



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (ΔΙΠΜΣ)
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΡΩΜΑΤΩΣΗΣ CFRP ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΗΝ
ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ ΤΟΥΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ Ε. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ Α. ΒΕΛΛΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Επιβλέπων αυτής της εργασίας υπήρξε ο καθηγητής κ. Δημήτριος Ε. Μανωλάκος στον οποίο και επιθυμώ να εκφράσω τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου τόσο για την εμπιστοσύνη και εκτίμηση την οποία επέδειξε προς το πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, όσο και γιατί υπήρξε πολύτιμος συνεργάτης και αρωγός σε οποιοδήποτε πρόβλημα ανέκυψε κατά το χρονικό διάστημα της σπουδής μου στο παρόν αντικείμενο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζονται και προς τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Αλέξανδρο Κιτσέλη ο οποίος επέδειξε καθ' όλο το παραπάνω χρονικό διάστημα αμέριστη συμπαράσταση για επίλυση προβλημάτων που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας και μου παραχώρησε τον εξοπλισμό του εργαστηρίου του για την κατασκευή των πλακιδίων CFRP. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται επίσης και προς όλο το προσωπικό του εργαστηρίου για την μεγάλη βοήθειά του τόσο κατά την προετοιμασία όσο και κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων που έλαβαν χώρα στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2011

Αριστείδης Α. Βελλής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταπτυχιακή αυτή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο του Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών των Υλικών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών.

Η σπουδαιότητα των πολύστρωτων σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα γνωστά ως CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) στην ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας είναι αναμφισβήτητη αφού το πεδίο εφαρμογών τους είναι πολύ ευρύ.

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη πλακιδίων CFRP τα οποία καταπονούνται σε κάμψη τριών σημείων (3 POINT BENDING) και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της διαστρωμάτωσής τους.

Αρχικά κατασκευάζονται πλακίδια CFRP και περιγράφεται επακριβώς η διαδικασία κατασκευής τους. Κατόπιν γίνονται πειραματικές δοκιμές στα παραγόμενα δοκίμια σε κάμψη τριών σημείων και χαράσσονται η αντίστοιχες καμπύλες flexure load – flexure extension. Στη συνέχεια ακολουθεί αριθμητική προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας και σύγκριση δεδομένων με τα αντίστοιχα των πειραματικών δοκιμών.

Η μεταπτυχιακή εργασία ολοκληρώνεται με τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές και την αριθμητική προσομοίωση.

Στο τέλος αναφέρεται η βιβλιογραφία η οποία καλύπτει σε ικανοποιητικό βαθμό όλα τα θέματα που αφορούν το εξεταζόμενο αντικείμενο.

ABSTRACT

The importance of composite laminated materials with carbon fibers known as CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) in the development of modern technology is undeniable. In this master thesis we manufacture laminated plates of CFRP and test them under three-point-bending. Then we analyze the outcomes in order to describe accurately the bending mechanism. The flexure load – flexure extension curves of the three point bending experiments are essential for our analysis, helping us understanding the behavior of CFRP under bending. Finally, we simulate the experiments with ANSYS software and we compare the results with those provided through the experimental procedure.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	2
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	4
Λίστα Εικόνων.....	8
Λίστα Πινάκων.....	9
Λίστα Σχημάτων.....	10
1. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	11
1.1. Εισαγωγή.....	11
1.2. Εφαρμογές των σύνθετων υλικών.....	12
1.3. Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών.....	14
1.4. Ινώδη Σύνθετα Υλικά.....	15
1.5. Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή.....	17
1.6. Υλικά και Ιδιότητες Ινών.....	20
1.6.1 Ίνες υάλου ή υαλονήματα.....	21
1.6.2 Ίνες άνθρακα ή ανθρακονήματα (Carbon fibers).....	23
1.6.3 Ίνες Πολυμερούς (Polymer fibers).....	25
1.7. Ιδιότητες και υλικά μητρών σύνθετων υλικών.....	27
1.7.1 Οργανικές μήτρες.....	28
1.7.2 Μεταλλικές και Κεραμικές μήτρες.....	30
1.8. Πολύστρωτα ή Στρωσιγενή σύνθετα υλικά (Laminated Composites).....	31
1.8.1 Κωδικοποίηση και συμβολισμός πολύστρωτων σύνθετων υλικών.....	33
1.8.2 Μηχανική των πολύστρωτων σύνθετων υλικών.....	35
1.8.3 Κριτήρια θραύσης.....	37
1.8.3.1 Κριτήριο Μέγιστης Τάσης.....	37

1.8.3.2	Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης.....	38
1.8.3.3	Κριτήριο Tsai-Hill.....	38
1.8.3.4	Κριτήριο Hoffman.....	39
1.8.3.5	Κριτήριο Tsai-Wu τάσης.....	39
1.9.	Μέθοδοι κατασκευής σύνθετων υλικών	41
2.	ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	43
2.1.	Εισαγωγή.....	43
2.2.	Κατασκευή πλακιδίων CFRP	44
3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	54
3.1	Εισαγωγή.....	54
3.2	Πειραματικός Εξοπλισμός	55
3.3	Αποτελέσματα Πειραματική Διδικασίας.....	61
3.3.1	Δοκίμιο #1.....	61
3.3.1.1	Δοκίμιο #1.1	61
3.3.1.2	Δοκίμιο #1.2	63
3.3.1.3	Δοκίμιο #1.3	64
3.3.2	Δοκίμιο #2.....	66
3.3.2.1	Δοκίμιο #2.1	67
3.3.2.2	Δοκίμιο #2.2	68
3.3.2.3	Δοκίμιο #2.3	69
3.3.3	Δοκίμιο #3.....	70
3.3.3.1	Δοκίμιο #3.1	71
3.3.3.2	Δοκίμιο #3.2	72
3.3.3.3	Δοκίμιο #3.3	73
3.3.4	Δοκίμιο #4.....	74
3.3.4.1	Δοκίμιο #4.1	76
3.3.4.2	Δοκίμιο #4.2	77

3.3.4.3	Δοκίμιο #4.3	79
3.3.5	Δοκίμιο #5.....	81
3.3.5.1	Δοκίμιο #5.1	81
3.3.5.2	Δοκίμιο #5.2	83
3.3.5.3	Δοκίμιο #5.3	85
3.3.6	Δοκίμιο #6.....	87
3.3.6.1	Δοκίμιο #6.1	87
3.3.6.2	Δοκίμιο #6.2	89
3.3.6.3	Δοκίμιο #6.3	90
3.3.7	Δοκίμιο #7.....	92
3.3.7.1	Δοκίμιο #7.1	93
3.3.7.2	Δοκίμιο #7.2	94
3.3.7.3	Δοκίμιο #7.3	96
3.3.8	Δοκίμιο #8.....	97
3.3.8.1	Δοκίμιο #8.1	98
3.3.8.2	Δοκίμιο #8.2	99
3.3.8.3	Δοκίμιο #8.3	101
3.4	Συγκεντρωτικοί Πίνακες-Συγκριτικά Γραφήματα	103
4.	Αριθμητική Προσομοίωση – Μοντελοποίηση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 13.....	106
4.1	Εισαγωγή.....	106
4.2	Σύγκριση πειραματικών δοκιμών και αριθμητικής προσομοίωσης.....	107
4.2.1	Δοκίμιο #1.....	107
4.2.2	Δοκίμιο #2.....	110
4.2.3	Δοκίμιο #3.....	112
4.2.4	Δοκίμιο #4.....	115
4.2.5	Δοκίμιο #5.....	117

4.2.6	Δοκίμιο #6.....	119
4.2.7	Δοκίμιο #7.....	121
5.	Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις	124
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	126
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	134
	Ηλεκτρονικές Πηγές	136

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1: Εφαρμογές σύνθετων υλικών [7]	13
Εικόνα 2: Fiberglass	22
Εικόνα 3: Carbon Fibers	23
Εικόνα 4: Διάταξη ατόμων άνθρακα στο γραφίτη	23
Εικόνα 5: Ίνες Kevlar	26
Εικόνα 6: (a) chopped strand mat, (b) unidirectional, (c) woven carbon fibers	32
Εικόνα 7: prepreg σε τόπια στην κατάψυξη στους -18 °C	44
Εικόνα 8: Λαμαρίνα	45
Εικόνα 9: Mould Cleaner	45
Εικόνα 10: Mould Sealer	45
Εικόνα 11: Αποκολλητικό μέσο 227CEE	46
Εικόνα 12: Κοπή prepreg CFRP	46
Εικόνα 13: κατασκευή πλακιδίων CFRP	47
Εικόνα 14: τοποθέτηση κουβέρτας αναπνοής	48
Εικόνα 15: Vacuum bagging	48
Εικόνα 16: Φούρνος	49
Εικόνα 17: Τα πλακίδια CFRP που προκύπτουν	51
Εικόνα 18: Κοπή πλακιδίων CFRP στο ψαλίδι	52
Εικόνα 19: Φινίρισμα πλευρικών επιφανειών	53
Εικόνα 20: Ειδική διάταξη για 3-POINT BENDING	60
Εικόνα 21: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 0,5 mm	107
Εικόνα 22: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 5,7 mm	108
Εικόνα 23: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 10 mm	108
Εικόνα 24: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 0,6 mm	110
Εικόνα 25: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 6,2 mm	110
Εικόνα 26: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 10 mm	111
Εικόνα 27: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 0,4 mm	112
Εικόνα 28: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 5 mm	113
Εικόνα 29: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 8 mm	113
Εικόνα 30: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 1 mm	115
Εικόνα 31: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 11 mm	115

Εικόνα 32: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 20 mm	116
Εικόνα 33: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 1,25 mm	117
Εικόνα 34: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 11,4 mm	117
Εικόνα 35: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 25 mm	118
Εικόνα 36: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 1 mm	119
Εικόνα 37: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 12 mm	119
Εικόνα 38: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 22 mm	120
Εικόνα 39: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 1 mm	121
Εικόνα 40: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 8 mm	121
Εικόνα 41: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 22 mm	122

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων ως προς απαιτούμενο βάρος υλικού συνθέτων υλικών και μετάλλων	17
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές Μηχανικές Ιδιότητες Συνθέτων Υλικών	19
Πίνακας 3: Ιδιότητες ινών (fibers).....	20
Πίνακας 4: Ιδιότητες νηματιδίων (whiskers).....	21
Πίνακας 5: Χημική σύσταση και ιδιότητες υαλονημάτων	21
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα.....	25
Πίνακας 7: Σύγκριση ιδιοτήτων ινών Kevlar με άλλες ίνες	25
Πίνακας 8: Ιδιότητες ρητινών	30
Πίνακας 9: Σύγκριση κριτηρίων Θραύσης	40
Πίνακας 10: διαστρωμάτωση πλακιδίων	47
Πίνακας 11: Πάχος πλακιδίων	52
Πίνακας 12: Ολική απορροφούμενη ενέργεια – Μέγιστο Φορτίο	103
Πίνακας 13: Μ.Ο. ολικής απορροφούμενης ενέργειας και μέγιστου φορτίου	104

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 1: Ταξινόμηση με βάση των προσανατολισμό των ινών.....	15
Σχήμα 2: Τύποι διάταξης ινών: (α) μονοδιευθυντικές, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση	16
Σχήμα 3: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών	16
Σχήμα 4: Παραγωγή ινών άνθρακα	24
Σχήμα 5: Σύγκριση ινών	27
Σχήμα 6: Ταξινόμηση μητρώων	28
Σχήμα 7: Είδη θερμοπλαστικών μητρώων	28
Σχήμα 8: Ταξινόμηση θερμοσκληρυνόμενων μητρώων	29
Σχήμα 9: Τύποι ενίσχυσης μεταλλικών μητρώων	30
Σχήμα 10: Ανατομία στρωματικού σύνθετου υλικού.....	31
Σχήμα 11: Τύποι διαστρωμάτωσης.....	32
Σχήμα 12: Συμβολισμοί πολύστρωτων.....	35
Σχήμα 13: Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ισοτροπικών και ορθοτροπικών υλικών	35
Σχήμα 14: (a) Μέθοδος παραγωγής σε «Αυτόκλειστο Κλίβανο» (Autoclave),(b) Μέθοδος «Ανοικτού καλουπιού» (Open Molding), (c) Μέθοδος «Περιέλιξης Νήματος» (Filament Winding), (d) Μέθοδος «Χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση» (Resin Transfer Molding)	42
Σχήμα 15: C.F.R.P.	43
Σχήμα 16: 3-point bending.....	43
Σχήμα 17: διάγραμμα καμπυλών Curing.....	49
Σχήμα 18: διάγραμμα καταγραφικών πίεσης.....	50
Σχήμα 19: Συνθήκες Περιβάλλοντος	51
Σχήμα 20: Σχηματική αναπαράσταση του 3-POINT BENDING.....	54
Σχήμα 21: Μηχανική πρέσα INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου 10 KNt.	55
Σχήμα 22: Πίνακας ελέγχου πρέσας INSTRON 4482.....	56
Σχήμα 23: Αρχικές επιλογές του προγράμματος INSTRON Series IX.....	59
Σχήμα 24: Μέσος όρος ολικής απορροφούμενης ενέργειας.....	104
Σχήμα 25: Μέσος όρος μέγιστου φορτίου	105

1. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.1. Εισαγωγή

Τα **σύνθετα υλικά (composite materials)** αποτελούν μια πολύ σημαντική κατηγορία υλικών με ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι ξεχωριστές ιδιότητες που παρουσιάζουν σε σχέση με τα κλασσικά – συμβατικά υλικά τα καθιστούν ιδανικά για πλήθος κατασκευών προσδίδοντάς τους βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Γενικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι τα σύνθετα υλικά και η εξέλιξή τους αποτέλεσαν και αποτελούν βασικό παράγοντα στην ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας, γεγονός που τα καθιστά σημαντικό πεδίο έρευνας και ανάπτυξης για τους μηχανικούς.

ΟΡΙΣΜΟΣ (Agarwal–1990): *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Η λέξη «σύνθετα» στην ονομασία των υλικών αυτών υποδηλώνει την ύπαρξη δύο ή και περισσότερων υλικών τα οποία συνδυάζονται μεταξύ τους σε μακροσκοπική κλίμακα για την παραγωγή ενός νέου βελτιωμένου υλικού. Εκείνο που πρέπει να τονιστεί στον ορισμό των συνθέτων υλικών είναι η μακροσκοπική κλίμακα εξέτασης των υλικών. Διαφορετικά υλικά μπορούν να συνδυαστούν σε μικροσκοπική κλίμακα όπως στην περίπτωση των κραμάτων, αλλά το αποτέλεσμα είναι μακροσκοπικά ομοιογενές. Αντίθετα τα σύνθετα υλικά διατηρούν την ανομοιογένειά τους σε επίπεδο κατασκευής, καθιστώντας πολύ εύκολη την αναγνώριση των συστατικών υλικών στις περισσότερες περιπτώσεις.

Το πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών είναι ότι, συνήθως επιδεικνύουν βελτιωμένες ιδιότητες σε σχέση με τα υλικά από τα οποία αποτελούνται και παρουσιάζουν ορισμένες ιδιότητες που κανένα από τα συστατικά υλικά δεν διαθέτε. Κάποιες από τις ιδιότητες που μπορούν να βελτιωθούν είναι η αντοχή, η ακαμψία, η αντοχή στη διάβρωση και στην κόπωση, το βάρος, η θερμική αγωγιμότητα, ο συντελεστής θερμικής διαστολής κ.α.

Όπως είναι φυσικό οι παραπάνω ιδιότητες δεν βελτιώνονται ταυτόχρονα σε ένα υλικό. Έτσι ανάλογα με την εφαρμογή και τις συγκεκριμένες βελτιωμένες ιδιότητες που θέλουμε να έχει το εκάστοτε σύνθετο υλικό επιλέγονται τα αντίστοιχα συστατικά υλικά καθώς και η διεργασία παραγωγής του.

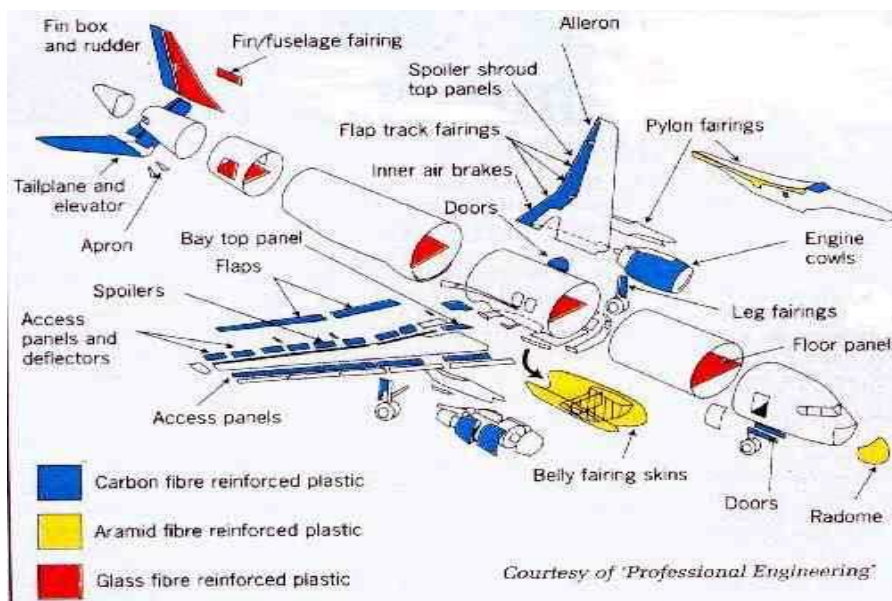
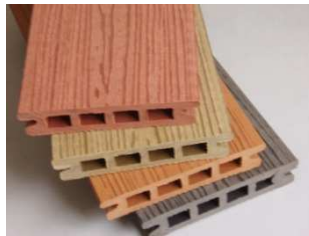
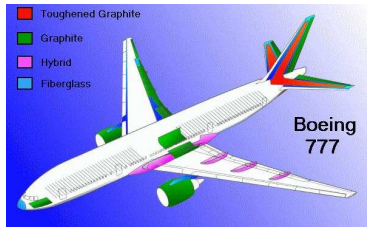
1.2. Εφαρμογές των σύνθετων υλικών

Αρχικά θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα σύνθετα υλικά δεν είναι κάτι καινούριο σαν έννοια και ιστορικά, σύνθετα υλικά κατασκευασμένα από άνθρωπο υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια. Παραδείγματα υπάρχουν πολλά, ενδεικτικά οι αρχαίοι Αιγύπτιοι χρησιμοποίησαν άχυρα για την ενίσχυση της λάσπης προκειμένου να κατασκευάσουν πλίνθους, οι Ατζέκοι χρησιμοποιούσαν ξύλινο οπλισμό για την ενίσχυση των κατασκευών τους ενώ διαφορετικά υλικά σε στρώσεις χρησιμοποιήθηκαν από τον άνθρωπο για να κατασκευάσει σπαθιά και πανοπλίες. Ωστόσο η εξέλιξη των σύνθετων υλικών και η κατασκευή συνθέτων υψηλής τεχνολογίας συντελέστηκε τα τελευταία χρόνια.[24]

Οι δεξαμενές και τα μεγάλα δοχεία τα οποία κατασκευάζονται με την μέθοδο περιτυλίξεως ινών υάλου υπήρξαν η πρώτη εφαρμογή χρήσεως των μοντέρνων σύνθετων υλικών. Η αεροδιαστημική βιομηχανία είναι ένας από τους τομείς που συνέβαλε σημαντικά στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών. Ο οριζόντιος σταθεροποιητής (stabilizer) των αεροσκαφών F-111 υπήρξε το πρώτο τεμάχιο αεροσκάφους που κατασκευάστηκε από σύνθετο υλικό. Με την πάροδο του χρόνου σε όλο και περισσότερες αεροναυπηγικές εφαρμογές γίνεται χρήση σύνθετων υλικών υψηλής τεχνολογίας (F-16, Boeing 767, Σοβιετικό μεταγωγικό Antonov 124, Airbus A310-300, Rafale της Dassault Breguet, European Fighter Aircraft κ.α.).[7]

Εκτός της αεροπορικής βιομηχανίας, τα υψηλής τεχνολογίας σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογές και σε άλλους τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας. Από την αυτοκινητοβιομηχανία και την ναυτιλία μέχρι τον αθλητισμό κάθε εξάρτημα όπου το βάρος, η ακαμψία και η αντοχή παίζουν σημαντικό ρόλο στην λειτουργικότητα του, είναι κατασκευασμένο από σύνθετα υλικά. Ενδεικτικά αναφέρουμε, τμήματα και εξαρτήματα αυτοκινήτων και μοτοσυκλετών (συμβατικών ή αγωνιστικών), ναυτικά σκάφη, κουπιά, ποδήλατα, κράνη, δομικά υλικά, παντός είδους αθλητικά είδη (ρακέτες τένις, κοντάρια, μπαστούνια γκόλφ κλπ.) κατασκευάζονται από σύνθετα υλικά.

Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό τα παραπάνω αποτελούν μόνο κάποιες από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τη συνεχιζόμενη έρευνα γύρω από τα σύνθετα και την τεχνολογία τους καταδεικνύουν το πολύ ευρύ φάσμα εφαρμογών τους και τη σημασία τους για τις σύγχρονες κατασκευές.



Εικόνα 1: Εφαρμογές σύνθετων υλικών [7]

1.3. Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά κατασκευάζονται γενικά , από ένα συνεχές και ένα ή περισσότερα μη συνεχή μέσα. Τα συνεχές μέσο ονομάζεται «Μήτρα» (matrix) και το μη συνεχές μέσον «Οπλισμός» (Reinforcement). Η ενίσχυση είναι το υλικό το οποίο προορίζεται για τη μεταφορά των φορτίων που ασκούνται στην κατασκευή από το σημείο εφαρμογής στο σημείο στήριξης και πρέπει να χαρακτηρίζεται από:

- Υψηλό μέτρο ελαστικότητας ώστε η ακαμψία που θα προσδώσει στην κατασκευή να είναι υψηλή
- Υψηλό όριο αντοχής σε θραύση, προκειμένου να επιτευχθεί υψηλή αντοχή της τελικής κατασκευής

Η μήτρα (Matrix) από την άλλη αποτελεί το συνεχές μέσο και είναι υπεύθυνη για τα εξής:

- Συνδέει τα στοιχεία οπλισμού για να δημιουργήσουν ένα δομικό στοιχείο ικανό να παραλάβει την απαιτούμενη φόρτιση
- Μεταφέρει τα φορτία από το σημείο άσκησης τους στον οπλισμό
- Προστατεύει την επιφάνεια των ενισχύσεων από πιθανή ζημιά κατά τη διάρκεια του χειρισμού τους όσο και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους.
- Διατηρεί τον οπλισμό στην κατάλληλη θέση

[24]

Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες:

- Ινώδη σύνθετα (fibrous composites) : Με ενίσχυση ινών εμποτισμένες σε υλικό μήτρας
- Στρωματικά σύνθετα (laminated composites) : Με επάλληλες στρώσεις υλικών
- Κοκκώδη σύνθετα (particulate composites) : Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένα στο υλικό της μήτρας
- Συνδυασμός των παραπάνω

[21],[24]

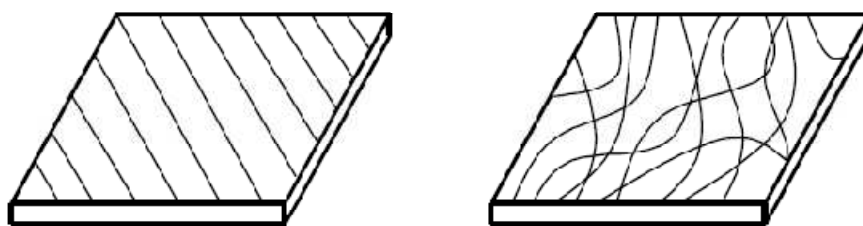
1.4. Ινώδη Σύνθετα Υλικά

Τα ινώδη σύνθετα υλικά αποτελούν τη σημαντικότερη κατηγορία σύνθετων υλικών, δεδομένης της ευρύτατης εξάπλωσης που γνωρίζουν σε πληθώρα εφαρμογών.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με τον προσανατολισμό και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρας.

Βάσει του προσανατολισμού των ινών υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες σύνθετων υλικών ινών:

- Μονοδιευθυντικά των οποίων οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση
- Πολυδιευθυντικά των οποίων οι ίνες είναι τυχαία προσανατολισμένες στο υλικό της μήτρας

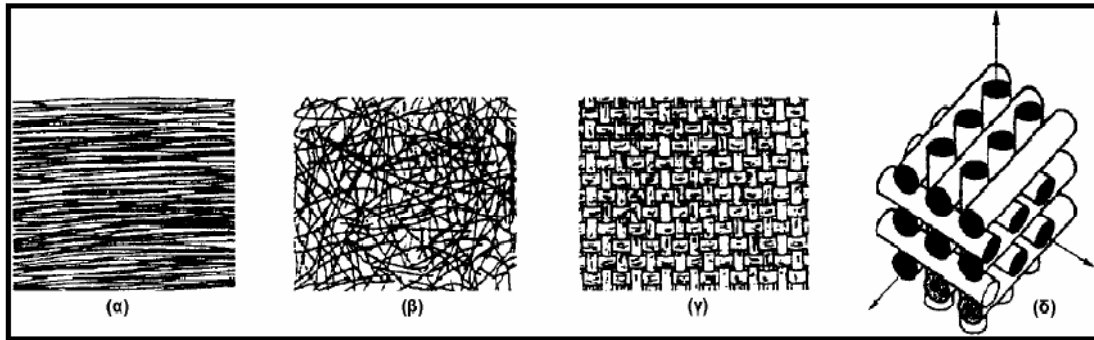


(α) Προσανατολισμένο σύνθετο υλικό. (β) Μη προσανατολισμένο σύνθετο υλικό.

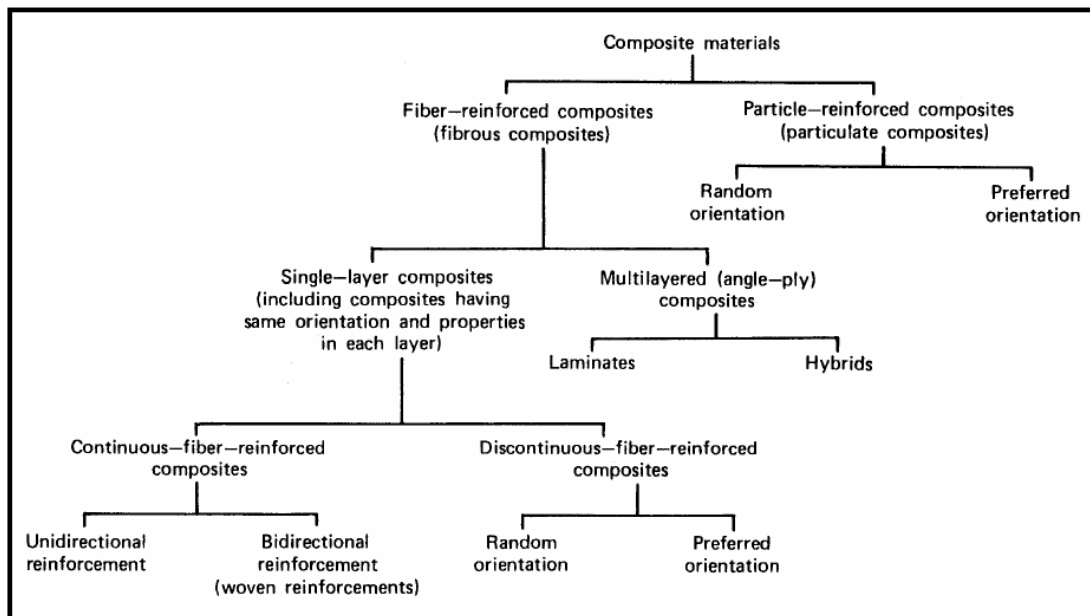
Σχήμα 1: Ταξινόμηση με βάση των προσανατολισμό των ινών

Από τη μεριά τους τα πολυδιευθυντικά σύνθετα χωρίζονται στις επιμέρους υποομάδες:

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης
- Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση



Σχήμα 2: Τύποι διάταξης ινών: (α) μονοδιευθυντικές, (β) ίνες τυχαίου προσανατολισμού, (γ) ίνες με πλέξη ύφανσης (δ) ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση



Σχήμα 3: Γενική ταξινόμηση των συνθέτων υλικών

1.5. Ιδιότητες σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή

Γενικά οι τυπικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι το χαμηλό ειδικό βάρος, ο μεγάλος λόγος αντοχής προς βάρος (specific strength- ειδική αντοχή) και ακαμψίας προς βάρος (specific modulus- ειδική ακαμψία).[21]

Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν κυρίως ανισοτροπική συμπεριφορά, δηλαδή εμφανίζουν ιδιότητες που σε κάθε σημείο τους είναι διαφορετικές προς όλες τις διευθύνσεις. Τις περισσότερες φορές εμφανίζουν μόνο ορθοτροπικότητα, δηλαδή οι ιδιότητές τους σε κάθε σημείο τους είναι διαφορετικές σε τρεις κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις και, επιπρόσθετα, έχουν τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα συμμετρίας.

Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων ως προς απαιτούμενο βάρος υλικού, μεταξύ συνθέτων υλικών και μετάλλων (Ειδική Αντοχή & Ειδική Ακαμψία)								
Είδος Υλικού	Graphite/ Epoxy (Υψηλής ακαμψίας)	Graphite/ Epoxy (Υψηλής αντοχής)	Kevlar/ Epoxy	Glass /Epoxy	Boron/ Epoxy	Αλουμί- νιο	Βηρύλ- λιο	Τιτά- νιο
Ειδική αντοχή (10 ⁶ in)	5,4	2,1	1	0,7	3,3	0,7	1,1	0,8
Ειδική ακαμψία (10 ⁶ in)	400	700	80	45	457	100	700	100

Πίνακας 1: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων ως προς απαιτούμενο βάρος υλικού συνθέτων υλικών και μετάλλων

Τα περισσότερα σύνθετα υλικά από ινοπλισμένα πολυμερή είναι εξαιρετικά ανθεκτικά σε ηλεκτροχημική διάβρωση. Ένα άλλο χαρακτηριστικό των σύνθετων υλικών από ινοπλισμένα πολυμερή είναι η σχεδόν γραμμική καμπύλη έντασης – παραμόρφωσης έως την αστοχία τους. Παρόλο που το υλικό της μήτρας δέχεται πλαστική παραμόρφωση οι ίνες συνήθως παραμορφώνονται μόνο ελαστικά. Αντίθετα η θραύση είναι η τυπική μορφή αστοχίας ενός σύνθετου υλικού που καταπονείται από οριακή τιμή τάσης.

Με βάση την περιεκτικότητα του σύνθετου υλικού σε καθένα από τα δύο συστατικά μέρη καθορίζονται τα ακόλουθα μεγέθη τα οποία είναι κρίσιμα για τον χαρακτηρισμό του σύνθετου υλικού αναφορικά με τις μηχανικές του ιδιότητες:

- Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες (fiber volume ratio):

$$V_f = (\text{Όγκος Ινών} / \text{Όγκος Σύνθετου Υλικού})$$

- Κατά βάρος περιεκτικότητα σε ίνες (Fiber Weight Ratio):

$$W_f = (\text{Βάρος Ινών} / \text{Βάρος Σύνθετου Υλικού})$$

- Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ρητίνη (Matrix Volume Ratio):

$$V_m = (\text{Όγκος Ρητίνης} / \text{Όγκος Σύνθετου Υλικού})$$

- Κατά βάρος περιεκτικότητα σε ρητίνη (Matrix Weight Ratio):

$$W_m = 1 - W_f = (\text{Βάρος Ρητίνης} / \text{Βάρος Σύνθετου Υλικού})$$

- Περιεκτικότητα σε κενά (Void Volume Ratio):

$$V_v = 1 - V_f - V_m = (\text{Όγκος κενών} / \text{Όγκος Σύνθετου Υλικού})$$

- Λόγος ανάμιξης (rule of mixtures):

$$E = V_f E_f - V_m E_m$$

E: Μέτρο Ελαστικότητας

Έτσι οι τελικές μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού επηρεάζονται από την αναλογία με την οποία έχουν συνδυασθεί τα δύο βασικά συστατικά (οπλισμός, μήτρα) και την περιεκτικότητα σε κενά πράγμα που φαίνεται ξεκάθαρα και από τον ορισμό του λόγου ανάμιξης.[24]

Χαρακτηριστικές Μηχανικές Ιδιότητες Συνθέτων Υλικών					
Τύπος Υλικού	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}	V_f
T300/934 Graphite Epoxy	131.0	10.3	6.9	0.22	0.65
AS/3501 Graphite epoxy	138.0	9.0	6.9	0.3	0.65
Kevlar 49/934 Aramid epoxy	75.8	5.5	2.3	0.34	0.65
Boron 5505 Boron Epoxy	204.0	18.5	5.59	0.23	0.5
E-glass/470-36 E-glass/vinylester	24.4	6.87	2.89	0.32	0.30

Όπου: E_1 : Μέτρο Ελαστικότητας κατά τη διεύθυνση των ινών
 E_2 : Μέτρο Ελαστικότητας κάθετα τη διεύθυνση των ινών
 G_{12} : Μέτρο διάτμησης
 ν_{12} : Λόγος Poisson
 V_f : Κατ' όγκο περιεκτικότητα σε ίνες

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές Μηχανικές Ιδιότητες Συνθέτων Υλικών

[24]

1.6. Υλικά και Ιδιότητες Ινών

Όπως προαναφέρθηκε οι ίνες χαρακτηρίζονται από τον πολύ μεγάλο λόγο μήκους προς διάμετρο και αποτελούν σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ινών είναι ότι λόγω της δομής, τους έχουν διαφορετικές ιδιότητες από τις ιδιότητες του υλικού τους όταν αυτό δεν είναι διαμορφωμένο υπό τη μορφή ίνας.

Μία επιπλέον διάκριση των ινών στηρίζεται στο λόγο μήκους προς διάμετρο (l/d) και χαρακτηρίζονται ως:

- Συνεχείς ή μεγάλου μήκους (continuous fibers) όταν είναι $l/d \geq 100$
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers) όταν είναι $l/d \leq 100$
- Νηματίδια ή τριχίτες (whiskers) με $d < 1 \mu\text{m}$ και $l/d \cong 100$

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κοντές ίνες λόγω του μικρού μήκους τους δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.

Για να γίνει αντιληπτή η σημασία των ινών όσον αφορά τις μηχανικές τους ιδιότητες παρατίθεται μια σύγκριση με τις αντίστοιχες συμβατικών υλικών.

Fibers:

Υλικό ίνας	Πυκνότης ρ (kN/m^3)	Εφελκυστική Αντοχή S (GN/m^2)	Λόγος S/ρ Αντοχής/πυκν. (km)	Εφελκυστικό Μέτρο ελ/τος E (GN/m^2)	Λόγος E/ρ Ακαμψίας/πυκν. (Mm)
Αργίλιο	26.3	0.62	24	73	2.8
Τιτάνιο	46.1	1.9	41	115	2.5
Χάλυβας	76.6	4.1	54	207	2.7
Ε-γυαλί	25.0	3.4	136	72	2.9
S-γυαλί	24.4	4.8	197	86	3.5
Ανθρακας	13.8	1.7	123	190	14.0
Βηρύλλιο	18.2	1.7	93	300	16.0
Βόριο	25.2	3.4	137	400	16.0
Γραφίτης	13.8	1.7	123	250	18.0

Πίνακας 3: Ιδιότητες ινών (fibers)

Whiskers:

Υλικό ίνας	Πυκνότης ρ (kN/m ³)	Θεωρητική αντοχή S_T (GN/m ²)	Πειραματική Αντοχή S_E (GN/m ²)	Λόγος S/ρ Αντοχής/πυκν.(Km)	Εφελκυστικό μέτρο ελ/τος E (GN/m ²)	Λόγος E/ρ Ακαμψίας/πυκν. (Mm)
Χαλκός	87.4	12	3.0	34	124	1.4
Νικέλιο	87.9	21	3.9	44	215	2.4
Χάλυβας	76.8	20	13.0	170	200	2.6
B ₄ C	24.7	45	6.7	270	450	18.0
S1C	31.2	83	11.0	350	840	27.0
AlO	38.8	41	19.0	490	410	11.0
C	16.3	98	21.0	1300	980	60.0

Πίνακας 4: Ιδιότητες νηματιδίων (whiskers)

Οι συνηθέστεροι τύποι ιών που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά είναι παρουσιάζονται ακολούθως.

1.6.1 Ίνες υάλου ή υαλονήματα

Θεωρούνται από τα πιο φθηνά ενισχυτικά υλικά. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση τα υαλονήματα που χρησιμοποιούνται σε σύνθετα υλικά είναι τύπου E,C και S.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO ₂ καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO ₂	54	60	65	>99,5
Al ₂ O ₃	16	25	25	-
B ₂ O ₃	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm ³)	2.54	2.50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

Πίνακας 5: Χημική σύσταση και ιδιότητες υαλονημάτων



Εικόνα 2: Fiberglass

- ✓ Ίνες υάλου τύπου E:
 - Πιο συχνά χρησιμοποιούμενες
 - Καλές ηλεκτρικές ιδιότητες
 - Αντοχή και δυσκαμψία
 - Καλή συμπεριφορά στην αλλαγή καιρικών συνθηκών
 - Μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια

- ✓ Ίνες υάλου τύπου C:
 - Υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση
 - Καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα υαλονήματα του τύπου E
 - Ακριβότερες από τις αντίστοιχες του τύπου E

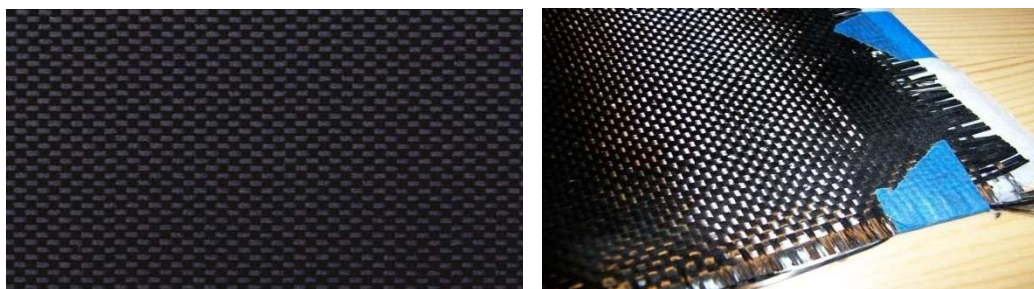
- ✓ Ίνες υάλου τύπου S:
 - Ακριβότερες από τις αντίστοιχες του τύπου E
 - Υψηλή δυσκαμψία και θερμική αντοχή
 - Χρήση κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία

Τα βασικά πλεονεκτήματα των υαλονημάτων είναι το χαμηλό κόστος και η υψηλή αντοχή ενώ ως μειονεκτήματα μπορούν να θεωρηθούν το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και η μικρή αντοχή τους έναντι φθοράς εκ τριβής. Τυχόν φθορές από εκδορές δημιουργούν περιοχές συγκέντρωσης τάσεων και υποβαθμίζουν τις μηχανικές ιδιότητες των υαλονημάτων.

Η παραγωγή των υαλονημάτων γίνεται με εκβολή τήγματος υάλου διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα.

1.6.2 Ίνες άνθρακα ή ανθρακονήματα (Carbon fibers)

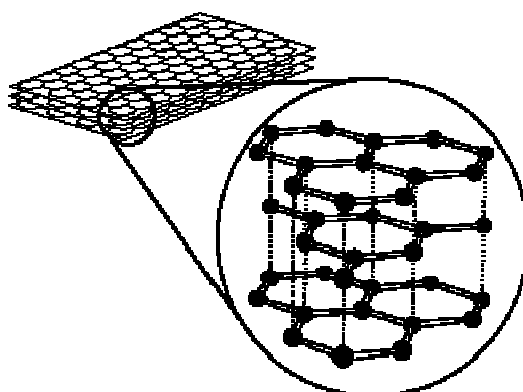
Οι ίνες άνθρακα είναι η επικρατέστερη ενίσχυση υψηλής αντοχής και υψηλού μέτρου ελαστικότητας σε σύνθετα υλικά ρητινικής μήτρας αφού αποτελούν βέλτιστο συνδυασμό μηχανικής συμπεριφοράς και ελάττωσης βάρους. Επίσης οι ίνες άνθρακα προτιμούνται όταν η θερμική διαστολή πρέπει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα ή όταν απαιτείται συμβατότητα των χαρακτηριστικών διαστολής δύο συνενωμένων διαφορετικών υλικών.



Εικόνα 3: Carbon Fibers

Η υπεροχή των ινών άνθρακα οφείλεται στη φύση του άνθρακα ως στοιχείου και τους ενδοατομικούς δεσμούς που σχηματίζει με τα άλλα άτομα άνθρακα. Ο γραφίτης αποτελείται από ανισότροπους πολυκρυσταλλίτες, των οποίων η ανισοτροπία εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους.

Ο ισχυρός προσανατολισμός των κρυσταλλιτών παράλληλα στο διαμήκη άξονα των ανθρακονημάτων προσδίδει υψηλή στιβαρότητα, αντοχή σε θραύση και χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση αυτή.[21]

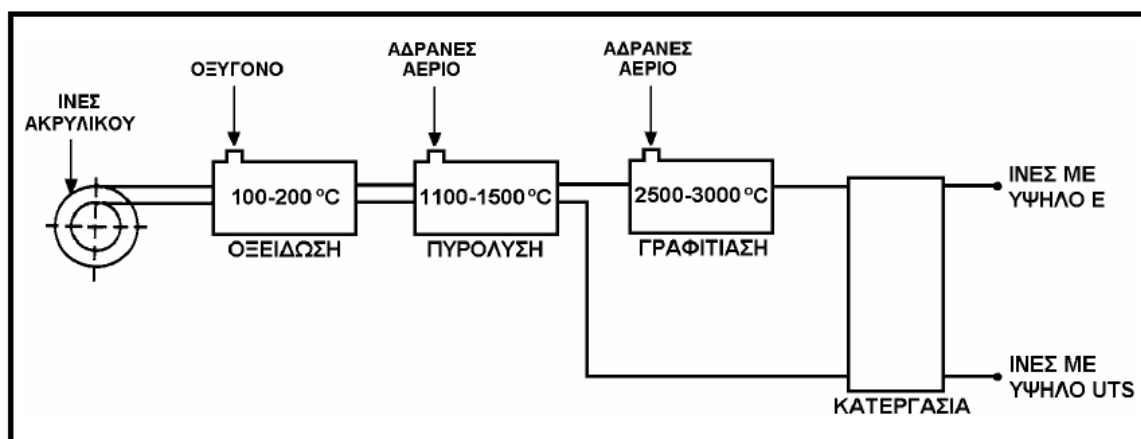


Εικόνα 4: Διάταξη ατόμων άνθρακα στο γραφίτη

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 4 στη γραφική δομή ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των ατόμων του άνθρακα που διατάσσονται πολύ πυκνά με την μορφή εξαγωνικών επιπέδων οδηγεί σε ψηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας στη διεύθυνση αυτή. Αντίθετα ο ασθενής δεσμός τύπου Van der Waals μεταξύ γειτονικών στρώσεων οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας στην διεύθυνση αυτή.

Τα ανθρακονήματα παράγονται από πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτρίλιου (PAN), ίνες τεχνητής μετάξας (rayon) και πίσσα με πυρόλυση σε πολύ υψηλή θερμοκρασία.

