



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου, Αθήνα

☎ 21 07721413, 21 07721415, Fax: 21 07721412

«Χαρακτηρισμός σύνθετων υλικών ανθρακονημάτων κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών (filament winding)»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ιωάννη Εμμ. Επιτροπάκη

A.M: 02106015

Επιβλέπων: Δημήτριος Μανωλάκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73 Ζωγράφου, Αθήνα

☎ 21 07721413, 21 07721415, Fax: 21 07721412

«Χαρακτηρισμός σύνθετων υλικών ανθρακονημάτων κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών (filament winding)»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Ιωάννη Εμμ. Επιτροπάκη

A.M: 02106015

Επιβλέπων: Δημήτριος Μανωλάκος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
1.1.	ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	5
1.2.	ΛΟΓΟΙ ΠΟΥ ΟΔΗΓΗΣΑΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ.....	5
1.3.	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	6
1.4.	ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	8
2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΑΠΟ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΚΑΙ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ.....	9
2.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
2.2.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	10
2.3.	ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ	17
2.4.	ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΙΝΕΣ	26
2.5.	ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	27
2.6.	ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ.....	28
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ	30
3.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	30
3.2.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	32
3.3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ	42
4.	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	55
4.1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	55
4.2.	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	55
5.	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	64
5.1.	ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ 0590.....	64
5.2.	ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ 2090.....	67
5.3.	ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ 0545.....	69

1. Πρόλογος

1.1. Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της μελέτης είναι ο χαρακτηρισμός αξονοσυμμετρικών κατασκευών από σύνθετα υλικά με ανθρακονήματα για χρήση σε εφαρμογές κυρίως στο υποθαλάσσιο περιβάλλον. Τέτοιες εφαρμογές είναι οι υποθαλάσσιοι αγωγοί μεταφοράς φυσικού αερίου και πετρελαίου, καθώς και τα εξωτερικά κελύφη (γάστρες) υποβρυχίων οχημάτων (επανδρωμένων, τηλεκατευθυνόμενων, αυτόνομων και υβριδικών), που υπόκεινται σε μεγάλα εξωτερικά φορτία (υδροστατική πίεση έως 50 MPa) σε ιδιαίτερα αντίξοο περιβάλλον (υποθαλάσσιο). Οι εφαρμογές αυτές έχουν κοινά βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (γεωμετρία κυλινδρικής κατασκευής, υλικά κατασκευής, φορτίσεις), κοινό περιβάλλον χρήσης και για αυτό το λόγο μελετούνται από κοινού.

1.2. Λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή του θέματος

1.2.1. Υποθαλάσσιοι αγωγοί

Στους υποθαλάσσιους αγωγούς που χρησιμοποιούνται στην υπεράκτια (offshore) βιομηχανία άντλησης πετρελαίου και στην υποθαλάσσια διανομή φυσικού αερίου ή πετρελαίου διαπιστώνονται σοβαρότατα προβλήματα από τη χρήση των μεταλλικών αγωγών, κυρίως λόγω διάβρωσης. Το 25% της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου γίνεται από υπεράκτιες εξέδρες άντλησης. Πάνω από 20.000 εξέδρες βρίσκονται σε τέσσερεις περιοχές: Κόλπος Μεξικού, Περσικός Κόλπος, Δυτ. Αφρική, Βόρειος Θάλασσα. Η Εθνική Ακαδημία Επιστημών των ΗΠΑ εκτιμά ότι ο όγκος των διαρροών πετρελαίου/φυσικού αερίου στους τερματικούς σταθμούς και στο υποθαλάσσιο δίκτυο διανομής είναι 80.000 τόνοι για το 1979, 50.000 τόνοι για το 1981 και 100.000 τόνοι για το 2000. (πηγή Lloyd's List, March 27, 1998).

Κατά το Netherlands Institute for North Sea Research (NIOZ) Macrobenthos of the Dutch Continental Shelf, May 2000, το 1-3% της παγκόσμιας θαλάσσιας ρύπανσης προέρχεται από το δίκτυο διανομής των υποθαλάσσιων αγωγών. Ήδη, υπάρχει στροφή από τη σχετική βιομηχανία προς την αντικατάσταση των μεταλλικών αγωγών με αγωγούς κατασκευασμένους από σύνθετα υλικά.

Η διάβρωση προκαλεί τη μεγαλύτερη καταστροφή στο υλικό του συστήματος των αγωγών, μειώνει το χρόνο λειτουργίας, οδηγεί σε καταστάσεις ανάγκης, αυξάνει το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης, καθώς επίσης προκαλεί απώλειες του μεταφερόμενου προϊόντος, μειώνει την ποιότητά του και, τέλος, προκαλεί σοβαρή ρύπανση στο περιβάλλον. Καθοριστικό ρόλο στην απόφαση για την κατάργηση των μεταλλικών αγωγών και τη χρήση αγωγών από σύνθετα υλικά, διαδραματίζει η προστασία του περιβάλλοντος.

Η λύση για την αντιμετώπιση του αυξανόμενου προβλήματος αξιοπιστίας απόκρισης των υποθαλάσσιων αγωγών είναι η χρήση μη μεταλλικών αγωγών και ειδικότερα η αντικατάστασή τους με κατασκευές από προηγμένα σύνθετα υλικά. Οι αγωγοί από σύνθετα υλικά δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης. Χώρες πρωτοπόρες σε αυτή τη βιομηχανία και στην παραγωγή/μεταφορά ενέργειας, έχουν προβεί σε μελέτες αντικατάστασης των μεταλλικών αγωγών με αγωγούς από σύνθετα υλικά. Το 2002, η κυβέρνηση των ΗΠΑ διενήργησε σειρά ερευνών που κατέδειξε αυτή την αναγκαιότητα. Μια από τις μελέτες [4] που διενεργήθηκαν για το U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, αναφέρει "The goal of any future research should not be to make composites equal to steel pipe, but to make

composites the pipe material of choice for high-pressure large diameter natural gas transmission pipelines". Σταδιακά έχει ξεκινήσει η αντικατάσταση των μεταλλικών αγωγών με κατασκευές από σύνθετα υλικά.

1.2.2. Γάστρες υποβρυχίων οχημάτων

Η ολοένα και αυξανόμενη χρήση υποβρυχίων οχημάτων για επιστημονική έρευνα των ωκεανών και του πυθμένα, για εκμετάλλευση υποθαλάσσιων ενεργειακών πόρων, αλλά και η ανάγκη εκτέλεσης υποθαλάσσιων τεχνικών έργων, έχει οδηγήσει στην κατακόρυφη άνοδο της τεχνολογίας υποβρυχίων οχημάτων και της βιομηχανίας παραγωγής τους. Η ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση για εφαρμογές σε μεγαλύτερα βάθη και η απαίτηση για μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο έχουν οδηγήσει στην αντικατάσταση των μεταλλικών γαστρών με κατασκευή γαστρών από σύνθετα υλικά. Μεγάλα ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα έχουν εντάξει στην έρευνά τους τη μελέτη/εξέταση αυτού του προβλήματος.

Η ανάγκη για ανάληψη εργασιών των υποβρυχίων οχημάτων σε μεγαλύτερο βάθος, αλλά και η απαίτηση για αύξηση του ωφέλιμου φορτίου, οδηγούν την έρευνα προς αντικατάσταση των βαριών μεταλλικών γαστρών από ελαφρύτερες, εξ ίσου ανθεκτικές, κατασκευασμένες από προηγμένα σύνθετα υλικά που τα καθιστούν ελαφρύτερα με αυξημένη μηχανική και χημική συμπεριφορά.

Τα σύνθετα υλικά, και ειδικά εκείνα με ενίσχυση ανθρακονημάτων, αποτελούν την καλύτερη πρόταση για την κατασκευή των υποθαλάσσιων αγωγών και γαστρών υποβρυχίων οχημάτων, αφενός λόγω των υψηλών μηχανικών τους ιδιοτήτων σε συνδυασμό με το μικρό βάρος τους, αφετέρου δε λόγω της αυξημένης χημικής και αντιδιαβρωτικής αντοχής τους.

Αυτές οι κατασκευές είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν στο αντίξοο υποθαλάσσιο περιβάλλον, ενώ πρέπει να πληρούνται δύο βασικές συνθήκες για να βεβαιωθεί η ορθή συμπεριφορά/απόδοσή τους:

- α. Να είναι γνωστή η συμπεριφορά των υλικών στο συγκεκριμένο περιβάλλον
- β. Να γίνει σωστή εκτίμηση των μεθόδων που θα επιλεγούν για τον κατασκευαστικό τους σχεδιασμό.

1.3. Αντικείμενο της προτεινόμενης μελέτης

Το αντικείμενο της μελέτης είναι η καταγραφή των κατασκευαστικών μεθόδων για αξονοσυμμετρικές κατασκευές από προηγμένα σύνθετα υλικά (εποξειδικές ρητίνες και ανθρακονήματα) κατάλληλων για εφαρμογές στο υποθαλάσσιο περιβάλλον και σε συνθήκες υψηλής εξωτερικής φόρτισης (υδροστατικής πίεσης 5-50 MPa), που παράγονται με τη μέθοδο της περιέλιξης των ινών (filament winding) και έχουν πολυμεριστεί σε κλίβανο. Η μελέτη θα περιλάβει:

Βέλτιστη επιλογή υλικών (εποξειδικές ρητίνες και ανθρακονήματα) με βάση επιχειρησιακά, τεχνοοικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Διαδικασίες πειραματικού προσδιορισμού ιδιοτήτων υλικών.

Διαδικασίες ποιοτικού ελέγχου με μη καταστροφικές μεθόδους.

Κατασκευαστικό σχεδιασμό και υπολογιστική προσομοίωση της συμπεριφοράς των κατασκευών με κατάλληλα προηγμένα μαθηματικά εργαλεία (μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων). Ανάπτυξη γραμμικού και μη γραμμικού μοντέλου.

Οι βασικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι:

Ο καθορισμός της μηχανικής αντοχής των υλικών σε συνάρτηση με τις επιχειρησιακές απαιτήσεις αλλά και τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος που θα λειτουργήσει η κατασκευή. Η ορθή επιλογή κατάλληλου κατασκευαστικού σχεδιασμού αξονοσυμμετρικών κατασκευών

Η δημιουργία κατάλληλης υπολογιστικής προσομοίωσης με χρήση προηγμένης μαθηματικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των κατασκευών.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Νικόλαο Τσούβαλη και στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη τους καθ'όλη την διάρκεια των εργασιών για την παρακάτω διπλωματική εργασία.

1.4. Ενδεικτική Βιβλιογραφία

1. A.N. Anoshkin, A.A. Tashkinov, A.F. Larionov and A.B. Pospelov, "BIBLASTIC PIPES FOR HGH-PRESSURE OIL PIPELINE SYSTEMS", Mechanics of Composite Materials, Vol 36, 3, 2000.
2. K.I. Zaitsev, "To the problem of designing plastic pipelines in oil and gas industry," Stroitel' stvo Truboprovodov, No. 5, 14-18 (1995).
3. A. S. Obukhov, Design of Chemical Equipment of Glass-Fiber-Reinforced Composites and Plastics [in Russian], Mashinostroenie, Moscow (1995).
4. Patrick Laney, «Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas», Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Bechtel BWXT Idaho, LLC, 2002
5. P. DAVIES & P. CHAUCHOT, "Underwater Structures", Ocean Engineering Department, IFREMER, Mechanics Of Composite Materials and Structures, NATO Science Series, VOL 361, 1998.
6. K.H.G. Ashbee, FUNDAMENTAL PRINCIPLES OF FIBER REINFORCED COMPOSITES", 1991
7. Lawrence E. Malvern "Introduction to the mechanics of a continues medium", Prentice-Hall Inc, 1969
8. Jack R. Vinson "The behavior of shells composed of isotropic and composite materials", 1993.
9. J.Y. Han, H.Y. Jung, J.R. Cho, J.H. Choi, W.B. Bae, «Buckling analysis and test of composite shells under hydrostatic pressure», journal of materials processing technology 201 (2008) pp742–745.
10. Myung-Hun Kim, Jong-Rae Cho², Won-Byong Bae, Jin-Hwe Kweon, Jin-Ho Choi, Sang-Rae Cho and Yun-Sik Cho, «Buckling Analysis of Filament-Wound Thick Composite Cylinder under Hydrostatic Pressure», INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING Vol. 11, No. 6, pp. 909-913 DECEMBER, 2010

2. Πειραματικός Προσδιορισμός Μηχανικών Ιδιοτήτων Σύνθετου Υλικού από Εποξειδική Ρητίνη και Ανθρακονήματα

2.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διπλωματική εργασία περιγράφει τον πειραματικό προσδιορισμό της ποιότητας κατασκευής και των μηχανικών ιδιοτήτων σύνθετων υλικών από ανθρακονήματα που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ο πειραματικός χαρακτηρισμός των σύνθετων υλικών πραγματοποιήθηκε από τον Ιούλιο μέχρι και τον Οκτώβριο του 2011 και περιελάμβανε τα εξής:

2.1.1 Δοκιμές αντοχής σε εφελκυσμό

- Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα παράλληλο στην κατεύθυνση των ινών (0°)
- Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα κάθετο με την κατεύθυνση των ινών (90°)
- Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με γωνία στρώσεων $\pm 45^\circ$ για τον προσδιορισμό του συνεπίπεδου μέτρου διάτμησης

2.1.2 Δοκιμές αντοχής σε θλίψη

- Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα παράλληλο με την κατεύθυνση των ινών (0°)
- Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα κάθετο στην κατεύθυνση των ινών (90°).

2.1.3 Μετρήσεις περιεκτικότητας ινών κατά βάρος

- Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων

2.1.4 Μετρήσεις πυκνότητας σύνθετου υλικού

- Δοκιμές στις πλάκες σύνθετου υλικού ανθρακονημάτων μετά την κοπή των δοκιμίων

2.1.5 Μετρήσεις σκληρότητας σύνθετου υλικού

- Δοκιμές στις πλάκες σύνθετου υλικού ανθρακονημάτων πριν την κοπή των δοκιμίων

Όλα τα επίπεδα δοκίμια κόπηκαν από επίπεδες πλάκες σύνθετου υλικού, που κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T Τιριακίδης με τη μέθοδο της εκ περιστροφής περιέλιξης (filament wound method) και χρησιμοποιώντας ειδική διάταξη περιστρεφόμενου καλουπιού. Η συγκεκριμένη μέθοδος της κατασκευής πλακών με περιέλιξη αναπτύχθηκε πειραματικά από την B&T Τιριακίδης σε συνεργασία με το ENT, ΕΜΠ. Όσον αφορά στη γωνία περιέλιξης, οι πλάκες κατασκευάστηκαν με περιφερειακή περιέλιξη (90°), εκτός των πλακών που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του μέτρου διάτμησης, οι οποίες κατασκευάστηκαν με γωνία $\pm 45^\circ$. Το ειδικό καλούπι φαίνεται στη Φωτ. 1.



Φωτ. 1: Διαδικασία κατασκευής πλάκας σύνθετου υλικού με τη μέθοδο της εκ περιστροφής περιέλιξης

2.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.2.1. Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ISO 527-4:1997 (Plastics - Determination of tensile properties - Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites), ISO 527-1:1993 (Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 1: General principles), ISO 527-1:1996 (Plastics. Determination of tensile properties. General principles), ASTM D3039/D3039M-95a (Standard Test Method for Tensile of Polymer Matrix Composite Materials) και ASTM D3518/D3518M-94 (Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate).

2.2.2. Η υδραυλική μηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002, Class C.

2.2.3. Το σύστημα συγκράτησης των δοκιμών είναι υδραυλικό. Η πίεση των αρπάγων που ασκήθηκε στα δοκίμια ήταν περίπου 1 MPa.

2.2.4. Η ταχύτητα επιβολής του εφελκυστικού φορτίου ήταν 1 mm/min.

2.2.5. Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε ως εξής:

- α. Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα παράλληλο με την κατεύθυνση των ινών (0°).
- β. Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα κάθετο στην κατεύθυνση των ινών (90°).
- γ. Δοκιμές σε δοκίμια ανθρακονημάτων με γωνία στρώσεων $\pm 45^\circ$.

2.2.6. Για την κατασκευή του σύνθετου υλικού από ανθρακονήματα και εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω πρώτες ύλες

- Εποξική ρητίνη: Araldite LY556
- Σκληρυντής: Anhydride Hardener HUNTSMAN Aradur 917 CH
- Επιταχυντής: HUNTSMAN DY 070
- Ως ενίσχυση (Reinforcement) χρησιμοποιήθηκε ανθρακόνημα TORAYCA T700SC -1200-50C με lot TY-025B και πιστοποιημένο σύμφωνα με ISO-3951

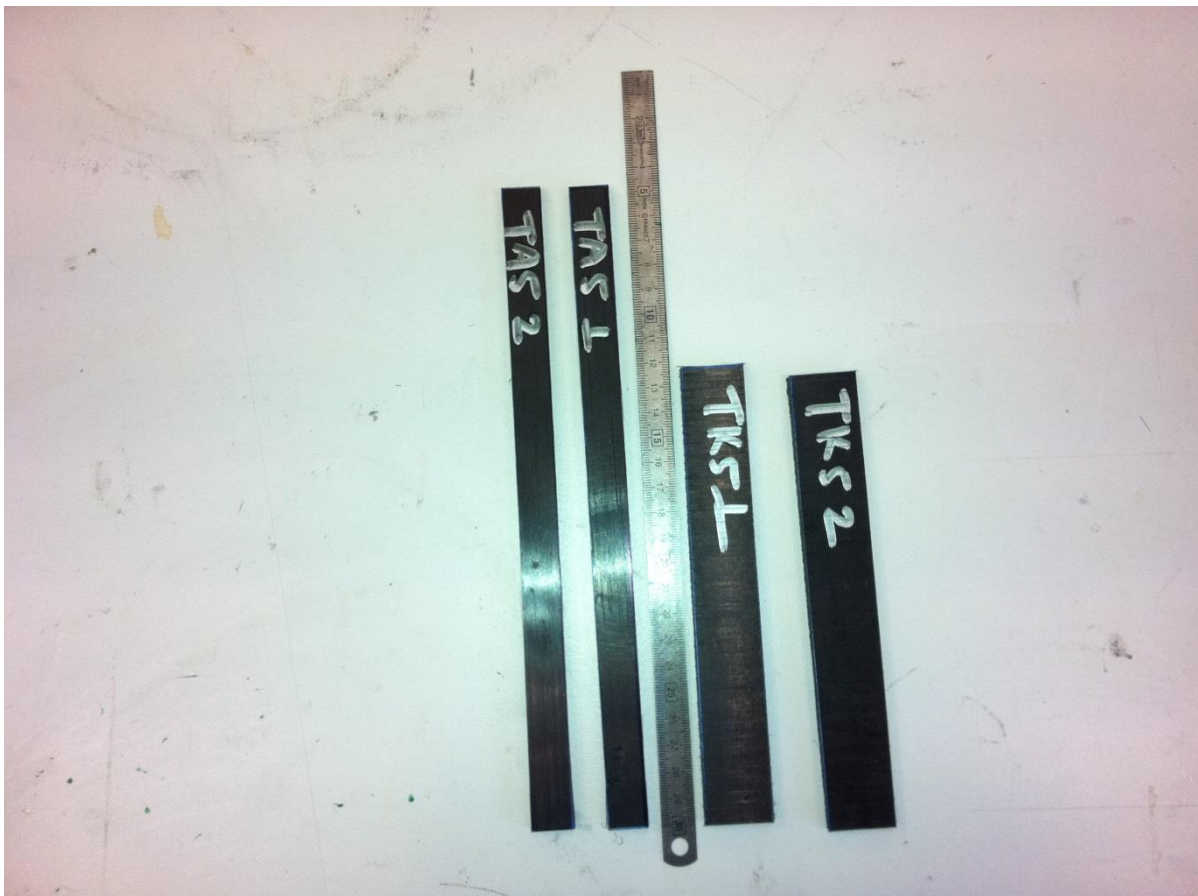
2.2.7. Τα δοκίμια από ανθρακονήματα διαστασιολογήθηκαν και ονοματίστηκαν με τρία γράμματα ακολουθούμενα από τον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το υλικό κατασκευής των νημάτων «C» (Carbon), το δεύτερο τη φόρτιση «T» (Tension – Εφελκυσμός) και το τρίτο τη διάταξη των ινών ως προς τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου ο οποίος ταυτίζεται με τον άξονα επιβολής του εφελκυστικού φορτίου. Το τρίτο γράμμα έλαβε τους προσδιορισμούς «A» για την κατεύθυνση των ινών κάθετα (Across-plane) και «I» για την κατεύθυνση των ινών παράλληλα (In-plane) με τον άξονα του δοκιμίου. Οι διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στους Πίνακες Π1 και Π2 για τα δοκίμια με κατεύθυνση ινών κάθετη και παράλληλη στον άξονα του δοκιμίου, αντίστοιχα.

