

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ
ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ
ΥΛΙΚΟΥ ‘ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕ ΙΝΕΣ
ΓΥΑΛΙΟΥ’ (FIBERGLASS)**

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	Σελ.
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	8
Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ FIBERGLASS ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ FIBERGLASS (F.R.P.).....	10

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 1^ο – ΟΠΛΙΣΜΟΣ : ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ - FIBERGLASS

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	18
1.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ - FIBERGLASS.....	18
1.3 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ FIBERGLASS.....	20
1.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΙΝΩΝ.....	22
1.4.1 ΕΜΜΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	22
1.4.2 ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	23
1.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΕΧΩΝ ΙΝΩΝ (ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ).....	25
1.6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΙΝΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ.....	26
1.6.1 1 ^Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	26
1.6.2 2 ^Η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	26
1.7 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ – FIBERGLASS.....	27
1.8 ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ.....	29
1.9 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΙΝΩΝ.....	31
1.10 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ.....	31
1.10.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΙΝΩΝ - ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΝΗΜΑΤΩΝ.....	31
1.10.2 ΤΥΠΟΙ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ.....	32
1.11 ΤΥΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ.....	34
1.12 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ.....	36

Κεφάλαιο 2^ο – ΜΗΤΡΑ : ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	37
2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΗΤΡΑΣ.....	37
2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΗΤΡΑΣ.....	37
2.4 ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	38
2.4.1 ΕΙΔΗ ΡΗΤΙΝΩΝ.....	39
2.4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΡΗΤΙΝΗΣ.....	39
2.5 ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ.....	40
2.5.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΩΝ.....	40
2.5.2 ΧΗΜΙΚΗ ΔΟΜΗ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΩΝ.....	42
2.5.3 ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ.....	42
2.5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	43
2.6 ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΡΗΤΙΝΩΝ.....	44
2.6.1 ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΕΩΣ.....	45
2.6.2 ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ ΡΗΤΙΝΩΝ.....	45
2.6.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ.....	46
2.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ.....	46

Κεφάλαιο 3^ο – ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	48
3.2 ΚΑΤΑΛΥΤΕΣ.....	48
3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΛΥΤΗ.....	48
3.4 ΔΟΣΟΛΟΓΙΑ.....	48

Κεφάλαιο 4^ο – ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ.....	50
4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ.....	51
4.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ F.R.P.....	52
4.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	55
4.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	58

4.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	59
4.6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ.....	60
4.6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ.....	62
4.7 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ - ΕΤΟΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	63
4.8 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ FIBERGLASS.....	64
4.9 F.R.P ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ.....	65
4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	66

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 5^ο – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

5.1 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....	69
5.2 ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	69
5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	70
5.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ.....	70
5.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	70
5.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	71
5.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ.....	71
5.8 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	72

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 6^ο – ΚΑΜΨΗ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ.....	75
6.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΜΨΗΣ.....	75
6.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ F.R.P. ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ.....	78
6.4 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ– ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	78
6.5 ΠΙΝΑΚΑΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS.....	80

6.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	83
6.7 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ- ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	83
6.8 ΠΙΝΑΚΑΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS.....	85
6.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	87
6.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	87
6.11 ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	87

Κεφάλαιο 7^ο – ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

7.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	89
7.2 ΟΛΚΙΜΗ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ.....	91
7.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	92
7.4 ΚΑΘΑΡΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ.....	93
7.5 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ.....	93
7.6 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ ΣΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	94
7.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ F.R.P. ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ.....	95
7.8 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	95
7.9 ΠΙΝΑΚΑΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS.....	96
7.10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	98
7.11 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ.....	98
7.12 ΠΙΝΑΚΑΣ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS.....	99
7.13 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	101
7.14 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	101
7.15 ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	101

Κεφάλαιο 8^ο – ΘΛΙΨΗ

8.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΛΙΨΗ.....	103
8.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ ΣΤΗ ΘΛΙΨΗ.....	104
8.3 ΟΛΚΙΜΗ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ.....	104

8.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ F.R.P. ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΘΛΙΨΗ.....	106
8.5 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΛΙΨΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	106
8.6 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΛΙΨΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ.....	107
8.7 ΠΙΝΑΚΑΣ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΘΛΙΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS.....	109
8.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	111
8.9 ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΘΛΙΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS.....	111
8.10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	113
8.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	113
8.12 ΣΦΑΛΜΑΤΑ.....	114

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Κεφάλαιο 9^ο – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΑΠΟ F.R.P.

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	116
9.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΟΥ F.R.P.....	116
9.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ - ΔΟΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ F.R.P.....	117
9.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ.....	120
9.5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	123

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	125
-------------------	-----

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε θερμά τον Καθηγητή Δημ. Π. Παπαγεωργίου, εισηγητή της πτυχιακής μας, για το αμέριστο ενδιαφέρον με το οποίο περιέβαλε την παρούσα μελέτη και για τις ουσιαστικές και βασικές υποδείξεις του, που συνετέλεσαν στην επιτυχή διεκπεραίωσή της. Επίσης απευθύνουμε θερμές ευχαριστίες προς τον Δρ. Κ. Δημάκο, για την πραγματοποίηση ενός εκ των πειραμάτων στο εργαστήριό του καθώς και τους καθηγητές του εργαστηρίου Μηχανικής ΙΙ, Μητροπούλου Βάσω, Καππέ Ιωάννη και Κουλούρη Παναγιώτη, για τη βοήθειά τους στην πραγματοποίηση των πειραμάτων.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ‘ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΣ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ’ (FIBERGLASS)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η τεχνολογία των σύνθετων υλικών και ειδικότερα του fiberglass αναπτύχθηκε εντυπωσιακά τις τελευταίες δεκαετίες, έχοντας ως κύριο τομέα εφαρμογής τις θαλάσσιες κατασκευές. Η ανάπτυξη διαδικασιών παραγωγής χαμηλότερου κόστους σε συνδυασμό με την αύξηση της αξιοπιστίας των κατασκευών από fiberglass, την αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρει για λειτουργία των κατασκευών παρουσία βλάβης και τέλος την ανάπτυξη νέων τεχνικών για την πρόβλεψη της υποβάθμισης των ιδιοτήτων του, καθιστούν το fiberglass ιδανικό υλικό για την εξυπηρέτηση βασικών αναγκών της καθημερινής ζωής. Αυτή η ανάπτυξη αποτέλεσε και την αφορμή για τη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία, κατά την οποία θα εξεταστούν τα εξής σημεία: τεχνικές παρασκευής, προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού και η διαπίστωση των πρακτικών δυνατοτήτων του.

Η εργασία χωρίζεται σε τέσσερα μέρη. Το πρώτο μέρος είναι το ερευνητικό και σε αυτό αναφέρονται οι δυνατότητες, οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των συστατικών του σύνθετου fiberglass ξεχωριστά (δηλαδή των ινών γυαλιού, της πολυεστερικής ρητίνης και του καταλύτη), καθώς και του ίδιου του fiberglass. Το δεύτερο μέρος της εργασίας είναι το κατασκευαστικό και σε αυτό παρουσιάζεται η τεχνική παρασκευής (μια από τις πολλές υπάρχουσες), που χρησιμοποιήσαμε προκειμένου να κατασκευάσουμε έξι δοκίμια από fiberglass. Το τρίτο μέρος της πτυχιακής είναι το πειραματικό και

σε αυτό υπολογίζονται ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, μέσα από απλές καταπονήσεις στο εργαστήριο (εφελκυσμός, θλίψη, κάμψη). Ο τελικός στόχος της εργασίας παρουσιάζεται στο τέταρτο μέρος, το ειδικό, και είναι η διαπίστωση των δυνατοτήτων των δομικών στοιχείων από fiberglass και το κατά πόσο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το υλικό στην κατασκευή προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων, τα οποία θα μπορούν συναρμολογούμενα να δημιουργούν οικοδομικά έργα με μεγάλη ταχύτητα και σε μεγάλη έκταση, για κάλυψη επείγουσών αναγκών (π.χ. προσωρινή στέγαση πληθυσμού που επλήγη από φυσικές καταστροφές).

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ FIBERGLASS ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ FIBERGLASS (F.R.P.)¹⁻⁸

Η μαζική παραγωγή ινών γυαλιού τύπου fiberglass έγινε εφικτή μόνο με την έλευση καλής ποιότητας εργαλείων και μηχανημάτων, ωστόσο η τεχνική της κατασκευής ινών γυαλιού ήταν γνωστή από τα αρχαία χρόνια. Αντίθετα η πολυεστερική ρητίνη ως επεξεργάσιμο υλικό, πρωτοεμφανίστηκε στη διάρκεια της δεκαετίας του '30, ενώ ο συνδυασμός της με ίνες γυαλιού, ξεκίνησε πειραματικά στις αρχές της δεκαετίας του '40.

ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ

Οι αρχαίοι Φοίνικες και οι αρχαίοι Αιγύπτιοι ήταν δύο, από τους πολλούς πολιτισμούς στη διάρκεια της ιστορίας, που παρασκεύαζαν γυαλί και μάλιστα γνώριζαν τεχνικές παρασκευής γυαλιού σε ίνες. Συνδυάζοντας τις ίνες κατασκεύαζαν δοχεία και βάζα, κυρίως για διακοσμητικούς λόγους. Οι ικανότητες παραγωγής που είχαν, τους επέτρεπαν να κατασκευάζουν πολύ μικρές ποσότητες ινών κάθε φορά, ενώ οι ίνες που παρήγαγαν ήταν αρκετά χοντρές σε πάχος.

ΚΑΤΑ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΟΧΗ

Η πρώτη σύγχρονη τεχνική για την κατασκευή ινών γυαλιού, τύπου fiberglass, κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το 1836 στο Γάλλο Ignace Dubus - Bonnel, που ύφανε ίνες γυαλιού σε ειδικό τύπο αργαλειού.

Το 1870, ο John Player ανέπτυξε μια διαδικασία μαζικής παραγωγής νημάτων γυαλιού, χρησιμοποιώντας μια συσκευή που λειτουργούσε με ατμό, για να δημιουργήσει αυτό που ονομάστηκε mineral wool (=ορυκτό μαλλί). Το συγκεκριμένο υλικό χρησιμοποιήθηκε αποτελεσματικά ως μόνωση.

Το 1880 στον Herman Hammesfahr απονεμήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, για έναν τύπο υφάσματος αποτελούμενο από ίνες γυαλιού, που ήταν αναμεμειγμένες με ίνες μεταξίου. Το προϊόν ήταν αρκετά ανθεκτικό, ενώ καιγόταν και αρκετά δύσκολα.

Το 1893 ο Edward Drummond Libbey παρουσίασε στην Παγκόσμια Έκθεση Columbian (World's Columbian Exposition), ένα ύφασμα, το οποίο αποτελούνταν από ίνες γυαλιού με διάμετρο ίση με τη διάμετρο ινών μεταξίου.

ΚΑΤΑ ΤΟΝ 20^Ο ΑΙΩΝΑ

Μέχρι τον 20^ο αιώνα, η κατασκευή ινών γυαλιού παρουσίαζε δύο σημαντικά προβλήματα : ήταν πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν σε μικρές διαμέτρους (επομένως δεν ήταν εύκαμπτες), ενώ δεν υπήρχε αξιόπιστη μέθοδος μαζικής παραγωγής τους. Ωστόσο άφηναν πολλές υποσχέσεις ως υλικό και για το λόγο αυτό συνεχίζονταν οι έρευνες. Από το 1930, με πρωτοπόρο την εταιρία Owens – Illinois, η κατασκευή των ινών γυαλιού εξελίχθηκε περαιτέρω.

Οι πρώτες ίνες γυαλιού του τύπου που γνωρίζουμε σήμερα ως fiberglass έγιναν τυχαία. Το 1932, ο Dale Kleist , ένας ερευνητής της εταιρίας Owens – Illinois, προσπαθούσε να συνενώσει δύο πλάκες γυαλιού για να διαμορφώσει ένα αεροστεγές σφράγισμα. Αναπάντεχα, ένα ρεύμα συμπιεσμένου αέρα χτύπησε το λιωμένο γυαλί και δημιούργησε μια μορφή ινών γυαλιού. Ο διευθυντής παραγωγής της εταιρίας Russell Games Slayter, αντιλήφθηκε ότι η διαδικασία αποτελούσε μια εύκολη και απλή μέθοδο για την δημιουργία ινών γυαλιού, που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν είτε για μόνωση είτε για άλλες χρήσεις. Μέχρι το 1934 η εταιρία Owens – Illinois ερευνούσε την ιδέα της νηματοποίησης των ινών σε ένα υλικό (ύφασμα).

Το 1935, η Owens – Illinois και η εταιρία Corning Glass από τη Νέα Υόρκη, αποφάσισαν να συνεργαστούν για να αναπτύξουν το προϊόν περαιτέρω.

Μέχρι το 1936 οι ίνες που παρήγαν είχαν διάμετρο καρφιού. Τον Ιανουάριο του 1936, κατοχύρωσαν το προϊόν ως "Fiberglas" (με μόνο ένα s) και άρχισε η εμπορική παραγωγή του. Την 1-11-1938 οι δύο εταιρίες συγχωνεύθηκαν για να γίνουν η Owens – Corning Fiberglas Corporation, επιχείρηση η οποία υπάρχει μέχρι και σήμερα και είναι ακόμα η μεγαλύτερη παραγωγός εταιρία fiberglass στην αγορά (ενώ ειδικεύεται και σε υλικά μονώσεων). Το ίδιο έτος (1938) ο Russell Games Slayter, της Owens – Corning, εφηύρε αυτό που αποτελεί άμεσο πρόδρομο του σημερινού fiberglass και η εταιρία παρουσίασε ίνες γυαλιού σε πολύ λεπτά νήματα. Το 1941, πειραματιζόμενοι προχώρησαν στη θερμική επεξεργασία και στη βελτίωση του υφάσματος fiberglass. Η θερμική επεξεργασία προσέδωσε στο ύφασμα περισσότερη ελαστικότητα, και αποδείχθηκε απαραίτητη διαδικασία για να κατασταθούν οι ίνες fiberglass κατάλληλες για χρήση ως οπλισμός.

Το 1936, στον Carlton Ellis DuPont απονεμήθηκε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την παρασκευή πολυεστερικής ρητίνης. Το 1943, η αμερικανική εταιρία Cyanamid παρήγαγε τη σύνθεση Laminac, τον άμεσο πρόδρομο της σημερινής πολυεστερικής ρητίνης. Η Laminac αποτελούσε συνδυασμό δύο ρητινών, που απαιτούσε επιταχυντή και στερεοποιούνταν σε θερμοκρασία δωματίου. Η πολυεστερική ρητίνη είναι ένα υλικό, που μετά από έρευνες, έγινε κατανοητό ότι συνδυάζεται άψογα με τις ίνες γυαλιού – fiberglass. Το σύνθετο υλικό, που προκύπτει, είναι γνωστό ως 'πολυεστέρας οπλισμένος με ίνες γυαλιού' (F.R.P. ή απλώς fiberglass).

Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου Πολέμου και από το 1941, η παραγωγή της εταιρίας Owens – Corning πολλαπλασιάστηκε και άρχισε να παράγει σύνθετα υλικά από 'πολυεστέρα συνδυασμένο με ίνες γυαλιού', για πολεμική χρήση. Παρήγαγε μέρη αεροσκαφών και εσωτερικά τμήματα πλοίων και υποβρυχίων.

Μετά το τέλος του Πολέμου παρουσιάστηκε ανάγκη για εύρεση νέων τομέων εφαρμογής του σύνθετου fiberglass. Από το 1945 η Owens – Corning άρχισε να πειραματίζεται με την κατασκευή θαλάσσιων σκαφών εξ ολοκλήρου από fiberglass. Μέχρι τότε τα σκάφη κατασκευάζονταν από ξύλο και είχαν την

τάση να στραβώνουν, να τρυπούν, να ξεβάφουν, να προσελκύσουν σκουλήκια, βακτήρια και μύκητες. Η κατασκευή των σκαφών εξ ολοκλήρου από F.R.P., εξάλειψε όλα αυτά τα προβλήματα.

Το 1953 η Owens - Corning συνεργάστηκε με την General Motors για την κατασκευή του πρώτου αυτοκινήτου παραγωγής, εξ ολοκλήρου από 'πολυεστέρα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού', του πρώτου μοντέλου Chevrolet Corvette^{5,6}. Τα πλεονεκτήματά του ήταν το μικρό βάρος ($\frac{1}{3}$ των αντίστοιχων μεταλλικών), το οποίο αύξησε τις επιδόσεις, αλλά και το πολύ μικρό κόστος παραγωγής. Σύμφωνα με τους κατασκευαστές οι λόγοι που χρησιμοποίησαν το fiberglass, ήταν η εξοικονόμηση χρόνου στην παραγωγή και η ελευθερία σχεδιασμού που δίνει το συγκεκριμένο υλικό σε σχέση με τα μέταλλα.



CHEVROLET CORVETTE 1953





CHEVROLET CORVETTE 1953

Το 1964 το αεροσκάφος της γερμανικής εταιρίας Glasflügel : H – 301 Libelle ("Dragonfly")^{7,8} έλαβε γερμανικό και αμερικανικό πιστοποιητικό αεροσκαφών, ως το πρώτο αεροσκάφος κατασκευασμένο εξ ολοκλήρου από 'πολυεστέρα ενισχυμένο με ίνες γυαλιού', και το πρώτο που πέρασε σε μαζική παραγωγή. Αυτή η ιδιαίτερη εφαρμογή του fiberglass αποδεικνύει ακριβώς το πόσο ελαφρύ υλικό είναι – το συγκεκριμένο ανεμοπλάνο έχει τη δυνατότητα να πετάει για μεγάλο χρονικό διάστημα, απλώς επιπλέοντας στον αέρα.



DRAGONFLY

Specifications:

Length: 20.25 ft

Span: 49.2ft

Aspect Ratio

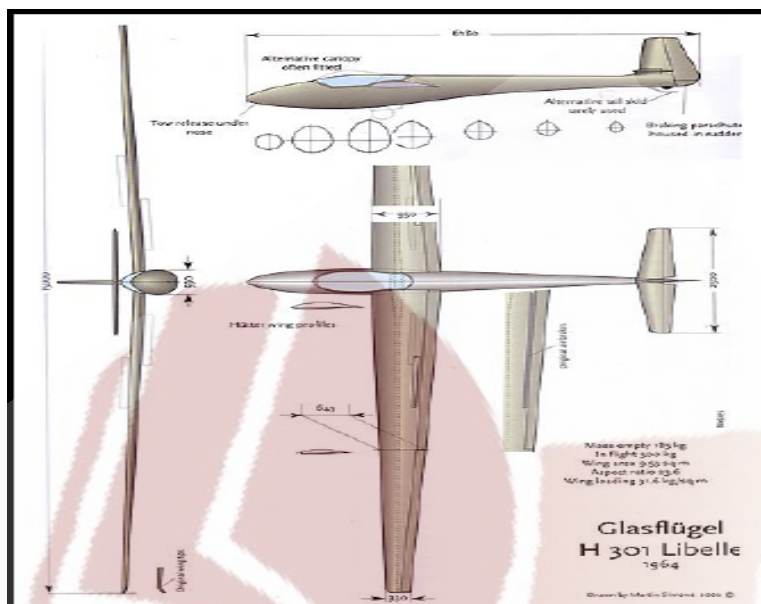
23.6

Empty Wt 397

lb.

Payload: 264 lb

Max Wt: 661 lb.



Σε όλη τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960, επεκτάθηκαν εντυπωσιακά οι εφαρμογές των ενισχυμένων από fiberglass πλαστικών. Μια από τις εφαρμογές ήταν η κατασκευή υπόγειων δεξαμενών και σωληνώσεων. Οι σωλήνες από fiberglass, παρέχουν ασφαλή και αποδοτική μεταφορά υγρών (νερού και αποβλήτων). Στα υπέρ τους καταμετρούνται το μικρό βάρος, η αντοχή στη διάβρωση, το ανταγωνιστικό κόστος σε σχέση με άλλα προϊόντα και η ευκολία στην εγκατάσταση τους. Το 1966 η εταιρία Armstrong Rubber Company παρουσίασε τα πρώτα ελαστικά αυτοκινήτου από fiberglass.

ΣΗΜΕΡΑ

Σήμερα συνδυάζοντας ίνες γυαλιού τύπου fiberglass με πολυμερή υλικά και την τελειοποίηση των διαδικασιών παραγωγής, έχει κατασταθεί εφικτή η κατασκευή πλήθους εφαρμογών που υπάρχουν σχεδόν σε κάθε σπίτι και οπουδήποτε αλλού. Τέτοιες εφαρμογές είναι από θαλάσσια σκάφη μέχρι αυτοκίνητα, από δεξαμενές πετρελαίου μέχρι σωληνώσεις και πισίνες, από επενδύσεις κεραιών μέχρι κιγκλιδώματα, από σκάλες μέχρι τοίχους. Η λίστα των χρήσεων του fiberglass είναι σχεδόν ατελείωτη και εμπλουτίζεται μέρα με τη μέρα.



Αquaglider – Υποβρύχιο Σκάφος από Fiberglass της Εταιρίας Fiberglass Sales, Inc.



Σκάλα Κατασκευασμένη από Fiberglass της Εταιρίας Fibrolux, Inc.



Έκθεση Ζωγραφικής σε Αγελάδες από Fiberglass στην Αθήνα – Οργανωμένη από το Υπουργείο Πολιτισμού (Cow Parade 2006 -'07)

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

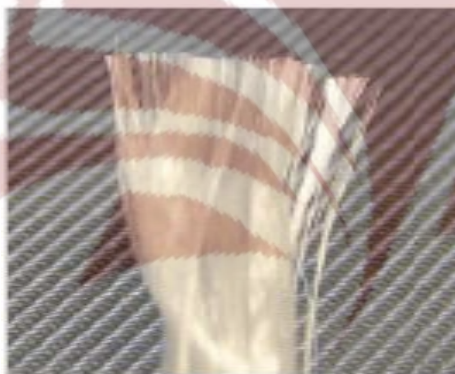
Στο ερευνητικό μέρος, εξετάζονται διαδοχικά οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά των δομικών συστατικών του σύνθετου F.R.P., δηλαδή των ινών γυαλιού, της πολυεστερικής ρητίνης και του καταλύτη. Επιπλέον παρουσιάζονται τεχνικές παρασκευής του σύνθετου F.R.P., που προκύπτει από το συνδυασμό των παραπάνω υλικών και τέλος μελετώνται οι ιδιότητες του, καθώς και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν.

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 1^ο – ΟΠΛΙΣΜΟΣ : ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ - FIBERGLASS

1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Με τον όρο fiberglass αναφερόμαστε κυριολεκτικά στις εξαιρετικά λεπτές ίνες γυαλιού, οι οποίες έχουν προέλθει από λιωμένο γυαλί και έχουν ψυχθεί σε μια άκαμπτη κατάσταση χωρίς να υποστούν κρυστάλλωση⁹. Χρησιμοποιούνται σαν οπλισμός σε πολυμερή υλικά γνωστά ως Fiberglass – Reinforced Polymers (ή Fiberglass – Reinforced Plastics).



ΔΕΣΜΗ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

1.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ - FIBERGLASS^{10,11}

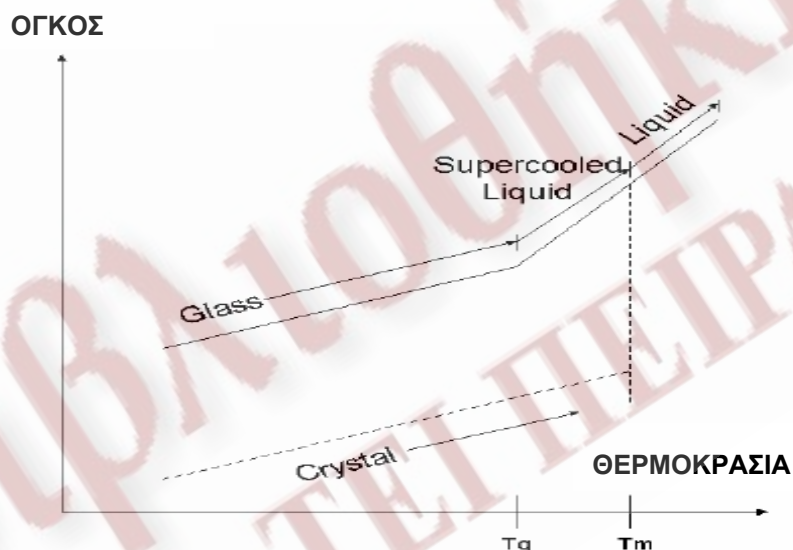
Το γυαλί ως υλικό έχει εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική και θλιπτική αντοχή, αλλά στη συνήθη στερεή (κρυσταλλική) μορφή του, αυτές οι ιδιότητες δεν είναι εύκολα εμφανείς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν φορτίζεται, τυχόν ρωγμές στην επιφάνεια του, θα αναγκάσουν το υλικό να ραγίσει και να αστοχήσει αρκετά πριν από το θεωρητικό σημείο θραύσης του.

Για να ξεπεραστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα, το γυαλί παράγεται σε μορφή ινών, έτσι ώστε, ακόμα και αν εμφανιστούν ρωγμές, να περιορίζονται σε ένα μικρό ποσοστό (ινών), ενώ το υπόλοιπο υλικό θα παραμένει θεωρητικά αναλλοίωτο. Κατά κάποιο τρόπο μια δέσμη ινών γυαλιού απεικονίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις βέλτιστες δυνατότητες του συγκεκριμένου υλικού. Επιπλέον διατηρούν τις ιδιότητες του γυαλιού, δηλαδή είναι κακοί αγωγοί του ηλεκτρισμού, δεν αποσυντίθενται, δεν συστέλλονται, δεν διαστέλλονται και δεν

καίγονται⁴. Εντούτοις, σημειώνουμε ότι οι ίνες μπορούν να φορτίζονται μόνο εφελκυστικά, παράλληλα στον άξονα τους (όπως ακριβώς και οι ίνες ενός σχοινιού).

Πάνω από το 90% των ινών¹⁰ που χρησιμοποιούνται ως οπλισμός σε κατασκευές είναι οι ίνες γυαλιού (fiberglass), αφού το γυαλί είναι υλικό φθηνό (το φθηνότερο από όλα τα άλλα είδη ινών που χρησιμοποιούνται ως οπλισμοί –άνθρακας, αραμίδιο), εύκολο στην παραγωγή και έχει υψηλή αντοχή και δυσκαμψία. Η μικρή πυκνότητά του, η ανθεκτικότητά του σε χημικά και η άριστη μονωτική του ικανότητα είναι μερικά από τα κύρια χαρακτηριστικά του.

Οι ίνες του γυαλιού παράγονται εύκολα από ακατέργαστα υλικά¹², που είναι διαθέσιμα σε απεριόριστες ποσότητες. Προέρχονται από λιωμένο γυαλί και έχουν ψυχθεί ακαριαία σε μια άκαμπτη κατάσταση, προκειμένου να μην υποστούν κρυστάλλωση. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η πορεία σχηματισμού του γυαλιού (κρυσταλλικού ή μη), συναρτήσει της θερμοκρασίας και του όγκου του.



ΟΙ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ FIBERGLASS ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΑΧΥΤΑΤΗ ΨΥΞΗ ΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ T_g .

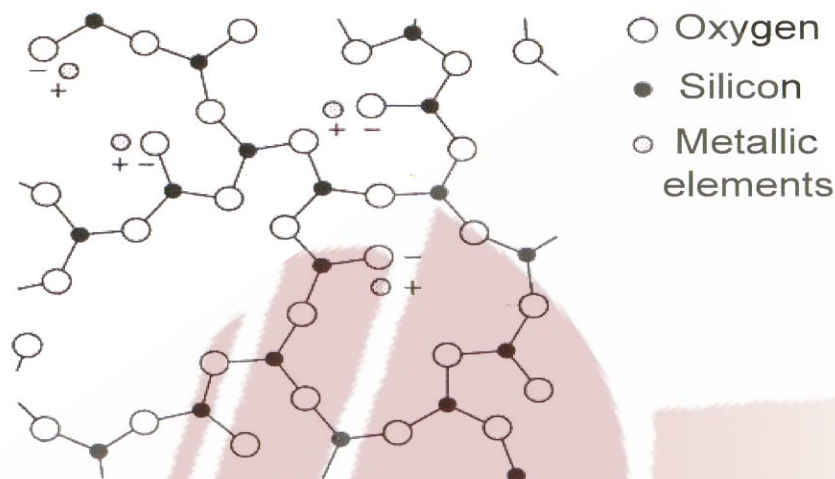
Από το διάγραμμα γίνεται φανερό ότι καθώς το υγρό γυαλί ψύχεται, παρατηρείται μείωση του όγκου του (συστέλλεται). Όταν φτάσει στη θερμοκρασία τήξης ή liquidus (T_m), παρουσιάζεται αξιοσημείωτη μείωση στο ποσοστό του

όγκου (συρρικνώνεται) και ταυτόχρονα αρχίζει η φάση της κρυστάλλωσης¹². Κατά τη φάση αυτή τα μόρια κλειδώνονται σε ακριβείς, επαναλαμβανόμενες και συμμετρικές μεταξύ τους θέσεις. Από το σημείο αυτό περαιτέρω μείωση της θερμοκρασίας αυξάνει το ποσοστό της κρυστάλλωσης. Μετά τη στερεοποίηση του γυαλιού, επιπρόσθετη μείωση της θερμοκρασίας, θα προκαλέσει πολύ μικρές αλλαγές στον όγκο του υλικού (ουσιαστικά αμετάβλητο).

Εάν δεν επιθυμούμε την πραγματοποίηση της κρυστάλλωσης (που επιτυγχάνεται στη θερμοκρασία T_m), και προχωρήσουμε σε ακόμα ταχύτερη μείωση της θερμοκρασίας, θα προκληθεί περαιτέρω συστολή των μορίων, με συνέπεια την υπερβολικά γρήγορη (ακαριαία) ψύξη (supercooled liquid). Στο διάγραμμα στην καμπύλη μη κρυσταλλικού σχηματισμού, παρατηρούμε ότι, στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης T_g , εμφανίζεται ξαφνική αλλαγή στην κλίση της καμπύλης, η οποία αποκαλείται συντελεστής της θερμικής επέκτασης. Σε αυτή τη θερμοκρασία το υγρό ρέει πολύ αργά, και συμπεριφέρεται περισσότερο σαν στερεό (παρά σαν υγρό). Μεγαλύτερη μείωση της θερμοκρασίας από το σημείο αυτό, θα έχει πολύ μικρές επιπτώσεις στον όγκο.

1.3 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ ΤΥΠΟΥ FIBERGLASS

Η χημική βάση των ινών γυαλιού (fiberglass) είναι η πυριτία (SiO_2). Σε καθαρή μορφή υπάρχει ως $(\text{SiO}_2)_n$. Δεν έχει καθαρό σημείο τήξης αλλά μαλακώνει στους 2000°C οπότε και αρχίζει να ευτελίζεται. Το μέτρο ελαστικότητας της πυριτίας είναι 69 GPa , η πυκνότητα της $2,60 \text{ g.cm}^{-3}$ και το ειδικό μέτρο ελαστικότητας της 27 GPa/g.cm^{-3} . Στην πολυμερή μορφή της υπάρχει ως SiO_4 , το οποίο είναι τετράεδρο με ένα άτομο πυριτίου στο κέντρο και τέσσερα άτομα οξυγόνου στις γωνίες. Σχηματίζει δίκτυα μοιράζοντας τα άτομα του οξυγόνου στο μόριο της.



ΜΟΛΙΑΚΗ ΔΟΜΗ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

Εκτός από την πυριτιά στην παραγωγή fiberglass χρησιμοποιούνται και άλλες πρώτες ύλες, διαφορετικές κάθε φορά, ανάλογα με τις ιδιότητες που απαιτούνται από το τελικό προϊόν. Τέτοιες πρώτες ύλες είναι φυσικά ορυκτά ή συνθετικές χημικές ουσίες όπως : ασβεστόλιθος, βόρακας, μαγνησίτης, νατριούχο πυρίτιο, αλουμίνα ή θραύσματα γυαλιού. Ο λόγος της παρουσίας των προσμίξεων στη σύνθεση είναι : για να διευκολύνουν την τήξη (νάτριο, ασβεστόλιθος), για να βελτιώσουν την αντίσταση σε χημικά του υλικού (βόρακας), για την ομογενοποίηση του μίγματος, ή για να βοηθήσουν στην απομάκρυνση αερίων προσμίξεων. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά των χημικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή του fiberglass.

ΤΥΠΟΣ ΙΝΩΝ	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	ZnO	TiO ₂	Zr ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
ΙΝΕΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ													
E - GLASS	52-56	-	12-15	21-23	0.4-4.0	-	0.2-0.5	-	0-1	ΙΧΝΟΣ	-	0.2-0.4	0.2-0.7
ΙΝΕΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΧΡΗΣΗΣ													
CR - GLASS	58.2	-	11.6	21.7	2	2.9	2.5	-	1	0.2	-	0.1	ΙΧΝΟΣ
D - GLASS	74.5	22	0.3	0.5	-	-	-	-	1	<1.3	-	-	-
S - GLASS	60-60.5	-	23-25	0-9	6-11	-	-	0-1	0-0.1	-	0.1	0-0.1	-
SILICA/QUARTZ	99.999	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ΠΟΣΟΣΤΑ ΠΡΟΣΜΙΞΕΩΝ % ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ FIBERGLASS

1.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΙΝΩΝ^{12,14-18}

Υπάρχουν δύο κύριες διαδικασίες παραγωγής ινών γυαλιού : η έμμεση και η άμεση. Και οι δύο ξεκινούν με τις πρώτες ύλες σε στερεά μορφή. Τα υλικά αφού ζυγιστούν, μεταφέρονται σε ένα συνδυαστικό σταθμό όπου θα υποστούν λεπτομερή ανάμιξη¹⁴⁻¹⁷. Στη σύγχρονη παραγωγή, η διαδικασία ανάμιξης είναι εντελώς αυτοματοποιημένη, με αυτόματες μονάδες ζύγισης και εσωτερικά αυτόματα συστήματα μεταφοράς των υλικών.

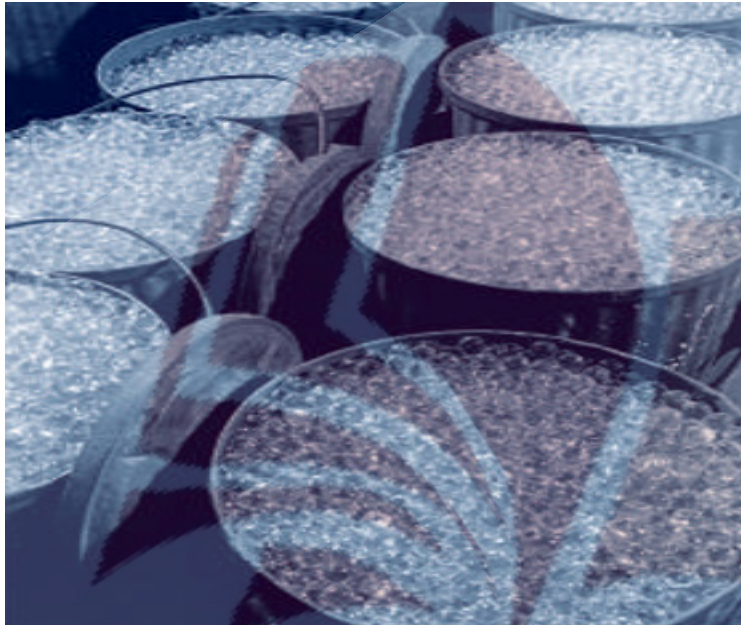


Ο επόμενος σταθμός των υλικών είναι οι φούρνοι, όπου θερμαίνονται στους 1600 °C και λειώνουν σχηματίζοντας μίγμα. Οι φούρνοι λειτουργούν είτε με ηλεκτρική ενέργεια είτε με ορυκτά καύσιμα ή συνδυασμό και των δύο. Η θερμοκρασία του μίγματος στους φούρνους, είναι απαραίτητο να κρατηθεί σταθερά πάνω από τους 1370 °C (ή 2500 °F) προκειμένου να κατασταθεί εφικτός ο σχηματισμός των ινών του γυαλιού. Από τη στιγμή αυτή αρχίζει η διαφοροποίηση των δύο διαδικασιών παραγωγής.

