



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διεξαγωγή Πειραματικών Δοκιμών Μέτρησης

Αντοχής σε Διαστρωματική Διάτμηση

σε Σύνθετα Υλικά

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΚΡΟΝΤΗΡΑΣ

Επιβλέπων: Νικόλαος Τσούβαλης, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

Ευχαριστίες

Η πραγματοποίηση της διπλωματικής αυτής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη του επιβλέποντα καθηγητή κ. Ν.Τσούβαλη. Εξίσου σημαντική υπήρξε η βοήθεια των Α.Μαρκουλή και Χ.Ξάνθη που με συνόδευσαν βήμα προς βήμα στην κατασκευή των δοκιμίων, την εκπόνηση των δοκιμών καθώς και στις διαδικασίες προσδιορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Τέλος θέλω να εκφράσω ένα βαθύ ευχαριστώ στην κα. Θ.Τσούρβια καθώς και στο συμφοιτητή μου Π.Χατζίνα, για την πολύτιμη βοήθεια τους όσο αφορά τις διεργασίες Acid Digestion και Image Analysis.

Πρόλογος

Σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή της μεθόδου short beam για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση δοκιμίων σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά που εξετάστηκαν κατασκευάστηκαν στο ομώνυμο εργαστήριο της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Πέρα από τον χαρακτηρισμό των υλικών ως προς την αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση, στόχος υπήρξε και ο χαρακτηρισμός της αποδοτικότητας της ίδιας της πειραματικής διαδικασίας.

Η διπλωματική εργασία οργανώνεται σε πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, ο αναγνώστης εισάγεται στη φιλοσοφία των σύνθετων υλικών, αποσκοπώντας στην εξοικείωση με τους όρους και τις παραμέτρους που συνδέονται με την τεχνολογία αυτή. Κατόπιν, επιχειρείται μια συνοπτική παρουσίαση της υπό μελέτη μηχανικής ιδιότητας, έτσι ώστε να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο επιχειρείται να εξεταστεί.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών, όπως αυτή υπαγορεύεται από το πρότυπο ISO 14130. Κατόπιν παρατίθενται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν να εξεταστούν στη διάρκεια της διπλωματικής. Ακολουθεί η ανάλυση των διαδικασιών κατασκευής των δοκιμίων καθώς και ο έλεγχος των ανοχών των διαστάσεων αυτών με βάση τις απαιτήσεις του προτύπου.

Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στον χαρακτηρισμό των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων που κατασκευάστηκαν. Κάθε φυσική ιδιότητα συνοδεύεται από το σχετικό θεωρητικό υπόβαθρο, καθώς και από την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της, στοιχεία που για λόγους συνοχής επιλέχθηκε να εξαιρεθούν από το εισαγωγικό κεφάλαιο. Τα αποτελέσματα κάθε δοκιμής παρατίθενται και σχολιάζονται σε μια προσπάθεια ποιοτικής αξιολόγησης των υπό μελέτη δοκιμίων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Σε πρώτη φάση, τα αποτελέσματα παρατίθενται μεμονωμένα για κάθε σειρά δοκιμίων, όπως προέκυψαν κατά τις πειραματικές δοκιμές. Κατόπιν, υφίστανται στατιστική ανάλυση και συγκρίνονται μεταξύ τους, με βάση την παραμετροποίηση που τέθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο εκτίθενται συμπεράσματα που αφορούν το σύνολο της διπλωματικής εργασίας, ενώ παράλληλα προτείνονται σημεία για μελλοντική έρευνα.

Prologue

Aim of the specific thesis is the implementation of the short beam method for the determination of the apparent interlaminar shear strength of fiber reinforced composite materials. The composite materials tested were constructed at the Composite Materials Laboratory of the School of Naval Architecture and Marine Engineering of the National Technical University of Athens. Besides the characterization of the materials tested as far as the interlaminar shear strength is concerned, complementary aim of the thesis was the characterization of the method as a whole.

The specific thesis is organized in five chapters. In the first of these, the reader is introduced at the philosophy of composite materials, in order to get familiar with the terms and the parameters connected with this technology. A concise presentation of the mechanical property tested follows, in an effort to clarify the way it is being examined.

In the second chapter, the procedure followed during the experiments as indicated by the standard ISO 14130 is being described. Then the parameters being examined are presented. The construction of the specimen tested is also being described as well as the check of the tolerance of their dimensions according to the indications of the standard.

The third chapter is dedicated to the characterization of the natural properties of the specimen constructed. Each natural property is accompanied by the pertinent theoretical background, as well as the description of the experimental procedure used to determine it, data chosen to be presented in this chapter on grounds of cohesion. The results of each test are depicted and commented in an effort of qualitative evaluation of the specimens used.

In the fourth chapter the results of the interlaminar shear strength tests are being presented. Initially, the results are presented individually for each series of specimens. Then the results are analyzed statistically in order to compare them according to the parameters presented in the second chapter.

Finally, in the fifth chapter the conclusions concerning the thesis as a whole are presented while at the same time topics for future research are being suggested.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Θεωρητικό υπόβαθρο	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά	1
1.3 Το φαινόμενο της διαστρωματικής διάτμησης	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Κατασκευή δοκιμών	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Το πρότυπο των δοκιμών - ISO 14130	10
2.2.1 Σκοπός	10
2.2.2 Βασική αρχή	11
2.2.3 Ορισμοί	11
2.2.4 Δοκίμια	12
2.2.5 Ταχύτητα της δοκιμής	14
2.2.6 Μηχανή δοκιμής	14
2.2.7 Μορφή αστοχίας	14
2.3 Εξεταζόμενες παράμετροι	16
2.4 Κατασκευή δοκιμών	17
2.4.1 Προετοιμασία	18
2.4.2 Διαδικασία κατασκευής πλακών	24
2.4.3 Σχεδιασμός και κοπή δοκιμών – Έλεγχος ανοχών	31
2.4.4 Υπολογισμός και σχεδίαση ανυποστήρικτου μήκους δοκιμών	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Δοκιμές προσδιορισμού φυσικών ιδιοτήτων	47
3.1 Εισαγωγή	47
3.2 Υπολογισμός πυκνότητας κατά ISO 1183-1	47
3.3 Υπολογισμός περιεκτικότητας δοκιμών σε ίνες	51
3.3.1 Διαδικασία υπολογισμού περιεκτικότητας σε ίνες για δοκίμια Glass κατά ISO 1172	52
3.3.2 Διαδικασία υπολογισμού περιεκτικότητας σε ίνες για δοκίμια Carbon	54
3.3.2.1 Διαδικασία Acid Digestion κατά ISO ASTM D 3171-99	55
3.3.2.2 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ίνες μέσω Image Analysis για τα διαξονικά δοκίμια άνθρακα	58
3.3.2.3 Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού περιεκτικότητας σε ίνες δοκιμών carbon	64

3.4 Υπολογισμός περιεκτικότητας σε κενά των δοκιμίων	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Πειραματικές δοκιμές ISS και αποτελέσματα	70
4.1 Εισαγωγή	70
4.2 Διαδικασία πειραματικών δοκιμών	70
4.3 Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων	72
4.4 Αποτελέσματα δοκιμίων με ίνες γυαλιού	73
4.4.1 Σειρά δοκιμίων GHU ₅	73
4.4.2 Σειρά δοκιμίων GHU ₁₀	74
4.4.3 Σειρά δοκιμίων GHX	76
4.4.4 Σειρά δοκιμίων GVU ₅	78
4.4.5 Σειρά δοκιμίων GVU ₁₀	79
4.4.6 Σειρά δοκιμίων GVX	81
4.5 Αποτελέσματα δοκιμίων με ίνες άνθρακα	83
4.5.1 Σειρά δοκιμίων CHU ₅	83
4.5.2 Σειρά δοκιμίων CHU ₁₀	85
4.5.3 Σειρά δοκιμίων CHX	87
4.5.4 Σειρά δοκιμίων CVU ₅	89
4.5.5 Σειρά δοκιμίων CVU ₁₀	91
4.5.6 Σειρά δοκιμίων CVX	93
4.6 Σύνοψη αποτελεσμάτων:	98
4.7 Δοκιμή εκτός προδιαγραφών προτύπου	96
4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων	98
4.8.1 Σύγκριση ως προς τον αριθμό στρώσεων	99
4.8.2 Σύγκριση ως προς το είδος υφάσματος	100
4.8.3 Σύγκριση ως προς τη μέθοδο κατασκευής	102
4.8.4 Σύγκριση ως προς το υλικό ενίσχυσης	103
4.8.5 Σύγκριση ως προς την επιφάνεια επαφής με στηρίξεις:	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Συμπεράσματα	106
5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα	106
5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	108
Βιβλιογραφία	109
Παράρτημα: Data sheets	111

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού αποτελεί η εισαγωγή του αναγνώστη στα βασικά σημεία της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πλήρης κατανόηση του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας, της προσέγγισης του υπό εξέταση προβλήματος, των περιγραφόμενων πειραματικών διαδικασιών αλλά και των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Για το σκοπό αυτό, σε πρώτη φάση επιχειρείται η συνοπτική παρουσίαση του χαρακτηρισμού και της δομής των σύνθετων υλικών, ενώ σε μια δεύτερη αναλύεται το φαινόμενο της διαστρωματικής διάτμησης, που αποτελεί τη μηχανική ιδιότητα που μελετάται στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής.

1.2 Εισαγωγή στα σύνθετα υλικά

Ορισμός

Ως σύνθετο ορίζεται κάθε υλικό που αποτελείται από χημικά διακριτά συστατικά και κατασκευάζεται μέσω τεχνητού συνδυασμού των διαφορετικών υλικών με σκοπό την επίτευξη ιδιοτήτων, που κανένα από τα επιμέρους υλικά δεν είναι σε θέση να επιτύχει από μόνο του (D.L.Chung 2010). Στο τελικό προϊόν κάθε μεμονωμένο υλικό παραμένει σαφώς διαχωρισμένο και διακριτό από τα υπόλοιπα. Ο χαρακτηρισμός του συνδυασμού των επιμέρους υλικών ως «τεχνητός» είναι εξαιρετικά σημαντικός, καθώς αποκλείει πολυφασικά υλικά, στα οποία οι διαφορετικές φάσεις έχουν σχηματιστεί μέσω αντιδράσεων, αλλαγών φάσης ή άλλων παρόμοιων φαινομένων. Επίσης, τα σύνθετα υλικά πρέπει να διακρίνονται σαφώς από μεταλλικά κράματα, τα οποία συνίστανται από δύο ή περισσότερα συστατικά παραπλήσιων μηχανικών ιδιοτήτων.

Κύριο πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών αποτελεί η ικανότητα τροποποίησης των ιδιοτήτων τους, μέσω κατάλληλης επιλογής των συστατικών στοιχείων, των αναλογιών, της κατανομής, της μορφολογίας, του βαθμού κρυσταλλικότητας, καθώς και της δομής και σύνθεσης των διεπιφανειών των συστατικών τους, ώστε να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ενός μεγάλου εύρους εφαρμογών. Οι εφαρμογές αυτές περιλαμβάνουν ένα πλήθος βιομηχανιών, όπως ενδεικτικά είναι η αεροδιαστημική, η αυτοκινητοβιομηχανία, ο ενεργειακός τομέας αλλά και η βιο-ιατρική, καθιστώντας τα σύνθετα μεταξύ των πιο εμπορικών μηχανικών υλικών.

Από τα συστατικά που ενδέχεται να απαρτίζουν ένα σύνθετο υλικό, το ένα τουλάχιστον χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο τις βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό ονομάζεται μήτρα και χαρίζει στο σύνθετο την

απαραίτητη συνοχή, ενώ παράλληλα μεταφέρει τις τάσεις μεταξύ των ινών και τις διασκορπίζει στη μεγάλη περιοχή του συνθέτου (Τσούβαλης 1998). Οι μηχανικές ιδιότητες της μήτρας είναι σαφώς κατώτερες του ενισχυτικού υλικού.

Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών

Μια πρώτη κατηγοριοποίηση των σύνθετων υλικών μπορεί να επιτευχθεί με **βάση τη μορφή του υλικού ενίσχυσης**. Το κριτήριο αυτό οδηγεί στην κατάταξη των συνθέτων σε τρεις κύριες κατηγορίες, στα ινώδη σύνθετα υλικά (fiber reinforced composites), στα σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composite materials) και στα πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites) τα οποία περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- Στα ινώδη σύνθετα υλικά το συστατικό ενίσχυσης έχει τη μορφή ινών. Ως ίνες καλούνται οι ενισχύσεις των οποίων η διάσταση του μήκους είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις άλλες δύο. Η ταξινόμηση των ινών μπορεί να γίνει τόσο ως προς το υλικό τους, όσο και ως προς τη διάταξή τους στο ύφασμα της ενίσχυσης.
- Στα σύνθετα υλικά σωματιδίων το συστατικό ενίσχυσης έχει τη μορφή σωματιδίων. Ως σωματίδια, καλούνται οι ενισχύσεις των οποίων οι διαστάσεις είναι συγκρίσιμες.
- Τέλος, τα πολύστρωτα συνθετικά υλικά αποτελούνται από διαδοχικές στρώσεις δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών (ή ενός υλικού με διαφορετικούς προσανατολισμούς) που συνδέονται μεταξύ τους. Η κατηγορία αυτή είναι που φαίνεται να βρίσκει τη μεγαλύτερη εφαρμογή στη ναυπηγική τεχνολογία.

Κατηγοριοποίηση ενισχυτικών ινών

Τα υλικά που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας αποτελούνται από επάλληλες στρώσεις ινωδών σύνθετων υλικών. Οι ενισχυτικές ίνες μεμονωμένες, είναι ικανές να μεταφέρουν μόνο εφελκυστικό φορτίο. Η επίτευξη υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων είναι δυνατή μόνο μετά την ενσωμάτωση των ινών στη μήτρα, όπου λειτουργούν σαν *μικροσκοπικοί συγκρατητές των ρωγμών* (Ν.Τσούβαλης 1998). Τα διάφορα είδη των ενισχυτικών ινών μπορούν σε πρώτη φάση να ταξινομηθούν με βάση το υλικό κατασκευής τους. Ως προς την παράμετρο αυτή, οι ενισχυτικές ίνες μπορούν να διακριθούν, μεταξύ άλλων, σε ίνες γυαλιού, ίνες άνθρακα, κεραμικές ίνες και ίνες aramid. Στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής επιλέγεται περαιτέρω ανάλυση των δύο πρώτων κατηγοριών:

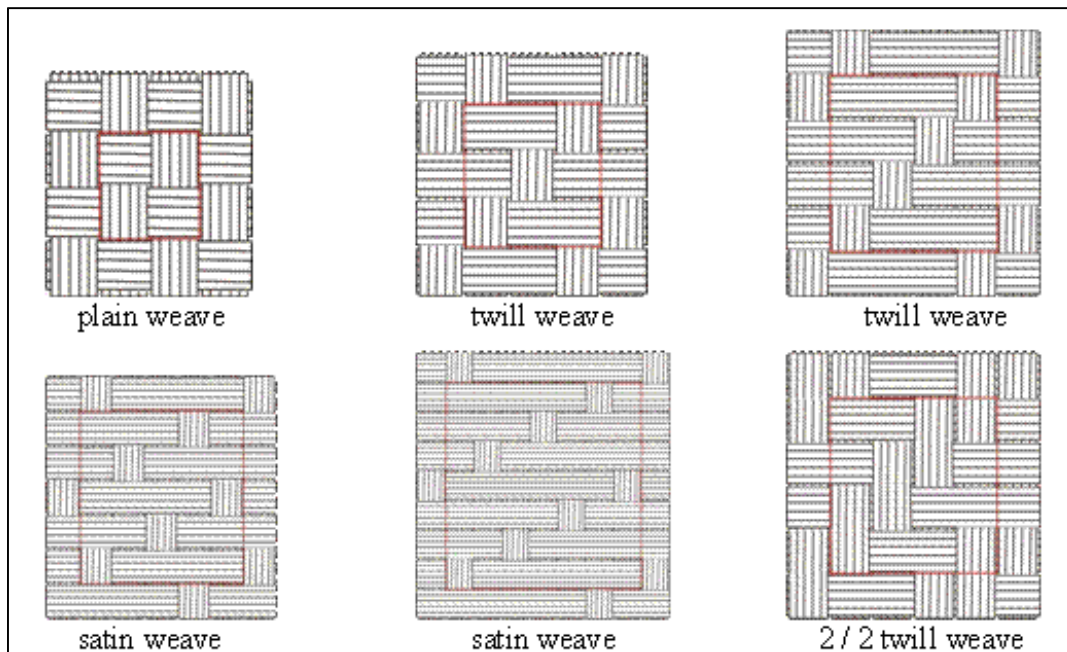
- Ίνες γυαλιού: Συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο πολυχρηστικών σύγχρονων βιομηχανικών υλικών. Επιδεικνύουν χρήσιμες εγγενείς ιδιότητες όπως σκληρότητα, διαφάνεια, αντίσταση σε χημική διάβρωση, σταθερότητα και (χημική) αδράνεια, αλλά και επιθυμητές ιδιότητες ως ίνες όπως αντοχή και χαμηλή δυσκαμψία. Οι ίνες γυαλιού μπορούν με τη σειρά τους να διαιρεθούν σε υποκατηγορίες όπως είναι, μεταξύ άλλων, οι ίνες E, R και S. Ο τύπος E χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και γενικευμένη χρήση σε ποσοστό που φθάνει το 90% των παραγόμενων ινών γυαλιού (ASM Handbook, Vol.21/2001). Οι υπόλοιποι τύποι αποτελούν ίνες υψηλότερων μηχανικών ιδιοτήτων.

- Ίνες άνθρακα/γραφίτη: Ο διαχωρισμός των ινών άνθρακα/γραφίτη, γίνεται με βάση την περιεκτικότητά τους σε άνθρακα. Ως ίνες άνθρακα χαρακτηρίζονται οι ίνες με περιεκτικότητα άνθρακα μεταξύ 80 και 95 %, ενώ ως ίνες γραφίτη εκείνες με περιεκτικότητα υψηλότερη από 99%. Η παραγωγή των ανθροκονημάτων είναι δυνατή μέσω της ανθρακοποίησης «πρόδρομων» ινών. Μεταξύ των ινών αυτών, πιο διαδεδομένη πρώτη ύλη αποτελούν οι ίνες του πολυμερούς πολυακρονυτριλίου (PAN). Οι υψηλές τους μηχανικές ιδιότητες είναι αποτέλεσμα του ισχυρού προσανατολισμού των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα της ίνας (Δ.Παντελής 2008). Με κατάλληλη διάρθρωση της παραγωγικής τους διαδικασίας, είναι δυνατή η επίτευξη δύο τύπων ινών άνθρακα, οι ίνες υψηλής αντοχής και οι ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας. Άλλα πλεονεκτήματά τους αποτελούν: χαμηλές τιμές ειδικού βάρους, αντοχή στην κόπωση, αντίσταση στη διάβρωση σε συνδυασμό με την κατάλληλη μήτρα, αλλά και διατήρηση των ιδιοτήτων τους σε υψηλές θερμοκρασίες (ASM Handbook, Vol.21 2001).

Πολλαπλές ίνες γυαλιού, περίπου 200 κάθε φορά (Ν.Τσούβαλης 1998) ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας νήματα. Τα νήματα αυτά συνδέονται μεταξύ τους με διάφορες μορφές πλέξης, κάθε μία από τις οποίες ενδείκνυται για συγκεκριμένη εφαρμογή. Από τις μορφές πλέξης αυτές, αναφέρονται ενδεικτικά οι εξής:

- Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CSM): Στο υαλοπίλημα, νήματα γυαλιού μικρού μήκους (6-50mm) συνδέονται μεταξύ τους με τη βοήθεια ειδικού συνδετικού σε τυχαίους προσανατολισμούς.
- Πλεξίδες υφασμάτων (Rovings) και υαλοϋφασμα (Woven Roving): Στη μορφή αυτή, μη στριμμένα νήματα ενώνονται μεταξύ τους δημιουργώντας πλεξίδες οι οποίες είτε χρησιμοποιούνται ως έχουν, είτε πλέκονται σε υαλοϋφάσματα. Στο τελικό ύφασμα, οι ίνες μπορεί να κατανέμονται στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις (warp και fill/weft) είτε σε ίσους αριθμούς (ισοσταθμισμένα-balanced) είτε σε προκαθορισμένη αναλογία (μη ισοσταθμισμένα-biased).
- Υφάσματα πυκνής πλέξης (Woven Fabrics): Έχουν την ίδια δομή με τα υαλοϋφάσματα με τη διαφορά ότι τα νήματα ινών δεν ενώνονται σε πλεξίδες αλλά υφίστανται περιστροφή (yarns).
- Μονοαξονικά υφάσματα (Unidirectional Rovings): Στην περίπτωση αυτή ίνες υφάσματος με προσανατολισμό μιας διεύθυνσης συνδέονται με τη βοήθεια συνδετικού υλικού.
- Πεπλεγμένα υφάσματα (knitted fabrics): Κύριο χαρακτηριστικό των υφασμάτων αυτών είναι ότι διαθέτουν ενίσχυση κατά τη διεύθυνση του πάχους.

Παρόμοιοι είναι οι τύποι ανθρακοϋφασμάτων που συναντούνται στο εμπόριο. Ένας επιπλέον τύπος διάθεσης που αφορά αποκλειστικά υφάσματα άνθρακα είναι οι λωρίδες (tapes) που συνίστανται από συνεχείς ίνες άνθρακα κολλημένες ή ελαφριά ραμμένες μεταξύ τους. Αναφέρεται ότι υπάρχουν ποικίλοι τρόποι ύφανσης τόσο για τα υαλοϋφάσματα όσο και για τα ανθρακοϋφάσματα. Οι σημαντικότεροι από αυτούς φαίνονται στο σχήμα 1.1:



Σχήμα 1.1: Τρόποι (δισδιάστατης) Ύφανσης

Επιπλέον αναφέρεται ότι ο όρος “biaxial” χρησιμοποιείται στο εμπόριο για τον χαρακτηρισμό των πολυδιευθυντικών υφασμάτων δύο διευθύνσεων, στα οποία οι δύο κάθετες διευθύνσεις έχουν περιστραφεί κατά 45° ως προς τη διεύθυνση ξετυλίγματος του ρολού του υφάσματος, με αποτέλεσμα ο τελικός τους προσανατολισμός στο ύφασμα να είναι $[\pm 45^\circ]$.

Υλικά μήτρας:

Οι μήτρες των σύνθετων υλικών μπορεί να είναι μεταλλικές, κεραμικές ή και οργανικές (ρητίνες). Οι τελευταίες διακρίνονται σε θερμοπλαστικές και θερμοσκληρυνόμενες. Ως θερμοπλαστικές χαρακτηρίζονται οι μήτρες, οι οποίες με αύξηση της θερμοκρασίας μαλακώνουν και μπορούν να μορφοποιηθούν. Ως θερμοσκληρυνόμενες χαρακτηρίζονται οι μήτρες που σκληραίνουν μόνιμα κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού τους και είναι αυτές που βρίσκουν εφαρμογή στη ναυπηγική βιομηχανία. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες με τη σειρά τους μπορούν να διακριθούν με βάση τη χημική τους σύσταση σε:

- Πολυεστερικές: χαρακτηρίζονται από λογικό κόστος, ευκολία χρήσης και καλή συμπεριφορά στο θαλάσσιο περιβάλλον
- Βινυλεστερικές: έχουν παρόμοια χημική σύσταση με τις πολυεστερικές αλλά καλύτερες ιδιότητες
- Εποξικές: παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις πολυεστερικές αλλά ταυτόχρονα και υψηλότερο κόστος. Για τον πολυμερισμό τους, απαραίτητη είναι η προσθήκη σκληρυντή (hardener).
- Φαινολικές; Εμφανίζουν δύο βασικά πλεονεκτήματα, αντοχή σε φωτιά και δυνατότητα σκλήρυνσης εν ψυχρώ

Χαρακτηρισμός μηχανικής συμπεριφοράς των συνθέτων

Σχετικά με τη μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών θεωρείται ωφέλιμο να σχολιαστούν τα εξής. Τα υλικά των κατασκευών στην πλειονότητά τους είναι ομογενή και ιστροπικά. Οι ορισμοί των χαρακτηρισμών αυτών έχουν ως εξής (Jones 1975):

- Ομογενές ονομάζεται κάθε υλικό, οι ιδιότητες του οποίου σε κάποιο σημείο **δεν** είναι συνάρτηση της θέσης του σημείου αυτού στο υλικό
- Ισοτροπικό ονομάζεται κάθε υλικό, οι ιδιότητες του οποίου σε κάποιο σημείο **δεν** είναι συνάρτηση της διεύθυνσης στην οποία μετρικούνται

Σε αντίθεση με τα παραπάνω τα σύνθετα υλικά είναι εν γένει ετερογενή και μη ιστροπικά, με τα τελευταία να διακρίνονται σε ορθοτροπικά και ανισοτροπικά όπου (Jones 1975):

- Ετερογενές ονομάζεται ένα υλικό όταν οι ιδιότητες σε κάποιο σημείο του είναι συνάρτηση της θέσης του σημείου αυτού στο υλικό
- Ορθοτροπικό ονομάζεται ένα υλικό όταν οι ιδιότητες του σε κάποιο σημείο του είναι διαφορετικές στις τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, αλλά ταυτόχρονα έχει τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας
- Ανισοτροπικό ονομάζεται ένα υλικό όταν οι ιδιότητες σε κάποιο σημείο του είναι διαφορετικές σε όλες τις διευθύνσεις

Στα ορθοτροπικά και ανισοτροπικά υλικά, δηλαδή, οι ιδιότητες κάθε σημείου είναι συνάρτηση του προσανατολισμού.

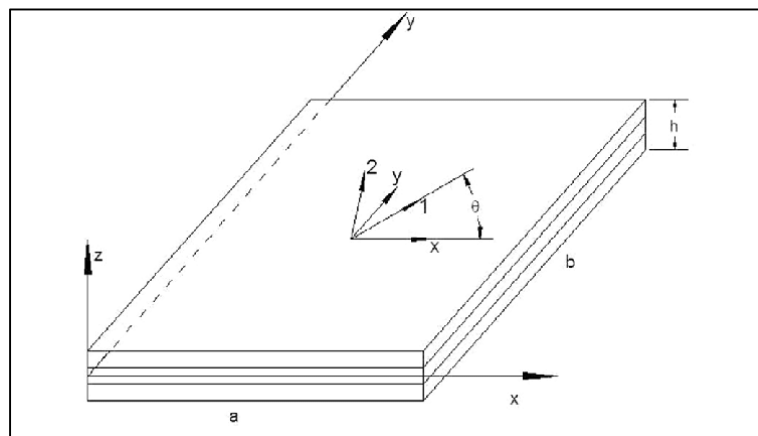
Πέρα από τα χαρακτηριστικά αυτά, σημαντικός θεωρείται και ο σχολιασμός της δυσκαμψίας και του τρόπου αστοχίας των σύνθετων υλικών. Τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από μικρή δυσκαμψία. Το χαρακτηριστικό αυτό είναι επιθυμητό στις περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η απορρόφηση μεγάλων ποσών ενέργειας, μέσω υψηλών παραμορφώσεων χωρίς το υλικό να αστοχεί, ενώ αποτελεί πρόβλημα σε περιπτώσεις όπου είναι απαραίτητες μικρές παραμορφώσεις. Συγκρινόμενα με τα μέταλλα, τα σύνθετα υλικά δεν παρουσιάζουν μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική συμπεριφορά πριν την αστοχία τους. Αντίθετα, τα πολύστρωτα ελάσματα σύνθετων υλικών οδηγούνται στην κατάρρευση με σταδιακή αστοχία των διαδοχικών στρώσεων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την παρατήρηση αλλαγών στην αντοχή και δυσκαμψία, ενώ συχνά συνοδεύεται και από την εμφάνιση ρωγμών. Συνηθισμένη είναι ακόμη η αποκόλληση διαδοχικών στρώσεων (delamination).

Κωδικοποίηση πολύστρωτων

Στο σημείο αυτό είναι πολύ σημαντικό να οριστούν οι άξονες συντεταγμένων κάθε στρώσης προκειμένου να είναι κατανοητός ο συμβολισμός των πολύστρωτων. Ως στρώση αναφέρεται η διαμόρφωση ινών (επίπεδη ή καμπύλη), οποιασδήποτε κατηγορίας από αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω, σε μια μήτρα. Για τον χαρακτηρισμό του σύνθετου, σε κάθε

στρώση εγκαθίσταται ένα ορθογώνιο σύστημα αξόνων. Οι άξονες αυτοί χαρακτηρίζονται ως 1,2 και 3. Από αυτούς, οι άξονες 1 και 2 ανήκουν στο επίπεδο της στρώσης ενώ ο τρίτος είναι κάθετος σε αυτό (διεύθυνση ανάπτυξης του πάχους της στρώσης). Στα μονοαξονικά υφάσματα ο άξονας 1 συμπίπτει με τη διεύθυνση των ινών. Στην περίπτωση των υφασμάτων πολλών διευθύνσεων ο άξονας 1 τοποθετείται στη διεύθυνση εκείνη που παρουσιάζει τις υψηλότερες μηχανικές αντοχές. Η διεύθυνση αυτή συνήθως ταυτίζεται και με τη διεύθυνση warp, τη διεύθυνση δηλαδή που είναι παράλληλη με το μήκος του ρολού ενίσχυσης όπως προκύπτει κατά την παραγωγική διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή, ο άξονας 2 συμπίπτει με τη διεύθυνση weft (ή fill) τη διεύθυνση κάθετη στο μήκος του ρολού ενίσχυσης. Στην περίπτωση του υλαοπιλήματος η τοποθέτηση των αξόνων γίνεται τυχαία.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το πολύστρωτο αποτελείται από επάλληλες στρώσεις κάθε μια από τις οποίες μπορεί να έχει προσανατολισμούς κύριων διαστάσεων διαφορετικούς από τα γεωμετρικά άκρα του πολύστρωτου. Η σύνδεση των διαδοχικών στρώσεων επιτυγχάνεται με το υλικό της μήτρας. Για να είναι επιτυχής, λοιπόν, ο χαρακτηρισμός ενός πολύστρωτου, πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο συστήματα συντεταγμένων. Το πρώτο από αυτά, χαρακτηρίζει ολόκληρο το πολύστρωτο και συμβολίζεται με τις γνωστές μεταβλητές (x,y,z) . Υποθέτοντας ότι το πολύστρωτο έχει τη μορφή ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου το σύστημα τοποθετείται έτσι ώστε οι άξονες να είναι παράλληλοι με τα άκρα αυτού. Παράλληλα, υπάρχει το σύστημα συντεταγμένων που χαρακτηρίζει κάθε στρώση, όπως αναλύθηκε στην παραπάνω παράγραφο. Οι άξονες του συστήματος αυτού συμβολίζονται ως $(1,2,3)$. Τα παραπάνω συστήματα παρουσιάζονται στο σχήμα 1.2.



Σχήμα 1.2: Γεωμετρικό (x,y,z) και κύριο σύστημα υλικού $(1,2,3)$

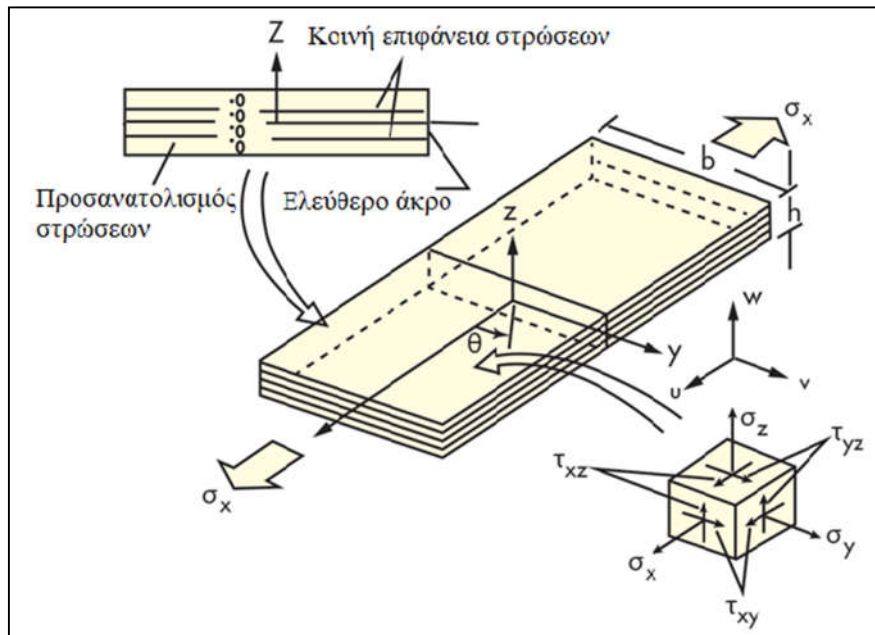
Ένα πολύστρωτο χαρακτηρίζεται ως συμμετρικό εάν για κάθε στρώση στο μισό του πάχους του, υπάρχει στο άλλο μισό πάχος μια άλλη στρώση, συμμετρική ως προς το μέσο επίπεδο αποτελούμενη από το ίδιο υλικό που έχει τον ίδιο προσανατολισμό ινών με την πρώτη (N.Τσουβάλης 1998). Ως προς τον προσανατολισμό των ινών των στρώσεων, ένα σύνθετο έχει διασταυρούμενες στρώσεις όταν οι ίνες του είναι παράλληλες στα γεωμετρικά του άκρα, ενώ έχει διαγώνιες στρώσεις όταν μία τουλάχιστον στρώση δεν ικανοποιεί την παραπάνω συνθήκη. Για τα πολύστρωτα άρτιου αριθμού στρώσεων, εάν η γωνία κάθε

στρώσης εναλλάσσεται διαδοχικά μεταξύ των τιμών $\pm\theta$, τότε το πολύστρωτο ονομάζεται αντισυμμετρικό με διαγώνιες στρώσεις. Στην ειδική περίπτωση που $\theta=90^\circ$ το πολύστρωτο ονομάζεται αντισυμμετρικό με διασταυρούμενες στρώσεις. Τέλος, ως κανονικό χαρακτηρίζεται ένα πολύστρωτο όταν όλες οι στρώσεις έχουν το ίδιο πάχος και τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες στις κύριες διευθύνσεις του (Jones 1975).

Είναι ωφέλιμο ο χαρακτηρισμός των πολύστρωτων να γίνεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρέχει άμεσα πληροφορία για την ακολουθία των στρώσεών του (stacking sequence). Για την κωδικοποίηση των κανονικών πολύστρωτων, οι στρώσεις του καταγράφονται διαδοχικά με βάση τη γωνία προσανατολισμού των ινών τους (θ) ως προς το σύστημα (x,y,z). Έστω ένα κανονικό πολύστρωτο με τρεις στρώσεις. Εάν στην κάτω στρώση ο άξονας 1 είναι παράλληλος στον άξονα x, στη μεσαία είναι κάθετος στο x, και στην πάνω σχηματίζει γωνία 45° με αυτόν τότε συμβολίζεται ως $[0^\circ/90^\circ/45^\circ]$. Στην περίπτωση μη κανονικού πολύστρωτου ο συμβολισμός του πάχους κάθε στρώσης εισάγεται μετά από τον προσανατολισμό κάθε στρώσης. Στο παραπάνω παράδειγμα αν οι στρώσεις έχουν πάχος $t, 2t$ και $3t$, ο συμβολισμός τροποποιείται ως εξής $[0^\circ@t/90^\circ@2t /45^\circ@3t]$. Συμμετρικό πολύστρωτου άρτιου αριθμού στρώσεων συμβολίζεται με την προσθήκη ενός δείκτη s μετά την αγκύλη, ενώ για πολύστρωτο περιττού αριθμού στρώσεων, η μεσαία στρώση δηλώνεται με μια παύλα. Έτσι ισχύουν οι ισότητες $[90^\circ/0^\circ/45^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ] = [90^\circ,0^\circ.45^\circ]_s$ και $[90^\circ/0^\circ/45^\circ/0^\circ/90^\circ] = [90^\circ,0^\circ.\overline{45^\circ}]_s$. Τέλος, ο αριθμός διαδοχικών στρώσεων μπορεί να τοποθετείται για συντομία ως δείκτης μετά την κοινή γωνία των στρώσεων π.χ. $[0^\circ_4/90]$ ή στην περίπτωση των αντισυμμετρικών πολύστρωτων μετά την αγκύλη για να δείξει επανάληψη όλης της ακολουθίας που βρίσκεται εντός της αγκύλης π.χ. $[+30^\circ/-30^\circ]_4$ ή αλλιώς $[\pm 30^\circ]_4$.

1.3 Το φαινόμενο της διαστρωματικής διάτμησης

Ως γνωστόν, ως διατμητική τάση (τ) ορίζεται το πηλίκο της παράλληλης ή εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται σε μια διατομή ενός υλικού προς την επιφάνεια της διατομής αυτής. Στη διεθνή βιβλιογραφία οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις των σύνθετων υλικών μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Η συνεπίπεδη (in plane) διάτμηση (επίπεδη εντατική κατάσταση) σχετίζεται με τις διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στο επίπεδο (1,2) κάθε στρώσης, δηλαδή στο επίπεδο (x,y) ενός πολύστρωτου. Οι διατμητικές τάσεις και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα επίπεδα (x,z) ή (1,3) και (y,z) ή (2,3) χαρακτηρίζονται ως “out of plane” (εκτός επιπέδου) ή αλλιώς διαστρωματικές (interlaminar). Οι περιγραφόμενες φορτίσεις φαίνονται στο σχήμα 1.3.



Σχήμα 1.3: Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε πολύστρωτο

Οι J.Ealías, Lalmoni και J.J.Mattam (2013) επισημαίνουν ότι οι διαστρωματικές διατμήσεις (τ_{xz} , τ_{yz}) αν και μπορούν να αναπτυχθούν σε οποιοδήποτε υλικό, αποτελούν συνηθέστερη πηγή αστοχίας στα σύνθετα υλικά, διότι η ανάπτυξη τους σε πολύστρωτα υλικά μπορεί να οδηγήσει σε αποχωρισμό στρώσεων (delamination). Η εμφάνιση τους μπορεί να αναζητηθεί σε διάφορα αίτια. Ένα από αυτά είναι οι ιδιότητες του υλικού μεταξύ στρώσεων. Διαδοχικές στρώσεις ενδέχεται να έχουν διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με την επιλογή ινών κάθε στρώσης ή του προσανατολισμού αυτών. Οι διαστρωματικές διατμήσεις τείνουν να οδηγήσουν τις διεπιφάνειες μεταξύ των διαδοχικών αυτών στρώσεων σε αστοχία.

Ως φαινόμενο, η διαστρωματική διάτμηση δεν λαμβάνεται υπόψη στη κλασική θεωρία των πολύστρωτων όπου θεωρείται επίπεδη εντατική κατάσταση. Η παραδοχή αυτή είναι ικανοποιητική σε περιοχές μακριά από τα άκρα του πολύστρωτου όπου οι διαστρωματικές τάσεις είναι αμελητέες. Ωστόσο, η εντατική κατάσταση κοντά στα ελεύθερα άκρα του πολύστρωτου δεν είναι επίπεδη αλλά τρισδιάστατη. Οι υψηλές διαστρωματικές παραμορφώσεις στην κοινή επιφάνεια δύο στρώσεων στην περιοχή αυτή, μπορούν να προκαλέσουν τη ρωγμάτωση της μήτρας στο ελεύθερο άκρο, η διάδοση της οποίας μπορεί να αποτελέσει απαρχή αστοχίας (N.Τσούβαλης 1998). Κατά συνέπεια, ο υπολογισμός των διαστρωματικών διατμήσεων, αν και απαραίτητος για τον χαρακτηρισμό ενός πολύστρωτου υλικού, δεν είναι δυνατός μέσω μαθηματικών εξισώσεων. Έτσι η εκτίμησή τους μπορεί να γίνει είτε πειραματικά είτε με την ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο MIL-17 (2002) η πειραματική εξέταση των διατμητικών τάσεων στα σύνθετα υλικά συγκαταλέγεται στις πιο δύσκολα πειραματικά προσδιοριζόμενες μηχανικές ιδιότητες, ειδικά στην περίπτωση των εκτός επιπέδου διατμητικών τάσεων. Η παρουσία επιδράσεων των άκρων, της σύζευξης υλικών, η μη γραμμική συμπεριφορά της μήτρας ή της διεπιφάνειας μήτρας, η μη ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων καθώς και η

συνύπαρξη άλλων τάσεων (π.χ. καμπτικών) καθιστούν τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διατμητικές καταπονήσεις αμφισβητήσιμα.

Μεταξύ των πειραματικών μεθόδων που έχουν αναπτυχθεί για το προσδιορισμό της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση των πολύστρωτων υλικών συγκαταλέγονται οι δοκιμές Short beam, Iosipescu και η μέθοδος ASTM D3856-79.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Κατασκευή δοκιμίων

2.1 Εισαγωγή

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού αποτελεί η παρουσίαση των διαδικασιών για την παραγωγή των δοκιμίων που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας. Στο κεφάλαιο αυτό επιλέγεται να γίνει αποκλειστική αναφορά στις διαδικασίες κατασκευής και ελέγχου των δοκιμίων κατά τις υποδείξεις του υπό μελέτη προτύπου, ενώ πειραματικές δοκιμές για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων τους, οι οποίες κρίνονται απαραίτητες για την ορθή εξαγωγή συμπερασμάτων, περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 3).

Συγκεκριμένα, η δομή που ακολουθεί το κεφάλαιο είναι η εξής: Σε πρώτη φάση, επιχειρείται μια συνοπτική παρουσίαση του προτύπου ISO με βάση το οποίο τυποποιήθηκε η διαδικασία των δοκιμών (ISO-14130), καθώς και των αναθεωρήσεων αυτού. Κατόπιν παρατίθενται οι παράμετροι οι οποίες επιλέχθηκαν να εξεταστούν κατά τις πειραματικές δοκιμές. Ακολουθεί η περιγραφή των διαδικασιών για την παραγωγή των δοκιμίων και τέλος παρουσιάζεται ο έλεγχος των ανοχών των διαστάσεων τους.

2.2 Το πρότυπο των δοκιμών - ISO 14130

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση των υπό εξέταση δοκιμίων είναι αυτή που περιγράφεται από το πρότυπο ISO 14130 με τίτλο “Fiber-reinforced plastic composites – Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method” ενώ για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκαν υποδείξεις που παρατίθενται στο αμερικανικό ανάλογο του συγκεκριμένου προτύπου ASTM – D2344 με τίτλο “Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates”.

2.2.1 Σκοπός

Το διεθνές αυτό πρότυπο καθορίζει τη διαδικασία για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση-Interlaminar Shear Strength (πλαστικών) σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες μέσω της μεθόδου short beam. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για σύνθετα, τόσο θερμοσκληρυνόμενης, όσο και θερμοπλαστικής μήτρας, με την προϋπόθεση ότι μπορεί να επιτευχθεί αστοχία σε διαστρωματική διάτμηση. Όπως χαρακτηριστικά υπογραμμίζεται στο πρότυπο η μέθοδος δεν κρίνεται κατάλληλη για τον καθορισμό σχεδιαστικών παραμέτρων, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαλογή υλικών, ή σαν δοκιμή ποιοτικού ελέγχου. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι όταν δοκιμάζονται πολύστρωτα υλικά που δεν είναι συμμετρικά ή ισοκατανεμημένα (βλ. εδάφιο 1.2 «κωδικοποίηση

πολύστρωτων σελ.3 & 6), τα αποτελέσματα ενδέχεται να επηρεάζονται από ποικίλες συζεύξεις φορτίσεων όπως εφελκυσμός/κάμψη, κάμψη/στρέψη.