Πίνακας Π1. Διαστάσεις Δοκιμίων Από Ανθρακονήματα Με Κατεύθυνση Ινών Κάθετη Στον Άξονα Του Δοκιμίου

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ						
	CTA1	CTA2	CTA3	CTA4	CTA5	CTA6	CTA7
ΠΑΧΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	4.33	4.53	4.53	4.57	4.62	4.60	4.62
Μέγιστη τιμή	4.40	4.70	4.70	4.70	4.85	4.80	4.75
Ελάχιστη τιμή	4.30	4.30	4.30	4.40	4.40	4.40	4.50
ΠΛΑΤΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	25.6	25.93	25.75	25.38	25.63	26.00	25.43
Μέγιστη τιμή	26.0	26.00	25.95	25.75	25.80	25.50	25.90
Ελάχιστη τιμή	25.0	25.80	25.40	25.00	25.40	25.50	25.00

Πίνακας Π2. Διαστάσεις Δοκιμών Από Ανθρακονήματα Με Κατεύθυνση Ινών
Παράλληλη Στον Άξονα Του Δοκιμίου

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ						
	CTI1	CTI2	CTI3	CTI4	CTI5	CTI6	CTI7
ΠΑΧΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	4.80	4.80	4.67	4.83	4.83	4.87	4.83
Μέγιστη τιμή	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Ελάχιστη τιμή	4.40	4.40	4.40	4.50	4.60	4.60	4.50
ΠΛΑΤΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	15.50	15.40	15.10	15.87	14.13	16.13	15.53
Μέγιστη τιμή	16.00	15.50	15.30	16.00	14.40	16.40	16.00
Ελάχιστη τιμή	15.20	15.20	15.00	15.60	14.00	16.00	15.00



Φωτ. 2: Δοκίμια εφελκυσμού. Αριστερά δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα παράλληλο στην κατεύθυνση των ινών. Δεξιά δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα κάθετο με την κατεύθυνση των ινών.

2.2.8. Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού προκειμένου να υπολογισθεί το μέτρο διάτμησης διαστασιολογήθηκαν και ονοματίστηκαν με τρία γράμματα ακολουθούμενα από τον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το υλικό κατασκευής των νημάτων «C» (Carbon), το δεύτερο την φόρτιση «T» (Tension – Εφελκυσμός), ενώ το τρίτο γράμμα έλαβε τον προσδιορισμό «S» (Shear) για το ζητούμενο μέτρο διάτμησης. Οι διαστάσεις των δοκιμίων φαίνονται στον Πίνακα Π3.

Πίνακας Π3. Διαστάσεις Δοκιμίων Από Ανθρακονήματα σειράς CTS

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ						
	CTS1	CTS2	CTS3	CTS4	CTS5	CTS6	CTS7
ΠΑΧΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	3.76	4.50	3.60	3.88	3.56	3.52	4.94
Μέγιστη τιμή	4.00	4.70	3.90	4.10	3.70	3.70	5.40
Ελάχιστη τιμή	3.60	4.30	3.20	3.70	3.40	3.40	4.50
ΠΛΑΤΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	26.40	27.20	25.47	26.13	25.77	25.77	25.93
Μέγιστη τιμή	26.80	27.20	26.30	26.50	26.00	26.10	26.10
Ελάχιστη τιμή	26.10	27.10	25.00	25.90	25.50	25.20	26.10



Φωτ. 3: Δοκίμια ανθρακονημάτων με γωνία στρώσεων $\pm 45^\circ$ για τον προσδιορισμό του συνεπίπεδου μέτρου διάτμησης.

2.2.9. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με τη βοήθεια ενός επιμηκνσιομέτρου (extensometer MTS, model 630.12-50) που προσαρμόζεται στο υπό δοκιμή δοκίμιο.

2.2.10. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Οι επί μέρους μετρήσεις στα δοκίμια από ανθρακονήματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

***Πίνακας Π4.** Μετρήσεις δοκιμών από ανθρακονήματα με κατεύθυνση ινών παράλληλη στον άξονα του δοκιμίου (κατηγορία δοκιμών CTI)*

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση σ_{u1} (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E_1 (GPa)
CTI1	756.69	137.9
CTI2	919.53	118.0
CTI3	1097.11	121.7
CTI4	873.71	112.8
CTI6	949.74	115.4
CTI7	810.82	121.6

***Πίνακας Π5.** Μετρήσεις δοκιμών από ανθρακονήματα με κατεύθυνση ινών κάθετη στον άξονα του δοκιμίου (κατηγορία δοκιμών CTA)*

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση σ_{u2} (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)
CTA2	25.63	8.5
CTA3	15.99	8.0
CTA4	24.96	7.8
CTA5	21.58	8.3
CTA6	21.22	8.1
CTA7	16.92	8.0

Σημείωση: Το Δοκίμιο CTA1 καταστράφηκε κατά τη διαδικασία προετοιμασίας της δοκιμής

Πίνακας Π6. Μετρήσεις δοκιμών από ανθρακονήματα κατηγορίας CTS

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση τ_u (MPa)	Μέτρο διάτμησης G_{12} (GPa)
CTS1	88.86	8.00
CTS3	65.48	6.45
CTS4	81.65	6.65
CTS5	81.78	7.75
CTS6	69.04	6.75

Τα μέτρα ελαστικότητας υπολογίστηκαν στα τμήματα των καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων μεταξύ των 500 και 2500 microstrains, σύμφωνα με την παράγραφο 10.3, του προτύπου ISO 527-1:1996.

2.2.10.1. Οι αριθμητικές μέσες τιμές των ιδιοτήτων που μετρήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας Π7. Οι αριθμητικές μέσες τιμές των ιδιοτήτων.

	Μέγιστη Τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέτρο διάτμησης G_{12} (GPa)
CTI	$\sigma_{u1} = 901.27$	$E_1 = 121.23$	-
CTA	$\sigma_{u2} = 21.05$	$E_2 = 8.12$	-
CTS	$\tau_u = 77.36$	-	7.12

2.2.10.2. Η τυπική απόκλιση (standard deviation) και ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς (coefficient of variation) των επί μέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο, καθώς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (95% confidence interval of mean value) για κάθε μία από τις ιδιότητες που μετρήθηκαν, είναι:

Πίνακας Π8. Η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής των επιμέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο.

		Μέγιστη Τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέτρο διάτμησης G₁₂ (GPa)
CTA	Τυπική απόκλιση	3.98	0.248	-
	Συντελεστής διακύμανσης	0.19	0.031	-
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	1.10	68.38	-
CTI	Τυπική απόκλιση	119.10	8.87	-
	Συντελεστής διακύμανσης	0.132	0.073	-
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	32.79	2.44	-
CTS	Τυπική απόκλιση	9.75	-	0.703
	Συντελεστής διακύμανσης	0.126	-	0.099
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	2.94	-	0.212

2.2.10.3. Οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των τριών σειρών δοκιμών CTI, CTA και CTS παρουσιάζονται στα Σχήματα 1 έως 5 μετά το τέλος του εδαφίου 2.3.

2.3 ΔΟΚΙΜΕΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.3.1. Η πειραματική δοκιμή στα επίπεδα δοκίμια πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ISO 14126.

2.3.2. Η υδραυλική μηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές, είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002, Class C.

2.3.3. Στα πλαίσια του προτύπου κατασκευάστηκαν tabs τα οποία και κολλήθηκαν στα δοκίμια. Για την κατασκευή των tabs χρησιμοποιήθηκε εποξική ρητίνη και σκληρυντής σε αναλογία 1:3. Τα tabs κατασκευάστηκαν με 3 στρώσεις υαλοϋφάσματος UD ώστε το τελικό πάχος των tabs να μην ξεπερνάει το 1 mm.

2.3.4. Το σύστημα συγκράτησης των δοκιμών είναι υδραυλικό. Η πίεση των αρπάγων που ασκήθηκε στα δοκίμια ήταν περίπου 1 MPa.

2.3.5. Η ταχύτητα επιβολής του εφελκυστικού φορτίου ήταν 1 mm/min.

2.3.6. Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε ως εξής:

- α. Δοκιμές σε επίπεδα δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα παράλληλο με την κατεύθυνση των ινών (0°)
- β. Δοκιμές σε επίπεδα δοκίμια ανθρακονημάτων με άξονα κάθετο στην κατεύθυνση των ινών (90°)

2.3.7. Για την κατασκευή των συνθέτων υλικών χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω πρώτες ύλες:

2.3.7.1. Σύνθετο υλικό από ανθρακονήματα και εποξειδικές ρητίνες

- Εποξική ρητίνη: Araldite LY556
- Σκληρυντής: Anhydride Hardener HUNTSMAN Aradur 917 CH
- Επιταχυντής: HUNTSMAN DY 070
- Ως σπλισμός (Reinforcement) χρησιμοποιήθηκε ανθρακόνημα TORAYCA T700SC -1200-50C με lot TY-025B και πιστοποιημένο σύμφωνα με ISO-3951

2.3.8. Τα δοκίμια από ανθρακονήματα που υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης διαστασιολογήθηκαν και ονοματίστηκαν με τρία γράμματα ακολουθούμενα από τον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου. Το πρώτο γράμμα χαρακτηρίζει το υλικό κατασκευής των νημάτων «C» (Carbon), το δεύτερο την φόρτιση «C» (Compression – Θλίψη) και το τρίτο τη διάταξη των ινών ως προς τον διαμήκη άξονα του δοκιμίου ο οποίος ταυτίζεται με τον άξονα επιβολής του εφελκυστικού φορτίου. Το τρίτο γράμμα έλαβε τους προσδιορισμούς «A» για την κατεύθυνση των ινών κάθετα (Across-plane) και «I» για την κατεύθυνση των ινών παράλληλα (In-plane) με τον άξονα του δοκιμίου. Οι διαστάσεις των δοκιμών φαίνονται στους Πίνακες Π9 και Π10 για τα δοκίμια με κατεύθυνση ινών κάθετη και παράλληλη στον άξονα του δοκιμίου, αντίστοιχα.

Πίνακας Π9. Διαστάσεις Δοκιμών Από Ανθρακονήματα Με Κατεύθυνση Ινών
Κάθετη Στον Άξονα Του Δοκιμίου

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ							
	CCA1	CCA2	CCA3	CCA4	CCA5	CCA6	CCA7	CCA8
ΠΑΧΟΣ (mm)								
Μέσος όρος	4.80	4.30	4.45	4.80	4.88	4.80	4.75	4.60
Μέγιστη τιμή	4.80	4.30	4.45	4.80	4.90	4.80	4.75	4.60
Ελάχιστη τιμή	4.80	4.30	4.45	4.80	4.85	4.80	4.75	4.60
ΠΛΑΤΟΣ (mm)								
Μέσος όρος	11.47	11.15	11.20	11.90	11.03	12.38	11.22	11.32
Μέγιστη τιμή	11.50	11.45	11.60	12.00	11.40	12.60	11.35	11.65
Ελάχιστη τιμή	11.40	11.00	10.70	11.80	10.70	12.00	11.10	11.10

Πίνακας Π10. Διαστάσεις Δοκιμών Από Ανθρακονήματα Με Κατεύθυνση Ινών
Παράλληλη Στον Άξονα Του Δοκιμίου

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ						
	CCI1	CCI2	CCI3	CCI4	CCI5	CCI6	CCI7
ΠΑΧΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	4.65	4.65	4.65	4.50	4.60	4.60	4.50
Μέγιστη τιμή	4.65	4.65	4.65	4.50	4.60	4.60	4.45
Ελάχιστη τιμή	4.65	4.65	4.65	4.50	4.60	4.60	4.48
ΠΛΑΤΟΣ (mm)							
Μέσος όρος	12.47	12.13	11.20	11.33	11.12	12.33	12.83
Μέγιστη τιμή	13.10	12.20	11.70	11.70	11.45	12.40	13.60
Ελάχιστη τιμή	12.00	12.00	10.80	11.10	10.80	12.30	12.30



Φωτ. 4: Δοκίμιο ανθρακονημάτων με άξονα κάθετο στην κατεύθυνση των ινών. Φαίνονται και τα tabs που κατασκευάστηκαν για την δοκιμή.



Φωτ. 5: Δοκίμιο ανθρακονημάτων με άξονα παράλληλο με την κατεύθυνση των ινών έτοιμο για την δοκιμή.

2.3.9. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Οι επί μέρους μετρήσεις στα δοκίμια από ανθρακονήματα φαίνονται στους παρακάτω πίνακες:

Πίνακας Π11. Μετρήσεις δοκιμών από ανθρακονήματα με κατεύθυνση ινών παράλληλη στον άξονα του δοκιμίου (κατηγορία δοκιμών CCI)

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση σ_{u1} (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E_1 (GPa)	Λόγος Poisson ν_{12}
CCI2	264.55	113.3	0.564
CCI3	316.07	102.8	-
CCI4	336.93	105.6	0.275
CCI5	366.51	124.1	0.275

Σημείωση 1: Το Δοκίμιο CCI1 καταστράφηκε κατά τη διαδικασία προετοιμασίας της δοκιμής

Σημείωση 2: Στο Δοκίμιο CCI3 κατά τη δοκιμή καταστράφηκε το transverse strain gauge με αποτέλεσμα την αδυναμία υπολογισμού του λόγου Poisson

Πίνακας Π12. Μετρήσεις δοκιμών από ανθρακονήματα με κατεύθυνση ινών κάθετη στον άξονα του δοκιμίου (κατηγορία δοκιμών CCA)

Δοκίμιο	Μέγιστη Τάση σ_{u2} (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)	Λόγος Poisson ν_{21}
CCA1	52.28	7.6	0.032
CCA2	77.26	5.8	0.026
CCA8	82.99	9.8	0.017

Σημείωση: Τα Δοκίμια CCA3, CCA4, CCA5, CCA6, CCA8 καταστράφηκαν κατά τη διαδικασία προετοιμασίας της δοκιμής

Τα μέτρα ελαστικότητας υπολογίστηκαν στα τμήματα των καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων μεταξύ των 500 και 2500 microstrains, σύμφωνα με την παράγραφο 10, του προτύπου ISO 14126.

2.3.9.1. Οι αριθμητικές μέσες τιμές των ιδιοτήτων που μετρήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας Π13. Οι αριθμητικές μέσες τιμές των ιδιοτήτων.

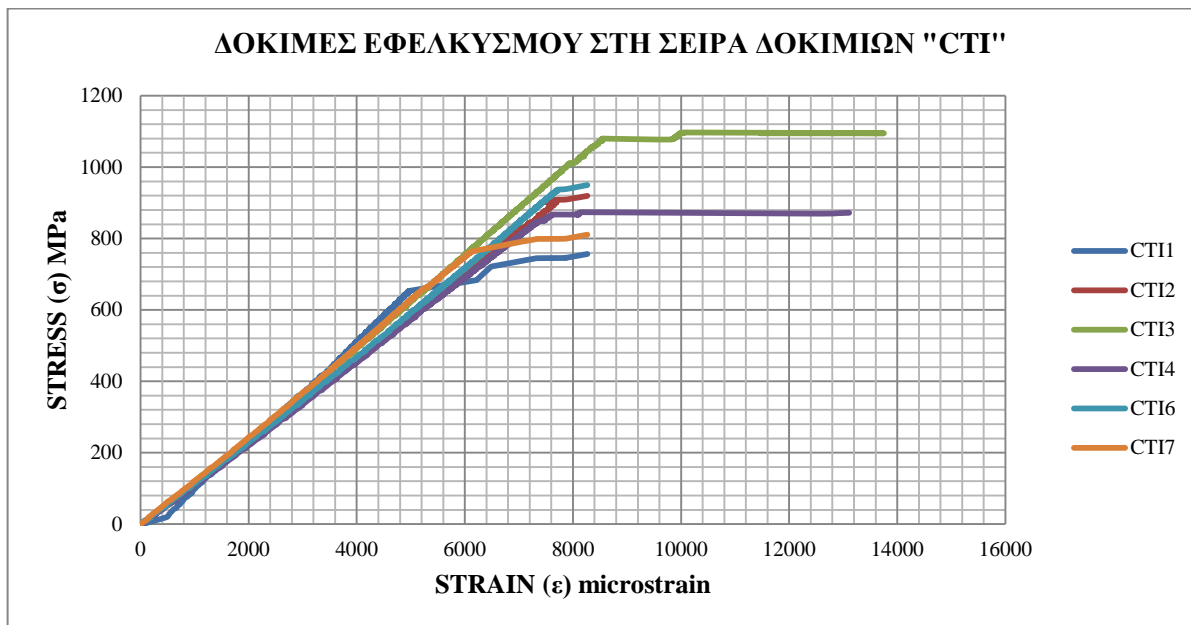
	Μέγιστη Τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson
CCI	$\sigma_{u1} = 321.02$	$E_1 = 111.45$	$\nu_{12} = 0.39$
CCA	$\sigma_{u2} = 70.84$	$E_2 = 7.73$	$\nu_{21} = 0.02$

2.3.9.2. Η τυπική απόκλιση (standard deviation) και ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς (coefficient of variation) των επί μέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο, καθώς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (95% confidence interval of mean value) για κάθε μία από τις ιδιότητες που μετρήθηκαν, είναι:

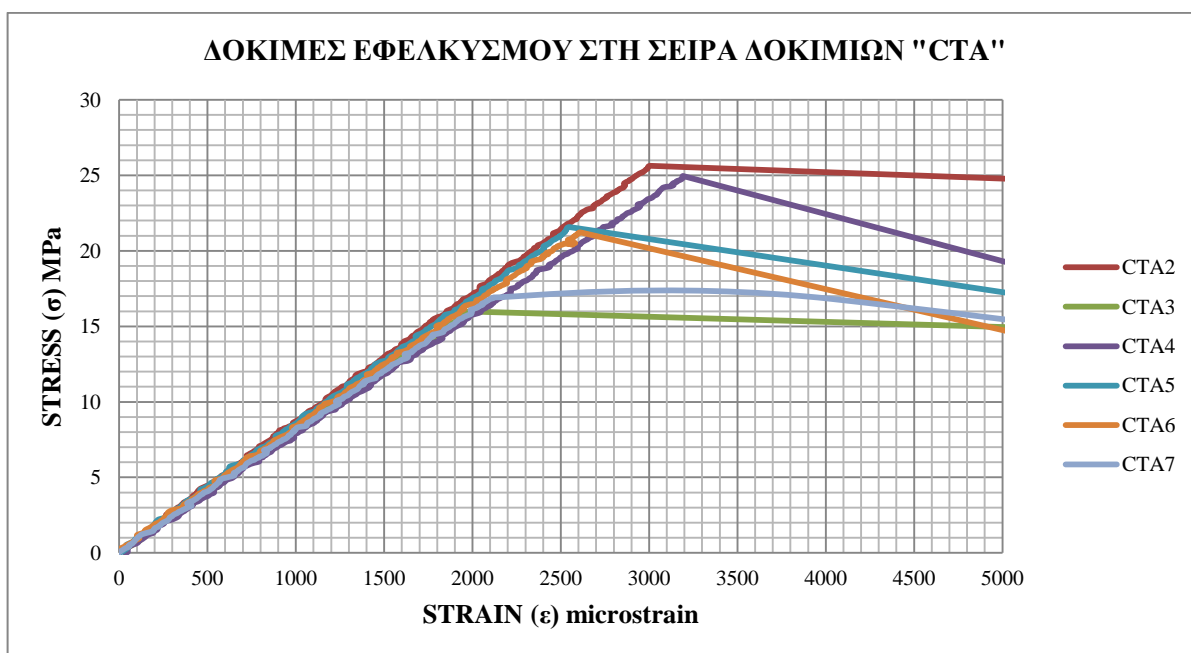
Πίνακας Π14. Η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής των επιμέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο.

		Μέγιστη Τάση (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson
CCA	Τυπική απόκλιση	16.33	2.003	0.01
	Συντελεστής διακύμανσης	0.231	0.259	0.3161
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	6.36	7.80	0.0031
CCI	Τυπική απόκλιση	42.96	9.53	0.20
	Συντελεστής διακύμανσης	0.134	0.085	0.5077
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	14.47	3.214	0.0762

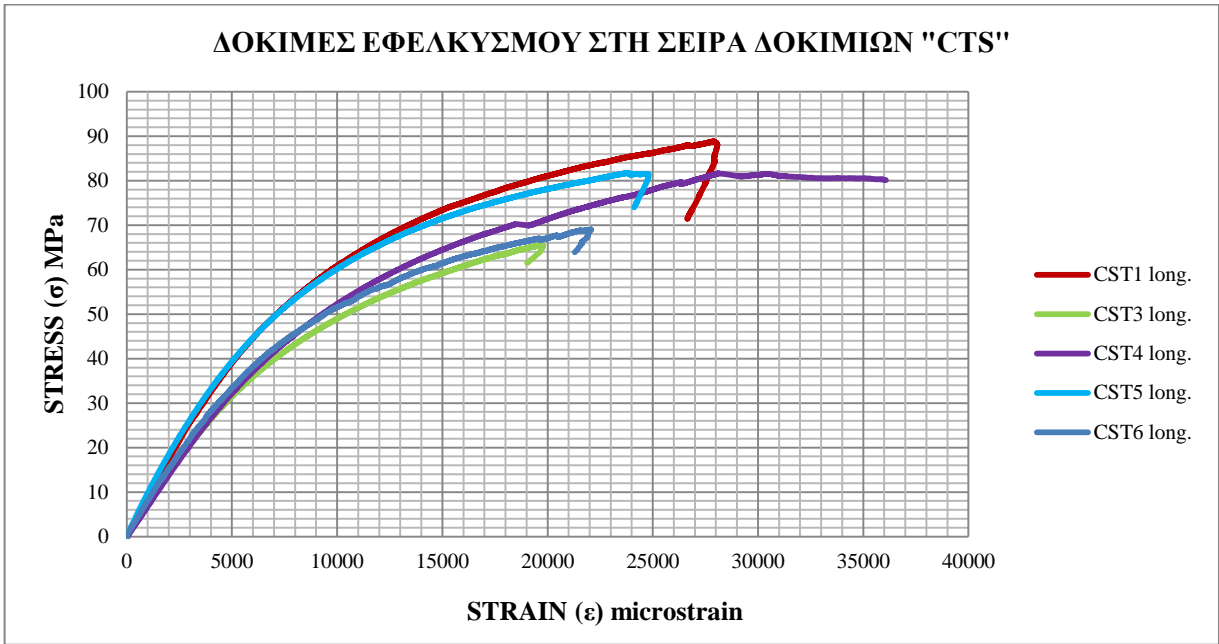
2.3.9.3. Οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των δύο σειρών δοκιμών CCI και CCA παρουσιάζονται στα Σχήματα 5 έως 8.