1.4.1 ΕΜΜΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ^{12,18}

Η έμμεση διαδικασία (marble melt process) χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση ινών ειδικής χρήσης, όπως για παράδειγμα οι ίνες υψηλής αντοχής. Σε αυτήν την διαδικασία, το λειωμένο υλικό, κόβεται και πλάθεται σε στερεούς βώλους (marbles), συνήθως 2 έως 3 εκατ. (0,8 έως 1,2 in.) σε διάμετρο. Η κατασκευή των σφαιρών αυτών προσφέρει έλεγχο της ροής του υλικού και διευκολύνει τον οπτικό έλεγχο του γυαλιού για ανεπιθύμητες προσμίξεις. Στη

συνέχεια, μεταφέρονται στο εργοστάσιο παρασκευής ινών, που μπορεί να βρίσκεται στην ίδια ή σε διαφορετική τοποθεσία, όπου θα λιώσουν ξανά και θα διαμορφωθούν σε ίνες γυαλιού.

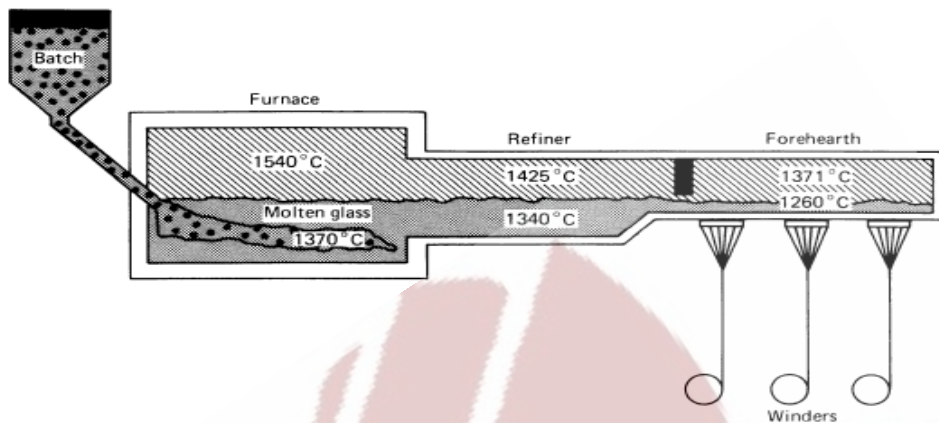


ΒΟΛΟΙ ΓΥΑΛΙΟΥ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΟΙ ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥΣ

1.4.2 ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ^{12,18}

Σχεδόν όλες οι συνεχείς ίνες γυαλιού παράγονται από την άμεση διαδικασία διαμόρφωσης (direct process), κατά την οποία το λιωμένο γυαλί από το φούρνο, οδηγείται κατευθείαν σε ειδικούς δακτυλίσκους.

Οι φούρνοι παραγωγής fiberglass διαιρούνται, γενικά, σε τρία τμήματα όπως φαίνεται στην επόμενο σχεδιάγραμμα. Αρχικά τα υλικά εισέρχονται στο φούρνο (furnace) για τήξη, απομάκρυνση αέριων προσμίξεων και ομογενοποίηση. Κατόπιν, το λειωμένο γυαλί ρέει σε μηχανές ραφινάρισματος (refiners), όπου η θερμοκρασία του γυαλιού πέφτει από τους 1370 °C (2500 °F) στους 1340 °C (2444 °F). Έπειτα, μεταφέρεται στο τμήμα που βρίσκεται ακριβώς επάνω από τους σταθμούς διαμόρφωσης ινών (forehearth), όπου η θερμοκρασία μειώνεται περισσότερο στους 1260 °C (2300 °F). Οι τρεις τομείς παρουσιάζονται παραστατικά στο επόμενο σχεδιάγραμμα. Σημειώνουμε ότι το σχεδιάγραμμα μπορεί να διαφέρει, ανάλογα με τις εκάστοτε εγκαταστάσεις.



ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ

Το τελευταίο τμήμα των φούρνων είναι το σπουδαιότερο της διαδικασίας παραγωγής ιών. Στο συγκεκριμένο τομέα, το λιωμένο γυαλί, καθώς ρέει από τους φούρνους μέσω των δακτυλίων και των στομίων (ακροφύσιων) που αυτοί περιέχουν, σχηματίζει τις ίνες. Οι δακτύλιοι και τα ακροφύσια είναι συνήθως κατασκευασμένα από κράμα πλατίνας και ρόδιου για αντοχή. Κάθε δακτύλιος μπορεί να περιλαμβάνει μέχρι και αρκετές χιλιάδες μεμονωμένα ακροφύσια (από 400 έως 8000 στην τυπική παραγωγή), με κάθε ένα να έχει διάμετρο από 0,793 έως 3.175 χιλ. (0.0312 έως 0.125 in.). Η θερμοκρασία του δακτυλίου, ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια, προκειμένου να διατηρείται σταθερό το ιξώδες του γυαλιού κατά το σχηματισμό των ιών.



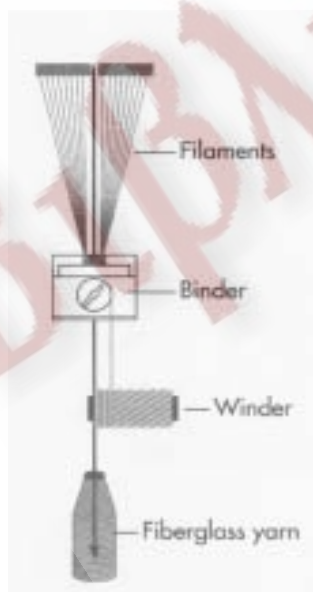
Το σημαντικότερο στην κατασκευή των ακροφυσίων, είναι το πάχος των τοιχωμάτων στην περιοχή εξόδου. Σήμερα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να έχουν ελάχιστο πάχος στην έξοδο. Όσο μικρότερα είναι τα τοιχώματα του

στομίου στο συγκεκριμένο σημείο, τόσο ταχύτερα θα ρέει προς τα κάτω το υλικό, που διέρχεται από αυτά (και όχι προς το πλάι).

Η λιωμένη μάζα καθώς ρέει έξω από τα ακροφύσια, ψύχεται ακαριαία, για να αποτραπεί η κρυστάλλωση του γυαλιού και με αυτόν τον τρόπο διαμορφώνονται οι ίνες του fiberglass. Η διαδικασία είναι γνωστή και ως νηματοποίηση (fiberization). Οι χαρακτηριστικές διαμέτροι των ινών, που προκύπτουν κυμαίνονται από 1 έως 25 μm .

1.5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΕΧΩΝ ΙΝΩΝ (ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ)^{14,15}

Οι μεμονωμένες ίνες (filaments), που εξέρχονται από τα ακροφύσια, τραβιούνται από ειδικές μηχανικές στρόφιγγες (winders). Οι στρόφιγγες περιστρέφονται με ταχύτητα μέχρι και 61 m/s (ή 200 ft/s). Η ταχύτητα περιστροφής είναι κατά πολύ υψηλότερη από την ταχύτητα ροής - εξόδου των ινών από τα ακροφύσια. Προκαλείται με τον τρόπο αυτό τέντωμα στις ίνες, που έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαμέτρου τους. Στη συνέχεια στην επιφάνειά τους αλείφεται ειδική χημική επίστρωση (chemical binder) που προστατεύει τις ίνες κατά την επεξεργασία τους στη διάρκεια των επόμενων διαδικασιών. Έπειτα τα νήματα υφαίνονται πάνω σε σωλήνες και διαμορφώνονται σε μασούρια (yarns). Η διαδικασία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



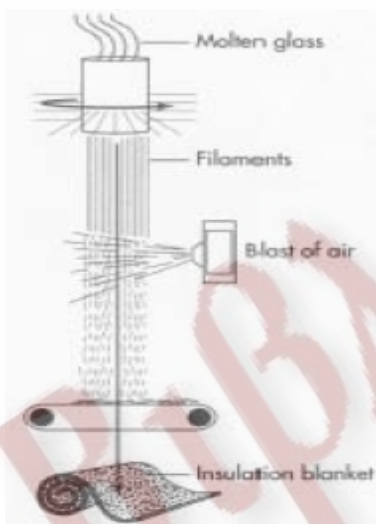
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΝΕΧΩΝ ΙΝΩΝ¹⁴

1.6 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΙΝΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ^{14,15,19}

1.6.1 1^η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο προκύπτει η δημιουργία ινών μικρού μήκους (μεγέθους καρφίτσας). Καθώς τα νήματα διέρχονται από τα ακροφύσια δέχονται ριπές ψυχρού αέρα, οι οποίες εκτός από τη στερεοποίηση των νημάτων προκαλούν και σπάσιμο (κοπή) των νημάτων σε μήκη 20 – 38 mm. Στη συνέχεια αφού προστίθεται επάλειψη λιπαντικής ουσίας στην επιφάνειά τους, πέφτουν σε ειδική ερπύστρια, πάνω στην οποία σχηματίζουν λεπτό ιστό (χνουδωτή μάζα). Ο ιστός τραβιέται και οι χαλαρωμένες ίνες υφαίνονται σε σκέλος (τόπια). Αυτό το σκέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατευθείαν για μόνωση, ή να προωθηθεί για περαιτέρω επεξεργασία.

Κατά την περαιτέρω επεξεργασία θα ψεκαστεί με ειδική επίστρωση, θα συμπιεστεί στο επιθυμητό πάχος, και θα τοποθετηθεί σε κλίβανο. Η θερμότητα ενεργοποιεί τον σύνδεσμο, και θα προκύψει μια πλάκα (άκαμπτη ή σχεδόν άκαμπτη). Η πορεία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

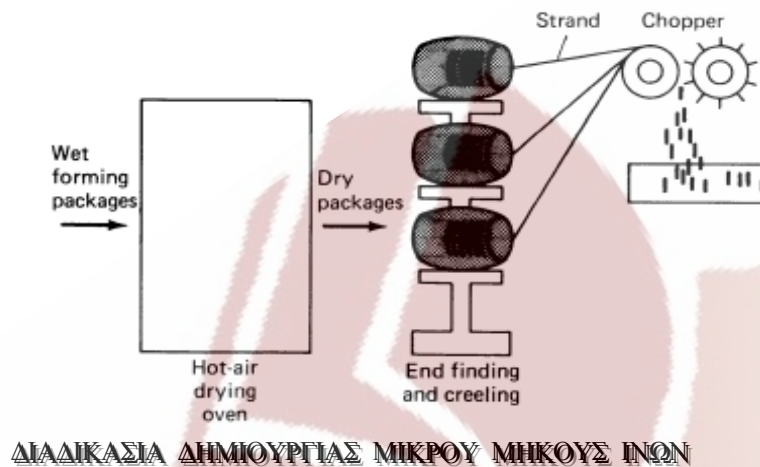


ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΙΝΩΝ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ¹⁴

1.6.2 2^η ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Εναλλακτική μέθοδος αποτελεί η διαδικασία κατά την οποία το συνεχές νήμα, αντί να συλλεχθεί σε μασούρι, τεμαχίζεται σε κοντά μήκη και να μαζεύεται σε κουβάρια (creels). Τα κουβάρια τραβιούνται από ειδικές μηχανές

και τα νήματά τους κόβονται σε συγκεκριμένα μήκη. Μετά την επάλειψη με ειδική κολλητική επίστρωση (binder) σχηματίζουν τα υφάσματα mat. Η πορεία παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.

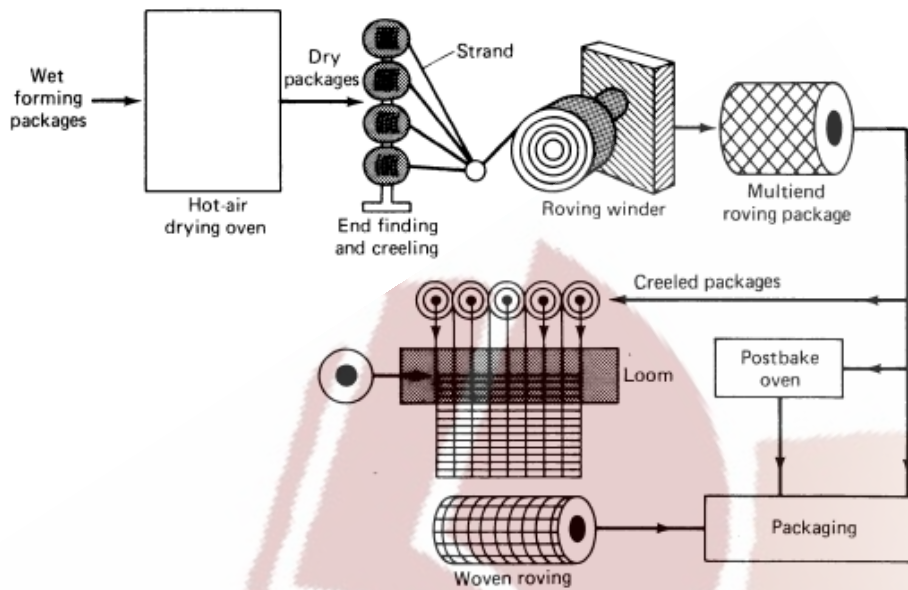


ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΙΝΩΝ

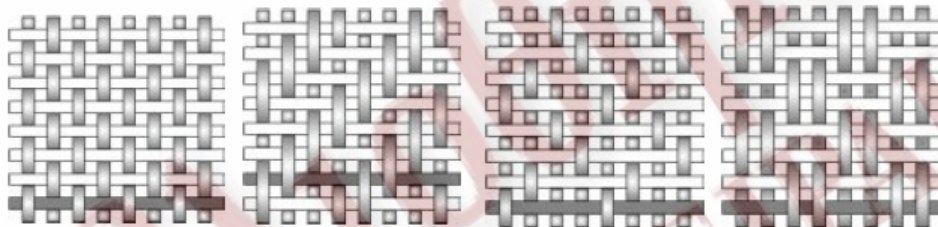
1.7 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ – FIBERGLASS¹⁹

Οι ίνες που δημιουργούνται από την κύρια διαδικασία, έχουν συνήθως μεγάλο μήκος και διατίθενται σε μορφή νημάτων (τυλιγμένων σε κουβάρια), σε μορφή υφάσματος (με ίνες σε δύο συνήθως διευθύνσεις) και σε μορφή ταινιών (πλάτους μερικών εκατοστών), αλλά μπορεί να χρησιμοποιούνται και σε μικρά μήκη, διασκορπισμένες σε τυχαίες διευθύνσεις.

i. Το woven roving (τόπι από υαλόπλεγμα) παράγεται με τη συλλογή δεσμών ινών γυαλιού (fiberglass) σε μασούρια. Στη συνέχεια τα μασούρια τοποθετούνται σε ειδική υποδοχή (creel). Έπειτα οι άκρες τους πλέκονται ταυτόχρονα (υπό ένταση) με τη βοήθεια ειδικής συσκευής (roving winder). Ο ρυθμός με τον οποία γίνεται η πλέξη έχει πολύ μεγάλη σημασία για την ποιότητα των ινών και τη σταθερότητα του προϊόντος. Η παραγωγή (σε m/kg), του τελικού προϊόντος καθορίζεται από τον αριθμό των άκρων (μασουριών), που εισάγουμε ταυτόχρονα και την δυνατότητα της συσκευής. Η διαδικασία παρουσιάζεται στο επόμενο σχεδιάγραμμα.

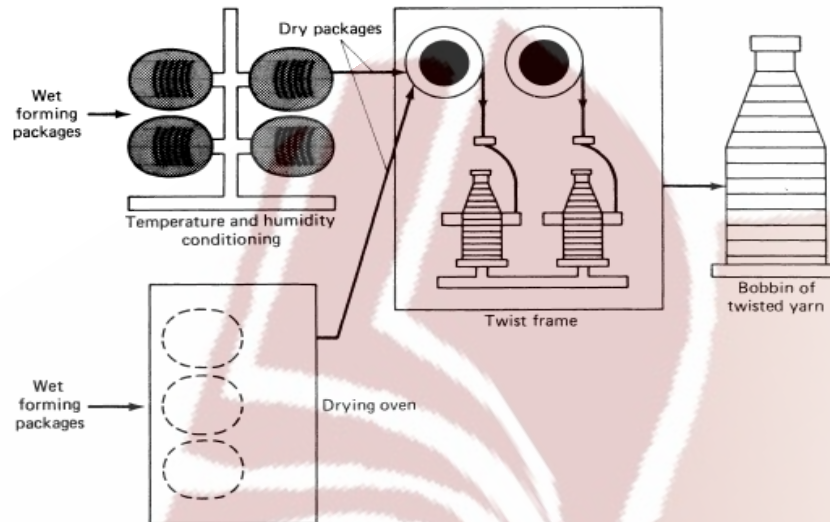


Το woven roving είναι διαθέσιμο σε μονοαξονική, διαξονική (η πιο συνήθης) ή πολυαξονική μορφή. Επιπλέον είναι διαθέσιμες διαφορετικές μορφές πλέξης των ινών (μεταξύ τους). Προορίζεται για πολλές εφαρμογές, αλλά η κυρία εφαρμογή του είναι στην παρασκευή F.R.P. και συγκεκριμένα στην διαδικασία χειρονακτικής εμπότισης ινών με τη ρητίνη. Στα επόμενα τέσσερα σχέδια παρουσιάζονται οι πιο χαρακτηριστικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες μορφές²⁰.



ii. Τα υφαντικά νήματα (textile yarns) παράγονται από εξαιρετικά λεπτά και καλής ποιότητας μασούρια από fiberglass, τα οποία έχουν αποξηρανθεί σε κλίβανους, απουσία αέρα. Η διαδικασία απαιτεί τη συστροφή δύο ή περισσότερων μασουριών μεταξύ τους σε ένα βαρύτερο μασούρι και προβλέπει την εκ νέου συστροφή τους σε φορά αντίθετη από την αρχική. Οι δύο τύποι συστροφών που χρησιμοποιούνται είναι γνωστές ως τύπου S και Z, γράμματα τα οποία δηλώνουν τη φορά (δεξιόστροφη ή αριστερόστροφη). Γενικά ισχύει ότι νήματα που έχουν συστραφεί σε μασούρια με φορά τύπου S, χρειάζονται και μια συστροφή τύπου Z προκειμένου να δώσουν ένα

ισορροπημένο νήμα (και το αντίστροφο). Τα παραπάνω είναι πρωταρχικής σημασίας προκειμένου να μπορεί να διασφαλιστεί η ακεραιότητα των νημάτων, και κατ' επέκταση και οι ιδιότητές τους. Η διαδικασία συστροφής παρουσιάζεται στο επόμενο σχεδιάγραμμα.



iii. Το fiberglass mat μπορεί να παραχθεί τόσο από τη διαδικασία παραγωγής συνεχών ινών (continuous) όσο και από αυτή ινών μικρού μήκους (short fibers). Ο σχηματισμός του mat από ίνες μικρού μήκους απαιτεί την εφαρμογή (επάλειψη) ειδικής συγκολλητικής επίστρωσης στην επιφάνεια των ινών. Αντιθέτως το mat από συνεχείς ίνες δεν απαιτεί επίστρωση, εξαιτίας της μηχανικής ύφανσης των ινών που επιτυγχάνεται από ειδικές συσκευές.

1.8 ΕΙΔΙΚΕΣ ΠΡΟΣΤΑΤΕΥΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΡΩΣΕΙΣ ΙΝΩΝ^{9,18,19,21}

Το συγκεκριμένο βήμα (εκτός από την επιλογή της αρχικής σύνθεσης του μίγματος), διαφοροποιεί πρωτίστως τα προϊόντα ινών fiberglass μεταξύ τους και είναι υπεύθυνο για την προσαρμογή των ιδιοτήτων των ινών σε συγκεκριμένες απαιτήσεις της τελικής χρήσης.

Κατά την έξοδό τους από τα ακροφύσια, οι ίνες διέρχονται από μια ειδική διάταξη εφαρμογής επικαλύψεων (applicator στο παρακάτω σχεδιάγραμμα), η οποία περιστρέφεται συνεχώς, και στην επιφάνειά τους εφαρμόζονται ειδικές χημικές επιστρώσεις (binder = σύνδεσμος).



Είδη επιστρώσεων που εφαρμόζονται στις ίνες είναι :

- I. Λιπαντικές επιστρώσεις, που προστατεύουν τις ίνες κατά τη διάρκεια της εργοστασιακής επεξεργασίας τους και αποτρέπουν τη λείανση της επιφάνειας των ινών από τη μεταξύ τους τριβή (αποτέλεσμα ανεπιθύμητο, καθώς προκαλεί υποβάθμιση της αντοχής των ινών και της συμβατότητάς τους με τη ρητίνη).
- II. Ειδική αντιστατική επίστρωση, που αποτελείται από δύο συστατικά: το πρώτο που ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εμφάνισης στατικού ηλεκτρισμού, και το δεύτερο που χρησιμεύει ως σταθεροποιητικός και ανασταλτικός παράγοντας έναντι της διάβρωσης.

Η **μορφή της επίστρωσης** μπορεί να είναι :

A. Προσωρινή, σε υφή γαλακτώματος, που θα αφαιρεθεί στη συνέχεια με θέρμανση ή την εφαρμογή κάποιου κατάλληλου χημικού και θα αντικατασταθεί με άλλη επίστρωση - μόνιμη, που θα λειτουργεί ως παράγοντας συμβατότητας μεταξύ του γυαλιού και της ρητίνης.

B. Μόνιμη, που θα διατηρηθεί και κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και κατά τη διάρκεια της διαπτόσης των ινών με ρητίνη, καθώς λειτουργεί ως παράγοντας συμβατότητας μεταξύ τους (γνωστή ως τελείωμα).

1.9 ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΩΝ ΙΝΩΝ²²

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής του fiberglass, συλλέγεται υλικό από τα διάφορα στάδια, για να ελεγχθεί η ποιότητά του, περιλαμβανομένων του μίγματος που λιώνει στους φούρνους, του λιωμένου γυαλιού προτού αυτό βγει από τα ακροφύσια, ινών καθώς βγαίνουν από τα ακροφύσια και τελικών εμπορικών προϊόντων fiberglass. Το λιωμένο γυαλί και οι ίνες του fiberglass αναλύονται για τον έλεγχο της χημικής τους σύστασης και την παρουσία ρωγμών, με τη βοήθεια περίπλοκων συσκευών ανάλυσης και μικροσκοπίων. Ο έλεγχος της διαμέτρου γίνεται με δοκιμή διέλευσης ινών από κόσκινα διαφορετικού μεγέθους. Το τελικό προϊόν ελέγχεται για το πάχος του μετά τη συσκευασία του σύμφωνα με τους κανονισμούς. Οποιαδήποτε απόκλιση στα προβλεπόμενα αποτελέσματα φανερώνει υποβαθμισμένη ποιότητα του προϊόντος.

1.10 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ^{13,23,24}

Οι ίνες του γυαλιού ταξινομούνται αναλόγως, με βάση τη διάμετρο, το μήκος κοπής (βασικό μήκος), την περιεκτικότητά τους σε υγρασία, και τη χημική συμπεριφορά τους.

1.10.1 ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΙΝΩΝ - ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΝΗΜΑΤΩΝ

Η συνηθισμένη πρακτική στην βιομηχανία ινών γυαλιού τύπου fiberglass είναι να αναφερόμαστε σε συγκεκριμένες διαμέτρους νημάτων με ένα αντίστοιχο γράμμα του λατινικού αλφαβήτου, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα της επόμενης σελίδας.

Η διάμετρος των ινών επηρεάζεται από τη θερμοκρασία των δακτυλίων σχηματισμού, από το ιξώδους του γυαλιού και την πίεση πάνω από το δακτύλιο. Τέλος η οριστική διάμετρος των ινών, καθορίζεται από τη συσκευή λήψης που χρησιμοποιείται.

ΓΡΑΜΜΑ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΙΝΑΣ	
	μm	10 ⁻⁴ in.
AA	0.8-1.2	0.3-0.5
A	1.2-2.5	0.5-1.0
B	2.5-3.8	1.0-1.5
C	3.8-5.0	1.5-2.0
D	5.0-6.4	2.0-2.5
E	6.4-7.6	2.5-3.0
F	7.6-9.0	3.0-3.5
G	9.0-10.2	3.5-4.0
H	10.2-11.4	4.0-4.5
J	11.4-12.7	4.5-5.0
K	12.7-14.0	5.0-5.5
L	14.0-15.2	5.5-6.0
M	15.2-16.5	6.0-6.5
N	16.5-17.8	6.5-7.0
P	17.8-19.0	7.0-7.5
Q	19.0-20.3	7.5-8.0
R	20.3-21.6	8.0-8.5
S	21.6-22.9	8.5-9.0
T	22.9-24.1	9.0-9.5
U	24.1-25.4	9.5-10

ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΙΝΩΝ FIBERGLASS

Οι λεπτότερες ίνες με διάμετρο από το γράμμα D έως το G χρησιμοποιούνται στην κατασκευή υφασμάτων από fiberglass. Ως οπλισμός συμβατικών πλαστικών χρησιμοποιούνται ίνες με διάμετρο από το γράμμα G έως το T.

1.10.2 ΤΥΠΟΙ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ^{13,25-28}

Οι ίνες γυαλιού χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις χαμηλού κόστους γενικής χρήσης και τις ακριβότερες ειδικής χρήσης. Σήμερα πάνω από το 90% της παραγωγής είναι ίνες γενικής χρήσης, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό είναι ίνες ανώτερης ποιότητας και ειδικών χρήσεων.

Ο πρώτος τύπος γυαλιού, που παράχθηκε σε ίνες, ήταν οι ίνες γυαλιού τύπου A, με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια και καλές αντιστάσεις σε χημικά.

Ο δεύτερος τύπος ινών που δημιουργήθηκε ήταν το γυαλί – E. Περιέχει σχετικά πολύ μικρή ποσότητα αλκαλίων (< 2%) και τα κυριότερα συστατικά του, είναι το αλουμίνιο και το βόριο. Το γράμμα E χρησιμοποιήθηκε διότι αρχικά προοριζόταν για ηλεκτρικές εφαρμογές (μόνωση). Η εταιρία Owens – Corning πρόσφατα παρουσίασε γυαλί τύπου E, φιλικό προς το περιβάλλον, χωρίς βόριο (προκειμένου να μην εκπέμπεται κατά τη διαδικασία παραγωγής). Σήμερα το γυαλί – E κατέχει το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ινών γενικής χρήσεως και χρησιμοποιείται κυρίως ως οπλισμός ρητινών.

Το γυαλί – S βασίζεται σε σύνθεση μαγνησίου και αλουμινίου και είναι μια μορφή ινών με υψηλές αντοχές, μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και χρησιμοποιείται κυρίως όταν είναι επιθυμητή η εφελκυστική αντοχή (40 – 70 % υψηλότερη από το γυαλί – E).

Το γυαλί – C δημιουργήθηκε για να αντιστέκεται σε διαβρωτικό περιβάλλον από χημικά, και ειδικότερα σε αυτά που απειλούν το γυαλί – E. Χρησιμοποιείται σε σύνθετα υλικά που περιέχουν ή έρχονται σε επαφή με οξέα.

Το γυαλί – AF βασίζεται σε σύνθεση αλκαλίου και βόριου και έχει χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή υφασμάτων ασυνεχούς τύπου ινών, που βρίσκουν ευρύτατη εφαρμογή σε θερμικές και ακουστικές μονώσεις.

Το γυαλί – Z (ή AR) είναι σύνθεση με μεγάλη αντοχή σε αλκαλικό περιβάλλον, όπως αυτό του σκυροδέματος.

Τα γράμματα στην ονομασία των περισσότερων ινών (π.χ. το γράμμα E στο γυαλί – E) υπονοούν τις ειδικές ιδιότητες που έχουν. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι ονομασίες και οι ιδιότητες των κυριοτέρων τύπων :

Γράμμα ονομασίας	Ιδιότητα ή Χαρακτηριστικό Ινών
E, electrical	Χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα
S, strength	Υψηλή αντοχή
C, chemical	Ανθεκτικότητα σε χημικά
M, modulus	Ακαμψία
A, alkali	Υψηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια
D, dielectric	Μικρή διηλεκτρική σταθερά

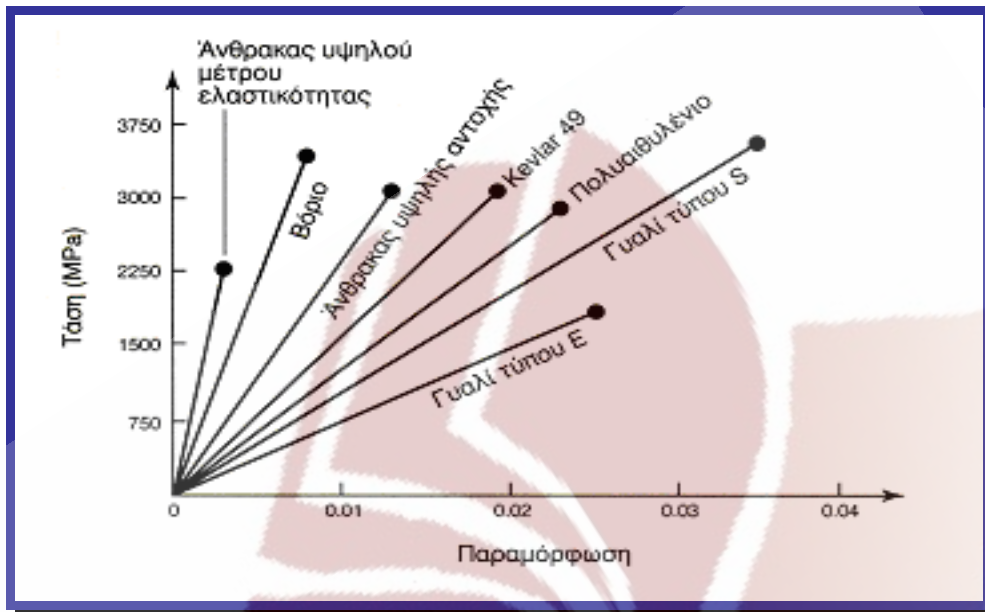
1.11 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ^{29,30}

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται ορισμένες τυπικές ιδιότητες για διάφορους τύπους ινών γυαλιού, συγκρινόμενες με τις ιδιότητες άλλων ινών (αραμιδί, άνθρακας).

Ίνες	Πυκνότητα (kg/m ³)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης (%)
Γυαλί					
E	2540	72-75	0.25	3500	4.8
Z	2270	70-76	0.25	2500-3500	3.0-4.6
S2	2440	85-88	0.25	4600	5.0
R	2500	80	0.25	2500-4400	5.0
Καθαρή SiO ₂	2200	72	0.25	3500-8800	5.0
Αραμιδί					
Κέβλαρ 49	1440	125	0.32	3500	2.9
Twaron	1450	127	0.32	3500	2.5
Κέβλαρ 29	1450	65	0.32	3500	4.0
Άνθρακας					
Υψηλού E	1900	380	0.35	2100	0.6
Υψηλής <i>f</i> _i	1800	230	0.35	2700	1.3

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες εφελκυστικής τάσης – παραμόρφωσης, για τις ίνες γυαλιού καθώς και για ίνες άλλων υλικών. Χαρακτηριστικό των ινών αυτών είναι η ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους (και η μηδενική πλαστική συμπεριφορά). Επιπλέον ισχύει

ότι όσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της καμπύλης τόσο μεγαλύτερη είναι η ακαμψία του υλικού.



Τέλος στον επόμενο πίνακα βαθμολογούνται τα κύρια χαρακτηριστικά των ινών fiberglass, συγκρινόμενα με ίνες άλλων υλικών. Το γράμμα A φανερώνει ότι το υλικό παρουσιάζει εξαιρετική συμπεριφορά στη συγκεκριμένη ιδιότητα, το B μέτρια συμπεριφορά και το C κακή.

ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΑΡΑΜΙΔΗ	ΑΝΘΡΑΚΑΣ	ΓΥΑΛΙ
ΥΨΗΛΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	B	A	B
ΥΨΗΛΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ	B	A	C
ΥΨΗΛΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	C	A	B
ΥΨΗΛΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	B	A	C
ΥΨΗΛΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	C	A	B
ΥΨΗΛΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΚΑΜΨΗΣ	B	A	C
ΥΨΗΛΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ	B	A	A
ΜΙΚΡΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ	A	B	C
ΥΨΗΛΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	B	A	C
ΥΨΗΛΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΚΑΥΣΗ	A	C	A
ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ	A	C	B
ΥΨΗΛΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ	B	C	A
ΧΑΜΗΛΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ	A	A	A
ΧΑΜΗΛΟ ΚΟΣΤΟΣ	C	C	A

1.12 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΩΝ ΓΥΑΛΙΟΥ²⁸

Ο ρόλος των ινών γυαλιού, ως οπλισμός, σε σύνθετα υλικά είναι κρισιμότερος, διότι αυτές προσδίδουν τις μηχανικές ιδιότητες στο σύνθετο υλικό, καθώς αναλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της φόρτισης.

Οι τέσσερις κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν τη συμβολή των ινών στα σύνθετα υλικά είναι οι εξής :

- Οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των ίδιων των ινών του γυαλιού.
- Η συμβατότητα των επιφανειών της ίνας και της ρητίνης.
- Το ποσοστό των ινών στο σύνθετο.
- Ο προσανατολισμός των ινών.



Κεφάλαιο 2^ο – ΜΗΤΡΑ : ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ

2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Με τον όρο μήτρα αναφερόμαστε στο στερεό υλικό, που περιβάλλει τις ίνες (τον οπλισμό), και τις συγκρατεί στην επιθυμητή θέση, τις προστατεύει από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και μεταφέρει φορτία μεταξύ των ινών.

2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΗΤΡΑΣ³⁰

Η μήτρα αναλαμβάνει αμελητέο ποσοστό του φορτίου που καταπονεί το σύνθετο, αλλά ο ρόλος της είναι πολύ σημαντικός και έγκειται στα εξής :

- Συγκρατεί τις ίνες στην επιθυμητή διεύθυνση και θέση.
- Εξασφαλίζει την μεταφορά των φορτίων στις δύσκαμπτες ίνες, με τις κατάλληλες μηχανικές ιδιότητες της.
- Προστατεύει τις ίνες από εξωτερικούς παράγοντες που μπορεί να τις φθείρουν.
- Καθορίζει ορισμένες από τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών (διατμητική, θλιπτική αντοχή κάθετα στην διεύθυνση των ινών).

