



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.)**

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας
με Ανόργανα και Οργανικά μέσα
ενίσχυσης Μηχανικών και Θερμικών
ιδιοτήτων**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΑΡΔΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ**

Διπλωματούχος Γεωπόνος του Γ.Π.Α

ΕΠΙΒΛΕΨΗ:
Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
(Δ.Π.Μ.Σ.)**

"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

**Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας
με Ανόργανα και Οργανικά μέσα
ενίσχυσης Μηχανικών και Θερμικών
ιδιοτήτων**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΠΑΡΔΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ**

Διπλωματούχος Γεωπόνος του Γ.Π.Α

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Α. Ζουμπουλάκης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ι. Σιμιτζής, Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Βρίσκομαι στην ευχάριστη θέση να προλογίζω την μεταπτυχιακή μου εργασία η οποία πραγματοποιήθηκε στην “Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Συνθέτων, Νάνο-υλικών και Νανοτεχνολογίας”, στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών “Επιστήμη και Τεχνολογία Υλικών” στη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον καθηγητή κ.Ζουμπουλάκη Λουκά του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ανάθεση της μεταπτυχιακής μου εργασίας και την υποστήριξή του.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα και ερευνητή Διονύση Σεμιτέκολο για την πολύτιμη βοήθειά του και την καταλυτική συμβολή του για την υλοποίηση της μελέτης στο εργαστήριο.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το οικογενειακό μου περιβάλλον για την υποστήριξή και την δυνατότητα που μου έδωσαν για την υλοποίηση των επιθυμιών και των στόχων μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
ABSTRACT	7
Κεφάλαιο 1. Πολυμερή	8
1.1 Εισαγωγή	8
1.2 Κατάταξη Πολυμερών	9
1.3 Κατηγοριοποίηση πολυμερών με βάση τη Θερμική Συμπεριφορά	10
1.3.1 Θερμοπλαστικά	10
1.3.2 Θερμοσκληρυνόμενα	10
1.3.3 Ελαστομερή	11
1.4 Είδη Πολυμερικών Μητρών	11
1.4.1 Θερμοσκληρυνόμενες Μήτρες	11
1.4.2 Θερμοπλαστικές Μήτρες	12
1.5 Εποξειδική ρητίνη.....	12
1.6 Παραγωγή και Σκλήρυνση Εποξειδικής Ρητίνης.....	13
1.7 Θερμική Επεξεργασία.....	14
1.8 Χαρακτηριστικά Εποξειδικής Ρητίνης	14
1.9 Εφαρμογές.....	15
Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου	18
Κεφάλαιο 2. Ίνες Άνθρακα	20
2.1 Εισαγωγή	20
2.1.1 Άνθρακας.....	20
2.1.2 Ίνες Άνθρακα	20
2.2 Παραγωγή	21
2.3 Δομή	23
2.4 Ιδιότητες	24
2.5 Εφαρμογές.....	26
Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου	29
Κεφάλαιο 3. Έριο	31
3.1 Εισαγωγικά	31

3.2 Χημική Σύσταση της τρίχας	31
3.3 Ανατομία και Μορφολογία της Τρίχας	32
3.4 Ομαδοποίηση του συνόλου των τριχών	33
3.5 Μικροσκοπικά η Παραγωγή της Τρίχας.....	34
3.6 Ιδιότητες του μαλλιού	34
3.7 Οικολογία και Έριο	36
3.8 Εναλλακτικές χρήσεις του μαλλιού	37
Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου	41
Κεφάλαιο 4. Σύνθετα Υλικά.....	43
4.1 Εισαγωγή	43
4.2 Χαρακτηριστικά.....	44
4.2.1 Γενικά.....	44
4.2.2 Τρόποι Ταξινόμησης.....	45
4.3 Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών Ενισχυμένα με Ίνες (fiber reinforced polymers, FRP).....	49
4.4 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά.....	53
4.5 Εφαρμογές των Σύνθετων υλικών με Ίνες	53
Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου	56
Κεφάλαιο 5. Σκοπός	59
Κεφάλαιο 6. Προετοιμασία Δειγμάτων.....	61
6.1 Πρώτες ύλες, Εργαστηριακές συσκευές, όργανα	61
6.2 Ζωικό Υλικό.....	61
6.3 Πλύσιμο	61
6.4 Μετρήσεις για την Ποιότητα του Μαλλιού	62
6.5 Κοπή Συνολικού Ερίου	63
Βιβλιογραφία 6^{ου} Κεφαλαίου.....	64
Κεφάλαιο 7. Μορφοποίηση Σύνθετων Υλικών	65
7.1 Πρώτες ύλες, εργαστηριακές συσκευές και όργανα	65
7.2 Προετοιμασία και Κατασκευή Σύνθετων Υλικών.....	66
Κεφάλαιο 8. Μηχανικές Ιδιότητες και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM).....	69
8.1 Δοκιμή σε Κάμψη και Διάτμηση	69
8.2 Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων	70
8.2.1 Αντοχή σε Κάμψη	70
8.2.2 Αντοχή σε Διάτμηση	72
8.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων.....	74
8.4 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)	75

Βιβλιογραφία 8 ^{ου} Κεφαλαίου.....	79
Κεφάλαιο 9. Θερμικές Ιδιότητες	80
9.1 Θερμική Αγωγιμότητα των Υλικών.....	80
9.2 Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας	80
9.3 Προσδιορισμός Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας	81
Βιβλιογραφία 9 ^{ου} Κεφαλαίου.....	85
Κεφάλαιο 10. Συμπεράσματα και Προτάσεις	86
10.1 Συμπεράσματα για τις μηχανικές Ιδιότητες.....	86
10.2 Συμπεράσματα για τις Θερμικές Ιδιότητες	86
10.3 Γενικά Συμπεράσματα.....	86
10.4 Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα.....	87

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία, μελετήθηκε η κατασκευή Σύνθετων Υλικών πολυμερικής μήτρας, με την προσθήκη κομμένων Ινών Άνθρακα και Έριο προβάτου ως μέσα ενίσχυσης, ως υποψήφια υλικά για θερμομονωτικές εφαρμογές. Στα Σύνθετα υλικά, που κατασκευάστηκαν, έγινε αποτίμηση των μηχανικών και θερμικών τους ιδιοτήτων.

Η μήτρα που επιλέχθηκε για τα σύνθετα υλικά είναι η εποξειδική ρητίνη της HUNTSMAN Industries (Η.Π.Α.) “Araldite LY 556”, οι ίνες άνθρακα είναι της Neotex και τα δείγματα του Ερίου δόθηκαν από το κέντρο Γενετική Βελτίωσης Ζώων (Ιωαννίνων) και την Ένωση Μετακινούμενων Κτηνοτρόφων Ηπείρου. Τα σύνθετα υλικά δοκιμάστηκαν ως προς την μηχανική τους απόδοση, με δοκιμή σε κάμψη και σε διάτμηση. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μελέτη της επιφάνειας θραύσης του σύνθετου υλικού, με τη χρήση SEM. Τέλος προσδιορίστηκε η θερμική συμπεριφορά των σύνθετων με τη μέτρηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.

Στο πείραμα, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα μαλλιών προβάτου από τις 2 φυλές (Καλαρρύτενη και Κατσικά) σε ποσοστά 2,5% και 3% w/w και κομμένες ίνες άνθρακα σε ποσοστά 5% w/w για την κατασκευή των δοκιμίων. Η μορφοποίηση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο της θερμής συμπίεσης. Οι μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων με ποσοστά προσθήκης μαλλιού 2,5% w/w και κομμένων ινών άνθρακα 5% w/w δείξαν την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά με βελτίωση μέχρι και 7,68% για την φυλή Κατσικά.

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας έδειξε την θερμομονωτική συμπεριφορά των σύνθετων υλικών. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για τα δοκίμια υπολογίστηκε και προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα: σύνθετα με 2.5% w/w έριο της Καλαρρύτενης φυλής – κομμένες ίνες άνθρακα 5% w/w: 0.46 W/mK και σύνθετα με 2.5%w/w έριο της φυλής Κατσικά- κομμένες ίνες άνθρακα 5% w/w: 0.47 W/mK.

ABSTRACT

In this postgraduate thesis, we studied the manufacture of Composite Materials by adding chopped carbon fibers and sheep's wool. These composite materials were measured for their thermal and mechanical properties

The matrix for the composites used is an epoxy resin "Araldite LY 556" from HUNTSMAN Industries (USA), the chopped carbon fibers were purchased from Neotex and sheep wool samples were provided by the Animal Genetics Center (Ioannina) and the Greek Network of Transhumant of Epirus). The composites were tested for their mechanical properties, via bending and shear testing. Fracture analysis of the composite material was also performed using SEM. Finally, the thermal properties of the composites were determined by measuring the thermal conductivity coefficient.

In this study, sheep wool samples from the 2 breeds (Kalarritika and Katsika) at 2.5% and 3% w/w and chopped carbon fibers at 5% w/w, were used to manufacture the specimens. The samples were molded via Hot Press method. The mechanical properties of the composites with rates at 2.5% w/w and at 5% w/w carbon fiber showed the best mechanical behavior with up to 7,68% improvement in Katsika breed.

The coefficient of thermal conductivity showed the thermal insulation behavior of the composites. The coefficient of thermal conductivity (λ) was calculated in the samples and the following results showed: Composites with 2.5% w/w Kalarrytiko-chopped carbon fibers 5% w/w: 0.46 w/mK and Composites with 2.5% w/w Katsika – chopped carbon fibers: 0.47 w/Mk.

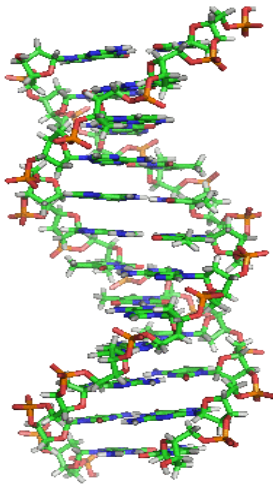
Κεφάλαιο 1. Πολυμερή

1.1 Εισαγωγή

Αν και ο 20^{ος} αιώνας μπορεί να χαρακτηριστεί ως ο αιώνας των πολυμερών λόγω της ανακάλυψης και της ευρείας χρήσης τους, στη φύση υπήρχαν εδώ και εκατομμύρια χρόνια τα φυσικά πολυμερή. Τα φυσικά είναι φυτικής ή ζωικής προέλευσης, όπως είναι το άμυλο, η πρωτεΐνη, το φυσικό καουτσούκ.

Ο όρος πολυμερή περιγράφει ένα σύστημα αποτελούμενο από μακρομόρια, των οποίων η σύνθεση έγινε μέσω της σύνδεσης μονομερών με δεσμούς και ενώνονται με επαναληψιμότητα των μονομερών [1].

Τα πολυμερή εντοπίζονται στα νουκλεϊκά οξέα, στις πρωτεΐνες και στους πολυσακχαρίτες. Εμφανίζονται είτε στη φυσική μορφή (φυσικά πολυμερή ή βιοπολυμερή) όπως το DNA και τα ένζυμα, είτε με τη συνθετική τους, όπως πλαστικά, συγκολλητικά. [2]



Εικόνα 1.1: Απεικόνιση DNA ως φυσικό πολυμερές (αριστερά) (πηγή: wikipedia.org) - Κόλλα ως συνθετικό πολυμερές (δεξιά) (πηγή: abcadhesives.com.au)

Τα πολυμερή έχουν ως χαρακτηριστικό το μεγάλο μοριακό βάρος και εμφανίζουν ευκαμψία. Όπως προαναφέρθηκε, υπάρχουν φυσικά και συνθετικά πολυμερή. Τα πολυμερή είναι μεγάλα μακρομόρια, οργανικές ενώσεις που αποτελούνται από άνθρακα και υδρογόνο καθώς και αμέταλλα στοιχεία. Τα μακρομόρια παράγονται μέσω μίας διαδικασίας, τον πολυμερισμό, από αρχικά μικρά μόρια, τα μονομερή. Τα πολυμερή με βάση την θερμοχημική τους συμπεριφορά μπορεί να διακριθούν σε: θερμοπλαστικά, θερμοσκληρυνόμενα και ελαστομερή. Αναλυτικότερα, τα θερμοπλαστικά (thermoplastics) αποτελούνται από μακρομόρια γραμμικά ή διακλαδωμένα, τήκονται και είναι διαλυτά σε διαλύτες. Τα θερμοσκληρυνόμενα (thermosettings) έχουν μόρια διασταυρωμένα, δεν τήκονται, δεν διαλύονται και ο διαποτισμός τους επιτυγχάνεται σε μικρό βαθμό από διαλύτες. Τα ελαστομερή

(elastomers) τα οποία παρουσιάζουν παροδικά διασταυρωμένους δεσμούς, δεν τήκονται, δεν διαλύονται όμως διαποτίζονται από διαλύτες. Επιπλέον, εμφανίζουν ελαστικότητα ελαστομερούς και επιμηκύνονται με πλήρη επαναφορά τους κατά τον εφελκυσμό.

Τα πολυμερή παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε διαβρώσεις και χημικές προσβολές. Παράλληλα παρουσιάζουν χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Δεν έχουν ικανοποιητική εφαρμογή σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς δεν παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή σε αυτές. Υπάρχει όμως η δυνατότητα χρήσης συγκεκριμένων πολυμερών που έχουν κατασκευαστεί τα τελευταία χρόνια, με συνθετική μορφή, και παρουσιάζουν ικανοποιητική αντοχή σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τα συμβατικά, περίπου και μέχρι τους 400°C. Επιπλέον έχουν μικρή μηχανική αντοχή, που έχει βελτιωθεί (αραμιδικές ίνες) και άλλα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν στους ημιαγωγούς αλλά και στους ηλεκτρικούς αγωγούς (όπως είναι τα πολυακετυλένια, πολυφαινυλένια, πολυπυρρόλες). (3)

1.2 Κατάταξη Πολυμερών

Τα πολυμερή μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση την προέλευση τους. Τα φυσικά πολυμερή είναι φυτικής ή ζωικής προέλευσης. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν όλοι οι πολυσακχαρίτες (όπως κυτταρίνη) πρωτεΐνες (μαλλί, μετάξι), και το φυσικό πλαστικό. Στη συνέχεια, η κατηγορία τεχνητά πολυμερή που ανήκουν οι κυτταρινικοί εστέρες, και προέρχονται από τη χημική επεξεργασία των φυσικών πολυμερών ώστε να αποκτήσουν επιθυμητές ιδιότητες. Τέλος υπάρχουν τα συνθετικά πολυμερή τα οποία είναι αποτέλεσμα χημικής επεξεργασίας και συνθέτονται μέσω πολυμερισμού των μονομερών για σύνθεση μακρομοριακών ενώσεων. Η σύνθεση των μονομερών προβλέπει τη σύνθεση μίας μεγάλης κατηγορίας διαφορετικών πολυμερικών ενώσεων. [1]

Στη συνέχεια, μπορούν να διακριθούν ανάλογα με την διάσταση τους (δομή) και υπάρχουν τρεις κατηγορίες. Τα γραμμικά (linear) πολυμερή τα οποία έχουν συντεθεί από μονομερή και ενώνονται το ένα δίπλα στο άλλο, σε σειρά. Στη συνέχεια, η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τα διακλαδισμένα (branched) και στην οποία η κύρια αλυσίδα διαθέτει κάθετα στο άξονα της άλλα μονομερή. Η τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει τα διασυνδεδεμένα (crosslinked) πολυμερή που περιλαμβάνει δίκτυα αλυσίδων, καθώς αποτελείται από αλυσίδες που έχουν ενωθεί και τελικά σχηματίζουν αυτή τη δομή. [2]

Επίσης, τα πολυμερή μπορούν να καταταγούν με βάση τον τρόπο σχηματισμού τους. Υπάρχουν τα πολυμερή πρόσθεσης και σχηματίζονται μέσω της ταχείας αλυσιδωτής αντίδρασης [2]. Ο αλυσωτός πολυμερισμός περιλαμβάνει την χημική αντίδραση ενός μορίου μονομερούς κάθε φορά προς σχηματισμό ενός μακρομορίου. Τα μονομερή έχουν είτε δραστικούς διπλούς δεσμούς ή έχουν δακτυλίους που με ή χωρίς την δράση ενός καταλύτη τελικά θα σχηματίσουν ένα μακρομόριο. (3) Υπάρχουν και τα πολυμερή συμπύκνωσης που σχηματίστηκαν μέσω διαμοριακών αντιδράσεων μονομερών που περιλαμβάνουν λειτουργικές ομάδες (-OH, -COOH, -NCO κ.α.). [2]

1.3 Κατηγοριοποίηση πολυμερών με βάση τη Θερμική Συμπεριφορά

Τα πολυμερή μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τη συμπεριφορά που εμφανίζουν κατά την αύξηση της θερμοκρασίας.

1.3.1 Θερμοπλαστικά

Τα θερμοπλαστικά έχουν μία απλή μοριακή κατασκευή. Η έκθεσή τους σε υψηλή θερμοκρασία τα καθιστά μαλακά υλικά και κατά αυτό τον τρόπο μπορούν να μορφοποιηθούν και έπειτα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες να στερεοποιηθούν. Η κατανάλωση τους εκτείνεται στο 80% περίπου [4]. Τα θερμοπλαστικά σε υψηλές θερμοκρασίες συμπεριφέρονται σαν ρευστά. Ουσιαστικά σε υψηλές θερμοκρασίες οι δυνάμεις ανάμεσα στους δεσμούς χαλαρώνουν και οι αλυσίδες κινούνται ευκολότερα, συγκριτικά με χαμηλότερες θερμοκρασίες, ειδικά αν ασκείται και πίεση [5]. Επιπλέον τα θερμοπλαστικά, μπορεί να είναι άμορφα ή ημικρυσταλλικά και τα μακρομόριά τους είναι γραμμικά ή διακλαδωμένα και είναι ενωμένα με δευτερεύοντες δεσμούς (όπως Vander Waals, διπόλου- διπόλου, δεσμούς H₂). Για να έρθουν σε ρευστή μορφή τα άμορφα θερμοπλαστικά πρέπει να θερμανθούν σε θερμοκρασία μεγαλύτερη της υαλώδους μετάπτωσης, ενώ στα ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά πρέπει να ανέλθει η θερμοκρασία σε υψηλότερο βαθμό της θερμοκρασίας που λιώνουν. Δεν είναι εφικτό με συμβατικές μεθόδους ρευστοποίησης να επεξεργαστούν τα θερμοπλαστικά με υψηλή μοριακή μάζα. Τα θερμοπλαστικά λαμβάνουν την τελική τους μορφή μέσω της βοήθειας ενός εξωθητήρα, καθώς η παροχή θερμότητας τα ρευστοποιεί και στη συνέχεια ψύχεται το υλικό και λαμβάνει τη τελική του μορφή. Συνήθη παραδείγματα αυτής της κατηγορίας αποτελούν: το πολυεθυλένιο, το πολυστυρένιο και το πολυβινυλοχλωρίδιο. [6]

1.3.2 Θερμοσκληρυνόμενα

Τα θερμοπλαστικά σε υψηλές θερμοκρασίες δεν περνάνε από το στάδιο της ρευστοποίησης, κατά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά αποσυντίθενται. Κατά αυτό το τρόπο, μέσω της υψηλής θερμοκρασίας μπορούμε να διαπιστώσουμε αν το πολυμερές ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Τα συγκεκριμένα πολυμερή αποκτούν την τελική τους μορφή και είναι μη αντιστρεπτή μετά την παραγωγή τους. Τα θερμοσκληρυνόμενα αποτελούνται από ένα δίκτυο με ομοιοπολικούς δεσμούς. Είναι αδιάλυτα από διαλύτες, παρά μόνο θα διογκωθεί με την παρουσία τους αλλά δεν θα διαλυθούν. Αναλυτικότερα, η διαδικασία επεξεργασίας τους περιλαμβάνει ταυτόχρονα τον πολυμερισμό και τον σχηματισμό της τελικής μορφής του υλικού. [6] Η σύνθεση των θερμοσκληρυνόμενων είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης δύο ή περισσότερων συστατικών, που ένα από αυτά είναι ένα πολυλειτουργικό συμονομερές που σχηματίζει τους σταυροδεσμούς στο υλικό. Ο ποσότητα των διασταυρώσεων καθορίζει τις ιδιότητες του τελικού υλικού. [7] Τα θερμοπλαστικά δεν μπορούν να ανταγωνιστούν τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή καθώς παρουσιάζουν εξαιρετικές ιδιότητες και χαμηλό κόστος. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι τα εξής πολυμερή: ουρία-φορμαλδεΐδη, φαινολικά, εποξειδικές ρητίνες, θερμοσκληρυνόμενος πολυεστέρας

[6] Η χρήση των θερμοσκληρυνόμενων στην συνολική κατανάλωση των πλαστικών είναι εκτείνεται στο 12-13% [4]

1.3.3 Ελαστομερή

Τα ελαστομερή, είναι εύκολα κατανοητό και από το όνομα τους, ότι η χαρακτηριστική ιδιότητά τους είναι η ελαστικότητά τους. Συχνά, χρησιμοποιείται και ο όρος καουτσούκ. Η ελαστικότητα οφείλεται στον χαμηλό συντελεστή Young και στην υψηλή απόδοση που παρουσιάζει συγκριτικά με άλλα υλικά. Είναι άμορφα πολυμερή και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος γίνεται να παραμορφωθούν εύκολα καθώς είναι μαλακά. Οι συνηθέστερες χρήσεις τους είναι στις σφραγίδες και στις κόλλες. [8] Χαρακτηριστικά παραδείγματα ελαστομερών είναι τα φυσικά ελαστικά, πολυισοπρένιο, πολυβουταδιένιο, ελαστομερή σιλικόνης. [7]

1.4 Είδη Πολυμερικών Μητρών

Οι κύριες κατηγορίες υλικών που χρησιμοποιούνται ως μήτρα είναι τα πολυμερή, τα κεραμικά και τα μέταλλα. Ανάλογα με τις ιδιότητες που είναι επιθυμητό να αποκτήσει το σύνθετο υλικό είναι κρίσιμη η επιλογή της κατάλληλης μήτρας προκειμένου να επιτευχθεί αυτό.

Οι πολυμερικές μήτρες προστατεύουν τα μέσα ενίσχυσης (π.χ. ίνες), που συμμετέχουν στην κατασκευή του τελικού σύνθετου, από την έκθεση τους στο περιβάλλον και συγκρατούν την επιθυμητή δομή και προσανατολισμό του σύνθετου. Συνήθως, ως πολυμερικές μήτρες χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικά πολυμερή ή θερμοσκληρυνόμενα. [9]

1.4.1 Θερμοσκληρυνόμενες Μήτρες

Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες αυτής της κατηγορίας μπορούν να ενισχυθούν με ίνες, ακόμα και φυτικής προέλευσης. Το μήκος της ίνας που μπορεί να επιλεγεί διαφέρει ανάλογα τις τελικές επιθυμητές ιδιότητες του υλικού. [10]

Οι μήτρες αυτής της κατηγορίας συνήθως είναι πολυεστέρες, βινυλικούς εστέρες, εποξειδικές, φαινόλες, διμμελιμίδη, πολυϊμίδια, κυανικοί εστέρες. Συνήθως, για χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιούνται οι εποξειδικές ρητίνες (135°C). Σε λίγο υψηλότερες θερμοκρασίες κυμαίνεται η διμμελιμίδη (135-175°C). Σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες κυμαίνονται οι πολυϊμίδια (287-315°C). Οι μήτρες από πολυεστέρες και βινυλικούς εστέρες έχουν δεν χρησιμοποιούνται συνήθως σε υψηλής κατασκευής σύνθετα. Οι κυανικοί εστέρες παρουσιάζουν αρκετά καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, είναι ανταγωνιστικοί των εποξειδικών, με μόνο μειονέκτημα το υψηλό κόστος αγοράς τους. Οι φαινολικές μήτρες έχουν εφαρμογή σε αεροσκάφη και παρουσιάζουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες και ανθεκτικότητα στην έκθεση τους στη φωτιά. [11] Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες ενδείκνυνται για την συμμετοχή τους σε κατασκευαστικά υλικά. [12]

Οι συγκεκριμένες μήτρες είναι ευρέως γνωστές για την εύκολη διαχείριση και επεξεργασία τους. Με τις θερμοσκληρυνόμενες μήτρες, καθώς είναι κατά την

διάρκεια του πολυμερισμού μικρού μοριακού βάρους χημικά υγρά με επίσης χαμηλό ιξώδες, επιτυγχάνεται καλή διαβροχή των ινών που προστίθενται. Οι εποξειδικές ρητίνες της κατηγορίας αυτής σχηματίζουν ομοιοπολικούς σταυροδεσμούς με τα φυτικά κυτταρικά τοιχώματα. Τέλος, δεν σχηματίζονται πτητικά προϊόντα κατά τη διαδικασία επεξεργασίας τους, επομένως, τα τελικά σύνθετα είναι χωρίς κενά. [9]

1.4.2 Θερμοπλαστικές Μήτρες

Οι μήτρες αυτής της κατηγορίας παρουσιάζουν τα εξής βασικά πλεονεκτήματα: είναι ανακυκλώσιμα υλικά, με δυνατότητα μειωμένου χρόνου παραγωγής. Όμως, απαιτείται αρκετά υψηλή θερμοκρασία κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης των θερμοσκληρυνόμενων που κυμαίνεται πάνω από τους 180 °C. [13]

Είναι πολύ διαδεδομένη η χρήση τους στην αυτοκινητοβιομηχανία, καθώς μπορούν να συνδυαστούν με ίνες γυαλιού (E-glass fibers) για χαμηλό τελικό κόστος ή με ίνες άνθρακα (carbon fibers) που παρουσιάζουν χαμηλότερη πυκνότητα. [14] Μερικές συνήθειες εφαρμογές τους είναι σε κελύφη μηχανών και καθισμάτων. [15] Συνήθως χρησιμοποιούνται για μήτρες το πολυλακτικό οξύ (PLA), χαμηλής πυκνότητας πολυεθυλένιο (LDPE), και υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE). Η βελτίωση των ιδιοτήτων της μήτρας επιτυγχάνεται με τη βοήθεια πληρωτικών, όπως είναι τα φυσικής προέλευσης πληρωτικά: η σκόνη ξύλου. Ωστόσο, η ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων και βελτίωση άλλων ιδιοτήτων έχει επικεντρωθεί κυρίως στα μέσα ενίσχυσης με ίνες. [13]

Τα θερμοπλαστικά σύνθετα εμφανίζουν καλύτερη αντίσταση στην κρούση συγκριτικά με τα θερμοσκληρυνόμενα. Για τον εμποτισμό μίας ίνας στη θερμοπλαστική μήτρα απαιτείται υψηλή θερμοκρασία και πίεση [16]

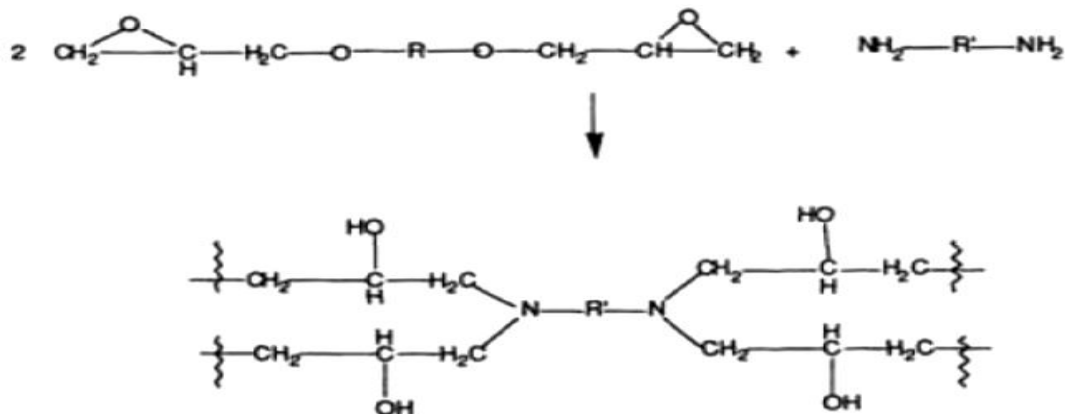
1.5 Εποξειδική ρητίνη

Η ανακάλυψη της εποξειδικής έγινε από τον Prileschajew το 1909. [17]

Οι εποξειδικές ρητίνες ανήκουν στην κατηγορία των θερμοσκληρυνόμενων πολυμερών και αποτελούνται από αλυσίδες που έχουν τουλάχιστον δύο εποξυομάδες. Οι εποξειδικές ρητίνες έχουν καλές μηχανικές αλλά και άριστες συγκολλητικές ιδιότητες. Επομένως είναι αυτές οι ιδιότητες τους καθιστά την ευρεία χρήση τους στη βιομηχανία ως επικαλυπτικά, συγκολλητικά υλικά ή και σε εφαρμογές συνθέτων. Επιπλέον έχουν βρεθεί τρόποι που μπορούν να τροποποιήσουν τις ιδιότητες της ρητίνης, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η βελτίωση των θερμικών ιδιοτήτων. [18]

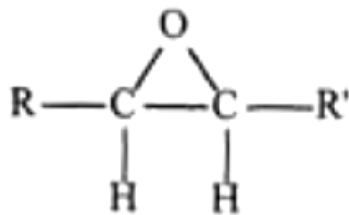
Η εποξειδική ρητίνη αποτελείται από οργανικά μόρια τα οποία ονομάζονται εποξειδικές ομάδες ή εποξειδικοί δακτύλιοι (οξυρανικοί δακτύλιοι). Οι ομάδες αυτές έχουν τη δυνατότητα να αντιδρούν είτε με το υδρογόνο είτε με αμίνες (διαδρατική αμίνη) ή και άνυδρα μόρια. Η πιο ευρέως γνωστή εποξειδική ρητίνη αποτελείται από διφαινόλη Α και ονομάζεται διγλυκυκιδικός αιθέρας του δισφαινολικού Α ή αλλιώς DGEBA. Το τρισδιάστατο δίκτυο που σχηματίζεται πραγματοποιείται είτε σε θερμοκρασίες δωματίου ή σε αυξανόμενες θερμοκρασίες που εξαρτώνται από τη φύση της αμίνης ή του ανυδρίτη. Οι ιδιότητες της εποξειδικής εξαρτώνται από τα