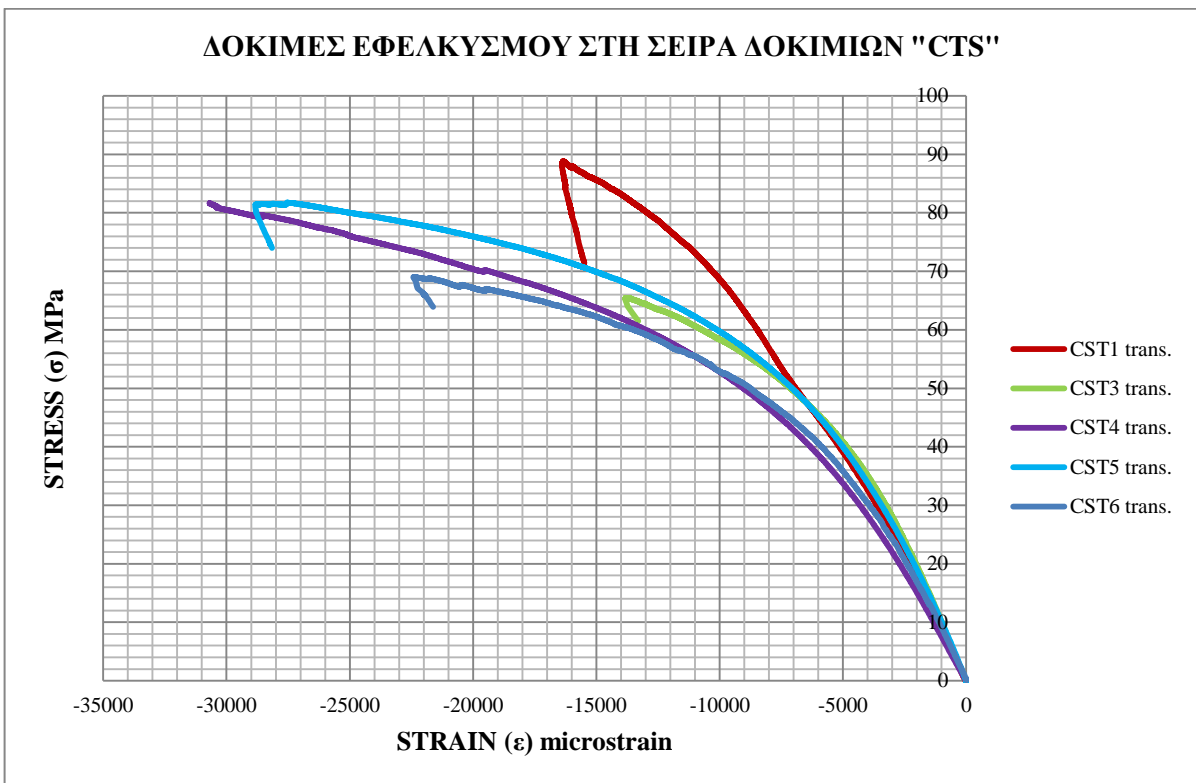
Σχήμα 1: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (longitudinal) στη σειρά δοκιμών CTI.



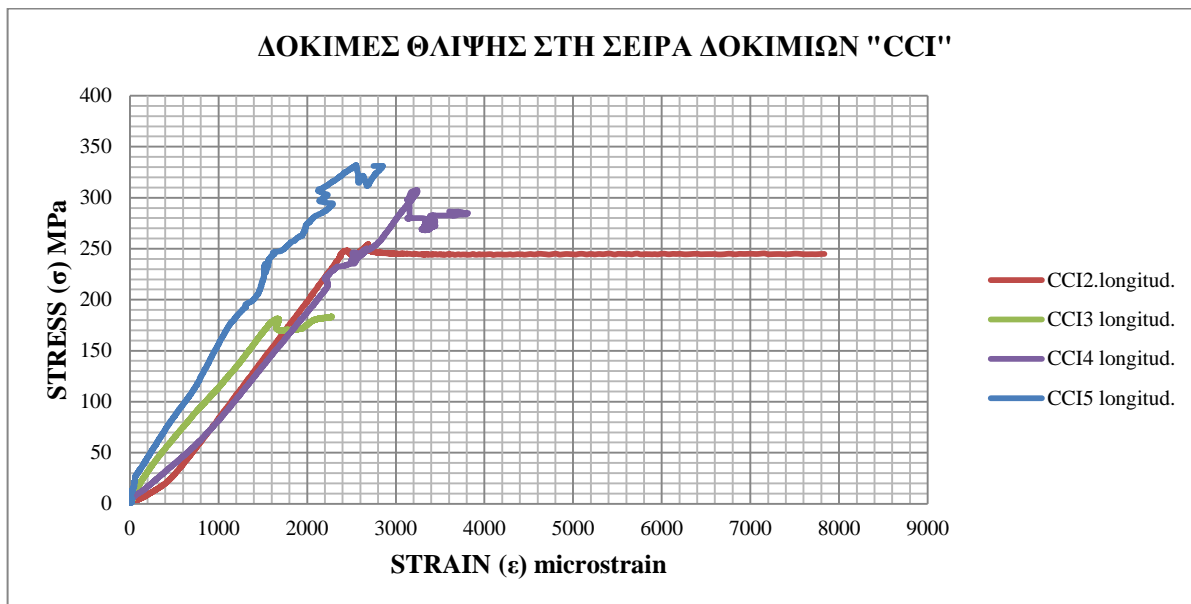
Σχήμα 2: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών CTA.



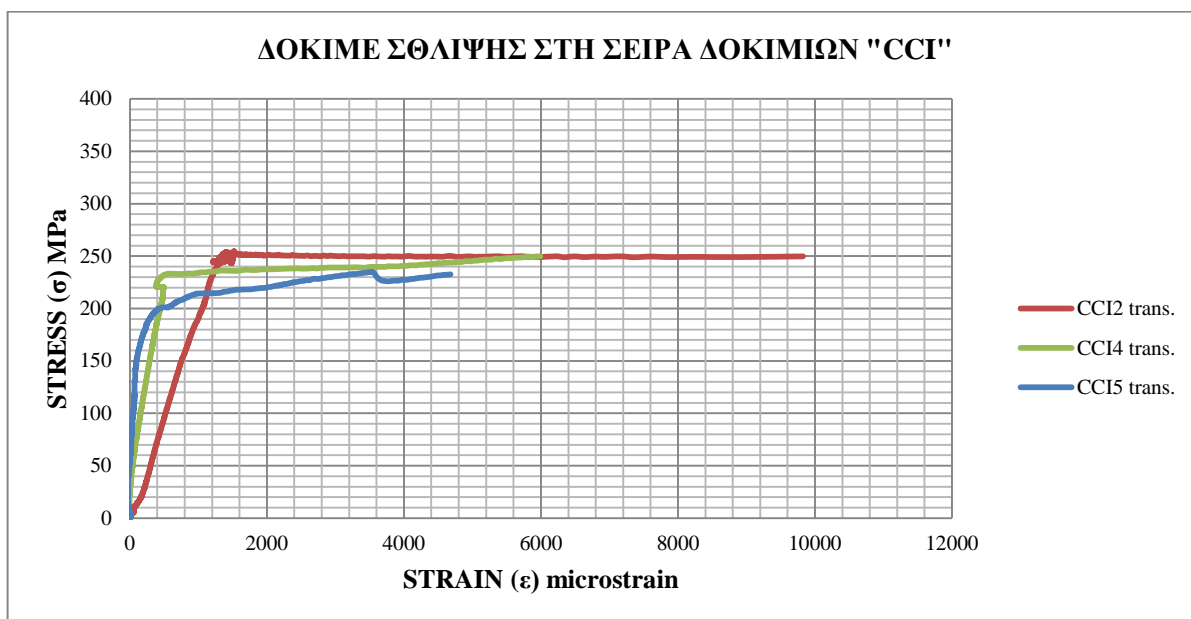
Σχήμα 3: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (longitudinal) στη σειρά δοκιμών CTS.



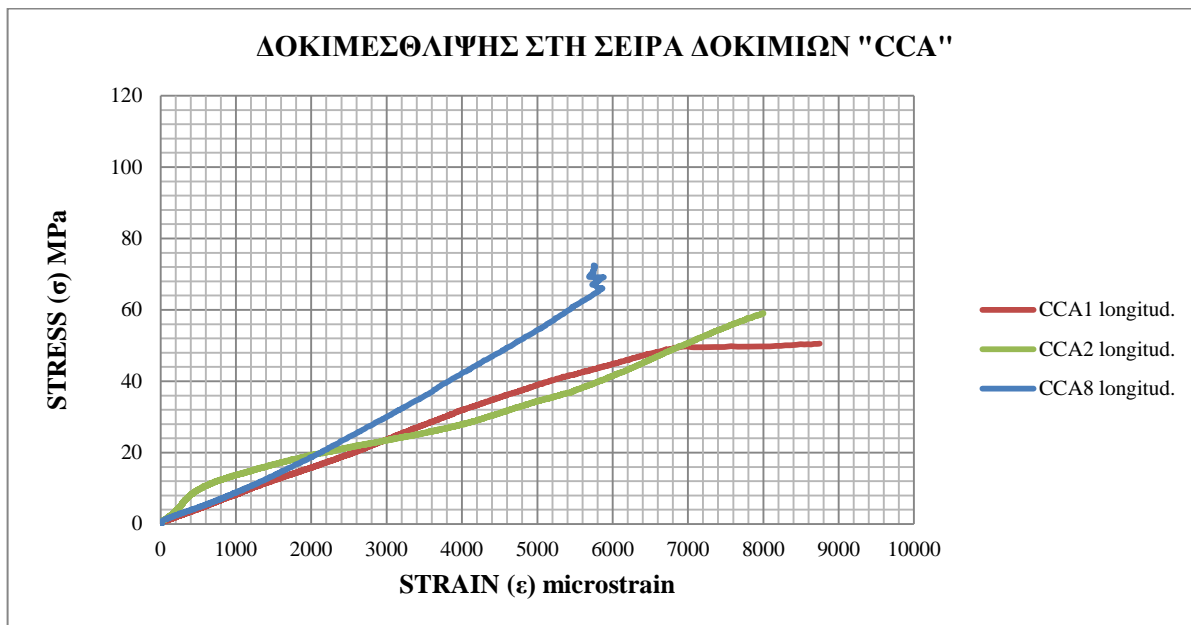
Σχήμα 4: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη κάθετη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (transverse) στη σειρά δοκιμών CTS.



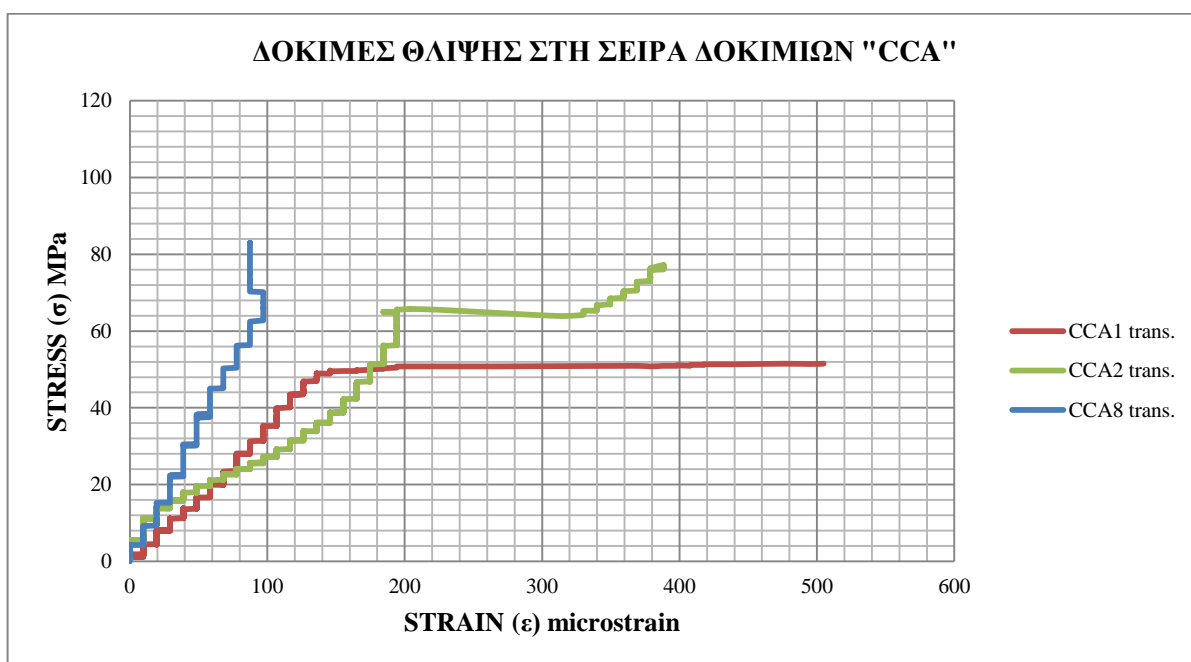
Σχήμα 5: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (longitudinal) στη σειρά δοκιμών CCI.



Σχήμα 6: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη κάθετη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (transverse) στη σειρά δοκιμών CCI.



Σχήμα 7: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (longitudinal) στη σειρά δοκιμών CCA.



Σχήμα 8: Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη κάθετη διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου (transverse) στη σειρά δοκιμών CCA

2.4 ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΙΝΕΣ

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.4.1. Για τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα, η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 3171 – 99. Σύμφωνα με το πρότυπο, η συνδετική ρητίνη του σύνθετου υλικού διαλύεται σε ισχυρό διάλυμα HNO_3 , ενώ οι ίνες άνθρακα παραμένουν αδιάλυτες. Από τη μεταβολή του βάρους του δείγματος υπολογίζεται η περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα.

2.4.2. Για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια διαστάσεων $2.5 \times 2.5 \text{ cm}^2$ περίπου.

2.4.3. Η ονοματολογία των δοκιμών περιλαμβάνει τον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου.

2.4.4. Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε διάλυμα HNO_3 70%. Στα γυάλινα σκεύη που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται ποτήρι ζέσεως 500 ml, ογκομετρική φιάλη, petri dish, κεραμικός ηθμός και κωνική φιάλη διήθησης. Για τη διήθηση χρησιμοποιήθηκε φίλτρο πορώδους 8 μm , ενώ χρησιμοποιήθηκαν επίσης θερμικός αναδευτήρας, ζυγός ακριβείας, φούρνος και γυάλινος ξηραντήρας.

2.4.5. Η διαδικασία μέτρησης της περιεκτικότητας των υλικών σε ίνες άνθρακα, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D 3171 – 99, είναι η εξής:

Αρχικά ζυγίζεται το δοκίμιο και το petri dish με το φίλτρο. Στη συνέχεια σε 200 ml HNO_3 σε ποτήρι ζέσεως εμβαπτίζεται το δοκίμιο και τοποθετούνται στο θερμικό αναδευτήρα σε θερμοκρασία $150\text{-}160^\circ\text{C}$, με ταχύτητα ανάδευσης περίπου 3 rpm. Το διάλυμα θα πρέπει να είναι ατμίζον. Εάν η ποσότητα του HNO_3 δεν επαρκεί για την πλήρη διάλυση της ρητίνης, συμπληρώνεται με επιπλέον ποσότητα HNO_3 . Μετά την πλήρη διάλυση της ρητίνης ακολουθεί διήθηση υπό κενό με χρήση κεραμικού ηθμού και φίλτρου με πορώδες 8 μm , για τη λήψη των ινών άνθρακα. Προηγείται αραίωση του διαλύματος ινών – HNO_3 για να μη διαλυθεί το χαρτί διήθησης. Τέλος οι ίνες άνθρακα και το χαρτί διήθησης τοποθετούνται σε petri dish και ξηραίνονται στους 100°C για 90 min. Στη συνέχεια η διάταξη τοποθετείται στον ξηραντήρα για 30 min. Τέλος ζυγίζεται το Petri Dish μαζί με τις ίνες άνθρακα και το διηθητικό χαρτί σε ζυγό ακριβείας. Από τη διαφορά βάρους του δείγματος προκύπτει η περιεκτικότητα σε ίνες άνθρακα.

2.4.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Οι επί μέρους μετρήσεις της περιεκτικότητας κατά βάρος σε ίνες άνθρακα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας Π15. Μετρήσεις της περιεκτικότητας κατά βάρος σε ίνες άνθρακα

Δοκίμιο	Βάρος δοκιμίου (g)	Βάρος φίλτρου και Petri Dish (g)	Βάρος φίλτρου, Petri Dish και ινών άνθρακα μετά τη διάλυση (g)	Περιεκτικότητα κάθε δοκιμίου (%)	Μέση περιεκτικότητα (%)
1	0.983	65.817	66.623	81.99	79.63
2	0.902	65.837	66.534	77.27	

2.5 ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ

2.5.1. Μετρήθηκε η πυκνότητα πλάκας ανθρακονημάτων πάχους 5 mm σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D1577-01. Η ονοματολογία των δοκιμών περιλαμβάνει τον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου.

Για την πειραματική μέτρηση πυκνότητας χρησιμοποιήθηκε ο τύπος:

$$\rho_s = (m_{SA} \times \rho_{LI}) / (m_{SA} - m_{SL}), \text{ όπου } m_{SA} : \text{μάζα δοκιμίου στον αέρα}$$

m_{SL} : μάζα δοκιμίου στο υγρό

ρ_{LI} : πυκνότητα υγρού (για νερό 1 gr/cm³)

2.5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ

Οι επί μέρους μετρήσεις της πυκνότητας σύνθετου υλικού από ανθρακόνημα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας Π16. Μετρήσεις της πυκνότητας σύνθετου υλικού από ανθρακόνημα.

Δοκίμιο	Πυκνότητα δοκιμίου (gr/cm ³)	Μέση πυκνότητα (gr/cm ³)
1	1.459	1.492
2	1.516	
3	1.470	
4	1.523	

2.6 ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ

2.6.1. Οι δοκιμές μέτρησης σκληρότητας έγιναν με τη φορητή αναλογική συσκευή Impressor model GYZI-934-1 της εταιρίας Barber Colman. Η συσκευή είναι κατάλληλη για μετρήσεις σκληρότητας σε σύνθετα υλικά.

2.6.2. Σκληρότητα στις πλάκες από ανθρακονήματα

Επιλέχθηκαν τυχαία 24 σημεία και λήφθηκαν μετρήσεις σκληρότητας του σύνθετου υλικού. Από τη μέτρηση της σκληρότητας των δύο πλακών ονομαστικού πάχους 5 mm λήφθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

Πίνακας Π17. Μετρήσεις της σκληρότητας σύνθετου υλικού από ανθρακόνημα.

ΠΛΑΚΑ CARBON	
	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (Brinell)
Μέσος όρος	63.96
Μέγιστη τιμή	78
Ελάχιστη τιμή	38

2.6.3. Η τυπική απόκλιση (standard deviation) και ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς (coefficient of variation) των επί μέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο, καθώς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (95% confidence interval of mean value) για τις τιμές που μετρήθηκαν, είναι:

Πίνακας Π18. Η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής των επιμέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο.

	ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ (Brinell)	
ΠΛΑΚΑ CARBON	Τυπική απόκλιση	11.64
	Συντελεστής διακύμανσης	0.182
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	0.149

3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΥΛΙΝΔΡΩΝ ΑΠΟ ΑΝΘΡΑΚΟΝΗΜΑΤΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιγράφει την πειραματική μελέτη εννέα κυλίνδρων από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη με σκοπό τη διερεύνηση της απόκρισής τους σε αξονικό θλιπτικό φορτίο, σε μια προσπάθεια «έμμεσης» μέτρησης μερικών από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένοι. Όλες οι σχετικές εργασίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ΕΝΤ) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στην πειραματική διαδικασία εξοπλίστηκαν με αισθητήρες μέτρησης παραμορφώσεων (strain gages) για την εκτίμηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης της κατασκευής στο εξωτερικό φορτίο. Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν συναρτήσει του χρόνου και του αυξανόμενου φορτίου σε διάφορα σημεία της κατασκευής, τόσο στη αξονική όσο και στην περιφερειακή διεύθυνση. Σκοπός ήταν οι εξαγωγή καμπύλων τάσης – παραμόρφωσης ώστε να χαρακτηριστεί το υλικό.