2.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ ΜΗΤΡΑΣ^{31,32,34}

Η επιλογή του υλικού από το οποίο θα παρασκευαστεί η μήτρα εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής που απαιτείται¹⁰. Το υλικό της μήτρας μπορεί να είναι από μέταλλο, πολυμερές, άνθρακα ή κεραμικό. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή^{2,6} (ρητίνες) είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται περισσότερο σαν υλικά μήτρας και τα πλέον φθηνότερα.

2.4 ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ - ΡΗΤΙΝΕΣ^{31,34,34}

Οι ρητίνες είναι μια κατηγορία οργανικών πολυμερών ουσιών, είτε φυσικών είτε συνθετικών στην προέλευση, που έχουν γενικά, μεγάλα μοριακά βάρη, και η δομή τους σχηματίζεται επαναλαμβάνοντας χημικές ενώσεις - μονάδες (τα μονομερή).

Είναι υλικά που μορφοποιούνται εύκολα και παρασκευάζονται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις στα μέτρα μας, έτσι ώστε να συνδυάζουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως : τη δυνατότητα δημιουργίας προϊόντων πολύπλοκης γεωμετρίας, την οπτική διαφάνεια, χαμηλή πυκνότητα, καλές μηχανικές ιδιότητες και συχνά μικρό κόστος .

Στα μειονεκτήματά τους συγκαταλέγονται τα εξής : δεν είναι δυνατή η χρήση τους σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες, η χρήση τους επιφυλάσσει μεγάλους κινδύνους ρύπανσης του περιβάλλοντος (πρόβλημα ανακύκλωσης) και τέλος ένας μεγάλος αριθμός πολυμερών, που παράγονται με πρώτη ύλη το πετρέλαιο, βρίσκεται σε άμεση εξάρτηση από την τιμή και την πολιτική του πετρελαίου στις διάφορες χώρες (ΟPEC) - χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι δεν ισχύει το ίδιο με την παραγωγή άλλων ανταγωνιστικών υλικών.

Οι περισσότερες ρητίνες, που διατίθενται για επεξεργασία, είναι σε υγρή μορφή. Χρησιμοποιούνται, κυρίως, ως μήτρες ινών. Όταν καταλύονται, μέσω μιας διαδικασίας πολυμερισμού¹, μεταβαίνουν από την υγρή στην στερεή μορφή. Αρχικά παράγεται μια ουσία (η ρητίνη) αποτελούμενη από αλυσίδες μακρομορίων^{2,6} και ακολούθως οι αλυσίδες αυτές συνδέονται διασταυρούμενες μεταξύ τους με τη βοήθεια καταλύτη, σε θερμοκρασία δωματίου ή υψηλότερη (και μερικές φορές με εφαρμογή επιπρόσθετης πίεσης). Η στερεοποιημένη ρητίνη και ο οπλισμός τους (οι ίνες), μας παρέχουν ένα σύνθετο υλικό του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες υπερβαίνουν αυτές των επιμέρους συστατικών.

2.4.1 ΕΙΔΗ ΡΗΤΙΝΩΝ³⁵

- Πολυεστερικές ρητίνες
- Βινυλεστερικές
- Εποξειδικές
- Ακρυλικές
- Φαινολικές
- Πολυουρεθάνες
- DCPD
- Οξέα ΗΕΤ

2.4.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΡΗΤΙΝΗΣ³¹

Οι πολυεστερικές, οι βινυλεστερικές και οι εποξειδικές ρητίνες καταλαμβάνουν στην αγορά περίπου το 90% όλων των άμορφων θερμοσκληρυνόμενων ρητινών που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα δομικά υλικά. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε ενός από τους παραπάνω τύπους εν συντομία είναι :

- Πολυεστερικές ρητίνες⁶ : Υλικό εύχρηστο με εξαιρετικές συγκολλητικές και υγρομονωτικές ιδιότητες, με το μικρότερο κόστος από τις άλλες ρητίνες (2 – 4 € / kg), ωστόσο έχει γενικά μέτριες μηχανικές ιδιότητες και αντοχές (σε σχέση με τις άλλες).
- Βινυλεστερικές ρητίνες : Υλικό με μεγάλη αντίσταση σε χημικά και στις περιβαλλοντικές συνθήκες, με καλές μηχανικές αντοχές αλλά και υψηλότερο κόστος από τους πολυεστέρες (3– 8 € / kg).
- Εποξειδικές ρητίνες : Είναι το υλικό με τις υψηλότερες αντοχές και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται κυρίως στην κατασκευή αεροσκαφών. Επιπλέον λόγω της απουσίας εστέρων στη μοριακή τους δομή έχουν εξαιρετική ανθεκτικότητα στο νερό και στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Το μεγαλύτερο μειονέκτημά τους είναι

το εξαιρετικά υψηλό κόστος τους σε σχέση με τις άλλες ρητίνες (5–30 €/ kg).

2.5 ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ^{31,35}

Συνηθίζεται να αναφερόμαστε στην ακόρεστη πολυεστερική ρητίνη ως πολυεστερική ρητίνη ή απλώς ως πολυεστέρα. Η ακόρεστη πολυεστερική ρητίνη είναι η δημοφιλέστερη ρητίνη για εφαρμογές τύπου F.R.P. και τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται, κυρίως, σε θαλάσσιες εφαρμογές. Υπάρχει μεγάλο εύρος πολυεστερικών ρητινών που παράγονται από οξέα, γλυκόλες και μονομερή, με όλες να έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Δύο είναι οι κυριότεροι τύποι πολυεστερικών ρητινών που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία σύνθετων υλικών. Ο πρώτος τύπος είναι ο ορθοφθαλικοί πολυεστέρες, που είναι και ο πιο οικονομικός τύπος και χρησιμοποιείται ευρέως. Ο δεύτερος τύπος είναι οι ισοφθαλικοί πολυεστέρες, που εξαιτίας της αντοχής τους στο νερό, χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στη βιομηχανία σκαφών.

Οι πολυεστερικές ρητίνες είναι θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, που σημαίνει ότι από την υγρή μορφή τους μπορούν να μετατραπούν σε στερεά, όταν βρεθούν υπό κατάλληλες συνθήκες και για το λόγο αυτό, μπορούν να παραμείνουν αποθηκευμένες για σχετικά περιορισμένο χρονικό διάστημα, καθώς με τον καιρό θα πήξουν από μόνες τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, συνηθίζεται να προστίθενται μικρές ποσότητες επιβραδυντή κατά τη διάρκεια της παρασκευής της ρητίνης προκειμένου να καθυστερήσει η αντίδραση πήξης. Σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να προστεθεί κάποια ποσότητα επιταχυντή (κοβαλτίου), για την παραγωγή πιο – επιταχυνόμενων ρητινών.

2.5.1 ΤΥΠΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΩΝ^{31,37-39}

i. ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι περισσότερες πολυεστερικές ρητίνες είναι αδιαφανή υγρά, με μεγάλο ιξώδες και με πρακτικά μηδενικό πορώδες. Η πυκνότητα του πολυεστέρα είναι 1100-1400 kg/m³, ο συντελεστής θερμικής διαστολής 50-100 *10⁻⁶/°C και ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας 0.15-0.20 W/mK.

ii. ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Το μέτρο ελαστικότητας των πολυεστέρων είναι μεταξύ 1,30 - 4,50 GPa (για 20°C, 100s) και η εφελκυστική αντοχή τους 45-85 MPa .

Στους δύο επόμενους πίνακες παρουσιάζονται οι ιδιότητες του πολυεστέρα συγκρινόμενες και με αυτές άλλων ρητινών .

Πίνακας 1 - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΩΝ^{31,40}

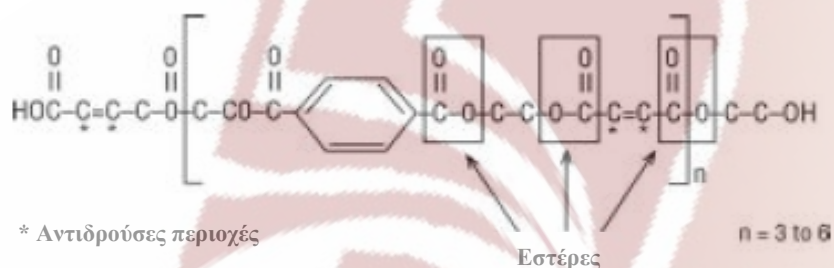
ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΟ ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ g/cm ³	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (200° C , 100s) GPa	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ MPa	ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑ MPa . m ^{1/2}
ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑΣ	1,1 – 1,4	1,3 – 4,5	45 – 48	0,5
ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ	1,2 – 1,4	2,1 – 5,5	40 – 85	0,6 – 1,0
ΦΑΙΝΟΦΟΡΜΑΛΛΕΥΔΗ	1,27	8	35 – 55	-

Πίνακας 2 - ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΩΝ^{31,40}

ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΟ ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΥΑΛΩΔΟΥΣ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗΣ (Tg) Κ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΑΛΑΚΥΝΣΗΣ Κ	ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ J . kg ⁻¹ . K ⁻¹	ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ W . m ⁻¹ . K ⁻¹	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ MK ⁻¹
ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑΣ	340	420 – 440	1200 – 2400	0,20 – 0,24	50 – 100
ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ	380	100 – 440	1700 – 2000	0,20 – 0,50	55 – 90
ΦΑΙΝΟΦΟΡΜΑΛΛΕΥΔΗ	-	370 – 550	1500 – 1700	0,12 – 0,24	26 – 60

2.5.2 ΧΗΜΙΚΗ ΔΟΜΗ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΩΝ^{31,33}

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η χημική δομή ενός τυπικού πολυεστέρα. Σημειώνονται οι θέσεις των εστέρων (CO – O – C) και των αντιδρώντων περιοχών (C* = C*). Σχηματίζονται από τις δομικές μονάδες ενός πολυεστέρα, τα μονομερή, που είναι συνήθως το στυρένιο. Η προσθήκη στυρένιου σε ποσοστό μέχρι 50% καθιστά τη ρητίνη πιο εύχρηστη, καθώς μειώνει το ιξώδες της .



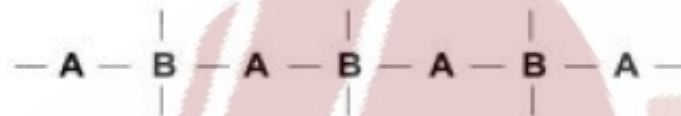
ΧΗΜΙΚΗ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ²⁰

2.5.3 ΣΚΛΗΡΥΝΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ³¹

Η αντίδραση της σκλήρυνσης (cure) των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών (όπως ο πολυεστέρας), που οδηγεί στο σχηματισμό μοριακού πλέγματος και τις μετατρέπει από ευδιαμόρφωτα υγρά, σε ισχυρά, αδιάλυτα, άκαυτα και άτηκτα στερεά (λόγω της ιδιαίτερης δικτυωτής κατανομής των μακρομορίων της), είναι η πιο κρίσιμη διαδικασία στην παραγωγή ενισχυμένων πλαστικών προϊόντων. Η αντίδραση αποκαλείται και πολυμερισμός, ενώ συνοδεύεται από την απελευθέρωση θερμότητας (εξώθερμη), η οποία με τη σειρά της επιταχύνει την αντίδραση. Σε σύγκριση με άλλες ρητίνες (όπως η εποξειδική), κατά την σκλήρυνση των πολυεστέρων, γενικά, παράγεται περισσότερη θερμότητα και έτσι αποκτώνται γρηγορότερα οι τελικές αντοχές του υλικού. Η αντίδραση είναι μη αναστρέψιμη (μονόδρομη) και από τη στιγμή που ολοκληρωθεί το υλικό είναι πρακτικά άκαυστο, αδύνατο να καταστραφεί ή να παραμορφωθεί. Η διαδικασία της σκλήρυνσης είναι αυτόματη, συνεχής αλλά και τόσο αργή χρονικά, που για πρακτικούς λόγους είναι απαραίτητη η

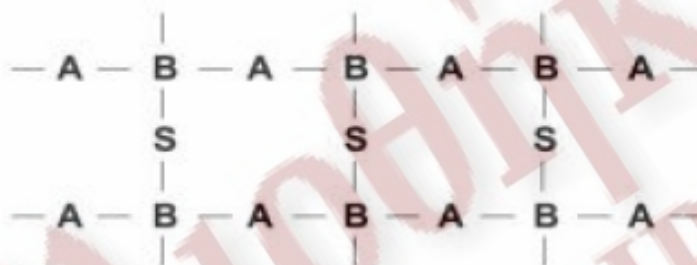
κατάλυση του πολυμερούς. Η πολυεστερική ρητίνη καταλύεται από το υπεροξείδιο της μεθυλαιθυλοκετόνης.

Η μοριακή αλυσίδα του πολυμερούς (πολυεστερικής ρητίνης) παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, όπου με το γράμμα Β παριστάνονται οι αντιδρούσες περιοχές :



ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ (ΠΡΙΝ ΤΗΝ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ)²⁰

Με την προσθήκη του στυρένιου^{1,6} S , και την απαραίτητη παρουσία καταλύτη, προκαλείται ενεργοποίηση της αντίδρασης μετατροπής της ρητίνης από υγρό σε στερεό, με τη "διασύνδεση" των μοριακών αλυσίδων του πολυεστέρα. Το στυρένιο εκτελεί τη ζωτικής σημασίας λειτουργία, καθώς συνδέει τις αλυσίδες των πολυμερών, σε κάθε αντιδρούσα περιοχή, σχηματίζοντας ένα εξαιρετικά περίπλοκο τρισδιάστατο σύμπλεγμα, όπως το παρακάτω :



ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ – ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΩΝ ΜΟΡΙΩΝ²⁰

Η πολυεστερική ρητίνη μετά την αντίδραση πολυμερισμού σχηματίζει τρισδιάστατα δίκτυα, παρουσιάζει ανθεκτικότητα σε χημικά και είναι (συνήθως) στερεό σώμα.

2.5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ^{31,37,40}

Επιπρόσθετη αύξηση της ταχύτητας της αντίδρασης πολυμερισμού είναι εφικτή, εάν αυξήσουμε τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Αυτή η

διαδικασία είναι γνωστή ως μετά - σκλήρυνση (post – cure). Εμπειρικά ισχύει ότι, αύξηση της θερμοκρασίας, της τάξεως των 10 °C θα διπλασιάσει, κατά προσέγγιση, την ταχύτητα της αντίδρασης. Για παράδειγμα, εάν μια ρητίνη πήζει σε 25 λεπτά στους 20 °C, θα πήξει σε περίπου 12 λεπτά στους 30 °C, ενώ η εκπομπή θερμότητας θα είναι η ίδια. Η σκλήρυνση σε υψηλές θερμοκρασίες (post – cure), εκτός από τους μικρότερους χρόνους αντίδρασης, προσφέρει το πλεονέκτημα ότι αυξάνει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Επιπλέον, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (η κρίσιμη τιμή T_g στην οποία οι μηχανικές ιδιότητες της ρητίνης ελαττώνονται σημαντικά), αυξάνεται περαιτέρω. Αντίθετα, σε γενικές γραμμές αληθεύει ότι, το υλικό δεν θα αποκτήσει τις μέγιστες δυνατές αντοχές του, εάν δεν υποστεί την απαραίτητη μετά – σκλήρυνση. Όμως, απαιτείται προσοχή, καθώς η έκθεση σε υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία, θα προκαλέσει πλήρη αποσύνθεση των ρητινών.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή από τη στιγμή που θα υποστούν τη σκλήρυνση, παραμένουν ουσιαστικά ανενεργά και αναλλοίωτα. Ωστόσο αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από κάποια τιμή μπορεί να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των ευεργετικών ιδιοτήτων τους, διότι προκαλείται ρήξη των δευτερευόντων δεσμών που συγκρατούν τις μακρομοριακές αλυσίδες. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αύξηση της θερμοκρασίας μεταξύ 50° – 80° C μειώνει σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων στις ρητίνες και επομένως και στα σύνθετα υλικά, καθώς μειώνεται και η συνάφειά τους με τον σπλισμό. Είναι προφανές ότι υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών.

2.6 ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΡΗΤΙΝΩΝ²⁰

Τα πρόσθετα υλικά χρησιμοποιούνται εκτενώς στις πολυεστερικές ρητίνες για διάφορους λόγους, όπως :

- Για τη μείωση του κόστους κατασκευής του υλικού (υλικά πλήρωσεως, αραιωτικά).

- Για τη διευκόλυνση της διαδικασίας σχηματισμού και της επεξεργασίας (θερμικοί σταθεροποιητές, λιπαντικά, διευκολυντικά ροής, θιξοτροπικά μέσα).
- Για την τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού (πλαστικοποιητές, μέσα ενίσχυσης).
- Για την τροποποίηση των οπτικών ιδιοτήτων (χρωστικές, μέσα πυρηνοποίησης).
- Για την παρεμπόδιση της γήρανσης (αντιοξειδωτικά, σταθεροποιητές υπεριώδους ακτινοβολίας, μυκητοκτόνα).
- Για την τροποποίηση των επιφανειακών ιδιοτήτων (αντιστατικά, ολισθητικά, αντικολλητικά, μείωση της τριβής).
- Για την αντίσταση στην καύση – αντιπυρικά.

2.6.1 ΥΛΙΚΑ ΠΛΗΡΩΣΕΩΣ

Τα υλικά πληρώσεως μπορούν να προστεθούν σε ποσοστό μέχρι και 50 % του βάρους της ρητίνης, αν και τόσο υψηλά επίπεδα είναι πιθανόν να έχουν επιπτώσεις στην αντοχή του υλικού. Η χρήση των υλικών πληρώσεως μπορεί να είναι ευεργετική στην τοποθέτηση πυκνών και χοντρών στρωμάτων, όπου μπορεί να ελευθερωθεί ιδιαίτερα μεγάλη ποσότητα θερμότητας.

2.6.2 ΧΡΩΜΑΤΙΣΜΟΣ ΡΗΤΙΝΩΝ

Ο χρωματισμός του μίγματος της ρητίνης μπορεί να πραγματοποιηθεί με ειδικές χρωστικές ουσίες. Η επιλογή της κατάλληλης ουσίας χρωματισμού πρέπει να γίνει προσεκτικά καθώς ακατάλληλη επιλογή μπορεί να έχει επιπτώσεις στην αντίδραση πολυμερισμού και να υποβιβάσει την ποιότητα του τελικού φύλλου πλαστικού. Σε κάθε περίπτωση οι χρωστικές ουσίες δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 3 % του βάρους της ρητίνης.

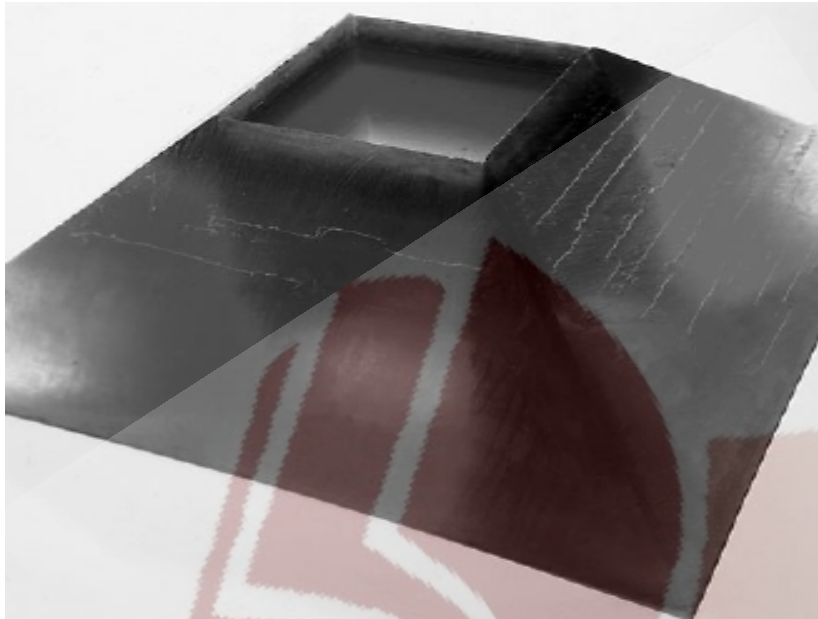
2.6.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ

Μεγάλη προσοχή απαιτείται κατά την προετοιμασία του μίγματος ρητίνης πριν από την εφαρμογή της. Η ρητίνη και οποιοσδήποτε πρόσθετες ουσίες πρέπει να αναδευτούν προσεκτικά, για να διασκορπιστούν ομοιόμορφα σε όλο τον όγκο του μίγματος, πριν από την προσθήκη του καταλύτη. Η ανάδευση χρειάζεται να είναι σχολαστική δεδομένου ότι οποιαδήποτε ποσότητα αέρα εισαχθεί στο μίγμα της ρητίνης θα έχει επιπτώσεις στο τελικό σχήμα. Επιπλέον, κατά την τοποθέτηση στρωμάτων ενίσχυσης, οι φυσαλίδες του αέρα που μπορεί να παγιδευτούν μέσα στα φύλλα του πλαστικού, μπορεί να αποδυναμώσουν τη δομή και τις ιδιότητες του σύνθετου υλικού F.R.P. Είναι επίσης σημαντικό ο καταλύτης και ο επιταχυντής, εφόσον χρησιμοποιηθούν, να προστεθούν στη συγκεκριμένη αναλογία που προτείνεται από τον παραγωγό και τον προμηθευτή, για να ελεγχθεί η αντίδραση πολυμερισμού και να δοθούν στο υλικό οι καλύτερες δυνατές ιδιότητες.

2.7 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ

Τα συστήματα ρητίνης, όπως οι πολυεστέρες, έχουν περιορισμένη χρήση για δομικές κατασκευές από μόνα τους, δεδομένου ότι οι μηχανικές ιδιότητές τους δεν είναι υψηλές συγκρινόμενες με, παραδείγματος χάριν, τα περισσότερα μέταλλα. Εντούτοις, έχουν και επιθυμητές ιδιότητες, όπως η δυνατότητά τους να διαμορφώνονται εύκολα σε πολύπλοκα σχήματα. Από πολυεστερική ρητίνη κατασκευάζονται : καλούπια, κουμπιά, χάντρες, τζάμια ασφαλείας, διακοσμητικά αντικείμενα και έργα τέχνης, όπως στη φωτογραφία της επόμενης σελίδας.

Η σημαντικότερη εφαρμογή της πολυεστερικής ρητίνης προκύπτει από το συνδυασμό της με ίνες γυαλιού, και είναι τα σύνθετα πολυμερή υλικά, δηλαδή το σύνθετο fiberglass.



ΕΡΓΟ ΤΟΥ ΧΡΗΣΤΟΥ ΓΙΑΝΝΑΚΟΥ ΑΠΟ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ,
1971 ΝΕΑ ΥΟΡΚΗ - ΗΠΑ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Καταλύτης ονομάζεται η χημική ουσία (συνήθως ένα υπεροξειδίο), που αλλάζει το ποσοστό των αντιδρώντων κάποιας χημικής αντίδρασης, επιταχύνοντας τη διαδικασία, χωρίς όμως να μεταβάλλεται η ίδια, όταν προστίθεται σε δευτερεύουσα ποσότητα έναντι των αρχικών αντιδραστηρίων.

3.2 ΚΑΤΑΛΥΤΕΣ

- Υπεροξειδίο Μεθυλαιθυλοκετόνης - ΜΕΚΡ (το πιο συνηθισμένο)
- Βενζολικό Υπεροξειδίο (Benzoyl Peroxide)

3.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑΛΥΤΗ

Ο καταλύτης προστίθεται χρονικά λίγο πριν την χρήση του πολυεστέρα σε κάποια εφαρμογή. Ο λόγος της προσθήκης του είναι η παραγωγή ελεύθερων ριζών. Οι ελεύθερες ρίζες, με τη σειρά τους, αντιδρούν με τα μόρια μονομερών και πολυμερών και επιταχύνουν την εξώθερμη αντίδραση στερεοποίησης της ρητίνης, μέχρι την ολοκλήρωσή της. Ο διαθέσιμος χρόνος από την προσθήκη του καταλύτη μέχρι την πήξη του μίγματος είναι περίπου 15 λεπτά για θερμοκρασία 25 °C.

3.4 ΔΟΣΟΛΟΓΙΑ

Η δοσολογία του καταλύτη κυμαίνεται από 0,2 % έως 2,0 % κατά βάρος πολυεστέρα. Υψηλότερα ποσοστά καταλύτη δίνουν ταχύτερους χρόνους αντίδρασης, ωστόσο θα πρέπει να αποφεύγεται η υπερδοσολογία (καθώς κάνει

την αντίδραση ακαριαία και συνεπώς μη πρακτική). Το ποσοστό του καταλύτη αυξομειώνεται, επίσης, ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες - σε χαμηλότερες θερμοκρασίες προσθέτουμε περισσότερη ποσότητα, ενώ σε υψηλότερες μειώνουμε αναλόγως το ποσοστό.



Κεφάλαιο 4^ο – ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗ ΡΗΤΙΝΗ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΜΕ ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ ΥΛΙΚΑ³¹

Τα σύνθετα υλικά (fiber – reinforced plastics) αποτελούνται από ανόργανες ή οργανικές ίνες υψηλής εφελκυστικής αντοχής (που οφείλεται στην πολύ μικρή διάμετρό τους, της τάξης των 5-25 μm) και από κάποια μήτρα από πολυμερές. Τα σύνθετα υλικά έχουν μικρότερο βάρος από το χάλυβα, και εκτός από τις μηχανικές αντοχές τους (που οφείλονται στις ίνες), χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ανθεκτικότητα σε δυσμενείς χημικές επιδράσεις. Λόγω δε της πολύ ικανοποιητικής συμπεριφοράς τους σε μια σειρά πεδίων εφαρμογής (αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία, σκάφη θαλάσσης, είδη σπορ κ.ά) τα τελευταία χρόνια άρχισαν να χρησιμοποιούνται και σε τεχνικά έργα, είτε σε αντικατάσταση του χάλυβα είτε σε εντελώς νέες εφαρμογές.

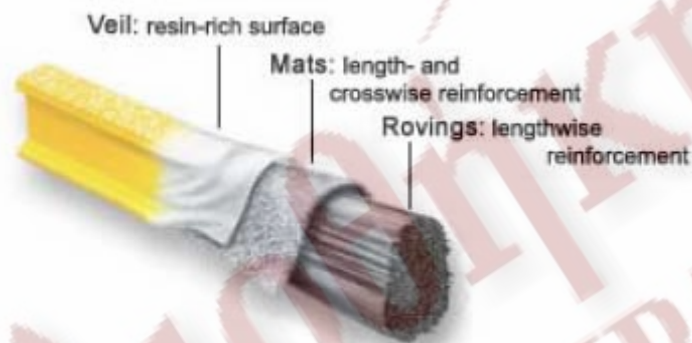
Οι κυριότεροι τύποι ινών που χρησιμοποιούνται στα ινοπλισμένα πολυμερή είναι οι ίνες γυαλιού, οι ίνες άνθρακα και οι ίνες αραμιδίου, με χαρακτηριστικό τους τη μεγάλη εφελκυστική αντοχή και τη γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση, ενώ οι κυριότεροι τύποι μήτρας που χρησιμοποιούνται είναι η εποξειδική και η πολυεστερική ρητίνη.



ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΑΠΟ F.R.P. – ΕΜΠΟΤΙΣΗ ΜΕ ΡΗΤΙΝΗ

4.2 ΟΡΙΣΜΟΣ

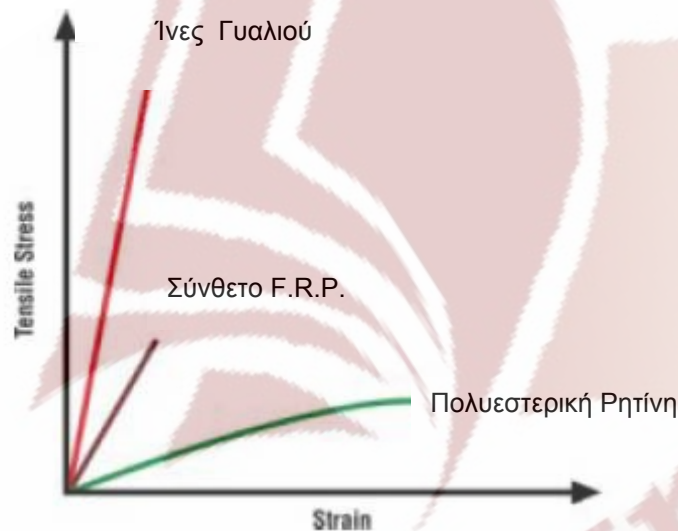
Το σύνθετο υλικό που παράγεται από το συνδυασμό των ινών γυαλιού τύπου fiberglass και την πολυεστερική ρητίνη (με προσθήκη καταλύτη) αποκαλείται “πολυεστέρας οπλισμένος με ίνες γυαλιού” (Fiberglass – Reinforced Polyester), ωστόσο έχει επικρατήσει να το αποκαλούμε απλώς με το όνομα του οπλισμού, δηλαδή fiberglass. Έχει πλήθος εφαρμογών, κυρίως στην κατασκευή θαλάσσιων σκαφών, στη βιομηχανία αυτοκινήτων και αλλού.



Η καταλυμένη ρητίνη και οι ίνες που χρησιμεύουν ως ενίσχυση μας δίνουν ένα σύνθετο υλικό, του οποίου οι μηχανικές ιδιότητες υπερβαίνουν εκείνες των επιμέρους συστατικών. Όπως συμβαίνει και με άλλα σύνθετα υλικά (όπως π.χ. το οπλισμένο σκυρόδεμα), τα δύο συστατικά του F.R.P. συνεργάζονται αρμονικά και το κάθε ένα καλύπτει τις αδυναμίες του άλλου. Συγκεκριμένα η πολυεστερική ρητίνη έχει μεγάλη αντοχή σε θλίψη και μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, ενώ αντιθέτως οι ίνες του γυαλιού έχουν μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά ελάχιστη σε θλίψη. Συνδυάζοντας τα δύο υλικά, προκύπτει ένα υλικό που είναι ανθεκτικό τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό. Σε εφαρμογές μπορούν να συνδυαστούν ομοιόμορφα σε όλο τον

όγκο του υλικού ή το γυαλί, απλώς μπορεί να τοποθετηθεί σε συγκεκριμένα σημεία της δομής (αναλαμβάνοντας τα εφελκυστικά φορτία για λόγους οικονομίας).

Στο επόμενο διάγραμμα²⁰ παρουσιάζεται παραστατικά η εφελκυστική συμπεριφορά των ινών γυαλιού, της πολυεστερικής ρητίνης και του σύνθετου F.R.P.



4.3 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΚΑΘΟΡΙΖΟΥΝ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ F.R.P.^{10,20,40}

Οι ιδιότητες του σύνθετου F.R.P. καθορίζονται από πέντε παράγοντες:

- i. Τον πρωτεύοντα ρόλο στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού έχει ο οπλισμός, δηλαδή οι ίνες του γυαλιού. Οι ίνες του γυαλιού έχουν υψηλή εφελκυστική αντοχή, δυσκαμψία, μικρή πυκνότητα, ανθεκτικότητα σε χημικά και άριστη μονωτική ικανότητα. Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα σε πολλά διαφορετικά είδη ινών γυαλιού, ανάλογα με τις ιδιότητες που επιθυμούμε.
- ii. Δευτερεύοντα ρόλο στις ιδιότητες του σύνθετου παίζει ο πολυεστέρας. Ειδικότερα συγκρατεί τις ίνες στην επιθυμητή θέση, τις προστατεύει

από εξωτερικούς παράγοντες, καθορίζει ιδιότητες όπως η διατμητική και η θλιπτική αντοχή, κάθετα στην διεύθυνση των ινών.

- iii. Οι ιδιότητες καθορίζονται από το ποσοστό συμμετοχής (αναλογία) ρητίνης – πολυεστέρα στο σύνθετο υλικό. Η αναλογία καθορίζεται, κατά ένα μεγάλο μέρος, από τη διαδικασία που χρησιμοποιείται για το συνδυασμό της ρητίνης με τις ίνες και από τον χρησιμοποιούμενο τύπο της ρητίνης. Γενικά ισχύει ότι, εφόσον οι μηχανικές ιδιότητες των ινών είναι κατά πολύ καλύτερες από εκείνες των ρητινών : όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό συμμετοχής των ινών, τόσο υψηλότερες θα είναι και οι μηχανικές αντοχές της σύνθεσης. Στην πράξη, όμως, υπάρχουν όρια σε αυτό, δεδομένου ότι το ποσοστό της ρητίνης θα πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε να είναι δυνατή η πλήρης διαβροχή των ινών (για να είναι αποτελεσματική η σύνθεση). Με την απλή διαδικασία επάλειψης (χειρονακτική), που χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή θαλάσσιων σκαφών, το ποσοστό των ινών υπολογίζεται περίπου στο 30 – 40 %. Με ποιοτικότερες διαδικασίες, πιο περίπλοκες και ακριβέστερες, όπως αυτές που χρησιμοποιούνται στην αεροδιαστημική βιομηχανία, το ποσοστό ινών μπορεί να προσεγγίσει το 70 %.
- iv. Καθορίζονται επίσης από τη γεωμετρία και τον προσανατολισμό των ινών στο σύνθετο. Η γεωμετρία των ινών σε ένα σύνθετο είναι σημαντική δεδομένου ότι οι ίνες έχουν μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές κατά το μήκος, παρά κατά το πλάτος τους. Αυτό οδηγεί τα σύνθετα υλικά, σε ιδιαίτερα ανισότροπη συμπεριφορά. Οι μηχανικές τους ιδιότητες, ως εκ τούτου, είναι πιθανόν να είναι πολύ διαφορετικές όταν εξετάζονται, κατά τη φόρτισή τους σε διαφορετικές κατευθύνσεις (σε αντίθεση με άλλα υλικά όπως τα μέταλλα). Αυτό σημαίνει ότι είναι πολύ σημαντικό κατά την εξέταση της χρήσης των σύνθετων, να κατανοηθεί το σχέδιο φόρτισης, δηλαδή το μέγεθος και η κατεύθυνση των εφαρμοσμένων φορτίων. Μάλιστα εάν προβλεφθούν σωστά οι φορτίσεις, είναι πιθανό να μπορεί να τοποθετηθεί ο οπλισμός

μόνο στα σημεία που θα εφαρμόζονται φορτία (και έτσι θα έχουμε εξοικονόμηση υλικών).

- ν. Ο τελευταίος παράγοντας είναι η συνάφεια των επιφανειών της πολυεστερικής ρητίνης και των ινών του γυαλιού. Οι αναπτυσσόμενοι δεσμοί μεταξύ τους θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυροί, ώστε να εξασφαλίζεται η μεταφορά των τάσεων μεταξύ των δύο συστατικών. Κακή συνάφεια θα έχει ως αποτέλεσμα την εκρίζωση των ινών από τον πολυεστέρα, γεγονός που θα οδηγήσει σε ταχύτερη αστοχία του σύνθετου υλικού.



**ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ ΣΕ ΜΗΤΡΑ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ
(ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ x700)**

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες υλικών, όπως τα μέταλλα, καθορίζονται κατά ένα μεγάλο μέρος από τον κατασκευαστή - προμηθευτή τους, και ως επακόλουθο ο χρήστης τους αναλαμβάνει να δουλέψει με μια ήδη οριστικοποιημένη δομή (και δεν μπορεί να κάνει τίποτα προκειμένου να αλλάξει τις ενσωματωμένες ιδιότητες των υλικών). Αντιθέτως, οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού διαμορφώνονται την ίδια στιγμή που κατασκευάζεται και εξαρτώνται κυρίως από τη διαδικασία κατασκευής που θα επιλεγεί.

4.4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ^{30,31,40-46}

- Συρρίκνωση κατά τη φάση σκλήρυνσης. Η συρρίκνωση του F.R.P. μπορεί να φτάσει το 10% κατά τη φάση παρασκευής του, γεγονός που οφείλεται στη μείωση του όγκου του πολυεστέρα κατά τη στερεοποίηση του. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια κατασκευαστές έχουν δημιουργήσει βελτιωμένες μορφές με μικρότερη συρρίκνωση.
- Σταθερότητα. Μετά την παρασκευή του, το F.R.P. ως υλικό διατηρεί τη σταθερότητά του. Δεν διαστέλλεται ούτε συστέλλεται κατά την έκθεσή του σε εξαιρετικά υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες.
- Μικρό βάρος. Το βάρος του υπολογίζεται στο ¼ περίπου του χάλυβα. Ως εκ τούτου, κατά την τοποθέτησή στοιχείων από το συγκεκριμένο υλικό, δεν απαιτείται χρήση ικριωμάτων κάτι που συνεπάγεται ευκολία και ταχύτητα στην εφαρμογή του, καθώς και μειωμένο κόστος εργατικών.
- Ψαθυρό υλικό με ελαστική συμπεριφορά κατά τον εφελκυσμό. Η μέγιστη επιμήκυνση του υλικού πριν τη θραύση του είναι 4,8 % του αρχικού μήκους, με 100 % ελαστική επαναφορά (και αντίστοιχα σχεδόν μηδενική πλαστική περιοχή) όταν φορτίζεται ακόμα και κοντά στο σημείο θραύσης, σε ιδανικές συνθήκες.
- Υψηλή αντοχή. Το σύνθετο fiberglass έχει αναλογία επιφάνειας και αντοχής. Σε συνδυασμό με το μικρό βάρος του καθίσταται ιδανικό σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές αντοχές και ελάχιστο βάρος.
- Αντιστέκεται στη διάβρωση και την υγρασία. Έχει μεγάλη ανθεκτικότητα έναντι της υγρασίας, διατηρεί τις φυσικές και χημικές του ιδιότητες όταν εκτίθεται στο νερό, εκτός κάποιων ακραίων περιπτώσεων, όπως η διαρκής διαβροχή για μακρό χρονικό διάστημα. Σε αυτή την τελευταία περίπτωση, είναι δυνατό με τη χρήση ειδικών επικαλύψεων (gel-coat) ή

αντιοσμωτικής μπογιάς, που εφαρμόζονται επιφανειακά, να εξαλειφθεί το πρόβλημα.

- Αντιστέκεται στην υπεριώδη ακτινοβολία. Συνήθως, η επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας περιορίζεται στην επιφανειακή στρώση (επιφανειακή μοριακή δομή) της ρητίνης, στην οποία προκαλεί χρωματική αλλοίωση και σε ακραίες περιπτώσεις μικρορηγματώση. Η ανθεκτικότητα σήμερα μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, αφενός χάρη σε ειδικούς χημικούς σταθεροποιητές ή αδρανή πρόσμικτα, αφετέρου χάρη σε εξωτερικές βαφές.
- Αντιστέκεται στην καύση και σε υψηλές θερμοκρασίες. Είναι ένα ανόργανο υλικό, το οποίο δεν καίγεται. Ωστόσο αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από κάποια τιμή μπορεί να προκαλέσει σημαντική υποβάθμιση των ευεργετικών ιδιοτήτων του και του μέτρου ελαστικότητας του. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι αύξηση της θερμοκρασίας της τάξης των 50° - 80° C μειώνει σημαντικά την ικανότητα ανάληψης δυνάμεων από τον πολυεστέρα και επομένως και από τον οπλισμό. Είναι προφανές ότι υψηλότερες θερμοκρασίες όπως αυτές που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, προκαλούν πλήρη αποσύνθεση των ρητινών και επομένως οι ράβδοι από F.R.P. δεν μπορούν να φέρουν τάσεις. Παρ' όλα αυτά κατάρρευση της κατασκευής αναμένεται να συμβεί σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες. Διατηρεί περίπου το 25 % των αρχικών αντοχών του σε θερμοκρασία 540°C .
- Αντιστέκεται στα χημικά. Οι περισσότερες χημικές ουσίες έχουν ελάχιστη ή καμία επίδραση στο σύνθετο F.R.P. Ωστόσο παρουσιάζει ευαισθησία σε όξινο ή αλκαλικό περιβάλλον και χρειάζεται προστασία. Σήμερα υπάρχει η δυνατότητα να επιλέξουμε ανάμεσα σε μεγάλο εύρος διαφορετικών πολυεστέρων και ινών γυαλιού και ως εκ τούτου το πρόβλημα μπορεί να ελαχιστοποιηθεί.

- Κακός αγωγός του ηλεκτρισμού. Είναι υλικό άριστο για ηλεκτρικές μονώσεις. Η χαμηλή διηλεκτρική σταθερά του σε συνδυασμό με την ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες καθιστούν το F.R.P. ιδανικό για εφαρμογές όπως : πίνακες κυκλωμάτων και μονωτικά περιβλήματα.
- Μικρή θερμική αγωγιμότητα. Οφείλεται στις ίνες γυαλιού που από μόνες τους χρησιμοποιούνται σαν μόνωση.
- Είναι υλικό ανθεκτικό στη γαλβανική διάβρωση.
- Η διάβρωση υπό τάση είναι ένα φαινόμενο το οποίο επηρεάζει τις ίνες του γυαλιού (τον σπλισμό), η εφελκυστική αντοχή των οποίων μειώνεται χαρακτηριστικά όταν βρίσκονται συνεχώς υπό τάση.
- Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το F.R.P. είναι υλικό με μεγάλη διάρκεια ζωής.
- Χαμηλό κόστος συντήρησης.
- Παράγεται σε εύκαμπτες και ποικίλες μορφές, σε διατομές οποιουδήποτε επιθυμητού σχήματος και διαστάσεων.
- Σήμερα για τη συνηθέστερη στα τεχνικά έργα περίπτωση, κατά την οποία το F.R.P. αποτελείται από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης (σε αναλογία 50-70% κατ' όγκο), οι μηχανικές ιδιότητες του, έχουν προσεγγιστικά, ως εξής: μέτρο ελαστικότητας = 45-65 GPa (ενώ είναι 65-120 GPa και 135-190 GPa για υλικά με ίνες αραμιδίου (AFRP) και άνθρακα (CFRP) αντίστοιχα). Η εφελκυστική αντοχή του, που είναι της τάξης των 1035 – 3500 MPa (σε βραχυχρόνια φόρτιση), μειώνεται στο 35-50% της αρχικής τιμής, όταν η φόρτιση είναι μακροχρόνια (50-60% και 70-90% για πολυμερή με ίνες αραμιδίου και άνθρακα), ενώ η μέγιστη παραμόρφωση του πριν τη θραύση μπορεί να φτάσει το 3% σε ιδανικές συνθήκες. Τα σύνθετα υλικά έχουν χαμηλή θλιπτική αντοχή, η οποία πρακτικά θεωρείται αμελητέα. Από

πειραματικές δοκιμές έχει προκύψει ότι η θλιπτική αντοχή του F.R.P. περιορίζεται στο 55 % της εφελκυστικής αντοχής (48 και 20 % για ίνες αραμιδίου και άνθρακα), ενώ ο αντίστοιχος συντελεστής για το μέτρο ελαστικότητας είναι 80% (85 και 100% για ίνες αραμιδίου και άνθρακα).

4.5 ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ^{31,46,51,52}

Για τα ινοπλισμένα πολυμερή με συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης είναι εύκολο να υπολογίσει κανείς (βάσει σχέσεων ισορροπίας και συμβιβαστού των παραμορφώσεων) το μέτρο ελαστικότητας στη διεύθυνση των ινών, E_f , από τη σχέση:

$$E_f = E_m V_m + E_{fib} V_{fib}$$

Στην παραπάνω σχέση E_m και E_{fib} είναι το μέτρο ελαστικότητας του μητρικού υλικού και των ινών, αντίστοιχα. Ομοίως, V_m και V_{fib} είναι το ποσοστό κατ' όγκο του μητρικού υλικού και των ινών, αντίστοιχα ($V_m + V_{fib} = 1$). Έτσι, δεδομένου ότι $E_{fib} \gg E_m$, γίνεται προφανές ότι το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού ισούται προσεγγιστικά με αυτό των ινών πολλαπλασιασμένο επί την κατ' όγκο αναλογία τους. Ακόμα μπορεί να δειχθεί ότι η παραπάνω εξίσωση ισχύει προσεγγιστικά και για την εφελκυστική αντοχή, $f_{f,t}$, αρκεί τα μέτρα ελαστικότητας να αντικατασταθούν από τις αντίστοιχες εφελκυστικές αντοχές :

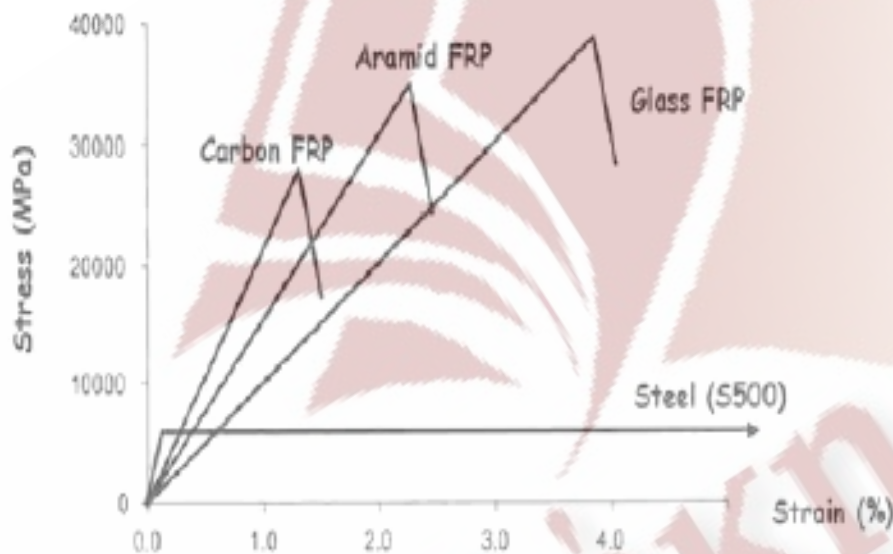
$$f_{f,t} = f_{m,t} V_m + f_{fib,t} V_{fib}$$

όπου $f_{m,t}$ και $f_{fib,t}$ είναι η εφελκυστική αντοχή του μητρικού υλικού και των ινών, αντίστοιχα. Ομοίως η εφελκυστική αντοχή του σύνθετου fiberglass εξαρτάται κυρίως από τις ίνες, άρα η εφελκυστική αντοχή ισούται προσεγγιστικά με αυτή των ινών πολλαπλασιασμένη επί την κατ' όγκο αναλογία τους .

Με βάση, λοιπόν, τα παραπάνω, εξάγεται το συμπέρασμα ότι για τις δύσκαμπτες λωρίδες, αποτελούμενες από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης, οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι γνωστές εκ των προτέρων βάσει εργαστηριακών μετρήσεων, ενώ για τα υφάσματα, των οποίων ο εμποτισμός με

ρητίνη γίνεται επί τόπου (συνήθως εφαρμογή με το χέρι), υπάρχει μία σχετική αβεβαιότητα ως προς την ποσότητα ρητίνης, η οποία θα εμποτίσει τις ίνες, και άρα ως προς την τελική περιεκτικότητα των ινών στο σύνθετο fiberglass.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η σχέση τάσης – παραμόρφωσης, κατά την καταπόνηση σε εφελκυσμό, για το σύνθετο fiberglass συγκρινόμενη με αυτή των ινοπλισμένων με άνθρακα, αραμιδής, και τέλος του χάλυβα .



**ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ
ΓΙΑ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ⁵⁸**

Το F.R.P. (και τα άλλα σύνθετα υλικά), όπως γίνεται φανερό και από το σχήμα, σε αντίθεση με το χάλυβα, παρουσιάζει ελαστική συμπεριφορά κατά τον εφελκυσμό (μέχρι και 100% ελαστική επαναφορά), μέχρι την τελική αστοχία και τη θραύση του. Τέλος είναι φανερή η απουσία διαρροής του ψαθυρού F.R.P. (και των άλλων σύνθετων υλικών) σε σύγκριση με το συνεκτικό χάλυβα.

4.6 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ³⁰

Τα ινοπλισμένα πολυμερή παρασκευάζονται:

α) με μη αυτοματοποιημένες μεθόδους, όπως η εφαρμογή με το χέρι, ο ψεκασμός και η χύτευση σε αυτόκλειστο.

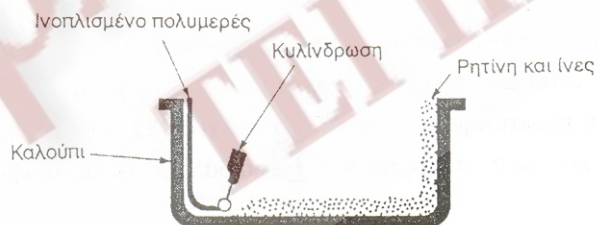
β) με ημι-αυτοματοποιημένες μεθόδους, όπως είναι η συμπίεση (εν ψυχρώ ή εν θερμώ).

γ) με αυτοματοποιημένες μεθόδους, όπως είναι η εξέλαση (pultrusion), η περιέλιξη και χύτευση με εμφύσηση.

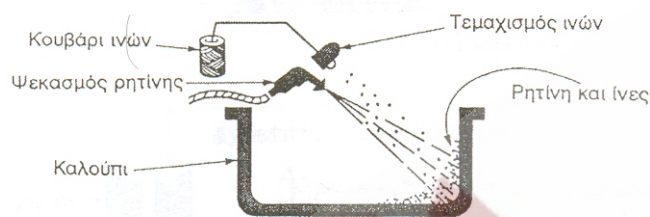
Οι μέθοδοι που βασίζονται στη χρήση ενός μόνο καλουπιού χαρακτηρίζονται ως ανοιχτού καλουπιού, ενώ αυτές κατά τις οποίες το προϊόν μορφοποιείται σε σύστημα κλειστών καλουπιών είναι γνωστές ως μέθοδοι κλειστού καλουπιού.

4.6.1 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

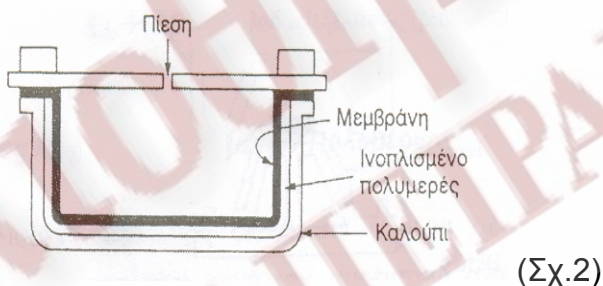
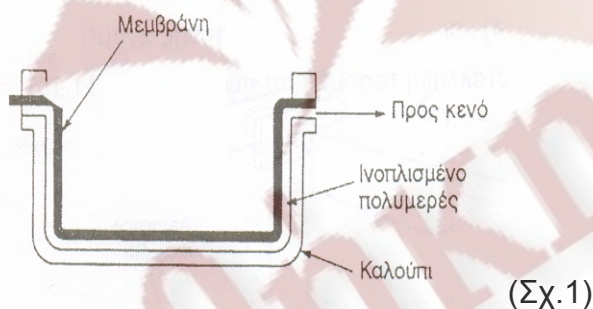
i. Εφαρμογή με το χέρι. Πρόκειται για διαδικασία αρκετά εύκολη και χαμηλού κόστους, η οποία ενδείκνυται για την παρασκευή σχετικά μικρού αριθμού ιδίων στοιχείων (π.χ. πετάσματα επικάλυψης). Όπως δείχνει και το επόμενο σχήμα, αρχικά η ρητίνη και οι ίνες απλώνονται στο καλούπι και κατόπιν συμπιέζονται με ειδικό κύλινδρο για τη μορφοποίηση του τελικού προϊόντος. Συνήθως η εμφανής επιφάνεια του στοιχείου καλύπτεται με στρώση ρητίνης πάχους περίπου 0.35 mm, γνωστή ως gel coat, ώστε αφενός να προστατεύονται οι ίνες από τυχόν περιβαλλοντικές επιδράσεις, αφετέρου να αναδεικνύεται λεία και στιλπνή επιφάνεια.



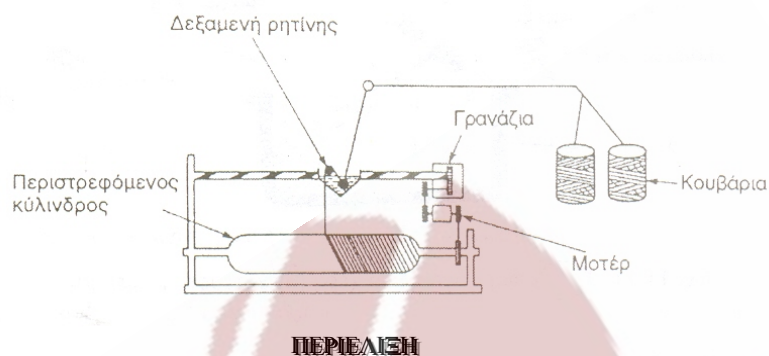
ii. Ψεκασμός. Βασική διαφορά της μεθόδου αυτής με την προηγούμενη, είναι ότι η ρητίνη εφαρμόζεται στο καλούπι με ψεκασμό ενώ ταυτόχρονα οι ίνες αποκόπτονται από κουβάρια ("μπομπίνες") και διασκορπίζονται ομοιόμορφα.



iii. Μέθοδοι με εφαρμογή πίεσης. Βασίζονται στην εφαρμογή πίεσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη συμπύκνωση του υλικού, μεγάλο ποσοστό ινών και καλής ποιότητας εξωτερική επιφάνεια. Η πίεση μπορεί να εφαρμόζεται: **α)** εν κενώ (Σχ.1), **β)** μέσω μεμβράνης (Σχ.2) και **γ)** σε αυτόκλειστο (αποτελεί παραλλαγή της μεθόδου εφαρμογής πίεσης μέσω μεμβράνης, με κύριο χαρακτηριστικό την εφαρμογή υψηλής πίεσης σε κλειστό θάλαμο).

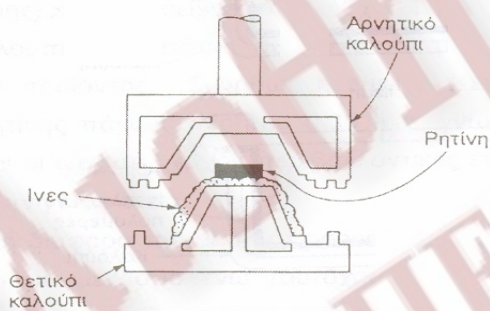


iv. Περιέλιξη. Αποτελεί σύγχρονη και πλήρως αυτοματοποιημένη μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται για την παρασκευή κυλινδρικών στοιχείων (π.χ. σωλήνες, δεξαμενές). Οι ίνες, σε μορφή νημάτων, αρχικά εμποτίζονται σε δεξαμενή ρητίνης και κατόπιν τυλίγονται γύρω από περιστρεφόμενο μεταλλικό στοιχείο. Τέλος το στοιχείο αφαιρείται και το τελικό προϊόν συντηρείται σε ειδικό θάλαμο, σε θερμοκρασία 60°C για 8 περίπου ώρες.

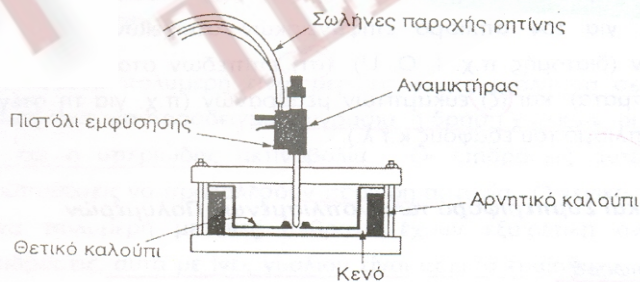


4.6.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

ι. Χρήση διπλού καλούπιού. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η ρητίνη και οι ίνες τοποθετούνται ανάμεσα σε δύο καλούπια με σχήμα όπως αυτό του επιθυμητού τελικού προϊόντος. Η μορφοποίηση μπορεί να γίνει : **α)** μέσω συμπίεσης των καλούπιών (σε πίεση π.χ. 100 kPa) εν ψυχρώ, **β)** μέσω συμπίεσης (0.5-15 MPa) εν θερμώ, σε θερμοκρασίες της τάξης των 120-150 °C (Σχ.3) και **γ)** με εμφύσηση ρητίνης ανάμεσα στα δύο καλούπια, στα οποία έχει προηγηθεί η κατάλληλη τοποθέτηση των ινών (Σχ.4).

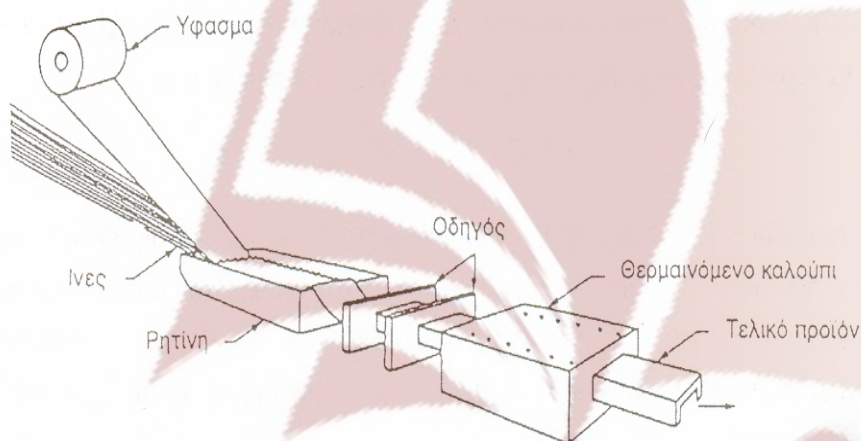


(Σχ.3)



(Σχ.4)

ii. Εξέλαση (pultrusion). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, οι ίνες αρχικά εμποτίζονται με ρητίνη και κατόπιν εξωθούνται μέσα σε καλούπι που έχει σχήμα ίδιο με αυτό της επιθυμητής τελικής διατομής του στοιχείου (π.χ. κυκλική σπή, για ινοπλισμένα πολυμερή μορφής ράβδων). Το καλούπι εμποτίζεται με πρόσθετη ρητίνη και θερμαίνεται, έτσι ώστε να επιτευχθεί η σκλήρυνση της ρητίνης και να πάρει το στοιχείο την τελική του μορφή.



PULTRUSION

4.7 ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ- ΕΤΟΙΜΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ^{46,54}

Τα ινοπλισμένα πολυμερή διατίθενται σήμερα σε μορφή: **α)** ράβδων και τενόντων (π.χ. για τον οπλισμό και/ή την προένταση στοιχείων σκυροδέματος), **β)** λωρίδων ή ταινιών πλάτους μερικών εκατοστών, πάχους της τάξης του χιλιοστού και μήκους αρκετών μέτρων (π.χ. για την εφαρμογή τους υπό μορφή εξωτερικού οπλισμού), **γ)** φύλλων, παρόμοιων με τις λωρίδες αλλά μεγαλύτερου πλάτους (π.χ. για χρήση σε μορφή εξωτερικού μανδύα δομικών στοιχείων), **δ)** δισδιάστατων ή τρισδιάστατων πλεγμάτων (π.χ. για τον οπλισμό επιφανειακών στοιχείων από σκυρόδεμα), **ε)** γραμμικών μελών (διατομής π.χ. I, O, U), **στ)** επίπεδων στοιχείων επικάλυψης (π.χ. κυματοειδή πετάσματα), και **ζ)** εύκαμπτων μεμβρανών (π.χ. για τη στέγαση ανοικτών χώρων, για τον οπλισμό του εδάφους κ.τ.λ.).

4.8 ΕΠΙΚΑΛΥΨΕΙΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ FIBERGLASS

Οι περισσότερες εφαρμογές, όπου χρησιμοποιείται το σύνθετο fiberglass, είναι δομικής φύσης αλλά, γενικά, υπάρχει πάντα ανάγκη για ένα αισθητικό, προστατευτικό τελείωμα της επιφάνειας του σύνθετου, το οποίο να έχει και ταυτόχρονα μικρές απαιτήσεις συντήρησης. Το πιο κοινό τελείωμα που χρησιμοποιείται σε “πολυεστερική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες γυαλιού” είναι το gel-coat και η αντιωσμωτική μπογιά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή θαλάσσιων σκαφών.

Κατά τη διάρκεια των ετών έχει αναπτυχθεί μια ιδιαίτερα μεγάλη ποικιλία gel-coats, για να ικανοποιήσει οποιεσδήποτε απαιτήσεις. Συγκεκριμένα το gel-coat προσφέρει τα εξής :

- Βελτιώνει τη διάρκεια ζωής του σύνθετου fiberglass.
- Προστατεύει το φύλλο του πλαστικού από το περιβάλλον (π.χ. προσφέρει αντίσταση στη διάβρωση του νερού, αντίσταση στην καύση, αντίσταση στα χημικά, αντίσταση στην υπεριώδη ακτινοβολία).
- Παρέχει ένα ομαλό αισθητικό τελείωμα στην επιφάνεια.
- Εξαλείφει την ανάγκη για χρωματισμό (μπορεί να παραχθεί με βάση τυποποιημένες σειρές χρωμάτων ή σε οποιαδήποτε άλλο χρωματισμό ζητηθεί).

Τα πιο κοινά gel-coats είναι βασισμένα στην εποξειδική ή στην ακόρεστη πολυεστερική ρητίνη (ορθοφαλικού ή ισοφθαλικού τύπου). Τα gelcoats είναι τροποποιημένες ρητίνες σε υγρή κατάσταση και είναι διαθέσιμα για εφαρμογή με βούρτσα ή για εφαρμογή με ψεκασμό. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται για πάχος στρώσης 0.5 – 0.8 mm (περίπου 500 g/m²). Σε διαφορετική περίπτωση μπορεί να προκληθεί μέχρι και μικρορηγμάτωση στο σύνθετο υλικό.

4.9 F.R.P ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΕΙΑ⁵⁵⁻⁵⁷

Η έκθεση και η εισπνοή σκόνης ορισμένων τύπων ινών γυαλιού (fiberglass), κατά την κατασκευή τους ή την επεξεργασία τους, μπορούν να προκαλέσουν βήχα, ερεθισμό στα μάτια, στη μύτη, στο δέρμα (μορφές δερματίτιδας), στο λαιμό, και γενικότερα ενόχληση σε τμήματα του αναπνευστικού συστήματος. Σύμφωνα με το τμήμα υγείας της Νέας Υόρκης (The New York City Department of Health and Mental Hygiene) υψηλά επίπεδα έκθεσης σε σκόνη fiberglass μπορούν να επιδεινώσουν το άσθμα ή τη βρογχίτιδα. Ωστόσο μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων (αναπνευστικές ασθένειες, καρκίνο ή άλλη αλλεργική αντίδραση), οι οποίες να συνδέονται με το fiberglass, δεν έχουν εξακριβωθεί εντελώς μέχρι και σήμερα. Μελέτες και πειράματα σε ζώα (ποντίκια), που παρουσίασαν αυξημένες πιθανότητες εμφάνισης καρκίνου των πνευμόνων, αμφισβητούνται. Βασισμένη σε αυτές ακριβώς τις ζωικές μελέτες, η διεθνής επιτροπή για την αντικαρκινική έρευνα (International Agency for Research on Cancer) έχει ταξινομήσει, ήδη από το 1994, μερικές από τις ίνες γυαλιού (fiberglass) ως πιθανές ανθρώπινες καρκινογόνες ουσίες (καρκινογόνους παράγοντες). Πρόσφατες μελέτες σε περισσότερους από 30.000 εργάτες βιομηχανιών, που χειρίζονταν το συγκεκριμένο υλικό, δεν μπόρεσαν να εντοπίσουν κανένα σημαντικό αποδεικτικό στοιχείο για την πρόκληση καρκίνου σε ανθρώπους. Παρ' όλα αυτά συνιστάται σε όσους χρησιμοποιούν και εργάζονται με το συγκεκριμένο υλικό να παίρνουν απαραίτητες προφυλάξεις, δηλαδή να προστατεύουν τα μέλη του σώματός τους (μάτια, μύτη κ.λπ.) φορώντας ειδικές φόρμες, γυαλιά, γάντια και μετά το τέλος της εργασίας να καθαρίζουν σχολαστικά το δέρμα τους με σαπούνι και άφθονο ζεστό νερό.

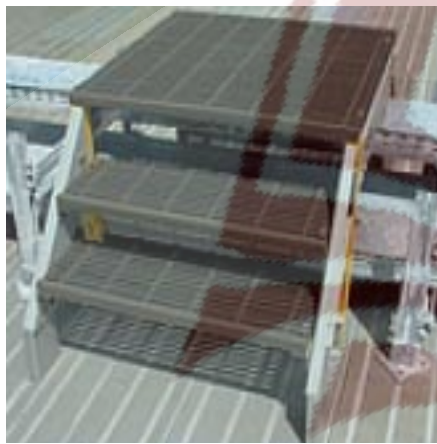
Ο κυριότερος κίνδυνος, που σχετίζεται με το σύνθετο υλικό fiberglass (F.R.P.), είναι οι διάφορες χημικές ουσίες που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και του σχηματισμού του. Η πολυεστερική ρητίνη καταλύεται από κάποιο οργανικό υπεροξειδίο, το οποίο συνήθως είναι το υπεροξειδίο της μεθυλαιθυλοκετόνης. Οι ενώσεις κοβαλτίου, που χρησιμοποιούνται συχνά ως επιταχυντές, μπορούν να προκαλέσουν αλλεργική δερματίτιδα ή αλλεργικό άσθμα. Η ακετόνη, που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό των εργαλείων, μπορεί να προκαλέσει μέχρι και παράλυση του κεντρικού νευρικού

συστήματος. Το σημαντικότερο στοιχείο που θα πρέπει να έχει υπόψη του κανείς, για αυτές τις χημικές ουσίες είναι ότι, είναι επικίνδυνες για την υγεία όταν εισπνέονται, ενώ είναι και πιθανό να διαμορφώσουν εύφλεκτες ή εκρηκτικές συγκεντρώσεις ακόμα και σε θερμοκρασία δωματίου. Για τους λόγους αυτούς κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας είναι απαραίτητος ο κατάλληλος αναπνευστικός εξοπλισμός και ο επαρκής εξαερισμός του χώρου επεξεργασίας.

4.10 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ^{4,35,38,39}

Το σύνθετο F.R.P., χάρη στις πολλές διαφορετικές ιδιότητες του, έχει ποικιλία χρήσεων. Αναπτύχθηκε αρχικά κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκόσμιου Πολέμου, όπου χρησιμοποιούνταν σε εφαρμογές πολεμικής χρήσης (όπως αεροσκάφη, εσωτερικά πλοίων και υποβρυχίων). Η κύρια χρήση του υλικού εντοπίζεται στην κατασκευή θαλάσσιων σκαφών, που ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1940, ενώ σήμερα κατέχει τον κυρίαρχο ρόλο στο συγκεκριμένο τομέα. Η χρήση του, χάρη στην εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνικών παραγωγής, έχει διευρυνθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών και έτσι σήμερα χρησιμοποιείται εκτενώς σε τομείς όπως : σε βιομηχανίες αυτοκινήτων, αθλητικού εξοπλισμού, στην κατασκευή επίπλων, ειδών υγιεινής, σωληνώσεων, αποχετεύσεων, στην κατασκευή δεξαμενών αποθήκευσης (πετρελαίου και άλλων χημικών) και φυσικά σε τεχνικά έργα (ως ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και φέρουσας τοιχοποιίας).





ΔΙΑΦΕΡΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥ FRP.

ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο κατασκευαστικό μέρος γίνεται εξοικείωση με την τεχνική παρασκευής του σύνθετου F.R.P., μέσω της δημιουργίας έξι δοκιμίων από το συγκεκριμένο υλικό τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για δοκιμές στο εργαστήριο.

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Τα υλικά για την κατασκευή των δοκιμίων που θα υποβληθούν σε μηχανικές καταπονήσεις στο εργαστήριο μηχανικής, τα προμηθευτήκαμε από την εταιρία Κώστας Χρόνης Α.Ε. που βρίσκεται στην οδό Τατοΐου 54 στη Μεταμόρφωση Αττικής. Η κατασκευή των δοκιμίων έγινε στο διάστημα 7 έως 9 Νοεμβρίου 2006 σε εργαστήριο ξυλουργικής.

5.1 ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

- Πλάκες νοβοπάν
- Πινέλο
- Δοχείο ανάδευσης
- Ασετόν για τον καθαρισμό των εργαλείων
- Πλαστική επιφάνεια
- Μεταλλικό ρολό πατήματος (με εξογκώματα κατά μήκος του κυλίνδρου)
 - Μεταλλικοί σφικτήρες
 - Γυαλόχαρτο και τριβείο

5.2 ΥΛΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

- Πολυεστερική Ρητίνη Γενικής Χρήσης (NORPOL 440-800)
- Καταλύτης (Υπεροξειδίο Μεθυλαιθυλοκετόνης)
- Υαλοπίλημα ινών μικρού μήκους, τυχαίων διευθύνσεων (ίνες fiberglass : τύπου E, συγκρατούμενες με τη μέθοδο powder)
- Υαλόπλεγμα δύο διευθύνσεων (ίνες fiberglass : τύπου E)



5.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η διαδικασία που χρησιμοποιήσαμε είναι μη αυτοματοποιημένη μέθοδος ανοιχτού καλουπιού, με χειρονακτική εφαρμογή της πολυεστερικής ρητίνης, καθώς και άσκηση πίεσης για καλύτερη συμπύκνωση των στρώσεων του σύνθετου υλικού. Δεν απαιτεί ιδιαίτερη τεχνογνωσία, είναι χαμηλού κόστους και ενδείκνυται για την παρασκευή σχετικά μικρού αριθμού ιδίων στοιχείων. Η συγκεκριμένη διαδικασία χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή και επισκευή θαλάσσιων σκαφών.

