

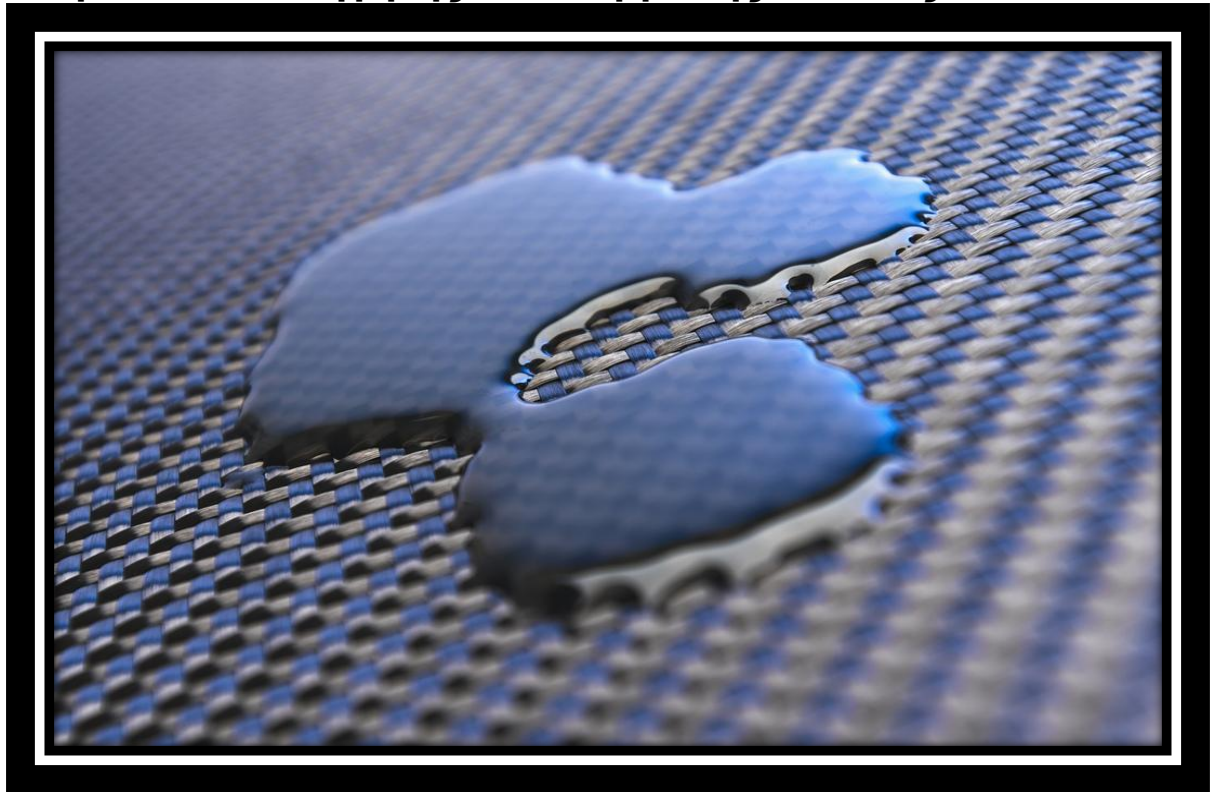


**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ ΤΜΗΜΑ  
ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**Μελέτη αντοχής σε θλίψη σύνθετου πολυμερούς (επόξυ – ρητίνης ενισχυμένης με υαλοϋφασμα ). A study of compression strength of Glass Fiber Reinforcement Epoxy Composites.**

**Φοιτητής: Προκοπάκης Γεώργιος**

**Επιβλέπων καθηγητής: Σαββάκης Κώστας**



Ηράκλειο 2017

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
ABSTRACT:.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 .....	9
1.ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ.....	9
1. Γενικά Στοιχεία για τα σύνθετα υλικά .....	9
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ(Agarwal -1990) :.....	9
1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών .....	10
1.3 Υλικά ενίσχυσης.....	12
1.4 Πολυμερείς μήτρες.....	14
1.5 Εποξυ ρητίνες.....	18
1.5.1 Εφαρμογές των εποξειδικών ρητινών.....	19
1.5.2 Ιδιότητες εποξειδικών ρητινών .....	20
1.5.3 Παραγωγή εποξειδικών ρητινών .....	21
1.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εποξειδικών ρητινών .....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 .....	24
2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	24
2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ.....	28
2.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	28
2.4 ΤΥΠΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....	40
3.1 ΙΝΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ.....	40
3.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (Glass Fibers).....	42
3.2.1 Τύποι Υαλονημάτων .....	43
3.2.2 Σύσταση ινών γυαλιού.....	44
3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	45
3.3.1Αεροναυπηγική και αεροδιαστημική .....	46
3.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία .....	47
3.3.3 Ναυπηγική.....	48
3.3.4 Ιατρική .....	49

3.4 Συμπεράσματα .....	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	
4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΩΝ .....	51
4.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ.....	52
4.2.1 Μορφοποίηση σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας .....	52
4.3 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ .....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 .....	63
ΥΛΙΚΑ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ .....	63
5.1 Κατασκευή των δοκιμίων .....	63
5.2 Περιγραφή κατασκευής του υλικού .....	63
5.3 Σχεδίαση των δοκιμίων .....	70
5.4 Κοπή και μορφοποίηση των δοκιμίων .....	71
5.5 Σύνδεση δοκιμίων με στηρίγματα .....	72
5.6 Προσανατολισμός κοπής.....	73
5.7 Περιγραφή δοκιμασίας θλίψης .....	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 .....	77
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ .....	77
6.1 Αποτελέσματα .....	77
6.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων .....	84
6.3 Συμπεράσματα .....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στην εργασία αυτή μελετάται η αντοχή των σύνθετων υλικών (επόξυ – ρητίνης ενισχυμένης με υαλοϋφασμα) σε δοκιμασίες θλίψης. Πιο συγκεκριμένα πως μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες τους(αντοχή θλίψης και η ελαστικότητα) ανάλογα με την γωνία προσανατολισμού των ινών του υαλοϋφάσματος σε σχέση με τον κατακόρυφο προσανατολισμό θλίψης.

Το υλικό και συγκεκριμένα οι δύο πλάκες παρασκευάστηκαν στο εργαστήριο του Κ. Ατζολετάκη στην βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου. Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες για τη βοήθεια του και τον απεριόριστο χρόνο που αφιέρωσε .

Το υλικό χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή πτερυγίων ανεμογεννητριών και σε πολλές άλλες μηχανολογικές εφαρμογές.

Επίσης τα δοκίμια σχεδιάστηκαν και μετρήθηκαν στο Αιολικό Εργαστήριο του Τ.Ε.Ι με τις οδηγίες του Κ. Κονταξάκη τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την βοήθεια του. Επίσης, και για την βοήθεια εύρεσης του κατάλληλου προτύπου για τις διαστάσεις και του τρόπου διεξαγωγής του πειράματος. Τα δοκίμια κόπηκαν στη βιοτεχνία των Αφών Σπανού με προσωπική τους εργασία. Τους ευχαριστώ θερμά για τη δωρεάν παροχή της υπηρεσίας αυτής.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο της πτυχιακής μου Κ. Κώστα Σαββάκη όπου ήταν πάντα πρόθυμος να μεταδώσει της γνώσης του να λύσει τυχόν απορίες μου και να με καθοδηγεί για να φέρω εις πέρας την εργασία.

Τέλος, την οικογένεια μου που στέκεται πάντα δίπλα μου και με στηρίζει σε ότι και αν κάνω.

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις μέρες μας, λόγω των αναγκών για υλικά με ανθεκτικότητα και μεγάλη αντοχή, έχει επικρατήσει να χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα υλικά στις περισσότερες εφαρμογές. Αυτά τα υλικά κατατάσσονται σε κατηγορίες οι οποίες είναι:

- Τα μέταλλα
- Κεραμικά και γυαλιά
- Πολυμερή
- Και σύνθετα υλικά

Λόγω των ιδιοτήτων τους και της χρησιμότητάς τους, τα σύνθετα υλικά παράγονται και χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο σύμφωνα με μελέτες από τα αρχαία χρόνια. Αρχικά τα έβρισκε στην φύση, υλικά όπως το ξύλο τα κόκκαλα και την πέτρα. Με τα χρόνια βελτίωσε τις ιδιότητες τους καθώς τα συνδύασε με πρόσθετα υλικά.

Από ιστορικές αναδρομές οι Αιγύπτιοι (5000 π.Χ.) χρησιμοποίησαν την τεχνική της ενίσχυσης τούβλων πηλού με προσθήκη άχυρων.

Στην Μεσοποταμία (1000 π.Χ.), λόγω επιφανειακής φθοράς ανέπτυξαν την τεχνική του βερνικώματος των τούβλων και των πλακιδίων.

Την δεκαετία του 1920 δημιουργείται το πρώτο σύνθετο υλικό βασισμένο σε μήτρα πλαστικού γνωστό και ως βακελίτης, αποτελείτο από μίγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΐδη.

Το 1964 διατέθηκαν στην αγορά οι ίνες άνθρακα(carbon fibers) οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στις αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Το 1971 διατέθηκαν στο εμπόριο οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες τώρα χρησιμοποιούνται στα ελαστικά των αυτοκινήτων καθώς και σε αεροδιαστημικές και ναυπηγικές εφαρμογές.

Η υψηλή αντοχή, η αντοχή σε διάβρωση, το μικρό βάρος, η συμπεριφορά σε κόπωση, σε κρούση και το μικρό κόστος συντήρησης είναι μερικοί από τους λόγους που έχουν οδηγήσει τα σύνθετα υλικά στην πρώτη θέση μεταξύ των κατασκευαστικών υλικών από τα αρχαία χρόνια μέχρι και σήμερα στην κατασκευή εφαρμογών.

Στα παραδοσιακά σύνθετα ανήκουν υλικά όπως το fiberglass, το ξύλο και το σκυρόδεμα. Τα υπόλοιπα σύνθετα που χρησιμοποιούνται σε τεχνικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων συνιστούν τα λεγόμενα προηγμένα σύνθετα υλικά.

Τα σύνθετα πολυμερή υλικά αποτελούν σήμερα αλλά και από τα αρχαία χρόνια μια σπουδαία κατηγορία μηχανολογικών κατασκευαστικών υλικών. Παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, ευελιξία στο σχεδιασμό και την μορφοποίηση τους. Τα σύνθετα πολυμερή χρησιμοποιούνται σήμερα σε μια μεγάλη ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών αλλά και σε κατασκευές υψηλής τεχνολογίας κυρίως στους τομείς της αεροναυπηγικής και αεροδιαστημικής τεχνολογίας. Πιο συγκεκριμένα, τα σύνθετα πολυμερή υλικά χρησιμοποιούνται σε:

- στρατιωτικά αεροπλάνα
- εμπορικά και συμβατικά αεροπλάνα
- πυραύλους
- κινητήρες αεροσκαφών
- φτερά ανεμογεννήτριας
- επιβατικά αυτοκίνητα αλλά και σε
- κράνη
- ρακέτες του τένις

και σε εκατοντάδες ακόμα εφαρμογές.

Η παραγωγή και η χρήση των σύνθετων πολυμερών υλικών γίνεται όλο και πιο "δημοφιλής" λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους που συνοδεύουν, όπως η ανθεκτικότητα, το χαμηλό κόστος συντήρησης και κυρίως η ευκολία στον σχεδιασμό των κατάλληλων εξαρτημάτων. Τα σύνθετα υλικά έχουν πολύ μικρότερο βάρος και πολύ μικρότερο λόγο αντοχής / πυκνότητας σε σχέση με υλικά κατασκευών όπως, χάλυβας, αλουμίνιο.

Βέβαια, πέρα από τις εφαρμογές των σύνθετων πολυμερών υπάρχουν και πολλές δυσκολίες ως προς την παραγωγή τους και τη μορφοποίηση τους, καθώς απαιτείται εφαρμογή εξελιγμένων τεχνολογιών με σύγχρονα μηχανήματα. Το 70% του κόστους τους προέρχεται από την κατασκευή τους, δηλαδή έχουν υψηλό κόστος κατασκευής, καθώς και δυσκολία στην ανακύκλωση τους.

Η μηχανική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών καθορίζεται από τη συνεργασία των φάσεων της δομής του (interface). Την πολυμερή φάση (μήτρα) και τη φάση της ενίσχυσης. Παρατηρείται ότι η συνεργασία αυτή που σχετίζεται με τη συνεκτικότητα της δομής και τη μεταφορά των φορτίων καταπόνησης του υλικού επηρεάζεται σημαντικά από την επίδραση διαφόρων

εξωτερικών παραμέτρων που σχετίζονται με την έκθεση του υλικού στις πραγματικές περιβαλλοντικές συνθήκες αλλά και τον τρόπο καταπόνησης του υλικού.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε σύνθετο υλικό με μήτρα επόξυ ρητίνη (epoxy resin) και ενίσχυση με υαλοϋφασμα. Εξετάστηκε η αντοχή σε θλίψη του υλικού σε δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό των ινών ενίσχυσης του υαλοϋφάσματος.

# ABSTRACT:

In our days, fiber reinforced composite materials play a significant role in science, industrial, and in many other branches. They present many advantages compared with common materials like metals or ceramics.

The aim of this project is to explore the resistance of composite materials with glass-fiber reinforced polymer under compressive load.

For this propose the material of this project is consisted by reinforced epoxy with glass-fiber (Glass-Woven), GFRE (glass fiber reinforced epoxy). The type of glass is E-glass.

Two plates were made for this project. The first plate is for the specimens and the second one is for the supports. Both of them were manufactured by the Hand Lay Up (Manual Process).

First plate: the composite consists of 9 layers of fiberglass (interglass) 60\*45, 3.3 mm width and 290 gr/m<sup>2</sup>. The layers are bonded together with Epoxy Resin LF.

Second plate: the composite consists of 12 layers of fiberglass (interglass) 50\*32, 4 mm width and 290 gr/m<sup>2</sup>. The layers are bonded together with Epoxy Resin LF + LF1.

After the manufacturing progress the plates stayed in a dry place to mature the bonds between the fiberglass and the epoxy. Then the plates designed properly with the test objects in the right cutting angle (0<sup>0</sup>,30<sup>0</sup>,45<sup>0</sup>,60<sup>0</sup>). After this the plates were cut into a cutting wheel to acquire the right dimensions. The supports were stuck on the specimens for better resistance with special glue, in specific distance.

Finally, the specimens were getting to the press for the tests with the suitable compressive load. The important part of the tests is that every specimen had a specific angle of compression.

For every angle of specimens there was a concentrated table that explains and compares the results.

It's good to be mentioned that the experiments were under the standard ASTM D695-10.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

### 1. Γενικά Στοιχεία για τα σύνθετα υλικά

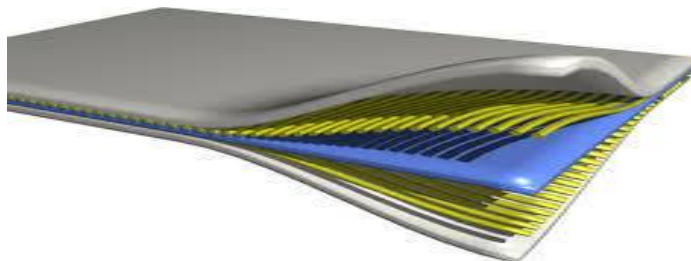
Σύνθετο υλικό χαρακτηρίζεται το υλικό το οποίο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη(φάσεις). Έτσι λόγω της διαφορετικότητας των υλικών είναι προφανές ότι θα έχουν διαφορετικές φυσικές αλλά και μηχανικές ιδιότητες μεταξύ τους. Ενώ και το υλικό το οποίο θα δημιουργηθεί θα έχει ιδιότητες που θα προκύπτουν από συνδυασμό των ιδιοτήτων των φάσεων του.

#### 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ(Agarwal -1990) :

*Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Όπως προαναφέρθηκε λόγω της διαφορετικότητας που υπάρχει μεταξύ των υλικών το ένα υλικό χρησιμοποιείται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο υλικό μηχανικές ιδιότητες, και το δεύτερο καλείται ως μήτρα, και προσδίδει την μέγιστη δυνατή προστασία των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

Έτσι με τον συνδυασμό των δυο έχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα που μπορεί να παραχθεί ώστε η κατασκευή μας να μας παρέχει τις βέλτιστες προσδοκώμενες ιδιότητες.



Σχήμα 1.1 Δομή Σύνθετων Υλικών

## 1.2 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

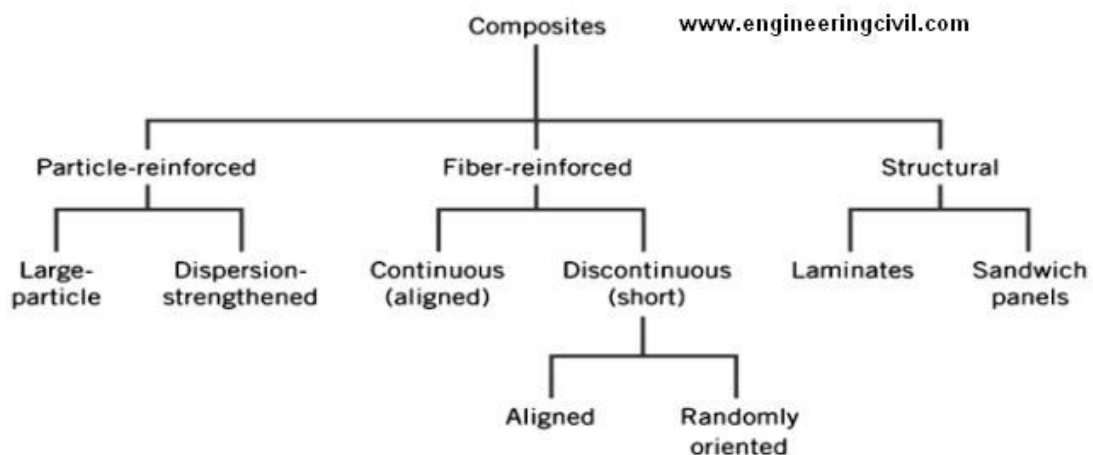
Ανάλογα με την μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- ❖ **Ινώδη Σύνθετα** (fiber composites): Με ενίσχυση ινών εμποτισμένων σε υλικό μήτρας.
- ❖ **Στρωματικά σύνθετα** (laminated composites): Με επάλληλες στρώσεις υλικών.
- ❖ **Κοκκώδη Σύνθετα** (particulate composites): Με ενίσχυση σωματιδίων διασκορπισμένων στο υλικό της μήτρας.

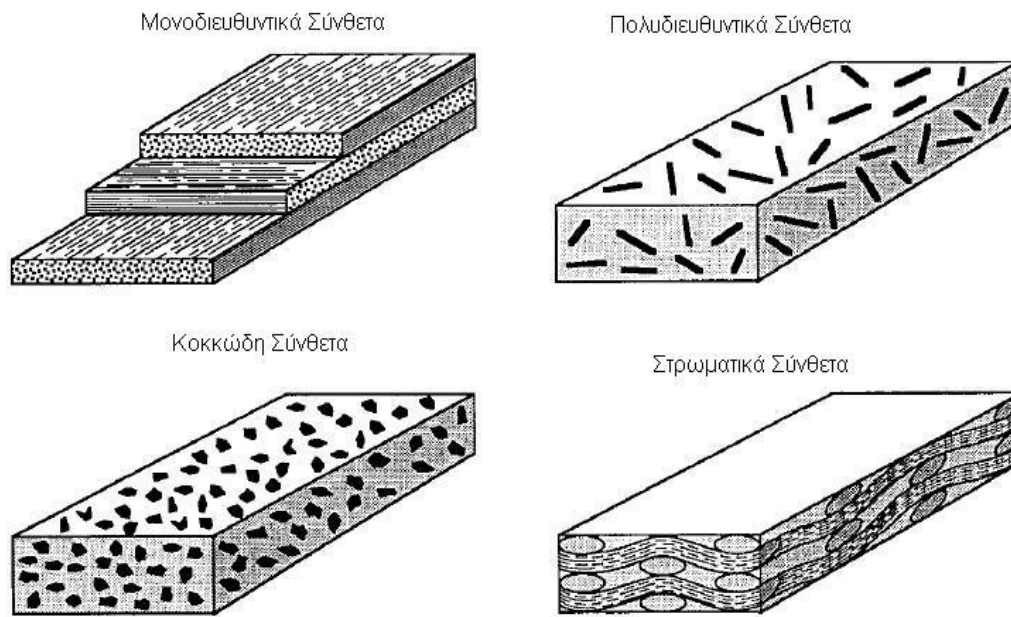
Τα ινώδη σύνθετα υλικά τα ξεχωρίζουμε ανάλογα με την διεύθυνση των ινών τους σε :

- Μονοδιευθυντικά σύνθετα, στα οποία οι ίνες έχουν κοινή διεύθυνση.
- Πολυδιευθυντικά σύνθετα στα οποία οι ίνες έχουν διαφορετικό προσανατολισμό.

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών εξηγείται με βάση το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 1.2 Ταξινόμηση των σύνθετων Υλικών



Σχήμα 1.3 Κατηγορίες Σύνθετων υλικών σύμφωνα με την μορφή του συστατικού ενίσχυσης.

Στα παραδοσιακά σύνθετα ανήκουν υλικά όπως το fiberglass, το ξύλο και το σκυρόδεμα. Τα υπόλοιπα σύνθετα που χρησιμοποιούνται σε τεχνικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων, συνιστούν τα λεγόμενα προηγμένα σύνθετα υλικά όπως:

**Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας:**

- ίνες KEVLAR/εποξική ρητίνη
- ίνες γραφίτη / CFRP
- ίνες γυαλιού / GFRP

Χρησιμοποιούνται κυρίως στην αεροναυπηγική, στην ναυπηγική , σε αθλητικά είδη και στην αυτοκινητοβιομηχανία.

• **Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας:**

- Al (Aluminum)
- SiC (silicon and carbon with chemical formula)
- SiC / Cu
- WC / Co (cermet- composed of ceramic (cer) and metallic (met) )

Χρησιμοποιούνται στην κατασκευή εμβόλων MEK , σε έδρανα, τριβείς, προπέλες , πτερωτές και εργαλεία κοπής.

- **Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας :**

- ίνες άνθρακα / άνθρακας

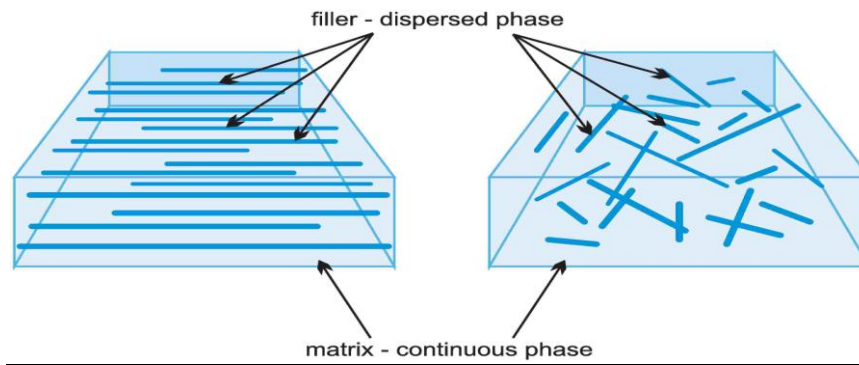
- ίνες SiC

- SiC / γυαλί

Με εφαρμογή σε θερμομονωτικά υλικά αντιτριβικές εφαρμογές στην αεροναυπηγική και στην αεροδιαστημική.

### 1.3 Υλικά ενίσχυσης

Τα κύρια συστατικά του σύνθετου υλικού είναι η μήτρα και η ενίσχυση.



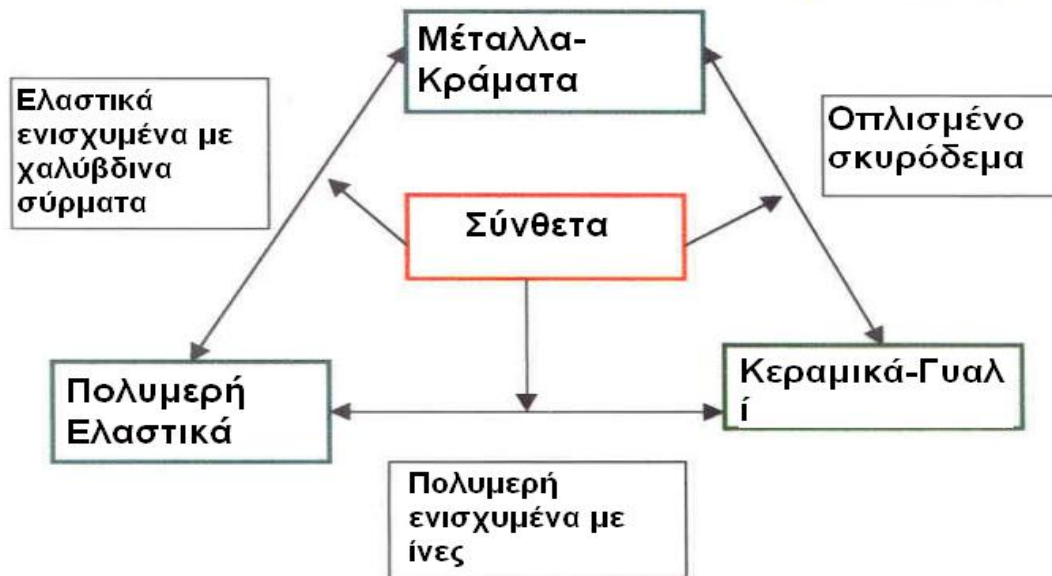
Σχήμα 1.4 Μήτρα(αριστερά)-Ενίσχυση(δεξιά)

**Ενίσχυση** είναι η ασυνεχής ή διασκορπισμένη φάση στο σύνθετο υλικό και έχει ως σκοπό την “ενδυνάμωση” της μήτρας .

Πραγματοποιείται με τρεις μεθόδους :

- α) ενίσχυση με σωματίδια ,η ενίσχυση γίνεται με μεγάλα σωματίδια ή με ενισχυμένα σωματίδια με περίπου ίδιες διαστάσεις σε όλες τις κατευθύνσεις.
- β) ενισχυμένα με ίνες , με την ενίσχυση να είναι με συνεχή ή με ασυνεχή προσανατολισμό και
- γ) ενίσχυση με δομικά σύνθετα όπου υπάρχει συνδυασμός σύνθετων και ομοιογενών υλικών(π.χ. φύλλα “σάντουιτς”).

## • Σύνθετα Υλικά (Composites)



Σχήμα 1.5 Κατηγορίες των σύνθετων υλικών

Στα σύνθετα πολυμερή υλικά χρησιμοποιείται το ενισχυτικό μέσο το οποίο πραγματοποιεί σημαντικές λειτουργίες αφού είναι και το ένα μέρος από το οποίο αποτελείτε το υλικό. Επιλέγοντας το κατάλληλο υλικό ενίσχυσης, επιτυγχάνονται οι επιθυμητές ιδιότητες, οι οποίες είναι απαραίτητες για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας της κατασκευής. Επίσης, για να φέρουν εις πέρας τις αυξημένες μηχανικές απαιτήσεις που χαρακτηρίζουν τα σύνθετα υλικά, μιας και είναι εκείνες που παραλαμβάνουν τα φορτία. Για αυτό και τα ενισχυτικά μέσα που χρησιμοποιούνται έχουν καλύτερες ιδιότητες από το υλικό της μήτρας δίνοντας στο τελικό υλικό αυξημένες ιδιότητες αντοχής και μέτρου ελαστικότητας. Οι ενισχυτικοί τρόποι που χρησιμοποιούνται διαφέρουν ως προς τις ιδιότητες και το μέγεθος τους.

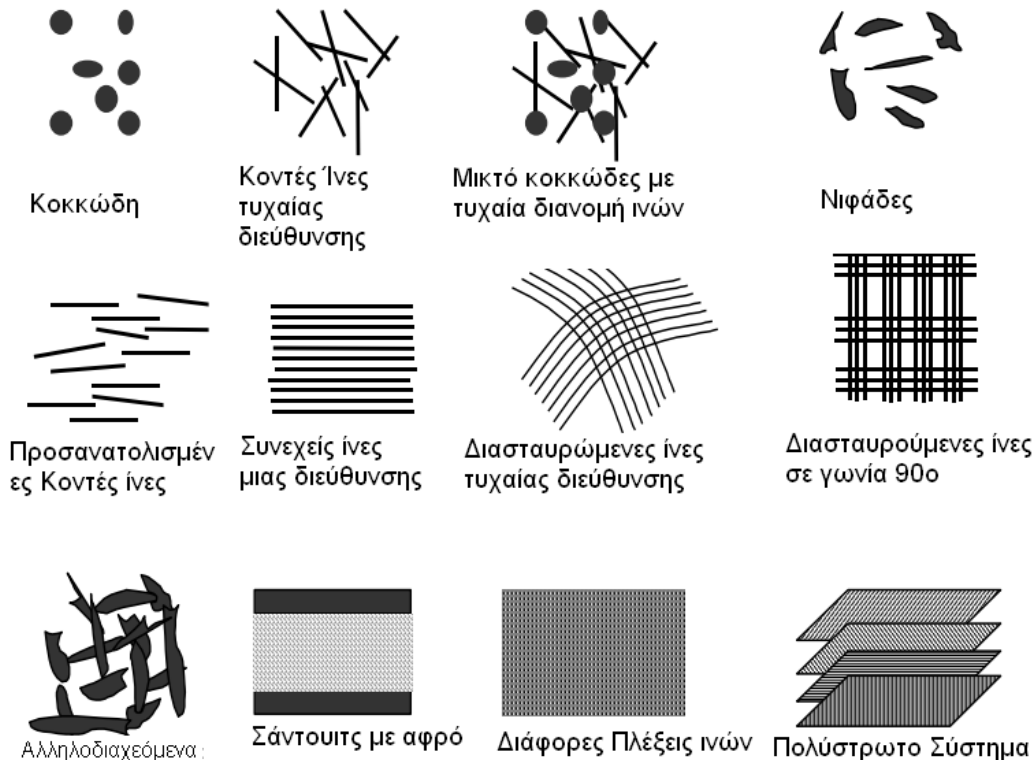
Με βάση το μέγεθος του ενισχυτικού μέσου, τα σύνθετα αυτά υλικά τα χωρίζουμε σε τρεις κατηγορίες:

- A) Νανοςύνθετα, με έγκλεισμα μεγέθους  $\sim 10^{-9}$  m
- B) Μικροσύνθετα, με έγκλεισμα μεγέθους  $\sim 10^{-6}$  m
- Γ) Μακροσύνθετα, με έγκλεισμα μεγέθους  $\gg 10^{-6}$  m

**Πιο συγκεκριμένα η ενίσχυση της μήτρας μπορεί να γίνει με :**

- Κοντές ίνες τυχαίας διεύθυνσης
- Κοκκώδη
- Νιφάδες
- Μεικτό κοκκώδες με τυχαία κατανομή κοντών ινών
- Προσανατολισμένες κοντές ίνες
- Συνεχείς ίνες μιας διεύθυνσης

- Διασταυρούμενες ίνες μιας διεύθυνσης
- Διασταυρούμενες ίνες σε γωνία 90°
- Σάντουιτς με αφρό
- Διάφορες πλέξεις ινών



Σχήμα 1.6 Τύποι ενίσχυσης μήτρας

## 1.4 Πολυμερείς μήτρες

Στα σύνθετα υλικά ο ρόλος της μήτρας είναι ο πιο κρίσιμος αφού δέχεται τα μηχανικά φορτία, για να μεταφερθούν στην συνέχεια μέσω της μήτρας στο ενισχυτικό υλικό.

