



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**ΣΤΡΕΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΗ ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ FRP's**



**Φοιτητής: Παναγής Σ. Καούκης**  
**ΑΜ: cw6981**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**Κωνσταντίνος Β. Δημάκος.**  
**Καθηγητής**  
**Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ**

**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Νοέμβριος 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

**Diploma Thesis**

**TORSIONAL STRENGTH OF RC T-BEAM STRENGTHENED WITH FRP'S**



**Student: Panagis S. Kaoukis  
Registration Number: cw6981**

**Supervisor**

**Constantinos B. Demakos  
Professor  
Dr. Civil Engineer NTUA**

**ATHENS-EGALEO, November 2023**

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

<b>Κ. Δημάκος, Καθηγητής</b>	<b>Κ. Ρεπαπής, Αναπλ. Καθηγητής</b>	<b>Δ. Δρίβας, Μετάπτυ. Υπότροφος</b>
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**Copyright** © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Παναγής Σ. Καούκης, Νοέμβριος, 2023**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο υπογεγραμμένος **Παναγής Καούκης** του **Σωτηρίου**, με αριθμό μητρώου **44369810226** φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.»

**Ο Δηλών**

**Παναγής Καούκης**

(Υπογραφή φοιτητή)





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με τον ένα ή τον άλλο τρόπο στην εκπόνηση της. Ιδιαίτερος επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα την εργασία μου, Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Δημάκο, για την πολύτιμη βοήθεια και την πραγματικά αμέριστη συμβολή του σε κάθε στάδιο εκπόνησης της διατριβής μου.

Θα ήθελα επίσης με την ευκαιρία να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη στήριξη και τη συμπαράστασή της κατά τη διάρκεια όλης της ακαδημαϊκής μου πορείας, από τα πρώτα μου φοιτητικά χρόνια μέχρι και αυτή τη συγκεκριμένη σημαντική στιγμή. Για το λόγο αυτό και ως ελάχιστη ένδειξη ευγνωμοσύνης αφιερώνω την παρούσα διπλωματική μου εργασία στην αγαπημένη μου οικογένεια, χωρίς την κατανόηση και τη βοήθεια της οποίας η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει ως σκοπό την εξέταση συμπεριφοράς μίας ενισχυμένης δοκού, με οπλισμένο σκυρόδεμα από ινοπλισμένα πολυμερή υλικά (FRP's), ως προς τη στρεπτική αντοχή υπό συγκεκριμένες δυνάμεις, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κυρίως σε κτήρια και γέφυρες παντός τύπου. Στην αρχή της εργασίας γίνεται αναφορά στα υλικά από τα οποία αποτελείται η πλακοδοκός και την εσωτερική πρωτότυπη σχεδίαση με σκοπό την ενίσχυση της πλακοδοκού σε εξωτερικές δυνάμεις. Στη συνέχεια, η πλακοδοκός ελέγχεται ως προς τη στρεπτική αντοχή της. Τέλος παρουσιάζονται πρότυπα αποτελέσματα ως προς την αντοχή, τη συμπεριφορά των υλικών και τις αντιδράσεις του οπλισμού της δοκού. Σε συνέχεια όλων των παραπάνω, αναφέρονται σκέψεις και υλοποιήσιμες ιδέες για μελλοντικές έρευνες.

**Λέξεις κλειδιά:** αντοχή, πλακοδοκός, πολυμερή υλικά, οπλισμένο σκυρόδεμα, στρέψη.

## **ABSTRACT**

The present thesis aims to investigate the behavior of a reinforced beam, with reinforced concrete made of fiber-reinforced polymeric materials (FRP's), in terms of torsional strength under specific forces, which mainly occur in buildings and bridges of all types. At the beginning of the paper, the materials of which the slab is composed and the internal prototype design are discussed in order to strengthen the slab under external forces. Then the slab is tested for its torsional strength. Finally, model results are presented, in terms of strength, material behavior and reactions of the beam reinforcement. In continuation of all the above, thoughts and feasible ideas for future research are reported.

**Key words** : strength, beam, polymeric materials, reinforced concrete, torsion



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες.....	σελ.6
Περίληψη.....	σελ.7
Abstract.....	σελ.8
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	σελ.13
Εισαγωγή.....	σελ.14-15
Κεφάλαιο 1 .....	σελ.16-33
Κεφάλαιο 2 .....	σελ.34-42
Κεφάλαιο 3 .....	σελ.43-53
Κεφάλαιο 4 .....	σελ.54-55
Κεφάλαιο 5 .....	σελ.56-63
Κεφάλαιο 6 .....	σελ.64-76
Αποτελέσματα.....	σελ.77-93
Συμπεράσματα.....	σελ.94
Βιβλιογραφία.....	σελ.95-97

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

### 1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

#### 1.1.1 ΤΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

#### 1.1.2 ΦΘΟΡΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 1.1.3 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

### 1.3 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 1.3.1 ΥΛΙΚΑ ΑΟΠΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 1.3.2 ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 1.4 ΧΑΛΥΒΑΣ ΟΠΛΙΣΜΩΝ

### 1.5 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

#### 1.5.1 ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

#### 1.5.2 ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ**

### 2.1 ΓΕΝΙΚΑ

### 2.2 ΙΝΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 2.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

#### 2.2.2 ΙΝΕΣ ΓΥΑΛΙΟΥ

#### 2.2.3 ΙΝΕΣ ΑΡΑΜΙΔΟΥ

#### 2.2.4 ΙΝΕΣ ΑΝΘΡΑΚΑ

### 2.3 ΜΗΤΡΑ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

#### 2.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

#### 2.3.2 ΘΕΡΜΟΣΚΛΗΡΥΝΟΜΕΝΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

##### 2.3.2.1 ΕΠΟΞΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

##### 2.3.2.2 ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

##### 2.3.2.3 ΒΙΝΥΛΕΣΤΕΡΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

#### 2.3.3 ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΡΗΤΙΝΕΣ

### 2.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΙΚΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

### 3.1 ΓΕΝΙΚΑ

### 3.2 ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

### 3.3 ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### 3.3.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

#### 3.3.2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΔΙΑΣΤΟΛΗΣ

### 3.4 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

#### 3.4.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

#### 3.4.2 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΘΛΙΠΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

#### 3.4.3 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

#### 3.4.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ

### 3.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΠΟ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ

#### 3.5.1 ΕΡΠΥΣΜΟΣ

#### 3.5.2 ΚΟΠΩΣΗ

### 3.6 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ-ΔΙΑΒΡΩΣΗ-ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ FRP

#### 3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

#### 3.6.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ-ΦΩΤΙΑ

#### 3.6.3 ΥΠΕΡΙΩΔΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

#### 3.6.4 ΥΓΡΑΣΙΑ

#### 3.6.5 ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΑΠΟ ΧΛΩΡΙΔΙΑ ΚΑΙ ΑΛΚΑΛΙΑ

#### 3.6.6 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΤΑ FRPs ΩΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΑΝΤΙ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ**

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ

### 4.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗΣ

### 4.3 ΔΡΑΣΗ ΒΛΗΤΡΟΥ

### 4.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΡΕΨΗΣ**

### 5.1 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

### 5.2 ΣΤΕΡΕΟ ΣΩΜΑ

#### 5.2.1 ΚΕΝΤΡΟ ΜΑΖΑΣ

#### 5.2.2 ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΩΜΑΤΟΣ

### 5.3 ΕΙΔΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗΣ ΣΤΑ ΣΤΕΡΕΑ ΣΩΜΑΤΑ

#### 5.3.1 ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ

#### 5.3.2 ΘΛΙΨΗ

#### 5.3.3 ΔΙΑΤΜΗΣΗ

#### 5.3.4 ΣΤΡΕΨΗ

### 5.4 ΔΥΣΚΑΜΨΙΑ ΔΟΚΩΝ

### 5.5 ΣΤΡΕΨΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΔΟΚΟΥ

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 6.2 ΕΠΙΛΟΓΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

### 6.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΛΙΚΟΥ

### 6.4 ΜΕΘΟΔΟΣ, ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΚΑΙ ΕΚΚΙΝΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

#### 6.4.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΔΟΜΗΣ

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 2.1.1 Δοκός στήριξης.....	
Εικόνα 2.2 Η πρώτη δοκός τύπου Ι.....	
Εικόνα 2.3.1.1 Απλή δοκός.....	
Εικόνα 2.3.1.2 Απλή δοκός στην καθημερινότητα.....	
Εικόνα 2.3.2.1 Πακτωμένη δοκός.....	
Εικόνα 2.3.2.2 Δοκός προβόλου σε κατοικία.....	
Εικόνα 2.3.3.1 Προεξέχουσα δοκός.....	
Εικόνα 2.3.3.2 Τύπος προεξέχουσας δοκού στον τομέα των μεταφορών.....	
Εικόνα 2.3.4.1 Συνεχής δοκός.....	
Εικόνα 2.3.4.2 Τύπος συνεχούς δοκού στην καθημερινότητα.....	