Ο πειραματικός χαρακτηρισμός των κυλίνδρων πραγματοποιήθηκε από τον Σεπτέμβριο μέχρι και τον Οκτώβριο του 2011 και περιελάμβανε τις παρακάτω δοκιμές αντοχής σε θλίψη:

- α. Δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια ανθρακονημάτων κατασκευασμένων με γωνία περιέλιξης 90° .
- β. Δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια ανθρακονημάτων κατασκευασμένων με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$.

Όλα τα δοκίμια κόπηκαν από κυλίνδρους σύνθετου υλικού από ανθρακονήματα και εποξική ρητίνη που κατασκευάστηκαν από την εταιρία Β&Τ με τη μέθοδο της εκ περιστροφής περιέλιξης ινών (filament wound method). Όσον αφορά στη γωνία περιέλιξης, έξι (6) κύλινδροι κατασκευάστηκαν με περιφερειακή περιέλιξη (90°) και τρεις (3) κύλινδροι με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$. Ο τρόπος κατασκευής των κυλίνδρων εμφανίζεται στις Φωτογραφίες 6 και 7.



Φωτ. 6: Κατασκευή κυλίνδρου ανθρακονημάτων με τη διαδικασία περιέλιξης ινών.



Φωτ. 7: Διαδικασία περιέλιξης των ινών στο κυλινδρικό καλούπι. Διακρίνεται ο βραχίονας της μηχανής περιέλιξης με τις ίνες άνθρακα.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

3.2.1. Η πειραματική δοκιμή στα κυλινδρικά δοκίμια πραγματοποιήθηκε για την εκτίμηση της συμπεριφοράς και της απόκρισης της κατασκευής στο εξωτερικό φορτίο (θλίψη). Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν συναρτήσει του χρόνου και του αυξανόμενου φορτίου σε διάφορα σημεία της κατασκευής, τόσο στη αξονική όσο και στην περιφερειακή διεύθυνση. Συνολικά εξετάστηκαν εννέα κυλινδρικά δοκίμια, τρία δοκίμια από τρεις διαφορετικούς τύπους κυλίνδρων, όπως παρακάτω:

- Τρία (3) Δοκίμια με γωνία περιέλιξης 90° πάχους 5 mm (κωδικός 0590)
- Τρία (3) Δοκίμια με γωνία περιέλιξης 90° πάχους 20 mm (κωδικός 2090)
- Τρία (3) Δοκίμια με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$ πάχους 5 mm (κωδικός 0545)

Οι διάφοροι τύποι των δοκιμών φαίνονται στις Φωτογραφίες 8 έως 10.

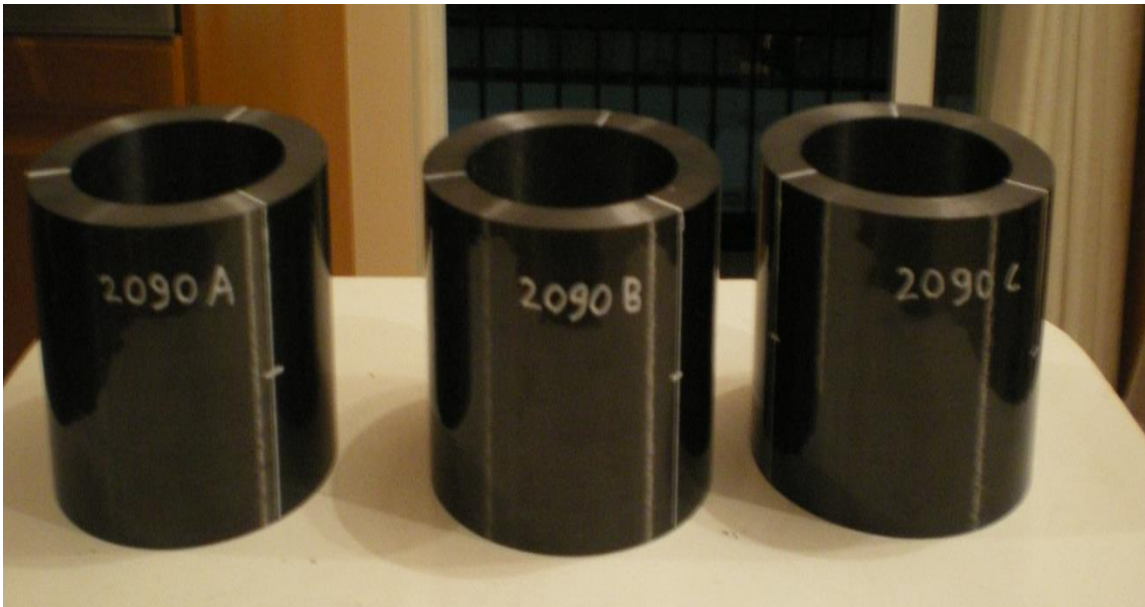
3.2.2 Η υδραυλική μηχανή στην οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές δοκιμές είναι σύμφωνη με τις απαιτήσεις του διεθνούς προτύπου ISO 5893:2002, Class C.



Φωτ. 8: Κυλινδρικά δοκίμια τύπου 0590.



Φωτ. 9: Κυλινδρικά δοκίμια τύπου 0545.



Φωτ. 10: Κυλινδρικά δοκίμια τύπου 2090.

3.2.3 Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε επιβάλλοντας αξονική θλιπτική δύναμη (force control test), με διαφορετικό ρυθμό για κάθε ομάδα δοκιμών, όπως περιγράφεται παρακάτω.

Η πειραματική δοκιμή πραγματοποιήθηκε ως εξής:

3.2.3.1 Δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια με γωνία περιέλιξης 90° και με τις ακόλουθες ονομαστικές τιμές γεωμετρίας:

- μήκος κυλίνδρου: 100 mm
- εσωτερική διάμετρος: 100 mm
- πάχος: 5 mm και 20 mm

3.2.3.2 Δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$ και με τις ακόλουθες ονομαστικές τιμές γεωμετρίας:

- μήκος κυλίνδρου: 100 mm
- εσωτερική διάμετρος: 100 mm
- πάχος: 5 mm

3.2.3.3 Για την κατασκευή των συνθέτων υλικών χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

- Εποξική ρητίνη: Araldite LY556
- Σκληρυντής: Anhydride Hardener HUNTSMAN Aradur 917 CH
- Επιταχυντής: HUNTSMAN DY 070
- Ως ενίσχυση χρησιμοποιήθηκε ανθρακόνημα T700S

3.2.4 Τα κυλινδρικά δοκίμια από ανθρακονήματα που υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης διαστασιολογήθηκαν και ονοματίστηκαν με τέσσερεις αριθμούς και ένα γράμμα. Οι δύο πρώτοι αριθμοί δηλώνουν το πάχος σε mm (05 mm και 20 mm) και οι δύο τελευταίοι αριθμοί δηλώνουν τη γωνία περιέλιξης (45° και 90°). Το γράμμα υποδηλώνει τον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου (A, B και C). Οι μετρήσεις πάρθηκαν με την βοήθεια παχυμέτρου από το πάνω και κάτω μέρος της κυκλικής περιφέρειας των κυλίνδρων σε σημεία (6 ανά κύλινδρο) που απείχαν 120° μεταξύ τους. Η απόσταση της μέτρησης από το άνω μέρος της κυκλικής επιφάνειας στα σημεία αυτά είναι περίπου 5 mm. Οι ληφθείσες μετρήσεις διαστάσεων των δοκιμών φαίνονται στους Πίνακες Π19 και Π20.

Πίνακας Π19. Διαστάσεις Κυλινδρικών Δοκιμών με γωνία περιέλιξης 90°.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ					
	0590A	0590B	0590C	2090A	2090B	2090C
ΠΑΧΟΣ						
Μέσος όρος	5.23	5.43	5.13	20.12	20.12	20.45
Μέγιστη τιμή	5.40	5.80	5.20	20.20	20.20	20.80
Ελάχιστη τιμή	5.10	5.10	5.10	20.00	20.00	20.00
ΜΗΚΟΣ						
Μέσος όρος	100.00	100.07	100.30	99.70	99.83	100.10
Μέγιστη τιμή	100.00	100.10	100.30	99.80	99.90	100.30
Ελάχιστη τιμή	100.00	100.00	100.30	99.60	99.80	100.00

Πίνακας Π20. Διαστάσεις Κυλινδρικών Δοκιμών με γωνία περιέλιξης +/-45°.

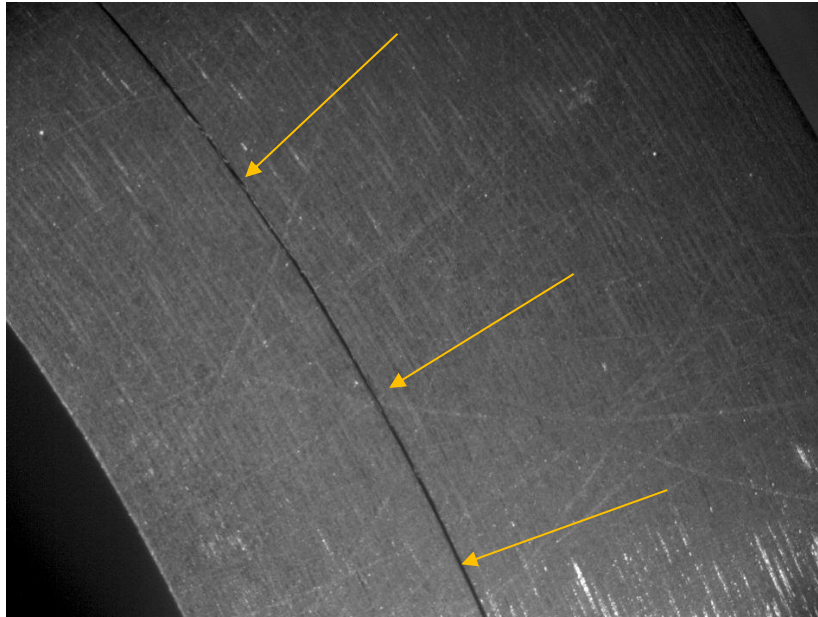
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ		
	0545A	0545B	0545C
ΠΑΧΟΣ			
Μέσος όρος	6.10	5.25	5.20
Μέγιστη τιμή	7.00	5.50	5.40
Ελάχιστη τιμή	5.50	5.00	5.00
ΜΗΚΟΣ			
Μέσος όρος	100.93	100.13	100.87
Μέγιστη τιμή	101.00	100.20	101.00
Ελάχιστη τιμή	100.80	100.10	100.70

3.2.5 Τα δοκίμια πριν και μετά τις δοκιμές εξετάστηκαν σε στερεοσκόπιο, όπου ελέχθησαν για την παρουσία κατασκευαστικών ελαττωμάτων. Τα ελαττώματα που εντοπίστηκαν φαίνονται στις Φωτογραφίες 11 έως 19. Οι περιοχές των ελαττωμάτων έχουν σημειωθεί με βέλη και με κλειστή κίτρινη γραμμή. Ειδικότερα, στα δοκίμια τύπου 2090 (Φωτ. 11 έως 14) παρατηρήθηκε εκτεταμένος αποχωρισμός στρώσεων (delamination) περίπου στο 1/3 του πάχους του κυλίνδρου από την εσωτερική του επιφάνεια, αποχωρισμός ο οποίος εκτεινόταν στο μεγαλύτερο μέρος της περιφέρειας. Σε συνεργασία με την κατασκευάστρια εταιρεία διερευνήθηκαν οι λόγοι δημιουργίας του αποχωρισμού αυτού, με καταληκτικό συμπέρασμα ότι αυτός οφείλεται πιθανότατα στην κατασκευή του κυλίνδρου σε δύο στάδια λόγω του μεγάλου του πάχους και συνεπώς στην έναρξη της σκλήρυνσης της ρητίνης πριν την ολοκλήρωση της περιέλιξης και στην εξ αυτού του γεγονότος προερχόμενη μη ομοιόμορφη κατανομή των παραμενουσών τάσεων στο εσωτερικό του κυλίνδρου. Τέτοιου είδους αποχωρισμός δεν παρατηρήθηκε στους λεπτότερους κυλίνδρους 0590 (Φωτ. 15).

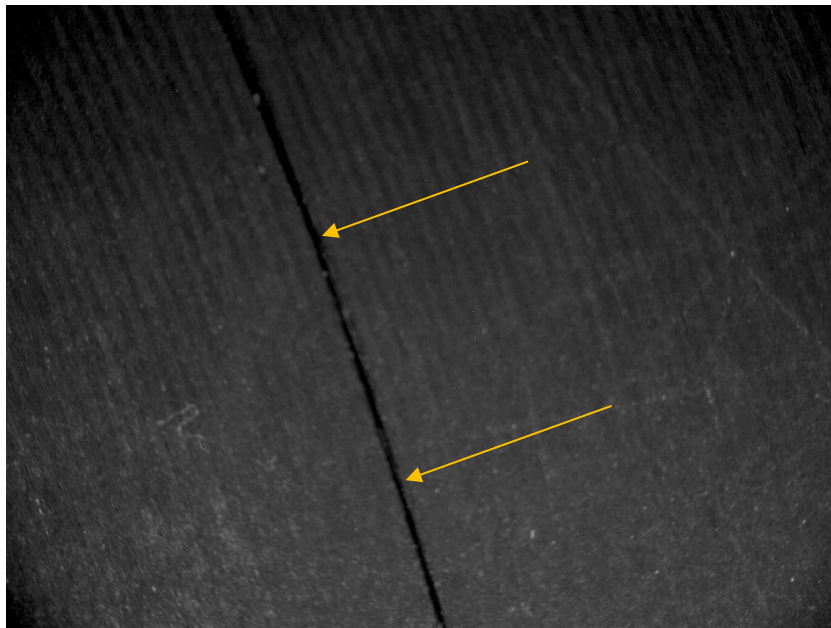
Τα δοκίμια τύπου 0545 παρουσίασαν σποραδικά ελαττώματα που είχαν τη μορφή κενών αέρα και ασυνεχειών κοντά στην εξωτερική επιφάνεια των κυλίνδρων (Φωτ. 16 έως 19). Οι ασυνέχειες αυτές εκτιμάται ότι προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια της κοπής των δοκιμίων με μηχανικό εργαλείο από τον αρχικό ενιαίο κύλινδρο λόγω της γωνίας των ινών 45° . Αυτού του είδους τα ελαττώματα εκτιμάται ότι προκάλεσαν και τις μόνιμες παραμορφώσεις που αναφέρονται παρακάτω.

Στα δοκίμια με ονομαστική γωνία περιέλιξης 90° μετρήθηκε γραφικά με χρήση κατάλληλου λογισμικού η γωνία περιέλιξης από φωτογραφίες που ελήφθησαν με το στερεοσκόπιο. Η μέση γωνία περιέλιξης υπολογίστηκε έτσι σε 88.74° .

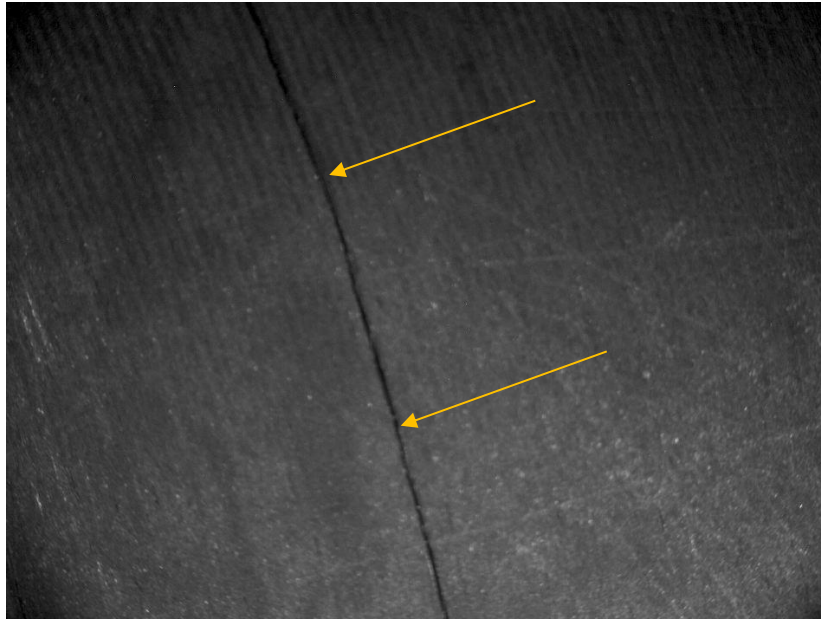
Ακολουθούν φωτογραφίες με κατασκευαστικά ελαττώματα όπως αυτά παρατηρήθηκαν στο στερεοσκόπιο:



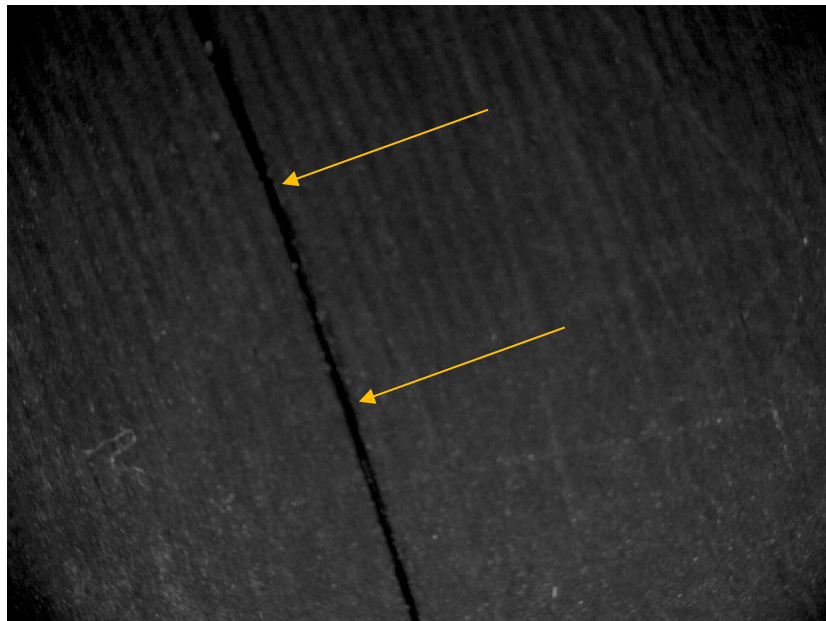
Φωτ. 11: Κυλινδρικό δοκίμιο 2090B – Αποχωρισμός στρώσεων.



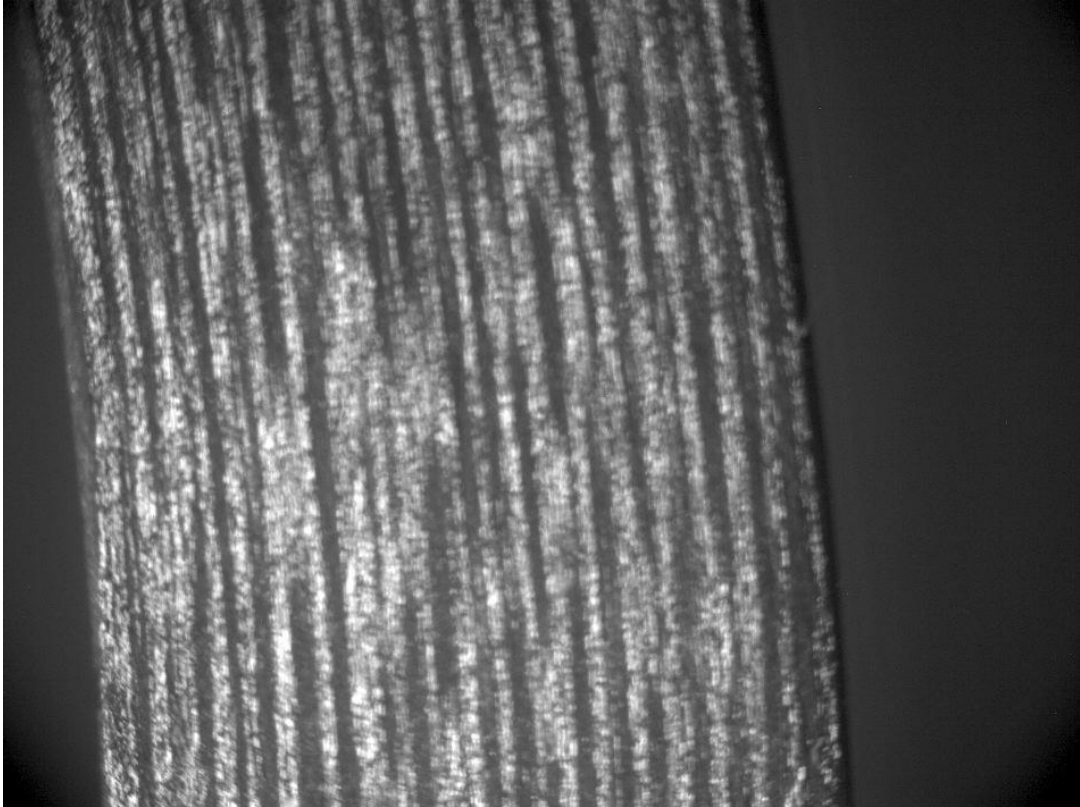
Φωτ. 12: Κυλινδρικό δοκίμιο 2090B – Ο παραπάνω αποχωρισμός σε μεγαλύτερη μεγέθυνση.



