

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## Διπλωματική Εργασία

**Πειραματικός χαρακτηρισμός σύνθετων υλικών ινών γυαλιού και βινυλεστερικής ρητίνης κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών**



Γεώργιος Καλός

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

## Ευχαριστίες

Με την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας κλείνει ένας ιδιαίτερα σημαντικός κύκλος της ζωής μου, αυτός των προπτυχιακών σπουδών. Η εργασία αυτή είναι αποτέλεσμα πολλών ωρών προσωπικής αφιέρωσης και έρευνας, αλλά δε θα ήταν δυνατή χωρίς την πολύτιμη συμβολή και στήριξη καθηγητών, συναδέλφων, φίλων.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Τσούβαλη, για την τιμή και το προνόμιο που μου παρείχε. Αρχικά για την ευκαιρία να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία μου στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και πιο συγκεκριμένα να συνεισφέρω στον τομέα των σύνθετων υλικών. Επιπλέον, για την συνεχή και στοχευμένη καθοδήγηση επί του τεχνικού μέρους της εργασίας, αλλά και για την στήριξή του σε ανθρώπινο πλαίσιο. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας, καθώς και για τη βελτίωσή μου ως μηχανικός αυτά τα χρόνια.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στο Διδακτικό Προσωπικό του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, συγκεκριμένα τους κ. Μαρκουλή και κ. Ξάνθη. Η βοήθειά τους για την προετοιμασία των δοκιμών και τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών υπήρξε υπερπολύτιμη, ενώ και η στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της παρουσίας μου στο εργαστήριο αμέριστη.

Ευχαριστώ, επίσης, τις συναδέλφους (διπλωματούχους πλέον) Κορίνα Ζερβού και Κατερίνα Χατζηπλή για τη βοήθεια που μου παρείχαν στα πρώτα στάδια του πειραματικού μέρους της διπλωματικής εργασίας και όχι μόνο. Ιδιαίτερα σημαντικές ήταν οι συμβουλές και παρατηρήσεις τους και ιδιαίτερα ευχάριστο το κλίμα που δημιούργησαν.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία B&T Composites για την κατασκευή και συνεισφορά των δοκιμών σύνθετων υλικών, προκειμένου να είναι εφικτή η διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών της διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, στην οικογένειά μου και στους φίλους μου, σας ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη, την υποστήριξη, την αγάπη σας. Σας είμαι βαθύτατα ευγνώμων.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των σύνθετων υλικών τείνει να αυξάνεται στη ναυπηγική και όχι μόνο, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων τους, όπως του μειωμένου βάρους τους, της υψηλής ειδικής αντοχής και της σημαντικής αντίστασής τους στη διάβρωση και στην κόπωση. Ιδιαίτερα, με τη μέθοδο περιέλιξης ινών είναι δυνατή η παραγωγή προϊόντων κυλινδρικής ή σφαιρικής μορφής με καλή επαναληψιμότητα, υψηλής αντοχής και δυσκαμψίας για τη χρήση σε εφαρμογές αυξημένων απαιτήσεων.

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών από βινυλεστερική ρητίνη και ίνες γυαλιού κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, καθώς και η διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων στις τελικές μηχανικές ιδιότητες. Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται μέσω πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού σε δακτυλοειδή και επίπεδα ευθύγραμμα δοκίμια που προήλθαν από κυλίνδρους σύνθετου υλικού. Εξετάζονται κυρίως η τάση θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας σε διεύθυνση παράλληλη με τις ενισχυτικές ίνες και κάθετα σε αυτές, καθώς και η τάση θραύσης σε διάτμηση και το μέτρο διάτμησης. Οι αντίστοιχες μέθοδοι που ακολουθούνται είναι μια ελαφρώς βελτιωμένη εκδοχή της δοκιμής διαιρούμενου δίσκου (split-disk test), η δοκιμή εφελκυσμού κάθετα στις ίνες και η δοκιμή εφελκυσμού σε διεύθυνση  $\pm 45^\circ$  σε σχέση με τις ίνες.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους για την αξιολόγηση της επίδρασης των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων, όπως η διάμετρος, το πάχος και ο αριθμός συστάδων ινών (tows) στη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων. Επιπλέον, πραγματοποιείται μια πρώτη εκτίμηση της απόδοσης της βινυλεστερικής ρητίνης, έναντι πιο συμβατικών συνδετικών υλικών (εποξική ή πολυεστερική) στα σύνθετα υλικά από περιέλιξη ινών.

## **ABSTRACT**

The use of composite materials is tending to increase in shipbuilding and beyond, due to their significant advantages such as their reduced weight, high specific strength and significant resistance to corrosion and fatigue. In particular, with the filament winding method, it is possible to produce cylindrical or spherical products with great repeatability, high strength and stiffness for use in high-demanding applications.

The aim of this thesis is to study the mechanical behavior of filament wound composites made of vinylester resin and glass fibers and to investigate the influence of the geometric and construction parameters on the final mechanical properties. This study is carried out by means of experimental tensile tests on ring and flat plane specimens, obtained from composite cylinders. In particular, the failure stress and modulus of elasticity in the direction parallel to and perpendicular to the reinforcing fibers, as well as the shear failure stress and shear modulus shall be considered. The respective methods followed are a slightly improved version of the split-disk test, the perpendicular to the fibers tensile test and the  $\pm 45^\circ$  tensile test in relation to the fibers.

The results are then compared with each other to evaluate the effect of geometric and construction parameters, such as diameter, thickness and the number of tows on the mechanical behavior of the specimens. In addition, a first evaluation of the performance of vinylester resin, compared to more conventional binders (epoxy or polyester) in filament wound composites is carried out.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ .....	1
1.1. Ορισμός .....	1
1.2. Ιστορική αναδρομή .....	2
1.3. Χαρακτηριστικά σύνθετων υλικών .....	4
1.3.1. Ρητίνες .....	5
1.3.2. Ίνες.....	9
1.4. Βινυλεστερικές ρητίνες .....	14
1.4.1. Διαφορές βινυλεστερικών – πολυεστερικών ρητινών .....	14
1.4.2. Χαρακτηριστικά, ιδιότητες, πλεονεκτήματα, εφαρμογές, κόστος .....	15
1.5. Κατασκευαστικές μέθοδοι.....	16
1.5.1. Μέθοδος περιέλιξης ινών.....	19
1.6. Εφαρμογές στη ναυπηγική σύνθετων υλικών από περιέλιξη ινών .....	20
1.7. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας.....	24
2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ .....	25
2.1. Δοκιμές χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων.....	25
2.2. Συμβατικές μέθοδοι μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων .....	26
2.3. Μέθοδοι χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμίων .....	30
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ .....	33
3.1. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας .....	33
3.2. Κατασκευή και χαρακτηριστικά κυλίνδρων.....	34
3.3. Ονοματολογία δοκιμίων .....	35
4. ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ( $E_1, \sigma_1$ ).....	39
4.1. Γεωμετρία δοκιμίων.....	39
4.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....	43
4.3. Αποτελέσματα.....	51
4.4. Πειραματικές δοκιμές με αισθητήρα στις $0^\circ$ περιφερειακά .....	67
5. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ ( $E_2, \sigma_2$ ).....	73
5.1. Γεωμετρία δοκιμίων.....	73
5.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....	75
5.3. Αποτελέσματα.....	78
6. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ( $G_{12}, \tau_{12}$ ) .....	85
6.1. Γεωμετρία δοκιμίων.....	85

6.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....	87
6.3. Αποτελέσματα.....	90
7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	96
7.1. Επίδραση της βινυλεστερικής ρητίνης στις μηχανικές ιδιότητες .....	96
7.2. Επίδραση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες .....	98
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	116
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	119



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

## 1.1. Ορισμός

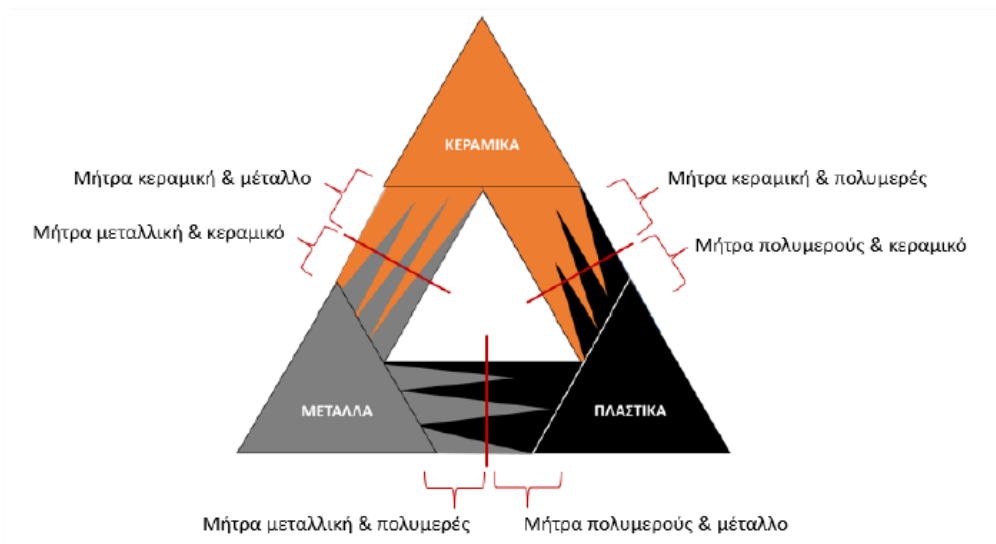
Ο όρος «σύνθετος», όπως υποδηλώνει η ετυμολογία της λέξης (συνθέτω, δηλαδή χρησιμοποιώ επιμέρους στοιχεία για να σχηματίσω ένα ολοκληρωμένο σύνολο), σημαίνει πως κάτι αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Συνεπώς, τα «σύνθετα υλικά» (composite materials) είναι τα υλικά εκείνα που προκύπτουν από τον συνδυασμό δύο ή περισσότερων επιμέρους υλικών. Τα συνιστώντα μέρη ενός σύνθετου έχουν μεταξύ τους αισθητά διαφορετικά χαρακτηριστικά, ενώ και το τελικό προϊόν χαρακτηρίζεται από νέες, βελτιωμένες ιδιότητες. Αυτός είναι, εξάλλου και ο σκοπός δημιουργίας των σύνθετων υλικών, η επίτευξη καλύτερων μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων σε σύγκριση με τα συνθετικά μέρη.

Κατά τον Agarwal (1990) δίνεται ο εξής ορισμός: «Σύνθετα θεωρούνται τα υλικά τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.»

Στην επιστήμη των υλικών, λοιπόν δεν μπορούν να θεωρηθούν ως σύνθετα για παράδειγμα τα μεταλλικά κράματα, των οποίων τα συστατικά στοιχεία έχουν παραπλήσιες ιδιότητες. Επιπλέον, το ένα στοιχείο (ή περισσότερα) βρίσκεται σε πολύ μικρή ποσότητα μέσα στο κράμα. Ούτε τα μίγματα δεν κατατάσσονται στα σύνθετα υλικά, παρά την ύπαρξη δύο ή περισσότερων μερών, καθώς δεν υπάρχει κάποια φυσική διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.

Εν γένει, σε ένα σύνθετο υλικό, οι ιδιότητες του ενός συνιστώντος υλικού θα πρέπει να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του άλλου (τουλάχιστον πενταπλάσιες), ενώ η περιεκτικότητα κατ' όγκο του ενός δε θα πρέπει να είναι πολύ μικρή, περίπου >10% (Τσούβαλης, 2022). Στο Σχήμα 1.1 απεικονίζονται οι κατηγορίες σύνθετων υλικών, ως αποτέλεσμα συνδυασμού ανά δύο των κύριων δομικών υλικών (μεταλλικά, κεραμικά, πολυμερή).





Σχήμα 1.1. Κατηγορίες σύνθετων υλικών (Χατζίνας, 2021)

## 1.2. Ιστορική αναδρομή

Οι ανθρώπινες κατασκευές με τη χρήση σύνθετων υλικών μπορούν να φτάσουν χρονικά πίσω στην εποχή παραγωγής πλίνθων και άλλων κεραμικών ειδών, από άργιλο ή λάσπη ενισχυμένα με άχυρο. Ένα από τα αρχαιότερα χρησιμοποιούμενα σύνθετα είναι το «μπαγδατί» (wattle and daub) με την χρήση του να καταγράφεται στα 6000 χρόνια πριν. Το μπαγδατί είναι ένας συνδυασμός ενός ξύλινου σκελετού, με οριζόντια πλέγματα από λεπτούς πήχεις ή καλάμια καρφωμένα σε αυτόν. Στα κενά μεταξύ των πήξεων ή των καλάμιών χρησιμοποιούνταν συνήθως ασβεστοκονίαμα ως συνδετικό υλικό. Η χρήση που είχε το μπαγδατί ήταν η κατασκευή των τοίχων των αρχαίων ξύλινων σπιτιών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2.

Ορισμένα σύνθετα υλικά είναι φυσικής προέλευσης, για παράδειγμα το ξύλο αποτελείται από ίνες κυτταρίνης, οι οποίες περιβάλλονται από ένα συνδετικό υλικό που ονομάζεται λιγνίνη (lignin). Από την άλλη, υπάρχουν και υλικά ευρέως χρησιμοποιούμενα, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των σύνθετων, όπως το οπλισμένο σκυρόδεμα. Το συγκεκριμένο υλικό απαντάται με την πιο συνήθη ονομασία «μπετό» και αποτελείται από σκυρόδεμα, ενισχυμένο με τον λεγόμενο «οπλισμό». Το σκυρόδεμα είναι ένα μίγμα χαλικιών, τσιμέντου και νερού που ύστερα από χημική αντίδραση μετατρέπεται σε ένα συμπαγές, στερεό σώμα. Ο οπλισμός είναι κυρίως γάλυβας σε μορφή ράβδων ή ινών, ή σπανιότερα ίνες γυαλιού.



Σχήμα 1.2. Αρχαίο σπίτι χτισμένο από μπαγδατί (πηγή: Wikipedia)

Στα σύγχρονα σύνθετα υλικά αξιοποιούνται κυρίως μεταλλικά, κεραμικά ή πολυμερή συνδετικά υλικά, τα οποία είναι ενισχυμένα με διάφορα είδη ινών ή σωματιδίων. Ειδικά τα τελευταία 50 χρόνια, η εφεύρεση και ανάπτυξη των «ενισχυμένων με ίνες πλαστικών» (Fiber Reinforced Plastics, FRP)<sup>1</sup> αποτέλεσε μια ιδιαίτερη καινοτομία στην επιστήμη και μηχανική των υλικών. Τα συγκεκριμένα υλικά προέκυψαν ως αποτέλεσμα μιας προσπάθειας στον χώρο της αεροδιαστημικής, να μειωθεί το βάρος των αεροσκαφών και των διαστημοπλοίων. Το χαμηλό βάρος ανά μονάδα όγκου, εξάλλου, είναι εκ των βασικότερων πλεονεκτημάτων των σύνθετων υλικών σε σχέση με τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα δομικά μέταλλα, όπως θα αναφερθεί και στη συνέχεια.

Με χρονική σειρά προηγήθηκαν της καθιέρωσης των FRP τα εξής:

- Υψηλής αντοχής ίνες γυαλιού, υψηλής δυσκαμψίας ίνες βορίου (boron) – 1960
- Ίνες άνθρακα (carbon fibers) – 1964
- Αραμιδικές ίνες (aramid), Kevlar – 1971

<sup>1</sup>: Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και ως «ινώδη σύνθετα υλικά» (fibrous composite materials)

Τις τελευταίες δεκαετίες, η ειδική αντοχή (πηλίκo αντοχής προς πυκνότητα) και η ειδική δυσκαμψία (πηλίκo μέτρου ελαστικότητας προς πυκνότητα) των ενισχυτικών ινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά αυξάνεται με διαρκείς ρυθμούς. Ως μία εικόνα τάξης μεγέθους, αναφέρεται πως τα μηχανικά αυτά μεγέθη είναι από 10 μέχρι και 14 φορές υψηλότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη του αλουμινίου (Τσούβαλης, 2022).

### 1.3. Χαρακτηριστικά σύνθετων υλικών

Τα σύνθετα υλικά κατατάσσονται στην κατηγορία των «ελαφρών υλικών» λόγω του μειωμένου βάρους που τα χαρακτηρίζει σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά. Επιπρόσθετοι λόγοι που συνηγορούν στην αξιοποίησή τους είναι η αυξημένη ειδική αντοχή, η καλή ανθεκτικότητα σε διάβρωση, η αυξημένη αντοχή σε κοπωτικά φορτία κ.α. Στο πλαίσιο των ναυπηγικών κατασκευών, λόγω του βασικότερου πλεονεκτήματός τους, δηλαδή του μειωμένου βάρους τους, τα σύνθετα συντελούν στα εξής:

- Μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο για δεδομένο μέγεθος πλοίου
- Υψηλότερες ταχύτητες
- Για δεδομένο ωφέλιμο φορτίο και απόσταση μεταφοράς, μειωμένη κατανάλωση καυσίμου και περιορισμός εκπομπών επιβλαβών αερίων
- Χρήση σε ανώτερα καταστρώματα οδηγεί σε μείωση της κατακόρυφης θέσης του κέντρου βάρους, συνεπώς αυξημένη ευστάθεια

Είναι γεγονός πως στις ναυπηγικές εφαρμογές, χρησιμοποιούνται κατά βάση τα ινώδη σύνθετα υλικά σε μια διαμόρφωση πολλών στρώσεων, τοποθετημένων η μία επί της άλλης. Ως αποτέλεσμα λαμβάνονται τα λεγόμενα πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composite materials).

Κάθε μία στρώση (layer/lamina/ply), αποτελείται από τη ρητίνη ή μήτρα (matrix) και τις ενισχυτικές ίνες (fibers). Οι τελευταίες, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τις τελικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού, καθώς συνεισφέρουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην αντοχή του (Τσούβαλης, 2022). Οι ίνες έχουν πολύ λεπτή κυκλική διατομή και χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα μεγάλες τιμές αντοχής, διότι η κρυσταλλική δομή τους ευθυγραμμίζεται με τον άξονά τους κατά την παραγωγή τους. Ωστόσο μπορούν να παραλάβουν μόνο εφελκυστικό φορτίο κατά τη διεύθυνση του άξονά τους. Αυτή την

αδυναμία των ινών καλύπτει η χρήση της ρητίνης, η οποία δρα σαν ενωτικό υλικό, σταθεροποιεί τις ίνες στις θέσεις τους και τις προστατεύει έναντι θλιπτικών φορτίων, περιβαλλοντικών επιδράσεων και φθορών. Για τη δημιουργία του σύνθετου υλικού, η ρητίνη σε αρχικό στάδιο βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Στη συνέχεια, όμως, στερεοποιείται γύρω από τις ενισχυτικές ίνες μέσω της διαδικασίας του πολυμερισμού (curing).

### 1.3.1. Ρητίνες

Όπως προαναφέρθηκε, ο βασικότερος ρόλος της ρητίνης στο τελικό σύνθετο υλικό είναι η συγκράτηση των ενισχυτικών ινών στην προβλεπόμενη θέση τους, καθώς και η προστασία τους από το περιβάλλον. Αποτελεί, επομένως ένα είδος συνδετικού υλικού που σταθεροποιεί και περικλείει τις ίνες, το οποίο μάλιστα μεταφέρει τις καταπονήσεις μεταξύ των ινών, της ρητίνης και των στηρίξεων. Η ρητίνη είναι επίσης καθοριστική και για την αντοχή σε διάβρωση του σύνθετου υλικού.

Ως δομικά υλικά κατασκευών από σύνθετα υλικά, χρησιμοποιούνται δύο είδη ρητινών:

1. Θερμοσκληρυνόμενες (Thermosetting resins)
2. Θερμοπλαστικές (Thermoplastic resins)

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες είναι πολυμερή, τα οποία δεν υφίστανται χημικούς μετασχηματισμούς κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Σε αυξημένες θερμοκρασίες (150-200°C) «μαλακώνουν» δίνοντας τη δυνατότητα να μορφοποιηθούν και, στη συνέχεια, επιστρέφουν ξανά στην στερεή φάση. Χαρακτηρίζονται από υψηλή σκληρότητα και ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, έχουν όμως χαμηλή δυσκαμψία, ενώ η κατεργασία τους απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες. Η δυσκολία αυτή της επεξεργασίας τους συντελεί σε αυξημένο κόστος παραγωγής, οδηγώντας στην σπάνια χρήση των θερμοπλαστικών ρητινών σε ναυπηγικές κατασκευές. Αντίθετα, αξιοποιούνται κυρίως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Η πλέον συνήθης θερμοπλαστική ρητίνη είναι η PolyEther-Ether Ketone (PEEK) για εφαρμογές υψηλής απόδοσης με πολύ μεγάλη αντοχή θραύσης. Άλλα παραδείγματα είναι το PolyEther Sulphone (PES), το Polyetherimide (PEI), η Polysulfone (PSUL).

Στον Πίνακα 1.1 φαίνονται οι κύριες μηχανικές ιδιότητες (ειδικό βάρος  $\gamma$ , μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών E, τάση θραύσης  $\sigma_T$ , παραμόρφωση θραύσης  $\epsilon_T$ ) ορισμένων θερμοπλαστικών ρητινών.

Πίνακας 1.1. Μηχανικές ιδιότητες θερμοπλαστικών ρητινών (Τσούβαλης, 2022)

Ρητίνη	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\epsilon_t$ (%)
ABS (acrylonitrile butadiene styrene)	1.05	3	35	50
PET (polyethylene terephthalate)	1.35	2.8	80	80
HDPE (high-density polyethylene)	0.95	1	30	600-1200
PA (polyamide, Nylon 6/6)	1.15	2.2	75	60
PC (polycarbonate)	1.2	2.3	60	100
PES	1.35	2.8	84	60
PEI	1.3	3	105	60
PEEK	1.3	3.7	92	50

Από την άλλη, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες υφίστανται έναν μη αναστρέψιμο χημικό μετασχηματισμό και σκληραίνουν μόνιμα κατά την επεξεργασία τους. Μετατρέπονται δηλαδή σε ένα άμορφο πολυμερές συνδετικό υλικό. Η διαδικασία σκλήρυνσης ονομάζεται πολυμερισμός (curing). Λόγω της εύκολης κατεργασίας και του χαμηλού κόστους, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες συνιστούν σχεδόν πάντα την επιλεγμένη ρητίνη σε ναυπηγικές εφαρμογές. Τα βασικότερα παραδείγματα είναι οι πολυεστερικές (polyester), οι βινυλεστερικές (vinylester), οι εποξικές (epoxy) και οι φαινολικές (phenolic), όλες με το χαρακτηριστικό να παρέχουν καλύτερη θερμική μόνωση από τα συνηθισμένα υλικά των κατασκευών. Τονίζονται στο σημείο αυτό δύο σημαντικά μεγέθη σχετικά με τις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Το πρώτο ονομάζεται χρόνος αποθήκευσης (shelf life) και αποτελεί το χρονικό διάστημα που η ακατέργαστη ρητίνη μπορεί να αποθηκευτεί χωρίς να αποδιοργανωθεί. Μετά το πέρας του shelf life, η ρητίνη καθίσταται μη χρηστική και μη κατεργάσιμη. Το δεύτερο μέγεθος ονομάζεται pot life ή gel time, χωρίς ακριβή ελληνική μετάφραση. Αποτελεί το χρονικό διάστημα από την έναρξη του πολυμερισμού μέχρι την στερεοποίηση της ρητίνης. Ο χρόνος αυτός του pot life είναι ουσιαστικά το διαθέσιμο περιθώριο που διαθέτει κάποιος για να διαχειριστεί και να μορφοποιήσει τη ρητίνη.

Για την αξιολόγηση και επιλογή της κατάλληλης ρητίνης για την εκάστοτε περίπτωση λαμβάνονται υπόψη και ακόμα δύο χαρακτηριστικά μεγέθη. Το πρώτο είναι η Θερμοκρασία Υαλώδους Μετάβασης/Μετάπτωσης (Glass Transition Temperature,  $T_g$ ), δηλαδή η θερμοκρασία πάνω από την οποία η πολυμερισμένη ρητίνη μεταβάλλει την

ψαθυρή φύση της σε όλκιμη, αποκτώντας μία μαλακή μορφή. Η μεταβολή αυτή οφείλεται εν γένει σε αλλαγές στη μοριακή δομή της ρητίνης, ενώ έχει ως συνέπεια διαφοροποίηση στις μηχανικές και φυσικές ιδιότητές της. Το δεύτερο μέγεθος είναι η συρρίκνωση κατ' όγκο (shrinkage), η οποία συναντάται στις θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. Η αιτία αυτού του φαινομένου είναι η εξώθερμη φύση του πολυμερισμού. Συνεπώς, κατά την στερεοποίηση, οι ρητίνες αυτές συστέλλονται επιφέροντας παραμένουσες θερμικές τάσεις και παραμορφώσεις, επιφανειακά ελαττώματα, ακόμα και ρωγμές. Η συρρίκνωση μετριάζεται από την παρουσία των ενισχυτικών ινών, είναι δε, διαφορετική σε κάθε είδος ρητίνης.

### Πολυεστερικές Ρητίνες

Οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν γενικά χαμηλό ιξώδες και είναι υγρά με βάση ακόρεστους πολυεστέρες, τα οποία διαλύονται σε κάποιο ενεργό μονομερές (π.χ. το στυρένιο). Οι συγκεκριμένες ρητίνες συνιστούν τη βασική επιλογή σε ναυπηγικές εφαρμογές. Χαρακτηρίζονται από σχετικά μικρό κόστος και σχετικά εύκολη διαχείριση κατά την παραγωγή τους. Επιπλέον η υψηλή τους αντοχή σε χημική διάβρωση τις καθιστά κατάλληλες για τη χρήση στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Κύριες κατηγορίες αποτελούν οι:

- Ορθοφθαλικοί πολυεστέρες
- Ισοφθαλικοί πολυεστέρες (υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα σε θαλάσσιο περιβάλλον, χρησιμοποιούνται ως εξωτερικό προστατευτικό στρώμα του σύνθετου υλικού – το λεγόμενο gel coat)

### Εποξικές Ρητίνες

Οι εποξικές ρητίνες συνιστούν ένα ιδιαίτερα αξιόπιστο συνδετικό υλικό, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται σαν adhesives, δηλαδή συγκολλητικά μέσα (Ραυτογιάννης, 2013). Το χαρακτηριστικό τους αυτό είναι απόρροια της χαμηλότερης συρρίκνωσης που υφίστανται κατά την στερεοποίησή τους - περίπου 1.5 ως 4% του αρχικού όγκου - από τις άλλες ρητίνες. Επιπρόσθετα τα εποξικά συνδετικά υλικά χαρακτηρίζονται από υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη αντοχή σε διάβρωση από τις

πολυεστερικές και τις βινυλεστερικές ρητίνες. Η επίδραση που δέχονται από την υγρασία και τη θερμοκρασία είναι επίσης ασθενέστερη σε σχέση με άλλα πολυμερή.

Ωστόσο, το υψηλό κόστος τους αποτρέπει την επικράτηση της χρήσης τους σε ναυπηγικές εφαρμογές, περιορίζοντας τις κυρίως σε αυτοματοποιημένες μεθόδους παραγωγής, όπως η μέθοδος περιέλιξης των ινών (filament winding – βλ. Κεφ. 1.5.1). Και αυτό διότι η διαδικασία στερεοποίησης των εποξικών ρητινών υποβάλλει την προσθήκη ενός σκληρυντικού μέσου (hardener) και συνήθως αυξημένες θερμοκρασίες (60 ως 150°C). Η συγκεκριμένη διαδικασία αποκαλείται μετα-πολυμερισμός (post-curing).

### Φαινολικές Ρητίνες

Το συγκεκριμένο είδος ρητίνης προσφέρει τα πλεονεκτήματα του χαμηλού κόστους, της ικανοποιητικής πυραντοχής και της ιδιαίτερα μικρής εκπομπής καπνού. Η διαδικασία παραγωγής τους διαφέρει αρκετά από τις αντίστοιχες διαδικασίες παραγωγής άλλων ρητινών, όπως οι πολυεστερικές. Ωστόσο, οι μηχανικές ιδιότητες μεταξύ των δύο ειδών είναι παραπλήσιες σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι φαινολικές ρητίνες περιέχουν υψηλά ποσοστά σε κενά αέρα, τα οποία συμβάλλουν στην απορρόφηση μεγάλων ποσοτήτων νερού -3 φορές περισσότερο από τους ισοφθαλικούς πολυεστέρες- (Τσούβαλης, 2022). Κατά συνέπεια, η χρήση τους στη ναυπηγική περιορίζεται εν γένει στην κατασκευή πυράντοχων εσωτερικών φρακτών και καταστρωμάτων.

### Άλλες Ρητίνες

Ενδεικτικά αναφέρονται και άλλα παραδείγματα θερμοσκληρυνόμενων ρητινών, οι οποίες όμως δεν συναντούν ευρεία χρήση στον τομέα της ναυπηγικής:

- Αμινο-ρητίνες (σχηματισμός από αντίδραση μεταξύ φορμαλδεΰδης και αμίνης)
- Νανοτροποποιημένες ρητίνες (σύγχρονες τεχνολογίες, περιέχουν τουλάχιστον μία πρόσθετη ουσία, η οποία έχει τουλάχιστον μία διάσταση σε τάξη μικρομέτρου)
- Αυτοϊάσιμες ρητίνες (self-healing resins – περιέχουν στο εσωτερικό τους ένα μέσο «ίασης» για περιπτώσεις βλάβης π.χ. ρωγμής και έναν καταλύτη· το μέσο ίασης πολυμερίζεται όταν έρθει σε επαφή με τον καταλύτη και καλύπτει το εκάστοτε ελάττωμα)

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών.

Πίνακας 1.2. Μηχανικές ιδιότητες θερμοσκληρυνόμενων ρητινών (Τσούβαλης, 2022)

Ρητίνη	$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	E (GPa)	$\nu$	$\sigma_T$ (MPa)	$\epsilon_T$ (%)	$\sigma_c$ (MPa)	Σκληρότητα Barcol	Συρρίκνωση (%)
Ορθοφθαλκή Πολυεστερική	1.23	4.1	0.36	48.3	1.0	130	42	8.2
Ισοφθαλκή Πολυεστερική	1.21	3.9	0.36	71.1	2.0	130	46	7.5
Βινυλεστερική	1.12	3.4	–	76-83	4.0-5.0	120	35	
Εποξική	1.20	3.7	0.37	48-76	5.0-6.0	130	86	0.3

### 1.3.2. Ίνες

Οι ίνες χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά ως μέσα ενίσχυσης, λόγω του μικρού τους βάρους, της υψηλής αντοχής και επειδή είναι πιο δύσκαμπτες. Οι αυξημένες μηχανικές ιδιότητες των ινών απομονωμένα (σε σχέση με το ακατέργαστο υλικό ή και σε σχέση με το τελικό σύνθετο) οφείλονται στην ευνοϊκή κατανομή των μορίων του υλικού κατά τη διεύθυνση της ίνας και στην απουσία μεγάλου αριθμού ατελειών. Οι ενισχυτικές ίνες χωρίς τη ρητίνη υπόκεινται αποκλειστικά και μόνο σε εφελκυστικές καταπονήσεις. Ωστόσο, πέρα από την εφελκυστική αντοχή και δυσκαμψία, η συνεισφορά τους στη συμπεριφορά του τελικού σύνθετου υλικού σε θλίψη, κάμψη και διάτμηση είναι επίσης σημαντική (Τσούβαλης, 2022). Οι ψαθυρές ρητίνες ύστερα από την ενίσχυση με ίνες μετατρέπονται τελικώς σε ανθεκτικά σύνθετα υλικά.

Την κυριότερη μορφή οπλισμού ενός σύνθετου υλικού με ίνες συνιστά η διάταξη πολλών ινών παράλληλα και στον ίδιο προσανατολισμό, μέσα σε ένα μικρό πάχος ενός κελύφους ή επίπεδου ελάσματος που καλείται «στρώση». Όπως ήδη αναφέρθηκε, με τη χρήση πολλών στρώσεων σε διάφορους προσανατολισμούς δημιουργείται το τελικό πολύστρωτο σύνθετο υλικό. Αναφέρεται σε αυτό το σημείο η βασική ιδιότητα της μέγιστης αντοχής και δυσκαμψίας της εκάστοτε στρώσης στη διεύθυνση, η οποία είναι παράλληλη με τις ενισχυτικές ίνες. Αντίθετα, σε διεύθυνση κάθετα στον προσανατολισμό των ινών, η στρώση χαρακτηρίζεται από πρακτικά μηδενική αντοχή και δυσκαμψία, αφού συνεισφέρει σε αυτή μόνο η ύπαρξη της ψαθυρής ρητίνης. Το σύνθετο υλικό εν τέλει έχει διαφορετικές ιδιότητες από τις στρώσεις του, λόγω της ποικιλότητας των προσανατολισμών αυτών.



Για την παραγωγή σύνθετων υλικών, οι ίνες ταξινομούνται στις λεγόμενες συστάδες (tows ή strands ή rovings). Ένα tow είναι ένας αριθμός από μη πλεγμένες συνεχείς ίνες, οι οποίες θεωρούνται ως ένα ενιαίο σύνολο. Τα μεγέθη που καθορίζουν τα tows είναι η μάζα των ινών ανά 1000 m μήκος (σε gr) ή ο αριθμός των ινών που περιέχεται σε αυτά (π.χ. ένα tow 12K αποτελείται από 12000 ίνες).

Οι κατασκευαστές προμηθεύονται τις ίνες από το εμπόριο συνήθως σε μορφή υφασμάτων. Τα υφάσματα αυτά κυκλοφορούν σε τόπια με ποικίλα μήκη και πλάτη, ενώ διάφοροι είναι και οι τρόποι πλέξης τους. Το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο για τον καθορισμό των τελικών ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Ενδεικτικά παρατίθενται οι συνηθέστερες μορφές πλέξης των υφασμάτων, οι οποίες φαίνονται και στα Σχήματα 1.3 και 1.4.

- **Υαλοπύλημα (Chopped Strand Mat, CSM):** Κυρίως για ίνες γυαλιού. Αποτελείται από ίνες με μικρό μήκος οι οποίες πλέκονται σε τυχαίους προσανατολισμούς. Κατά συνέπεια, το CSM παρουσιάζει μακροσκοπικά ιστροπική συμπεριφορά, δηλαδή παραπλήσιες μηχανικές ιδιότητες σε όλες τις διευθύνσεις.
- **Υαλοϋφασμα (Woven Roving, WR):** Δέσμες νημάτων γυαλιού, που πλέκονται κάθετα μεταξύ τους. Έχουν συνήθως ισοσταθμισμένη διαμόρφωση, δηλαδή περίπου ίδιο αριθμό ινών στις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις (warp-fill). Εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές από το CSM.
- **Υφασμα πυκνής πλέξης (Woven Fabric):** Για την πλέξη αυτών των υφασμάτων χρησιμοποιούνται απλά περιεστρεμμένα νήματα. Είναι ελαφρύτερα από τα WR, ενώ η εξωτερική τους επιφάνεια είναι πιο ομαλή και λεία. Για αυτό το λόγο έχουν υψηλότερο κόστος και η χρήση τους πραγματοποιείται σε εξειδικευμένες εφαρμογές με πολύ αυστηρές απαιτήσεις αντοχής.
- **Μονοαξονικά υφάσματα (Unidirectional Rovings, UD):** Για την κατασκευή αυτών των υφασμάτων, ίνες παράλληλες μεταξύ τους και προσανατολισμένες προς μια κοινή διεύθυνση ράβονται με κάποιο συνδετικό υλικό. Συνεπώς, τα UD υφάσματα προσφέρουν στο σύνθετο υλικό αντοχή και δυσκαμψία μόνο σε μία διεύθυνση, τη διεύθυνση των ινών. Η χρήση τους περιορίζεται σε εφαρμογές όπου αναπτύσσονται μονοαξονικά εντατικά πεδία. Σε τέτοιες περιπτώσεις ο σχεδιαστής φροντίζει η διεύθυνση των ινών να ευθυγραμμίζεται με την διεύθυνση της καταπόνησης.

- Πλεγμένα υφάσματα (Knitted Fabrics): Ενισχυτικές ίνες τοποθετούνται και κατά τη διεύθυνση του πάχους των συγκεκριμένων υφασμάτων, προσδίδοντάς τους ένα τρισδιάστατο χαρακτήρα. Τα knitted fabrics παράγουν σύνθετα υλικά με αυξημένη ανθεκτικότητα σε αποχωρισμό των στρώσεων (delamination), όμως με κόστος την ελάττωση των συνεπίπεδων ιδιοτήτων τους. Είναι γεγονός πως σπάνια βρίσκουν χρήση αυτά τα υφάσματα σε ναυπηγικές εφαρμογές.



Σχήμα 1.3. Τρόποι πλέξης υφασμάτων – Γαλοπίλημα (αριστερά), υαλοϋφασμα (δεξιά) (Τσούβαλης, 2022)



Σχήμα 1.4. Υφασμα πυκνής πλέξης (αριστερά), μονοαξονικό ύφασμα (δεξιά) (Τσούβαλης, 2022)

Από την άλλη, για τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των ινών, καθοριστικός παράγοντας είναι και το ίδιο το υλικό από το οποίο αποτελούνται. Κατά βάση, σε ναυπηγικές κατασκευές η πλειοψηφία των ινών κατασκευάζεται από γυαλί, ωστόσο αρχίζουν τα τελευταία χρόνια να καθιερώνονται οι ίνες από άνθρακα και οι οργανικές ίνες (κυρίως οι αραμιδικές - aramid). Σημειώνεται πως οι ίνες γυαλιού συμπεριφέρονται σχεδόν ιστροπικά, ενώ οι ίνες άνθρακα και aramid είναι ανισοτροπικές.

### Ίνες γυαλιού

Όπως προαναφέρθηκε αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία στις ναυπηγικές κατασκευές από σύνθετα υλικά, κυρίως λόγω του χαμηλού τους κόστους. Οι ίνες από γυαλί (glass fibers) λόγω της φύσης τους χαρακτηρίζονται από σκληρότητα και αντοχή σε διάβρωση, ενώ επιπλέον παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και σχετικά χαμηλή δυσκαμψία. Τα κύρια είδη ινών γυαλιού είναι ο τύπος E, οι τύποι S, D, A κ.α. και κυκλοφορούν για εμπορικές χρήσεις σε μορφές υαλοπιλήματος, υαλοϋφάσματος, υφάσματος πυκνής πλέξης, μονοαξονικών υφασμάτων ή ως σκέτα νήματα. Τονίζεται επίσης, πως, ενώ η εφελκυστική αντοχή των ινών γυαλιού είναι υψηλή, μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και με τη δράση δυναμικών φορτίων. Σύμφωνα με τη Fibermax (2024) η τιμή για 1 m<sup>2</sup> ινών γυαλιού στη μορφή υαλοϋφάσματος κυμαίνεται από 5 έως 10 ευρώ.

### Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα ή ανθρακονήματα είναι ιδιαίτερα ελαφριές και ανθεκτικές, ωστόσο το υψηλό κόστος παραγωγής τους αποτρέπει την ευρεία χρήση τους στη ναυπηγική. Περιορίζονται κυρίως σε εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις αντοχής, όπως ταχύπλοα σκάφη ή υποβρύχια. Επειδή υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής ανθρακονημάτων με ποικίλες αντοχές και δυσκαμψίες, υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ινών από άνθρακα, οι ίνες υψηλής αντοχής (High Strength, HS) και οι ίνες υψηλής δυσκαμψίας (High Modulus, HM), με τις δεύτερες να είναι ακόμα πιο ακριβές από τις πρώτες. Το υψηλό τους κόστος αντισταθμίζεται με τις αυστηρές απαιτήσεις βάρους που ικανοποιούν, κυρίως σε αεροδιαστημικές εφαρμογές. Στο εμπόριο κυκλοφορούν με τη μορφή συνεχών ινών, ως υφάσματα πυκνής πλέξης ή ως προεμποτισμένες λωρίδες (prepregs).

### Οργανικές ίνες

Οργανικές ίνες συνήθως χρησιμοποιούνται σε κλωστοϋφαντουργικές εφαρμογές, ωστόσο, με την προϋπόθεση ότι διαθέτουν υψηλή αντοχή και δυσκαμψία, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησής τους ως ενισχυτικά στοιχεία σε προηγμένα σύνθετα υλικά. Οι πιο συνήθεις και ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι ίνες αραμιδίου (aramid) ή αρωματικού πολυαμιδίου ακριβέστερα, με εμπορική ονομασία Kevlar (π.χ. Kevlar-49). Χαρακτηρίζονται από μικρή πυκνότητα και, συνεπώς, υψηλή ειδική αντοχή και υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας. Οι ίνες αραμιδίου έχουν επιπλέον υψηλή απορροφητικότητα ενέργειας κατά την αστοχία η οποία τις καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικές έναντι κρουστικών φορτίων και, επομένως, κατάλληλες για χρήση σε δυναμικά φορτιζόμενες κατασκευές. Ωστόσο, η αντοχή τους σε θλίψη, κάμψη και ερπυσμό δεν είναι το ίδιο ικανοποιητικές, ενώ από τη φύση τους, φτιαγμένες από πολυμερή υλικά, επηρεάζονται σημαντικά από την υγρασία και τις υψηλές θερμοκρασίες. Το κόστος των αραμιδικών ινών είναι υψηλότερο και από αυτό των ινών γυαλιού και άνθρακα. Οργανικές είναι και οι ίνες πολυαιθυλενίου (polyethylene), οι οποίες παρουσιάζουν χαμηλότερη απορροφητικότητα σε υγρασία και χαμηλότερη πυκνότητα από το Kevlar-49, αλλά και μικρότερη μέγιστη θερμοκρασία χειρισμού.

Σε κάποιες εφαρμογές, χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα υβριδικά υφάσματα, δηλαδή συνδυασμός αραμιδικών ινών είτε με ίνες γυαλιού ή με ανθρακονήματα. Ο συνδυασμός αυτός παρέχει τα πλεονεκτήματα του κάθε είδους ινών, ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή. Για παράδειγμα οι υβριδικές ίνες carbon-aramid θα έχουν την υψηλή αντοχή και δυσκαμψία των ανθρακονημάτων, καθώς και την πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία των αραμιδικών ινών.

### Άλλες ίνες

Λοιποί τύποι ινών που χρησιμοποιούνται σε προηγμένα σύνθετα υλικά, αλλά με μικρή εφαρμογή σε ναυπηγικές κατασκευές είναι οι ίνες βορίου (boron), οι κεραμικές ίνες (για παράδειγμα από  $Al_2O_3$  ή από SiC). Αναφέρεται ενδεικτικά πώς παρουσιάζουν πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας και, η χρήση τους περιορίζεται στην αεροδιαστημική λόγω και του μεγάλου κόστους τους.

Ο Πίνακας 1.3 παρουσιάζει τις μηχανικές ιδιότητες των κυριότερων ενισχυτικών ινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά.

Πίνακας 1.3. Τυπικές ιδιότητες ορισμένων ενισχυτικών ινών (Τσούβαλης, 2022)

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

#### 1.4. Βινυλεστερικές ρητίνες

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία κατασκευάστηκαν και υποβλήθηκαν σε πειραματικές δοκιμές, δοκίμια με ίνες γυαλιού και βινυλεστερική ρητίνη. Συνεπώς παρουσιάζονται παρακάτω με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και εμβάθυνση τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες των βινυλεστέρων.

##### 1.4.1. Διαφορές βινυλεστερικών – πολυεστερικών ρητινών

Οι βινυλεστέρες αποτελούν υβριδική μορφή μεταξύ των πολυεστερικών και των εποξικών ρητινών. Οι βινυλεστερικές ρητίνες παράγονται από τις εποξικές με τις οποίες είναι παραπλήσιες χημικά, ενώ η (εξώθερμη) διαδικασία σκλήρυνσής τους προσιδιάζει την αντίστοιχη διαδικασία σκλήρυνσης των πολυεστερικών. Όσον αφορά στις μηχανικές τους ιδιότητες, οι βινυλεστέρες διαθέτουν υψηλότερη αντοχή από τους πολυεστέρες. Επιπλέον, ένα βασικό τους πλεονέκτημα είναι ότι διατηρούν σε μεγάλο βαθμό αυτές τις ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών (έως 120°C). Επιπρόσθετα, οι βινυλεστερικές ρητίνες παρουσιάζουν υψηλότερη αντίσταση στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον, λόγω της ανθεκτικότητάς τους σε οξέα και διαλυτικά μέσα. Άλλα πλεονεκτήματα σε σχέση με τους πολυεστέρες συνιστούν η μικρότερη συρρίκνωση κατά την στερεοποίηση, η μεγαλύτερη ανοχή σε παραμορφώσεις (δηλαδή υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας χωρίς βλάβες), ο γρηγορότερος πολυμερισμός και η χαμηλότερη πιθανότητα αποκόλλησης στρώσεων (delamination) στο παραγόμενο σύνθετο υλικό. Ωστόσο, οι βινυλεστερικές ρητίνες είναι ακριβότερες από τις πολυεστερικές.