2.2.2 Βασική αρχή

Μια πλάκα ορθογωνικής διατομής υποβάλλεται σε κάμψη, ως απλή δοκός, έτσι ώστε να επιτευχθεί αστοχία από διαστρωματική διάτμηση. Η πλάκα εδράζεται σε δύο στηρίξεις και η φόρτιση εφαρμόζεται μέσω ενός στελέχους φόρτισης στο μέσο μεταξύ των εδράσεων. Η δοκιμή είναι παρόμοια στη φύση με τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων, που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό των καμπτικών ιδιοτήτων των πλαστικών. Ωστόσο, με την εφαρμογή ενός μικρότερου λόγου της απόστασης μεταξύ των εδράσεων (ανυποστήρικτο μήκος-span) ως προς το πάχος του δοκιμίου, επιδιώκεται η αύξηση των αναπτυσσόμενων εκτός επιπέδου διατμητικών τάσεων έναντι των καμπτικών στο υπό εξέταση δοκίμιο, ώστε να επιτευχθεί πρώτα αστοχία από διαστρωματική διάτμηση. Απαιτείται να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται δεν εκφράζουν απόλυτες τιμές. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται ο όρος «φαινόμενη αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση» για να καθορίσει τη μετρούμενη ποσότητα.

2.2.3 Ορισμοί

Για τους σκοπούς του διεθνούς αυτού προτύπου, βρίσκουν εφαρμογή οι παρακάτω ορισμοί:

Φαινόμενη διαστρωματική τάση, τ : Η διαστρωματική τάση που δρα στο ουδέτερο επίπεδο του δοκιμίου. Υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.1) και εκφράζεται σε MegaPascals (MPa):

$$\tau = \frac{3}{4} \cdot \frac{F}{bh} \quad (2.1)$$

Φαινόμενη διαστρωματική αντοχή, τ_M : Η τιμή της διαστρωματικής τάσης κατά την αστοχία ή όταν το φορτίο επιτύχει μέγιστη τιμή. Υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.2) και εκφράζεται σε MegaPascals (MPa):

$$\tau_M = \frac{3}{4} \cdot \frac{F_M}{bh} \quad (2.2)$$

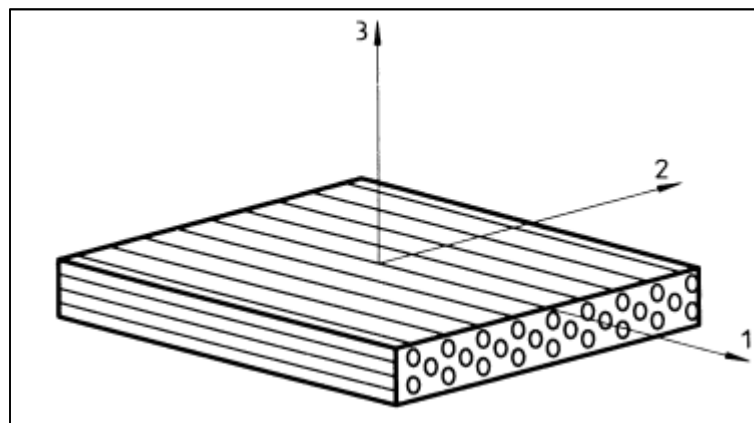
Όπου:

- F/F_M το φορτίο σε Newtons (N)
- b το πλάτος, σε millimeters (mm) , του δοκιμίου
- h το πάχος, σε millimeters (mm) , του δοκιμίου

Κατόπιν, υπολογίζεται ο αριθμητικός μέσος των ανεξάρτητων αποτελεσμάτων και, εφόσον απαιτείται, η τυπική απόκλιση. Τα μεγέθη της φαινόμενης διαστρωματικής τάσης και αντοχής δίνονται με ακρίβεια τριών σημαντικών ψηφίων.

Ανυποστήρικτο μήκος, L: Η απόσταση μεταξύ των δύο εδράσεων του δοκιμίου στη μηχανή των δοκιμών. Εκφράζεται σε millimeters (mm).

Άξονες συντεταγμένων του δοκιμίου: Οι άξονες συντεταγμένων για το υπό εξέταση υλικό φαίνονται στο σχήμα 2.1 και ταυτίζονται με αυτούς που αναλύθηκαν στο εδάφιο 1.2. Σε προσθήκη των όσων αναφέρθηκαν στο εδάφιο 1.2 αναφέρεται ότι στο πλαίσιο του συγκεκριμένου προτύπου, η διεύθυνση «1» αναφέρεται συχνά και ως 0 μοιρών (0°) ή διαμήκης διεύθυνση και η διεύθυνση «2» ως 90 μοιρών (90°) ή εγκάρσια διεύθυνση. Σημειώνεται ότι ο ορισμός των κύριων διευθύνσεων έγκειται στον ερευνητή και έτσι είναι δυνατό για υλικά με κάποια προτιμητέα διάταξη ινών, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου μια διεύθυνση μπορεί να συσχετιστεί με κάποια παραγωγική διαδικασία ή κάποια εφαρμογή, να μην χρησιμοποιηθεί η κλασική αντιστοίχιση του άξονα 1 με τον άξονα υψηλότερων μηχανικών αντοχών αλλά με τη διεύθυνση παραγωγής/εφαρμογής συνοδευόμενη πάντα από κατάλληλη επισήμανση. Για άλλα υλικά, οι διευθύνσεις 1,2 και 3 περιγράφονται γενικά από τα συστήματα συντεταγμένων x,y,z.



Σχήμα 2.1: Στοιχείο πλάκας από σύνθετο υλικό ενισχυμένο με μονοαξονικό ύφασμα, όπου φαίνεται η αρίθμηση των αξόνων

2.2.4 Δοκίμια

Σχήμα και Διαστάσεις

Τα δοκίμια αποτελούνται από ορθογωνικές πλάκες ομοιόμορφου πάχους με τις διαστάσεις που φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Τυποποιημένο μέγεθος δοκιμίων κατά ISO-14130

Πάχος, h (mm)	Ολικό μήκος, l (mm)	Πλάτος, b (mm)
2±0.2	20±1	10±0.2

Όταν δεν είναι δυνατό ή επιθυμητό να χρησιμοποιηθούν τα τυποποιημένα δοκίμια, θα πρέπει να ακολουθούνται οι παρακάτω κανόνες:

- Το μήκος (l) και το πάχος (h) των δοκιμίων θα πρέπει να διατηρούν τον ίδιο λόγο με το πρότυπο δοκίμιο - Σχέση 2.3:

$$l = 10h \quad (2.3)$$

- Το πλάτος (b) επιλέγεται με το ίδιο λόγο ως προς το πάχος (h), όπως το πρότυπο δοκίμιο – Σχέση 2.4 :

$$b = 5h \quad (2.4)$$

Ομοίως, το ανυποστήρικτο μήκος (L) επιλέγεται με σταθερό λόγο ως προς το μέσο πάχος (h_{av}) του συνόλου των δοκιμίων ίσο με – Σχέση 2.5:

$$L = 5h_{av} \pm 0.03 \quad (2.5)$$

Μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου

Η μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων πρέπει να γίνεται στο μέσο του κάθε δοκιμίου, το πλάτος με ακρίβεια 0.02 mm και το πάχος με ακρίβεια 0.05 mm.

Ανοχές Δοκιμίων

Τα δοκίμια οφείλουν να είναι επίπεδα και χωρίς συστροφή. Οι επιφάνειες και οι άκρες απαιτείται να είναι ελεύθερες από ρωγμές. Το πάχος σε όλο το μήκος προβλέπεται να βρίσκεται εντός του $\pm 5\%$ του μέσου πάχους. Το πλάτος του κάθε δοκιμίου θα πρέπει να είναι σταθερό με μέγιστο όριο απόκλισης τα 0.2 mm. Δοκίμια που παρουσιάζουν μετρήσιμες ή παρατηρήσιμες αποκλίσεις από μία ή περισσότερες από τις παραπάνω προϋποθέσεις πρέπει είτε να απορρίπτονται είτε να κατεργάζονται στο επιθυμητό μέγεθος ή σχήμα πριν τη δοκιμή.

Αριθμός Δοκιμίων

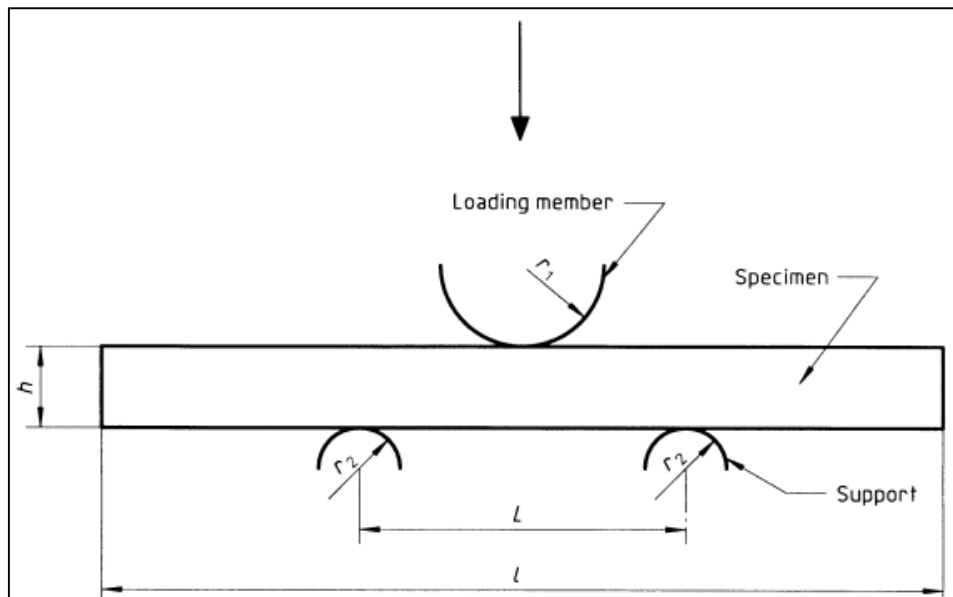
Πρέπει να δοκιμαστούν το λιγότερο 5 δοκίμια. Όταν ο προσανατολισμός των ινών καθώς και η κατανομή τους στο υλικό δεν διαφέρουν σημαντικά ανάμεσα στις δύο κύριες διευθύνσεις, πρέπει να λαμβάνονται δοκίμια σε κάθε μια από τις διευθύνσεις αυτές. Όταν το υλικό έχει μια **προτιμητέα διεύθυνση**, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου μια διεύθυνση μπορεί να συσχετιστεί με κάποια παραγωγική διαδικασία ή κάποια εφαρμογή, τα δοκίμια απαιτείται να λαμβάνονται στη διεύθυνση αυτή.

2.2.5 Ταχύτητα της δοκιμής

Όπου είναι εφαρμόσιμο, η ταχύτητα της δοκιμής πρέπει να τίθεται ίση με την προβλεπόμενη από το πρότυπο για το εκάστοτε υλικό. Στην απουσία τέτοιων πληροφοριών, η ταχύτητα των δοκιμών επιλέγεται ίση με 1 ± 0.2 mm/min.

2.2.6 Μηχανή δοκιμής

Η ακτίνα του στελέχους φόρτωσης r_1 είναι ίση με $5 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ και εκείνες των εδράσεων r_2 ίσες με $2 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ (βλ. σχήμα 2.2). Το πλάτος του στελέχους φόρτωσης και των εδράσεων πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του δοκιμίου. Το στέλεχος φόρτωσης πρέπει να εφαρμόζει το φορτίο στο μέσο μεταξύ των εδράσεων. Η απόσταση μεταξύ των εδράσεων θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμη.



Σχήμα 2.2: Διάταξη φόρτωσης

2.2.7 Μορφή αστοχίας

Το κριτήριο προκειμένου μια μορφή αστοχίας να κριθεί αποδεκτή είναι αμιγώς οπτικό. Η μορφή αστοχίας καταγράφεται με βάση την ταξινόμηση που φαίνεται στο σχήμα 2.3. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό αποδεκτή μορφή αστοχίας από διαστρωματική διάτμηση θεωρείται η:

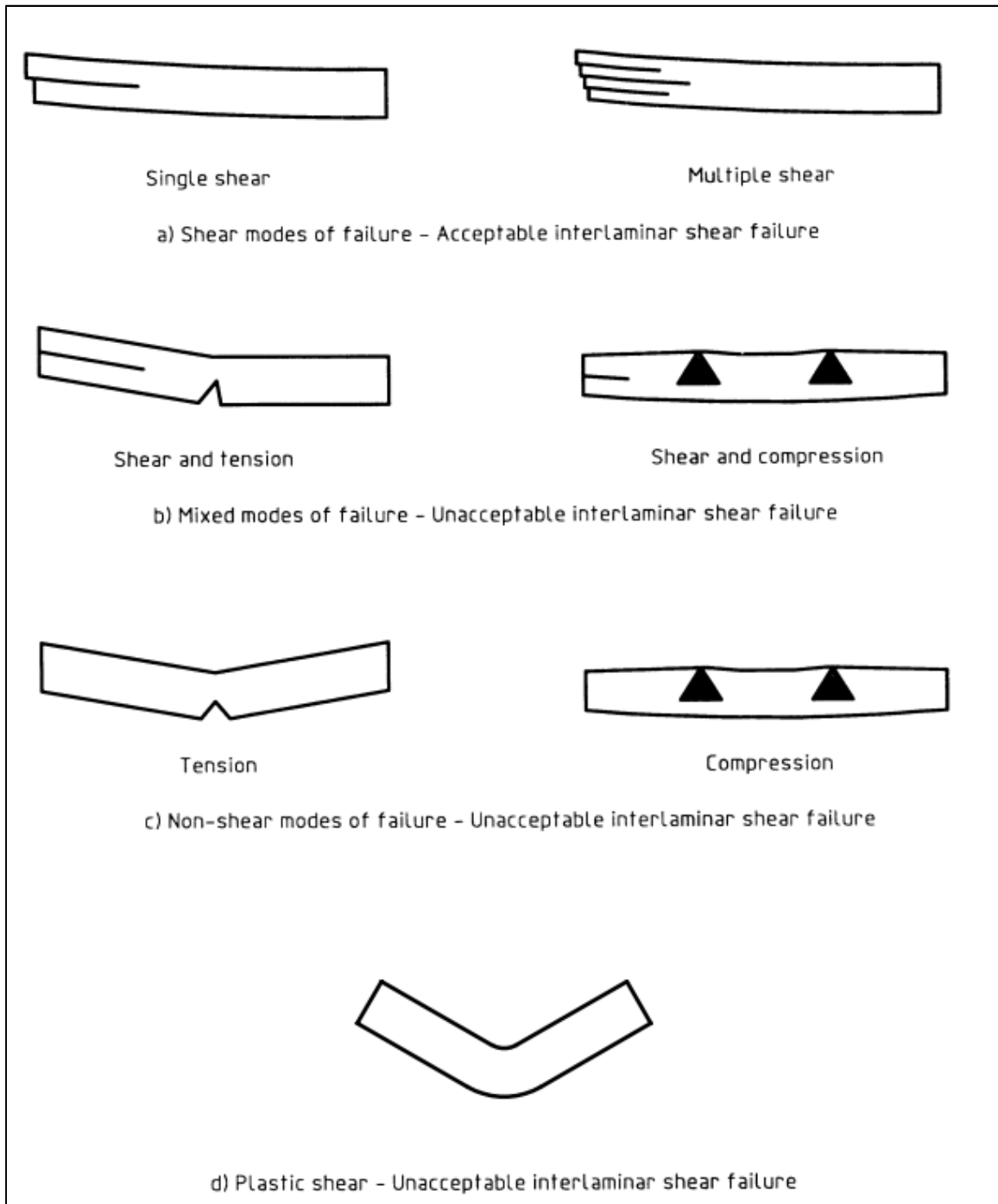
- a. Μονή ή πολλαπλή διάτμηση (σχήμα 2.3α)

ενώ μη αποδεκτές μορφές αστοχίας κρίνονται οι:

- b. Μεικτές μορφές αστοχίας (σχήμα 2.3b): διάτμηση και εφελκυσμός, διάτμηση και συμπίεση,
- c. Μορφές αστοχίας διάφορες της διάτμησης (σχήμα 2.3c): εφελκυσμός, συμπίεση,

d. Πλαστική διάτμηση (σχήμα 2.3d)

Περαιτέρω σημειώνεται ότι για αστοχία μορφής «α» στο επίπεδο του ουδέτερου άξονα, η φαινόμενη διαστρωματική διάτμηση μπορεί να υπολογιστεί από την εξ.(2.1). Για αστοχία των μορφών “b” και “c” το αποτέλεσμα που μετράται από την εξ.(2.1) **δεν αντιπροσωπεύει αμιγώς** τη διαστρωματική διάτμηση αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση δοκιμίων από το ίδιο υλικό.



Σχήμα 2.3: Μορφές Αστοχίας

2.3 Εξεταζόμενες παράμετροι

Τα δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας κατασκευάστηκαν στη Μονάδα Σύνθετων Υλικών του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Τομέα Θαλάσσιων Κατασκευών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, γεγονός που επέτρεψε την επιλογή μιας σειράς παραμέτρων προς εξέταση κατά την εκπόνηση των δοκιμών. Οι παράμετροι που μελετήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω:

Αριθμός Στρώσεων

Για κατασκευαστικά όμοια υλικά ως προς το είδος της ρητίνης, των ενισχυτικών ινών αλλά και της μεθόδου κατασκευής, θεωρήθηκε σκόπιμο να μελετηθεί η επίδραση του αριθμού του στρώσεων στην αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση. Η μελέτη αυτή, πραγματοποιήθηκε σε υλικά με ενίσχυση μονοαξονικού (unidirectional) υφάσματος ινών. Ο αριθμός στρώσεων, σε ένα πρώτο στάδιο, επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτευχθεί ένα επιθυμητό πάχος της υπό κατασκευή πλάκας. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε μεταξύ δύο πλακών, η πρώτη με ονομαστικό πάχος ίσο με 5mm και η δεύτερη ίσο με 10mm.

Είδος Υφάσματος

Για ίνες ίδιου υλικού εξετάστηκαν δύο είδη υφασμάτων ως προς τον τύπο διάταξης των ινών. Ο πρώτος τύπος, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι αυτός του μονοαξονικού υφάσματος (UD) $[0^\circ]$, ενώ ο δεύτερος είναι αυτός του πλεκτού διαξονικού (BX) υφάσματος. Στα τελικά σύνθετα επιλέχθηκε να μην αλλάξουν οι προσανατολισμοί διαδοχικών στρώσεων, δίνοντας ακολουθίες στρώσεων $[0^\circ]_n$.

Μέθοδος Κατασκευής

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή πλακών όμοιων ως προς τον αριθμό των στρώσεων, το υλικό και το είδος υφάσματος είναι η μέθοδος Hand Lay-up και η μέθοδος Vacuum Bagging.

Υλικό Ενίσχυσης

Στόχος υπήρξε η μελέτη της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση δοκιμίων ενισχυμένων με ίνες διαφορετικού υλικού. Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκαν πλάκες με ενίσχυση ινών γυαλιού και πλάκες με ενίσχυση ινών άνθρακα.

Επιφάνεια Επαφής με Στηρίξεις Μηχανής Δοκιμών

Κατά τις υποδείξεις του υπό εξέταση προτύπου η επιφάνεια του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με τις στηρίξεις της μηχανής δοκιμών δεν πρέπει να έχει υποστεί κατεργασία λείανσης. Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής δεν υπέστησαν κάποιου τέτοιου είδους κατεργασία. Ωστόσο λόγω της φύσης των κατασκευαστικών

μεθόδων, η οποία περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω (βλ. εδάφιο 2.4.2.2), η μια επιφάνεια κάθε δοκιμίου προκύπτει πολύ πιο λεία από την άλλη. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν η αλλαγή επιφάνειας επαφής επιφέρει κάποια σημαντική μεταβολή στα αποτελέσματα της δοκιμής, διεξήχθησαν πειράματα και με τις δυο επιφάνειες σε επαφή με τις στηρίξεις.

Στον παρακάτω Πίνακα (Πίνακας 2.2) παρουσιάζονται τα στοιχεία κάθε μιας από τις κατασκευαζόμενες πλάκες ως προς τις υπό μελέτη παραμέτρους:

Πίνακας 2.2: Παραμετροποίηση υπό κατασκευή πλακών

Πλάκα Παράμετροι	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Μέθοδος Κατασκευής	Hand Lay-up						Vacuum Bagging					
Υλικό Υφάσματος	Glass			Carbon			Glass			Carbon		
Είδος Υφάσματος	BX	UD		BX	UD		BX	UD		BX	UD	
Ονομαστικό Πάχος (mm)	5	5	10	5	5	10	5	5	10	5	5	10

Έχοντας αναλύσει τις υπό μελέτη παραμέτρους είναι πλέον δυνατός ο ορισμός της κωδικοποίησης των πλακών και των δοκιμίων. Το πρώτο σύμβολο (C/G) αναφέρεται στο υλικό των ινών (carbon/glass), το δεύτερο (V/H) στη μέθοδο κατασκευής (Vacuum Bagging/Hand Lay-up), το τρίτο (U/X) στη πλέξη του υφάσματος (unidirectional/biaxial) ενώ ο αριθμός σε μορφή δείκτη που ακολουθεί δηλώνει ονομαστικό πάχος της πλάκας. Ένας ακόμη αριθμός 1-8 ακολουθεί για να υποδηλώσει αριθμό δοκιμίου. Συνεπώς ως CHU₅₇ συμβολίζεται το έβδομο από τα δοκίμια μονοαξονικού υφάσματος άνθρακα με ονομαστικό πάχος ίσο με 5mm που έγινε με μέθοδο Hand Lay-up.

2.4 Κατασκευή δοκιμίων

Στο εδάφιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την κατασκευή των δοκιμίων του πειράματος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διαιρεθεί σε τρία στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελεί την προκαταρκτική μελέτη για την κατασκευή των δοκιμίων. Σημαντικότερο κομμάτι του σταδίου αυτού, αποτελεί η εκτίμηση των τελικών διαστάσεων των πλακών, πληροφορία απαραίτητη για τη σωστή κοπή των χρησιμοποιούμενων υφασμάτων με βάση τις γεωμετρικές υποδείξεις του προτύπου. Δεύτερο στάδιο αποτελεί η κατασκευή των πλακών με χρήση των μεθόδων που αναφέρθηκαν παραπάνω. Στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο πραγματοποιείται μια συνοπτική περιγραφή των μεθόδων αυτών. Τελικό στάδιο αποτελεί ο σχεδιασμός και η κοπή των δοκιμίων από τις πλάκες καθώς και ο έλεγχος των γεωμετρικών ανοχών που θέτει το πρότυπο για τα παραχθέντα δοκίμια. Στα εδάφια που ακολουθούν πέρα από περιγραφή των παραπάνω σταδίων, πραγματοποιείται ακόμη παράθεση προβλημάτων και παρατηρήσεων που καταγράφηκαν κατά την κατασκευή των δοκιμίων.

2.4.1 Προετοιμασία

Πρώτο βήμα για την κατασκευή των δοκιμίων αποτελεί η επιλογή ενισχυτικών υφασμάτων. Η διαδικασία αυτή απλοποιήθηκε σημαντικά από το γεγονός ότι η επιλογή υφασμάτων περιορίστηκε μεταξύ των υφασμάτων που υπήρχαν σε απόθεμα στο εργαστήριο. Υπενθυμίζεται ότι απαιτούνται δύο υφάσματα Glass, ένα μονοαξονικό και ένα διαξονικό, και δύο υφάσματα Carbon αντίστοιχου προσανατολισμού ινών. Τα υφάσματα που χρησιμοποιήθηκαν εν τέλει καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών, όπως καθορίζονται από τον κατασκευαστή φαίνονται στον πίνακα 2.3:

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά κατασκευαστή υπό χρήση υφασμάτων

	Carbon				Glass			
Κωδικός Υφάσματος	C322U		C210T		G600U		G300X	
Κατασκευαστής	Fibremax				Owens Corning		Απροσδιόριστος	
Πλέξη	Unidirectional		Twill 2x2		Unidirectional		Biaxial	
Επιφανειακό βάρος [g/m ²]	322		210		≈600		≈300	
Πάχος στρώσης (mm)	ονομαστικό	ανοχή	ονομαστικό	ανοχή	ονομαστικό	ανοχή	ονομαστικό	ανοχή
	0.35	n/a	0.19	± 2,5%	≈0.42	≈±15%	≈0.25	≈±15%
Κατανομή Βάρους [%]	warp	weft	warp	weft	warp	weft	warp	weft
	94	6	50	50	95	5	50	50

Σχετικά με τον παραπάνω πίνακα σημειώνονται τα εξής:

- Στα διαξονικά υφάσματα οι ίνες είναι ισοκατανεμημένες γεγονός που σημαίνει ότι το παραγόμενο πολυμερές χαρακτηρίζεται από μικρή διαφοροποίηση των ιδιοτήτων στις δύο κύριες κάθετες διευθύνσεις [0°,90°] λόγω της πλέξης των ινών weft γύρω από τις ίνες warp. Για λόγους περιορισμένων πόρων, επιλέχθηκε η κοπή των δοκιμίων BX έτσι ώστε το μήκος του δοκιμίου να είναι κατά μήκος των ινών warp (εξέταση ισχυρότερης διεύθυνσης).
- Το σύμβολο «≈» στην περίπτωση των υφασμάτων G600U και G300X χρησιμοποιείται διότι υπήρξε αδύνατη η εύρεση των ακριβών τεχνικών χαρακτηριστικών όπως καθορίζονται από τον κατασκευαστή για τα εν λόγω υφάσματα. Συνεπώς, για μια αρχική εκτίμηση των ιδιοτήτων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν τα στοιχεία των παραπλήσιων υφασμάτων G520U και G310X της Fibremax.
- Τα παρατιθέμενα πάχη στρώσης αντιστοιχούν στο θεωρητικό πάχος στρώσης σύνθετου εποξικής μήτρας με ενίσχυση 40% κατ'όγκον όπως δίνεται από τον κατασκευαστή.

Το πρόβλημα διαστασιολόγησης των πλακών

Κατά τις υποδείξεις του προτύπου τα δοκίμια του πειράματος οφείλουν να έχουν τις πρότυπες διαστάσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1. Ωστόσο η διαθέσιμη μηχανή δοκιμής λόγω προεκβολής των βάσεων των στηρίξεων προς το εσωτερικό της διάταξης θέτει ελάχιστο επιτεύξιμο ανυποστήρικτο μήκος ίσο με περίπου 22.5 mm. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την επιλογή μελέτης της επίδρασης του αριθμού στρώσεων στη διαστρωματική αντοχή καθιστούν αναγκαστική την προσφυγή στη δεύτερη γεωμετρική συνθήκη που υπαγορεύει το πρότυπο που δεν είναι άλλη από τη διατήρηση του λόγου των διαστάσεων.

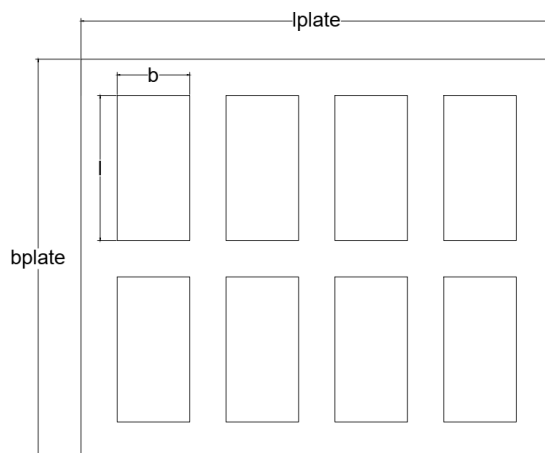
Οι λόγοι των διαστάσεων που πρέπει να διατηρούνται σταθεροί συνοψίζονται στον πίνακα 2.4:

Πίνακας 2.4: Λόγοι διαστάσεων δοκιμίων

Λόγος	Σύμβολο	Τιμή
Μήκος προς πάχος	$l/h =$	10
Πλάτος προς πάχος	$b/h =$	5
Span προς μέσο πάχος	$L/h_{av} =$	5

Γίνεται, λοιπόν, αντιληπτό ότι βασική διάσταση για τον καθορισμό των υπόλοιπων αποτελεί το πάχος της κατασκευαζόμενης πλάκας. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα πάχη των πλακών και κατά επέκταση των δοκιμίων καθορίστηκαν για τα μονοαξονικά υφάσματα κοντά στα 5 και 10 mm, ενώ για τα διαξονικά μόνο κοντά στα 5 mm έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι μπορεί να καλυφθεί το ελάχιστο ανυποστήρικτο μήκος της μηχανής δοκιμής ($L=5 \cdot h=5 \cdot 5=25 \text{ mm} > 22.5 \text{ mm}$). Με γνωστό το πάχος των δοκιμίων είναι δυνατός ο προσδιορισμός των υπόλοιπων διαστάσεών τους μέσω των σταθερών λόγων. Κατά συνέπεια είναι επίσης δυνατός ο προσδιορισμός του μήκους και του πλάτους των πλακών από τις οποίες θα κοπούν τα δοκίμια έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί η κοπή των υφασμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω:

- Από κάθε πλάκα είναι επιθυμητό να κοπούν οκτώ δοκίμια έτσι ώστε να ικανοποιείται ο ελάχιστος αριθμός που θέτει το πρότυπο (5) επιτρέποντας παράλληλα τη δυνατότητα απόρριψης κάποιων δοκιμίων. Αυτά διατάσσονται σε δύο σειρές των τεσσάρων με τη διάσταση του πλάτους τους να εκτείνεται κατά το μήκος της πλάκας και το αντίστροφο. Ένα σκαρίφημα της διάταξης αυτής φαίνεται στο σχήμα 2.4:



Σχήμα 2.4: Σκαρίφημα διάταξης δοκιμίων πάνω στην πλάκα

- Μεταξύ διαδοχικών δοκιμίων είναι επιθυμητή η ύπαρξη κενού 25mm για την επίτευξη σωστής κοπής.
- Η γεωμετρία των παραγόμενων ορθογώνιων πλακών χαλάει έντονα, κυρίως ως προς το πάχος, κοντά στις ακμές της. Συνεπώς είναι επιθυμητό να υπάρχει ένα περιθώριο 25 mm των δοκιμίων από τα άκρα της πλάκας.

Συνεπώς το μήκος της πλάκας υπολογίζεται περίπου ίσο με:

$$l_{\text{plate}} = 4 \cdot b + 3 \cdot 25 + 2 \cdot 25 \quad (\text{mm}) \quad (2.6)$$

και το πλάτος της ίσο με:

$$b_{\text{plate}} = 2 \cdot l + 2 \cdot 25 + 25 \quad (\text{mm}) \quad (2.7)$$

Γνωρίζοντας τις διαστάσεις κοπής του υφάσματος συναρτήσει των κύριων διαστάσεων των δοκιμίων, μένει μόνο ο προσδιορισμός του αριθμού των στρώσεων που πρέπει να κοπούν για την επίτευξη του (επιθυμητού) ονομαστικού πάχους. Για τα δοκίμια Glass, τα οποία κατασκευάστηκαν πρώτα, η πληροφορία αυτή προσεγγίστηκε διαιρώντας το ονομαστικό πάχος με το θεωρητικό πάχος στρώσης όπως δίνεται από τον κατασκευαστή. Οι σχετικοί υπολογισμοί φαίνονται στον πίνακα 2.5:

Πίνακας 2.5: Υπολογισμός αριθμού και διαστάσεων στρώσεων με βάση το θεωρητικό πάχος στρώσης

Μέγεθος \ Πλάκα	U ₅ (5mm)	U ₁₀ (10mm)	X (5mm)
Πάχος στρώσης (mm)	0.483	0.483	0.288
Αριθμός στρώσεων	11	22	20
Θεωρητικό πάχος πλάκας (mm)	5.3	10.6	5.8
Μήκος πλάκας (mm)	201	308	210
Πλάτος πλάκας (mm)	151	258	160

Σχετικά με τον πίνακα αυτό, σημειώνεται ότι οι τιμές των παχών στρώσεων είναι οι προβλεπόμενες από τους κατασκευαστές, επαυξημένες κατά την ανοχή που προβλέπει ο κατασκευαστής, μιας και στις δυο περιπτώσεις τα υπάρχοντα δεδομένα αφορούν προϊόντα διαφορετικού επιφανειακού βάρους.

Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί πως ενώ οι πλάκες G/CHU₅ και G/CHX θεωρητικά κατασκευάζονται με τελικό πάχος ίσο με 5mm, κάτι τέτοιο είναι πρακτικά αδύνατο, μιας και έτσι θα ήταν αδύνατη η διεξαγωγή πειραμάτων για δοκίμια όμοιων υλικών και αριθμού στρώσεων κατασκευασμένα με διαφορετική μέθοδο, δεδομένου ότι η μέθοδος Vacuum Bagging περιορίζεται στο ελάχιστο πάχος που θέτει ο περιορισμός του ανυποστήρικτου μήκους της μηχανής δοκιμής. Με άλλα λόγια, κάθε φορά επιλέγεται ο αριθμός αυτός των στρώσεων που δίνει πάχος πλακών Vacuum Bagging ίσο με περίπου 5mm. Για να υπάρξει παραμετροποίηση ως προς τη μέθοδο κατασκευής, ο αριθμός των στρώσεων των ομοειδών πλακών Hand Lay-up πρέπει να παραμείνει ίδιος, κάτι που εξαιτίας της φύσης της μεθόδου οδηγεί σε μεγαλύτερα πάχη πλακών. Ο λόγος που διατηρούνται οι συμβολισμοί 5, 10 στην κωδικοποίηση των πλακών είναι ότι παραμένουν πρακτικοί σε σχέση με την εισαγωγή του αριθμού των στρώσεων για τον συμβολισμό των δοκιμίων.

Με την κατασκευή των πλακών διαπιστώθηκε ότι για τις πλάκες Hand Lay-up η μέθοδος αυτή οδήγησε εν τέλει σε σοβαρή υποεκτίμηση του πάχους των τελικών πλακών. Οι σχετικές τιμές φαίνονται στον πίνακα 2.6:

Πίνακας 2.6: Απόκλιση θεωρητικού-πραγματικού πάχους πλακών glass

ID \ Πάχος (mm)	Θεωρητικό προσδοκώμενο πάχος	Τελικό [Hand Lay-up]	Απόκλιση	Τελικό [Vacuum Bagging]	Απόκλιση
GU ₅	5.3	6.70	26%	4.7	-12%
GU ₁₀	10.6	12.30	16%	9.2	-13%
GX _{plate1}	5.8	8.00	38%	5.1	-12%
GX _{plate2}	5.8	8.00	38%	5.1	-12%

Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα να είναι δυνατή η κοπή μόλις 5 δοκιμίων από τις πλάκες μονοαξονικού υφάσματος. Αναφέρεται ότι το ύφασμα G300X έχει προσανατολισμό [-45°,45°] με αποτέλεσμα τα δοκίμια να πρέπει να σχεδιαστούν διαγωνίως προκειμένου να έχουν προσανατολισμό [0°/90°]_n γεγονός που υπαγόρευσε την κατασκευή δύο πλακών για να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός δοκιμίων, επιτρέποντας εν τέλει την κοπή 8 συνολικά δοκιμίων παρά την υποδιαστασιολόγηση των πλακών.

Σχετικά με αιτίες που οδήγησαν στην υποδιαστασιολόγηση αυτή αναφέρονται τα εξής:

- Το προβλεπόμενο από τον κατασκευαστή πάχος αναφέρεται σε σύνθετο με περιεκτικότητα ινών ίση με 40% κατ'όγκον. Στην περίπτωση των πλακών Hand Lay-up η περιεκτικότητα αυτή ενδέχεται να είναι αρκετά μικρότερη, γεγονός που επιβεβαιώνεται

από το ότι η απόκλιση από την αναμενόμενη τιμή πάχους των πλακών Vacuum Bagging (μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ίνες λόγω αποβολής περίσσειας ρητίνης) είναι αρκετά μικρότερη.

- Υπενθυμίζεται ότι τα διαθέσιμα τεχνικά χαρακτηριστικά δεν αφορούν τα υφάσματα καθανά, αλλά τα πλησιέστερα δυνατά ως προς το επιφανειακό βάρος των οποίων τα στοιχεία ήταν διαθέσιμα, γεγονός που σημαίνει ότι το θεωρητικό πάχος στρώσης που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς ενδέχεται στην πραγματικότητα να διαφέρει σημαντικά.

Στην περίπτωση των πλακών Carbon που κατασκευάστηκαν σε δεύτερο στάδιο, προκειμένου να αποφευχθεί μια ανάλογη υποδιαστασιολόγηση της κατασκευής των τελικών πλακών, προηγήθηκε η κατασκευή μιας σειράς πειραματικών πλακών ώστε να είναι δυνατός ο προσδιορισμός του πραγματικού πάχους στρώσης για κάθε ύφασμα. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν δύο πλάκες μονοαξονικού υφάσματος με ονομαστικό πάχος ίσο περίπου με 7 mm με κάθε μια από τις δύο μεθόδους και δυο αντίστοιχες διαξονικού υφάσματος με πάχος ίσο με 5mm. Τα 7 mm επιλέχθηκαν ως ενδιάμεση τιμή μεταξύ των 5 και 10 mm που είναι τα ονομαστικά πάχη των πλακών μονοαξονικού υφάσματος μιας και στα δοκίμια glass παρατηρήθηκε μικρή διαφοροποίηση του πάχους στρώσης για δοκίμια ίδιου υφάσματος αλλά διαφορετικού αριθμού στρώσεων. Μια πρώτη εκτίμηση του αριθμού των απαιτούμενων στρώσεων των πλακών για τον προσδιορισμό του πάχους στρώσης πραγματοποιήθηκε με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή.

Στον πίνακα 2.7 παρατίθεται η εκτίμηση του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων για την κατασκευή των δοκιμαστικών πλακών:

Πίνακας 2.7: Αριθμός στρώσεων για κατασκευή πλακών προσδιορισμού πειραματικού πάχους στρώσης

Υφασμα	C322U	C210T2
Ονομαστικό πάχος (mm)	7	5
Θεωρητικό πάχος στρώσης κατασκευαστή (mm)	0.35	0.19
Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων	19	27

Στον πίνακα 2.8 συγκρίνονται οι θεωρητικές και τελικές τιμές πάχους των δοκιμαστικών πλακών.

Πίνακας 2.8: Πραγματικό πάχος στρώσης δοκιμίων Carbon

Τελικό πάχος πλακών δοκιμής πάχους				
Πλάκα \ Πάχος	Αναμενόμενο με βάση θεωρητικό πάχος στρώσεων πάχος (mm)	Πραγματικό πάχος (mm)	Απόκλιση (%)	Πραγματικό πάχος στρώσης (mm)
CHX	5.13	7.95	55%	0.294
CVX	5.13	5.59	9%	0.207
CHU ₇	6.65	8.23	24%	0.433
CVU ₇	6.65	5.63	-15%	0.296

Στον πίνακα 2.9 παρατίθενται οι υπολογισμοί του απαιτούμενου αριθμού στρώσεων για κάθε πλάκα:

Πίνακας 2.9: Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων δοκιμίων Carbon

Πλάκα	Ονομαστικό πάχος πλάκας (mm)	Πειραματικό πάχος στρώσης (mm)	Απαιτούμενος αριθμός στρώσεων	Τελικός αριθμός στρώσεων
HU ₅	5	0.43	12	17
VU ₅	5	0.30	17	
HU ₁₀	8	0.43	19	28
VU ₁₀	8	0.30	28	
HX	5	0.29	17	25
VX	5	0.21	25	

Σημειώνεται ότι επειδή οι πλάκες GH/VU₁₀ οδηγούσαν σε κατασπατάληση υλικού επιλέχθηκε η μείωση του πάχους τους στα 8mm. Για να είναι ευκολότερη η σύγκριση των δοκιμίων και σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται να διατηρηθεί ο δείκτης 10 για το συμβολισμό των δοκιμίων.

Στον πίνακα 2.10 φαίνεται ο υπολογισμός των διαστάσεων των πλακών carbon:

Πίνακας 2.10: Υπολογισμός διαστάσεων πλακών carbon

Μέγεθος	Πλάκα					
	HU ₅	VU ₅	HU ₁₀	VU ₁₀	HX	VX
Πάχος στρώσης (mm)	0.43	0.30	0.43	0.30	0.29	0.21
Αριθμός στρώσεων	17	17	28	28	25	25
Θεωρητικό πάχος πλάκας (mm)	7.37	5.04	12.13	8.29	7.36	5.17
Μήκος πλάκας (mm)	297	251	393	316	347	303
Πλάτος πλάκας (mm)	222	176	318	241	272	228

Σχετικά με την κατασκευή των πλακών Carbon πρέπει να σημειωθούν τα εξής. Η διαδικασία στερεοποίησης της ρητίνης επιτυγχάνεται μέσω μιας αντίδρασης πολυμερισμού που αποτελεί εξώθερμη αντίδραση. Κατά την στερεοποίηση της πλάκας glass GHU₁₀ οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες οδήγησαν στην τήξη του γυαλιού του τραπεζιού του εργαστηρίου όπου κατασκευάζονται οι πλάκες. Για την αποφυγή ενός παρόμοιου ή χειρίστου συμβάντος κατά την κατασκευή των πλακών carbon, η κατασκευή των πλακών HU₁₀, VU₁₀ και HX πραγματοποιήθηκε τμηματικά έτσι ώστε η ποσότητα της χρησιμοποιούμενης ρητίνης σε κάθε στάδιο να μη ξεπερνά την ποσότητα των 500g για την οποία και δίνεται από τον κατασκευαστή η μέγιστη αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κατά τη στερεοποίηση σκέτης ρητίνης.

Στον πίνακα 2.11 παρουσιάζονται το προβλεπόμενο από τον κατασκευαστή πάχος κάθε πλάκας με βάση τον επιλεγμένο αριθμό στρώσεων, το αναμενόμενο πάχος πλάκας με βάση το πάχος στρώσης όπως προέκυψε από το σχετικό πείραμα, το τελικό πάχος των πλακών καθώς και οι μεταξύ τους αποκλίσεις.

Πίνακας 2.11: Σύγκριση παχών carbon όπως προκύπτουν με τις διάφορες μεθόδους.

Πλάκα	Πάχος πλάκας (mm)			Αποκλίσεις		
	πάχος στρώσης κατασκευαστή	πειραματικό πάχος στρώσης (II)	τελική πλάκα (III)	(I)-(II)	(I)-(III)	(II)-(III)
HU ₅	5.95	7.37	8.08	19.2%	26.4%	9%
VU ₅	5.95	5.04	5.13	-18.2%	-15.9%	2%
HU ₁₀	9.80	12.13	13.43	19.2%	27.0%	10%
VU ₁₀	9.80	8.29	8.57	-18.2%	-14.3%	3%
HX	4.75	7.36	7.57	35.5%	37.3%	3%
VX	4.75	5.17	5.98	8.1%	20.6%	14%

2.4.2 Διαδικασία κατασκευής πλακών

Μέθοδοι Κατασκευής

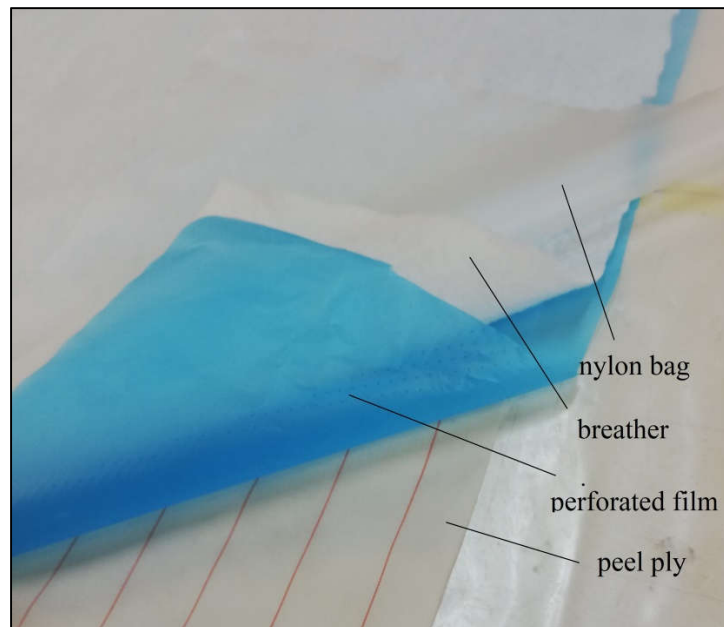
Για την κατασκευή των πλακών εφαρμόστηκαν, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, δύο κατασκευαστικές μέθοδοι, προκειμένου να είναι δυνατή η μεταξύ τους σύγκριση. Οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

Επίστρωση με το χέρι (Hand Lay-up): Αποτελεί την απλούστερη από τις δύο μεθόδους κατασκευής. Κατά τη μέθοδο αυτή, υγρή (εποξική) ρητίνη αναμιγμένη με τον κατάλληλο σκληρυντή εναποτίθεται πάνω σε μια προηγούμενη στρώση ενισχυτικού υφάσματος με τη βοήθεια ειδικού ρολού. Προκειμένου να επιτευχθεί η απαραίτητη συνοχή της κατασκευής είναι απαραίτητο κάθε στρώση να διαβρέχεται πλήρως από τη ρητίνη. Όπως γίνεται αντιληπτό, η ποιότητα του τελικού προϊόντος εξαρτάται από την επιδεξιότητα του τεχνίτη ενώ η αδυναμία αποβολής της περίσσειας ρητίνης οδηγεί σε προϊόντα με χαμηλή περιεκτικότητα σε ενισχυτικές ίνες που μπορεί να χαρακτηρίζονται από έντονη ανομοιομορφία.