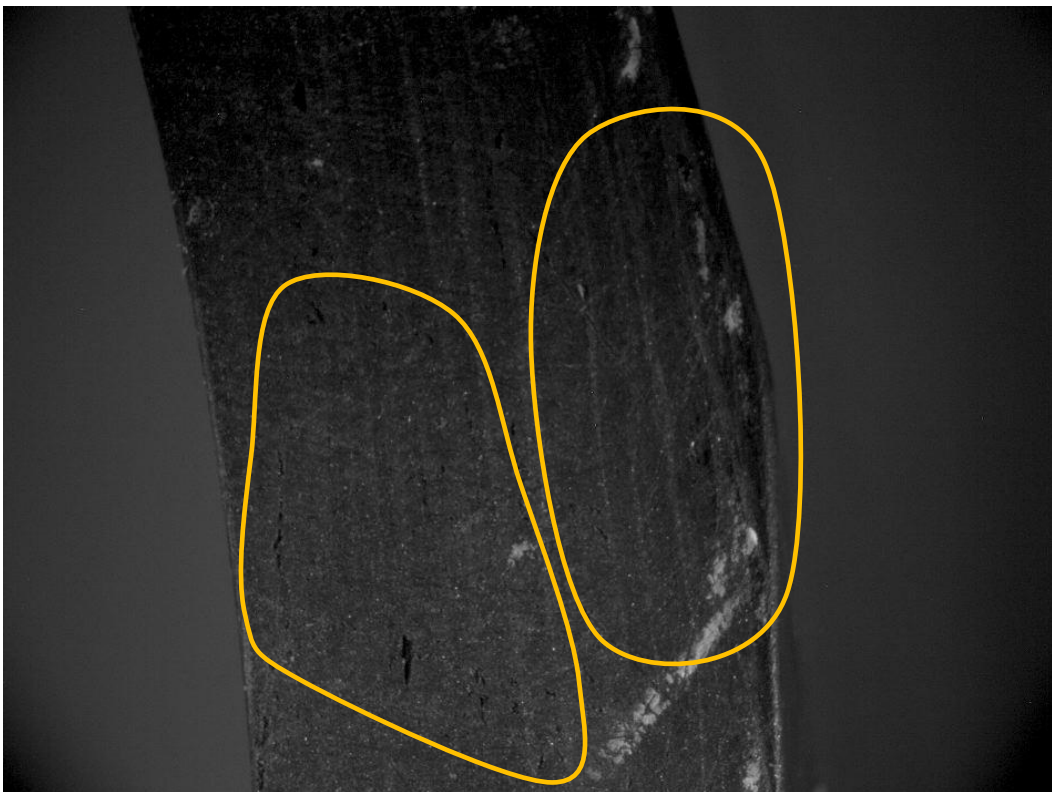
Φωτ. 13: Κυλινδρικό δοκίμιο 2090A – Αποχωρισμός στρώσεων.



Φωτ. 14: Κυλινδρικό δοκίμιο 2090A – Ο παραπάνω αποχωρισμός σε μεγαλύτερη μεγέθυνση



Φωτ. 15: Κυλινδρικό δοκίμιο 0590A – Χαρακτηριστική εγκάρσια διατομή του σύνθετου υλικού.



Φωτ. 16: Κυλινδρικό δοκίμιο 0545A – Περιοχές ελαττωμάτων.



Φωτ. 17: Κυλινδρικό δοκίμιο 0545A – Περιοχές ελαττωμάτων.



Φωτ. 18: Κυλινδρικό δοκίμιο 0545B – Περιοχές ελαττωμάτων.

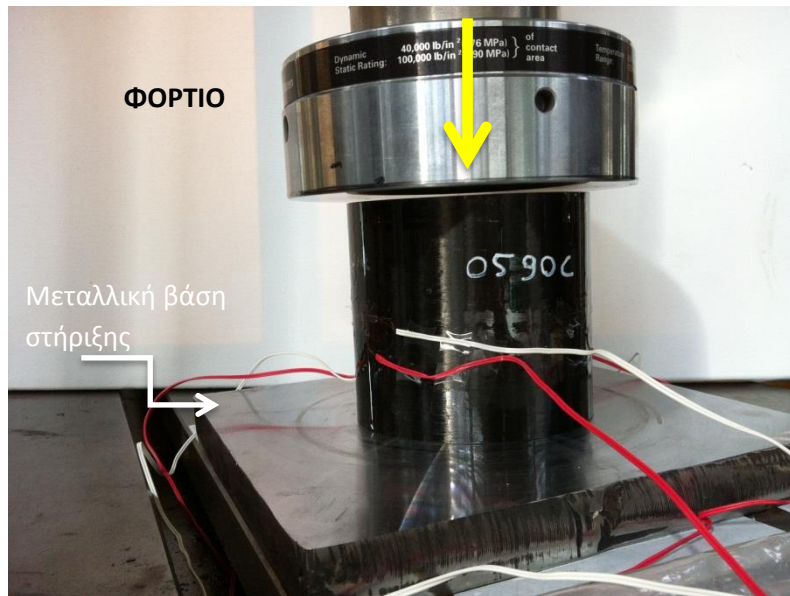


Φωτ. 19: Κυλινδρικό δοκίμιο 0545B – Περιοχές ελαττωμάτων.

- 3.2.6** Οι παραμορφώσεις μετρήθηκαν με τη βοήθεια τριών μετρητών παραμορφώσεων (strain gages) τύπου ροζέτας, μήκους μέτρησης (gage length) ίσου με 10mm για τα δοκίμια τύπου 2090 και 0590 και 5mm για τα δοκίμια τύπου 0545, με καταγραφή στους άξονες x (περιφερειακή διεύθυνση – circumferential) και z (αξονική διεύθυνση – axial) που προσαρμόστηκαν σε κάθε υπό δοκιμή δοκίμιο. Οι μετρητές παραμορφώσεων τοποθετήθηκαν στο μέσον του μήκους των κυλινδρικών δοκιμών ($L/2$) και σε ισαποστάσεις ίσες με τόξα των 120° .

3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ

3.3.1. Η πειραματική δοκιμή δεν βασίστηκε σε συγκεκριμένο πρότυπο. Στους κυλίνδρους ασκήθηκε θλιπτική δύναμη παράλληλα με τον άξονά τους (Φωτ. 19).



Φωτ. 19: Η πειραματική διάταξη.

3.3.2 Για να επιτευχθεί καλή στήριξη του κυλίνδρου και για να εξασφαλιστεί η καθετότητα μεταξύ της βάσης στήριξης και του κυλίνδρου, κατασκευάστηκε από την B&T Τριακίδης ΑΒΕΤΕ μεταλλική πλάκα σε τόρνο, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως έδρα στήριξης του κυλινδρικού δοκιμίου (Φωτ. 19).

3.3.3 Η πειραματική διαδικασία και για τους τρεις τύπους δοκιμών πραγματοποιήθηκε με έλεγχο της επιβαλλόμενης δύναμης, ως εξής:

1. Για τα δοκίμια τύπου 0590 και 2090 το φορτίο της δοκιμής ξεκίνησε από τα 0 kN, έφτασε μέχρι τα 87 kN με ρυθμό 13 kN/min, όπου και παρέμεινε για λίγα δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ακολούθησε αποφόρτιση με ρυθμό 26 kN/min.
2. Για τα δοκίμια 0545 το φορτίο της δοκιμής ξεκίνησε από τα 0 kN, έφτασε τα 35 kN με ρυθμό 13 kN/min όπου και παρέμεινε για λίγα δευτερόλεπτα και στη συνέχεια ακολούθησε αποφόρτιση με ρυθμό 26 kN/min. Στη συνέχεια τα δοκίμια φορτίστηκαν μέχρι τα 87 kN με ρυθμό 13 kN/min όπου και παρέμειναν για λίγα δευτερόλεπτα και αποφορτίστηκαν με ρυθμό 26 kN/min.

Ο λόγος που ακολουθήθηκε η παραπάνω διαδικασία είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς του υλικού στην ελαστική περιοχή των δοκιμών, καθώς και ο προσδιορισμός των παραμενουσών παραμορφώσεων.

- 3.3.4** Η ομοιόμορφη θλιπτική τάση που αναπτύχθηκε από την επιβαλλόμενη φόρτιση υπολογίστηκε από τον γενικό τύπο:

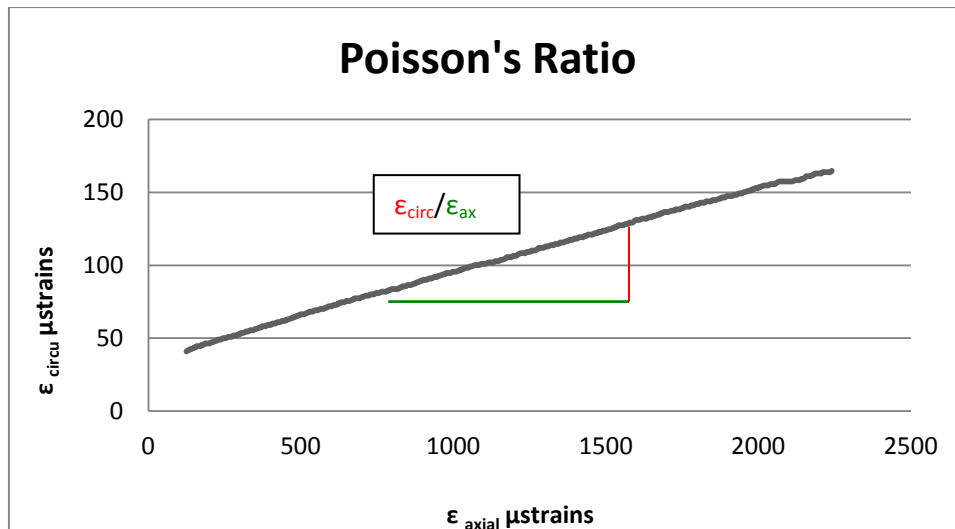
$$\sigma = \frac{F}{A},$$

όπου F: επιβαλλόμενη θλιπτική δύναμη και A: επιφάνεια επιβολής φορτίου. Ως επιφάνεια επιβολής του φορτίου A ελήφθη η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του κυλίνδρου, δηλαδή η επιφάνεια του κυκλικού δακτυλίου από την παρακάτω σχέση:

$$A = \pi * (R_{out}^2 - R_{in}^2),$$

όπου R_{in} η εσωτερική και R_{out} η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου.

- 3.3.5** Το μέτρο ελαστικότητας E_2 του υλικού των κυλίνδρων κατά τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, δηλαδή κατά την κάθετη προς τις ενισχυτικές ίνες διεύθυνση για τους κυλίνδρους 0590 και 2090, υπολογίστηκε από την κλίση των καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων μεταξύ των 500 και 2500 microstrains, για τις παραμορφώσεις που μετρήθηκαν από τα αξονικά strain gages, ϵ_{ax} .
- 3.3.6** Κατά αντιστοιχία με την διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM-D3039 για τα επίπεδα δοκίμια οι λόγοι Poisson ν_{12} υπολογίστηκαν από τον λόγο $\epsilon_1/\epsilon_2 = \epsilon_{circ}/\epsilon_{ax}$ για φορτίο από 3 MPa έως 25 MPa για κάθε θέση όπου είχε τοποθετηθεί strain gage τύπου ροζέτας στους κυλίνδρους 0590 και 2090. (Σχήμα 9)



Σχήμα 9: Καμπύλη για εξαγωγή του λόγου Poisson

3.3.7 Το μέτρο διάτμησης G_{12} του υλικού των κυλίνδρων, υπολογίστηκε από την κλίση των καμπύλων διατμητικών τάσεων – παραμορφώσεων μεταξύ των 1000 και 4000 microstrains, για τις παραμορφώσεις που μετρήθηκαν από τα αξονικά strain gages, ϵ_{ax} , κατά αντιστοιχία με την διαδικασία που περιγράφει το πρότυπο ASTM D3518 για τα επίπεδα δοκίμια καθώς δεν υπάρχει σχετικό πρότυπο για κυλινδρικά δοκίμια. Η περιοχή 1000 έως 4000 microstrains επιλέχθηκε διότι στην εν λόγω περιοχή η γραμμικότητα εξασφάλιζε την εξαγωγή ασφαλέστερων στοιχείων. Η ομοιόμορφη θλιπτική τάση που αναπτύχθηκε από την επιβαλλόμενη φόρτιση υπολογίστηκε με την μεθοδολογία του προτύπου και τη χρήση του αντίστοιχου τύπου, δηλαδή:

$$\tau_{12} = \frac{F}{2A},$$

όπου F: επιβαλλόμενη θλιπτική δύναμη και A: επιφάνεια επιβολής φορτίου. Ως επιφάνεια επιβολής του φορτίου A ελήφθη η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του κυλίνδρου, δηλαδή η επιφάνεια του κυκλικού δακτυλίου από την παρακάτω σχέση:

$$A = \pi * (R_{out}^2 - R_{in}^2),$$

όπου R_{in} η εσωτερική και R_{out} η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου.

Το μέτρο διάτμησης G_{12} υπολογίζεται από τον τύπο:

$$G_{12} = \frac{\tau_{12}}{\gamma_{12}}$$

Όπου τ_{12} : η διατμητική τάση στην επιφάνεια του κυλίνδρου και γ_{12} : η μέγιστη διατμητική παραμόρφωση που ισούται με $\gamma_{12} = \epsilon_x - \epsilon_y = \epsilon_{axial} - \epsilon_{circu}$.

3.3.8 Οι επί μέρους μετρήσεις σε όλα τα κυλινδρικά δοκίμια φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (τρεις μετρήσεις ανά κύλινδρο, που αντιστοιχούν στα τρία strain gages τύπου ροζέτας):

Πίνακας Π21. Μετρήσεις κυλινδρικών δοκιμών σειράς 0590.

Δοκίμιο & Θέση Μέτρησης	Λόγος Poisson ν_{21}	Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)
0590A-1	0.0583	4.6
0590A-2	0.0455	4.5
0590A-3	0.0603	4.9
0590B-1	0.0572	4.7
0590B-2	0.0563	5.2
0590B-3	0.0519	4.6
0590C-1	0.0515	4.7
0590C-2	0.0477	4.8
0590C-3	0.0583	4.8

Πίνακας Π22. Μετρήσεις κυλινδρικών δοκιμών σειράς 2090.

Δοκίμιο & Θέση Μέτρησης	Λόγος Poisson ν_{21}	Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)
2090A-1	0.0772	4.8
2090A-2	0.0967	6.9
2090A-3	0.0865	5.1
2090B-1	0.0847	5.8
2090B-2	0.0678	5.2
2090B-3	0.0858	5.6
2090C-1	0.0887	5.7
2090C-2	0.0901	5.6
2090C-3	0.0768	5.3

Πίνακας Π23. Μετρήσεις κυλινδρικών δοκιμών σειράς 0545

Δοκίμιο	Μέτρο Διάτμησης G_{12} (GPa)
0545A-1	3.00
0545A-2	3.00
0545A-3	3.20
0545B-1	3.70
0545B-2	3.70
0545B-3	3.90
0545C-1	3.80
0545C-2	3.60
0545C-3	4.00

3.3.9 Οι αριθμητικές μέσες τιμές των ιδιοτήτων που μετρήθηκαν φαίνονται στον παρακάτω πίνακα για κάθε τύπο κυλινδρικών δοκιμών ξεχωριστά:

Πίνακας Π24. Οι αριθμητικές μέσες τιμές των ιδιοτήτων που μετρήθηκαν.

	Μέτρο Διάτμησης G_{12} (GPa)	Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)	Λόγος Poisson ν_{21}
0590	-	4.76	0.054
2090	-	5.56	0.084
0545	3.54	-	-

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα, όπου ήταν δυνατό να συγκριθούν, των τιμών των ιδιοτήτων μεταξύ επιπέδων και κυλινδρικών δοκιμών. Στη σύγκριση λήφθηκαν υπόψη και παρουσιάζονται οι μετρήσεις των κυλινδρικών δοκιμών τύπου 0590 και 0545. Η επιλογή των συγκεκριμένων κυλινδρικών δοκιμών για τη σύγκριση με τα επίπεδα δοκίμια έγινε με κριτήριο το συγκρίσιμο πάχος (5 mm) και τη γωνία περιέλιξης των ινών 90° και 45° για την εξαγωγή του μέτρου ελαστικότητας E_2 και του μέτρου διάτμησης G_{12} , αντίστοιχα για 90° και 45°.

Πίνακας Π25. Συγκριτικά αποτελέσματα των τιμών των ιδιοτήτων μεταξύ επιπέδων και κυλινδρικών δοκιμών

Ιδιότητες	Επίπεδα δοκίμια	Κυλινδρικά δοκίμια
Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)	7.73	4.76
Λόγος Poisson ν_{21}	0.025	0.054
Μέτρο Διάτμησης G_{12} (GPa)	7.12	3.54

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτουν τα εξής:

Το μέτρο ελαστικότητας κατά την διεύθυνση 2 (E_2) παρουσιάζεται αυξημένο κατά 38.3% στα επίπεδα δοκίμια έναντι των κυλινδρικών. Η διαφορά αυτή εκτιμάται ότι οφείλεται στον τρόπο κατασκευής των δοκιμών και όχι στην πειραματική διαδικασία.

Ο λόγος Poisson ν_{21} εμφανίζεται μειωμένος κατά 53% στα επίπεδα δοκίμια έναντι των κυλινδρικών.

Το μέτρο διάτμησης G_{12} παρουσιάζει αύξηση στα κυλινδρικά δοκίμια κατά 12.5% που θεωρείται αμελητέα.

3.3.10 Η τυπική απόκλιση (standard deviation) και ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς (coefficient of variation) των επί μέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο, καθώς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής (95% confidence interval of mean value) για κάθε μία από τις ιδιότητες που μετρήθηκαν, είναι:

Πίνακας Π26. Η τυπική απόκλιση, ο συντελεστής διακύμανσης ή διασποράς και το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της μέσης τιμής των επιμέρους μετρήσεων για κάθε δοκίμιο.

		Λόγος Poisson ν_{21}	Μέτρο Ελαστικότητας E_2 (GPa)	Μέτρο Διάτμησης G_{12} (GPa)
0590	Τυπική απόκλιση	0.00527	0.206	-
	Συντελεστής διακύμανσης	0.0984	0.043	-
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	0.00118	0.047	-
2090	Τυπική απόκλιση	0.00859	0.598	-
	Συντελεστής διακύμανσης	0.1025	0.108	-
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	0.00193	0.134	-
0545	Τυπική απόκλιση	-	-	0.381
	Συντελεστής διακύμανσης	-	-	0.108
	95% διάστημα εμπιστοσύνης μ.τ.	-	-	0.012

3.3.11 Μετά την πειραματική διαδικασία μετρήθηκαν εκ νέου οι διαστάσεις των δοκιμών προκειμένου να ελεγχθούν για τυχόν μόνιμες παραμορφώσεις. Δια γυμνού οφθαλμού ήταν εμφανείς οι μόνιμες ακτινικές παραμορφώσεις των δοκιμών τύπου 0545 στο κάτω άκρο στήριξής τους στη μηχανή δοκιμών (τοπική αύξηση του πάχους). Στα δοκίμια τύπου 0590 και 2090 δεν παρατηρήθηκαν αξιόλογες παραμορφώσεις. Οι μετρηθείσες διαστάσεις όλων των δοκιμών μετά τις δοκιμές φαίνονται στους Πίνακες 27 και 28.

***Πίνακας Π27.** Διαστάσεις Κυλινδρικών Δοκιμών με γωνία περιέλιξης 90° μετά το τέλος των δοκιμών.*

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ					
	0590A	0590B	0590C	2090A	2090B	2090C
ΠΑΧΟΣ (mm)						
Μέσος όρος	5.33	5.52	5.22	20.12	20.12	20.45
Μέγιστη τιμή	5.60	5.90	5.30	20.20	20.20	20.80
Ελάχιστη τιμή	5.20	5.10	5.20	20.00	20.00	20.00
ΜΗΚΟΣ (mm)						
Μέσος όρος	100	99.57	100.00	99.70	99.83	100.10
Μέγιστη τιμή	100	99.60	100.10	99.80	99.90	100.30
Ελάχιστη τιμή	100	99.50	99.80	99.60	99.80	100.00

Πίνακας Π28. Διαστάσεις Κυλινδρικών Δοκιμών με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$ μετά το τέλος των δοκιμών.