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, λόγω της γήρανσης κυρίως των περισσότερων δομών και για τη βιωσιμότητα των ικανοποιητικών απόδοσης του υφιστάμενου δομικού συστήματος, η επισκευή και η ενίσχυση των γεφυρών, των κτιρίων και άλλων κατασκευών που εντάσσονται στο πολυποίκιλο αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού έχουν καταστεί τουλάχιστον αναγκαίες. Σε γενικές γραμμές, οι περισσότερες κατασκευές απαιτούν επισκευή και ενίσχυση για διάφορους λόγους, κάποιιοι από τους οποίους είναι η υποβάθμιση που προκαλείται από το περιβάλλον, η αύξηση των φορτίων λειτουργίας, οι αλλαγές στη χρήση της δομής, τα σφάλματα σχεδιασμού και της κατασκευής, οι αλλαγές στους κανονισμούς του κώδικα σχεδιασμού και τέλος οι σεισμικές μετασκευές. Ειδικότερα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ορισμένα στοιχεία που αποτελούνται είτε αποκλειστικά είτε όχι από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ), όπως για παράδειγμα οι δοκοί μπορεί να παρουσιάζουν πολλές φορές ανεπάρκεια στη στρεπτική διατμητική ικανότητα και να χρειάζονται ενίσχυση. Αυτές οι ανεπάρκειες, μπορεί να προκύψουν από διάφορους λόγους, όπως για παράδειγμα ανεπαρκείς αναβολείς που προκύπτουν από κατασκευαστικά σφάλματα ή ανεπαρκή σχεδιασμό, μείωση της πραγματικής επιφάνειας του χάλυβα λόγω διάβρωσης, ή αυξημένη ζήτηση λόγω αλλαγής χρήσης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η στρεπτική ενίσχυση μελών από σκυρόδεμα επιτυγχάνεται ενώ παράλληλα διαμορφώνονται και αναπτύσσονται οι υπόλοιπες μηχανικές αντοχές της δοκού σε μηχανική καταπόνηση που λαμβάνει χώρα σε ενισχυμένα, μεγάλου εμβαδού κτήρια, αλλά και σε γέφυρες με αποστολή είτε σε πανελλήνια δεδομένα είτε σε παγκόσμια κατά βάση πολλές φορές δεδομένα. Συνήθως, η στρεπτική ενίσχυση μελών από σκυρόδεμα επιταχύνεται μέσω της αύξησης του εμβαδού της διατομής του μέλους σε συνδυασμό με προσθήκη εγκάρσιου οπλισμού είτε με τη χρήση εξωτερικά συνδεδεμένων χαλύβδινων πλακών και πίεσης αρμολόγηση του διακένου μεταξύ της πλάκας και του στοιχείου σκυροδέματος είτε τέλος με την εφαρμογή αξονικού φορτίου στο μέλος με εφαρμογή έντασης σε δεύτερο χρόνο. Αν και οι παραπάνω μέθοδοι εικάζεται ότι θα συνεχίσουν να χρησιμοποιούνται σε πολλές περισσότερες και διάφορες περιπτώσεις, οι ίνες από σύνθετα πολυμερή (FRP) παρέχουν μια εναλλακτική και εγκυρότερη επιλογή ενίσχυσης. Οι ίνες από σύνθετα πολυμερή υλικά (FRP) έχουν δείξει μεγάλη εγκυρότητα και αξιόπιστα αποτελέσματα έως τώρα, ως ένα σύγχρονο υλικό σε κάμψη και διάτμηση ενίσχυση ως εξωτερική ενίσχυση.

Μελέτες ως προς την ενίσχυση σε κάμψη και διάτμηση RC δοκών με χρήση FRP έχουν διαμορφωθεί περίπου από τις αρχές της δεκαετίας του ενενήντα (90's) του περασμένου αιώνα [1]. Ωστόσο, δεν έχει δοθεί η απαραίτητη προσοχή στη δυνατότητα εφαρμογής των στη στρεπτική ενίσχυση των δοκών οπλισμένου σκυροδέματος (RC Beams) όσον αφορά την πειραματική [2], [3], [4] και την αριθμητική έρευνα [5], [6] λόγω της εξειδικευμένης φύσης του προβλήματος σε συνδυασμό με τις δυσκολίες που δημιουργούνται στη διεξαγωγή ρεαλιστικών δοκιμών και των αντίστοιχων αντιπροσωπευτικών αναλύσεων.

Παρόλα αυτά αρκετοί άλλοι ερευνητές έχουν μελετήσει τη βελτίωση της στρεπτικής συμπεριφοράς των ενισχυμένων μελών RC με πειραματικές και αριθμητικές έρευνες. Οι περισσότερες μελέτες εξετάζουν τη συμπεριφορά ορθογωνικών δοκών. Υπάρχουν ελάχιστα δημοσιευμένα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τη στρεπτική συμπεριφορά δοκών σχήματος T ενισχυμένων με υλικά FRP.

Ο ερευνητής Κωνσταντίνος Χαλιορής [31] διερεύνησε πειραματικά την επίδραση της χρήσης φύλλων και λωρίδων FRP στη στρεπτική τους ικανότητα σε δοκάρια RC σχήματος T χωρίς συνδετήρες, από όπου προέκυψε, ότι τα συνεχή φύλλα FRP είχαν υψηλότερη στρεπτική ικανότητα από τη χρήση λωρίδων FRP. Ταυτόχρονα, η χρήση U-jacket σε δοκούς σχήματος T παρουσίασε χαμηλότερη στρεπτική ικανότητα λόγω πρόωρης αποκόλλησης των υφασμάτων.

Ο στόχος της παρούσας πειραματικής διατριβής είναι να αποκομισθούν περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη στρεπτική συμπεριφορά ενισχυμένων δοκαριών σχήματος T από FRP.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

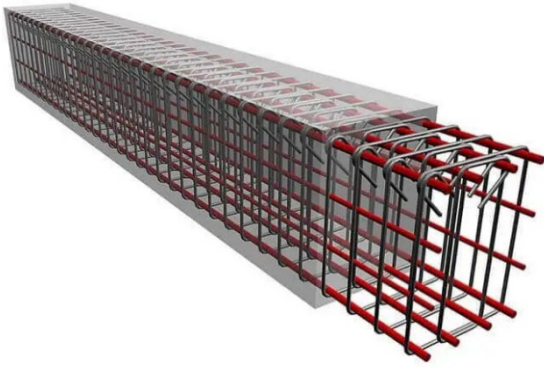
## 1.1 Ορισμός

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα ισχυρό, ανθεκτικό στο χρόνο δομικό υλικό που μπορεί να διαμορφωθεί σε πολλά διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα και μεγέθη, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μηχανική αλλά και αισθητική υπόσταση στην κατασκευή. Η συμβολή του στη σύγχρονη αρχιτεκτονική, την διαμόρφωση της κατοικίας και των χώρων που φιλοξενούν κάθε είδος εργασίας στο σύγχρονο κόσμο, είναι σαφώς τεράστια. Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει ανακηρυχθεί κυρίαρχος των δομικών υλικών τόσο στον κόσμο όσο και την Ελλάδα, καθώς έχει χαμηλό κόστος και συνδυάζει άψογα τις μηχανικές ιδιότητες των δυο υλικών από τα οποία και αποτελείται: του σκυροδέματος και του χάλυβα. Ωστόσο, όπως κάθε υλικό έτσι κι αυτό, κατά την περίοδο λειτουργίας της κατασκευής εμφανίζει φθορές, σημαντικές ή ασήμαντες.

Ως αποτέλεσμα, κατά τη διάρκεια ζωής ενός έργου από οπλισμένο σκυρόδεμα, η συμβολή του Πολιτικού Μηχανικού τόσο στη φάση της κατασκευής όσο και στη φάση λειτουργίας του, κρίνεται αναγκαία για την ασφάλεια των χρηστών του έργου (Mosley, Bill; Bungey, John; Hulse, 2016). Το ενισχυμένο σκυρόδεμα είναι ο κοινός όρος που δίνεται σε συγκεκριμένο μέλος (ή πλάκα) που περιέχει χάλυβα οπλισμού (συνήθως με τη μορφή χαλύβδινων ράβδων) με σκοπό την αύξηση στο μέρος κυρίως της αντοχής της δομής. Το οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) είναι η ουσία που παράγεται όταν συνδυάζονται σκυρόδεμα και ράβδοι οπλισμού. Ο χαλύβδινος οπλισμός εισάγεται αρχικά στον τύπο ξύλου κατά την κατασκευή. Μπορεί να πάρει το σχήμα χαλύβδινων ράβδων που είναι καλωδιωμένες στη θέση τους ή ενός προκατασκευασμένου χαλύβδινου κλωβού.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η άριστη συνεργασία μεταξύ των δύο υλικών, το ολοκληρωμένο σκυρόδεμα στη συνέχεια χύνεται στον τύπο ξύλου και δονείται χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους μηχανισμούς.





Εικόνα 1.1.1. οπλισμένο σκυρόδεμα

### 1.1.1 Το Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ).

Τα υλικά από τα οποία συντίθεται το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως αναφέρθηκε, είναι το σκυρόδεμα και ο χάλυβας. Η βασική ιδέα της συνεργασίας αυτών των δύο υλικών προκύπτει από το γεγονός ότι διαθέτουν πολύ διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες όμως συνδυαστικά λειτουργούν πολύ καλά. Η κυριότερη ιδιότητα που εκμεταλλεύεται ο συνδυασμός των δύο αυτών υλικών είναι η μεγάλη αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό, σε αντιδιαστολή με την αντίστοιχα μικρή εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον, η αντοχή των δύο υλικών σε θλίψη είναι αμφότερα καλή αλλά ο χάλυβας για ραβδόμορφα μέλη (όπως ο χαλύβδινος οπλισμός του Ο.Σ.) ελλοχεύει τον κίνδυνο του λυγισμού κατά τη θλιπτική φόρτιση, κάτι το οποίο αποφεύγεται εγκιβωτίζοντάς τον στο περιβάλλον του σκυροδέματος και περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις πλευρικές μετακινήσεις.

Σε κάθε περίπτωση, όσο καλύτερα γίνει η μελέτη και η επίβλεψη μιας κατασκευής από Ο.Σ., τόσο καλύτερα θα συνεργαστούν οι ιδιότητες των δύο υλικών και ταυτόχρονα θα επιτευχθεί εξοικονόμηση υλικών και χρόνου και κυρίως η ασφαλής μελλοντική χρήση της (Mosley, Bill; Bungey, John; Hulse, 2016). Το οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί επιπλέον ως ένα βιώσιμο και περιβαλλοντικό υλικό.

Η επιλογή του για τη διαμόρφωση ενός φορέα, σε συνδυασμό με την κατάλληλη μόρφωση του φέροντος συστήματος, συνεισφέρει σημαντικά στην αειφορία της κατασκευής. Αρχικά το σκυρόδεμα διατίθεται από τοπικές πηγές και γι' αυτό απαιτεί μικρές αποστάσεις μεταφοράς έως το εργοτάξιο. Ταυτόχρονα διαθέτει μεγάλη θερμική μάζα, δηλαδή απορροφάει την περίσσεια θερμικής ενέργειας και την εκλύει με αργό ρυθμό ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός της ημέρας. Επίσης, είναι ένα ανθεκτικό υλικό, που εν γένει απαιτεί μικρή συντήρηση, έχει καλή αντίσταση στη φωτιά, τις πλημμύρες και το θόρυβο. Μάλιστα, στο τέλος της ζωής μίας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα,

είναι δυνατή η ανακύκλωση του υλικού για μετέπειτα χρήση. Επομένως η χρήση του αλλά και η βελτιστοποίησή του ως δομικό υλικό ενδείκνυται τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς (The Concrete Centre, n.d.).