Επίστρωση με σάκο κενού (Vacuum Bagging): Το πρώτο στάδιο της μεθόδου αυτής ταυτίζεται με τη μέθοδο Hand Lay-up που περιγράφηκε παραπάνω. Οι στρώσεις του ενισχυτικού υφάσματος εμποτίζονται με το μίγμα ρητίνης-σκληρυντή επιδιώκοντας όσο το δυνατό καλύτερη διαβροχή των διαδοχικών στρώσεων καθώς και κατανομή της ρητίνης. Στη συνέχεια, τοποθετούνται διαδοχικά πάνω από το στερεοποιούμενο σύνθετο τα εξής υφάσματα (σχήμα 2.5):

- ένα φύλλο υφάσματος που βοηθά στην αποκόλληση του στερεοποιημένου συνθέτου από τα υπόλοιπα υφάσματα της μεθόδου (peel ply)
- ένα φύλλο υφάσματος που συντελεί στην ομοιόμορφη κατανομή της ρητίνης στην επιφάνεια της πλάκας (perforated film)
- ένα ύφασμα που απορροφά την περίσσεια της ρητίνης (breather)
- ένα ύφασμα νάιλον που με τη βοήθεια ειδικής ταινίας διπλής όψης (tucky tape) προσκολλάται στο τραπέζι εργασίας ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή υποπίεσης

Εντός της διάταξης προσαρμόζονται σωλήνες που συνδέονται με αντλία κενού. Με την εκκίνηση της αντλίας ο αέρας εντός του υφάσματος νάιλον αναρροφάται, με αποτέλεσμα την εφαρμογή υποπίεσης (τάξεως του -0.6 bar). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται τόσο καλύτερη κατανομή της ρητίνης στην κατασκευή, όσο και άμεση αποβολή της περίσσειας ρητίνης, οδηγώντας σε σύνθετα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε ενισχυτικές ίνες, μεγαλύτερη ομοιομορφία ιδιοτήτων και καλύτερη επαναληψιμότητα ποιότητας πλακών.



Σχήμα 2.5: Διαδοχικές στρώσεις υφασμάτων μεθόδου Vacuum Bagging

Ακολουθεί πιο αναλυτική περιγραφή της κατασκευής των δοκιμίων με ταυτόχρονη παρουσίαση σχετικών φωτογραφιών.

Σύστημα Ρητίνης – Σκληρυντή

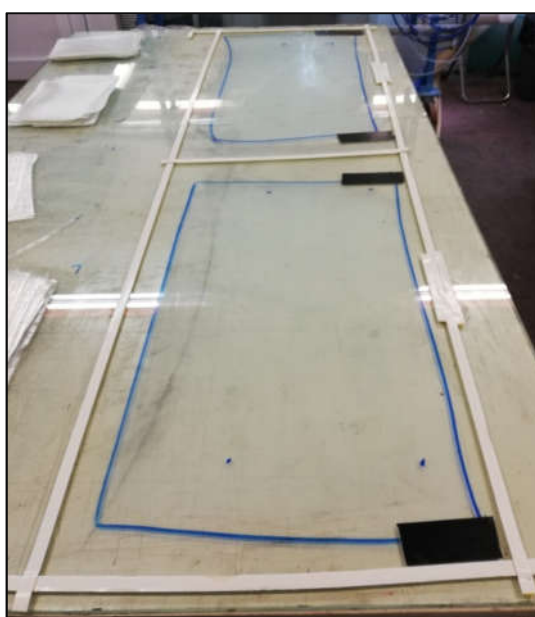
Το σύστημα ρητίνης-σκληρυντή που χρησιμοποιήθηκε είναι το σύστημα εποξικής ρητίνης R9330 με σκληρυντή H9054. Στον πίνακα 2.12 παρουσιάζονται οι φυσικές ιδιότητες της ρητίνης και του σκληρυντή καθώς και η αναλογία ανάμειξης/αντιδραστικότητα του συστήματος:

Πίνακας 2.12: Ιδιότητες Συστήματος ρητίνης-σκληρυντή R9330 / H9054

Φυσική ιδιότητα	Εποξική ρητίνη R9330	Σκληρυντής H9054
Ιξώδες στους 20°C [mPa.s]	1320 ± 100	6±2
Πυκνότητα στους 20°C [g/cm ³]	1.158	0.942
Ιδιότητα	Epoxy System R9330/H9054 (Fast)	
Ιξώδες στους 20°C [mPa.s]	9±3	
Κατά βάρος αναλογία ανάμειξης	22 g σκληρυντή για 100 g ρητίνης	
Gel time στους 40°C	1 h 07'	
Εξώθερμη θερμοκρασία στους 20 °C [°C]	>210	
Ώρα επίτευξης μέγιστης θερμοκρασίας για 500g μίγματος στους 20 °C	2h 05'	

Προετοιμασία επιφάνειας εργασίας

Το βήμα αυτό είναι κοινό και στις δύο μεθόδους κατασκευής. Η επιφάνεια πάνω στην οποία πραγματοποιείται η κατασκευή των πλακών είναι γυαλί ορθογωνικού σχήματος που λειτουργεί ως ένα είδος καλουπιού για τις υπό κατασκευή πλάκες. Σε πρώτη φάση, η επιφάνεια αυτή καθαρίζεται με ακετόνη προκειμένου να απομακρυνθούν ακαθαρσίες που ενδέχεται να οδηγήσουν σε αλλοίωση της επιφάνειας της πλάκας που έρχεται σε επαφή με το καλούπι. Κατόπιν είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ενός στρώματος κεριού στην επιφάνεια εργασίας ώστε να είναι δυνατή η εύκολη αποκόλληση της στερεοποιημένης πλάκας, μιας και σε διαφορετική περίπτωση είναι πιθανή η καταστροφή τόσο της πλάκας όσο και του καλουπιού. Στην περίπτωση της μεθόδου Vacuum Bagging απαραίτητη είναι ακόμη η οριοθέτηση της επιφάνειας εργασίας με tucky tape για να επιτευχθεί η προσκόλληση του φύλλου νάιλον για την εφαρμογή υποπίεσης. Η προετοιμασία της επιφάνειας εργασίας απεικονίζεται στο σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Προετοιμασία και οριοθέτηση επιφάνειας εργασίας

Προετοιμασία μίγματος ρητίνης – σκληρυντή

Μια αρχική εκτίμηση της απαιτούμενης μάζας μίγματος για κάθε πλάκα μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη ότι απαιτείται ποσότητα τουλάχιστον ίση της μάζας των ενισχυτικών ινών, έτσι ώστε στο τελικό προϊόν να υπάρχει μια αναλογία μαζών ρητίνης ινών 1:1. Η αναλογία ρητίνης σκληρυντή είναι αυτή που ορίζεται από τον κατασκευαστή. Αξίζει να σημειωθεί ότι από τη στιγμή της ανάμιξης ρητίνης σκληρυντή υπάρχει προδιαγεγραμμένος, από τον κατασκευαστή, χρόνος εργασίας, με το πέρας του οποίου το μίγμα αρχίζει να πολυμερίζεται. Επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις η ποσότητα της απαιτούμενης ρητίνης υπήρξε αρκετά μεγάλη, προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό, η ανάμιξη πραγματοποιήθηκε σε στάδια.

Στον πίνακα 2.13 παρουσιάζονται οι σχετικές τιμές μάζας:

Πίνακας 2.13: Βάρος υλικών κατασκευής πλακών

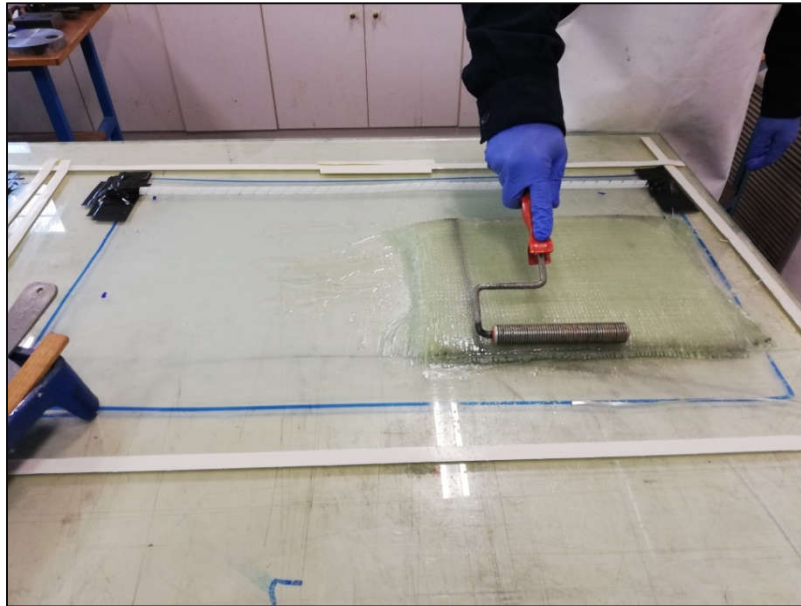
Πλάκα	Μάζα πλάκας (gr)		Μάζα μίγματος (gr)	Μάζα ρητίνης (gr)	Μάζα σκληρυντή (gr)	
	Μεμονωμένη πλάκα	Άθροιση μάζας πλακών που κατασκευάστηκαν μαζί				
Glass	GHU ₅	264	1465	1500	1170	330
	GHU ₁₀	1201				
	GHX	235	235	250	195	55
	GVU ₅	264	1465	1500	1170	330
	GVU ₁₀	1201				
	GVX	235	235	250	195	55
Carbon	CHU ₅	452	1939	2000	1560	440
	CHU ₁₀	1488				
	CHX	496	496	500	390	110
	CVU ₅	274	1018	1050	819	231
	CVU ₁₀	744				
	CVX	362	362	400	312	88

Σημειώνεται ότι κατά περιπτώσεις το μίγμα που φτιάχτηκε αποδείχτηκε είτε ελλιπές είτε περίσσιο, με αποτέλεσμα οι τιμές του παραπάνω πίνακα να είναι ενδεικτικές της ποσότητας που χρησιμοποιήθηκε και όχι ακριβείς.

Τοποθέτηση στρώσεων:

Έχοντας ολοκληρώσει τα παραπάνω βήματα είναι δυνατή η έναρξη της κατασκευής της πλάκας. Η κάθε στρώση τοποθετείται στην προσημασμένη θέση του καλουπιού. Η ρητίνη εκχύεται στο κέντρο κάθε στρώσης οπότε και απλώνεται ομοιόμορφα με τη χρήση ειδικού

ρολού (σχήμα 2.7). Προσοχή απαιτείται ώστε κάθε στρώση να ευθυγραμμίζεται με την προηγούμενή της.



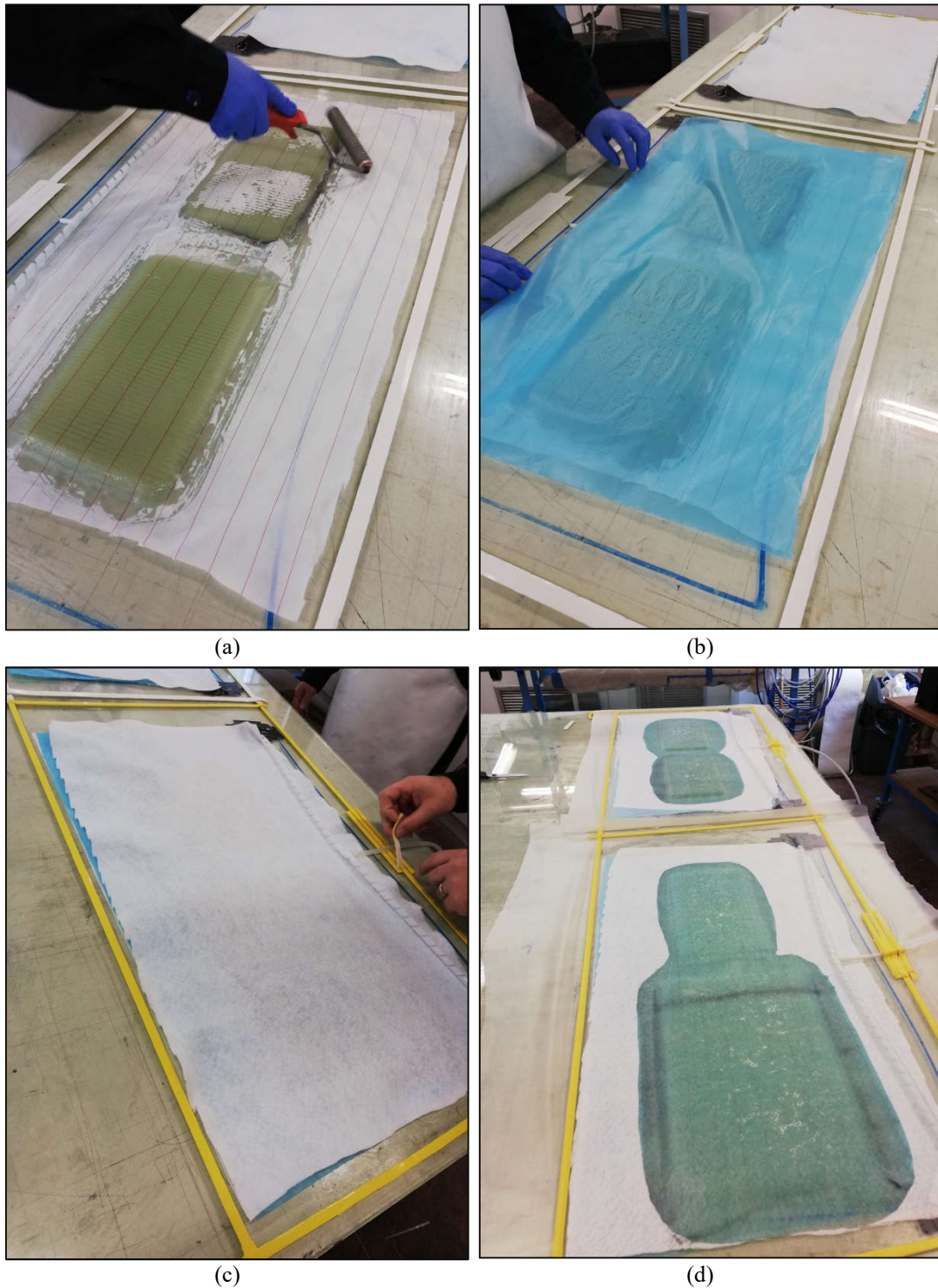
Σχήμα 2.7: Τοποθέτηση στρώσεων και εμποτισμός με ρητίνη

Τα βήματα που προαναφέρθηκαν ακολουθούνται τόσο στη μέθοδο Hand Lay-up όσο και στη μέθοδο Vacuum Bagging. Τα βήματα που ακολουθούν αφορούν μόνο τη δεύτερη μέθοδο.

Τοποθέτηση υφασμάτων Vacuum Bagging

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στη μέθοδο Vacuum Bagging με το πέρας της τοποθέτησης και του εμποτισμού των στρώσεων είναι απαραίτητη η επιπρόσθετη τοποθέτηση ορισμένων συμπληρωματικών υφασμάτων (σχήμα 2.8). Το πρώτο εξ'αυτών ονομάζεται peel ply και αποσκοπεί στην απομόνωση της πλάκας από τα υφάσματα που έπονται και στην εύκολη αποκόλλησή της με το τέλος της στερεοποίησης. Η επιφάνεια που καλύπτεται από το φύλλο αυτό αποκτά μια εν γένει πιο τραχιά επιφάνεια, ενώ η επιφάνεια που εφάπτεται στο γυαλί είναι πιο λεία. Ακολουθεί η τοποθέτηση του perforated film, ενός διάτρητου φύλλου, που συμβάλλει στην ομοιόμορφη κατανομή της ρητίνης στην επιφάνεια της πλάκας ώστε να αποφευχθούν περιοχές υψηλής και χαμηλής συγκέντρωσης της ρητίνης. Τελευταίο τοποθετείται το ύφασμα breather που συντελεί στην απορρόφηση της περίσσειας ρητίνης (σχήμα 2.9). Η περίσσεια της ρητίνης πρέπει να αποβληθεί από τη διάταξη. Για το λόγο αυτό τοποθετείται ένα σύστημα αναρρόφησης που αποτελείται από ένα σπιράλ σωλήνα που συνδέεται με την αντλία εφαρμογής υποπίεσης. Η ρητίνη που αποβάλλεται συλλέγεται σε ένα δοχείο στο εσωτερικό της αντλίας (σχήμα 2.10). Η διάταξη ασφαλίζεται αεροστεγώς με ένα φύλλο νάιλον που προσκολλάται στο tucky tape που έχει τοποθετηθεί προηγουμένως στην επιφάνεια εργασίας. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί πολύ καλή εφαρμογή του φύλλου νάιλον στο tucky tape καθώς οποιαδήποτε ασυνέχεια μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αδυναμία εφαρμογής υποπίεσης. Η αντλία ενεργοποιείται οπότε και η

πίεση σταθεροποιείται στα -0.6 bar μιας και μεγαλύτερη τιμή εγκυμονεί τον κίνδυνο εξαναγκασμένης αποβολής ρητίνης.



Σχήμα 2.8: Διαδοχική τοποθέτηση στρωμάτων κατά τη διαδικασία Vacuum Bagging (a) peel ply (b) perforated film (c) breather (d) nylon bag



Σχήμα 2.9: Στιγμιότυπο αναρρόφησης της ρητίνης



Σχήμα 2.10: Δοχείο Συλλογής ρητίνης

Post-Curing

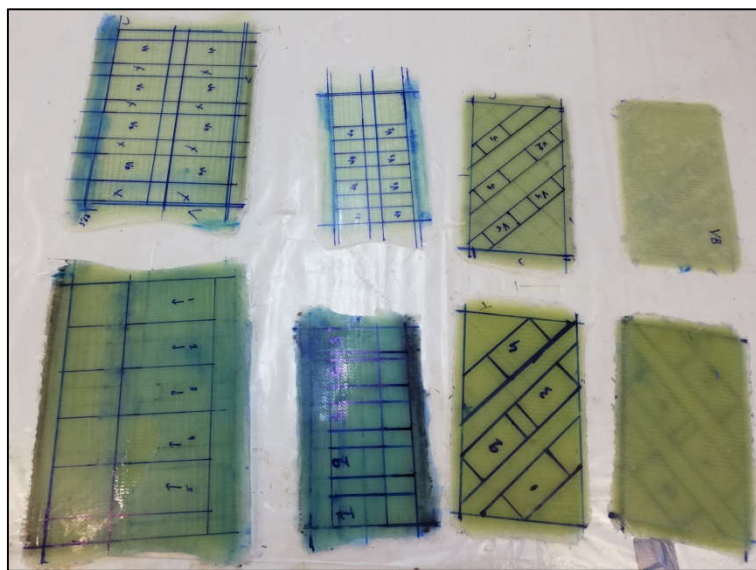
Κατά τις υποδείξεις του κατασκευαστή, οι πλάκες παρέμειναν για 24h σε θερμοκρασία δωματίου. Κατόπιν οι πλάκες τοποθετήθηκαν σε φούρνο (σχήμα 2.11) προκειμένου να υποστούν post curing. Από τον κατασκευαστή δίνεται ένα σύνολο δυνατών συνδυασμών θερμοκρασίας-χρόνου παραμονής. Από αυτούς επιλέχθηκε η παραμονή των πλακών στους 40°C για χρονικό διάστημα 24 ωρών.



Σχήμα 2.11: Τοποθέτηση πλακών glass στο φούρνο για post curing.

2.4.3 Σχεδιασμός και κοπή δοκιμίων – Έλεγχος ανοχών

Με το πέρας του post curing είναι πλέον δυνατή η κοπή των δοκιμίων. Επειδή όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το τελικό πάχος των πλακών κατά κανόνα διαφέρει σημαντικά από το ονομαστικό ή το εκτιμώμενο, είναι απαραίτητη η μέτρηση του πάχους των πλακών. Η μέτρηση αυτή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ψηφιακού μικρομέτρου ακρίβειας 0.01mm. Πρέπει να αναφερθεί πως οι πλάκες παρουσίαζαν σημαντικές διαφοροποιήσεις του πάχους κατά το μήκος και πλάτος τους, φαινόμενο που όπως είναι αναμενόμενο υπήρξε αρκετά πιο έντονο στις πλάκες Hand Lay-up από ότι στις πλάκες Vacuum Bagging. Για το λόγο αυτό ελήφθησαν πολλαπλές μετρήσεις και ως πάχος της πλάκας θεωρήθηκε ο μέσος όρος αυτών. Με γνωστό πλέον το μέσο πάχος κάθε πλάκας και μέσω των λόγων που δίνονται στον πίνακα 2.4 είναι πλέον δυνατός ο σχεδιασμός των προς κοπή δοκιμίων (σχήμα 2.12).



(a)



(b)

Σχήμα 2.12: Οι πλάκες (a) glass και (b) carbon με σχεδιασμένα τα προς κοπή δοκίμια

Οι θεωρητικές διαστάσεις κοπής των δοκιμίων για κάθε πλάκα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.14: Θεωρητικές διαστάσεις κοπής δοκιμίων

Πλάκα	h=πάχος [mm]	l=μήκος [mm]	L=span [mm]	b=πλάτος [mm]	
Glass	GHU ₅	6.70	67.0	33.5	33.5
	GHU ₁₀	12.30	123.0	61.5	61.5
	GHX _{plate1}	8.00	80.0	40.0	40.0
	GHX _{plate2}	8.00	80.0	40.0	40.0
	GVU ₅	4.68	46.8	23.4	23.4
	GVU ₁₀	9.23	92.3	46.1	46.1
	GVX _{plate1}	5.10	51.0	25.5	25.5
	GVX _{plate2}	5.10	51.0	25.5	25.5
Carbon	CHU ₅	8.00	80.0	40.0	40.0
	CHU ₁₀	13.40	134.0	67.0	67.0
	CHX	7.60	76.0	38.0	38.0
	CVU ₅	5.10	51.0	25.5	25.5
	CVU ₁₀	8.60	86.0	43.0	43.0
	CVX	6.00	60.0	30.0	30.0

Η κοπή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο με χρήση κοπτικού εργαλείου. Όπως περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 2.2.4 οι διαστάσεις κάθε δοκιμίου μετρούμενες σε διαφορετικά σημεία του δεν πρέπει να ξεπερνούν ορισμένα όρια απόκλισης. Συγκεκριμένα, το πάχος καθ'όλο το μήκος πρέπει να βρίσκεται εντός του $\pm 5\%$ του μέσου πάχους. Το πλάτος του κάθε δοκιμίου θα πρέπει να είναι σταθερό με μέγιστο όριο απόκλισης τα 0.2 mm. Προκείμενου να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αυτός της γεωμετρίας των δοκιμίων αλλά και, σε ένα επόμενο στάδιο, να υπολογιστεί το ανυποστήρικτο μήκος κάθε δοκιμίου, είναι απαραίτητη η λήψη μετρήσεων των διαστάσεων για κάθε δοκίμιο. Στα δοκίμια Glass για τις διαστάσεις του πλάτους και του πάχους ελήφθησαν τρεις μετρήσεις ενώ στη διάσταση του μήκους δύο. Στα δοκίμια Carbon ελήφθησαν τέσσερις μετρήσεις πάχους. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν (2.15,2.16):

Πίνακας 2.15: Διαστάσεις δοκιμίων Glass και έλεγχος ανοχών

Glass													
Κύριες Διαστάσεις									Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους	
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]			Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]
Hand Lay Up UD [5mm] Total No: 5 specimens													
GHU ₅ 1	68.53	68.8	34.39	34.6	34.54	6.64	6.62	6.89	6.72	0.17	2.6%	34.51	0.12
GHU ₅ 2	68.74	68.64	34.89	35.05	34.9	7.20	6.89	6.86	6.98	0.22	3.1%	34.95	0.10
GHU ₅ 3	68.5	68.27	33.61	33.84	33.62	6.86	7.04	7.10	7.00	0.14	2.0%	33.69	0.15
GHU ₅ 4	68.4	68.33	34.37	34.56	34.41	6.76	6.88	6.73	6.79	0.09	1.3%	34.45	0.11
GHU ₅ 5	68.18	68.58	32.14	32.67	33.32	6.52	6.43	6.65	6.53	0.12	1.8%	32.71	0.61
Hand Lay Up UD [10mm] Total No: 5 specimens													
GHU ₁₀ 1	123.04	123.06	62.01	61.58	61.3	12.31	12.90	12.50	12.57	0.33	2.6%	61.63	0.38
GHU ₁₀ 2	123.64	123.86	59.81	59.74	59.79	13.21	12.58	12.78	12.86	0.35	2.7%	59.78	0.04
GHU ₁₀ 3	123.66	123.17	59.45	59.82	59.7	12.92	13.41	13.51	13.28	0.36	2.7%	59.66	0.21
gHU ₁₀ 4	122.96	123.07	58.66	58.51	58.65	12.82	13.16	12.68	12.89	0.27	2.1%	58.61	0.10
GHU ₁₀ 5	123.35	123.6	60.62	59.99	59.79	12.01	12.73	12.15	12.30	0.43	3.5%	60.13	0.49
Hand Lay Up Biaxial [10mm] Total No: 8 specimens													
GHX1	83.11	82.11	40.82	38.44	39.5	7.57	7.73	7.57	7.62	0.11	1.4%	39.59	1.23
GHX2	82.21	80.7	39.85	40.3	40.24	7.52	7.74	7.94	7.73	0.21	2.8%	40.13	0.28
GHX3	81.39	81.27	41.76	41.56	41.2	7.99	8.09	8.12	8.07	0.08	1.0%	41.51	0.25
GHX4	81.52	82.27	40.73	40.5	40.51	8.00	8.01	7.99	8.00	0.01	0.1%	40.58	0.15
GHX5	81.77	81.54	41.15	41.17	41.09	7.92	7.70	7.80	7.81	0.11	1.5%	41.14	0.03
GHX6	80.45	79.59	42.34	42.09	41.74	7.89	7.80	7.80	7.83	0.06	0.8%	42.06	0.28
GHX7	81.75	81.89	41.43	41.27	40.93	7.58	7.76	7.93	7.76	0.18	2.3%	41.21	0.22

Glass													
Κύριες Διαστάσεις									Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους	
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]			Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]
GHX8	81.36	81.1	41.46	41.02	40.68	7.41	7.38	7.63	7.47	0.16	2.1%	41.05	0.41
Vacuum Bagging UD [5mm] Total No: 8 specimens													
GVU ₅ 1	47.76	47.37	25.58	25.79	25.8	4.31	4.34	4.54	4.40	0.14	3.3%	25.72	0.14
GVU ₅ 2	47.69	48	24.38	24.44	24.56	4.56	4.57	4.68	4.60	0.08	1.7%	24.46	0.10
GVU ₅ 3	47.99	48.03	24.1	24.12	24.15	4.82	4.81	5.04	4.89	0.15	3.1%	24.12	0.03
GVU ₅ 4	47.48	47.59	23.71	23.72	23.81	4.67	4.87	4.78	4.77	0.10	2.2%	23.75	0.06
GVU ₅ 5	47.6	47.33	25.7	25.62	25.28	4.12	4.26	4.18	4.19	0.07	1.8%	25.53	0.17
GVU ₅ 6	47.57	47.59	24.58	24.79	24.69	4.73	4.77	4.84	4.78	0.06	1.3%	24.69	0.11
GVU ₅ 7	47.57	47.58	23.95	24.18	24.19	4.83	4.68	4.87	4.79	0.11	2.4%	24.11	0.16
GVU ₅ 8	47.7	48.06	23.81	24.01	24.24	4.70	4.88	4.97	4.85	0.15	3.1%	24.02	0.22
Vacuum Bagging UD [10mm] Total No: 8 specimens													
GVU ₁₀ 1	92.39	92.02	47.86	48.16	48.26	8.82	9.35	8.97	9.05	0.30	3.4%	48.09	0.23
GVU ₁₀ 2	93.24	92.97	46.86	47	47.08	9.76	9.29	9.78	9.61	0.32	3.3%	46.98	0.12
GVU ₁₀ 3	90.36	90.91	47.8	47.49	47.44	9.86	10.20	9.55	9.87	0.33	3.3%	47.58	0.22
GVU ₁₀ 4	92.14	92.95	46.57	46.82	47.22	9.52	9.22	10.16	9.63	0.53	5.5%	46.87	0.35
GVU ₁₀ 5	93.87	94.67	47.86	47.91	48.3	9.49	9.82	9.04	9.45	0.37	3.9%	48.02	0.28
GVU ₁₀ 6	93.52	93.28	46.57	46.4	46.03	9.75	9.89	9.79	9.81	0.08	0.8%	46.33	0.24
GVU ₁₀ 7	93.91	93.89	46.73	46.95	47.2	9.98	9.70	9.77	9.82	0.16	1.7%	46.96	0.24
GVU ₁₀ 8	94.21	94.15	45.64	46.03	46.31	9.54	9.69	9.30	9.51	0.18	1.9%	45.99	0.35
Vacuum Bagging Biaxial Total No: 8 specimens													

Glass													
Κύριες Διαστάσεις									Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους	
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]			Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]
GVX1	53.24	53.21	26.39	26.35	26.35	5.06	5.05	5.10	5.07	0.03	0.6%	26.36	0.03
GVX2	53.33	53.54	26.96	26.82	26.6	4.91	5.04	5.01	4.99	0.08	1.5%	26.79	0.17
GVX3	52.63	52.81	26.67	27	27.18	5.10	5.25	5.15	5.17	0.08	1.6%	26.95	0.28
GVX4	52.56	52.34	27.06	27.06	27.08	4.95	5.13	5.05	5.04	0.09	1.9%	27.07	0.01
GVX5	52.69	52.78	26.62	26.54	26.67	5.20	5.21	5.27	5.23	0.04	0.8%	26.61	0.07
GVX6	52.14	52.16	27.2	27.27	26.96	4.99	4.95	4.99	4.98	0.03	0.5%	27.14	0.13
GVX7	52.95	52.75	27.7	27.45	27.56	4.97	5.09	5.01	5.02	0.07	1.3%	27.57	0.13
GVX8	52.1	52.08	27.24	27.95	27.37	5.09	5.12	5.09	5.10	0.02	0.4%	27.52	0.43

Πίνακας 2.16: Διαστάσεις δοκιμίων Carbon και έλεγχος ανοχών

Carbon														
Κύριες Διαστάσεις									Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους		
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]			Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]	
Hand Lay Up UD [5mm] Total No: 8 specimens														
CHU ₅ 1	78.44	78.30	39.19	39.31	39.38	7.77	8.08	8.18	7.98	8.00	0.23	2.9%	39.29	0.10
CHU ₅ 2	78.44	78.23	40.14	39.89	39.79	8.00	8.27	8.49	8.05	8.20	0.29	3.5%	39.94	0.20
CHU ₅ 3	78.08	78.01	40.05	40.01	39.55	8.11	8.56	8.46	8.62	8.44	0.33	3.9%	39.87	0.18
CHU ₅ 4	77.69	77.20	38.90	39.38	39.61	8.11	7.77	8.21	8.00	8.02	0.25	3.1%	39.30	0.40
CHU ₅ 5	78.39	78.46	38.94	38.93	38.96	8.03	7.84	7.76	7.97	7.90	0.14	1.8%	38.94	0.02

Carbon														
Κύριες Διαστάσεις										Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους	
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]				Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]
CHU ₅ 6	78.31	78.26	40.41	40.25	39.95	8.07	8.08	7.90	8.30	8.09	0.21	2.6%	40.20	0.21
CHU ₅ 7	78.01	77.98	38.76	38.94	39.15	7.72	8.37	8.26	8.13	8.12	0.40	4.9%	38.95	0.20
CHU ₅ 8	77.95	77.87	38.23	39.07	39.38	8.18	7.54	7.82	7.96	7.88	0.34	4.3%	38.89	0.66
Hand Lay Up UD [10mm] Total No: 8 specimens														
CHU ₁₀ 1	125.59	125.81	63.55	63.52	63.41	13.05	12.29	13.35	12.55	12.81	0.54	4.2%	63.49	0.06
CHU ₁₀ 2	125.91	126.04	61.31	62.46	62.07	12.45	14.21	13.74	13.66	13.52	1.07	7.9%	61.95	0.64
CHU ₁₀ 3	125.86	125.83	62.65	62.98	63.11	14.52	13.92	12.35	13.88	13.67	1.32	9.6%	62.91	0.26
CHU ₁₀ 4	125.12	125.45	62.90	63.87	63.98	12.44	13.57	13.72	14.04	13.44	1.00	7.5%	63.58	0.68
CHU ₁₀ 5	125.25	125.07	61.07	61.35	61.53	12.11	13.13	12.13	13.39	12.69	0.70	5.5%	61.32	0.25
CHU ₁₀ 6	124.71	124.89	61.42	62.41	62.62	14.22	13.01	13.96	13.70	13.72	0.71	5.2%	62.15	0.73
CHU ₁₀ 7	124.27	124.54	62.76	62.90	62.56	12.68	14.64	14.30	14.10	13.93	1.25	9.0%	62.74	0.16
CHU ₁₀ 8	124.21	123.95	64.18	64.68	64.99	14.26	12.93	13.50	14.08	13.69	0.76	5.6%	64.62	0.44
Hand Lay Up Biaxial [10mm] Total No: 8 specimens														
CHX1	78.05	78.17	39.53	39.77	40.02	7.49	7.70	7.67	7.68	7.64	0.15	1.9%	39.77	0.25
CHX2	78.19	78.37	39.13	39.18	39.41	7.81	7.70	7.68	7.73	7.73	0.08	1.0%	39.24	0.17
CHX3	78.30	78.34	38.21	38.25	38.22	7.60	7.55	7.74	7.62	7.63	0.11	1.5%	38.23	0.02
CHX4	78.03	78.17	39.12	39.37	39.51	7.32	7.36	7.44	7.35	7.37	0.07	1.0%	39.33	0.21
CHX5	78.05	78.04	38.32	38.56	38.60	7.37	7.25	7.45	7.30	7.34	0.11	1.5%	38.49	0.17
CHX6	78.04	78.12	38.92	39.06	39.10	7.42	7.57	7.54	7.56	7.52	0.10	1.4%	39.03	0.11
CHX7	77.92	77.93	38.46	39.03	39.18	7.72	7.55	7.65	7.74	7.67	0.12	1.5%	38.89	0.43
CHX8	77.66	77.78	39.52	39.44	39.62	7.75	7.61	7.65	7.68	7.67	0.08	1.0%	39.53	0.09

Carbon															
Κύριες Διαστάσεις										Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους		
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]					Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]
Vacuum Bagging UD [5mm] Total No: 8 specimens															
CVU ₅ 1	52.51	52.62	25.04	24.76	24.48	5.21	5.10	5.16	5.08	5.14	0.07	1.4%	24.76	0.28	
CVU ₅ 2	52.66	52.77	26.76	26.70	26.76	5.19	5.22	5.15	5.27	5.21	0.06	1.2%	26.74	0.04	
CVU ₅ 3	52.85	53.10	26.32	26.49	26.67	5.22	5.15	5.06	5.11	5.14	0.09	1.7%	26.49	0.18	
CVU ₅ 4	53.46	53.61	25.17	25.30	25.35	5.17	5.09	5.10	5.12	5.12	0.05	1.0%	25.27	0.10	
CVU ₅ 5	51.99	52.14	23.34	23.54	23.78	5.08	5.11	5.09	5.06	5.09	0.03	0.5%	23.55	0.23	
CVU ₅ 6	52.54	52.36	25.67	25.93	26.32	5.16	5.15	5.05	5.14	5.13	0.08	1.5%	25.97	0.35	
CVU ₅ 7	52.12	52.11	26.07	25.73	25.61	5.22	5.23	5.15	5.08	5.17	0.09	1.7%	25.80	0.27	
CVU ₅ 8	51.76	51.86	26.76	26.61	26.58	5.14	5.12	5.05	5.08	5.10	0.05	0.9%	26.65	0.11	
Vacuum Bagging UD [10mm] Total No: 8 specimens															
CVU ₁₀ 1	86.92	86.85	44.18	44.07	43.56	8.51	8.62	8.50	8.74	8.59	0.15	1.7%	43.94	0.24	
CVU ₁₀ 2	85.96	86.55	44.25	44.30	44.06	8.44	8.56	8.53	8.53	8.52	0.08	0.9%	44.20	0.10	
CVU ₁₀ 3	86.08	86.02	44.04	44.35	44.27	8.62	8.60	8.58	8.52	8.58	0.06	0.7%	44.22	0.18	
CVU ₁₀ 4	85.83	85.73	43.98	44.22	44.10	8.60	8.64	8.57	8.56	8.59	0.05	0.6%	44.10	0.12	
CVU ₁₀ 5	85.91	85.89	43.10	43.56	43.91	8.68	8.65	8.43	8.59	8.59	0.16	1.8%	43.52	0.42	
CVU ₁₀ 6	85.89	85.81	42.29	42.09	41.84	8.56	8.50	8.62	8.54	8.56	0.06	0.8%	42.07	0.22	
CVU ₁₀ 7	85.28	85.76	43.55	43.63	43.60	8.74	8.57	8.68	8.50	8.62	0.12	1.4%	43.59	0.04	
CVU ₁₀ 8	84.92	85.26	43.87	44.10	44.20	8.44	8.63	8.58	8.51	8.54	0.10	1.2%	44.06	0.19	
Vacuum Bagging Biaxial Total No: 8 specimens															
CVX1	59.31	59.25	27.02	26.80	27.05	6.17	6.11	6.09	6.16	6.13	0.04	0.7%	26.96	0.16	

Carbon														
Κύριες Διαστάσεις										Έλεγχος Πάχους			Έλεγχος Πλάτους	
ID	L=μήκος [mm]		b=πλάτος [mm]			h=πάχος [mm]				Μέσο πάχος [mm]	Απόλυτη μέγιστη απόκλιση [mm]	Ποσοστό απόκλισης ≤5%	Μέσο πλάτος [mm]	Απόλυτη Μέγιστη απόκλιση ≤0.2 [mm]
CVX2	59.78	59.74	29.69	29.36	28.94	5.92	6.06	5.94	6.07	6.00	0.08	1.3%	29.33	0.36
CVX3	60.14	60.21	29.10	29.76	30.14	5.95	5.93	5.85	5.94	5.92	0.07	1.1%	29.67	0.57
CVX4	59.28	59.07	30.07	29.74	29.58	5.86	5.90	5.81	5.82	5.85	0.05	0.9%	29.80	0.27
CVX5	59.14	58.94	28.80	29.33	29.73	6.18	6.06	6.06	6.00	6.08	0.11	1.7%	29.29	0.49
CVX6	58.25	58.27	29.95	29.75	29.53	5.97	5.98	5.97	6.08	6.00	0.08	1.3%	29.74	0.21
CVX7	57.68	57.69	29.62	29.66	29.79	5.99	5.89	5.92	6.06	5.97	0.10	1.6%	29.69	0.10
CVX8	58.70	58.76	29.12	29.28	29.15	5.86	5.93	5.92	5.91	5.91	0.04	0.8%	29.18	0.10

Σχετικά με τα αποτελέσματα του ελέγχου ανοχών σημειώνονται τα εξής: Το πάχος των δοκιμίων παρουσιάζει την προβλεπόμενη από το πρότυπο ομοιομορφία. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια της σειράς CHU₁₀. Τα δοκίμια αυτά λόγω των μεγάλων διαστάσεών τους αλλά και της τεχνικής με την οποία κατασκευάστηκαν παρουσιάζουν σημαντική ανομοιομορφία του πάχους με το μέσο όρο της μέγιστης απόκλισης από τη μέση τιμή πάχους του συνόλου των δοκιμίων να ανέρχεται στο 6.8% σε σχέση με το 5% που προτείνεται από το πρότυπο. Χειρότερα είναι τα αποτελέσματα για τον έλεγχο των αποκλίσεων πλάτους όπου το 48% στην περίπτωση των δοκιμίων Glass και το 54% στην περίπτωση των δοκιμίων Carbon φαίνεται να βρίσκονται εκτός των προβλεπόμενων ανοχών. Είναι αναγκαίο, ωστόσο, να ληφθεί υπόψη το γεγονός πως σε αντίθεση με τον έλεγχο ομοιομορφίας του πάχους, ο έλεγχος ομοιομορφίας του πλάτους δεν εκφράζεται ως ποσοστό αλλά παραμένει σταθερός ($\leq 0.2\text{mm}$) ανεξάρτητα της μεταβολής των μεγεθών των δοκιμίων, καθιστώντας την ικανοποίηση του αρκετά πιο δύσκολη.

2.4.4 Υπολογισμός και σχεδίαση ανυποστήρικτου μήκους δοκιμίων

Με γνωστές, πλέον, τις κύριες διαστάσεις όλων των δοκιμίων είναι δυνατός ο υπολογισμός και η σχεδίαση του ανυποστήρικτου μήκους των δοκιμίων. Η διαδικασία αυτή είναι πολύ σημαντική προκειμένου να επιτευχθεί τόσο η σωστή τοποθέτηση των δοκιμίων στις στηρίξεις της μηχανής δοκιμής όσο και η ευθυγράμμιση του στελέχους φόρτισης με το νοητό κέντρο κάθε δοκιμίου. Για κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε με βάση τους λόγους που δίνονται στον πίνακα 2.4 το απαιτούμενο ανυποστήρικτο μήκος. Υπενθυμίζεται ότι προβλέπεται σχέση ανυποστήρικτου μήκους (L) πάχους (h) ίση με: $L=5h_{av}\pm 0.03$. Ταυτόχρονα υπολογίστηκαν και οι αναμενόμενες τιμές του span με βάση τις υπόλοιπες διαστάσεις των δοκιμίων ώστε να διαπιστωθεί αν παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση λόγω εσφαλμένου σχεδιασμού και κοπής των δοκιμίων. Οι σχέσεις μεταξύ του ανυποστήρικτου μήκους και των υπόλοιπων διαστάσεων των δοκιμίων προκύπτουν εάν στις σχέσεις (2.3)-(2.5) απαλειφθεί ο όρος του πάχους. Οι σχέσεις φαίνονται στον πίνακα 2.17.

Πίνακας 2.17: Σχέση ανυποστήρικτου μήκους λοιπών διαστάσεων δοκιμίων

Λόγος	Σύμβολο	Τιμή
Σχέση span-πάχους	$L_h/h_{av} =$	5
Σχέση span-μήκους	$L_l/l =$	1/2
Σχέση span-πλάτους	$L_b/b =$	1

Σχετικά με τον παραπάνω πίνακα αναφέρεται πως οι δείκτες h, l, b χρησιμοποιούνται για να δείξουν το μέγεθος από το οποίο προκύπτει το ανυποστήρικτο μήκος.