5.4 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΗΣ ΡΗΤΙΝΗΣ

Προσθέτουμε στο δοχείο ανάδευσης την πολυεστερική ρητίνη και την κατάλληλη ποσότητα καταλύτη. Η αναλογία είναι 2 % καταλύτη κατά βάρος (ή 15 – 20 γραμμάρια ανά κιλό). Ωστόσο ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες προσθέτουμε ή αφαιρούμε αντίστοιχα καταλύτη. Στη συνέχεια αναδεύουμε συνεχώς μέχρι το μείγμα να γίνει ομογενές και παχύρρευστο. Ο διαθέσιμος χρόνος από την προσθήκη του καταλύτη μέχρι την πήξη του μίγματος είναι 15 λεπτά για θερμοκρασία 25 °C .

5.5 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Πάνω στις επίπεδες πλάκες από νοβοπάν τοποθετούμε μια λεία πλαστική επιφάνεια για να μην κολλήσει το ξύλο πάνω στο υλικό μας .

5.6 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΩΤΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

Με το πινέλο απλώνουμε πολυεστερική ρητίνη επάνω στην πλαστική επιφάνεια. Έπειτα στην υγρή επιφάνεια τοποθετούμε το πρώτο φύλλο ινών γυαλιού και με το πινέλο το διαβρέχουμε τις ίνες με την πολυεστερική ρητίνη. Όταν έχουμε διαβρέξει πλήρως το πρώτο φύλλο, προσθέτουμε ακόμη ένα. Διαβρέχουμε πάλι με την πολυεστερική ρητίνη και συνεχίζουμε ομοίως τη διαδικασία ώσπου να έχουμε τοποθετήσει 6 ή 7 το πολύ, φύλλα ινών γυαλιού. Αυτά τα 6 πρώτα φύλλα αποτελούν την πρώτη στρώση. Με το ειδικό ρολό πατήματος πιέζουμε ολόκληρη την πρώτη στρώση προκειμένου να απομακρυνθούν τυχόν φυσαλίδες αέρα που έχουν εγκλωβιστεί και να πετύχουμε συμπίεση. Έπειτα τοποθετούμε στο πάνω μέρος μια ακόμη πλαστική επιφάνεια, μια ακόμη πλάκα νοβοπάν και με τους μεταλλικούς σφικτήρες προκαλούμε μεγαλύτερη συμπίεση στο υλικό.

Δέκα λεπτά έπειτα από την παρασκευή της πρώτης στρώσης, τα υλικά θα αρχίσουν να αντιδρούν μεταξύ τους και θα εκλυθεί θερμότητα, διότι η αντίδραση σκλήρυνσης της πολυεστερικής ρητίνης είναι εξώθερμη. Το σύνθετο υλικό θα αρχίσει να στερεοποιείται και θα είναι έτοιμο σε περίπου δύο ώρες, όταν και θα έχει κρυώσει. Μέχρι τότε όμως θα ήταν λάθος να προχωρήσουμε στην προσθήκη επιπλέον στρώσης (ή ακόμα και ενός φύλλου) αφού κάτι τέτοιο θα αυξήσει τη θερμότητα που εκλύεται και μπορεί να προκαλέσει ρηγματώση στο υλικό (και να το αχρηστέψει).

Μετά τις δύο ώρες απομακρύνουμε τους μεταλλικούς σφικτήρες, το νοβοπάν και την πλαστική επιφάνεια. Το πάχος του υλικού που θα έχουμε επιτύχει μετά την πρώτη στρώση είναι περίπου 6 χιλιοστά. Προκειμένου να αυξηθεί η διάσταση προχωρούμε στην κατασκευή επιπλέον στρώσεων.

5.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΠΙΠΛΕΟΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ

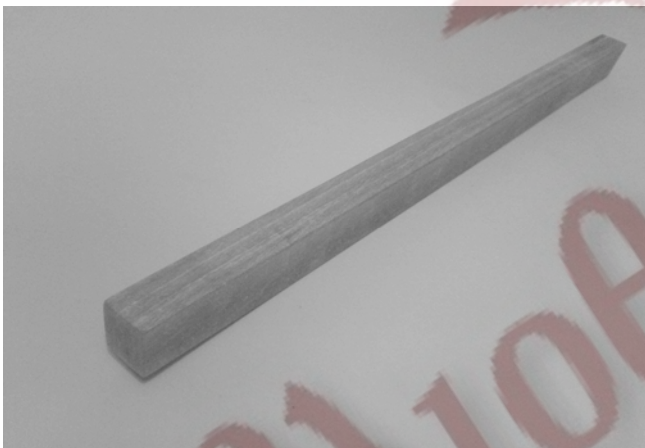
Κατασκευάζουμε πάλι μείγμα πολυεστερικής ρητίνης και καταλύτη και με αυτό αλείφουμε την επιφάνεια της πρώτης στρώσης. Προσθέτουμε ένα

φύλλο κάθε φορά και το διαβρέχουμε όπως και προηγουμένως μέχρι να φτάσουμε τα 6 φύλλα. Έπειτα συσφίγγουμε το υλικό για δύο ώρες μέχρι να στερεοποιηθεί. Συνεχίζουμε τη διαδικασία μέχρι να επιτύχουμε την επιθυμητή διάσταση.

5.8 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Παίρνουμε το κάθε δοκίμιο και το κόβουμε στην κορδέλα κοπής στις επιθυμητές διαστάσεις και στη συνέχεια λειαίνουμε τις επιφάνειές του με τη βοήθεια γυαλόχαρτου και τριβείου. Τα έξι δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν στις δοκιμές του εργαστηρίου (δύο για κάθε καταπόνηση) είναι πλέον έτοιμα.

Τα δοκίμια που κατασκευάσαμε παρουσιάζονται παρακάτω, όπου αναγράφονται και οι διαστάσεις τους.



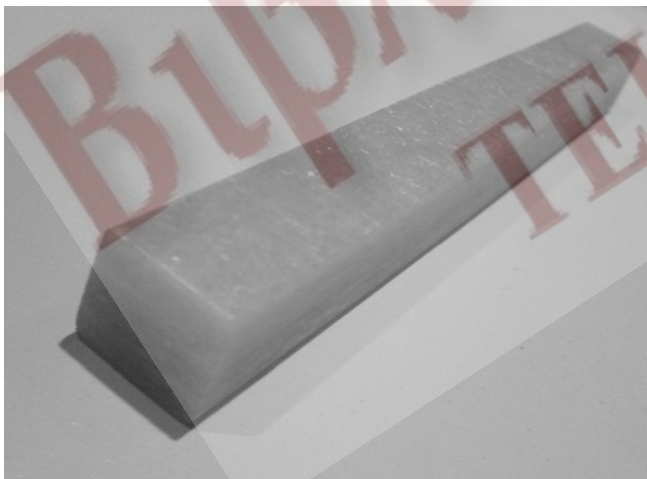
Ράβδος fiberglass για χρήση σε δοκιμές κάμψης .

Διαστάσεις

Μήκος : 40,00 cm

Πλάτος : 1,94 cm

Ύψος : 3,00 cm



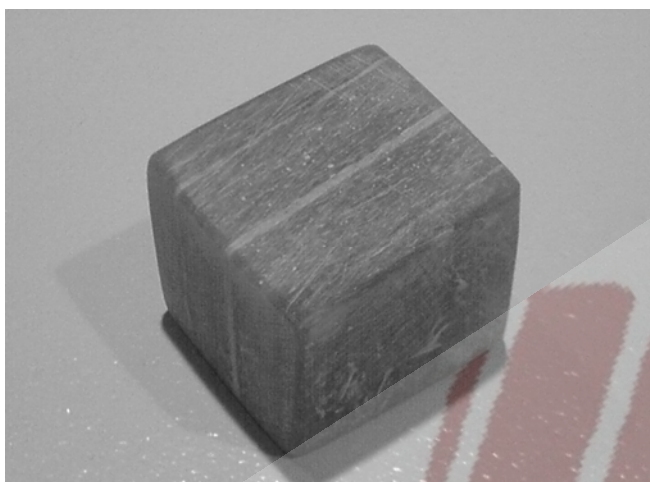
Ράβδος fiberglass για χρήση σε δοκιμές εφελκυσμού .

Διαστάσεις

Μήκος : 15,00 cm

Πλάτος : 1,00 cm

Ύψος : 1,00 cm



Κύβος fiberglass για χρήση
σε δοκιμές θλίψης.

Διαστάσεις

Μήκος : 2,00 cm
Πλάτος : 2,00 cm
Ύψος : 2,00 cm

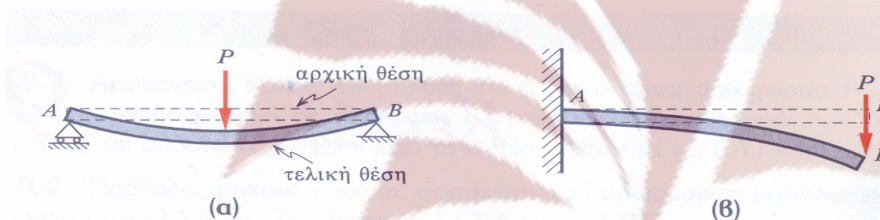
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Κατά το πειραματικό μέρος, τα έξι δοκίμια από F.R.P., θα ελεγχθούν, ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες μέσα από τις εξής απλές μηχανικές καταπονήσεις στο εργαστήριο (κάμψη, εφελκυσμό, θλίψη).



6.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ

Η εντατική κατάσταση στην οποία βρίσκεται μια δοκός, που υποβάλλεται σε εγκάρσια φόρτιση, ονομάζεται κάμψη. Χαρακτηριστικά παρατηρείται ότι, αν σε μία αμφιέριστη δοκό (α), ή σε μία δοκό σε πρόβολο (β) επιβληθεί ένα εγκάρσιο φορτίο P , τότε και στις δύο περιπτώσεις η δοκός θα παραμορφωθεί κατά τη διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου και ο άξονάς της θα καμφθεί, όπως φαίνεται παραστατικά στα παρακάτω σχήματα .



Παραμόρφωση δοκών λόγω εγκάρσιου εξωτερικού φορτίου

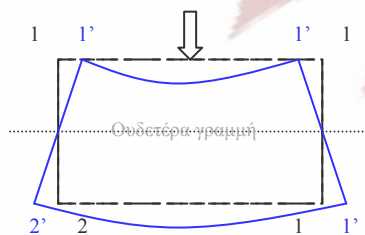
6.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΚΑΜΨΗΣ

- i. Ο διαμήκης άξονας της δοκού είναι ευθύγραμμος.
- ii. Οι γραμμικές διαστάσεις της διατομής είναι μικρές συγκρινόμενες με το μήκος της δοκού.
- iii. Η διατομή της δοκού έχει τουλάχιστον έναν άξονα συμμετρίας, που περιέχεται στο επίπεδο φόρτισης.
- iv. Όλα τα φορτία ενεργούν κάθετα στον άξονα της δοκού και βρίσκονται μέσα στο επίπεδο φόρτισης. Το επίπεδο φόρτισης, ή περιέχει τον άξονα συμμετρίας της διατομής ή είναι κάθετο σε αυτόν.
- v. Ισχύει η αρχή του Bernoulli - Navier , κατά την οποία :
Κάθε διατομή επίπεδη και κάθετη στον άξονα της δοκού πριν την παραμόρφωση, παραμένει επίπεδη και κάθετη και μετά από

αυτήν , όταν και μόνο όταν : $(l / h) > 10$, όπου h το ύψος της διατομής της δοκού και l το μήκος της.

- vi. Ισχύει ο νόμος του Hooke, δηλαδή οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από το όριο αναλογίας του υλικού.
- vii. Η ροπή κάμψης θεωρείται θετική, όταν τείνει να εφελκύσει την ίνα αναφοράς που λαμβάνεται ως κατώτερη.

Θεωρούμε ότι η δοκός αποτελείται από δέσμες αλληλένδετων ινών, που είναι διατεταγμένες κατά οριζόντια και παράλληλα μεταξύ τους στρώματα. Κατά την καταπόνηση σε κάμψη αναπτύσσονται καμπτικές ροπές, οι οποίες προκαλούν αφενός μεν καμπύλωση της δοκού, αφετέρου δε τη δημιουργία τάσεων εντός του υλικού της. Το αποτέλεσμα της κάμψης φαίνεται στο επόμενο σχήμα .



Αρχικές Διατομές (προ της φόρτισης)
Τελικές Διατομές (μετά τη φόρτιση)

Όπως γίνεται φανερό από το σχήμα, μετά την κάμψη , έχουμε επιβράχυνση των ανωτέρων ινών και επιμήκυνση των κατωτέρων, οι οποίες προκαλούνται από καταπόνηση των ινών, σε θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα. Επειδή το υλικό δεν παρουσιάζει κενά εντός της μάζας του, η παραμόρφωση είναι συνεχής και επομένως η μετάβαση από το φαινόμενο θλίψης στο φαινόμενο του εφελκυσμού γίνεται βαθμιαία και όχι απότομα. Δηλαδή σε ενδιάμεσες θέσεις της διατομής υπάρχουν ίνες που δεν υφίστανται καμία μεταβολή στο μήκος τους, και άρα δεν καταπονούνται ούτε σε εφελκυσμό ούτε σε θλίψη, αλλά σε διάτμηση, η οποία πραγματοποιείται κατά την ολίσθηση κάθε οριζόντιου στρώματος σε σχέση με τα εκατέρωθέν του. Οι ίνες που δεν καταπονούνται ούτε σε εφελκυσμό ούτε σε θλίψη αλλά μόνο σε διάτμηση, ονομάζονται ουδέτερες ίνες, το επίπεδο που αυτές αποτελούν ουδέτερο επίπεδο ή ουδέτερη στρώση και τέλος το ίχνος του ουδέτερου επιπέδου σε μια διατομή της δοκού, ουδέτερα γραμμή. Ο υπολογισμός των ορθών τάσεων γίνεται από τον τύπο : $\sigma_x = (M_z * y) / I_z$.

Από τον παραπάνω τύπο γίνεται φανερό ότι η αναπτυσσόμενη ορθή τάση είναι ανάλογη της ροπής κάμψης (M_z), ανάλογη της απόστασης της εξεταζόμενης ίνας από την ουδετέρα γραμμή (y) και αντιστρόφως ανάλογη της ροπής αδράνειας (I_z) της διατομής ως προς την ουδετέρα γραμμή.

Στην πράξη επιζητούμε συνήθως τον υπολογισμό της μέγιστης ορθής τάσης σ_{\max} που αναπτύσσεται εντός του υλικού της δοκού. Ο τύπος γίνεται : $\sigma_{\max} = (M_z * y_{\max}) / I_z$, όπου y_{\max} η απόσταση των ακραίων ινών από την ουδετέρα γραμμή.

Για να αντέχει μία δοκός που καταπονείται σε κάμψη, θα πρέπει: η μέγιστη ορθή τάση να είναι μικρότερη ή το πολύ ίση από την επιτρεπόμενη τάση του υλικού της. Δηλαδή να ισχύει : $\sigma_{\max} \leq \sigma_{\text{επ}}$.

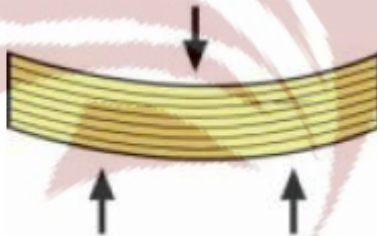
Για λόγους αντοχής, επειδή η αναπτυσσόμενη αυτή τάση ενδείκνυται να παρουσιάζει μικρές τιμές, θα πρέπει ο παρανομαστής να παίρνει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι σε ορθογωνική διατομή $b * h$ για παράδειγμα, όπου η μια ροπή αδράνειας είναι $(b * h^3) / 12$, ενώ η άλλη $(b^3 * h) / 12$ και επειδή $h > b$, μεγαλύτερη είναι η πρώτη, άρα ενδείκνυται η διατομή να τοποθετείται όρθια για την κάμψη.

Η καμπύλη που προκύπτει από την φόρτιση της δοκού από εγκάρσιο φορτίο, ονομάζεται ελαστική γραμμή και οι μετατοπίσεις των διαφόρων σημείων του ουδέτερου άξονα ονομάζονται βέλη κάμψης και συμβολίζονται με f . Το σύνολο των βελών κάμψης αποτελεί την ελαστική γραμμή. Η εξίσωση της ελαστικής γραμμής κατά την κάμψη δίνεται από την ακόλουθη δευτέρου βαθμού διαφορική εξίσωση : $d^2y / dx^2 = - M_z(x) / E I_z$

Η προηγούμενη σχέση, για την αμφιέρειστη δοκό γίνεται :
 $f = (P * l^3) / (48 * E * I_x)$, όπου P : το ασκούμενο φορτίο, f : το μέγιστο βέλος κάμψης, l : το μήκος της δοκού, E : το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, και I_x : η ροπή αδράνειας της διατομής που εξαρτάται μόνο από τα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής και για την ορθογωνική διατομή δίνεται από τον τύπο $I_x = (b * h^3) / 12$.

6.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ F.R.P. ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΜΨΗ

Η καταπόνηση σε κάμψη μιας δοκού F.R.P. είναι στην πραγματικότητα συνδυασμός εφελκυσμού, θλίψης και διάτμησης. Όταν φορτίζεται ένα σύνθετο, με συνεχείς προσανατολισμένες ίνες, όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, οι ανώτερες ίνες (στρώσεις) καταπονούνται σε θλίψη, οι κατώτερες σε εφελκυσμό ενώ οι ενδιάμεσες καταπονούνται από διατμητικές τάσεις. Η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού στην κάμψη εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις εφελκυστικές ιδιότητες και την αντοχή των ινών ενίσχυσης, από την ακαμψία του συστήματος της ρητίνης και τέλος από τη συνάφεια μεταξύ των επιφανειών της ρητίνης και των ινών.

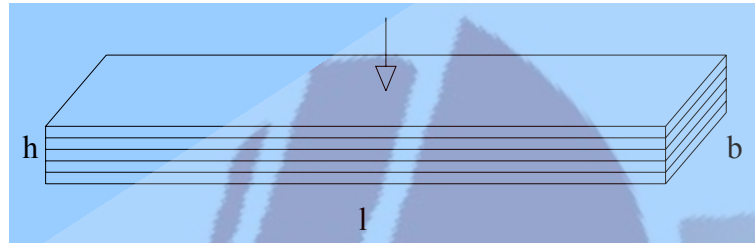


6.4 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

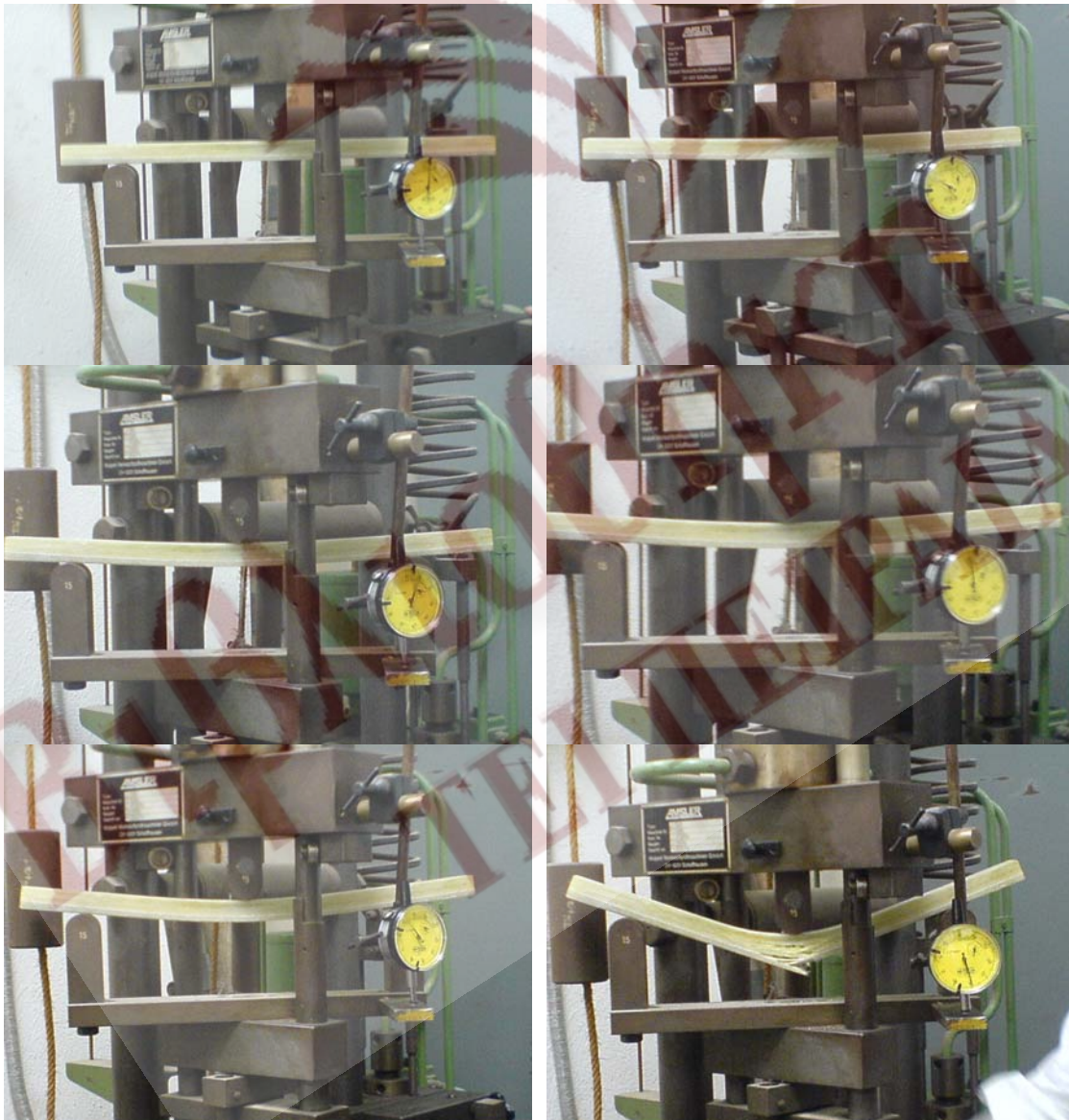
Τοποθετούμε την πρώτη δοκό του fiberglass στη συσκευή κάμψης. Η δοκός έχει κατασκευαστεί όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, από πολυεστερική ρητίνη, υαλοπίλημα ινών τυχαίων διευθύνσεων και μικρού μήκους (τύπου E, συγκρατούμενες με τη μέθοδο powder) και υαλόπλεγμα συνεχών ινών δύο διευθύνσεων (ίνες fiberglass : τύπου E), σε διαδοχικές στρώσεις, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκαφών. Τα στοιχεία της συσκευής κάμψης είναι : μοντέλο AMSLER, τύπου 120 και η ημερομηνία κατασκευής της 07 / 03 / 1974. Η συσκευή ασκεί φορτίο P στο κέντρο ακριβώς της δοκού και κάθετα στον άξονα της με αποτέλεσμα να καμφθεί στο κέντρο της αμφιέρειστη δοκός). Οι μετρήσεις που παίρνουμε από το πείραμα είναι φορτία P (σε Kg) και βέλη κάμψης f (σε εκατοστά του χιλιοστού) .

Κατά το πρώτο πείραμα η δοκός τοποθετείται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Τα γεωμετρικά στοιχεία της δοκού είναι : h

= 19,40 mm , b = 30,00 mm και ωφέλιμο μήκος $l = 280,00$ mm, ενώ η ροπή αδράνειας της διατομής $I = (b \cdot h^3) / 12 = 18253,46$ mm⁴. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέχρι να σπάσει η δοκός του fiberglass.



Στις επόμενες έξι φωτογραφίες παρουσιάζεται η πορεία της δοκιμής έως τη θραύση.



Όπως γίνεται φανερό και από την τελευταία φωτογραφία, το σπάσιμο παρουσιάστηκε κάθετα στην επιφάνεια φόρτισης στη μέση της δοκού και στο κάτω της σημείο, από εφελκυστικές τάσεις (εκεί όπου έχει μέγιστη απόσταση $y = h/2$).

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα φορτία P που ασκούσε η συσκευή και τα αντίστοιχα βέλη κάμψης f που αναγράφονταν στο βελόμετρο. Διορθώνουμε κατάλληλα τις ενδείξεις της συσκευής ώστε οι τιμές να ξεκινούν από το μηδέν. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση $P_{\text{πραγματικό}} = F(f)$. Η γραφική παράσταση είναι αρχικά ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, που από κάποιο σημείο αρχίζει να καμπυλώνει ώσπου η δοκός να σπάσει. Αν η πορεία της δεν είναι ευθύγραμμη στο διάγραμμα κάνουμε την απαραίτητη διόρθωση των τιμών. Από τη γραφική με βάση τις διορθωμένες τιμές υπολογίζουμε το Μέτρο Ελαστικότητας (E) από τον τύπο : $E = (P \cdot I^3) / (48 \cdot f \cdot I_x)$, καθώς και την Τάση Θραύσεως (σ_{max}).

6.5 ΠΙΝΑΚΑΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS

ΚΑΜΨΗ 1η - ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ

$b=30,00 \text{ mm}$
 $h = 19,40 \text{ mm}$
 $I = 280,00 \text{ mm}^4$

$$J = b \cdot h^3 / 12 = 18253,46 \text{ mm}^4$$

Διόρθωση
 βελών στο
 $f=60 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

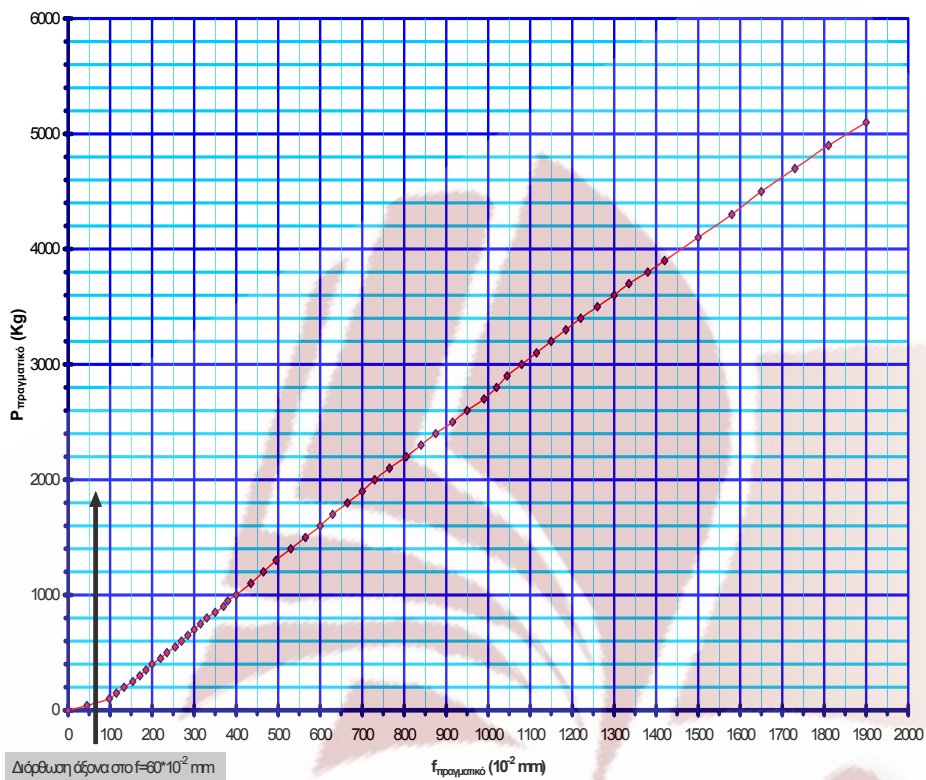
$$E = (P \cdot I^3) / (48 \cdot f \cdot J)$$

$P_{\text{ένδειξη}}$ (Kg)	$P_{\text{πραγματικό}}$ (Kg)	$f_{\text{ένδειξη}} = f_{\text{πραγματικό}}$ (10^{-2} mm)	$f_{\text{διορθωμένο}}$ (10^{-2} mm)	E (Kg / mm^2)	$E_{\text{ΜΕΣΟ}}$ (KN / mm^2)	$E_{\text{ΜΕΣΟ}}$ (KN/ mm^2) =GPa
100	0	0	-	-		71,31
140	40	45	-	-		
200	100	98	38	6593,32	69,73	
250	150	115	55	6833,08		
300	200	133	73	6864,28		
350	250	154	94	6663,46		
400	300	171	111	6771,52		
450	350	185	125	7015,29		
500	400	200	140	7158,46		
550	450	220	160	7046,61		

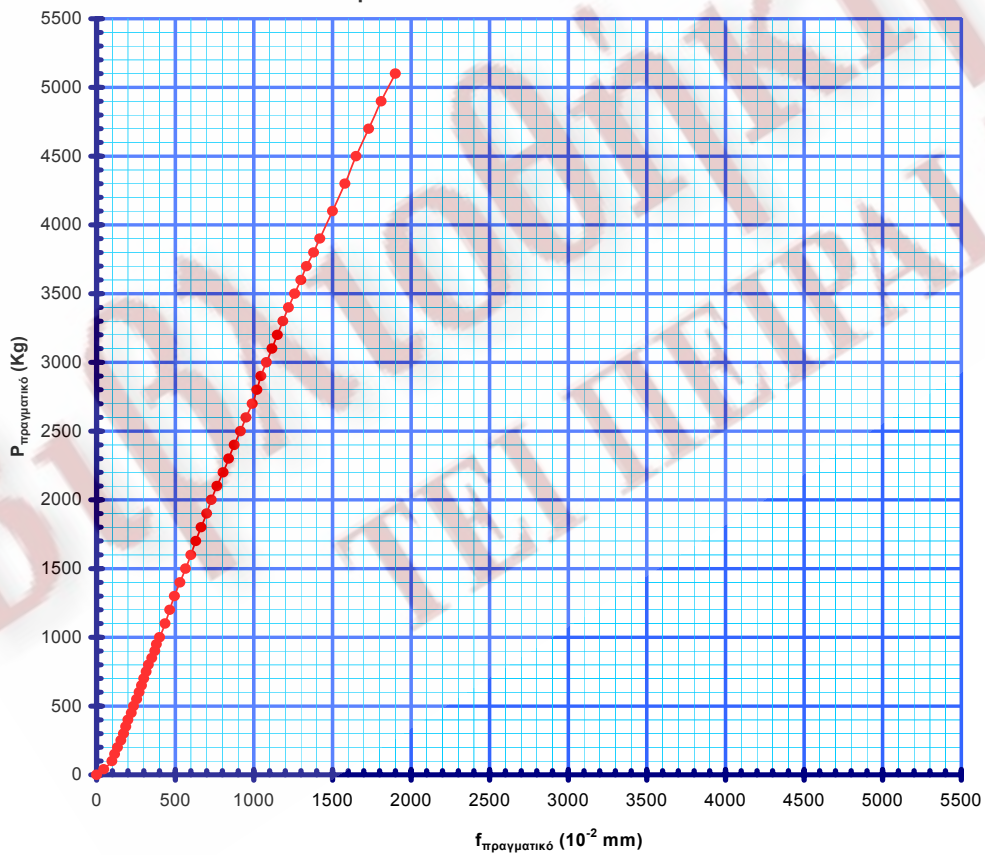
600	500	235	175	7158,46	
650	550	255	195	7066,69	
700	600	270	210	7158,46	
750	650	285	225	7238,00	
800	700	300	240	7307,59	
850	750	315	255	7369,00	
900	800	330	270	7423,59	
950	850	350	290	7343,59	
1000	900	370	310	7273,92	
1050	950	380	320	7438,09	
1100	1000	400	340	7369,00	
1200	1100	435	375	7349,35	72,89
1300	1200	465	405	7423,59	
1400	1300	495	435	7487,58	
1500	1400	530	470	7463,08	
1600	1500	565	505	7441,96	
1700	1600	600	540	7423,59	
1800	1700	630	570	7472,43	
1900	1800	665	605	7454,26	
2000	1900	700	640	7438,09	
2100	2000	730	670	7478,99	
2200	2100	765	705	7463,08	
2300	2200	805	745	7398,68	
2400	2300	840	780	7387,90	
2500	2400	875	815	7378,04	
2600	2500	915	855	7325,91	
2700	2600	950	890	7319,32	
2800	2700	990	930	7273,92	
2900	2800	1020	960	7307,59	
3000	2900	1045	985	7376,48	
3100	3000	1080	1020	7369,00	
3200	3100	1115	1055	7362,02	
3300	3200	1150	1090	7355,48	
3400	3300	1185	1125	7349,35	
3500	3400	1220	1160	7343,59	
3600	3500	1260	1200	7307,59	
3700	3600	1300	1240	7273,92	
3800	3700	1335	1275	7270,75	
3900	3800	1380	1320	7212,69	
4000	3900	1420	1360	7184,78	
4200	4100	1500	1440	7133,60	
4400	4300	1580	1520	7087,82	
4600	4500	1650	1590	7090,93	
4800	4700	1730	1670	7051,30	
5000	4900	1810	1750	7015,29	
5200	5100	1900	1840	6944,48	

ΘΡΑΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΚΑΜΨΗ 1η – ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ
ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΑΞΟΝΑ



ΚΑΜΨΗ 1η ΔΟΚΟΥ FIBERGLASS - ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ



6.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρο Ελαστικότητας : $E_{1\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 71,31 \text{ KN/mm}^2 = 71,31 \text{ GPa}$

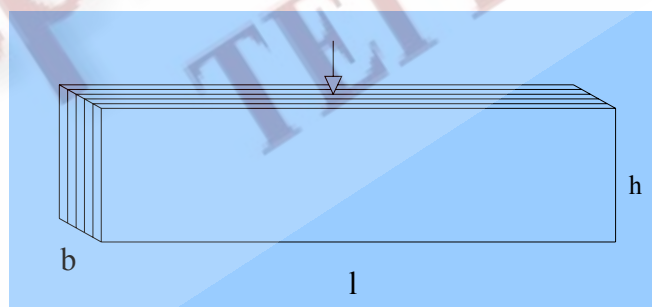
$$\begin{aligned} \text{Τάση Θραύσεως} : \sigma_{1\text{ΚΑΜΨΗΣ}} &= \{[P \cdot (l/4)] / [(b \cdot h^3) / 12]\} \cdot h/2 = \\ &= \{[5100 \text{ Kg} \cdot (280 \text{ mm} / 4)] / [18253,46 \text{ mm}^4]\} \cdot (19,40 \text{ mm} / 2) = \\ &= 189,72 \text{ Kg/mm}^2 = 1,86 \text{ KN/mm}^2 = 1,86 \text{ GPa} \end{aligned}$$

Μέγιστο Βέλος Κάμψης : $f_{1\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 1840 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

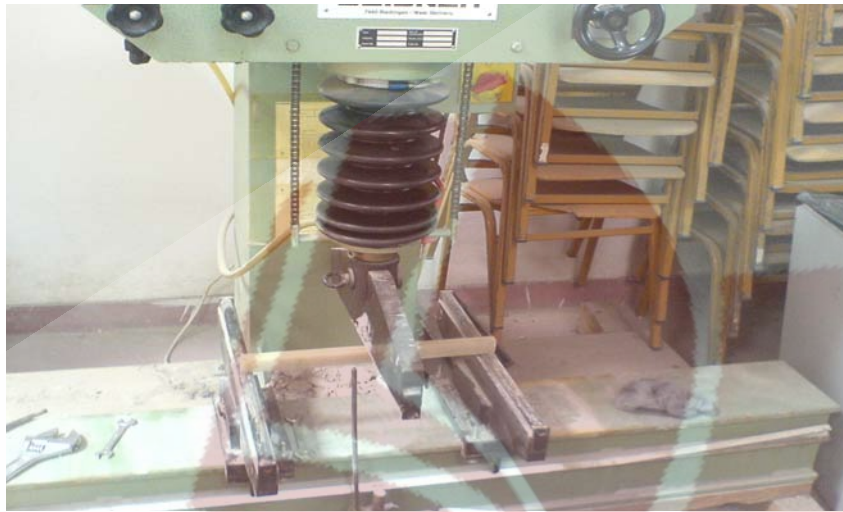
6.7 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΚΑΜΨΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

Τοποθετούμε την δεύτερη δοκό του fiberglass στη συσκευή κάμψης. Τα στοιχεία της είναι : συσκευή Seidner, type 200/100E, model 40424, με έτος κατασκευής 1980. Η διαδικασία φόρτισης είναι η ίδια, δηλαδή ασκούμε φορτίο P στο κέντρο ακριβώς της δοκού και κάθετα στον άξονα της με αποτέλεσμα να καμφθεί στο κέντρο της (αμφιέρειστη δοκός). Οι μετρήσεις που παίρνουμε από το πείραμα είναι φορτία P (σε KN) και βέλη κάμψης f (σε εκατοστά του χιλιοστού).