### **1.1.2 Φθορές Οπλισμένου Σκυροδέματος**

Όπως και κάθε άλλο δομικό υλικό, το οπλισμένο σκυρόδεμα στην διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής εμφανίζει φθορές που σε κάθε περίπτωση οφείλουν να εκτιμηθούν από το μηχανικό. Ειδικά στον ελλαδικό χώρο που η σεισμική δραστηριότητα είναι αυξημένη, τα φαινόμενα φθορών των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ακόμα πιο έντονα. Η ύπαρξη φθοράς συνήθως εντοπίζεται πρώτα οπτικά, μιας και οι φθορές είναι και επιφανειακές. Οι αιτίες των φθορών μπορεί να είναι μηχανικές, περιβαλλοντικές ή φυσικές. Όταν η εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών είναι σε φέροντα στοιχεία και έχοντας αποκλείσει ως αιτία τη μηχανική φόρτιση, είναι πολύ πιθανή η ύπαρξη διάβρωσης. Όμως, ακόμα και αν η ρωγμή δημιουργηθεί λόγω μηχανικής φόρτισης, η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού ξεκινάει ή και επιδεινώνεται ταχύτατα, λόγω της άμεσης επαφής του με το ατμοσφαιρικό περιβάλλον, γεγονός που καθιστά τον εντοπισμό, την αξιολόγηση και την επισκευή των ρωγμών βήματα υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας της κατασκευής.

### **1.1.3 Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος**

Η ικανότητα ενός υλικού να αντέχει τις αλλαγές στις φυσικές του ιδιότητες που προκαλούνται από τις κλιματικές συνθήκες της ατμόσφαιρας και γενικά από περιβαλλοντικούς παράγοντες (όπως υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, διακυμάνσεις θερμοκρασίας, παγετός και χημικές ουσίες) είναι γνωστή ως ανθεκτικότητα.

Γενικά, μία κατασκευή ορίζεται ως ανθεκτική εάν εξυπηρετήσει το σκοπό δημιουργίας της για την διάρκεια ζωής για την οποία είχε αρχικά σχεδιαστεί και με τη λιγότερο δυνατή επέμβαση (Τριανταφύλλου, 2018). Το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως και όλα τα σύνθετα υλικά, εμφανίζει φθορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής, έχει δηλαδή πεπερασμένο χρόνο ζωής που πέρα από αυτόν, το υλικό κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές έχοντας υποστεί αλλοιώσεις των οποίων η επισκευή είναι είτε αντιοικονομική είτε επισφαλής. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι αποτέλεσμα του περιβάλλοντος, του σχεδιασμού, του ανθρωπίνου παράγοντα, των ιδιοτήτων του υλικού και της χρήσης του. Συγκεκριμένα, αν και το σκυρόδεμα μπορεί υπό προϋποθέσεις<sup>1</sup> να θεωρηθεί ότι έχει δυνατότητα απεριόριστης ζωής, σε συνδυασμό με το χάλυβα οπλισμού, επηρεάζεται από διάφορους διαβρωτικούς παράγοντες και το γεγονός ότι η πλειοψηφία των κατασκευών από Ο.Σ. είναι κατασκευασμένη αρκετά χρόνια πριν, καθιστά

την ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος μείζον ζήτημα στο σύγχρονο κατασκευαστικό και επιστημονικό κλάδο. Ειδικότερα, η χαμηλή ανθεκτικότητα του σύνθετου αυτού υλικού μπορεί να οφείλεται είτε στο εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται και εκτίθεται συνεχώς η κατασκευή, είτε στο εσωτερικό περιβάλλον του σκυροδέματος το οποίο δύναται να δημιουργεί αιτίες διάβρωσης από μόνο του.

Εξωτερικά, οι αιτίες αλλοίωσής του σκυροδέματος μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή μηχανικές. Παραδείγματος χάριν, οι καιρικές συνθήκες, οι ακραίες θερμοκρασίες οι θερμοκρασιακές μεταβολές, η πυρκαγιά, η όξινη βροχή, η τριβή, η εναπόθεση μεγάλου φορτίου, αποτελούν εξωτερικούς παράγοντες αλλοίωσης του σκυροδέματος, επηρεάζοντας όμως σε πρώτο στάδιο μόνο το σκυρόδεμα και όχι το χαλύβδινο οπλισμό του. Αντίστοιχα, εσωτερικές αιτίες διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού αποτελούν τα χλωριόντα και η ενανθράκωση. Στην περίπτωση, λοιπόν, που σημειωθεί ενανθράκωση του σκυροδέματος, χημική αντίδραση των συστατικών του ή διείσδυση χλωριόντων θα προκληθεί ομοιόμορφη/ανομοιόμορφη διάβρωση, ρηγμάτωση και εκτίναξη (spalling) της επικάλυψης του σκυροδέματος και τότε το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται πλέον από χαμηλή ανθεκτικότητα. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι το ήπιο κλίμα της Ελλάδας καθιστά εξαιρετικά σπάνιο το φαινόμενο του σκυροδέματος να υποβαθμίζεται σταδιακά λόγω των κύκλων πόρων του νερού ψύξης και απόψυξης, σε αντίθεση με άλλες χώρες. Ως αποτέλεσμα, η διάβρωση είναι η κύρια αιτία της επιδείνωσης της αντοχής του χαλύβδινου οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Ως γνωστόν, η όπλιση του σκυροδέματος με χάλυβα γίνεται κυρίως για να επιτευχθεί μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα του στατικού στοιχείου σε εφελκυσμό, μιας και το σκυρόδεμα από μόνο του υπολείπεται σε αυτού του είδους την καταπόνηση. Όμως εν τέλει, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα υποφέρουν από τη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού, η οποία μπορεί να οδηγήσει μέχρι και σε κατάρρευση, ενώ οι επιδιορθώσεις της κοστίζουν δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως (Almusallam, 2001) (1) εκτός και αν εκτεθεί σε χημικές διεργασίες, περιβαλλοντικές ή τεχνητές, ή δεχθεί φυσική καταστροφή, όπως ο σεισμός (6). Οι συνθήκες έκθεσης του περιβάλλοντος και οι απαιτούμενες ποιότητες καθορίζουν το επιθυμητό επίπεδο ανθεκτικότητας των κτιρίων με βάση την αναμενόμενη μελλοντική χρήση τους. Γι' αυτό πλέον, οι κατασκευές σχεδιάζονται ακολουθώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές, μεταξύ αυτών και η απαιτούμενη ανθεκτικότητα όπως ορίζεται από τον εκάστοτε κανονισμό. Τελικά, η ανθεκτικότητα και η ζωή του σκυροδέματος καθορίζεται από τα συστατικά του, την αναλογία τους, την αλληλεπίδραση τους, αλλά και από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και συνθήκες.

Αξίζει να δοθεί ο ορισμός του οπλισμένου σκυροδέματος σε αυτό το σημείο λόγω της υψίστης σημασίας που έχει για την παρούσα διπλωματική εργασία. Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα ισχυρό, ανθεκτικό

στο χρόνο δομικό υλικό που μπορεί να διαμορφωθεί σε πολλά διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα και μεγέθη, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μηχανική αλλά και αισθητική υπόσταση στην κατασκευή. Η συμβολή του στη σύγχρονη αρχιτεκτονική, τη διαμόρφωση της κατοικίας και των χώρων που φιλοξενούν κάθε είδους εργασίας στο σύγχρονο κόσμο, είναι σαφώς τεράστια. Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει ανακηρυχθεί κυρίαρχος των δομικών υλικών στον κόσμο αλλά και την Ελλάδα καθώς έχει χαμηλό κόστος και συνδυάζει άψογα τις μηχανικές ιδιότητες των δυο υλικών από τα οποία και αποτελείται: του σκυροδέματος και του χάλυβα. Ωστόσο, όπως κάθε υλικό έτσι κι αυτό, κατά την περίοδο λειτουργίας της κατασκευής εμφανίζει φθορές, σημαντικές ή ασήμαντες. Εξαιτίας αυτού, η συμμετοχή του πολιτικού μηχανικού θεωρείται απαραίτητη για την ασφάλεια των χρηστών του έργου καθ' όλη τη διάρκεια ζωής ενός έργου από οπλισμένο σκυρόδεμα, τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας (Mosley, Bill; Bungey, John; Hulse, 2016). Ένα συγκεκριμένο στοιχείο (ή πλάκα) που περιέχει ενισχυτικό χάλυβα - συνήθως με τη μορφή χαλύβδινων ράβδων - για να βοηθήσει στην αύξηση της αντοχής της κατασκευής αναφέρεται συνήθως ως οπλισμένο σκυρόδεμα. Το οπλισμένο σκυρόδεμα (RC) είναι η ουσία που παράγεται όταν συνδυάζονται σκυρόδεμα και ράβδοι οπλισμού. Ο χαλύβδινος οπλισμός εισάγεται αρχικά στον τύπο ξύλου κατά την κατασκευή. Μπορεί να πάρει το σχήμα χαλύβδινων ράβδων που είναι καλωδιωμένες στη θέση τους ή ενός προκατασκευασμένου χαλύβδινου κλωβού.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η άριστη συνεργασία μεταξύ των δύο υλικών, το ολοκληρωμένο σκυρόδεμα στη συνέχεια χύνεται στον τύπο ξύλου και δονείται χρησιμοποιώντας τους κατάλληλους μηχανισμούς.

## **1.2 Ιστορική αναδρομή**

Λόγω των εξαιρετικών του ιδιοτήτων, το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει γίνει το πιο δημοφιλές δομικό υλικό στην Ελλάδα και έχει εξαπλωθεί σε όλη την Κεντρική Ευρώπη, την Αμερική και την Ασία διαχρονικά. Οι Ρωμαίοι ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν το σκυρόδεμα ως υλικό και το χρησιμοποίησαν ως συνδετικό παράγοντα σε διάφορα έργα τους. Η ανακάλυψη του τσιμέντου Πόρτλαντ από τον Joseph Aspdin το 1824 πιστώνεται ότι εγκαινίασε τη νέα εποχή του σκυροδέματος.



