

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΧΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ**  
**ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ:**

**ΣΟΝΑΪΔΗΣ ΘΩΜΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**ΜΠΕΛΔΕΚΑΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ**

**ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:**

**ΓΡΑΜΜΑΤΙΚΟΠΟΥΛΟΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ**

**ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΣ ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΑΤΡΑ 2018**



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής εργασίας του τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας. Γίνεται μία προσπάθεια αναφοράς της χρήσης και εφαρμογής των σύνθετων υλικών σε δομικά στοιχεία.

Κατά τη διάρκεια έως την αποπεράτωση της εργασίας της εργασίας καταλυτικό ρόλο έπαιξε η βοήθεια που είχαμε από τον Δρ Σπυρίδων Γραμματικόπουλο καθηγητή του τμήματος των Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. για τις γνώσεις και την τεχνική καθοδήγηση που λάβαμε, χωρίς τη βοήθεια του οποίου δεν θα είχαμε το παρών αποτέλεσμα.

Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την αμέριστη αγάπη, υπομονή και καθοδήγηση που μας έδωσαν με σκοπό να φτάσουμε σε αυτό το σημείο της ολοκλήρωσης των σπουδών μας και της παρουσίασης αυτής την εργασίας.

Μετά τιμής,

Σοναΐδης Θωμας Νικόλαος

Μπελδέκας Βασίλειος

**Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητών:** Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι Φοιτητές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι Φοιτητές

(Όνοματεπώνυμο)

(Όνοματεπώνυμο)

.....

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

## Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αναφέρεται στη χρήση και την εφαρμογή σύνθετων υλικών σε δομικά στοιχεία. Σκοπός της πτυχιακής εργασίας είναι η κατανόηση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς με σκοπό την ενίσχυση δομικών στοιχείων. Ο άνθρωπος οδηγούμενος από την έμφυτη επιθυμία του να κάνει τη ζωή του όσο καλύτερη μπορεί, ξεκίνησε να συνδυάζει υλικά με σκοπό να βελτιώσει τις υπάρχουσες ιδιότητες που πρόσφεραν τα υλικά ή ακόμα και να δημιουργήσουν νέες.

Αρχικά, ξεκινήσαμε να αναφερόμαστε γενικότερα στα σύνθετα υλικά. Τι ονομάζουμε ένα υλικό σύνθετο, ποια είναι τα πλεονεκτήματά τους, που χρησιμοποιούνται, ποιες είναι οι μελλοντικές τους χρήσεις, όπως και τις επιδράσεις που παρουσιάζουν από περιβαλλοντικές συνθήκες.

Έπειτα ακολουθεί το δεύτερο κεφάλαιο στο οποίο γίνεται μία προσπάθεια παρουσίασης αναλυτικά ποια είναι τα σύνθετα υλικά που υπάρχουν, ποιές είναι οι ιδιότητές τους, τι είναι η μήτρα, τα είδη μητρών που υπάρχουν και ποιος είναι ο ρόλος της στη παρούσα έρευνα. Τέλος, γίνεται αναφορά στις κόλλες.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται μία προσπάθεια παρουσίασης των συστημάτων ενίσχυσης που υπάρχουν, των τεχνικών εφαρμογής, όπως επίσης και των ειδικών κατηγοριών που υπάρχουν. Επίσης, γίνεται λόγος για τις εφαρμογές που βρίσκουν σε δομικές κατασκευές.

Στη συνέχεια ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο στο οποίο γίνεται μία ενδελεχή παρουσίαση των κανονισμών που υπάρχουν τόσο στον Ελλαδικό χώρο όσο και στον παγκόσμιο.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι μέθοδοι του ποιοτικού έλεγχου που υπάρχουν στη διάθεση των μηχανικών με σκοπό τον έλεγχο των υλικών για να χρησιμοποιηθούν στις κατασκευές.

Στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι βλάβες που προκλήθηκαν μετά το πέρασμα ενός σεισμού και ο ρόλος των σύνθετων υλικών στην ενίσχυση της κτιριακής δομής.

Τέλος, στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο αυτής της πτυχιακής, γίνεται μία προσπάθεια παρουσίασης της ελληνικής πραγματικότητας στη χρήση και εφαρμογή των σύνθετων υλικών, όπως και τα γενικότερα συμπεράσματα που απορρέουν στο τέλος αυτής της εργασίας.

## **Abstract**

This thesis deals with the use and application of composite materials in building blocks. The aim of this thesis is to understand the methods which are used by the engineers to reinforce structural elements. The mankind, driven by his inherent desire to make his life as good as possible, he has begun combining materials to improve the existing properties or even create new ones.

First of all, we started to refer generally to composite materials. What we call a composite material, what their advantages are, how they are used, what their future uses are, and what effects appears under the environmental influence.

The second chapter is followed by an attempt to analyze in detail which the composite materials are, what their properties are, what the matrixes are and what types of them there are in the market.

In the third chapter, an attempt is trying to present the systems of reinforcement of blocks, the implementation techniques, as well as the specific categories that they are existing. We also refer to the applications there are in the market.

The fourth chapter is followed by an analytical presentation of the regulations which are existing both in Greece and in the world.

In the fifth chapter, we present the quality control systems which are available to engineers in order to control materials for use in construction.

The sixth chapter presents the damage caused after an earthquake and the role of the composite materials in strengthening the building structure.

Last but not least, in the seventh and final chapter of this dissertation, an attempt is made to present the Greek reality on the use and the application of composite materials, as well as some conclusions which are appearing at the end of this thesis.

## Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iv
ABSTRACT.....	vi
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b> .....	<b>1</b>
1.1 Γενικά .....	1
1.2 Ορισμός .....	1
1.3 Ιστορική αναδρομή.....	2
1.4 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών.....	4
1.5 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα.....	8
1.6 Εφαρμογές σύνθετων υλικών.....	12
1.7 Μελλοντικές εφαρμογές των σύνθετων υλικών.....	19
1.8 Ανθεκτικότητα και συμπεριφορά σύνθετων υλικών υπό την επίδραση διάφορων παραγόντων .....	21
1.8.1 Επίδραση διάφορων παραγόντων στα υλικά.....	21
<b>Κεφάλαιο 2</b> .....	<b>26</b>
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Ταξινόμηση των ινών .....	27
2.2.1 Ίνες γυαλιού .....	27
2.2.2 Ίνες άνθρακα.....	30
2.2.4 Ίνες πολυαιθυλενίου .....	36
2.2.5 Βιολογικές ίνες.....	37
2.3 Σύγκριση των μέσων ενίσχυσης.....	51
2.4 Μήτρα .....	54
2.4.1 Οργανικές μήτρες.....	54
2.4.2 Θερμοσκληρυνόμενες οργανικές μήτρες .....	55
2.4.3 Θερμοπλαστικές οργανικές μήτρες .....	57
2.4.4 Μεταλλικές Μήτρες .....	57
2.4.5 Κεραμικές Μήτρες .....	59
2.5 Κόλλα .....	59
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup></b> .....	<b>61</b>
3.1 Θέτοντας το πρόβλημα.....	61
3.2 Συστήματα ενίσχυσης.....	64
3.2.1 Συστήματα υγρής ενίσχυσης .....	65



3.2.2	Προκατασκευασμένα υλικά .....	66
3.3	Τεχνικές εφαρμογής .....	67
3.3.1	Βασική τεχνική.....	68
3.3.2	Ειδικές τεχνικές.....	72
3.4	Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών.....	74
3.4.1	Επιφανειακά φαινόμενα.....	74
3.4.2	Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος.....	77
3.5	Στάδια εφαρμογής σύνθετων υλικών .....	79
3.6	Ενίσχυση φέροντος οργανισμού.....	80
3.7.1	Περίσφυξη υποστυλωμάτων .....	80
3.7.2	Αύξηση πλαστιμότητας υποστυλωμάτων.....	81
3.7.3	Ενίσχυση έναντι κάμψης.....	82
3.7.4	Ενίσχυση έναντι διάτμησης .....	84
3.8.1	Αποκόλληση σύνθετων υλικών και ρωγμές.....	85
3.8.2	Κόπωση.....	92
3.8.3	Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης.....	92
3.8.4	Μηχανική Συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών.....	93
3.9	Μηχανικές αγκυρώσεις.....	95
3.10	Μηχανική συμπεριφορά και δυναμική καταπόνηση των σύνθετων υλικών .....	96
3.10.1	Ερπυσμός.....	96
Κεφάλαιο 4ο	.....	98
4.1	Εισαγωγή στους κανονισμούς .....	98
4.2	Θεωρήσεις για τον σχεδιασμό.....	99
4.2.1	Ανθεκτικότητα .....	99
4.2.2	Κάμψη .....	100
4.2.3	Μετατοπίσεις και ρηγμάτωση.....	102
4.2.4	Διάτμηση .....	103
4.2.5	Συνάφεια.....	104
4.2.6	Φιλοσοφία σχεδιασμού.....	105
4.3	Προδιαγραφές- Κανονισμοί για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με FRP .....	108
4.3.1	Επικόλληση ελασμάτων/ υφασμάτων.....	108
4.3.2	Προσωπικό- Εξοπλισμός .....	109
4.3.3	Αποθήκευση/προσωρινή τοποθέτηση πριν την εφαρμογή.....	109
4.4	Κατασκευαστικές διατάξεις.....	110

<b>Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup></b> .....	117
<b>6.1 Αποτίμηση αντοχής και συστήματα ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές</b> .....	117
<b>6.2 Σεισμικές βλάβες και ενίσχυση κτιρίων με σύνθετα υλικά</b> .....	121
<b>6.3 Βλάβες που προκαλούνται από σεισμικά φορτία</b> .....	121
<b>6.3.1 Τυπικοί βαθμοί βλάβης</b> .....	122
<b>6.3.2 Χαρακτήρας βλαβών</b> .....	125
<b>6.4 Παραμένουσα αντοχή μεμονωμένων στοιχείων</b> .....	126
<b>6.4.1 Τρόποι επέμβασης</b> .....	127
<b>6.5 Έρευνα και ανάπτυξη</b> .....	128
<b>6.6 Ενισχύσεις</b> .....	129
<b>Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup></b> .....	130
<b>7.1 Ελληνική Πραγματικότητα</b> .....	130
<b>7.2 Γενικά συμπεράσματα</b> .....	132
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	135



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## 1.1 Γενικά

Ο άνθρωπος οδηγούμενος από την έμφυτη επιθυμία του να ικανοποιήσει όσες περισσότερες ανάγκες μπορεί, ερευνά και ανακαλύπτει καινούριες μεθόδους και υλικά, τα οποία θα τον βοηθήσουν να έρθει πιο κοντά σε αυτό που ονομάζει ο ίδιος καλύτερη ζωή.

Στο πρώτο Κεφάλαιο της πτυχιακής εργασίας γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης των σύνθετων υλικών. Απαντώνται ερωτήματα όπως τι ονομάζεται σύνθετο υλικό, πότε εμφανίστηκαν στη ζωή του ανθρώπου και πως χρησιμοποιήθηκαν. Στη συνέχεια θα γίνει αναφορά στο ποιες είναι οι κατηγορίες των σύνθετων υλικών και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των προαναφερθέντων υλικών. Τέλος, θα επισημανθούν οι εφαρμογές που βρίσκουν αυτά τα υλικά άλλα και οι μελλοντικές εφαρμογές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

## 1.2 Ορισμός

Για ένα σύστημα ο όρος ' σύνθετο ' σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material).

Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθεται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι

σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου ( τουλάχιστον πενταπλάσιες) και η κατ' όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή ( >10%).

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

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως συστατικό ενίσχυσης και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές κυρίως ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται μήτρα, είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης.

### 1.3 Ιστορική αναδρομή

Ο άνθρωπος από την αρχαιότητα στην προσπάθεια του να επιβιώσει, να βελτιώσει το επίπεδο της ζωής του και να καλύψει νέες ανάγκες ξεκίνησε να χρησιμοποιεί υλικά που εύκολα έβρισκε στη φύση όπως είναι το ξύλο, η πέτρα, ο πηλός και τα κόκαλα. Με το πέρασμα των χρόνων εμφανίστηκαν νέες ανάγκες, οι οποίες για να καλυφθούν χρειάστηκαν νέα υλικά, τα οποία θα είχαν βελτιωμένες ιδιότητες. Έτσι, ξεκίνησε να συνδυάζει δύο ή περισσότερα υλικά με σκοπό να πετύχει ιδιότητες που θα τον βοηθούσαν. Στη συνέχεια, οι συγκεκριμένες ιδιότητες χρειάστηκαν σε σύνθετα επιτεύγματα, όπως είναι ο χώρος των κατασκευών, της ναυσιπλοΐας, της γραφικής ύλης κ.α.<sup>35</sup>

Πιο αναλυτικά, αναζητώντας τη χρήση των σύνθετων υλικών μέσα στην ιστορία διαπιστώνεται το ευρύ φάσμα εφαρμογής τους από τον άνθρωπο. Από την παλαιά διαθήκη (Έξοδος) γίνεται φανερό ότι στην Αρχαία Αίγυπτο, οι Ισραηλίτες για να ενισχύσουν δομικά τις κατοικίες τους τοποθετούσαν πλέγμα από άχυρα στα πήλινα τούβλα με σκοπό να μειώσουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις τάσεις συστολής που εμφανίζονται στη ξήρανση του πηλού. Περί το 2500 π.Χ., στη Μεσοποταμία, οι κάτοικοι ενσωματώνοντας πέτρες ή κώνους από πηλό προσπάθησαν να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες των

τοίχων, τα οποία είχαν ως βάση το τούβλο. Η εξέλιξη των σύνθετων υλικών δεν παρουσιάζει σημαντική ανάπτυξη μέσα στους επόμενους αιώνες<sup>35</sup>.

Μέχρι τον 19<sup>ο</sup> αιώνα, η εξέλιξη των σύνθετων υλικών είναι αμελητέα και δεν διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από αυτή των Αρχαίων Αιγυπτίων και των Ελλήνων. Η άνοδος των σύνθετων υλικών παρουσιάζεται τον 20<sup>ο</sup> αιώνα με την εξέλιξη της επιστήμης των πολυμερών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, τα υλικά αυτά να αντικαταστήσουν τα μέταλλα σε διάφορα είδη κατασκευών λόγω του χαμηλού κόστους, της επάρκειας τους και της συμπεριφορά τους. Το 1920, εφευρέθηκε το πρώτο σύνθετο υλικό το οποίο είχε ως βάση μήτρα πλαστικού και αποτελούνταν από μείγμα ινιδίων ξύλου με φαινολική φορμαλδεΰδη (βακελίτης). Επιπροσθέτως, η εξέλιξη των σύνθετων υλικών τα τελευταία 30 χρόνια συνδυάστηκε με την ταυτόχρονη πρόοδο των ινών γυαλιού και των ινών βορίου (1960) τα οποία προσφέρουν υψηλή αντοχή και υψηλή δυσκαμψία αντίστοιχα<sup>35</sup>.

Το 1964, εμφανίστηκαν στην αγορά οι πρώτες ποσότητες ινών άνθρακα (carbon fibers), οι οποίες έχουν ευρεία χρήση σε πολλές αεροδιαστημικές κατασκευαστικές εφαρμογές. Επίσης, το 1971 παρουσιάστηκαν οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες εφαρμόζονται στα ελαστικά των αυτοκινήτων καθώς και στην ναυπηγική. Ακόμη, τα τελευταία 30 χρόνια οι προαναφερθείσες ίνες έχουν 10-14 φορές μεγαλύτερη ειδική αντοχή και ειδική δυσκαμψία σε σχέση με τις αντίστοιχες ιδιότητες του αλουμινίου (ελαφρό μέταλλο). Άξιο να σημειωθεί είναι ότι, η περίσσεια ποσότητα ινών και ρητινών που υπάρχει στο εμπόριο δίνει την δυνατότητα επιλογής του υλικού για κάθε μορφή κατασκευής τα οποία έχουν τις περισσότερες φορές μοναδικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες. Συγκεκριμένα, κάποια από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα συγκεκριμένα υλικά είναι η υψηλή αντοχή, η αντοχή σε διάβρωση και πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες όσον αφορά την παραμόρφωσή τους<sup>35</sup>.

**Πίνακας 1.1** Ιστορική αναδρομή στα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί. <sup>32</sup>

<b>Ημερομηνία</b>	<b>Υλικά</b>
5000 π. Χ.	Πάπυρος/πίσσα (βάρκες)
1500 μ. Χ.	Ξύλινα επιστρώματα
1909 μ. Χ.	Φαινολικό σύνθετο
1928 μ. Χ.	Σύνθετο ουρίας φορμαλδεΐδης
1938 μ. Χ.	Σύνθετο μελαμίνης φορμαλδεΐδης
1942 μ. Χ.	Πολυεστέρας ενισχυμένος με γυαλί
1946 μ. Χ.	Σύνθετα εποξειδικών ρυτινών - νάυλον ενισχυμένο με γυαλί
1951 μ. Χ.	Πολυστερένιο ενισχυμένο με γυαλί
1956 μ. Χ.	Σύνθετα φαινόλης αμιάντου
1964 μ. Χ.	Πολυμερή ενισχυμένα με άνθρακα
1965 μ. Χ.	Πολυμερή ενισχυμένα με ίνες βορίου
1969 μ. Χ.	Υβριδικά συστήματα ινών άνθρακα, γυαλιού
1972 μ. Χ.	Πολυμερή ενισχυμένα με αραμιδικές ίνες
1975 μ. Χ.	Υβριδικά συστήματα αραμιδικών ινών και ινών άνθρακα

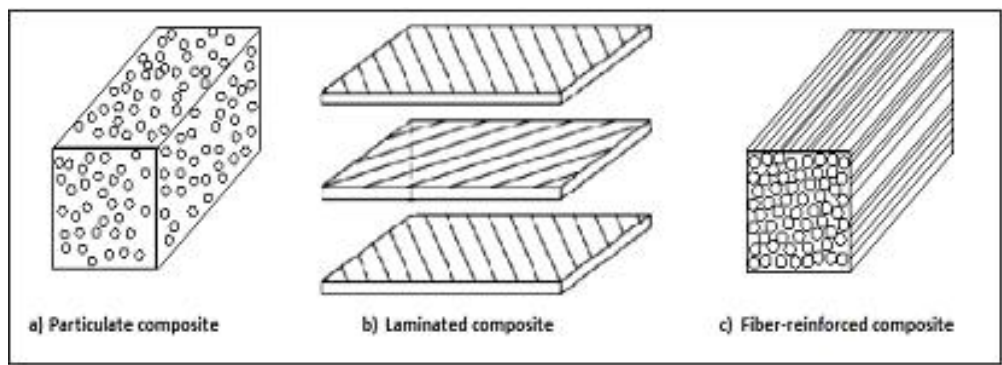
#### **1.4 Κατηγοριοποίηση σύνθετων υλικών**

Τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες με βάση κάποια κριτήρια, τα οποία εμφανίζονται παρακάτω <sup>41</sup>:

1. Με βάση την προέλευση του υλικού ενίσχυσης.
2. Με βάση τον τύπο του υλικού πλήρωσης.
3. Με βάση τη κλίμακα των συστατικών.
4. Σύμφωνα με το υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί για τη μήτρα.



**Εικόνα 1.1:** Κατηγορίες σύνθετων υλικών.<sup>5</sup>



**Εικόνα 1.2:** Ταξινόμηση σύνθετων υλικών με βάση το είδος της ενίσχυσης σε α) κοκκώδη, β) πολύστρωτα και γ) ινώδη σύνθετα υλικά.<sup>5</sup>

Η διάκριση των σύνθετων υλικών σε κατηγορίες με βάση το πρώτο κριτήριο της προέλευσης του υλικού ενίσχυσης είναι η εξής<sup>41</sup>:

- **Φυσικά:** είναι τα υλικά τα οποία ο άνθρωπος μπορεί να βρει σε περίσσειες ποσότητες στην φύση. Για παράδειγμα, ένα από αυτά υλικά είναι το ξύλο. Το ξύλο θεωρείται ένα τρισδιάστατο πολυμερές σύνθετο



υλικό το οποίο απαρτίζεται κυρίως από κυτταρίνη, ημι-κυτταρίνη και λιγνίτη.



**Εικόνα 1.3** Το Ξύλο είναι φυσικό υλικό.<sup>5</sup>

- **Συνθετικά:** είναι τα υλικά των οποίων ένα ή περισσότερα από τα συστατικά που το αποτελούν βρίσκονται στην φύση ή παράγονται με τεχνικές μεθόδους. Στην συνέχεια, συνδυάζονται μεταξύ τους με σκοπό να παραχθεί η κατάλληλη δομή και οι ιδιότητες του τεμαχίου μέσα από μια ελεγχόμενη παραγωγή.
- **Ημισυνθετικά:** είναι τα υλικά τα οποία ο άνθρωπος βρίσκει στην φύση και στην συνέχεια επιδρώντας επάνω τους με διάφορες χημικές ενώσεις παράγει τα λεγόμενα ημισυνθετικά πολυμερή.

Η διάκριση των σύνθετων υλικών σε κατηγορίες με βάση το δεύτερο κριτήριο τον τύπο του υλικού πλήρωσης είναι η εξής:

- **Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων** (particulate composites):  
είναι τα λεγόμενα 'κοκκώδη υλικά' τα οποία έχουν στο εσωτερικό της μήτρας σαν υλικό πλήρωσης διασκορπισμένα σωματίδια. Σαν αποτέλεσμα, η τεχνική αυτή που εφαρμόζεται στα σωματίδια συμβάλλει στην μείωση του κόστους των σύνθετων υλικών. Το μέγεθος των προαναφερθέντων σωματιδίων κυμαίνεται από nm σε mm.
- **Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών** (fibrous composites):  
Είναι τα λεγόμενα 'ινώδη σύνθετα υλικά' τα οποία έχουν σαν υλικό ενίσχυσης τις ίνες. Η διάδοση των ρωγμών και η ύπαρξη εγκοπών δεν εμφανίζονται σε μεγάλο βαθμό στα ινώδη υλικά με αποτέλεσμα να έχουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σχέση με άλλα υλικά. Επιπρόσθετα, ένα πλεονέκτημα των υλικών

αυτών είναι ότι ακόμα και αν κάποιες ίνες αστοχήσουν, οι υπόλοιπες συνεχίζουν να δέχονται φορτία. Εκμεταλλευόμενοι το παραπάνω πλεονέκτημα, τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται για την επιπλέον ενίσχυση ορισμένων σημείων, που σύμφωνα με τη μελέτη της κατασκευής είναι πιθανόν να αστοχήσουν. Τέλος, η τοποθέτηση των ινών παράλληλα στην διεύθυνση του επιβαλλόμενου φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την βέλτιστη εκμετάλλευση των ιδιοτήτων τους.

- **Στρωματικά σύνθετα υλικά** (laminated composites):

Είναι τα υλικά που αποτελούνται από δύο ή περισσότερα στρωματικά επίπεδα, τα οποία τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο. Τα επίπεδα αυτά αποτελούνται από το ίδιο ή διαφορετικό υλικό. Τα προαναφερθέντα επίπεδα δημιουργούνται με την ένωση δυο λεπτών πλακών με ένα ελαφρύ πυρήνα. Η εξωτερική επιφάνεια των παραπάνω επιπέδων είναι κατασκευασμένη μπορεί να είναι κατασκευασμένα από κράματα αλουμινίου, πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, κράματα τιτανίου κλπ. Ενώ, ο πυρήνας δημιουργείται από μια κυψελοειδή μορφή από χαρτί, πολυπροπυλένιο, πολυστυρένιο ή από μέταλλο και από άλλα αφρώδη όπως πολυβινυλοχλωρίδιο, πολυουραιθάνη, πολυαιθυλένιο κλπ.

Η διάκριση των σύνθετων υλικών σε κατηγορίες με βάση το τρίτο κριτήριο, την κλίμακα των συστατικών <sup>41</sup>:

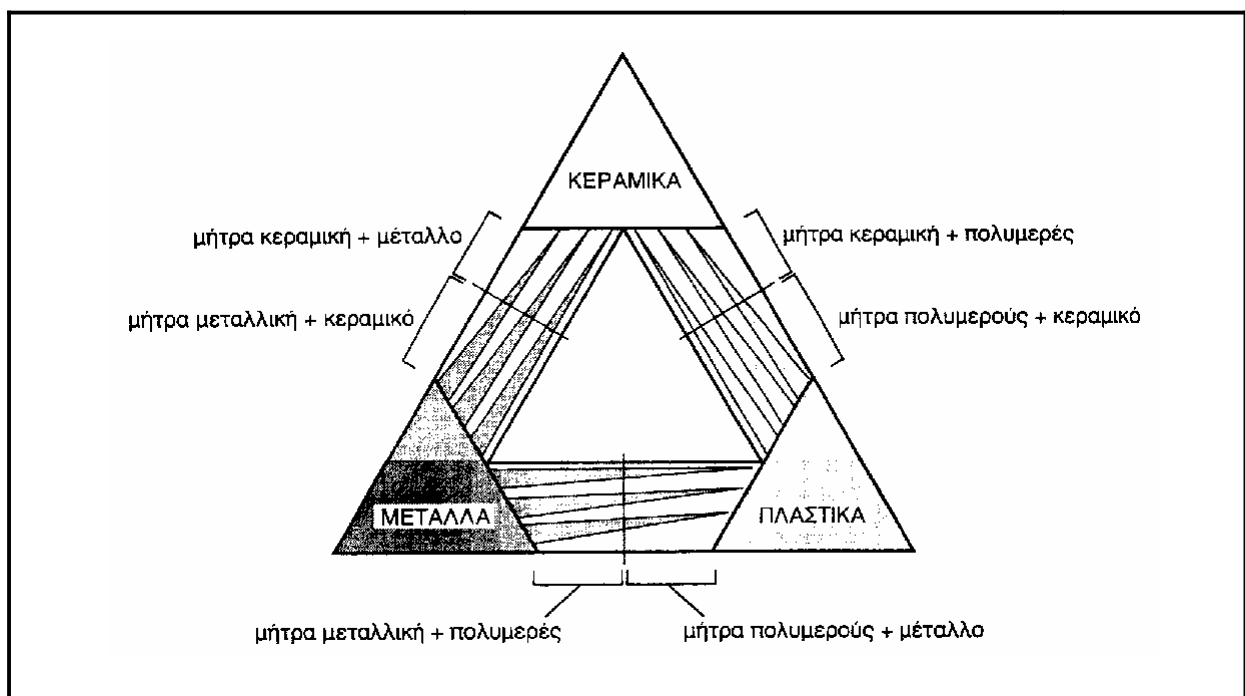
- **Μικροσύνθετα:** Η τάξη μεγέθους των συστατικών του υλικού της μήτρας κυμαίνεται περίπου ( $10^{-6}$  m). Στην κατηγορία των μικροσύνθετων, εμπεριέχονται τα μεταλλικά κράματα και τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά.
- **Μακροσύνθετα:** Η τάξη μεγέθους των συστατικών του υλικού της μήτρας κυμαίνεται περίπου ( $10^{-3}$  m). Στα μακροσύνθετα, ανήκουν υλικά όπως είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα και ο γαλβανισμένος χάλυβας.
- **Νανοσύνθετα:** Η τάξη μεγέθους των συστατικών του υλικού της μήτρας κυμαίνεται περίπου ( $10^{-9}$  m) έως μερικά εκατοντάδες νανόμετρα. Σε αυτήν την κατηγορία, απαντώνται τα carbon –black, τα

σωματίδια πυριτιούχων ενώσεων, τα σωματίδια από πηλό, οι νανο-ίνες άνθρακα και οι νανοσωλήνες άνθρακα.

Η διάκριση των σύνθετων υλικών σε κατηγορίες με βάση το τέταρτο κριτήριο, σύμφωνα με το υλικό που έχει χρησιμοποιηθεί για τη μήτρα:

- **Πολυμερικής μήτρας** (Polymer Matrix Composites - PMC)
- **Μεταλλικής μήτρας** (Metal Matrix Composites – MMC)
- **Κεραμικής Μήτρας** (Ceramic Matrix Composites – CNC)
- **Άνθρακα-Άνθρακα** (Carbon-Carbon Composites - CCC)
- **Πυριτικής μήτρας** (Silicon Matrix Composites – SMC)<sup>28</sup>

### 1.5 Πλεονεκτήματα- Μειονεκτήματα



Εικόνα 1.4: Η διάκριση των υλικών με βάση τη μήτρα.<sup>5</sup>

Τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών είναι πολλά, κάποια από αυτά είναι το ελαφρύτερο βάρος, την ικανότητα να προσαρμόζονται έτσι ώστε να έχουν την βέλτιστη αντοχή και ακαμψία, αντοχή στην κόπωση, αντίσταση στην διάβρωση και με έναν καλό σχεδιασμό, το κόστος συναρμολόγησης μειώνεται λόγω λιγότερων εξαρτημάτων και συνδέσμων.

Το χαρακτηριστικό πλεονέκτημα των σύνθετων υλικών, είναι οι βέλτιστες ιδιότητες που αποκτούν από τον συνδυασμό ίνας και μήτρας με αποτέλεσμα την καλύτερη συμπεριφορά του υλικού. Επίσης, πρέπει να τονιστεί ότι δίνεται η δυνατότητα του σχεδιασμού ενός σύνθετου υλικού με ιδιότητες ανάλογα με τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής.

Οι ιδιότητες που αναβαθμίζουν τα σύνθετα υλικά σε σχέση με τα κοινά υλικά είναι:

- ü Χαμηλό βάρος
- ü Υψηλή αντοχή
- ü Μεγάλη δυσκαμψία
- ü Αντίσταση σε διάβρωση
- ü Αντίσταση σε φθορά
- ü Πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση και κρούση
- ü Καλή θερμική αγωγιμότητα
- ü Θερμική μόνωση
- ü Ακουστική μόνωση
- ü Χαμηλό κόστος συντήρησης

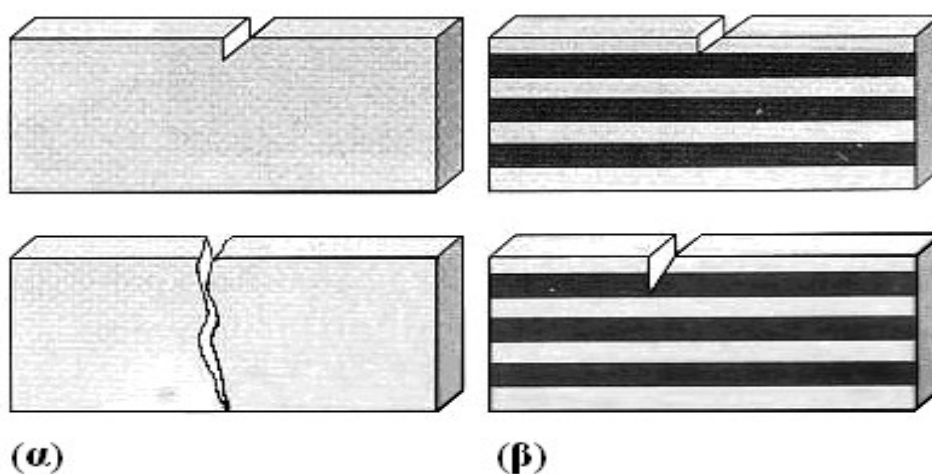
Οι παραπάνω ιδιότητες των σύνθετων υλικών δεν μπορούν να συνδυαστούν όλες ταυτόχρονα διότι κάποιες από αυτές είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση και θερμική αγωγιμότητα). Στη πράξη κάθε σύνθετο υλικό δημιουργείται με σκοπό να έχει κάποιες από τις παραπάνω ιδιότητες. Για παράδειγμα τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών διακρίνονται για την δυσκαμψία, την αντοχή, το βάρος και το κόστος τους.

**Πίνακας 1.2:** Συγκριτικός πίνακας ειδικών ιδιοτήτων σύνθετων και παραδοσιακών υλικών.<sup>32</sup>

Υλικό	$\rho$ (Mg/m <sup>-3</sup> )	E (GPa)	Ts (MPa)	ε <sub>υ</sub> (%)	$\alpha$ (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> )	E/d	Ts/ d
Κράμα Al-Zn-Mg	2.8	72	503	11	24	25.7	180
Κράμα Χάλυβα	7.85	207	2000	12-28	11	26.4	270
Κράμα Ni	8/18	204	1200	26	16	24.9	110
Nylon 6,6	1.14	2	70	60	90	1.8	61
Nylon/GRP (25%)	1.47	14	207	2.2	25	9.5	141
CFE-UD (60%)	Long. 1.62 Trans. 1.62	220 7	1400 38	0.8 0,6	-0.2 30	135 -	865 -
GFP-UD (50%)	Long. 1.93 Trans. 1.93	38 10	750 22	1,8 0.2	11 -	19.7 -	390 -
GFP-20% Random Planar	1.55	8.5	110	2	25	5.5	71

Απαριθμώντας τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών, το πρώτο σε σειρά είναι οι άριστες μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν. Αναλύοντας τα ινώδη σύνθετα υλικά, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι αρκετοί τύποι ινών έχοντας την αντοχή και την δυσκαμψία που απαιτείται, χαρακτηρίζονται ως προηγμένες ίνες και είναι κατάλληλες για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Παράδειγμα των παραπάνω είναι οι ίνες βορίου και γραφίτη, οι οποίες διακρίνονται για τη μεγάλη αντοχή και δυσκαμψία τους. Επίσης, ένα πλεονέκτημα που θεωρείται απαραίτητο να αναφερθεί είναι αυτό του κόστους, το οποίο είναι αρκετά μειωμένο ιδιαίτερα σε αεροναυπηγικές εφαρμογές και εμφανίζεται σε περιπτώσεις υψηλής δυσκαμψίας. Επιπρόσθετα, αξίζει να υπερτονιστεί ότι τα σύνθετα υλικά συνεχίζουν να αναλαμβάνουν φορτία, και στη περίπτωση που εμφανιστεί κάποια αστοχία. Για παράδειγμα, τα σύνθετα υλικά που είναι ενισχυμένα με ίνες γυαλιού μετά τη διαρροή τους συνεχίζουν να δέχονται φορτία, τα οποία φθάνουν στο 85% της τάσης αστοχίας τους. Αυτό παρατηρείται, διότι μετά την αστοχία του υλικού επέρχεται η θραύση των

ινών με αποτέλεσμα η τάση να μεταβιβάζεται σε παραπάνω από μία κατεύθυνση μέσα στη μάζα του υλικού.



**Εικόνα 1.5:** Διάδοση ρωγμής σε (α) ομογενές υλικό και (β) διφασικό υλικό.<sup>32</sup>

Ακόμη, τα σύνθετα υλικά τα οποία είναι ενισχυμένα με ίνες παρουσιάζουν αντοχή στο φαινόμενο της κόπωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα προαναφερθέντα υλικά εμφανίζουν μικρή ευαισθησία στην ύπαρξη εγχοπών και περιορισμένη διάδοση ρωγμών. Τα υλικά αυτά εμφανίζουν καλύτερο προσδόκιμο ζωής σε σχέση με αυτή των αντίστοιχων μεταλλικών κατασκευών σε πειράματα κόπωσης, τα οποία συνέβησαν σε πραγματικές κατασκευές.

Στη συνέχεια, αξίζει να σημειωθεί ότι τα σύνθετα υλικά τύπου sandwich ακόμα και αν τους επιβληθούν υψηλά φορτία διατηρούν την μορφή και το σχήμα τους με αποτέλεσμα, να πετυχαίνουν με μεγάλη ευκολία εξαιρετικές αεροδυναμικές επιφάνειες. Ακόμη, η προαναφερθείσα κατηγορία εμφανίζει ένα σημαντικό πλεονέκτημα, αυτό της απορρόφησης ενέργειας κατά την διάρκεια μιας μηχανικής ταλάντωσης με συνέπεια την απόσβεσή της. Επιπροσθέτως, άλλο ένα χαρακτηριστικό των παραπάνω υλικών είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σαν ηχομονωτικά υλικά.

Επιπλέον, μια σημαντική ιδιότητα των σύνθετων υλικών είναι η αντίσταση στην διάβρωση γιατί τα υλικά αυτά δεν παρουσιάζουν περιπτώσεις ηλεκτροχημικής διάβρωσης. Η ηλιακή ακτινοβολία είναι ο μοναδικός παράγοντας που μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες των υλικών αυτών, ο οποίος μπορεί να ελεγχθεί με την κατάλληλη προστασία.

Παρατηρείται ότι, τα ινώδη σύνθετα υλικά διαθέτουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε κρουστικά φορτία. Αυτή η ιδιότητα, συμβάλλει στον περιορισμό της καταστροφής μιας κατασκευής με αποτέλεσμα να διατηρείται το περίγραμμα ακέραιο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, είναι αυτό της βαλλιστικής κρούσης κατά την οποία η σπή που δημιουργείται στο υλικό είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του βλήματος. Τα μέταλλα παρουσιάζουν υψηλή συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή της καταστροφής σε σχέση με τα ινώδη σύνθετα υλικά τα οποία εμφανίζουν περιορισμένη συγκέντρωση.

Τέλος, από την εφαρμογή των σύνθετων υλικών σε κατασκευές παρατηρείται μια σημαντική μείωση του βάρους, η οποία μπορεί να φτάσει έως και 50%. Γενικά σε διάφορες εφαρμογές, η παραπάνω μείωση κυμαίνεται μεταξύ 20-80%. Παρατηρείται, σημαντική μείωση του βάρους σε απλά στοιχεία μιας κατασκευής όπως είναι οι άξονες οι άτρακτοι και τα πλαίσια και στις πιο σύνθετες κατασκευές όπως είναι οι πτέρυγες των αεροσκαφών. Η προαναφερθείσα μείωση παρατηρείται λόγω των ειδικών ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών με συνέπεια την κατασκευή πτερυγών με μικρό πάχος σε σχέση με τις προγενέστερες κατασκευές που ήταν από αλουμίνιο <sup>28</sup>.

## **1.6 Εφαρμογές σύνθετων υλικών**

Μετά το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, παρατηρήθηκε μία ξαφνική εξέλιξη πάνω στα σύνθετα υλικά, ως επακόλουθο της γρήγορης ανάπτυξης της αεροδιαστημικής βιομηχανίας. Αυτή η ανάγκη είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης για σύνθετα υλικά νέας και υψηλής απόδοσης για τους νέους στόχους υψηλής τεχνολογίας. Τα υλικά που υπήρχαν μέχρι τότε όπως είναι τα μέταλλα και τα πολυμερή σύνθετα υλικά δεν ήταν σε θέση να ανταποκριθούν στις νέες ανάγκες του ανθρώπου. Έτσι ο άνθρωπος χρειάστηκε υλικά που θα

είχαν νέα χαρακτηριστικά όπως είναι οι καλές μηχανικές ιδιότητες, η υψηλή αντοχή στην οξειδωση και η μείωση του βάρους τους. Στην εποχή μας τα σύνθετα υλικά είναι ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο καθημερινά στη ζωή του μέχρι σε πυραύλους και σε διαστημικά οχήματα. Στη συνέχεια, αναλύονται κάποιες από τις εφαρμογές των σύνθετων υλικών:

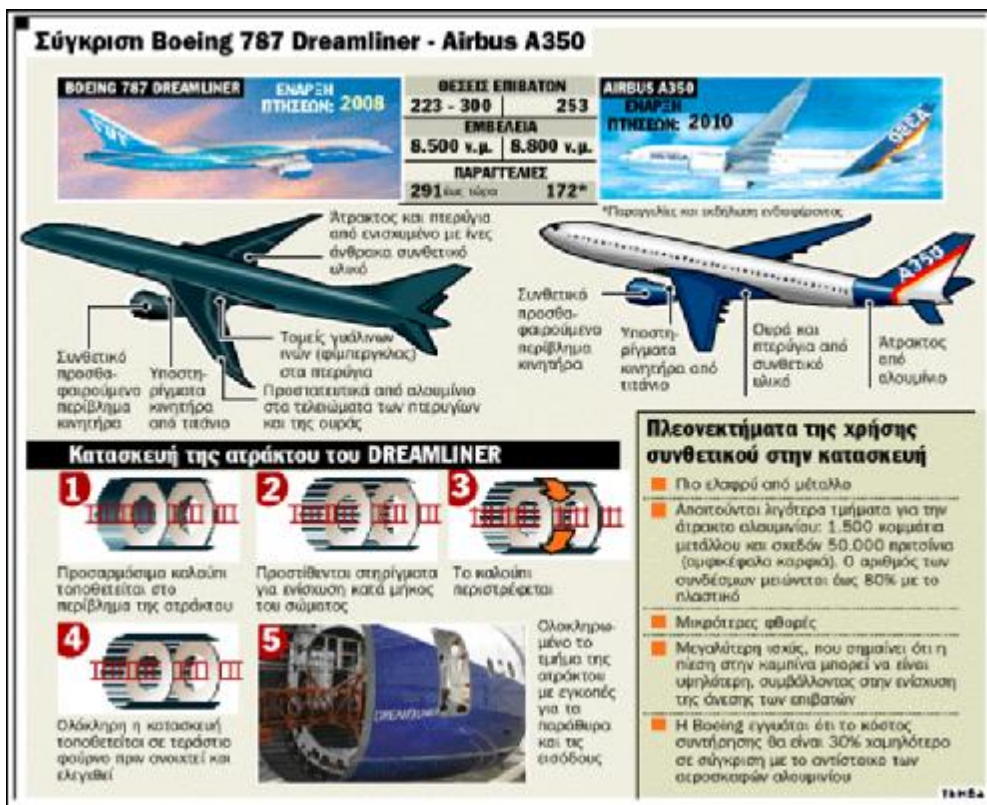
- 1. Αεροσκάφη:** Αν και η συμβολή του στρατού πάνω στη πρόοδο των σύνθετων υλικών ήταν αξιοσημείωτη, ο υπεύθυνος που δημιούργησε το περιβάλλον έτσι ώστε τα σύνθετα υλικά να είναι στη θέση που βρίσκονται στις μέρες μας είναι η NASA, η οποία συνέβαλε στη προώθηση των σύνθετων υλικών στις μεταφορές με συμβόλαια με μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες αεροπλάνων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης των σύνθετων υλικών είναι τα αεροπλάνα, στα οποία αρκετά τμήματα μέρη είναι φτιαγμένα από τα παραπάνω υλικά, όπως είναι κάποια τμήματα των φτερών, τα καθίσματα, οι σταθεροποιητές πτήσης, τα πηδάλια κλπ. Με τη χρήση των σύνθετων υλικών επέρχονται κάποια πλεονεκτήματα σε ό,τι αφορά τη μείωση του βάρους, η οποία συμβάλλει στη μείωση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας της ατράκτου.

