

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Πειραματική παραμετρική μελέτη μέτρησης  
μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών από περιέλιξη ινών  
και εφαρμογή στατιστικής ανάλυσης**



ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΑΤΖΙΝΑΣ

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

Αθήνα, Ιανουάριος 2021



## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Καθηγητή μου κ. Νικόλαο Τσούβαλη, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το τομέα των σύνθετων υλικών, με καθοδήγησε και με συμβούλεψε οποιαδήποτε στιγμή τον χρειάστηκα, ενεργώντας όχι μόνο ως καθηγητής αλλά και ως άνθρωπος.

Απευθύνω επίσης ευχαριστίες στον υποψήφιο διδάκτορα Αστρινό Παπαδάκη που έθεσε τα θεμέλια για την εργασία αυτή καθώς για την πολύτιμη συμβολή του. Επίσης πολύτιμη ήταν η καθοδήγηση από την κα. Θεοδώρα Τσιούρβα στο τομέα της διερεύνησης των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών και γι' αυτό την ευχαριστώ ιδιαίτερος. Ευχαριστώ επίσης θερμά τους κ. Θανάση Μαρκουλή και Χάρη Ξάνθη για την αμέριστη βοήθεια τους κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, αλλά για τη δημιουργία ενός ευχάριστου εργασιακού περιβάλλοντος.

Ακόμα ευχαριστώ την εταιρία B&T Composites για την κατασκευή και συνεισφορά των πειραματικών δοκιμών.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω βαθύτατα την οικογένεια μου καθώς και όλους τους ανθρώπους που βρίσκονται δίπλα μου και με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ .....	5
1.1. Ορισμός σύνθετων υλικών .....	5
1.2. Βασικά χαρακτηριστικά .....	6
1.2.1. Ρητίνες .....	6
1.2.2. Ενισχυτικές ίνες .....	8
1.3. Κατασκευαστικές Μέθοδοι .....	11
1.4. Εφαρμογές υλικών από περιέλιξη ινών .....	15
2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	18
2.1. Συμβατικές μέθοδοι χαρακτηρισμού .....	18
2.2. Δοκιμές χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμίων .....	20
2.3. Δοκιμές χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων .....	22
3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ .....	24
3.1. Γενική περιγραφή και σκοπός πειραματικής διαδικασίας .....	24
3.1.1. Μελέτη δοκιμίων FICHO3 .....	24
3.1.2. Μελέτη δοκιμίων B&T .....	30
4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ .....	34
4.1. Σκοπός .....	34
4.2. Μέτρηση πυκνότητας .....	34
4.3. Μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες .....	38
4.3.1. Διάλυση ρητίνης με νιτρικό οξύ .....	38
4.3.2. Διάλυση ρητίνης με θειικό οξύ .....	44
4.3.3. Μέθοδος ανάλυσης εικόνας .....	46
4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και παρατηρήσεις .....	57

5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	61
5.1. Σκοπός .....	61
5.2. Γεωμετρία δοκιμίων .....	61
5.3. Δοκιμή εφελκυσμού .....	65
5.3.1. Πειραματική διαδικασία .....	65
5.4. Δοκιμή διάτμησης.....	67
5.4.1. Πειραματική διαδικασία .....	69
5.5. Αποτελέσματα .....	72
5.5.1. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού.....	72
5.5.2. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης.....	75
6. ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ .....	80
6.1. Σκοπός .....	80
6.2. Γεωμετρία δοκιμίων .....	80
6.3. Πειραματική διαδικασία .....	86
6.4. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου.....	92
6.4.1. Αποτελέσματα δοκιμών FIXO3 .....	92
6.4.2. Αποτελέσματα δοκιμών B&T .....	97
7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	109
7.1. Στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών FIXO3.....	109
7.1.1. Πειραματικό σχέδιο .....	109
7.1.2. Κατάστρωση εξισώσεων .....	113
7.1.3. Αποτελέσματα .....	116
7.2. Ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών B&T.....	131
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	149
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	152







## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των παραμέτρων που επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, κατασκευασμένων από περιέλιξη ινών. Τα δοκίμια τα οποία εξετάζονται είναι κυρίως δακτυλιοειδή τα οποία προέρχονται από κυλίνδρους με διαφορετικές κατασκευαστικές παραμέτρους όπως είναι ο τύπος των ινών ενίσχυσης, τα γεωμετρικά στοιχεία, η γωνία και η δύναμη περιέλιξης των ινών καθώς και οι χρησιμοποιούμενες δέσμες τύλιξης (tows).

Αρχικά, εξετάζονται οι φυσικές ιδιότητες των δοκιμίων και ειδικότερα η πυκνότητα και η περιεκτικότητα σε ίνες. Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε ενισχυτικές ίνες επιχειρείται μια νέα μέθοδος με ανάλυση εικόνας από το οπτικό μικροσκόπιο. Τα αποτελέσματα της παραπάνω μεθόδου συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των συμβατικών μεθόδων που ορίζει το πρότυπο ASTM D3171. Στη συνέχεια εκτελούνται δοκιμές εφελκυσμού σε δακτυλιοειδή δοκίμια διαφόρων κατασκευαστικών παραμέτρων με σκοπό την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας και της τάσης θραύσης. Η μέθοδος η οποία ακολουθείται για τον παραπάνω σκοπό αφορά μία ελαφρώς βελτιστοποιημένη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου ASTM D2290. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους με σκοπό να αξιολογηθούν οι παράγοντες που φαίνεται να επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες.

Επιπλέον, σε μία άλλη σειρά δακτυλιοειδών αλλά και ευθύγραμμων δοκιμίων προερχόμενων από κυλίνδρους διαφορετικών κατασκευαστικών στοιχείων, εξετάζεται η επίδραση του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις μηχανικές τους ιδιότητες. Από τέσσερις ομάδες όμοιων δοκιμίων οι τρεις ποντίστηκαν και παρέμειναν στη θάλασσα για διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Κάθε δέκα μήνες πραγματοποιούταν ανέλκυση διαδοχικών ομάδων με σκοπό τη μελέτη του μέτρου ελαστικότητας και διάτμησης αλλά και των τάσεων θραύσης σε εφελκυσμό και διάτμηση. Η τέταρτη ομάδα δοκιμίων, έπειτα από τριάντα δύο μήνες στο νερό, δοκιμάστηκε σε εφελκυσμό σύμφωνα με τις μεθόδους ASTM D2290 και ASTM D3039. Τα αποτελέσματα από όλες τις ομάδες ανέλκυσης υπόκεινται σε στατιστική ανάλυση ANOVA με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις μηχανικές ιδιότητες.



# ABSTRACT

The aim of the present diploma thesis is the study of the parameters that affect the mechanical properties of composite materials, constructed with the method of filament winding. The examined specimens are mostly ring shaped, coming from cylinders with different construction parameters such as the type of the fibers, the geometric characteristics, the angle and the tensioning force of the winding as well as the tows.

Firstly, are examined the natural properties of the specimens and more specifically the density and the fiber fraction. In order to measure the fiber mass fraction, is used the method image analysis with pictures acquired from the optical microscope. The results of the method above are compared with the results of the methods described in the conventional standard ASTM D3171. Following, the ring specimens with different manufacturing parameters, are loaded in tension in order to evaluate the Young's modulus and the maximum hoop strength. For the implementation of the tests is used a slightly modified and improved version of the split-disk test method (ASTM D2290). The results are compared in order to evaluate the parameters that seem to affect the mechanical properties.

Moreover, another series of ring and long specimens, coming from cylinders with different manufacturing parameters, are tested in order to evaluate the effect of deep-sea environment in the mechanical properties. For this purpose, several batches of composite filament wound specimens were exposed to deep sea conditions for several periods of time. After completing the predetermined period of exposure, each batch was lifted and the mechanical properties of the specimens were measured via proper mechanical tests. In this study, the last batch that was lifted is tested according to the standards ASTM D2290 and ASTM D3039 in order to measure the Young's modulus, the strength in the fiber direction and perpendicular to it and shear properties. Finally, comparison between the results of a dry reference batch and the immersed specimens is made, using the ANOVA statistical analysis, in order to investigate possible differences in material degradation.



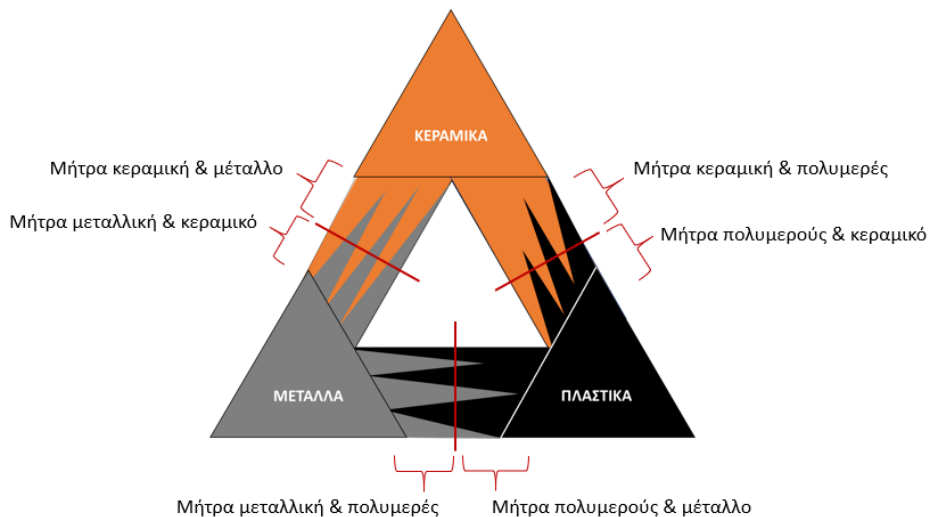
# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

## 1.1. Ορισμός σύνθετων υλικών

Για ένα σύστημα ο όρος «σύνθετο» σημαίνει ότι αυτό αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material). Ειδικότερα, στην επιστήμη των υλικών, ως σύνθετο χαρακτηρίζεται ένα υλικό του οποίου τα συνιστάμενα στοιχεία έχουν αισθητά διαφορετικές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες με αποτέλεσμα και το παράγωγο υλικό να έχει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτές των επιμέρους στοιχείων του. Τα επιμέρους στοιχεία παραμένουν διαχωρισμένα εντός του σύνθετου υλικού, διαφοροποιώντας το έτσι από μείγματα και στερεά διαλύματα. Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων υλικών θα πρέπει οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη του να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από των υπολοίπων ( $\geq 5$  φορές) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα όλων των μερών να μην είναι πολύ μικρή ( $>10\%$ ). (Τσούβαλης, 1998).

Για τους Agarwal & Broutman (1990) ως σύνθετα υλικά ορίζονται «τα υλικά τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μία συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.»

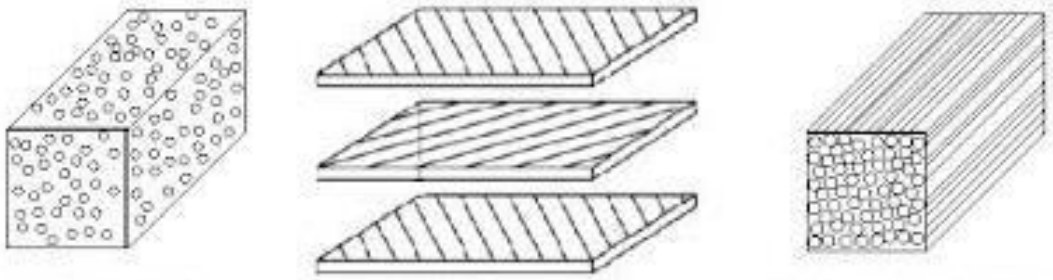
Το ένα από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Στο σχήμα 1.1 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερή και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Σχήμα 1.1 Κατηγορίες Σύνθετων Υλικών

## 1.2. Βασικά χαρακτηριστικά

Τα σύνθετα υλικά χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με τη μορφή τους, σε σύνθετα υλικά σωματιδίων (particulate composite materials), σε πολυστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composite materials) και σε ινώδη σύνθετα υλικά (fibrous composite materials, fiber reinforced plastics, FRP). Σχηματική αναπαράσταση των τριών ειδών απεικονίζεται στο σχήμα 1.3 όπου παρουσιάζονται τα είδη σύνθετων υλικών με τη σειρά που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση των διάφορων ειδών σύνθετων υλικών.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα μελετηθούν αποκλειστικά τα ινώδη σύνθετα υλικά. Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούνται από ένα υλικό που ονομάζεται μήτρα (matrix), μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένες ίνες άλλου υλικού. Ως ίνες θεωρούνται οι ενισχύσεις οι οποίες έχουν τη μία τους διάσταση (μήκος) πολύ μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες και μπορεί να είναι τοποθετημένες είτε άτακτα, είτε με συγκεκριμένη πλέξη και προσανατολισμό. Οι ίνες λόγω της ευθυγράμμισης της κρυσταλλικής τους δομής με τον άξονα του μήκους τους είναι εφικτό να έχουν υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες σε αυτήν την διεύθυνση από οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση του υλικού. Οι μηχανικές ιδιότητες των ενισχυτικών ινών είναι αυτές που καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις ιδιότητες του τελικού σύνθετου υλικού. Η κύρια καταπόνηση που μπορεί να παραληφθεί από τις ίνες είναι ο εφελκυσμός στην κύρια διεύθυνσή τους, για το λόγο αυτό εμβαπτίζονται μέσα στην μήτρα, η οποία δρα σα συνδετικό υλικό μεταξύ των ινών και βοηθάει στη μεταφορά των τάσεων μεταξύ αυτών και στο διασκορπισμό τους σε μεγάλο εύρος του σύνθετου υλικού. Επιπρόσθετα η μήτρα, σταθεροποιεί τις ίνες σε συγκεκριμένη θέση και τις προστατεύει από περιβαλλοντικές φθορές και προσβολές. (Τσούβαλης, 1998)

### 1.2.1. Ρητίνες

Το συνδετικό υλικό αποτελεί σημαντικό κομμάτι του σύνθετου υλικού. Η μήτρα, για να μπορεί να ικανοποιεί τις ανάγκες που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ολκιμότητα, ανθεκτικότητα και σχετική ευκαμψία. Στα ινώδη σύνθετα υλικά ως μήτρα χρησιμοποιούνται ρητίνες που αρχικά βρίσκονται σε υγρή μορφή και καταλήγουν μέσω της χημικής αντίδρασης του πολυμερισμού (σκλήρυνση, curing) σε στερεή μορφή. Στη ναυπηγική χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο οργανικές θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες (thermosetting resins). Οι κυριότερες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι οι πολυεστερικές (polyester),

βινυλεστερικές (vinylester), εποξικές ή εποξειδικές (epoxy) και οι φαινολικές (phenolic). Οι τυπικές ιδιότητες των ρητινών απεικονίζονται στον πίνακα 1.1. Η δεύτερη κατηγορία οργανικών ρητινών είναι οι θερμοπλαστικές ρητίνες (thermoplastic resins) οι οποίες σε αυξημένες θερμοκρασίες μαλακώνουν και μπορούν να μορφοποιηθούν.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1** Τυπικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Ρητίνη	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_t$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)	$\sigma_c$ (MPa)
Πολυεστερική (ορθοφθαλκή)	1.23	3.2	0.36	65	2	130
Πολυεστερική (ισοφθαλκή)	1.21	3.6	0.36	60	2.5	130
Βινυλεστερική	1.12	3.4	-	83	5	120
Εποξική	1.20	3	0.37	85	5	130
Φαινολική	1.15	3	-	50	2	-

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δοκίμια που θα εξεταστούν είναι κατασκευασμένα με εποξική ρητίνη, επομένως θα γίνει αναφορά μόνο σε αυτού του τύπου τις ρητίνες. Εκτός της μεγάλης ικανότητας προσαρμογής, οι εποξικές ρητίνες παρουσιάζουν υψηλές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη αντοχή σε διάβρωση. Άλλο ένα προτέρημα αυτού του τύπου ρητίνης είναι η μικρή συρρίκνωση κατά τη σκλήρυνσή της (1.2 έως 4% του όγκου) πράγμα το οποίο συμβάλλει στα εξαιρετικά χαρακτηριστικά δεσμού όταν χρησιμοποιούνται ως συγκολλητικά μέσα (adhesives).

Οι εποξικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικούς κλάδους ως συγκολλητικό μέσο σε κατασκευές κυψελών για αεροσκάφη και σαν διαστρωματικό υλικό στο σκελετό των αεροσκαφών και σε εφαρμογές πυραύλων. Είναι πολύ χρήσιμες ως συστατικά στεγανοποίησης για τη κατασκευή πλαστικών ή μεταλλικών σκαφών και αυτοκινήτων. Επίσης τυγχάνουν ευρείας χρήσης και σε ηλεκτρικές εφαρμογές λόγω της εξαιρετικής ηλεκτρικής μόνωσης που προσφέρουν. Για τη κατασκευή σύνθετων υλικών χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε αυτοματοποιημένες μεθόδους παραγωγής (π.χ. μέθοδος περιέλιξης ινών, filament winding).

Η διαδικασία στερεοποίησης των εποξικών ρητινών απαιτεί την προσθήκη σκληρυντικής ουσίας (hardener) και καταλύτη (catalyst) ώστε να ελεγχθεί η διαδικασία η οποία συνήθως περιλαμβάνει και την επιβολή υψηλών θερμοκρασιών, μεταξύ 60° και 150° C. Υπάρχουν επίσης εποξικές ρητίνες ψυχρής σκλήρυνσης (cold-cure) που πολυμερίζονται σε θερμοκρασίες 20-25° C, έχουν όμως χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες ενώ παρουσιάζουν και αρκετά προβλήματα κυρίως ως προς το ιξώδες τους. Τα τελευταία χρόνια γίνονται έρευνες για προσθήκη και άλλων υλικών στο σύστημα της ρητίνης, όπως είναι το γραφένιο, καθώς προσδίδουν στο υλικό νέες φυσικές ιδιότητες όπως η ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα.

### 1.2.2. Ενισχυτικές ίνες

Οι ενισχυτικές ίνες, όπως αναφέρθηκε ως άνω, είναι ικανές να φέρουν κατά κύριο λόγο εφελκυστικό φορτίο κατά την κύρια διεύθυνσή τους, παρόλα αυτά τα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται παρουσιάζουν καλές μηχανικές ιδιότητες και σε άλλες καταπονήσεις, όπως θλίψη, κάμψη και διάτμηση. Η ανθεκτικότητα του σύνθετου υλικού οφείλεται στη συνεργασία ινών και ρητίνης όπου οι ίνες δρουν σαν μικροσκοπικοί συγκρατητές των ρωγμών της ρητίνης, ενώ αντίστοιχα η ρητίνη βοηθά στη μεταβίβαση των τάσεων σε μεγαλύτερο μέρος της ενισχυτικής ίνας, μειώνοντας έτσι την καταπόνησή της. Μέσω του μηχανισμού αυτού μία ψαθυρή ρητίνη μετατρέπεται σε ένα ανθεκτικό σύνθετο υλικό, του οποίου οι ιδιότητες είναι υψηλότερες από αυτές των συστατικών του μερών. Κατά πλειοψηφία στις ναυπηγικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται ίνες γυαλιού, ενώ διαρκώς αυξανόμενη χρήση παρατηρείται στις ίνες άνθρακα και αραμιδίου, κυρίως σε κατασκευές υψηλών επιδόσεων. Οι ίνες άνθρακα και αραμιδίου εμφανίζουν αισθητά καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από αυτές του γυαλιού, αλλά με πολύ υψηλότερο κόστος (τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερο). Εκτός από τις ως άνω ίνες, άλλες ίνες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών είναι οι ίνες boron, οι κεραμικές ίνες, καθώς και διάφορες οργανικές ίνες, οι οποίες δε βρίσκουν εφαρμογές στην ναυπηγική.

Οι ευρύτερα χρησιμοποιημένες ίνες στον τομέα της ναυπηγικής, όπως προαναφέρθηκε, είναι οι ίνες γυαλιού (glass fibers) οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή, σχετικά χαμηλή δυσκαμψία και χαμηλό κόστος. Ανάλογα με την χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χαρακτηρίζονται ως τύπου E, C και S, των οποίων οι κύριες ιδιότητες παρουσιάζονται στον πίνακα 1.2.



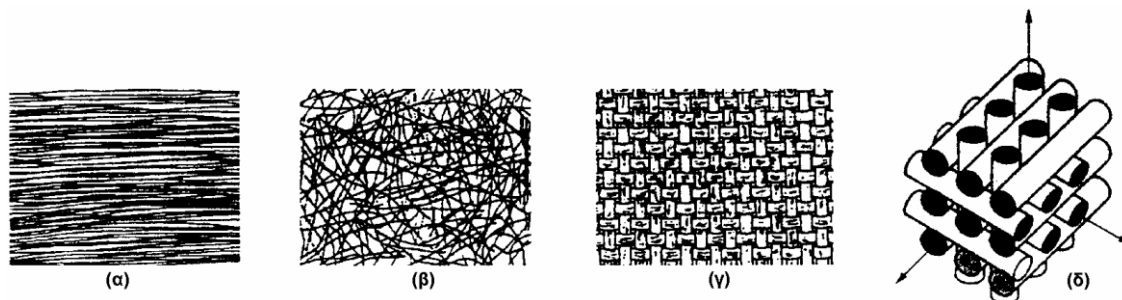
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2 Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ		
	E	C	S
Χημική σύσταση (%)			
SiO <sub>2</sub>	54	60	65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16	25	25
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	-	-
CaO	17	9	-
MgO	5	6	10
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	2,54	2,50	2,48
Θερμοκρασία τήξης ( °C)	900-1200	1400-1600	1400-1600
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ( °C)	550	650	650

Ο τύπος E των ινών αυτών είναι ο τύπος που χρησιμοποιείται περισσότερο ως τύπος ενίσχυσης στις ναυπηγικές εφαρμογές (πάνω από το 90% των ινών που χρησιμοποιούνται είναι τύπος E). Έχουν καλές ηλεκτρικές ιδιότητες καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά στην αλλαγή των καιρικών συνθηκών, αντιθέτως έχουν μέτρια αντοχή σε χημικές αντιδράσεις. Οι ίνες παράγονται μεμονωμένα η μία από την άλλη. Κατά την παραγωγή τους η πρώτη ύλη τοποθετείται σε δεξαμενή όπου τήκεται και στη συνέχεια το τήγμα τροφοδοτείται σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα όπου το γυαλί ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα υπό την επίδραση της βαρύτητας. Οι παραγόμενες ίνες συγκεντρώνονται σε ένα σύνολο και εφελκύνονται μηχανικά μέχρις ότου αποκτήσουν την κατάλληλη διάμετρο, ακολουθεί ελαφρός ψεκασμός τους με νερό (ψύξη). Ακολουθώς οι ίνες διέρχονται από ιμάντα, που επιβάλλει σ' αυτές προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό (binder) ή ειδικά κολλώδη πρόσθετα (sizers) που δρουν ως προστατευτικές επικαλύψεις και συνεισφέρουν στην καλύτερη πρόσφυση ινών-μήτρας. Τέλος, οι ίνες τυλίγονται σε νήματα (strands), το κάθε ένα από τα οποία περιέχει περίπου 200 ίνες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μερικά από τα δοκίμια που θα μελετηθούν θα κατασκευαστούν από πλεξίδες νημάτων γυαλιού τύπου E. Οι ίνες γυαλιού διατίθενται στο εμπόριο σε διάφορες μορφές, κατάλληλες για διαφορετικές εφαρμογές η κάθε μία. Οι βασικές από τις μορφές αυτές είναι:

- Υαλοπίλημα (Chopped Strand Mat, CMT)
- Πλεξίδες νημάτων (Rovings) και υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR)
- Υφάσματα πυκνής πλέξης (Woven Fabrics)
- Μονοαξονικά υφάσματα (Unidirectional Rovings, UD)

Στο σχήμα 1.4 απεικονίζεται σκαρίφημα με τις διαφορετικές διατάξεις των ινών. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιηθούν πλεξίδες νημάτων ως έχουν, χωρίς καμία πλέξη.

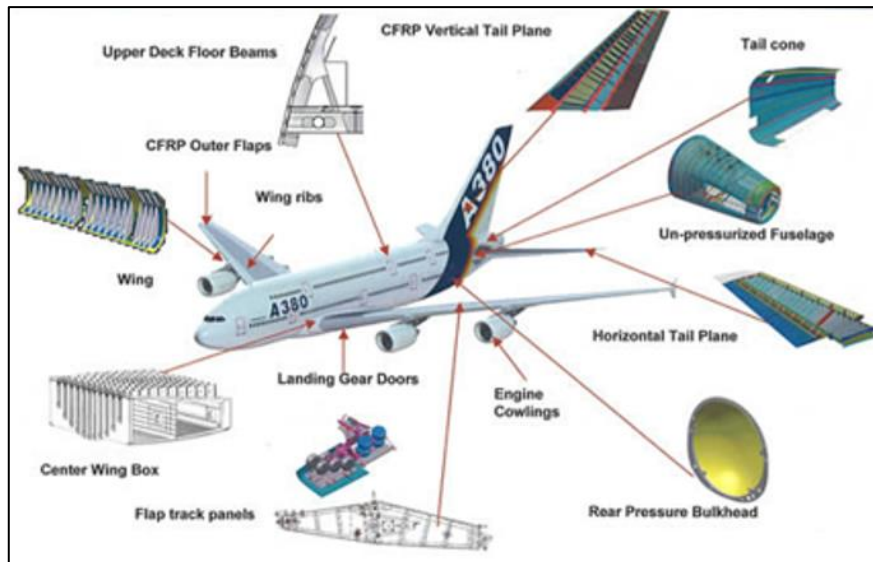


Σχήμα 1.4 Τύποι διάταξης ινών. (α) μονοαξονικό ύφασμα, (β) υαλοπίλημα, (γ) υαλοϋφασμα και (δ) πεπλεγμένο ύφασμα.

Εκτός από τις ίνες γυαλιού σημαντικό ενδιαφέρον για τις ναυπηγικές εφαρμογές παρουσιάζουν και οι ίνες άνθρακα, οι οποίες είναι η επικρατέστερη ενίσχυση για την κατασκευή σύνθετων υλικών υψηλών επιδόσεων. Λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής παράγονται δύο διαφορετικές κατηγορίες ινών, οι ίνες υψηλής αντοχής (high strength, HS) και οι ακριβότερες ίνες υψηλού μέτρου ελαστικότητας (high modulus, HM), οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των οποίων φαίνονται στον πίνακα 1.3. Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται βέλτιστος συνδυασμός μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης βάρους, όπου το υψηλό κόστος τους δικαιολογείται κυρίως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές (σχήμα 1.5). Σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι επίσης ο χαμηλός συντελεστής διαστολής. Στην παραγωγή ανθρακονημάτων χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητού μεταξιού (rayon) και πίσσα. Οι ίνες άνθρακα διατίθενται στο εμπόριο σε διάφορες μορφές, όπως και οι ίνες γυαλιού. Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία τα περισσότερα από τα δοκίμια που θα μελετηθούν είναι κατασκευασμένα από πλεξίδες νημάτων άνθρακα υψηλής αντοχής και ένα δοκίμιο από ίνες με βάση την πίσσα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.3 Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ	ΙΝΕΣ ΥΨΗΛΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	180-230	350-420
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2500-3400	1900-2300
% περιεκτικότητα άνθρακα	95-98	99
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1,8	1,9
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	2000	2500



Σχήμα 1.5 Τμήματα αεροσκάφους από σύνθετο υλικό

### 1.3. Κατασκευαστικές Μέθοδοι

Τα σύνθετα υλικά εκτός από πληθώρα επιλογών ως προς τα κατασκευαστικά τους υλικά, παρουσιάζουν και πολλές επιλογές ως προς τις μεθόδους κατασκευής τους. Η επιλογή πάντα γίνεται δεδομένων των αναγκών που πρέπει να καλυφθούν σε κάθε εφαρμογή από το σύνθετο υλικό.

Οι μέθοδοι μορφοποίησης ινωδών σύνθετων υλικών με οργανική μήτρα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις ασυνεχείς μεθόδους μορφοποίησης σύνθετου υλικού και στις συνεχείς.

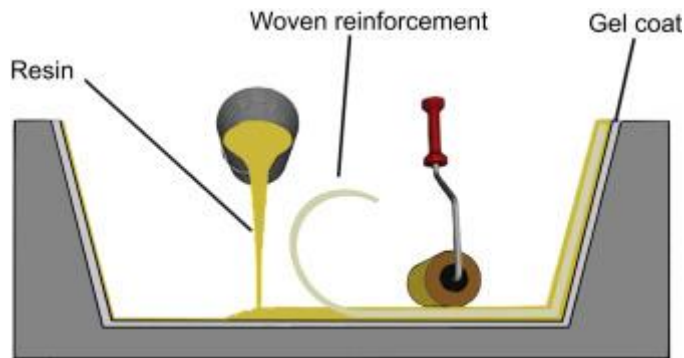
Ασυνεχείς μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετου υλικού:

- Μορφοποίηση με απλή επαφή (contact moulding)
- Μορφοποίηση με πίεση (compression moulding)
- Μορφοποίηση με διαιρετό καλούπι (matched die moulding)
- Έκχυσης ρητίνης (resin transfer moulding, RTM)

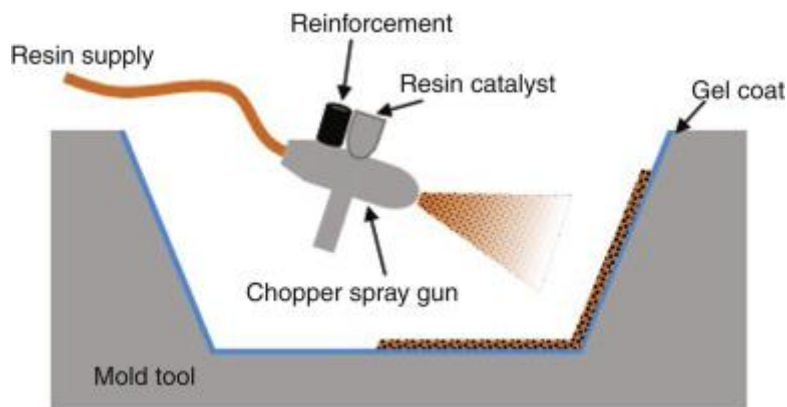
Συνεχείς μέθοδοι μορφοποίησης σύνθετου υλικού:

- Περιέλιξη ινών (filament winding)
- Συνεχούς μορφοποίησης ελασμάτων (sheet moulding compounds, SMC)
- Μορφοποίηση με έλξη (pultrusion)

Για την κατασκευή σκαφών από σύνθετα υλικά μακράν όλων των άλλων η πιο συνηθισμένη μέθοδος είναι η μορφοποίηση με απλή επαφή. Πρόκειται για μία απλή μέθοδο όπου πολυεστερική ρητίνη και ίνες γυαλιού Ε τοποθετούνται πάνω σε καλούπι είτε με τη μέθοδο επίστρωσης με το χέρι (hand lay-up method), είτε με την μέθοδο επίστρωσης με ψεκασμό (spray-up method). Σχηματικές αναπαραστάσεις των μεθόδων απεικονίζονται στα σχήματα 1.6 και 1.7.



Σχήμα 1.6 Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι.



Σχήμα 1.7 Μέθοδος επίστρωσης με ψεκασμό.

Η μορφοποίηση με πίεση περιλαμβάνει την άσκηση πίεσης στην επιφάνεια του μη στερεοποιημένου πολύστρωτου, με σκοπό την απομάκρυνση της περίσσειας ρητίνης καθώς και των κενών αέρα. Πολλές φορές επιβάλλεται ταυτόχρονα και θερμότητα προκειμένου να επιταχυνθεί ο πολυμερισμός και να αναπτυχθεί πλήρως η αντοχή και η δυσκαμψία του υλικού. Η μέθοδος εφαρμόζεται με δύο τεχνικές, είτε με σάκο κενού (vacuum bag moulding), είτε σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave moulding). Η μέθοδος αυτή παράγει προϊόντα πολύ υψηλής ποιότητας καθώς και καλής επαναληψιμότητα ως προς τις ιδιότητές τους.

Η μέθοδος έκχυσης ρητίνης ενδείκνυται σε περιπτώσεις που απαιτούνται προϊόντα απόλυτα καθορισμένης γεωμετρίας και λείων επιφανειών. Κατά τη διαδικασία αυτής της μεθόδου, οι ενισχυτικές ίνες τοποθετούνται μεταξύ δύο καλουπιών τα οποία καθορίζουν και τη γεωμετρία του προϊόντος. Στη συνέχεια η ρητίνη εκχύνεται με πίεση μέσα στην ειδική κοιλότητα μεταξύ των καλουπιών. Με τη μέθοδο αυτή κατασκευάζονται προϊόντα με υψηλές απαιτήσεις ανοχών και μεγάλη περιεκτικότητα ινών. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα είναι η υψηλή πίεση που απαιτείται καθώς και τα ανθεκτικά και δύσκαμπτα καλούπια που χρησιμοποιούνται.

Εκτός από τις μεθόδους ασυνεχούς μορφοποίησης που αναφέρθηκαν παραπάνω, σημαντικές για την παραγωγή στοιχείων από σύνθετα υλικά είναι οι μέθοδοι της μορφοποίησης με έλξη καθώς και της μορφοποίησης ελασμάτων που παράγουν μορφοδοκούς και επίπεδα φύλλα αντίστοιχα. Οι μέθοδοι αυτές είναι πλήρως αυτοματοποιημένες και τα τελικά τους

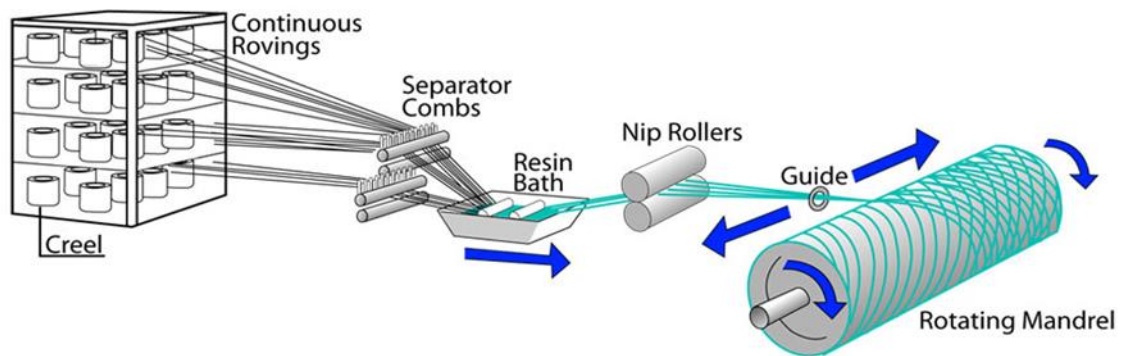
προϊόντα μπορούν να τυποποιηθούν σύμφωνα με τα πρότυπα των αντίστοιχων χαλύβδινων στοιχείων.

Τέλος, θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μέθοδος περιέλιξης ινών (filament winding), με την οποία θα κατασκευαστούν τα δοκίμια που θα εξεταστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Πρόκειται για μία μέθοδο με την οποία παράγονται κυρίως υψηλής ποιότητας εκ περιστροφής συμμετρικές κατασκευές, όπως κυλινδρικά κελύφη ή κύλινδροι με ημισφαιρικά καπάκια. Η διαδικασία περιλαμβάνει περιέλιξη νημάτων υπό τάση πάνω σε περιστρεφόμενο κυλινδρικό καλούπι (mandrel).

Αρχικά οι ίνες είναι τυλιγμένες σε ρολά με συστάδες ινών (tows) που τροφοδοτούν τη μονάδα παραγωγής. (σχήμα 1.8) Το αξονικό καλούπι περιστρέφεται συνεχώς κατά τον διαμήκη άξονα που διέρχεται από το κέντρο του, καθώς ο βραχίονας τροφοδοσίας ινών κινείται συνεχώς, με ταχύτητες συγχρονισμένες με αυτές του άξονα, σε οριζόντια διεύθυνση παράλληλη σε αυτόν. Η τοποθέτηση των ινών γίνεται υπό συγκεκριμένη γωνία που καθορίζεται από τη σχετική θέση καλουπιού και βραχίονα και ελέγχεται από την μονάδα ελέγχου της μηχανής. Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος τύπος ενισχυτικών ινών είναι οι συνεχόμενης ροής πλεξίδες νημάτων ινών γυαλιού ή άνθρακα οι οποίες εμποτίζονται σε λουτρό οργανικής ρητίνης και στη συνέχεια τυλίγονται γύρω από το καλούπι. Μόλις το καλούπι καλυφθεί πλήρως με το επιθυμητό πάχος ινών, ξεκινάει η διαδικασία της σκλήρυνσης της ρητίνης επάνω στο καλούπι και πιθανόν μέσα σε φούρνο, ανάλογα με το σύστημα της ρητίνης και τα χαρακτηριστικά σκλήρυνσής του. Μετά από τον πλήρη πολυμερισμό της ρητίνης το καλούπι αφαιρείται αφήνοντας το τελικό κυλινδρικό σύνθετο υλικό. Τα αξονικά καλούπια πρέπει να αντέχουν τα θλιπτικά φορτία που αναπτύσσονται από τις τάσεις περιέλιξης καθώς και τις υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται κατά την σκλήρυνση της ρητίνης, για το λόγο αυτό είναι συνήθως χαλύβδινα και για την ευκολότερη αποκόλληση τους έχουν μικρή κωνικότητα ή είναι διαιρετά. Σε ορισμένες εφαρμογές το καλούπι δεν αφαιρείται μετά το τέλος της διαδικασίας και αποτελεί μόνιμο μέρος του τελικού προϊόντος. Γραφική απεικόνιση της μεθόδου περιέλιξης ινών φαίνεται στο σχήμα 1.9.



Σχήμα 1.8 Ίνες τυλιγμένες σε ρολό



Σχήμα 1.9 Γραφική απεικόνιση της μεθόδου περιέλιξης ινών.

Η διαδικασία περιέλιξης είναι μία διαδικασία κατάλληλη για αυτοματοποίηση, αποτέλεσμα της οποίας είναι η επίτευξη υψηλών ρυθμών παραγωγής. Επίσης, η μικρή επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην παραγωγική διαδικασία οδηγεί σε προϊόντα υψηλής ποιότητας καθώς και σε μείωση του κόστους λόγω των λιγότερων εργατοωρών. Οι κύλινδροι που κατασκευάζονται έχουν μεγάλη περιεκτικότητα ινών με αναμενόμενες τιμές από 65% έως 85%. Τα κυριότερα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η αδυναμία περιέλιξης επιφανειών κάθετα στον άξονα περιστροφής, καθώς και η δυσκολία περιέλιξης σε μικρές γωνίες (παράλληλα με τον άξονα περιστροφής). Τέλος, τα προϊόντα συνήθως δεν έχουν πολύ καλή ποιότητα στην εξωτερική επιφάνειά τους χωρίς να υποστούν περαιτέρω κατεργασία.

#### 1.4. Εφαρμογές υλικών από περιέλιξη ινών

Δεδομένων των πλεονεκτημάτων που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα υλικά που έχουν κατασκευαστεί με τη μέθοδο περιέλιξης ινών βρίσκουν συνεχώς νέες εφαρμογές. Εκτός από τον κλάδο της ναυπηγικής, από τα υλικά αυτά κατασκευάζονται υψηλών απαιτήσεων κυλινδρικά στοιχεία όπως μπαστούνια του γκολφ, καλάμια ψαρέματος, σκελετοί ποδηλάτων, στύλοι μετάδοσης ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και φανοστάτες. Σημαντική εφαρμογή βρίσκουν και στην αεροναυπηγική, όπου με την εν λόγω μέθοδο κατασκευάζονται άτρακτοι αεροσκαφών, αλλά και κελύφη κινητήρων πυραύλων των διαστημοπλοίων (σχήμα 1.10) και βλημάτων (Peters, 2011).



Σχήμα 1.10 Prime Rocket, της εταιρίας Orbex κατασκευασμένος με τη μέθοδο περιέλιξης ινών.

Στον τομέα της ναυπηγικής τα σύνθετα υλικά εμφανίζονται σε ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Οι δύο κύριοι λόγοι που οδηγούν σε αυτήν την αύξηση είναι η καλή τους συμπεριφορά σε υδάτινο περιβάλλον αλλά και οι υψηλές ειδικές τους ιδιότητες (λόγος τιμής ιδιότητας προς ειδικό βάρος). Όσον αναφορά στα υλικά που παράγονται με την μέθοδο περιέλιξης ινών, προορίζονται για στοιχεία κυλινδρικών διατομών. Ιδιαίτερη εφαρμογή βρίσκουν σε υποθαλάσσιους αγωγούς μεταφοράς πετρελαίου καθώς και σε δίκτυα σωληνώσεων σκαφών και μεγάλων εμπορικών πλοίων όπως στα νέα συστήματα επεξεργασίας έρματος (overboard pipes in water ballast treatment system). Ακόμη μία εφαρμογή που συναντώνται τα συγκεκριμένα υλικά μέσα στα σκάφη είναι οι άξονες μετάδοσης ισχύος (drive shaft) που σε ορισμένες περιπτώσεις μικρών σκαφών τείνουν να αντικατασταθούν από σύνθετα υλικά λόγω εξοικονόμησης βάρους (σχήμα 1.11). Από τις σημαντικότερες εφαρμογές τους είναι η κατασκευή δοχείων ανθεκτικών σε μεγάλες εσωτερικές ή εξωτερικές πιέσεις. Οι δεξαμενές με μεγάλη αντοχή σε εσωτερικές πιέσεις προορίζονται για τη μεταφορά και αποθήκευση καυσίμων όπως το υδρογόνο, το φυσικό αέριο (CNG tank) ή υγρό οξυγόνο (LOX tank) όπως η δεξαμενή που φαίνεται στο σχήμα 1.12. Αντίστοιχα, οι κύλινδροι με αντοχή στις

εξωτερικές πιέσεις χρησιμοποιούνται ως προστατευτικά περιβλήματα πίεσης (pressure housings). Πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή των ίδιων κυλίνδρων αποτελούν τα αυτόνομα υποβρύχια οχήματα (autonomous underwater vehicle, AUV), πληθώρα των οποίων κατασκευάζεται με την μέθοδο περιέλιξης ινών, όπως αυτό που απεικονίζεται στο σχήμα 1.13. Αντίστοιχα, γίνεται κατασκευή γαστρών πίεσης για επανδρωμένα υποβρύχια οχήματα. Άλλες εφαρμογές που έχουν τα σύνθετα υλικά κατασκευασμένα με τη μέθοδο περιέλιξης ινών είναι οι πλωτήρες, οι θόλοι ηχοβολιστικών καθώς και τα κελύφη τορπιλών. Τέλος υπάρχει εφαρμογή στους κυλίνδρους που υποστηρίζουν τις ηλεκτρικές έλικες πηδαλιουχίας (tunnels for electric bow thrusters) και στα κατάρτια των ιστιοπλοϊκών (σχήμα 1.14).

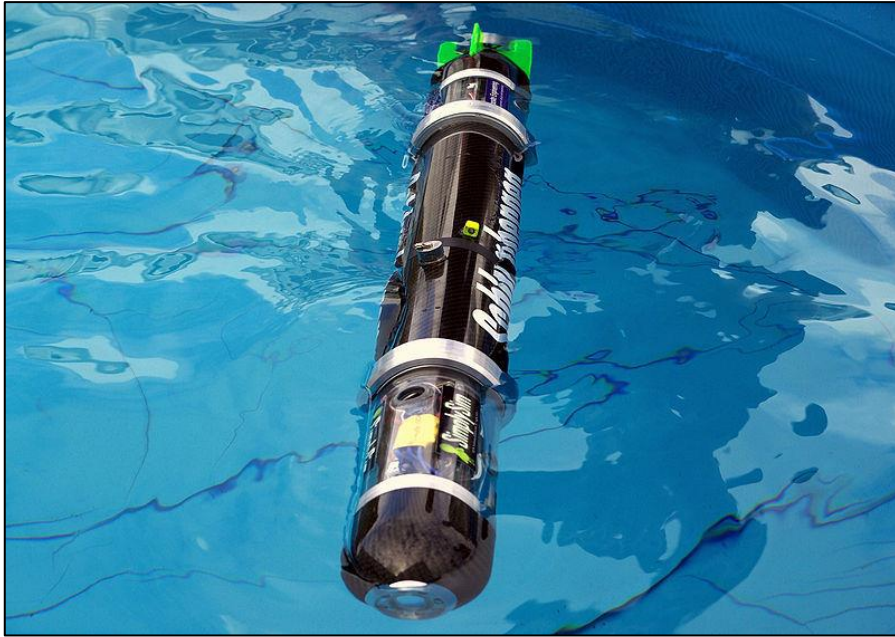


**Σχήμα 1.11** Κινητήριος άξονας κατασκευασμένος από σύνθετα υλικά.

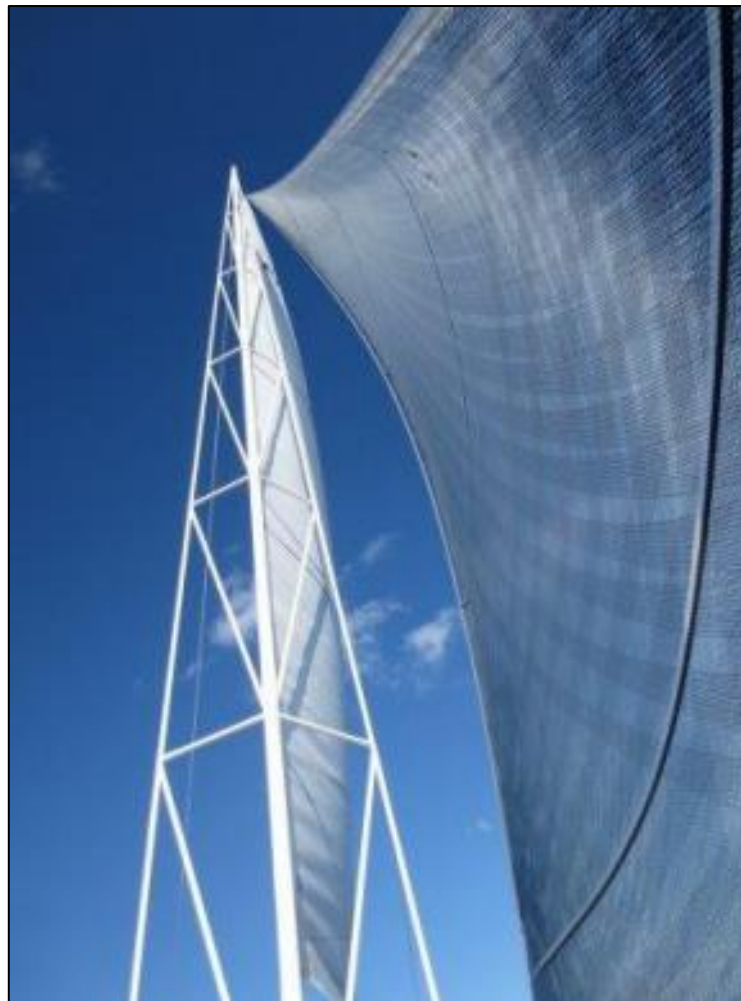


**Σχήμα 1.12** Δεξαμενή αποθήκευσης υγρού οξυγόνου από σύνθετο υλικό με carbon fibers





Σχήμα 1.13 Αυτόνομο υποβρύχιο όχημα κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά.



Σχήμα 1.14 Ανυποστήρικτο carbon κατάρτι από σε ιστιοπλοϊκό ύψους 18m, κατασκευασμένο από τη B&T Composites.

## 2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η ανάγκη των ανθρώπων να χρησιμοποιούν υλικά και μεθόδους που πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις και προδιαγραφές έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη προτύπων που προσδιορίζουν πλήρως τις διαδικασίες μέτρησης των ιδιοτήτων των περισσότερων υλικών ευρείας χρήσης. Τα πρότυπα αυτά χρειάστηκε να συμβαδίζουν με διεθνώς αναγνωρισμένους κανονισμούς. Έτσι το 1898 ιδρύθηκε η Αμερικανική Εταιρία Δοκιμών και υλικών (American Society for Testing and Materials, ASTM) με σκοπό την ανάπτυξη και δημοσίευση ομόφωνα αποδεκτών τεχνικών προτύπων που αφορούν στην κατασκευή υλικών, προϊόντων, συστημάτων και υπηρεσιών.

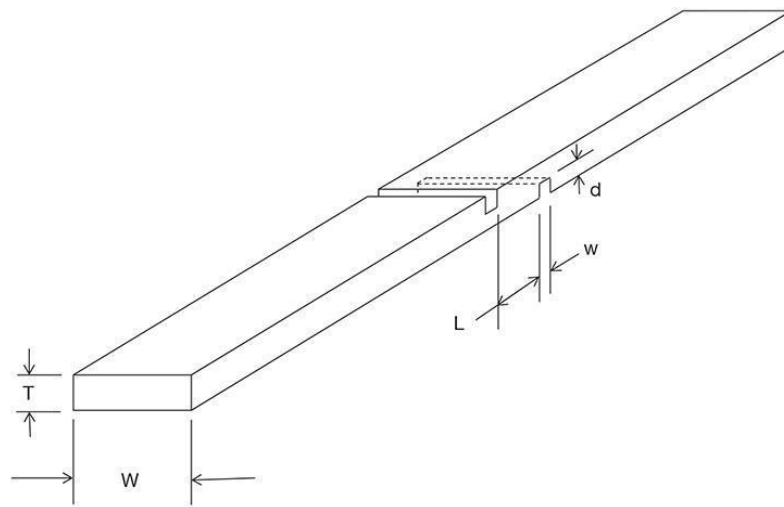
### 2.1. Συμβατικές μέθοδοι χαρακτηρισμού

Τα πρότυπα στη σύγχρονη εποχή ακολουθούνται και αναπτύσσονται από την επιστημονική κοινότητα αλλά και από τους κλάδους της βιομηχανίας. Κυρίως για τα σύνθετα υλικά, η λογική των προτύπων είναι ο προσδιορισμός μίας ιδιότητας του υλικού μέσω πειραματικής διαδικασίας όπου εξετάζονται δοκίμια του υλικού. Όσον αφορά στα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα, υπάρχει πλήρης σειρά προτύπων μέσω των οποίων μετρούνται όλες οι κύριες μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες είναι:

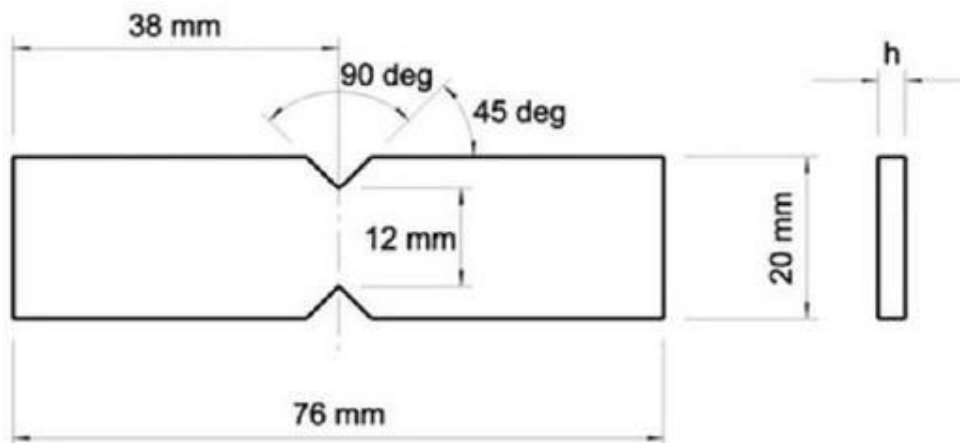
- Η αντοχή σε εφελκυσμό, καθώς και το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση άσκησης του φορτίου. Εφαρμόζεται το πρότυπο ASTM D3039, στο οποίο λεπτό επίπεδο δοκίμιο του υλικού σταθερής διατομής, εφελκύεται μονοτονικά με ταυτόχρονη καταγραφή του φορτίου. Ως ολική αντοχή θεωρείται το μέγιστο φορτίο, ενώ το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται μέσω του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων.
- Με την ίδια λογική μετρούνται οι ιδιότητες θλίψης του υλικού μέσω του προτύπου ASTM D3410.
- Όσον αφορά στις διατμητικές ιδιότητες του υλικού, έχουν αναπτυχθεί διάφορα πρότυπα που αποσκοπούν στον προσδιορισμό αυτών. Αρχικά το πρότυπο ASTM D3518, εφαρμόζεται σε συμμετρικά υλικά ενισχυμένα σε γωνίες +45 και -45 από τον βασικό άξονα του υλικού, όπου ασκείται σε λεπτά επίπεδα δοκίμια μονοαξονικός εφελκυσμός κατά τον κύριο άξονα όμοιος με του προτύπου ASTM D3039. Η διατμητική αντοχή του υλικού υπολογίζεται μέσω του εφαρμοζόμενου φορτίου και το μέτρο διάτμησης από το διάγραμμα διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων. Άλλη μέθοδος είναι αυτή του προτύπου ASTM D3846 όπου σε δοκίμιο με εγκοπές, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.1, ασκείται θλιπτική φόρτιση. Μεταξύ των δύο εγκοπών δημιουργείται καθαρή διάτμηση και στο σημείο αυτό γίνονται οι μετρήσεις των ιδιοτήτων. Τέλος, τα ίδια αποτελέσματα μπορούν να υπολογιστούν και μέσω του προτύπου ASTM D5379, όπου δοκίμιο με εγκοπές τύπου V και γεωμετρία που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.2, φορτίζεται μέσω ειδικής διάταξης που απεικονίζεται στο σχήμα 2.3. Η διάτμηση εμφανίζεται

μεταξύ των δύο εγκοπών, στο μέσο του δοκιμίου. Η επιλογή της μεθόδου επιλέγεται από τον ερευνητή, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του αλλά και βάσει του υπάρχοντος εξοπλισμού.

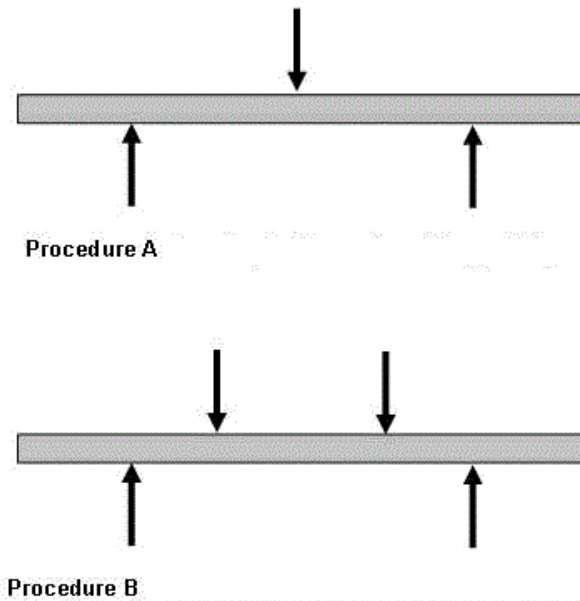
- Οι καμπτικές ιδιότητες υπολογίζονται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7264 (το οποίο βασίστηκε στο διεθνές πρότυπο ISO 14125). Δοκίμιο σταθερής ορθογωνικής διατομής φορτίζεται σε κάμψη τριών (Procedure A) ή τεσσάρων σημείων (Procedure B) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.3. Οι καμπτικές ιδιότητες μετρούνται κάτω από το σημείο της φόρτισης ή μεταξύ των δύο μελών εφαρμογής της φόρτισης αντίστοιχα για τις δύο διαδικασίες.



Σχήμα 2.1 Σκαρίφημα δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3846.



Σχήμα 2.2 Σκαρίφημα δοκιμίου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D5379.



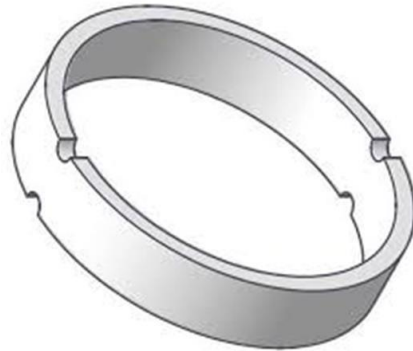
Σχήμα 2.3 Απεικόνιση των διαδικασιών του προτύπου ASTM D7264.

## 2.2. Δοκιμές χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμίων

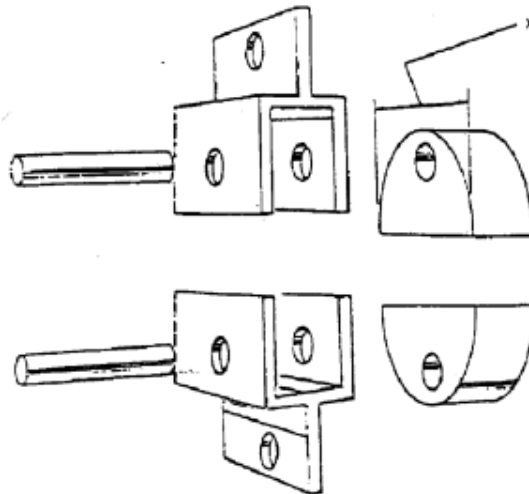
Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στα σύνθετα υλικά που κατασκευάζονται με τη μέθοδο της περιέλιξης ινών, καθώς και στις εφαρμογές τους σε διάφορους κατασκευαστικούς κλάδους. Η αυξανόμενη χρήση τους οδήγησε πολλούς ερευνητές στην προσπάθεια χαρακτηρισμού των υλικών αυτών (Peters, 2011). Το μεγάλο πρόβλημα που προκύπτει κατά την προσπάθεια χαρακτηρισμού τους είναι το γεγονός ότι η μέθοδος περιέλιξης ινών παράγει κατά κύριο λόγο προϊόντα με καμπυλότητα, στα οποία δεν μπορούν να εφαρμοστούν οι κλασσικές δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων που ορίζονται από τα προαναφερθέντα πρότυπα, τα οποία αφορούν σε επίπεδα δοκίμια.

Η αρχή για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος έγινε από το Αμερικανικό Ναυτικό, Εργαστήριο Πυροβολικού (Kinna, 1964), το οποίο πρότεινε δύο πειραματικές διαδικασίες προσδιορισμού μηχανικών ιδιοτήτων καμπύλων δοκιμίων. Η πρώτη εξ αυτών αναφέρεται στον υπολογισμό της τάσης αστοχίας του υλικού στην περιφερειακή διεύθυνση του κυλίνδρου. Κατά την πειραματική διαδικασία σε δακτυλιοειδές δοκίμιο, σκαρίφημα του οποίου απεικονίζεται στο σχήμα 2.4, ασκείται εσωτερικά ακτινική φόρτιση σε μία διεύθυνση μέσω ειδικής διάταξης διαιρούμενου δίσκου που απεικονίζεται στο σχήμα 2.5. Η μέγιστη αντοχή υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο θραύσης που δύναται να φέρει το δοκίμιο. Η διαδικασία αυτή συντέλεσε στη δημιουργία του προτύπου ASTM D2290, το οποίο μέχρι σήμερα αποτελεί ένα από τα βασικά πρότυπα χαρακτηρισμού των υλικών που κατασκευάζονται με την μέθοδο περιέλιξης ινών. Η δεύτερη πειραματική δοκιμή που προτάθηκε από το ίδιο εργαστήριο, προσδιορίζει την αντοχή δοκιμίου μικρής ακτίνας καμπυλότητας σε κάμψη και βάσει αυτής δημιουργήθηκε το πρότυπο ASTM D2344. Κατά το πρότυπο αυτό δοκίμιο μικρής ακτίνας καμπυλότητας τοποθετείται πάνω σε στηρίγματα που επιτρέπουν την πλευρική κίνηση όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.6,

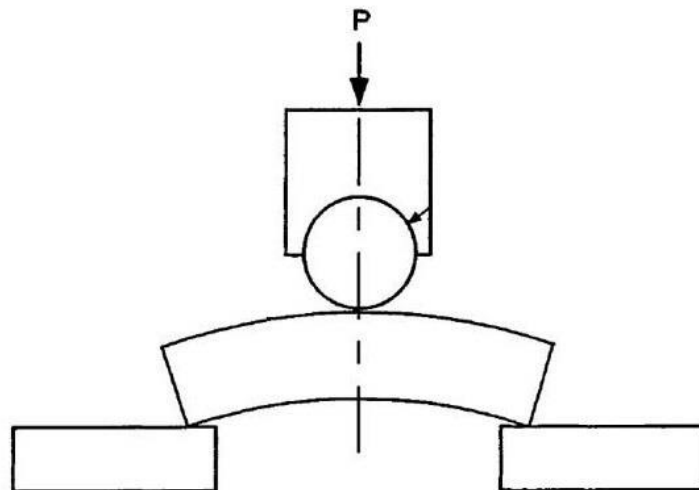
ενώ η δύναμη εφαρμόζεται μέσω ειδικής διάταξης, που φαίνεται στο ίδιο σχήμα, κατευθείαν στο κέντρο του δοκιμίου. Ομοίως με το προηγούμενο πρότυπο, η μέγιστη αντοχή υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο θραύσης που δύναται να φέρει το δοκίμιο.



Σχήμα 2.4 Σκαρίφημα δοκιμίου για το πρότυπο ASTM D2290.



Σχήμα 2.5 Τυπική διάταξη διαιρούμενου δίσκου για το πρότυπο ASTM D2290.



Σχήμα 2.6 Πειραματική διάταξη του προτύπου ASTM D2344.

Μία διαφορετική προσέγγιση επίλυσης του ζητήματος χαρακτηρισμού των σύνθετων υλικών που κατασκευάζονται με την μέθοδο της περιέλιξης ινών έγινε από τους Παπαδάκη & Τσούβαλη (2014) και Επιτροπάκη (2012). Κατά την αναφερόμενη σειρά δοκιμών που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ΕΝΤ), χρησιμοποιήθηκε ειδικά διαμορφωμένο επίπεδο καλούπι που φαίνεται στο σχήμα 2.7 για την κατασκευή επίπεδων πλακών. Κατασκευάστηκαν δύο ζεύγη πλακών με γωνία περιέλιξης  $\pm 86^\circ$  και  $\pm 45^\circ$  και τα επίπεδα δοκίμια που κόπηκαν από αυτούς εξετάστηκαν ως προς τις διατμητικές τους ιδιότητες σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D3039 και D3518, αντίστοιχα. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών φαίνεται ότι από τα επίπεδα δοκίμια υπολογίζονται πολύ χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις προσδοκώμενες, γεγονός που οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα σε κενά των δοκιμίων που παρήχθησαν με τον τρόπο αυτόν.

Δεδομένης της αποτυχίας των επίπεδων δοκιμίων κατά την προαναφερόμενη σειρά δοκιμών, καθώς και από τους Βολονάκη & Τσούβαλη (2012), κρίθηκε σκόπιμη η μελέτη καμπύλων δοκιμίων. Τα δοκίμια αυτά υπόκεινται σε κάμψη τριών σημείων με σκοπό τον προσδιορισμό της μέγιστης αντοχής καθώς και του μέτρου ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών.



Σχήμα 2.7 Διαστάσεις και μορφή επίπεδου καλουπιού.

### 2.3. Δοκιμές χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων

Τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός σύνθετου υλικού όπως είναι η πυκνότητά του καθώς και η περιεκτικότητα των επί μέρους υλικών ή των κενών αέρα, αποτελούν μερικές από τις βασικότερες παραμέτρους καθορισμού των τελικών μηχανικών ιδιοτήτων του. Για τη μέτρηση της πυκνότητας στα πλαστικά υλικά εν γένει χρησιμοποιείται η διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D792 και είναι σύμφωνη με το ISO 1183. Σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία μετريέται η μάζα ενός δοκιμίου στον αέρα και στο νερό με σκοπό να βρεθεί το ειδικό βάρος και στη συνέχεια να υπολογιστεί η πυκνότητα.

Για την εύρεση της περιεκτικότητας σε ενισχυτικό υλικό ή μήτρα συνήθως χρησιμοποιούνται καταστρεπτικές μέθοδοι. Στην περίπτωση του GRP (Glass Reinforced Plastic) η δοκιμή καύσης είναι πιθανότατα η πιο αποτελεσματική μέθοδος (ASTM D2584, ISO

1172). Σύμφωνα με τη δοκιμή αυτή, ένα μικρό δοκίμιο, του οποίου έχουν μετρηθεί με ακρίβεια το βάρος και ο όγκος, θερμαίνεται σε ελεγχόμενες συνθήκες (500 - 600°C) μέχρι να εξαερωθεί η πολυμερής μήτρα. Στη συνέχεια ζυγίζονται οι εναπομένουσες ενισχυτικές ίνες γυαλιού και το βάρος τους αφαιρείται από το αρχικό βάρος του δοκιμίου για να υπολογιστεί το βάρος της μήτρας. Οι όγκοι των ινών και της μήτρας υπολογίζονται τότε συναρτήσει των βαρών και με τη βοήθεια των γνωστών πυκνοτήτων τους, ενώ μία εκτίμηση περιεκτικότητας σε κενά (< 5%) γίνεται δυνατή αφαιρώντας τον συνολικό όγκο των συνιστώντων μερών (ίνες και μήτρα) από τον αρχικό όγκο του δοκιμίου.

Στην περίπτωση των CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic), στα οποία οι ίνες άνθρακα οξειδώνονται από την δοκιμή καύσης, χρησιμοποιείται η εναλλακτική μέθοδος της διάλυσης της μήτρας, κατά την οποία η ρητίνη εξάγεται από το σύνθετο υλικό χρησιμοποιώντας ένα ισχυρό οξύ σαν διαλύτη (matrix digestion, ASTM D3171). Οι τελευταίες εξελίξεις στον τεχνολογικό τομέα αλλά και στα ίδια τα σύνθετα υλικά, που πλέον περιέχουν προσμίξεις διαφόρων στοιχείων για αύξηση των μηχανικών και θερμοηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, οδηγούν στην ανάπτυξη νέων μεθόδων. Υπάρχει ανάγκη για τυποποίηση μεθόδων πιο φιλικών προς τον άνθρωπο, το περιβάλλον αλλά και προς το ίδιο το υλικό. Μερικές μη τυποποιημένες μέθοδοι για μέτρηση της περιεκτικότητας των συνιστώντων στοιχείων ενός σύνθετου υλικού με πολύ καλά αποτελέσματα είναι οι ακόλουθες.