Εικόνα 1.1.2 τσιμέντο Portland τύπου I



Εικόνα 1.1.3. Joseph Aspdin

Το 1855, ένας αγρότης, ο Jean-Louis Lambot στην κεντρική Γαλλία έκανε την πρώτη γνωστή μελέτη και χρήση οπλισμού σε σκυρόδεμα όταν προσπάθησε να κατασκευάσει δεξαμενές νερού για το κτήμα του. Λίγα χρόνια αργότερα, έκανε άλλη μια ανεπιτυχή προσπάθεια να κατασκευάσει ένα σκάφος για να διασχίσει μια κοντινή λίμνη. Ταυτόχρονα, ο Γάλλος κηπουρός Joseph Monier χρησιμοποίησε μεταλλικό πλέγμα για να δημιουργήσει γλάστρες για τη δουλειά του που θα διαρκούσαν περισσότερο. Ακολούθησε γρήγορα τον J.L. Lambot στις προσπάθειές του να εξερευνήσει περαιτέρω τις ιδιότητες του σκυροδέματος αφού συνειδητοποίησε τη μηχανική του αξία.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, ιδιαίτερα όσον αφορά τους δημιουργούς του υλικού, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα αρχικά στάδια του υλικού πραγματοποιήθηκαν στη Γαλλία είναι πιθανότατα ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται τόσο ευρέως οι γαλλικοί όροι "Béton" και "Béton armé" να αναφέρεται στο σκυρόδεμα και στο οπλισμένο σκυρόδεμα, αντίστοιχα. Η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος στην κατασκευή κτιρίων εισήχθη αρχικά από τον Francois Coignet, έναν Γάλλο κατασκευαστή που είναι επίσης γνωστός. Με τον καιρό, περισσότεροι μηχανικοί υιοθέτησαν σταδιακά αυτή την τεχνική. Να σημειωθεί ότι η οικία F. Coignet στο Παρίσι, η οποία χρησιμοποιούσε ως κύριο δομικό υλικό το οπλισμένο σκυρόδεμα, παραμένει άθικτη. Ο William E. Ward κατασκεύασε το πρώτο σπίτι από οπλισμένο σκυρόδεμα στις Ηνωμένες Πολιτείες στο Port Chester της Νέας Υόρκης, στις

αρχές του 1873. Είναι ακόμα γνωστό ως "Κάστρο του Ward" και εξακολουθεί να είναι σε καλή κατάσταση σήμερα.

### 1.3 Κανονισμοί οπλισμένου σκυροδέματος

Ο σχεδιασμός των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπαγορεύεται από νομικά δεσμευτικούς κανονισμούς, οι οποίοι πρέπει να τηρούνται μεταξύ άλλων λόγων. Ακολουθεί μια λίστα με όλους τους κανόνες που ισχύουν τώρα, αυτούς που έχουν τροποποιηθεί και αυτούς που έχουν παραμεριστεί με την πάροδο του χρόνου.

- Η Γαλλία υιοθέτησε την πρώτη νομοθεσία το 1904, ακολουθούμενη από τη Γερμανία το 1907 και τις Ηνωμένες Πολιτείες το 1909.
- Η πιο πρόσφατη ελληνική νομοθεσία που αφορά την κατασκευή (κυρίως) κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι:
  - ΕΚΩΣ2000: Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος
  - ΕΑΚ2000: Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός
  - Η ιστοσελίδα του Οργανισμού Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας διαθέτει ηλεκτρονική έκδοση αυτών των κανονισμών (ΟΑΣΠ): [www.oasp.gr](http://www.oasp.gr)
- Σε αντίθεση με τους προηγούμενους νόμους, οι οποίοι βασίζονταν στην αποδεκτή προσέγγιση του στρες, οι σύγχρονοι κανονισμοί βασίζονται στη μέθοδο της οριακής κατάστασης παγκοσμίως.
- Οι ακόλουθοι κανόνες σχετικά με το οπλισμένο σκυρόδεμα που ίσχυαν μέχρι σήμερα στην Ελλάδα:
  - 1954: Περί Κανονισμών δια την μελέτην και εκτέλεσιν οικοδομικών έργων εξ οπλισμένου σκυροδέματος
  - 1991: Ο Νέος Ελληνικός Κανονισμός για τη Μελέτη και Κατασκευή Έργων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ν.Ε.Κ.Ω.Σ.)
  - 2001: Ελληνικός Κανονισμός Οπλισμένου Σκυροδέματος - 2000 (Ε.Κ.Ω.Σ.-2000). Μικρής κλίμακας τροποποιήσεις το 2003.
- Αντίστοιχα για τους αντισεισμικούς κανονισμούς:
  - 1959: Βασιλικό Διάταγμα '59. Εισαγωγή πρόσθετων άκρων το 1984
  - 1995: Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (Ν.Ε.Α.Κ.)
  - 2001: Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός – 2000 (Ε.Α.Κ. 2000). Αντίστοιχες τροποποιήσεις το 2003

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης καταβάλλεται προσπάθεια αντικατάστασης όλης της εθνικής νομοθεσίας στα κράτη μέλη της με ενιαίους ευρωκώδικες που επιβάλλονται πέρα από τα σύνορά τους. Οι δομικοί ευρωκώδικες είναι οι ακόλουθοι:

Ευρωκώδικας 1. Δράσεις σε δομήματα.

Ευρωκώδικας 2. Σχεδιασμός κατασκευών από σκυρόδεμα.

Ευρωκώδικας 3. Σχεδιασμός των κατασκευών από χάλυβα.

Ευρωκώδικας 4 Σχεδιασμός σύμμεικτων κατασκευών από χάλυβα και σκυρόδεμα.

Ευρωκώδικας 5. Σχεδιασμός ξύλινων κατασκευών.

Ευρωκώδικας 6 Σχεδιασμός κατασκευών από τοιχοποιία.

Ευρωκώδικας 7. Γεωτεχνικός σχεδιασμός.

Ευρωκώδικας 8 Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών.

Ευρωκώδικας 9 Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο.

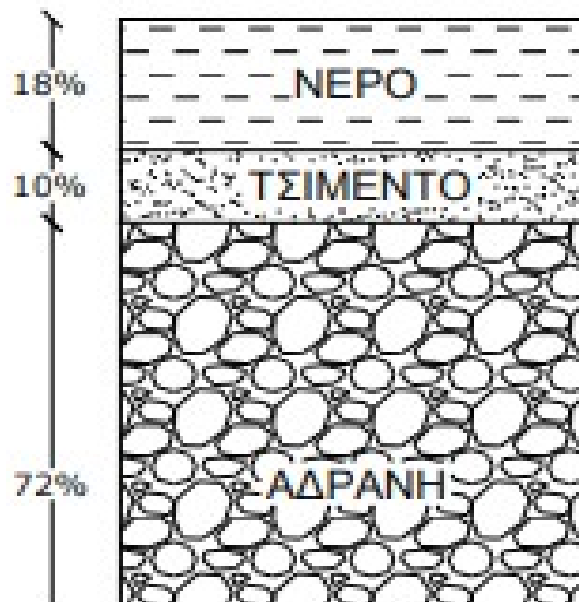
- Με πρόσφατο κοινό υπουργικό ψήφισμα εγκρίνεται η εφαρμογή και χρήση των ελληνικών μεταφράσεων των εγγράφων του Ευρωκώδικα σε όλα τα δημόσια και ιδιωτικά έργα.
- Κάθε Κάτοχος Έργου μπορεί να επιλέξει να χρησιμοποιήσει τις προαναφερθείσες οδηγίες κατά την κρίση του. Οι ισχύοντες Ευρωκώδικες, γνωστοί και ως Ελληνικά Ευρωπαϊκά Πρότυπα, απαριθμούνται σε Παραρτήματα και συμπληρώνονται από Ελληνικά Πρότυπα, τα οποία είναι τα εθνικά παραρτήματα.
- Καταργείται η απαιτούμενη εφαρμογή για τα εθνικά πρότυπα και κανόνες (προϋπάρχοντες οικοδομικοί κανονισμοί).

### **1.3.1 Υλικά άοπλου σκυροδέματος**

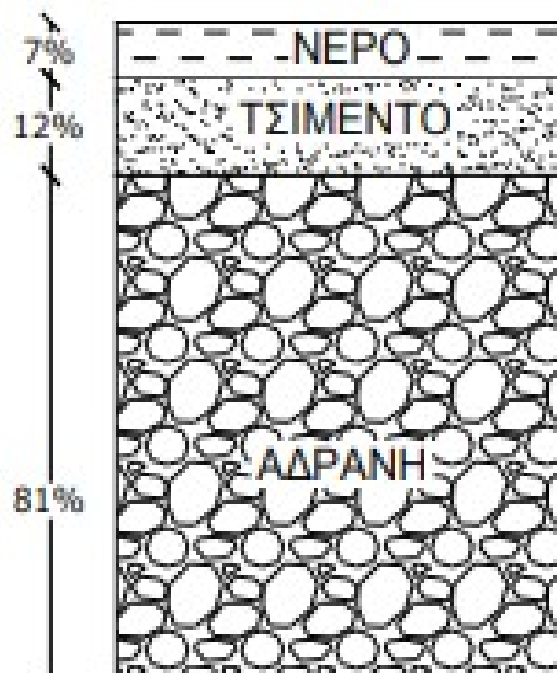
Το σκυρόδεμα που δεν είναι οπλισμένο μπορεί να θεωρηθεί ως ψεύτικη πέτρα. Ως τεχνητός λίθος θεωρείται το υλικό το οποίο αποτελείται είτε εξ ολοκλήρου είτε εν μέρη από ένα υλικό που αναφέρεται παρακάτω:

- Τσιμέντο
- Άμμος ( αδρανή υλικό )
- Σκύρα ( αδρανή υλικό )
- Νερό

Όταν τα παραπάνω υλικά έχουν την σωστή - επιτρεπτή ανάμειξη, με φυσικά τις σωστές αναλογίες μεταξύ τους, σε συνδυασμό πάντα με τον σωστό χρόνο επεξεργασίας - ανάμειξης τότε μετατρέπονται σε ένα σώμα, γνωστό στην μηχανική και ως στερεό σώμα δηλαδή στην παρούσα εργασία, σε σκυρόδεμα.