Η παραγωγή ινών άνθρακα από ίνες PAN απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4: Παραγωγή ινών άνθρακα

Όπως φαίνεται και στο σχήμα τα τρία στάδια είναι τα εξής:

Στάδιο 1: Οξείδωση των ινών PAN στον αέρα και σε χαμηλή θερμοκρασία με ταυτόχρονη εφαρμογή τάσης για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς.

Στάδιο 2: Πυρόλυση υπό τάση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε θερμοκρασία 1100-1500 °C. Παράγονται ίνες άνθρακα υψηλής αντοχής.

Στάδιο 3: Συνέχεια θέρμανσης σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα σε υψηλή θερμοκρασία (2500-3000 °C) οπότε πραγματοποιείται γραφίτιωση με ταυτόχρονη ανακρυστάλλωση που οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυσταλλιτών. Παράγονται ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας.

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

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικές ιδιότητες ινών άνθρακα

1.6.3 Ίνες Πολυμερούς (Polymer fibers)

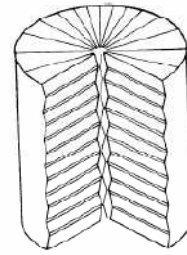
Οι πιο συνηθισμένες ίνες πολυμερούς είναι οι ίνες από Nylon, πολυαιθυλένιο και πολυαραμίδιο. Η πρώτη υψηλής απόδοσης ίνα αραμιδίου παρασκευάστηκε από την DuPont και έγινε γνωστή με την εμπορική ονομασία Kevlar με την οποία και καθιερώθηκε.[15]

Οι υψηλές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων του Kevlar οφείλονται στο γεγονός ότι οι πολυμερικές δομικές αλυσίδες του υλικού είναι ισχυρές και διατάσσονται έτσι δημιουργώντας ένα σταθερό πλέγμα σε μορφή επίπεδης ταινίας.

Customary (inch-pound) Units							
	Specific Density lb/in. ³	Tenacity 10 ³ psi	Modulus 10 ³ psi	Break Elongation %	Specific Tensile Strength* 10 ³ in.	CTE** 10 ⁻⁶ /°F	Decomposition Temperature °F (°C)
KEVLAR 29	0.052	424	10.2	3.6	8.15	-2.2	800-900 (427-482)
KEVLAR 49	0.052	435	16.3	2.4	8.37	-2.7	800-900 (427-482)
Other Yarns							
S-Glass	0.090	665	12.4	5.4	7.40	+1.7	1,562° (850)
E-Glass	0.092	500	10.5	4.8	5.43	+1.6	1,346° (730)
Steel Wire	0.280	285	29	2.0	1.0	+3.7	2,732° (1,500)
Nylon-66	0.042	143	0.8	18.3	3.40	—	490° (254)
Polyester	0.050	168	2.0	14.5	3.36	—	493° (256)
HS Polyethylene	0.035	375	17	3.5	10.7	—	300° (149)
High-Tenacity Carbon	0.065	450	32	1.4	6.93	-0.1	6,332 (3,500)

Πίνακας 7: Σύγκριση ιδιοτήτων ινών Kevlar με άλλες ίνες

[TECHNICAL GUIDE KEVLAR ARAMID FIBER, DUPONT]



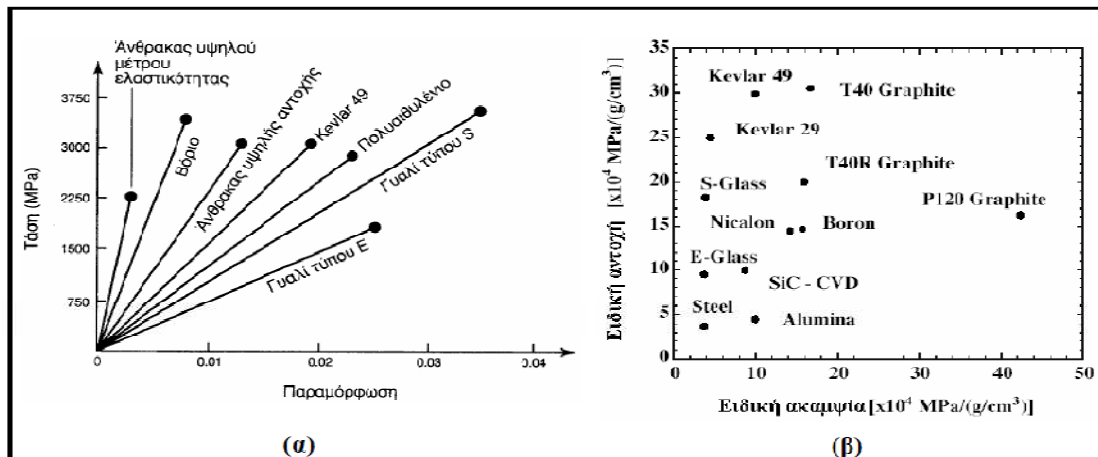
Δομή ίνας Kevlar

Εικόνα 5: Ίνες Kevlar

Ο κυλινδρικός φλοιός της ίνας περικλείει και συγκρατεί το υλικό του πυρήνα αποδίδοντας στο υλικό πολύ καλές ιδιότητες κατά την αξονική διεύθυνση αλλά φτωχές κατά την εγκάρσια.

Επιπλέον, ενώ στην εφελκυστική καταπόνηση το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά με παραμόρφωση έως και 2%, η μεγάλη του αδυναμία εμφανίζεται στη θλίψη, όπου σε 0,3 % θλιπτική παραμόρφωση αναπτύσσεται πλαστικού τύπου αστοχία. Αξιοσημείωτο, όμως, είναι ότι η αστοχία αυτή δεν είναι καταστροφική, αλλά έχει τη μορφή πτυχώσεων (kink bands).

Τα παραπάνω είδη ενισχυτικών ινών είναι τα συνηθέστερα. Εκτός όμως από αυτά υπάρχουν και άλλα είδη ινών όπως οι μεταλλικές και οι κεραμικές. Διάφορα μέταλλα όπως το βόριο (B) , το βηρύλλιο (Be) και το βολφράμιο (W) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ινών συνθέτων υλικών με πολύ καλές ιδιότητες αφού παρουσιάζουν υψηλή τιμή ακαμψίας σε σχέση με το ειδικό τους βάρος. Από την άλλη οι κεραμικές ίνες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες. Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι η υψηλή αντοχή, η στιβαρότητα και η θερμική ευστάθεια. Οι ίνες καρβιδίου του πυριτίου (SiC) και αλούμινας (Al₂O₃) είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συχνότερα.



Σχήμα 5: Σύγκριση ινών

1.7. Ιδιότητες και υλικά μητρών σύνθετων υλικών

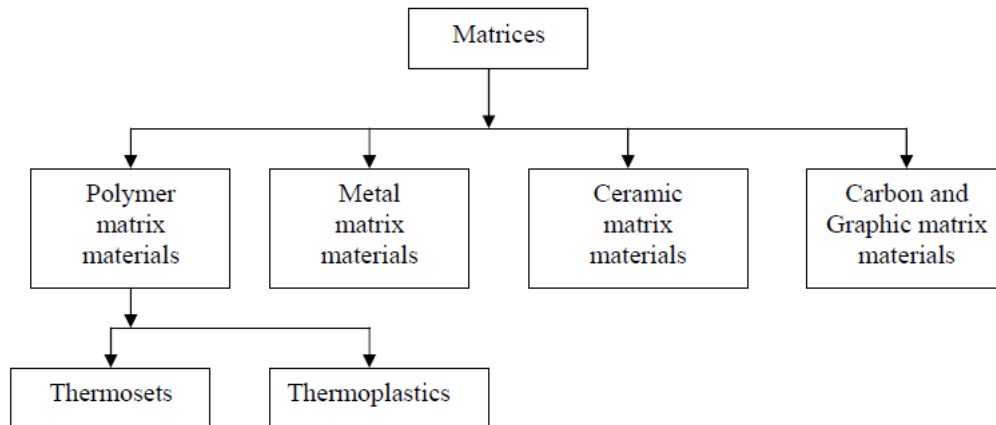
Οι ίνες που περιγράφηκαν παραπάνω θα ήταν πρακτικά άχρηστες αν δεν μπορούσαν να τοποθετηθούν κατάλληλα μαζί και να σχηματίσουν ένα δομικό στοιχείο που θα μπορεί μεταφέρει φορτία. Το συνδετικό υλικό ονομάζεται μήτρα (matrix). Ο σκοπός της μήτρας είναι πολλαπλός. Η μήτρα χρησιμεύει στην προστασία των ινών, τη συγκράτησή τους, τη μεταφορά τάσεων κ.α. (όπως αναφέρονται αναλυτικά στην 1.3).

Συνήθως η μήτρα έχει μικρότερη πυκνότητα, αντοχή και δυσκαμψία από τις ίνες και τους τριχίτες. Ωστόσο ο συνδυασμός ινών και μήτρας απορεί να αποδώσει ένα σύνθετο υλικό με υψηλή αντοχή και ακαμψία αλλά με μικρή πυκνότητα, γεγονός που είναι πολύ σημαντικό. [21]

Ανάλογα με το υλικό από το οποίο αποτελείται η μήτρα έχουμε τις ακόλουθες κατηγορίες μητρών:

- Οργανικές
- Μεταλλικές
- Κεραμικές

Η επιλογή του κατάλληλης μήτρας εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το περιβάλλον χρήσης του σύνθετου υλικού. Συνήθως το κόστος μιας μήτρας κυμαίνεται ανάλογα με την θερμοκρασιακή της αντίσταση.



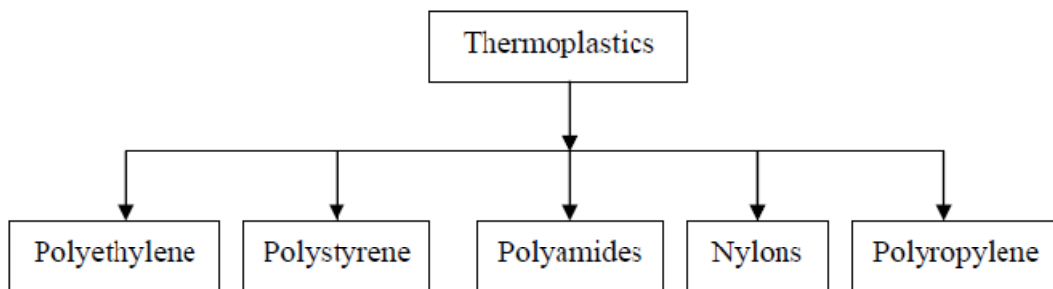
Σχήμα 6: Ταξινόμηση μητρών

1.7.1 Οργανικές μήτρες

Οι οργανικές μήτρες διακρίνονται:

I. Θερμοπλαστικές

Πρόκειται για πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες. Παρουσιάζουν δομή, όπου οι μοριακές αλυσίδες διασυνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals, που λύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας με αντιστρεπτή όμως διαδικασία, καθιστώντας το υλικό μαλακότερο σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν χαμηλό κόστος και γι αυτό χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ευρείας κατανάλωσης.



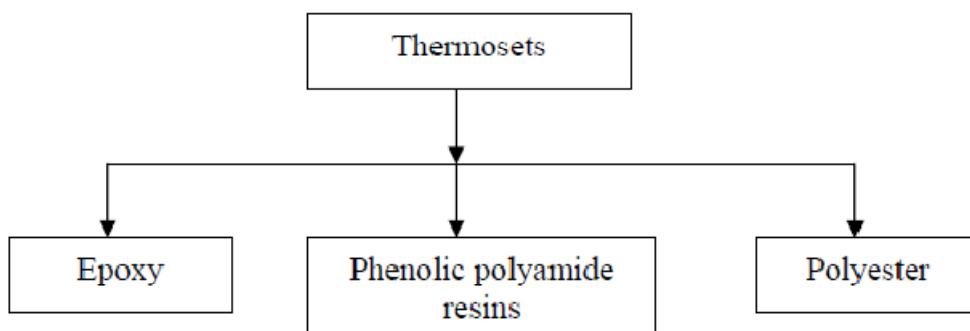
Σχήμα 7: Είδη θερμοπλαστικών μητρών

Οι θερμοπλαστικές ρητίνες αποτελούν πολύ καλή μήτρα για ινοπλισμένα σύνθετα υλικά. Αν οι ίνες είναι διασκορπισμένες τυχαία μέσα στη μήτρα τότε η ενίσχυση είναι ισότροπη. Στις θερμοπλαστικές μήτρες μπορεί να αυξηθεί η θερμική αντίσταση με χρήση κάποιων πρόσθετων. Παρά το γεγονός ότι επηρεάζονται σημαντικά από την αύξηση της θερμοκρασίας, οι καλές ιδιότητες που διαθέτουν όπως

η ακαμψία, η αντοχή και η αντίσταση στην ολίσθηση τις καθιστούν σημαντικές μήτρες για σύνθετα υλικά ειδικά τα ινοπλισμένα.

II. Θερμοσκληρυνόμενες

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες αποτελούν τις πιο δημοφιλείς μήτρες για ινοπλισμένα σύνθετα υλικά. Έδωσαν τεράστια ώθηση στους μηχανικούς για έρευνα και ανάπτυξη πολλών κατασκευών από σύνθετα υλικά. Έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις αντίστοιχες θερμοπλαστικές. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή παρουσιάζουν τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων. Με αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το πλήθος των διαμοριακών δεσμών καθιστώντας τα υλικά αυτά σκληρότερα και ψαθυρότερα.



Σχήμα 8: Ταξινόμηση θερμοσκληρυνόμενων μητρών

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 8 θερμοσκληρυνόμενες μήτρες είναι:

- Πολυεστερικές ρητίνες που ενισχύονται με ίνες υάλου
- Εποξειδικές ρητίνες με μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας τους 200 °C, καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τις πολυεστερικές και με πολλές εφαρμογές στην αεροναυπηγική
- Φαινολικές ρητίνες οι οποίες έχουν χαμηλή πλαστικότητα και μέτριες μηχανικές ιδιότητες.

Ρητίνη	ρ (g/cm ³)	E (GPa)	ν	σ_{ut} (MPa)	ϵ_t (%)	σ_{uc} (MPa)	Κόστος* (\$/lb)
Πολυεστερική (ορθοφθαλκή)	1.23	3.2	0.36	65	2	130	1.05
Πολυεστερική (Ισοφθαλκή)	1.21	3.6	0.36	60	2.5	130	1.19
Βινυλεστερική	1.12	3.4	-	83	5	120	1.74
Εποξική	1.20	3.0	0.37	85	5	130	3.90
Φαινολική	1.15	3.0	-	50	2	-	1.10

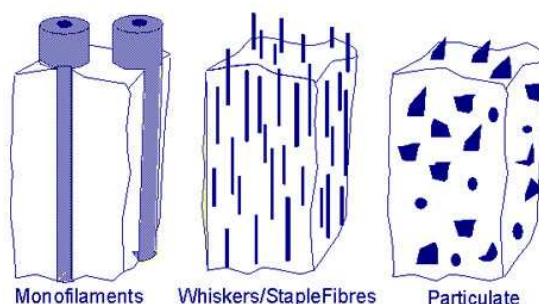
*τιμές 1995 (SSC 403-1997)

Πίνακας 8: Ιδιότητες ρητινών

1.7.2 Μεταλλικές και Κεραμικές μήτρες

Για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών μητρών.

Μέταλλα όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως υλικά μήτρας για σύνθετα υλικά. Οι μεταλλικές μήτρες παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις πολυμερικές μήτρες και αυξάνουν το θερμοκρασιακό εύρος χρήσης των αντίστοιχων συνθέτων. Τα μεγαλύτερα μειονεκτήματά τους (σε σχέση πάντα με τις πολυμερικές) είναι ότι παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος κατασκευής ενώ έχουν υψηλό κόστος και παρουσιάζουν δυσκολίες στην παραγωγή των αντίστοιχων συνθέτων.[5]



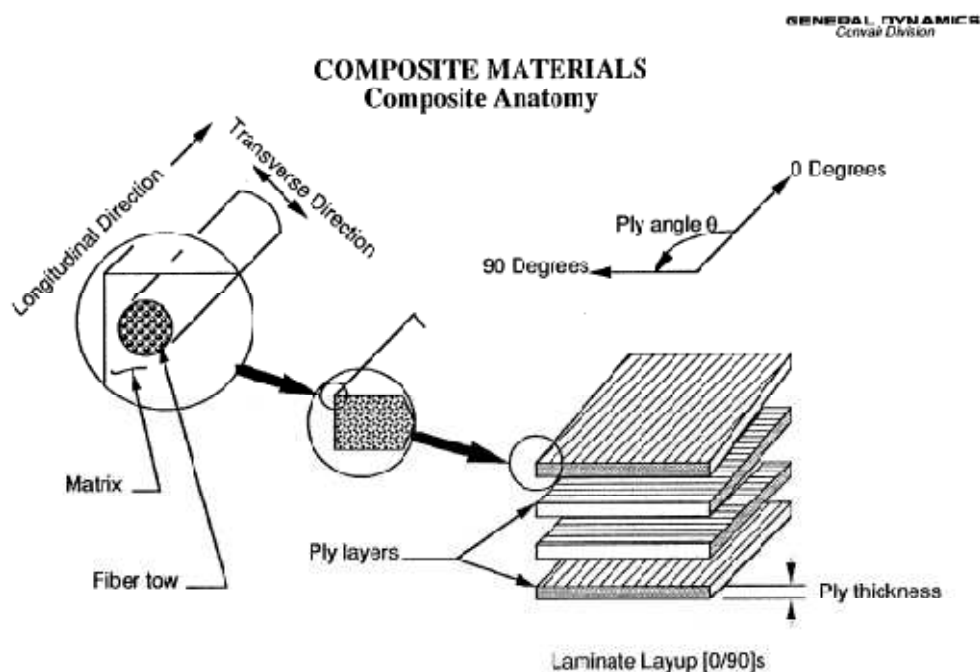
Σχήμα 9: Τύποι ενίσχυσης μεταλλικών μητρών

Τα κεραμικά υλικά είναι σκληρά, δύστηκτα, μεγάλης στιβαρότητας και μεγάλης αντοχής στη διάβρωση και τη χημική προσβολή. Οι κεραμικές μήτρες είναι ιδανικές για περιπτώσεις που απαιτείται χρήση σύνθετων υλικών σε πολύ υψηλές

θερμοκρασίες. Στην περίπτωση της κεραμικής μήτρας, οι ίνες αποβλέπουν αφενός στη βελτίωση της αντοχής του κεραμικού στους θερμικούς αιφνιδιασμούς και αφετέρου στην αύξηση της μηχανικής του αντοχής. Το σημαντικότερο μειονέκτημά τους αφορά στη συνάφεια ινών-μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής της κεραμικής μήτρας και των συνήθων ενισχυτικών ινών. Τα σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας χρησιμοποιούνται στην αεροναυπηγική-αεροδιαστημική, σε θερμομονωτικά υλικά και σε αντιτριβικές εφαρμογές.

1.8. Πολύστρωτα ή Στρωσιγενή σύνθετα υλικά (Laminated Composites)

Τα στρωσιγενή σύνθετα υλικά, αποτελούνται από στρώσεις δύο τουλάχιστον διαφορετικών υλικών, τα οποία έχουν συγκολληθεί. Σκοπός της διαστρωμάτωσης είναι η δημιουργία ενός υλικού το οποίο θα χαρακτηρίζεται από τις καλύτερες ιδιότητες καθενός από τα συστατικά υλικά. [24]

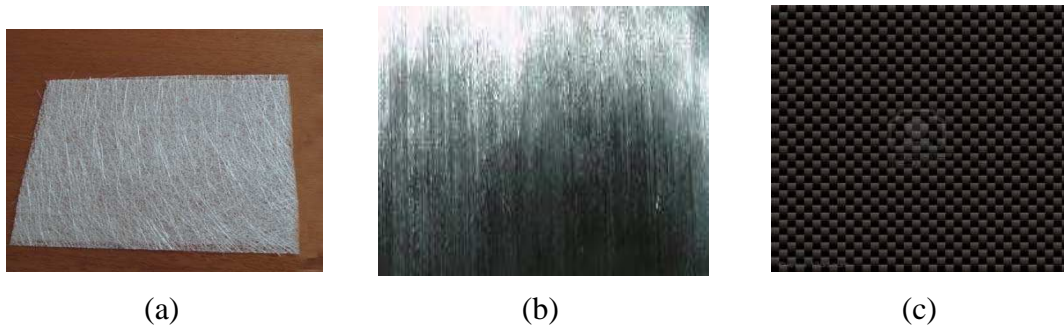


Σχήμα 10: Ανατομία στρωματικού σύνθετου υλικού

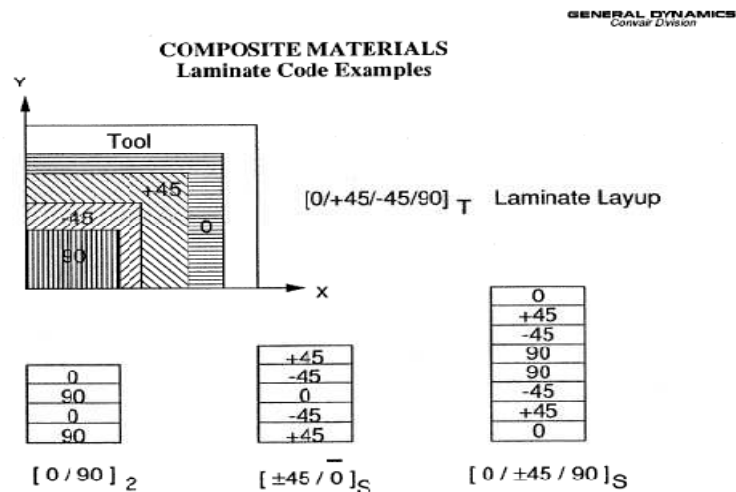
Η στρώση αποτελεί το βασικό δομικό μπλόκ των πολύστρωτων σύνθετων υλικών. Στα ινοπλισμένα πολύστρωτα οι στρώσεις αποτελούνται από νήματα ινών, τα

οποία ράβονται, κολλώνται ή πλέκονται μεταξύ τους, δημιουργώντας την εντύπωση «υφάσματος» ή «φύλλου». Πολλά τέτοια φύλλα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και ενώνονται με ρητίνη, η οποία μπαίνει ανάμεσα σε κάθε φύλλο για να τα συγκρατεί και να αυξήσει τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Η κατανομή των ινών στα «υφάσματα» γίνεται με διάφορους τρόπους. Μπορεί οι ίνες να μην έχουν προσανατολισμό, να είναι άτακτα κατανεμημένες (random) και χαλαρά συνδεδεμένες μεταξύ τους. Επίσης είναι δυνατό να σχηματίζουν πλεξίδες νημάτων (woven), όπου οι ίνες ενώνονται παράλληλα δημιουργώντας πλεξίδες και αυτές με τη σειρά τους απαρτίζουν το «φύλλο- ύφασμα». Τέλος έχουμε τα μονοαξονικά υφάσματα (unidirectional), όπου οι ίνες ράβονται ή συγκρατούνται παράλληλα μεταξύ τους, προσανατολισμένες σε μία διεύθυνση.



Εικόνα 6: (a) chopped strand mat, (b) unidirectional, (c) woven carbon fibers



Σχήμα 11: Τύποι διαστρωμάτωσης

Με βάση τις μηχανικές ιδιότητες που θέλουμε να διαθέτει το πολύστρωτο σύνθετο υλικό επιλέγεται η εκάστοτε διαστρωμάτωση. Η σειρά, το είδος και το πλήθος των στρώσεων αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες στη διαμόρφωση των ιδιοτήτων του σύνθετου υλικού. Για παράδειγμα ένα σύνθετο υλικό δέκα στρωμάτων εκ των οποίων τα έξι στρώματα είναι σε μία διεύθυνση και τα υπόλοιπα τέσσερα είναι σε διεύθυνση 90° προς τα άλλα έξι παρουσιάζει αντοχή και δυσκαμψία 50% μεγαλύτερη στη μία διεύθυνση. Επίσης ανάλογα με το αν η διαστρωμάτωση είναι συμμετρική ή όχι το τελικό σύνθετο υλικό που προκύπτει διαθέτει αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες.

1.8.1 Κωδικοποίηση και συμβολισμός πολύστρωτων σύνθετων υλικών

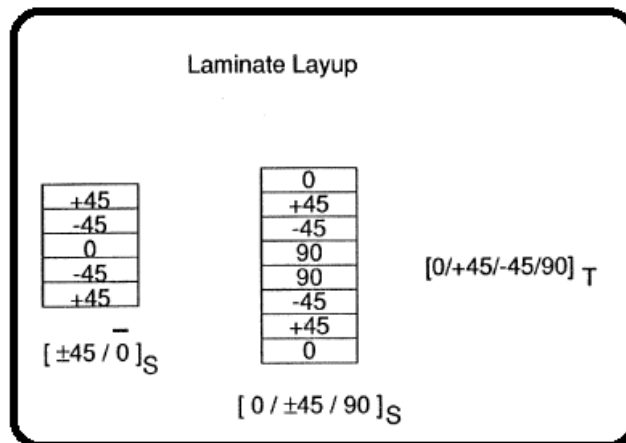
Αν και για την κωδικοποίηση των πολύστρωτων υλικών δεν υπάρχει κάποια κοινώς αποδεκτή μέθοδος, ανατρέχοντας στη βιβλιογραφία μπορούμε να αναφέρουμε τους συμβολισμούς που χρησιμοποιούνται συνήθως για την περιγραφή τους.

- Η κάθε στρώση συμβολίζεται με έναν αριθμό ο οποίος δηλώνει τον προσανατολισμό των ινών σε μοίρες ως προς τον άξονα αναφοράς χ του πολύστρωτου π.χ. [45/0/-45/0]. Ως άξονας αναφοράς λαμβάνεται ο άξονας που είναι παράλληλος με την κύρια διεύθυνση φόρτισης.
- Μπροστά από τον αριθμό των μοιρών αναγράφεται το πρόσημο + ή - ανάλογα με τη φορά στροφής των ινών ως προς τον άξονα χ . Θετικές λαμβάνονται οι γωνίες που έχουν αντιωρολογιακή φορά όπως τις κοιτάζουμε από επάνω.
- Οι στρώσεις αναγράφονται με σειρά τέτοια ώστε ο πρώτος αριθμός να παριστά την κατώτερη στρώση.
- Το σύνολο των αριθμών που συμβολίζουν τις στρώσεις περικλείεται ανάμεσα σε δύο αγκύλες «[]».
- Οι στρώσεις διαφορετικού προσανατολισμού διαχωρίζονται μεταξύ τους με καθέτους «/». Αντίθετα, οι διαδοχικές στρώσεις ίδιου προσανατολισμού δηλώνονται με τον αριθμό που συμβολίζει το πλήθος τους ως δείκτη στον αριθμό που παριστά τη γωνία προσανατολισμού των μοιρών π.χ. [0/0/0/0] ή [0₈] ή [0]₈

- Σε περίπτωση που δύο ή περισσότερες διαδοχικές στρώσεις έχουν τοποθετηθεί με τις ίδιες μοίρες εκτροπής ως προς τον άξονα χ αλλά με διαφορετική φορά μεταξύ τους, χρησιμοποιούνται διαδοχικά τα πρόσημα $+ -$ ανάλογα με τη φορά εκτροπής κάθε στρώσης π.χ. $[0/90/\pm 45/+45/90/0]$.
- Για λόγους συντόμευσης στην περίπτωση συμμετρικών πολύστρωτων με άρτιο αριθμό στρώσεων, είναι δυνατή η αναγραφή των μισών μόνο στρώσεων και η δήλωση της συμμετρίας με το γράμμα «S» ως δείκτη στην αγκύλη που κλείνει η παράσταση π.χ. $[0/45/0]_s$.
- Πολύστρωτα υλικά που αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες ομάδες-διατάξεις έχουν δείκτη τον αριθμό των επαναλήψεων των ομάδων π.χ. $[-45,45]_2$.
- Πολύστρωτα σύνθετα υλικά που παρουσιάζουν κάποια μορφή συμμετρίας ως προς το μέσο επίπεδό τους, αλλά τα αντίστοιχα ζεύγη των στρωμάτων έχουν διαφορετικό πρόσημο λέμε ότι παρουσιάζουν ψευδοσυμμετρία. Η κωδικοποίησή τους γίνεται όπως στα προηγούμενα με το δείκτη Q στο τέλος της παράστασης.
- Για το συμβολισμό ψευδοσυμμετρικών πολύστρωτων με περιττό αριθμό στρώσεων υπεργαμμίζεται το κεντρικό στρώμα και χρησιμοποιείται ο δείκτης Q όμοια με πριν.

Οι παραπάνω αποτελούν κάποιες από τις βασικές κωδικοποιήσεις που συναντάμε στη βιβλιογραφία για τα πολύστρωτα σύνθετα υλικά. [24], [10]

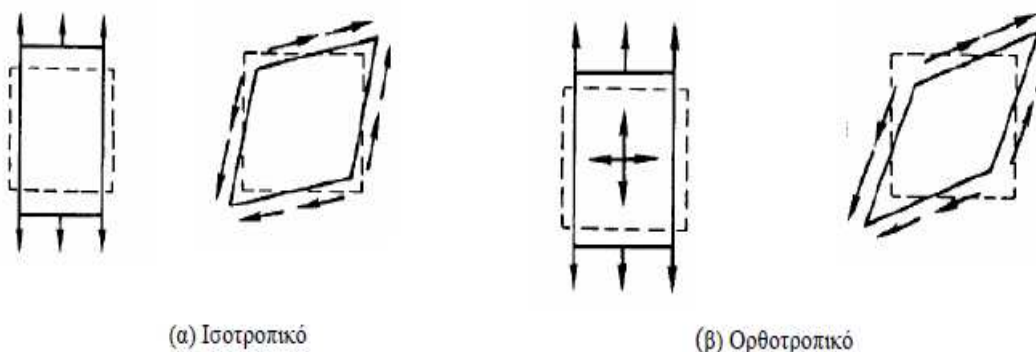
Υπάρχουν και άλλα σύμβολα ή και σχηματικές παραστάσεις (βλέπε σχ. 12) που βοηθούν στο συμβολισμό των πολύστρωτων σύνθετων υλικών απλά παρατέθηκαν τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα. Επίσης είναι δυνατό να υπάρξει και συνδυασμός των παραπάνω για το συμβολισμό πιο σύνθετων μορφών πολύστρωτων σύνθετων υλικών π.χ. $[(30/0)_Q/(-60/0)_Q]_s$.



Σχήμα 12: Συμβολισμοί πολύστρωτων

1.8.2 Μηχανική των πολύστρωτων σύνθετων υλικών

Όπως όλα τα κατασκευαστικά υλικά έτσι και τα πολύστρωτα χαρακτηρίζονται από το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young (E), το λόγο Poisson (ν) και το μέτρο διάτμησης (G). Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών είναι καθοριστικές για τις μηχανικές ιδιότητες που θα έχει το πολύστρωτο. Τα σύνθετα πολύστρωτα είναι συχνά ορθοτροπικά, δηλαδή έχουν τουλάχιστον 2 επίπεδα συμμετρίας στα οποία οι ιδιότητες δεν εξαρτώνται από την κατεύθυνση. Μια εφαρμοζόμενη τάση προκαλεί διαφορετική παραμόρφωση στη διεύθυνση εφαρμογής της και στην κάθετη σ' αυτήν διεύθυνση, ενώ το μέτρο διάτμησης είναι ανεξάρτητο των μεγεθών E και ν .



Σχήμα 13: Συμπεριφορά σε ορθή τάση και σε διάτμηση ισοτροπικών και ορθοτροπικών υλικών

Οι σχέσεις μεταξύ τάσεων και παραμορφώσεων στα σύνθετα υλικά είναι γραμμικές, και ακολουθούν το νόμο του Hooke:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$$

με $\boldsymbol{\sigma}$: επιβαλλόμενη τάση και
 $\boldsymbol{\varepsilon}$: την παραμόρφωση που δημιουργεί αυτή

Στα ορθοτροπικά σύνθετα υλικά οι σχέσεις μεταξύ των 3 ορθών και 3 διατμητικών τάσεων, και των αντίστοιχων παραμορφώσεων σε κάθε επίπεδο ορίζονται από το μητρώο δυσκαμψίας C_{ij} :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} * \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{Bmatrix}$$

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται ευρύτερα το μητρώο ενδοτικότητας, $[S_{ij}]$, το οποίο είναι το αντίστροφο του μητρώου δυσκαμψίας ($[S_{ij}] = [C_{ij}]^{-1}$). Η ευκολία χρήσης του μητρώου ενδοτικότητας $[S_{ij}]$ συνίσταται στο ότι τα στοιχεία του ορίζονται συναρτήσει των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} & , & & S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} & , & & S_{13} &= -\frac{\nu_{13}}{E_1} \\ S_{21} &= -\frac{\nu_{21}}{E_2} & , & & S_{22} &= \frac{1}{E_2} & , & & S_{32} &= -\frac{\nu_{23}}{E_2} \\ S_{13} &= -\frac{\nu_{31}}{E_3} & , & & S_{23} &= -\frac{\nu_{32}}{E_3} & , & & S_{33} &= \frac{1}{E_3} \\ S_{44} &= \frac{1}{G_{23}} & , & & S_{55} &= \frac{1}{G_{13}} & , & & S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned}$$

Σημειώνεται επίσης ότι τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν μόνο γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι σε κατάσταση φόρτισης, οι παραμορφώσεις αυξάνονται ανάλογα με την επιβαλλόμενη τάση, με σταθερό ρυθμό, μέχρι να επέλθει τελικά η θραύση. Η συμπεριφορά αυτή κατατάσσει τα σύνθετα υλικά ως ψαθυρά.

1.8.3 Κριτήρια θραύσης

Όλα τα κριτήρια βασίζονται στη μακροσκοπική ομοιογένεια των υλικών και τη γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο. [24],[22]

1.8.3.1 Κριτήριο Μέγιστης Τάσης

Με βάση το κριτήριο αυτό θραύση ενός στρώματος σύνθετου υλικού έχουμε όταν οποιαδήποτε από τις τιμές των τάσεων κατά τη διεύθυνση των αξόνων του υλικού υπερβεί την τάση αστοχίας:

- ❖ $\sigma_1 < X_t$ ή $\sigma_2 < Y_t$ για Εφελκυστικές τάσεις
- ❖ $[\sigma_1] < [X]_c$ ή $[\sigma_2] < [Y]_c$ για Θλιπτικές τάσεις
- ❖ $[\sigma_{12}] < S$ για Διατμητικές τάσεις

Οι παραπάνω ανισότητες μετασχηματίζονται ως εξής:

- ❖ $\sigma_1 / X_t < 1$ ή $\sigma_2 / Y_t < 1$ για Εφελκυστικές τάσεις
- ❖ $[\sigma_1] / [X]_c < 1$ ή $[\sigma_2] / [Y]_c < 1$ για Θλιπτικές τάσεις
- ❖ $[\sigma_{12}] / S < 1$ για Διατμητικές τάσεις

Τα αριστερά μέλη των παραπάνω ανισοτήτων ονομάζονται δείκτες αστοχίας (**failure indices F.I.**). Έτσι επαναδιατυπώνεται το κριτήριο μέσης τάσης ως εξής:

Στρώση σύνθετου υλικού αστοχεί όταν :

- ❖ $F.I.1 > 1$, με F.I.1 το δείκτη αστοχίας του σύνθετου υλικού στη διεύθυνση των ινών
- ❖ $F.I.2 > 1$, με F.I.2 το δείκτη αστοχίας του σύνθετου υλικού κατά τον εγκάρσιο στις ίνες άξονα

- ❖ $F.I.12 > 1$, με $F.I.12$ το δείκτη αστοχίας λόγω διάτμησης

Πρέπει να αναφερθεί ότι το κριτήριο μέγιστης τάσης θεωρεί ότι η θραύση σε μια διεύθυνση προκαλείται ανεξάρτητα από τις τάσεις που ασκούνται στις άλλες διευθύνσεις, χωρίς να υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους. (noninteractive criterion)

1.8.3.2 Κριτήριο Μέγιστης Παραμόρφωσης

Πρόκειται για κριτήριο παρεμφερές με το προηγούμενο (noninteractive criterion) με τη διαφορά ότι αντί για τις τάσεις υπολογίζονται και συγκρίνονται οι παραμορφώσεις:

Όμοια με πριν για παραμορφώσεις όμως έχουμε:

- ❖ $\varepsilon_1 < \varepsilon_{x,t}$ ή $\varepsilon_2 < \varepsilon_{y,t}$ για Εφελκυστικές τάσεις
- ❖ $[\varepsilon_1] < [\varepsilon_{x,c}]$ ή $[\varepsilon_2] < [\varepsilon_{y,c}]$ για Θλιπτικές τάσεις
- ❖ $[\varepsilon_{12}] < \gamma$ για Διατμητικές τάσεις

Και με βάση τους δείκτες αστοχίας:

- ❖ $F.I.1 = \varepsilon_1 / \varepsilon_{x,t}$ και $F.I.2 = \varepsilon_2 / \varepsilon_{y,t}$ για Εφελκυστικές τάσεις
- ❖ $F.I.1 = [\varepsilon_1 / \varepsilon_{x,c}]$ και $F.I.2 = [\varepsilon_2 / \varepsilon_{y,c}]$ για Θλιπτικές τάσεις
- ❖ $F.I.12 = [\varepsilon_{12}] / \gamma$ για Διατμητικές τάσεις

1.8.3.3 Κριτήριο Tsai-Hill

Το παρών κριτήριο αντίθετα με τα δύο προηγούμενα θεωρεί ότι υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των αναπτυσσόμενων τάσεων στις διάφορες διευθύνσεις για την αστοχία του υλικού. Με βάση το κριτήριο Tsai-Hill η θραύση συμβαίνει όταν ο δείκτης αστοχίας του υλικού υπερβεί την τιμή 1.

$$F.I. = (\sigma_1 / X)^2 + (\sigma_2 / Y)^2 + (\sigma_{12} / S)^2 - (\sigma_1 / X)(\sigma_2 / X) > 1$$

Όπου $X = X_t$ ή X_c , $Y = Y_t$ ή Y_c ανάλογα με το αν οι ασκούμενες τάσεις είναι εφελκυστικές ή θλιπτικές. Οι τιμές X_c και Y_c είναι απόλυτες. Το κριτήριο Tsai-Hill προβλέπει αν θα συμβεί αστοχία ή όχι αλλά δεν προβλέπει τον τρόπο με τον οποίο θα συμβεί.

1.8.3.4 Κριτήριο Hoffman

Το κριτήριο Hoffman είναι κριτήριο αλληλεπίδρασης και αντίστοιχα με το προηγούμενο προβλέπει αστοχία όταν ο δείκτης αστοχίας υπερβεί την τιμή 1. Όμοια με πριν προβλέπει αν θα συμβεί αστοχία αλλά όχι τον τρόπο.

$$F.I. = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 > 1$$

όπου:

$$F_1 = 1/X_t - 1/X_c$$

$$F_2 = 1/Y_t - 1/Y_c$$

$$F_{11} = 1/(X_t X_c)$$

$$F_{22} = 1/(Y_t Y_c)$$

$$F_{33} = 1/S^2$$

$$F_{12} = -1/(2X_t X_c)$$

1.8.3.5 Κριτήριο Tsai-Wu τάσης

Η μόνη διαφορά με το κριτήριο Hoffman που περιγράφηκε προηγουμένως είναι η τιμή του συντελεστή F_{12} .

$$F.I. = F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + F_{33}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 > 1$$

όπου:

$$F_1 = 1/X_t - 1/X_c$$

$$F_2 = 1/Y_t - 1/Y_c$$

$$F_{11} = 1/(X_t X_c)$$

$$F_{22} = 1/(Y_t Y_c)$$

$$F_{33} = 1/S^2$$

$$F_{12} = F_{12}^* / (X_t X_c Y_t Y_c)^{1/2}$$

Ο όρος F_{12}^* είναι ένας ανεξάρτητος συντελεστής ο οποίος προσδιορίζεται από διαξονικό πείραμα εφελκυσμού. Επειδή η εκτέλεση μιας δοκιμής διαξονικού εφελκυσμού σε ένα στρώμα σύνθετου υλικού είναι πολύ δύσκολη τις περισσότερες φορές υπολογίζεται προσεγγιστικά με τιμές μεταξύ -1 και 1. Το κριτήριο Tsai-Wu

τάσης δεν προβλέπει τον τρόπο αστοχίας αλλά αντίθετα με το Tsai-Hill λαμβάνει υπόψιν τις διαφορετικές αντοχές σε εφελκυσμό και θλίψη που μπορεί να παρουσιάσει ένα υλικό.

Επίσης υπάρχει και το κριτήριο Tsai-Wu Παραμόρφωσης. Η μόνη διαφορά του με το αντίστοιχο τάσης είναι ότι υπολογίζονται οι παραμορφώσεις. Θεωρείται ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ τάσεων –παραμορφώσεων μέχρι τη θραύση όπως προαναφέρθηκε.

$$F.I. = G_1\varepsilon_1 + G_2\varepsilon_2 + G_{11}\varepsilon_1^2 + G_{22}\varepsilon_2^2 + G_{33}\varepsilon_{12}^2 + 2G_{12}\varepsilon_1\varepsilon_2 > 1$$

Κριτήριο Θραύσης	Αλληλεπίδραση καταπονήσεων	Διαφορετικές τιμές εφελκυσμού - θλίψης	Πρόβλεψη τρόπου θραύσης
Μέγιστης Τάσης	OXI	NAI	NAI
Μέγιστης Παραμόρφωσης	OXI	NAI	NAI
Tsai – Hill	NAI	OXI	OXI
Hoffman	NAI	NAI	OXI
Tsai-Wu Τάσης	NAI	NAI	OXI
Tsai-Wu Παραμόρφωσης	NAI	NAI	OXI

Πίνακας 9: Σύγκριση κριτηρίων Θραύσης

1.9. Μέθοδοι κατασκευής σύνθετων υλικών

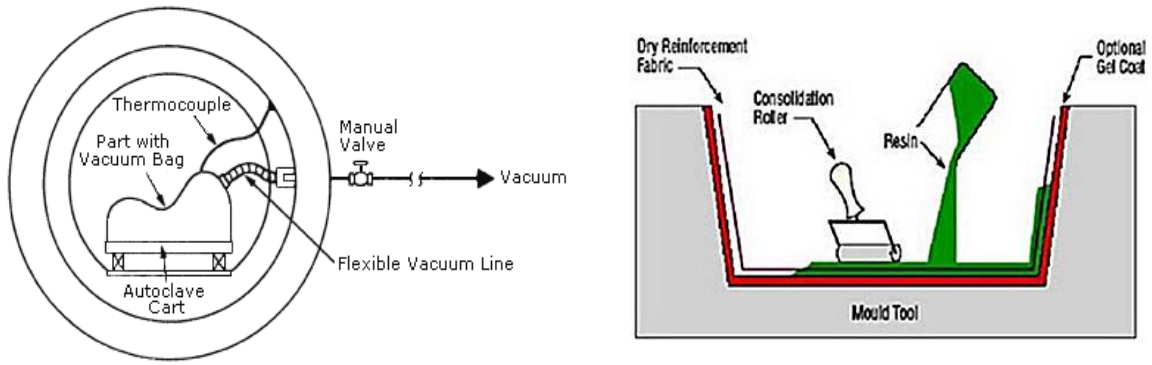
Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την κατασκευή σύνθετων υλικών. Καθεμία έχει τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά της. Ανάλογα με τα μέσα που διαθέτουμε αλλά και το τι ακριβώς σύνθετο θέλουμε να κατασκευάσουμε διαλέγουμε την κατάλληλη μέθοδο. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι καθώς και παραλλαγές τους. Συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες είναι οι παρακάτω:

1. Μέθοδος «Ανοικτού καλουπιού» (Open Molding)
2. Μέθοδος παραγωγής σε «Αυτόκλειστο Κλίβανο» (Autoclave)
3. Μέθοδος «Περιέλιξης Νήματος» (Filament Winding)
4. Μέθοδος «Χύτευσης δια εγχύσεως υπό πίεση» (Resin Transfer Molding)
5. Μέθοδος επίστρωσης σε ταινία (tapelaying)
6. Μέθοδος εξώθησης με έλξη (pultrusion)

Τα υλικά των ινών και της μήτρας διατίθενται στο εμπόριο ξεχωριστά το καθένα ή ενωμένα υπό μορφή στρώματος. Οι ίνες μπορούν να βρεθούν είτε μεμονωμένες είτε πολλές μαζί υπό μορφή μη στριμμένων δεσμών. Αυτές μπορεί να είναι προσανατολισμένες κατά την αυτή διεύθυνση ή και κατά διαφορετικές διευθύνσεις υπό μορφή υφάνσεως.