μονομερή που την αποτελούν. Τέλος είναι αρκετά οικονομική σε σύγκριση με άλλες θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες. [19]



Εικόνα 1.2: Αντίδραση εποξειδικής με αμίνη (πηγή: [19])

Επίσης πέρα από τη διφαινόλη Α, υπάρχουν και άλλες δύο κατηγορίες εποξειδικών ρητινών: κυκλοαλοφατικές εποξειδικές ρητίνες (R και R' ανήκουν σε οξανικό δακτύλιο), και εποξειδικά έλαια (όπου το R είναι οξυγόνο και το R' μπορεί να είναι πολυδροξυφαινόλη, πολυβασικό οξύ ή πολυόλη). [19]



Εικόνα 1.3: Τύπος εποξειδικής ρητίνης (πηγή: [19])

1.6 Παραγωγή και Σκλήρυνση Εποξειδικής Ρητίνης

Η παραγωγή των εποξειδικών ρητινών πραγματοποιείται μέσω μίας αντίδρασης της επιχλωρυδρίνης και διφαινόλης Α. Το αποτέλεσμα είναι να παράγονται διγλυκιδυλαιθέρες της διφαινόλης Α. Επομένως ως τελικό προϊόν μπορούμε να πάρουμε ένα θερμοσκληρυνόμενο υλικό αφού πρώτα έχει γίνει η προσθήκη σκληρυντή. Η επιλογή του κατάλληλου σκληρυντή, καθώς υπάρχει πλήθος επιλογών, εξαρτάται από το τελικό προϊόν που είναι επιθυμητό να κατασκευασθεί, δηλαδή τις συνθήκες που επικρατούν κατά τη σκλήρυνση, τις επιθυμητές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες, τις τεχνικές εφαρμογές. Υπάρχει η δυνατότητα μέσω αδρανών ή δραστικών προσθέτων, που αντιδρούν με την εποξυ-ομάδα, να τροποποιηθεί η ρητίνη και ο σκληρυντής. Η τροποποίηση της εποξειδικής ρητίνης μπορεί να πραγματοποιηθεί με την προσθήκη ορυκτών πληρωτικών, πλαστικοποιητών, αραιωτικών μέσων. Τα αραιωτικά υλικά είναι δραστικά ή αδρανή, και επηρεάζουν το ιξώδες της εποξειδικής ρητίνης. Τα πληρωτικά μέσα επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα της ρητίνης είτε αυξάνοντας την είτε μειώνοντας την. Η προσθήκη των πλαστικοποιητών ακόμα και οι μεγάλες συγκεντρώσεις δεν επηρεάζουν σημαντικά την ελαστικότητα του υλικού,

καθώς οι εποξειδικές ρητίνες είναι υλικά μη εύκαμπτα και δεν πρόκειται να αποκτήσουν τις ιδιότητες των ελαστομερών. Ο πλαστικοποιητής αυξάνει τη δυνατότητα παραμόρφωσης της και επιπλέον μειώνει την ευθραυστότητα της εποξειδικής ρητίνης. [20]

1.7 Θερμική Επεξεργασία

Η θερμική επεξεργασία (curing) των ρητινών καθορίζει την ποιότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Κατά τη διάρκεια της θερμικής επεξεργασίας (θέρμανση ή ψύξη) πραγματοποιούνται χημικές αντιδράσεις και είναι εφικτό να επιβληθεί πίεση ή και κενό αέρος. Προκειμένου το υλικό να αποκτήσει τις μέγιστες μηχανικές ιδιότητες απαιτείται μία μετέπειτα θερμική επεξεργασία σε υψηλή θερμοκρασία (post-curing) που εξασφαλίζει την αριστοποίηση του τελικού υλικού. Η επεξεργασία αυτή εφαρμόζεται σε ρητίνες που είναι είτε σε υγρή μορφή είτε βρίσκονται σε φύλλα προ-πολυμερισμένης ρητίνης. Η θερμική επεξεργασία πρέπει να επιτρέπει τον πολυμερισμό της ρητίνης και να βελτιστοποιεί τον χρόνο της διαδικασίας αυτής, και παράλληλα να απομακρύνονται τα εκλυόμενα αέρια. Σε περίπτωση εμφάνισης πόρων στο υλικό κατά την επεξεργασία αυτή, μία λύση θεωρείται η θερμική επεξεργασία υπό κενό. Οι εποξειδικές ρητίνες έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες ως θερμοσκληρυνόμενες συγκριτικά με τις θερμοπλαστικές ρητίνες. [20]

1.8 Χαρακτηριστικά Εποξειδικής Ρητίνης

Πλεονεκτήματα

Η εποξειδική ρητίνη, λόγω των παρακάτω ιδιοτήτων που εμφανίζει, κατάφερε να έχει μία σταθερά ανοδική πορεία ανάπτυξης και ζήτησης:

- Πολύ καλή χημική αντοχή, και ειδικά σε χημικά περιβάλλοντα
- Προσφυτικότητα σε πληθώρα υποστρωμάτων
- Εξαιρετικά καλή αντοχή σε θλίψη, κάμψη και εφελκυσμό
- Ελάχιστη συρρίκνωση κατά τη θερμική επεξεργασία
- Ηλεκτρική μόνωση που διατηρείται ακόμα και κατά τη γήρανση
- Πολύ καλή αντίσταση στη διάβρωση [19]
- Έχουν χαμηλή υδροσκοπικότητα, καλή διαστατική σταθερότητα και παρουσιάζουν καλή αντοχή απέναντι σε οξέα, βάσεις και οργανικούς διαλύτες και ύδατα. Το ιξώδες τους έχει χαμηλή τιμή και για αυτό επιτυγχάνεται η εύκολη επεξεργασία τους, καθώς και τα μείγματα που σχηματίζουν με πρόσθετα, όπως είναι οι σκληρυντές, πλαστικοποιητές.
- Η επιλογή του προσθέτου επηρεάζει το πόσο εύκολα γίνεται η επεξεργασία της ρητίνης, ενώ σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 5°C έως και 150°C πέρα από την ευκολία της επεξεργασίας επιτυγχάνεται και σε μικρό χρόνο
- Μεγάλη συγκολλητική δύναμη που τη καθιστά σημαντική ιδιότητα για την επιλογή και χρήση της σε πολλές εφαρμογές.

- Μπορούν να συμμετέχουν σε πληθώρα εφαρμογών λόγω της τροποποίησης των ιδιοτήτων τους.
- Μικρή συστολή κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού αλλά και της επεξεργασίας τους. Το χαρακτηριστικό αυτό δίνει προβάδισμα για τη χρήση της. [21]

Στις ρητίνες παρατηρείται ένα φούσκωμα στην μακροδομή τους από υγρά που παρουσιάζουν ίδια παράμετρο διαλυτότητας. η ρητίνη και ο σκληρυντής καθορίζουν την φύση των δεσμών και κατεπέκταση την χημική αντοχή της ρητίνης που προέρχεται από την ανάμειξη τους. Οι θερμικές ιδιότητες των ρητινών προκύπτουν από το βαθμό συνδεσμολογίας των σταυροδεσμών, της ελαστικότητας της ρητίνης αλλά και του σκληρυντή. Τέλος, οι ρητίνες έχουν υψηλό συντελεστή ισχύος και διηλεκτρική σταθερά ως μονωτικά υλικά, καθώς είναι πολικές. [22]

Μειονεκτήματα

Ανάλογα με την εφαρμογή τους οι εποξειδικές ρητίνες μπορεί να εμφανίσουν αδυναμία σε κάποιες ιδιότητες παρόλο που παρουσιάζουν υψηλή πυκνότητα διασταυρομένων δεσμών. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μικρή επιμήκυνση κατά τη θραύση (break), μικρή αντοχή στη διάδοση ρωγμής, και χαμηλή δύναμη κρούσης. [23]

1.9 Εφαρμογές

- Χρώματα και επικαλύψεις
Οι εξαιρετικές ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών, όπως αναλύθηκαν και στο κεφάλαιο 1.8 των ιδιοτήτων, τις καθιστούν ικανές και χρήσιμες ως επικαλυπτικά μέσα Η αντοχή τους σε χημικά μέσα βοηθάει σε εφαρμογές τους όπως είναι οι επικαλύψεις χαλύβδινων σωλήνων που μεταφέρουν πόσιμο νερό. Παράλληλα, επικαλύπτουν δοχεία κονσέρβας και τροφίμων, δάπεδα, ηλεκτρικές συσκευές όπως το πλυντήριο. Στην κονσερβοποίηση τροφίμων και ειδικά σε πιο όξινες τροφές, όπως οι ντομάτες, η επικάλυψη της κονσέρβας με εποξειδική ρητίνη, αποτρέπει τη σκουριά. Επίσης χρησιμοποιείται σε κατασκευή δαπέδων για διακοσμητικούς λόγους.
- Συγκολλητικά
Η εφαρμογή ως συγκολλητικό, λόγω των υψηλών αντοχών πρόσφυσης, πραγματοποιείται για την κατασκευή αεροσκαφών, αυτοκινήτων, ποδηλάτων, πλοίων, σανίδες του σκι. Ως συγκολλητικά υψηλής απόδοσης χαρακτηρίζονται και «δομικά συγκολλητικά». Έχουν την ικανότητα να συγκολλούν το ξύλο, το γυαλί, το μέταλλο, πέτρα, μέχρι και κάποια πλαστικά. Οι εμπορικές εποξειδικές ρητίνες συγκόλλησης μπορούν να ενισχυθούν για την μέγιστη σκληρότητα τους, μέσω μορίων καουτσούκ, και προσθήκη θερμοπλαστικών σε ξεχωριστή φάση και ανόργανων μορίων μέσα στην μήτρα. Τα συγκολλητικά σκληραίνουν σε αυξανόμενες θερμοκρασίας ώστε

να αυξηθεί η αντοχή τους και να ενεργοποιηθεί η χημική συγκόλληση μεταξύ της ίδιας της κόλλας και της επιφάνειας που τοποθετήθηκε.

- Βιομηχανικά εργαλεία

Μπορεί να γίνει η χρήση τους για την παραγωγή βιομηχανικών βοηθητικών εργαλείων, όπως καλουπιών, μοντέλων, αντικολλητικών φύλλων και γενικά βοηθημάτων της βιομηχανικής παραγωγής. Μπορεί να αντικαταστήσει άλλα υλικά, όπως το ξύλο, το μέταλλο γιατί έχει μικρό κόστος και απαιτείται μικρός χρόνος κατασκευής τους με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η απόδοση της διαδικασίας.

Επιπλέον η κατασκευή σύνθετων με εποξειδική και ενισχυμένα με ίνες συντελούν στη επισκευή μεταλλικών εξαρτημάτων αλλά και να συντελούν αυτά τα σύνθετα σε κυλίνδρους αποθήκευσης υδρογόνου.

- Ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα

Οι εποξειδικές ρητίνες έχουν εφαρμογή σε κινητήρες, γεννήτριες, μετασχηματιστές, σε εξοπλισμό διανομής μεγάλων ηλεκτρικών φορτίων. Η ιδιότητά τους, ως καλοί μονωτές, τα καθιστά ικανά να προστατεύουν τα ηλεκτρικά σύνθετα από την υγρασία, τη σκόνη και το βραχυκύκλωμα.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υψηλές τάσεις λόγω της ανθεκτικότητας τους και χρησιμοποιούνται σε διάφορα εξαρτήματα, όπως τα καλώδια. Η εποξειδικές ρητίνες είναι οι πιο διαδεδομένες σε αυτού του είδους τις εφαρμογές μαζί με το πολυεθυλένιο.

- Αεροδιαστημικές εφαρμογές

Η εποξειδική ρητίνη χρησιμοποιείται ως υλικό δομικής μήτρας και ενισχύεται με ίνες Kevlar, υάλου, άνθρακος και βορίου. Έχει εφαρμογή ως δομική κόλλα και θεωρείται επιπλέον πλεονέκτημα το χαμηλό κόστος.

- Βιοιατρικά συστήματα

Οι Πολυμερικοί αφροί (shape memory polymer foams) μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά ως εμβολικά σφουγγάρια. Επιπλέον νανοδιαμάντινα-εποξειδικά παράγωγα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους συστήματα, καθώς είναι υψηλά θερμικά αγωγίμα, παρουσιάζουν πολύ καλή χημική αδράνεια, υψηλή σκληρότητα, οπτική διαφάνεια. [24]

- Ναυτιλιακές εφαρμογές

Η εποξειδική ρητίνη δεν μπορεί να εφαρμοσθεί εξωτερικά σε μία επιφάνεια λόγω της ευαισθησίας που παρουσιάζει κατά την έκθεση της σε UV ακτίνες. Η εφαρμογή τους είναι κατά την επισκευή και συναρμολόγηση των σκαφών και έπειτα απαιτείται η επικάλυψη τους με πολυουρεθανικό χρώμα ή βερνίκι θαλάσσης για προστασία.

Επίσης, προτείνεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης ρητίνης σε θαλάσσιο περιβάλλον και συγκεκριμένα σε επισκευή και αναμόρφωση τσιμέντου. Η εφαρμογή του εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος της ζημιάς. [25]



Εικόνα 1.4: Εφαρμογές της εποξειδικής ρητίνης. (πηγή: jana-ksa.net)

Βιβλιογραφία 1^{ου} Κεφαλαίου

- [1] Y. Gnanou και M. Fontanille, *Organic and Physical Chemistry of Polymers*, Paris: Wiley-Interscience, 2002, pp. 1-12
- [2] E. K. Μπίρμπας, «Μοντελοποίηση Θρυμματισμού και βιοαποικοδόμησης του πολυαιθυλενίου με χρήση Matlab,» Κρήτη, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2017, pp. 1-6.
- [3] Σμιτζής. Ι., « Τεχνολογικά Υλικά (Σημειώσεις),» Αθήνα: ΕΜΠ, pp. 1-12.
- [4] M. Biron, *Thermoplastics and Thermoplastic Composites*, Elsevier, 2013, pp 14-18
- [5] Γ. Παναγιωτάτος, *Νανοσύνθετα Πολυμερή*, Πειραιάς: Α.Ε.Ι Πειραιά pp.3-18
- [6] J.-P. Pascault, H. Sautereau, J. Verdu και R. J. J. Williams, «Thermosetting Polymers,» New York, Marcel Dekker, 2002, pp 12-15.
- [7] V. R. Sastri, «Plastics in Medical Devices (Second Edition): Properties, Requirments and Applications,» Wiliam Andrew, 2014, pp. 19-31, 215-261.
- [8] L. McKeen, «The Effect of Sterilization Methods on Plastics and Elastomers (Fourth Edition),,» Wiliam Andrew, 2018, pp. 305-351.
- [9] A. Khalil, C. Saurabh, M. Asniza, Y. Tye, M. Nurul Fazita, M. Syakir, H. Fizree, A. Yusra, M. Haazif, M. Kassim και N. Suraya, σε *Celluse-Reinforced Nanofibre Composites*, Woodhead Publishing, 2017, pp. 1-24.
- [10] W. Ouarhim, N. Zari, R. Bouhfid και A. e. k. Qaiss, σε *Mechanical and physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Compsites*, Woodhead Publishing Series, 2019, pp. 43-60.
- [11] F. Campbell, σε *Manufacturing Processes for Advanced Composites*, Elsevier, 2004, pp. 63-101.
- [12] E. Καβελάκης, «Σύνθετα υλικά με Θερμοπλαστική Μήτρα: Χρήση Καινούργιου και παλαιωμένου φύλλου κάλυψης ερμοληπίων ως μήτρα σύνθετου υλικού,» Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010, pp. 1-7.
- [13] J. Naveen, M. Jawaid, P. Amuthakkannan και M. Chandrasekar, σε *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Woodhead Publishing, 2019, pp. 427-440.
- [14] P. Mallick, σε *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*, Woodhead Publishing, 2010, pp. 174-207.
- [15] M. Wakeman και C. Rudd, «Compresion Molding of Thermolastic Composites,» σε *Comprehensive Composite Materials*, Elsevier, 2000, pp. 915-963.

- [16] A. Adeniyi, O. Agboola, E. Sadiku, M. Durowoju, P. Olubambi, A. Babul Reddy, I. Ibrahim και W. Kopolati, σε *Design and Applications of Nanostructured Polymer Blends and Nanocomposite Systems*, William Andrew, 2016, pp. 15-38.
- [17] C. May, *Epoxy Resins, Chemistry and Technology*, New York: Marcel Dekker, pp 3, 1988.
- [18] J. Cheng, J. Li και Y. Zhang J, «Curing Behavior and thermal properties of trifunctional epoxy resin cured by 4, 4'-diaminodiphenyl sulfone,» *Express Polymer Letters*, τόμ. 3, 2009, pp. 501-509,
- [19] C. D. Craver, E. Charles και J. Carraher, «Applied Polymer Science 21th Century,» UK, Elsevier Science, 2000, pp. 199-200, 395.
- [20] Θ. Τριρακίδου, Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων Νανοσυνθέτων και μακροσυνθέτων, ΑΠΘ: διπλωματική εργασία, 2014. 34-37
- [21] Ν. Τσούβαλης, «Μηχανική Σύνθετων Υλικών,» Αθήνα, ΕΜΠ, 1998, pp. 1-28.
- [22] J. ., Brydson, «Epoxy Resins,» *Plastics Material*, τόμ. 7, pp. 772, 1999.
- [23] M. Bakar, A. Białkowska, J. Rudecka και D. Bachan, «Preparation and Properties Evaluation of an Epoxy Resin Toughened by a Combination of Reactive Polyester and Kaolin,» *Polymers and Polymer Composites*, τόμ. 20, αρ. 7, pp. 629-639, 2012.
- [24] F.-L. Jin, X. Li και S.-J. Park, «Synthesis and application of epoxy resins: A review,» σε *Journal of industrial and engineering chemistry*, Elsevier, pp. 1-11, 2015.
- [25] M. El-Hawary, H. Al-Khaiat και S. Fereig, «Perform of epoxy- repaired concrete in a marine environment,» *Cement and Concrete Research*, pp. 259-266, 2000.

Κεφάλαιο 2. Ίνες Άνθρακα

2.1 Εισαγωγή

2.1.1 Άνθρακας

Ο άνθρακας παρουσιάζει αλλοτροπικές μορφές που οφείλονται στις διαφορετικές μοριακές δομές που μπορεί να πάρει. Ως αποτέλεσμα ενώ το κύριο συστατικό παραμένει ίδιο, ο άνθρακας, το υλικό και οι ιδιότητες διαφέρουν. Χαρακτηριστικά παραδείγματα της πολυμορφικότητας (αλλοτροπικότητας) του άνθρακα είναι το διαμάντι και ο γραφίτης, που παρόλο που έχουν κοινό το χημικό στοιχείο του άνθρακα (C), διαφέρουν στην δομή και κατεπέκταση στις ιδιότητες. (1) Ο γραφίτης είναι ένα μαλακό υλικό, αδιαφανές και ηλεκτρικά αγώγιμος, ενώ το διαμάντι είναι σκληρό υλικό (το σκληρότερο έως τώρα υλικό), διαφανές στο ορατό φάσμα και μη ηλεκτρικά αγώγιμο (μονωτής). (2)

Το διαμάντι παρουσιάζει sp^3 υβριδισμένα άτομα άνθρακα ενωμένα με ομοιοπολικό δεσμό (πλήρη ηλεκτρονιακά ζεύγη). Οι κρυσταλλικές του μορφές είναι τρεις: κυβικό (100), δωδεκαεδρικό (110) και οκταεδρικό (111). Ο γραφίτης παρουσιάζει sp^2 υβριδισμό και κάθε ηλεκτρόνιο μπορεί να σχηματίσει σ και π δεσμούς. Το ένα στρώμα γραφίτη συνδέεται με άλλο, μέσω των δεσμών Van der Waals. Το 1985 ανακαλύφθηκε μία δομή άνθρακα, το φουλερένιο, που παρουσιάζει sp^2 και sp^3 υβριδισμό.

Μερικές από τις μορφές είναι ο άνθρακας σε μορφή ίνας: ο πυρολυτικός γραφίτης, ο υαλώδης άνθρακας, ίνες που η παραγωγή τους έγινε με ατμούς και οι ίνες και νήματα άνθρακα με καταλυτική χημική εναπόθεση. Επιπλέον, η αιθάλη, ο ενεργός άνθρακας, τα φουλερένια, νανοσωλήνες, ο γραφίτης και τα φουλερένια. (1)

2.1.2 Ίνες Άνθρακα

Οι πρώτη αναφορά για ίνες άνθρακα χρονολογείται το 1879 από τον Edison που χρησιμοποίησε κυτταρικές ίνες αφού τις πυρόλυσε για τη χρήση τους ως νήματα πυρακτώσεως σε ηλεκτρικούς λαμπτήρες. Η πηγή των κυτταρικών ινών ήταν το μπαμπού και το βαμβάκι. Η φυτική κυτταρίνη είναι ένα φυσικό πολυμερές που αποτελείται από επαναλαμβανόμενα μόρια γλυκόζης. Το βολφράμιο ήρθε για να αντικαταστήσει αυτού του τύπου τα νήματα στους λαμπτήρες. Όμως οι ίνες άνθρακα το 1960 χρησιμοποιήθηκαν λόγω της καλής αντοχής τους σε πλοία. (1)

Το 1950 ο R.C.Hourtz άφησε το ορλόني (πολυακρilonιτρίλιο) για περίπου 20 ώρες σε φούρνο των 200°C και παρατήρησε ότι ένα μη εύφλεκτο υλικό, με ανθεκτικότητα στη θερμότητα και αποτελεί το πρώτο παράδειγμα για την οξειδωση ινών πολυακρilonιτρίλιο. Παρόλα αυτά έχασε κατά τη διαδικασία αυτή το 30% του βάρους του, όμως δεν έλιωσε και δεν αποσυντέθηκε. Το 1959 στις ΗΠΑ στα πλαίσια ενός διαστημικού προγράμματος κατασκευάστηκαν πιο δυνατές ίνες άνθρακα από ραγιόν και άλλες πρόδρομες ουσίες. Την ίδια εποχή στην Ιαπωνία, η επιστημονική ομάδα του Shindo ανακάλυψε ότι οι ίνες PAN με προοξειδωση και σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία δίνει τελικά καλές ίνες με υψηλή απόδοση. Η υψηλή αντοχή των ινών άνθρακα οφείλεται στην πυρόλυση των ινών. Το 1965 το PAE (royal Aircraft

Establishment) συνέβαλε στην πειραματική εξέλιξη των ινών άνθρακα από PAN ενισχύοντας την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας (3)

Οι ίνες άνθρακα είναι δυνατό να κατασκευαστούν από: πίσσα, πολυμερικές ίνες(πολυακρυλονιτρίλιο) ή ανθρακούχα αέρια(ακετυλένιο). Οι δύο πρώτες πηγές παρασκευής ινών άνθρακα, η πίσσα και οι πολυμερικές ίνες, μπορεί να δώσουν ίνες είτε σε μικρά κομμάτια είτε να παρουσιάζουν μεγάλο μήκος, σε αντίθεση με τα ανθρακούχα αέρια που δίνουν ίνες μόνο με μικρό μήκος. Η διαδικασία της πυρόλυσης εφαρμόζεται για την παρασκευή ινών άνθρακα που προέρχονται από πίσσα ή πολυμερές. Οι ίνες από ανθρακούχα αέρα παρασκευάζονται από καταλυτική ανάπτυξη του άνθρακα. Η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άνθρακα εξασφαλίζεται μέσω της πρώτης διαδικασίας, της πυρόλυσης. (3)

2.2 Παραγωγή

Οι ίνες άνθρακα σύμφωνα με το πρόδρομο συστατικό που χρησιμοποιείται μπορούν να κατασκευαστούν οι εξής ίνες: ανθρακούχες ίνες από PAN, ανθρακούχες ίνες από πίσσα, ίνες άνθρακα από ραγιόν και οι ίνες άνθρακα από ανάπτυξη ατμών (varogrow). Παράλληλα μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις ίνες άνθρακα και σύμφωνα με τις μεθόδους που μπορεί να παρασκευασθεί. Αναλυτικότερα, υπάρχουν οι ίνες άνθρακα (800-1600°C, οι γραφιτικές ίνες (2000-3000°C), οι οξειδωτικές ίνες (προ-οξειδωμένες στους 200-300°C, οι ενεργές ίνες άνθρακα και οι ίνες άνθρακα με ανάπτυξη ατμών. (4)

Οι ίνες άνθρακα από PAN, που θα μελετηθούν στη συγκεκριμένη εργασία, παρουσιάζουν υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, η μέθοδος παρασκευής τους είναι σχετικά απλή και γρήγορη, συγκριτικά και με άλλες μεθόδους.

1. Ινοποίηση

Υπάρχουν δύο διαδικασίες ινοποίησης: η υγρή και η ξηρή ινοποίηση. Συνήθως γίνεται πιο συχνά η πραγματοποίηση της υγρής διαδικασίας και είναι πιο διαδεδομένη στις εμπορικές διεργασίες. Αναλυτικότερα, κατά την διεργασία αυτή γίνεται η χρήση PAN, ή συμπολυμερές του, σε περιεκτικότητα 10% έως 30% που είναι διαλυμένο σε πολικό διαλύτη(θειοκυανικό νάτριο, νιτρικό οξύ κ.α.). Το διάλυμα που σχηματίζεται αφού φιλτραριστεί, θα εξωθηθεί στο λουτρό πήξης, με τη βοήθεια ενός στροφέα. Σε αυτό του λουτρό πήξης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν διαλύματα το θειακυανικό νάτριο, διμεθυλοκεταμίδιο. Παράμετροι όπως η συγκέντρωση του διαλύματος και του λουτρού πήξης, καθώς και η θερμοκρασία του λουτρού καθορίζουν τον ρυθμό που σχηματίζονται οι ίνες. (5)

2. Οξείδωση/Σταθεροποίηση

Στο στάδιο της σταθεροποίησης η θερμοκρασία κυμαίνεται στους 200°C έως 260°C με σκοπό να βελτιωθούν οι ιδιότητες των ινών. Πρακτικά οι ίνες θα παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στη φωτιά και δεν θα λιώνουν. Αυτό οφείλεται στην ετεροαρωματική δομή που σχηματίζεται κατά τη διαδικασία αυτή. Αν και η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί με απουσία οξυγόνου, το οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί

προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της ίνας και αυτό οφείλεται στις διαμοριακές επιδράσεις. Οι μορφές που μπορεί να καταγραφούν κατά τη γραφίτοποίηση είναι η κυκλοποιημένη και η αφυδατωμένη δομή. Με την παρουσία του οξυγόνου μπορούν να σχηματισθούν οξειδωμένες μορφές. (6) Κατά τη διαδικασία ενσωματώνεται περίπου 8% οξυγόνο στις ίνες. (7) αξίζει να ειπωθεί ότι όλα το στάδιο αυτό είναι σημαντικό καθώς απαιτεί χρόνο, και κατανάλωση ενέργειας για να επιτευχθεί η κατασκευή των ινών άνθρακα. Πρέπει σε αυτές τις διεργασίες να δίνεται η κατάλληλη προσοχή καθώς λαμβάνουν χώρα περίπλοκες αντιδράσεις, η οξείδωση, η αφυδρογόνωση και η κυκλοποίηση, που τελικά καθορίζουν και το τελικό αποτέλεσμα. (8)

3. Ανθρακοποίηση

Η ανθρακοποίηση είναι μια διαδικασία θερμικής επεξεργασίας σε θερμοκρασίες από 300°C έως 1500°C. Κατά την άνοδο της θερμοκρασίας μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής φαινόμενα:

- Θερμοκρασία 300-400°C: ενδομοριακή αφυδάτωση
- Θερμοκρασία 400-600°C: απονιτροποίηση και αφυδάτωση των διασταυρούμενων δεσμών
- Θερμοκρασία 600-1300°C: συνεχίζεται η ίδια κατάσταση των προηγούμενων θερμοκρασιών

Οι ίνες άνθρακα σε αυτό το σημείο αποτελούνται από γραφίτικά επίπεδα που είναι παράλληλα και έχουν συγκεκριμένες αποστάσεις μεταξύ τους. Το κάθε επίπεδο αποτελείται από ένα δισδιάστατο εξαγωνικό δίκτυο. Όμως, πρέπει να τονισθεί ότι τα πολυστρωματικά φύλλα δεν είναι πλήρως διατεταγμένα με αποτέλεσμα να παρατηρείται μία χαοτική γραφίτική κατασκευή.

Η διαδικασία ανθρακοποίησης ολοκληρώνεται σε 40 λεπτά και πραγματοποιείται ταυτόχρονη ένταση που βοηθάει στον προσανατολισμό του κρυστάλλου. (4) Κατά τη διαδικασία της ανθρακοποίησης παρατηρείται ότι το μη ανθρακούχο περιεχόμενο χάνεται με την μορφή πτητικών αερίων, και είναι τα εξής:

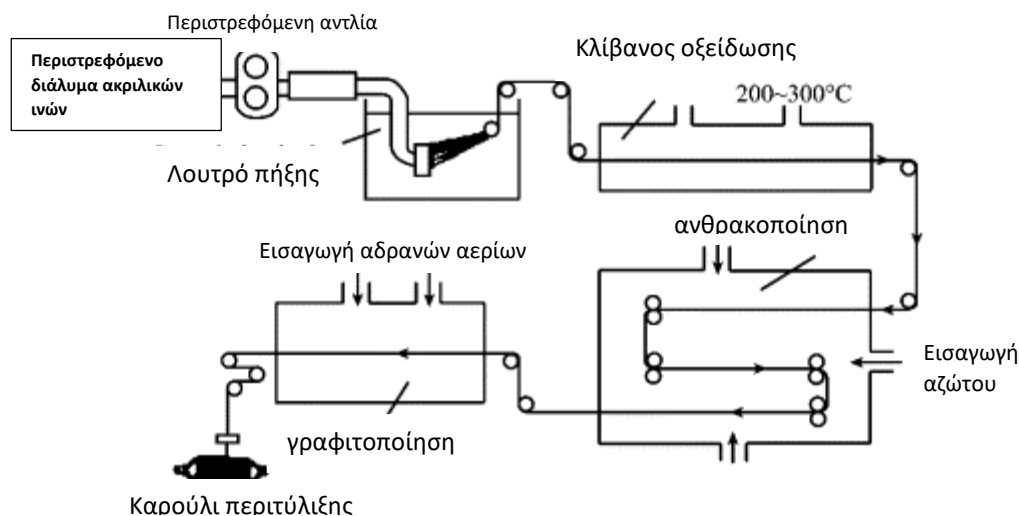
- Αζωτούχα αέρια : σε θερμοκρασίες 350-700°C εκλύεται NH_3 , σε θερμοκρασίες 600-900 °C το HCN και το N_2 στους 1100 °C
- Οξυγονούχα αέρια: εκλύεται στους 300-400 °C το CO_2 , το CO στους 700 °C, και το H_2O στους 300-500°C
- Άλλα αέρια που μπορεί να εκλυθούν είναι: το CH_4 στους 500-600°C και το H_2 σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 700°C. (9) (10) (11)

Για να παρασκευασθούν ίνες χωρίς ατέλειες και για να μην υπάρξει υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων πρέπει το άζωτο που παρέχεται να ρέει αντίθετα μέσα στο χώρο επεξεργασίας και με χαμηλή ροή.