Στους παρακάτω πίνακες (2.18 έως 2.19) απεικονίζεται η μέση τιμή των διαστάσεων κάθε δοκιμίου, ο υπολογισμός του μέσου ανυποστήρικτου μήκους κάθε ομάδας ομοειδών δοκιμίων, καθώς και οι λόγοι των κύριων διαστάσεων για κάθε δοκίμιο προκειμένου να διαπιστωθεί αν βρίσκονται κοντά σε αυτούς που ορίζονται από το πρότυπο (βλ. πίνακα 2.4).

Πίνακας 2.18: Υπολογισμός ανυποστήρικτου μήκους και έλεγχος λόγων-Δοκίμα Glass

Δοκίμα	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L _l	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
Hand Lay Up UD [5mm] Total No: 5 specimens												
GHU ₅ 1	68.67	34.51	6.72	34.33	34.51	33.58	5.08	1.57%	10.22	2.23%	5.14	2.76%
GHU ₅ 2	68.69	34.95	6.98	34.35	34.95	34.92	4.88	-2.31%	9.84	-1.64%	5.00	0.09%
GHU ₅ 3	68.39	33.69	7.00	34.19	33.69	35.00	4.87	-2.54%	9.77	-2.31%	4.81	-3.74%
GHU ₅ 4	68.37	34.45	6.79	34.18	34.45	33.95	5.02	0.47%	10.07	0.68%	5.07	1.46%
GHU ₅ 5	68.38	32.71	6.53	34.19	32.71	32.67	5.22	4.42%	10.47	4.66%	5.01	0.13%
Average	68.50	34.06	6.80	34.25	34.06	34.02	5.02	0.32%	10.07	0.73%	5.01	0.14%
				L _{final}		34.11						
Hand Lay Up UD [10mm] Total No: 5 specimens												
GHU ₁₀ 1	123.05	61.63	12.63	61.53	61.63	63.16	4.90	-1.95%	9.74	-2.59%	4.88	-2.43%
GHU ₁₀ 2	123.75	59.78	12.99	61.88	59.78	64.93	4.77	-4.61%	9.53	-4.70%	4.60	-7.92%
GHU ₁₀ 3	123.42	59.66	13.28	61.71	59.66	66.40	4.66	-6.73%	9.29	-7.07%	4.49	-10.16%
GHU ₁₀ 4	123.02	58.61	12.95	61.51	58.61	64.75	4.78	-4.35%	9.50	-5.01%	4.53	-9.49%
GHU ₁₀ 5	123.48	60.13	12.31	61.74	60.13	61.56	5.03	0.60%	10.03	0.28%	4.88	-2.32%
Average	123.34	59.96	12.83	61.67	59.96	64.16	4.83	-3.41%	9.62	-3.82%	4.68	-6.46%
				L _{final}		61.93						
Hand Lay Up Biaxial Total No: 8 specimens												
GHX1	82.61	39.59	7.62	41.31	39.59	38.12	5.27	5.46%	10.84	8.36%	5.19	3.86%
GHX2	81.46	40.13	7.73	40.73	40.13	38.67	5.20	3.96%	10.53	5.33%	5.19	3.78%
GHX3	81.33	41.51	8.07	40.67	41.51	40.33	4.98	-0.34%	10.08	0.82%	5.15	2.91%
GHX4	81.90	40.58	8.00	40.95	40.58	40.00	5.02	0.49%	10.24	2.37%	5.07	1.45%
GHX5	81.66	41.14	7.81	40.83	41.14	39.03	5.15	2.98%	10.46	4.60%	5.27	5.39%

Δοκίμια	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L ₁	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
GHX6	80.02	42.06	7.83	40.01	42.06	39.15	5.13	2.67%	10.22	2.20%	5.37	7.42%
GHX7	81.82	41.21	7.76	40.91	41.21	38.78	5.18	3.64%	10.55	5.48%	5.31	6.26%
GHX8	81.23	41.05	7.47	40.62	41.05	37.37	5.38	7.57%	10.87	8.69%	5.49	9.87%
Average	81.50	40.91	7.79	40.75	40.91	38.93	5.17	3.30%	10.47	4.73%	5.26	5.12%
				L _{final}		40.20						
Vacuum Bagging UD [5mm] Total No: 8 specimens												
GVU ₅ 1	47.57	25.72	4.19	23.78	25.72	20.95	5.69	13.85%	11.35	13.52%	6.14	22.78%
GVU ₅ 2	47.85	24.46	4.60	23.92	24.46	23.02	5.18	3.63%	10.39	3.94%	5.31	6.27%
GVU ₅ 3	48.01	24.12	4.89	24.01	24.12	24.45	4.88	-2.44%	9.82	-1.82%	4.93	-1.34%
GVU ₅ 4	47.54	23.75	4.77	23.77	23.75	23.87	5.00	-0.06%	9.96	-0.42%	4.97	-0.50%
GVU ₅ 5	47.47	25.53	4.19	23.73	25.53	20.93	5.70	13.95%	11.34	13.37%	6.10	21.97%
GVU ₅ 6	47.58	24.69	4.78	23.79	24.69	23.90	4.99	-0.20%	9.95	-0.46%	5.16	3.29%
GVU ₅ 7	47.58	24.11	4.79	23.79	24.11	23.97	4.98	-0.48%	9.93	-0.75%	5.03	0.58%
GVU ₅ 8	47.88	24.02	4.85	23.94	24.02	24.25	4.92	-1.64%	9.87	-1.28%	4.95	-0.95%
Average	47.68	24.55	4.63	23.84	24.55	23.17	5.17	3.33%	10.33	3.26%	5.33	6.51%
				L _{final}		23.85						
Vacuum Bagging UD [10mm] Total No: 8 specimens												
GVU ₁₀ 1	92.21	48.09	9.18	46.10	48.09	45.91	5.14	2.83%	10.04	0.41%	5.24	4.75%
GVU ₁₀ 2	93.11	46.98	9.60	46.55	46.98	47.98	4.92	-1.59%	9.70	-2.97%	4.90	-2.07%
GVU ₁₀ 3	90.64	47.58	9.88	45.32	47.58	49.39	4.78	-4.41%	9.18	-8.24%	4.82	-3.67%
GVU ₁₀ 4	92.55	46.87	9.57	46.27	46.87	47.86	4.93	-1.36%	9.67	-3.32%	4.90	-2.07%
GVU ₁₀ 5	94.27	48.02	9.48	47.14	48.02	47.40	4.98	-0.40%	9.94	-0.56%	5.07	1.32%
GVU ₁₀ 6	93.40	46.33	9.78	46.70	46.33	48.91	4.83	-3.48%	9.55	-4.52%	4.74	-5.27%

Δοκίμια	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L _l	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
GVU ₁₀₇	93.90	46.96	9.80	46.95	46.96	49.00	4.82	-3.65%	9.58	-4.18%	4.79	-4.16%
GVU ₁₀₈	94.18	45.99	9.54	47.09	45.99	47.69	4.95	-1.00%	9.87	-1.25%	4.82	-3.55%
Average	93.03	47.10	9.60	46.52	47.10	48.02	4.92	-1.63%	9.69	-3.08%	4.91	-1.84%
Vacuum Bagging Biaxial Total No: 8 specimens												
GVX1	53.23	26.36	5.07	26.61	26.36	25.35	5.18	3.52%	10.50	4.98%	5.20	4.00%
GVX2	53.44	26.79	4.99	26.72	26.79	24.93	5.26	5.25%	10.72	7.16%	5.37	7.46%
GVX3	52.72	26.95	5.17	26.36	26.95	25.83	5.08	1.58%	10.20	2.04%	5.22	4.32%
GVX4	52.45	27.07	5.04	26.23	27.07	25.22	5.20	4.07%	10.40	4.00%	5.37	7.34%
GVX5	52.74	26.61	5.23	26.37	26.61	26.13	5.02	0.42%	10.09	0.90%	5.09	1.82%
GVX6	52.15	27.14	4.98	26.08	27.14	24.88	5.27	5.46%	10.48	4.79%	5.45	9.08%
GVX7	52.85	27.57	5.02	26.43	27.57	25.12	5.22	4.48%	10.52	5.21%	5.49	9.77%
GVX8	52.09	27.52	5.10	26.05	27.52	25.50	5.15	2.91%	10.21	2.14%	5.40	7.92%
Average	52.71	27.00	5.07	26.35	27.00	25.37	5.17	3.46%	10.39	3.90%	5.32	6.46%

Πίνακας 2.19: Υπολογισμός ανυποστήρικτου μήκους και έλεγχος λόγων-Δοκίμια Carbon

Δοκίμια	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L _l	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
Hand Lay Up UD [5mm] Total No: 8 specimens												
CHU ₅ 1	78.37	39.29	8.00	39.19	39.29	40.01	4.95	-0.97%	9.79	-2.07%	4.91	-1.80%

Δοκίμα	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L ₁	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
CHU ₅ 2	78.34	39.94	8.20	39.17	39.94	41.01	4.83	-3.38%	9.55	-4.50%	4.87	-2.62%
CHU ₅ 3	78.05	39.87	8.44	39.02	39.87	42.19	4.70	-6.07%	9.25	-7.50%	4.73	-5.49%
CHU ₅ 4	77.45	39.30	8.02	38.72	39.30	40.11	4.94	-1.21%	9.65	-3.47%	4.90	-2.03%
CHU ₅ 5	78.43	38.94	7.90	39.21	38.94	39.50	5.02	0.32%	9.93	-0.73%	4.93	-1.41%
CHU ₅ 6	78.29	40.20	8.09	39.14	40.20	40.44	4.90	-2.01%	9.68	-3.20%	4.97	-0.58%
CHU ₅ 7	78.00	38.95	8.12	39.00	38.95	40.60	4.88	-2.40%	9.61	-3.95%	4.80	-4.06%
CHU ₅ 8	77.91	38.89	7.88	38.96	38.89	39.38	5.03	0.64%	9.89	-1.07%	4.94	-1.22%
Average	78.10	39.42	8.08	39.05	39.42	40.40	4.91	-1.88%	9.67	-3.31%	4.88	-2.40%
				L _{final}		39.63						
Hand Lay Up UD [10mm] Total No: 8 specimens												
CHU ₁₀ 1	125.70	63.49	12.81	62.85	63.49	64.05	5.01	0.23%	9.81	-1.87%	4.96	-0.87%
CHU ₁₀ 2	125.98	61.95	13.52	62.99	61.95	67.58	4.75	-5.00%	9.32	-6.79%	4.58	-8.33%
CHU ₁₀ 3	125.85	62.91	13.67	62.92	62.91	68.34	4.70	-6.06%	9.21	-7.92%	4.60	-7.94%
CHU ₁₀ 4	125.29	63.58	13.44	62.64	63.58	67.21	4.78	-4.49%	9.32	-6.80%	4.73	-5.40%
CHU ₁₀ 5	125.16	61.32	12.69	62.58	61.32	63.45	5.06	1.18%	9.86	-1.37%	4.83	-3.36%
CHU ₁₀ 6	124.80	62.15	13.72	62.40	62.15	68.61	4.68	-6.43%	9.09	-9.05%	4.53	-9.42%
CHU ₁₀ 7	124.41	62.74	13.93	62.20	62.74	69.65	4.61	-7.83%	8.93	-10.69%	4.50	-9.92%
CHU ₁₀ 8	124.08	64.62	13.69	62.04	64.62	68.46	4.69	-6.23%	9.06	-9.38%	4.72	-5.62%
Average	125.16	62.85	13.43	62.58	62.85	67.17	4.78	-4.33%	9.33	-6.74%	4.68	-6.36%
				L _{final}		64.20						
Hand Lay Up Biaxial Total No: 8 specimens												
CHX1	78.11	39.77	7.64	39.06	39.77	38.18	5.06	1.25%	10.23	2.31%	5.21	4.19%

Δοκίμια	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L _l	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
CHX2	78.28	39.24	7.73	39.14	39.24	38.65	5.00	0.00%	10.13	1.27%	5.08	1.53%
CHX3	78.32	38.23	7.63	39.16	38.23	38.14	5.07	1.35%	10.27	2.68%	5.01	0.23%
CHX4	78.10	39.33	7.37	39.05	39.33	36.84	5.25	4.92%	10.60	6.01%	5.34	6.78%
CHX5	78.05	38.49	7.34	39.02	38.49	36.71	5.26	5.28%	10.63	6.29%	5.24	4.85%
CHX6	78.08	39.03	7.52	39.04	39.03	37.61	5.14	2.76%	10.38	3.80%	5.19	3.76%
CHX7	77.93	38.89	7.67	38.96	38.89	38.33	5.04	0.85%	10.17	1.66%	5.07	1.47%
CHX8	77.72	39.53	7.67	38.86	39.53	38.36	5.04	0.75%	10.13	1.30%	5.15	3.03%
Average	78.07	39.06	7.57	39.04	39.06	37.85	5.11	2.14%	10.32	3.16%	5.16	3.23%
				L _{final}		38.65						
Vacuum Bagging UD [5mm] Total No: 8 specimens												
CVU ₅ 1	52.57	24.76	5.14	26.28	24.76	25.69	5.03	0.69%	10.23	2.32%	4.82	-3.61%
CVU ₅ 2	52.72	26.74	5.21	26.36	26.74	26.04	4.97	-0.66%	10.12	1.23%	5.13	2.70%
CVU ₅ 3	52.98	26.49	5.14	26.49	26.49	25.68	5.04	0.74%	10.32	3.16%	5.16	3.19%
CVU ₅ 4	53.54	25.27	5.12	26.77	25.27	25.60	5.05	1.03%	10.46	4.56%	4.94	-1.28%
CVU ₅ 5	52.07	23.55	5.09	26.03	23.55	25.43	5.09	1.73%	10.24	2.39%	4.63	-7.36%
CVU ₅ 6	52.45	25.97	5.13	26.23	25.97	25.63	5.05	0.93%	10.23	2.34%	5.07	1.36%
CVU ₅ 7	52.12	25.80	5.17	26.06	25.80	25.85	5.00	0.06%	10.08	0.80%	4.99	-0.18%
CVU ₅ 8	51.81	26.65	5.10	25.91	26.65	25.49	5.07	1.48%	10.16	1.64%	5.23	4.56%
Average	52.53	25.66	5.13	26.26	25.66	25.67	5.04	0.75%	10.23	2.31%	5.00	-0.08%
				L _{final}		25.86						
Vacuum Bagging UD [10mm] Total No: 8 specimens												
CVU ₁₀ 1	86.89	43.94	8.59	43.44	43.94	42.96	5.03	0.50%	10.11	1.12%	5.11	2.27%
CVU ₁₀ 2	86.26	44.20	8.52	43.13	44.20	42.58	5.07	1.42%	10.13	1.30%	5.19	3.82%

Δοκίμια	Διαστάσεις [mm]						Λόγοι					
	l	b	h	L _l	L _b	L _h	L _{final} /h (ideal=5)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	l/h (ideal=10)	Απόκλιση από ιδανική τιμή	b/h (ideal=5.0)	Απόκλιση από ιδανική τιμή
CVU ₁₀₃	86.05	44.22	8.58	43.03	44.22	42.90	5.03	0.65%	10.03	0.29%	5.15	3.08%
CVU ₁₀₄	85.78	44.10	8.59	42.89	44.10	42.96	5.03	0.50%	9.98	-0.17%	5.13	2.65%
CVU ₁₀₅	85.90	43.52	8.59	42.95	43.52	42.94	5.03	0.56%	10.00	0.03%	5.07	1.36%
CVU ₁₀₆	85.85	42.07	8.56	42.93	42.07	42.78	5.05	0.94%	10.04	0.35%	4.92	-1.64%
CVU ₁₀₇	85.52	43.59	8.62	42.76	43.59	43.11	5.01	0.15%	9.92	-0.82%	5.06	1.12%
CVU ₁₀₈	85.09	44.06	8.54	42.55	44.06	42.70	5.06	1.12%	9.96	-0.36%	5.16	3.18%
Average	85.92	43.71	8.57	42.96	43.71	42.87	5.04	0.73%	10.02	0.22%	5.10	1.98%
				L _{final}		43.18						
Vacuum Bagging Biaxial Total No: 8 specimens												
CVX1	59.28	26.96	6.13	29.64	26.96	30.66	4.82	-3.67%	9.67	-3.33%	4.40	-12.09%
CVX2	59.76	29.33	6.00	29.88	29.33	29.99	4.93	-1.50%	9.96	-0.36%	4.89	-2.19%
CVX3	60.18	29.67	5.92	30.09	29.67	29.59	4.99	-0.17%	10.17	1.69%	5.01	0.27%
CVX4	59.18	29.80	5.85	29.59	29.80	29.24	5.05	1.03%	10.12	1.20%	5.10	1.91%
CVX5	59.04	29.29	6.08	29.52	29.29	30.38	4.86	-2.76%	9.72	-2.81%	4.82	-3.58%
CVX6	58.26	29.74	6.00	29.13	29.74	30.00	4.92	-1.54%	9.71	-2.90%	4.96	-0.86%
CVX7	57.69	29.69	5.97	28.84	29.69	29.83	4.95	-0.96%	9.67	-3.29%	4.98	-0.45%
CVX8	58.73	29.18	5.91	29.37	29.18	29.53	5.00	0.04%	9.95	-0.54%	4.94	-1.16%
Average	59.01	29.21	5.98	29.51	29.21	29.90	4.94	-1.19%	9.87	-1.29%	4.89	-2.27%
				L _{final}		29.54						

Από τη μελέτη των παραπάνω πινάκων προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα. Ο λόγος που σε κάθε περίπτωση διατηρείται πιο κοντά στην επιθυμητή τιμή είναι αυτός του ανυποστήρικτου μήκους προς το πάχος πλην ελαχίστων εξαιρέσεων (Σειρές CVU₁₀ και GVU₅). Η χειρότερη προσέγγιση στην τιμή επιθυμητού λόγου φαίνεται να υπάρχει στην περίπτωση του λόγου μήκους προς πάχος. Δεν παρατηρείται κάποια σύνδεση ανάμεσα στο μέγεθος του δοκιμίου και την αδυναμία διατήρησης των επιθυμητών λόγων.

3.1 Εισαγωγή

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, πέρα από τις δοκιμές για τον προσδιορισμό της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση, πραγματοποιήθηκε και μια σειρά δοκιμών για το προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων των σύνθετων πλακών, η κατασκευή των οποίων περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η γνώση των ιδιοτήτων αυτών κρίθηκε ότι αποτελεί απαραίτητο συμπλήρωμα για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων. Οι φυσικές ιδιότητες που μελετήθηκαν είναι η πυκνότητα καθώς και οι περιεκτικότητες σε ίνες και κενά των υπό μελέτη δοκιμίων. Ο (πειραματικός) υπολογισμός των ιδιοτήτων αυτών, πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια διαδικασιών που ορίζονται από σχετικά πρότυπα. Συγκεκριμένα:

- Για τον υπολογισμό της πυκνότητας των δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται από το πρότυπο ISO 1183-1
- Ο υπολογισμός της περιεκτικότητας σε ίνες των δοκιμίων glass έγινε με βάση το πρότυπο ISO 1172
- Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες των δοκιμίων carbon χρησιμοποιήθηκε μια τυποποιημένη διαδικασία που ορίζεται στο πρότυπο ASTM D 3171-99, ενώ για τα διαξονικά δοκίμια αυτού του είδους επιχειρήθηκε ο πρόσθετος προσδιορισμός της ιδιότητας αυτής, μέσω μη τυποποιημένων μεθόδων image analysis.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαδικασίες που εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων αυτών, ακολουθούμενες από τα σχετικά αποτελέσματα.

3.2 Υπολογισμός πυκνότητας κατά ISO 1183-1

Σκοπός

Το πρότυπο αυτό καθορίζει τρεις μεθόδους για τον προσδιορισμό της πυκνότητας μη πορωδών πλαστικών (non cellular) στην μορφή αντικειμένων μορφοποιημένων με καλούπωση ή εξώθηση, ελεύθερων από κενά, καθώς και σε μορφές σκόνης, νιφάδων και κόκκων. Από τις τρεις αυτές μεθόδους, στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής, εφαρμόστηκε μόνο η μέθοδος A ή αλλιώς «μέθοδος βύθισης» που συνίσταται για τον προσδιορισμό της πυκνότητας στερεών πλαστικών σε ελεύθερη από κενά μορφή, με εξαίρεση πλαστικά σε μορφή σκόνης.

Όροι και Ορολογία

Η ορολογία και οι ορισμοί που ακολουθεί το συγκεκριμένο πρότυπο παρατίθενται για λόγους πληρότητας στον πίνακα 3.1:

Πίνακας 3.1: Όροι και ορισμοί του πρότυπου ISO 1183-1

Όρος	Ορισμός	Σύμβολο	Τύπος	Μονάδες
Μάζα	Η ποσότητα ύλης σε ένα σώμα	-	-	kg ή g
Φαινόμενη μάζα	Η μάζα ενός σώματος που καθορίζεται με μέτρηση του βάρους το με μια κατάλληλα βαθμονομημένη ζυγαριά	m	-	kg ή g
Πυκνότητα	Ο λόγος της μάζας m ενός δείγματος προς τον όγκο του V (σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία t)	ρ	m/V	kg/m ³

Εξοπλισμός

Για τις ανάγκες της μεθόδου αυτής απαιτούνται:

- Αναλυτική ζυγαριά ή όργανο ειδικά σχεδιασμένο για τη μέτρηση της φαινόμενης μάζας
- Δοχείο βύθισης με φαρδύ στόμιο για την τοποθέτηση του υγρού βύθισης
- Θερμόμετρο ακρίβειας 0.1°C με διακύμανση από τους 0°C έως τους 30°C
- Καλώδιο ανθεκτικό στη διάβρωση, διαμέτρου όχι μεγαλύτερης των 0.5 mm για την ανάρτηση του υπό εξέταση δοκιμίου

Υγρό Βύθισης

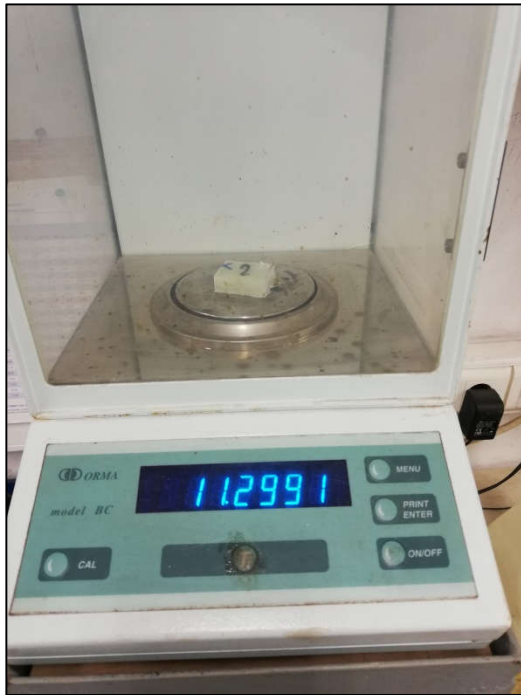
Το υγρό βύθισης που χρησιμοποιήθηκε είναι νερό βρύσης ελεύθερο από την παρουσία φυσαλίδων. Η θερμοκρασία του νερού μετρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων έτσι ώστε να είναι δυνατή η εύρεση ακριβούς τιμής για την πυκνότητα του.

Δοκίμια

Ιδανικά τα χρησιμοποιούμενα δοκίμια πρέπει να είναι σε ελεύθερη από κενά μορφή. Το μέγεθος κοπής τους πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να αποτρέπεται η επαφή τους με το δοχείο βύθισης. Κατά προτίμηση κάθε δοκίμιο πρέπει να έχει μάζα τουλάχιστον 1g.

Διαδικασία

Η διαδικασία της δοκιμής έχει ως εξής. Σε πρώτη φάση τα δοκίμια ζυγίζονται στον αέρα (σχήμα 3.1.a). Τα δοκίμια μάζας ίσης ή μικρότερης των 10 gr ζυγίζονται στο πλησιέστερο 0.1 mg ενώ τα δοκίμια μάζας μεγαλύτερης των 10 gr στο πλησιέστερο 1 mg. Η μάζα των δοκιμίων καταγράφεται. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνται στην άκρη του καλωδίου οπότε και βυθίζονται στο υγρό βύθισης (νερό) (σχήμα 3.1.b). Η θερμοκρασία του υγρού βύθισης και η ένδειξη της ζυγαριάς καταγράφονται. Ιδανικά η αναγραφόμενη ένδειξη καταγράφεται στο πλησιέστερο 0.1 mg.



(a)



(b)

Σχήμα 3.1: Μέτρηση μάζας δοκιμίου (a) στον αέρα και (b) στο νερό

Με γνωστή την πυκνότητα του υγρού βύθισης και έχοντας επιτύχει την πλήρη βύθιση του υπό μελέτη δοκιμίου χωρίς τη χρήση κάποιου βαριδιού, η πυκνότητα ρ_s του δοκιμίου σε g/cm^3 δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_s = \frac{m_{s,A} \times \rho_{IL}}{m_{s,A} - m_{s,IL}} \quad (3.1)$$

Όπου:

- $m_{s,A}$ η φαινόμενη μάζα του δοκιμίου στον αέρα σε g
- $m_{s,IL}$ η φαινόμενη μάζα του δοκιμίου στο υγρό βύθισης σε g
- ρ_{IL} η πυκνότητα του υγρού βύθισης, σε g/cm^3

Η μάζα του καλωδίου αμελείται. Η δοκιμή πραγματοποιείται για τουλάχιστον τρία δοκίμια από κάθε είδος ενώ ο αριθμητικό μέσος υπολογίζεται με ακρίβεια τριών σημαντικών ψηφίων.

Στους πίνακες 3.2 έως 3.3 παρατίθενται οι σχετικοί υπολογισμοί για τα δοκίμια glass και carbon αντίστοιχα. Στον πίνακα 3.2 παρατηρείται μια αλλαγή της τιμής της πυκνότητας του υγρού βύθισης στο δοκίμιο τρία κάθε σειράς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μέτρηση της πυκνότητας του τρίτου δοκιμίου κάθε σειράς, πραγματοποιήθηκε διαφορετική μέρα από τα πρώτα δύο (διαφορετική θερμοκρασία υγρού βύθισης). Για την μέτρηση της πυκνότητας των δοκιμίων glass χρησιμοποιήθηκαν τρία δοκίμια ενώ για τα δοκίμια carbon τέσσερα,

Πίνακας 3.2: Μέτρηση πυκνότητας δοκιμίων glass

Δοκίμιο	$m_{S,A}$ [g]	$m_{S,IL}$ [g]	ρ_{IL} [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	Μέση τιμή πυκνότητας [g/cm ³]
GHU ₅ 1	13.549	5.5221	0.9984	1.685	1.671
GHU ₅ 2	13.847	5.5824	0.9984	1.673	
GHU ₅ 3	12.049	4.7810	0.9980	1.654	
GHU ₁₀ 1	17.071	7.1011	0.9984	1.709	1.708
GHU ₁₀ 2	19.864	8.1864	0.9984	1.698	
GHU ₁₀ 3	17.478	7.3236	0.9980	1.718	
GHX1	7.4170	2.7870	0.9984	1.599	1.593
GHX2	7.6301	2.8208	0.9984	1.584	
GHX3	7.4280	2.7784	0.9980	1.594	
GVU ₅ 1	13.393	6.1532	0.9984	1.847	1.817
GVU ₅ 2	12.813	5.5764	0.9984	1.768	
GVU ₅ 3	10.738	4.9053	0.9980	1.837	
GVU ₁₀ 1	13.605	6.7124	0.9984	1.971	1.914
GVU ₁₀ 2	11.300	5.3445	0.9984	1.894	
GVU ₁₀ 3	17.055	7.9859	0.9980	1.877	
GVX1	6.2801	2.7011	0.9984	1.752	1.762
GVX2	6.3103	2.8264	0.9984	1.808	
GVX3	5.9965	2.5284	0.9984	1.726	

Πίνακας 3.3: Μέτρηση πυκνότητας δοκιμίων carbon

Δοκίμιο	$m_{S,A}$ [g]	$m_{S,IL}$ [g]	ρ_{IL} [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	Μέση τιμή πυκνότητας [g/cm ³]
CHU ₅ 1	4.8240	1.274	0.9979	1.356	1.345
CHU ₅ 2	4.8229	1.275	0.9979	1.356	
CHU ₅ 3	5.2648	1.401	0.9979	1.360	
CHU ₅ 4	1.6566	0.3914	0.9979	1.307	
CHU ₁₀ 1	7.7693	2.101	0.9979	1.368	1.350
CHU ₁₀ 2	7.0413	1.896	0.9979	1.366	
CHU ₁₀ 3	9.1073	2.331	0.9979	1.341	
CHU ₁₀ 4	1.9145	0.4738	0.9979	1.326	
CHX1	5.4025	1.505	0.9979	1.383	1.369
CHX2	5.5256	1.557	0.9979	1.390	
CHX3	6.4169	1.827	0.9979	1.395	

Δοκίμιο	$m_{S,A}$ [g]	$m_{S,IL}$ [g]	ρ_{IL} [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	Μέση τιμή πυκνότητας [g/cm ³]
CHX4	1.4226	0.336	0.9979	1.307	
CVU ₅ 1	3.5654	1.027	0.9979	1.402	1.377
CVU ₅ 2	4.3308	1.210	0.9979	1.385	
CVU ₅ 3	3.9345	1.122	0.9979	1.396	
CVU ₅ 4	1.2533	0.3104	0.9979	1.326	
CVU ₁₀ 1	7.4569	2.134	0.9979	1.398	1.400
CVU ₁₀ 2	6.1605	1.768	0.9979	1.400	
CVU ₁₀ 3	6.6765	1.925	0.9979	1.402	
CVU ₁₀ 4	1.8400	0.5299	0.9979	1.402	
CVX1	5.8437	1.606	0.9979	1.376	1.370
CVX2	5.7299	1.571	0.9979	1.375	
CVX3	5.0452	1.463	0.9979	1.406	
CVX4	1.6507	0.4066	0.9979	1.324	

Σχετικά με τα αποτελέσματα των μετρήσεων σχολιάζονται τα εξής. Τα δοκίμια glass παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές πυκνότητας από τα δοκίμια carbon. Ως προς την κατασκευαστική μέθοδο τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές πυκνότητας από εκείνα της μεθόδου Vacuum Bagging. Στην περίπτωση των δοκιμίων glass τα δοκίμια διαξονικού υφάσματος παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές πυκνότητας σε σχέση με αυτά του μονοαξονικού. Ο κανόνας αυτός δεν φαίνεται να ισχύει και στην περίπτωση των δοκιμίων carbon καθώς τα κατασκευασμένα με τη μέθοδο Hand Lay-up διαξονικά δοκίμια παρουσιάζουν υψηλότερη τιμή πυκνότητας σε σχέση με τα μονοαξονικά, ενώ τα κατασκευασμένα με μέθοδο Vacuum Bagging χαμηλότερη.

3.3 Υπολογισμός περιεκτικότητας δοκιμίων σε ίνες

Για την ενίσχυση των υπό μελέτη δοκιμίων έχουν χρησιμοποιηθεί δύο είδη ινών ως προς το υλικό, ίνες glass και ίνες carbon. Οι ίνες αυτές παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικές ιδιότητες μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η εφαρμογή διαφορετικής κάθε φορά μεθόδου για τον υπολογισμό του περιεχόμενου ενισχυτικού υλικού, σε αντίθεση με την περίπτωση του προσδιορισμού της πυκνότητας όπου η μέθοδος που εφαρμόστηκε υπήρξε κοινή και για τα δύο είδη υλικών ενίσχυσης. Για λόγους πληρότητας, παρατίθενται οι παρακάτω ορισμοί, όπως αναγράφονται στο πρότυπο ASTM D3171 - 99:

- Περιεκτικότητα σε ίνες (fiber content): η ποσότητα ινών ενός σύνθετου ή προεμποτίσματος εκφρασμένη σε ποσοστό επί τις εκατό κατά βάρος ή κατ'όγκον

- Περιεκτικότητα σε μήτρα (matrix content): η ποσότητα μήτρας ενός συνθέτου ή προεμποτίσματος εκφρασμένη σε ποσοστό επί τις εκατό κατά βάρος ή κατ'όγκον. Για μήτρες πολυμερούς ισούται με την ποσότητα ρητίνης
- Περιεκτικότητα σε ενίσχυση (reinforcement content): η ποσότητα υλικού εκτός μήτρας (ίνες και filler) ενός συνθέτου ή προεμποτίσματος εκφρασμένη σε ποσοστό επί τις εκατό κατά βάρος ή κατ'όγκον. Σε περίπτωση απουσίας filler η περιεκτικότητα αυτή ισούται με την περιεκτικότητα σε ίνες του σύνθετου.

3.3.1 Διαδικασία υπολογισμού περιεκτικότητας σε ίνες για δοκίμια Glass κατά ISO 1172

Σκοπός

Το διεθνές αυτό πρότυπο καθορίζει δύο μεθόδους για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε γυαλί και σε ορυκτό περιεχόμενο συνθέτων ενισχυμένα με ίνες γυαλιού. Από τις δύο αυτές μεθόδους ακολουθήθηκε η μέθοδος A για τον «προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες γυαλιού απουσία ορυκτού περιεχομένου».

Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που είναι απαραίτητος για την εκπόνηση της δοκιμής αυτής είναι ο εξής:

- Ζυγαριά ακρίβειας 0.1 mg
- Δοχείο κατασκευασμένο από πυρίμαχο υλικό μεγέθους ικανού για την τοποθέτηση ενός δοκιμίου
- Φούρνος ικανός να διατηρεί την επιλεγμένη θερμοκρασία με μέγιστη διακύμανση ίση με $\pm 20^{\circ}\text{C}$

Διαδικασία

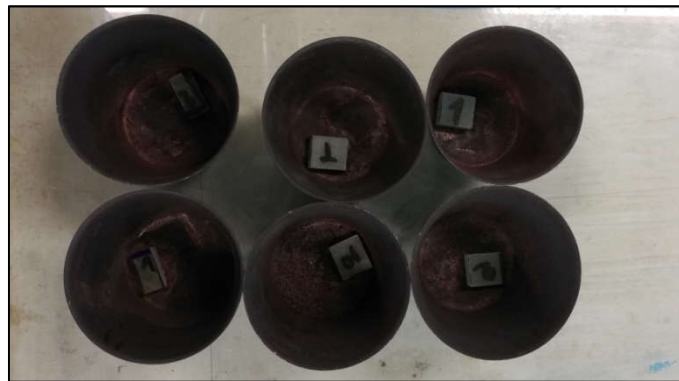
Το στεγνό πυρίμαχο σκεύος ζυγίζεται και καταγράφεται η μάζα του m_1 σε g. Το προς εξέταση δοκίμιο τοποθετείται στο πυρίμαχο σκεύος οπότε το σύστημα ζυγίζεται και καταγράφεται η μάζα του m_2 σε γραμμάρια (σχήμα 3.2.a). Το σκεύος μαζί με το περιεχόμενο δοκίμιο τοποθετούνται σε προθερμασμένο φούρνο θερμοκρασίας περίπου 625°C . Στη θερμοκρασία αυτή η μήτρα ρητίνης υφίσταται εξάχνωση και απομακρύνεται, ενώ στο εσωτερικό του δοχείου παραμένει μόνο η μη καύσιμη ενίσχυση γυαλιού (σχήμα 3.2.b/c). Το πυρίμαχο σκεύος που περιέχει την εναπομείνασα ενίσχυση αφήνεται να ψυχθεί οπότε και καταγράφεται η μάζα του m_3 σε g.

Για κάθε δοκίμιο η περιεκτικότητα σε ενίσχυση γυαλιού M_{glass} εκφρασμένη σε ποσοστό επί τοις εκατό της αρχικής μάζας δίνεται από τη σχέση:

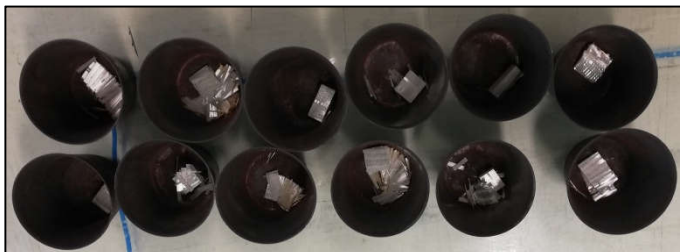
$$M_{\text{glass}} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (3.2)$$

Όπου τα μεγέθη m_1 , m_2 , m_3 , M_{glass} , όπως έχουν οριστεί παραπάνω.

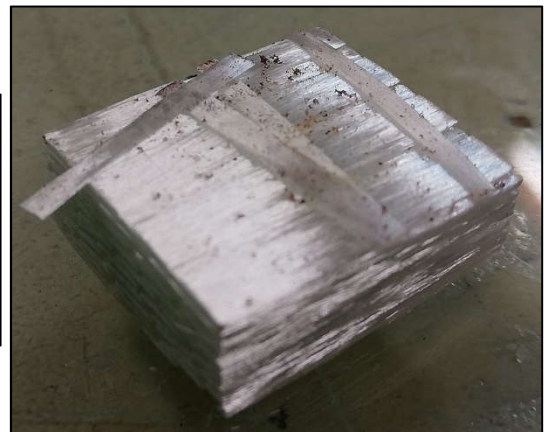
Κατά τις υποδείξεις του προτύπου απαιτούνται το ελάχιστο δύο δοκίμια από κάθε είδος. Σε περίπτωση που τα αποτελέσματα ομοειδών δοκιμών διαφέρουν σε ποσοστό υψηλότερο του 5% είναι απαραίτητη η διεξαγωγή και τρίτου πειράματος μέτρησης. Η περιεκτικότητα σε ίνες ορίζεται ο αριθμητικός μέσος των δύο (ή τριών μετρήσεων).



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 3.2: Δοκίμια (a) πριν και (b) μετά την καύση, (c) υλικό ενίσχυσης μετά την καύση

Η μετάβαση από την επί τοις εκατό κατά βάρος περιεκτικότητα στην κατ'όγκον περιεκτικότητα (V_r) μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της σχέσης:

$$V_r = W_r \times \frac{\rho_c}{\rho_s} \quad (3.3)$$

Όπου:

- W_r η επί τοις εκατό κατά βάρος περιεκτικότητα ($=M_{\text{glass}}$)
- ρ_r η πυκνότητα της ενίσχυσης όπως ορίζεται από τον κατασκευαστή
- ρ_s η πυκνότητα του δοκιμίου όπως υπολογίστηκε στη σχετική δοκιμή με τα δύο μεγέθη πυκνοτήτων να εκφράζονται στις ίδιες μονάδες

Ως προς την παραπάνω περιγραφόμενη διαδικασία σημειώνεται πως εξαιρετική προσοχή πρέπει να δοθεί στην πλήρη γνώση της αντιστοίχισης του πυρίμαχου σκεύους και του περιεχόμενου δοκιμίου. Τα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4, όπου γίνεται και έλεγχος της απόκλισης των τιμών για δοκίμια της ίδιας σειράς:

Πίνακας 3.4: Προσδιορισμός κατά βάρος περιεκτικότητας σε ίνες δοκιμίων glass

Δοχείο	m ₁ [g]	Περιεχόμενο Δοκίμιο	m ₂ [g]	m ₃ [g]	M _{glass} [%]	Απόκλιση [%] (≤5)	W _r	ρ _s [g/cm ³]	ρ _c [g/cm ³]	V _r
14	77.591	HU ₅ 1	81.390	79.754	56.94	0.21	57.0%	1.671	2.620	36.3%
10	83.391	HU ₅ 2	87.203	85.566	57.06	0.21				
2	77.038	HU ₁₀ 1	83.848	81.053	58.96	2.26	59.6%	1.708	2.620	38.9%
4	77.409	HU ₁₀ 2	84.146	81.473	60.32	2.26				
15	77.535	HX1	80.331	78.839	46.63	0.69	46.5%	1.593	2.620	28.2%
7	77.951	HX2	80.863	79.300	46.31	0.69				
13	77.814	VU ₅ 1	80.851	80.160	77.26	0.91	76.9%	1.817	2.620	53.3%
9	77.627	VU ₅ 2	80.594	79.899	76.57	0.91				
3	76.661	VU ₁₀ 1	81.964	80.585	74.00	0.56	74.2%	1.914	2.620	54.2%
5	76.532	VU ₁₀ 2	80.782	79.695	74.41	0.56				
8	76.473	VX1	79.513	78.471	65.72	0.13	65.8%	1.762	2.620	44.2%
16	76.600	VX2	79.206	78.315	65.81	0.13				

Τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα είναι σε ένα βαθμό αναμενόμενα. Λόγω της ικανότητας αποβολής της περίσσιας ρητίνης στη μέθοδο Vacuum Bagging, τα δοκίμια της μεθόδου παρουσιάζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες σε σχέση με τα δοκίμια της μεθόδου Hand Lay-up. Και στις δύο μεθόδους τα δοκίμια διαξονικού υφάσματος εμφανίζουν μικρότερη περιεκτικότητα σε ίνες σε σχέση με αυτά του μονοαξονικού υφάσματος. Σημειώνεται ότι το θεωρητικό πάχος στρώσης από τον κατασκευαστή δίνεται για 40% ενίσχυση κατ'όγκον, μια τιμή που προσεγγίζεται επαρκώς κυρίως από τα GHU₁₀ και GHU₅ με αποτέλεσμα να κρίνεται πως η απόκλιση του πάχους των τελικών πλακών από το θεωρητικό πάχος κατασκευαστή μπορεί να αναζητηθεί στην έλλειψη στοιχείων για τα ίδια τα υφάσματα και τη χρήση στοιχείων παραπλήσιων υφασμάτων.

3.3.2 Διαδικασία υπολογισμού περιεκτικότητας σε ίνες για δοκίμια Carbon

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας των δοκιμίων carbon χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη από αυτές αποτελεί τυποποιημένη μέθοδο και εφαρμόστηκε για όλες τις σειρές δοκιμίων carbon. Η δεύτερη μέθοδος είναι μη τυποποιημένη και συνίσταται στον υπολογισμό της κατ'όγκον περιεκτικότητας του δοκιμίου σε ίνες με αναγωγή του προβλήματος σε λόγο εμβαδού ιών προς εμβαδό της υπό μελέτη περιοχής σε φωτογραφίες της τομής του δοκιμίου. Η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε μόνο στα ενισχυμένα με διαξονικό ύφασμα δοκίμια. Στα εδάφια που ακολουθούν παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχετικές διεργασίες καθώς και τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

3.3.2.1 Διαδικασία Acid Digestion κατά ISO ASTM D 3171-99

Σκοπός

Το συγκεκριμένο πρότυπο καθορίζει πολλαπλές μεθόδους για τον καθορισμό της περιεκτικότητας σε ενισχυτικές ίνες σύνθετων υλικών. Η μέθοδος που επιλέχθηκε να ακολουθηθεί (Μέθοδος I) συνίσταται στην αφαίρεση της μήτρας μέσω διάλυσής της με τη χρήση οξέος, το οποίο δεν προσβάλλει το υλικό της ενίσχυσης, επιτρέποντας την καταγραφή της μάζας του. Από το πλήθος των αντιδραστηρίων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη μέθοδο, διαπιστώθηκε ότι καταλληλότερος συνδυασμός για τη διάβρωση των δοκιμίων σε εύλογο χρονικό διάστημα, αποτελεί ο συνδυασμός θεικού οξέος/υπεροξειδίου του υδρογόνου όπως προβλέπεται από τη διαδικασία B του προτύπου.

Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που είναι απαραίτητος για την εκπόνηση της μέτρησης αυτής περιλαμβάνει:

- Απορροφητήρα για την απομάκρυνση των επικίνδυνων αερίων από το χώρο εργασίας
- Αναδευτήρα ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας και περιστροφών
- Πυρίμαχο κεραμικό φίλτρο
- Αφυγραντήρα
- Φούρνο
- Εργαστηριακό εξοπλισμό: ποτήρι ζέσεως, ογκομετρικός σωλήνας, τσιμπίδες, χοάνη ρυθμιζόμενης εσωτερικής πίεσης.