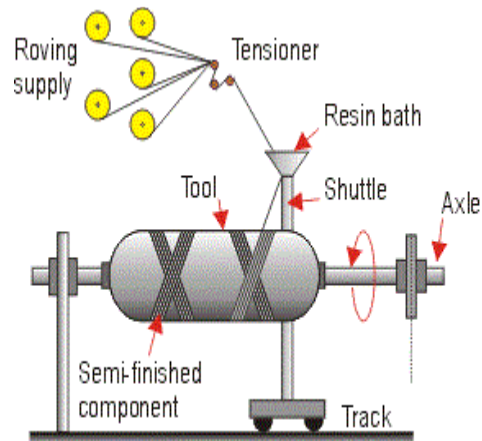
Μία πολύ σημαντική εξέλιξη στη βιομηχανία κατασκευής σύνθετων υλικών αποτέλεσε η δημιουργία της ταινίας προεμποτισμένων ινών (pre-impregnated fibers tape-Prepreg). Οι ίνες αυτές έχουν εμβαπτιστεί σε ρητίνη σε ελεγχόμενο εργοστασιακό περιβάλλον. Η καινοτομία αυτή πρακτικά σημαίνει ότι ο κατασκευαστής του τελικού προϊόντος δεν χρειάζεται πλέον να ασχολείται με την ανάμειξη των συστατικών της μήτρας ούτε για την αναλογία μήτρας οπλισμού στην κατασκευή του, αφού αυτά έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια κατά τη διαμόρφωση της ταινίας προεμποτισμένων ινών. Η κατασκευή ενός σύνθετου υλικού με τη χρήση ταινίας ινών Prepreg περιλαμβάνει απλώς την επίστρωση της ταινίας με τον επιθυμητό προσανατολισμό ινών και με το επιθυμητό πάχος πάνω στο καλούπι και στη συνέχεια τον πολυμερισμό σε συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης.

[13]

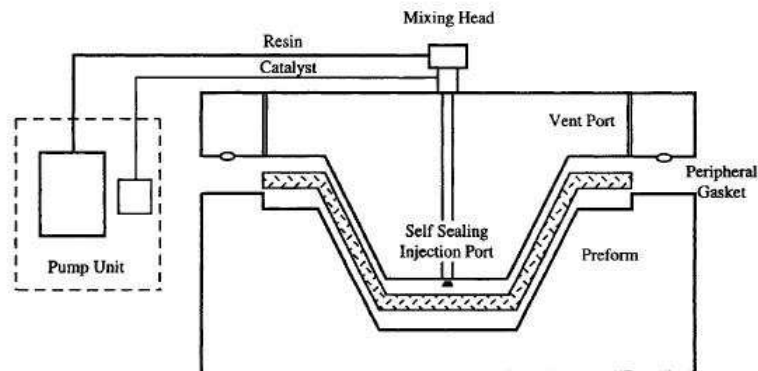


(a)

(b)



(c)



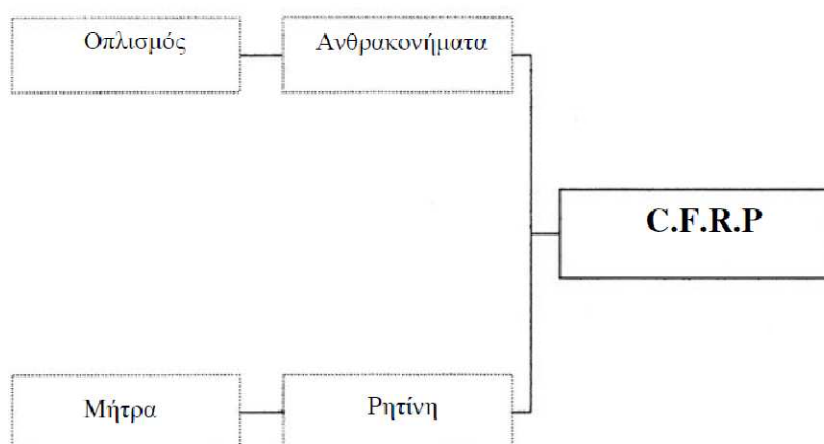
(d)

Σχήμα 14: (a) Μέθοδος παραγωγής σε «Αυτόκλειστο Κλίβανο» (Autoclave), (b) Μέθοδος «Ανοικτού καλουπιού» (Open Molding), (c) Μέθοδος «Περιέλιξης Νήματος» (Filament Winding), (d) Μέθοδος «Χύτευσης δια εγγύσεως υπό πίεση» (Resin Transfer Molding)

2. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

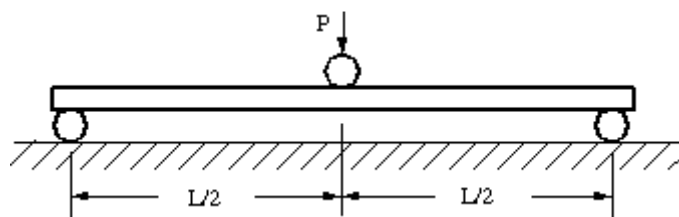
2.1. Εισαγωγή

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία θα κατασκευάσουμε πολύστρωτα ινοπλισμένα πλακίδια τα οποία χρησιμοποιούν ως οπλισμό ανθρακονήματα ενώ η μήτρα είναι εποξειδική ρητίνη και προσδιορίζονται από το ακρωνύμιο C.F.R.P. (Carbon Fiber Reinforced Polymers). Τα υλικά αυτά συνδυάζουν υψηλές αντοχές με εξαιρετικά χαμηλό βάρος και μεγάλη αντοχή σε γήρανση. Τα C.F.R.P ουσιαστικά δεν διαβρώνονται.



Σχήμα 15: C.F.R.P.

Στη συνέχεια θα γίνει δοκιμή των ινοπλισμένων πλακιδίων σε κάμψη τριών σημείων (flexure test) 3-point bending.



Σχήμα 16: 3-point bending

2.2. Κατασκευή πλακιδίων CFRP

Το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των πλακιδίων CFRP είναι σε μορφή προεμποτισμένων ινών (prepreg) και προέρχονται από την εταιρεία AMBERCOMPOSITES (βλ. Παράρτημα). Οι δύο τύποι prepreg ινών που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

- **Unidirectional 140 g/m² T700 equivalent 36% RW**
- **Woven T300 equivalent 2x2 twill 245 g/m² 40% RW**

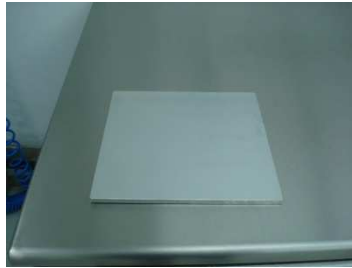
Με βάση τα στοιχεία από την κατασκευάστρια εταιρεία έχουμε για τα δύο είδη prepreg τις αντίστοιχες ιδιότητες που παρατίθενται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.

Αρχικά έχουμε βγάλει το υλικό μας (που είναι όπως προαναφέρθηκε ανθρακονήματα prepreg) από τους -18 °C σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και το αφήνουμε 8 ώρες να ξεπαγώσει. Πρέπει να τονίσουμε ότι ο χρόνος που πρέπει να μείνει εκτός ψυγείου μέχρι να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το πάχος του τοπιού.



Εικόνα 7: prepreg σε τόπια στην κατάψυξη στους -18 °C

Η κυρίως διαδικασία κατασκευής των πλακιδίων από CFRP διάστασης 12X12 cm περιγράφεται αναλυτικά ακολούθως. Τα πρώτα βήματα γίνονται και για τις δύο πλευρές τις λαμαρίνας αφού θα στρώσουμε αμφίπλευρα τα υλικά μας 4 πλακίδια σε κάθε πλευρά:



Εικόνα 8: Λαμαρίνα

1. Καθαρίζουμε τη λαμαρίνα πάνω στην οποία θα στρωθούν τα CFRP με Mould Cleaner μέχρι να πετύχουμε πολύ καλή επιφάνεια (καθρέπτη).



Εικόνα 9: Mould Cleaner

2. Περνάμε ένα χέρι Mould Sealer και περιμένουμε 15-30 λεπτά. Στη συνέχεια περνάμε και δεύτερο χέρι Mould Sealer και το βάζουμε στο φούρνο για 30 λεπτά σε θερμοκρασία 10 βαθμών πάνω από τη θερμοκρασία Curing.



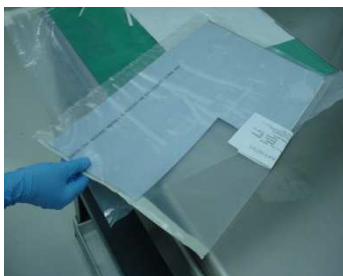
Εικόνα 10: Mould Sealer

3. Στη συνέχεια περνάμε τη λαμαρίνα αμφίπλευρα 3 στρώσεις αποκολλητικό μέσο που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι το 227CEE. Στα δύο πρώτα στρώματα αποκολλητικού περιμένω 10-15 λεπτά ενδιάμεσα και μετά την τρίτη στρώση αποκολλητικού τοποθετούμε τη λαμαρίνα στο φούρνο σε θερμοκρασία 10 βαθμών πάνω από τη θερμοκρασία Curing.



Εικόνα 11: Αποκολλητικό μέσο 227CEE

4. Κατόπιν κόβουμε τις ταινίες προεμποτισμένων ινών σε διάσταση 12X12 cm και ανάλογα με τον προσανατολισμό ινών που θέλουμε να έχει κάθε στρώμα στο εκάστοτε πλακίδιο CFRP.



Εικόνα 12: Κοπή prepreg CFRP

5. Προχωρούμε στο χτίσιμο των πλακιδίων σε αλληπάλλληλες στρώσεις πάνω στην πλάκα από αλουμίνιο με προσοχή και ανάλογα με τη διαστρωμάτωση που έχουμε επιλέξει για κάθε πλακίδιο. Τελικά «στρώνουμε» τα 8 πλακίδια διαστάσεων 12X12 cm τέσσερα σε κάθε πλευρά της λαμαρίνας.



Εικόνα 13: κατασκευή πλακιδίων CFRP

ΔΟΚΙΜΙΟ 1	ΔΟΚΙΜΙΟ 3	ΔΟΚΙΜΙΟ 5	ΔΟΚΙΜΙΟ 7
± 45 WOVEN	± 090 WOVEN	UNI 0	± 090 WOVEN
UNI 0	UNI 0	UNI 90	± 090 WOVEN
± 45 WOVEN	± 090 WOVEN	UNI 0	
UNI 0	UNI 0	UNI 90	
± 45 WOVEN	± 090 WOVEN		
UNI 0	UNI 0		
ΔΟΚΙΜΙΟ 2	ΔΟΚΙΜΙΟ 4	ΔΟΚΙΜΙΟ 6	ΔΟΚΙΜΙΟ 8
± 45 WOVEN	± 090 WOVEN	UNI 45	± 45 WOVEN
UNI 0	± 45 WOVEN	UNI -45	± 45 WOVEN
± 090 WOVEN		UNI 45	
UNI 0		UNI -45	
± 45 WOVEN			
UNI 0			

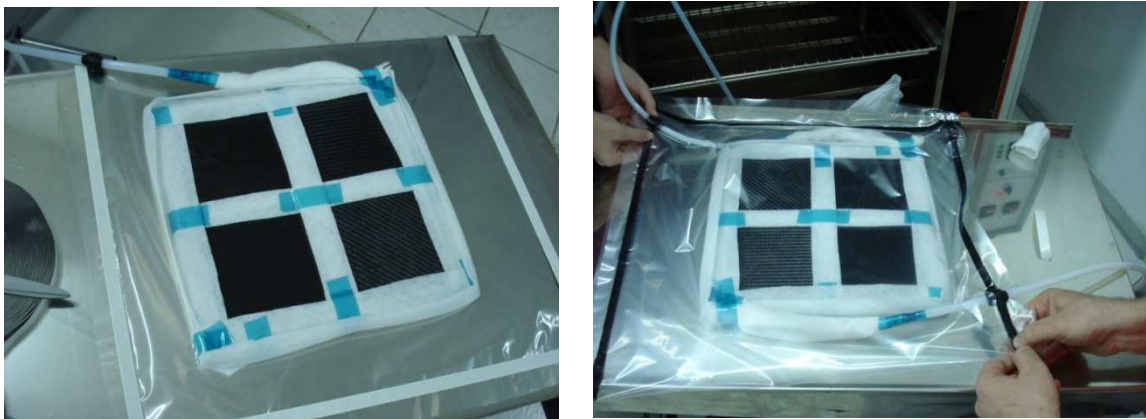
Πίνακας 10: διαστρωμάτωση πλακιδίων

6. Τοποθετούμε την κουβέρτα αναπνοής (ύφασμα από υαλοβάμβακα) σε μορφή σταυρού στα κενά μεταξύ πλακιδίων και λαμαρίνας και τη στερεώνουμε με ειδική κολλητική ταινία Teflon. Η κουβέρτα αναπνοής επιτρέπει την κυκλοφορία αέρα για την επίτευξη της ομοιόμορφης υποπίεσης στην περιοχή του πολυμερισμού.



Εικόνα 14: τοποθέτηση κουβέρτας αναπνοής

7. Ακολουθεί η διαδικασία που είναι γνωστή με τον όρο vacuum bagging ή ασκός υποπίεσης. Στεγανοποιητικό φιλμ (θερμοανθεκτικό νάιλον) το οποίο περικλείει το σύνθετο υλικό, για το σχηματισμό της απαιτούμενης υποπίεσης. Στη συνέχεια τοποθετούμε το σωλήνα υποπίεσης που συνδέει την αντλία κενού με τον ασκό για τη δημιουργία της υποπίεσης στην απαιτούμενη περιοχή. Στον δημιουργούμενο ασκό προσαρμόζουμε και το σωληνάκι του καταγραφικού πίεσης ώστε έλεγχο της πίεσης κατά τη διαδικασία του curing. Για την τελική στεγανοποίηση του ασκού και για να στερεωθούν τα δύο σωληνάκια (αντλίας κενού και καταγραφικού πίεσης) χωρίς να έχουμε απώλειες πίεσης χρησιμοποιείται στεγανοποιητικό ελαστικό γνωστό ως bag seal. Το bag seal είναι ελαστικό διπλής όψης σε μορφή λωρίδας (σαν πλαστελίνη) και επικολλάται περιφερειακά του ασκού υποπίεσης.



Εικόνα 15: Vacuum bagging

8. Τοποθετούμε τα υλικά μας στο φούρνο αφού πρώτα προγραμματίσουμε την καμπύλη Curing με βάση τα στοιχεία που έχουμε λάβει από την κατασκευάστρια εταιρία των προεμποτισμένων ινών άνθρακα.

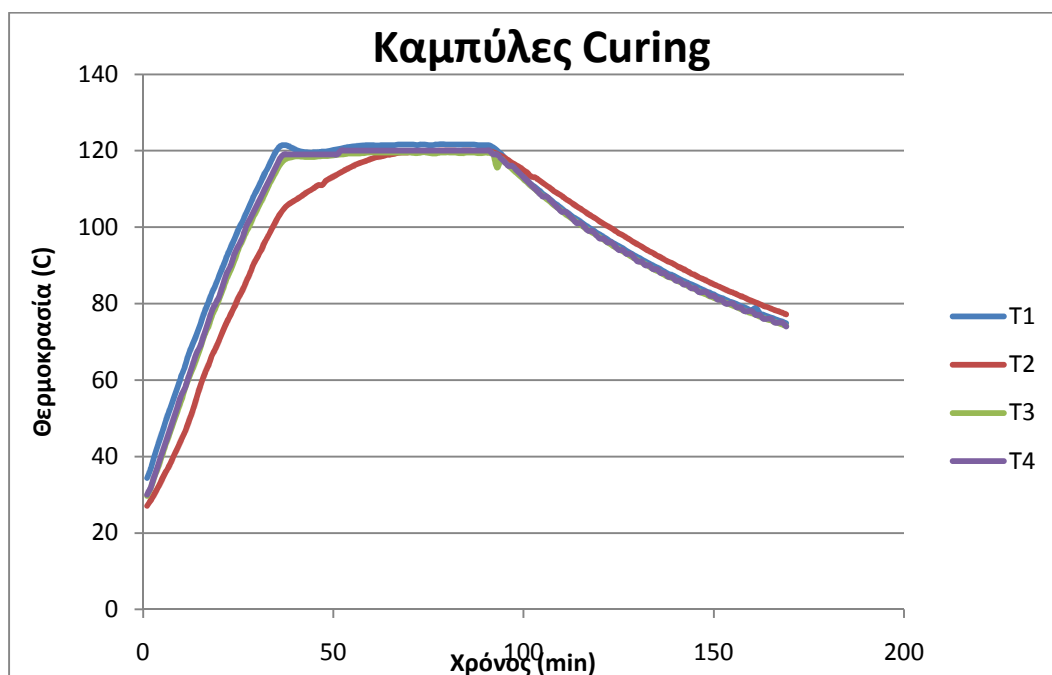
Έτσι έχουμε για την καμπύλη που πρέπει να ακολουθηθεί:

- 5' παραμονή στους 30 °C
- Από τους 30 °C ανεβαίνουμε στους 120 °C ρυθμό 3 °C/λεπτό
- Παραμονή 1 ώρα στους 120 °C
- Κάθοδος της θερμοκρασίας από τους 120 °C στους 70 °C περίπου με σταθερό ρυθμό



Εικόνα 16: Φούρνος

Καμπύλη Curing:

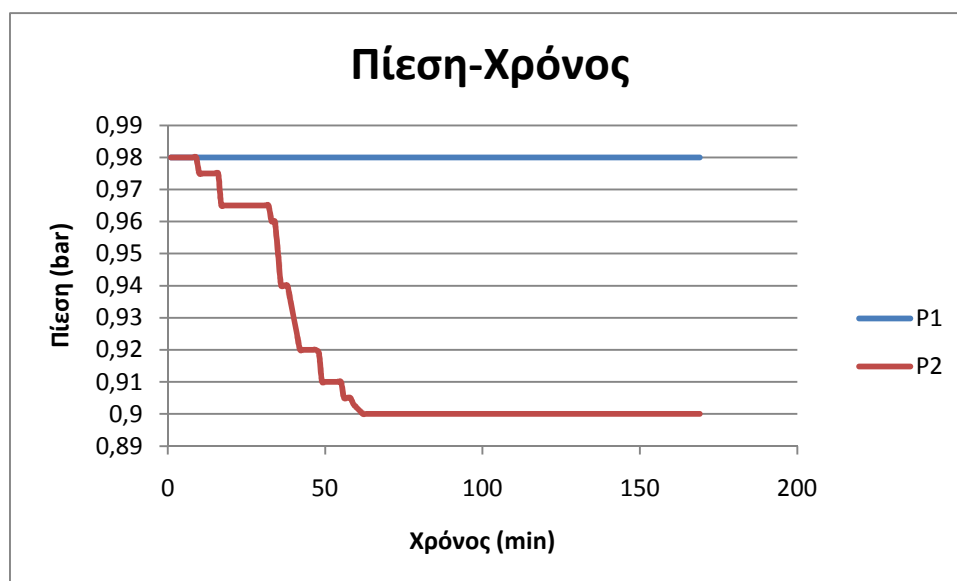


Σχήμα 17: διάγραμμα καμπυλών Curing

Για την καλύτερη αποτύπωση της καμπύλης Curing παίρνουμε τιμές από τέσσερα καταγραφικά θερμοκρασίας όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα. Οι αισθητήρες αυτοί θερμοκρασίας αντιστοιχούν:

- T1: Καταγράφει τη θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό του φούρνου
- T2: Καταγράφει τη θερμοκρασία των δοκιμίων. Ο αισθητήρας βρίσκεται πάνω στην πλάκα που βρίσκονται τα δοκίμια και μας δίνει την πιο ακριβή εικόνα της καμπύλης Curing
- T3 : Καταγράφει τη θερμοκρασία του θερμοστάτη ασφαλείας
- T4 : Καταγράφει τη θερμοκρασία του θερμοστάτη του φούρνου

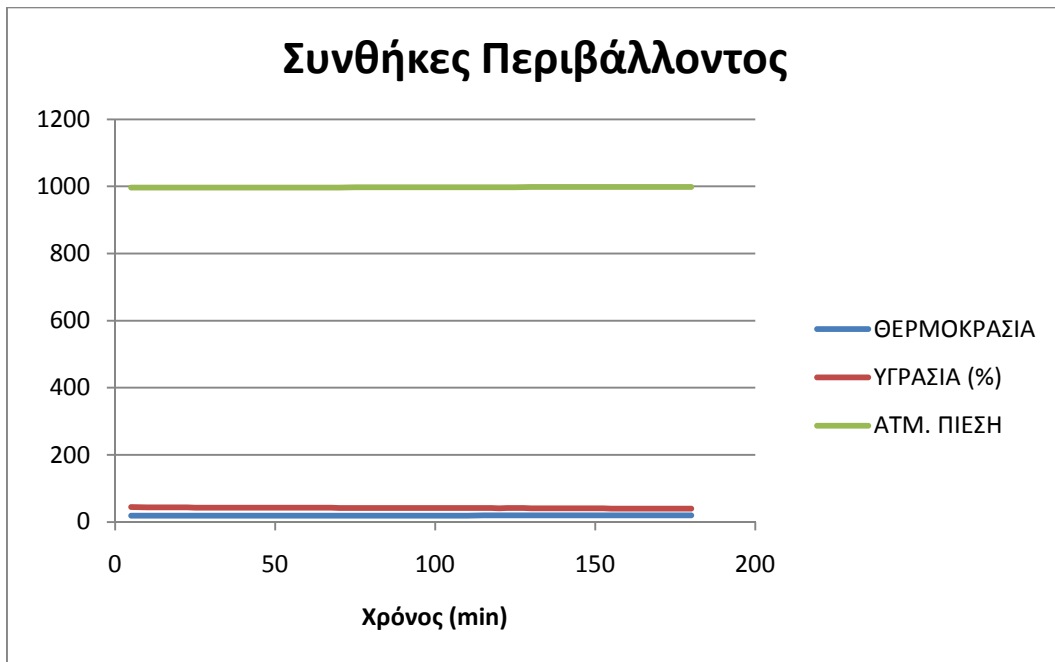
Για την καλύτερη εποπτεία των συνθηκών που επικρατούν κατά την κατασκευή των πλακιδίων καταγράφουμε την πίεση από την αντλία κενού και από το καταγραφικό πίεσης που είναι ενσωματωμένο στον ασκό υποπίεσης και παίρνουμε τιμές ανά 5 λεπτά για τις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν στο χώρο διεξαγωγής της κατασκευής. Ακολουθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα:



Σχήμα 18: διάγραμμα καταγραφικών πίεσης

P1: Πίεση αντλίας κενού

P2: Καταγραφικό πίεσης στον ασκό υποπίεσης



Σχήμα 19: Συνθήκες Περιβάλλοντος

Τελικά προκύπτουν τα πλακίδια CFRP της παρακάτω φωτογραφίας:



Εικόνα 17: Τα πλακίδια CFRP που προκύπτουν

Ακολουθεί μέτρηση του πάχους των πλακιδίων με μικρόμετρο σε 8 σημεία του κάθε πλακιδίου:

ΔΟΚΙΜΙΟ	1	2	3	4	5	6	7	8
#1	1,08	1,11	1,13	1,11	1,09	1,08	1,11	1,07
#2	1,09	1,07	1,09	1,1	1,08	1,08	1,07	1,1
#3	1,09	1,13	1,09	1,09	1,1	1,08	1,06	1,07
#4	0,49	0,499	0,49	0,48	0,5	0,48	0,5	0,49
#5	0,51	0,53	0,51	0,5	0,52	0,53	0,51	0,53
#6	0,53	0,52	0,53	0,51	0,51	0,52	0,52	0,5
#7	0,48	0,49	0,51	0,51	0,51	0,53	0,49	0,5
#8	0,48	0,48	0,49	0,49	0,49	0,49	0,48	0,49

Πίνακας 11: Πάχος πλακιδίων

Στη συνέχεια κάθε πλακίδιο οδηγείται στο ψαλίδι όπου κόβεται και εξάγονται τέσσερα δοκίμια για τις ανάγκες του πειράματος. (3 που θα χρησιμοποιηθούν και ένα εφεδρικό). Τα πλακίδια έχουν διαστάσεις 2X8 cm.



Εικόνα 18: Κοπή πλακιδίων CFRP στο ψαλίδι

Κατόπιν τα δοκίμια τρίβονται περιμετρικά με τρία γυαλόχαρτα (χοντρό, μεσαίο και ψιλό σε σειρά) ώστε να εξομαλυνθούν οι πλευρές από τυχόν ελαττώματα που θα επηρεάσουν την πειραματική διαδικασία και ελέγχονται με μικροσκόπιο για την επιθυμητή ποιότητα επιφανείας.



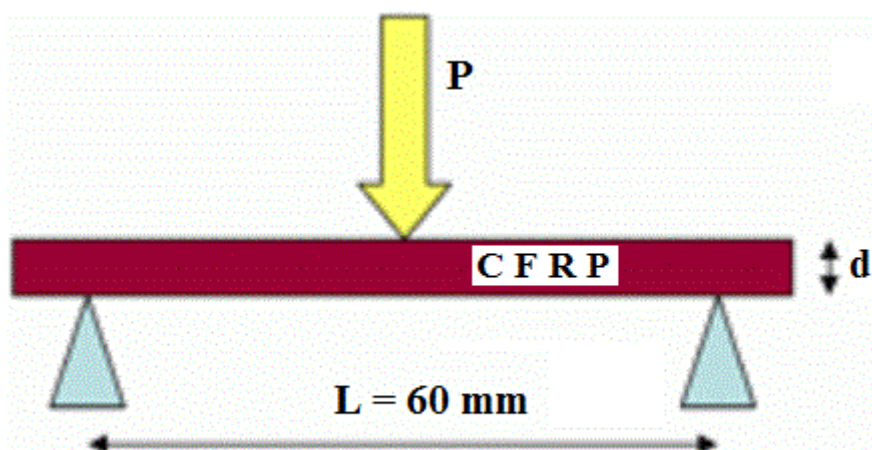
Εικόνα 19: Φινίρισμα πλευρικών επιφανειών

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Εισαγωγή

Τα πλακίδια από CFRP που κατασκευάστηκαν με τη διαδικασία του προηγούμενου κεφαλαίου θα υποβληθούν σε τεστ κάμψης τριών σημείων (3 POINT BENDING). Οι διαστάσεις των δοκιμίων και οι αποστάσεις στις οποίες θα τοποθετηθούν οι στηρίξεις καθορίζονται από τα διεθνή πρότυπα της ASTM για flexure test σύνθετων υλικών. Έτσι η απόσταση ανάμεσα στις δύο στηρίξεις πρέπει να είναι τουλάχιστον 60 φορές το πάχος για λεπτά σύνθετα υλικά. [3]

Τελικά έχουμε:



Σχήμα 20: Σχηματική αναπαράσταση του 3-POINT BENDING

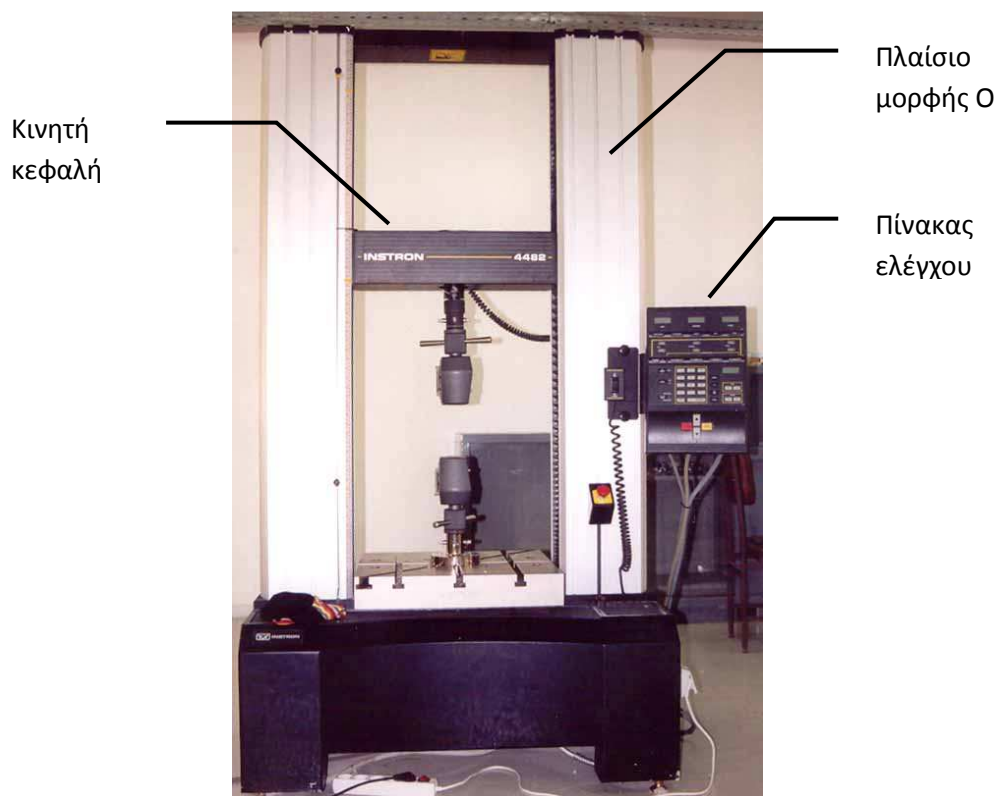
Το έμβολο της πρέσας κατεβαίνει με σταθερή ταχύτητα $u = 25 \text{ mm / min}$. Σε κάθε δοκίμιο έχουμε το αντίστοιχο διάγραμμα flexure load – flexure extension και τις αντίστοιχες φωτογραφίες που λαμβάνονται ανά 6 sec και αναπαρίστανται σε κάθε διάγραμμα με τις μαύρες κάθετες γραμμές. Από τα σημεία του διαγράμματος που λαμβάνονται υπολογίζεται με κανόνα τραπεζίου η ολική απορροφούμενη ενέργεια W .

3.2 Πειραματικός Εξοπλισμός

Για την αξονική καταπόνηση χρησιμοποιήθηκε η πρέσα INSTRON 4482 του εργαστηρίου. Πρόκειται για μηχανική πρέσα (μηχανισμού κοχλία-περικοχλίου) ονομαστικού φορτίου 100 KNt.

Τα βασικά μέρη της πρέσας αυτής είναι:

- Το πλαίσιο, μορφής O, που περιλαμβάνει το τραπέζι στερέωσης του δοκιμίου και το μηχανισμό κίνησης του εργαλείου διαμόρφωσης.
- Ο μηχανισμός της κινητής κεφαλής.
- Ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος διαθέτει θύρα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE, συνδεδεμένη μέσω παράλληλης θύρας με ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Σχήμα 21: Μηχανική πρέσα INSTRON 4482, ονομαστικού φορτίου 10 KNt.

Τα βασικά λειτουργικά χαρακτηριστικά της πρέσας είναι :

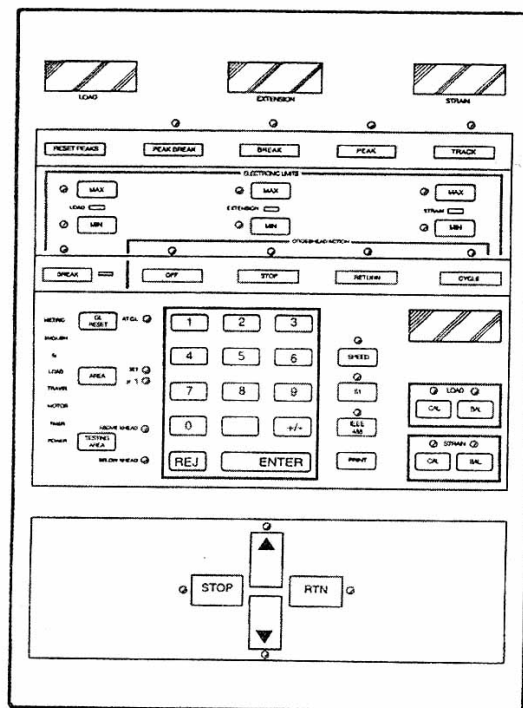
- Ονομαστική δύναμη: 100 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής: 500 mm min^{-1} .

- Ταχύτητα επιστροφής κινητής κεφαλής στην αρχική θέση: 600 mm min^{-1} .
- Μέγιστο αναπτυσσόμενο φορτίο στη μέγιστη ταχύτητα: 75 KNt.
- Μέγιστη ταχύτητα κινητής κεφαλής σε μέγιστο φορτίο: 250 mm min^{-1} .
- Ευαισθησία κεφαλής πρέσας: 2 mV V^{-1} .

Ο πίνακας ελέγχου έχει ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή που αναλαμβάνει τη ρύθμιση όλων των παραμέτρων κατεργασίας και την επεξεργασία των απαραίτητων υπολογισμών.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 22, ο πίνακας ελέγχου απαρτίζεται από τέσσερις κυρίους τομείς από πάνω προς τα κάτω:

- Τον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων.
- Τον τομέα οριοθετήσεως.
- Τον κεντρικό τομέα.
- Τον τομέα κίνησης κεφαλής.



Σχήμα 22: Πίνακας ελέγχου πρέσας INSTRON 4482.

Στον κεντρικό τομέα υπάρχει αριθμητικό πληκτρολόγιο και οθόνη υγρών κρυστάλλων, τεσσάρων ψηφίων, καθώς και λυχνίες ένδειξης στο αριστερό μέρος, όπου αναγράφεται το χρησιμοποιούμενο σύστημα μέτρησης (SI, ENGLISH, METRIC). Η επιλογή του συστήματος μέτρησης γίνεται μέσω διακόπτη που βρίσκεται στο πίσω μέρος του πίνακα. Από τον κεντρικό τομέα υπάρχει η δυνατότητα για τις εξής ρυθμίσεις,

- Καλιμπράρισμα της μηχανής.
- Επιλογή της ταχύτητας κίνησης της κεφαλής.
- Οριοθέτηση της διαδρομής κίνησης.
- Καθορισμός του εύρους ενεργούς συμπίεσης του δοκιμίου.
- Έλεγχος της διαδικασίας εκτύπωσης των αποτελεσμάτων.
- Ενεργοποίηση της επικοινωνίας του πίνακα ελέγχου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- Λειτουργία ειδικού λογισμικού διάγνωσης όλων των λειτουργιών της πρέσας.
- Καλιμπράρισμα των μετρητικών φορτίου και παραμόρφωσης.

Στον τομέα οθονών υγρών κρυστάλλων περιέχονται τρεις τετραψήφιες οθόνες υγρών κρυστάλλων καθώς και πλήκτρα, τα οποία επιτρέπουν την επιλογή φορτίου, επιμήκυνσης ή συμπίεσης δοκιμίου, καθώς επίσης και τα ακρότατα αυτών. Όλες οι τιμές αποθηκεύονται και είναι διαθέσιμες προς επεξεργασία μετά το πέρας της δοκιμής. Σε κάθε περίπτωση, η επιλεγείσα λειτουργία υποδεικνύεται από αντίστοιχη λυχνία.

Στον τομέα οριοθέτησης δηλώνεται το όριο οποιασδήποτε λειτουργίας, το οποίο δεν πρέπει να υπερβεί το σύστημα. Τα όρια αυτά πρέπει να εισάγονται για λόγους ασφαλείας στην περίπτωση καταπόνησης δοκιμίου με κρίσιμο ύψος, για την αποφυγή ενδεχομένου συναντήσεως κινητής και σταθερής πλάκας από εσφαλμένο καλιμπράρισμα της μέγιστης διαδρομής. Οι καταχωρήσεις εκτελούνται μέσω του αριθμητικού πληκτρολογίου του πίνακα ελέγχου και οι επιλεγείσες τιμές εμφανίζονται στην οθόνη υγρών κρυστάλλων του κεντρικού τομέα.

Οι λειτουργίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν, μόλις επιτευχθούν τα όρια στις τιμές του φορτίου (LOAD), της επιμήκυνσης (EXTENSION), της παραμόρφωσης (STRAIN) και της θραύσης (BREAK) είναι οι εξής:

- Στάση της κεφαλής στη συγκεκριμένη θέση (STOP).

- Επιστροφή της κεφαλής στην αρχική θέση (RETURN).
- Αλλαγή της κατεύθυνσης για επαναλαμβανόμενη κίνηση (CYCLE).
- Σταμάτημα της κίνησης της κεφαλής (OFF).

Στον τομέα κίνησης της κεφαλής, που βρίσκεται στο κάτω μέρος του πίνακα ελέγχου, υπάρχει η δυνατότητα χειροκίνητου ελέγχου της κίνησης της κεφαλής μέσω τεσσάρων πλήκτρων. Να σημειωθεί ότι με την επιλογή του κομβίου «επιστροφή» η κεφαλή δεν κινείται με την προγραμματισμένη ταχύτητα αλλά με την μέγιστη δυνατή και σταματά στο σημείο εκκίνησης.

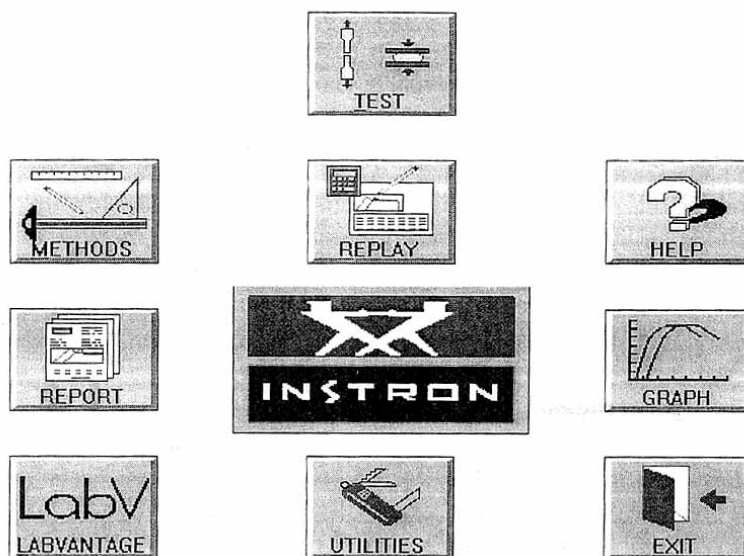
Στον πίνακα ελέγχου είναι επίσης ενσωματωμένα και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που αναλαμβάνουν τον έλεγχο και την επικοινωνία του συστήματος με τα μετρητικά φορτίου και παραμόρφωσης.

Όσον αφορά την ταχύτητα της δοκιμής είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους όπως είναι το υλικό του δοκιμίου, οι αλλαγές που θα υποστεί το δοκίμιο κατά την διάρκεια του πειράματος και η μέγιστη ταχύτητα του εξωτερικού καταγραφέα-λήπτη που εξαρτάται από το ρυθμό δειγματοληψίας. Η ταχύτητα μπορεί να οριστεί με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου στην κάτω πλάκα της πρέσας, ώστε να αποφευχθεί τυχόν μετακίνηση του, και οι δύο πλάκες να παραμένουν παράλληλες μεταξύ τους, κατά την διάρκεια της δοκιμής. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επιβολή μεγάλων φορτίων και εφαρμογή στρεπτικής δύναμης στην πλάκα της βάσης.

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται από την πρέσα δοκιμών για την επίτευξη της πειραματικής εργασίας είναι το INSTRON Series IX Automated Material Tester, το οποίο έχει την δυνατότητα να επεξεργαστεί τα λαμβανόμενα αρχεία και σε υπολογιστή που δεν είναι συνδεδεμένος στην πρέσα δοκιμών.

Η αρχική οθόνη του προγράμματος αποτελείται από ένα αριθμό επιλογών που δίνουν πρόσβαση σε διάφορες λειτουργίες όπως αυτές φαίνονται στο Σχ. 23



Σχήμα 23: Αρχικές επιλογές του προγράμματος INSTRON Series IX.

Οι διάφορες λειτουργίες που παρέχονται είναι:

- TEST- Η λειτουργία αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή πειράματος που ήδη έχει προετοιμαστεί.
- METHODS- Σε συνεργασία με το Method Editor, επιτρέπει την εισαγωγή νέων μεθόδων πειραμάτων ή τη μεταβολή των συνθηκών ενός ήδη υπάρχον.
- REPLAY- Δίδει τη δυνατότητα επανάληψης της διαδικασίας ενός πειράματος.
- GRAPH- Εισάγει την διαδικασία δημιουργίας γραφημάτων.
- HELP- Παρέχει βοηθητικές οδηγίες από το Merlin Online Help and Reference στην περίπτωση που παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα.
- EXIT- Έξοδος από το πρόγραμμα.

Στην πρέσα προσαρμόζεται η ειδική διάταξη του παρακάτω σχήματος για την εκτέλεση των πειραμάτων.