4. Γραφίτοποίηση

Κατά το στάδιο της ανθρακοποίησης, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιήθηκε αέριο αζώτου (N_2). Κατά το στάδιο της γραφίτοποίησης η χρήση του πρέπει να αποφεύγεται καθώς, είναι μία διαδικασία που πραγματοποιείται σε βαθμούς άνω των $1700^{\circ}C$ μέχρι και τους $3000^{\circ}C$. Το άζωτο αντιδρά με τον άνθρακα στις θερμοκρασίες της γραφίτοποίησης με αποτέλεσμα να παράγεται κυανογένιο (cyanogen). Κατά το στάδιο αυτό παραλαμβάνουμε ίνες, με υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας (modulus) από του προηγούμενου σταδίου και τελειοποιημένες δομικά (γραφιτική δομή). (6) Επειδή η δομή της ίνας κατά την ανθρακοποίηση είναι παραπλήσια κατά την γραφίτοποίηση, πρέπει η τελευταία να διαρκέσει κάποια δευτερόλεπτα έως λεπτά. Παράλληλα, με την εφαρμογή ατμοσφαιρικής πίεσης κατά τη διαδικασία, η αντοχή της ίνας είναι και 40% μεγαλύτερη συγκριτικά με μία ίνα που είναι υπό φυσιολογική πίεση. (4)

Υπάρχει άμεση σχέση στην αρχική ίνα και στην τελική ίνα ως προς τις μηχανικές ιδιότητες. Η πρόδρομη ίνα με ικανοποιητική ελαστικότητα και αντοχή θα αποδώσει αντίστοιχα καλή ίνα άνθρακα με την αρχική. Ένας τρόπος για αυτά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα, λόγω της άμεσης σχέσης πρόδρομης και τελικής ίνας, είναι να χρησιμοποιούνται πολυμερή με αρχικό υψηλό μοριακό βάρος και υψηλό τέντωμα στις αρχικές ίνες. (7)



Εικόνα 2.1: Απεικόνιση σταδίων παραγωγής ιών άνθρακα (πηγή: sciencedirect.com)

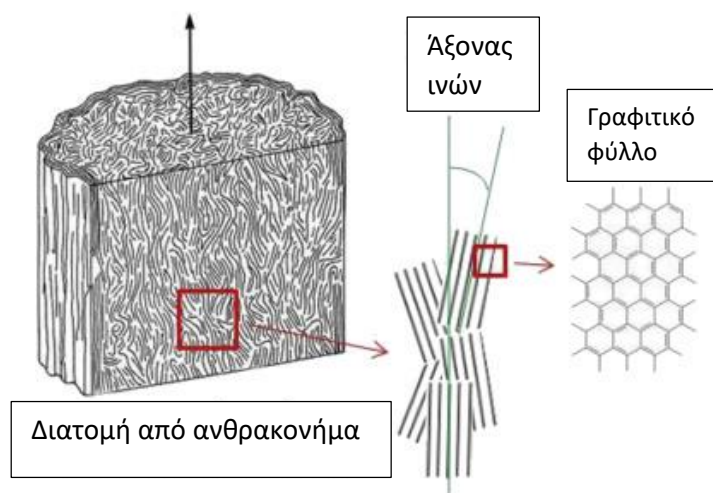
2.3 Δομή

Η ίνα άνθρακα είναι αποτέλεσμα συνένωσης πολλών λωρίδων άνθρακα μαζί που προέρχονται από την ένωση πολλών ανθρακικών φύλλων. Αναλυτικότερα, οι ίνες άνθρακα έχουν την ίδια μορφή με τον γραφίτη και είναι διατεταγμένες με την μορφή φύλλων, αποτελούμενων από εξαγωνικού δακτυλίου.

Η διάμετρος των ιών άνθρακα κυμαίνεται περίπου από $0.005-0.010mm$ και η απόσταση ανάμεσα στα γραφίτικά επίπεδα είναι $0,34nm$. Η ίνα άνθρακα αποτελείται από μικροϊνίδια, τα δομικά της στοιχεία, που δίνουν τη συνολική τελική της μορφή

και έχουν παράλληλο προσανατολισμό παράλληλο προς τον άξονα της ίνας. Κάθε γραφικό επίπεδο συγκρατείται με το άλλο μέσω δυνάμεων Van der Waals, και επιπλέον κάθε ένα γραφικό επίπεδο έχει sp^2 υβριδισμό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται βενζολικοί δακτύλιοι από τα υβριδισμένα άτομα που συνδεόνται και σχηματίζουν δισδιάστατα φύλλα.

Ο διαφορετικός προσανατολισμός των επιπέδων και η ύπαρξη ατελειών σε αυτά που σημειώθηκαν κατά τη διαδικασία της παραγωγής των συγκεκριμένων ιών καθορίζουν την πραλλακτικότητα μεταξύ τους ως προς τις ηλεκτρικές και τις μηχανικές ιδιότητες. (12)



Εικόνα 2.2: Απεικόνιση της ίνας άνθρακα αποτελούμενη από μικροϊνίδια (πηγή: sciencedirect.com)

2.4 Ιδιότητες

Οι ιδιότητες των ιών άνθρακα καθορίζονται από την δομή του. Μερικές από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των ιών είναι:

- Χαμηλή πυκνότητα
- Υψηλή δύναμη εφελκυσμού και αντοχής
- Χαμηλό θερμικό συντελεστή διαστολής
- Χημική σταθερότητα, ακόμη και σε ισχυρή οξεία
- Βιοσυμβατότητα
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα
- Χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση
- Πολύ καλή αντοχή στον ερπυσμό
- Μικρό κόστος

Μερικές αδυναμίες των ιών άνθρακα είναι:

- Η ανισοτροπία, κατά τις αξονικές και εγκάρσιες διευθύνσεις
- Χαμηλή τάση
- Η αντοχή σε θλίψη είναι μικρότερη συγκριτικά με τον εφελκυσμό

- Οξειδώνεται και γίνεται αέριο, για παράδειγμα CO, σε θερμοκρασίες άνω των 400°C.
- Οξείδωση των ινών καταλύεται από αλκαλικό περιβάλλον (13)

Οι ίνες άνθρακα αποτελούν ένα κορυφαίο προϊόν άνθρακα που οφείλεται στην υψηλή αντοχή και στην ακαμψία του. Συνδυάζει πλεονεκτικά χαρακτηριστικά, όπως το χαμηλό βάρος, με αποτέλεσμα να έχει εφαρμογές σε αθλητικά είδη μέχρι και σε αεροναυπηγικές κατασκευές. Πρέπει να τονισθεί ότι οι ιδιότητες της τελικής ίνας οφείλονται στον τρόπο παρασκευής της και στη δομή της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ίνες άνθρακα από PAN και οι ίνες άνθρακα από πίσσα, που ενώ καταλήγουν και οι δυο στην κατασκευή ινών άνθρακα, τελικά έχουν διαφορετικές ιδιότητες τα τελικά προϊόντα που προκύπτουν. Είναι εύκολα κατανοητό ότι οι πρόδρομες ουσίες, έχουν καταλυτικό ρόλο στην δομή και στην κατασκευή των ινών και επομένως και στις τελικές ιδιότητες. (5) Ειδικότερα θα αναλυθούν οι σημαντικότερες ιδιότητες των ινών άνθρακα:

Μηχανικές Ιδιότητες

Ο ισχυρός δεσμός μεταξύ των γραφιτικών στρωμάτων εξηγεί τις καλές μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν οι ίνες άνθρακα. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι η αντοχή εφελκυσμού και το μέτρο ελαστικότητας αφορούν τον διαμήκη άξονα της ίνας. Κατά τον εγκάρσιο άξονα της ίνας, οι τιμές θα είναι πολύ μικρότερες που οφείλονται στις δυνάμεις Van der Waals μεταξύ των ατόμων γειτονικών στιβάδων. Ο προσανατολισμός των γραφιτικών κρυσταλλιτών καθορίζουν το μέτρο ελαστικότητας και οι δεσμοί μεταξύ των ατόμων και οι δομικές ατέλειες της ίνας καθορίζουν τις τιμές του εφελκυσμού. Οι μηχανικές ιδιότητες της ίνας άνθρακα θα καθορίσουν και τη συμμετοχή της σε εφαρμογές σύνθετων υλικών με πολυμερικές ή ανόργανες μήτρες. Ο τανυσμός κατά τη θερμική επεξεργασία βελτιώνει τις μηχανικές ιδιότητες, καθώς επίσης και η επιφανειακή επεξεργασία τους σε ηλεκτρολυτικά διαλύματα. (14)

Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Οι συνθήκες παραγωγής και οι προσμίξεις στη δομή των ινών άνθρακα καθορίζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες τους. Μπορούν να χαρακτηρισθούν ως αγωγοί, ίνες που παράγονται σε υψηλές θερμοκρασίες και ως ημιαγωγοί, οι ίνες που παράγονται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες οφείλονται στον απεντοπισμό των π-ηλεκτρονίων. (14)

Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε τύπου ίνας. Επιπλέον, η αντίσταση παρατηρείται ότι μπορεί να μειωθεί κατά την αύξηση της δύναμης του εφελκυσμού. (13)

Θερμική Αγωγιμότητα

Ανάλογα με τις εφαρμογές των ινών άνθρακα μπορούν να σχεδιαστούν ίνες είτε με υψηλή είτε με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα και ακόμα πραγματοποιούνται προσπάθειες διεύρυνσης αυτής της δυνατότητας. Η παραλλακτικότητα των ινών άνθρακα δεν μπορεί να δώσει συγκεκριμένη απάντηση για την θερμική τους αγωγιμότητα. (15)

Αντίσταση στην Οξείδωση

Ο βαθμός γραφίτιοποίησης καθορίζει και την τελική συμπεριφορά των ινών άνθρακα κατά της οξείδωσης. Αναλυτικότερα αυξάνεται η αντίσταση όσο αυξάνεται και ο βαθμός της γραφίτιοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι μία ελαφρώς μικρή οξείδωση θα ωφελήσει τις ίνες άνθρακα ως προς το βάρος τους, καθώς θα αυξηθεί σε μικρό βαθμό. Το τελευταίο οφείλεται στον σχηματισμό χημικών δεσμών στις λειτουργικές ομάδες της επιφάνειας που περιέχουν το οξυγόνο(οξυγονούχες ενώσεις). Οι οξυγονούχες ομάδες βοηθούν σημαντικά σε εφαρμογές σύνθετων υλικών, για την καλύτερη συγκόλληση των ινών άνθρακα με τη μήτρα. Επίσης, οι οξυγονούχες αυτές ομάδες, για την εφαρμογή ινών ως ηλεκτρόδια, ενισχύουν την ηλεκτροχημική τους απόκριση. Σε περίπτωση που σημειωθεί έντονη οξείδωση των ινών άνθρακα, τότε παρατηρείται και η απώλεια βάρους τους, καθώς ο άνθρακας απομακρύνεται με τη μορφή αερίων (CO και CO₂). (13)

Βιοσυμβατότητα

Η αναζήτηση νέων υλικών συμβατών με τον ανθρώπινο οργανισμό οδήγησε στην ανακάλυψη των πλεονεκτημάτων που εμφανίζουν οι ίνες άνθρακα ως βιοϋλικά. Η αντοχή και πυκνότητα, είναι δύο βασικές ιδιότητες που μοιάζουν με το ανθρώπινο οστό. (16) Οι ίνες με την εισαγωγή τους στον οργανισμό δεν προκαλούν ανοσολογική απόκριση, καθώς δεν αναγνωρίζεται ως ξένο σώμα. Παράλληλα παρατηρείται ότι με την παραμονή τους ξεκινάει η δημιουργία και ανάπτυξη ιστού γύρω από τις ίνες. (17)

2.5 Εφαρμογές

Η χρήση των ινών άνθρακα στα σύνθετα υλικά αποτελεί μία λύση αντικατάστασης των μετάλλων σε εφαρμογές, όπως τα αεροσκάφη. Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα μπορούν να παρουσιάσουν χαμηλότερο βάρος από 20 έως και 30 % συγκριτικά με τα μέταλλα. Επιπλέον, χαρακτηριστικά όπως η αυξημένη αντοχή, ανθεκτικότητά τους, η ευελιξία προσαρμογής στις απαιτήσεις του σχεδιασμού τα καθιστά ακόμα πιο σημαντικά σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Παρόλο που ήδη η χρήση τους είναι ευρεία σε αεροναυπηγικές κατασκευές, με περαιτέρω έρευνα για την χρήση τους θα επιτραπεί η επιπλέον μείωση του συνολικού βάρους των αεροπλάνων. (1)

Οι ίνες άνθρακα στην αεροναυπηγική

Οι ίνες άνθρακα ως μέσο ενίσχυσης στα σύνθετα υλικά μπορούν χρησιμοποιηθούν στα αεροσκάφη και ειδικά στις μηχανές αεροστροβίλων. Κατά τη λειτουργία των

αεροστροβίλων μπορούν να αναπτυχθούν εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες στις οποίες είναι ανθεκτικές οι συγκεκριμένες ίνες. Συγκεκριμένα χαρακτηρίζονται ως απαραίτητα και κατάλληλα υλικά για τέτοιου είδους εφαρμογές, ειδικά αν οι θερμοκρασίες δεν ξεπερνούν τους 1500°C. Επιπλέον ο σχεδιασμός αεροσκαφών με σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα μπορούν συμβάλλουν στη μείωση κατά 20% του βάρους τους συγκριτικά με αεροσκάφη που αποτελούνται από αλουμίνιο. Επομένως αναμένεται και αναμενόμενη μείωση στην κατανάλωση καυσίμων σε ποσοστό 20% (18)

Οι ίνες άνθρακα στην αυτοκινητοβιομηχανία

Ο σχεδιασμός αυτοκινήτων από ίνες άνθρακα ως μέσο ενίσχυσης σε μήτρα πολυμερών εφαρμόζεται καθώς συντελεί στη μείωση του βάρους του αυτοκινήτου. Αυτός ο ελαφρύς σχεδιασμός αντικαθιστά το αλουμίνιο χωρίς να υποβαθμίζει τις λειτουργίες του οχήματος. Επιπλέον έχουν γίνει προσπάθειες αντικατάστασης των ινών PAN με ίνες λιγνίνης, καθώς το μισό κόστος μίας συμβατικής ίνας ανήκει στο πρόδρομο πολυακρυλονιτρικό PAN. (19) Οι ίνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσω των σύνθετων υλικών στο αυτοκίνητο για την κατασκευή εσωτερικών χώρων, του σασί και των ηλεκτρικών εξαρτημάτων (1)

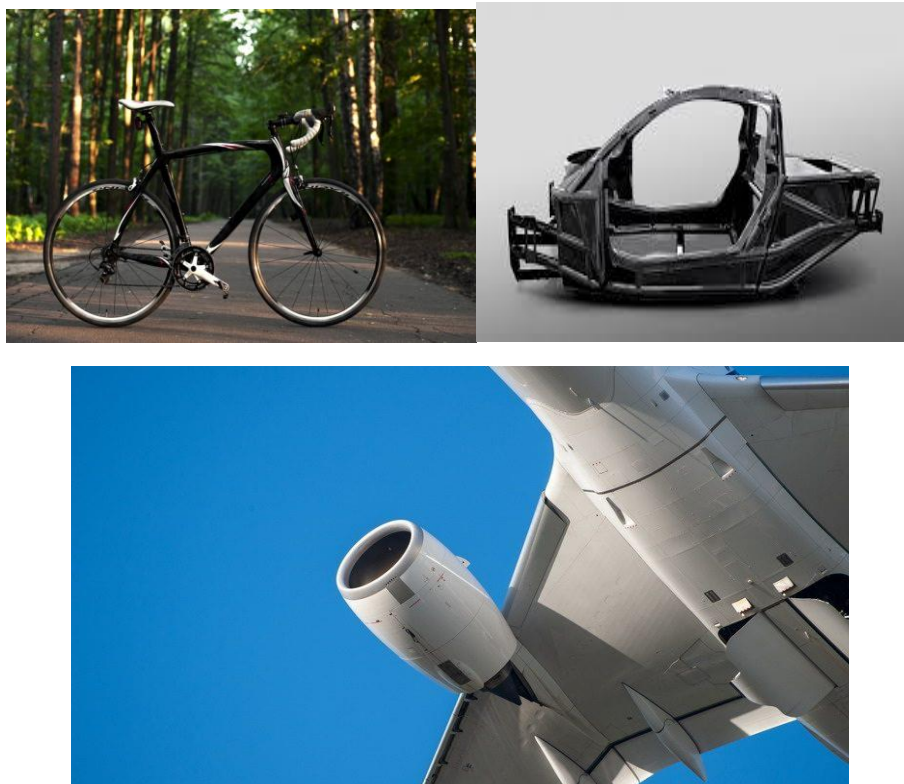
Οι ίνες άνθρακα στα αθλητικά είδη

Οι απαιτήσεις στον σχεδιασμό αθλητικών ειδών αυξάνονται συνεχώς, καθώς όλο και περισσότεροι άνθρωποι επιδιώκουν στον ελεύθερο τους χρόνο να ασχοληθούν με τον αθλητισμό, αλλά επιπλέον αυξάνεται και ο ανταγωνισμός ανάμεσα στους αθλητές με αποτέλεσμα όλο και περισσότερες απαιτήσεις για τη βελτιστοποίηση του αθλητικού εξοπλισμού. Οι ίνες άνθρακα συμμετέχουν σε σύνθετα υλικά για την κατασκευή αθλητικών ειδών και χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν: οι ρακέτες του τένις, τα ποδήλατα, το σκι, το κανό. Η εφαρμογή τους σε αυτές τις κατασκευές βοηθάει στη καλύτερη διαχείριση του εξοπλισμού από τον ίδιο τον αθλητή, επειδή ο εξοπλισμός είναι ελαφρύς και συμβάλλει στην ευκολία της κίνησης και στο καλύτερο αποτέλεσμα της απόδοσης του αθλητή. Τα σύνθετα υλικά με ίνες άνθρακα ήρθαν να αντικαταστήσουν το μέταλλο και το ξύλου σε τέτοιου είδους εξοπλισμούς χαρίζοντας καλύτερη απόδοση και ελευθερία στον σχεδιασμό τους. Οι μηχανικές ιδιότητες τους, όπως η αντοχή, η ανθεκτικότητα και η ελαστικότητα επιβεβαιώνουν την επιλογή χρήσης αυτών των υλικών. Τέλος, η προώθηση αυτών των αθλητικών ειδών μπορεί να βασιστεί στο χαμηλό κόστος των πρώτων υλών και της επεξεργασίας, αλλά και στην ανακύκλωση τους, λόγω στο ότι η μήτρα των σύνθετων υλικών που είναι θερμοπλαστική μπορεί να ανακυκλωθεί. (20)

Οι ίνες άνθρακα ως βιοϋλικά

Οι ίνες άνθρακα έχουν εφαρμογή ως βιοϋλικά με τη συμμετοχή τους σε σύνθετα υλικά. Οι ίνες άνθρακα συνήθως θα αναμειχθούν με κάποιο πολυμερές. Η επιλογή αυτών των υλικών γίνεται καθώς επιτυγχάνεται μειωμένο βάρος με καλές αντοχές και χάρη στη βιοσυμβατότητα που παρουσιάζει μπορεί να συμβάλει στην επιδιόρθωση του οστού. Μία συνήθη εφαρμογή των ινών άνθρακα είναι στην

ορθοπεδική, μέσω της συμμετοχή τους σε σύνθετα υλικά, με πολυαιθερική αιθερική κετόνη (PEEK). Επίσης, αξίζει να σημειωθεί μία άλλη εξίσου σημαντική εφαρμογή των ινών άνθρακα στην ιατρική, που είναι τα ικρίωματα. Αναλυτικότερα, μπορούν να συμβάλλουν στην αναγέννηση ιστών με αποτέλεσμα να μπορούν να δώσουν λύσεις στην αναγεννητική ιατρική. Η αναγεννητική ιατρική περιλαμβάνει μεθόδους όπως η κυτταρική θεραπεία και γενετική θεραπεία. Οι ίνες άνθρακα μπορούν να εισαχθούν στον ανθρώπινο οργανισμό και να συμμετέχουν σε θεραπείες, λόγω της βιοαποδοτικότητας και βιοδραστικότητας με τα βιολογικά συστήματα. Σε δοκιμή in vivo είναι βιοενεργά υλικά και δεν διαβρώνονται και παρατηρήθηκε από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, η δημιουργία οστικού ιστού γύρω από τις ίνες. Μία ακόμη μελέτη in vitro, που έγινε η κυτταρική καλλιέργεια οστεοβλαστών με ίνες άνθρακα, έδειξε την βελτίωση των κυττάρων και την ενεργοποίησή τους. (21)



Εικόνα 2.3: Εφαρμογές ινών άνθρακα (πηγές: taurigasience.com, famousbusinessman.com, thoughtco.co)

Βιβλιογραφία 2^{ου} Κεφαλαίου

1. **Park, Soo-Jin.** Carbon Fibers. Korea : Springer Series, 2015, σσ. 1-27.
2. **Pierson, Hugh.** Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes. s.l. : Noyes Publications, 1993.
3. **P., Morgan.** *Carbon Fibers and their Composites.* New York : Taylor & Francis, 2005.
4. **Wang Ru, Zheng Shui, Zheng Ya.** *Polymer Matrix Composites and Technology.* s.l. : Woodhead Publishing, 2011. σσ. 49-58.
5. **D., Edie D.** The effect of processing on the structure and properties of carbon fibers. *Carbon.* s.l. : Elsevier, 1998, Τόμ. 36, σσ. 345-362.
6. **Xiangwu, Zhang.** *Fundamentals of fiber science.* North Carolina : Destech Publications, 2014. σσ. 205-215.
7. **Gupta B S, Afshari M.** *Handbook of tensile properties of textile and technical fibres.* s.l. : Woodhead Publishing, 2009. σσ. 486-528.
8. **Khayyam Hamid, Jazar Reza N, Nunna Srinivas ,Golkarnarenji Gelayol, Badii Khashayar, Fakhroseini Seyed Mousa, Kumar Satish, Naebe Minoo.** PAN precursor fabrication, application and thermal stabilization process in carbon fiber production: Experimental and mathematical modelling. *Progress in Material Science.* Elsevier, 2020, Τόμ. 107, σσ. 1-39.
9. **E. Fitzer.** *Composites Carbon Fibers and their.* Berlin : Spinger Verlag, 1985. 62-77.
10. **Jain M., Abhiraman A.** *Conversion of acrylonitrile-Based precursor fibers to carbon Part 1.* 1987. σσ. 278-300. 22.
11. **Henrici-Olive G, Olive S.** *The chemistry of carbon fiber formation from polyacrylonitrile.* 1983. σσ. 1-60.
12. **Κωνσταντίνος, Καρυωτάκης.** Πειραματική μελέτη στατικής και δυναμικής διάτρησης πορωδών και σύνθετων υλικών. 2016, σσ. 9-11.
13. **D. Chung.** *Carbon Fiber Composites.* s.l. : Butterworth-Heinemann, 1994. σσ. 1-11,65-78.
14. **Νικόλαος, Κουτρουμάνης.** *Χαρακτηρισμός ινών άνθρακα υψηλής αντοχής.* Πανεπιστήμιο Πατρών. Πάτρα : Διπλωματική εργασία, 2014. σσ. 19-28.
15. **Bhatt P., Goe A.** Carvon Fibres: Production, pProperties and Potential Use. *Material science research India,* 2017, Τόμ. 14, 1, σσ. 52-57.
16. **R., Petersen.** Carbon Fiber Biocompatibility for Implants. *Fibers.* 2016, σσ. 1-13.
17. **D, Wolter.** Biocompatibility of carbon fibre and carbon fibre microparticles. 1983, σσ. 26,28-36.
18. **J.P Brown** Carbon fibre composites in aerospace and aviation, 1-35, 2017.
19. **Mains H., Tager O., Konre E., Hilfert L., Busse S., Edelmann F. T., Herrmann A. S.** Lignin-as an alternative precursor for sustainable and cost effective automotive carbon fiber. *Journal of material research and technology.* Elsevier, 2015, Τόμ. 4, 3, σσ. 283-296.

20. **D., Tang.** The application of carbon fiber material in sport equipment. *Applied Mechanics and Materials*. Trans Tech Publicationw, 2014, Τόμ. 443, σσ. 613-616.

21. **Saito N, Kaoru A, Usui Y, Shimizu M, Hara K, Narita N, Ogihara N, Nakamura K, Ishigaki N, Kato H, Haniu H, Taruta S, Kim Y A, Endo M.,** Application of carbon fibers to biomaterials : A new era of nano-level control of carbon fibers after 30-years of development. *Chem. Soc. Rev.*, 2011, Τόμ. 40, σσ. 3824-3834.

Κεφάλαιο 3. Έριο

3.1 Εισαγωγικά

Το έριο ή αλλιώς μαλλί ονομάζεται το τρίχωμα που καλύπτει το σώμα του προβάτου. Ο ρόλος του είναι προστατευτικός για το ζώο καθώς είναι πάνω από την επιφάνεια του δέρματος και διατηρεί τη θερμοκρασία του σώματος του ζώου σταθερή. (1) Το μαλλί είναι μία εμπορική ίνα, από την αρχαιότητα με ποικίλες χρήσεις, όπως στον ρουχισμό και στα χαλιά. Στη σημερινή εποχή, τη θέση του φυσικού μαλλιού έχει πάρει η συνθετική ίνα που μιμείται τις ιδιότητες και πλέον ανταγωνίζεται την ποιότητά της. (2) Εκτιμάται ότι η εριοπαραγωγή μπορεί να φτάσει και τα δύο εκατομμύρια μετρικού τόνους παγκοσμίως ανά έτος, με πρώτη στην παραγωγή την Κίνα και έπειτα ακολουθεί η Αυστραλία, σχετικά με την ετήσια παραγωγή για το 2013 (3). Ο αριθμός των προβάτων για την ελληνική προβατοτροφία εκτείνεται στα 8.429.654 πρόβατα, με 842.965 ζωικές μονάδες (47,5% των συνολικών ζωικών μονάδων) για το έτος 2018 (4)

3.2 Χημική Σύσταση της τρίχας

Τα χημικά στοιχεία που αποτελούν μία τρίχα του μαλλιού είναι: ο άνθρακας (C), το υδρογόνο (H₂), το οξυγόνο (O₂), το άζωτο (N₂), το θείο (S).

Στοιχείο	Βάρος (%)
Άνθρακας	50-52
Υδρογόνο	6,5-7,5
Οξυγόνο	22-25
Άζωτο	16-17
Θείο	3-4

Πίνακας 3.1: Ποσότητα % στοιχείων στην τρίχα. (5)

Η τρίχα αποτελείται κυρίως από μία ομάδα πρωτεϊνών, την α-κερατίνη. Η συνολική σύσταση των αμινοξέων που αποτελούν την κερατίνη βασίζεται σε δύο είδη πρωτεϊνών, της χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και της υψηλής περιεκτικότητας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα του παραπάνω αποτελεί η φυλή Merinos που λόγω της υψηλής περιεκτικότητας κυστίνη(CYS), η κατηγορία του μαλλιού της συγκεκριμένης φυλής ανήκει στις πρωτεΐνες της υψηλής περιεκτικότητας σε θείο. Η ποσότητα του θείου προέρχεται κυρίως από το αμινοξύ κυστίνη. Η κυστίνη αποτελείται από δύο άτομα θείου, τα οποία μεταξύ τους σχηματίζουν δισουλφιδικό δεσμό. Ο δισουλφιδικός δεσμός χαρακτηρίζεται ως ο σημαντικότερος, ενώ υπάρχουν και επιπλέον άλλοι δύο τύποι δεσμών, οι γέφυρες αλάτων (salt bridges) και ακολουθεί ο τρίτος τύπος δεσμών, ο ισοπεπτιδικός. Πρέπει να σημειωθεί ότι και ο δεσμός υδρογόνου είναι καθοριστικός στη σύνθεση του μαλλιού

Τα λιπίδια που μπορεί να διαθέτει διακρίνονται σε δύο κατηγορίες. Αρχικά, τα εξωτερικά λιπίδια προσδίδουν την λιπαρότητα στην τρίχα. Το πιο χαρακτηριστικό συστατικό που προσδίδει την λιπαρότητα στην τρίχα είναι η λανολίνη. (5) Η λανολίνη έχει αντιμικροβιακή δράση και προσφέρει ενυδάτωση (6), και απομακρύνεται από το μαλλί με τη χρήση ζεστού νερού και απορρυπαντικού. (7) Στη συνέχεια, τα εσωτερικά

λιπίδια αποτελούνται από χοληστερόλη, λιπαρά οξέα και πολικά οξέα. Τα λιπίδια προέρχονται από τις κυτταρικές μεμβράνες.