Αξίζει επίσης να συμπληρωθεί ότι τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται αρκετά και στα μαχητικά αεροπλάνα. Για παράδειγμα, ένα υπό ανάπτυξη μαχητικό, το AV-8B αποτελείται κατά κύριο λόγο από σύνθετα υλικά όπως είναι ο γραφίτης και οι εποξειδικές ρητίνες. Η χρήση των προαναφερθέντων υλικών στο συγκεκριμένο μαχητικό ανέρχεται στο 86% του βάρους του, το οποίο είναι 590 Kg. Η χρήση και η μείωση του βάρους στα αεροσκάφη με τη χρήση των υλικών αυτών φαίνεται στον Πίνακα 1.3. Τα υλικά αυτά βρίσκουν εφαρμογή στα ελικόπτερα, στα μαχητικά και μη. Αναλυτικότερα τα σύνθετα που χρησιμοποιούν είναι οι εποξειδικές ρητίνες, οι οποίες είναι ενισχυμένες με ίνες βορίου, γυαλιού, γραφίτη και Kevlar. Τα ποσοστά βάρους των σύνθετων υλικών κυμαίνονται μέχρι και 30% του συνολικού βάρους των αεροσκαφών και η μείωση του ολικού βάρους που επιτυγχάνουν είναι από 20 έως 55 %.



Πίνακας 1.3: Χρήση και μείωση του βάρους στα αεροσκάφη.<sup>32</sup>

ΑΕΡΟΣΚΑΦΟΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (%)	ΕΠΕΡΧΟΜΕΝΗ ΜΕΙΩΣΗ ΒΑΡΟΥΣ (%)
F – 14	1	19
F – 15	1	23
F – 16	2	23
F – 18	10	35
AV - 8V	26	20 – 25



Εικόνα 1.6: Τι ισχύει στα αεροσκάφη.<sup>49</sup>

2. **Πύραυλοι:** Τα σύνθετα υλικά λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους βρίσκουν εφαρμογή στους πυραύλους, οι οποίοι απαιτούν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά για να λειτουργήσουν. Οι κύριοι λόγοι χρησιμοποίησης των υλικών που αναφέραμε παραπάνω είναι η υψηλή σκληρότητα, η αντοχή και το ελάχιστο βάρος που απαιτούνται από τους πυραύλους. Επιπλέον, οι πύραυλοι Trident-I και Pershing II κάνουν χρήση σύνθετων υλικών από εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένες από ίνες Kevlar.



**Εικόνα 1.7:** Πύραυλος κατασκευασμένος με τη βοήθεια ινών από Kevlar.<sup>49</sup>

3. **Αεροδιαστημική:** Ένας σημαντικός παράγοντας στη κατασκευή διαστημικών οχημάτων είναι το βάρος τους. Οι αιτίες που καθιστούν το βάρος τους σημαντικό παράγοντα στη κατασκευή τους είναι οι τροχιές υψηλής θερμοκρασίας στο διάστημα, η απαίτηση διατήρησης άριστων συστημάτων επικοινωνίας και πλεύσης και η ανάγκη της διαστασιακής σταθερότητας τους. Τα υλικά που απαιτούνται για τη κατασκευή διαστημικών οχημάτων είναι τα σύνθετα ενισχυμένα με ίνες γραφίτη και Kevlar.
4. **Δορυφόροι και συστήματα επικοινωνιών:** Στη κατασκευή δορυφόρων απαιτείται η υψηλή αντοχή και η χαμηλή θερμική διαστολή, οι οποίες επιτυγχάνονται με τη χρήση σύνθετων ενισχυμένων ρητίνες και ίνες γραφίτη. Η αντικατάσταση του αλουμινίου

στις κατασκευές από τον γραφίτη, συνέβαλε στη μείωση του βάρους τους κατά 50 %. Επίσης, οι κεραίες των διαστημικών οχημάτων χρησιμοποιούν κατά κύριο λόγο σύνθετα υλικά. Για παράδειγμα, η μεγαλύτερη κεραία πτήσης που έχει κατασκευαστεί είναι αυτή του Voyager, η οποία είναι 3.7 μέτρα και αποτελείται από εποξειδική ρητίνη με ίνες γραφίτη.

5. **Αυτοκίνητα:** Μια νέα κατηγορία αυτοκινήτων είναι τα υβριδικά, τα οποία αποτελούν έναν βασικό καταναλωτή στην παραγωγή των σύνθετων υλικών. Τα κύρια υλικά ενισχυμένα με ίνες που χρησιμοποιούνται από τους κατασκευαστές υβριδικών αυτοκινήτων είναι ίνες γραφίτη και γυαλιού ή γραφίτη και Kevlar, για τη παραγωγή τμημάτων του αυτοκινήτου όπως είναι οι προφυλακτήρες, οι άξονες οδήγησης, το ταμπλό οργάνων, ελαστικών κλπ. Επιπρόσθετα, για τη μείωση του βάρους σε μεγάλα φορτηγά, θεωρείται απαραίτητη η χρήση σύνθετων υλικών ενισχυμένων με εποξειδικές ρητίνες, με ίνες γυαλιού και γραφίτη αντί για μέταλλα, διότι εμφανίζουν μείωση του βάρους μέχρι και 80%.



Εικόνα 1.8: Εφαρμογή σύνθετων υλικών στα αυτοκίνητα.<sup>49</sup>

6. **Ηλεκτρονικά είδη:** Η αγορά των ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών θέλοντας να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών, της βελτιωμένης απόδοσης και του χαμηλότερου βάρους των προϊόντων τους, αύξησε τη ζήτηση τους. Τα παραδείγματα ποικίλουν κάποια από αυτά είναι σύνθετα από εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένα με ίνες γυαλιού για προστασία τυπωμένων κυκλωμάτων, καθώς επίσης και μία νέα κατηγορία από θερμοπλαστικά έγχυσης για της μείωση των ηλεκτρομαγνητικών και ραδιοσυχνοτήτων παρεμβολών.
7. **Ναυπηγική:** Τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται στη ναυπηγική από τη κατασκευή βαρκών μέχρι πλοίων του πολεμικού ναυτικού. Συγκεκριμένα στις βάρκες γίνεται χρήση ως υλικό κατασκευής η εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες γυαλιού, ενώ σε ορισμένα τμήματα μεγαλύτερων πλοίων χρησιμοποιούνται εποξειδικές ρητίνες με ίνες γραφίτη ή βορίου.



Composite materials are widely used in the nautical field for:



Pleasure yachts...



Sailing boats...



Racing boats....

...but also in the shipbuiding world, composite materials find their applications, as in the following examples.

ADVANCED MATERIALS INTERNATIONAL FORUM  
Bari, 18-19 sept. 2014

Εικόνα 1.9: Εφαρμογή σύνθετων υλικών στη ναυπηγική.<sup>49</sup>

8. **Είδη σπορ και αναψυχής:** Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών σε είδη σπορ και αναψυχής είναι αρκετά, κάποια από αυτά είναι τα ποδήλατα, τα οποία κατασκευάζονται από εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένες με ίνες, σε σκάφη αναψυχής όπως είναι της ιστιοπλοΐας, καταμαράν, καγιάκ και κανό, τα οποία φτιάχνονται από ίνες γυαλιού Kevlar και γραφίτη σε εποξειδικές ή πολυεστερικές μήτρες. Στη συνέχεια, οι ρακέτες του τένις φτιάχνονται από εποξειδικές ρητίνες με ίνες γραφίτη και Kevlar, τα μπάστούνια του γκολφ, τα οποία κατασκευάζονται με ίνες βορίου και γραφίτη και στα οποία δίνεται καλύτερη σταθερότητα σε σύγκριση με άλλα υλικά. Τέλος, η κατασκευή καλαμιών για ψάρεμα, τόξων και σκι γίνεται με τη βοήθεια σύνθετων υλικών από εποξειδικές ρητίνες ενισχυμένες από ίνες.
9. **Ιατρικές εφαρμογές:** Εξαιτίας της ευελιξίας σχεδιασμού και των δυνατοτήτων ρύθμισης των ιδιοτήτων με σκοπό να συγκλίνουν καλύτερα στις απαιτήσεις των πελατών, τα σύνθετα υλικά εφαρμόζονται εκτενώς στο χώρο της βιοϊατρικής. Επιπλέον ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν είναι η καλή βιοσυμβατότητα. Για παράδειγμα, στη περίπτωση της οστεοσύνθεσης χρησιμοποιούνται σύνθετα με ίνες άνθρακα σε θερμοπλαστικές μήτρες. Τα πλεονεκτήματα που αξίζουν να αναφερθούν είναι αυτά της μεγάλης αντοχής και της χαμηλής ακαμψίας σε σχέση με τα κεραμικά και τα μέταλλα, τα οποία παρουσιάζουν 10 έως 40 φορές μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από ότι τα οστά, με αποτέλεσμα να επηρεάζεται αρνητικά η εύρυθμη λειτουργία της περιοχής όπου συνέβη η πρόσθεση<sup>5</sup>.



**Εικόνα 1.10:** Γενικές εφαρμογές σύνθετων υλικών.<sup>49</sup>

## 1.7 Μελλοντικές εφαρμογές των σύνθετων υλικών

Η υφεσιακή πορεία που ακολουθούσε για κάποια χρόνια η βιομηχανία των σύνθετων υλικών σταμάτησε κάπου στα μέσα τις δεκαετίας του 2000, διότι η ζήτηση των υλικών αυξήθηκε σε επίπεδα-ρεκόρ για τα σημερινά δεδομένα. Επίσης, αξίζει να αναφερθούν ότι οι καινοτομίες στο τρόπο κατασκευής και κάποιες τεχνολογίες των υλικών, συντελούν στη διεύρυνση των εφαρμογών τους.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής των σύνθετων υλικών, το οποίο παρουσιάζει αρκετές προοπτικές είναι αυτό της χρήσης τους στη οικοδομική. Τα υλικά αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στα πρωταρχικά στάδια κατασκευής είτε στη συντήρηση και τη διόρθωση. Σε ό,τι αφορά την κατασκευή, τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε μία ευρέως στις δομικές εφαρμογές, όπως είναι οι πεζοδρόμοι, οι γέφυρες και τα τοίχοι σε αντιπλημμυρικά έργα. Ενώ, στο τομέα της επιδιόρθωσης και της συντήρησης των έργων, η χρήση των προαναφερθέντων υλικών γίνεται αντιληπτή κυρίως στις γέφυρες και στους αυτοκινητόδρομους<sup>5</sup>.



**Εικόνα 1.11:** Το μουσείο Ριβεράιντ στη Σκωτία.<sup>49</sup>

Η παραγωγή των σύνθετων υλικών μπαίνει σε νέα κατεύθυνση, ως αποτέλεσμα της αυξημένης χρήσης των θερμοπλαστικών από διάφορες βιομηχανίες όπως είναι αυτοκινητοβιομηχανία. Οι λόγοι που συντελούν σε αυτή την πρόοδο είναι ο εύκολος τρόπος παραγωγής και η δυνατότητα που προσφέρεται στο χρήστη τους για ανακύκλωση. Η συνολική αγορά των σύνθετων υλικών στην Ευρώπη, αποτελείται από θερμοπλαστικά. Η είσοδος κατάλληλα τροποποιημένων μέσων ενίσχυσης, με σκοπό την ενδυνάμωση θερμοπλαστικών μητρών, συνέβαλλε στη αύξηση της ζήτησης τους. Για παράδειγμα, αξίζει να αναφερθεί ότι οι ίνες γυαλιού είναι κατάλληλες για πολυπροπυλένιο και πολυαμίδια.

Νέα συστατικά με καλύτερες ιδιότητες έρχονται στην επιφάνεια ως αποτέλεσμα της συνεχής έρευνας που διεξάγεται έτσι ώστε τα σύνθετα υλικά να ανταποκρίνονται καλύτερα στις ανάγκες των ανθρώπων. Επίσης αξίζει να σημειωθεί η εξέλιξη που παρατηρείται στο πεδίο των διεργασιών παραγωγής των σύνθετων υλικών. Για παράδειγμα, η εταιρεία BP εισήγαγε μια νέα

μέθοδο παραγωγής των σύνθετων υλικών, η οποία θεωρείται εξέλιξη της μεθόδου μορφοποίησης με έλξη (pultrusion) <sup>4</sup>.

Τέλος, συμπεραίνεται ότι η συνεχής εξέλιξη της βιομηχανικής παραγωγής των σύνθετων υλικών αλλά και η παράλληλη ισορροπία που βρίσκονται με τους τομείς των υψηλών τεχνολογίας υλικών, απορρέει το συμπέρασμα ότι η έρευνα καθοδηγείται από τη την ανάγκη νέων χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων, και οι καινοτομίες που προκύπτουν οδηγούν σε νέες εφαρμογές.

## **1.8 Ανθεκτικότητα και συμπεριφορά σύνθετων υλικών υπό την επίδραση διάφορων παραγόντων**

Σε αυτό το τμήμα της πτυχιακής εργασίας θα αναλυθούν οι παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν την ανθεκτικότητα των συστημάτων ενίσχυσης των σύνθετων υλικών.

### **1.8.1 Επίδραση διάφορων παραγόντων στα υλικά**

Σε γενικές γραμμές τα σύνθετα υλικά σχεδιάζονται και κατασκευάζονται με σκοπό να είναι ανθεκτικά υπό φυσιολογικές συνθήκες, που επικρατούν στο περιβάλλον σε μακροχρόνια περίοδο.

Τα σύνθετα υλικά ινοπλισμένων πολυμερών εμφανίζουν μεγάλη διάρκεια ζωής, όταν επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες στο περιβάλλον. Αυτές οι συνθήκες αναλύονται στη συνέχεια:

- Ø Θερμοκρασία: από  $-30^{\circ}\text{C}$  έως  $60^{\circ}\text{C}$  θερμοκρασιακά όρια που ισχύουν για μακρά έκθεση,  $650^{\circ}\text{C}$  έως  $110^{\circ}\text{C}$  θερμοκρασιακά όρια που ισχύουν για βραχεία έκθεση δηλαδή για 2 ώρες σε φωτιά.
- Ø Υγρασία: πλήρης βύθιση σε αλμυρό ή γλυκό νερό για έκθεση μακράς διάρκειας σε θερμοκρασιακά όρια από  $0^{\circ}\text{C}$  έως  $40^{\circ}\text{C}$ .
- Ø pH: τα όρια σε αυτή τη κατηγορία είναι από 3 έως 10 για μακρά χρήση.
- Ø Υπεριώδης ακτινοβολία: ο δείκτης υπεριώδους ακτινοβολίας ίσος με 10 για μακρά έκθεση.
- Ø Υδρογονάνθρακες: απορρόφηση συγκεκριμένης ποσότητας για μακροχρόνια διαστήματα.



Σε εφαρμογές που έχουν έντονο αλκαλικό περιβάλλον, επιβάλλεται η χρησιμοποίηση ειδικών ρητινών με ίνες άνθρακα ή ύαλου για παράδειγμα η ενίσχυση πασσάλων στη θάλασσα. Οι προδιαγραφές ενός καλού σχεδιασμένου συστήματος ινοπλισμένων πολυμερών πρέπει να περιέχουν έκθεση συστήματος σε κάθε μία από τις παραπάνω συνθήκες για περιόδους έως 10000 ωρών.

Στη συνέχεια παρατίθενται σχολαστικά η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών σε διάφορους δυσμενείς συνθήκες <sup>35</sup>.

#### **1.8.1.1 Επίδραση της θερμοκρασίας**

Τα ινοπλισμένα πολυμερή δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες μεταβολές της ιδιότητες της, της μέσης θερμοκρασίες που υπάρχουν στο περιβάλλον, όταν η διαλογή της και η εφαρμογής της γίνει προσεχτικά για της εκάστοτε ανάγκες. Οι αρνητικές επιπτώσεις στα προαναφερθέντα υλικά εμφανίζονται σε θερμοκρασίες της τάξεως των 50-80 °C, επειδή επηρεάζεται αρνητικά η ικανότητα των ρητινών να δεχτούν επιπλέον δυνάμεις, με συνέπεια μακροχρόνια να παρουσιάζονται προβλήματα της κατασκευές, της οποίες έχει γίνει χρήση σύνθετων υλικών. Ακόμη, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες, της αυτές που αναπτύσσονται στη περίπτωση της πυρκαγιάς, επέρχεται η ολοκληρωτική αποσύνθεση των ρητινών, με συνέπεια τα υλικά αυτά να μην είναι σε θέση να δεχτούν παραπάνω τάσεις. Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί ότι η υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας των ρητινών προκαλεί την ελευθέρωση τοξικών ουσιών για τον ανθρώπινο οργανισμό. Για να γίνει πρόληψη όλων των παραπάνω αρνητικών επιπτώσεων που παρουσιάζονται σε περιπτώσεις αύξηση της θερμοκρασίας, πρέπει να γίνει χρήση πυροπροστασίας με τη βοήθεια επικάλυψης των προαναφερθέντων υλικών με ειδικά επιχρίσματα, της είναι η γυψοσανίδα μεγάλου πάχους. Της χαμηλές θερμοκρασίες εμφανίζεται μία αύξηση της δυσκαμψίας του υλικού, με αποτέλεσμα να επέρχεται η ψαθυρή μορφή αστοχίας και μείωση της αντοχής σε κρούση <sup>35</sup>.

### 1.8.1.2 Επίδραση της υγρασίας

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αυτή την κατηγορία τα σύνθετα υλικά δεν επηρεάζονται από την υγρασία. Όμως, αρνητικές επιπτώσεις εμφανίζονται όταν αυτά τα υλικά βρίσκονται σε συνεχή επαφή με το νερό. Αυτό που επιδρά αρνητικά σε αυτά τα υλικά αφορά τις μήτρες. Αναλυτικότερα, οι ρητίνες έχουν την τάση να απορροφούν νερό, η οποία εξαρτάται από το είδος της ρητίνης και από τη θερμοκρασία που βρίσκεται το νερό, ως συνέπεια να επέρχεται μείωση της δυσκαμψία τους και ταυτόχρονη μείωση της υαλώδους μετάπτωσης. Οι δύο παραπάνω αρνητικές συνέπειες μπορούν να αποφευχθούν εφόσον γίνει χρήση εποξειδικής ρητίνης μετά το στέγνωμα της μήτρας. Επιπλέον, επισημαίνεται ότι όταν γίνει χρήση πολυεστερική ή βινυλεστερικής ρητίνης, οι αρνητικές συνέπειες είναι σε θέση να εξαλειφθούν ανάλογα με το χρόνο έκθεσης τους σε αυτές τις συνθήκες. Από τα είδη των ινών, η κατηγορία του άνθρακα παρουσιάζει μία εικόνα που δεν επηρεάζεται καθόλου από το νερό, ενώ το γυαλί παρουσιάζει μία μικρή μείωση της αντοχής του. Το αραμίδιο είναι σε θέση να απορροφήσει μέχρι το 13% κατά βάρος του νερού στη συνέχεια θα εμφανίσει μείωση της εφελκυστικής τους αντοχής<sup>35</sup>.

### 1.8.1.3 Επίδραση του ερπυσμού

Οι παραμορφώσεις των σύνθετων υλικών που οφείλονται στον ερπυσμό είναι αμελητέες. Ο ερπυσμός, αυτό που επηρεάζει στα σύνθετα υλικά είναι οι ίνες. Αυτές που είναι από άνθρακα εμφανίζονται να μην επηρεάζονται από τον ερπυσμό, οι ίνες από γυαλί εμφανίζουν σχετικά μικρές παραμορφώσεις και μεγαλύτερες παραμορφώσεις εμφανίζουν οι ίνες από αραμίδιο. Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι ο βαθμός του ερπυσμού είναι ανάλογος με το υλικό της ίνας αλλά και τον προσανατολισμός της σε σχέση με την ένταση<sup>35</sup>.

#### **1.8.1.4 Επίδραση της θραύσης και της διάβρωσης υπό τάση**

Θραύση υπό τάση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο οι ίνες δύνανται να αστοχήσουν υπό μόνιμη τάση, ακόμα και αν αυτή είναι εξαιρετικά μικρή. Διάβρωση υπό τάση ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μειώνεται η αντοχή των σύνθετων υλικών λόγω της συνδυασμένης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού (όξινου ή αλκαλικού ) περιβάλλοντος. Σε ένα περιβάλλον, όπου δεν υπάρχει ένταση, δεν θα υπήρχε μείωση της αντοχής. Οι ίνες άνθρακα δεν παρουσιάζουν προβλήματα διάβρωσης υπό τάση, κάτι που δεν συμβαίνει όμως με τις ίνες αραμιδίου και τις ίνες γυαλιού, οι οποίες είναι αρκετά ευπαθείς. Επιπλέον, είναι σωστό να αναφερθεί ότι η εποξειδική ρητίνη εμφανίζει μία αρκετά ανθεκτική συμπεριφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη ρητινών.

Τέλος, αυτό που αποφαίνεται από τα παραπάνω είναι ότι όταν υπάρχουν μόνιμα φορτία, τότε θεωρείται ιδανική η χρήση ινών άνθρακα συνδυασμό με εποξειδική ρητίνη<sup>35</sup>.

#### **1.8.1.5 Επίδραση της κόπωσης**

Τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το σκυρόδεμα ή το χάλυβα υπό την επίδραση του φαινομένου της κόπωσης, όταν ενεργούν μεγάλοι αριθμοί κύκλων επαναλαμβανόμενης φόρτισης. Επιπλέον, η αντοχή σε κόπωση διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της ίνας και της ρητίνης που χρησιμοποιείται. Συγκεκριμένα, οι ίνες άνθρακα εμφανίζουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά από αυτή του χάλυβα οπλισμού. Αντίθετα, οι ίνες αραμιδίου και οι ίνες γυαλιού παρουσιάζουν κατώτερη συμπεριφορά σε σχέση με τις προαναφερθέντες ίνες. Επιπρόσθετα, ό,τι αφορά τις ρητίνες, αυτές που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αντοχή ,σε σύγκριση με τις πολυεστερικές και τις βινυλεστερικές, είναι οι εποξειδικές ρητίνες<sup>35</sup>.

#### **1.8.1.6 Επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας**

Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι η υπεριώδης ακτινοβολία επηρεάζει σημαντικά την αντοχή της μήτρας. Αναλυτικότερα, η ακτινοβολία προκαλεί αρνητικές συνέπειες στην επιδερμική στρώση της ρητίνης, επηρεάζοντας το χρώμα στη επιφάνεια της και προκαλώντας μικρή μείωση στην αντοχή της. Οι ίνες που παρουσιάζονται να είναι ευπαθείς σε σχέση με τις υπόλοιπες είναι οι ίνες αραμιδίου. Όμως τα σύνθετα υλικά μπορούν να προστατευθούν από τις αρνητικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας με τη χρήση επιχρίσματος ή ειδικές άντι-UV βαφές ανοιχτού χρώματος, οι οποίες μπορεί να είναι ακρυλικές ή πολυουρεθανικές<sup>35</sup>.

#### **1.8.1.7 Κρούση**

Η συμπεριφορά των σύνθετων υλικών στην επίδραση του φαινομένου της κρούσης διαμορφώνεται ως εξής, την καλύτερη συμπεριφορά την παρουσιάζουν οι ίνες πολυαραμιδίου για παράδειγμα οι συγκεκριμένες ίνες χρησιμοποιούνται στη κατασκευή αλεξίσφαιρων γιλέκων. Ακολουθούν οι ίνες γυαλιού και τέλος έρχονται οι ίνες άνθρακα<sup>35</sup>.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Εισαγωγή

Τα μέσα ενίσχυσης είναι στερεά υλικά τα οποία διαχωρίζονται ανάλογα με την μορφή τους. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία από υλικά τα οποία έχουν την μορφή κόκκων, νιφάδων, ασυνεχών ινών, συνεχών ινών και φύλλων. Επιπλέον, το μεγαλύτερο ποσοστό των υλικών αυτών χαρακτηρίζονται από υψηλή αντοχή και υψηλό μέτρο ελαστικότητας ιδιαίτερα όταν βρίσκονται στην ινώδη μορφή. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλη προτίμηση στα ινώδη υλικά ενίσχυσης. Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ίνες υψηλής τεχνολογίας, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ανθεκτικότητα, μεγάλη ακαμψία και χαμηλή πυκνότητα. Η υψηλή απόδοση των ινών ως προς την χρήση τους εξαρτάται σε τρία βασικά χαρακτηριστικά:

- Μικρές διαστάσεις όπως είναι η διάμετρος, σε ότι αφορά την μικροδομική τους μονάδα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να έχουμε ένα μεγαλύτερο κλάσμα όσον αφορά την θεωρητική αντοχή σε σχέση με αυτό που μπορεί να αναπτυχθεί σε μια ογκώδη μορφή. Αυτό οφείλεται στην επίδραση του μεγέθους, αφού όσο πιο μικρό είναι το μέγεθος, τόσο λιγότερες είναι οι πιθανότητες να εμφανιστούν ατέλειες στο υλικό.
- Υψηλό λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l / d$ ), που επιτρέπει σε ένα πολύ μεγάλο μέρος του φορτίου που εφαρμόζεται να μεταφερθεί διαμέσου της μήτρας στη σκληρή και άκαμπτη ίνα.
- Υψηλό βαθμό ευκαμψίας, που χαρακτηρίζει ένα υλικό με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και μικρής διαμέτρου. Αυτή η ευκαμψία έχει ως αποτέλεσμα την χρήση πολλών και διαφορετικών τεχνικών παραγωγής για την κατασκευή σύνθετων υλικών με ίνες.<sup>30</sup>

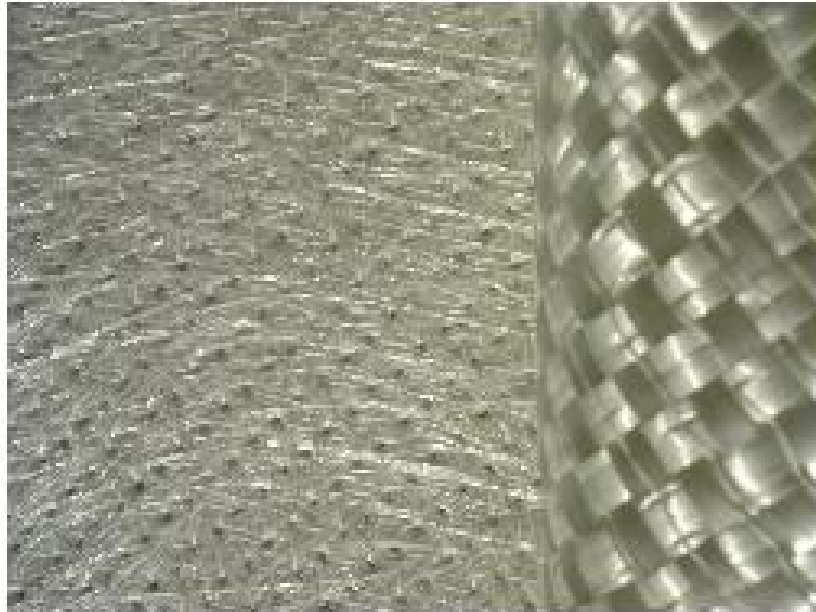
## 2.2 Ταξινόμηση των ινών

### 2.2.1 Ίνες γυαλιού

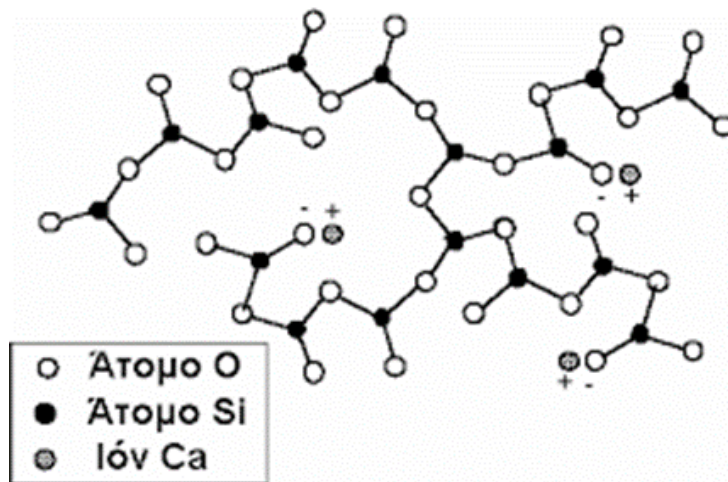
Γενικά, η ονομασία γυαλί εμπεριέχει ίνες οι οποίες αποτελούνται από διαφορετικές χημικές συστάσεις. Οι ίνες του γυαλιού έχουν ως βάση το πυρίτιο ( 50 – 60 %  $\text{SiO}_2$  ) και περιέχουν οξειδία ασβεστίου, βορίου, νατρίου, αργιλίου και σιδήρου. Το γυαλί είναι ένα υλικό το οποίο είναι ευρύτατα διαδεδομένο ως προς την χρήση του ως μέσο ενίσχυσης, αφού καταλαμβάνει το 90% των θερμοσκληρυνόμενων ρητινών. Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται σε αεροπορικές και στρατιωτικές εφαρμογές καθώς συμβάλλουν και στην κατασκευή αυτοκινήτων και σκαφών.

Οι ίνες γυαλιού συμβάλλουν στην ενίσχυση πολυμερικών σύνθετων υλικών στην εφαρμοσμένη μηχανική. Στην αγορά υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη ινών γυαλιού που περιλαμβάνουν τους τύπους E, R, S, C, ECR και του AR. Αξίζει να σημειωθεί ότι, κάθε μια από τις προαναφερθέντες ίνες διαθέτουν διαφορετικές χημικές συνθέσεις και η κάθε μια ξεχωριστά μπορεί να ανταπεξέλθει σε διαφορετικές απαιτήσεις.

Όλοι οι τύποι γυαλιού (E, R, S, C, ECR και του AR ) έχουν πολύ υψηλούς λόγους αντοχής σε εφελκυσμό ως προς το βάρος, παρόλο που το γυαλί βρίσκεται μεταξύ των συνθετικών ανόργανων ινών οι οποίες έχουν την μεγαλύτερη πυκνότητα. Ένα χαρακτηριστικό του γυαλιού είναι ότι δεν καίγεται και έχει την ικανότητα να διατηρεί τις μηχανικές ιδιότητές του έως και το 50% της αντοχής του στους 371 °C και έως και το 25% της αντοχής του στους 538 °C. Επιπλέον, παρουσιάζει πολύ καλή αντοχή στην υγρασία και επιπλέον οι ίνες δεν διογκώνονται, δεν εκτείνονται και δεν υπόκειται σε καμία χημική αλλαγή όταν έρχονται σε επαφή με το νερό. Επίσης, έχει άριστη αντοχή στην χημική διάβρωση, εκτός από τις περιπτώσεις που έρχεται σε επαφή με πυκνά αλκάλια και το υδροχλωρικό οξύ<sup>45</sup>.



Εικόνα 2.1: Ίνες γυαλιού.<sup>48</sup>



Εικόνα 2.2: Δομή ενισχυτικής ίνας γυαλιού.<sup>48</sup>

Οι σημαντικότερες μορφές γυαλιού είναι :

ü **Γυαλί E** : είναι το πρώτο γυαλί που δημιουργήθηκε για την παραγωγή συνεχών ινών και σχεδιάστηκε για ηλεκτρικές μηχανές. Επιπλέον, είναι ένα τυπικό υφάνσιμο γυαλί και έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο αριθμό προϊόντων.

ü **Γυαλί S** : είναι γυαλί με υψηλές αντοχές σε εφελκυσμό και σε διάφορες θερμοκρασίες. Ένας από τους τομείς που εφαρμόζεται παρατεταμένα είναι η αεροναυπηγική.

ü **Γυαλί D** : είναι γυαλί που λαμβάνει χώρα σε εφαρμογές υψηλής απόδοσης και είναι γνωστό για τις βελτιωμένες διηλεκτρικές ικανότητές του. Παρόλο , που οι μηχανικές του ιδιότητες είναι κατώτερες από τις ιδιότητες του E και του D, χρησιμοποιείται για εξειδικευμένες κατασκευές λόγω της χαμηλής τιμής που κατέχει η διηλεκτρική του σταθερά και της χαμηλής πυκνότητας.

**Πίνακας 2.1:** *Τυπικές ιδιότητες των γυαλιών E,S,D.*

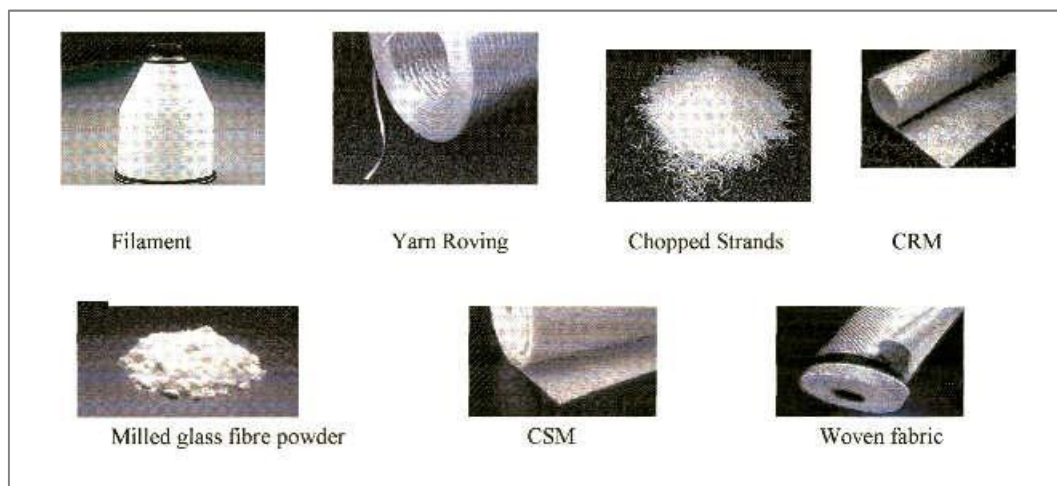
<b>Ιδιότητα</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>D</b>
<b>Ειδικό βάρος</b>	2,54	2,49	2,16
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)<sup>1</sup></b>	3,54	4,6	2,41
<b>Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)<sup>2</sup></b>	1,7	2,41	-
<b>Μέτρο ελαστικότητας (GPa)</b>	724	855	517
<b>Ελαστική επιμήκυνση (%)</b>	4,8	5,4	4,7
<b>Σημείο μαλθώσεως (°C)</b>	824	970	771

Το fiberglass σε αρχικό στάδιο παράγεται με την μίξη των κατάλληλων υλικών σε παρτίδες στις ακριβείς αναλογίες. Στην συνέχεια, το μείγμα που θα παραχθεί από την προηγούμενη διαδικασία λιώνει σε έναν φούρνο υψηλής θερμοκρασίας. Το ιξώδες γυαλί, σύρεται με συνεχή μορφή νήματος μέσω δακτυλίων από περιστρεφόμενα τύμπανα μεγάλης ακρίβειας και ταχύτητας έχοντας μορφή τήγματος. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας τυλίγματος, εφαρμόζεται μια χημική επεξεργασία με σκοπό το ντύσιμο των ινών. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η θραύση των ινών κατά την επεξεργασία τους και εξασφαλίζει καλές μηχανικές ιδιότητες και καλή διεπιφανειακή τάση.

Από την βασική μορφή παραγωγής νήματος fiberglass, μπορούν να παραχθούν και άλλα διαφορετικά είδη ινών γυαλιού όπως είναι:



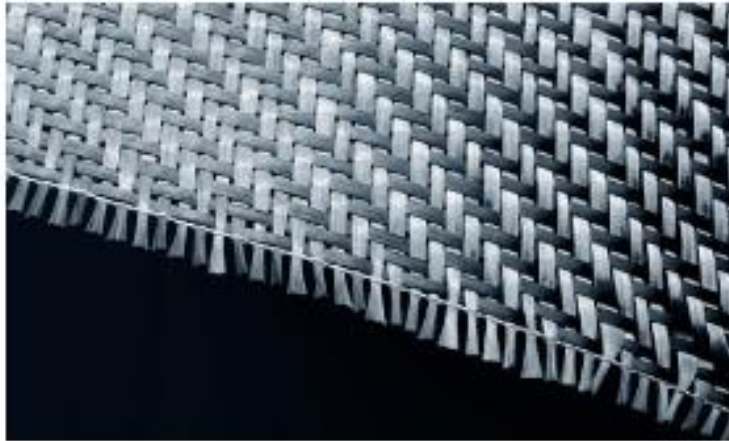
- Οι τεμαχισμένες κοντές ίνες (**chopped strands**)
- Το CSM (**Continuous random mats**)
- Το CRM (**Chopped strand mat**)
- Το υφασμένο ύφασμα που διακρίνεται για το πλήθος χαρακτηριστικών όσον αφορά την αρχιτεκτονική του.



**Εικόνα 2.3: Μορφές Fiberglass.**<sup>48</sup>

### 2.2.2 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα παράγονται με πυρόλυση πρόδρομων οργανικών ινών σε αδρανή ατμόσφαιρα. Οι θερμοκρασίες που διεξάγεται η διαδικασία της πυρόλυσης κυμαίνονται από 1000 °C έως 3000 °C . Όταν η θερμοκρασία αγγίξει τους 3000 °C, οι ίνες του άνθρακα αποκτούν την μορφή γραφίτη με αποτέλεσμα να αυξάνεται το μέτρο ελαστικότητας.



**Εικόνα 2.4:** Ίνες άνθρακα.<sup>48</sup>

Στην βιομηχανία για την παραγωγή ινών άνθρακα έχουν χρησιμοποιηθεί πρόδρομα υλικά όπως είναι:

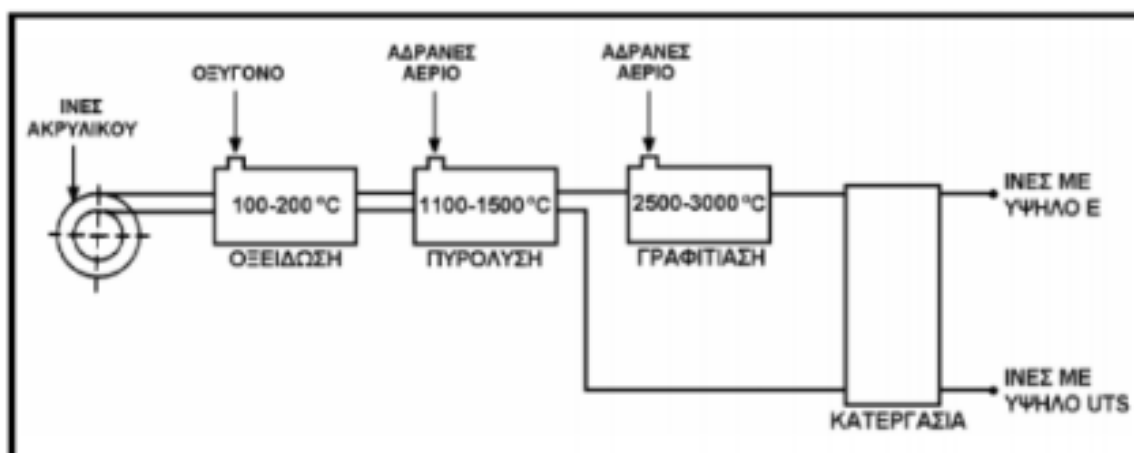
- Η αναγεννημένη κυτταρίνη (**rayon**)
- Το πολυκρυλονιτρίλιο (**PAN**)
- Η πίσσα

Αρχικά, ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των ινών αυτών είναι ότι αποτελούνται από έναν συνδυασμό χαμηλού βάρους, μεγάλης αντοχής και σκληρότητας. Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας σε συνδυασμό με την υψηλή τους αντοχή εξαρτώνται από τον βαθμό του προσανατολισμού δηλαδή από την έκταση στην οποία τα επίπεδα των στρωμάτων του άνθρακα βρίσκονται παράλληλα στον άξονα της ίνας. Στην συνέχεια, κατά την πορεία του προσανατολισμού ο βαθμός της τάξης που επιτυγχάνεται και κατά συνέπεια, το μέτρο ελαστικότητας στην διεύθυνση του άξονα της ίνας μεγαλώνει με την αύξηση της θερμοκρασίας της γραφίτοποίησης.