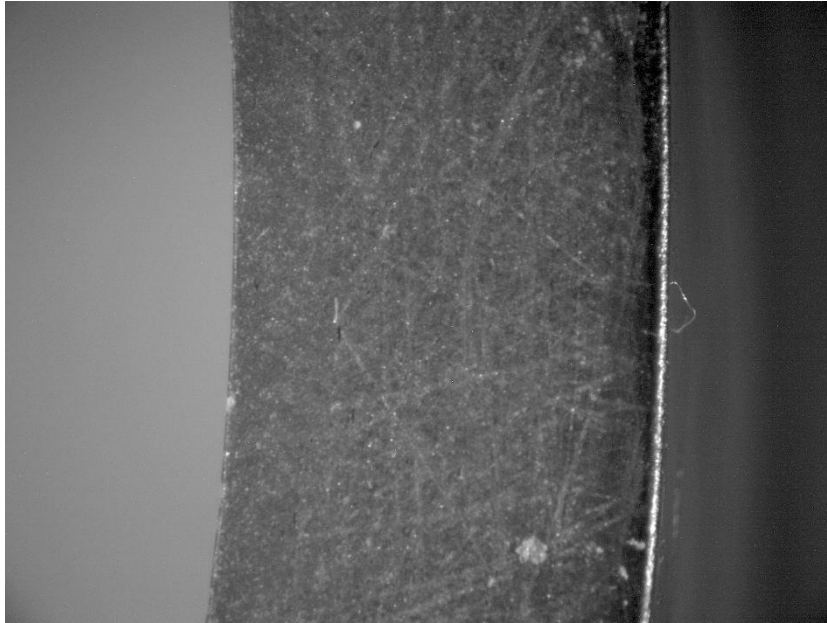
ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ		
	0545A	0545B	0545C
ΠΑΧΟΣ (mm)			
Μέσος όρος	6.20	5.28	5.20
Μέγιστη τιμή	7.20	5.60	5.50
Ελάχιστη τιμή	5.50	5.00	5.00
ΜΗΚΟΣ (mm)			
Μέσος όρος	100.20	99.67	100.23
Μέγιστη τιμή	100.40	100.00	100.40
Ελάχιστη τιμή	100.00	99.40	100.00

Πίνακας Π29. Διαφορές Διαστάσεων Κυλινδρικών Δοκιμών με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$ πρό και μετά το τέλος των δοκιμών.

ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ	ΔΟΚΙΜΙΑ		
	0545A	0545B	0545C
ΠΑΧΟΣ (mm)			
Μέσος όρος	0.1	0.03	0.0
Μέγιστη τιμή	0.2	0.1	0.1
Ελάχιστη τιμή	0.0	0.0	0.0
ΜΗΚΟΣ (mm)			
Μέσος όρος	-0.73*	-0.46	-0.64
Μέγιστη τιμή	-0.60	-0.20	-0.60
Ελάχιστη τιμή	-0.80	-0.70	-0.70

* Σημείωση: Το αρνητικό πρόσημο (-) δεικνύει ελάττωση της διάστασης

Ακολουθούν φωτογραφίες της εγκάρσιας διατομής στο άκρο των δοκιμών 0545 που λήφθηκαν μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών δοκιμών.

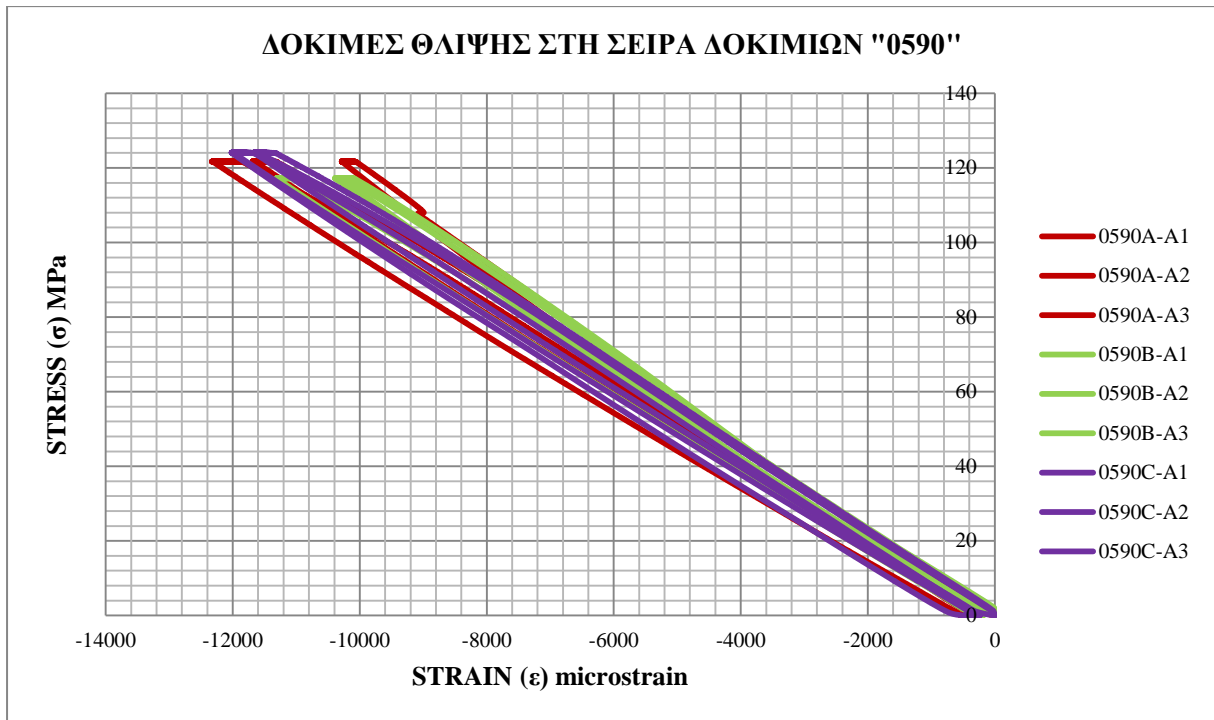


Φωτ. 20: Κυλινδρικό δοκίμιο 0545A.

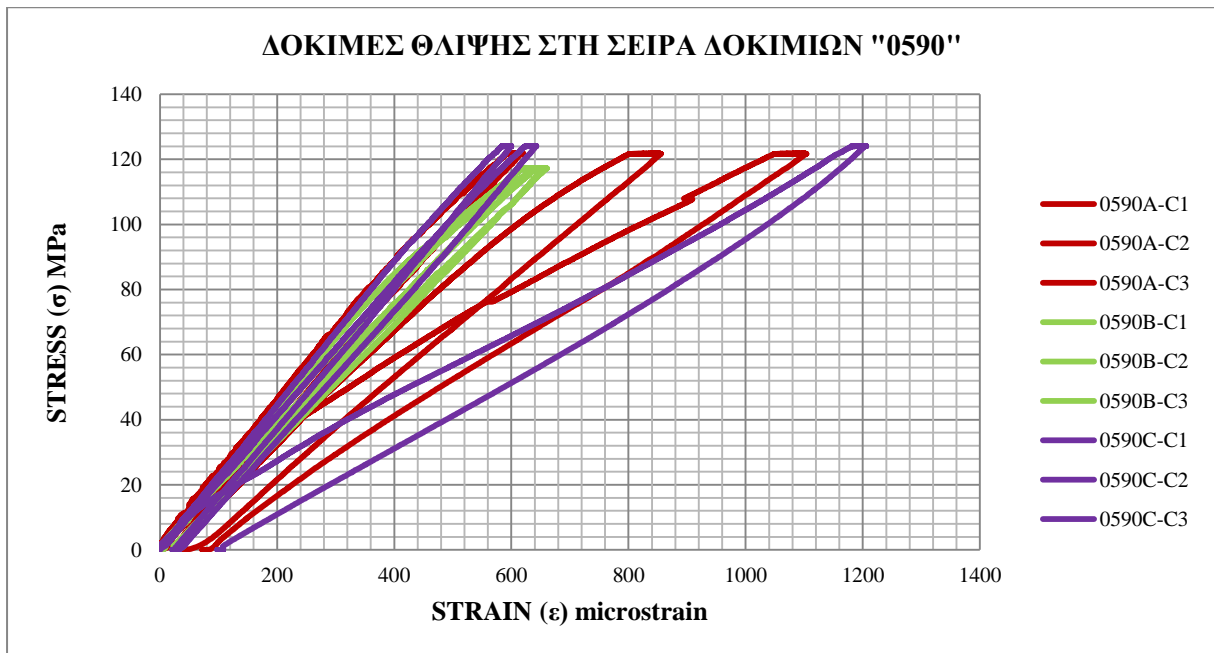


Φωτ. 21: Κυλινδρικό δοκίμιο 0545B.

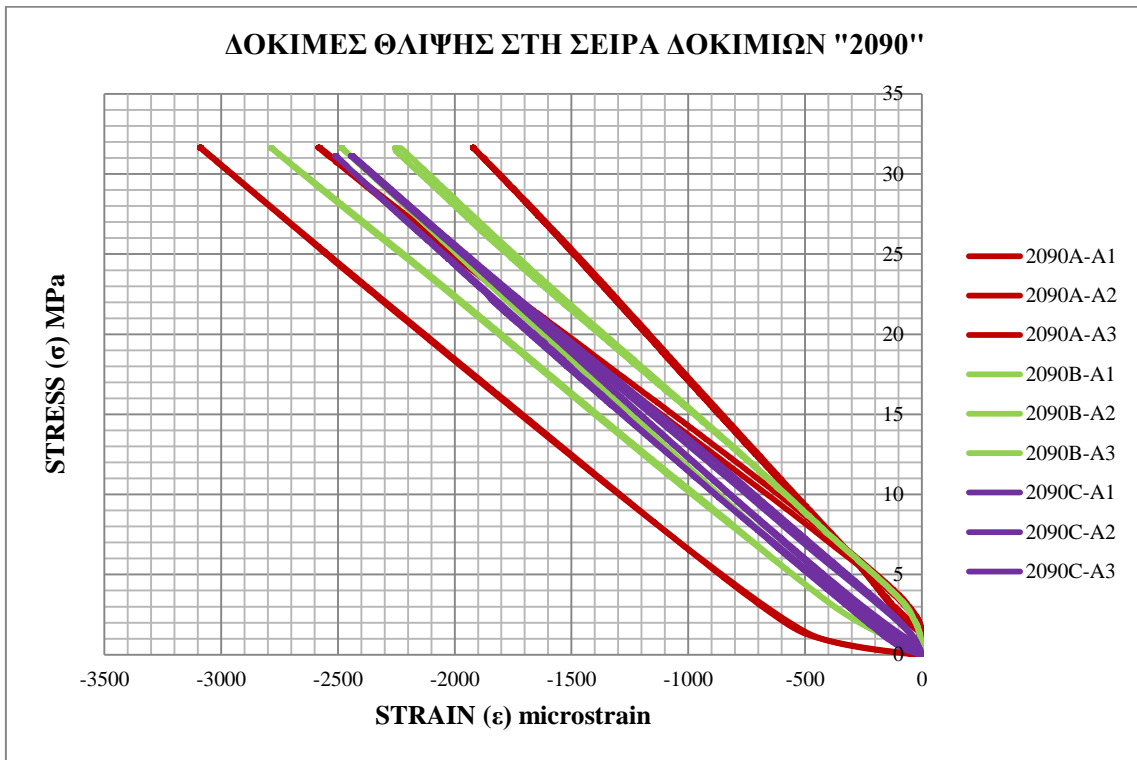
3.3.12 Οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων όλων των σειρών δοκιμών παρουσιάζονται στα Σχήματα 10 έως 14.



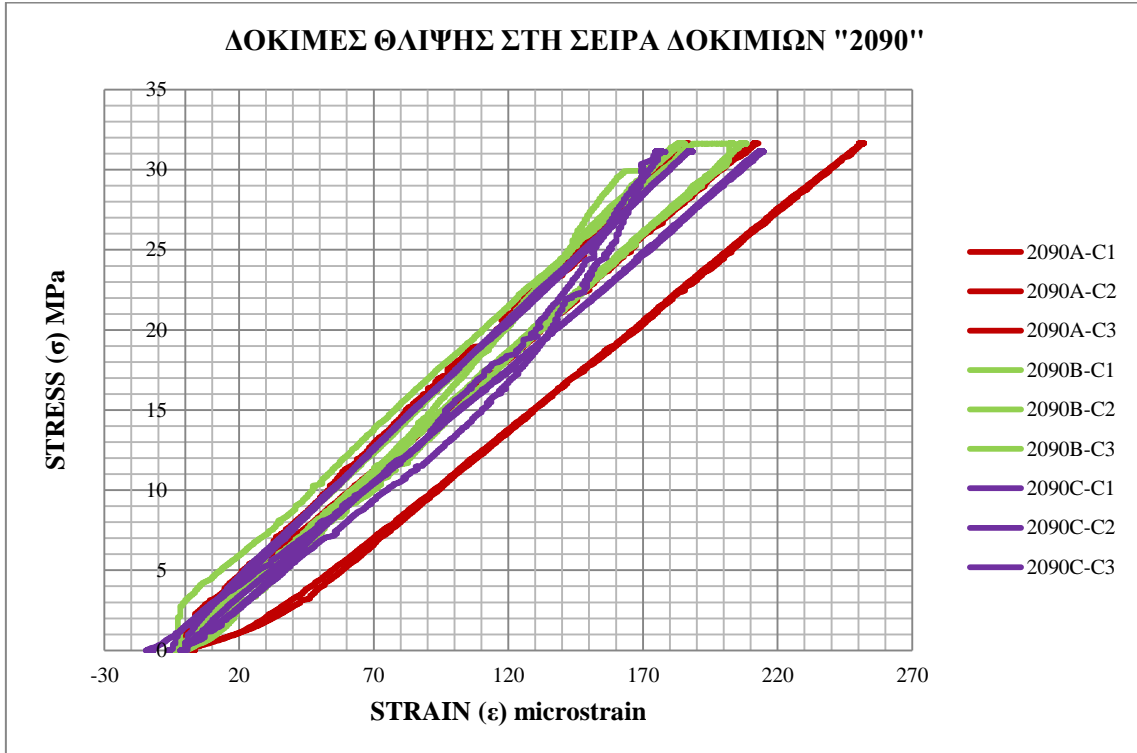
Σχήμα 10: Καμπύλες τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 0590.



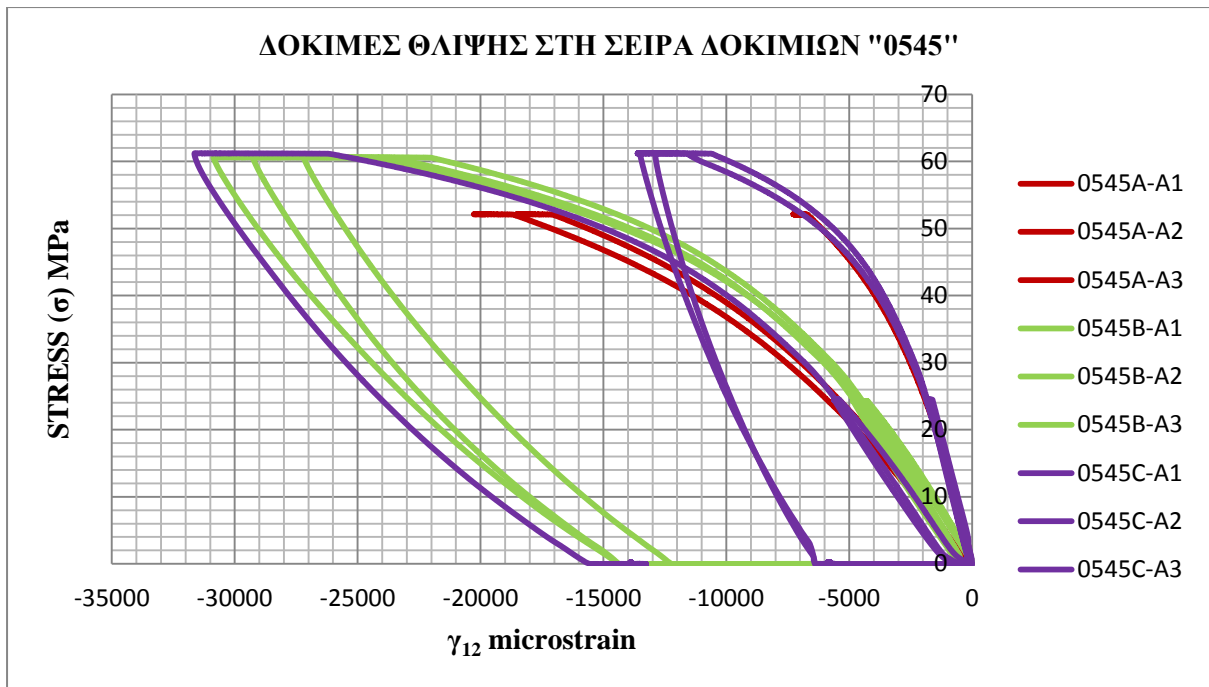
Σχήμα 11: Καμπύλες τάσεων – περιφερειακών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 0590.



Σχήμα 12: Καμπύλες τάσεων – αξονικών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 2090.



Σχήμα 13: Καμπύλες τάσεων – περιφερειακών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 2090.



Σχήμα 14: Καμπύλες τάσεων – γ_{12} στη σειρά δοκιμών 0545.

4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης και τη σύγκριση των αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων των πειραματικών δοκιμών κυλίνδρων από σύνθετα υλικά φορτιζόμενων σε αξονική θλίψη, που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας (ENT) της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

4.2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η αριθμητική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (ΠΣ) ANSYS 13.0. Σκοπός ήταν η ανάπτυξη αξιόπιστων μοντέλων ΠΣ που να προβλέπουν με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση των κυλίνδρων που δοκιμάστηκαν. Τα αναπτυγμένα μοντέλα θα αξιολογηθούν μέσω σύγκρισης των αριθμητικών τους αποτελεσμάτων και των αντίστοιχων πειραματικών μετρήσεων.

4.2.1. Ιδιότητες Υλικών και Μοντελοποίηση

Μοντελοποιήθηκαν τρεις τύποι κυλινδρικών δοκιμίων κατασκευασμένων με τη μέθοδο περιέλιξης των ινών (filament winding). Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των κυλίνδρων είναι:

- Εποξική ρητίνη: Araldite LY556
- Σκληρυντής: Anhydride Hardener HUNTSMAN Aradur 917
- Επιταχυντής: HUNTSMAN DY 070

Ως ενίσχυση (reinforcement) χρησιμοποιήθηκαν ανθρακονήματα T700S. Όλα τα δοκίμια κόπηκαν από μεγαλύτερους κυλίνδρους που κατασκευάστηκαν από την εταιρία B&T. Συνολικά υποβλήθηκαν σε δοκιμές εννέα κυλινδρικά δοκίμια, τρία δοκίμια από κάθε έναν από τρεις διαφορετικούς τύπους κυλίνδρων, όπως παρακάτω:

- Τρία (3) δοκίμια με γωνία περιέλιξης 90° πάχους 5 mm (κωδικός 0590)
- Τρία (3) δοκίμια με γωνία περιέλιξης 90° πάχους 20 mm (κωδικός 2090)
- Τρία (3) δοκίμια με γωνία περιέλιξης $\pm 45^\circ$ πάχους 5 mm (κωδικός 0545)

Όλοι οι κύλινδροι υποβλήθηκαν σε θλιπτική φόρτιση κατά τον άξονά τους εντός της ελαστικής περιοχής απόκρισης του υλικού τους. Το μέγιστο φορτίο που επιβλήθηκε σε όλους τους κυλίνδρους ήταν 200 kN.

Οι βασικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη μοντελοποίηση είναι εκείνες που μετρήθηκαν πειραματικά σε προγενέστερο στάδιο των εργασιών, στο πλαίσιο ενός πλήρους χαρακτηρισμού του υλικού. Οι δοκιμές αυτές περιγράφονται στα εδάφια 2 και 3 της

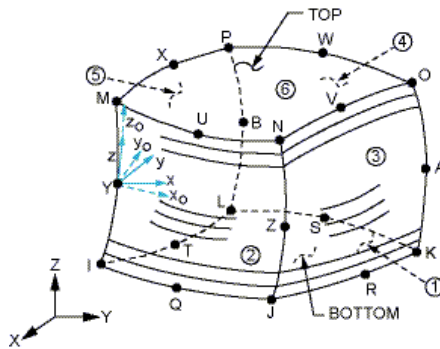
διπλωματικής εργασίας. Το πλήρες σετ ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση φαίνεται στον Πίνακα 30, όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας (Young modulus), G το μέτρο διάτμησης και ν ο λόγος Poisson. Όσον αφορά στους δείκτες, 1 είναι η διεύθυνση των ινών, 2 η διεύθυνση κάθετα στις ίνες και 3 η διεύθυνση κατά το πάχος των κυλινδρικών δοκιμίων. Οι τιμές των E_1 , E_2 και ν_{12} προέκυψαν από τις δοκιμές επίπεδων δοκιμίων του υλικού σε θλίψη, ενώ η τιμή του μέτρου διάτμησης G_{12} από τις δοκιμές κυλινδρικών δοκιμίων σε αξονική θλίψη. Οι τιμές των υπόλοιπων μεγεθών E_3 , G_{23} , G_{13} , ν_{23} και ν_{31} είναι τυπικές τιμές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία και οι οποίες δεν επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης.

Πίνακας 30: Ιδιότητες υλικού μοντέλου ΠΣ.