Η παρουσία μεταλλικών αλάτων, υπολλειμάτων νουκλεϊκών οξέων και υδρογονανθράκων περιορίζεται στο 1%. Τα νουκλεϊκά οξέα, που μπορούν να απομονωθούν από την τρίχα αποτελούν την ταυτότητά της, καθώς είναι εύκολο μέσω αυτών να καταλάβουμε από ποιο είδος ζώου προέρχεται. (5)

3.3 Ανατομία και Μορφολογία της Τρίχας

Μέσα από ένα μικροσκόπιο σε ένα δείγμα μίας δέσμης τριχών μπορούμε να συμπεράνουμε ότι υπάρχει μία διαφοροποίηση σχετικά με το εύρος της διαμέτρου από τρίχα σε τρίχα. Η διάμετρος, ή αλλιώς λεπτότητα, καθορίζει την ποιότητα της τρίχας και μπορεί να χαρακτηριστεί το σχήμα της ως κυλινδρικό με τραχιά επιφάνεια (8)

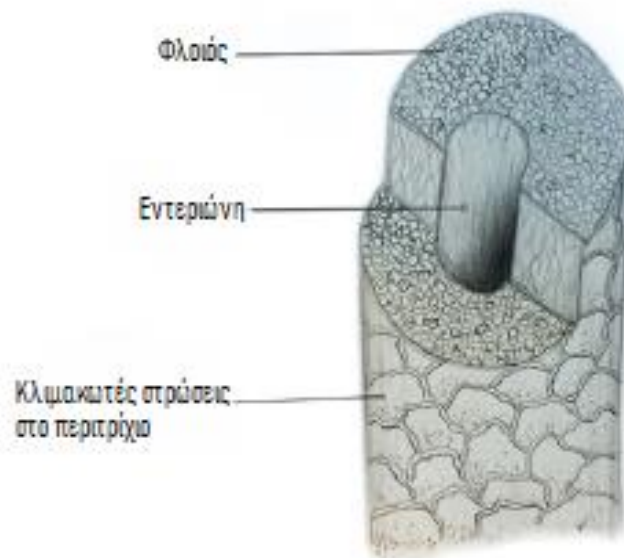
Η σύνθεση της τρίχας από την εξωτερική στρώση στην εσωτερική είναι η εξής:

Α) το περιτρίχιο, το επιφανειακό μέρος της τρίχας, αποτελείται από κερατοειδή κύτταρα που έχουν πλατιά μορφή και είναι χωρίς πυρήνα. Η κάτω επιφάνεια των κυττάρων είναι κολλημένη, και η άλλη ελεύθερη με φορά καθοδική, δίνοντας την εντύπωση κεραμοσκεπής. Από το μικροσκόπιο κοιτάζοντας τη δομή της τρίχας παρατηρούνται κλιμακωτά επίπεδα, δίνοντας την άποψη ότι παρατηρείται μία κεραμοσκεπή. Αυτές οι κλιμακωτές στρώσεις έχουν προστατευτικό ρόλο στο σώμα του ζώου καθώς βοηθούν στην ενυδάτωση του και ταυτόχρονα συγκρατούν τυχόν ακαθαρσίες. Η μαλακότητα στο σύνολο του πόκου καθορίζεται ανάλογα με την απόσταση και το μέγεθος των επιφανειών που υπάρχουν. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η φυλή Merinos, που ενδύκνεται για την μαλακότητα που παρουσιάζει ο πόκος, και ο λόγος είναι τα πολυάριθμα και μικρά επίπεδα που διαθέτει η τρίχα του συγκεκριμένου ζώου. Επίσης θα μπορούσε να τονισθεί ότι οι κλιμακωτές στρώσεις στο μαλλί προβάτου δεν τείνουν να είναι κάθετες προς τον κεντρικό άξονα της τρίχα αλλά εκτείνονται προς τα έξω, σχηματίζοντας γωνία με τον άξονα (1) (8) (9)

Β) ο φλοιός, που αποτελεί και το κύριο δομικό μέρος της τρίχας αποτελείται από δύο τύπους κυττάρων, τα ορθοφλοιϊκά (orthocortex) και τα παραφλοιϊκά (paracortex). Ο φλοιός καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της τρίχας σε ποσοστό περίπου 90% και είναι εκείνος που τελικά προσδίδει στην τρίχα την συνολική ελαστικότητα και αντοχή. (9)

Γ) ο μυελός ή εντεριώνη, αποτελείται από κερατινοποιημένα κύτταρα διαφόρων σχημάτων με επικρατέστερα το πολυγωνικό και κυβικό σχήμα. Ο μυελός είναι ένα κανάλι αποτελούμενο από κοίλους σωλήνες. Η παρουσία ή όχι της εντεριώνης καθορίζεται από την διάμετρο που παρουσιάζει η τρίχα. Αναλυτικότερα, η παρουσία της εντοπίζεται σε μεγάλης διαμέτρου τρίχες και η απουσία της στις μικρής διαμέτρου με αποτέλεσμα ο φλοιός να αποτελείται από δύο τμήματα: τον ορθοφλοιό και τον παραφλοιό. Τέλος, θεωρείται μη επιθυμητή η παρουσία της εντεριώνης καθώς

ευθύνεται για την υποβάθμιση της ποιότητας του μαλλιού γιατί είναι αδύναμες και αρκετά λεπτές. (9)



Εικόνα 3.5: Η σύνθεση της τρίχας. (8)

Σχετικά με τη ανατομία της τρίχας μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής τρία μέρη:

- A) τη ρίζα, που βρίσκεται εσωτερικά του θύλακα της τρίχας του ζώου και αποτελείται από ζωντανά κύτταρα
- B) το στέλεχος, που βρίσκεται πάνω από το θύλακα της τρίχας, το ορατό τμήμα πάνω από την επιδερμίδα. Αποτελείται από σύνολο νεκρών κυττάρων.
- Γ) την άκρη, που βρίσκεται στο εξωτερικό άκρο της τρίχας με παραλλαγές του οξέος άκρου σε κάθε τρίχα. (1)

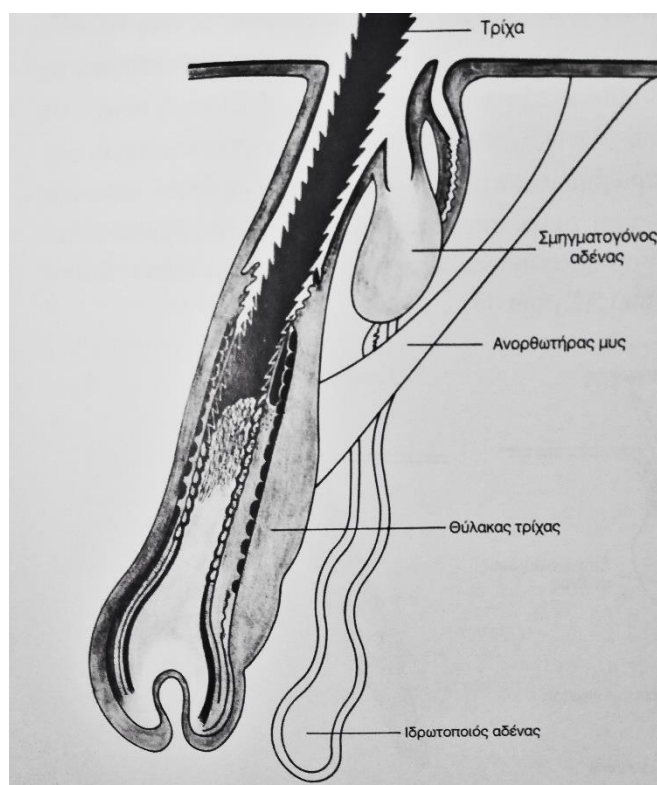
3.4 Ομαδοποίηση του συνόλου των τριχών

Η ομαδοποίηση του συνόλου των τριχών προκύπτει με την βοήθεια μιας ουσίας, της οισύπης. Η οισύπη είναι μία λιπαρή ουσία με προστατευτικό ρόλο που αποτελείται από χοληστερόλη. Είναι προϊόν των ουσιών που εκκρίνονται από συγκεκριμένους αδένες, τους σμηγματογόνους και τους ιδρωτοποιούς, καθώς και ουσιών που προέρχονται από το περιβάλλον του ζώου, όπως οι ρύποι.

- A) Οι πλοκαμίσκοι, δημιουργούνται από συγκέντρωση 20 έως 50 εριότριχων με την προσκολλητική ικανότητα της οισύπης
- B) Οι πλόκαμοι, συνίσταται από ομάδες πλοκαμίσκων που συντελούν στο σχηματισμό των πλοκάμων.
- Γ) Ο πόκος, αναφέρεται στο συνολικό συνεχόμενο, χωρίς διακοπή έριο (μαλλί) που καλύπτει το σώμα του προβάτου (1)

3.5 Μικροσκοπικά η Παραγωγή της Τρίχας

Η τρίχα του μαλλιού παράγεται από τους θύλακες. Οι θύλακες της τρίχας βρίσκονται κάτω από την επιδερμίδα και διακρίνονται σε δύο είδη: πρωτεύοντες και δευτερεύοντες θύλακες. (10) Ο πρωτεύοντας θύλακας έχει δίπλα του δύο άλλους θύλακες που κατά την εμβρυϊκή ζωή εξελίσσονται σε ιδρωτοποιό και σμηματογόνο αδένες. Επιπλέον υπάρχει και ένας ανορθωτήρας μυς που συνδέει τον θύλακα της τρίχας με την επιδερμίδα. Ο δευτερεύον θύλακας αναπτύσσεται έπειτα από τον πρωτεύον κατά την εμβρυϊκή ηλικία, και διαφέρει από αυτόν καθώς αν και φέρει ανορθωτήρα μυ, συνοδεύεται από έναν μικρό σμηματογόνο αδένες. Οι θύλακες δεν βρίσκονται στο ίδιο στάδιο λειτουργίας και οι πρωτεύοντες θύλακες δεν εκκρίνουν την κερατίνη, αλλά την τριχοϋαλίνη. (1) Η κερατίνη είναι μία πρωτεΐνη, με χαρακτηριστικές ιδιότητες ανάλογα σε ποια σημεία του σώματος βρίσκεται, είναι ανθεκτική στη κρούση (κέρατα), έχει αντοχή σε εφελκυσμό (μαλλί), αντοχή στην συμπίεση (οπλή). (11)



Εικόνα 3.6: Ο πρωτεύοντας θύλακας της τρίχας. (1)

3.6 Ιδιότητες του μαλλιού

1. Μηχανικές Ιδιότητες

Η τρίχα του μαλλιού έχει περιεκτικότητα 82% κερατίνη, στην οποία υπάρχει ένα ποσοστό 3% σε θείο. Η παρουσία του θείου, και κατ' επέκταση των δισουλφιδικών δεσμών έχουν καθοριστικό ρόλο στην ανθεκτικότητα του. Η κερατίνη έχει την ιδιότητα να μην διαλύεται στο κρύο και στη ζέση και δεν καταστρέφεται σε διαλυτές ουσίες.

Η ξηρότητα σε ποσοστό 30% στην τρίχα επιδρά καθοριστικά στην επιμήκυνση της, κατά 30% επιμήκυνση σπάει. Αντιθέτως, η πλήρη ενύδατωση της τρίχας (100%) δεν προβλέπει σπάσιμο της πριν την έκταση της σε ποσοστό 70%.

Με παρόμοιο τρόπο επηρεάζει η θερμοκρασία την ανθεκτικότητα του μαλλιού. Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, η τρίχα αφυδατώνεται και μειώνεται η ανθεκτικότητά της. Τέλος, ομοίως επιδρούν τα οξέα και τα αλκάλια. (12)

2.Χημικές Αλληλεπιδράσεις

Η πρωτεϊνική φύση του μαλλιού, το καθιστά να αντιδρά με πολλά χημικά και αυτό οφείλεται στις συγκεκριμένες ομάδες δεσμών που διαθέτει: οι πεπτιδικοί δεσμοί, οι πλευρικές αλυσίδες των αμινοξέων και οι δισουλφιδικοί δεσμοί. (12)

Η γενική μορφή της χημικής σύστασης είναι $\text{COOH-CHNH}_2\text{-R}$. Λόγω της χημικής κατασκευής τους, τους δίνεται η ικανότητα απορρόφησης πολλών μορίων, όπως SO_2 , NO_x , O_3 , αλδεΐδες. (13) Όσον αφορά την έκθεση του μαλλιού σε αλκαλικά διαλύματα, διαπιστώνεται ότι πραγματοποιείται η αποικοδόμησή του με ευκολία και αυτό συμβαίνει λόγω της αστάθειας που παρουσιάζουν οι δισουλφιδικοί δεσμοί που βρίσκονται στην κυσίνη της τρίχας. (14)

Τα οξέα, σε αντίθεση με τα αλκάλια, δρουν λιγότερο ή και καθόλου καταστρεπτικά στο μαλλί. Τα αραιωμένα ανόργανα οξέα δεν βλάπτουν σχεδόν καθόλου την τρίχα. Σε πολύ υψηλές αραιώσεις τα οξέα έχουν προστατευτικό ρόλο. Το ισοηλεκτρικό σημείο του μαλλιού είναι $\text{pH}=4,8$, επομένως ένα διάλυμα περίπου σε αυτές τις τιμές $\text{pH}=4-5$ ελαχιστοποιεί της πιθανότητες της κυματότητας (swelling) και θεωρείται η παρουσία του καλύτερη και από το νερό, ως λιγότερο βλαπτικό.

Το μαλλί έχει την ικανότητα να απορροφά πτητικές και βλαπτικές από τον καπνό του τσιγάρου ουσίες. (13)

3. Υγροσκοπικότητα

Η τρίχα του προβάτου έχει την ικανότητα να απορροφά υγρασία σε ποσοστό πάνω από 33-34% του ξηρού της βάρους. (13) Η έκθεση του μαλλιού σε νερό σε κανονικές θερμοκρασίες αυξάνεται ο όγκος του κατά 1/10 του αρχικού του και έπειτα σε ξηρές συνθήκες επαναφέρεται στον αρχικό όγκο του. Σε υψηλές θερμοκρασίες νερού η έκθεση του για ορισμένο χρόνο δρα καταστρεπτικά και σε θερμοκρασία 120°C υπό πίεση οδηγεί στην πλήρη αποσύνθεσή της. Αυξάνεται η πλαστικότητα της τρίχας σε περίπτωση έκθεσης της σε νερό που βράζει και συνδέεται και με τον χρόνο, καθώς όσο περισσότερο είναι εκτεθειμένη τόσο αυξάνεται η ελαστικότητά της. (15)

4. Ανθεκτικότητα σε μύκητες και έντομα

Πάντα υπάρχει η πιθανότητα παρουσίας βακτηρίων και μυκήτων κάτω από συγκεκριμένες για αυτά ευνοϊκές συνθήκες (θερμοκρασία, υγρασία, pH). Τα κερατινοειδή σημεία του ζώου, όπως είναι το μαλλί, παρουσιάζουν μεγάλη ανθεκτικότητα κατά τω ενζύμων λόγω της ύπαρξης των δισουλφιδικών δεσμών.

Αποσύνθεση του μαλλιού μπορούν να δημιουργήσουν μόνο οι εξής μικροοργανισμοί να δημιουργήσουν: *Pseudomonas aeruginosa*, *proteus vulgaris*, *Aspergillus*, *Penicillium*. Επιπλέον οι προνύμφες από *Lepidoptera*, *Coleoptera*. Τα πιο επικίνδυνα για το μαλλί έντομα εισβολείς είναι : *Tineola bissiela*, *Tinea*, *Homfannophilai pseudospretella*, *Anthmus*. (13)

5. Περιβάλλον και μαλλί

Το μαλλί είναι ένα υλικό μη τοξικό που παράγεται με φυσικό τρόπο και είναι εύκολο στη διαχείρισή του ακόμα και με γυμνά χέρια σε αντίθεση με άλλα θερμομονωτικά υλικά, όπως είναι ο υαλοβάμβακας (15). Κατά την αποθήκευση του, καθώς υπάρχει κίνδυνος να προσβληθεί από έντομα και παράσιτα, απαιτείται για την προστασία του ο ψεκασμός του με εντομοαπωθητικό ενώ δεν προσβάλλεται από μούχλα. (16). Επιπλέον είναι βιοδιασπώμενο και ανακυκλώσιμο. (17)

6. Ανθεκτικότητα στη Φωτιά

Η ανθεκτικότητα στη φωτιά διαμορφώνεται μέσω μίας κλίμακας: A,B,C,D,E,F,Z. Το A υποδηλώνει την μέγιστη ανθεκτικότητα που μπορεί να παρουσιάσει το υλικό και το Z την ελάχιστη. Το μαλλί ανήκει στην κατηγορία B2 ανθεκτικότητας, που σημαίνει ότι παρουσιάζει μία πολύ σημαντική ανθεκτική συμπεριφορά απέναντι στη φωτιά. Και οφείλεται στα α-αμινοξέα, όπως η κυστεΐνη, και από πεπτίδια τα οποία σχηματίζουν μία ελικοειδή κατασκευή. Η ανθεκτικότητα στη φλόγα οφείλεται στην περιεκτικότητα 16% αζώτου, στην υψηλή θερμοκρασία αναφλεξιμότητας (570-600οC), στον υψηλό δείκτη οξυγόνου (O2), στη χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης. (18)

3.7 Οικολογία και Έριο

Μερικά κύρια χαρακτηριστικά του ερίου είναι ότι είναι

- προϊόν φυσικής προέλευσης,
- βιώσιμο, βιοδιασπώμενο και δεν επιβαρύνει το περιβάλλον,
- ανανεώσιμο καθώς κάθε χρόνο προβλέπεται η παραγωγή του από τα πρόβατα
- με χαμηλή εκπομπή άνθρακα

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν την τρίχα από το έριο ως μία από τις καλύτερες φυσικές ίνες. Η παραγωγή του μαλλιού ποικίλει, από 1kg έως και 4kg (φυλή Merino). Ο αριθμός των θυλάκων της τρίχας καθορίζει την ποσότητα του μαλλιού που παράγει κάθε πρόβατο και διαφοροποιείται σε κάθε φυλή. Μηνιαία η παραγωγή σε κάθε θύλακα κυμαίνεται στο 1cm τρίχας. (17)

Το μαλλί αποτελείται από άνθρακα σε ποσοστό 40%, και μπορεί εύκολα να βιοδιασπασθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί. Τα ίδια τα πρόβατα καταναλώνουν τον βιογενή άνθρακα μέσω της τροφής του (χόρτα), μετατρέποντας τον σε αμινοξέα του μαλλιού. Σε αντίθεση με τις ίνες από nylon, ακρυλικά (acrylic) και οι πολυεστέρες (oil-based esters), που παρασκευάστηκαν τα τελευταία 50 χρόνια

δεν μπορούν να διασπασθούν τόσο γρήγορα όσο το μαλλί και τελικώς συσσωρεύονται στο περιβάλλον επιβαρύνοντας το. (19)

3.8 Εναλλακτικές χρήσεις του μαλλιού

Τα προβλήματα που αντιμετωπίζει η σημερινή κοινωνία σχετικά με οικονομικά και περιβαλλοντικά προβλήματα έχουν στρέψει την αναζήτηση του ανθρώπου σε εναλλακτικές

- **Το μαλλί ως θερμομονωτικό υλικό**

Το μαλλί παρέχει θερμομονωτικά και ηχομονωτικά χαρακτηριστικά στον χώρο που θα τοποθετηθεί. Η ανάγκη χρήση ανανεώσιμων υλικών σε κτίρια έχουν στρέψει το ενδιαφέρον προς τη χρήση του μαλλιού καθώς και σε άλλες φυσικές ίνες.

Το μαλλί, λόγω των φυσικών του ιδιοτήτων, είναι ένα υλικό που μπορεί να ανταπεξέλθει στις θερμομονωτικές απαιτήσεις. Αναλυτικότερα, είναι ένα υλικό που είναι σχετικά καθαρό ή απαιτείται μικρή διαδικασία καθαρισμού. Υπάρχει άνεση στην διαχείριση του χωρίς να υπάρχει κίνδυνος να δημιουργήσει προβλήματα υγείας στον χρήστη. Επιπλέον είναι φιλικό προς το περιβάλλον και ανακυκλώνεται. Η υγροσκοπικότητα είναι, όπως προαναφέρθηκε, σε ποσοστό άνω των 35%. Δεν υπάρχει μεταβολή στον όγκο του, μεταβάλλεται η ελαστικότητά του και είναι αδιάβροχο. Το μαλλί έχει μικρό αντίκτυπο στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ομοίως με άλλα φυσικά συστατικά με την κυτταρίνη και το λινάρι. (20)



Εικόνα 3.7: Μόνωση με μαλλί σε δωμάτιο. (πηγή: www.constructionspecifier.com)

- **Βιοϊατρικές εφαρμογές**

Το μαλλί του προβάτου, αποτελείται από μία πρωτεΐνη, την κερατίνη, η οποία παρουσιάζει βιοσυμβατότητα και εγγενή βιολογική δραστηριότητα. Η συγκεκριμένη πρωτεΐνη μπορεί και συμμετέχει σε διάφορες βιολογικές εφαρμογές όπως είναι σε φορείς φαρμάκων, η επούλωση πληγών, η μηχανική των ιστών. (21)

Μία πιο συγκεκριμένη εφαρμογή που μελετήθηκε είναι για την κατασκευή ικριωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η αξιοποίηση της κερατίνης έγινε μέσω από το έριο του προβάτου για την προετοιμασία κεράτινων σπόγγων. Το αποτέλεσμα ήταν η κατασκευή ικριωμάτων που μιμούνται εξωκυττάρια το οστό, με υψηλή διασύνδεση του μικροπορώδες και μακροπορώδες. (16)

- **Σύνθετα Υλικά Ενισχυμένα με Έριο**

Το ενδιαφέρον για την προστασία του περιβάλλοντος και την προσπάθεια μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων οδήγησαν στην αναζήτηση υλικών με την προοπτική της ανακύκλωσης τους. Η κατασκευή σύνθετων υλικών από θερμοσκληρυνόμενη μήτρα, είναι ένα από τα υλικά με αδυναμία στην ανακύκλωσή τους. Επομένως, η αναζήτηση μέσων ενίσχυσης για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ανέδειξε τη χρήση φυτικών και ζωικών ινών. Οι ίνες από το τρίχωμα των ζώων και συγκεκριμένα το μαλλί του προβάτου, μπορεί να εξυπηρετήσουν μία τέτοια εφαρμογή. (22)

Η μελέτη των Kim, Bhattacharyya και Lin, ανέδειξε τη χρήση μαλλιού από το πρόβατο ως επιβραδυντικό της φωτιάς κατά τη συμμετοχή του ως μέσω ενίσχυσης σε σύνθετο υλικό. Η μήτρα του συνθέτου είναι πολυπροπυλένιο, που ανήκει στις θερμοπλαστικές μήτρες. Η χρήση του μαλλιού σε διαφορετικές ποσοστιαίες αναλογίες ανέδειξαν ότι με την αύξηση του αυξάνεται και η προστασία κατά της φωτιάς, καθώς μειώνεται το ποσοστό που καίγεται. (23)

- **Λίπασμα από μαλλί**

Ο στόχος το περισσότερων προβατοτροφικών μονάδων είναι η παραγωγή κρέατος και γάλακτος. Η εριοπαραγωγή δεν κινεί το ενδιαφέρον των περισσότερων κτηνοτρόφων με αποτέλεσμα η ποιότητα του μαλλιού να έχει μειωθεί και ταυτόχρονα να θεωρείται ότι δεν βρίσκει εφαρμογή για την ταπητουργία και τον ρουχισμό. Όμως, έχουν αρχίσει οι προσπάθειες χρήσεις του σε γεωργικές εφαρμογές έως λίπασμα. Η χρήση του ως λίπασμα μπορεί να επιτευχθεί μέσω της υδρόλυσης του σε ζεστό νερό. Το μαλλί μπορεί να προσφέρει αύξηση στην απόδοση της καλλιέργειας, λόγω το ότι απορροφά και διατηρεί την υγρασία. (24) Επιπλέον παρέχει μεγάλη ποσότητα θρεπτικών συστατικών και αζώτου και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ιδιαίτερα σε καλλιέργειες λαχανικών και ανθοκομίας. Η μορφή του μαλλιού για τη χρήση του ως λίπασμα είναι σε pellets. (25)



Εικόνα 3.8: Μαλλί σε μορφή pellet για τη χρήση του ως λίπασμα (πηγή: univm.edu)

- **Το μαλλί και ηχομόνωση**

Η χρήση συνθετικών υλικών στην ηχομόνωση, όπως ο πολυεστέρας και ο υαλοβάμβακας, μπορεί να επιφέρουν προβλήματα στην υγεία του ανθρώπου καθώς η σύνθεσή τους βασίζεται σε πετροχημικά. Επιπλέον η ανάγκη για μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, έχει επιφέρει στην επιφάνεια προτάσεις για σύνθεση ηχομονωτικών κατασκευών από φυσικές ίνες που προέρχονται από το μαλλί.

Το μαλλί έχει χαρακτηριστικά που μπορούν να θεωρηθούν ικανά για τη χρήση του σε ηχομονωτικά πάνελ, με χαρακτηριστικό για αυτή την εφαρμογή το πορώδες που διαθέτει. Παράλληλα, διαθέτει χαρακτηριστικά, όπως το ότι είναι αδιάβροχο, αλλά με ικανότητα απορρόφησης υγρασίας. Η αντοχή στην φωτιά και ελαστικότητα του είναι μερικά από τα χαρακτηριστικά που το καθιστούν ικανό να συμβάλλει σε μία τέτοιου είδους εφαρμογή. Αξιοσημείωτο είναι ότι δεν προσβάλλεται από την μούχλα καθώς είναι πρωτεϊνικής φύσης. (26)



Εικόνα 3.9: Ρολό από μαλλί (75%) και πολυεστέρα (15%) (πηγή: keeprquiet.co.uk)

Βιβλιογραφία 3^{ου} Κεφαλαίου

1. **Δημήτριος, Ζυγογιάνης.** Προβατοτροφία. 3η. Θεσσαλονίκη : Σύγχρονη Παιδεία, 2014, σσ. 189-208.
2. **Buschow K.H Jürgen, Cahn W. Robert, Flemings C. Merton, Ilchner Bernhard, Kramer J. Edward, Mahajan Subhash, Veysièere Patrick.** *Encyclopedia of materials: science and technology (2nd Edition)*. s.l. : Elsevier, 2001. σσ. 9100-9116.
3. **Colin, Scanes G.** *Animals and Humans*. s.l. : Academic Press, 2018. σσ. 13-40.
4. **Αρχή, Ελληνική Στατιστική.** *Δελτιο Τύπου: Έρευνες ζωικού κεφαλαίου(χοίρων-βοοειδών-προβάτων-αιγών): έτος 2018Ε*. Πειραιάς : Ελληνική Δημοκρατία, Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2018.
5. **Simpson W. S., Crawshae G. H.** *Wool: Science and technology*. s.l. : Woodhead Publishing Limited, 2002. σσ. 60-79,130-159.
6. **Colin, Scanes G.** *Animals and Human Society*. s.l. : Academic Press, 2018. σσ. 13-40.
7. **Tinto W.F., Elufioye T.O., Roach J.** *Waxes*. s.l. : Academic Press, 2017. σσ. 443-445.
8. **Ivana, Markova.** *Textile Fiber Microscopy: A Practical Approach*. s.l. : Wiley, 2019. σσ. 31-76.
9. **Clara, Parkes.** *The knitter's book of wool*. New York : Potter Craft. σσ. 12-21.
10. **Paula, Simmons.** *Storey's guide to raising sheep*. North Adams : MA: Storey Publishing, 2009. σσ. 315-316.
11. **McKittrick J, Chen P.-Y, Bodd S. G, Yang W, Novitskaya, E. E, Meyers, M.A.** The structure, Functions, and Mechanical Properties. JOM, 2012, Τόμ. 64, 4, σσ. 449-451.
12. **Lewis David M., Rippon John A.** *The coloraton of wool and other keratin fibres*. s.l. : by John Wiley & Sons in association with the Society of Dyers and Colourists, 2013. σσ. 1-35.
13. **T.M., Turzeu.** *Hygro-Thermal properties of sheep wool insulation*. s.l. : Delf University of Technology. σσ. 1-30.
14. **Mizell Louis R., Harris Milton.** Nature of the reaction of wool with alkali. *Part of Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1943, Τόμ. 30.
15. **Ιωσήφ, Μπιζέλης.** *Εναλλακτικές χρήσεις του μαλλιού προβάτων*. Ιωάννινα : Πρακτικά ενημερωτικής ημερίδας. “Το έριο των προβάτων από την παρ.αδοσιακή και σύγχρονη κοινωνία, 2011. σσ. 18-20.
16. **Patrucco A., Cristofaro F., Simionati M., Zoccola M., Fassina L., Visai L., Magenes G., Mossotti R., Montarsolo A., Tonin C.** Wool Fibril sponges with perspective biomedical applications. *Materials science and engineering: C*. s.l. : Elsevier, 2016, σσ. 42-50.
17. **H., Kuffner.** Wool fibers. [συγγρ. βιβλίου] Kozłowski M. Ryszard. *Hanbook of natiral fibres: Volume 1: Types, properties and factors affecting breeding and cultivation*. s.l. : Woodhead publishing, 2012, σσ. 171-175.

18. **Forouharshada M., Montazerb M., Moghadamc M.B., Salighehd O.** Flame retardant wool using zirconium oxychloride in various acidic media. *Thermochimica Acta*. s.l. : elsevier, 2011, σσ. 29-34.
19. **Paul, Swan.** *Wool and the Carbon Cycle*. s.l. : IWTO, 2019.
20. **Zach J., Korjenic A., Petráněk V., Hroudová J., Bednar T.** Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*. s.l. : Elsvier, 2012, Τόμ. 49, σσ. 246-253.
21. **Rousses Jillian, Dyke Mark.** A review of keratin-based biomaterial for biomedical applications. *Materials*. 2010, σσ. 999-1014.
22. **Gonçalves S., Vieira P., Esteves J.L.** *Mechanical Charactirization of wool fibres for reinforcing of composites materials*. University of Porto, Portugal : ScienceDirect.
23. **Kim Nam Kyeum, Bhattacharyya Debes, Lin RichardL.T.** Multi-functional Properties of Wool Fibre Composites. *Advanced Materials Research*. Switzerland : trans tech publications, 2013, Τόμ. 778, σσ. 8-11.
24. **Zoccola M., Montarsolo A., Mossotti R., Patrucco A., Tonin C.** Green hydrolysis conversion of wool wastes into organic nitrogen fertilisers. Biella : LIFE+GREENWOOLF, 2014, σσ. 1-11.
25. **Böhme M., Pinker I., Grüneberg H., Herfort S.** Sheep Wool as Fertiliser for Vegetables and Flowers in Organic Farming. s.l. : Acta Horticulturae, 2012, Τόμ. 933, σσ. 195-202.
26. Berardi, U., Iannace, G., & Di Gabriele, M. Characterization of sheep wool panels for room acoustic applications. *Proc. Mtgs. Acoustic*. s.l. : Acoustical society of America, 2016, Τόμ. 28.