Εικόνα 1.3.1.1 Σκυρόδεμα αναλογία υλικών κατά όγκο

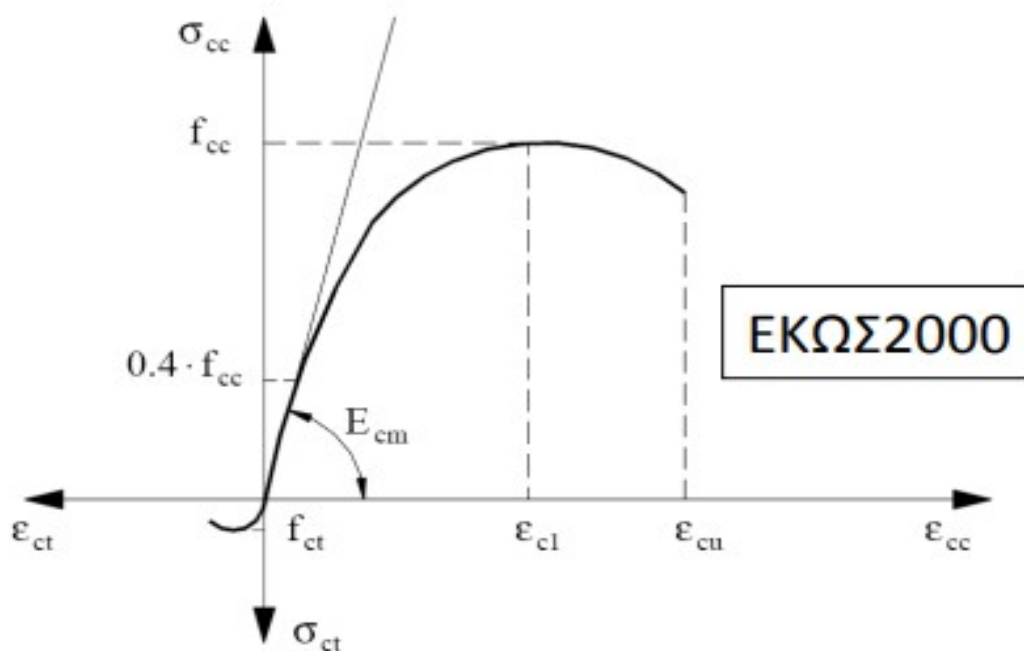


Εικόνα 1.3.1.2 Σκυρόδεμα αναλογία υλικών κατά βάρος

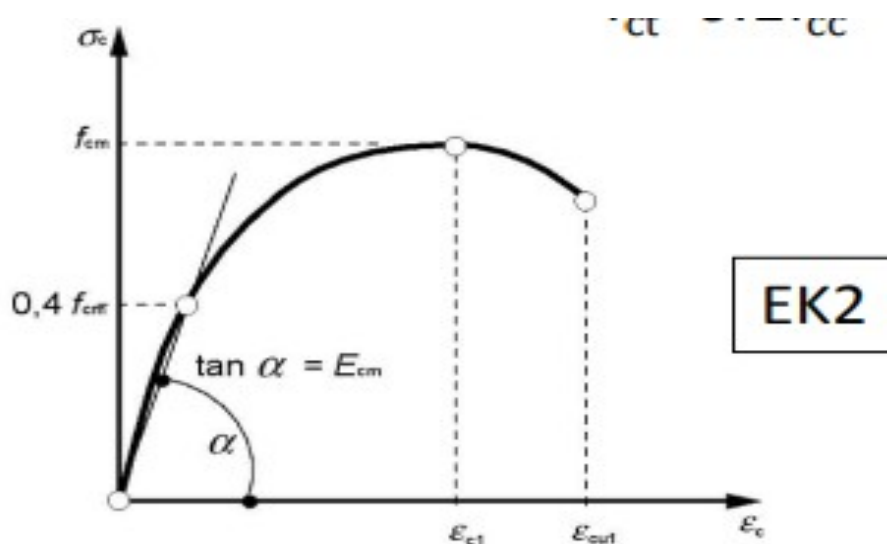


### 1.3.2 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Σε συνέχεια του τελευταίου κεφαλαίου, το μη οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που παρουσιάζει αρκετά ισχυρή αντίσταση, κυρίως στη θλίψη, σε αντίθεση με την αντοχή του σε εφελκυσμό, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη ως προς την τιμή του σχηματικού διαγράμματος που φαίνεται παρακάτω. (τάσεις και παραμορφώσεις στο σκυρόδεμα όπου  $c = \text{θλίψη}$  και  $t = \text{εφελκυσμός}$ ). Να τονιστεί ότι ως τάξη μεγέθους θεωρείται  $f_{ct} \approx 0.1 f_{cc}$ .



Διάγραμμα 1.3.2.1 Αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη



Διάγραμμα 1.3.2.2 Αντοχή σκυροδέματος σε εφελκυσμό

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος συμβολίζεται συνήθως, αλλά και στην παρούσα εργασία, ως  $f_c$  (όπου c: concrete δηλαδή τσιμέντο) στους κανονισμούς. Το παρόν κεφάλαιο αναφέρεται στην μονό-αξονική θλιπτική αντοχή. Οι αντίστοιχες αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό μετρήθηκαν κατά την διάρκεια 28 ημερών σε κυλινδρικά δείγματα με διάμετρο 150 mm, ύψος 300 mm και άκρα δείγματος στα 150 mm. Τα ευρήματα απεικονίζονται σχηματικά στα παραπάνω σχήματα. Η τυπική θλιπτική αντοχή  $f_{ck}$  ορίζεται ως το βάθος στο πρότυπο οπλισμένου σκυροδέματος. Ο αριθμός αντοχής κάτω από τον οποίο ένα τυχαίο δείγμα έχει πιθανότητα 5% να έχει την ίδια αντοχή είναι γνωστός ως η χαρακτηριστική αντοχή του κυλινδρικού δείγματος  $f_{ck}$  του κυβικού δείγματος  $f_{ck}$  [κύβος].

## 1.4 Χάλυβας οπλισμών

Είναι δυνατή η διάκριση μεταξύ των χάλυβων που χρησιμοποιούνται ως ράβδοι οπλισμού με τους εξής τρόπους:

α) με βάση την διαδικασία παραγωγής.

- Η Θερμή έλαση, δίχως καμιά περαιτέρω επεξεργασία
- Η Θερμή έλαση που ακολουθείται από μία άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία
- Η Ψυχρή κατεργασία με στρέψη ή με όλκηση (γνωστή επίσης και ως συρματοποίηση) του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση.

β) Με βάση τη μορφή επιφάνειας:

- Λείες κυλινδρικές ράβδους ή ακόμα και σύρματα (συμπεριλαμβανομένων των συγκολλημένων δομικών ματιών).
- Ράβδοι ή σύρματα υψηλής συνάφειας με νευρώσεις, που αναφέρονται επίσης ως χάλυβες ραβδώσεων στη μηχανική, που χρησιμοποιούνται και σε συγκολλημένα δομικά πλέγματα.

γ) Σύμφωνα με την συγκολλησιμότητα σε:

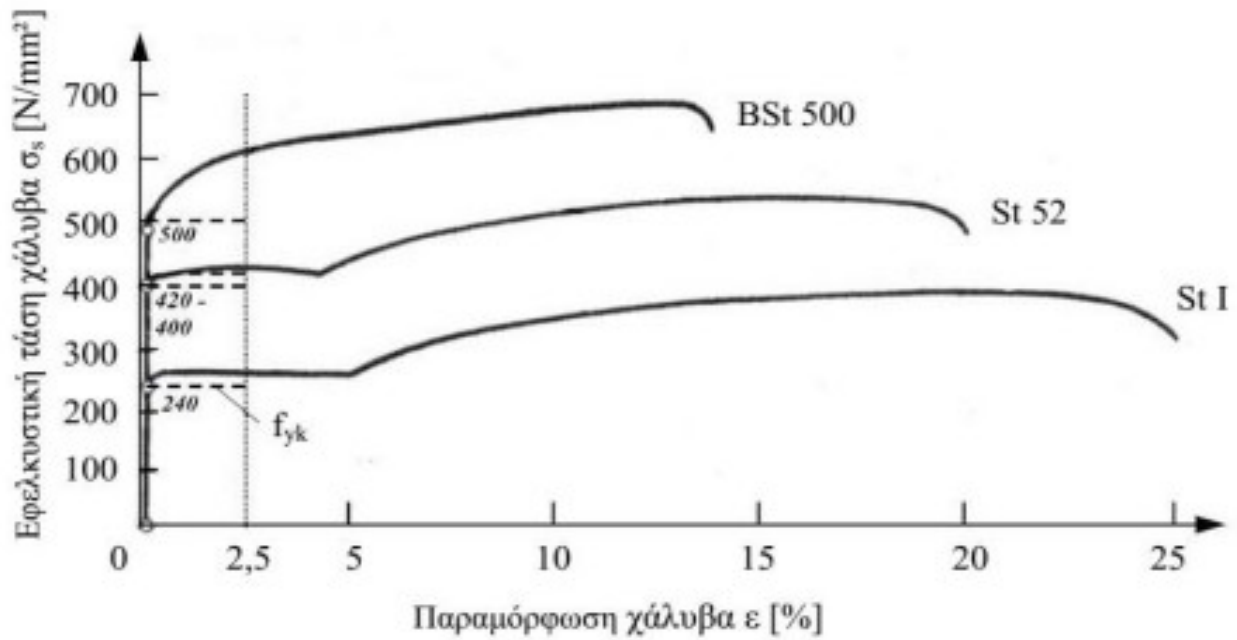
- Χάλυβες συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις
- Χάλυβες συγκολλησίμους.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο ακόλουθος πίνακας όπου αναφέρεται στην ονομαστική διάμετρο των ράβδων καθώς και στην ονομαστική διατομή των ράβδων. Όλες οι τιμές είναι σε εκατοστά τετραγωνικά μέτρα ( $\text{cm}^2$ ).

Διάμετ. mm	Βάρος Kg/m	Αριθμός Σιδήρων									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	0,154	0,20	0,39	0,59	0,78	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96
6	0,222	0,28	0,56	0,83	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54	2,83
7	0,302	0,38	0,77	1,15	1,84	1,92	2,31	2,69	3,08	3,46	3,85
8	0,395	0,50	1,00	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03
10	0,617	0,79	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85
12	0,888	1,13	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31
14	1,208	1,54	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85	15,39
16	1,578	2,01	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,10	20,11
18	1,998	2,54	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,90	25,45
20	2,466	3,14	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	31,42
22	2,984	3,80	7,60	11,40	15,21	19,01	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01
24	3,551	4,52	9,05	13,57	18,10	22,62	27,14	31,67	36,19	40,72	45,24
26	4,168	5,31	10,62	15,93	21,24	26,55	31,86	37,17	42,47	47,78	53,09
28	4,834	6,16	13,32	18,47	24,63	30,79	36,98	43,10	49,26	55,42	61,58
30	5,550	7,07	14,14	21,21	28,27	35,34	42,41	49,48	56,55	63,62	70,69
32	6,313	8,04	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,30	64,34	72,38	80,42

Πίνακας 1.4.1 Ονομαστική διάμετρος και διατομή των ράβδων

Στην περίπτωση της χαρακτηριστικής αντοχής  $f_{yk}$ , όπου  $y$  είναι η απόδοση ή η διαρροή. Η τιμή αντοχής  $f_y$  ορίζεται ως η τιμή κάτω από την οποία υπάρχει πιθανότητα 5% να ληφθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαία επιλεγμένου δείγματος. Η κατηγορία S500 αντικαθίσταται ουσιαστικά από τις ποιότητες χάλυβα B500A και B500C, οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά ως ράβδοι οπλισμού.



