. Η ασκούμενη εφελκυστική τάση και η παραμόρφωση υπολογίστηκαν από τις εξισώσεις 21 και 22 αντιστοίχως.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (22)$$

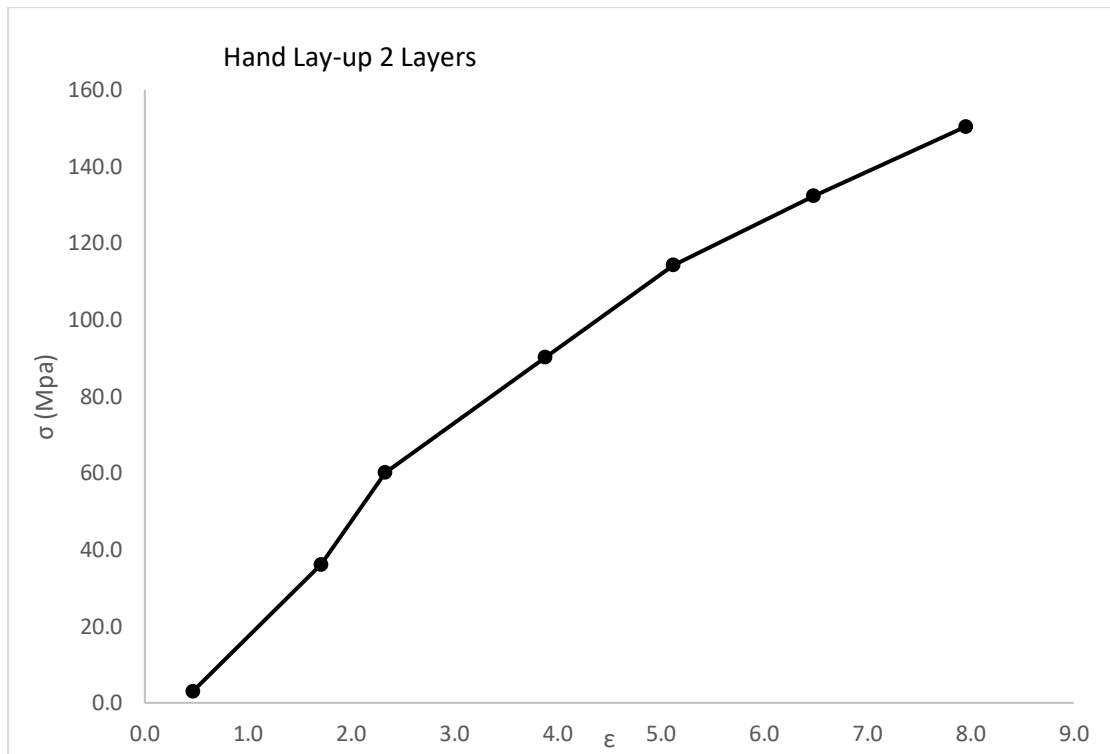
Όπου:

F: Αξονικό φορτίο που επιβλήθηκε στο δοκίμιο.

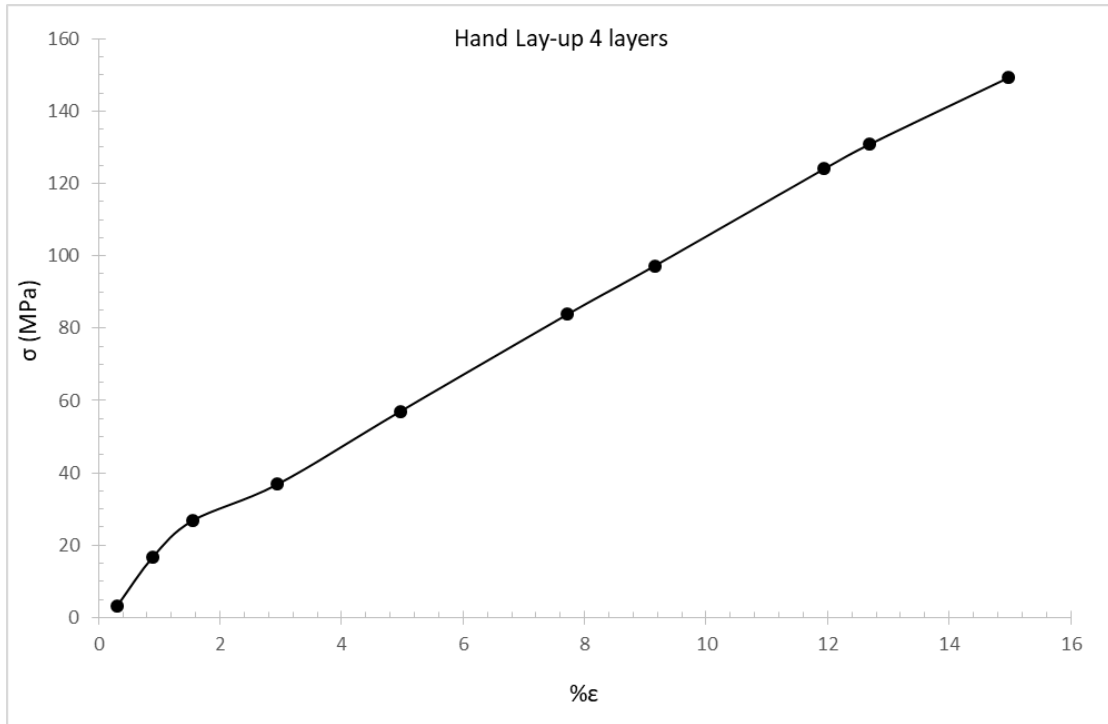
A: Αρχικό εμβαδόν διατομής.

ΔL : Μεταβολή του μήκους του δοκιμίου.

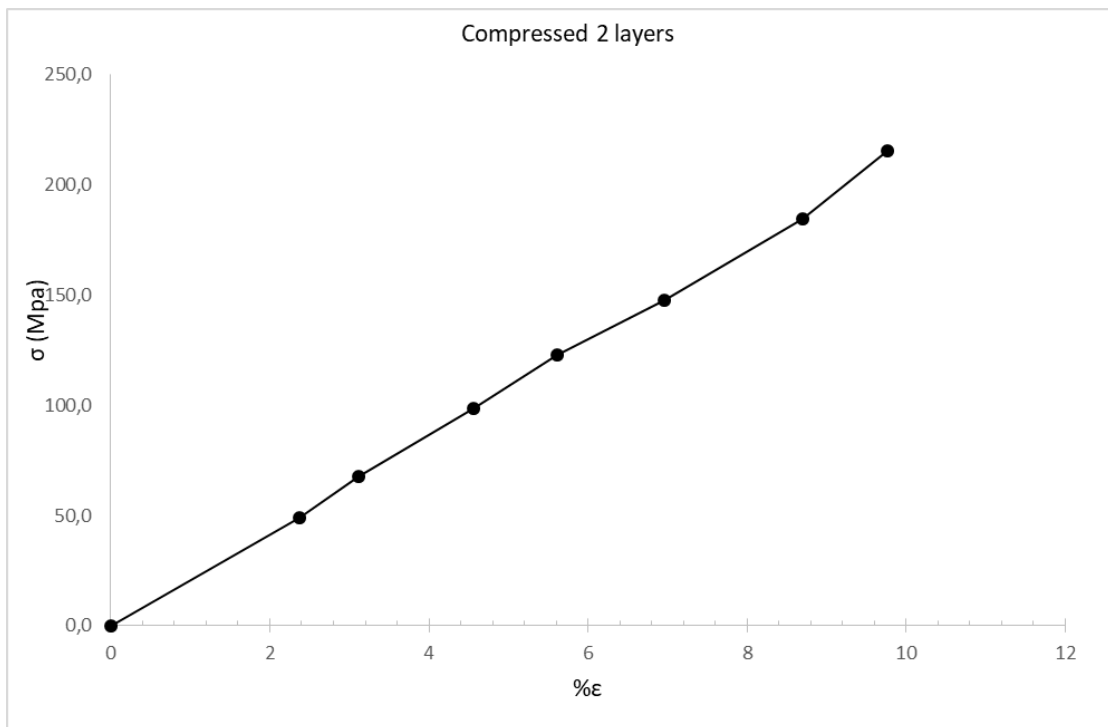
L_0 : Αρχικό μήκος δοκιμίου.