Κεφάλαιο 4. Σύνθετα Υλικά

4.1 Εισαγωγή

Η ιδέα των σύνθετων υλικών και η εφαρμογή τους ξεκίνησε το 1950 και μέχρι την επόμενη δεκαετία είχε διαδωθεί. Ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από την ετερογενή μίξη δύο ή περισσότερων ομογενών υλικών που είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένος ορισμός δόθηκε από τον Changxu Shi που όρισε ως σύνθετο υλικό των συνδιασμό διαφορετικών υλικών, για παράδειγμα οργανικά πολυμερή, ανόργανα μη μεταλλικά ή μεταλλικά συστατικά που συμβάλλουν στην κατασκευή του σύνθετου υλικού. Το σύνθετο υλικό που προκύπτει έχει τα χαρακτηριστικά των επιμέρους υλικών που το αποτελούν και επιπλέον εμφανίζει και καινούργια που δεν είχαν αυτά που το αποτελεί. Μία σειρά από μεθόδους μπορούν να συμβάλλουν στην κατασκευή σύνθετων υλικών που θα μεγιστοποιήσουν τις ιδιότητες του. Τα βήματα που θα οδηγήσουν στην βελτιστοποίηση των σύνθετων υλικών είναι: Η έρευνα των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων επιμέρους υλικών αλλά και του σύνθετου, η επιρροή του τρόπου παρασκευής στις τελικές ιδιότητες του σύνθετου και ποια διαδικασία θα επιφέρει τη μεγιστοποίηση των ιδιοτήτων, οι μέθοδοι χαρακτηρισμού και η ικανότητα πρόβλεψης του συνθέτου ως προς τις ιδιότητες με βάση τις διαφορετικές συνθήκες παρασκευής τους. (1) (2) (3)

Τα σύνθετα υλικά πρέπει να εμφανίζουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που τα ομαδοποιούν στην συγκεκριμένη κατηγορία και είναι τα εξής: μικροσκοπικά δεν παρουσιάζει ομοιογένεια και παρουσιάζει διακριτή διεπαφή, υπάρχουν μεγάλες διαφορές στα υλικά που το αποτελούν, πρέπει να παρουσιάζουν νέα βελτιωμένη εμφάνιση και το κλάσμα όγκου των υλικών που το αποτελούν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 10%. (1)

Γενικά, ένα σύνθετο υλικό αποτελείται από τη μήτρα, που όπως προαναφέρθηκε μπορεί είναι πολυμερικής, μεταλλικής και κεραμική φύσης, και ένα μέσο ενίσχυσης: ινών, μορίων, πληρωτικών. (2) Κατά την μικροσκοπική παρατήρηση του σύνθετου πέρα από τη φάση της μήτρας, που είναι συνεχής, και τη φάση ενίσχυσης που περιβάλλεται από την μήτρα και είναι διασκορπισμένη μέσα σε αυτή, υπάρχει μία Τρίτη φάση που αναφέρεται στην διεπαφή ανάμεσα στη φάση ενίσχυσης και στην μητρική φάση. Στο σημείο διεπαφής του μέσου ενίσχυσης και της μήτρας υπάρχει μία σύνθετη διαφορετική κατασκευή από αυτές που αποτελείται που κατεπέκταση επηρεάζει την μακροσκοπική εξωτερική εμφάνιση των σύνθετων. Η τελική μορφή και οι ιδιότητες του σύνθετου οφείλονται καθοριστικά από τις τρεις φάσεις που προαναφέρθηκαν και τελικά καθορίζουν το σύνθετο. (1)

Η χρήση των σύνθετων υλικών προέρχεται από την αρχαιότητα καθώς το ξύλο και το καλαμπόκι είναι ένα από αυτά. Οπότε γίνεται λόγος για την ύπαρξη σύνθετων υλικών που παράγει η ίδια η φύση. (4) Το ξύλο αποτελείται από κυτταρινικές ίνες (φυσικό πολυμερές) που συγκρατούνται από την λυγνίνη (5) Επιπλέον, το οστό είναι ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα φυσικού πορώδους σύνθετου υλικού. (6) Παράλληλα, κατασκευάζονται σύνθετα πορώδη υλικά, βιοπολυμερή και κεραμικά που χρησιμοποιούνται ως κριώματα για την αναγέννηση κυττάρων και κατ'

επέκταση των ιστών. (7) Ένα σύνθετο που χρησιμοποιείται για δομικές επιλογές είναι το σκυρόδεμα, η ανάμειξη από τσιμέντο, άμμο και αδρανή υλικά. Πιο σύγχρονες εφαρμογές των σύνθετων υλικών, αφορούν την αεροδιαστημική βιομηχανία αλλά και την κατασκευή αθλητικού εξοπλισμού. Ως μέσα ενίσχυσης στις σύγχρονες εφαρμογές είναι οι ίνες υάλου και οι ίνες άνθρακα, που οι δεύτερες ίνες είναι πιο ανθεκτικές αλλά πιο ακριβές στην παραγωγή τους. (6) (5) Τα σύνθετα υλικά στη σημερινή εποχή προβλέπουν την χρήση ως μέσων ενίσχυσης και τους νανοσωλήνες άνθρακα, καθώς είναι επιβεβαιωμένο ένα από τα πιο άκαμπτα υλικά επειδή η δομή τους στηρίζεται στους ομοιοπολικούς δεσμούς του άνθρακα –άνθρακα. Οι νανοσωλήνες θεωρούνται κατάλληλα υλικά για τη συμμετοχή τους σε κατασκευαστικές εφαρμογές. (8) Είναι εύκολα κατανοητό, ότι τα σύνθετα υλικά μπορούν να συμμετέχουν σε πολλές εφαρμογές. (9)

4.2 Χαρακτηριστικά

4.2.1 Γενικά

Η σημερινή εποχή επιβάλλει την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών που αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση των απαιτήσεων του ανθρώπου. Μία νέα κατηγορία στην ανάπτυξη των υλικών είναι τα σύνθετα υλικά που εμφανίζουν βελτιωμένες ιδιότητες των υλικών που τα αποτελούν ή έναν συνδυασμό τους. Τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από τη μήτρα (ή το φέρον υλικό) και τις ίνες υψηλών αντοχών ή σωματίδια, το μέσον ενίσχυσης που βρίσκεται διεσπαρμένο στη μήτρα.

Τα πιο συνηθισμένα τεχνικά υλικά διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, και μπορούν να διακριθούν με βάση τις ιδιότητές τους. (10)

ΟΜΑΔΑ	ΥΛΙΚΟ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ρ (g/cm ³)	Αντοχή Εφελκυσμού (MPa)	Μέτρο σ Ελαστικότητας (MPa)	E
I	Ξύλο Πεύκης	0.6	78	10000	
	Συνθετικές Ρητίνες	0.9-1.5	40-100	3000-5000	
II	Al ₂ O ₃	3.9	260	360000	
	SiC	3.2	110	490000	
III	Τιτάνιο	4.5	500-900	112000	
	Χάλυβας	7.8	400-1400	210000	

Πίνακας 4.2: Ιδιότητες των τεχνητών υλικών. (10)

Τα υλικά της κατηγορίας I, και συγκεκριμένα οι συνθετικές ρητίνες είναι υλικά με χαμηλή πυκνότητα, αρκετά μικρού βάρους. Επιπλέον, έχουν μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, είναι υλικά μικρής αντοχής και λόγω του μικρού μέτρου ελαστικότητάς τους εμφανίζουν ελάχιστη ακαμψία και δεν θεωρούνται τα κατάλληλα υλικά για κατασκευαστικές εφαρμογές που θα καταπονηθούν από μεγάλα φέροντα στοιχεία. Τα υλικά της κατηγορίας II, που αφορά τα κεραμικά υλικά, εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα συγκριτικά με την προηγούμενη κατηγορία, δεν είναι ιδιαίτερα βαριά

υλικά, έχουν θερμική σταθερότητα και υψηλό μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα να είναι άκαμπτα υλικά. Όμως τα κεραμικά υλικά είναι ψαθυρά με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μικρή αντοχή και ευαισθησία στις κρούσεις. Στην κατηγορία III, ανήκουν τα στερεά μέταλλα που ενώ παρουσιάζουν αξιοσημείωτες ιδιότητες, όπως την ακαμψία, την υψηλή αντοχή και την θερμική σταθερότητα, υστερούν όμως λόγω του μεγάλου βάρους που παρουσιάζουν.(10) (11) (12)

Ο ρόλος της μήτρας στο σύνθετο είναι προστατευτικός ως προς τα μέσο ενίσχυσης από το περιβάλλον, έχει συνδετικό ρόλο, συνεισφέρει στις τελικές ιδιότητες και μεταφέρει το φορτίο στο μέσω ενίσχυσης(μέσω της διεπιφάνειας). Τέλος η διαδικασία κατασκευής του συνθέτου καθορίζεται από τον τύπο της μήτρας που θα χρησιμοποιηθεί. Από την μεριά του ενισχυτικού μέσου, έχει ρόλο ενισχυτικό στις ιδιότητες του συνθέτου. Η γεωμετρία του συνθέτου έχει καθοριστικό ρόλο όπως και ο τρόπος τοποθέτησης των ινών, καθώς παρατηρείται ανισοτροπία στις τελικές ιδιότητες του συνθέτου. Επομένως παρουσιάζονται διαφορετικές ιδιότητες(θερμικές, ηλεκτρικές, , μαγνητικές, μέτρο ελαστικότητας κ.α.) στον διαμήκη και εγκάρσιο άξονα του συνθέτου. (13)

4.2.2 Τρόποι Ταξινόμησης

Η ταξινόμηση των σύνθετων υλικών μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση το υλικό της μήτρας και είναι οι εξής κατηγορίες:

- **Σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Matrix Composites)**

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας κατασκευάζονται με τη συμμετοχή ινών ή πληρωτικών μέσων (fillers) καθώς και ενός πολυμερούς (μήτρα) προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες στο τελικό σύνθετο. Τα σύνθετα υλικά έχουν ποικίλες εφαρμογές στην βιομηχανία και πιο συγκεκριμένα στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε αεροδιαστημικές και ναυπηγικές κατασκευές. (14) Η επιλογή της πολυμερικών συνθέτων για τις παραπάνω εφαρμογές οφείλεται στην ελαφρότητά τους, στην υψηλή αντοχή τους, στον υψηλό λόγο ακαμψίας προς το βάρος και την αντοχή σε βάρος καθώς και την μικρή ευαισθησία σε περιβαλλοντική υποβάθμιση συγκριτικά με άλλα συμβατικά υλικά. (15) Η χρήση πολυμερικής μήτρας στα σύνθετα, περιορίζεται συνήθως σε δύο κατηγορίες πολυμερών: τα θερμοπλαστικά και τα θερμοσκληρυνόμενα. (16)

Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας, και συγκεκριμένα από θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές μπορεί να περιλαμβάνει τους πολυεστέρες, βινυλικούς πολυεστέρες, εποξειδικές ρητίνες, φαινόλες, πολυαμίδια, διμυαλίδια, κυανικούς πολυεστέρες. (17) Η εύκολη διαδικασία επεξεργασίας και για το τελικό σύνθετο της πολυμερικής μήτρας και η καλή διαβροχή που μπορεί να επιτευχθεί ανάμεσα στην μήτρα και τις ίνες την καθιστά πιο διαδεδομένη με συχνή εφαρμογή. Είναι ευρέως διαδεδομένη λόγω του χαμηλού μοριακού βάρους και του χαμηλού ιξώδους της. Πολύ συχνή είναι η

χρήση της εποξειδικής ρητίνης με εφαρμογές στην αεροναυπηγική. Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι ιδιότητες των τεσσάρων συνηθέστερων θερμοπλαστικών που χρησιμοποιούνται ως μήτρες.

Πίνακας 4.3:Ιδιότητες των θερμοπλαστικών ρητινών. (16)

Ιδιότητες	Εποξειδικές Ρητίνες	Πολυεστερικές Ρητίνες	Βινυλικοί Εστέρες	Φαινολικές Ρητίνες
Πυκνότητες (g cm ⁻³)	1,1-1,4	1,2-1,5	1,2-1,4	1,3
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	35-100	40-90	69-83	10
Συντελεστής του Young (GPa)	3-6	2-4,5	3,1-3,8	0,375
Επιμήκυνση στο σπάσιμο (%)	1-6	2	4-7	2
Αντοχή σε θλίψη (MPa)	100-200	90-250	86	49
Συρρίκνωση κατά τη Σκλήρυνση (%)	1-2	4-8	7,14	0,002
Απορρόφηση Νερού (wt.%)	0,1-0,4	0,1-0,3	0,2	0,11-1,39

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή όταν λάβουν την τελική του μορφή μέσω της διαδικασίας της σκλήρυνσης, δεν μπορούν να μετασχηματιστούν και δεν επιδέχονται άλλη διαδικασία επεξεργασίας μέσω της θερμότητας ή της πίεσης. Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στο τρισδιάστατο δίκτυο που σχηματίζεται κατά τον πολυμερισμό. Οι θερμοπλαστικές μήτρες είναι δομικά και θερμικά σταθερές, με χημική αντοχή και υψηλές ιδιότητες ερπυσμού. (16) Οι συνηθέστερες θερμοπλαστικές μήτρες είναι: το πολυλακτικό οξύ(PLA), το χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDPE) και το υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE). Τα θερμοπλαστικά απαιτούν μικρό χρόνο παραγωγής και είναι ανακυκλώσιμα υλικά, όμως κατά τη διαδικασία της σκλήρυνσης απαιτούν θερμοκρασίες υψηλότερες των 180°C. (18) Παράλληλα, η κατηγορία των θερμοπλαστικών μπορεί να επανασηματιστεί αφού μπορεί να πραγματοποιηθεί η τήξη του υλικού. (19) Επιπλέον, οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες κατασκευάζονται με μία απλή διαδικασία χωρίς

την παρέμβαση χημικών που περιλαμβάνει: την θέρμανση, τον σχηματισμό, και την ψύξη. Οι θερμοκρασίες, όπως προαναφέρθηκε είναι υψηλές και συγκριτικά με τις θερμοκρασίες που απαιτούνται για τις θερμοσκληρυνόμενες μήτρες. (20)

- **Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites, MMC's):**
Τα συνηθέστερα μέταλλα που χρησιμοποιούνται ως μήτρες σε σύνθετα υλικά είναι τα εξής: Al, Be, Mg, Ti, Fe, Ni, Co, Ag. Το αλουμίνιο (Al) αποτελεί το μεγαλύτερο σε χρήση υλικό για τις μεταλλικές μήτρες. Επιπλέον, ως μέσω ενίσχυσης συνήθως είναι υλικά που ανήκουν στην κατηγορία των κεραμικών, όπως είναι: SiC, Al₂O₃, B₄C, TiC, TiB₂. Τα μέσα ενίσχυσης μπορεί να έχουν την μορφή συνεχόμενων ή κομμένων ινών, και μορίων. Η επιλογή του μέσω ενίσχυσης συσχετίζεται με τις τελικές ιδιότητες που πρέπει να έχει το σύνθετο σε συνδυασμό με το κόστος του. (21) Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας παρουσιάζουν αντοχή σε ερπυσμό, κόπωση, φθορά. Παράλληλα ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες συγκρατούν την αντοχή τους, έχουν υψηλή αναλογία αντοχής σε βάρος και η εφαρμογή τους είναι στην αυτοκινητοβιομηχανία, σε κινητήρες και φρένα. (22) Όμως, πρέπει να τονισθεί ότι στην πλειοψηφία τους τα κράματα δεν ανήκουν στην κατηγορία των σύνθετων υλικών, αυτό όμως δεν αναιρεί την σημαντική συμμετοχή τους σε πλήθος εφαρμογών όταν απαιτείται. Αναλυτικότερα, τα κράματα δεν ανήκουν στα σύνθετα υλικά γιατί υπάρχει χημική σύνδεση της μήτρας με το έγγεισμα και ευαισθησία των μετάλλων στην οξειδωση με αποτέλεσμα η διεπιφάνεια να τροποποιείται χημικά. Σύνθετο υλικό μεταλλικής μήτρας μπορεί να χαρακτηριστεί το κράμα στο οποίο δεν θα προκύψουν χημικοί δεσμοί ανάμεσα στο κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου (κράματος) και των μικτών μεταλλικών κρυστάλλων που παρεμβάλλονται στο διάκενο της μήτρας. (13)
- **Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας (Ceramic Matrix Composites, CMC's):**
Κεραμικό ορίζεται το στερεό υλικό που αποτελείται από ανόργανες, μη μεταλλικές ουσίες. Η κατασκευή τους γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, άνω των 500°C. Τα κεραμικά διακρίνονται σε παραδοσιακά κεραμικά, όπως η πορσελάνη και το τσιμέντο, και τα προηγμένα κεραμικά, όπως είναι τα βιοκεραμικά, δομικά οξειδία, μη οξειδικά υλικά. Επιπλέον, τα γυαλιά ανήκουν και αυτά στην κατηγορία των κεραμικών. Τα κεραμικά διακρίνονται σε κρυσταλλικά και μη κρυσταλλικά (άμορφες ενώσεις). Ορισμένες από τις ιδιότητες τους είναι η υψηλή σκληρότητα τους, η ευθραυστότητα τους και η αποφυγή παραμορφώσεως τους κατά τη θραύση τους, διαθέτουν μονωτικές ιδιότητες και αντοχή στη διάβρωση και στη θερμότητα. (23) Το σπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα χαρακτηριστικό σύνθετο κεραμικής μήτρας που

αποτελείται από τα εξής υλικά: άμμο, χαλίκι, γαρμπύλι, σκύρα, νερό, τσιμεντοκονία και συνδυάζεται με τις χαλύβδινες ράβδους, που λειτουργούν ως μέσο ενίσχυσης. Η αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες του οπλισμένου σκυροδέματος. (24)

- **Σύνθετα υλικά ανθρακούχου μήτρας (Carbon Carbon Composites, CCCs):**
Τα σύνθετα αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από μήτρα άνθρακα που ενισχύεται με ίνες άνθρακα. Η υψηλή απόδοση τους και το κόστος τους επιφέρει μία λύση για την αντικατάσταση των πυρίμαχων μετάλλων. Οι συνήθεις εφαρμογές τους είναι σε αεροδιαστημικές κατασκευές και συγκεκριμένα η συμμετοχή τους σε κινητήρες πυραύλων και συστήματα θερμικής προστασίας. Χάρη στην αξιοπιστία, την απόδοση που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα σύνθετα, την έκθεση σε θερμικές καταπονήσεις, μπορούν να αντικατασταθούν πολλά μέρη συστημάτων με αυτά. (25)
- **Σύνθετα υλικά διαμεταλλικών ενώσεων/μήτρας (Intermetallic Composites, IMCs):**
Τα συγκεκριμένα σύνθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευές με απαιτητικά υψηλές θερμοκρασίες. Μερικές χαρακτηριστικές μήτρες αυτές της κατηγορίας είναι η αλουμίνα τιτανίου, αλουμίνα νικελίου, δισιλικοειδές μολυβδαίνιο. (26)
- **Υβριδικά σύνθετα υλικά (Hybrid Composites Materials, HCMs):**
Τα υβριδικά σύνθετα παρουσιάζουν βελτιωμένες ιδιότητες συγκριτικά με τα συμβατικά σύνθετα με αποτέλεσμα να υπάρχει η προοπτική χρήσης τους σε πολλές εφαρμογές. Τα υβριδικά αποτελούνται από περισσότερων του ενός είδος ενισχύσεως στην ίδια μήτρα προκειμένου να ληφθούν οι συνολικές ιδιότητες των ενισχύσεων. Ο σκοπός κατασκευής αυτών των συνθέτων είναι ο καλύτερος έλεγχος των ιδιοτήτων του συνθέτου. (27) (28)

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν και ανάλογα με τον τύπο εγκλείσματος τούς ως εξής:

- **Ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Composites, FRC):**
Τα σύνθετα υλικά με ίνες παρέχουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, αντοχή και ακαμψία προς την κατεύθυνση των ινών. Επιπλέον πλεονεκτήματα είναι η ευκολία διαμόρφωσης τους και το ελάχιστο βάρος τους. Επομένως έχουν σημαντικό ρόλο σε κατασκευαστικές εφαρμογές αεροσκαφών. Η εφαρμογή των ινών άνθρακα ξεκίνησε για την στρατιωτική και αεροδιαστημική βιομηχανία και πλέον σήμερα επεκτείνεται και στην αυτοκινητοβιομηχανία. Μία ευρέως γνωστή και συχνή χρήση των ινών είναι με θερμοπλαστική μήτρα,

που μέσω της έγχυσης και της διαδικασία της σκλήρυνσης, παραλαμβάνεται το τελικό υλικό. (29)

- **Πολυστρωματικά σύνθετα υλικά (Laminated Composites) :**

Τα σύνθετα αυτά παρέχουν ακαμψία στο διαμήκη άξονα και εκτός από αυτόν, και αυτό οφείλεται στον τρόπο που τοποθετούνται τα στρώματα. Η κάθε στρώση είναι δυνατόν να έχει άλλο προσανατολισμό από τον προηγούμενο και μπορεί να είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους με διάφορες τεχνικές, όπως τη θερμότητα, την πίεση, την κόλλα. Σημαντικό μειονέκτημα των πολυστρωματικών συνθέτων είναι η προσπάθεια επισκευής ή ανάκτησης των αποτελούμενων στρωμάτων. (30) (31) (32) Επίσης η ανάπτυξη διατμητικών τάσεων μεταξύ των στρώσεων μπορεί τελικά να αποκολλήσει τις στρώσεις, να παραμορφωθούν και να έχουν και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. (33)

- **Σωματιδιακά (κοκκώδη) σύνθετα υλικά**

Τα σωματιδιακά σύνθετα υλικά βρίσκουν εφαρμογή σε καυασκευή δρόμων και τσιμεντοειδών κατασκευών που απαιτείται αντοχή στη θλίψη. Τα κοκκώδη μόρια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μπορεί να προέρχονται από κεραμικά, μέταλλα, ανόργανα υλικά που τελικά θα προσδώσουν στο τελικό σύνθετο ακαμψία. Θεωρείται ελκυστική η επιλογή των συγκεκριμένων σύνθετων καθώς έχουν ισοτροπικές ιδιότητες, το τελικό τους θεωρείται ιδανικό με βάση τα αποτελέσματα που δίνει, και πραγματοποιούνται οι ίδιες τεχνικές για την κατασκευή τους με αυτές των μονολιθικών υλικών. (34)

- **Σάντουιτς υλικά**

Τα σάντουιτς υλικά έχουν μία εσωτερική βασική δομή, η οποία διαχωρίζει δύο επιφάνειες, που λειτουργούν ως εξωτερικές δομές της κατασκευής. Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν ανισοτροπική συμπεριφορά καθώς παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες σε κάθε άξονα. Συχνή είναι η εφαρμογή τους σε ναυπηγικές κατασκευές που χρησιμοποιούνται υλικά πορώδη, όπως είναι το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυραιθάνιο, από πολυμερή αφρώδη υλικά. Επιπλέον, επιπλέον κυψελωτές δομές και μπάλα ξύλα σε τέτοι είδους εφαρμογές. Το PVC, χρησιμοποιείται συχνά, καθώς αυξάνει τον όγκο επειδή διαθέτει φυσαλίδες αέρα, χωρίς όμως να αυξάνεται το βάρος. (35)

4.3 Μέθοδοι Μορφοποίησης Σύνθετων Υλικών Ενισχυμένα με Ίνες (fiber reinforced polymers, FRP)

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων υλικών που συνεχίζουν να εξελίσσονται χάρη στην απαίτηση βελτιστοποίηση τους. Αυτή η απαίτηση προέρχεται από την ευρεία χρήση τους στην αεροδιαστημική, στην μεταφοράς, σε δομικές κατασκευές. Η κάθε μέθοδος που περιγράφεται παρακάτω καθορίζει διαφορετική γεωμετρία στο σύνθετο καθώς άλλα απαιτούν πιο

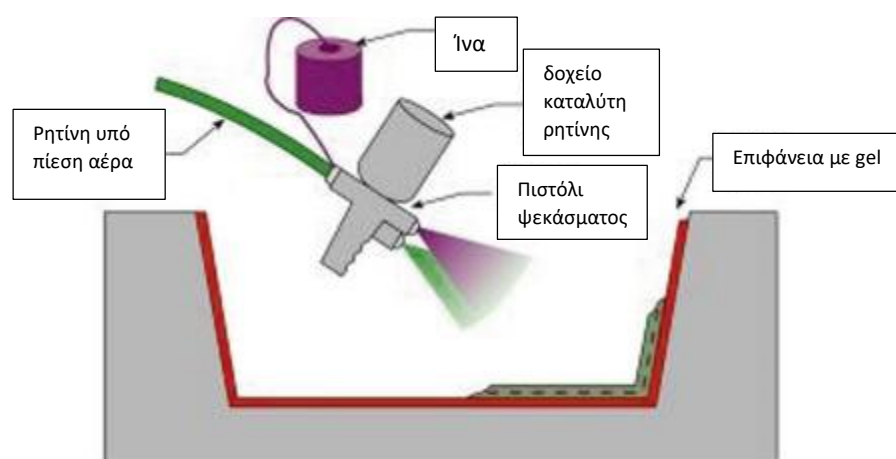
σύνθετη γεωμετρία, άλλα πιο απλή. Πέρα από την τελική επιθυμητή γεωμετρία του τελικού σύνθετου υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που καθορίζουν τον τρόπο μορφοποίησης και κατεπέκταση την μέθοδο κατασκευής του τελικού σύνθετου, όπως είναι το μέγεθος του, η ποσότητα που χρειάζεται. (36)

Ασυνεχής Μορφοποιήσεις Σύνθετων

1.Μορφοποίηση με απλή επαφή

I. Επίστρωση με ψεκασμό

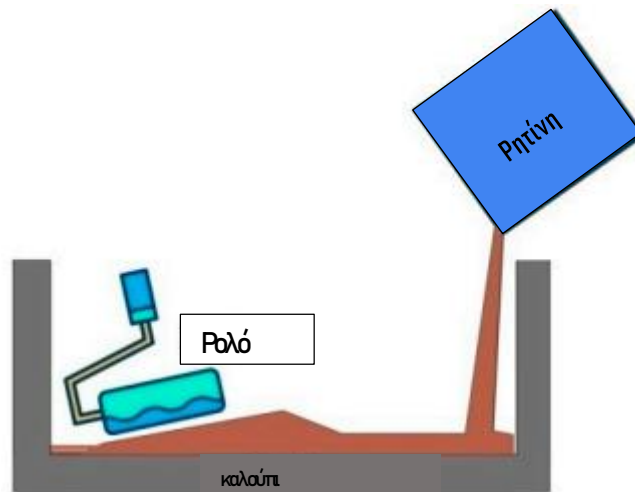
Η επίστρωση με ψεκασμό επιτυγχάνεται με πιστόλι ψεκασμού ρητίνης και κομμένες ίνες (chopped fibres). Το πιστόλι ψεκασμού ψεκάζει έως ότου η ρητίνη σκληρυνθεί πάνω στις ίνες και χρησιμοποιείται ώστε να αποφευχθούν τυχόν φυσαλίδες και κενά που μπορεί να δημιουργηθούν. Ο προσανατολισμός των ινών θα καθορίσει τις τελικές μηχανικές ιδιότητες. (37)



Εικόνα 4.3: Τεχνική επίστρωσης με ψεκασμό. (37)

II. Επίστρωση με το χέρι (hand lay-up)

Η επίστρωση με το χέρι είναι κατάλληλη μόνο όταν χρησιμοποιούνται μικρή ποσότητα δειγμάτων. Είναι η πιο διαδεδομένη και η πιο απλή μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Αρχικά, σε ένα καλούπι απλώνεται μία λεπτή στρώση αντικολλητικού ώστε μετά το πέρας της διαδικασίας να απομακρύνεται με ευκολία το υλικό του καλουπιού. Στη συνέχεια, η ρητίνη προστίθεται στο καλούπι, αφού πρώτα έχουν τοποθετηθεί οι ίνες ή τα υφάσματα, και με τη βοήθεια ενός ρολού απλώνεται ομοιόμορφα η ρητίνη και να επιτευχθεί η καλύτερη αλληλεπίδραση των ινών και της μήτρας. (34)



Εικόνα 4.4: Τεχνική Επίστρωσης με το Χέρι. (34)

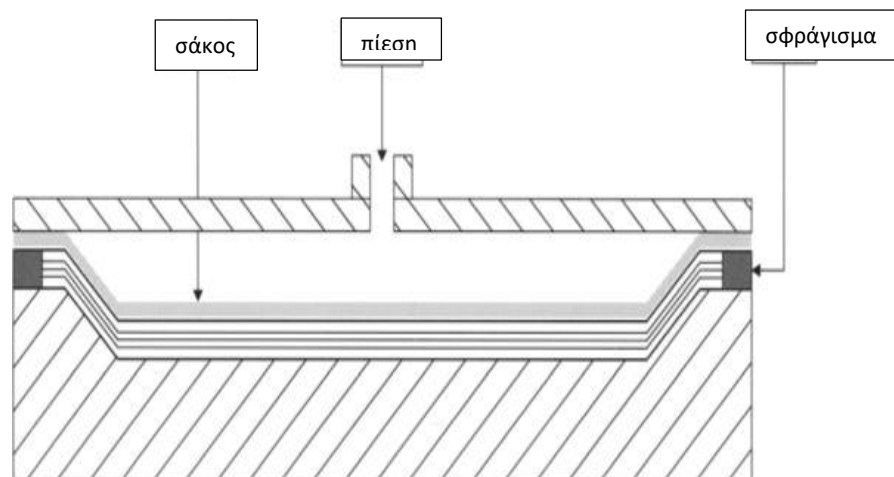
2. Μορφοποίηση με πίεση (Compression Moulding)