Η πρώτη γενιά ινών άνθρακα χαρακτηρίζονται από υψηλό μέτρο ελαστικότητας και βασίζονται στην αναγεννημένη κυτταρίνη. Οι ίνες αυτές έχουν μήκος πολλαπλάσιο του αρχικού και θερμαίνονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από τους 2800 °C. Όμως, η αβεβαιότητα σχετικά με την τροφοδοσία του κατάλληλου προδρόμου rayon σε συνδυασμό με το αυξημένο κόστος, παραμέρισε αναγκαστικά την παραγωγή τους. Ωστόσο, ένα σημαντικό ποσοστό των συγκεκριμένων ινών, οι οποίες δεν έχουν υποστεί

έκταση εν θερμώ, χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε αεροναυπηγικές εφαρμογές.

Η δεύτερη γενιά ινών άνθρακα, έχει ως βάση το πρόδρομο υλικό **PAN** και σε συνδυασμό με τον χαμηλό κόστος παραγωγής τους και τις καλές φυσικές τους ιδιότητες τις κάνουν περιζήτητες στην αγορά. Επιπλέον, αυτές οι ίνες προκύπτουν σε θερμοκρασίες υψηλότερες των 2000 °C είναι έντονα γραφίτικές όταν βρίσκονται σε κρυσταλλική μορφή.



**Σχήμα 2.1:** Σχηματική αναπαράσταση παραγωγής ενισχυτικών ινών άνθρακα σε τρία στάδια.

Τέλος, η τρίτη γενιά ινών άνθρακα έχει ως βάση την πίσσα. Αρχικά, η πίσσα είναι ένα μείγμα αρωματικών συνθέτων που οι ιδιότητές τους δεν διαφέρουν όσον αφορά την κατεύθυνση (**ισοτροπικό**). Οι ίνες που προκύπτουν από το παραπάνω μείγμα έχουν μικρό έως και μηδενικό προσανατολισμό, με αποτέλεσμα το υλικό να χαρακτηρίζεται από μικρή αντοχή και χαμηλό μέτρο ελαστικότητας. Επιπροσθέτως, για να μπορέσουν οι ίνες αυτές να χαρακτηρίζονται από υψηλό μέτρο ελαστικότητας πρέπει, η πίσσα που θα χρησιμοποιηθεί να έχει μετατραπεί αρχικά σε μορφή υγρού κρυστάλλου. Σε σύγκριση με την αναγεννημένη κυτταρίνη και το PAN, η πίσσα αποτελεί φθηνότερο υλικό.

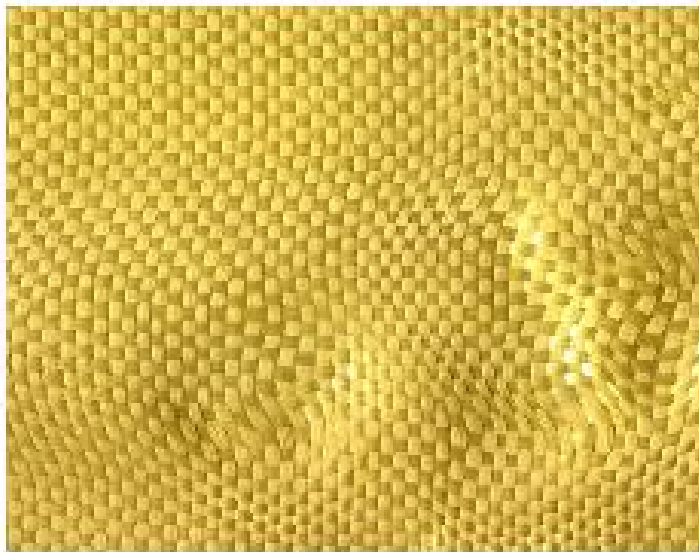
Πίνακας 2.2: Ιδιότητες ινών άνθρακα.<sup>48</sup>

Προέλευση	Τύπος ίνας	Εμπορική Ονομασία	Διάμετρος	Ειδικό Βάρος	Αντοχή σε Εφελκυσμό (GPa)
Πίσσα Λιγνίτης	Άνθρακας	Kureha	10,5	1,6	1,03
	Άνθρακας		10-15	1,5	0,6
Κυτταρίνη	Γραφίτης	Thormel	6,6	1,67	2
PAN	Άνθρακας	Graphil HT	8	1,76	3,2
PAN	Άνθρακας	Graphil HM	8	1,87	2,4

Όπως, αναφέρθηκε και παραπάνω οι ίνες άνθρακα έχουν αρκετές μορφές αλλά αυτή που χρησιμοποιείται κατακόρων είναι με την μορφή υφάσματος. Το είδος του προσανατολισμού των ινών καθορίζει τις τιμές του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής του. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι, είναι διαθέσιμες στην αγορά με έναν διαχωρισμό όσων αφορά το μέτρο ελαστικότητας σε χαμηλό, ενδιάμεσο και σε υψηλό. Οι ίνες άνθρακα μπορούν να έχουν μεγάλο μήκος και να είναι συνεχείς ή να είναι μικρού μήκους και τεμαχισμένες. Είναι κατασκευασμένες να έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό ή ο προσανατολισμός τους να είναι τυχαίος.

### 2.2.3 Αραμιδικές ίνες

Ο όρος “αραμιδικό” συνδέεται άμεσα με τις συνθετικές οργανικές ίνες οι οποίες είναι γνωστές ως αρωματικές πολυαμιδικές ίνες. Η αραμιδική ίνα σύμφωνα με την εθνική επιτροπή εμπορίου των Η.Π.Α. ορίζεται ως μια ίνα η οποία είναι βιομηχανικά κατασκευασμένη και αποτελείται από ένα συνθετικό πολυαμίδιο με μεγάλη αλυσίδα όπου το 85% των αμιδικών δεσμών έχουν άμεση σύνδεση με δυο αρωματικούς δακτυλίους. Η πρώτη εταιρεία η οποία παράγει από το 1971 αραμιδικές ίνες γνωστές και ως Kevlar είναι η Du Point.



**Εικόνα 2.5:** Ίνες αραμιδίου.<sup>48</sup>

Αρχικά, οι αραμιδικές ίνες δομικά αποτελούνται από αρωματικές μονάδες αποκατεστημένες στην θέση, με αποτέλεσμα να συμπεριφέρονται ως άκαμπτοι ράβδοι. Η δομή αυτή, οδηγεί σε υψηλή θερμοκρασία μετάπτωσης και χαμηλή διαλυτότητα με συνέπεια η παραγωγή των αραμιδικών ινών με τις συνηθισμένες τεχνικές να είναι δύσκολη. Ωστόσο, για την αποφυγή των παραπάνω τεχνικών ακολουθείτε η διαδικασία της ινοποίησης τηγματος από διαλύματα υγροκρυσταλλικών πολυμερών.

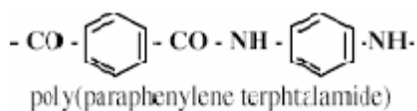
Επιπροσθέτως, διαθέτουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας κατά την διεύθυνση του προσανατολισμού, που προκύπτει από το γεγονός ότι οι αλυσίδες είναι άριστα προσανατολισμένες κατά το μήκος του άξονα της ίνας. Άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά των ινών αυτών αποτελούν οι δεσμοί που αναπτύσσονται καθώς και η υγροκρυσταλλική τους δομή. Οι δεσμοί που αναπτύσσονται είναι ασθενείς δεσμοί κατά την εγκάρσια διεύθυνση και ισχυροί ομοιοπολικοί δεσμοί κατά την διεύθυνση της ίνας, που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι αραμιδικές ίνες διαθέτουν εξαιρετικά ανισοτροπικές ιδιότητες.

Τέλος, διαθέτουν υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία. Παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στους διαλύτες με εξαίρεση τα ισχυρά οξέα και τις βάσεις.

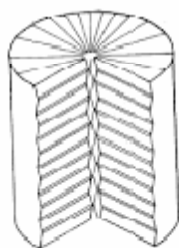
Επίσης, οι αραμιδικές ίνες σε συνθήκες θερμού περιβάλλοντος και υγρασίας σε υψηλά ποσοστά παρουσιάζουν απώλειες στην αντοχή τους.

**Πίνακας 2.3: Ιδιότητες Ινών Kelvar.<sup>48</sup>**

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Kevlar-29	Kevlar-49
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	60	130
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2700	3600
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4.5	2
Πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )	1.45	1.45
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	200	200
Θερμοκρασία αστοχίας (°C)	400	425



Τύπος αραμιδίου



Δομή ίνας Kevlar

**Εικόνα 2.6: Δομή ίνας αραμιδίου.<sup>48</sup>**

#### 2.2.4 Ίνες πολυαιθυλενίου

Το πολυαιθυλένιο αποτελεί ένα γραμμικό πολυμερές που θεωρητικά λόγω των ισχυρών δεσμών μεταξύ των ατόμων άνθρακα διαθέτει πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας και κατά την διεύθυνση των μοριακών αλυσίδων υψηλή αντοχή. Αυτά τα χαρακτηριστικά, λειτούργησαν ως αφετηρία για την δημιουργία ινών πολυαιθυλενίου και αρχικά σε ερευνητικό επίπεδο θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τον κατάλληλο προσανατολισμό των μοριακών αλυσίδων στην διεύθυνση της ίνας.

Στην συνέχεια, μετά από πολλές μελέτες για τις διάφορες τεχνικές παραγωγής τους η πλέον διαδεδομένη σήμερα είναι η ινοποίηση πήγματος πολυαιθυλενίου με μοριακό βάρος εξαιρετικά υψηλό (*UHMWPE*). Η παραπάνω διαδικασία, έχει ως αποτέλεσμα ίνες που διαθέτουν πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας (*UHMPE*) και ίνες πολύ υψηλής αντοχής (*UHSPE*).

Αρχικά, οι ίνες *PE* σε αντίθεση με άλλα μέσα ενίσχυσης παρουσιάζουν πολλά και ιδιαίτερος σημαντικά πλεονεκτήματα. Έχουν το χαρακτηριστικό να συνδυάζουν την μικρή πυκνότητα που διαθέτουν με την εξαιρετικά υψηλή αντοχή και το πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σε σύνθετα που το βάρος αποτελεί κρίσιμη ιδιότητα. Παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε διάφορους διαλύτες και ενώσεις καθώς και υψηλή αντοχή στην υγρασία και στο νερό.

Τέλος, από την χρήση τους στα σύνθετα υλικά προκύπτουν κάποια προβλήματα τα οποία συνδέονται άμεσα με την ανισοτροπία των ινών πολυαιθυλενίου στις μηχανικές αντοχές. Αυτό έχει ως συνέπεια, να μην υπάρχει καλή απόδοση σε περιπτώσεις σύνθετης φόρτισης καθώς και με την κακή συνοχή με τις πολυμερικές μήτρες, που είναι αποτέλεσμα του αδρανή χαρακτήρα του πολυαιθυλενίου και στον άπολο.

**Πίνακας 2.4:** Σύγκριση ιδιοτήτων υψηλής απόδοσης.<sup>48</sup>

Ιδιότητα	Ίνες	Kevlar 49	Ίνες Άνθρακα	E - Γυαλί
Πυκνότητα (g / cm <sup>3</sup> )	0,96	1,45	1,78	2,55
Αντοχή σε εφελκυσμό (Gra)	2,7	2,7	3,4	2
Ειδικό μέτρο ελαστικότητας (gr / den)	1000	940	1500	310
Επιμήκυνση σε θραύση (%)	3,0 - 3,5	1,9	1,4	2,0

## 2.2.5 Βιολογικές ίνες

### 2.2.5.1 Φυτικές ίνες

Οι φυτικές ίνες είναι μια διαφορετική λύση σε σχέση με τις κοινές συνθετικές ίνες όπως οι ίνες άνθρακα, αραμιδίου ή γυαλιού λόγω της μικρής πυκνότητας, των καλών μηχανικών ιδιοτήτων και την αφθονίας τους στο περιβάλλον. Τα ινώδη φυτά παράγουν συνήθως μακριές ίνες και οι ίνες που προκύπτουν από τα φυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες.

Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Ο βλαστός του φυτού
- Τα φύλλα
- Οι σπόροι
- Οι ίνες ξύλου



Οι πιο σημαντικές και οι πιο διαδεδομένες όσον αφορά την ενίσχυση στα πολυμερή είναι οι ίνες από το βλαστό του φυτού. Υπάρχουν πλεονεκτήματα αρκετά όπως η μικρή κατανάλωση ενέργειας για την παραγωγή, την καλλιέργεια, την συγκομιδή και το διαχωρισμό των ινών σε σχέση με τις συνθετικές ίνες. Όμως, υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα στην χρήση τους ως ενίσχυση, λόγω του ότι έχουν μικρή αντοχή σε μικρόβια, χαμηλή θερμική σταθερότητα και μεγάλη απορρόφηση υγρασίας.

Ωστόσο, το χαμηλό τους κόστος σε σχέση με την βιοδιασπασή τους και την ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια της οικολογικής συνείδησης είναι κάποιοι παράγοντες που οδηγούν την αποδοχή τους από τις βιομηχανίες όπως τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Για παράδειγμα, η Mercedes-Benz χρησιμοποιεί τις ίνες του λιναριού, της κάναβης, της ίνες αγαύης και της ινδικής καρύδας με στόχο την μείωση του κόστους της παραγωγής και στην συνέχεια το βάρος των αυτοκινήτων.

#### **2.2.5.2 Ίνες Κενάφ**

Αρχικά, οι ίνες κενάφ βρίσκονται κατά κύριο λόγο στο φλοιό του φυτού σε ποσοστό 40%. Το κυτταρικό τοίχωμα είναι παχύ και ο πολτός του χαρτιού που παράγεται έχει ποιότητα σχεδόν ίδια με αυτήν σκληρού ξύλου. Επίσης, το μέτρο ελαστικότητας καθώς η αντοχή τους κατά την διαδικασία του εφελκυσμού διαφέρουν και εξαρτώνται από το είδος των ινών, τον προσανατολισμό τους (τυχαίας ή μιας διεύθυνσης), την μορφή (ίνα ή ύφασμα) καθώς και από το είδος της μήτρας.

Οι ίνες κενάφ έχουν πολλές εφαρμογές όπως την παραγωγή απορροφητικών και μονωτικών υλικών, ξύλου καθώς και την παραγωγή πλαστικών σύνθετων υλικών με την ανάμειξη τους με ρητίνες. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή μερών των αυτοκινήτων.

### 2.2.5.3 Ίνες Bamboo

Οι ίνες Bamboo προκύπτουν από τον πολτό των φυτών Bamboo. Χρησιμοποιούνται για την παραγωγή επίπλων υφασμάτων και χαρτιού. Οι ίνες αποτελούνται από κυτταρίνη και λιγνίτη σε ποσοστό 60% και 25% αντίστοιχα.

Επιπροσθέτως, οι ίνες Bamboo χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά και κυρίως στα βιοπολυμερή. Τέλος, η συλλογή των ινών γίνεται με μια ιδιαίτερη διαδικασία κατά την οποία γίνεται η εκχύλιση τους με μηχανικό βελονισμό και ξύσιμο ή μέσω της έκρηξης ατμού.

### 2.2.5.4 Ίνες Ξύλου

Τα ξύλα στο εμπόριο διακρίνονται σε δυο κατηγορίες :

- Μαλακά ξύλα (έλατο, κυπαρίσσι, πεύκο, κέδρος κ.α)
- Σκληρά ξύλα (βελανιδιά, καρυδιά, οξιά κ.α)

Ο όρος 'μαλακό' και αντίστοιχα 'σκληρό' ξύλο προέκυψε γιατί συνήθως στα σκληρά ξύλα έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα από τα μαλακά. Στα σύνθετα πολυμερή και οι δύο κατηγορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως ενιαίες ίνες με μεγαλύτερες αναλογίες είτε ως δέσμες ινών σε μικρότερες αναλογίες.

Επίσης, η αντοχή των σύνθετων υλικών που έχουν προκύψει από ίνες ξύλου επηρεάζεται από το μεγεθών των ινών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, να χρησιμοποιούνται μικροσκοπικές ίνες για τον λόγο ότι η ειδική επιφάνεια αυξάνεται και επιτυγχάνουμε μια ομοιόμορφη κατανομή.

Επακόλουθα, τα προϊόντα ξύλου-πλαστικού WPC(Wood Plastic Composites), περιλαμβάνουν ένα μεγάλο μέρος σύνθετων υλικών που αποτελούνται από τα συνηθισμένα ή τα ανακυκλώμενα θερμοπλαστικά και σε διάφορα ποσοστά λιγνινοκυτταρινούχα υλικά. Ένα πολύ σημαντικό κριτήριο για την κατάλληλη επιλογή του θερμοπλαστικού υλικού με στόχο την παραγωγή των WPC είναι η θερμοκρασία με την οποία θα επεξεργαστεί που πρέπει να είναι μικρότερη των 200°C έτσι ώστε να μην επηρεάζονται τα

λιγνινοκυτταρινούχα υλικά. Έτσι, τα πιο διαδεδομένα πλαστικά είναι το πολυπροπυλένιο (PP) , το πολυαιθυλένιο υψηλής και χαμηλής πυκνότητας (HDPE,LDPE), το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυστυρένιο (PS).

Είναι γνωστό ότι, στην Ευρώπη χρησιμοποιείται το πολυπροπυλένιο σε αντίθεση με τον υπόλοιπο κόσμο όπου εκεί χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές το πολυαιθυλένιο.

Γενικότερα, ο συνδυασμός του πλαστικού και του ξύλου οδηγεί στην παραγωγή προϊόντων με ιδιαίτερες φυσικές ιδιότητες. Το ξύλο προσδίδει στο υλικό σκληρότητα, θερμική σταθερότητα και ανθεκτικότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία και σε συνδυασμό με το πλαστικό προσφέρει προστασία από την υγρασία και την αποσύνθεση.

Τα WPC (Wood Plastic Composites) χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές λόγω των μηχανικών και των φυσικών τους ιδιοτήτων όπως είναι η αντοχή, η σκληρότητα, η πυκνότητα και το χρώμα. Τέλος, μερικές από αυτές τις εφαρμογές είναι:

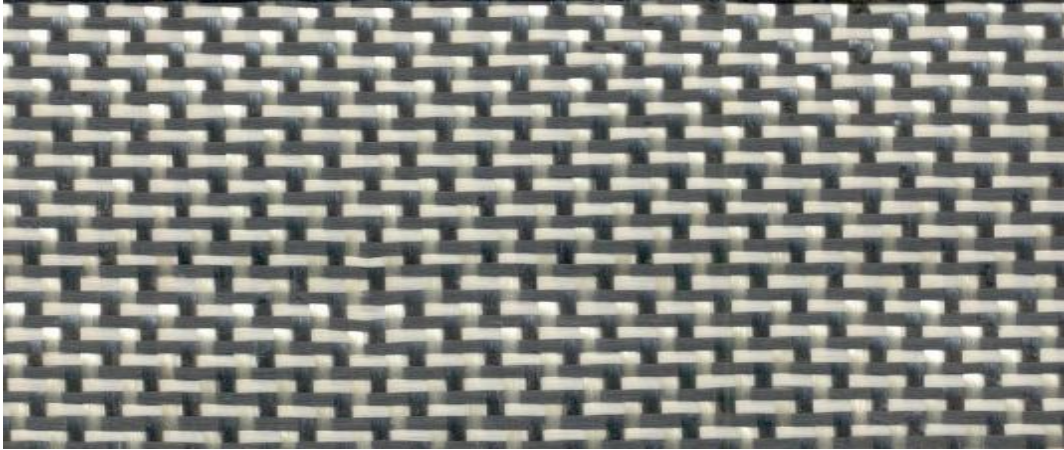
- Στην αυτοκινητοβιομηχανία, η οποία χρησιμοποιεί το ειδικό βάρος των WPC (Wood Plastic Composites) σχετίζοντάς τα με τα ενισχυμένα με ανόργανες ουσίες προϊόντα.
- Τα οικιακά προϊόντα που παρόλο μπορούν να έχουν την μορφή του ξύλου μπορούν να κατεργαστούν όπως τα πλαστικά.
- Σε κατασκευές δομικές, όπως σκεπές στις οποίες παρέχουν την ξύλινη εμφάνιση αλλά έχουν καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με τα συνηθισμένα πλαστικά.

#### **2.2.5.5 Υφάσματα από διάφορες ίνες**

##### **Ύφασμα Βέκτραν V200T2**

Το ύφασμα Βέκτραν έχει εξαιρετικές ιδιότητες που συνήθως είναι πολύ καλύτερες από αυτές του αραμιδίου (Βλέπε πίνακα 2). Αξίζει να σημειωθεί ότι,

το έχει την δυνατότητα να αντικαταστήσει υφάσματα όπως ανθρακονημάτων , αραμιδίου ή υδριβικά.<sup>48</sup>



Εικόνα 2.7 : Ύφασμα Βέκτραν.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος

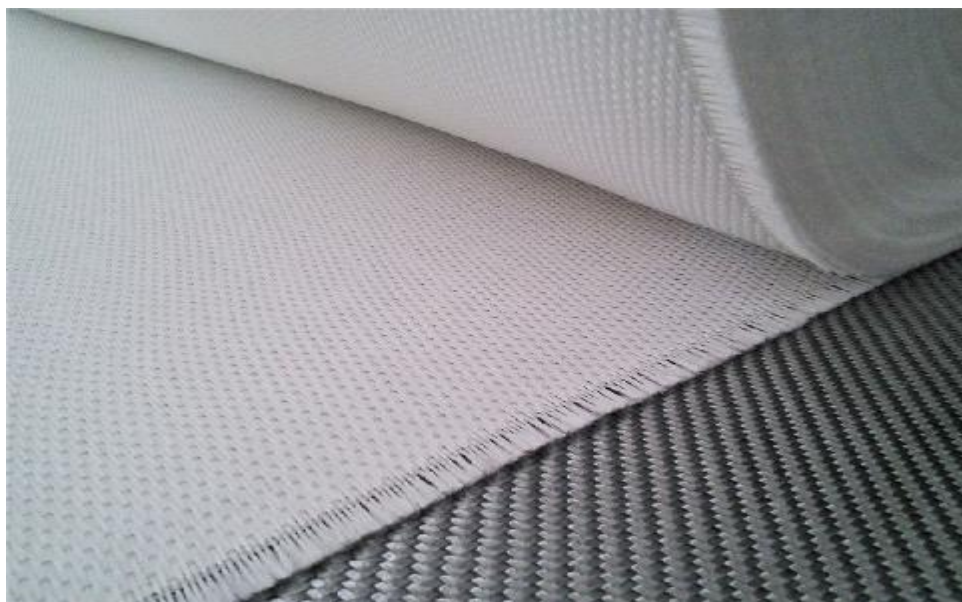
Πίνακας 2.5 : Χαρακτηριστικά του υφάσματος Βέκτραν<sup>48</sup>

<b>Βάρος</b>	<i>200 gr/τεμ</i>
<b>Ύφανση</b>	<i>Τουίλ 2x2</i>
<b>Στημόνι</b>	<i>Ίνα βέκτραν φυσικού χρώματος 1670 dtex 25% , Ίνα βέκτραν μαύρου χρώματος 1670 dtex 25% , 6 κλωστές ανά εκατοστό</i>
<b>Υφάδι</b>	<i>Ίνα βέκτραν φυσικού χρώματος 1670 dtex 25% , Ίνα βέκτραν μαύρου χρώματος 1670 dtex 25% , 6 κλωστές ανά εκατοστό</i>

**Πίνακας 2.6 :** Μηχανικές ιδιότητες της ίνας Βέκτραν.<sup>48</sup>

<b>Αντοχή σε εφελκυσμό</b>	23 - 26 g/denier ( 412-465 ksi)
<b>Μέτρο ελαστικότητας</b>	525 - 585 g/denier ( 9,4 - 10,5 Msi)
<b>Μήκυνση θραύσης</b>	3,3 % - 3,7 %

### Υφασμα Innegra I200s8



**Εικόνα 2.8 :** Ύφασμα Innegra.<sup>48</sup>

**Πίνακας 2.7 :** Χαρακτηριστικά του υφάσματος *Innegra*.<sup>48</sup>

<b>Πλάτος</b>	1.25 m
<b>Βάρος</b>	200 gr/τεμ
<b>Ύφανση</b>	Σατέν 8H
<b>Στημόνι</b>	Ίνα <i>Innegra S940</i> , 53% , 9.7 κλωστές / cm
<b>Υφάδι</b>	Ίνα <i>Innegra S940</i> , 47% , 8.7 κλωστές / cm

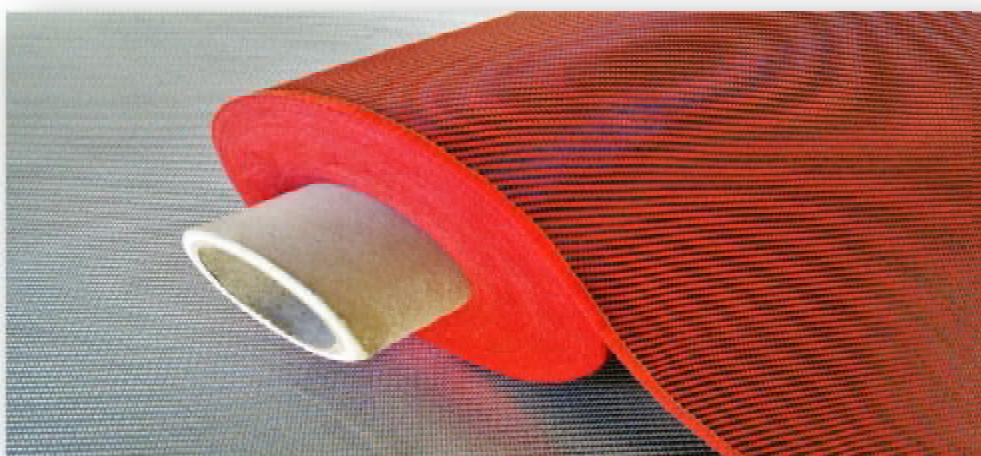
**Πίνακας 2.8 :** Μηχανικές ιδιότητες του υφάσματος *Innegra*.<sup>48</sup>

<b>Αντοχή σε εφελκυσμό (gF / denier )</b>	9
<b>Μέτρο ελαστικότητας ( MPa )</b>	14,828
<b>Μήκυνση θραύσης ( % )</b>	9,5

### **Ύφασμα Diolen P200Tr**

Το συγκεκριμένο ύφασμα αποτελείται από ένα κόκκινο / μαύρο λαμπερό χρωματιστό ύφασμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν απομίμηση ανθρακοϋφασμάτων – κέβλαρ. Ακόμη, έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί

στο πίσω ή στο μπροστά μέρος από προϊόντα για μείωση του κόστους των υλικών.<sup>48</sup>



**Εικόνα 2.9:** Υφασμα Diolen.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος

**Πίνακας 2.9:** Χαρακτηριστικά του υφάσματος Diolen.<sup>48</sup>

<b>Πλάτος</b>	1.20 m
<b>Βάρος</b>	200 gr/τεμ
<b>Ύφανση</b>	Τουίλ 2x2
<b>Στημόνι</b>	Ίνα Diolen 164S (μαύρη) , 50% , 7 κλωστές / cm
<b>Υφάδι</b>	Ίνα Diolen 164S (κόκκινη) , 50% , 7 κλωστές / cm

## Ύφασμα γεμίματος P120

Το ύφασμα γεμίματος μοιάζει με ύφασμα αναπνοής και κατά την χρήση σου δίνει την δυνατότητα της αύξησης του όγκου σε στρώματα στεγνών υφασμάτων ή προεμπροτισμένων και για την μείωση του κόστους κατασκευής. Το κάθε στρώμα προσφέρει περίπου 0,55 mm πάχος σε υποπίεση. Αξίζει να σημειωθεί ότι , το μαύρο χρώμα που διαθέτει αποτελεί ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό αφού είναι σχεδόν άρατο ανάμεσα στα άλλα στρώματα των ανθρακούφασμάτων.<sup>48</sup>



**Εικόνα 2.10 :** Ύφασμα γεμίματος.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος:

**Πίνακας 2.10 :** Χαρακτηριστικά του υφάσματος γεμίματος.<sup>48</sup>

ΠΛΑΤΟΣ	1.50m
ΒΑΡΟΣ	120 mm /τεμ
ΥΦΑΝΣΗ	ΜΗ ΥΦΑΝΤΟ
ΠΑΧΟΣ ΣΕ ΥΠΟΠΙΕΣΗ	0.55 mm
ΤΥΠΟΣ ΥΛΙΚΟΥ	ΠΟΛΥΕΣΤΕΡ



## Υαλοϋφάσματα αλουμινίου GA290T2

Το συγκεκριμένο ύφασμα είναι ιδιαίτερα απαλό και λαμπερό. Διαθέτει επικάλυψη αλουμινίου και βαθιά τρισδιάστατη όψη.<sup>48</sup>



**Εικόνα 2.11:** Υαλοϋφάσμα αλουμινίου.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος

**Πίνακας 2.11 :** Χαρακτηριστικά του υαλοϋφάσματος αλουμινίου.<sup>48</sup>

ΠΛΑΤΟΣ	1.00
ΒΑΡΟΣ	190 mm /τεμ
ΥΦΑΝΣΗ	ΤΟΥΙΛ 2Χ2
ΣΤΗΜΟΝΙ	EC9 68 X 3 tex ίνα, 50 %7 ΚΛΩΣΤΕΣ / cm
ΥΦΑΔΙ	EC11 204 tex ίνα, 50 %7 ΚΛΩΣΤΕΣ / cm

## Βαλλιστικό ύφασμα αραμιδίου K468P

Το βαλλιστικό ύφασμα αραμιδίου είναι ένα ύφασμα κατασκευασμένο ειδικά για βαλλιστική χρήση. Χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη αντοχή στην κρούση, στην υπεριώδη ακτινοβολία, στην διάβρωση και διαθέτει και υψηλό μέτρο ελαστικότητας.<sup>48</sup>



Εικόνα 2.12 : Βαλλιστικό ύφασμα αραμιδίου.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος

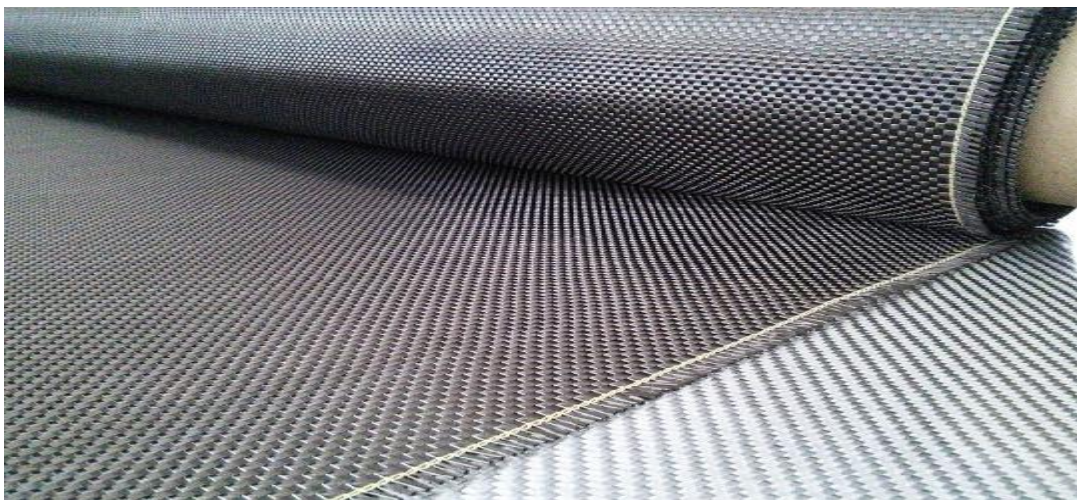
Πίνακας 2.12 : Χαρακτηριστικά του Βαλλιστικού υφάσματος αραμιδίου.<sup>48</sup>

ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΠΛΑΤΟΙ	1.12 m
ΒΑΡΟΣ	460 gr / τεμ
ΥΦΑΝΣΗ	ΑΠΛΗ
ΣΤΗΜΟΝΙ	ΪΝΑ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ 3300dtex, 50%, 6.7 κλωστες / cm
ΥΦΑΔΙ	ΪΝΑ ΑΡΑΜΙΔΙΟΥ 3300dtex, 50%, 6.7 κλωστες / cm

**Πίνακας 2.13:** Μηχανικές ιδιότητες Βαλλιστικού υφάσματος αραμιδίου.<sup>48</sup>

<b>Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)</b>	2863
<b>Μέτρο ελαστικότητας (GPa)</b>	67
<b>Μήκυνση θραύσης (%)</b>	3,7
<b>Βαλλιστικό αποτέλεσμα (V - 50 , clay backed)</b>	44 mag , swc, 16 layers, 474 m/sec

### **Ανθρακούφασμα με σύρμα CM300P**



**Εικόνα 2.13 :** Ανθρακούφασμα με σύρμα.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος

**Πίνακας 2.14 :** Χαρακτηριστικά του Ανθρακούφασματος με σύρμα.<sup>48</sup>

Πλάτος	1.00 m
Βάρος	300 gr/τεμ
Ύφανση	Απλή
Στημόνι	Ανθρακόνημα HS 6K, 50%, 4.1 κλωστές / εκατοστό
Υφάδι	Ανθρακόνημα HS 3K + σύρμα από αλουμίνιο και τιτάνιο, 50%, 4.1+4.1=8.2 κλωστές / εκατοστό

### Ύφασμα Zylon Z300T2



Εικόνα 2.14 : Ύφασμα Zylon.<sup>48</sup>

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του υφάσματος

**Πίνακας 2.14 :** Χαρακτηριστικά του υφάσματος Zylon.<sup>48</sup>

<b>Πλάτος</b>	1.30 m
<b>Βάρος</b>	300 gr/τεμ
<b>Υφανση</b>	Τουίλ 2Χ2
<b>Στημόνι</b>	1να Zylon HM, 50%, 9.2 κλωστές / cm
<b>Υφάδι</b>	1να Zylon HM, 50%, 9.2 κλωστές / cm

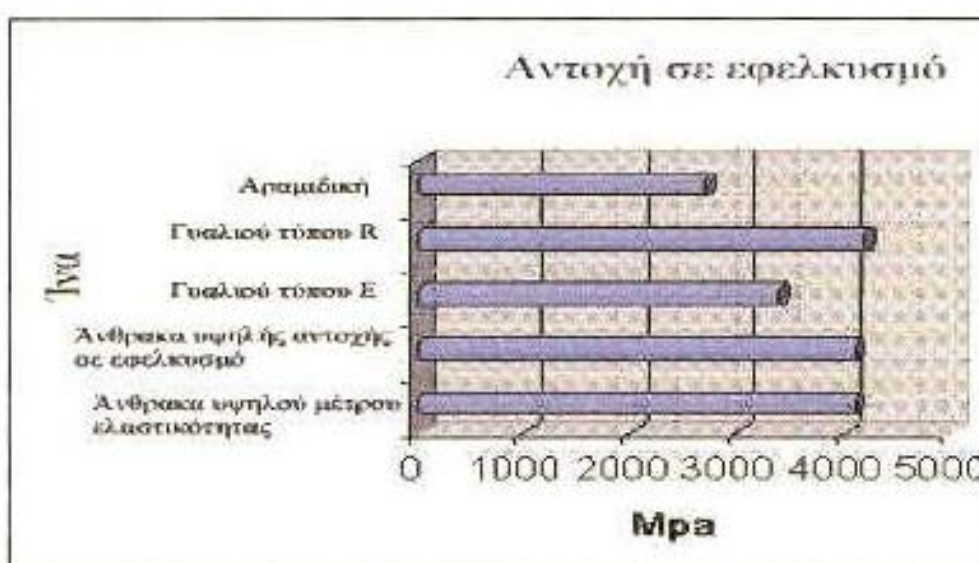
**Πίνακας 2.15 :** Μηχανικές ιδιότητες υφάσματος Zylon.<sup>48</sup>

<b>Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)</b>	5800
<b>Μέτρο ελαστικότητας (Gra)</b>	270
<b>Μήκυνση θραύσης (%)</b>	2,5

## 2.3 Σύγκριση των μέσων ενίσχυσης

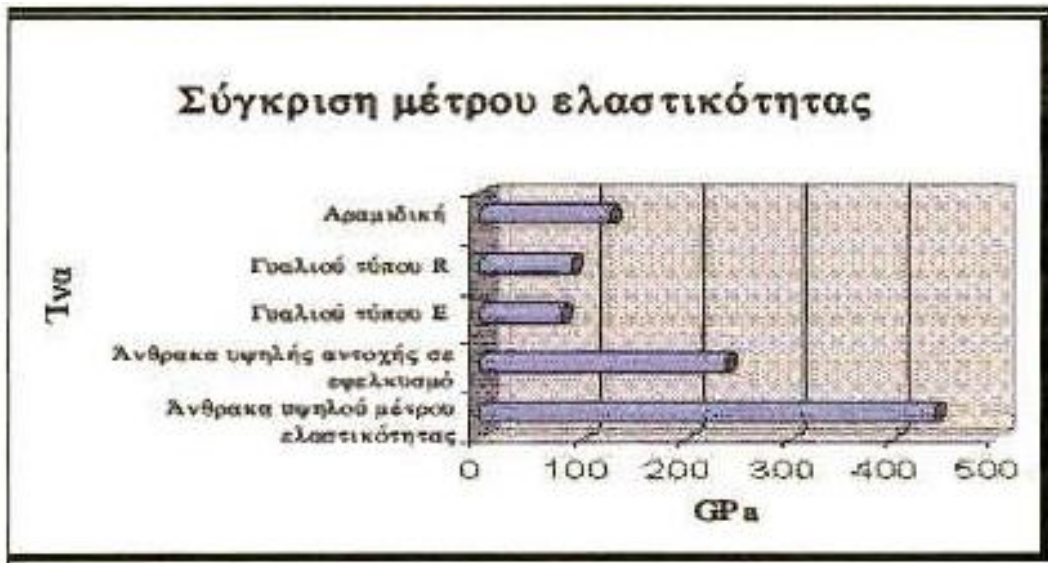
Στην συνέχεια θα κάνουμε μια σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων ινών. Αρχικά, θα εξετάσουμε την αντοχή των ινών και το μέτρο ελαστικότητας κατά την διαδικασία του εφελκυσμού όπως και το κόστος τους.

Στο *Σχήμα 2.2* παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκρισης από το οποίο προκύπτει το συμπέρασμα ότι η ίνα γυαλιού τύπου R έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό αν και έχει πολύ μικρή διαφορά από τις ίνες του άνθρακα.<sup>46</sup>



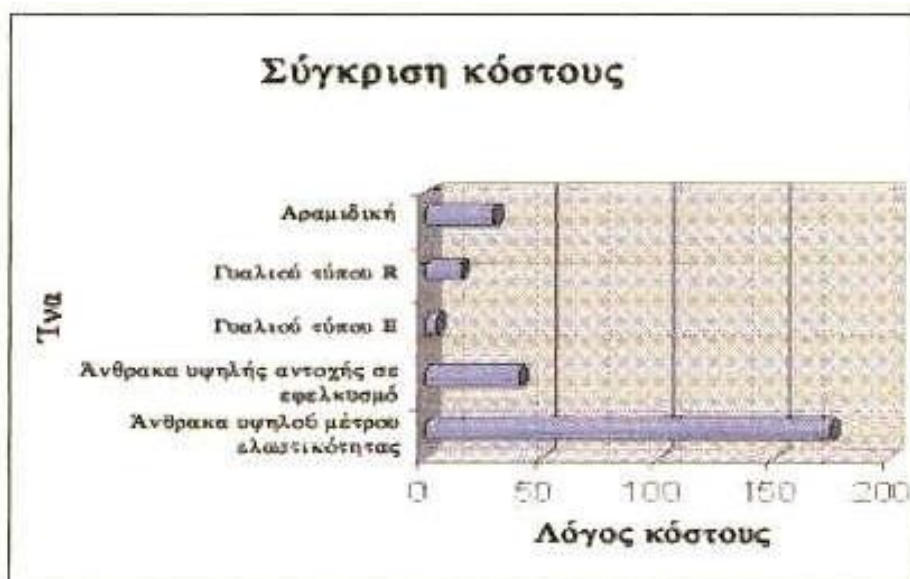
**Σχήμα 2.2:** Συγκριτικό διάγραμμα τύπων ινών σε αντοχή σε εφελκυσμό.<sup>46</sup>

Στην συνέχεια στο *Σχήμα 2.3* διακρίνεται με ευκολία ότι οι ίνες άνθρακα διαθέτουν με διαφορά υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες ίνες. Αυτό εξηγεί το γεγονός, ότι οι ίνες άνθρακα χρησιμοποιούνται κατά κόρων στην αεροδιαστημική βιομηχανία.



**Σχήμα 2.3:** Συγκριτικό διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας και τύπων μέσων ενίσχυσης.<sup>46</sup>

Ένας σημαντικός παράγοντας όσον αφορά την χρησιμότητα τους στα σύνθετα ως μέσα ενίσχυσης είναι το κόστος τους. Όπως φαίνεται το Σχήμα 2.4, η ίνα γυαλιού τύπου E είναι η ίνα με το μικρότερο κόστος με αποτέλεσμα να είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιημένη. Τέλος, οι ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας φαίνεται να είναι οι ακριβότερες σε κόστος.