Η διαφοροποίηση των δύο δοκιμών εντοπίζεται στο ότι κατά το δεύτερο πείραμα η δοκός τοποθετείται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα . Επομένως τα γεωμετρικά στοιχεία της δοκού είναι : $b = 19,40 \text{ mm}$, $h = 30,00 \text{ mm}$ και ωφέλιμο μήκος $l = 380,00 \text{ mm}$, ενώ η ροπή αδράνειας της διατομής $I = (b \cdot h^3) / 12 = 43650 \text{ mm}^4$. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέχρι τη θραύση του δοκιμίου.



Στις επόμενες φωτογραφίες παρουσιάζεται η πορεία της δεύτερης δοκιμής έως τη θραύση.





ΤΟ ΔΟΚΙΜΙΟ ΜΕΤΑ ΤΗΝ 2^η ΚΑΜΨΗ

Όπως γίνεται φανερό και από την τελευταία φωτογραφία, το σπάσιμο παρουσιάστηκε κάθετα στην επιφάνεια φόρτισης στη μέση της δοκού και στο κάτω της σημείο, από εφελκυστικές τάσεις .

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα φορτία P που ασκούσε η συσκευή και τα αντίστοιχα βέλη κάμψης f που αναγράφονταν στο βελόμετρο. Οι ενδείξεις της συσκευής δεν χρειάζονται διόρθωση, επομένως είναι $P_{\text{ένδειξη}} = P_{\text{πραγματικό}}$ και $f_{\text{ένδειξη συσκευής}} = f_{\text{πραγματικό}}$ μετατρέπουμε σε πραγματικές τιμές $P_{\text{πραγματικό}}$ και $f_{\text{πραγματικό}}$. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση $P_{\text{πραγματικό}} = F(f_{\text{πραγματικό}})$. Η γραφική παράσταση είναι ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και δεν χρειάζεται διόρθωση των αξόνων. Από τη γραφική με βάση τις διορθωμένες τιμές υπολογίζουμε το Μέτρο Ελαστικότητας (E) από τον τύπο : $E = (P \cdot l^3) / (48 \cdot f \cdot I_x)$, καθώς και την Τάση Θραύσεως (σ_{max}).

6.8 ΠΙΝΑΚΑΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS

ΚΑΜΨΗ 2^η - ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ

$$h=30,00 \text{ mm}$$

$$J=b \cdot h^3/12=43650 \text{ mm}^4$$

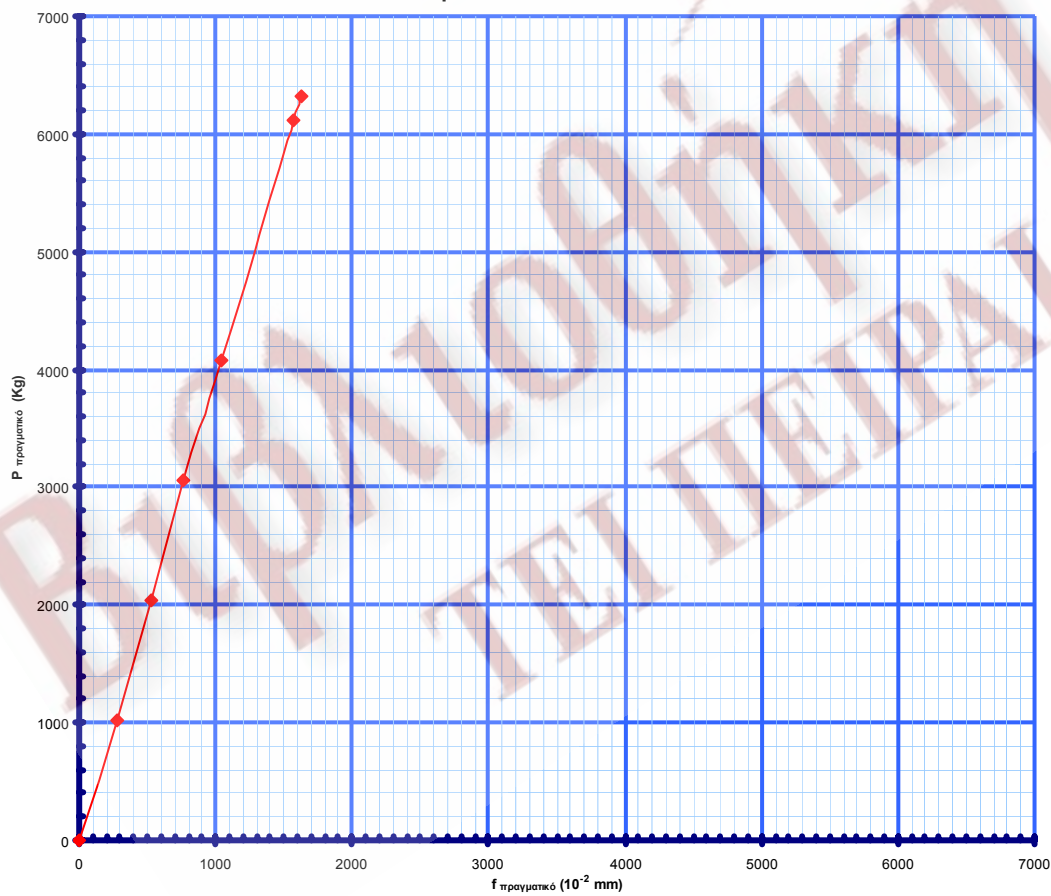
$$b = 19,40 \text{ mm}$$

$$l = 380,00 \text{ mm}$$

y Μετατροπή Μονάδων		x $E=(P \cdot I^3)/(48 \cdot f \cdot J)$		
$P_{\text{ένδειξη}} =$ $P_{\text{πραγματικό}}$	$P_{\text{ένδειξη}} =$ $P_{\text{πραγματικό}}$	$f_{\text{ένδειξη συσκευής}} =$ $f_{\text{πραγματικό}}$	E	$E_{\text{ΜΕΣΟ}}$
(KN)	(Kg)	(10^{-2} mm)	(KN / mm ²)	(KN / mm ²)
0	0	0	0	99,19
10	1019,72	282	92,87	
20	2039,43	524	99,96	
30	3059,15	768	102,30	
40	4078,86	1048	99,96	
60	6118,30	1571	100,02	
62	6322,24	1623	100,05	

ΘΡΑΥΣΗ

ΚΑΜΨΗ 2η - ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΙΣ ΙΝΕΣ



6.9 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρο Ελαστικότητας : $E_{2\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 99,19 \text{ KN/mm}^2 = 99,19 \text{ GPa}$

$$\begin{aligned} \text{Τάση Θραύσεως} : \sigma_{2\text{ΚΑΜΨΗΣ}} &= \{[P \cdot (l/4)] / [(b \cdot h^3) / 12]\} \cdot h/2 = \\ &= \{[62 \text{ KN} \cdot (380 \text{ mm} / 4)] / [43650 \text{ mm}^4]\} \cdot (30,00 \text{ mm} / 2) = \\ &= 4,05 \text{ KN/mm}^2 = 4,05 \text{ GPa} \end{aligned}$$

Μέγιστο Βέλος Κάμψης : $f_{2\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 1623 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$

6.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το μέτρο ελαστικότητας από την πρώτη δοκιμή υπολογίστηκε $E_{1\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 71,31 \text{ KN/mm}^2$, ενώ από τη δεύτερη $E_{2\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 99,19 \text{ KN/mm}^2$. Η τάση θραύσης υπολογίστηκε της πρώτης δοκιμής : $\sigma_{1\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 1,86 \text{ GPa}$ και της δεύτερης $\sigma_{2\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 4,05 \text{ GPa}$. Το μέγιστο βέλος κάμψης υπολογίστηκε $f_{1\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 1840 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ και $f_{2\text{ΚΑΜΨΗΣ}} = 1623 \cdot 10^{-2} \text{ mm}$ αντίστοιχα στις δύο δοκιμές. Οι διαφορές των αποτελεσμάτων οφείλονται στη φόρτιση των δοκιμών σε διαφορετική διεύθυνση σε σχέση με τις στρώσεις. Από τα αποτελέσματα είναι φανερό, ότι το υλικό παρουσιάζει ικανοποιητική αντοχή κατά την κάμψη, γεγονός που οφείλεται στις ιδιότητες του fiberglass και του πολυεστέρα, αλλά και στη συνάφεια των επιφανειών τους.

6.11 ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Σημειώνονται οι παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τυχόν σφάλματα στα αποτελέσματα μεταξύ των δύο δοκιμών, και αυτά είναι : η χρήση δύο διαφορετικών συσκευών κάμψης για τα δύο πειράματα, οι ίδιες οι συσκευές κάμψης και η παλαιότητά τους, η παλαιότητα του βελόμετρου, η παρατήρηση και ο υπολογισμός με το μάτι των βελών κάμψης στο βελόμετρο, ο συγχρονισμός των παρατηρητών, λάθη στις γραφικές παραστάσεις, λάθη στις διορθώσεις των τιμών των αποτελεσμάτων και στις στρογγυλοποιήσεις. Επίσης σφάλματα μπορεί να οφείλονται στις δοκούς fiberglass και συγκεκριμένα στην διαδικασία κατασκευής τους (π.χ. πιθανόν η κοπή τους να

μην ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος με αποτέλεσμα να μην έχουν σταθερή διατομή, ή μπορεί να διαφέρει η χημική σύστασή τους εξαιτίας της χειρονακτικής εμπότισης των ινών με τη ρητίνη, κλπ.).



7.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Η απλούστερη και η βασικότερη καταπόνηση, είναι ο εφελκυσμός. Ένα σώμα καταπονείται σε εφελκυσμό, όταν επάνω του επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις, οι οποίες τείνουν να το διασπάσουν. Αν το σώμα έχει έναν ευθύγραμμο κεντροβαρικό άξονα συμμετρίας και οι δυνάμεις κείνται επάνω στον άξονα αυτόν, τότε ο εφελκυσμός ονομάζεται αξονικός ή μονοαξονικός.



Αν οι δυνάμεις όμως είναι μεν παράλληλες με τον άξονα της ράβδου αλλά δεν κείνται επάνω σε αυτόν, τότε ονομάζεται έκκεντρος εφελκυσμός.



Ο εφελκυσμός νοείται συνήθως σε σώματα που έχουν μήκος αισθητά μεγαλύτερο από τις άλλες τους διαστάσεις, όπως είναι για παράδειγμα οι ράβδοι. Κατά τον εφελκυσμό οι δυνάμεις τείνουν να αυξήσουν το μήκος του σώματος. Κάθε ενδιάμεση διατομή της ράβδου καταπονείται σε εφελκυσμό.

Αν P το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο, F το εμβαδόν της ράβδου και σ η εσωτερική δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας, τότε από τη συνθήκη ισοροπίας προκύπτει : $S = \sigma F = P$. Συνεπώς : $\sigma = P / F$.

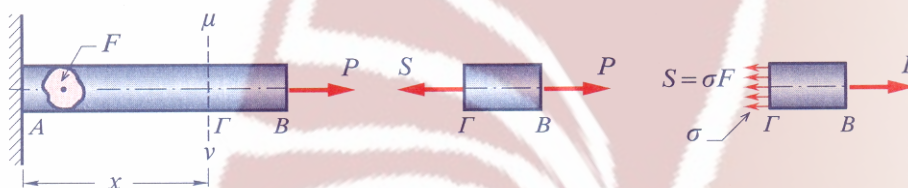
Το πηλίκο P/F ονομάζεται ορθή ή κάθετη τάση και έχει μονάδες μέτρησης $[N/m^2]$, $[kp/cm^2]$, $[t/m^2]$, κ.ά.

Η τάση έχει γενικά τα χαρακτηριστικά της δύναμης, είναι δηλαδή

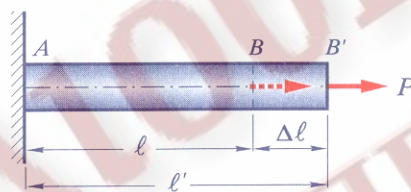
διάνυσμα, συνεπώς μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες κλπ.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό ίσως γνώρισμα της ορθής τάσης είναι ότι επενεργεί κάθετα στη διατομή F και επιπλέον δεχόμαστε πώς έχει την ίδια, τιμή σε κάθε σημείο της (ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων).

Η τάση σ , επειδή προέκυψε από εφελκυστική δύναμη P , θα την ονομάζουμε ορθή εφελκυστική τάση, ή απλά εφελκυστική τάση και θα τη θεωρούμε θετική (+).



Αν στην αβαρή ράβδο AB αρχικού μήκους l , επιβληθεί εφελκυστικό φορτίο P στο κέντρο βάρους B της διατομής της, θα παρατηρήσουμε ότι το σημείο B θα μετατοπιστεί δεξιότερα στη θέση έστω B' , όπως παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα. Η απόσταση $\Delta l = BB'$ ονομάζεται επιμήκυνση ή μήκυνση της ράβδου.



Επιμήκυνση εφελκυσόμενης ράβδου

Το τελικό μήκος έστω l' της ράβδου, που προκύπτει μετά την επιβολή του εφελκυστικού φορτίου γίνεται $l' = l + \Delta l$. Δηλαδή στον εφελκυσμό, το αρχικό μήκος μίας εφελκυσόμενης ράβδου αυξάνεται κατά Δl .

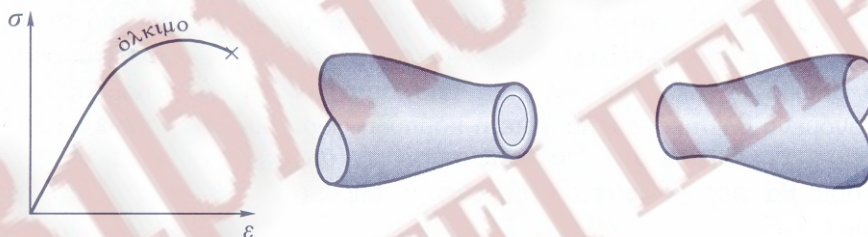
Ονομάζουμε ανηγμένη παραμόρφωση ή και ανηγμένη τροπή ϵ , την ποσότητα : $\epsilon = [\Delta l / l] = [(l' - l) / l] = [(l' / l) - 1]$.

Η ανηγμένη παραμόρφωση επειδή είναι λόγος μηκών, είναι αδιάστατο μέγεθος και αναφέρεται συνήθως επί τοις εκατό (%) και επειδή ανάγεται στο αρχικό μήκος l ράβδου, ονομάζεται επακριβώς ανηγμένη (ή ονομαστική) συμβατική παραμόρφωση.

7.2 ΟΛΚΙΜΗ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

Η **όλκιμη** θραύση διακρίνεται από τις έντονες πλαστικές παραμορφώσεις γύρω από την περιοχή θραύσης και η επιφάνεια θραύσης είναι ανομοιόμορφη και χονδρόκοκκη. Κατά τη θραύση αυτή, το υλικό σπάει εξαιτίας κυρίως, των διατμητικών τάσεων. Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να σπάνε όλκιμα, χαρακτηρίζονται ως όλκιμα υλικά ή συνεκτικά. Στο πείραμα του εφελκυσμού, η όλκιμη θραύση φαίνεται από τη δημιουργία λαιμού στο δοκίμιο. Η τάση ενός υλικού προς την όλκιμη θραύση, αυξάνει με αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της ταχύτητας φόρτισης. Επειδή η όλκιμη θραύση γίνεται αργά, δεν είναι τόσο επικίνδυνη όσο η ψαθυρή.

Στα όλκιμα υλικά, σαν κριτήριο διαστασιολόγησης ή ελέγχου χρησιμοποιείται η μέγιστη διατμητική τάση. Τα όλκιμα υλικά διαρρέουν πριν αστοχήσουν. Η διαρροή αυτή είναι αποτέλεσμα κρίσιμων διατμητικών τάσεων σε επίπεδο 45° .

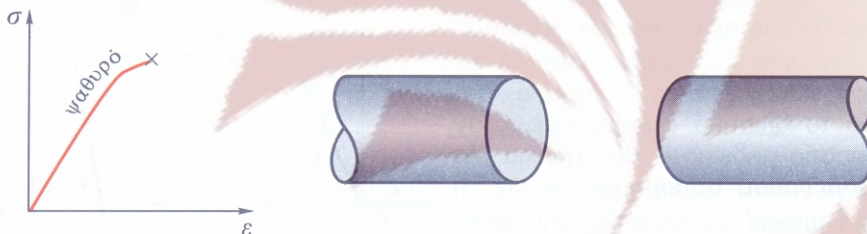


ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΟΛΚΙΜΗ ΘΡΑΥΣΗ

Ψαθυρή είναι η θραύση εκείνη, κατά την οποία το υλικό σπάει κάθετα στη διεύθυνση φόρτισής του, χωρίς σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις γύρω από την περιοχή θραύσης, η δε επιφάνεια θραύσης είναι λεία και λεπτόκοκκη. Τα

υλικά που έχουν την ιδιότητα να σπάνε ψαθυρά, χαρακτηρίζονται ως ψαθυρά υλικά. Στο πείραμα του εφελκυσμού, η ψαθυρή θραύση, φαίνεται από τη μη δημιουργία έντονου λαιμού στην περιοχή θραύσης, δηλαδή τα ψαθυρά υλικά θραύονται χωρίς προηγουμένως να διαρρεύσουν. Η τάση ενός υλικού προς ψαθυρή θραύση, αυξάνει με μείωση της θερμοκρασίας και αύξηση της ταχύτητας φόρτισης. Επειδή η ψαθυρή θραύση μπορεί να δημιουργηθεί ακόμα και κάτω από μικρές φορτίσεις και επειδή επιπλέον διαδίδεται ταχύτατα, είναι πολύ επικίνδυνη.

Στα ψαθυρά υλικά, σαν κριτήριο διαστασιολόγησης ή ελέγχου χρησιμοποιείται η μέγιστη ορθή τάση γιατί τα υλικά αυτά αστοχούν κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης ορθής τάσης.



ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

Τόσο η ολκιμότητα (συνεκτικότητα) όσο και η ψαθυρότητα, δεν είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός υλικού (όπως π.χ. το όριο διαρροής), αλλά μεταβάλλονται από εξωτερικές επιδράσεις όπως είναι η θερμοκρασία, το είδος της φόρτισης, η ταχύτητα καταπόνησης κα., ώστε το ίδιο υλικό άλλοτε να συμπεριφέρεται όλκιμα και άλλοτε ψαθυρά, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες.

7.3 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Για λόγους ασφαλείας ενός υλικού πρέπει οι αναπτυσσόμενες τάσεις $[\sigma$ (ορθή) αλλά και τ (διατμητική)] εντός των υλικών, να είναι μικρότερες ή το πολύ ίσες με τις αντίστοιχες επιτρεπόμενες, δηλαδή :

$$\sigma \leq \sigma_{\text{επ}} \quad \text{και} \quad \tau \leq \tau_{\text{επ}}$$

Οι εξισώσεις αυτές ονομάζονται συνθήκες αντοχής.

Σημειώνουμε ότι ως κριτήριο για την επιτρεπόμενη τάση, είναι το όριο διαρροής για τα όλκιμα υλικά , για δε τα ψαθυρά υλικά το όριο θραύσης.

7.4 ΚΑΘΑΡΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

Οι βασικές παραδοχές του καθαρού εφελκυσμού είναι :

1. Άξονας ευθύγραμμος.
2. Φορτίο αξονικό.
3. Υλικό ισότροπο και ομοιογενές.

Οι παραπάνω προϋποθέσεις είναι απαραίτητες ώστε το φορτίο να κατανέμεται κατά τον ίδιο τρόπο σε κάθε σημείο της διατομής και να ισχύει $\sigma = dP / df$.

7.5 ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΗΟΟΚΕ

Ο Robert Hooke πειραματιζόμενος με πρισματικές ράβδους ποικίλων υλικών, υποβαλλόμενες σε μονοαξονικό εφελκυσμό , απέδειξε ότι υπάρχει σχέση μεταξύ τάσης – παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα παρατήρησε ότι εντός μιας ελαστικής περιοχής ισχύει η σχέση :

$$\Delta \ell = \frac{P\ell}{EF}$$

Όπου : $\Delta \ell = |' - | = (BB')$ είναι η παραμόρφωση της ράβδου που για τον εφελκυσμό καλείται επιμήκυνση ή μήκυνση (σε m, cm, mm, κλπ.).

P το αξονικό φορτίο (δύναμη) εφελκυσμού (σε N, t, κλπ.).

F το εμβαδόν της κάθετης διατομής στον άξονα της ράβδου (σε m², cm², κλπ.).

E ο συντελεστής αναλογίας, που είναι η ελαστική σταθερά η οποία εξαρτάται από το είδος του υλικού. Η σταθερά αυτή ονομάζεται μέτρο

ελαστικότητας ή μέτρο του Young (σε N/m^2 , at, κλπ.).

7.6 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ HOOKE ΣΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Ο νόμος του Hooke που δίνεται από την προηγούμενη εξίσωση, ισχύει επακριβώς, εφόσον, πληρούνται οι παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές :

- I. Ο άξονας της ράβδου είναι ευθύγραμμος.
- II. Η δύναμη δρα στη διεύθυνση του άξονα της ράβδου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- III. Οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.
- IV. Όλες οι κατά μήκος ίνες της ράβδου επιμηκύνονται το ίδιο.
- V. Οι διατομές που είναι αρχικά επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.
- VI. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από την τάση αναλογίας σ_A του υλικού.

Με βάση την προηγούμενη παραδοχή, ότι οι αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις σε μία τυχαία διατομή της ράβδου κατανέμονται ομοιόμορφα σε αυτήν και αν αμελήσουμε το ίδιο βάρος της, η ορθή τάση σ είναι $\sigma = P / F$, η δε ανηγμένη (ή ειδική) παραμόρφωση ε από τη σχέση ορισμού της, είναι $\varepsilon = \Delta l / l$. Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο προηγούμενες εξισώσεις, ο νόμος του Hooke (πάντα εντός της ελαστικής περιοχής) γράφεται και με την εξής απλούστερη μορφή:

$$\sigma = \varepsilon E$$

Η εξίσωση διατυπώνει συνοπτικά το νόμο του Hooke και δείχνει ότι η τάση είναι ανάλογη προς την ανηγμένη παραμόρφωση.

Το μέτρο ελαστικότητας E είναι ο συντελεστής αναλογίας μεταξύ της τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης, όπως προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση. Λύνοντάς την ως προς E , έχουμε : $E = \sigma / \varepsilon$. Η ανηγμένη παραμόρφωση είναι αδιάστατο μέγεθος, άρα το μέτρο ελαστικότητας έχει μονάδες τάσης.

Η γραφική παράσταση της εξίσωσης $\sigma = \varepsilon E$ σε άξονες ε και σ είναι ευθεία εντός της ελαστικής περιοχής, δηλαδή εκεί όπου ισχύει ο τύπος (μέχρι το όριο αναλογίας Ο.Α.).

7.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ F.R.P. ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει πως εφαρμόζεται ο εφελκυσμός σε ένα σύνθετο υλικό με συνεχείς προσανατολισμένες ίνες. Η συμπεριφορά ενός σύνθετου στον εφελκυσμό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις εφελκυστικές ιδιότητες και την αντοχή των ινών ενίσχυσης, δεδομένου ότι είναι κατά πολύ υψηλότερες από το σύστημα της ρητίνης.



7.8 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Τοποθετούμε την πρώτη δοκό του fiberglass στη συσκευή εφελκυσμού. Η δοκός έχει κατασκευαστεί όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, από πολυεστερική ρητίνη, υαλοπίλημα ινών τυχαίων διευθύνσεων και μικρού μήκους (τύπου E, συγκρατούμενες με τη μέθοδο powder) και υαλόπλεγμα δύο διευθύνσεων (ίνες fiberglass : τύπου E), σε διαδοχικές στρώσεις, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκαφών. Τα γεωμετρικά στοιχεία της δοκού είναι : $h = 1,00 \text{ cm}$, $b = 1,00 \text{ cm}$ και ωφέλιμο μήκος $l = 10,00 \text{ cm}$.

Η ράβδος δέχθηκε, από τη συσκευή εφελκυσμού, φορτίο P (σε N) ακριβώς στο κέντρο της διατομής της (αξονικός εφελκυσμός), ενώ ίσχυαν και οι παραδοχές του αξονικού εφελκυσμού, όπως περιγράφονται παραπάνω. Η συσκευή μας έδινε για κάθε φορτίο και την αντίστοιχη επιμήκυνση της ράβδου Δl (σε μm). Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέχρι να σπάσει η δοκός του fiberglass.

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο το δοκίμιο

συμπεριφέρθηκε κατά ψαθυρό τρόπο, δηλαδή η δοκός του fiberglass έσπασε κάθετα στη διεύθυνση φόρτισής της, χωρίς σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις γύρω από την περιοχή θραύσης, ενώ η επιφάνεια θραύσης ήταν όπως θα περιμέναμε, δηλαδή λεία και λεπτόκοκκη. Κατά τη διάρκεια του πειράματος δεν παρατηρήθηκε εμφάνιση λαιμού στην περιοχή θραύσης, δηλαδή η δοκός έσπασε χωρίς προηγουμένως να διαρρεύσει.

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα φορτία P (σε N) που ασκούσε η συσκευή και η αντίστοιχη επιμήκυνση Δl (σε μm) που έδινε η συσκευή. Αφού διορθώσουμε τις τιμές της συσκευής (ώστε η αρχική ένδειξη να είναι μηδέν – βαθμονόμηση), στη συνέχεια μετατρέπουμε τις τιμές P (KN) και Δl (cm) σε ορθή τάση $\sigma = P/F$ και ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon = \Delta l/l$ αντίστοιχα και συμπληρώνουμε αντίστοιχες στήλες του παρακάτω πίνακα. Έπειτα σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση $\sigma = F(\epsilon)$. Η γραφική παράσταση είναι αρχικά ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, που από κάποιο σημείο και μετά αρχίζει να καμπυλώνει ώσπου η δοκός να σπάσει. Από τη γραφική παράσταση με βάση τις διορθωμένες τιμές υπολογίζουμε το **Μέτρο Ελαστικότητας (E)** από τον τύπο: $\sigma = E\epsilon$, καθώς και την **Τάση Θραύσεως ($\sigma_{\text{θραύσεως}}$)**.

7.9 ΠΙΝΑΚΑΣ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ 1ος

$$h=1,0 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$$

$$b=1,0 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$$

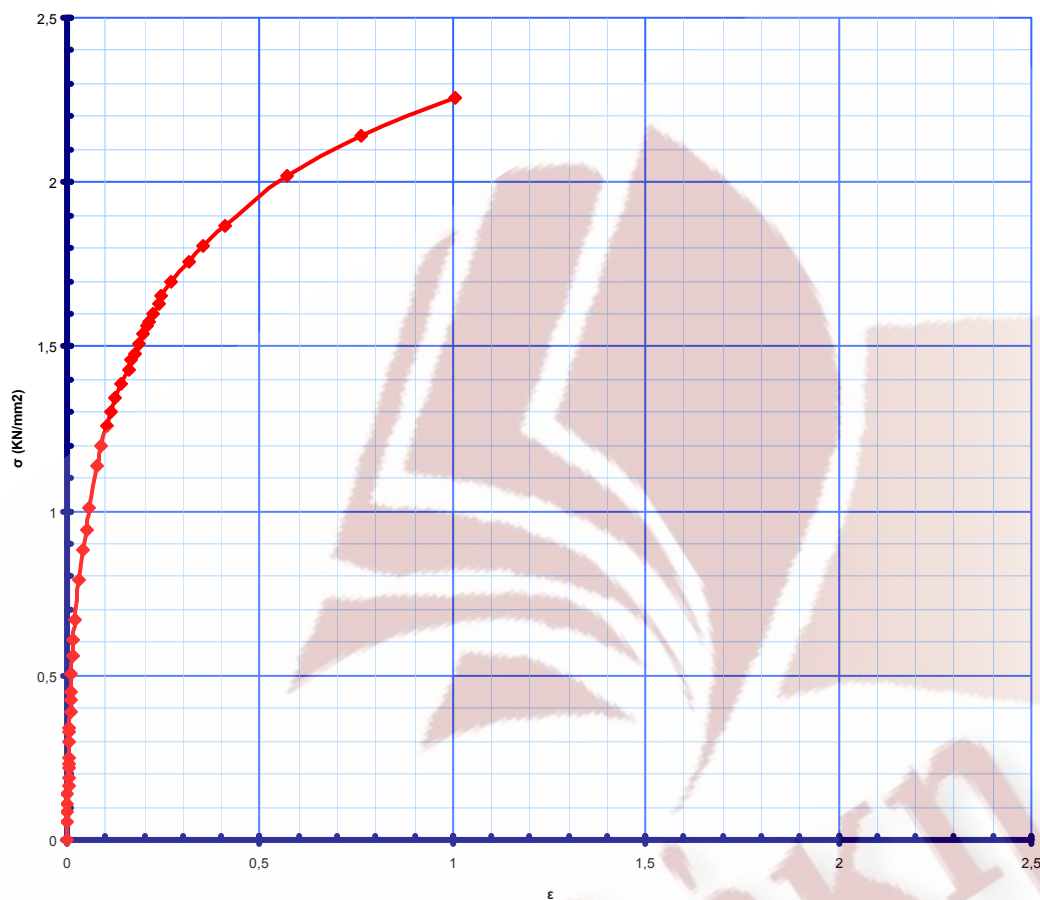
$$l=10 \text{ cm} = 100 \text{ mm}$$

$$F=10 \text{ mm} * 10 \text{ mm} = 100 \text{ mm}^2$$

P _{ένδειξη} (KN)	P _{πραγματικό} (KN)	Δl _{ένδειξη} = Δl _{πραγματικό} (cm)	σ (KN/mm ²)	ε -	E (KN/mm ²)	E _{ΜΕΣΟ} (KN/mm ²)
400,0	0	0	0	0		
405,5	5,5	0,009	0,055	0,0009	62,92	60,73
408,3	8,3	0,013	0,083	0,0013	62,72	
411,0	11,0	0,018	0,110	0,0018	62,63	
413,8	13,8	0,022	0,138	0,0022	62,54	
416,5	16,5	0,026	0,165	0,0026	62,46	
419,0	19,0	0,031	0,190	0,0031	62,15	
421,6	21,6	0,036	0,216	0,0036	59,35	
423,0	23,0	0,040	0,230	0,0040	57,25	

425,1	25,1	0,046	0,251	0,0046	54,54	
429,7	29,7	0,057	0,297	0,00569	52,15	44,01
432,9	32,9	0,065	0,329	0,00651	50,54	
434,0	34,0	0,068	0,340	0,00680	50,02	
439,2	39,2	0,087	0,392	0,00870	45,00	
442,4	42,4	0,096	0,424	0,00962	44,11	
445,3	45,3	0,103	0,453	0,01033	43,80	
450,4	50,4	0,119	0,504	0,01192	42,28	
455,8	55,8	0,139	0,558	0,01389	40,15	
460,7	60,7	0,164	0,607	0,01635	37,12	
467,2	67,2	0,192	0,672	0,01923	34,92	
479,3	79,3	0,314	0,793	0,03140		
487,9	87,9	0,399	0,879	0,03990		
494,5	94,5	0,493	0,945	0,04930		
501,1	101,1	0,585	1,011	0,05850		
513,9	113,9	0,772	1,139	0,07720		
519,9	119,9	0,858	1,199	0,08580		
526,0	126,0	1,040	1,260	0,10400		
529,9	129,9	1,150	1,299	0,11500		
534,4	134,4	1,260	1,344	0,12600		
538,5	138,5	1,420	1,385	0,14200		
543,0	143,0	1,600	1,430	0,16000		
546,1	146,1	1,660	1,461	0,16600		
548,1	148,1	1,740	1,481	0,17400		
550,9	150,9	1,880	1,509	0,18800		
553,8	153,8	1,970	1,538	0,19700		
556,2	156,2	2,050	1,562	0,20500		
557,5	157,5	2,130	1,575	0,21300		
560,1	160,1	2,250	1,601	0,22500		
563,0	163,0	2,370	1,630	0,23700		
565,2	165,2	2,460	1,652	0,24600		
569,6	169,6	2,720	1,696	0,27200		
576,0	176,0	3,180	1,760	0,31800		
580,7	180,7	3,520	1,807	0,35200		
586,6	186,6	4,114	1,866	0,41140		
601,7	201,7	5,700	2,017	0,57000		
613,9	213,9	7,650	2,139	0,76500		
625,9	225,9	10,050	2,259	1,00500		

ΘΡΑΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ



7.10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρο Ελαστικότητας : $E_{1\text{ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ}} = 52,37 \text{ KN/mm}^2$

Τάση Θραύσεως : $\sigma_{\text{θραύσεως}} = 1,807 \text{ KN/mm}^2$

Μέγιστη Παραμόρφωση : $\varepsilon_1 = 1,005 \%$

7.11 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Τοποθετούμε με όμοιο τρόπο τη δεύτερη δοκό του fiberglass στη συσκευή εφελκυσμού. Τα γεωμετρικά στοιχεία της δοκού είναι όπως και στην πρώτη περίπτωση : $h = 1,00 \text{ cm}$, $b = 1,00 \text{ cm}$ και ωφέλιμο μήκος $l = 10,00 \text{ cm}$.

Όπως και στο πρώτο πείραμα η ράβδος δέχθηκε, από τη συσκευή εφελκυσμού, αξονικό φορτίο P (σε N) ακριβώς στο κέντρο της διατομής της (αξονικός εφελκυσμός), ενώ ίσχυαν και οι παραδοχές του αξονικού εφελκυσμού. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέχρι να σπάσει η δοκός του fiberglass.