Συνεπώς ο ρόλος της μήτρας είναι να δέχεται και να προστατεύει την επιφάνεια της ενίσχυσης από κυρίως περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως υγρασία και θερμότητα αποτρέποντας τυχόν χημικές προσβολές που θα έχουν ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του υλικού. Ακόμα, διατηρεί την συνοχή των μορίων του υλικού.

Επίσης, η μήτρα βοηθάει το υλικό στην προστασία του από ενδεχόμενη θραύση.

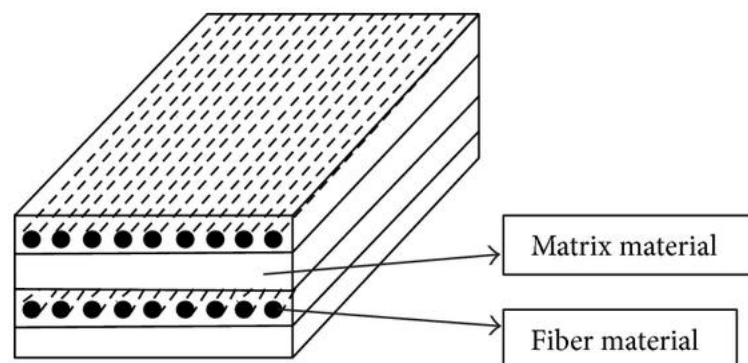
Η μήτρα και η ενίσχυση είναι πολύ σημαντικό να έχουν καλή φυσικοχημική πρόσφυση. Όταν η πρόσφυση της ενίσχυσης και της μήτρας είναι η κατάλληλη τότε και η λειτουργία του σύνθετου είναι σωστή.

Ακόμα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιότητες του υλικού της μήτρας με εκείνες της ενίσχυσης που αφορούν το ιξώδες, την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης, κ.α.

Τέλος, για να φτάσουμε στην μέθοδο κατασκευής του σύνθετου υλικού πραγματοποιείται η κατάλληλη επεξεργασία με βάση την φύση της μήτρας αφού κάθε υλικό έχει και διαφορετικές μεθόδους κατασκευής.

Οι τύποι μήτρας που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σύνθετων υλικών, είναι μεταλλικές, κεραμικές και πολυμερείς :

- MMC(Metal matrix composites)
- CMC(Ceramic matrix composites)
- PMC(Polymer matrix composites)



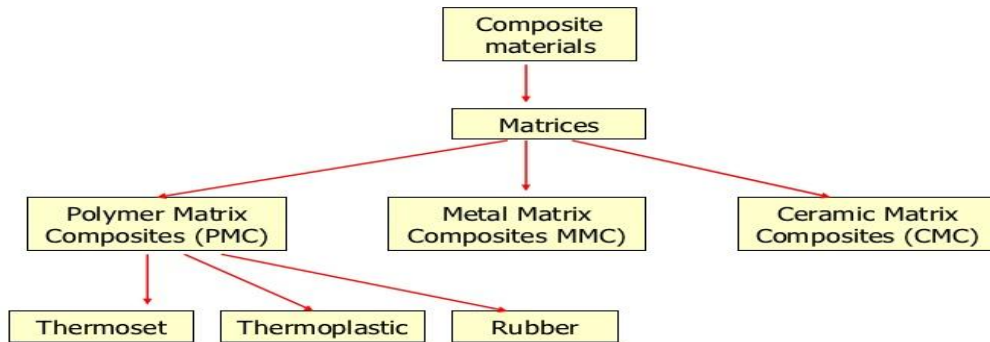
Σχήμα 1.7 Σύνθετο Υλικό με μήτρα και ίνες

Οι πολυμερείς μήτρες είναι αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο και διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Θερμοσκληρυνόμενες
2. Θερμοπλαστικές
3. Ελαστομερείς



## Classification based on Matrices



Σχήμα 1.8 Πολυμερείς μήτρες-Κατηγορίες

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή υλικά είναι δύσκαμπτα και οι ιδιότητες τους, τους επιτρέπουν να μην επηρεάζονται από την θερμοκρασία. Έχουν υψηλό σημείο τήξης, θερμικές ιδιότητες, υψηλή δυσκαμψία, μειωμένη αναφλεξιμότητα και επιφανειακή σκληρότητα. Αυτό τους επιτρέπει να έχουν μεγάλο πλήθος εφαρμογών χάρις στην θερμοσταθερότητα τους.

Για σύνθετα υλικά οι πιο γνωστές θερμοσκληρυνόμενες μήτρες είναι οι εποξειδικές ρητίνες, οι ακόρεστοι πολυεστέρες(UP), οι φαινόλες, οι βυνιλεστέρες κ.α. Αυτές καλύπτουν πλήθος χημικών συστάσεων και μεγάλο εύρος φυσικών και χημικών ιδιοτήτων.

Τα θερμοπλαστικά υλικά έχουν ευρεία χρήση λόγω του χαμηλού τους κόστους, της εύκολης επεξεργασία τους, καθώς και στην ευκολία με την οποία επεξεργάζονται με κοινές μεθόδους μορφοποίησης πλαστικών.

Εκείνο που τα χαρακτηρίζει είναι ότι όταν θερμανθούν μαλακώνουν και σε υψηλές θερμοκρασίες ρέουν λόγω της χαλάρωσης των μοριακών δεσμών τους. Εάν θερμανθούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από εκείνη της θερμοκρασίας υαλώδους μετάβασης ( $T_g$ ) και στην συνέχεια ψυχθούν τότε επανέρχονται πάλι σε στερεά επανακτώντας εν μέρει τις ιδιότητες τους.

Οι πιο γνωστές ρητίνες σε θερμοπλαστικά είναι το πολυαιθυλένιο(PE), το πολυπροπυλένιο(PP), το πολυστυρένιο(PS) κ.α.

Ελαστομερείς μήτρες είναι γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες σε τυχαίο προσανατολισμό. Διαθέτουν μεγάλη ελαστικότητα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα όταν υποστούν παραμορφώσεις να επανέρχονται στο αρχικό τους σχήμα, όχι βέβαια ακριβώς με τις αρχικές τους ιδιότητες λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που υπόκεινται.

Για την αποφυγή της πλαστικής παραμόρφωσης πραγματοποιείται ο βουλκανισμός ο οποίος δημιουργεί σταυροδεσμούς(cross-links) ανάμεσα στα μόρια με αποτέλεσμα την ενίσχυση της δομής του υλικού.

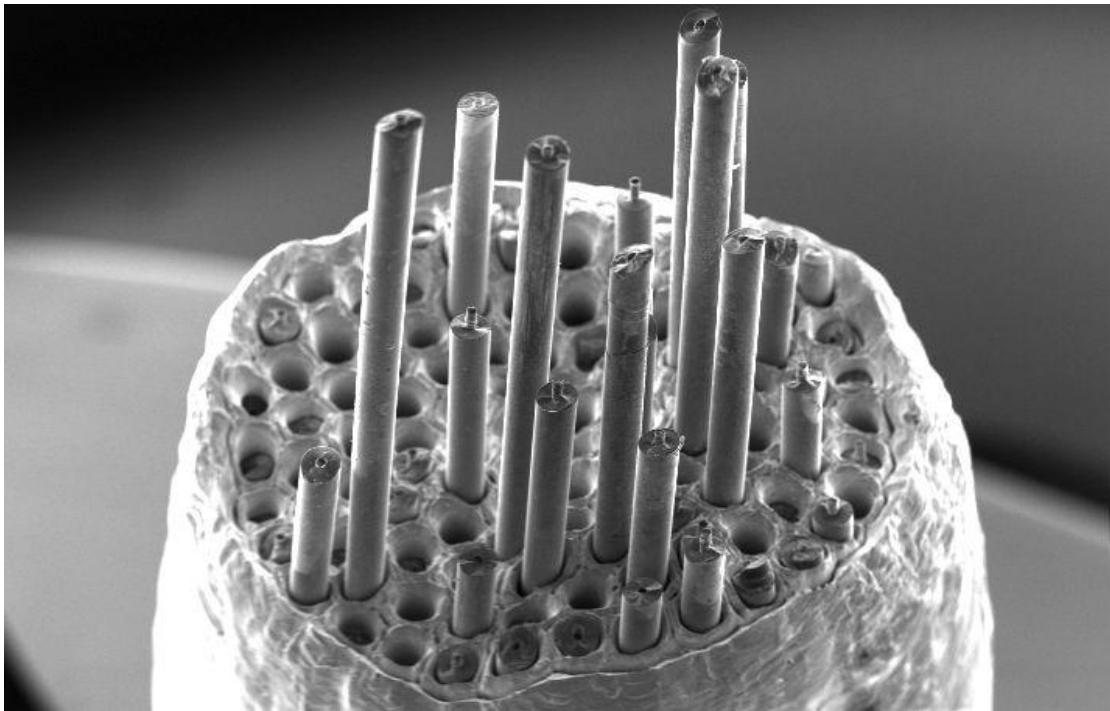
Έτσι, με τον βουλκανισμό το ελαστομερές γίνεται σκληρότερο, αποκτά



αντιδιαβρωτικές ικανότητες και γίνεται ανθεκτικότερο στις θερμοκρασιακές μεταβολές.

Βέβαια, ο βουλκανισμός είναι πολύ δαπανηρός για αυτό και αναπτύχθηκαν τα ελαστομερή με τις ιδιότητες του καουτσούκ.

Τα πιο γνωστά ελαστομερή είναι οι πολυεστέρες, οι πολυουρεθάνες κ.α.

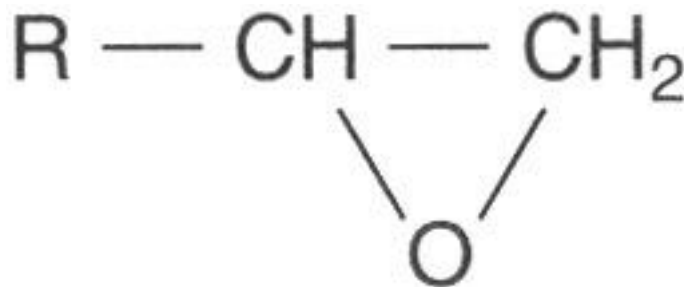


Σχήμα 1.9 Μήτρα Σύνθετου Υλικού και Ίνες

## 1.5 Εποξυ ρητίνες

Εποξική ρητίνη ορίζεται ως ένα μόριο που περιέχει περισσότερες από μία ομάδες εποξειδίου. Είναι θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Αυτές οι ρητίνες έχουν εξαιρετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, καλή πρόσφυση σε πολλά μέταλλα και αντοχή στην υγρασία, επίσης έχουν θερμικές και κορυφαίες μηχανικές ιδιότητες.

Ο όρος <<εποξειδικό>> αναφέρεται σε μια χημική ομάδα που αποτελείται από ένα άτομο οξυγόνου συνδεδεμένο με δύο άτομα άνθρακα που είναι ήδη συνδεδεμένα μεταξύ τους. Η απλούστερη εποξύ είναι μια δομή δακτυλίου τριμελής, γνωστή με τον όρο <<άλφα-εποξύ>> ή <<1,2-εποξύ>>.



Σχήμα 1.10 Χημική δομή εποξικής ρητίνης

### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΟΞΕΙΔΙΚΩΝ ΡΗΤΙΝΩΝ

Οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να είναι στερεές ή ρευστές. Οι στερεές εποξειδικές ρητίνες είναι άκαμπτα άμορφα στερεά που μοιάζουν με γυαλί. Συνήθως ξεχωρίζουν από το χαρακτηριστικό πορτοκαλί ή καφέ χρώμα που έχουν.

Η μεγάλη οικογένεια των εποξειδικών ρητινών αποτελούν πλέον μια από τις υψηλότερες σε απόδοση ρητίνες από εκείνες που είναι διαθέσιμες αυτή τη στιγμή, λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων και της αντοχής τους.

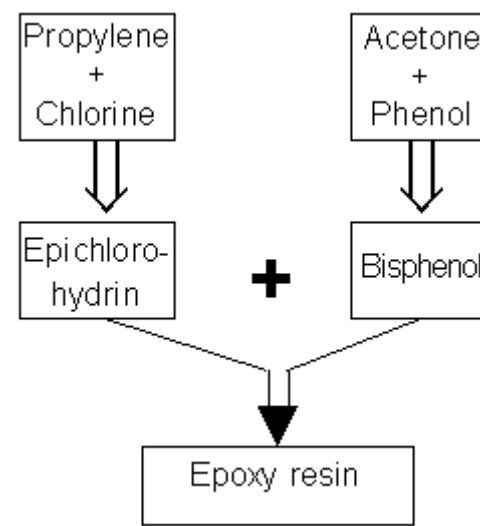
### 1.5.1 Εφαρμογές των εποξειδικών ρητινών

Ο όρος εποξική έχει πλέον προσαρμοστεί για πολλές χρήσεις πέρα από τα πολυμερή σύνθετων υλικών.

Χρησιμοποιείται:

1. Ως συνδετικό υλικό σε τσιμέντα
2. Αντιολισθητικές επικαλύψεις
3. Βιομηχανικά πατώματα
4. Πλαστικό ενισχυμένο με ίνες
5. Χρώματα και επικαλυπτικά
6. Ηλεκτρονικά και ηλεκτρικά συστήματα
7. Ναυτιλιακές εφαρμογές
8. Αεροδιαστημικές εφαρμογές
9. Αυτοκινητοβιομηχανία

και πολλές ακόμα εφαρμογές καθώς η χρησιμοποίησή της έχει “λύσει τα χέρια” σε χιλιάδες εφαρμογές ανά τον κόσμο.



Σχήμα 1.11 Δημιουργία εποξικής ρητίνης

### Σύγκριση Πολυεστερικών ρητινών και εποξειδικών ρητινών

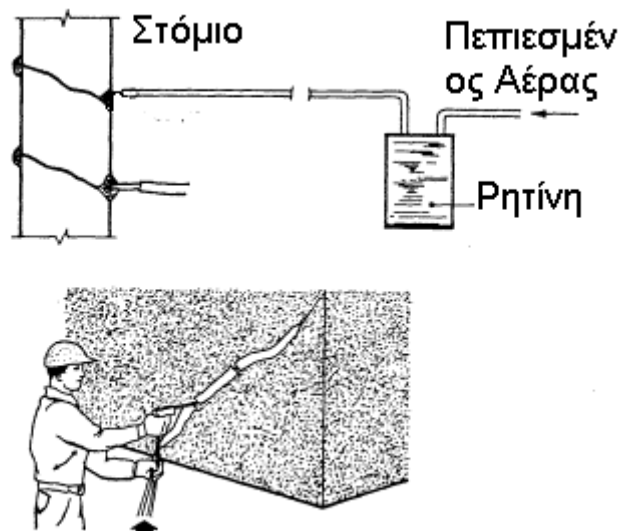
<b>Characteristics</b>	<b>Polyester Resin</b>	<b>Epoxy Resin</b>
<b>Flexural Strength:</b>	-Good	best
<b>Tensile Strength:</b>	-Good	best
<b>Elongation %:</b>	-Good	lowest
<b>Water Absorption:</b>	-Good	excellent
<b>Hardness:</b>	-Good	best
<b>Pot Life:</b>	4-7 minutes	14-20 minutes
<b>Working Time:</b>	20-30 minutes	½-6 hours
<b>Above Waterline:</b>	yes	yes
<b>Below Waterline:</b>	yes	yes
<b>General Repairs:</b>	yes	yes
<b>Shelf Life:</b>	18-24 months	2years+

Σχήμα 1.12 Σύγκριση εποξειδικών και πολυεστερικών ρητινών

#### 1.5.2 Ιδιότητες εποξειδικών ρητινών

Οι ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών είναι πάρα πολλές και μπορούν να τροποποιούνται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εφαρμογής. Μερικές από τις ιδιότητες είναι:

- Χαμηλή υγροσκοπικότητα (δεν “μαζεύει” νερό)
- Καλή διαστατική σταθερότητα. Η ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε συνεχείς και ουσιαστικές αλλαγές των διαστάσεων του)
- Ικανοποιητική αντοχή στην επίδραση ύδατος, οξέων, βάσεων και πολλών οργανικών διαλυτών.
- Άριστη ηλεκτρική μόνωση
- Υψηλή δύναμη συγκόλλησης
- Καλή χημική αντίσταση(οι εποξειδικές ρητίνες έχουν πολύ υψηλή αντίσταση στα καυστικά και καλή μέχρι άριστη στα οξέα)
- Μικρή συστολή κατά τον πολυμερισμό και κατά την διάρκεια της επεξεργασίας τους.



Ένεση με εποξειδική ρητίνη

Σχήμα 1.13 Χρήση Εποξικής Ρητίνης

### 1.5.3 Παραγωγή εποξειδικών ρητινών

Οι συνηθέστερες εποξειδικές ρητίνες παράγονται από την αντίδραση επιχλωρυδρίνης και δισφαινόλης όπου παράγονται γλυκιδυλαιθέρες της δισφαινόλης Α. Οι εποξειδικές ρητίνες τελικά μετατρέπονται σε θερμοσκληρυνόμενο προϊόν με την προσθήκη ενός <<σκληρυντή>> και μπορούν να πολυμερισθούν από ένα ευρύ φάσμα σκληρυντών.

Η επιλογή του σκληρυντή εξαρτάται από τις τεχνικές εφαρμογής, τις συνθήκες σκλήρυνσης και τις επιδιωκόμενες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες.

Μερικοί μέθοδοι τροποποίησης των εποξειδικών ρητινών είναι:

- Με προσθήκη ορυκτών πληρωτικών (σκόνη αλουμινίου)
- Με προσθήκη πλαστικοποιητών για την βελτίωση της ευκαμψίας του υλικού,

- Μειωτών ιξώδους ,
- Βελτιωτικών πρόσφυσης.

Με τις παραπάνω τροποποιήσεις μπορεί να μειωθεί το κόστος και να βελτιωθεί η αποτελεσματικότητα των εποξειδικών ρητινών.



Σχήμα 1.14 Ένεση με εποξική ρητίνη.

#### 1.5.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των εποξειδικών ρητινών

Πλεονεκτήματα:

- Υψηλή πρόσφυση με το σκυρόδεμα και το χάλυβα.
- Μικρή ή καθόλου μείωση της συνάφειας ως αποτέλεσμα της παρόδου του χρόνου και της έκθεσης σε υγρασία.
- Λόγω της ρευστότητας τους, καλύπτουν πλήρως μια ρωγμή.
- Προσφέρουν στεγανότητα και προστασία από τυχών διάβρωση.
- Καλύπτουν πλήρως μια ρωγμή λόγω του χαμηλού ιξώδους τους και όχι μόνο επιφανειακά.
- Μικρή συστολή ξήρανσης και ερπυσμό.
- Μεγάλη συγκολλητική ικανότητα.
- Ανθεκτικό υλικό σε περιβαλλοντικές καταπονήσεις και σε φυσικά φαινόμενα.
- Μικρά προβλήματα γήρανσης του υλικού.
- Εύκολη εφαρμογή σε κατασκευές.
- Είναι πιο ανθεκτική από το σκυρόδεμα σε θλίψη και εφελκυσμό.
- Προσφέρουν καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα.

Μειονεκτήματα:

- Το διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας συγκριτικά με αυτό του σκυροδέματος.

- Μικρή αντοχή σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.
- Κάποια συστατικά στοιχεία της είναι ικανά να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία.



Σχήμα 1.15 Πάτωμα εμβαπτισμένο με εποξική ρητίνη

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

#### 2.1 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Οι ιδιότητες του σύνθετου είναι ο συνδυασμός των ιδιοτήτων της μήτρας και αυτών της ενίσχυσης. Χάρης σε αυτές τις ιδιότητες τα σύνθετα υλικά προσδίδουν καλύτερα αποτελέσματα και καλύτερη απόδοση στις εφαρμογές που χρησιμοποιούνται.

Αυτό που επιθυμούμε από την επιλογή του σύνθετου υλικού είναι να εκμεταλλευτούμε στο μέγιστο βαθμό τις πολύ καλές ιδιότητες που κατέχει. Βέβαια, λόγω πολλών παραγόντων που εμπλέκονται αυτό δεν είναι δυνατόν. Αυτό που έχει σημασία είναι το σύνθετο που θα επιλεγεί να είναι το κατάλληλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή ώστε να αποδώσει τα μέγιστα.

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών διακρίνονται ως **φυσικές** που εξαρτώνται από την δομή και την δημιουργία του υλικού και ως **μηχανικές**. Οι φυσικές ιδιότητες είναι η πυκνότητα, καλή θερμική συμπεριφορά, οι καλές αντιδιαβρωτικές και μονωτικές ιδιότητες, κ.α. Ενώ, οι μηχανικές διακρίνονται με καλή αντοχή σε θλίψη, σε κάμψη, υψηλό μέτρο ελαστικότητας, αντοχή σε εφελκυσμό, καλή διηλεκτρική συμπεριφορά, μεγάλη ακαμψία, ολκιμότητα, αντοχή σε κόπωση κ.α.

#### 2.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΘΕΤΟΥ

Εξαιτίας των καταπονήσεων και των φορτίσεων που δέχονται τα υλικά κατά τις εφαρμογές τους είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών μας δείχνει την σχέση μεταξύ δύναμης(φορτίου) και παραμόρφωσης.

Με εξειδικευμένα πειράματα σε εργαστήρια αυτές οι ιδιότητες μπορούν να εξακριβωθούν σε μεγάλο βαθμό για τα εκάστοτε υλικά. Καθώς τα πειράματα είναι σχεδιασμένα ώστε τα υλικά να εκτίθενται σε πραγματικά φορτία και συνθήκες περιβάλλοντος. Το φορτίο που δέχονται μπορεί να είναι θλιπτικό, εφελκυστικό ή και διατμητικό και το μέγεθος του να παραμένει σταθερό με τον χρόνο ή να μεταβάλλεται συνεχώς. Ακόμα, οι θερμοκρασίες που επικρατούν στο υλικό μπορεί να καθοριστούν ως σημαντικός παράγοντας για την λειτουργικότητα του.

Οι μηχανικές ιδιότητες καθορίζονται ανάλογα με τον προσανατολισμό των ινών μέσα στην μήτρα του σύνθετου υλικού για να καλύψουν την εκάστοτε



εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθούν δηλαδή, ανάλογα τις απαιτήσεις της εφαρμογής έχουμε και τον ανάλογο προσανατολισμό. Το διάγραμμα (α) δείχνει ένα μονοαξονικό σύνθετο υλικό και το διάγραμμα (β) μας δείχνει την σχέση της τάσης- παραμόρφωσης ( $\sigma$ - $\epsilon$ ). Σε κανονικές συνθήκες η ενίσχυση έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας( $E$ ) από ότι η μήτρα αλλά στην περίπτωση συνεχούς ινών, όπου η ένταση(παραμόρφωση , $\epsilon$  ) είναι ίση στην μήτρα και στην ενίσχυση , η τάση της ενίσχυσης ( $\sigma_f$ ) είναι υψηλότερη από ότι η τάση στην μήτρα( $\sigma_m$ ).

Το μέτρο ελαστικότητας του Young των σύνθετων υλικών δίνετε από τον κανόνα της ανάμειξης (rule of mixtures):

$$E_c = E_f \cdot V_f + E_m \cdot V_m$$

$$(V_m + V_f) = 1 \text{ ή}$$

$$V_m = (1 - V_f)$$

Όπου:

$E_c$  : μέτρο ελαστικότητας σύνθετου υλικού

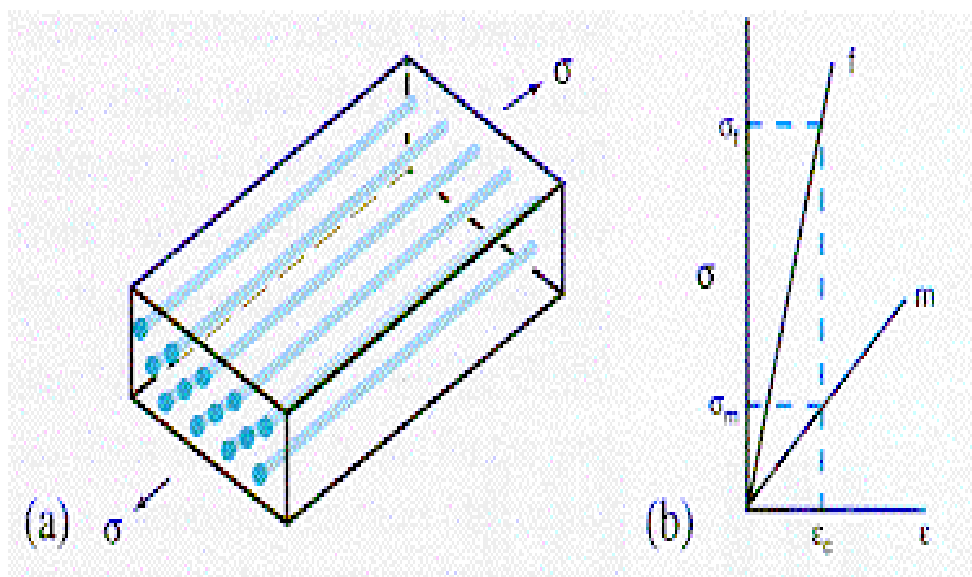
$E_f$  : μέτρο ελαστικότητας ινών

$V_f$  : ογκομετρικό ποσοστό ινών

$E_m$  : μέτρο ελαστικότητας μήτρας

$V_m$  : ογκομετρικό ποσοστό μήτρας

Το μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) κατά μήκος της κατεύθυνσης των ινών μπορεί να ελεγχθεί επιλέγοντας την κατάλληλη περιεκτικότητα της ενίσχυσης για την εφαρμογή.



Σχήμα 2.1 : Διάγραμμα (α) μονοαξονικό σύνθετο υλικό. Διάγραμμα (β) Σχέση τάση( $\sigma$ ) – παραμόρφωση ( $\epsilon$ ).

Συνολικά, οι ιδιότητες του σύνθετου καθορίζονται από τις:

1. Ιδιότητες της μήτρας
2. Ιδιότητες της ενίσχυσης
3. Γεωμετρία και προσανατολισμός της ενίσχυσης(προσανατολισμός των ινών)
4. Ποσοστό των δυο φάσεων(μήτρας ,ενίσχυσης)
5. Πρόσφυση μήτρας , ενίσχυσης
6. Κατασκευαστική τεχνολογία.

## ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά υλικά όπως τον χάλυβα και το σκυρόδεμα τα σύνθετα υλικά έχουν υποπενταπλάσια πυκνότητα. Για παράδειγμα ο χάλυβας έχει  $7,850 \text{ kg/m}^3$  ενώ το σκυρόδεμα  $2,4 \text{ kg/m}^3$ . Αυτό το χαρακτηριστικό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα σύνθετα υλικά έχουν πολύ υψηλή ειδική αντοχή και ακαμψία. Η ακαμψία των σύνθετων υλικών συσχετίζεται με την περιεκτικότητα σε ίνες μέσα στο υλικό αλλά και τον προσανατολισμό τους.

## ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Έρευνες έχουν δείξει ότι τα σύνθετα υλικά είναι ευάλωτα στην αύξηση της θερμοκρασίας και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την συρρίκνωση τους. Ειδικότερα ο άνθρακας και το αραμίδιο έχουν αρνητικό συντελεστή θερμικής διαστολής ενώ το γυαλί θετικό. Παρόλο που οι ρητίνες διαστέλλονται θερμικά ο άνθρακας και το αραμίδιο αντιστέκονται στην θερμική διαστολή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο συντελεστής θερμικής διαστολής να μηδενίζεται καθώς αλληλοεξουδετερώνονται.

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Όπως ήδη αναφέρθηκε τα σύνθετα υλικά είναι ευάλωτα σε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, η υγρασία και η υψηλή θερμοκρασία είναι μερικοί από αυτούς. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών. Ένας τρόπος βελτίωσης της ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι κάποια πρόσθετα υλικά τα οποία δημιουργούν νέες ιδιότητες. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις ηλιακών γίνετε ενίσχυση νανοσωλήνων άνθρακα στις ηλιακές

κυφάλες και έτσι επιτυγχάνεται η δημιουργία νέων, αναβαθμισμένων ηλεκτρικών ιδιοτήτων.

## ANTOXH

Η δομικές ιδιότητες, όπως η ακαμψία, η σταθερότητα των διαστάσεων και η δύναμη ενός σύνθετου υλικού εξαρτώνται από την ακολουθία τοποθέτησης των στρώσεων. Η σειρά στίβαξης περιγράφει την κατανομή και των προσανατολισμό των ινών. Καθώς ο αριθμός των στρωμάτων των προσανατολισμένων ινών αυξάνεται τόσο και η κατασκευή γίνεται πιο δυνατή. Για παράδειγμα, ένα συμμετρικό έλασμα οκτώ στρώσεων με τέσσερις διαφορετικούς προσανατολισμούς των ινών έχει 24 διαφορετικές συσσωρευμένες ακολουθίες.

Η διαφορά ανάμεσα στην αντοχή των σύνθετων υλικών με εκείνη των συμβατικών κατασκευαστικών υλικών είναι τεράστια. Τα σύνθετα υλικά αντέχουν σε πολύ μεγάλες πιέσεις και σε μεγάλες θλιπτικές δυνάμεις αφού έχουν πολύ υψηλή αντοχή χάρις στην δομή τους και στις ιδιότητες τους. Για αυτό και τα σύνθετα υλικά προσφέρουν ισχυρά κίνητρα για χρήση. Η αντοχή σε θλίψη είναι συνήθως μικρότερη από εκείνη του εφελκυσμού. Επίσης, η διατμητική αντοχή σε μονοαξονικά δοκίμια είναι σχετικά χαμηλή καθώς τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει η δύναμη της ρητίνης. Βέβαια με κατάλληλο σχεδιασμό των ινών μέσα στην μήτρα η διατμητική αντοχή μπορεί να παραχθεί από την ενίσχυση.