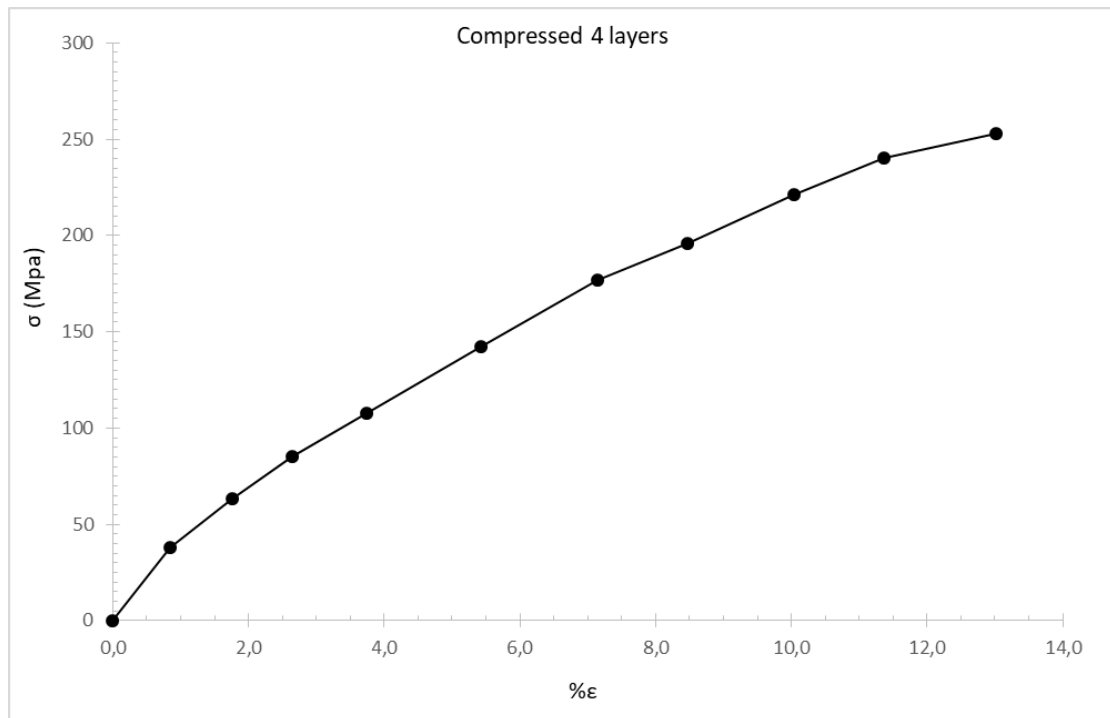
Εικόνα 13. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο H2.



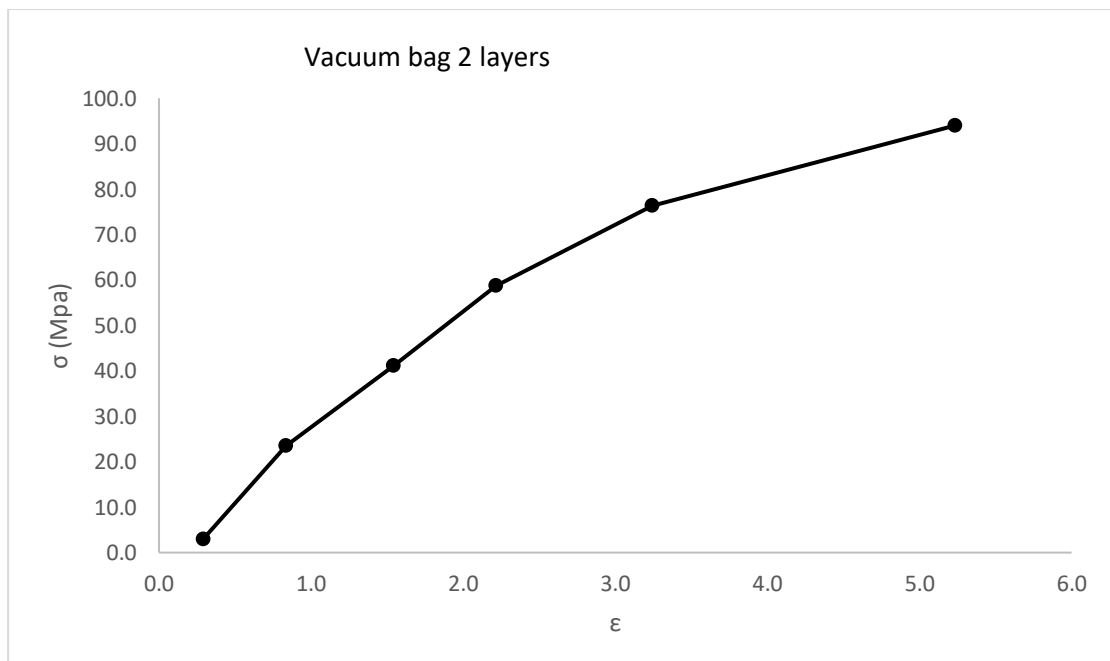
Εικόνα 14. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο Η4.



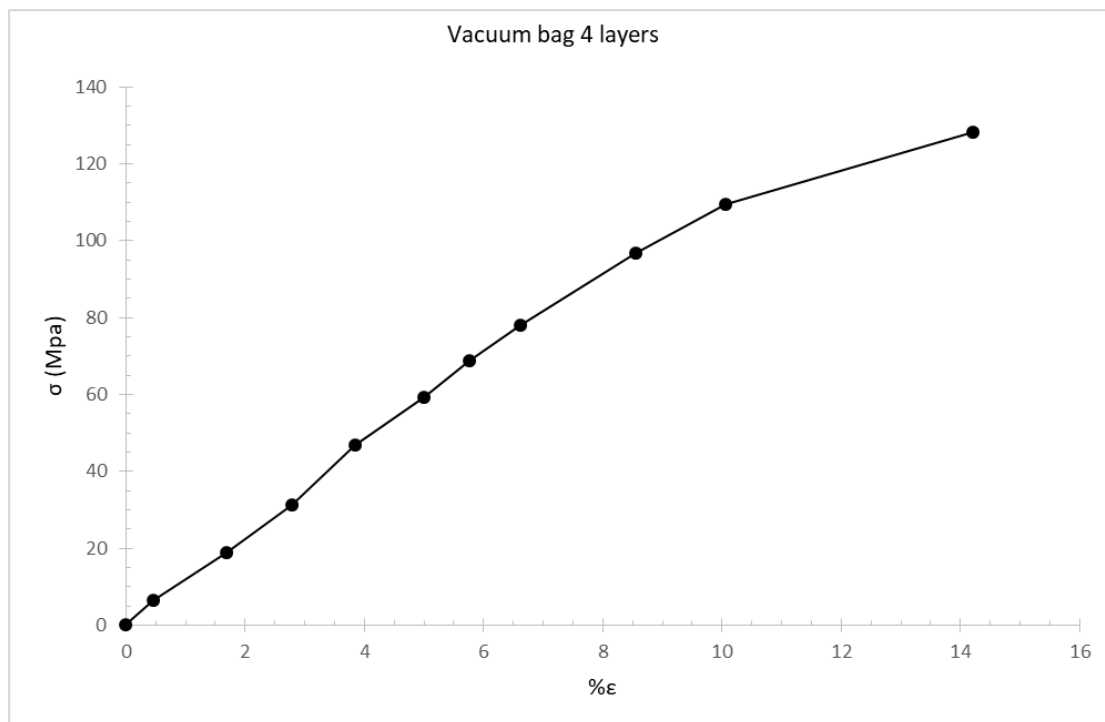
Εικόνα 15. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο C2.