#### 1.4.2. Χαρακτηριστικά, ιδιότητες, πλεονεκτήματα, εφαρμογές, κόστος

Τα σύνθετα υλικά με βινυλεστερική ρητίνη είναι κατάλληλα για δομικές εφαρμογές και ιδίως σε δύσκολες χημικές και θερμικές συνθήκες, χάρη στην υψηλή αντοχή τους σε διάβρωση (υπερτερούν σε σχέση με τα μέταλλα) και στην εξαιρετική θερμική σταθερότητά τους. Δέχονται βέβαια μία σχετικά μικρή επίδραση από το νερό που μειώνει σε ένα βαθμό τις ιδιότητές τους. Συγκεκριμένα, η απορρόφηση υδάτων αυξάνει το βάρος τους και ελαττώνει μακροπρόθεσμα την αντοχή και τη δυσκαμψία τους. Όπως και οι πολυεστερικές ρητίνες, έτσι και οι βινυλεστερικές απαιτούν αραίωση κατά την παραγωγή τους με την προσθήκη στυρενίου, το οποίο όμως εκπέμπει τοξικά καυσαέρια (Volatile Organic Compounds – VOC). Στον Πίνακα 1.4 παρατίθεται λεπτομερής σύγκριση των βινυλεστερικών με τις πολυεστερικές αλλά και με τις εποξικές ρητίνες.

Στο πλαίσιο των ναυπηγικών εφαρμογών, η βινυλεστερική ρητίνη αξιοποιείται σε μικρά σκάφη υψηλών απαιτήσεων, όπως αγωνιστικά ή ταχύπλοα, καθώς και σε πολεμικά σκάφη κατασκευασμένα από σύνθετα υλικά. Προτιμάται επίσης αντί των πολυεστέρων για να περιοριστεί η ώσμωση (blistering). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται στη γάστρα του σκάφους μετά από μεγάλης διάρκειας έκθεση στο νερό. Η διείσδυση ποσοτήτων ύδατος στις εσωτερικές στρώσεις του σύνθετου υλικού προκαλεί τη δημιουργία φυσαλίδων και την παραμόρφωση του gel coat στην επιφάνεια του πολύστρωτου (Σχήμα 1.5). Σε προχωρημένο στάδιο οι φυσαλίδες μπορεί να σπάσουν, αφήνοντας εκτεθειμένες στο νερό τις εσωτερικές στρώσεις.



Σχήμα 1.5. Ωσμωση σε γάστρα από GRP (πηγή: <https://www.sea-help.eu/en/guide/qfk-polyester-osmosis-boat-hull/>)

Όπως ήδη αναφέρθηκε το κόστος των βινυλεστερικών ρητινών είναι υψηλότερο από αυτό των πολυεστερικών, αλλά και μικρότερο από το κόστος των εποξικών. Ενδεικτικά, η τιμή ενός γαλονιού βινυλεστερικής ρητίνης της εταιρείας DERAKANE είναι 115 \$, δηλαδή περίπου 27 ευρώ/λίτρο ρητίνης (Sherfab, 2024).

Πίνακας 1.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα πολυεστερικών, βινυλεστερικών και εποξικών ρητινών (Τσούβαλης, 2022)

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

### 1.5. Κατασκευαστικές μέθοδοι

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται περιληπτικά οι διαδικασίες παραγωγής δομικών σύνθετων υλικών. Μεγαλύτερη εμβάθυνση και βάση θα δοθεί στη μέθοδο περιέλιξης ινών (filament winding). Με αυτή τη μέθοδο κατασκευάστηκαν οι κύλινδροι από τους οποίους προέκυψαν τα δοκίμια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Γενικά, η επιλογή της κατασκευαστικής μεθόδου που θα χρησιμοποιηθεί για το τελικό σύνθετο εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως ο τύπος των ινών και της ρητίνης, η απαιτούμενη θερμοκρασία για τη διαχείριση του συνδετικού υλικού, το κόστος, ο ρυθμός παραγωγής.

Οι βασικότερες μέθοδοι παραγωγής σε ναυπηγικές κατασκευές είναι οι παρακάτω:

- **Μορφοποίηση με απλή επαφή (contact moulding)**
  - Επίστρωση με ψεκασμό (spray-up)
  - Επίστρωση με το χέρι (hand lay-up)
- **Μορφοποίηση με πίεση (compression moulding)**
  - Μορφοποίηση με έγχυση με τη βοήθεια κενού (vacuum infusion)
  - Μορφοποίηση με σάκο κενού (vacuum bag moulding)

Άλλες μέθοδοι, οι οποίες δεν είναι συνήθεις στις κατασκευές σκαφών, όμως χρησιμοποιούνται σε διάφορες υψηλών απαιτήσεων εφαρμογές:

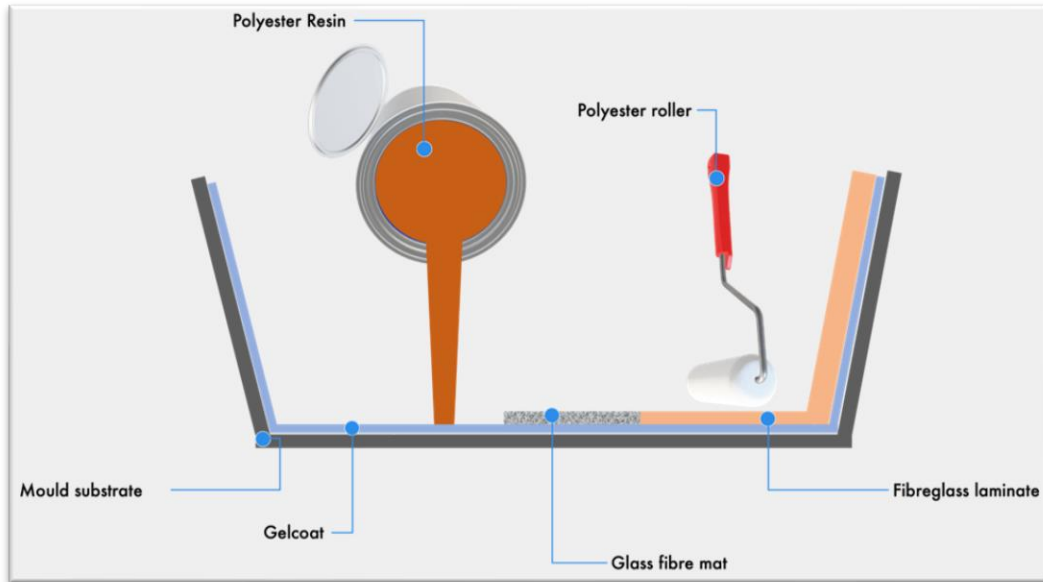
- Μέθοδος περιέλιξης ινών (filament winding)
- Μορφοποίηση με σάκο πίεσης (pressure bag moulding)
- Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave moulding)
- Μέθοδος έγχυσης ρητίνης (resin transfer moulding – RTM)
- Τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing)
- Μέθοδος μορφοποίησης με διαιρετό καλούπι (matched die moulding)
- Μέθοδος μορφοποίησης με έλξη (pultrusion)

Υπάρχουν προφανώς και άλλες μέθοδοι παραγωγής σύνθετων υλικών, αφενός όμως συναντώνται σπάνια στη ναυπηγική βιομηχανία, αφετέρου η αναφορά σε αυτές ξεφεύγει από τα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

Η μορφοποίηση με απλή επαφή (contact moulding) σε ένα ανοιχτό καλούπι είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την κατασκευή σκαφών από ινώδη σύνθετα υλικά. Έπειτα από την προσεκτική παραγωγή του (συνήθως ξύλινου για μικρά σκάφη) καλουπιού, υλοποιείται η επίστρωση με τα μέρη του σύνθετου σε υγρή μορφή. Σε πρώτη βάση η επίστρωση ξεκινάει με την εφαρμογή χρωματισμένης ρητίνης, η οποία θα έχει το ρόλο του gel coat στο εξωτερικό της γάστρας, και συνεχίζεται με την απόθεση του υπόλοιπου υλικού. Είναι προφανές ότι η τελευταία επίστρωση στο καλούπι θα αποτελεί το εσωτερικό της γάστρας, η οποία μετά τη στερεοποίηση απομακρύνεται από το καλούπι. Όπως αναφέρθηκε, η διαδικασία επίστρωσης



πραγματοποιείται είτε με ψεκασμό νημάτων γυαλιού ταυτόχρονα με σταγονίδια ρητίνης (spray-up), είτε με το χέρι, όπου απλώνεται ρητίνη πάνω στο καλούπι και παράλληλα τοποθετούνται οι ενισχυτικές ίνες με τη βοήθεια ειδικών ρολών (hand lay-up, Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6. Μέθοδος επίστρωσης με το χέρι (πηγή: <https://www.fassmer.de/en/wind-power/production/hand-lay-up>)

Από την άλλη, στη μορφοποίηση με πίεση, όπως περιγράφεται και στην ονομασία της μεθόδου, επιβάλλεται πίεση στην επιφάνεια του μη στερεοποιούμενου πολύστρωτου σύνθετου υλικού. Το γεγονός αυτό αποσκοπεί στον περιορισμό των κενών αέρα στο εσωτερικό του σύνθετου και στην αύξηση της περιεκτικότητάς του σε ενισχυτικές ίνες.

Οι βασικότεροι τρόποι μορφοποίησης με πίεση συνιστούν την έγχυση με τη βοήθεια κενού (vacuum infusion) ή τη μορφοποίηση με σάκο κενού (vacuum bag moulding).

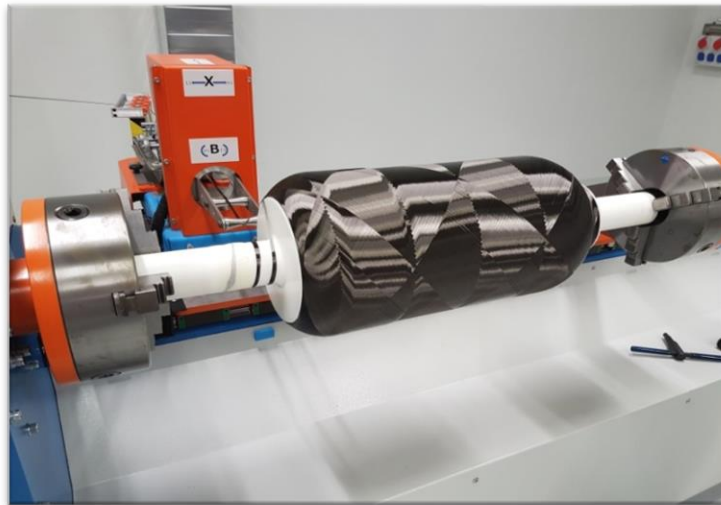
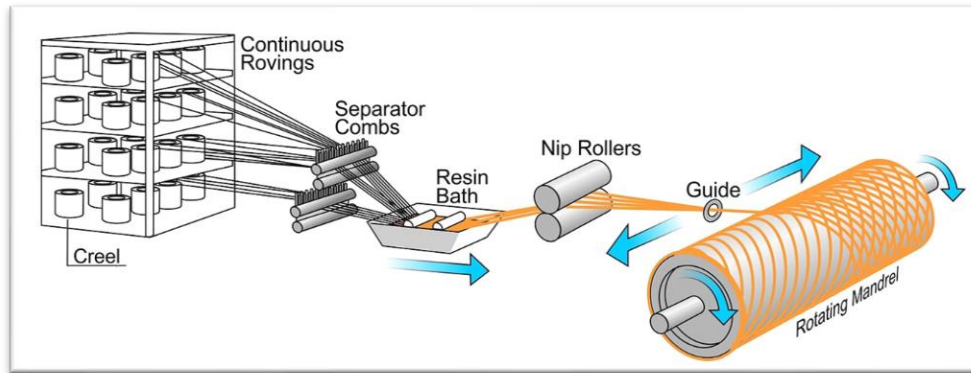
#### 1.5.1. Μέθοδος περιέλιξης ινών

Η συγκεκριμένη μέθοδος παραγωγής αποτελεί έναν φθηνό και ικανοποιητικό ποιοτικά τρόπο για την κατασκευή προϊόντων με κυλινδρική ή σφαιρική μορφή, όπως για παράδειγμα σωληνώσεων. Στη διαδικασία της περιέλιξης (filament winding), συνεχή ενισχυτικά στοιχεία τυλίγονται γύρω από ένα αξονοσυμμετρικό καλούπι (mandrel), το οποίο καθορίζει την τελική εσωτερική γεωμετρία της κατασκευής. Η ενίσχυση είναι συνήθως σε μορφή δέσμης ινών (roving) και πριν τυλιχθεί περιμετρικά του καλουπιού εμποτίζεται σε λουτρό ρητίνης.

Κατά βάση, η περιέλιξη των ινών πραγματοποιείται με ελικοειδή τρόπο, δηλαδή ο άξονας-καλούπι βρίσκεται σε διαρκή περιστροφή, ενώ ο οδηγός τροφοδότησης ινών εκτελεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση για να βρίσκεται σε συγχρονισμό με τον άξονα. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται η επιθυμητή γωνία περιέλιξης. Σημειώνεται πώς υπάρχει και η δυνατότητα πολικής περιέλιξης για την παραγωγή σφαιρικών κατασκευών.

Ακολουθεί η στερεοποίηση της ρητίνης είτε απευθείας επάνω στο καλούπι είτε σε κατάλληλο φούρνο αν υπάρχει απαίτηση υψηλών θερμοκρασιών. Στη συνέχεια, το καλούπι αφαιρείται και μένει τελικά ένας κούφιος κύλινδρος από σύνθετο υλικό με εξαιρετική ειδική αντοχή. Για την πιο εύκολη αφαίρεση του, ο άξονας-καλούπι έχει μια μικρή κωνικότητα ή είναι διαιρετός. Σχηματική αναπαράσταση της μεθόδου παρατίθεται στο Σχήμα 1.7.

Η διαδικασία προσφέρει πλεονεκτήματα όπως υψηλή αντοχή, προσαρμογή των μηχανικών ιδιοτήτων και τη δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων σχημάτων με σχετική ευκολία, καθιστώντας τη μια ευέλικτη και αποτελεσματική μέθοδο για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Είναι δε γρήγορη και αυτοματοποιημένη, επομένως οικονομική με υψηλούς ρυθμούς παραγωγής. Μερικά μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό αρχικό κόστος κτήσης του εξοπλισμού, η δυσκολία περιέλιξης σε μικρές γωνίες παράλληλα με το καλούπι, η δυσκολία κατασκευής επιφανειών με ανάποδη καμπυλότητα, καθώς και ο περιορισμός σε συμμετρικές γεωμετρίες.



Σχήμα 1.7. Μέθοδος περιέλιξης ινών – Διαδικασία (πάνω), μηχανή (κάτω) (πηγή:

<https://www.kompozitsan.com/en/compozit-machinery-manufacturing/418-4-akis-filament-winding-machine.html>)

## 1.6. Εφαρμογές στη ναυπηγική σύνθετων υλικών από περιέλιξη ινών

Είναι γεγονός πώς η συγκεκριμένη κατασκευαστική μέθοδος εξελίσσεται διαρκώς τα τελευταία χρόνια, αυτοματοποιώντας τη διαδικασία σε μεγάλο βαθμό και σημειώνοντας σημαντική πρόοδο στον τομέα των σύνθετων υλικών. Όπως ήδη τονίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, παράγονται προϊόντα υψηλής ποιότητας με ικανοποιητική επαναληψιμότητα, τα οποία έχουν ποικίλες εφαρμογές στη ναυτιλία. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότερες ναυπηγικές εφαρμογές σύνθετων υλικών από περιέλιξη ινών:

- **Άξονες:** Παραγωγή αξόνων μετάδοσης ισχύος από τη μηχανή στην έλικα. Ιδιαίτερα σε μικρά σκάφη, τείνουν να χρησιμοποιούνται άξονες από σύνθετα υλικά προς αντικατάσταση των συνηθισμένων μεταλλικών. Αιτία αυτής της τάσης συνιστά η εξοικονόμηση βάρους που επιτυγχάνεται.
- **Δοχεία-Δεξαμενές:** Πολύ σημαντική εφαρμογή της μεθόδου και των σύνθετων υλικών γενικότερα. Τα λεγόμενα δοχεία πίεσης (pressure vessels) που είναι ανθεκτικά σε μεγάλες εσωτερικές ή εξωτερικές πιέσεις αξιοποιούνται για τη μεταφορά και αποθήκευση υγρών (νερό) και καυσίμων (υδρογόνο, φυσικό αέριο).
- **Σωλήνες:** Σύνθετα υλικά από περιέλιξη ινών αξιοποιούνται ευρέως στην κατασκευή δικτύων σωληνώσεων για τη μεταφορά ρευστών στα πλοία. Η υψηλή αντοχή και η αντίσταση στη διάβρωση τα καθιστά κατάλληλα και ανθεκτικά όσον αφορά τέτοιες λειτουργίες.
- **Υποβρύχια σώματα:** Αξιοσημείωτη είναι η εφαρμογή της μεθόδου για την κατασκευή υψηλών απαιτήσεων γαστρών για υποβρύχια σκάφη. Τέτοια σύνθετα υλικά παρέχουν την απαραίτητη αντοχή που χρειάζεται σε μεγάλα βάθη και υψηλές πιέσεις.
- **Ιστοί-Μπούμες:** Τα σύνθετα υλικά από περιέλιξη ινών (filament wound composites) χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ιστών (masts) και για μπούμες γερανών (booms). Και αυτό διότι, τα συγκεκριμένα υλικά είναι κατάλληλα για δομές που απαιτούν ταυτόχρονα αντοχή και χαμηλό βάρος.
- **Κεραίες:** Κατασκευή ελαφριών δομών κεραιών (antennas), παρέχοντας υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα στις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες.
- **Προστατευτικά:** Με τη μέθοδο περιέλιξης παράγονται θόλοι, οι οποίοι έχουν προστατευτικό ρόλο σε συστήματα επικοινωνίας, όπως ραντάρ.
- **Αγωγοί:** Λόγω της αντίστασης σε μεγάλες πιέσεις και στη διάβρωση συχνή είναι η κατασκευή υποθαλάσσιων αγωγών και δομών από σύνθετα υλικά, για πολλαπλές χρήσεις (π.χ. η άντληση πετρελαίου από πλωτές εγκαταστάσεις)
- **Κελύφη:** Χρήση στην κατασκευή κυλινδρικών κελυφών τορπιλών, παρέχοντας συνδυασμένη αντοχή και ελαφρότητα.

Συνοψίζοντας, η χρήση των σύνθετων υλικών που παράγονται με τη μέθοδο περιέλιξης ινών στη ναυτιλία, συμβάλλει στην επίτευξη ισορροπίας μεταξύ της δομικής απόδοσης, της μείωσης του βάρους και της αντοχής σε αντίξοες θαλάσσιες συνθήκες. Παράλληλα παρέχει την απαραίτητη αντοχή για διάφορες ναυπηγικές εφαρμογές. Με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών παράγονται προϊόντα με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες, με τη χρήση συνεχών ινών, ενώ ταυτόχρονα μειώνεται και το κόστος κατασκευής (Peters, 2011). Στα Σχήματα 1.8-1.12 διακρίνονται ορισμένες από τις ναυπηγικές εφαρμογές σύνθετων υλικών κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης ινών.



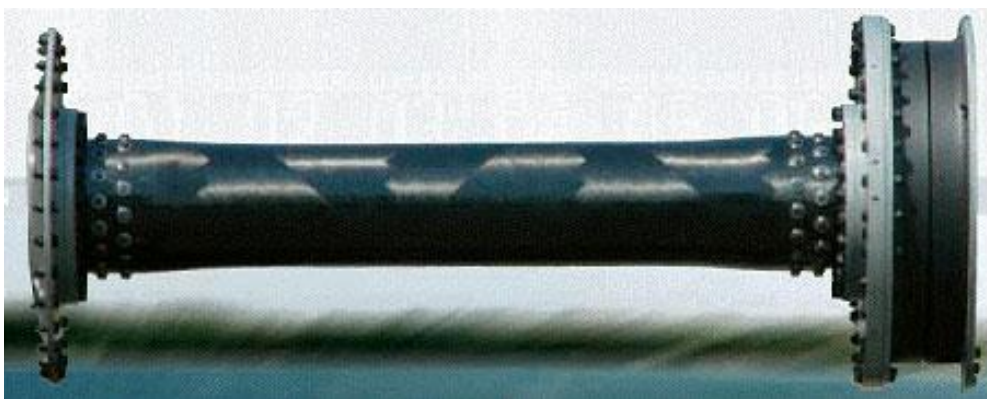
Σχήμα 1.8. Σύστημα σωληνώσεων πλοίου από GFRP (πηγή: <http://www.sspt.com.cy/qre-grp-pipes-accessories-3>)



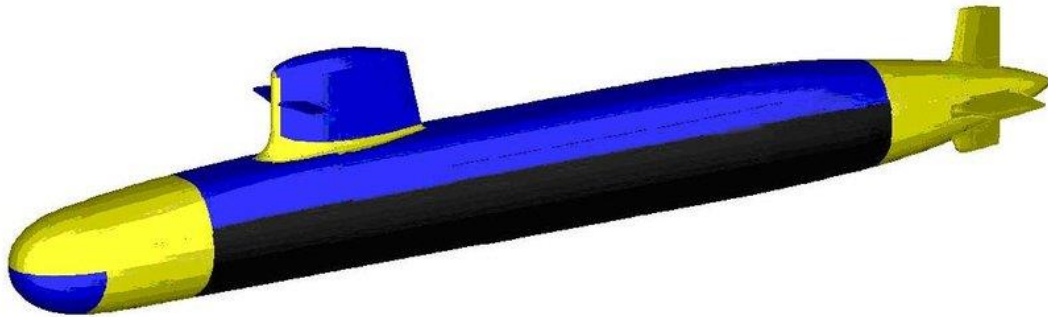
Σχήμα 1.9. Προστατευτικός θόλος σε ραντάρ πλοίου (πηγή: <https://www.curbellplastics.com/materials/industries/radomes/>)



Σχήμα 1.10. Δοχεία πίεσης από σύνθετα υλικά (πηγή: <https://www.indiamart.com/proddetail/frp-vessel-20758646912.html>)



Σχήμα 1.11. Άξονας μετάδοσης ισχύος σκάφους (πηγή: <https://www.driveshaftsaustralia.com.au/driveshafts/marine>)



Σχήμα 1.12. Μοντέλο γάστρας υποβρυχίου σκάφους. Κίτρινο: χάλυβας, μπλε: σύνθετο υλικό (πηγή: Maxit et al., 2004)

### 1.7. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού κυλίνδρων-σωληνώσεων από σύνθετα υλικά, κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης ινών, μέσω πολλαπλών πειραματικών δοκιμών. Η παραγωγή των κυλίνδρων πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία B&T Composites στη Φλώρινα (<https://www.btcomposites.gr/>), ενώ τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίνες γυαλιού τύπου E και βινυλεστερική ρητίνη. Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Οι μηχανικές ιδιότητες που μελετώνται είναι η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας σε διεύθυνση παράλληλη ( $\sigma_1, E_1$ ) και κάθετη ( $\sigma_2, E_2$ ) ως προς τις ίνες, η διατμητική αντοχή και το μέτρο διάτμησης ( $\tau_{12}, G_{12}$ ) και οι αντίστοιχες μέγιστες παραμορφώσεις  $\varepsilon_{max}$ . Το πειραματικό πρόγραμμα που υλοποιείται είναι παραμετρικό, δηλαδή γίνεται μελέτη για 12 κυλίνδρους από τους οποίους προέκυψαν 16 «ομάδες» δοκιμών (batches), κάθε φορά με διαφορετική μία παράμετρο. Σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων και για την επίδραση των διαφόρων παραμέτρων (διάμετρος, πάχος, αριθμός συστάδων ινών-tows) σε αυτές τις μηχανικές ιδιότητες, μέσω των δεδομένων που λήφθηκαν στις πειραματικές δοκιμές.

Το πειραματικό πρόγραμμα της διπλωματικής εργασίας παρατίθεται αναλυτικότερα στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, ύστερα από την περιγραφή των πειραματικών διαδικασιών χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων σύνθετων υλικών. Οι τελευταίες αναφέρονται στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

## **2. ΔΟΚΙΜΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### **2.1. Δοκιμές χαρακτηρισμού φυσικών ιδιοτήτων**

Η πυκνότητα ενός σύνθετου υλικού, καθώς και η περιεκτικότητα των επιμέρους υλικών στο τελικό προϊόν και η περιεκτικότητα των κενών αέρα είναι οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες, οι οποίες επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου. Οι δοκιμές που εκτελούνται για τον προσδιορισμό αυτών των μεγεθών πραγματοποιούνται κατά βάση σε δοκίμια από το εκάστοτε σύνθετο υλικό και παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω. Σημειώνεται πως τα πρότυπα προέρχονται από οργανισμούς και επιτροπές, όπως ο ASTM (American Society for Testing and Materials), ο ISO (International Organization for Standardization), ή ο BSI (British Standards Institution).

#### **Πυκνότητα**

Η μέτρηση της πυκνότητας στα σύνθετα υλικά υλοποιείται μέσω του προτύπου ASTM D792 ή με το ISO 1183. Το πρώτο βασίζεται στη μέτρηση της μάζας του δοκιμίου σε δύο διαφορετικά περιβάλλοντα, στον αέρα και στο νερό. Υπολογίζεται στη συνέχεια το ειδικό βάρος και τελικά η πυκνότητα.

#### **Περιεκτικότητα σε ρητίνη ή ίνες**

Για τον προσδιορισμό της σύστασης του σύνθετου υλικού, δηλαδή της περιεκτικότητας σε μήτρα και ίνες, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Για Glass Fiber Reinforced Plastics (GFRP) υπάρχει η δοκιμή καύσης (ASTM D2584, ISO 1172). Δηλαδή, μέσω ελεγχόμενης θέρμανσης απομακρύνεται το συνδετικό υλικό από το αρχικό σύνθετο, μετρίεται η μάζα των απομενουσών ενισχυτικών ινών και, έτσι υπολογίζεται η μάζα της μήτρας, αφού προφανώς το άθροισμα των δύο μαζών ισούται με τη μάζα του σύνθετου υλικού. Μέσω των δεδομένων πυκνοτήτων των δύο μερών, μπορεί να προσδιοριστεί και ο όγκος τους, δίνοντας μία εκτίμηση των κενών αέρα που περιέχει το σύνθετο.

Από την άλλη για Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) χρησιμοποιείται η δοκιμή διάλυσης της μήτρας, μέσω ισχυρού οξέος-διαλύτη (ASTM D3171). Ο τρόπος μέτρησης των περιεκτικότητων ενίσχυσης, μήτρας, κενών αέρα είναι παρόμοιος με τη μέθοδο ASTM D2584 που αναφέρθηκε προηγουμένως.



Υπάρχει προφανώς και ένα πλήθος άλλων μεθόδων χαρακτηρισμού των φυσικών ιδιοτήτων, λιγότερο επιβαρυντικών προς το περιβάλλον μάλιστα. Μερικά παραδείγματα είναι η ανάλυση εικόνας σε μικροσκόπιο (Image Analysis) ή η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (Thermogravimetric Analysis). Σημειώνεται πως στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία δεν πραγματοποιήθηκαν τέτοιες δοκιμές χαρακτηρισμού, ωστόσο παρατίθενται για λόγους πληρότητας.

## 2.2. Συμβατικές μέθοδοι μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων

Όσον αφορά στις κυριότερες μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών, αυτές προσδιορίζονται από συγκεκριμένες συμβατικές πειραματικές μεθόδους, οι οποίες εφαρμόζονται σε ειδικά κατασκευασμένα επίπεδα δοκίμια. Τα κυριότερα πρότυπα που ακολουθούνται στις πειραματικές δοκιμές για τον χαρακτηρισμό των σύνθετων υλικών παρουσιάζονται στη συνέχεια.

### Εφελκυσμός

- Το πρότυπο ASTM D3039 έχει αναπτυχθεί για τη μέτρηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Λεπτό επίπεδο δοκίμιο (plane specimen) σταθερής ορθογωνικής διατομής (Σχήμα 2.1), κομμένο από το μελετώμενο σύνθετο, υπόκειται σε εφελκυστικό φορτίο. Καταγράφονται η επιβαλλόμενη δύναμη και η επιμήκυνση του δοκιμίου και, ακολούθως υπολογίζεται και η τάση που υφίσταται το δοκίμιο. Η μέγιστη μετρούμενη τάση αποτελεί την αντοχή και από το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων που χαράσσεται, εξάγεται το μέτρο ελαστικότητας.

### Θλίψη

- Βάσει του προτύπου ASTM D3410 μετρούνται οι θλιπτικές ιδιότητες δοκιμίου αντίστοιχης γεωμετρίας με το πρότυπο ASTM D3039. Σύμφωνα με το ASTM D3410, το πρότυπο εφαρμόζεται σε στρώσεις σύνθετων υλικών από προεμποτισμένες λωρίδες (prepregs) ή παρόμοιες μορφές προϊόντων. Για άλλα είδη ενισχυτικών ινών μπορεί να χρειαστούν παρεκκλίσεις από την μέθοδο.

### Κάμψη

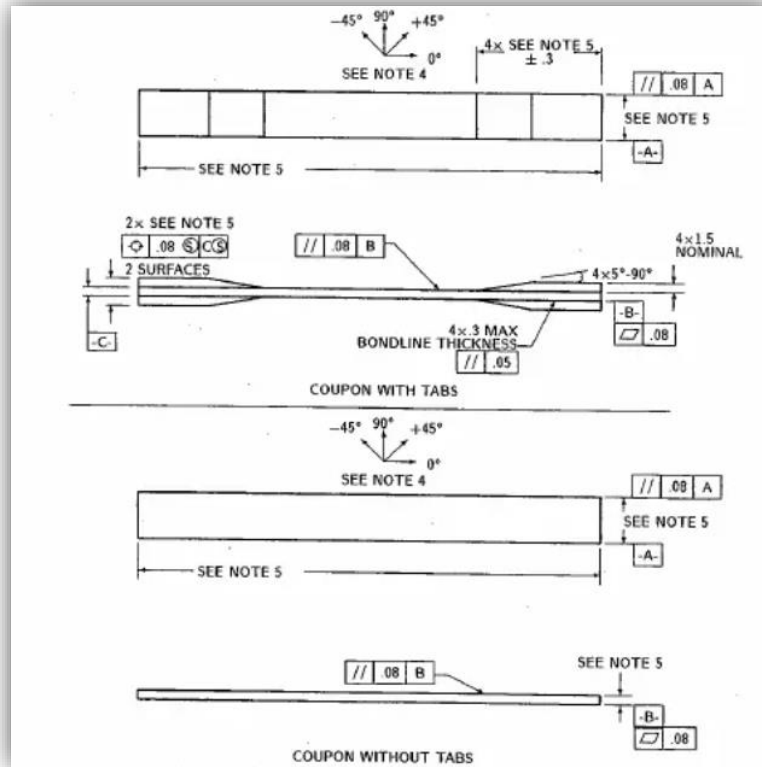
- Οι ιδιότητες σε κάμψη του υλικού προσδιορίζονται μέσω του προτύπου ASTM D7264 ή ISO 14125. Το πρώτο στηρίζεται στη διαδικασία της κάμψης τριών ή

τεσσάρων σημείων που επιβάλλεται σε επίπεδο δοκίμιο ορθογωνικής διατομής (Procedure A και B αντίστοιχα). Οι δύο διαδικασίες φαίνονται στο Σχήμα 2.2.

### Διάτμηση

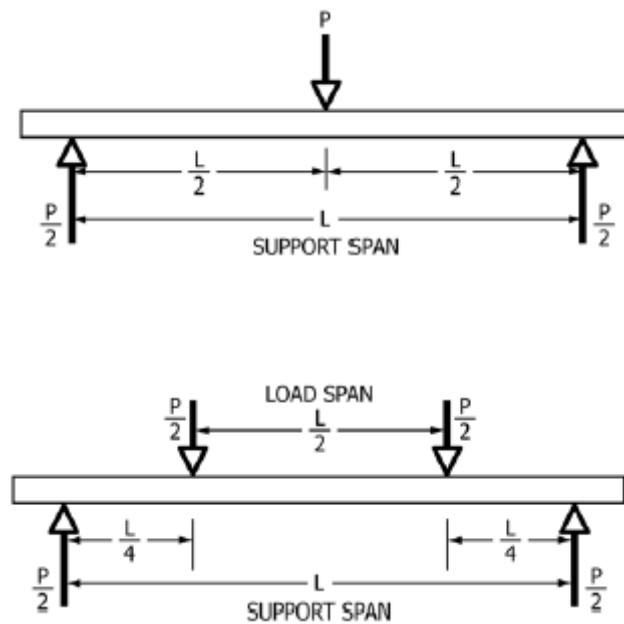
- Για το χαρακτηρισμό των διατμητικών ιδιοτήτων στο επίπεδο των ινών, υπάρχει το πρότυπο ASTM D3518, του οποίου η λογική είναι η εφαρμογή μονοαξονικού εφελκυσμού σε άξονα δοκιμίου με  $\pm 45^\circ$  ενίσχυση των ινών ως προς αυτόν (Σχήμα 2.3). Η εφαρμογή του προτύπου είναι παρόμοια με το ASTM D3039 του εφελκυσμού, δηλαδή καταγράφονται συνεχώς οι δυνάμεις και οι παραμορφώσεις στον κύριο άξονα, καθώς και στον κάθετο σε αυτόν άξονα, ωστόσο η διεύθυνση των ινών βρίσκεται σε γωνία  $45^\circ$  σε σχέση με το φορτίο. Η διατμητική αντοχή προκύπτει ως η μέγιστη διατμητική τάση στο δοκίμιο, ενώ το μέτρο διάτμησης εξάγεται από το διάγραμμα διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων.
- Ένα άλλο πρότυπο είναι το ASTM D3846. Το εξεταζόμενο δοκίμιο σε αυτή την περίπτωση διαθέτει εγκοπές και δέχεται θλιπτικό φορτίο από μια διάταξη σφιγκτήρα. Το σημείο ανάμεσα στις δύο εγκοπές αποτελεί το σημείο μέτρησης, καθώς σε αυτό το χώρο δημιουργείται καθαρή διάτμηση του δοκιμίου. Η διαδικασία και τα δοκίμια του προτύπου απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4.
- Οι ίδιες μετρήσεις μπορούν να γίνουν με το πρότυπο ASTM D5379. Δοκίμιο με εγκοπές τύπου V φορτίζεται από κατάλληλη διάταξη, ώστε να εμφανιστεί διάτμηση μεταξύ των δύο εγκοπών (Σχήμα 2.5).

Υπάρχουν διάφορες άλλες διαδικασίες-πρότυπα με τροποποιήσεις στη λογική που στηρίζονται, στη διάταξη που χρησιμοποιείται ή στο χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωσή τους. Η κοινή βάση είναι η μέτρηση των βασικών μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών, όπως η αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson σε διάφορες διευθύνσεις, ανάλογα με τον προσανατολισμό των ενισχύσεων των δοκιμίων. Η επιλογή του προτύπου που ακολουθείται σχετίζεται με την επιλογή του ερευνητή, καθώς και με το διαθέσιμο εξοπλισμό που διαθέτει.

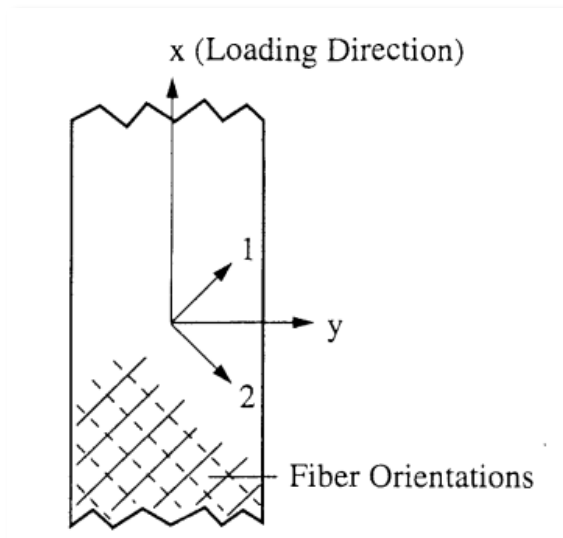


Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

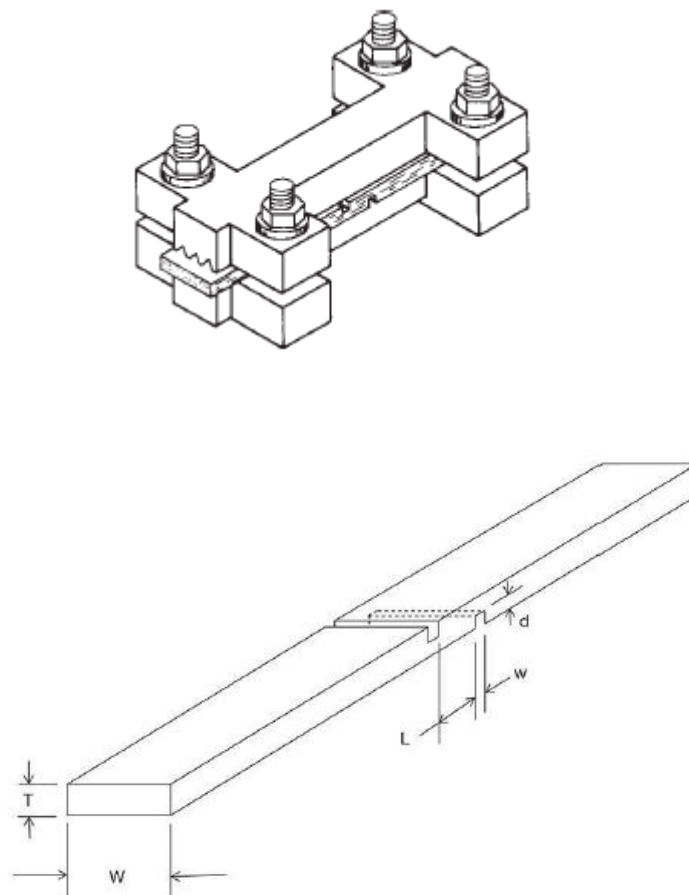
Σχήμα 2.1. Γεωμετρία και διαστάσεις δοκιμίου για το πρότυπο ASTM D3039



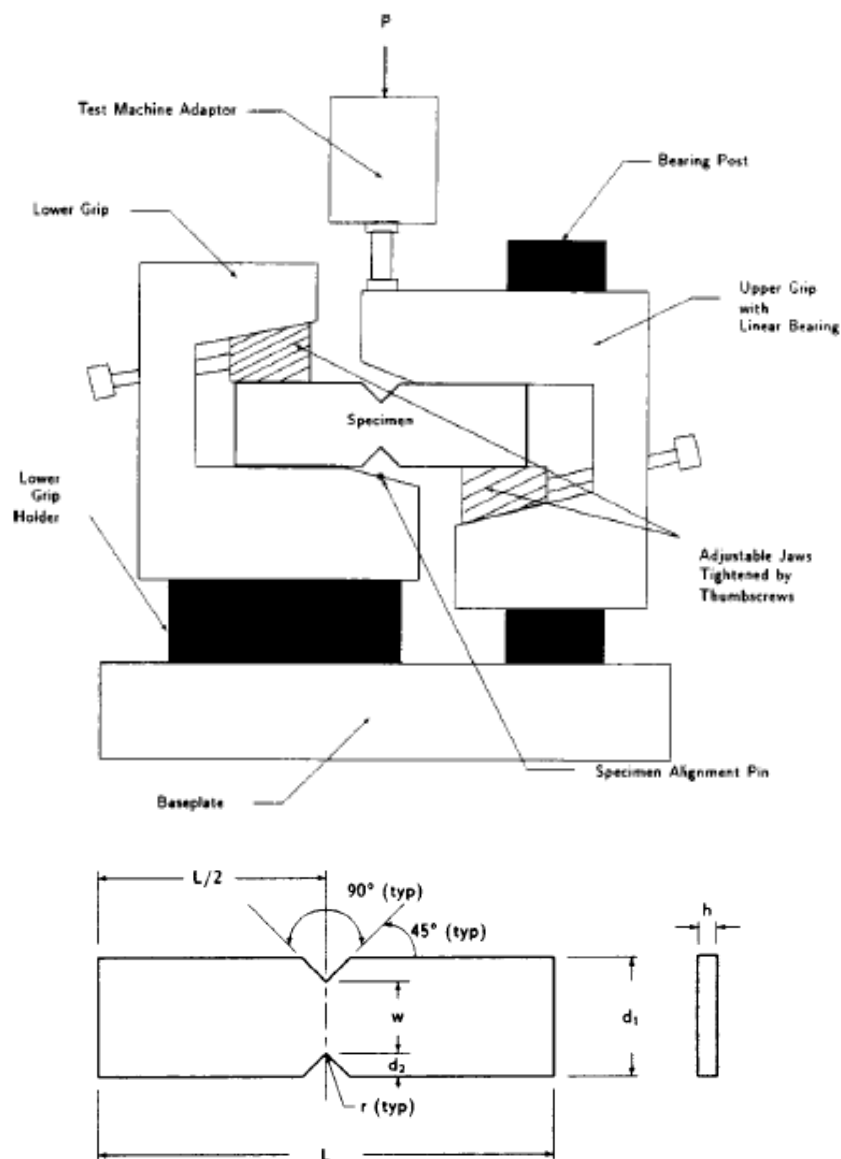
Σχήμα 2.2. Procedure A (πάνω) και Procedure B (κάτω) για το πρότυπο ASTM D7264



Σχήμα 2.3. Δοκίμιο για το πρότυπο ASTM D3518 για μέτρηση διατμητικών ιδιοτήτων. Η διεύθυνση  $x$  που επιβάλλεται το φορτίο βρίσκεται υπό γωνία  $45^\circ$  σε σχέση με τον άξονα 1 των ινών



Σχήμα 2.4. Διάταξη σφιγκτήρα (πάνω) και δοκίμιο (κάτω) για το πρότυπο ASTM D3846



Σχήμα 2.5. Διάταξη (πάνω) και δοκίμιο (κάτω) για το πρότυπο ASTM D5379

### 2.3. Μέθοδοι χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμίων

Οι παραπάνω μέθοδοι που αναφέρθηκαν είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν με την διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών σε δοκίμια τα οποία είναι επίπεδα (plane specimens). Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις που η γεωμετρία του σύνθετου υλικού καθιστά κάτι τέτοιο δύσκολο ή ανέφικτο. Για παράδειγμα, η μέθοδος περιέλιξης ινών που περιγράφηκε αναλυτικά στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο, παράγει προϊόντα κυλινδρικής ή σφαιρικής μορφής. Κατά συνέπεια, ο καθορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων μίας τέτοιας γεωμετρίας θα πρέπει να πραγματοποιηθεί με διαφορετικές δοκιμές από τις προαναφερθείσες συμβατικές.

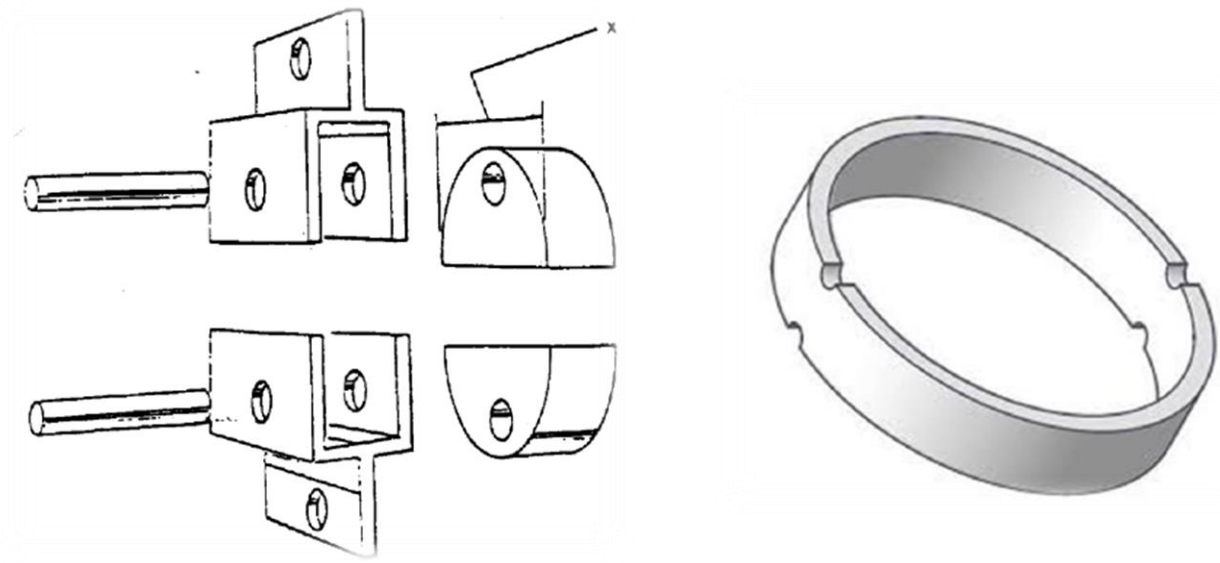
Ήδη τα τελευταία χρόνια έχει γίνει σημαντική προσπάθεια καθιέρωσης προτύπων και δοκιμών που αφορούν σε καμπύλα δοκίμια. Πρωτοπόρος στη συγκεκριμένη στροφή των πειραματικών δοκιμών υπήρξε το Αμερικανικό Ναυτικό Εργαστήριο Πυροβολικού (Naval Ordnance Laboratory - NOL), το οποίο έδωσε λύση στο ζήτημα μέτρησης ιδιοτήτων για σύνθετα υλικά με καμπυλωμένες γεωμετρίες (1964). Οι βασικότερες δοκιμές χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμών που διεξήγαγε είναι η δοκιμή διαιρούμενου δίσκου (split-disk test) και η κάμψη δοκιμών με μικρή ακτίνα καμπυλότητας.