7.12 ΠΙΝΑΚΑΣ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ 2ος

$$h=1,0 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$$

$$F=10 \text{ mm} * 10 \text{ mm} = 100 \text{ mm}^2$$

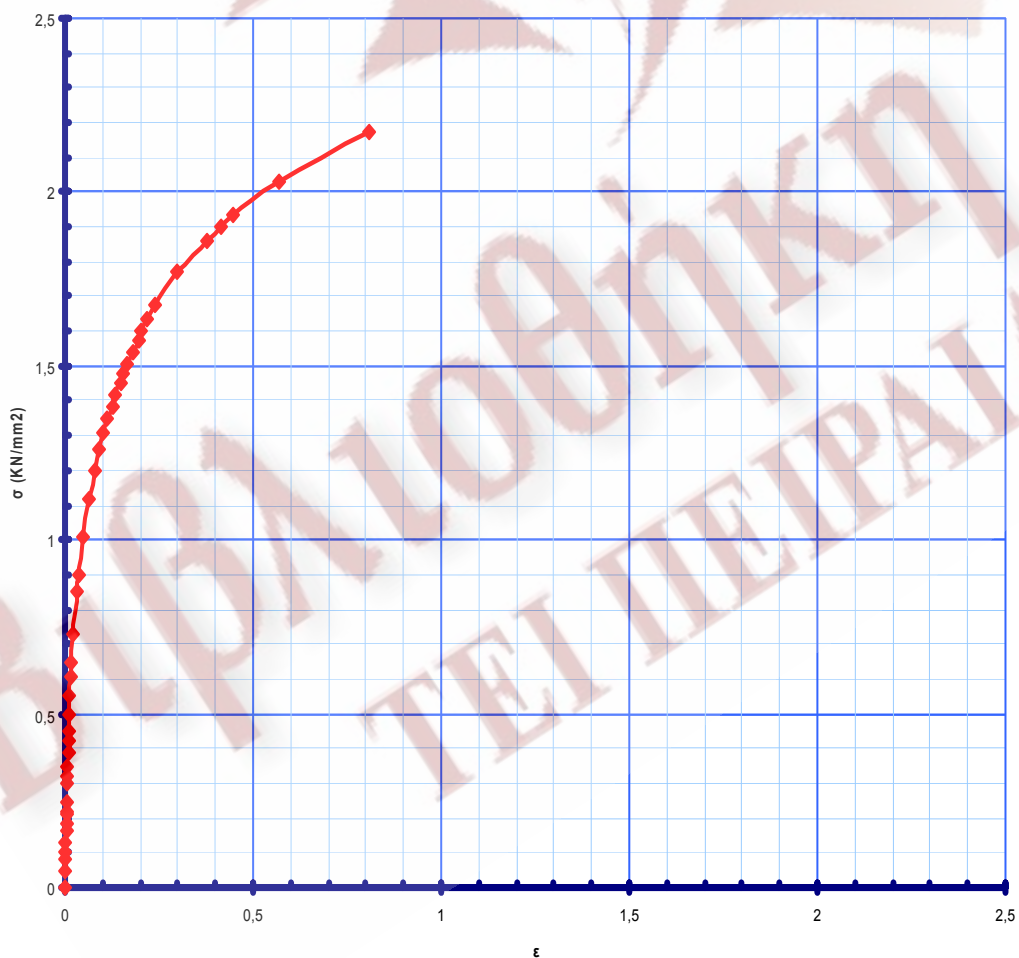
$$b=1,0 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$$

$$l=10 \text{ cm} = 100 \text{ mm}$$

$P_{\text{ένδειξη}}$	$P_{\text{πραγματικό}}$	$\frac{\Delta l_{\text{ένδειξη}}}{\Delta l_{\text{πραγματικό}}}$	σ	ϵ	E	$E_{\text{ΜΕΣΟ}}$
(KN)	(KN)	(cm)	(KN/mm ²)	-	(KN/mm ²)	(KN/mm ²)
400,0	0	0	0	0		
405,0	5,0	0,008	0,050	0,0008	59,0	55,34
408,0	8,0	0,014	0,080	0,0014	59,0	
410,1	10,1	0,018	0,101	0,0018	57,0	
412,8	12,8	0,023	0,128	0,0023	56,0	
416,2	16,2	0,029	0,162	0,0029	55,5	
418,5	18,5	0,034	0,185	0,0034	54,2	
421,1	21,1	0,039	0,211	0,0039	54,1	
422,0	22,0	0,041	0,220	0,0041	54,0	
424,3	24,3	0,046	0,243	0,0046	53,2	
430,0	30,0	0,058	0,300	0,0058	51,5	
431,9	31,9	0,066	0,319	0,0066	48,5	44,91
435,0	35,0	0,073	0,350	0,0073	47,7	
438,8	38,8	0,084	0,388	0,00844	46,0	
442,0	42,0	0,092	0,420	0,00917	45,8	
445,0	45,0	0,101	0,450	0,01011	44,5	
450,0	50,0	0,114	0,500	0,01136	44,0	
455,1	55,1	0,125	0,551	0,01255	43,9	
460,9	60,9	0,143	0,609	0,01433	42,5	
465,0	65,0	0,157	0,650	0,01574	41,3	
473,1	73,1	0,221	0,731	0,02210		
485,0	85,0	0,306	0,850	0,03060		
490,0	90,0	0,357	0,900	0,03570		
501,1	101,1	0,493	1,011	0,04930		
511,8	111,8	0,646	1,118	0,06460		
520,0	120,0	0,799	1,200	0,07990		
526,0	126,0	0,918	1,260	0,09180		

530,6	130,6	1,020	1,306	0,10200
535,0	135,0	1,139	1,350	0,11390
538,5	138,5	1,250	1,385	0,12500
541,9	141,9	1,352	1,419	0,13520
545,0	145,0	1,471	1,450	0,14710
547,9	147,9	1,556	1,479	0,15560
550,6	150,6	1,664	1,506	0,16640
553,8	153,8	1,786	1,538	0,17860
557,5	157,5	1,943	1,575	0,19430
560,1	160,1	2,038	1,601	0,20380
563,4	163,4	2,192	1,634	0,21920
567,6	167,6	2,405	1,676	0,24050
577,0	177,0	3,000	1,770	0,30000
585,9	185,9	3,764	1,859	0,37640
590,1	190,1	4,138	1,901	0,41380
593,5	193,5	4,488	1,935	0,44880
603,1	203,1	5,700	2,031	0,57000
617,5	217,5	8,090	2,175	0,80900

ΘΡΑΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ



7.13 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρο Ελαστικότητας : $E_{2ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ} = 50,13 \text{ KN/mm}^2$

Τάση Θραύσεως : $\sigma_{2\theta\rho\alpha\upsilon\sigma\epsilon\omega\varsigma} = 2,175 \text{ KN/mm}^2$

Μέγιστη Παραμόρφωση : $\epsilon_2 = 0,809 \%$

7.14 ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε στην πρώτη δοκιμή $E_{1ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ} = 52,37 \text{ KN/mm}^2$, ενώ στη δεύτερη $E_{2ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ} = 50,13 \text{ KN/mm}^2$. Και στις δύο περιπτώσεις το μέτρο ελαστικότητας είναι εντός ορίων ($45 - 65 \text{ KN/mm}^2 = \text{GPa}$).

Η τάση θραύσεως από την πρώτη δοκιμή υπολογίστηκε $\sigma_{1\theta\rho\alpha\upsilon\sigma\epsilon\omega\varsigma} = 1,807 \text{ KN/mm}^2$, ενώ στη δεύτερη $\sigma_{2\theta\rho\alpha\upsilon\sigma\epsilon\omega\varsigma} = 2,175 \text{ KN/mm}^2$. Και στις δύο περιπτώσεις τα αποτελέσματα είναι εντός ορίων, καθώς η τάση θραύσεως μπορεί να φτάσει τα $2,50 \text{ KN/mm}^2$ σε ιδανικές συνθήκες.

Η μέγιστη παραμόρφωση στις δύο δοκιμές εφελκυσμού υπολογίστηκε : $\epsilon_1 = 1,005 \%$ και $\epsilon_2 = 0,809 \%$ αντίστοιχα. Η συγκεκριμένη τιμή μπορεί να φτάσει το 3% σε ιδανικές συνθήκες.

Τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών μπορούν να χαρακτηριστούν ικανοποιητικά και οφείλονται κυρίως στην εφελκυστική αντοχή των ινών του γυαλιού (fiberglass).

7.15 ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Σημειώνονται οι παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τυχόν σφάλματα στα αποτελέσματα μεταξύ των δύο δοκιμών εφελκυσμού, και αυτά είναι η ίδια η συσκευή εφελκυσμού (η οποία παρείχε τις τιμές φόρτισης P και τις επιμηκύνσεις Δl), η μικρή ολίσθηση του δοκιμίου στις σιαγόνες της συσκευής, λάθη στις γραφικές παραστάσεις, στις διορθώσεις των τιμών και στις

στρογγυλοποιήσεις. Επίσης σφάλματα μπορεί να οφείλονται στις ίδιες τις δοκούς fiberglass και συγκεκριμένα στην διαδικασία κατασκευής τους (π.χ. πιθανόν η κοπή τους να μην ήταν ομοιόμορφη με αποτέλεσμα να μην έχουν σταθερή διατομή κατά το μήκος τους όσο και μεταξύ τους, ή ρητίνη να μην είχε διαβρέξει ομοιόμορφα πλήρως τις ίνες, ή μπορεί να διαφέρει η χημική σύσταση τους κλπ).

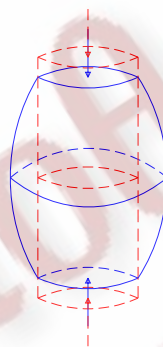


8.1 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΘΛΙΨΗ

Ένα σώμα καταπονείται σε θλίψη, όταν επάνω του επενεργούν δύο ίσες και αντίθετες δυνάμεις, οι οποίες τείνουν να το συνθλίψουν. Όπως και στον εφελκυσμό έτσι και στη θλίψη υπάρχει αξονική και έκκεντρη θλίψη.



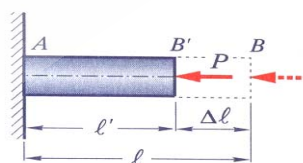
Η βασική διαφορά της θλίψης με τον εφελκυσμό είναι ότι κατά τη διάρκεια της καταπόνησης δεν δημιουργείται λαιμός στο δοκίμιο, αλλά αντίθετως η διατομή του αυξάνει συνεχώς. Δηλαδή έχουμε διαμήκη βράχυνση και εγκάρσια διόγκωση.



Αρχικό κυλινδρικό δοκίμιο.

Το ίδιο δοκίμιο υπό την επίδραση θλιπτικής δύναμης.

Αν σε ράβδο αρχικού μήκους l , όπως αυτή στο επόμενο σχήμα, επιβάλλουμε εξωτερικό θλιπτικό φορτίο P τότε το σημείο B μετατοπίζεται κατά Δl αριστερότερα στη θέση B' . Η απόσταση $\Delta l = BB'$ ονομάζεται επιβράχυνση ή βράχυνση. Το τελικό μήκος της ράβδου γίνεται $l' = l - \Delta l$.



Επιβράχυνση θλιβόμενης ράβδου

Η ανηγμένη παραμόρφωση ή ανηγμένη τροπή στην περίπτωση της θλιπτικής καταπόνησης ονομάζεται ανηγμένη επιβράχυνση και ισούται με : $\epsilon = \Delta l / l$.

8.2 ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΝΟΜΟΥ ΤΟΥ HOOKE ΣΤΗ ΘΛΙΨΗ

Ο νόμος του Hooke, που για τη θλίψη είναι $\sigma = E \epsilon$, όπως στον εφελκυσμό, ισχύει επακριβώς, εφόσον, πληρούνται οι παρακάτω απλοποιητικές παραδοχές :

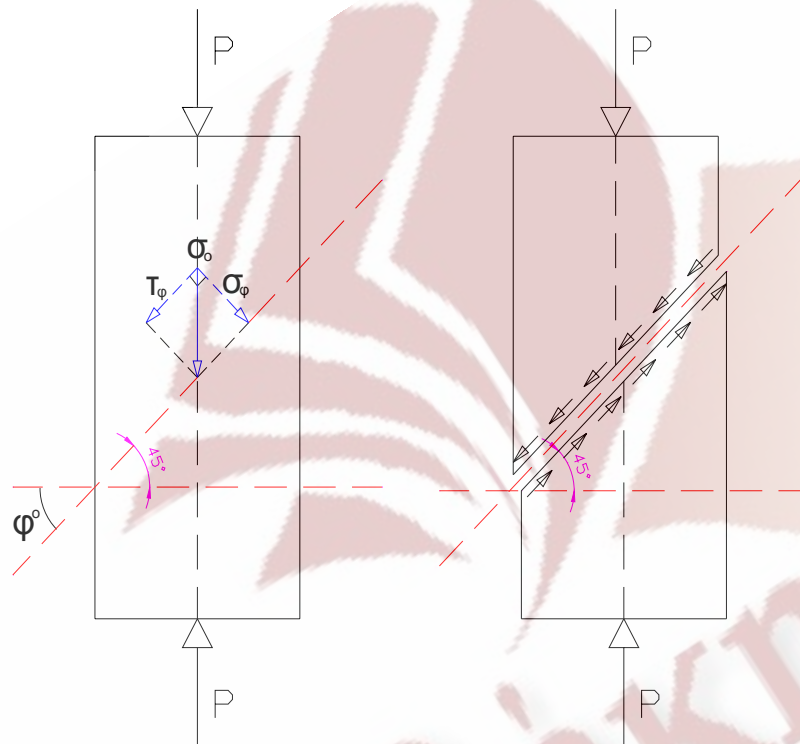
- I. Ο άξονας της ράβδου είναι ευθύγραμμος.
- II. Η δύναμη δρα στη διεύθυνση του άξονα της ράβδου και το σημείο εφαρμογής της είναι το κέντρο βάρους της διατομής.
- III. Οι τάσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στη διατομή.
- IV. Όλες οι κατά μήκος ίνες της ράβδου επιβραχύνονται το ίδιο.
- V. Οι διατομές που είναι αρχικά επίπεδες και κάθετες στον άξονα της ράβδου παραμένουν έτσι και μετά την παραμόρφωση.
- VI. Οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι μικρότερες από την τάση αναλογίας σ_A του υλικού.
- VII. Στα θλιβόμενα μέρη δεν υπάρχει κίνδυνος λυγισμού. Η εμφάνιση του φαινομένου του λυγισμού εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία της δοκού και για να αποφευχθεί χρησιμοποιούμε δοκούς με λόγο $2 < l/d < 5$. Όπου l το ύψος του δοκιμίου και d η αρχική διάμετρος (στην περίπτωση κυλινδρικών δοκιμίων).

Το διάγραμμα $\sigma - \epsilon$ για τη θλίψη είναι αντίστοιχο με εκείνο του εφελκυσμού.

8.3 ΟΛΚΙΜΗ ΚΑΙ ΨΑΘΥΡΗ ΘΡΑΥΣΗ

Έστω P το θλιπτικό φορτίο και F η διατομή του δοκιμίου. Σε κάθε διατομή ασκείται ομοιόμορφη τάση που υπολογίζεται από τον τύπο : $\sigma_0 = P / F$. Σε

κάθε τυχαία διατομή υπό γωνία φ έχουμε τριαξονική εντατική κατάσταση και αναπτύσσονται ορθές και διατμητικές τάσεις. Ισχύει ότι $\sigma_{\varphi} = \sigma_0 \cdot \sin^2\varphi$ και $\tau_{\varphi} = (\sigma_0/2) \cdot \sin 2\varphi$. Μέγιστη ορθή τάση έχουμε όταν $\sin^2\varphi=1$, δηλαδή $\varphi=0^\circ$ και είναι $\sigma_{\varphi} = \sigma_0$. Μέγιστη διατμητική τάση έχουμε όταν $2\varphi=90^\circ$ ή $\varphi=45^\circ$ και είναι $\tau_{\varphi} = (\sigma_0/2)$.



Τα όλκιμα (συνεκτικά) υλικά, κατά τη διάρκεια της θλιπτικής καταπόνησης παραμορφώνονται εντονότατα. Στα όλκιμα δεν επέρχεται θραύση με τη φυσική έννοια του όρου, καθώς διαδοχικά βαρελοποιούνται, πλακοποιούνται και τελικά μετατρέπονται σε ελάσματα. Το όριο θραύσης για θλίψη ενός όλκιμου υλικού, ορίζεται συμβατικά ότι, είναι η τιμή της τάσης εκείνης που προκαλεί παραμόρφωση (επιβράχυνση) του ύψους του δοκιμίου κατά 30 % του αρχικού μήκους.

Αντιθέτως στα ψαθυρά υλικά έχουμε θραύση του δοκιμίου, όταν ξεπεράσουμε τη μέγιστη διατμητική αντοχή του υλικού [$\tau_{\varphi} = (\sigma_0/2)$] υπό γωνία 45° (Από ορθές τάσεις δεν προκαλείται θραύση διότι δεν αποχωρίζουν τα τμήματα μεταξύ τους). Η αστοχία του υλικού οφείλεται σε ολίσθηση των επαπτόμενων τμημάτων μεταξύ τους. Η ψαθυρή θραύση παρουσιάζεται στο προηγούμενο σχήμα.

8.4 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ F.R.P. ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΛΙΨΗ

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει ένα σύνθετο, με συνεχείς προσανατολισμένες ίνες, που καταπονείται σε θλίψη. Στη θλίψη οι συγκολλητικές ιδιότητες και η ακαμψία του συστήματος της ρητίνης είναι κρισιμότεροι παράγοντες, δεδομένου ότι είναι ρόλος της ρητίνης η διατήρηση των ινών σε ευθείες στήλες και η αποτροπή του λυγισμού τους.



8.5 ΠΡΩΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΛΙΨΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗ ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

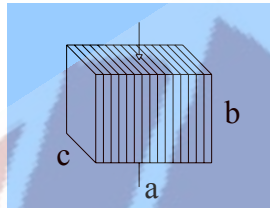
Τοποθετούμε το πρώτο δοκίμιο του fiberglass στη συσκευή θλίψης (INSTRON, model No 4 – 86, serial No H1887), στο εργαστήριο μηχανικής. Η συσκευή ασκεί φορτίο P στο κέντρο ακριβώς της δοκού και κάθετα στον άξονα της (αξονική θλίψη). Οι μετρήσεις που παίρνουμε από το πείραμα είναι φορτία P (σε KN) και επιβράχυνση Δl (σε mm).



ΕΝΑ ΑΠΟ ΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΣΤΗ ΣΥΣΚΕΥΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Κατά το πρώτο πείραμα το δοκίμιο τοποθετείται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, δηλαδή με τις στρώσεις παράλληλα στη φόρτιση. Το δοκίμιο έχει κατασκευαστεί όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως, από πολυεστερική ρητίνη, υαλοπίλημα ινών τυχαίων διευθύνσεων και μικρού μήκους (τύπου E, συγκρατούμενες με τη μέθοδο powder) και υαλόπλεγμα δύο

διευθύνσεων (ίνες fiberglass : τύπου E), σε διαδοχικές στρώσεις, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή σκαφών . Τα γεωμετρικά στοιχεία του δοκιμίου είναι : $a = 2,00 \text{ cm}$, $b = 2,00 \text{ cm}$ και $c = 2,00 \text{ cm}$. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέχρι τη θραύση.

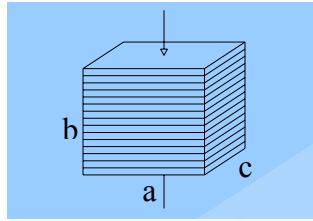


Στο πρώτο πείραμα που πραγματοποιήθηκε (φόρτιση παράλληλη με τις στρώσεις), το δοκίμιο συμπεριφέρθηκε κατά ψαθυρό τρόπο – αστόχησε από διαμητικές τάσεις, υπό γωνία 45° . Το δοκίμιο μετά τη θλίψη, παρουσιάζεται στις δύο επόμενες φωτογραφίες.



8.6 ΔΕΥΤΕΡΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΛΙΨΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΘΕΤΗ ΣΤΙΣ ΣΤΡΩΣΕΙΣ

Κατά το δεύτερο πείραμα, το δοκίμιο τοποθετείται με τον τρόπο που παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, δηλαδή με τις στρώσεις κάθετα στη φόρτιση. Το δοκίμιο έχει κατασκευαστεί όπως και το πρώτο, από πολυεστερική ρητίνη, υαλοπίλημα ινών τυχαίων διευθύνσεων και μικρού μήκους (τύπου E, συγκρατούμενες με τη μέθοδο powder) και υαλόπλεγμα δύο διευθύνσεων (ίνες fiberglass : τύπου E), σε διαδοχικές στρώσεις, όπως αυτό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή θαλάσσιων σκαφών. Τα γεωμετρικά στοιχεία του δοκιμίου είναι : $a = b = c = 2,00 \text{ cm}$. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε μέχρι τη θραύση.



Και στο δεύτερο πείραμα (φόρτιση κάθετα στις στρώσεις), το δοκίμιο συμπεριφέρθηκε κατά ψαθυρό τρόπο – επήλθε θραύση όταν ξεπεράσαμε τη διατμητική αντοχή του, στο κέντρο του υπό γωνία 45° . Το δοκίμιο μετά τη θλίψη, παρουσιάζεται στις τρεις επόμενες φωτογραφίες.



Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δύο δοκιμών. Αναγράφονται τα φορτία $P_{\text{ένδειξη}}$ (σε KN) που ασκούσε η συσκευή και η αντίστοιχη επιβράχυνση $\Delta l_{\text{ένδειξη}}$ (σε mm) που έδινε η συσκευή. Αφού διορθώσουμε τις ενδείξεις (ώστε η αρχική ένδειξη να είναι μηδέν – βαθμονόμηση), στη συνέχεια μετατρέπουμε τις τιμές P (KN) και Δl (mm) σε ορθή τάση $\sigma = P/F$ και ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon = \Delta l/l$ αντίστοιχα και συμπληρώνουμε τις αντίστοιχες στήλες του παρακάτω πίνακα. Έπειτα σχεδιάζουμε την αντίστοιχη γραφική παράσταση $\sigma = F(\epsilon)$ για κάθε δοκιμή. Η γραφική παράσταση είναι αρχικά ευθεία που διέρχεται από την αρχή των αξόνων, που από κάποιο σημείο και μετά αρχίζει να καμπυλώνει ώσπου η δοκός να σπάσει. Από τη γραφική με βάσει τις διορθωμένες τιμές υπολογίζουμε το **Μέτρο Ελαστικότητας (E)** από τον τύπο : $\sigma = E\epsilon$, την **Τάση Θραύσεως (σ_{max})** καθώς και την **μέγιστη διατμητική τάση (τ_{max})**, από τον τύπο $\tau_{\text{max}} = (\sigma/2)$.

8.7 ΠΙΝΑΚΑΣ – ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΡΩΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΘΛΙΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS

ΘΛΙΨΗ 1η - ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

b=2,0cm F=20mm * 20mm= 400 mm²

h=2,0cm

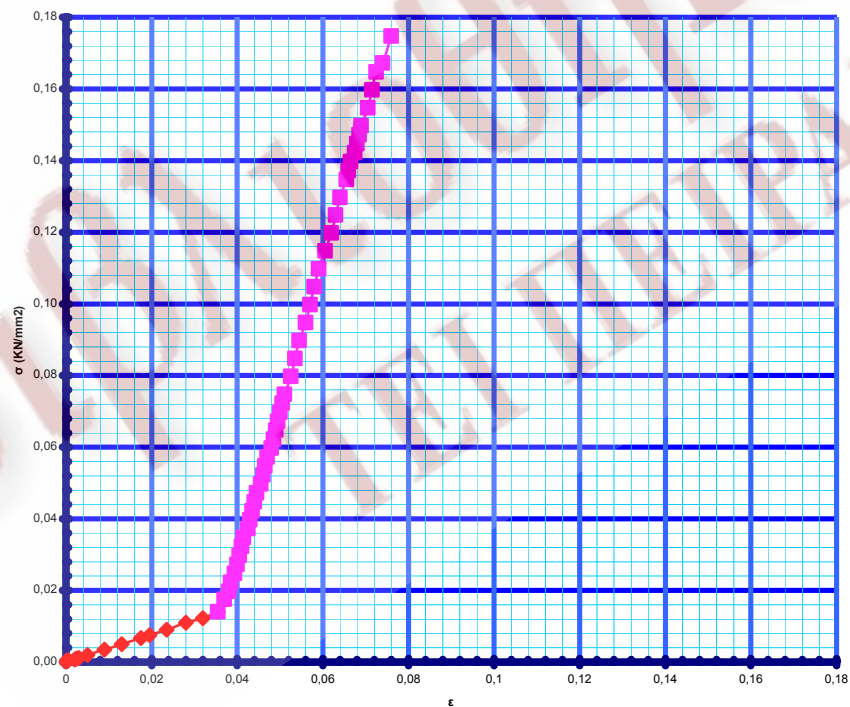
l=2,0cm

$P_{\text{ένδειξη}}$	$\Delta l_{\text{ένδειξη}}$	$P_{\text{πραγματικό}}$	$\Delta l_{\text{πραγματικό}}$	$\sigma=P/F$	$\epsilon=\Delta l/l$	$E=\sigma/\epsilon$	$E_{\text{ΜΕΣΟ}}$
(KN)	(mm)	(KN)	(mm)	(KN/mm ²)	-	(KN/mm ²)	(KN/mm ²)
0,1	0,01	0,0	0	0	0		
0,2	0,01	0,1	0	0,0003	0		
0,3	0,02	0,2	0,01	0,0005	0,0005		
0,4	0,05	0,3	0,04	0,0007	0,0020		
0,5	0,06	0,4	0,05	0,0010	0,0025		
0,6	0,07	0,5	0,06	0,0012	0,0030		
0,9	0,11	0,8	0,1	0,0020	0,0050		
2,3	0,19	2,2	0,18	0,0035	0,0090		
2,1	0,27	2,0	0,26	0,0050	0,0130		
2,8	0,36	2,7	0,35	0,0067	0,0175		
3,1	0,4	3,0	0,39	0,0075	0,0195		
3,7	0,48	3,6	0,47	0,0090	0,0235		
4,5	0,57	4,4	0,56	0,0110	0,0280		
5,0	0,65	4,9	0,64	0,0123	0,0320		
5,7	0,72	5,6	0,71	0,0140	0,0355	0,39	0,98
7,1	0,75	7,0	0,74	0,0175	0,0370	0,47	
8,0	0,77	7,9	0,76	0,0198	0,0380	0,52	
9,0	0,78	8,9	0,77	0,0223	0,0385	0,58	
10,0	0,80	9,9	0,79	0,0248	0,0394	0,63	
11,0	0,81	10,9	0,8	0,0273	0,0400	0,68	
12,0	0,82	11,9	0,81	0,0298	0,0405	0,73	
13,0	0,83	12,9	0,82	0,0323	0,0410	0,79	
14,0	0,84	13,9	0,83	0,0348	0,0415	0,84	
15,0	0,86	14,9	0,85	0,0373	0,0425	0,88	
16,0	0,87	15,9	0,86	0,0398	0,0430	0,92	
17,0	0,88	16,9	0,87	0,0423	0,0435	0,97	
18,0	0,89	17,9	0,88	0,0448	0,0440	1,02	
19,0	0,9	18,9	0,89	0,0473	0,0445	1,06	
20,0	0,92	19,9	0,91	0,0498	0,0455	1,09	
21,0	0,93	20,9	0,92	0,0523	0,0460	1,14	
22,0	0,94	21,9	0,93	0,0548	0,0465	1,18	
23,0	0,95	22,9	0,94	0,0573	0,0470	1,22	
24,0	0,97	23,9	0,96	0,0598	0,0480	1,24	
25,0	0,98	24,9	0,97	0,0623	0,0485	1,28	
26,0	0,99	25,9	0,98	0,0648	0,0490	1,32	
27,0	1,00	26,9	0,99	0,0673	0,0495	1,36	
28,0	1,01	27,9	1	0,0698	0,0500	1,40	
29,0	1,02	28,9	1,01	0,0723	0,0505	1,43	
30,0	1,03	29,9	1,02	0,0748	0,0510	1,47	

32,0	1,06	31,9	1,05	0,0798	0,0525	1,52	1,69
34,0	1,08	33,9	1,07	0,0848	0,0535	1,58	
36,0	1,1	35,9	1,09	0,0898	0,0545	1,65	
38,0	1,13	37,9	1,12	0,0948	0,0560	1,69	
40,0	1,15	39,9	1,14	0,0998	0,0570	1,75	
42,0	1,17	41,9	1,16	0,1048	0,0580	1,81	
44,0	1,19	43,9	1,18	0,1098	0,0590	1,86	
46,0	1,22	45,9	1,21	0,1148	0,0605		
48,0	1,25	47,9	1,24	0,1198	0,0620		
50,0	1,27	49,9	1,26	0,1248	0,0630		
52,0	1,29	51,9	1,28	0,1298	0,0640		
54,0	1,32	53,9	1,31	0,1348	0,0655		
55,0	1,33	54,9	1,32	0,1373	0,0660		
56,0	1,34	55,9	1,33	0,1398	0,0665		
57,0	1,36	56,9	1,35	0,1423	0,0675		
58,0	1,37	57,9	1,36	0,1448	0,0680		
59,0	1,38	58,9	1,37	0,1473	0,0685		
60,0	1,39	59,9	1,38	0,1498	0,0690		
62,0	1,42	61,9	1,41	0,1548	0,0705		
64,0	1,44	63,9	1,43	0,1598	0,0715		
66,0	1,46	65,9	1,45	0,1648	0,0725		
67,0	1,49	66,9	1,48	0,1673	0,0740		
70,0	1,53	69,9	1,52	0,1748	0,0760		

ΘΡΑΥΣΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΘΛΙΨΗ 1η ΔΟΚΟΥ FIBERGLASS - ΙΝΕΣ ΠΑΡΑΛΛΗΛΑ ΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ



8.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρο Ελαστικότητας : $E_{1\Theta\Lambda\text{I}\Psi\text{H}\Sigma} = 1,34 \text{ KN/mm}^2$

Τάση Θραύσεως : $\sigma_{\text{θραύσεως}} = 0,1748 \text{ KN/mm}^2$

Μέγιστη Παραμόρφωση : $\varepsilon_1 = 0,076 \%$

8.9 ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ ΘΛΙΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ FIBERGLASS

ΘΛΙΨΗ 2η - ΚΑΘΕΤΑ ΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

$b=2,0\text{cm}$ $F=20\text{mm} * 20\text{mm}= 400 \text{ mm}^2$

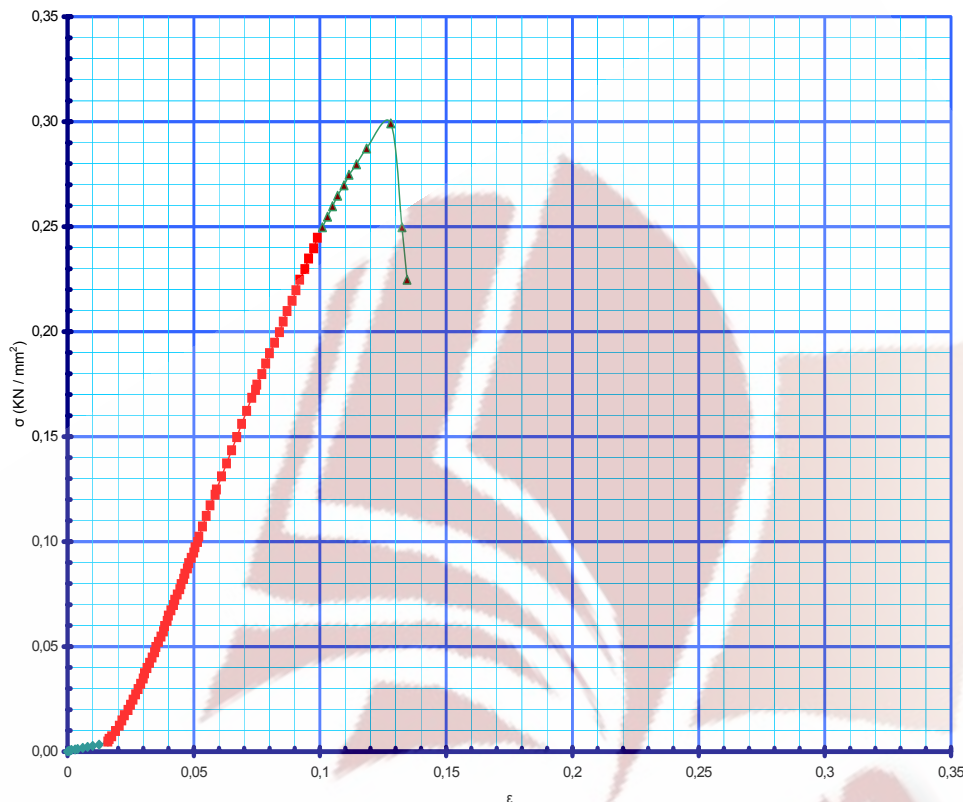
$h=2,0\text{cm}$

$l=2,0\text{cm}$

$P_{\text{ένδειξη}}$ (KN)	$\Delta l_{\text{ένδειξη}}$ (mm)	$P_{\text{πραγματικό}}$ (KN)	$\Delta l_{\text{πραγματικό}}$ (mm)	$\sigma=P/F$ (KN/mm ²)	$\varepsilon=\Delta l/l$ -	$E=\sigma/\varepsilon$ (KN/mm ²)	$E_{\text{ΜΕΣΟ}}$ (KN/mm ²)
0,10	0,01	0	0	0	0		
0,20	0,02	0,10	0,01	0,00025	0,0005		
0,30	0,03	0,20	0,02	0,00050	0,0010		
0,40	0,04	0,30	0,03	0,00075	0,0015		
0,50	0,07	0,40	0,06	0,00100	0,0030		
0,60	0,09	0,50	0,08	0,00125	0,0040		
0,80	0,13	0,70	0,12	0,00175	0,0060		
1,00	0,17	0,90	0,16	0,00225	0,0080		
1,20	0,21	1,10	0,20	0,00275	0,0100		
1,40	0,26	1,30	0,25	0,00325	0,0125		
2,00	0,33	1,90	0,32	0,00475	0,0160		
2,50	0,34	2,40	0,33	0,00600	0,0165		
3,00	0,36	2,90	0,35	0,00725	0,0175		
4,00	0,39	3,90	0,38	0,00975	0,0190		
5,00	0,42	4,90	0,41	0,01225	0,0205		
6,00	0,44	5,90	0,43	0,01475	0,0215		
7,00	0,46	6,90	0,45	0,01725	0,0225		
8,00	0,49	7,90	0,48	0,01975	0,0240		
9,00	0,51	8,90	0,50	0,02225	0,0250		
10,00	0,53	9,90	0,52	0,02475	0,0260		
11,00	0,55	10,90	0,54	0,02725	0,0270		
12,00	0,57	11,90	0,56	0,02975	0,0280		
13,00	0,59	12,90	0,58	0,03225	0,0290		
14,00	0,61	13,90	0,60	0,03475	0,0300		
15,00	0,62	14,90	0,61	0,03725	0,0305		
16,00	0,64	15,90	0,63	0,03975	0,0315		
17,00	0,66	16,90	0,65	0,04225	0,0325		
18,00	0,68	17,90	0,67	0,04475	0,0335		
19,00	0,7	18,90	0,69	0,04725	0,0345		
20,00	0,71	19,90	0,70	0,04975	0,0350	1,42	1,70
21,00	0,73	20,90	0,72	0,05225	0,0360	1,45	
22,00	0,75	21,90	0,74	0,05475	0,0370	1,48	
23,00	0,77	22,90	0,76	0,05725	0,0380	1,51	
24,00	0,78	23,90	0,77	0,05975	0,0385	1,55	