Ιδιότητα (σε 20°C)	Εποξειδική Ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	1,10-1,70	2,4	7,850
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0,5-20	20-50	205
Λόγος Poisson	0,3-0,4	0,2	0,3
Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	9-30	1-4	200-600
Διατμητική Αντοχή (MPa)	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική Αντοχή (MPa)	55-110	25-150	200-600
Συντελεστής θερμικής διαστολής (*10 <sup>-6</sup> /°C)	25-100	11-13	10-15

Σχήμα 2.2 : Σύγκριση τυπικών ιδιοτήτων μεταξύ Εποξεικής ρητίνης, σκυροδέματος και χάλυβα.

## 2.3 ΜΕΛΕΤΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

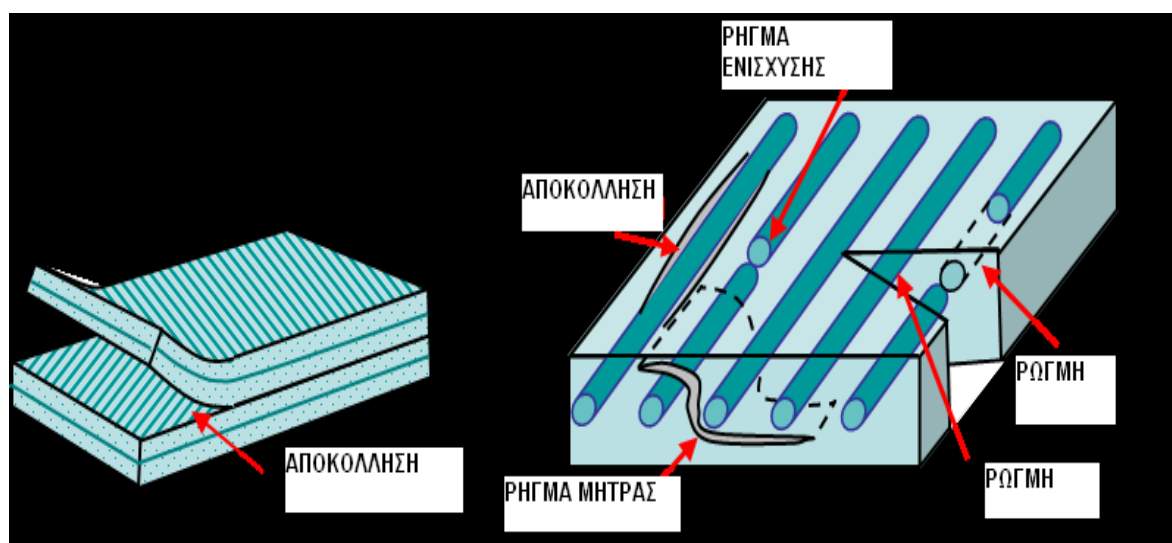
Πλέον, τα σύνθετα υλικά καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος από τις υπάρχουσες εφαρμογές λόγω των ιδιοτήτων τους και της χρησιμότητάς τους, αυτό τα καθιστά απαραίτητα στην σύγχρονη μηχανική. Βέβαια λόγω της διαφορετικότητας των υλικών που γίνεται η σύνθεση εμφανίζουν κάποιους μηχανισμούς αστοχίας. Λόγου της διαφορετικότητας των υλικών, δηλαδή της μήτρας και της ενίσχυσης οι μηχανικές αναλύσεις θραύσης και άλλες δοκιμασίες δεν μπορούν να προσδιορίσουν ακριβώς την συμπεριφορά αυτών των υλικών.

Τα κύρια αίτια που οδηγούν στην αστοχία των υλικών είναι η διάβρωση και η φθορά που σταδιακά φέρνουν και την παραμόρφωση του υλικού αφού μεταβάλλει το σχήμα του. Αυτά αφορούν κυρίως τις μηχανικές αστοχίες.

### 2.3.1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Για την διερεύνηση των αστοχιών των σύνθετων υλικών χρησιμοποιούνται κάποιες τεχνικές σε ειδικά διαμορφωμένα εργαστήρια με τα κατάλληλα μέσα. Η ανάπτυξη μικρορηγματώσεων, η αποφλοιώση πολυστρωματικών υλικών, το σπάσιμο των ινών και ο διαχωρισμός της μήτρας με την ενίσχυση που καλείται και αποκόλληση είναι οι πιο συχνές αιτίες αστοχίας των σύνθετων υλικών.

Η αστοχία μπορεί να δημιουργηθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους στο υλικό. Είτε αστοχία εντός του στρώματος ( Interlaminar - στρωματική ), είτε αστοχία μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων, καθώς και αστοχία που διατρέχει το μέγιστο μέρος ή το σύνολο των στρωμάτων ( Translaminar - διαστρωματική ).



Σχήμα 2.3: Πιθανοί τρόποι Αστοχίας Σύνθετων Υλικών

Ελαττώματα που δημιουργούνται κατά την δημιουργία των υλικών είναι τα εξής:

- Αποκόλληση
- Μικρορηγμάτωση πολυμερούς μήτρας
- Αποφλοΐωση πολυστρωματικών υλικών
- Περιοχές του υλικού με μειωμένη ρητίνη
- Περιοχές του υλικού με αυξημένη ρητίνη
- Φυσαλίδες αέρα
- Ρωγμές
- Κενά

Για την αποφυγή των παραπάνω προβλημάτων η σωστή αναλογία είναι 60/40 αναλογία ινών προς την αναλογία της ρητίνης.

Ελαττώματα που δημιουργούνται κατά την εφαρμογή των υλικών είναι τα εξής:

- Διάβρωση
- Στιγμαϊαία βλάβη
- Κόπωση υλικού
- Ρωγμές από υπερφόρτωση
- Αποκολλήσεις
- Σπάσιμο των ινών

**Ρωγμές:** Με την απόκτηση ρωγμών στα σύνθετα υλικά δεν σημαίνει αυτόματα και εξασθένηση των ιδιοτήτων του υλικού. Εφόσον απαιτείται, στο σημείο όπου έχει δημιουργηθεί μπορεί να αντιμετωπιστεί η ρωγμή είτε απομακρύνοντας τις αιτίες, είτε ενισχύοντας το υλικό με τα κατάλληλα μέσα. Οι ρωγμές διακρίνονται σε ενεργές και μη-ενεργές. Στις ενεργές είναι πιθανόν η αύξηση του μήκους τους ή του εύρους τους καθώς υπάρχει πιθανότητα μετακίνησης, ενώ, στις μη-ενεργές δεν υπάρχει κίνδυνος περεταίρω μετάδοσης της ρωγμής αφού δεν μετακινούνται παρά μόνο ο κίνδυνος διάβρωσης αφού είναι εκτεθειμένο το εσωτερικό του υλικού σε περιβαλλοντικές συνθήκες.

**Σπάσιμο των ινών:** Σε αυτήν την αστοχία, οι ίνες της ενίσχυσης δεν βλάπτονται από την ρωγμή. Όμως, όσο περισσότερη καταπόνηση δέχονται κοντά στην ρωγμή τόσο είναι πιθανόν και να σπάσουν. Όσο ανοίγει το εύρος της ρωγμής τόσο και οι ίνες βγαίνουν από την μήτρα, έτσι είναι πιθανόν οι ίνες να αποκολλήσουν από την μήτρα και έπειτα να σπάσουν.



Σχήμα 2.4: Τρόποι Αστοχίας ίνας.

**Μικρορηγμάτωση πολυμερούς μήτρας:** Μέσω των μικρορηγματώσεων στα σύνθετα υλικά ακολουθεί και η θραύση των ινών τους, αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ανοίγει το εύρος των ρωγμών παραπάνω και συνάμα τα υλικά να εκθέτονται σε διαβρωτικά μέσα ( υγρασία ). Επίσης, λόγω των μικρορηγματώσεων στην μήτρα υποβαθμίζονται οι θερμομηχανικές ιδιότητες του υλικού συμπεριλαμβανομένου και των αλλαγών που υφίσταται σε όλη του την δομή.

**Αποφλοίωση πολυστρωματικών υλικών:** Είναι η χειρότερη κατάσταση που μπορεί να επέλθει σε ένα σύνθετο υλικό καθώς μπορεί να καταστρέψει ολοσχερώς τις ιδιότητες και την χρησιμότητα του. Λόγω διείσδυσης υγρασίας, λυγισμού, δυσκαμψίας κ.α.

**Διάβρωση:** Υλικά που τα μέρη τους αποτελούνται από ίνες γυαλιού και κέβλαρ έχουν μια μικρή στρώση από αλουμίνιο για προστασία από την ακτινοβολία. Αυτή η στρώση αλουμινίου συχνά διαβρώνεται γύρω από τους κοχλίες ή στις τρύπες των κοχλιών. Η διάβρωση επηρεάζει την ηλεκτρική συγκόλληση του υλικού, και έτσι η στρώση του προστατευτικού αλουμινίου χρειάζεται να αφαιρεθεί και να τοποθετηθεί καινούργια.

Η υπεριώδης ακτινοβολία (UV) επηρεάζει την αντοχή των σύνθετων υλικών. Οι κατασκευές πρέπει να προστατεύονται με μια τέτοια επίστρωση για να αποφευχθούν οι όποιες πιθανότητες ακτινοβολίας. Ειδικά χρώματα και μονωτικά έχουν δημιουργηθεί για την προστασία των σύνθετων υλικών.

**Αποκόλληση:** Η αποκόλληση δημιουργείται εξαιτίας των διατμητικών τάσεων που ασκούνται στο σύνθετο υλικό. Αυτό το είδος αστοχίας δημιουργείται στην διεπιφάνεια του υποστρώματος. Η διεπιφάνεια μπορεί να είναι μεταξύ των δύο στρώσεων σύνθετου υλικού ή μεταξύ του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας του δομικού στοιχείου. Οι αποκολλήσεις μπορεί να δημιουργηθούν από ρωγμές στην μήτρα οι οποίες εξαπλώνονται στο εσωτερικό των στρωμάτων ή από χαμηλής έντασης φόρτιση(κρούση). Αποκολλήσεις επίσης, μπορεί να προκληθούν από την μη καλή προσκόλληση των στρωμάτων (μεταξύ τους) και έτσι να εξαπλωθεί σε όλο το υλικό. Κάτω από ορισμένες δοκιμασίες όπως π.χ. δοκιμασία θλίψης, αποκολλήσεις μπορεί να δημιουργηθούν στο υλικό όταν αυτό υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις, αυτό μπορεί και να συνδράμει στην καταστροφή του υλικού. Η αστοχία αυτή είναι ψαθυρής μορφής. Η κρισιμότητα της αστοχίας της αποκόλλησης στα σύνθετα υλικά εξαρτάται από:

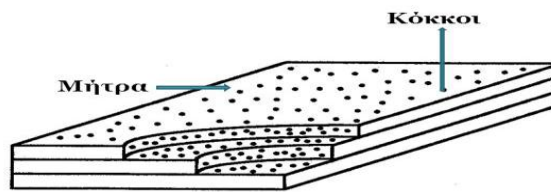
- Τις διαστάσεις
- Δομικά-Στο πάχος των στρώσεων ,στην κατασκευή, συγκέντρωση τάσεων και γεωμετρικές ασυνέχειες του υλικού.
- Φορτίσεις- η δημιουργία της αστοχίας εξαρτάται από τον τύπο των φορτίσεων, έχουν μικρή επίδραση στο υλικό όταν αυτό φορτίζεται εφελκυστικά ενώ, σε φορτίσεις όπως θλίψη ή διάτμηση εάν υπάρξει αποκόλληση σε ένα σημείο τότε είναι πιθανόν να εξαπλωθεί σε όλο το υλικό και να δημιουργηθεί ένας νέος μηχανισμός φόρτισης που να οδηγήσει στην καταστροφή του υλικού.

Διάφορες μορφές αποκόλλησης:

- Αποκόλληση στην περιοχή της αγκύρωσης
- Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή
- Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή
- Διατμητική αστοχία του υποβάθρου

Τα κύρια μεγέθη εξέτασης των σύνθετων υλικών για την ταυτοποίηση μιας ρωγμής είναι η ενέργεια θραύσης καθώς και ο συντελεστής έντασης τάσεων. Τα μεγέθη αυτά δεν είναι υπεύθυνα για την δημιουργία ρωγμών παρά μόνον για την διάδοσή τους. Στις ρητίνες γενικά( εποξικές, πολυεστερικές ) η ενέργεια θραύσης και η αντίσταση στην διάδοση των ρωγμών σε σχέση με άλλα υλικά, είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Με την προσθήκη κόκκων εσωτερικά της μήτρας η αντίσταση τους στην διάδοση των ρωγμών αρχίζει και αυξάνεται. Λόγω του ότι οι κόκκοι παρεμβαίνουν στο μέτωπο της ρωγμής και δυσκολεύουν την διάδοσή τους.

## Κοκκώδη σύνθετα υλικά

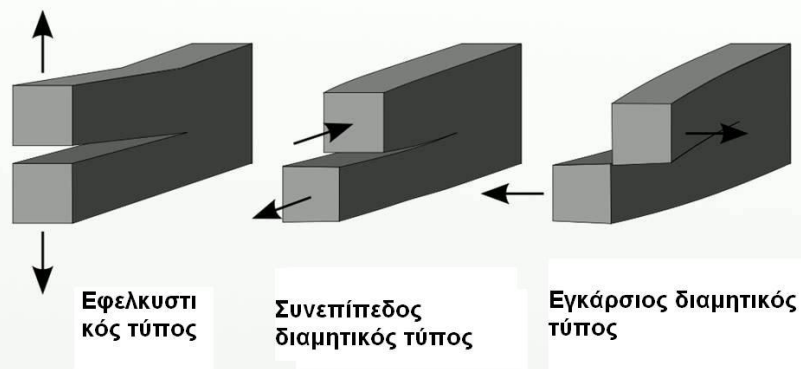


Σχήμα 2.5: Εισαγωγή κόκκων για την αντιμετώπιση ρωγμών

**Φορτίσεις Αστοχιών:** Έπειτα από μελέτες, στο τασικό πεδίο στην αιχμή μιας ρωγμής διαπιστώθηκαν τρεις ανεξάρτητοι τύποι παραμόρφωσης ανάλογα με το είδος της εφαρμοζόμενης φόρτισης. Ενώ κάθε άλλη μορφή παραμορφώσεως προκύπτει από τον συνδυασμό των τριών παρακάτω:

1. Επίπεδος εφελκυστικός τύπος
2. Συνεπίπεδος διαμητικός τύπος
3. Εγκάρσιος διαμητικός τύπος.

## Μηχανισμοί Θραύσης



Σχήμα 2.6: Μηχανισμοί θραύσης



## 2.4 ΤΥΠΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ

Λόγω των προβλημάτων που δημιουργούνται σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμογής των σύνθετων υλικών και στις κατασκευές, είτε κατά την δημιουργία τους είτε, κατά την χρησιμοποίησή τους έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να διαπιστωθεί ο λόγος της αποτυχίας του εκάστοτε υλικού.

Αυτοί οι μέθοδοι ονομάζονται Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι (ΜΚΕ) και είναι πολύ σημαντικοί στην δημιουργία και στην συντήρηση των εξαρτημάτων. Χρησιμοποιούνται ώστε η ύπαρξη ή το μέγεθος της αστοχίας στο υλικό να αναγνωρίζεται άμεσα ώστε να είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί.

Πλέον τα σύνθετα υλικά και οι κατασκευές τους ελέγχονται πριν δοθούν στην αγορά. Ο έλεγχος γίνεται στην ενδιάμεση φάση μεταξύ της παραγωγής του τελικού προϊόντος και της χρήσης του.

Οι έλεγχοι ΜΚΕ λέγονται έτσι για τον λόγο ότι η κατασκευή δεν θα καταστραφεί αλλά ούτε και θα επηρεαστεί η λειτουργικότητά της.

Για την εφαρμογή των Μη Καταστροφικών Ελέγχων δεν είναι απαραίτητο να έχει εντοπιστεί κάποια πιθανή ζημιά, κάποιες κατασκευές κατά την διάρκεια της λειτουργίας τους πρέπει να ελέγχονται τακτικά ώστε να εντοπιστούν πιθανές αστοχίες οι οποίες δεν μπορούν να εντοπιστούν αλλιώς. Για παράδειγμα κατασκευές όπως: επένδυση αεροσκαφών, κατασκευές από σκυρόδεμα, συρματόσχοινα γεφυρών, κ.ά.

### **ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΟΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ** **Nondestructive Inspection (NDI) of composites**

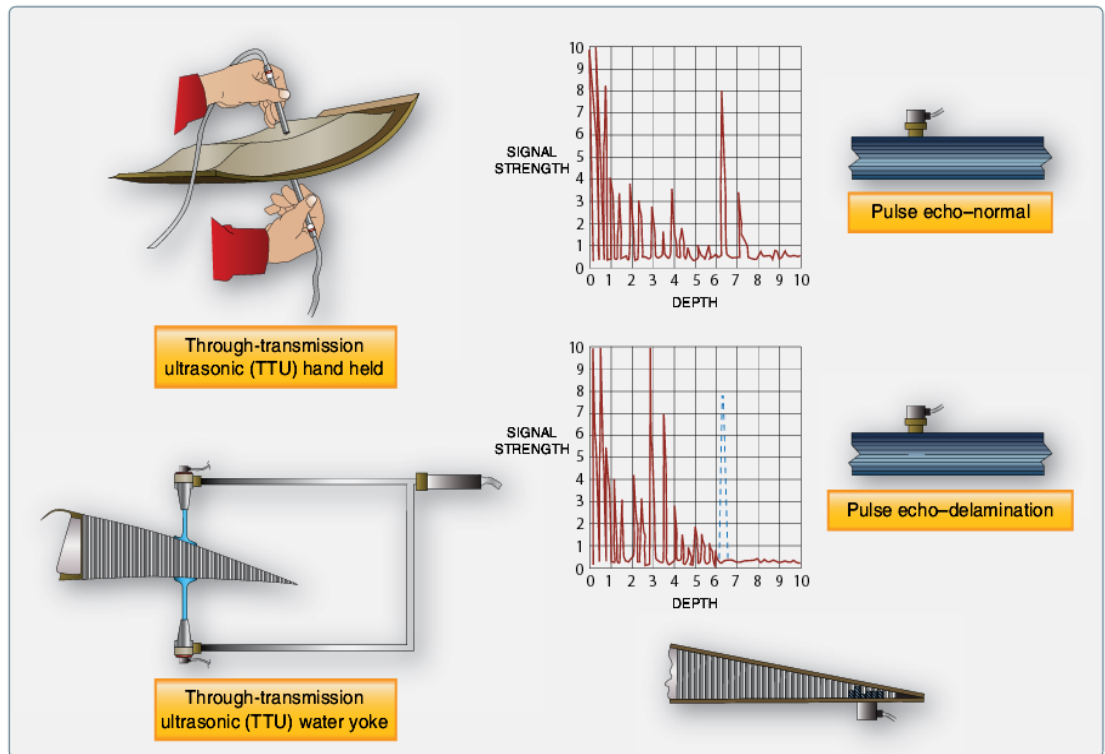
### **Έλεγχος με υπέρηχους (Ultrasonic Inspection):**

Η μέθοδος αυτή είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη από όλες τις μεθόδους (ΜΚΕ) για την εξέταση των σύνθετων υλικών. Σε μακροσκοπικά ομογενή υλικά ( μη-σύνθετα ) συνήθως ο έλεγχος γίνεται σε συχνότητα από 20kHz έως 20MHz. Ενώ στα σύνθετα υλικά η εμβέλεια συχνότητας μειώνεται σημαντικά λόγω της μειωμένης πυκνότητας του υλικού και έτσι η συχνότητα είναι από 5 MHz και κάτω.

Η μέθοδος αυτή έχει αποδειχθεί πολύ χρήσιμη για τον εντοπισμό εσωτερικών αποκολλήσεων, εσωτερικών κενών, και τυχόν μη ακολουθίες των σύνθετων συστατικών του υλικού οι οποίες δεν είναι ορατές με άλλες μεθόδους. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι με υπέρηχους, ωστόσο, κάθε μέθοδος χρησιμοποιεί ακουστικά κύματα με συχνότητα πάνω από το ακουστικό κύμα. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει είτε κατά μήκος της επιφάνειας του υλικού, είτε κάθετα , είτε σε κάποια προκαθορισμένη γωνία. Μπορεί να χρειαστεί ο έλεγχος να γίνει σε διάφορες κατευθύνσεις για να εντοπιστεί η ζημιά. Ένα ηχητικό κύμα υψηλής συχνότητας εισέρχεται στο υλικό τότε διέρχεται σε όλη την επιφάνεια του υλικού και παρακολουθείται από τα κατάλληλα όργανα για τυχόν οποιαδήποτε αλλαγή. Όταν το υπερηχητικό κύμα φτάνει σε κενό τότε αυτό απορροφάται ή αντανακλάται πίσω στην επιφάνεια. Στην συνέχεια δημιουργείται η κατάλληλη ένδειξη στον παλμογράφο και έτσι γίνεται η μελέτη για το που υπάρχουν αστοχίες στο υλικό. Για την καλύτερη αξιολόγηση της αστοχίας στο υλικό έχουν δημιουργηθεί τα κατάλληλα πρότυπα ειδικά για την μέθοδο υπέρηχων.

### **Έλεγχος μέσω μετάδοσης υπερήχων (Through transmission Ultrasonic Inspection):**

Ο έλεγχος μέσω μετάδοσης υπερήχων χρησιμοποιεί δύο μεταδότες, έναν σε κάθε επιφάνεια ελέγχου. Το υπερηχητικό κύμα μεταδίδεται από τον έναν μεταδότη στον άλλο και έτσι πραγματοποιείται η συνεχής μέτρηση του σήματος από το όργανο μέτρησης (π.χ. παλμογράφος) .Το όργανο δείχνει την απώλεια της αρχικής ισχύος σε ποσοστό (%) ή σε ντεσιμπέλ (decibel) και έτσι γίνεται η σύγκριση με τα κατάλληλα πρότυπα. Περιοχές με μεγαλύτερες τιμές σε σύγκριση με τις τιμές των προτύπων υποδεικνύουν αστοχία του υλικού.



Σχήμα 2.7: Μέθοδοι Υπερήχων

### Μέθοδος παλμικών υπερήχων (Pulse Echo Ultrasonic Inspection):

Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του σύνθετου υλικού με την βοήθεια ενός μεταδότη υψηλής τάσης παλμών που λειτουργεί και ως αισθητήρας λήψης δεδομένων. Κάθε ηλεκτρικός παλμός ενεργοποιεί τον μεταδότη. Αυτός ο μεταδότης μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια σε μορφή υπερηχητικού κύματος. Ο υπερηχητικός παλμός μεταφέρεται μέσω ενός μεθακρυλικού συνδέσμου στο δοκίμιο και έτσι δημιουργείται μια κυματομορφή στην οθόνη. Οποιαδήποτε αλλαγή του πλάτους του λαμβανόμενου σήματος ή του χρόνου επιστροφής της συχνότητας παλμών που απαιτείται, υποδηλώνει την παρουσία αστοχίας. Η μέθοδος παλμικών υπερήχων χρησιμοποιείται για την εύρεση αποκολλήσεων, ρωγμών, διάβρωσης, κ.ά.



Σχήμα 2.8: Μέθοδος παλμικών Υπερήχων

### **Οπτικός έλεγχος (Visual inspection):**

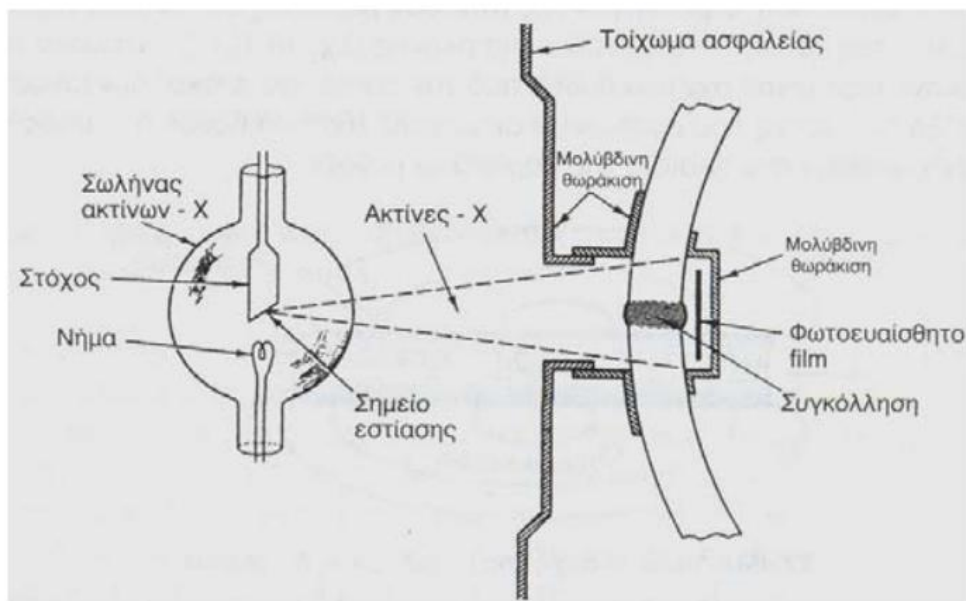
Ο οπτικός έλεγχος είναι ο πρωταρχικός έλεγχος σε σύνθετα υλικά υπολειμότητα. Εξωτερικές φθορές όπως, εκδορές, βαθουλώματα και διεισδύσεις στην επιφάνεια των σύνθετων υλικών είναι ορατές και με γυμνό μάτι. Στην περιοχή του σύνθετου όπου υπάρχει ζημιά χρησιμοποιούνται συγκεκριμένα υλικά όπως φακοί, μεγεθυντικά γυαλιά, καθρέπτες τα οποία θα κάνουν πιο ορατά τα σημεία που υπάρχει η αστοχία βοηθώντας να γίνει ο οπτικός έλεγχος ακόμα και σε σημεία που δεν είναι προσιτά. Έλλειψη ρητίνης, περίσσεια ρητίνης, αποχρωματισμός (λόγω καιρικών συνθηκών), φουσκάλες, ρωγμές και αποκολλήσεις μόνωσης είναι μερικές αιτίες που μπορεί να ανιχνευθούν με τον οπτικό έλεγχο. Ενώ ο οπτικός έλεγχος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εσωτερικές ζημιές όπως αποκολλήσεις ινών, ανωμαλίες στην μήτρα.



Σχήμα 2.9: Ορατές φθορές σε σύνθετο υλικό.

### **Ραδιογραφία (Radiography):**

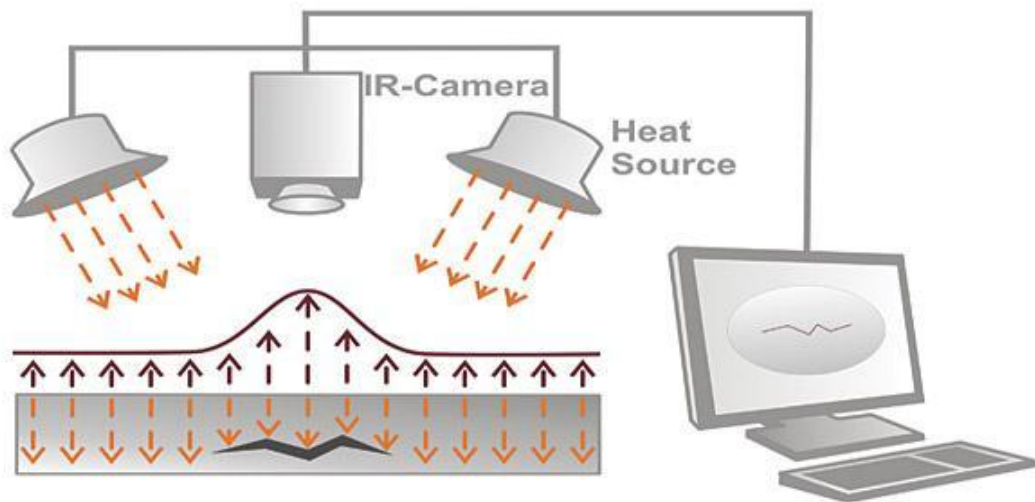
Η ραδιογραφία συχνά αναφέρεται και με τον όρο Ακτίνες-Χ. Λόγω του μικρού μήκους κύματος τους εμφανίζουν υψηλή διεισδυτική ικανότητα, ενώ ένα μικρό ποσοστό τους απορροφάται από το υλικό. Το οποίο εξαρτάται από την δομή του υλικού όπως πάχος και πυκνότητα, αλλά και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι ακτίνες Χ δημιουργούνται από τον βομβαρδισμό ενός μεταλλικού στόχου συνήθως βολφραμίου από δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ταχύτητας που λαμβάνει χώρα στον σωλήνα ακτινών Χ. Οι ακτίνες Χ διέρχονται μέσω της επιφάνειας του υλικού στο πίσω μέρος όπου υπάρχει μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια (film) αποτύπωσης τους. Έτσι στις περιοχές με μεγαλύτερη πυκνότητα απορροφάται και περισσότερη ακτινοβολία άρα και το φιλμ στο πίσω μέρος της επιφάνειας σκιάζεται λιγότερο. Ενώ στα μέρη όπου η ακτινοβολία δεν απορροφάται κανονικά αλλά λιγότερο υπάρχουν αστοχίες. Στα περισσότερα σύνθετα υλικά οι ακτίνες Χ είναι φανερές για αυτόν τον λόγο πρέπει να χρησιμοποιούνται ακτίνες χαμηλής ενέργειας. Αυτή η μέθοδος δεν συνίσταται για πρακτικές αεροσκαφών. Επίσης, ο μηχανικός που θα πραγματοποιήσει την συγκεκριμένη μέθοδο πρέπει πάντα να είναι προστατευμένος από προστατευτικά μολύβδου καθώς, υπάρχει πιθανότητα έκθεσης του είτε από τον σωλήνα ακτινών Χ είτε από διάσπαρτη ακτινοβολία που μπορεί να υπάρχει. Συνίσταται μια ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από την πηγή.



Σχήμα 2.10: Ραδιογραφία με ακτίνες X, Radiography.