### Split-disk test

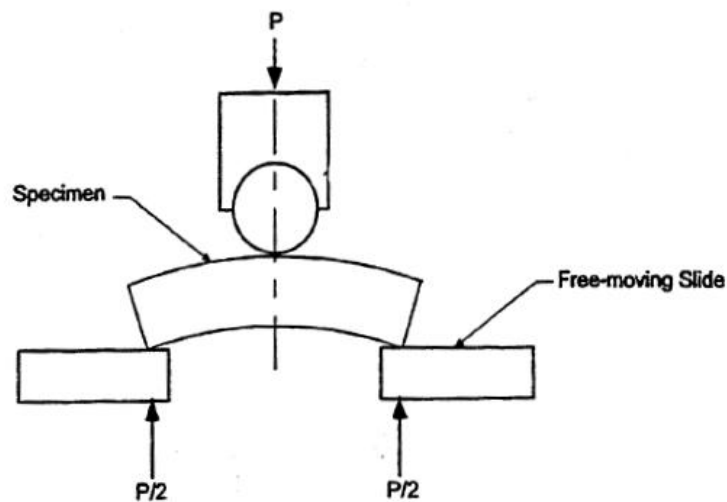
Η δημιουργία και καθιέρωση του προτύπου ASTM D2290 ακολούθησε. Μέχρι και σήμερα το συγκεκριμένο πρότυπο ακολουθείται ευρέως για τον προσδιορισμό ιδιοτήτων κατασκευών από περιέλιξη ινών. Η διαδικασία βασίζεται στη μέτρηση της τάσης αστοχίας του υλικού στην περιφερειακή διεύθυνση ενίσχυσης των ινών. Χρησιμοποιούνται δακτυλιοειδή δοκίμια (ring specimens), τα οποία υπόκεινται σε εσωτερική ακτινική φόρτιση μέσω ειδικής διάταξης διαιρούμενου δίσκου. Ενδεικτικά, μέσω αυτής της διαδικασίας λαμβάνεται η αντοχή σαν το μέγιστο φορτίο θραύσης, ωστόσο περισσότερες λεπτομέρειες για τη μέθοδο θα παρατεθούν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Η διάταξη και η γεωμετρία των δοκιμών για τη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου φαίνονται στο Σχήμα 2.6.

### Κάμψη δοκιμών μικρής ακτίνας καμπυλότητας

Η συγκεκριμένη διαδικασία διαφέρει από την προηγούμενη ως προς τη διάταξη, όμως χρησιμοποιείται και αυτή για τη μέτρηση της τάσης θραύσης του σύνθετου υλικού στη διεύθυνση των ινών. Βάσει του προτύπου ASTM D2344, το δοκίμιο μικρής καμπυλότητας φορτίζεται στο κέντρο του, τοποθετημένο σε στηρίγματα, με ελευθερία να κινείται πλευρικά (Σχήμα 2.7). Η μέθοδος προσομοιάζει δοκιμή κάμψης, ωστόσο στο εσωτερικό του σύνθετου παρουσιάζονται και φαινόμενα διάτμησης.



Σχήμα 2.6. Πρότυπο ASTM D2290 – Τυπική διάταξη μεθόδου διαιρούμενου δίσκου (αριστερά), σκαρίφημα δακτυλιοειδούς δοκιμίου (δεξιά)



Σχήμα 2.7. Διάταξη προτύπου ASTM D2344

Σημειώνεται πως καταβάλλονται προσπάθειες διαρκούς βελτιστοποίησης των δοκιμών χαρακτηρισμού καμπύλων δοκιμών, ώστε να δίνουν όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα. Η δοκιμή διαιρούμενου δίσκου χαρακτηρίζεται από απλότητα και αξιοπιστία στις τιμές που δίνει, επομένως ανήκει στις δημοφιλέστερες μεθόδους χαρακτηρισμού, ιδίως για σύνθετα υλικά από περιέλιξη ινών. Η χρήση της είναι ευρεία στη βιομηχανία των σύνθετων.

### **3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**

#### **3.1. Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας**

Το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου διεξάγει τα τελευταία χρόνια μια σειρά πειραματικών δοκιμών αποσκοπώντας στη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων κυλίνδρων από σύνθετα υλικά. Οι βασικές αιτίες για την πρωτοβουλία αυτή είναι η εξακρίβωση της γενικής αξιοπιστίας των μεθόδων χαρακτηρισμού για υλικά από περιέλιξη ινών, καθώς και η ανάλυση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων της μεθόδου, καθώς και των γεωμετρικών παραμέτρων, στις τελικές ιδιότητες των κυλίνδρων.

Στόχος, λοιπόν της πειραματικής διαδικασίας είναι η μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων κυλίνδρων από σύνθετα υλικά γυαλιού-βινυλεστέρα μέσω πειραματικών δοκιμών. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διαδικασίας· για παράδειγμα οι ιδιότητες που προσδιορίζονται, η γεωμετρία των δοκιμίων, οι δοκιμές που εκτελούνται. Τελικώς, παρατηρείται η επίδραση που έχουν διάφορες παράμετροι στις τελικές ιδιότητες. Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι οι εξής:

- Εσωτερική διάμετρος δακτυλιοειδών δοκιμίων (internal diameter)
- Πάχος δοκιμίων (thickness)
- Αριθμός συστάδων ινών δοκιμίων (number of tows)

Η σύγκριση των δοκιμών ανάμεσα σε δοκίμια με μία διαφορετική παράμετρο κάθε φορά συντελεί στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την επίδραση αυτής της παραμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες. Επιπλέον, απαραίτητη καθίσταται η ονοματολογία των δοκιμίων, ώστε να είναι εύκολη και απρόσκοπτη η παρακολούθηση του αναγνώστη στη συνέχεια. Αξίζει να σημειωθεί πως, σε γενικότερο πλαίσιο, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν συμπληρώνουν τη μελέτη παλαιότερων διπλωματικών εργασιών με αντίστοιχη δράση, παρέχοντας συμπεράσματα και για την επίδραση της βινυλεστερικής έναντι της εποξικής ρητίνης.



### 3.2. Κατασκευή και χαρακτηριστικά κυλίνδρων

Συνολικά κατασκευάστηκαν 12 κύλινδροι από την B&T Composites, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ίνες γυαλιού τύπου E και βινυλεστερική ρητίνη.

Όλοι οι κύλινδροι κατασκευάστηκαν με τις ίνες γυαλιού τοποθετημένες σε σύστημα μηχανικού ελέγχου της τάνυσης (tension control creel). Για το λόγο αυτό δεν ήταν εφικτή η ακριβής πρόβλεψη της δύναμης τάνυσης των ινών,  $F_N$ . Κατ' εκτίμηση ήταν ίση με 8-10 N για όλους τους κυλίνδρους. Στη συνέχεια, για λόγους απλότητας η δύναμη τάνυσης θα θεωρείται κοινή και ίση με 8 N. Από την άλλη, οι μεταβλητές παράμετροι ήταν η εσωτερική διάμετρος (100 mm ή 200 mm), το πάχος των κυλίνδρων (2 mm ή 8 mm), ο αριθμός των συστάδων ινών (1 ή 8 tows) και η γωνία περιέλιξης ( $90^\circ$  ή  $\pm 45^\circ$ ). Σημειώνεται πως λόγω περιορισμών στη μονάδα παραγωγής, η πλησιέστερη εφικτή γωνία περιέλιξης στις  $90^\circ$  ήταν οι  $86^\circ$ , με την οποία και κατασκευάστηκαν οι κύλινδροι στην πρώτη περίπτωση. Για λόγους απλότητας, θα αναφέρονται ως  $90^\circ$ . Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η διάταξη της B&T Composites και η κατασκευή ενός κυλίνδρου από ίνες άνθρακα, με τη μέθοδο περιέλιξης ινών.

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά κυλίνδρων

Κύλινδρος	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Tows	Δύναμη Τάνυσης (N)	Γωνία Περιέλιξης ( $^\circ$ )
1	200	2	1	8	90
2	200	2	8	8	90
3	200	2	1	8	$\pm 45$
4	200	2	8	8	$\pm 45$
5	200	8	1	8	90
6	200	8	8	8	90
7	200	8	1	8	$\pm 45$
8	200	8	8	8	$\pm 45$
9	100	2	1	8	90
10	100	2	8	8	90
11	100	8	1	8	90
12	100	8	8	8	90



*Σχήμα 3.1. Κύλινδροι από carbon fibers σε περιστρεφόμενο καλούπι της B&T Composites (πηγή: B&T Composites)*

Οι εμπορικές ονομασίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν δίνονται στη συνέχεια:

- 411-350 Epoxy Vinyl Ester Resin της εταιρείας DERAKANE MOMENTUM (βινυλεστερική ρητίνη)
- E6-CR 386T Direct Roving της εταιρείας JUSHI (ίνες γυαλιού σε μορφή υαλοϋφάσματος)

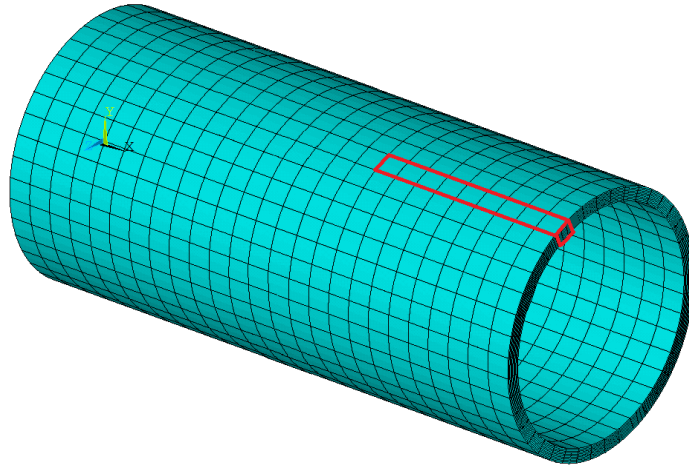
Τα φύλλα τεχνικών δεδομένων (Technical Data Sheets) των δύο υλικών παρατίθενται στο Παράρτημα Α.

### 3.3. Ονοματολογία δοκιμών

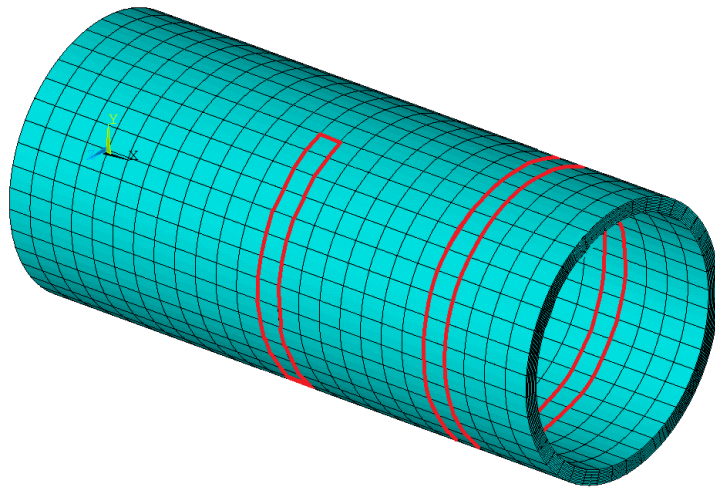
Για την εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών, κόπηκαν από τους παραπάνω κυλίνδρους του Πίνακα 3.1 τρεις τύποι δοκιμών:

- Δακτυλιοειδή δοκίμια (ring specimens) από τους κυλίνδρους 1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12
- Επίπεδα δοκίμια (plane specimens) από τους κυλίνδρους 1, 2, 5, 6
- Επίπεδα δοκίμια (plane specimens) από τους κυλίνδρους 3, 4, 7, 8

Τα ring specimens κόπηκαν κατά το εγκάρσιο επίπεδο των κυλίνδρων, ενώ τα plane specimens κόπηκαν κατά το διάμηκες, όπως φαίνεται στα Σχήματα 3.2 και 3.3.



Σχήμα 3.2. Επίπεδα δοκίμια κομμένα κατά το διαμήκη άξονα των κυλίνδρων



Σχήμα 3.3. Δακτυλιοειδή δοκίμια κομμένα κατά εγκάρσια επίπεδα των κυλίνδρων

Προέκυψαν 16 ομάδες (batches) δοκιμίων, με 7 δοκίμια σε κάθε μία. Ακολουθεί η ονοματολογία των ομάδων των δοκιμίων, ώστε να είναι πιο κατανοητή η διαδικασία και οι αναφορές τους στη συνέχεια της διπλωματικής. Περισσότερες πληροφορίες για τη γεωμετρία των δοκιμίων θα παρατεθούν σε επόμενα κεφάλαια.

Η ονοματολογία των δοκιμίων εξαρτάται βασικά από την πειραματική δοκιμή που θα υποστούν, συνεπώς και από τη μηχανική ιδιότητα προς μέτρηση σε κάθε περίπτωση. Οι ιδιότητες που θα μετρηθούν είναι οι:

- $E_1, \sigma_1$  : Μέτρο ελαστικότητας και αντοχή στη διεύθυνση των ενισχυτικών ινών (Πρότυπο ASTM D2290)
- $E_2, \sigma_2$  : Μέτρο ελαστικότητας και αντοχή σε διεύθυνση κάθετη στις ενισχυτικές ίνες (Πρότυπο ASTM D3039)
- $G_{12}, \tau_{12}$  : Μέτρο διάτμησης και διατμητική αντοχή στο επίπεδο των ινών (Πρότυπο ASTM D3518)

Πίνακας 3.2. Ονοματολογία δοκιμών για μέτρηση του  $E_1$

Ομάδα δοκιμών	Κύλινδρος	Γωνία Περιέλιξης	Σχήμα δοκιμών
E1-D200-T2-TW1-i	1	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D200-T2-TW8-i	2	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D200-T8-TW1-i	5	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D200-T8-TW8-i	6	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D100-T2-TW1-i	9	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D100-T2-TW8-i	10	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D100-T8-TW1-i	11	90°	Δακτυλιοειδές
E1-D100-T8-TW8-i	12	90°	Δακτυλιοειδές

Πίνακας 3.3. Ονοματολογία δοκιμών για μέτρηση του  $E_2$

Ομάδα δοκιμών	Κύλινδρος	Γωνία Περιέλιξης	Σχήμα δοκιμών
E2-T2-TW1-i	1	90°	Επίπεδο ορθογωνικό
E2-T2-TW8-i	2	90°	Επίπεδο ορθογωνικό
E2-T8-TW1-i	5	90°	Επίπεδο ορθογωνικό
E2-T8-TW8-i	6	90°	Επίπεδο ορθογωνικό

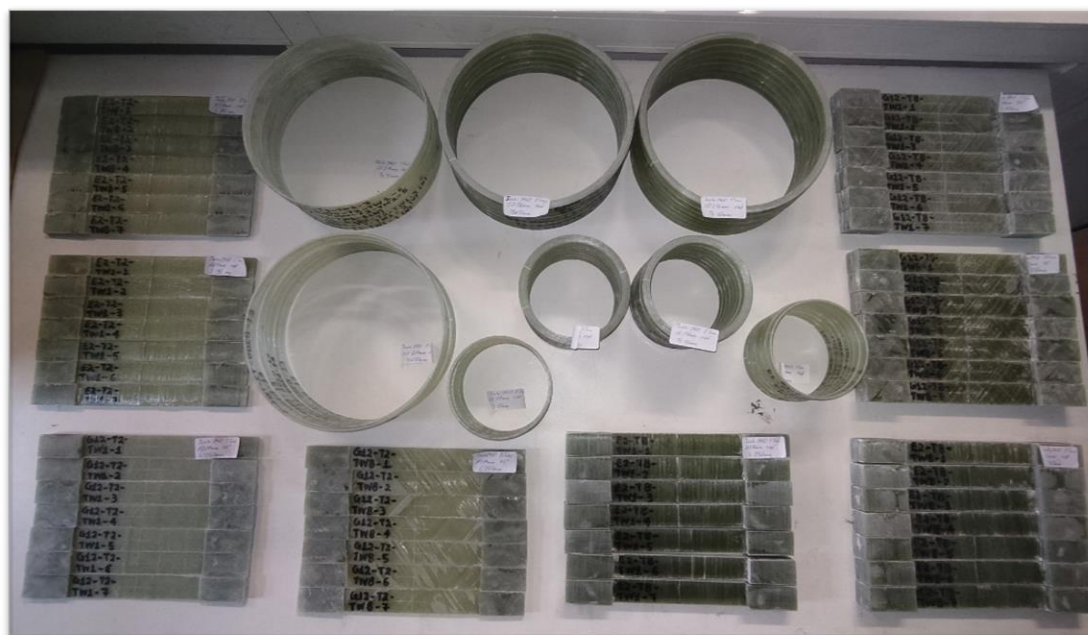
Πίνακας 3.4. Ονοματολογία δοκιμών για μέτρηση του  $G_{12}$

Ομάδα δοκιμών	Κύλινδρος	Γωνία Περιέλιξης	Σχήμα δοκιμών
G12-T2-TW1-i	3	±45°	Επίπεδο ορθογωνικό
G12-T2-TW8-i	4	±45°	Επίπεδο ορθογωνικό
G12-T8-TW1-i	7	±45°	Επίπεδο ορθογωνικό
G12-T8-TW8-i	8	±45°	Επίπεδο ορθογωνικό

Στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζεται η ονοματολογία των δακτυλιοειδών δοκιμών προς μέτρηση των  $E_1, \sigma_1$  με τη μέθοδο διαιρούμενου δίσκου. Περιγράφεται με τη σειρά η ιδιότητα προς μέτρηση ( $E_1$ ), η εσωτερική διάμετρος του δοκιμίου (D100 ή D200) σε

mm, το πάχος του δοκιμίου (T2 ή T8) σε mm, ο αριθμός των συστάδων ινών (TW1 ή TW8) και το κάθε δοκίμιο  $i$  (1 έως 7). Ως παράδειγμα προς κατανόηση του αναγνώστη, το E1-D200-T2-TW8-6 είναι το 6<sup>ο</sup> δοκίμιο με διάμετρο 200 mm, πάχος 2 mm και 8 tows προς μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών.

Στους Πίνακες 3.3 και 3.4 παρατίθενται τα επίπεδα δοκίμια για μέτρηση των  $E_2$  και  $G_{12}$  αντίστοιχα. Περιγράφονται με τη σειρά η προς μέτρηση μηχανική ιδιότητα ( $E_2$  ή  $G_{12}$ ), το πάχος (T2 ή T8) σε mm, ο αριθμός των συστάδων ινών (TW1 ή TW8) και ο αριθμός του δοκιμίου  $i$  (1-7). Σημειώνεται πως παραλείπεται η διάμετρος του κυλίνδρου από τον οποίο προήλθε το εκάστοτε δοκίμιο, καθώς αυτά τα δοκίμια κόπηκαν μόνο από κυλίνδρους με διάμετρο 200 mm. Ξανά ως παράδειγμα, το G12-T8-TW8-5 είναι το 5<sup>ο</sup> δοκίμιο προς μέτρηση του μέτρου διάτμησης στο επίπεδο των ινών, με πάχος 8 mm και 8 tows. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα δοκίμια της διπλωματικής εργασίας, δακτυλιοειδή και επίπεδα.



Σχήμα 3.4. Δοκίμια διπλωματικής εργασίας

## **4. ΔΟΚΙΜΗ ΔΙΑΙΡΟΥΜΕΝΟΥ ΔΙΣΚΟΥ ( $E_1, \sigma_1$ )**

Η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών διαιρούμενου δίσκου έγινε προς μέτρηση των ιδιοτήτων των κυλίνδρων 1, 2, 5, 6, 9, 10, 11, 12 (βλ. Πίνακα 3.1) στην περιφερειακή διεύθυνση, δηλαδή παράλληλα στη διεύθυνση των ιών ( $E_1, \sigma_1$ ). Χρησιμοποιήθηκαν αρχικά 5 δακτυλιοειδή δοκίμια από κάθε ομάδα, και τελικά και τα υπόλοιπα (Κεφ. 4.1).

### **4.1. Γεωμετρία δοκιμίων**

Ένα τυπικό δακτυλιοειδές δοκίμιο για τη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.3 διακρίνεται στο Σχήμα 4.1. Σύμφωνα με τους Laiarinandrasana et al. (2010), κατά τη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου παρατηρούνται φαινόμενα κάμψης στην περιοχή του δακτυλιοειδούς δοκιμίου εκατέρωθεν των δύο split disks, εξαιτίας της παραμόρφωσης της «κυκλικότητάς» (roundness) του κατά τη διάρκεια της φόρτισής του (το φαινόμενο θα επεξηγηθεί πιο αναλυτικά στο Κεφ. 4.2). Κατά συνέπεια, το τασικό πεδίο που δημιουργείται κατά τη δοκιμή δεν είναι καθαρά εφελκυστικό. Δεν μετράται δηλαδή η πραγματική εφελκυστική τάση κατά την περιφερειακή διεύθυνση των ιών. Η ύπαρξη των ημικυκλικών εγκοπών (notches) που παρατηρούνται στο δοκίμιο αποδίδεται στον περιορισμό αυτού του προβλήματος.



Σχήμα 4.1. Τυπικό δοκίμιο για τη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου (πηγή: Ledjane et al., 2011)

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δακτυλιοειδή δοκίμια με εγκοπές, όπως ορίζει το πρότυπο, αλλά και δοκίμια χωρίς εγκοπές (Σχήμα 4.2). Αρχικά, διότι η κατασκευή δοκιμίων χωρίς εγκοπές είναι ευκολότερη – δεν

απαιτείται η κατεργασία για τη δημιουργία των εγκοπών, αντίθετα κόβονται κατευθείαν από τον κύλινδρο σύνθετου υλικού. Επιπλέον, για να παρατηρηθούν οι διαφορές στις μετρούμενες ιδιότητες και στη μηχανική συμπεριφορά μεταξύ των δύο τύπων δοκιμίων.



Σχήμα 4.2. Δοκίμιο χωρίς εγκοπές (πηγή: Laiarinandrasana et al., 2010)

Από τα 7 δακτυλιοειδή δοκίμια κάθε ομάδας, τα 4 ήταν με εγκοπές και τα 3 χωρίς. Για τη διάκριση μεταξύ τους, τα δοκίμια με εγκοπές χαρακτηρίζονται με ένα (N) στο τέλος της ονομασίας τους. Της εκτέλεσης των δοκιμών προηγήθηκε η διαστασιολόγηση του κάθε δοκιμίου όλων των ομάδων, για τους μετέπειτα υπολογισμούς, και η σύγκριση των μετρήσεων με τις ονομαστικές διαστάσεις. Το ονομαστικό πλάτος κοπής (b) των δοκιμίων είναι 10 mm σε κάθε περίπτωση, η ονομαστική εσωτερική διάμετρος (D) 100 mm ή 200 mm και το ονομαστικό πάχος (t) 2 mm ή 8 mm. Σε δοκίμια με εγκοπές, η ονομαστική ακτίνα εγκοπών (r) είναι 2 mm. Το πάχος και το πλάτος των δοκιμίων μετρήθηκαν σε τρία διαφορετικά σημεία κατά την περιφέρεια του δοκιμίου, τα οποία απείχαν γωνία 120° μεταξύ τους και υπολογίστηκε μία μέση τιμή για καθένα από τα δύο μεγέθη (average value). Υπολογίστηκαν, επίσης, η τυπική απόκλιση (standard deviation) και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation) των μετρήσεων για την διαπίστωση της επαναληψιμότητάς τους. Οι συντελεστές διακύμανσης σε όλες τις μετρήσεις για κάθε ομάδα ήταν μικρότεροι από 5%, καθιστώντας τις επαναλήψιμες σε ικανοποιητικό βαθμό. Τέλος, πραγματοποιήθηκε μέτρηση της εσωτερικής διαμέτρου, καθώς και της ακτίνας των εγκοπών (notches) σε όσα δοκίμια είχαν τέτοιες. Τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης των δοκιμίων φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Διαστάσεις δακτυλιοειδών δοκιμών

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 1 (E1-D200-T2-TW1-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.13	9.91	10.26	10.27	10.07	10.23	10.29
standard deviation	0.02	0.08	0.05	0.06	0.02	0.04	0.02
coefficient of variation	0.24%	0.85%	0.51%	0.60%	0.20%	0.41%	0.21%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.31	2.25	2.26	2.23	2.26	2.26	2.35
standard deviation	0.05	0.07	0.02	0.01	0.06	0.04	0.05
coefficient of variation	2.01%	3.23%	0.96%	0.56%	2.56%	1.57%	2.08%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	200.20	200.10	199.90	200.10	200.10	200.20	200.10
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.88	1.95	1.86	1.86			

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 2 (E1-D200-T2-TW8-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.07	10.22	10.15	9.91	9.87	9.90	10.03
standard deviation	0.08	0.04	0.04	0.03	0.03	0.01	0.02
coefficient of variation	0.82%	0.39%	0.36%	0.34%	0.27%	0.13%	0.17%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.33	2.28	2.21	2.27	2.10	2.19	2.29
standard deviation	0.05	0.04	0.07	0.03	0.02	0.09	0.03
coefficient of variation	2.11%	1.89%	3.32%	1.26%	1.19%	4.23%	1.44%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	199.60	200.20	200.10	200.10	199.90	200.10	200.20
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.94	1.98	1.97	1.89			

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 5 (E1-D200-T8-TW1-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.32	10.69	10.31	10.06	10.43	9.72	10.36
standard deviation	0.05	0.04	0.08	0.04	0.03	0.05	0.07
coefficient of variation	0.47%	0.38%	0.75%	0.35%	0.31%	0.56%	0.70%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	8.22	8.04	8.04	8.04	7.94	7.90	8.01
standard deviation	0.12	0.10	0.02	0.08	0.04	0.03	0.12
coefficient of variation	1.45%	1.19%	0.31%	1.03%	0.47%	0.37%	1.46%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	200.00	199.90	200.00	199.90	199.82	200.00	199.90
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.94	1.97	1.91	2.01			



ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 6 (E1-D200-T8-TW8-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.41	10.18	10.13	10.19	10.29	9.95	10.28
standard deviation	0.03	0.02	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02
coefficient of variation	0.25%	0.16%	0.14%	0.12%	0.38%	0.09%	0.24%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	8.20	8.27	8.28	8.24	8.26	8.21	8.29
standard deviation	0.19	0.17	0.16	0.16	0.18	0.16	0.08
coefficient of variation	2.34%	2.07%	1.98%	1.95%	2.18%	1.90%	0.94%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	200.00	199.70	199.98	199.94	200.20	200.00	200.02
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.94	1.92	1.88	1.86			

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 9 (E1-D100-T2-TW1-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.39	10.36	10.33	10.18	10.50	10.34	10.48
standard deviation	0.07	0.06	0.04	0.04	0.08	0.04	0.03
coefficient of variation	0.64%	0.57%	0.34%	0.35%	0.73%	0.40%	0.25%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.47	2.55	2.53	2.52	2.46	2.43	2.49
standard deviation	0.13	0.15	0.05	0.02	0.06	0.04	0.07
coefficient of variation	5.25%	6.06%	2.10%	0.86%	2.39%	1.46%	2.73%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	99.90	99.80	100.00	100.00	100.00	99.70	99.90
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	2.02	2.00	1.96	1.96			

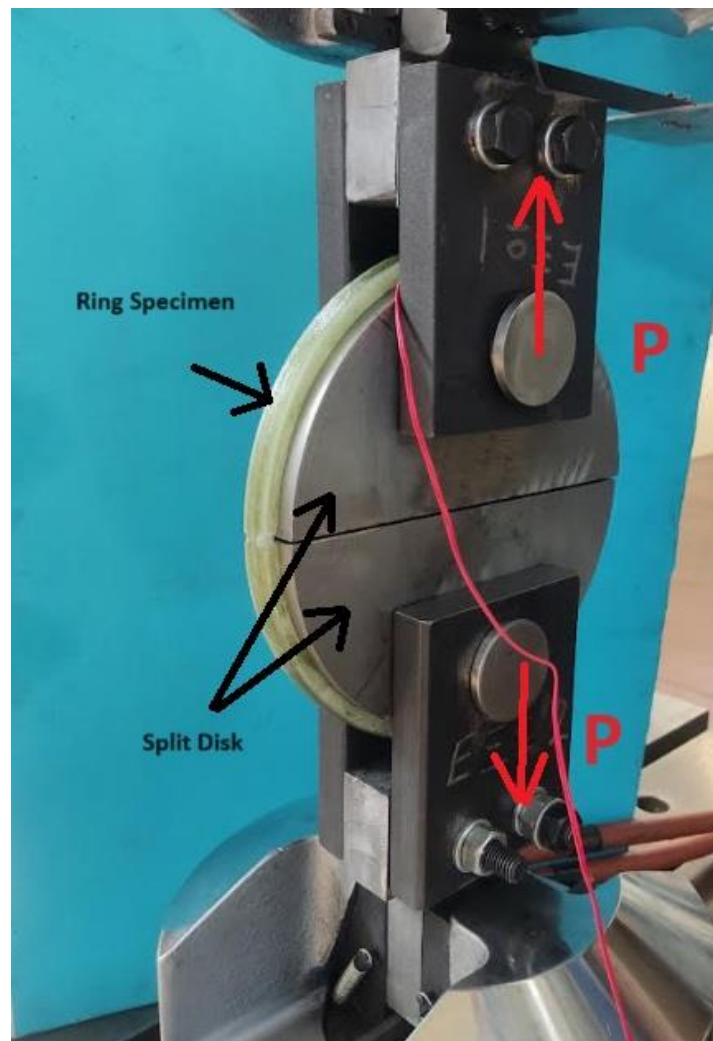
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 10 (E1-D100-T2-TW8-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.07	10.02	10.26	10.34	10.46	10.42	10.47
standard deviation	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04	0.08	0.05
coefficient of variation	0.38%	0.29%	0.39%	0.21%	0.41%	0.74%	0.51%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.43	2.41	2.36	2.37	2.42	2.44	2.42
standard deviation	0.09	0.05	0.08	0.05	0.03	0.03	0.05
coefficient of variation	3.79%	1.98%	3.53%	1.96%	1.18%	1.34%	2.11%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	99.90	99.90	99.70	99.80	99.80	99.90	100.00
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.96	1.99	1.97	1.98			

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 11 (E1-D100-T8-TW1-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.01	10.16	10.01	10.24	10.31	10.22	10.20
standard deviation	0.05	0.09	0.02	0.02	0.04	0.06	0.03
coefficient of variation	0.46%	0.88%	0.24%	0.16%	0.44%	0.63%	0.29%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	8.16	8.31	8.28	8.30	8.29	8.29	8.28
standard deviation	0.07	0.10	0.03	0.05	0.01	0.05	0.02
coefficient of variation	0.91%	1.15%	0.35%	0.55%	0.15%	0.60%	0.21%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	99.80	99.90	99.90	99.90	99.70	99.60	99.80
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.95	1.97	2.04	1.94			

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 12 (E1-D100-T8-TW8-i)							
	1 (N)	2 (N)	3 (N)	4 (N)	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	10.02	10.27	9.99	9.85	10.37	10.39	10.39
standard deviation	0.02	0.04	0.03	0.03	0.04	0.08	0.04
coefficient of variation	0.16%	0.44%	0.31%	0.30%	0.42%	0.81%	0.40%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	8.26	8.62	8.30	8.22	8.50	8.44	8.34
standard deviation	0.02	0.06	0.05	0.04	0.09	0.02	0.09
coefficient of variation	0.25%	0.72%	0.60%	0.50%	1.11%	0.19%	1.03%
<b>Διάμετρος (mm)</b>							
average value	99.90	99.90	99.80	99.90	100.00	99.90	99.90
<b>Ακτίνα εγκοπών (mm)</b>	1.98	1.96	2.01	2.02			

#### 4.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η μέθοδος διαιρούμενου δίσκου βάσει μιας ελαφρώς τροποποιημένης μορφής του προτύπου ASTM D2290. Συγκεκριμένα, τα δακτυλιοειδή δοκίμια φορτίστηκαν ακτινικά με εσωτερική δύναμη εφελκυσμού μέχρι τη θραύση (Σχήμα 4.3). Για τη συνεχή μέτρηση των παραμορφώσεων του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής, χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες μέτρησης παραμόρφωσης (strain gauges).



Σχήμα 4.3. Διάταξη δοκιμής διαιρούμενου δίσκου

Η δύναμη εφελκυσμού ασκήθηκε στα δοκίμια μέσω της διάταξης του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, η οποία αποτελείται καταρχάς από την υδραυλική μηχανή 322 της εταιρείας MTS με μέγιστη δυνατότητα φόρτισης 250 kN (Σχήμα 4.4) και το σύστημα πρόσκτησης δεδομένων Spider 8 της εταιρείας HBM (Σχήμα 4.5) για την καταγραφή και συλλογή των δεδομένων κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπλέον, ένας διαιρούμενος δίσκος με διάμετρο ίση με την εσωτερική διάμετρο του εκάστοτε δοκιμίου, με οπή σε καθένα από τα δύο μέρη του, συνδέεται μέσω αρπάγων στη μηχανή (Σχήμα 4.6). Οι δύο δίσκοι συγκρατούνται από τις αρπάγες μέσω πείρων. Μέσω της απομάκρυνσης των κινούμενων μερών της μηχανής και, συνεπώς και απομάκρυνσης των δύο δίσκων, ασκείται εσωτερικά το

φορτίο στο δακτυλιοειδές δοκίμιο. Ο δίσκος, οι αρπάγες και οι πείροι της διάταξης είναι κατασκευασμένοι από χάλυβα υψηλής αντοχής S355. Αναφέρεται πως κατά τη διεξαγωγή των ίδιων πειραματικών δοκιμών, με μικρότερες οπές στα μέρη του διαιρούμενου δίσκου και με υλικό χάλυβα S235 εμφανίστηκαν φαινόμενα πλαστικοποίησης και στένωσης των οπών. Ύστερα από μελέτη και ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (Θεμελάκης, 2017), κατασκευάστηκε καινούρια διάταξη διαιρούμενου δίσκου με μεγαλύτερη διάμετρο οπών και πείρων από την B&T Composites. Της τοποθέτησης των δοκιμών στην υδραυλική μηχανή προηγήθηκε η κόλληση μονοαξονικών αισθητήρων παραμόρφωσης (strain gauges) μήκους 10 mm της εταιρείας KYOWA επί των δοκιμών (Type: FLAB-10-11). Τα strain gauges τοποθετήθηκαν στην περιφερειακή διεύθυνση, στο μέσο του πλάτους κάθε δοκιμίου. Επίσης, το εσωτερικό των δοκιμών επαλείφθηκε με γράσο για την ελαχιστοποίηση της τριβής μεταξύ των δοκιμών και του εξωτερικού μέρους των δίσκων.



Σχήμα 4.4. Υδραυλική μηχανή MTS 322



Σχήμα 4.5. Σύστημα συλλογής δεδομένων HBM Spider 8

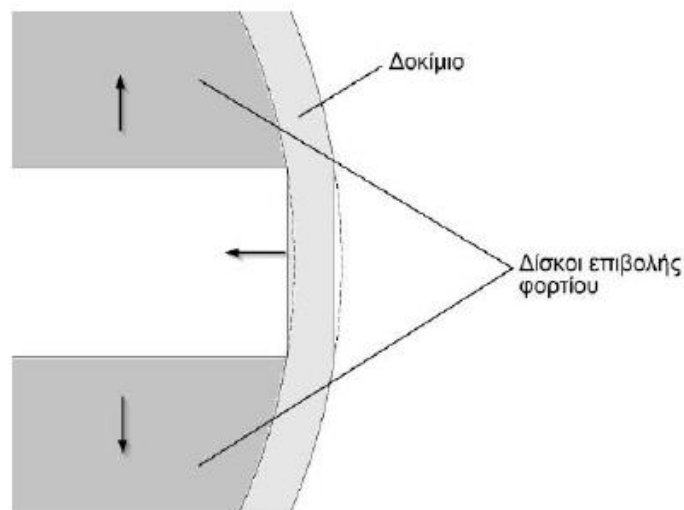


Σχήμα 4.6. Διάταξη διαιρούμενου δίσκου-πείρων-αρπάγων του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας ΕΜΠ

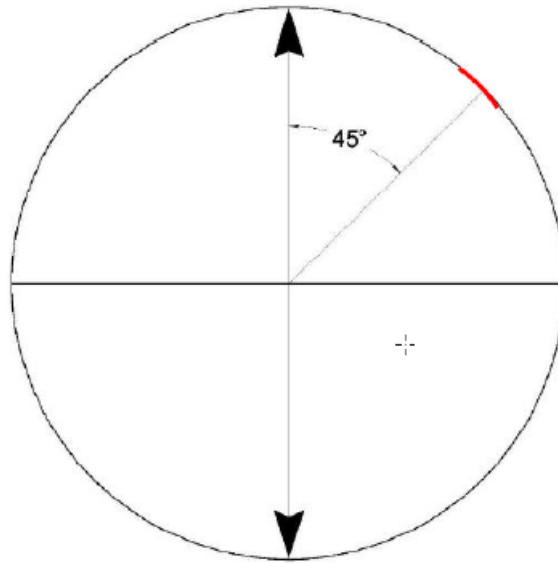
Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4.1, από την πειραματική διαδικασία και την ίδια τη διάταξη, προκαλούνται φαινόμενα κάμψης του δοκιμίου, η οποία επηρεάζει την ομοιομορφία των τάσεων και δύναται να υποβαθμίσει την αξιοπιστία των μετρήσεων. Αυτό διότι το πρότυπο επιτάσσει την επιβολή καθαρού εφελκυσμού κατά τη δοκιμή. Η κάμψη εμφανίζεται εξαιτίας της ασυνέχειας στην επαφή δοκιμίου-διαιρούμενου

δίσκου. Για την αντιμετώπιση του εν λόγω φαινομένου και για τη λήψη ορθότερων δεδομένων εκτελέστηκαν οι εξής ενέργειες:

1. Μεταρρύθμιση της γεωμετρίας της διάταξης σε σχέση με το πρότυπο (διάκενο διαιρούμενου δίσκου στα 5 mm έναντι τουλάχιστον 63 mm που ορίζει το ASTM D2290). Κατά συνέπεια, ελαχιστοποίηση του φαινομένου κάμψης στο ανυποστήρικτο μέρος του δοκιμίου κατά την απομάκρυνση των δίσκων (Philippidis & Roukis, 2015). Το φαινόμενο αυτό της κάμψης εξηγείται στο Σχήμα 4.7, όπου με διακεκομμένες γραμμές φαίνεται η θεωρητική θέση του δοκιμίου και με συνεχείς γραμμές απεικονίζεται η πραγματική θέση του. Όπως παρατηρείται το δοκίμιο χάνει την «κυκλικότητά» του και κάμπτεται από τους δίσκους.
2. Τοποθέτηση των αισθητήρων μέτρησης παραμορφώσεων (strain gauges) σε σημείο ανεπηρέαστο από την κάμψη. Βέλτιστη θέση (Κωνσταντινίδης, 2016) τοποθέτησης του αισθητήρα βρέθηκε να είναι στις 45° από το σημείο του φαινομένου κάμψης ή από τη διεύθυνση άσκησης του φορτίου (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.7. Σκαρίφημα κάμψης δακτυλιοειδούς δοκιμίου



Σχήμα 4.8. Θέση τοποθέτησης strain gauge κατά την περιφέρεια του δοκιμίου

Σύμφωνα με τον Peters (2011), είναι σημαντικό ο κύλινδρος, από τον οποίο θα προκύψουν τα δοκίμια που θα υποβληθούν στη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου, να είναι λεπτός, ώστε οι μετρούμενες παραμορφώσεις στην εξωτερική επιφάνεια να είναι περίπου ίσες με τις παραμορφώσεις στο εσωτερικό.

Η εκκίνηση της δοκιμής σημαίνει την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου με την απομάκρυνση των δίσκων. Από το σύστημα συλλογής δεδομένων (data acquisition system) μετρούνται σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής η δύναμη αντίδρασης της μηχανής και η μετατόπιση του κινούμενου μέρους της. Επιπροσθέτως μέσω των strain gauges λαμβάνεται και η παραμόρφωση του δοκιμίου. Η τάση  $\sigma_1$  που αναπτύσσεται στην περιφερειακή διεύθυνση του δοκιμίου υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης (4.1), όπως ορίζει το πρότυπο ASTM D2290. Με  $P$  συμβολίζεται η μετρούμενη δύναμη από τη μηχανή και με  $A$  η ορθογωνική εγκάρσια διατομή ως (πλάτος x πάχος) για κάθε δοκίμιο. Ως αντοχή θεωρείται η μέγιστη τάση  $\sigma_{1,max}$ .

$$\sigma_1 = \frac{P}{2A} \quad (4.1)$$

Για τη μέτρηση της αντοχής στα δοκίμια με εγκοπές, χρησιμοποιείται η εξίσωση (4.2) με τη μειωμένη ενεργή διατομή στην περιοχή των εγκοπών.

$$\sigma_{1,N} = \frac{F}{2A_{red}} , A_{red} = b * t - \frac{\pi * r^2}{2} \quad (4.2)$$

Όπου:

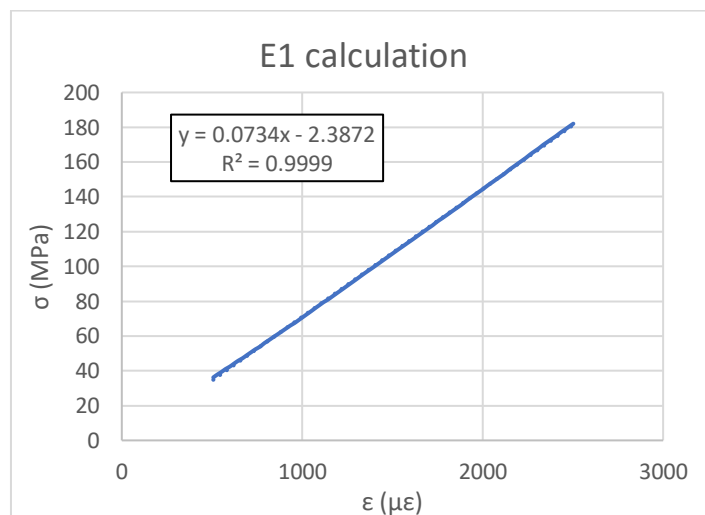
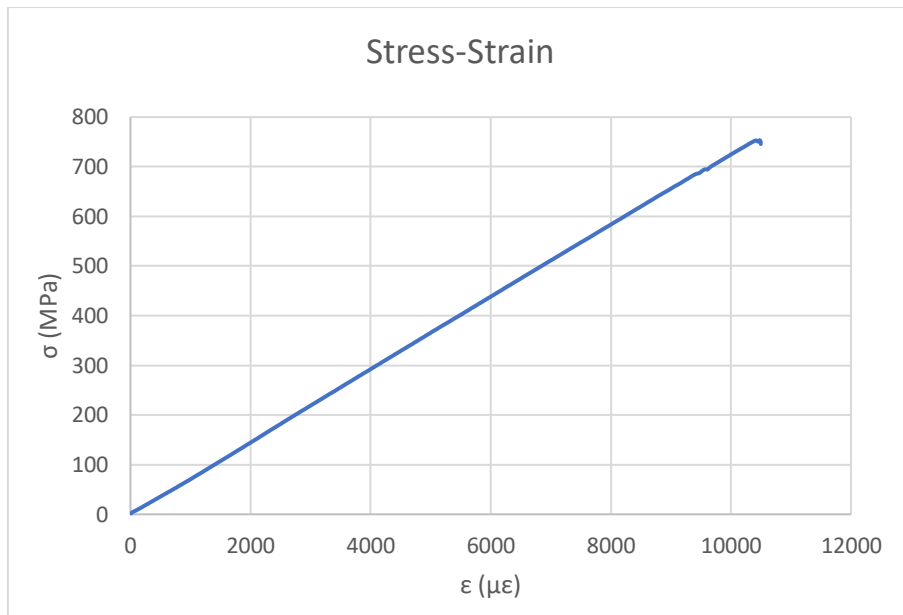
- b: πλάτος
- t: πάχος
- r: ακτίνα εγκοπών

Όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ , για τη μέτρησή του ακολουθήθηκε διαδικασία παρόμοια με αυτή του προτύπου ASTM D3039 για τα επίπεδα δοκίμια (βλ. Κεφάλαιο 5). Λήφθηκε δηλαδή το  $E_1$  ως η κλίση του γραμμικού μέρους της καμπύλης τάσεων-παραμορφώσεων για το κάθε δοκίμιο. Μετά από παρατήρηση της πλειοψηφίας των καμπυλών σ-ε, καλή γραμμικότητα φάνηκε να υπάρχει κατά βάση στο εύρος 500-2500 με. Επομένως το μέτρο ελαστικότητας του κάθε δοκιμίου μετρήθηκε από την κλίση του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων σε αυτή την περιοχή παραμορφώσεων. Σημειώνεται ότι:

$$1 \mu\epsilon = 1 \frac{\mu m}{m} \quad (4.3)$$

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται μια τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων μιας δοκιμής, από το δοκίμιο E1-D200-T2-TW8-1, καθώς και ο τρόπος μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$ . Μετά την απομόνωση του μέρους της καμπύλης από 500 έως 2500 με, μέσω του προγράμματος Excel υπολογίζεται η εξίσωση της γραμμικοποιημένης καμπύλης ως ευθείας:  $y=ax+b$ . Ο συντελεστής a αποτελεί το  $E_1$ . Επιπλέον, για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της μεθόδου (δηλαδή της αξιοπιστίας της γραμμικής προσέγγισης) στο διάγραμμα παρουσιάζεται και ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination),  $R^2$ . Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής ήταν μεγαλύτερος του 0.99, κατά συνέπεια η προσέγγιση ήταν αξιόπιστη.