**Σχήμα 2.4:** Συγκριτικό διάγραμμα κόστους διαφόρων τύπων ινών.<sup>46</sup>

Πίνακας 2.16 Εμπορικές ίνες ενίσχυσης.<sup>46</sup>

Ίνα	Τυπική διάμετρος (μm)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Παραμόρφωση θραύσης (%)	Συντελεστή θερμικής διαστολής (10 / C)	Λόγος Poisson
Γυαλί						
E - glass	10	72.4	3.45	4.8	5	0.2
S - glass	10	86.9	4.30	5.0	2.9	0.22
Άνθρακας PAN						
T - 300	7	231	3.65	1.4	-0.6	0.2
AS - 1	8	228	3.10	1.32		
AS - 4	7	248	4.07	1.65	-0.75	
T - 40	5.1	290	5.65	1.8		
IM - 7	5	301	5.31	1.81		
HMS - 4	8	345	2.48	0.7		
GY - 70	8.4	483	1.52	0.38		
Άνθρακας πίσσας						
P - 55	10	380	1.90	0.5	-1.3	0.35
P - 100	10	758	2.41	0.32	-1.45	
Αραμίδιο						
Kevlar 49	11.9	131	3.62	2.8	-2	0.35
Kevlar 149		179	3.45	1.9		
Technora		70	3.0	4.4	-6	
Πολυαιθυλένιο εκτεταμένης αλυσίδας						
Spectra 900	38	117	2.59	3.5	5	0.2
Spectra 1000	27	172	3.0	2.7		
Βόριο	140	393	3.1			
SiC						
Monofilament	140	400	3.44	0.86	1.5	
Nicalon (multifilamen)	14.5	196	2.75	1.4		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>						
FiberFP	20	379	1.90	0.4	8.3	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - SiO <sub>3</sub>						
Fiberfrax (ασυνεχής)	2-12	103	1.03 - 1.72			



## 2.4 Μήτρα

Η συγκόλληση των ινών μεταξύ τους γίνεται με την χρήση της μήτρας. Η μήτρα είναι ένα θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές, η οποία συνδέει τις ίνες μαζί και επενεργεί σαν μέσον μέσω του οποίου μια τάση εξωτερικά εφαρμοζόμενη μεταφέρεται και διανέμεται στις ίνες. Επίσης, η μήτρα παίζει σημαντικό ρόλο στην προστασία των ινών από οποιαδήποτε βλάβη στην επιφάνειά τους ως αποτέλεσμα της μηχανικής εκτριβής ή χημικών αντιδράσεων με το περιβάλλον. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό της είναι ότι διαχωρίζεται τις ίνες με αποτέλεσμα της σχετικής μαλακότητας και της πλαστικότητάς της και λειτουργεί ως εμπόδιο στην διάδοση των ψαθυρών ρωγμών από ίνα σε ίνα.

Στο εμπόριο, συναντάμε σύνθετα υλικά με διαφορετικούς τύπους μήτρας που χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες <sup>17-24,47</sup>

1. Σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας
2. Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας
3. Σύνθετα υλικά κεραμικής μήτρας

### 2.4.1 Οργανικές μήτρες

Τα σύνθετα υλικά πολυμερούς μήτρας (PMC) διαθέτουν ως μήτρα ένα πολυμερές και ως μέσο ενίσχυσης ίνες ή κόκκους. Τα συγκεκριμένα υλικά, έχουν ευρεία χρήση σε πολλές εφαρμογές λόγω του ότι έχουν καλές ιδιότητες σε θερμοκρασία δωματίου και χαμηλό κόστος όσον αφορά την κατασκευή τους. Οι οργανικές μήτρες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες <sup>24</sup>:

- Θερμοσκληρυνόμενες
- Θερμοπλαστικές
- Ελαστομερείς

## 2.4.2 Θερμοσκληρυνόμενες οργανικές μήτρες

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή διακρίνονται για τον υψηλό σημείο τήξης τους, την θερμική τους σταθερότητα, υψηλή ακαμψία, μικρή ευφλεκτότητα και σκληρότητα στην επιφάνεια του υλικού. Οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες, επειδή διαθέτουν μια τρισδιάστατη δομή πλέγματος από πρωτογενείς ισχυρούς δεσμούς μεταξύ των μοριακών αλυσίδων, η χρήση τους είναι απαραίτητη σε περιπτώσεις όπου χρειαζόμαστε πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες.

Αξίζει να σημειωθεί, ότι οι μήτρες αυτές όταν η επεξεργασία τους φτάσει στο τελευταίο της στάδιο υπό την επίδραση της θερμοκρασίας σχηματίζουν ένα δικτύωμα το οποίο αποτελείται από σταυρόδεσμούς. Οι σταυρόδεσμοι αυτοί προκύπτουν από την ανάμειξη ρητίνης και σκληρυντή όπου με αυτόν τον τρόπο παίρνει την μορφή σκληρού, άκαμπτου και ψαθυρού στερεού.

Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής είναι ότι εμποδίζεται η πλαστική παραμόρφωση και τοφαινόμενο του ερπυσμού. Επίσης, τα υλικά αυτά έχουν την ικανότητα με την αύξηση της θερμοκρασίας να γίνονται πιο σκληρά και πιο ψαθυρά. Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερικά υλικά, παίρνουν μορφή κατά την πρώτη τους θέρμανση δηλαδή όταν πολυμεριστούν με την χρήση θερμότητας και πίεσης μορφοποιούνται και η κατάστασή τους είναι μη ανατρέψιμη<sup>3,6,7</sup>.

Οι θερμοσκληρυνόμενες οργανικές μήτρες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- 1. Εποξειδικές ρητίνες:** Οι εποξειδικές ρητίνες υπερέχουν από τους άλλους τύπους μήτρας λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους όπως είναι η υψηλή αντοχή τους, η ανθεκτικότητα σε κόπωση και στην χημική διάβρωση. Επίσης διαθέτουν μεγάλο συντελεστή ιξώδους σε σχέση με άλλες ρητίνες. Τέλος, οι εποξειδικές ρητίνες έχουν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα όπως το μεγάλο διάστημα που χρειάζονται έτσι ώστε να αναπτύξουν πλήρως τις μηχανικές τους ιδιότητες και το μεγάλο κόστος.

**2. Πολυεστερικές ρητίνες:** Οι πολυεστέρες παράγονται από την αντίδραση της γλυκόλης , μέσω μια συγκεκριμένης εξώθερμης χημικής αντίδρασης που αυτό έχει ως αποτέλεσμα να συνιστάται από τους κατασκευαστές προσοχή στην χρήση της ποσότητας των αντιδρώντων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης του φύλλου πολυεστέρα. Τέλος, οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν ορισμένα μειονεκτήματα όπως είναι η μικρή αντοχή στην κόπωση, η χαμηλή αντίσταση στην υποβάθμισή τους από οργανικές βάσεις και σε νερό υψηλής θερμοκρασίας και λόγω της σύστασής τους η δυσάρεστη οσμή.

**3. Βινυλεστερικές ρητίνες:** Είναι ρητίνες οι οποίες παράγονται από αλυσιδωτές αντιδράσεις ενός εποξειδικού πολυμερούς με ακρυλικές ενώσεις. Με αυτόν τον τρόπο προσδίδονται ορισμένα χαρακτηριστικά όπως είναι η ευκαμψία , η σκληρότητα και η καλύτερη αντοχή σε κόπωση σε σχέση με τις πολυεστερικές. Ωστόσο, όπως και οι πολυεστερικές ρητίνες έχουν δυσάρεστη οσμή λόγω της χημικής τους σύστασης. Τέλος, το κόστος τους βρίσκεται μεταξύ του κόστους των δυο παραπάνω ρητινών.

**Πίνακας 2.16:** Μηχανικές ιδιότητες ρητινών.<sup>46</sup>

Είδος ρητίνης	Εποξειδική ρητίνη	Πολυεστερική ρητίνη	Βινυλεστερική ρητίνη
Εφελκυστική αντοχή (Mpa)	55 – 130	35 – 104	73 – 81
Μέτρο ελαστικότητας (Gra)	2,0 – 4,5	2,1 – 4,1	3,0 – 3,6
Επιμήκυνση θραύσης (%)	4,0 – 14,0	< 5,0	3,5 – 5,5
Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	1,20 – 1,30	1,10 – 1,46	1,12 – 1,32

## **i. Θερμοπλαστικές οργανικές μήτρες**

Θερμοπλαστικά είναι τα υλικά τα οποία με την επιβολή θερμότητας και πίεσης γίνονται εύπλαστα και ρέουν. Αρχικά, είναι πολυμερή με γραμμικές αλυσίδες οι οποίες συνδέονται με ασθενείς δυνάμεις Van der Waals και λύονται με την αύξηση της θερμοκρασίας κάνοντας το πολυμερές μαλακόσε υψηλότερες θερμοκρασίες. Αυτό συμβαίνει γιατί τα θερμοπλαστικά πολυμερή με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνεται ταυτόχρονα και η κίνηση των μακρομορίων ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Τα περισσότερα θερμοπλαστικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες όπως μερικά παραδείγματα είναι το πολυστυρένιο (HIPS) , το πολυμεθακρυλικό μεθύλιο (PMMA), το συμπολιμερές ακρυλονιτριλίου-βουταδιενίου-στυρενίου (ABS), το πολυπροπυλένιο (PP) και το πολυαιθυλένιο (PE). Οι συγκεκριμένες μήτρες δίνουν στα υλικά πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες όπως υψηλή αντοχή και ακαμψία και αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγάλο μοριακό βάρος τους. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των θερμοπλαστικών μητρών είναι το μεγάλο ιξώδες που έχουν πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει δυσκολία όσον αφορά τον εμποτισμό των ινών. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα όπως η ευκολία παραγωγής τους με συγκεκριμένο τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον. Τέλος, άλλο εάν σημαντικό πλεονέκτημα είναι η ευκολία στην συγκόλληση κομματιών μεταξύ τους με θέρμανση<sup>24</sup>.

## **ii. Μεταλλικές Μήτρες**

Οι μεταλλικές μήτρες χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υλικών που θα έχουν αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτά τα υλικά είναι κατά κύριο λόγο το αλουμίνιο, το τιτάνιο και το νικέλιο. Έχουν το χαρακτηριστικό να προσδίδουν στο υλικό πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τις οργανικές μήτρες. Οι μεταλλικές μήτρες περιορίζουν την ευαισθησία του υλικού στους διαλύτες και αυξάνουν τα όρια της θερμοκρασίας χρήσης τους

σε σχέση με άλλα υλικά. Επίσης, βελτιώνουν την ακαμψία, αυξάνουν το μέτρο ελαστικότητας, την θερμοηλεκτρική αγωγιμότητα των παραγόμενων υλικών. Συγχρόνως αυξάνουν και το μέτρο ελαστικότητας και παρέχουν ευκολία στην συγκόλληση των τεμαχίων μεταξύ τους. Υπάρχουν όμως και κάποια μειονεκτήματα όπου οι μήτρες αυτές μπορούν να οδηγήσουν ευθραυστότητα στις ενώσεις μεταξύ μετάλλου και ίνας με αποτέλεσμα την αποκόλληση ινών. Επιπροσθέτως, τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν έχουν μεγάλη πυκνότητα με αποτέλεσμα το βάρος τους να είναι μεγάλο. Τέλος, λόγω του μεγάλου κόστους η παραγωγή των συγκεκριμένων υλικών είναι δύσκολη<sup>24, 47</sup>

**Πίνακας 2.18:** Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Μεταλλικών Μητρών Έναντι Άλλων.<sup>47</sup>

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Μεγαλύτερη ολκιμότητα και καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.	Μεγαλύτερη πυκνότητα και επομένως μεγαλύτερο βάρος συνολικής κατασκευής.
Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων σε καταπονήσεις ασκούμενες σε διαφορετικές διευθύνσεις από αυτές του προσανατολισμού των ινών.	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου-ίνας που συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από μήτρα που οδηγεί στην μικρορηγμάτωση και θραύση ινών.
Βελτίωση ακαμψίας και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου.	Φαινόμενα διάλυσης ινών στην μήτρα, σε υψηλές θερμοκρασίες.
Μείωση ευαισθησίας του σύνθετου στην παρουσία διαλυτών και διεύρυνση των θερμοκρασιακών ορίων χρήσης του.	Ασυνέχεια καμπύλης εφελκυσμού των σύνθετων υλικών στο όριο διαρροής της μήτρας.
Βελτίωση της θερμικής και ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σύνθετου για ειδικές εφαρμογές.	Δύσκολη παραγωγή υλικού και μεγαλύτερο κόστος.
Ευκολότερη σύνδεση τεμαχίων και του σύνθετου υλικού (συγκόλληση, κόλληση).	Δημιουργία εύθραυστων μεσομεταλλικών ενώσεων στη διεπιφάνεια μετάλλου- ίνας συμβάλλουν στην αποκόλληση ινών από την μήτρα που φέρει μικρορηγμάτωση και θράυση ινών.

### iii. Κεραμικές Μήτρες

Τα κεραμικά υλικά είναι από την φύση τους πιο ανθεκτικά στην οξειδωση και στην υποβάθμιση σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν υψηλή μηχανική αντοχή και μεγάλη ανθεκτικότητα σε θερμοκρασιακές μεταβολές. Με αυτόν τον τρόπο, βελτιώνεται η ολκιμότητα του υλικού και προστατεύεται η ενισχυτική φάση έτσι ώστε να έχουμε καλύτερες ιδιότητες σε περιπτώσεις φόρτιση. Τέλος, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ότι δεν υπάρχει συνάφεια μεταξύ των ινών και της μήτρας λόγω της γραμμικής διαστολής<sup>19,47</sup>.

### iv. Κόλλα

Στο εμπόριο υπάρχουν διαφόρων ειδών κόλλες αλλά η πιο συνηθισμένη είναι η εποξειδική ρητίνη δυο συστατικών. Αρχικά, τοποθετείται μεταξύ του σύνθετου υλικού και του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την συνεχή αλληλεπίδραση μεταξύ τους και την μεταφορά των τάσεων από το ένα στο άλλο. Επιπροσθέτως, υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά που παίζουν σημαντικό ρόλο για την αποτελεσματική και σωστή χρήση της κόλλας τα οποία είναι:

1. Ο χρόνος εργασιμότητας
2. Ο χρόνος μετάπτωσης
3. Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης

Ο χρόνος εργασιμότητας, είναι ο χρόνος που έχουμε στην διάθεσή μας σύμφωνα με τις προδιαγραφές στον οποίο η κόλλα είναι εύκολη ως προς την μεταχείρησή της μέχρι να πολυμεριστεί δηλαδή να σκληρύνει. Για αυτόν τον λόγο, πρέπει να τηρούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις οι οποίες εξαρτώνται από τον τύπο και την ποσότητας της κόλλας καθώς και από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκετε.

Ο χρόνος μετάπτωσης, είναι το διάστημα στο οποίο η κόλλα είναι εύκολα διαχειρίσιμη και διατηρεί τις ιδιότητές της όσων αφορά την κόλληση. Είναι ο χρόνος που πρέπει να γίνει συγκολληθεί ο σπλισμός ενίσχυσης με το σκυρόδεμα.

Τέλος, η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης είναι η θερμοκρασία κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας της κόλλας μειώνεται με γρήγορους ρυθμούς, με αποτέλεσμα να χάνεται όσο περνάει ο χρόνος και η δυνατότητά της για μεταφορά δυνάμεων.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

### 3.1 Θέτοντας το πρόβλημα

Στην εποχή μας, αυξάνεται επιτακτικά η ανάγκη ενίσχυσης των κατασκευών και ειδικότερα των κτιρίων. Οι αιτίες που επιβάλλουν αυτή την προσοχή των σύγχρονων μηχανικών πάνω στη δομική αναβάθμιση είναι αρκετές. Κάποιες από αυτές είναι η γήρανση των υλικών, η αύξηση των απαιτήσεων φόρτισης, οι απαιτήσεις που προκύπτουν από τους νέους κανονισμούς σχεδιασμού αλλά και ο ανεπαρκής σχεδιασμός των κτιρίων, με σκοπό να αντέξουν σε έντονα φυσικά φαινόμενα.

Η αντισεισμική ενίσχυση σε κτίρια κατασκευασμένα από οπλισμένο σκυρόδεμα θεωρείται ένας από τους βασικότερους παράγοντες ενίσχυσης δηλαδή τα κτίρια να γίνουν λιγότερο ευάλωτα κάτω από σεισμικά φορτία. Η πείρα που έχει συλλεχθεί από βλάβες/ αστοχίες που έχουν εμφανιστεί σε κτιριακά τμήματα και καταρρεύσεις κτιρίων, αποδεικνύει ότι παρουσιάζονται τα προβλήματα αυτά σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος κάτω από έντονα σεισμικά φορτία.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι έχει ευρέως παραδεχθεί από την κοινότητα των επιστημόνων και των μηχανικών ότι στις χώρες που είναι επιρρεπής από σεισμούς έως και δύο δεκαετίες πριν, στον κατασκευαστικό σχεδιασμό δεν λαμβάνονταν υπόψη τα πιθανά σεισμικά φορτία. Ως συνέπεια του προαναφερθέντος ήταν τα κτίρια να σχεδιάζονται κυρίως για κατακόρυφα φορτία, με αποτέλεσμα να επιβαρύνονται περισσότερο από έντονος σεισμούς. Κάποιες από τις ελλείψεις που έχουν αυτά τα κτίρια και οι οποίες είναι σε πλήρη αντίθεση με τους αντισεισμικούς κανονισμούς είναι οι ανεπαρκείς λεπτομέρειες όπλισης των μελών του φέροντος οργανισμού, η ανεπάρκεια πλαστιμότητας των μελών σε κρίσιμες περιοχές, για παράδειγμα είναι τα άκρα των υποστυλωμάτων, η ανυπαρξία ικανοτικού σχεδιασμού στους κόμβους δοκού-υποστυλώματος και τέλος η εκκεντρότητα του κέντρου μάζας ως προς το κέντρο δυσκαμψίας σε κάτοψη.

Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό στοιχείο που εξακολουθεί να παραλείπεται στην αξιολόγηση μίας κτιριακής κατασκευής είναι η επιρροή που ασκούν οι



τοιχοπληρώσεις, οι οποίες δεν είναι τμήμα από τα φέροντα στοιχεία της κατασκευής ή δεν συνυπολογίστηκαν και δεν σχεδιάστηκαν κατ' επέκταση στο φέροντα οργανισμό της συνολικής κατασκευής. Κατά την διάρκεια μίας σεισμικής δόνησης οι τοιχοπληρώσεις που επηρεάζουν την αντίδραση του κτιρίου είναι αυτές που έχουν τοποθετηθεί σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος και έχουν δημιουργηθεί μετά τον φέροντα οργανισμό.

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν διεξαχθεί υπό την επίδραση μεγάλων σεισμικών φορτίων – π.χ. Mehrabi et al. 1996, Fardis and Panagiotakos 1997- παρουσία των τοιχοπληρώσεων σε κάποιες περιπτώσεις θεωρείται ότι βοηθάει την απόκριση των κτιρίων σε πλευρικές δράσεις. Τα χαρακτηριστικά, που έχουν παρατηρηθεί ότι είναι ευεργετικά για τις κτηριακές κατασκευές είναι:

- Αρχικά, έχει παρατηρηθεί ότι η ανάπτυξη της πλευρικής δυσκαμψίας συνοδεύεται με παράλληλη μείωση των απαιτήσεων παραμόρφωσης στους ορόφους και στα μέλη του φέροντος οργανισμού.
- Στη συνέχεια, αξίζει να αναφερθεί ότι η βελτίωση της διατμητικής αντοχής των φανωμάτων εντός του επιπέδου, πετυχαίνει και ταυτόχρονη αύξηση της πλευρικής αντοχής στους ορόφους.
- Τέλος, η συμβολή στη ικανότητα κατανάλωσης ενέργειας της κατασκευής μέσω της υστερητικής συμπεριφοράς των τοιχοπληρώσεων σε εντός επιπέδου φόρτισης.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά για να επιτευχθούν χρειάζεται πρώτα να επικρατούν ευνοϊκές συνθήκες ενσφήνωσης της τοιχοποιίας, που βρίσκονται στα περιμετρικά μέλη του πλαισίου. Για να πετύχουν οι ευνοϊκές συνθήκες χρειάζεται ο μηχανικός να έχει αποφύγει τη δημιουργία κενών κατά μήκος της περιμέτρου. Σε κάποιες χώρες, όπως και της Ελλάδας αυτά τα κενά αποφεύγονται με το προσεχτικό σφήνωμα της τοιχοποιίας στη δοκό του πλαισίου.

Ανεξάρτητα των παραπάνω προϋποθέσεων, αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν κάποιες δυσμενείς επιρροές που επηρεάζουν αρνητικά την συμπεριφορά του κτιρίου. Σύμφωνα με μελέτες –Fardis, 2009- αυτές οι δυσμενείς προϋποθέσεις συνοψίζονται αναλυτικά παρακάτω:

- Αρχικά, εμφανίζεται ο κίνδυνος δημιουργίας μαλακού ορόφου, με συνέπεια κάποιος μηχανισμός να ενεργοποιηθεί και να προκληθεί η κατάρρευση του κτιρίου. Για να συμβεί αυτό το σενάριο τότε σημαίνει ότι υπάρχει απώλεια της δομικής ακεραιότητας, η οποία παρατηρείται στο πρώτο όροφο δηλαδή στο ισόγειο. Ως συνέπεια της προαναφερθείσας απώλειας είναι ότι εμφανίζονται πλευρικές παραμορφώσεις στον όροφο αυτό, όπως περιγράφεται αναλυτικά από τον Fardis, 2000 ότι σε πολυώροφα κτίρια υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης βλαβών στο πρώτο όροφο και κατά συνέπεια δημιουργία του μαλακού ορόφου.
- Στη συνέχεια εμφανίζεται ο κίνδυνος ανελαστικών παραμορφώσεων σε μία περιοχή του κτιρίου σε κάτοψη. Αυτό παρατηρείται εξαιτίας της μη συμμετρικής παρουσίας των τοιχοπληρώσεων σε κάτοψη, το οποίο δημιουργεί εκκεντρότητα στο κέντρο μάζας του ως προς το κέντρο δυσκαμψίας. Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα οι ανελαστικές παραμορφώσεις να συγκεντρωθούν σε ένα τμήμα του κτιρίου κάθετα του ύψους, που συμβαίνει όταν οι τοιχοπληρώσεις δεν βρίσκονται συμμετρικά με την όψη.
- Τέλος, εξαιτίας τοπικών φαινομένων που μπορεί να εμφανίζονται στο κτίριο, υπάρχει η πιθανότητα γρήγορης διατμητικής αστοχίας στα υποστυλώματα, τα οποία βρίσκονται σε επαφή με την τοιχοπλήρωση. Αναλυτικότερα, το πρόβλημα επικεντρώνεται στις δύσκαμπτες τοιχοπληρώσεις, οι οποίες εμφανίζουν μεγάλη διατμητική αντοχή και προκαλούν βλάβες σε αδύναμα υποστυλώματα.

Τέλος, συμπεραίνεται ότι ως μέτρο αντιμετώπισης απέναντι σε μεγάλα σεισμικά φορτία είναι οι τυχοπληρώσεις, οι οποίες βελτιώνουν την πλευρική αντοχή και τη δυσκαμψία του κτιρίου. Όμως αξίζει να αναφερθεί ότι παρά τα ευεργετικά πλεονεκτήματα που εμφανίζονται για τις τοιχοπληρώσεις, έχει παρατηρηθεί ότι αυτές είναι που αστοχούν πρώτα σε μία έντονη σεισμική δραστηριότητα, όταν βρίσκονται στο πρώτο όροφο. Επίσης, είναι πιθανόν να εμφανιστεί βλάβη περιμετρικά των μελών του πλαισίου, που αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα σε περιπτώσεις που τα υποστυλώματα μεγάλης

αντοχής και δυσκαμψίας βρίσκονται σε επαφή με δοκούς με μικρή δυσκαμψία και αντοχή.

Με όλα τα παραπάνω είναι χρήσιμο να αναφερθεί η ανάγκη ενίσχυσης των τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος έτσι ώστε:

- Αρχικά, να μετατραπούν σε αξιόπιστα μέλη ανάληψης δυνάμεων της εντός του επιπέδου διέγερσης
- Να βελτιωθεί η πλευρική αντοχή και η δυσκαμψία του κτιρίου σε συγκεκριμένες θέσεις σε κάτοψη
- Να μειωθεί ο κίνδυνος της δημιουργίας μαλακού ορόφου σε πολυώροφα κτίρια
- Τέλος και σημαντικότερο είναι η μείωση της πιθανότητας της κατάρρευσης τους

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι είναι σημαντική η ενίσχυση των τοιχοπληρώσεων σε πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος, με την βοήθεια χρήσης σύνθετων υλικών στοχεύοντας όλων των παραπάνω.

### **3.2 Συστήματα ενίσχυσης**

Η ενίσχυση των δομικών στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα γίνεται με τη βοήθεια δύο τύπων συστημάτων<sup>42</sup>:

1. Με το σύστημα της υγρής εφαρμογής (ή επιτόπου σκλήρυνση της μήτρας)
2. Με το σύστημα των προκατασκευασμένων υλικών (σε αυτή τη περίπτωση η σκλήρυνση της μήτρας γίνεται πριν την εφαρμογή)

Στη συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης των παραπάνω διαδικασιών.

### 3.2.1 Συστήματα υγρής ενίσχυσης

Αρχικά, υπάρχουν τα φύλλα ή υφάσματα, τα οποία αποτελούνται από συνεχείς ίνες μίας διεύθυνσης, χωρίς μήτρα (< ξηρή> κατάσταση). Για να συμβεί η εφαρμογή τους, πρέπει πρώτα από όλα να εφαρμοστεί το <αστάρωμα> στο σκυρόδεμα και έπειτα ο εμποτισμός των ινών με ρητίνη βάσει μιας εκ των εξής μεθόδων<sup>41</sup>:

- Στη πρώτη μέθοδο, οι ίνες τοποθετούνται απευθείας στη ρητίνη, και η ρητίνη με τη σειρά της εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα
- Στη δεύτερη μέθοδο, γίνεται προεμποτισμός των ινών, δηλαδή συμβαίνει επί τόπου στο έργο, όχι όμως πάνω στο υπό ενίσχυση στοιχείο, με ρητίνη και στη συνέχεια γίνεται η επικόλληση

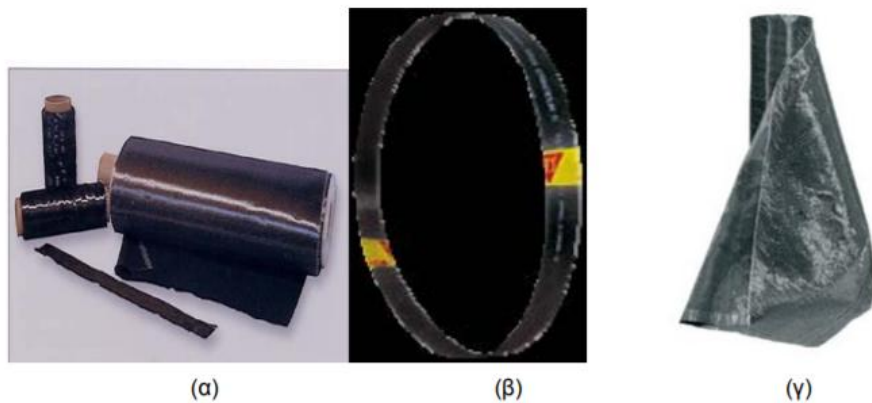
Επιπλέον, εμφανίζονται τα υφάσματα, τα οποία αποτελούνται από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις (για παράδειγμα  $0^{\circ}$  και  $90^{\circ}$  ή  $+45^{\circ}$  σε σχέση με τον άξονα του υπό ενίσχυση μέλους, το οποίο είναι χωρίς μήτρα). Η εφαρμογή αυτής της περίπτωσης γίνεται ακριβώς όπως περιγράφεται στις δύο παραπάνω περιπτώσεις.

Ακόμη, παρουσιάζονται τα φύλλα ή υφάσματα, τα οποία αποτελούνται από συνεχείς ίνες μίας κυρίως διεύθυνσης. Αυτά είναι προεμποτισμένα με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή των οποίων γίνεται με ή χωρίς ρητίνη.

Στη συνέχεια, γίνεται λόγος για τα φύλλα ή υφάσματα, τα οποία αποτελούνται από συνεχείς ίνες σε τουλάχιστον δύο διευθύνσεις, προεμποτισμένα με τη σειρά τους με ρητίνη σε μη σκληρυμένη μορφή. Η εφαρμογή των οποίων γίνεται με ή χωρίς παραπάνω ρητίνη.

Επίσης, επισημαίνονται οι συνεχείς ίνες, οι οποίες δεν έχουν μήτρα, συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος. Το τελευταίο εμποτίζεται με ρητίνη καθώς γίνεται η τύλιξη στο στοιχείο που αποτελείται από σκυρόδεμα.

Τέλος, αναφέρονται οι προεμποτισμένες συνεχείς ίνες, οι οποίες είναι συγκεντρωμένες σε μορφή νήματος, το οποίο με τη σειρά του καθώς τυλίγεται στο στοιχείο που αποτελείται από σκυρόδεμα ενδέχεται να υπάρξει επιπλέον εμποτισμός.



**Εικόνα 3.1:** (α) Ύφασμα σε ρολό και συνεχείς ίνες σε μορφή νήματος, (β) Προκατασκευασμένα ελάσματα σε μορφή ρόλων και (γ) Ύφασμα.<sup>42</sup>

### 3.2.2 Προκατασκευασμένα υλικά

Αρχικά, υπάρχουν τα προκατασκευασμένα ευθύγραμμα υλικά (ελάσματα), στα οποία η επικόλληση γίνεται με τη βοήθεια της ρητίνης. Τα προαναφερθέντα ελάσματα εμφανίζονται στη αγορά με τη μορφή ρολών (κουλούρες) και η παραγωγή τους γίνεται με τη βοήθεια της μεθόδους της εξέλασης ή της μεθόδου της στρωμάτωσης (σε σπάνιες περιπτώσεις). Πιο αναλυτικά, κατά την εξέλαση, οι ίνες είναι κατά κανόνα συνεχείς και παράλληλες στη διεύθυνση των ελασμάτων. Αντιθέτως, στη μέθοδο της στρωμάτωσης, οι ίνες βρίσκονται σε διαφορετικές διευθύνσεις.

Έπειτα, γίνεται αναφορά για τα προκατασκευασμένα κελύφη (shells), μανδύες (jackets) ή γωνίες (angles), στα οποία με τη σειρά τους γίνεται η επικόλληση με τη βοήθεια της ρητίνης.

Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να αναφερθεί ότι το ευρύ κοινό διαλέγει ευκολότερα τα προκατασκευασμένα ελάσματα σε σχέση των υφασμάτων, όταν αυτά προτιμώνται έτσι ώστε να εφαρμοστούν σε επίπεδες επιφάνειες (για παράδειγμα όπως είναι η καμπτική ενίσχυση των δικών ή των πλακών), ενώ σε περιπτώσεις όπως είναι οι μανδύες υποστυλωμάτων διαλέγεται να εφαρμοστούν τα υφάσματα με τη συμβολή της υγρής μεθόδου<sup>42</sup>.

### 3.3 Τεχνικές εφαρμογής

Τα σύνθετα υλικά αποτελούμενα από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) εφαρμόζονται στη εποχή μας υπό την μορφή υφασμάτων ή ελασμάτων, καθώς αποτελούν την τελευταία τεχνική ενίσχυσης κατασκευών αποτελούμενα από οπλισμένο σκυρόδεμα. Οι προαναφερθείσες τεχνικές δεν γνωρίζουν ευρεία εφαρμογή, χρησιμοποιούνται κυρίως σε αδύναμα σημεία συγκεκριμένων στοιχείων, και όχι για αντισεισμικούς λόγους για ολόκληρη την κατασκευή. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί ότι στις κατασκευές παλαιότερων χρόνων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από χαμηλή αντισεισμική αντοχή, συμβατικές τεχνικές ενίσχυσης, όπως είναι η προσθήκη τοιχωμάτων, τα χαλύβδινα τοιχώματα και οι μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα πλεονεκτούν σημαντικά. Γενικά, τα σύνθετα υλικά λειτουργούν βοηθητικά στο σύνολο της κατασκευής<sup>42</sup>.

Η τεχνική των χαλύβδινων επικολητών ελασμάτων εξελίχθηκε και πλέον στη θέση της προαναφερθείσας τεχνικής γίνεται χρήση σύνθετων υλικών, καθώς με αυτά τα υλικά αντιμετωπίζονται πολλές αδυναμίες της παλιάς τεχνικής. Επίσης τα υλικά χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος, έχουν υψηλή εφελκυστική ικανότητα, βρίσκονται στην αγορά σε μεγάλα μήκη και δεν επηρεάζονται από τη διάβρωση. Επιπλέον, αξίζει να τονιστούν κάποια επιπλέον πλεονεκτήματα όπως είναι τεχνικής εφαρμογής είναι απλούστερη, ο χρόνος εφαρμογής είναι μικρότερος από αυτό των χαλύβδινων ελασμάτων. Ως αποτέλεσμα, όλων των παραπάνω η τεχνική των σύνθετων υλικών έχει διευρυνθεί σε περισσότερες εφαρμογές σε σχέση με τη παλαιότερη εφαρμογή. Κάποιες από αυτές τις εφαρμογές είναι οι ενισχύσεις υποστυλωμάτων με μανδύες και οι ενισχύσεις δοκών υποστυλωμάτων. Όμως, πρέπει να αναφερθούν και τα μειονεκτήματα της τεχνικής είναι το μεγάλο κόστος των υλικών. Επιπρόσθετα, η πορεία εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι σε πλήρη σύνδεση με τον τύπο του υλικού που χρησιμοποιείται – έλασμα ή ύφασμα- καθώς επίσης είναι τις γενικευμένες απαιτήσεις του παραγωγού.

Ο σύγχρονος μηχανικός φθάνοντας στο σημείο που πρέπει να επιλέξει τον τύπο, τη μορφή και τη μέθοδο εφαρμογής των σύνθετων υλικών, πρέπει να αναλογιστεί κάποιες βασικές παράμετροι, όπως είναι η γεωμετρία και οι

διαστάσεις των στοιχείων που πρόκειται να ενισχυθούν. Επίσης, είναι το είδος της εντατικής καταπόνησης, στην οποία θα υπόκειται και οι περιβαλλοντικές συνθήκες που υπάρχουν στη περιοχή που θα λάβει χώρα η ενίσχυση, εμπειρία του μηχανικού και του εργατοτεχνικού προσωπικού καθώς επίσης και ο προϋπολογισμός του εγχειρήματος<sup>41</sup>.

### 3.3.1 Βασική τεχνική

Η τεχνική, η οποία εφαρμόζεται ευρέως (ουσιαστικά μόνο στη χώρα μας) και θεωρείται βασική, είναι η δια χειρός επικόλληση. Η συγκεκριμένη τεχνική επιτυγχάνεται είτε με τη βοήθεια υφασμάτων (προεμπροτισμένων με ρητίνη ή μη προεμπροτισμένων), είτε με τη βοήθεια προκατασκευασμένων στοιχείων, όπως είναι τα ελάσματα σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος ή τοιχοποιίας με τη συμβολή εποξειδικών ρητινών<sup>42</sup>. Παραδείγματα εφαρμογής δίνονται στα παρακάτω σχήματα:



**Εικόνα 3.2:** Τοποθέτηση υφασμάτων σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.<sup>42</sup>



**Εικόνα 3.3:** Εφαρμοσμένα υφάσματα σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος.<sup>42</sup>



**Εικόνα 3.4:** Παραδείγματα εφαρμογής βασικής τεχνικής.<sup>42</sup>

Τα στάδια εφαρμογής μίας τυπικής διαδικασίας (ΟΑΣΠ 2001) σύνθετων υλικών σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα είναι τα ακόλουθα:



1. Αρχικά, αφαιρείται η επιδερμική στρώση του σκυροδέματος και γίνεται μία προσπάθεια εξομάλυνσης της επιφάνειας πριν την εφαρμογή του σύνθετου υλικού.  
Ακόμη, ό,τι ανωμαλίες παραμένουν στην επιφάνεια συμπληρώνονται με την βοήθεια ενός επισκευαστικού υλικού.
2. Επίσης, όταν τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιηθούν σε γωνίες του δομικού στοιχείου από σκυρόδεμα, τότε αυτές εξομαλύνονται και λειαινούνται με σκοπό να αποκτήσουν καμπύλη της τάξεως των 50 mm και όχι των 25mm.
3. Στη συνέχεια η επιφάνεια που πρόκειται να εφαρμοστεί το σύνθετο υλικό καθαρίζεται σχολαστικά με την βοήθεια νερού υπό πίεση και στεγνώνεται καλά με στόχο η υγρασία της επιφάνειας να μην ξεπερνάει το ποσοστό των 4%.
4. Έπειτα στη περίπτωση που η επιφάνεια του δομικού στοιχείου φέρει μικρορηγματώσεις ή είναι αρκετά πορώδη τότε η επιφάνεια του δομικού στοιχείου εμποτίζεται με ένα αραιό διάλυμα. Έπειτα, στη επιφάνεια ρίχνεται ένα παχύρρευστη συγκολλητική ουσία, η οποία συνήθως είναι εποξειδικός στόκος.
5. Αφού επέλθει σκλήρυνση του συγκολλητικού υλικού, η επιφάνεια λειάνεται σχολαστικά με σκοπό να αφαιρεθεί οποιαδήποτε ανωμαλία υπερβαίνει το 1 mm.
6. Στη συνέχεια, η επιφάνεια αναμονής προετοιμάζεται κατάλληλα με σκοπό να τοποθετηθούν στα φύλλα. Η προετοιμασία της επιφάνειας περιλαμβάνει την επάλειψη της με εποξειδική ρητίνη, η οποία έχει πάχος της τάξεως 1-2mm. Η κόλλα στη συνέχεια εφαρμόζεται με πάχος των 10mm στην κεντρική περιοχή επαφής, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια εφαρμογής του φύλλου η κόλλα να κυλά προς τα έξω όταν συμπιεστεί.
7. Έπειτα εφαρμόζεται το φύλλο του σύνθετου υλικού στην επιφάνεια με τη βοήθεια ενός σκληρού ρολού, το οποίο όταν χρησιμοποιείται δημιουργεί ομοιόμορφη πίεση με αποτέλεσμα να απεγκλωβίζεται ο αέρας.

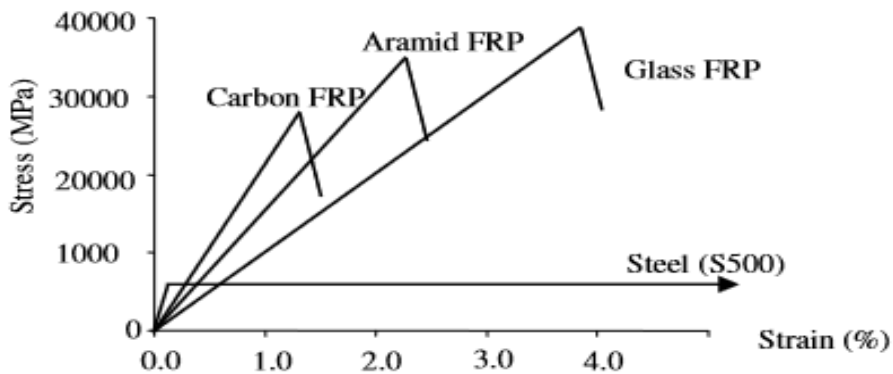
8. Στη συνέχεια, όταν περάσει μίση έως μία ώρα το προστατευτικό κάλυμμα φύλλου που τοποθετείται απομακρύνετε και εφαρμόζεται μία δεύτερη στρώση της ίδιας ρητίνης που είχε χρησιμοποιηθεί πάνω στις ίνες.
9. Πρέπει να αναφερθεί εδώ ότι αν προγραμματίζεται η εφαρμογή περισσότερων φύλλων, η παραπάνω ενέργειες επαναλαμβάνονται για να εφαρμοστούν στην επιφάνεια του προηγούμενου ελάσματος.
10. Τέλος, με σκοπό την προστασία των φύλλων του σύνθετου υλικού από υψηλές θερμοκρασίες και άλλες περιβαλλοντικούς κινδύνους, τοποθετείται ένα «πεταχτό» τσιμεντοκονίαμα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένας πίνακας (Πίνακας 3.1), στον οποίο εμφανίζονται κάποιες τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και τη παραμόρφωση αστοχίας των σύνθετων υλικών και του χάλυβα, τα οποία χρησιμοποιούνται στην ενίσχυση δομικών στοιχείων.

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Παραμόρφωση αστοχίας (%)
Σύνθετο Υλικό με ίνες γυαλιού (GFRP)	50-85	3.0-5.5
Σύνθετο Υλικό με ίνες αραμιδίου (AFRP)	60-120	2.5-5.0
Σύνθετο Υλικό με ίνες άνθρακα (CFRP)	170-600	0.2-2.3
Χάλυβας	200	12.0-25.0

**Πίνακας 3.1:** *Τυπικές τιμές μέτρου ελαστικότητας και παραμόρφωσης αστοχίας σύνθετων υλικών και χάλυβα.*<sup>18</sup>

Ακόμη, στο παρακάτω διάγραμμα διακρίνονται, ποιοτικά, οι τυπικές καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων, οι οποίες αναφέρονται σε σύνθετα υλικά και τον χάλυβα.