25,00	0,8	24,90	0,79	0,06225	0,0395	1,58	
26,00	0,81	25,90	0,80	0,06475	0,0400	1,62	
27,00	0,83	26,90	0,82	0,06725	0,0410	1,64	
28,00	0,85	27,90	0,84	0,06975	0,0420	1,66	
29,00	0,86	28,90	0,85	0,07225	0,0425	1,70	
30,00	0,88	29,90	0,87	0,07475	0,0435	1,72	
31,00	0,9	30,90	0,89	0,07725	0,0445	1,74	
32,00	0,91	31,90	0,90	0,07975	0,0450	1,77	
33,00	0,93	32,90	0,92	0,08225	0,0460	1,79	
34,00	0,94	33,90	0,93	0,08475	0,0465	1,82	
35,00	0,96	34,90	0,95	0,08725	0,0475	1,84	
36,00	0,97	35,90	0,96	0,08975	0,0480	1,87	
37,00	0,99	36,90	0,98	0,09225	0,0490	1,88	
38,00	1,01	37,90	1,00	0,09475	0,0500	1,90	
39,00	1,02	38,90	1,01	0,09725	0,0505	1,93	
40,00	1,04	39,90	1,03	0,09975	0,0515	1,94	
41,00	1,05	40,90	1,04	0,10225	0,0520	1,97	
43,00	1,08	42,90	1,07	0,10725	0,0535	2,00	2,21
45,00	1,11	44,90	1,10	0,11225	0,0550	2,04	
47,00	1,14	46,90	1,13	0,11725	0,0565	2,08	
49,00	1,18	48,90	1,17	0,12225	0,0585	2,09	
50,00	1,19	49,90	1,18	0,12475	0,0590	2,11	
52,50	1,23	52,40	1,22	0,13100	0,0610	2,15	
55,00	1,27	54,90	1,26	0,13725	0,0630	2,18	
57,50	1,31	57,40	1,30	0,14350	0,0650	2,21	
60,00	1,35	59,90	1,34	0,14975	0,0670	2,24	
62,50	1,39	62,40	1,38	0,15600	0,0690	2,26	
65,00	1,43	64,90	1,42	0,16225	0,0710	2,29	
67,50	1,47	67,40	1,46	0,16850	0,0730	2,31	
69,00	1,5	68,90	1,49	0,17225	0,0745	2,31	
70,00	1,51	69,90	1,50	0,17475	0,0750	2,33	
72,00	1,55	71,90	1,54	0,17975	0,0770	2,33	
74,00	1,58	73,90	1,57	0,18475	0,0785	2,35	
76,00	1,61	75,90	1,60	0,18975	0,0800	2,37	
78,00	1,65	77,90	1,64	0,19475	0,0820		
80,00	1,69	79,90	1,68	0,19975	0,0840		
82,00	1,72	81,90	1,71	0,20475	0,0855		
84,00	1,75	83,90	1,74	0,20975	0,0870		
86,00	1,79	85,90	1,78	0,21475	0,0890		
88,00	1,82	87,90	1,81	0,21975	0,0905		
90,00	1,85	89,90	1,84	0,22475	0,0920		
92,00	1,89	91,90	1,88	0,22975	0,0940		
94,00	1,92	93,90	1,91	0,23475	0,0955		
96,00	1,96	95,90	1,95	0,23975	0,0975		
98,00	1,99	97,90	1,98	0,24475	0,0990		
100,00	2,03	99,90	2,02	0,24975	0,1010		
102,00	2,07	101,90	2,06	0,25475	0,1030		
104,00	2,11	103,90	2,10	0,25975	0,1050		
106,00	2,15	105,90	2,14	0,26475	0,1070		
108,00	2,2	107,90	2,19	0,26975	0,1095		
110,00	2,24	109,90	2,23	0,27475	0,1115		
112,00	2,3	111,90	2,29	0,27975	0,1145		
115,00	2,38	114,90	2,37	0,28725	0,1185		
119,80	2,57	119,70	2,56	0,29925	0,1280		
100,00	2,66	99,90	2,65	0,24975	0,1325		
90,00	2,7	89,90	2,69	0,22475	0,1345		

ΘΡΑΥΣΗ



8.10 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέτρο Ελαστικότητας : $E_{2\Theta\Lambda\text{I}\Psi\text{H}\Sigma} = 1,96 \text{ KN/mm}^2$

Τάση Θραύσεως : $\sigma_{2\theta\text{ρα}\acute{\upsilon}\sigma\epsilon\omega\varsigma} = 0,30 \text{ KN/mm}^2$

Μέγιστη Παραμόρφωση : $\epsilon_2 = 0,13 \%$

8.11 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΩΝ ΔΥΟ ΔΟΚΙΜΩΝ

Το μέτρο ελαστικότητας, από τις δοκιμές θλίψης, υπολογίστηκε στην πρώτη $E_{1\Theta\Lambda\text{I}\Psi\text{H}\Sigma} = 1,34 \text{ KN/mm}^2$, ενώ στη δεύτερη $E_{2\Theta\Lambda\text{I}\Psi\text{H}\Sigma} = 1,96 \text{ KN/mm}^2$. Η τάση θραύσεως από την πρώτη δοκιμή υπολογίστηκε $\sigma_{1\theta\text{ρα}\acute{\upsilon}\sigma\epsilon\omega\varsigma} = 0,1748 \text{ KN/mm}^2$, ενώ στη δεύτερη $\sigma_{2\theta\text{ρα}\acute{\upsilon}\sigma\epsilon\omega\varsigma} = 0,30 \text{ KN/mm}^2$. Η μέγιστη παραμόρφωση στις δύο δοκιμές θλίψης υπολογίστηκε : $\epsilon_1 = 0,076 \%$ και $\epsilon_2 = 0,13 \%$ αντίστοιχα.

Από τα αποτελέσματα είναι προφανές ότι η θλιπτική αντοχή του υλικού F.R.P. είναι, όπως θα περιμέναμε, δηλαδή σχεδόν αμελητέα σε σχέση με άλλες μηχανικές ιδιότητες του (πχ. εφελκυστική αντοχή), καθώς εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες του πολυεστέρα. Επίσης γίνεται κατανοητό, από το γεγονός ότι το υλικό άντεξε περισσότερο στη δεύτερη δοκιμή (φόρτιση κάθετα στις ίνες), ότι η διεύθυνση της φόρτισης, σε σχέση με τις στρώσεις, παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αντοχή του.

8.12 ΣΦΑΛΜΑΤΑ

Σημειώνονται οι παράγοντες που θα μπορούσαν να προκαλέσουν τυχόν σφάλματα στα αποτελέσματα μεταξύ των δοκιμών, και αυτά είναι η ίδια η συσκευή θλίψης και η παλαιότητά της, ο συγχρονισμός των παρατηρητών, λάθη στις γραφικές παραστάσεις, λάθη στις διορθώσεις των τιμών των αποτελεσμάτων και στις στρογγυλοποιήσεις. Επίσης σφάλματα μπορεί να οφείλονται στα δοκίμια και συγκεκριμένα στην διαδικασία κατασκευής τους (π.χ. πιθανόν η κοπή τους να μην ήταν ομοιόμορφη κατά μήκος - με αποτέλεσμα να μην έχουν σταθερή διατομή, ή ρητίνη να μην είχε διαβρέξει ομοιόμορφα πλήρως τις ίνες, ή μπορεί να διαφέρει η χημική σύσταση τους, κλπ).

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο ειδικό μέρος θα εξετάσουμε το κατά πόσο είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το σύνθετο F.R.P. στην κατασκευή προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων, τα οποία συναρμολογούμενα θα μπορούν να δημιουργούν οικοδομικά έργα με μεγάλη ταχύτητα και σε μεγάλη έκταση. Επίσης θα προσπαθήσουμε να διαπιστώσουμε τα χαρακτηριστικά που θα έχουν τέτοιου είδους κατασκευές και αν θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη επείγουσών αναγκών (π.χ. προσωρινή στέγαση πληθυσμού που επλήγη από φυσικές καταστροφές).

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ

Κεφάλαιο 9^ο – ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ FIBERGLASS

9.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με αφορμή την εξέλιξη των τεχνικών και την αυτοματοποίηση των μεθόδων παραγωγής του F.R.P., δημιουργήθηκαν ερωτήματα, όπως το κατά πόσο το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων (τα οποία συναρμολογούμενα θα μπορούν να σχηματίζουν σταθερές κατασκευές), καθώς και ποια θα είναι τα χαρακτηριστικά αυτού του είδους των κατασκευών.

Για να απαντηθούν τα παραπάνω ερωτήματα, πρέπει προηγουμένως να ληφθούν υπ' όψη οι ιδιότητες του υλικού και οι δομικές δυνατότητες που προσφέρει.

9.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ F.R.P.

Σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του σύνθετου fiberglass, των συστατικών του (δηλαδή των ινών γυαλιού, της πολυεστερικής ρητίνης και του καταλύτη), μέθοδοι παρασκευής του, αλλά και κάποιες από τις μηχανικές ιδιότητές του μέσα από απλές εργαστηριακές δοκιμές. Εν συντομία, ορισμένες από τις ιδιότητες του που ανακαλύψαμε είναι ότι πρόκειται για ένα φτηνό και ελαφρύ υλικό με υψηλή αντοχή (κυρίως εφελκυστική - ειδικά όταν φορτίζεται παράλληλα στις ίνες οπλισμού, με σχεδόν 100 % ελαστική επαναφορά σε ιδανικές συνθήκες), που αντιστέκεται στη διάβρωση, στην καύση, στα χημικά και με άριστες μονωτικές ικανότητες.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε, ότι οι ιδιότητες του σύνθετου εξαρτώνται εκτός από την επιλογή των υλικών ή τη διεύθυνση φόρτισης και

από την διαδικασία παρασκευής που επιλέγουμε. Για την κατασκευή των έξι δοκιμίων που ελέγχθηκαν με δοκιμές στο εργαστήριο, επιλέξαμε την χειρονακτική διαδικασία επάλειψης της ρητίνης (κεφάλαιο 5). Πρόκειται για την απλούστερη διαδικασία, με το χαμηλότερο κόστος, που δεν απαιτεί ιδιαίτερη εξειδίκευση και βρίσκει εφαρμογή κυρίως στην επισκευή θαλάσσιων σκαφών. Από τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι πρακτικά αδύνατο να υπολογιστεί με ακρίβεια η αναλογία πολυεστέρα – fiberglass και ως εκ τούτου τα αποτελέσματα των δοκιμών, που παρουσιάζονται στα κεφάλαια 6, 7 και 8 είναι ενδεικτικά. Ωστόσο χρησιμοποιώντας ακριβέστερες μεθόδους, η αναλογία μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια και επομένως είναι δυνατή η πρόβλεψη των ιδιοτήτων και των αντοχών του σύνθετου.

9.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ – ΔΟΜΙΚΕΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ F.R.P.

Το σύνθετο F.R.P. μπορεί να παραχθεί σε ποικίλες μορφές (στοιχεία) οποιοδήποτε επιθυμητού σχήματος και διαστάσεων. Τα στοιχεία αυτά είναι εύκολα επεξεργάσιμα, και ως εκ τούτου είναι απλή διαδικασία η δημιουργία ανοιγμάτων, η τοποθέτηση κουφωμάτων, η εγκατάσταση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων κλπ., δηλαδή η μετατροπή τους σε προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία.

Τα προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία που προκύπτουν έχουν μικρό βάρος (το F.R.P. ζυγίζει περίπου το 1/4 του βάρους του χάλυβα), γεγονός που συνεπάγεται ότι τα στοιχεία αυτά μεταφέρονται εύκολα και οικονομικά.



ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ F.R.P. ΕΧΟΥΝ ΜΙΚΡΟ ΒΑΡΟΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΕΡΟΝΤΑΙ ΕΥΚΟΛΑ

Δεν απαιτείται ειδική διαμόρφωση και προετοιμασία του χώρου εγκατάστασης. Μια οποιαδήποτε ομαλή επιφάνεια είναι αρκετή. Τα στοιχεία μπορούν εύκολα και απλά να αγκιστρωθούν σε οποιαδήποτε έδαφος (από σκυρόδεμα, ξύλο, άσφαλο ή χώμα), προκειμένου να εξασφαλιστεί η σταθερότητά τους.

Οι κατασκευές από F.R.P. είναι απλές στην εγκατάστασή τους. Λόγω του μικρού βάρους των στοιχείων (ουσιαστικά μόνο τοίχοι και στέγες) δεν απαιτείται χρήση ικριωμάτων ή μεγάλος αριθμός εργαλείων, κάτι που συνεπάγεται μειωμένο κόστος εργατικών και μικρότερο χρόνο εγκατάστασης, σε σχέση με κτίρια από συμβατικά δομικά υλικά.



Η ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΙΝΑΙ ΑΠΛΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΓΙΝΕΙ ΒΙΩΝΟΝΤΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ



ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΙΔΙΚΩΝ ΥΠΟΔΟΧΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Ακόμη, είναι δυνατή η επέκτασή αυτών των κατασκευών, απλώς τοποθετώντας επιπρόσθετα στοιχεία. Τα παλιά τμήματα δεν αχρηστεύονται, αλλά μπορούν να μεταφερθούν, να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν ξανά σε άλλες περιπτώσεις.

Οι κατασκευές από προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία (από F.R.P.) έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Είναι ανθεκτικές έναντι της διάβρωσης (από υγρασία ή χημικές ουσίες), έναντι της υπεριώδους ακτινοβολίας (μάλιστα με τη χρήση ειδικών επικαλύψεων η επίδραση της ακτινοβολίας εκμηδενίζεται) και έναντι της καύσης (πρακτικά άκαυστες). Στα συν συγκαταλέγεται το ότι δεν έχουν την τάση να σκουριάζουν ή να σαπίζουν. Επομένως τα στοιχεία δεν χρειάζονται ιδιαίτερα έξοδα βαψίματος και συντήρησης.

Ακόμη και στην περίπτωση που κάποιο στοιχείο της κατασκευής καταστραφεί, είναι εύκολο να αντικατασταθεί ή να επισκευαστεί, όπως συμβαίνει ακριβώς και με τα θαλάσσια σκάφη. Η διαδικασία επισκευής έχει μηδαμινό κόστος και μπορεί να γίνει ταχύτατα.

Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται ενδεικτικά ο τρόπος με τον οποίο επισκευάζονται στοιχεία από F.R.P.



εικόνα 1



εικόνα 2



εικόνα 3



εικόνα 4

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1, αρχικά λειαίνεται η επιφάνεια του στοιχείου (στο σημείο που έχει καταστραφεί) με τη χρήση γυαλόχαρτου και τριβείου. Στη συνέχεια τοποθετούνται φύλλα ινών γυαλιού στη συγκεκριμένη περιοχή (εικόνα 2). Έπειτα γίνεται επάλειψη των ινών με πολυεστερική ρητίνη και καταλύτη (εικόνα 3). Αφού περάσουν δύο ώρες το υλικό στερεοποιείται,

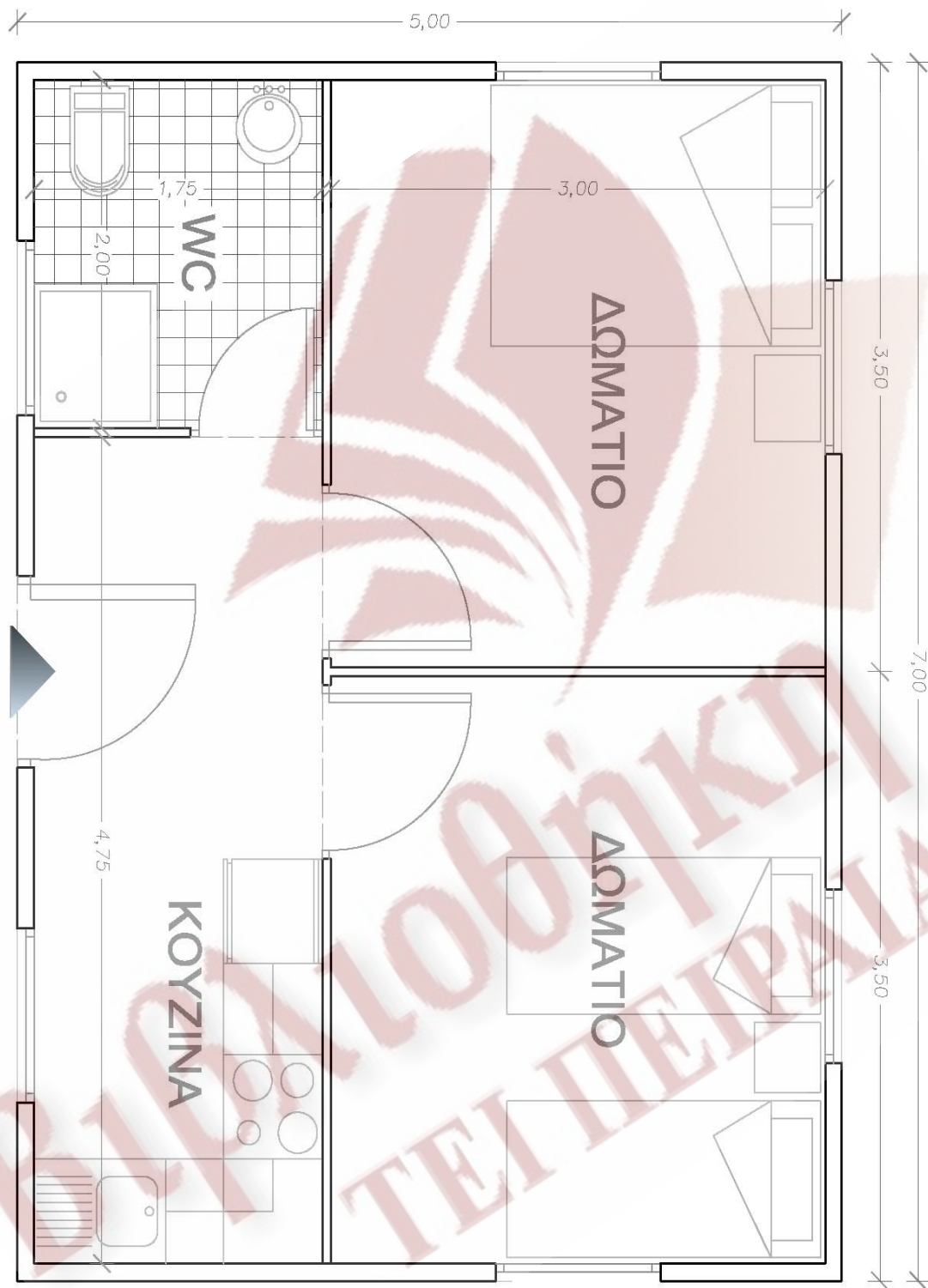
και είναι δυνατή η λείανση της περιοχής (με γυαλόχαρτο) και ο χρωματισμός της (εικόνα 4). Το στοιχείο έχει πλέον επισκευαστεί.

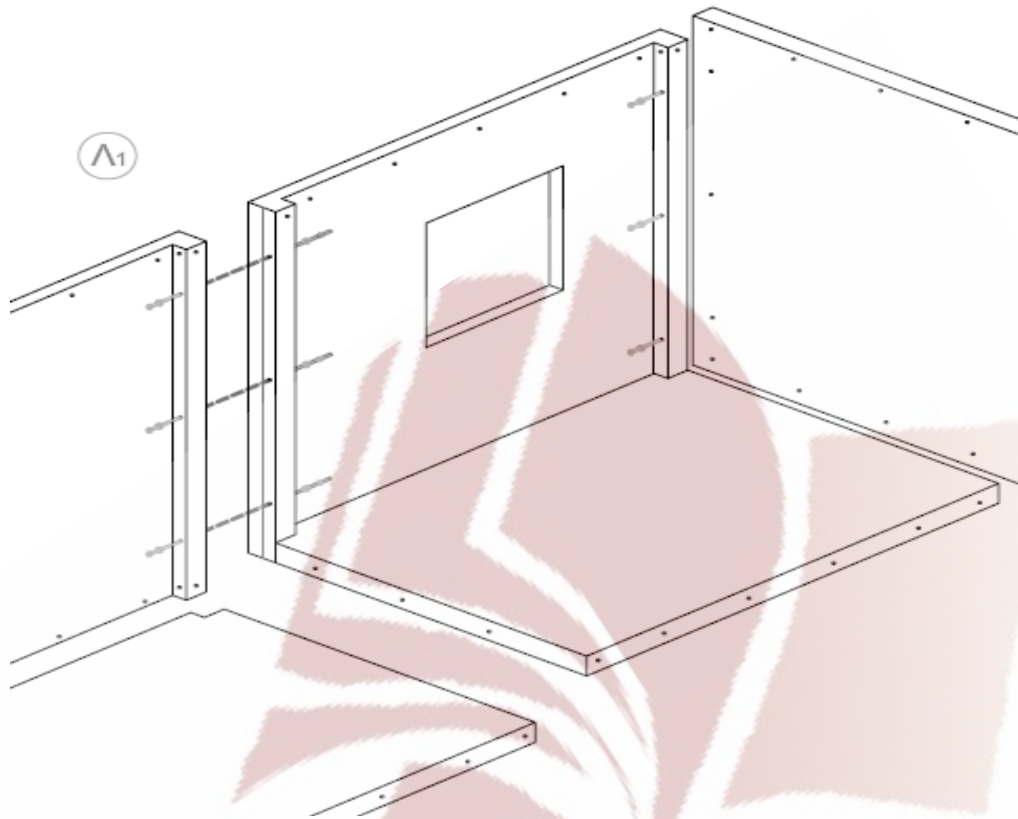
9.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι κατασκευές (όπως μικρά σπίτια, αποθήκες κλπ.) συναρμολογούμενες από προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία από F.R.P., κρίνονται ιδανικές :

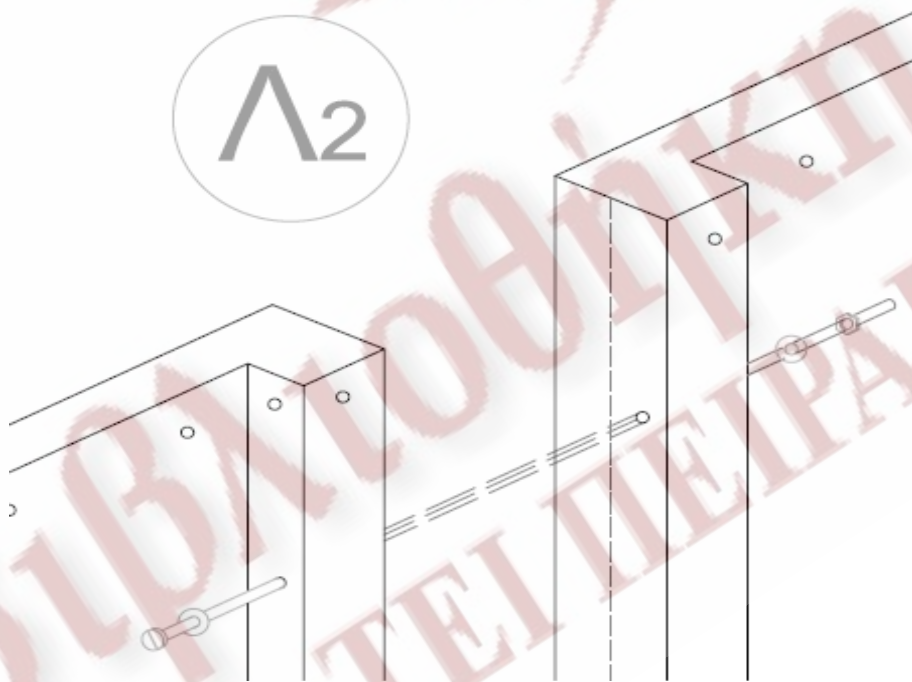
i. Για περιπτώσεις που απαιτείται ταχύτητα και ευκολία στην τοποθέτηση. Τέτοιες κατασκευές (μικρά σπίτια) θα μπορούσαν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών, όπου απαιτείται άμεση προσωρινή στέγαση πληθυσμού, μετά από κάποια φυσική καταστροφή (όπως σεισμοί, πυρκαγιές, πλημμύρες κ.α.).

Στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται μια κάτοψη ενός κτίσματος από σύνθετο fiberglass, που θα μπορούσε να στεγάσει μια τετραμελή οικογένεια, με δύο δωμάτια, κουζίνα και μπάνιο. Το κτίσμα αυτό αποτελείται από προκατασκευασμένα δομικά στοιχεία - τοίχους με σταθερό μήκος ύψος (2 στοιχεία μήκους 5m x 3 m και 6 στοιχεία μήκους 3,5m x 3 m). Σε κάθε στοιχείο μπορεί να τοποθετηθεί αναλόγως πόρτα ή παράθυρο. Τα στοιχεία ενώνονται μεταξύ τους με μπουλόνια, βίδες και παξιμάδια (Λεπτομέρειες 1, 2) και επομένως η κατασκευή αυτή είναι εύκολο να συναρμολογηθεί ή να αποσυναρμολογηθεί ή να επεκταθεί ανάλογα με τις απαιτήσεις.





Λ₂



ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Μάλιστα υπάρχει προηγούμενο όσον αφορά τη συγκεκριμένη χρήση του. Μετά από σεισμό στο Πακιστάν το 2005, κατασκευάστηκαν και δωρίθηκαν από αμερικανική εταιρία (Alaska Structures) 115 σπίτια από F.R.P., τα οποία στάλθηκαν στο Κασμίρ. Τα συγκεκριμένα σπίτια είχαν διαστάσεις 3,50 m x 6.00 m., και περιελάμβαναν κουζίνα και μπάνιο^{4,59}.

ii. Για περιπτώσεις που απαιτείται μικρό κόστος κατασκευής και συντήρησης. Θα μπορούσαν να βρουν εφαρμογή ως αποθηκευτικοί χώροι είτε για επαγγελματίες, όπως γεωργοί, κτηνοτρόφοι, είτε για ερασιτέχνες.

iii. Για περιπτώσεις που απαιτείται ανθεκτικότητα σε χημικά. Θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν σαν κατασκευές αποθήκευσης και φύλαξης επικίνδυνων και εύφλεκτων χημικών ουσιών.

9.5 ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Συνοψίζοντας μπορούμε να αναφέρουμε ότι το σύνθετο F.R.P. είναι ένα υλικό το οποίο στη χώρα μας, σε σχέση με άλλες χώρες, είναι ακόμα σχετικά άγνωστο, εκτός από τον τομέα κατασκευής θαλάσσιων σκαφών. Τα πρόσφατα χρόνια η χρήση του έχει διευρυνθεί και έτσι χρησιμοποιείται πλέον σε βιομηχανίες αθλητικού εξοπλισμού, επίπλων, ειδών υγιεινής, σωληνώσεων, διακοσμητικών προϊόντων και σε τεχνικά έργα ως ενίσχυση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Το συγκεκριμένο υλικό έχει πολλές δυνατότητες και αφήνει υποσχέσεις και για αυτόνομες κατασκευές εξ ολοκλήρου από F.R.P. Οι κατασκευές αυτές είναι αξιόπιστες, ανθεκτικές, με μικρό βάρος, προσφέρουν ευκολία αποθήκευσης, μεταφοράς, συναρμολόγησης, αποσυναρμολόγησης, επέκτασης και επισκευής. Επιπλέον, παρουσιάζουν όλα τα χαρακτηριστικά του fiberglass, δηλαδή υψηλές μηχανικές ιδιότητες και αντοχές σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία και χημικά). Όλα τα παραπάνω καθιστούν αυτού του είδους τις κατασκευές οικονομικά και χρονικά συμφέρουσες. Η επένδυση σε τέτοιες κατασκευές θα προσφέρει μια ιδιαίτερα ανταγωνιστική λύση στην αγορά, με πολλές δυνατότητες και είναι δυνατόν να φέρει ανακούφιση σε περιπτώσεις εκτάκτων αναγκών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ
ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑΣ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Fiberglass>
2. http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_Fiberglass
3. <http://www.owenscorning.com/acquainted/about/history/index.asp>
4. <http://AmericanHeritage.com>
5. <http://www.caranddriver.com/roadtests/7449/1953-chevrolet-corvette.html>
6. <http://www.conceptcarz.com/vehicle/z205/default.aspx>
7. <http://www.streifly.de/ehistorie.htm>
8. <http://www.fiddlersgreen.net/AC/aircraft/Libelle-Sailplane/libelle.php>
9. Gupta, V.B.; V.K. Kothari (1997). *Manufactured Fibre Technology*, 544-546, London: Chapman and Hall.
10. Sharma, S.C. (2000). *Composite Materials*, Narosa Publishing House.
11. Kachlakev D.I. *Strengthening Structures Using F.R.P. Composite Materials*, Ph.D., P.E., California Polytechnic State University San Luis Obispo.
12. K.L. Loewenstein, *The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers*, 3rd revised ed., Elsevier, 1993
13. F.T. Wallenberger, *Structural Silicate and Silica Glass Fibers*, in Fig. 7 *Texturizing Advanced Inorganic Fibers Processes, Structures, Properties, Applications*, F.T. Wallenberger, Ed., Kluwer Academic Publishers, 1999, p 129–168.
14. <http://www.madchow.com/Volume-2/Fiberglass.html>
15. Aubourg.P.F., C. Crall, J. Hardley, R.D. Kaverman, and D.M. Miller, “Glass Fibers, Ceramics and Glasses”, in *Engineered Materials Handbook*, Vol. 4 ASM International, 1991, pp. 1027-1031
16. McLellan, G. W. and E.B. Shand, *Glass Engineering Handbook*, McGraw-Hill, 1984
17. Pfaender, H.G., *Schoot Guide to Glass*, Van Norstrand Reinhold Company.
18. Lubin, George (Ed.) (1975). *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastic Composites*, Huntington NY: Robert E. Krieger.
19. D.M. Miller, *Glass Fibers, Composites*, Vol 1, *Engineered Materials Handbook*, ASM International, 1987, p 45–48.
20. <http://www.netcomposites.com>

21. Mohr, J.G.; W.P. Rowe (1978). *Fiberglass*, 13, Atlanta: Van Nostrand Reinhold.
22. Volf, Milos B. (1990). *Technical Approach to Glass*, New York: Elsevier.
23. J.F. Sproull, *Fiber Glass Composition*, U.S. Patent 4,542,106, 17 Sept 1985
24. 10. F. Rossi and G. Williams, *A New Era in Glass Fiber Composites*, Proc., 28th AVK Conf. (Baden-Baden, Germany), 1-2 Oct. 1997, p 1-10.
25. "Standard Specification for Glass Fiber Strands", D 578-98, Annual Book of ASTM Standards, ASTM.
26. <http://www.nonwovens.com>
27. P.K. Gupta, *Glass Fibers for Composite Materials, Fibre Reinforcements for Composite Materials*, A.R. Bunsell,
28. F.T. Wallenberger, *Melt Viscosity and Modulus of Bulk Glasses and Fibers: Challenges for the Next Decade*, in *Present State and Future Prospects of Glass Science and Technology*, Proc. of the Norbert Kreidl Symposium (Triesenberg, Liechtenstein), 1994, p 63–78.
29. Παπανικολάου Γ., *Σύνθετα Υλικά*, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, 2004.
30. Τριανταφύλλου, Θ. Χ., *Ενισχύσεις Κατασκευών Σκυροδέματος με Ινοπλισμένα Πλαστικά Υλικά*.
31. Τριανταφύλλου Θ. Χ. ,(2001). *Δομικά Υλικά*.
32. Austin, C.D., B.S. in Civil Engineering (2000). *Buckling Of Symmetric Laminated Fiberglass Reinforced Plastic (F.R.P.) Plates* , University Of Pittsburgh.
33. Σίδερης, Κ. Κ. (1984). *Τεχνολογία Δομικών Υλικών*, τόμ.Β' , Δημοκρ. Πανεπ. Θράκης , Ξάνθη .
34. Wenderhorst, R. (1975). *Baustoffkunde* , Verlag , Hannover .
35. <http://www.costaschronis.com>
36. Abbott, T. W.; Johnson, J. R. "Phenylethylene [Styrene]" *Organic Syntheses*, Coll. Vol. 1, p.440 (1941).
37. Ashby , M. F. and Jones, D. R. H. (1988). *Engineering Materials 2: An Introduction to Microstructures, Processing and Design* , Pergamon Press, Oxford.
38. Feldman , D. (1989) .*Polymeric Building Materials* , Elsevier Science Publishers Ltd. , London.

39. Jackson, N. and Dhir , R.K. (1988). Civil Engineering Materials, 4th edition, MacMillan Education Ltd., London.
40. Παντελής Δημήτρης Ι., Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά.
41. Nicholls, R.(1976). Composite Construction Materials Handbook, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
42. Humphreys, M. F. , The Use of Polymer Composites in Construction
43. Francesco Micelli, Antonio Nanni, (2001) Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, σσ. 21-33.
44. Micelli, F. and A. Nanni, (2001) Issues Related to Durability of FRP Reinforcement for RC Structures Exposed to Accelerated Ageing Tests, , ASC 16th Annual Conference –Virginia Tech, Blacksburg, VA, Sept. 9-12, 2001.
45. Hull, D.(1981). An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge England.
46. Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ., (2006), Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά, κεφ 2 και 10.
47. Ντελμεκούρα Κωνσταντίνα, Ενίσχυση Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα με Χρήση Σύνθετων Υλικών Ανόργανης Μήτρας, φοιτητικό συνέδριο «Επισκευές – Ενισχύσεις Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα», Πάτρα 2005.
48. Phillips, L. N., editor (1989). Design with Advanced Composite Materials, Springer – Verlag, London.
49. Jones, R. M. (1975). Mechanics of Composite Materials, Scripta Book Co., Washington D.C.
50. Kim, D. H., (1995). Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FN Spon, London.
51. Ching Chiaw Choo, (2005) Investigation of Rectangular Concrete Columns Reinforced or Prestressed with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars or Tendons, σσ.20-30.
52. Τριανταφύλλου Αθανάσιος Χ., (2001), Προηγμένες Τεχνολογίες Υλικών και Κατασκευών , Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.
53. Δρίτσος Σ.Η., Ενισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Πάτρα 2006.

54. Τριανταφύλλου, Αθ.Χ., Παπανικολάου, Αικ. Γ., Μπουρνάς, Δ., Λόντου, Π., Νέα Γενιά Σύνθετων Υλικών Ανόργανης Μήτρας (TRM) για την Ενίσχυση Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, 25-27 Οκτ., Αλεξανδρούπολη 2006.
55. New York City Department of Health and Mental Hygiene:
http://www.nyc.gov/html/doh/html/press_archive02/pr08-208.shtml
56. American Lung Association:
<http://www.lungusa.org/site/pp.asp?c=dvLUK9O0E&b=35439>
57. Illinois Department of Public Health:
<http://www.idph.state.il.us/envhealth/factsheets/fiberglass.html>
58. Βουθούνης, Π. Α., Τεχνική Μηχανική – Αντοχή των Υλικών, 1993.
59. <http://www.militantislammonitor.org/article/id/1691>