Σχήμα 4.9. Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και τρόπος μέτρησης  $E_1$  (κάτω) στη δοκιμή διαιρούμενου δίσκου

Τέλος, παρατίθενται και οι παράμετροι διεξαγωγής των δοκιμών διαιρούμενου δίσκου:

- Ταχύτητα απομάκρυνσης σιαγόνων μηχανής: 3 mm/min για δοκίμια εσωτερικής διαμέτρου 200 mm και 2 mm/min για δοκίμια εσωτερικής διαμέτρου 100 mm. Σημειώνεται πως το πρότυπο θέτει ελάχιστη ταχύτητα 0.1 inches/min, δηλαδή 2.54 mm/min. Ωστόσο χρησιμοποιήθηκε μικρότερη ταχύτητα στα δοκίμια μικρότερης διαμέτρου, για να μην αστοχήσουν γρήγορα και να ληφθούν περισσότερα δεδομένα κατά τη δοκιμή.
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 5 Hz

### 4.3. Αποτελέσματα

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα των δοκιμών διαιρούμενου δίσκου παρατίθενται στη συνέχεια. Οι κύλινδροι από τους οποίους προήλθαν τα δοκίμια είχαν κατασκευαστεί με γωνία περιέλιξης  $90^\circ$ , κατά συνέπεια, όπως ήδη εξηγήθηκε, από την πειραματική διαδικασία θα προκύψουν αποτελέσματα σχετικά με την περιφερειακή διεύθυνση των δοκιμών, δηλαδή παράλληλα στις ενισχυτικές ίνες. Οι τιμές της αντοχής  $\sigma_{1,max}$ , της μέγιστης ασκούμενης δύναμης  $F_{max}$  και της μέγιστης παραμόρφωσης  $\epsilon_{max}$  παρατίθενται για δύο περιπτώσεις:

- Για τα δοκίμια με εγκοπές (χαρακτηρίζονται με (N) στο τέλος)
- Για τα δοκίμια χωρίς εγκοπές

Οι εγκοπές αποτελούν σημεία συγκέντρωσης τάσεων και λογικά το φορτίο αστοχίας των δοκιμών με εγκοπές θα είναι μικρότερο. Ωστόσο, επειδή και η εγκάρσια διατομή είναι μειωμένη σε σχέση με τα δοκίμια χωρίς εγκοπές, δεν είναι σίγουρο ποια δοκίμια θα έχουν μεγαλύτερη τάση θραύσης. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τις ιδιότητες των δοκιμών με και χωρίς εγκοπές θα συγκριθούν στη συνέχεια.

Τα αποτελέσματα φαίνονται συγκεντρωτικά στους Πίνακες 4.2-4.9. Σε κάθε ομάδα δοκιμών υπάρχουν δύο υποπίνακες για την περίπτωση ύπαρξης εγκοπών και για τα δοκίμια χωρίς εγκοπές. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης και δύναμης-μετατόπισης στα Σχήματα 4.11-4.18 για κάθε ομάδα δοκιμών. Με πράσινες αποχρώσεις φαίνονται οι καμπύλες δοκιμών με εγκοπές (N) και με κόκκινες αποχρώσεις τα δοκίμια χωρίς εγκοπές. Σε ορισμένες δοκιμές, το strain gauge αστόχησε πριν ολοκληρωθεί η θραύση του δοκιμίου. Σε αυτά τα δοκίμια μετρήθηκε η αντοχή κανονικά, ωστόσο δεν ήταν δυνατή η μέτρηση της μέγιστης παραμόρφωσης ούτε η αποτύπωση των καμπυλών  $\sigma$ - $\epsilon$  με ακρίβεια. Για αυτό το λόγο οι καμπύλες παραλείφθηκαν από τα διαγράμματα, ενώ στα δοκίμια αυτά δεν υπάρχει και τιμή  $\epsilon_{max}$  στους πίνακες. Επίσης, ορισμένες τιμές που παρατηρήθηκαν να έχουν μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες αντίστοιχες τιμές στην ίδια ομάδα δοκιμών απορρίφθηκαν και δεν χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του μέσου όρου της ιδιότητας. Αυτές οι αποκλίνουσες τιμές φαίνονται με κόκκινο χρώμα στους πίνακες.

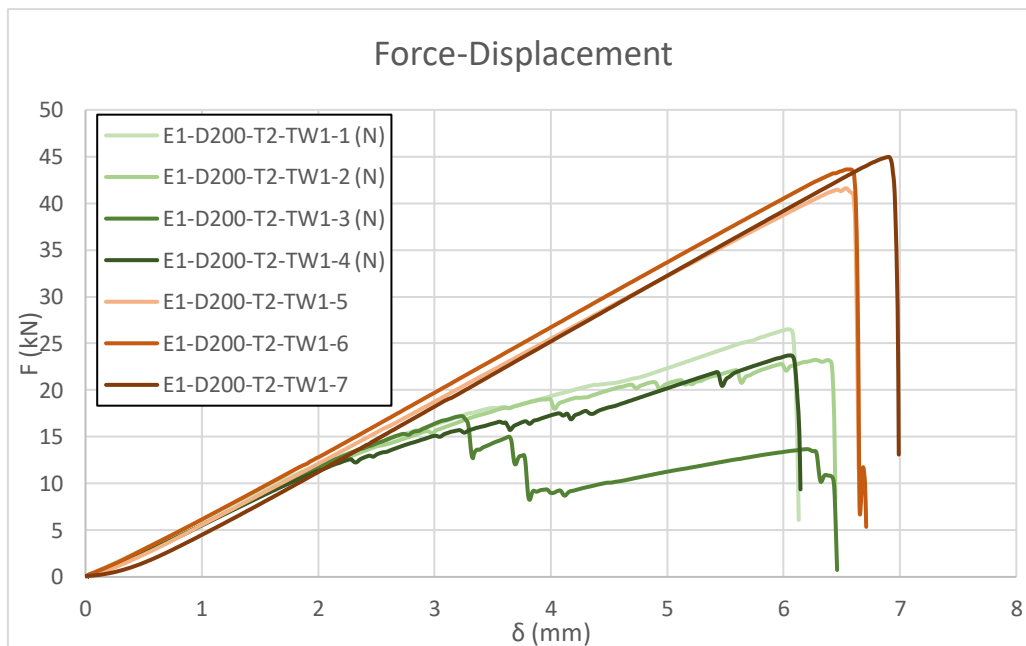
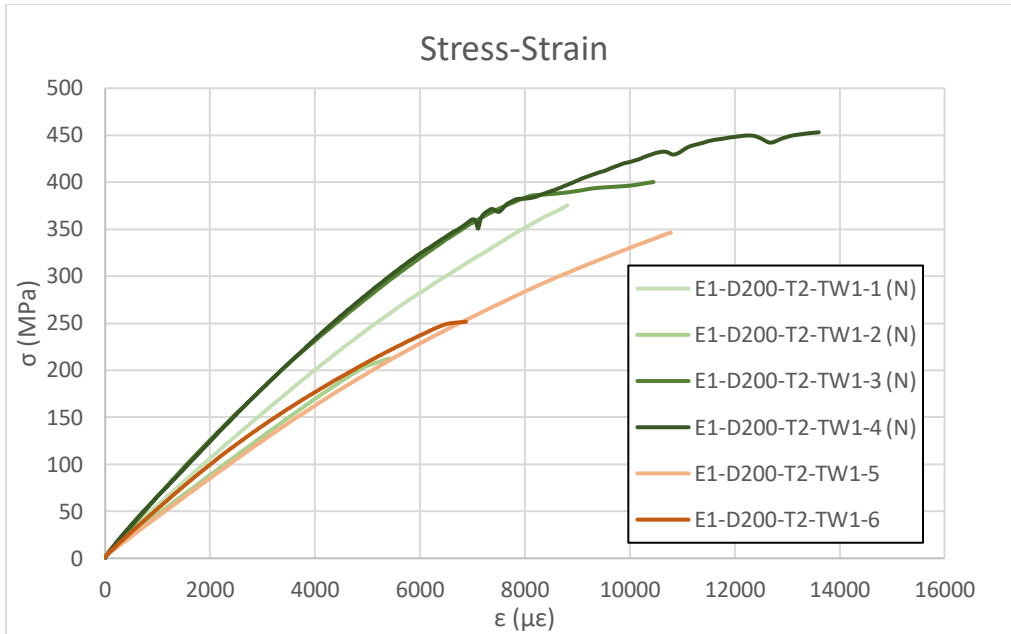
Σημειώνεται πως το δοκίμιο E1-D200-T2-TW8-5 (Σχήμα 4.10) δε χρησιμοποιήθηκε για δοκιμή. Συγκεκριμένα απορρίφθηκε λόγω έντονης αρχικής καμπυλότητας που πιθανώς ήταν αποτέλεσμα προβλημάτων κατά την κοπή του.



Σχήμα 4.10. Απορριφθέν δοκίμιο λόγω έντονης αρχικής παραμόρφωσης

Πίνακας 4.2. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D200-T2-TW1-i)

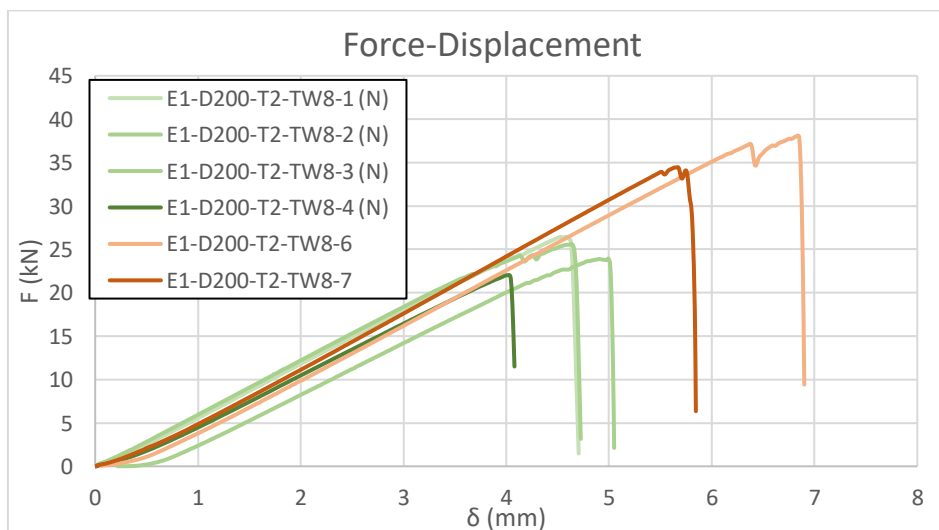
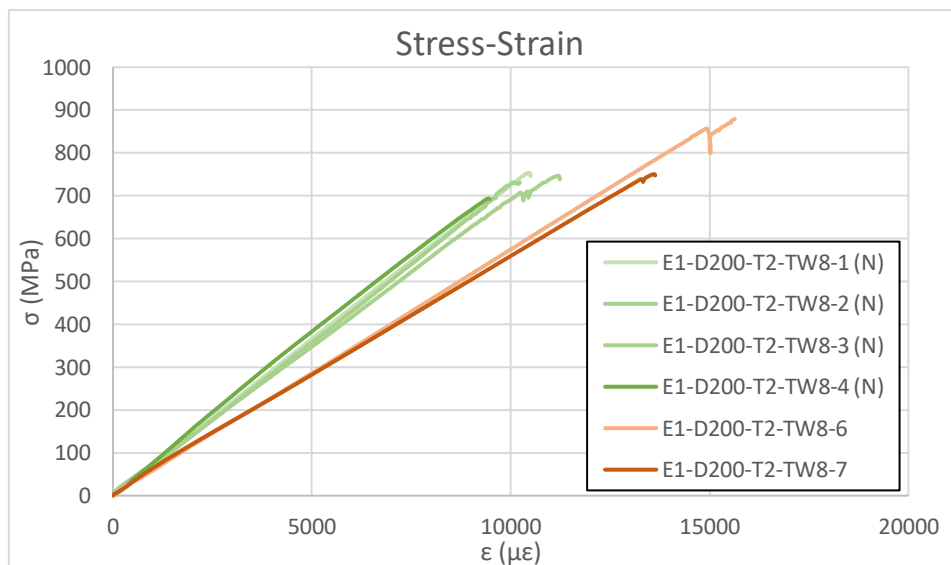
<b>ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 1 (E1-D200-T2-TW1-i)</b>				
	<b>E<sub>1</sub> (GPa)</b>	<b>F<sub>max</sub> (kN)</b>	<b>σ<sub>1</sub> (MPa)</b>	<b>ε<sub>max</sub> (μΕ)</b>
<b>E1-D200-T2-TW1-1 (N)</b>	49.90	26.51	742.6	8810
<b>E1-D200-T2-TW1-2 (N)</b>	42.40	23.23	711.5	
<b>E1-D200-T2-TW1-3 (N)</b>	60.30	17.21	484.7	10452
<b>E1-D200-T2-TW1-4 (N)</b>	58.50	23.71	678.7	13601
<b>Average (N)</b>	52.78	24.48	710.9	10954
<b>St. Deviation (N)</b>	8.27	1.77	32.0	2435
<b>Coef. of Variance (N)</b>	15.7%	7.2%	4.5%	22.2%
<b>E1-D200-T2-TW1-5</b>	41.10	41.60	914.0	10783
<b>E1-D200-T2-TW1-6</b>	46.80	43.62	943.4	
<b>E1-D200-T2-TW1-7</b>	43.90	44.96	929.6	13899
<b>Average</b>	43.93	43.39	929.0	12342
<b>St. Deviation</b>	2.85	1.69	14.7	2204
<b>Coef. of Variance</b>	6.5%	3.9%	1.6%	17.9%



Σχήμα 4.11. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D200-T2-TW8-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 2 (E1-D200-T2-TW8-i)				
	E <sub>1</sub> (GPa)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>1</sub> (MPa)	ε <sub>max</sub> (μϵ)
E1-D200-T2-TW8-1 (N)	73.40	26.44	753.2	10497
E1-D200-T2-TW8-2 (N)	67.20	25.61	746.9	11236
E1-D200-T2-TW8-3 (N)	71.30	23.93	732.5	10229
E1-D200-T2-TW8-4 (N)	79.10	22.04	693.4	9473
<b>Average (N)</b>	<b>72.75</b>	<b>24.51</b>	<b>731.5</b>	<b>10359</b>
<b>St. Deviation (N)</b>	<b>4.95</b>	<b>1.95</b>	<b>26.9</b>	<b>728</b>
<b>Coef. of Variance (N)</b>	<b>6.8%</b>	<b>7.9%</b>	<b>3.7%</b>	<b>7.0%</b>
E1-D200-T2-TW8-6	58.10	37.14	878.9	15632
E1-D200-T2-TW8-7	57.20	34.47	750.4	13655
<b>Average</b>	<b>57.65</b>	<b>35.81</b>	<b>814.6</b>	<b>14644</b>
<b>St. Deviation</b>	<b>0.64</b>	<b>1.89</b>	<b>90.9</b>	<b>1398</b>
<b>Coef. of Variance</b>	<b>1.1%</b>	<b>5.3%</b>	<b>11.1%</b>	<b>9.5%</b>



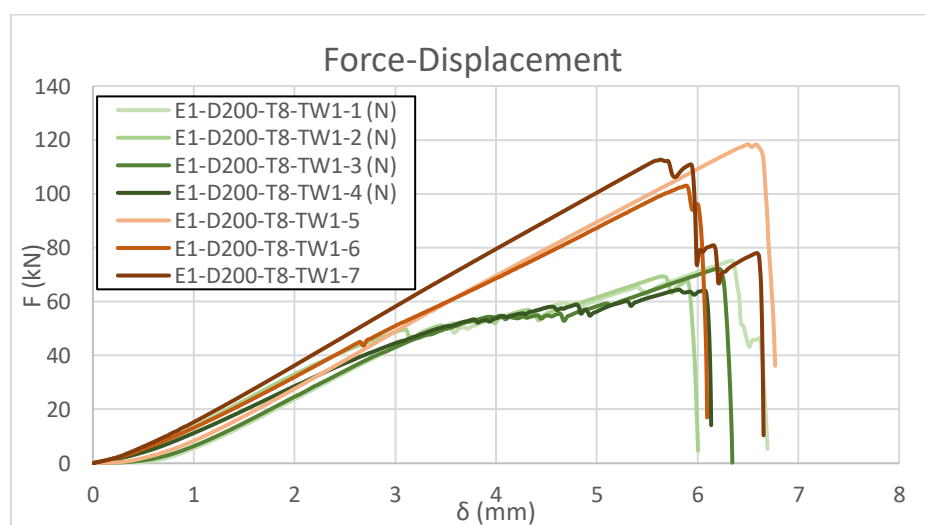
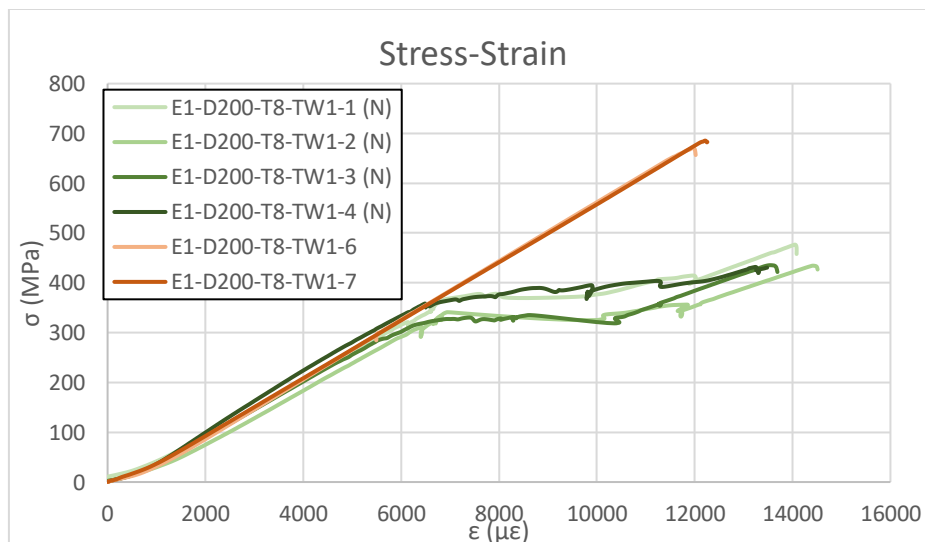
Σχήμα 4.12. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D200-T8-TW1-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 5 (E1-D200-T8-TW1-i)				
	$E_1$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_1$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ )
E1-D200-T8-TW1-1 (N)	55.70	75.23	476.6	14047
E1-D200-T8-TW1-2 (N)	53.10	69.38	434.4	14422
E1-D200-T8-TW1-3 (N)	56.20	72.18	435.4	13534
E1-D200-T8-TW1-4 (N)	63.40	64.38	431.9	13480
Average (N)	57.10	70.29	444.6	13871
St. Deviation (N)	4.41	4.61	21.4	448
Coef. of Variance (N)	7.7%	6.6%	4.8%	3.2%

E1-D200-T8-TW1-5		118.35	721.5	
E1-D200-T8-TW1-6	59.60	103.03	670.9	12019
E1-D200-T8-TW1-7	58.10	112.67	685.5	12218
Average	58.85	111.35	692.6	12119
St. Deviation	1.06	7.74	26.0	140
Coef. of Variance	1.8%	7.0%	3.8%	1.2%



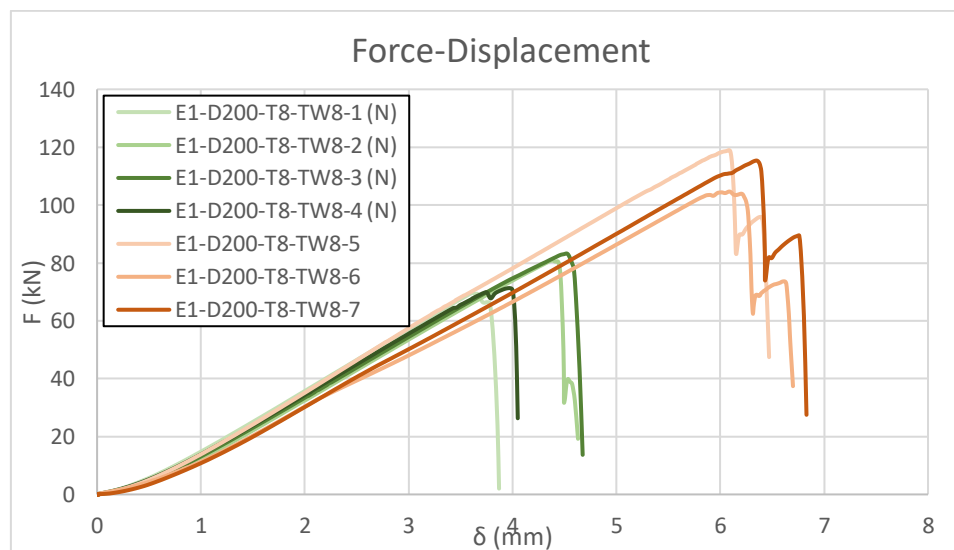
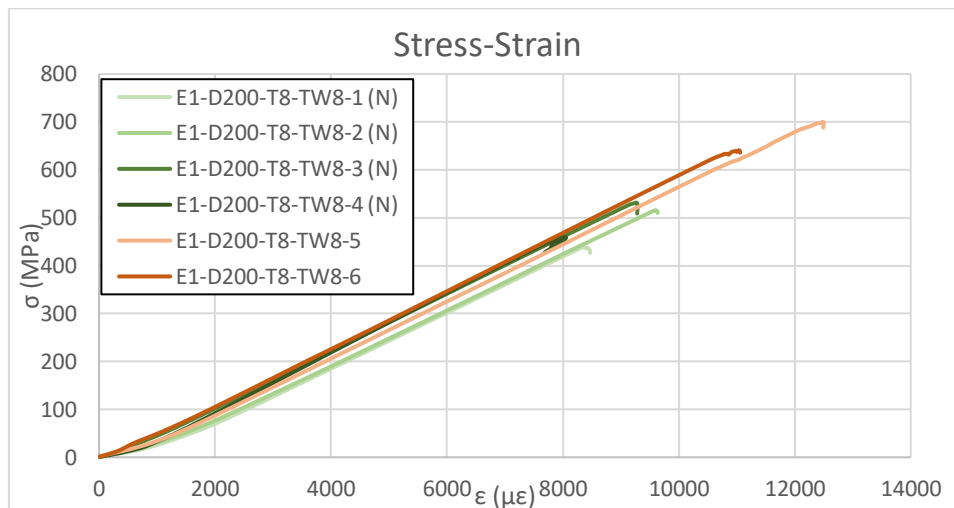
Σχήμα 4.13. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 4.5. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D200-T8-TW8-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 6 (E1-D200-T8-TW8-i)				
	$E_1$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_1$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ )
E1-D200-T8-TW8-1 (N)	55.80	69.58	437.9	8489
E1-D200-T8-TW8-2 (N)	55.40	80.82	515.4	9601
E1-D200-T8-TW8-3 (N)	59.40	83.25	531.4	9258
E1-D200-T8-TW8-4 (N)	63.30	71.31	460.0	8055
Average (N)	58.48	76.24	486.2	8851
St. Deviation (N)	3.69	6.80	44.4	706
Coef. of Variance (N)	6.3%	8.9%	9.1%	8.0%

E1-D200-T8-TW8-5	59.10	118.98	699.9	12485
E1-D200-T8-TW8-6	60.20	104.67	640.7	11040
E1-D200-T8-TW8-7		115.38	676.9	
Average	59.65	113.01	672.5	11763
St. Deviation	0.78	7.44	29.9	1021
Coef. of Variance	1.3%	6.6%	4.4%	8.7%

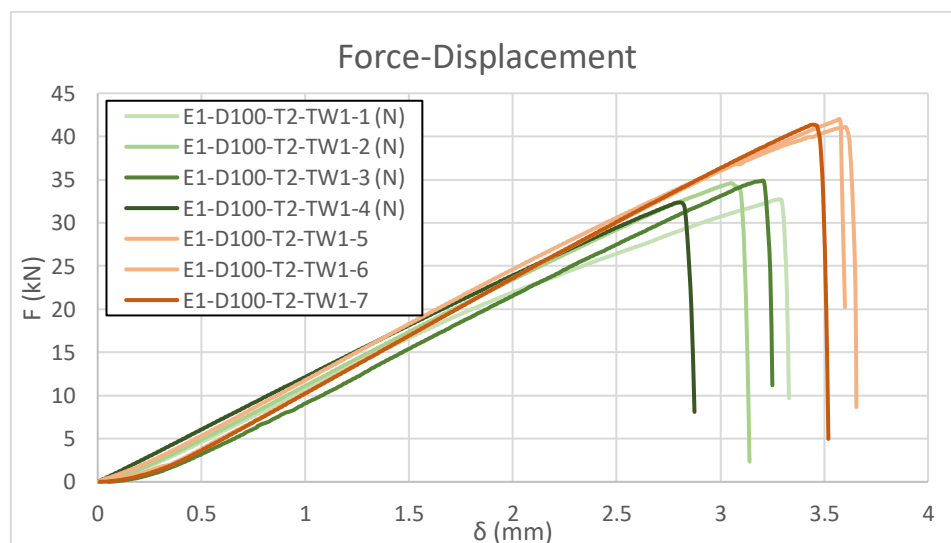
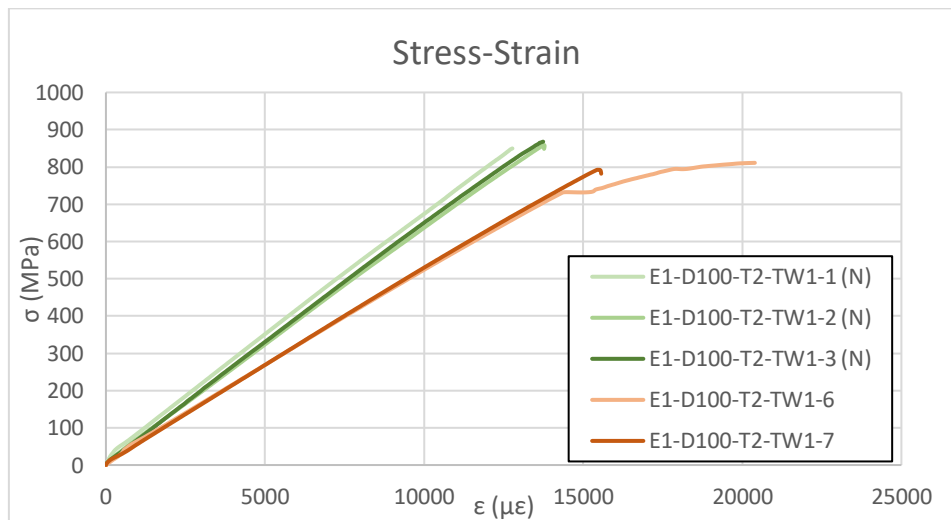


Σχήμα 4.14. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 4.6. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D100-T2-TW1-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 9 (E1-D100-T2-TW1-i)				
	E <sub>1</sub> (GPa)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>1</sub> (MPa)	ε <sub>max</sub> (με)
E1-D100-T2-TW1-1 (N)	66.40	32.72	849.7	12775
E1-D100-T2-TW1-2 (N)	62.60	34.59	859.0	13784
E1-D100-T2-TW1-3 (N)	66.20	34.89	867.9	13742
E1-D100-T2-TW1-4 (N)		32.35	824.4	
Average (N)	65.07	33.64	850.2	13434
St. Deviation (N)	2.14	1.29	18.7	571
Coef. of Variance (N)	3.3%	3.8%	2.2%	4.3%

E1-D100-T2-TW1-5		42.00	813.0	
E1-D100-T2-TW1-6	51.20	41.09	817.7	20394
E1-D100-T2-TW1-7	52.90	41.36	792.5	15565
Average	52.05	41.48	807.7	17980
St. Deviation	1.20	0.47	13.4	3415
Coef. of Variance	2.3%	1.1%	1.7%	19.0%



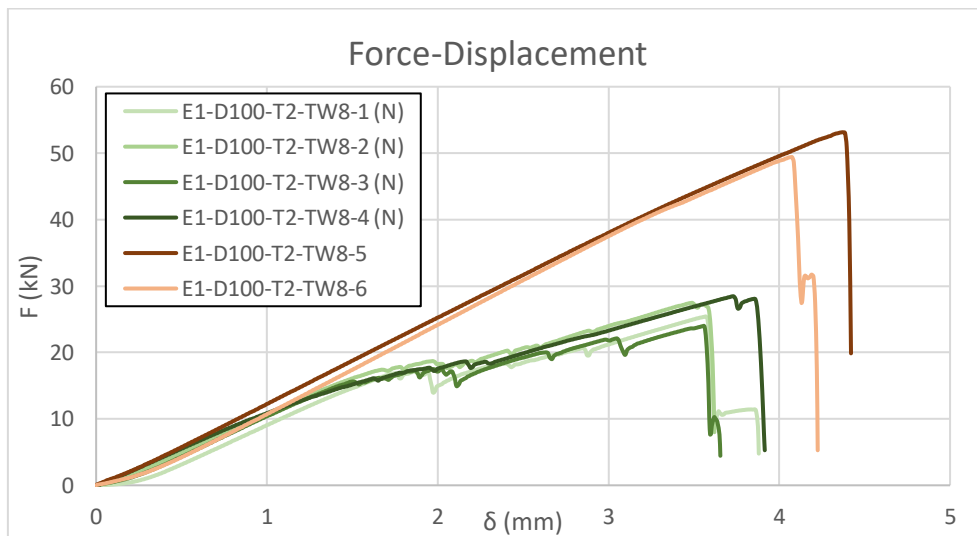
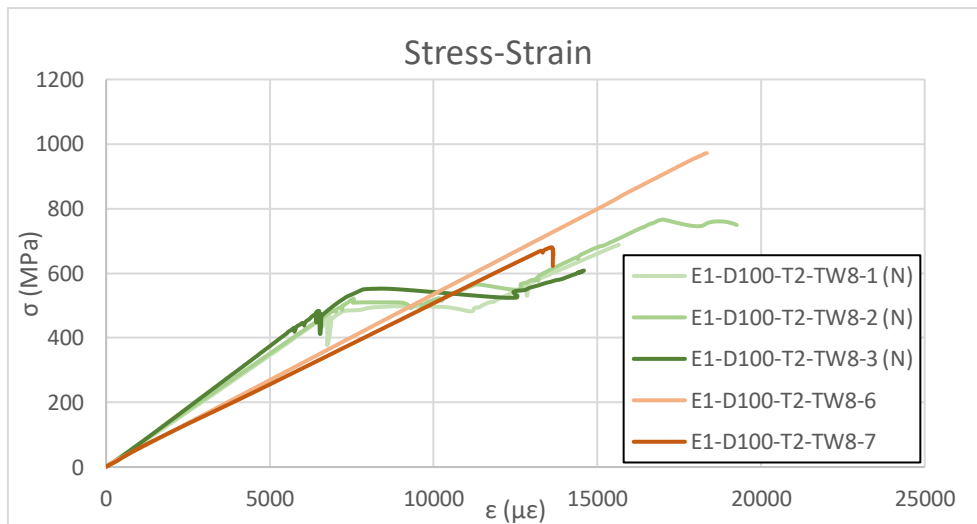
Σχήμα 4.15. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)



Πίνακας 4.7. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D100-T2-TW8-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 10 (E1-D100-T2-TW8-i)				
	E <sub>1</sub> (GPa)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>1</sub> (MPa)	ε <sub>max</sub> (μ <sub>ε</sub> )
E1-D100-T2-TW8-1 (N)	69.20	25.42	689.4	15658
E1-D100-T2-TW8-2 (N)	69.60	27.47	766.1	16998
E1-D100-T2-TW8-3 (N)	75.80	24.00	662.3	14619
E1-D100-T2-TW8-4 (N)	68.10	28.46	775.6	19073
Average (N)	70.68	26.34	723.4	16587
St. Deviation (N)	3.48	2.01	56.1	1923
Coef. of Variance (N)	4.9%	7.6%	7.7%	11.6%

E1-D100-T2-TW8-5		53.15	1049.8	
E1-D100-T2-TW8-6	53.40	49.41	971.7	18343
E1-D100-T2-TW8-7	48.80	34.47	680.2	13655
Average	51.10	45.68	900.6	15999
St. Deviation	3.25	9.88	194.8	3315
Coef. of Variance	6.4%	21.6%	21.6%	20.7%

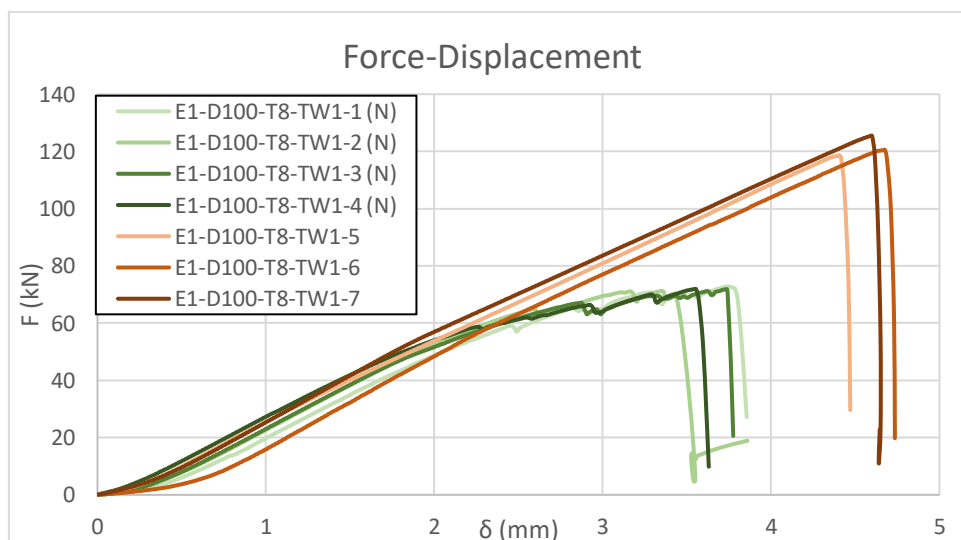
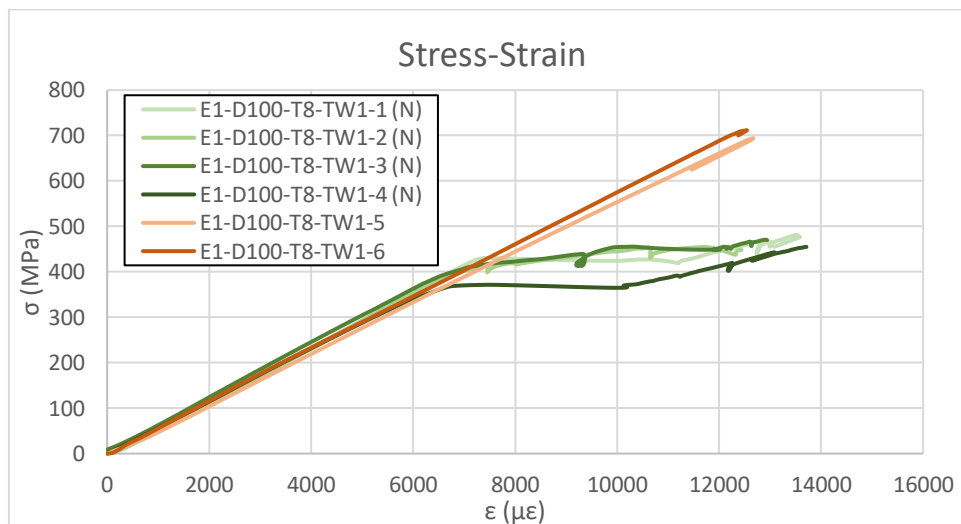


Σχήμα 4.16. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 4.8. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D100-T8-TW1-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 11 (E1-D100-T8-TW1-i)				
	E <sub>1</sub> (GPa)	F <sub>max</sub> (kN)	σ <sub>1</sub> (MPa)	ε <sub>max</sub> (με)
E1-D100-T8-TW1-1 (N)	60.10	72.84	481.0	13506
E1-D100-T8-TW1-2 (N)	61.10	71.23	454.7	11698
E1-D100-T8-TW1-3 (N)	61.30	71.88	470.7	12909
E1-D100-T8-TW1-4 (N)	59.40	71.95	454.9	13712
Average (N)	60.48	71.98	465.3	12956
St. Deviation (N)	0.89	0.66	12.9	905
Coef. of Variance (N)	1.5%	0.9%	2.8%	7.0%

E1-D100-T8-TW1-5	57.80	118.66	694.2	12668
E1-D100-T8-TW1-6	59.50	120.59	711.7	12547
E1-D100-T8-TW1-7		125.46	742.7	
Average	58.65	121.57	716.2	12608
St. Deviation	1.20	3.50	24.6	85
Coef. of Variance	2.0%	2.9%	3.4%	0.7%

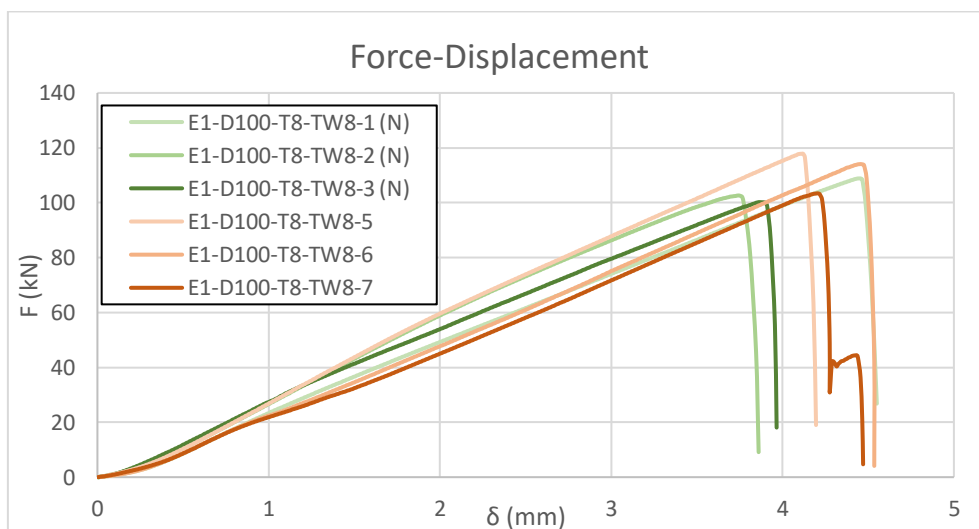
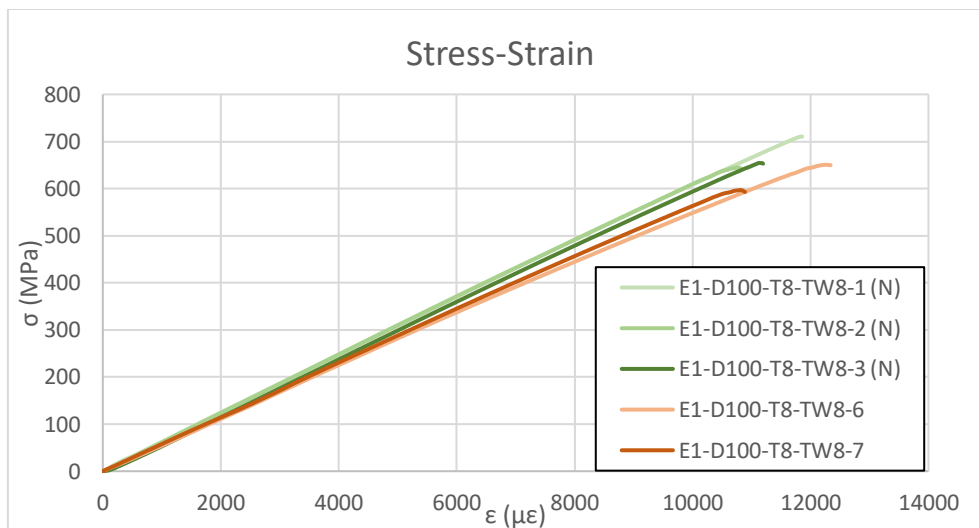


Σχήμα 4.17. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 4.9. Αποτελέσματα δοκιμών διαιρούμενου δίσκου (E1-D100-T8-TW8-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 12 (E1-D100-T8-TW8-i)				
	$E_1$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_1$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ )
E1-D100-T8-TW8-1 (N)	61.40	108.85	710.4	11859
E1-D100-T8-TW8-2 (N)	62.30	102.64	644.7	10819
E1-D100-T8-TW8-3 (N)	61.70	100.22	654.4	11195
E1-D100-T8-TW8-4 (N)	60.30	74.49	499.5	
Average (N)	61.43	103.90	669.9	11291
St. Deviation (N)	0.84	4.45	35.5	526
Coef. of Variance (N)	1.4%	4.3%	5.3%	4.7%

E1-D100-T8-TW8-5		117.83	676.3	
E1-D100-T8-TW8-6	57.10	114.09	650.5	12341
E1-D100-T8-TW8-7	57.70	103.41	596.7	10889
Average	57.40	111.78	641.2	11615
St. Deviation	0.42	7.48	40.6	1027
Coef. of Variance	0.7%	6.7%	6.3%	8.8%



Σχήμα 4.18. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Στον Πίνακα 4.10 παρατίθενται τα αποτελέσματα για το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων, με εγκοπές ή χωρίς, όλων των ομάδων. Παρατηρείται ότι το  $E_1$  είναι σημαντικά μεγαλύτερο στα δοκίμια με εγκοπές συγκριτικά με εκείνα που δεν έχουν εγκοπές για τους λεπτούς δακτύλιους (πάχος 2 mm, διαφορές από 20 έως 40% περίπου), ενώ οι διαφορές είναι πολύ μικρότερες και εντός του εύρους του πειραματικού λάθους για τους παχύτερους δακτύλιους (πάχος 8 mm, διαφορές από 2 έως 7% περίπου). Επίσης, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.11 και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την τάση θραύσης των δοκιμίων. Το  $\sigma_1$  φαίνεται να είναι αισθητά χαμηλότερο στα δοκίμια με εγκοπές για τους δακτύλιους μεγαλύτερης διαμέτρου (200 mm, μεταβολές από 10 έως και 36%). Αντίθετα, στους μικρότερους δακτύλιους (διάμετρος 100 mm) δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο συμπέρασμα, καθώς οι διαφορές των αντοχών είναι απρόβλεπτες για τα δοκίμια με εγκοπές και χωρίς. Από τους πίνακες έχουν παραληφθεί η **δύναμη τάνυσης** (tensioning force) των ινών και το **πλάτος** των δοκιμίων, μεγέθη τα οποία είναι σταθερά για όλα τα δοκίμια και ίσα με 8 N και 10 mm αντίστοιχα.