Εικόνα 20: Ειδική διάταξη για 3-POINT BENDING

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας:

3.3 Αποτελέσματα Πειραματική Διαδικασίας

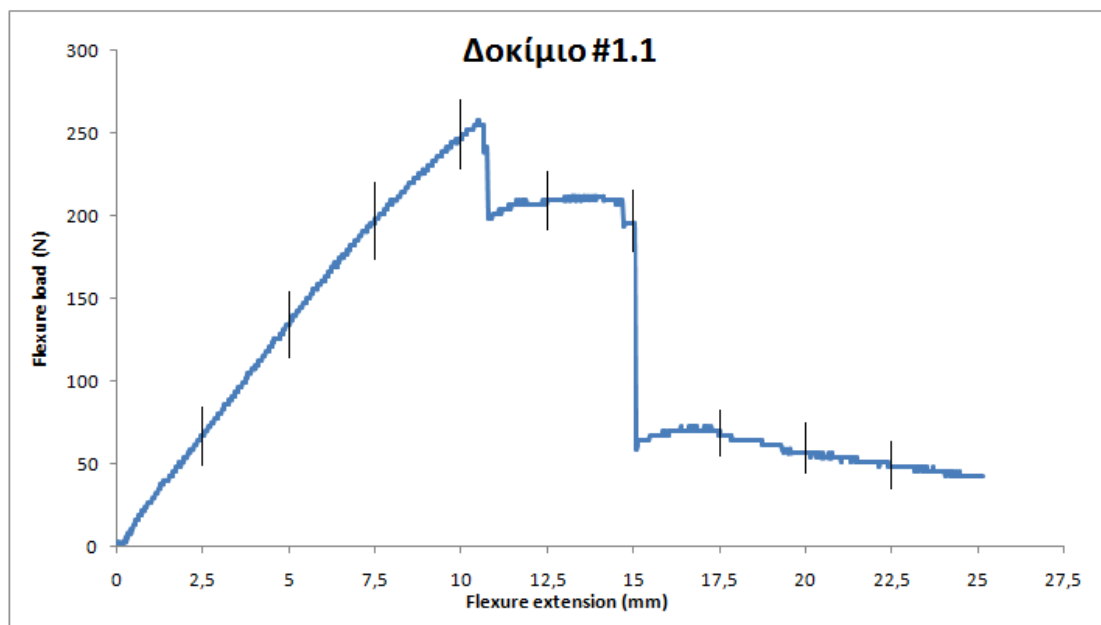
3.3.1 Δοκίμιο #1

Το Δοκίμιο #1 με πάχος 1 mm αποτελείται από 6 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 1
± 45 WOVEN
UNI 0
± 45 WOVEN
UNI 0
± 45 WOVEN
UNI 0

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #1

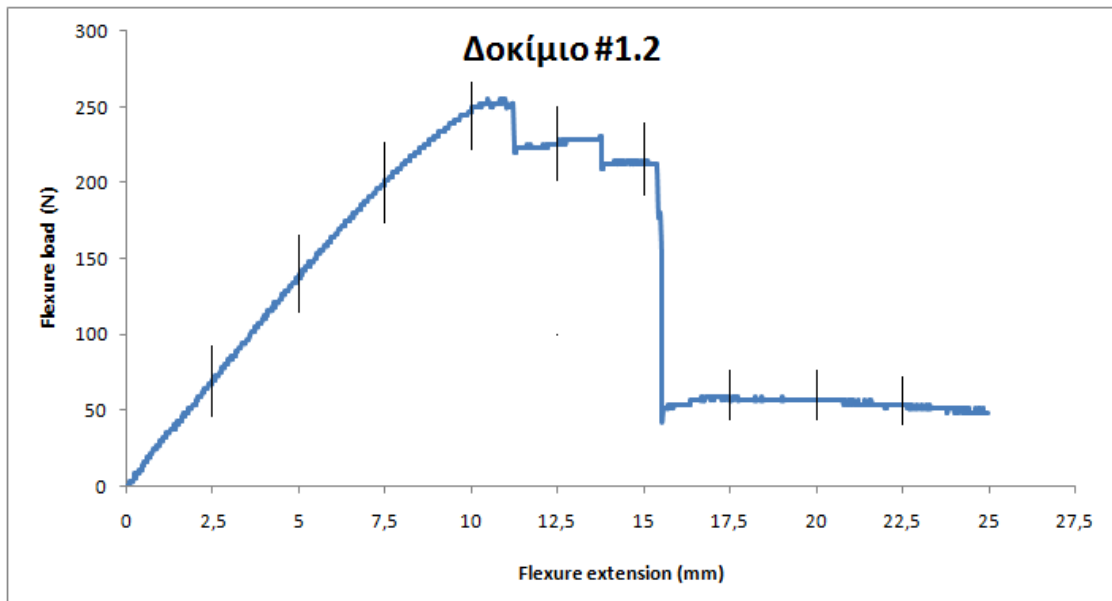
3.3.1.1 Δοκίμιο #1.1





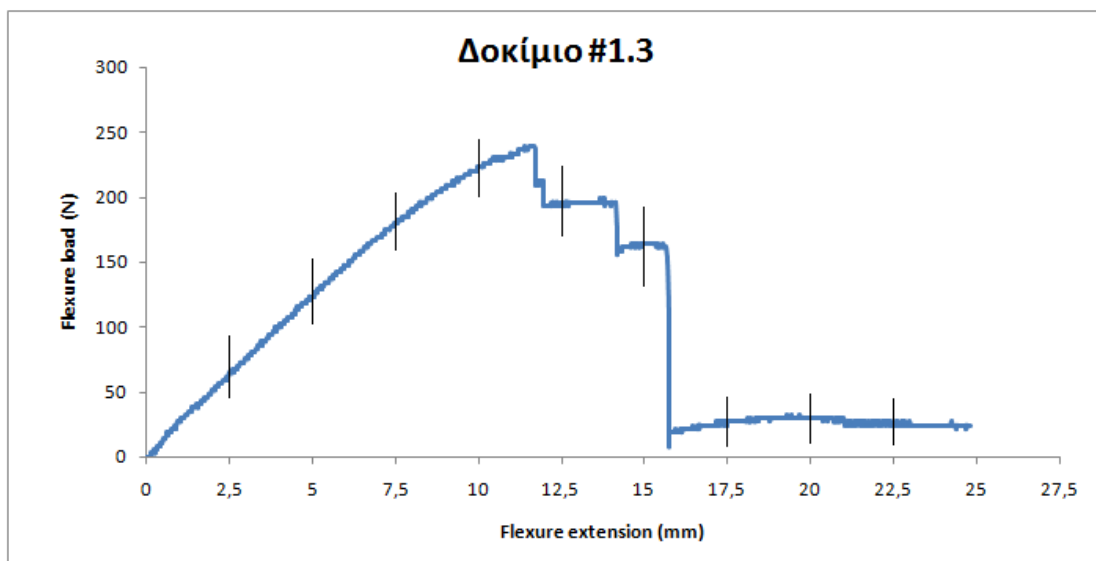
- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{\max}
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια : $W = 2,976 \text{ Joule}$ (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 258 \text{ N}$
- Το δοκίμιο #1.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 10,5 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται.

3.3.1.2 Δοκίμιο #1.2



- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{max}
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια : $W = 3,109$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 252$ N
- Το δοκίμιο #1.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 11 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται.

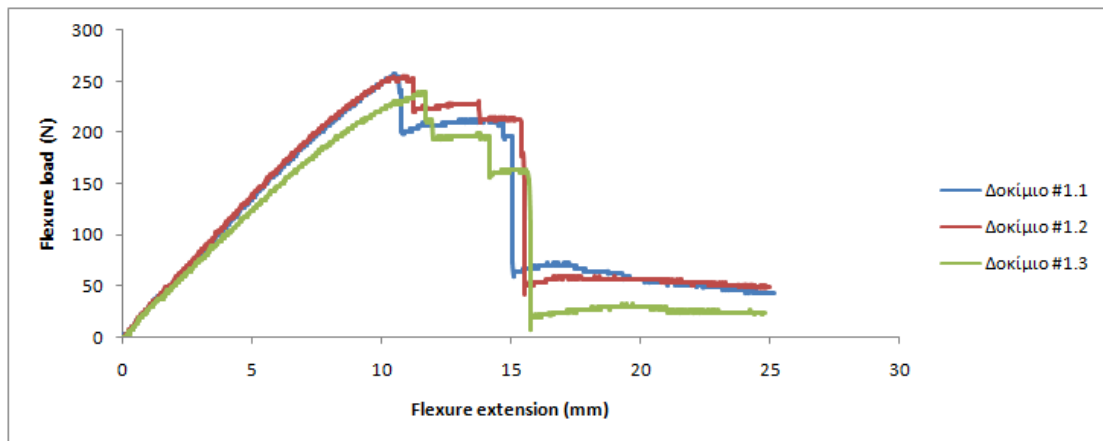
3.3.1.3 Δοκίμιο #1.3





- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{max}
- Ολική απορροφούμενη ενέργεια: $W = 2,568$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 239$ N
- Το δοκίμιο #1.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 11,5 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται.

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #1.1, #1.2, #1.3



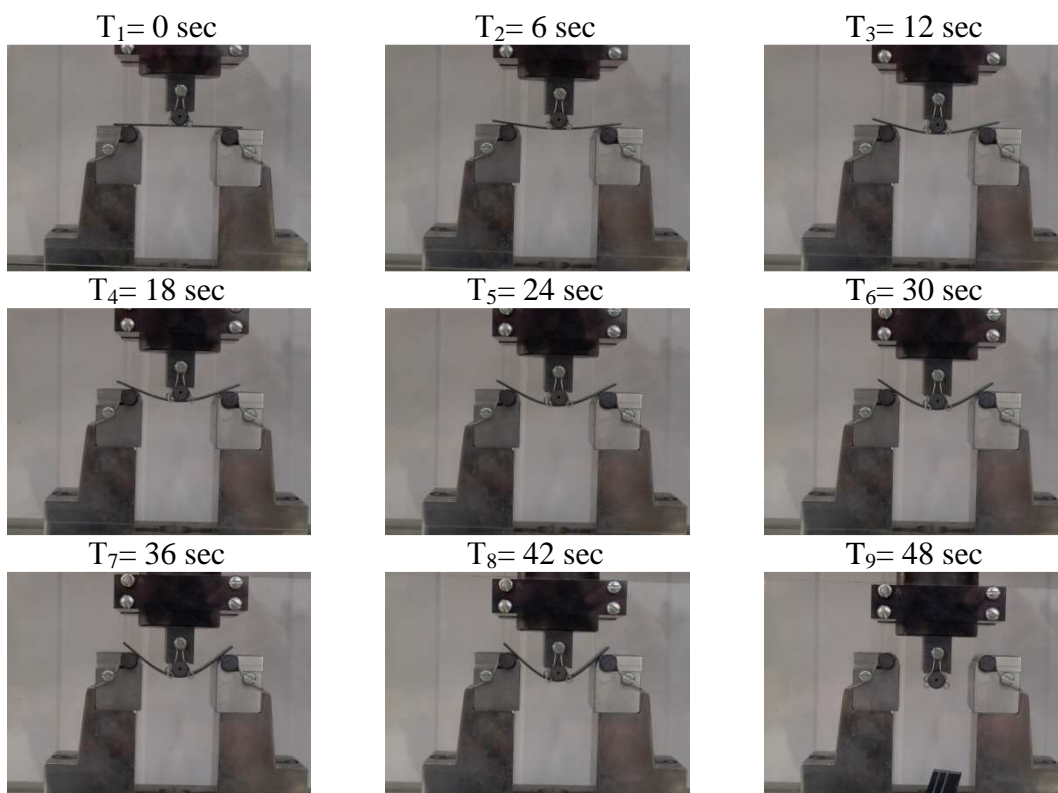
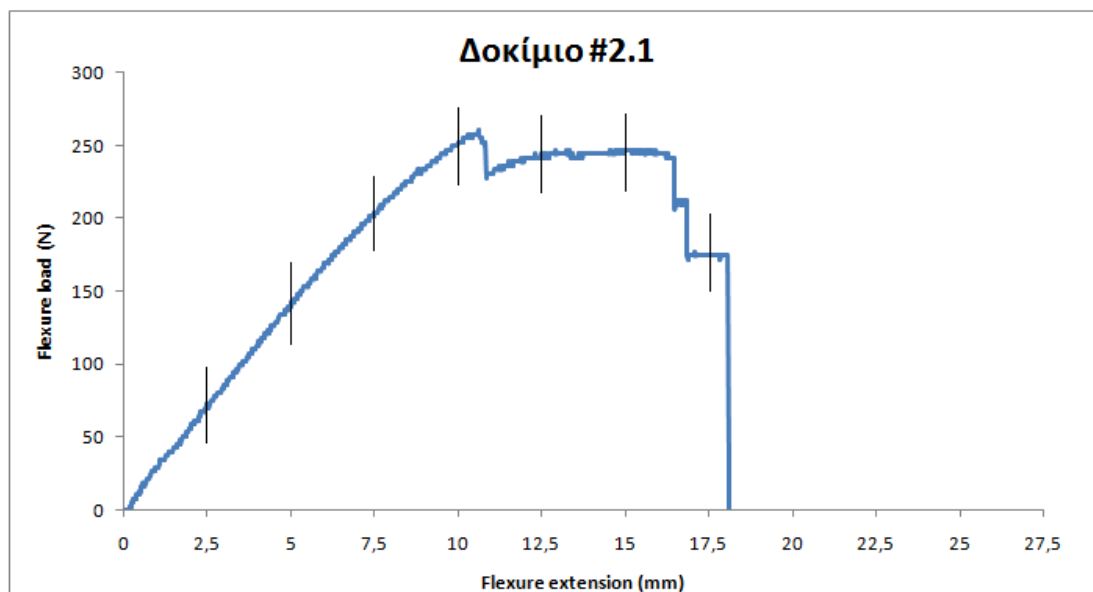
3.3.2 Δοκίμιο #2

Το Δοκίμιο #2 με πάχος 1 mm αποτελείται από 6 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 2
± 45 WOVEN
UNI 0
± 090 WOVEN
UNI 0
± 45 WOVEN
UNI 0

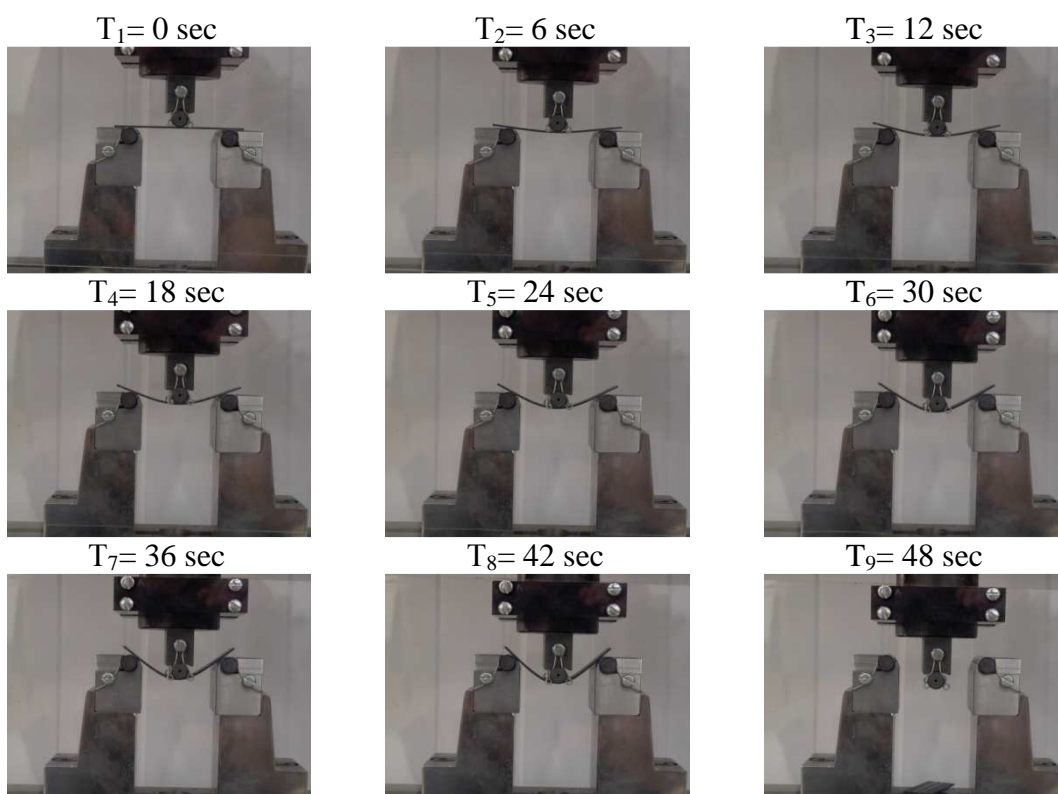
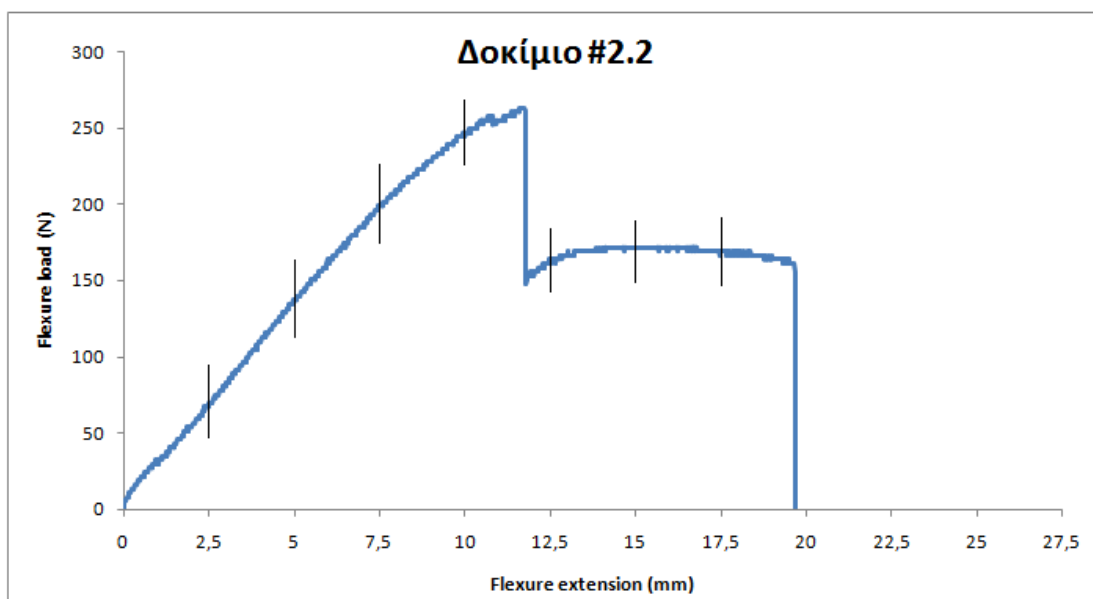
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #2.

3.3.2.1 Δοκίμιο #2.1



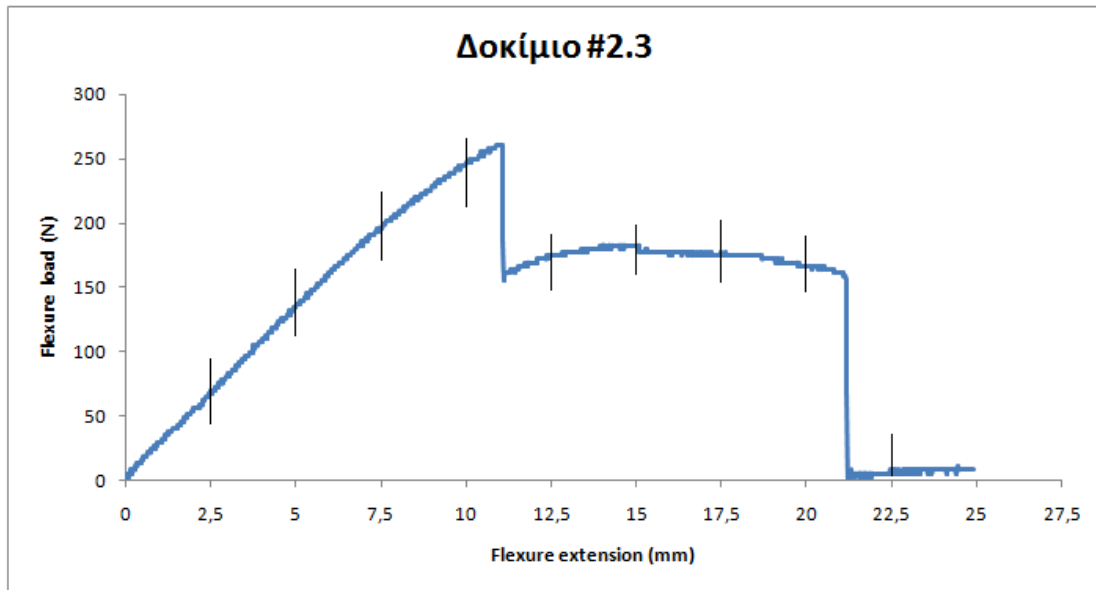
- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{\max}
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 3,231 \text{ Joule}$ (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 258 \text{ N}$
- Το δοκίμιο #2.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 10,5 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται και σπάει σε δύο μέρη

3.3.2.2 Δοκίμιο #2.2



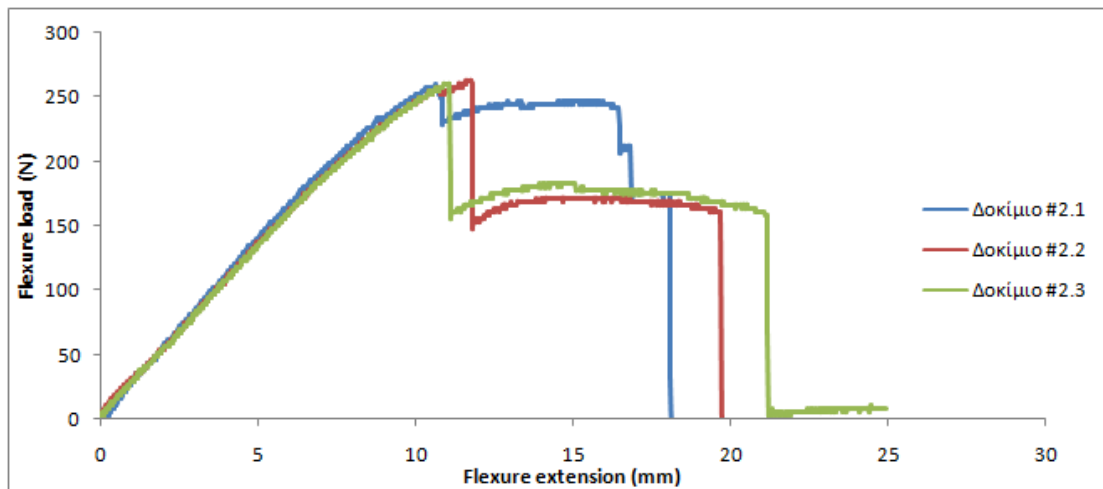
- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{\max}
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 3,108 \text{ Joule}$ (κανόνας τραπέζιου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 260 \text{ N}$
- Το δοκίμιο #2.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 11,7 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται και σπάει σε δύο μέρη

3.3.2.3 Δοκίμιο #2.3



- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{max}
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 3,367$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 260$ N
- Το δοκίμιο #2.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 11 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #2.1, #2.2, #2.3



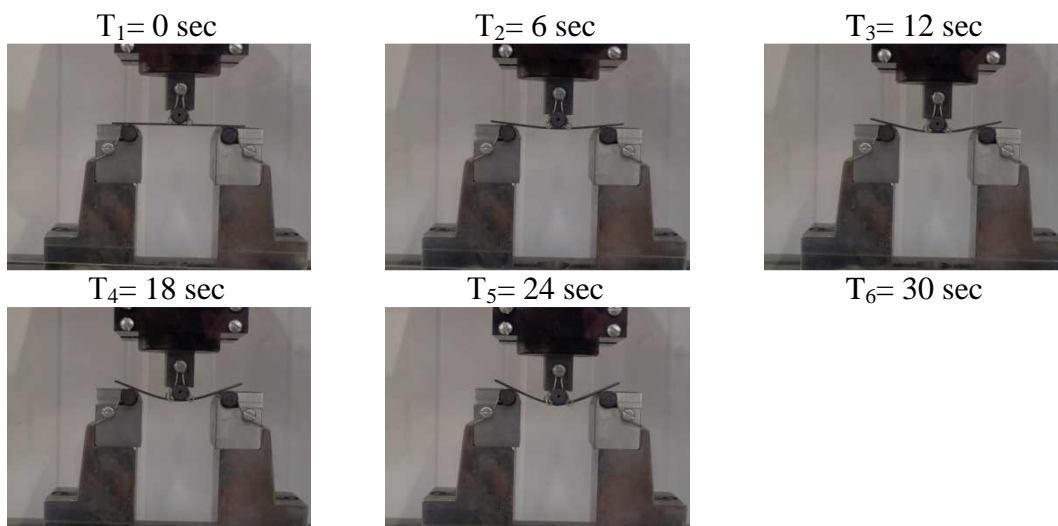
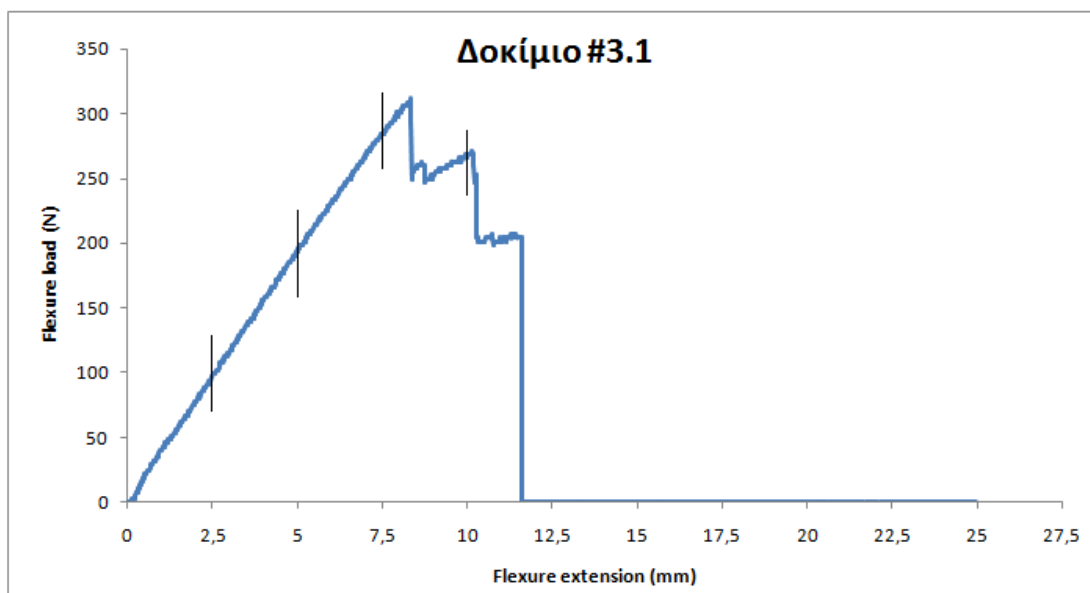
3.3.3 Δοκίμιο #3

Το Δοκίμιο #3 με πάχος 1 mm αποτελείται από 6 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 3
± 090 WOVEN
UNI 0
± 090 WOVEN
UNI 0
± 090 WOVEN
UNI 0

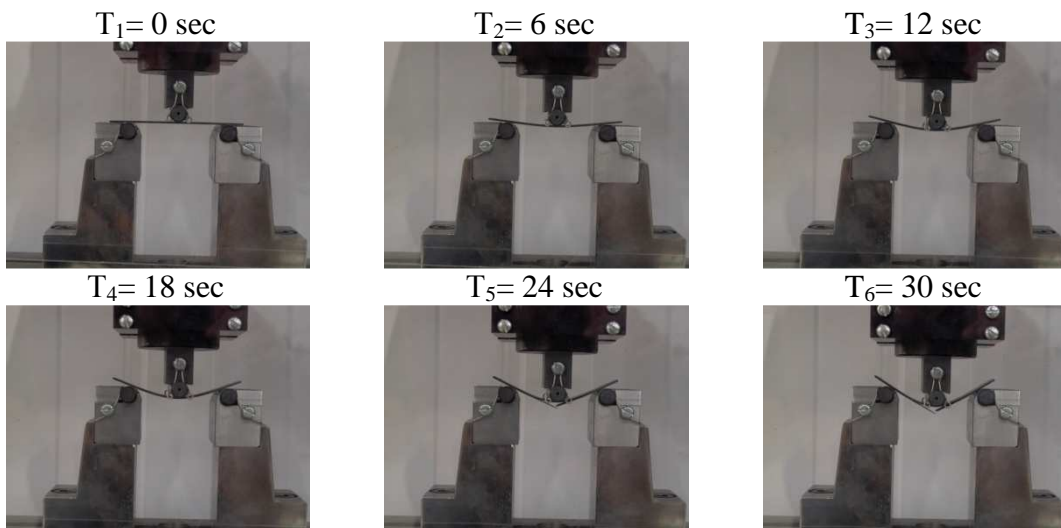
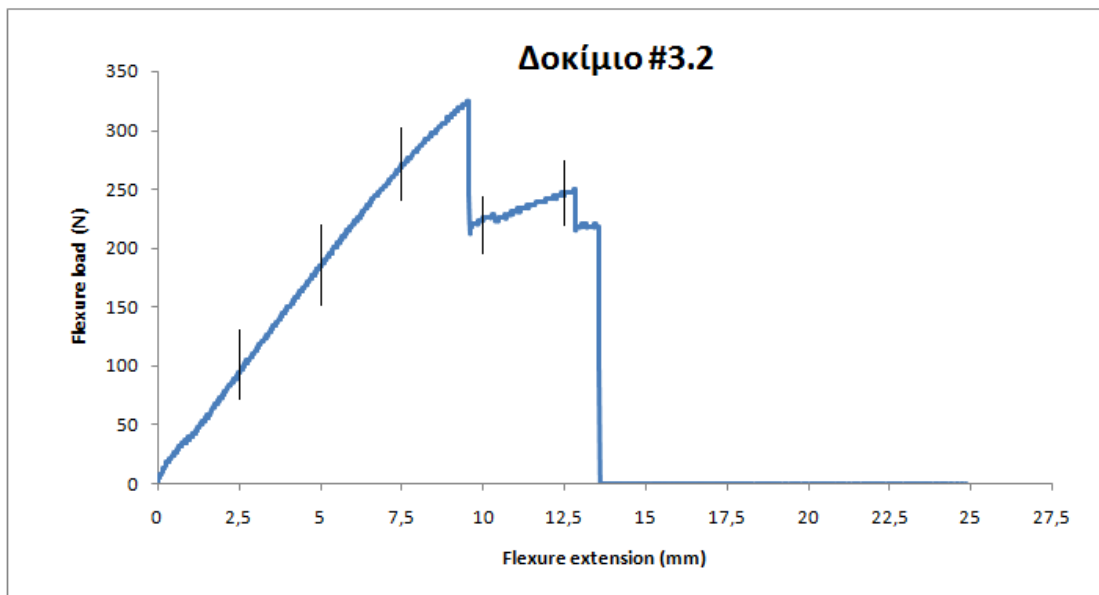
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #3.

3.3.3.1 Δοκίμιο #3.1



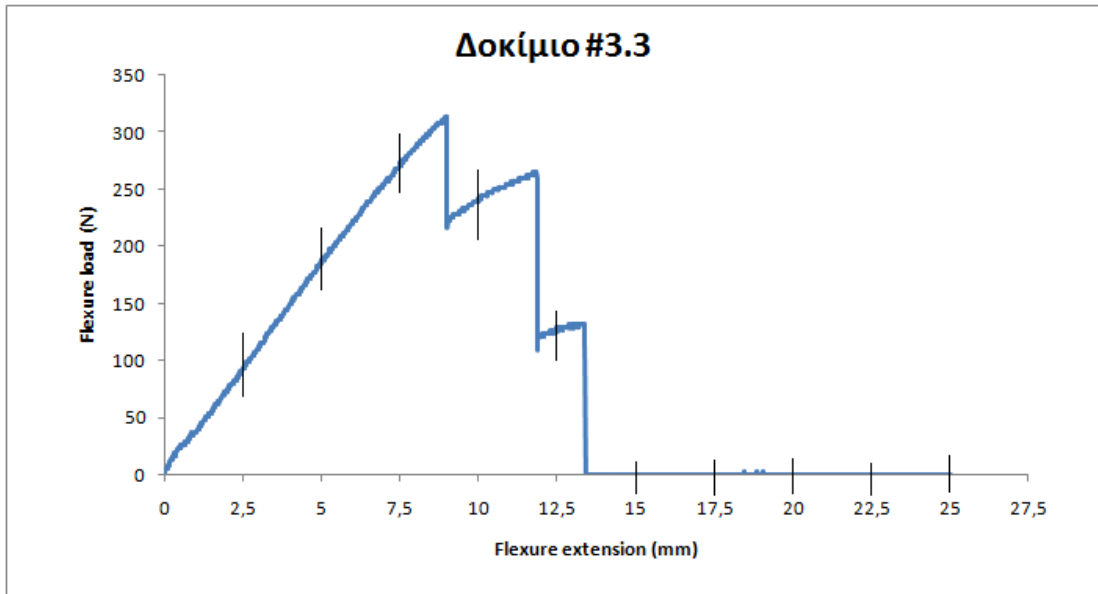
- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{max}
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 2,105$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 311$ N
- Το δοκίμιο #3.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 8,3 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται

3.3.3.2 Δοκίμιο #3.2



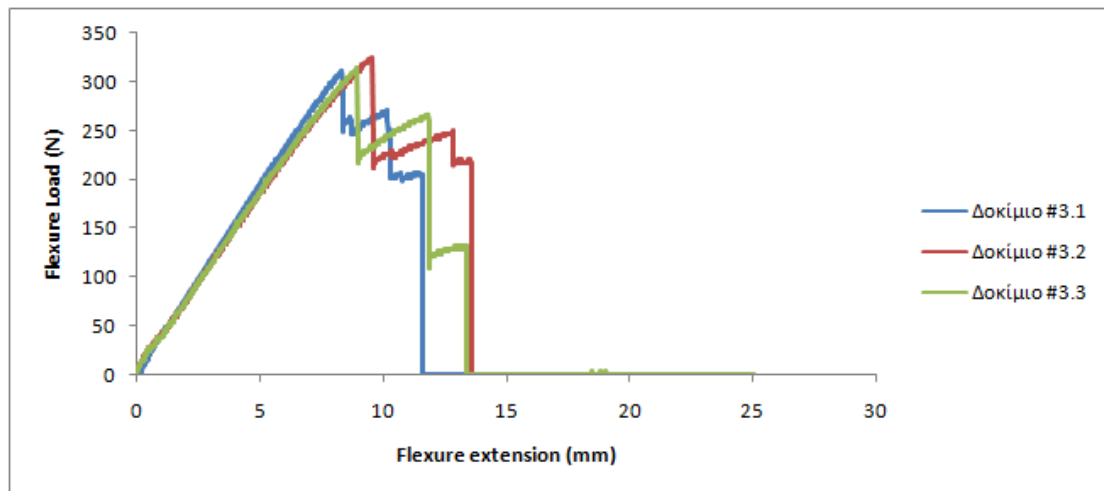
- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{max}
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 2,583$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 324$ N
- Το δοκίμιο #3.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 9,5 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται

3.3.3.3 Δοκίμο #3.3



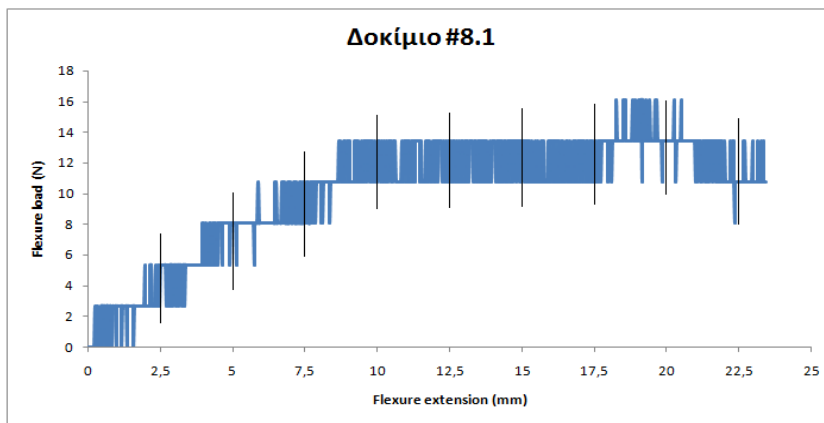
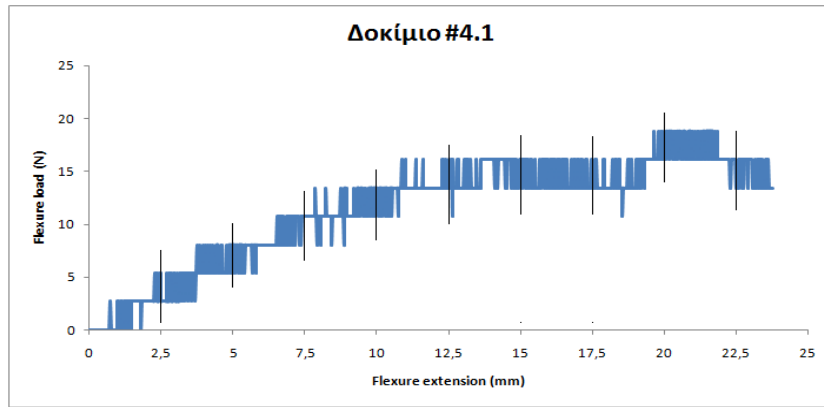
- Το φορτίο αυξάνεται σχεδόν γραμμικά μέχρι την τιμή P_{max}
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 2,384$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 314$ N
- Το δοκίμιο #3.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 9 mm.
- Το δοκίμιο τελικά θραύεται

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #3.1, #3.2, #3.3



3.3.4 Δοκίμιο #4

Τα Δοκίμια #4, #5, #6, #7, #8 παρουσιάζουν έντονη διακύμανση (fluctuation) στα διαγράμματα Flexure extension – Flexure Load. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι τα φορτία που αναπτύσσονται κατά την κάμψη είναι πολύ χαμηλά και βρίσκονται στα όρια της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα της πρέσας. Για λόγους καλύτερης παρουσίασης γίνεται χρήση της πολυωνυμικής γραμμής τάσης (μέσα από το excel) για την απόδοση των καμπυλών. Οι αρχικές καμπύλες που λαμβάνονται από το καταγραφικό της πρέσας είναι της μορφής :

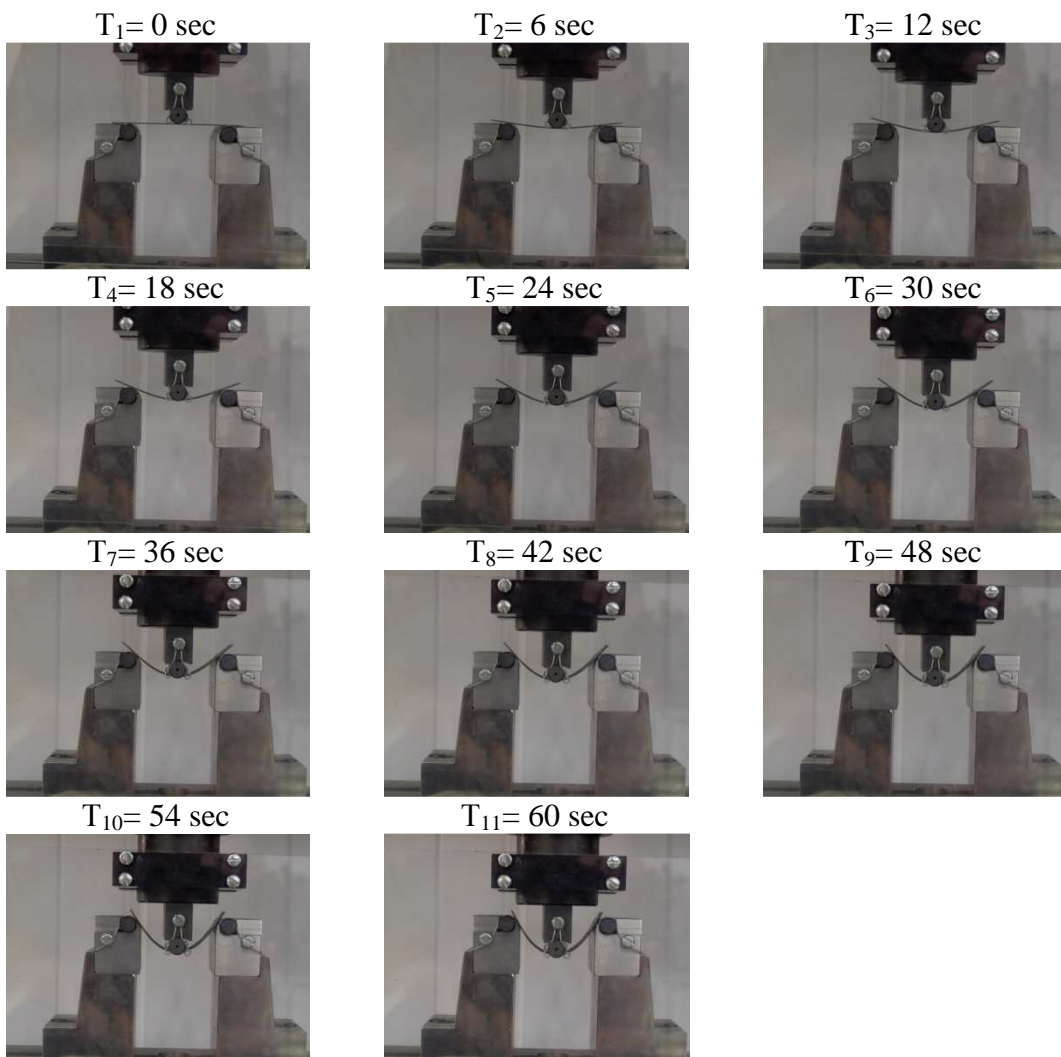
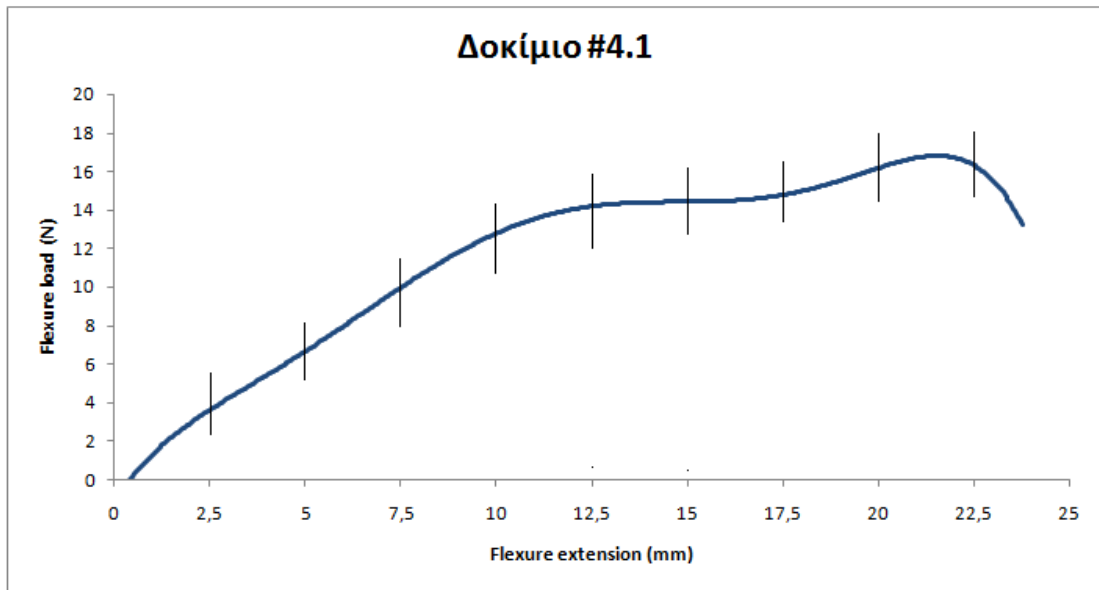


Το Δοκίμιο #4 με πάχος 0,5 mm αποτελείται από 2 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 4
± 090 WOVEN
± 45 WOVEN

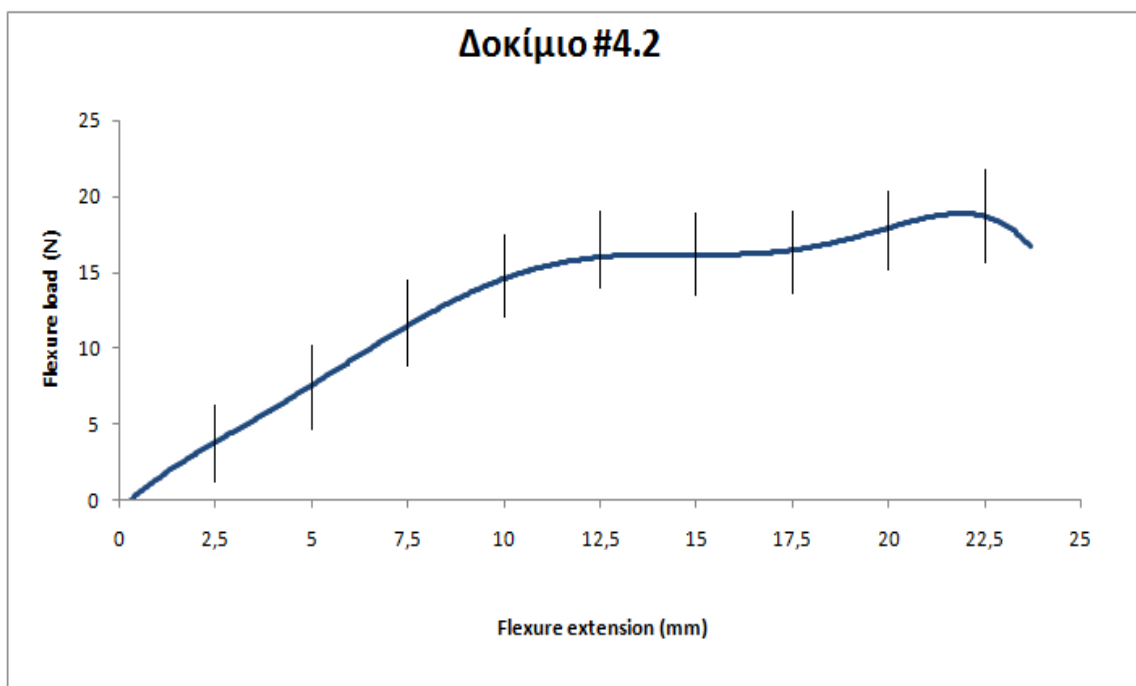
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #4.