**Διάγραμμα 3.1:** Σχέσεις τάσης- παραμόρφωσης για σύνθετα υλικά και χάλυβα, σε εφελκυσμό.<sup>18</sup>

Επιπλέον, κάπου εδώ μπορούν να αναφερθούν κάποια σχόλια για το διάγραμμα, όπως είναι ότι συμπεριφέρονται ελαστικά μέχρι την αστοχία τους. Επιπρόσθετα, αξίζει να τονιστεί, όπως διακρίνεται από το διάγραμμα ότι τα σύνθετα υλικά εμφανίζουν ένα μειονέκτημα, το οποίο είναι η ανυπαρξία πλαστικής συμπεριφοράς, με αποτέλεσμα να αδυνατεί να απορροφήσει ενέργεια το υλικό. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι σε εφαρμογές ενίσχυσης δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα, το προαναφερθέν μειονέκτημα δεν είναι έντονο διότι η ύπαρξη του χάλυβα αναγκάζει το ενισχυμένο στοιχείο να κρατάει ένα βαθμό πλαστιμότητας. Ακόμη, σε καταστάσεις που επιδιώκεται η αύξηση της πλαστιμότητας, όπως στις εφαρμογές κλειστού μανδύα, η συγκεκριμένη τεχνική αποτελεί το πρώτη επιλογή του μηχανικού<sup>18</sup>.

### 3.3.2 Ειδικές τεχνικές

Στη συνέχεια, γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης των ειδικών τεχνικών εφαρμογής των σύνθετων υλικών, οι οποίες δεν γνωρίζουν ευρεία άνθιση στη χώρα μας<sup>36</sup>.

- **Αυτοματοποιημένη περιτύλιξη:** Αρχικά, η τεχνική της αυτοματοποιημένης περιτύλιξης γνώρισε άνθηση στις αρχές της δεκαετίας του 90 και στη συνέχεια στις Η.ΠΑ. Πιο αναλυτικά, η συγκεκριμένη τεχνική γίνεται με το εξής τρόπο, τυλίγονται νήματα, τα

οποία είναι προεμπροτισμένα με ρητίνη χωρίς να εμφανίζουν κάποια διακοπή κυκλικά υπό μικρή γωνία γύρω από υποστυλώματα γεφυρών ή άλλων στοιχείων με τη βοήθεια μίας ειδικής συσκευής ρομπότ. Το βασικό θετικό κομμάτι αυτής της τεχνικής είναι η γρήγορη ταχύτητα εφαρμογής της.

- **Εφαρμογή με προένταση:** Η επόμενη τεχνική είναι αυτή της εφαρμογής με προένταση, στην οποία επικολλούνται ελάσματα, τα οποία είναι υπό τάνυση. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται αξιοποίηση των οφελών της προέντασης, δηλαδή αύξηση της δυσκαμψίας, καθυστέρηση ρηγμάτωσης, μείωση πλάτους ρωγμών, αύξηση καμπτικής και διατμητικής αντοχής. Βέβαια, αξίζει να σημειωθεί ότι με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται το κόστος αλλά και του βαθμού πολυπλοκότητας της μεθόδου τοποθέτησης εξαιτίας της χρησιμοποίησης ειδικών αγκυρώσεων. Ακόμη, η τεχνική της ρηγμάτωσης έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί και σε μανδύες υποστυλώματος με δύο τρόπους. Είτε τοποθετώντας σύνθετα υλικά με ίνες βρισκόμενα υπό τάνυση, είτε βάζοντας στο κενό ανάμεσα στο μανδύα και το σκυρόδεμα ρητίνη υπό πίεση ή διογκόμενο κονίαμα.
- **Επιταχυμένη σκλήρυνση με θέρμανση:** Η εποξειδική ρητίνη που βρίσκεται ανάμεσα στα ελάσματα και στο σκυρόδεμα μπορεί να επιτευχθεί η σκλήρυνση της πιο γρήγορα με τη βοήθεια ειδικών συσκευών θέρμανσης. Με αυτόν τον τρόπο παρατηρείται μία σημαντική αύξηση στην ταχύτητα που εφαρμόζεται η ενίσχυση και σε περιπτώσεις αδύνατες. Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί και αύξηση της θερμοκρασίας υαλώδους μετάπτωσης της ρητίνης.
- **Προκατασκευασμένα στοιχεία:** Αυτή η τεχνική είναι της μορφής ελάσματος, γωνιών ή μανδύα – κελύφους, η οποία εφαρμόζεται περιμετρικά των υποστυλωμάτων με σκοπό την αύξησης της περίσφιγξης ή της διατμητικής αντοχής.

- **Εφαρμογή ράβδων σε εγκοπές:** Σε αυτή την τεχνική, η εφαρμογή και η επικόλληση ράβδων ή ελασμάτων σε εγκοπές στοχεύει στην βελτίωση της καμπτικής αντοχής των υφιστάμενων μελών από σκυρόδεμα. Τα βασικά θετικά κομμάτια αυτής της τεχνικής είναι η καλή συνάφεια των σύνθετων υλικών με το σκυρόδεμα και εν τέλει η καλύτερη προστασία που προσφέρει αυτή η τεχνική.
- **Εκτοξευμένο ή ψεκασμένο FRP (sprayed – up FRP):** Σε αυτή τη μέθοδο το υποστύλωμα ψεκάζεται με μικρές ίνες άνθρακα και γυαλιού, οι οποίες είναι ανακατεμένες με βινυλεστερική ρητίνη και έπειτα εφόσον απαιτείται δέχεται επιπλέον ενίσχυση με φύλλα FRP. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι χρειάζεται λιγότερο χρόνο σε σχέση με την εποξειδική ρητίνη ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες.

### 3.4 Διαδικασία εφαρμογής σύνθετων υλικών

Η πορεία εφαρμογής των σύνθετων υλικών, με σκοπό την ενίσχυση και επισκευή των κατασκευών περιλαμβάνει δύο σημαντικά στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από την προετοιμασία της επιφάνειας, στη οποία πρόκειται να συμβεί η διαδικασία και το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει την επικόλληση των στρώσεων του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια. Ακόμη, για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά του στοιχείου που έχει ενισχυθεί, θεωρείται απαραίτητο να γίνει μία ενδεδειγμένη προετοιμασία της επιφάνειας, στη οποία πρόκειται να εφαρμοστεί η προαναφερθείσα ενίσχυση. Αν δεν γίνει η σωστή προετοιμασία, τότε υπάρχει το ενδεχόμενο να απορριφθεί η ενίσχυση από την επιφάνεια<sup>35</sup>.

#### 3.4.1 Επιφανειακά φαινόμενα

Με τη βοήθεια συγκολλητικών ουσιών τα σύνθετα υλικά τοποθετούνται και μένουν πάνω στη επιφάνεια του στοιχείου. Πιο συγκεκριμένα κάποιες από

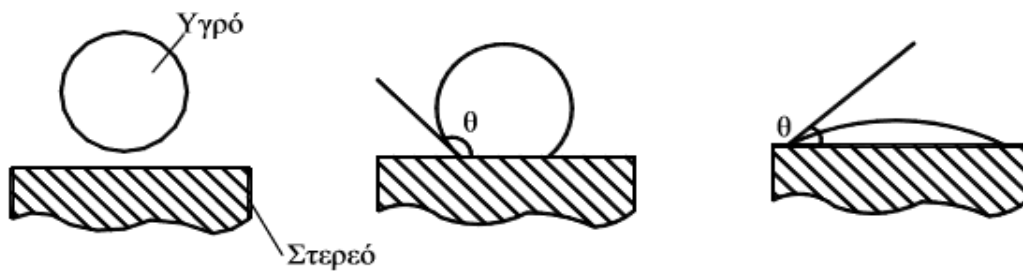
αυτές τις συγκολλητικές ουσίες είναι οι εποξικές κόλλες και οι πολυεστερικές κόλλες. Με τη χρήση των παραπάνω ουσιών επιτυγχάνεται η άρρηκτη και αδιάκοπη σύνδεση ενισχυτικού υλικού και επιφάνειας. Αυτό το αποτέλεσμα παρατηρείται εξαιτίας της διατμητικής τάσης, η οποία μεταδίδεται στη διεπιφάνεια επαφής τους. Η γωνία επαφής ενός ρευστού σε μία επιφάνεια εξαρτάται από την επιφανειακή τάση<sup>35</sup>.

Με σκοπό να επιτευχθεί η παραπάνω διαδικασία, συγκολλητική ουσία πρέπει να ικανοποιεί κάποιους κανόνες<sup>35</sup>:

- Ικανοποιητική αντοχή σε υγρασία και ερπυσμό
- Η θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης  $T_g$  να είναι τουλάχιστον ίση με  $45^0$
- Η μικρότερη διατμητική αντοχή στους  $20^0$  να είναι ίση με 18 MPa
- Να είναι σε θέση η ουσία να πληρώνει κενά σε κατακόρυφες και ανεστραμμένες επιφάνειες.
- Να εμφανίζουν αμετάβλητη συμπεριφορά στην αλκαλική φύση του δομικού στοιχείου που αποτελείται από σκυρόδεμα.

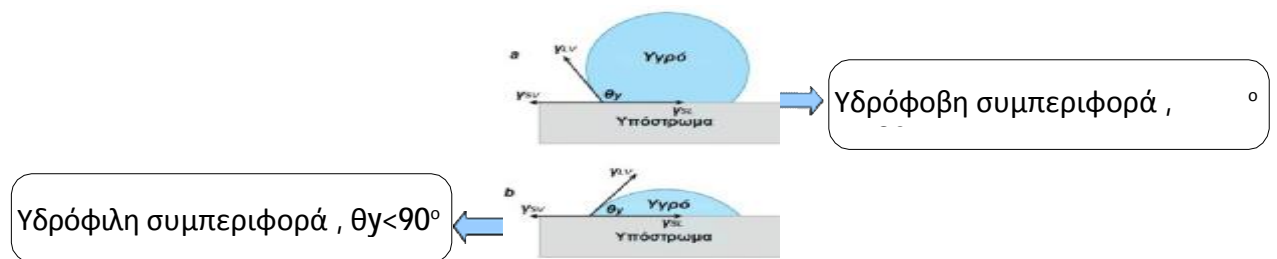
Η συγκόλληση του σύνθετου υλικού και της επιφάνειας γίνεται με την ακόλουθη διαδικασία, οι ουσίες που βοηθούν στην συγκόλληση εφαρμόζονται στις επιθυμητές επιφάνειες σε αρκετά πολύ μικρή ποσότητα της τάξεως των 0.1-0.5 nm. Ο όρος σύμφυση –συγκόλληση- χρησιμοποιείται διότι περιγράφει τις εφελκυστικές μοριακές δυνάμεις, οι οποίες ενεργούν κατά μήκος των επιφανειών των δύο υλικών. Συγκεκριμένα, οι συγκολλητικές ουσίες εξαιτίας της υγρή κατάστασης στη οποία βρίσκονται, κυλούν πάνω και ανάμεσα στις ανωμαλίες που μπορεί να εμφανίζει η επιφάνεια του στερεού κατά τη διάρκεια που έρχονται σε επαφή με αυτή. Έπειτα, η συγκολλητική ουσία στερεοποιείται και με αυτή τη διαδικασία συγκόλληση των δύο υλικών επιτυγχάνεται. Όμως για να επιτευχθεί σωστά η παραπάνω διαδικασία, αναγκαίος όρος θεωρείται η άμεση επαφή της συγκολλητικής ουσίας με τα δύο υποστρώματα, αλλά εξίσου σημαντική θεωρείται και η απουσία ενανθρακωμένων στρώσεων ή σκόνης από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Όπως διακρίνεται από τη παρακάτω εικόνα η ισορροπημένη στρώση της συγκολλητικής ουσίας, θεωρείται σημαντική διότι με αυτή συνδέεται η

ποιότητα της συγκόλλησης. Ακόμη, η μορφή της στρώσης πρέπει να είναι λεπτή χωρίς να σχηματίζονται σταγονίδια<sup>35</sup>.



**Εικόνα 3.5:** Διάστρωση της συγκολλητικής ουσίας στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου.<sup>35</sup>

Με αφορμή την εικόνα 3.5, αξίζει να αναφερθεί η περιγραφή της ισορροπίας που εμφανίζεται ανάμεσα στα υλικά με την βοήθεια της εξίσωσης Young. Αναλυτικότερα, όταν η γωνία  $\Theta$ , η γωνία επαφής, είναι μεγαλύτερη των  $90^\circ$  τότε η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται υδρόφοβη, όταν η γωνία είναι μικρότερη των  $90^\circ$  τότε η συμπεριφορά είναι υδρόφιλη.<sup>50</sup>



**Εικόνα 3.6:** Σταγόνα σε στερεή επιφάνεια.<sup>50</sup>

$$\text{Εξίσωση Young : } \gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} (\cos\theta_y),$$

Όπου,  $\theta_y$ : η γωνία επαφής

$\gamma_{sv}$ : η διεπιφανειακή τάση στερεού - υγρού

$\gamma_{lv}$ : η διεπιφανειακή τάση υγρού – αερίου

$\gamma_{sl}$ : η διεπιφανειακή τάση στερεού – υγρού<sup>50</sup>

### 3.4.2 Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος

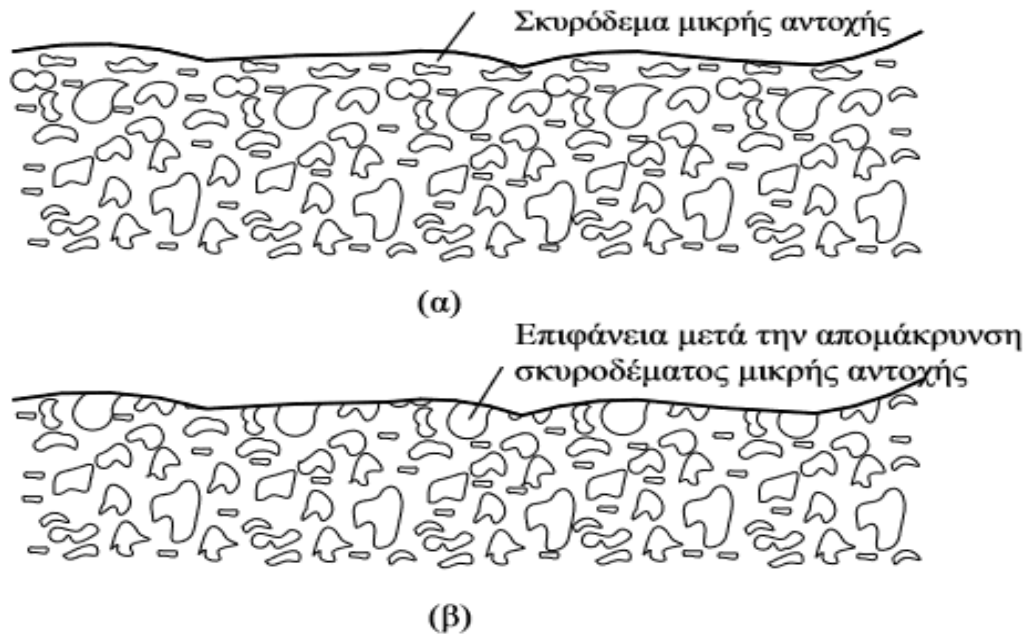
Εξαιτίας της περίτεχνης σύστασης του σκυροδέματος, στην επιφάνεια του είναι πιθανόν να εμπεριέχονται εκτεθειμένα αδρανή, άμμο, άνυδρα σωματίδια τσιμέντου και τσιμεντοκονίας, αλλά επίσης και ρωγμές και κενά. Όπως προαναφέρθηκε παραπάνω η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι σημαντική διότι σε αυτό το στάδιο γίνεται η απομάκρυνση αδύναμων ή ενανθρακωμένων στρώσεων και η ομαλοποίηση της, με αποτέλεσμα τη συγκόλληση των στρώσεων του σύνθετου υλικού με την επιφάνεια του σκυροδέματος<sup>35</sup>.

Ένας ακόμα λόγος, που θεωρείται σημαντική η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος είναι η επιρροή στη μακρόχρονη αντοχή της σύνδεσης. Εξαιτίας του παραπάνω λόγου η σωστή προετοιμασία της επιφάνειας επιδρά στη συμπεριφορά που μπορεί να εμφανίσει το στοιχείο στο οποίο έχει συμβεί η επέμβαση.

Γενικά, οι συνθήκες εργασίας επισκευής και ενίσχυσης εφαρμογών από σκυρόδεμα θεωρούνται αντίξοες και λαμβάνουν χωρά επιτόπου στο έργο. Για να γίνει η σωστή επιλογή της μεθόδου προετοιμασίας απαραίτητοι θεωρούνται κάποιοι παράγοντες όπως είναι ο προσανατολισμός της επιφάνειας – οριζόντιος, κατακόρυφος ανεστραμμένος-, το κόστος, η κλίμακα, η τοποθεσία του έργου, η εύκολη πρόσβαση στα υλικά και τον εξοπλισμό αλλά επίσης η ασφάλεια και η υγιεινή των εργαζομένων<sup>35</sup>.

Τέλος, αυτό που επιτυγχάνεται στην προετοιμασία που λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι η απομάκρυνση της εξωτερικής μειωμένης αντοχής, η οποία πιθανώς να είναι ενανθρακωμένη. Παράλληλα με τη προαναφερθείσα διαδικασία είναι η έκθεση αδρανών μικρού έως μεσαίου μεγέθους. Όλη η ενέργεια πρέπει να γίνει χωρίς να συμβεί κάποια μικρορωγμή ή άλλη βλάβη στην υποκειμενική στρώση που πιθανώς να επέλθει μείωση της αντοχής. Επιπλέον, στη περίπτωση εμφάνισης μεγάλων κενών, οπών, ρωγμών με μεγάλο εύρος, θεωρείται απαραίτητο να γίνει γέμισμα με κατάλληλα κονιάματα ή ρητινένεσις πριν εφαρμοστεί η συγκολλητική ουσία. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί μία στρώση ομοιόμορφου πάχους και έτσι μεγιστοποιείται η μετάδοση της διατμητικής τάσης.





**Εικόνα 3.6:** Προετοιμασία επιφάνειας σκυροδέματος. (α) Πριν την επεξεργασία. (β) Μετά την επεξεργασία.<sup>35</sup>

Η προετοιμασία της επιφάνειας του σκυροδέματος περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια<sup>35</sup>:

- Η πρώτη ενέργεια που εκτελείται είναι η αφαίρεση του σκυροδέματος που δεν είναι σύμφωνο με τις προδιαγραφές και η αλλαγή του με υλικό καλής ποιότητας.
- Η επόμενη ενέργεια είναι η αφαίρεση του σκυροδέματος το οποίο έχει υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο με αμμοβολή.
- Επιπλέον, είναι η αφαίρεση της σκόνης και θραυσμάτων με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα.

Αφού γίνουν όλες οι παραπάνω διαδικασίες, η επόμενη ενέργεια που συνιστάται να γίνει είναι να εφαρμοστεί η μέθοδος του εξολκέα. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το χρονικό κενό μεταξύ της προετοιμασίας της επιφάνειας και της επικόλλησης του σύνθετου υλικού, πρέπει να είναι όσο το δυνατότερο μικρότερο, με σκοπό να την επιπλέον ενανθράκωση του σκυροδέματος.

### 3.5 Στάδια εφαρμογής σύνθετων υλικών

Τα στάδια εφαρμογής σύνθετων υλικών σε δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα είναι τα ακόλουθα<sup>35</sup>:

- Το πρώτο στάδιο είναι η απομάκρυνση του επιχρίσματος
- Επόμενο στάδιο είναι η επισκευή ενδεχόμενων βλαβών με την βοήθεια μίας κατάλληλης μεθόδου
- Στη συνέχεια είναι η προετοιμασία της επιφάνειας του δομικού στοιχείου, για παράδειγμα σε αυτή τη διαδικασία εμπεριέχονται οι ενέργειες της εξομάλυνσης της επιφάνειας, της λάξευσης γωνιών κλπ
- Έπειτα, είναι η κάλυψη της επιφάνειας του στοιχείου από σκυρόδεμα με εποξική ρητίνη ή άλλη ικανοποιητική συγκολλητική ουσία.
- Το πέμπτο στάδιο είναι η εφαρμογή της πρώτης στρώσης του ινοπλισμένου πολυμερούς στην επιφάνεια του δομικού στοιχείου. Εδώ θεωρείται πρέπον να αναφερθεί ότι στη περίπτωση που γίνει χρήση ελασμάτων, τότε εφαρμόζεται μία μόνο στρώση.
- Το έκτο στάδιο, είναι η εγκατάσταση ειδικών αγκυρίων στα σημεία που απαιτείται, τα οποία είναι τα τοιχεία, οι άνω παρειές δοκών κλπ.
- Επιπρόσθετα, είναι η επιπλέον στρώση σύνθετου υλικού, η οποία θα γίνει με τη συμβολή της μελέτης/ενίσχυσης.
- Τέλος, αφού γίνουν όλες οι παραπάνω ενέργειες προσεχτικά, γίνεται έλεγχος σκλήρυνσης του συστήματος, ο οποίος διαρκεί γύρω στις 24 ώρες και έπειτα γίνεται η τοποθέτηση επιχρίσματος και βαφής της επιφάνειας του δομικού στοιχείου σύμφωνα με τον αρχιτεκτονικό και αισθητικό σχεδιασμό.

### **3.6 Διατιθέμενες μορφές Fibre Reinforced Polymer (FRP)**

Οι μορφές FRP που διατίθενται στην αγορά είναι οι παρακάτω<sup>37</sup>:

- Αρχικά είναι οι ράβδοι και τένοντες
- Στη συνέχεια είναι οι λωρίδες με πλάτος μερικών εκατοστών και μήκος αρκετών μέτρων.
- Ακόμη είναι τα φύλλα με μεγαλύτερο πλάτος από αυτό των λωρίδων
- Τα δισδιάστατα ή τρισδιάστατα πλέγματα
- Τα γραμμικά μέλη
- Επίσης στη λίστα βρίσκονται τα επίπεδα στοιχεία επικάλυψης
- Τέλος, υπάρχουν οι εύκαμπτες μεμβράνες

Οι μορφές όμως που ζητούνται στην αγορά αρκετά είναι αυτές των φύλλων και των ινουφασμάτων.

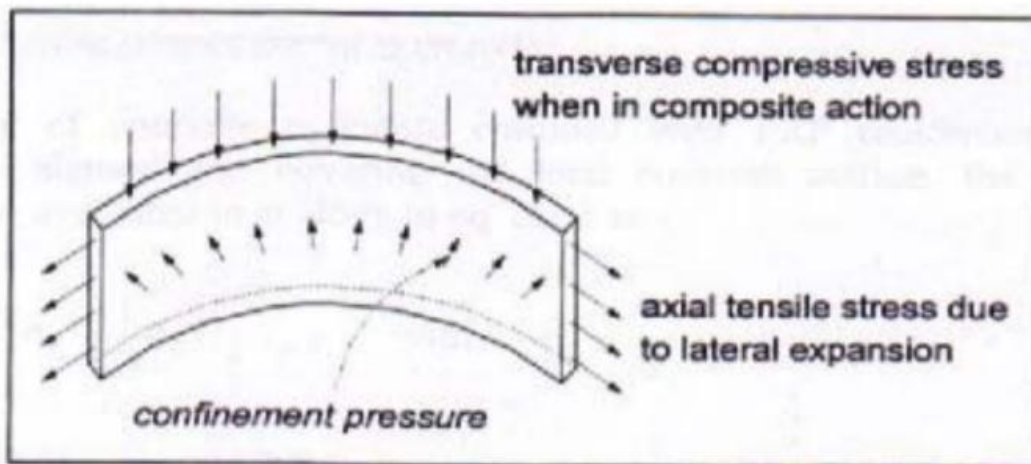
### **3.7 Ενίσχυση φέροντος οργανισμού**

#### **3.7.1 Περίσφυξη υποστυλωμάτων**

Ένας διαδεδομένος τρόπος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι αυτός της περίσφυξης του σκυροδέματος. Σε καταστάσεις όπου η κατασκευή καταπονείται αρκετά στα υποστυλώματα, η τεχνική αυτή συμβάλει στην εμπόδιση της διόγκωσης του σκυροδέματος με την βοήθεια της ενεργοποίησης του μανδύα. Οι ίνες του, αναλαμβάνουν το ρόλο να δέχονται τις εφελκυστικές τάσεις, χρησιμοποιώντας με αυτό τον τρόπο τις εξαιρετικά υψηλές εφελκυστικές αντοχές που διαθέτουν.

Η εφαρμογή αυτής της τεχνικής προσφέρει στο μέλος τα εξής:

- Αρχικά, την βελτίωση της θλιπτικής αντοχής και παραμόρφωσης του σκυροδέματος.
- Την αύξηση της πλαστιμότητας του μέλους, στο οποίο εφαρμόζονται.
- Την βελτίωση της επαφής ανάμεσα στις ράβδους οπλισμού και του σκυροδέματος σε περιοχές μάτισης.
- Την καθυστέρηση της εμφάνισης του φαινομένου του λυγισμού στις διαμήκης ράβδους.



Εικόνα 3.7: Τριαξονική κατάσταση τάσης σε μανδύα FRP.<sup>36</sup>

### 3.7.2 Αύξηση πλαστιμότητας υποστυλωμάτων

Η τεχνική των μανδυών σύνθετων υλικών, χρησιμοποιείται σε καταστάσεις όπου ο μηχανικός απαιτεί την βελτίωση της πλαστιμότητας του σημείου. Οι μανδύες αυτό που κάνουν είναι να περισφίγγουν τις κρίσιμες διατομές υποστυλωμάτων στη κορυφή και στη βάση, όπου εμφανίζεται μειωμένη η ικανότητα να απορροφήσει ενέργεια σε σεισμικές καταπονήσεις.

Αυτό που έχει αποδειχθεί από πειραματικές διαδικασίες είναι ότι η συμπεριφορά των υποστυλωμάτων που έχουν ενισχυθεί παρουσιάζει αρκετές βελτιώσεις εξαιτίας την ύπαρξης της περίσφιξης στις κρίσιμες διατομές. Ακόμη, αυτό που διαφαίνεται είναι ότι η αστοχία στις διατομές οφείλεται στις καμπτική διαρροή, η οποία εμφανίζεται στη κρίσιμη διατομή υπό την επιβολή του ίδιου φορτίου. Αντιθέτως, ο λυγισμός που ακολουθεί, ελέγχεται εξαιτίας της ύπαρξης της περίσφιξης. Το αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι να δημιουργείται μία μεγάλη οριζόντια μετατόπιση, η οποία στη συνέχεια προκαλεί μια μικρή πτώση στο φορτίο.

### 3.7.3 Ενίσχυση έναντι κάμψης

Αυτός ο στόχος της ενίσχυσης είναι να παραλαμβάνει τις εφελκυστικές δυνάμεις μιας κατασκευής. Ο τρόπος που γίνεται αυτή η προσπάθεια είναι με την τοποθέτηση ελασμάτων ή υφασμάτων, τα οποία εφαρμόζονται στο εφελκυσμένο πέλμα ακολουθώντας τη διεύθυνση αυτή των ινών. Κάπου εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η εφαρμογή αυτού του τρόπου αντιμετωπίζει μια δυσκολία διότι οι μηχανικοί πρέπει να αντιμετωπίσουν την αγκύρωση των οπλισμών εντός των κόμβων. Επίσης, είναι χρήσιμο να επισημανθεί ότι όταν οι κατασκευαστές επιλέξουν να χρησιμοποιήσουν FRP σε μορφή ράβδων, θα πρέπει να επικαλύψουν σκυρόδεμα στο στοιχείο με σκοπό την καλή συνεργασία των δύο υλικών. Αναλυτικότερα, αυτό που θα πρέπει να πετύχουν είναι την δημιουργία ενός οπλισμένου μανδύα με FRP, ο οποίος όπως εμφανίζεται σε αρκετές μελέτες εμφανίζεται να δίνει άριστα αποτελέσματα σε καταστάσεις όπου εμφανίζεται διάβρωση. Βέβαια πρέπει να αναφερθεί ότι το κόστος αυτής επιχείρησης είναι αρκετά αυξημένο εξαιτίας της μικρής ζήτησης που εμφανίζει στην αγορά.

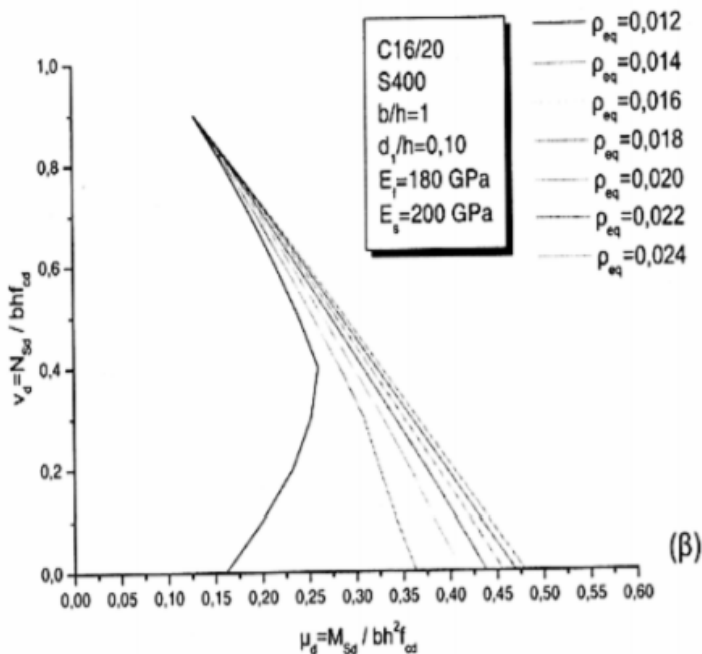
Επιπλέον, η αστοχία υπό κάμψη είναι :

- Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, σύνθλιψη σκυροδέματος
- Διαρροή εφελκυσμένου χάλυβα, αποκόλληση ή θραύση σύνθετων υλικών
- Σύνθλιψη σκυροδέματος.

Ο τρόπος που θεωρητικά επιθυμείται είναι ο πρώτος από τους τρεις, στο οποίο συμβαίνει σε πρώτη φάση η διαρροή στο διαμήκη οπλισμό, ο οποίος είναι σε εφελκυσμό και στη συνέχεια ακολουθεί η σύνθλιψη του σκυροδέματος στη περιοχή της θλιβόμενης ζώνης, χωρίς να εμφανίζεται κάποια αστοχία ή κάποιου είδους αποκόλληση στα σύνθετα υλικά. Με σκοπό τον υπολογισμό της ροπής της αντοχής στην κρίσιμη διατομή του υποστυλώματος αρκεί να ακολουθήσει κανείς την ισορροπία των εσωτερικών δυνάμεων και του ασυμβίβαστου των παραμορφώσεων.

Ο δεύτερος τρόπος αστοχία που αναφέρθηκε παραπάνω εμφανίζεται να είναι και ο πιο σπάνιος και παρουσιάζεται εφόσον το εμβαδόν της διατομής

του σύνθετου υλικού είναι αρκετά μικρό. Στην συνέχεια ακολουθεί ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η αλληλεπίδραση τετραγωνικής διατομής για μονοαξονική κάμψη:



**Εικόνα 3.8:** Διάγραμμα αλληλεπίδρασης τετραγωνικής διατομής για μονοαξονική κάμψη με αξονική δύναμη.<sup>36</sup>

Όσο αναφορά το παραπάνω διάγραμμα αλληλεπίδρασης αυτό που συμπεραίνεται είναι ότι ένα σύνθετο υλικό θεωρείται αποτελεσματικό στο να αυξάνει την ροπή την αντοχής, από το μέγεθος του αξονικού φορτίου, όπου όταν το τελευταίο μειώνεται τότε αυξάνεται η ροπή αντοχής. Ακόμη αυτό που διαφαίνεται στο διάγραμμα και αξίζει να αναφερθεί είναι ότι οι καμπύλες συγκλίνουν σε ένα σημείο πάνω από το οποίο η διατομή βρίσκεται σε θλίψη και ως αποτέλεσμα του οποίου η δράση των σύνθετων υλικών μπορεί να αγνοηθεί. Επομένως, αυτό που μπορεί εύκολα να προκύψει ως συμπέρασμα είναι ότι εφόσον η αξονική δύναμη ελεγχθεί και παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα τότε τα σύνθετα υλικά θα θεωρούνται πως πετυχαίνουν τον στόχο τους διότι όπως περιγράφηκε παραπάνω πετυχαίνουν αύξηση της καμπτικής αντοχής.

### 3.7.4 Ενίσχυση έναντι διάτμησης

Η ενίσχυση έναντι διάτμησης πετυχαίνεται με τον εξής τρόπο, με την τοποθέτηση υφασμάτων και σπανιότερα ελασμάτων, τα οποία εφαρμόζονται στις εξωτερικές επιφάνειες με τις ίνες των οποίων να είναι παράλληλες στις τροχιές των κύριων τάσεων. Στην ουσία αυτό που πετυχαίνεται είναι να τοποθετούνται κάθετα στις ρωγμές. Επειδή, αυτό που περιγράφηκε παραπάνω δεν είναι σχετικά εφικτό, αυτό που γίνεται στην πραγματικότητα είναι η εφαρμογή των ινών να συμβαίνει με την τοποθέτηση τους κάθετα στη διεύθυνση του άξονα των δομικών στοιχείων.

Και σε αυτή την ενίσχυση υπάρχουν κάποια είδη αστοχίας εξαιτίας της τέμνουσας:

- Θραύση των σύνθετων υλικών, η οποία αναμένεται να συμβαίνει σε κατασκευές οι οποίες είναι επαρκώς αγκυρωμένες με μανδύες.
- Αποκόλληση των σύνθετων υλικών, η οποία εμφανίζεται στους μη επαρκώς αγκυρωμένους μανδύες όπως είναι οι τρίπλευροι και οι δίπλευροι. Αυτό το είδος βέβαια είναι σπάνιο στα υποστυλώματα από τη στιγμή που ο μανδύας είναι αγκυρωμένος και κλειστού τύπου.
- Πρόωρη αστοχία λόγω του μεγάλου ανοίγματος της λοξής ρωγμής, από τη στιγμή που παρατηρηθεί ανάπτυξη στο άνοιγμα της ρωγμής, εμφανίζεται μείωση στη συνεισφορά των μηχανισμών ανάληψης τέμνουσας. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι να βρεθεί στην οριακή κατάσταση αστοχίας.

### **3.8 Μορφές αστοχίας των σύνθετων υλικών**

#### **3.8.1 Αποκόλληση σύνθετων υλικών και ρωγμές**

##### **3.8.1.1 Γενικά**

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην χρησιμοποίηση των σύνθετων υλικών με σκοπό την ενίσχυση διάφορων δομικών τμημάτων, σε ό,τι αφορά την τοποθέτησή τους στο εργοτάξιο και στην όσο το δυνατό καλύτερη τήρηση των κανόνων. Αυτή η προσπάθεια γίνεται με στόχο οι μηχανικοί να έχουν την καλύτερη απόδοση σε ό,τι αφορά τα χαρακτηριστικά από αυτά τα υλικά. Ο σημαντικότερος παράγοντας επιτυχίας αυτής της επέμβασης είναι η αποτελεσματική ένωση του νέου υλικού με την επιθυμητή επιφάνεια. Αυτή η ένωση επιτυγχάνεται με την συμβολή των διατμητικών τάσεων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια των δύο υλικών. Στην ουσία αυτό που θεωρείται απαραίτητο στο συγκεκριμένο εγχείρημα είναι ο συγκολλητικός δεσμός που δημιουργείται μέσω της κόλλας. Υπάρχουν αρκετά παραδείγματα κατασκευών που έχουν ενισχυθεί με σύνθετα υλικά και έχουν αστοχήσει με πολύ μικρότερα φορτία από αυτά που είχαν εκτιμηθεί κατά την διάρκεια της διαλογής την ενίσχυσης. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται εξαιτίας της υπολειτουργίας των σύνθετων υλικών, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα αυτά τα υλικά να μην φτάνουν στην οριακή τάση εφελκυστικής αστοχίας. Έτσι δεν μπορούν να αναλάβουν επιπλέον τάσεις με αποτέλεσμα να αχρηστεύονται παρόλο που δεν θραύονται.

Οι δύο σημαντικότερες αιτίες που προκαλούν τις παραπάνω παρατηρήσεις δηλαδή της υπολειτουργίας των σύνθετων υλικών από FRP είναι το φαινόμενο της αποκόλλησης τους (delamination) και της ανεπαρκούς αγκύρωσης (insufficient anchorage). Τα δύο αυτά φαινόμενα παρατηρούνται τακτικά και απαιτείται από τους μηχανικούς να έχουν επαρκή γνώση γύρω από αυτά τα θέματα.



**Πίνακας 3.2: Μέγιστο Επιτρεπόμενο Εύρος Ρωγμών.<sup>9</sup>**

Συνθήκες Περιβάλλοντος	Μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος ρωγμής
Ξυρό περιβάλλον	0.41 mm
Υγρό περιβάλλον ή έδαφος	0.30 mm
Χημικές προσβολές	0.18 mm
Θαλάσιες κατασκευές	0.15 mm
Δεξαμενές	0.10 mm

### 3.8.1.2 Η έννοια και οι μηχανισμοί της αποκόλλησης

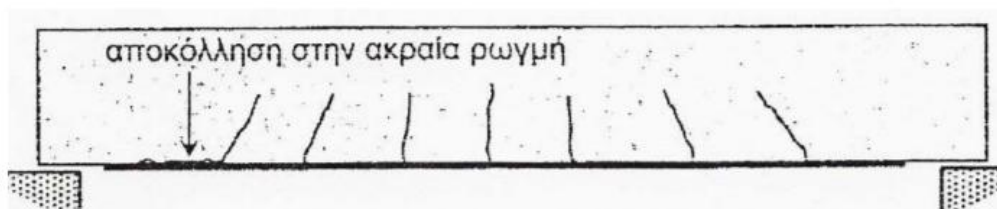
Έχουν παρατηρηθεί περιστατικά στα οποία δεν εμφανίζεται εφελκυστική αστοχία στα σύνθετα υλικά, αλλά αποκόλληση από την επιφάνεια του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ανάπτυξης διατμητικών τάσεων, οι οποίες δημιουργούνται στη διεπιφάνεια σκυροδέματος και σύνθετου υλικού. Αναλυτικότερα, στην επιφάνεια του σκυροδέματος αναπτύσσεται μικρότερη διατμητική αντοχή σε σχέση με τις εποξειδικές ρητίνες καλής ποιότητας που κυκλοφορούν στην αγορά με αποτέλεσμα να προκαλούν το παραπάνω φαινόμενο. Κατά την διαδικασία της αποκόλλησης εμφανίζεται γρήγορη αστοχία στην εξωτερική ενίσχυση, διότι παύει να υπάρχει κάποια ένωση με το δομικό στοιχείο με αποτέλεσμα να μην είναι σε θέση να αναλάβει τις τάσεις για τις οποίες αρχικά σχεδιάστηκε με αποτέλεσμα του παραπάνω γεγονότος να υπάρξει θραύση στο δομικό στοιχείο. Κάπου εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι έχουν εμφανιστεί περιστατικά στα οποία μικρά ποσοστά φορτίων έχουν προκαλέσει αποκόλληση σε σχέση πάντα με τα φόρτια με τα οποία αρχικά έγινε ο σχεδιασμός. Αυτό το περιστατικό θεωρείται αρκετά επικίνδυνο διότι εμφανίζεται χωρίς καμία προειδοποίηση.

Κατά την διάρκεια της ενίσχυσης δομικών στοιχείων με σύνθετα υλικά μπορούν να εμφανιστούν οι εξής τύποι αποκόλλησης:

- Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή
- Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή
- Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή
- Διατμητική αστοχία στο άκρο αποκόλλησης της επικάλυψης
- Ατέλειες της επιπεδότητας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου.

### 3.8.1.2.1 Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή

Όταν εμφανίζεται η αποκόλληση στην ακραία ρωγμή στο δομικό τμήμα μιας κατασκευής, αυτό που προκαλεί είναι να ακυρώνει το μήκος της αγκύρωσης που αρχικά υπολογίστηκε. Στο σχήμα που ακολουθεί εμφανίζεται μία δοκός, η οποία είναι ενισχυμένη με ινοπλισμένο πολυμερές στο εφελκόμενο τμήμα της, στο οποίο φαίνεται επίσης η αποκόλληση στην ακραία ρωγμή.