Εικόνα 16. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο C4.



Εικόνα 17. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο V2.



Εικόνα 18. Διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης για το δοκίμιο V4.

7.4 Δοκιμασία κάμψης τριών σημείων

Με την εξίσωση 23 που φαίνεται παρακάτω μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση που ασκήθηκε στα δοκίμια H8, C8 και V8 κατά την δοκιμασία της κάμψης τριών σημείων και τα οδήγησαν σε αστοχία.

$$\sigma = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (23)$$

Όπου

P: Δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο.

L: Απόσταση των σημείων στήριξης του δοκιμίου.

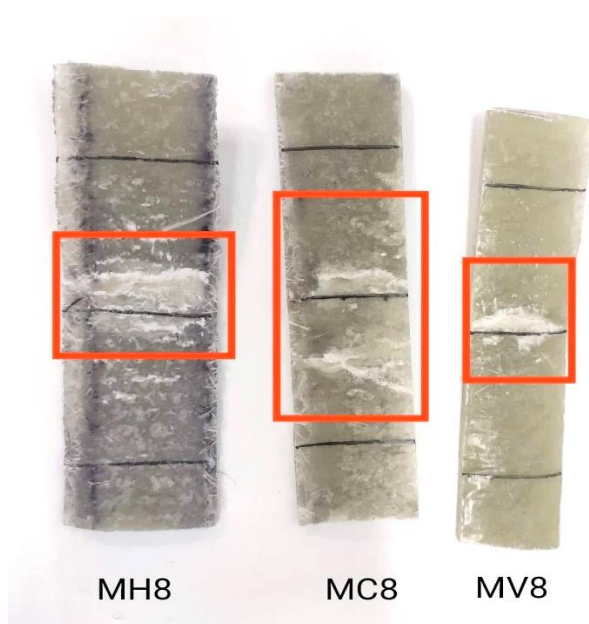
b: Πλάτος δοκιμίου.

h: Πάχος δοκιμίου.

Στην Εικόνα 19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμασίας αντοχής σε κάμψη τριών σημείων. Στη συνέχεια (Εικόνα 20) απεικονίζονται τα δοκίμια μετά την ολοκλήρωση της κάμψης που τα οδήγησε σε αστοχία, μέσα στο κόκκινο πλαίσιο φαίνεται το σημείο στο οποίο πραγματοποιήθηκε η θραύση και οδήγησε στους χαρακτηρισμούς IDC.

Flexural strength (3 point method)						
Specimen	P (N)	L (mm)	b (mm)	h (mm)	σ (MPa)	IDC
H8	900	100	37.0	4.370	191	TAB
C8	780	100	27.7	3.718	306	CLT
V8	780	100	27.9	4.324	224	TAB

Εικόνα 19. Αποτελέσματα δοκιμασίας κάμψης.

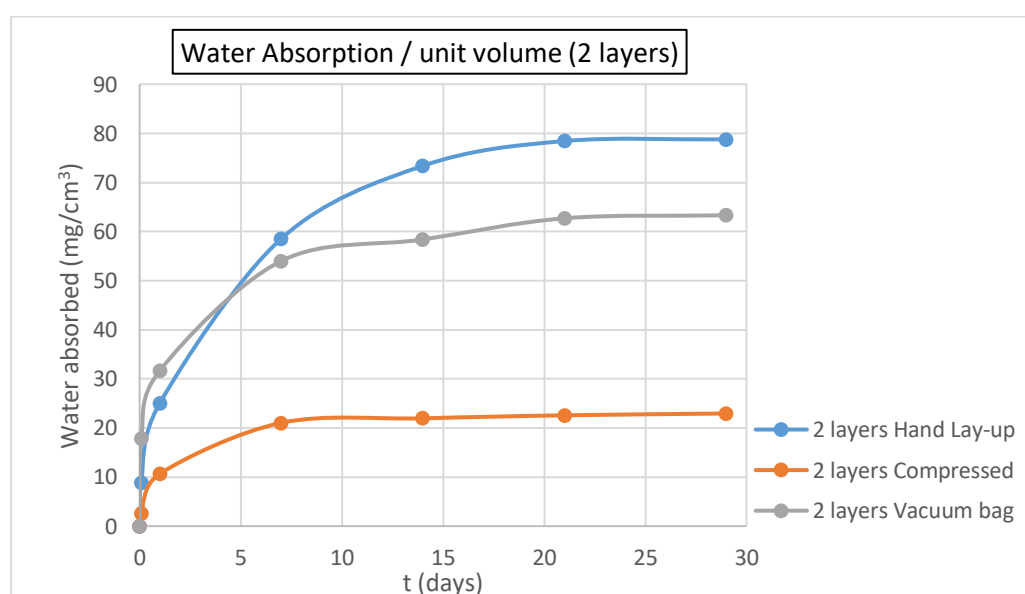


Εικόνα 20. Τα δοκίμια μετά την δοκιμασία της κάμψης τριών σημείων.

7.5 Υδατοαπορροφητικότητα

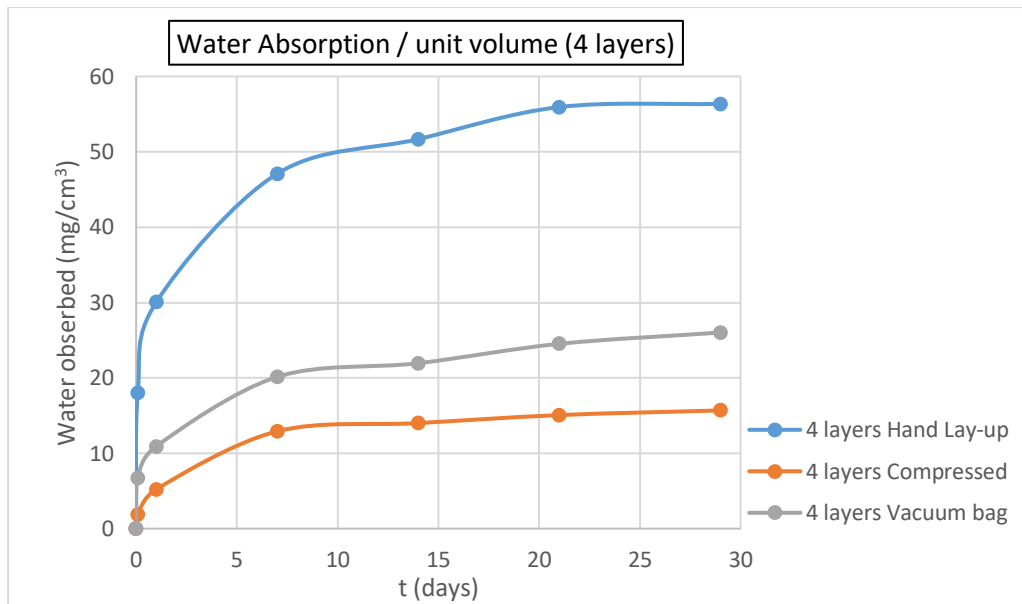
Τέλος στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η απορρόφηση ύδατος ανά μονάδα όγκου που είχαν τα δοκίμια για το διάστημα που παρέμειναν εμβαπτισμένα στο νερό. Για τη εύρεση των κάτωθι αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση 24.

$$\frac{1000 \times (m_n - m_{n-1})}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (24)$$