Διαδικασία

Σε πρώτη φάση από το προς μελέτη υλικό κόβονται δοκίμια ελάχιστης μάζας ίσης με 0.5 g. Αν και τα δοκίμια δεν έχουν άλλους γεωμετρικούς περιορισμούς, πέρα από αυτούς που καθορίζονται από τον λοιπό εξοπλισμό, διαπιστώθηκε ότι η κοπή των δοκιμίων ώστε αυτά να έχουν επαρκή επιφάνεια επαφής, μπορεί να βοηθήσει στην επιτάχυνση της διαδικασίας. Υπενθυμίζεται ότι με αύξηση της επιφάνειας επαφής στερεού με τα λοιπά αντιδρώντα, μεγαλώνει ο αριθμός των ενεργών συγκρούσεων με αποτέλεσμα την αύξηση της ταχύτητας της αντίδρασης. Ως ελάχιστο εμβαδόν της ενεργού επιφάνειας, ορίστηκαν τα 625 mm² κατά τις υποδείξεις του προτύπου.

Αφού πραγματοποιηθεί η κοπή των δοκιμίων είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της πυκνότητας αυτών κατά την τυποποιημένη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 3.2. Στον πίνακα 3.3 όπου παρουσιάζονται υπολογισμένες πυκνότητες των δοκιμίων carbon το τέταρτο δοκίμιο κάθε σετ, αντιστοιχεί στο δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες. Πριν την έναρξη της διαδικασίας είναι πολύ σημαντικό τα δοκίμια να τοποθετηθούν σε αφυγραντήρα ώστε να είναι ελεύθερα από υγρασία.

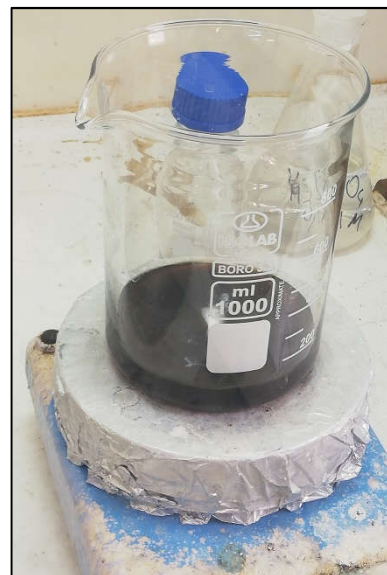
Η διαδικασία που περιγράφεται παρακάτω πραγματοποιείται στο εσωτερικό του απορροφητήρα για την απομάκρυνση επιβλαβών αναθυμιάσεων (σχήμα 3.3.a). Το κάθε δοκίμιο ζυγίζεται στο πλησιέστερο 0.1 mg και η μάζα του (M_i) καταγράφεται. Το δοκίμιο τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως ελάχιστης χωρητικότητας 100 mL. Στο ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται το λιγότερο 20 mL θεικού οξέος (95.0-97.0%). Το ποτήρι τοποθετείται πάνω σε αναδευτήρα όπου αφήνεται να θερμανθεί στους 200°C με την ταυτόχρονη ανάδευσή του. Πέντε λεπτά αφότου το χρώμα του διαλύματος έχει σταθεροποιηθεί σε μια σκούρα απόχρωση (σχήμα 3.3.b) το ποτήρι ζέσεως τοποθετείται σε κρύο λουτρό οπότε και προστίθεται υπεροξείδιο του οξυγόνου 30%. Η ποσότητα του προστιθέμενου υπεροξειδίου πρέπει να υπερβαίνει εκείνη του θεικού οξέος. Το μίγμα αφήνεται έως ότου γίνει διαφανές και είναι πλέον ορατές οι ίνες του δοκιμίου.

Στο μίγμα προστίθεται απιονισμένο νερό οπότε και το περιεχόμενο του ποτηριού ζέσεως φιλτράρεται μέσω ενός πυρίμαχου φίλτρου, που στηρίζεται στο στόμιο δοχείου, στο εσωτερικό του οποίου έχει εφαρμοστεί κενό για πιο διεξοδικό φιλτράρισμα (σχήμα 3.3.c). Οι ίνες στην επιφάνεια του φίλτρου ξεπλένονται το λιγότερο τρεις φορές με τη χρήση απιονισμένου νερού. Ένα τέταρτο ξέπλυμα με αλκοόλη μπορεί να βοηθήσει στην μείωση του χρόνου που απαιτείται για το στέγνωμα των ινών.

Το πυρίμαχο φίλτρο και οι ίνες τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας περίπου 100°C έως ότου οι ίνες έχουν στεγνώσει πλήρως (ελάχιστος χρόνος παραμονής στο φούρνο 1 ώρα). Προαιρετικά περαιτέρω αποβολή υγρασίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τοποθέτηση και παραμονή των ινών στον αφυγραντήρα. Οι ίνες ζυγίζονται στο πλησιέστερο 0.1 mg (M_f).



(a)



(b)



(c)

Σχήμα 3.3: (a) Ο εξοπλισμός στον οποίο πραγματοποιήθηκε η διεργασία. Μέσα στον απορροφητήρα φαίνονται στα αριστερά το πυρίμαχο φίλτρο, το δοχείο εφαρμογής κενού ενώ στα δεξιά φαίνεται ο αναδευτήρας (b) στιγμιότυπο όπου το διάλυμα έχει γίνει πλήρως σκούρο (c) Οι ίνες που φιλτράρονται. Στο εσωτερικό του δοχείου φαίνεται το διάλυμα που με την προσθήκη του υπεροξειδίου έχει γίνει από σκούρο, διαφανές.

Σχετικά με παρατηρήσεις που έγιναν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, σημειώνονται τα εξής. Διαπιστώθηκε ότι μια επανάληψη της διαδικασίας δεν επαρκεί για την πλήρη διάλυση των δοκιμίων, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου το οξύ είχε αφεθεί να δράσει για μία ώρα αφότου το διάλυμα είχε αποκτήσει πλήρως σκούρο χρώμα. Η απαραίτητη ποσότητα οξέως ανά επανάληψη εκτιμήθηκε γύρω στα 50mL και του υπεροξειδίου του υδρογόνου γύρω στα 70mL.

Η επί τοις εκατό κατά βάρος (W_r) περιεκτικότητα του δοκιμίου σε ενίσχυση δίνεται από τη σχέση:

$$W_r = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (3.4)$$

Όπου:

- M_i η αρχική μάζα των δοκιμίων σε g
- M_f η τελική μάζα των ινών μετά τη διάλυση με οξύ σε g.

Στον πίνακα 3.5 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί της περιεκτικότητας σε ενίσχυση των δοκιμίων carbon. Η πυκνότητα ρ_C των ινών βρέθηκε από το σχετικό φυλλάδιο ιδιοτήτων του κατασκευαστή. Για κάθε είδος δοκιμίου εξετάστηκε ένα μόνο δοκίμιο.

Πίνακας 3.5: Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ενίσχυση δοκιμίων carbon

Δοκίμιο	A [mm ²] ≥ 625	M _i [g]	M _f [g]	Περιεκτικότητα σε ίνες [%w/w]	ρ _s [g/cm ³]	ρ _c [g/cm ³]	Περιεκτικότητα σε ίνες [%v/v]
CHU ₅	780	1.648	0.803	48.73%	1.307	1.820	34.98%
CHU ₁₀	830	1.907	0.971	50.92%	1.326	1.820	37.10%
CHX	698	1.418	0.728	51.34%	1.307	1.760	38.12%
CVU ₅	709	1.245	0.887	71.24%	1.377	1.820	53.91%
CVU ₁₀	786	1.843	1.265	68.64%	1.400	1.820	52.82%
CVX	775	1.628	1.052	64.62%	1.324	1.760	48.61%

Σε αναλογία με τα δοκίμια glass τα δοκίμια carbon κατασκευασμένα με μέθοδο Vacuum Bagging έχουν υψηλότερη τιμή περιεκτικότητας σε ενίσχυση σε σχέση με δοκίμια Hand Lay-up. Στην περίπτωση του Vacuum Bagging τα διαζονικό ύφασμα παρουσιάζει χαμηλότερη τιμή πυκνότητας από το μονοαξονικό ενώ αντίθετη συμπεριφορά παρατηρείται για τα δοκίμια Hand Lay-up. Υπενθυμίζεται ότι η συμπεριφορά αυτή παρατηρήθηκε και στην περίπτωση του υπολογισμού πυκνότητας.

3.3.2.2 Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε ίνες μέσω Image Analysis για τα διαζονικά

δοκίμια άνθρακα

Βασική Αρχή

Όπως σημειώνεται στο εγχειρίδιο MIL-17 (2002) η χρήση της μεθόδου Image Analysis προσφέρει μια εναλλακτική μέθοδο για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες ενός σύνθετου που μπορεί να προσφέρει επιπρόσθετες πληροφορίες για τον προσανατολισμό των ινών των διάφορων στρώσεων καθώς και για τις διαβαθμίσεις της πυκνότητας που ενδέχεται να παρουσιάζονται κατά το πάχος του δοκιμίου. Ταυτόχρονα η μέθοδος είναι απαλλαγμένη από την χρήση επιβλαβών ουσιών και παραπροϊόντων, όπως τοξικές αναθυμιάσεις και απόβλητα. Η μέθοδος στηρίζεται στην υπόθεση ότι η εξέταση της διδιάστατης κατανομής των ινών στην επιφάνεια μιας τυχαίας εγκάρσιας τομής του συνθέτου προσεγγίζει την ογκομετρική κατανομή τους. Φυσικά η υπόθεση αυτή ισχύει με την προϋπόθεση ότι οι εγκάρσιες τομές του συνθέτου κατά την τρίτη διάσταση παραμένουν σχετικά αμετάβλητες. Η μέθοδος αυτή φαίνεται να αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα στην περίπτωση συνθέτου ενισχυμένου με ίνες άνθρακα όπου μπορεί να επιτευχθεί επαρκής αντίθεση μεταξύ των ινών και της μήτρας, κάτι που την καθιστά ακατάλληλη στην περίπτωση των δοκιμίων glass.

Εξοπλισμός

Για την εφαρμογή της μεθόδου είναι απαραίτητη η ύπαρξη του παρακάτω εξοπλισμού:

- Εξοπλισμός για τη μεταλλογραφική προετοιμασία των δοκιμίων (καλούπια εγκιβωτισμού, εργαστηριακός λειαντήρας)
- Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο συνδεδεμένο με ψηφιακή κάμερα
- Υπολογιστής εξοπλισμένος με λογισμικό λήψης φωτογραφιών
- Λογισμικό ανάλυσης φωτογραφιών.

Διαδικασία

Ένα δοκίμιο κόβεται από κάθε υπό μελέτη σύνθετο με μοναδικούς γεωμετρικούς περιορισμούς αυτούς που τίθενται από το καλούπι εγκιβωτισμού. Σημειώνεται ότι η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ογκομετρικής περιεκτικότητας σε ίνες συνθέτων με προσανατολισμό από 0° έως περίπου 60° . Για μεγαλύτερες γωνίες τα όρια μεταξύ ινών και μήτρας γίνονται αρκετά δυσδιάκριτα. Τα υπό μελέτη σύνθετα έχουν προσανατολισμό ινών $[0^\circ/90^\circ]$. Συνεπώς για να αποφευχθεί η τμηματική μελέτη καθενός από τους κύριους προσανατολισμούς, είναι δυνατή η τομή του συνθέτου σε γωνία 45° .

Τα κομμένα δοκίμια εγκιβωτίζονται σε ειδικά καλούπια ώστε να είναι δυνατή η μεταλλογραφική τους προετοιμασία. Η επιφάνεια του δοκιμίου προς παρατήρηση είναι αναγκαίο να λειανθεί για τη λήψη ευδιάκριτων φωτογραφιών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία τους με το σχετικό λογισμικό. Για το λόγο αυτό, τα δοκίμια τοποθετούνται στον λειαντήρα όπου διαδοχικά χρησιμοποιούνται φύλλα μεταλλογραφικής λείανσης με μέγεθος κόκκων (grit size) P80, P120, P320, P500, P800, P1200, P2000 και P4000 (σχήμα 3.4). Κάθε φύλλο αφήνεται να επενεργήσει για περίπου 5 λεπτά. Στη συνέχεια η επιφάνεια του δοκιμίου ξεπλένεται με αλκοόλη και αφήνεται να στεγνώσει. Με το τέλος της λείανσης τα δοκίμια είναι έτοιμα για παρατήρηση στο μικροσκόπιο.



Σχήμα 3.4: Λείανση των δοκιμίων

Λήψη εικόνων και επεξεργασία αποτελεσμάτων

Κατά τις υποδείξεις του MIL-17 (2002) θεωρείται ότι ικανοποιητική προσέγγιση της περιεκτικότητας σε ίνες επιτυγχάνεται με τη λήψη 20 έως 50 φωτογραφιών. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Leica DMILM ενώ το λογισμικό επεξεργασίας των φωτογραφιών το Leica Application Suite V3. Απαραίτητη είναι η ρύθμισης της εστίασης, του φωτός και της αντίθεσης σε κάθε λήψη έτσι ώστε να επιτυγχάνονται φωτογραφίες βέλτιστης ποιότητας. Οι εικόνες που λαμβάνονται είναι σε γκρι κλίμακα με την προσθήκη ράβδου κλίμακας ώστε να υποστούν επεξεργασία από το λογισμικό Image Analysis.

Οι M.T.Cann, Daniel O. Adams, C.L.Schneider (2008) περιγράφουν δύο μεθόδους Areal/Fiber Counting για την εύρεση της ογκομετρικής περιεκτικότητας με Image Analysis,

Areal Method

Στη μέθοδο αυτή, ο προσδιορισμός της κατ'όγκον περιεκτικότητας επιτυγχάνεται με καταμέτρηση, μέσω υπολογιστικού αλγορίθμου, των λευκών και μαύρων pixel μέσα σε προσδιορισμένη από το χρήστη περιοχή. Τα λευκά pixel αντιπροσωπεύουν την μήτρα ενώ τα μαύρα τις ίνες. Προκειμένου να είναι δυνατή η καταμέτρηση αυτή, η εικόνα γκρι κλίμακας πρέπει προηγουμένως να μετατραπεί σε διχρωματική (δυαδική). Για να επιτευχθεί αυτό είναι απαραίτητος ο καθορισμός ενός κατάλληλου ορίου γκρι “grey threshold” το οποίο διαχωρίζει τα pixel που θα μετατραπούν σε λευκά από εκείνα που θα μετατραπούν σε μαύρα. Όπως είναι φανερό, ο λόγος του αριθμού των μαύρων προς τα συνολικά pixel ισούται με την κατ'όγκον περιεκτικότητα σε ίνες της υπό μελέτη περιοχής.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής εξαιρετική προσοχή πρέπει να δοθεί στα ακόλουθα σημεία:

- Η επιλογή του “grey threshold” πρέπει να γίνεται στη διχρωματική εικόνα έτσι ώστε τα όρια μεταξύ μαύρων και λευκών περιοχών να προσεγγίζουν όσο το δυνατό καλύτερα τα όρια ίνας-μήτρας στην κανονική φωτογραφία. Αλλαγή στην τιμή του threshold οδηγεί σε σημαντική αλλαγή της τιμής του λόγου των επιφανειών.
- Σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα της υπό μελέτη επιφάνειας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η παρουσία μικρο-εκδορών που προκύπτουν κατά τη λείανση της επιφάνειας, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα περιοχές της μήτρας να αποτυπώνονται με μαύρο χρώμα στη δυαδική εικόνα, οδηγώντας σε αλλοίωση των αποτελεσμάτων.
- Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί εικόνες υψηλής μεγέθυνσης, με αποτέλεσμα για να υπάρχει ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της επιφάνειας, να απαιτείται μεγάλος αριθμός εικόνων.

Fiber Counting Method

Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής είναι ξανά απαραίτητη η μετατροπή της εικόνας σε δυαδική μορφή με την επιλογή του κατάλληλου threshold. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, το λογισμικό δεν καταμετρά τον αριθμό των λευκών και μαύρων pixel, αλλά τον αριθμό των

μαύρων περιοχών που περικλείονται από λευκές, παρέχοντας έτσι μια ικανοποιητική προσέγγιση του αριθμού των ινών στην προσδιορισμένη από τον χρήστη περιοχή. Στη συνέχεια, ο αριθμός αυτός πολλαπλασιάζεται με το εμβαδόν τομής κάθε ίνας όπως δίνεται από τον κατασκευαστή. Η προκύπτουσα τιμή διαιρείται με το συνολικό εμβαδόν της περιοχής οπότε και λαμβάνεται η προσέγγιση για την κατ'όγκον περιεκτικότητα του δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή συνοψίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$V_f = \frac{\pi \cdot N_f \cdot d_f^2}{4 \cdot A_t} \cdot \sec(\varphi) \quad (3.5)$$

Όπου:

- N_f ο αριθμός των ινών όπως καταμετράται με τη βοήθεια του λογισμικού
- d_f η διάμετρος, σε μm , της ίνας όπως καθορίζεται από τον κατασκευαστή
- A_t το εμβαδόν της υπό μελέτη περιοχής που καταμετράται με τη βοήθεια του λογισμικού σε μm^2
- $\sec(\varphi) = \frac{1}{\cos(\varphi)}$, παράγοντας που λαμβάνει υπόψη τη γωνία πρόσπτωσης (φ) των ινών πάνω στην τομή ($\pm 45^\circ$). Διευκρινίζεται ότι λόγω της τομής της επιφάνειας υπό γωνία 45° , η τομή των ινών δεν έχει τη μορφή κυκλικών δίσκων αλλά ελλειπτικών.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής έμφαση πρέπει να δοθεί στα ακόλουθα:

- Απαραίτητη είναι η εφαρμογή αλγορίθμου (watershed separation) για το διαχωρισμό ινών που βρίσκονται σε επαφή με αποτέλεσμα να καταμετρώνται ως μία. Ο αλγόριθμος αυτός σχεδιάζει μια γραμμή πλάτους ενός pixel μεταξύ των εφαπτόμενων ινών έτσι ώστε να καταμετρώνται ως δύο διαφορετικές.
- Μετά το διαχωρισμό των ινών ακολουθεί η εφαρμογή ενός φίλτρου μεγέθους για την αποφυγή καταμέτρησης εγκλεισμάτων και «θορύβου» της εικόνας (π.χ. αποκολλημένων κομματιών ινών).

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τη σύμφωνη με τα παραπάνω επεξεργασία των ληφθέντων φωτογραφιών, είναι το πρόσθετο Fiji του ImageJ. Συνοπτικά η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- Η εικόνα εισάγεται και ο τύπος της μετατρέπεται σε 8bit
- Με τη χρήση της επιλογής “Enhance Local Contrast” η αντίθεση μεταξύ ινών και μήτρας ενισχύεται, ενώ η τραχιά πλέον εικόνα εξομαλύνεται με την εντολή “smooth”
- Επιλέγεται κατάλληλο grey threshold
- Με τη βοήθεια του πινέλου του λογισμικού οποιαδήποτε εμφανής ανωμαλία (π.χ. μικροεγδορές) διορθώνεται στο σωστό χρώμα.

Στο σημείο αυτό είναι δυνατή η λήψη μετρήσεων για την Areal Method. Για την εφαρμογή της Fiber Counting Method απαιτούνται ακόμη τα εξής βήματα:

- Καθορισμός κλίμακας για τη μέτρηση της επιφάνειας της εικόνας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της μπάρας κλίμακας που τοποθετήθηκε κατά τη λήψη των φωτογραφιών, μιας και το πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα αντιστοίχισης του μήκους της μπάρας (σε pixel) σε γνωστή στον χρήστη απόσταση
- Εφαρμογή αλγόριθμου watershed για διαχωρισμό ενωμένων ινών
- Αφαίρεση με το πινέλο εσφαλμένα διαχωρισμένων ινών
- Εφαρμογή του φίλτρου μεγέθους με ελάχιστο όριο τα 1000 pixels.

Είναι πλέον δυνατός ο υπολογισμός της κατ'όγκον περιεκτικότητας με τη μέθοδο fiber counting. Όπως αναφέρθηκε, οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό της κατ'όγκον περιεκτικότητας των διαξονικών δοκιμίων άνθρακα. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 3.6 και 3.7, όπου υπολογίζεται και η απόκλιση της ογκομετρικής περιεκτικότητας όπως προκύπτει από τις 2 μεθόδους για κάθε δοκίμιο:

Πίνακας 3.6: Εφαρμογή μεθόδων Image Analysis για διαξονικά δοκίμια Carbon μεθόδου Hand Lay-up

Hand Lay UP						
Μέθοδος	Areal	Fiber Counting			Απόκλιση	
Εικόνα	V _f	d _f [μm]	N _f	A _t [μm ²]		V _f
						φ = 45°
CHX_1	39.45%	7	490	49947	53.39%	26.11%
CHX_2	21.53%	7	255	49947	27.79%	22.53%
CHX_3	39.23%	7	424	50276	45.90%	14.53%
CHX_4	43.22%	7	460	49585	50.49%	14.40%
CHX_5	44.22%	7	471	49752	51.52%	14.18%
CHX_6	49.37%	7	500	49397	55.09%	10.38%
CHX_7	52.53%	7	537	49799	58.69%	10.49%
CHX_8	47.94%	7	513	49707	56.17%	14.66%
CHX_9	31.78%	7	388	49920	42.30%	24.87%
CHX_10	37.95%	7	426	49623	46.72%	18.77%
CHX_11	48.89%	7	497	49525	54.62%	10.50%
CHX_12	33.97%	7	369	49689	40.42%	15.95%
CHX_13	43.85%	7	451	50140	48.95%	10.44%
CHX_14	14.92%	7	192	49689	21.03%	29.05%
CHX_15	41.87%	7	426	49774	46.58%	10.12%
CHX_16	44.57%	7	513	49841	56.02%	20.43%
CHX_17	41.27%	7	508	49895	55.41%	25.53%
CHX_18	51.85%	7	483	49946	52.63%	1.48%
CHX_19	39.53%	7	431	49983	46.93%	15.76%
CHX_20	42.20%	7	405	49723	44.33%	4.80%
CHX_21	54.66%	7	530	49723	58.01%	5.78%
CHX_22	17.82%	7	216	49793	23.61%	24.51%
CHX_24	18.79%	7	187	49793	20.44%	8.05%
CHX_25	33.10%	7	329	49897	35.89%	7.75%

Hand Lay UP						
Μέθοδος	Areal	Fiber Counting				Απόκλιση
Εικόνα	Vf	d _f [μm]	N _f	A _i [μm ²]	V _f	
					φ = 45°	
CHX_26	40.22%	7	442	49793	48.31%	16.74%
CHX_27	52.49%	7	524	49793	57.28%	8.35%
CHX_28	41.95%	7	467	49793	51.04%	17.81%
CHX_29	18.56%	7	179	50052	19.46%	4.64%
CHX_30	37.63%	7	429	49947	46.75%	19.49%
CHX_31	33.31%	7	391	50052	42.52%	21.66%
CHX_32	43.07%	7	497	50052	54.04%	20.30%
CHX_33	36.96%	7	376	50052	40.89%	9.60%
CHX_34	46.72%	7	547	49947	59.60%	21.62%
CHX_35	38.05%	7	462	50052	50.24%	24.26%
CHX_36	47.81%	7	563	50052	61.22%	21.90%
CHX_38	37.94%	7	452	50052	49.15%	22.81%
CHX_39	40.89%	7	498	49947	54.26%	24.65%
Average	39.19%				45.47%	15.66%

Πίνακας 3.7: Εφαρμογή μεθόδων Image Analysis για διαζωνικά δοκίμια Carbon μεθόδου Vacuum Bagging

Vacuum Bagging						
Μέθοδος	Areal	Fiber Counting				Απόκλιση
Εικόνα	Vf	d _f [μm]	N _f	A _i [μm ²]	V _f	
					φ = 45°	
CVX_1	44.11%	7	571	49793	62.41%	29.33%
CVX_2	50.07%	7	534	49946	58.19%	13.95%
CVX_3	53.09%	7	614	50052	66.76%	20.48%
CVX_4	48.18%	7	577	50052	62.74%	23.20%
CVX_5	53.78%	7	607	50052	66.00%	18.53%
CVX_6	45.14%	7	571	50052	62.09%	27.31%
CVX_7	49.58%	7	580	50052	63.07%	21.39%
CVX_8	51.42%	7	570	49946	62.11%	17.21%
CVX_9	46.45%	7	522	50052	56.76%	18.17%
CVX_10	49.94%	7	584	50052	63.50%	21.36%
CVX_12	49.43%	7	592	50052	64.37%	23.21%
CVX_13	50.34%	7	562	50052	61.11%	17.63%
CVX_14	49.18%	7	534	50052	58.07%	15.31%
CVX_15	43.90%	7	491	50157	53.28%	17.60%
CVX_16	46.20%	7	487	50052	52.95%	12.75%
CVX_17	48.73%	7	524	50052	56.98%	14.48%
CVX_18	48.28%	7	524	50052	56.98%	15.27%

Vacuum Bagging						
Μέθοδος	Areal	Fiber Counting				Απόκλιση
Εικόνα	V _f	d _f [μm]	N _f	A _i [μm ²]	V _f	
					φ = 45°	
CVX_22	51.18%	7	569	50052	61.87%	17.28%
CVX_23	48.09%	7	540	50052	58.72%	18.09%
CVX_24	45.63%	7	550	50052	59.81%	23.70%
CVX_25	44.81%	7	516	50052	56.11%	20.14%
CVX_26	37.22%	7	447	50052	48.61%	23.43%
CVX_27	52.22%	7	543	49947	59.17%	11.74%
CVX_28	33.77%	7	408	50052	44.36%	23.89%
CVX_29	47.00%	7	528	50052	57.41%	18.14%
CVX_30	59.91%	7	597	50052	64.92%	7.72%
CVX_32	39.95%	7	415	50052	45.13%	11.47%
CVX_33	49.72%	7	549	49947	59.82%	16.89%
CVX_34	47.47%	7	551	50052	59.91%	20.78%
CVX_36	48.55%	7	569	49947	62.00%	21.69%
CVX_37	40.66%	7	467	49947	50.89%	20.09%
CVX_38	51.64%	7	552	49947	60.15%	14.14%
CVX_39	45.66%	7	528	50052	57.41%	20.48%
CVX_40	37.82%	7	477	50052	51.87%	27.08%
Average	47.33%				58.40%	18.94%

Σχετικά με τους παραπάνω πίνακες σημειώνονται τα εξής. Και για τα δύο είδη δοκιμίων παρατηρήθηκε ότι η fiber counting method οδηγεί σε υπερεκτίμηση της περιεκτικότητας έναντι της areal method. Η υπερεκτίμηση αυτή είναι της τάξης του 16% για τα δοκίμια Hand Lay-Up και της τάξεως του 19% για τα δοκίμια Vacuum Bagging.

3.3.2.3 Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού περιεκτικότητας σε ίνες δοκιμίων carbon

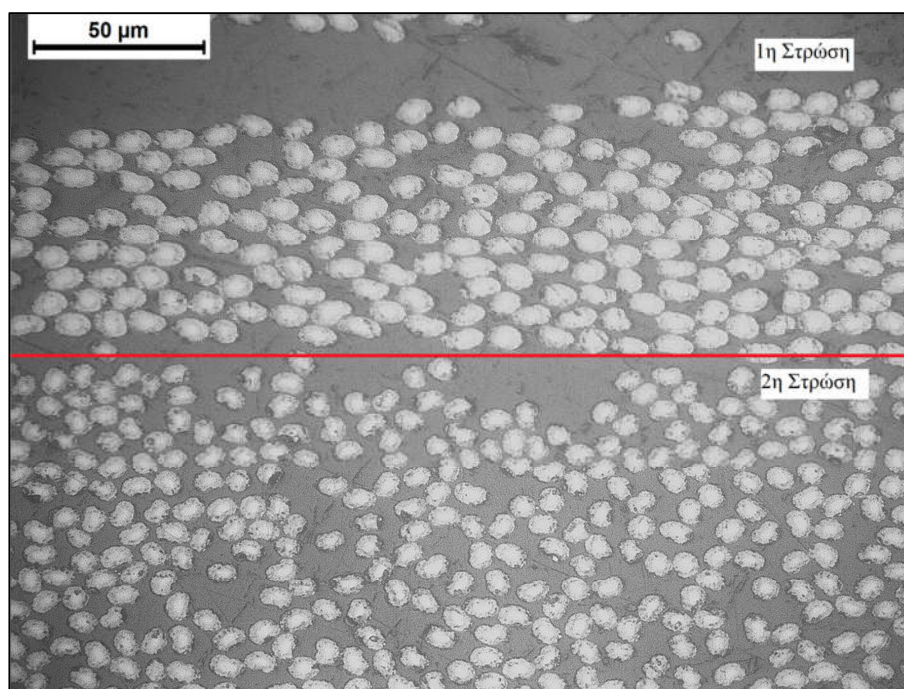
Στον πίνακα 3.8 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα αποτελέσματα για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες των δοκιμίων άνθρακα όπως αυτά προέκυψαν με την εφαρμογή των τριών μεθόδων, καθώς και η απόκλιση μεταξύ κάθε μεθόδου Image Analysis από την μέθοδο Acid Digestion:

Πίνακας 3.8: Σύγκριση μεθόδων προσδιορισμού περιεκτικότητας σε ίνες δοκιμίων carbon

Περιεκτικότητα [V _f]					
Δοκίμιο	Acid Digestion	Areal Method	Απόκλιση	Fiber Counting Method	Απόκλιση
HX	38.12%	39.19%	2.82%	45.47%	19.3%
VX	48.61%	47.33%	-2.65%	58.40%	20.1%

Από τη μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι οι μέθοδοι Acid Digestion και Areal συγκλίνουν ως προς την υπολογιζόμενη τιμή περιεκτικότητας παρουσιάζοντας απόκλιση της τάξεως του 3%. Σε αντίθεση, η μέθοδος fiber counting οδηγεί σε υπερεκτίμηση της περιεκτικότητας σε ποσοστό της τάξης του 20%. Η υψηλή αυτή απόκλιση από τις τιμές των δύο προηγούμενων μεθόδων μπορεί να αποδοθεί στα εξής:

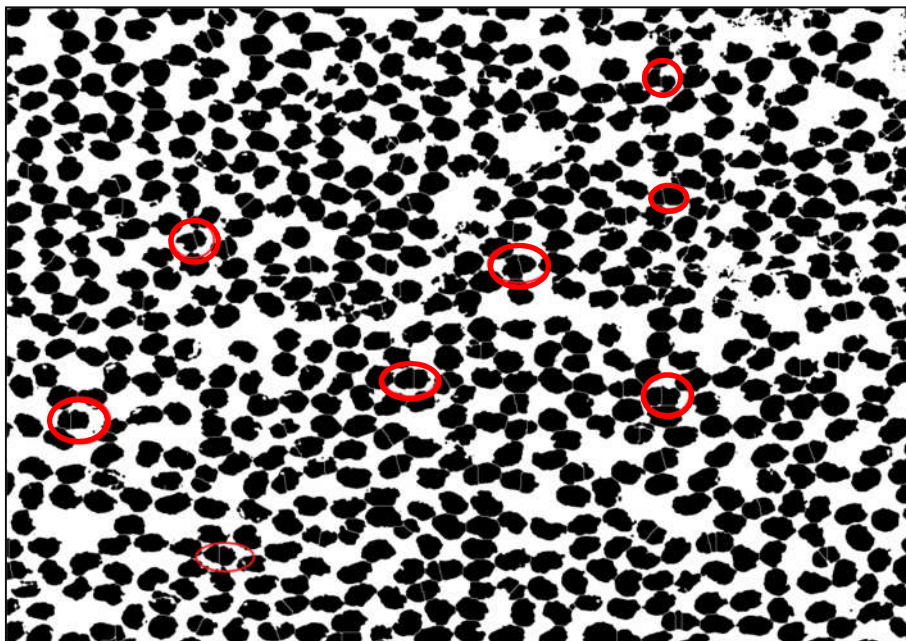
- Η γωνία κοπής των δοκιμίων (γωνία φ σχέσης 3.5) θεωρήθηκε ίση με 45° . Η υπόθεση αυτή, ωστόσο, δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί με σιγουριά. Έτσι η θεώρηση του εμβαδού κάθε ίνας ίση με το εμβαδόν έλλειψης που προκύπτει από την προβολή κυκλικού δίσκου σε επίπεδο, με τη γωνία μεταξύ κυκλικού δίσκου και επιπέδου ίση με 45° , ενδέχεται να συμβάλλει στην υπερεκτίμηση του λόγου εμβαδών έλλειψης προς το εμβαδόν της υπό μελέτη επιφάνειας. Σημειώνεται πως, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο προσανατολισμός των υπό μελέτη σύνθετων είναι $[0^\circ/90^\circ]$, γωνία κοπής ίση με 45° σημαίνει ότι στις υπό μελέτη φωτογραφίες η γεωμετρία των ινών πρέπει θεωρητικά να παρουσιάζει ομοιομορφία, μιας και οι γωνίες πρόσπτωσης των ινών στην εγκάρσια τομή ισούνται με $\pm 45^\circ$. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται παράδειγμα φωτογραφίας που οι ίνες διαδοχικών στρώσεων εμφανίζουν εξαιρετική ανομοιομορφία ως προς τη γεωμετρία. Συγκεκριμένα είναι εμφανής η ύπαρξη δυο διαδοχικών στρώσεων ινών, εκ των οποίων στην πρώτη (άνω στρώση) οι ίνες παρουσιάζουν ελλειπτική μορφή, ενώ στη δεύτερη (κάτω στρώση) παρουσιάζουν κυκλική μορφή.



Σχήμα 3.5: Μικροσκοπική φωτογραφία δοκιμίου HX

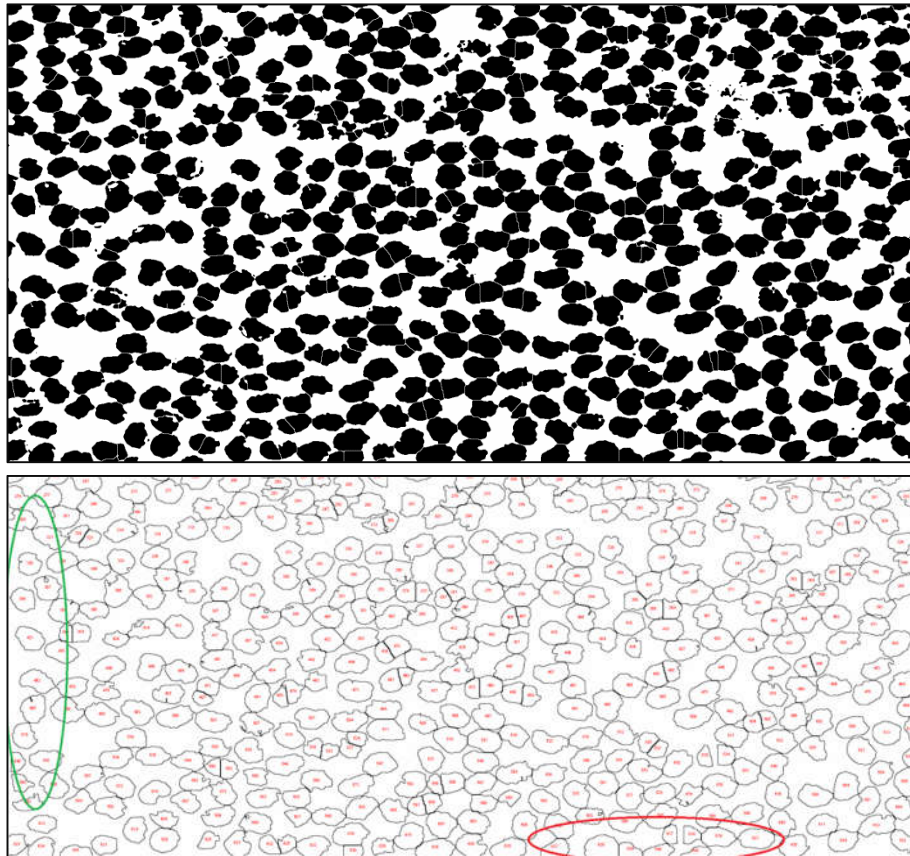
- Κατά την εφαρμογή του αλγορίθμου διαχωρισμού των ενωμένων ινών (watershed separation algorithm) διαπιστώθηκε ότι ακόμη και επιφάνειες που αντιστοιχούν σε μια ενιαία ίνα υπέστησαν διαχωρισμό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο παράγοντας N_f της σχέσης 3.5, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της περιεκτικότητας. Οι εσφαλμένοι αυτοί

διαχωρισμοί επιχειρήθηκαν να εντοπιστούν οπτικά και να διαγραφούν, δίχως ωστόσο να είναι βέβαιη η πλήρης αφαίρεσή τους (σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Εικόνα δοκιμίου VX όπου φαίνονται εσφαλμένοι διαχωρισμοί ενιαίων ινών

- Τέλος αναφέρεται ότι δεν υπήρξε δυνατή η εφαρμογή κάποιου “border kill” αλγορίθμου ώστε να μη ληφθούν υπόψη οι ίνες που βρίσκονται μερικώς στα σύνορα της υπό μελέτη περιοχής, με αποτέλεσμα αυτές να καταμετρώνται ως ολόκληρες ίνες οδηγώντας στην υπερεκτίμηση της περιεκτικότητας. Οι ίνες αυτές επιχειρήθηκε να αφαιρεθούν με την επιλογή ενός κάτω ορίου για το μέγεθος σε pixel των μαύρων περιοχών προς καταμέτρηση (size filter) κίνηση που και πάλι μπορεί να οδηγήσει σε αλλοίωση των αποτελεσμάτων, αυτή τη φορά προς χαμηλότερες τιμές περιεκτικότητας, μιας και η μη καταμέτρηση μιας συνοριακής ίνας σημαίνει ότι αυτή λαμβάνεται ως περιοχή μήτρας από το λογισμικό (σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Παράδειγμα εικόνας όπου φαίνεται η επιτυχής (πράσινη περιοχή) και ανεπιτυχής (κόκκινη περιοχή) αφαίρεση περιθωριακών ινών

3.4 Υπολογισμός περιεκτικότητας σε κενά των δοκιμίων

Με γνωστές πλέον τις πειραματικές τιμές της πυκνότητας των δοκιμίων καθώς και της περιεκτικότητάς τους σε ίνες, είναι δυνατός ο υπολογισμός της κατ'όγκον περιεκτικότητάς τους σε κενά. Για να επιτευχθεί αυτό υπολογίζεται σε πρώτη φάση η θεωρητική τιμή (ρ_c) της πυκνότητας των δοκιμίων με βάση την κατ'όγκον περιεκτικότητά τους σε ενίσχυση και τις πυκνότητες των ινών και της μήτρας όπως καθορίζονται από τον κατασκευαστή, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\rho_c = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot V_m \quad (3.6)$$

όπου:

- ρ_f η πυκνότητα των ινών όπως δίνεται από τον κατασκευαστή
- V_f η κατ'όγκον περιεκτικότητα σε ίνες
- ρ_m η πυκνότητα της μήτρας όπως δίνεται από τον κατασκευαστή
- V_m η κατ'όγκον περιεκτικότητα σε μήτρα ($V_m = 1 - V_f$)

με τα μεγέθη των πυκνοτήτων να εκφράζονται στις ίδιες μονάδες.

Ο υπολογισμός της περιεκτικότητας των δοκιμίων σε κενά (V_v) γίνεται μέσω της σχέσης:

$$V_v = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ce}}{\rho_{ct}} \quad (3.7)$$

όπου:

- ρ_{ct} η θεωρητική τιμή πυκνότητας των δοκιμίων
- ρ_{ce} η πειραματική τιμή πυκνότητας των δοκιμίων

με τα μεγέθη πυκνοτήτων εκφράζονται στις ίδιες μονάδες.

Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στους πίνακες 3.9 – 3.10:

Πίνακας 3.9: Υπολογισμός περιεκτικότητας σε κενά δοκιμίων glass

Πλάκα	ρ_{ce} [g/cm ³]	ρ_f [g/cm ³]	V_f [%]	ρ_m [g/cm ³]	V_m [%]	ρ_{ct} [g/cm ³]	V_v [%]
GHU ₅	1.671	2.62	36.35%	1.158	63.65%	1.689	1.1%
GHU ₁₀	1.708	2.62	38.89%	1.158	61.11%	1.727	1.1%
GHX	1.593	2.62	28.25%	1.158	71.75%	1.571	-1.4%
GVU ₅	1.817	2.62	53.35%	1.158	46.65%	1.938	6.2%
GVU ₁₀	1.914	2.62	54.21%	1.158	45.79%	1.950	1.9%
GVX	1.762	2.62	44.23%	1.158	55.77%	1.805	2.4%

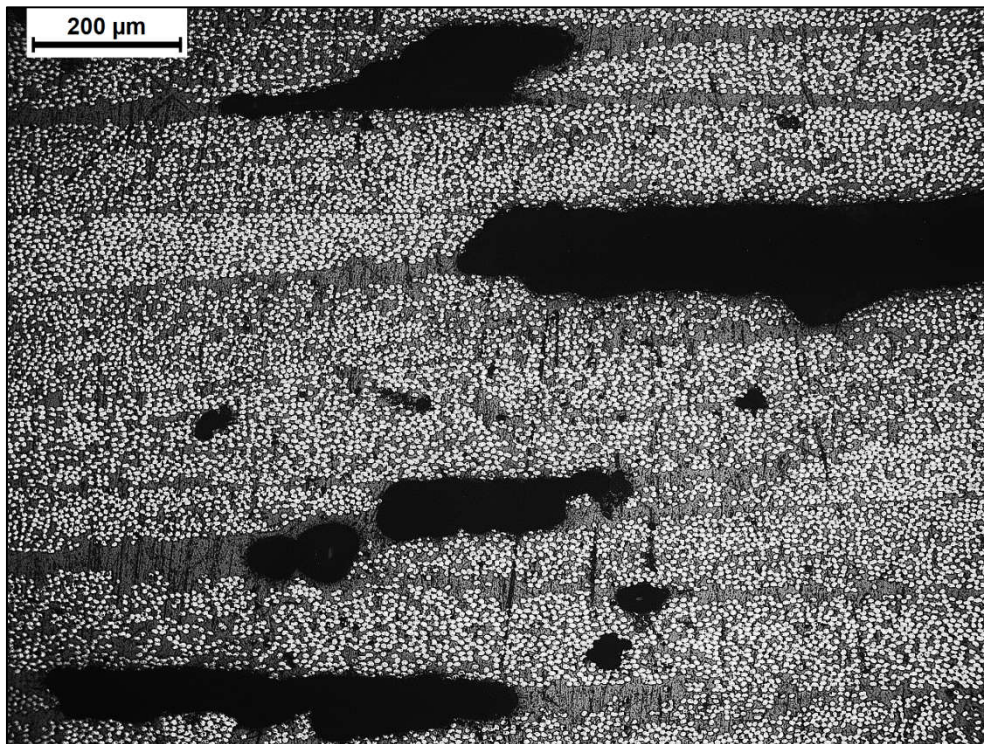
Πίνακας 3.10: Υπολογισμός περιεκτικότητας σε κενά δοκιμίων carbon

Πλάκα	ρ_{ce} [g/cm ³]	ρ_f [g/cm ³]	V_f [%]	ρ_m [g/cm ³]	V_m [%]	ρ_{ct} [g/cm ³]	V_v [%]
CHU ₅	1.345	1.82	34.98%	1.158	65.02%	1.390	3.3%
CHU ₁₀	1.350	1.82	37.10%	1.158	62.90%	1.404	3.8%
CHX	1.369	1.76	38.12%	1.158	61.88%	1.388	1.4%
CVU ₅	1.377	1.82	53.91%	1.158	46.09%	1.515	9.1%
CVU ₁₀	1.377	1.82	52.82%	1.158	47.18%	1.508	8.7%
CVX	1.370	1.76	48.61%	1.158	51.39%	1.451	5.6%

Κατόπιν μελέτης του πίνακα 3.9 προκύπτει ότι για τη σειρά δοκιμίων GHX η περιεκτικότητα σε κενά λαμβάνει αρνητική τιμή. Το αποτέλεσμα αυτό δεν ευσταθεί φυσικά και μπορεί να αποδοθεί σε ανακρίβειες κατά τον πειραματικό προσδιορισμό της πυκνότητας και της περιεκτικότητας σε ίνες της σειράς.

Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια Glass παρουσιάζουν μικρότερη περιεκτικότητα σε κενά από τα δοκίμια Carbon. Για κάθε υλικό ενίσχυσης τα δοκίμια κατασκευασμένα με μέθοδο Hand Lay-up παρουσιάζουν μικρότερη περιεκτικότητα σε κενά από τα δοκίμια κατασκευασμένα με μέθοδο Vacuum Bagging. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να επιβεβαιωθεί

και από τη μικροσκοπική εξέταση των δοκιμίων CHX και CVX όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8:



(a)



(b)

Σχήμα 3.8: Μικροσκοπική φωτογραφία διαξονικού δοκιμίου (a) Vacuum Bagging (b) Hand Lay-up σε τομή 45°

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι πειραματικές δοκιμές για τον υπολογισμό της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) των κατασκευασμένων δοκιμίων καθώς και τα αποτελέσματα αυτών. Σε πρώτη φάση πραγματοποιείται μια σύντομη αναφορά στη διαδικασία των πειραματικών δοκιμών καθώς και σε γενικές παρατηρήσεις που έγιναν στη διάρκεια αυτών. Κατόπιν, παρατίθενται και σχολιάζονται μεμονωμένα τα αποτελέσματα της κάθε σειράς δοκιμίων, ενώ παράλληλα τα αποτελέσματα αυτά υφίστανται την απαραίτητη στατιστική επεξεργασία για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος, επιχειρείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς τις παραμέτρους που τέθηκαν υπό εξέταση στο εδάφιο 2.3. Για κάθε σειρά δοκιμίων παρουσιάζονται τα διαγράμματα δύναμης – βέλους κάμψης όπως καταγράφηκαν κατά τις δοκιμές και οι υπολογισμοί της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση.

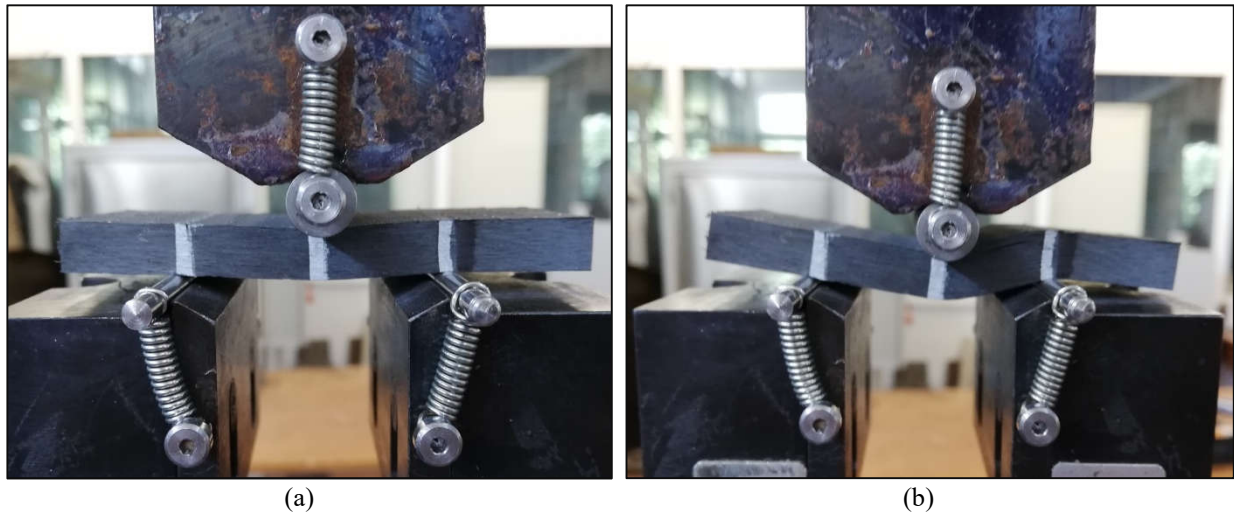
4.2 Διαδικασία πειραματικών δοκιμών

Στο στάδιο αυτό, η προετοιμασία των δοκιμίων έχει ολοκληρωθεί οπότε είναι δυνατή η έναρξη των πειραματικών δοκιμών. Λόγω του όγκου των δοκιμών, τα πειράματα έλαβαν χώρα κατά τη διάρκεια πολλαπλών ημερών. Προκειμένου να αποφευχθεί οποιοδήποτε συστηματικό λάθος κατά την εκπόνηση των πειραμάτων, επιλέχθηκε να υποβληθούν σε δοκιμή αρχικά τρία δοκίμια από κάθε σειρά. Με την επιβεβαίωση της ορθής εξαγωγής αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε και η δοκιμή των εναπομεινάντων δοκιμίων.

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, πολύ σημαντική υπήρξε η σωστή ευθυγράμμιση των δοκιμίων με τα rollers της μηχανής, έτσι ώστε οι στηρίξεις να εφάπτονται στο σημειωμένο ανυποστήρικτο μήκος και το στέλεχος επιβολής του φορτίου στο κέντρο του δοκιμίου. Η απόσταση των στηρίξεων της μηχανής είναι εύκολο να ρυθμιστεί με τη βοήθεια σχετικού μετρητικού οργάνου ώστε να ισούται με το υπολογισμένο ανυποστήρικτο μήκος κάθε σετ δοκιμίων. Η ταχύτητα των δοκιμών ρυθμίστηκε σύμφωνα με τα προβλεπόμενα από το πρότυπο ίση με $1 \text{ mm/min} \pm 0.2 \text{ mm/min}$.

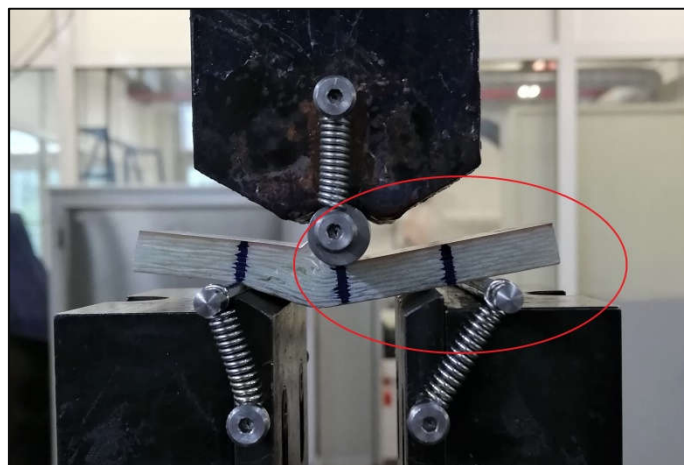
Σχετικά με την παραμόρφωση των δοκιμίων σημειώνονται τα εξής. Κατά την επίτευξη μέγιστου φορτίου (F_M) τα δοκίμια παρουσίασαν συμμετρική μορφή παραμόρφωσης. Με τη περαιτέρω διάδοση της αστοχίας, μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, τα δοκίμια παρουσίασαν συστηματικά μη συμμετρική μορφή παραμόρφωσης (βλ. σχήμα 4.1). Ωστόσο, λόγω του ότι ως φορτίο προσδιορισμού της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση υπήρξε, κατά τις υποδείξεις του προτύπου, το μέγιστο καταγεγραμμένο, κατά τη διάρκεια επίτευξης του οποίου η παραμόρφωση υπήρξε συμμετρική, η μη συμμετρική παραμόρφωση

κατά τα τελευταία στάδια θεωρήθηκε ότι δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα και ότι αποτελεί συνέπεια της διάδοσης της αστοχίας.



Σχήμα 4.1: Δοκίμιο CVU₁₀₄ (a) κατά την επίτευξη μέγιστου φορτίου (b) στο τέλος της δοκιμής

Πριν την πραγματοποίηση των δοκιμών με τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής εργασίας, πραγματοποιήθηκε μια σειρά δοκιμών με προϋπάρχοντα δοκίμια του εργαστηρίου, για σκοπούς εξοικείωσης με τη μηχανή δοκιμής. Τα δοκίμια αυτά, σε συμφωνία με τις επιταγές του προτύπου, τοποθετήθηκαν αρχικά με την πιο τραχιά επιφάνεια τους σε επαφή με τις στηρίξεις της δοκιμής. Στη διάρκεια των δοκιμών εξοικείωσης, παρατηρήθηκε ότι κατά τα τελευταία στάδια του πειράματος, αρκετά μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, λόγω των υψηλών παραμορφώσεων των δοκιμίων, οι στηρίξεις της μηχανής μετακινούνται από τη προβλεπόμενη από το υπολογισμένο ανυποστήρικτο μήκος θέση τους, οδηγώντας σε αλλοίωση των λαμβανόμενων τιμών (σχήμα 4.2). Το φαινόμενο αυτό φάνηκε να περιορίζεται με την επιλογή της πιο λείας επιφάνειας για επαφή με τις στηρίξεις της μηχανής. Συνεπώς, από κάθε σειρά δοκιμών επιλέχθηκε ένα μόλις δοκίμιο να τοποθετηθεί με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις, ενώ τα υπόλοιπα δοκίμια δοκιμάστηκαν με τη λεία επιφάνεια. Στην ανάλυση που ακολουθεί σημειώνεται το σχετικό δοκίμιο κάθε σειράς.



Σχήμα 4.2: Μετακίνηση roller σε δοκίμιο εξάσκησης

Τα μεγέθη που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής είναι η δύναμη που επιβάλλει το στέλεχος φόρτωσης καθώς και το βέλος κάμψης, ενώ δεν απαιτήθηκε η τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρων. Η συχνότητα λήψης μετρήσεων τέθηκε στις 2 καταγραφές ανά δευτερόλεπτο, έτσι ώστε να μην προκύψει μεγάλος όγκος δεδομένων. Η γεωμετρία των στηρίξεων και του στελέχους φόρτισης υπήρξε η πρότυπη όπως περιγράφεται στο εδάφιο 2.2.6 (ακτίνα του στελέχους φόρτωσης r_1 ίση με $5 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$ και των εδράσεων r_2 ίση με $2 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$).

4.3 Στατιστική ανάλυση αποτελεσμάτων

Γνωρίζοντας το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει κάθε δοκίμιο, είναι δυνατός ο υπολογισμός της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση μέσω της εξ.(2.2) εδάφιο 2.2.3. Η παρουσίαση των τιμών αυτών συνοδεύεται από την κατάλληλη στατιστική τους επεξεργασία. Η ανάλυση αυτή, πραγματοποιήθηκε με βάση τις υποδείξεις του ASTM D 2344. Το πρότυπο αυτό αποτελεί το αμερικανικό ανάλογο του ISO-14130. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, για κάθε σειρά δοκιμών υπολογίζονται:

- ο αριθμητικός μέσος \bar{x} σύμφωνα με την εξ. 4.1:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (4.1)$$

- η τυπική απόκλιση s_{n-1} σύμφωνα με την εξ. 4.2:

$$s_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2 - n(\bar{x})^2}{n-1}} \quad (4.2)$$

- ο (επί τοις εκατό) συντελεστής διακύμανσης CV σύμφωνα με την εξ. 4.3:

$$CV = 100 \cdot \frac{s_{n-1}}{\bar{x}} \quad (4.3)$$

Όπου:

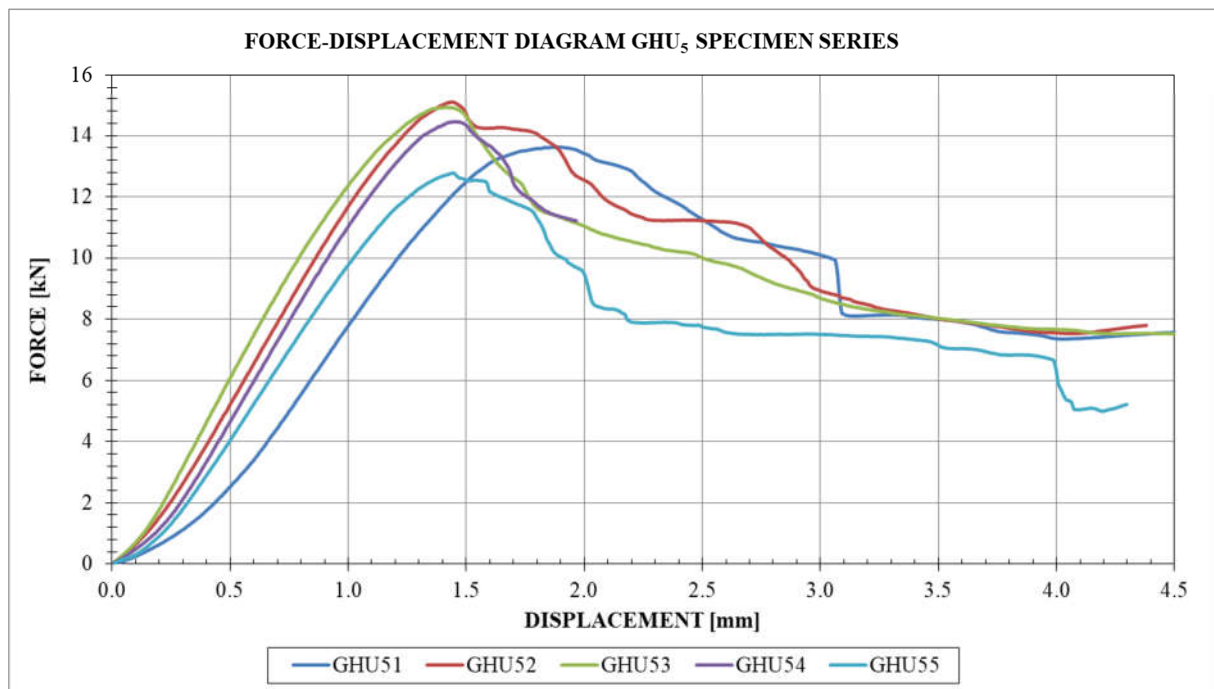
- n ο αριθμός των δοκιμών
- x_i η υπό εξέταση ποσότητα (στην προκειμένη η τάση αστοχίας από διαστρωματική διάτμηση)

Τα δοκίμια κάθε σειράς που εξαιρέθηκαν από τη στατιστική ανάλυση, καθώς και ο λόγος απόρριψής τους, σημειώνονται στο σχετικό εδάφιο.

4.4 Αποτελέσματα δοκιμών με ίνες γυαλιού

4.4.1 Σειρά δοκιμών GHU₅

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up με τη χρήση 11 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος G600U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 68.50$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 34.06$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 6.80$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 34.11$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 5 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμών της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.3:



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια GHU₅

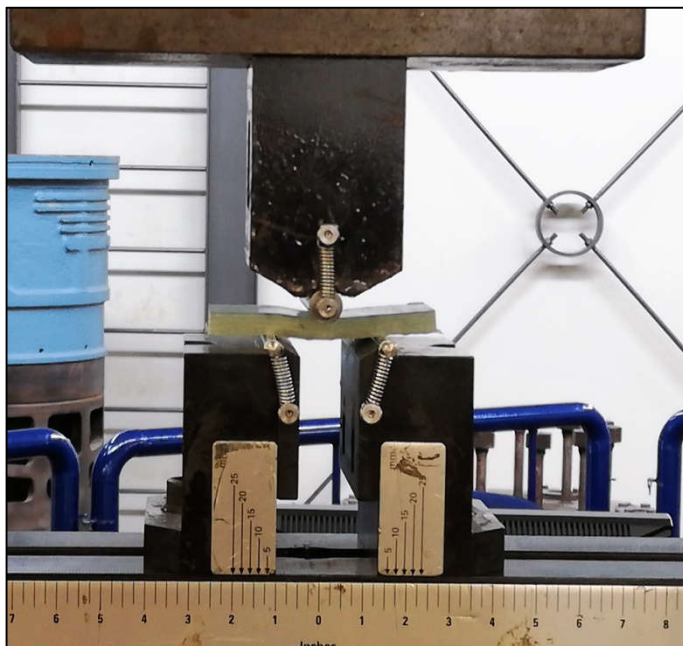
Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GHU₅:

Πίνακας 4.1: Τιμές αντοχής δοκιμών GHU₅

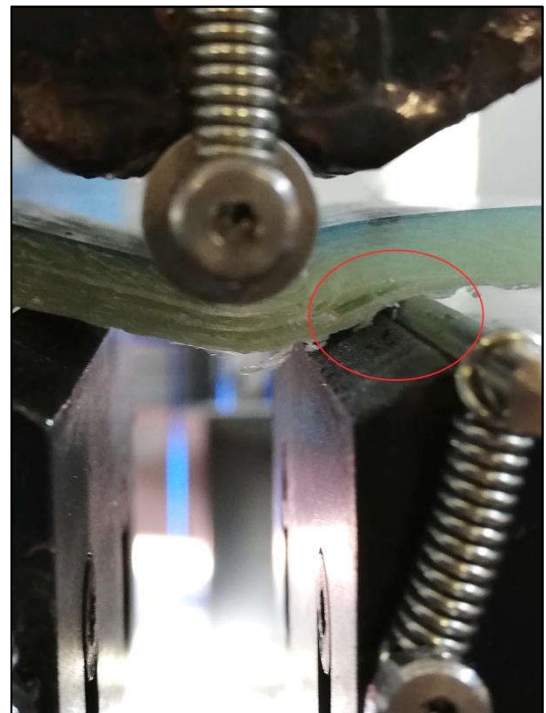
Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F_M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F_M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος ISS [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης	
GHU ₅	GHU ₅ 1	13.620	14.175	44.070	45.825	1.354	2.955
	GHU ₅ 2	15.096		46.393			
	GHU ₅ 3	14.925		47.467			
	GHU ₅ 4	14.454		46.349			
	GHU ₅ 5	12.778		44.844			

Παρατηρήσεις:

- Τα δοκίμια GHU₅₂, GHU₅₃ και GHU₅₄ παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς την ακαμψία και το μέγιστο φορτίο
- Στο δοκίμιο GHU₅₄ η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο GHU₅₅ τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων παρατηρήθηκε **μόνο** κοντά στις στηρίξεις του δοκιμίου (σχήμα 4.4)



(a)

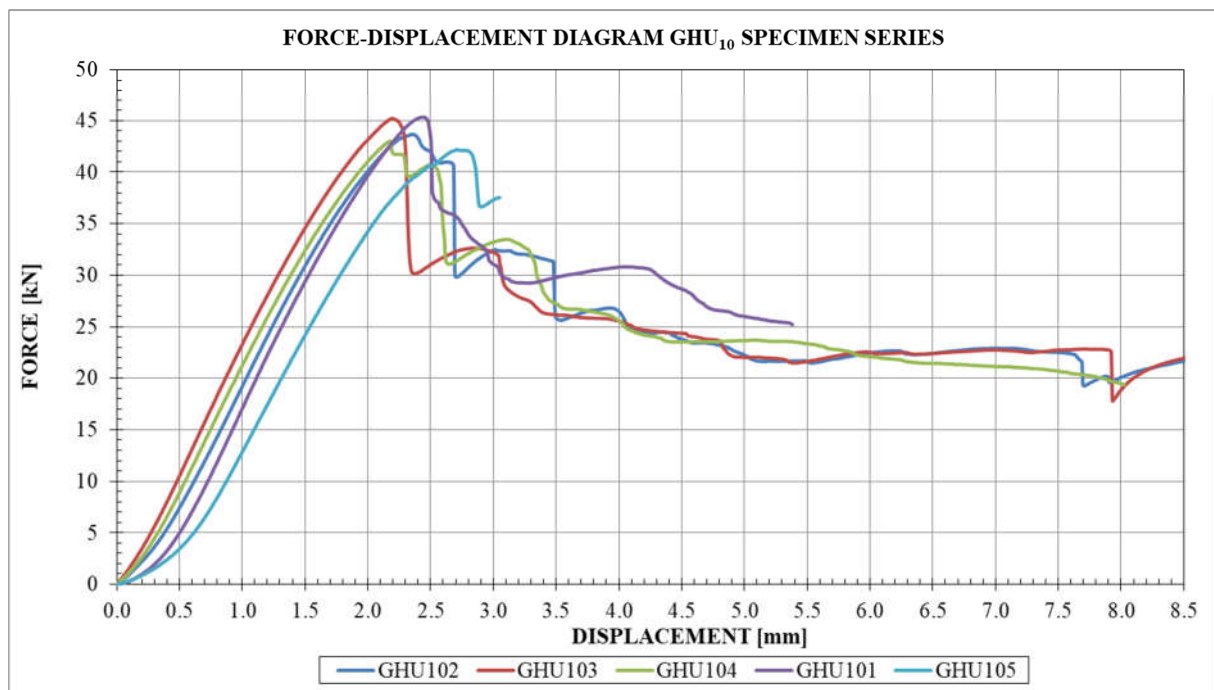


(b)

Σχήμα 4.4: (a) Βέλος κάμψης δοκιμίου GHU₅₄ (b) τοπικός αποχωρισμός στρώσεων δοκιμίου GHU₅₁ κατά την επιβολή του φορτίου

4.4.2 Σειρά δοκιμών GHU₁₀

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up με τη χρήση 22 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος G600U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 123.34$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 59.96$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 12.83$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 61.93$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 5 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμών της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.5:



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια GHU₁₀

Στον πίνακα 4.2 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GHU₁₀:

Πίνακας 4.2: Τιμές αντοχής δοκιμών GHU₁₀

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F _M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F _M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης
GHU ₁₀	GHU ₁₀₁	45.334	43.673	42.773	0.553	1.294
	GHU ₁₀₂	43.680	42.203			
	GHU ₁₀₃	45.206	42.796			
	GHU ₁₀₄	42.984	42.477			
	GHU ₁₀₅	42.169	42.717			

Παρατηρήσεις:

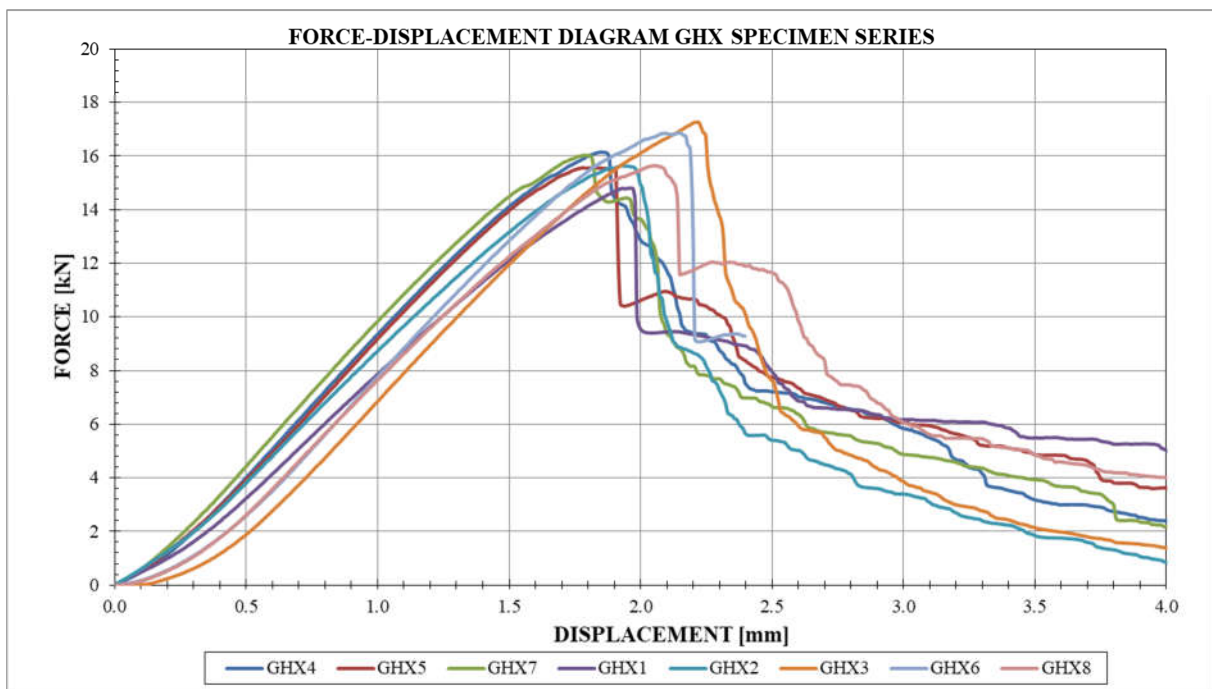
- Τα δοκίμια GHU₁₀₁, GHU₁₀₂, GHU₁₀₃ και GHU₁₀₄ παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς την ακαμψία και το μέγιστο φορτίο
- Την επίτευξη μέγιστου φορτίου ακολουθεί απότομη πτώση της ασκούμενης δύναμης
- Στο δοκίμιο GHU₁₀₅ η δοκιμή τερματίστηκε πρόωρα, ενώ το ίδιο δοκίμιο τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M, μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων παρατηρήθηκε **μόνο** μεταξύ στήριξης και στελέχους επιβολής φορτίου (σχήμα 4.6)



Σχήμα 4.6: Λεπτομέρεια όπου φαίνεται ο τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων του δοκιμίου GHU₁₀₂

4.4.3 Σειρά δοκιμών GHX

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up με τη χρήση 20 στρώσεων διαξονικού υφάσματος G300X. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 81.50$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 40.91$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 7.79$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 40.20$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.7:



Σχήμα 4.7: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια GHX

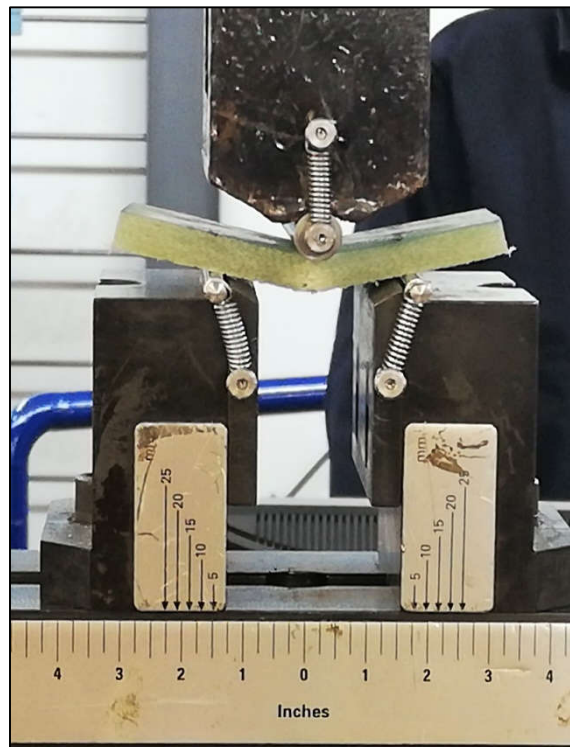
Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GHX:

Πίνακας 4.3: Τιμές αντοχής δοκιμίων GHX

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F_M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F_M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης
GHX	GHX1	14.802	36.786	37.645	0.807	2.144
	GHX2	15.651	37.823			
	GHX3	17.257	38.657			
	GHX4	16.142	37.293			
	GHX5	15.560	36.340			
	GHX6	16.863	38.407			
	GHX7	16.029	37.609			
	GHX8	15.645	38.245			

Παρατηρήσεις:

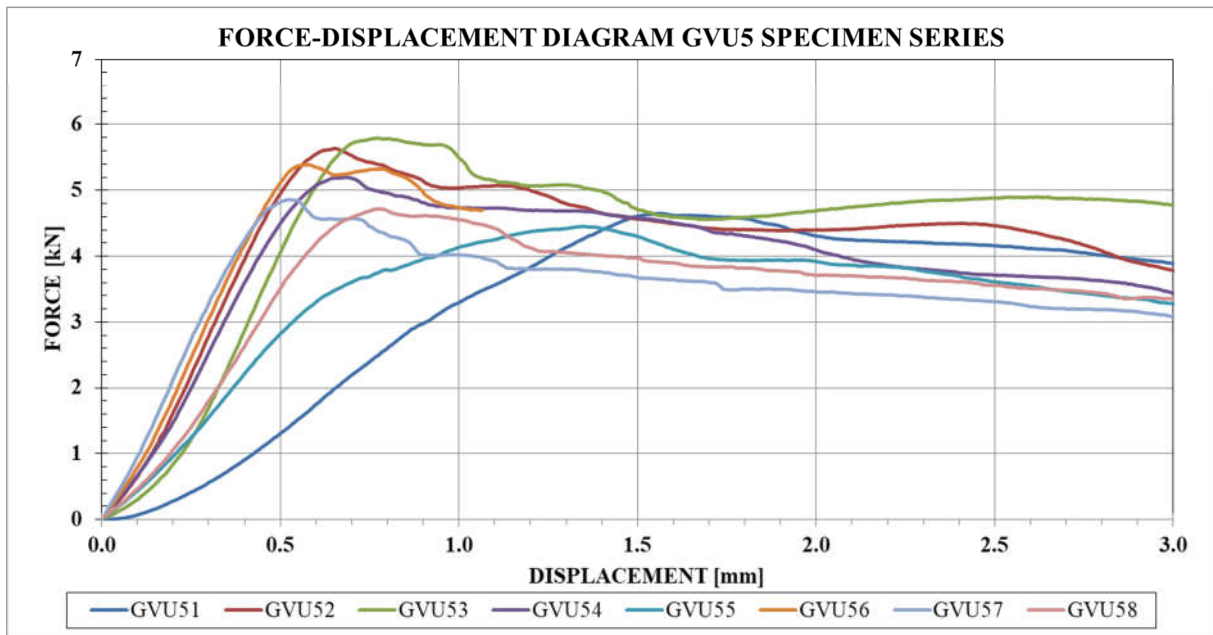
- Τα δοκίμια GHX1/2/4/5/7 παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς την ακαμψία και το μέγιστο φορτίο
- Την επίτευξη μέγιστου φορτίου ακολουθεί απότομη πτώση της ασκούμενης δύναμης
- Στο δοκίμιο GHX6 η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο GHX8 τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8 είναι ο εφελκυσμός (c) του σχήματος 2.3 (μη αποδεκτή μορφή)
- Δεν παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων.



Σχήμα 4.8: Το δοκίμιο GHX2 κατά τη θραύση του

4.4.4 Σειρά δοκιμών GVU₅

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Vacuum Bagging με τη χρήση 11 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος G600U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 47.68$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 24.55$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 4.63$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 23.85$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμών της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.9:



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια GVU₅

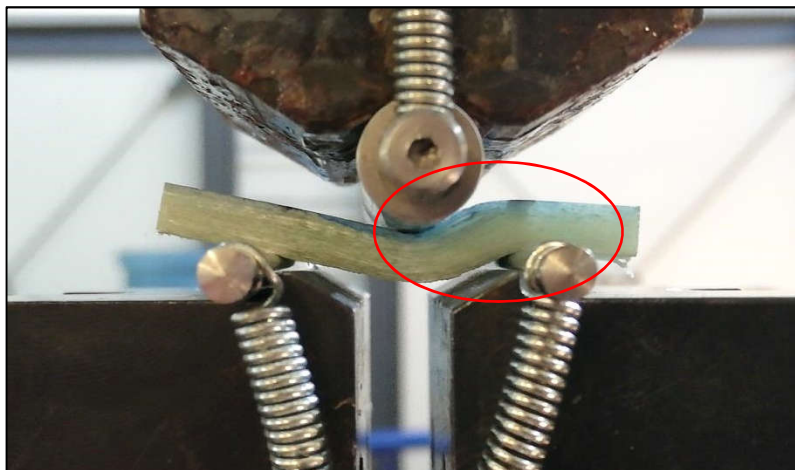
Στον πίνακα 4.4 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GVU₅:

Πίνακας 4.4: Τιμές αντοχής δοκιμών GVU₅

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F_M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F_M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης
GVU ₅ 1	4.651	5.265	-	34.154	2.390	6.997
GVU ₅ 2	5.635		37.537			
GVU ₅ 3	5.795		36.842			
GVU ₅ 4	5.198		34.396			
GVU ₅ 5	4.454		-			
GVU ₅ 6	5.389		34.252			
GVU ₅ 7	4.858		31.529			
GVU ₅ 8	4.717		30.367			

Παρατηρήσεις:

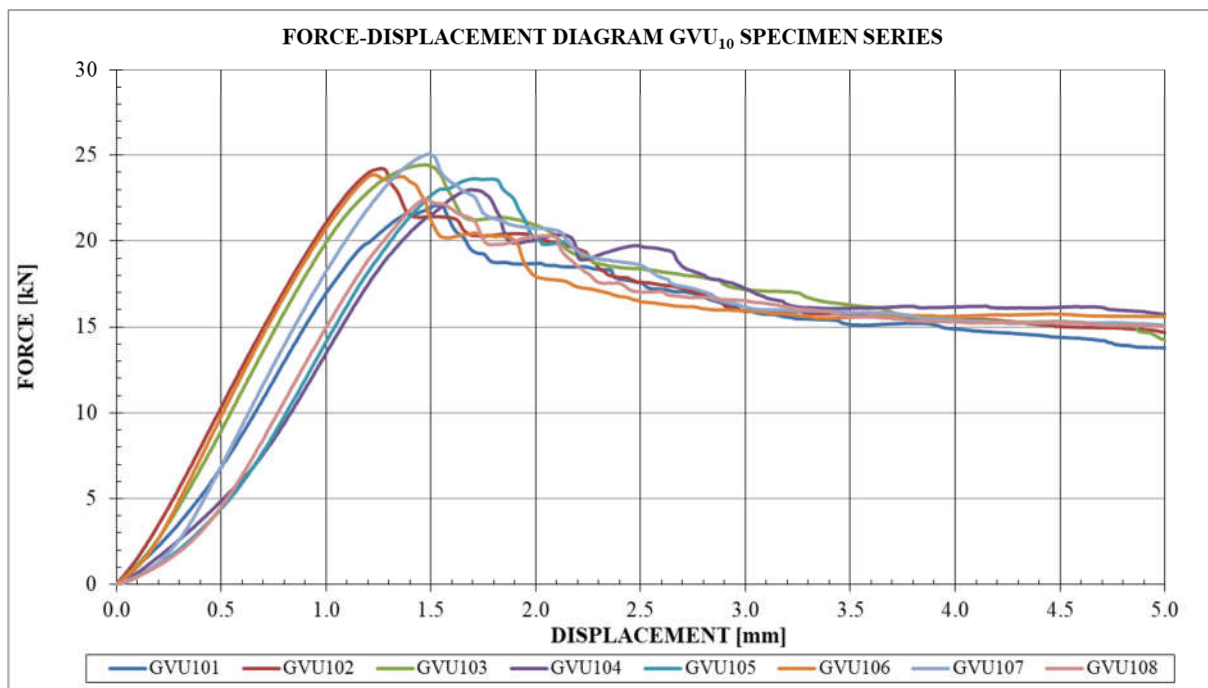
- Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια δεν παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα με ιδιαίτερη έμφαση να πρέπει να δοθεί στις αποκλίσεις που παρουσιάζουν τα δοκίμια GVU₅₁ και GVU₅₅. Μια πιθανή αιτία της απόκλισης αυτής μπορεί να βρεθεί με προσεκτική μελέτη του πίνακα 2.18 όπου αναγράφονται οι λόγοι των κύριων διαστάσεων των δοκιμίων. Όπως προκύπτει από τον πίνακα αυτό, τα εν λόγω δοκίμια παρουσιάζουν παρέκκλιση των λόγων των κύριων διαστάσεων από τις προδιαγραφόμενες τιμές. Συγκεκριμένα, ο λόγος μήκους προς πάχους (l/h) παρουσιάζει τιμή κοντά στο έντεκα έναντι του δέκα που ορίζεται από το πρότυπο, ενώ ο λόγος πλάτους (b/h) προς πάχος ξεπερνά την τιμή έξι έναντι πέντε που θα έπρεπε να είναι κανονικά. Αύξηση παρουσιάζει και ο λόγος ανυποστήρικτου μήκους προς πάχος (L/h). Για το λόγο αυτό τα συγκεκριμένα δοκίμια δεν λήφθηκαν υπόψη κατά τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Στο δοκίμιο GVU₅₆ η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο GVU₅₇ τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M, μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε ελαφρύς τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων (σχήμα 4.10)



Σχήμα 4.10: Πλαστική παραμόρφωση δοκιμίου GVU₅₄ πριν τη διακοπή της δοκιμής

4.4.5 Σειρά δοκιμίων GVU₁₀

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Vacuum Bagging με τη χρήση 22 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος G600U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 93.03$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 47.10$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 9.60$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 47.21$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 5 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.11:



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια GUV₁₀

Στον πίνακα 4.5 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GUV₁₀:

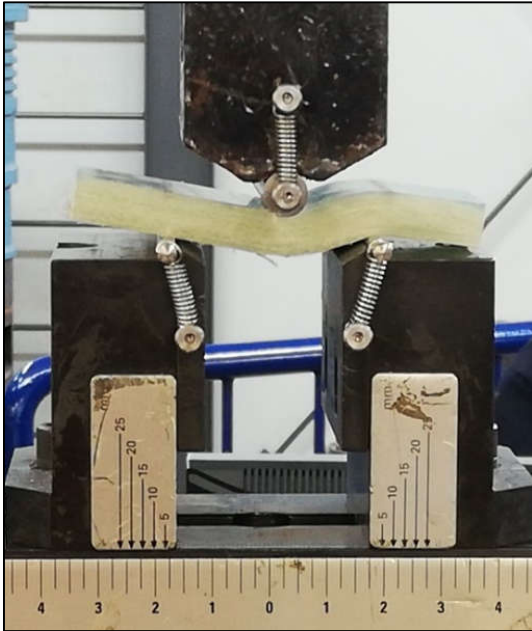
Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής δοκιμών GUV₁₀

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F _M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F _M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης	
U ₁₀	GVU ₁₀₁	22.076		37.492	39.118	1.079	2.759
	GVU ₁₀₂	24.231	23.597	40.315			
	GVU ₁₀₃	24.441		39.007			
	GVU ₁₀₄	22.999		38.445			
	GVU ₁₀₅	23.639		38.943			
	GVU ₁₀₆	23.870		39.498			
	GVU ₁₀₇	25.056		40.833			
	GVU ₁₀₈	22.467		38.413			

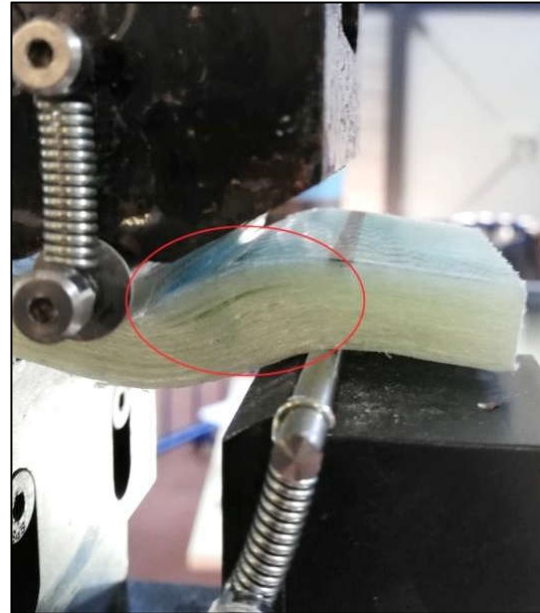
Παρατηρήσεις:

- Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο επιτεύξιμο φορτίο, ενώ η ακαμψία «ταλαντώνεται» γύρω από μια σταθερή τιμή.
- Στο δοκίμιο GUV₁₀₅ η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο GUV₁₀₄ τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις

- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.12.a είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων κοντά στις στηρίξεις του δοκιμίου (βλ. σχήμα 4.12.b)



(a)

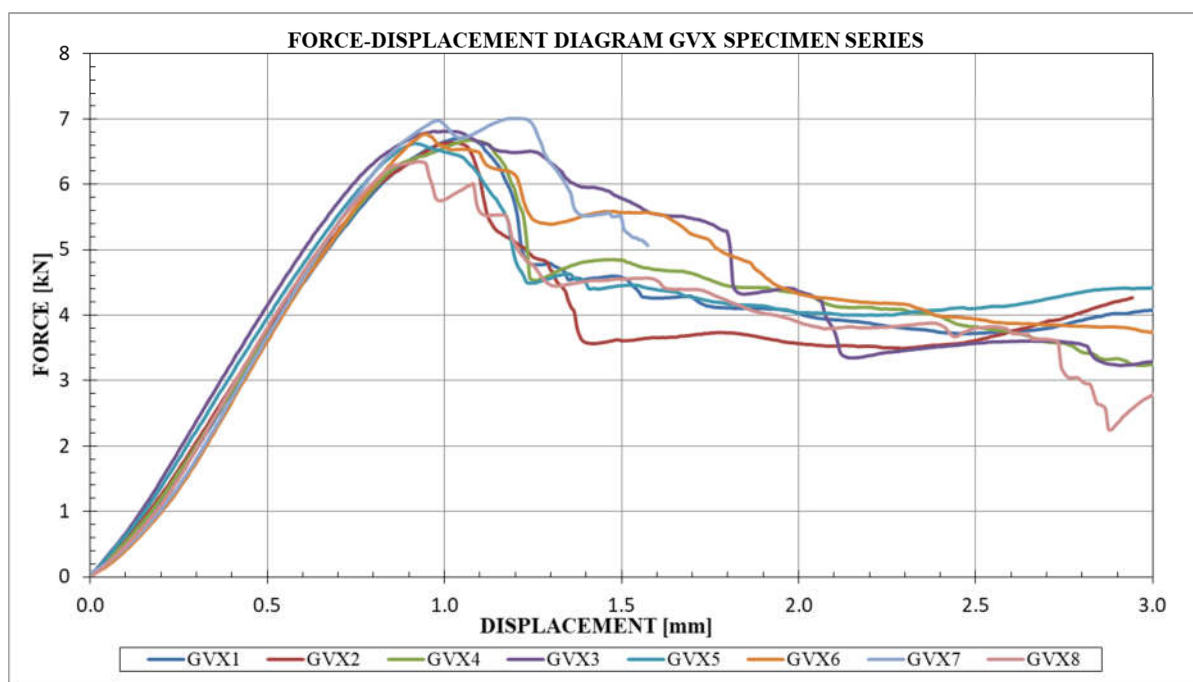


(b)

Σχήμα 4.12: (a) Πλαστική Παραμόρφωση δοκιμίου GVU_{106} (b) Τοπικός αποχωρισμός στρώσεων δοκιμίου GVU_{103}

4.4.6 Σειρά δοκιμών GVX

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Vacuum Bagging με τη χρήση 20 στρώσεων διαξονικού υφάσματος G300X. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 52.71$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 27.00$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 5.07$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 26.24$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.13:



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια GVX

Στον πίνακα 4.6 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GVX:

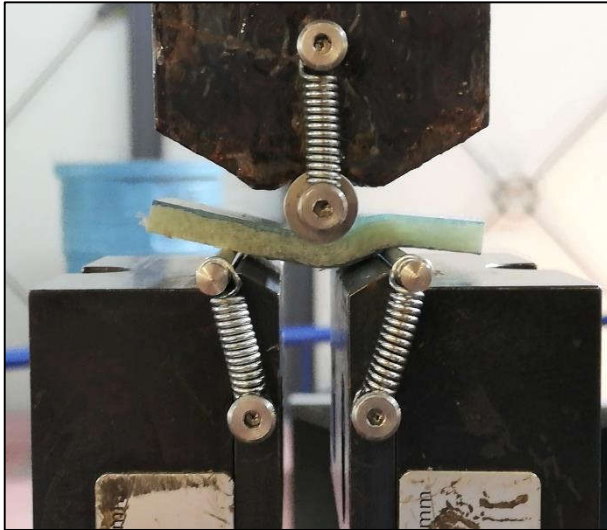
Πίνακας 4.6: Τιμές αντοχής δοκιμίων GVX

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F_M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F_M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης	
X	GVX1	6.711	6.693	37.659	36.652	1.302	3.554
	GVX2	6.634		37.242			
	GVX3	6.811		36.685			
	GVX4	6.676		36.679			
	GVX5	6.623		35.715			
	GVX6	6.768		37.575			
	GVX7	6.972		37.759			
	GVX8	6.345		33.903			

Παρατηρήσεις:

- Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο επιτεύξιμο φορτίο και την ακαμψία, με εξαίρεση τα δοκίμια GVX7 που εμφανίζει δυο διαδοχικά μέγιστα φορτία με το πρώτο να υπολείπεται του δεύτερου
- Αρκετά φανερά είναι η εμφάνιση κλιμακωτών «πλατό» καθένα από τα οποία μπορεί να συνδεθεί με την αστοχία μιας νέας στρώσης.
- Στο δοκίμιο GVX7 η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο GVX8 τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις

- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.14.a είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων μεταξύ στηρίξεων και στελέχους επιβολής φόρτωσης (βλ. σχήμα 4.14.b)



(a)



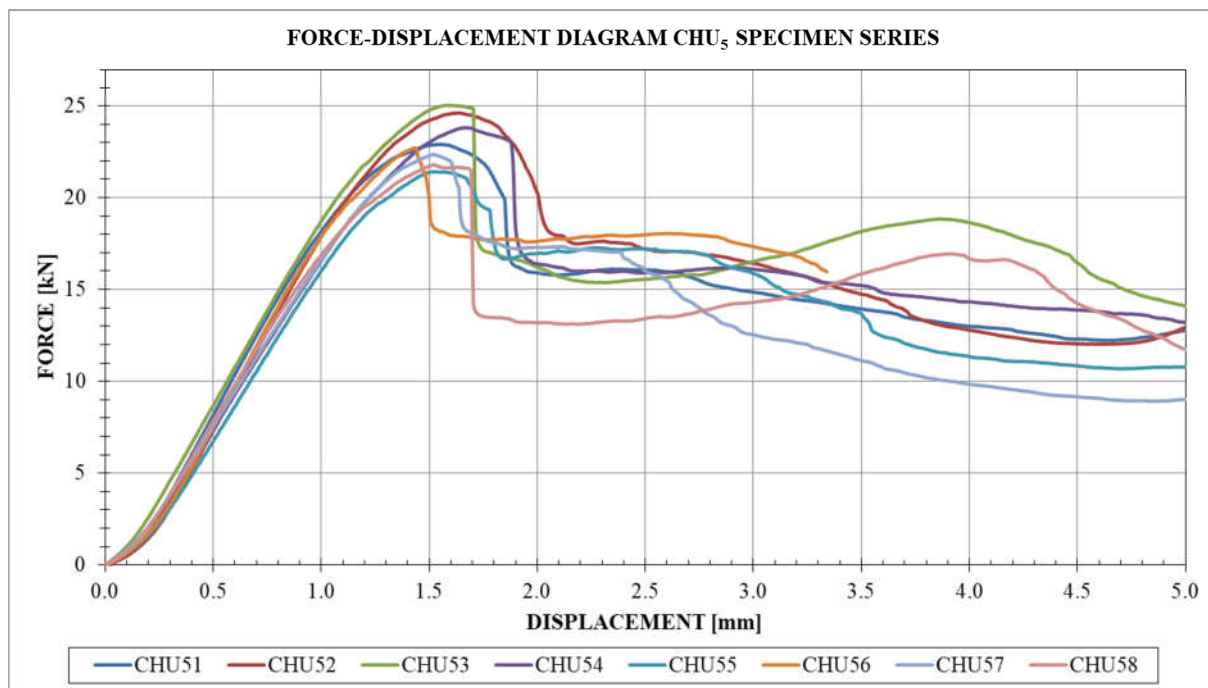
(b)

Σχήμα 4.14: (a) Πλαστική Παραμόρφωση δοκιμίου GVX6 (b) Τοπικός αποχωρισμός στρώσεων δοκιμίου GVX8

4.5 Αποτελέσματα δοκιμίων με ίνες άνθρακα

4.5.1 Σειρά δοκιμίων CHU₅

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up με τη χρήση 17 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος C322U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 78.10$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 39.42$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 8.08$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 39.63$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.15:



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια CHU₅

Στον πίνακα 4.7 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς CHU₅:

Πίνακας 4.7: Τιμές αντοχής δοκιμών CHU₅

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F _M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F _M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης
CHU ₅	CHU ₅ 1	22.902	54.626	54.280	1.797	3.311
	CHU ₅ 2	24.606	56.330			
	CHU ₅ 3	25.017	55.774			
	CHU ₅ 4	23.800	56.620			
	CHU ₅ 5	21.404	52.180			
	CHU ₅ 6	22.702	52.366			
	CHU ₅ 7	22.355	53.011			
	CHU ₅ 8	21.780	53.333			

Παρατηρήσεις:

- Τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο φορτίο και την ακαμψία, ενώ η συμπεριφορά τους διαφοροποιείται μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου.
- Την επίτευξη μέγιστου φορτίου ακολουθεί απότομη πτώση της ασκούμενης δύναμης
- Στο δοκίμιο CHU₅6 η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο CHU₅8 τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις.