E_1	111450 (MPa)
E_2	7730 (MPa)
E_3	7120 (MPa)
G_{12}	3540 (MPa)
G_{23}	2800 (MPa)
G_{13}	3925 (MPa)
ν_{12}	0.39
ν_{23}	0.02
ν_{31}	0.016

4.2.2. Τύπος Πεπερασμένων Στοιχείων

Αναπτύχθηκε ένα παραμετρικό μοντέλο ΠΣ με μεταβλητές τη γωνία περιέλιξης των ινών και το πάχος του κυλίνδρου και έγιναν επιλύσεις για όλους τους τύπους των δοκιμίων (0590, 2090 και 4590). Τα μοντέλα ΠΣ που αναπτύχθηκαν αποτελούνται από τρισδιάστατα 20-κομβικά πολυστρωματικά στοιχεία (ονομαζόμενα SOLID186 Layered elements στο ANSYS, Σχήμα 15), με τρεις βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο (μετατοπίσεις στις διευθύνσεις x , y , και z). Το πολυστρωματικό στοιχείο SOLID186 χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει χοντρά κελύφη και συμπαγή υλικά και επιτρέπει τη χρήση μέχρι 250 διαφορετικών στρώσεων. Διαθέτει δυνατότητα ανάλυσης πλαστικότητας, υπερελαστικότητας, ερπυσμού και μεγάλων παραμορφώσεων, και υποστηρίζει ορθοτροπικά υλικά.



Σχήμα 15: Γεωμετρία του πολυστρωματικού στοιχείου SOLID186.

4.2.3. Γεωμετρία Μοντέλου

Τα αναλυτικά στοιχεία της γεωμετρίας των κυλίνδρων που δοκιμάστηκαν περιέχονται στο εδάφιο 3 και αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- μήκος κυλίνδρου: 100 mm
- εσωτερική διάμετρος: 100 mm
- πάχος: 5 mm ή 20 mm

4.2.4. Διαμέριση – Κάνναβος

Για τον καθορισμό του καννάβου του μοντέλου ΠΣ έγινε μελέτη σύγκλισης με κριτήριο την υπολογιζόμενη τιμή της αξονικής θλιπτικής μετατόπισης ($disp_x$) σε επιβαλλόμενο θλιπτικό φορτίο 87 kN. Εξετάστηκαν είκοσι διαφορετικοί συνδυασμοί διαμερίσεων κατά την αξονική (axial) και την περιφερειακή (circ) διεύθυνση του κυλίνδρου (βλέπε και Σχήμα 15), καθώς και δύο τιμές διαμερίσεων κατά το πάχος του κυλίνδρου (1 ή 2 στοιχεία, $t=1$ και $t=2$, αντίστοιχα). Η διαμέριση των καννάβων που μελετήθηκαν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα αξονικής μετατόπισης παρουσιάζονται στους Πίνακες 31, 32 και 33, για τους κυλίνδρους 0590, 2090 και 0545, αντίστοιχα.

Πίνακας 31: Μελέτη σύγκλισης καννάβου στη σειρά δοκιμών 0590.

t=1		t=2	
circ x axial	disp _x	circ x axial	disp _x
50 x 8	1.10689	50 x 8	1.10669
80 x 8	1.10689	80 x 8	1.10669
100 x 8	1.10689	100 x 8	1.10669
150 x 8	1.10689	150 x 8	1.10669
200 x 8	1.10689	200 x 8	1.10669
50 x 10	1.10689	50 x 10	1.10669
80 x 10	1.10689	80 x 10	1.10669
100 x 10	1.10689	100 x 10	1.10669
150 x 10	1.10689	150 x 10	1.10669
200 x 10	1.10689	200 x 10	1.10669
50 x 15	1.10673	50 x 15	1.10668
80 x 15	1.10673	80 x 15	1.10667
100 x 15	1.10673	100 x 15	1.10667
150 x 15	1.10673	150 x 15	1.10667
200 x 15	1.10673	200 x 15	1.10667
50 x 20	1.10662	50 x 20	1.10664
80 x 20	1.10661	80 x 20	1.10664
100 x 20	1.10661	100 x 20	1.10664
150 x 20	1.10661	150 x 20	1.10664
200 x 20	1.10661	200 x 20	1.10664

Πίνακας 32: Μελέτη σύγκλισης κανάβου στη σειρά δοκιμών 2090.

t=1		t=2	
circ x axial	disp _x	circ x axial	disp _x
50 x 8	0.278109	50 x 8	0.278282
80 x 8	0.278108	80 x 8	0.278281
100 x 8	0.278108	100 x 8	0.278281
150 x 8	0.278108	150 x 8	0.278281
200 x 8	0.278108	200 x 8	0.278281
50 x 10	0.278080	50 x 10	0.278274
80 x 10	0.278079	80 x 10	0.278273
100 x 10	0.278079	100 x 10	0.278273
150 x 10	0.278079	150 x 10	0.278273
200 x 10	0.278079	200 x 10	0.278273
50 x 15	0.278075	50 x 15	0.278269
80 x 15	0.278074	80 x 15	0.278267
100 x 15	0.278074	100 x 15	0.278267
150 x 15	0.278074	150 x 15	0.278267
200 x 15	0.278074	200 x 15	0.278267
50 x 20	0.278085	50 x 20	0.278269
80 x 20	0.278083	80 x 20	0.278267
100 x 20	0.278083	100 x 20	0.278267
150 x 20	0.278083	150 x 20	0.278267
200 x 20	0.278083	200 x 20	0.278267

Πίνακας 33: Μελέτη σύγκλισης κανάβου στη σειρά δοκιμών 0545.

t=1		t=2	
circ x axial	disp _x	circ x axial	disp _x
50 x 8	0.392925	50 x 8	0.394353
80 x 8	0.392925	80 x 8	0.394352
100 x 8	0.392925	100 x 8	0.394352
150 x 8	0.392925	150 x 8	0.394352
200 x 8	0.392925	200 x 8	0.394352
50 x 10	0.392925	50 x 10	0.394353
80 x 10	0.392925	80 x 10	0.394352
100 x 10	0.392925	100 x 10	0.394352
150 x 10	0.392925	150 x 10	0.394352
200 x 10	0.392925	200 x 10	0.394352
50 x 15	0.392938	50 x 15	0.39446
80 x 15	0.392937	80 x 15	0.394459
100 x 15	0.392937	100 x 15	0.394459
150 x 15	0.392937	150 x 15	0.394459
200 x 15	0.392937	200 x 15	0.394459
50 x 20	0.392946	50 x 20	0.394497
80 x 20	0.392945	80 x 20	0.394496
100 x 20	0.392944	100 x 20	0.394496
150 x 20	0.392944	150 x 20	0.394496
200 x 20	0.392944	200 x 20	0.394496

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων, για όλες τις διαμερίσεις που λήφθηκαν υπόψη. Όπως αναμενόταν λόγω του είδους της φόρτισης, κάποια μικρή επίδραση έχει μόνο ο αριθμός των στοιχείων κατά την αξονική διεύθυνση, ενώ η μεταβολή του αριθμού των στοιχείων κατά την περιφερειακή διεύθυνση δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Όσον αφορά στον αριθμό των στοιχείων κατά το πάχος, η μεταβολή του από 1 σε 2 έχει μόνο μια μικρή επίδραση στα αποτελέσματα των κυλίνδρων 2090 και 0545.

Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα των Πινάκων 31 έως 33, για την τελική εξαγωγή των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν κάρναβοι με τις παρακάτω διαμερίσεις:

κύλινδροι 0590

1. 1 στοιχείο κατά το πάχος του κυλίνδρου
2. 8 στοιχεία κατά την αξονική διεύθυνση
3. 50 στοιχεία κατά την περιφερειακή διεύθυνση

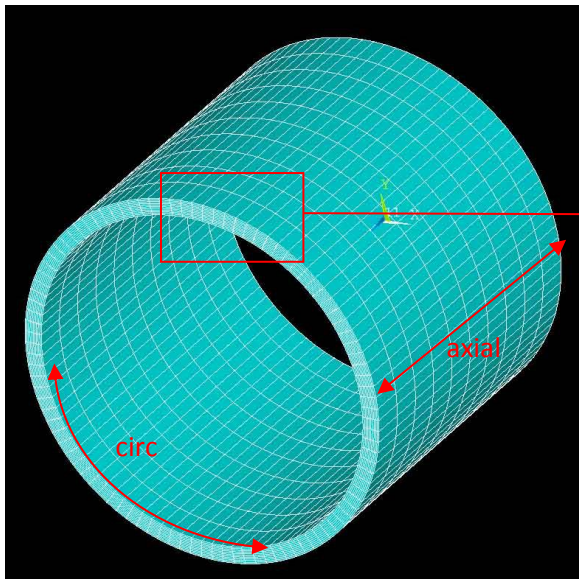
κύλινδροι 2090

1. 2 στοιχεία κατά το πάχος του κυλίνδρου
2. 8 στοιχεία κατά την αξονική διεύθυνση
3. 50 στοιχεία κατά την περιφερειακή διεύθυνση

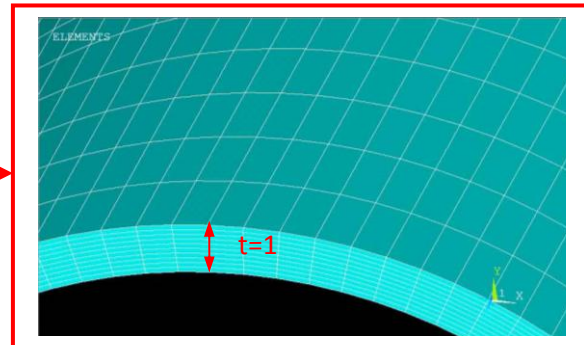
κύλινδροι 0545

1. 2 στοιχεία κατά το πάχος του κυλίνδρου
2. 8 στοιχεία κατά την αξονική διεύθυνση
3. 50 στοιχεία κατά την περιφερειακή διεύθυνση

Στα Σχήματα 15 και 16 φαίνεται η διαμέριση των στοιχείων, όπως αυτή εφαρμόστηκε στα μοντέλα ΠΣ που αναπτύχθηκαν για όλους του τύπους των κυλινδρικών δοκιμίων.



Σχήμα 15: Διαμέριση καννάβου κυλίνδρου



Σχήμα 16: Διαμέριση καννάβου με ένα στοιχείο κατά το πάχος του κυλίνδρου (φαίνονται ακόμη οι 10 όμοιες στρώσεις που μοντελοποιήθηκαν).

4.2.5. Τύπος ανάλυσης

Μελετήθηκαν δύο τύποι αναλύσεων, η γραμμική ανάλυση (μικρές παραμορφώσεις) και η μη γραμμική (μεγάλες παραμορφώσεις). Η πρώτη χρησιμοποιήθηκε σε όλους τους τύπους των δοκιμίων για την αρχική εκτίμηση της συμπεριφοράς του κάθε τύπου κυλίνδρου υπό το πειραματικά εφαρμοζόμενο θλιπτικό φορτίο. Η μη γραμμική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε επίσης σε όλους τους τύπους κυλίνδρων για σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα πειραματικά. Η μη γραμμική ανάλυση παρέχει εν γένει περισσότερο ακριβή λύση, λόγω όμως της ισχυρής γραμμικότητας του προβλήματος και της εφαρμογής του φορτίου εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού, δεν παρουσιάστηκαν αξιοσημείωτες αποκλίσεις μεταξύ των δύο λύσεων.

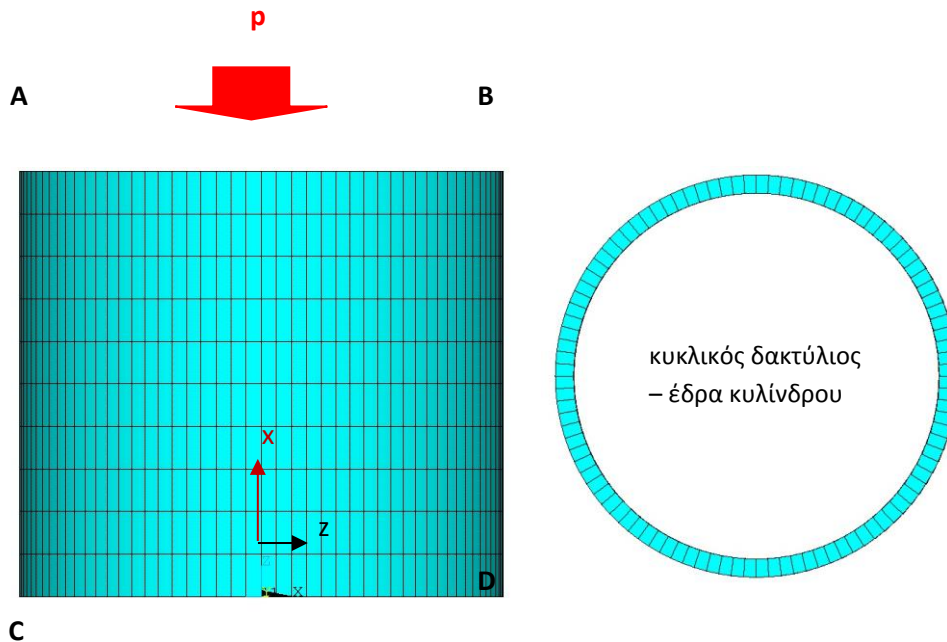
4.2.6. Οριακές συνθήκες και επιβαλλόμενη φόρτιση

Θεωρήθηκε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων, όπου ο άξονας x συμπίπτει με τον διαμήκη άξονα του κυλίνδρου. Δεσμεύτηκαν όλες οι μετατοπίσεις σε όλους τους κόμβους της επιφάνειας της μίας έδρας του κυλίνδρου (κυκλικός δακτύλιος CD, Σχήμα 17), ενώ στους κόμβους της άλλης έδρας (κυκλικός δακτύλιος AB, Σχήμα 17) αφέθηκε ελεύθερη μόνο η μετατόπιση κατά τον άξονα x , διατηρώντας δεσμευμένους όλους του υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας.

Η επιβαλλόμενη φόρτιση μοντελοποιήθηκε ως ασκούμενη πίεση επί της επιφάνειας του κυκλικού δακτυλίου AB του κυλίνδρου (Σχήμα 17). Η αριθμητική τιμή της πίεσης που ασκήθηκε υπολογίσθηκε με βάση τον τύπο $p = F/A$, όπου p η πίεση, F η επιβαλλόμενη δύναμη και A η επιφάνεια του κυκλικού δακτυλίου όπου ασκήθηκε η δύναμη. Ως επιφάνεια A επιβολής του φορτίου ελήφθη η επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής του κυλίνδρου, δηλαδή η επιφάνεια του κυκλικού δακτυλίου, από την παρακάτω σχέση:

$$A = \pi * (R_{out}^2 - R_{in}^2)$$

όπου R_{in} η εσωτερική και R_{out} η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου. Ο ρυθμός επιβολής της πίεσης ήταν ο ίδιος με το ρυθμό που επιβλήθηκε το φορτίο κατά την πειραματική διαδικασία.



Σχήμα 17: Επιβαλλόμενη πίεση και οριακές συνθήκες στις έδρες AB και CD του κυλίνδρου.

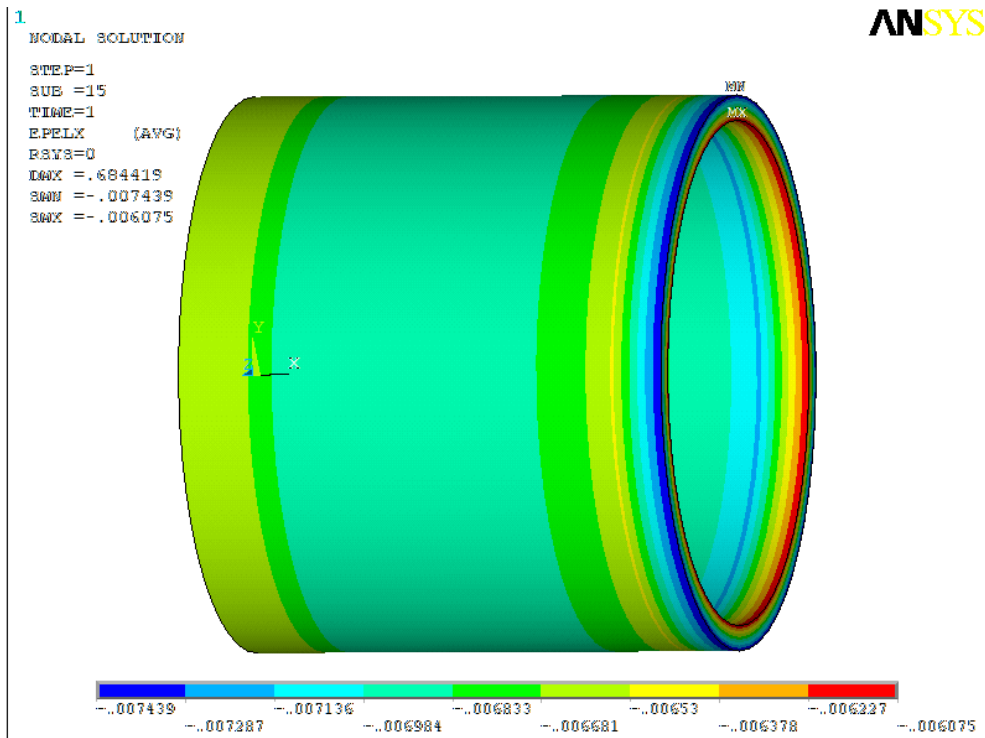
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η σύγκριση των αριθμητικών και των πειραματικών αποτελεσμάτων έγινε συγκρίνοντας τις παραμορφώσεις που υπολογίστηκαν από τα μοντέλα των ΠΣ στα σημεία όπου είχαν τοποθετηθεί μετρητές παραμορφώσεων (strain gages) κατά την πειραματική διαδικασία. Οι μετρητές αυτοί είχαν τοποθετηθεί στο μέσο του μήκους των κυλίνδρων και σε τρία σημεία κατά την περιφερειακή διεύθυνση που απείχαν μεταξύ τους 120° , ήταν δε τύπου ροζέτας με δυνατότητα μέτρησης τόσο της αξονικής όσο και της περιφερειακής παραμόρφωσης. Κατά την πειραματική διαδικασία μετρήθηκαν η επιβαλλόμενη δύναμη, η αξονική μετατόπιση του άνω άκρου του κυλίνδρου και οι παραμορφώσεις από όλους τους μετρητές συναρτήσει του χρόνου (βλέπε και εδάφιο 3).

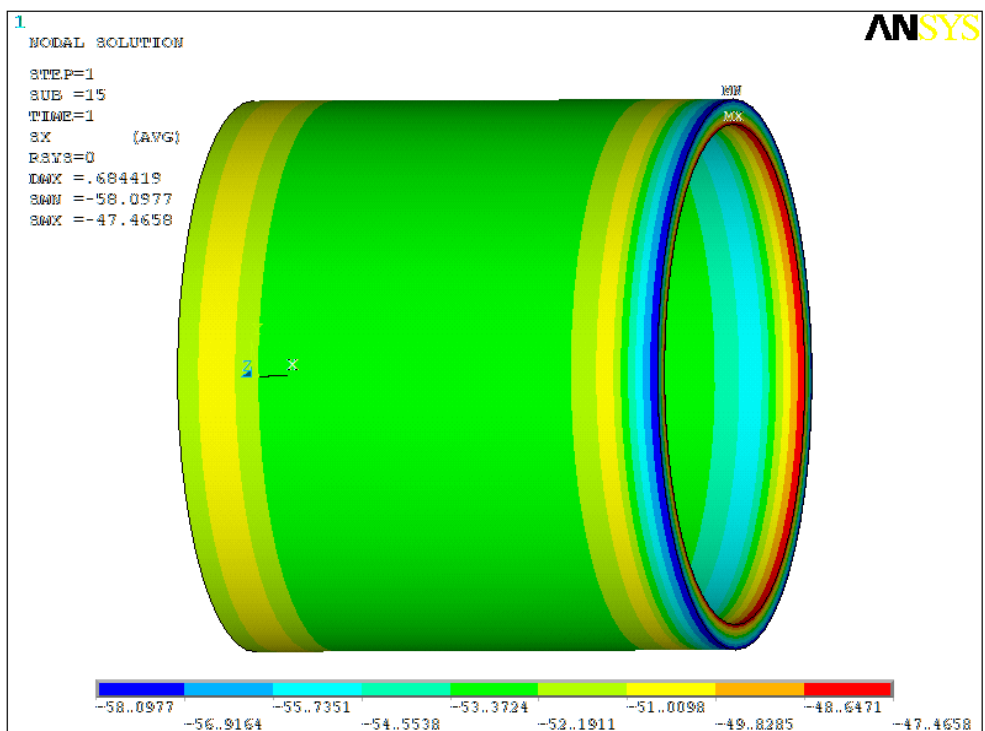
Στα επόμενα εδάφια παρουσιάζονται ο κατανομές των αξονικών παραμορφώσεων και τάσεων για κάθε τύπο δοκιμίων. Επίσης παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της μεταβολής των παραμορφώσεων συναρτήσει της επιβαλλόμενης τάσης μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων των μοντέλων ΠΣ.