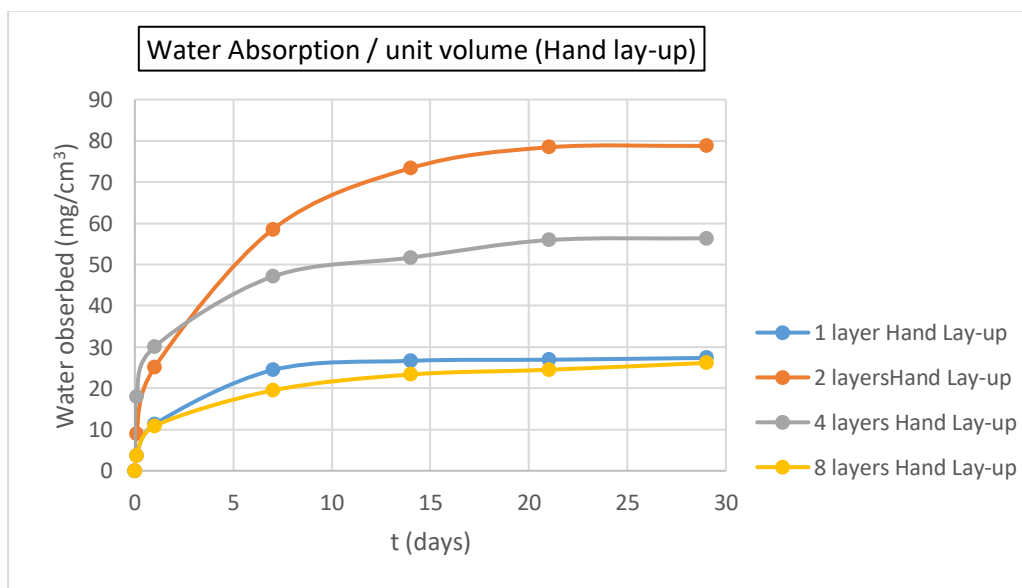
Εικόνα 21. Διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας δοκιμίων 2 στρώσεων με μεθόδους κατεργασίας *Hand-lay up*, *Compressed* και *Vacuum bag*.

Με βάση τον παραπάνω το διάγραμμα της Εικόνας 21 μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μέθοδος *Compressed* έχει ως αποτέλεσμα να απορροφάται πολύ λιγότερο νερό σε σύγκριση με τις άλλες δύο μεθόδους, σε χρονικό διάστημα 30 ημερών για τα δοκίμια δύο στρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η απορρόφηση νερού για την μέθοδο *Compressed* είναι περίπου 22 mg νερού ανά μονάδα όγκου, ενώ για τις *Hand-lay up* και *Vacuum bag* είναι 79 και 62 mg νερού ανά μονάδα όγκου, αντίστοιχα.



Εικόνα 22. Διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας δοκιμών 4 στρώσεων με μεθόδους κατεργασίας *Hand-lay up*, *Compressed* και *Vacuum bag*.

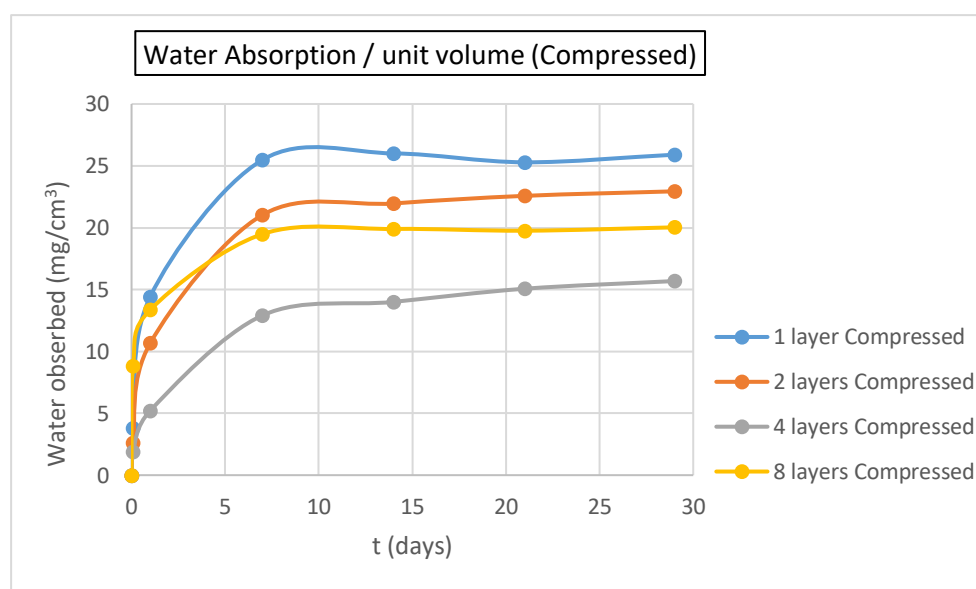
Όσον αφορά τα δοκίμια που είναι κατασκευασμένα από τέσσερις στρώσεις, και πάλι καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την απορρόφηση νερού δίνουν τα δοκίμια με μέθοδο κατασκευής υπό πίεση (*Compressed*), τα οποία απορροφούν στις 30 ημέρες 17 mg νερού ανά μονάδα όγκου. Η υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμών *Hand-lay up* και *Vacuum bag* είναι 57 και 28 mg νερού ανά μονάδα όγκου, αντίστοιχα.



Εικόνα 23. Διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας δοκιμών 1, 2, 4 και 8 στρώσεων κατασκευασμένα με την μέθοδο *Hand-lay up*.

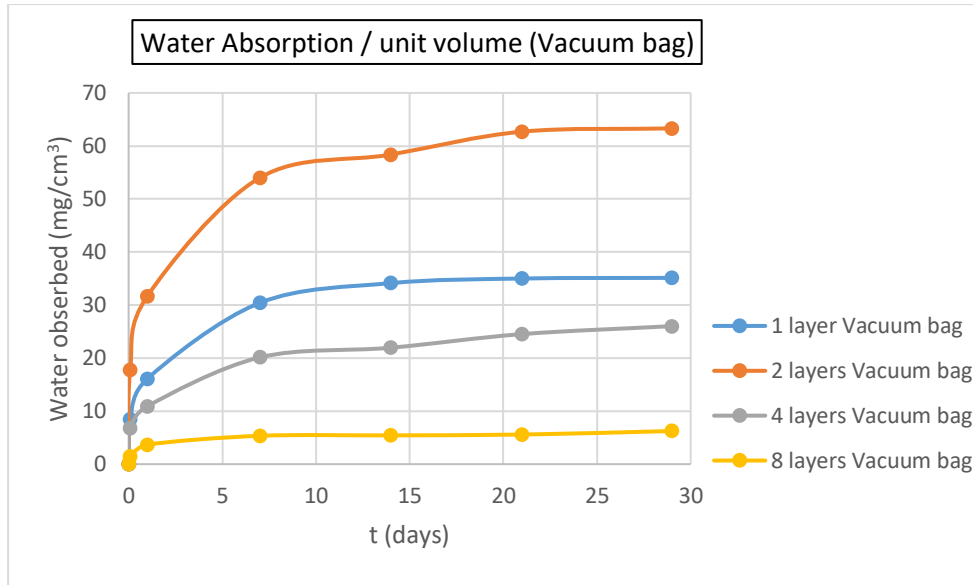
Από το διάγραμμα της Εικόνας 23 φαίνεται ότι τα δοκίμια *Hand-lay up* με μια και οκτώ στρώσεις έχουν καλύτερα αποτελέσματα υδατοαπορροφητικότητας καθώς σε 30 ημέρες απορροφούν 29 και 28 mg νερού ανά μονάδα όγκου. Τα δοκίμια δύο και τεσσάρων στρώσεων απορροφούν 80 και 58 mg νερού ανά μονάδα όγκου σε 30 ημέρες αντίστοιχα.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 24, τα δοκίμια με την μέθοδο κατασκευής *Compressed* παρουσιάζουν εξαιρετικά αποτελέσματα σχέση με την απορρόφηση του νερού. Πιο συγκεκριμένα, η απορρόφηση νερού για τα δοκίμια με μία, δύο, τέσσερις και οκτώ στρώσεις είναι 26, 23, 16 και 20 mg νερού ανά μονάδα όγκου αντίστοιχα.