Η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TGA-Thermogravimetric Analysis) είναι μία τεχνική κατά την οποία η μάζα του δείγματος μετριέται σαν ιδιότητα της θερμοκρασίας (η του χρόνου) καθώς το δείγμα θερμαίνεται η ψύχεται με σταθερό ρυθμό. Σύμφωνα με τη NASA (Polis & Sovinski, 2007) η τεχνική TGA, σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους, είναι λιγότερο επιβλαβής για το περιβάλλον και τον άνθρωπο και μπορεί να αυτοματοποιηθεί δίνοντας ταυτόχρονα ελευθερία στην επιλογή δοκιμίων όσον αφορά το βάρος και το σχήμα τους.

Η ανάλυση εικόνας από το οπτικό μικροσκόπιο (Image Analysis) είναι επίσης μία σύγχρονη και ακίνδυνη τεχνική. Η συγκεκριμένη μέθοδος αναλύεται περισσότερο σε επόμενο κεφάλαιο καθώς πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### **3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ**

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να αναλυθεί το πειραματικό πρόγραμμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Θα εξηγηθεί ο σκοπός της πειραματικής διαδικασίας, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν και θα παρουσιαστούν τα δοκίμια με συγκεκριμένη ονοματολογία έτσι ώστε να είναι πιο εύκολη οποιαδήποτε αναφορά σε αυτά.

#### **3.1. Γενική περιγραφή και σκοπός πειραματικής διαδικασίας**

Λόγω της έλλειψης τυποποιημένων μεθόδων χαρακτηρισμού σύνθετων υλικών κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, τα τελευταία χρόνια το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διεξάγει μια σειρά δοκιμών που αποσκοπούν στον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων κυλίνδρων κατασκευασμένων από σύνθετα υλικά με την εν λόγω μέθοδο, εξετάζοντας παράλληλα την επίδραση διάφορων κατασκευαστικών και φυσικών παραμέτρων στις ιδιότητες αυτές.

Για τον χαρακτηρισμό ενός υλικού είναι απαραίτητη η γνώση των φυσικών και των μηχανικών του ιδιοτήτων. Έπεται ο προσδιορισμός των βασικότερων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, οι οποίες είναι το μέτρο ελαστικότητας, το μέτρο διάτμησης καθώς και η αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση στις κύριες διευθύνσεις του. Για το σκοπό αυτόν κατασκευάστηκαν κύλινδροι με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, με διαφορετικές παραμέτρους όπως το υλικό των ενισχυτικών ινών, η δύναμη τάνυσης περιέλιξης καθώς και ο αριθμός των δεσμίδων ινών (tows) περιέλιξης.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί πως η παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνει μία σειρά δοκιμών από δύο διαφορετικές μελέτες του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα στα εδάφια που ακολουθούν.

##### **3.1.1. Μελέτη δοκιμών FIXO3**

Η μια από τις δύο ερευνητικές εργασίες του εργαστηρίου αποτελεί τμήμα του ευρωπαϊκού προγράμματος με την ονομασία AGE-CO-DEEP στο πλαίσιο του Fixed Point Open Ocean Observatory network (FixO3, [www.fixo3.eu](http://www.fixo3.eu)). Το ως άνω πρόγραμμα διερευνά την επίδραση της μακροχρόνιας παραμονής κυλίνδρων σε θαλάσσιο περιβάλλον ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες και την απορρόφηση υγρασίας. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση αυτή, κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Composites ([www.btcomposites.gr](http://www.btcomposites.gr)) τέσσερις ίδιες σειρές δοκιμών. Η πρώτη εξ αυτών μελετήθηκε με μία σειρά πειραματικών δοκιμών απ' ευθείας μετά την κατασκευή της. Οι υπόλοιπες τρεις μεταφέρθηκαν και ποντίστηκαν σε βάθος 1000 m σε περιοχή βόρεια της Κρήτης. Ακολούθησε η συλλογή της κάθε σειράς, ανά περίπου δέκα μήνες και η μετέπειτα υποβολή των δοκιμών της κάθε σειράς σε πειραματικές δοκιμές.



Η πόντιση των δοκιμίων έγινε μέσα σε ειδικά διαμορφωμένους κυλίνδρους, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3.1, ενώ η διαδικασία πραγματοποιήθηκε από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ, [www.hcmr.gr](http://www.hcmr.gr)) σε συνεργασία με την εταιρεία ALS MARINE CONSULTANTS ([www.alsmarine.gr](http://www.alsmarine.gr)) και το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ. Μερικά από τα δοκίμια πριν τη βύθισή τους επικαλύφθηκαν με ειδική βαφή προστασίας από την υγρασία (gel coat) προκειμένου να μελετηθεί επιπλέον η συνεισφορά της συγκεκριμένης προστατευτικής μεθόδου στην αποφυγή απορρόφησης υγρασίας. Σύμφωνα με τους Papadakis, Konstantinidis και Tsovalis (2020) η υγρασία τελικά δεν εντοπίζεται στο εσωτερικό των υλικών, ανεξάρτητα από το αν είχαν βαφτεί η όχι, έπειτα από δοκιμές που διεξήχθησαν κατά τη δεύτερη ανέλκυση της σειράς των δοκιμίων. Κατά την παραπάνω έρευνα επίσης μελετήθηκαν τα στεγνά δοκίμια (Α) καθώς και αυτά της πρώτης (Β) και δεύτερης (C) ανέλκυσης, ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων της τρίτης (D) και τελευταίας ανέλκυσης μετά από παραμονή των δοκιμίων για τριάντα δύο μήνες στο νερό. Στον πίνακα 3.1 αναφέρεται το ακριβές χρονοδιάγραμμα ποντίσεων-ανελεύσεων για καλύτερη κατανόηση. Έχοντας συγκεντρώσει τα δεδομένα από όλες τις σειρές, στο τελευταίο κεφάλαιο γίνεται στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών.



**Σχήμα 3.1** Απεικόνιση της διάταξης πόντισης με τις ξεχωριστές ομάδες δοκιμίων, οι οποίες βρίσκονται κάθε μία μέσα σε έναν από τους κατακόρυφους κυλίνδρους χρώματος πορτοκαλί.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1** Χρονοδιάγραμμα ποντίσεων-ανελεύσεων των ομάδων δοκιμίων.

Ημερημνία πόντισης	Ημερομνία ανέλκυσης	Ομάδα	Παραμονή στο νερό (μήνες)
Δεν ποντίστηκαν	-	A	0
30/7/2015	20/5/2016	B	≈10
	07/4/2017	C	≈20
	21/6/2018	D	≈35

## *Υλικά*

Για τον χαρακτηρισμό των σύνθετων υλικών επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι ινών. Οι ίνες άνθρακα υπερτερούν σε σχέση με τα υπόλοιπα υποψήφια υλικά, τόσο ως προς τις ιδιότητές τους, όσο και ως προς το βάρος τους. Οι τύποι των ινών που χρησιμοποιούνται καθορίζονται από δύο κυρίως παραμέτρους, οι οποίες είναι οι ιδιότητές τους και ο αριθμός των ινών που περιέχονται σε κάθε δέσμη/τύλιγμα (tow). Στην συγκεκριμένη περίπτωση λοιπόν, επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις ινών άνθρακα, αυτές των 12000 (12K) και 60000 (60K) ινών ανά δέσμη, με αντοχή σε εφελκυσμό 4900 MPa και μέτρο ελαστικότητας 230 GPa και 250 GPa αντίστοιχα, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Επιπλέον, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά και άλλων τύπων ινών σε υδάτινο περιβάλλον, επιλέχθηκε να εξεταστούν και ίνες γυαλιού (E-Glass). Οι εμπορικές ονομασίες των τριών τύπων ινών που αναφέρθηκαν, είναι:

- T700S (12K) της εταιρίας TORAYCA
- RAYON PYROFIL TRH50 (60K) της εταιρίας MITSUBISHI
- 1062 Multi – End Roving (Glass) της εταιρίας PPG Fiber Glass

Στη συνέχεια της εργασίας και για λόγους συντομίας, οι παραπάνω τύποι ινών θα αναφέρονται ως 12K, 60K και Glass, αντίστοιχα.

Όσον αφορά στο σύστημα εποξικής ρητίνης-σκληρυντή-επιταχυντή, σε όλα τα είδη ινών χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα, το οποίο αποτελείται από τα εξής επιμέρους υλικά:

- TW 100 Epoxy Resin της εταιρίας VORAFORCE
- TW 150 Hardener της εταιρίας VORAFORCE
- TC 3000 Catalyst της εταιρίας VORAFORCE

Αναλυτικά οι ιδιότητες των τριών τύπων ινών, καθώς και των συστατικών της ρητίνης παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

## *Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά*

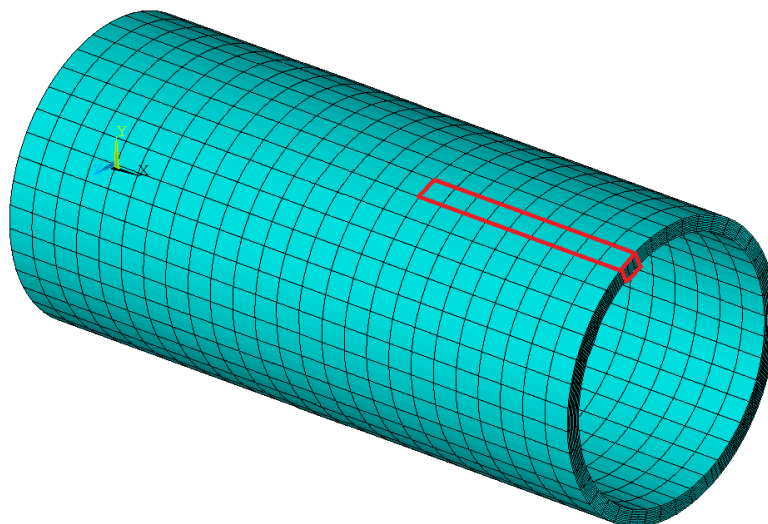
Για τον κάθε τύπο ίνας κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Composites (σχήμα 3.2) δύο κύλινδροι με τη μέθοδο περιέλιξης ινών. Η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται μεταξύ των δύο κυλίνδρων είναι η γωνία περιέλιξης. Στην πρώτη περίπτωση η επιθυμητή γωνία περιέλιξης ήταν 90° μοίρες, το οποίο είναι ανέφικτο λόγω αδυναμίας της παραγωγικής διαδικασίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι κύλινδροι που κατασκευάστηκαν για κάθε τύπο ίνας είχαν γωνία περιέλιξης  $\pm 86^\circ$ , η οποία ήταν η πλησιέστερη στις 90° βάσει της δυνατότητας της μονάδας παραγωγής. Χάριν απλότητας στην υπόλοιπη εργασία θα αναφέρονται ως 90° μοίρες. Οι υπόλοιποι κύλινδροι για τους τρεις τύπους ινών επιλέχθηκε να κατασκευαστούν με γωνία περιέλιξης  $\pm 55^\circ$  μοιρών. Η γωνία των 55° μοιρών θεωρείται η βέλτιστη για κατασκευή κυλίνδρων που υπόκεινται σε εξωτερική πίεση (external pressure), όπου ο λόγος της

αναπτυσσόμενης περιφερειακής τάσης ως προς την αξονική είναι 2:1 (hoop stress/axial stress = 2:1) όπως αναφέρεται και από τους (Soden, Kitching, Tse, Tsavalas, & Hinton, 1993). Όλοι οι κύλινδροι κατασκευάστηκαν με ονομαστική εσωτερική διάμετρο  $D = 100 \text{ mm}$  ενώ το ονομαστικό τους πάχος ήταν  $t = 5 \text{ mm}$ .

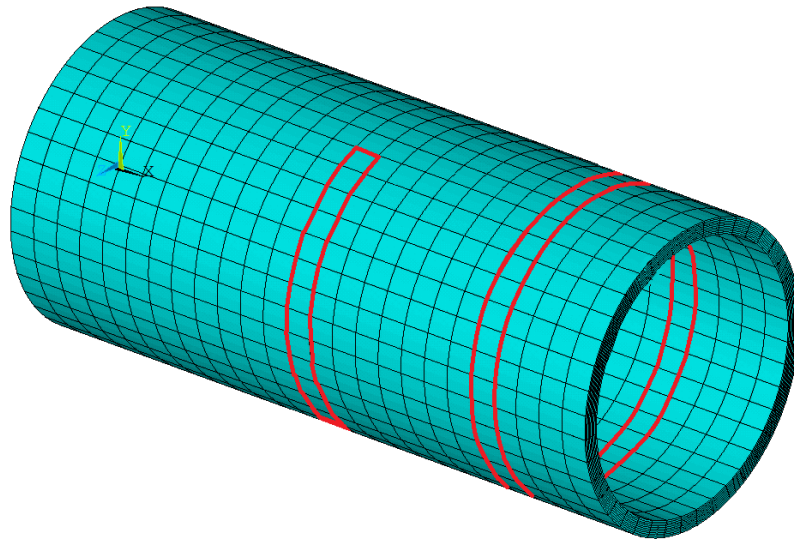


**Σχήμα 3.2** Περιστρεφόμενο μεταλλικό καλούπι από τις εγκαταστάσεις της B&T Composites στη Φλώρινα.

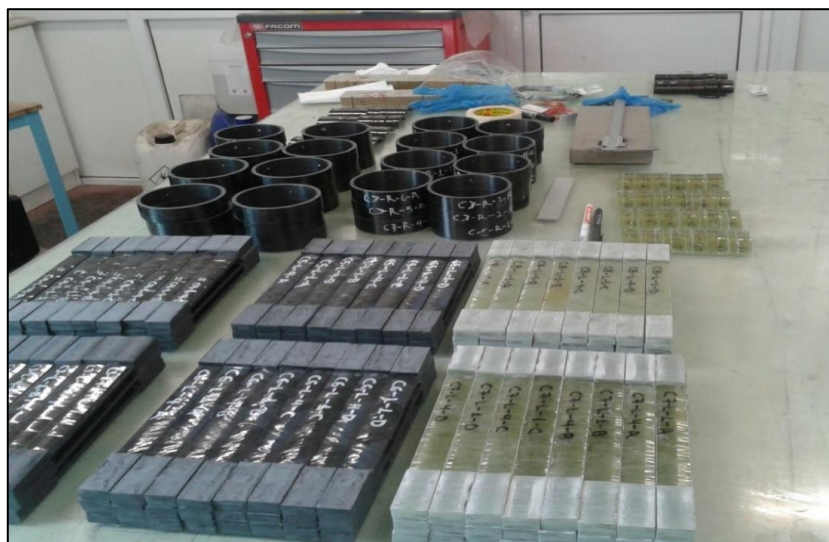
Στη συνέχεια, από τους κυλίνδρους κόπηκαν τρεις τύποι δοκιμών που ήταν απαραίτητοι για την πειραματική διαδικασία. Αρχικά από όλους τους κυλίνδρους κόπηκαν διαμήκη δοκίμια παράλληλα με τον άξονα του κάθε κυλίνδρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.3. Από τους κυλίνδρους 3, 4 και 7 που είναι τυλιγμένοι με γωνία  $90^\circ$  κόπηκαν επιπροσθέτως δακτύλιοι και καμπύλα δοκίμια (σχήμα 3.4). Από κάθε κύλινδρο κόπηκαν 6 όμοια δοκίμια από την εταιρία B&T Composites, όπως φαίνονται στην τελική τους μορφή στο σχήμα 3.5. Αναλυτικές διαστάσεις των δοκιμών θα δοθούν στα αντίστοιχα κεφάλαια.



**Σχήμα 3.3** Σκαρίφημα δοκιμών που κόπηκαν κατά το διαμήκη άξονα του κυλίνδρου.



Σχήμα 3.4 Σκαρίφημα δοκιμίων που κόπηκαν κατά το εγκάρσιο επίπεδο του κυλίνδρου.



Σχήμα 3.5 Τελική μορφή δοκιμίων που κατασκευάστηκαν για την πειραματική διαδικασία.

## Ονοματολογία

Η ονομασία των συγκεκριμένων δοκιμίων ακολουθεί τη λογική των προηγούμενων διπλωματικών εργασιών και χωρίζεται σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος αναγράφεται ο αύξων αριθμός του κυλίνδρου (C3 έως C8) από τον οποίον προήλθαν τα δοκίμια. Στο δεύτερο μέρος αναγράφεται το αρχικό γράμμα του σχήματος κατά οποίο είναι κομμένα τα δοκίμια (R for Ring, L for Longitude, A for Arc). Στο τρίτο και τελευταίο μέρος του ονόματος αναγράφεται η ομάδα ανέλκυσης των δοκιμίων (A: δεν ποντίστηκαν, B: ανέλκυση στους 10 μήνες, C: ανέλκυση στους 20 μήνες, D: ανέλκυση στους 35 μήνες). Έτσι για παράδειγμα η ομάδα δοκιμίων C3-R-D αποτελείται από 6 πανομοιότυπα δοκίμια που προέρχονται από τον κύλινδρο 3, έχουν σχήμα δακτυλοειδές και προέρχονται από την ομάδα ανέλκυσης D στους 35 μήνες. Για τη διάκριση των όμοιων δοκιμίων εντός της ομάδας χρησιμοποιήθηκε αύξων αριθμός στο τέλος του ονόματος π.χ. C3-R-D-1, C3-R-D-2, ..., C3-R-D-6.

### Σκοπός της παρούσας μελέτης

Σε αυτό το σημείο μπορεί πλέον να γίνει σαφής ο διαχωρισμός της παρούσας διπλωματικής εργασίας από αυτές που προηγήθηκαν. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για την ομάδα ανέλκυσης A παρουσιάζονται στη διπλωματική εργασία του Κωνσταντινίδη Γ. Α. (2016). Έπειτα, σύμφωνα με τους Papadakis, A. Z., & Tsouvalis, N. G. (2016) φαίνεται πως οι δακτύλιοι και τα διαμήκη δοκίμια (Rings & Longs) περιγράφουν καλύτερα τις μηχανικές ιδιότητες των κυλίνδρων σε σχέση με τα τοξωτά δοκίμια (Arcs). Οι δοκιμές συνεχίζονται με τα αποτελέσματα για τις ομάδες A, B και C να παρουσιάζονται από τους Papadakis, A. Z., Konstantinidis, G. K., & Tsouvalis, N. G. (2020). Στην παρούσα μελέτη δοκιμάζεται ένα σύνολο 54 δακτυλοειδών και διαμήκων δοκιμίων της ομάδας D, όπως αναλυτικά φαίνεται στον πίνακα 3.2. Επίσης σε επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων για τα δακτυλοειδή και διαμήκη δοκίμια όλων των ομάδων A, B, C και D με σκοπό τη διερεύνηση της αλλοίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων από το θαλάσσιο περιβάλλον.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2** Ονομασία ομάδων δοκιμίων παρούσας εργασίας και βασικά στοιχεία.

Όνομα ομάδας δοκιμίων	Κύλινδρος	Υλικό ινών	Γωνία περιέλιξης ινών	Σχήμα δοκιμίων	Ομάδα ανέλκυσης	Χρόνος παραμονής στη θάλασσα (μήνες)
C3-R-D	3	Carbon 12K	90°	Ring	D	35
C3-L-D	3	Carbon 12K	90°	Long	D	35
C4-R-D	4	Carbon 60K	90°	Ring	D	35
C4-L-D	4	Carbon 60K	90°	Long	D	35
C5-L-D	5	Carbon 12K	±55°	Long	D	35
C6-L-D	6	Carbon 60K	±55°	Long	D	35
C7-R-D	7	Glass	90°	Ring	D	35
C7-L-D	7	Glass	90°	Long	D	35
C8-L-D	8	Glass	±55°	Long	D	35

Χάριν διευκόλυνσης, τα συγκεκριμένα δοκίμια θα αναφέρονται στην υπόλοιπη εργασία ως FIXO3 και το κυρίαρχο χρώμα σε πίνακες γραφήματα θα είναι το μπλε.

### 3.1.2. Μελέτη δοκιμών B&T

Η μελέτη της επίδρασης των κατασκευαστικών και γεωμετρικών παραμέτρων σε κυλίνδρους από σύνθετο υλικό κατασκευασμένων με τη μέθοδο filament winding, βασίστηκε στο γεγονός πως η έρευνα στο συγκεκριμένο θέμα είναι περιορισμένη. Έτσι τα τελευταία χρόνια το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας με τη βοήθεια της κατασκευαστικής εταιρίας B&T Composites διεξάγει έρευνα πάνω στις κρίσιμότερες κατασκευαστικές παραμέτρους που επιδρούν στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες ενός κυλίνδρου από σύνθετο υλικό.

Οι φυσικές ιδιότητες που πρόκειται να μετρηθούν είναι η πυκνότητα του σύνθετου υλικού και η κατά βάρος περιεκτικότητά του σε ίνες. Οι μετρήσεις θα γίνουν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM D792 και ASTM D3171, αντίστοιχα.

Έπεται ο προσδιορισμός των βασικότερων μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, οι οποίες είναι το μέτρο ελαστικότητας καθώς και η αντοχή σε εφελκυσμό. Για το σκοπό αυτόν κατασκευάστηκαν κύλινδροι με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, με διαφορετικές παραμέτρους όπως το είδος των ενισχυτικών ινών, η δύναμη τάνυσης περιέλιξης καθώς και ο αριθμός των δεσμών (tows) περιέλιξης. Από τους κυλίνδρους αυτούς προέκυψαν δακτυλιοειδή δοκίμια (σχήμα 3.6). Όλοι οι κύλινδροι κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Composites από την οποία κόπηκαν και τα δοκίμια. Οι απαιτούμενες δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών έγιναν με τη μέθοδο του διαιρούμενου δίσκου και διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



**Σχήμα 3.6** Γενική όψη των δοκιμών ταξινομημένων σε ομάδες με βάση τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά.

## *Υλικά*

Για τον χαρακτηρισμό των σύνθετων υλικών επιλέχθηκαν διαφορετικοί τύποι ινών. Οι τύποι των ινών που χρησιμοποιούνται καθορίζονται από δύο κυρίως παραμέτρους, οι οποίες είναι οι ιδιότητές τους και ο αριθμός των ινών που περιέχονται σε κάθε δέσμη/τύλιγμα (tow). Στην συγκεκριμένη περίπτωση λοιπόν επιλέχθηκαν διαφορετικές περιπτώσεις ινών άνθρακα, αυτές των 12000 (12K), των 24000 (24K) και 50000 (50K) ινών ανά δέσμη (tow). Επιπλέον, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά και άλλων τύπων ινών, επιλέχθηκε να εξεταστούν και ίνες από πίσσα (Pitch fibers) λόγω των πολύ καλών μηχανικών και θερμοηλεκτρικών τους ιδιοτήτων (Huson, 2017). Οι εμπορικές ονομασίες των τριών τύπων ινών που αναφέρθηκαν, είναι:

- T700S (12K) της εταιρίας TORAYCA
- UMT42 - 24K-EP της εταιρίας UMATEX
- PX35 - 50K της εταιρίας ZOLTEK
- Pitch Fibers (K63712) της εταιρίας DIALED

Όσον αφορά στο σύστημα εποξικής ρητίνης-σκληρυντή-επιταχυντή, σε όλα τα είδη ινών χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σύστημα, εκτός από ένα δοκίμιο στο οποίο προστέθηκε γραφένιο. Το σύστημα ρητίνης αποτελείται από τα εξής επιμέρους υλικά:

- Resin 828 LVEL της εταιρίας EPIKOTE
- Curing Agent 866 της εταιρίας EPIKURE
- Catalyst 101 της εταιρίας EPIKURE

Αναλυτικά οι ιδιότητες των τεσσάρων τύπων ινών, καθώς και των συστατικών της ρητίνης παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

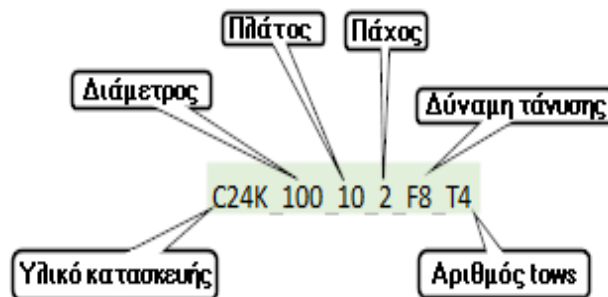
## *Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά*

Οι κύλινδροι είναι όλοι κατασκευασμένοι με τη μέγιστη δυνατή γωνία περιέλιξης, δηλαδή τις  $\pm 86^\circ$  με σκοπό να μετρηθούν το μέτρο ελαστικότητας και η μέγιστη τάση θραύσης κατά την περιφερειακή διεύθυνση. Κάθε κύλινδρος κατασκευάστηκε έτσι ώστε να διαφέρει από τους υπόλοιπους ως προς ένα μόνο χαρακτηριστικό. Το χαρακτηριστικό αυτό θεωρείται μια παράμετρος που δύναται να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες και για αυτό το λόγο μελετάται. Οι παράμετροι που μελετώνται είναι οι εξής:

- Υλικό κατασκευής (Graphene enhanced resin, Pitch fibers, Carbon fibers 24K and 50K, Basalt fibers)
- Διάμετρος κυλίνδρου (200, 150 και 100 mm)
- Πλάτος δακτυλίου ( 6.35, 10 και 20 mm)
- Πάχος δακτυλίου (1 και 2 mm)
- Δύναμη τάνυσης ινών (45, 25 και 8 N)
- Αριθμός συστάδων ινών (1, 4 και 8 tows)
- Περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος

## Ονοματολογία

Οι ομάδες δοκιμών παίρνουν την ονομασία τους με βάση τις υπό μελέτη παραμέτρους. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.7 στο πρώτο μέρος του ονόματος διευκρινίζεται το υλικό κατασκευής, για παράδειγμα το C24K αναφέρεται σε ίνες άνθρακα με 24000 ίνες ανά δέσμη, ή αντίστοιχα το PF αναφέρεται σε ίνες άνθρακα με προερχόμενες από πίσσα. Στο δεύτερο μέρος του ονόματος αναφέρεται η ονομαστική διάμετρος του δακτυλίου, στο τρίτο μέρος το πλάτος, στο τέταρτο το πάχος, στο πέμπτο η δύναμη τάνυσης και τέλος στο έκτο ο αριθμός των tows. Τα δοκίμια που έχουν C ως πρώτο γράμμα είναι κατασκευασμένα με 12000 ίνες ανά tow, αλλά χάριν απλότητας το 12K παραλείπεται. Κάθε ομάδα αποτελείται 6 πανομοιότυπα δοκίμια τα οποία διαχωρίζονται μεταξύ τους με αύξοντα αριθμό π.χ. C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4\_1, C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4\_2, ..., C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4\_6.



Σχήμα 3.7 Επεξήγηση ονοματολογίας δοκιμών

## Σκοπός της παρούσας μελέτης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έλαβαν χώρα 48 δοκιμές εφελκυσμού (split disk), με τα δακτυλιοειδή δοκίμια του πίνακα 3.3.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3 Ονομασία των ομάδων δοκιμών παρούσας εργασίας και βασικά στοιχεία.

Ονομασία δοκιμίου	Υλικό ινών	Διάμετρος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Δύναμη τάνυσης (Nt)	Δέσμες
C24K_100_10_2_F8_T4	UMT42-24K-EP	100	10	2	8	4
C50K_100_10_2_F8_T4	PX35 - 50K	100	10	2	8	4
GR_100_10_2_F8_T8	T700S - graphene enhanced resin	100	10	2	8	8
PF_100_10_2_F8_T8	Pitch fibers (DIALED K63712)	100	10	2	8	8
C_150_10_1_F8_T1	T700S	150	10	1	8	1
C_100_10_2_F25_T8	T700S	100	10	2	25	8
C_200_10_2_F25_T1	T700S	200	10	2	25	1
C_200_10_2_F45_T1	T700S	200	10	2	45	1



Οι παραπάνω δοκιμές συμπληρώνουν μία σειρά δοκιμών της διπλωματικής εργασίας του Θεμελάκη Ι. Γ. (2017). Έτσι γίνεται εφικτή η συγκριτική μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ δοκιμίων που διαφέρουν μόνο κατά μία κατασκευαστική παράμετρο. Με το τρόπο αυτό εξετάζεται πως επιδρά κάθε διαφορετική κατασκευαστική παράμετρος στις μηχανικές ιδιότητες των κυλίνδρων. Το σύνολο των δοκιμών τα οποία μελετώνται φαίνεται στον πίνακα 3.4 και οι ανάλυση των αποτελεσμάτων τους ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3.4** Ονομασία των όλων των ομάδων δοκιμών που μελετώνται και βασικά στοιχεία.

Specimen Name	Fibers	Diameter (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Tensioning force (N)
B_100_20_5_F8_T1	B	100	20	5	8
P_100_10_2_F8_T1	P	100	10	2	8
C50K_100_10_2_F8_T4	C50K	100	10	2	8
C_200_10_2_F8_T8	C12K	200	10	2	8
C_100_10_2_F8_T8	C12K	100	10	2	8
C24K_100_10_2_F8_T4	C24K	100	10	2	8
GR_100_10_2_F8_T8	C12K-GR	100	10	2	8
C_100_10_2_F25_T8	C12K	100	10	2	25
C_150_10_2_F8_T1	C12K	150	10	2	8
C_150_10_1_F8_T1	C12K	150	10	1	8
C_100_10_2_F8_T1	C12K	100	10	2	8
C_200_10_2_F45_T8	C12K	200	10	2	45
C_150_6.35_1.52_F8_T1	C12K	150	6.35	1.52	8
C_200_10_2_F25_T8	C12K	200	10	2	25
C_200_10_2_F45_T1	C12K	200	10	2	45
C_100_10_2_F25_T1	C12K	100	10	2	25
C_200_10_2_F8_T1	C12K	200	10	2	8
C_100_10_2_F45_T1	C12K	100	10	2	45
C_200_10_2_F25_T1	C12K	200	10	2	25
PF_100_10_2_F8_T8	PF	100	10	2	8

Τα συγκεκριμένα δοκίμια για λόγους εύκολης αναφοράς στη υπόλοιπη εργασία θα αναφέρονται ως B&T και το κυρίαρχο χρώμα σε πίνακες και γραφήματα θα είναι το πράσινο.

## 4. ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΦΥΣΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ

### 4.1. Σκοπός

Όπως και σε όλα τα υλικά έτσι και στα σύνθετα ο προσδιορισμός των φυσικών ιδιοτήτων είναι σημαντικός καθώς αποτελεί έναν από τους βασικούς παράγοντες καθορισμού των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Η πυκνότητα και η αναλογία των συνιστώντων μερών των σύνθετων υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένη με τα μέτρα ελαστικότητας και διάτμησης, όπως αυτά διατυπώνονται και από τις θεωρητικές σχέσεις του Tsai (1964). Έτσι κρίθηκε σκόπιμο να προσδιορίσουμε πειραματικά και με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια τις παραπάνω παραμέτρους. Πιο συγκεκριμένα αρχικά μετρήθηκε η πυκνότητα των υπό εξέταση δοκιμίων και στη συνέχεια υπολογίστηκε η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες.

### 4.2. Μέτρηση πυκνότητας

Η πυκνότητα του υλικού μετρήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D792 (TEST METHOD A). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για τη σειρά δοκιμίων B&T, χρησιμοποιώντας μικρά κομμάτια βάρους λίγο μεγαλύτερου του 1 g και όγκου μικρότερου του  $1 \text{ cm}^3$  ώστε να μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια για τον πειραματικό προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ίνες. Τα εν λόγω κομμάτια κόπηκαν από δακτυλιοειδή δοκίμια.

Αρχικά, μετρήθηκε η μάζα του κάθε δοκιμίου στον αέρα και στη συνέχεια η μάζα του σε απιονισμένο νερό, όπως απεικονίζεται στα σχήματα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα. Όπως ορίζεται στο πρότυπο, για τη μέτρηση της μάζας χρειάζεται ακρίβεια στο τέταρτο δεκαδικό ψηφίο. Η θερμοκρασία του δωματίου και του νερού κατά τη διάρκεια των μετρήσεων κυμαινόταν στους  $23 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Το ειδικό βάρος και η τελική πυκνότητα δίνονται από τις εξισώσεις (4.1) και (4.2) που καθορίζονται από το πρότυπο ASTM D792. Εξετάστηκαν 4 δοκίμια από κάθε σειρά δοκιμίων και σαν τελική τιμή για την πυκνότητα του κάθε υλικού ελήφθη ο μέσος όρος των μετρήσεων (average value). Ακόμα, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (standard deviation) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων καθώς και η απόκλιση τους από τον μέσο όρο.

$$\rho_c = W_a / (W_a - W_w) \quad (4.1)$$

$$D = \rho_c \times 997.5 \quad (4.2)$$

Όπου,

$W_a$  (g) η μάζα του δοκιμίου στον αέρα.

$W_w$  (g) η μάζα του δοκιμίου στο νερό.

$\rho_c$  ο λόγος βαρών.

$D$  ( $Kg/m^3$ ) η πυκνότητα του υλικού.

997.5 ( $Kg/m^3$ ) η πυκνότητα του νερού στους 23 °C στους οποίους έγινε η μέτρηση.



Σχήμα 4.1 Μέτρηση της μάζας του δοκιμίου στον αέρα.



Σχήμα 4.2 Μέτρηση της μάζας του δοκιμίου στο νερό.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται στον πίνακα 4.1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Μετρήσεις πυκνότητας υλικών κατά ASTM D792.

<b>C_100_10_2_F25_T8</b>					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.5660</b>	<b>1562.04</b>	<b>20.77</b>	<b>1.33%</b>
#	1	2	3	4				
<i>Wa (g)</i>	1.2084	1.0406	1.0745	1.0095				
<i>Ww (g)</i>	0.4502	0.3735	0.3785	0.3650				
$\rho_c$	1.5938	1.5599	1.5438	1.5663				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1589.79	1555.99	1539.96	1562.41				

<b>C_150_10_1_F8_T1</b>					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.4638</b>	<b>1460.16</b>	<b>42.93</b>	<b>2.94%</b>
#	1	2	3	4				
<i>Wa (g)</i>	0.6385	0.5563	0.5168	0.5458				
<i>Ww (g)</i>	0.2150	0.1825	0.1505	0.1690				
$\rho_c$	1.5077	1.4882	1.4109	1.4485				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1503.90	1484.51	1407.34	1444.89				

<b>C_200_10_2_F25_T1</b>					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.5069</b>	<b>1503.11</b>	<b>28.80</b>	<b>1.92%</b>
#	1	2	3	4				
<i>Wa (g)</i>	1.1447	1.0614	1.1292	1.0948				
<i>Ww (g)</i>	0.4002	0.3650	0.3638	0.3603				
$\rho_c$	1.5375	1.5241	1.4753	1.4905				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1533.70	1520.31	1471.62	1486.81				

<b>C_200_10_2_F45_T1</b>					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.5282</b>	<b>1524.36</b>	<b>17.34</b>	<b>1.14%</b>
#	1	2	3	4				
<i>Wa (g)</i>	1.1561	1.1147	1.1689	1.1949				
<i>Ww (g)</i>	0.4050	0.3740	0.4116	0.4114				
$\rho_c$	1.5392	1.5049	1.5435	1.5251				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1535.36	1501.17	1539.65	1521.27				

<b>C24K_100_10_2_F8_T4</b>					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.5144</b>	<b>1510.60</b>	<b>35.37</b>	<b>2.34%</b>
#	1	2	3	4				
<i>Wa (g)</i>	1.0292	0.9946	1.0876	1.1296				
<i>Ww (g)</i>	0.3358	0.3270	0.3910	0.3875				
$\rho_c$	1.4843	1.4898	1.5613	1.5222				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1480.57	1486.09	1557.39	1518.36				

C50K_100_10_2_F8_T4					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.4989</b>	<b>1495.16</b>	<b>7.41</b>	<b>0.50%</b>
#	1	2	3	4				
<i>W<sub>a</sub> (g)</i>	1.0111	1.2520	1.3420	1.2445				
<i>W<sub>w</sub> (g)</i>	0.3375	0.4158	0.4412	0.4190				
$\rho_c$	1.5010	1.4972	1.4898	1.5076				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1497.29	1493.51	1486.06	1503.80				

PF_100_10_2_F8_T8					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.6663</b>	<b>1662.13</b>	<b>13.95</b>	<b>0.84%</b>
#	1	2	3	4				
<i>W<sub>a</sub> (g)</i>	1.1710	1.1267	1.1577	1.1535				
<i>W<sub>w</sub> (g)</i>	0.4687	0.4581	0.4571	0.4587				
$\rho_c$	1.6674	1.6852	1.6524	1.6602				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1663.21	1680.95	1648.31	1656.04				

GR_100_10_2_F8_T8					Average $\rho_c$	Average Density	standard deviation	coef. of variation
					<b>1.4812</b>	<b>1477.47</b>	<b>10.39</b>	<b>0.70%</b>
#	1	2	3	4				
<i>W<sub>a</sub> (g)</i>	1.1610	1.2100	1.2958	1.2888				
<i>W<sub>w</sub> (g)</i>	0.3832	0.3950	0.4130	0.4177				
$\rho_c$	1.4927	1.4847	1.4678	1.4795				
<i>D (kg/m<sup>3</sup>)</i>	1488.94	1480.95	1464.16	1475.81				

#### Παρατηρήσεις

Παρατηρείται καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων με το συντελεστή διακύμανσης να βρίσκεται κάτω του 3%, γεγονός το οποίο αποδεικνύει ότι οι μετρήσεις ήταν αξιόπιστες. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι οι δακτύλιοι που κατασκευάστηκαν με μεγαλύτερη δύναμη τάνυσης έχουν λίγο μεγαλύτερη πυκνότητα (F8<F25<F45). Ακόμα, παρατηρείται αύξηση της πυκνότητας στους δακτυλίους με ενισχυτικές ίνες από πίσσα (Pitch Fibers) σε σχέση με τους αντίστοιχους από απλές ίνες άνθρακα και με αυτούς με πρόσμιξη γραφένιου στο σύστημα ρητίνης (GR<C<PF). Σε κάθε περίπτωση οι τιμές είναι κοντά στις αντίστοιχες τυπικές τιμές που υπάρχουν στην βιβλιογραφία.

### 4.3. Μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες

Για τη μέτρηση της κατά βάρος περιεκτικότητας των ινών του υλικού ακολουθήθηκε η διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D3171 καθώς και οι μη τυποποιημένες μέθοδοι που περιγράφονται στο Composite Materials Handbook, (2002) από το Αμερικάνικο Υπουργείο Άμυνας σύμφωνα με τα πειράματα του οργανισμού Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate. Για τους τέσσερις δακτυλίους με απλές ίνες άνθρακα (C\_100\_10\_2\_F25\_T8, C\_200\_10\_2\_F45\_T1, C\_200\_10\_2\_F25\_T1 C\_150\_10\_1\_F8\_T1) δοκιμάστηκαν 3 διαφορετικές μέθοδοι σε κάθε υλικό. Σκοπός είναι να βρεθεί η πιο αξιόπιστη μέθοδος. Οι δύο από τις τρεις μεθόδους που έδειξαν να δίνουν παρόμοια αποτελέσματα εφαρμόστηκαν στη συνέχεια και για τα υπόλοιπα τέσσερα υλικά της σειράς B&T. Δύο μέθοδοι αφορούν τη διάλυση της ρητίνης με οξέα όπως ορίζονται από τα εδάφια Procedure A και Procedure B του πρότυπου ASTM D3171 και η τρίτη μέθοδος βασίζεται στην ανάλυση εικόνας (Image Analysis) από το οπτικό μικροσκόπιο μιας τομής του υλικού σε διεύθυνση κάθετη της διεύθυνσης των ινών. Σκοπός της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας είναι ο υπολογισμός της περιεκτικότητας σε ίνες με την καλύτερη δυνατή μέθοδο, καθώς και η περιγραφή και αξιολόγηση της μεθόδου Image Analysis.

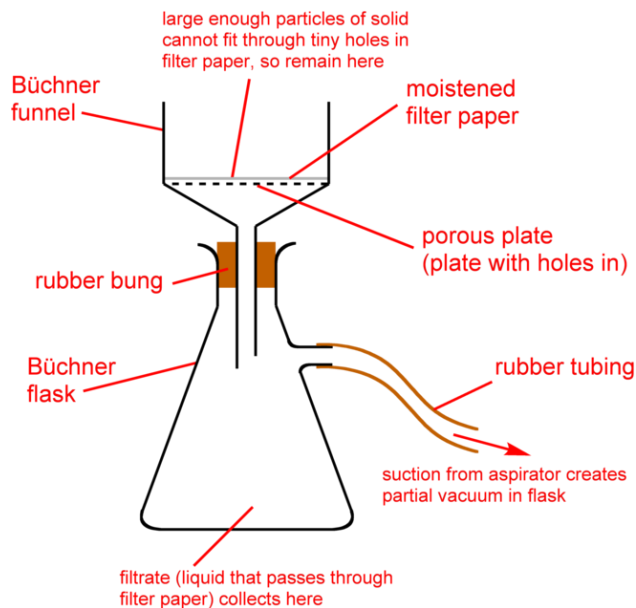
#### 4.3.1. Διάλυση ρητίνης με νιτρικό οξύ

Σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3171 απαιτούνται κομμάτια βάρους μεγαλύτερου του 0.5 g και εμβαδού επιφάνειας μεγαλύτερου των  $625 \text{ mm}^2$ . Για τον λόγο αυτό από τους δακτυλίους κόπηκαν κομμάτια με βάρος κοντά στο 1 g, έτσι ώστε να είναι δυνατή η πυκνομέτρησή τους σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.2. Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας των ινών για κάθε διαφορετικό υλικό χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι, γιατί αφενός μεν η διαδικασία είναι χρονοβόρα και επικίνδυνη, αφετέρου δε, σύμφωνα με το πρότυπο αρκεί ένα κομμάτι ώστε να υπάρξει αξιόπιστο αποτέλεσμα.

#### Εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες των σύνθετων υλικών ήταν ο εξής:

- Απαγωγός αερίων, για την απομάκρυνση των τοξικών αερίων από το χώρο εργασίας.
- Μαγνητικός θερμαινόμενος αναδευτήρας, για τη ρύθμιση των στροφών ανάδευσης και τον έλεγχο της θερμοκρασίας.
- Διάταξη διήθησης υπό κενό (Büchner funnel) (Σχήμα 4.3), για το διαχωρισμό των ινών από το υγρό διάλυμα.
- Χάρτινο φίλτρο μίας χρήσης  $0.2 \mu\text{m}$ , για να συγκρατεί τις ίνες μέσα στο φίλτρο Büchner.
- Ξηραντήρας.
- Φούρνος.
- Εργαστηριακός εξοπλισμός: ποτήρι ζέσεως, ογκομετρικός σωλήνας, τσιμπίδες, χοάνη ρυθμιζόμενης εσωτερικής πίεσης.



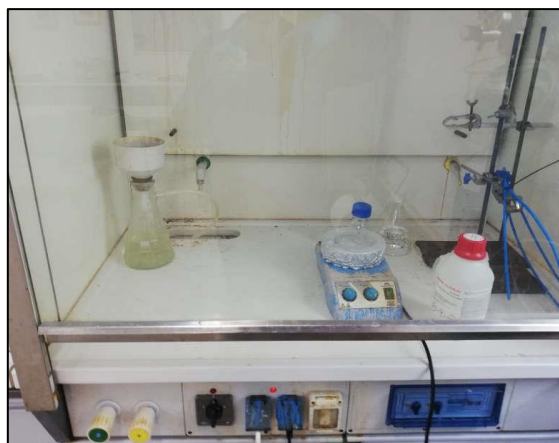
Σχήμα 4.3 Διάταξη εξοπλισμού διήθησης υπό κενό (Büchner funnel).

### Διαδικασία

Σύμφωνα με το πρότυπο, πρώτα μετρήθηκε η πυκνότητα του κάθε κομματιού με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εδάφιο 4.2. Στη συνέχεια, αφού είχαν εισέλθει σε υγρό περιβάλλον, τα κομμάτια σκουπίζονται καλά και τοποθετούνται στον ξηραντήρα για περίπου μια μέρα ώστε να απαλλαγθούν από την υγρασία. Το κάθε κομμάτι ζυγίζεται στο πλησιέστερο 0.0001 g ( $M_i$ ). Σε αυτό το σημείο μετριέται και το βάρος του χάρτινου φίλτρου ( $M_c$ ). Είναι σημαντική η καταγραφή και των δύο μετρήσεων για κάθε κομμάτι, καθώς με το πέρας της διαδικασίας πολλές ίνες θα είναι κολλημένες πάνω στο φίλτρο.

Ύστερα από αυτό το σημείο, οι εργασίες που ακολουθούν γίνονται στον απαγωγό αερίων, καθώς το νιτρικό οξύ είναι άκρως τοξικό για τον άνθρωπο και η θέρμανσή του πάνω από τους 40°C δημιουργεί αναθυμιάσεις. Επίσης ο ερευνητής είναι υπεύθυνος να τηρεί όλα τα μέτρα ασφαλείας φορώντας εργαστηριακή ποδιά, διπλά γάντια και προστατευτικά γυαλιά, καθώς και να διαβάσει προσεκτικά το Δελτίο δεδομένων ασφαλείας για νιτρικό οξύ 64.0-66.0%.

Το δοκίμιο τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως ελάχιστης χωρητικότητας 200 mL μαζί με τον ειδικό μαγνήτη ανάδευσης. Στο ποτήρι ζέσεως τοποθετούνται το λιγότερο 30 mL νιτρικού οξέος (64.0-66.0%). Το ποτήρι τοποθετείται πάνω στον μαγνητικό θερμαινόμενο αναδευτήρα, όπου αφήνεται να θερμανθεί στους 70°C και με ταυτόχρονη ανάδυσή του (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4 Εξοπλισμός μέσα στον απαγωγό αερίων.

Για το συγκεκριμένο σύστημα ρητίνης αποδείχθηκε ότι απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα νιτρικού οξέος καθώς και θέρμανση σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Αρχικά για το δοκίμιο C\_100\_10\_2\_F25\_T8 προστέθηκαν 60 ml νιτρικού οξέος με θέρμανση στους 70°C για μία ώρα. Στη συνέχεια καθώς δεν υπήρχε καμία ένδειξη διάλυσης της ρητίνης, αυξήθηκε η θερμοκρασία της δοκιμής στους 120°C για 2 ακόμα ώρες, πάντα με ταυτόχρονη ανάδευση. Με το πέρας των τριών ωρών αυξήθηκε η θερμοκρασία στους 150°C συμπληρώνοντας 100 ml νιτρικού οξέος (Σχήμα 4.5). Ύστερα από περίπου 8 ώρες το μίγμα άρχισε να αλλάζει χρώμα προς το σκούρο και υπήρχαν και εμφανή κομμάτια διαλυμένης ρητίνης. Στο σημείο που το μίγμα πάρει μαύρο χρώμα, αφήνεται για ακόμα μία ώρα ώστε να διασφαλιστεί πως δεν έχουν μείνει αδιάλυτα κομμάτια ρητίνης σε αυτό. Για τα υπόλοιπα τρία κομμάτια των υλικών C\_200\_10\_2\_F45\_T1, C\_200\_10\_2\_F25\_T1 και C\_150\_10\_1\_F8\_T1 ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Στο ποτήρι ζέσεως τοποθετείται το προς διάλυση κομμάτι, προστίθενται 200 ml νιτρικού οξέος και θερμαίνεται το μείγμα στους 200°C αναδεύοντας. Κατά μέσο όρο μετά από οκτώ ώρες η ρητίνη αρχίζει να διαλύεται.



Σχήμα 4.5 Κομμάτι του σύνθετου υλικού βαπτισμένο σε νιτρικό οξύ κατά την ανάδευση και θέρμανση του.



Όταν το μείγμα γίνει αρκετά σκούρο και μη διαφανές (Σχήμα 4.6), με τη βοήθεια των μεταλλικών τσιμπίδων το ποτήρι τοποθετείται σε λουτρό από πάγο και νερό, ώστε να πέσει η θερμοκρασία του. Όταν το μείγμα έρθει σε θερμοκρασία δωματίου, είναι έτοιμο να περάσει από τη διάταξη Büchner ώστε να γίνει διήθηση των ινών. Το περιεχόμενο χύνεται αργά στο κεραμικό φίλτρο, το οποίο, μέσω της δημιουργίας κενού στο κάτω μέρος του, αναρροφά το υγρό διάλυμα.



Σχήμα 4.6 Σκουρόχρωμο μείγμα που παρατηρείται όταν η ρητίνη του σύνθετου υλικού έχει διαλυθεί στο νιτρικό οξύ.

Στη συνέχεια προστίθεται απιονισμένο νερό στο άδειο πλέον ποτήρι, το οποίο αμέσως εκχύνεται στη διάταξη Büchner. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται άλλες δύο φορές για δύο βασικούς λόγους. Πρώτον φεύγουν από το ποτήρι οι ίνες που αναπόφευκτα έχουν κολλήσει στα τοιχώματα του δοχείου και δεύτερον ξεπλένονται οι ίνες που υπάρχουν πάνω στο φίλτρο από τα υπολείμματα του μίγματος νιτρικού οξέος και ρητίνης. Τέλος οι ίνες ξεπλένονται με ακετόνη, ώστε να μειωθεί ο χρόνος που απαιτείται για το στέγνωμά τους (Σχήμα 4.7).



**Σχήμα 4.7** Καθαρές ίνες άνθρακα έπειτα από διήθησή τους μέσα στο φίλτρο Büchner.

Το χάρτινο φίλτρο και οι ίνες τοποθετούνται σε φούρνο θερμοκρασίας περίπου 100°C, για τουλάχιστον μία ώρα, έως ότου οι ίνες στεγνώσουν πλήρως (Σχήμα 4.8). Αφήνονται στη συνέχεια σε θερμοκρασία δωματίου να κρυσώσουν και σε περίπτωση που χρειάζεται περαιτέρω αποβολή υγρασίας, τοποθετούνται στον ξηραντήρα.



**Σχήμα 4.8** «Μαλλί» από ίνες άνθρακα πάνω στο φίλτρο διήθησης, έπειτα από αποβολή της υγρασίας.

Οι ίνες που πλέον φαίνονται καθαρά με τη μορφή «μαλλιού», ζυγίζονται μαζί με το χάρτινο φίλτρο στο πλησιέστερο 0.0001 g ( $M_{fc}$ ). Η μάζα των ινών μπορεί να υπολογιστεί εύκολα αφαιρώντας το βάρος του χάρτινου φίλτρου όπως φαίνεται στη παρακάτω σχέση (4.3) και η επί τοις εκατό κατά βάρος ( $W_f$ ) περιεκτικότητα του δοκιμίου σε ενίσχυση από ίνες δίνεται από τη σχέση (4.4).

$$M_f = M_{fc} - M_c \quad (4.3)$$

$$W_f = (M_f / M_i) \times 100 \quad (4.4)$$

Όπου,

$M_i$  η αρχική μάζα των δοκιμίων σε g

$M_c$  η μάζα του χάρτινου φίλτρου

$M_{fc}$  η μάζα του φίλτρου και των ινών.

$M_f$  η τελική μάζα των ινών μετά τη διάλυση με οξύ σε g.

Τα αποτελέσματα των παραπάνω μετρήσεων αποτυπώνονται στον πίνακα 4.2.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2** Μέτρηση περιεκτικότητας κατά βάρος σε ίνες.

<b>HNO3 digestion</b>	<b>C_200_10_2_F45_T1</b>	<b>C_200_10_2_F25_T1</b>	<b>C_150_10_1_F8_T1</b>	<b>C_100_10_2_F25_T8</b>
<i>Mi (g)</i>	1.1364	1.0964	0.5158	1.0095
<i>Mc(g)</i>	0.9160	0.9630	0.9580	0.9855
<i>Mfc (g)</i>	1.6260	1.8350	1.4125	1.8026
<i>Mf (g)</i>	0.7100	0.8720	0.4545	0.8171
<i>Wf</i>	62.48%	79.53%	88.12%	80.94%

### *Παρατηρήσεις*

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι οι δακτύλιοι που είναι κατασκευασμένοι με τη μεγαλύτερη δύναμη τάνυσης έχουν μικρότερη περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα. Συγκεκριμένα, για τον δακτύλιο που κατασκευάστηκε με τη μεγαλύτερη δύναμη τάνυσης (F45) παρατηρείται αρκετά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες. Σε αντίθεση, ο δακτύλιος κατασκευασμένος με τη μικρότερη δύναμη τάνυσης (F8) φαίνεται να έχει το υψηλότερο ποσοστό σε ίνες άνθρακα κατά βάρος. Επίσης στο εδάφιο 4.2 παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της πυκνότητας των σύνθετων με την αύξηση της δύναμης τάνυσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία αλλά και τα data sheets του παραρτήματος Α, η ρητίνη έχει χαμηλότερη πυκνότητα ( $1.2 - 1.4 \text{ g/cm}^3$ ) σε σχέση με τις ίνες ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) οπότε στα δοκίμια με μεγαλύτερη πυκνότητα αναμενόταν να έχουν και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ίνες. Κάτι τέτοιο δεν προκύπτει από τα αποτελέσματα, γεγονός που τα κάνει αναξιόπιστα.

#### 4.3.2. Διάλυση ρητίνης με θειικό οξύ

Η διαδικασία για τη διάλυση της μήτρας με θειικό οξύ και υπεροξειδίο του υδρογόνου έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3171 (Procedure B) και είναι όμοια με αυτή που αναλύθηκε στο προηγούμενο εδάφιο (4.3.1.). Το συγκεκριμένο αντιδραστήριο χρησιμοποιήθηκε για να ελεγχθεί η δραστηριότητά στο συγκεκριμένο σύστημα ρητίνης. Μία κοινή ονομασία του διαλύματος αυτού, είναι «Piranha Solution», λόγω της αυξημένης δραστηριότητάς του σε υπολείμματα οργανικών ενώσεων, όπως είναι στην περίπτωση μας η εποξική ρητίνη. Με το αντιδραστήριο αυτό διαλύσαμε τα κομμάτια από τα σύνθετα υλικά της της σειράς B&T ώστε να μετρήσουμε τη περιεκτικότητά τους σε ίνες. Τα κομμάτια κόπηκαν σε διαστάσεις και μάζα που ορίζει το πρότυπο και επιλέχθηκαν εκείνα που ήταν πιο κοντά στις διαστάσεις των κομματιών που διαλύθηκαν με το νιτρικό οξύ. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι ο ίδιος με αυτόν που περιγράφεται στο εδάφιο 4.3.1. και για αυτόν τον λόγο παραλείπεται. Το παρόν εδάφιο εστιάζει κυρίως στις διαφορές που υπήρξαν κατά τη διαδικασία καθώς και στα αποτελέσματα αυτής.

#### *Διαδικασία*

Αφού το δοκίμιο και το χάρτινο φίλτρο έχουν ζυγιστεί με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού του γραμμαρίου (0.0001 g), τοποθετείται το δοκίμιο στο ποτήρι ζέσεως. Κάθε εργασία από αυτό το σημείο και έπειτα πραγματοποιείται μέσα στον απαγωγό αερίων. Στο ποτήρι ζέσεως προστίθεται θειικό οξύ περιεκτικότητας 95.0 – 97.0 % και ποσότητας τουλάχιστον 20 ml σύμφωνα με το πρότυπο. Για τα συγκεκριμένα δοκίμια κρίθηκε αναγκαία η πρόσθεση 50 ml θειικού οξέος. Ακολούθως το ποτήρι τοποθετείται στον μαγνητικό θερμαινόμενο αναδευτήρα σε θερμοκρασία 200°C. Το συγκεκριμένο αντιδραστήριο χρειάστηκε κατά μέσο όρο τέσσερις ώρες ώστε να διαλύσει τη ρητίνη σε ικανοποιητικό βαθμό και το χρώμα του διαλύματος να είναι σχεδόν μαύρο.

Αφού το διάλυμα πάρει έντονο σκούρο χρώμα, αφήνεται ακόμα πέντε λεπτά ώστε να διασφαλιστεί πως δεν έχουν μείνει μεγάλα αδιάλυτα κομμάτια ρητίνης μέσα σε αυτό. Στη συνέχεια τοποθετείται το ποτήρι σε παγωμένο λουτρό οπότε και προστίθεται το υπεροξειδίο του υδρογόνου περιεκτικότητας 30%. Η πρόσθεσή του γίνεται βηματικά με μικρές στην αρχή ποσότητες καθώς ακραία εξώθερμη αντίδραση λαμβάνει χώρα με απότομη αύξηση της θερμοκρασίας και αποβολή τοξικών ατμών. Για το λόγο αυτό ο ερευνητής πρέπει να είναι σίγουρος πως δεν αφήνει κάποιο σημείο του σώματός του εκτεθειμένο. Η ποσότητα του υπεροξειδίου που προστίθεται πρέπει σίγουρα να ξεπερνά αυτή του θειικού οξέος και προσαρμόζεται να είναι τέτοια ώστε το διάλυμα από σκούρο χρώμα να γίνει ξανά διαφανές. Ενδεικτικά, από το πρότυπο συστήνονται 35 ml ως ελάχιστη ποσότητα, ενώ στο συγκεκριμένο πείραμα χρειάστηκε να προστεθούν 70 ml, καθώς αυξημένη είναι και η ποσότητα του θειικού οξέος. Το διάλυμα αφήνεται να κρυώσει στο λουτρό έως ότου οι ίνες είναι πλέον καθαρά εμφανείς. Ακολουθεί η διήθηση των ινών στη διάταξη Büchner σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο εδάφιο 4.3.1. και στη συνέχεια το στέγνωμά τους στο φούρνο.

Οι ίνες, απαλλαγμένες πλέον από την υγρασία, ζυγίζονται μαζί με το χάρτινο φίλτρο στην ηλεκτρονική ζυγαριά ακριβείας τέταρτου δεκαδικού ψηφίου ( $M_{fc}$ ). Έχοντας ήδη καταγράψει

τη μάζα του δοκιμίου ( $M_i$ ) και του φίλτρου ( $M_c$ ) χωριστά, μπορεί να υπολογιστεί η περιεκτικότητα σε ίνες ( $W_f$ ) κατά βάρος, με τη βοήθεια των σχέσεων 4.3 και 4.4. Στους πίνακες 4.3 και 4.4 που ακολουθούν αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3** Μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες σύνθετων υλικών. Για τα συγκεκριμένα υλικά μετρήθηκε η περιεκτικότητα και με τη μέθοδο του νιτρικού οξέος.

H2SO4/H2O2 digestion	C_200_10_2_F45_T1	C_200_10_2_F25_T1	C_150_10_1_F8_T1	C_100_10_2_F25_T8
$M_i$ (g)	1.1940	1.0930	0.6370	0.7350
$M_c$ (g)	0.9670	0.9632	0.9784	0.9493
$M_{fc}$ (g)	1.8740	1.8392	1.4674	1.5573
$M_f$ (g)	0.9070	0.8760	0.4890	0.6080
$W_f$	75.96%	80.15%	76.77%	82.72%

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.4** Μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες σύνθετων υλικών. Για τα συγκεκριμένα υλικά μετρήθηκε η περιεκτικότητα και με τη μέθοδο του νιτρικού οξέος.

H2SO4/H2O2 digestion	C24K_100_10_2_F8_T4	C50K_100_10_2_F8_T4	PF_100_10_2_F8_T8	GR_100_10_2_F8_T8
$M_i$ (g)	1.0880	1.0110	1.1610	1.1580
$M_c$ (g)	0.9780	0.9896	0.9555	0.9543
$M_{fc}$ (g)	1.6960	1.6346	1.8165	1.7103
$M_f$ (g)	0.7180	0.6450	0.8610	0.7560
$W_f$	65.99%	63.80%	74.16%	65.28%

### Παρατηρήσεις

Από τον πίνακα 4.4 φαίνεται ότι ο δακτύλιος που είναι κατασκευασμένος με πρόσμιξη γραφένιου στο σύστημα ρητίνης παρουσιάζει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα σε σχέση με τους υπόλοιπους δακτυλίους, για την ίδια δύναμη τάνυσης 8 Nt και τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Αυτό θα μπορούσε να οφείλεται στη μέθοδο η οποία χρησιμοποιήθηκε καθώς το θεικό οξύ αντιδρά με το γραφένιο δημιουργώντας οξείδια του γραφένιου SIGO (Hong et al 2013). Έτσι, είτε το θεικό οξύ δεν «πρόλαβε» να διαλύσει τη ρητίνη, είτε τα σχηματιζόμενα οξείδια συγκρατήθηκαν από το χάρτινο φίλτρο 0,2 μ, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα. Επίσης στον πίνακα 4.3 παρουσιάζεται αυξημένη περιεκτικότητα ινών για τα σύνθετα υλικά κατασκευασμένα με δύναμη τάνυσης 25N. Όπως και με τη μέθοδο με το νιτρικό οξύ του προηγούμενου εδαφίου τα αποτελέσματα δεν συμφωνούν με τις πυκνότητες που υπολογίστηκαν. Έτσι για ακόμα μία φορά τα αποτελέσματα κρίνονται αναξιόπιστα με απόκλιση τουλάχιστον 5-7% από το αναμενόμενο.

#### 4.3.3. Μέθοδος ανάλυσης εικόνας

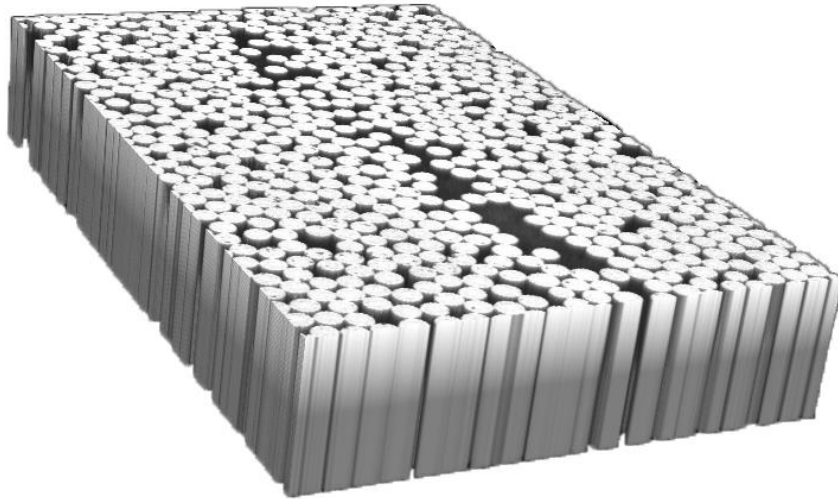
Ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε ίνες μέσω της διάλυσης της μήτρας με οξέα, όπως περιγράφεται στα προηγούμενα εδάφια, αποτέλεσε μία σχετικά επικίνδυνη και χρονοβόρα διαδικασία. Επίσης μία ακόμα αδυναμία των παραπάνω μεθόδων έγκειται στη χαμηλή δραστηριότητα των οξέων έναντι νέων πιο ανθεκτικών συστημάτων ρητίνης όπως είναι για τα συγκεκριμένα σύνθετα υλικά. Απόρροια του προβλήματος της δραστηριότητας αποτέλεσε η μερική απόκλιση από την μεθοδολογία που ορίζει το πρότυπο ASTM D3171 κυρίως όσον αφορά τη ποσότητα των οξέων και το χρόνο δράσης τους. Κατά συνέπεια κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστεί μία πιο σύγχρονη μέθοδος η οποία θα ανταποκρίνεται ικανοποιητικά στα περισσότερα σύνθετα υλικά κατασκευασμένα με περιέλιξη ινών.

Η διαδικασία ανάλυσης εικόνας του οπτικού μικροσκοπίου σε μία τομή του δακτυλίου κάθετη στη διεύθυνση των ινών αποτέλεσε πρόκληση, καθώς δεν είχε πραγματοποιηθεί στο παρελθόν στο εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας του ΕΜΠ. Αν και η συγκεκριμένη μέθοδος δεν ορίζεται από πρότυπα ISO ή ASTM ακόμα, περιγράφεται λεπτομερώς στο βιβλίο Composite Materials Handbook Volume 1: Polymer Matrix Composites - Guidelines for Characterisation of Structural Materials (US Department of Defense, 2002). Η παραπάνω μέθοδος αποτελεί επίσης μία χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία η οποία όμως παρέχει μεγαλύτερη ασφάλεια στον ερευνητή και τον εξοικειώνει με τα συνιστώσα μέρη των σύνθετων υλικών. Η εικόνα μιας τυχαίας τομής του σύνθετου υλικού κάθετα στις ενισχυτικές ίνες μπορεί να δώσει πληροφορίες για την κατανομή και τη διάταξη των ινών σε όλο το πάχος του δοκιμίου, όπως επίσης και για την ύπαρξη κενών αέρα μέσα σε αυτό. Στο παρόν εδάφιο θα εξεταστούν οι πιο συνήθεις τρόποι ανάλυσης της εικόνας μέσω προγράμματος υπολογιστή, καθώς και θα διαπιστωθούν σφάλματα λόγω της υποκειμενικότητας που διέπει τη διαδικασία.

#### *Εξοπλισμός*

Ο απαραίτητος εξοπλισμός για τη μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες των σύνθετων υλικών μέσω Image Analysis είναι ο εξής:

- Εργαστηριακός λειαντήρας (Struers LaboPol-5), για την προετοιμασία των επιφανειών του δοκιμίου.
- Εξοπλισμός εγκιβωτισμού, (μήτρες εγκιβωτισμού, δοσομετρητές).
- Εξοπλισμός λείανσης, (λειαντικά χαρτιά, πάστες διαμαντιού).
- Οπτικό μικροσκόπιο συνδεδεμένο με ψηφιακή κάμερα (Leica DMILM).
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής με εγκατεστημένο λογισμικό συμβατό με το μικροσκόπιο (Leica Application Suite).
- Λογισμικό ανάλυσης εικόνων (Σχήμα 4.9).



**Σχήμα 4.9** Τρισδιάστατη απεικόνιση ενισχυτικών ινών σε σύνθετο υλικό κατασκευασμένο με τη μέθοδο Filament Winding. Πρόκειται για εικόνα οπτικού μικροσκοπίου σε μεγέθυνση 1000X η οποία στη συνέχεια επεξεργάστηκε με τη βοήθεια του ανοιχτού λογισμικού ImageJ/Fiji.

### *Προετοιμασία*

Τοξωτά κομμάτια μήκους περίπου 4 εκατοστών κόβονται από τους δακτυλίους και αποτελούν τα δοκίμια του πειράματος. Κατά τη κοπή πρέπει να δοθεί προσοχή στις επιφάνειες κοπής οι οποίες πρέπει να είναι κατά το δυνατόν κάθετες στη περιφερειακή διεύθυνση του δακτυλίου. Επίσης έλαια κοπής βοηθούν τις επιφάνειες να είναι λείες. Τα εναπομείναντα έλαια που παραμένουν στο δοκίμιο απομακρύνονται με τη βοήθεια νωπού πανιού.