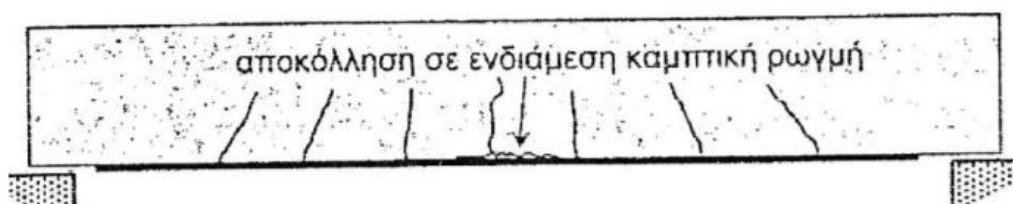
**Εικόνα 3.9:** Αποκόλληση στην ακραία ρωγμή.<sup>36</sup>

Η αιτία της δημιουργίας αυτής της ρωγμής είναι μία κατασκευαστική αδυναμία του δομικού στοιχείου, στο οποίο κατά την διάρκεια της επιβολής της δύναμης πάνω στη δοκό αναπτύσσονται σε εκείνο το σημείο τάσεις, οποίες με τη σειρά τους δημιουργούν αυτό το άνοιγμα. Το γεγονός αυτό παρατηρείται σε παλαιότερα χρόνια στα οποία οι εργάτες που επιχειρούσαν αυτού του είδους τις επεμβάσεις δεν είχαν σχετικές γνώσεις για να προσέχουν τις κατασκευαστικές ατέλειες. Επιπρόσθετα αυτού του είδους οι ρωγμές εμφανίζονται σε περιπτώσεις σεισμών, όπου οι μηχανικοί στη συνέχεια

προχωρούν σε τοποθέτηση ελασμάτων σε μορφή ανοικτών μανδουών. Αυτό που προκαλεί στη συνέχεια αυτή η ρωγμή είναι αποκόλληση στη περιοχή γύρω από τη ρωγμή. Στη συνέχεια, η περιοχή που έχει αποκολληθεί σταματάει να αναλαμβάνει επιπλέον τάσεις, ενώ η ένωση που υπήρχε κάποτε με το σκυρόδεμα δεν υπάρχει πλέον. Οι μηχανικοί προκειμένου να αντιμετωπίσουν αυτό το γεγονός αυξάνουν είτε το πλάτος του ελάσματος, είτε μειώνουν το πάχος του με αποτέλεσμα να μειώνεται η μέση διατμητική τάση.

### 3.8.1.2.2 Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή

Σε καταστάσεις κάμψης εκτός του επιπέδου, μπορεί να παρατηρηθούν καμπτικές ρωγμές, οι οποίες είναι ανάμεσα στις στηρίξεις. Αυτές οι ρωγμές είναι οριζόντιες μη λοξές, στις οποίες εμφανίζονται χαμηλές τιμές τέμνουσας. Το αποτέλεσμα αυτής της εμφάνισης είναι να αλλάξει η συμπεριφορά του ελάσματος, το οποίο βρίσκεται στη περιοχή γύρω από τη ρωγμή. Στο σχήμα που ακολουθεί παρακάτω, παρατηρείται αποκόλληση στο μεσαίο τμήμα του ελάσματος, το οποίο είναι μακριά από τις περιοχές που υπάρχει αγκύρωση, στο οποίο επίσης παρατηρείται χαμηλή τιμή διάτμησης.

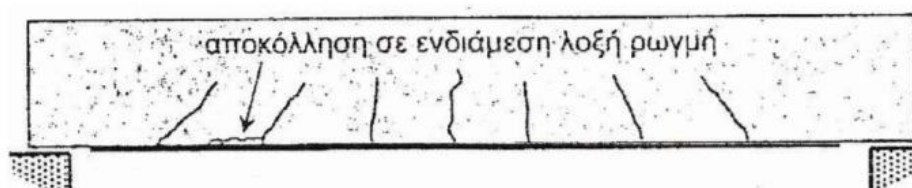


**Εικόνα 3.10:** Αποκόλληση σε ενδιάμεση καμπτική ρωγμή.<sup>36</sup>

### 3.8.1.2.3 Αποκόλλησης σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή

Σε αυτή την κατηγορία οι ρωγμές, οι οποίες προκαλούν αποκόλληση εμφανίζονται σε θέσεις όπου επικρατεί διάτμηση μεγάλου μέτρου. Ως αποτέλεσμα του παραπάνω γεγονότος είναι οι ρωγμές να είναι σοβαρότερες και αυξάνεται ο κίνδυνος αποκόλλησης του ελάσματος εκατέρωθεν.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή



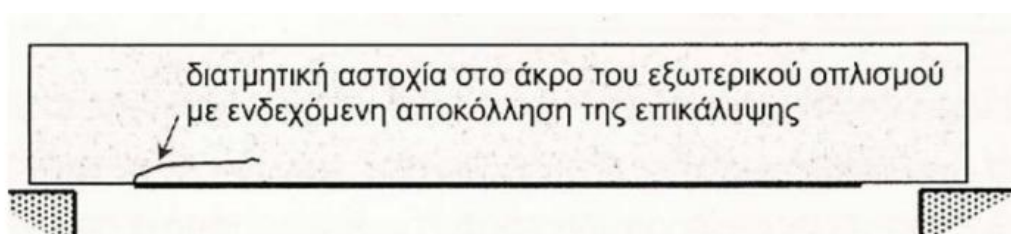
Εικόνα 3.12: Αποκόλληση σε ενδιάμεση λοξή ρωγμή.<sup>36</sup>

### 3.8.1.2.4 Διατμητική αστοχία στο άκρο – αποκόλληση της επικάλυψης

Ένας συνηθισμένος τρόπος αστοχίας δοκών και πλακών ενισχυμένων σε κάμψη είναι η αποκόλληση σύνθετων υλικών, η οποία έχει προκληθεί εξαιτίας της δημιουργίας διατμητικής ρωγμής από το άκρο μέχρι την κάτω στρώση του οπλισμού και κόλλας, ακολουθώντας στην ουσία μια οριζόντια κατεύθυνση. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται εξαιτίας της δημιουργίας σημαντικών οριζόντιων διατμητικών και κάθετων εφελκυστικών τάσεων, οι οποίες έχουν κατεύθυνση κάθετα στον άξονα του οπλισμού. Αυτό που προκαλεί αυτό το φαινόμενο είναι να αποκολλά το έλασμα από το δομικό στοιχείο, συμπαρασύροντας το αδύναμο τμήμα του σκυροδέματος. Οι μηχανικοί προκειμένου να αποφύγουν αυτό το φαινόμενο διαλέγεται σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με στόχο να μην παρασύρεται από τη αποκόλληση του ελάσματος. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι ένας άλλος τρόπος αποφυγής αυτού του είδους της αποκόλλησης είναι να μειωθεί η διατμητική τάση ανάμεσα στα δύο υλικά, το οποίο επιτυγχάνεται με την αύξηση της επιφάνειας επαφής. Αυτό

μπορεί να πετύχει με την αύξηση της επιφάνειας επαφής των δύο υλικών, είτε μικραίνοντας το πάχος του ελάσματος, είτε αυξάνοντας το πάχος της στρώσης. Συνεπώς, η διατμητική τάση δεν εμφανίζεται στο μήκος του ελάσματος αλλά στα άκρα του με αποτέλεσμα σε εκείνα τα σημεία να τοποθετείται αγκύρωση.

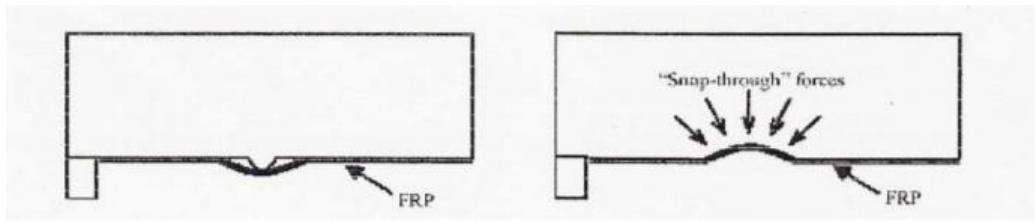
Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η προαναφερθείσα αστοχία.



**Εικόνα 3.13:** Διατμητική αστοχία στο άκρο του εξωτερικού οπλισμού με ενδεχόμενη αποκόλληση της επικάλυψης.<sup>36</sup>

#### **3.8.1.2.5 Ατέλειες της επιπεδότητας της επιφάνειας του δομικού στοιχείου**

Μια εξίσου σημαντική παράμετρος είναι αυτής της καλά προετοιμασμένης επιφάνειας πριν ξεκινήσει το εγχείρημα. Η επιφάνεια του ελάσματος του σύνθετου υλικού πρέπει να είναι καλά προετοιμασμένη. Ο στόχος αυτής της λεπτομερής προσοχής που πρέπει να δώσει ο μηχανικός είναι να αποφύγει θέσεις αποκόλλησης έστω και σε μικρή κλίμακα που να έχουν δημιουργηθεί εξαιτίας της ανώμαλης επιφάνειας. Σε ό,τι αφορά τις τοιχοποιίες είναι απαραίτητη η ανάπτυξη εξισωτικής στρώσης από σκυρόδεμα υψηλής ποιότητας και αντοχής.



**Εικόνα 3.14:** Παρουσιάζονται κάποιες πιθανές ατέλειες.<sup>36</sup>

### 3.8.1.3 Οδηγίες για την αποφυγή πρόωρων αποκολλήσεων

Γενικά, αυτό που συμπεραίνεται είναι ότι οι μηχανικοί προκειμένου να αποφύγουν τις πρόωρες αποκολλήσεις πρέπει να ακολουθούν τις παρακάτω οδηγίες:

- Αρχικά, θα πρέπει να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση ενός συνεχούς ελάσματος σε εσωτερικές γωνίες. Κάθε ένα επίπεδο είναι απαραίτητο να έχει το δικό του έλασμα, το οποίο θα διακόπτεται σε κάθε εσωτερική γωνία.
- Στη συνέχεια, θεωρείται απαραίτητο η δημιουργία μίας καμπυλότητας στις εξωτερικές γωνίες, κατά την διάρκεια της χρησιμοποίησης κλειστού μανδύα από ινοπλισμένο υλικό. Αυτή η διαδικασία συμβάλει στο μοίρασμα των τάσεων μέσα από τον κλειστό μανδύα.
- Έπειτα, πρέπει να σφραγίζονται όλες οι ρωγμές που προϋπάρχουν με την βοήθεια ενέσεων κονιάματος ή εποξειδικής ρητίνης.
- Τέλος, το σκυρόδεμα στο οποίο πρόκειται να γίνει η επέμβαση πάνω πρέπει να είναι άριστης ποιότητας και σίγουρα αντοχής άνω των 2000psi.

### 3.8.2 Κόπωση

Ως κόπωση ορίζεται “ η διαδικασία των προοδευτικών τοπικών μόνιμων δομικών μεταβολών που συμβαίνουν στα υλικά που υποβάλλονται σε συνθήκες μεταβαλλόμενων τάσεων και παραμορφώσεων σε ένα ή περισσότερα σημεία και που μπορούν να οδηγήσουν σε ρωγμές ή πλήρη θραύση μετά από ένα επαρκή αριθμό μεταβολών του φορτίου” . Ο ορισμός αυτός αφορά τα μεταλλικά υλικά. Αντίθετα, στα σύνθετα υλικά ο παραπάνω ορισμός δεν βρίσκει άμεση ισχύ. Στα σύνθετα υλικά οι βλάβες λόγω της κόπωσης είναι δύσκολο να συναντηθούν εξαιτίας της πολυπλοκότητας των μηχανισμών που συναντά κανείς.

Είναι ευρέως γνωστό ότι στα ινώδη σύνθετα υλικά οι βασικοί μηχανισμοί αστοχίας είναι η ανάπτυξη και η διάδοση ρωγμών στο υλικό της μήτρας, η αποκόλληση ανάμεσα στις στρώσεις, η θραύση των ινών και τέλος η αποκόλληση μήτρας και ίνας. Η εμφάνιση των παραπάνω αστοχιών εξαρτάται από το υλικό ( τύπος μήτρας και ίνας), από την περιεκτικότητα σε ίνες, από την αλληλουχία των στρώσεων, από το φορτίο κόπωσης και από τη διεύθυνση του σε σχέση με τις ίνες. Κάπου εδώ είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι τα σύνθετα υλικά από ίνες άνθρακα εμφανίζουν καλύτερη αντοχή σε κόπωση από αυτή που εμφανίζει ο χάλυβας. Γενικά η αντοχή σε κόπωση ενός συστήματος ινοπλισμένου πολυμερούς, βασίζεται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της ρητίνης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

### 3.8.3 Θραύση και διάβρωση λόγω έντασης

Η διάβρωση και η θραύση είναι δύο φαινόμενα τα οποία παρατηρούνται στα ινοπλισμένα πολυμερή υπό συνεχή τάση. Τα δύο προαναφερθέντα φαινόμενα εξαρτώνται άμεσα από το χρόνο έκθεσης, το επίπεδο της έντασης, τον περιβάλλοντα χώρο, τη μήτρα και τις ίνες του σύνθετου υλικού. Η αστοχία που προκλήθηκε εξαιτίας των παραπάνω φαινομένων χαρακτηρίζεται πρώιμη, διότι το ινοπλισμένο πολυμερές παρουσιάζει αστοχία για ένταση μικρότερη από την αντοχή του.

Σε καταστάσεις σεισμού τα σύνθετα υλικά ενεργοποιούνται μόνο κατά της διάρκειά του, εκτός και αν αυτές τοποθετηθούν με προένταση.

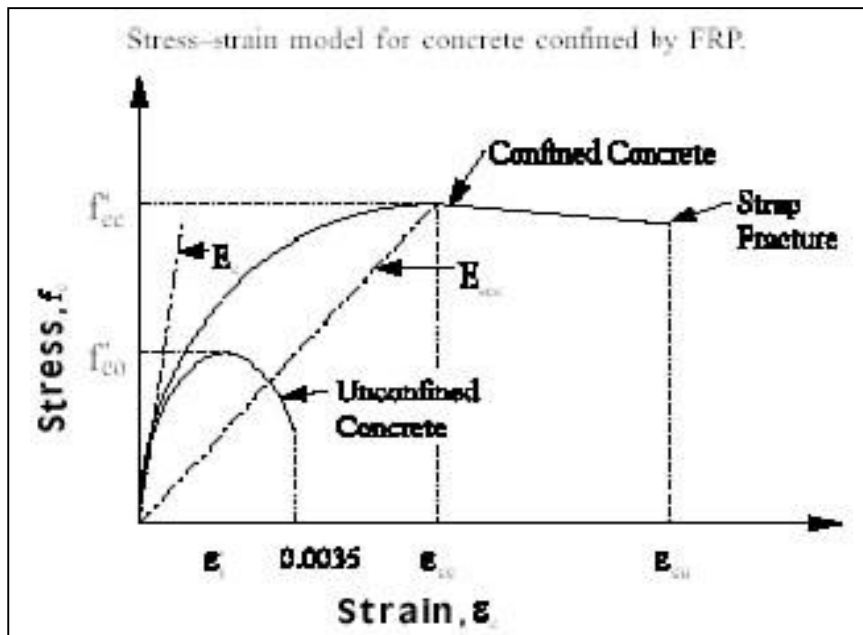
Επίσης εμφανίζεται ένας ακόμη παράγοντας στο οποίο παρουσιάζεται μείωση αντοχής στα σύνθετα υλικά και είναι αυτός ταυτόχρονης δράσης εφελκυστικών τάσεων και διαβρωτικού περιβάλλοντος όπως είναι το όξινο. Το φαινόμενο αυτό δεν εμφανίζεται στα σύνθετα υλικά που αποτελούνται από ίνες άνθρακα με αποτέλεσμα οι ίνες αυτές να είναι στη πρώτη επιλογή των μηχανικών σε αντίθεση με τις ίνες γυαλιού οι οποίες θεωρούνται αρκετά ευπαθείς.

Η επιλογής της μήτρας θεωρείται αρκετά σημαντική διότι με αυτή εξαρτάται ο χρόνος στο οποίο θα εκδηλωθεί η αστοχία. Θεωρείται ότι τα συστήματα, τα οποία αποτελούνται από εποξειδικές ρητίνες πιο ανθεκτικά σε σχέση με τις υπόλοιπες<sup>34</sup>.

#### **3.8.4 Μηχανική Συμπεριφορά των ινοπλισμένων πολυμερών.**

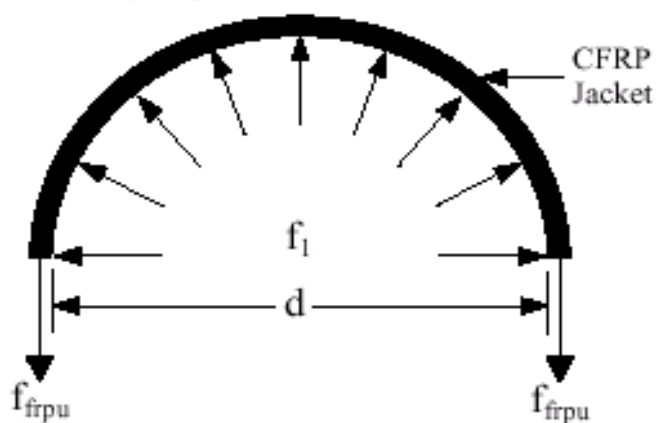
Η εφαρμογή των FRP με την διεύθυνση της ίνας κάθετα στον άξονα του υποστυλώματος έχει ως αποτέλεσμα την αντοχή στις τάσεις που αναπτύσσονται όταν το υποσύλωμα φορτίζεται σε θλίψη και αποτελεί ένα μέσο περίσφιξης. Αξίζει να σημειωθεί ότι, με την αύξηση της ανθεκτικότητας του περισφιγμένου σκυροδέματος έχουμε και σημαντική αύξηση της απορρόφησης ενέργειας από το ίδιο το υποσύλωμα καθώς και την αύξηση της πλαστιμότητας. Ακόμη για το περισφιγμένο σκυρόδεμα έχουν αναπτυχθεί πολλές σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης αλλά χρήση τους γίνεται σε εξειδικευμένες περιπτώσεις(κυκλικές και ορθογωνικές διατομές). Σήμερα, το πιο διαδεδομένο είναι το μοντέλο του Mander et al. Στην αρχή είχε αναπτυχθεί για την περιγραφή της περίσφιξης υποστυλωμάτων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Ωστόσο, στην πορεία εξελίχθηκε από τους Myrmidon και Shahawy για την περιγραφή των FRP που καλύπτουν τα υποστυλώματα.





Σχήμα 2.5: Σχέση τάσεων-παραμορφώσεων στο περισφιγμένο και απερίσφικτο σκυρόδεμα.<sup>36</sup>

Επιπροσθέτως, η τάση που αναπτύσσεται λόγω περίσφυξης με την εισαγωγή στον πυρήνα του σκυροδέματος προκύπτει με την εφαρμογή ισορροπίας δυνάμεων κάνοντας το διάγραμμα ελεύθερου σώματος μιας διατομής.



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος μιας διατομής.<sup>36</sup>

Ακόμη, η αντίδραση του μανδύα του πολυμερούς στις εγκάρσιες παραμορφώσεις ονομάζεται τάση λόγω εγκιβωτισμού. Με λίγα λόγια, η ενίσχυση των υποστυλωμάτων με FRP γίνεται για την αύξηση της αντοχής τους σε επιπλέον φορτίο.

Επιπλέον, είναι άξιο προσοχής ότι κατά την διάρκεια την ενίσχυσης του υποστυλώματος το επιπλέον φορτίο που καλείται να αναλάβει δεν πρέπει να οδηγήσει σε λυγισμό. Σύμφωνα με τον Καναδικό κανονισμό (CSA Standard A23.3-94) προτείνει για μέλη με  $I_u / h \leq 3$  να ταξινομούνται ως υποστυλώματα και να ελέγχεται αν ικανοποιούν την σχέση [8] με αποτέλεσμα να μην υπάρξει αστοχία σε λυγισμό.

### 3.9 Μηχανικές αγκυρώσεις

Υπάρχουν διατάξεις στις οποίες δεν υπάρχει ο απαραίτητος χώρος στον οποίο πρέπει να εφαρμοστεί το απαραίτητο μήκος επικόλλησης. Σε αυτές τι περιπτώσεις έρχεται η μηχανική αγκύρωση να βοηθήσει τους μηχανικούς, με την οποία δεν είναι απαραίτητο να διαθέτει ιδιαίτερο χώρο για την τοποθέτηση της. Υπάρχουν κάποια χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτουν οι μηχανικές αγκυρώσεις προκειμένου να πετύχουν τον στόχο για τον οποίο χρησιμοποιούνται. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι τα υλικά με καλή μηχανική συμπεριφορά, υψηλή αντοχή και πλαστική συμπεριφορά. Το υλικό που συνηθίζεται να χρησιμοποιείται είναι ο χάλυβας. Επιπλέον, η τεχνική που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο είναι αυτή των χαλύβδινων πλακών αγκύρωσης, τοποθετούμενες στα άκρα του ελάσματος σε ζεύγη και στις δύο όψεις, όπως για παράδειγμα είναι ένας τοίχος, με την βοήθεια ενός αριθμού προεντεταμένων κοχλιών ασκεί πίεση θλιπτική πίεση εγκλωβίζοντας το έλασμα. Ακόμη, μία διαφορετική τεχνική αγκύρωσης από αυτή που ήδη έχει αναφερθεί είναι με τη χρήση γωνιακών χαλύβδινων ελασμάτων και επίσης ένας ακόμη είναι η δημιουργία εγκοπών μέσα στο σώμα του τοίχου και με τη βοήθεια μηχανικών μέσων πετυχαίνεται η αγκύρωση του ελάσματος.

Κάπου εδώ πρέπει να αναφερθούν οι βασικοί στόχοι αγκύρωσης:

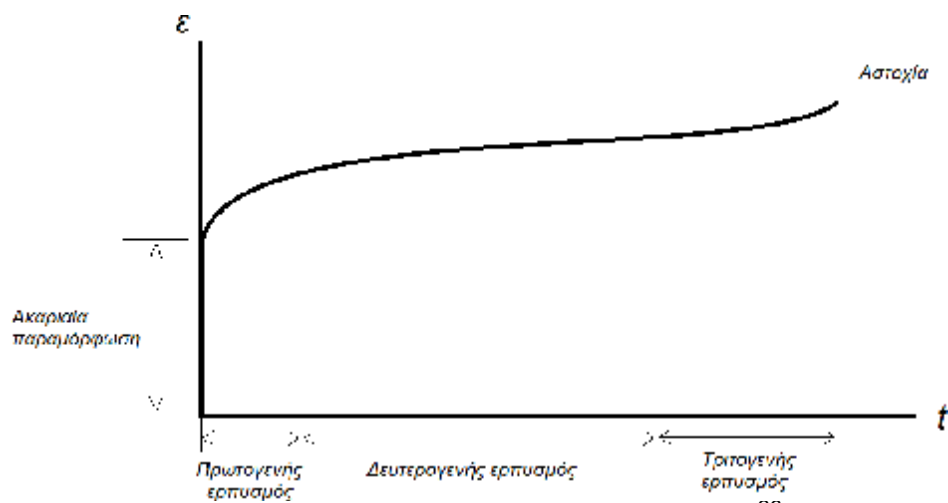
- Να βοηθούν στη συγκράτηση των ελασμάτων από τα άκρα τους με στόχο την αποφυγή αποκόλλησης στις ευαίσθητες περιοχές.
- Να συγκρατεί το έλασμα και στη περίπτωση που εμφανιστεί αποκόλληση με στόχο να συνεχίσει να αναλαμβάνει φορτία.
- Στη περίπτωση που εμφανιστεί υπερκάλυψη ελασμάτων να εμποδίζει τη συγκέντρωση διατμητικών τάσεων.

### 3.10 Μηχανική συμπεριφορά και δυναμική καταπόνηση των σύνθετων υλικών

#### 3.10.1 Ερπυσμός

Ως ερπυσμός ορίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο σε στερεό σώμα στο οποίο ασκείται μια σταθερή δύναμη εκδηλώνεται αργή και συνεχής παραμόρφωση παρότι η τάση, η οποία το καταπονεί είναι μικρότερη από το όριο διαρροής του υλικού. Το φαινόμενο εμφανίζεται σε υψηλές θερμοκρασίες και όταν ασκούνται μηχανικές καταπονήσεις για συνεχόμενο χρόνο. Στο φαινόμενο του ερπυσμού η παραμόρφωση δίνεται συναρτήσει με το χρόνο επιβολής της τάσης και τη θερμοκρασία  $\epsilon=f(t,\sigma,T)$ .

Στη συνέχεια παραθέτεται ένα διάγραμμα στο οποίο εμφανίζεται η παραμόρφωση να είναι ελαστική με την άσκηση του φορτίου.



Εικόνα 3.15: Καμπύλη ερπυσμού.<sup>36</sup>

Η διαδικασία του ερπυσμού εμφανίζεται σε τρία στάδια, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

- Πρωτογενής ή μεταβατικός ερπυσμός, στον οποίο εμφανίζεται συνεχής μείωση του ρυθμού παραμόρφωσης του υλικού με το χρόνο.
- Δευτερογενής ερπυσμός, είναι το δεύτερο στάδιο του ερπυσμού, στο οποίο η χρονική διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου είναι αρκετά μεγάλη, ενώ η ταχύτητα ερπυσμού ε μένει σταθερή. Η ταχύτητα ερπυσμού παραμένει σταθερή εξαιτίας δύο διεργασιών που δημιουργούνται, της σκλήρυνσης πλαστικής παραμόρφωσης και της αποκατάστασης της δομής εξαιτίας της ανόπτησης.
- Τριτογενής ερπυσμός, είναι το τρίτο στάδιο, στο οποίο η ταχύτητα του ερπυσμού αυξάνεται ραγδαία με αποτέλεσμα να προκαλείται η αστοχία του υλικού. Η αύξηση αυτή οφείλεται στην μείωση της ενεργούς διατομής του υλικού με αποτέλεσμα η πραγματική τάση που ασκείται να αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό.

Κάπου εδώ είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι ανθρακονήματα και τα υαλονήματα δεν εμφανίζουν το φαινόμενο του ερπυσμού. Οι ίνες αραμιδίου και οι μήτρες ρητινών εμφανίζουν το φαινόμενο του ερπυσμού. Επίσης, ο βαθμός με τον οποίο εμφανίζεται ο ερπυσμός εξαρτάται από την ίνα που χρησιμοποιήθηκε και του προσανατολισμού της. Οι ίνες άνθρακα και γυαλιού δεν στρεβλώνονται, παραμένουν αμετακίνητες με αποτέλεσμα να μην εμφανίζουν ερπυσμό και να συμπεριφέρονται ελαστικά.

## Κεφάλαιο 4ο

### 4.1 Εισαγωγή στους κανονισμούς

Τα ινοπλισμένα πολυμερή δεν εμφανίζουν ευρεία χρήση στις επιλογές των μηχανικών όσο αναφορά τις κατασκευές που αποτελούνται από σκυρόδεμα, ως αποτέλεσμα της έλλειψης των κανονιστικών πλαισίων. Αρχικά, ο πρώτος κανονισμός τυπώθηκε στη χώρα του ανατέλλοντος ηλίου – Japan Society of Civil Engineers, 1992; 1993; 1997-. Στη συνέχεια, οι επόμενες συστάσεις που ακολούθησαν ήταν στην Ευρωπαϊκή χερσόνησο από το πρόγραμμα EUROCRETE -Clarke et al., 1996-, οι επόμενες χώρες που ακολούθησαν ήταν ο Καναδάς από το Canadian Standards Association, 1996 και η ΗΠΑ από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος – ACI Committee 440, 1998-. Πιο αναλυτικά, οι συστάσεις του ACI έχουν αναθεωρηθεί αρκετές φορές, και μία σειρά από Ευρωπαϊκές χώρες έχουν τυπώσει και δημοσιεύσει δικούς τους κανονισμούς ή συστάσεις με σκοπό την χρήση των ινοπλισμένων πολυμερών, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως ενισχυτικά στοιχεία σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα ή και για βασικό στοιχείο όπλισης μίας κατασκευής.

Το 1996, η Διεθνής Ομοσπονδία Σκυροδέματος, η γνωστή με το συμβολισμό fib, οργάνωσε την ομάδα 9.3 με την βοήθεια του καθηγητή Luc Taerwe να προεδρεύει αυτής, έτσι ώστε να δημιουργήσουν οδηγίες, τέτοιες ώστε να βοηθήσουν στο σχεδιασμό κατασκευών από σκυρόδεμα, οπλισμένων, προεντεταμένων ή ενισχυμένων με σύνθετα υλικά. Επίσης, αξίζει να γίνει αναφορά ότι το 2000 η προαναφερθείσα ομάδα με τη συμβολή του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Δικτύου ConFibreCrete (1997-2001) δημοσίευσε το τεύχος 1, στο οποίο αναφέρεται για τον εξωτερικά επικολλημένο οπλισμό από ινοπλισμένα πολυμερή σε κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (fib Task-group 9.3,2001). Η ομάδα αυτή στη συνέχεια μαζί με το ερευνητικό δίκτυο En-Core (2004-08) το 2007 τύπωσαν το τεύχος 40, στο οποίο περιέχεται μία ολοκληρωμένη έκθεση για τις συστάσεις πάνω

στο σχεδιασμό κατασκευών από σκυρόδεμα ,οι οποίες θα έχουν ως κύριο οπλισμό τα ινοπλισμένα πολυμερή (fib Task – group 9.3, 2007). Η ομάδα αυτή ως επόμενο στόχο προς κατάκτηση έχει θέσει είναι η δημιουργία συστάσεων για χρήση ινοπλισμένων πολυμερών για εσωτερικό αλλά και για εξωτερικό οπλισμό.

Σε αυτό το κομμάτι της πτυχιακής εργασίας γίνεται μία προσπάθεια προσέγγισης των σημαντικότερων σημείων του τεύχους 40 της fib, η οποία ασχολείται εκτενέστερα με όλα τα ζητήματα της κατασκευαστικής συμπεριφοράς και φιλοσοφίας που διέπουν στον σχεδιασμό. Επιπλέον, δίνοντας παράλληλα προσοχή στην αντοχή, την καμπτική ικανότητα, τις παραμορφώσεις, τη ρηγμάτωση, τη διάτμηση και τη συνάφεια.

## **4.2 Θεωρήσεις για τον σχεδιασμό**

### **4.2.1 Ανθεκτικότητα**

Ο σύγχρονος μηχανικός είναι περιορισμένος για να χρησιμοποιήσει τα ινοπλισμένα πολυμερή διότι οι πληροφορίες που έχουν συγκεντρωθεί και τα αφορούν είναι ελλιπή παρ'όλο που έχει παρατηρηθεί εκτενή πρόοδος σχετικά με την κατανόηση των μηχανισμών φθοράς των υλικών αυτών. Επιπρόσθετα, αξίζει να προστεθεί με τα παραπάνω ότι το θέμα της χρήσης ινοπλισμένων πολυμερών γίνεται ακόμα πιο δύσκολο εξαιτίας συγκεκριμένων καταστάσεων. Κάποιες από αυτές τις περιπτώσεις είναι η ανύπαρκτη διεθνή συμφωνία για τις δοκιμές ανθεκτικότητας στα προαναφερθέντα υλικά, η πολυπλοκότητα που δημιουργείται εξαιτίας των πολλών και διάφορων μεθόδων που δημιουργούνται, στη ποικιλότητα που εμφανίζουν οι διάφοροι τύποι ινών/ πολυμερών, στις διαφορετικές έρευνες που προσπαθούν να προσεγγίσουν το ζήτημα, αλλά καθώς και η έλλειψη πληροφοριών από πραγματικού χρόνου στοιχεία που αφορούν τα χαρακτηριστικά τους<sup>33</sup>.

Με σκοπό την βελτίωση βάσιμων και πρακτικών κανόνων για τον σχεδιασμό, το τεύχος 40 της fib προτείνει για την αξιολόγηση της

ανθεκτικότητας μία συσχέτιση πληροφοριών, οποίες προέκυψαν από πειράματα ανθεκτικότητας και προτεινόμενων τιμών σχεδιασμού για τις μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων πολυμερών. Ακόμη, ελέγχονται και δύο προσεγγιστικές ενέργειες με σκοπό τη διερεύνηση της ανθεκτικότητας. Αναλυτικότερα, η πρώτη από τις προαναφερθείσες ενέργειες με τον όρο <απλοποιητική διαδικασία υπολογισμού της ανθεκτικότητας> στηρίζεται σε επιταχυνόμενες διεργασίες υπό φόρτιση και σε αντοχής, η οποία έχει απομείνει και οι οποίες είναι σε παράλληλη ταύτιση με το διεθνές ημι – πιθανοτικό σκεπτικό ασφάλειας.

Η δεύτερη ενέργεια έχει τον όρο <ακριβής διαδικασία υπολογισμού της ανθεκτικότητας> εμφανίστηκε με τη συμβολή της ομάδας 9.3 της fib, η οποία μελετά τις φθορές του περιβάλλοντος με μεθόδους περίπου ίδιους με αυτούς που χρησιμοποιούν στο σχεδιασμό των κατασκευών από σκυρόδεμα οπλισμένων με χάλυβα. Η βοήθεια για να εξάγουν συμπεράσματα με αυτή την προσέγγιση είναι η είσοδος μειωτικών συντελεστών για τις τάσεις με τις οποίες συνυπολογίζεται η σχετική αντίσταση διάφορων τύπων ινοπλισμένων πολυμερών σε διαβρωτικό περιβάλλον καθώς επίσης την ζωή σχεδιασμού κατασκευής που είναι επιθυμητή προς απόκτηση. Με αποτέλεσμα αυτή η προσέγγιση να θεωρείται καλύτερη που αναφέρονται σε διεθνής συστάσεις διότι θεωρείται λιγότερο συντηρητική<sup>33</sup>.

#### **4.2.2 Κάμψη**

Είναι ευρέως γνωστό ότι τα βασικά σημεία της ανάλυσης διατομής, είναι σε θέση να εφαρμοστούν σε κατασκευές, οι οποίες αποτελούνται από οπλισμένο σκυρόδεμα με ινοπλισμένα πολυμερή. Ακόμη, και αν όλες οι μορφές αστοχίας, απομακρυνθούν από την κατασκευή, η αστοχία της κάμψης θα παραμένει στην κατασκευή. Αυτό συμβαίνει διότι είτε της σύνθλιψης του

σκυροδέματος είτε λόγω της αστοχίας που εμφανίζουν τα ινοπλισμένα πολυμερή σε εφελκυσμό (Εικόνα 4.1).



**Εικόνα 4.1:** Αστοχία σε κάμψη δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με ΙΩΠ: (α) σύνθλιψη του σκυροδέματος και (β) εφελκυστική αστοχία του διαμήκους οπλισμού.<sup>2</sup>

Επιπρόσθετα, το τεύχος 40 της fib συμπεριέλαβε το περιεχόμενο του Ευρωκώδικα 2 (CEN, 2004) για την αξιολόγηση της ροπής αντοχής ( $M_u$ ) που εφίστανται οι διατομές από σκυρόδεμα οπλισμένων με ινοπλισμένα πολυμερή. Το συγκεκριμένο τεύχος για τη αστοχία της κάμψης προτείνει κάποια εργαλεία για να αντιμετωπιστεί. Αυτά είναι εξισώσεις και διαγράμματα σχεδιασμού για την  $M_u$ . Στη περίπτωση που παρατηρηθεί καμπτική αστοχία, η οποία οφείλεται στην αστοχία του οπλισμού από ινοπλισμένα πολυμερή, το τεύχος 40 υποδεικνύει μία επαναληπτική σειρά ενεργειών με σκοπό την αξιολόγηση της θλιπτικής παραμόρφωσης του σκυροδέματος στην ακραία ίνα καθώς επίσης και την αποτίμηση της  $M_u$ . Επίσης, μία επιπλέον πρόταση που κάνει για την αντιμετώπιση του ζητήματος της  $M_u$  να είναι σε υψηλότερη θέση



σε σχέση με τη ροπή ρηγμάτωσης της διατομής του οπλισμένου σκυροδέματος είναι το μικρότερο ποσοστό του διαμήκους οπλισμού<sup>33</sup>.

#### 4.2.3 Μετατοπίσεις και ρηγμάτωση

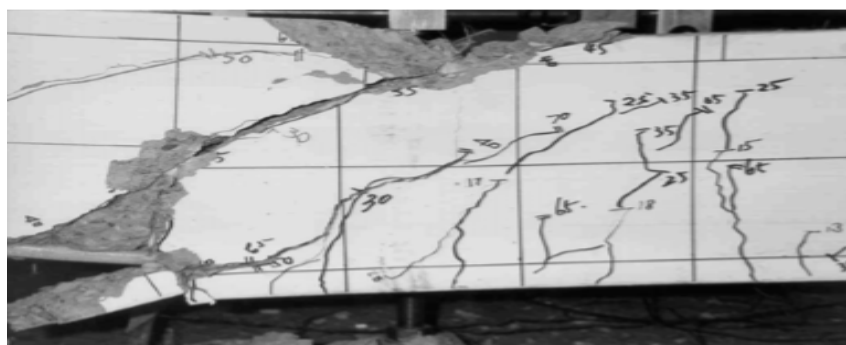
Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια ο οπλισμός αποτελούμενος από ινοπλισμένα πολυμερή δεν επιβαρύνεται από προβλήματα διάβρωσης, όπως συμβαίνει στους οπλισμούς αποτελούμενους από χάλυβα. Όμως, στο πρόβλημα της ρηγμάτωσης, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα με σκοπό τον περιορισμό της. Οι λόγοι που αναγκάζουν τους μηχανικούς να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα αφορούν κυρίως την αισθητική αλλά και καταστάσεις ειδικών εφαρμογών. Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί ότι οι κανόνες που διέπουν τα φαινόμενα των μετατοπίσεων και της ρηγμάτωσης των οπλισμένων με ινοπλισμένα πολυμερή μελών από σκυρόδεμα είναι περίπου ίδιες με αυτούς των μελών οπλισμένων με χάλυβα. Κάπου εδώ, πρέπει να αναφερθεί ότι αν παρατηρηθεί οποιαδήποτε αλλαγή στις οριακές τιμές των υλικών αυτών, τότε η διαφοροποίηση θα μπορούσε να συμπεριληφθεί τόσο στις βραχυπρόθεσμες όσο και μακροπρόθεσμες μηχανικές ιδιότητες των υλικών. Για παράδειγμα μπορεί να γίνει λόγος για το μέτρο ελαστικότητας των οπλισμών από ινοπλισμένα πολυμερή, το οποίο προκαλεί καλύτερες μετατοπίσεις σε σχέση με τα μέλη που είναι οπλισμένα από χάλυβα<sup>33</sup>.

Στη συνέχεια, στο τεύχος 40 της fib εμφανίζονται τα διάφορα είδη ρηγμάτωσης, τα οποία αναφέρονται στις διεθνείς οδηγίες σχεδιασμού. Ακόμη, εμφανίζονται και οι δύο σημαντικές ενέργειες, οι οποίες συμβάλουν στο καθορισμό των μετατοπίσεων σε μέλη σκυροδέματος ενισχυμένα με ινοπλισμένα πολυμερή. Στη πρώτη από τις δύο ενέργειες εμπεριέχονται οι διαφοροποιημένες εξισώσεις του ACI, οι οποίες στηρίζονται στις δευτερεύοντες ροπές της ρηγματωμένης και μη διατομής, έτσι όπως αρχικά παρουσιάστηκαν από τον Branson. Η ανεπάρκεια ικανοποιητικής

τεκμηρίωσης έχει ως αποτέλεσμα να γνωρίζουν λίγες εφαρμογές οι εμπειρικές τροποποιήσεις πάνω στη συνάφεια παρόλο το πλήθος των τροποποιήσεων και διορθωτικών συντελεστών. Από την άλλη ο Ευρωκώδικας 2 (και του Model Code 90) έχει εξεταστεί σχολαστικά και εφαρμόζεται καλύτερα σε σκυρόδεμα από οπλισμένο με ινοπλισμένα πολυμερή<sup>33</sup>.

#### 4.2.4 Διάτμηση

Το φαινόμενο της διάτμησης πάνω στα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα θεωρείται σύνθετο εξαιτίας της δημιουργίας εσωτερικών μηχανισμών ανάληψης φορτίων, των οποίων το μέγεθος και ο συνδυασμός είναι ακόμα υπό έρευνα (π.χ. Εικόνα 4.2.4.1). Μολονότι, την προαναφερθείσα δυσκολία η διατμητική αντίσταση που εμφανίζουν τα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα δημιουργείται κυρίως από τα εξής γεγονότα, από την συνδρομή της αρηγμάτωσης θλιβόμενης ζώνης, την αλληλοσύνδεση των αδρανών, την δράση βλήτρου και τον οπλισμό διάτμησης όταν αυτός υφίσταται. Η δημιουργία όλων των παραπάνω μηχανισμών οφείλεται όχι μόνο τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος αλλά και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού, το οποίο χρησιμοποιείται στο οπλισμό και στη διεπιφάνεια μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού<sup>33</sup>.



**Εικόνα 4.2:** Δοκός ΟΣ με κύριο οπλισμό από ΙΩΠ: αστοχία σε διάτμηση.<sup>33</sup>

Στο τεύχος 40 της fib εμπεριέχεται το φαινόμενο της διάτμησης, και αναλύεται η επίδραση που ασκεί η χρησιμοποίηση οπλισμού από ινοπλισμένα πολυμερή στο φαινόμενο αυτό, και ποιες συστάσεις θα πρέπει να δημιουργηθούν με σκοπό την εφαρμογή αυτού του είδους οπλισμών.