Εικόνα 24. Διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας δοκιμών 1, 2, 4 και 8 στρώσεων κατασκευασμένα με την μέθοδο *Compressed*.

Από το διάγραμμα της Εικόνας 25 προκύπτει ότι τα δοκίμια οκτώ στρώσεων της μεθόδου κατασκευής υπό κενό (*Vacuum bag*) απορροφούν πολύ λιγότερο νερό συγκριτικά με τα υπόλοιπα καθώς η απορρόφηση νερού είναι 8 mg νερού ανά μονάδα όγκου. Τα δοκίμια με 1, 2 και 4 στρώσεις απορρόφησαν 33, 62 και 28 mg νερού ανά μονάδα όγκου αντίστοιχα.



Εικόνα 25. Διάγραμμα υδατοαπορροφητικότητας δοκιμίων 1, 2, 4 και 8 στρώσεων κατασκευασμένα με την μέθοδο *Vacuum bag*.

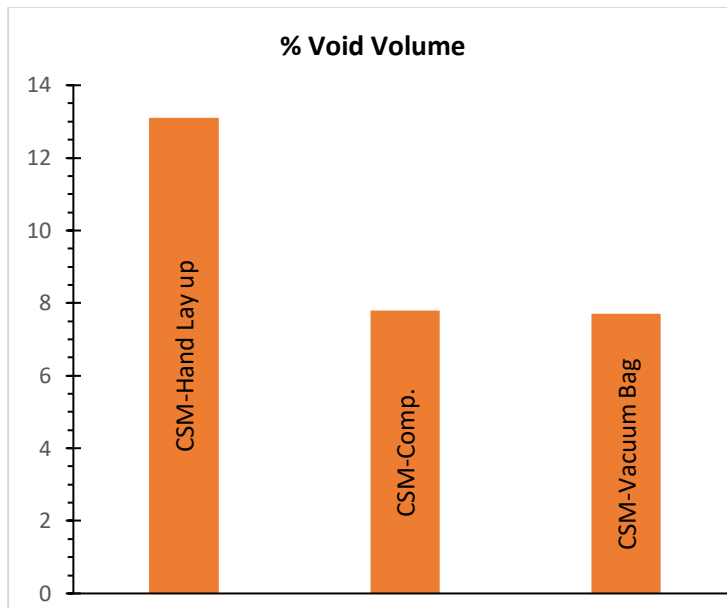
7.6 Προσδιορισμός Όγκου των Κενών

Στο διάγραμμα της εικόνας 26 παρουσιάζεται ο υπολογισμός του όγκου κενών για τα δοκίμια με δύο, τέσσερις και οκτώ στρώσεις που είναι κατασκευασμένα και με τους 3 τρόπους παραγωγής, δηλαδή με το χέρι (*Hand lay-up*), υπό πίεση (*Compressed*) και σε κενό αέρος (*Vacuum bag*). Για τον υπολογισμό έγινε χρήση των ακόλουθων εξισώσεων [ASTM D 2734] :

$$\%Void = \left[1 - \left(\frac{wf}{df} + \frac{wm}{dm} \right) \times dc_{exp} \right] \times 100 \quad (25)$$

$$\%Void = \left(1 - \frac{dc_{exp}}{dc_{the}} \right) \times 100 \quad (26)$$

Από τις σχέσεις (25) και (26) προκύπτουν όμοιες τιμές όσον αφορά το ποσοστό κενού των δοκιμίων.



Εικόνα 26. Σύγκριση του ποσοστού κενών για τις τρεις μεθόδους παραγωγής των δοκιμίων.

Η μέθοδος παραγωγής των δοκιμίων με το χέρι (*Hand-lay up*) εμφανίζει 13% του συνολικού τους όγκου με κενά αέρα, ενώ τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί υπό πίεση (*Compressed*) και σε κενό αέρος (*Vacuum bag*) ο όγκος τους σε κενά είναι σημαντικά μικρότερος καθώς ανέρχεται στο 8%.

7.7 Αποτελέσματα Δοκιμασίας Καύσης (Burn Off Test)

Η κατά βάρος περιεκτικότητα όλων των δοκιμίων, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο απώλειας μάζας κατά την καύση, παρατίθενται στην Εικόνα 27. Για την επαλήθευση και την μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του πειράματος καύσης πραγματοποιήθηκε η ίδια μέτρηση σε δύο δοκίμια για κάθε μέθοδο κατασκευής.

Spec.	m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_m (g)	m_f (g)	d_m (g/cm ³)	d_f (g/cm ³)	%wt _f	%wt _m
H1	16.7957	17.3166	17.0074	0.3092	0.2117	1.220	2.500	40.6	59.4
H1	17.1708	17.6567	17.3861	0.2706	0.2153	1.220	2.500	44.3	55.7
							M.O. =	42.5	57.5
H2	18.8275	19.7196	19.2269	0.4927	0.3994	1.220	2.500	44.8	55.2

H2	16.7953	17.2926	16.9874	0.3052	0.1921	1.220	2.500	38.6	61.4
							M.O. =	41.7	58.3
H4	17.1703	18.1948	17.6282	0.5666	0.4579	1.220	2.500	44.7	55.3
H4	18.8244	19.7122	19.2149	0.4973	0.3905	1.220	2.500	44.0	56.0
							M.O. =	44,3	55,7
H8	16.7924	21.3598	18.9920	2.3678	2.1996	1.220	2.500	48.2	51.8
H8	16.1576	21.1077	19.0242	2.0835	2.8666	1.220	2.500	57.9	42.1
							M.O. =	53,0	47,0
C2	18.8228	19.3952	19.1885	0.2067	0.3657	1.220	2.500	63.9	36.1
C2	15.8206	16.4447	16.2469	0.1978	0.4263	1.220	2.500	68.3	31.7
							M.O. =	66,1	33,9
C4	15.8231	17.1287	16.5767	0.5520	0.7536	1.220	2.500	57.7	42.3
C4	15.6756	16.8674	16.3099	0.5575	0.6343	1.220	2.500	53.2	46.8
							M.O. =	55.5	44.5
C8	16.7919	20.0630	18.4786	1.5844	1.6867	1.220	2.500	51.6	48.4
C8	15.6738	19.1707	17.5217	1.6490	1.8479	1.220	2.500	52.8	47.2
							M.O. =	52.2	47.8
V2	17.1537	18.0869	17.5025	0.5844	0.3488	1.220	2.500	37.4	62.6
V2	174817	18.3903	17.8437	0.5466	0.3620	1.220	2.500	39.8	60.2
							M.O. =	38.6	61.4
V4	16.7919	18.4146	17.5894	0.8252	0.7975	1.220	2.500	49.1	50.9
V4	15.6739	17.3250	16.4446	0.8804	0.7707	1.220	2.500	46.7	53.3
							M.O. =	47.9	52.1
V8	17.1535	19.8485	18.4364	1.4121	1.2829	1.220	2.500	47.6	52.4
V8	17.4819	20.8860	19.1001	1.7859	1.6182	1.220	2.500	47.5	52.5
							M.O. =	47.6	52.4

Εικόνα 27. Κατά βάρος περιεκτικότητα (%) των δοκιμίων σε ενισχυτικές ίνες (% wt_f) και σε ρητίνη (% wt_m).