I. Μορφοποίηση με σάκο κενού (vacuum bag moulding)

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την τοποθέτηση ειδικού σάκου (μεμβράνη) πάνω από το καλούπι που έχει τοποθετηθεί το υλικό ώστε με ειδικό αναρροφητήρα αέρος και μία αντλία κενό να είναι δυνατόν να απομακρυνθεί ο αέρας. Ο σάκος πρέπει να έχει τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζει την πλήρη στεγανοποίηση του το υλικό που έχει τοποθετηθεί στο καλούπι. Στη συνέχεια, αφού έχει πραγματοποιηθεί πλήρως η αφαίρεση του αέρα, η διαδικασία της σκλήρυνσης μπορεί να επιτευχθεί μέσα σε φούρνο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ή με τη χρήση θερμαινόμενου καλουπιού. (33)

II. Μορφοποίηση με σάκο πίεσης (pressure bag moulding)

Η διαδικασία αυτή βελτιώνει την εξωτερική επιφάνεια του σύνθετου που πρόκειται να παρασκευαστεί, μειώνοντας τις ατέλειες της επιφάνειας. Παράλληλα το υλικό που προκύπτει έχει καλύτερη συνοχή. Μπορεί να τοποθετηθεί μία αντικολλητική και ελαστική επιφάνεια για να απομακρυνθεί με ευκολία το σύνθετο στο τέλος της διαδικασίας και το καλούπι κλείνει με μία επίπεδη επιφάνεια. Η κατάλληλη πίεση υποβάλλεται στο σύνθετο, το οποίο συμπιέζεται. (38)



Εικόνα 4.5: Τεχνική Μορφοποίησης με σάκο πίεσης (38)

III. Μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο πίεσης (autoclave moulding):

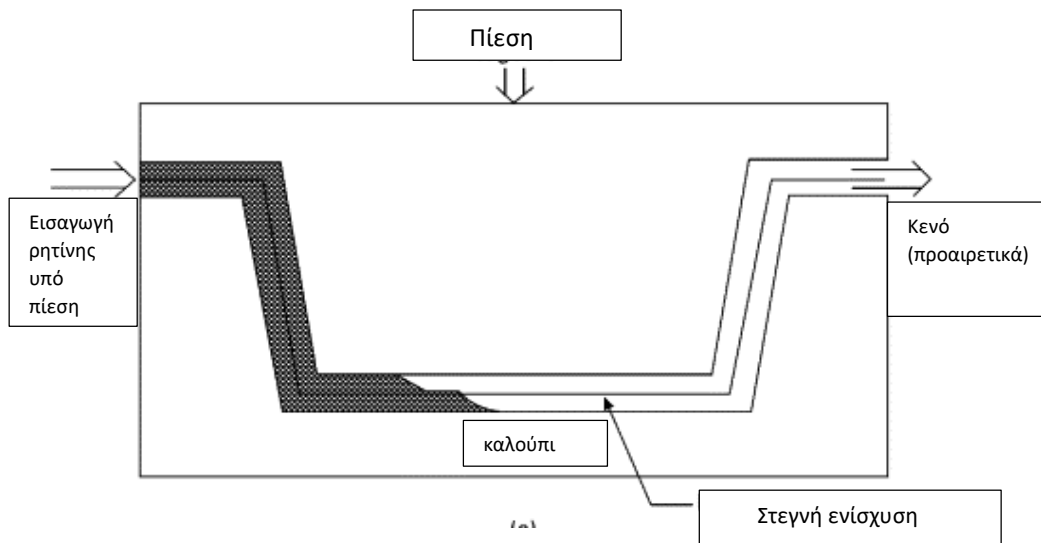
Η μορφοποίηση σε θερμαινόμενο θάλαμο, βοηθάει στην απομάκρυνση του αέρα σε μέγιστο βαθμό. Σε αυτή τη διαδικασία πραγματοποιείται η ταυτόχρονη υποβολή θερμότητας και πίεσης, οι διαστάσεις του σύνθετου μπορεί να περιοριστούν λόγω του θαλάμου. Οι πιέσεις που μπορούν ασκηθούν είναι από 50 έως και 200 psi (3-12 MPa). (39)

IV. Χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die- moulding)

Η χύτευση σε διαιρετό καλούπι περιλαμβάνει την χύτευση της ρητίνης στο καλούπι, αφού έχει προστεθεί και το μέσο ενίσχυσης. Η διαδικασία περιλαμβάνει την επιβολή πίεσης και αν χρειάζεται και θερμοκρασία. Μετά τη επιβολή της διαδικασίας το σύνθετο αφήνεται στο καλούπι μέχρι να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου και τότε μπορεί να αφαιρεθεί. (40)

V. Μέθοδος έγχυσης ρητίνης (resin transfer moulding, RTM)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την κατασκευή σύνθετων μεσαίου μεγέθους (μέγιστο τα 3 m). Το ύφασμα ή οι ίνες τοποθετούνται πρώτα στο ανάμεσα στα δύο καλούπια, λαμβάνοντας τον επιθυμητό προσανατολισμό. Στη συνέχεια, το καλούπι κλείνει και συσφίγγει το υλικό. Η ρητίνη εισέρχεται μέσα στο καλούπι μέχρι να γεμίσει εντελώς και το ιξώδες της πρέπει να είναι χαμηλό ώστε να ρέει με μεγαλύτερη ευκολία μέσα στο καλούπι και να απλωθεί σε όλα τα σημεία του. Το καλούπι με το υλικό θα θερμανθεί και έπειτα από τη διαδικασία της σκλήρυνσης, το τελικό σύνθετο μπορεί να αφαιρεθεί από το καλούπι και να είναι έτοιμο για το τελικό φινίρισμα. (41)



Εικόνα 4.6: Τεχνική έγχυσης ρητίνης. (41)

4.4 Ιδιότητες και Χαρακτηριστικά

Τα σύνθετα υλικά διαθέτουν πολύ μικρό βάρος, συγκριτικά με τα μέταλλα και άλλα συμβατικά υλικά, ένα χαρακτηριστικό που τα ευνοεί για συχνότερη χρήση τους. Οι ίνες, το ενισχυτικό μέσο, μπορούν να τοποθετηθούν ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής εκεί που χρειάζονται, δηλαδή στους άξονες που δέχεται το φορτίο. Το τελευταίο περιορίζει ακόμη περισσότερη την χρήση των ενισχυτικών μέσων, με αποτέλεσμα το ελάχιστο δυνατό βάρος του συνθέτου.

Σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον, όπως είναι το θαλάσσιο, τα σύνθετα υλικά παρουσιάζουν εξαιρετική αντοχή. Δεν μπορούν να αλλοιωθούν τα ινώδη σύνθετα υλικά, δεν σαπίζουν, και δεν επηρεάζονται από χημικές ενώσεις οξέων, αλκαλίων, ενυδατωμένων αλάτων, οξειδωτικών μέσων και οργανικών ενώσεων.

Επιπλέον μερικά ακόμα χαρακτηριστικά τους είναι ο μηδενικός συντελεστής θερμικής διαστολής, και η χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Το κόστος παραμένει χαμηλό καθώς δεν τίθεται θέμα συγκολλήσεων ή ραφών, απαιτείται μικρή συντήρηση συγκριτικά με τις μεταλλικές κατασκευές.

Το μικρό μέτρο ελαστικότητας που παρουσιάζεται, θεωρείται πλεονέκτημα όταν το απαιτεί η κατασκευή και αποτελεί μία ιδανική λύση. Η απουσία πλαστικής περιοχής (ολκιμότητας) μπορεί να θεωρηθεί μειονέκτημα καθώς, δεν είναι γνωστό πότε η κατασκευή θα αστοχήσει. Τα σύνθετα υλικά είναι ευπαθή στη φωτιά και παρουσιάζεται σε συνθήκες μεγάλης φόρτισης το φαινόμενο ερπυσμού. Όταν η κατασκευή έχει υψηλές απαιτήσεις τότε και το σύνθετο θα πρέπει να παρουσιάζει τις κατάλληλες ιδιότητες με κατάλληλες μεθόδους παραγωγής. (42)

4.5 Εφαρμογές των Σύνθετων υλικών με Ίνες

Τα σύνθετα υλικά, με τις ιδιότητες που εμφανίζουν έχουν καταφέρει να αντικαταστήσουν τα μέταλλα. Το μειωμένο βάρος που παρουσιάζουν, συγκριτικά με τα μέταλλα και οι υψηλές αντοχές τα καθιστούν ιδανικά για την επιλογή συμμετοχής

του σε πολλές εφαρμογές, όπως περιγράφεται και παρακάτω. Οι θερμικές, ηλεκτρικές και μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν τα σύνθετα πολυμερικής μήτρας ενισχυμένα με ίνες άνθρακα τα καθιστούν ιδανικά να αντικαταστήσουν τα μέταλλα σε κατασκευές αεροσκαφών. Επιπλέον, συνηθισμένη επιλογή για δομικές κατασκευές είναι η ενίσχυση πολυμερικής μήτρας με ίνες υάλου, αραμιδικές ή άνθρακα με αντοχές σε κάμψη και διάτμηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αντικατάσταση του αλουμινίου 6061 με σύνθετα ενισχυμένα με ίνες που παρατηρήθηκε η καλύτερη απορρόφηση κραδασμών. (34)

Αεροπορικές Κατασκευές

Η εφαρμογή των σύνθετων αυτών συνέβαλαν στην αντικατάσταση των μετάλλων σε αεροσκάφη και ελικόπτερα με αποτέλεσμα να μειώνεται ο αριθμός των εξαρτημάτων, την σημαντική μείωση του βάρους, την οικονομία στα καύσιμα, και την ενίσχυση της αξιοπιστίας για την χρήση τους. Εισήλθαν σε διάφορα σημεία των αεροσκαφών, όπως στο σκελετό των φτερών τους, σε πηδάλια, φυσητήρες. (43) Αυτές οι κατασκευές χρειάζονται μεγάλη αντοχή, ακαμψία και μία επιλογή ρητίνης μπορεί να είναι η εποξειδική και ως μέσα ενίσχυσης για τα μη κατασκευαστικά μέρη χρησιμοποιούνται αραμιδικές ίνες και ίνες υάλου, ενώ για το κατασκευαστικό γίνεται με χρήση ινών άνθρακα και βορίου. Για την τελειοποίηση των σύνθετων σε κατασκευές αεροπλάνων πέρα από την κατασκευαστική πλευρά, σε περίπτωση κινδύνου και έκθεση σε φωτιά, η μήτρα μπορεί να ενισχυθεί με καταστολείς καπνού και ανθεκτικά πρόσθετα στη φωτιά (44)

Ναυπηγική

Οι ναυπηγικές κατασκευές έχουν μία σειρά απαιτήσεων που πρέπει να πληρούν, όπως το μειωμένο βάρος, την ανθεκτικότητα στη διάβρωση αλλά και στο περιβάλλον. Το ξύλο, το αλουμίνιο και τα κράματα του χάλυβα, είναι από τα υλικά που αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις κατασκευές και ύστερα με την αναγνώριση των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών έγινε και η σταδιακή αντικατάστασή τους. Όπως έχει προαναφερθεί, το μειωμένο βάρος που πρόσφεραν σε σύγκριση με άλλα συμβατικά υλικά, είναι ένας εξίσου σημαντικός λόγος της χρήσης τους. Μία άλλη χρήση τους, είναι η εφαρμογή τους στο περίβλημα των ραντάρ και στους θόλους των σόναρς καθώς διαθέτει ακουστική αντίσταση (acoustic transparency). (45)

Κατασκευαστική Βιομηχανία

Τα δομικά συμβατικά υλικά μπορούν να αντικατασταθούν με αποτελεσματικό τρόπο από σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες. Μπορούν να προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις και να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικότερα ως δομικά υλικά. Λαμβάνουν μέρος στην κατασκευή μίας γέφυρας, ή στην αναστήλωση κολώνων σε κτίρια που βρίσκονται σε έντονα σεισμογενής περιοχές. Μερικά από τα συμβατικά υλικά που μπορούν να αντικαταστήσουν είναι ο χάλυβας, το ξύλο, το σκυρόδεμα. Η ανισοτροπία, η αντοχή σε διάβρωση, φυσικά το μειωμένο βάρος από άλλα υλικά αναβαθμίζουν την απόδοση και τη διάρκεια μίας κατασκευής. Επίσης υπάρχει η προοπτική συνδυασμού συμβατικών υλικών με FRP, συνδυάζοντας τα επιθυμητά

χαρακτηριστικά κάθε υλικού είτε για καλύτερα αποτελέσματα είτε ο συνδυασμός τους να επιφέρει οικονομικότερη λύση στην κατασκευή. (46)

Βιβλιογραφία 4^{ου} Κεφαλαίου

1. **Wang Ru-Min, Zheng Shui- Rong, Ya-Ping Zheld.** Polymer Matrix Composites and Technology. s.l. : Woodhead, 2011, σσ. 1-28.
2. **Dragan, Aleksedric.** *Soft computing in the design and manufacturing of composite materials.* s.l. : Elsevier Limited, 2015. σσ. 1-5.
3. **Mortnsen, A.** *Concise Encyclopedia of composite materials: Second Edition.* s.l. : Elsvier, 2007. σσ. 18-30.
4. **Gay Daniel, Hoa Suang V., Tsai Stephen W.** *Composite Material: Design and application.* s.l. : CRC PRESS, 2003. σσ. 14-26.
5. **Vicky, Wong.** A composite material: concrete. *Inspiration chemistry* . s.l. : Advancing the chemical sciences, σσ. 1-3.
6. **G.W., Milton.** The theory of composites. s.l. : Cambridge, 2004, σσ. 1-14.
7. **Todo, Mitsugo.** Development and Characterization of Porous Composite Materials for Bone Tissue Engineering. *The proceedings of mechanical congress.σσ 722-725*, 2014.
8. **Ajayan Pulickel M., Zhon Otto Z.** Applications of nanotubes. *Carbon Nanotubes. Topics in Applied Physics.* Berlin, Heidelberg : Spinger, 2001, Τόμ. 80, σσ. 391-425.
9. **Aleksendrić Dragan, Carlone Pierpaolo.** Composite materials-modelling, prediction and optimization. *Soft Computing in the design and manufacturing of composite materials.* s.l. : Woodhead Publishing, σσ. 61-289.
10. **Σιμιτζής, Ιωάννης.** *Τεχνολογία προηγμένων πολυμερών και σύνθετων υλικών (σημειώσεις).* Αθήνα : s.n., 2002. σσ. 64-84.
11. **Stevens, T.** *Materials Engineering*, 1990.
12. **Buckley, J. D.** Ceramic Bulletin. *Carbon-Carbon an Overview.* 1988, Τόμ. 67, σσ. 364-368.
13. **Σιμιτζής, Ι. Χ.** *Εργαστηριακές Ασκήσεις (Πολυμερή και Σύνθετα υλικά).* Αθήνα : ΕΜΠ, 2010. σσ. 1-125.
14. **Ravindra K Dhir OBE, Jorge de Brito, Raman Mangabhai, Chao Qun Lye.** Production and Properties of Copper Slag. *Sustainable Construction Materials: Copper Slag.* s.l. : WoodHead Publishing, 2017, σσ. 27-86.
15. **Jihua Gou, Jinfeng Zhuge.** Nanotechnology Safety in the Marine Industry. *Nanotechnology Safety.* s.l. : Elsevier, σσ.161-174 2013.
16. **Abdul Khalil H.P.S., Chaturbhuj K.Saurabh, Mustapha Asniza, Ying Y.Tye, Mohammad R.Nurul Fazita, Muhammad I. Syakir, Hashim M. Fizree, Abdul Fatah I. Yusra, Mohamad Kassim M. Haafiz, Mohd A.Kassim, Noorul Linda M.Suraya.** Nanofibrillated cellulose reinforcement in thermoset polymer composites. *Cellulose-Reinforced Nanofibre Composites.* s.l. : WoodHead Publishing, 2017, σσ. 1-24.
17. **Campbell, F.C.** Thermoset Resins: The Glue That Holds the Strings Together. *Manufacturing Processes for Advanced Composites.* s.l. : Elsevier, 2004, σσ. 63-101.

18. **J. Naveen, M. Jawaid, P. Amuthakkannan, M. Chandrasekar.** Mechanical and physical properties of sisal and hybrid sisal fiber-reinforced polymer composite. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. s.l. : Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, 2019, σσ. 427-440.
19. **G.D. Sims, W.R. Broughton.** Glass Fiber Reinforced Plastics—Properties. *Comprehensive Composite Materials*. 2. s.l. : Pergamon, 2000, σσ. 151-197.
20. **Gibson, A.G.** Continuous Molding of Thermoplastic Composites. *Comprehensive Composite Materials*. s.l. : Pergamon, 2000, σσ. 979-998.
21. **H. Warren, JR. Hunt.** Metal Matrix Composites. *Comprehensive Composite Material*. 6. s.l. : Pergamon, σσ. 57-66.
22. **Mallick, P.K.** *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles*. s.l. : Woodhead Publishing, 2010, σσ. 1-32.
23. **Boccaccini, Aldo R.** Ceramics. *Biomaterials, Artificial Organs and Tissue Engineering*. s.l. : WoodHead Publishing, 2005, σσ. 26-36.
24. **Ταραντίλη, Π.** *Μηχανική Πολυμερών*. Αθήνα: ΕΜΠ : s.n., 2009. σσ. 1-57.
25. **Soo-Jin Park, Min-Kang Seo.** Types of Composites. *Interface Science and Technology*. s.l. : Elsevier, 2011, Τόμ. 18, σσ. 501-629.
26. **C.M. Ward-Close, R.Minor, P.J.Doorbar.** Intermetallic-matrix composites—a review. *Intermetallics*. s.l. : Elsevier, 1996, Τόμ. 4, σσ. 217-229.
27. **Shahzad, Asim.** Investigation into fatigue strength of natural/synthetic fiber-based composite materials. *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. s.l. : WoodHead Publishing , 2019, σσ. 215-239.
28. **NabilBouhfid, Marya Raji, Radouane Boujmal, Hamid Essabir, Mohammed-Ouadi Bensalah, Rachid Bouhfid, Abou el kacemQaiss.** Numerical modeling of hybrid composite materials. *Modelling of Damage Processes in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*. s.l. : WoodHeadPublishing, 2018, σσ. 57-101.
29. **Madeo, Angela.** Fibrous Composite Reinforcements. *Generalized Continuum Mechanics and Engineering Applications*. 2015, σσ. 19-47.
30. **John Zhanhu Guo, Kenan Song, Chuntai Liu.** Thermal Conduction in Polymer Composites. *Polymer-Based Multifunctional Nanocomposites and Their Applications*. 77-110 : Elsevier, 2019.
31. **Leterrier, Y.** Life Cycle Engineering of Composites. *Comprehensive Composite Materials*. s.l. : Pergamon, 2000, Τόμ. 2, σσ. 1073-1102.
32. **Singh, C.V.** Evolution of multiple matrix cracking. *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*. s.l. : WoodHead Publishing, 2016, σσ. 143-171.
33. **Τσούβαλης, Ν.** *Τεχνολογία και Μηχανική Σύνθετων Υλικών*. Αθήνα : s.n., 1998. σσ. 1-105.

34. **Dipen Kumar Rajak, Durgesh D. Pagar, Pradeep L. Menezes, Emanoil Linul.** *Fiber-Reinforced Polymer Composites: Manufacturing, Properties, and Applications*. s.l. : Polymers Open Access Journal, 2019. σσ. 1-37.
35. **E.Oterkus, C.Diyaroglu, D.De Meo, G.Allegri79-10.** Fracture modes, damage tolerance and failure mitigation in marine composites. *Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites*. s.l. : WoodHead, 2016, σσ. 79-102.
36. **Ashok, Rajpurohit.** *Fiber Reinforced Composites Advances in Manufacturing Techniques*. s.l. : Textile Review, 2012.
37. **K.Balasubramanian, Mohamed T.H. Sultan, N.Rajeswari.** Manufacturing techniques of composites for aerospace applications. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*. s.l. : WoodHead Publishing, 2018, σσ. 55-67.
38. **Biron, Michel.** Composites. *Thermosets and Composites*. s.l. : Elsevier, 2004, σσ. 343-463.
39. **Eckold, Geoff.** Design and Manufacture of composites structures. *Manufacture*. s.l. : WoodHead Publishing, 1994, σσ. 251-304.
40. **Lee, Stuart M.** *Handbook of Composites: Reinforcements*. s.l. : Wiley-Vch, 1992. σσ. 328-330.
41. **Mouritz, Adrian.** Manufacturing of fibre-polymer composite materials. *Introduction to Aerospace Materials*. s.l. : WoodHead Publishing, 2012, σσ. 303-337.
42. **Θωμαΐς, Τριακίδιου.** Προσδιορισμός Μηχανικών Ιδιοτήτων Ναυσοσυνθετων και Μικροσύνθετων Υλικών. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ : σσ. 20-29, 2014.
43. **Seymour, Raymond B.** *Polymeric Composites*. s.l. : VSP, 1990. σσ. 160-162.
44. **Bai, Jiping.** *Advanced Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications*. s.l. : WoodHead Publishing, 2013. σσ. 110-114.
45. **S. Selvaraju, S.Ilaiyavel.** *Applications of Composites in Marine Industry*. s.l. : Technical journals online.
46. **Hollaway, L. C.** ICE manual of Construction Materials. *Applications of fibre-reinforced polymer composite materials*. s.l. : ICE Manuals, σσ. 675-692, 2009.

Κεφάλαιο 5. Σκοπός

Τα σύνθετα υλικά λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων τους σε συνδυασμό με το πολύ χαμηλό βάρος, βρίσκουν ευρεία εφαρμογή. Η αυτοκινητοβιομηχανία, η ναυπηγική, οι δομικές κατασκευές στηρίζονται πλέον σε αυτά τα υλικά, που συνεχώς εξελίσσονται. Η κατασκευή τους, όμως, συνήθως στηρίζεται σε συνθετικά μέσα ενίσχυσης της μήτρας. Η ανάπτυξη της ιδέας κατασκευής σύνθετων υλικών με φυσικές ίνες προήλθε από την ανάγκη και τη ζήτηση της αγοράς υλικών με χαμηλότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Το μαλλί του προβάτου, είναι φυσική ίνα, με σταθερή παραγωγή ετησίως στην Ελλάδα, με κανένα κίνδυνο χρήσης του και στον κατασκευαστή και στον καταναλωτή.

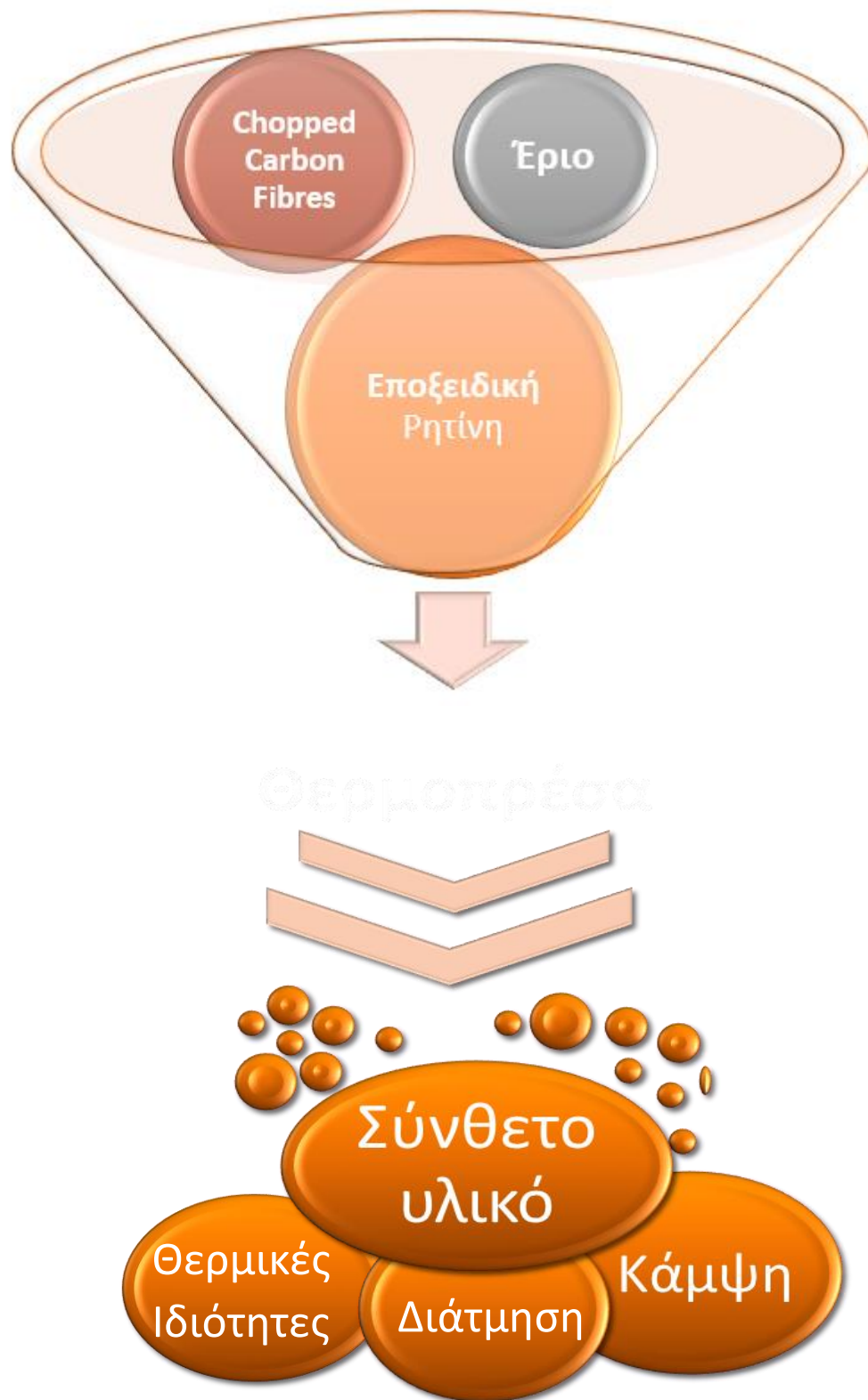
Η παραγωγή του μαλλιού είναι υψηλή στην Ελλάδα και σταθερή κάθε χρόνο. Η ποιότητα του παραγόμενου ερίου από τις αναμικτόμαλλες φυλές της χώρας μας είναι χαμηλής αξίας και παραμένει ανεκμετάλλευτη από τους κτηνοτρόφους. Οι παραδοσιακές εφαρμογές του, όπως η ταπητουργία, έχουν περιοριστεί, επομένως υπάρχει τεράστια διαθεσιμότητα αυτής της φυσικής ίνας.

Οι ίνες άνθρακα διακρίνονται για τις πολύ καλές μηχανικές τους ιδιότητες, για αυτό άλλωστε είναι διαδεδομένη η χρήση τους σε εφαρμογές των σύνθετων υλικών. Η παρουσία τους στο σύνθετο θα βοηθήσει στην βελτίωση των μηχανικών αντοχών του συνθέτου.

Η ενσωμάτωση του μαλλιού αποτελεί μία λύση αντικατάστασης των συνθετικών μέσων ενίσχυσης που θα επιφέρει ευκολία στη διαχείριση του και χωρίς χημική τροποποίηση του. Παράλληλα είναι μία οικονομική λύση, διότι συμβάλλει στη μείωση του συνολικού κόστους του σύνθετου υλικού. Το μαλλί είναι ένα φυσικό προϊόν, ανακυκλώσιμο με μεγάλη διάρκεια ζωής, ασφαλές στη χρήση χαρακτηριστικά που το δίνουν την ευκαιρία συμμετοχής στις κατασκευές ως δομικό υλικό. Όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της μεθόδου ίσως να αποτελεί ερέθισμα όχι μόνο ανάδειξης των τρόπων αξιοποίησής του, αλλά και να δοθεί η ευκαιρία πολλαπλών χρήσεων του μέσω της εμπορικής χρήσης του.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η κατασκευή ενός νέου σύνθετου υλικού που θα παρουσιάζει πολύ καλές θερμομονωτικές και μηχανικές ιδιότητες. Το μαλλί ως φυσική ίνα θα είναι υπεύθυνο για τον χαμηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του συνθέτου, ενώ με την ενσωμάτωση κομμένων ινών άνθρακα θα εξασφαλιστούν οι καλές μηχανικές ιδιότητες.

Ο χαρακτηρισμός του σύνθετου υλικού θα πραγματοποιηθεί μέσω της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (SEM), ενώ θα πραγματοποιηθεί και δοκιμή σε κάμψη, σε διάτμηση και προσδιορισμός συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



Εικόνα 5.10: Διάγραμμα ροής για μορφοποίηση Σύνθετων υλικών.

Κεφάλαιο 6. Προετοιμασία Δειγμάτων

6.1 Πρώτες ύλες, Εργαστηριακές συσκευές, όργανα

Οι ίνες άνθρακα αποκτήθηκαν από την εταιρία Neotex AEBE. Τα δείγματα του μαλλιού δόθηκαν από το κέντρο Γενετική Βελτίωσης Ζώων (Ιωαννίνων) και την Ένωση Μετακινούμενων Κτηνοτρόφων Ηπείρου.

6.2 Ζωικό Υλικό

Για τη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δείγματα από δύο Ελληνικές φυλές, αρσενικών και θηλυκών ζώων. Οι δύο αυτές φυλές είναι η Καλαρρύτεκη και η Κατσικά και παρακάτω αναφέρονται μερικές χαρακτηριστικές πληροφορίες σχετικά με την εριοπαραγωγή τους.