5.1. Κύλινδροι 0590

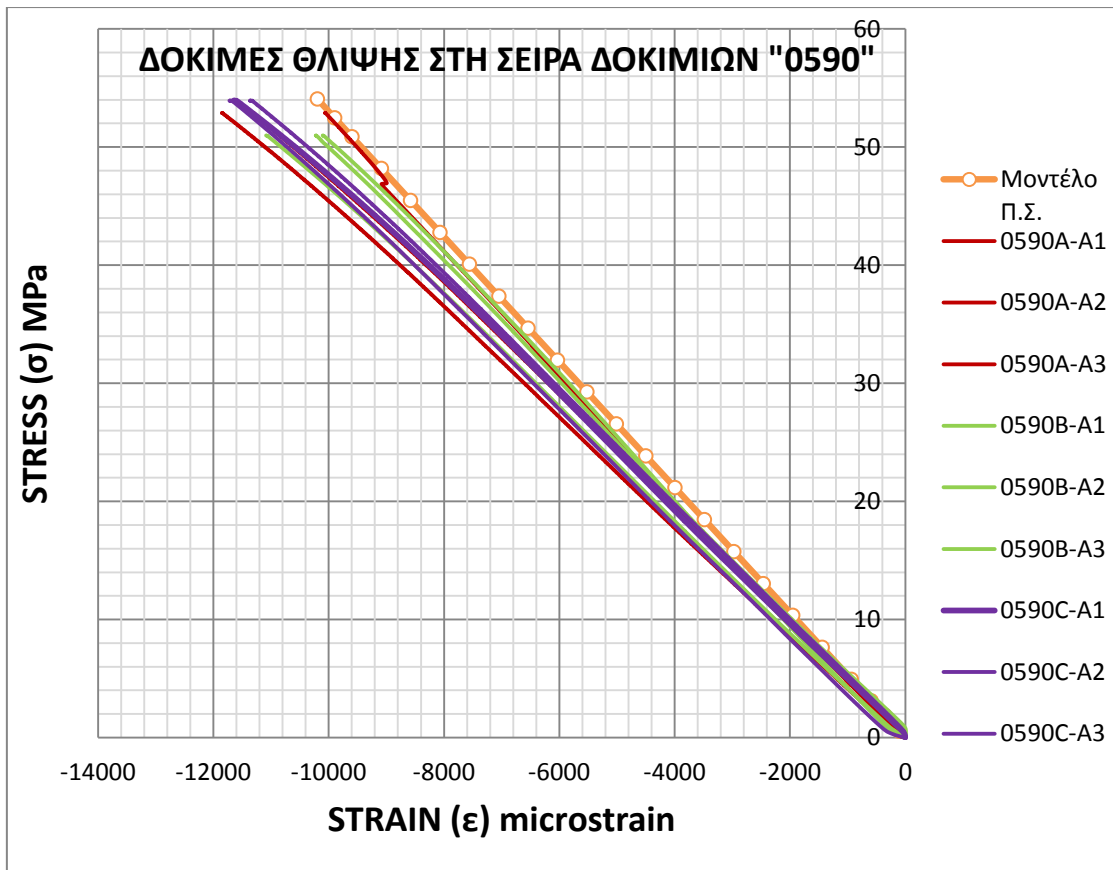
Η κατανομή των παραμορφώσεων των δοκιμίων 0590 κατά τη διεύθυνση x εμφανίζεται στο Σχήμα 18, ενώ η κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x παρουσιάζεται στο Σχήμα 19, για επιβαλλόμενη δύναμη 87 kN. Στο Σχήμα 20 παρουσιάζεται η σύγκριση των καμπύλων επιβαλλόμενης τάσης – παραμορφώσεων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Όπως παρατηρείται από αυτό το διάγραμμα, υπάρχει πολύ καλή σύμπτωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την ορθότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου ΠΣ σε σχέση με τα πραγματικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του κυλίνδρου (γεωμετρία, μηχανικές ιδιότητες υλικού, πειραματικές συνθήκες).



Σχήμα 18: Κατανομή των παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση x, των δοκιμών 0590.



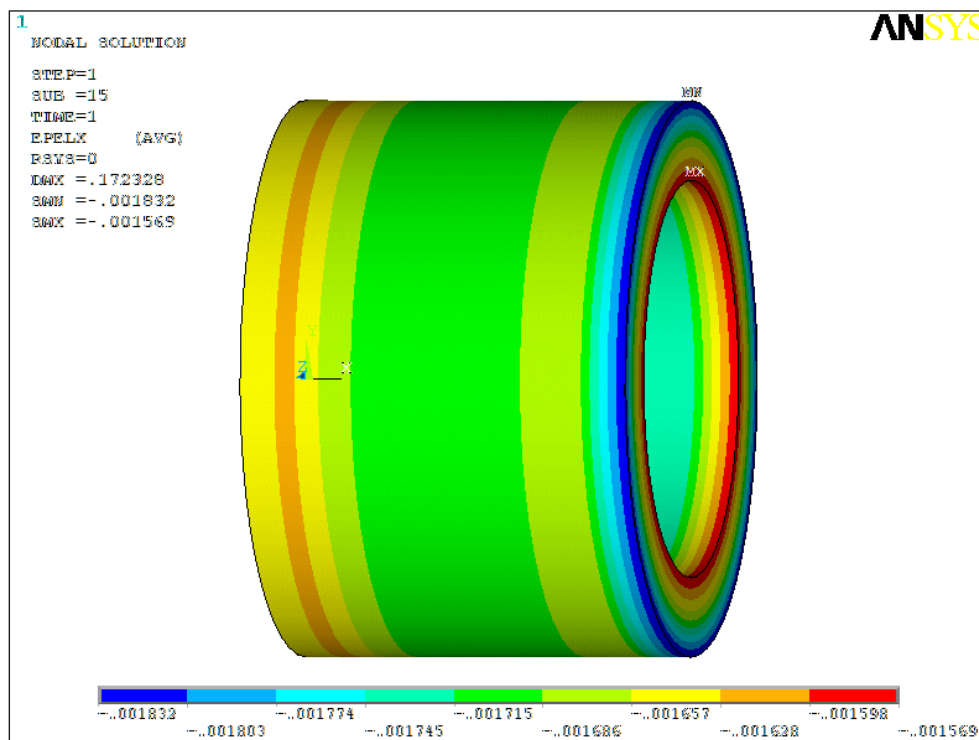
Σχήμα 19: Κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x, των δοκιμών 0590.



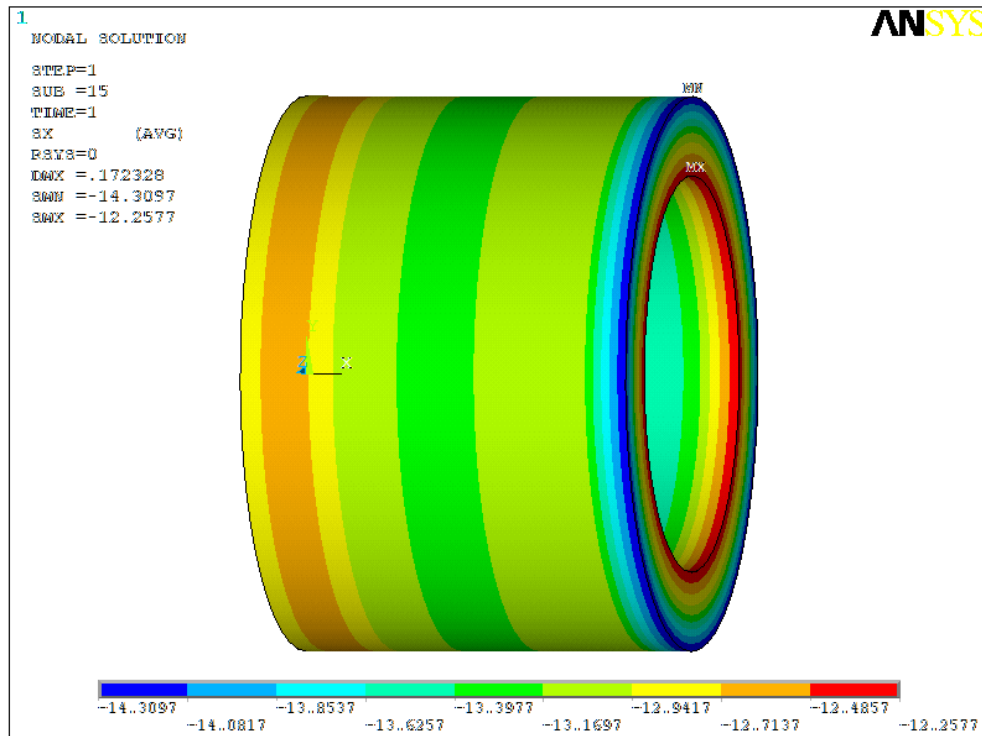
Σχήμα 20: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 0590.

5.2. Κύλινδροι 2090

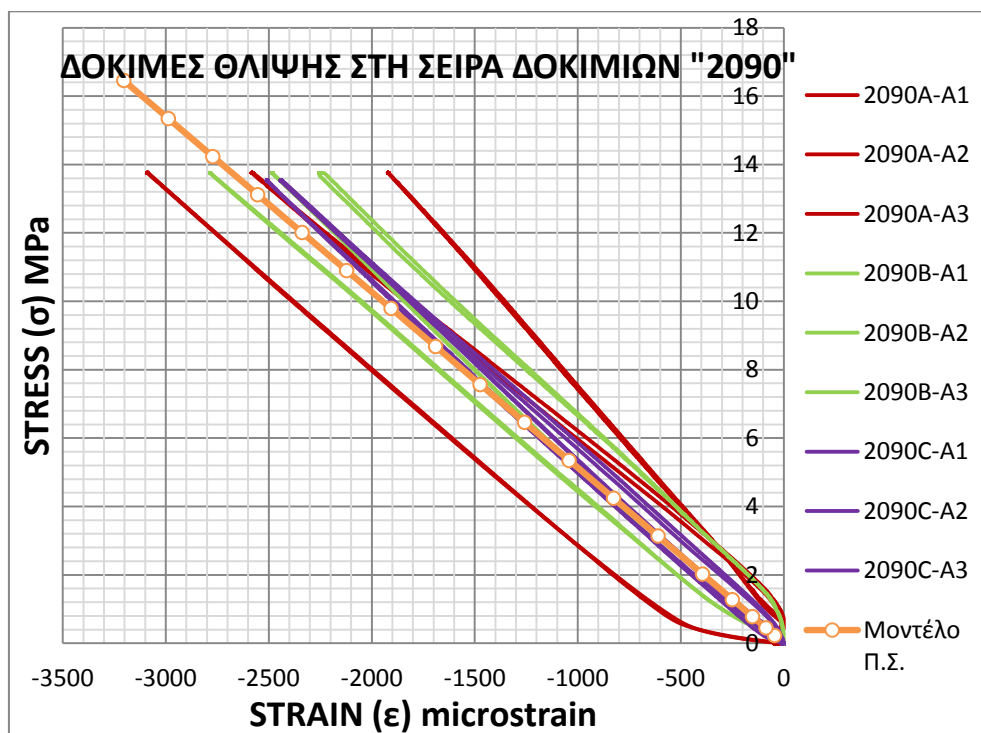
Η κατανομή των παραμορφώσεων των δοκιμίων 2090 κατά τη διεύθυνση x εμφανίζεται στο Σχήμα 21, ενώ η κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x παρουσιάζεται στο Σχήμα 22, για επιβαλλόμενη δύναμη 87 kN. Στο Σχήμα 23 παρουσιάζεται η σύγκριση των καμπύλων επιβαλλόμενης τάσης – παραμορφώσεων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Όπως και προηγουμένως, υπάρχει καλή σύμπτωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις, λαμβάνοντας επιπρόσθετα υπόψη και τη μικρή διασπορά που παρατηρείται στις πειραματικές μετρήσεις. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει για άλλη μία φορά την ορθότητα της διαδικασίας μοντελοποίησης με ΠΣ.



Σχήμα 21: Κατανομή των παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση x, των δοκιμίων 2090.



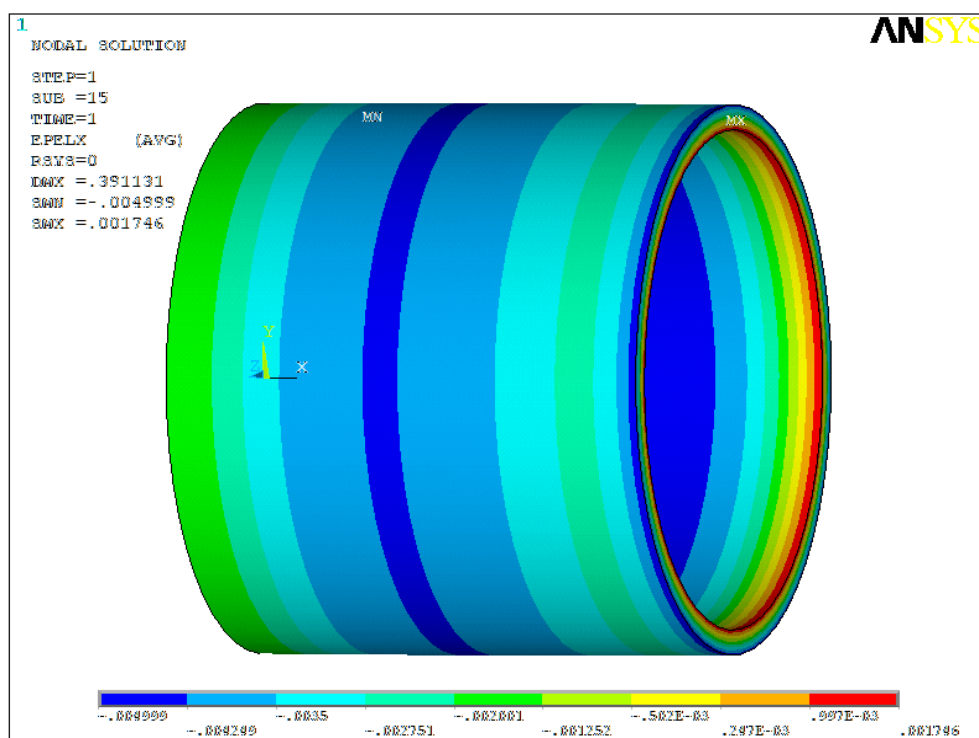
Σχήμα 22: Κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x, των δοκιμών 2090.



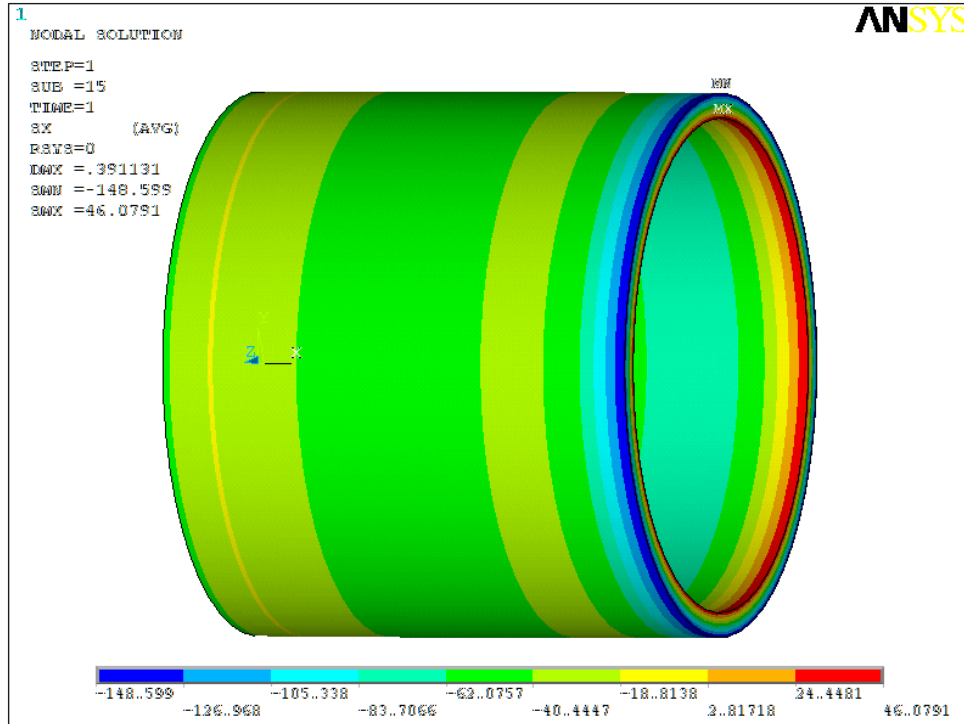
Σχήμα 23: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 2090.

5.3 Κύλινδροι 0545

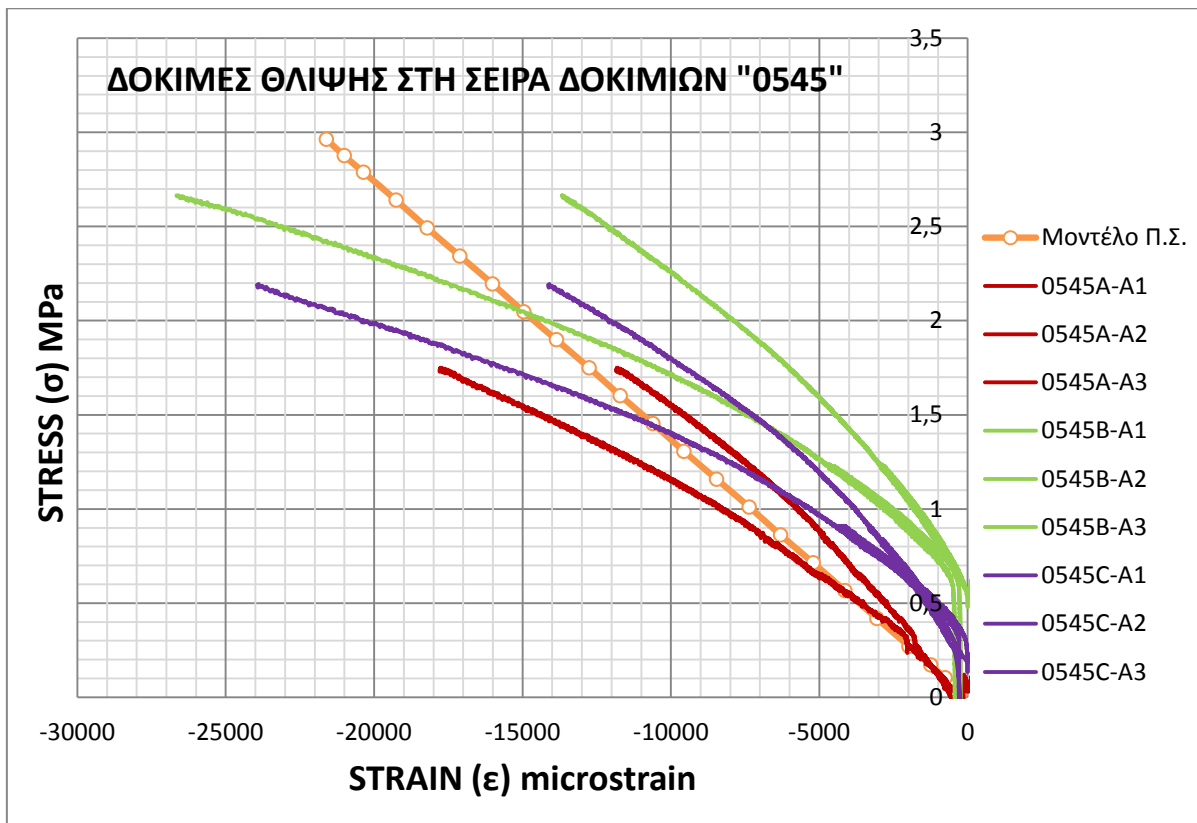
Η κατανομή των παραμορφώσεων των δοκιμίων 0545 κατά τη διεύθυνση x εμφανίζεται στο Σχήμα 24, ενώ η κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x παρουσιάζεται στο Σχήμα 25, για επιβαλλόμενη δύναμη 87 kN. Στο Σχήμα 26 παρουσιάζεται η σύγκριση των καμπύλων επιβαλλόμενης τάσης – παραμορφώσεων μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση αυτή, αν και η εν γένει σύμπτωση των αποτελεσμάτων είναι καλή, παρατηρείται ότι το μοντέλο ΠΣ αδυνατεί να προβλέψει τη μη γραμμική απόκριση που μετρήθηκε κατά τις πειραματικές δοκιμές. Αυτές οι μη γραμμικότητες εκτιμάται ότι οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες που παρατηρήθηκαν στα κυλινδρικά δοκίμια (βλέπε και εδάφιο 3) και οι οποίες δεν μοντελοποιήθηκαν με τη μέθοδο των ΠΣ.



Σχήμα 24: Κατανομή των παραμορφώσεων κατά τη διεύθυνση x, των δοκιμίων 0545.



Σχήμα 25: Κατανομή των τάσεων κατά τη διεύθυνση x, των δοκιμών 0545.



Σχήμα 26: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών παραμορφώσεων στη σειρά δοκιμών 0545.