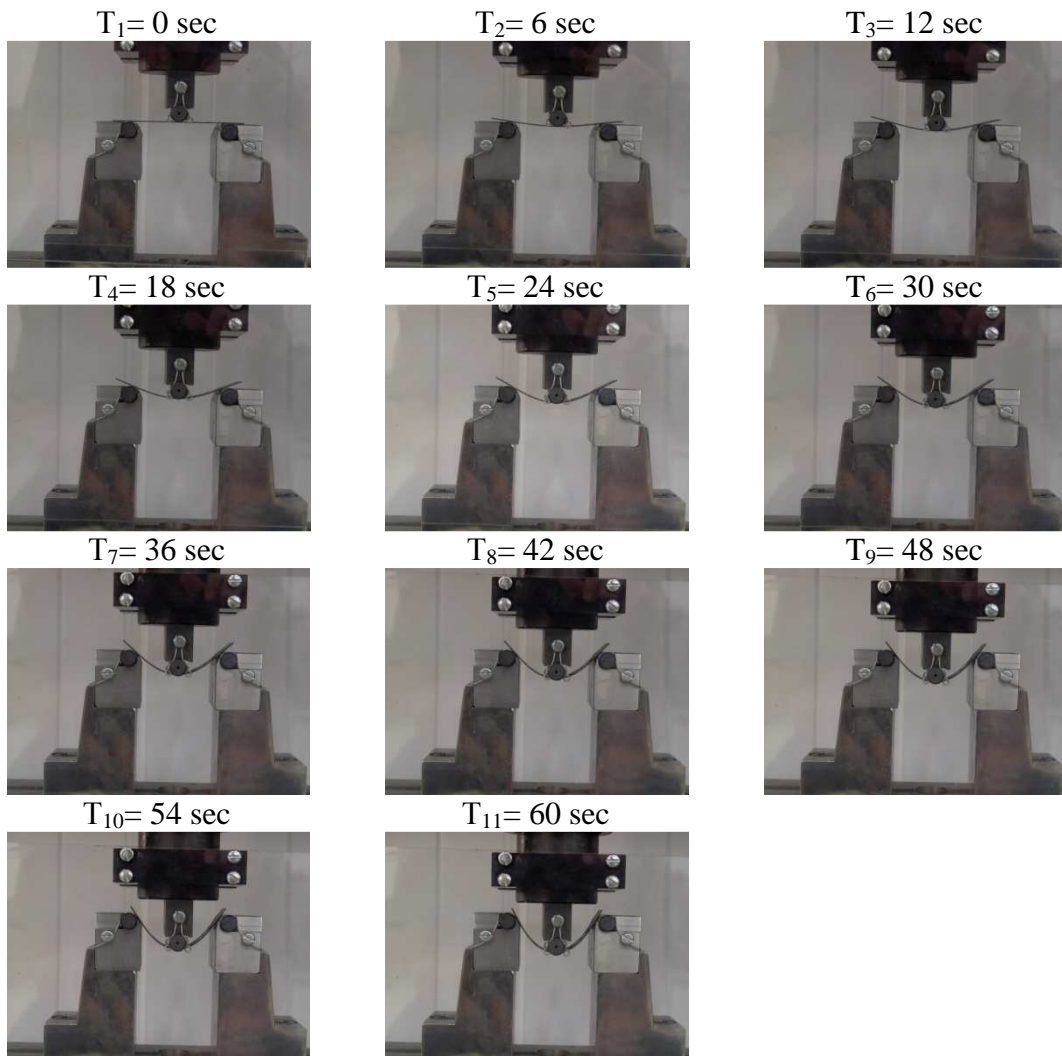
3.3.4.1 Δοκίμιο #4.1



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,270$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 18,8$ N
- Το δοκίμιο #4.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 20 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

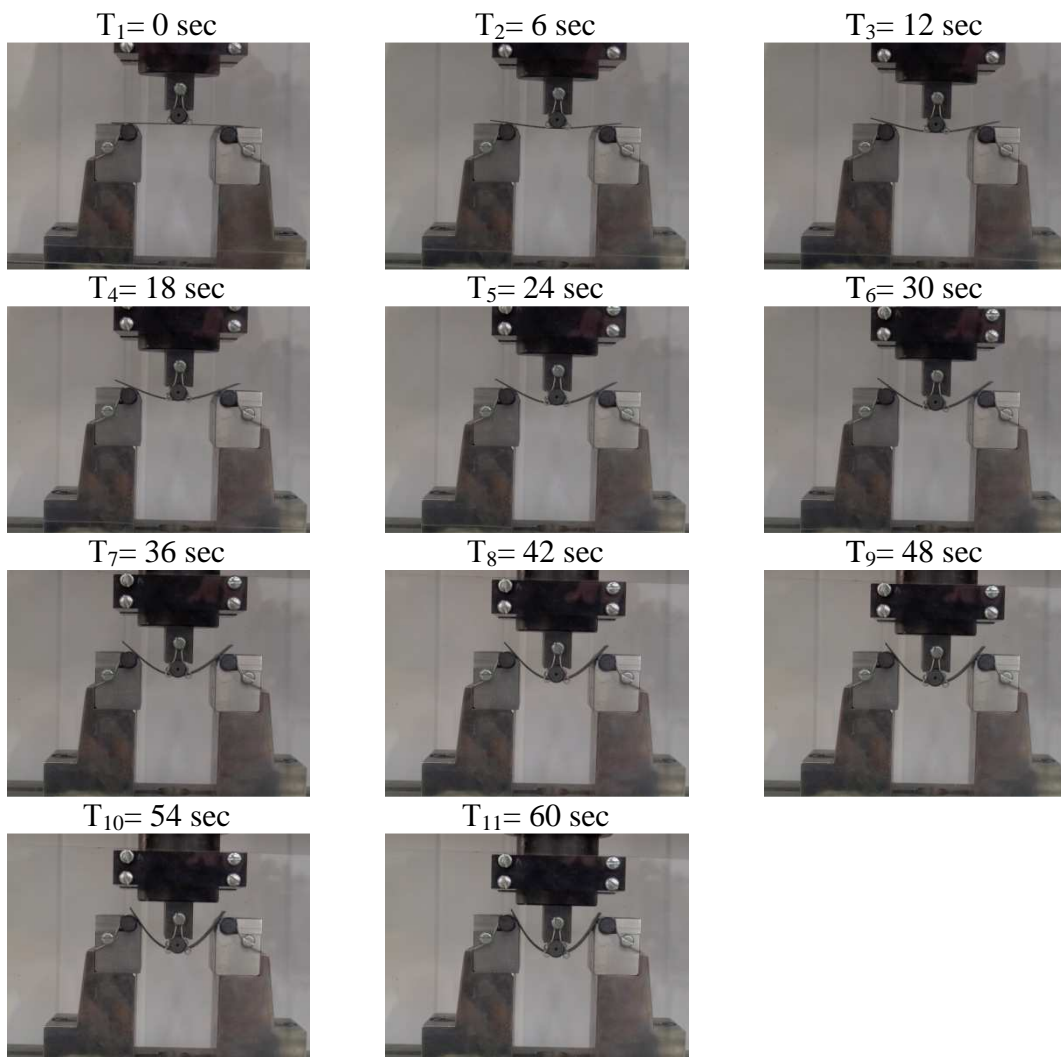
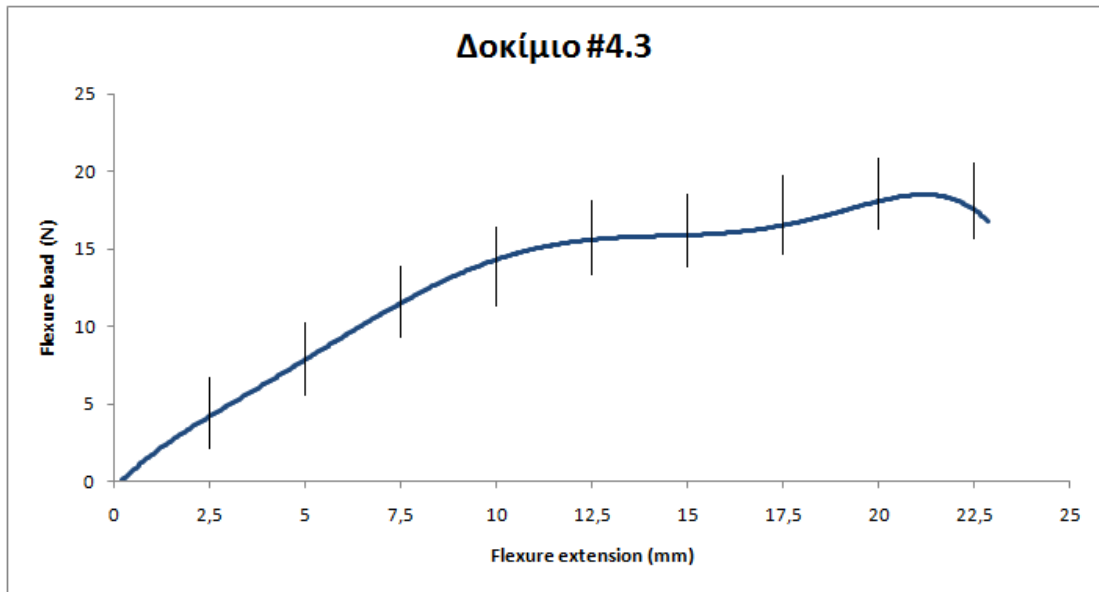
3.3.4.2 Δοκίμιο #4.2





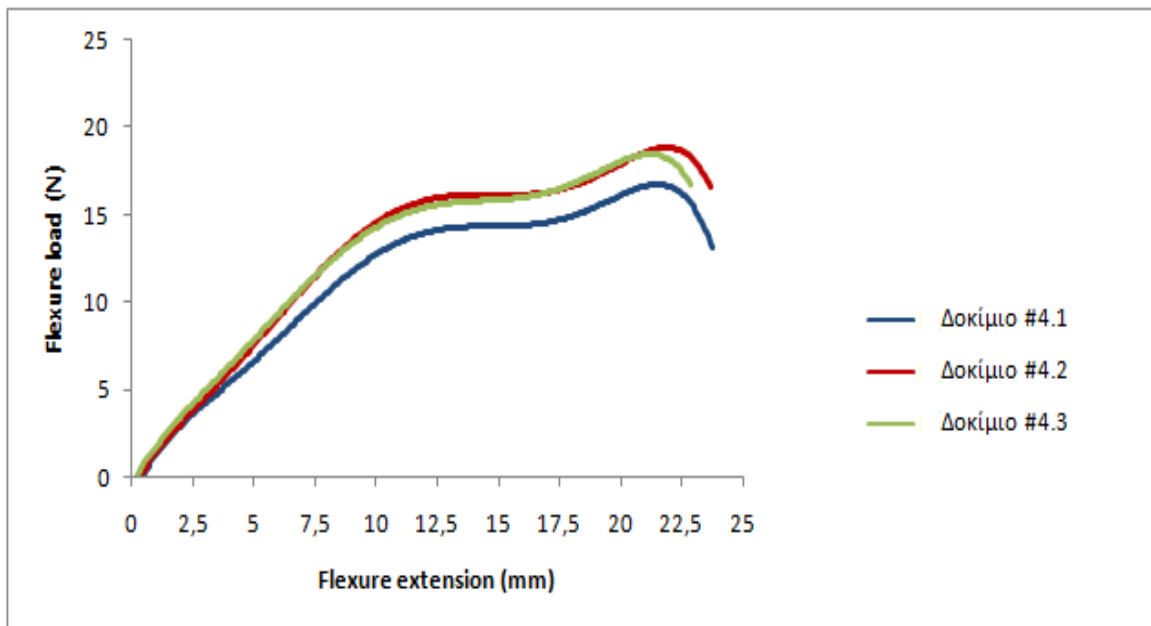
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,304$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 21,5$ N
- Το δοκίμιο #4.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 21 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμή τάσης.

3.3.4.3 Δοκίμιο #4.3



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,289$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 21,5$ N
- Το δοκίμιο #4.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 19,2 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #4.1, #4.2, #4.3



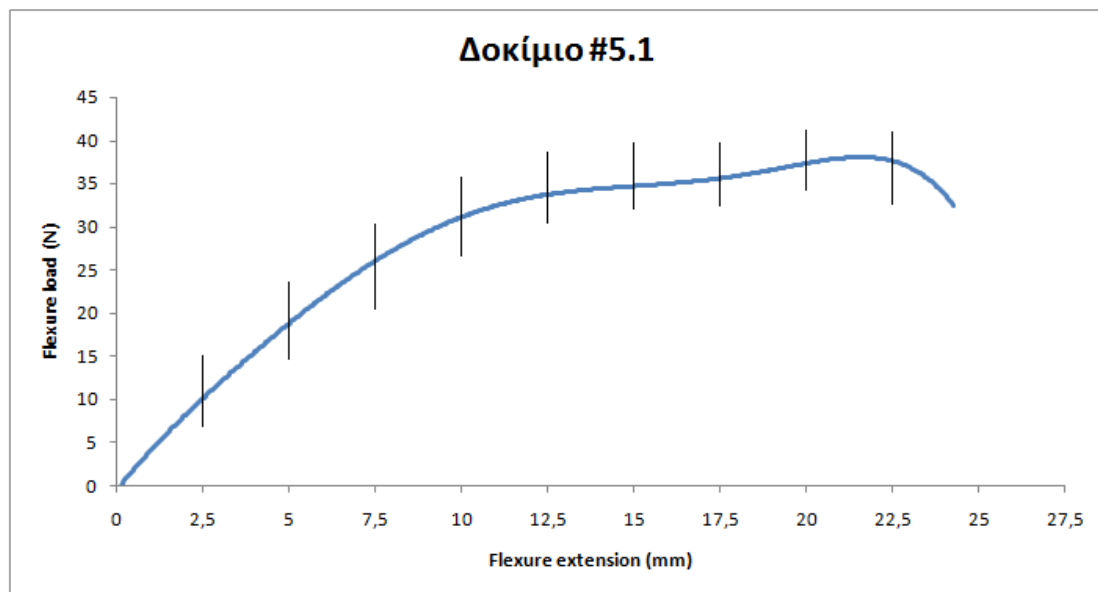
3.3.5 Δοκίμιο #5

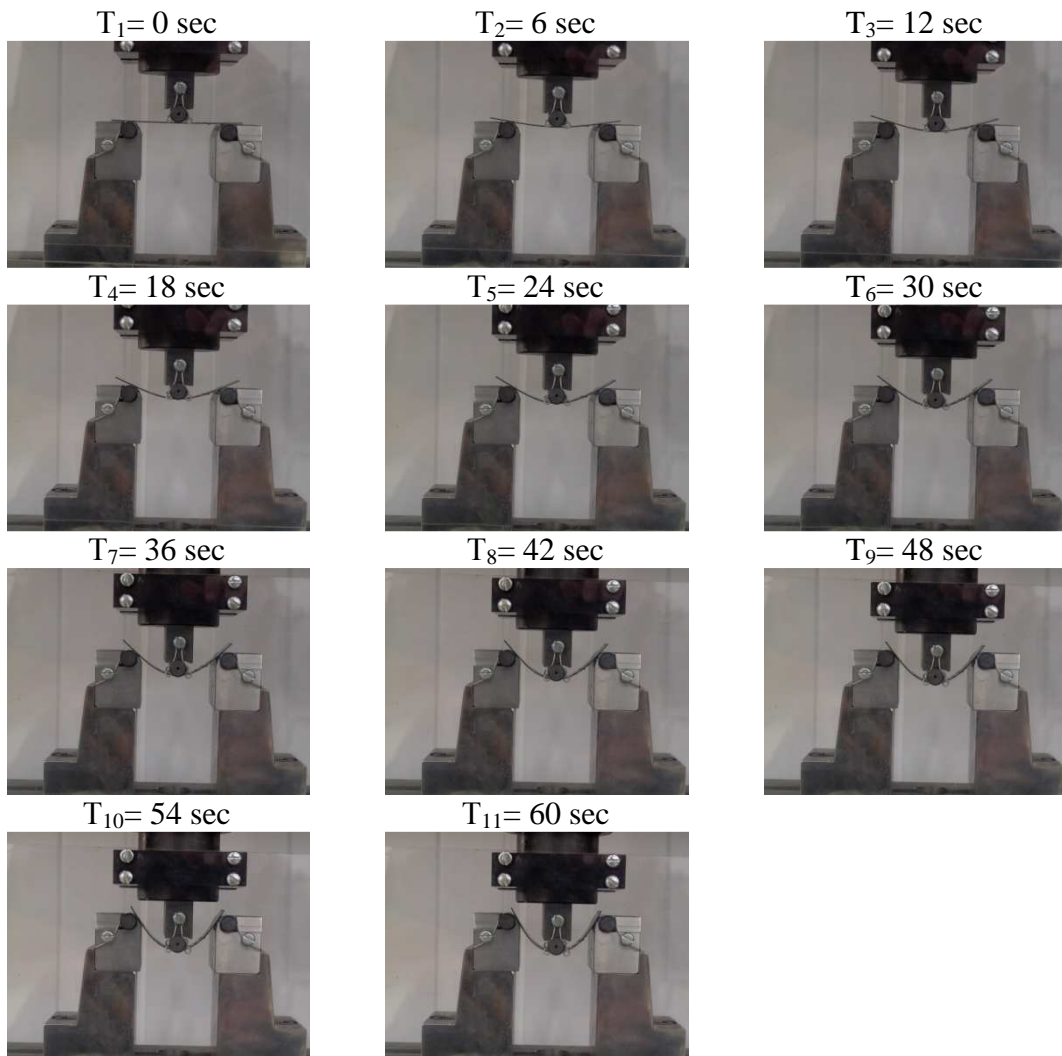
Το Δοκίμιο #5 με πάχος 0,5 mm αποτελείται από 4 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 5
UNI 0
UNI 90
UNI 0
UNI 90

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #5.

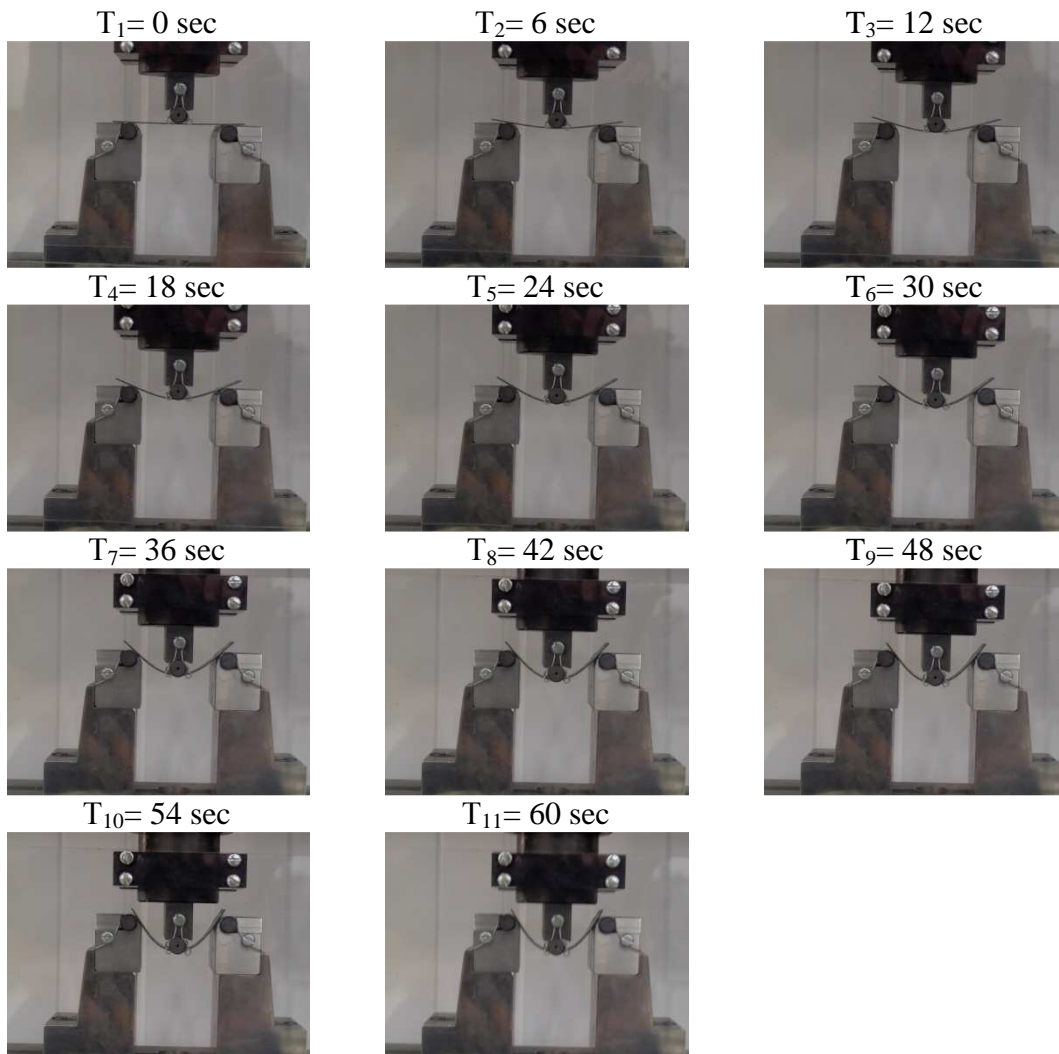
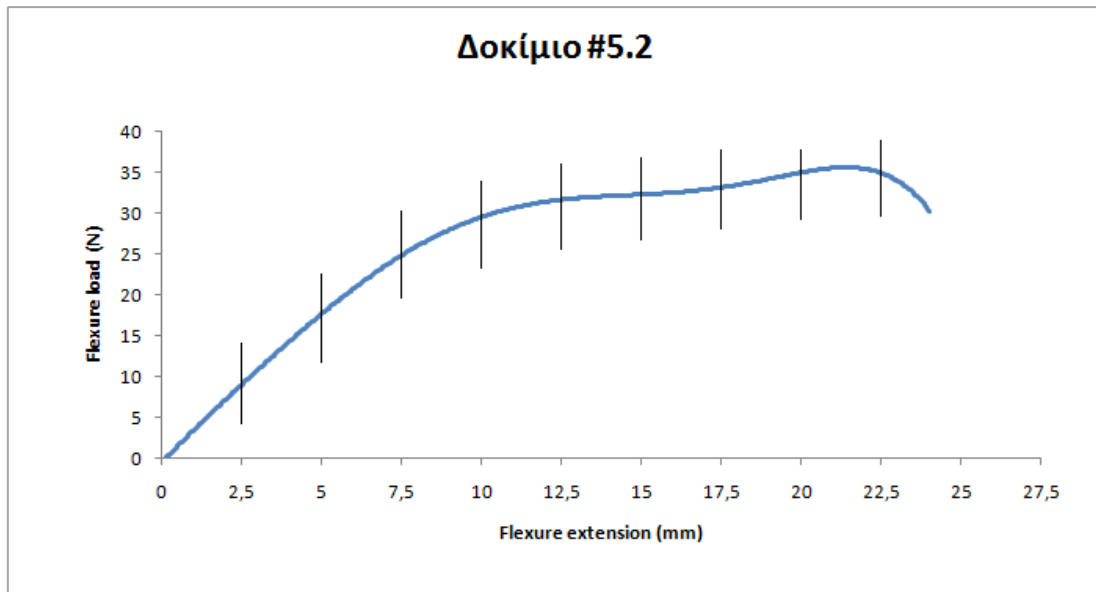
3.3.5.1 Δοκίμιο #5.1





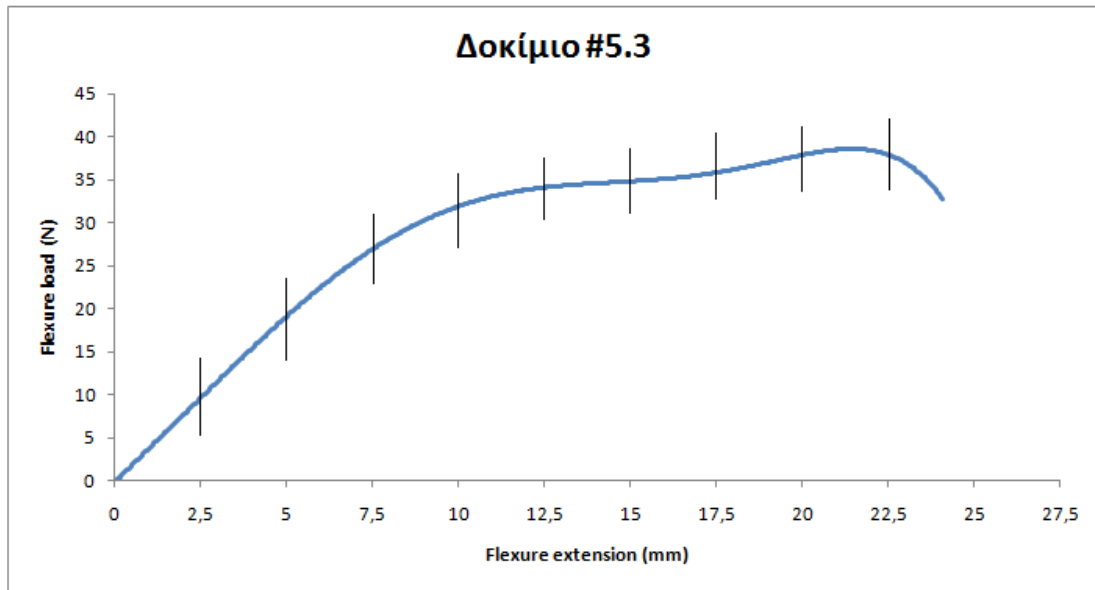
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,680$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 40,27$ N
- Το δοκίμιο #5.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 20 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμή τάσης.

3.3.5.2 Δοκίμιο #5.2



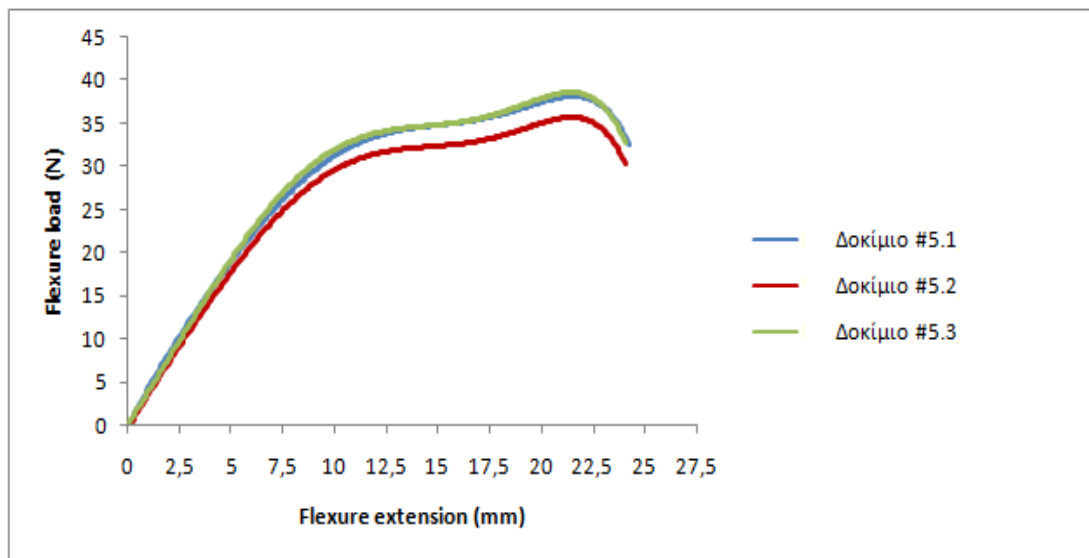
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,630$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 37,5$ N
- Το δοκίμιο #5.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 19,5 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

3.3.5.3 Δοκίμιο #5.3



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,683$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 40,3$ N
- Το δοκίμιο #5.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 19,4 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #5.1, #5.2, #5.3



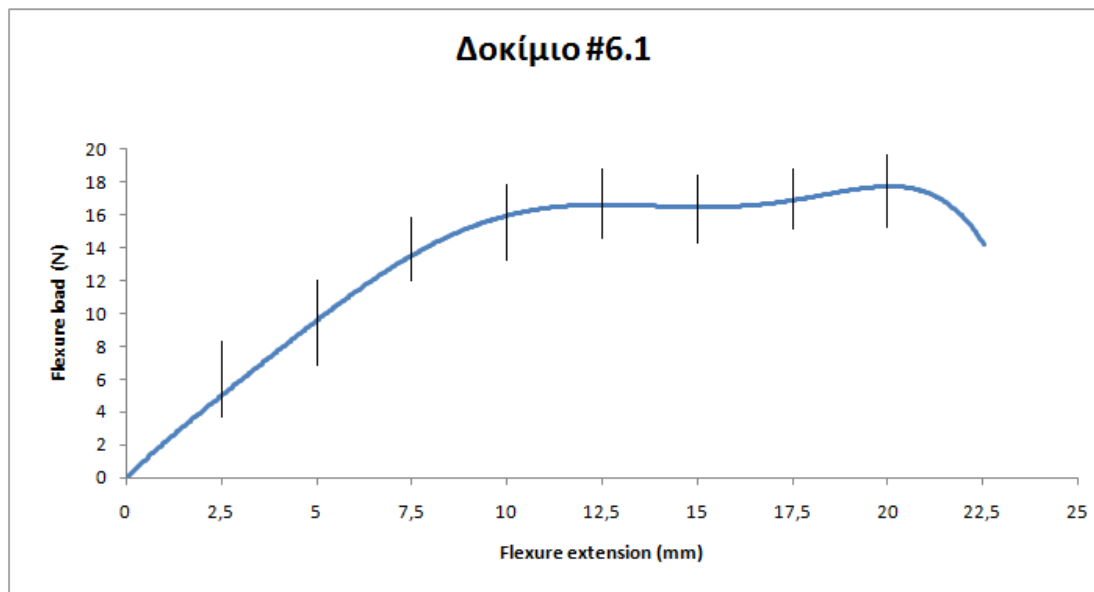
3.3.6 Δοκίμιο #6

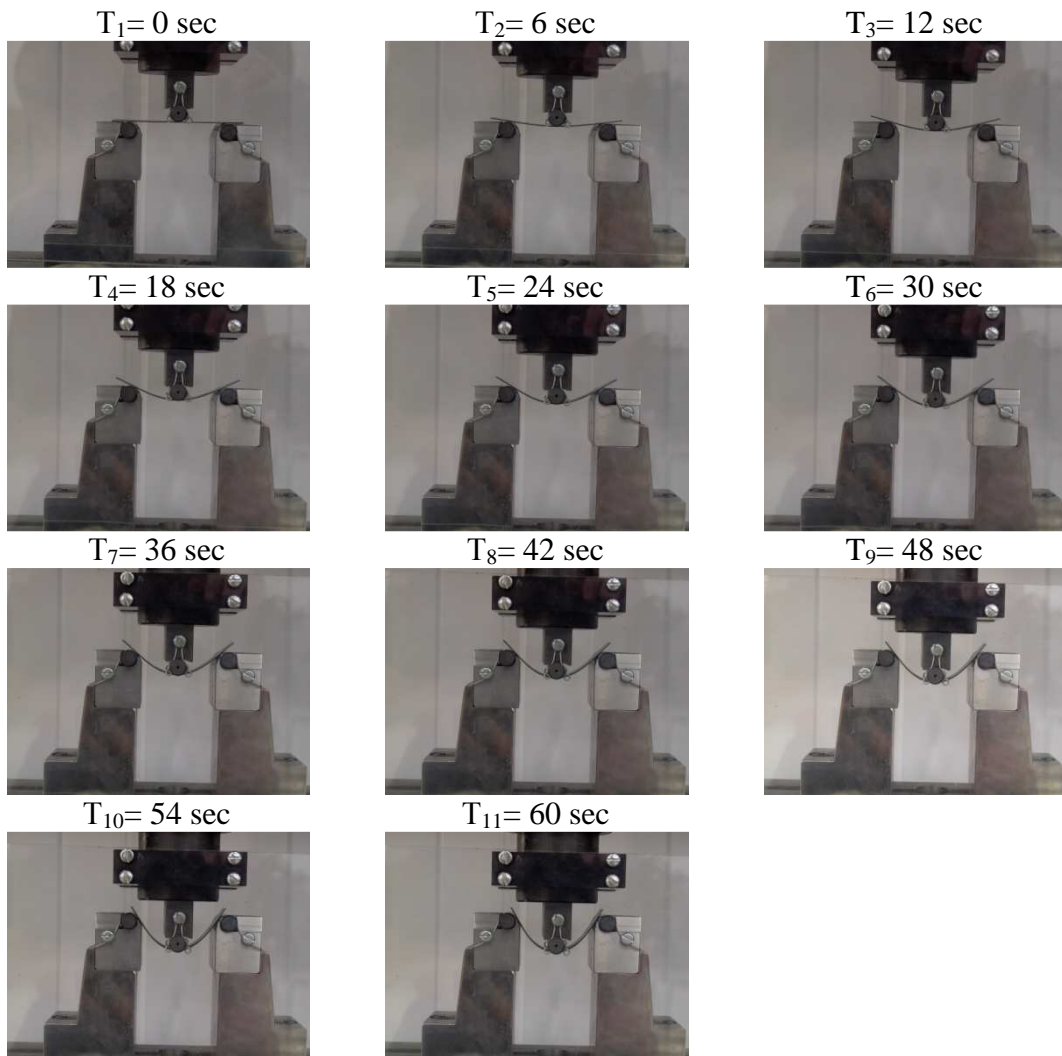
Το Δοκίμιο #6 με πάχος 0,5 mm αποτελείται από 4 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 6
UNI 45
UNI -45
UNI 45
UNI -45

Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #6.

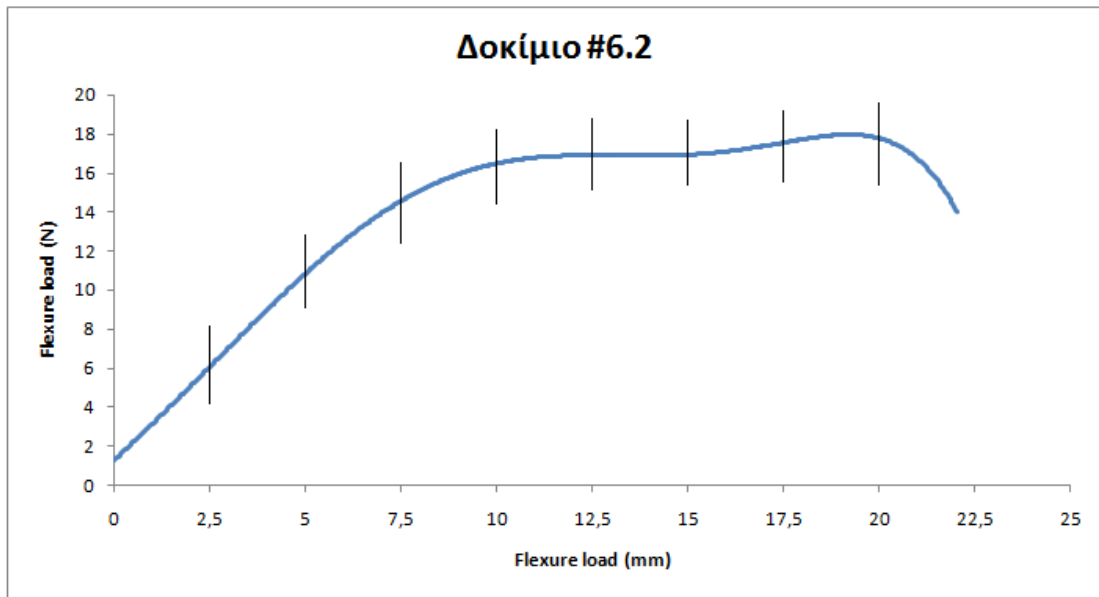
3.3.6.1 Δοκίμιο #6.1





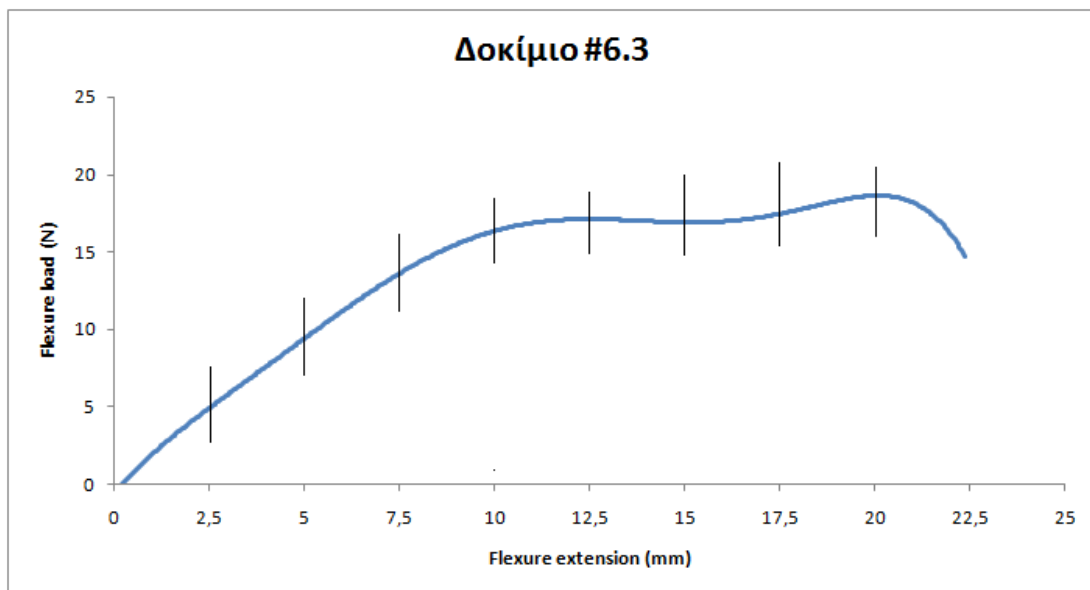
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,301$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 18,8$ N
- Το δοκίμιο #6.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 10,3 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμή τάσης.

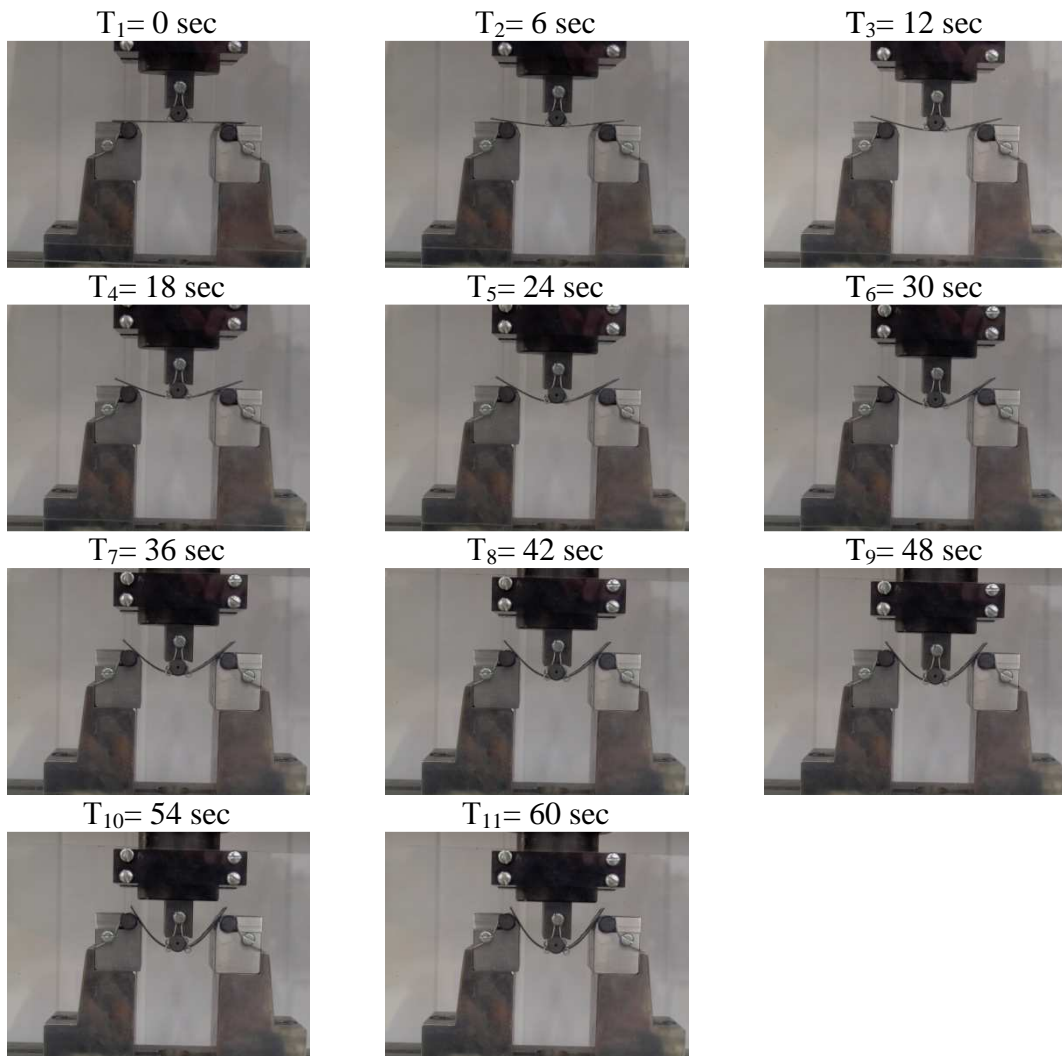
3.3.6.2 Δοκίμιο #6.2



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,306$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 18,8$ N
- Το δοκίμιο #6.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 9,6 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

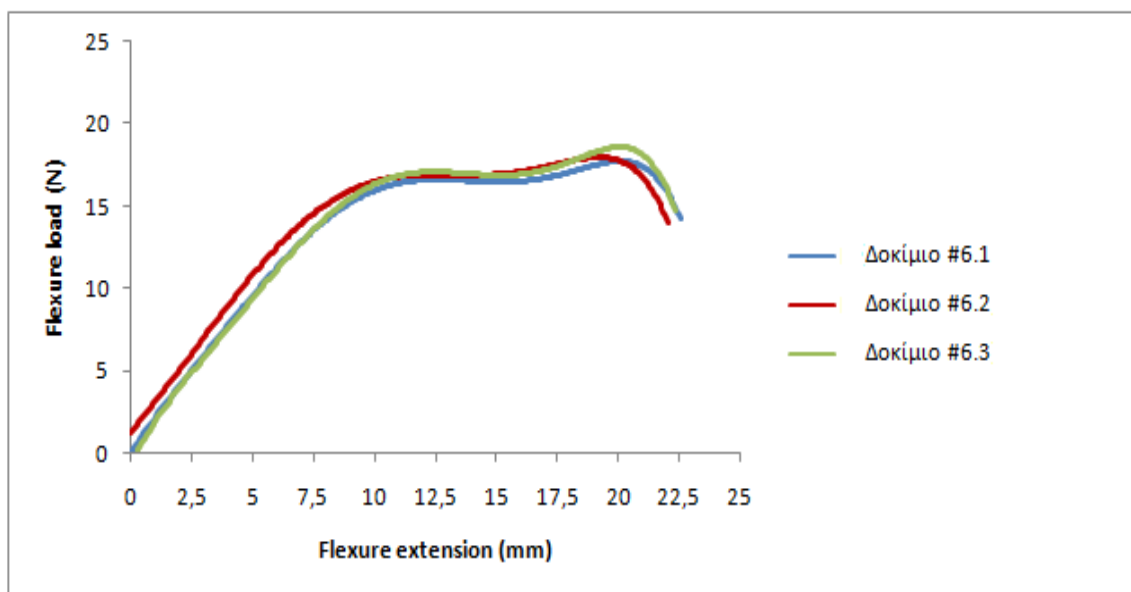
3.3.6.3 Δοκίμιο #6.3





- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,305$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 18,8$ N
- Το δοκίμιο #6.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 10,4 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμή τάσης.