Ακολουθεί ο εγκιβωτισμός του δοκιμίου σε εποξική ρητίνη όπως φαίνεται στο σχήμα 4.10. Το δοκίμιο σταθεροποιείται σε κατακόρυφη θέση μέσα στην ειδική μήτρα εγκιβωτισμού και στα τοιχώματα της εφαρμόζεται λεπτή στρώση βαζελίνης ώστε το χυτό να απομακρυνθεί εύκολα από αυτή. Μίγμα εποξικής ρητίνης με ειδικό σκληρυντή (EpoFix) για χύτευση, σε αναλογία 15 προς 2 κατ' όγκο, τοποθετείται σε δοσομετρητή και αναδεύεται για 2 λεπτά, διαλύοντας τις φυσαλίδες αέρα που τυχόν δημιουργηθούν. Στη συνέχεια το μίγμα περιχύνεται στο καλούπι με το δοκίμιο και αφήνεται σε θερμοκρασία δωματίου για 12 ώρες μέχρι να σκληρύνει η ρητίνη (curing: 12 hours, pot life: 30 min.).



**Σχήμα 4.10** Εγκιβωτισμός δοκιμίων από σύνθετο υλικό σε εποξική ρητίνη. Σε κάθε καλούπι έχουν τοποθετηθεί 2 δοκίμια για οικονομία στα υλικά και στο χρόνο λείανσης.

Αφού το χυτό αφαιρεθεί από το πλαστικό καλούπι τοποθετείται στην ειδική υποδοχή του λειαντήρα ώστε να κατεργαστεί η επιφάνειά του σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία (Σχήμα 4.11). Πρώτα εφαρμόζεται λειαντικό χαρτί μεγάλης τραχύτητας (grit/ grain size 80) και το χυτό τρίβεται στα 250 rpm με παρουσία τρεχούμενου νερού, μέχρι να εμφανιστεί η επιφάνεια του δοκιμίου. Στη συνέχεια τοποθετούνται ολοένα μειούμενης τραχύτητας χαρτιά στα οποία η επιφάνεια κατεργάζεται για 2-3 λεπτά στο κάθε ένα. Η ακολουθία που επιλέχθηκε δίνοντας τη καλύτερη τελική επιφάνεια στο δοκίμιο είναι η εξής: Grit/ Grain size 120 → 320 → 500 → 800 → 1200 → 2000 → 4000. Τέλος η επιφάνεια γυαλίζεται στον λειαντήρα με πάστα Alumina 0.1 μm. Σε αυτό το στάδιο η επιφάνεια θα πρέπει να είναι επίπεδη και πολύ λεία χωρίς εμφανείς γραμμές ή άλλες ατέλειες. Αν παρατηρηθούν ατέλειες η διαδικασία επαναλαμβάνεται, από το στάδιο που κρίνει ο ερευνητής, μέχρι η επιφάνεια να βρεθεί στην επιθυμητή κατάσταση (Σχήμα 4.12). Το δοκίμιο ξεπλένεται με νερό και ακετόνη και αφήνεται στον ξηραντήρα για μία μέρα ώστε να απαλλαγεί από την υγρασία.



**Σχήμα 4.11** Λείανση της επιφάνειας δύο χυτών με σύνθετα υλικά εγκιβωτισμένα, στον εργαστηριακό λειαντήρα.

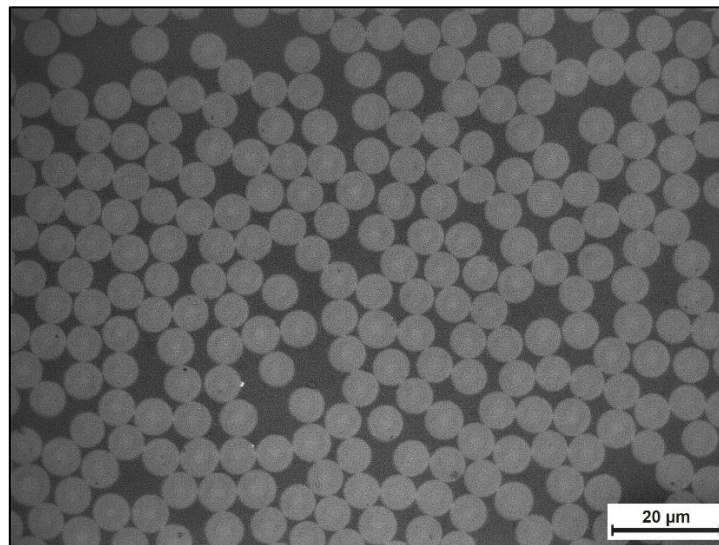


**Σχήμα 4.12** Δοκίμια από σύνθετο υλικό εγκιβωτισμένα σε ρητίνη μετά από κατεργασία λείανσης της επιφάνειάς τους.



### Διαδικασία

Κατά τις υποδείξεις του MIL-17 (2002), θεωρείται ότι ικανοποιητική προσέγγιση της περιεκτικότητας σε ίνες επιτυγχάνεται με τη λήψη 20 έως 50 φωτογραφιών, με κάθε φωτογραφία να συμπεριλαμβάνει 30-100 ίνες. Η μεγέθυνση του φακού του μικροσκοπίου πρέπει να είναι από 400 έως 1000. Απαραίτητη είναι η ρύθμιση 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 (Σχήμα 4.13).



**Σχήμα 4.13** Φωτογραφία x1000 από οπτικό μικροσκόπιο μίας τομής σύνθετου υλικού κάθετα στις ενισχυτικές ίνες. Οι ίνες άνθρακα απεικονίζονται με γκρι ανοιχτό χρώμα ενώ η μήτρα με μαύρο.

Οι Cann, Adams και Schneider (2008) περιγράφουν δύο μεθόδους Areal/Fiber Counting για την εύρεση της ογκομετρικής περιεκτικότητας με Image Analysis.

### Areal Method

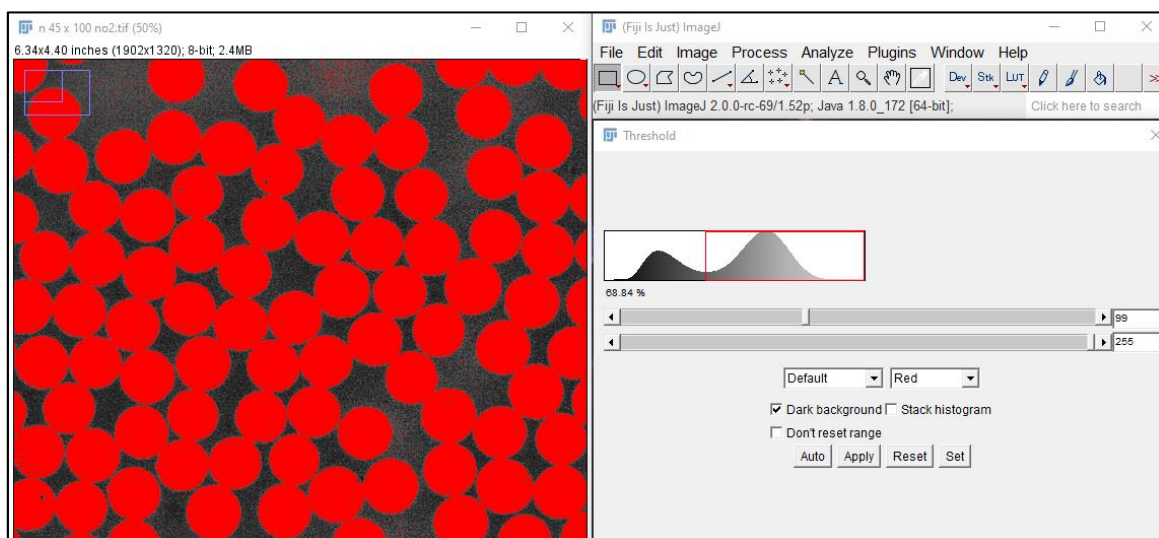
Στη μέθοδο αυτή, ο προσδιορισμός της κατ' όγκο περιεκτικότητας επιτυγχάνεται με καταμέτρηση, μέσω υπολογιστικού αλγορίθμου, των λευκών και μαύρων pixels μέσα σε προσδιορισμένη από το χρήστη περιοχή. Προκειμένου να είναι δυνατή η καταμέτρηση αυτή, η εικόνα γκρι κλίμακας πρέπει να μετατραπεί σε διχρωματική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

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των 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 μία τραχιά εικόνα εξομαλύνεται με την εντολή “smooth”.
- Με τη βοήθεια του πινέλου του λογισμικού, διορθώνεται στο σωστό χρώμα οποιαδήποτε εμφανής ανωμαλία (π.χ. μικροεκδορές, ξένα σώματα).
- Επιλέγεται κατάλληλο grey threshold.
- Στην οθόνη εμφανίζεται το ποσοστό των μαύρων pixels προς τα λευκά το οποίο και καταγράφεται (Σχήμα 4.14).

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου αυτής, πρέπει να δοθεί εξαιρετική προσοχή 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. Εδώ υπάρχει το σφάλμα που βασίζεται στην υποκειμενική αντίληψη του ερευνητή για την ακριβή θέση του ορίου αυτού. Μικρή αλλαγή στην τιμή του threshold οδηγεί σε σημαντική αλλαγή της τιμής του λόγου των επιφανειών.
- Τα φίλτρα πρέπει να εφαρμόζονται καθολικά για όλες τις εικόνες της ίδιας επιφάνειας και να χρησιμοποιούνται με τρόπο που δεν αλλοιώνει τα όρια μεταξύ ινών και μήτρας.
- Σημαντικό ρόλο παίζει η ποιότητα της υπό μελέτη επιφάνειας. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η παρουσία μικροεκδορών που προκύπτουν κατά τη λείανση της επιφάνειας ή ξένων σωματιδίων, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση των αποτελεσμάτων.
- Η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί εικόνες υψηλής μεγέθυνσης, με αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγάλος αριθμός εικόνων ώστε να αποτελεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα της επιφάνειας.



Σχήμα 4.14 Επιλογή threshold κατά τη διάρκεια επεξεργασίας της εικόνας μέσω του λογισμικού ImageJ

### Fiber Counting Method

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην καταμέτρηση των ινών που υπάρχουν στη φωτογραφία. Στη συνέχεια, ο αριθμός των ινών 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 ( $V_f$ ) του δοκιμίου. Η διαδικασία αυτή συνοψίζεται στην παρακάτω σχέση:

$$V_f = \frac{\pi \cdot N_f \cdot d_f^2}{4 \cdot A_t} \quad (4.5)$$

Έπειτα ακολουθεί ο υπολογισμός της κατά βάρος περιεκτικότητας ( $W_f$ ) σε ίνες:

$$W_f = \frac{D_f \cdot V_f}{D} \quad (4.6)$$

Όπου,

$N_f$  ο αριθμός των ινών όπως καταμετράται με τη βοήθεια του λογισμικού.

$d_f$  η διάμετρος, σε  $\mu\text{m}$ , της ίνας όπως καθορίζεται από τον κατασκευαστή.

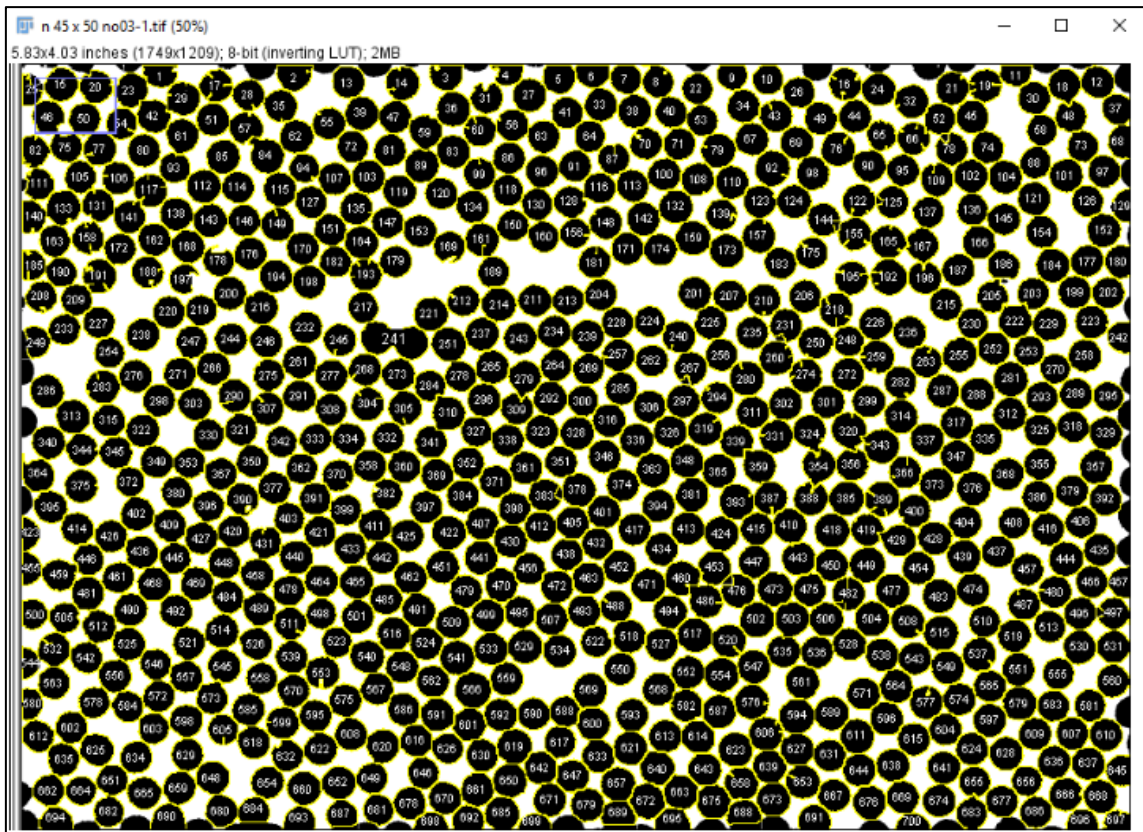
$A_t$  το εμβαδόν της υπό μελέτη περιοχής που καταμετράται με τη βοήθεια του λογισμικού σε  $\mu\text{m}^2$

$D_f$  η πυκνότητα των ινών άνθρακα όπως τη δίνει ο κατασκευαστής.

$D$  η πυκνότητα των υλικών όπως μετρήθηκαν στο εδάφιο 4.2.

Για την εφαρμογή της Fiber Counting Method απαιτούνται τα εξής βήματα:

- 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 μία τραχιά εικόνα εξομαλύνεται με την εντολή “smooth”.
- Με τη βοήθεια του πινέλου διορθώνεται οποιαδήποτε εμφανής ανωμαλία.
- Επιλέγεται κατάλληλο grey threshold.
- 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 pixels) σε γνωστή στον χρήστη απόσταση.
- Εφαρμογή αλγόριθμου watershed για διαχωρισμό ενωμένων ινών.
- Αφαίρεση με το πινέλο εσφαλμένα διαχωρισμένων ινών.
- Εφαρμογή του αλγόριθμου Analyze particles το οποίο καταμετρά τις διαχωρισμένες πλέον ίνες με ελάχιστο όριο τα 1000 pixels για εικόνες με μεγέθυνση x500. (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15 Καταμετρητής ινών σε τομή σύνθετου υλικού μέσω του λογισμικού ImageJ.

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 pixels 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 όριο των 1000 pixels σαν ελάχιστο μέγεθος εφαρμόζεται μόνο για εικόνες με μεγέθυνση x500.
- Το όριο των 1000 pixels εφαρμόστηκε επίσης για να μην καταμετρούνται μικρά κομμάτια ινών που βρίσκονται στα όρια της εικόνας. Ο μετρητής συμπεριλαμβάνει μία ίνα μόνο όταν πάνω από το μισό του εμβαδού της διατομής της βρίσκεται μέσα στην εικόνα. Έτσι κατά προσέγγιση καταμετρούνται οι μισές ίνες που βρίσκονται στα όρια της εικόνας.
- Το σφάλμα του μετρητή για τις συγκεκριμένες μετρήσεις βρέθηκε να είναι  $\pm 1$  ίνα για κάθε 350.

## Αποτελέσματα

Για τη μέτρηση της κατ' όγκο περιεκτικότητας σε ίνες επιλέχθηκε η Areal Method, καθώς είναι πιο γρήγορη από την Fiber Counting Method και δεν βασίζεται στη διατομή των ινών που δίνει ο κατασκευαστής. Επίσης η Areal Method επιλέγεται και περιγράφεται αναλυτικά από το MIL-17 (2002). Για κάθε διαφορετικό υλικό χρησιμοποιήθηκαν 21 εικόνες και ο μέσος όρος της περιεκτικότητας σε ίνες χαρακτηρίζει ολόκληρο το υλικό, όπως φαίνεται στους πίνακες 4.5 και 4.6.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4.5** Μέτρηση περιεκτικότητας ενισχυτικών ινών σε σύνθετο υλικό μέσω Image analysis.

Image analysis	Σύνθετο Υλικό			
	C_200_10_2_F45_T1	C_200_10_2_F25_T1	C_150_10_1_F8_T1	C_100_10_2_F25_T8
Αύξ. Αριθμ. εικόνας				
No.01	75.88	68.25	68.20	65.03
No.02	72.69	70.92	68.77	61.99
No.03	76.79	76.66	72.52	63.14
No.04	73.82	66.88	67.40	61.42
No.05	73.24	67.16	65.18	61.74
No.06	63.55	63.96	67.57	63.34
No.07	64.83	67.38	71.98	61.01
No.08	65.72	66.97	66.31	65.45
No.09	66.48	67.61	66.35	63.24
No.10	69.91	67.58	68.06	58.23
No.11	63.35	60.51	67.64	70.07
No.12	70.39	70.88	67.08	67.64
No.13	63.52	73.46	64.88	62.58
No.14	65.91	67.60	67.11	70.96
No.15	67.84	69.50	70.15	71.20
No.16	65.33	73.08	64.84	69.80
No.17	66.54	67.96	64.56	59.76
No.18	67.59	66.32	69.12	62.94
No.19	69.34	65.17	66.68	63.98
No.20	73.00	68.63	64.88	64.24
No.21	65.53	66.82	63.71	67.97
Average Vf	<b>68.63</b>	<b>68.25</b>	<b>67.29</b>	<b>64.56</b>
St. Deviation	4.18	3.44	2.34	3.72
Coef. Of Variation	6%	5%	3%	6%
Material Density	1.5244	1.5031	1.4602	1.5620
Fiber Density	1.8000	1.8000	1.8000	1.8000
<b>Wf</b>	<b>81.04%</b>	<b>81.73%</b>	<b>82.95%</b>	<b>74.39%</b>

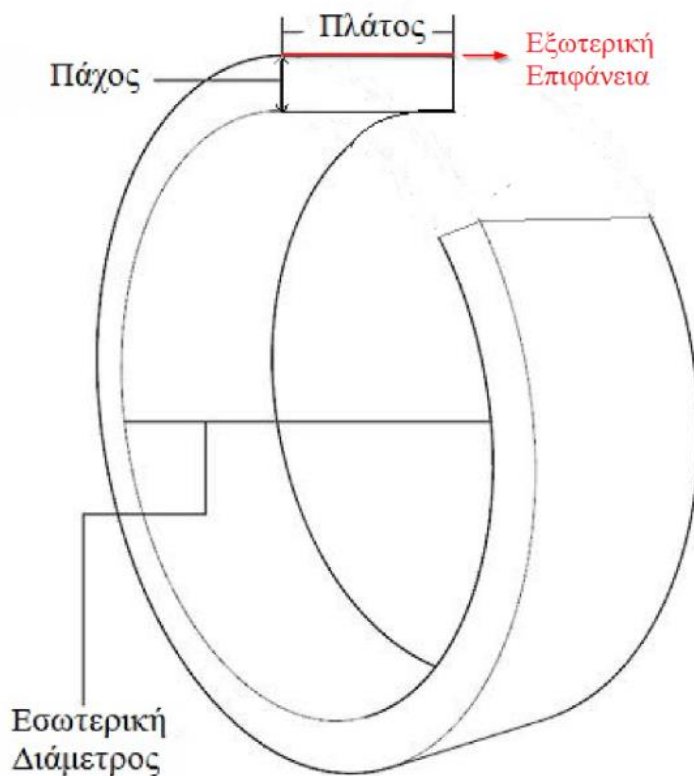
ΠΙΝΑΚΑΣ 4.6 Μέτρηση περιεκτικότητας ενισχυτικών ινών σε σύνθετο υλικό μέσω Image analysis.

Image analysis	Σύνθετο Υλικό			
	Αύξ. Αριθμ. εικόνας	C24K_100_10_2_F8_T4	C50K_100_10_2_F8_T4	GR_100_10_2_F8_T8
No.01	53.13	53.54	52.29	69.74
No.02	47.73	50.06	58.25	51.96
No.03	46.76	42.64	55.36	60.86
No.04	53.58	46.18	53.89	58.02
No.05	48.12	57.79	51.49	62.58
No.06	49.57	51.32	55.06	60.96
No.07	54.79	50.38	51.00	59.15
No.08	50.59	48.37	55.67	62.09
No.09	53.74	49.91	56.94	64.80
No.10	52.79	58.55	58.15	54.68
No.11	51.71	53.17	59.34	50.23
No.12	54.36	51.33	52.64	56.39
No.13	56.95	40.94	42.15	49.02
No.14	56.68	46.98	50.11	50.23
No.15	57.13	49.28	44.12	60.47
No.16	60.89	56.57	65.87	52.85
No.17	52.75	50.04	60.75	62.36
No.18	62.03	57.27	63.01	65.12
No.19	54.00	58.26	63.42	58.24
No.20	58.25	55.46	67.89	58.10
No.21	56.30	58.99	61.03	56.48
Average Vf	<b>56.12</b>	<b>58.30</b>	<b>53.90</b>	<b>51.76</b>
St. Deviation	6.54	5.45	4.05	5.16
Coef. Of Variation	12%	9%	8%	10%
Material Density	1.5106	1.4952	1.4775	1.6621
Fiber Density	1.7800	1.8100	1.8000	2.1200
<b>Wf</b>	<b>67.61%</b>	<b>63.49%</b>	<b>64.22%</b>	<b>73.40%</b>

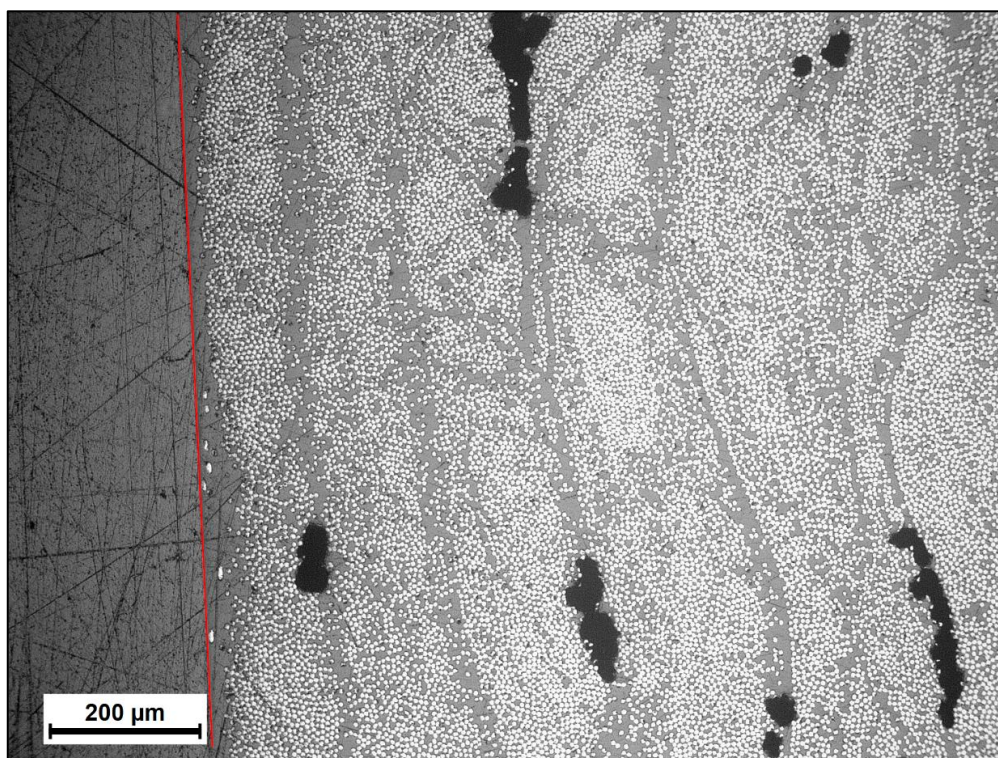
## Παρατηρήσεις

Από τα αποτελέσματα εύκολα παρατηρεί κανείς τους σχετικά μεγάλους συντελεστές μεταβλητότητας (Coef. Of Variation). Ο συντελεστής στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνει πληροφορίες για την κατανομή των ινών μεταξύ των διαφορετικών περιοχών στην εγκάρσια τομή του σύνθετου υλικού που εξετάζεται. Υψηλός συντελεστής μεταβλητότητας εκφράζει ίνες που δεν είναι ισάριθμα κατανεμημένες σε όλο το πάχος του σύνθετου υλικού, ή και κενά αέρα (voids) όπως για παράδειγμα στα υλικά C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4, C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4, GR\_100\_10\_2\_F8\_T8 και PF\_100\_10\_2\_F8\_T8. Διευκρινίζεται πως ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για ακριβείς μετρήσεις σε κενά αέρα καθώς είναι απλά ένας δείκτης ανισοκατανομής των ινών μεταξύ των διάφορων περιοχών μέτρησης. Στο σχήμα 4.16 απεικονίζονται οι διαστάσεις των δακτυλίων ενώ στα σχήματα 4.17 και 4.18 γίνεται και οπτικά αισθητή η άνιση κατανομή των ινών κατά τη διεύθυνση του πάχους των δακτυλίων καθώς και η σχετικά μεγάλη περιεκτικότητα σε κενά αέρα.

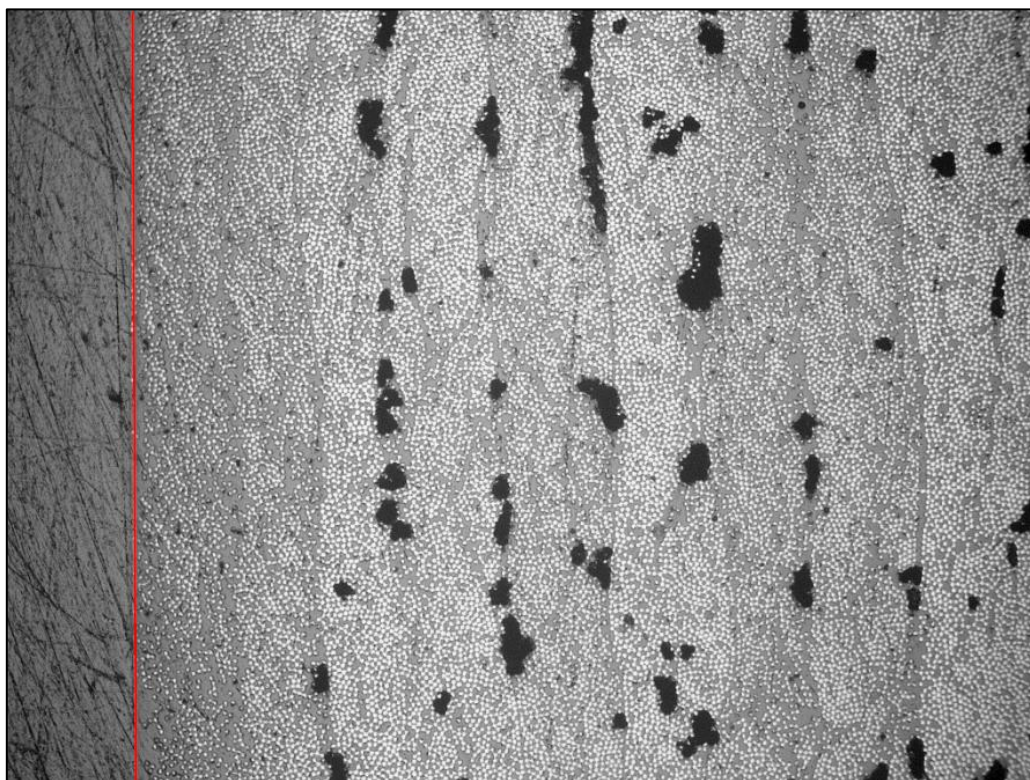
Παρατηρείται επίσης αυξημένη περιεκτικότητα σε ίνες για τα υλικά κατασκευασμένα με μεγαλύτερη δύναμη τάνυσης, γεγονός που συμφωνεί και με τη πυκνότητα των υλικών στις περισσότερες περιπτώσεις. Εξάιρεση αποτελεί το υλικό C\_150\_10\_1\_F8\_T1 του πίνακα 4.5 το οποίο έχει αρκετά μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σχέση με τα υλικά του πίνακα 4.6. Υπενθυμίζεται πως τα υλικά του πίνακα 4.5 έχουν κατασκευαστεί με το ίδιο σύστημα ρητίνης και ινών, ενώ τα σύνθετα υλικά του πίνακα 4.6 έχουν διαφορετικά υλικά κατασκευής.



Σχήμα 4.16 Διαστάσεις σε δακτύλιο.



**Σχήμα 4.17** Τομή δακτυλίου από σύνθετο υλικό C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4, όπου διακρίνεται η μειωμένη περιεκτικότητα σε ίνες κοντά στην εξωτερική επιφάνεια. Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά την εξωτερική επιφάνεια του δακτυλίου και το σκούρο μαύρο χρώμα τα κενά αέρα.



**Σχήμα 4.18** Τομή δακτυλίου από σύνθετο υλικό GR\_100\_10\_2\_F8\_T8, όπου διακρίνεται η μειωμένη περιεκτικότητα σε ίνες κοντά στην εξωτερική επιφάνεια. Η κόκκινη γραμμή αναπαριστά την εξωτερική επιφάνεια του δακτυλίου και το σκούρο μαύρο χρώμα τα κενά αέρα.



#### 4.4. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Στο παρόν εδάφιο παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων των φυσικών ιδιοτήτων των δοκιμών από σύνθετο υλικό. Στη συνέχεια παρατίθενται και σχολιάζονται ενδεικτικές εικόνες από την τομή των σύνθετων υλικών κάθετα στις ενισχυτικές ίνες. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από όλες τις μεθόδους που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο φαίνονται στο πίνακα 4.7, όπου,  $D$  είναι η πυκνότητα των υλικών όπως αυτή μετρήθηκε κατά ASTM D792 και  $W_f$  είναι η κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες, μετρημένη με τρεις διαφορετικές μεθόδους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.7 Φυσικές ιδιότητες δακτυλίων από σύνθετο υλικό κατασκευασμένων με τη μέθοδο Filament Winding.

Σύνθετο Υλικό	$D$ ( $g/cm^3$ )	$W_f$			Average $W_f$	St. Deviation $W_f$
		$W_f$ (Νιτρικό Οξύ)	(Θειικό Οξύ/Υπεροξείδιο Υδρογόνου)	$W_f$ (Image Analysis)		
C_200_10_2_F45_T1	1.5244	62.48%	75.96%	81.04%	73.16%	7.83%
C_200_10_2_F25_T1	1.5031	79.53%	80.15%	81.73%	80.47%	0.93%
C_150_10_1_F8_T1	1.4602	88.12%	76.77%	82.95%	82.61%	4.64%
C_100_10_2_F25_T8	1.5620	80.94%	82.72%	74.39%	79.35%	3.58%
C24K_100_10_2_F8_T4	1.5106	-	63.80%	67.61%	65.71%	1.91%
C50K_100_10_2_F8_T4	1.4952	-	65.99%	63.49%	64.74%	1.25%
GR_100_10_2_F8_T8	1.4775	-	74.16%	64.22%	69.19%	4.97%
PF_100_10_2_F8_T8	1.6621	-	65.28%	73.40%	69.34%	4.06%

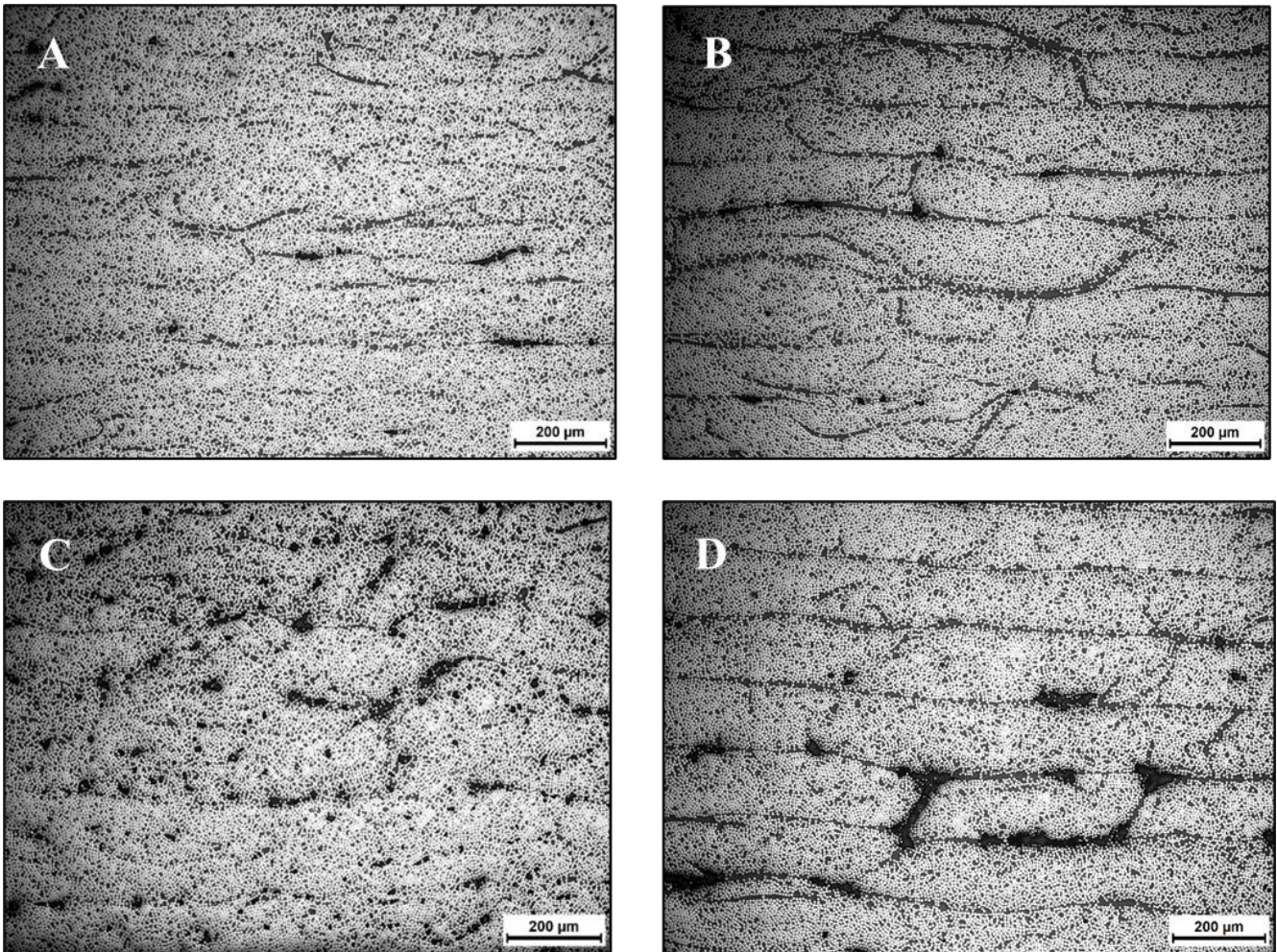
#### Παρατηρήσεις

Όσον αφορά στην περιεκτικότητα των σύνθετων υλικών σε ίνες, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στα αποτελέσματα μεταξύ των μεθόδων. Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις παρουσιάζονται στα υλικά GR\_100\_10\_2\_F8\_T8 και PF\_100\_10\_2\_F8\_T8. Οι διαφοροποιήσεις αυτές μπορεί να οφείλονται στις προσμίξεις (Γραφένιο) των συγκεκριμένων υλικών, καθώς δεν είναι σαφής η αντίδρασή τους με την εφαρμοζόμενη μέθοδο των οξέων (Θειικό Οξύ/Υπεροξείδιο Υδρογόνου).

Αν και στη μέθοδο με το Νιτρικό οξύ αρχικά παρατηρήθηκε αυξημένη περιεκτικότητα σε ίνες για υλικά κατασκευασμένα με μικρότερη δύναμη τάνυσης, δεν φαίνεται να επιβεβαιώνεται η ίδια συμπεριφορά για όλα τα υλικά με βάση τις υπόλοιπες μεθόδους. Ακόμα δεν φαίνεται τα *tows* να επιδρούν με κάποιο τρόπο στη περιεκτικότητα σε ίνες για τα συγκεκριμένα υλικά.

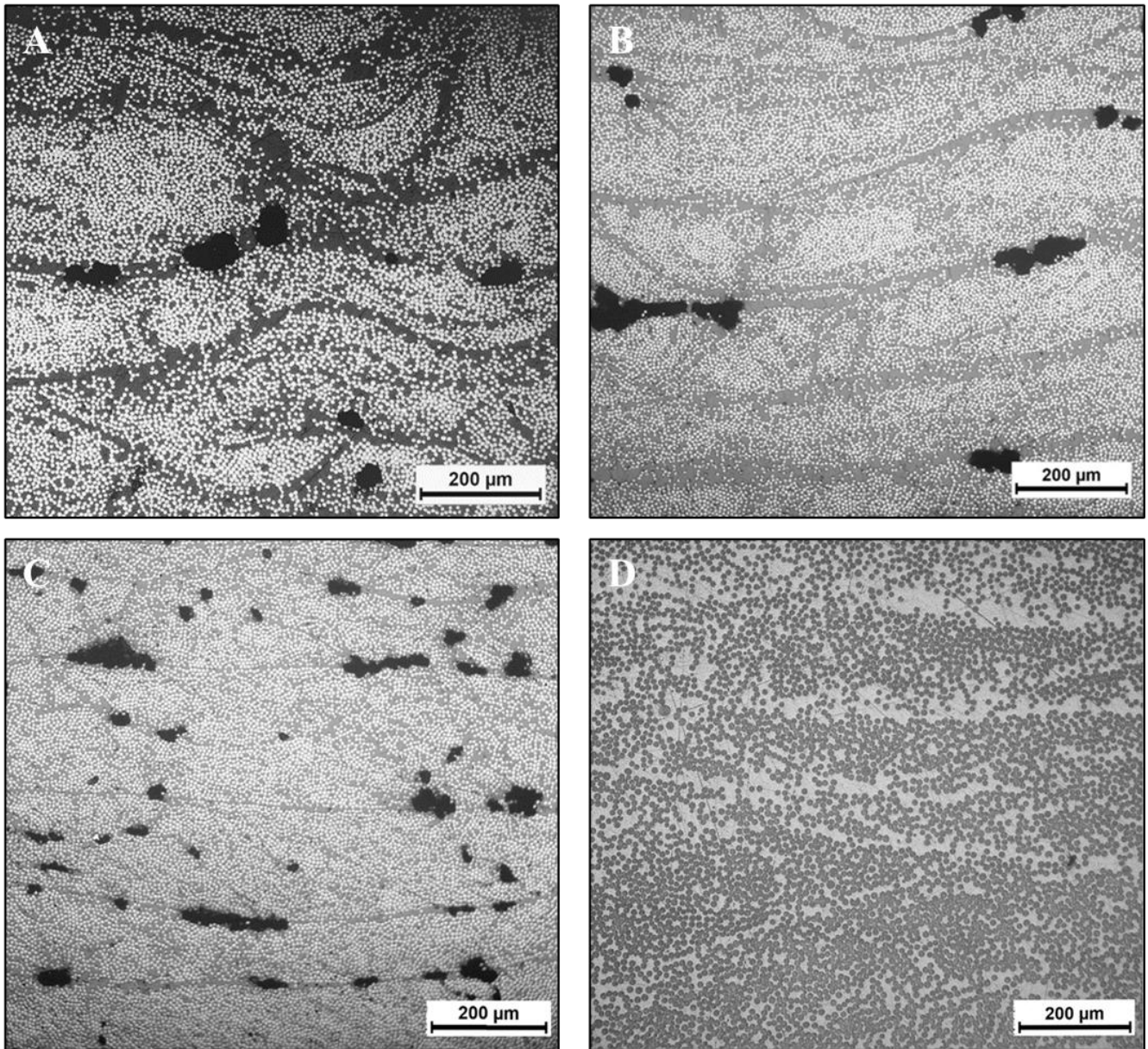
Τέλος, και οι δύο μέθοδοι που πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα υλικά δίνουν κατά κύριο λόγο μεγαλύτερες περιεκτικότητες για υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα, εκτός από το υλικό

PF\_100\_10\_2\_F8\_T8 όπου οι ίνες με βάση τη πίσσα ( $2.15 \text{ g/cm}^3$ ) είναι αρκετά βαρύτερες από τις PAN ίνες άνθρακα ( $1.8 \text{ g/cm}^3$ ) των υπόλοιπων υλικών, έτσι αν και έχουν λίγο χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες από κάποια υλικά, η πυκνότητά του είναι η μεγαλύτερη.



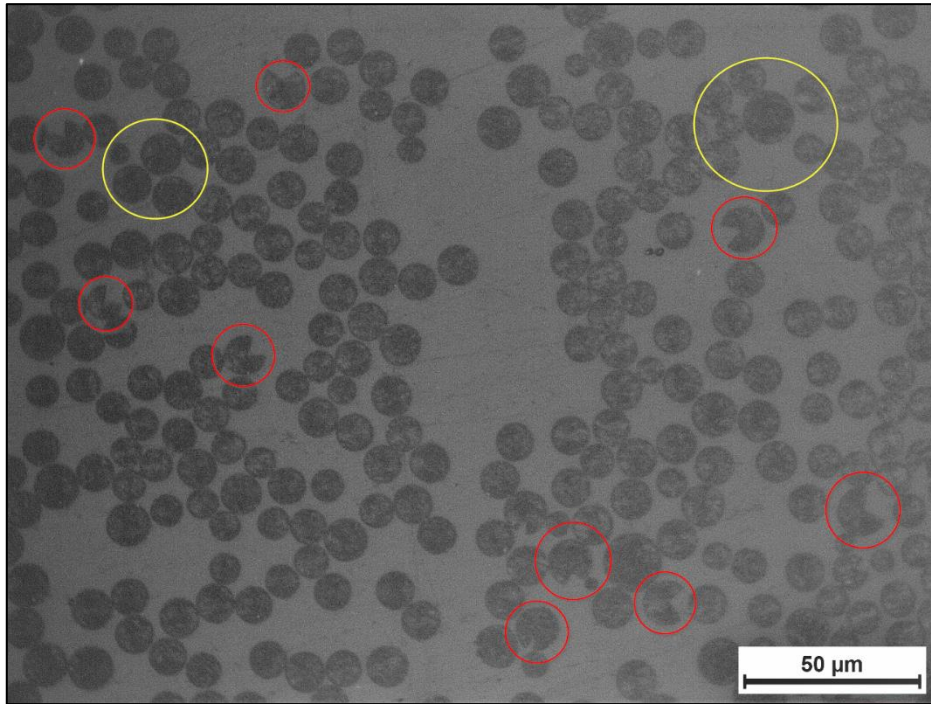
**Σχήμα 4.19** Εικόνες σύνθετων υλικών στο οπτικό μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100X. Απεικονίζονται τομές κάθετα στη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών των υλικών: (A) C\_200\_10\_2\_F45\_T1, (B) C\_200\_10\_2\_F25\_T1, (C) C\_150\_10\_1\_F8\_T1, (D) C\_100\_10\_2\_F25\_T8

Στο σχήμα 4.19 διακρίνονται στα περισσότερα υλικά οι στρώσεις ως συστάδες ινών οριζόντια διευθετημένες, και τα tows ως συστάδες ινών που ορίζονται από τις στρώσεις και τις σκουρόχρωμες περιοχές κάθετα σε αυτές. Παρατηρείται σαφής διαχωρισμός των στρώσεων στα υλικά (B) και (D) που έχουν κατασκευαστεί με δύναμη τάνυσης 25 N. Επίσης για τα ίδια υλικά καθώς και για το (C) που έχει κατασκευαστεί με δύναμη τάνυσης 8 N, παρατηρείται μεγάλη περιεκτικότητα σε κενά αέρα (μαύρα σημεία) τα οποία λαμβάνουν χώρα κυρίως μεταξύ των στρώσεων αλλά και των tows. Το υλικό (A) που έχει κατασκευαστεί με δύναμη τάνυσης 45 N παρουσιάζει τα λιγότερα κενά αέρα καθώς και τη λιγότερο ευδιάκριτη διαστρωμάτωση.



**Σχήμα 4.20** Εικόνες σύνθετων υλικών στο οπτικό μικροσκόπιο με μεγέθυνση 100X. Απεικονίζονται τομές κάθετα στη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών των υλικών: (A) C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4, (B) C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4, (C) GR\_100\_10\_2\_F8\_T8, (D) PF\_100\_10\_2\_F8\_T8

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται σαφής διαχωρισμός των στρώσεων και περίπου ίδια ποσοστά σε κενά αέρα για τα υλικά (A), (B) και (C). Επίσης παρατηρείται διαφοροποίηση στη διάμετρο των ινών μεταξύ των υλικών καθώς αυτές προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ίνες από πίσσα στο υλικό (D) οι οποίες εμφανίζουν διαφοροποίηση στη διάμετρο μεταξύ τους καθώς και ατέλειες όπως σπασίματα. Περαιτέρω μεγέθυνση του υλικού PF\_100\_10\_2\_F8\_T8 για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω σχολίων φαίνεται στο σχήμα 4.21.



**Σχήμα 4.20** Εικόνα από τομή του σύνθετου υλικού PF\_100\_10\_2\_F8\_T8 σε μεγέθυνση 1000X. Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι σπασμένες ίνες ενώ με κίτρινο οι εμφανείς ανισομεγέθεις ίνες.

Γενικά σημειώνεται πως διαφορετικά συστήματα ρητίνης και ινών καθώς και διαφοροποιήσεις στη διαδικασία κατασκευής των υλικών, όπως είναι η δύναμη τάνυσης και τα *tows*, επηρεάζουν σημαντικά τις φυσικές ιδιότητές τους. Συγκεκριμένα η μεγάλη δύναμη τάνυσης φαίνεται να επιδρά θετικά μειώνοντας τα κενά αέρα που υπάρχουν μέσα στο υλικό όπως επίσης αυξάνει και την περιεκτικότητα του υλικού σε ίνες. Η συσχέτιση της δύναμης τάνυσης και της περιεκτικότητας του υλικού σε ίνες κατ' αυτόν τον τρόπο σημειώνεται επίσης από τους Mertiny και Ellyin (2002).

Επισημαίνεται πως το δείγμα των δοκιμών που εξετάστηκε είναι μικρό αναλογικά με τις παραμέτρους που διαφοροποιούνται μεταξύ των υλικών και επηρεάζουν τις φυσικές τους ιδιότητες. Έτσι δεν κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων.

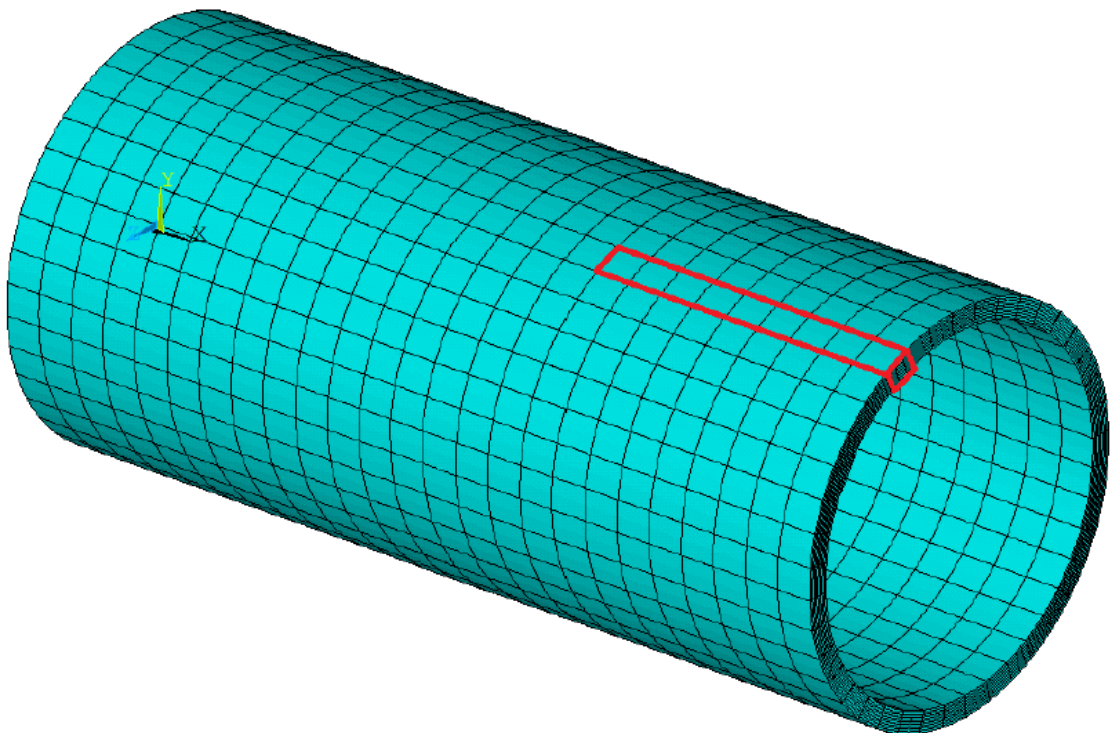
## 5. ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

### 5.1. Σκοπός

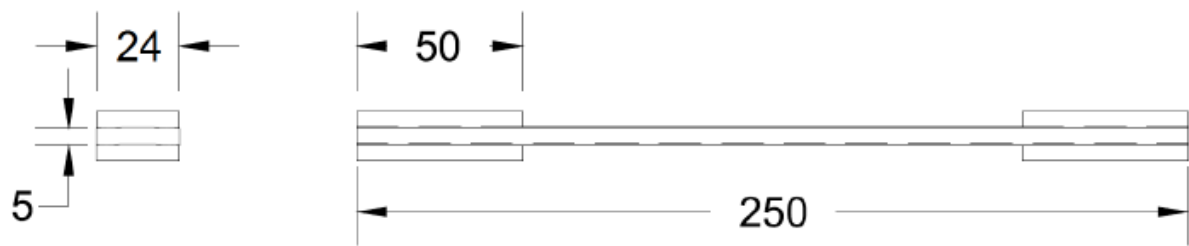
Σκοπός αυτής της σειράς δοκιμών είναι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας  $E_2$  και του μέτρου διάτμησης  $G_{12}$  στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες. Επίσης προσδιορίζονται η τάση θραύσης  $\sigma_{2max}$  και  $\tau_{12max}$ , καθώς και η μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon_{2max}$  στην ίδια διεύθυνση.

### 5.2. Γεωμετρία δοκιμίων

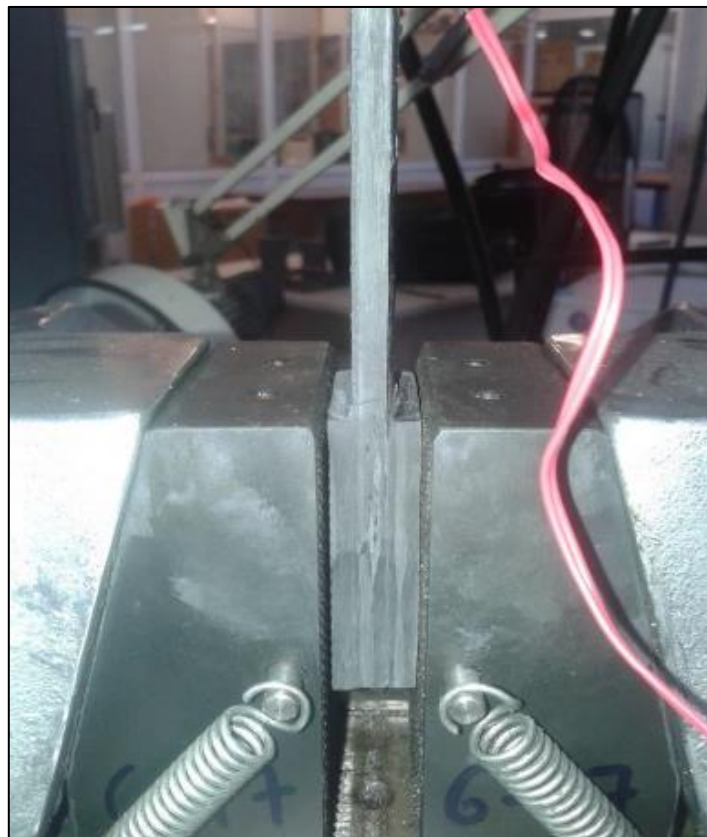
Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν διαμήκη ευθύγραμμα δοκίμια που προέκυψαν από τους κυλίνδρους 3 (12K), 4 (60K), 5 (12K), 6 (60K), 7 (Glass) και 8 (Glass). Οι κύλινδροι είχαν εσωτερική διάμετρο  $D_i=100$  mm και ονομαστικό πάχος 5 mm. Τα δοκίμια κόπηκαν σε διεύθυνση παράλληλη στον άξονα του κυλίνδρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1. Το ονομαστικό πλάτος του κάθε δοκιμίου είναι 24 mm και το ονομαστικό μήκος 250 mm (σχήμα 5.2), ενώ συνολικά για τις δοκιμές κόπηκαν 6 δοκίμια από κάθε κύλινδρο. Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη συγκράτηση των δοκιμίων από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, στα άκρα τους κολλήθηκαν με εποξική κόλλα επιθέματα (tabs) μήκους 50 mm έκαστο (σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.1 Σχηματική απεικόνιση του κυλίνδρου και του δοκιμίου, όπως αυτό κόπηκε.



Σχήμα 5.2 Σχηματική απεικόνιση του κυλίνδρου και του δοκιμίου, όπως αυτό κόπηκε.



Σχήμα 5.3 Συγκράτηση του δοκιμίου στις αρπάγες της μηχανής.

Στη συνέχεια ακολούθησε η αναλυτική διαστασιολόγηση του κάθε δοκιμίου και η σύγκριση των τιμών με τις ονομαστικές. Ελήφθησαν τρεις μετρήσεις για το πλάτος και το πάχος σε κάθε δοκίμιο, μία στο κέντρο και δύο στα άκρα πριν τα επιθέματα, ενώ σαν τελική τιμή ελήφθη ο μέσος όρος τους (average value). Ακόμα, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (standard deviation) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρούμενων διαστάσεων και η απόκλισή τους από τις αντίστοιχες ονομαστικές. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο συντελεστής διακύμανσης σε όλες τις μετρήσεις είναι μικρότερος του 5%, το οποίο καθιστά τα δοκίμια αποδεκτά από άποψη γεωμετρίας. Οι ονομαστικές τιμές για το πλάτος (width) και το πάχος (thickness) είναι 24 mm και 5 mm αντίστοιχα, ενώ οι μετρούμενες τιμές φαίνονται στον πίνακα 5.1 που ακολουθεί.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1 Διαστασιολόγηση ευθύγραμμων δοκιμίων.

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 3							
C3_L_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	24.53	24.20	23.97	24.37	23.93	24.03	<b>24.17</b>
Standard deviation	0.21	0.10	0.15	0.06	0.06	0.06	<b>0.24</b>
Coef. of variation	0.85%	0.41%	0.64%	0.24%	0.24%	0.24%	<b>0.99%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	5.00	5.00	5.03	5.00	5.00	5.00	<b>5.01</b>
Standard deviation	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	<b>0.01</b>
Coef. of variation	0.00%	0.00%	1.15%	0.00%	0.00%	0.00%	<b>0.27%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 4							
C4_L_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	24.13	24.10	24.17	24.43	24.30	23.73	<b>24.14</b>
Standard deviation	0.15	0.10	0.15	0.12	0.10	0.42	<b>0.24</b>
Coef. of variation	0.63%	0.41%	0.63%	0.47%	0.41%	1.75%	<b>0.98%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	5.33	5.30	5.43	5.30	5.30	5.33	<b>5.33</b>
Standard deviation	0.12	0.10	0.06	0.00	0.10	0.12	<b>0.05</b>
Coef. of variation	2.17%	1.89%	1.06%	0.00%	1.89%	2.17%	<b>0.97%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 5							
C5_L_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	25.82	24.92	24.77	23.63	24.89	24.50	<b>24.76</b>
Standard deviation	4.49	0.40	0.06	0.32	0.25	0.14	<b>0.71</b>
Coef. of variation	17.40%	1.60%	0.22%	1.36%	0.98%	0.57%	<b>2.86%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	4.62	4.70	4.37	4.53	4.36	4.33	<b>4.48</b>
Standard deviation	0.22	0.14	0.03	0.10	0.06	0.08	<b>0.16</b>
Coef. of variation	4.84%	2.99%	0.61%	2.12%	1.38%	1.92%	<b>3.46%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 6							
C6_L_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	24.93	24.89	24.82	24.84	24.51	24.60	<b>24.77</b>
Standard deviation	0.04	0.26	0.47	0.20	0.24	0.25	<b>0.17</b>
Coef. of variation	0.14%	1.03%	1.89%	0.82%	0.96%	1.01%	<b>0.68%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	5.02	5.38	5.49	5.28	4.93	4.89	<b>5.16</b>
Standard deviation	0.07	0.14	0.32	0.36	0.12	0.13	<b>0.25</b>
Coef. of variation	1.41%	2.68%	5.90%	6.77%	2.44%	2.67%	<b>4.83%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 7							
C7_L_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	24.20	24.43	24.37	24.57	24.43	24.27	<b>24.38</b>
Standard deviation	0.26	0.15	0.15	0.21	0.15	0.12	<b>0.13</b>
Coef. of variation	1.09%	0.63%	0.63%	0.85%	0.63%	0.48%	<b>0.54%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	5.13	5.13	5.17	5.13	5.07	5.20	<b>5.14</b>
Standard deviation	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.10	<b>0.04</b>
Coef. of variation	1.12%	1.12%	1.12%	1.12%	1.14%	1.92%	<b>0.86%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 8							
C8_L_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	24.48	24.93	24.48	24.60	24.38	24.39	<b>24.54</b>
Standard deviation	0.05	0.14	0.19	0.38	0.27	0.13	<b>0.20</b>
Coef. of variation	0.22%	0.55%	0.76%	1.54%	1.13%	0.54%	<b>0.83%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	5.34	5.50	5.12	5.18	5.18	5.05	<b>5.23</b>
Standard deviation	0.06	0.01	0.12	0.05	0.11	0.10	<b>0.16</b>
Coef. of variation	1.10%	0.11%	2.25%	0.91%	2.15%	1.91%	<b>3.12%</b>



### 5.3. Δοκιμή εφελκυσμού

Σκοπός αυτών των δοκιμών είναι να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$ , και η τάση θραύσης  $\sigma_{2max}$  σε διεύθυνση κάθετα των ινών.

Από κάθε κύλινδρο δοκιμάστηκαν έξι δοκίμια. Υπενθυμίζεται πως οι κύλινδροι 3, 4 και 7 έχουν κατασκευαστεί με γωνία περιέλιξης ινών  $90^\circ$ . Έτσι στα δοκίμια τα προερχόμενα από τους κυλίνδρους 3, 4 και 7 κολλήθηκαν μονοαξονικά strain gauges μήκους μέτρησης  $L=5$  mm, της εταιρίας KYOWA, στο κέντρο του κάθε δοκιμίου.

#### 5.3.1. Πειραματική διαδικασία

Τα δοκίμια εφελκύνονται από υδραυλική μηχανή εφελκυσμού καταγραφόμενου φορτίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4. Η αντοχή του υλικού  $\sigma_{2max}$  μπορεί να υπολογισθεί από το μέγιστο φορτίο που παραλήφθηκε από το δοκίμιο, σύμφωνα με την εξίσωση (5.1), η οποία αναφέρεται στο πρότυπο ASTM D 3039.

$$\sigma_2 = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

Όπου,

$F$  η δύναμη που ασκείται από τη μηχανή

$A$  η μέση ορθογωνική διατομή του δοκιμίου (πλάτος x πάχος)

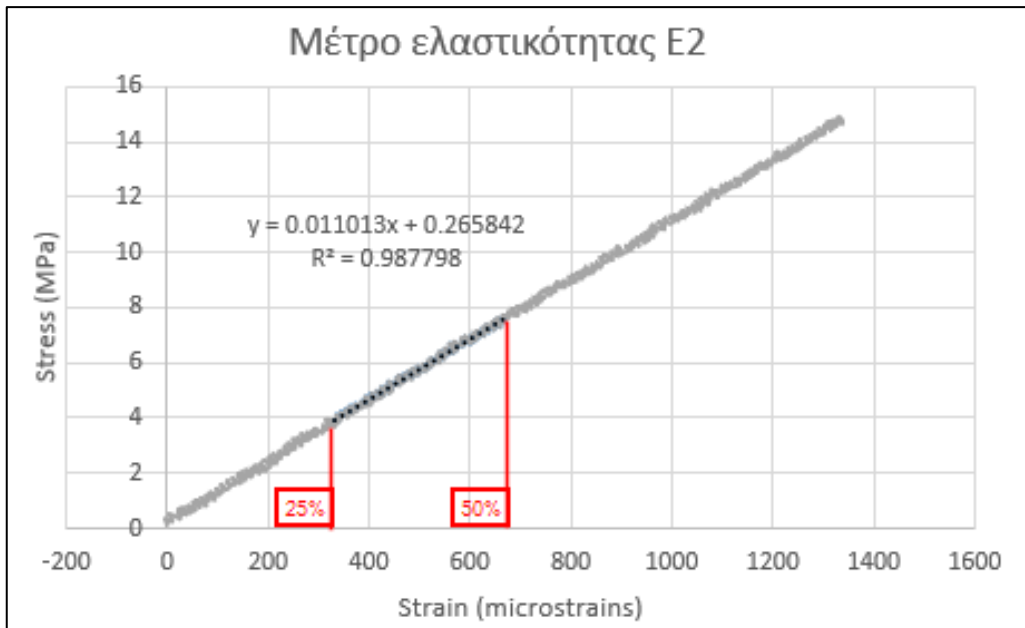
Οι παράμετροι της δοκιμής ήταν οι ακόλουθες:

- Ρυθμός μετατόπισης της κεφαλής της μηχανής: 1 mm/min
- Πίεση στις αρπάγες: 8-12 MPa
- Συχνότητα δειγματοληψίας των αποτελεσμάτων: 10 Hz.



Σχήμα 5.4 Τοποθέτηση δοκιμίου στην υδραυλική μηχανή.

Εφόσον οι παραμορφώσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης είναι καταγεγραμμένες, μπορεί να σχεδιαστεί το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, μέσω του οποίου εξάγεται το μέτρο ελαστικότητας του υλικού  $E_2$ . Το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$  προσδιορίστηκε από την κλίση της γραμμικής περιοχής του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων. Για το κάθε δοκίμιο το εύρος παραμορφώσεων από το οποίο προέκυψε το μέτρο ελαστικότητας ορίστηκε από 25% έως 50% της μέγιστης παραμόρφωσης, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3039. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται ένα τυπικό διάγραμμα από το οποίο λαμβάνεται το μέτρο ελαστικότητας του δοκιμίου C3\_L\_1\_D. Για την εύρεση της τιμής της κλίσης της ευθείας, πραγματοποιήθηκε γραμμική προσέγγιση της καμπύλης μέσω του προγράμματος Excel. Η συνάρτηση που εξάγεται είναι της μορφής  $y = a * x + b$ , όπου ως μέτρο ελαστικότητας θεωρείται η τιμή του  $a$ . Στη συνέχεια η τιμή πολλαπλασιάζεται επί  $10^3$  έτσι, ώστε το αποτέλεσμα να προκύψει σε GPa. Σε κάθε διάγραμμα υπολογίστηκε επίσης ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination)  $R^2$ , ώστε να κριθεί η αξιοπιστία της γραμμικής προσέγγισης. Σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται και στη συνέχεια, ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν περίπου 0.99, γεγονός που υποδηλώνει την απόλυτη αξιοπιστία της προσέγγισης.

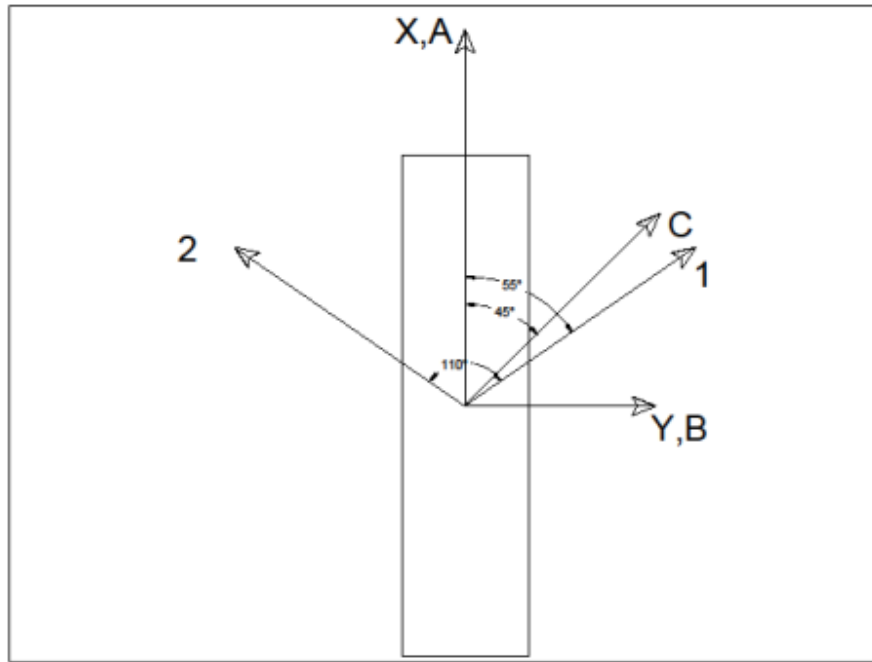


Σχήμα 5.5 Τυπικό διάγραμμα εξαγωγής μέτρου ελαστικότητας.

#### 5.4. Δοκιμή διάτμησης

Σκοπός αυτών των δοκιμών είναι να υπολογιστεί το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  και η τάση θραύσης σε διάτμηση  $\tau_{12max}$  στο επίπεδο που ορίζεται από τις κύριες διευθύνσεις του 1 και 2.