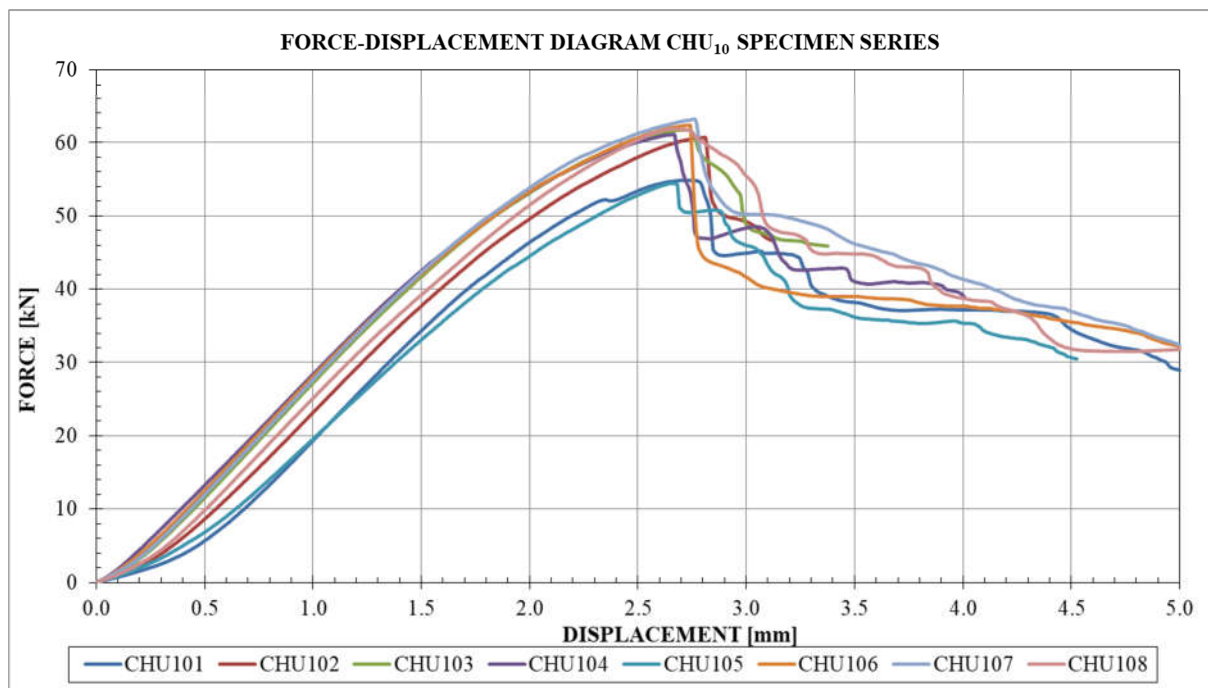
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.16a είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων κοντά στις στηρίξεις (βλ. σχήμα 4.16.b)



Σχήμα 4.16: Δοκίμιο CHU₅₄ (a) τη στιγμή επίτευξης μέγιστου φορτίου (b) στο τέλος της δοκιμής

4.5.2 Σειρά δοκιμών CHU₁₀

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up με τη χρήση 28 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος C322U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 125.16$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 62.85$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 13.43$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 64.20$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.17:



Σχήμα 4.17: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια CHU₁₀

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GHU₁₀:

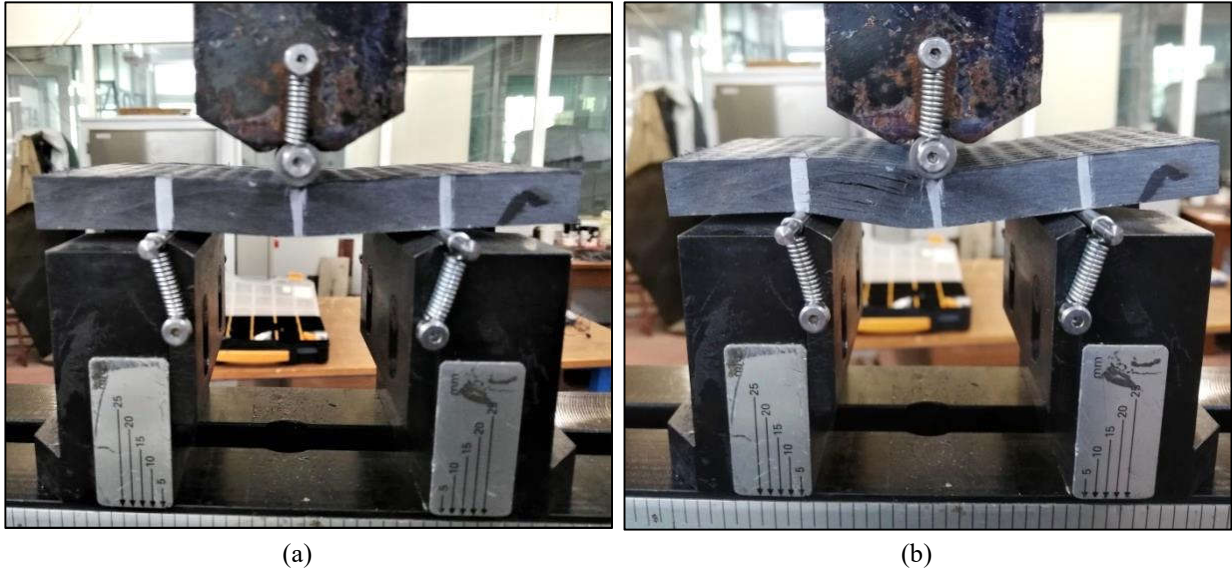
Πίνακας 4. 8: Τιμές αντοχής δοκιμών CHU₁₀

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F _M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F _M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης	
CHU ₁₀	CHU ₁₀ 1	54.858	60.034	50.585	53.303	1.394	2.614
	CHU ₁₀ 2	60.679		54.358			
	CHU ₁₀ 3	61.755		53.864			
	CHU ₁₀ 4	61.098		53.612			
	CHU ₁₀ 5	54.445		52.478			
	CHU ₁₀ 6	62.373		54.851			
	CHU ₁₀ 7	63.199		54.235			
	CHU ₁₀ 8	61.867		52.444			

Παρατηρήσεις:

- Τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο φορτίο και την ακαμψία.
- Την επίτευξη μέγιστου φορτίου ακολουθεί απότομη πτώση της ασκούμενης δύναμης
- Στο δοκίμιο CHU₁₀3 η δοκιμή τερματίστηκε αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο CHU₁₀8 τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις

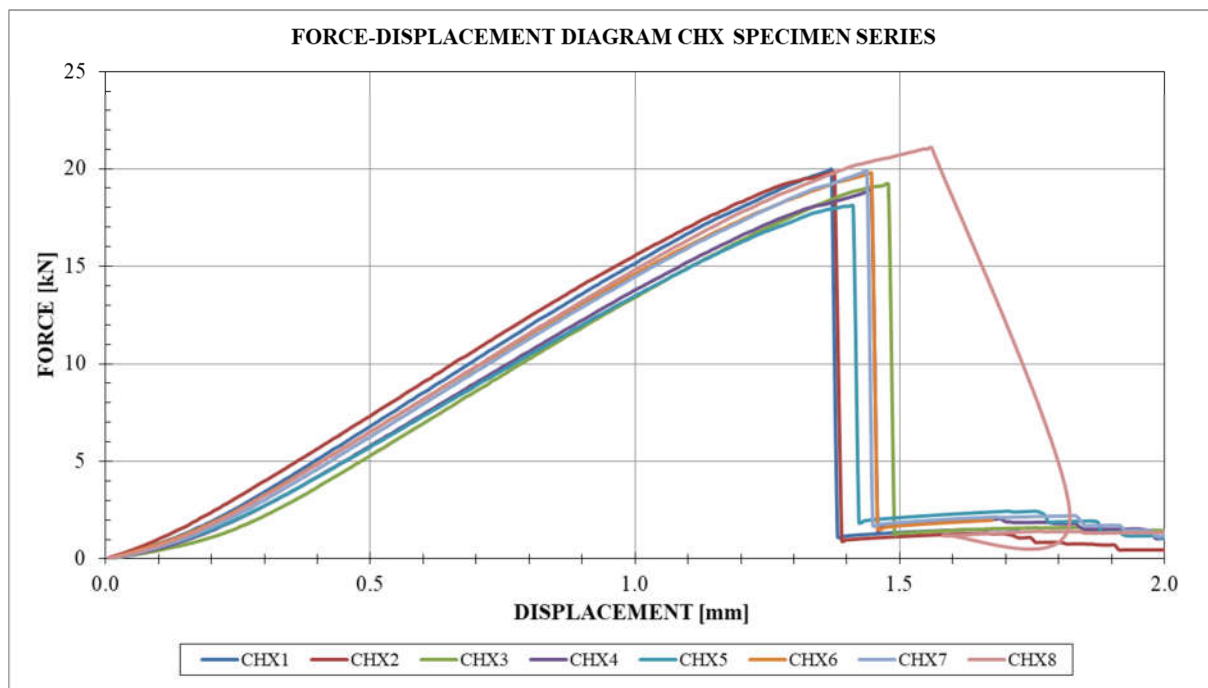
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.18.a είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων κοντά στις στηρίξεις (βλ. σχήμα 4.18.b)



Σχήμα 4.18: Δοκίμιο CHU₁₀₁ (a) τη στιγμή επίτευξης μέγιστου φορτίου (b) στο τέλος της δοκιμής

4.5.3 Σειρά δοκιμίων CHX

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Hand Lay-up με τη χρήση 25 στρώσεων διαξονικού υφάσματος C210T. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 78.07$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 39.06$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 7.57$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 38.65$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.19:



Σχήμα 4.19: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια CHX

Στον πίνακα 4.9 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς GHX:

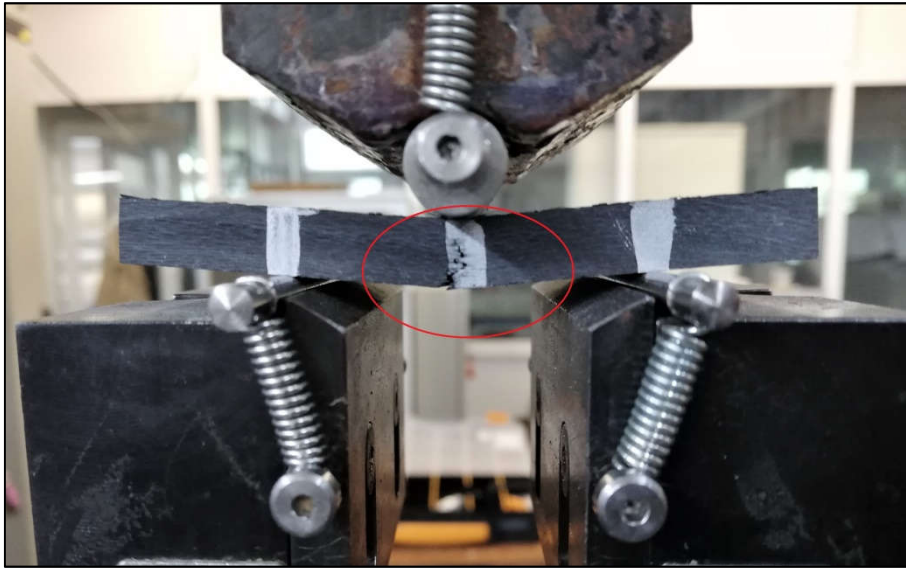
Πίνακας 4.9: Τιμές αντοχής δοκιμίων CHX

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F_M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F_M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διανύμανσης
CHX	CHX1	19.954	49.281	49.294	0.800	1.624
	CHX2	19.832	49.036			
	CHX3	19.196	49.378			
	CHX4	18.894	48.900			
	CHX5	18.082	47.982			
	CHX6	19.756	50.471			
	CHX7	19.876	50.008			
	CHX8	21.067	-			

Παρατηρήσεις:

- Τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο φορτίο και την ακαμψία, με εξαίρεση το δοκίμιο CHX8. Αίτιο φαίνεται να είναι η τοποθέτηση του δοκιμίου έτσι ώστε η τραχιά επιφάνεια του να βρίσκεται σε επαφή με τις στηρίξεις, γεγονός που οδήγησε στην μετακίνηση του roller των στηρίξεων αλλοιώνοντας τη μορφή της καμπύλης. Για το λόγο αυτό το συγκεκριμένο δοκίμιο δεν λήφθηκε υπόψη κατά τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

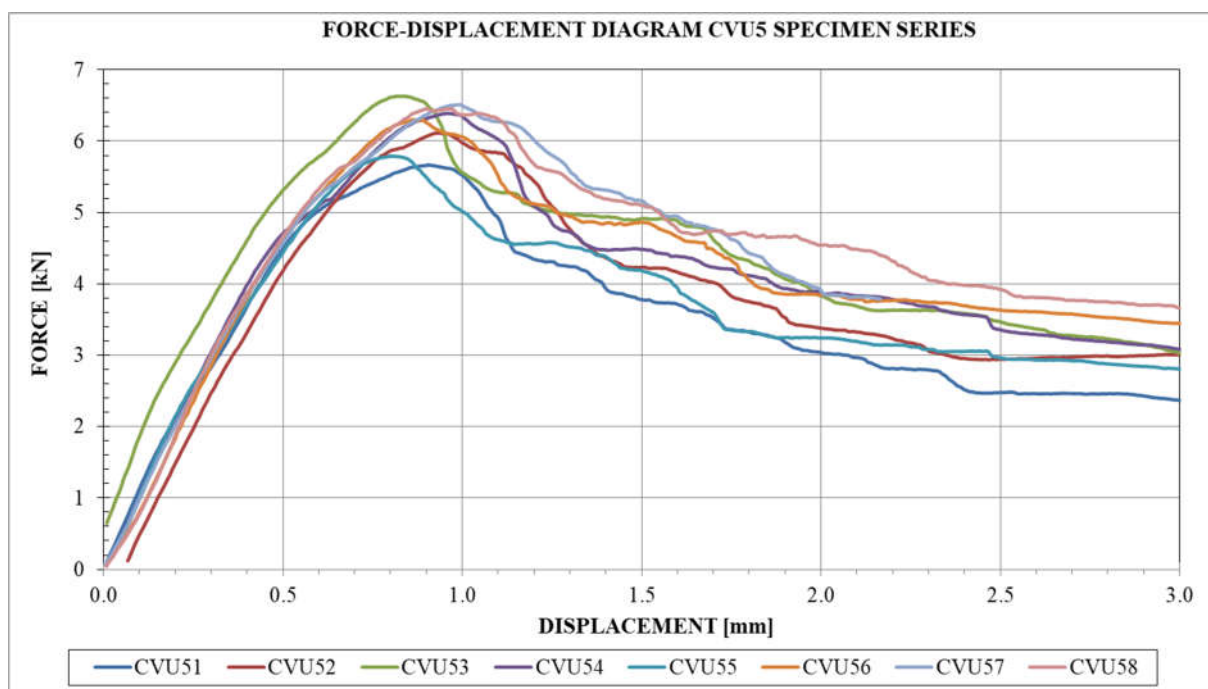
- Σε αντίθεση με τις προηγούμενες σειρές δοκιμίων, τα δοκίμια της εν λόγω σειράς δεν υπέστησαν πλαστική παραμόρφωση πριν την αστοχία τους, εμφανίζοντας εξαιρετικά ψαθυρή συμπεριφορά.
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.20 είναι ο εφελκυσμός (c) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Δεν παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων



Σχήμα 4.20: Αστοχία δοκιμίου CHX7

4.5.4 Σειρά δοκιμίων CVU₅

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Vacuum Bagging 17 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος C322U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 52.53 \text{ mm}$, μέσο πλάτος $b_{av} = 25.66 \text{ mm}$, μέσο πάχος $h_{av} = 5.13 \text{ mm}$ και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 25.85 \text{ mm}$. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.21:



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα Δόναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια CVU₅

Στον πίνακα 4.10 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς CVU₅:

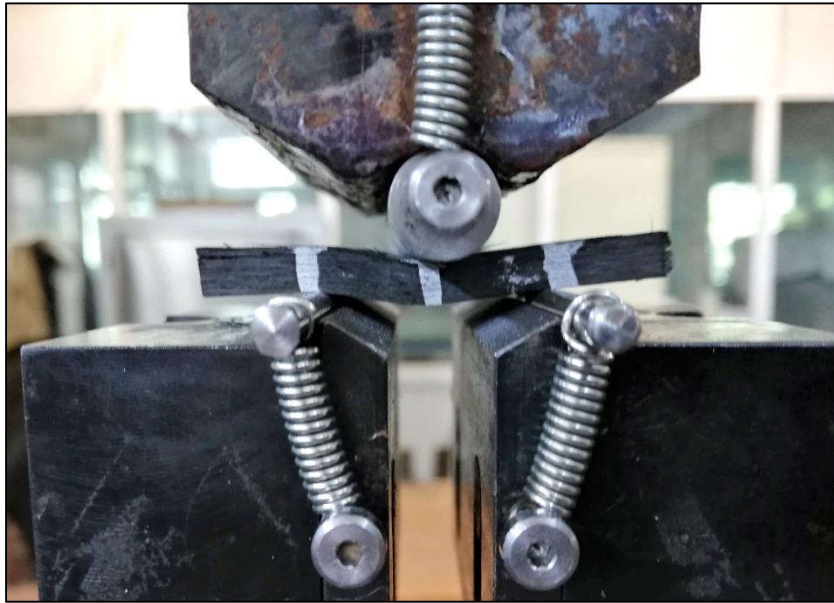
Πίνακας 4.10: Τιμές αντοχής δοκιμίων CVU₅

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F _M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F _M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διανόμανσης	
CVU ₅	CVU ₅ 1	5.667		33.415	35.488	1.517	4.276
	CVU ₅ 2	6.116	6.232	32.940			
	CVU ₅ 3	6.629		36.545			
	CVU ₅ 4	6.389		37.029			
	CVU ₅ 5	5.790		36.259			
	CVU ₅ 6	6.299		35.492			
	CVU ₅ 7	6.509		36.593			
	CVU ₅ 8	6.454		35.630			

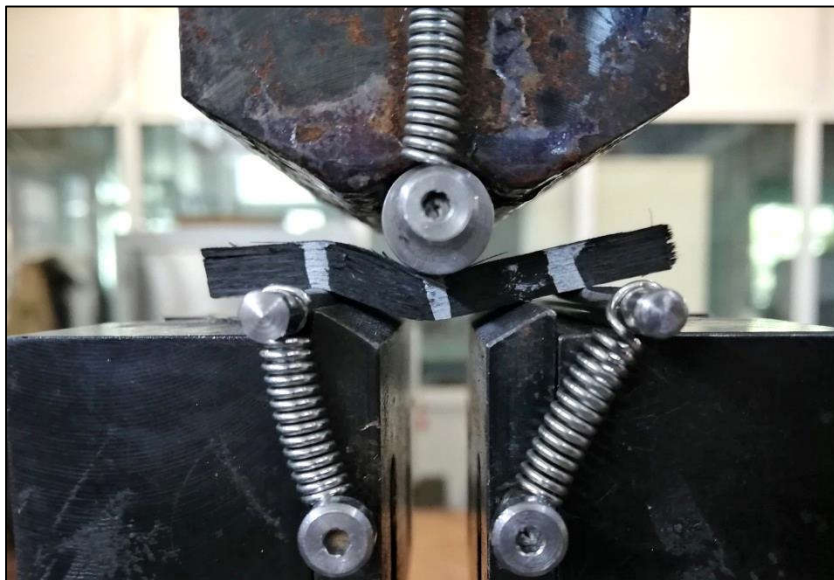
Παρατηρήσεις:

- Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο φορτίο και την ακαμψία, με τα δοκίμια CVU₅1 και CVU₅5 να παρουσιάζουν ελαφριές αποκλίσεις.
- Το δοκίμιο CVU₅8 τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις.
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε φαίνεται στο σχήμα 4.22.b είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M, μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)

- Δεν παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων



(a)

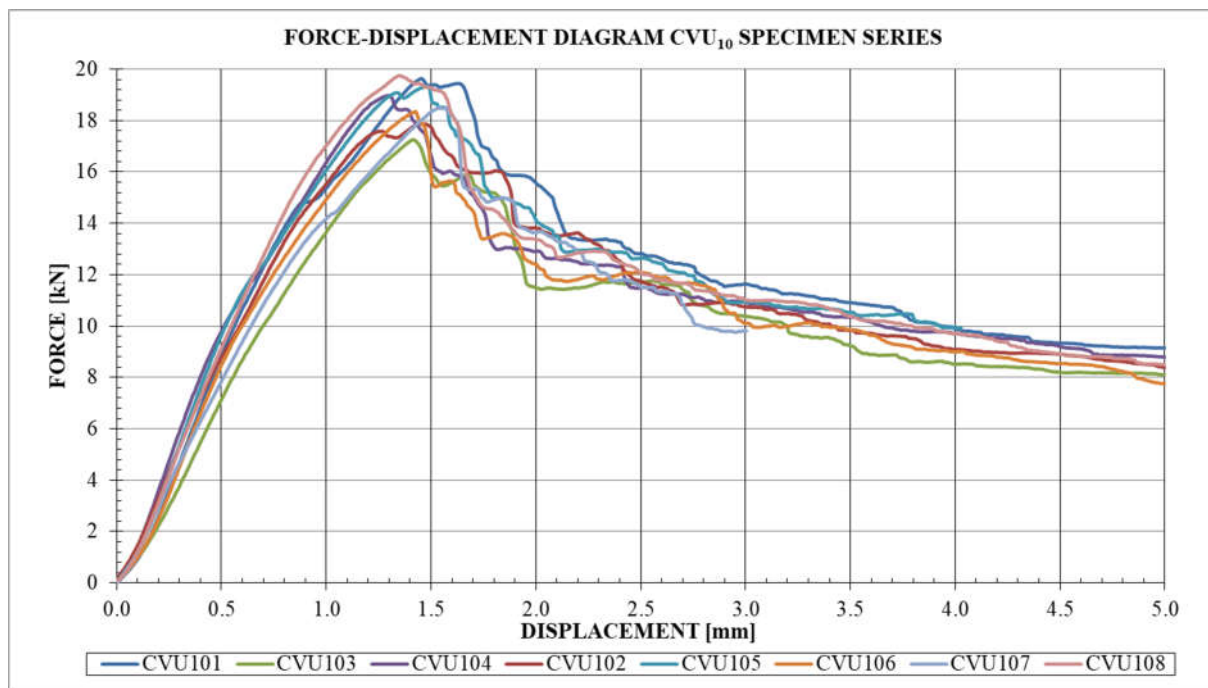


(b)

Σχήμα 4.22: Δοκίμιο CVU₅₁ (a) τη στιγμή επίτευξης μέγιστου φορτίου (b) στο τέλος της δοκιμής

4.5.5 Σειρά δοκιμών CVU₁₀

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Vacuum Bagging με τη χρήση 28 στρώσεων μονοαξονικού υφάσματος C322U. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 85.92$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 43.17$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 8.57$ mm και μέσο ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 43.18$ mm. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.23:



Σχήμα 4.23: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια CVU₁₀

Στον πίνακα 4.11 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς CVU₁₀:

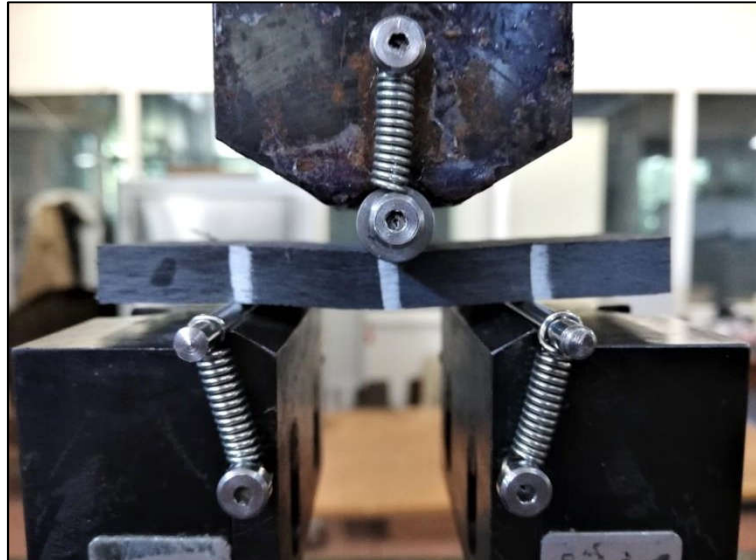
Πίνακας 4.11: Τιμές αντοχής δοκιμών CVU₁₀

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F _M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F _M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διανόμανσης
CVU ₁₀	CVU ₁₀₁	19.634	39.005	37.455	1.817	4.851
	CVU ₁₀₂	17.901	35.669			
	CVU ₁₀₃	17.258	34.115			
	CVU ₁₀₄	18.976	37.558			
	CVU ₁₀₅	19.333	38.795			
	CVU ₁₀₆	18.345	38.226			
	CVU ₁₀₇	18.497	36.906			
	CVU ₁₀₈	19.749	39.368			

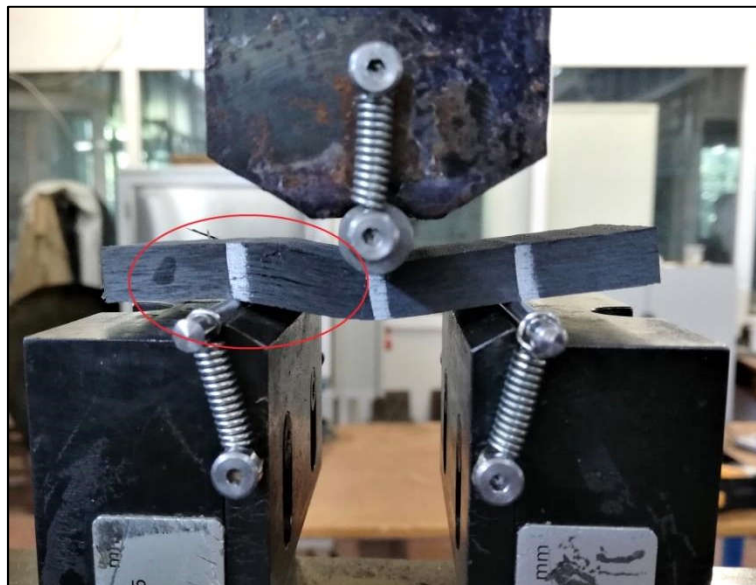
Παρατηρήσεις:

- Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο φορτίο και την ακαμψία.
- Στο δοκίμιο CHU₁₀₇ η δοκιμή τερματίστηκε πρόωρα προκειμένου να υπάρχει διαθέσιμη η οπτική μορφή αστοχίας αμέσως μετά την επίτευξη μέγιστου φορτίου, ενώ το δοκίμιο CVU₁₀₈ τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις.

- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.24.a είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων κατά την επιβολή του φορτίου (βλ. σχήμα 4.24.b)



(a)



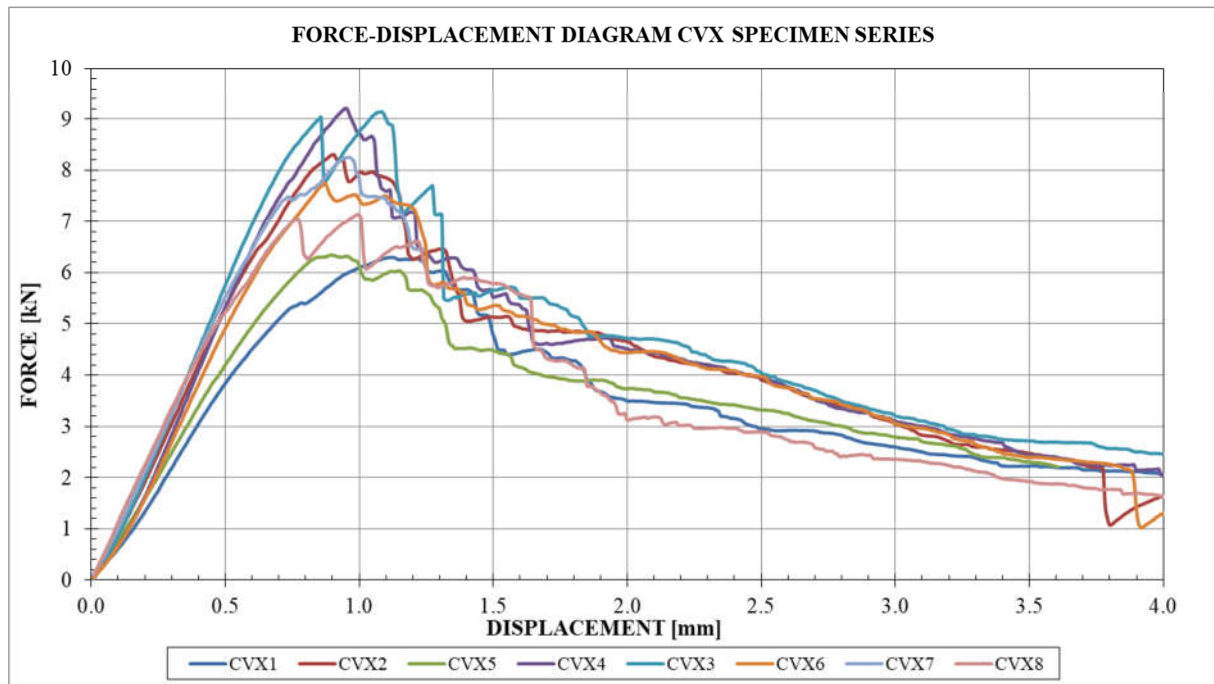
(b)

Σχήμα 4.24: Δοκίμιο CVU₁₀₅ (a) τη στιγμή επίτευξης μέγιστου φορτίου (b) στο τέλος της δοκιμής

4.5.6 Σειρά δοκιμών CVX

Τα δοκίμια της σειράς αυτής έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο Vacuum Bagging με τη χρήση 25 στρώσεων διαξονικού υφάσματος C210T. Τα δοκίμια παρουσιάζουν μέσο μήκος $l_{av} = 78.07$ mm, μέσο πλάτος $b_{av} = 39.06$ mm, μέσο πάχος $h_{av} = 7.57$ mm και μέσο

ανυποστήρικτο μήκος $L_{av} = 38.65 \text{ mm}$. Συνολικά εξετάστηκαν 8 δοκίμια. Οι καμπύλες δύναμης-βέλους κάμψης των δοκιμίων της σειράς φαίνονται στο σχήμα 4.25:



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα Δύναμης – Βέλους Κάμψης για τα δοκίμια CVX

Στον πίνακα 4.12 παρατίθενται οι ακριβείς τιμές του μέγιστου φορτίου, της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση καθώς και η στατιστική ανάλυση αυτών για τα δοκίμια της σειράς CVX:

Πίνακας 4.12: Τιμές αντοχής δοκιμίων CVX

Δοκίμιο	Μέγιστο φορτίο (F_M) [kN]	Αριθμητικός μέσος F_M [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση (ISS) [MPa]	Αριθμητικός μέσος (ISS) [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διανόμανσης
CVX	CVX1	6.295	-	35.350	3.323	9.401
	CVX2	8.301	35.391			
	CVX3	9.142	38.536			
	CVX4	9.210	39.643			
	CVX5	6.344	-			
	CVX6	7.751	32.573			
	CVX7	8.249	34.934			
	CVX8	7.128	31.021			

Παρατηρήσεις:

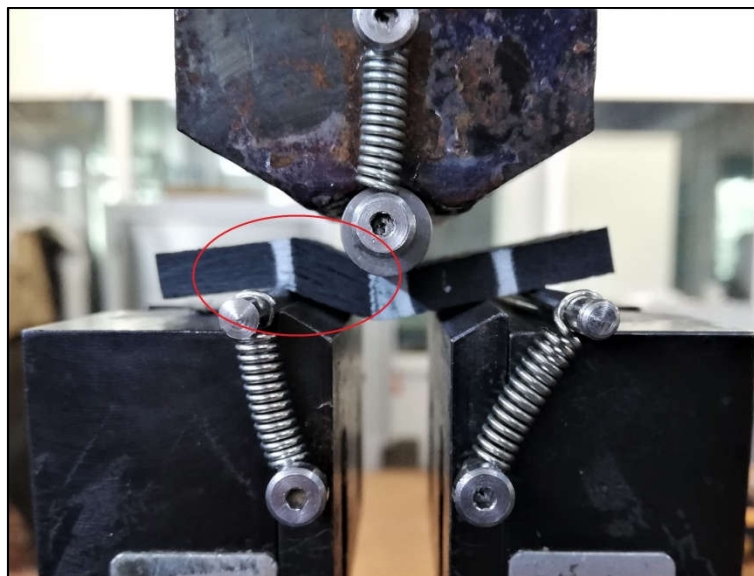
- Σε γενικές γραμμές τα δοκίμια δεν παρουσιάζουν καλή επαναληψιμότητα ως προς το μέγιστο φορτίο και την ακαμψία, με ιδιαίτερη αναφορά στα δοκίμια CVX1/5 που εμφανίζουν μικρότερο μέγιστο φορτίο καθώς και στο CVX3 που εμφανίζει δυο διαδοχικά μέγιστα. Για τα δοκίμια CVX1/5, σημειώνεται ότι παρουσιάζοντας τις υψηλότερες (απόλυτες) τιμές του λόγου (b/h) της σειράς τους (βλ. πίνακα 2.19). Για το

λόγο αυτό τα συγκεκριμένα δοκίμια **δεν** λήφθηκαν υπόψη κατά τη στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

- Το δοκίμιο CVX8 τοποθετήθηκε με την τραχιά επιφάνεια σε επαφή με τις στηρίξεις.
- Η μορφή αστοχίας που παρατηρήθηκε όπως φαίνεται στο σχήμα 4.26.a είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 συμμετρική κατά F_M , μη συμμετρική στο τέλος της δοκιμής (μη αποδεκτή μορφή)
- Παρατηρήθηκε τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων κοντά στις στηρίξεις (βλ. σχήμα 4.26.b)



(a)



(b)

Σχήμα 4.26: Δοκίμιο CVX2 (a) τη στιγμή επίτευξης μέγιστου φορτίου (b) στο τέλος της δοκιμής

4.6 Δοκιμή εκτός προδιαγραφών προτύπου

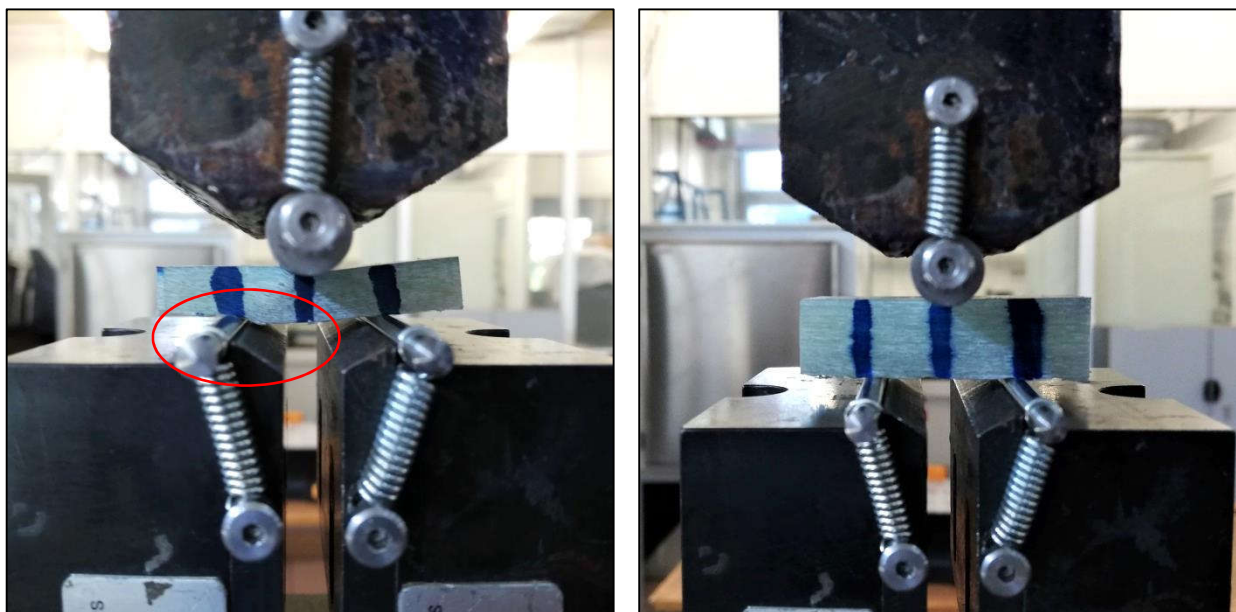
Κατά τις δοκιμές που περιγράφηκαν στα προηγούμενα εδάφια παρατηρήθηκε ότι καμία σειρά δοκιμών δεν εμφάνισε τη μορφή αστοχίας που ορίζει το πρότυπο ως αποδεκτή (βλ. σχήμα 2.3). Η επικρατούσα μορφή αστοχίας υπήρξε η «πλαστική» διάτμηση, ενώ τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων παρατηρήθηκε σε ορισμένες σειρές δοκιμών, στην περιοχή του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με τις στηρίξεις της μηχανής δοκιμής. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στην υπόθεση ότι μείωση των λόγων των κύριων διαστάσεων των δοκιμίων έτσι ώστε να μειωθεί το τελικό τους μέγεθος ενδεχομένως να οδηγούσε σε πιο γρήγορη εξάπλωση του αποχωρισμού στα άκρα του δοκιμίου, έτσι ώστε το τέλος της δοκιμής να υπάρχει η αποδεκτή μορφή αστοχίας. Για το σκοπό αυτό, με την ολοκλήρωση των δοκιμών γυαλιού και πριν την έναρξη της κατασκευής των δοκιμίων άνθρακα από τα «ρετάλια» των πλακών GHX και GHU₁₀ επιχειρήθηκε η κοπή δοκιμίων με τις διαστάσεις που φαίνονται στον πίνακα 4.13:

Πίνακας 4.13: Κύριες διαστάσεις και λόγοι αυτών για δοκίμια εκτός προδιαγραφών

Δοκίμια	Διαστάσεις [mm]				Λόγοι		
	l	b	h	L	L/h (ideal=5)	L/l (ideal=1/2)	L/b (ideal=1.0)
HX _{diversified}	46.13	22.90	7.50	23.01	3.07	0.50	1.00
HU _{10diversified}	46.00	23.60	12.55	23.20	1.85	0.50	0.98

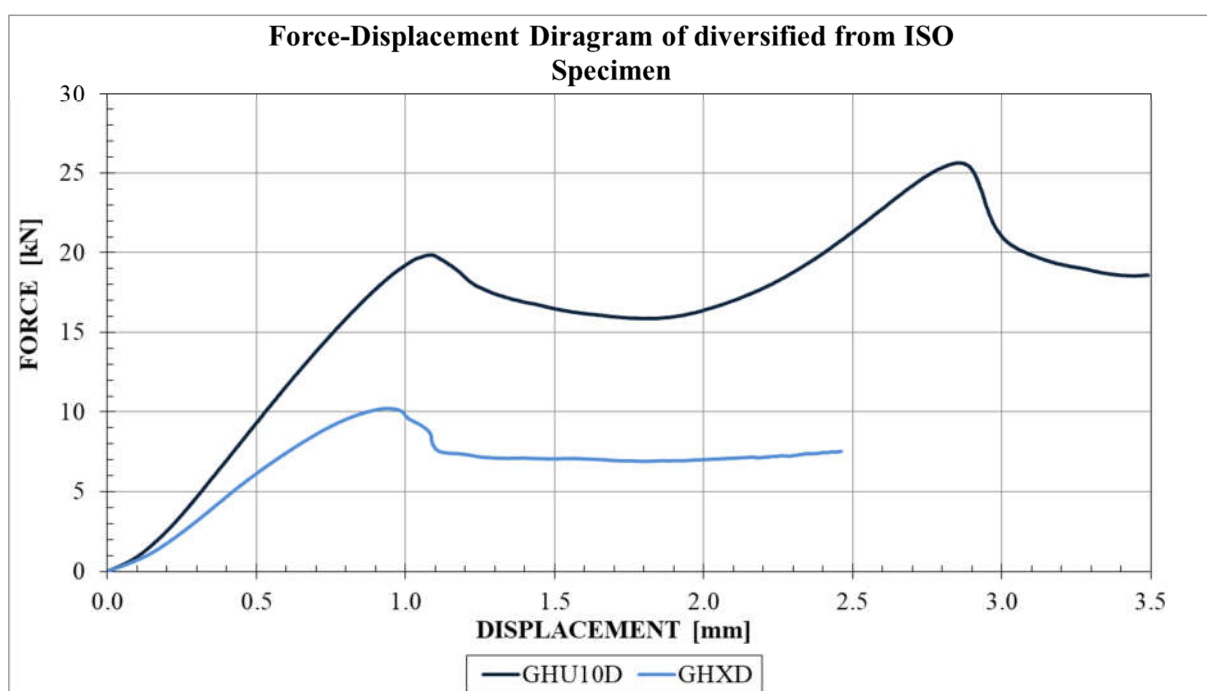
Για κάθε ένα από τα δύο δοκίμια επιλέχθηκε ανυποστήρικτο μήκος ίσο με το ελάχιστο που υποστηρίζει η μηχανή των δοκιμών (22.5 mm) οδηγώντας σε μείωση του λόγου ανυποστήρικτου μήκους προς πάχος δοκιμίου, αποσκοπώντας στην περαιτέρω αύξηση των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων έναντι των καμπτικών στο υπό εξέταση δοκίμιο. Οι υπόλοιπες διαστάσεις επιλέχθηκαν έτσι ώστε οι λόγοι των κυρίων διαστάσεων των δοκιμίων, έχοντας απαλείψει το πάχος (βλ. πίνακα 2.17) να παραμένουν σταθεροί.