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #6.1, #6.2, #6.3



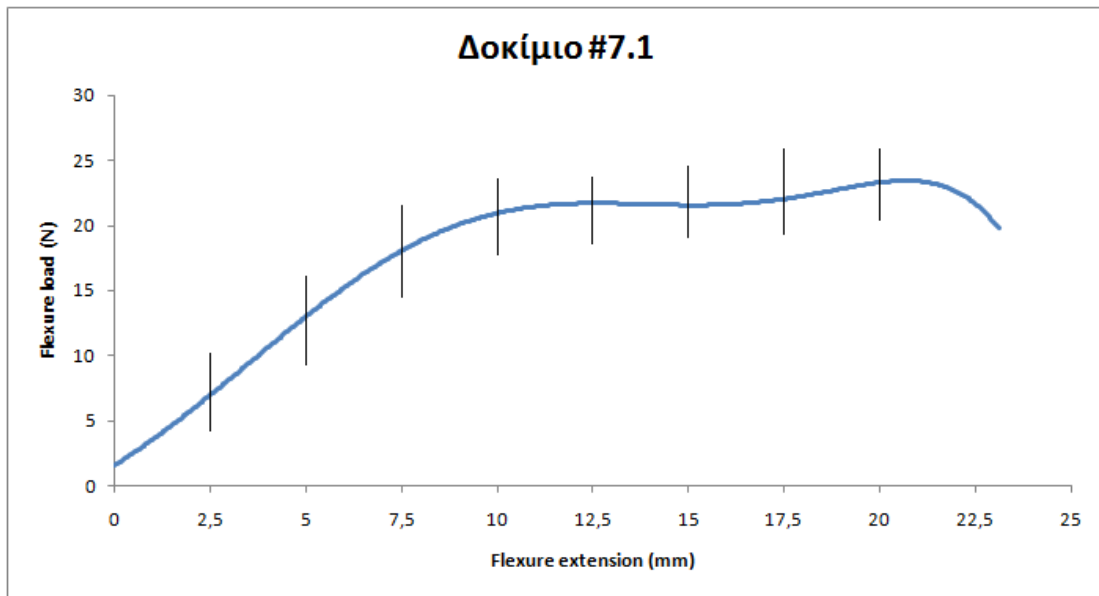
3.3.7 Δοκίμιο #7

Το Δοκίμιο #7 με πάχος 0,5 mm αποτελείται από 2 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 7
± 090 WOVEN
± 090 WOVEN

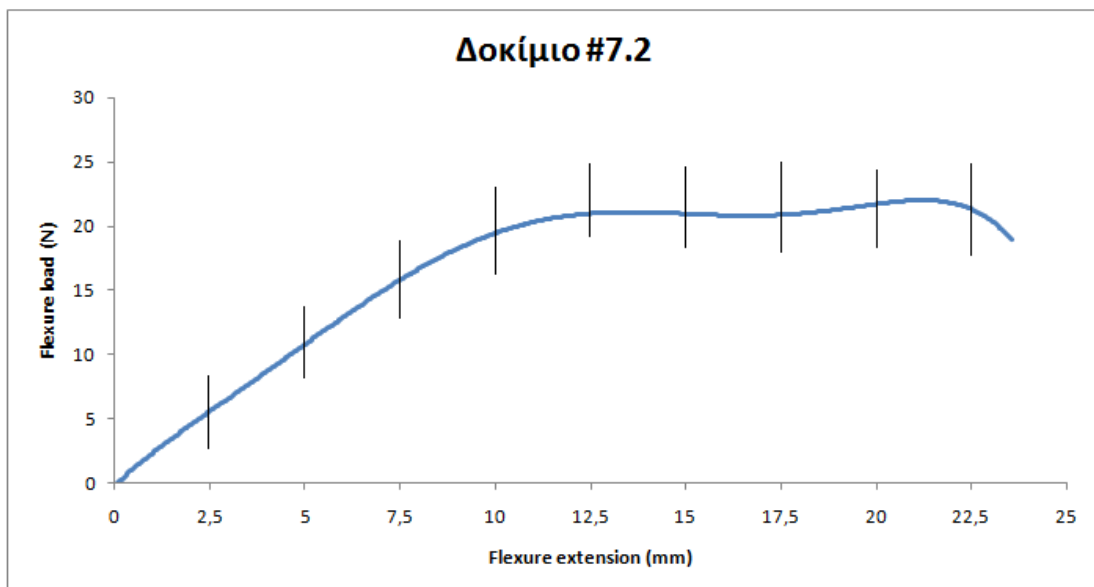
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #7.

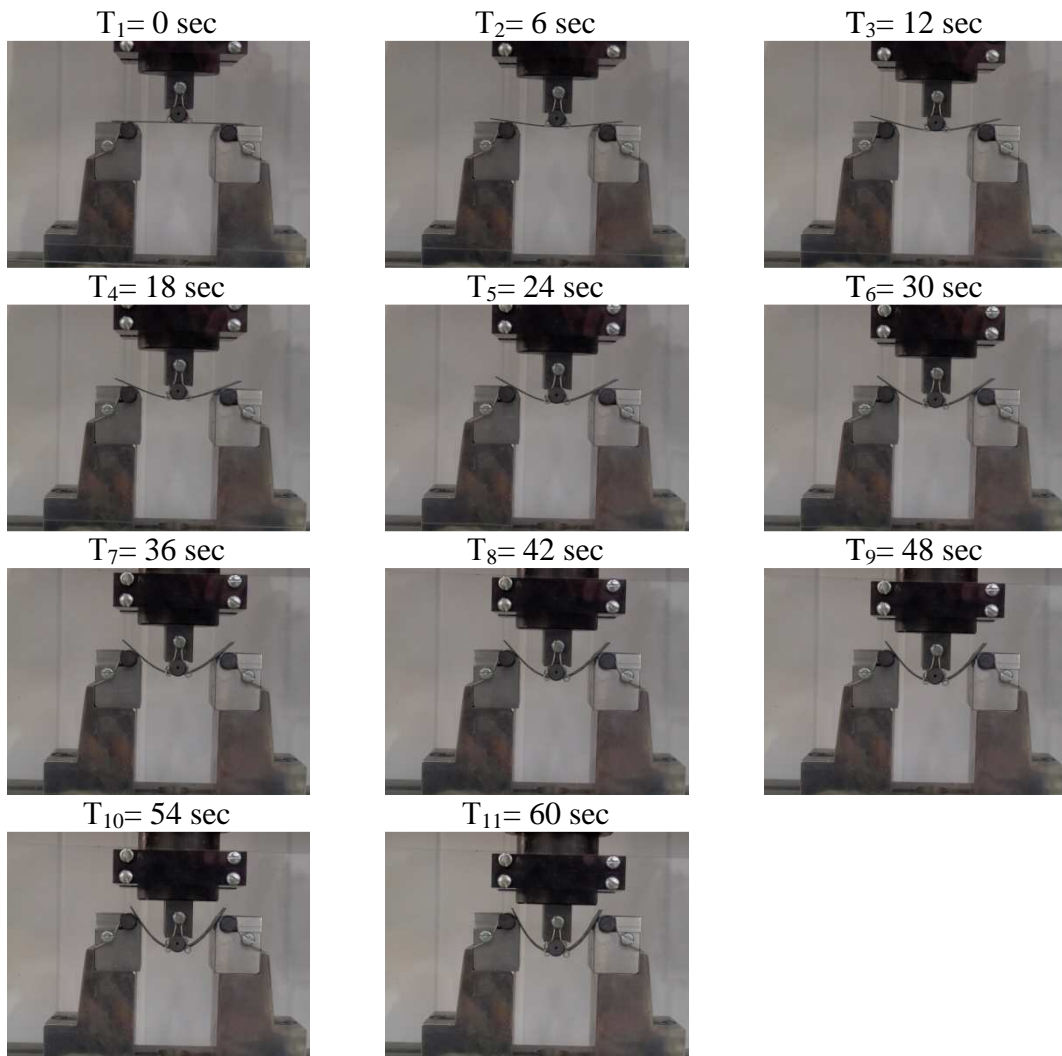
3.3.7.1 Δοκίμο #7.1



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,412$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 24$ N
- Το δοκίμιο #7.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 12 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

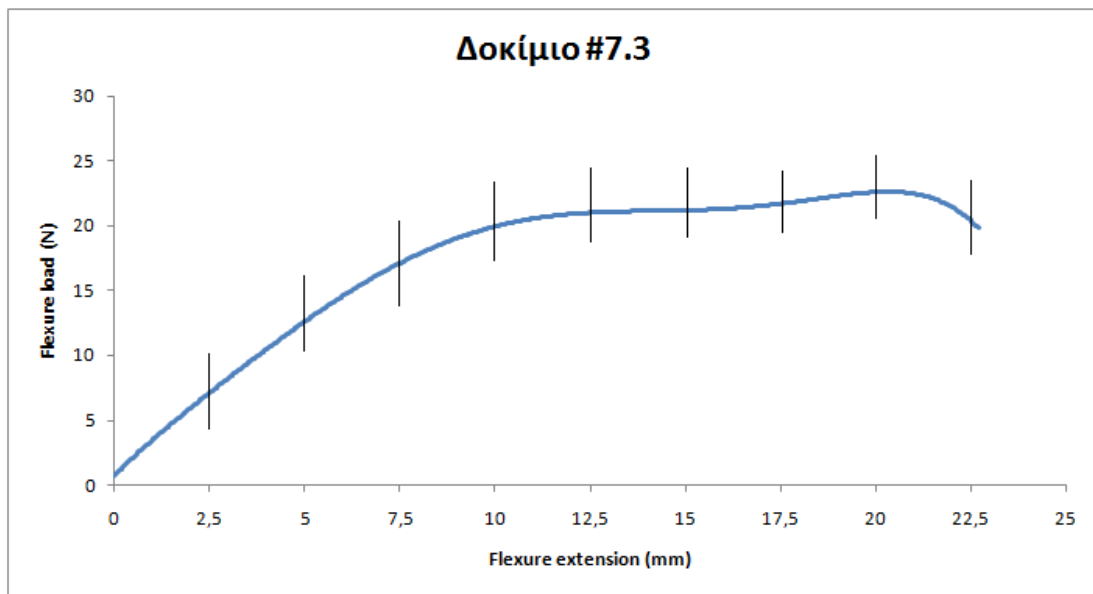
3.3.7.2 Δοκίμιο #7.2





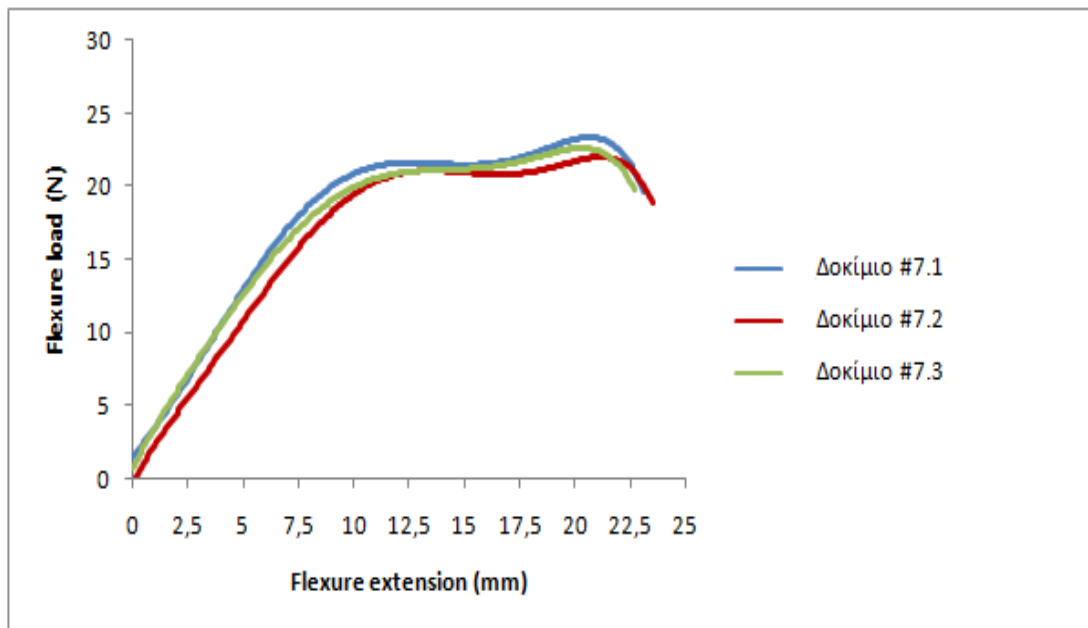
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,389$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 24$ N
- Το δοκίμιο #7.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 19 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμή τάσης.

3.3.7.3 Δοκίμο #7.3



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,391$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 24$ N
- Το δοκίμιο #7.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 18,3 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμών #7.1, #7.2, #7.3



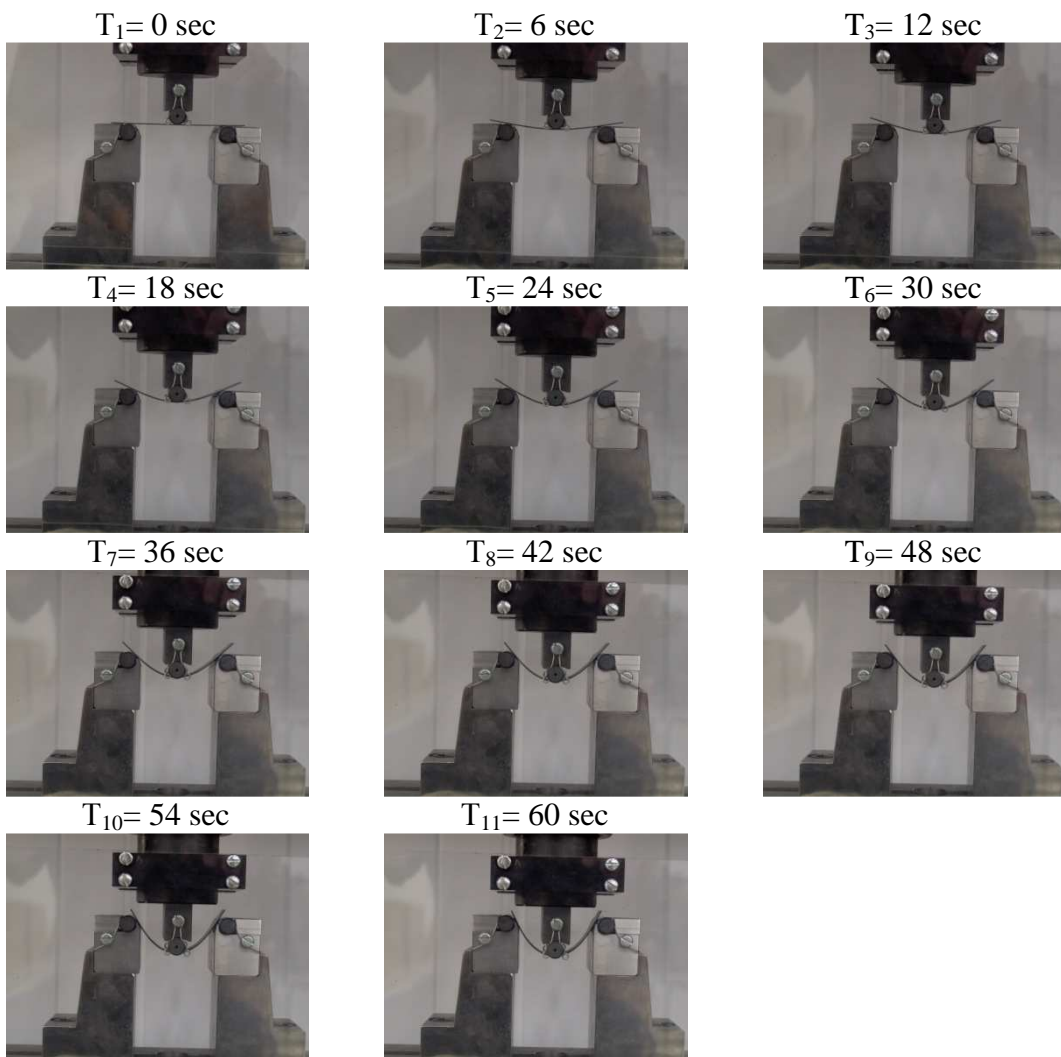
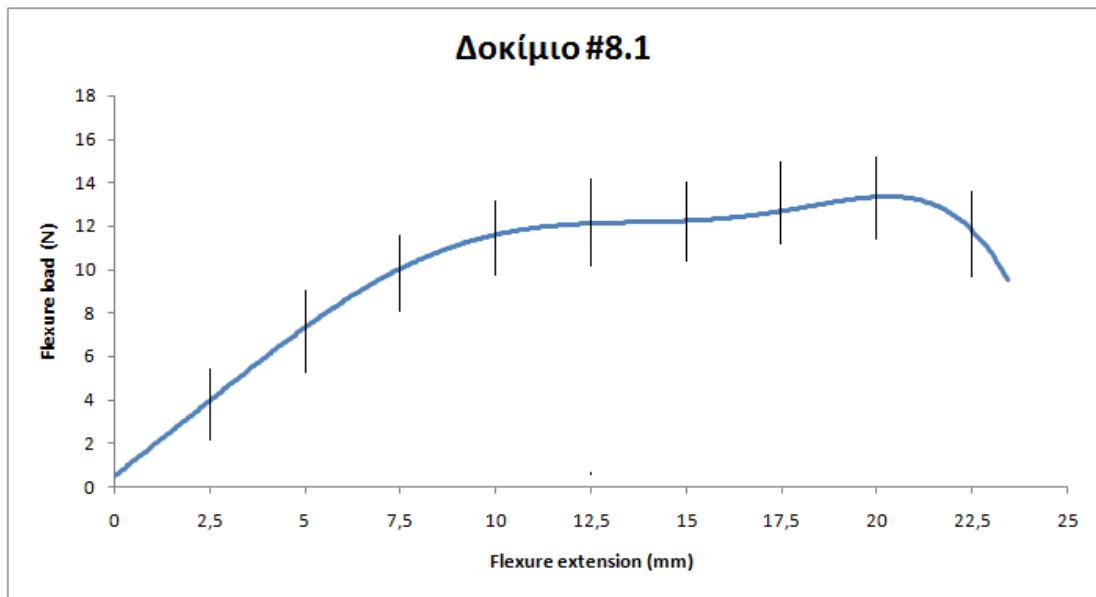
3.3.8 Δοκίμιο #8

Το Δοκίμιο #8 με πάχος 0,5 mm αποτελείται από 2 στρώσεις. Ξεκινώντας πάντα από την κάτω στρώση έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ 8
± 45 WOVEN
± 45 WOVEN

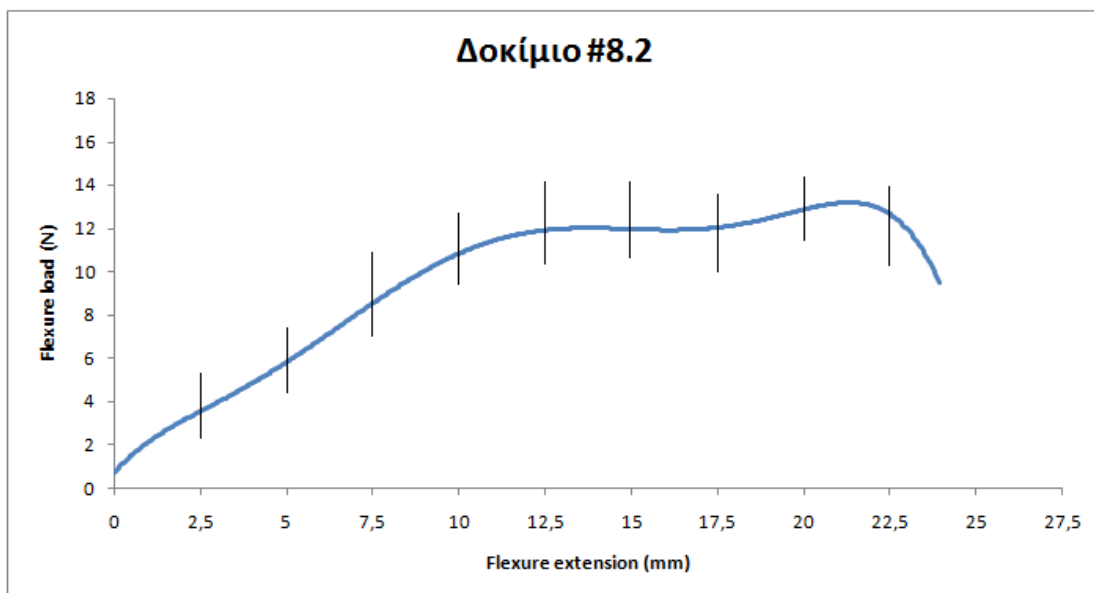
Στη συνέχεια ακολουθούν τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για το δοκίμιο #8.

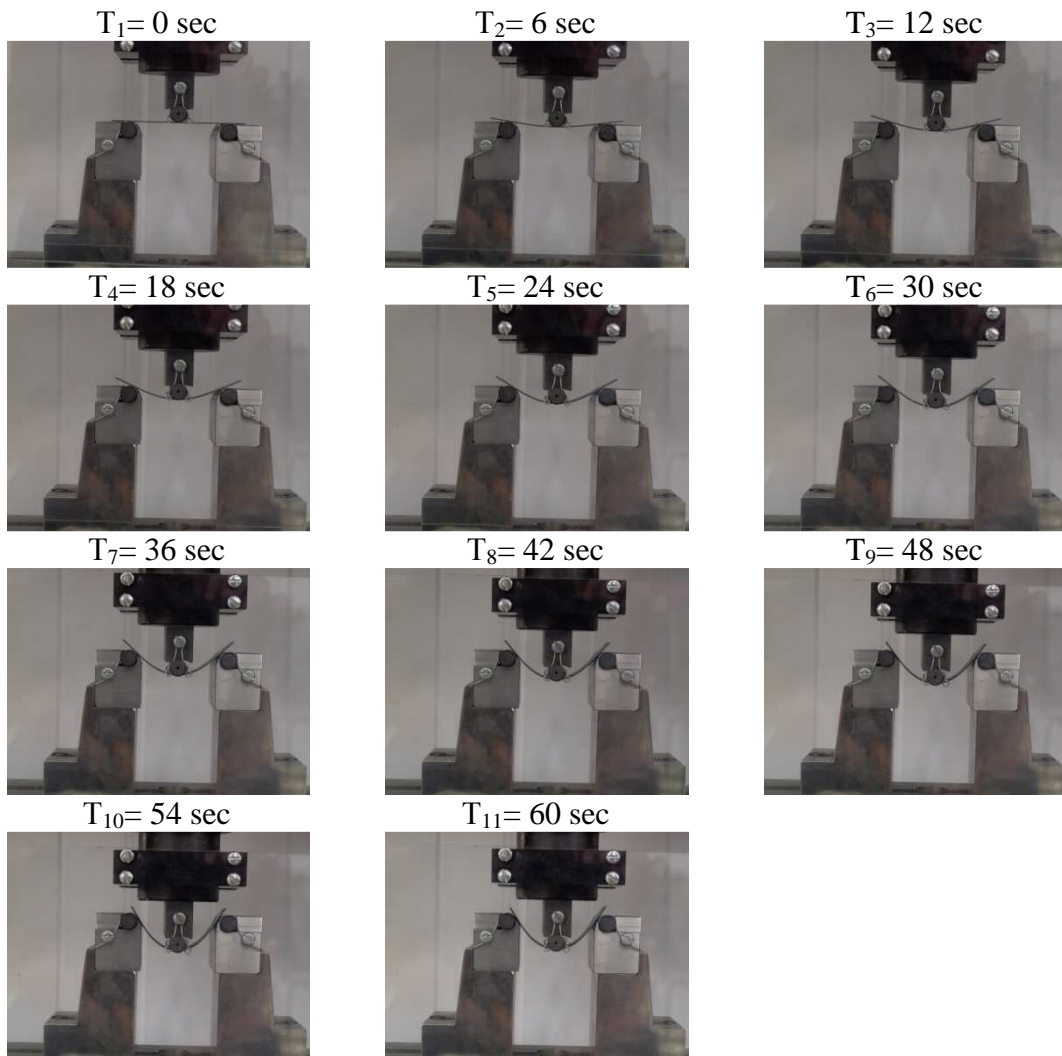
3.3.8.1 Δοκίμιο #8.1



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,235$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{\max} = 16$ N
- Το δοκίμιο #8.1 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 18 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

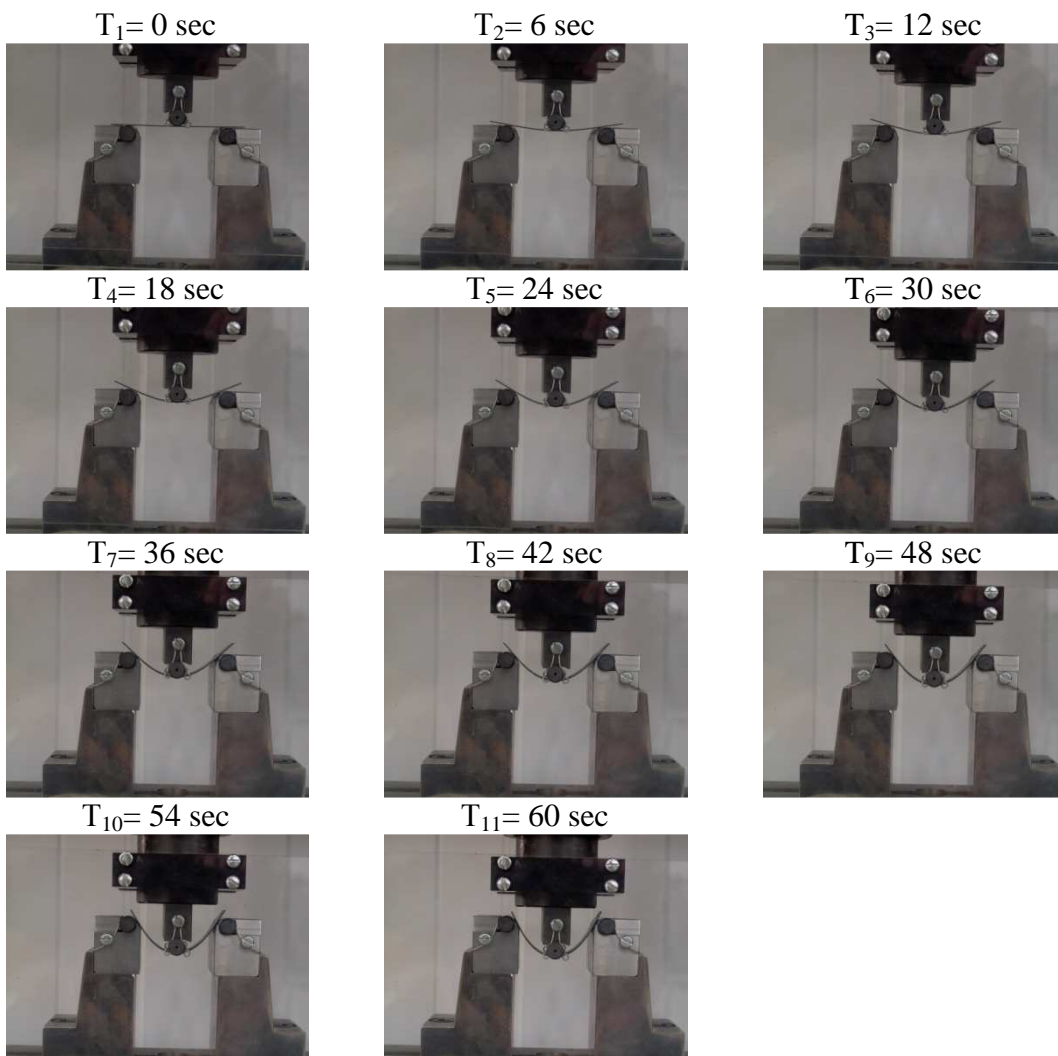
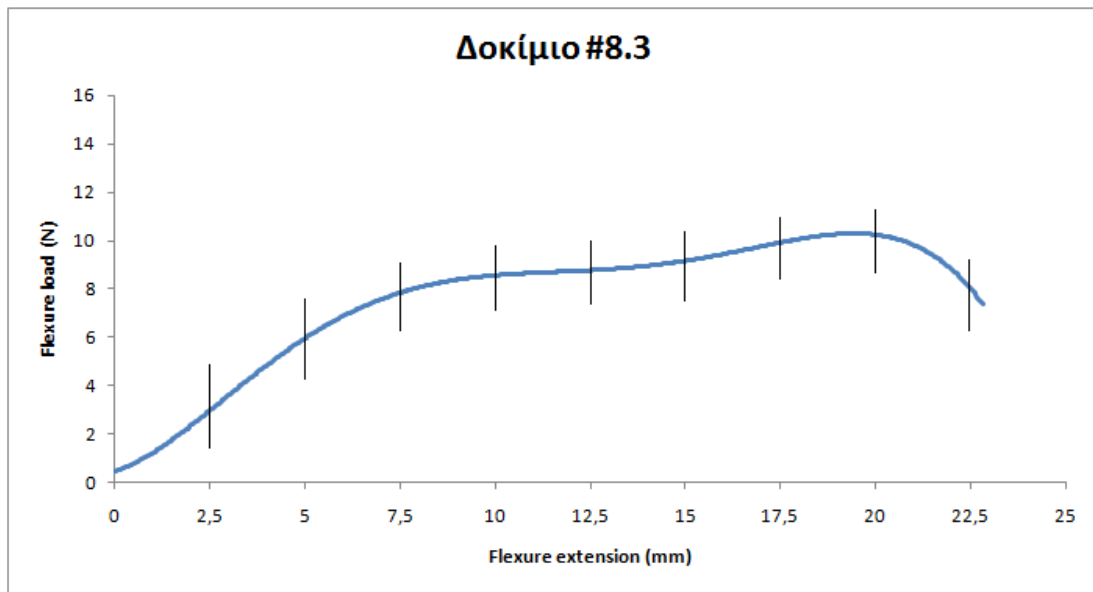
3.3.8.2 Δοκίμιο #8.2





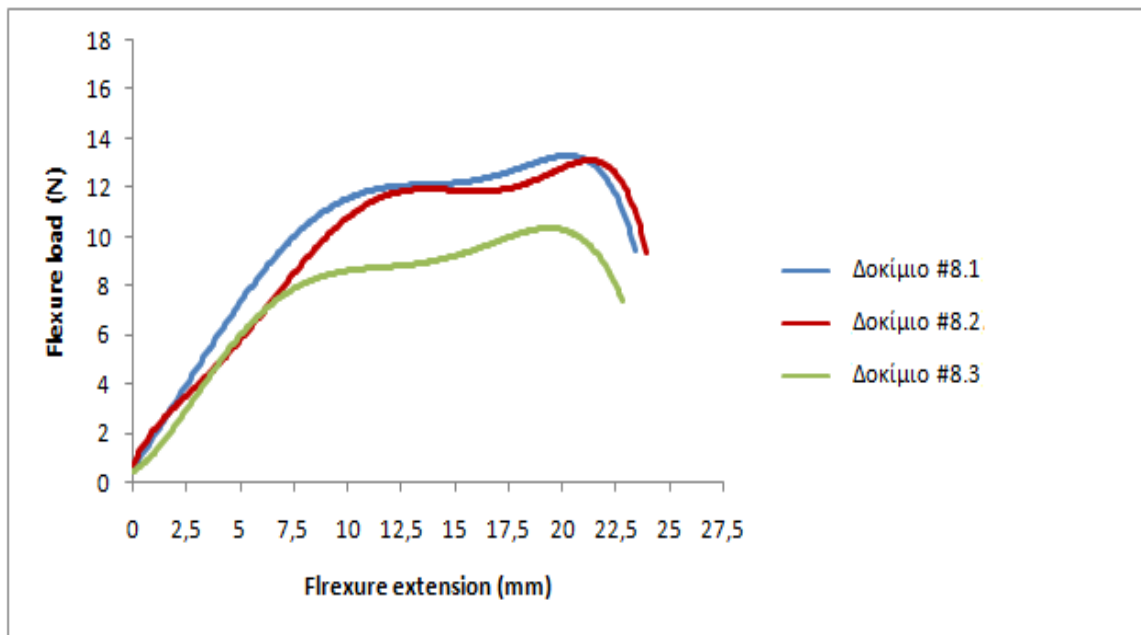
- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,228$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 16$ N
- Το δοκίμιο #8.2 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 20 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμή τάσης.

3.3.8.3 Δοκίμιο #8.3



- Ενέργεια Απορρόφησης : $W = 0,173$ Joule (κανόνας τραπεζίου)
- Μέγιστο Φορτίο: $P_{max} = 13,4$ N
- Το δοκίμιο #8.3 εμφανίζει μέγιστο φορτίο για βέλος κάμψης 17,5 mm.
- Το δοκίμιο δεν θραύεται.
- Το διάγραμμα που λαμβάνεται από τον αισθητήρα της πρέσας παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις (fluctuations) και γι αυτό προσεγγίζουμε την καμπύλη με τη γραμμική τάση.

Συγκριτικό Διάγραμμα δοκιμίων #8.1, #8.2, #8.3



3.4 Συγκεντρωτικοί Πίνακες-Συγκριτικά Γραφήματα

- Για την ολική απορροφούμενη ενέργεια και το μέγιστο φορτίο κάθε δοκιμίου έχουμε τον ακόλουθο συγκεντρωτικό πίνακα:

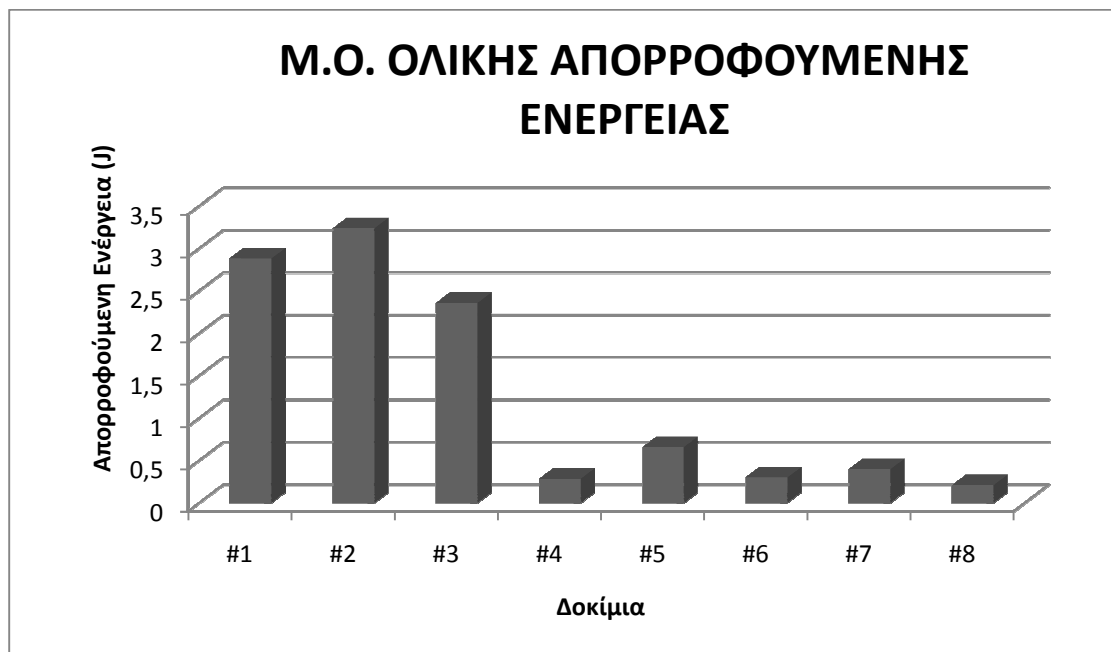
ΔΟΚΙΜΙΟ	ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ W (J)	ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ P_{max} (N)
#1.1	2,976	258
#1.2	3,109	252
#1.3	2,568	239
#2.1	3,231	258
#2.2	3,108	260
#2.3	3,367	260
#3.1	2,105	311
#3.2	2,583	324
#3.3	2,384	314
#4.1	0,27	18,8
#4.2	0,304	21,5
#4.3	0,289	21,5
#5.1	0,68	40,27
#5.2	0,63	37,5
#5.3	0,683	40,3
#6.1	0,301	18,8
#6.2	0,306	18,8
#6.3	0,305	18,8
#7.1	0,412	24
#7.2	0,389	24
#7.3	0,391	24
#8.1	0,235	16
#8.2	0,228	16
#8.3	0,173	13,4

Πίνακας 12: Ολική απορροφούμενη ενέργεια – Μέγιστο Φορτίο

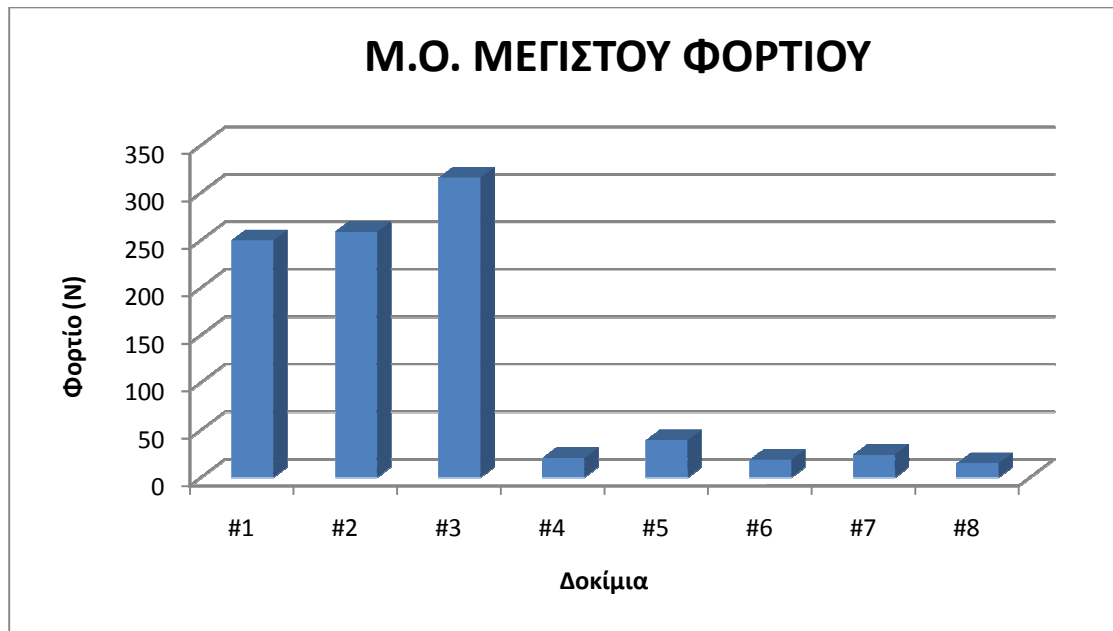
- Για το μέσο όρο της ολικής απορροφούμενης ενέργειας και το μέσο όρο του μέγιστου φορτίου των δοκιμίων έχουμε:

ΔΟΚΙΜΙΟ	Μ.Ο. ΟΛΙΚΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΟΥΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ W (J)	Μ.Ο. ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ P _{max} (N)
#1	2,884	250
#2	3,24	259
#3	2,36	316
#4	0,288	20,6
#5	0,66	39,4
#6	0,304	18,8
#7	0,4	24
#8	0,212	15

Πίνακας 13: Μ.Ο. ολικής απορροφούμενης ενέργειας και μέγιστου φορτίου



Σχήμα 24: Μέσος όρος ολικής απορροφούμενης ενέργειας



Σχήμα 25: Μέσος όρος μέγιστου φορτίου

4. Αριθμητική Προσομοίωση – Μοντελοποίηση με χρήση λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS 13

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την αριθμητική προσομοίωση των πειραμάτων που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ANSYS θα μοντελοποιήσουμε τα δοκίμια CFRP που καταπονούνται σε κάμψη τριών σημείων (3 POINT BENDING). Πρέπει να επισημανθεί ότι η προσομοίωση πολύστρωτων σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα (CFRP) που καταπονούνται είναι αρκετά δύσκολη διαδικασία και οφείλεται σε πληθώρα παραμέτρων που σχετίζονται με τη φύση και τις ιδιότητες των παραπάνω υλικών όπως η μη ισοτροπικότητά τους. Επίσης οι ιδιότητες τέτοιων υλικών εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες κατασκευής τους και είναι δύσκολο να προσδιοριστούν επακριβώς.

Το πακέτο λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων ANSYS που θα χρησιμοποιηθεί είναι ένα από τα πιο γνωστά του είδους του. Λόγω της φύσης του μηχανισμού 3 POINT BENDING δοκιμίων CFRP τα μοντέλα που θα κληθούν προς επίλυση μέσω του ANSYS θα είναι μη γραμμικά (Nonlinear solver).

Για λόγους συμμετρικότητας ο σχεδιασμός των αριθμητικών μοντέλων θα γίνει στο μισό του δοκιμίου. Ο τύπος πεπερασμένων στοιχείων elements με τα οποία θα γίνει διακριτοποίηση (meshing) είναι shell281, πρόκειται για 8-κομβικά στοιχεία κελύφους που υποστηρίζουν διαστρωμάτωση. Επίσης το ζεύγος στοιχείων επαφής πλάκας – στήριξης είναι conta174-targe170.