Όπου :

m₀ : Η μάζα του άδειου δοχείου πορσελάνης.

m₁ : Η μάζα του δοχείου πορσελάνης με το δοκίμιο πριν την καύση.

m₂ : Η μάζα του δοχείου πορσελάνης με το δοκίμιο μετά την καύση.

m_m : Η μάζα της μήτρας του δοκιμίου, με

$$m_m = m_1 - m_2 \quad (27)$$

m_f : Η μάζα ενίσχυσης του δοκιμίου, με

$$m_f = m_2 - m_0 \quad (28)$$

d_m : Η πυκνότητα της μήτρας του δοκιμίου.

d_f : Η πυκνότητα της ενίσχυσης του δοκιμίου.

$\%wt_f$: Ποσοστό της μάζας ενίσχυσης του δοκιμίου, όπου

$$\%wt_f = \frac{100m_f}{m_m+m_f} \quad (29)$$

$\%wt_m$: Ποσοστό της μάζας μήτρας του δοκιμίου, όπου

$$\%wt_m = \frac{100m_m}{m_m+m_f} \quad (30)$$

Στην συνέχεια έγινε υπολογισμός των κλασμάτων όγκων της ενίσχυσης της μήτρας και των κενών για καθένα από τα δοκίμια με την χρήση των ακόλουθων υπολογιστικών σχέσεων :

$$V_v = 1 - d_c \times \left(\frac{w_f}{d_f} + \frac{w_m}{w_f} \right) \quad (31)$$

(σχέση κλάσματος όγκου των κενών)

Όπου :

$$w_m = \frac{m_m}{m_m+m_f} \quad (32)$$

$$w_f = \frac{m_f}{m_m+m_f} \quad (33)$$

Και d_c : Ο μέσος όρος της πυκνότητας του κάθε δοκιμίου, όπως φαίνεται στον πίνακα πυκνοτήτων.

$$V_f = \frac{m_f d_m}{m_f d_m + m_m d_f} \quad (34) \quad (\text{σχέση κλάσματος όγκου της ενίσχυσης})$$

$$V_m = 1 - V_v - V_f \quad (35) \quad (\text{σχέση κλάσματος όγκου της μήτρας})$$

Ακολουθεί η Εικόνα 28 με τα επί τοις εκατό κλάσματα όγκων μήτρας, ενίσχυσης και κενών.

Spec.	%Vf	%Vm	%Vv
H1	22.8	68.3	8.9
H1	24.9	64.0	11.1
M.O. =	23.9	66.2	10.0
H2	25.3	64.1	10.6
H2	21.9	71.2	7.0
M.O. =	23.6	67.7	8.8
H4	22.7	57.5	19.8
H4	22.3	58.3	19.4
M.O. =	22.5	57.9	19.6
H8	28.7	63.4	7.9
H8	34.6	51.5	14.0
M.O. =	31.7	57.5	11.0
C2	42.3	49.0	8.7
C2	45.2	43.0	11.7
M.O. =	43.8	46.0	10.2
C4	37.3	56.0	6.6
C4	34.4	62.0	3.6
M.O. =	35.9	59.0	5.1
C8	31.2	60.0	8.8
C8	31.9	58.4	9.7
M.O. =	31.6	59.2	9.3
V2	21.3	73.3	5.4
V2	22.8	70.3	6.9
M.O. =	22.1	71.8	6.2
V4	27.6	58.6	13.8
V4	26.3	61.5	12.3
M.O. =	27.0	60.1	13.1
V8	29.5	66.4	4.1
V8	29.4	66.5	4.1
M.O. =	29.5	66.5	4.1

Εικόνα 28. Επί τοις εκατό κλάσμα όγκου μήτρας, ενίσχυσης και κενών.

8. Συμπεράσματα

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η πειραματική μελέτη των ιδιοτήτων σύνθετου υλικού πολυεστερικής μήτρας ενισχυμένου με υαλοπίλημα. Στο χώρο των μηχανικών αυξάνεται ολοένα και περισσότερο η ανάγκη για χρήση σύνθετων υλικών καθώς μπορούν να προσδώσουν πολύ καλύτερο αποτέλεσμα λόγω των ανεπτυγμένων χαρακτηριστικών τους σε σχέση με τα απλά υλικά.

Βάσει των παραπάνω πειραματικών δοκιμασιών που υποβλήθηκαν τα συνολικά δώδεκα δοκίμια που κατασκευάστηκαν εφαρμόζοντας τρεις διαφορετικές τεχνικές, μπορούμε να καταλήξουμε σε σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού πολυεστερικής μήτρας με ενίσχυση από υαλοπίλημα όσον αφορά την μέθοδο παραγωγής του αλλά και των αριθμό των στρώσεων.

Η μέθοδος παραγωγής του σύνθετου υπό συμπίεση (*Compressed*) δίνει προϊόντα τα οποία είναι πιο λεπτά καθώς το μέσο πάχος στρώσης είναι $0.421 \text{ mm} \pm 0.06 \text{ mm}$. Ακολουθούν τα υλικά που κατασκευάστηκαν με τη μέθοδο *Hand-lay up* με μέσο πάχος $0.599 \text{ mm} \pm 0.09$ και τέλος αυτά που κατασκευάστηκαν με την τεχνική *Vacuum bag* με πάχος $0.614 \text{ mm} \pm 0.09 \text{ mm}$.

Όσον αφορά την πυκνότητα τα υλικά που έχουν παραχθεί υπό πίεση φαίνεται ότι υπερτερούν και πάλι καθώς βάση της παρούσας πειραματικής μελέτης προκύπτει ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα.

Από την δοκιμασία του εφελκυσμού μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα υλικά που έχουν παραχθεί με την μέθοδο *Compressed* χρειάζονται μεγαλύτερη τάση ώστε να φτάσουν σε σημείο αστοχίας ενώ εμφανίζουν και χαμηλότερη παραμόρφωση στη θραύση. Σε σχέση με τον αριθμό των στρώσεων προκύπτει ότι τα δοκίμια με δύο στρώσεις αστοχούν σε χαμηλότερη τάση, ενώ εμφανίζουν μικρότερη παραμόρφωση.

Τα δοκίμια που είναι κατασκευασμένα υπό συμπίεση (*Compressed*) δείχνουν να είναι ανθεκτικότερα σε σχέση με αυτά των άλλων δύο μεθόδων παραγωγής καθώς από την δοκιμασία κάμψης τριών σημείων προκύπτει ότι χρειάζεται σημαντικά μεγαλύτερη τάση για να αστοχήσουν. Ακολουθεί η μέθοδος του κενού (*Vacuum bag*) και τελευταία η κατασκευή δοκιμίων με το χέρι (*Hand-lay up*).

Τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως τα υπό συμπίεση κατασκευασμένα υλικά (*Compressed*) απορροφούν

μικρότερη ποσότητα νερού ανεξαρτήτως του αριθμού στρώσεων. Αντίθετα, η σύγκριση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων απορρόφησης νερού ανά μέθοδο κατασκευής σε σχέση με τον αριθμό των στρώσεων δεν μπορεί να μας οδηγήσει σε ασφαλή συμπεράσματα, σχετικά με την ικανότητα απορρόφησης νερού από τα δοκίμια.

Προσδιορίζοντας το ποσοστό του όγκου των κενών μπορούμε να συμπεράνουμε πως οι μέθοδοι *Vacuum bag* και *Compressed* δίνουν υλικά με παρόμοιο ποσοστό κενών, ενώ τα κενά στην μέθοδο κατασκευής *Hand-lay up* είναι περισσότερα.