#### 4.2.5 Συνάφεια

Η σχέση ανάμεσα σε σκυρόδεμα και ράβδων από ινοπλισμένα πολυμερή είναι σημαντική για εύρυθμη λειτουργία των οπλισμένων στοιχείων. Για να πετύχει ο σύνδεση ανάμεσα σε σκυρόδεμα και ράβδων από ινοπλισμένα πολυμερή, η προαναφερθείσα σχέση πρέπει να είναι σχολαστικά αναλυτική με σκοπό οι δυνάμεις να μεταδοθούν από το ένα στο άλλο<sup>33</sup>.

Η επίδραση ανάμεσα σε σκυρόδεμα και χαλύβδινων ράβδων διαφοροποιείται από αυτή των ράβδων από ινοπλισμένα πολυμερή εξαιτίας αρκετών λόγων. Συγκεκριμένα, στη περίπτωση των ράβδων που χρησιμοποιούνται νευρώσεις από χάλυβα, η επίδραση δημιουργείται εξαιτίας της μηχανικής δράσης των ράβδων του οπλισμού στο σκυρόδεμα. Ακόμη, παρατηρείται ότι όταν η εφελκυστική τάση που οφείλεται στο σκυρόδεμα ξεπεράσει την μηχανική δράση εξαιτίας της συνάφειας αυτό προκαλεί ρηγμάτωση, οποία συνεχίζει να αναπτύσσεται μέχρι την επιφάνεια. Επίσης, μπορεί να εμφανιστούν αρκετές δευτερεύουσες ρηγματώσεις, οι οποίες αναπτύσσονται κατά μήκος της ράβδου ανάμεσα στις κύριες ρωγμές και είναι σε κλίση σε σχέση με τις κύριες και μένουν μέσα στο σκυρόδεμα χωρίς να εμφανίζονται στην επιφάνεια. Ακόμη, στο σενάριο που χρησιμοποιηθούν ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή χαρακτηριζόμενα από χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και με λιγότερες πτυχές στην επιφάνεια, η συνάφεια εμφανίζεται να λειτουργεί ως τριβή. Η αστοχία της συνάφειας που μπορεί να εμφανιστεί στις χαλύβδινες ράβδους είναι εξαιτίας της θραύσης του σκυροδέματος στη περιοχή των ραβδώσεων. Η αστοχία της συνάφειας ανάμεσα στις ράβδους από ινοπλισμένα πολυμερή οφείλεται εξαιτίας της αστοχίας που εμφανίζεται στο σκυρόδεμα και σε μερικές περιπτώσεις στην φθορά της επιφάνειας του οπλισμένου πολυμερή<sup>33</sup>.

Μερικές λεπτομέρειες , οι οποίες υποδεικνύουν την διαφορά ανάμεσα στην αστοχία που εμφανίζουν οι ράβδοι από ινοπλισμένα πολυμερή και των ράβδων από χάλυβα είναι το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας, της χαμηλότερης διατμητικής αντοχής και δυσκαμψίας στην διαμήκη και στη εγκάρσια διεύθυνση και των χαμηλών εγκάρσιων παραμορφώσεων. Μολονότι, της χαμηλότερης αντοχής της συνάφειας που εμφανίζει η χρήση του χάλυβα, η όλκιμη συμπεριφορά της συνάφειας παρουσιάζει καλύτερη κατανομή τάσεων συνάφειας με αποτέλεσμα να μειώνονται τα μήκη αγκύρωσης.

Στο τεύχος 40 της fib κάνει διακρίνει τη συνάφεια σε τρία επίπεδα, μικρό, μέσο και μακροσκοπικά και εμφανίζει της εξισώσεις , οι οποίες υποδεικνύονται από τις υπάρχουσες οδηγίες σχεδιασμού με σκοπό τον υπολογισμό των μηκών της αγκύρωσης. Πρέπει να αναφερθεί ότι ακόμα δεν έχουν προταθεί συγκεκριμένες συστάσεις πάνω στο θέμα αυτό για σχεδιασμό<sup>33</sup>.

#### **4.2.6 Φιλοσοφία σχεδιασμού**

Αρχικά, οι τυπικοί κανόνες σχεδιασμού για οπλισμένο σκυρόδεμα ισχυρίζονται ότι η βασική μορφή αστοχίας έχει πάντα μια πλαστιμότητα εξαιτίας της διαρροής του καμπτόμενου οπλισμού. Αυτό δεν ισχύει στις συστάσεις για οπλισμένα μέλη από ινοπλισμένα πολυμερή, στα οποία ασκείται ψαθυρή αστοχία εξαιτίας δύο παραγόντων, οι οποίοι είναι είτε λόγω της σύνθλιψης του σκυροδέματος είτε λόγω της εφελκυστικής αστοχίας της ράβδου από ινοπλισμένα πολυμερή. Επιπρόσθετα, οι κανόνες που υπάρχουν έχουν βασικές ασάφειες σε ό,τι αφορά την ασφάλεια, οι οποίες σε συσχέτιση με την αλλαγή του είδους της αστοχίας και με άλλα θέματα που αφορούν τα οπλισμένα στοιχεία από ινοπλισμένα πολυμερή επηρεάζουν σημαντικά το τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και την ασφάλεια στοιχείων σκυροδέματος από ινοπλισμένα πολυμερή<sup>1</sup>.

Στη εργασία των Neocleous et al. (2005) εμφανίζεται ότι η υλοποίηση των προσεγγίσεων για την ασφάλεια δηλαδή τον σχεδιασμό οριακής κατάστασης δεν αποφαίνεται να οδηγούν σε ασφαλή στοιχεία με αποτέλεσμα μέλη από οπλισμένο σκυρόδεμα με μεγαλύτερα επίπεδα οπλισμού ή καλύτερους λόγους μόνιμων προς κινητών φορτίων να εμφανίζονται ασφαλέστερα. Επίσης ένα ακόμα αρνητικό είναι αυτό της σημαντικής διαφοράς που εμφανίζουν τα όρια αντοχής ανάμεσα στη καμπτική μορφή αστοχίας και των άλλων μορφών, τα οποία εμφανίζουν σημαντικές διαφορές με αποτέλεσμα ο μηχανικός να μην είναι σε θέση να τα αξιολογήσει. Αυτός ο λόγος είναι που συντελεί στο ότι οι κανονισμοί δεν δίνουν πληροφορίες πάνω στη μορφή αστοχίας, που θα συμβεί και σε ποιο φορτίο στη περίπτωση που ασκείται καμπτική υπερ – αντοχή.

Σε στοιχεία σκυροδέματος ενισχυμένα με ινοπλισμένα πολυμερή έχει παρατηρηθεί ότι η σύνθλιψη του σκυροδέματος είναι συνηθέστερη μορφή καμπτικής αστοχίας εξαιτίας της οριακής τιμής της εφελκυστικής αντοχής του ινοπλισμένου πολυμερούς, η οποία επιταχύνεται σε σπάνιες περιπτώσεις σε τυπικές διατομές από σκυρόδεμα. Επίσης, η χρησιμοποίηση συντελεστών ασφάλειας για τον διαμήκη οπλισμό ( $\gamma_{FRP-L}$ ) κάποιες φορές δεν είναι απαραίτητη στο σχεδιασμό οπλισμένου σκυροδέματος με ινοπλισμένα πολυμερή επειδή η καμπτική αστοχία οφείλεται στην σύνθλιψη του σκυροδέματος<sup>33</sup>.

Επίσης, η χρησιμοποίηση του συντελεστή  $\gamma_{FRP-L}$  επιφέρει πάντα της επιθυμητή μορφή της καμπτικής αστοχίας. Αυτό βέβαια δεν ισχύει πάντα σε όλες τις περιπτώσεις δηλαδή για μεγάλες τιμές  $\gamma_{FRP-L}$ , οι οποίες προκαλούν καμπτική αστοχία εξαιτίας της αστοχίας που εμφανίζουν τα ινοπλισμένα πολυμερή. Ωστόσο αξίζει να σημειωθεί κάπου εδώ ότι η εφαρμογή μεγάλων συντελεστών ασφάλειας απορρέει σύνθλιψη του σκυροδέματος χωρίς να καλυτερεύει η ασφάλεια των στοιχείων.

Επίσης, η χρήση αρκετών συντελεστών μειωτικών συντελεστών της αντοχής, με στόχο να συμπεριλαμβάνεται και η επίδραση του χρόνου στη συμπεριφορά του οπλισμού από ινοπλισμένα πολυμερή πιθανόν να μην επιφέρει την επιθυμητή μορφή αστοχίας, είναι θεωρητικά είναι πρωταρχικός βραχυπρόθεσμος σχεδιασμός και ίσως να οδηγεί σε ασύμφορο σχεδιασμό. Χρίζεται βασικό κομμάτι να δημιουργηθούν διατάξεις τέτοιες ώστε στο

σχεδιασμό να εμπεριέχονται υπολογισμοί, οι οποίοι να στοχεύουν στη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των οπλισμών από ινοπλισμένα πολυμερή. Μία προτεινόμενη λύση σε όλο αυτόν το προβληματισμό είναι η χρησιμοποίηση των βραχυπρόθεσμων ιδιοτήτων για τον σχεδιασμό για την οριακή κατάσταση και συνεπώς για επιβεβαιωθεί ότι η τάση που εφαρμόζεται είναι μικρότερη από τη διαθέσιμη σε κάθε χρονικό διάστημα<sup>2</sup>.

Τέλος, στο τεύχος 40 της fib εμφανίζεται μία νέα αντιμετώπιση όσο αναφορά τον σχεδιασμό και την ασφάλεια. Αναλυτικότερα, ο κύριος στόχος αυτής της νέα αντιμετώπισης είναι η ταξινόμηση ως προς τον βαθμό ζημιάς που προκαλούν οι αστοχίες καθώς και η επίτευξη των απαιτήσεων για τα επίπεδα ασφάλειας. Η εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας εξαρτάται από την εφαρμογή ενός πλαισίου, το οποίο θα βοηθάει στη εφαρμογή κατάλληλων συντελεστών ασφαλείας, οι οποίοι με τη σειρά τους θα αποτελούν μέρος ενός συνόλου διαδικασιών που θα στοχεύουν στην βελτίωση του κανονισμού Neoclaous et al, 2005. Η αντιμετώπιση αυτή έγινε δεκτή αρχικά διότι πρόσφερε την δυνατότητα να χρησιμοποιούνται νέα υλικά χωρίς να αναθεωρείται κάθε φορά ο κανονισμός. Ως αποτέλεσμα, οι μηχανικοί ή οι επιτροπές των κανονισμών αυτών θα είναι σε θέση να καθορίζουν αν η σύνθλιψη του σκυροδέματος, η αστοχία της συνάφειας ή η διατμητική αστοχία θα αποτελούν την βασική μορφή αστοχίας για σχεδιαστικούς λόγους αλλά επίσης θα επιτρέπει στον μηχανικό να επιλέγουν της δευτερεύουσα μορφή αστοχίας, έτσι η λύση αυτή θα δίνει το κατάλληλο επίπεδο ασφάλειας της κατασκευής.

### 4.3 Προδιαγραφές- Κανονισμοί για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με FRP

#### 4.3.1 Επικόλληση ελασμάτων/ υφασμάτων

##### Αποδεκτά υλικά

- ✚ Προκειμένου να εξομαλυνθεί η επιφάνεια του υποστρώματος, γίνεται χρήση μη συρικνούμενων τσιμεντοειδών κονιαμάτων ή εποξειδικών παστών με συνάφεια και εφελκυστική αντοχή, τουλάχιστον κατά 50% μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του υποστρώματος. Κρίνεται απαραίτητο τα υλικά να συνοδεύονται από αναλυτικά τεχνικά φυλλάδια του παραγωγού, υπόκειται σε έγκριση της Υπηρεσίας.
- ✚ Η χρήση ελασμάτων από ανθρακονήματα υψηλού μέτρου ελαστικότητας δε συνίσταται, διότι τα υλικά εκείνα έχουν μικρή παραμορφωσιμότητα. Κρίσιμο παράγοντα αποτελεί η θερμική αντοχή των ελασμάτων, η οποία ορίζεται ως η θερμοκρασία άνω της οποίας το πολυμερές και το συγκολλητικό υλικό αρχίζουν να αποδομούνται και να χάνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες. Η κρίσιμη θερμοκρασία για τα ελάσματα CFRP κυμαίνεται μεταξύ 100ο C - 300ο C. Από θερμικής άποψης ασθενέστερο είναι το συγκολλητικό υλικό. Ο προσδιορισμός της θερμικής διαστολής των ελασμάτων γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο EN 1770:1998. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενίσχυση με ινοπλισμένα πολυμερή δεν προκαλεί τυχόν άλλα προβλήματα του στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως π.χ. διάβρωση του οπλισμού. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 1542:1999 το σκυρόδεμα επί του οποίου θα συγκολληθούν τα ελάσματα πρέπει να διαθέτει αντοχή τουλάχιστον<sup>38,39</sup>
- ✚ Για την επικόλληση των ινοπλισμένων υφασμάτων χρησιμοποιούνται εποξειδικές κόλλες χωρίς ανενεργούς διαλύτες με τα εξής χαρακτηριστικά:
  1. Εποξειδικές κόλλες δυο συστατικών (ρητίνη, σκληρυντής)

2. Η κατ' όγκον αναλογία ανάμειξης σκληρυντή προς ρητίνη θα υπερβαίνει το 1:3
3. Το μέτρο ελαστικότητας του σκληρυμένου μίγματος δε θα είναι μικρότερο από το 1/30 του μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος.
4. Οι αντοχές της κόλλας σε θλίψη και εφελκυσμό θα είναι τουλάχιστον 50% μεγαλύτερες των αντίστοιχων αντοχών του σκυροδέματος.

Οι απαιτήσεις για τα συγκολλητικά υλικά πρέπει να είναι σύμφωνα με το πρότυπο του EN 1504-4:2004 και το Δελτίο της FIB (Federation International du Beton)<sup>43,44</sup>.

#### **4.3.2 Προσωπικό- Εξοπλισμός**

Το τεχνικό προσωπικό που θα ασχοληθεί με την εφαρμογή της μεθόδου οφείλει να έχει αποδεδειγμένη εμπειρία (βεβαιώσεις) εργοδοτών, σε έργα επισκευών και ενισχύσεων. Πριν την έναρξη των εργασιών πρέπει να πραγματοποιείται δοκιμαστική εφαρμογή, έτσι ώστε η υπηρεσία να εξακριβώσει την ικανότητα του συνεργείου, το οποίο πρέπει να είναι πλήρως εξοπλισμένο. Η επίβλεψη τέλος πρέπει να γίνεται από μηχανικό ο οποίος να διαθέτει εμπειρία τουλάχιστον 5 ετών.

#### **4.3.3 Αποθήκευση/προσωρινή τοποθέτηση πριν την εφαρμογή**

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίδεται στην αποθήκευση τους πριν από κάθε χρήση τους. Η άμεση τοποθέτησή τους σε έδαφος ή δάπεδο θα πρέπει να αποφεύγεται κυρίως σε εξωτερικό περιβάλλον ενώ ένα κατάλληλο κάλυμμα κρίνεται απαραίτητο. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να λαμβάνονται επίσης υπόψη (όπως υψηλές ή πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ακτίνες, χημικές ουσίες κτλ) τόσο κατά την αποθήκευση όσο και κατά τη χρήση καθώς και την



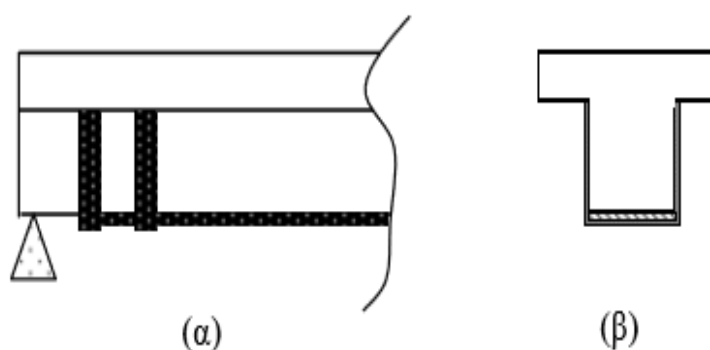
εφαρμογή τους. Τα FRP είναι επιρρεπή σε επιφανειακές φθορές και τομές με αιχμηρά αντικείμενα καταστάσεις που μπορούν να μειώσουν την αντοχή τους<sup>38,39</sup>.

#### 4.4 Κατασκευαστικές διατάξεις

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μία προσπάθεια να μαζευτούν όλες οι κατασκευαστικές διατάξεις οι οποίες έχουν γραφεί μέχρι σήμερα στη βιβλιογραφία και τις συστάσεις του σχεδίου 2 και του κανονισμού των επεμβάσεων. Έτσι αναλυτικότερα παρουσιάζονται οι εξής διατάξεις (7):

- Αρχικά, κρίζεται απαραίτητο το πάχος των ελασμάτων, τα οποία στοχεύουν προς ενίσχυση να είναι μικρό με σκοπό να αποφεύγεται η γρήγορη αστοχία στη διεπιφάνεια επικόλλησης του ελάσματος. Ακόμη, επιλέγεται η χρησιμοποίηση ελασμάτων σε στρώσεις παραπάνω από μία αντί να χρησιμοποιηθεί ελάσματα με μεγάλο πάχος.
- Έπειτα, ο αριθμός των στρώσεων να μην ξεπερνά τα τρία σε αριθμό για ελάσματα και το πέντε σε πλήθος για εύκαμπτα υφάσματα, έκτος αν υπάρχει ένδειξη που να επιτρέπει τη χρησιμοποίηση περισσότερων στρώσεων.
- Επιπρόσθετα, αποφεύγονται οι ματίσεις του υλικού ενίσχυσης.
- Ακόμη, η απόσταση που υπάρχει ανάμεσα στο υλικό ενίσχυσης και τις ακμές της διατομής του σκυροδέματος να μην ξεπερνά το πάχος της επικάλυψης της κοντινότερης με την ακμή που είναι παράλληλη με τη ράβδο του υφιστάμενου οπλισμού.
- Στη συνέχεια, αξίζει να επισημανθεί ότι στις καταστάσεις που χρησιμοποιηθούν περισσότερες λωρίδες που είναι παράλληλες, όπως συμβαίνει στη περίπτωση πλακών, η απόσταση μεταξύ τους δεν πρέπει να υπερβαίνει το πενταπλάσιο του πάχους του στοιχείου, αλλά και το  $0.20 l_0$ , όπου  $l_0$  είναι η απόσταση των σημείων μηδενισμού της ροπής κάμψης κατά μήκους του στοιχείου.

- Η κόλλα που χρησιμοποιείται με σκοπό την ενίσχυση να έχει πλάσιμη συμπεριφορά.
- Η αγκύρωση του οπλισμού ενίσχυσης που είναι στο μέσο του ανοίγματος, το υλικό ενίσχυσης επιβάλλεται να επεκτείνεται και να αγκυρώνεται κοντά στις στηρίξεις. Στη περίπτωση ενίσχυσης πρέπει να απλώνεται και να αγκυρώνεται στις θλιβόμενες περιοχές σε μήκος της τάξεως του 1μ εντός αυτών. Κάπου εδώ πρέπει να αναφερθεί η εφαρμογή της τεχνικής δεν προδιαγράφεται σε στηρίξεις δοκών αυτό παρατηρείται εξαιτίας της εναλλαγής του πρόσημου της ροπής, όπου όταν ασκούνται μόνιμα φορτία στην εφελκόμενη ζώνη, τότε υπάρχει η πιθανότητα να μετατραπεί σε θλιβόμενη.



**Εικόνα 4.3:** Στοιχεία αγκύρωσης άκρων όταν χρησιμοποιούνται ΙΟΠ.<sup>39</sup>

- Να επιζητείται η βελτίωση της αγκύρωσης στα άκρα των ελασμάτων/υφασμάτων με τη βοήθεια εγκάρσιων λωρίδων ή άλλων αγκυριών ειδικού τύπου με αποδεδειγμένη αποτελεσματικότητα. Ακόμη, είναι σε θέση να χρησιμοποιηθούν λωρίδες ινοπλισμένων πολυμερών, οι οποίες θα είναι της μορφής αντεστραμμένου Π τα άκρα των οποίων φθάνουν μέχρι τη θλιβόμενη ζώνη της διατομής, μοιράζοντας τις τάσεις στην πλευρική επιφάνεια της δοκού (Εικόνα 4.4.1).

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

### 5.1 Ποιοτικός έλεγχος σύνθετων υλικών

Ο ποιοτικός έλεγχος των σύνθετων υλικών, έχει ως στόχο τον έλεγχο και την επιβεβαίωση ότι σε όλα τα βήματα που απαιτούνται για να πετύχει η επέμβαση της κατασκευής με την χρήση σύνθετων υλικών ακολουθούνται έτσι όπως αναγράφονται στις προδιαγραφές του έργου, σε ό,τι συστήνει ο προμηθευτής των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν και τέλος στους κανονισμούς που ισχύουν στην εκάστοτε χώρα<sup>40</sup>.



Για να θεωρηθεί μια επέμβαση πως έχει πετύχει τότε ο ποιοτικός έλεγχος πρέπει να ακολουθείται αυστηρά σε όλα τα στάδια της ενίσχυσης που χρησιμοποιούνται σύνθετα υλικά.

Τα στάδια είναι:

- Αρχικά, είναι η παράδοση και αποθήκευση των υλικών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν
- Έπειτα είναι οι συνθήκες του έργου, όπως είναι οι καιρικές και η καταλληλότητα του υποστρώματος.
- Τέλος, είναι η τοποθέτηση των υλικών στην στις επιθυμητές επιφάνειες.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο στάδιο βρίσκεται ο έλεγχος της ταυτότητας των σύνθετων υλικών, ο οποίος είναι η ονομασία του υλικού, ο τύπος του

προϊόντος που αγοράστηκε, ο έλεγχος του παραγωγού αν είναι αξιόπιστος, οι κωδικοί παρτίδας και η ημερομηνία λήξης των ρητινών. Όλα τα προαναφερθέντα μαζί συνθέτουν τον έλεγχο που γίνεται στο πρώτο στάδιο.

Στη συνέχεια, ακολουθεί ο έλεγχος εξακρίβωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας, η εφελκυστική αντοχή των ινών, η θερμοκρασία υαλώδους μεταπτώσεως, ο οποίος έλεγχος είναι απαραίτητο να συμβαίνει πριν την τοποθέτηση των υλικών στην επιθυμητή επέμβαση.

Έπειτα, αναφέρονται οι πληροφορίες που έχουν σχέση με τη μεταφορά και την αποθήκευση των υλικών, όπως περιγράφεται αναλυτικά στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο, και οι οποίες αναφέρονται στις συστάσεις του κατασκευαστή<sup>40</sup>.

## **5.2 Απαιτήσεις ποιοτικών ελέγχων και δοκιμών για την παραλαβή**

### **5.2.1 Έλεγχοι – Κριτήρια αποδοχής**

Με σκοπό να γνωρίζει ο σύγχρονος μηχανικός ότι η επέμβαση με την βοήθεια του σύνθετου υλικού αποτελείται από ινοπλισμένα πολυμερή ότι έγινε εύρυθμα χρειάζεται να κάνει κάποιους ελέγχους. Αυτοί οι έλεγχοι παρουσιάζονται στη συνέχεια αναλυτικά<sup>40</sup>:

#### **Οπτικός έλεγχος**

Ο οπτικός έλεγχος στοχεύει στον να βρίσκει κακοτεχνίες, πριν και κατά τη διάρκεια εφαρμογής των ενεργειών

- Αρχικά, πριν προχωρήσει η ενέργεια της επικόλλησης των υφασμάτων, θα πρέπει γίνεται έλεγχος της κατάστασης που βρίσκονται δηλαδή πρέπει να ελέγχεται η ύπαρξη πτυχώσεων, φθορών ή τραυματισμών. Επιπλέον, θα γίνεται σχολαστικός έλεγχος του υποστρώματος σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται στην προετοιμασία επιφάνειας του σκυροδέματος.
- Στη συνέχεια, πρέπει να γίνεται έλεγχος της εφαρμογής των κανόνων όπως αυτοί περιγράφονται αναλυτικά στη παράγραφο, η οποία αναφέρεται στην εφαρμογή του υφάσματος με σκοπό να πιθανόν

κακοτεχνίες να βρίσκονται έγκαιρα και να αφαιρούνται πριν η εργασία ολοκληρωθεί. Κάποιες από τις πιθανές κακοτεχνίες είναι οι παρακάτω: ο εγκλωβισμένος αέρας υφάσματος - υποστρώματος ή μεταξύ υφασμάτων, ο ελλιπής εμποτισμός των υφασμάτων, η ανομοιομορφία της κατεύθυνσης των ινών, η δημιουργία πτυχώσεων, ο ελλιπής πολυμερισμός της εποξειδικής κόλλας (ελέγχεται με την αφή), η μειωμένη συγκολλητική ικανότητα τη εποξειδικής κόλλας (ελέγχεται με τράβηγμα του υφάσματος με το χέρι όταν η κόλλα έχει πολυμεριστεί) και το ανεπαρκές μήκος αλληλοκάλυψης των υφασμάτων.

Τέλος, η επέμβαση χαρακτηρίζεται ως ικανοποιητική στις απαιτήσεις της κατασκευής, μόνο όταν κατά την διάρκεια του οπτικού ελέγχου δεν εντοπίζονται κακοτεχνίες ή αν εντοπίζονται να είναι μικρής κλίμακας με σκοπό να αποκατασταθούν.

#### **Μηχανικός (κρουστικός έλεγχος)**

Αυτός ο έλεγχος διεξάγεται στη περάτωση ή σε ενδιάμεσα στάδια εκτελούνται οι ενέργειες της διαδικασίας.

Ο σκοπός αυτού του ελέγχου είναι για να ελεγχθεί η στερεότητα και η συνοχή της επέμβασης. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη με την βοήθεια ενός σφυριού πλαστικής ή ελαστικής κεφαλής με στρογγυλά άκρα ασκούνται ελαφρές κρούσεις με ιδιαίτερη προσοχή διότι διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος να τραυματιστεί το ύφασμα. Στη συνέχεια εξετάζεται ο ήχος που παράγεται κατά τη διάρκεια αυτών των κρούσεων. Ο υπόκωφος ήχος σημαίνει ότι η συγκόλληση είναι πλημμελής, έχει εγκλωβιστεί αέρας και επίσης δεν τηρήθηκε το χρονικό όριο για να εφαρμοστεί η κόλλα.

Στη περίπτωση που παρατηρηθεί το παραπάνω φαινόμενο, γίνεται αμέσως γνωστό στον μηχανικό και στη συνέχεια, έχοντας εξετάσει το βαθμό του προβλήματος, κρίνει αν απαιτούνται μέτρα με σκοπό τη διόρθωση της επέμβασης ή να την επαναλάβει από την αρχή.

## Έλεγχος πρόσφυσης υφασμάτων

Ο τρίτος έλεγχος γίνεται με τη βοήθεια συγκεκριμένων βημάτων, όπου ο μηχανικός ελέγχει τη διαδικασία δοκιμάζοντας να αποκολλήσει ένα δείγμα που έχει κατασκευάσει ειδικά για αυτό το σκοπό μόνο. Στη συνέχεια αναλύονται τα βήματα της διαδικασίας:

- Αρχικά, δημιουργείται ένα δοκιμαστικό τμήμα στη θέση που προβλέπεται να ελεγχθεί ή αυτή που έχει επιδείξει ο Υπηρεσία. Για να συλλεχθούν παραπάνω δείγματα από αυτά που απαιτούνται, όπως πρέπει να γίνεται, τότε ο μηχανικός τοποθετεί επαρκή επιφάνεια υφασμάτων.
- Επίσης, το δείγμα που έχει δημιουργηθεί, το οποίο είναι από ινοπλισμένο πολυμερές έχει διάμετρο 50 -100 mm, απομακρύνεται από το στοιχείο που έχει συγκολληθεί με τη βοήθεια ενός περιστροφικού δράπανου, το οποίο είναι εφοδιασμένο με ένα κατάλληλο κομπτικό. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι αν το πλάτος του ινοπλισμένου πολυμερούς είναι λιγότερο από 500 mm τότε η διάμετρος του δείγματος θα είναι της τάξης των 30mm
- Στη επιφάνεια που έχει εκτεθεί από την αφαίρεση του δείγματος τοποθετείται μία μεταλλική κεφαλή διαμέτρου ίδιας με αυτής του δείγματος. Πάνω στο μέταλλο εφαρμόζεται κατάλληλα ένας εξολκέας, ο οποίος στηρίζεται εξωτερικά της επιφάνειας του δείγματος. Η δύναμη του εξολκέα ρυθμίζεται να έχει ρυθμό της τάξης των 1.0 έως 3.0 Μρα/min και μετράται το μέγεθος της κατά την διάρκεια της αποκόλλησης.
- Για να λάβει χώρα ο έλεγχος, θεωρείται απαραίτητη η κατοχή τουλάχιστον 3 δοκιμίων, έχοντας διαστάσεις 30 m<sup>2</sup> επικολλημένης επιφάνειας ή 300m μήκους υφασμάτων. Ο αριθμός των δοκιμίων μπορεί να αυξηθεί αν παρατηρηθεί από την Επίβλεψη κατά τη διάρκεια του κρουστικού ελέγχου ή του οπτικού ότι υπάρχουν ελαττώματα.
- Η τελική αφαίρεση του δείγματος θα γίνεται μετά το πέρας του πολυμερισμού της εποξειδικής κόλλας, σύμφωνα με τα βήματα που δίνει ο παραγωγός.

- Υπάρχει περίπτωση να αποξηλώνεται το δοκιμαστικό τμήμα μετά την περάτωση των ελέγχων, εφόσον βέβαια προταθεί από την μελέτη ή την υπηρεσία.

Θεωρείται πως πέτυχε τον σκοπό του ο έλεγχος της δοκιμής πρόσφυσης, ελεγχθεί κάθε δοκίμιο και παρατηρηθεί ότι δεν εμφανίζει κάποια αστοχία στην επιφάνεια ανάμεσα στο ύφασμα και στο υπόστρωμα ή στην επιφάνια μεταξύ των υφασμάτων. Αν παρατηρηθεί αστοχία στην διεπιφάνεια, τότε η δύναμη εξόλκευσης γίνεται ίση ή μεγαλύτερη με την τάση πρόσφυσης. Σε γενικές γραμμές η τάση αποκόλλησης που θεωρείται πως είναι αποδεκτή είναι  $\geq 1.50 \text{ Mpa}$ , εκτός και αν η μελέτη προβλέπει κάτι διαφορετικό.

#### **Επανελέγχοι – διορθωτικά μέτρα**

Αν δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις του σχετικού κριτηρίου αποδοχής, το οποίο καθορίζεται αρχικά στη μελέτη, από τα αποτελέσματα της δοκιμής πρόσφυσης τότε ο έλεγχος θα επαναληφθεί σε δύο γειτονικές θέσεις για κάθε δοκίμιο που εμφανίστηκε ότι είναι ανεπαρκής λόγω αστοχίας. Αν και στη συνέχεια δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις του σχετικού κριτηρίου αποδοχής τότε ο έλεγχος θα διεξαχθεί ξανά ακολουθώντας τα ίδια βήματα σε δύο καινούργιες γειτονικές θέσεις για κάθε δοκίμιο, το οποίο χαρακτηρίστηκε ανεπαρκές.

Αν τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από την νέα επανάληψη, θεωρούνται πως ικανοποιούν τις απαιτήσεις του κριτηρίου τότε η εργασία θεωρείται αποδεκτή.

Τέλος, όταν τα αποτελέσματα του των προαναφερθέντων τριών ελέγχων εμφανιστούν ότι δεν καλύπτουν τα προσυμφωνημένα χαρακτηριστικά τότε τα στοιχεία που προέκυψαν από τους ελέγχους θα κρίνονται από την μηχανικό, ο οποίος καθορίζει τα ληπτέα μέτρα και τις διορθωτικές ενέργειες στην έκταση που απαιτούνται για την ασφάλεια και λειτουργικότητα του έργου<sup>40</sup>.

## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

### 6.1 Αποτίμηση αντοχής και συστήματα ενίσχυσης σε υφιστάμενες κατασκευές

Αυτό που είναι ευρέως γνωστό στους χώρους που ασχολούνται με τις κατασκευές είναι ότι το σκυρόδεμα ως δομικό στοιχείο έχει αρκετά μεγάλη διάρκεια ζωής. Αυτό που το χαρακτηρίζει είναι ότι η αντοχή του αυξάνεται με το χρόνο, βέβαια σε αυτό που μειονεκτεί είναι ότι υπόκειται στους νόμους της φθοράς όπως και όλα τα υπόλοιπα υλικά. Όταν ο μηχανικός αποφασίσει να επέμβει σε μία κατασκευή προκειμένου να την ενισχύσει, έρχεται αντιμέτωπος με ένα βασικό παράγοντα που είναι αυτός της αβεβαιότητας ως προς τη φέρουσα ικανότητα της. Τα βασικότερα ζητήματα που απασχολούν τους μηχανικούς είναι η αντοχή του σκυροδέματος, στις προβλεπόμενες από τη μελέτη θέσεις, στη διάμετρο και τις αποστάσεις που βρίσκονται ανάμεσα στις ράβδους του οπλισμού. Επίσης στο ενδεχόμενο ο οπλισμός να έχει υποστεί διάβρωση όπως επίσης και άλλα πολλά ερωτήματα, τα οποία αφορούν ορατές ρωγμές, αποφλοιώσεις και άλλες βλάβες που εμφανίζει η κατασκευή.

Ο μηχανικός δεν μπορεί να αρκестεί στον οπτικό έλεγχο για να προσδιορίσει την δομική κατάσταση της φέρουσας κατασκευής. Ένα παράδειγμα που αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί είναι αυτό της αντοχής του σκυροδέματος, η οποία μειώνεται εξαιτίας της διάβρωσης του οπλισμού διότι τα οξειδωτικά προϊόντα έχουν την τάση να προχωρούν στο εσωτερικό τμήμα του σκυροδέματος όπου προκαλούν αποφλοίωση και ρηγμάτωση. Αυτό που μπορεί να δείξει αποτελεσματικά όλα τα παραπάνω που περιγράφηκαν είναι οι πειραματικοί έλεγχοι διάγνωσης βλαβών, οι οποίοι δίνουν στα μάτια των κατασκευαστών την κατάσταση της κατασκευής όπως και την έκταση των βλαβών.

Αυτοί οι έλεγχοι που περιγράφηκαν παραπάνω έχουν ως στόχο να βοηθήσουν τους κατασκευαστές να επιλέξουν την κατάλληλη μέθοδο με στόχο να επισκευάσουν ή και να ενισχύσουν την κατασκευή. Αυτοί οι έλεγχοι δίνουν τη δυνατότητα στους μηχανικούς να επιλέξουν τις κατάλληλες



ενέργειες με στόχο την επισκευή και την ενίσχυση του της κατασκευής μέσα στα όρια των πόρων που παρέχονται στον μηχανικό.

Κάπου εδώ είναι αναγκαίο να αναφερθούν τα βήματα τα οποία οδηγούν στον ανασχεδιασμό μίας υφιστάμενης κατασκευής. Αυτά τα βήματα είναι τρία στον αριθμό και στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση τους. Το πρώτο είναι η αποτίμηση, στο οποίο εμπεριέχεται η εξέταση της υπάρχουσας κατασκευής, η τεκμηρίωση του υφιστάμενου φορέα και τέλος η αποτίμηση της σεισμικής ικανότητας της κατασκευής. Στη συνέχεια εμφανίζεται το δεύτερο στάδιο στο οποίο παρουσιάζεται η διαδικασία με στόχο να παρθεί μία απόφαση. Ακόμη, σε αυτό το στάδιο ο κατασκευαστής ελέγχει πιθανά σχήματα επέμβασης και την επιλογή λύσης. Τέλος είναι το τρίτο στάδιο εμπεριέχει τον σχεδιασμό της λύσης, όπως και την διαστασιολόγηση των μελών των τμημάτων της κατασκευής, την περιγραφή των ενεργειών που χρειάζονται με στόχο να φτάσουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα, όπως και το κόστος που απαιτείται.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο στάδιο εμπεριέχεται η καταγραφή των βλαβών που υπάρχουν σε μία κατασκευή καθώς και η εκτίμηση των συνοριακών συνθηκών που υπάρχουν σε μία κατασκευή, των κατακόρυφων φορτίων και των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών της κατασκευής. Αυτό που είναι σημαντικό σε αυτό το στάδιο και που φέρει αποτελέσματα είναι η εκτίμηση της συνολικής παθολογικής εικόνας του της κατασκευής, η οποία επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα που εμφανίζονται από την ανάλυση της αποτίμησης της σεισμικής ικανότητας. Το τελικό στάδιο του πρώτου μέρους είναι η απόφαση που πρέπει να παρθεί από τους μηχανικούς με σκοπό την ανάγκη να ενισχυθεί η κατασκευή ή όχι.

Για να φτάσουν σε αυτό το στάδιο, είναι σημαντικό να προχωρήσουν στην επιλογή της στάθμης επιλεστικότητας, με την οποία γίνεται η επιλογή της επιθυμητής συμπεριφορά της κατασκευής. Υπολογίζοντας πάντα και τη παράμετρο του σεισμικού σχεδιασμού, όπου εκφράζεται από την υπέρβαση της σεισμικής δράσης εντός των χρονικών πλαισίων ζωής της κατασκευής που θεωρητικά έχει καθοριστεί στα 50 έτη. Με τα σημερινά δεδομένα και όσα ισχύουν ως κανονιστικό πλαίσιο αυτό που δίνεται σημασία είναι η προστασία των ενοίκων και η περιουσία τους και η υπέρβαση της σεισμικής δράσης δεν πρέπει να ξεπερνά το 10% όπως καθορίζεται αναλυτικά από το παραπάνω

πλαίσιο. Στη συνέχεια ακολουθεί ένας πίνακας με τον οποίο παρουσιάζονται οι στάθμες επιλεστικότητας έτσι όπως περιγράφονται στο νομικό πλαίσιο<sup>8</sup>.

**Πίνακας 6.1: Στάθμες επιλεστικότητας.<sup>8</sup>**

Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Άμεση χρήση μετά τον σεισμό	Προστασία ζωής	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης
1. 10%	A1	B1	Γ1
2. 50%	A2	B2	Γ2

Οι στάθμες επιλεστικότητας του φέροντος οργανισμού ορίζονται ως εξής:

- Άμεση χρήση μετά το σεισμό (A): αυτή η στάθμη που αναφέρεται παραπάνω είναι μία κατάσταση στην οποία καμία λειτουργία του οργανισμού δεν διακόπτεται την ώρα του σεισμού, όπως και μετά το πέρασμα του. Σε αυτό το στάδιο είναι επιτρεπτό να εμφανίζονται μερικές τριχοειδείς ρωγμές στην κατασκευή.
- Προστασία Ζωής (B) : Σε αυτό το στάδιο είναι επιτρεπτό να παρουσιαστούν κάποιες βλάβες αλλά θεωρούνται πως εύκολα επισκευάζονται χωρίς να γίνει κάποιος τραυματισμός εξαιτίας της ύπαρξης αυτών των βλαβών.
- Οιονεί κατάρρευση (Γ) : είναι η κατάσταση στην οποία κατά την διάρκεια του σεισμού εμφανίζονται εκτεταμένες και σοβαρές βλάβες οι οποίες θεωρούνται πως δεν επισκευάζονται. Παρόλο που υπάρχουν αυτές οι βλάβες ο φέρων οργανισμός εξακολουθεί να φέρει κατακόρυφα φορτία με τη διαφορά πλέον πως στον επόμενο σεισμό η κατασκευή θα είναι απροστάτευτη και θα αντιμετωπίζει τον κίνδυνο μίας κατάρρευσης<sup>20</sup>.

Το δεύτερο στάδιο είναι αυτό της λήψης της απόφασης με σκοπό την επέμβαση, η οποία θεωρείται πως είναι και το δυσκολότερο στάδιο για έναν κατασκευαστή. Αυτό που κάνει αυτό το στάδιο το δυσκολότερο είναι το πλήθος των παραγόντων που πρέπει να παρθούν με στόχο την επιλογή της σωστής λύσης. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

- Επισκευή της κατασκευής αν έχουν προκύψει βλάβες. Ως επισκευή ορίζουμε μια διαδικασία στην οποία επεμβαίνουμε σε μια κατασκευή με προβλήματα και στην συνέχεια γίνεται η επαναφορά της στην αρχική της κατάσταση.
- Ενίσχυση της κατασκευής. Με τον όρο ενίσχυση εννοούμε, την επέμβαση σε μια κατασκευή με ή χωρίς βλάβες. Μέσω αυτής αυξάνεται η αντοχή της κατασκευής σε επίπεδα μεγαλύτερα σε σχέση με αυτά που είχαν σχεδιαστεί σε αρχικό στάδιο.
- Κατεδάφιση της κατασκευής και δημιουργία νέας.