Στα δοκίμια προερχόμενα από τους κυλίνδρους 5, 6 και 8, που κατασκευάστηκαν με γωνία περιέλιξης  $\pm 55^\circ$ , κολλήθηκαν τριαξονικές ροζέτες ( $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ ) μήκους μέτρησης 5 mm της εταιρίας KYOWA. Οι τρεις διευθύνσεις στις οποίες προσανατολίστηκαν οι άξονες των ροζετών είναι η διεύθυνση της φόρτισης (A), η διεύθυνση κάθετα στη φόρτιση (B) και η διεύθυνση ανάμεσα στις δύο προαναφερθείσες η οποία απέχει  $45^\circ$  από την κάθε μία (C). Στο σχήμα 5.6 φαίνεται ένα τυπικό σκαρίφημα των αξόνων του δοκιμίου όπου A, B και C είναι οι άξονες του επιμηκυσιόμετρου, X και Y είναι οι κύριοι γεωμετρικοί άξονες του δοκιμίου, ενώ 1 και 2 είναι οι διευθύνσεις των ινών. Σε κάθε δοκίμιο το επιμηκυσιόμετρο κολλήθηκε στο κέντρο του, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.6 Σκαρίφημα αξόνων για τα δοκίμια με γωνία περιέλιξης ινών  $\pm 55^\circ$ .



Σχήμα 5.7 Απεικόνιση ροζέτας τοποθετημένης στο δοκίμιο με γωνία περιέλιξης ινών  $\pm 55^\circ$ .

#### 5.4.1. Πειραματική διαδικασία

Τα δοκίμια θα δοκιμαστούν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3518, το οποίο αναφέρεται σε συμμετρικά πολύστρωτα υλικά με μήτρα πολυμερούς και ενίσχυση μόνο κατά γωνίες + 45° και - 45° ως προς τον βασικό άξονα του υλικού. Οι κύλινδροι που παράγονται με τη μέθοδο περιέλιξης ινών μπορούν να θεωρηθούν συμμετρικοί ως προς τις στρώσεις των ενισχυτικών ινών αφού για κάθε στρώση γωνίας + θ, έπεται μία στρώση γωνίας - θ. Η μεγαλύτερη διαφορά με το πρότυπο έγκειται στο γεγονός ότι οι κύλινδροι ενισχύθηκαν σε γωνίες ± 55° αντί ± 45°. Για τον λόγο αυτό, για την εύρεση του μέτρου διάτμησης ακολουθήθηκε διαφορετική υπολογιστική διαδικασία από αυτήν που ορίζει το πρότυπο, η οποία αναλύεται παρακάτω.

Τα δοκίμια συγκεκριμένης διατομής εφελκύνονται από υδραυλική μηχανή εφελκυσμού καταγραφόμενου φορτίου. Ως μέγιστο φορτίο  $F_{max}$  θεωρήθηκε το φορτίο που καταγράφεται κατά την θραύση του δοκιμίου. Η διατμητική τάση  $\tau_{12}$  στο επίπεδο 1-2 το οποίο ορίζεται από τις αντίστοιχες διευθύνσεις των ινών προσδιορίστηκε από τους Young & Budynas (2002) από τη σχέση 5.2 που ακολουθεί:

$$\tau_{12} = \frac{F}{2 \cdot A} * \sin 2\theta \quad (5.2)$$

Όπου,

$F$  η δύναμη που ασκείται από τη μηχανή

$A$  η μέση ορθογωνική διατομή του δοκιμίου (πλάτος x πάχος)

$\theta$  η γωνία περιέλιξης των ινών ως προς διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της φόρτισης,  $\theta=35^\circ$

Για την εύρεση του μέτρου διάτμησης  $G_{12}$  ήταν απαραίτητος ο υπολογισμός της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma_{12}$  στο επίπεδο που ορίζουν οι ενισχυτικές ίνες (επίπεδο 12), έτσι ώστε να μπορέσει να παραχθεί το διάγραμμα  $\tau_{12} - \gamma_{12}$  και μέσω της κλίσης του να υπολογιστεί το αντίστοιχο μέτρο. Ο υπολογισμός της διατμητικής παραμόρφωσης πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης (5.3) που αναφέρεται από τον Τσούβαλη (1998):

$$\gamma_{12} = 2 * \varepsilon_{12} = m * n * \varepsilon_x + m * n * \varepsilon_y + (m^2 - n^2) * \varepsilon_{xy} \quad (5.3)$$

Όπου,

$$m = \cos(55)$$

$$n = \sin(55)$$

$\varepsilon_x$  η αξονική παραμόρφωση στην διεύθυνση X

$\varepsilon_y$  η αξονική παραμόρφωση στην διεύθυνση Y

$\varepsilon_{xy}$  η διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο XY

$\varepsilon_{12}$  η διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο 12

Για τις παραμορφώσεις που καταγράφονται από τα τρία strain gauges ισχύει:

$$\varepsilon_A = \varepsilon_x \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_B = \varepsilon_y \quad (5.5)$$

$$\varepsilon_C = m^2 * \varepsilon_x + n^2 * \varepsilon_y + 2 * m * n * \varepsilon_{xy} \quad (5.6)$$

Όπου,

$$m = \cos(45)$$

$$n = \sin(45)$$

Τις εξισώσεις (5.4) – (5.6) τις λαμβάνουμε επίσης από τον Τσούβαλη (1998).

Για την εξίσωση (5.6) αντικαθιστώντας τις (5.4) και (5.5) προκύπτει:

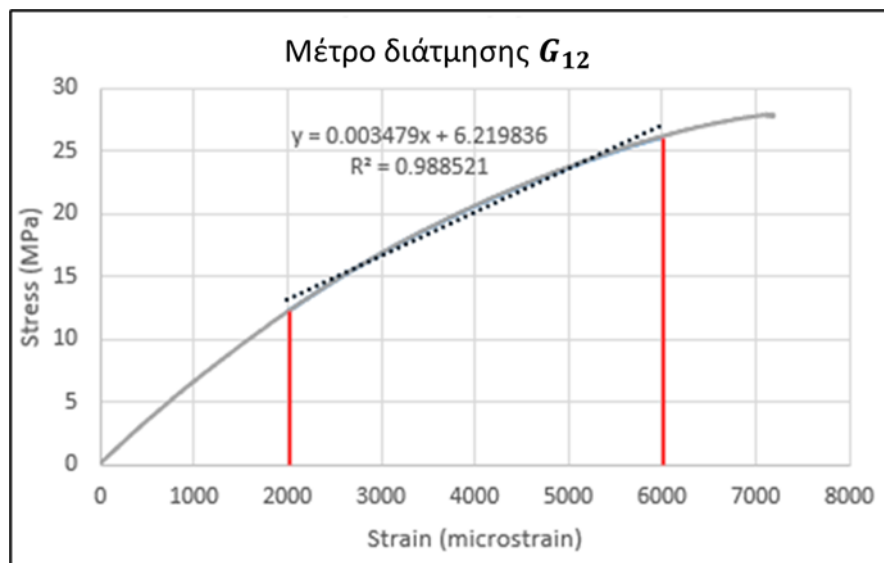
$$\varepsilon_{xy} = -\left(\frac{\varepsilon_A + \varepsilon_B}{2} - \varepsilon_C\right) \quad (5.7)$$

Από τη σχέση (5.7) είναι εφικτό μέσω των μετρήσεων της τριαξονικής ροζέτας να μετρηθούν αποτελέσματα για τη διατμητική παραμόρφωση  $\varepsilon_{xy}$ . Με δεδομένες τις τρεις παραμορφώσεις στο γεωμετρικό σύστημα αξόνων XY, είναι πλέον εφικτό μέσω της σχέσης (5.3) να εξαχθούν αποτελέσματα για τη διατμητική παραμόρφωση στο επίπεδο των ιών ( $\gamma_{12}$ ). Επομένως χαράσσεται το διάγραμμα  $\tau_{12} - \gamma_{12}$  μέσω του οποίου θα ληφθεί το μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση  $G_{12}$ . Το εύρος τιμών του διαγράμματος που θα ερευνηθεί είναι από

2000 έως 6000 με (microstrains) το οποίο αναφέρεται στη διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_{12}$ , σε αντιστοιχία με το πρότυπο ASTM D 3518. Το σχήμα 5.8 είναι ένα τυπικό διάγραμμα διατμητικών τάσεων – διατμητικών παραμορφώσεων και αναφέρεται στο δοκίμιο C5\_L\_1, το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα 5.9. Για την εύρεση της τιμής της κλίσης της ευθείας, πραγματοποιήθηκε γραμμική προσέγγιση της καμπύλης μέσω του προγράμματος Excel. Η συνάρτηση που εξάγεται είναι της μορφής  $y = a * x + b$ , όπου ως μέτρο ελαστικότητας σε διάτμηση θεωρείται η τιμή του  $a$ . Στη συνέχεια η τιμή πολλαπλασιάζεται επί  $10^3$  έτσι, ώστε το αποτέλεσμα να προκύψει σε GPa. Σε κάθε διάγραμμα υπολογίστηκε επίσης ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination)  $R^2$ , ώστε να κριθεί η αξιοπιστία της γραμμικής προσέγγισης. Σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται και στη συνέχεια, ο συντελεστής προσδιορισμού ήταν περίπου 0.99, γεγονός που υποδηλώνει απόλυτη αξιοπιστία της προσέγγισης.

Οι παράμετροι της δοκιμής ήταν οι ακόλουθες:

- Ρυθμός μετατόπισης της κεφαλής της μηχανής: 1 mm/min
- Πίεση στις αρπάγες: 8-12 MPa
- Συχνότητα δειγματοληψίας των αποτελεσμάτων: 10 Hz.



**Σχήμα 5.8** Τυπικό διάγραμμα διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων, από το οποίο εξάγεται το μέτρο διάτμησης  $G$ .

## 5.5. Αποτελέσματα

Στη συνέχεια θα παρατεθούν σε ξεχωριστά εδάφια τα αποτελέσματα των δοκιμών για την εύρεση του μέτρου ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης.

### 5.5.1. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού

Ακολουθεί ο πίνακας 5.2, στον οποίο φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών, ενώ ακολούθως στα σχήματα 5.9-5.11 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τα δοκίμια από κάθε κύλινδρο χωριστά.

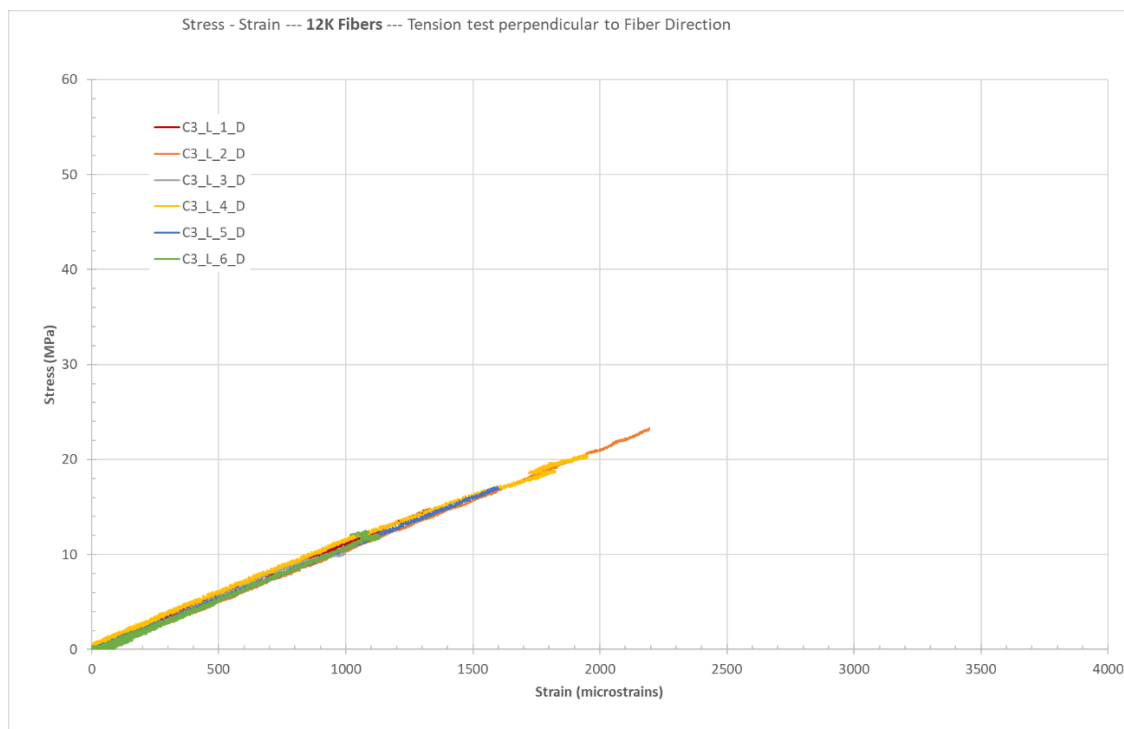
ΠΙΝΑΚΑΣ 5.2 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού στις 90°.

Specimen	F <sub>2</sub>	ε <sub>2max</sub>	σ <sub>2max</sub>	E <sub>2</sub>
<b>C3-L-D</b>	kN	με	MPa	GPa
<b>C3_L_1_D</b>	1.821	1330	14.85	<b>11.0</b>
<b>C3_L_2_D</b>	2.859	2190	23.60	<b>10.8</b>
<b>C3_L_3_D</b>	1.247	981	10.34	<b>11.9</b>
<b>C3_L_4_D</b>	2.501	1943	20.53	<b>10.8</b>
<b>C3_L_5_D</b>	2.054	1595	17.17	<b>10.7</b>
<b>C3_L_6_D</b>	1.499	1075	12.47	<b>10.8</b>
<b>Average</b>	1.997	1519	16.49	<b>11.0</b>
<b>St. Deviation</b>	0.607	481	4.98	<b>0.4</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	30.4%	31.7%	30.2%	<b>4.1%</b>

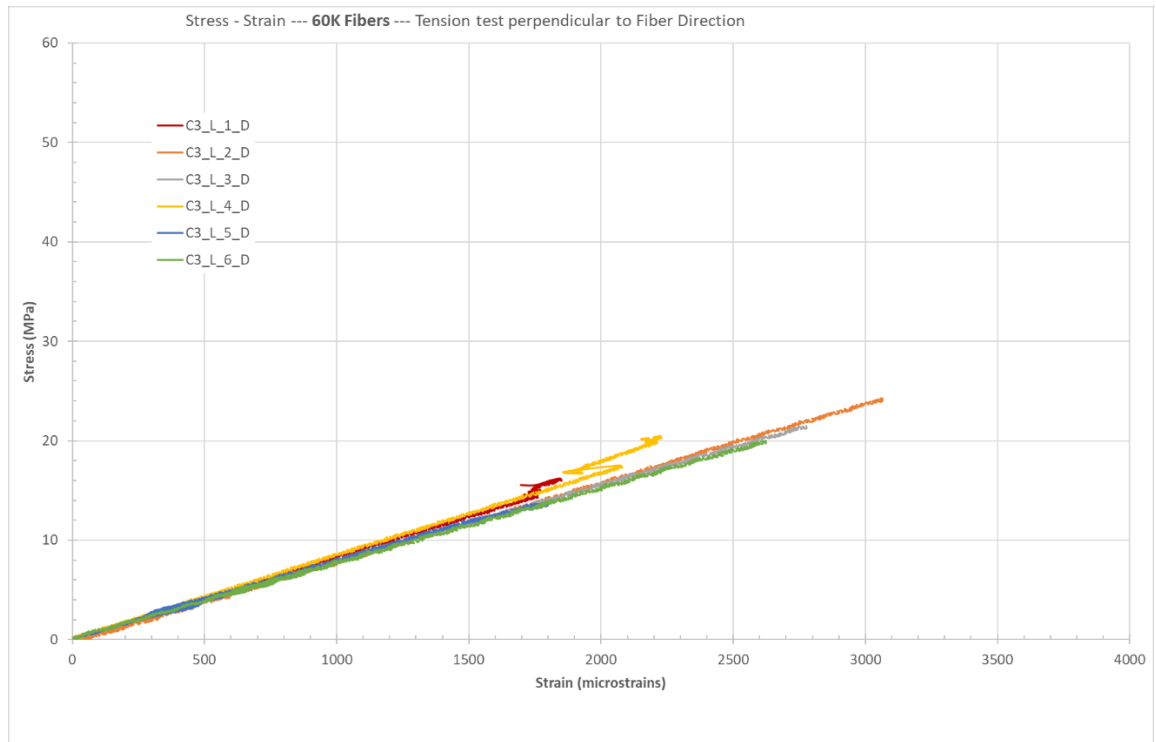
Specimen	F <sub>2</sub>	ε <sub>2max</sub>	σ <sub>2max</sub>	E <sub>2</sub>
<b>C4-L-D</b>	kN	με	MPa	GPa
<b>C4_L_1_D</b>	2.083	1846	16.19	<b>8.3</b>
<b>C4_L_2_D</b>	2.993	3063	24.70	<b>8.1</b>
<b>C4_L_3_D</b>	2.817	2775	21.46	<b>7.8</b>
<b>C4_L_4_D</b>	2.653	2223	20.49	<b>8.5</b>
<b>C4_L_5_D</b>	1.771	1789	13.75	<b>7.7</b>
<b>C4_L_6_D</b>	2.531	2623	19.99	<b>7.6</b>
<b>Average</b>	2.475	2386	19.43	<b>8.0</b>
<b>St. Deviation</b>	0.462	518	3.90	<b>0.3</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	18.7%	21.7%	20.1%	<b>4.3%</b>



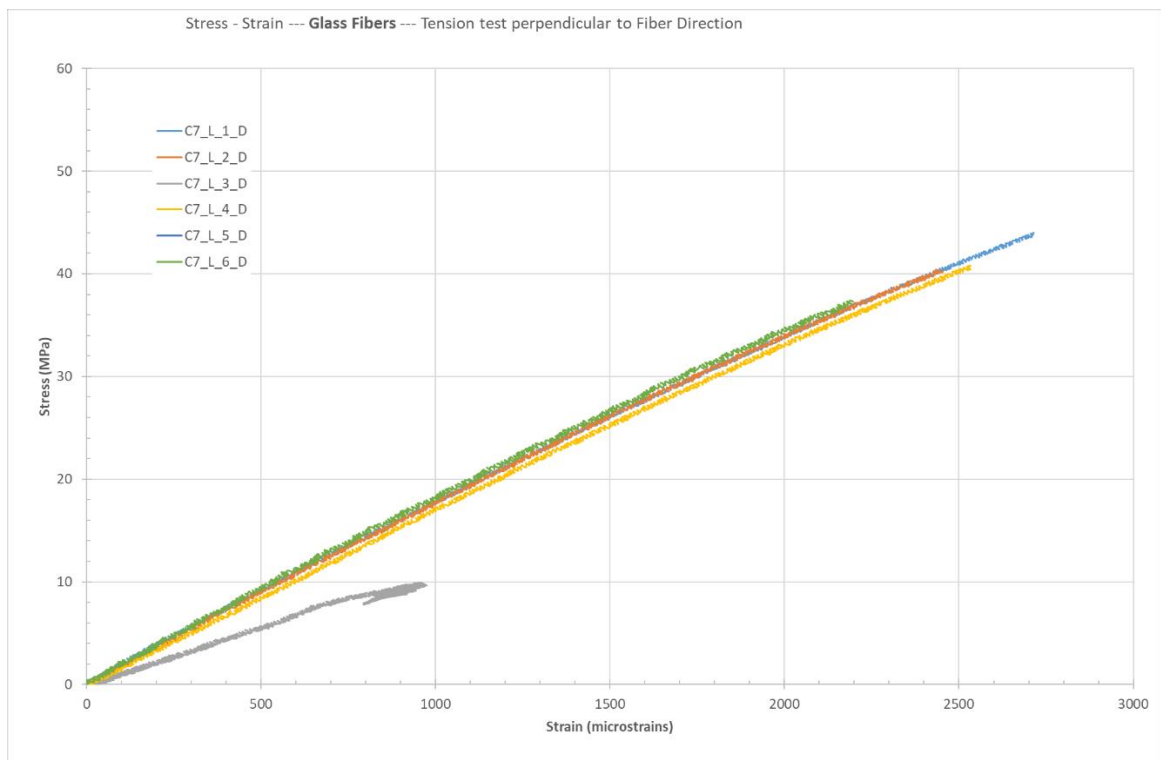
Specimen	F <sub>2</sub>	ε <sub>2max</sub>	σ <sub>2max</sub>	E <sub>2</sub>
<b>C7-L-D</b>	kN	με	MPa	GPa
<b>C7_L_1_D</b>	5.465	2714	43.99	<b>17.0</b>
<b>C7_L_2_D</b>	5.067	2434	40.40	<b>17.1</b>
<b>C7_L_3_D</b>	1.247	958	9.91	<b>11.4</b>
<b>C7_L_4_D</b>	5.144	2532	40.79	<b>17.0</b>
<b>C7_L_5_D</b>	5.703	2929	46.07	<b>16.1</b>
<b>C7_L_6_D</b>	4.718	2189	37.39	<b>17.4</b>
<b>Average</b>	5.219	2560	41.73	<b>16.9</b>
<b>St. Deviation</b>	0.379	280	3.37	<b>0.5</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	7.3%	11.0%	8.1%	<b>2.8%</b>



Σχήμα 5.9 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, 12K, κάθετα στις ίνες.



Σχήμα 5.10 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, 60K, κάθετα στις ίνες.



Σχήμα 5.11 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, Glass, κάθετα στις ίνες.

## Παρατηρήσεις

Γενικά οι μετρήσεις φαίνεται να έχουν καλή επαναληψιμότητα με τον συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation) να είναι κάτω από 5%, γεγονός που καθιστά τα αποτελέσματα αξιόπιστα. Η τάση θραύσης και η μέγιστη παραμόρφωση παρουσιάζουν αρκετά μεγάλη διασπορά, γεγονός σύνηθες από βιβλιογραφικές αναφορές. Η μετρήσεις για το δοκίμιο C7-L-3-D δεν συμπεριλαμβάνονται στα αποτελέσματα, καθώς έσπασε σε πολύ χαμηλή τάση.

Όσον αφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες, τα δοκίμια από το υλικό τυλιγμένο με ίνες άνθρακα 12K παρουσιάζουν μέτρο ελαστικότητας  $E_2=11.0$  GPa και μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_{2max}=16.49$  MPa. Το σύνθετο υλικό από ίνες άνθρακα 60K παρουσιάζει μέτρο ελαστικότητας  $E_2=8.0$  GPa και μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_{2max}=19.43$  MPa. Το σύνθετο από ίνες γυαλιού παρουσιάζει μέτρο ελαστικότητας  $E_2=16.9$  GPa και μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_{2max}=41.73$  MPa. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας για όλα τα υλικά είναι χαμηλή, όπως αναμενόταν, αφού η συγκεκριμένη ιδιότητα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες της ρητίνης, οι οποίες είναι σημαντικά χαμηλότερες από αυτές της ενίσχυσης. Αισθητά μεγαλύτερη είναι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας και της τάσης θραύσης όσον αφορά στον κύλινδρο 7, ο οποίος ενισχύθηκε με ίνες γυαλιού. Σε κάθε περίπτωση, οι τιμές είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες τυπικές τιμές που συναντώνται στη βιβλιογραφία (Hamed, Hamdan, Sahari, & Sapuan, 2008).

### 5.5.2. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης

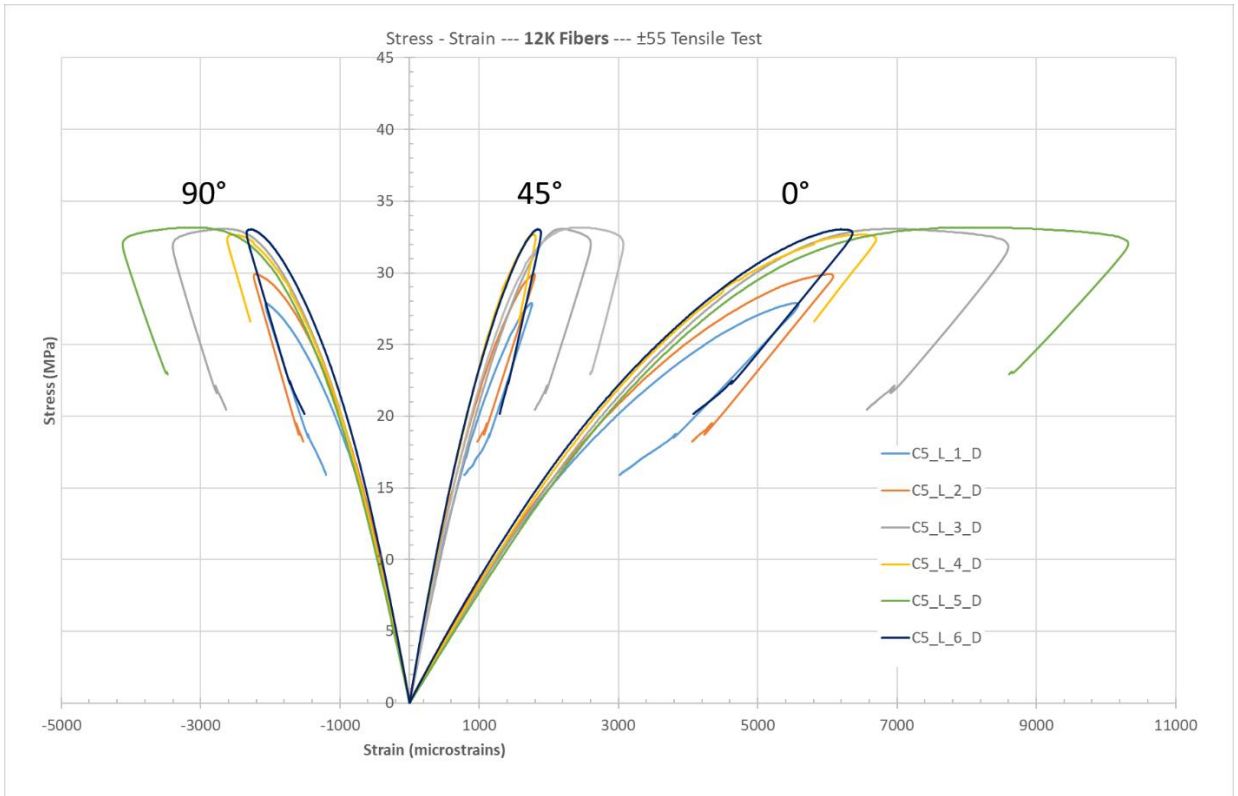
Ακολουθεί ο πίνακας 5.3, στον οποίο φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών, ενώ ακολούθως στα σχήματα 5.12-5.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για τον κάθε κύλινδρο χωριστά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.3 Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού στις  $\pm 55^\circ$ .

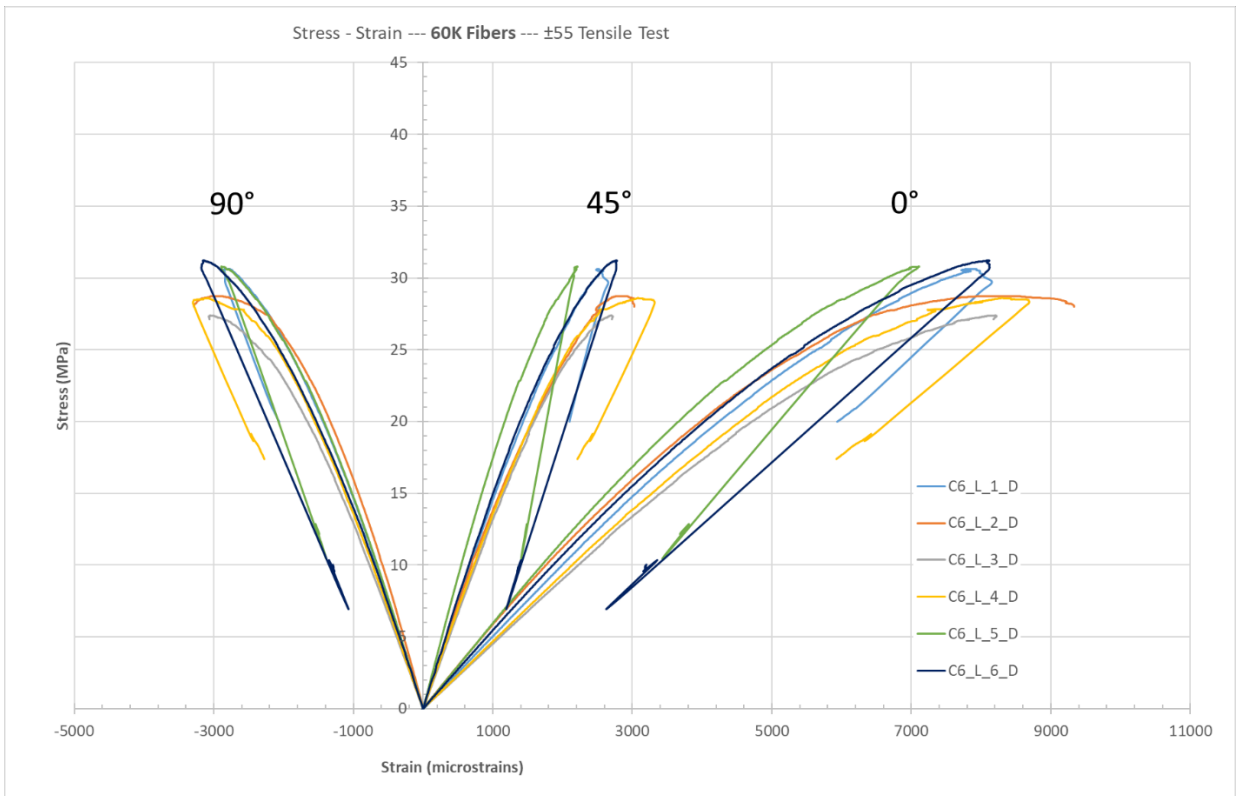
Specimen	F	$\tau_{12}$	$G_{12}$
<b>C5-L-D</b>	kN	MPa	GPa
<b>C5_L_1_D</b>	7.09	27.91	<b>3.5</b>
<b>C5_L_2_D</b>	7.45	29.91	<b>3.7</b>
<b>C5_L_3_D</b>	7.62	33.08	<b>4.1</b>
<b>C5_L_4_D</b>	7.44	32.68	<b>4.1</b>
<b>C5_L_5_D</b>	7.65	33.14	<b>4.1</b>
<b>C5_L_6_D</b>	7.46	33.07	<b>4.1</b>
<b>Average</b>	7.45	31.63	<b>4.0</b>
<b>St. Deviation</b>	0.20	2.21	<b>0.3</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	2.7%	7.0%	<b>7.2%</b>

Specimen	F	$\tau_{12}$	$G_{12}$
<b>C6-L-D</b>	kN	MPa	GPa
C6_L_1_D	8.15	30.62	<b>3.5</b>
C6_L_2_D	8.19	28.73	<b>3.4</b>
C6_L_3_D	7.94	27.40	<b>3.2</b>
C6_L_4_D	7.98	28.61	<b>3.3</b>
C6_L_5_D	7.93	30.81	<b>3.7</b>
C5_L_6_D	8.00	31.22	<b>3.4</b>
<b>Average</b>	8.03	29.56	<b>3.4</b>
<b>St. Deviation</b>	0.11	1.53	<b>0.2</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	1.4%	5.2%	<b>5.0%</b>

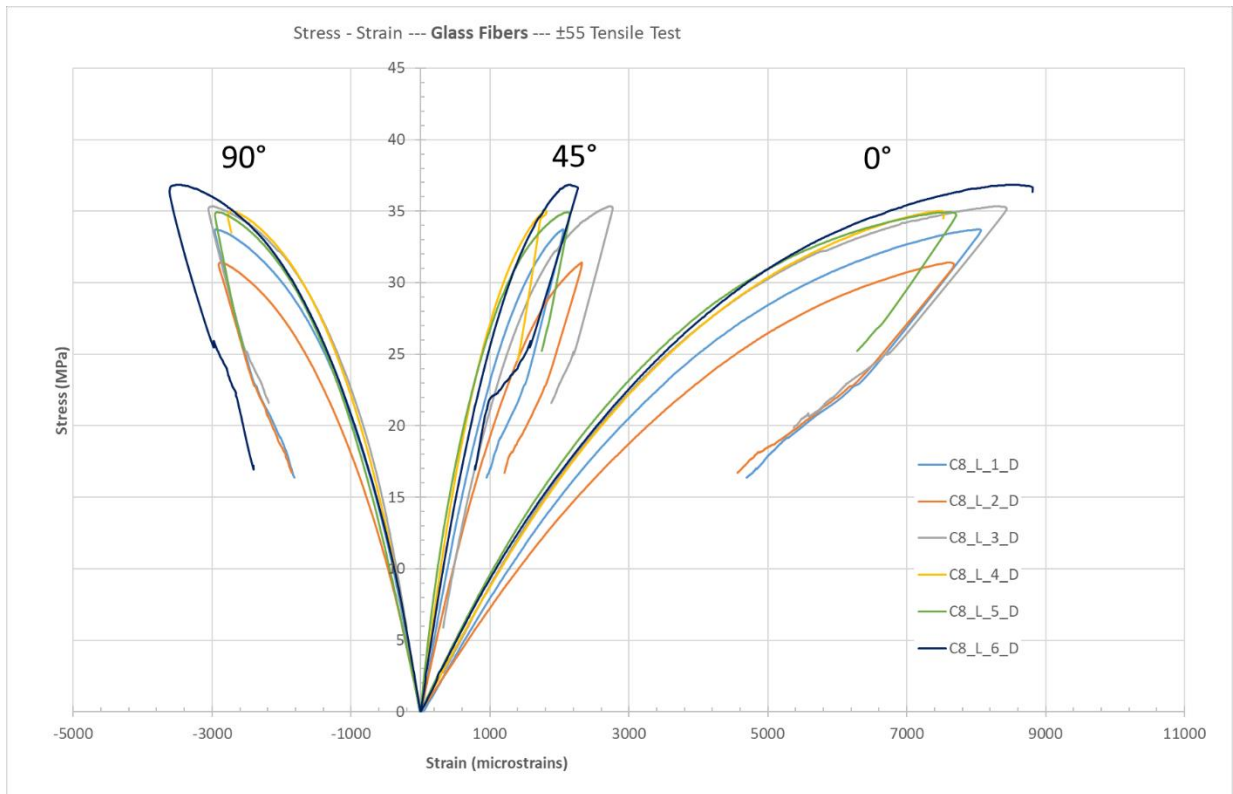
Specimen	F	$\tau_{12}$	$G_{12}$
<b>C8-L-D</b>	kN	MPa	GPa
C8_L_1_D	9.39	33.73	<b>3.8</b>
C8_L_2_D	9.16	31.41	<b>3.6</b>
C8_L_3_D	9.43	35.34	<b>3.9</b>
C8_L_4_D	9.50	35.01	<b>4.0</b>
C8_L_5_D	9.39	34.94	<b>4.0</b>
C8_L_6_D	9.66	36.84	<b>4.0</b>
<b>Average</b>	9.42	34.55	<b>3.9</b>
<b>St. Deviation</b>	0.16	1.83	<b>0.2</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	1.7%	5.3%	<b>4.5%</b>



Σχήμα 5.12 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, 12Κ.



Σχήμα 5.13 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, 60Κ.

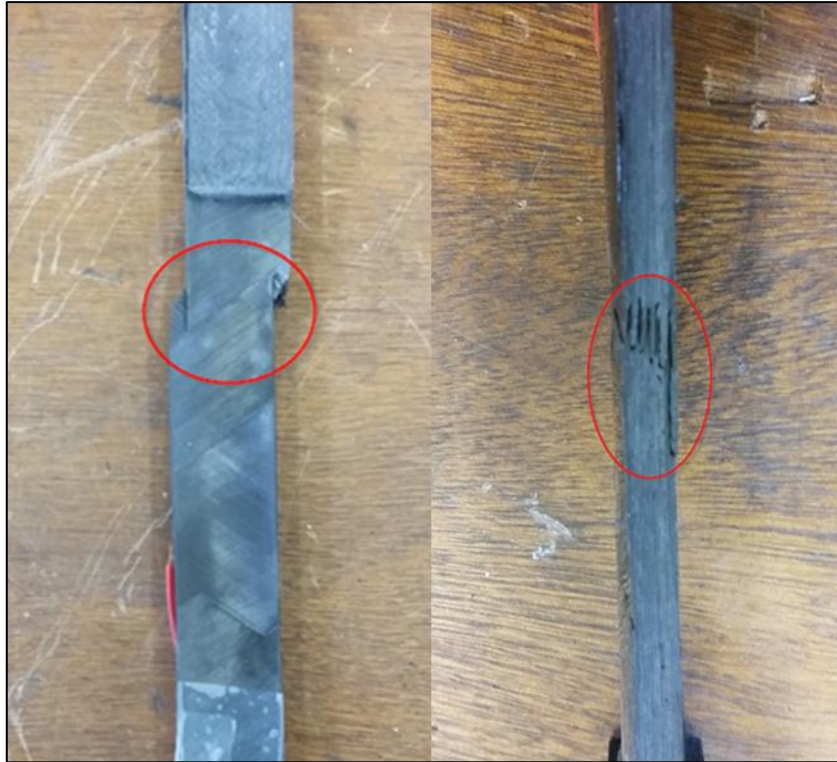


Σχήμα 5.14 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, glass fibers.

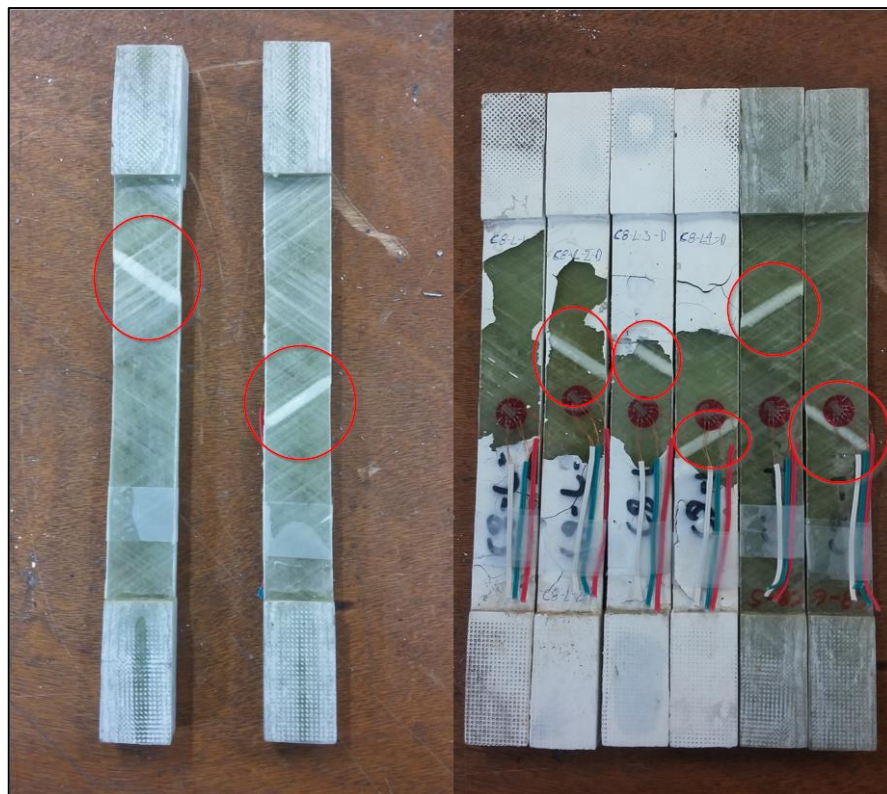
### Παρατηρήσεις

Στον πίνακα 5.3 παρατηρείται καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, εκτός ίσως από τον κύλινδρο 5 ο οποίος εμφανίζει συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation) κοντά στο 7% για το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$ . Επίσης στα γραφήματα κυρίως των κυλίνδρων 6 και 8, παρατηρούνται μερικές απότομες αλλαγές κλίσης της καμπύλης, όπως εκείνες των δοκιμών C6-L-6-D και C8-L-6-D. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στην αποκόλληση στρώσεων σε σχετικά μεγάλη επιφάνεια κοντά στο σημείο αστοχίας, με αποτέλεσμα να αλλάζει απότομα η μετρούμενη παραμόρφωση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει ο τρόπος αστοχίας των δοκιμών η οποία επέρχεται ως τομή παράλληλα στις ίνες ενίσχυσης, όπως φαίνεται στα σχήματα 5.15 και 5.16. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει πως όλα τα δοκίμια αστόχησαν λόγω διάτμησης. Επίσης από την οπτική παρατήρηση καταλαβαίνουμε πως η αστοχία συμβαίνει με αποκόλληση των στρώσεων (delamination), όπως φαίνεται και στη δεξιά φωτογραφία του σχήματος 5.15.



**Σχήμα 5.15** Αστοχία δοκιμίων carbon fiber με γωνία περιέλιξης  $\pm 55^\circ$ , υπό εφελκυστικό φορτίο. Αριστερά φαίνεται η όψη κάθετα στις ίνες από την εσωτερική επιφάνεια του κυλίνδρου και δεξιά η όψη του πάχους του κυλίνδρου.



**Σχήμα 5.16** Αστοχία δοκιμίων glass fiber με γωνία περιέλιξης  $\pm 55^\circ$ , υπό εφελκυστικό φορτίο.

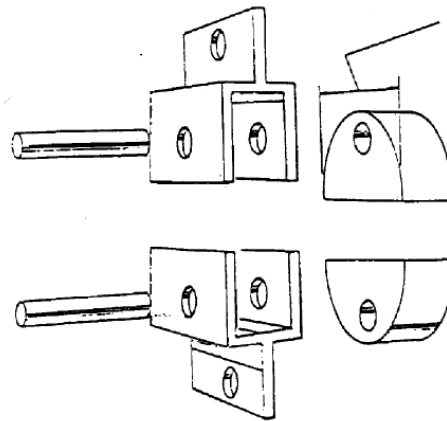
## 6. ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ

### 6.1. Σκοπός

Σκοπός αυτής της σειράς δοκιμών είναι ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$  και της τάσης θραύσης  $\sigma_{1max}$ , μέσω άσκησης εσωτερικής φόρτισης σε δακτυλιοειδή δοκίμια.

### 6.2. Γεωμετρία δοκιμίων

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σύμφωνα με την πειραματική διάταξη που ορίζει το πρότυπο ASTM D2290, τυπική διάταξη της οποίας απεικονίζεται στα σχήματα 6.1 και 6.2. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν δακτυλιοειδή δοκίμια της σειράς B&T και FIXO3.



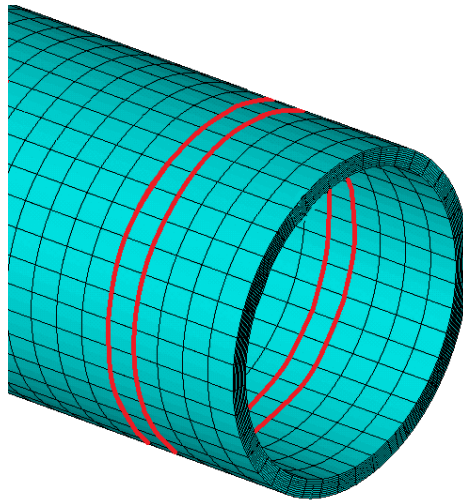
Σχήμα 6.1 Τυπική διάταξη προτύπου ASTM D2290.



Σχήμα 6.2 Διάταξη Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας Ε.Μ.Π.



Για τη σειρά FIXO3 οι δακτύλιοι κόπηκαν από τους κύλινδρους 3 (12K), 4 (60K) και 7 (Glass), οι οποίοι έχουν κατασκευαστεί με γωνία περιέλιξης ινών 90°. Οι κύλινδροι είχαν εσωτερική διάμετρο  $D_i=100$  mm και ονομαστικό πάχος 5 mm. Τα δοκίμια κόπηκαν κατά διεύθυνση κάθετη στον άξονα του κυλίνδρου, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3. Το ονομαστικό πλάτος του κάθε δοκιμίου είναι 25 mm, ενώ συνολικά για τις δοκιμές κόπηκαν 6 δοκίμια από κάθε κύλινδρο.



Σχήμα 6.3 Σκαρίφημα δοκιμίων (κόκκινο χρώμα) κομμένα κατά το εγκάρσιο επίπεδο του κυλίνδρου.

Για την σειρά B&T χρησιμοποιήθηκαν δακτύλιοι κομμένοι ήδη από την εταιρία B&T Composites σε διάφορες διαστάσεις και μεγέθη. Οι διαφορετικές διαστάσεις των δακτυλίων αυτών εκτιμώνται ως παράμετροι που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των υπό εξέταση υλικών. Οι δακτύλιοι είχαν εσωτερική διάμετρο 200, 150 και 100 mm, πάχος 2 και 1 mm και πλάτος 10 mm, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4. Η ονοματολογία βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση των διαστάσεων του κάθε δοκιμίου. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν 5 δοκίμια από κάθε ομάδα όμοιων δακτυλίων, καθώς και 1 από κάθε ομάδα για τη μέτρηση περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα (βλ. Κεφάλαιο 4).



Σχήμα 6.4 Γενική όψη των δοκιμίων ταξινομημένων σε ομάδες με βάση τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά.

Στη συνέχεια ακολούθησε η αναλυτική διαστασιολόγηση του κάθε δοκιμίου και η σύγκριση των τιμών με τις ονομαστικές. Οι μετρήσεις για το πλάτος και το πάχος του κάθε δοκιμίου έγιναν σε τέσσερα διαφορετικά σημεία επί του κάθε δοκιμίου, η κάθε μέτρηση απείχε από την επόμενη κατά γωνία 90° και σαν τελική ελήφθη ο μέσος όρος τους (average value). Στα δακτυλιοειδή δοκίμια έγιναν μετρήσεις και για τη διάμετρο του κάθε δοκιμίου, με τις δύο μετρήσεις να απέχουν 90°. Ακόμα, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση (standard deviation) καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) έτσι ώστε να αξιολογηθεί η επαναληψιμότητα των μετρούμενων διαστάσεων και η απόκλισή τους από τις αντίστοιχες ονομαστικές. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο συντελεστής διακύμανσης σε όλες τις μετρήσεις είναι μικρότερος του 5%, το οποίο καθιστά τις διαστάσεις αποδεκτές. Στον πίνακα 6.1 φαίνονται τα μετρούμενα μεγέθη για τα δοκίμια της σειράς FIXO3, ενώ στον πίνακα 6.2 φαίνονται τα αντίστοιχα μεγέθη των δακτυλίων της σειράς B&T.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.1** Διαστάσεις δακτυλίων FIXO3

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 3							
C3_R_D	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	25.03	25.03	25.03	25.18	24.58	25.05	<b>24.98</b>
<b>Standard deviation</b>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	<b>0.21</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.20%	0.23%	<b>0.83%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	4.95	4.90	4.95	4.98	4.98	4.95	<b>4.95</b>
<b>Standard deviation</b>	0.06	0.00	0.06	0.05	0.05	0.06	<b>0.03</b>
<b>Coef. of variation</b>	1.17%	0.00%	1.17%	1.01%	1.01%	1.17%	<b>0.55%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	99.85	100.00	100.00	100.00	99.90	99.85	<b>99.93</b>
<b>Standard deviation</b>	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	<b>0.08</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%	<b>0.08%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 4							
C4_R_D	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	24.88	25.20	25.25	24.63	25.18	25.03	<b>25.03</b>
<b>Standard deviation</b>	0.05	0.00	0.06	0.05	0.05	0.05	<b>0.24</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.20%	0.00%	0.23%	0.20%	0.20%	0.20%	<b>0.96%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	5.40	5.35	5.30	5.25	5.25	5.25	<b>5.30</b>
<b>Standard deviation</b>	0.00	0.06	0.08	0.06	0.13	0.06	<b>0.06</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.00%	1.08%	1.54%	1.10%	2.46%	1.10%	<b>1.19%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	99.85	99.95	100.00	99.90	100.00	99.95	<b>99.94</b>
<b>Standard deviation</b>	0.07	0.07	0.00	0.00	0.00	0.07	<b>0.06</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.07%	0.07%	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%	<b>0.06%</b>

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 7							
C7_R_D	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	25.03	25.00	25.13	25.00	25.13	25.08	<b>25.06</b>
Standard deviation	0.05	0.00	0.05	0.00	0.05	0.05	<b>0.06</b>
Coef. of variation	0.20%	0.00%	0.20%	0.00%	0.20%	0.20%	<b>0.23%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	5.03	4.98	4.93	4.93	5.03	5.10	<b>5.00</b>
Standard deviation	0.05	0.05	0.05	0.13	0.10	0.08	<b>0.07</b>
Coef. of variation	1.00%	1.01%	1.02%	2.55%	1.91%	1.60%	<b>1.36%</b>
Διάμετρος (mm)							
Average value	99.90	99.90	100.00	99.95	99.90	99.95	<b>99.93</b>
Standard deviation	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.07	<b>0.04</b>
Coef. of variation	0.00%	0.00%	0.00%	0.07%	0.00%	0.07%	<b>0.04%</b>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.2 Διαστάσεις δακτυλίων B&T

C_100_10_2_F25_T8							
	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	9.80	9.82	9.47	9.29	9.71	9.66	<b>9.62</b>
Standard deviation	0.06	0.04	0.09	0.10	0.02	0.09	<b>0.03</b>
Coef. of variation	0.57%	0.41%	0.95%	1.09%	0.16%	0.95%	<b>0.35%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	2.28	2.24	2.24	2.28	2.19	2.19	<b>2.24</b>
Standard deviation	0.03	0.04	0.06	0.10	0.04	0.04	<b>0.02</b>
Coef. of variation	1.10%	1.79%	2.46%	4.22%	1.84%	1.85%	<b>1.10%</b>
Διάμετρος (mm)							
Average value	100.00	100.25	100.15	99.90	100.04	99.80	<b>100.02</b>
Standard deviation	0.00	0.35	0.21	0.14	0.06	0.28	<b>0.13</b>
Coef. of variation	0.00%	0.35%	0.21%	0.14%	0.06%	0.28%	<b>0.13%</b>

C_150_10_1_F8_T1							
	1	2	3	4	5	6	Average
Πλάτος (mm)							
Average value	10.09	10.00	10.64	10.09	10.55	9.95	<b>10.22</b>
Standard deviation	0.07	0.04	0.05	0.05	0.37	0.16	<b>0.13</b>
Coef. of variation	0.67%	0.44%	0.50%	0.47%	3.52%	1.58%	<b>1.26%</b>
Πάχος (mm)							
Average value	1.08	1.08	1.10	1.13	1.09	1.09	<b>1.10</b>
Standard deviation	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	<b>0.01</b>
Coef. of variation	1.41%	0.93%	1.82%	1.84%	1.40%	2.94%	<b>0.69%</b>
Διάμετρος (mm)							
Average value	150.00	149.50	149.00	150.50	151.50	151.00	<b>150.25</b>
Standard deviation	0.00	0.71	1.41	0.71	2.12	1.41	<b>0.74</b>
Coef. of variation	0.00%	0.47%	0.95%	0.47%	1.40%	0.94%	<b>0.49%</b>

C_200_10_2_F25_T1							
	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	10.47	10.12	10.29	10.03	10.15	9.90	<b>10.16</b>
<b>Standard deviation</b>	0.05	0.11	0.05	0.04	0.06	0.18	<b>0.05</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.45%	1.09%	0.50%	0.43%	0.58%	1.81%	<b>0.53%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	2.11	2.12	2.11	2.03	2.10	2.10	<b>2.10</b>
<b>Standard deviation</b>	0.02	0.03	0.05	0.02	0.03	0.01	<b>0.01</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.73%	1.42%	2.37%	1.02%	1.20%	0.48%	<b>0.67%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	200.00	200.03	200.15	199.83	199.90	200.01	<b>199.99</b>
<b>Standard deviation</b>	0.00	0.04	0.21	0.25	0.14	0.01	<b>0.11</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.00%	0.02%	0.11%	0.12%	0.07%	0.01%	<b>0.05%</b>

C_200_10_2_F45_T1							
	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	10.16	10.14	9.95	10.42	9.82	9.98	<b>10.08</b>
<b>Standard deviation</b>	0.07	0.09	0.08	0.11	0.09	0.06	<b>0.02</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.70%	0.89%	0.82%	1.07%	0.89%	0.60%	<b>0.17%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	2.20	2.14	2.14	2.13	2.08	2.05	<b>2.12</b>
<b>Standard deviation</b>	0.06	0.04	0.04	0.03	0.02	0.03	<b>0.02</b>
<b>Coef. of variation</b>	2.66%	1.89%	1.89%	1.18%	0.74%	1.23%	<b>0.73%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	199.85	200.10	199.90	200.50	200.33	199.70	<b>200.06</b>
<b>Standard deviation</b>	0.21	0.14	0.14	0.71	0.46	0.42	<b>0.22</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.11%	0.07%	0.07%	0.35%	0.23%	0.21%	<b>0.11%</b>

C50K_100_10_2_F8_T4							
	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	10.37	11.43	10.58	10.53	10.79	11.21	<b>10.82</b>
<b>Standard deviation</b>	0.04	0.45	0.19	0.03	0.04	0.01	<b>0.17</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.39%	3.95%	1.77%	0.31%	0.37%	0.09%	<b>1.58%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	2.74	2.73	2.81	2.65	2.62	2.76	<b>2.72</b>
<b>Standard deviation</b>	0.18	0.09	0.06	0.05	0.07	0.03	<b>0.05</b>
<b>Coef. of variation</b>	6.48%	3.33%	2.08%	1.94%	2.68%	0.96%	<b>1.94%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	99.93	100.00	99.90	99.98	99.93	100.07	<b>99.96</b>
<b>Standard deviation</b>	0.18	0.00	0.12	0.09	0.22	0.01	<b>0.09</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.18%	0.00%	0.12%	0.09%	0.22%	0.01%	<b>0.09%</b>

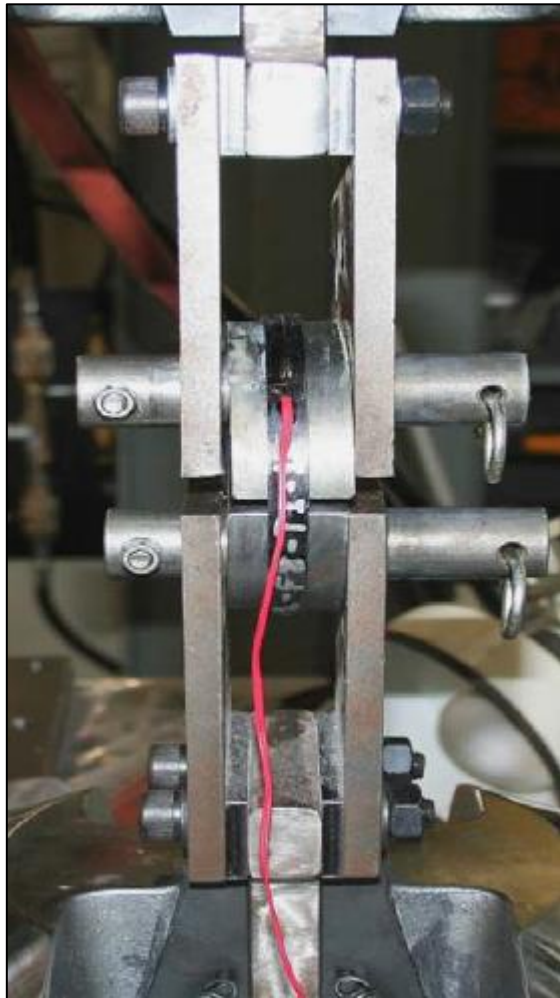
C24K_100_10_2_F8_T4							
	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	10.97	9.26	10.28	9.59	10.27	9.67	<b>10.01</b>
<b>Standard deviation</b>	0.08	0.10	0.11	0.11	0.11	0.11	<b>0.01</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.71%	1.03%	1.10%	1.18%	1.07%	1.14%	<b>0.14%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	2.56	2.59	2.56	2.46	2.49	2.61	<b>2.54</b>
<b>Standard deviation</b>	0.01	0.11	0.03	0.08	0.12	0.09	<b>0.04</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.39%	4.24%	1.03%	3.15%	4.82%	3.26%	<b>1.74%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	100.06	100.04	100.06	99.93	100.06	100.02	<b>100.06</b>
<b>Standard deviation</b>	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.02	<b>0.02</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.02%	0.02%	0.02%	0.04%	0.04%	0.02%	<b>0.02%</b>

GR_100_10_2_F8_T8							
	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	10.28	10.32	10.89	10.83	10.83	10.99	<b>10.69</b>
<b>Standard deviation</b>	0.16	0.23	0.09	0.06	0.04	0.03	<b>0.08</b>
<b>Coef. of variation</b>	1.51%	2.18%	0.78%	0.56%	0.38%	0.28%	<b>0.71%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	2.24	2.26	2.22	2.33	2.35	2.57	<b>2.33</b>
<b>Standard deviation</b>	0.02	0.05	0.03	0.02	0.05	0.02	<b>0.01</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.77%	2.00%	1.30%	0.65%	2.01%	0.90%	<b>0.59%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	100.07	100.05	100.00	100.01	99.98	99.99	<b>100.01</b>
<b>Standard deviation</b>	0.02	0.06	0.00	0.01	0.02	0.01	<b>0.02</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.02%	0.06%	0.00%	0.01%	0.02%	0.01%	<b>0.02%</b>

PF_100_10_2_F8_T8							
	1	2	3	4	5	6	Average
<b>Πλάτος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	10.59	10.39	10.42	10.36	10.27	10.86	<b>10.48</b>
<b>Standard deviation</b>	0.03	0.02	0.14	0.10	0.06	0.10	<b>0.05</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.30%	0.19%	1.35%	0.99%	0.59%	0.92%	<b>0.44%</b>
<b>Πάχος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	2.21	2.11	2.18	2.18	2.17	2.21	<b>2.18</b>
<b>Standard deviation</b>	0.06	0.09	0.09	0.05	0.02	0.05	<b>0.03</b>
<b>Coef. of variation</b>	2.83%	4.31%	4.27%	2.31%	0.71%	2.09%	<b>1.35%</b>
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
<b>Average value</b>	100.05	100.03	100.07	100.03	100.03	100.06	<b>100.04</b>
<b>Standard deviation</b>	0.00	0.01	0.01	0.02	0.06	0.01	<b>0.02</b>
<b>Coef. of variation</b>	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.06%	0.01%	<b>0.02%</b>

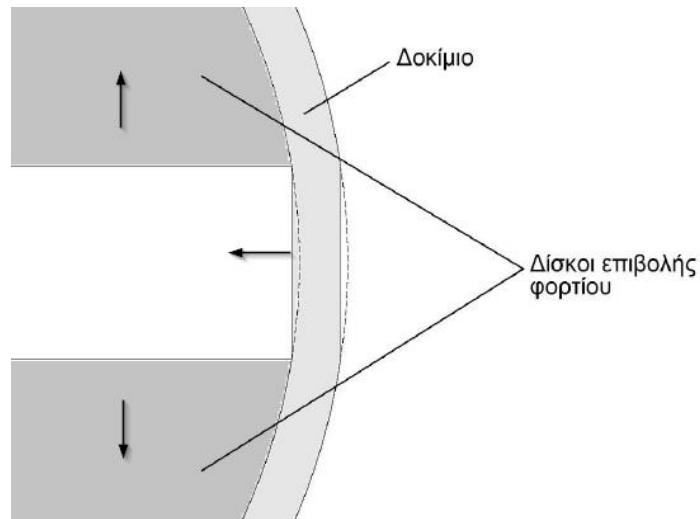
### 6.3. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν σύμφωνη με το πρότυπο ASTM D2290. Η διάταξη μέσω της οποίας ασκήθηκε το εφελκυστικό φορτίο στα δοκίμια σχεδιάστηκε από το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Αποτελείται από έναν διαιρούμενο δίσκο με διάμετρο την εσωτερική διάμετρο των δοκιμίων, ο οποίος σε κάθε ένα από τα δύο μέρη του έχει οπή προκυμμένου να συνδεθεί μέσω πείρου με τη διάταξη, η οποία θα εφαρμοστεί στην υδραυλική μηχανή δοκιμίων. Το υλικό κατασκευής του δίσκου, των αρπάγων και των πείρων ήταν χάλυβας υψηλής αντοχής S355. Σημειώνεται ότι κατά τη διεξαγωγή της αντίστοιχης πειραματικής διαδικασίας με χάλυβα S235 και διαφορετική σχεδίαση οπών, παρουσιάστηκαν φαινόμενα στένωσης των οπών συγκράτησης των διαιρούμενων δίσκων. Έτσι κατασκευάστηκαν νέοι διαιρούμενοι δίσκοι, με μεγαλύτερη διάμετρο οπής και πείρων, σύμφωνα με σχετική μελέτη αντοχής με πεπερασμένα στοιχεία (Θεμελάκης, 2017). Η κατασκευή έγινε από την εταιρία B&T Composites στην Φλώρινα και η πειραματική διάταξη φαίνεται στο σχήμα 6.5.

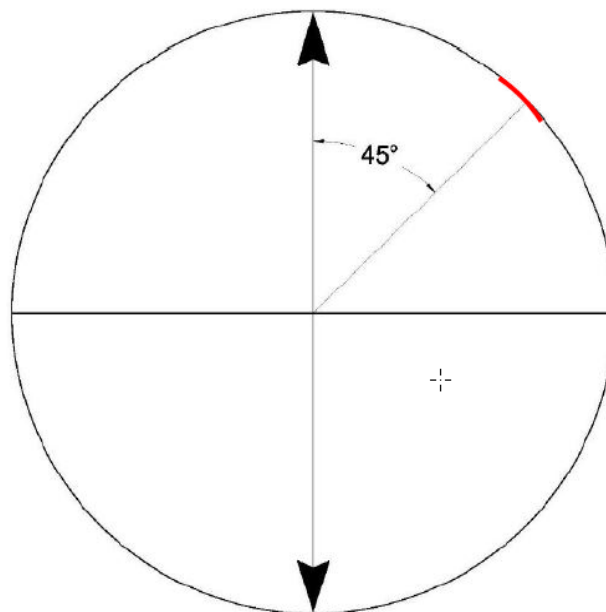


Σχήμα 6.5 Η διάταξη συγκράτησης των δακτυλιοειδών δοκιμίων.

Διαφοροποίηση σε σχέση με το πρότυπο παρουσιάστηκε στο σχεδιασμό της διάταξης, όπου χρησιμοποιήθηκε διαιρούμενος δίσκος με διάκενο μήκους 5 mm, ενώ η διάταξη που προτείνει το πρότυπο έχει διάκενο τουλάχιστον 63 mm. Η επιλογή αυτή έγινε με σκοπό τον περιορισμό του φαινομένου της κάμψης που παρουσιάζεται στην ανυποστήρικτη περιοχή του δοκίμιου κατά την απομάκρυνση των δύο μερών του δίσκου (σχήμα 6.6). Κατά συνέπεια το δοκίμιο φορτίζεται με εσωτερική πίεση ομοιόμορφα στο μεγαλύτερο μέρος του (Philippidis & Roukis, 2015). Η εμφάνιση της κάμψης προκαλείται από την πειραματική διαδικασία και δεν οφείλεται στις ιδιότητες του υλικού. Επομένως θεωρείται ότι η μέτρηση των τιμών της τάσης πρέπει να γίνεται σε θέσεις ανεπηρέαστες από την κάμψη. Από προηγούμενη έρευνα (Κωνσταντινίδης, 2016) βρέθηκε ότι η καλύτερη θέση τοποθέτησης του επιμηκυσσιόμετρου είναι αυτή σε γωνία  $45^\circ$  από το σημείο εμφάνισης της κάμψης ή τον άξονα επιβολής του φορτίου (σχήμα 6.7). Έτσι σε κάθε δοκίμιο το επιμηκυσσιόμετρο κολλήθηκε στο μέσο του πλάτους του, στην περιφερειακή διεύθυνση.



Σχήμα 6.6 Σκαρίφημα της κάμψης του δοκίμιου.



### Σχήμα 6.7 Σημείο τοποθέτησης του strain gauge.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η δοκιμή των δοκιμίων με χρήση της υδραυλικής μηχανής, ασκώντας τους εφελκυστικό φορτίο. Πριν από κάθε δοκιμή τοποθετήθηκε γράσο στο εσωτερικό της επιφάνειας των δακτυλίων, στην περιφέρεια των διαιρούμενων δίσκων, καθώς και στους πείρους της πειραματικής διάταξης, με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί το φαινόμενο της τριβής.

Σε όλα τα δοκίμια, αρχικά, εφαρμόστηκε μια προφόρτιση με ελεγχόμενη αύξηση φορτίου (Force Control) με ρυθμό 0.5 kN/sec και μια αντίστοιχη αποφόρτιση με σκοπό να βελτιωθεί η εφαρμογή του δακτυλίου στον διαιρούμενο δίσκο. Προκειμένου η διαδικασία προφόρτισης να μην προκαλεί σημαντικές παραμορφώσεις στα δοκίμια ρυθμίστηκε η φόρτιση να φτάνει μέχρι ένα όριο (20% περίπου) του φορτίου αστοχίας τους. Το φορτίο αστοχίας των δοκιμίων εκτιμήθηκε από προηγούμενα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Έτσι καθορίστηκε το όριο προφόρτισης για όλα τα δοκίμια που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Σημειώνεται ωστόσο, ότι η συγκεκριμένη φάση της πειραματικής διαδικασίας δεν παρουσιάζεται αναλυτικότερα, καθώς δεν έχει κάποια επίδραση στα αποτελέσματα και πραγματοποιείται μόνο για πρακτικούς λόγους.