Η δοκιμασία της καύσης (*Burn Off*) μας οδήγησε στο συμπέρασμα ότι τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί υπό συμπίεση δίνουν καλύτερα αποτελέσματα καθώς το ποσοστό των κενών είναι εμφανώς χαμηλότερο. Η μέθοδος *Vacuum bag* δίνει τα αμέσως επόμενα καλύτερα, ενώ η μέθοδος *Hand-lay up* βρίσκεται στην τελευταία θέση μεταξύ των τριών, όσον αφορά την περιεκτικότητα των δοκιμίων σε κενό όγκο. Ο αριθμός των στρώσεων δείχνει να μην επηρεάζει σημαντικά το ποσοστό των κενών στα δοκίμια.

Είναι εύκολα αντιληπτό από τα παραπάνω πως τα σύνθετα υλικά που είναι κατασκευασμένα υπό συμπίεση 0.6 – 0.7 MPa, όπως εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σχεδόν σε όλες τις μηχανικές τους ιδιότητες και αποτελούν μια ενδιαφέρουσα επιλογή λόγω των βελτιωμένων ιδιοτήτων τους και της μηχανικής συμπεριφοράς τους.

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία αναδεικνύει τη σημασία και την πολλαπλή χρησιμότητα των σύνθετων υλικών πολυεστερικής μήτρας ενισχυμένων με υαλοπίλημα, μέσω της κατασκευής και των πειραματικών δοκιμών που έγιναν σε δοκίμια τέτοιων σύνθετων υλικών. Οι τεχνικές κατασκευής που εφαρμόστηκαν είναι ίδιες μ' αυτές που χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατασκευή μικρών, μη μεταλλικών σκαφών. Η έρευνα επικεντρώθηκε στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αυτών των υλικών, εστιάζοντας ιδιαίτερα σε εφαρμογές που σχετίζονται με τον τομέα των θαλάσσιων περιβάλλον.

9. Προτάσεις – Μελλοντικές Προοπτικές

Από τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας γίνεται αντιληπτό πως η μέθοδος κατασκευής υπό ήπια μηχανική συμπίεση (*compressed*) αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση, καθώς φαίνεται τα δοκίμια που έχουν παραχθεί με αυτό τον τρόπο να έχουν αρκετά βελτιωμένη συμπεριφορά στις μηχανικές δοκιμές.

Από την παρούσα εργασία μπορούν να προκύψουν νέες ιδέες – πειραματικές μελέτες με αρκετό ενδιαφέρον για την έρευνα πάνω στην χρήση των ενισχυμένων σύνθετων υλικών πολυεστερικής μήτρας σε μηχανικές κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, θα ήταν χρήσιμη η κατασκευή και δοκιμή νέων σύνθετων υλικών με διαφορετικούς τύπους ενίσχυσης. Αυτοί οι τύποι ενίσχυσης μπορεί να είναι υαλοϋφάσματα *Woven Roving* (πλεκτό), *Surfacing Tissue* (αράχνη) και υαλοταινίες. Η μελέτη υλικών με συνδυασμό δύο ή περισσότερων από τους παραπάνω τύπους ενίσχυσης παρουσιάζει επίσης σημαντικό ενδιαφέρον για την ποιότητα και τη βελτίωση των ιδιοτήτων των κατασκευών. Από τη σύγκριση των ιδιοτήτων τέτοιων δοκιμίων με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορεί να προκύψουν ομοιότητες και διαφορές που δίνουν απαντήσεις σε διάφορα κατασκευαστικά ερωτήματα (π.χ. σταθερότητα κατασκευής, αστοχία, συμπεριφορά σε φορτίσεις).

Ακόμα προτείνεται η κατασκευή και μελέτη ανάλογων δοκιμίων χρησιμοποιώντας διαφορετική μέθοδο κατασκευής αλλά τις ίδιες παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Ειδικότερα μέθοδοι όπως η έγχυση υπό κενό (*Vacuum Infusion*) και η χύτευση υπό συμπίεση (*Autoclave Molding*), που παράγουν εξαιρετικής ποιότητας υλικά, αποτελούν μια πολύ ελκυστική πρόταση για περαιτέρω μελέτη και σύγκριση.

Επίσης μια ακόμη πρόταση ως συνέχεια της παρούσας εργασίας είναι η κατασκευή ενός μοντέλου γάστρας από σύνθετα υλικά σαν και αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία και η δοκιμή τμημάτων αυτού σύμφωνα με τις απαιτήσεις των Νηογνωμόνων (*IACS*). Τέτοιες δοκιμές αφορούν την αντοχή σε εφελκυσμό, θλίψη, κρούση, κάμψη και τη δοκιμή καύσης για τον ακριβή υπολογισμό της αναλογίας ρητίνης / ενισχυτικών και του όγκου των κενών.

Τέλος λόγω της σύγχρονης ανάγκης για επιλογές φιλικές προς το περιβάλλον μια επιπλέον πρόταση είναι η πειραματική μελέτη σύνθετων υλικών από φυσικούς πόρους. Ειδικότερα προτείνεται η κατασκευή ανάλογων δοκιμίων με αυτά της παρούσης

εργασίας χρησιμοποιώντας ως ενισχυτικό μέσο ίνες από σχοινί ή *bamboo* και οικολογικές (*eco friendly*) ρητίνες. Συγκρίνοντας τέτοια νέα «πράσινα» σύνθετα υλικά μπορεί να εξαχθούν αξιόλογα συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία τους σε κατασκευές χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Παπανικολάου, Γ., & Μουζάκης, Δ. (2007). *Σύνθετα Υλικά*. Αθήνα : Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
2. Δρίτσος, Σ. (2017). *Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά*. Πάτρα : Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.
3. Abdurohman, K., & Marta, A. (2016). An Experimental Study of Polyester Composite Tensile Properties Reinforced Unidirectional Carbon Fiber Manufactured by Vacuum Infusion for LSU Materials. *Jurnal Teknologi Dirgantara*, **14**, 61.
https://www.researchgate.net/publication/318722837_An_Experimental_Study_of_Polyester_Composite_Tensile_Properties_Reinforced_Unidirectional_Carbon_Fiber_Manufactured_by_Vacuum_Infusion_for_LSU_Materials
4. Σιμιτζής, Ι. (2017). *Επιστήμη και Τεχνική Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών*. Αθήνα.
5. Toutanji, H., & Dempsey, S. (2001). Stress modeling of pipelines strengthened with advanced composites materials, *Thin-Walled Structures* **39**, 153.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382310000495?via%3Dihub>
6. Καλαφάτη, Ε. (2017). *Θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*. Ευρωπαϊκό Κέντρο Αριστείας.
<https://jmce.gr/portal/wp-content/uploads/2017/04/Kalafati-Thalassies-Anan.-Piges.pdf>
7. Ζησιμόπουλος, Δ. (2015). *Use of Fiber Reinforced Plastics in Ship Construction: A Study of SOLAS regulation II-2/17 on Alternative Design and Arrangements for Fire Safety*. ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.
8. Amaechi, C., Chesterton, C., Butler, H., & Gillet, N. (2022). Review of Composite Marine Risers for Deep-Water Applications: Design, Development and Mechanics. *J. Compos. Sci.* **6**, 96.
9. Graham-Jones, J., & Summerscales, J. (2015). *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*. Elsevier, ISBN 978-1-78242-250-1,
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-16504-X>
10. Sutherland, H. (1999). On the fatigue analysis of wind turbines, Sandia National Laboratories, USA.
11. Hasson, D., & Crowe, C. (1998). *Materials for Marine Systems and Structures*, Academic Press, ISBN: 9781483218328.
https://books.google.gr/books/about/Materials_for_Marine_Systems_and_Structu.html?id=DHAVBQAAQBAJ&redir_esc=y
12. Calvario, M., Sutherland, L., & Guedes, S. (2018). A review of the applications composite materials in wave and tidal energy devices. *In: Developments in Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources: Proceedings of the 17th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2017), Lisbon, Portugal, CRC Press*.