### Θερμογραφία (Thermography):

Η θερμογραφία πραγματοποιείται μετρώντας την μεταβολή της θερμότητας σε εξαρτήματα κάτω από έλεγχο με συσκευές ανίχνευσης θερμότητας. Η βασική αρχή της θερμογραφίας συνιστά την μέτρηση των επιφανειακών θερμοκρασιών όταν η θερμότητα ρέει από, προς ή μέσω του ελεγχόμενου αντικειμένου. Όλες οι θερμογραφικές μέθοδοι βασίζονται στις διαφοροποιήσεις της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού μεταξύ των επιφανειών χωρίς ζημιά και σε αυτόν με ζημιά. Η μέθοδος πραγματοποιείται τοποθετώντας μια πηγή θερμότητας πάνω από την εξεταζόμενη περιοχή παρατηρώντας παράλληλα τις επιπτώσεις θέρμανσης. Με αυτόν τον τρόπο βλέπουμε ότι στις περιοχές χωρίς κάποια ζημιά η θερμοκρασία ρέει πιο αποτελεσματικά από ότι στις περιοχές με κάποιο ελάττωμα άρα με την ποσότητα της θερμότητας που απορροφάται ή ανακλάται καταλαβαίνουμε την ποιότητα των δεσμών του σύνθετου υλικού. Τα ελαττώματα που ανιχνεύονται με την θερμογραφία είναι: Αποκολλήσεις, ρωγμές, εισροή νερού στο υλικό, ανωμαλίες στο εσωτερικό. Η θερμογραφία είναι πιο αποτελεσματική σε σύνθετα υλικά με λεπτές επιφάνειες ή για σύνθετα υλικά με αστοχίες κοντά στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.11: Θερμογραφία (Thermography).



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## 3.1 ΙΝΩΔΗ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

Τα ινώδη σύνθετα υλικά (fiber-reinforced composites ) αποτελούνται από μία συνεχή μήτρα και εσωτερικά της κατάλληλα διαμορφωμένες ίνες. Οι ίνες μέσα στην μήτρα μπορεί να είναι σε τυχαίο ή μη προσανατολισμό. Αυτό που χαρακτηρίζει τα ινώδη σύνθετα υλικά είναι το υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας (E) που κατέχουν η υψηλή αντοχή, μεγάλη ακαμψία, και η μικρή πυκνότητα ( $\rho$ ) ενώ σε σχέση με τα άλλα σύνθετα έχουν μεγαλύτερη ευκολία στον σχεδιασμό τους. Επίσης, κάποιες ίνες έχουν και άλλες ιδιότητες όπως ηλεκτρική αγωγιμότητα και θερμική αντίσταση.

Οι ενισχυτικές ίνες εσωτερικά της μήτρας μπορεί να είναι είτε από ανόργανα υλικά (γυαλί, άνθρακας, κεραμικά, μέταλλα) είτε από οργανικά υλικά (πολυμερή).

Η πλειοψηφία των υλικών είναι ανθεκτικότερα και σκληρότερα στην ινώδη μορφή τους από το αν αποτελούν ογκώδη και συμπαγή μάζες. Ο μεγάλος λόγος ( $s$ -aspect ratio) μήκους ( $l$ ) και διαμέτρου ( $d$ ) της ίνας, επιτρέπει ουσιαστική μεταφορά του φορτίου μέσω του συστατικού της μήτρας στις ίνες. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο τα σύνθετα υλικά έχουν άριστες ιδιότητες. Επομένως οι ίνες είναι κατάλληλες για την ενίσχυση των υλικών.

Τα ινώδη σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: Η πρώτη κατηγορία στηρίζεται στον λόγο των ινών δηλαδή, μήκους/διάμετρο ( $l/d$ ). Έτσι έχουμε

- Συνεχείς ίνες μεγάλου μήκους, όταν  $l/d \geq 100$
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες, όταν  $l/d < 100$
- Τριχίτες (whiskers), χρησιμοποιείται κυρίως για την περιγραφή λεπτών μονοκρυστάλλων κεραμικού υλικού.

Η δεύτερη κατηγορία είναι με βάση των προσανατολισμό των ινών:

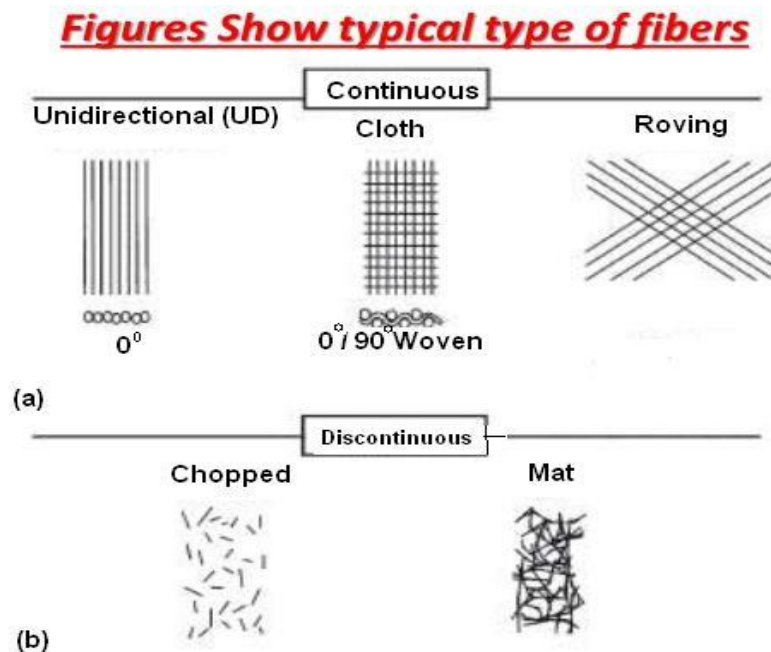
- Προσανατολισμένες ίνες
- Μη προσανατολισμένες ίνες

Και τέλος η τρίτη κατηγορία με βάση την τοποθέτηση των ινών εσωτερικά της μήτρας με τους ακόλουθους τρόπους:

- Υφασμένα νήματα (woven)
- Διάσπαρτες περιελίξεις νήματος (roving)



- Μονής διεύθυνσης (Unidirectional UD)
- Ασυνεχείς ίνες, με κοντές ίνες διάσπαρτες στην μήτρα μη-προσανατολισμένες (chopped)
- Συνεχείς ίνες σαν δέμα από χιλιάδες νήματα, χωρίς στρέψη μοιάζοντας σαν "στουπί". (mat)



Σχήμα 3.1: Τύποι σύνθετων υλικών με ενισχυτικές ίνες

Οι πιο σημαντικές και συνηθισμένες ίνες που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές είναι οι ίνες από άνθρακα (γραφίτη), αραμίδιο (κέβλαρ), γυαλί αλλά και βορίου, πυριτίου.

1. Οι ίνες από άνθρακα είναι δύσκαμπτες, έχουν μεγάλη αντοχή, καλή πρόσφυση με πολυμερή συγκολλητικά (εποξική ρητίνη), καλή θερμική αντίσταση, και είναι αδρανής χημικά. Οι ίνες άνθρακα μπορούν να είναι 25 φορές πιο δύσκαμπτες από το ασάλι.
2. Οι ίνες από αραμίδιο γνωστό και ως Kevlar παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, είναι δύσκαμπτες αλλά λιγότερο από του άνθρακα και παρουσιάζουν σημαντική παραμόρφωση στην θραύση.

3. Οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή, και δυσκαμψία περίπου ίδια με του αλουμινίου. Το μεγάλο τους πλεονέκτημα βρίσκεται στο ότι είναι φθηνό υλικό σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (MPa)	Οριακή παραμόρφωση εφελκυστικής αστοχίας (%)
<i>Ανθρακας</i>			
Υψηλής αντοχής	215-235	3500-4800	1.4-2.0
Υπερ- υψηλής αντοχής	215-235	3500-6000	1.5-2.3
Υψηλού μέτρου ελαστικότητας	350-500	2500-3100	0.5-0.9
Υπερ-υψηλού μέτρου ελαστικ	500-700	2100-2400	0.2-0.4
<i>Γυαλί</i>			
E	70-75	1900-3000	3.0-4.5
Z ή AZ	70-75	1900-3000	3.0-4.5
S	85-90	3500-4800	4.5-5.5
<i>Αραμιίδιο</i>			
Χαμηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 29)	70-80	3500-4100	4.3-5.0
υψηλού μέτρου ελαστικότητας (Κέβλαρ 49, Twaron)	115-130	3500-4000	2.5-3.5

Σχήμα 3.2: Ιδιότητες ινών

### 3.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ (Glass Fibers)

Οι ίνες γυαλιού παράγονται από λιωμένο γυαλί σε πολύ μεγάλες θερμοκρασίες το οποίο ψύχεται ακαριαία από ακτινοβολία σε μια άκαμπτη κατάσταση προκειμένου να μην εκτεθούν σε κρυστάλλωση.

Πλέον, η ενίσχυση των περισσότερων σύνθετων υλικών αποτελείται από ίνες γυαλιού λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν. Αρχικά, το γυαλί συγκαταλέγεται στα πιο φθηνά υλικά, έχει εύκολη παραγωγική διαδικασία, υψηλή αντοχή, και υψηλή δυσκαμψία. Επίσης, κατέχει χαμηλή πυκνότητα μεγάλη αντοχή στα χημικά, και διατηρεί της ιδιότητες του γυαλιού. Είναι στερεό και άμορφο δηλαδή δεν παρουσιάζει κρυσταλλική δομή, άκαμπτο, και με ιδιαίτερες μονωτικές ιδιότητες.

### 3.2.1 Τύποι Υαλονημάτων

Ανάλογα με την χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού χωρίζονται σε τρεις κυρίως κατηγορίες E, C, S. Οι φυσικές και μηχανικές τους ιδιότητες διαφοροποιούνται σε κάθε τύπο γυαλιού.

- **Ο τύπος E** (E-glass, E for electrical) είναι ο πιο εφαρμόσιμος τύπος ινών για την μεγάλη αντοχή που διαθέτει, το μέτρο ελαστικότητας, τις καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, αλλά και για τον λόγο ότι δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες.
- **Ο τύπος C** (C-glass, C for corrosion) έχει μικρότερη αντοχή από τον τύπο E επίσης είναι και ακριβότερος. Ωστόσο, παρουσιάζει καλύτερες μηχανικές ιδιότητες αλλά και υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση.
- **Ο τύπος S** (S-glass, S for Strength) είναι ακριβότερος από τον τύπο E αλλά έχει υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας, υψηλότερη δυσκαμψία καθώς και θερμική αντοχή. Χρησιμοποιείται κυρίως στην βιομηχανία αεροσκαφών.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ		
	E	C	S
Χημική σύσταση (%)			
Διοξείδιο του πυριτίου $\text{SiO}_2$	54	60	65
Οξείδιο του αλουμινίου $\text{Al}_2\text{O}_3$	16	25	25
Τριοξείδιο του βορίου $\text{B}_2\text{O}_3$	8	-	-
Οξείδιο του Ασβεστίου $\text{CaO}$	17	9	-
Οξείδιο του μαγνησίου $\text{MgO}$	5	6	10
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800
Πυκνότητα ( $\text{g/cm}^3$ )	2,54	2,50	2,48
Θερμοκρασία τήξης ( $^{\circ}\text{C}$ )	900-1200	1400-1600	1400-1600
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης ( $^{\circ}\text{C}$ )	550	650	650

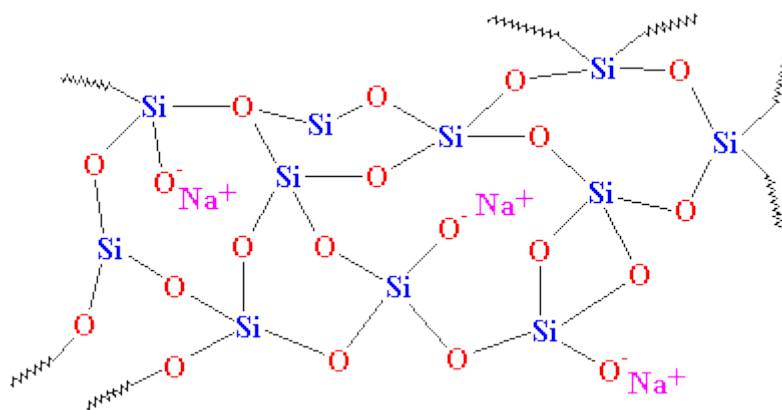
Σχήμα 3.3: Χημική σύσταση και ιδιότητες ενισχυτικών ινών γυαλιού.

Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιούνται συχνά για εξαρτήματα αεροσκαφών όπως φτερά αεροσκαφών, σφαιρικούς θόλους, και εξαρτήματα όπου με τον κατάλληλο σχεδιασμό μπορούν να δώσουν την κατάλληλη αεροδυναμική στην κατασκευή. Επίσης, χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ελίκων ελικοπτέρων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι σύνθετων με ίνες γυαλιού που χρησιμοποιούνται στον κλάδο των αερομεταφορών (πχ τύπου S).

### 3.2.2 Σύσταση ινών γυαλιού

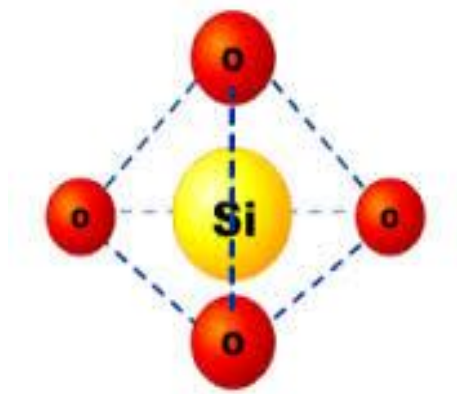
Ανάλογα με τις απαιτήσεις που χρειάζονται στην εκάστοτε εφαρμογή υπάρχει και η ανάλογη σύσταση στο σύνθετο υλικό. Εκτός του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) που είναι το κύριο συστατικό χρησιμοποιούνται και άλλες πρώτες ύλες όπως ο ασβεστόλιθος ( $\text{CaCO}_3$ ), ανθρακικό νάτριο (κοινή Σόδα  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), μαγνησίτης (ορυκτό του μαγνησίου), νατριούχο πυρίτιο, οξείδιο του αργιλίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ή θραύσματα γυαλιού. Με αυτά τα συστατικά τα ινώδη σύνθετα αποκτούν μεγαλύτερες ιδιότητες όπως, μεγαλύτερη αντίσταση σε χημικά, ομορφοποίηση του μίγματος, διευκόλυνση στην τήξη του γυαλιού.

Όσο μεγαλύτερο ποσοστό πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) υπάρχει στο υλικό τόσο αυξάνονται οι μηχανικές ιδιότητες και η αντοχή που αποκτά. Έτσι σε περιπτώσεις όπου απαιτούνται υψηλή αντοχή και μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να αποτελείται πλήρως από πυριτία.



Σχήμα 3.4 : Δομή ενισχυτικής ίνας γυαλιού

Το πυρίτιο ( $\text{SiO}_2$ ) χρησιμοποιείται ως η χημική βάση για τις ίνες γυαλιού με ατομικό αριθμό 14. Προτού επεξεργαστεί βρίσκεται στην μορφή  $(\text{SiO}_2)_n$  ενώ, στην πολυμερή μορφή του συναντάται ως  $(\text{SiO}_4)$ . Είναι τετράεδρο με τέσσερα άτομα οξυγόνου και ένα πυριτίου στην μέση.



Σχήμα 3.5: Σύσταση Πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ )

### 3.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Η χρήση των σύνθετων υλικών ενισχυμένων με ίνες γίνεται μέρα με την μέρα και με την εξέλιξη της τεχνολογίας, όλο και πιο ελκυστική εναλλακτική λύση σε πολλές εφαρμογές, λόγω τις αύξησης της αντοχής τους, της ανθεκτικότητας που διαθέτουν, την αντοχή σε καιρικά φαινόμενα, και την αντοχή στην κόπωση που παρουσιάζουν. Επίσης, τα σύνθετα υλικά παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία σε πολλούς τομείς όπως στον σχεδιασμό, και στην μείωση του βάρους της κατασκευής.

Με τον κατάλληλο σχεδιασμό μεμονωμένων εξαρτημάτων μπορεί να εξοικονομηθεί περίπου 20-30% το βάρος κατασκευής σε σχέση με κάποιο συμβατικό υλικό.

Για αυτούς του λόγους αλλά και για άλλους που θα δούμε στην συνέχεια τα σύνθετα υλικά έχουν καταφέρει να είναι πλέον στην λίστα με τα πιο περιζήτητα υλικά στην βιομηχανία. Αφού έχουν ενταχθεί στην αυτοκινητοβιομηχανία, αεροδιαστημική, ναυπηγική, βιομηχανία αθλητικών ειδών όπως, στο σκι, για μπαστούνια του γκολφ, για ρακέτες του τένις και αθλητικά παπούτσια. Επίσης, στην παραγωγή αντιδιαβρωτικών, στην ιατρική, στην κατασκευή τεχνικών έργων και για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

### 3.3.1 Αεροναυπηγική και αεροδιαστημική

Αρχικά, οι σχεδιαστές αντιμετώπιζαν προβλήματα σε σχέση με τον δύσκολο χειρισμό αλλά και της μειωμένης απόδοσης των αεροσκαφών λόγω του βάρους που υπήρχε. Έτσι, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και συνάμα των σύνθετων υλικών ευνοήθηκε ο τομέας της αεροναυπηγικής στο έπακρο καθώς η μείωση του βάρους των κατασκευών ήταν υποχρεωτική. Βέβαια, με τα σύνθετα υλικά αποκτήθηκαν και άλλοι παράγοντες όπως υψηλή ειδική αντοχή, ακαμψία, και αντοχή στην διάβρωση, παράγοντες που προϋπήρχαν βέβαια και με τα συμβατικά υλικά αλλά όχι στον ίδιο βαθμό.

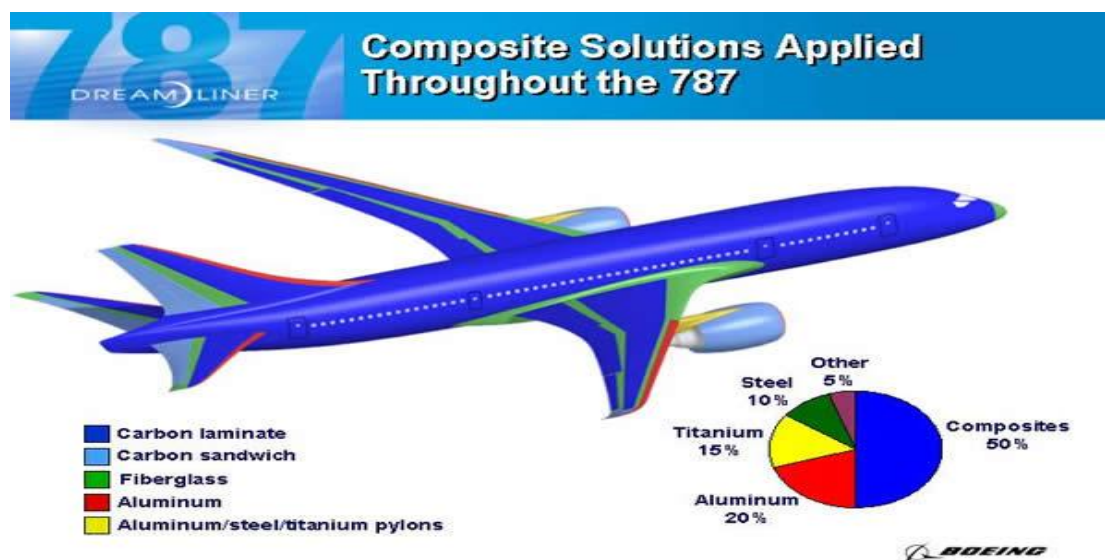
Οι σύνθετες κατασκευές επίσης οδηγούν σε λείες επιφάνειες με μειωμένες τριβές, λόγος που βοηθάει και για καλύτερη αεροδυναμική.

Τα αναβαθμισμένα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε μαχητικά αεροσκάφη για κατασκευή οριζόντιων και κάθετων σταθεροποιητών, πτερύγια αεροπλάνων, προστατευτικά φτερών, και ποικιλία επιφανειών ελέγχου, με τις απώλειες βάρους να είναι της τάξης του 20%. Με την απώλεια βάρους να φτάνει σε τόσο μεγάλα ποσοστά τα μαχητικά αεροσκάφη φτάνουν στα επιθυμητά όρια ταχύτητας.

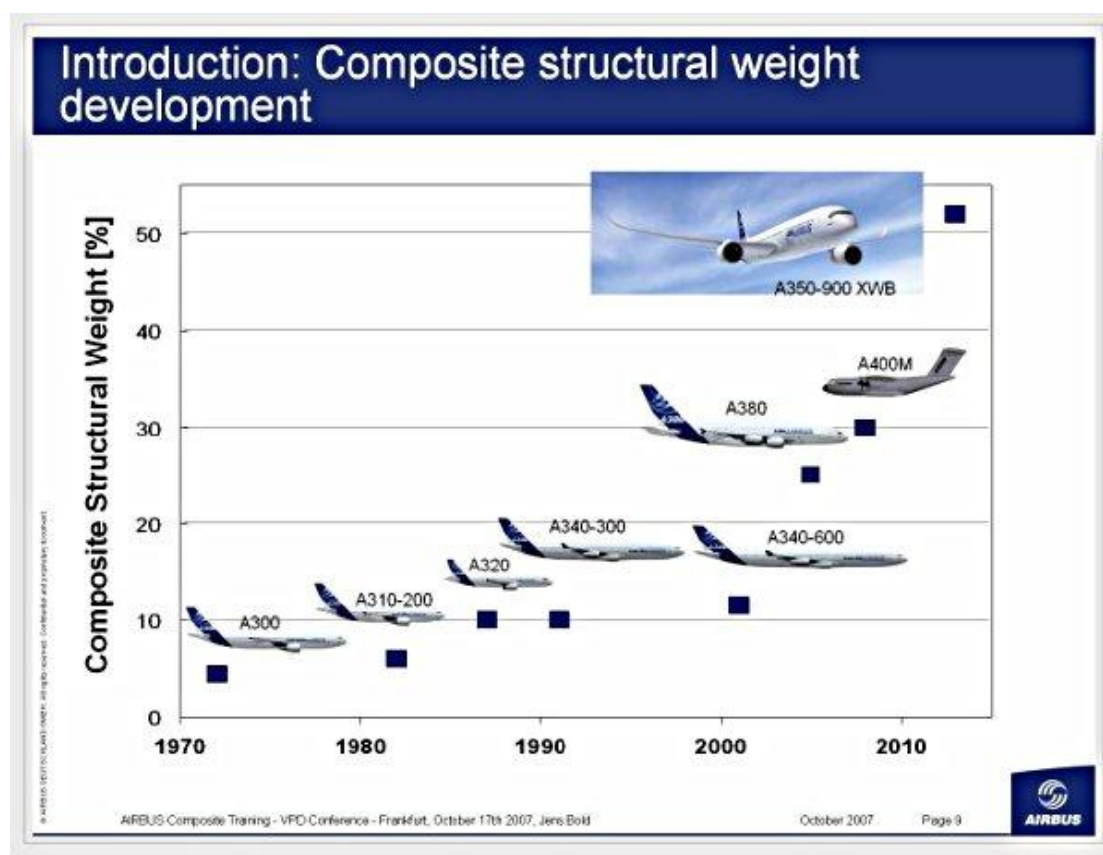
Επίσης, οι εφαρμογές των σύνθετων σε εμπορικά αεροσκάφη συνεχίζει να αυξάνεται. Χρησιμοποιούνται για τμήματα εσωτερικού χώρου, εξοικονομώντας χώρο, και βάρος, άρα και εξοικονόμηση καυσίμων, που μπορεί να φτάσει μέχρι και στο 33%.

Λόγω του τεράστιου κόστους ανά μονάδα βάρους για την τοποθέτηση ενός αντικειμένου στο διάστημα, η αξία της εξοικονόμησης βάρους έχει μεγαλύτερη αξία στην αεροδιαστημική. Έτσι, τα σύνθετα υλικά είναι άκρως ελκυστικά για διαστημικές εφαρμογές.

Τέλος, χρήση σύνθετων υλικών γίνεται ακόμα και για παραγωγή πυραύλων, βλημάτων, κινητήρες αεροσκαφών, δορυφορικές εφαρμογές.



Σχήμα 3.6: Σύνθετα και μη υλικά στην αεροναυπηγική



Σχήμα 3.7: Στατιστική αύξηση των σύνθετων υλικών των αεροσκαφών στην πάροδο του χρόνου.

### 3.3.2 Αυτοκινητοβιομηχανία

Τα σύνθετα υλικά μπορεί σε μερικά χρόνια να έχουν μεγαλύτερα πλεονεκτήματα σε σχέση με τον χάλυβα στην αυτοκινητοβιομηχανία. Βέβαια, τα πολυμερή με ενισχυτικές ίνες γυαλιού συνεχίζουν να κυριαρχούν στα σύνθετα εξαρτήματα των αυτοκινήτων, ωστόσο τα εξελιγμένα σύνθετα δεν έχουν χρησιμοποιηθεί σημαντικά. Τα σύνθετα υλικά είναι μελετημένα ώστε να κάνουν τα οχήματα, ελαφρύτερα, ασφαλή, και πιο αποδοτικά.

Η οικονομία καυσίμων στο αυτοκίνητο θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 60% λόγω της μείωσης του βάρους του, σύμφωνα με το εθνικό εργαστήριο του Oak Ridge.

Χρήση των σύνθετων υλικών γίνεται σε προφυλακτήρες, και κατασκευή καμπινών σε φορτηγά, επίσης, στο Σχήμα 3.9 βλέπουμε την κατασκευή σκελετού αυτοκινήτου (σασί) από σύνθετο με ίνες άνθρακα (CFRP) με τα αποτελέσματα να είναι εκπληκτικά σε σχέση με το βάρος του οχήματος, καθώς το σασί αυτού του τύπου οχήματος ζυγίζει 1195 kg. Εφόσον, οι ίνες άνθρακα μπορεί να ζυγίζουν 40% λιγότερο από το αλουμίνιο και έως 60% λιγότερο από το ατσάλι.



Τέλος, η χρήση των σύνθετων υλικών στον μηχανοκίνητο αθλητισμό (Formula 1) είναι απαραίτητη, καθώς χρησιμοποιούνται για σασί, και αεροτομές, για την ελάφρυνση του οχήματος αλλά και για την αντοχή που δείχνουν στις υψηλές φορτίσεις που δέχονται, αφού τα σύνθετα υλικά απορροφούν περισσότερη ενέργεια/kg κατά την κρούση από ότι τα μέταλλα.

Κατηγορία αυτοκινήτου	Απόβαρο σε κιλά
Κόμπακτ	1354 kg
Μεσαίου μεγέθους	1590 kg
Μεγάλου μεγέθους	1985 kg

Σχήμα 3.8: Σχέση κατηγορίας αυτοκινήτου - Απόβαρου



Σχήμα 3.9: Σκελετός αυτοκινήτου τύπου BMW i3 με ίνες άνθρακα.

### 3.3.3 Ναυπηγική

Η χρήση σύνθετων υλικών σε διάφορα εξαρτήματα πλοίων δεν ήταν και τόσο διαδεδομένη μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αιώνα. Πλέον, τα παραδοσιακά υλικά όπως το ξύλο, έχουν αντικατασταθεί με ινώδη σύνθετα υλικά καθώς έχουν μεγαλύτερη αντίσταση στην διάβρωση. Επίσης, με την δημιουργία των σκαριών μικρών σκαφών να γίνεται σε καλούπια στα οποία γίνεται χύτευση κερδίζοντας χρήματα αλλά και χρόνος.





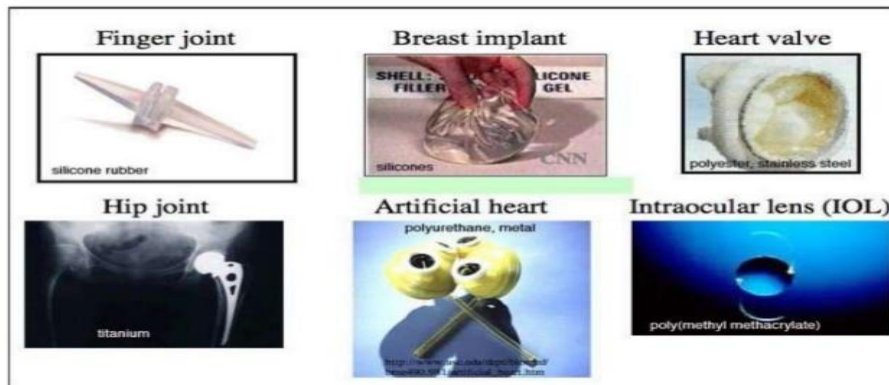
Σχήμα 3.10: Χύτευση σε καλούπι για κατασκευή σκάφους

### 3.3.4 Ιατρική

Τα σύνθετα υλικά εμποτισμένα με ίνες γυαλιού έχουν πληθώρα εφαρμογών στον τομέα της ιατρικής, αρχικά είναι κατάλληλα για ιατρικό εξοπλισμό, λόγω του ότι μπορούν με την διαδικασία της χύτευσης στα κατάλληλα καλούπια να πάρουν ότι σχήμα χρειαστεί είτε για λόγους αισθητικής, είτε για λόγους χρησιμότητας.

Με την ανάπτυξη των πολυμερών καθώς και την ανάπτυξη των σύνθετων υλικών έχουμε και την ανάπτυξη των βιοϋλικών. Έτσι έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται τεχνητοί σύνδεσμοι, αρθρώσεις, βηματοδότες, καρδιακές βαλβίδες, ακόμα και τεχνητές καρδιές αλλά και τεχνητό δέρμα.