Προκειμένου να εξαχθούν πληροφορίες όχι μόνο για την αντοχή των δειγμάτων αλλά και για το μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus), ακολουθήθηκε η διαδικασία που προτείνεται από τους Yoon et al. (1997). Πιο συγκεκριμένα, οι Yoon et al. προτείνουν ότι, για να αποκλειστεί η επίδραση της τριβής από τα εξαγόμενα αποτελέσματα των δοκιμών, το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να υπολογιστεί ως η μέση τιμή των μέτρων ελαστικότητας που προκύπτουν από τις καμπύλες φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου. Για το σκοπό αυτό, η παρούσα διαδικασία δοκιμής συνίσταται από μια αρχική ελεγχόμενη φόρτιση μέχρι ένα ορισμένο επίπεδο καταπόνησης, μια επακόλουθη αποφόρτιση στην κατάσταση μηδενικής φόρτισης και μια τελική νέα φόρτιση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Η τάση που αναπτύσσεται στην περιφερειακή διεύθυνση  $\sigma_1$  υπολογίζεται σύμφωνα με την ASTM D2290 μέσω της εξίσωσης (6.1), όπου το  $F$  αντιπροσωπεύει τη δύναμη που μετράται από τη μηχανή δοκιμής ενώ  $A_m$  η είναι η μέση ορθογωνική διατομή των δειγμάτων (πλάτος  $\times$  πάχος).

$$\sigma_1 = \frac{F}{2 \cdot A_m} \quad (6.1)$$

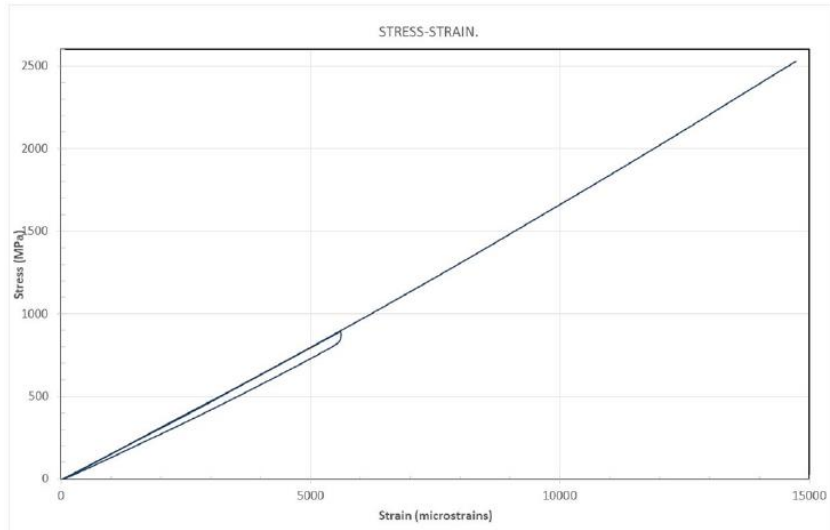
Για τη διαδικασία φόρτισης και αποφόρτισης, το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D3039 που αναφέρεται στον χαρακτηρισμό επιπέδων δειγμάτων σύνθετων υλικών υπό τάση. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, το μέτρο ελαστικότητας πρέπει να θεωρηθεί ίσο με την κλίση του τμήματος της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης μεταξύ των τιμών της παραμόρφωσης 1000 – 3000με, εφόσον η παραμόρφωση μέχρι την



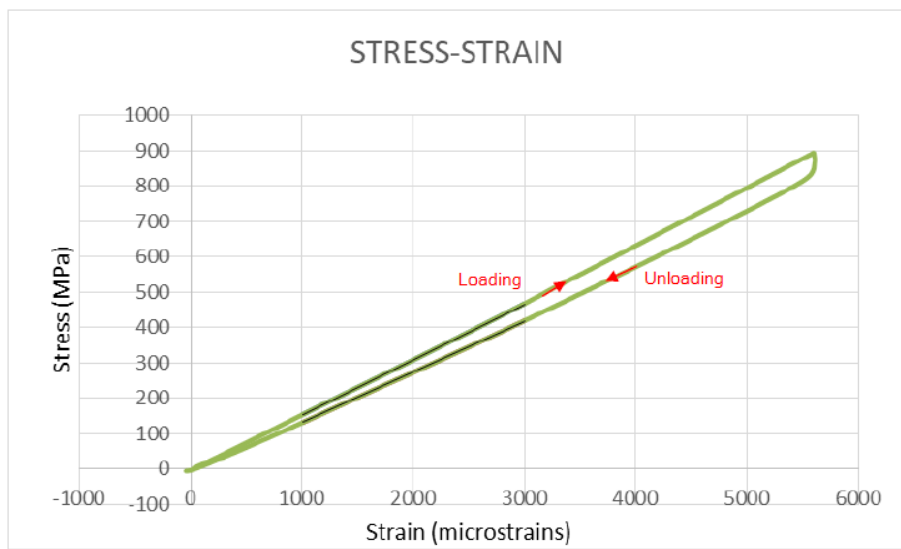
αστοχία του δοκιμίου είναι μεγαλύτερη από 6000με. Στην προκειμένη περίπτωση, η εμπειρία από προηγούμενη μελέτη (Papadakis & Tsouvalis, 2016) έχει δείξει ότι η παραμόρφωση μέχρι την αστοχία παρόμοιων δειγμάτων είναι σημαντικά υψηλότερη από το όριο αυτό. Ως εκ τούτου, η συγκεκριμένη φάση φόρτισης-αποφόρτισης της πειραματικής διαδικασίας ελέγχεται αυτόματα ρυθμίζοντας ένα όριο ελεγχόμενης μετατόπισης (Displacement Control) το οποίο αντιστοιχεί σε επίπεδο παραμόρφωσης 3500 – 4500με. Στη περίπτωση που ένα δοκίμιο αστοχεί πριν από τα 6000με τότε το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται στο διάστημα 25% με 50% του  $\varepsilon_{max}$ .

Οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης σχεδιάζονται για ολόκληρη τη διαδικασία που εκτελείται για κάθε δοκίμιο. Μια τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που προκύπτει από τις δοκιμές αυτής της μελέτης παρουσιάζεται στο σχήμα 6.8, ενώ στο σχήμα 6.9 παρουσιάζεται αναλυτικά ο βρόχος υστέρησης που δημιουργείται λόγω τριβής από τη φόρτιση και αποφόρτιση των δοκιμίων. Η καμπύλη με τη μεγαλύτερη κλίση (άνω) αντιστοιχεί στη φάση φόρτισης, ενώ η καμπύλη με τη μικρότερη κλίση (κάτω) στη φάση αποφόρτισης, αντίστοιχα. Το γεγονός ότι, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.8, η καμπύλη που αντιστοιχεί στην τελική φόρτιση μέχρι την αστοχία των δειγμάτων συμπίπτει με την καμπύλη της πρώτης φόρτισης μέχρι περίπου τα 5500 με δείχνει πως, παρά την αρχική προφόρτιση του δοκιμίου, αυτό παραμένει στην γραμμική-ελαστική περιοχή χωρίς να έχει υποστεί μόνιμες παραμορφώσεις. Ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας, επιτυγχάνεται με την ακόλουθη εξίσωση (6.2), στην οποία η  $E_1$  αντιστοιχεί στο τελικώς υπολογισμένο Young's modulus στην περιφερειακή διεύθυνση ενώ το  $E_{load}$  και το  $E_{unload}$  αντιστοιχούν στις τιμές των μέτρων ελαστικότητας που προέρχονται από τις φάσεις φόρτισης και αποφόρτισης, αντίστοιχα. Για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας, στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται μία τυπική καμπύλη δύναμης – μετατόπισης και στο σχήμα 6.11 μια τυπική καμπύλη δύναμης – χρόνου.

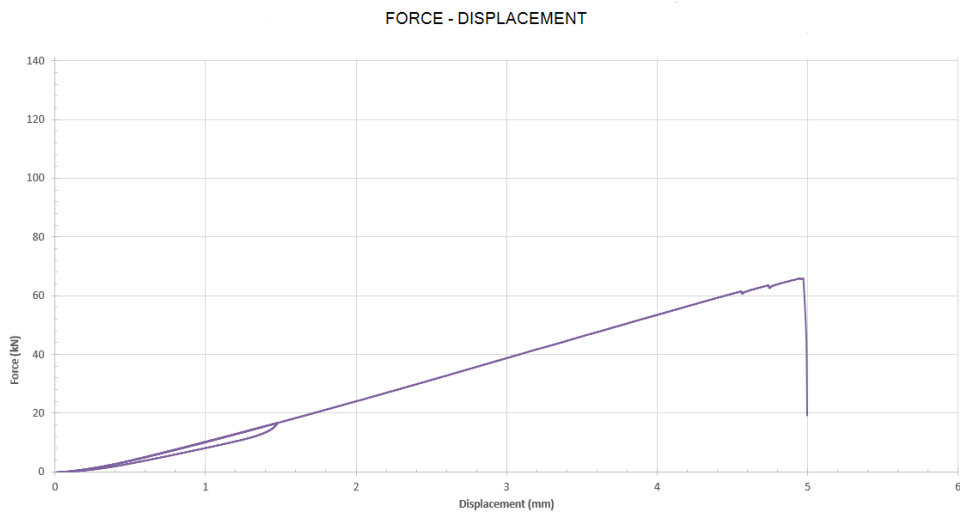
$$E_1 = \frac{E_{load} + E_{unload}}{2} \quad (6.2)$$



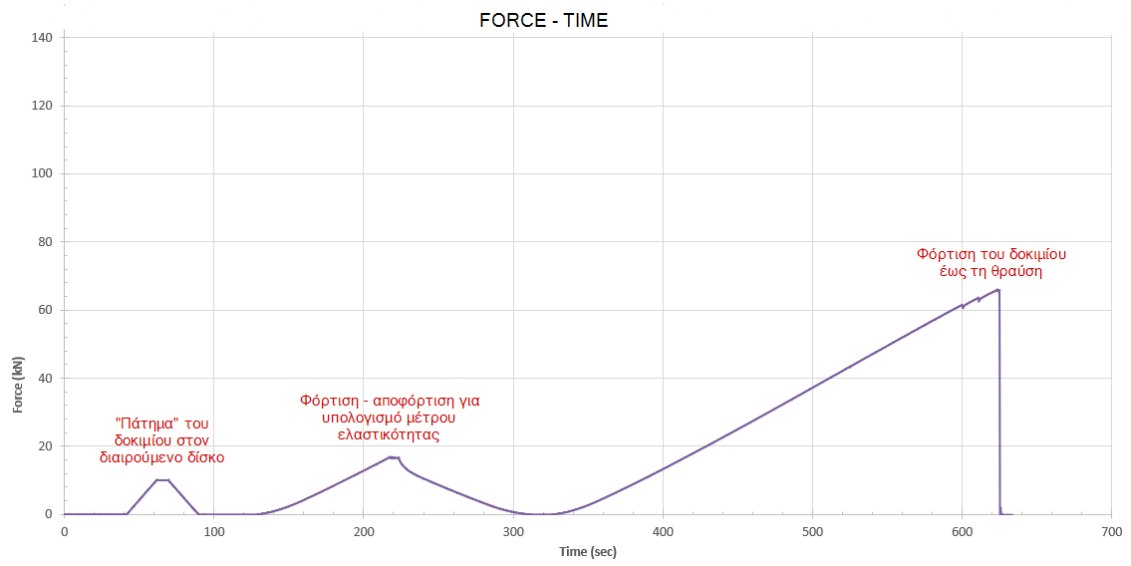
Σχήμα 6.8 Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου.



Σχήμα 6.9 Βρόχος υστέρησης καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης δοκιμίου.



Σχήμα 6.10 Τυπική καμπύλη δύναμης-μετατόπισης δοκιμίου.



**Σχήμα 6.11** Τυπική καμπύλη δύναμης-χρόνου δοκιμίου.

## 6.4. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου

Στη συνέχεια θα παρατεθούν σε ξεχωριστά εδάφια τα αποτελέσματα των δοκιμών από τις σειρές FIXO3 και B&T. Υπενθυμίζεται πως από την σειρά FIXO3 δοκιμάστηκαν μόνο οι δακτύλιοι προερχόμενοι από κυλίνδρους που είχαν κατασκευαστεί με γωνία περιέλιξης ινών τις 90° (Κύλινδροι 3, 4 και 7). Ακόμα, οι δακτύλιοι της σειράς B&T είναι κατασκευασμένοι με γωνία περιέλιξης ινών άνθρακα τις 90°. Έτσι και στις δύο περιπτώσεις υπολογίζονται το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και τάση αστοχίας  $\sigma_{1max}$  καθώς και η μέγιστη παραμόρφωση  $\varepsilon_{1max}$  και η μέγιστη μετατόπιση  $Disp_{1max}$  κατά την περιφερειακή διεύθυνση και παράλληλα στις ενισχυτικές ίνες. Επίσης στους πίνακες φαίνονται τα  $E_{load}$  και  $E_{unload}$  από τα οποία υπολογίστηκε το  $E_1$ .

### 6.4.1. Αποτελέσματα δοκιμών FIXO3

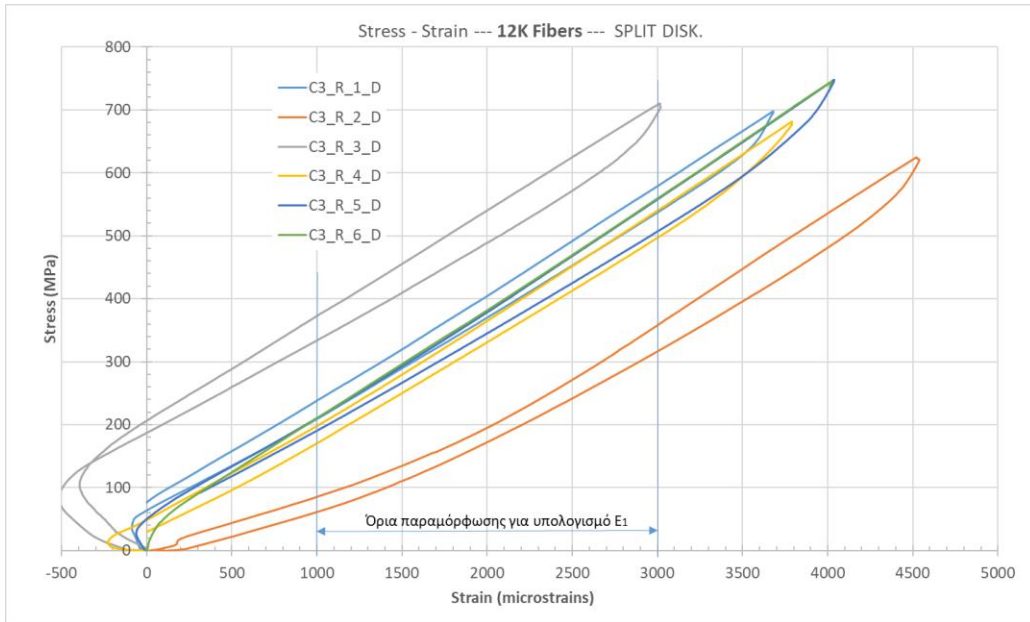
Ακολουθεί ο πίνακας 6.3, στον οποίο φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών, ενώ ακολούθως στα σχήματα 6.12-6.14 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για την κάθε ομάδα δακτυλίων χωριστά. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια από ίνες άνθρακα C3-R-D και C4-R-D δεν έσπασαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καθώς τα στοιχεία της συγκράτησης των δοκιμών (διάταξη split disk) διαρρέουν πλαστικά αρκετά πριν την τάση αστοχίας των δοκιμών (Κωνσταντινίδης, 2016).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.3 Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου στους δακτυλίους FIXO3

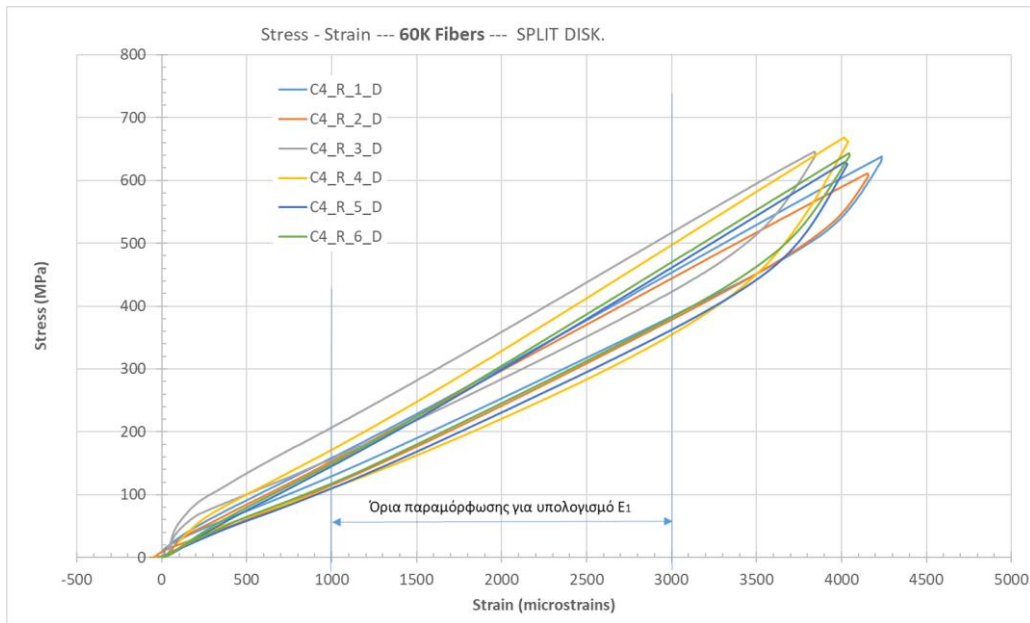
Specimen	F <sub>1</sub>	Disp <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>	σ <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>
<b>C3-R-D</b>	kN	mm	με	MPa	GPa
<b>C3_R_1_D</b>	172.89	3.32	3680	698	<b>167.5</b>
<b>C3_R_2_D</b>	154.30	3.97	4540	625	133.7
<b>C3_R_3_D</b>	178.45	3.89	3018	710	<b>169.3</b>
<b>C3_R_4_D</b>	170.73	4.31	3791	682	<b>167.2</b>
<b>C3_R_5_D</b>	182.90	3.24	4038	748	<b>166.3</b>
<b>C3_R_6_D</b>	185.74	3.36	4064	749	<b>167.6</b>
<b>Average</b>	178.14	3.62	3719	717	<b>167.6</b>
<b>St. Deviation</b>	6.38	0.46	424	30	<b>1.1</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	3.6%	12.8%	11.4%	4.2%	<b>0.7%</b>

Specimen	F <sub>1</sub>	Disp <sub>1</sub>	ε <sub>1</sub>	σ <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>
<b>C4-R-D</b>	kN	mm	με	MPa	GPa
<b>C4_R_1_D</b>	171.41	3.87	4238	638	<b>137.2</b>
<b>C4_R_2_D</b>	164.82	3.44	4158	611	<b>138.8</b>
<b>C4_R_3_D</b>	172.91	3.49	3845	646	<b>144.1</b>
<b>C4_R_4_D</b>	172.84	4.13	4039	668	<b>142.8</b>
<b>C4_R_5_D</b>	166.44	3.07	4035	630	<b>142.5</b>
<b>C4_R_6_D</b>	169.02	3.02	4049	643	<b>147.1</b>
<b>Average</b>	169.57	3.50	4061	639	<b>142.1</b>
<b>St. Deviation</b>	3.40	0.44	133	19	<b>3.6</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	2.0%	12.5%	3.3%	3.0%	<b>2.5%</b>

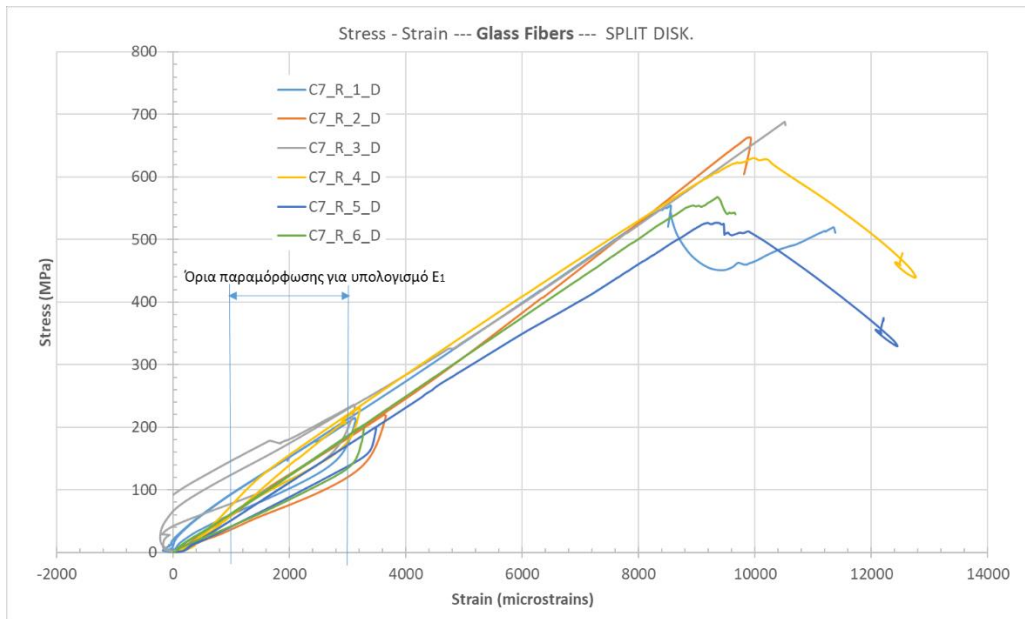
Specimen	F <sub>1max</sub>	Disp <sub>1max</sub>	ε <sub>1max</sub>	σ <sub>1max</sub>	E <sub>1</sub>
<b>C7-R-D</b>	kN	mm	με	MPa	GPa
<b>C7_R_1_D</b>	139.54	5.24	11478	554.83	<b>52.8</b>
<b>C7_R_2_D</b>	165.04	4.62	9930	663.48	<b>50.5</b>
<b>C7_R_3_D</b>	170.33	5.17	10524	688.25	<b>46.7</b>
<b>C7_R_4_D</b>	155.23	4.98	12762	630.38	<b>64.8</b>
<b>C7_R_5_D</b>	133.12	5.52	12447	527.19	<b>54.1</b>
<b>C7_R_6_D</b>	145.28	4.32	9663	568.02	<b>53.9</b>
<b>Average</b>	150.66	4.97	10808.31	600.36	<b>51.6</b>
<b>St. Deviation</b>	16.23	0.49	1151	71.03	<b>3.1</b>
<b>Coef. Of Variation</b>	10.8%	9.9%	10.6%	11.8%	<b>6.0%</b>



Σχήμα 6.12 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων Carbon Fibers 12K.



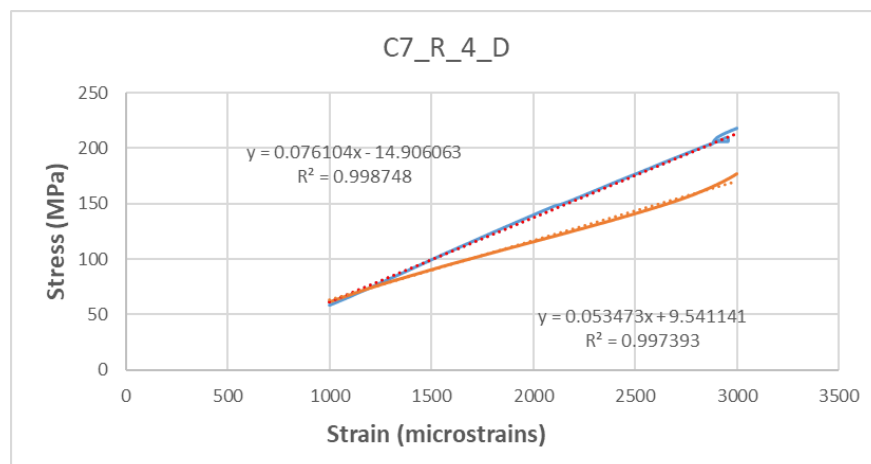
Σχήμα 6.13 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων Carbon Fibers 60K.



Σχήμα 6.14 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων Glass Fibers.

### Παρατηρήσεις

Στον πίνακα 6.3 παρατηρείται καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, εκτός ίσως από τον κύλινδρο 7 ο οποίος εμφανίζει συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation) 6% για το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και ακόμη μεγαλύτερο για την τάση θραύσης  $\sigma_{1max}$ . Λόγω μη γραμμικής συμπεριφοράς του δοκιμίου C3\_R\_2\_D στο όριο των 1000 – 3000 με, όπως φαίνεται και στο σχήμα 6.12, τα αποτελέσματά του δεν συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό των μέσων όρων. Πιο συγκεκριμένα η κλίση της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων φαίνεται να αυξάνεται από τα 2000 με και πάνω, που φυσικά αυτό δεν είναι δυνατόν, και έτσι δεν μπορούμε να εξάγουμε με ασφάλεια το μέτρο ελαστικότητας. Ακόμα μία μέτρηση που απορρίφθηκε είναι αυτή του δοκιμίου C7\_R\_4\_D, καθώς η κλίση της καμπύλης φόρτισης διαφέρει σημαντικά από αυτή της αποφόρτισης, στο διάστημα υπολογισμού του  $E_1$ , όπως φαίνεται σε μεγέθυνση στο σχήμα 6.15.



Σχήμα 6.15 Προβληματική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δακτυλίου C7\_R\_4\_D

Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει η συμπεριφορά των δοκιμίων C\_R\_3\_D και C\_R\_4\_D όπου, σύμφωνα με το σχήμα 6.12, κατά την εκκίνηση της φόρτισής τους παρουσιάζουν αρνητική παραμόρφωση. Σε αυτό το σημείο ίσως κατά την παραγωγή των δεδομένων κάποιο όργανο μετέφρασε εσφαλμένα τις τιμές της παραμόρφωσης σε αρνητικές τιμές, παρόλα αυτά το μέτρο ελαστικότητας δεν φαίνεται να επηρεάζεται.

Όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας, αρκετά μεγαλύτερη δυσκαμψία παρουσιάζουν τα υλικά από carbon fibers σε σχέση με τα σύνθετα από glass fibers, όπως αναμενόταν. Μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας φαίνεται να έχει το σύνθετο υλικό από ίνες άνθρακα 12K (167.6 GPa), ακολουθεί το σύνθετο από ίνες άνθρακα 60K (142.1 GPa) και το σύνθετο από ίνες γυαλιού (51.6 GPa).

Από την οπτική παρατήρηση μετά την θραύση για τα δοκίμια από ίνες γυαλιού, βλέπουμε ότι η αστοχία των περισσότερων δοκιμίων επήλθε περιφερειακά σε όλο το δοκίμιο με σπάσιμο των δεσμών ίνας-μήτρας, όπως φαίνεται και στα σχήματα 6.16 και 6.17. Η έλλειψη τοπικών αστοχιών μας δείχνει ότι δεν υπήρχαν κατασκευαστικές ατέλειες στα δοκίμια,.



Σχήμα 6.16 Τυπική μορφή αστοχίας δοκιμίου από ίνες γυαλιού.



Σχήμα 6.17 Τυπική μορφή αστοχίας δοκιμίου από ίνες γυαλιού.



#### 6.4.2. Αποτελέσματα δοκιμών B&T

Ακολουθεί ο πίνακας 6.4, στον οποίο φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών, ενώ ακολούθως στα σχήματα 6.18-6.25 παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για την κάθε ομάδα δακτυλίων χωριστά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.4** Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου στους δακτυλίους FIXO3

Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
C24K_100_10_2_F8_T4	kN	mm	με	MPa	GPa
24K-8N-4T_1	68.56	2.42	8826	1220	<b>135.2</b>
24K-8N-4T_2	52.89	2.16	8025	1104	<b>134.1</b>
24K-8N-4T_3	61.16	2.21	7937	1162	<b>134.6</b>
24K-8N-4T_5	54.70	2.19	7237	1069	<b>138.2</b>
24K-8N-4T_6	58.55	2.17	8133	1161	<b>134.7</b>
Average	59.17	2.23	8032	1143	<b>135.4</b>
St. Deviation	6.16	0.11	566	58	<b>1.6</b>
Coef. Of Variation	10.4%	4.9%	7.0%	5.1%	<b>1.2%</b>

Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
C50K_100_10_2_F8_T4	kN	mm	με	MPa	GPa
50K-8N-4T_1	59.28	2.30	8231	1042	<b>120.6</b>
50K-8N-4T_2	56.73	2.06	7529	910	<b>119.2</b>
50K-8N-4T_3	58.62	2.08	7800	985	<b>121.5</b>
50K-8N-4T_4	51.47	1.96	7439	924	<b>119.9</b>
50K-8N-4T_5	51.38	1.92	6375	910	<b>137.2</b>
Average	55.50	2.06	7475	954	<b>123.7</b>
St. Deviation	3.83	0.15	688	58	<b>7.6</b>
Coef. Of Variation	6.9%	7.2%	9.2%	6.1%	<b>6.2%</b>

Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
GR_100_10_2_F8_T8	kN	mm	με	MPa	GPa
GR-8N-8T_1	59.02	2.50	9130	1282	<b>132.3</b>
GR-8N-8T_2	55.00	2.21	8326	1181	<b>131.2</b>
GR-8N-8T_3	63.38	2.48	8937	1312	<b>136.6</b>
GR-8N-8T_5	66.17	2.53	8312	1301	<b>149.4</b>
GR-8N-8T_6	77.49	2.93	9612	1374	<b>131.7</b>
Average	64.21	2.53	8864	1290	<b>136.2</b>
St. Deviation	8.55	0.26	554	70	<b>7.7</b>
Coef. Of Variation	13.3%	10.2%	6.3%	5.4%	<b>5.6%</b>

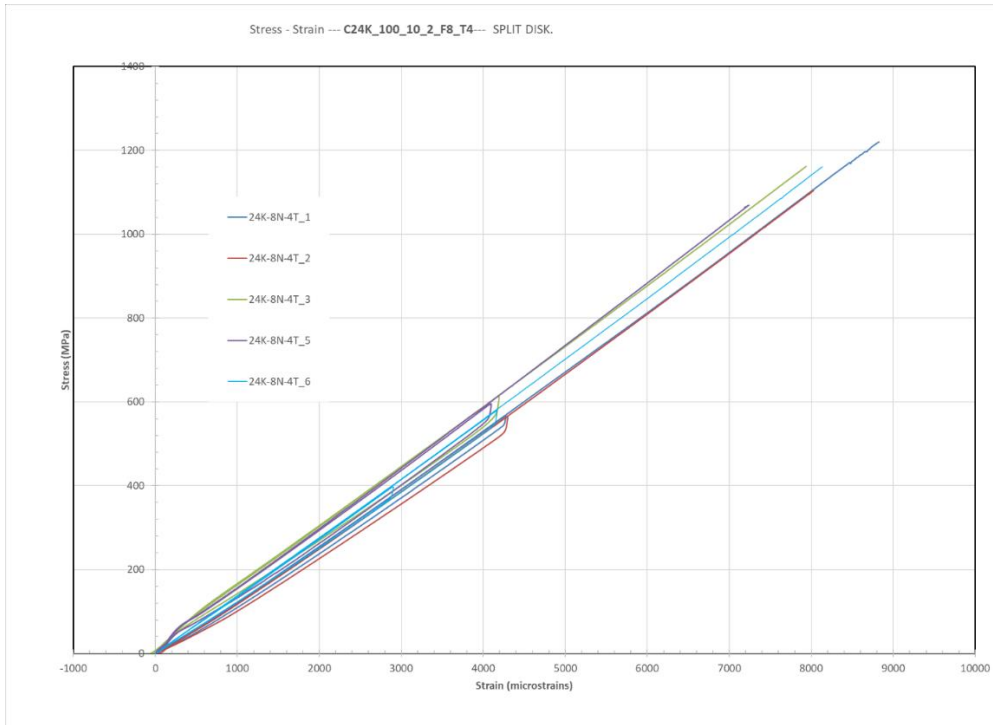
Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
PF_100_10_2_F8_T8	kN	mm	με	MPa	GPa
PF-8N-8T_1	23.91	0.79	1663	511	<b>246.0</b>
PF-8N-8T_2	21.09	0.74	1310	481	<b>357.9</b>
PF-8N-8T_3	23.12	0.91	1350	510	<b>362.1</b>
PF-8N-8T_4	27.08	0.82	1866	600	<b>308.3</b>
PF-8N-8T_5	24.01	0.74	1847	540	<b>255.4</b>
Average	23.84	0.80	1607	528	<b>305.9</b>
St. Deviation	2.16	0.07	266	45	<b>54.8</b>
Coef. Of Variation	9.0%	8.6%	16.5%	8.6%	<b>17.9%</b>

Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
C_100_10_2_F25_T8	kN	mm	με	MPa	GPa
100-25N-8T_1	59.25	2.52	9366	1324	<b>136.2</b>
100-25N-8T_2	61.17	2.56	9181	1391	<b>144.0</b>
100-25N-8T_3	57.34	2.49	8673	1349	<b>147.1</b>
100-25N-8T_4	59.30	2.42	9440	1402	<b>141.6</b>
100-25N-8T_5	57.64	2.16	8596	1354	<b>143.9</b>
Average	58.94	2.43	9051	1364	<b>142.6</b>
St. Deviation	1.54	0.16	393	32	<b>4.0</b>
Coef. Of Variation	2.6%	6.5%	4.3%	2.3%	<b>2.8%</b>

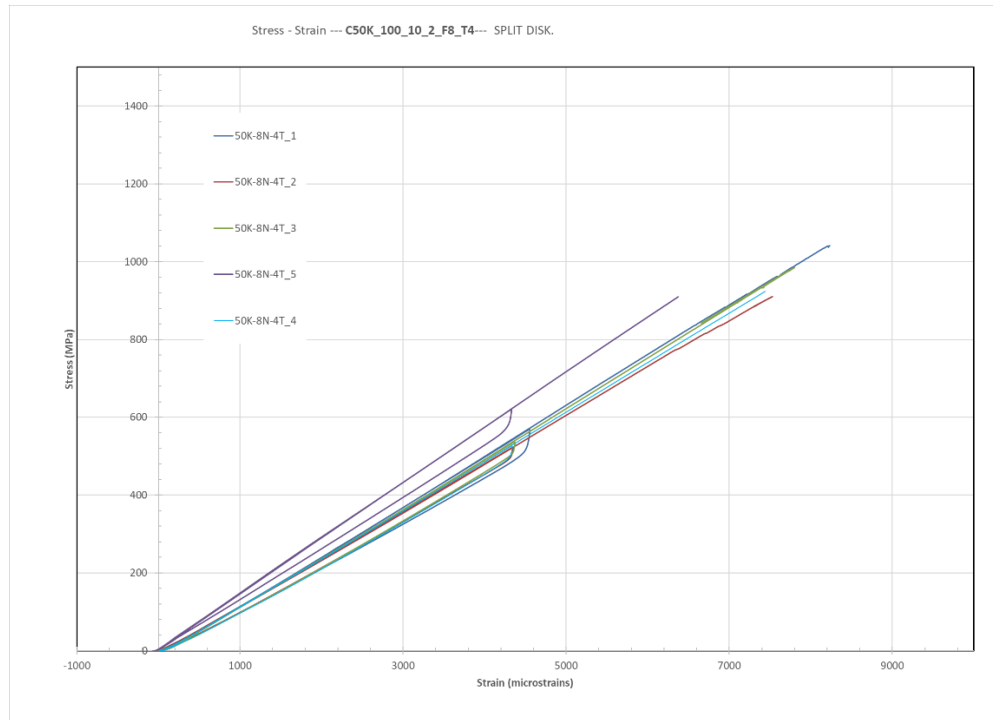
Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
C_150_10_1_F8_T1	kN	mm	με	MPa	GPa
150-8N-1T_1	58.38	6.23	15066	2670	<b>147.9</b>
150-8N-1T_2	51.89	4.24	13238	2402	<b>156.0</b>
150-8N-1T_3	66.36	4.64	14562	2835	<b>149.4</b>
150-8N-1T_4	65.81	4.97	16209	2878	<b>150.1</b>
150-8N-1T_5	54.32	4.97	17451	2355	<b>136.1</b>
Average	59.35	5.01	15305	2628	<b>147.9</b>
St. Deviation	6.57	0.74	1605	241	<b>7.3</b>
Coef. Of Variation	11.1%	14.9%	10.5%	9.2%	<b>4.9%</b>

Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
C_200_10_2_F25_T1	kN	mm	με	MPa	GPa
200-25N-1T_1	138.87	9.01	17184	3149	<b>158.5</b>
200-25N-1T_2	124.90	8.14	16031	2910	<b>152.7</b>
200-25N-1T_3	133.69	8.09	17277	3080	<b>152.8</b>
200-25N-1T_4	121.89	7.19	16627	2988	<b>161.8</b>
200-25N-1T_5	130.86	7.48	15998	3064	<b>161.0</b>
Average	130.04	7.98	16624	3038	<b>157.4</b>
St. Deviation	6.80	0.70	609	92	<b>4.4</b>
Coef. Of Variation	5.2%	8.8%	3.7%	3.0%	<b>2.8%</b>

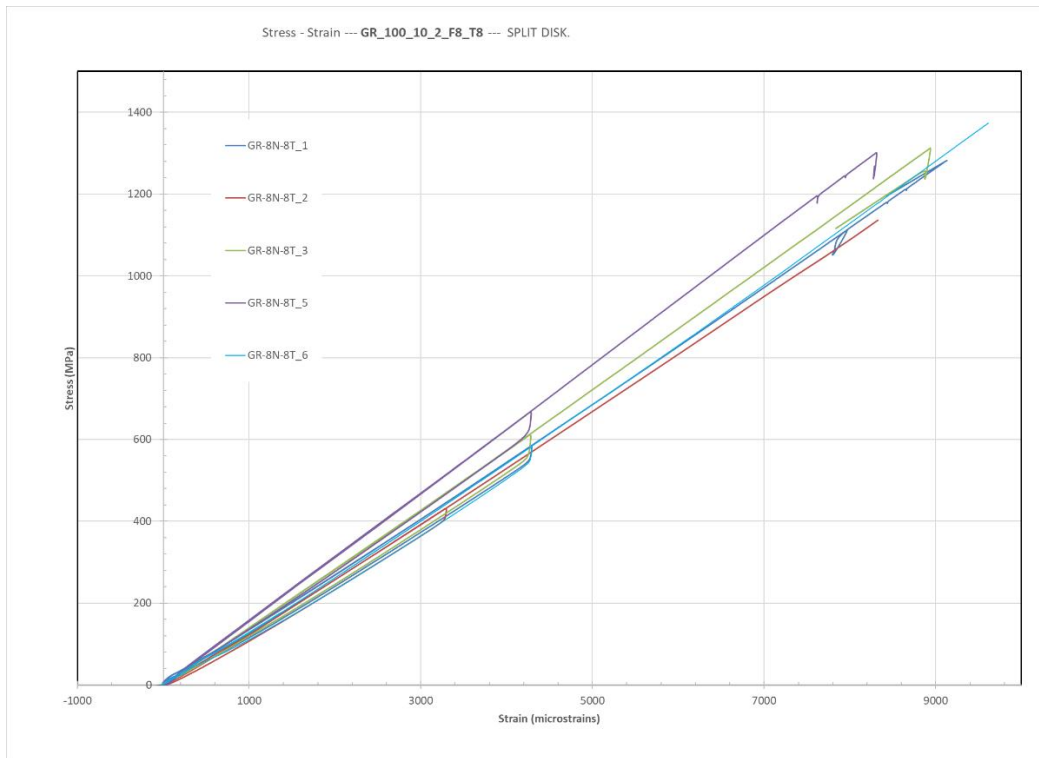
Specimen	F1max	Disp1max	ε1max	σ1max	E1
C_200_10_2_F45_T1	kN	mm	με	MPa	GPa
200-45N-1T_2	116.84	7.36	15594	2611	<b>147.9</b>
200-45N-1T_3	120.19	6.92	15991	2764	<b>156.5</b>
200-45N-1T_4	115.97	6.48	15106	2727	<b>156.1</b>
200-45N-1T_5	97.75	6.24	13340	2206	<b>143.0</b>
200-45N-1T_6	126.23	7.78	17244	3094	<b>153.1</b>
Average	115.40	6.96	15455	2680	<b>151.3</b>
St. Deviation	10.66	0.63	1423	320	<b>5.8</b>
Coef. Of Variation	9.2%	9.0%	9.2%	12.0%	<b>3.8%</b>



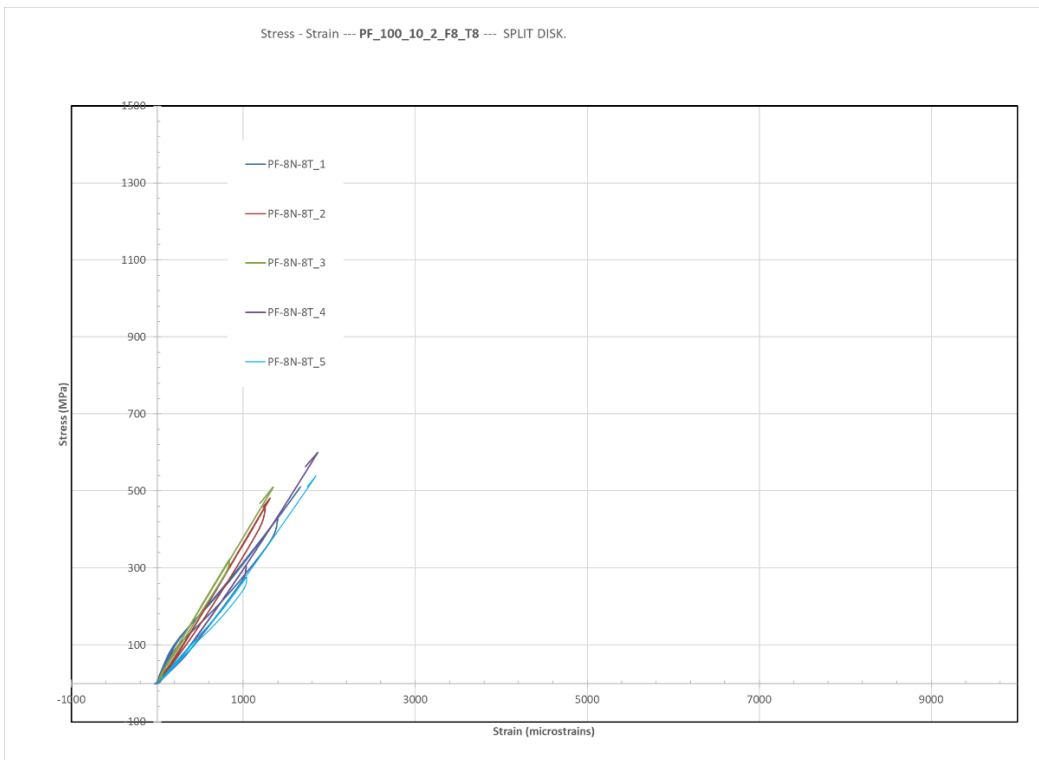
Σχήμα 6.18 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4



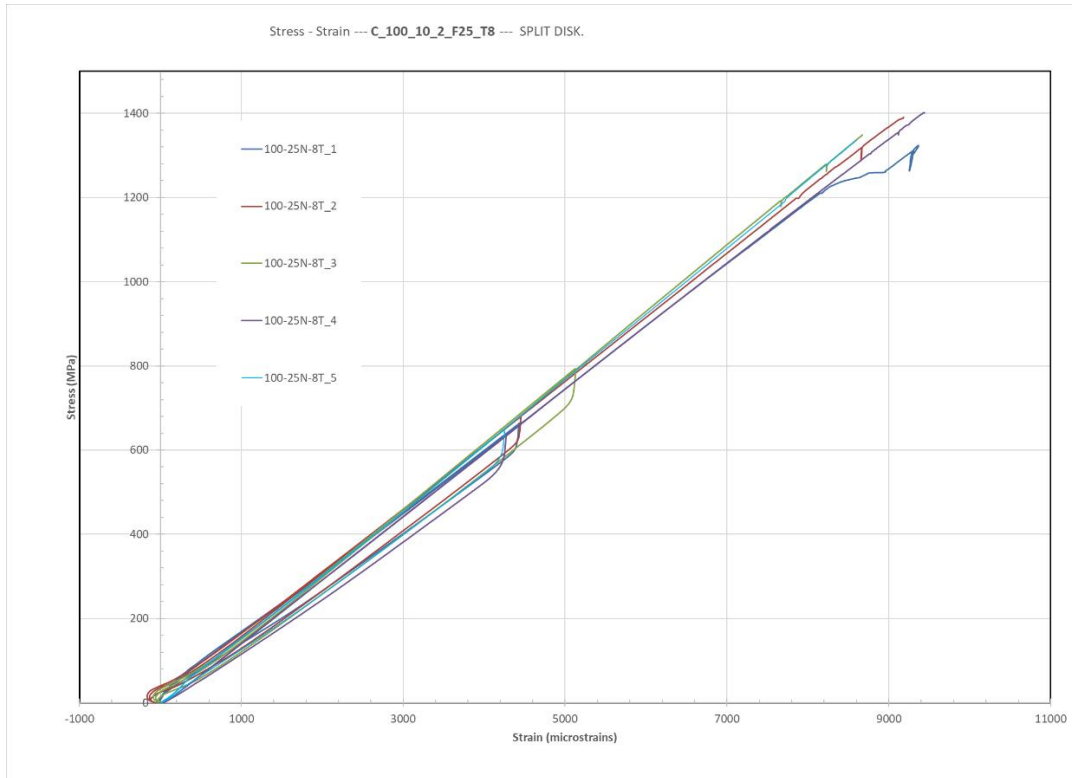
Σχήμα 6.19 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4



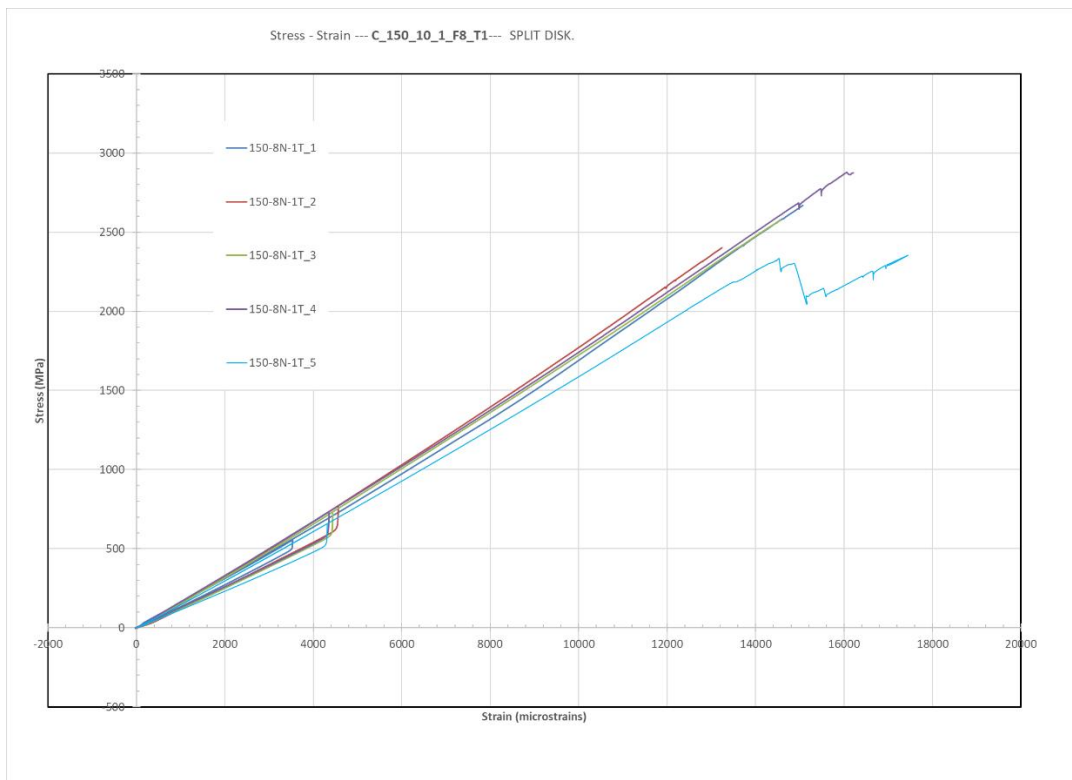
Σχήμα 6.20 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων GR\_100\_10\_2\_F8\_T8



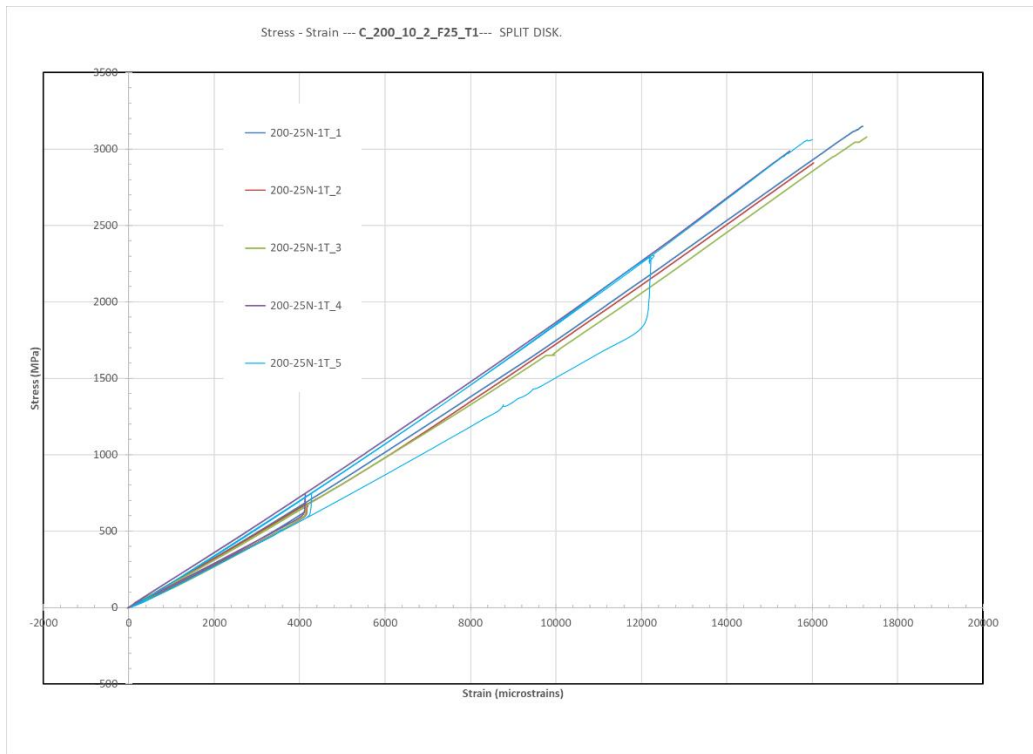
Σχήμα 6.21 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων PF\_100\_10\_2\_F8\_T8



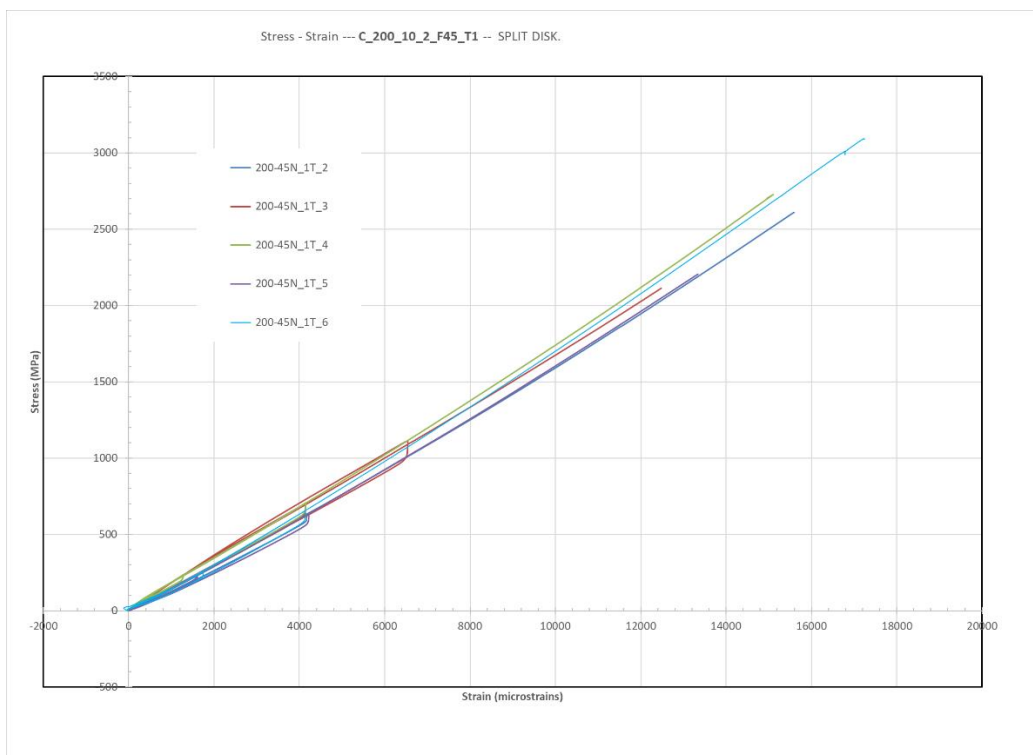
Σχήμα 6.22 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων C\_100\_10\_2\_F25\_T8



Σχήμα 6.23 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων C\_150\_10\_1\_F8\_T1



Σχήμα 6.24 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων C\_200\_10\_2\_F25\_T1



Σχήμα 6.25 Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, δακτυλίων C\_200\_10\_2\_F45\_T1

Στον πίνακα 6.5 φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από τα πειράματα που διεξήχθησαν για τα δοκίμια B&T από όλες τις διπλωματικές εργασίες συμπεριλαμβανομένης της παρούσας.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6.5** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών B&T.

Specimen Name	Fibers	Diameter (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Tensioning force (N)	Tows	Mf%	E1 (GPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)
B_100_20_5_F8_T1	B	100	20	5	8	1	82.00%	59.3	898
P_100_10_2_F8_T1	P	100	10	2	8	1	86.00%	105.8	1398
C50K_100_10_2_F8_T4	C50K	100	10	2	8	4	63.49%	123.7	954
C_200_10_2_F8_T8	C12K	200	10	2	8	8	79.30%	131.1	1629
C_100_10_2_F8_T8	C12K	100	10	2	8	8	82.00%	131.9	1485
C24K_100_10_2_F8_T4	C24K	100	10	2	8	4	67.61%	135.4	1143
GR_100_10_2_F8_T8	C12K-GR	100	10	2	8	8	64.22%	136.2	1290
C_100_10_2_F25_T8	C12K	100	10	2	25	8	74.39%	142.6	1364
C_150_10_2_F8_T1	C12K	150	10	2	8	1	84.70%	147.8	2453
C_150_10_1_F8_T1	C12K	150	10	1	8	1	82.95%	147.9	2628
C_100_10_2_F8_T1	C12K	100	10	2	8	1	77.30%	148.6	2392
C_200_10_2_F45_T8	C12K	200	10	2	45	8	84.70%	150.7	1484
C_150_6.35_1.52_F8_T1	C12K	150	6.35	1.52	8	1	83.70%	150.8	2722
C_200_10_2_F25_T8	C12K	200	10	2	25	8	85.70%	151.0	1626
C_200_10_2_F45_T1	C12K	200	10	2	45	1	81.04%	151.3	2680
C_100_10_2_F25_T1	C12K	100	10	2	25	1	77.70%	153.0	2293
C_200_10_2_F8_T1	C12K	200	10	2	8	1	82.30%	155.1	2662
C_100_10_2_F45_T1	C12K	100	10	2	45	1	83.00%	157.3	2332
C_200_10_2_F25_T1	C12K	200	10	2	25	1	81.73%	157.4	3038
PF_100_10_2_F8_T8	PF	100	10	2	8	8	73.40%	305.9	528



### Παρατηρήσεις

Στον πίνακα 6.4 παρατηρείται καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, εκτός ίσως από τη σειρά δοκιμίων C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4 και PF\_100\_10\_2\_F8\_T8 οι οποίες εμφανίζουν συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation) για το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ , 6.2% και 17.9% αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα το δοκίμιο 50K-8N-4T\_5 φαίνεται να έχει αρκετά μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τα υπόλοιπα της σειράς με αποτέλεσμα να αυξάνει σημαντικά τον συντελεστή διακύμανσης. Η σειρά PF\_100\_10\_2\_F8\_T8 έχει αρκετά μεγάλο συντελεστή διακύμανσης για να μπορέσουμε να εμπιστευτούμε τα αποτελέσματα. Από την οπτική ανάλυση της διατομής δοκιμίου αυτής της σειράς (βλ. Εδάφιο 4.4, σχήμα 4.20) φαίνεται πως υπάρχουν αρκετές ατέλειες στο υλικό, καθώς και ανομοιομορφία στη διατομή των ινών άνθρακα. Αξίζει να σημειωθεί πως η μεγάλη δυσκαμψία (~305 GPa) του υλικού σε συνδυασμό με την αστοχία σε πολύ μικρές τάσεις (~528 MPa) το κάνουν ψαθυρό, όπως φαίνεται και από την οπτική παρατήρηση του τρόπου αστοχίας όλων των δοκιμίων. Στο σχήμα 6.26 διακρίνεται η αστοχία των δοκιμίων από καθαρή ρωγμάτωση, κάθετα στις ίνες, χωρίς αποκόλληση μήτρας και ενίσχυσης και χωρίς άλλη εμφανή αλλοίωση.



Σχήμα 6.26 Αστοχία δοκιμίων της σειράς PF\_100\_10\_2\_F8\_T8

Η σειράς δοκιμών GR\_100\_10\_2\_F8\_T8, C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4 και C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4 αστόχησαν κυρίως με αποχωρισμό των στρώσεων περίπου στο μέσο του πάχους (σχήμα 6.27).



Σχήμα 6.27 Αστοχία δοκιμών της σειράς GR\_100\_10\_2\_F8\_T8



Σχήμα 6.28 Αστοχία δοκιμών της σειράς C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4



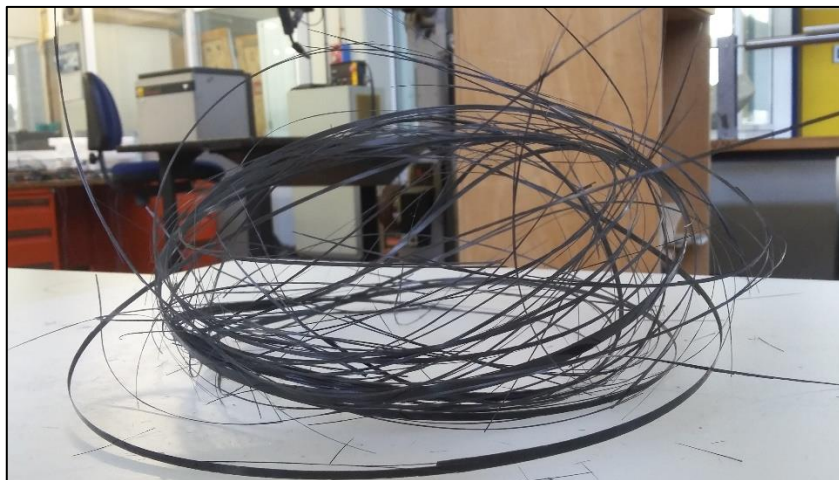
Σχήμα 6.29 Αστοχία δοκιμών της σειράς C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4

Η σειρά δοκιμίων C\_100\_10\_2\_F25\_T8 αστόχησε κυρίως με περιφερειακή ρωγμάτωση καθώς και με αποκοπή των ινών σε ένα ή δύο σημεία. Παρατηρείται επίσης μικρή αποκόλληση μεμονωμένων ινών από τη μήτρα (σχήμα 6.30).



**Σχήμα 6.30** Αστοχία δοκιμίων της σειράς C\_100\_10\_2\_F25\_T8

Η σειρά δοκιμίων C\_150\_10\_1\_F8\_T1 αστόχησε κυρίως με τον διαχωρισμό των περισσότερων ινών μεταξύ τους. Παρατηρείται επίσης συστροφή των ενισχυτικών ινών (σχήμα 6.31).



**Σχήμα 6.31** Αστοχία δοκιμίων της σειράς C\_150\_10\_1\_F8\_T1

Οι σειρές δοκιμών C\_200\_10\_2\_F25\_T1 και C\_200\_10\_2\_F45\_T1 αστόχησαν με πλήρη διαχωρισμό των ινών μεταξύ του καθός και μεγάλη συστροφή αυτών (σχήμα 6.32 και 6.33)



Σχήμα 6.32 Αστοχία δοκιμών της σειράς C\_200\_10\_2\_F25\_T1



Σχήμα 6.33 Αστοχία δοκιμών της σειράς C\_200\_10\_2\_F45\_T1

### Παρατηρήσεις

Στα δοκίμια παρατηρούνται κυρίως 3 τρόποι αστοχίας. Ψαθυρή θραύση παρατηρείται στη σειρά δοκιμών PF\_100\_10\_2\_F8\_T8, αποχωρισμός των στρώσεων παρατηρείται στις σειρές GR, 24K και 50K, και τέλος πλήρης διαχωρισμός ινών-μήτρας (delamination) παρατηρείται σε δοκίμια 12K και μεγαλύτερης διαμέτρου. Αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια με μεγαλύτερη διάμετρο έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ίνες σύμφωνα με τη μέθοδο Image Analysis (Εδάφιο 4.4, πίνακας 4.7). Αυτό δικαιολογεί έναν τέτοιο τρόπο αστοχίας (delamination), καθώς ένα δοκίμιο με μικρή περιεκτικότητα σε ρητίνη αναμένεται να συγκρατεί αντίστοιχα λιγότερο τις ίνες ενίσχυσης.

## 7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 7.1. Στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμίων FIXO3

Λόγω της πληθώρας των δεδομένων για τα δοκίμια FIXO3 από προηγούμενες διπλωματικές εργασίες (Κωνσταντινίδης 2016), πλέον είναι εφικτή μία στατιστική ανάλυση με σκοπό τη διερεύνηση της επίδρασης του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών. Η ανάλυση διακύμανσης ή ανάλυση διασποράς, ANOVA (Analysis Of Variance), εξυπηρετεί αυτόν ακριβώς το σκοπό, καθώς ελέγχει αν μεταβάλλονται σημαντικά οι μέσες τιμές των δειγμάτων για περισσότερους από δύο πληθυσμούς. Πιο συγκεκριμένα η στατιστική μέθοδος που ακολουθείται ονομάζεται ANOVA ως προς ένα παράγοντα (one-way ANOVA).

#### 7.1.1. Πειραματικό σχέδιο

Η ANOVA ενός παράγοντα χρησιμοποιείται για τον έλεγχο υποθέσεων σε μελέτες ανεξάρτητων δειγμάτων. Ο ερευνητής επιλέγει μία εξαρτημένη μεταβλητή ή μεταβλητή απόκριση (response variable) και στη συνέχεια συγκρίνει τις μέσες τιμές αυτής, σε διαφορετικούς πληθυσμούς. Οι πληθυσμοί πρέπει να αποτελούν και να αποτελούνται από ανεξάρτητα δείγματα και η μόνη διαφορά μεταξύ πληθυσμών να είναι ένας παράγοντας (factor). Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ως ανεξάρτητους πληθυσμούς θα θεωρήσουμε τις ομάδες δοκιμίων που ποντίστηκαν στη θάλασσα και έμειναν εκεί για διαφορετικά χρονικά διαστήματα (Batch A, B, C και D). Ο παράγοντας (factor) ως προς τον οποίο γίνεται η ανάλυση είναι ο χρόνος παραμονής στη θάλασσα. Ως εξαρτημένες μεταβλητές (response variables) θεωρούμε το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και τη μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_1$  κατά τη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών, το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$  και τη μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_2$  σε διεύθυνση κάθετα των ινών, τον συντελεστή διάτμησης  $G_{12}$  και τη μέγιστη τάση θραύσης σε διάτμηση  $\tau_{12}$  στο επίπεδο 1-2. Διευκρινίζεται ότι σε κάθε διαδικασία ανάλυσης εξετάζεται μόνο μία εκ των παραπάνω μεταβλητών.

#### *Μηδενική υπόθεση*

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης απορρίπτουν ή όχι μια αρχική υπόθεση, την λεγόμενη μηδενική υπόθεση. Η μηδενική υπόθεση  $H_0$  (null hypothesis) δηλώνει ότι δεν υφίσταται διαφορά ανάμεσα στις μέσες τιμές των δειγμάτων μεταξύ των πληθυσμών. Στην περίπτωση που δεν απορριφθεί η υπόθεση αυτή, υπάρχει περίπτωση τα δείγματα να προέρχονται από τον ίδιο πληθυσμό (ακολουθούν την ίδια κατανομή). Στην περίπτωση που ο ερευνητής απορρίψει τελικά τη μηδενική υπόθεση, το μόνο που μπορεί να ισχυριστεί είναι ότι τα δείγματα διαφέρουν μεταξύ τους, αλλά δεν είναι σε θέση να γνωρίζει ποια συγκεκριμένα

δείγματα διαφέρουν. Για να αποφανθεί ο ερευνητής ποιες ακριβώς ομάδες ευθύνονται για την απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης χρειάζεται μετά-ανάλυση (post-hoc). Εν κατακλείδι η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης δίνει τη βεβαιότητα πως οι παρατηρήσεις προέρχονται από τουλάχιστον δύο πληθυσμούς, ενώ η μη απόρριψη της αφήνει ανοιχτό το ενδεχόμενο οι παρατηρήσεις να προέρχονται από ένα πληθυσμό.

Στη περίπτωση μας η μηδενική υπόθεση συνοψίζεται στον παρακάτω ισχυρισμό:

**« Το θαλάσσιο περιβάλλον δεν επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών »**

Η μαθηματική έκφραση του παραπάνω ισχυρισμού είναι η εξής,  $H_0: \bar{X}_A = \bar{X}_B = \bar{X}_C = \bar{X}_D$

Όπου  $\bar{X}$  είναι μια από τις μηχανικές ιδιότητες και όπου A,B,C και D οι διαφορετικοί πληθυσμοί.

*Εξεταζόμενες μηχανικές ιδιότητες*

Για να αποκτήσει νόημα ο παραπάνω ισχυρισμός, για κάθε ομάδα δοκιμίων και κάθε παράμετρο, θα πρέπει να γίνει πιο συγκεκριμένος. Παραδείγματος χάρη, όταν θα εξετάσουμε τη μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$  στα δακτυλιοειδή δοκίμια από τον κύλινδρο 3 με ίνες άνθρακα 12K, κατά τη παραμονή τους στη θάλασσα, θα κάνουμε την εξής μηδενική υπόθεση:

**« Ο χρόνος παραμονής στη θάλασσα δεν επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  των δακτυλίων από σύνθετο υλικό με ενίσχυση ινών άνθρακα 12K »**

Και με μαθηματική έκφραση,  $H_0: \bar{E}_{1A} = \bar{E}_{1B} = \bar{E}_{1C} = \bar{E}_{1D}$

Όπου  $\bar{E}_1$  είναι το μέτρο ελαστικότητας και οι δείκτες A,B,C και D αφορούν τις ομάδες ανέλκυσης.