13. Falcão, A. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **14**, 899.
doi:10.1016/j.rser.2009.11.003
14. Mouritz, A., & Mathys, Z. (1999). Post-fire mechanical properties of marine polymer composites. *Composite Structures*, **47**, 643.
doi:10.1016/s0263-8223(00)00043-x
15. Mouritz, A., & Mathys, Z. (2001). Post-fire mechanical properties of glass-reinforced polyester composites. *Composites science and technology*, **61**, 476.
16. Rubino, F., Nistico, A., Tucci, F. & Pierpalo C. (2020). Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A review. *Journal Marine Science and Engineering*, **8**, 26.
17. Barsotti, B., Gaiotti, M., & Rizzo, C. M. (2020). Recent Industrial Developments of Marine Composites Limit States and Design Approaches on Strength. *Journal of Marine Science and Application*, **19**, 553.
18. Buccino, M., Stagonas, D., & Vicinanza, D. (2015). Development of a composite sea wall wave energy converter. *Renewable Energy*, **81**, 509.
19. Funke, S., Farrell, P., & Piggott, M. (2014). Tidal turbine array optimisation using the adjoint approach. *Renewable Energy*, **63**, 658.
20. Bidal, M. (2022). *Composite Formation By Hand-Layup Process*. Pakistan Institute of Engineering and Applied Sciences.
https://www.researchgate.net/publication/360654863_COMPOSITE_FORMATION_BY_HAND-LAYUP_PROCESS
21. Jaafar, C., Zainol, I., Rizal, M., & Sultan, U. (2018). Preparation and characterisation of epoxy/silica/kenaf composite using hand lay-up method. *In 27th Scientific Conference of the Microscopy Society Malaysia*, a (27th SCMSM 2018), pp. 2-6.
22. Elkington, M., Bloom, D., Ward, C., Chatzimichali, A. & Potter, K., (2015). Hand layup: understanding the manual process. *Advanced manufacturing: polymer & Composites Science*, **1**, 138.
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20550340.2015.1114801>
23. Ahmad, J., González-Lezcano, R.A., Majdi, A., Kahla N.B., Deifalla, A.F. & El-Shorbagy, M.A., (2022). Glass Fibers Reinforced Concrete: Overview on Mechanical, Durability and Microstructure Analysis. *Materials* **15**, 5111.
24. Bureau Veritas. (2018). *Hull in Composite Materials and Plywood, Material Approval, Design Principles, Construction and Survey*.
25. Chand, N., & Fahim, M. (2021). Introduction to tribology of polymer composites. In: *Tribology of Natural Fiber Polymer Composites (Second Edition)*, pp. 61-85.
26. Tatara, R. (2017). Compression molding. *Applied plastics engineering handbook*, pp. 291-320.
27. Davis, B., & Gramann, P., (2003). Compression molding. *Hanser Verlag*, pp. 233-243.
28. Young, R., & Lovel, P. (2018). *Introduction to Polymers*. Taylor & Francis Inc.

29. Park, S.-J., & Seo, M.-K. (2011). Element and Processing. *Interface Science and Technology*, **18**, 431. doi:10.1016/b978-0-12-375049-5.00006-2
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123750495000062>
30. Favaloro, A., Sommer, E., Denos, B., & Pipes, R. (2018). Simulation of prepreg platelet compression molding: Method and orientation validation. *Journal of Rheology*, **62**, 1443.
31. Joshi, S. (2012). The pultrusion process for polymer matrix composites. In: *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, pp. 381-413.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780857090676500122>
32. Dilsil, N. & Wightman, J.P., (1999). Surface analysis of unsized and sized carbon fibers. *Carbon*, **37**, 1105.
33. Gopal, K. (2016). Product design for advanced composite materials in aerospace engineering. In: *Advanced composite materials for aerospace engineering*, pp. 413-428.
34. Hanaoka, T., Ikematsu, I., & Takashi, S. (2022). Recovery of carbon fiber from prepreg using nitric acid and evaluation of recycled CFRP. *Composites Part B: Engineering*, **231**, 109560.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109560>
35. Ji, Z., Guan, Z., & Li, Z. (2016). Damage resistance property of stiffened composite panels under low-velocity impact. *Beijing Hangkong Hangtian Daxue Xuebao*, **42**, 751.
<https://bhxb.buaa.edu.cn/bhzk/en/article/Y2016/I4/751>
36. McGowan, J., Hyers, R., Sullivan, K., Manwell, J., Nair, S., McNiff, B., & Syrett, B. (2007). A review of materials degradation in utility scale wind turbines. *Energy Materials*, **2**, 41.
37. Smith, C. (1990). *Design of maritime structures in composite materials*. London : Elsevier.
38. Scala, E. (1996). A Brief History of Composites in the U.S.—The Dream and the Success. *Journal of Materials, publication of The Minerals, Metals & Materials Society*, **48**, 45.
<https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/9602/Scala-9602.html>
39. Cucinotta, F., Guglielmino, E., & Sfravara, F. (2017). An experimental comparison between different artificial air cavity designs for a planing hull. *Ocean Engineering*, **14**, 233.
40. Hiremath, M. M., Bernthaler, T., Anger, P., Mishra, S. K., Guha, A., & Tewari, A. (2024). Comparison of damage mechanisms in chopped strand mat and woven roving mat composites under cyclic tension. *Polymer Composites*, **45**, 11162.
<https://doi.org/10.1002/pc.28539>
41. Erhard, G. (2006). *Designing with Plastics*. Munich: Hanser Publishers.

42. Summerscales, J. (1991). Design of marine structures in composite materials. *Composites Science and Technology*, **41**, 99.
[https://doi.org/10.1016/0266-3538\(91\)90055-t](https://doi.org/10.1016/0266-3538(91)90055-t)
43. Đai, L. Q. (2014). COMPOSITES MANUFACTURING materials, product, and process engineering. Hutech.
https://www.academia.edu/8105712/COMPOSITES_MANUFACTURING_Materials_Product_and_Process_Engineering
44. Rosato, D. V., & Rosato, D. V., (2004). *Reinforced plastics handbook*. Elsevier.
<https://www.sciencedirect.com/book/9781856174503/reinforced-plastics-handbook>
45. Lundquist, N., Tikoalu, A., Shapter, R., & Tonkin, S., *et al.*, (2018). Reactive Compression Molding Post-Inverse Vulcanization: A Method to Assemble, Recycle, and Repurpose Sulfur Polymers and Composites. *Chemistry–A European Journal*, **26**, 10035.
<https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/chem.202001841>
46. George, R., Das, B.B. & Goudar S.K., (2019). Durability Studies on Glass Fiber Reinforced Concrete. In : *Sustainable Construction and Building Materials*. pp. 747-756, Berlin/Heidelberg: Springer.
47. Górski, M., Kotala, B., & Białożor, R. (2018). Types and Properties of Non-Metallic Reinforcement, *Proceedings of the XXXIII National Workshops of Structural Designers*, pp. 6-9.
48. Notional Academy. (2011). Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*.
<https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/OPPORTUNITIES%20IN%20PROTECTION%20MATERIALS%20SCIENCE%20AND%20TECHNOLOGY%20OF%20FUTURE%20ARMY.pdf>
49. Neşer, G. (2017). Polymer Based Composites in Marine Use: History and future trends. *Procedia Engineering*, **194**, 19.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.111>
50. Newell, J. (2004). Carbon Fibers, In: *Encyclopedia of polymer science and technology*. New York, J. Wiley.
51. Iakovidis I, Dimitrellou S, Orfanos G & Vlachogiannis M; Improving the mechanical properties of Glass Reinforced Plastics by slight mechanical compression, *Proceed. VII Int. Conf. Eng. against Failure 2023* (Spetses, Greece) and *Journal of Physics: Conference Series 2024* p.2692.