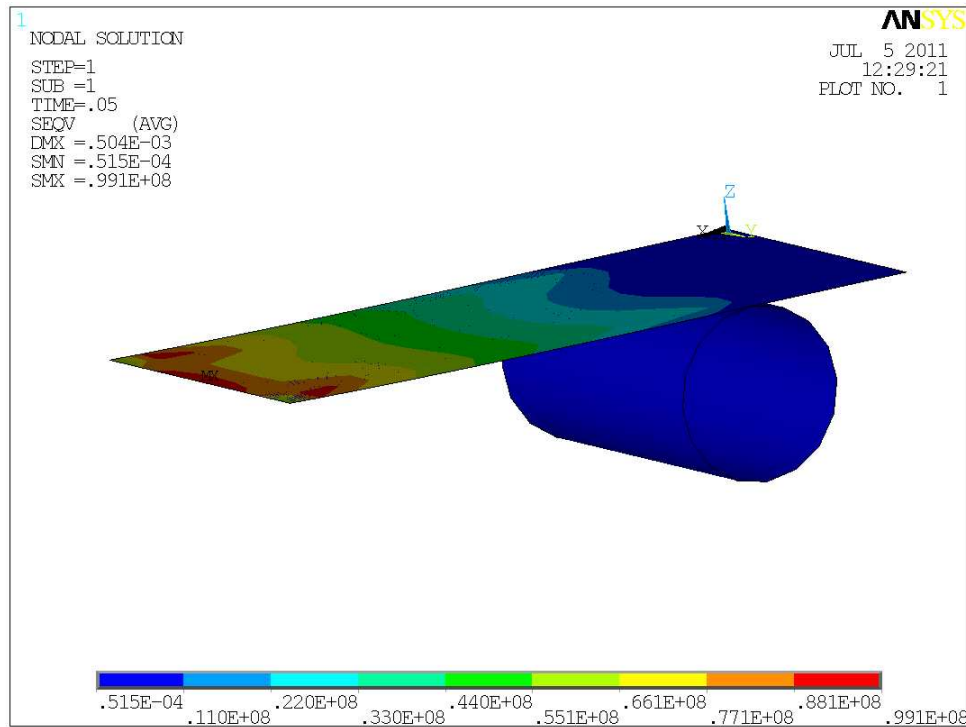
Για τα δοκίμια #1,#2,#3 που θραύονται η αριθμητική προσομοίωση θα γίνει μέχρι το σημείο που εμφανίζεται η θραύση. Από το σημείο θραύσης μέχρι την τελική κατάρρευση του δοκιμίου ο μηχανισμός κατάρρευσης είναι πολύ δύσκολο να μοντελοποιηθεί λόγω της σύνθετης εσωτερικής δομής.

Επειδή στο κεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση πειραματικής διαδικασίας και αριθμητικής προσομοίωσης για τα δοκίμια #4, #5, #6, #7 θα χρησιμοποιήσουμε το διάγραμμα Flexure load – Flexure extension όπως λαμβάνετε από το καταγραφικό της πρέσας χωρίς να γίνει διόρθωση της καμπύλης με πολυωνυμική γραμμή τάσης.

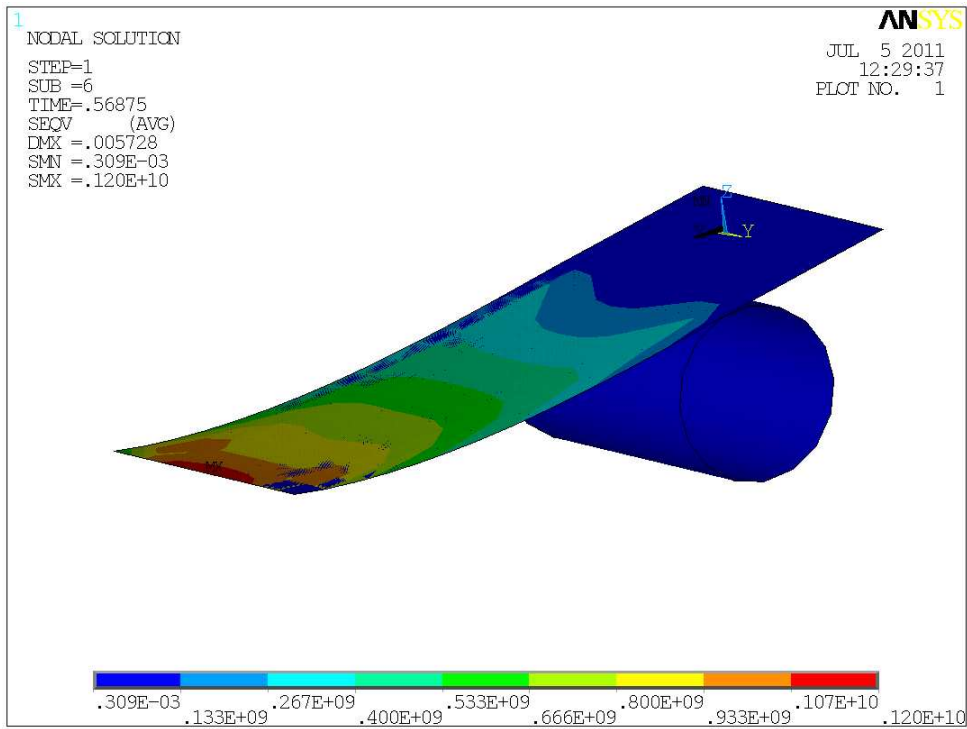
4.2 Σύγκριση πειραματικών δοκιμών και αριθμητικής προσομοίωσης

4.2.1 Δοκίμιο #1

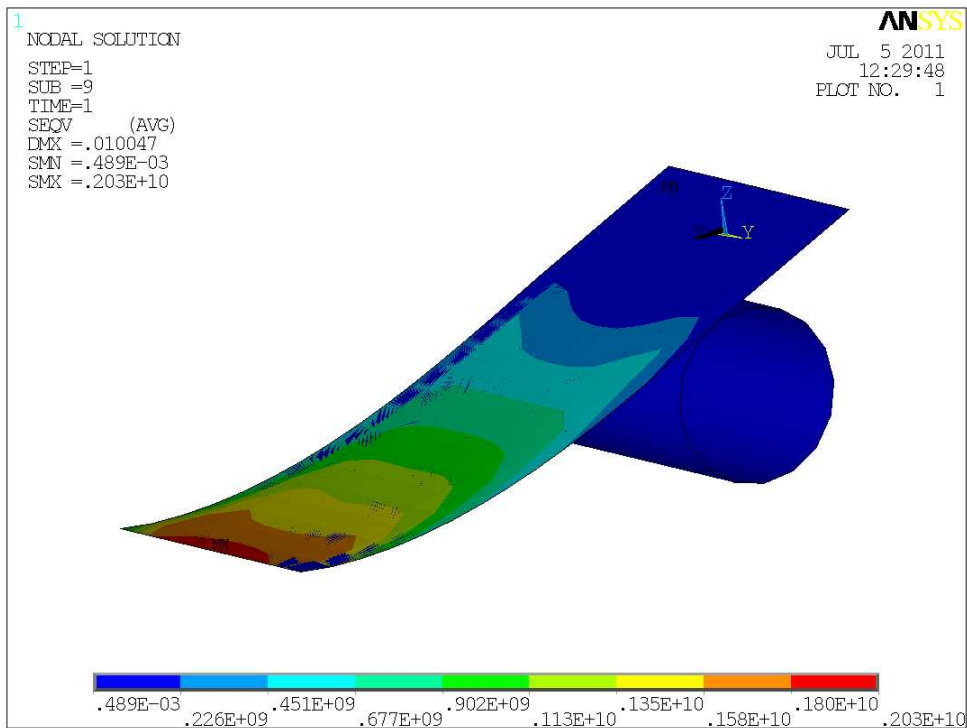
Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η ισοδύναμη τάση κατά τη διάρκεια της κάμψης του τεμαχίου:



Εικόνα 21: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 0,5 mm

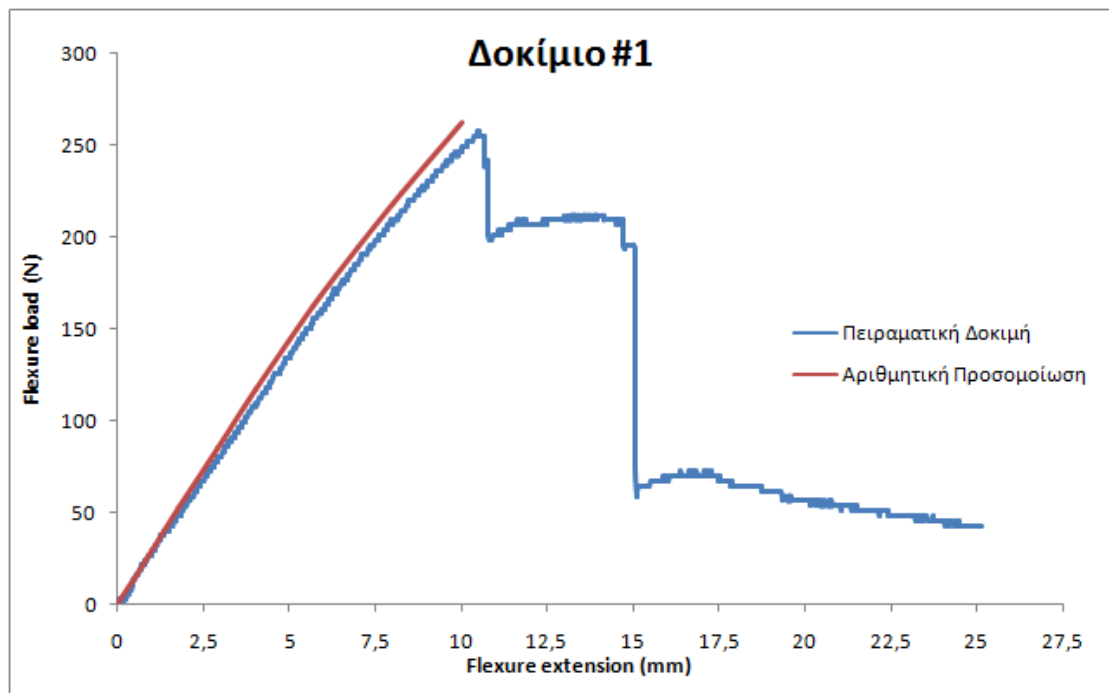


Εικόνα 22: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 5,7 mm



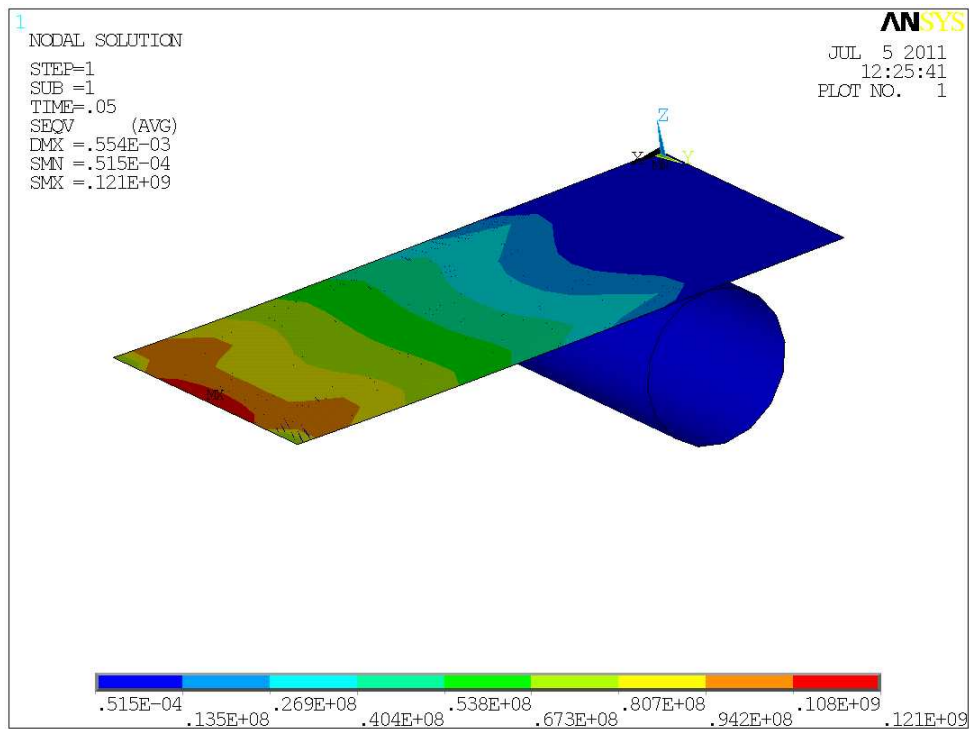
Εικόνα 23: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 10 mm

Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης

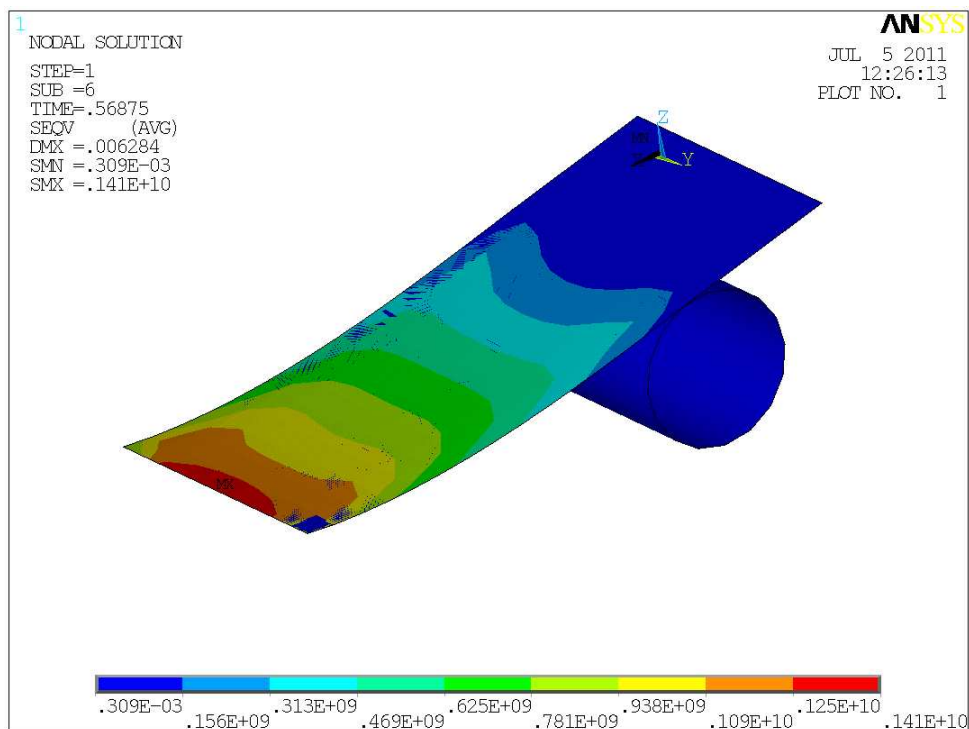


Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε μια πολύ καλή προσέγγιση του μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #1 κατά την ελαστική περιοχή. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζεται με αυτή της πειραματικής δοκιμής.

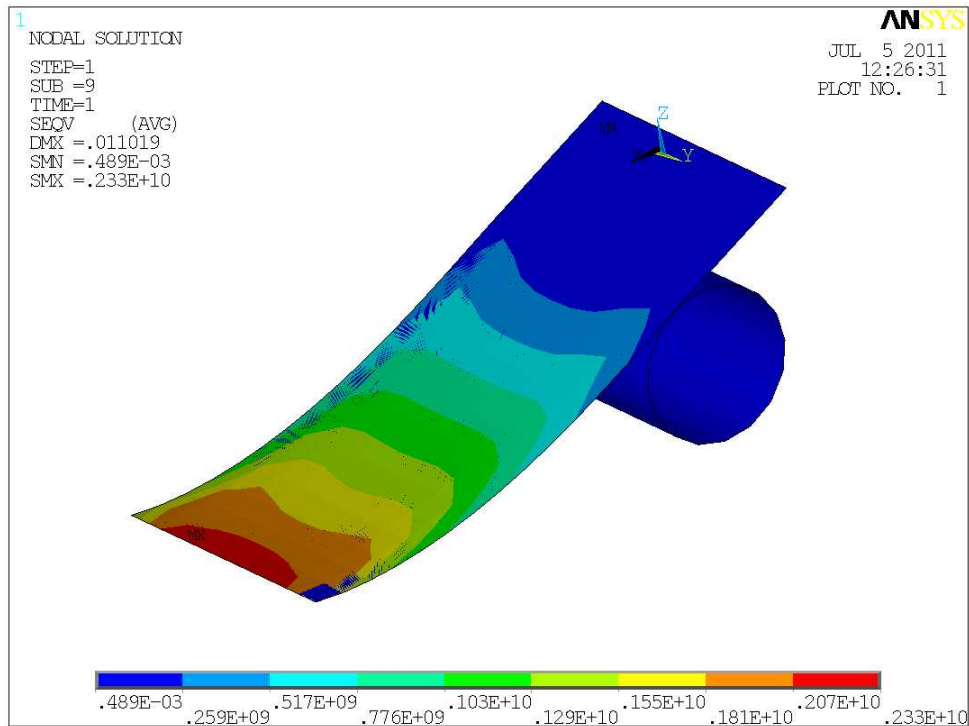
4.2.2 Δοκίμιο #2



Εικόνα 24: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 0,6 mm

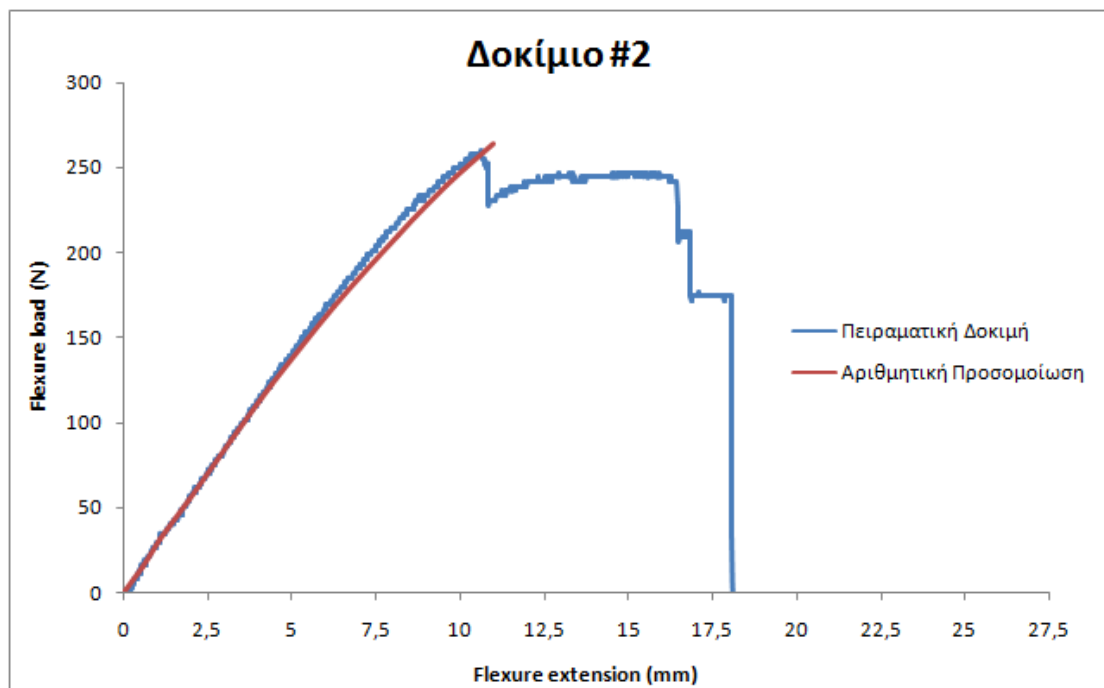


Εικόνα 25: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 6,2 mm



Εικόνα 26: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 10 mm

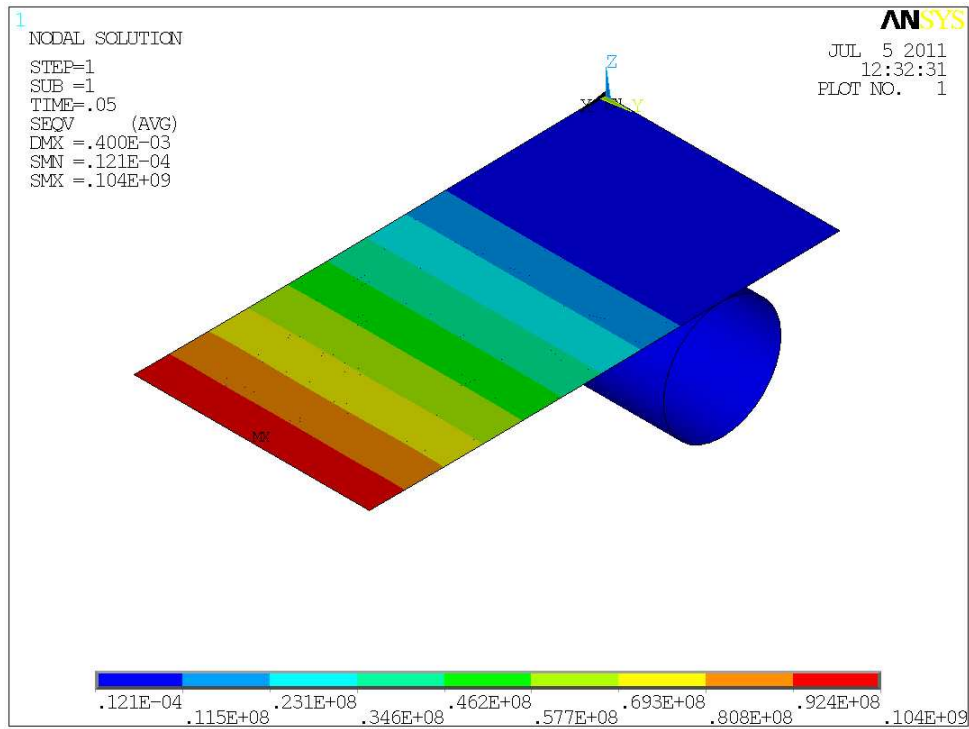
Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης



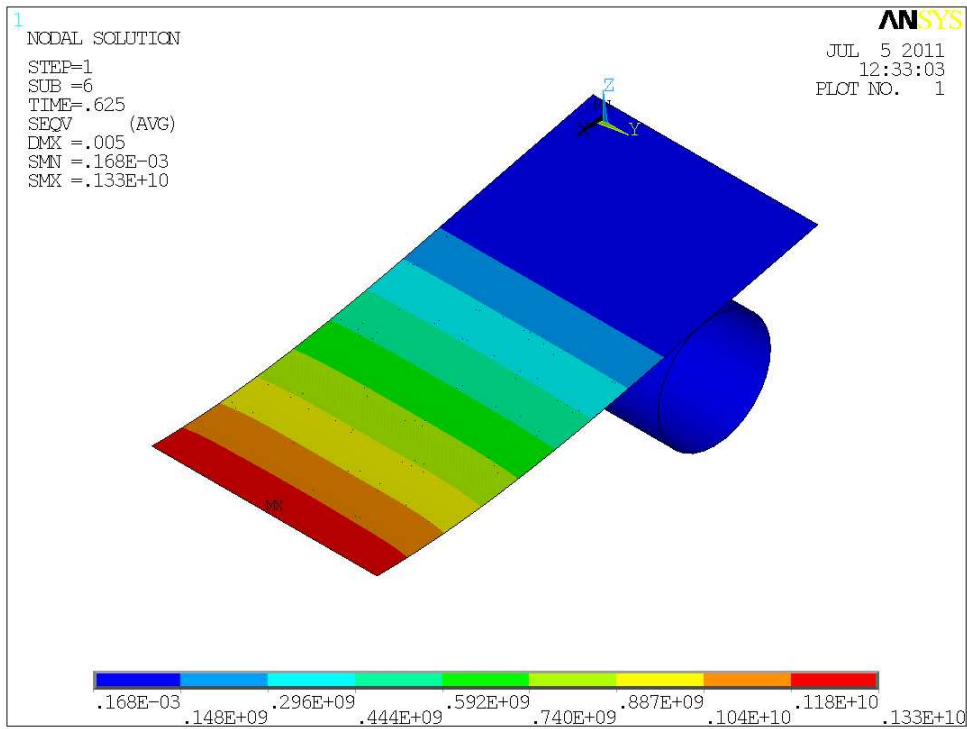
Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε μια πολύ καλή προσέγγιση του

μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #2 κατά την ελαστική περιοχή. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζεται με αυτή της πειραματικής δοκιμής.

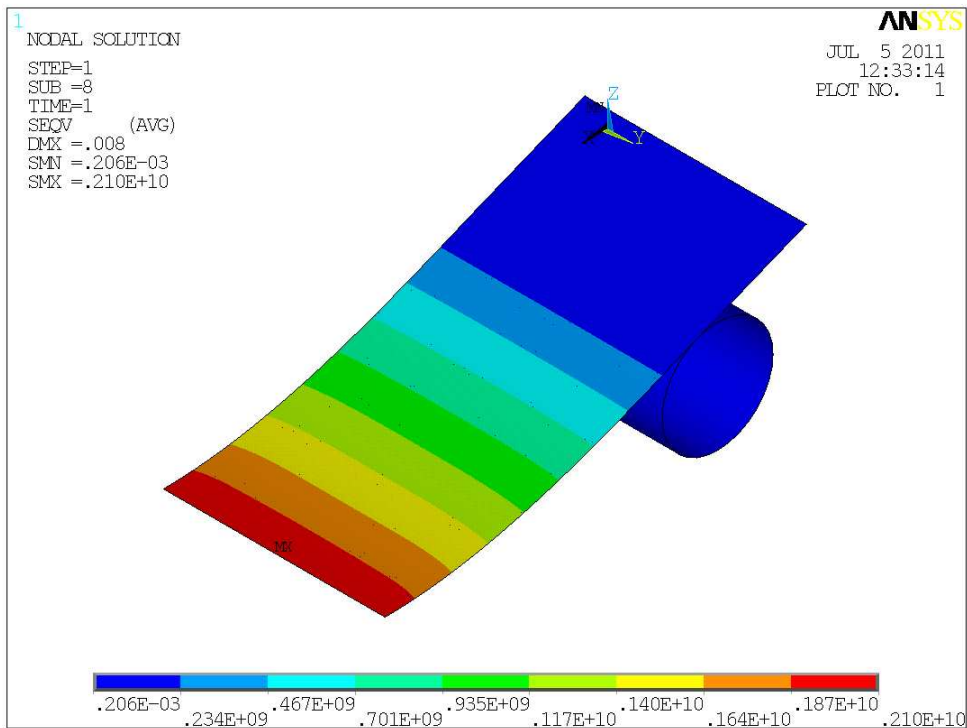
4.2.3 Δοκίμιο #3



Εικόνα 27: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 0,4 mm

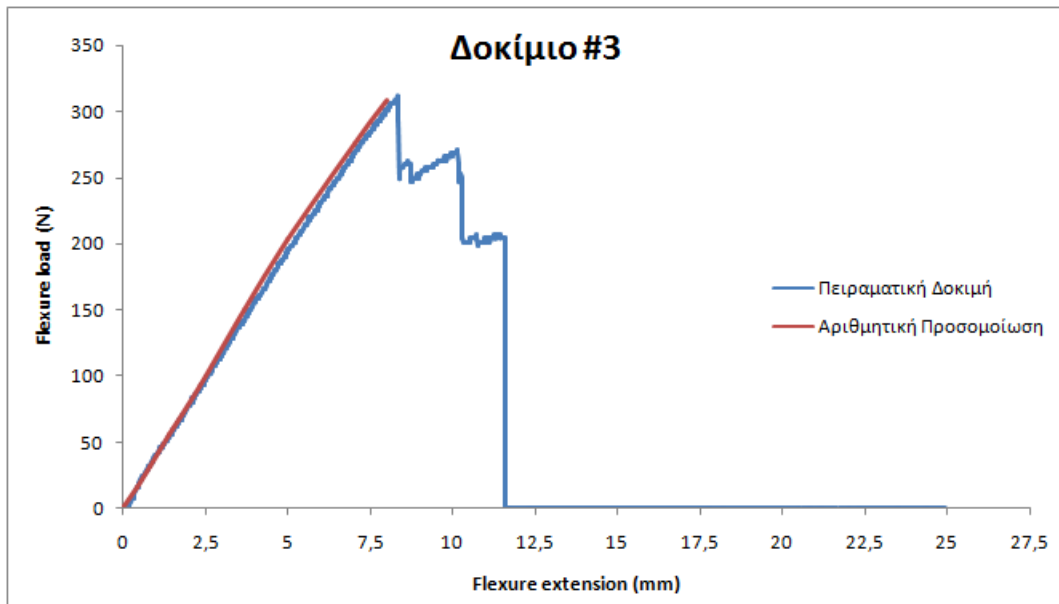


Εικόνα 28: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 5 mm



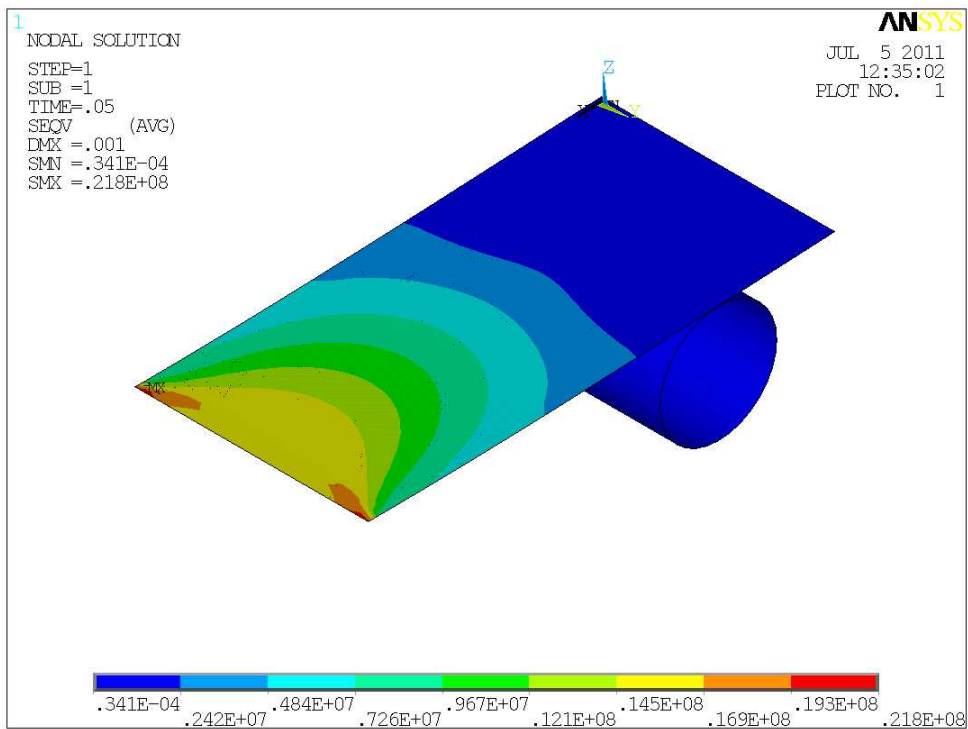
Εικόνα 29: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 8 mm

Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης

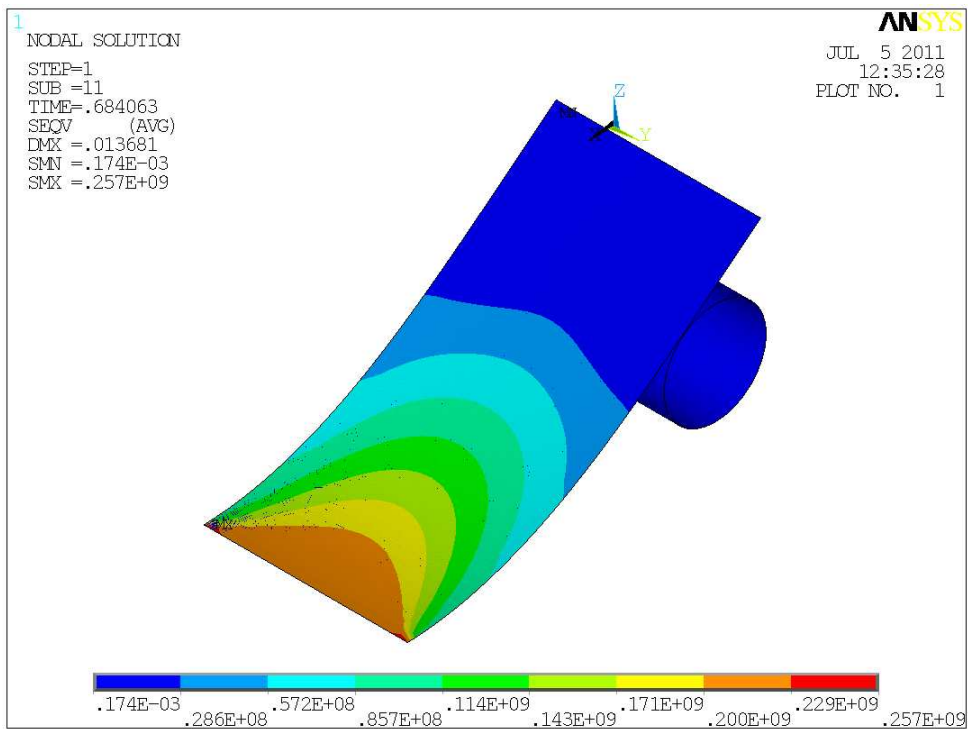


Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε μια πολύ καλή προσέγγιση του μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #3 κατά την ελαστική περιοχή. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης σχεδόν ταυτίζεται με αυτή της πειραματικής δοκιμής.

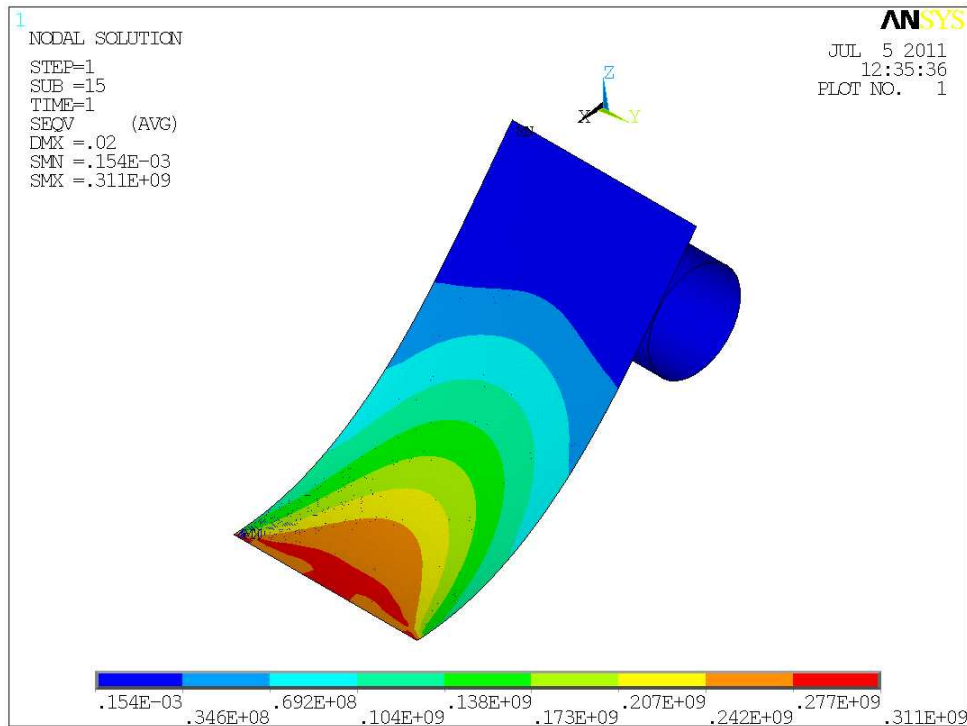
4.2.4 Δοκίμιο #4



Εικόνα 30: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 1 mm

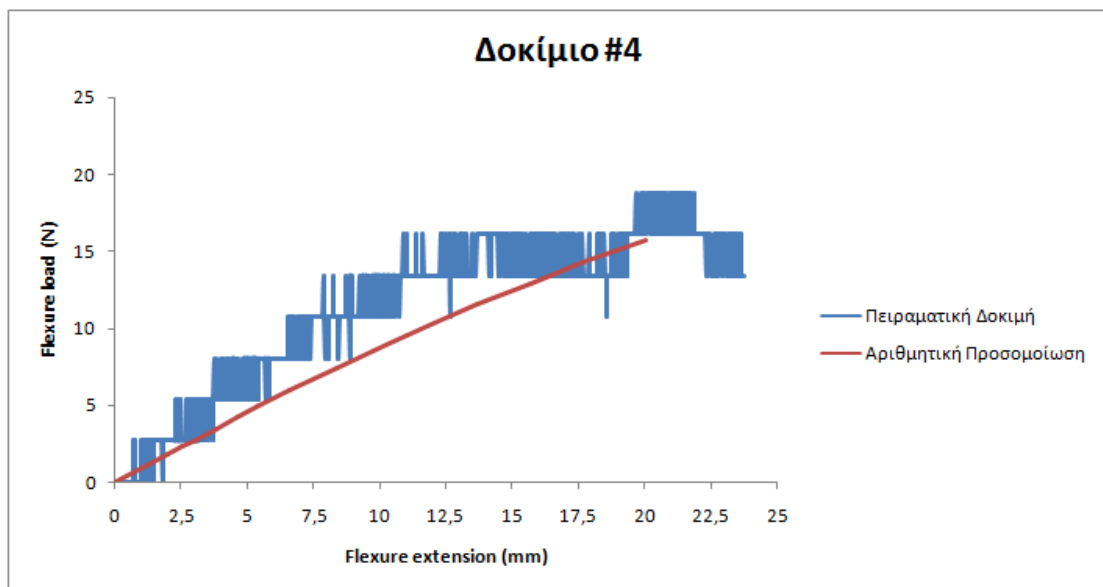


Εικόνα 31: Ισοδύναμη von Misses τάση για βέλος κάμψης 11 mm



Εικόνα 32: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 20 mm

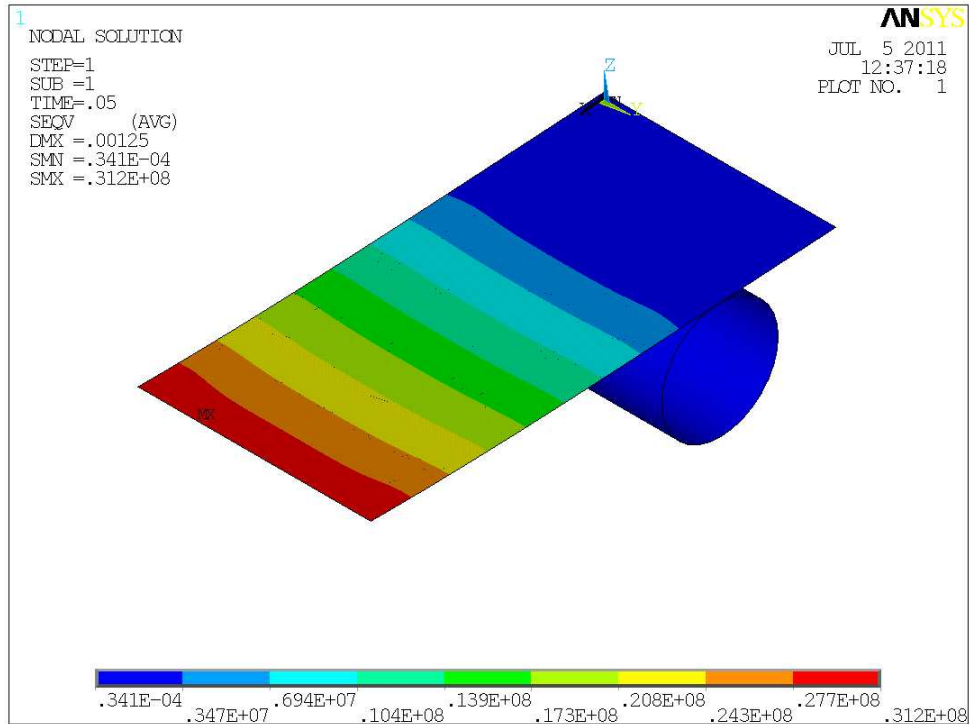
Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης



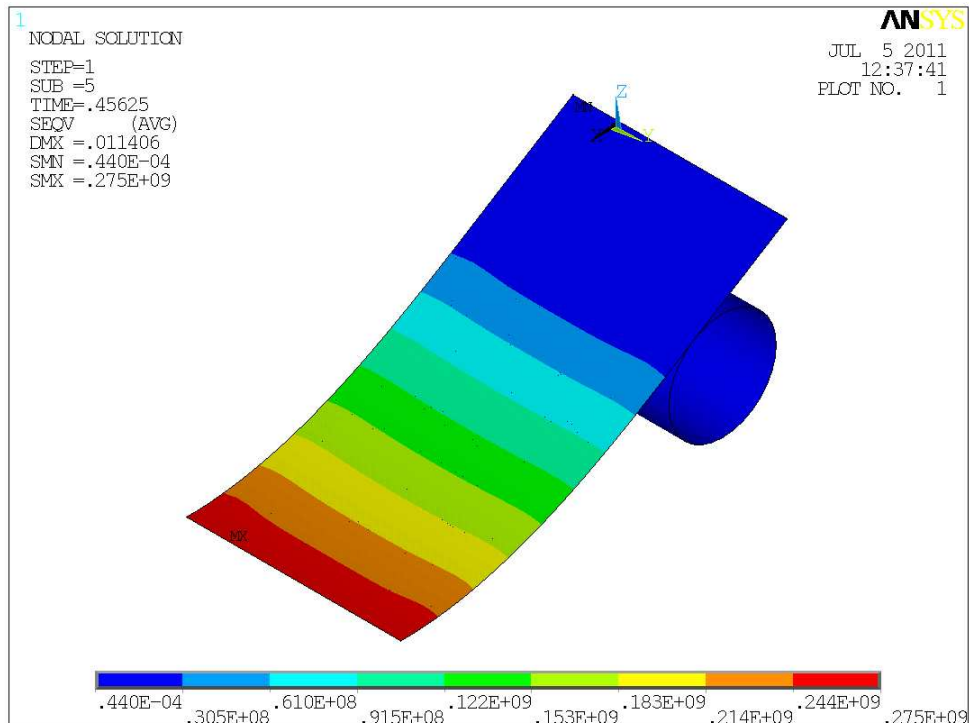
Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε σχετικά καλή προσέγγιση του μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #4. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης προσεγγίζει αυτή της πειραματική δοκιμής, ωστόσο υπάρχει μία απόκλιση που είναι απόλυτα δικαιολογημένη λόγω του λεπτού πάχους του δοκιμίου και κατά συνέπεια

του χαμηλού φορτίου. Εξάλλου από τη μορφή της πειραματική καμπύλης καταλαβαίνουμε ότι βρισκόμαστε στα όρια της διακριτικής ικανότητας του αισθητήρα της πρέσας.