Οι μηχανικές ιδιότητες που πρόκειται να εξεταστούν ως εξαρτημένες μεταβλητές (X) είναι οι εξής:

- Για τον κύλινδρο 3 εξετάζονται το  $E_1$  και το  $E_2$
- Για τον κύλινδρο 4 εξετάζονται το  $E_1$  και το  $E_2$
- Για τον κύλινδρο 5 εξετάζονται το  $G_{12}$  και το  $\tau_{12}$
- Για τον κύλινδρο 6 εξετάζονται το  $G_{12}$  και το  $\tau_{12}$
- Για τον κύλινδρο 7 εξετάζονται τα  $E_1, \sigma_1$  και τα  $E_2, \sigma_2$
- Για τον κύλινδρο 8 εξετάζονται το  $G_{12}$  και το  $\tau_{12}$

### Επίπεδο σημαντικότητας και προϋποθέσεις ανάλυσης

Κατά τον σχεδιασμό της ανάλυσης, επιλέγεται ένα επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ( $\alpha$ ) που συνήθως βρίσκεται στο 0,05 (5%). Η στατιστική σημαντικότητα είναι θεμελιώδης για τη δοκιμή στατιστικής υπόθεσης καθώς καθορίζει το βαθμό στον οποίο μπορούμε να εμπιστευτούμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Ένα μέτρο της πιθανότητας για μία στατιστική ανάλυση είναι η τιμή σημαντικότητας ( $p$ -value), η οποία εκφράζει τις «ακραίες» παρατηρήσεις λόγω σφάλματος δειγματοληψίας ή στη περίπτωση μας λόγω σφάλματος της πειραματικής διαδικασίας. Έτσι, σε μία ανάλυση που έχει τεθεί επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=0.05$  και βρεθεί τιμή σημαντικότητας  $p\text{-value}>0.05$  αυτό σημαίνει ότι οι παρατηρήσεις δεν μπορούν να δώσουν κάποιο αποτέλεσμα στο βαθμό βεβαιότητας που ο ερευνητής έχει επιλέξει, κατ' επέκταση δεν απορρίπτεται η μηδενική. Στη περίπτωση της ANOVA η τιμή της στατιστικής σημαντικότητας ( $p$ -value) εκφράζεται από ένα στατιστικό δείκτη  $F$  ο οποίος συγκρίνεται με την οριακή τιμή του ( $F_{crit.}$ ) για το επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας που έχει επιλέξει ο ερευνητής.

Όπως κάθε παραμετρική ανάλυση έτσι και η ANOVA χρησιμοποιείται υπό προϋποθέσεις. Υπάρχουν βέβαια προϋποθέσεις που είναι δύσκολο να επιβεβαιωθούν σε περίπτωση λίγων παρατηρήσεων, όπως η συνήθης προϋπόθεση σε στατιστικές αναλύσεις, οι παρατηρήσεις να ακολουθούν κανονική κατανομή. Αν και η ANOVA αρκετά ισχυρή στην παραβίαση μερικών εκ των προϋποθέσεων, θα γίνει ο τυπικός έλεγχος και μια προσπάθεια φυσικής ερμηνείας χωρίς περεταίρω ανάλυση, καθώς αυτό ξεφεύγει από τα όρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι προϋποθέσεις της ANOVA είναι οι εξής:

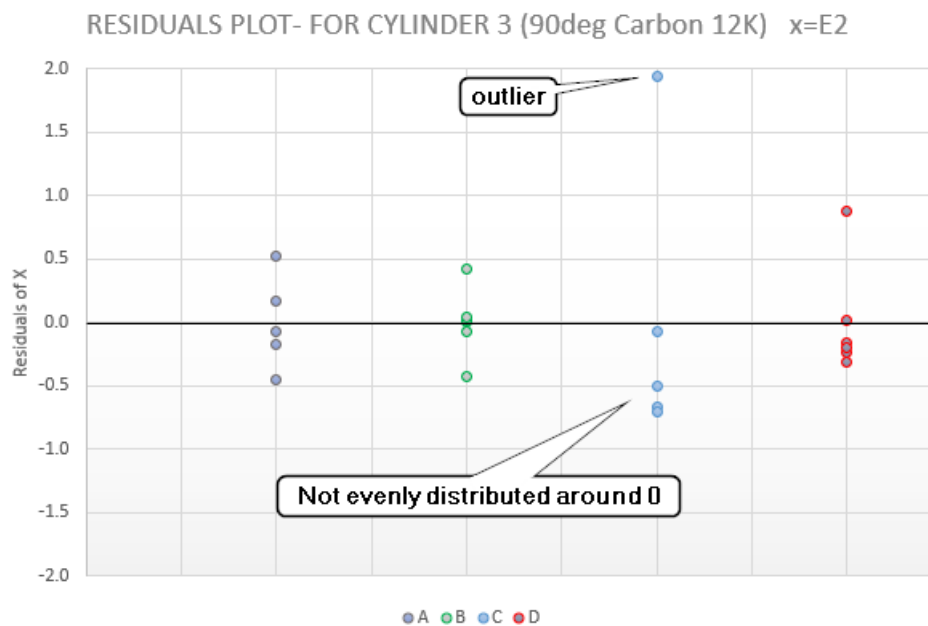
- Οι επιμέρους ομάδες-δείγματα είναι ανεξάρτητες
- Τα σφάλματα της εξαρτημένης μεταβλητής ακολουθούν κανονική κατανομή (normality of residuals)
- Οι κατανομές των σφαλμάτων των συγκρινόμενων ομάδων είναι ομοιογενείς (homoscedasticity)

Η ανεξαρτησία των δειγμάτων επιτυγχάνεται καθώς δεν επικαλύπτεται καμία από της μετρήσεις, αλλά ούτε επηρεάζει με κάποιο τρόπο η μία την άλλη.

Ως εξαρτημένη μεταβλητή σε κάθε ανάλυση λαμβάνεται μία εκ των μηχανικών σταθερών του υλικού. Οι μηχανικές σταθερές των υπό μελέτη σύνθετων υλικών, μετρούμενες πάντα κατά μία διεύθυνση, δεν θα μπορούσαν παρά να συγκλίνουν γύρω από μία μέση τιμή η οποία θα θεωρούνταν και πραγματική. Ακόμα, θα μπορούσε η μέθοδος απόκτησης των μετρήσεων (πειραματική διαδικασία) να περιέχει κάποιο συστηματικό σφάλμα το οποίο δεν είναι αντιληπτό από τον ερευνητή. Ακόμα και σε αυτή τη περίπτωση, η ανεξάρτητη μεταβλητή εξακολουθεί να ακολουθεί κανονική κατανομή, αλλά με μετατοπισμένο τον μέσο όρο.

Το διάγραμμα του σχήματος 7.1 είναι ενδεικτικό της κατανομής και της ομοσκεδαστικότητας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν για το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$  του κυλίνδρου 3. Στο κατακόρυφο άξονα φαίνονται τα σφάλματα ( $X - \bar{X}$ ), της κάθε ομάδας

ανέλκυσης με διαφορετικό χρώμα. Τα σφάλματα θα έπρεπε να συγκεντρώνονται γύρω από 0 με παρόμοια διασπορά κατά τον κατακόρυφο άξονα.



Σχήμα 7.1 Διάγραμμα υπολοίπων μεταβλητών για ένδειξη κανονικότητας και ομοσκεδαστικότητας

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα παραπάνω, στην ομάδα C υπάρχουν μακρινές παρατηρήσεις (outliers) και μετατόπιση του κέντρου των παρατηρήσεων. Θεωρείται όμως μεμονωμένη περίπτωση η οποία δεν είναι ικανή να αμφισβητήσει την κατανομή και την ομοιογένεια των μετρούμενων μεγεθών από την πειραματική διαδικασία. Επίσης, εκτός από μία μακρινή τιμή τα υπόλοιπα σφάλματα κατανέμονται με ομοιογένεια αφού τα περισσότερα βρίσκονται στο διάστημα από 1 έως -1.

Σε όσες περιπτώσεις δεν ισχύει προϋπόθεση της ομοσκεδαστικότητας, εκτελείται επιπλέον η παραλλαγή της ANOVA του Welch, B. L. (1951) μέσω του προγράμματος στατιστικού υπολογισμού SPSS της IBM.

#### Post-hoc ανάλυση

Στις περιπτώσεις που η μηδενική υπόθεση της ANOVA απορρίπτεται, ακολουθεί μετά-ανάλυση (post-hoc) των δεδομένων ώστε ναδειχθεί ποιες ακριβώς ομάδες ευθύνονται για την απόρριψη της. Στη περίπτωση που ισχύουν όλες οι προϋποθέσεις της ANOVA επιλέγεται η post-hoc ανάλυση Tukey-HSD. Στη περίπτωση που η προϋπόθεση για ομοσκεδαστικότητα δεν τηρείται τότε επιλέγεται η post-hoc ανάλυση Games-Howell. Όλες οι αναλύσεις εκτελούνται μέσω του προγράμματος SPSS κατά το οποίο συγκρίνονται οι ομάδες ανέλκυσης σε ζεύγη και προκύπτει το p\_value για κάθε ζεύγος. Όταν ισχύει  $p\_value > 0.05$  τότε η μηδενική υπόθεση της ισότητας δεν μπορεί να απορριφθεί ενώ στην αντίθετη περίπτωση απορρίπτεται με βεβαιότητα ίση ή μεγαλύτερη του 95%.



### 7.1.2. Κατάστροψη εξισώσεων

Σύμφωνα με το βιβλίο-σημειώσεις από το εργαστήριο μαθηματικών & στατιστικής (Παπαδόπουλος, 2020) κατά τη διαδικασία της ανάλυσης αρχικά υπολογίζεται το άθροισμα των τετραγώνων μέσα στους πληθυσμούς ( $SS_w$ ) σύμφωνα με τη παρακάτω εξίσωση:

$$SS_w = \bar{X}_A^2 + \bar{X}_B^2 + \bar{X}_C^2 + \bar{X}_D^2 \quad (7.1)$$

Όπου,

$\bar{X}_{A,B,C,D}$  ο μέσος όρος της μεταβλητής  $X$  για τις ομάδες A, B, C και D αντίστοιχα.

Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συνολικός μέσος όρος  $\bar{X}$  όλων των παρατηρήσεων, με σκοπό να βρεθεί το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων της κάθε παρατήρησης από το συνολικό μέσο όρο, ή αλλιώς το ολικό άθροισμα τετραγώνων ( $SS_t$ ), όπως περιγράφεται στην εξίσωση (7.2).

$$SS_t = (X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2 \quad (7.2)$$

Όπου,

$X_i$  μία παρατήρηση (μέτρηση για ένα δοκίμιο), και  $n$  το πλήθος των παρατηρήσεων

Το άθροισμα των τετραγώνων μεταξύ των πληθυσμών  $SS_b$  υπολογίζεται με τη σχέση (7.3)

$$SS_b = SS_t - SS_w \quad (7.3)$$

Υπολογίζονται επίσης οι βαθμοί ελευθερίας μεταξύ πληθυσμών ( $Df_b$ ) και παρατηρήσεων ( $Df_w$ ) ως εξής:

$$Df_b = k - 1 \quad (7.4)$$

$$Df_w = n - k \quad (7.5)$$

Όπου,

$k$  το σύνολο των πληθυσμών, και  $n$  το μέγεθος των παρατηρήσεων

Από τις παραπάνω εξισώσεις υπολογίζονται το μέσο άθροισμα τετραγώνων των επεμβάσεων  $MS_b$  και το μέσο άθροισμα τετραγώνων του σφάλματος  $MS_w$ .

$$MS_b = SS_b / Df_b \quad (7.6)$$

$$MS_w = SS_w / Df_w \quad (7.7)$$

Επομένως υπάρχουν όλα τα δεδομένα για να εκφραστεί ο στατιστικός δείκτης ελέγχου  $F$  για τον οποίο ισχύει:

$$F = \frac{MS_b}{MS_w} = \frac{\text{Μεταβλητότητα μεταξύ των δειγμάτων}}{\text{Μεταβλητότητα εντός των δειγμάτων}} \quad (7.8)$$

Ο λόγος αυτός συγκρίνεται με δεδομένη οριακή τιμή  $F_{crit}$  που εξαρτάται από το επίπεδο σημαντικότητας που τίθεται στην αρχή της ανάλυσης, καθώς και από τους βαθμούς ελευθερίας του πληθυσμού και των δειγμάτων. Συνήθως η οριακή αυτή τιμή βρίσκεται μέσω του πίνακα 7.2, αλλά στη παρούσα εργασία έγινε μέσω συνάρτησης στο πρόγραμμα Excel και συγκεκριμένα την ακόλουθη:

`F.INV.RT(πιθανότητα; βαθμοί_ελευθερίας1; βαθμοί_ελευθερίας2)`

Τέλος, αν  $F > F_{crit}$  τότε απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση. Αν όμως  $F < F_{crit}$  τότε δεν απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση  $H_0: \bar{X}_A = \bar{X}_B = \bar{X}_C = \bar{X}_D$

Διευκρινίζεται πώς όλη η ανάλυση υλοποιήθηκε στο Excel του MS Office χρησιμοποιώντας πίνακες και κατάλληλες εξισώσεις, όπως φαίνεται στον πίνακα 7.1.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.1** Συγκέντρωση δεδομένων για την ανάλυση ANOVA

FOR CYLINDER 3 (90deg Carbon 12K) X=E2(GPa)												
BATCH A			BATCH B			BATCH C			BATCH D			
x	(x-mean)	(x-mean)^2	x	(x-mean)	(x-mean)^2	x	(x-mean)	(x-mean)^2	x	(x-mean)	(x-mean)^2	
10.8	-0.1	0.01	10.7	-0.4	0.18	13.3	1.9	3.77	11.0	0.0	0.00	
11.4	0.5	0.28	11.1	0.0	0.00	11.3	-0.1	0.00	10.8	-0.2	0.06	
10.7	-0.2	0.03	11.1	0.0	0.00	10.7	-0.7	0.45	11.9	0.9	0.78	
11.0	0.2	0.03	11.0	-0.1	0.01	10.7	-0.7	0.50	10.8	-0.2	0.02	
10.4	-0.5	0.21	11.5	0.4	0.18	10.9	-0.5	0.25	10.7	-0.3	0.10	
-			11.2	0.0	0.00	-			10.8	-0.2	0.04	
<b>Sum</b>	54.3	0.0	0.5	66.7	0.0	0.4	56.9	0.0	5.0	66.0	0.0	1.0
<b>Average</b>	10.9			11.1			11.4			11.0		
<b>St. Deviation</b>	0.4			0.3			1.1			0.4		
<b>coef. Of Varian</b>	3.4%			2.4%			9.8%			4.1%		

ΠΙΝΑΚΑΣ 7.2 Πίνακας εύρεσης οριακής τιμής του λόγου F για επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha=0.05$

Denominator DF	Numerator DF									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	161.448	199.500	215.707	224.583	230.162	233.986	236.768	238.883	240.543	241.882
2	18.513	19.000	19.164	19.247	19.296	19.330	19.353	19.371	19.385	19.396
3	10.128	9.552	9.277	9.117	9.013	8.941	8.887	8.845	8.812	8.786
4	7.709	6.944	6.591	6.388	6.256	6.163	6.094	6.041	5.999	5.964
5	6.608	5.786	5.409	5.192	5.050	4.950	4.876	4.818	4.772	4.735
6	5.987	5.143	4.757	4.534	4.387	4.284	4.207	4.147	4.099	4.060
7	5.591	4.737	4.347	4.120	3.972	3.866	3.787	3.726	3.677	3.637
8	5.318	4.459	4.066	3.838	3.687	3.581	3.500	3.438	3.388	3.347
9	5.117	4.256	3.863	3.633	3.482	3.374	3.293	3.230	3.179	3.137
10	4.965	4.103	3.708	3.478	3.326	3.217	3.135	3.072	3.020	2.978
11	4.844	3.982	3.587	3.357	3.204	3.095	3.012	2.948	2.896	2.854
12	4.747	3.885	3.490	3.259	3.106	2.996	2.913	2.849	2.796	2.753
13	4.667	3.806	3.411	3.179	3.025	2.915	2.832	2.767	2.714	2.671
14	4.600	3.739	3.344	3.112	2.958	2.848	2.764	2.699	2.646	2.602
15	4.543	3.682	3.287	3.056	2.901	2.790	2.707	2.641	2.588	2.544
16	4.494	3.634	3.239	3.007	2.852	2.741	2.657	2.591	2.538	2.494
17	4.451	3.592	3.197	2.965	2.810	2.699	2.614	2.548	2.494	2.450
18	4.414	3.555	3.160	2.928	2.773	2.661	2.577	2.510	2.456	2.412
19	4.381	3.522	3.127	2.895	2.740	2.628	2.544	2.477	2.423	2.378
20	4.351	3.493	3.098	2.866	2.711	2.599	2.514	2.447	2.393	2.348
21	4.325	3.467	3.072	2.840	2.685	2.573	2.488	2.420	2.366	2.321
22	4.301	3.443	3.049	2.817	2.661	2.549	2.464	2.397	2.342	2.297
23	4.279	3.422	3.028	2.796	2.640	2.528	2.442	2.375	2.320	2.275
24	4.260	3.403	3.009	2.776	2.621	2.508	2.423	2.355	2.300	2.255
25	4.242	3.385	2.991	2.759	2.603	2.490	2.405	2.337	2.282	2.236
26	4.225	3.369	2.975	2.743	2.587	2.474	2.388	2.321	2.265	2.220
27	4.210	3.354	2.960	2.728	2.572	2.459	2.373	2.305	2.250	2.204
28	4.196	3.340	2.947	2.714	2.558	2.445	2.359	2.291	2.236	2.190
29	4.183	3.328	2.934	2.701	2.545	2.432	2.346	2.278	2.223	2.177
30	4.171	3.316	2.922	2.690	2.534	2.421	2.334	2.266	2.211	2.165
31	4.160	3.305	2.911	2.679	2.523	2.409	2.323	2.255	2.199	2.153
32	4.149	3.295	2.901	2.668	2.512	2.399	2.313	2.244	2.189	2.142
33	4.139	3.285	2.892	2.659	2.503	2.389	2.303	2.235	2.179	2.133
34	4.130	3.276	2.883	2.650	2.494	2.380	2.294	2.225	2.170	2.123
35	4.121	3.267	2.874	2.641	2.485	2.372	2.285	2.217	2.161	2.114
36	4.113	3.259	2.866	2.634	2.477	2.364	2.277	2.209	2.153	2.106
37	4.105	3.252	2.859	2.626	2.470	2.356	2.270	2.201	2.145	2.098
38	4.098	3.245	2.852	2.619	2.463	2.349	2.262	2.194	2.138	2.091
39	4.091	3.238	2.845	2.612	2.456	2.342	2.255	2.187	2.131	2.084
40	4.085	3.232	2.839	2.606	2.449	2.336	2.249	2.180	2.124	2.077
41	4.079	3.226	2.833	2.600	2.443	2.330	2.243	2.174	2.118	2.071
42	4.073	3.220	2.827	2.594	2.438	2.324	2.237	2.168	2.112	2.065
43	4.067	3.214	2.822	2.589	2.432	2.318	2.232	2.163	2.106	2.059
44	4.062	3.209	2.816	2.584	2.427	2.313	2.226	2.157	2.101	2.054
45	4.057	3.204	2.812	2.579	2.422	2.308	2.221	2.152	2.096	2.049
46	4.052	3.200	2.807	2.574	2.417	2.304	2.216	2.147	2.091	2.044
47	4.047	3.195	2.802	2.570	2.413	2.299	2.212	2.143	2.086	2.039
48	4.043	3.191	2.798	2.565	2.409	2.295	2.207	2.138	2.082	2.035
49	4.038	3.187	2.794	2.561	2.404	2.290	2.203	2.134	2.077	2.030
50	4.034	3.183	2.790	2.557	2.400	2.286	2.199	2.130	2.073	2.026

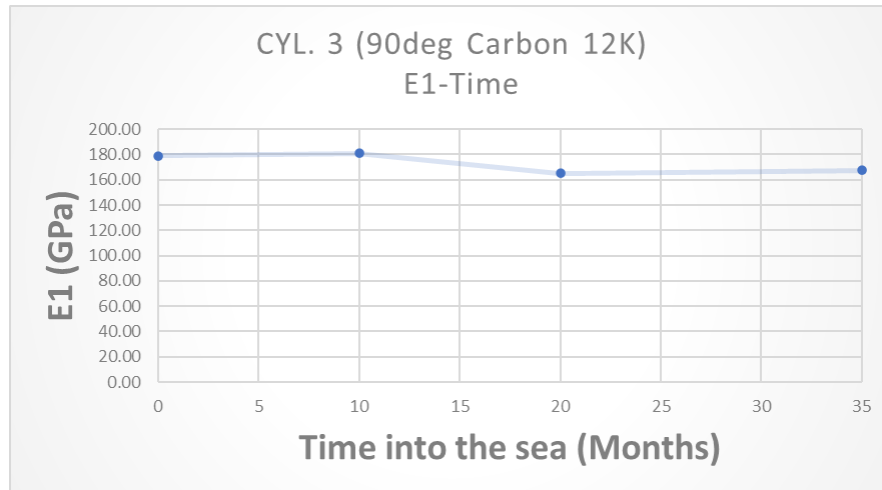
### 7.1.3. Αποτελέσματα

Ακολουθούν οι πίνακες και τα γραφήματα με μεταβολή της εξεταζόμενης μηχανικής ιδιότητας συναρτήσει του χρόνου παραμονής σε μεγάλο βάθος θάλασσας, καθώς και οι πίνακες με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA.

Το μέτρο ελαστικότητας E1 του κυλίνδρου 3 μειώνεται μετά τους 10 μήνες και από τους 20 μέχρι τους 35 παραμένει σταθερό ( $p_{\text{value}_{10-20}}=0.005$  και  $p_{\text{value}_{10-35}}=0,025$ ).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.3** Μεταβολή E<sub>1</sub> κυλίνδρου 3 κατά τη παραμονή στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.3 (90deg Carbon 12K)	Time into the see (Months)	E1(GPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	179.04	0.00%	1.000
B	10	180.94	1.06%	0.979
C	20	165.00	-7.84%	0.047
D	35	167.58	-6.40%	0.143



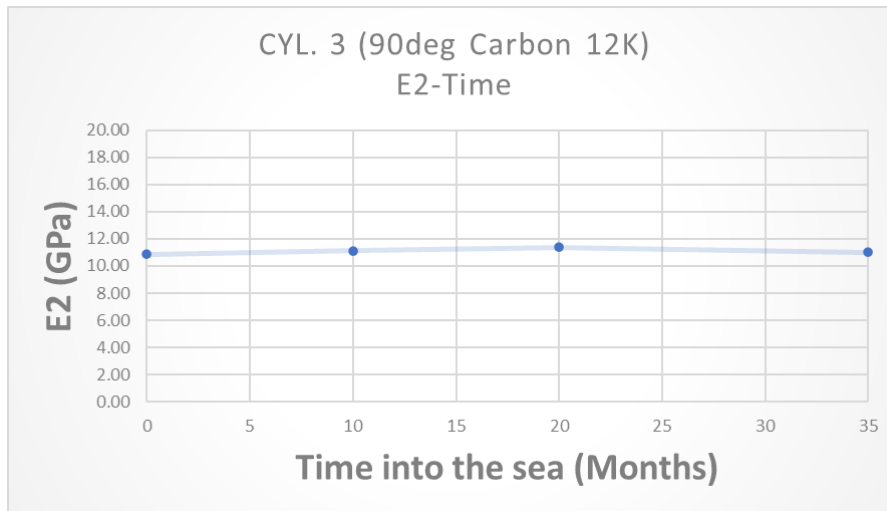
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.4** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 3 (90deg Carbon 12K) X=E1(GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>1768.0</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>753.5</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>1014.5</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>16</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 338.16</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 47.09</b>
	<b>F=</b>	<b>7.180634</b>
Για στατιστική σημαντικότητα= 0.05	<b>.==&gt;</b>	<b>Fcrit= 3.2388715</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Το μέτρο ελαστικότητας E2 του κυλίνδρου 3 δεν φαίνεται να αλλάζει σημαντικά χωρίς όμως αυτό να μπορεί να υποστηριχθεί με μεγάλη βεβαιότητα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.5** Μεταβολή E<sub>2</sub> κυλίνδρου 3 κατά τη παραμονή στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

CYL. 3 (90deg Carbon 12K)	Time into the see (Months)	E2(GPa)	Percentage of change
A	0	10.86	0.00%
B	10	11.11	2.28%
C	20	11.39	4.83%
D	35	11.00	1.24%



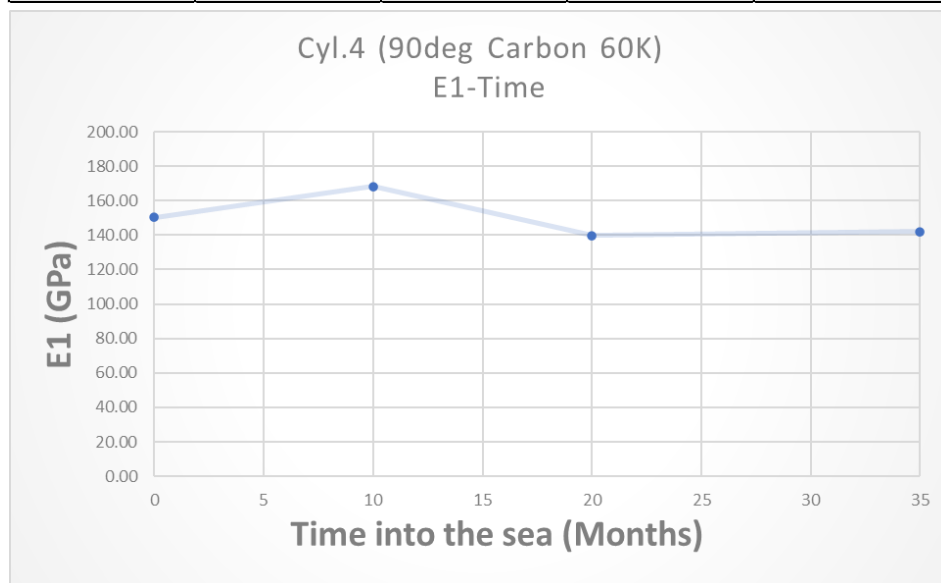
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.6** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 3 (90deg Carbon 12K) X=E2(GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>7.6</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>6.9</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>0.8</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedc	<b>DFw=</b>	<b>18</b>
<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb=</b>	<b>0.25</b>
<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw=</b>	<b>0.38</b>
	<b>F=</b>	<b>0.65829293</b>
Για στατιστική σημαντικότητα= 0.05	<b>.==&gt;</b>	<b>Fcrit= 3.15990759</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>CANNOT REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Για το μέτρο ελαστικότητας E1 του κυλίνδρου 4 παρατηρείται μία αύξηση στους 10 μήνες η οποία σύμφωνα με την ανάλυση δεν είναι στατιστικά σημαντική. Η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται λόγω της διαφοράς στους 10 μήνες σε σχέση με τους 20 και 35 μήνες που το E1 φαίνεται μειωμένο ( $p_{value_{10-20}}=0.004$  και  $p_{value_{10-35}}=0,009$ ).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.7** Μεταβολή E<sub>1</sub> κυλίνδρου 4 κατά την παραμονή στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.4 (90deg Carbon 60K)	Time into the see (Months)	E1(GPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	150.34	0.00%	1.000
B	10	168.27	11.92%	0.170
C	20	139.72	-7.07%	0.516
D	35	142.10	-5.49%	0.701



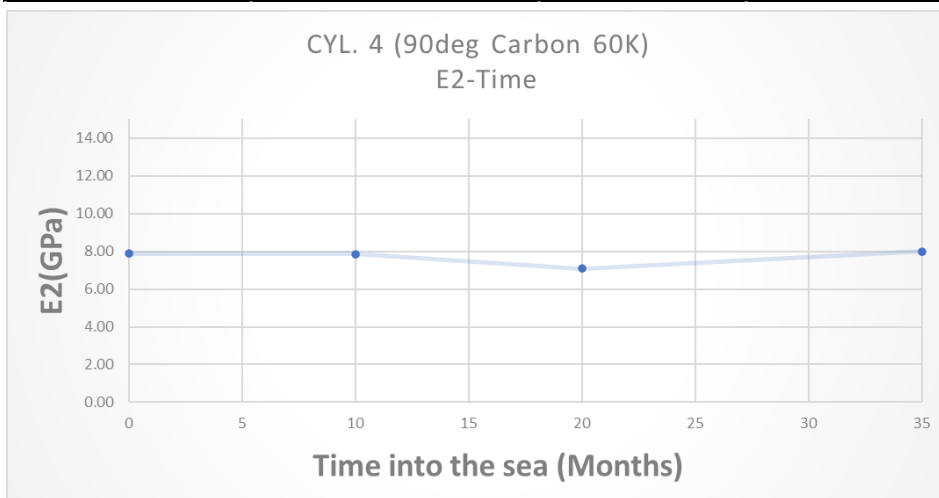
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.8** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 4 (90deg Carbon 60K) x=E1 (GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>3997.3</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>1717.2</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>2280.2</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>15</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 760.06</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 114.48</b>
	<b>F=</b>	<b>6.639443964</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>.==&gt; Fcrit= 3.287382105</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Το μέτρο ελαστικότητας E2 του κυλίνδρου 4 δεν φαίνεται να αλλάζει σημαντικά χωρίς όμως αυτό να μπορεί να υποστηριχθεί με μεγάλη βεβαιότητα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.9** Μεταβολή E<sub>2</sub> κυλίνδρου 4 κατά την παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

CYL. 4 (90deg Carbon 60K)	Time into the see (Months)	E2(GPa)	Percentage of change
A	0	7.87	0.00%
B	10	7.86	-0.14%
C	20	7.09	-9.96%
D	35	7.98	1.39%



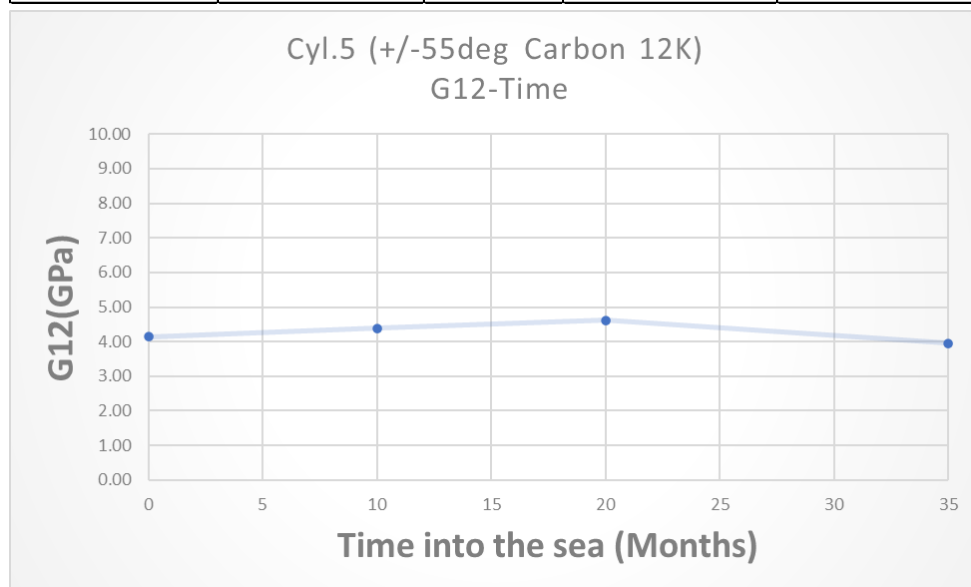
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.10** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

CYLINDER 4 (90deg Carbon 60K) x=E2(GPa)		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>5.0</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>3.8</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>1.3</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freee	<b>DFw=</b>	<b>15</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 0.42</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 0.25</b>
	<b>F=</b>	<b>1.6544025</b>
Για στατιστική σημαντικότητα		
=	<b>0.05</b>	<b>,==&gt; Fcrit= 3.2873821</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>CANNOT REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Στο μέτρο διάτμησης G12 του κυλίνδρου 5 παρατηρείται αύξηση στους 20 μήνες σε σχέση με τα αρχικά του επίπεδα. Στους 35 μήνες παρατηρείται μείωση σε σχέση με τους 10 και 20 μήνες αλλά όχι σε σχέση με τα αρχικά του επίπεδα. ( $p_{value_{10-35}}=0.008$  και  $p_{value_{20-35}}<0.001$ )

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.11** Μεταβολή G<sub>12</sub> κυλίνδρου 5 κατά την παραμονή στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.5 (+/-55deg Carbon 12K)	Time into the sea (Months)	G12(MPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	4.14	0.00%	1.000
B	10	4.38	5.75%	0.206
C	20	4.61	11.28%	0.006
D	35	3.95	-4.58%	0.386



**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.12** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

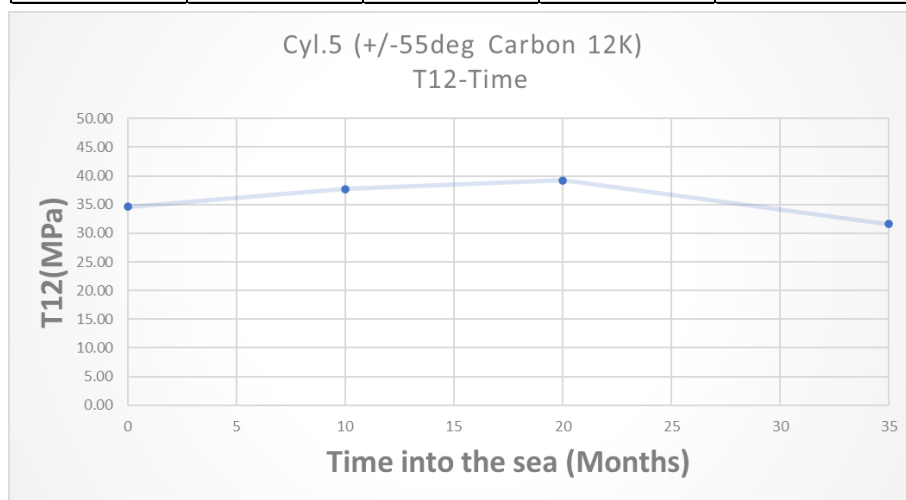
CYLINDER 5 (+/-55deg Carbon 12K) x=G12(GPa)		
Total Sum of Squares	SSt=	2.1
Sum of Squares Within	SSw=	0.8
Sum of Squares Between	SSb=	1.3
Batches Deg of Freedom	DFb=	3
Observations Deg of Freedom	DFw=	19
	MSb=	SSb/DFb= 0.45
	MSw=	SSw/DFw= 0.04
	F=	11.05967252
για στατιστική σημαντικότητα=	0.05	==> Fcrit= 3.127350005
NULL-HYPOTHESIS: Χμμεσο(A)=Χμμεσο(B)=Χμμεσο(C)=Χμμεσο(D)		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		



Στη μέγιστη τάση σε διάτμηση  $\tau_{12}$  του κυλίνδρου 5 παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά με το μέτρο διάτμησης. Η ιδιότητα φαίνεται αυξημένη στους 10 και 20 μήνες σε σχέση με τα αρχικά επίπεδα. Τα επίπεδα του  $\tau_{12}$  στους 35 μήνες μπορεί να φαίνονται μειωμένα σε σχέση με τα αρχικά αλλά αυτό δεν ορίζεται ως στατιστικά σημαντικό. ( $p_{\text{value}_{0-35}}=0.056$ )

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.13** Μεταβολή  $\tau_{12}$  κυλίνδρου 5 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.5 (+/-55deg Carbon 12K)	Time into the see (Months)	T12(MPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	34.58	0.00%	1.000
B	10	37.68	8.96%	0.043
C	20	39.22	13.41%	0.003
D	35	31.63	-8.54%	0.056



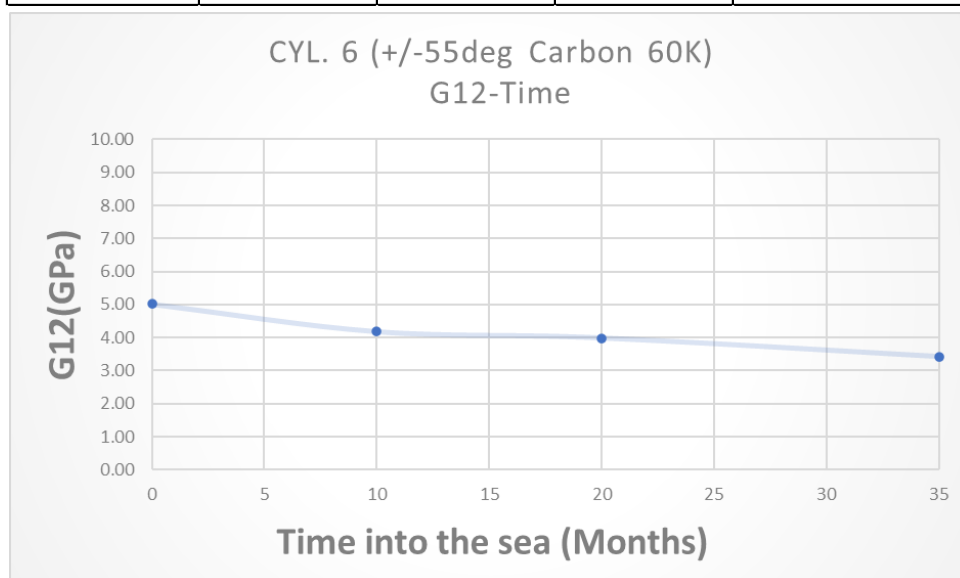
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.14** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 5 (+/-55deg Carbon 12K) <math>\chi=T_{12}</math>(MPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>257.9</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>65.6</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>192.3</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>19</b>
<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb=</b>	<b>64.10</b>
<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw=</b>	<b>3.45</b>
	<b>F=</b>	<b>18.5625206</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>.==&gt; Fcrit= 3.127350005</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: <math>\chi_{\text{μεσο(A)}}=\chi_{\text{μεσο(B)}}=\chi_{\text{μεσο(C)}}=\chi_{\text{μεσο(D)}</math></b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Το μέτρο διάτμησης G12 του κυλίνδρου 6 είναι μειωμένο στο 10, 20 και 35 μήνες σε σχέση με τα αρχικά του επίπεδα. Σταθερό εντοπίζεται μόνο μεταξύ των 10 και 20 μηνών ( $p_{value_{10-20}}=0.595$ )

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.15** Μεταβολή G<sub>12</sub> κυλίνδρου 6 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.6 (+/-55deg Carbon 60K)	Time into the see (Months)	G12(GPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	5.02	0.00%	1.000
B	10	4.18	-16.74%	>0.001
C	20	3.99	-20.56%	>0.001
D	35	3.42	-31.88%	>0.001



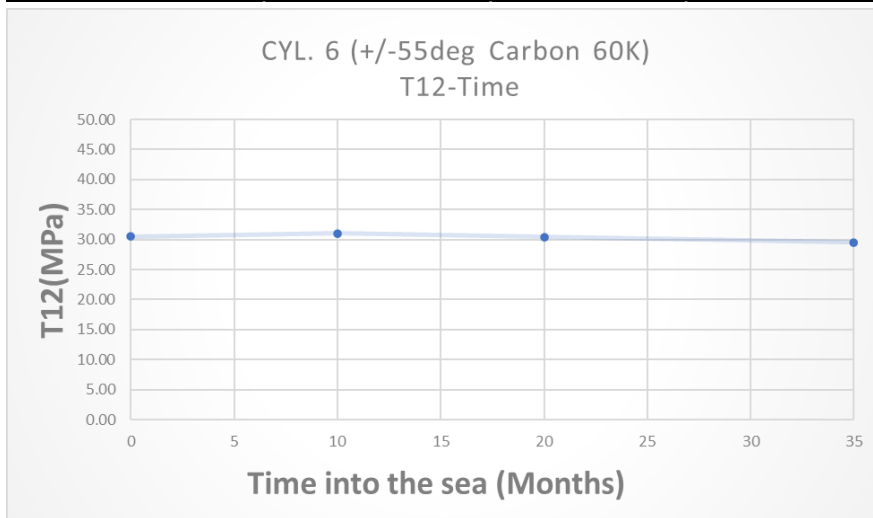
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.16** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 6 (+/-55deg Carbon 60K) x=G12(GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>8.2</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>1.1</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>7.1</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>18</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 2.37</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 0.06</b>
	<b>F=</b>	<b>37.7217421</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>.==&gt; Fcrit= 3.15990759</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Η μέγιστη τάση σε διάτμηση  $\tau_{12}$  του κυλίνδρου 6 φαίνεται να παραμένει σχετικά αμετάβλητη χωρίς όμως μεγάλη βεβαιότητα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.17** Μεταβολή  $\tau_{12}$  κυλίνδρου 6 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

CYL. 6 (+/-55deg Carbon 60K)	Time into the see (Months)	T12(MPa)	Percentage of change
A	0	30.50	0.00%
B	10	31.02	1.70%
C	20	30.40	-0.33%
D	35	29.56	-3.07%



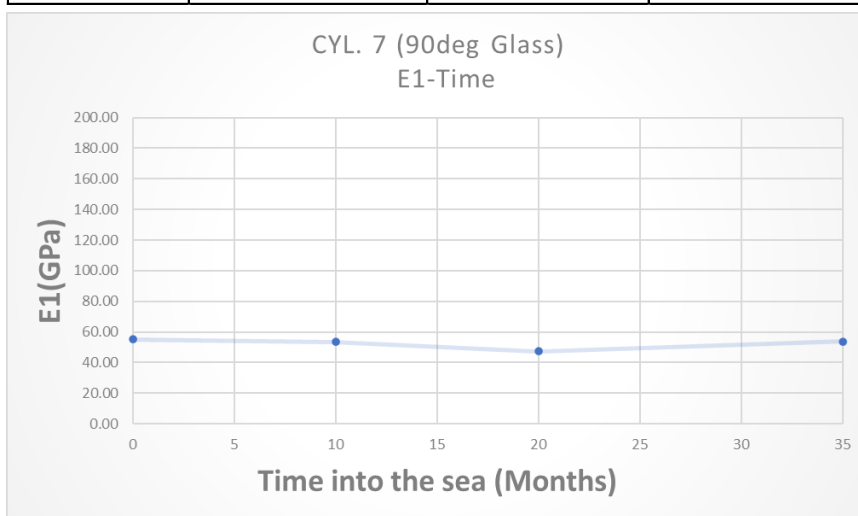
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.18** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 6 (+/-55deg Carbon 60K) <math>x=T12</math>(MPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>29.8</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>23.3</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>6.5</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>18</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 2.17</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 1.29</b>
	<b>F=</b>	<b>1.674334</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>.==&gt; Fcrit= 3.159908</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: <math>\chi_{\text{μεσο}}(A)=\chi_{\text{μεσο}}(B)=\chi_{\text{μεσο}}(C)=\chi_{\text{μεσο}}(D)</math></b>		
<b>CANNOT REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Για το μέτρο ελαστικότητας E1 του κυλίνδρου 7 η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και έτσι υπάρχει πιθανότητα η ιδιότητα να μην επηρεάζεται από το χρόνο παραμονής στη θάλασσα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.19** Μεταβολή E1 κυλίνδρου 7 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

CYL. 7 (90deg Glass)	Time into the see (Months)	E1(GPa)	Percentage of change
A	0	55.07	0.00%
B	10	53.50	-2.86%
C	20	47.35	-14.03%
D	35	53.79	-2.33%



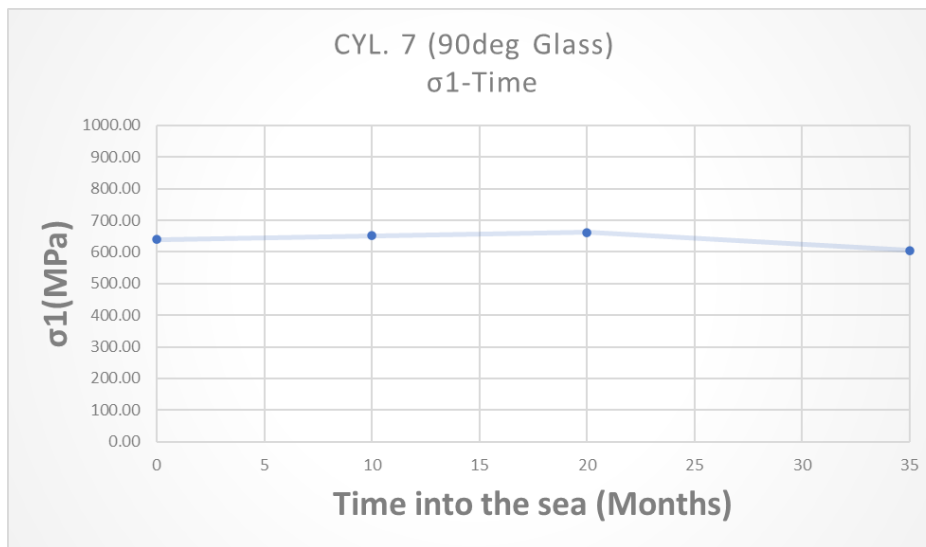
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.20** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 7 (90deg Glass) x=E1(GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>970.6</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>763.1</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>207.5</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>19</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 69.16</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 40.16</b>
	<b>F=</b>	<b>1.72185739</b>
Για στατιστική σημαντικότητα= 0.05	<b>.==&gt;</b>	<b>Fcrit= 3.12735001</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>CANNOT REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Η μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_1$  του κυλίνδρου 7 δεν φαίνεται να επηρεάζεται στατιστικά σημαντικά από το θαλάσσιο περιβάλλον.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.21** Μεταβολή  $\sigma_1$  κυλίνδρου 7 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

CYL. 7 (90deg Glass)	Time into the see (Months)	$\sigma_1$ (MPa)	Percentage of change
A	0	638.63	0.00%
B	10	651.26	1.98%
C	20	661.74	3.62%
D	35	605.36	-5.21%



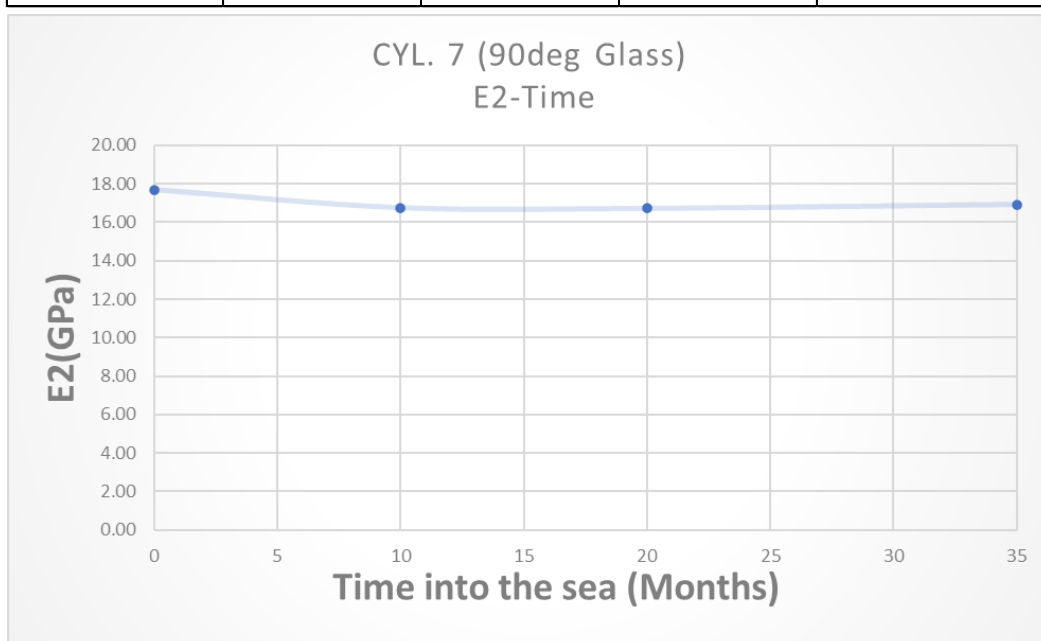
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.22** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 7 (90deg Glass) <math>x=\sigma_1</math>(MPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>66251.8</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>55457.5</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>10794.3</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>19</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 3598.11</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 2918.82</b>
	<b>F=</b>	<b>1.232729757</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>==&gt; Fcrit= 3.127350005</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: <math>\chi_{\text{μεσο}}(A)=\chi_{\text{μεσο}}(B)=\chi_{\text{μεσο}}(C)=\chi_{\text{μεσο}}(D)</math></b>		
<b>CANNOT REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Το μέτρο ελαστικότητας E2 του κυλίνδρου 7 φαίνεται πως επηρεάζεται από το θαλάσσιο περιβάλλον κυρίως κατά τους πρώτους 10 μήνες ενώ στους τους 20 και 35 δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.23** Μεταβολή E<sub>2</sub> κυλίνδρου 7 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.7 (90deg Glass)	Time into the sea (Months)	E2(GPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	17.68	0.00%	1.000
B	10	16.76	-5.19%	0.045
C	20	16.73	-5.39%	0.077
D	35	16.93	-4.26%	0.116



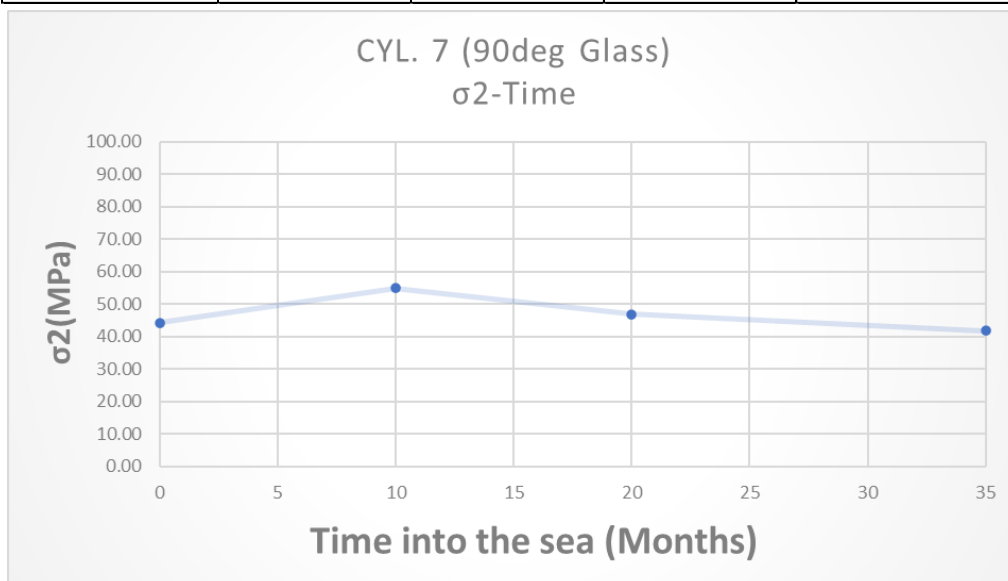
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.24** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 7 (90deg Glass) <math>\chi</math>=E2(GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>6.1</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>3.4</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>2.8</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>14</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 0.93</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 0.24</b>
	<b>F=</b>	<b>3.87902272</b>
Για στατιστική σημαντικότητα= 0.05	<b>==&gt; Fcrit=</b>	<b>3.34388868</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: <math>\chi</math>μεσο(A)=<math>\chi</math>μεσο(B)=<math>\chi</math>μεσο(C)=<math>\chi</math>μεσο(D)</b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Η μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_2$  του κυλίνδρου 7 φαίνεται πως αυξάνεται στους 10 μήνες παραμονής σε βάθος θάλασσας ενώ στους 20 και 35 μήνες επιστρέφει στα αρχικά του επίπεδα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.25** Μεταβολή  $\sigma_2$  κυλίνδρου 7 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.7 (90deg Glass)	Time into the sea (Months)	$\sigma_2$ (MPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	44.17	0.00%	1.000
B	10	54.93	24.37%	0.040
C	20	46.85	6.07%	0.913
D	35	41.73	-5.53%	0.900



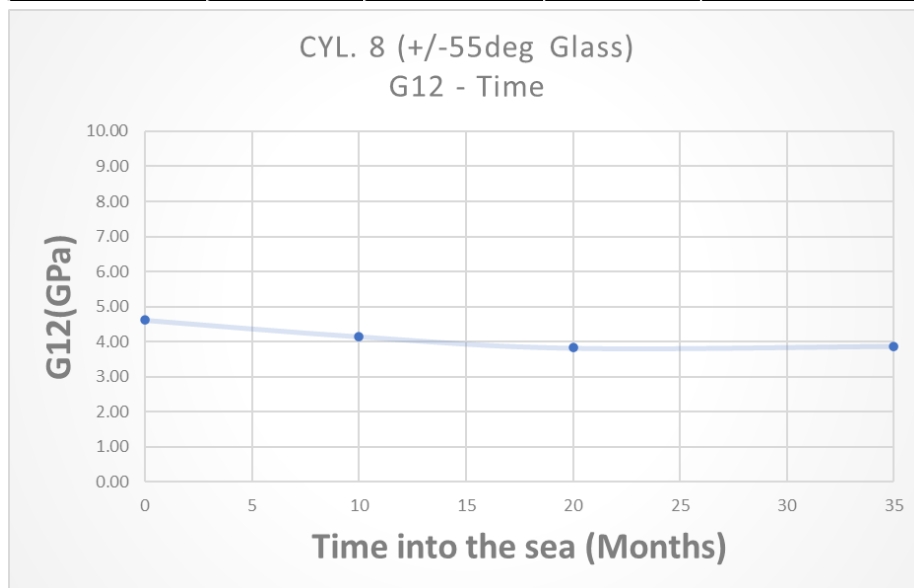
**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.26** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 7 (90deg Glass) <math>x=\sigma_2</math>(MPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>935.5</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>442.0</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>493.5</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>14</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 164.50</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 31.57</b>
		<b>F= 5.210352064</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>==&gt; Fcrit= 3.343888678</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: <math>\chi_{\text{μεσο(A)}}=\chi_{\text{μεσο(B)}}=\chi_{\text{μεσο(C)}}=\chi_{\text{μεσο(D)}</math></b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

Στο μέτρο διάτμησης G12 του κυλίνδρου 8 παρατηρείται μείωση στους 10 μήνες και περαιτέρω μείωση στους 20 μήνες όπου και μένει σταθερό μέχρι τους 35 μήνες.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.27** Μεταβολή G<sub>12</sub> κυλίνδρου 8 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.8 (+/-55deg Glass)	Time into the sea (Months)	G12(GPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	4.61	0.00%	1.000
B	10	4.15	-10.08%	>0.001
C	20	3.82	-17.09%	>0.001
D	35	3.88	-15.95%	>0.001



**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.28** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

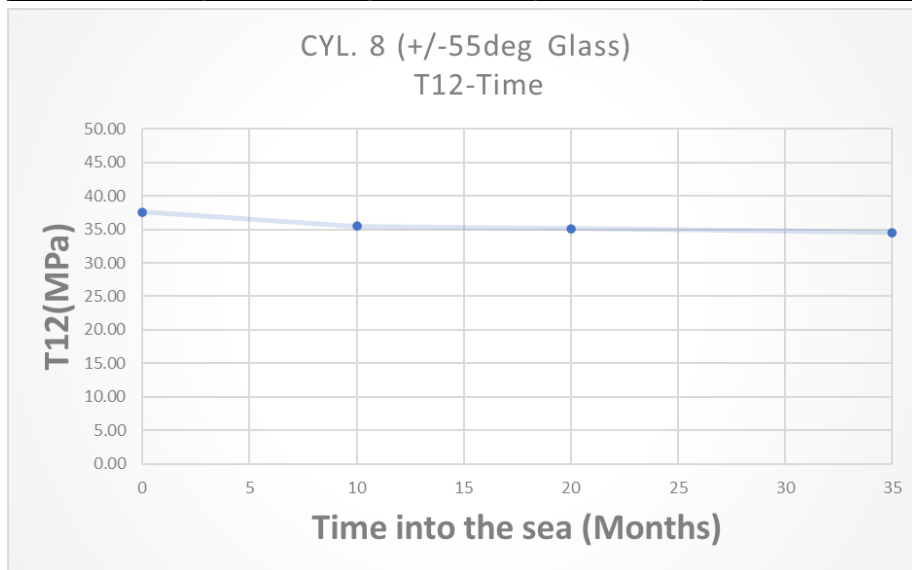
<b>CYLINDER 8 (+/-55deg Glass) x=G12(GPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>2.5</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>0.5</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>2.1</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freedom	<b>DFw=</b>	<b>19</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 0.69</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 0.02</b>
	<b>F=</b>	<b>28.964488</b>
Για στατιστική σημαντικότητα=	<b>0.05</b>	<b>.==&gt; Fcrit= 3.127350005</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: Χμεσο(A)=Χμεσο(B)=Χμεσο(C)=Χμεσο(D)</b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		



Στη μέγιστη τάση διάτμησης  $\tau_{12}$  του κυλίνδρου 8 παρατηρείται μείωση στους 20 μήνες και έκτοτε σταθεροποίηση του στους 35 μήνες.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.29** Μεταβολή  $\tau_{12}$  κυλίνδρου 8 κατά τη παραμονή του στο νερό με ακόλουθη γραφική παράσταση

Cyl.8 (+/-55deg Glass)	Time into the sea (Months)	T12(MPa)	Percentage of change	Significance to Batch A (p-value)
A	0	37.58	0.00%	1.000
B	10	35.51	-5.50%	0.068
C	20	35.11	-6.58%	0.024
D	35	34.55	-8.07%	0.005



**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.30** Ανάλυση ANOVA για την εξέταση της μηδενικής υπόθεσης.

<b>CYLINDER 8 (+/-55deg Glass) <math>x=T12</math>(MPa)</b>		
Total Sum of Squares	<b>SSt=</b>	<b>59.2</b>
Sum of Squares Within	<b>SSw=</b>	<b>31.4</b>
Sum of Squares Between	<b>SSb=</b>	<b>27.8</b>
Batches Deg of Freedom	<b>DFb=</b>	<b>3</b>
Observations Deg of Freed	<b>DFw=</b>	<b>19</b>
	<b>MSb=</b>	<b>SSb/DFb= 9.25</b>
	<b>MSw=</b>	<b>SSw/DFw= 1.65</b>
	<b>F=</b>	<b>5.5928002</b>
Για στατιστική σημαντικότητα		
= 0.05	,==>	<b>Fcrit= 3.12735</b>
<b>NULL-HYPOTHESIS: <math>\chi_{\text{μεσο}}(A)=\chi_{\text{μεσο}}(B)=\chi_{\text{μεσο}}(C)=\chi_{\text{μεσο}}(D)</math></b>		
<b>REJECT NULL-HYPOTHESIS</b>		

## Συμπεράσματα

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός πίνακας 7.31 με τα αποτελέσματα της ανάλυσης ANOVA. Υπενθυμίζεται πως η μηδενική υπόθεση αφορά τον παρακάτω ισχυρισμό ο οποίος προσαρμόζεται σε κάθε μηχανική ιδιότητα και κάθε υλικό:

**«Η εξεταζόμενη μηχανική ιδιότητα δεν επηρεάζεται από τη μακροχρόνια παραμονή του υλικού σε μεγάλο βάθος θάλασσας»**

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.31** Συγκεντρωτικός πίνακας με αποτελέσματα δοκιμών και ανάλυσης ANOVA για τα δοκίμια FIX03.

Batch	CYLINDER 3 (90deg Carbon 12K)		CYLINDER 4 (90deg Carbon 60K)		CYLINDER 5 (+/-55deg Carbon 12K)		CYLINDER 6 (+/-55deg Carbon 60K)	
	E1(GPa)	E2(GPa)	E1(GPa)	E2(GPa)	G12(GPa)	$\tau_{12max}$ (MPa)	G12(GPa)	$\tau_{12max}$ (MPa)
A (δεν ποντίστηκε)	179.0	10.9	150.3	7.9	4.1	34.6	5.0	30.5
B (10 μήνες)	180.9	11.1	168.3	7.9	4.4	37.7	4.2	31.0
C (20 μήνες)	165.0	11.4	139.7	7.1	4.6	39.2	4.0	30.4
D (35 μήνες)	167.6	11.0	142.2	8.0	4.0	31.6	3.4	29.6
<b>Average</b>	173.1	11.1	150.1	7.7	4.3	35.8	4.2	30.4
<b>Μηδενική υπόθεση</b>	Απορρίπτεται	Δεν απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Δεν απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Δεν απορρίπτεται

Batch	CYLINDER 7 (90deg Glass)				CYLINDER 8 (+/-55deg Glass)	
	E1(GPa)	$\sigma_1$ (MPa)	E2(GPa)	$\sigma_2$ (MPa)	G12(GPa)	$\tau_{12max}$ (MPa)
A (δεν ποντίστηκε)	55.1	638.6	17.7	44.2	4.6	37.6
B (10 μήνες)	53.5	651.3	16.8	54.9	4.1	35.5
C (20 μήνες)	47.3	661.7	16.7	46.8	3.8	35.1
D (35 μήνες)	53.8	605.4	16.9	41.7	3.9	34.5
<b>Average</b>	52.4	639.3	17.0	46.9	4.1	35.7
<b>Μηδενική υπόθεση</b>	Δεν απορρίπτεται	Δεν απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Απορρίπτεται	Απορρίπτεται

Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός πως για το σύνθετο υλικό από carbon fibers 12K στις 90° (κύλινδρος 3) όπως επίσης και για το υλικό από carbon fibers 60K στις 90° (κύλινδρος 4) η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται για το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ , καθώς όπως φαίνεται μειώνεται κυρίως στο χρονικό διάστημα μεταξύ 10 και 20 μηνών και έπειτα παραμένει σταθερό. Για τα ίδια υλικά το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$  δεν φαίνεται να επηρεάζεται σε βαθμό στατιστικής σημαντικότητας.

Επίσης για το σύνθετο υλικό από glass fibers στις 90° (κύλινδρος 7) το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και η τάση θραύσης  $\sigma_1$ , δεν φαίνεται να αλλοιώνονται στατιστικά σημαντικά από το θαλάσσιο περιβάλλον. Ακόμα, το  $E_2$  και το  $\sigma_2$ , κάθετα στις ίνες, δείχνουν να επηρεάζονται κυρίως κατά τους πρώτους 10 μήνες αλλά στους 35 δεν δείχνουν σημαντική διαφορά από τα αρχικά τους επίπεδα.

Αξίζει να σημειωθεί πως πριν τις δοκιμές τα δοκίμια είχαν υποστεί διαδικασία ξήρανσης και σύμφωνα με τους A. Papadakis, G. Konstantinidis και N. Tsouvalis (2020) η υγρασία δεν είχε προχωρήσει στο εσωτερικό τους.

## 7.2. Ανάλυση των αποτελεσμάτων των δοκιμών B&T

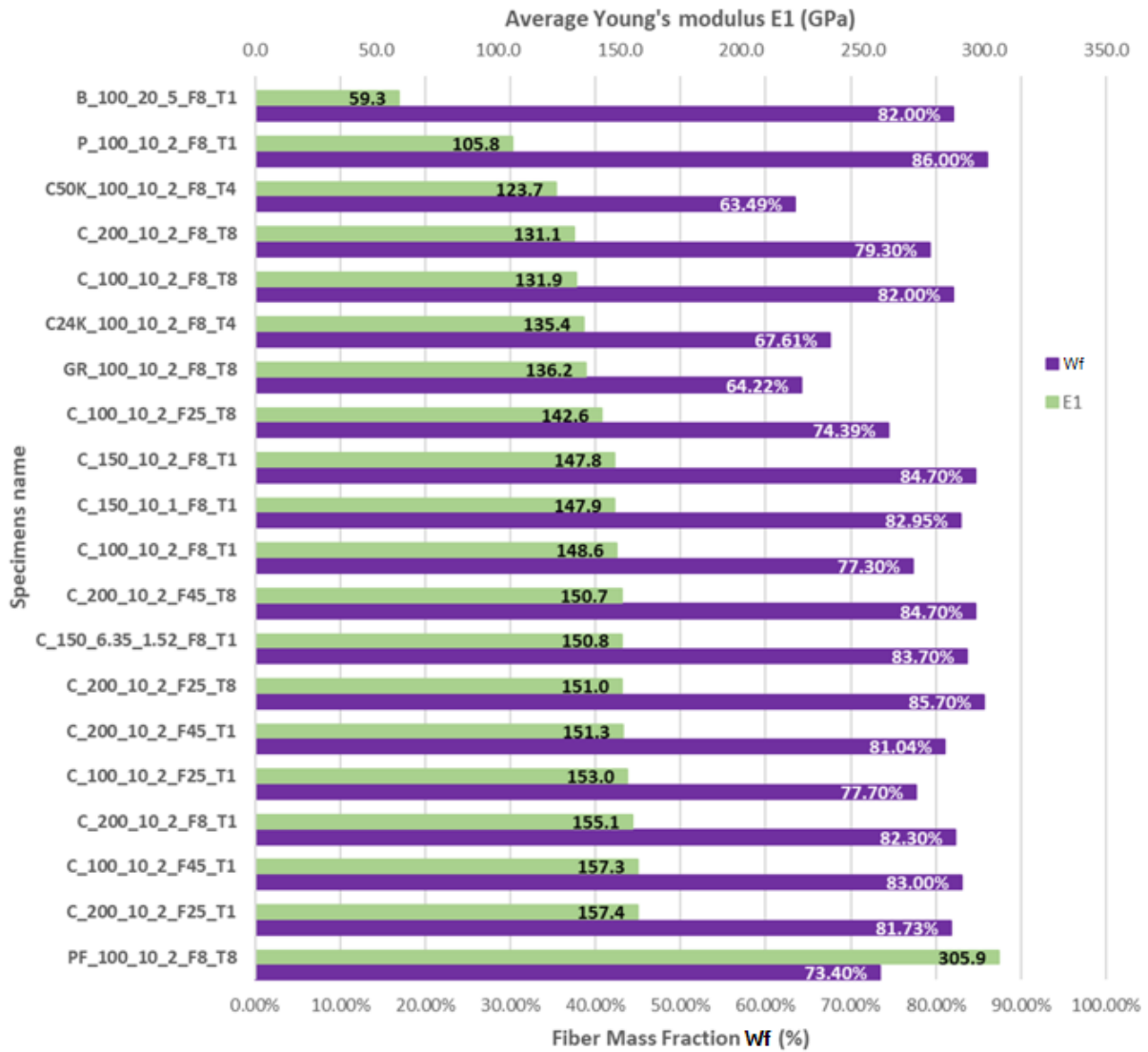
Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα δοκίμια B&T είναι αρκετά ώστε να γίνει μία εκτίμηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων από σύνθετο υλικό. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκαν τα ραβδογράμματα σε περιπτώσεις εξέτασης ποιοτικών παραμέτρων όπως είναι το υλικό των ινών ή ρητίνης, και γραφήματα για τις ποσοτικές παραμέτρους όπως είναι ο αριθμός των tows και η δύναμη τάνυσης. Επισημαίνεται ότι μία πολυπαραμετρική στατιστική ανάλυση δεν θα ήταν αξιόπιστη, καθώς οι εξεταζόμενες παράμετροι είναι πολλές και ο αριθμός των παρατηρήσεων είναι σχετικά μικρός. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τα δακτυλίδια που δεν δοκιμάστηκαν στην παρούσα εργασία λήφθηκαν από προηγούμενη διπλωματική εργασία πάνω στο ίδιο θέμα (Θεμελάκης, 2017).