Η απόφαση που πρέπει να παρθεί για την επιλογή ανάμεσα στους παραπάνω παράγοντες καθώς και η τελική λύση η οποία θα βρεθεί είναι αποτέλεσμα της επαναλαμβανόμενης εξέτασης σχεδίων επέμβασης, με σκοπό την αποτελεσματική συμπεριφορά της κατασκευής κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

Στην συνέχεια, με την επιλογή της ενίσχυσης, τα σχέδια της επέμβασής μπορούν να γίνουν σε δύο στάδια. Αρχικά, στο πρώτο στάδιο θα πρέπει να βρεθεί μια λύση όσον αφορά την κατασκευή, έτσι ώστε να ενισχύεται σαν σύνολο. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η ένταση στα αδύναμα σημεία της κατασκευής σε χαμηλότερα επίπεδα από τα όρια ανοχής. Στο δεύτερο στάδιο, θα εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί η ενίσχυση στα αδύναμα μέρη προσθέτοντας με αυτόν τον τρόπο αντοχή και πλαστιμότητα στην κατασκευή. Επίσης, το πρώτο στάδιο εφαρμόζεται όταν τα αδύναμα μέρη της κατασκευής είναι μεγάλα σε αριθμό, σε αντίθεση με το δεύτερο στάδιο που χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να αντιμετωπίσουμε κάποιες μικρές αδυναμίες της κατασκευής. Θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ανεξαρτήτως των παραπάνω σταδίων, ότι η εικόνα μιας κατασκευής η οποία

έχει υποστεί ζημιές από ισχυρό σεισμό αποτελεί ένα σοβαρό στοιχείο της ικανότητας του σεισμού. Για αυτόν τον λόγο, η επέμβαση θα πρέπει να έχει ως στόχο την ενίσχυση της κατασκευής.

Το τρίτο στάδιο αφορά τον κατάλληλο σχεδιασμό της επέμβασης στην κατασκευή και συνδέεται άμεσα με την μέτρηση των διαστάσεων των ενισχυμένων μελών της. Ακόμη, η χρησιμοποίηση καινούργιων στοιχείων σε συνδυασμό με τα παλιότερα οδηγεί στην δημιουργία σύνθετων στοιχείων, η διαστασιολόγηση των οποίων γίνεται με την μέτρηση των διαστάσεων μονολιθικών στοιχείων στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Μετά από την διαδικασία της μέτρησης των διαστάσεων, καταλήγουμε στα σχέδια της οριστικής μελέτης επέμβασης και αναγραφή του κόστους των εργασιών. Αξίζει να σημειωθεί τελικά ότι, η ενίσχυση της κατασκευής αποτελεί την πιο οικονομική επιλογή.

## **6.2 Σεισμικές βλάβες και ενίσχυση κτιρίων με σύνθετα υλικά**

Η θέση που βρίσκεται η Ελλάδα θεωρείται σεισμογενής, με αποτέλεσμα τα κτίρια που έχουν χτιστεί να δοκιμάζονται από σεισμικά φορτία. Ως αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος παρατηρείται ότι η ύπαρξη βλαβών είναι αναπόφευκτη. Έτσι, γίνεται ευρέως γνωστό από το Ν.Ε.Α.Κ. ότι ο η κατασκευή θα υποστεί βλάβες, αυτές όμως πρέπει να είναι περιορισμένες και επισκευάσιμες, ενώ στη περίπτωση που το κτίριο κινδυνεύει να γκρεμιστεί μετά από ένα ισχυρό σεισμό, πρέπει να είναι αρκετά μικρή.

## **6.3 Βλάβες που προκαλούνται από σεισμικά φορτία**

Στη συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια παράθεσης των βλαβών, οι οποίες εμφανίζονται σε διάφορα τμήματα μίας κατασκευής μετά τη καταπόνηση από ένα σεισμικό φορτίο.

Συνεπώς η προσπάθεια ταξινόμησης των βλαβών εμπεριέχει<sup>22</sup>:

- Αρχικά, του τυπικούς βαθμούς βλάβης, οι οποίοι εμφανίζονται σε μεμονωμένα τμήματα της φέρουσας κατασκευής και ταυτίζονται με βλάβες που προκαλούνται εξαιτίας των αντοχών και σε περιθώρια ασφάλειας.
- Έπειτα, υπάρχει ο χαρακτήρας των βλαβών, ο οποίος συνδέεται με την σύνολο της κατασκευής και όχι μεμονωμένα όπως γίνεται με τις παραπάνω. Αυτή η κατηγορία ταυτίζεται με τη λήψη αποφάσεων και την ασφάλεια της φέρουσας κατασκευής.

### 6.3.1 Τυπικοί βαθμοί βλάβης

#### (α) Θεμελίωση

Σε αυτό το μέρος της έρευνας εμπεριέχονται τα προβλήματα που προκαλούνται λόγω του υπεδάφους ή των θεμελίων. Μερικά παραδείγματα που αξίζουν να αναφερθούν είναι οι ολισθήσεις που μπορούν να προκληθούν σε ένα μέρος μιας φέρουσας κατασκευής, επιπλέον οι διάφορες καθιζήσεις και η βλάβη συνδετήριων δοκών, τα οποία βέβαια θεωρούνται από τους κατασκευαστές επικίνδυνες για την ασφάλεια της κατασκευής και κατ' επέκταση για τη ζωή των ανθρώπων που ζουν σε αυτές<sup>22</sup>.

#### (β) Αναδωμή

##### (β1) Φέρων οργανισμός

#### Υποστυλώματα

Οι μηχανικοί έχουν παρατηρήσει ότι η βλάβη που εμφανίζεται συχνά μετά το πέρασμα ενός σεισμού είναι αυτή στα υποστυλώματα μίας κατασκευής, η οποία βέβαια θεωρείται και η πιο σοβαρή. Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι τα υποστυλώματα σε μία κατασκευή θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικά διότι εξασφαλίζουν την ασφάλεια της. Συνεπώς, αυτό που συμπεραίνεται είναι ότι

μία αστοχία πάνω στα υποστυλώματα μπορεί να προκαλέσει την κατάρρευση (ολική ή τμηματική ) του δομήματος.

Οι βλάβες στα υποστυλώματα διαφοροποιούνται και εμφανίζονται ως εξής:

- Βαθμού 'Α' , οι οποίες είναι οι ελαφρές βλάβες. Είναι οι μεμονωμένες ρωγμές όχι μεγάλου πλάτους δηλαδή εμφανίζονται λιγότερο από 2,0 mm εξαιτίας κάμψεων ή λόγω ελαφρών κρούσεων ή ανεπαρκών αγκυρώσεων. Μία βλάβη για χαρακτηριστεί από τον μηχανικό ότι είναι σε αυτή την κατηγορία είναι απαραίτητο να εμφανίσει αποδείξεις ο μηχανικός ότι δεν οφείλεται από ανεπάρκεια διατομής, χάλυβα ή σκυροδέματος.
- Βαθμού 'Β' , οι οποίες είναι εξίσου ελαφρές βλάβες. Σε αυτή την κατηγορία εμπεριέχονται πολλές καμπτικές ρωγμές ή μεμονωμένες διατμητικές ρωγμές οι οποίες δεν ξεπερνούν σε πλάτος τα 0,5 mm, και επίσης δεν εμφανίζεται κάποια μετακίνηση στο σκελετό.
- Βαθμού 'Γ', οι οποίες είναι οι σοβαρές βλάβες. Σε αυτή την κατηγορία, εμφανίζονται η έντονη ρηγμάτωση σε πλάτος μεγάλο, επίσης σε τοπικό τμήμα στο σκυρόδεμα παρατηρείται αναδιοργάνωση εξαιτίας θλίψης ή διάτμησης, εφόσον βέβαια οι παραμορφώσεις να είναι πολύ μικρές.
- Βαθμού 'Δ', οι οποίες είναι οι βαριές βλάβες. Εδώ εμφανίζονται η θραύση του τμήματος το οποίο αποτελείται από σκυρόδεμα, η βλάβη των κύριων οπλισμών, και τέλος η διακοπή στη συνέχεια του στοιχείου, χωρίς την κατάρρευση. Σε αυτή την κατηγορία οι παραμορφώσεις που παραμένουν είναι αρκετά μικρές.

Γενικά, οι βλάβες τύπου 'Δ' θεωρούνται ότι προκαλούν ιδιαίτερα μεγάλη αποδιοργάνωση. Επίσης, ο μηχανικός δεν δίνει ιδιαίτερη προσοχή στις βλάβες τύπου 'Α' και 'Β' διότι θεωρούνται μικρής σπουδεότητας, εκτός και αν παρουσιάζονται σε μεγάλο αριθμό στοιχείων. Ενώ, όταν οι σοβαρές και οι βαριές βλάβες εμφανίζονται τότε επηρεάζουν την ασφάλεια όλης της φέρουσας κατασκευής.

### Δοκοί, πλάκες

Η εμφάνιση των βλαβών σε δοκούς θεωρείται συχνότερη σε μία κατασκευή από αυτή των πλακών. Ο ρόλος τους μέσα στη κατασκευή είναι κυρίως σε κάμψη και εμφανίζονται σε αυτούς ό,τι προαναφέρθηκε για τα υποστυλώματα. Επιπρόσθετα, κάπου εδώ αξίζει να γίνει λόγος ότι οι δοκοί και οι πλάκες καταπονούνται λιγότερο σε μία σεισμική φόρτιση με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μόνο ελαφρές. Στη περίπτωση όμως που εμφανίσουν σοβαρές, εξαιτίας της ύπαρξης διαφραγματικής λειτουργίας ή και μεταφοράς δυνάμεων στα στοιχεία ακαμψία. Εφόσον παρατηρηθεί αυτό το γεγονός από τον μηχανικό τότε χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή από μέρος του. Στους δοκούς η βλάβη που παρατηρείται συχνότερα είναι οι εγκάρσιες καμπτικές ρωγμές στο κάτω πέλμα. Στο πάνω πέλμα των δοκών στις στηρίξεις θεωρείται συχνότερο να εμφανιστούν μετά από μακροχρόνιες σεισμικές φορτίσεις. Επιπλέον, ρωγμές που μοιάζουν με αυτές του πάνω πέλματος είναι πιθανόν να παρουσιαστούν και στο κάτω πέλμα εξαιτίας ενώ ισχυρού σεισμού ή αγκύρωσης, η οποία δεν ήταν επαρκής για τη θέση στην οποία τοποθετήθηκε.

### Τοιχώματα, κόμβοι

Ο ρόλος αυτού του στοιχείου θεωρείται από τους κατασκευαστές αρκετά σημαντικός για το γενικότερο σκελετό της φέρουσας κατασκευής, έτσι κάθε πιθανή παρουσίαση βλάβης ή ρηγμάτωσης σε αυτά τα στοιχεία αντιμετωπίζεται με ιδιαίτερη προσοχή διότι είναι αρκετά επικίνδυνη για το σύνολο της κατασκευής. Ο τρόπος που οι μηχανικοί τις αντιμετωπίζουν είναι αντίστοιχος με αυτές τις βλάβες του τύπου 'Γ' και 'Δ'.

Οι βλάβες που εμφανίζονται στα τοιχώματα είναι της μορφής της διάτμησης και κάμψης. Η διαφορά στην αντιμετώπιση των κατασκευαστών στα τοιχώματα είναι ότι οι βλάβες 'Α' και 'Β' αντιμετωπίζονται ως 'Γ' και οι 'Γ' ως 'Δ', εξαιτίας του γεγονότος που αναφέρθηκε παραπάνω.

### (β2) Οργανικής πλήρωσης

- ο Ελαφρές βλάβες θεωρούνται η απλή ρηγμάτωση που μπορεί να εμφανιστεί διαστάσεων ανοίγματος μικρότερο από 1,0 mm, κυρίως στις γωνίες των κουφωμάτων.
- ο Σοβαρές βλάβες θεωρούνται η έντονη ρηγμάτωση, οι ρωγμές που μπορεί να εμφανιστούν διαγώνια ή χιαστί, το άνοιγμα του οποίου να μην ξεπερνά τα 5,0 mm. Στη συνέχεια είναι η αποδιοργάνωση της τοιχωπιοΐας και η βλάβη στα διαζώματα.
- ο Βαριές βλάβες θεωρούνται η θλιπποδιατμητική θραύση, ρωγμές οι οποίες είναι μεγάλες με διαστάσεις περίπου 10mm, το σπάσιμο τούβλων, και η θραύση στα διαζώματα, οι αποκλίσεις.

### (β3) Δευτερεύουσες κατασκευές

Σε αυτή την κατηγορία εμπεριέχονται οι βλάβες στις καμινάδες, στα πατάρια, στα διακοσμητικά στοιχεία, όπως είναι οι επενδύσεις, οι αψίδες και τα στηθαία. Ακόμη, είναι οι βλάβες στις υδραυλικές και ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

### **6.3.2 Χαρακτήρας βλαβών**

- ο Βλάβες γενικού χαρακτήρα ή τις λεγόμενες καθολικές για το σύνολο της φέρουσας κατασκευής ή της πλήρωσης είναι αυτές εκτείνονται σε όλη τη κατασκευή.
- ο Βλάβες μερικού χαρακτήρα θεωρούνται αυτές που έχουν δημιουργηθεί σε ποσοστό 1/3 έως 2/3 στο σύνολο του τμήματος που εξετάζεται του οργανισμού.
- ο Βλάβες τοπικού χαρακτήρα είναι αυτές που παρουσιάζονται σε τμηματικά στοιχεία της φέρουσας κατασκευής είτε γραμμικά είτε επιφανειακά.

Οι βλάβες που πιθανόν να εμφανιστούν στα δευτερευόντα τμήματα μίας κατασκευής εξαρτάται από το πόσο θα επηρεαστεί η συνολική



λειτουργικότητα των στοιχείων που αναφέρθηκαν από τις βλάβες που θα προκαλέσει ένας σεισμός άλλα και από τον τύπο της βλάβης όπως έγινε η περιγραφή παραπάνω<sup>20</sup>.

#### 6.4 Παραμένουσα αντοχή μεμονωμένων στοιχείων

Ο χαρακτηρισμός των βλαβών από τον μηχανικό γίνεται με τη βοήθεια του υπολογισμού της παραμένουσας αντοχής στη κατασκευή αλλά και τα διαθέσιμα περιθώρια που έχει η κατασκευή σε θέματα ασφάλειας των προβληματικών στοιχείων της.

Ο μηχανικός, αντιμετωπίζει ένα βαθμό δυσκολίας στην εκτίμηση της παραμένουσας αντοχής για όλη την κατασκευή, διότι πρέπει να συνυπολογίσει αρχικά όλα τα δομικά στοιχεία της κατασκευής, τον τύπο της βλάβης, τον τυπικό βαθμό βλάβης και τον ρόλο που παίζουν αυτές οι βλάβες σε όλο το σύνολο της κατασκευής. Επιπλέον αξίζει να αναφερθεί ότι πρέπει συνυπολογιστεί η δυνατότητα που δίνει η κατασκευή μετά από ένα σεισμό στην ανακατανομή της έντασης και στη συνέχεια να υπολογιστούν οι συντελεστές βαρύτητας για μεμονωμένα στοιχεία τα οποία βρίσκονται σε κατακόρυφη θέση, οι οποίοι πρέπει να είναι αντάξιοι με τις συνέπειες που μπορεί να αφήσουν πίσω η πιθανή βλάβη τους. Αυτή η εκτίμηση της παραμένουσας αντοχής στα χέρια των μηχανικών είναι αρκετά σημαντική.

**Πίνακας 6.1:** Εκτιμήσεις παραμενουσών αντοχών για βλαμμένα δομικά στοιχεία (υποστυλώματα και τοιχώματα).<sup>20</sup>

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ	ΒΑΘΜΟΣ ΒΛΑΒΗΣ			
	«Α»	«Β»	«Γ»	«Δ»
Νέα	0,95	0,75	0,45	0,15
Παλιά	0,80	0,60	0,30	Æ

Στη συνέχεια ακολουθούν ενδεικτικά κάποια σχόλια για την παραμένουσα αντοχή που προκύπτουν από τον παραπάνω πίνακα:

- Η παραμένουσα αντοχή είναι πλήρως συνδεδεμένη με τον βαθμό επείγοντος λήψεως μέτρων. Αναλυτικότερα, όταν οι τιμές εμφανίζονται κάτω από το 0.50 τα μέτρα που απαιτούνται από τον μηχανικό είναι άμεσα, ενώ όταν οι τιμές εμφανίζονται κοντά στο 1.00, τότε οι επεμβάσεις μπορούν να γίνουν και αργότερα, για παράδειγμα μέσα σε μία δεκαετία.
- Ο υπολογισμός της παραμένουσας αντοχής ταυτίζεται πλήρως με την απόφαση του μηχανικού για απλή επισκευή ή για ενίσχυση του στοιχείου ή της κατασκευής με τον όρο ότι η πρώτη μελέτη δεν περιλαμβάνει λάθη σε ό,τι αφορά τη μόρφωση και ότι η κατασκευή δεν εμφανίζει κακοτεχνίες. Συνεπώς, αυτό που αποφαίνεται είναι ότι η επισκευή συμβαίνει όταν η απώλεια της αντοχής είναι μέχρι 15%, η ενίσχυση συμβαίνει όταν η απώλεια της αντοχής εμφανίζεται να είναι παραπάνω από 20%<sup>20</sup>.

#### 6.4.1 Τρόποι επέμβασης

Ο μηχανικός για να επιλέξει τον τρόπο επέμβασης πρέπει να συνυπολογίσει αρχικά την παραμένουσα αντοχή, τον βαθμό επείγοντος και από τεχνο-οικονομικές θεωρήσεις. Κάποιοι από τους τρόπους επέμβασης που ακολουθούνται από τους μηχανικούς είναι:

- 1) Αρχικά, ο μηχανικός πρέπει να απαλλαγεί από μεγάλα φορτία ή από δυσμενή λειτουργία σε υψηλότερα επίπεδα ή τμημάτων του κτιρίου.
- 2) Στη συνέχεια εμφανίζεται ο περιορισμός της χρήσεως, δηλαδή ελαχιστοποίηση της χρήσης του ωφέλιμου φορτίου.
- 3) Τροποποίηση του δομικού συστήματος, δηλαδή μετατροπή των αμφίεριστων τμημάτων δοκών σε συνεχή δοκό.

- 4) Αποκατάσταση της φέρουσας ικανότητας ή ακαμψίας του δομικού στοιχείου.
- 5) Έπειτα εμφανίζεται η αλλαγή του δομικού στοιχείου, το οποίο έχει υποστεί σοβαρή βλάβη.
- 6) Στη συνέχεια εμφανίζεται ενίσχυση του κτιρίου, η οποία γίνεται είτε με πρόσθετες κατασκευές, είτε με επιτόπου ενίσχυση αρκετών στοιχείων της κατασκευής<sup>8</sup>.

## 6.5 Έρευνα και ανάπτυξη

Ο μηχανικός πριν προχωρήσει σε οποιαδήποτε ενίσχυση-αποκατάσταση του κτιρίου, είναι απαραίτητο αρχικά να εφαρμόσει ένα σύνολο ερευνητικών εργασιών, το οποίο έχει ως στόχο την να αποσαφηνίσει στα μάτια του κατασκευαστή τον τρόπο με τον οποίο θα δράσει.

Αυτό που κάνει πρώτα από όλα είναι να κάνει μία μορφολογική γεωμετρική αποτύπωση του κτιρίου, με την οποία θα είναι σε θέση να καταγράψει τα υλικά, τον τρόπο δόμησης του κτιρίου καθώς επίσης και το ιστορικό του.

Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση των φυσικών και χημικών χαρακτηριστικών που έχουν τα υλικά, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο κτίριο, όπως είναι το ειδικό βάρος τους, η φυσική υγρασία που διαθέτουν, η πυκνότητα και η περιεκτικότητα των συστατικών. Ακόμη, εμφανίζεται τα μηχανικά χαρακτηριστικά που διαθέτουν, όπως για παράδειγμα είναι η θλιπτική αντοχή, η αντοχή σε εφελκυσμό, η κάμψη, η συνάφεια και το μέτρο ελαστικότητας.

Αρκετά σημαντική εμφανίζεται η γεωτεχνική έρευνα που κάνει ο μηχανικός, καθώς με αυτή αποσαφηνίζεται η συμπεριφορά του εδάφους δηλαδή η συνολική ευστάθεια του κτιρίου. Συγκεκριμένα αυτό που ελέγχεται είναι η ικανότητα του εδάφους να φέρει μία κατασκευή. Σε αυτό που δίνεται ιδιαίτερη προσοχή είναι αν οι μελλοντικές επεμβάσεις έχουν δημιουργήσει νέα δεδομένα.

Επιπρόσθετα, εμφανίζεται ιδιαίτερα σημαντική και ο έλεγχος της αντισεισμικής επάρκειας του κτιρίου. Σε νέες κατασκευές, ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών συμβαίνει με σκοπό την σωστή επιλογή των υλικών και

διαστασιολόγηση των φορέων με σκοπό οι αναπτυσσόμενες τάσεις να μην ξεπερνούν τις επιτρεπόμενες και οι συντελεστές ασφάλειας να είναι στις επιθυμητές τιμές.

Για να γίνει μία στατική μελέτη, πρέπει αρχικά να μελετηθεί η συμπεριφορά του κτιρίου, ασκώντας ένα σεισμικό φορτίο. Με αυτή την προϋπόθεση, δημιουργούνται μοντέλα για τη στατική λειτουργία διαφορετικά για κάθε είδος καταπόνησης, λαμβάνοντας υπόψη και το ιστορικό που έχει το κτίριο, δηλαδή παλαιότερες σεισμικές καταπονήσεις. Η ακρίβεια που εμφανίζουν τα αποτελέσματα επηρεάζεται σημαντικά από την απουσία πληροφοριών για τις παλαιότερες καταπονήσεις του κτιρίου, όπως και από την απουσία των πραγματικών τιμών των αντοχής των υλικών και των δομικών στοιχείων. Με όλα όσα προηγήθηκαν, αυτό που αποφαίνεται είναι η ότι ο μηχανικός προκειμένου να αποφύγει τις αβεβαιότητες λαμβάνει υπόψη όσο τον δυνατόν περισσότερες τιμές αντοχών.

## 6.6 Ενισχύσεις

Η ενίσχυση του στοιχείου ή της κατασκευής περιλαμβάνει όλα εκείνα τα μέτρα, τα οποία λαμβάνονται με σκοπό το στοιχείο ή η κατασκευή να ενισχυθεί σε αντοχή υπό την συγκεκριμένες δράσεις. Όταν οι βλάβες εμφανίζονται εξαιτίας μίας σεισμικής φόρτισης, η ενίσχυση γίνεται συνδυαστικά με την επισκευή. Ο συνδυασμός της ενίσχυσης και της επισκευής εμφανίζεται να είναι συνδεδεμένος ο ένας με τον άλλον διότι στην περίπτωση που συμβεί μόνο η επισκευή, τότε μετά από ένα χρονικό διάστημα θα παρουσιαστούν οι ίδιες βλάβες με αυτές πριν την επισκευή. Ανάλογα με τον στόχο, οι μέθοδοι ενίσχυσης διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες<sup>20</sup>:

- 1) Μέθοδοι ακαμψίας και αντοχής της κατασκευής
- 2) Μέθοδοι αύξησης της πλαστιμότητας της κατασκευής
- 3) Μέθοδοι βελτίωσης των δύο παραπάνω μαζί.

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

### 7.1 Ελληνική Πραγματικότητα

Η χρήση των σύνθετων υλικών με σκοπό την ενίσχυση κατασκευών ξεκίνησε και βελτιώθηκε στα καλύτερα ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια των Ηνωμένων Πολιτειών περίπου στα μέσα της δεκαετίας του 80 ενώ ταυτόχρονα διάφορες χώρες του εξωτερικού χρησιμοποίησαν αυτό τον τρόπο ενίσχυσης, όπως η ίδια η Αμερική, στην οποία αναπτύχθηκε αυτή η τεχνική όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο Καναδάς, η Ιαπωνία κ.α. Επίσης, την δεκαετία του 90 χώρες στις οποίες συνέβησαν σοβαρές ζημιές από σεισμούς, όπως είναι οι Δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες (California, Oregon), η Ιαπωνία και η Νέα Ζηλανδία, έκαναν χρήση αυτή της τεχνικής με στόχο να ενισχύσουν και να επισκευάσουν τις κατασκευές τους. Στη συνέχεια, μία εταιρεία που δημιουργεί σύνθετα υλικά είναι η SP-systems, ενώ για την εφαρμογή αυτών των υλικών είναι η XX-sys<sup>18</sup>.

Περίπου στις αρχές του 1998 ο όμιλος exeLTEK A.E έφερε και εφάρμοσε για πρώτη φορά στην Ελλάδα, την τεχνολογία των σύνθετων υλικών. Η προαναφερθείσα εταιρεία χρησιμοποίησε αυτά τα υλικά XL-Wrap (ανθρακούφασμα, και υαλοϋφάσματα ) στο σεισμό του 1999 της Αθήνας με σκοπό να βελτιώσουν δημόσια και ιδιωτικά έργα. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η τεχνολογία εφαρμόζει συνδυαστικά το μικρό πάχος, και βάρος με την καλή μηχανική αντοχή, την γρήγορη εφαρμογή και το μικρό κόστος. Σε αρκετά ερευνητικά κέντρα στο εξωτερικό , όπως επίσης και σε Ελληνικά Πανεπιστήμια έχει δοκιμαστεί αυτή η τεχνική<sup>18</sup>.

Πιο συγκεκριμένα, στην Θεσσαλονίκη όσων αφορά τις κατασκευές με την χρήση σύνθετων υλικών σε έργα σεισμικής ενίσχυσης το ερευνητικό και τεχνικό δυναμικό της ήταν πρωτοπόρο. Αξίζει να σημειωθεί ότι, υπήρξε ευρεία χρήση των σύνθετων υλικών για μεγάλη χρονική περίοδο σύμφωνα με την ιστορία της πόλης.

Τα πιο σημαντικά έργα που κατασκευάστηκαν στην Θεσσαλονίκη με την εφαρμογή σύνθετων υλικών και κατά χρονολική σειρά παρουσιάζονται παρακάτω. Οι κατασκευές αυτές έγιναν από τον όμιλο exeLTEK A.E που είναι μια εταιρεία η οποία εξειδικεύεται στις αντισεισμικές εφαρμογές.

1. [1998] *Κτίριο Αγροτικής Τράπεζας Θεσσαλονίκης*, Προσεισμική ενίσχυση των υποστηλωμάτων και των δοκών στους χώρους του πρώτου ορόφου, του υπογείου και του ισογείου.
2. [1999] *Πολυώροφο Κτίριο Σταθμού Αυτοκινήτων*, Αντισεισμική ενίσχυση με την χρήση προσεισμικής ενίσχυσης 138 υποστυλωμάτων στους έξι ορόφους της κατασκευής.
3. [2000] *Υδατόπυργος στην Μηχανιώνα Θεσσαλονίκης*, Ενίσχυση φέροντος οργανισμού της κατασκευής.
4. [2000] *Κτίριο Χ.Α.Ν.Θ , Πλατεία Χ.Α.Ν.Θ* , Αναβάθμιση των υποστυλωμάτων, των δοκών και των κόμβων της πρωτεύουσας αίθουσας του κολυμβητηρίου.
5. [2000] *Κτίριο Γερμανικής Σχολής*, Αναβάθμιση υποστυλωμάτων (πεσσών) και δοκών στους τρεις ορόφους του κτιρίου.
6. [2000] *Πολυώροφο Κτίριο Κατοικιών*, Προσεισμική ενίσχυση όλων των υποστυλωμάτων, τοιχείων και δοκών pilotis.
7. [2000] *Πολυώροφο Κτίριο Κατοικιών*, Αναβάθμιση κοντών υποστυλωμάτων και δοκών στο χώρο του υπογείου.
8. [2001] *Ιερός Ναός Αναλήψεως Θεσσαλονίκης*, Ενίσχυση των υποστυλωμάτων (πεσσών) του κτιρίου
9. [2001] *Κτίριο Περαία Θεσσαλονίκης*, Ενίσχυση κλιμάκων της εισόδου του παραθεριστικού συγκροτήματος.
10. [2001] *Δεξαμενές καθιζήσεως και επεξεργασίας πόσιμου ύδατος στο Καλοχώρι Θεσσαλονίκης (ΕΥΑΘ)*, Ενίσχυση των υποστυλωμάτων του κτιρίου.

## 7.2 Γενικά συμπεράσματα

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί στη ενίσχυση κατασκευών με σύνθετα υλικά, θεωρείται σημαντική η επιλογή της καταλληλότερης ίνας που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε κατασκευή. Οι μηχανικοί συνήθως διαλέγουν τις ίνες άνθρακα έναντι αυτών του γυαλιού για να ενισχύσουν τις κατασκευές εξαιτίας του καλού μέτρου ελαστικότητας που παρουσιάζουν. Ως αποτέλεσμα, να χρειάζονται μικρού πάχους μανδύες, καθώς επίσης και μεγάλη ανθεκτικότητα παράγοντες που θεωρούνται διαβρωτικοί. Σε ότι αφορά τις ίνες γυαλιού, το πλεονέκτημα που αξίζει να σημειωθεί είναι αυτό του χαμηλού κόστους που παρουσιάζουν ανά μονάδα αντοχής. Επιπρόσθετα, το παραπάνω πλεονέκτημα δεν θα συνεχίσει να ισχύει λόγω της όλο ένα και αυξανόμενης ζήτησης που παρουσιάζουν οι ίνες άνθρακα, αναγκάζοντας την τιμή της να πέσει σε επίπεδα με αυτή των ινών γυαλιού<sup>18</sup>.

Τέλος, συμπεραίνεται ότι όταν γίνει η επιλογή της κατάλληλης ίνας και πλαστικού για τη κατασκευή τότε οι ιδιότητες που εμφανίζονται είναι πολύ καλύτερες από αυτές των συμβατικών υλικών. Επίσης, αυτή η τεχνολογία εμφανίζει ιδιαίτερα καλές προοπτικές εξέλιξης, διότι δίνουν στο μηχανικό την δυνατότητα ενός σημαντικά μεγάλου αριθμού συνδυασμού ινών, οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με τις ιδιότητες του εκάστοτε υλικού στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθούν<sup>18</sup>.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, μέχρι πρόσφατα η επίλυση των προβλημάτων όσων αφορά την ενίσχυση των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελούσε μια χρονοβόρα διαδικασία. Ένα σημαντικό μειονέκτημά τους μέχρι τώρα ήταν η δυσκολίας εφαρμογής τους στις κατασκευές<sup>18</sup>.

Ωστόσο, παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων που αυτά είναι<sup>23</sup>:

- Εξαιρετική αντοχή στον εφελκυσμό, πολύ μεγαλύτερη από αυτή του χάλυβα.
- Χαρακτηρίζονται από μικρό βάρος, ευκαμπτότητα και είναι διαθέσιμα σε διαφορετικά μήκη με αποτέλεσμα να γίνεται εύκολη η εφαρμογή τους.

- Μέσω της εφαρμογής τους, έχουμε υψηλή αντοχή και πλαστιμότητα της κατασκευής, χωρίς να αλλάζει η γεωμετρία της.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στην διάβρωση.
- Χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλα υλικά κατά την εφαρμογή τους σε κατασκευές

Επιπροσθέτως, η ενίσχυση και η αποκατάσταση με σύνθετα υλικά μπορεί να εφαρμοστεί σε στοιχεία όπως είναι τα δοκάρια, οι πλάκες, τα υποστρώματα, τα τοιχεία, σε κόμβους και σε στοιχεία από ξύλο.

Με την χρήση ινοπλισμένων πολυμερών έχουμε την δυνατότητα ενίσχυσης των ρηγμάτων σε δομικά στοιχεία, προστασία από την διάβρωση και την αποσύνθεση του σκυροδέματος. Ακόμη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για προστασία σε κρούση (ίνες πολυαραμιδίου) καθώς και για την ενίσχυση των γεφυρών με συνέπεια την αύξηση της αντοχής τους<sup>23</sup>.

Είναι ευρύτατα διαδεδομένη η άποψη, ότι τα ινοπλισμένα υλικά έχουν σημαντικό ρόλο στην εποχή μας στον τομέα της αντισεισμικότητας. Προσφέρουν αντοχή και δίνουν την δυνατότητα παραμόρφωσης, χωρίς όμως να δημιουργούν προβλήματα όπως την αύξηση της δυσκαμψίας των στοιχείων ενίσχυσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η χρήση υλικών που απαιτούν αύξηση της δυσκαμψίας τους σύμφωνα με τον κανονισμό της αντισεισμικότητας να μην χρησιμοποιούνται. Επίσης, άλλο ένα σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι τα πολυμερή αυξάνουν την αντοχή τους στον σεισμό κατά έναν συντελεστή 4.3 (στοιχεία EMPA) και μεγαλύτερη ενδοτικότητα. Οι εκκεντρότητες που αναπτύσσονται έχουν μικρή επιρροή στην αντοχή. Τα φύλλα ξεκολλούν από τους τοίχους στις μεγάλες μετακινήσεις ωστόσο μπορούν να δεχτούν ακόμα δυνάμεις εφελκυσμού που τις μεταφέρουν μέσω των σημείων αγκύρωσης στα άκρα της τοιχοποιίας. Για αυτό τον λόγο, είναι σημαντικό να εφαρμογή τους να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και με σύνεση<sup>23</sup>.

Εύκολα λοιπόν καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι, ο ρόλος των ινοπλισμένων πολυμερών είναι πολύ σημαντικός στην ενίσχυση και στην αποκατάσταση των κτιρίων<sup>23</sup>.





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (1) ACI Committee 440: Provisional design recommendations for concrete reinforced with FRP bars, American Concrete Institute ACI 440-98 (1998).
- (2) Al-Sunna R.A.S., “Deflection behaviour of FRP reinforced concrete flexural members”, Διδακτορική Διατριβή (υπό την επίβλεψη του Καθ. Κ. Πηλακούτα), Department of Civil and Structural Engineering, University of Sheffield (2006).
- (3) Callister W.D. Jr., Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών, 5<sup>η</sup> έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, 2004.
- (4) Canadian Standards Association: Canadian highway bridge design code, section 16: Fibre reinforced structures, CSA (1996).
- (5) Christel P., Claes L., Brown S. A., Carbon-reinforced Composites in Orthopedic Surgery, Orthopedic Applications, p. 499-503.
- (6) ConfibreCrete: European Union TMR research network, Network contract N° ERBFMRXCT970135 (1998-2001).
- (7) Γκότης Α., «Σημειώσεις επιστήμης και τεχνολογίας σύνθετων υλικών», Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.
- (8) Δρίτσος Σ. (2007), " Στρατηγικές και Σχεδιασμός Αντισεισμικής Ενίσχυσης Κτιρίων ", Τ.Ε.Ε Αθήνα .
- (9) Δρίτσος Σ., “Ένισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2006.
- (10) Δρίτσος Σ, “Τα Σύνθετα Υλικά στις Κατασκευές”, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου., 2006, [www.tee.gr](http://www.tee.gr).
- (11) EN-Core: European Union Marie Curie research training network, “European network for composite reinforcement”, contract MRTN-CT-2004-512397 (2004- 08), Website: <http://encore.shef.ac.uk/index.htm>.
- (12) fib Task-group 9.3: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures, International Federation for Structural Concrete, fib Bulletin 14 (2001) <http://fib.epfl.ch/publications/fib/14/>.

- (13) fib Task-group 9.3: FRP reinforcement in RC structures, International Federation for Structural Concrete, fib Bulletin 40 (2007) <http://fib.epfl.ch/publications/fib/40/>.
- (14) Japan Society of Civil Engineers, “Application of continuous fiber reinforcing materials to concrete structures”, Concrete Library, No. 72 (1992).
- (15) Japan Society of Civil Engineers, “State-of-the-Art report on continuous fiber reinforcing materials”, Concrete Engineering Series 3, 1993.
- (16) Japan Society of Civil Engineers, Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series 23 (1997).
- (17) Καβελάκης Ε., «Σύνθετα υλικά με θερμοπλαστική μήτρα», Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010.
- (18) ΚΑΪΑΦΑΣ Ν. & ΤΣΑΜΟΠΟΥΛΟΣ Ν., Πτυχιακή εργασία “ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ”, Αθήνα 2006.
- (19) Καλίνη Α., «Διηλεκτρική Απόκριση Σύνθετων Συστημάτων Ελαστομερικής Μήτρας-Ανόργανων Νανο-σωματιδίων», Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2008.
- (20) ΚΑΝ.ΕΠΕ (2012), Εφημερις της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας , Τεύχος 2 , Αρ. Φύλλου 42.
- (21) Καραγιάννης Χ.Γ., “Επισκευές-Ενισχύσεις στοιχείων από ωπλισμένο σκυρόδεμα. Έμφαση σε ακραίους κόμβους δοκού-υποστυλωμάτων”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, [www.tee.gr](http://www.tee.gr).
- (22) Καραντώνη – Μαραγκού Τρ., Σχεδιασμός και ανασχεδιασμός κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία, εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 1999.
- (23) ΚΩΝΣΤΑΝΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Γ. & ΣΥΜΕΩΝΟΓΛΟΥ Ι., ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ FRP, 7ο Φοιτητικό Συνέδριο “ Επισκευές Κατασκευών ’01 ”, Μάρτιος 2001.
- (24) Μητρούση Μ.-Ε., «Μελέτη της μεταβολής της απόσβεσης πολυμερικών και σύνθετων υλικών με την προσθήκη νανοσωματιδίων», Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- (25) Modern Plastics International, April 1994, p. 28.

- (26) Modern Plastics International, June 1004, p. 42.
- (27) Μπαλτζόπουλος Γ, Τέγος Ι., “Ενίσχυση Κατασκευών Ο/Σ με Εξωτερικά Προεντεταμένα Ελάσματα Ινοπλισμένων Πολυμερών (FRP)”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, [www.tee.gr](http://www.tee.gr).
- (28) Μπέλτσιος, Κ., Επιστήμη και τεχνολογία σύνθετων υλικών, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, 2003.
- (29) Μπούσιας Ε.Ν., Σπαθής Λ-Α.Ν., Τριανταφύλλου Α.Χ., Φαρδής Μ.Ν., “Σεισμική ενίσχυση υποστυλωμάτων οπλισμένου σκυροδέματος με διαβρωμένο οπλισμό”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, [www.tee.gr](http://www.tee.gr).
- (30) Μωροπούλου Α., Σημειώσεις για το μάθημα Υλικά, 2000.
- (31) Νοβίδης Δ.Γ., Πανταζοπούλου Σ.Ι., “Καμπτική ενίσχυση στοιχείων σκυροδέματος με ένθετα ελάσματα από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ)”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, [www.tee.gr](http://www.tee.gr).
- (32) Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ., Σύνθετα υλικά, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2007.
- (33) ΠΗΛΑΚΟΥΤΑΣ, Maurizio GUADAGNINI, Κυριάκος ΝΕΟΚΛΕΟΥΣ, Stijn MATTHYS, Σκυρόδεμα Οπλισμένο με Ινοπλισμένα Πολυμερή: Ερευνητικές Δραστηριότητες της fib, 16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.
- (34) Σπυράκος Κ. (2004), “ Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά φορτία ”, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας , Αθήνα.
- (35) Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία, Κεφάλαιο 6, σελ. 175-181, 2004.
- (36) Τριανταφύλλου Αθ., “Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος και Φέρουσας Τοιχοποιίας με Σύνθετα Υλικά”, Πάτρα, 2006.
- (37) Τριανταφύλλου Θ., “Δομικά Υλικά”, σελ. 425-446, Έκδοση 7η , Πάτρα 2005.
- (38) Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ., Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών (Ι.Ο.Κ.), ΠΙΕΤΕΠ, 14-01-08-01: “Strengthening of Concrete Structures Using Externally Bonded Preformed FRP Ζωσιμά Ελένη – Στρατήγη Βασιλική “13ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές

Κατασκευών'' Πάτρα, Φεβ.2007 Fabrics Επικόλληση Υφασμάτων'', Έκδοση 1η , [www.iok.gr](http://www.iok.gr).

(39) (23) Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε., Ινστιτούτο Οικονομίας Κατασκευών (Ι.Ο.Κ.), ΠΕΤΕΠ, 14-01-08-02: ''Strengthening of Concrete Structures Using Externally Bonded Preformed FRP Laminates, Επικόλληση Ελασμάτων'', Έκδοση 1 η , [www.iok.gr](http://www.iok.gr).

(40) ΥΠΕΧΩΔΕ, ''Προσωρινές εθνικές τεχνικές προδιαγραφές'', Έκδοση 1.0, 2006.

(41) Φέτσης Ε., Διατμηματική διπλωματική εργασία με θέμα: ''Χαρακτηρισμός σύνθετων υλικών με συνεχή ενισχύση ινών άνθρακα με διηλεκτρική φασματοσκοπία σάρωσης και μελέτη της συμπεριφοράς τους σε περιβάλλον υψηλής τάσης'', Πάτρα.

(42) Χριστόπουλος Α., Καλαντζής Σ., Αντισεισμική ενίσχυση κτιρίων με ινοπλισμένα πολυμερή, Αθήνα, 2006.

(43) [www.fib.org](http://www.fib.org).

(44) [www.iso.org](http://www.iso.org).

(45) <http://www.mech.port.ac.uk/zyz/public>.

(46) <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID:=962>.

(47) [courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf).

(48) [http:// www.fibermaxcomposites.com/shop/](http://www.fibermaxcomposites.com/shop/).

(49) [http:// www.tanea.gr/2006/01/09/world/aeroplana-apo-plastiko/](http://www.tanea.gr/2006/01/09/world/aeroplana-apo-plastiko/).

(50) Νικόλαος Θ. Χαμάκος, Υπολογιστική ανάλυση διαβροχής στερεών επιφανειών από σταγόνες, ΕΜΠ Χημικών Μηχανικών, 2011