Πίνακας 4.10. Σύγκριση του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$  για δοκίμια με και χωρίς εγκοπές

Ομάδα δοκιμίων	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Tows	$E_1$ (GPa)		% διαφορά
				Με εγκοπές	Χωρίς εγκοπές	
E1-D200-T2-TW1	200	2	1	52.78	43.93	20.1
E1-D200-T2-TW8	200	2	8	72.75	57.65	26.2
E1-D200-T8-TW1	200	8	1	57.10	58.85	-3.0
E1-D200-T8-TW8	200	8	8	58.48	59.65	-2.0
E1-D100-T2-TW1	100	2	1	65.07	52.05	25.0
E1-D100-T2-TW8	100	2	8	70.86	51.10	38.7
E1-D100-T8-TW1	100	8	1	60.48	58.65	3.1
E1-D100-T8-TW8	100	8	8	61.43	57.40	7.0

Πίνακας 4.11. Σύγκριση της αντοχής  $\sigma_1$  για δοκίμια με και χωρίς εγκοπές

Ομάδα δοκιμίων	Διάμετρος (mm)	Πάχος (mm)	Tows	$\sigma_{1,max}$ (MPa)		% διαφορά
				Με εγκοπές	Χωρίς εγκοπές	
E1-D200-T2-TW1	200	2	1	710.9	929.0	-23.5
E1-D200-T2-TW8	200	2	8	731.5	814.6	-10.2
E1-D200-T8-TW1	200	8	1	444.6	692.6	-35.8
E1-D200-T8-TW8	200	8	8	486.2	672.5	-27.7
E1-D100-T2-TW1	100	2	1	850.2	807.7	5.3
E1-D100-T2-TW8	100	2	8	723.4	900.6	-19.7
E1-D100-T8-TW1	100	8	1	465.3	716.2	-35.0
E1-D100-T8-TW8	100	8	8	669.9	641.2	4.5

## Παρατηρήσεις

Η οπτική παρατήρηση των ανωτέρω διαγραμμάτων (Σχήματα 4.11-4.18) οδηγεί στο συμπέρασμα της καλής επαναληψιμότητας των πειραματικών δοκιμών με μία σχετική διαφοροποίηση των δοκιμών με και χωρίς εγκοπές. Όπως ήδη αναφέρθηκε, τα δοκίμια με εγκοπές αναπαρίστανται με πράσινο χρώμα, ενώ με κόκκινο φαίνονται τα δοκίμια χωρίς εγκοπές. Η διαφορά έγκειται στη μεγαλύτερη μέγιστη δύναμη που φαίνεται να παρέλαβαν τα δοκίμια χωρίς εγκοπές. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς οι εγκοπές αποτελούν σημείο συγκέντρωσης τάσεων και μειώνουν σε ένα βαθμό το φορτίο που μπορεί να παραληφθεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η αντοχή στα δοκίμια χωρίς εγκοπές ήταν μεγαλύτερη. Από την άλλη, τα δοκίμια με εγκοπές μικρότερου πάχους (2 mm) παρουσίασαν αυξημένο μέτρο ελαστικότητας, από 20 ως και 40%. Για τα δοκίμια με εγκοπές μεγαλύτερου πάχους (8 mm) οι διαφορές ήταν μικρές -εντός του εύρους του πειραματικού σφάλματος. Όσον αφορά στην επίδραση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες στη διεύθυνση των ινών, γίνεται ειδική αναφορά στο 7<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Εν πρώτοις, παρατηρούνται τα εξής:

- Η διάμετρος επιδρά με διαφορετικό τρόπο σε κάθε περίπτωση, στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών.
- Δοκίμια με μικρότερο πάχος είχαν αισθητά υψηλότερες τάσεις θραύσης και παρόμοια μέτρα ελαστικότητας.
- Η αύξηση του αριθμού των tows επιδρά απρόβλεπτα στην αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας.
- Τα δοκίμια χωρίς εγκοπές εμφάνισαν εν γένει μεγαλύτερη τάση θραύσης, αλλά μικρότερο μέτρο ελαστικότητας.

Τα αποτελέσματα όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$  και της αντοχής στην περιφερειακή διεύθυνση  $\sigma_1$  φαίνονται κατά βάση αρκετά αξιόπιστα. Στους Πίνακες 4.2-4.9 παρατηρείται ότι αυτά τα μεγέθη έχουν συντελεστή διακύμανσης (coefficient of variation) μικρότερο από 5% στην πλειοψηφία των περιπτώσεων και ελάχιστα μεγαλύτερο σε άλλες. Εξαιρέση αποτελεί ο Κύλινδρος 1 για το  $E_1$  με συντελεστή διακύμανσης 15.7% για δοκίμια με εγκοπές. Επίσης, ο Κύλινδρος 10 για το  $\sigma_1$  με συντελεστή 21.6% για τα δοκίμια χωρίς εγκοπές. Η μέγιστη

παραμόρφωση παρουσιάζει τις μεγαλύτερες αποκλίσεις. Η μεγαλύτερη αβεβαιότητα συναντάται στον Κύλινδρο 1 με συντελεστή διακύμανσης περί το 20%.

Σημαντικό είναι να τονιστεί η απόκλιση (για τα  $F_{max}$  και  $\sigma_1$ ) των δοκιμίων E1-D200-T2-TW1-3 και E1-D100-T8-TW8-4 σε σχέση με τα υπόλοιπα των αντίστοιχων ομάδων. Η απόκλιση αυτή αποδίδεται πιθανώς σε ελαττώματα των συγκεκριμένων δοκιμίων που δεν αναγνωρίστηκαν πριν τις πειραματικές δοκιμές. Οι τιμές αυτές δεν συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του μέσου όρου των ιδιοτήτων.

Η μορφή θραύσης των δοκιμίων κατά βάση παρατηρείται οπτικά στην περιφερειακή διεύθυνση με καθαρή ρωγμάτωση, κάθετα στις ίνες (Σχήματα 4.19-4.20). Στα δοκίμια με εγκοπές, αναμενόμενα επήλθε στο σημείο των εγκοπών, αλλά και στην πλειοψηφία των υπόλοιπων δοκιμίων η αστοχία παρατηρήθηκε στις  $0^\circ$  ή  $180^\circ$ , εκεί όπου θεωρητικά θα υπήρχε εγκοπή. Από τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης των Σχημάτων 4.11-4.18 παρατηρείται ότι τα δοκίμια με εγκοπές με 1 tow, ύστερα από την αρχική τους γραμμική απόκριση, παρουσιάζουν μία μικρή πτώση στην κλίση τους (στο 30-50% της μέγιστης τάσης) και συνεχίζουν γραμμικά μέχρι τη θραύση. Αντίθετα, τα δοκίμια με 8 tows δεν παρουσιάζουν αυτή την ιδιαιτερότητα, έχοντας γραμμική συμπεριφορά μέχρι την αστοχία. Η συμπεριφορά αυτή των δοκιμίων με 1 tow αποδίδεται στο γεγονός ότι η αστοχία τους ξεκινά από δύο περιφερειακές ρωγμές, των οποίων η δημιουργία εντοπίζεται στο σημείο των άκρων των εγκοπών (είτε της μίας είτε και των δύο). Οι ρωγμές αυτές διαδίδονται περιφερειακά του δοκιμίου, οδηγούν σε αποχωρισμό των ινών κατά το πλάτος και τελικά μειώνουν την ενεργή εγκάρσια διατομή του δοκιμίου. Για αυτό παρατηρείται και η απότομη αλλαγή της κλίσης στην καμπύλη  $\sigma$ - $\epsilon$ . Σημειώνεται πως στα δοκίμια με εγκοπή με 8 tows, συναντάται επίσης αυτή η δημιουργία ρωγμών στις εγκοπές, ωστόσο οι ρωγμές δε διαδίδονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Έτσι τα δοκίμια με 8 tows συμπεριφέρονται γραμμικά μέχρι τη θραύση τους.



Σχήμα 4.19. Θραύση δοκιμίου κάθετα στις ίνες



Σχήμα 4.20. Θραύση δοκιμίου κάθετα στις ίνες

Οι σειρές δοκιμών E1-D200-T2-TW1-i και E1-D200-T8-TW1-i αστόχησαν κατά βάση με έντονο αποχωρισμό των ινών και συστροφή μεταξύ τους (Σχήμα 4.21).



*Σχήμα 4.21. Θραύση δοκιμίου με αποχωρισμό και συστροφή των ινών*

Τα δακτυλοειδή δοκίμια με διάμετρο 100 mm εμφάνισαν κατά βάση θραύση με αποχωρισμό των στρώσεων περίπου στο μέσο του πάχους (Σχήματα 4.22-4.23).





*Σχήμα 4.22. Θραύση δοκιμίου με αποχωρισμό των στρώσεων*



*Σχήμα 4.23. Θραύση δοκιμίου με αποχωρισμό των στρώσεων*

#### 4.4. Πειραματικές δοκιμές με αισθητήρα στις 0° περιφερειακά

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο εδάφιο (βλ. Κεφάλαιο 4.1), οι δοκιμές διαιρούμενου δίσκου πραγματοποιήθηκαν με strain gauges τοποθετημένα στο δοκίμιο στις 45° σε σχέση με τη διεύθυνση φόρτισης από τη μηχανή. Και αυτό διότι αυτό το σημείο θεωρείται ανεπηρέαστο από τα φαινόμενα κάμψης του δοκιμίου από τον δίσκο (Κωνσταντινίδης, 2016). Συνεπώς, έτσι θα λαμβάνονταν ορθότερα αποτελέσματα σχετικά με τις «καθαρές» παραμορφώσεις για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων.

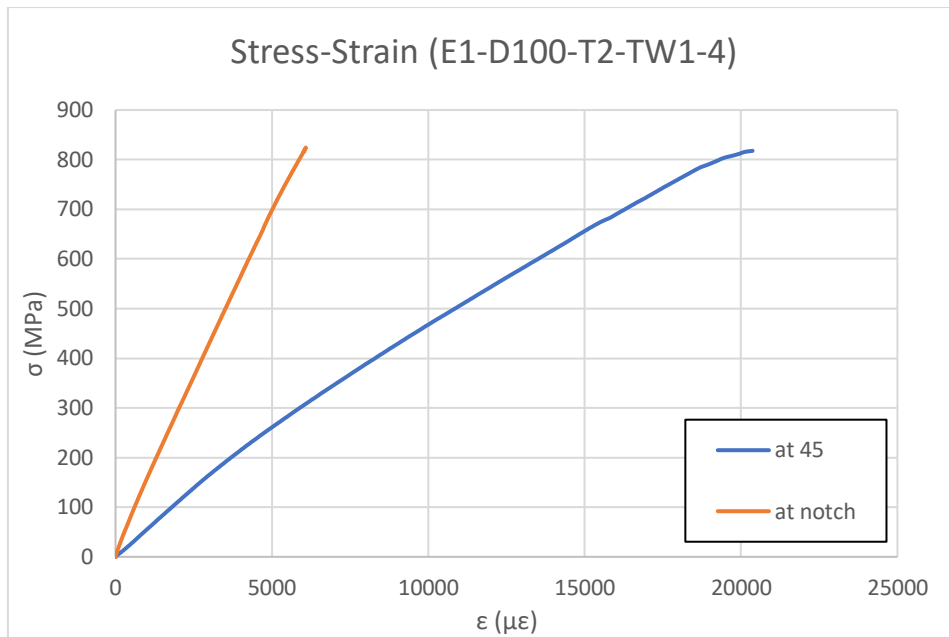
Ωστόσο, αποφασίστηκε να εξεταστεί και η παραμορφωσιακή συμπεριφορά των δοκιμίων με εγκοπές στο σημείο της εγκοπής, δηλαδή στις 0° περιφερειακά, ώστε να μελετηθεί αν υπάρχουν διαφορές λόγω της ύπαρξης της εγκοπής. Στα δοκίμια χωρίς εγκοπές, το strain gauge θα τοποθετούνταν στις 0° περιφερειακά, δηλαδή σε διεύθυνση κάθετη στη φόρτιση. Στο Σχήμα 4.24 απεικονίζονται τα τοποθετημένα strain gauges των επιπλέον δοκιμών.

Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τα δακτυλιοειδή δοκίμια που απέμειναν από κάθε ομάδα, δηλαδή 1 με εγκοπές και 1 χωρίς. Υπενθυμίζεται ότι το δοκίμιο E1-D200-T2-TW8-5 (Σχήμα 4.10) έχει απορριφθεί. Στα δοκίμια με εγκοπές τοποθετήθηκαν strain gauges στις 45°, αλλά και στο σημείο των εγκοπών αυτή τη φορά, προς σύγκριση των παραμορφώσεων σε αυτές τις θέσεις. Στα άλλα δοκίμια χωρίς εγκοπές τοποθετήθηκε αισθητήρας μόνο στις 0° περιφερειακά, δηλαδή σε διεύθυνση κάθετη της επιβαλλόμενης δύναμης. Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων και δύναμης-μετατόπισης, όπως ακριβώς στα υπόλοιπα δοκίμια. Τα αποτελέσματα ενσωματώθηκαν στους Πίνακες 4.2-4.9, εκτός από το E<sub>1</sub>, διότι όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, το φαινόμενο της κάμψης στην περιοχή της επαφής δοκιμίου-δίσκου, επηρεάζει την κλίση του διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης.

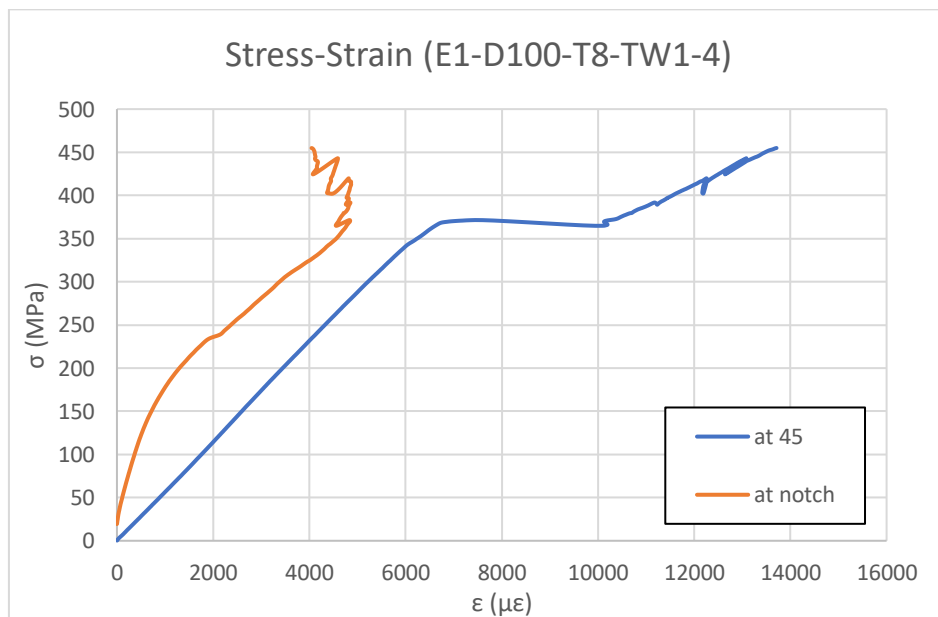


Σχήμα 4.24. Διάταξη με strain gauges και στις  $0^\circ$  - δοκίμιο με εγκοπές (αριστερά) και χωρίς (δεξιά)

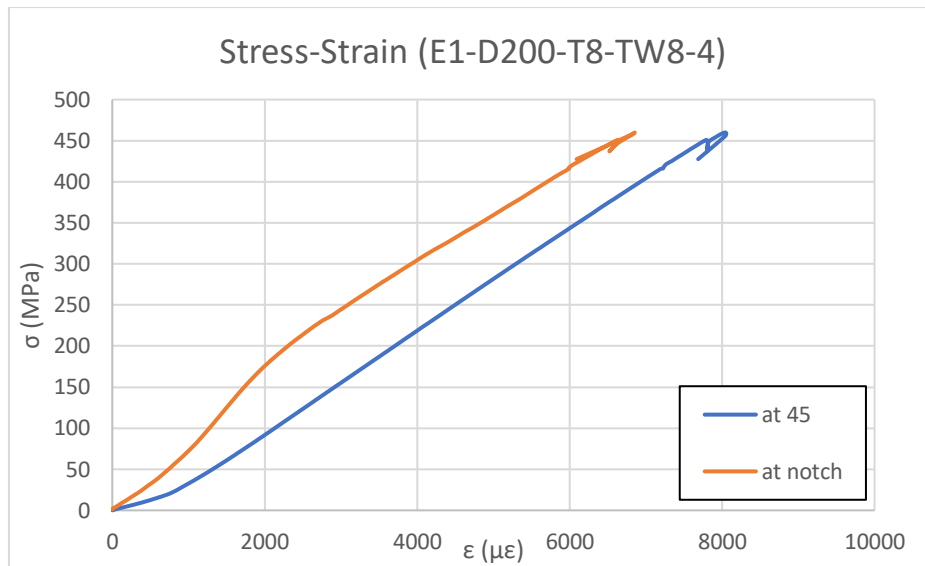
Ενδεικτικά διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια με εγκοπές φαίνονται στα Σχήματα 4.25-4.28. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται η παραμορφωσιακή συμπεριφορά στις  $45^\circ$  και με πορτοκαλί η συμπεριφορά στην εγκοπή. Όπως είναι λογικό η παραμόρφωση στις θέσεις των εγκοπών είναι μικρότερη από ότι στις  $45^\circ$  κατά την θραύση του δοκιμίου, καθώς το strain gauge είναι τοποθετημένο στην εξωτερική, θλιπτική μεριά της κάμψης. Επομένως, η συνολική παραμόρφωση φθίνει σε σχέση με την ανεπηρέαστη από την κάμψη θέση του αισθητήρα στις  $45^\circ$ . Από την άλλη, η τάση θραύσης παραμένει ίδια, καθώς έχει ληφθεί η μειωμένη διατομή της εγκοπής για τη μέτρησή της. Η ύπαρξη των εγκοπών δε φάνηκε να επηρεάζει σε κάποιο βαθμό την παραμορφωσιακή συμπεριφορά.



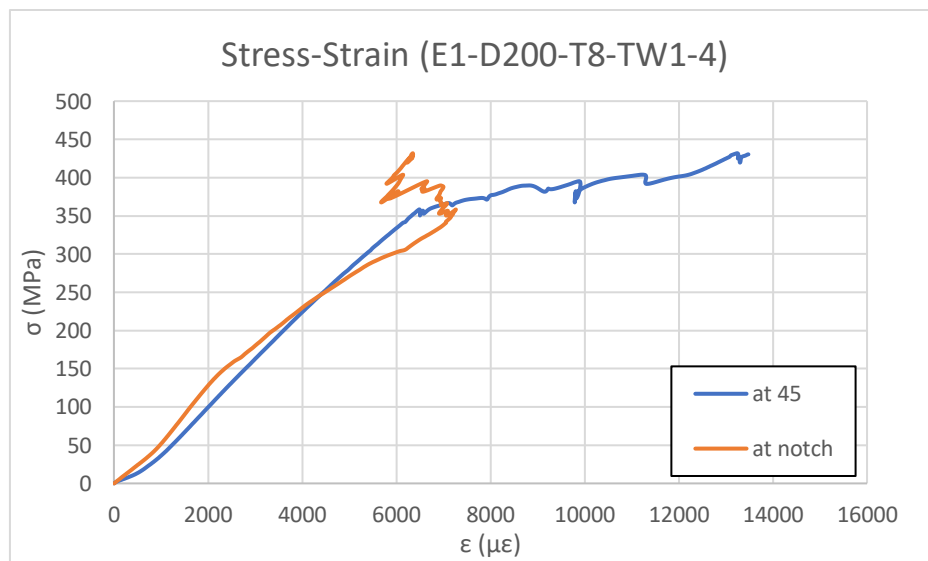
Σχήμα 4.25. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 45° και στο notch για το δοκίμιο E1-D100-T2-TW1-4



Σχήμα 4.26. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 45° και στο notch για το δοκίμιο E1-D100-T8-TW1-4



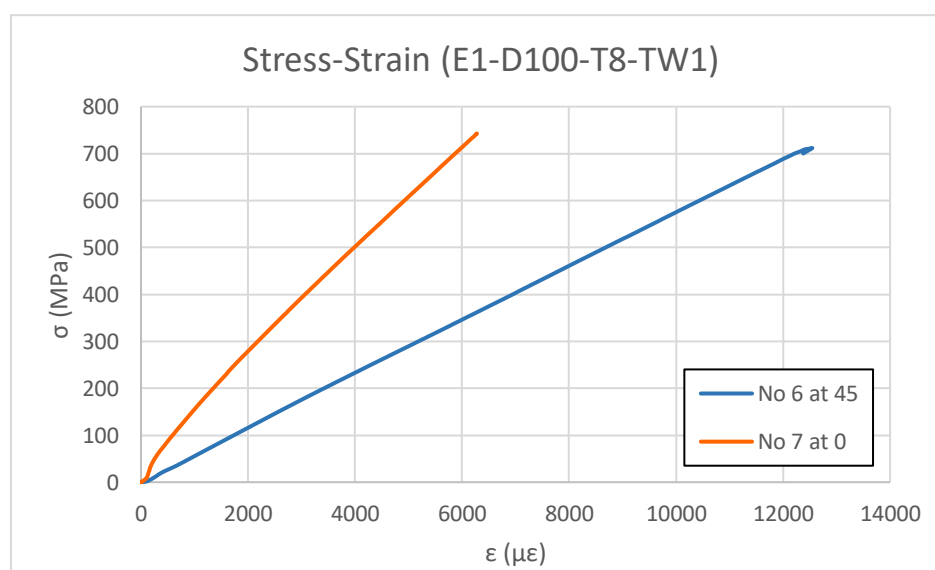
Σχήμα 4.27. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 45° και στο notch για το δοκίμιο E1-D200-T8-TW8-4



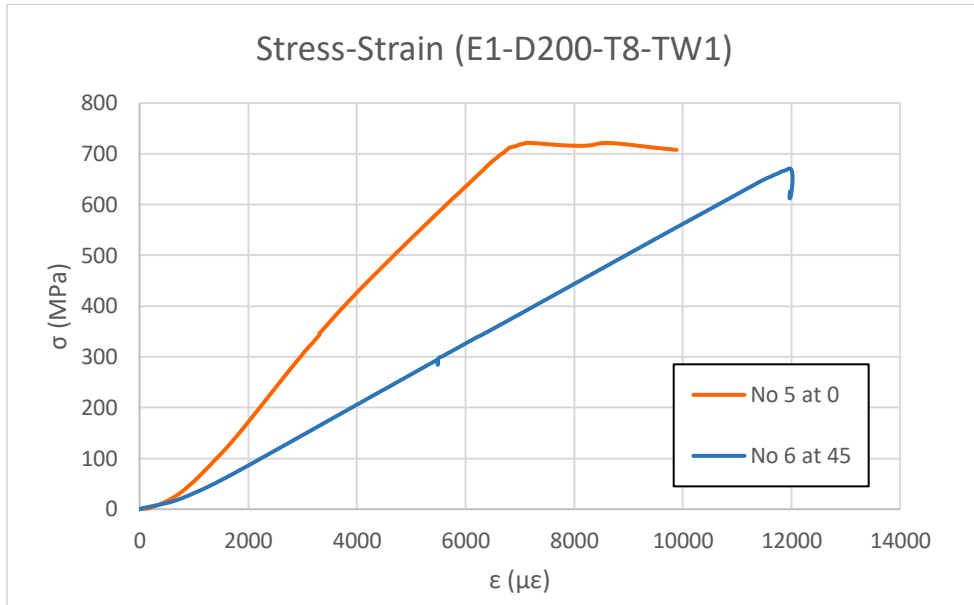
Σχήμα 4.28. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 45° και στο notch για το δοκίμιο E1-D200-T8-TW1-4

Αντίστοιχα αποτελέσματα παρατηρούνται και για τα δοκίμια χωρίς εγκοπές (Σχήματα 4.29-4.31). Στις συγκεκριμένες περιπτώσεις, συγκρίθηκε η συμπεριφορά του εκάστοτε δοκιμίου στις 0° με τη συμπεριφορά άλλου δοκιμίου χωρίς εγκοπές από την ίδια ομάδα, στις 45°. Τα αποτελέσματα μικρότερης παραμόρφωσης στις 0° συμφωνούν με τα αποτελέσματα του Κωνσταντινίδη (2016), καθώς το φαινόμενο της κάμψης του δοκιμίου επηρεάζει την αξιοπιστία των μετρήσεων, όπως και στα δοκίμια με εγκοπές.

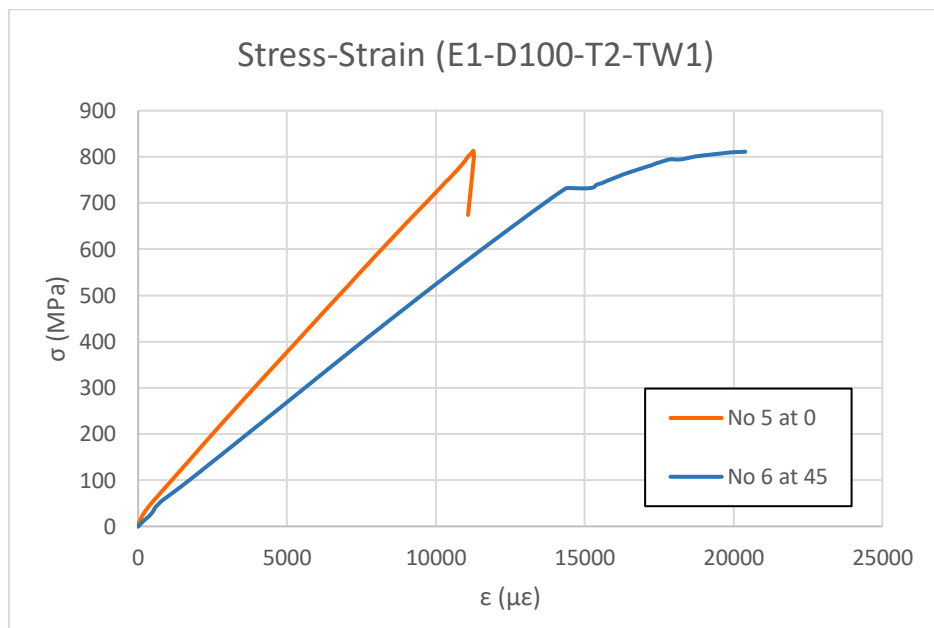
Σημειώνεται πως τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης δεν παρουσιάζουν κάποια μεταβολή, καθώς η περιφερειακή θέση του αισθητήρα δεν επηρεάζει αυτά τα μεγέθη. Επομένως συμπεριλήφθηκαν κανονικά στα συγκεντρωτικά διαγράμματα του Κεφαλαίου 4.3. Αντίθετα, το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  δεν λήφθηκε υπόψη, διότι όπως παρατηρείται στις καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  για το σημείο των εγκοπών, είτε δεν υπάρχει εμφανής γραμμική περιοχή ή και να υπάρχει, η κλίση είναι σημαντικά διαφορετική.



Σχήμα 4.29. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 45° και στις 0° για τα δοκίμια E1-D100-T8-TW1-6/7



Σχήμα 4.30. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 0° και στις 45° για τα δοκίμια E1-D200-T8-TW1-5/6



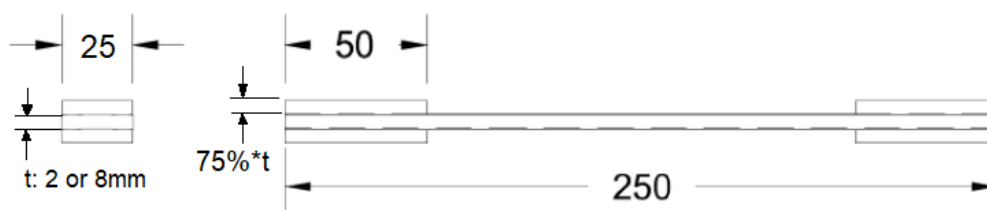
Σχήμα 4.31. Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων στις 0° και στις 45° για τα δοκίμια E1-D100-T2-TW1-5/6

## **5. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ ( $E_2$ , $\sigma_2$ )**

Η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών εφελκυσμού κάθετα στις ίνες έγινε προς μέτρηση των ιδιοτήτων των δοκιμίων που προήλθαν από τους Κυλίνδρους 1, 2, 5, 6 (βλ. Πίνακα 3.1) στην αξονική διεύθυνση, δηλαδή κάθετα στις ίνες ( $E_2$ ,  $\sigma_2$ ). Χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) επίπεδα δοκίμια από κάθε αντίστοιχη ομάδα.

### **5.1. Γεωμετρία δοκιμίων**

Για τις δοκιμές εφελκυσμού κάθετα στις ενισχυτικές ίνες χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις ομάδες δοκιμίων. Όλα τα δοκίμια προήλθαν από κυλίνδρους με ονομαστική εσωτερική διάμετρο ( $D$ ) 200 mm, κατασκευασμένους με γωνία περιέλιξης  $90^\circ$ . Η κοπή τους πραγματοποιήθηκε κατά το διαμήκη άξονα των κυλίνδρων, όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 3 (Σχήμα 3.2). Το ονομαστικό πλάτος ( $b$ ) ήταν σε όλες τις περιπτώσεις 25 mm, ενώ το ονομαστικό πάχος ( $t$ ) είτε 2 ή 8 mm. Τέλος, το ονομαστικό μήκος ( $l$ ) των δοκιμίων ήταν 250 mm. Μάλιστα, στα άκρα κάθε δοκιμίου είχαν κολληθεί επιθέματα (tabs) μήκους 50 mm και πάχους ίσο με 75% του πάχους του δοκιμίου, κομμένα από τους ίδιους κυλίνδρους, ώστε να διευκολυνθεί η συγκράτησή τους από τις σιαγόνες της μηχανής κατά την πειραματική διαδικασία. Οι εξωτερικές επιφάνειες των επιθεμάτων είχαν υποστεί μηχανουργική κατεργασία για να γίνουν επίπεδες και να αποκτήσουν επιφάνεια παράλληλη με την επιφάνεια συγκράτησης των αρπάγων της μηχανής. Σκαρίφημα ενός επίπεδου δοκιμίου για τις δοκιμές εφελκυσμού κάθετα στις ίνες παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1. Σκαρίφημα επίπεδου δοκιμίου

Δοκιμή εφελκυσμού υπέστησαν πέντε (5) δοκίμια από κάθε ομάδα. Η αναλυτική διαστασιολόγηση των επίπεδων δοκιμίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.1. Μετρήθηκαν το πάχος και το πλάτος τους σε τρία σημεία και υπολογίστηκε μία μέση τιμή (average value), η τυπική απόκλιση των μετρήσεων (standard deviation), καθώς



και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation). Στόχος ήταν η παρατήρηση όσον αφορά στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων και την σύγκριση με τις ονομαστικές τιμές. Ο συντελεστής διακύμανσης φαίνεται να είναι μικρότερος από 5% σε όλες τις μετρήσεις, καθιστώντας τη γεωμετρία των δοκιμίων αποδεκτή.

Πίνακας 5.1. Διαστάσεις επίπεδων δοκιμίων

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 1 (Ε2-T2-TW1-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.34	24.93	25.02	25.19	25.30	25.06	25.29
standard deviation	0.10	0.14	0.05	0.11	0.03	0.02	0.06
coefficient of variation	0.38%	0.58%	0.22%	0.42%	0.13%	0.09%	0.23%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.51	2.37	2.48	2.30	2.31	2.40	2.42
standard deviation	0.12	0.03	0.03	0.10	0.08	0.02	0.04
coefficient of variation	4.66%	1.38%	1.37%	4.32%	3.48%	0.68%	1.60%

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 2 (Ε2-T2-TW8-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.20	25.28	25.24	25.18	25.18	24.99	25.20
standard deviation	0.09	0.05	0.02	0.13	0.04	0.03	0.02
coefficient of variation	0.38%	0.19%	0.10%	0.52%	0.16%	0.12%	0.07%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.30	2.25	2.22	2.25	2.30	2.39	2.39
standard deviation	0.03	0.05	0.13	0.11	0.04	0.02	0.04
coefficient of variation	1.48%	2.22%	5.78%	4.95%	1.96%	0.86%	1.57%

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 5 (Ε2-T8-TW1-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.30	25.25	25.26	25.27	25.23	25.26	25.31
standard deviation	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.06	0.05
coefficient of variation	0.18%	0.15%	0.20%	0.17%	0.22%	0.23%	0.19%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	7.91	7.73	7.92	7.98	7.85	7.88	8.10
standard deviation	0.06	0.07	0.14	0.07	0.07	0.10	0.12
coefficient of variation	0.78%	0.86%	1.79%	0.83%	0.95%	1.30%	1.50%

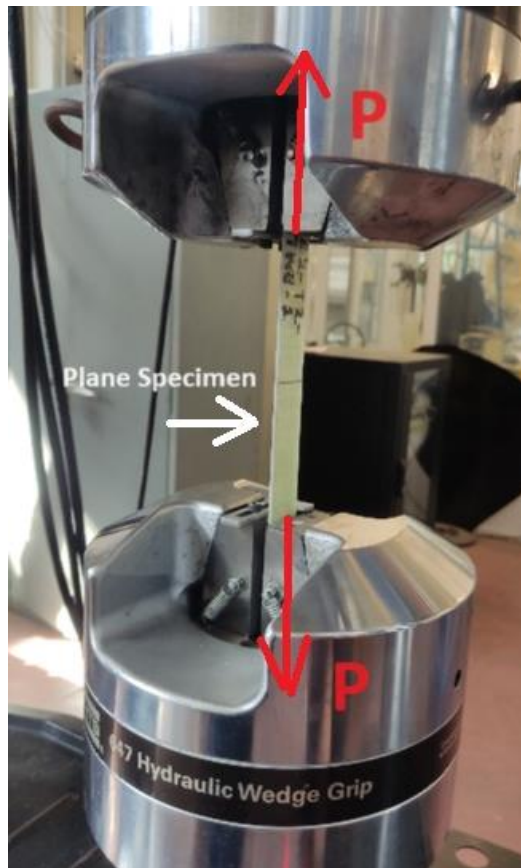
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 6 (E2-T8-TW8-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.20	25.23	25.09	25.20	25.24	25.27	25.12
standard deviation	0.06	0.04	0.07	0.09	0.05	0.02	0.02
coefficient of variation	0.23%	0.15%	0.28%	0.34%	0.20%	0.08%	0.09%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	8.14	8.03	8.38	8.43	8.26	8.24	8.38
standard deviation	0.30	0.12	0.02	0.12	0.09	0.26	0.23
coefficient of variation	3.66%	1.44%	0.29%	1.45%	1.15%	3.14%	2.76%

## 5.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Το πρότυπο που ακολουθήθηκε για τις συγκεκριμένες δοκιμές είναι το ASTM D3039. Κατά την πειραματική διαδικασία, τα επίπεδα δοκίμια εφελκούνται από την υδραυλική μηχανή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Τα δοκίμια είναι κομμένα και τοποθετημένα στη μηχανή με τέτοιο τρόπο, ώστε να υφίστανται το φορτίο κάθετα στις ενισχυτικές τους ίνες, ενώ το σύστημα λήψης δεδομένων καταγράφει συνεχώς τη δύναμη που ασκείται και τη μετατόπιση του δοκιμίου. Από προηγούμενη μελέτη (Κωνσταντινίδης, 2016) η χρήση επιμηκυνσιόμετρου (extensometer) είναι ισοδύναμη για τη μέτρηση της παραμόρφωσης των δοκιμίων με τη χρήση strain gauges. Συνεπώς, με την τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρου της εταιρείας Epsilon Technology Corporation μήκους μέτρησης 50 mm στο μέσο του δοκιμίου, μετράται συνεχώς η παραμόρφωση του δοκιμίου κάθετα στις ίνες κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η επιλογή αυτή έναντι αισθητήρων, συνετέλεσε σε οικονομία χρόνου και κόστους. Η διάταξη της δοκιμής και η τοποθέτηση του επιμηκυνσιόμετρου φαίνονται στο Σχήμα 5.2.

Οι παράμετροι διεξαγωγής των δοκιμών παρατίθενται παρακάτω:

- Ταχύτητα απομάκρυνσης σιαγόνων μηχανής: 0.2 mm/min
- Πίεση σύσφιγξης σιαγόνων: 5 MPa
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 10 Hz



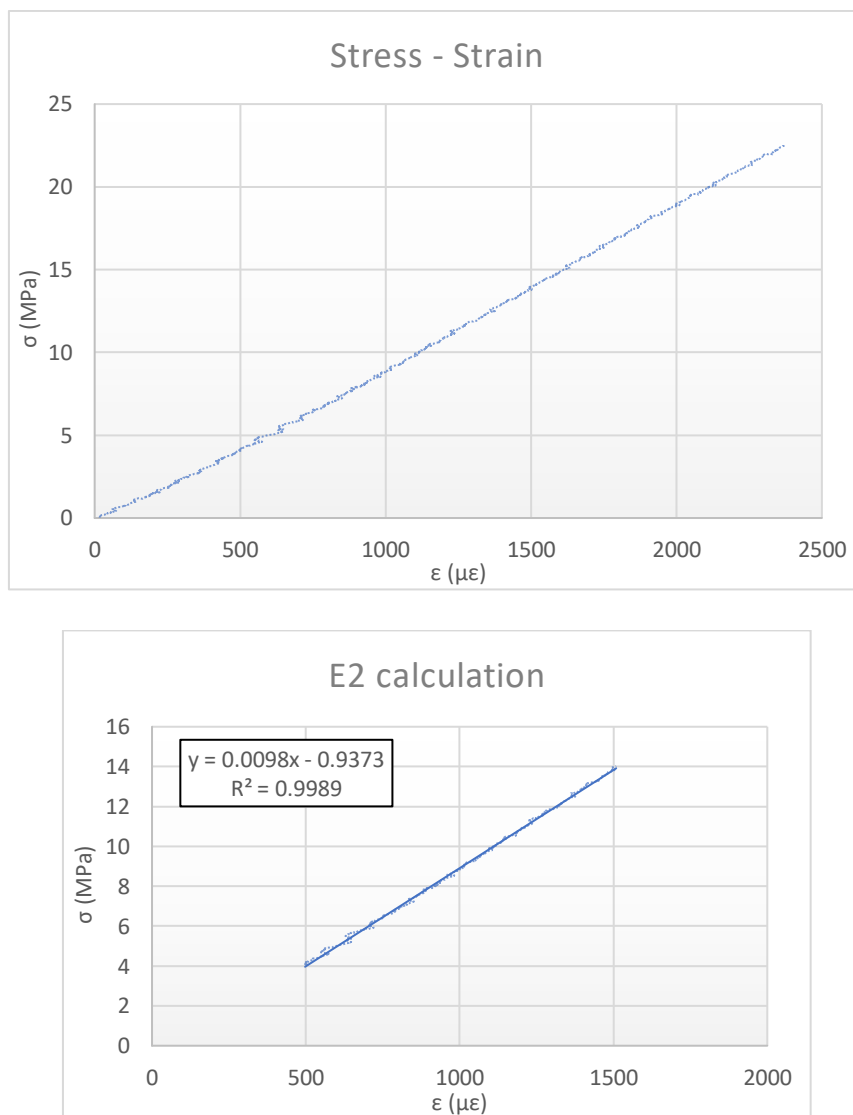
Σχήμα 5.2. Πειραματική διάταξη (αριστερά) και τοποθέτηση επιμηκυνσιόμετρου (δεξιά)

Η ασκούμενη τάση στο δοκίμιο υπολογίζεται βάσει του προτύπου, θεωρώντας ως  $P$  την επιβαλλόμενη δύναμη και  $A$  (= πάχος x πλάτος) την επιφάνεια της ορθογωνικής εγκάρσιας διατομής του δοκιμίου, ως εξής:

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

Ως αντοχή θεωρείται η μέγιστη τάση  $\sigma_{2,max}$ . Για την εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας  $E_2$ , είναι απαραίτητη η χάραξη του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων ( $\sigma$ - $\epsilon$ ), για τον υπολογισμό της κλίσης κατάλληλου εύρους της γραμμικής του περιοχής. Η πλειοψηφία των δοκιμών έφτασαν στη θραύση ανάμεσα στα 2000 και τα 3000 με. Σε αυτές τις περιπτώσεις (πιο συγκεκριμένα αν  $\epsilon_{max} < 6000$  με) το πρότυπο ASTM D3039 προτείνει τη χρήση του εύρους του διαγράμματος από 25-50% της παραμόρφωσης θραύσης. Παρατηρώντας όμως τις περισσότερες καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, επιλέχθηκε ένα εύρος από 500 ως 1500 με, για τη μέτρηση του  $E_2$ , καθώς θεωρήθηκε

ότι σε αυτή την περιοχή παρουσιάζεται καλύτερη γραμμικότητα. Όπως και για τις δοκιμές διαιρούμενου δίσκου ( $E_1$ ), ύστερα από την απομόνωση του μέρους της καμπύλης από 500 έως 1500 με, μέσω του προγράμματος Excel υπολογίζεται η εξίσωση της γραμμικοποιημένης καμπύλης ως ευθείας:  $y=ax+b$ . Ο συντελεστής  $a$  αποτελεί το  $E_2$ . Επιπλέον, για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της μεθόδου (δηλαδή της αξιοπιστίας της γραμμικής προσέγγισης) στο διάγραμμα παρουσιάζεται και ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination),  $R^2$ . Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής ήταν μεγαλύτερος του 0.99, κατά συνέπεια η προσέγγιση ήταν αξιόπιστη. Παράδειγμα τυπικής καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης και μέτρησης του  $E_2$  φαίνεται στο Σχήμα 5.3, από το δοκίμιο E2-T2-TW1-4.



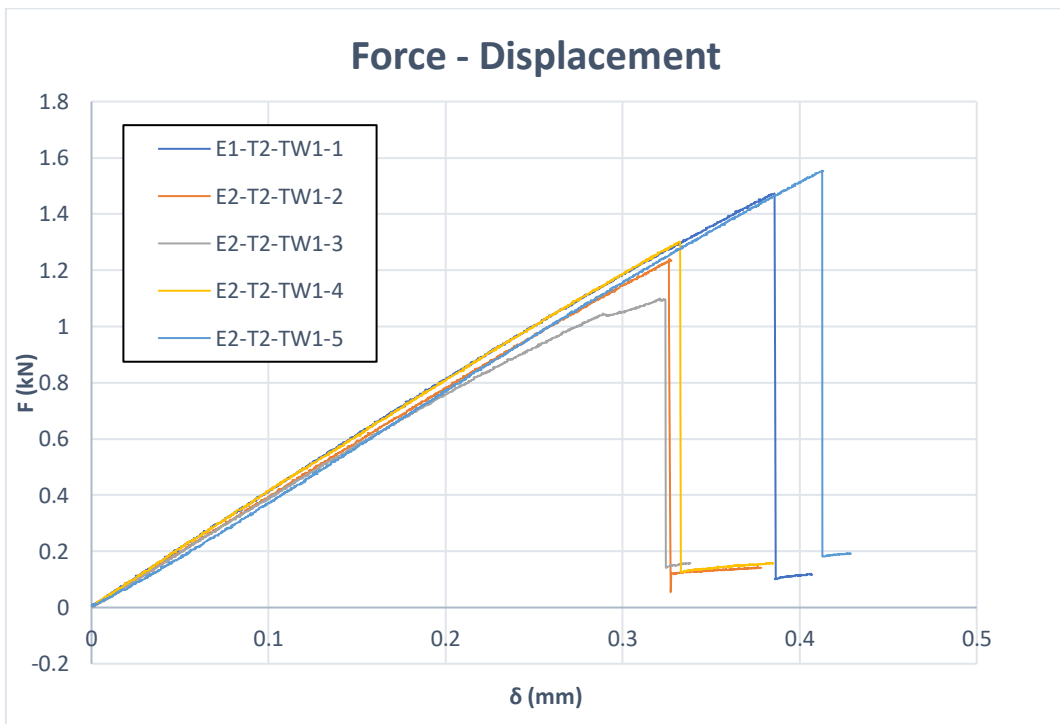
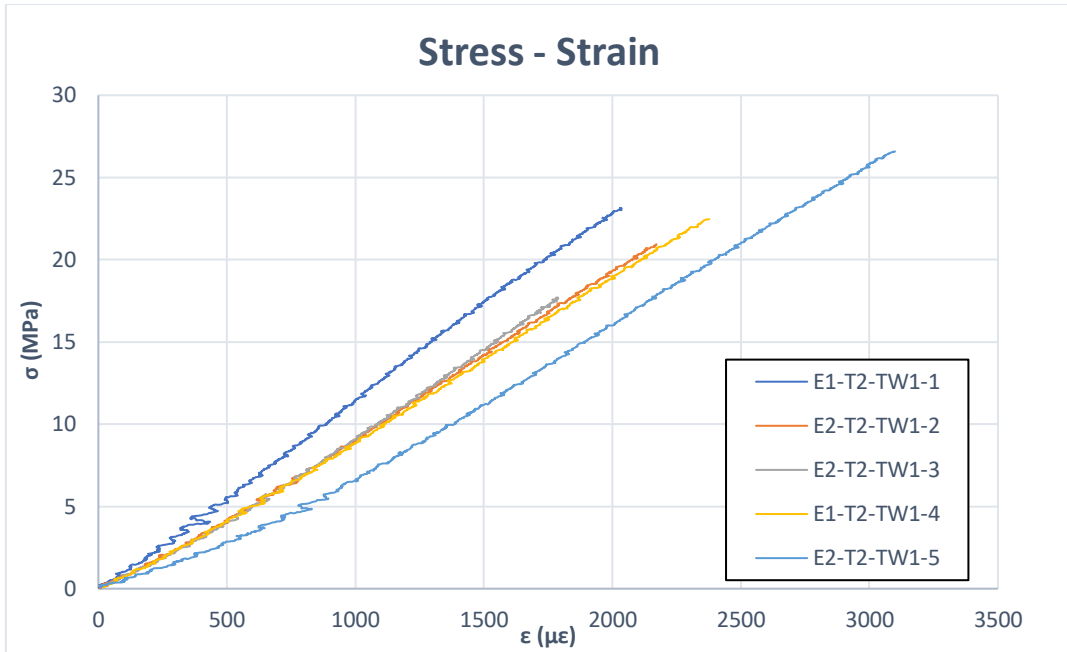
Σχήμα 5.3. Τυπική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης σε διεύθυνση κάθετα στις ίνες και τρόπος μέτρησης  $E_2$

### 5.3. Αποτελέσματα

Εν συνεχεία, παρατίθενται τα αποτελέσματα εφελκυσμού κάθετα στις ίνες, όπως προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές και από την μετέπειτα ανάλυση των δεδομένων. Μετρήθηκαν οι ιδιότητες των δοκιμίων από τους κυλίνδρους 1, 2, 5, 6 κάθετα στις ίνες ( $E_2$ ,  $\sigma_2$ ,  $F_{\max}$ ,  $\epsilon_{\max}$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πινακοποιημένα (Πίνακες 5.2-5.5) και σε μορφή διαγραμμάτων τάσης-παραμόρφωσης αλλά και δύναμης-μετατόπισης (Σχήματα 5.4-5.7).