Καλαρρύτεκη Φυλή

Η **Καλαρρύτεκη** φυλή, προέρχεται από το πρόβατο της Ηπείρου. Η εκτροφή του πραγματοποιείται από τους κατοίκους στο χωριό Καλαρρύτες, το όνομα του οποίου δόθηκε και στη συγκεκριμένη φυλή. Το σημερινό Καλαρρύτεκο πρόβατο προήλθε πιθανότητα από το Ορεινό Ηπειρώτικο πρόβατο και του Comsana της Σικελίας. Η εκτροφή της φυλής ανέρχεται περίπου στα 8000 πρόβατα (1)

Η παραγωγή Ερίου στο συγκεκριμένο ζώο είναι περίπου 1,2 kg έως 1,8 kg και δεν έχει υψηλή εμπορική αξία. Η Καλαρρύτεκη φυλή ανήκει στην κατηγορία των αναμικτόμαλλων προβάτων. Το σύνολο του ερίου είναι λευκού χρώματος εκτός από συγκεκριμένα σημεία, τις παρειές και κάτω από τα αυτιά, που είναι κοκκινοκάστανου χρώματος. (2)

Φυλή Κατσικά

Η φυλή **Κατσικά**, προήλθε από την ανάμειξη του Ηπειρώτικου και Καραμάνικου προβάτου. Η καταγωγή του είναι από την κεντρική Τουρκία. Η ονομασία Κατσικά καθιερώθηκε λόγω της εκτροφής του στο ομώνυμο χωριό των Ιωαννίνων. Η συνολική παραγωγή ερίου ανά ζώο είναι περίπου 1,5 έως 2,0 kg.

Το συνολικό τρίχωμα της συγκεκριμένη φυλής είναι λευκού χρώματος, με εξαίρεση την περιοχή γύρω από τα μάτια, τα αυτιά και τα κάτω άκρα. Λόγω της σκουρόχρωμης περιοχής γύρω από τα μάτια το πρόβατο χαρακτηρίζεται και ως Μαυρομάτικο. (3)

6.3 Πλύσιμο

Το πλύσιμο του μαλλιού πραγματοποιήθηκε τμηματικά καθώς η πλύση έγινε σε ποτήρια ζέσεως. Αναλυτικότερα δέσμες μαλλιού τοποθετήθηκαν στα ποτήρια ζέσεως και με προσθήκη απεσταγμένου νερού και σκόνη απορρυπαντικού τοποθετήθηκαν σε νερό θερμοκρασίας 50°C. Το κάθε δείγμα παραμένει, από 20 έως 30 λεπτά ακίνητο σε αυτή τη θερμοκρασία των 50°C. Το νερό αφαιρείται μετά το πέρας του

συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και γίνεται η προσθήκη απεσταγμένου νερού και τοποθετείται πάλι στην ίδια θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι τη στιγμή που θα καθαρίσει το κάθε δείγμα του ερίου. Στο τέλος, πραγματοποιείται μία τελευταία έκπλυση. Η διαδικασία του στεγνώματος περιελάμβανε την παραμονή των δειγμάτων σε συνθήκες δωματίου για 1 έως και 2 ημέρες.



Εικόνα 6.11: Διαδικασία πλυσίματος του ερίου.

6.4 Μετρήσεις για την Ποιότητα του Μαλλιού

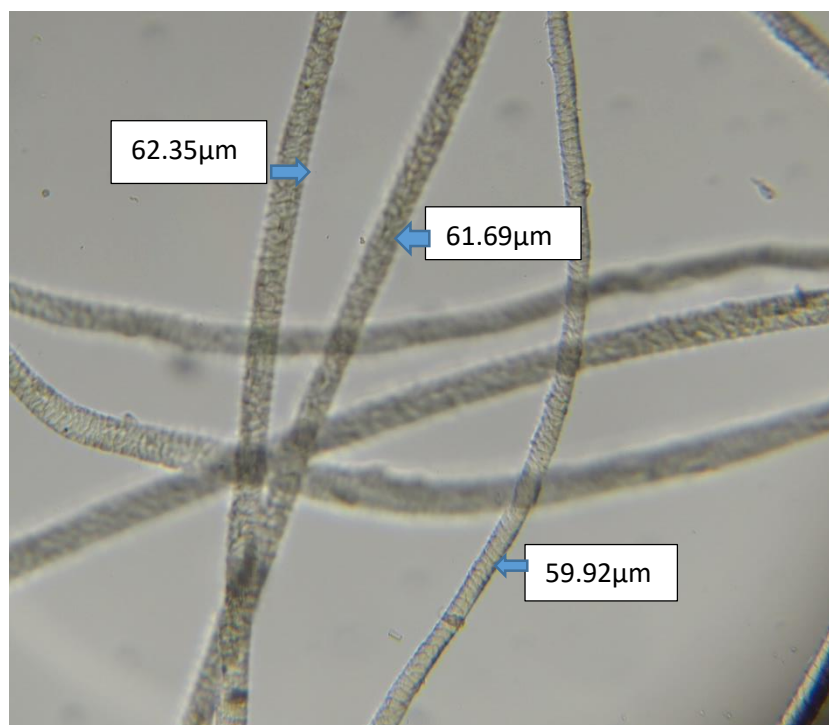
Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις σχετικά με τη λεπτότητα της τρίχας.

Λεπτότητα Τρίχας

Η λεπτότητα της τρίχας εκτιμήθηκε μέσω του υπολογισμού της διαμέτρου με τη βοήθεια οπτικού μικροσκοπίου OLYMPUSSX40 και τη χρήση φωτογραφικής μηχανής OLYMPUSD71 που βρισκόταν σε σύνδεση με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πρόγραμμα ανάλυσης φωτογραφιών βοήθησε στον υπολογισμό της διαμέτρου.

Για τη διαδικασία της μέτρησης στο οπτικό μικροσκόπιο, μικρός αριθμός τριχών τοποθετήθηκαν σε αντικειμενοφόρο πλάκα, με την προσθήκη γέλης (gel) γλυκερίνης για τη σταθεροποίηση του. Η γέλη γλυκερίνης αποτελούνταν από: : α) 10 gr ζελατίνα,

β) 70 ml γλυκερίνης, γ) 0.25 φαινόλη και δ) απεσταγμένο νερό. Η ζελατίνη διαβρέχθηκε με νερό για διάστημα 2 ωρών. Στην συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία θέρμανσης σε υδατόλουτρο. Κατά τη διαδικασία της θέρμανσης πραγματοποιήθηκε και ταυτόχρονη ανάδευση για την ομοιογένεια του μίγματος.



Εικόνα 6.12: Υπολογισμός διαμέτρου από το οπτικό μικροσκόπιο

Πίνακας 6.4: Πίνακας υπολογισμού της λεπτότητας της τρίχας.

Φυλές	Καλαρρύτικο	Κατσικά
Μέσος Όρος Διαμέτρου (μm)	68.38	61.54

6.5 Κοπή Συνολικού Ερίου

Το συνολικό μαλλί κόπηκε σε μήκος περίπου 1cm με τη βοήθεια μικρού ψαλιδιού. Η διαδικασία αυτή βοήθησε την καλύτερη διαχείριση του και ενσωμάτωση του στο σύνθετο υλικό.

Βιβλιογραφία 6^{ου} Κεφαλαίου

1. **Βασιλική, Λάγκα.** *Αιγοπροβατοτροφία*. Σύγχρονη Παιδεία. Θεσσαλονίκη : s.n., 2017. σσ. 38-49.
2. **Ένωση Μετακινούμενων Κτηνοτρόφων.** 2013.
3. **Εμμανουήλ, Ρογδάκης.** *Εγχώριες Φυλές Προβάτων*. Αγρότυπος ΑΕ, 2002.

Κεφάλαιο 7. Μορφοποίηση Σύνθετων Υλικών

7.1 Πρώτες ύλες, εργαστηριακές συσκευές και όργανα

Πρώτες Ύλες

Για τη μορφοποίηση σύνθετων υλικών χρησιμοποιήθηκε εποξειδική ρητίνη, Chopped CF και έριο προβάτου.

Εποξειδική Ρητίνη

Η εποξειδική ρητίνη που χρησιμοποιήθηκε απαρτίζεται από τρία συστατικά και αποκτήθηκε από την HUNTSMAN Industries (Η.Π.Α.). Συγκεκριμένα, η εποξειδική ρητίνη είναι η Araldite LY 556, σκληρυντής ο Aradur 917 και επιταχυντής ο DY 070. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του συστήματος της ρητίνης.

Πίνακας 7.5: Βασικές ιδιότητες εποξειδική ρητίνης

	Περιεχόμενο σε οξιράνιο [eq/kg]	Ιξώδες (25 °C) [mPa s]	Πυκνότητα (25 °C) [g/cm ³]	Σημείο Ανάφλεξης °C
Araldite LY 556	5.30-5.45	10000-12000	1.15-1.20	>200
Aradur 917	-	50-100	1.20-1.25	195
Accelerator DY 070	-	≤ 50	0.95-1.05	92

Ίνες Άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα αποκτήθηκαν από την Εταιρία Neotex.

Έριο Προβάτου

Το συνολικό έριο που χρησιμοποιήθηκε δόθηκε από το κέντρο Γενετική Βελτίωσης Ζώων (Ιωαννίνων) και την Ένωση Μετακινούμενων Κτηνοτρόφων Ηπείρου. Το μήκος της κάθε ίνας ήταν περίπου 1cm και η πυκνότητα του είναι 0.4gr/cm³.

Εργαστηριακές Συσκευές και Όργανα

Θερμοπρέσα (Carver, Model 3856 CE)

Φούρνος

Αναλυτικός ζυγός

7.2 Προετοιμασία και Κατασκευή Σύνθετων Υλικών

Προετοιμασία-Κατασκευή Πρότυπου Δείγματος χωρίς Ίνες

Χρησιμοποιήθηκε ρητίνη Araldite LY556 και η αναλογία των συστατικών είναι 100:90:0,5 (ρητίνη: σκληρυντής: επιταχυντής). Πραγματοποιήθηκε καλή ανάδευση των συστατικών και έγινε η χύτευσή τους σε ειδικό καλούπι. Στο καλούπι πριν τη χρήση έγινε καλή επάλειψη με κερί για καλύτερη αποκόλληση του τελικού σύνθετου. Στη συνέχεια, μετά την χύτευση τοποθετήθηκε σε θερμοπρέσα Carver, Model 3856 CE που διαθέτει δύο μεταλλικές πλάκες. Η παραμονή του είναι για 4 ώρες στους 80°C και σε συνεχή πίεση τιμής 17.5 MPa. Έπειτα ακολουθείται η διαδικασία της μετασκλήρυνσης, όπου το υλικό παραμένει για 4 ώρες σε θερμοκρασία 120°C μέσα σε φούρνο. Με τη διαδικασία της μετασκλήρυνσης θα προκύψουν οι μέγιστες μηχανικές ιδιότητες που μπορούν να επιτευχθούν.



Εικόνα 7.13: Το μεταλλικό καλούπι που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διαδικασία.

Προετοιμασία Κατασκευή Σύνθετου με Ίνες Άνθρακα

Η κατασκευή του σύνθετου υλικού με ίνες άνθρακα (Chopped Carbon Fibers) ακολουθεί επακριβώς την ίδια διαδικασία της πρώτης παραγράφου που περιγράφει την κατασκευή από σκέτη μήτρα. Η χρήση της ποσότητας των ινών στο σύνθετο είναι σε ποσοστό 5% w/w και αναδεύεται μαζί με το μίγμα της εποξειδικής. Η πίεση στη θερμοπρέσα ορίζεται στα 11.72 MPa.



Εικόνα 7.2: Σύνθετα εποξειδικής μήτρας και ινών άνθρακα 5%.

Προετοιμασία- Κατασκευή Σύνθετου με Ίνες Άνθρακα και Έριο

Η κατασκευή του σύνθετου υλικού με ίνες άνθρακα και έριο περιλαμβάνει την ανάμειξη των ινών άνθρακα (CCF) σε ποσοστό 5% w/w, ερίου 2.5% w/w για την κάθε φυλή ξεχωριστά, και εποξειδικής. Η διαδικασία περιλαμβάνει τα στάδια που περιγράφονται στην πρώτη παράγραφο. Οπότε τελικώς κατασκευάζονται τα Erox-CF-Kal2.5 και Erox-CF-Kat2.5. Η πίεση στη θερμοπρέσα ορίζεται για την πρώτη περίπτωση 7.6MPa και στην δεύτερη στα 8.5MPa.

Η κατασκευή συνθέτου πραγματοποιήθηκε και με την ανάμειξη Chopped CF 5% w/w, ερίου 3% w/w και εποξειδική ρητίνη. Πραγματοποιήθηκαν τα βήματα κατασκευής, όπως περιγράφηκαν στην πρώτη παράγραφο του 7.2 κεφαλαίου. Για τον τύπο Erox-CF-Kat3 ορίζεται πίεση στα 8MPa και για το Erox-CF-Kal3 ορίζεται στα 9.6MPa.



Εικόνα 7.3: Σύνθετα εποξειδικής μήτρας με προσθήκη μαλλιού (2,5%) και ίνες άνθρακα 5%.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει συνοπτικά τα ποσοστά που χρησιμοποιήθηκαν ξεχωριστά σε κάθε περίπτωση για την κατασκευή των σύνθετων υλικών:

Πίνακας 7.2: Υλικά και οι αναλογίες τους που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σύνθετων υλικών.

κωδικός	Μήτρα	Αναλογία ανάμιξης Μήτρας	Ενίσχυση	Αναλογία Ανάμιξης κομμένων ινών άνθρακα	Αναλογία ανάμιξης ερίου
Epoxy	Araldite LY 556 + Aradur 917 + Accelerator DY 070	100:90:0,5	-	-	-
Epoxy-CF			Chopped CF	5%	-
Epoxy-CF-Kal2.5			Chopped CF+ Kallaritiko Wool fibre		2.5%
Epoxy-CF-Kal3			Chopped CF+ Kallaritiko Wool fibre		3%
Epoxy-CF-Kat2.5			Chopped CF+ Katsika Wool fibre		2.5%
Epoxy-CF- Kat3			Chopped CF+ Katsika Wool fibre		3%

Κεφάλαιο 8. Μηχανικές Ιδιότητες και Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

8.1 Δοκιμή σε Κάμψη και Διάτμηση

Για τις μηχανικές ιδιότητες των συνθέτων που κατασκευάστηκαν πραγματοποιήθηκαν: η δοκιμή σε κάμψη και σε διάτμηση.

Δοκιμή σε Κάμψη

Για τη συγκεκριμένη μέθοδο ακολουθήθηκαν τα πρότυπα κατά ASTM D790. Τα δοκίμια έχουν τις συγκεκριμένες διαστάσεις: μήκος 127mm, πλάτος 12.7mm και πάχος 3mm. Έγινε η δοκιμή τριών σημείων προκειμένου να υπολογισθεί η αντοχή σε κάμψη. Το φορτίο ασκείται στο μέσο της απόστασης των σημείων στήριξης L_s , και η μεταξύ τους απόσταση είναι 10cm. Με αναλογικό βελόμετρο ακριβείας εκατοστού του mm μετράται το βέλος της κάμψης.

Η παρακάτω εξίσωση υπολογίζει την αντοχή σε κάμψη σ_b :

$$\sigma_b = \frac{3 * P_{max} * L_s}{2 * b * d^2} \quad (1)$$

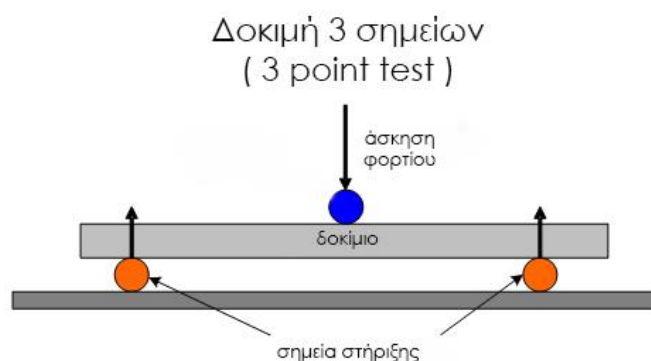
σ_b : αντοχή σε κάμψη (MPa)

P_{max} : μέγιστο εφαρμοζόμενο φορτίο που αντέχει το δοκίμιο (N)

L_s : απόσταση σημείων στήριξης (mm)

b : πλάτος δοκιμίου (mm)

d : πάχος δοκιμίου (mm)



Εικόνα 8.1: Σχηματική απεικόνιση τριών σημείων.

Δοκιμή σε Διάτμηση

Η μέθοδος που ακολουθήθηκε βασίστηκε στο πρότυπο ASTM D2344. Όλα τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν είχαν τις εξής διαστάσεις: μήκος 127mm, πλάτος 12.7mm, πάχος 3mm. Για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάταξη με την διαφορά ότι τα σημεία στήριξης απείχαν 11mm.

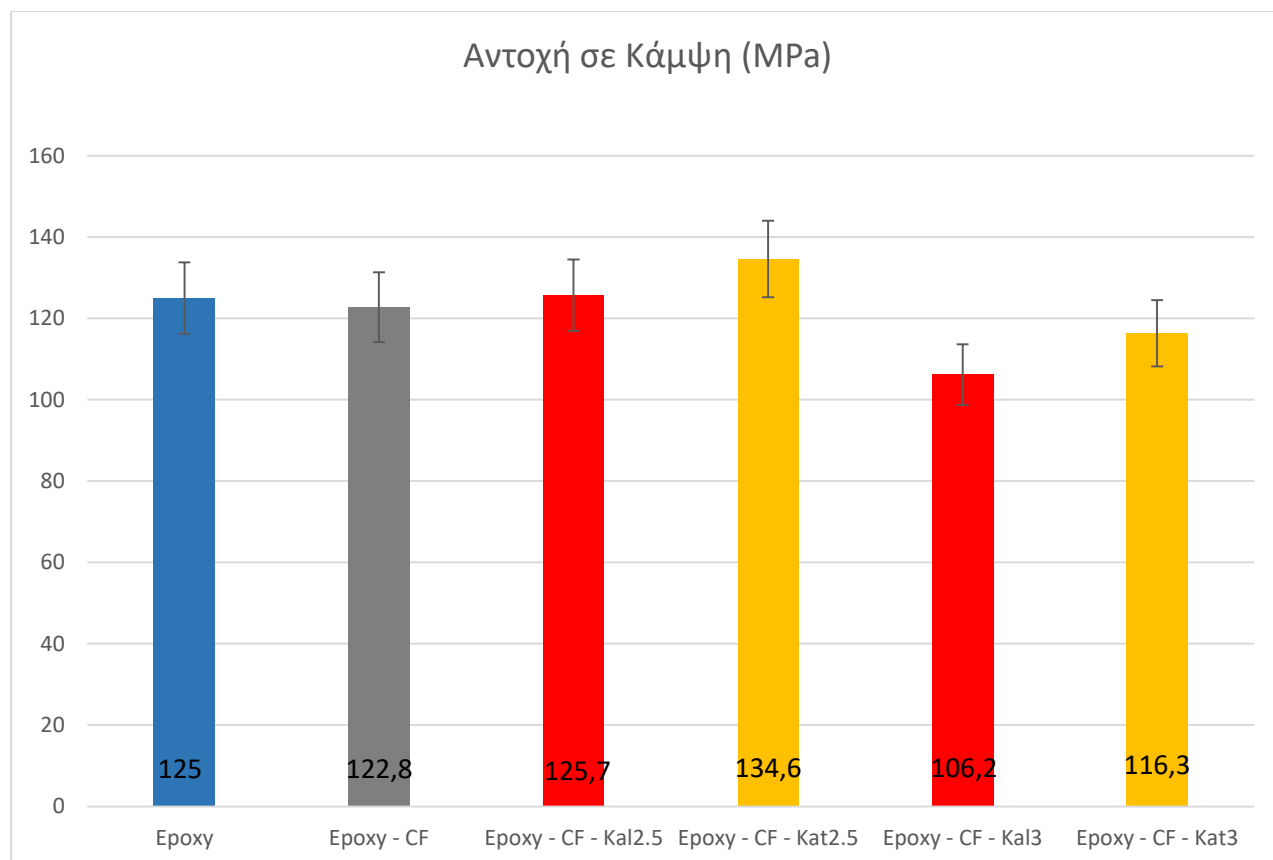
Η αντοχή σε διάτμηση, τ_b , υπολογίζεται από την εξής εξίσωση:

$$\tau_b = 0,75 * \frac{p_{max}}{b*d} \quad (2)$$

8.2 Αποτελέσματα Μηχανικών Ιδιοτήτων

8.2.1 Αντοχή σε Κάμψη

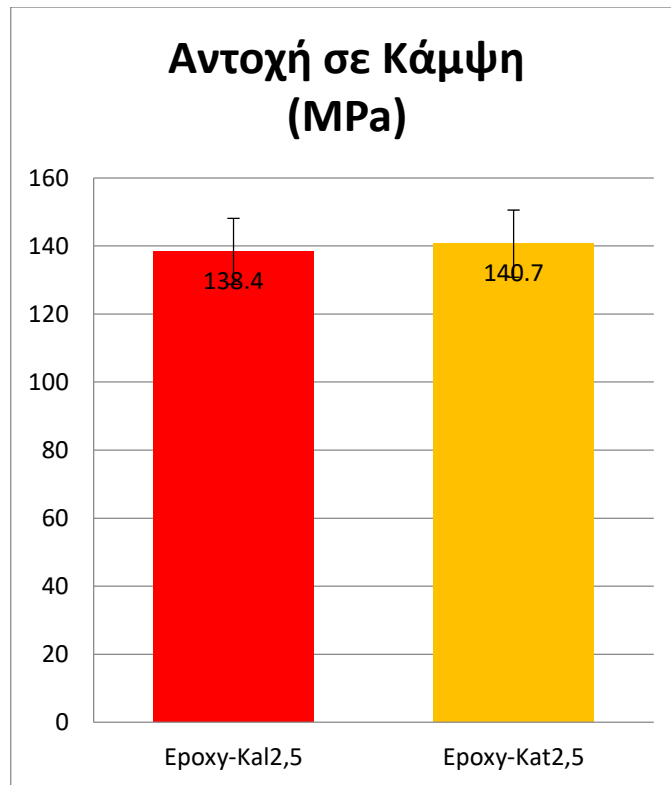
Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την αντοχή σε κάμψη των 6 δειγμάτων που κατασκευάστηκαν.



Σχήμα 8.6: Απεικόνιση αποτελεσμάτων Αντοχής σε Κάμψη.

Παρατηρήσεις

Στο Σχήμα 8.1 που παρουσιάζεται, παρατηρείται ότι η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα σε ποσοστό 5% σε εποξειδική ρητίνη, δεν είναι αρκετή ώστε να αυξήσει τις μηχανικές ιδιότητές της. Επιπροσθέτως, οι αλλαγές που επέφερε η επιπλέον προσθήκη του ερίου για την κατασκευή Σύνθετων τύπου Epoxy-CF-Kal2.5 (0.56%) και Epoxy-CF-Kat2.5 (7.68%) στις μηχανικές ιδιότητες, δεν υπερβαίνουν τα όρια σφάλματος. Τα σύνθετα λοιπόν, διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Αντιθέτως, μείωση των αντοχών σε κάμψη καταγράφηκε για τα Σύνθετα Epoxy-CF-Kal3 και Epoxy-CF-Kat3 σε ποσοστά 15.02% και 6.92% αντίστοιχα.



Σχήμα 8.7: Αποτελέσματα Αντοχής σε Κάμψη Σύνθετων με Έριο και Εποξειδική.¹

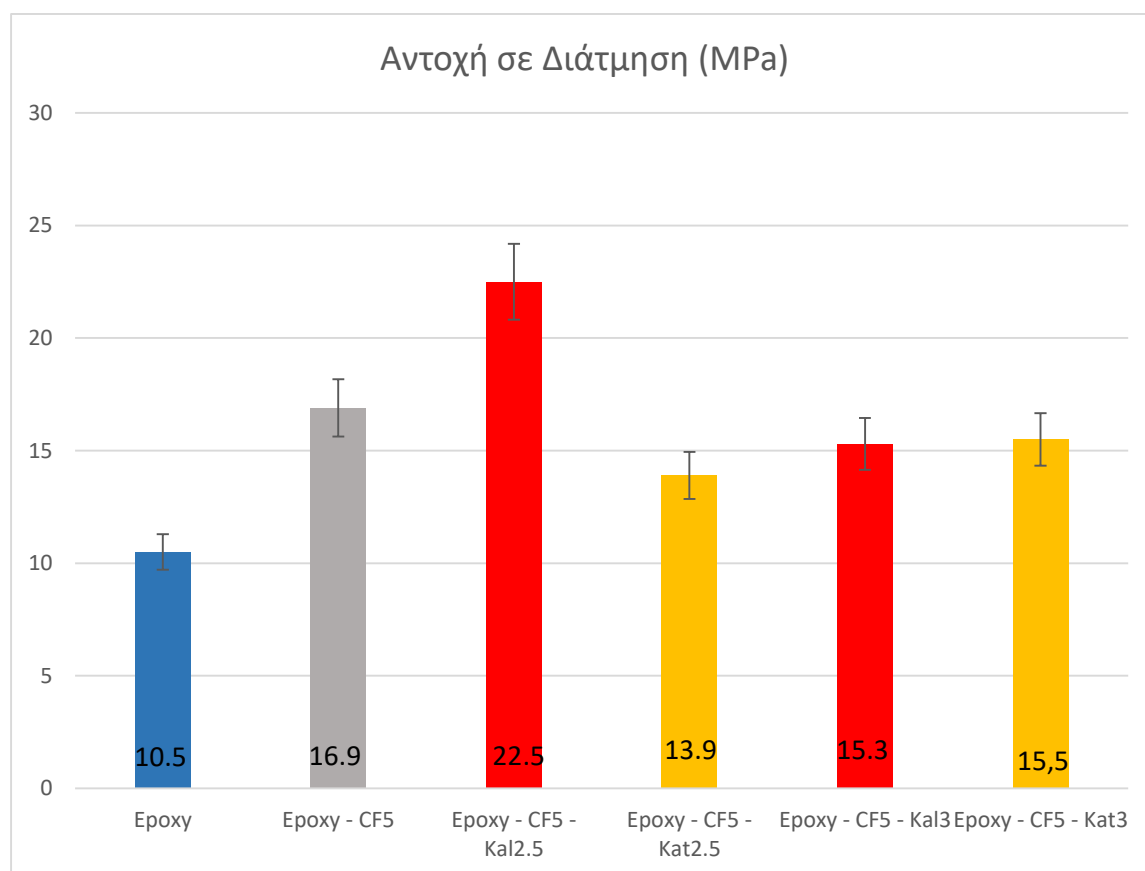
Παρατηρήσεις

Από το σχήμα 8.2, παρατηρείται η μεταβολή αντοχή σε κάμψη για τα Σύνθετα Epoxy-kal2.5 σε ποσοστό 10.72% και για τα σύνθετα Epoxy-Kat2.5 σε ποσοστό 12.56%.

¹ Τα αποτελέσματα αποτελούν μέρος της πτυχιακής μου μελέτης 2018 (Το έριο των ελληνικών προβάτων ως βάση για την κατασκευή Σύνθετων Υλικών).

8.2.2 Αντοχή σε Διάτμηση

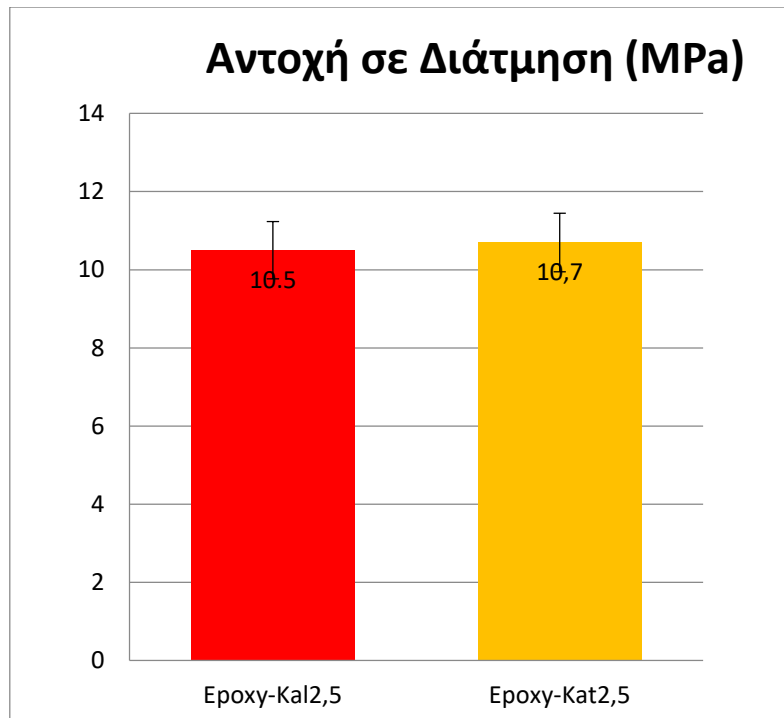
Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει την αντοχή σε διάτμηση των 6 δειγμάτων που κατασκευάστηκαν.



Σχήμα 8.8: Απεικόνιση Αποτελεσμάτων Αντοχής σε Διάτμηση.

Παρατηρήσεις

Στο Σχήμα 8.3 που παρουσιάζεται, παρατηρείται ότι η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα σε ποσοστό 5% w/w σε εποξειδική ρητίνη (Epoxy-CF5) προκαλεί αύξηση στην αντοχή σε διάτμηση σε ποσοστό 60,95%. Παρόμοια ποσοστά ενίσχυσης σημειώθηκαν και για τα σύνθετα που περιείχαν έριο και ίνες άνθρακα. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση για το Epoxy-CF-Kat2.5 κατά 32.38%, για το Epoxy-CF5-Kal3 κατά 45.71% και για το Epoxy-CF5-Kat κατά 47.61%. Την πιο σημαντική βελτίωση στην αντοχή σε διάτμηση έδειξε το σύνθετο Epoxy-CF-Kal2.5 κατά 114.28%.



Σχήμα 8.9: Αποτελέσματα Αντοχής σε Διάτμηση Σύνθετων με Έριο και Εποξειδική.²

Παρατηρήσεις

Από το Σχήμα 8.4, παρατηρείται ότι η προσθήκη ερίου 2.5% w/w για τα σύνθετα Epoxy-Kal2.5 δεν προκαλεί καμία μεταβολή στη αντοχή σε διάτμηση και για τα σύνθετα Epoxy-Kat2.5 αυξήθηκε κατά 1.9%. Αυτό αποδεικνύει ότι η ενίσχυση της αντοχής σε διάτμηση οφείλεται αποκλειστικά στην προσθήκη των ινών άνθρακα.

² Τα αποτελέσματα αποτελούν μέρος της πτυχιακής μου μελέτης 2018 (Το έριο των ελληνικών προβάτων ως βάση για την κατασκευή Σύνθετων Υλικών).