Οι παράμετροι οι οποίες εξετάζονται είναι οι εξής:

- Υλικό κατασκευής (Graphene enhanced resin, Pitch fibers, Carbon fibers 24K and 50K, Basalt fibers)
- Διάμετρος κυλίνδρου (200, 150 και 100 mm)
- Πλάτος δακτυλίου ( 6.35, 10 και 20 mm)
- Πάχος δακτυλίου (1 και 2 mm)
- Δύναμη τάνυσης ινών (45, 25 και 8 N)
- Αριθμός συστάδων ινών (1, 4 και 8 tows)
- Περιεκτικότητα σε ίνες κατά βάρος

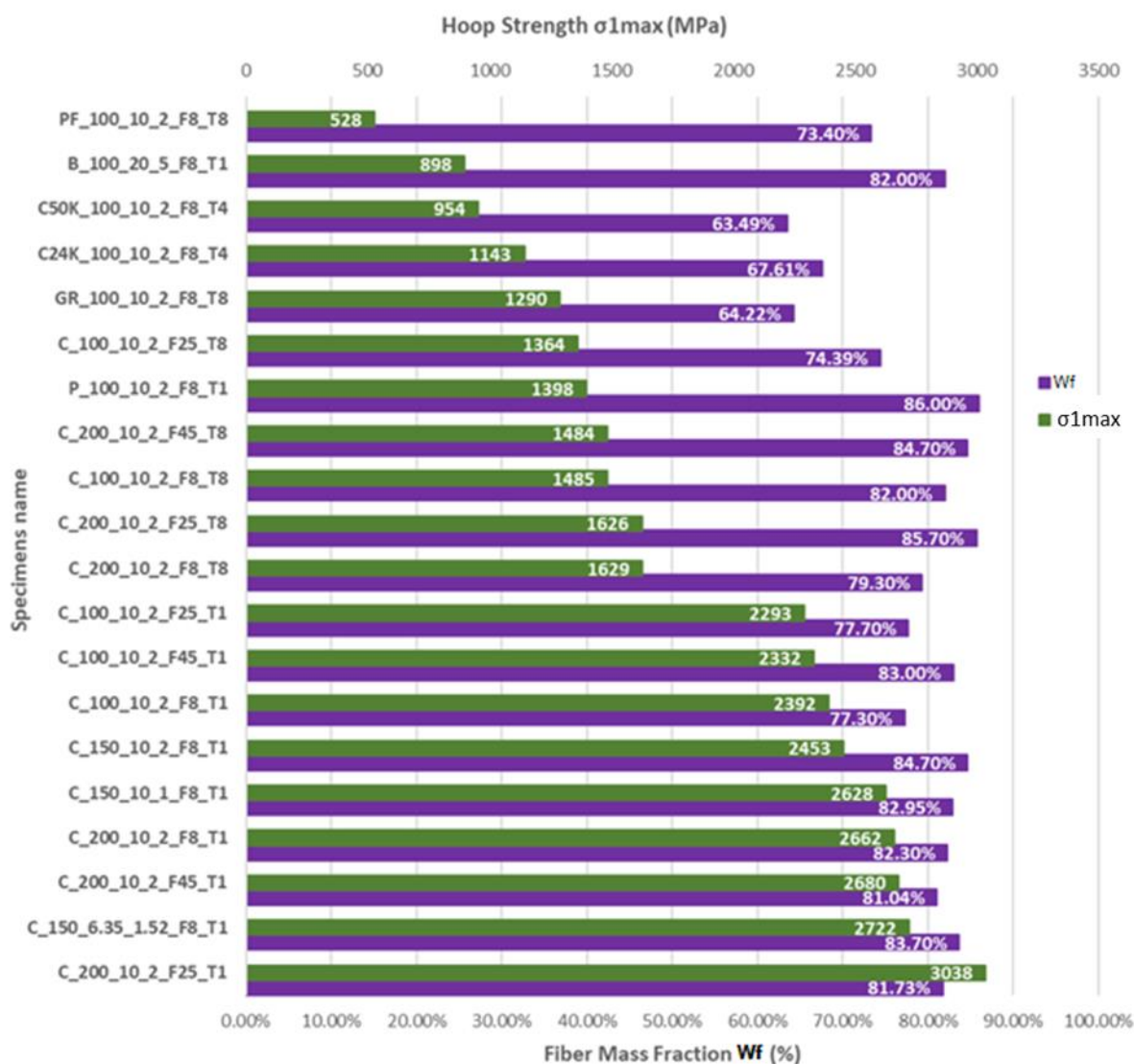
Υπενθυμίζεται πως η ονοματολογία του κάθε δοκιμίου ακολουθεί με την παραπάνω σειρά τον προσδιορισμό της κάθε παραμέτρου. Ακολουθούν τα ραβδογράμματα με όλα τα δοκίμια στο σχήμα 7.2 και 7.3, στα οποία φαίνεται πως επηρεάζεται το μέτρο ελαστικότητας και η τάση θραύσης από την περιεκτικότητα σε ίνες.

### Effect of Fiber Mass Fraction on Young's Modulus E1



Σχήμα 7.2 Ραβδόγραμμα ένδειξης μέτρου ελαστικότητας και περιεκτικότητας σε ίνες των δακτυλίων από σύνθετο υλικό.

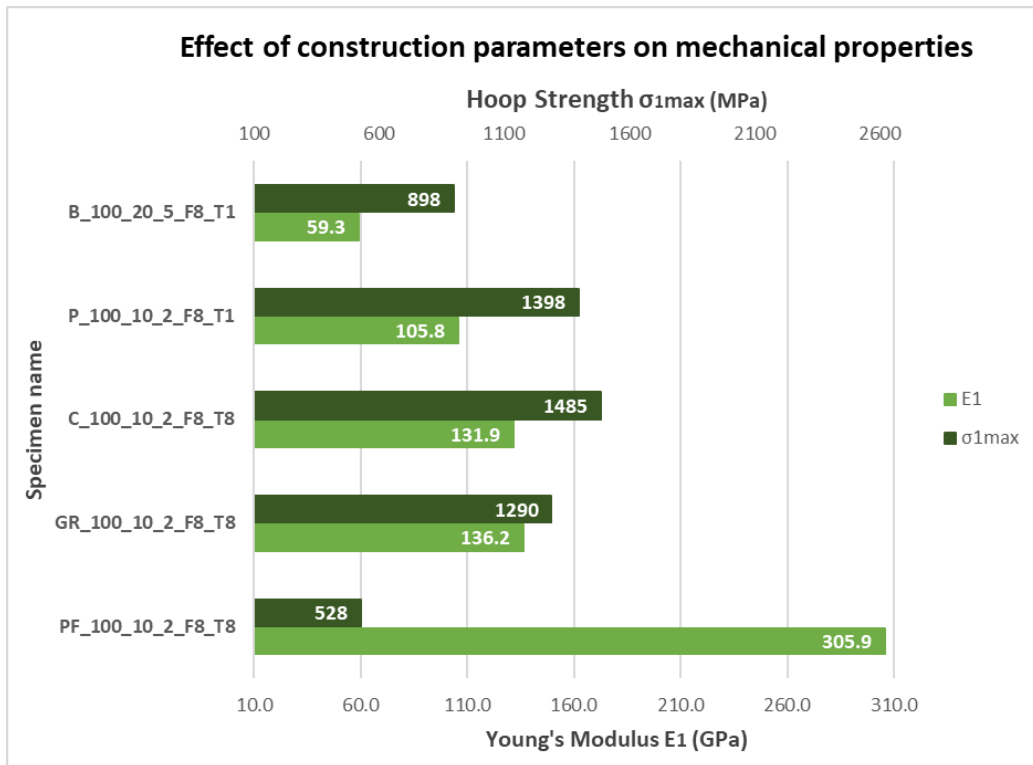
### Effect of fiber mass fraction on Hoop Strength $\sigma_{1max}$



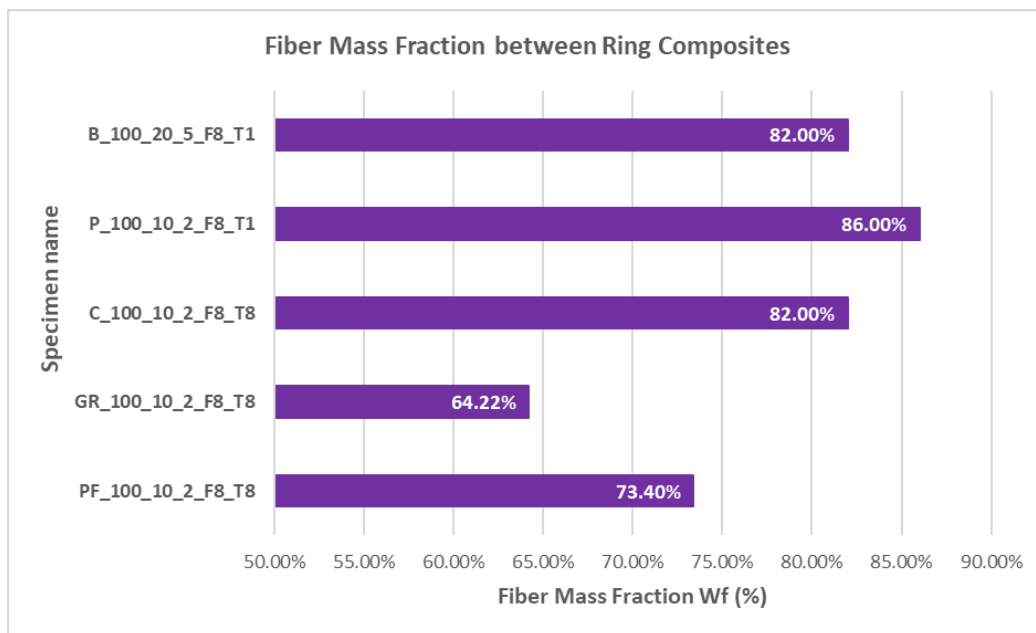
Σχήμα 7.3 Ραβδόγραμμα ένδειξης τάσης θραύσης και περιεκτικότητας σε ίνες των δακτυλίων από σύνθετο υλικό.

Από τα παραπάνω ραβδογράμματα (σχήμα 7.2 και 7.3), παρατηρείται πως τα υλικά με τυλιγμένα με 1 tow παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη τάση θραύσης. Επίσης τα υλικά με χαμηλή περιεκτικότητα σε ίνες (C24K\_100\_10\_2\_F8\_T4, C50K\_100\_10\_2\_F8\_T4, GR\_100\_10\_2\_F8\_T8 <70%) τείνουν να παρουσιάζουν χαμηλότερη τάση θραύσης και μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά. Παρόλα αυτά δεν μπορεί να υπάρξει ασφαλής εκτίμηση της επίδρασης αυτής καθώς μεταξύ των υλικών αλλάζουν πολλές παράμετροι οι οποίες θα μπορούσαν να επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες.

Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά ραβδογράμματα και γραφήματα με πίνακες, σε υλικά ανά δύο ή τρία, ώστε να αλλάζει μόνο μία κατασκευαστική παράμετρος μεταξύ τους. Έτσι σχολιάζεται η επίδραση της κάθε παραμέτρου χωριστά στο μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και στη τάση θραύσης  $\sigma_{1max}$  παράλληλα στις ίνες ενίσχυσης.



Σχήμα 7.4 Ραβδόγραμμα επίδρασης υλικού ινών στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων



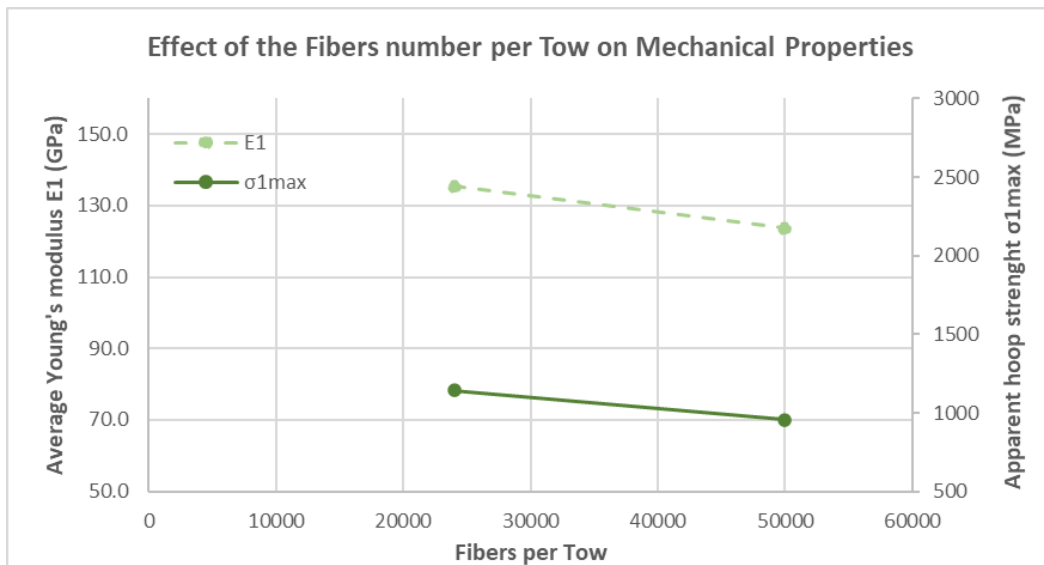
Σχήμα 7.5 Ραβδόγραμμα ένδειξης περιεκτικότητας σε ίνες δακτυλίων

Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4 και 7.5 το υλικό των ινών ενίσχυσης είναι πολύ σημαντικό κριτήριο για το μέτρο ελαστικότητας, καθώς όπως είναι αναμενόμενο, οι ίνες ενίσχυσης παραλαμβάνουν το φορτίο. Αν και τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά δεν παραμένουν ίδια, η διαφορά είναι φανερά. Μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζει το υλικό με pitch fibers, ακολουθούν τα υλικά με ενίσχυση από ίνες άνθρακα και προεμποτισμένες ίνες, και τέλος το υλικό ενισχυμένο από ίνες βασάλτη έχει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας.

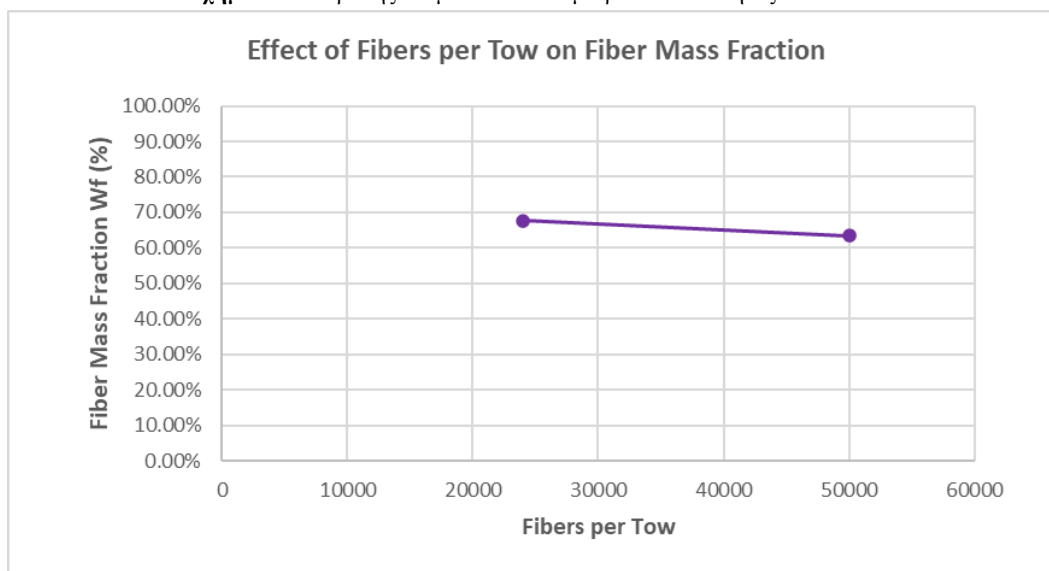
Στη συνέχεια παρατίθενται συγκριτικά ραβδογράμματα και γραφήματα με πίνακες, σε υλικά ανά δύο ή τρία, ώστε να αλλάζει μόνο μία κατασκευαστική παράμετρος μεταξύ τους. Έτσι σχολιάζεται η επίδραση της κάθε παραμέτρου χωριστά στο μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και στη τάση θραύσης  $\sigma_{1max}$  παράλληλα στις ίνες ενίσχυσης.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.30** Επίδραση δεσμών ινών στο μέτρο ελαστικότητας δακτυλίων

Specimen name	E1(GPa)	$\sigma_{1max}$ (Mpa)	Fibers per Tow	Wf (%)
C24K_100_10_2_F8_T4	135.4	1143	24000	67.61%
C50K_100_10_2_F8_T4	123.7	954	50000	63.49%



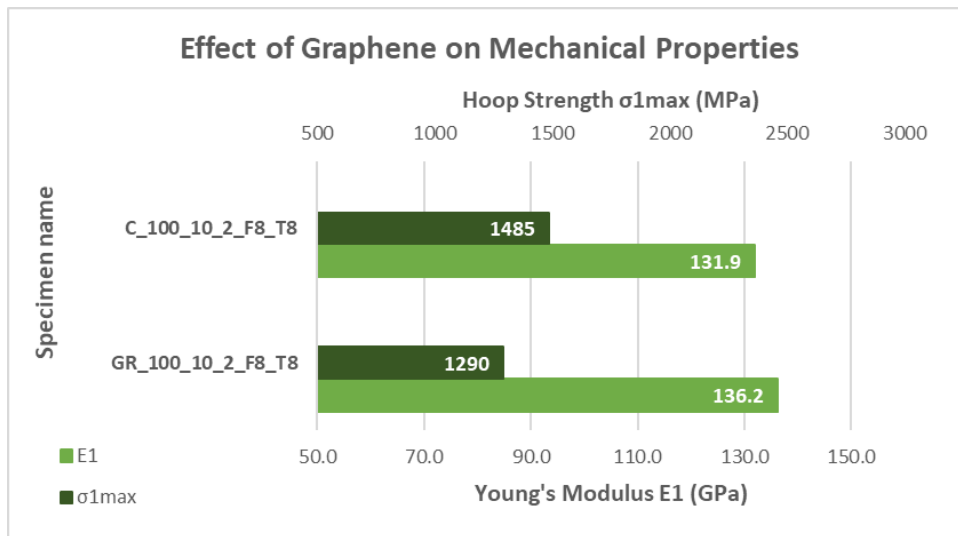
**Σχήμα 7.7** επίδρασης δεσμών ινών στο μέτρο ελαστικότητας δακτυλίων



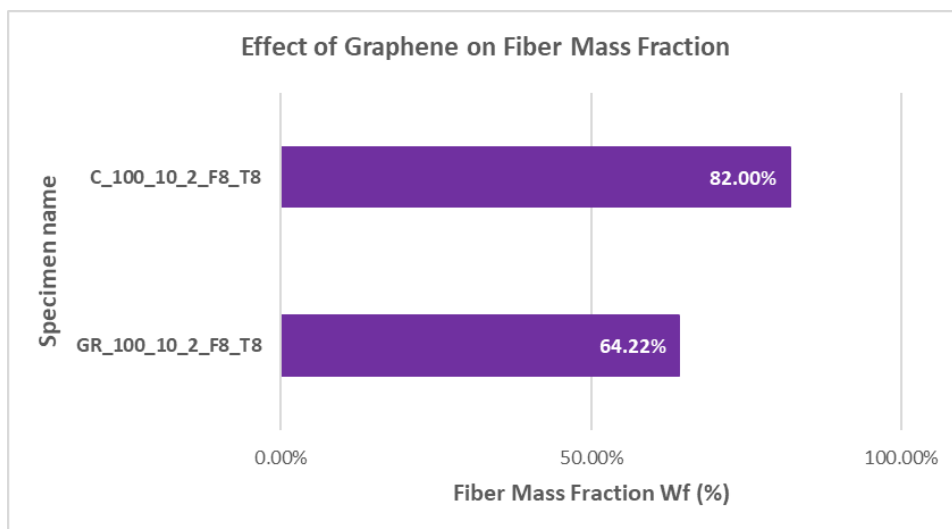
**Σχήμα 7.8** Γράφημα επίδρασης δεσμών ινών στη περιεκτικότητα σε ίνες

Στα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται αυξημένο μέτρο ελαστικότητας και τάση θραύσης στο υλικό με ίνες άνθρακα 24K σε σχέση με το υλικό με 50K. Επίσης φαίνεται μικρή αύξηση

στο ποσοστό περιεκτικότητας των ινών στο υλικό, γεγονός που θα μπορούσε να συμβάλει και στην αύξηση των παραπάνω ιδιοτήτων.



Σχήμα 7.9 Ραβδόγραμμα επίδρασης γραφενίου στο μέτρο ελαστικότητας δακτυλίων



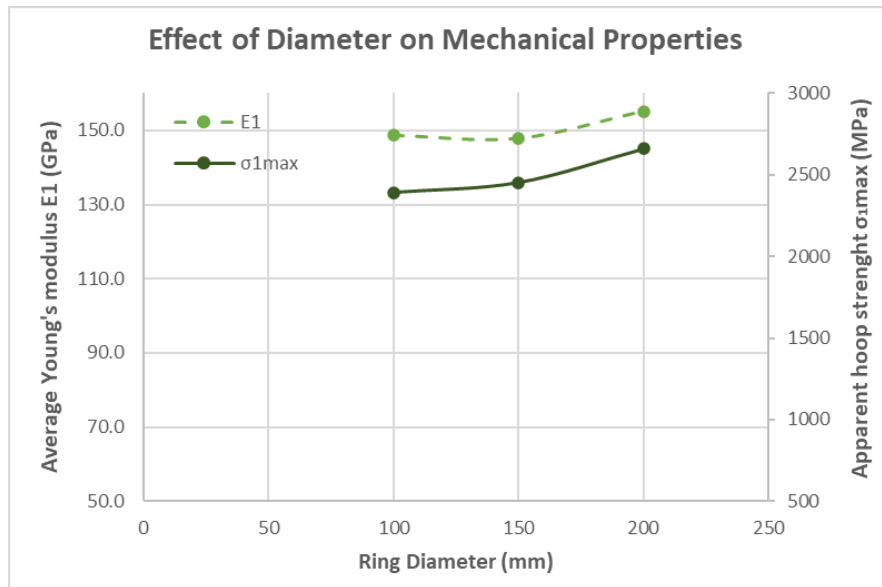
Σχήμα 7.10 Ραβδόγραμμα επίδρασης γραφενίου στη περιεκτικότητα σε ίνες

Στο παραπάνω ραβδόγραμμα παρατηρείται μικρή αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας για το δοκίμιο στο οποίο έχει προστεθεί γραφένιο στο σύστημα ρητίνης του, σε σχέση με το υλικό από απλό σύστημα ρητίνης. Επίσης παρατηρείται μείωση στη τάση θραύσης για το υλικό με γραφένιο, το οποίο έχει και αρκετά μειωμένη περιεκτικότητα σε ίνες. Οι διαφορές αυτές είναι σχετικά μικρές ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα.

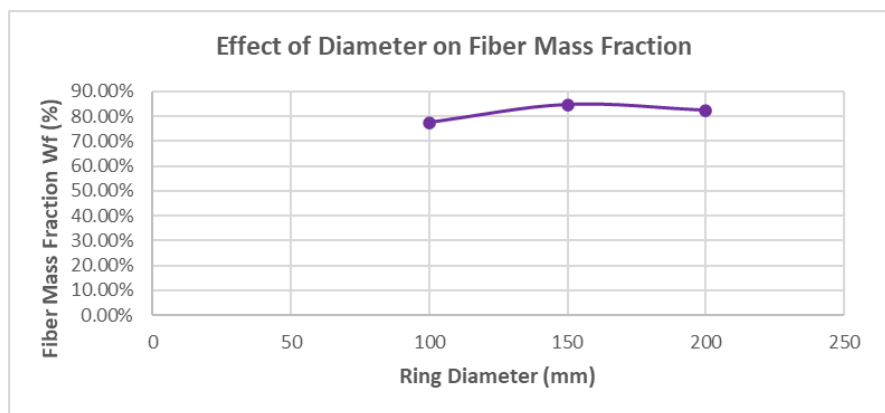


**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.31** Επίδραση διαμέτρου στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1(GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Diameter (mm)	Wf (%)
C_100_10_2_F8_T1	148.6	2392	100	77.30%
C_150_10_2_F8_T1	147.8	2453	150	84.70%
C_200_10_2_F8_T1	155.1	2662	200	82.30%



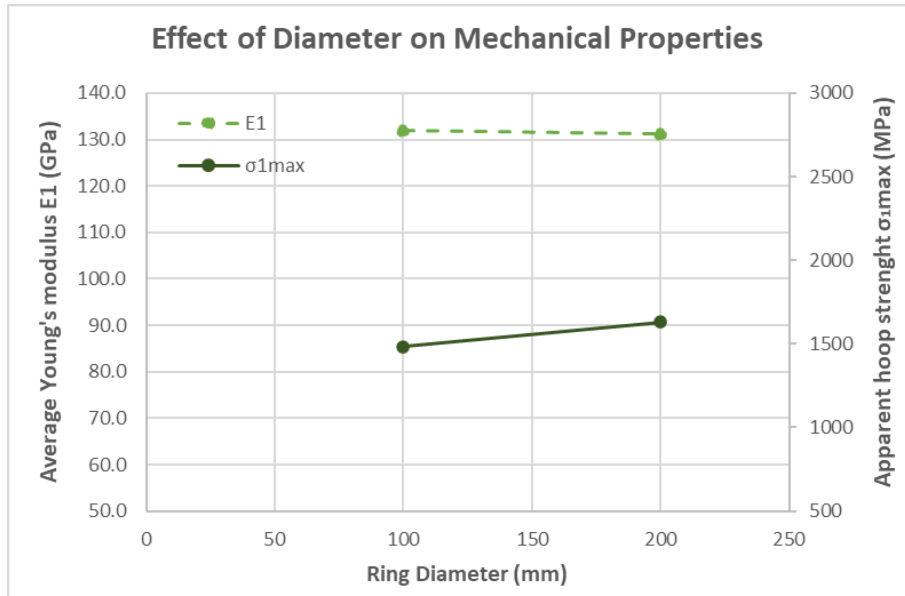
**Σχήμα 7.11** Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



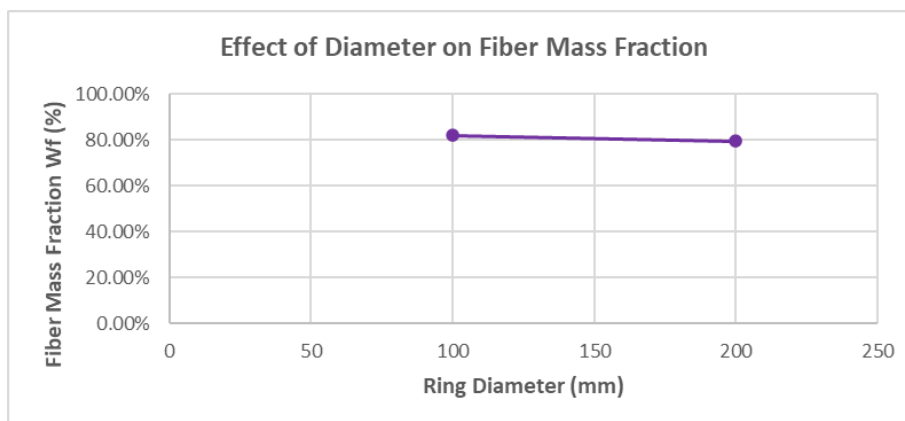
**Σχήμα 7.12** Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.32** Επίδραση διαμέτρου στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1(GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Diameter (mm)	Wf (%)
C_100_10_2_F8_T8	131.9	1485	100	82.00%
C_200_10_2_F8_T8	131.1	1629	200	79.30%



**Σχήμα 7.13** Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων

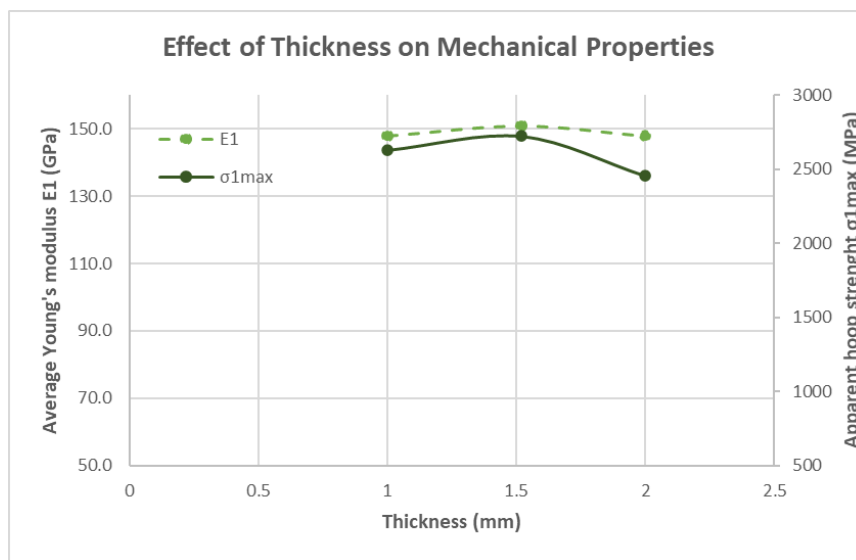


**Σχήμα 7.14** Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

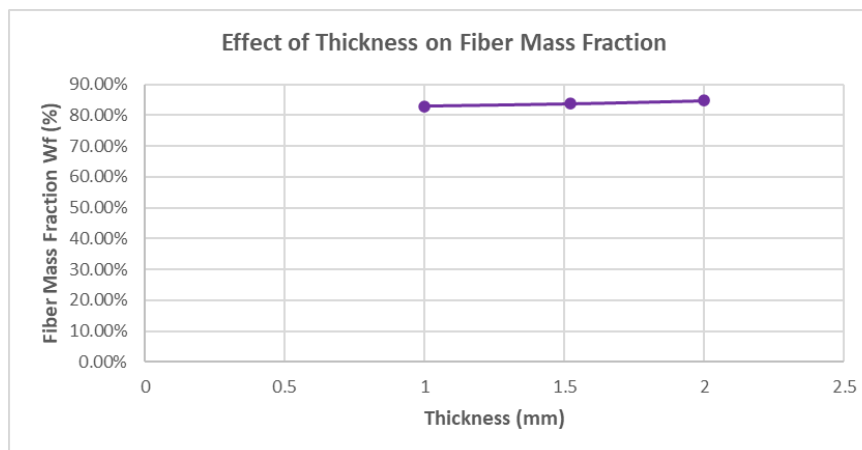
Στα παραπάνω σχήματα 7.13 και 7.14 συγκρίνεται η επίδραση της διαμέτρου ενός δακτυλίου, στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης, όταν τα υπόλοιπα κατασκευαστικά στοιχεία παραμένουν ίδια. Δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά στο  $E_1$  και πολύ μικρή αύξηση της τάσης θραύσης παρατηρείται σε δοκίμια μεγαλύτερης διαμέτρου.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.32** Επίδραση πάχους στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Thickness (mm)	Wf(%)
C_150_10_1_F8_T1	147.9	2628	1	82.95%
C_150_6.35_1.52_F8_T1	150.8	2722	1.52	83.70%
C_150_10_2_F8_T1	147.8	2453	2	84.70%



**Σχήμα 7.15** Γράφημα επίδρασης πάχους και πλάτους στο μέτρο ελαστικότητας δακτυλίων

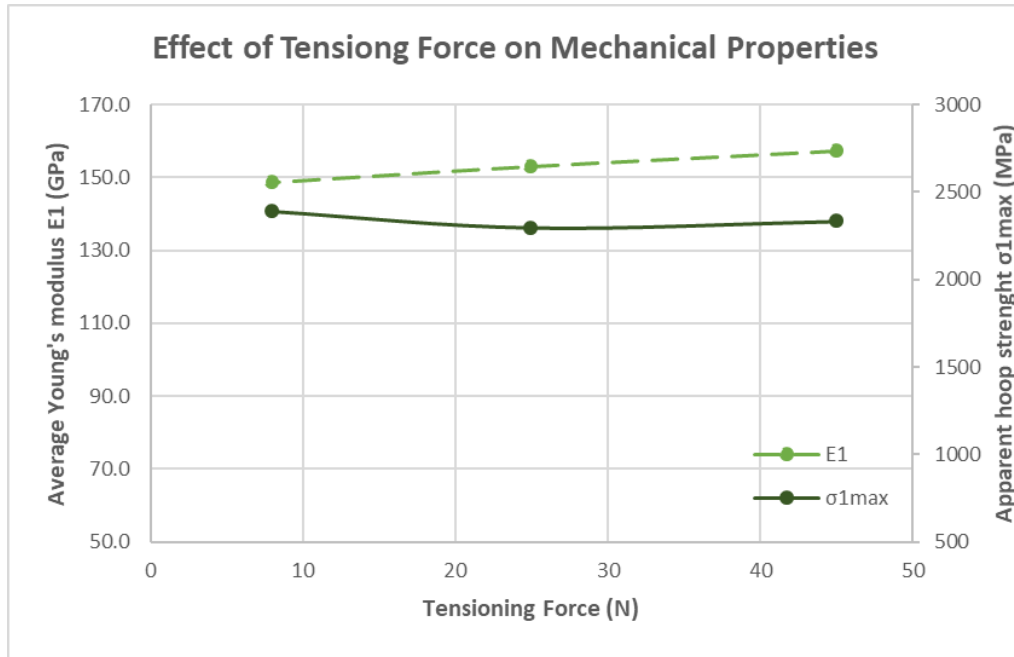


**Σχήμα 7.16** Γράφημα επίδρασης πάχους και πλάτους στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

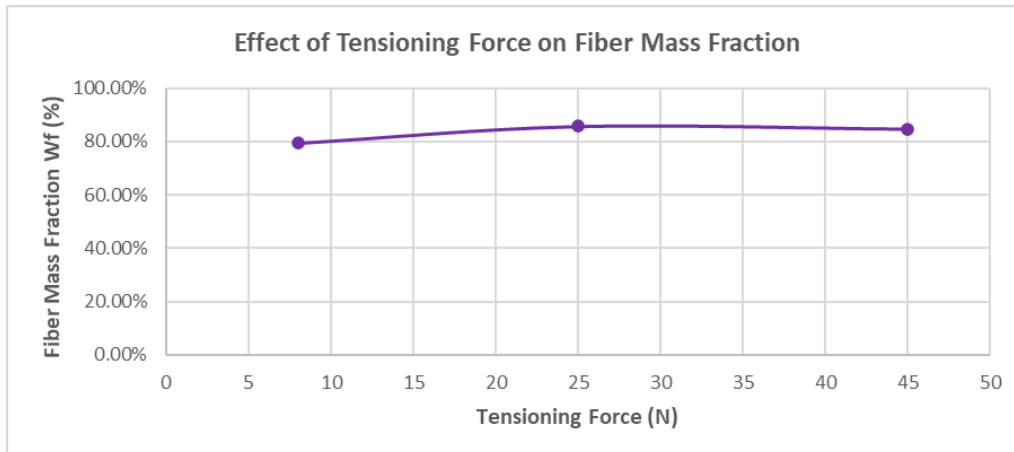
Από τα παραπάνω γραφήματα (σχήμα 7.15 και 7.16) παρατηρείται μικρή μείωση της τάσης θραύσης σε δακτυλιοειδή δοκίμια από ίνες άνθρακα, όταν το πάχος του δοκιμίου είναι αυξημένο.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.33** Επίδραση δύναμης τάνυσης στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tensioning Force (N)	Wf (%)
C_100_10_2_F45_T1	157.3	2332	45	83.00%
C_100_10_2_F25_T1	153.0	2293	25	77.70%
C_100_10_2_F8_T1	148.6	2392	8	77.30%



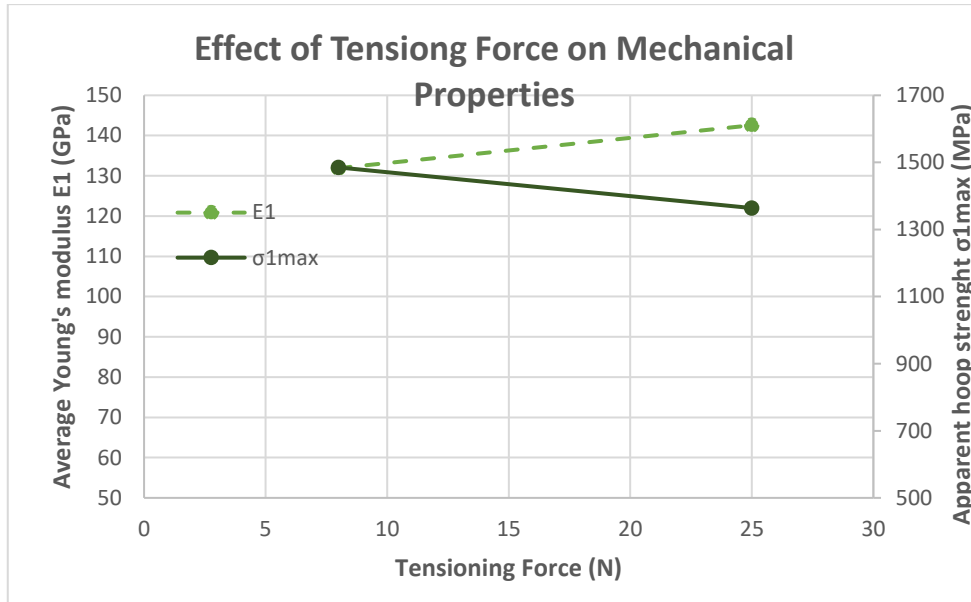
**Σχήμα 7.17** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνυσης στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



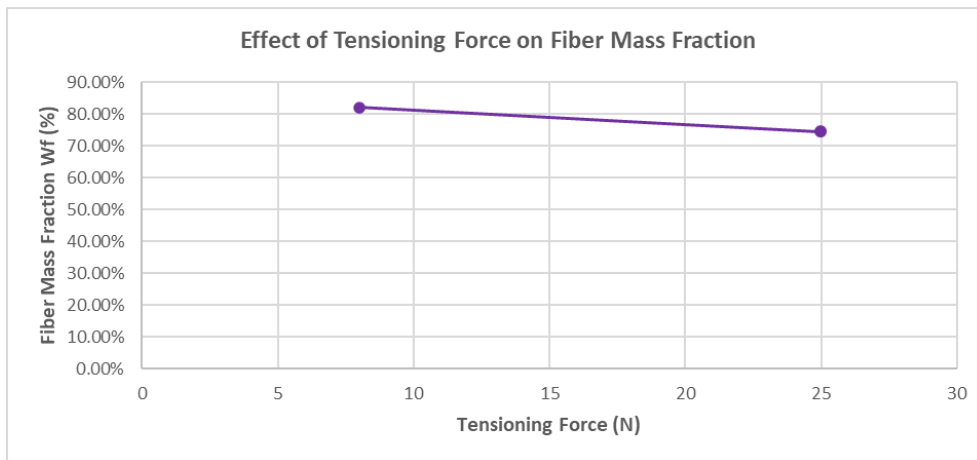
**Σχήμα 7.18** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνυσης στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.34** Επίδραση δύναμης τάνσης στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tensioning Force (N)	Wf
C_100_10_2_F8_T8	131.9	1485	8	82.00%
C_100_10_2_F25_T8	142.6	1364	25	74.39%



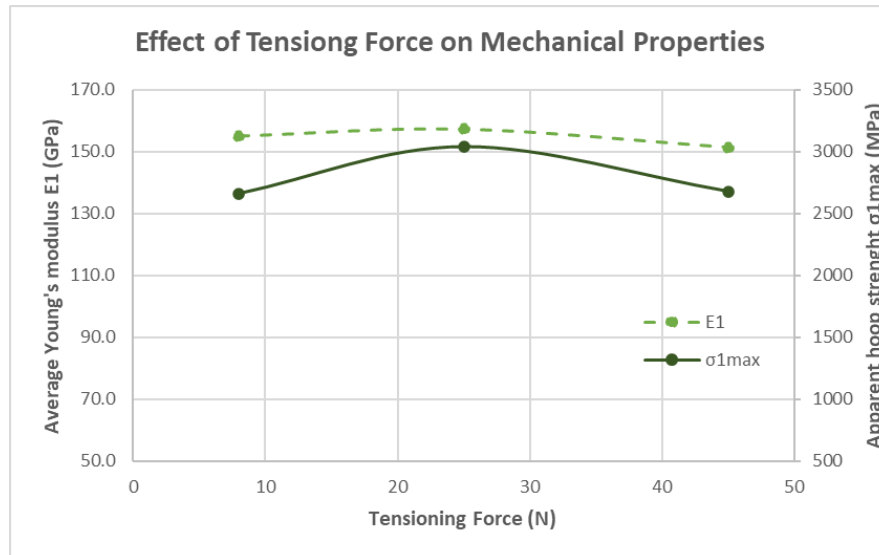
**Σχήμα 7.19** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνσης στο μέτρο ελαστικότητας και τάση θραύσης δακτυλίων



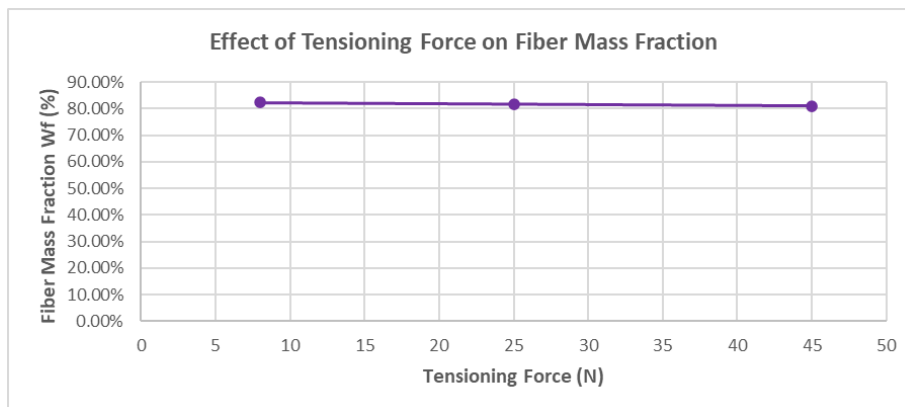
**Σχήμα 7.20** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνσης στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.35** Επίδραση δύναμης τάνυσης στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tensioning Force (N)	Mf (%)
C_200_10_2_F8_T1	155.1	2662	8	82.30%
C_200_10_2_F25_T1	157.4	3038	25	81.73%
C_200_10_2_F45_T1	151.3	2680	45	81.04%



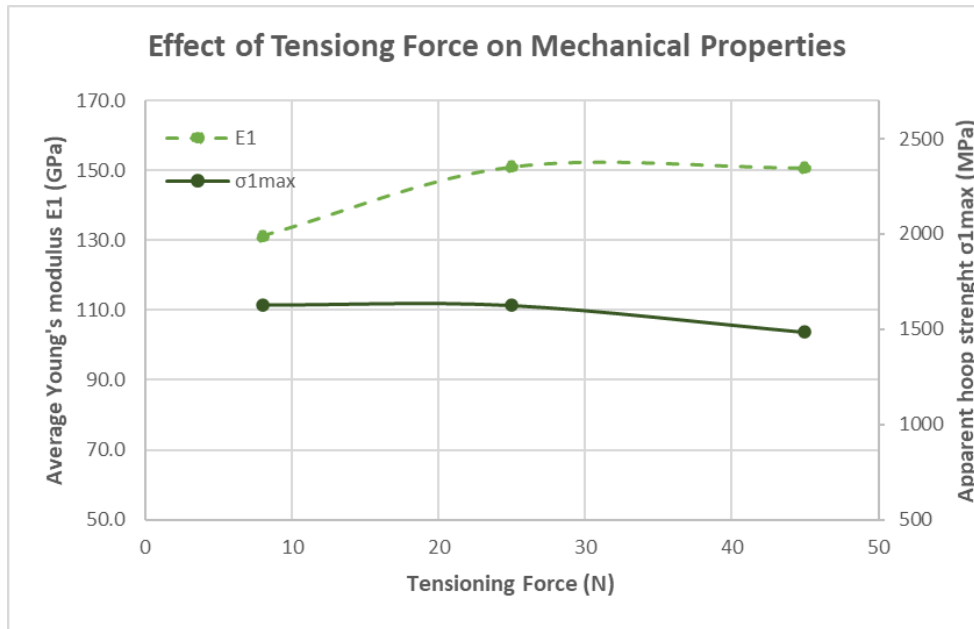
**Σχήμα 7.21** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνυσης στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



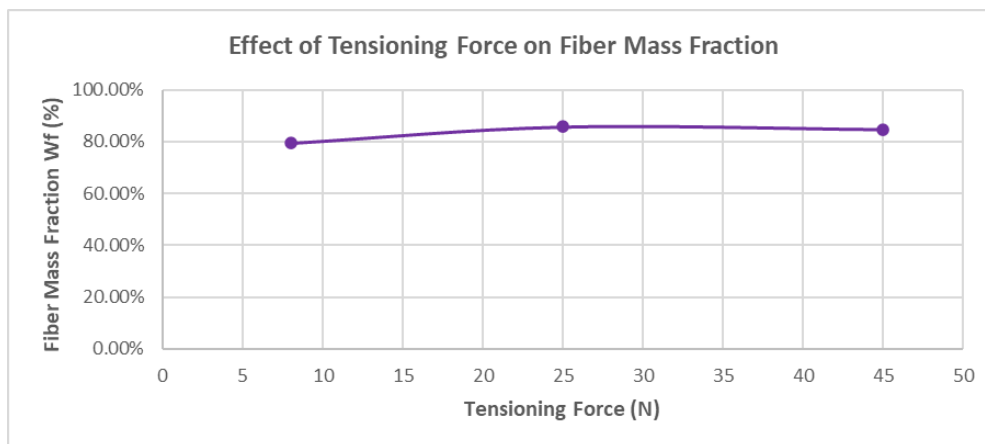
**Σχήμα 7.22** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνυσης στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.36** Επίδραση δύναμης τάνσης στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tensioning Force (N)	Wf (%)
C_200_10_2_F8_T8	131.1	1629	8	79.30%
C_200_10_2_F25_T8	151.0	1626	25	85.70%
C_200_10_2_F45_T8	150.7	1484	45	84.70%



**Σχήμα 7.23** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνσης στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων

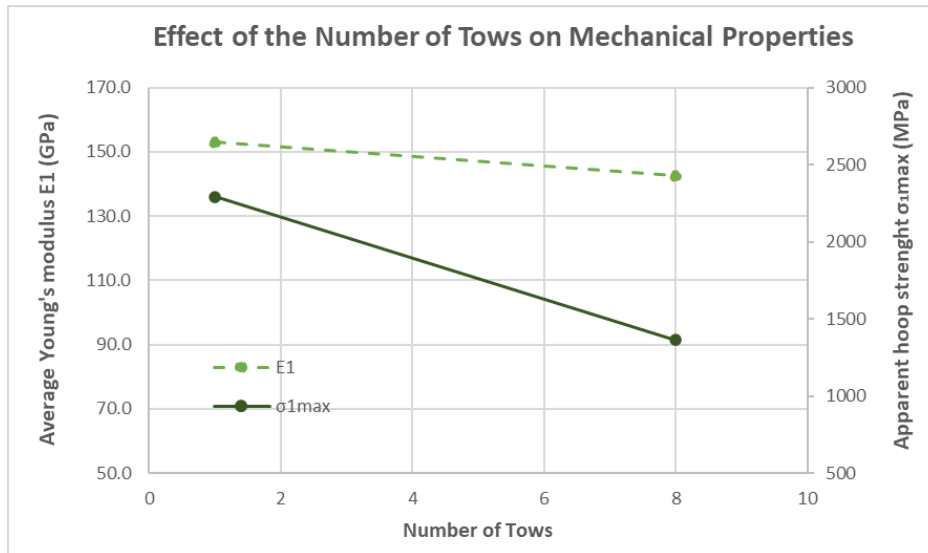


**Σχήμα 7.24** Γράφημα επίδρασης δύναμης τάνσης στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

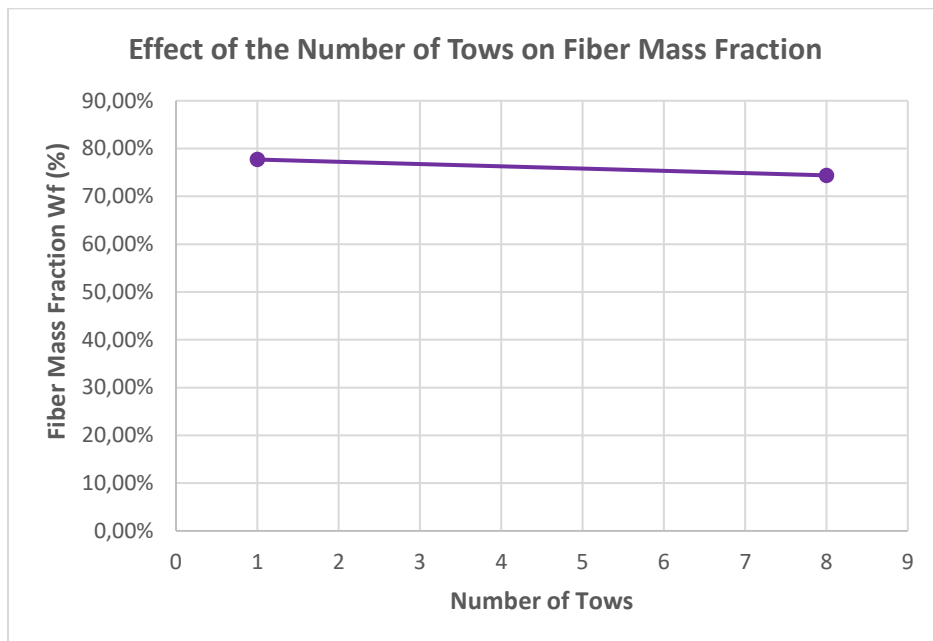
Από τα παραπάνω γραφήματα (σχήματα 7.17 – 7.24) φαίνεται ότι οι δακτύλιοι κατασκευασμένοι με δύναμη τάνσης 25N τείνουν να εμφανίζουν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας. Το σχήμα 7.17 αποτελεί εξαίρεση στη προηγούμενη παρατήρηση καθώς το δοκίμιο τυλιγμένο με δύναμη τάνσης 45N εμφανίζει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το δοκίμιο με 25Nt δύναμη. Στη περίπτωση όμως αυτή παρατηρείται και σχετικά μεγάλη διαφορά στη περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα μεταξύ των δύο δοκιμίων. Για τη τάση θραύσης δεν παρατηρείται κάποια τάση.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.37** Επίδραση αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tows	Wf(%)
C_100_10_2_F25_T1	153.0	2293	1	77.70%
C_100_10_2_F25_T8	142.6	1364	8	74.39%



**Σχήμα 7.25** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων

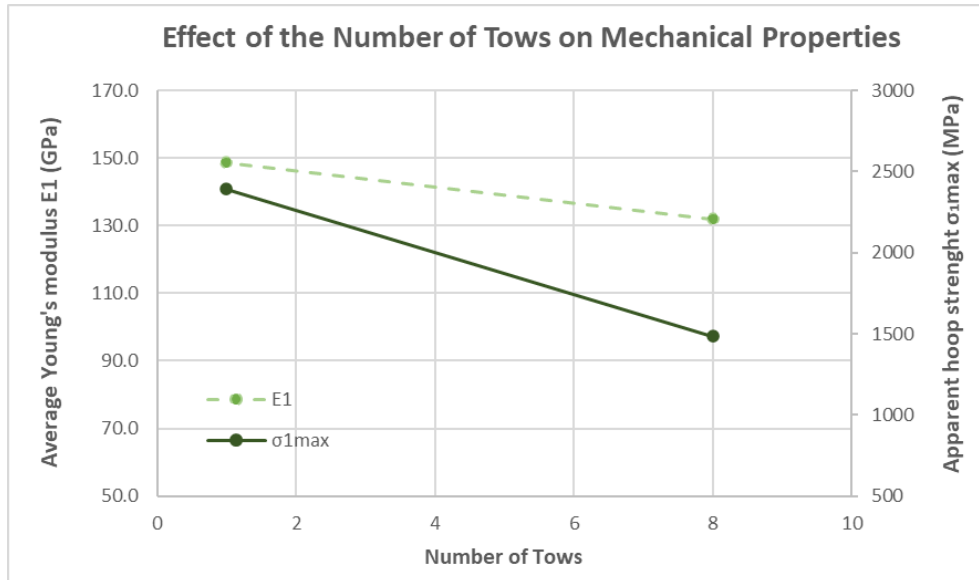


**Σχήμα 7.26** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

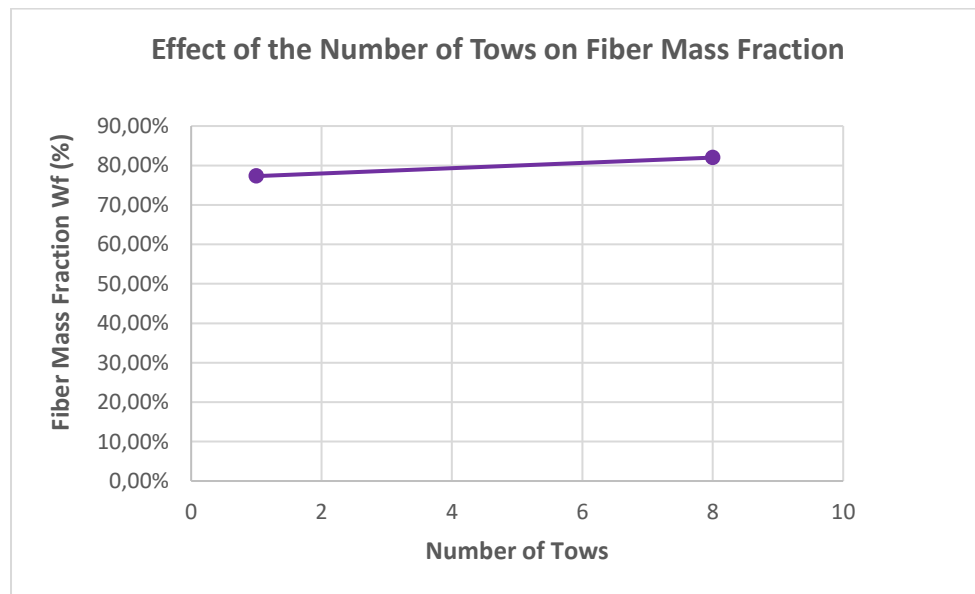


**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.38** Επίδραση αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tows	Wf(%)
C_100_10_2_F8_T8	131.9	1485	8	82.00%
C_100_10_2_F8_T1	148.6	2392	1	77.30%



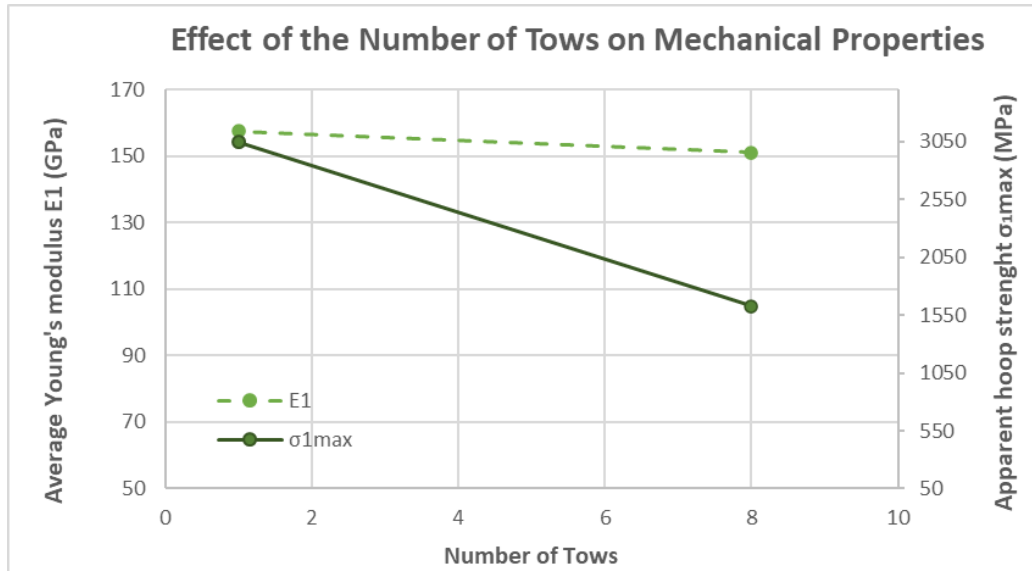
**Σχήμα 7.27** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



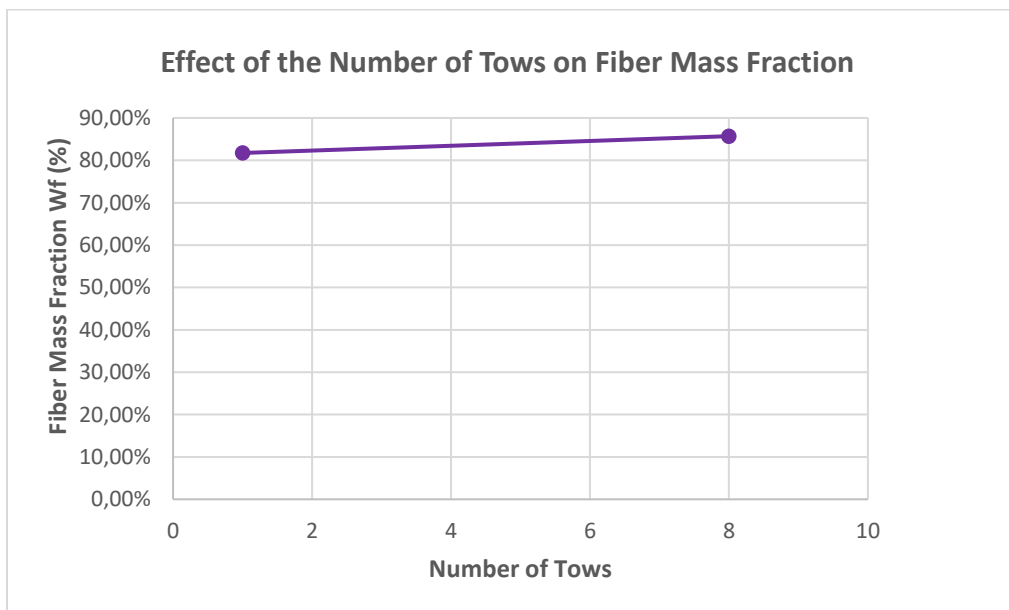
**Σχήμα 7.28** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.39** Επίδραση αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tows	Wf(%)
C_200_10_2_F25_T8	151.0	1626	8	85.70%
C_200_10_2_F25_T1	157.4	3038	1	81.73%



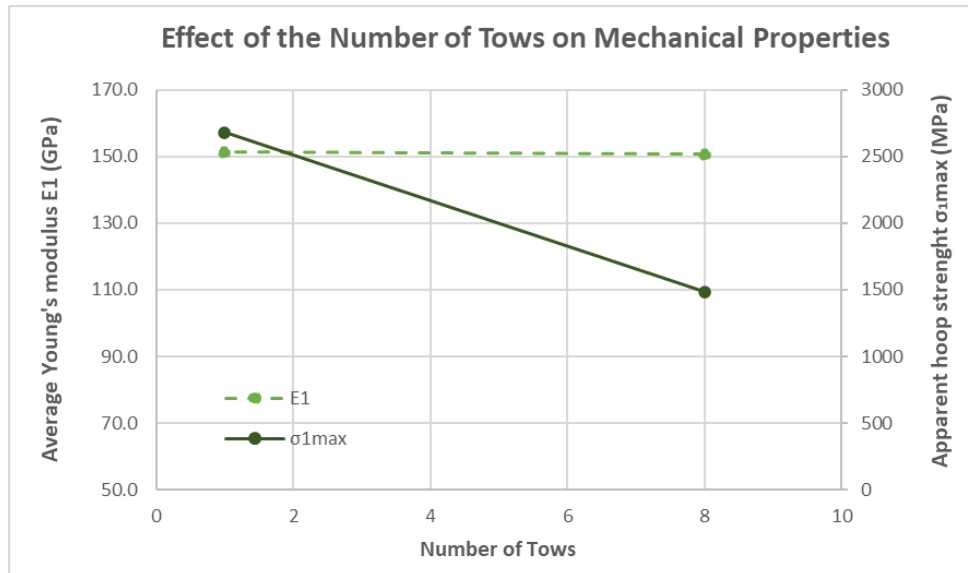
**Σχήμα 7.29** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



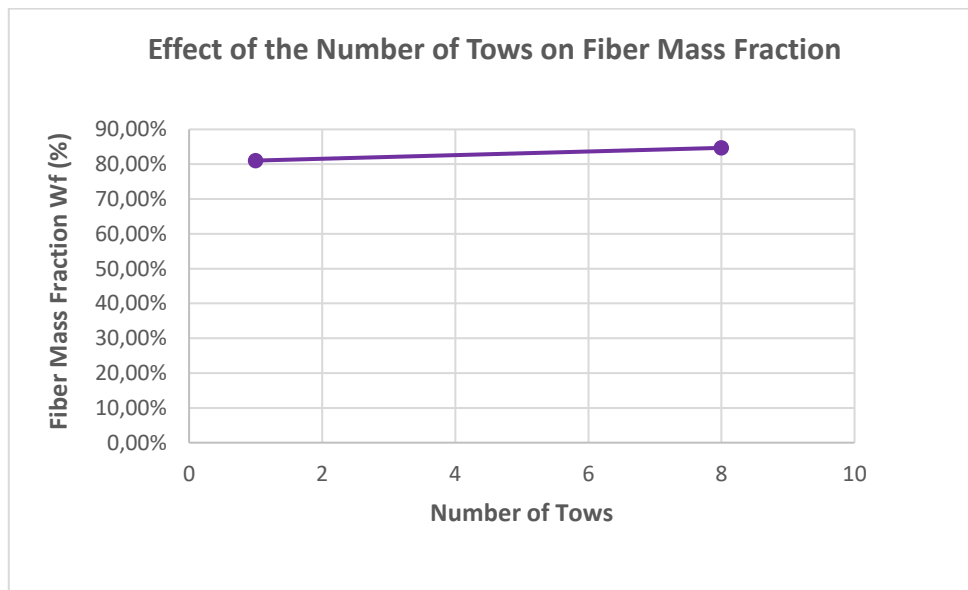
**Σχήμα 7.30** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.40** Επίδραση tows στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tows	Wf(%)
C_200_10_2_F45_T8	150.7	1484	8	84.70%
C_200_10_2_F45_T1	151.3	2680	1	81.04%



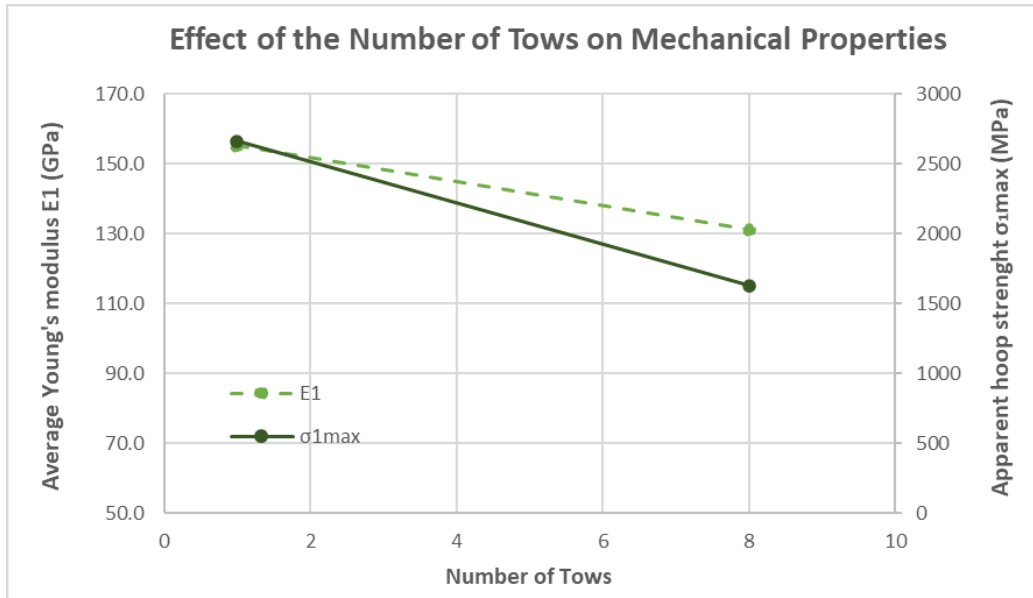
**Σχήμα 7.31** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



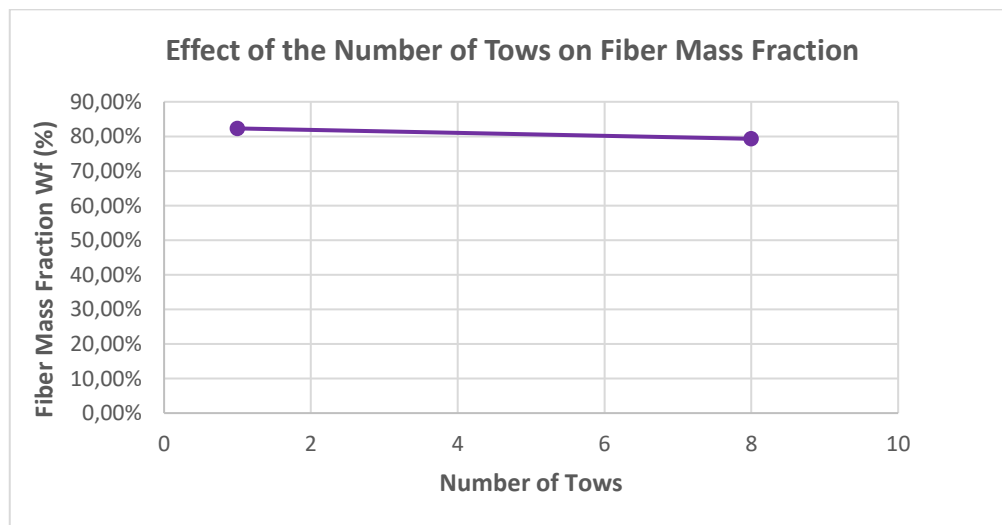
**Σχήμα 7.32** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7.41** Επίδραση αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και στη τάση θραύσης δακτυλίων

Specimen name	E1 (GPa)	$\sigma_{1max}$ (MPa)	Tows	Wf(%)
C_200_10_2_F8_T1	155.1	2662	1	82.30%
C_200_10_2_F8_T8	131.1	1629	8	79.30%



**Σχήμα 7.33** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στο μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης δακτυλίων



**Σχήμα 7.34** Γράφημα επίδρασης αριθμού tows στη περιεκτικότητα σε ίνες δακτυλίων

Οι συστάδες ινών όπως φαίνεται στα παραπάνω γραφήματα (σχήμα 7.25 – 7.34), ίσως παίζουν σημαντικό ρόλο στον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων ενός υλικού. Σε δοκίμια διάφορων κατασκευαστικών παραμέτρων τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν με 1 δέσμη ινών, σε σχέση με αυτά που κατασκευάστηκαν με 8, εμφάνισαν μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας σε κάθε περίπτωση. Ακόμα πιο έντονη φαίνεται η αύξηση της τάσης θραύσης σε δοκίμια κατασκευασμένα με 1 tow. Σε όλες τις περιπτώσεις οι περιεκτικότητες σε ίνες, των υπό σύγκριση υλικών, ήταν πολύ κοντά. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις μεγάλες διαφορές που παρατηρούνται σε  $E_1$  και  $\sigma_{1max}$  ενισχύει τη παραπάνω διαπίστωση.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων από σύνθετο υλικό, καθώς και οι παράμετροι που επιδρούν σε αυτές. Μελετήθηκαν ευθύγραμμα και δακτυλιοειδή δοκίμια που προέκυψαν από κυλίνδρους κατασκευασμένους με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, με σκοπό να εκτιμηθούν το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και η μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_1$  κατά τη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών, το μέτρο ελαστικότητας  $E_2$  και η μέγιστη τάση θραύσης  $\sigma_2$  σε διεύθυνση κάθετα των ινών, το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  και η μέγιστη τάση θραύσης σε διάτμηση  $\tau_{12}$  στο επίπεδο 1-2.