# Biomaterials

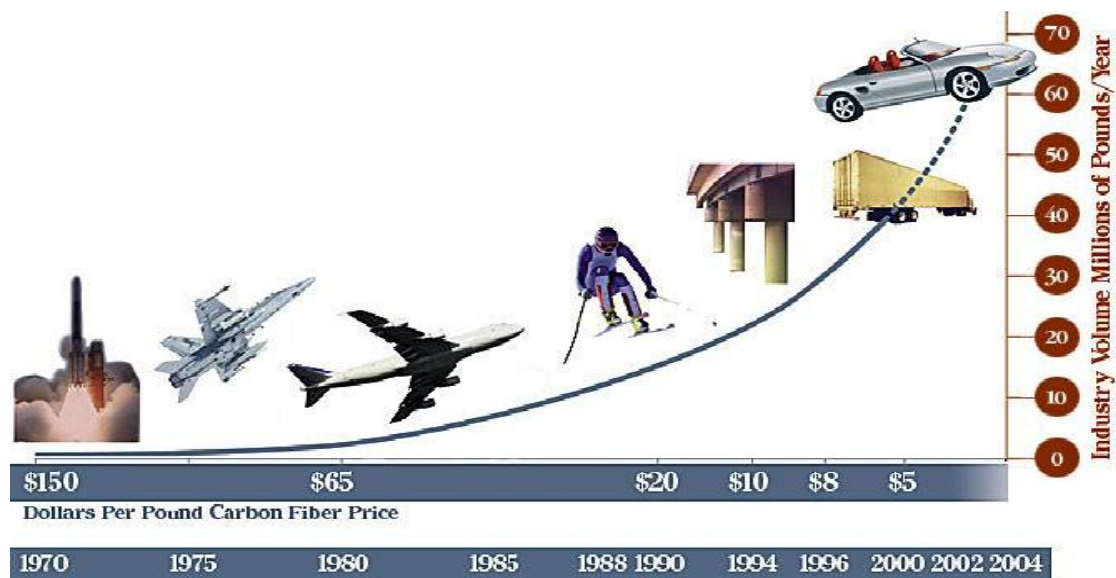


Σχήμα 3.11: Σύνθετα πολυμερή στην ιατρική

## 3.4 Συμπεράσματα

Όπως είδαμε παραπάνω οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών έχουν κατά κύριο λόγο πάρα πολλά πλεονεκτήματα όπως η ανθεκτικότητά τους, το χαμηλό κόστος συντήρησης που διαθέτουν, ευελιξία στον σχεδιασμό, και το πιο δυνατό τους σημείο η μείωση βάρους που προσδίδουν στις κατασκευές αλλά και η ασφάλεια. Αυτό αναγνωρίζεται αφού πλέον χρησιμοποιούνται σε χιλιάδες εφαρμογές σε πάρα πολλούς τομείς.

Βέβαια, υπάρχουν και μειονεκτήματα, όπως το υψηλό κόστος κατασκευής τους, η ελλιπής γνώση στον σχεδιασμό, και αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των μηχανισμών αστοχίας τους.



Σχήμα 3.12: Βιομηχανικός όγκος ινοπλισμένων σύνθετων υλικών τον χρόνο.

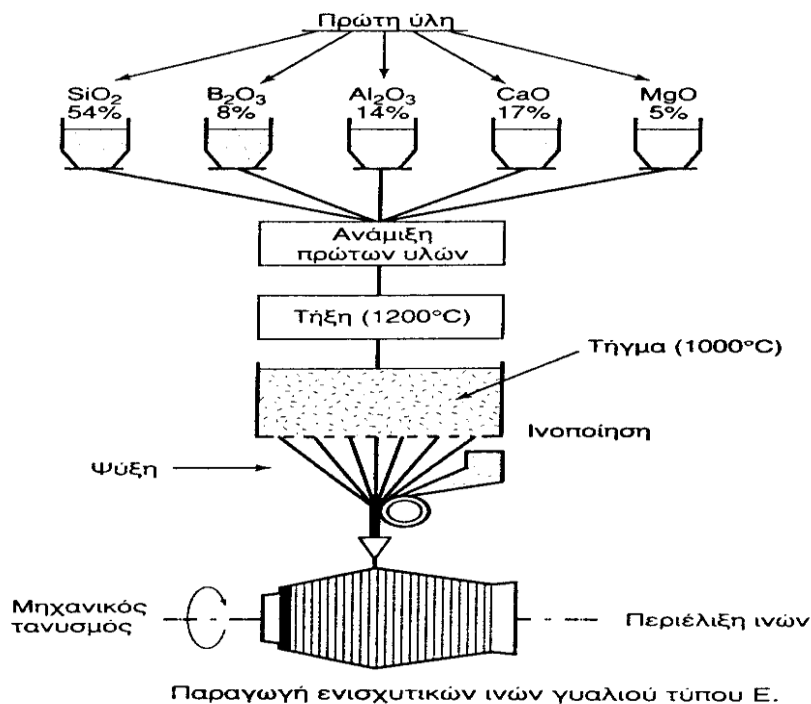
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

### 4.1 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα δώσουμε βάση στην διαδικασία δημιουργίας ινών γυαλιού, τους τρόπους πλέξης ινών αλλά και την μορφοποίηση τους ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες εφαρμογής.

Αρχικά, η πρώτη ύλη αναμιγνύεται με τα κατάλληλα συστατικά ώστε να αποκτήσει τα απαιτούμενα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την δημιουργία του γυαλιού. Έπειτα, πραγματοποιείται η τήξη αυτών των πρώτων υλών σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες (<math><1200\text{ }^\circ\text{C}</math>). Στην συνέχεια το μίγμα (γυαλί) ρέει μέσα από τις οπές του πυθμένα και οι παραγόμενες ίνες εξολκύνονται με μηχανική μέθοδο. Ταυτόχρονα γίνεται και η ψύξη για να κρυσταλλοποιηθούν οι ίνες καθώς είναι ακόμα σε ρευστή μορφή. Μετά, οι ίνες περιτυλίγονται γύρω από ένα κυλινδρικό τύμπανο το οποίο περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα. Ο έλεγχος της διαμέτρου των ινών γίνεται με ρύθμιση της στάθμης του τήγματος μέσα στην δεξαμενή, την πυκνότητα του, την διάμετρο των οπών καθώς επίσης και την ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου. Η επαφή των ινών θα πρέπει να αποφεύγονται καθώς μπορεί να προκληθούν κακώσεις μεταξύ τους.



Σχήμα 4.1: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού τύπου Ε.

### **Διάταξη ινών γυαλιού:**

Οι ίνες γυαλιού με κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να διαμορφωθούν σε πολλές διατάξεις οι οποίες είναι:

- Διάταξη σε πλεξίδες (συγκεντρωμένες παράλληλες ίνες)
- Σε υαλοϋφασμα (κατάλληλες για εφαρμογή σε φτερά ανεμογεννητριών)
- Υαλοποίημα (ύφασμα ινών γυαλιού συνδεδεμένες μεταξύ τους με τυχαία κατεύθυνση “mat”, παίρνει εύκολα την μορφή καλουπιού)

## **4.2 ΜΟΡΦΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΙΝΩΝ**

Η μορφοποίηση των ινών στα σύνθετα υλικά αρχικά εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένη η μήτρα. Οι μήτρες μπορεί να είναι είτε κεραμικές, είτε μεταλλικές, είτε οργανικές.

Ανάλογα το υλικό της μήτρας υπάρχουν και οι κατάλληλοι μέθοδοι για την μορφοποίηση των ινών οι οποίες διαφέρουν από υλικό σε υλικό.

Αρχικά, 1) γίνεται η παραγωγή των ινών, έπειτα 2) οι ίνες ομαδοποιούνται ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, είτε σαν ενισχυτικά νήματα, είτε σαν πλεξίδες (πλέξης). Επίσης, μπορούν να προστεθούν σαν ενισχυτικές στρώσεις μονοδιευθυντικές ίνες μεγάλου μήκους, σε διάφορους προσανατολισμούς (mat) αλλά και ως δυσδιάστατες ή τρισδιάστατες πλέξεις (fabrics), και 3) τέλος, γίνεται η εισαγωγή των ινών στην μήτρα.

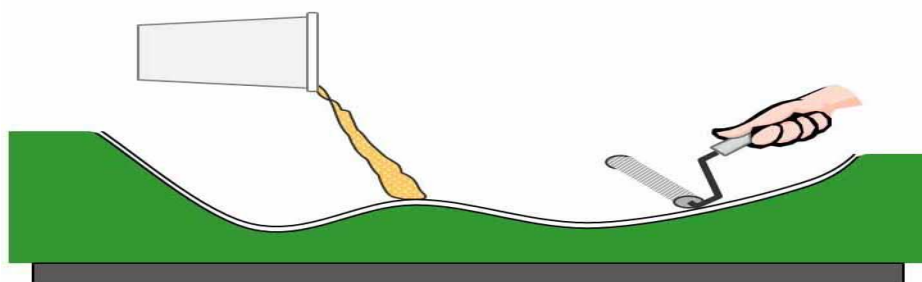
### **4.2.1 Μορφοποίηση σύνθετων υλικών οργανικής μήτρας**

- **Ασυνεχής μορφοποίηση σύνθετων**
- **Χειροποίητη στρώση (hand lay-up)**

Αρχικά οι ίνες τοποθετούνται σε καλούπι, μετά αναμιγνύοντας την πολυμερική ρητίνη με τον κατάλληλο σκληρυντή παρασκευάζεται το κατάλληλο μίγμα το οποίο αποτελεί και την μήτρα. Στην συνέχεια αυτό το μίγμα τοποθετείται επάνω στην ενίσχυση με επάλειψη, ψεκασμό ή απλή έγχυση. Τέλος, η επιφάνεια του υλικού συμπιέζεται με το κατάλληλο ρολό για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη επαφή των δυο υλικών. Για να αποφευχθούν τυχόν φυσαλίδες λόγω αέρα στο εσωτερικό που μπορεί να οδηγήσουν το υλικό σε αστοχία. Στο τέλος πραγματοποιείται και ξήρανση.

Είναι η πιο απλή και εύκολη μέθοδος παραγωγής σύνθετων αλλά συνάμα και αργή. Αυτή η τεχνική παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Στα θετικά παρουσιάζονται το χαμηλό κόστος κατασκευής, ο εξοπλισμός που απαιτείται είναι πολύ απλός, παραγωγή πολύπλοκων αντικειμένων και σχεδιαστική ευελιξία αφού πραγματοποιείται σε καλούπια. Τα αρνητικά είναι κυρίως ότι, χρειάζεται πολύς χρόνος για την παραγωγή αλλά και ότι η επαναληψιμότητα της κατασκευής είναι πολύ δύσκολο να πραγματοποιηθεί.

## Hand Lay-Up Manual Process



Σχήμα 4.2: Χειροποίητη Στρώση

- **Χύτευση Θαλάμου πίεσης (pressure bag):**

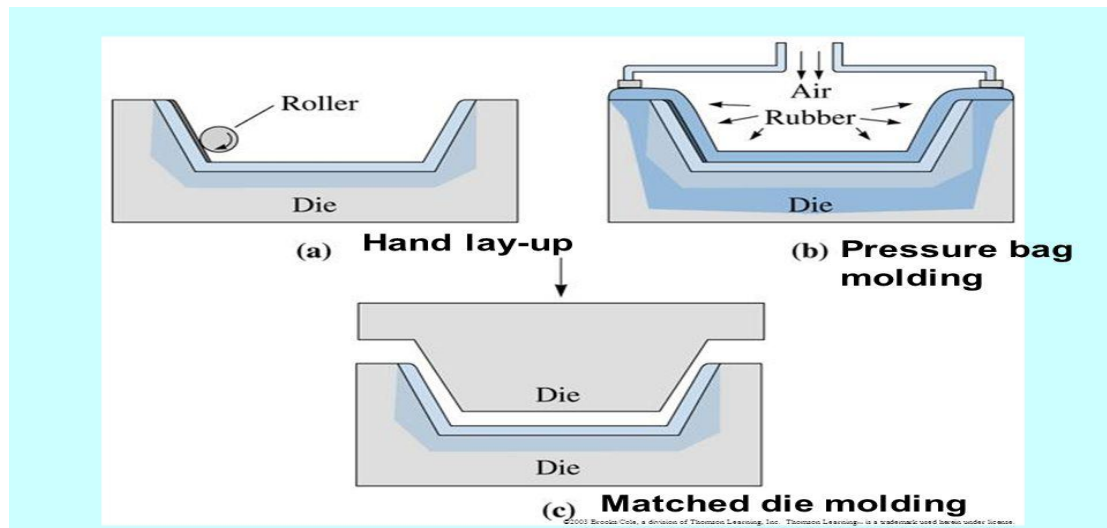
Είναι από τις κύριες μεθόδους μορφοποίησης των ινών αλλά με σχετικά υψηλό κόστος.

Υπάρχουν τρεις παραλλαγές σε αυτήν την μέθοδο. Η χύτευση σε θάλαμο πίεσης (pressure bag), σε θάλαμο κενού (vacuum bag), και ο θάλαμος πίεσης σε κλίβανο (autoclave).

Η χύτευση σε θάλαμο πίεσης κλιβάνου χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές. Αρχικά, τοποθετείται το καλούπι μέσα στον κλίβανο και με την απαραίτητη θερμοκρασία και πίεση που αναπτύσσεται πραγματοποιείται η κατεργασία. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι το μέγεθος των αντικειμένων κατεργασίας είναι μικρότερο αλλά ευέλικτο στον σχεδιασμό.

- **Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-moulding)**

Είναι η ίδια διαδικασία με την παραπάνω αλλά εδώ αντί για θερμαινόμενο δοχείο πίεσης χρησιμοποιείται διαιρετό καλούπι, με το οποίο ασκείται πίεση πάνω στο υλικό.



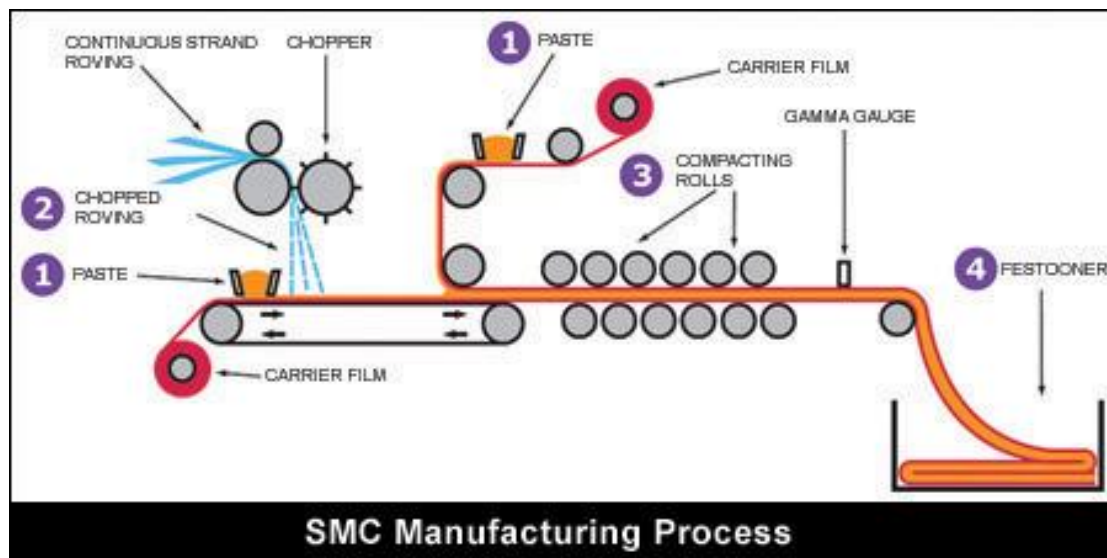
Σχήμα 4.3: Μέθοδοι χύτευσης Θαλάμου πίεσης

- **Συνεχείς Μορφοποίηση σύνθετων**
- **Συνεχείς Μορφοποίηση ελάσματος (Sheet Molding Composite-SMC)**

Η συνεχείς μορφοποίηση σύνθετων είναι ο συνδυασμός ψιλοκομμένων ινών γυαλιού με γεμίσματα πολυεστερικής ρητίνης στην μορφή φύλλου. Η μέθοδος αυτή πραγματοποιείται με συμπίεση ή με έγχυση σε καλούπι για την παραγωγή αμαξωμάτων (σασί) ή δομικών εξαρτημάτων αυτοκινήτων, καθώς και για περιβλήματα μηχανής. Βέβαια πραγματοποιείται και για άλλες εφαρμογές όπως σε είδη υγιεινής, καθίσματα, στάδια.

Στην πράξη, οι τεμαχισμένες ίνες γυαλιού τοποθετούνται πάνω σε στρώμα από το υλικό της μήτρας και από πάνω από τις ψιλοκομμένες ίνες τοποθετείται άλλο ένα στρώμα από το υλικό της μήτρας τα οποία έχουν εμποτιστεί ήδη με ρητίνη, έτσι δημιουργείται ένα sandwich. Έπειτα περνάει μέσα από ένα σύστημα συμπίεσης που εξασφαλίζει καλή συνάφεια μεταξύ ινών και μήτρας. Το τελικό υλικό (ρολά) αποθηκεύεται σε αποθήκες για μερικές μέρες για να "ωριμάσει". Εν συνεχεία, το έλασμα κόβεται στο επιθυμητό μέγεθος και τοποθετείται σε θερμαινόμενο μεταλλικό καλούπι ώστε να μορφοποιηθεί στο τελικό προϊόν.





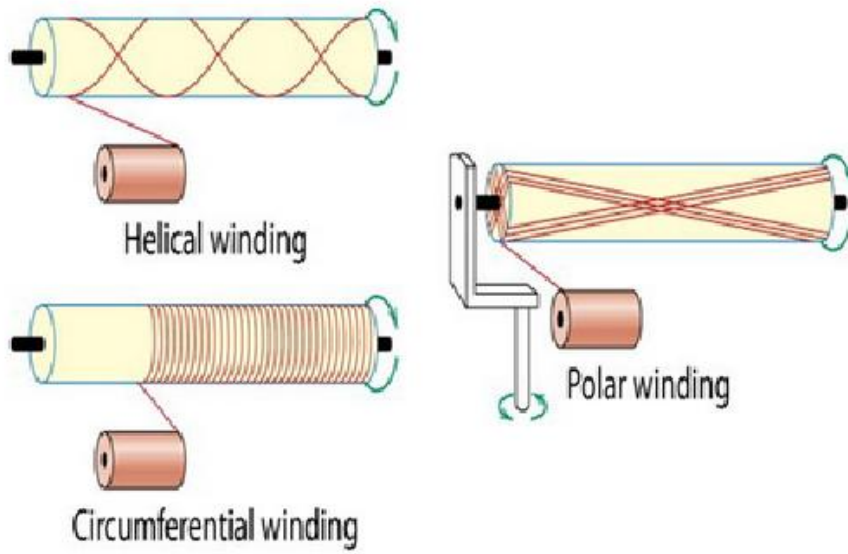
Σχήμα 4.4: Συνεχής Μορφοποίηση σύνθετων

- **Περιέλιξη νήματος (filament winding)**

Με την μέθοδο αυτή δημιουργούνται κοίλες δομές με μεγάλη αντοχή. Με συνεχής πλεκτές υφάνσεις από πολλαπλές στρώσεις ινών γυαλιού οι οποίες στην συνέχεια εμβαπτίζονται σε μια μήτρα ρητίνης. Η διαδικασία αυτή, οδηγεί σε προϊόντα κατάλληλα για δοχεία πίεσης, στην αεροδιαστημική, μπαστούνια του γκολφ, στρατιωτικό εξοπλισμό και εκατοντάδες άλλες χρήσεις. Όπου η δύναμη είναι απαραίτητη σε χαμηλό βάρος τότε η μέθοδος της περιέλιξης νήματος είναι η κατάλληλη.

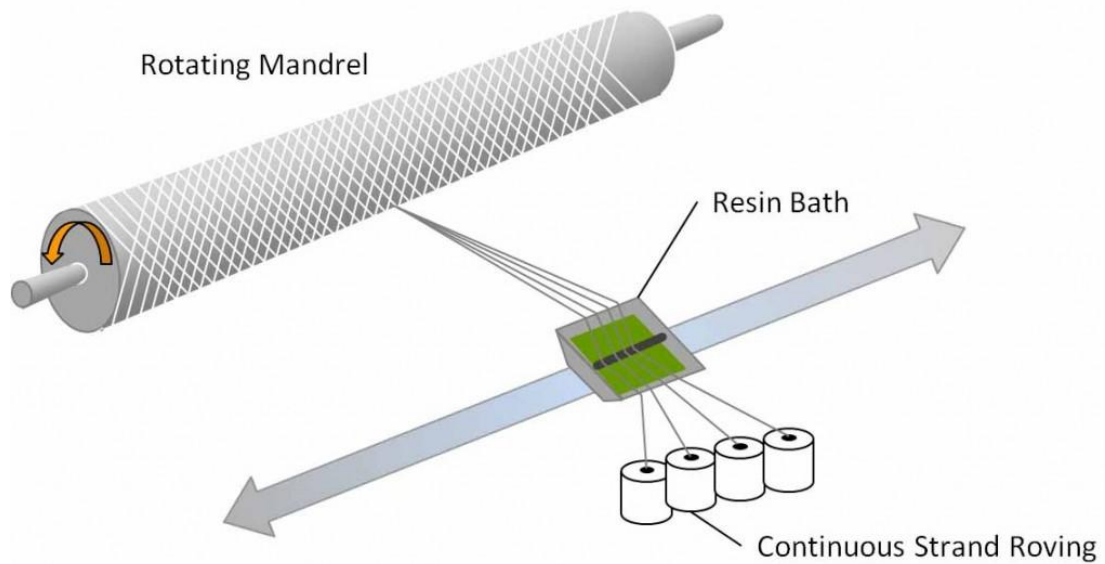
Στην πράξη, η περιέλιξη νήματος περιέχει δυο κύρια στάδια. Μια στάσιμη άτρακτος χάλυβα περιστρέφεται ενώ ταυτόχρονα ένας βραχίονας μεταφοράς ινών κινείται οριζόντια πάνω και κάτω στο μήκος της άτρακτου. Πάνω στον βραχίονα είναι τοποθετημένο το λεγόμενο λουτρό ρητίνης για την εμβάπτιση των ινών. Καθώς η άτρακτος περιστρέφεται οι πολλαπλές στρώσεις ινών περιτυλίγονται γύρω από αυτόν και έτσι σχηματίζεται ένα σύνθετο στρώμα πάνω του. Ο ακριβής προσανατολισμός των ινών πάνω στην άτρακτο προσδιορίζεται από τον ρυθμό της διαδρομής που κάνει ο βραχίονας μεταφοράς και από την ταχύτητα περιστροφής της άτρακτου. Τέλος, οι ίνες στερεοποιούνται μαζί με την ρητίνη πάνω στον άξονα για την δημιουργία του τελικού σύνθετου υλικού.

Συχνά ένας συνδυασμός από διαφορετική γωνία περιέλιξης χρησιμοποιείται για καλύτερα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.5: Διάφορες περιελίξεις (κυκλική, ελικοειδής, διαμήκης)

## Filament Winding



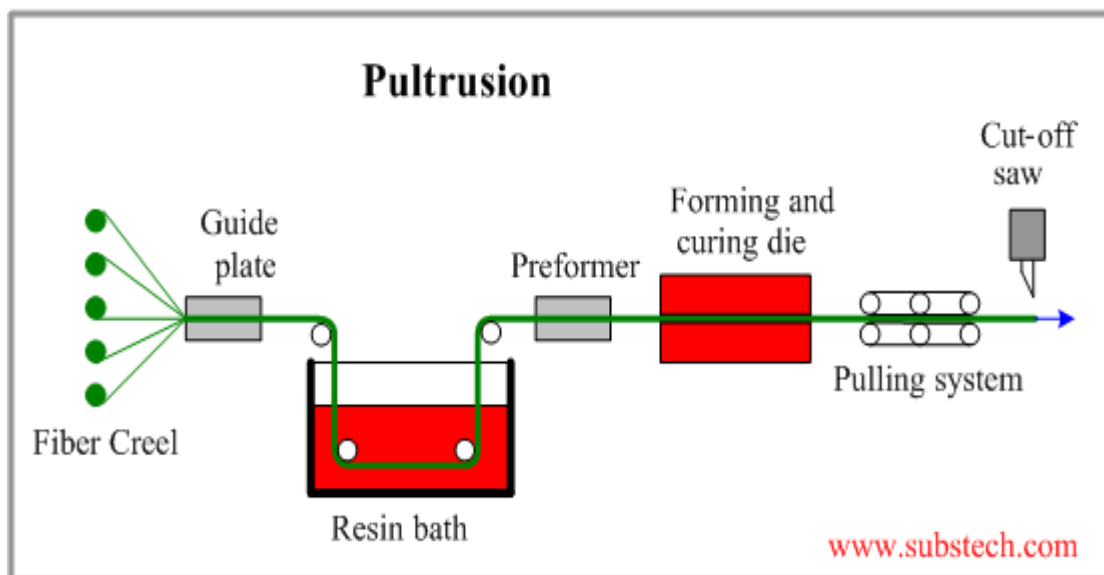
Σχήμα 4.6: Περιέλιξη νήματος



- **Μορφοποίηση με εμβάπτιση (Pultrusion)**

Είναι μια αυτοματοποιημένη μέθοδος με υψηλή παραγωγική διαδικασία σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας, με συνεχής ίνες μεγάλου μήκους για προϊόντα σταθερής διατομής. Όπως, δοκούς, σωλήνες, και αγωγούς αλλά και άλλων σχημάτων με την κατεργασία τους όμως να γίνεται στα κατάλληλα καλούπια.

Στην πράξη, συνεχείς ίνες μεγάλου μήκους εισέρχονται σε λουτρό ρητίνης για την εμβάπτιση τους από το υλικό της μήτρας, εν συνεχεία εφελκύνονται μέσω του καλουπιού και αρχίζει η σκλήρυνση της ρητίνης λόγω της θερμότητας του καλουπιού. Έτσι σχηματίζεται ένα άκαμπτο προφίλ που αντιστοιχεί στο σχήμα του καλουπιού. Τέλος ένα ενσωματωμένο πριόνι κόβει το σύνθετο υλικό στο κατάλληλο μήκος.



Σχήμα 4.7: Μορφοποίηση με εμβάπτιση

Επίσης η μορφοποίηση των ινών γίνεται και σε μεταλλικές μήτρες με μεθόδους όπως η α) συνδιέλαση (co-extrusion), β) συμπίεση σε σταθερή κατάσταση γ) μορφοποίηση με χύτευση (casting process) και δ) απόθεση υλικού μήτρας, αλλά και σε κεραμικές μήτρες.

## 4.3 ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

Οι εταιρίες παραγωγής σύνθετων υλικών δέχονται πολλές πιέσεις από τις κυβερνήσεις αλλά και από οργανισμούς περιβάλλοντος λόγω περιβαλλοντικών ζητημάτων που προκύπτουν από τα απόβλητα που δημιουργούνται κατά χιλιάδες τόνους ετησίως. Όσο η παραγωγή και η χρήση των σύνθετων υλικών αυξάνονται χρόνο με τον χρόνο τόσο αυξάνονται και τα απόβλητα. Ο συνδυασμός παραγωγής αλλά και αποβλήτων σε σύνθετα πολυμερή από ίνες γυαλιού έφτασε στους 304,000 τόνους το 2015 στην Ευρώπη σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Εταιρία ανακύκλωσης σύνθετων υλικών (ECRC).

Τα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού είναι δύσκολο να ανακυκλωθούν, ειδικά αυτά που έχουν παραχθεί από θερμοσκληρυνόμενα υλικά. Λόγω του ότι κατά την δημιουργία τους έχουν αναπαραχθεί δεσμοί εξαιτίας της θέρμανσης που υπόκεινται.

Προβλέπεται ότι μέχρι το 2040, 380,000 τόνοι ινοπλισμένων σύνθετων υλικών θα διατίθενται κάθε χρόνο. Ενώ κατά προσέγγιση κάθε χρόνο στην Ευρώπη κατασκευάζονται περίπου 1,000,000 τόνοι σύνθετων υλικών.

Οι παραδοσιακοί τρόποι ανακύκλωσης όπως η υγειονομική ταφή (landfill) και η καύση (incineration) έχουν σχεδόν απαγορευτεί στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες. Αφού είναι επιβλαβής για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Στην καύση το 60% του υλικού καταλήγει σε στάχτη, η οποία σε μεγάλο βαθμό μπορεί να είναι επιβλαβής λόγω των ανόργανων ουσιών που υπάρχουν στα σύνθετα υλικά π.χ. ρητίνη, και να οδηγήσει σε επιβλαβή αέρια. Και έτσι αυτή η μέθοδος καταλήγει τελικά σε υγειονομική ταφή.

Άλλος ένας λόγος που οδηγεί στην σχεδόν κατάργηση αυτών των μεθόδων είναι η σπατάλη μεγάλης ενέργειας που χρειάζεται και συνάμα χρημάτων.

Σύμφωνα με καινούργιες νομοθεσίες στο Ηνωμένο Βασίλειο οι αυτοκινητοβιομηχανίες πρέπει:

- Από το 2006, το 85% του βάρους του αυτοκινήτου προς ανακύκλωση θα πρέπει να ξαναχρησιμοποιείται, ή να ανακυκλώνεται, και μόνο το 15% να διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής.
- Από το 2015, το 95% του βάρους του αυτοκινήτου προς ανακύκλωση θα πρέπει να ξαναχρησιμοποιείται, ή να ανακυκλώνεται, και μόνο το 5% να διατίθεται σε χώρους υγειονομικής ταφής.
- Από το 2007 είναι υποχρέωση του κατασκευαστή να διαθέσει τα οχήματα για τις παραπάνω διαδικασίες.

- **Τεχνολογίες ανακύκλωσης**

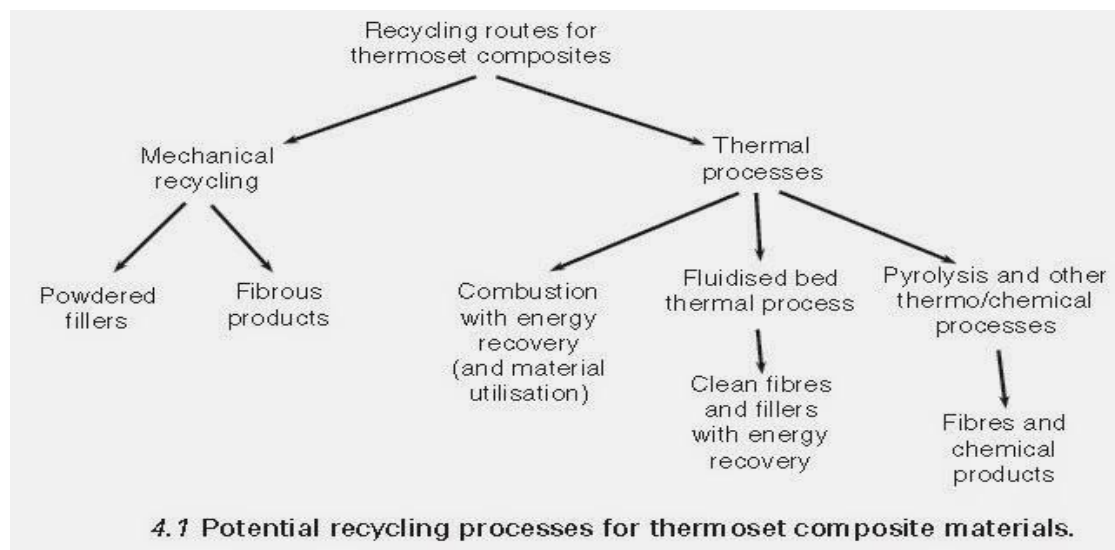
Υπάρχει ένας αριθμός τεχνολογιών ανακύκλωσης σύνθετων υλικών οι οποίες έχουν αναπτυχθεί ειδικά για θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά. Οι κύριες κατηγορίες είναι δύο και είναι η μηχανική ανακύκλωση και η θερμική.