Αναφέρεται πως η μορφή αστοχίας που παρουσίασαν τα δοκίμια αυτά, είναι η πλαστική διάτμηση (d) του σχήματος 2.3 (βλ. σχήμα 4.27-μη αποδεκτή μορφή).



(a) (b)
 Σχήμα 4.27: Δοκίμια (a) GHXd και (b) GHU_{10d} στο τέλος της δοκιμής

Για λόγους πληρότητας παρατίθενται τα γραφήματα δύναμης – βέλους κάμψης των διαφοροποιημένων δοκιμίων (σχήμα 4.28):



Σχήμα 4.28: Διάγραμμα δύναμης – βέλους κάμψης δοκιμίων εκτός προδιαγραφών ISO

Στον πίνακα 4.14 παρουσιάζονται οι τιμές του μέγιστου φορτίου και της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση για τα δοκίμια εκτός προτύπου:

Πίνακας 4.14: Φαινόμενη αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση δοκιμών εκτός προτύπου

ID	Μέγιστο φορτίο [kN]	Αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση [MPa]
GHXD	10.220	44.627
GHU ₁₀ D	19.863	50.298

4.7 Σύνοψη αποτελεσμάτων:

Ο αριθμητικός μέσος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής διακύμανσης της αντοχής για κάθε σειρά δοκιμών παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 4.15:

Πίνακας 4.15: Στατιστική ανάλυση ISS

ID	Κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες	Αριθμητικός μέσος ISS [MPa]	Τυπική απόκλιση	[%] συντελεστής διακύμανσης	
Glass					
HLU	GHU ₅	57.0%	45.825	1.354	2.955
	GHU ₁₀	59.6%	42.773	0.553	1.294
	GHX	46.5%	37.645	0.807	2.144
VB	GVU ₅	76.9%	34.154	2.390	6.997
	GVU ₁₀	74.2%	39.118	1.079	2.759
	GVX	65.8%	36.652	1.302	3.554
Carbon					
HLU	CHU ₅	48.7%	54.280	1.797	3.311
	CHU ₁₀	50.9%	53.303	1.394	2.614
	CHX	51.3%	49.294	0.800	1.624
VB	CVU ₅	71.2%	35.488	1.517	4.276
	CVU ₁₀	68.6%	37.455	1.817	4.851
	CVX	64.6%	35.350	3.323	9.401

Τα σχόλια που ακολουθούν αφορούν **αποκλειστικά** τη σύγκριση των σειρών των δοκιμών ως προς τη στατιστική τους ανάλυση και όχι ως προς τη φαινόμενη αντοχή που αυτές εμφανίζουν σε διαστρωματική διάτμηση (βλ. υποεδάφιο 4.8). Σε γενικές γραμμές, τα δοκίμια Glass παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές τυπικής απόκλισης και συντελεστή μεταβολής σε σχέση με τα δοκίμια Carbon. Παρατηρείται ότι για δοκίμια ίδιου υλικού ενίσχυσης τα δοκίμια Vacuum Bagging παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές τυπικής απόκλισης και συντελεστή μεταβολής από τα δοκίμια Hand Lay-up, τάση που ενδέχεται να υποδηλώνει κάποια σύνδεση μεταξύ καλής επαναληψιμότητας του πειράματος και μέγεθος του δοκιμίου. Η τάση αυτή δεν επιβεβαιώνεται ωστόσο και για μεταξύ δοκιμών ίδιου υλικού **και** κατασκευαστικής μεθόδου γεγονός που δηλώνει ότι υπεισέρχεται και κάποιος παράγοντας τυχαιότητας.

Όσο αφορά τη φαινόμενη αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση, ένα πρώτο σχόλιο που πρέπει να γίνει στο σημείο αυτό, αφορά την ομοιομορφία στη τιμή που παρουσιάζουν τα δοκίμια Vacuum Bagging. Συγκεκριμένα παρατηρείται ότι για όλα τα δοκίμια Vacuum Bagging, ανεξάρτητα από το υλικό ενίσχυσης, τον αριθμό στρώσεων και τη πλέξη του υφάσματος οι τιμές της ISS κυμαίνονται στο διάστημα 34 έως 39 MPa. Στην περίπτωση των δοκιμίων Hand Lay-up το αντίστοιχο διάστημα είναι αρκετά μεγαλύτερο, από 37 έως 54 MPa. Προκύπτει συνεπώς, ότι η μέθοδος Vacuum Bagging οδηγεί σε δοκίμια καλύτερης ομοιομορφίας όσον αφορά τη μηχανική ιδιότητα, παρατήρηση σε ένα βαθμό αναμενόμενη λόγω της καλής επαναληψιμότητας της μεθόδου ως προς την ποιότητα των τελικών δοκιμίων. Παράλληλα οι χαμηλότερες τιμές ISS των δοκιμίων Vacuum Bagging, που είναι χαμηλότερης περιεκτικότητας σε ρητίνη (υψηλότερης περιεκτικότητας σε ίνες), προσφέρουν μια πρώτη ένδειξη της συνεισφοράς της ρητίνης στη διαστρωματική αντοχή.

4.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Στο εδάφιο αυτό επιχειρείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω ως προς τις παραμέτρους που τέθηκαν στο εδάφιο 2.3. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι επειδή η μορφή αστοχίας των δοκιμίων δεν είναι αυτή που το πρότυπο χαρακτηρίζει ως αποδεκτή, τα αποτελέσματα του εδαφίου 4.5 μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο στην ποιοτική σύγκριση των υπό μελέτη υλικών, και σε καμιά περίπτωση δεν πρέπει οι παρουσιαζόμενες τιμές να λαμβάνονται ως αμιγώς αντιπροσωπευτικές της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση των υλικών.

4.8.1 Σύγκριση ως προς τον αριθμό στρώσεων

Στον πίνακα 4.16 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση των δοκιμίων U₅ και U₁₀ για τις δύο μεθόδους κατασκευής (Hand Lay-up/Vacuum Bagging) και για τα δύο υπό μελέτη υλικά (Glass/Carbon).

Πίνακας 4.16: Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς τον αριθμό των στρώσεων

Μέθοδος	Σειρά Δοκιμίων	Αριθμός Στρώσεων	Περιεκτικότητα σε ίνες [w/w]	Μέσο πάχος [mm]	Μέση ISS [MPa]	Απόκλιση
Glass						
Hand Lay-up	GHU ₅	11	57.0%	6.80	45.825	6.7%
	GHU ₁₀	22	59.6%	12.83	42.773	
Vacuum Bagging	GVU ₅	11	76.9%	4.633	34.154	-12.7%
	GVU ₁₀	22	74.2%	9.603	39.118	
Carbon						
Hand Lay-up	CHU ₅	17	48.73%	8.08	54.280	1.8%
	CHU ₁₀	28	50.92%	13.43	53.303	
Vacuum Bagging	CVU ₅	17	71.24%	5.135	35.488	-5.3%
	CVU ₁₀	28	68.64%	8.573	37.455	

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται φανερό πως, όπως είναι αναμενόμενο, η αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση **δεν** δείχνει να εξαρτάται από τον αριθμό των στρώσεων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των δοκιμών Glass όπου ο αριθμός των στρώσεων των δοκιμών U_{10} είναι ακριβώς ο διπλάσιος σε σχέση με τα δοκίμια U_5 , ενώ το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η σειρά U_{10} είναι 3.1 φορές μεγαλύτερο στην περίπτωση των δοκιμών Hand Lay-up και 4.6 στην περίπτωση των Vacuum Bagging από τα αντίστοιχα που μπορεί να φέρει η U_5 , ανάλογες φαίνεται να είναι και οι αντίστοιχες αυξήσεις του εμβαδού των διατομών των U_{10} έναντι των U_5 , με αποτέλεσμα οι τελικές τιμές της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση να είναι παραπλήσιες. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρούνται και στην περίπτωση των δοκιμών Carbon όπου παρά τον τριπλασιασμό του μέγιστου φορτίου που μπορεί να φέρει το δοκίμιο περισσότερων στρώσεων, η τελική αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση παρουσιάζει παρόμοιες τιμές μεταξύ δοκιμών ίδιας μεθόδου και υλικού. Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι οι **κατά βάρος περιεκτικότητες** σε ίνες των συγκρινόμενων δοκιμών είναι παραπλήσιες, γεγονός που δικαιολογεί και τις παραπλήσιες τιμές αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση. Συνεπώς προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αντοχή σε φαινόμενη διαστρωματική διάτμηση φαίνεται να μην επηρεάζεται σημαντικά από τον αριθμό στρώσεων και συνεπώς του πάχους του δοκιμίου για υλικά ίδιου ενισχυτικού υφάσματος και κατασκευαστικής μεθόδου, με την προϋπόθεση ότι οι λόγοι των διαστάσεων του δοκιμίου παραμένουν σταθεροί. Η προϋπόθεση αυτή, εισάγεται διότι συγκρίνοντας τη φαινόμενη αντοχή των δοκιμών εντός προτύπου με το δοκίμιο εκτός πρότυπου λόγου διαστάσεων (βλ. πίνακα 4.15) υπάρχει μια πρώτη ένδειξη ότι αυτή ενδέχεται να διαφοροποιείται με αλλαγή των λόγων της διατομής.

4.8.2 Σύγκριση ως προς το είδος υφάσματος

Στον πίνακα 4.17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση των δοκιμών U_5 και X για τις δύο μεθόδους κατασκευής (Hand Lay-up/Vacuum Bagging) και για τα δύο υπό μελέτη υλικά (Glass/Carbon):

Πίνακας 4.17: Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς τον τύπο υφάσματος

Μέθοδος	Σειρά Δοκιμών	Αριθμός Στρώσεων	Επιφανειακά βάρος υφάσματος [g/m^2]	Περιεκτικότητα σε ίνες [w/w]	Απόκλιση περιεκτικότητας.	Μέσο πάχος h_{av} [mm]	Μέση ISS [MPa]	Απόκλιση ISS
Glass								
Hand Lay-up	GHU ₅	11	600	57.0%	22.7%	6.80	45.825	21.7%
	GHX	20	300	46.5%		7.79	37.645	
Vacuum Bagging	GVU ₅	11	600	76.9%	17.0%	4.63	34.154	-6.8%
	GVX	20	300	65.8%		5.07	36.652	
Carbon								
Hand Lay-up	CHU ₅	17	322	48.7%	-5.1%	8.08	54.280	10.1%
	CHX	25	210	51.3%		7.57	49.294	
Vacuum Bagging	CVU ₅	17	322	71.2%	10.3%	5.13	35.488	0.4%
	CVX	25	210	64.6%		5.98	35.350	

Ύστερα από προσεκτική μελέτη του παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι η εξαγωγή συμπερασμάτων είναι πιο εύκολη όταν η σύγκριση των αποτελεσμάτων γίνεται ανά μέθοδο κατασκευής.

Για τα δοκίμια κατασκευασμένα με μέθοδο **Hand Lay-up** παρατηρείται σαφής υπεροχή του μονοαξονικού υφάσματος. Συγκεκριμένα:

- Στην περίπτωση των δοκιμίων **Glass** κατασκευασμένα με μέθοδο Hand Lay-up (GH) παρατηρείται ότι τα δοκίμια X αν και μεγαλύτερου πάχους, εμφανίζουν μικρότερες τιμές αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση από τα δοκίμια U₅. Αξίζει να σημειωθεί ότι το ποσοστό υπεροχής σε διαστρωματική αντοχή των δοκιμίων GH έναντι των GX είναι παραπλήσιο της απόκλισης τους σε περιεκτικότητα ινών. Η διαφορά αυτή γίνεται αντιληπτή και με προσεκτική παρατήρηση των σχημάτων 4.3 και 4.7 όπου φαίνεται η πιο απότομη κλίση της καμπύλης των δοκιμίων GHU₅ έναντι των GHX, ενδεικτική της «τάσης» για αστοχία.
- Στην περίπτωση των δοκιμίων **Carbon** κατασκευασμένα με μέθοδο Hand Lay-up (CH), τα δοκίμια X αν και παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση, ταυτόχρονα έχουν και μικρότερο πάχος, γεγονός που εμποδίζει την άμεση εξαγωγή συμπεράσματος. Δεχόμενοι, ωστόσο, το πόρισμα που προέκυψε στο εδάφιο 4.6.1 ότι η αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση είναι ανεξάρτητη του πάχους του δοκιμίου με την προϋπόθεση ότι οι λόγοι των διαστάσεων του δοκιμίου παραμένουν σταθεροί και επεκτείνοντάς το στην περίπτωση των δοκιμίων X, είναι δυνατή η υπόθεση ότι και στην περίπτωση των CH τα δοκίμια X παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση από τα δοκίμια U₅. Στην περίπτωση των δοκιμίων αυτών δεν παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ αποκλίσεων περιεκτικότητας (υπεροχή δοκιμίων X κατά 5%) και αντοχών (υπεροχή δοκιμίων U₅ κατά 10%).

Για τα δοκίμια κατασκευασμένα με μέθοδο **Vacuum Bagging** δεν επιβεβαιώνεται η προαναφερθείσα τάση Συγκεκριμένα:

- Τα δοκίμια Carbon κατασκευασμένα με μέθοδο Vacuum Bagging (CV) παρουσιάζουν παραπλήσιες τιμές αντοχής ανεξάρτητα από το τύπο υφάσματος. Τα διαξονικά δοκίμια παρουσιάζουν υψηλότερο πάχος, αλλά ταυτόχρονα και μικρότερη περιεκτικότητα σε ίνες.
- Τα πράγματα περιπλέκονται ακόμη περισσότερο στην περίπτωση των δοκιμίων Glass κατασκευασμένα με μέθοδο Vacuum Bagging (GV) όπου τα δοκίμια X φαίνεται να εμφανίζουν υψηλότερη τιμή αντοχής έναντι των U₅ αποκλίνοντας από τον μέχρι τώρα παρατηρούμενο κανόνα, και καθιστώντας αδύνατο τον γενικευμένο χαρακτηρισμό των δοκιμίων U₅ ως πιο ανθεκτικά έναντι των X. Παράλληλα παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερη τιμή περιεκτικότητας σε ίνες. Υπενθυμίζεται ότι κατά την στατιστική ανάλυση των δοκιμίων GVU₅ παρατηρήθηκαν υψηλές τιμές διασποράς των αποτελεσμάτων.

Συνεπώς προκύπτει ότι κατά την εξέταση των δοκιμών ως προς τον τύπο του υφάσματος παρατηρήθηκε η υπεροχή ως προς την φαινόμενη αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση των δοκιμών μονοαξονικού έναντι δοκιμών διαξονικού υφάσματος για δοκίμια Hand Lay-up, τάση που δεν επιβεβαιώθηκε και για τα δοκίμια Vacuum Bagging, όπου σημειώθηκε ισότητα των υπολογιζόμενων αντοχών ή και ακόμη υπεροχή των διαξονικών δοκιμών. Λόγω της καταγραφής μη συστηματικών αποτελεσμάτων κατά τη μελέτη της παραμέτρου, συστήνεται η περαιτέρω εκπόνηση σχετικών πειραμάτων για την επανεξέταση της.

4.8.3 Σύγκριση ως προς τη μέθοδο κατασκευής

Στον πίνακα 4.18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση κάθε σειράς δοκιμών ίδιου υλικού, τύπου υφάσματος και αριθμού στρώσεων ως προς τις δύο μεθόδους κατασκευής (Hand Lay-up (H)/Vacuum Bagging (V)):

Πίνακας 4.18: Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς τη μέθοδο κατασκευής

Σειρά Δοκιμών	Αριθμός Στρώσεων	Μέθοδος κατασκευής	Περιεκτικότητα σε ίνες [w/w]	Απόκλιση περιεκτικότητας	Μέσο πάχος h_{av} [mm]	Μέση ISS [Mpa]	Απόκλιση ISS
Glass							
GU ₅	11	H	57.0%	-25.9%	6.80	45.825	25.5%
		V	76.9%		4.63	34.154	
GU ₁₀	22	H	59.6%	-19.6%	12.83	42.773	8.5%
		V	74.2%		9.60	39.118	
GX	20	H	46.5%	-29.3%	7.79	37.645	2.6%
		V	65.8%		5.07	36.652	
Carbon							
CU ₅	17	H	48.7%	-31.6%	8.08	54.280	34.6%
		V	71.2%		5.13	35.488	
CU ₁₀	28	H	50.9%	-25.8%	13.43	53.303	29.7%
		V	68.6%		8.57	37.455	
CX	25	H	51.3%	-20.6%	7.57	49.294	28.3%
		V	64.6%		5.98	35.350	

Από την εξέταση του παραπάνω πίνακα, προκύπτει ότι για δοκίμια όμοια ως προς το υλικό των ινών, το τύπο του υφάσματος αλλά και τον αριθμό στρώσεων τα δοκίμια που έχουν κατασκευαστεί με μέθοδο Hand Lay-up (H) παρουσιάζουν υψηλότερη τιμή φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση από εκείνα που έχουν κατασκευαστεί με μέθοδο Vacuum Bagging (V). Μάλιστα το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά πιο έντονο στην περίπτωση των δοκιμών Carbon από ότι στην περίπτωση των δοκιμών Glass. Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως είναι αναμενόμενο, τα δοκίμια Vacuum Bagging παρουσιάζουν σε κάθε περίπτωση αρκετά υψηλότερες τιμές περιεκτικότητας σε ίνες, γεγονός που δείχνει πως αύξηση της

ποσότητας της ρητίνης των δοκιμίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παρατηρούμενης αντοχής.

4.8.4 Σύγκριση ως προς το υλικό ενίσχυσης

Στον πίνακα 4.19 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η άμεση σύγκριση δοκιμίων ίδιου προσανατολισμού υφάσματος και μεθόδου κατασκευής ως προς το υλικό της ενίσχυσης:

Πίνακας 4.19: Σύγκριση αποτελεσμάτων ως προς το υλικό ενίσχυσης

Σειρά Δοκιμίων	Αριθμός Στρώσεων	Περιεκτικότητα σε ίνες [w/w]	Απόκλιση περιεκτικότητας	Μέσο πάχος h_{av} [mm]	Μέση ISS [Mpa]	Απόκλιση ISS
Hand Lay up						
GHU ₅	11	57.0%	15%	6.80	45.825	-18%
CHU ₅	17	48.7%		8.08	54.280	
GHU ₁₀	22	59.6%	15%	12.83	42.773	-25%
CHU ₁₀	28	50.9%		13.43	53.303	
GHX	20	46.5%	-10%	7.79	37.645	-31%
CHX	25	51.3%		7.57	49.294	
Vacuum Bagging						
GVU ₅	11	76.9%	7%	4.63	34.154	-4%
CVU ₅	17	71.2%		5.13	35.488	
GVU ₁₀	22	74.2%	8%	9.60	39.118	4%
CVU ₁₀	28	68.6%		8.57	37.455	
GVX	20	65.8%	2%	5.07	36.652	4%
CVX	25	64.6%		5.98	35.350	

Εξετάζοντας προσεκτικά τα ζεύγη δοκιμίων ως προς το πάχος, προκύπτει ότι για να είναι δυνατή η εξαγωγή οποιουδήποτε συμπεράσματος σχετικά με την επίδραση του υλικού κατασκευής στην αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση, είναι απαραίτητη η αποδοχή του πορίσματος του εδαφίου 4.6.1. που αφορά την αποσύζευξη της μηχανικής ιδιότητας από το πάχος του δοκιμίου, εφόσον οι λόγοι των διαστάσεων των υπό μελέτη δοκιμίων παραμένουν σταθεροί. Με την προϋπόθεση αυτή σημειώνονται τα εξής:

- Στην περίπτωση της μεθόδου Hand Lay-up τα μονοαξονικά δοκίμια Carbon, που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες ή αλλιώς υψηλότερη περιεκτικότητα σε μήτρα, παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση από τα δοκίμια Glass.
- Για την ίδια μέθοδο, τα διαξονικά δοκίμια έχουν αστοχήσει με μορφή εφελκυσμού (tension). Έτσι στην παρατηρούμενη υπεροχή των δοκιμίων Carbon έναντι των δοκιμίων

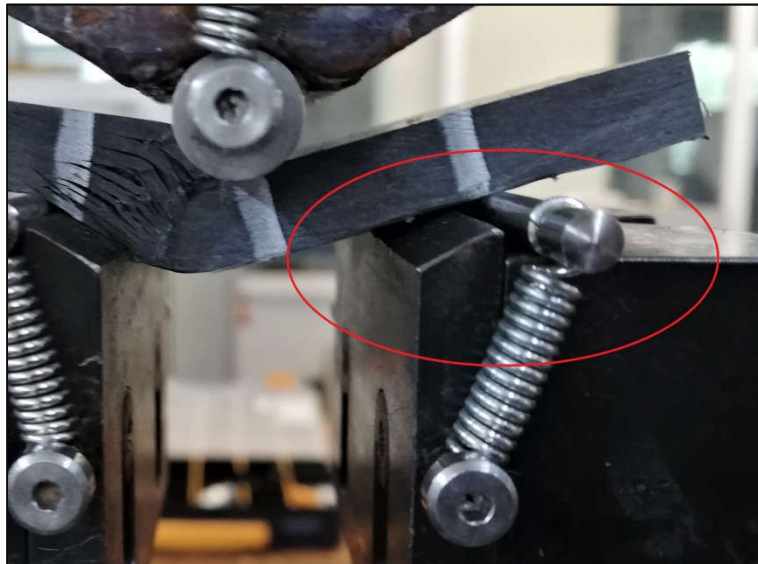
Glass πρέπει να ληφθεί υπόψη και η υψηλότερη αντοχή των ινών άνθρακα (3530 MPa) έναντι των ινών γυαλιού (3100 MPa) σε εφελκυσμό.

- Στην περίπτωση της μεθόδου Vacuum Bagging οι τιμές φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση μεταξύ δοκιμίων διαφορετικών υλικών είναι παραπλήσιες χωρίς κάποια συστηματική υπεροχή ενός εκ των δυο υλικών, κανόνας που ισχύει και για την περιεκτικότητα των δοκιμίων αυτών σε ίνες.

Τα παραπάνω, δείχνουν για μια ακόμη φορά πως αύξηση της ποσότητας της ρητίνης των δοκιμίων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της παρατηρούμενης αντοχής.

4.8.5 Σύγκριση ως προς την επιφάνεια επαφής με στηρίξεις:

Όσον αφορά την επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τις στηρίξεις, παρατηρήθηκε ότι αυτή επηρεάζει κυρίως την καμπύλη δύναμης - βέλους κάμψης και σε ένα μικρότερο ποσοστό τις τιμές του φορτίου και τάσης αντοχής, δίχως ωστόσο η παρατήρηση αυτή να είναι συστηματική. Ενδεικτικά συνιστάται η μελέτη των σχημάτων 4.3 (GHU₅5), 4.5 (GHU₁₀5), 4.15 (CHU₅8) και 4.19 (CHX8) όπου γίνεται αντιληπτό ότι τα δοκίμια που έρχονται σε επαφή με τις στηρίξεις μέσω των αδρών επιφανειών τους εμφανίζουν αλλοιωμένη μορφή καμπύλης δύναμης-βέλους κάμψης. Συνεπώς προτιμάται η επαφή της πιο λείας επιφάνειας του δοκιμίου με τις στηρίξεις της μηχανής, μιας και αυτή οδηγεί σε πιο μικρή μετακίνηση των rollers, ειδικά στα τελευταία στάδια του πειράματος, σε σχέση με την πιο τραχιά επιφάνεια (βλ. σχήμα 4.29).



Σχήμα 4.29: Σύγκριση μετακίνησης roller κατά τη δοκιμή (a) CHU₅1 (δοκίμιο με λεία επιφάνεια σε επαφή με στηρίξεις) (b) CHU₅1 (δοκίμιο με τραχιά επιφάνεια σε επαφή με στηρίξεις)

5.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιχειρήθηκε να διερευνηθεί η αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση δοκιμίων σύνθετου υλικού με βάση την πειραματική μέθοδο short beam, όπως αυτή ορίζεται από το πρότυπο ISO 14130. Η μελέτη παραμετροποιήθηκε, σε πρώτη φάση, ως προς τον αριθμό στρώσεων, το υλικό και την πλέξη του υφάσματος ενίσχυσης και τη μέθοδο κατασκευής ενώ σε δεύτερη φάση ως προς την επιφάνεια επαφής του δοκιμίου με τις στηρίξεις της μηχανής. Τα δοκίμια της μελέτης κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο της σχολής, ενώ την κατασκευή τους ακολούθησε μια πλήρη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων τους. Τα συμπεράσματα της διπλωματικής μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αφορά το σχολιασμό της μεθόδου καθαυτής, η δεύτερη τη σύγκριση των δοκιμίων ως προς τις επιλεγμένες παραμέτρους, ενώ η τρίτη περιλαμβάνει μια παρατήρηση σχετικά με τη διαδικασία καθορισμού των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμίων.

A. Μέθοδος Δοκιμής:

- Το κριτήριο που θέτει το πρότυπο προκειμένου να αξιολογηθεί αν η αστοχία του δοκιμίου έχει επέλθει αποκλειστικά από την ανάπτυξη διαστρωματικών τάσεων είναι οπτικό και έγκειται στην εμφάνιση αποχωρισμού των στρώσεων στα ελεύθερα άκρα του. Παρατηρήθηκε, ωστόσο, ότι η επίτευξη της μορφής αστοχίας αυτής, είναι αρκετά δύσκολη και συνεπώς όλα τα δοκίμια που μελετήθηκαν φαίνεται να αστόχησαν από την ανάπτυξη πολλαπλών μορφών τάσεων.
- Μεταξύ των μορφών αυτών, ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει στην αναπόφευκτη ανάπτυξη καμπτικών τάσεων λόγω της ίδιας της φύσης της δοκιμής, αλλά και στην συγκέντρωση τάσεων στα σημεία του δοκιμίου που έρχονται σε επαφή με τις στηρίξεις και το στέλεχος εφαρμογής του φορτίου, κοντά στο οποίο παρατηρήθηκε και ο τοπικός αποχωρισμός των στρώσεων.
- Με βάση τα παραπάνω πρέπει να επισημανθεί ότι οι μετρούμενες, στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής, αντοχές **δεν** είναι αμιγώς ίσες με τις τιμές της αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση των υπό μελέτη υλικών, αλλά χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση κάποιων αρχικών ποιοτικών συγκρίσεων.

B. Σύγκριση ως προς τις υπό μελέτη παραμέτρους:

Η υπολογιζόμενη (φαινόμενη) αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση φαίνεται να επηρεάζεται από το ποσοστό περιεχόμενης ρητίνης των δοκιμίων, μιας και αυτή παραλαμβάνει τις διατμήσεις που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες των διαδοχικών στρώσεων. Έτσι η εξαγωγή συμπερασμάτων είναι πιο εύκολη στην περίπτωση των δοκιμίων

Hand Lay-up από ότι στα Vacuum Bagging, όπου παρατηρούνται παραπλήσιες τιμές περιεκτικότητας και αντοχής. Πιο συγκεκριμένα:

- Η αντοχή σε φαινόμενη διαστρωματική διάτμηση φαίνεται να **μην** επηρεάζεται σημαντικά από τον **αριθμό στρώσεων** και συνεπώς του πάχους του δοκιμίου για υλικά ίδιου ενισχυτικού υφάσματος και κατασκευαστικής μεθόδου, με την προϋπόθεση ότι οι λόγοι των κύριων διαστάσεων $(\frac{L}{h}, \frac{l}{h}, \frac{b}{h})$ των δοκιμίων παραμένουν σταθεροί. Η αποσύζευξη αυτή είναι πολύ σημαντική διότι απλοποιεί σημαντικά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων ως προς τις λοιπές παραμέτρους και στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής γίνεται αποδεκτή για τις μετέπειτα συγκρίσεις. **Προτείνεται συνεπώς η επαλήθευση της ιδιότητας αυτής σε κάθε μελλοντικό πείραμα.**
- Κατά την εξέταση των δοκιμίων ως προς τον τύπο του υφάσματος παρατηρήθηκε η υπεροχή ως προς την φαινόμενη διαστρωματική αντοχή των δοκιμίων μονοαξονικού έναντι δοκιμίων διαξονικού υφάσματος για δοκίμια κατασκευασμένα με μέθοδο Hand Lay-up, τάση που δεν επιβεβαιώθηκε και για τα δοκίμια Vacuum Bagging, όπου σημειώθηκε ισότητα των υπολογιζόμενων αντοχών ή και ακόμη υπεροχή των διαξονικών δοκιμίων.
- Για δοκίμια όμοια ως προς το υλικό των ινών, τον τύπο υφάσματος αλλά και τον αριθμό στρώσεων, τα κατασκευασμένα με μέθοδο Hand Lay-up παρουσιάζουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε ρητίνη και σε φαινόμενη διαστρωματική αντοχή έναντι με μέθοδο Vacuum Bagging.
- Τα δοκίμια Hand Lay-up carbon (HC) παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερες τιμές φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση από τα αντίστοιχα glass (HG) σε συνδυασμό με υψηλότερη περιεκτικότητα σε ρητίνη. Η ίδια τάση δεν παρατηρείται και στην περίπτωση της μεθόδου Vacuum Bagging όπου οι τιμές φαινόμενης αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση και περιεκτικότητας σε ρητίνη μεταξύ δοκιμίων διαφορετικών υλικών είναι παραπλήσιες, δίχως να παρατηρείται κάποια συστηματική υπεροχή ενός εκ των δυο υλικών.
- Τέλος, παρατηρήθηκε ότι η επαφή της πιο λείας επιφάνειας του δοκιμίου με τις στηρίξεις της μηχανής, οδηγεί σε πιο μικρή μετακίνηση των στηρίξεων σε σχέση με την πιο τραχιά επιφάνεια, οδηγώντας στη λήψη καλύτερων καμπυλών φορτίου-βέλους κάμψης.

Γ. Χαρακτηρισμός υλικών

- Ένα τελευταίο σχόλιο πρέπει να γίνει σχετικά με τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ενίσχυση των διαξονικών δοκιμίων carbon με τη μέθοδο Image Analysis. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τέτοιες μέθοδοι εκ των οποίων η μία (Areal) φάνηκε να συγκλίνει με την τυποποιημένη μέθοδο, ενώ η δεύτερη (Fiber Counting) φάνηκε να δίνει αυξημένες τιμές περιεκτικότητας.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με βάση τα συμπεράσματα της μελέτης αυτής, προτείνεται η μελλοντική διερεύνηση των εξής σημείων:

- Η επίδραση του λόγου των κύριων διαστάσεων στις μετρούμενες τιμές αντοχής σε διαστρωματική διάτμηση αλλά και στη μορφή αστοχίας που παρουσιάζουν τα δοκίμια
- Η περαιτέρω εκπόνηση πειραμάτων για την εξαγωγή πιο σαφών συμπερασμάτων σχετικά με τη σύγκριση των δοκιμίων ως προς τον τύπο του υφάσματος.
- Η επίδραση της αλληλουχίας των στρώσεων στην αντοχή σε διαστρωματική διάτμηση.

Βιβλιογραφία

A. ΕΛΛΗΝΙΚΗ:

- [1] Δ.Ι.Παντελής (2008). Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
- [2] Τσουβαλης Ν. (1998). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος, Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

B. ΔΙΕΘΝΗΣ:

- [3] ASM Handbook, Volume 21 Composites, Published by ASM International, 2001, p.77-107.
- [4] Composite Material Handbook, Volume 1. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials, Published by Army Research Laboratory, Department of Defense, 2002, p. 6.42-6.51 & p. 6.125-6.127.
- [5] D.L.Chung (2010). Composite Material Science Applications Second Edition, State University of New York, Buffalo.
- [6] J. Ealias, Lalmoni, J.J.Mattam (2013). Study of Inter-laminar Shear Stress of composite Structures, Internanional Journal of Emerging Technology and Advances Engineering Vol. 3, Issue 8.
- [7] M.T.Cann, Daniel O. Adams, C.L.Schneider (2008). Characterization of Fiber Volume Fraction Gradients in Composite Laminates, Journal of Composite Materials. Vol. 42, No. 5/2008, Los Angeles, London, New Delhi, Singapore.
- [8] S.K.Dandayuhapani, (2003). Characterization of in-plane properties of laminated composites at high strain rates, Thesis, India.

C. STANDARDS:

- [9] ASTM D 2344/D 2344M, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Material and Their Laminates, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2016.

- [10]ASTM D 3171 – 99, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1999.
- [11]ISO 1183-1, Methods for determining the density of non-cellular plastics – Part.1 Immersion Method, liquid Pyknometer method and titration method, International Organization for Standardization.
- [12]ISO 1172, Textile glass reinforced plastics – Prepegs, moulding compounds and laminates – Determination of the textile-glass and mineral-filler contents – Calcination Methods, International Organization for Standardization.
- [13]ISO 14130, Fibre-reinforced plastic Composites – Determination of apparent Interlaminar shear strength by short-beam method, International Organization for Standardization.

Παράρτημα: Data sheets

1. Advantex Boron-Free E-CR Glass Reinforcement Properties, Owens Corning, V. Reinforcements, Toledo:



INTRODUCTION

Advantex® glass offers a full line of products for every type of composite application designed to face corrosive environments. As an engineer, end-user, or fabricator selecting **Advantex®** glass will ensure you will be specifying, using, or making the highest quality composite applications ready to face the harshest environments. Select **Advantex®** glass when corrosion failure is not an option.

A proven product, introduced to the market in the late 1990's, **Advantex®** glass offers the unique attributes of being both a boron-free E-glass and an E-CR glass reinforcement in accordance with ASTM D578, ISO 2078.

ASTM D 578-00

Boron-Free

ISO 2078

E-CR: Recommended for use
In acidic environments

ADVANTEX® GLASS PROPERTIES

Advantex® glass is formulated using a patented boron-free glass composition giving it a high performance required in applications facing corrosion.

Property	Units	Test Method	Advantex®
Single Filament Tensile Strength	MPa	ASTM D2101	3,100 - 3,800
Single Filament Tensile Strength	Kpsi	ASTM D2101	450 - 550
Young's Modulus of Elasticity	GPa	Sonic	80 - 81
Young's Modulus of Elasticity	Mpsi		11.6 - 11.8
Fiber Density	g/cc	ASTM D1505	2.62
Softening Point	°C	ASTM C338	916
Annealing Point	°C	Parallel plate viscometry	736
Refractive Index		Oil Immersion	1.560 - 1.562
Dielectric Strength	kV/cm	ASTM D149	100 - 106
Dielectric Constant at 100kHz & 23 °C	kV/cm	ASTM D150	7.2
Dielectric Constant at 100kHz & 250 °C	kV/cm	ASTM D150	7.5

ADVANTEX® E-CR GLASS PRODUCTS OFFERED:

Owens Corning OCV™ businesses offer all product types necessary to make a complete FRP application out of high quality E-CR glass. Products Include:

- Direct Roving (single-end or Type 30® roving)
- Assembled Roving (spray-up, chop, SMC)
- Chopped Strand Mat (CSM)
- Continuous Filament Mat (CFM) – Unifilo® mat
- Non-Woven Veil
- Technical Fabrics

2. Balanced woven fabric data sheet # C210T2, Fibermax Composites, London.



Balanced woven fabric data sheet

Code # C210T2

Characteristics			
		Nominal	Tolerance
Mass per unit of area	(gr/sqm)	210	± 5%
Weave		Twill 2x2	
Laminate thickness	(mm)	0,19*	± 2,5%

Warp – Weft ratio		
	Warp	Weft
Fiber description	3K carbon fiber	3K carbon fiber
Thread count (ends/cm)	5,25	5,25
Weight distribution (g/mq)	105	105
Weight distribution (%)	50	50

(*) Theoretical thickness of compressed epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

FIBREMAX LTD
35 GRAFTON WAY, W1T 5DB LONDON, UNITED KINGDOM
TEL ++30 24280 92210, FAX ++30 24280 92270, info@fibermaxcomposites.com

3. Biaxial fabric data sheet Code # G310X, Fibermax Composites, London.



Biaxial fabric data sheet

Code # G310X

Characteristics			
		Nominal	Tolerance
Mass per unit of area	(gr/sqm)	310	± 5%
Weave		Biaxial	
Laminate thickness	(mm)	0,25*	± 15%
Knitting		12	

(*) Theoretical thickness of compressed epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

FIBREMAX LTD
35 GRAFTON WAY, W1T 5DB LONDON, UNITED KINGDOM
TEL ++30 24280 92210, FAX ++30 24280 92270, info@fibermaxcomposites.com

4. PYROFIL™ TR50S 12K fiber properties sheet, Grafil Inc. Sacramento.



PYROFIL™ TR50S 12K

Typical Fiber Properties

Tow Tensile	Strength	710 4,900	ksi MPa	JISR 7601
	Modulus	35 240	msi GPa	
Typical Density		0.066 1.82	lb.in ³ g/cm ³	JISR 7601
Typical Yield	12K	620 800	yds/lb mg/m	JISR 7601

Typical Mechanical Properties

Tensile Properties	0°	Strength*	430 2950	ksi MPa	ASTM D3039 / Vf=60.0%
		Modulus*	20.6 142	msi GPa	ASTM D3039 / Vf=60.0%
	90°	Strength	11 79	ksi MPa	ASTM D3039 / Vf=56.0%
		Modulus	1.3 9	msi GPa	ASTM D3039 / Vf=56.0%
Compressive Properties	0°	Strength*	230 1600	ksi MPa	SRM 1-88 / Vf=60.0%
		Modulus*	18.7 130	msi GPa	SRM 1-88 / Vf=60.0%
Flexural Properties	0°	Strength	430 3000	ksi MPa	ASTM D790 / L/d=40 / Vf=60.0%
		Modulus	19 130	msi GPa	ASTM D790 / L/d=40 / Vf=60.0%
	90°	Strength	20 140	ksi MPa	ASTM D790 / L/d=16 / Vf=56.0%
		Modulus	1.3 9	msi GPa	ASTM D790 / L/d=16 / Vf=56.0%
Short-Beam Shear	Strength		13 90	ksi MPa	ASTM D2344 / L/d=4 / Vf=56.0%

- 250F Epoxy Prepregs
- Resin: Mitsubishi Rayon #340 resin system
- Tensile and compressive properties are normalized to 60% fiber volume

5900 88th Street
Sacramento, CA
95828, USA
Tel: 916.386.1733
Fax: 916.383.7668
Web: www.grafil.com



6, Orchard Court
Binley Business Park
Harry Weston Road
Binley, Coventry CV3 2TQ UK
Tel: +44 (0) 2476 447272
Fax: +44 (0) 2476 449565

Important: The technical information contained herein is not to be construed as warranties and no patent liability can be assumed. This information can be used for material selection purposes only.

5. T300 data sheet, Toray Carbon Fibers America Inc, USA.

TECHNICAL
DATA SHEET
No. CFA-001

TORAYCA® T300 DATA SHEET

Baseline carbon fiber used in aerospace applications. Has 30 year production history and is known for its balanced composite properties, high quality, consistency, reliability and supplyability.

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		512 ksi	3,530 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		1.5 %	1.5 %	TY-030B-01
Density		0.064 lbs/in ³	1.76 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	1K	22,568 ft/lbs	66 g/1000m	TY-030B-03
	3K	7,523 ft/lbs	198 g/1000m	TY-030B-03
	6K	3,761 ft/lbs	396 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	40A, 40B		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	40D		0.7 %	TY-030B-05
	50A, 50B		1.0 %	TY-030B-05
	Twist	Twisted, Untwisted, or Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.41 $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.19 Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.025 Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	$1.7 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

COMPOSITE PROPERTIES *

Tensile Strength	270 ksi	1,860 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	260 ksi	1,810 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-790
ILSS	14 ksi	10 kgf/mm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.0 ksi	76 MPa	ASTM D-3039

* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6. Unidirectional fabric data sheet # C322U, Fibermax Composites, London.



Unidirectional fabric data sheet

Code # C322U

Characteristics			
		Nominal	Tolerance
Mass per unit of area	(g/m ²)	322	± 5%
Weave		Unidirectional, woven	
Laminate thickness	(mm)	0,35*	n/a

Warp – Weft ratio		
	Warp	Weft
Fiber description	12K carbon fiber	Glass thermoplastic
Thread count (ends/cm)	3,8	1,6
Weight distribution (g/mq)	302,68	19,32
Weight distribution (%)	94	6

(*) Theoretical thickness of compressed epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

FIBREMAX LTD
35 GRAFTON WAY, W1T 5DB LONDON, UNITED KINGDOM
TEL ++30 24280 92210, FAX ++30 24280 92270, info@fibermaxcomposites.com

7. Woven fabric data sheet Code # G520U, Fibermax Composites, London.



Woven fabric data sheet

Code # G520U

Characteristics			
		Nominal	Tolerance
Mass per unit of area	(gr/sqm)	520	± 5%
Weave		Unidirectional	
Laminate thickness	(mm)	0,42*	± 15%

Warp – Weft ratio		
	Warp	Weft
Fiber description	Glass roving 1200 tex	Thermoplastic 110 tex
Thread count (ends/cm)	4	1,5
Weight distribution (g/mq)	494	26
Weight distribution (%)	95	5

(*) Theoretical thickness of compressed epoxy laminate with 40% of reinforcement in volume.

Note: Technical information furnished is based on laboratory findings and believed to be correct. No warranties of any kind are made except that the materials supplied are of standard quality. All risk and liabilities arising from handling, storage and use of products, as well as compliance with applicable legal restrictions, rests with the user.

FIBREMAX LTD
35 GRAFTON WAY, W1T 5DB LONDON, UNITED KINGDOM
TEL ++30 24280 92210, FAX ++30 24280 92270, info@fibermaxcomposites.com