Πίνακας 5.2. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού κάθετα στις ίνες (E2-T2-TW1-i)

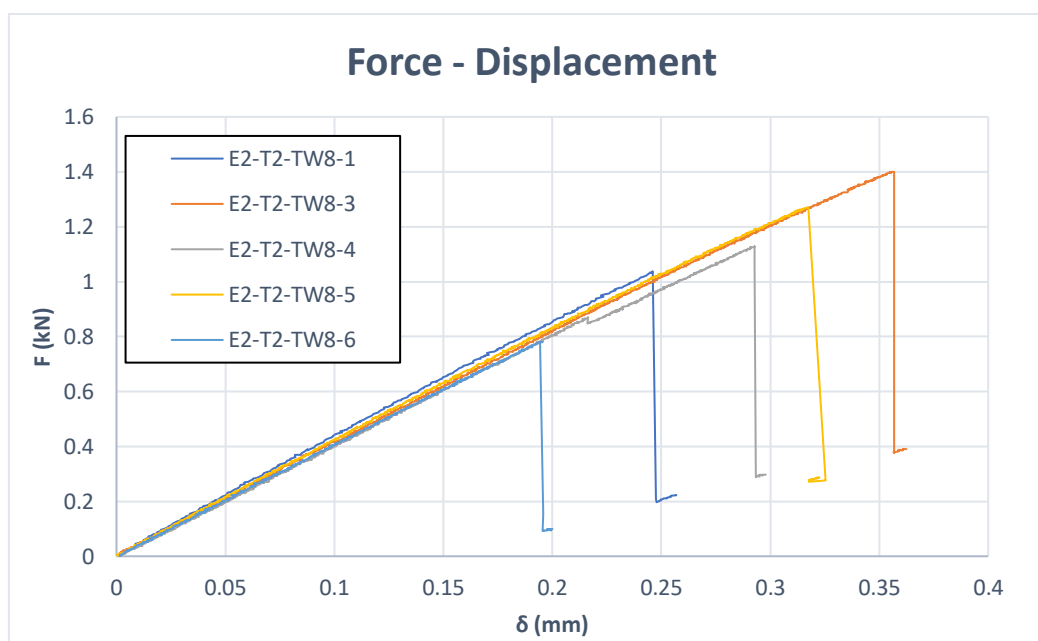
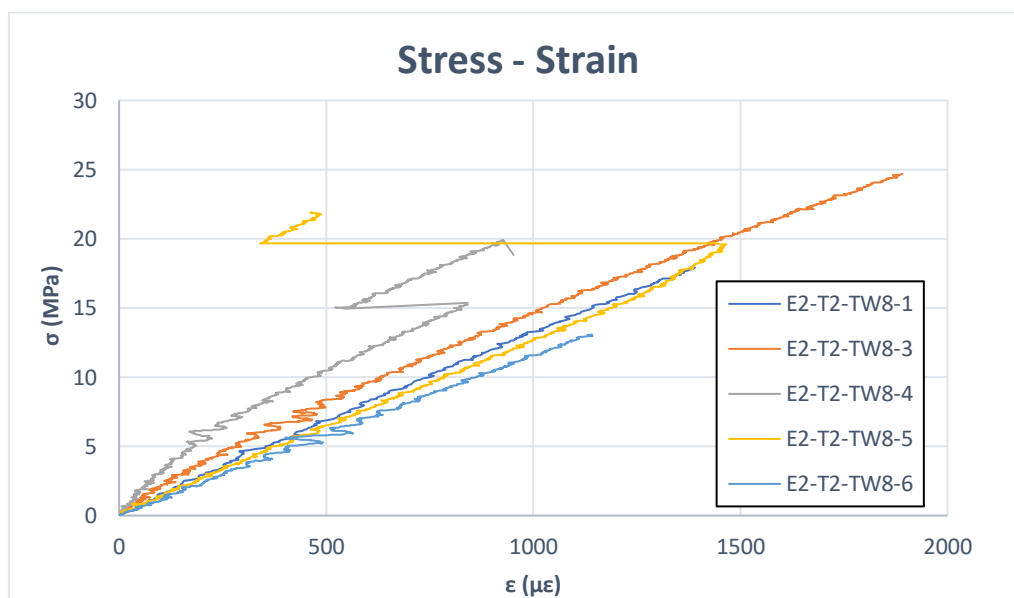
<b>ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 1 (E2-T2-TW1-i)</b>				
	<b><math>E_2</math> (GPa)</b>	<b><math>F_{\max}</math> (kN)</b>	<b><math>\sigma_2</math> (MPa)</b>	<b><math>\epsilon_{\max}</math> (μ<math>\epsilon</math>)</b>
<b>E2-T2-TW1-1</b>	12.06	1.47	23.2	2036
<b>E2-T2-TW1-2</b>	10.14	1.24	20.9	2170
<b>E2-T2-TW1-3</b>	10.57	1.01	17.7	1788
<b>E2-T2-TW1-4</b>	9.84	1.30	22.5	2377
<b>E2-T2-TW1-5</b>	9.53	1.55	26.6	3099
<b>Average</b>	10.43	1.33	22.2	2294
<b>St. Deviation</b>	0.99	0.18	3.2	498
<b>Coef. of Variance</b>	9.5%	13.7%	14.6%	21.7%



Σχήμα 5.4. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 5.3. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού κάθετα στις ίνες (E2-T2-TW8-i)

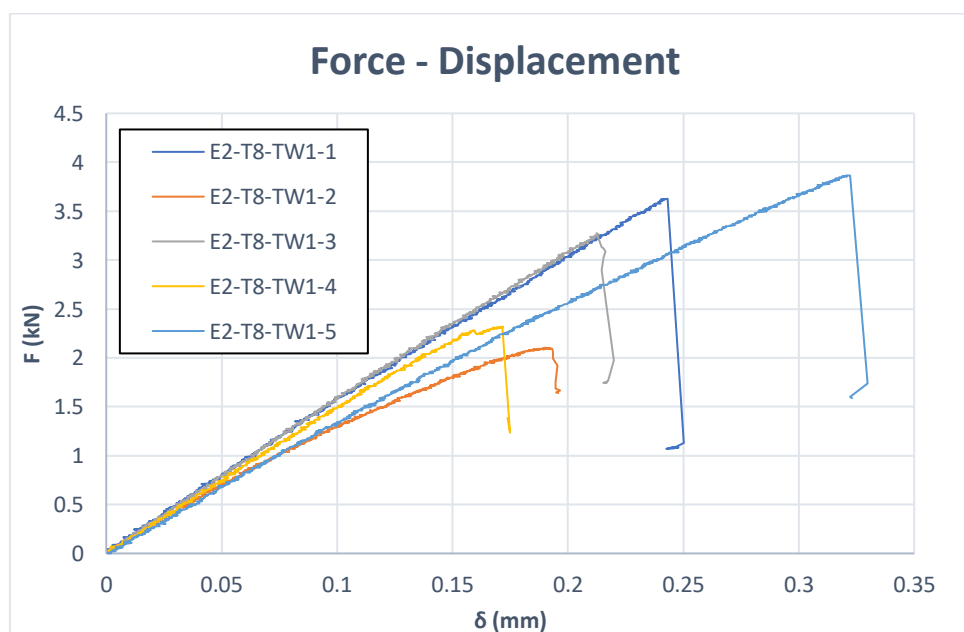
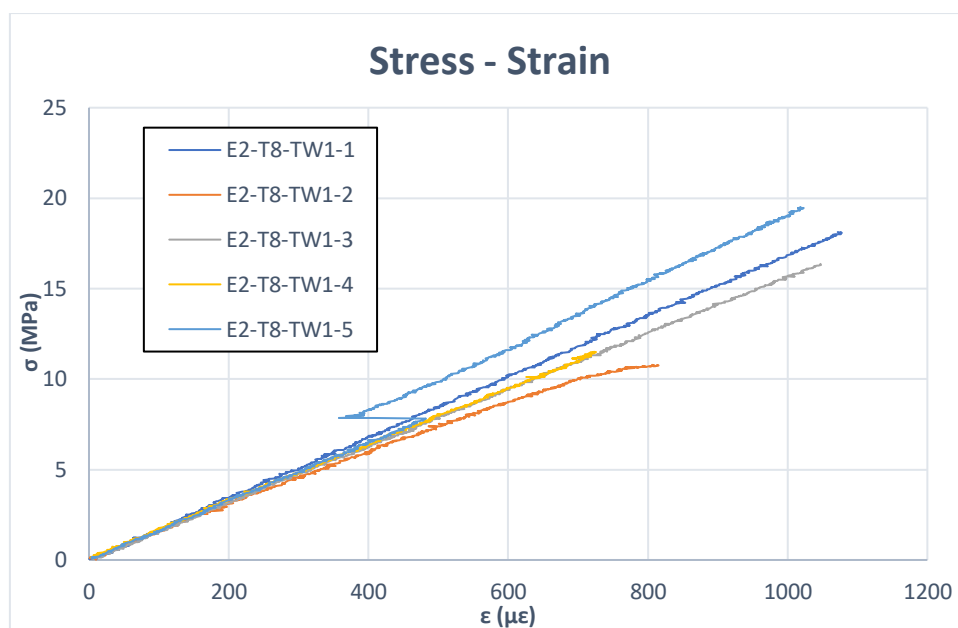
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 2 (E2-T2-TW8-i)				
	$E_2$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_2$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ )
E2-T2-TW8-1	12.49	1.04	17.9	1390
E2-T2-TW8-3	12.66	1.40	25.0	1891
E2-T2-TW8-4	13.98	1.13	19.9	952
E2-T2-TW8-5	13.04	1.27	21.9	1465
E2-T2-TW8-6	11.40	0.78	13.1	1139
<b>Average</b>	<b>12.71</b>	<b>1.12</b>	<b>19.6</b>	<b>1368</b>
<b>St. Deviation</b>	<b>0.93</b>	<b>0.24</b>	<b>4.5</b>	<b>357</b>
<b>Coef. of Variance</b>	<b>7.3%</b>	<b>21.0%</b>	<b>22.8%</b>	<b>26.1%</b>



Σχήμα 5.5. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Πίνακας 5.4. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού κάθετα στις ίνες (E2-T8-TW1-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 5 (E2-T8-TW1-i)				
	$E_2$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_2$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ ( $\mu\epsilon$ )
E2-T8-TW1-1	16.78	3.63	18.1	1078
E2-T8-TW1-2	12.39	2.10	10.8	813
E2-T8-TW1-3	15.61	3.27	16.4	1048
E2-T8-TW1-4	15.62	2.32	11.5	724
E2-T8-TW1-5	18.56	3.86	19.5	1019
<b>Average</b>	<b>15.79</b>	<b>3.04</b>	<b>15.3</b>	<b>936</b>
<b>St. Deviation</b>	<b>2.25</b>	<b>0.79</b>	<b>3.9</b>	<b>158</b>
<b>Coef. of Variance</b>	<b>14.3%</b>	<b>25.9%</b>	<b>25.7%</b>	<b>16.9%</b>

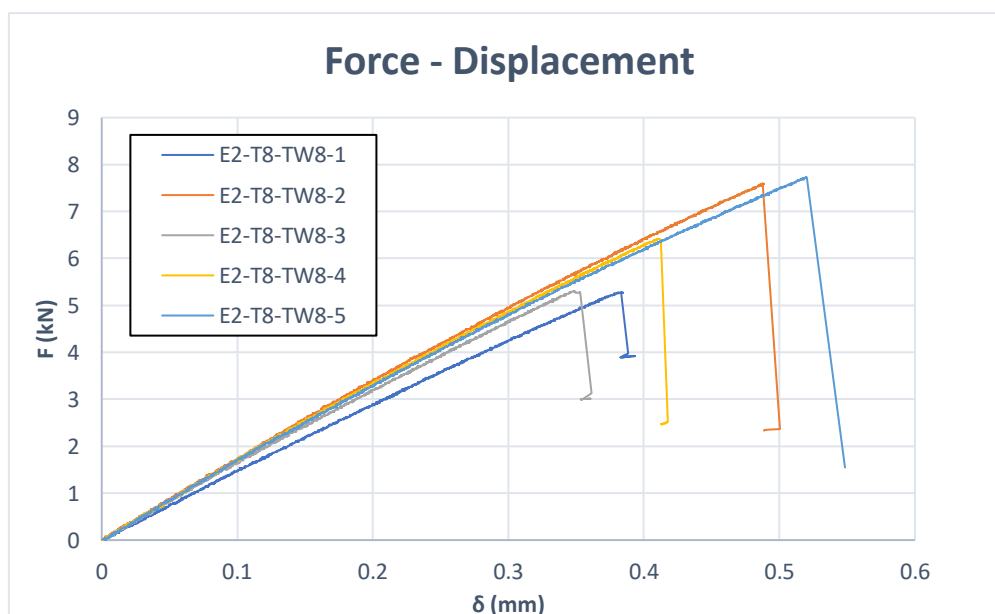
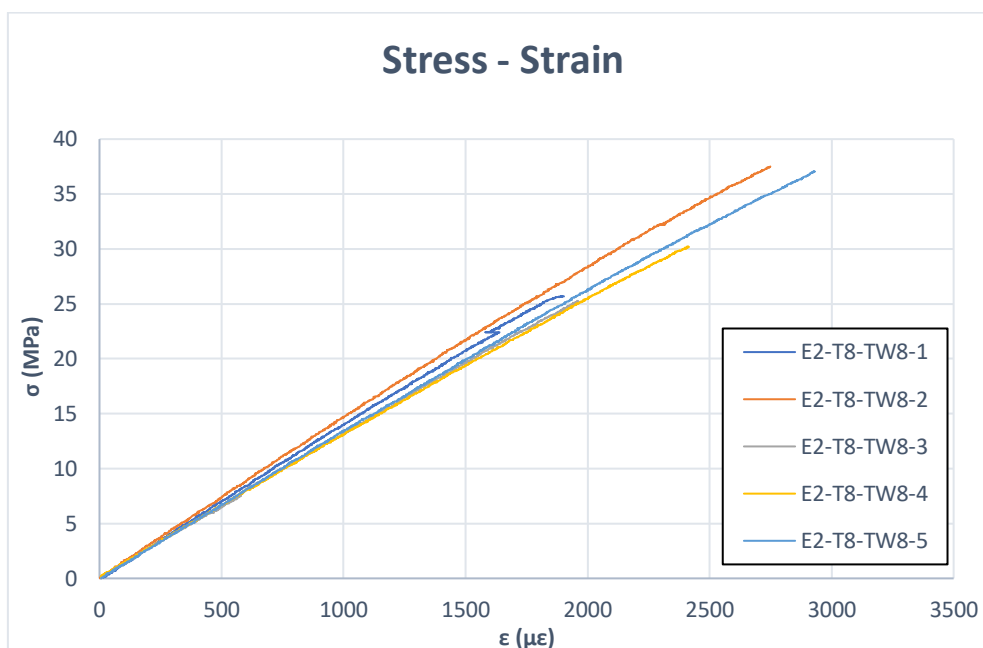


Σχήμα 5.6. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)



Πίνακας 5.5. Αποτελέσματα δοκιμών εφελκυσμού κάθετα στις ίνες (E2-T8-TW8-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 6 (E2-T8-TW8-i)				
	$E_2$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\sigma_2$ (MPa)	$\epsilon_{max}$ (μΕ)
E2-T8-TW8-1	13.71	5.27	25.7	1903
E2-T8-TW8-2	14.28	7.60	37.5	2749
E2-T8-TW8-3	13.01	5.31	25.2	1962
E2-T8-TW8-4	12.70	6.42	30.2	2415
E2-T8-TW8-5	13.19	7.73	37.1	2930
Average	13.38	6.47	31.1	2392
St. Deviation	0.62	1.19	5.9	459
Coef. of Variance	4.7%	18.4%	19.0%	19.2%



Σχήμα 5.7. Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης (πάνω) και δύναμης-μετατόπισης (κάτω)

Τέλος, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών κάθετα στις ίνες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6 παρακάτω.

Πίνακας 5.6. Μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών κάθετα στις ίνες

Κύλινδρος	Ομάδα δοκιμών	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Tows	E <sub>2</sub> (GPa)	σ <sub>2,max</sub> (MPa)
1	E2-T2-TW1	25	2	1	10.43	22.2
2	E2-T2-TW8	25	2	8	12.71	19.6
5	E2-T8-TW1	25	8	1	15.79	15.3
6	E2-T8-TW8	25	8	8	13.38	31.1

### Παρατηρήσεις

Στην πλειοψηφία των δοκιμών, ύστερα από το πέρας των δοκιμών παρατηρήθηκε θραύση στα άκρα, δηλαδή κοντά στα κολλημένα επιθέματα (Σχήμα 5.8). Η αιτία της εντοπισμένης αυτής αστοχίας πιθανώς να ήταν η πίεση που ασκείται από τις σιαγόνες της μηχανής στην περιοχή των επιθεμάτων. Ωστόσο, αυτή η πίεση ασκείται απαραίτητως, ώστε να μην ολισθαίνουν τα δοκίμια κατά την πειραματική διαδικασία.

Στα Σχήματα 5.4-5.7 φαίνεται να υπάρχει καλή επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών. Στους Πίνακες 5.2-5.5 παρατηρείται ικανοποιητική αξιοπιστία κυρίως στο μέτρο ελαστικότητας E<sub>2</sub>, όπου ο συντελεστής διακύμανσης είναι από 4 ως 10%, με εξαίρεση τον Κύλινδρο 5 (συντελεστής αξιοπιστίας περίπου 14%). Το E<sub>2</sub>, εφόσον αφορά στην ιδιότητα του υλικού κάθετα στις ενισχυτικές ίνες, κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές, όπως ήταν αναμενόμενο. Το ίδιο και η αντοχή σ<sub>2,max</sub>. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην συμβολή αποκλειστικά και μόνο της ρητίνης στις ιδιότητες αυτές, οι οποίες είναι μικρές συγκριτικά με τις αντίστοιχες ιδιότητες των ενισχυτικών ινών. Στα υπόλοιπα μεγέθη (σ<sub>2,max</sub>, ε<sub>max</sub>, F<sub>max</sub>) παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή διακύμανσης, γεγονός το οποίο ενδεχομένως οφείλεται σε ελαττώματα που δεν αναγνωρίστηκαν πριν τις πειραματικές δοκιμές. Η αβεβαιότητα στο μέγεθος της μέγιστης παραμόρφωσης ενδεχομένως οφείλεται σε σφάλματα κατά τη μέτρηση του επιμηκυνσιόμετρου, καθώς και ανακριβείς τοποθετήσεις του επί των δοκιμών.

Η εξέταση των αποτελεσμάτων του Πίνακα 5.6 δεν οδηγεί σε κάποιο συμπέρασμα για την επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των άλλων παραμέτρων, δηλαδή του πάχους και του αριθμού συστάδων ινών των δοκιμών.



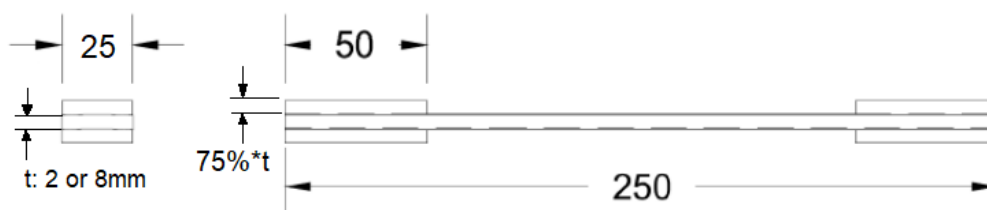
Σχήμα 5.8. Τυπική αστοχία δοκιμίου σε εφελκυσμό κάθετα στις ίνες – κάτοψη (πάνω), πλάγια όψη (κάτω)

## 6. ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΓΙΑ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ( $G_{12}$ , $\tau_{12}$ )

Η διεξαγωγή πειραματικών δοκιμών για τις ιδιότητες διάτμησης διενεργήθηκε σε δοκίμια που προήλθαν από κυλίνδρους με γωνία περιέλιξης  $\pm 45^\circ$ , όπως έχει ήδη περιγραφεί στο εδάφιο 2.2. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) επίπεδα δοκίμια που προήλθαν από τους Κυλίνδρους 3, 4, 7, 8 (βλ. Πίνακα 3.1) με στόχο τη μέτρηση του μέτρου διάτμησης και της διατμητικής αντοχής στο επίπεδο των ιών του υλικού ( $G_{12}$ ,  $\tau_{12}$ ).

### 6.1. Γεωμετρία δοκιμίων

Οι δοκιμές διάτμησης διεξήχθησαν σε δοκίμια τεσσάρων ομάδων. Όλα τα δοκίμια προήλθαν από κυλίνδρους με ονομαστική εσωτερική διάμετρο (D) 200 mm, κατασκευασμένους με γωνία περιέλιξης  $\pm 45^\circ$ . Η διαδικασία προετοιμασίας των δοκιμίων είναι παρόμοια με την αντίστοιχη διαδικασία στη δοκιμή εφελκυσμού κάθετα στις ίνες. Συγκεκριμένα, η κοπή τους πραγματοποιήθηκε κατά το διαμήκη άξονα των κυλίνδρων, όπως εξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 3 (Σχήμα 3.2). Το ονομαστικό πλάτος (b) ήταν σε όλες τις περιπτώσεις 25 mm, ενώ το ονομαστικό πάχος (t) είτε 2 ή 8 mm. Τέλος, το ονομαστικό μήκος (l) των δοκιμίων ήταν 250 mm. Μάλιστα, στα άκρα κάθε δοκιμίου είχαν κολληθεί επιθέματα (tabs) μήκους 50 mm και πάχους ίσο με 75% του πάχους του δοκιμίου, ώστε να διευκολυνθεί η συγκράτησή τους από τις σιαγόνες της μηχανής, κατά την πειραματική διαδικασία. Με αυτό τον τρόπο δε θα ολισθαίνουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι εξωτερικές επιφάνειες των επιθεμάτων είχαν υποστεί μηχανουργική κατεργασία για να γίνουν επίπεδες και να αποκτήσουν επιφάνεια παράλληλη με την επιφάνεια συγκράτησης των αρπάγων της μηχανής. Ένα σκαρίφημα των επιπέδων δοκιμίων για τη δοκιμή διάτμησης φαίνεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Σκαρίφημα επίπεδου δοκιμίου

Η αναλυτική διαστασιολόγηση των επίπεδων δοκιμίων παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1. Μετρήθηκαν το πάχος και το πλάτος τους σε τρία σημεία και υπολογίστηκε μία μέση τιμή (average value), η τυπική απόκλιση των μετρήσεων (standard deviation), καθώς και ο συντελεστής διακύμανσης (coefficient of variation). Στόχος ήταν η παρατήρηση όσον αφορά στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων και την σύγκριση με τις ονομαστικές τιμές. Ο συντελεστής διακύμανσης φαίνεται να είναι μικρότερος από 5% σε σχεδόν όλες τις μετρήσεις, καθιστώντας τη γεωμετρία των δοκιμίων αποδεκτή. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια G12-T2-TW1-4, G12-T2-TW1-6 στις μετρήσεις πάχους, στις οποίες όμως ο συντελεστής διακύμανσης ξεπερνά το 5% κατά ελάχιστο (5.19 και 5.79% αντίστοιχα).

Πίνακας 6.1. Διαστάσεις επίπεδων δοκιμίων για δοκιμές διάτμησης

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 3 (G12-T2-TW1-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.33	25.23	25.26	24.81	25.09	25.26	25.21
standard deviation	0.07	0.05	0.08	0.10	0.04	0.03	0.11
coefficient of variation	0.26%	0.21%	0.30%	0.41%	0.16%	0.12%	0.42%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.36	2.55	2.42	2.42	2.53	2.45	2.59
standard deviation	0.07	0.08	0.06	0.13	0.06	0.14	0.10
coefficient of variation	2.83%	3.24%	2.37%	5.19%	2.26%	5.79%	3.87%

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 4 (G12-T2-TW8-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.24	25.14	25.22	25.15	25.26	25.21	25.12
standard deviation	0.06	0.06	0.04	0.08	0.09	0.05	0.04
coefficient of variation	0.23%	0.25%	0.17%	0.31%	0.36%	0.18%	0.17%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	2.87	2.96	2.69	2.77	2.93	2.95	2.83
standard deviation	0.01	0.09	0.13	0.06	0.02	0.05	0.12
coefficient of variation	0.28%	3.19%	4.71%	2.21%	0.58%	1.68%	4.16%

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 7 (G12-T8-TW1-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.32	25.24	25.30	25.26	25.34	25.33	25.33
standard deviation	0.03	0.05	0.02	0.02	0.06	0.02	0.03
coefficient of variation	0.12%	0.21%	0.09%	0.10%	0.25%	0.09%	0.13%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	7.39	7.45	7.45	7.31	7.61	7.44	7.47
standard deviation	0.15	0.10	0.24	0.14	0.09	0.10	0.12
coefficient of variation	1.98%	1.35%	3.25%	1.88%	1.22%	1.34%	1.58%

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 8 (G12-T8-TW8-i)							
	1	2	3	4	5	6	7
<b>Πλάτος (mm)</b>							
average value	25.24	25.27	25.25	25.21	25.29	25.15	25.24
standard deviation	0.03	0.06	0.05	0.02	0.04	0.11	0.03
coefficient of variation	0.13%	0.22%	0.22%	0.10%	0.17%	0.44%	0.10%
<b>Πάχος (mm)</b>							
average value	7.96	8.08	7.86	7.78	8.04	8.13	8.03
standard deviation	0.08	0.08	0.23	0.16	0.17	0.15	0.12
coefficient of variation	0.99%	1.00%	2.89%	2.05%	2.05%	1.80%	1.49%

## 6.2. Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε συμφωνία με το πρότυπο ASTM D3518, το οποίο όμως χαρακτηρίζει συμμετρικά πολύστρωτα σύνθετα υλικά, ενισχυμένα σε γωνίες  $\pm 45^\circ$  ως προς τον κύριο άξονα του υλικού. Ωστόσο, η αξιοποίηση επίπεδων δοκιμών που προήλθαν από τους κυλίνδρους με γωνία περιέλιξης  $\pm 45^\circ$ , μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με τη χρήση συμμετρικού πολύστρωτου, καθώς μία περιέλιξη ινών με γωνία  $-45^\circ$  ακολουθεί μία περιέλιξη ινών  $+45^\circ$  στην κατασκευή των κυλίνδρων αυτών.

Η πειραματική διαδικασία εμφανίζει κοινά σημεία με τη δοκιμή εφελκυσμού κάθετα στις ίνες (ASTM D3039). Συγκεκριμένα, τα επίπεδα δοκίμια σταθερής ορθογωνικής εγκάρσιας διατομής εφελκύνονται σε διεύθυνση  $45^\circ$  ως προς τις ενισχυτικές ίνες από την υδραυλική μηχανή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας (Σχήμα 6.2). Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφεται το ασκούμενο φορτίο και, με τη χρήση αισθητήρων μετρούνται οι παραμορφώσεις σε δύο άξονες του υλικού ( $\epsilon_{90^\circ}$  και  $\epsilon_{0^\circ}$ ). Οι αισθητήρες ήταν ροζέτες (δηλαδή διαζονικά strain gauges) της εταιρείας KYOWA, μήκους 5 mm και κολλήθηκαν στο μέσο του μήκους και του πλάτους των δοκιμών (Type: FLAB-5-11). Όπως ορίζει το πρότυπο, δύνανται να υπολογιστούν η διαμητική

τάση  $\tau_{12}$  που ασκείται στο δοκίμιο σε κάθε στιγμή της δοκιμής από την εξίσωση (6.1) και η διατμητική παραμόρφωση  $\gamma_{12}$  του δοκιμίου από την εξίσωση (6.2). Ως αντοχή σε διάτμηση του εκάστοτε δοκιμίου θεωρείται η μέγιστη τάση  $\tau_{12,max}$ .

$$\tau_{12} = \frac{P}{2A} \quad (6.1)$$

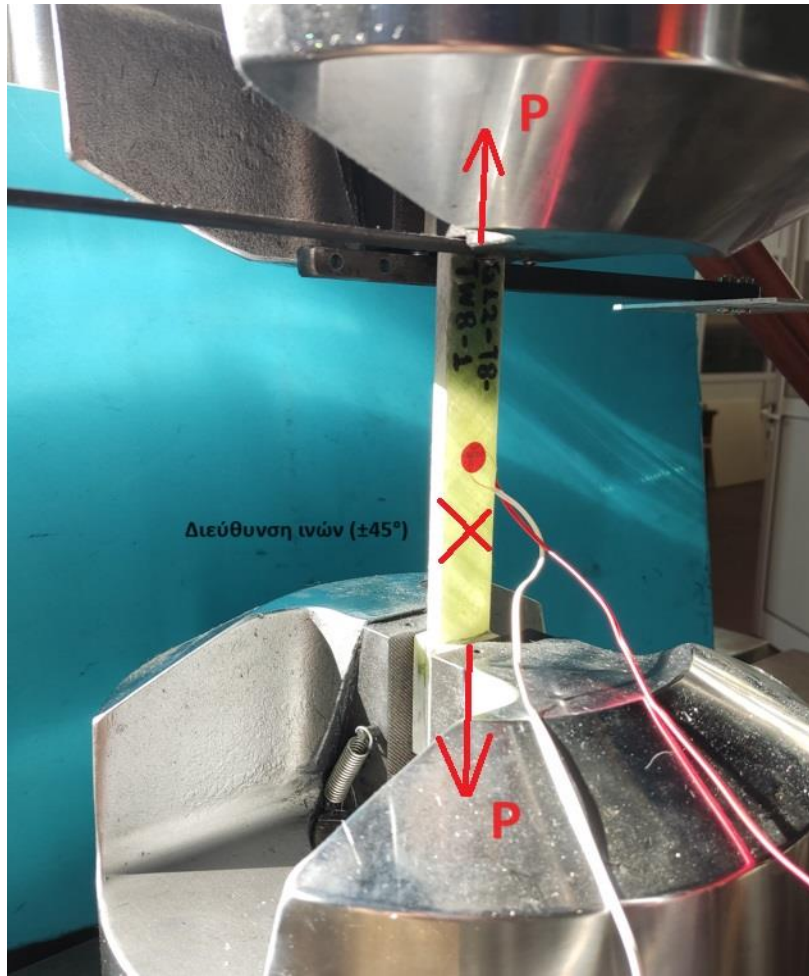
$$\gamma_{12} = \varepsilon_{0^\circ} - \varepsilon_{90^\circ} \quad (6.2)$$

Όπου:

- P: το ασκούμενο φορτίο στο δοκίμιο από τη μηχανή
- A: η σταθερή ορθογωνική εγκάρσια διατομή (=πλάτος x πάχος)
- $\varepsilon_{0^\circ}$ ,  $\varepsilon_{90^\circ}$ : οι παραμορφώσεις στη διεύθυνση της φόρτισης και κάθετα σε αυτήν αντίστοιχα

Οι παράμετροι διεξαγωγής των δοκιμών παρατίθενται παρακάτω:

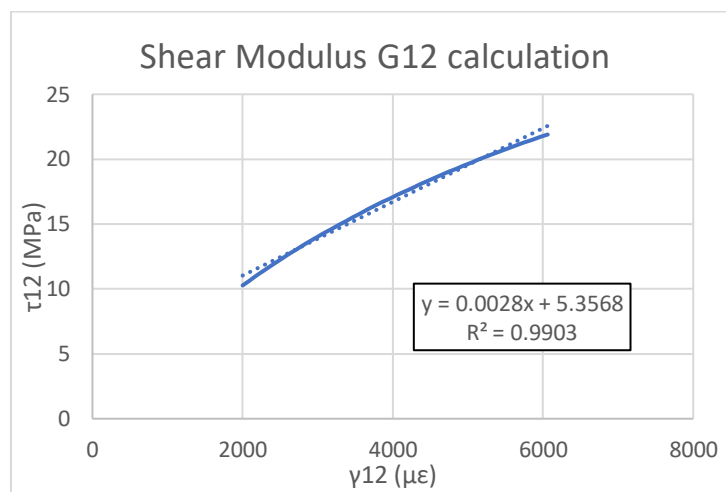
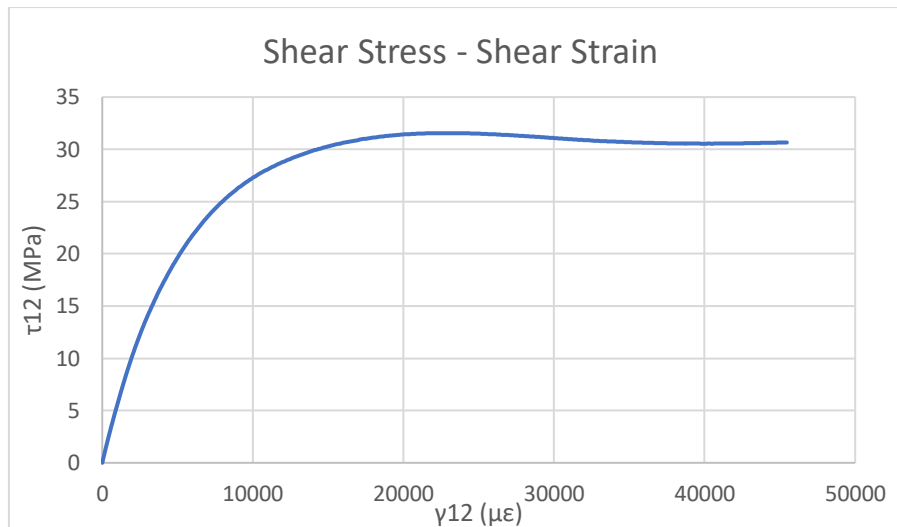
- Ταχύτητα απομάκρυνσης σιαγόνων μηχανής: 5 mm/min για δοκίμια πάχους 8 mm και 3 mm/min για δοκίμια πάχους 2 mm. Επιλέχθηκαν διαφορετικές ταχύτητες ώστε να πληρούνται με σιγουριά οι απαιτήσεις του προτύπου όσον αφορά στο χρόνο που θα διαρκέσει η δοκιμή. Συγκεκριμένα, στο ASTM D3512 καταγράφεται πως η διαδικασία εφελκυσμού πρέπει να είναι σε συμφωνία με το πρότυπο ASTM D3039, το οποίο ορίζει η αστοχία να επέρχεται τουλάχιστον μετά από 1 λεπτό (και μέχρι 10 λεπτά).
- Πίεση σύσφιξης σιαγόνων: 12 MPa για δοκίμια πάχους 8 mm και 3 MPa για δοκίμια πάχους 2 mm. Η διαφορά στην πίεση σύσφιξης δικαιολογείται όπως και η διαφορά στην ταχύτητα της δοκιμής παραπάνω.
- Συχνότητα δειγματοληψίας: 5 Hz.



Σχήμα 6.2. Διάταξη για τη δοκιμή διάτμησης

Για το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  στο επίπεδο των ινών των δοκιμίων, χαράχθηκε το διάγραμμα διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης. Σύμφωνα με το πρότυπο, το  $G_{12}$  λαμβάνεται ως η κλίση στο διάγραμμα, στο εύρος διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma_{12}$  από 2000 ως 6000 με. Όπως και για τις προηγούμενες δοκιμές ( $E_1$ ,  $E_2$ ) ύστερα από την απομόνωση του μέρους της καμπύλης από 2000 έως 6000 με, μέσω του προγράμματος Excel υπολογίζεται η εξίσωση της γραμμικοποιημένης καμπύλης ως ευθείας:  $y=ax+b$ . Ο συντελεστής  $a$  αποτελεί το  $G_{12}$ . Επιπλέον, για την επιβεβαίωση της ακρίβειας της μεθόδου (δηλαδή της αξιοπιστίας της γραμμικής προσέγγισης) στο διάγραμμα παρουσιάζεται και ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination),  $R^2$ . Σε κάθε περίπτωση ο συντελεστής ήταν μεγαλύτερος του 0.99, κατά συνέπεια η προσέγγιση ήταν απολύτως αξιόπιστη. Τυπική καμπύλη διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης και ο τρόπος μέτρησης του  $G_{12}$  φαίνεται στο Σχήμα 6.3, από το δοκίμιο G12-T2-TW1-5.





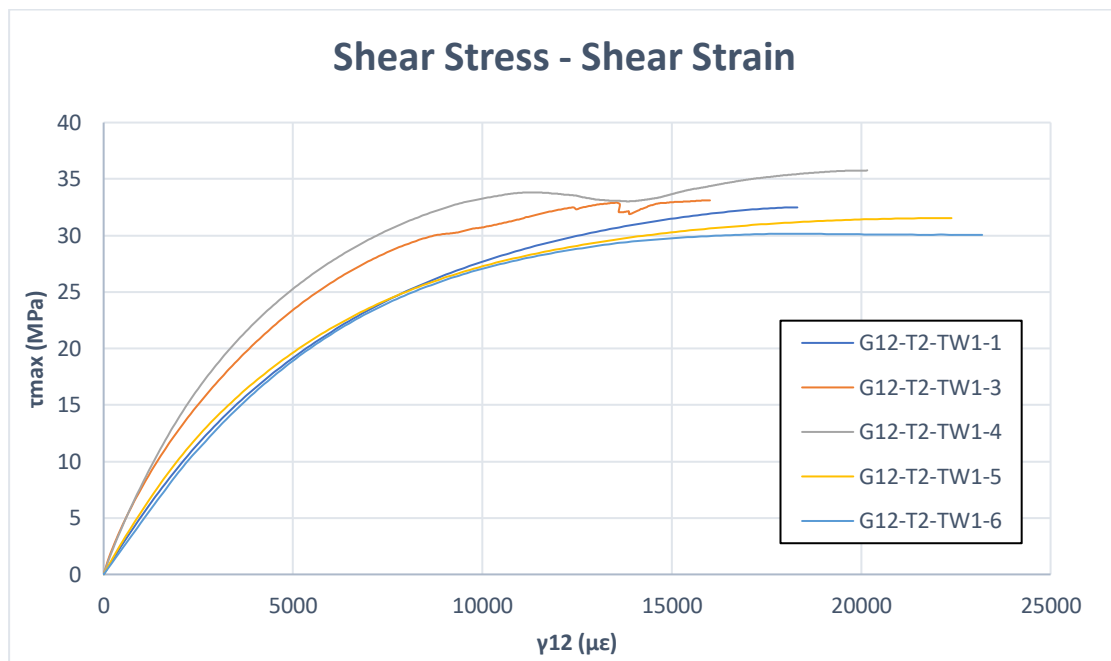
Σχήμα 6.3. Τυπική καμπύλη διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης και τρόπος μέτρησης του  $G_{12}$

### 6.3. Αποτελέσματα

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης, όπως προέκυψαν και από την μετέπειτα ανάλυση των μετρήσεων. Μετρήθηκαν οι ιδιότητες των δοκιμίων που κόπηκαν από τους κυλίνδρους 3, 4, 7, 8 σε διάτμηση ( $G_{12}$ ,  $\tau_{12}$ ,  $F_{max}$ ). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται πινακοποιημένα (Πίνακες 6.2-6.5) και σε μορφή διαγραμμάτων διατμητικής τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης (Σχήματα 6.4-6.7).

Πίνακας 6.2. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης (G12-T2-TW1-i)

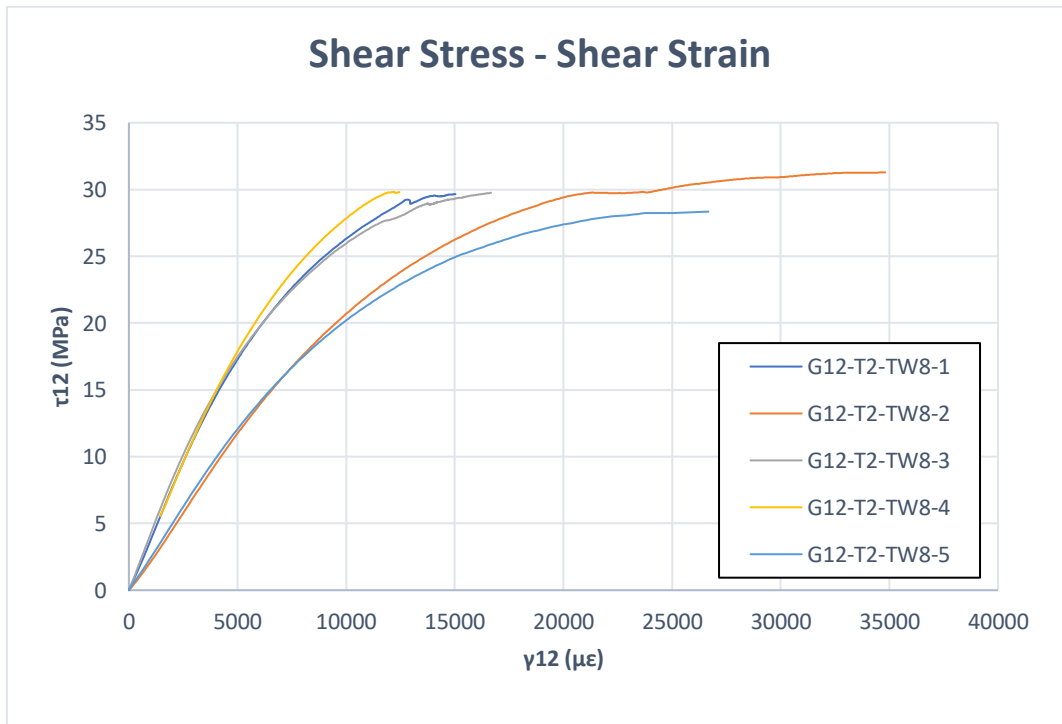
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 3 (G12-T2-TW1-i)			
	$G_{12}$ (GPa)	$F_{max}$ (kN)	$\tau_{12}$ (MPa)
G12-T2-TW1-1	2.92	3.88	32.5
G12-T2-TW1-3	3.23	4.05	33.1
G12-T2-TW1-4	3.37	4.30	35.8
G12-T2-TW1-5	2.84	4.70	37.0
G12-T2-TW1-6	2.98	3.99	32.3
<b>Average</b>	<b>3.07</b>	<b>4.19</b>	<b>34.1</b>
<b>St. Deviation</b>	<b>0.22</b>	<b>0.33</b>	<b>2.1</b>
<b>Coef. of Variance</b>	<b>7.3%</b>	<b>7.8%</b>	<b>6.3%</b>



Σχήμα 6.4. Καμπύλη διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων (G12-T2-TW1-i)

Πίνακας 6.3. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης (G12-T2-TW8-i)

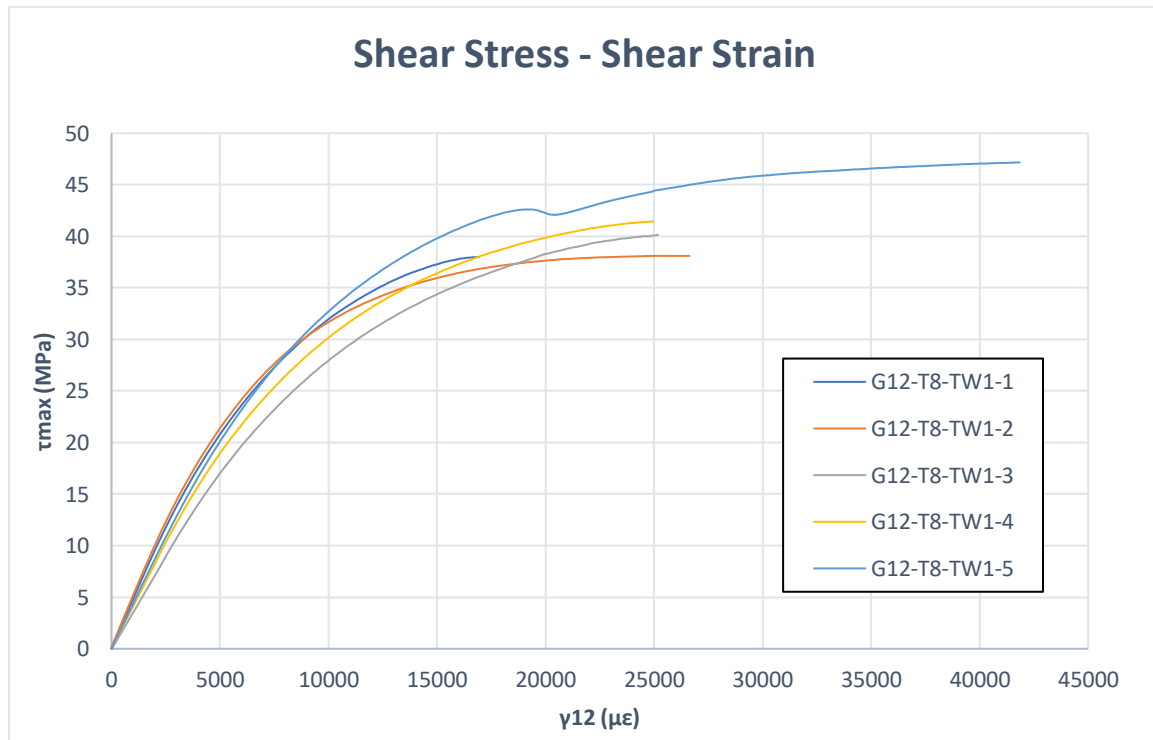
<b>ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 4 (G12-T2-TW8-i)</b>			
	<b>G<sub>12</sub> (GPa)</b>	<b>F<sub>max</sub> (kN)</b>	<b>τ<sub>12</sub> (MPa)</b>
<b>G12-T2-TW8-1</b>	3.01	4.30	29.6
<b>G12-T2-TW8-2</b>	2.34	4.66	31.3
<b>G12-T2-TW8-3</b>	2.82	4.17	29.7
<b>G12-T2-TW8-4</b>	3.19	4.17	29.8
<b>G12-T2-TW8-5</b>	2.31	4.30	29.0
<b>Average</b>	2.73	4.32	29.9
<b>St. Deviation</b>	0.40	0.20	0.83
<b>Coef. of Variance</b>	14.5%	4.6%	2.8%



Σχήμα 6.5. Καμπύλη διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων (G12-T2-TW8-i)

Πίνακας 6.4. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης (G12-T8-TW1-i)

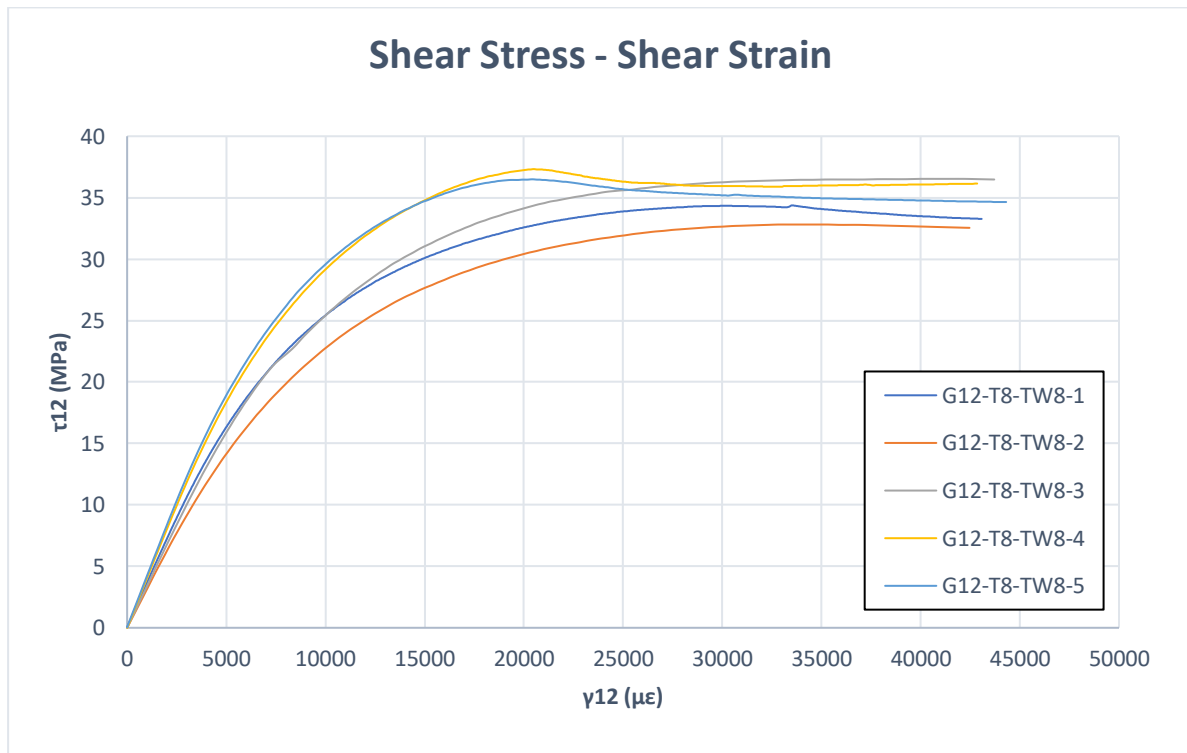
ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 7 (G12-T8-TW1-i)			
	G <sub>12</sub> (GPa)	F <sub>max</sub> (kN)	τ <sub>12</sub> (MPa)
G12-T8-TW1-1	3.51	14.22	38.0
G12-T8-TW1-2	3.53	14.33	38.1
G12-T8-TW1-3	3.14	15.13	40.1
G12-T8-TW1-4	3.39	15.30	41.4
G12-T8-TW1-5	3.57	18.39	47.7
Average	3.43	15.47	41.1
St. Deviation	0.17	1.70	4.0
Coef. of Variance	5.1%	11.0%	9.7%



Σχήμα 6.6. Καμπύλη διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων (G12-T8-TW1-i)

Πίνακας 6.5. Αποτελέσματα δοκιμών διάτμησης (G12-T8-TW8-i)

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 8 (G12-T8-TW8-i)			
	G <sub>12</sub> (GPa)	F <sub>max</sub> (kN)	τ <sub>12</sub> (MPa)
G12-T8-TW8-1	2.91	13.88	34.5
G12-T8-TW8-2	2.54	13.93	34.1
G12-T8-TW8-3	2.88	14.90	37.5
G12-T8-TW8-4	3.26	15.45	39.4
G12-T8-TW8-5	3.28	14.84	36.5
Average	2.97	14.60	36.4
St. Deviation	0.31	0.68	2.2
Coef. of Variance	10.3%	4.6%	6.0%



Σχήμα 6.7. Καμπύλη διατμητικών τάσεων-διατμητικών παραμορφώσεων (G12-T8-TW8-i)

Τέλος, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών σε διάτμηση παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.6 παρακάτω.