### **Μηχανική ανακύκλωση**

Η τεχνικές μηχανικής ανακύκλωσης έχουν διερευνηθεί για σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού αλλά και για σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα, αλλά η πιο εκτενής μελέτη έχει γίνει για τα σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού.

Τα σύνθετα υλικά τοποθετούνται σε έναν μηχανικό τεμαχιστή, σε αργή ταχύτητα τεμαχίζονται σε μικρά κομμάτια διάστασης 50-100 mm και έπειτα σφυροκοπούνται για να απομακρυνθούν οι ρητίνες αλλά και τυχόν μέταλλα. Έπειτα, η κύρια μείωση μεγέθους των υλικών επιτυγχάνεται σφυροκοπώντας τα σε μεγάλη ταχύτητα αλέθοντας τα και κάνοντας τα λεπτότερα κυμαίνοντας από 10 mm έως και 50 μm. Στην συνέχεια με την βοήθεια κόσκινου ταξινομούνται ανάλογα με τα μεγέθη. Έτσι σε αυτήν την μέθοδο όλα τα συστατικά των σύνθετων υλικών μειώνονται σε μέγεθος και εμφανίζονται στα ανακυκλώσιμα υλικά που προκύπτουν τα οποία είναι μίγματα από ίνες, πολυμερή και πληρωτικά.

Σε αυτήν την μέθοδο μόνο το 30% του υλικού που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να ανακτηθεί και να σχηματίσει νέο σύνθετο υλικό ινών γυαλιού. Λόγω των πληρωτικών που χρησιμοποιούνται είναι δύσκολο να παραχθούν ξανά.



Σχήμα 4.8: Διαδικασίες ανακύκλωσης για σύνθετα υλικά

## Θερμική ανακύκλωση

- **Καύση με ανάκτηση ύλης και ενέργειας**

Τα θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά, όπως όλα τα οργανικά υλικά έχουν θερμογόνο ισχύ και με την καύση τους μπορεί να παραχθεί ενέργεια.. Μετρήσεις πάνω στην θερμογόνο ισχύ αναφέρονται για πολυεστέρες, βινυλεστέρες, φαινόλες, ουρία-φορμαλδεΐδη, και εποξικές ρητίνες. Εκτός από την φορμαλδεΐδη όπου η θερμογόνο ισχύ της είναι γύρω στα 15,700 kJ/kg, στις υπόλοιπες ρητίνες είναι κατά προσέγγιση γύρω στα 30,000 kJ/kg.

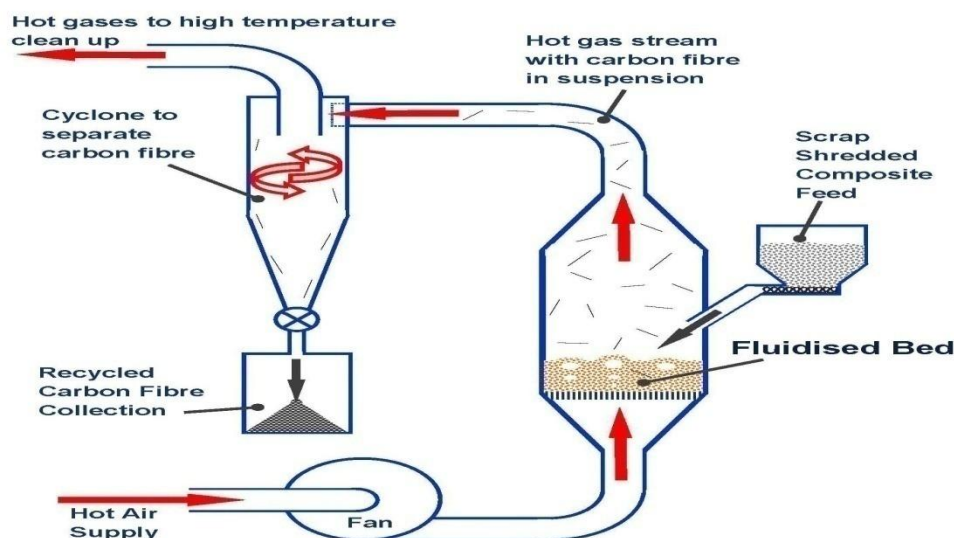
Με τη καύση ορισμένα ορυκτά υλικά πληρώσεως που υπάρχουν στα υλικά αποσυντίθενται και απορροφούν ενέργεια, για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά επιβραδυντικά ανάφλεξης. Βέβαια, ακόμα και, με την χρήση των επιβραδυντικών αυτών για την μείωση της αρχικής ανάφλεξης, η ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται είναι μικρή σε σύγκριση με την θερμογόνο ισχύ της ρητίνης.

Η ενέργεια που απορροφάται από το υδροξείδιο του αργιλίου είναι 1000 kJ/kg, έτσι, αν υπάρχει τόσο υδροξείδιο του αργιλίου όσο και πολυμερές στο σύνθετο υλικό η θερμογόνο αξία θα μειωθεί κατά 3,3%.

- **Ανακύκλωση ινών με θερμική κατεργασία μέσω ρευστοποιημένης κλίνης.**

Τα σύνθετα υλικά προς ανακύκλωση αρχικά μειώνονται σε μέγεθος στα 25mm μέσω εξειδικευμένης διαδικασίας και έπειτα εισέρχονται σε έναν ρευστοποιημένο κλίβανο. Είναι κλίβανος που εσωτερικά αποτελείται από σκόνη πυριτίου με μέγεθος κόκκων στα 0,85 mm. Η ρευστοποιημένη σκόνη αναμιγνύεται με την βοήθεια καυτού αέρα με ταχύτητα 0,4 έως 1,0 m/s, ενώ θερμαίνεται με κατάλληλη αντίσταση σε θερμοκρασία από 450 έως 550 °C. Έτσι, διασπώνται οι ίνες και τα υλικά πλήρωσης από το σύνθετο. Έπειτα εισέρχονται σε έναν δευτερεύοντα υψηλής θερμοκρασίας διαχωριστή όπου πλέον το πολυμερές είναι πλήρως οξειδωμένο. Τέλος, οι ίνες και τα πληρωτικά με την βοήθεια ενός 'κυκλώνα' μέσα στον διαχωριστή, διαχωρίζονται αποθηκεύοντας τις ίνες προς ανακύκλωση σε κατάλληλη αποθήκη απομακρύνοντας τα πληρωτικά με την βοήθεια ζεστού αέρα από τις κατάλληλες εξόδους.

## Fluidised Bed Carbon Fibre Recycling Process

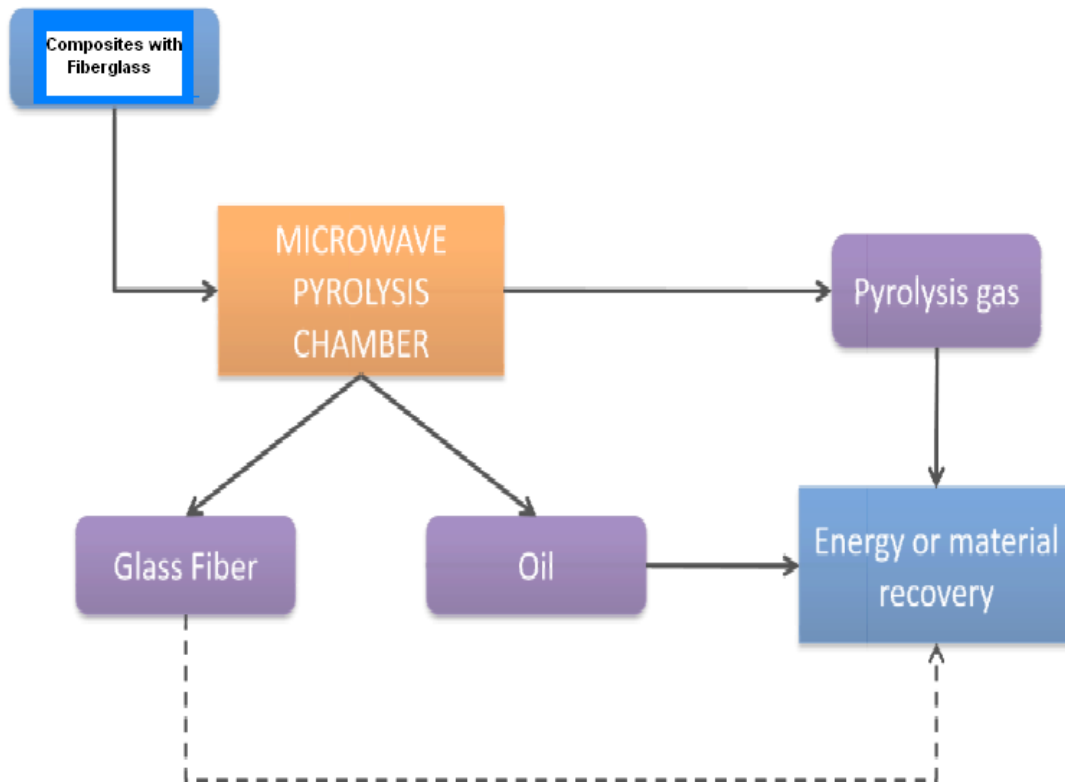


Σχήμα 4.9: Ανακύκλωση ινών μέσω θερμικής κατεργασίας

- **Πυρόλυση**

Σε αυτή την κατεργασία το απόβλητο του υλικού εκτίθεται σε θερμική επεξεργασία σε αδρανή ατμόσφαιρα και έτσι το πολυμερές υποβαθμίζεται σε υγρό και αέριο. Το αποτέλεσμα της θερμικής κατεργασίας είναι οι ανακυκλωμένες ίνες να χάνουν σημαντικά την δύναμη τους αλλά όχι και τόσο τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Μια νέα μέθοδος έχει αναδυθεί τελευταία. Η πυρόλυση μέσω μικροκυμάτων. Είναι μια θερμική μέθοδος στην οποία τα πολυμερή σύνθετα διασπώνται σε οργανικά (ρητίνη) και ίνες γυαλιού σε αδρανή ατμόσφαιρα. Στην πράξη, τα σύνθετα υλικά θερμαίνονται με μικροκύματα 400 έως 600 °C χωρίς την παρουσία οξυγόνου. Έτσι το πολυμερές διασπάται σε ίνες και πληρωτικά (αέρια και υγρά). Τα μικροκύματα ζεσταίνουν το σύνθετο υλικό πιο ομοιόμορφα από άλλες θερμικές μεθόδους για αυτό είναι και πιο αξιόπιστη μέθοδος. Επίσης ο χρόνος έκθεσης στην θερμότητα είναι λιγότερος άρα χρειάζεται και λιγότερη ενέργεια. Ακόμα, η μέθοδος αυτή παράγει από 5 έως 20% λιγότερα αέρια. Τέλος, το ποσοστό ανακύκλωσης ινών γυαλιού του προϊόντος είναι υψηλότερο σε σχέση με άλλες μεθόδους.



Σχήμα 4.10: Πυρόλυση μέσω μικροκυμάτων

- **Χημική ανακύκλωση**

Σε αυτήν την μέθοδο πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των ρητινών με τις ίνες χάρις την χρήση χημικών. Αυτή η μέθοδος έχει πιθανούς κινδύνους προς το περιβάλλον και επίσης είναι πολύ δαπανηρή. Επίσης, υπάρχουν και η υδρόλυση, η γλυκόλυση, και η σολβόλυση.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όλες οι παραπάνω μέθοδοι παρουσιάζουν μειονεκτήματα, ειδικά στο εμπορικό κομμάτι λόγω μεγάλου κόστους, για αυτό τον λόγο συνεχίζεται ακόμα οι εξέλιξη τους ειδικά στο θέμα κατανάλωσης ενέργειας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΥΛΙΚΑ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

### 5.1 Κατασκευή των δοκιμίων

#### 1<sup>η</sup> πλάκα:

Το υλικό που εξετάζει η παρούσα πτυχιακή είναι epoxy οπλισμένο με ύφασμα γυαλιού(Glass Woven),GFRE(glass fiber reinforced epoxy) τύπου E-glass σε μορφή υαλοϋφάσματος.

Το σύνθετο υλικό αποτελείται από (9) εννιά στρώσεις υαλοϋφάσματος interglass 60x45 πάχους 3.3mm και 290 gr/m<sup>2</sup> . Οι στρώσεις συγκολλούνται μεταξύ τους με Epoxy Resin LF.

#### 2<sup>η</sup> πλάκα:

Το υλικό που εξετάζει η παρούσα πτυχιακή είναι epoxy οπλισμένο με ύφασμα γυαλιού(Glass Woven),GFRE(glass fiber reinforced epoxy) τύπου E-glass σε μορφή υαλοϋφάσματος.

Το σύνθετο υλικό αποτελείται από (12) δώδεκα στρώσεις υαλοϋφάσματος interglass 50x32 πάχους 4mm και 290 gr/m<sup>2</sup> . Οι στρώσεις συγκολλούνται μεταξύ τους με Epoxy Resin LF + LF1.

### 5.2 Περιγραφή κατασκευής του υλικού

Η κατασκευή του υλικού πραγματοποιήθηκε, αποκλειστικά στο εργαστήριο του κ. Ατζολετάκη Αγαπητού στην βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου με την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθεια του.

Στάδια κατασκευής:

1. Κόβουμε από το ρολό του υαλοϋφάσματος τον απαιτούμενο αριθμό τεμαχίων με τις επιθυμητές διαστάσεις για την κάθε πλάκα ξεχωριστά, σημειώνοντας την κύρια διεύθυνση των ινών.



Εικόνα 5.1 Ρολό υαλοϋφάσματος



Εικόνα 5.2 Τεμάχιο σε επιθυμητές διαστάσεις

2. Για να δημιουργήσουμε στο υλικό μας λεία επιφάνεια χρησιμοποιήσαμε ως βάση της κατασκευής επιφάνεια μελαμίνης, με συμαδμένες τις κατάλληλες διαστάσεις της πλάκας, χωρίς τυχόν ρωγμές ή εξογκώματα. Τα οποία θα επηρέαζαν αρνητικά την μηχανική συμπεριφορά του υλικού.



Εικόνα 5.3 Επιφάνεια βάσης

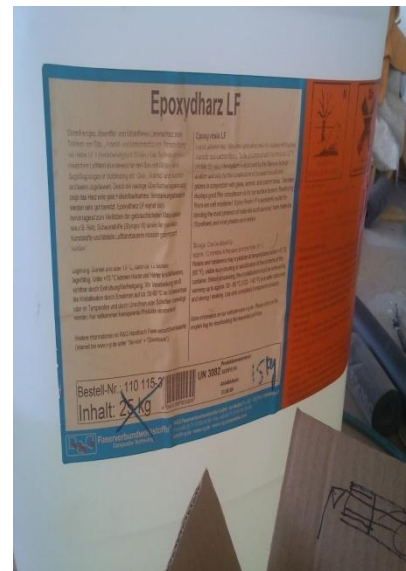
3. Επίσης για την επίτευξη ακόμα πιο λείας επιφάνειας τοποθετήθηκε κερί πάνω σε σφουγγάρι και με κυκλικές κινήσεις έγινε η επάληψη του θρανίου. Έπειτα με εφημερίδα σκουπίστηκε το κερί με κυκλικές κινήσεις και τοποθετήθηκε αποκολλητικό υγρό κερί ώστε να μην κολλήσει η πλάκα στην μελαμίνη.



4. Στην συνέχεια παρασκευάζουμε το υλικό της μήτρας που αποτελείται από κόλλα Epoxy resin LF και σκληρυντή HARTER LF1 σε αναλογία βάρους 100/40. Δηλαδή για κάθε 100 gr ρητίνης 40gr σκληρυντή. Το βάρος μετρήθηκε σε ζυγαριά ακρίβειας γραμμαρίου.



Εικόνα 5.4 Σκληρυντής τύπου HARTER LF1

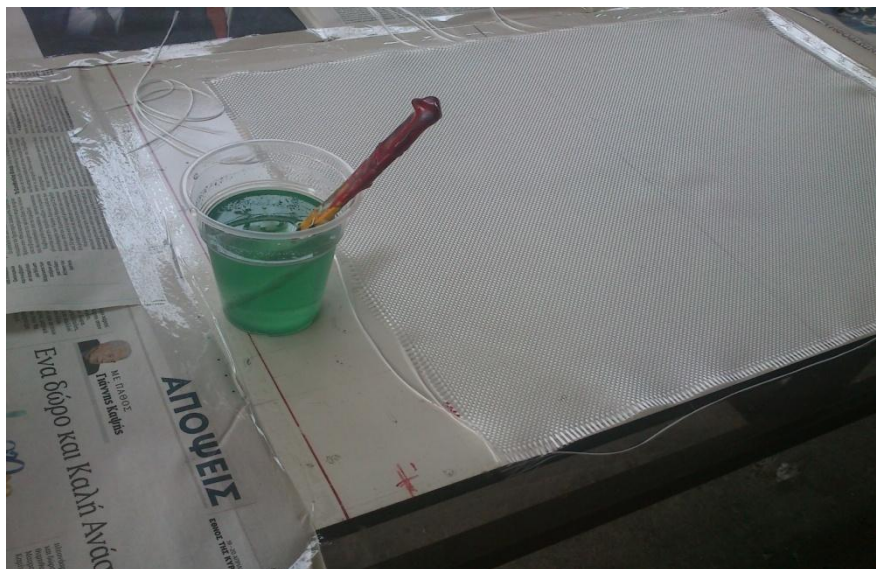


Εικόνα 5.5 Εποξική ρητίνη



Εικόνα 5.6 Ζυγαριά μέτρησης αναλογιών

5. Αφού τοποθετηθούν μαζί σε δοχείο σκληρυντής και ρητίνη αναδεύονται μεταξύ τους με ειδικό πινέλο.



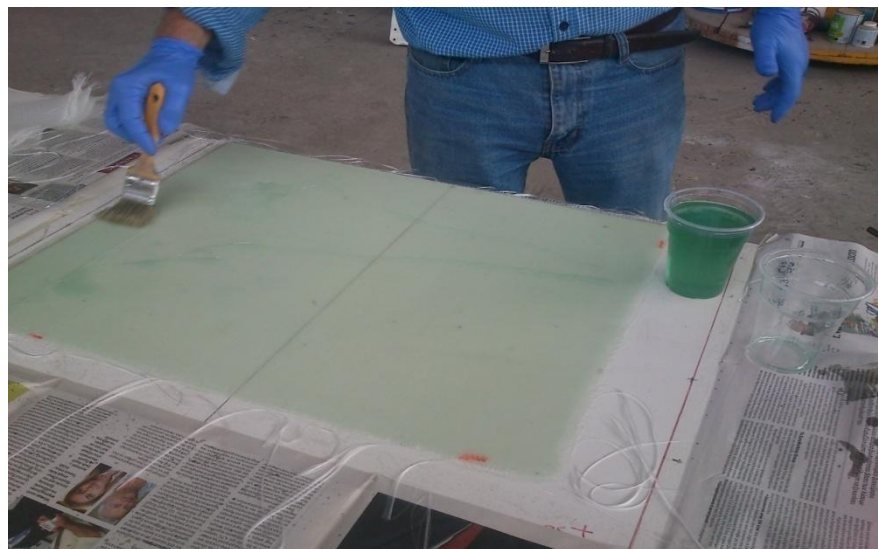
Εικόνα 5.7 Ανάδευση ρητίνης-σκληρυντή

6. Για την αποφυγή φυσαλίδων στο μίγμα, οι οποίες μπορεί να επιφέρουν κακή διεπιφάνεια των ινών στο υλικό γίνεται μεταφορά του μίγματος σε άλλο δοχείο. Αυτή την φορά όμως χρησιμοποιήθηκε ύφασμα ώστε να περάσει το μίγμα χωρίς φυσαλίδες.



Εικόνα 5.8 Μεταφορά μίγματος για την αποφυγή φυσαλίδων

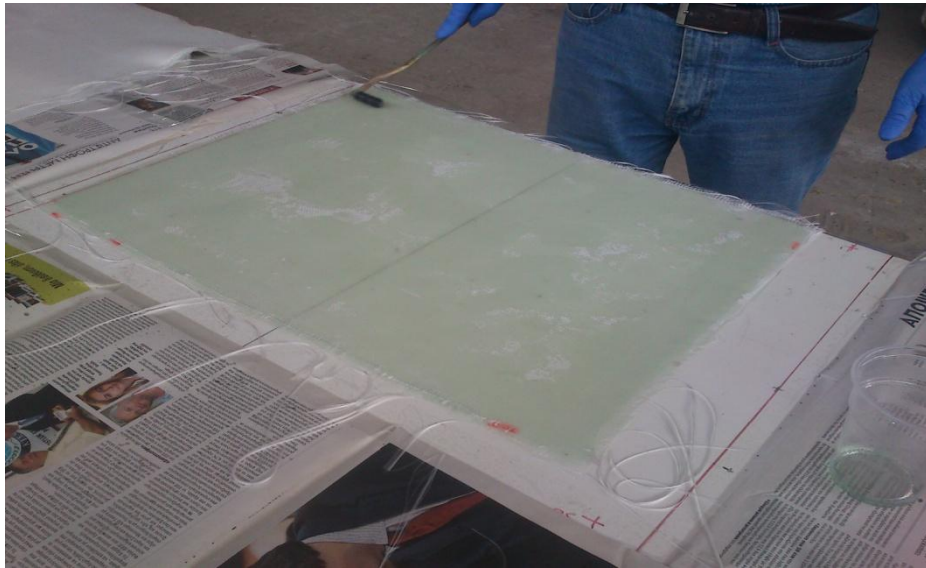
7. Στην συνέχεια το τελικό μίγμα εφαρμόζεται στην επιφάνεια του καλουπιού και αρχίζει η επάλειψη του υαλοϋφάσματος με ειδικό βουρτσάκι. Λόγω ελάχιστου χρονικού περιθωρίου μέχρι το κρίσιμο σημείο αύξησης του ιξώδους το υλικό αναμιγνύεται σε δόσεις.



Εικόνα 5.9 Επάλειψη υλικού στο υαλοϋφασμα



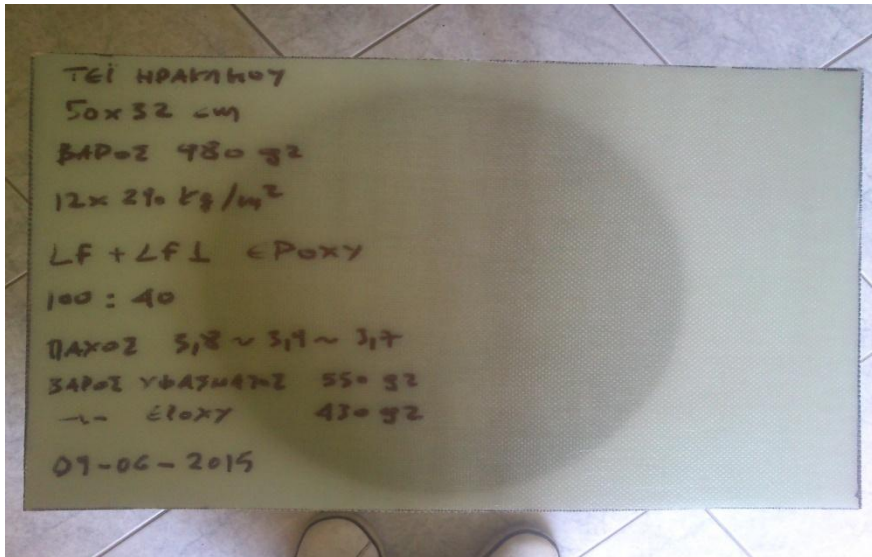
8. Λόγω δημιουργίας εγκλεισμάτων αέρα ανάμεσα στις στρώσεις του υαλοϋφάσματος αλλά και για την κατάλληλη μεταφορά του μίγματος σε όλη την επιφάνεια εφαρμόζεται τοπική πίεση με την βοήθεια ενός ρολού.



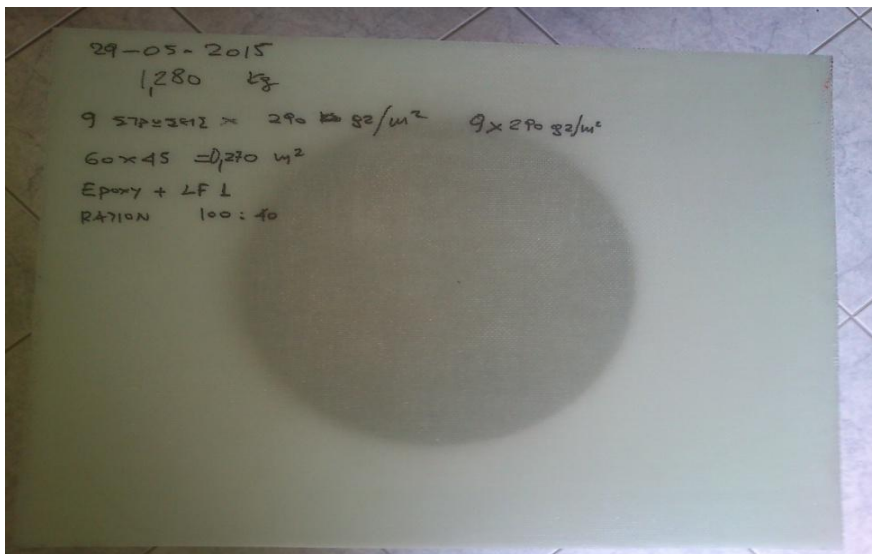
Εικόνα 5.10 Εφαρμογή πίεσης του υλικού με ρολό

9. Τέλος μετά την τοποθέτηση και των (9) εννέα στρώσεων η πλάκα αφέθηκε για ένα 24ωρο στην επιφάνεια πριν την αποκόλληση της. Και έμεινε υπό περιβαλλοντικές συνθήκες για μια βδομάδα μέχρι να στεγνώσει το μίγμα.

Η διαδικασία δημιουργίας της δεύτερης πλάκας έγινε με τα ίδια ακριβώς βήματα.



Εικόνα 5.11 Πλάκα στηριγμάτων

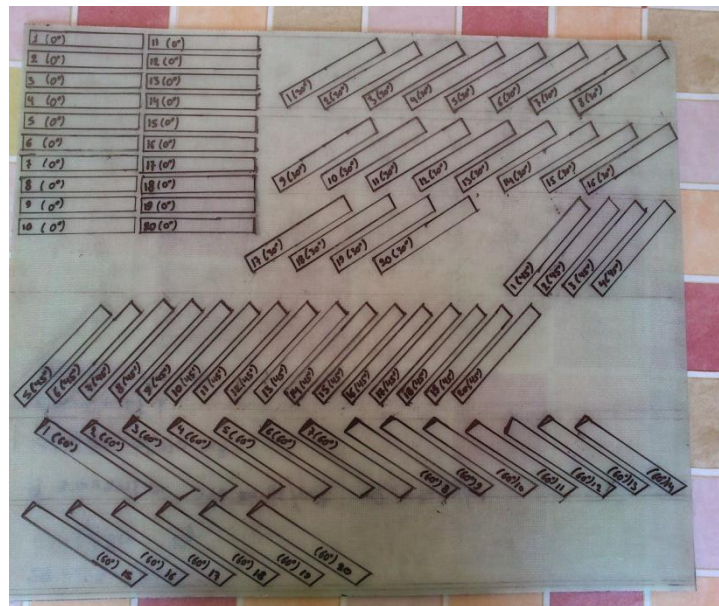


Εικόνα 5.12 Πλάκα δοκιμίων

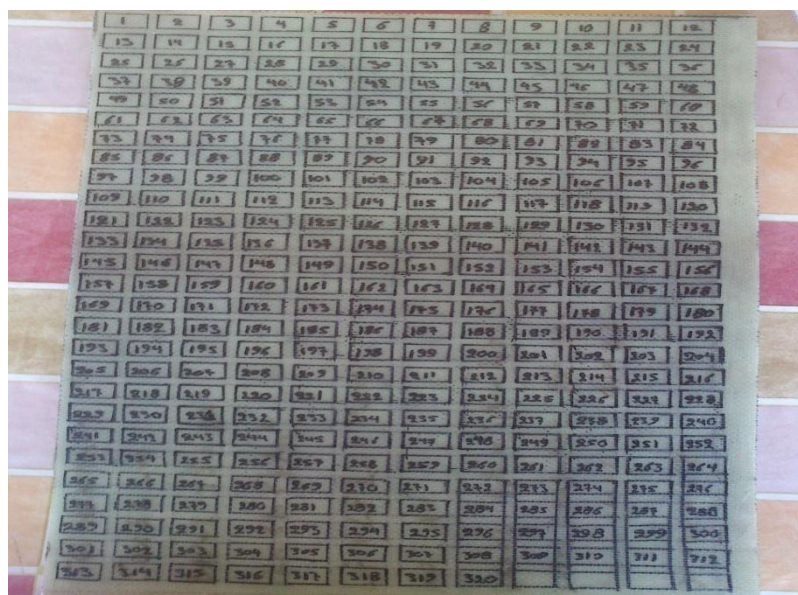
### 5.3 Σχεδίαση των δοκιμίων

Η σχεδίαση των δοκιμίων έγινε με την καθοδήγηση του κ. Κονταξάκη στο εργαστήριο αιολικής ενέργειας του Τ.Ε.Ι .Αρχικά οι πλάκες σχεδιάστηκαν στο AutoCAD με την ακριβή μορφή των δοκιμίων, καθώς και την ακριβή γωνία κοπής τους.

Έπειτα, με την βοήθεια κατάλληλου χάρακα, σχεδιάστηκαν επάνω στην πλάκα. Τα δοκίμια και τα στηρίγματα καταμετρήθηκαν και γράφτηκαν οι γωνίες κοπής τους επάνω στις πλάκες.



Εικόνα 5.13 Σχεδιασμένη πλάκα δοκιμίων



Εικόνα 5.14 Σχεδιασμένη πλάκα στηριγμάτων

## 5.4 Κοπή και μορφοποίηση των δοκιμίων

Μετά τη σχεδίαση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η κοπή τους. Η κοπή των δοκιμίων έγινε σε σταθερό τροχό κοπής. Ενώ η κοπή των στηριγμάτων σε τροχό κοπής μεταβαλλόμενης γωνίας. Η κοπή έγινε στο εργαστήριο των Αφών Σπανού με την πολύτιμη βοήθεια τους.