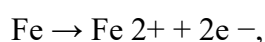
Διάγραμμα 1.4.1 Τάσεις - παραμορφώσεις χάλυβα οπλισμού

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του χάλυβα είναι σχεδόν ίδιος με αυτόν του σκυροδέματος. Δεδομένου ότι δεν προκύπτουν διακριτές παραμορφώσεις με τις αλλαγές θερμοκρασίας, οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν απώλεια της συνεργασίας των δύο υλικών, αυτό το κοινό χαρακτηριστικό βοηθά πολύ στη συνεργασία των δύο υλικών.

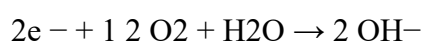
## 1.5 Ο Μηχανισμός της Διάβρωσης

Η διάβρωση είναι ένα φαινόμενο που οδηγεί στην υποβάθμιση ή την αποσύνθεση ενός υλικού ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται. Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία στην οποία φυσιολογικά λαμβάνει χώρα μία σειρά από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Ο χάλυβας στο οπλισμένο σκυρόδεμα βρίσκεται σε παθητικές συνθήκες και προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου (του άνθρακα) εξαιτίας της αλκαλικότητας του σκυροδέματος ( $\text{pH}=12-13$ ) που τον περιβάλλει. Αυτή η αλκαλικότητα είναι ισοδύναμη με τη συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) στο νερό των πόρων, υπό την προϋπόθεση της θερμοκρασίας. Ο χάλυβας διαβρώνεται και αποπαιτικοποιείται όταν το  $\text{pH}$  πέσει σε επίπεδα κάτω από 9. Αιτίες αυτής της μείωσης του  $\text{pH}$  αποτελούν η ενανθράκωση και η επίδραση των χλωριόντων (Almusallam, 2001) (Τσίκας & Παπασπυριδάκος, 2006). Η διαδικασία διάβρωσης, η οποία χρησιμοποιεί νερό πόρων ως ηλεκτρολύτη σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση, ξεκινά μόλις τρυπηθεί το προστατευτικό στρώμα της θωράκισης. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται η

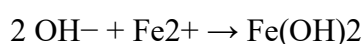
διέλευση ηλεκτρικού φορτίου (Τσίκας & Παπασπυριδάκος, 2006). Συγκεκριμένα στην περιοχή που έχει γίνει η διάτρηση δημιουργείται «άνοδος» όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση:



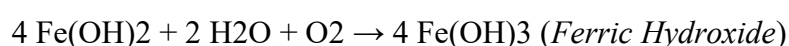
Τα δύο ελεύθερα ηλεκτρόνια ( $2\text{e}^{-}$ ) που προκύπτουν, πρέπει να καταναλωθούν κάπου αλλού στην επιφάνεια του χάλυβα, ώστε να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα. Γι' αυτό, κινούνται μέσω της χαλύβδινης ράβδου σε κάποιο άλλο σημείο της όπου δημιουργείται η «κάθοδος» και καταναλώνονται σύμφωνα με την αντίδραση:



Τα ανιόντα αυτά κινούνται προς την άνοδο που αντιδρούν με τα οξειδία του σιδήρου με την παρακάτω αντίδραση:



Αυτή η διαδικασία φαίνεται (Broomfield, 2007) στις αντιδράσεις στην άνοδο, κάθοδο, οξείδωσης και υδρόλυσης του διαβρωμένου χάλυβα. Παρατηρείται ότι στην καθοδική αντίδραση δημιουργούνται ελεύθερα υδροξύλια. Αυτά τα ιόντα αυξάνουν την τοπική αλκαλικότητα και γι' αυτό ενδυναμώνουν το στρώμα παθητικής προστασίας, εκμηδενίζοντας έτσι τις πιθανότητες εμφάνισης των συνεπειών της ενανθράκωσης και της παρουσίας χλωριόντων στην κάθοδο. Η ανοδική και καθοδική αντίδραση είναι μόνο τα πρώτα βήματα της διαδικασίας δημιουργίας της οξείδωσης (παρολ' αυτά, αποτελούν βασικές δράσεις για την κατανόηση της διάβρωσης). Εάν ο σίδηρος διαλυόταν στο νερό των πόρων, δεν θα υπήρχαν ρωγμές και αποφλοίωση. Συμβαίνουν πολλά ακόμα βήματα για να δημιουργηθεί η οξείδωση. Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί η ηλεκτρολυτική διάβρωση ωστόσο, αποτελεί η παρουσία οξυγόνου και η υγρασία (ηλεκτρολύτης), παράμετροι χωρίς τις οποίες δεν θα μπορούσε να συμβεί η διάβρωση. Ο βαθμός της διάβρωσης είναι αργός εάν η ποσότητα του νερού ή του οξυγόνου είναι περιορισμένη. Η παρουσία υγρασίας και οξυγόνου δρα ως καταλύτης της διάβρωσης δημιουργώντας περισσότερα ελεύθερα  $\text{OH}^{-}$  που κατ' επέκταση παράγουν τη σκουριά  $\text{Fe}(\text{OH})_x$ , ( $x = 2, 3$ ), σύμφωνα με τις αντιδράσεις, στην συνέχεια του υπό κεφαλαίου, που αναπαριστούν την διαμόρφωση της οξείδωσης μετά τη διάσπαση του σιδήρου στην ανοδική πλευρά του σπλισμού.





Αυτό δείχνει, ότι η άνοδος είναι το μόνο μέρος όπου συμβαίνει διάβρωση, όχι η κάθοδος. Επιπλέον, κάθοδο ή άνοδο μπορεί να αποτελούν δύο διαφορετικά μέταλλα συνδεδεμένα μεταξύ τους, που δημιουργούν ένα διμεταλλικό έλασμα. Χαρακτηριστικά φαίνεται ότι η διαδικασία κατά την οποία υπάρχει ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο και επίσης φαίνονται και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Μεταβολή του ρυθμού των αντιδράσεων αυτών είναι δυνατή είτε με πρόσθεση είτε με αφαίρεση ηλεκτρονίων. Σε αυτή τη μεταβολή βασίζεται η μέθοδος καθοδικής προστασίας. Ηλεκτροχημικός σχηματισμός διάβρωσης Γενικά η διάβρωση συμβαίνει ουσιαστικά εξαιτίας της δημιουργίας ηλεκτροχημικών δυναμικών λόγω των παρακάτω:

- Όταν υπάρχουν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις στις επιφανειακές ιδιότητες του χάλυβα που διακρίνουν τη χημική του σύσταση, ή όταν δύο διακριτά μέταλλα συνυπάρχουν στο σκυρόδεμα, όπως ο χαλύβδινος οπλισμός και ο σωλήνας αλουμινίου (Quraishi et al., 2017)
- Μπορεί να δημιουργηθούν πυκνά μόρια κοντά στον οπλισμό εξαιτίας των διαφορών της πυκνότητας των διαλυμένων ιόντων όπως αλκάλια και χλωρίδια (Quraishi et al., 2017).

Έτσι, συμβαίνουν οι αντιδράσεις αυτές, όπως διατυπώθηκε από τον Ahmad, (2003), στην άνοδο και κάθοδο. Όπως φαίνεται το οξειδίο του σιδήρου ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) έχει όγκο περίπου δύο φορές τον όγκο του χάλυβα που αντικαθιστά. Όταν υδρολύεται, φουσκώνει ακόμα περισσότερο και γίνεται πορώδες. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση του όγκου στην διεπιφάνεια του χάλυβα και του σκυροδέματος είναι περίπου έξι με δέκα φορές όπως φαίνεται (Broomfield, 2007). Αυτή είναι η αιτία που δημιουργούνται η ρηγμάτωση και η αποφλοιώση του σκυροδέματος. Μηχανισμός Συσχέτιση του όγκου του σιδήρου με τον όγκο των προϊόντων των αντιδράσεων διάβρωσης. Γενικά, ανάλογα με τη σύνθεση του σκυροδέματος, το περιβάλλον της κατασκευής αλλά και τις συνθήκες κατά τις οποίες διαβρώνεται ο χάλυβας, τα προϊόντα της μπορεί να διαφέρουν. Ανάλογα με τα προϊόντα, διαφέρει και ο όγκος τους. Σύμφωνα με τον Ahmad (2003) για τα μοντέλα εκτίμησης της διάρκειας ζωής θεωρείται αύξηση του όγκου λόγω της παραγωγής της ερυθράς σκωρίας ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) γύρω από τη ράβδο οπλισμού. Αυτή η κόκκινη σκουριά, που είναι εκ φύσεως διογκωτική, καταναλώνει τέσσερις φορές τον όγκο του χάλυβα από τον οποίο προήλθε.

### 1.5.1 Συνέπειες Διάβρωσης

Μετά την εκκίνηση της διαδικασίας της διάβρωσης:

1. Μειώνεται η διατομή του οπλισμού, αφού μέρος του έχει μετατραπεί σε οξειδίο, με συνέπεια τη μείωση της αντοχής της κατασκευής, αφού πλέον αδυνατεί να αναλάβει τα φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε.
2. Μειώνεται η ολκιμότητα του υλικού και μάλιστα με ρυθμό μεγαλύτερο από εκείνο της μείωσης της διατομής, γεγονός που υποβαθμίζει τη συμπεριφορά της κατασκευής σε σεισμό.
3. Η σκουριά καταλαμβάνει περίπου 2 με 6 φορές μεγαλύτερο όγκο, ανάλογα το χημικό περιβάλλον, σε σχέση με το χάλυβα από τον οποίο προέκυψε, με συνέπεια την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο σκυρόδεμα από το χάλυβα, προκαλώντας ρηγματώσεις.