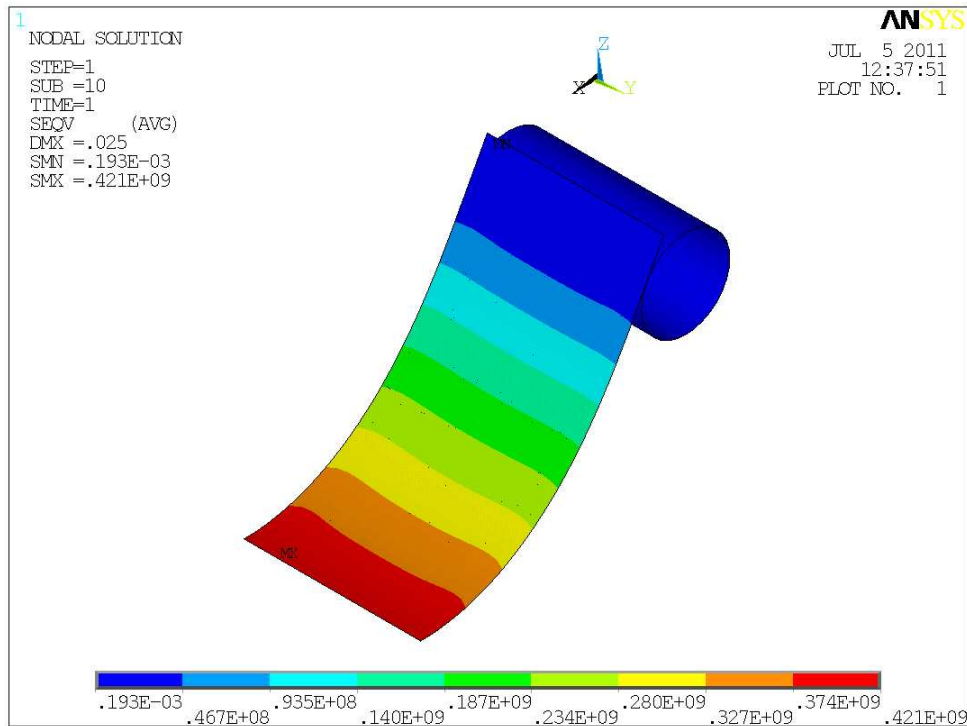
4.2.5 Δοκίμιο #5



Εικόνα 33: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 1,25 mm

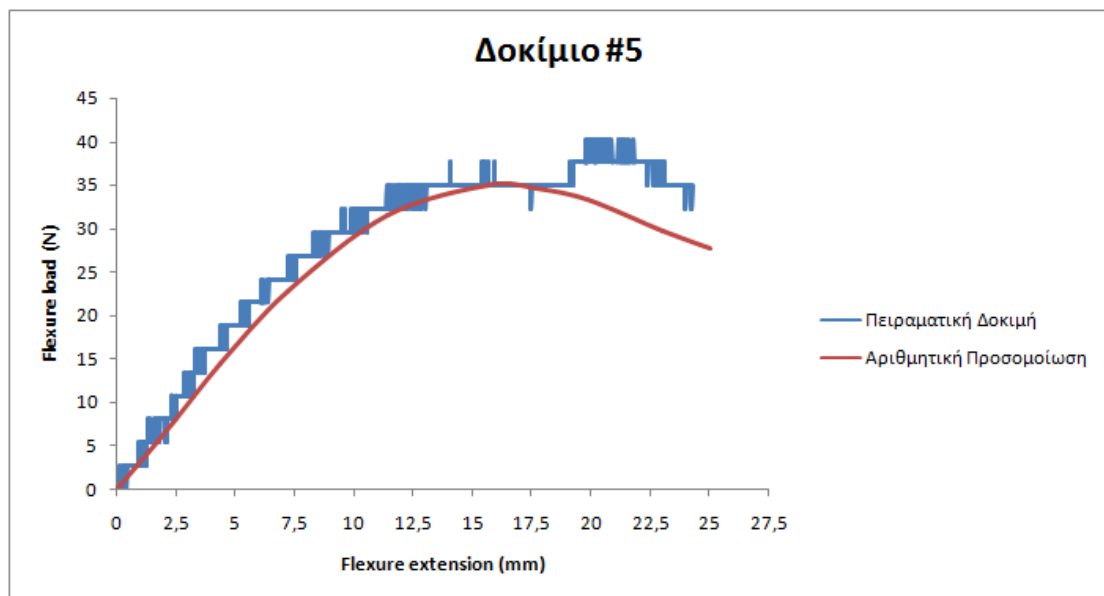


Εικόνα 34: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 11,4 mm



Εικόνα 35: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 25 mm

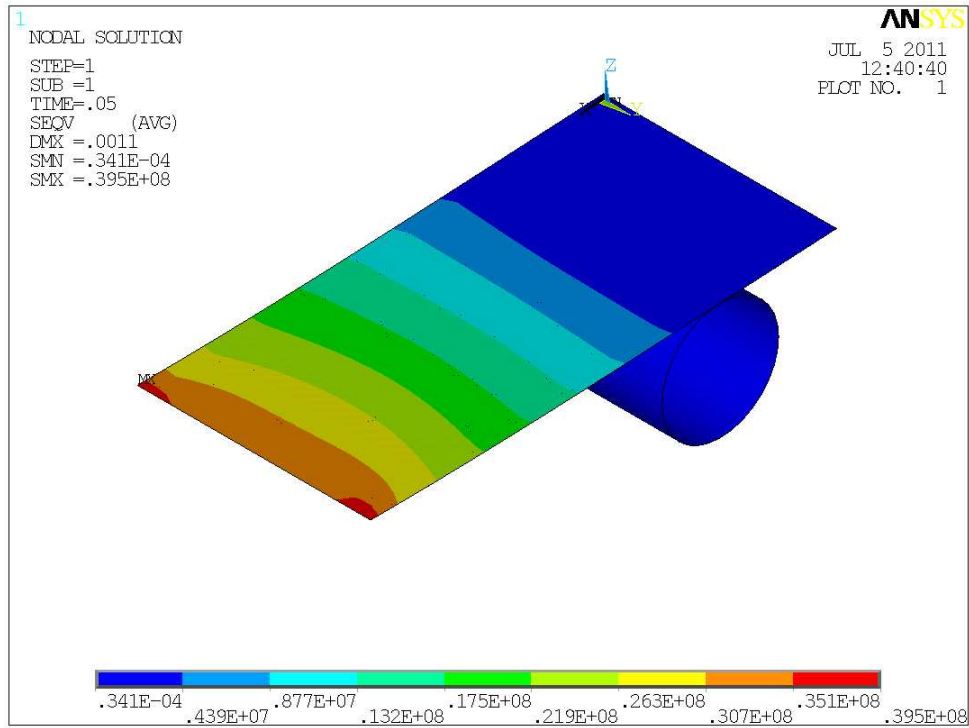
Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης



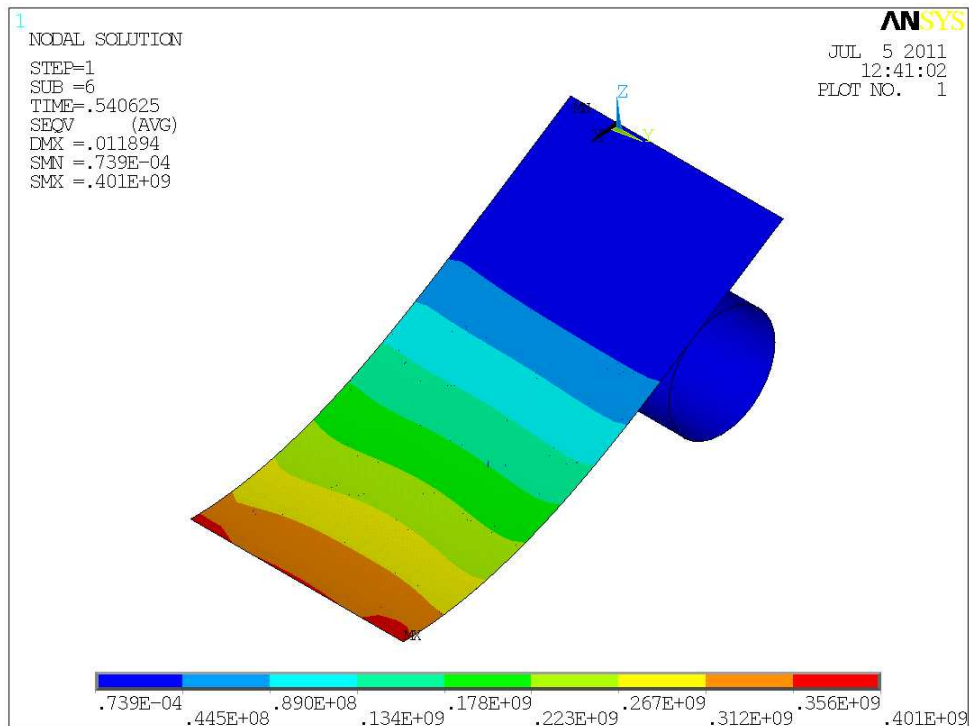
Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε πολύ καλή προσέγγιση του μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #5. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης προσεγγίζει πολύ αυτή της πειραματική δοκιμής και έχουμε πολύ μικρότερη απόκλιση από την αντίστοιχη του δοκιμίου #4. Ένας βασικός λόγος στον οποίο οφείλεται το τελευταίο είναι η διαφορετική διαστρωμάτωση του δοκιμίου #5 και το μεγαλύτερο φορτίο που

μπορεί να σηκώσει το δοκίμιο σε σχέση με το αντίστοιχο του δοκιμίου #5. Ωστόσο μία μικρή απόκλιση εμφανίζεται προς το τέλος της κάμψης.

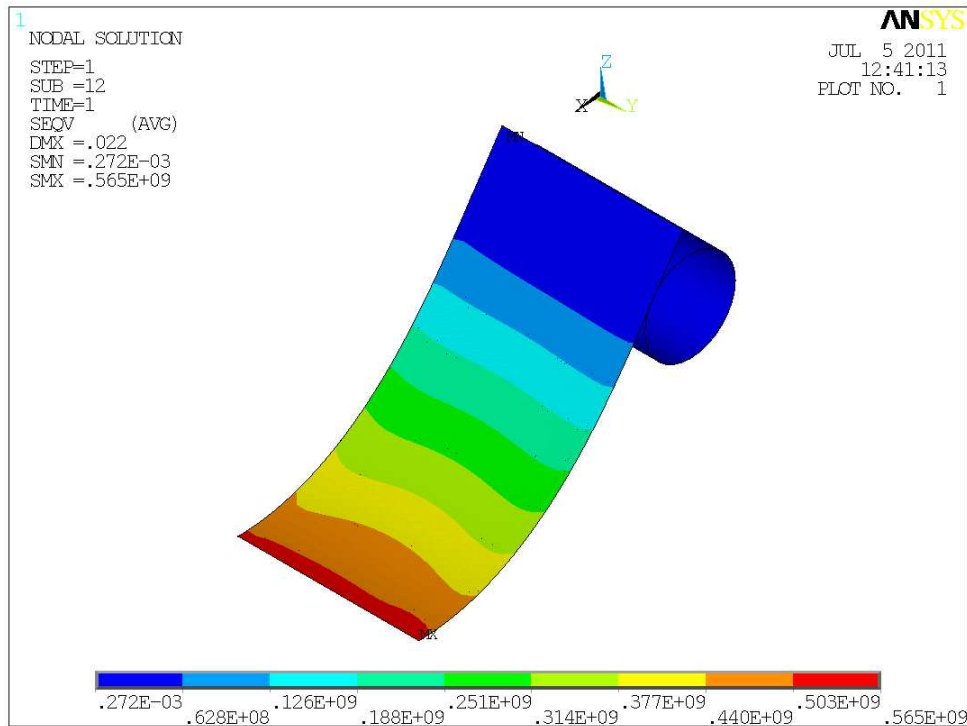
4.2.6 Δοκίμιο #6



Εικόνα 36: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 1 mm

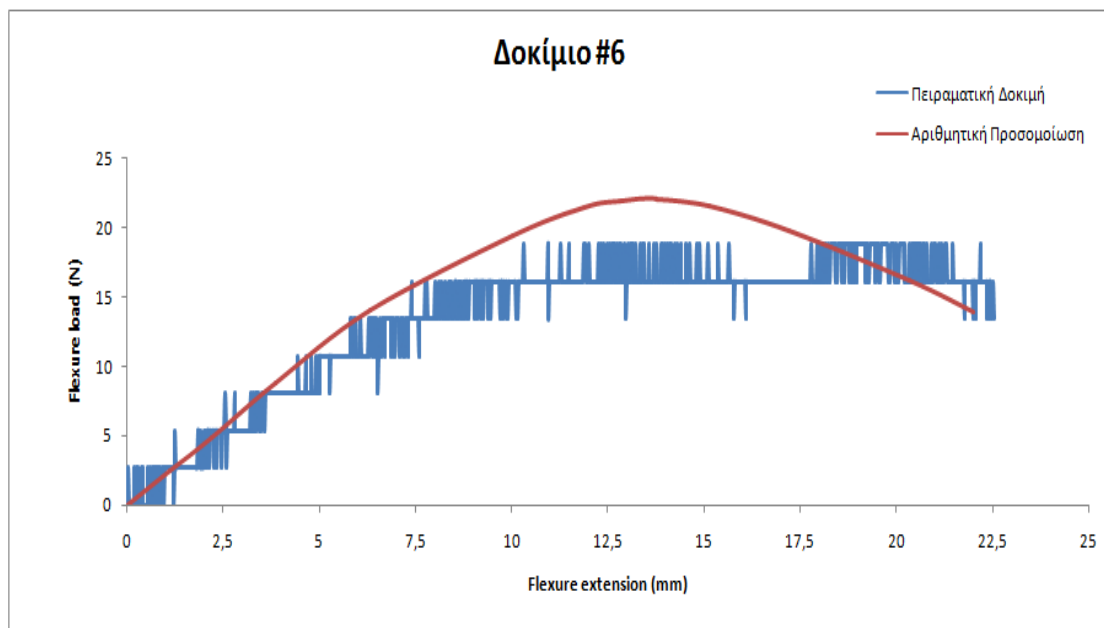


Εικόνα 37: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 12 mm



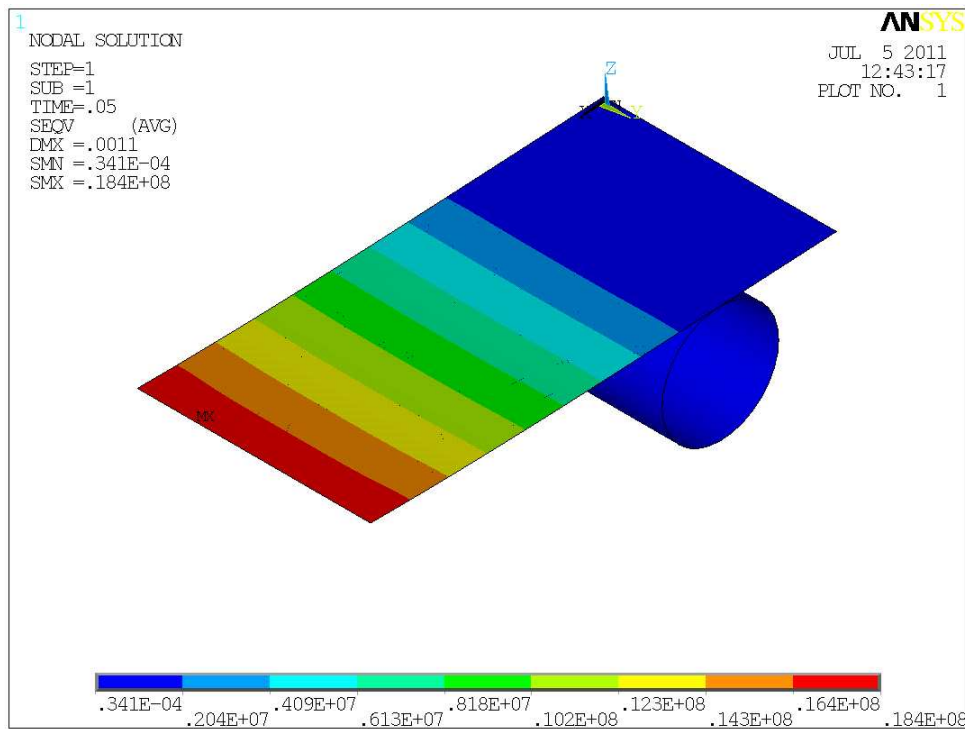
Εικόνα 38: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 22 mm

Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης

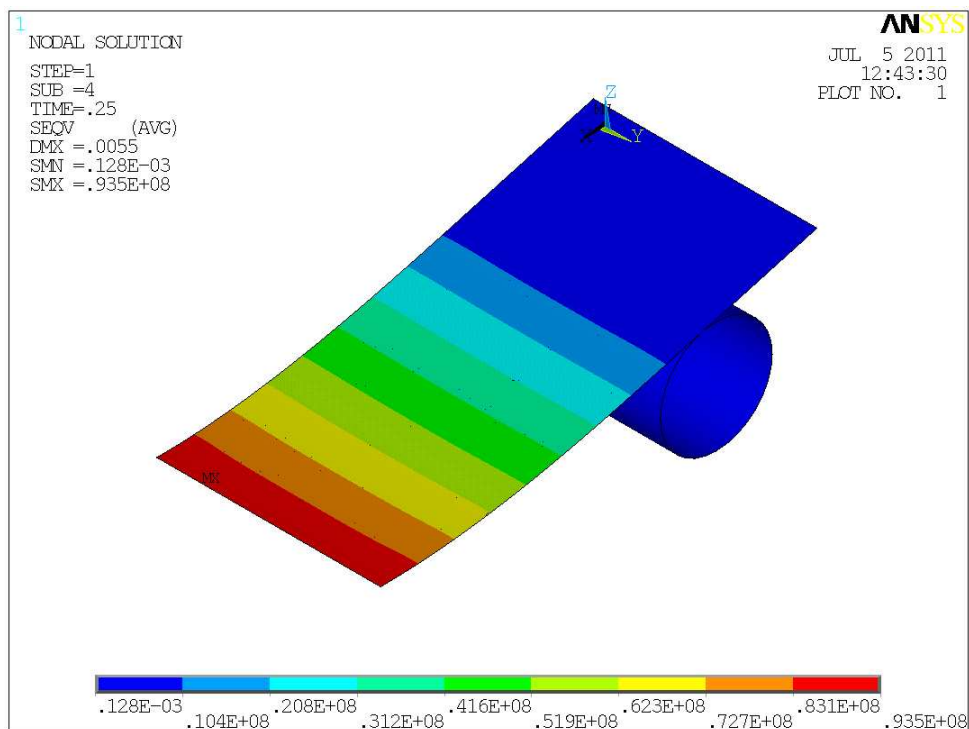


Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε πολύ καλή προσέγγιση του μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #6. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης προσεγγίζει αυτή της πειραματική δοκιμής Ωστόσο μία απόκλιση εμφανίζεται που είναι απόλυτα δικαιολογημένη.

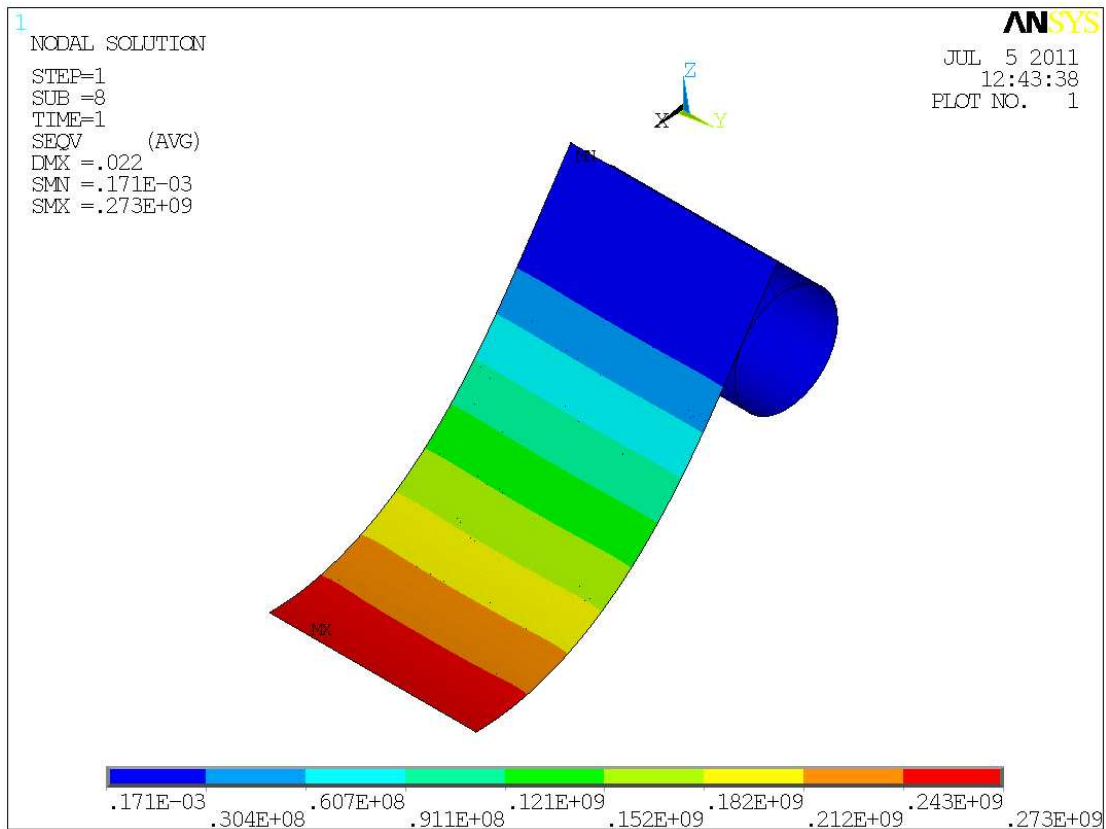
4.2.7 Δοκίμιο #7



Εικόνα 39: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 1 mm

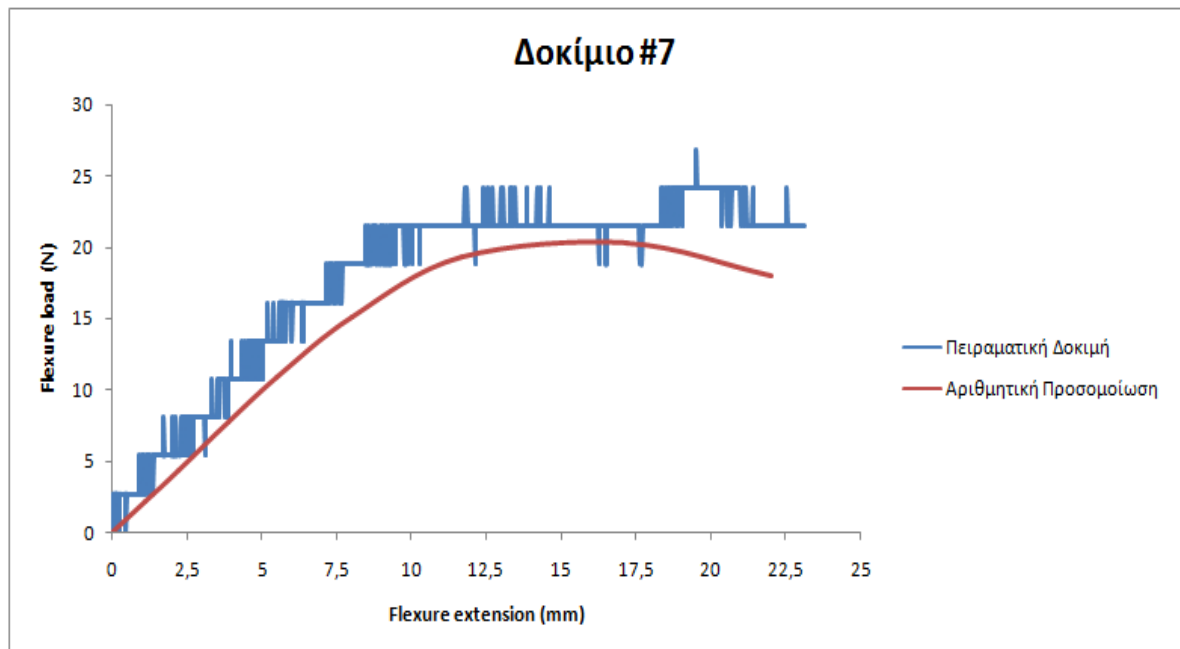


Εικόνα 40: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 8 mm



Εικόνα 41: Ισοδύναμη von Mises τάση για βέλος κάμψης 22 mm

Σύγκριση Πειραματικής Δοκιμής και Αριθμητικής Προσομοίωσης



Τόσο από τις εικόνες κατά τη διάρκεια της κάμψης όσο και από το διάγραμμα flexure load - flexure extension παρατηρούμε σχετικά καλή προσέγγιση του

μηχανισμού κάμψης του δοκιμίου #7. Η καμπύλη της αριθμητικής προσομοίωσης προσεγγίζει αυτή της πειραματική δοκιμής, ωστόσο υπάρχει μία απόκλιση που είναι απόλυτα δικαιολογημένη λόγω του λεπτού πάχους του δοκιμίου και κατά συνέπεια του χαμηλού φορτίου.

5. Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Η σπουδαιότητα των πολύστρωτων σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα στην ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας είναι αναμφισβήτητη αφού το πεδίο εφαρμογών τους είναι πολύ ευρύ. Μέσα από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μπορούν να εξαχθούν ποικίλα και σημαντικά συμπεράσματα.

Αρχικά ασχοληθήκαμε με την κατασκευή πολύστρωτων πλακιδίων σύνθετων υλικών με ίνες άνθρακα CFRP. Η κατασκευή τέτοιων σύνθετων υλικών είναι μια διαδικασία η οποία πρέπει να γίνει με βάση συγκεκριμένες προδιαγραφές έτσι ώστε τα παραγόμενα τεμάχια να έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες και να είναι απαλλαγμένα από κατασκευαστικά ελαττώματα τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα κατά την πειραματική διαδικασία.

Στη συνέχεια τα δοκίμιά μας καταπονήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων (3 POINT BENDING) και ελέγχθηκαν ως προς την ολική ενέργεια που απορροφούν αλλά και ως προς το μέγιστο φορτίο που εμφανίζουν κατά την κάμψη. Από κάθε πλακίδιο δοκιμάστηκαν πειραματικά τρία δοκίμια ώστε να ελεγχθεί η επαναληψιμότητα του μηχανισμού της κάμψης. Συνοψίζοντας τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την καταγραφή και σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων της πειραματικής δοκιμής μπορούμε να εξάγουμε τα εξής:

Για κάθε πλακίδιο και τα τρία δοκίμια που δοκιμάστηκαν εμφανίζουν επαναληψιμότητα αφού οι αντίστοιχες καμπύλες flexure extension – flexure load αλλά και η ολική απορροφούμενη ενέργεια κατά την κάμψη συμπίπτουν σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό.

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων διαφαίνεται ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει το πάχος αλλά και η διαστρωμάτωση των δοκιμίων. Τα δοκίμια με πάχος 1mm εμφανίζουν σαφώς πιο βελτιωμένες ιδιότητες από εκείνα με πάχος 0,5 mm.. Έτσι τα δοκίμια #1, #2, #3 απορροφούν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια και κατά συνέπεια δέχονται πολύ μεγαλύτερο φορτίο από τα αντίστοιχα των δοκιμίων #4 - #8. Ανάμεσα στα δοκίμια #1 - #3 το δοκίμιο #2 απορροφά μεγαλύτερη ενέργεια κατά την κάμψη ενώ το δοκίμιο #3 εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή για το μέγιστο φορτίο.

Ανάμεσα στα δοκίμια #4, #5, #6, #7, #8 που έχουν το ίδιο πάχος το δοκίμιο #5 απορροφά μεγαλύτερη ενέργεια και εμφανίζει τη μεγαλύτερη τιμή για το μέγιστο φορτίο κατά τη διαδικασία της κάμψης γεγονός που οφείλεται στη διαστρωμάτωση

του που είναι με τέσσερις συμμετρικές στρώσεις unidirectional 0 και unidirectional 90. Το δοκίμιο #5 συγκρινόμενο με το ισόπαχο δοκίμιο #6 το οποίο αποτελείται από 4 συμμετρικές στρώσεις unidirectional 45 και unidirectional -45 εμφανίζει σαφώς πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Ανάμεσα στα δοκίμια #4, #7, #8 που αποτελούνται από δύο στρώσεις το δοκίμιο #7 είναι αυτό που εμφανίζει καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με τα άλλα δυο γεγονός που οφείλεται επίσης στη διαστρωμάτωσή του. Τέλος θα πρέπει να αναφέρουμε ότι στα δοκίμια με πάχος 1mm υπάρχει θραύση γεγονός που δε συμβαίνει στα αντίστοιχα των 0,5mm που συμπεριφέρονται ελαστικά.

Στη συνέχεια γίνεται αριθμητική προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας. Συνοψίζοντας τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την καταγραφή και σύγκριση όλων των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης της πειραματικής διαδικασίας μπορούμε να εξάγουμε τα εξής:

Για τα δοκίμια #1, #2, #3 μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης έχουμε μια πολύ καλή προσέγγιση της κάμψης μέχρι τη στιγμή της θραύσης. Από το σημείο της θραύσης και μετά η αριθμητική προσομοίωση του φαινομένου είναι πολύ δύσκολη και απαιτεί χρήση εξειδικευμένων λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων λόγω της μη ισοτροπικότητας των υλικών των δοκιμίων.

Για τα δοκίμια #4, #5, #6 και #7 που δεν θραύονται έχουμε πλήρη αριθμητική προσομοίωση της διαδικασίας της κάμψης τριών σημείων. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται θεωρούνται αρκετά ικανοποιητικά και αντικατοπτρίζονται στη σύγκριση των καμπυλών πειραματικής δοκιμής και αριθμητικής προσομοίωσης για τα αντίστοιχα δοκίμια. Ωστόσο υπάρχουν κάποιες μικρές αποκλίσεις που είναι απόλυτα δικαιολογημένες. Οι λόγοι στους οποίους οφείλονται αυτές οι αποκλίσεις είναι πολλοί. Αρχικά τα πειραματικά μοντέλα είναι πιθανόν να περιέχουν κάποιες κατασκευαστικές αδυναμίες καθώς και μικρές διαφορές στις οριακές συνθήκες σε σχέση με τα εξειδικευμένα αριθμητικά μοντέλα. Επίσης έχουμε να κάνουμε με σύνθετα υλικά τα οποία δεν είναι ισότροπα και έχουν πολύπλοκη εσωτερική δομή γεγονός που δυσχεραίνει την αριθμητική προσομοίωση τους. Τέλος οι ιδιότητες τέτοιων σύνθετων υλικών είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστούν επακριβώς και μπορεί να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τις πραγματικές τους τιμές.



MULTIPREG E722

120°C (248°F) Curing Modified Epoxy Resin Component Prepreg

E722 is a toughened epoxy resin system of medium viscosity for cures at 120°C (248°F), pre-impregnated into high performance fibers such as carbon, glass and aramid. Designed for structural applications in the motor racing and marine industries, also for general aircraft fittings, sporting equipment, and for a wide range of engineering applications.

*E722 is compatible for co-cure with Amber Composites 120°C (248°F) cure resin film EF72 and Amber Composites syntactic core Amlite SC72A.

CHARACTERISTICS:

- > Excellent drapeability – complex shapes easily formed
- > At least 1 month shelf life at ambient temperature
- > Autoclave, vacuum bag or press cures
- > Good surface finish
- > Medium tack level, easily laminates to mold surface
- > Tg (DMTA – peak tan δ) 138°C (280°F) after 1 hr at 120°C (248°F)
- > Low volatile content – no solvents used during processing

RESIN PROPERTIES

Density	1.21 g/cm ³ (75.5lbs/ft ³) at 23°C (73.4°F)
Tg (DMTA) after 1hr at 120°C (248°F)	Onset: 120°C (248°F) Peak Tan δ : 138°C (280°F)



MULTIPREG E722

120°C (248°F) Curing Modified Epoxy Resin Component Prepreg

PROCESSING

Following removal from refrigerated storage, allow prepreg to reach room temperature before opening the polythene bag, to avoid moisture condensation.

Cut patterns to size and lay up the laminate in line with design instructions taking care not to distort the prepreg. If necessary, the tack of the prepreg may be increased by gentle warming with hot air. The lay up should be vacuum debulked at regular intervals using a P3 (pin pricked) release film on the prepreg surface, vacuum of 980 mbar (29 ins Hg) is applied for 20 minutes.

For autoclave cures, use of a non-perforated release film on the prepreg surface trimmed to within 25-30mm of prepreg edge is recommended for the cure cycle, a vacuum bag should be installed using standard techniques.

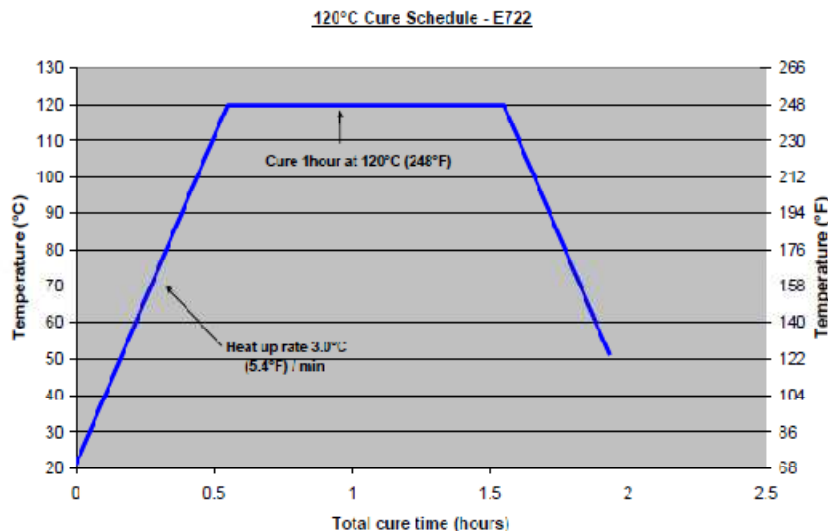
CURING CYCLES

E722 can be successfully molded by vacuum bag, autoclave, or matched die molding techniques.

Increase autoclave pressure to 1.4 bar (20 psi) with vacuum applied.

Vent to atmosphere and raise pressure to 6.2 bar (90 psi) (or max allowed by the core material).

Increase air temperature at 3°C (5.4°F) / min and hold for 1 hour at 120°C (248°F). Allow to cool to 50°C (122°F) before removal of pressure.





MULTIPREG E722

120°C (248°F) Curing Modified Epoxy Resin Component Prepreg

EXOTHERM

In certain circumstances, such as the production of thick section laminates rapid heat up rates or highly insulating masters, E722 can undergo exothermic heating leading to rapid temperature rise and component degradation in extreme cases.

Where this is likely, a cure incorporating an intermediate dwell of 1 hr at 90°C (194°F) is recommended in order to minimize the risk.

TYPICAL LAMINATE PROPERTIES (at Room Temperature)

T300 (3K) 280g/m² 5HS carbon 0/90° configuration woven laminates, cured 1hr at 120°C(248°F), results normalised to 55% Vf.

Tensile Strength	641.2 MPa
Tensile Modulus	58.0 GPa
Tensile Poisson's Ratio	0.04
Tensile Strain to failure (%)	1.0

Compression Strength	605.8 MPa
Compression Modulus	75.1 GPa

Flexural Strength	901 MPa
Flexural Modulus	59 GPa

Apparent ILSS	68.1 MPa
---------------	----------

T300 (3K) 280g/m² 4/4 twill carbon 0/90° configuration woven laminates, cured 1hr at 120°C(248°F), results normalised to 55% Vf.

Flexural Strength	900 MPa
Flexural Modulus	66 GPa

Apparent ILSS	59 MPa
---------------	--------



MULTIPREG E722

120°C (248°F) Curing Modified Epoxy Resin Component Prepreg

STORAGE

Shelf life is at least 1 month at ambient temperature 20°C (68°F)

Refrigerated storage life is 12 months at -18°C (0°F)

To avoid moisture condensation: Following removal from cold storage, allow prepreg to reach room temperature before opening the polythene bag.

HANDLING SAFETY

Observe established precautions for handling epoxy resins and fibrous materials.

For further information refer to Material Safety Data Sheet.

FURTHER INFORMATION

Please contact Amber Composites for additional information.

This is not a specification. The information given in this data sheet in relation to the performance, storage and other characteristics of the product is based on results gained from experience and tests and is believed to be accurate. Given, however, that conditions of use and storage will vary, Amber Composites will not be liable for any loss or damage resulting from reliance upon such information. The purchaser is recommended to carry out his own tests to establish the suitability of the product for its particular purpose. The use of the product in certain processes may require third party consent.

TORAYCA®

T300 DATA SHEET

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

FIBER PROPERTIES

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

FUNCTIONAL PROPERTIES

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

COMPOSITE PROPERTIES*

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

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

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T300

COMPOSITE PROPERTIES**

Tensile Strength	255 ksi	1,760 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	19.5 Msi	130 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.3 %	1.3 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	230 ksi	1,570 MPa	ASTM D-695
Compressive Modulus	18.5 Msi	125 GPa	ASTM D-695
In-Plane Shear Strength	14 ksi	98 MPa	ASTM D-3518
ILSS	15.5 ksi	11 kgf/cm ²	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	11.5 ksi	80 MPa	ASTM D-3039

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

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

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

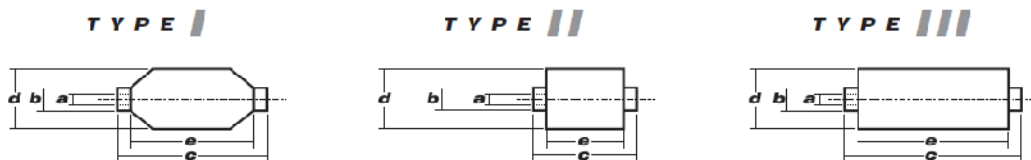
PACKAGING

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

Tow Sizes	TWST ¹	Sizing	Bobbin Net Weight (kg)	Bobbin Type ²	Bobbin Size (mm)					Spools per Case	Case Net Weight (kg)
					a	b	c	d	e		
1K	A	40A, 50A	1.0	I	94	99	320	135	260	15	15
	A	40A, 50A	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
	B	50B	1.0	II	76	82	192	132	156	16	16
3K	A	40A, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40B, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
6K	A	40D, 50A	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
	B	40D, 50B	2.0	II	76	82	192	157	156	12	24
12K	A	50A	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24
	B	50B	4.0	II	76	82	192	204	156	6	24

¹ **Twist** A: Twisted yarn B: Untwisted yarn made from a twisted yarn through an untwisting process

² **Bobbin Type** See Diagram below



TORAYCA®

T700S DATA SHEET

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

FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in ³	1.80 g/cm ³	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 μm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type	50C		1.0 %	TY-030B-05
& Amount	60E		0.3 %	TY-030B-05
	F0E		0.7 %	TY-030B-05
	Twist	Never twisted		

FUNCTIONAL PROPERTIES

CTE	-0.38	$\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Specific Heat	0.18	Cal/g $\cdot^{\circ}\text{C}$
Thermal Conductivity	0.0224	Cal/cm $\cdot\text{s}\cdot^{\circ}\text{C}$
Electric Resistivity	1.6×10^{-3}	$\Omega \cdot \text{cm}$
Chemical Composition: Carbon	93	%
Na + K	<50	ppm

COMPOSITE PROPERTIES*

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

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

TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

T700S

COMPOSITE PROPERTIES**

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

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

See Section 4 for Safety & Handling information. The above properties do not constitute any warranty or guarantee of values. These values are for material selection purposes only. For applications requiring guaranteed values, contact our sales and technical team to establish a material specification document.

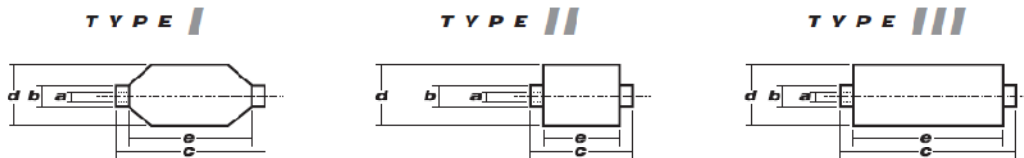
PACKAGING

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

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

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

² Bobbin Type See Diagram below



TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.

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

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A THREE POINT BEND TEST FOR FIBRE-REINFORCED COMPOSITES, A. W. CHRISTIANSEN, J. LILLEY and J. B. SHORTALL, Department of Metallurgy and Materials Science, University of Liverpool, Liverpool Great Britain, 15 December, 1972
2. Applied Stress Analysis, Section XI, Composite Materials (Analysis), Bob Matthews, General Dynamics, Convair Division
3. ASTM 2004 STANDARDS
4. Axial capacity and crushing of thin-walled metal, fibre-epoxy and composite metal-fibre tubes M.R. Bambach Department of Civil Engineering, Monash University, Australia
5. Basics of Metal Matrix Composites, *Karl Ulrich Kainer*
6. COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK, DEPARTMENT OF DEFENSE, MIL-HDBK-17-2F, Volume 2 of 5, 17 JUNE 2002, SUPERSEDING, MIL-HDBK-17-2E, Volume 2 of 5, 24 MAY 1999
7. Composite Materials in Aircraft Structures, D. H. Middleton, Longman Singapore Publishers, 1990
8. COMPOSITE MATERIALS, Prof.P.C.Pandey, Dept.of Civil Eng., IISc Bangalore, Web-based Course, SYLLABUS VERSION 2.0 — 17August 2004
9. COMPOSITE STRUCTURES Theory and Practice, Peter Grant, Carl Q. Rousseau, ASTM, STP 1383
10. Engineering Mechanics of Composite Materials, Isaac M. Daniel, Ori Ishai
11. Experimental assessment of energy absorption capability of carbon-epoxy and glass-epoxy composites, Stanislaw Ochelski , Pawel Gotowicki, Military Academy of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Material Sciences and Applied Mechanics, 00-908 Warsaw, Poland
12. EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON FLEXURAL STRENGTHENING OF TIMBER STRUCTURES WITH CFRP, *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures (BBFS 2005)*, Chen and Teng (eds), 2005 International Institute for FRP in Construction, K.U. Schober and K. Rautenstrauch Department of Timber and Masonry Engineering Bauhaus-University of Weimar, Marienstr. 13A, 99423 Weimar, Germany

13. Fabrication and Properties of Carbon Fibers, Xiaosong Huang, *Materials* 2009, 2, 2369-2403; doi:10.3390/ma2042369
14. Failure of carbon/epoxy composite tubes under combined axial and torsional loading, Fracture morphology and failure mechanism, C.S. Lee, W. Hwang, H.C. Park, K.S. Han, Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang 790-784, Republic of Korea, Received 25 August 1997; received in revised form 6 July 1998; accepted 10 February 1999
15. Guide to Prepregs, *Lavender CE Pty Ltd*
16. HANDBOOK OF COMPOSITES, SECOND EDITION, S. T. Peters, *Process Research, Mountain View, California, USA, CHAPMAN & HALL*
17. Impact behaviour of fibre-reinforced composite, materials and structures, S R Reid and G Zhou, Woodhead Publishing Limited, Cambridge England
18. INTRODUCTION TO COMPOSITE MATERIALS, David Roylance, Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, March 24, 2000
19. Material characterization of laminated composite materials using a three-point-bending technique, T.Y. Kam, C.M. Chen, S.H. Yang, Mechanical Engineering Department, National Chiao Tung University, 1001 Ta Hsueh Road, Hsin Chu 300, Taiwan, ROC
20. MCGRAW-HILL, Dictionary of Engineering, 2003, second edition
21. Mechanics of composite materials, second edition, Robert M. Jones, Taylor and Francis
22. Mechanics of Fibrous Composites, Mahmood Husein Dato, Elsevier Applied Science, 1991
23. Toray's Strategy for Carbon Fiber Composite Materials, 3rd IT-2010 Strategy seminar (Carbon Fiber Composite Materials) Presentation, April 11, 2008, Toray Industries, Inc., Senior Vice President Masayoshi Kamiura
24. Ειδικά Κεφάλαια Σύνθετων Υλικών, Γ. Τσαμασφύρος, Γ. Καντεράκης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2004

Ηλεκτρονικές Πηγές

1. www.toray.com
2. <http://www.ambercomposites.com>
3. www.sciencedirect.com
4. <http://en.wikipedia.org>