Εικόνα 5.15 Κοπή Δοκιμίων

Έπειτα, ξανά στο αιολικό εργαστήριο του Τ.Ε.Ι τα κομμένα πλέον δοκίμια μετρήθηκαν και ζυγίστηκαν με την βοήθεια παχύμετρου και ζυγαριάς ακρίβειας γραμμαρίων. Οι μετρήσεις τους καταγράφηκαν σε αρχείο Excel.



## 5.5 Σύνδεση δοκιμίων με στηρίγματα

Στη συνέχεια τα στηρίγματα τοποθετήθηκαν πάνω στα δοκίμια με εποξική κόλλα δυο συστατικών. Σε απόσταση 38,1mm το ένα στήριγμα με το άλλο σύμφωνα με το πρότυπο D695-10.



Εικόνα 5.16 Έτοιμο δοκίμιο

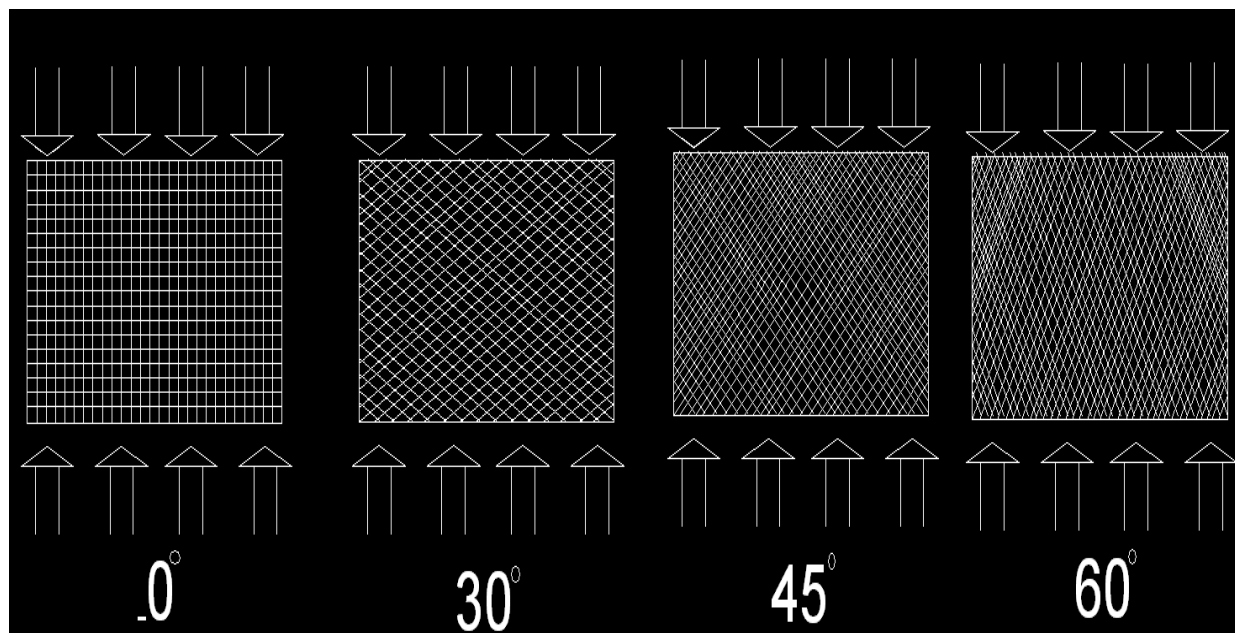


Εικόνα 5.17 Δοκίμια έτοιμα για δοκιμασία θλίψης



## 5.6 Προσανατολισμός κοπής

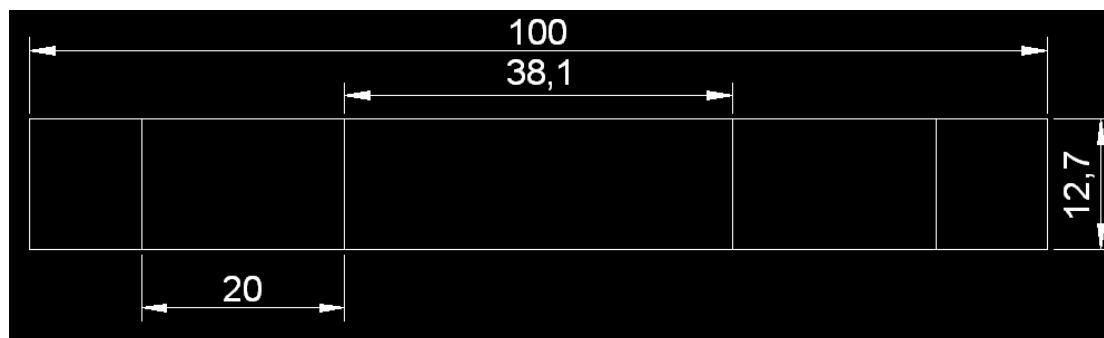
Οι διαφορετικοί προσανατολισμοί κοπής των δοκιμίων πραγματοποιήθηκαν ώστε να βγάλουμε συμπεράσματα για την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων σε περίπτωση θλίψης σε διαφορετικές κατευθύνσεις. Τα δοκίμια σχεδιάστηκαν και δημιουργήθηκαν σε (4) τέσσερις διαφορετικές διευθύνσεις οι οποίες είναι σε,  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ , και  $60^{\circ}$ .



Σχήμα 5.18 Προσανατολισμός κοπής των δοκιμίων

Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D695-10 και είχαν τις διαστάσεις και την διαμόρφωση που φαίνεται στο σχήμα 5.19

Επίσης, τα στηρίγματα των δοκιμίων τοποθετήθηκαν σε απόσταση 38.1mm μεταξύ τους σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D695-10.



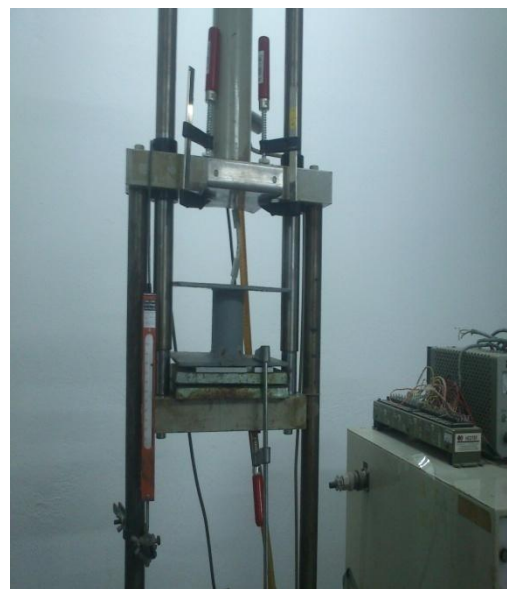
Σχήμα 5.19 Διαστάσεις δοκιμίων και στηριγμάτων σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D695-10

## 5.7 Περιγραφή δοκιμασίας θλίψης

Για τη δοκιμασία θλίψης χρησιμοποιήθηκε η μηχανή εφελκυσμού- θλίψης του εργαστηρίου Τεχνολογίας Υλικών με κατάλληλη διαμόρφωση διάταξης των δοκιμίων.



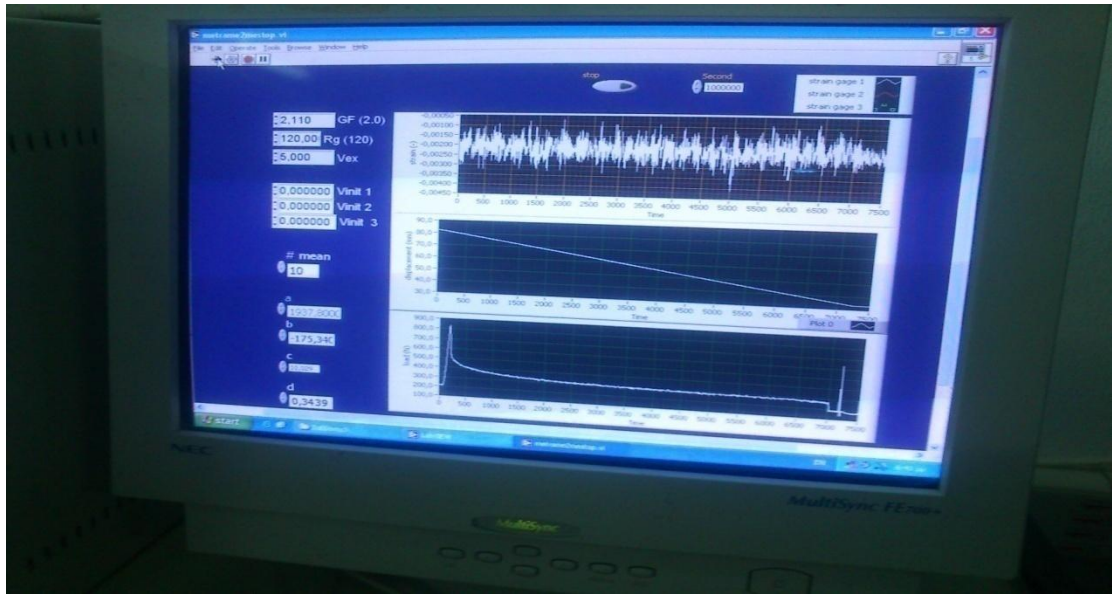
Σχήμα 5.20 Συσκευή Εφελκυσμού-θλίψης



Σχήμα 5.21 Διάταξη για θλίψη

Η μηχανή εφελκυσμού αποτελείται από ένα υδραυλικό σύστημα της εταιρίας Schenck trebel.

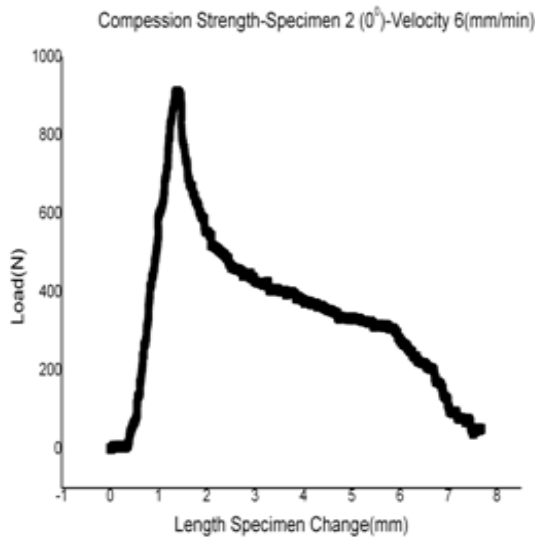
Το εφαρμοζόμενο φορτίο θλίψης (compressive load) μετριέται με τον αισθητήρα φορτίου (load cell)-τύπου **GLG-2B** με ευαισθησία (- +) 1 Kp, ακρίβειας (- +) 0.5%, και η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου με τον αισθητήρα μήκους (extensometer) τύπου SDP-100C με ακρίβεια (- +) 0,01mm, και **γραμμικότητα** 0.2% Ro. Οι δύο αισθητήρες συνδέονται με κατάλληλη κάρτα σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την μεταφορά των δεδομένων μέτρησης φορτίου , μεταβολές μήκους. Στον υπολογιστή είναι εγκατεστημένο το πρόγραμμα LabView για την καταγραφή των δεδομένων. Μετά το τέλος κάθε πειράματος παίρνουμε στην οθόνη του υπολογιστή τα τρία διαγράμματα του σχήματος 5.22 τα οποία δίνει το πρόγραμμα LabView.



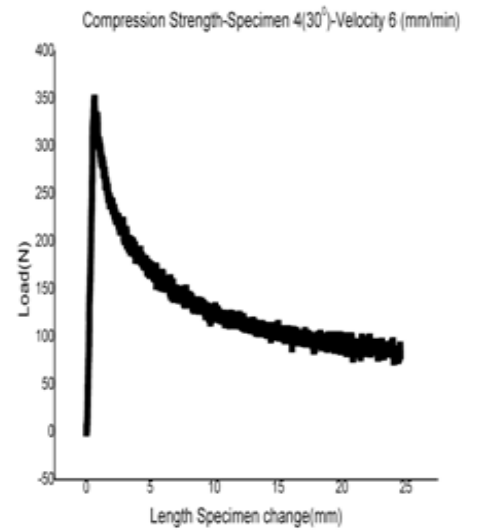
Σχήμα 5.22 Απεικόνιση αποτελεσμάτων δοκιμασίας από το πρόγραμμα LabView

Οι μετρήσεις καταγράφονται με την μορφή αρχείων .txt τα οποία μεταφέρονται πρώτα στο Excel όπου γίνεται κατάλληλη πρώτη επεξεργασία των δεδομένων. Στην συνέχεια μεταφέρονται στο πρόγραμμα Origin Pro 8 για την δημιουργία των διαγραμμάτων <<Φορτίου (Load) (N) –Μεταβολή μήκους (displacement) (mm) >>.

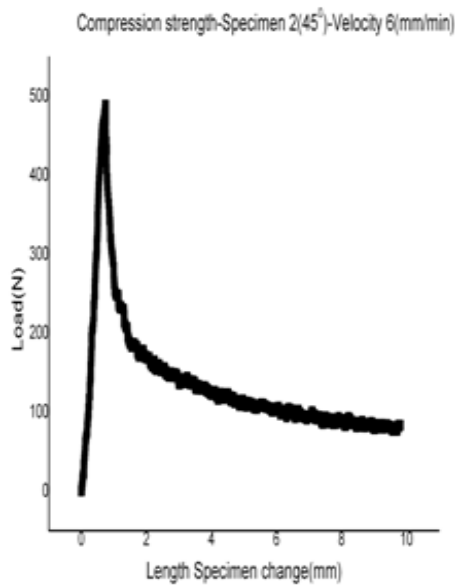
Στο σχήμα 5.23 που ακολουθεί δίδονται τυπικά διαγράμματα Φορτίου – Μεταβολής μήκους.



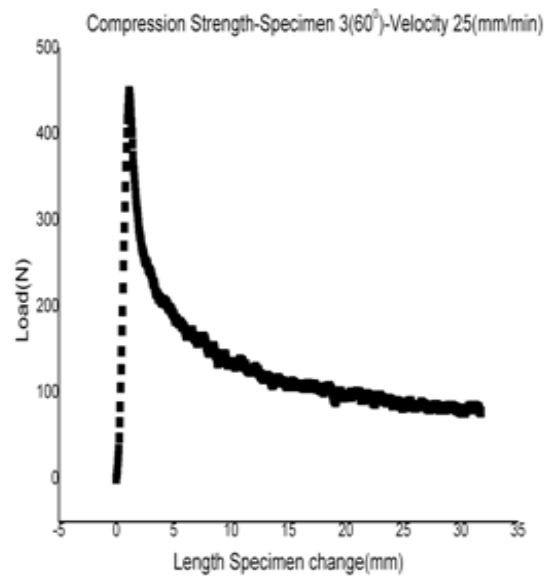
α)



β)



γ)



δ)

Σχήμα 5.23 Τυπικά διαγράμματα Φορτίου-Μεταβολής μήκους για δοκίμια με διάφορους προσανατολισμούς. (α)  $0^\circ$  ,  $30^\circ$  ,  $45^\circ$  , και  $60^\circ$  .

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 6.1 Αποτελέσματα

Επιδίωξη της εργασίας μου ήταν να μελετήσω τη συμπεριφορά σε θλίψη δοκιμίων, πολυστρωματικών κατασκευασμένων από εποξική ρητίνη με ενίσχυση υαλοϋφασμα. Επιπλέον μελέτησα τη συμπεριφορά σε θλίψη σε διάφορους προσανατολισμούς των ινών του υαλοϋφάσματος (της ενίσχυσης) σε σχέση με τη διεύθυνση θλίψης. Στο σχήμα 5.18 του κεφαλαίου 5.6 απεικονίζονται γραφικά οι διαφορετικοί προσανατολισμοί των δοκιμίων που μετρήθηκαν.

Τέλος ενδιέφερε να μελετήσω την επίδραση της ταχύτητας εφαρμογής της τάσης θλίψης στην αντοχή θλίψης των υλικών που μετρήθηκαν.

Η βασική δοκιμασία θλίψης έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D695-10. Η προβλεπόμενη από το πρότυπο ταχύτητα εφαρμογής της θλιπτικής τάσης είναι 5-7 mm/min. Για να μελετήσουμε την επίδραση της ταχύτητας αυτής στις μηχανικές ιδιότητες επιλέξαμε μια επιπλέον ταχύτητα 25 mm/min.

Η ταχύτητα εφαρμογής της τάσης θλίψης καθορίζει την ταχύτητα παραμόρφωσης (strain rate).

Στη βιβλιογραφία για τις αντίστοιχες μελέτες χρησιμοποιείται η ταχύτητα παραμόρφωσης η οποία υπολογίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας θλίψης προς το μήκος του δοκιμίου.

Στην περίπτωση της πτυχιακής μου το μήκος ήταν 100mm και συνεπώς οι ταχύτητες που εφαρμόστηκαν είναι:

1. 0,06 ( $\text{min}^{-1}$ ) Για ταχύτητα θλίψης 6 mm/min.
2. 0,25 ( $\text{min}^{-1}$ ) Για ταχύτητα θλίψης 25 mm/min.

Από τα διαγράμματα Φορτίου-Μεταβολής μήκους (βλέπε σχήμα 5.23 κεφάλαιο 5.7) προσδιορίστηκε η μέγιστη τιμή φορτίου θλίψης πριν από την αστοχία του δοκιμίου.

Το μέγιστο φορτίο αυτό  $F_{TS}(N)$  πριν από την θραύση του δοκιμίου αντιστοιχεί στο φορτίο αντοχής θλίψης το οποίο διαιρούμενο με την επιφάνεια διατομής μας δίνει την αντοχή θλίψης (compressive stress)  $\sigma_{TS}$  (MPa).

Η παράμετρος αυτή λόγω της ψαθυρότητας του υλικού είναι η μοναδική παράμετρος τάσης που μπορούμε να προσδιορίσουμε με αξιοπιστία.

Όλα τα διαγράμματα φορτίου – μεταβολής μήκους εμφανίζουν ένα ευθύγραμμο τμήμα πριν το μέγιστο φορτίο θλίψης. Από το ευθύγραμμο αυτό

τμήμα μπορούμε να υπολογίσουμε το μέτρο ελαστικότητας θλίψης του υλικού (Compressive modulus of elasticity) (GPA )ως εξής:

α) Από το ευθύγραμμο τμήμα του φορτίου –μεταβολής του μήκους του διαγράμματος υπολογίζω την κλίση ( $F/\Delta L$ ) (N/mm). Η κλίση στο επιλεγμένο τμήμα υπολογίζεται από το πρόγραμμα Origin Pro 8. Σε όλες τις περιπτώσεις ο συντελεστής συσχέτισης της ευθείας γραμμής ήταν  $\geq 0,99$ .

β) Από τη σχέση  $\ll \sigma = E * \epsilon \gg$  έχουμε

$$\Rightarrow (F / A_0) = E ( \Delta L / l_0) \Rightarrow E = (F / \Delta L) * l_0 / A_0 .$$

Όπου

**E = μέτρο ελαστικότητας (modulus of elasticity)**

**$\sigma$  = τάση θλίψης (compressive strength)**

**$\epsilon$  = παραμόρφωση (strain)**

**$\Delta L$  = μεταβολή μήκους δοκιμίου (displacement)**

**$l_0$  = αρχικό μήκος δοκιμίου**

**$A_0$  = αρχική διατομή δοκιμίου**

**$F / \Delta L$  = κλίση**

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των δεδομένων των διαγραμμάτων για κάθε κατηγορία δοκιμίων και ταχύτητα θλίψης. Για κάθε κατηγορία δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν επτά δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο. Οι σκιασμένες τιμές δεν θα ληφθούν υπόψη στους μέσους όρους.

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 1:Γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση θλίψης <math>\Psi= 0</math></b>								
Ταχύτητα 6 (mm/min)								
	Μήκος(mm)	Πλάτος(mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο( N)	Κλίση	Αντοχή (MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPA)
1	102,1	13,3	3,1	40,9	924		22,6	0,0
2	102,3	13,4	3,1	41,4	899	1009	21,7	2,5
3	102,4	13,4	3,1	42,1	1050	1338	24,9	3,3
4	102,5	13,1	3,1	40,8	974	1164	23,9	2,9
5	101,7	13,3	3,1	41,8	865	1144	20,7	2,8
6	102,2	13,4	3,2	42,4	820	1067	19,4	2,6
7	102,7	13,3	3,0	40,6	891	1132	21,9	2,9
ΜΟ							<b>21,70</b>	<b>2,8</b>

Σχήμα 6.1 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi=0$ . Ταχύτητα 6(mm/min).

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 2:Ταχύτητα 25(mm/min)</b>								
	Μήκος( mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο( N)	Κλίση	Αντοχή (MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPA)
1	102,2	13,4	3,1	41,0	1070	1473	26,1	3,7
2	101,0	13,3	3,1	41,4	952	1343	23,0	3,3
3	102,2	13,3	3,1	41,6	1057	1460	25,4	3,6
4	101,7	13,4	3,0	39,9	720	1167	18,0	3,0
5	101,7	13,3	3,0	39,6	780	1210	19,7	3,1
6	101,6	13,4	3,0	40,1	799	1138	19,9	2,9
7	101,3	13,4	3,0	40,4	879	1177	21,8	3,0
ΜΟ							<b>22,0</b>	<b>3,1</b>

Σχήμα 6.2 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi=0$ . Ταχύτητα 25(mm/min).

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 3:Γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση θλίψης <math>\Psi= 30</math></b>								
Ταχύτητα 6(mm/min)								
	Μήκος( mm)	Πλάτος( mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο( N)	Κλίση	Αντοχή( MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)
1	102,0	13,4	3,0	40,9	387	730	9,5	1,8
2	101,5	13,4	3,1	40,9	356	443	8,7	1,1
3	100,8	13,4	3,1	40,8	580	860	14,2	2,1
4	101,3	13,2	3,0	40,2	350	658	8,7	1,7
5	102,3	13,2	3,1	40,4	500	648	12,4	1,6
6	101,9	13,3	3,1	40,8	386	573	9,5	1,4
7	100,9	13,3	3,0	39,9	378	717	9,5	1,8
Μ Ο							<b>9,7</b>	<b>1,7</b>

Σχήμα 6.3 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi=30$ . Ταχύτητα 6 (mm/min).

<b>ΠΙΝΑΚΑΣ 4:Ταχύτητα 25(mm/min)</b>								
	Μήκος( mm)	Πλάτος( mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο( N)	Κλίση	Αντοχή( MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)
8	103,3	13,4	3,0	40,4	300	395	7,4	1,0
9	101,5	13,3	3,1	41,7	450	520	10,8	1,3
1 0	102,0	13,4	3,1	41,6	560	554	13,5	1,4
1 1	100,3	13,4	3,1	42,1	446	547,7	10,6	1,3
1 2	101,6	13,4	3,1	41,4	554	788,27	13,4	1,9
1 3	102,3	13,5	3,1	41,9	487	712,26	11,6	1,7
1 4	103,1	13,4	3,0	40,5	462	561,23	11,4	1,4
Μ Ο							<b>11,9</b>	<b>1,6</b>

Σχήμα 6.4 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi=30$ . Ταχύτητα 25 (mm/min).



**ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση θλίψης  $\Psi = 45$**

Ταχύτητα 6 (mm/min)

	Μήκος( mm)	Πλάτος( mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο (N)	Κλίση	Αντοχή( MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας(GPa)
1	101,7	13,2	3,1	41,0	367	840	8,9	2,1
2	102,6	13,5	3,0	40,2	485	860	12,1	2,2
3	101,9	13,4	3,0	39,9	360	610	9,0	1,6
4	102,6	13,4	3,0	40,3	444	850	11,0	2,2
5	101,6	13,3	3,1	41,4	567	880	13,7	2,2
6	101,1	13,5	3,0	40,9	525	825	12,8	2,0
7	104,1	13,4	3,1	41,3	380	620	9,2	1,6
ΜΟ							<b>9,5</b>	<b>2,0</b>

Σχήμα 6.5 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi = 45$ . Ταχύτητα 6 (mm/min).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Ταχύτητα 25 (mm/min)**

	Μήκος( mm)	Πλάτος( mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο (N)	Κλίση	Αντοχή( MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας(GPa)
8	99,7	13,4	3,0	40,4	471	837	11,7	2,1
9	102,0	13,3	3,1	40,6	450	771	11,1	1,9
10	100,4	13,3	3,1	40,9	713	810	17,4	2,0
11	101,4	13,4	3,2	42,4	512	663	12,1	1,6
12	100,3	13,3	3,1	41,2	454	589	11,0	1,4
13	101,2	13,4	3,1	41,9	505	720	12,1	1,7
14	101,1	13,4	3,1	41,9	425	620	10,1	1,5
ΜΟ							<b>11,3</b>	<b>1,7</b>

Σχήμα 6.6 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi = 45$ . Ταχύτητα 25 (mm/min).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Γωνία προσανατολισμού ως προς τη διεύθυνση θλίψης  $\Psi=60$**

Ταχύτητα 6 (mm/min)

	Μήκος( mm)	Πλάτος( mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο(N)	Κλίση	Αντοχή( MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας(GPa)
1	99,3	13,5	2,99	40,3	540,6 15	988	13,4	2,4
2	99,8	13,2	2,98	39,5	490,7 49	788	12,4	2,0
3	98,6	13,3	3,02	40,1	494,6 99	786	12,3	1,9
4	100,2	13,4	3,04	40,7	440,8 84	740	10,8	1,8
5	101,5	13,6	3,05	41,5	455,6 26	683	11,0	1,7
6	100,3	13,6	2,97	40,4	484,8 25	870	12,0	2,2
7	100,5	13,3	3,11	41,4	648,7 37	827	15,7	2,0
Μ Ο							<b>11,7</b>	<b>1,9</b>

Σχήμα 6.7 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi=60$ . Ταχύτητα 6 (mm/min).

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Ταχύτητα 25 (mm/min)**

	Μήκος( mm)	Πλάτος( mm)	Πάχος (mm)	Διατομή A (mm <sup>2</sup> )	Φορτίο(N)	Κλίση	Αντοχή( MPA)	Μέτρο Ελαστικότητας(GPa)
8	101,0	13,5	3,02	40,8	545	668	13,4	1,7
9	99,5	13,3	2,97	39,5	475	773	12,0	1,9
1 0	100,1	13,3	2,92	39,0	450	558	11,6	1,4
1 1	101,3	13,3	2,93	39,0	456	637	11,7	1,7
1 2	100,4	13,1	2,90	38,0	509	817	13,4	2,2
1 3	98,7	13,4	2,92	39,2	478	746	12,2	1,9
1 4	100,3	13,4	2,93	39,2	542	860	13,8	2,2
Μ Ο							<b>12,6</b>	<b>1,8</b>

Σχήμα 6.8 Πίνακας Αποτελεσμάτων σε δοκιμασία θλίψης με γωνία προσανατολισμού  $\psi=60$ . Ταχύτητα 25 (mm/min).

Ενδεικτικές φωτογραφίες δοκιμίου μετά τον καταστροφικό έλεγχο θλίψης:



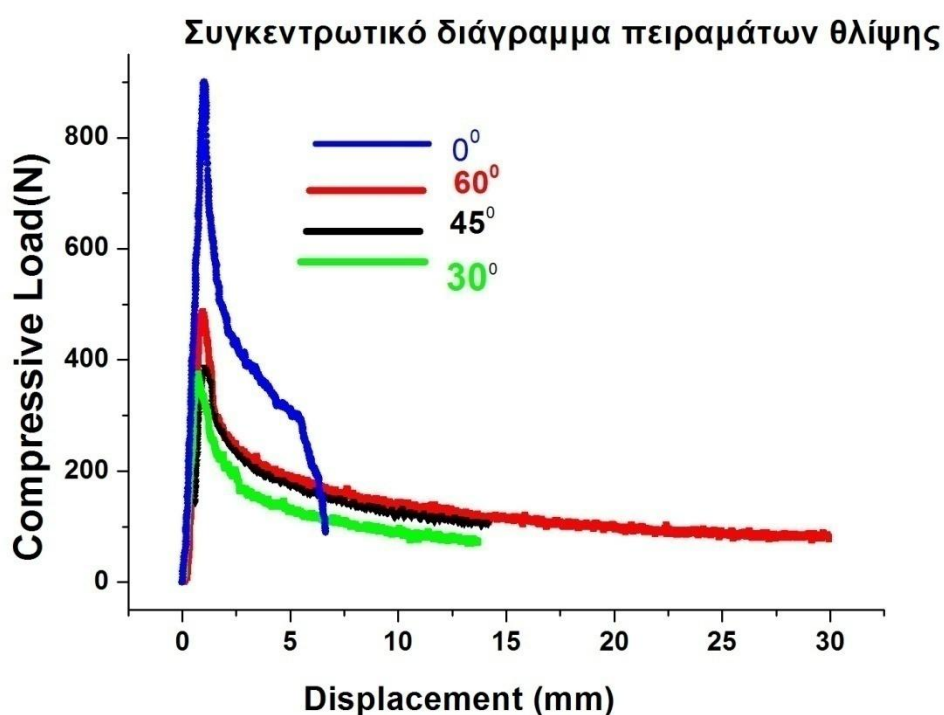
Σχήμα 6.9: Ενδεικτική φωτογραφία δοκιμίου μετά τον καταστροφικό έλεγχο θλίψης



Σχήμα 6.10: Ενδεικτική φωτογραφία δοκιμίου μετά τον καταστροφικό έλεγχο θλίψης

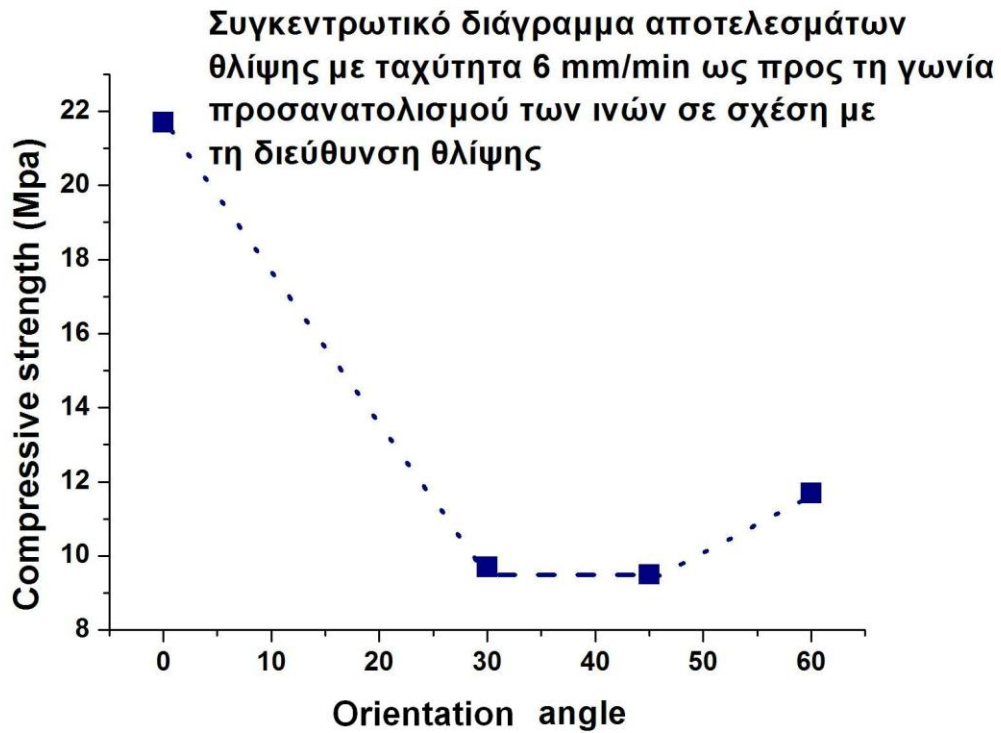
## 6.2 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Οι μορφές των διαγραμμάτων για όλα τα δοκίμια και για τις δύο ταχύτητες παραμόρφωσης δείχνουν να προσομοιάζουν με διαγράμματα ψαθυρών υλικών. Δηλαδή δεν παρουσιάζουν καθόλου πλαστική περιοχή. Μετά την ελαστική περιοχή και τη μέγιστη τιμή η οποία αντιστοιχεί στην αντοχή θλίψης παρατηρείται μια απότομη κατάρρευση της δομής του υλικού. Το υλικό δεν θραύεται αλλά η δομή του κάμπτεται σημαντικά μέχρι την τελική του θραύση. Όμως όπως έδειξαν όλες οι δοκιμασίες το υλικό μετά την μέγιστη τιμή (δηλαδή την αντοχή θλίψης), υφίσταται προοδευτικά τέτοια υποβάθμιση της δομής που δεν εμφανίζει ενδιαφέρον η εξέταση του δεύτερου κλάδου των διαγραμμάτων. Στο σχήμα 6.11 απεικονίζεται ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα Φορτίου(N)-μεταβολής του μήκους(mm) για τους τέσσερις προσανατολισμούς που εξετάσαμε.