Στις περισσότερες βιομηχανίες, η διάβρωση είναι ανησυχητική λόγω της απώλειας του μετάλλου που οδηγεί σε στατική ανεπάρκεια, όπως κατάρρευση, διάτρηση των κοντέινερ ή των σωλήνων κ.α. Ωστόσο, τα περισσότερα προβλήματα με τη διάβρωση έχουν να κάνουν με τη διόγκωση του οξειδίου παρά με τη μείωση του χάλυβα. Η στατική κατάρρευση λόγω διάβρωσης εξάλλου, είναι σπάνια και οι κατασκευές που ενέχουν κίνδυνο λόγω διάβρωσης είναι κυρίως αυτές με προεντεταμένο σκυρόδεμα, μιας και οι τένοντες που τοποθετούνται σφραγίζονται και δεν εντοπίζεται έκδηλα η διάβρωση. Το πιο κοινό πρόβλημα λοιπόν, είναι η αποκόλληση του σκυροδέματος.

### 1.5.2 Ρηγμάτωση (Crack) και Αποκόλληση (Spalling)

Όπως ειπώθηκε, η σκουριά  $Fe(OH)_2$ , προϊόν της αλληλουχίας των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων της διάβρωσης έχει ως συνέπεια μεταξύ άλλων την αύξηση του όγκου του οπλισμού κατά 2 με 6 φορές, αριθμός που εξαρτάται από τα συναντιδρώντα. Η αύξηση αυτή του όγκου προκαλεί εσωτερική θλίψη στο σκυρόδεμα, το οποίο αντιδρώντας εφελκυστικά αστοχεί, εκδηλώνοντας ρηγμάτωση (Γκίβαλου & Μιτζήθρα, n.d.) και (Broomfield, 2007). Αν μάλιστα η επικάλυψη του σκυροδέματος ή η ποσότητα του εγκάρσιου οπλισμού στο σημείο που γίνεται η διάβρωση είναι μικρή, η ρηγμάτωση μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια. Η προκύπτουσα ρωγμή είναι ευθύγραμμη και παράλληλη με τη ράβδο οπλισμού. Με την ύπαρξη ρωγμής, επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερη έκθεση της ράβδου σε διάβρωση με αποτέλεσμα τη ραγδαία εξέλιξη της διάβρωσης.

Γενικά, η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα λειτουργεί καταλυτικά στην επιτάχυνση της διάβρωσης, είτε οφείλονται στην ίδια την διάβρωση, είτε έχουν προκύψει από υψηλή φόρτιση, συγκρούσεις, σεισμικές δυνάμεις ή συστολή ξήρανσης. Αυτό συμβαίνει διότι η ρωγμή αποτελεί άμεσο δρόμο διείσδυσης τόσο



του διοξειδίου του άνθρακα, όσο και των χλωριόντων και τα βοηθάει να φτάσουν πιο γρήγορα στον οπλισμό, κάτι το οποίο ενδεχομένως να μη συνέβαινε άμεσα.

Στις περιοχές της κατασκευής που φορτίζονται εφελκυστικά, ο χαλύβδινος οπλισμός αναλαμβάνει τον εφελκυσμό. Αν το εφελκυστικό φορτίο όμως υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του, εμφανίζονται μικρές ρωγμές (<0.05mm). Συνήθως δεν επηρεάζουν το ρυθμό της διάβρωσης, μιας και οι μικρές ποσότητες χλωριόντων και υγρασίας που διεισδύουν, αναλαμβάνονται τοπικά από την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Αν όμως αυτές οι ρωγμές υπερβούν τα 0.05mm και παραμείνουν ανοιχτές, αποτελούν αιτία επιτάχυνσης του ρυθμού διάβρωσης.

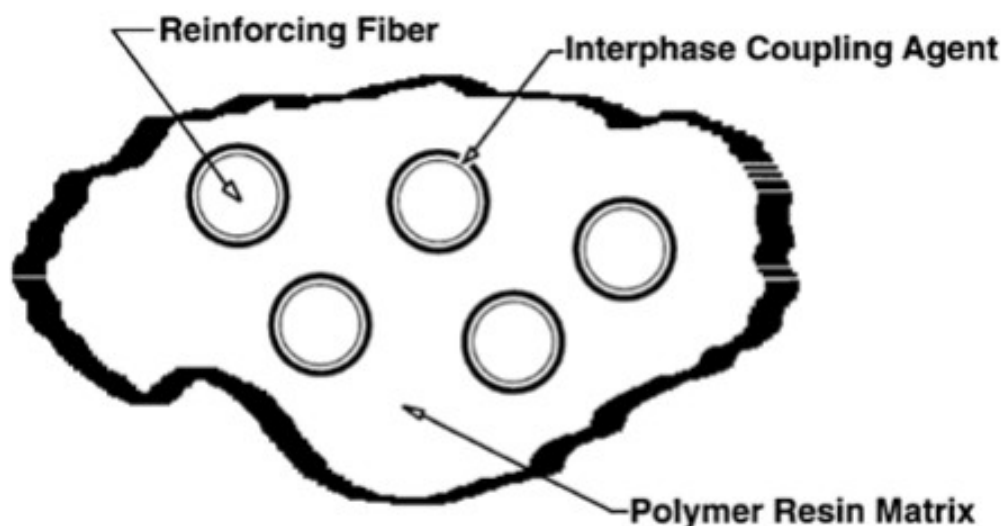
Όπως ειπώθηκε, η διάβρωση προκαλεί οριζόντια διαμήκη ρηγμάτωση (longitudinal cracking) παράλληλα με τις ράβδους που διαβρώνονται (Zhu & François, 2015). Αυτό οδηγεί σε μείωση της επικάλυψης οπλισμού, κύρια συνέπεια της οποίας είναι η πτώση της (αποκόλληση) και η μη αποδεκτή εμφάνιση με τον κίνδυνο τραυματισμού των χρηστών της κατασκευής.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

### 2.1 Γενικά

Ο συνδυασμός δύο ή περισσότερων μηχανικά διακριτών υλικών (συστατικών) που αναμειγνύονται σκόπιμα σε μοριακό επίπεδο για να σχηματίσουν ένα υλικό (συχνά νέο) με βελτιωμένες ιδιότητες που διαφέρουν από εκείνες των συστατικών υλικών είναι αυτό που εννοείται με τον όρο "σύνθετο υλικό". Αυτός ο ορισμός αναπτύχθηκε από την American Chemical Society (ACS).

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το FRP είναι ένα σύνθετο υλικό που αποτελείται από δέσμες ινών υψηλής αντοχής και υψηλού συντελεστή που συνδέονται με μια μήτρα σκληρυμένης ρητίνης. Στη σφαίρα της μηχανικής, αυτό το υλικό είναι γνωστό ως πολυμερές ενισχυμένο με ίνες (FRP).



Εικόνα 2.1. δομή από ινοπλισμένα πολυμερή

### 2.2 Ίνες σύνθετου υλικού

#### 2.2.1 Γενικά

Η «ενίσχυση» των σύνθετων υλικών FRP έρχεται με τη μορφή ινών, οι οποίες αποτελούν περίπου το 30–70% του συνολικού όγκου. Η κύρια ευθύνη των ινών είναι να συγκρατούν τα φορτία. Γενικά, οι ίνες πρέπει να έχουν τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται εδώ:

- Εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας
- Εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, με μικρή μόνο διακύμανση αυτής της τιμής στις πολλές ξεχωριστές μεμονωμένες ίνες.
- Σχετικά χαμηλός βαθμός διακύμανσης τόσο στην περιοχή της διατομής όσο και στην επιφάνεια μεταξύ των μεμονωμένων ινών.
- Να έχει την ικανότητα να τα παράγει στο επιθυμητό σχήμα και με τις επιδιωκόμενες ιδιότητες.
- Να διατηρούν τα χαρακτηριστικά τους κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε επεξεργασίας που είναι απαραίτητη για την κατασκευή του σύνθετου υλικού όσο είναι εφικτό και όσο είναι δυνατόν.
- Το τελευταίο στοιχείο που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι εάν η τιμή είναι αποδεκτή ή όχι.

Σε αυτή τη συγκυρία, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η κατασκευή πολυμερών υλικών ενισχυμένων με ίνες χρησιμοποιεί συχνά τυποποιημένο FRP, δηλαδή καθαρό γυαλί, άνθρακα, ακόμη και ίνες αραμιδίου.

### **2.2.2 Ίνες γυαλιού**

Το Fiberglass είναι μακράν το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο συστατικό των FRP. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα χαρακτηριστικά αντοχής και κόστους του επιτυγχάνουν την ιδανική ισορροπία. Η επεξεργασία του υγρού γυαλιού με μοναδικό τρόπο έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ινών γυαλιού, οι οποίες μπορούν επίσης να δημιουργηθούν με τη μορφή λωρίδων. Κατά τη διαδικασία παραγωγής, οι ίνες γυαλιού συχνά επικαλύπτονται με εξειδικευμένα χημικά προκειμένου να αυξηθεί η απόδοσή τους μετά τον εμποτισμό με ρητίνη. Αυτό συμβαίνει στις περισσότερες περιπτώσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συγγένειας μεταξύ των δύο υλικών και τη μείωση του αριθμού των κενών στο σύνθετο FRP, που είναι το τελικό προϊόν.



Εικόνα 2.2.2.1 Ίνες γυαλιού σε μορφή ρολού

Οι πιο γνωστοί τύποι ινών γυαλιού που βρίσκονται στο εμπόριο και είναι διαθέσιμοι άρα και υπαρκτοί, είναι :

- Γυαλί που είναι ανθεκτικό στα αλκάλια: αυτές οι συγκεκριμένες ίνες γυαλιού κατασκευάζονται με την προσθήκη ζirkονίου, και ως αποτέλεσμα, είναι ανθεκτικές στο αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος, το οποίο συνήθως προκαλεί τη διάβρωση των ινών γυαλιού.
- Το e-glass δεν είναι μόνο ο τύπος ινών γυαλιού που χρησιμοποιείται πιο συχνά, αλλά είναι επίσης ο τύπος ινών γυαλιού που μπορεί να αγοραστεί στη χαμηλότερη τιμή.
- Το S-glass έχει τη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό σε σύγκριση με τα είδη ινών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Επιπλέον, όσον αφορά την ελαστικότητα, είναι πιο αξιόπιστο από τα άλλα, όμως λόγω του ακριβού κόστους του, δεν είναι η ιδανική επιλογή.

Θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι τα γενικά και σχεδόν αμετάβλητα μειονεκτήματα των ινών γυαλιού είναι :

- Το σχετικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας
- Η γενικά χαμηλή ανθεκτικότητα σε υγρό και αλκαλικό περιβάλλον
- Τέλος η χαμηλή αντοχή σε μεγάλο χρονικό διάστημα, κυρίως λόγω του φαινομένου της ερπυστικής διάρρηξης γνωστό και ως stress rupture.