Για τη μελέτη της επίδρασης του θαλάσσιου περιβάλλοντος στις μηχανικές σταθερές, κατασκευάστηκαν τέσσερις όμοιες σειρές δοκιμίων από σύνθετο υλικό. Η μία δοκιμάστηκε απευθείας μετά τη κατασκευή της και οι υπόλοιπες τρεις ποντίστηκαν σε βάθος 1000 μέτρων. Ακολούθησε η ανέλκυσή τους σύμφωνα με το πρόγραμμα του πίνακα 8.1, και οι δοκιμές τους.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8.1** Χρονοδιάγραμμα ποντίσεων-ανελκύσεων των ομάδων δοκιμίων.

Ημερημηνία πόντισης	Ημερομηνία ανέλκυσης	Ομάδα	Παραμονή στο νερό (μήνες)
Δεν ποντίστηκαν	-	A	0
30/7/2015	20/5/2016	B	≈10
	07/4/2017	C	≈20
	21/6/2018	D	≈35

Στα δακτυλιοειδή δοκίμια εκτελέστηκε η μέθοδος του διαιρούμενου δίσκου σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D2290 με ελαφρώς παραλλαγμένη διάταξη. Το μέτρο ελαστικότητας μετρήθηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που προτείνεται από τους Yoon et al για την εξάλειψη της επίδρασης της τριβής, στο κατάλληλο εύρος παραμορφώσεων όπως ορίζεται από το πρότυπο ASTM D3039 και τις παρατηρήσεις των Παπαδάκη και Τσούβαλη (2016). Τα ευθύγραμμα δοκίμια δοκιμάστηκαν σε εφελκυσμό με το μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης να υπολογίζονται σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάζεται στο πρότυπο ASTM D3039. Για την εκτίμηση του συντελεστή διάτμησης και της τάσης θραύσης σε διάτμηση ακολουθήθηκε η διαδικασία που ορίζει το πρότυπο ASTM D3518 και οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με τους Τσούβαλη (1998) και Young & Budynas (2002). Ακολούθησε στατιστική ανάλυση ANOVA από την οποία εξάγονται οι παρακάτω παρατηρήσεις:

- Στα δοκίμια από carbon fibers 12K και 60K στις 90° (κύλινδροι 3 και 4), το  $E_1$  μειώνεται κατά το χρονικό διάστημα των 10 με 20 μηνών και έπειτα παραμένει σταθερό. Το  $E_2$  φαίνεται να μην επηρεάζεται από το θαλάσσιο περιβάλλον.
- Στα σύνθετα υλικά από carbon fibers 12K στις ±55° (κύλινδρος 5), για το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  και τη μέγιστη τάση θραύσης σε διάτμηση  $\tau_{12}$  η ανάλυση ANOVA δείχνει πως υπάρχει μία σημαντική αύξηση στους 20 μήνες η οποία συνοδεύεται από μείωση στα αρχικά επίπεδα η και περισσότερο στους 35 μήνες.

- Στα σύνθετα υλικά από carbon fibers 60K στις  $\pm 55^\circ$  (κύλινδρος 6), το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  φαίνεται να μειώνεται αρκετά μέχρι τους 35 μήνες, ενώ αντίθετα η μέγιστη τάση θραύσης σε διάτμηση  $\tau_{12}$  δεν επηρεάζεται απαραίτητα.
- Για το σύνθετο υλικό από glass fibers στις  $90^\circ$  (κύλινδρος 7) το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  και η τάση θραύσης  $\sigma_1$ , δεν φαίνεται να αλλοιώνονται στατιστικά σημαντικά από το θαλάσσιο περιβάλλον. Από την άλλη το  $E_2$  και το  $\sigma_2$ , κάθετα στις ίνες, δείχνουν να επηρεάζονται κυρίως κατά τους πρώτους 10 μήνες. Στους 35 μήνες δεν δείχνουν σημαντική διαφορά από τα αρχικά τους επίπεδα.
- Για το σύνθετο υλικό από glass fibers στις  $\pm 55^\circ$  (κύλινδρος 8), το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  και η τάση θραύσης σε διάτμηση  $\tau_{12}$  φαίνεται πως μειώνονται κατά τη παραμονή τους σε βάθος θάλασσας κυρίως κατά τους πρώτους 10 μήνες ενώ έπειτα παραμένουν σταθερά.

Για τη μελέτη των φυσικών ιδιοτήτων σε δακτυλιοειδή δοκίμια αρχικά μετρήθηκε η πυκνότητα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D792. Στη συνέχεια ακολούθησε η μελέτη της περιεκτικότητας των υλικών σε ίνες ενίσχυσης. Οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν είναι οι Procedure A και Procedure B από το πρότυπο ASTM D3171, καθώς και η μέθοδος Image Analysis που περιγράφεται στο Composite Materials Handbook Volume 1: Polymer Matrix Composites - Guidelines for Characterisation of Structural Materials (US Department of Defense, 2002). Ο λόγος που δοκιμάστηκαν και οι τρεις μέθοδοι είναι για να αξιολογηθεί η μη τυποποιημένη μέθοδος Image Analysis η οποία υπερτερεί σε πολλούς τομείς σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους διάλυσης των δοκιμίων με οξέα. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του πίνακα 4.7 στο εδάφιο 4.4, η μέθοδος Image Analysis δίνει τιμές κοντά σε αυτές του πρότυπου με τυπική απόκλιση κάτω από 5% στις περισσότερες περιπτώσεις.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται η μεγάλη δύναμη τάνυσης περιέλιξης να αυξάνει τη περιεκτικότητα σε ίνες ενός σύνθετου υλικού κατασκευασμένου με τη μέθοδο περιέλιξης ινών. Ακόμα με την ανάλυση εικόνας των υλικών διαπιστώθηκαν μορφολογικά χαρακτηριστικά των επιφανειών τομής, τα οποία τελικά επίδρασαν και στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, όπως οι ανισομεγέθης και σπασμένες ίνες του υλικού από ίνες άνθρακα με βάση τη πίσσα (PF\_100\_10\_2\_F8\_T8) το οποίο κατά τον εφελκυσμό έσπασε ψαθυρά σε πολύ χαμηλή τάση.

Εν συνεχεία, έγινε μελέτη των δακτυλίων ως προς τις παραμέτρους που επηρεάζουν το μέτρο ελαστικότητας και τη τάση θραύσης τους σε εφελκυσμό. Τα αναλυτικά αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 6.5. Η αύξηση της διαμέτρου των δακτυλίων συνοδεύεται με ελαφρώς αυξημένη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας. Ανάμεσα σε παραμέτρους όπως η διάμετρος, το πλάτος, το πάχος του δακτυλίου και η δύναμη τάνυσης περιέλιξης φαίνεται πως ο αριθμός των δεσμίδων ινών (tows) κατά τη κατασκευή του υλικού επηρέασαν με κυρίαρχο τρόπο τα υπό μελέτη δοκίμια. Τα δοκίμια τυλιγμένα με μία δέσμη ινών εμφάνισαν αυξημένη τάση θραύσης και μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με αυτά που κατασκευάστηκαν με οχτώ δέσμες. Η παραπάνω παρατήρηση συμφωνεί με τα αποτελέσματα των Papadakis, Themelakis και Tsouvalis (2018)

Τα παραπάνω πειράματα και αποτελέσματα θα μπορούσαν να συμβάλουν στην επιλογή σύνθετων υλικών σε εφαρμογές εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος αλλά και σε λοιπές εφαρμογές που χρειάζεται πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων κυλίνδρων από σύνθετο υλικό. Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να γίνει πάνω στην ιδιόμορφη συμπεριφορά των μηχανικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών στο θαλάσσιο περιβάλλον σε συνάρτηση με το χρόνο παραμονής σε αυτό. Επίσης έρευνα χρειάζονται οι νέες μέθοδοι για την μέτρηση της περιεκτικότητας σε ίνες όπως είναι οι τεχνικές TGA και Image Analysis. Τέλος προτείνεται η έρευνα σε υλικά με λιγότερες παραμέτρους αλλά με μεγαλύτερο εύρος της κάθε παραμέτρου (κυρίως περιεκτικότητα σε ίνες και αριθμό tows) που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες ώστε να είναι εφικτή στη συνέχεια μια στατιστική ανάλυση.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ελληνική

- Βολονάκης, Σ., & Τσούβαλης, Ν. (2012). ΔΟΧΕΙΟ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΥΠΟΠΙΕΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ (ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ), Αποτελέσματα Πειραματικών Δοκιμών Χαρακτηρισμού του Σύνθετου Υλικού, Παραδοτέο .
- Επιτροπάκης, Ι. (2012). Χαρακτηρισμός σύνθετων υλικών ανθρακονημάτων κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών (filament winding), Αθήνα.
- Θεμελάκης, Ι. Γ. (2017). ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κωνσταντινίδης Γ. Α. (2016). ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ, Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Παπαδάκης, Α., & Τσούβαλης, Ν. (2014). Σχεδιασμός, Κατασκευή και Πειραματική Δοκιμή Δοχείων Πίεσης από Σύνθετα Υλικά για Μεγάλα Θαλάσσια Βάθη (DEEP-CO-HOUS), Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών χαρακτηρισμού υλικού, Παραδοτέο .
- Παπαδόπουλος Γ. (n.d.). Εργαστήριο Μαθηματικών & Στατιστικής. [www.aua.gr/gpapadopoulos/files/anova12-13a.pdf](http://www.aua.gr/gpapadopoulos/files/anova12-13a.pdf)
- Τσούβαλης, Ν. (1998). Ανάλυση και Σχεδίαση Σκαφών από Σύνθετα Υλικά, Σημειώσεις Μαθήματος. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

### Διεθνής

- Agarwal, B. D., & Broutman, L. J. (1990). Composites, Analysis and Performance of Fiber. Jonh Wiley & Sons, Inc.
- American Society for Testing and Materials. (2013b). ASTM D792, Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.



- American Society for Testing and Materials. (2014a). ASTM D2290, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials. (2014b). ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (Vol. 15). Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials. (2015a). ASTM D3171, Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials. (2013a). ASTM D3518, Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a  $\pm 45^\circ$  Laminate. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- Cann, M. T., Adams, D. O., & Schneider, C. L. (2008). Characterization of fiber volume fraction gradients in composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 42(5), 447–466. <https://doi.org/10.1177/0021998307086206>
- Hamed, A. F., Hamdan, M. M., Sahari, B. B., & Sapuan, S. M. (2008). Experimental Characterization of Filament Wound Glass / Epoxy and Carbon / Epoxy Composite Materials, 3(4), 76–87.
- Hong, Y., Wang, Z., & Jin, X. (2013). Sulfuric acid intercalated graphite oxide for graphene preparation. *Scientific Reports*, 3, 5–10. <https://doi.org/10.1038/srep03439>
- Huson, M. G. (2017). 3 - High-performance pitch-based carbon fibers. In G. B. T.-S. and P. of H.-P. F. Bhat (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Textiles* (pp. 31–78). Woodhead Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100550-7.00003-6>
- ISO 14125, Fibre-reinforced plastic composites - Determination of flexural properties, International Organization of Standardization.
- Mertiny, P., & Ellyin, F. (2002). Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 33(12), 1615–1622. [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(02\)00209-9](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(02)00209-9)
- Papadakis, A. Z., & Tsouvalis, N. G. (2016). Use of Different Geometries Specimens for the Material Characterization of CFRP Filament Wound Cylinders. *Proceedings of the 17th International Conference of Experimental Mechanics, Icem 17*.
- Papadakis, A. Z., Themelakis, J. G., & Tsouvalis, N. G. (2018). The effect of geometric and manufacturing parameters on filament wound composites split disk test results. *Maritime Transportation and Harvesting of Sea Resources*, 2, 713–721.

- Papadakis, A. Z., Konstantinidis, G. K., & Tsouvalis, N. G. (2020). Long-term deep-sea exposure effect on the mechanical properties of filament wound composites. ECCM 2018 - 18th European Conference on Composite Materials, June, 24–28.
- Peters, S. T. (2011). COMPOSITE FILAMENT WINDING.
- Philippidis, P., & Roukis, G. (2015). Static Tests on Ring Specimens for Mechanical Property Characterization of Filament Wound Composite Materials.
- Polis, D. L., & Sovinski, M. F. (2007). Determination of Fiber Volume in Carbon / Cyanate Ester Composites Using Thermogravimetric Analysis (TGA). Nasa, TM–214143(January).
- S.-H. Yoon, W.-M. Cho, and C.-G. K. (1997). Measurement of Modulus in Filament Wound Ring. 25–28.
- Soden, P. D., Kitching, R., Tse, P. C., Tsavalas, Y., & Hinton, M. J. (1993). Influence of winding angle on the strength and deformation of filament-wound composite tubes subjected to uniaxial and biaxial loads. *Composites Science and Technology*, 46(4), 363–378. [http://doi.org/10.1016/0266-3538\(93\)90182-G](http://doi.org/10.1016/0266-3538(93)90182-G)
- Tsai. (1964). Strength characteristics of composite materials. *Welding International*, 5(5), 341–345. <https://doi.org/10.1080/09507119109446748>
- US Department of Defense. (2002). *Composite Materials Handbook Volume 1: Polymer Matrix Composites - Guidelines for Characterisation of Structural Materials*. Composite Materials Handbook Series, 1(June), 1–586
- United States Naval Ordnance Laboratory. (1964). NOL RING TEST METHODS. Office of Technical Services.
- Welch, B. L. (1951). On the Comparison of Several Mean Values: An Alternative Approach. *Biometrika*, 38(3/4), 330. doi:10.2307/2332579
- Young, W. C., & Budynas, R. G. (2002). *Roark's Formulas for Stress and Strain*. Library (Vol.7). <http://doi.org/10.1002/9780470974414.part3>

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## **TORAYCA®** **T700S** DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

### **F I B E R   P R O P E R T I E S**

	<b>English</b>	<b>Metric</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Strength	711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus	33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain	2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density	0.065 lbs/in <sup>3</sup>	1.80 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02
Filament Diameter	2.8E-04 in.	7 μm	
Yield			
6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C	1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E	0.3 %	TY-030B-05
	FOE	0.7 %	TY-030B-05
Twist	Never twisted		

### **F U N C T I O N A L   P R O P E R T I E S**

CTE	-0.38 α·10 <sup>-6</sup> /°C
Specific Heat	0.18 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.0224 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.6 x 10 <sup>-3</sup> Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

### **C O M P O S I T E   P R O P E R T I E S \***

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

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

**TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.**

# T700S

## COMPOSITE PROPERTIES \*\*

Tensile Strength	355 ksi	2,450 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	18.0 Msi	125 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	--- Msi	--- GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	70 MPa	ASTM D-3039

\*\* Toray Semi-Toughened 350°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values.

These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

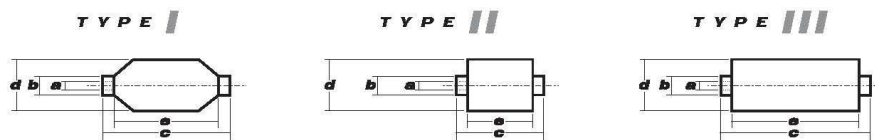
## PACKAGING

The table below summarizes the tow sizes, twists, sizing types, and packaging available for standard material. Other bobbin sizes may be available on a limited basis.

Tow Sizes	Twist <sup>1</sup>	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type <sup>2</sup>	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
6K	C	50C	2.0	III	76.5	82.5	280	140	252	12	24
	C	50C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
12K	C	60E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	F0E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
24K	C	50C	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	60E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24
	C	F0E	6.0	III	76.5	82.5	280	200	252	4	24

<sup>1</sup> Twist A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process C: Never twisted yarn

<sup>2</sup> Bobbin Type See Diagram below



## TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

6 Hutton Centre Drive, Suite #1270, Santa Ana, CA 92707 TEL: (714) 431-2320 FAX: (714) 424-0750  
Sales@Toraycfa.com Technical@Toraycfa.com www.torayusa.com

## PYROFIL™ TRH50 60M

### Product Data Sheet

#### Description

**PYROFIL™ TRH50 60M** is a higher filament count carbon fiber with high tensile strength. It is a continuous carbon fiber and has 60k(60,000) and filaments with approximately 6 microns diameter. **PYROFIL™ TRH50 60M** is a PAN based carbon fiber, which is made of non-textile precursor designed for high performance applications and suitable for many applications requiring high tensile strength.

#### Typical Fiber Properties

Fiber Properties	Typical Values
Strand Tensile Strength	4,900 MPa (710 ksi)
Strand Tensile Modulus	250 GPa (36.3 Msi)
Filament Density	1.81 g/cm <sup>3</sup>
Mass Per Unit Length	3,200 mg/m
Elongation	1.9 %
Filament Count	60k (60,000)
Filament Diameter	6.2 μm

#### Standard Spool Selection

Properties		Typical Values	
Spool Weight		17.6 Lbs	8.0 kgs
Fiber Length		2,734 yds	2,500 m
Size Level		1.0 %	
Standard Case 1	# of Spools	3	
	Net Weight	52.8 Lbs	24.0 kgs
Standard Pallet 1	# of Cases	18	
	Net Weight	952.4 Lbs	432.0 kgs
Standard Case 2	# of Spools	75	
Standard Pallet 2	Net Weight	1,322.8 Lbs	600.0 kgs
Spool Outside Diameter		8.4 in	213 mm

The numbers of the above preliminary specifications are representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. cannot accept responsibility for the misapplication of this products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

PYROFIL TRH50 60M 08/16/2012  
CAT I

## **Mechanical Properties of PYROFIL™ TRH50 60M Composite**

Properties		Typical Value	Test Method	
Tensile Properties	0°	Strength	2,780 MPa	ASTM D 3039
		Modulus	149 GPa	ASTM D 3039
	90°	Strength	85 MPa	ASTM D 3039
		Modulus	8.6 GPa	ASTM D 3039
Compressive Properties	0°	Strength	1,575 MPa	SACMA SRM 1R
		Modulus	135 GPa	SACMA SRM 1R
	90°	Strength	243 MPa	ASTM D 3410
		Modulus	9.5 GPa	ASTM D 3410
Flexural Properties	0°	Strength	1,920 MPa	ASTM D 790
		Modulus	140 GPa	ASTM D 790
	90°	Strength	143 MPa	ASTM D 790
		Modulus	8.7 GPa	ASTM D 790
Shear Property	ILSS	Strength	98 MPa	ASTM D 2344

### **Safety Precautions**

It is recommended that customers should notice precautions for handling carbon fibers and operators should handle the material with clean wear, special gloves and eyeglasses to prevent from contacting the materials.

Material Safety Data Sheets (MSDS) are prepared for all MITSUBISHI RAYON products and are available if required.

### **For More Information**

MITSUBISHI RAYON CO., LTD.  
 Carbon Fiber and Composite Materials Division  
 1-1, Marunouchi 1-chome, Chiyoda-ku,  
 Tokyo 100-8253, Japan  
 Phone; +81- 3- 6748- 7514  
 Fax; +81- 3- 3286- 1380

The numbers of the above preliminary specifications are representative properties obtainable. Mitsubishi Rayon Co., Ltd. cannot accept responsibility for the misapplication of this products nor for their use under controlled conditions. Numerical values resulting from the application of this material are dependent on processing details. It is recommended that the users develop his/her own application techniques and generate data consistent with his/her specific applications and process.

PYROFIL TRH50 60M 08/16/2012  
 CAT I

# 1062 Multi-End Roving



## Product Description

**1062 Multi-End Roving** from PPG Fiber Glass is designed specifically for use with epoxy resin systems and it incorporates a sizing chemistry that imparts high composite properties to the end-use application and product. 1062 Multi-End Roving is typically used in applications that require high mechanical strength and corrosion resistance such as filament wound pipe.

## User Benefits

- Provides exceptionally high interfacial bond between the resin and the fiber glass.
- Choice of outside (tubed) or inside (no-tube) payout.
- Multi-end roving of positive end count with superior yield control.
- Minimum catenary.
- Metered length packages available.
- Supported by PPG's global technical support service team.
- Manufacturing facilities operate quality management systems that comply with ISO9001:2008 requirements.

## Packaging

### Bulk Pak:

- 48 packages/pallet
- 44 lbs. (20 kg)/package (average)
- Pallet area: 43 in. x 43 in. (109 cm x 109 cm)
- Average pallet weight: 2,112 lbs. (958 kg)

# 1062 Multi-End Roving

## Property Information

Type of Fiber	E-Glass (ASTM D 578-98, Section 4.2.2)			
Type of Sizing	Silane			
Roving Tex, nominal (g/km)	1145	2010	4030	4313
Roving Yield, nominal (yd/lb)	433	247	123	115
Yield/Tex Tolerance	±5.5%	±5.5%	±5.5%	±5.5%
Average Fiber Diameter	13µm	13µm	13µm	13µm

## Storage

These products should be stored in a dry area with ambient temperature and relative humidity, optimally from 20°C to 25°C and between 50% and 70%, respectively. Protect product from all sources of water at all times. A First-In-First-Out (FIFO) stock control system is recommended to minimize the influence of storage conditions. Prior to use, products should be conditioned in the work area for a minimum of 24 hours. If contents of a package unit are partially used, the unit should be closed until the next use. With proper storage, there are no known limitations on shelf life of the product. To insure optimal performance, retesting is recommended for products stored more than three years from the initial production date.

## Caution

To avoid the possibility of potential injury, maintain column stability by limiting pallet stacking to two (2) high as noted on individual shipping containers.

NOTE: This data is offered for informational purposes only in the selection of a composite reinforcement. The information contained in this bulletin is based on actual laboratory data. We believe that this information is reliable, but do not guarantee its applicability to the process of the user or assume any liability arising out of its use or performance. The user, by accepting the products described, agrees to be responsible for thoroughly testing any application to determine its suitability before committing to production. It is important for the user to determine the properties of its own commercial laminates when using this or any other reinforcement. Because of numerous factors affecting the results, we make no warranty of any kind, expressed or implied, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. Statements in this document shall not be construed as representations or warranties or as inducements to infringe any patent or violate any law, safety code, or insurance regulation.

Americas	ppgfiberglassamericas@ppg.com	1.800.613.0155
Europe	ppgfiberglassseurope@ppg.com	+31.598.313911
Asia	ppgfiberglassasia@ppg.com	+86.21.6091.8500
India	ppgfiberglassindia@ppg.com	+91.20.4011.1448

## Mechanical Properties Interlaminar Shear Strength (ASTM D2344)

Horizontal Shear Dry (ksi/MPa) = 11.6/80  
Horizontal Shear Wet\*(ksi/MPa) = 11.1/76.3  
Strength Retention = 95.7%

\* After 6-hour water boil



**PPG Fiber Glass**

*Expertise you trust. Solutions you demand.™*

[www.ppgfiberglass.com](http://www.ppgfiberglass.com)

PPG Fiber Glass reserves the right to modify this document without prior notice.  
© 2012 PPG Fiber Glass Product Bulletin 1062 Multi-End Roving\_12\_2012\_Rev0





### VORAFORCE™ Filament Winding System

VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin  
 VORAFORCE™ TW 150 Hardener  
 VORAFORCE™ TC 3000 Catalyst

#### Description

The VORAFORCE™ Filament Winding System consists of an epoxy resin, hardener and catalyst designed for the filament winding process. The low viscosity of the VORAFORCE Filament Winding System results in excellent flow properties and fiber wetting and is especially suitable for production by the filament winding process where low viscosity and long pot-life are required. This system combines good mechanical and electrical properties, as well as high temperature resistance and low moisture take-up.

#### Applications

The VORAFORCE TW Filament Winding System is suitable for the manufacturing of structural composites for diverse applications including Construction, Marine and Infrastructure.

#### Typical Properties

Property <sup>(1)</sup>	VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin (EEW <sup>(2)</sup> : 176-185)	VORAFORCE™ TW 150 Hardener (AnhEW <sup>(3)</sup> : 160-170)	VORAFORCE™ TC 3000 Catalyst
Viscosity @ 25°C (mPa·s) ASTM D-445	7000-10000	60-100	---
Density @ 25°C (g/cc) ASTM D-4052	1.1-1.2	1.1-1.2	1.21 <sup>(5)</sup>
Shelf Life (Months) <sup>(4)</sup>	24	12	12

- 1) These are typical values and should not be construed as specifications.
- 2) EEW - Epoxide equivalent weight
- 3) AnhEW - Anhydride equivalent weight
- 4) See Packaging, Storage and Shelf Life section for details.
- 5) @ 20 °C

#### Typical Formulation

	VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin	VORAFORCE™ TW 150 Hardener	VORAFORCE™ TC 3000 Catalyst
Parts by Weight	100	83	0.5-2.0

#### Typical Properties Of Mixed System

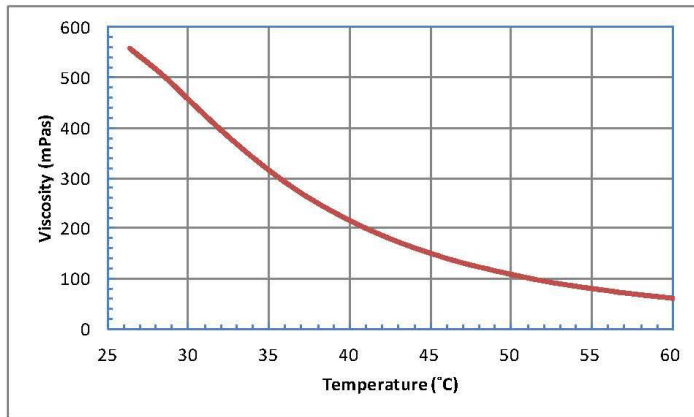
Property <sup>(1)</sup>	VORAFORCE™ TW 100 VORAFORCE™ TW 150 VORAFORCE™ TC 3000 (at 1.4 phr)

Viscosity @ 25°C (mPa·s) ASTM D-2983	450-750
Gel Time @ 25°C, (hrs) Gardner Instrument	>8
Gel Time @ 80°C, (min) Gardner Instrument	58-60

1) These are typical values and should not be construed as specifications.

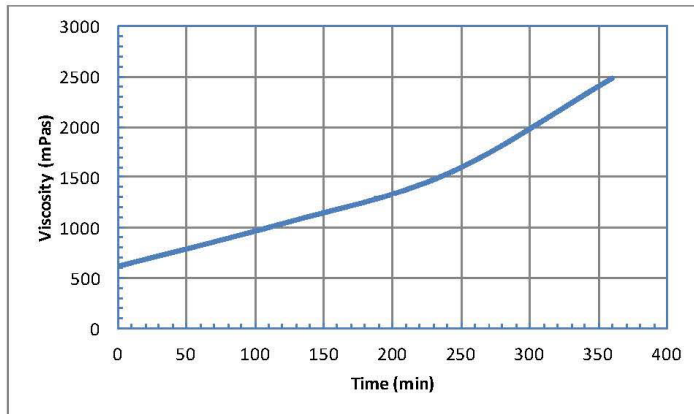
**Viscosity of Mixed System vs. Temperature**  
(Catalyst at 1.4 phr)

ARES Rheometer from TA instruments, parallel plate geometry using the formulation prescribed in table above.



**Viscosity of Mixed System vs. Time at 25°C**  
(Catalyst at 1.4 phr)

ARES Rheometer from TA instruments, parallel plate geometry using the formulation prescribed in table above.



**Typical Curing Conditions**

The recommended pot conditions are between 20°C and 25°C with a maximum relative humidity (RH) of 70%. Higher temperatures will shorten the pot life and lower temperatures will increase viscosity, significantly affecting fiber wetting. The following cure schedule is a typical starting point for most filament winding applications:

- Step 1: Cured 2 hr at 90°C
- Step 2: Post Cured 4 hr at 150°C.

Cure schedules can be tailored to each application. Accordingly, times, temperatures and ramp rates should be adjusted such that the entire composites part receives sufficient heat history to attain desired properties.

**Mechanical Properties of Cured System**

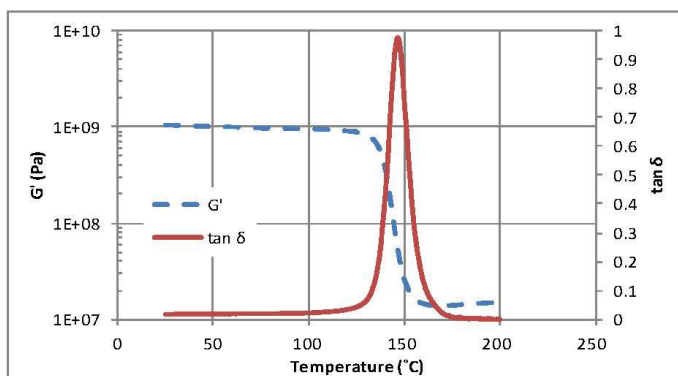
Cured at 90 °C for 2 hrs and at 150 °C for 4 hrs

Property <sup>(1)</sup> measured at 25°C	VORAFORCE™ TW 100 VORAFORCE™ TW 150 VORAFORCE™ TC 3000 (at 1.4 phr)
Tg (as cured) (°C) <sup>(2)</sup>	140-150
Ultimate Tensile Strength (MPa) ASTM D-638	80-90
Elongation at Ultimate Tensile Strength (%) ASTM D-638	5.5-6.5
Tensile Modulus (GPa) ASTM D-638	2.7-2.9
Flexural Strength (MPa) ASTM D-790	135-145
Flexural Modulus (GPa) ASTM D-790	2.9-3.1
Fracture Toughness K <sub>1c</sub> (MPa √m) ASTM D-5045	0.56

- 1) These are typical values and should not be construed as specifications.
- 2) ARES DMTA from TA Instruments, (peak in tan δ).

**Dynamic Thermal Analysis**

Cured casting tested in torsion on ARES DMTA at 5 °C/min.



**Mechanical Properties in Glass Fiber Composite<sup>(4)</sup>**

Property <sup>(1)</sup> measured at 25°C	VORAFORCE™ TW 100 VORAFORCE™ TW 150 VORAFORCE™ TC 3000 (at 1.4 phr)
Tg (as cured) (°C) <sup>(2)</sup>	140-145
Shear Strength at 5% Shear Strain (MPa) <sup>(3)</sup> ASTM D-3518	48-52
Shear Modulus (GPa) <sup>(3)</sup> ASTM D-3518	2.9-3.0

- 1) These are typical values and should not be construed as specifications.
- 2) ARES DMTA from TA Instruments, (peak in tan δ).
- 3) 8 plies of E-Glass fabric (VECTORPLY ELT 2400), tested as a ± 45° in tension.
- 4) 0.47 glass fiber volume fraction.

**Packaging, Storage and Shelf Life**

VORAFORCE™ TW 100 resin should retain its chemical properties for at least 24 months when stored in a dry place in its original closed packaging between 25°C and 35°C. For further storage information on liquid epoxy resins consult the Dow technical bulletin Product Coding, Shelf-life and Storage Stability, Form No. 296-01657.

As with many liquid epoxy resins, VORAFORCE™ TW 100 Epoxy Resin may crystallize during storage. The potential for crystallization can be minimized by storing the resin in a controlled temperature environment between 25°C and 35°C. Crystallized resin can be reconstituted by heating to 60°C. For further details see the technical bulletin, Crystallization of Liquid Epoxy Resins, Form No. 296-01652.

VORAFORCE™ TW 150 liquid anhydride hardener should retain its chemical properties for at least 12 months when stored in a dry place in its original closed packaging in a cool, dry environment, away from direct sun light. If possible, provide nitrogen padding in the headspace of opened containers and bulk storage facilities. VORAFORCE™ TW 150 is sensitive to moisture. Higher level of moisture could significantly change the reactivity of the system and alter the final properties.

**Product Stewardship**

The Dow Chemical Company and its subsidiaries ("Dow") has a fundamental concern for all who make, distribute, and use its products, and for the environment in which we live. This concern is the basis for our Product Stewardship philosophy by which we assess the safety, health, and environmental information on our products and then take appropriate steps to protect employee and public health and our environment. The success of our Product Stewardship program rests with each and every individual involved with Dow products – from the initial concept and research, to manufacture, use, sale, disposal, and recycle of each product.

**Customer Notice**

This VORAFORCE™ System is intended for use in the manufacture of composite articles. The information provided in this data sheet is intended to

help the user achieve positive results. It is the user's responsibility to fully test and qualify the resin system, along with ingredients, methods, applications or equipment identified herein, by the user's knowledgeable formulator or scientist, and to determine the appropriate use conditions and legal restrictions, prior to use of any information given in this data sheet.

Dow strongly encourages its customers to review both their manufacturing processes and their applications of Dow products from the standpoint of human health and environmental quality to help ensure that Dow products are not used in ways for which they were not intended or tested. Dow personnel are available to answer your questions and to provide reasonable technical support. Dow product literature, including safety data sheets, should be consulted prior to use of Dow products. Current safety data sheets are available from Dow.

### **Medical Application Policy**

Dow will not knowingly sell or sample any product or service ("Product") into any commercial or developmental application that is intended for:

- (a) permanent (long term) contact with internal body fluids or internal body tissues. Long term is a use which exceeds 72 continuous hours (except 30 days for PELLETHANE™ Polyurethane Elastomers);
- (b) use in cardiac prosthetic devices regardless of the length of time involved (cardiac prosthetic devices include, but are not limited to, pacemaker leads and devices, artificial hearts, heart valves, intra-aortic balloons and control systems and ventricular bypass assisted devices);
- (c) use as a critical component in medical devices that support or sustain human life; or
- (d) use specifically by pregnant women or in applications designed specifically to promote or interfere with human reproduction.

Additionally, all Products intended for use in pharmaceutical applications must pass the then current Pharmaceutical Liability Guidelines. For additional information please contact your regular Dow representative.

### **Food Contact Applications**

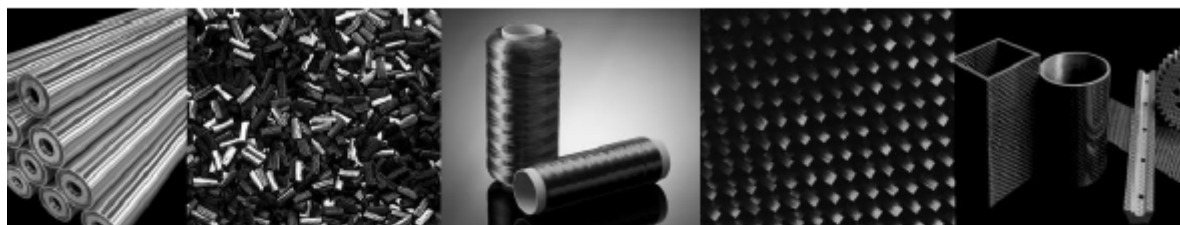
This epoxy resin is not intended for food or potable water contact applications. If your applications include food contact requirements, please contact your Dow representative for further information and forthcoming EC regulations.

#### **Contact information:**

For more information about this product please call The Dow Chemical Company.

North America: 1-800-441-4369  
Latin America: (+52) 11-5199-9000  
Europe: (+31) 11-567-2626  
Asia/Pacific: (+60) 3-7969-5392  
<http://www.dowepoxysystems.com>

NOTICE: No freedom from infringement of any patent owned by Dow or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other government enactments. The product shown in this literature may not be available for sale and/or available in all geographies where Dow is represented. The claims made may not have been approved for use in all countries. Dow assumes no obligation or liability for the information in this document. References to "Dow" or the "Company" mean the Dow legal entity selling the products to Customer unless otherwise expressly noted. NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.


**DIALEAD™**

Mitsubishi Chemical Corporation has developed a high performance pitch-based carbon fiber (DIALEAD™), which is available in a large range of product formats, from low modulus to ultra high modulus grades. (DIALEAD™) is recognised worldwide as a composite material which gives big advantages for numerous applications.

**PERFORMANCE**

- High Purity
- High and Ultra High Modulus
- High Thermal Conductivity
- Excellent Handling Characteristics
- Proven Cost Advantage


**GRADE**
**■ (DIALEAD™) STANDARD GRADE**

	Grade [Unit]	Tensile Modulus [GPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]	Density [g/cm <sup>3</sup> ]	Yield [g/1000m]	Thermal Conductivity [W/m·K]	ER [μΩm]
Continuous Fiber (2K, 6K Type)	K1352U	620	3600	0.6	2.12	270	140	6.6
	K1392U	760	3700	0.5	2.15	270	210	5.0
	K13C2U	900	3800	0.4	2.20	275	620	1.9
	K13C6U	900	3600	0.4	2.18	760	580	2.0
	K13D2U	935	3700	0.4	2.20	365	800	1.5
Continuous Fiber (12K, 16K Type)	K13312	420	3200	0.7	2.05	1550	110	8.0
	K63712	640	2600	0.4	2.12	2000	140	6.6
	K13916	760	3000	0.4	2.15	2200	200	5.1
	K63A12	785	2600	0.3	2.15	1950	220	4.7
Chopped Fiber	K223Y1	50	1000	1.8	1.5	—	—	—
	K223SE	185	2350	1.1	2.0	—	—	—
	K223HE	900	3800	0.3	2.2	—	550	—
	K6371T	640	2600	0.4	2.1	—	140	—
Milled Fiber	K223HM	900	3800	—	2.2	—	550	—
	K6371M	640	2600	—	2.1	—	140	—

This information can be used for material selection only.

# DIALEAD™



## Continuous Fiber

(DIALEAD™) fibers are offered in a wide range of modulus levels, having excellent laminate properties.

### Laminate Properties (2K, 6K)

Style : Uni-directional [0] Resin : 350°F Cure Epoxy

			K1352U	K1392U	K13C2U	K13C6U *	K13D2U
Longitudinal	Tensile	Strength [MPa]	2000	2100	2200	2000	1800
		Modulus [GPa]	380	460	560	550	560
	Compressive	Strength [MPa]	450	400	380	340	340
		Modulus [GPa]	250	420	560	550	560
	ILSS	[MPa]	75	70	50	50	40
CTE (Temp. 50–125°C)		[ $\times 10^{-6}/K$ ]	-1.1	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
Transverse	Tensile	Strength [MPa]	40	35	30	20	25
		Modulus [GPa]	6.0	6.0	5.5	5.0	5.0

Data are average results of experiments made on standard procedures and subject to normal manufacturing variation.  
Tensile and compressive data normalized by 60% Fiber Volume.  
\*Resin : 250°F Cure Epoxy

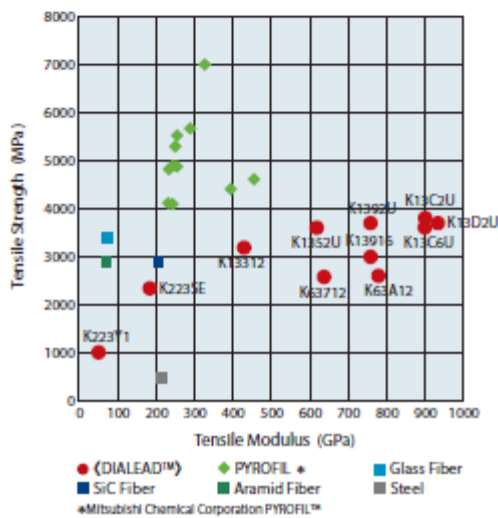
### Laminate Properties (12K, 16K)

Style : Uni-directional [0] Resin : 250°F Cure Epoxy

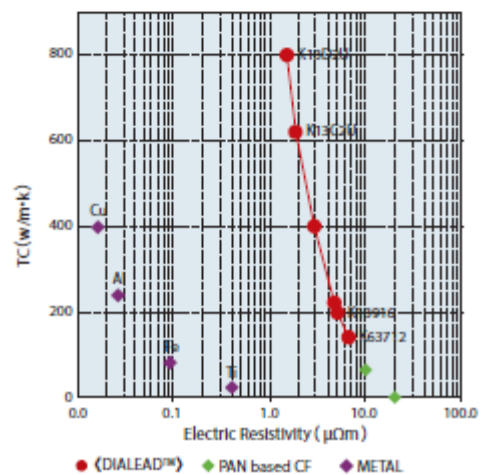
			K13312	K63712	K13916	K63A12
Longitudinal	Tensile	Strength [MPa]	1700	1500	1700	1500
		Modulus [GPa]	230	370	460	470
	Compressive	Strength [MPa]	540	440	360	380
		Modulus [GPa]	160	330	430	470
	ILSS	[MPa]	70	75	70	70
CTE (Temp. 50–125°C)		[ $\times 10^{-6}/K$ ]	—	-1.1	-1.2	-1.2
Transverse	Tensile	Strength [MPa]	30	35	25	25
		Modulus [GPa]	6.0	5.5	5.0	5.0

Data are average results of experiments made on standard procedures and subject to normal manufacturing variation.  
Tensile and compressive data normalized by 60% Fiber Volume.

### Tensile Modulus and Strength



### Thermal Conductivity and Electric Resistivity



# DIALEAD™



## Chopped Fiber

{DIALEAD™} chopped fiber offers excellent purity and high performance. Our chopped fibers are available in a variety of grades to meet the demands of numerous applications.

### Fiber Properties

Grade	Bulk Properties				Filament properties					
	Length [mm]	Bulk Density [g/l]	Shape	Sizing Amount [%]	Filament Diameter [μm]	T.C. [W/m · K]	Tensile Modulus [GPa]	Tensile Strength [MPa]	Elongation [%]	Density [g/cm³]
K223Y1	6	>330	Round	2-4	13	<5	50	1000	1.8	1.5
K223SE	6	>430	Round	3-5	11	20	185	2350	1.1	2.0
K223HE	6	>400	Round	0	11	550	900	3800	0.3	2.2
K6371T	6	—	Flat	1-3	11	140	640	2600	0.4	2.1

This information can be used for material selection only.

## Milled Fiber

{DIALEAD™} milled fibers are available. Offered in a range of modulus levels, retaining properties which allow users to achieve high performance

Grade	Fiber Length [μm]	T. Strength [MPa]	T. Modulus [GPa]	Sizing [%]
K223HM	50/200μm	3800	900	non
K6371M	50μm	2600	640	1-3

This information can be used for material selection only.



## Fabric

Numerous areal weights and weave styles are available.



### Typical Fabric

Grade	Style	FAW[g/m²]	{DIALEAD™}Grade
FT37Y960	Twill	960	K63712
F637400	UD-Fabric	400	K63712

### Typical Prepreg

Grade	FAW[g/m²]	{DIALEAD™}Grade	Resin system
HyEJ34M65 PD	340	K63712	125°C Cure Type
HyEJ34M65 PDHX1	340	K63712	180°C Cure Type
HyEJ28M80QD	280	K13916	125°C Cure Type

This information can be used for material selection only.

## {DIALEAD™} PACKAGE

### Continuous Fiber

Grade	Length [m]	Typical Weight [kg/ Spool]	Sizing [code]	Carton [No. of Spool]
K1352U	*730	0.2	P	25
K1392U	*730	0.2	P	25
K13C2U	*380	0.1	P	25
	*750	0.2	P	25
K13D2U	*280	0.1	P	25

\*Controlled by weight

Grade	Typical Length [m]	Weight [kg/ Spool]	Sizing [code]	Carton [No. of Spool]
K13312	1250	*2.0	R	9
K63712	1250	*2.5	R	9
K13916	1250	*2.8	R	9
K63A12	600	*1.2	R	16
K13C6U	250	*0.2	R	25

\*Controlled by length

### Core Size

I.D. [mm]	76.5
O.D. [mm]	82.5
Length [mm]	305
Weight [g]	170

### Chopped and Milled Fiber

- 10kg/Bag
- 30Bags(300kg)/Pallet



For Continuous Fiber



For Chopped and Milled Fiber



## Technical Datasheet

# UMT42-24K-EP

High strength and standard tensile modulus continuous carbon fibre based on polyacrylonitrile precursor used in various branches of industry.

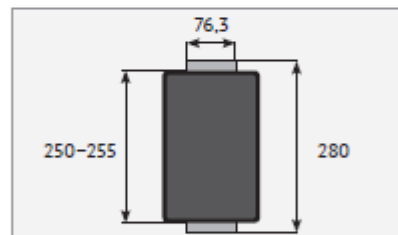
### Typical Carbon Fiber Properties

Tensile strength	4.2 GPa
Tensile modulus	260 GPa
Elongation at break	1.5 %
Linear density	1530 tex
Density	1.78 g/cm <sup>3</sup>
Carbon content	More than 95 %
Sizing <sup>1</sup>	EP
Sizing content <sup>2</sup>	0.8–1.5 %



### Bobbin Properties

Bobbin weight <sup>3</sup>	6 kg
Length of fiber on bobbin	3950 m
Bobbin diameter with coiled fiber	250–255 mm
Height of fiber on bobbin	190 mm
Spool height	280 mm
Spool diameter	76.3 mm



<sup>1</sup> CF can be produced with VE finish (compatible with vinyl ester resins).

<sup>2</sup> The sizing content (from 0.5%) and type can be varied based on customer's request.

<sup>3</sup> 1 kg, 2 kg, 5–7 kg bobbins are available on request (may affect the price depending on the volume of the non-standard package batch).

### Packaging

Carbon fiber is wound untwisted onto cardboard spool, sealed with heat shrunk PE or PVC foil and placed in cardboard box.

### Certification

The products are produced in full compliance with ISO 9001-certified Quality Management System.

# Technical Datasheet

## ZOLTEK™ PX35 Continuous Tow



Commercial Carbon Fiber for Industrial Applications

### DESCRIPTION

ZOLTEK PX35 continuous carbon fiber is manufactured from polyacrylonitrile (PAN) precursor. The consistency in yield and mechanical properties that are provided by large filament count strands gives the user the ability to design and manufacture composite materials with greater confidence and allows for efficient and fast buildup of carbon fiber reinforced composite structures.

ZOLTEK PX35 50K fibers are available with a variety of sizing formats for different composite processing methods and for compatibility with a wide range of standard resin systems. ZOLTEK quality focuses on spool to spool consistency yielding low coefficients of variation.



### APPLICATIONS

Wind energy, automotive, petroleum production, aviation, marine, industrial, other transportation, medical (including X-ray), sports and recreation, etc.

### RECOMMENDED USE

Any article or component benefiting from the unique properties of carbon fiber composites.

MATERIAL OVERVIEW	SI	US
Tensile Strength	4,137 MPa	600 ksi
Tensile Modulus	242 GPa	35 msi
Elongation	1.5%	1.5%
Electrical Resistivity	0.00155 ohm-cm	0.00061 ohm-in
Density	1.81 g/cc	0.065 lb/in <sup>3</sup>
Fiber Diameter	7.2 microns	0.283 mils
Carbon Content	95%	95%
Yield	267 m/kg	397 ft/lb
Textile Units	267 m/kg	33700 denier
Spool Weight	5.5 kg, 11 kg	12 lb, 24 lb
Spool Length	1,500 m, 3,000 m	1,640 yd, 3,280 yd

*The properties listed in this datasheet do not constitute any warranty or guarantee of values. This information should only be used for the purposes of material selection. Please contact us for more details.*

## ZOLTEK™ PX35

# Technical Datasheet

## ZOLTEK™ PX35 Continuous Tow



Commercial Carbon Fiber for Industrial Applications

### TYPICAL PACKAGING

Wound on a 3" x 11" (7.6 cm x 28 cm) cardboard spool, sealed in heat shrunk covering, and placed in cardboard box; two splices are permitted per every 1,500m spool and five per every 3,000m spool.

Spool outside diameter:

- 1,500 m: 180-185 mm x 255-260 mm
- 3,000 m: 235-245 mm x 255-260 mm

### APPROVAL

DNV-GL has granted approval to ZOLTEK PX35 Continuous Tow for use in wind energy applications.



**DNV·GL**

Approval No. WP 1030012 HH

### CERTIFICATION

ZOLTEK PX35 Continuous Tow is manufactured in accordance with ZOLTEK's written and published data. A Certificate of Conformance is provided with each shipment.

### SAFETY

Obtain, read, and understand the Material Safety Data Sheet (SDS) before use of this or any other ZOLTEK product.

**ZOLTEK™ PX35**



## EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL EPIKURE™ Curing Agent 866 EPIKURE™ Catalyst 101

### Applications

EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL with the anhydride hardener EPIKURE™ Curing Agent 866 and the accelerator EPIKURE™ Catalyst 101 is a low viscosity hot curing epoxy resin system suited to the production of composite fibre components using the filament winding technique. The moulding materials made with the EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL - EPIKURE™ Curing Agent 866 - EPIKURE™ Catalyst 101 matrix possess good electrical and mechanical characteristics with good thermoforming stability and thermal to ageing stability.

At room temperature, the hardener EPIKURE™ Curing Agent 866 is a low viscosity, not easily volatilized dicarboxylic anhydride of low physiological risk. Thanks to its excellent properties as a hardener for liquid epoxy resin, it lends itself well to the production of composite fibre structures in a wet process and impregnating in vacuum or under normal pressure conditions.

The processing, gel and curing times can be controlled over a wide range through the addition of the EPIKURE™ Catalyst 101 accelerator. Curing of the components can be carried out, depending on the resin components and the amount of accelerator, at temperatures between 70 - 130 °C.

The following handling instructions for the EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL - EPIKURE™ Curing Agent 866 (hardener) - EPIKURE™ Catalyst 101 (accelerator) system show the typical processing features of the hardener that are exhibited in a similar manner when combined with other resin systems.

Product Physical Properties: (at time of Manufacturing)				
Property	Unit	EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL	EPIKURE™ Curing Agent 866	EPIKURE™ Catalyst 101
Viscosity at 25°C	mPa·s	10000 ± 2000	60 ± 5	250 ± 20
Viscosity at 40°C	mPa·s	950 ± 50	25 ± 5	
Viscosity at 60°C	mPa·s	175 ± 25	7 ± 3	
Epoxy equivalent	g/equiv.	186 ± 4		
Anhydride equivalent	g/equiv.		165	
Density at 20°C	g/cm <sup>3</sup>		1.21 ± 0.02	0.97 ± 0.03



## **EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL**

### **EPIKURE™ Curing Agent 866**

### **EPIKURE™ Catalyst 101**

#### **Processing Details**

##### **Mixing ratio**

Optimal moulding properties are obtained when EPIKURE™ Curing Agent 866 hardener comprises between 85 and 90 % of the additives, calculated on the basis of their weight equivalents. For the EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL – EPIKURE™ Curing Agent 866 hardener system, this means a mixture ratio of:

EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL	100.0 parts by weight
EPIKURE™ Curing Agent 866	80.0 parts by weight
EPIKURE™ Catalyst 101	1.5 parts by weight

Depending on precise requirements the amount of EPIKURE™ Catalyst 101 accelerator used can vary between a minimum of 0.2 and maximum of 3.0 parts by weight in relation to the amount of the resin.

##### **Mixing tolerance**

The maximum allowable mixing tolerance is  $\pm 2$ pbw, but it is particularly important to observe the recommend mixing ratio as exactly as possible. Adding more or less Hardener will not effect a faster or slower reaction - but an incomplete curing which cannot correct in any way. Resin and Hardener must be mixed very thoroughly. Mix until no clouding is visible in the mixing container. Pay special attention to the walls and the bottom of the mixing container. The reddish discolouring of the hardener or the resin mass that occurs on addition of the accelerator disappears almost entirely during the curing process and has no detrimental effect on the quality of the product.

## EPIKOTE™ Resin 828 LVEL

### EPIKURE™ Curing Agent 866

### EPIKURE™ Catalyst 101

#### Processing Temperature

A good processing temperature is in the range between RT and 40°C. Higher processing temperatures are possible but will shorten the pot life. A rise in temperature of 10°C reduces the pot life by approx. 50%. Different temperatures during processing have no significant effect on the strength of the hardened product.

Service life depending on amount of the accelerator and processing temperature						
Temperature [°C]	Initial Viscosity [mPa-s]	Service life [h] on addition of x ppw accelerator EPIKURE™ Catalyst to 100 ppw of resin EPIKOTE™ Resin 828 LVEL				
		--	0,3	0,5	1,0	2,0
20	1000	> 20	> 20	12	6	3
40	240	> 20	6	5	3	1
60	70	> 20	3	2	1	0.25
80	20	20	1	0.5	0.25	-----

Best results are obtained at processing temperatures between 20 and 40 °C.

Do not mix large quantities at elevated processing temperatures. The mixture will heat up fast because of the dissipating reaction heat (exothermic reaction). This can result in temperatures of more than 200°C in the mixing container.

#### Exemplify Curing Cycle:

The following table shows an overview about the minimum - curing conditions:

Curing time depending on amount of the accelerator and processing temperature				
Curing temperature [°C]	Curing time [h] at addition of x ppw EPIKURE™ Catalyst to 100 ppw of resin EPIKOTE™ Resin 828 LVEL			
	0,3	0,5	1,0	2,0
60	40-45	30-35	20-25	10-15
80	20-25	15-20	8-10	4-6
100	6-8	4-5	2-3	1-2
120	3-4	2-3	1-2	0,5-1

Optimal moulding properties are not obtained, however, until additional after postcuring is carried out for 6 - 12 hours at temperatures between 120 and 130 °C.



**EPIKOTE™ Resin 828 LVEL**  
**EPIKURE™ Curing Agent 866**  
**EPIKURE™ Catalyst 101**

<b>Properties of the cured, non-reinforced Resin System</b>		
Curing: 3 h at 80 °C and 15 h at 130 °C		
Mixing ratio: 100 : 85 : 0.5 parts by weight		
<b>Property</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Flexural strength	MPa	120
Deflection	mm	10
Modulus in flexure	MPa	3000
Tensile strength	MPa	70
Elongation at break	%	4
Impact strength	mJ/mm <sup>2</sup>	22
Compressive strength	MPa	140
Ball indentation H 60	MPa	160
Heat deflection temperature under load (Martens)	°C	125

<b>Properties of the cured, reinforced Resin System</b>		
Curing: 5 h at 80 °C and 15 h at 130 °C		
Mixing ratio: 100 : 80 : 0.5 parts by weight		
<b>Property</b>	<b>Unit</b>	<b>Value</b>
Flexural strength	MPa	550
Compressive strength	MPa	380
Modulus in flexure	MPa	23200
Tensile strength	MPa	450
Water uptake (24 h at 22 °C)	%	0.03

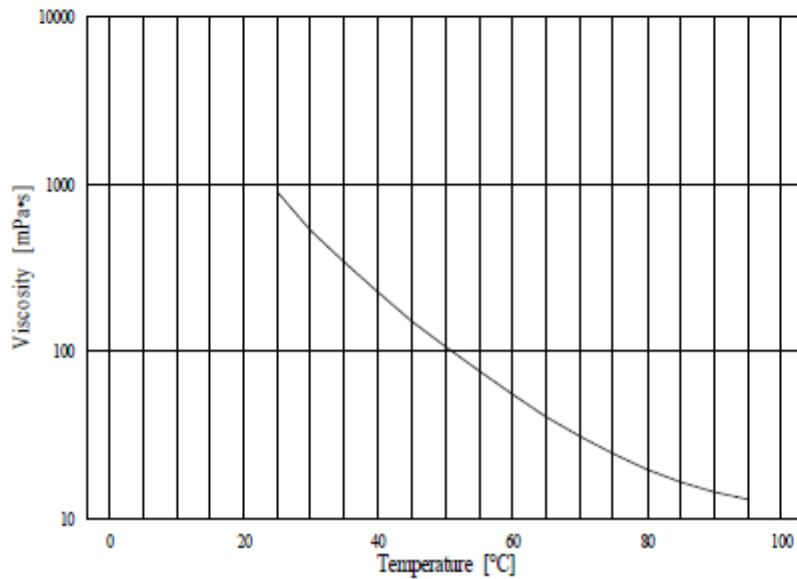
The values are measured on 4 mm laminates (16 layers glass fabric 181/Interglas 91745),

**EPIKOTE™ Resin 828 LVEL**  
**EPIKURE™ Curing Agent 866**  
**EPIKURE™ Catalyst 101**

<b>Electrical properties of the cured Resin System</b>			
Curing: 5 h at 80 °C and 15 h at 130 °C			
Mixing ratio: 100 : 80 : 0.5 parts by weight			
<b>Property</b>	<b>Unit</b>		<b>Value</b>
Resistance to breakdown	kV/mm	(DIN 53481)	25 - 30
Special volume resistance	Ω·cm	(DIN 53482)	8.2 · 10 <sup>15</sup>
Surface resistance	Ω	(DIN 53482)	5.2 · 10 <sup>13</sup>
Electrolytic corrosion		(DIN 53489)	A 1.2

**Viscosity of the system by different temperatures**

**Viscogramm 1: dyn. Viscosity at 25.....100 °C**  
 100 ppw EPIKOTE™ Resin 828 LVEL  
 80 ppw EPIKURE™ Curing Agent 866

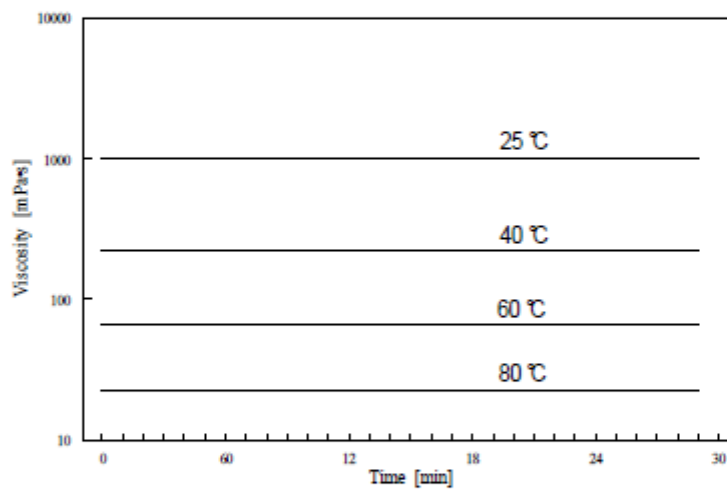




**EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL**  
**EPIKURE™ Curing Agent 866**  
**EPIKURE™ Catalyst 101**

**Viscosity of the unaccelerated system by different temperatures**

**Viscogramm 2: dyn. Viscosity at 25, 40, 60 and 80 °C**  
100 ppw EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL  
80 ppw EPIKURE™ Curing Agent 866

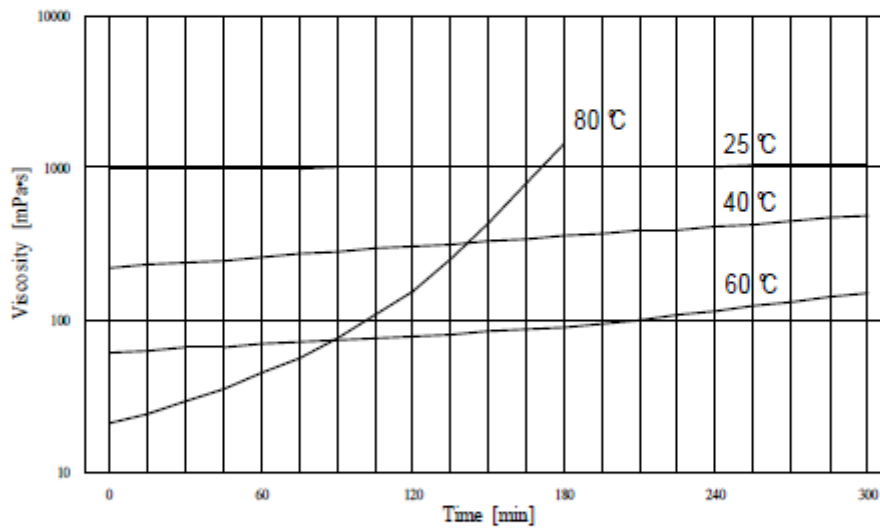


**EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL**  
**EPIKURE™ Curing Agent 866**  
**EPIKURE™ Catalyst 101**

**Viscosity of the accelerated system (0.3) by different temperatures**

**Viscogramm 3: dyn. Viscosity at 25, 40, 60 and 80 °C**

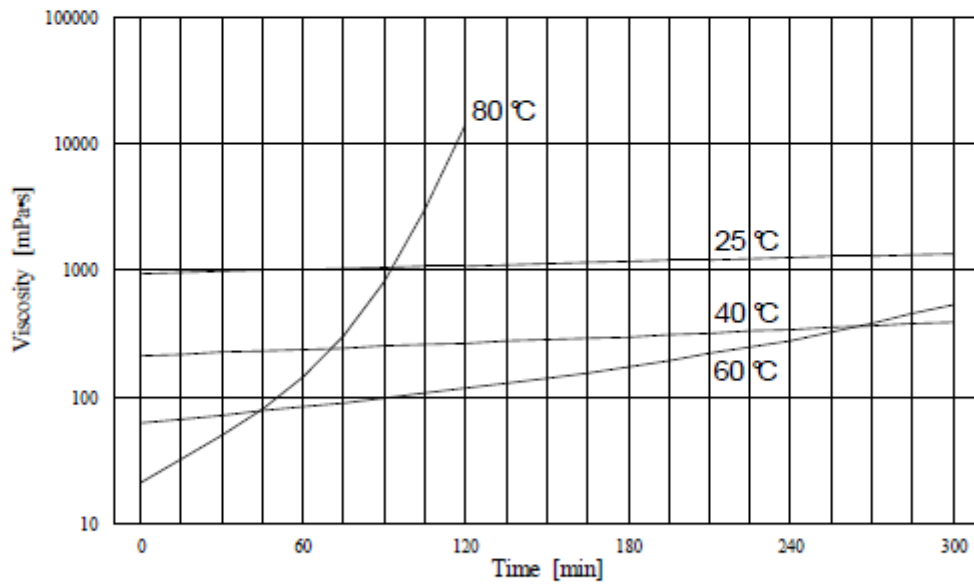
100 ppw EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL  
80 ppw EPIKURE™ Curing Agent 866  
0,3 ppw EPIKURE™ Catalyst 101



**EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL**  
**EPIKURE™ Curing Agent 866**  
**EPIKURE™ Catalyst 101**

**Viscosity of the accelerated system (0.5) by different temperatures**

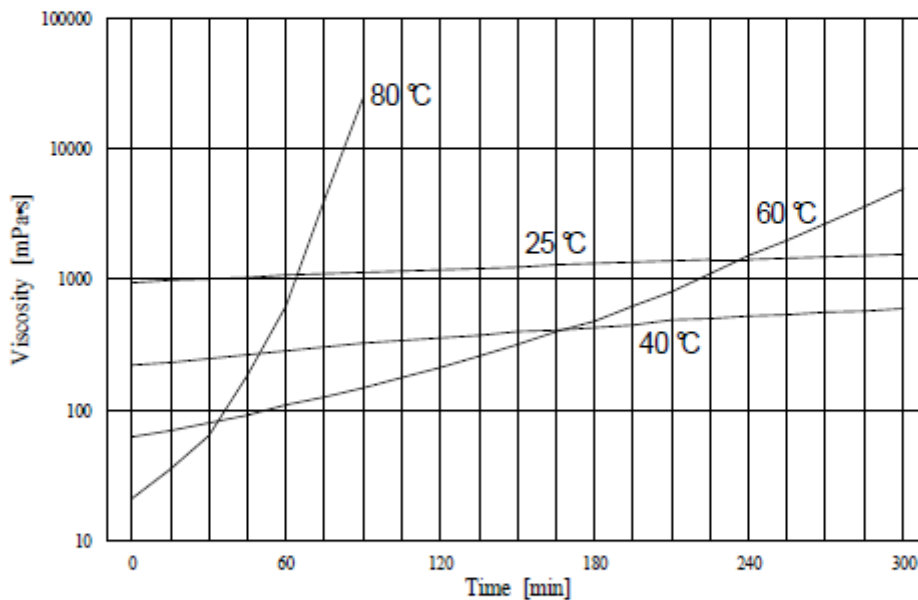
**Viscogramm 4: dyn. Viscosity at 25, 40, 60 and 80 °C**  
100 ppw EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL  
80 ppw EPIKURE™ Curing Agent 866  
0,5 ppw EPIKURE™ Catalyst 101



**EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL**  
**EPIKURE™ Curing Agent 866**  
**EPIKURE™ Catalyst 101**

**Viscosity of the accelerated system (1.0) by different temperatures**

**Viscogramm 5: dyn. Viscosity at 25, 40, 60 and 80 °C**  
 100 ppw EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL  
 80 ppw EPIKURE™ Curing Agent 866  
 1 ppw EPIKURE™ Catalyst 101



**Shelf Life**

In sealed containers at 20 - 25°C EPIKOTE™ Resin 828 LEVEL - 12 months, EPIKURE™ Curing Agent 866 - 24 months and EPIKURE™ Catalyst 101 - 12 months.

**Precautions**

For information about safe handling of EPIKOTE epoxy resins and EPIKURE Curing Agents, please note the corresponding Safety Data Sheet.