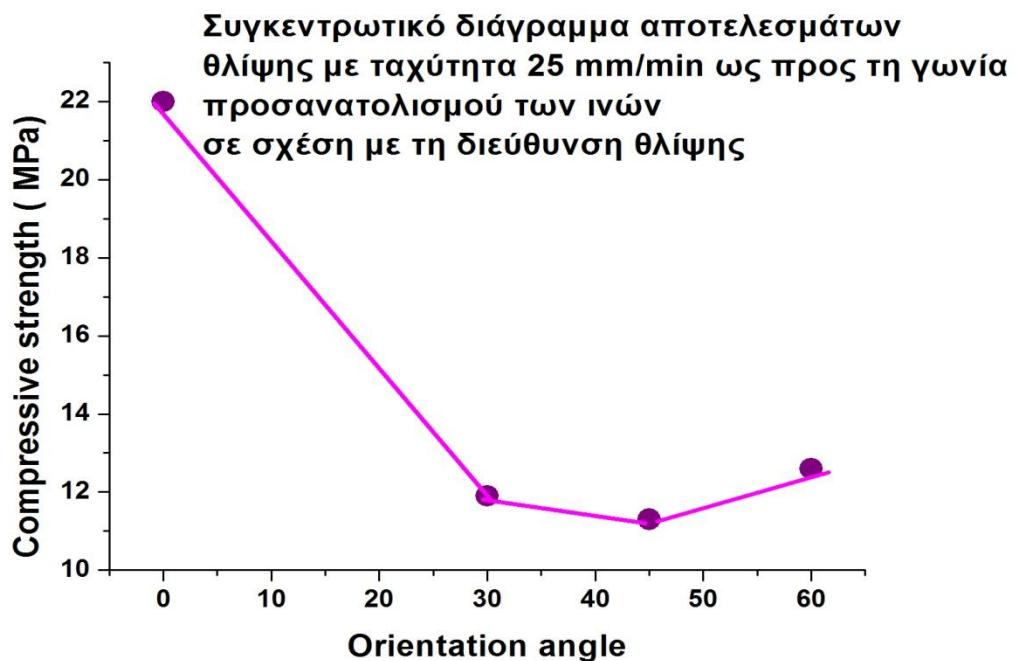
Σχήμα 6.11: Συγκεντρωτικό διάγραμμα πειραμάτων θλίψης για ταχύτητα 6(mm/min).

Η αντοχή θλίψης μειώνεται μέχρι και την γωνία προσανατολισμού 45° και στην συνέχεια στην γωνία 60° φαίνεται η μείωση να είναι μικρότερη απ ότι στις 45°.(Σχήμα 6.11)



Σχήμα 6.12: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων θλίψης με ταχύτητα 6(mm/min) ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση θλίψης.

Ανάλογη εικόνα δείχνουν και τα αποτελέσματα για ταχύτητα 25(mm/min).

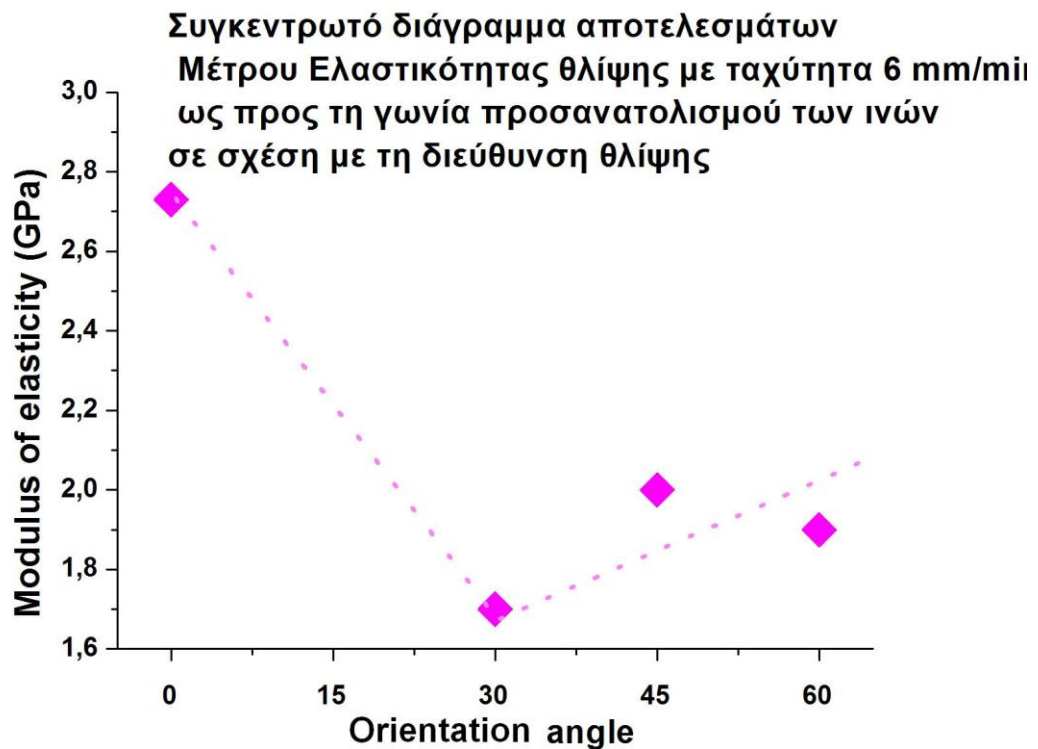


Σχήμα 6.13: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων θλίψης με ταχύτητα 25(mm/min) ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση θλίψης.

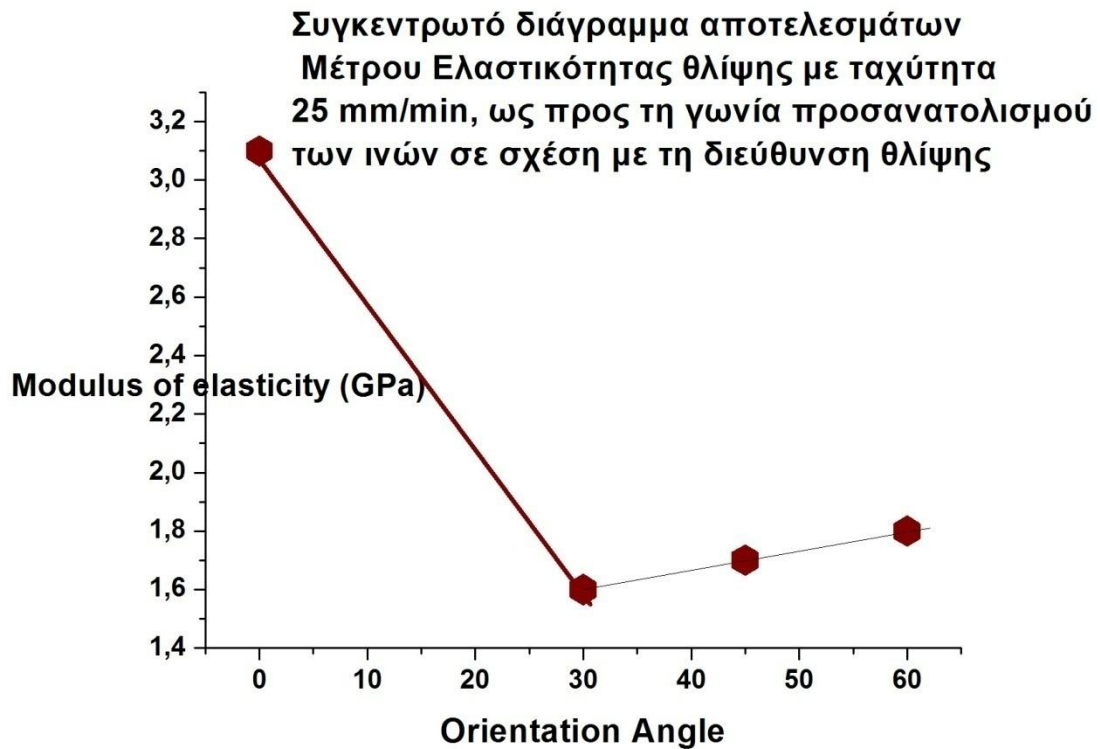


Το μέτρο ελαστικότητας θλίψης για ταχύτητα 6 (mm/min) ελαττώνεται μέχρι την γωνία 30° όπου και εμφανίζει ελάχιστο, αποτέλεσμα που είναι συμβατό με αυτό της αντοχής θλίψης, στη συνέχεια παρατηρείται ότι η μείωση στις 60° είναι μικρότερη από την μείωση στις 30°.

Ασάφεια εμφανίζεται στην μέτρηση του μέτρου ελαστικότητας στις 45°. Ανάλογη εικόνα εμφανίζει το μέτρο ελαστικότητας για ταχύτητα θλίψης 25 (mm/min). (Σχήμα 6.14)



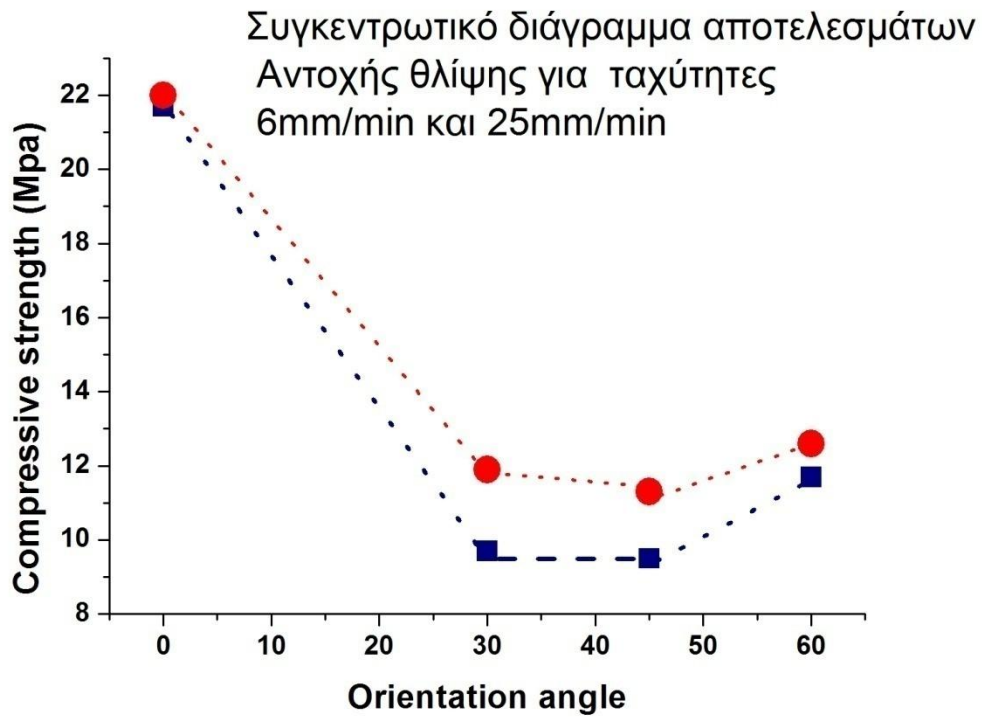
Σχήμα 6.14: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας θλίψης με ταχύτητα 6 (mm/min) ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση θλίψης.



Σχήμα 6.15: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας θλίψης με ταχύτητα 25 (mm/min) ως προς τη γωνία προσανατολισμού των ινών σε σχέση με τη διεύθυνση θλίψης.

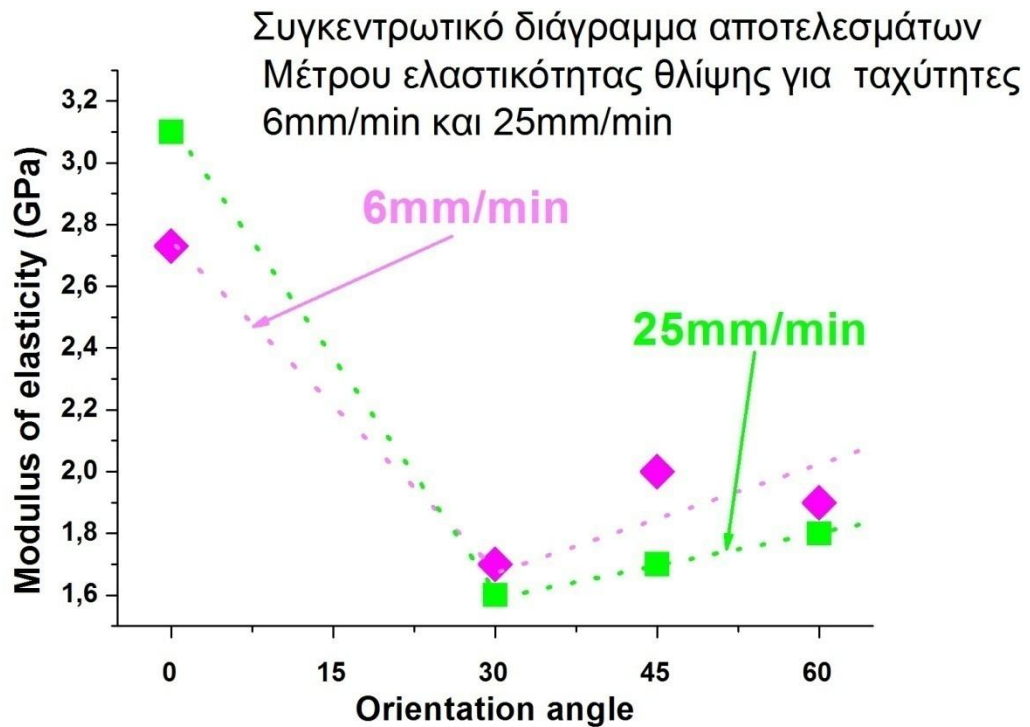
Το συγκεντρωτικό διάγραμμα (σχήμα 6.16) των αποτελεσμάτων αντοχής θλίψης για ταχύτητες 6(mm/min) και 25 (mm/min) δείχνει την ίδια συμπεριφορά του υλικού και για τις δύο ταχύτητες με την επισήμανση ότι η αύξηση της ταχύτητας προκαλεί αύξηση της αντοχής θλίψης για όλες τις γωνίες. Το αποτέλεσμα αυτό είναι συμβατό με δοκιμασίες σε αντίστοιχα υλικά αλλά με μονοδιευθυντική ενίσχυση ινών.





Σχήμα 6.16: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων αντοχής θλίψης για ταχύτητες 6 (mm/min) και 25 (mm/min).

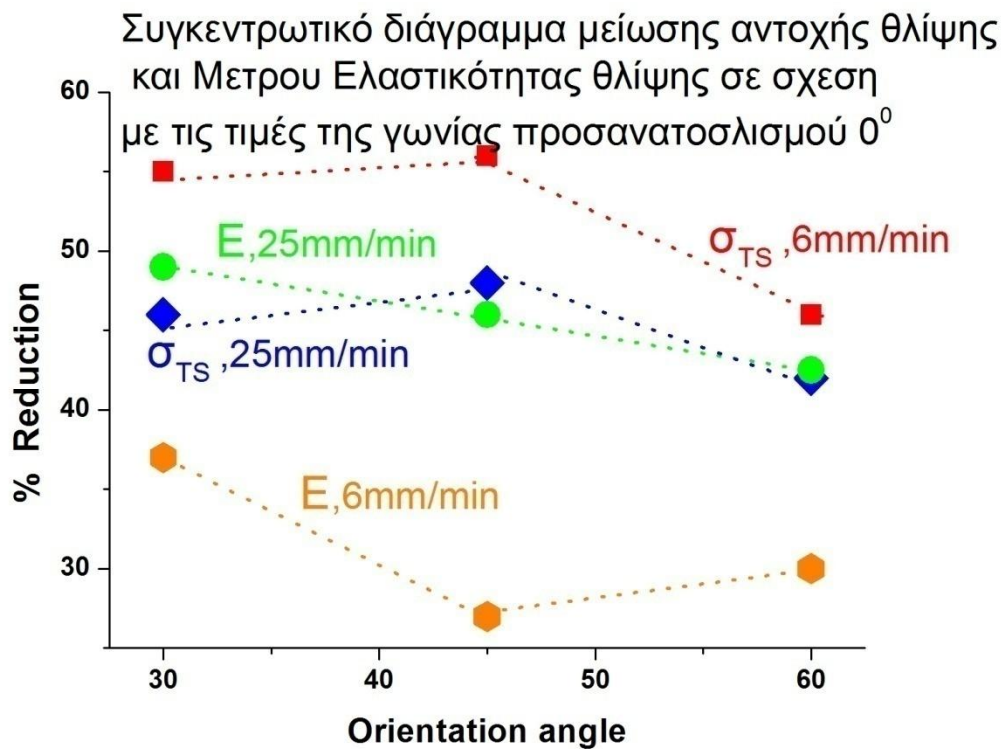
Το συγκεντρωτικό διάγραμμα (σχήμα 6.17) αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας θλίψης δείχνει ίδια συμπεριφορά αντοχής μόνο για γωνία  $0^\circ$ . Η διαφοροποίηση στις  $45^\circ$  και στις  $60^\circ$  μπορεί να οφείλεται στην αβεβαιότητα υπολογισμού της κλίσης στην ταχύτητα των 25(mm/min).



Σχήμα 6.17: Συγκεντρωτικό διάγραμμα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας θλίψης για ταχύτητες 6 (mm/min) και 25 (mm/min).

Στο σχήμα απεικονίζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα % μείωσης της αντοχής θλίψης και του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την τιμή που έχουν για γωνία 0°.

Στη γωνία 30° η μείωση της  $\sigma_{TS}$  για ταχύτητα 6(mm/min) είναι 55% ενώ για ταχύτητα 25 (mm/min) η μείωση είναι 45%. Στην γωνία των 45° η μείωση της  $\langle \sigma_{TS} - 6(\text{mm/min}) \rangle$  είναι 57% και της  $\langle \sigma_{TS} - 25(\text{mm/min}) \rangle$  είναι 48%, ενώ για γωνία 60° η μείωση της  $\langle \sigma_{TS} - 6(\text{mm/min}) \rangle$  είναι 47% και της  $\langle \sigma_{TS} - 25(\text{mm/min}) \rangle$  είναι 43%.



Σχήμα 6.18: Συγκεντρωτικό διάγραμμα % μείωσης των παραμέτρων  $\sigma_{TS}$  (αντοχής θλίψης) και E (μέτρου ελαστικότητας) στις γωνίες  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , και  $60^\circ$  σε σχέση με τις τιμές της γωνίας προσανατολισμού  $0^\circ$ .

Η μελέτη της συνολικής εικόνας των αποτελεσμάτων μου δείχνει ότι είναι συμβατά με ανάλογα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας.

Συγκεκριμένα για υλικά εποxy πολυστρωματικά αλλά με ενίσχυση παράλληλων ινών (μονοδιευθυντικά Epoxy GFR) στην διεύθυνση  $0^\circ$  έχουν την μέγιστη αντοχή και αυτή βαίνει μειώμενη μέχρι την γωνία  $90^\circ$  και στη συνέχεια το φαινόμενο αναστρέφεται.

Το φαινόμενο αυτό είναι εξηγήσιμο καθώς η σταδιακή αλλαγή της γωνίας προσανατολισμού των ινών αλλάζει και την συνεισφορά της μήτρας στην μηχανική αντοχή. Στα μονοδιευθυντικά υλικά όσο αυξάνεται η γωνία προσανατολισμού η συνεισφορά της μήτρας είναι μεγαλύτερη με αποτέλεσμα με τη θλίψη να ρηγματώνεται ευκολότερα και η ρηγμάτωση να εξελίσσεται χωρίς αντίσταση.

Στη περίπτωση μας έχουμε ενίσχυση και προς τις δύο διευθύνσεις.

Καθώς η γωνία διεύθυνσης αλλάζει παρατηρείται μια μείωση μέχρι τις  $45^\circ$  όπου το υλικό συμπιέζεται στη διεύθυνση της διχοτόμου των  $90^\circ$  οπότε και η μήτρα έχει τη μέγιστη συμβολή άρα την μικρότερη αντοχή, και είναι αναμενόμενο ότι καθώς θα μεταβαίνουμε από τις  $45^\circ$  στις  $90^\circ$  το φαινόμενο θα αναστρέφεται λόγω της συμμετρίας του υλικού.

Επίσης ανάλογα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας δείχνουν ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα θλίψης αυξάνεται και η αντοχή θλίψης ή εφελκυσμού των υλικών.

Τα αποτελέσματα μας δείχνουν ανάλογη εικόνα όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Όμως τα αποτελέσματα μας δείχνουν μια οριακά τέτοια εικόνα γιατί η μέγιστη ταχύτητα που μπορούσαμε να επιβάλουμε με τη διαθέσιμη μηχανή ήταν σχετικά μικρή σε σχέση με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας.

Η ασάφεια στις τιμές του μέτρου ελαστικότητας (E) οφείλετε στην αβεβαιότητα προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας κυρίως στη ταχύτητα των 25(mm/min).

### 6.3 Συμπεράσματα

1. Σύμφωνα με τα διαγράμματα φορτίου- προσανατολισμού ινών παρατηρούμε ότι, η αντοχή θλίψης έχει την μέγιστη τιμή της για τις γωνίες σε  $0^\circ$  και για όλες τις υπόλοιπες ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , και  $60^\circ$ ) η αντοχή θλίψης μειώνεται. Με την μείωση στις  $60^\circ$  να είναι μικρότερη από ότι σε αυτή των  $30^\circ$ . Αυτό ισχύει και για τις δύο ταχύτητες που χρησιμοποιήθηκαν.
2. Επίσης, από τα διαγράμματα αποτελεσμάτων μέτρου ελαστικότητας θλίψης συμπεραίνουμε ότι το μέτρο ελαστικότητας θλίψης έχει την μέγιστη τιμή για τις γωνίες σε  $0^\circ$  και για όλες τις υπόλοιπες ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , και  $60^\circ$ ) η αντοχή του μέτρου ελαστικότητας θλίψης μειώνεται. Ισχύει το ίδιο και για τις δύο ταχύτητες.
3. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα θλίψης αυξάνεται και η αντοχή θλίψης ή εφελκυσμού.
4. Στις  $0^\circ$  έχουμε μέγιστη αντοχή θλίψης και όσο οι γωνίες αυξάνονται, αυτή μειώνεται μέχρι και τις  $45^\circ$  που το φαινόμενο αυτό αναστρέφεται.
5. Από τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι τα δοκίμια που εξετάσαμε είναι ψαθυρά υλικά. Δηλαδή αμέσως μετά την ελαστική περιοχή (μέγιστη αντοχή θλίψης) το υλικό σπάει αμέσως.
6. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα θλίψης αυξάνεται και αντοχή θλίψης, ενώ, μειώνεται η τάση θλίψης σε οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του δοκιμίου.
7. Υπάρχει ασάφεια στα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας (E) λόγω αβεβαιότητας στον υπολογισμό της κλίσης.
8. Όσο η γωνία διεύθυνσης αλλάζει παρατηρούμε μείωση της αντοχής θλίψης μέχρι και τις  $45^\circ$  αφού το υλικό συμπιέζεται στην διεύθυνση της διχοτόμου όπου και η μήτρα έχει την μέγιστη συμβολή, άρα το υλικό έχει την μικρότερη αντοχή.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Κώστας Ε. Σαββάκης, Διαλέξεις μαθήματος, Τεχνολογία Υλικών.
- Felix Antonio Lopez (2012), Recycling of Glass Fibers from Fiberglass Polyester Waste. Composite for the Manufacture of Glass-Ceramic Materials ([http://file.scirp.org/pdf/JEP20120800004\\_61806709.pdf](http://file.scirp.org/pdf/JEP20120800004_61806709.pdf), τελευταία πρόσβαση στις 27/01/2017 ).
- Sheet Molding Compound (1996-2017) Owens Corning, ([http://composites.owenscorning.com/processes/Sheet\\_Molding\\_Compound.aspx](http://composites.owenscorning.com/processes/Sheet_Molding_Compound.aspx), τελευταία πρόσβαση στις 05/02/2017).
- Strongwell (2017), (<http://www.strongwell.com/about/the-pultrusion-process/>, τελευταία πρόσβαση στις 05/02/2017).
- Richard B. Brown(2011), Building Engineering at the U ([http://mech.utah.edu/composites\\_cars/](http://mech.utah.edu/composites_cars/), τελευταία πρόσβαση στις 07/02/2017).
- Gevin McDaniel, P.E & Chase Knight, PhD (2014) Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites, (<http://www.fdot.gov/design/training/designexpo/2014/presentations/GevinMcDaniel-FRP%20Composites.pdf>, τελευταία πρόσβαση στις 20/12/2016).
- Παύλου Παναγιώτης, Advanced composite materials, Εφαρμογές προηγμένων υλικών , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ([http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sint\\_heta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sint_heta_ilika.pdf) , Δικτυακός τόπος σελίδων μαθημάτων).
- B. Boro Djordjevic(2009), Non destructive test technology for the composites, Keynote lecture.
- Ajay Kapadia, National Composites Network (ncn), Non destructive testing of composite materials.
- Origin 8.0 Πρόγραμμα γραφικής αναπαράστασης δεδομένων.
- Ψυρρόπουλος Στ, Ηλιακίδης Αν (2006), Πτυχιακή Εργασία, Προσδιορισμός ιδιοτήτων Σύνθετου Υλικού.

- Σύνθετα Υλικά: Χαρακτηρισμός και ιδιότητες, Διαφάνειες Μαθήματος, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών.
- Ταυτοποίηση και Μοντελοποίηση Σύνθετου Υλικού(GFRP), Πτυχιακή Εργασία ΤΕΙ Ηρακλείου.
- Stella Job (2010), Composite Recycling, Summary of recent research and development, τελευταία πρόσβαση στις 03/01/2017).
- Wiley (3rd edition-2006), Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, Analysis and performance of fiber composites.
- Wikipedia, Google
- Μητρούση Μαρίνα – Ειρήνη (2014), Μελέτη της μεταβολής της απόσβεσης πολυμερών και σύνθετων υλικών με την προσθήκη νανοσωματιδίων.
- Σιούλα Βασιλική (2011), Μελέτη φθοράς και υποβάθμιση των ιδιοτήτων σύνθετων πολυμερών, Πτυχιακή Εργασία-ΣΤΕΦ.
- Barrie Royce & Lex Smits (1997), [https://www.princeton.edu/~humcomp/bikes/design/desi\\_30.htm](https://www.princeton.edu/~humcomp/bikes/design/desi_30.htm), τελευταία πρόσβαση στις 17/12/2016).
- S.J. Pickering(2005), School of Mechanical, Recycling Technologies for thermoset composite materials, The University of Nottingham, <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/recycling-technologies-for-thermoset-composite-materials-current-Zk6D5pL2QU>, τελευταία πρόσβαση στις 07/01/2017).
- Χρήστος Παπακωνσταντίνου, Σύνθετα Υλικά – Ίνες 2<sup>ο</sup> μάθημα, (ανοικτά μαθήματα e-class).
- Κοτρώτσος Αθανάσιος (2011), Υγρό θερμική κόπωση σε Ινώδη Σύνθετα Υλικά με τροποποιημένη πολυμερική μήτρα. Παρακολούθηση της Απορρόφησης υγρασίας μέσω της μεταβολής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων, Διπλωματική εργασία ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Μελέτη επίδρασης υδροθερμικής κατεργασίας στις μηχανικές ιδιότητες επόξυ- σύνθετου οπλισμένου με ίνες γυαλιού GFRP, Πτυχιακή Εργασία- ΣΤΕΦ- ΤΕΙ Ηρακλείου.

- Μαρία Καλογέρη (2016), Ανίχνευση ατελειών σε σύνθετα υλικά μέσω μη καταστροφικού ελέγχου, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Τριακίδου Θωμαΐς (2014), Προσδιορισμός Μηχανικών ιδιοτήτων νανοσύνθετων και μικροσύνθετων υλικών,( <https://ikee.lib.auth.gr/>) Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- U.S Department of Transportation (2012), Aviation Maintenance Technician Handbook- Airframe, Volume 1, Flight Standards Service, Chapter 7 – Advanced Composite Materials.
- Αριστομένης Αντωνιάδης, Μη μεταλλικά υλικά, Micromachining & Manufacturing Modeling Lab, Technical University of Crete, DEPT. of Production Engineering & Management
- Ιδρυματικό Αποθετήριο Α.Ε.Ι Πειραιά Τ.Τ (2007) Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς και προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού ‘Πολυεστέρας με ίνες γυαλιού’ (Fiberglass), Ερευνητική Πτυχιακή Εργασία