Πίνακας 6.6. Ιδιότητες των κυλίνδρων σε διάτμηση

Κύλινδρος	Ομάδα δοκιμίων	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Tows	G <sub>12</sub> (GPa)	τ <sub>12,max</sub> (MPa)
3	G12-T2-TW1	25	2	1	3.07	34.1
4	G12-T2-TW8	25	2	8	2.73	29.9
7	G12-T8-TW1	25	8	1	3.43	41.1
8	G12-T8-TW8	25	8	8	2.97	36.4

### Παρατηρήσεις

Τα ανωτέρω διαγράμματα (Σχήματα 6.4-6.7) εμφανίζουν ικανοποιητική επαναληψιμότητα, δηλαδή τα δοκίμια είχαν παρόμοια συμπεριφορά μεταξύ τους, κατά τις δοκιμές. Από την πλειοψηφία των δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια αστοχούν από διάτμηση σε περιοχή ανάμεσα στο μέσο του μήκους και στο επίθεμα (Σχήμα 6.8). Η αστοχία παρατηρήθηκε να συμβαίνει με αποκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού (delamination). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι όλα τα δοκίμια έφτασαν στη θραύση λόγω διάτμησης. Τα αποτελέσματα για τις διατμητικές αντοχές τ<sub>12</sub> των κυλίνδρων και για τα μέγιστα ασκούμενα φορτία εμφανίζουν συντελεστή διακύμανσης έως 10% και, συνεπώς κρίνονται αξιόπιστα σε καλό βαθμό. Το μέτρο διάτμησης G<sub>12</sub> παρομοίως, εκτός από τον Κύλινδρο 4, στον οποίο ο συντελεστής διακύμανσης έχει τιμή ίση με 14.5%. Σαν γενική παρατήρηση, τα δοκίμια με μεγαλύτερο πάχος εμφάνισαν ελαφρώς υψηλότερες αντοχές τ<sub>12</sub> ενώ τα μέτρα διάτμησης G<sub>12</sub> ήταν παραπλήσια. Επιπλέον η αύξηση των συστάδων ινών (tows) στην κατασκευή των (με σταθερό πάχος) δοκιμίων φάνηκε να υποβαθμίζει σε μικρό βαθμό τις παραπάνω μηχανικές ιδιότητες.



Σχήμα 6.8. Τυπική θραύση δοκιμίου σε δοκιμή διάτμησης με αποχωρισμό των στρώσεων (delamination)

## **7. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**

Σε κάθε περίπτωση τα αποτελέσματα για τις κυριότερες μηχανικές ιδιότητες των κυλίνδρων, δηλαδή την αντοχή σε θραύση στη διεύθυνση των ινών και κάθετα σε αυτές, τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας και το μέτρο διάτμησης, είναι κοντινά με τις αντίστοιχες τυπικές τιμές που συναντώνται στη βιβλιογραφία (Wonderly et al., 2005). Εξάιρεση αποτελεί η μέγιστη παραμόρφωση, της οποίας τα αποτελέσματα δεν ήταν απολύτως αξιόπιστα και χρίζουν περαιτέρω διερεύνησης. Στα επόμενα κεφάλαια θα εξεταστεί ο τρόπος που επιδρά η βινυλεστερική ρητίνη στις μηχανικές ιδιότητες, καθώς και η επίδραση που έχουν οι γεωμετρικές και κατασκευαστικές παράμετροι των δοκιμίων, όπως το πάχος, η εσωτερική διάμετρος και ο αριθμός των συστάδων ινών.

### **7.1. Επίδραση της βινυλεστερικής ρητίνης στις μηχανικές ιδιότητες**

Έχοντας εξαγάγει τα αποτελέσματα για τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων όλων των κυλίνδρων, σκοπός είναι να συγκριθούν αυτές οι τιμές με τις ήδη υπάρχουσες στην βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, ενδιαφέρον έχει η σύγκριση με δεδομένα παλαιότερων διπλωματικών του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Για τη συγκεκριμένη μελέτη αντλήθηκαν δεδομένα από αντίστοιχες μελέτες και δοκιμές που αφορούσαν δοκίμια με τις ίδιες (ή παραπλήσιες αν δεν υπάρχουν δεδομένα) κατασκευαστικές και γεωμετρικές παραμέτρους (διάμετρος, πάχος, πλάτος, tows, δύναμη τάνυσης), από ίνες γυαλιού, αλλά διαφορετικό είδος ρητίνης. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα για εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της βινυλεστερικής ρητίνης στις μηχανικές ιδιότητες, σε σχέση με άλλα είδη ρητινών.

Στον Πίνακα 7.1 φαίνεται η σύγκριση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών με τις αντίστοιχες τιμές δοκιμίων από ίνες γυαλιού και εποξική ρητίνη. Επιπροσθέτως, οι Πίνακες 7.2-7.3 αφορούν την ίδια σύγκριση για τις ιδιότητες κάθετα στις ίνες και σε διάτμηση, αντίστοιχα. Τα δεδομένα λήφθηκαν από προηγούμενες δοκιμές (Κωνσταντινίδης, 2016) για δοκίμια με 1 tow με τη μόνη διαφορά ότι το πάχος εκείνων των δοκιμίων ήταν 5 mm. Συνεπώς πραγματοποιείται αντιπαραβολή με τα δοκίμια πάχους και 2 mm και 8 mm από την παρούσα διπλωματική εργασία. Η εσωτερική διάμετρος για τα  $E_1$ ,  $\sigma_1$  ήταν 100 mm, άρα η σύγκριση αφορά τα αντίστοιχα δοκίμια με 100 mm: E1-D100-T2-TW1 και E1-D100-T8-TW1.

Πίνακας 7.1. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων στην διεύθυνση των ινών με δοκίμια εποξικής ρητίνης

Δοκίμια	$E_1$ (GPa)		$\sigma_{1,max}$ (MPa)	
	Glass-vinylester	Glass-epoxy	Glass-vinylester	Glass-epoxy
E1-D100-T2-TW1	52.05	55.07	807.7	631.67
E1-D100-T8-TW1	58.65		716.2	

Πίνακας 7.2. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων κάθετα στις ίνες με δοκίμια εποξικής ρητίνης

Δοκίμια	$E_2$ (GPa)		$\sigma_{2,max}$ (MPa)	
	Glass-vinylester	Glass-epoxy	Glass-vinylester	Glass-epoxy
E2-T2-TW1	10.43	17.68	22.2	44.17
E2-T8-TW1	15.79		15.3	

Πίνακας 7.3. Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων σε διάτμηση με δοκίμια εποξικής ρητίνης

Δοκίμια	$G_{12}$ (GPa)		$\tau_{12,max}$ (MPa)	
	Glass-vinylester	Glass-epoxy	Glass-vinylester	Glass-epoxy
G12-T2-TW1	3.07	4.61	34.1	37.6
G12-T8-TW1	3.43		36.4	

Οι τιμές αντλήθηκαν από τον Πίνακα 4.11 για τα δοκίμια **χωρίς** εγκοπές, όπως ήταν τα δοκίμια της προηγούμενης μελέτης. Η χρήση της βινυλεστερικής ρητίνης φαίνεται να βελτιώνει τις ιδιότητες στην διεύθυνση των ινών, κυρίως την αντοχή  $\sigma_{1,max}$ . Όσον αφορά στο μέτρο ελαστικότητας  $E_1$ , φαίνεται να έχει σχετικά μικρές επιδράσεις σε σχέση με τα δοκίμια με εποξική ρητίνη. Από την άλλη, η βινυλεστερική ρητίνη παρατηρείται να υποβαθμίζει ελαφρώς τις ιδιότητες σε διάτμηση και περισσότερο τις ιδιότητες σε διεύθυνση κάθετα στις ίνες. Ωστόσο, η εγκυρότητα αυτών των ισχυρισμών χρίζει περαιτέρω εμβάθυνσης και μελέτης, καθώς πέρα από τη ρητίνη του σύνθετου, μία ακόμη παράμετρος ήταν διαφορετική ανάμεσα στις δύο ομάδες δοκιμών (πάχος ίσο με 5 αντί για 2 ή 8 χιλιοστά). Η αντιπαραβολή των τιμών με αντίστοιχες τιμές από πειραματικές δοκιμές σε σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα κρίθηκε άσκοπη, παρότι υπάρχει πληθώρα δεδομένων στη βιβλιογραφία. Και αυτό διότι, είναι γνωστό ότι οι τελευταίες παρουσιάζουν γενικά αυξημένη αντοχή σε σχέση με τις ίνες γυαλιού. Επομένως δε θα γινόταν εμφανής η επίδραση του βινυλεστέρα έναντι άλλου είδους ρητίνης στις μηχανικές ιδιότητες.



## 7.2. Επίδραση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων στις μηχανικές ιδιότητες

Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών είναι αρκετά, ώστε να εκτιμηθεί ποιες γεωμετρικές και κατασκευαστικές παράμετροι επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού από περιέλιξη ινών, καθώς και με ποιον τρόπο τις επηρεάζουν. Το σύνθετο υλικό δεν αλλάζει από δοκιμή σε δοκιμή, στην παρούσα διπλωματική εργασία, άρα εξετάζονται αποκλειστικά δοκίμια από ίνες γυαλιού και βινυλεστερική ρητίνη. Για την παρούσα ανάλυση συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα για διαφορετικές περιπτώσεις, όπου μόνο μία παράμετρος ήταν διαφορετική, για παράδειγμα δακτυλιοειδή δοκίμια με κοινά πλάτη, εσωτερικές διαμέτρους, δύναμη τάνυσης, αριθμό συστάδων ινών (tows), αλλά διαφορετικά πάχη.

Οι σταθερές παράμετροι της μελέτης, όπως αναλύθηκαν και στο Κεφάλαιο 3 είναι οι εξής:

- Υλικά κατασκευής δοκιμίων (ίνες γυαλιού τύπου E και βινυλεστερική ρητίνη)
- Πλάτος δοκιμίων (10 mm για τα δακτυλιοειδή και 25 mm για τα επίπεδα)
- Δύναμη τάνυσης ινών (8 N)
- Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρων για τα επίπεδα δοκίμια (200 mm)

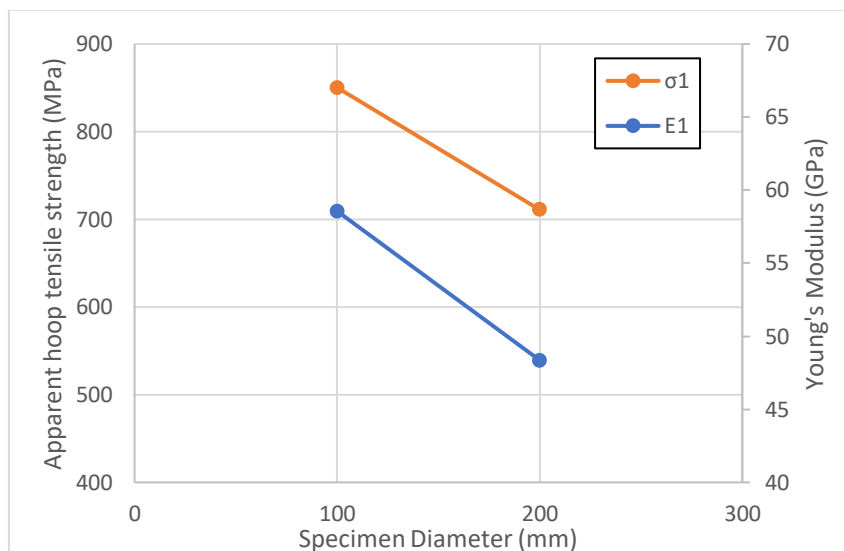
Οι μεταβλητές παράμετροι είναι οι εξής:

- Εσωτερική διάμετρος για τα δακτυλιοειδή δοκίμια (100 και 200 mm)
- Πάχος δοκιμίων (2 και 8 mm)
- Αριθμός συστάδων ινών δοκιμίων (1 και 8 tows)

Ακολουθούν διαγράμματα (Σχήματα 7.1-7.12) και πίνακες (Πίνακες 7.4-7.15) που καθιστούν εμφανή τον τρόπο που επηρεάζουν οι παραπάνω παράμετροι τη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων, παράλληλα στις ίνες ενίσχυσης, δηλαδή τα μεγέθη  $\sigma_{1,max}$  και  $E_1$ . Κάθε φορά όλες οι παράμετροι παραμένουν σταθερές, εκτός από μία που μεταβάλλεται. Οι τιμές των ιδιοτήτων αντλήθηκαν από τον Πίνακα 4.11. Σημειώνεται πως για τη σύγκριση της μέγιστης τάσης θραύσης χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχες τιμές για τα δοκίμια **με εγκοπές**. Και αυτό διότι αυτά τα δοκίμια προτείνονται στο πρότυπο ASTM D2290 για τις δοκιμές.

Πίνακας 7.4. Επίδραση της διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

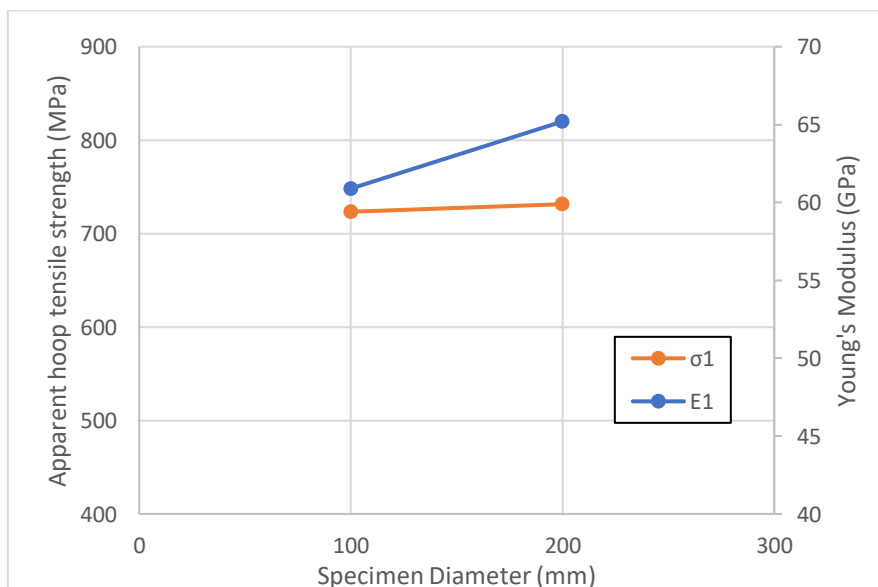
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Διάμετρος (mm)
E1-D100-T2-TW1	850.2	58.56	100
E1-D200-T2-TW1	710.9	48.355	200



Σχήμα 7.1. Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.5. Επίδραση της διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

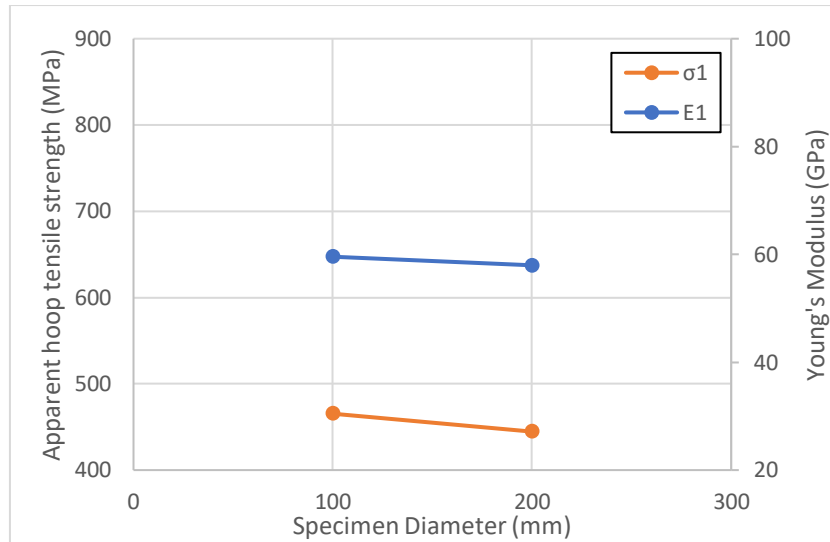
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Διάμετρος (mm)
E1-D100-T2-TW8	723.4	60.89	100
E1-D200-T2-TW8	731.5	65.2	200



Σχήμα 7.2. Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.6. Επίδραση της διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

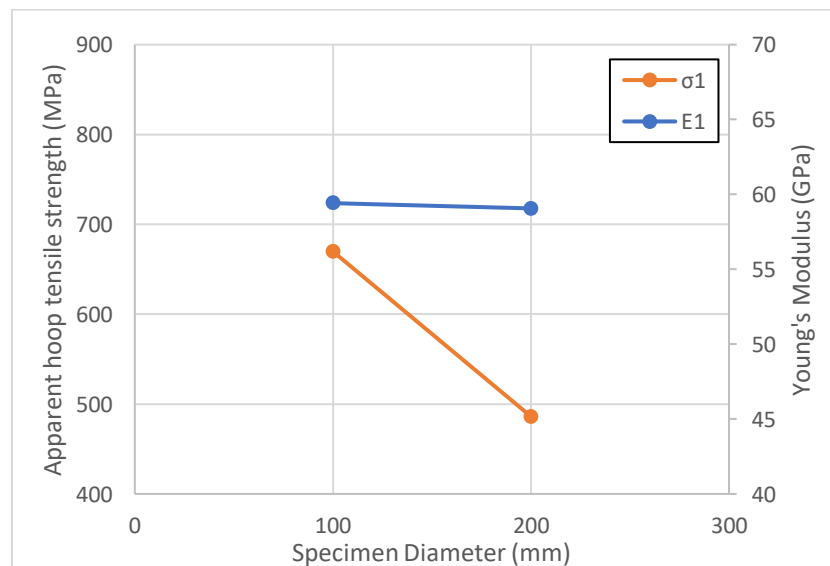
Ομάδα δοκιμών	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Διάμετρος (mm)
E1-D100-T8-TW1	465.3	59.565	100
E1-D200-T8-TW1	444.6	57.975	200



Σχήμα 7.3. Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.7. Επίδραση της διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Ομάδα δοκιμών	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Διάμετρος (mm)
E1-D100-T8-TW8	669.9	59.415	100
E1-D200-T8-TW8	486.2	59.065	200



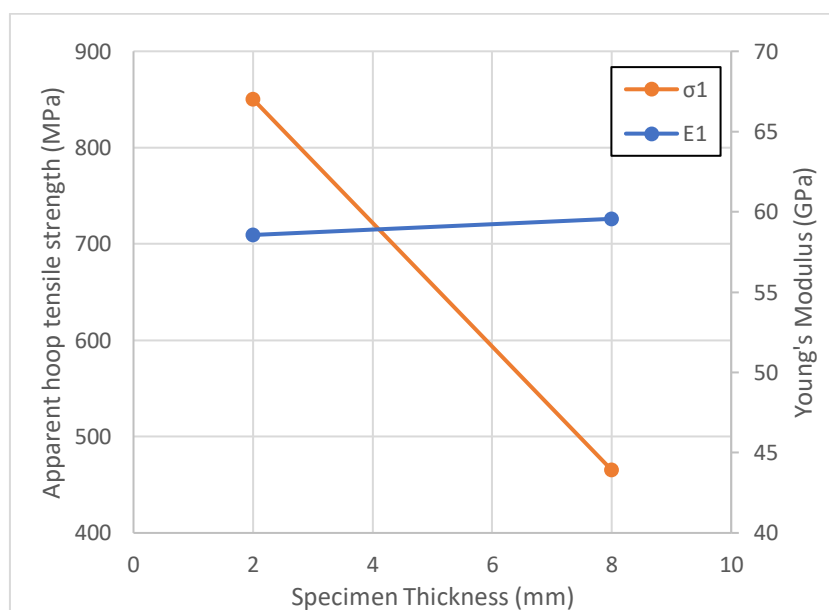
Σχήμα 7.4. Γράφημα επίδρασης διαμέτρου στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω δεδομένα, η αύξηση της διαμέτρου των δακτυλιοειδών δοκιμίων, φαίνεται να υποβαθμίζει ελαφρώς την τάση θραύσης  $\sigma_{1,max}$ , εκτός από την περίπτωση των E1-D100/D200-T2-TW8, όπου παρατηρήθηκε πολύ μικρή αύξηση. Στην ίδια περίπτωση σύγκρισης παρατηρήθηκε και ελαφριά βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας  $E_1$ , ενώ αντίστοιχα στις υπόλοιπες περιπτώσεις, η αύξηση της διαμέτρου οδήγησε σε πολύ μικρού βαθμού πτώση του μεγέθους, εντός του εύρους του πειραματικού σφάλματος.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του πάχους των δοκιμίων.

Πίνακας 7.8. Επίδραση του πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

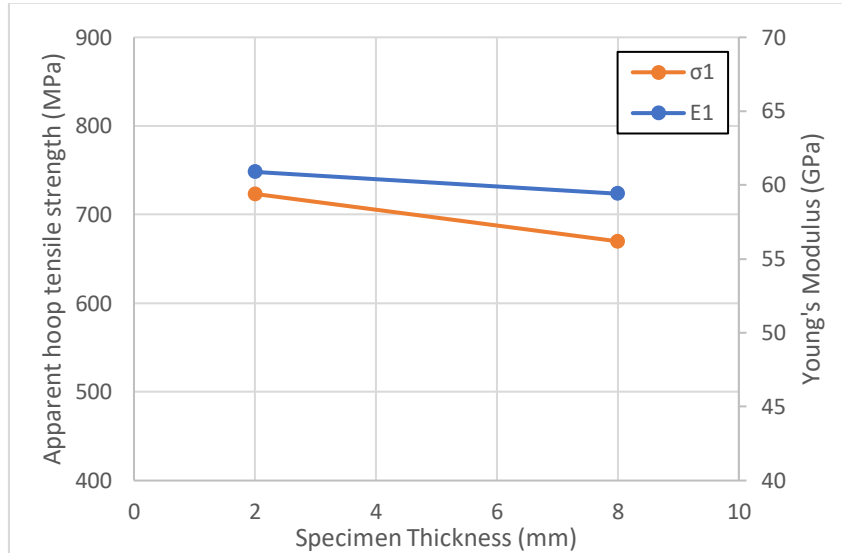
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Πάχος (mm)
E1-D100-T2-TW1	850.2	58.56	2
E1-D100-T8-TW1	465.3	59.565	8



Σχήμα 7.5. Γράφημα επίδρασης πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.9. Επίδραση του πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

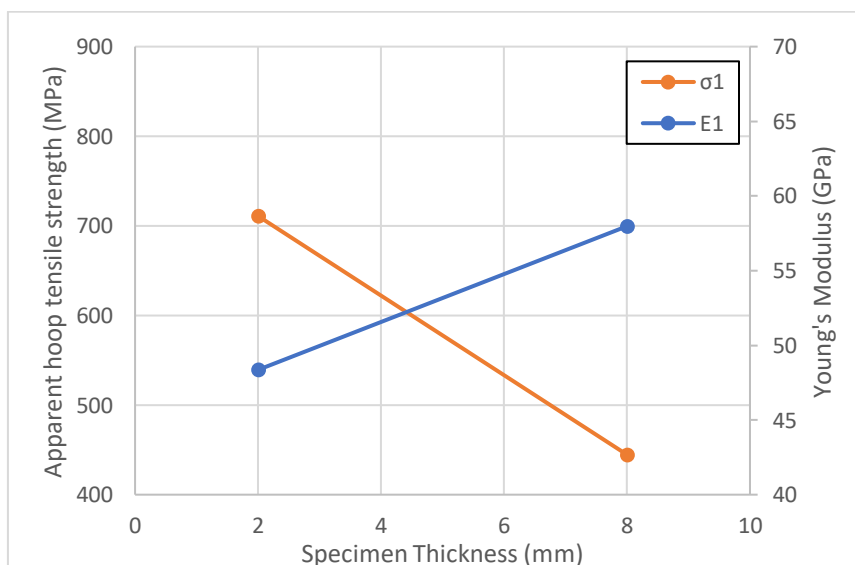
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Πάχος (mm)
E1-D100-T2-TW8	723.4	60.89	2
E1-D100-T8-TW8	669.9	59.415	8



Σχήμα 7.6. Γράφημα επίδρασης πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.10. Επίδραση του πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

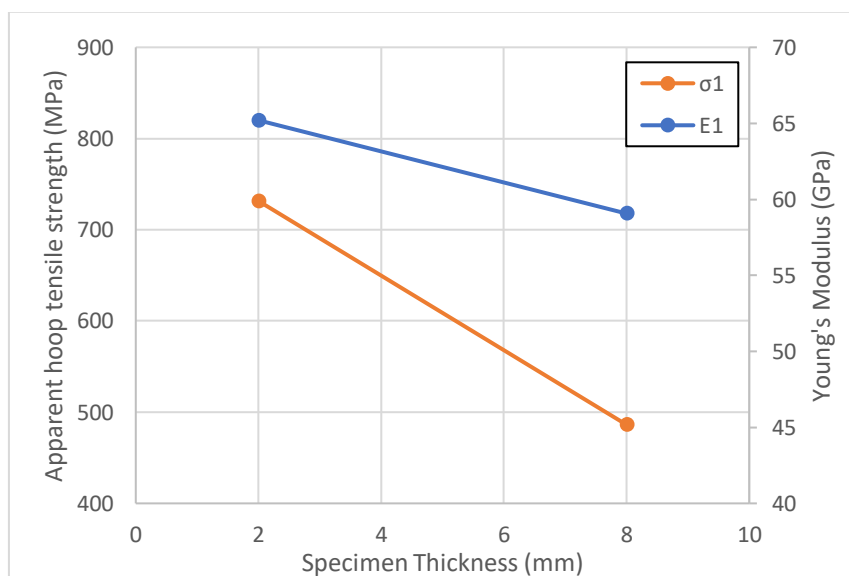
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Πάχος (mm)
E1-D200-T2-TW1	710.9	48.355	2
E1-D200-T8-TW1	444.6	57.975	8



Σχήμα 7.7. Γράφημα επίδρασης πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.11. Επίδραση του πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Πάχος (mm)
E1-D200-T2-TW8	731.5	65.2	2
E1-D200-T8-TW8	486.2	59.065	8



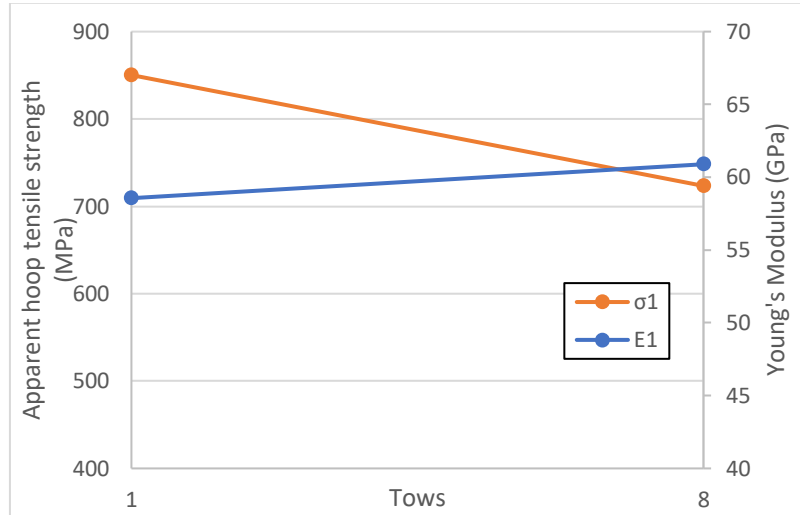
Σχήμα 7.8. Γράφημα επίδρασης πάχους στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Το πάχος φαίνεται να είναι σημαντικός παράγοντας στη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων, κυρίως για την αντοχή. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται αισθητή μείωση της τάσης θραύσης  $\sigma_{1,max}$  των δακτυλίων με την αύξηση του πάχους από 2 σε 8 mm. Για το μέτρο ελαστικότητας  $E_1$  δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, καθώς η αύξηση του πάχους επιδρά απρόβλεπτα σε αυτό.

Στη συνέχεια, έπεται η μελέτη επίδρασης του αριθμού των συστάδων ινών (number of tows) στη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων.

Πίνακας 7.12. Επίδραση του αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

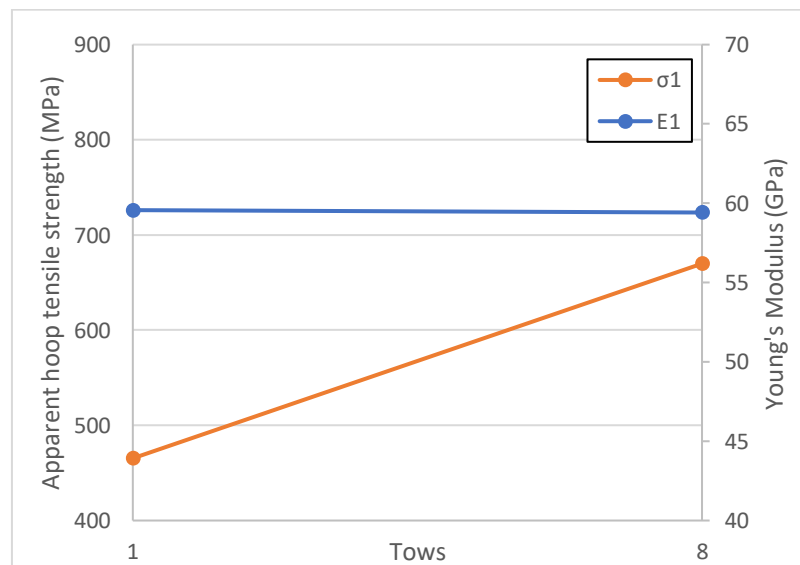
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Tows
E1-D100-T2-TW1	850.2	58.56	1
E1-D100-T2-TW8	723.4	60.89	8



Σχήμα 7.9. Γράφημα επίδρασης αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.13. Επίδραση του αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

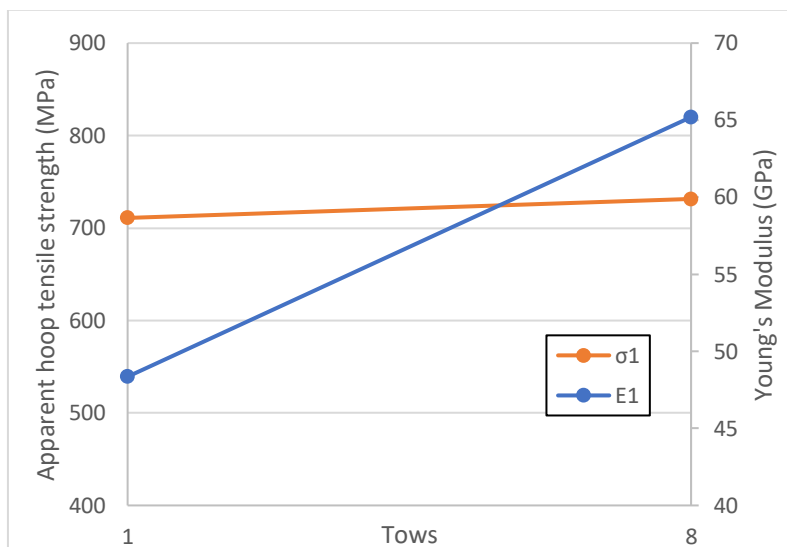
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Tows
E1-D100-T8-TW1	465.3	59.565	1
E1-D100-T8-TW8	669.9	59.415	8



Σχήμα 7.10. Γράφημα επίδρασης αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.14. Επίδραση του αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

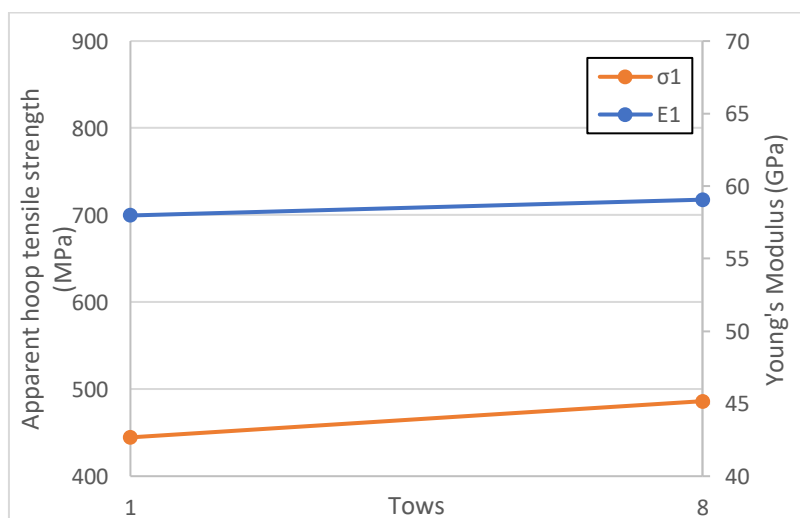
Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Tows
E1-D200-T2-TW1	710.9	48.355	1
E1-D200-T2-TW8	731.5	65.2	8



Σχήμα 7.11. Γράφημα επίδρασης αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Πίνακας 7.15. Επίδραση του αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων

Ομάδα δοκιμίων	$\sigma_{1,max}$ (MPa)	$E_1$ (GPa)	Tows
E1-D200-T8-TW1	444.6	57.975	1
E1-D200-T8-TW8	486.2	59.065	8



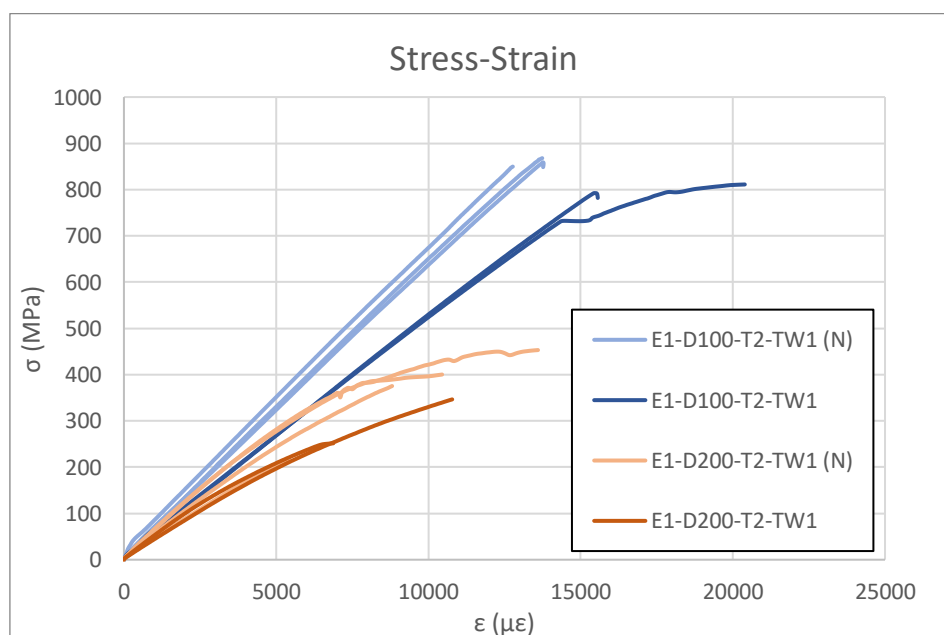
Σχήμα 7.12. Γράφημα επίδρασης αριθμού συστάδων ινών στις μηχανικές ιδιότητες των δακτυλίων



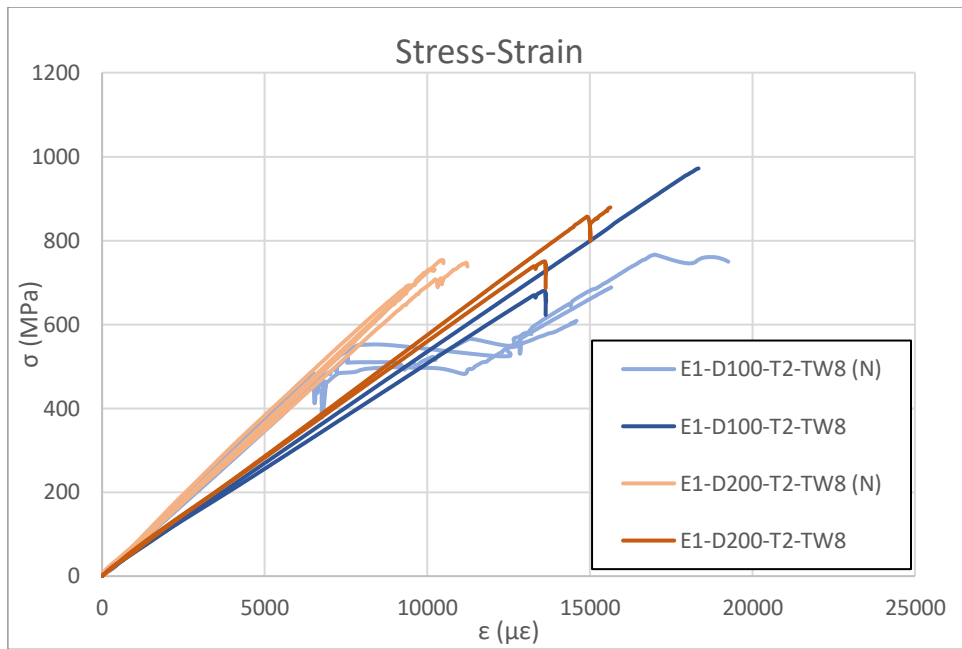
Στα δοκίμια με 8 tows έναντι ενός, διαφαίνεται μια τάση για μικρή βελτίωση του μέτρου ελαστικότητας, εντός όμως του εύρους του πειραματικού σφάλματος. Επιπλέον αυξημένη είναι και η τάση θραύσης, εκτός από μία περίπτωση (E1-D100-T2-TW1/TW8). Η σημαντική υποβάθμιση της τιμής της τάσης θραύσης σε αυτή την περίπτωση αποτρέπει την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για την επίδραση του αριθμού των συστάδων ινών στην αντοχή των δοκιμίων.

Τέλος, ακολουθεί και μια παραστατική απεικόνιση-σύγκριση της μηχανικής συμπεριφοράς όλων των δοκιμίων ανά δύο ομάδες μεταξύ τους, δηλαδή με τις κατασκευαστικές παραμέτρους τους κοινές, εκτός από μία κάθε φορά. Η σύγκριση πραγματοποιήθηκε σε διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης και παρατίθεται στα Σχήματα 7.13-7.24. Διακρίνεται η συμπεριφορά όλων των δοκιμίων κάθε ομάδας σε αντιπαραβολή με τα δοκίμια μίας άλλης ομάδας, με στόχο ξανά την οπτική παρατήρηση της επίδρασης της διαμέτρου, του πάχους, του αριθμού των tows των δοκιμίων, αλλά και της ύπαρξης εγκοπών ή όχι, στις μηχανικές ιδιότητες. Σημειώνεται ότι σε κάθε διάγραμμα, οι καμπύλες  $\sigma$ - $\epsilon$  των ομάδων δοκιμίων με διαφορετική την εκάστοτε παράμετρο αναπαρίστανται με διαφορετικό χρώμα. Η ανοιχτή απόχρωση αφορά τα δοκίμια με εγκοπές (N) και η σκούρα απόχρωση τα δοκίμια χωρίς εγκοπές.