Ο παρακάτω πίνακας μας δείχνει συνολικά τα ποσοστά αύξησης και μείωσης στην αντοχή σε κάμψη και σε διάτμηση συγκριτικά με την σκέτη εποξειδική:

Πίνακας 8.1: Ποσοστά αντοχής σε κάμψη και σε διάτμηση.

Κωδικός	Αντοχή σε Κάμψη (MPa)	Ποσοστό μεταβολής στην Αντοχή σε Κάμψη(%)	Αντοχή σε Διάτμηση (MPa)	Ποσοστό μ στην Αντοχή σε Διάτμηση(%)
Epoxy	125	-	10.5	-
Epoxy-CF	122.8	-0.56	16.9	60.95
Epoxy-Kal2.5*	138.4	10.72	10.5	0
Epoxy-Kat2.5*	140.7	12.56	10.7	1.9
Epoxy-CF-Kal2.5	125.7	0.56	22.5	114.28
Epoxy-CF-Kat2.5	134.6	7.68	13.9	32.38
Epoxy-CF-Kal3	106.3	-15.02	15.3	45.71
Epoxy-CF-Kat3	116.3	-6.91	15.5	47.61

**Τα αποτελέσματα αποτελούν μέρος της πτυχιακής μου μελέτης (2018).*

8.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Από τα αποτελέσματα της αντοχής σε κάμψη (Πίνακας 8.1) καταλήγουμε στους παρακάτω σχολιασμούς:

Η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα σε ποσοστό 5% κατά βάρος δεν επηρεάζει την αντοχή σε κάμψη των δειγμάτων αυτής της μελέτης. Μελέτη του Ozsou και Mimaroglu παρουσιάζει ότι η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα 6% σε εποξειδική ρητίνη αύξησε την αντοχή σε κάμψη κατά 8%. Το ποσοστό αυτό δεν επηρεάζει την αντοχή σε κάμψη και συνάδει με το αποτέλεσμα της προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα 5% κατά βάρος. (1)

Με την προσθήκη ερίου, τα σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης – κομμένων ινών άνθρακα διατηρούν την αντοχή σε κάμψη στο ποσοστό του 2.5%, κάτι το οποίο οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό ερίου που επιλέχθηκε να εισαχθεί στο σύνθετο.

Με την προσθήκη ερίου σε ποσοστό 3% παρατηρείται μείωση της αντοχή σε κάμψη. Πέραν τούτου, η κατεργασιμότητα του μίγματος υγρής εποξειδικής – κομμένων ινών άνθρακα, δυσχεραίνει με περαιτέρω προσθήκη ερίου σε ποσοστό άνω του 2.5%. Το μέγιστο δυνατό μίγμα που ήταν εφικτό να παρασκευαστεί είναι αυτό με ποσότητα ερίου 3%.

Εν αντιθέσει με την αντοχή σε κάμψη, η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα σε ποσοστό 5% κατά βάρος βελτιώνει την αντοχή σε διάτμηση της εποξειδικής ρητίνης κατά 60,95%. Αυτό οφείλεται στην προσθήκη με τυχαίο προσανατολισμό των ινών μέσα στο σύνθετο.

Τέλος, η αντοχή σε διάτμηση δεν επηρεάζεται από την προσθήκη ερίου σε ποσοστό 2.5% - 3%, κάτι το οποίο οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό ερίου που επιλέχθηκε να εισαχθεί στο σύνθετο

8.4 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

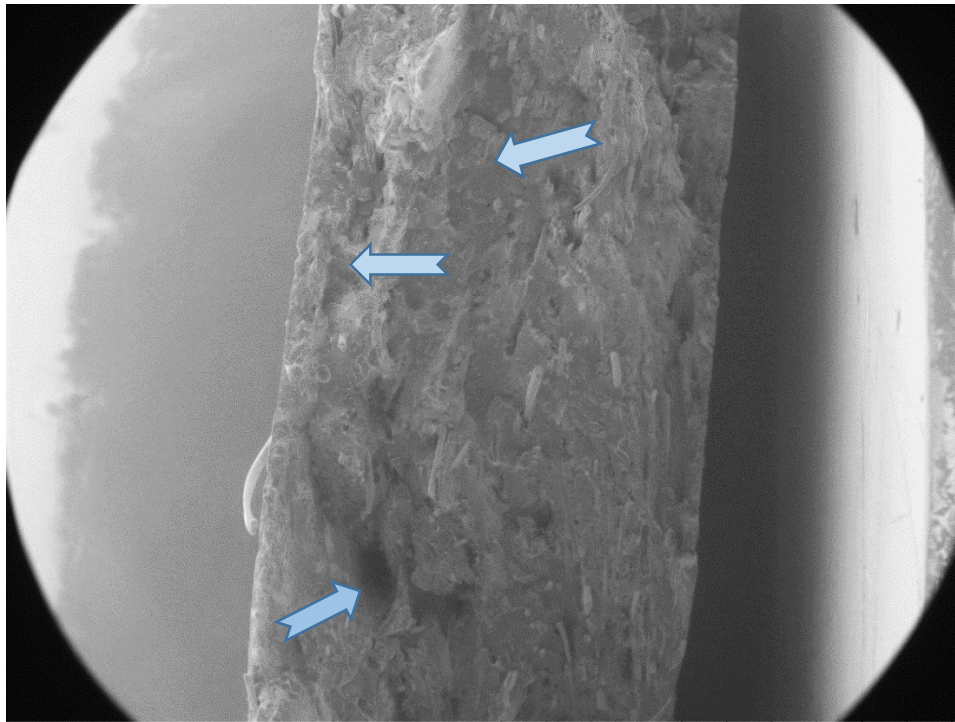
Έπειτα από την δοκιμή σε κάμψη και διάτμηση επιλέχθηκε η διαδικασία μελέτης της περιοχής στη διατομή των σύνθετων υλικών μέσω του SEM.

Αρχή Λειτουργίας

Το SEM αποτελεί μία σύγχρονη μέθοδο μελέτης και ανάλυσης της μικροδομής των υλικών, και μπορεί να υποστηρίξει την έρευνα σε ένα ευρύ φάσμα υλικών.

Η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης μπορεί και υποστηρίζει μεγεθύνσεις έως και $\times 1000$ με διακριτική ικανότητα $0.2 \mu\text{m}$. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο έχει κάποια βασικά στοιχεία λειτουργίας του παρόμοια με το οπτικό μικροσκόπιο. Αναλυτικότερα, το SEM για την μελέτη της δομής των αντικειμένων χρησιμοποιεί τη δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας ενώ το οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιεί το φως. Τα ηλεκτρόνια, χάρη στην κυματική φύση τους, μπορούν να εστιάσουν σε πολύ μικρότερη επιφάνεια του υλικού συγκριτικά με τα κύματα του φωτός. Η δέσμη ηλεκτρονίων αλληλεπιδρά με την εξεταζόμενη επιφάνεια, δηλαδή τα στοιχεία που αποτελείται το υλικό, και έτσι λαμβάνονται οι πληροφορίες για την επιφάνεια. Γίνεται η εκπομπή δευτερογενών και οπισθοσκεδαζόμενων (backscattered) ηλεκτρονίων και ακτίνων X και η έντασή τους επηρεάζεται από την επιφάνεια. Κατά τη διαδικασία του SEM μελετάται η μορφολογία του υλικού. Παράλληλα μπορεί να επιτευχθεί και ημιοσοτική στοιχειακή ανάλυση από την προσπίπτουσα δέσμη που πέφτει στην επιφάνεια. (2)

Αποτελέσματα



Test5488

2019/11/08

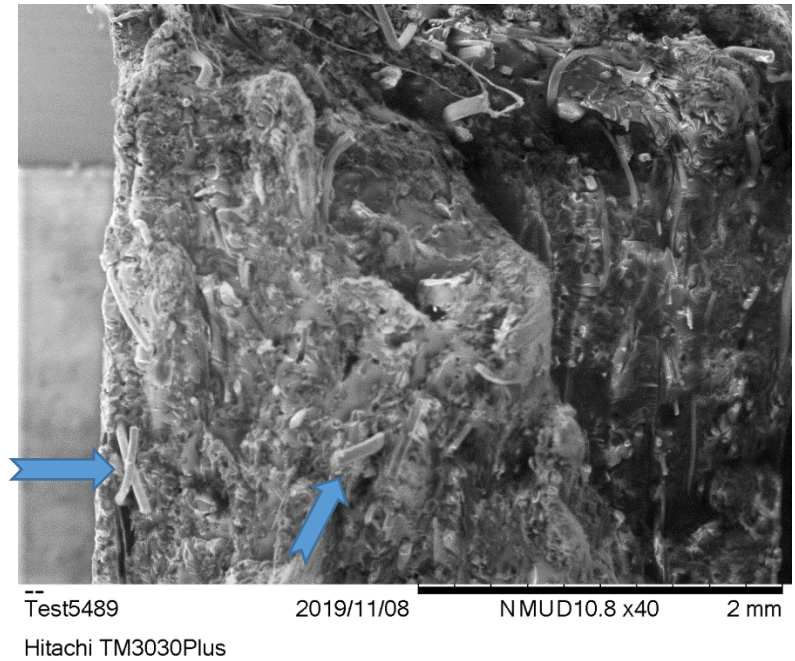
h MUD10.8 x20

4 mm

Hitachi TM3030Plus

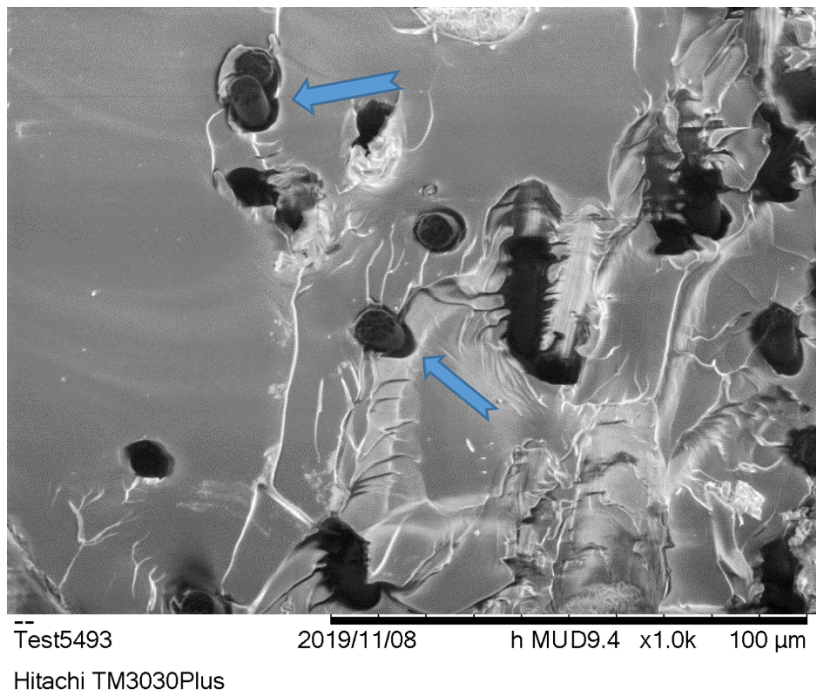
Εικόνα 8.2: SEM ανάλυση της διατομής σύνθετου υλικού μετά την θραύση του

Στην Εικόνα 8.2, παρατηρείται η γενική εικόνα της επιφάνειας του συνθέτου μετά τη θραύση. Η ανομοιογένεια στο χρωματισμό της επιφάνειας (σκουρόχρωμες-ανοιχτόχρωμες περιοχές), υποδηλώνει ότι το υλικό μας έχει θραυστεί σε διαφορετικά επίπεδα. Αυτό οφείλεται στο μέσο ενίσχυσης που έχει χρησιμοποιηθεί στο σύνθετο υλικό. Συγκεκριμένα, οι κομμένες ίνες που προστέθηκαν (άνθρακα-έριο) στο σύνθετο είχαν τυχαίο προσανατολισμό, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται πολλές διευθύνσεις που επηρεάζουν την αστοχία και οδηγούν την θραύση του υλικού σε πολλά σημεία.



Εικόνα 8.3: SEM ανάλυση της διατομής σύνθετου υλικού με μεγέθυνση x40.

Στην Εικόνα 8.3, που υπάρχει μεγαλύτερη εστίαση διακρίνονται οι ίνες άνθρακα και ερίου. Εστιάζοντας στις ίνες του μαλλιού, βλέποντας της εξωτερική τους επιφάνεια-τύπου κεραμοσκεπή και από το μέγεθός τους, επιβεβαιώνεται η παρουσία τους στο σύνθετο.



Εικόνα 8.4: SEM ανάλυση με μεγέθυνση x1.0k.

Σε αυτή την εικόνα, φαίνεται ξεκάθαρα η παρουσία των ιών άνθρακα και παρατηρείται η κακή πρόσφυση μεταξύ ιών άνθρακα και εποξειδικής ρητίνης. Αυτό οφείλεται ότι στο γεγονός ότι ίνες δεν έχουν υποστεί κάποιο είδος επεξεργασίας και τροποποίησης με αποτέλεσμα να μην σχηματίζουν ισχυρούς δεσμούς με την εποξειδική.

Βιβλιογραφία 8^{ου} Κεφαλαίου

1. **Ozsoy Neslihan, Ozsoy Murat, Mimaroglu A.** Mechanical Properties of Chopped Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites. *Acta Physica Polonica A*. 130, 2016, σσ. 297-299.
2. **Κουή Μ, Λυμπεροπούλου Θ.** Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης με Φασματομέτρο Ενεργειακής Διασποράς Ακτίνων Χ. Αθήνα : s.n.

Κεφάλαιο 9. Θερμικές Ιδιότητες

9.1 Θερμική Αγωγιμότητα των Υλικών

Η θερμική αγωγιμότητα είναι η ιδιότητα των υλικών που μπορούν και παράγουν θερμότητα. Η αντίστροφη ιδιότητα είναι η θερμική αντίσταση. Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και όταν το υλικό παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα η μεταφορά θερμότητας συμβαίνει με χαμηλότερο ρυθμό, ενώ όταν παρουσιάζουν υψηλή τότε συμβαίνει το αντίστροφο. (1) Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης της θερμότητας: αγωγή, μεταφορά (convection), ακτινοβολία και μπορούν να πραγματοποιηθούν είτε μεμονωμένα είτε την ίδια χρονική στιγμή. (2)

Η θερμική αγωγιμότητα των υλικών επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, τη χημική σύσταση και την μικροδομή του υλικού.

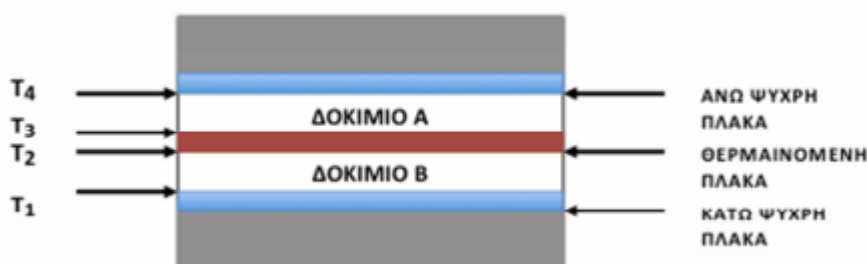
- Θερμοκρασία: Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Έπειτα σε ένα μικρό εύρος μπορεί να παραμείνει σταθερή και στη συνέχεια, μειώνεται μέχρι να φτάσει στο ελάχιστο της (κοντά στο σημείο τήξης), με περαιτέρω αυξήσεις της θερμοκρασίας.
- Χημική Σύσταση: η θερμική αγωγιμότητα παρουσιάζεται από την καθαρότητα του υλικού
- Κρυσταλλικότητα: η θερμική αγωγιμότητα για τα ανισότροπα υλικά περιγράφεται μέσα από τα κρυσταλλικά συστήματα. Για το κυβικό σύστημα η θερμική αγωγιμότητα είναι ανεξάρτητη του προσανατολισμού.
- Μέγεθος κόκκου: Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση του μεγέθους του κόκκου που αποτελείται το υλικό. (3)

9.2 Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας

Η θερμική αγωγιμότητα μπορεί να εκφραστεί μέσω του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, και συμβολίζεται με το γράμμα k ή το λ . Η μονάδα μέτρησης είναι W/mK . Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ορίζεται ως το ποσό θερμότητας που περνάει σε ένα υλικό (στερεό υλικό, υγρή μεμβράνη, λεπτό στρώμα), ανά μονάδα χρόνου, επιφάνειας και βαθμού θερμοκρασίας. (4) Υλικά υψηλής θερμικής αγωγιμότητας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται γρήγορη μεταφορά θερμότητας και υλικά με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα χρησιμοποιούνται ως θερμομονωτικά. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας (λ) των πολυμερών είναι πολύ μικρότερος από αυτόν των μετάλλων. Αυτό οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στην δομή των μετάλλων, τα οποία μεταφέρουν την θερμότητα (ενέργεια) πιο γρήγορα. Στα πολυμερή η μεταφορά θερμότητας (ενέργειας) πραγματοποιείται με δόνηση (φωτόνια) και περιστροφή των αλυσίδων των μακρομορίων. (5)

9.3 Προσδιορισμός Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του δοκιμίου του συνθέτου υλικού προσδιορίζεται σε κατάλληλη διάταξη που φαίνεται στην εικόνα. Τα αντίστοιχα δύο δοκίμια του συνθέτου υλικού χυτεύθηκαν σε μεγάλους δίσκους διαμέτρου 30 cm, η οποία είναι ίση με τη διάμετρο των μεταλλικών πλακών της διάταξης μέτρησης. Η διάταξη μέτρησης είναι σχεδιασμένη με βάση το πρότυπο ASTM C177 και περιλαμβάνει κατάλληλο ρυθμιστή θερμάνσεως, καθώς και κατάλληλο δειγματοφορέα. Ο τελευταίος αποτελείται από τρεις ίδιες σε διαστάσεις (διαμέτρου 30 cm) μεταλλικές πλάκες όπου η κεντρική είναι η θερμαινόμενη πλάκα (με κατάλληλα ενσωματωμένη αντίσταση) και παρέχει θέρμανση από έναν εξωτερικό ρυθμιστή θέρμανσης, ενώ οι άλλες δύο είναι οι ψυχρές πλάκες και βρίσκονται επάνω και κάτω της κεντρικής. Μεταξύ των ψυχρών μεταλλικών πλακών τοποθετούνται τα δύο πανομοιότυπα δοκίμια των συνθέτων υλικών για την μέτρηση της θερμορροής. Η πλήρης διάταξη του δειγματοφορέα είναι καλά μονωμένη στο επάνω και κάτω μέρος, καθώς και περιμετρικά. Η διάταξη του δειγματοφορέα και οι θέσεις μετρήσεως των θερμοκρασιών φαίνονται στην εικόνα



Εικόνα 9.14: Διάταξη μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας.

Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ισοθερμοκρασιακά στους 44 °C και εφαρμόζεται η παρακάτω εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\Phi * S_m}{2A(\theta_{wm} - \theta_{cm})} \quad (1)$$

Όπου:

Φ : ικανότητα αντίστασης της θερμαινόμενης επιφάνειας

S_m : μέσο πάχος σύνθετου (m)

A: μέση επιφάνεια σύνθετου (m²)

θ_{wm} : μέση θερμοκρασία της θερμής επιφάνειας του Σύνθετου Υλικού (°K)

θ_{cm} : μέση θερμοκρασία ψυχρής επιφάνειας του Σύνθετου Υλικού (°K)

Αποτελέσματα

Πίνακας 9.10: Αποτελέσματα Μετρήσεων για το Συντελεστή της Θερμικής αγωγιμότητας.

Υλικό	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας λ (W/mK)
Epoxy	0.55 ± 0.05
Epoxy-CF	0.56 ± 0.02
Epoxy-CF-Kal2.5	0.46 ± 0.04
Epoxy-CF-Kat2.5	0.47 ± 0.04

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας των σύνθετων υλικών ενισχυμένα με μαλλί σε αναλογία 2.5% και Chopped CF 5% κατά βάρος είναι μειωμένος συγκριτικά με τα δοκίμια σκέτης εποξειδικής ρητίνης. Αυτό υποδηλώνει την καλύτερη θερμομονωτική συμπεριφορά που έχουν τα σύνθετα αυτά υλικά.

Πιο συγκεκριμένα τα σύνθετα Epoxy-CF-Kal2.5 παρουσιάζουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μειωμένο κατά 16,36 %, ενώ τα σύνθετα Epoxy-CF-Kat2.5 έχουν συντελεστή θερμική αγωγιμότητας μειωμένο κατά 14.55%.

Ο τύπος Σύνθετου υλικού Epoxy-CF παρουσιάζει ελάχιστα αυξημένο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας κατά 1.82%. Είναι αναμενόμενο αυτό καθώς οι ίνες άνθρακα είναι αγωγίμες, οπότε συμβάλλουν στην συνολική άνοδο του συντελεστή. Παρ' όλα αυτά το ποσοστό είναι εντός ορίων σφάλματος.

Τα σύνθετα με έριο παρουσιάζουν χαμηλότερο συντελεστή θερμική αγωγιμότητας από τα σύνθετα τύπου Epoxy και epoxy-CF. Παρόλο που με την προσθήκη ερίου σε ποσοστό 2.5%, προστέθηκε ποσοστό 5% ίνες άνθρακα, το τελικό σύνθετο παρουσιάζει θερμομονωτική συμπεριφορά. Επομένως ακόμα και σε μικρό ποσοστό το έριο, στο τελικό σύνθετο διαπιστώνεται ότι μπορούν να συμβάλλουν στην θερμομόνωση.

Πίνακας 9. 11: Αποτελέσματα Μετρήσεων Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας Σύνθετων Με εποξειδική και έριο.³

³ *Αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην πτυχιακή μου εργασία 2018 (Το έριο των ελληνικών προβάτων ως βάση για την κατασκευή Σύνθετων Υλικών).

Υλικό	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας λ (W/mK)
*Epoxy-Kal2.5	0.32±0,008
*Epoxy-Kat2.5	0.3±0,008

Τα σύνθετα τύπου Epoxy-Kal2.5 εμφανίζουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μειωμένο κατά 41.82%, ενώ τα σύνθετα τύπου Epoxy-Kat2.5 παρουσιάζουν συντελεστή μειωμένο κατά 45.45%. Αυτή η μικρή μεταβολή ενδεχομένως να οφείλεται στις διαφορετικές διαμέτρους που υπολογίστηκαν στο μαλλί των δύο αυτών φυλών.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τα ποσοστά αύξησης και μείωσης του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας συγκριτικά με τα δοκίμια της σκέτης εποξειδικής (Epoxy):

Πίνακας 9.12: : Ποσοστά αύξησης/μείωσης Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας Σύνθετων υλικών..

**Αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην πτυχιακή μου εργασία (2018)*

Υλικό	Συντελεστής Θερμικής Αγωγιμότητας λ (W/mK)	Ποσοστά Μεταβολής του Συντελεστή Θερμικής Αγωγιμότητας (%)
Epoxy-CF	0.56 ± 0.02	+1,82%
Epoxy-CF-Kal2.5	0.46 ± 0.04	-16,36%
Epoxy-CF-Kat2.5	0.47 ± 0.04	-14,55%
*Epoxy-Kal2.5	0.32±0,008	-41,82%
*Epoxy-Kat2.5	0.3±0,008	-45,45%

Το έριο σε ποσοστά ενίσχυσης 2,5% σε εποξειδική ρητίνη επιφέρει μείωση της θερμικής αγωγιμότητας καθώς μπορεί να μειώσει το συντελεστή της θερμικής

αγωγιμότητας έως και 41,82% για την φυλή Κατσικά και 45,45% για την Καλαρρύτεκη φυλή. Η προσθήκη των Chopped CF, ως αγώγιμο υλικό, επιφέρει μία μικρή αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της τάξης του 1,82% στην σκέτη εποξειδική. Σε ποσοστό 5% σε σύνθετα εποξειδικής με έριο 2,5% με βάση τα ποσοστά του πίνακα, παρατηρείται ότι η θερμομονωτική συμπεριφορά τους μειώνεται στο μισό. Στα σύνθετα τύπου *Epoxy-Kat2.5* με ποσοστό μειωμένο κατά 45,45% με την προσθήκη Chopped CF παρουσιάζουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας μειωμένο κατά το μισό, με ποσοστό 14.55%. Ομοίως, για το σύνθετο *Epoxy-Kal2.5* με ποσοστό μείωσης 41.82% που η προσθήκη Chopped CF αυξάνει την αγωγιμότητα και επιφέρει ένα ποσοστό μείωσης 14.55% του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας.



Εικόνα 9.15: Δοκίμιο Epoxy-CF (αριστερά) και Δοκίμιο Epoxy-CF-Kat2.5 (δεξιά) για την μέτρηση των θερμικών ιδιοτήτων.

Βιβλιογραφία 9^{ου} Κεφαλαίου

1. **Huang, Y.** Electrical and thermal properties of activated carbon fibers. *Activated Carbon Fiber and Textiles*. s.l. : WoodHead, 2017, σσ. 181-192.
2. **Varley, J.** Heat transfer methods. *Encyclopedia of food science and nutrition (2nd edition)*. s.l. : Academic Press, 2003, σσ. 3029-3034.
3. **P.S.Liu, G.F.Chen.** Characterization Methods: Physical Properties. *Porous Materials*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2014, σσ. 493-532.
4. **Vassilis Belessiotis, Soteris Kalogirou, Emmy Delyannis.** Water, the Raw Material for Desalination. *Thermal Solar Desalination*. s.l. : Academic Press, 2016, σσ. 21-102.
5. **Zaitlin M. P., Anderson M. C.** Phonon thermal transport in nanocrystalline material. *Physical Review B*. 12. 1975, p. 4475.

Κεφάλαιο 10. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή νέων συνθέτων υλικών με εποξειδική ρητίνη ως μήτρα και προσθήκη Ερίου από ελληνικές φυλές προβάτων, καθώς και ινών άνθρακα ως μέσο ενίσχυσης.

Η τεχνική μορφοποίησης των σύνθετων υλικών που κατασκευάστηκαν είναι η θερμή συμπίεση. Πραγματοποιήθηκε μελέτη των μηχανικών ιδιοτήτων, με δοκιμή σε κάμψη και διάτμηση. Μετρήθηκε ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ώστε να μελετηθεί η θερμική συμπεριφορά των συνθέτων.

10.1 Συμπεράσματα για τις μηχανικές Ιδιότητες

- Η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα σε ποσοστό 5% κατά βάρος δεν επηρεάζει την αντοχή σε κάμψη των δειγμάτων αυτής της μελέτης. Με την προσθήκη ερίου, τα σύνθετα υλικά εποξειδικής ρητίνης – κομμένων ινών άνθρακα διατηρούν την αντοχή σε κάμψη στο ποσοστό του 2.5%, κάτι το οποίο οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό ερίου που επιλέχθηκε να εισαχθεί στο σύνθετο.
- Η προσθήκη κομμένων ινών άνθρακα σε ποσοστό 5% κατά βάρος βελτιώνει την αντοχή σε διάτμηση της εποξειδικής ρητίνης (κατά 60,95%). Η αντοχή σε διάτμηση δεν επηρεάζεται από την προσθήκη ερίου σε ποσοστό 2.5% - 3% για την φυλή Κατσικά. Αντίθετα, η αντοχή σε διάτμηση αυξάνεται σημαντικά από την προσθήκη ερίου σε ποσοστό 2.5% για την Καλαρρύτενη φυλή.

10.2 Συμπεράσματα για τις Θερμικές Ιδιότητες

- Τα σύνθετα τα οποία κατασκευάστηκαν (Epoxy-CF-Kat2.5, Epoxy-CF-Kal2.5) μειώνουν τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με την σκέτη εποξειδική ρητίνη. Αυτό οφείλεται στην πολύ χαμηλή τιμή συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας που έχει το έριο. Τα σύνθετα Epoxy-CF-Kat2.5, Epoxy-CF-Kal2.5 έχουν συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας 0,47 W/mK και 0,46 W/mK αντίστοιχα.
- Η προσθήκη ενός αγώγιμου υλικού, όπως τα Chopped Carbon Fibers στην περίπτωση μας, σε συνδυασμό με το έριο δεν αυξάνει τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό ενίσχυσης που επιλέχθηκε για τα chopped carbon fibers.

10.3 Γενικά Συμπεράσματα

- Τα σύνθετα υλικά με μήτρα εποξειδική ρητίνη και μέσο ενίσχυσης Chopped Carbon Fibers (CCF) σε ποσοστό 5% (w/w) και έριο μέχρι 2.5% w/w διατηρούν τις μηχανικές τους ιδιότητες, αλλά η κατεργασία τους είναι εφικτή μέχρι την προσθήκη ερίου σε ποσοστό 3%. Το μίγμα, με προσθήκη ερίου σε ποσοστό μεγαλύτερο του 3%, δεν καθίσταται διαχειρίσιμο.
- Η μελέτη των θερμικών ιδιοτήτων πραγματοποιήθηκε μόνο για τα σύνθετα με προσθήκη μαλλιού σε ποσοστό 2,5% (w/w) και CF σε ποσοστό 5% (w/w) γιατί

παρουσίασαν καλύτερη μηχανική συμπεριφορά συγκριτικά με αυτά που έγινε προσθήκη μαλλιού σε ποσοστό 3% (w/w).

- Η ασθενής πρόσφυση των ινών άνθρακα με την εποξειδική ρητίνη επιβεβαιώνεται με την ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης. Μια επιτυχημένη τροποποίηση των ινών άνθρακα θα μπορούσε να επιφέρει καλύτερα αποτελέσματα στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών με την ίδια αναλογία σε ποσοστά ενίσχυσης.

10.4 Προτάσεις για μελλοντική Έρευνα

- Η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με την αύξηση περιεκτικότητας σε ίνες άνθρακα. Παρ' όλα αυτά δεν θα πρέπει να επηρεάζει αρνητικά τις θερμομονωτικές ιδιότητες που προσδίδει το έριο.
- Για να γίνει εφικτή η προσθήκη επιπλέον ποσοστού ερίου με εύκολη επεξεργασία της ρητίνης, προτείνεται η χρήση υφασμάτων άνθρακα.
- Η προσθήκη τροποποιημένων ινών άνθρακα μπορεί να οδηγήσει σε σύνθετα με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.