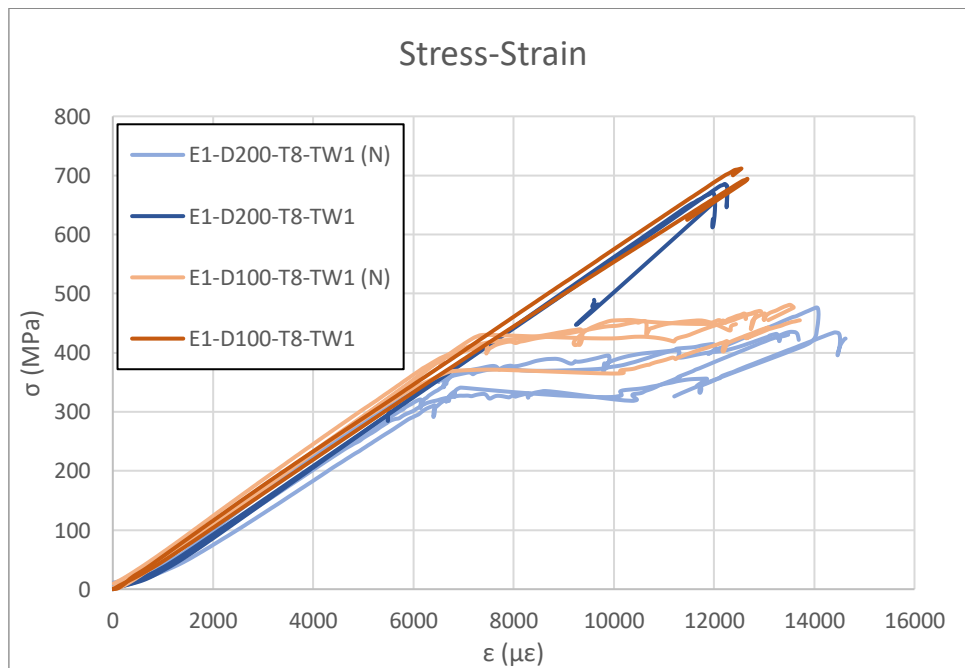
#### Διάμετρος (100 ή 200 mm)



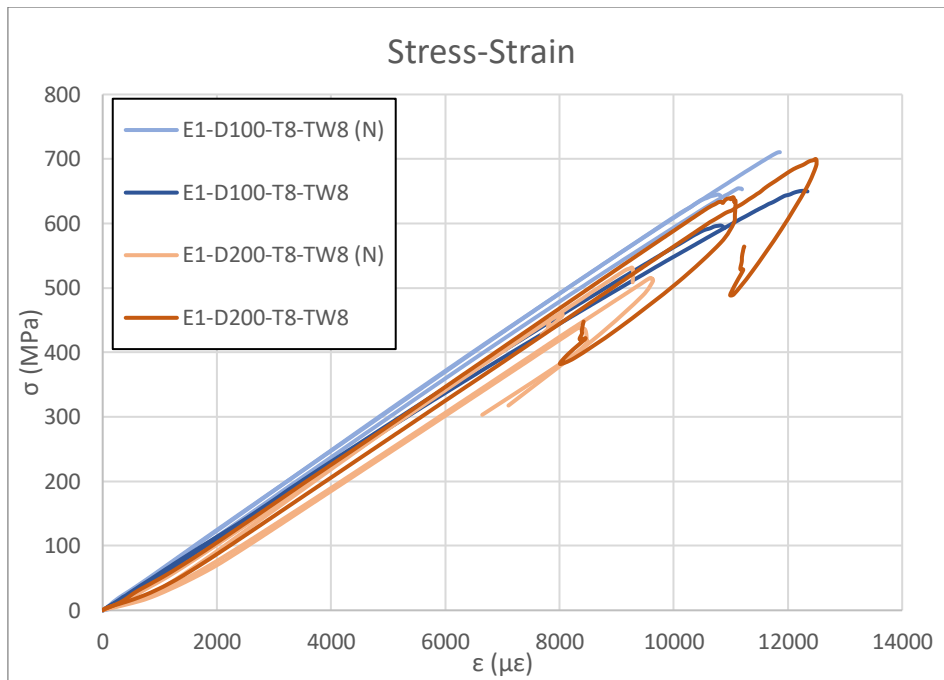
Σχήμα 7.13. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμίων με διαφορετική διάμετρο



Σχήμα 7.14. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμίων με διαφορετική διάμετρο

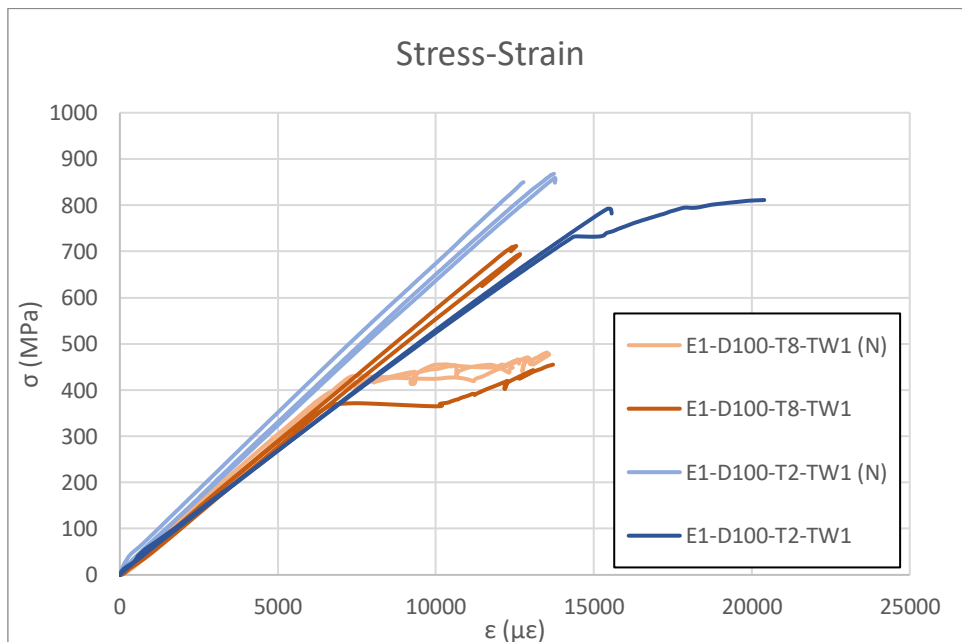


Σχήμα 7.15. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμίων με διαφορετική διάμετρο

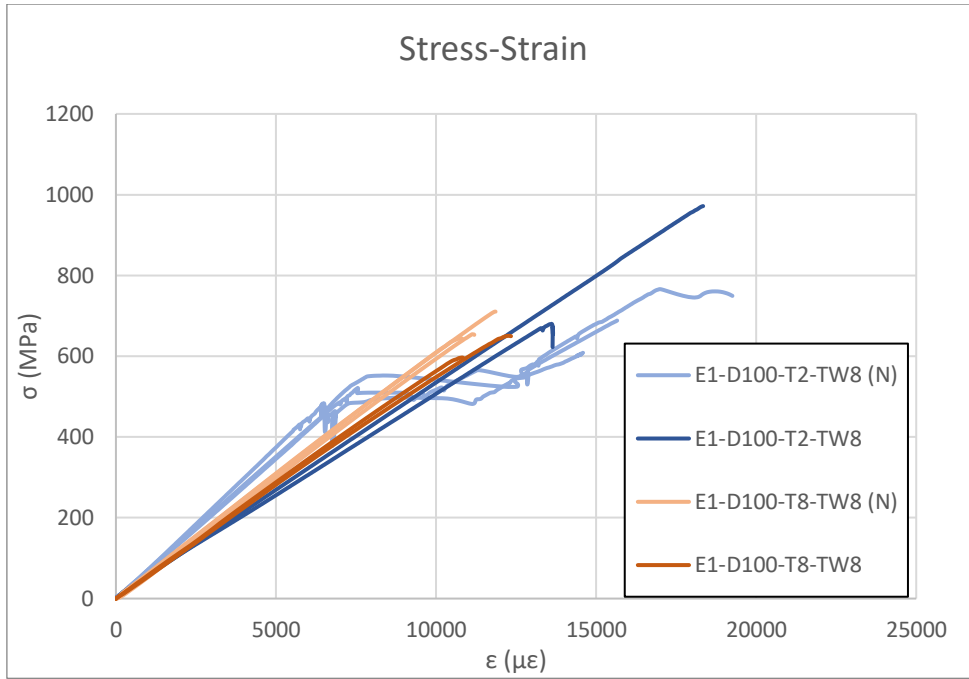


Σχήμα 7.16. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμίων με διαφορετική διάμετρο

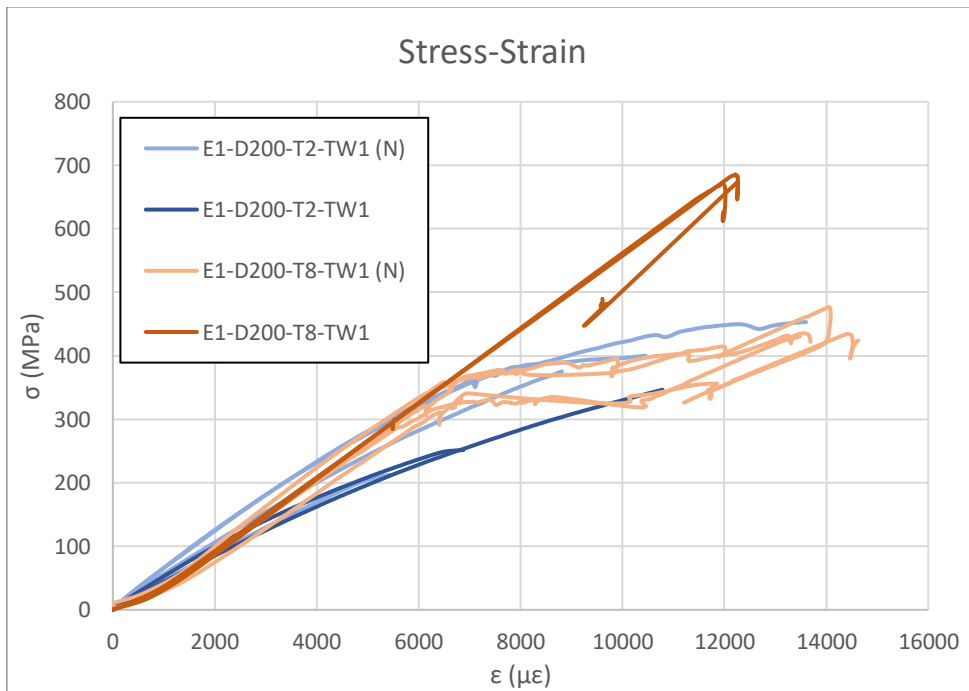
Πάχος (2 ή 8 mm)



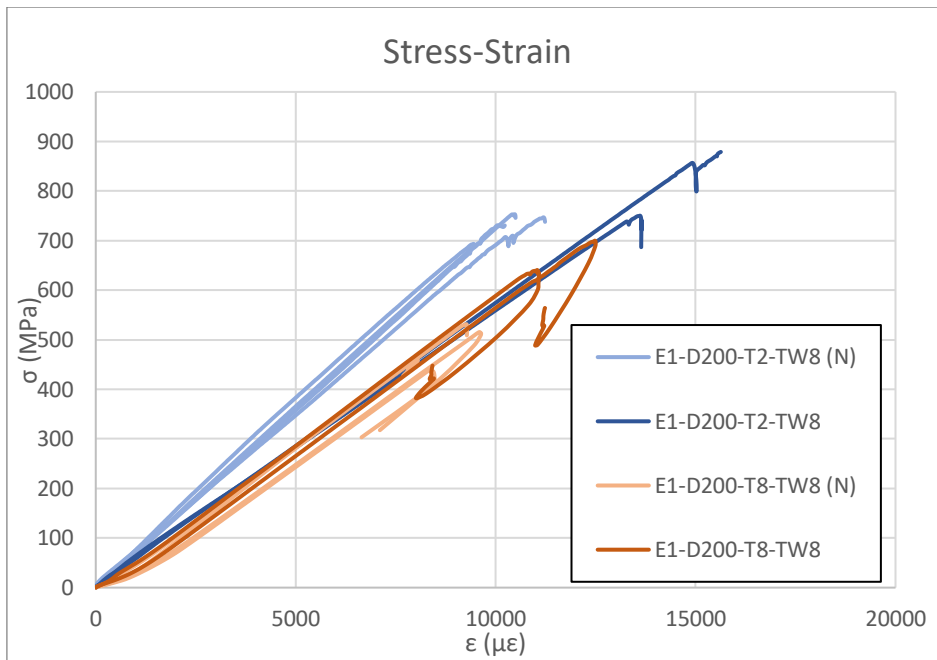
Σχήμα 7.17. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμίων με διαφορετικό πάχος



Σχήμα 7.18. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών με διαφορετικό πάχος

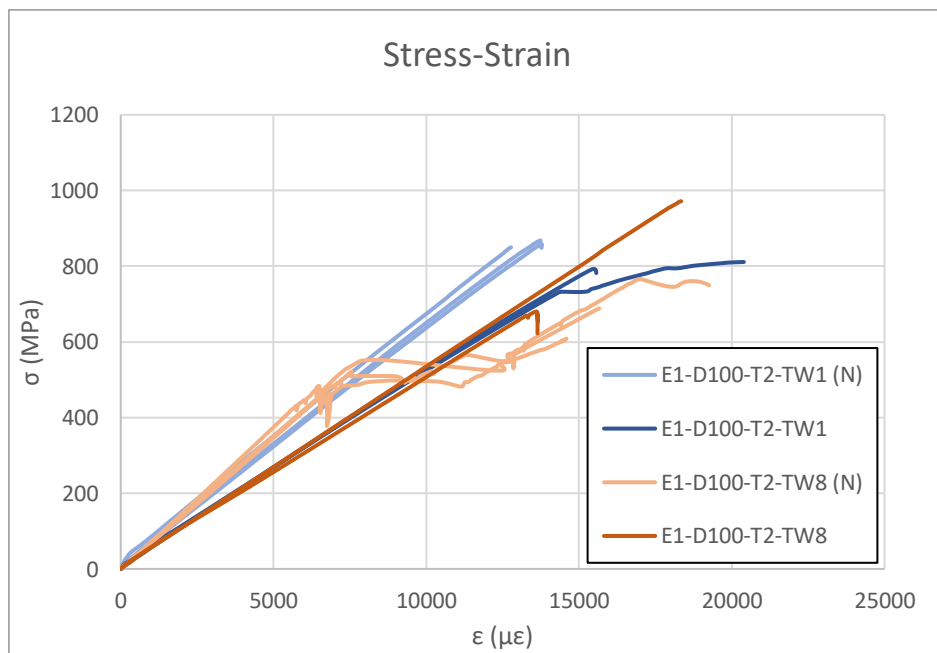


Σχήμα 7.19. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών με διαφορετικό πάχος

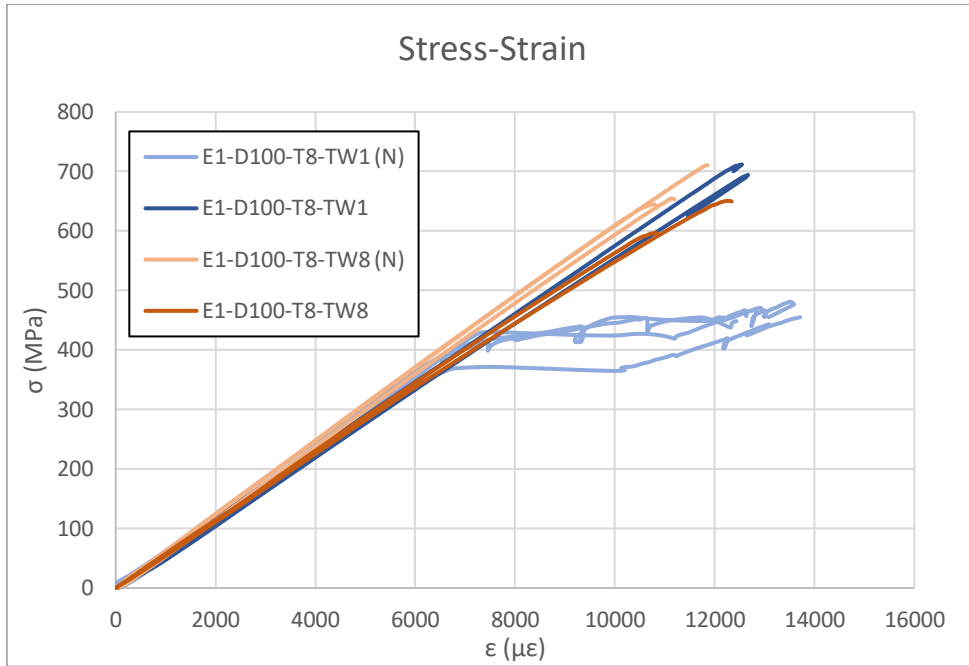


Σχήμα 7.20. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών με διαφορετικό πάχος

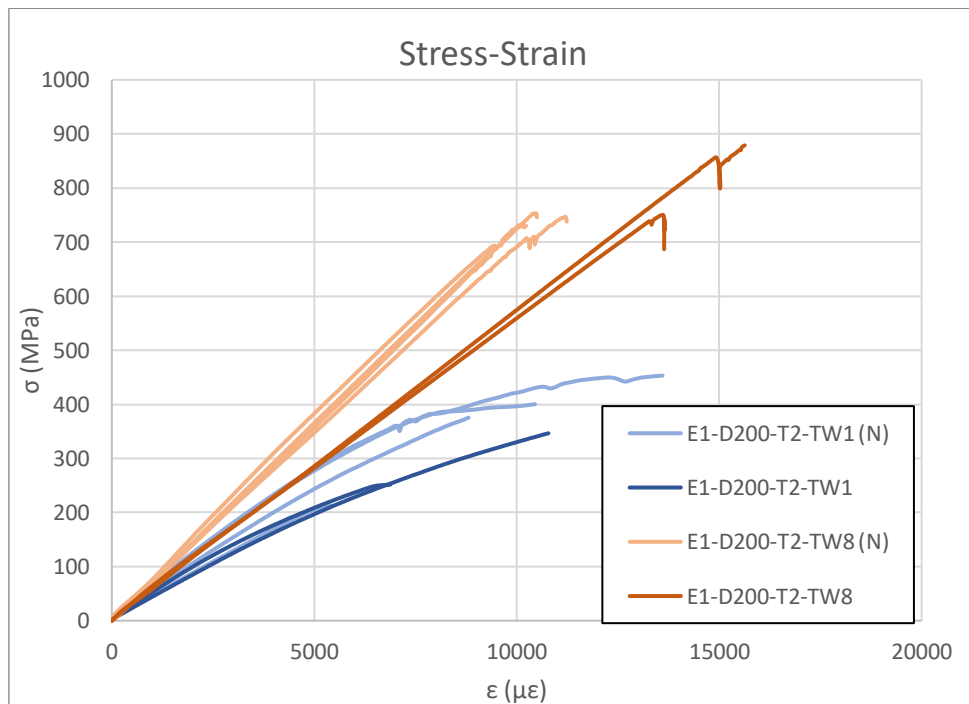
Number of tows (1 ή 8)



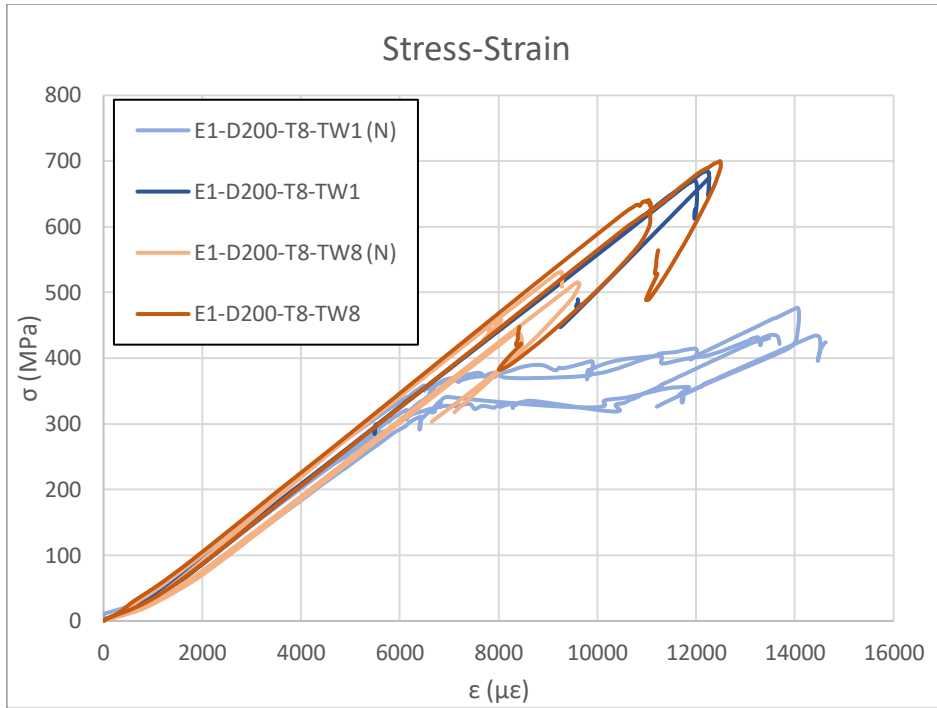
Σχήμα 7.21. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών με διαφορετικό αριθμό tows



Σχήμα 7.22. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών με διαφορετικό αριθμό tows



Σχήμα 7.23. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμών με διαφορετικό αριθμό tows



Σχήμα 7.24. Σύγκριση μηχανικής συμπεριφοράς δοκιμίων με διαφορετικό αριθμό tows

## **8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μετρήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες δοκιμίων από σύνθετο υλικό, ινών γυαλιού τύπου E και βινυλεστερικής ρητίνης, μέσω πειραματικών δοκιμών στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Επιπροσθέτως, εξετάστηκαν οι παράμετροι και ο τρόπος που αυτές επιδρούν στη μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων. Τα δοκίμια που μελετήθηκαν ήταν ευθύγραμμα (plane specimens) και δακτυλοειδή (ring specimens), τα οποία προέκυψαν από κυλίνδρους κατασκευασμένους από την B&T Composites, με τη μέθοδο περιέλιξης ινών (filament winding).

Οι μηχανικές ιδιότητες που εκτιμήθηκαν ήταν κατά κύριο λόγο 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 κάθετη ως προς αυτή των ινών και, τέλος, το μέτρο διάτμησης  $G_{12}$  και η μέγιστη διατμητική τάση θραύσης  $\tau_{12}$  στο επίπεδο των ινών. Επιπλέον, μελετήθηκαν και οι αντίστοιχες μέγιστες φορτίσεις  $F_i$  και οι μέγιστες παραμορφώσεις  $\epsilon_i$  στην εκάστοτε περίπτωση.

Για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, ακολουθήθηκαν οι εξής πειραματικές διαδικασίες:

- Μέθοδος διαιρούμενου δίσκου για τα  $E_1$ ,  $\sigma_{1,max}$ . Οι δοκιμές διεξήχθησαν βάσει του προτύπου ASTM D2290 με μικρές παραλλαγές στη διάταξη. Χρησιμοποιήθηκαν δακτυλοειδή δοκίμια με αλλά και χωρίς εγκοπές, προς παρατήρηση διαφορών στη συμπεριφορά τους.
- Μέθοδος εφελκυσμού κάθετα στις ίνες για τα  $E_2$ ,  $\sigma_{2,max}$ . Οι δοκιμές διεξήχθησαν βάσει του προτύπου ASTM D3039 με μικρές παραλλαγές στο εύρος μέτρησης του μέτρου ελαστικότητας. Χρησιμοποιήθηκαν ευθύγραμμα δοκίμια.
- Μέθοδος εφελκυσμού σε διεύθυνση γωνίας  $\pm 45^\circ$  ως προς τη διεύθυνση των ινών για τα  $G_{12}$ ,  $\tau_{12,max}$ . Οι δοκιμές διεξήχθησαν βάσει του προτύπου ASTM D3518. Χρησιμοποιήθηκαν ευθύγραμμα δοκίμια.

Οι μετρηθείσες τιμές, εκτός ορισμένων εξαιρέσεων, είναι κοντινές στις αντίστοιχες που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία και παρουσιάζουν ικανοποιητική επαναληψιμότητα.



Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εκτιμήθηκε με βάση τον συντελεστή διακύμανσης που υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση, ο οποίος ήταν στα όρια του 5-10%.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μία πρώτη εκτίμηση για την επίδραση της χρήσης βινυλεστερικής ρητίνης έναντι εποξικής. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με τα αντίστοιχα από τα δεδομένα παλαιότερων σχετικών διπλωματικών εργασιών, η βινυλεστερική ρητίνη φάνηκε να βελτιώνει την τάση θραύσης του σύνθετου υλικού στη διεύθυνση των ινών, ενώ το μέτρο ελαστικότητας δεν είχε μεγάλη διαφοροποίηση. Ωστόσο, η συμπεριφορά στη διεύθυνση κάθετα στις ίνες, καθώς και σε διάτμηση ήταν ελαφρώς υποβαθμισμένη. Το παραπάνω συμπέρασμα χρίζει βέβαια περαιτέρω μελέτης και εμβάθυνσης. Χρειάζονται περισσότερες δοκιμές με σύνθετα υλικά γυαλιού-βινυλεστέρα για τη λήψη και την αξιολόγηση επιπλέον δεδομένων.

Τελικά, παρατέθηκε και ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της παρούσας μελέτης. Αξιολογήθηκε συγκεκριμένα η επίδραση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων του σύνθετου υλικού στις τελικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, στη διεύθυνση των ινών. Αυτό πραγματοποιήθηκε μέσω της σύγκρισης των τιμών που μετρήθηκαν σε δύο ομάδες δοκιμίων με κοινές όλες τις παραμέτρους εκτός από μία. Μεταβλητά χαρακτηριστικά για τα δοκίμια ήταν η εσωτερική διάμετρος, το πάχος, ο αριθμός των συστάδων ινών (tows), καθώς και η ύπαρξη ή μη εγκοπών. Υπάρχουν και άλλες παράμετροι που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων, όπως τα υλικά κατασκευής, η δύναμη τάνυσης (tensioning force), ο αριθμός ινών ανά tow κ.α., όμως δεν μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν ήταν τα εξής:

- Η αύξηση της διαμέτρου των δοκιμίων με εγκοπές φάνηκε να υποβαθμίζει ελαφρώς τις μηχανικές ιδιότητες, κυρίως την τάση θραύσης. Ωστόσο, παρατηρώντας και τα δοκίμια χωρίς εγκοπές, η διάμετρος επιδρά με απρόβλεπτο τρόπο στη μηχανική συμπεριφορά τους.
- Μεγαλύτερο πάχος δοκιμίων παρατηρήθηκε να μην επιδρά ιδιαίτερα στο μέτρο ελαστικότητας, ωστόσο να μειώνει αισθητά την τάση θραύσης.
- Μεγαλύτερος αριθμός συστάδων ινών (tows) κατά βάση βελτίωσε ελάχιστα τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων με εγκοπές (στο εύρος του πειραματικού σφάλματος). Η διαφορετική συμπεριφορά όμως των δοκιμίων χωρίς εγκοπές

αποτρέπει την εξαγωγή κάποιου ασφαλούς συμπεράσματος για τη γενική επίδραση του αριθμού των tows.

- Τα δοκίμια με εγκοπές εμφάνισαν εν γένει μικρότερες τάσεις θραύσης, αλλά υψηλότερα μέτρα ελαστικότητας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι την σημαντικότερη επίδραση φάνηκε να ασκεί το πάχος των δοκιμίων στις τελικά μετρηθείσες τιμές.

Συνοψίζοντας, οι παραπάνω πειραματικές δοκιμές και τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για την ευρύτερη κατανόηση ενός σημαντικού τομέα έρευνας στην τεχνολογία των υλικών, αυτόν της μηχανικής συμπεριφοράς κατασκευών από σύνθετα υλικά με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών. Η συγκεκριμένη μέθοδος δύναται να παράγει προϊόντα με ικανοποιητικές ιδιότητες για χρήση στη ναυπηγική και όχι μόνο. Χρήσιμες πληροφορίες παρέχονται για την αντοχή στις διάφορες διευθύνσεις του υλικού, τη δυσκαμψία, καθώς και τη συμπεριφορά σε διάτμηση. Η αξιολόγηση της επίδρασης της χρήσης βινυλεστερικής ρητίνης στο σύνθετο υλικό έναντι των συμβατικών ρητινών (πολυεστερική και κυρίως εποξική) βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και απαιτούνται επιπλέον δεδομένα για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Τέλος, η διερεύνηση της επίδρασης των γεωμετρικών και κατασκευαστικών παραμέτρων των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως η εσωτερική διάμετρος, το πάχος και ο αριθμός των tows ενισχύει την κατανόηση των χαρακτηριστικών εκείνων που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες. Μπορεί μάλιστα να αξιοποιηθεί και για την ανάπτυξη της καινοτομίας και της βελτιστοποίησης στον τομέα των σύνθετων υλικών, ανοίγοντας νέες προοπτικές στο σχεδιασμό για προηγμένες εφαρμογές. Περαιτέρω έρευνα και πειραματικές δοκιμές μπορούν να υλοποιηθούν σε μελλοντική βάση, για την αξιολόγηση της επίδρασης και άλλων παραμέτρων, όπως η δύναμη τάνυσης των ινών, το πλάτος των δοκιμίων, ακόμα και διαφορετικά είδη ινών ή ρητίνης.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική**

- Θεμελάκης, Ι. (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. (2016). *ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ ΙΝΩΝ*, Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Ραυτογιάννης, Ι. (2013). *ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ, Τόμος – Ι, Μηχανική Συμπεριφορά*. Αθήνα, Εκδόσεις Συμεών.
- Τσούβαλης, Ν. (2022). *ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΚΑΦΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Αθήνα. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Χατζίνας, Π. (2021). *ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΑΠΟ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ*, Προπτυχιακή διπλωματική εργασία, Αθήνα. Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

### **Διεθνής**

- Agarwal, B. D. & Broutman, L. J. (1990). *Composites, Analysis and Performance of Fiber*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- American Society for Testing and Materials, (2020). *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 Plastic Pipe by Split Disk Method*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.

- American Society for Testing and Materials, (2000). *ASTM D2344, Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials, (2002). *ASTM D2584, Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins*. 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*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials, (1995). *ASTM D3410, Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading*. 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.
- American Society for Testing and Materials, (2002). *ASTM D3846, Standard Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials, (1999). *ASTM D5379, Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- American Society for Testing and Materials, (2015). *ASTM D7264, Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. Philadelphia: Annual Book of ASTM Standards.
- Fibermax. <https://www.fibermax.eu/el-gr/>
- Laiarinandrasana, L., Deviilliers, C., Oberti, S., Gaudichet, E., Fayolle, B. & Lucatelli, J. M. (2010). *Ring tests on high density polyethylene: Full investigation assisted by finite element modeling*. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2010.12.002>
- Ledjane et al., (2011). *Composite tubes for riser application in deep water*.

- Maxit et al., (2004). *Target strength modelling of submarines*. Nice, Undersea Defence Technology Conference.
- Papadakis, A. Z., Themelakis, J. G. & Tsouvalis, N. G. (2017). *The effect of geometric and manufacturing parameters on filament wound composites split disk test results*.
- Peters, S. T. (2011). *Composite Filament Winding*. Ohio, ASM International.
- Philippidis, P. & Roukis, G. (2015). *Static Tests on Ring Specimens for Mechanical Property Characterization of Filament Wound Composite Materials*.
- Sherfab. <https://www.sherfab.com/>
- United States Naval Ordnance Laboratory. (1964). *NOL RING TEST METHODS*. Office of Technical Services.
- US Department of Defense. (2002). *Composite Materials Handbook, Volume 1: Polymer Matrix Composites - Guidelines for Characterization of Structural Materials*. Composite Materials Handbook Series.
- Whitney, J. M., Daniel, I. M., & Pipes, R. B. (1982). *Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials*. (2nd ed.) Society for Experimental Mechanics.
- Wonderly, C. & Grenestedt, J. & Göran, F. & Cēpus, E. (2005). *Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.01.004>

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## Technical Data Sheet βινυλεστερικής ρητίνης

COMPOSITE POLYMERS

**DERAKANE®**  
EPOXY VINYL ESTER

### DERAKANE MOMENTUM™ 411-350 Epoxy Vinyl Ester Resin

JUNE 2006

#### A New Generation of Epoxy Vinyl Ester Resins

DERAKANE MOMENTUM 411-350 epoxy vinyl ester resin is based on bisphenol-A epoxy resin and provides resistance to a wide range of acids, alkalis, bleaches, and organic compounds for use in many chemical processing industry applications. DERAKANE MOMENTUM resins are a new generation of resins that can be used to improve fabrication efficiency and product quality. Their lighter color makes defects easier to see and correct while the resin is still workable. The resin's improved reactivity properties often permit an increase in the lay-up thickness per session. The longer stability provides additional flexibility to fabricators in storage and handling.

#### Typical Liquid Resin Properties

Property <sup>(1)</sup>	Value
Density, 25°C/77°F	1.046 g/mL
Dynamic Viscosity, 25°C/77°F	370 mPa·s
Kinematic Viscosity	350 cSt
Styrene Content	45%
Commercial Warranty <sup>(2)</sup> , Dark, 25°C/77°F	12 months

(1) Typical property values only, not to be construed as specifications.

(2) When stored in accordance with the recommended storage, Ashland warrants this product to remain within specifications for twelve months from date of manufacture. All things being equal, higher storage temperatures will reduce product stability and lower storage temperatures will extend product stability.

#### Applications and Fabrication Techniques

- FRP storage tanks, vessels, ducts, and on-site maintenance projects, particularly in chemical processing and pulp and paper operations.
- The resin is designed for ease of fabrication using hand lay-up, spray-up, filament winding, compression molding and resin transfer molding techniques, pultrusion and molded grating applications.
- An alternate viscosity, optimized for some vacuum infusion processes, is available as DERAKANE MOMENTUM™ 411-200 resin.

#### Benefits

- Provides resistance to wide range of acids, alkalis, bleaches, and solvents. This resin holds up in corrosive environments, postponing the need for equipment replacement.
- Tolerates heavy design loads without causing failure due to resin damage. This facilitates working with large weight-bearing equipment with confidence.
- Superior elongation and toughness provides FRP equipment with better impact resistance and less cracking due to cyclic temperature, pressure fluctuations, and mechanical shocks providing a safety factor against damage during process upsets or during shipping installation.
- When properly formulated and cured, complies with FDA regulation 21 CFR 177.2420, covering materials intended for repeated use in contact with food.



Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

® Registered trademark and ™ trademark of Ashland

\* Registered service mark of the American Chemistry Council

© 2002, 2004 Ashland. All Rights Reserved. • CWT-DS-344 Rev. 1

All statements, information and data presented herein are believed to be accurate and reliable but are not to be taken as a guarantee, express warranty or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose, or representation, express or implied, for which seller assumes legal responsibility, and they are offered solely for your consideration, investigation and verification. Statements or suggestions concerning possible use of this product are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe on any patent.

**ASHLAND**

**Gel Time Formulations**

The following table provides typical gel times for MEKP. "Starting point" formulations for MEKP, non-foaming MEKP alternatives, and BPO peroxides are available in separate product bulletins. These and other information are available at [www.derakane.com](http://www.derakane.com).

**MEKP Gel Time Table**

**Typical Gel Times<sup>(3)</sup> Using NOROX<sup>(4)</sup> MEKP-925H<sup>(5)</sup> and Cobalt Naphthenate-6%<sup>(6)</sup>**

Temperature	15 +/-5 Minutes	30 +/-10 Minutes	60 +/-15 Minutes
15°C/59°F	1.5 phr <sup>(7)</sup> MEKP 0.30 phr CoNap6% 0.60 phr DEA	1.5 phr MEKP 0.20 phr CoNap6%	1.5 phr MEKP 0.05 phr CoNap6%
20°C/68°F	1.5 phr MEKP 0.30 phr CoNap6%	1.0 phr MEKP 0.10 phr CoNap6%	1.0 phr MEKP 0.10 phr CoNap6% 0.02 phr 2,4-P
25°C/77°F	1.0 phr MEKP 0.2 phr CoNap6%	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6%	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6% 0.015 phr 2,4-P
30°C/86°F	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6%	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6% 0.015 phr 2,4-P	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6% 0.035 phr 2,4-P
35°C/95°F	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6% 0.01 phr 2,4-P	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6% 0.03 phr 2,4-P	1.0 phr MEKP 0.05 phr CoNap6% 0.06 phr 2,4-P

- (3) Thoroughly test any other materials in your application before full-scale use. Gel times may vary due to the reactive nature of these products. Always test a small quantity before formulating large quantities.  
 (4) Registered trademark of Norac Inc.  
 (5) Materials: NOROX MEKP-925H Methyl ethyl ketone peroxide (MEKP) or equivalent low hydrogen peroxide content MEKP, Cobalt Naphthenate-6% (CoNap6%), Diethylaniline (DEA), and 2,4-Pentanedione (2,4-P). Use of other MEKP or other additives may result in different gel time results.  
 (6) Use of cobalt octoate, especially in combination with 2,4-P can result in 20-30% slower gel times.  
 (7) Phr-parts per hundred resin molding compound

**Casting Properties**

**Typical Properties<sup>(1)</sup> of Postcured<sup>(8)</sup> Resin Clear Casting**

Property	SI	US Standard	Test Method
Tensile Strength	88 MPa	12,000 psi	ASTM D-638/ISO 527
Tensile Modulus	3.2 GPa	4.6 x 10 <sup>5</sup> psi	ASTM D-638/ISO 527
Tensile Elongation, Yield	5-6%	5-6%	ASTM D-638/ISO 527
Flexural Strength	150 MPa	22,000 psi	ASTM D-790/ISO 178
Flexural Modulus	3.4 GPa	4.9 x 10 <sup>5</sup> psi	ASTM D-790/ISO 178
Density	1.14 g/cm <sup>3</sup>		ASTM D-792/ISO 1183
Volume Shrinkage	7.8%	7.8%	
Heat Distortion Temperature <sup>(9)</sup>	105°C	220°F	ASTM D-648 Method A/ISO 75
Glass Transition Temperature, Tg2	120°C	250°F	ASTM D-3419/ISO 11359-2
Barcol Hardness	35	35	ASTM D-2583/EN50

- (1) Typical property values only, not to be construed as specifications. SI values reported to two significant figures; US standard values based on conversion.  
 (8) Cure schedule: 24 hours at room temperature; 2 hours at 120°C (250°F)  
 (9) Maximum stress: 1.8 MPa (264 psi)



Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

® Registered trademark and ™ trademark of Ashland  
 \* Registered service mark of the American Chemistry Council  
 © 2002, 2004 Ashland. All Rights Reserved. • CWT-09-344 Rev. 1

All statements, information and data presented herein are believed to be accurate and reliable but are not to be taken as a guarantee, express warranty or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose, or representation, express or implied, for which seller assumes legal responsibility, and they are offered solely for your consideration, investigation and verification. Statements or suggestions concerning possible use of this product are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe on any patent.

**ASHLAND**

Laminate Properties

Typical Properties<sup>(1)</sup> of Postcured<sup>(10)</sup> 6 mm (1/4") Laminate<sup>(11)</sup>

Property	SI	US Standard	Test Method
Tensile Strength	150 MPa	22,000 psi	ASTM D-3039/ISO 527
Tensile Modulus	12 GPa	1.7 x 10 <sup>6</sup> psi	ASTM D-3039/ISO 527
Flexural Strength	210 MPa	30,000	ASTM D-790/ISO 178
Flexural Modulus	8.1 GPa	1.2 x 10 <sup>6</sup> psi	ASTM D-790/ISO 178
Glass Content	40%	40%	ASTM D-2584/ISO 1172

(1) Typical property values only, not to be construed as specifications. SI values reported to two significant figures; US standard values based on conversion.

(10) Cure schedule: 24 hours at room temperature; 6 hours at 80°C (175°F)

(11) 6 mm (1/4") Construction - V/M/M/Wr/M/Wr/M

V - Continuous veil glass; M - Chopped strand mat; 450 g/m<sup>2</sup> (1.5 oz/yd<sup>2</sup>);

Wr - Woven roving, 800 g/m<sup>2</sup> (24 oz/yd<sup>2</sup>)

Safety and Handling Consideration

This resin contains ingredients which could be harmful if mishandled. Contact with skin and eyes should be avoided and necessary protective equipment and clothing should be worn.

Ashland maintains Material Safety Data Sheets on all of its products. Material Safety Data Sheets contain health and safety information for your development of appropriate product handling procedures to protect your employees and customers.

Our Material Safety Data Sheets should be read and understood by all of your supervisory personnel and employees before using Ashland's products in your facilities.

Recommended Storage:

Drums - Store at temperatures below 27°C/80°F. Storage life decreases with increasing storage temperature. Avoid exposure to heat sources such as direct sunlight or steam pipes. To avoid contamination of product with water, do not store outdoors. Keep sealed to prevent moisture pick-up and monomer loss. Rotate stock.

Bulk - See Ashland's Bulk Storage and Handling Manual for Polyesters and Vinyl Esters. A copy of this may be obtained from Composite Polymers at 1.614.790.3333.

Product Name	Product Code	Standard Package*
MOMENTUM 411-350	536-000	55-Gal Drum, Net Weight 452 Lbs. 210 Liter, Net Weight 205 Kg *Non-Returnable



Ashland is committed to the continuous evolution of technology and service solutions that promote health, safety and environmental protection around the world.

® Registered trademark and ™ trademark of Ashland  
\* Registered service mark of the American Chemistry Council  
© 2002, 2004 Ashland. All Rights Reserved. • CWT-DS-344 Rev. 1

All statements, information and data presented herein are believed to be accurate and reliable but are not to be taken as a guarantee, express warranty or implied warranty of merchantability or fitness for a particular purpose, or representation, express or implied, for which seller assumes legal responsibility, and they are offered solely for your consideration, investigation and verification. Statements or suggestions concerning possible use of this product are made without representation or warranty that any such use is free of patent infringement and are not recommendations to infringe on any patent.

ASHLAND



## Technical Data Sheet 无碱 无捻 玻璃纤维



# E6-CR 386T Direct Roving

For Filament Winding, Pultrusion, Weaving

386T Direct Roving is coated with a silane-based sizing compatible with unsaturated polyester, vinyl ester, and epoxy resins. It is designed for filament winding, pultrusion, and weaving applications. 386T is suitable for use in pipes, pressure vessels, gratings, and profiles, and the woven roving converted from it is used in boats and chemical storage tanks.



### Product Features

- Good process performance and low fuzz
- Compatibility with a multiple of resin systems
- Complete and fast wet-out
- Good mechanical properties of woven fabrics
- Excellent acid corrosion resistance

### Identification

Glass Type	E							
Type of Size	Silane							
Size Code	386T							
Linear Density (tex)	300	200	600	1100	2000	2200	2400	9600
		400	735	1200			4800	
Flament Diameter (μm)	13	16	17	17	21	22	24	31

### Technical Parameters

Linear Density (%)	Moisture Content (%)	Size Content (%)	Breakage Strength (N/tex)
ISO 1889	ISO 3344	ISO 1887	ISO 3341
±5	≤ 0.10	0.55±0.15	≥0.40

### Mechanical Properties

Mechanical Properties	Unit	Value	Resin	Method
Tensile Strength	MPa	2741	UP	ASTM D2343
Tensile Modulus	MPa	81232	UP	ASTM D2343
Tensile Strength	MPa	2673	EP	ASTM D2343
Tensile Modulus	MPa	81126	EP	ASTM D2343
Shear strength	MPa		epoxy	ASTM D2344
Shear strength retention (72 hr boiling)			epoxy	—

The above data are actual experimental values for E6CR24-2400-386T and for reference only.

### Storage

Unless otherwise specified, the fiberglass products should be stored in a dry, cool and moisture-proof area. The room temperature and humidity should be always maintained at 15°C ~ 35°C and 35% ~ 65%. It is best if the product is used within 12 months after production date. The fiberglass products should remain in their original packaging until just prior to user.

To ensure safety and avoid damage to the product, the pallets should not be stacked more than three layers high. When the pallets are stacked in 2 or 3 layers, special care should be taken to correctly and smoothly move the top pallet.

Note: There may be some slight deformation to the doffs, which will not affect the use.

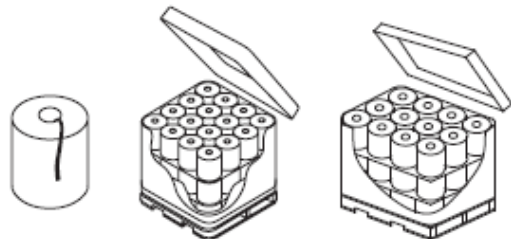
### Packaging

\* The product can be packed on pallet or in small cardboard boxes.

Package height mm (in)	260 (10.2)	260 (10.2)
Package inside diameter mm (in)	160 (6.3)	160 (6.3)
Package outside diameter mm (in)	270 (10.6)	310 (12.2)
Package weight kg (lb)	15.6 (34.4)	22 (48.5)

Number of layers	3	4	3	4
Number of doffs per layer	16		12	
Number of doffs per pallet	48	64	36	48
Net weight per pallet kg (lb)	750 (1653)	1000 (2205)	792 (1746)	1056 (2328)

Pallet length mm (in)	1120 (44.1)	1270 (50)
Pallet width mm (in)	1120 (44.1)	960 (37.8)
Pallet height mm (in)	940 (37)	1200 (47.2)



## JUSHI GROUP CO., LTD.

Add: Tongxiang Economic Development Zone, Zhejiang 314500, PRC  
 Domestic Sales: +86-573-88181016 Fax: +86-573-88136222  
 Http://www.jushi.com E-mail: info@jushi.com

International Sales: +86-573-88181026 Fax: +86-573-88181058  
 Customer Service: +86-573-88181017 Fax: +86-573-88181388

版权所有: © 巨石集团有限公司 © 巨石集团有限公司 注册商標