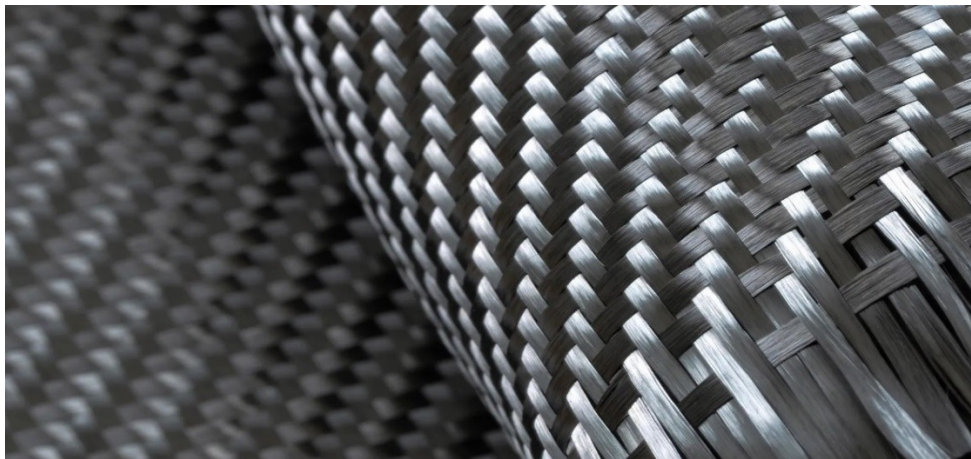
### 2.2.3 Ίνες αραμίδου

Σχετικά με τις ίνες αραμίδου, γνωρίζουμε ότι παράγονται με την κατάλληλη, πάντα, διαδικασία και με την συμμετοχή αρωματικού πολυαμιδίου. Αυτήν την στιγμή και στην Ελλάδα αλλά και στον υπόλοιπο πλανήτη, υπάρχουν συγκεκριμένοι τύποι αγαθών όπου περιέχουν το συγκεκριμένο πολυμερές υλικό. Τύποι όπως το kevlar, το Technora, Twaron και το SVM με καταγωγή από την χώρα του χειμώνα, την Ρωσία.

Οι ίνες αραμίδου διαθέτουν εξαιρετικά υψηλή αντοχή σε κόπωση τόσο σε στατικά όσο και σε δυναμικά φορτία, καθώς και πολύ υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία. Από την άλλη πλευρά, έχουν σχετικά χαμηλή αντοχή σε θλίψη, η οποία μειώνει τη μακροπρόθεσμη αντοχή τους λόγω της επίδρασης τάσης-θραύσης που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, είναι ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον ήλιο, κάτι που είναι ένα άλλο από τα μειονεκτήματά τους.

### 2.2.4 Ίνες άνθρακα

Οι ίνες άνθρακα, κοινώς και ανθρακόνημα, παράγονται αποκλειστικά από πολυακρυλονιτρίλιο και πίσσα (που είναι ένα υποπροϊόν της δύλισης του πετρελαίου) ή ρεγιόν με την βοήθεια της πυρόλυσης σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (συχνά εννοείται έως 3000οC).



Εικόνα 2.2.4.1 Ίνες άνθρακα

Τα πιο σημαντικά οφέλη είναι η εξαιρετικά υψηλή αντοχή και ακαμψία, η αντοχή σε διαβρωτικές συνθήκες και οι αλλαγές θερμοκρασίας που δεν επηρεάζουν την ικανότητα του υλικού να διατηρεί την αντοχή του. Το γεγονός ότι είναι αρκετά ακριβά είναι το κύριο πλεονέκτημα της κατοχής τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στις εξαιρετικά ακριβές πρώτες ύλες και στις διαδικασίες παραγωγής που χρησιμοποιούνται.

## 2.3 Μήτρα συνθετικού υλικού

### 2.3.1 Γενικά

Η μήτρα των πολυμερών σύνθετων υλικών, η οποία είναι τυπικά FRP, είναι ένα υλικό ρητίνης σε συνδυασμό με μια σειρά από διαφορετικά πρόσθετα. Η τελική δομή αυτού του υλικού κρυσταλλώνεται σε πολυμερές υλικό μετά την επεξεργασία και αντιπροσωπεύει περίπου το 30-60% του συνολικού όγκου των FRPs. Η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού καθορίζεται από τη χημική σύνθεση καθώς και από τις ιδιότητές του. Ο τρόπος αστοχίας του εξαρτήματος μπορεί να επηρεαστεί από τη συμβατότητα ινών του εξαρτήματος καθώς και από τη σκοπιμότητα των διαδικασιών συγκόλλησης ινών.

Οι κύριες λειτουργίες του είναι:

- Συσσωρεύει τις ίνες και καθορίζει τη γεωμετρική τους κατανομή.
- Μεταφέρει τα φορτία στις ίνες κυρίως με μηχανισμούς τριβής.
- Παρέχει ακαμψία και επιθυμητή γεωμετρία στα στοιχεία FRP.
- Προστατεύει τις ίνες από τον κίνδυνο διάβρωσης λόγω του περιβάλλοντος.
- Συμβάλλει σημαντικά στην επιβράδυνση της εξάπλωσης των ρωγμών, καθώς οι ίνες διαχωρίζονται και λειτουργούν ξεχωριστά.
- Διαμορφώνει τις επιφάνειες σύνδεσης του στοιχείου.
- Καθορίζει τη διατμητική αντοχή του μέλους έναντι φορτίων κάθετων στην κύρια διεύθυνση των ινών.
- Στην περίπτωση κυρίως θλιπτικών φορτίων, υποστηρίζει τις ίνες στην εγκάρσια διεύθυνση και απότρέπει την αστοχία λόγω τοπικού λυγισμού.
- Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο κατηγορίες ρητινών που χρησιμοποιούνται στα συνθετικά πολυμερή υλικά: τα θερμοσκληρυνόμενα και τα θερμοπλαστικά.

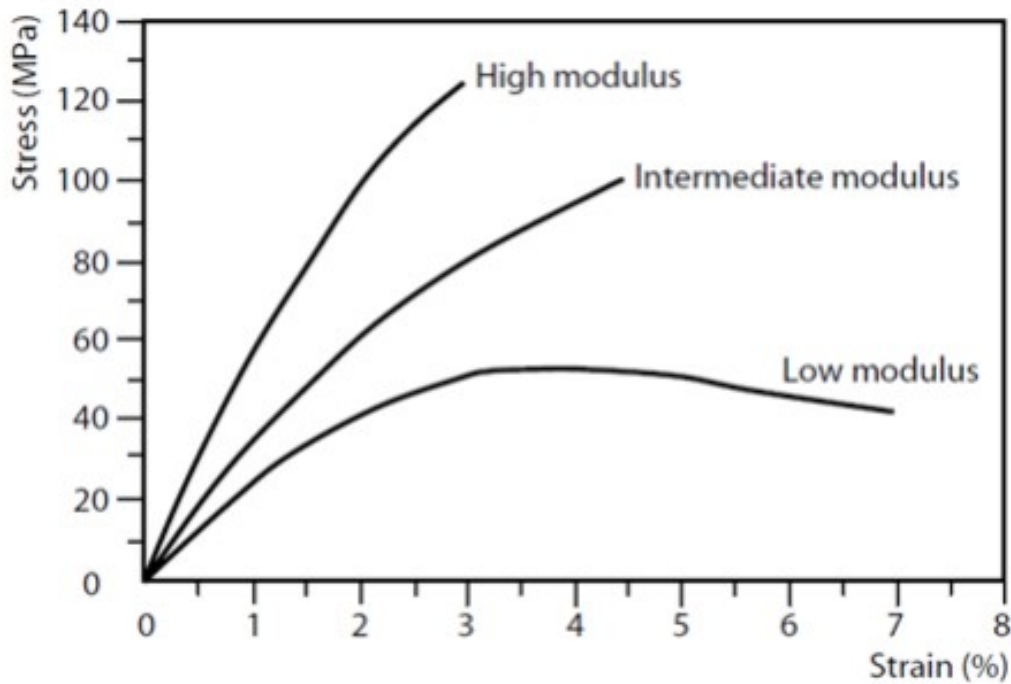
### 2.3.2 Θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες

Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες προτιμώνται για την παραγωγή σύνθετων υλικών, ιδίως πολυμερών, κυρίως επειδή είναι εύκολες στην επεξεργασία (κυρίως λόγω του χαμηλού ιξώδους τους) και σχετικά φθηνές. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι πολυμερή με πολύ ισχυρούς μοριακούς δεσμούς και τρισδιάστατη δομή δικτύου πολυμερικής αλυσίδας, η οποία τους προσδίδει σταθερή εσωτερική δομή και σχήμα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι, σε αντίθεση με τα θερμοπλαστικά, δεν λιώνουν και δεν αλλάζουν σχήμα υπό την επίδραση της θερμοκρασίας μέχρι να επιτευχθεί το όριο θερμικής αποσύνθεσης μετά την τελική σκλήρυνση. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες παρουσιάζουν συμπεριφορά που μοιάζει με

άμμο. Οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες προσδίδουν στα σύνθετα υλικά υψηλή ακαμψία και σταθερότητα σχήματος, χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής και υψηλή αντοχή σε διαλύτες και άλλες χημικές ουσίες. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η ογκομετρική συρρίκνωση των ρητινών κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης κυμαίνεται 4% για τις εποξειδικές ρητίνες έως περίπου 8% για τις πολυεστερικές ρητίνες, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει εσωτερικές τάσεις στη διεπιφάνεια των ινών. Οι συνηθέστεροι τύποι θερμοσκληρυνόμενων ρητινών, δηλαδή ρητινών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή πολυμερών υλικών, είναι οι εποξειδικές ρητίνες, οι πολυεστερικές ρητίνες και τέλος οι βινυλεστέρες.

### **2.3.2.1 Εποξειδικές ρητίνες**

Οι εποξειδικές ρητίνες χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα στον τομέα της αεροναυπηγικής. Έχουν πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες, είναι εύκολες στην κατεργασία, έχουν χαμηλή συρρίκνωση όγκου κατά τη σκλήρυνση και γενικά έχουν καλή πρόσφυση στους περισσότερους τύπους ινών. Έχουν επίσης υψηλή αντοχή στη διάβρωση και είναι λιγότερο ευαίσθητες στο νερό και τη θερμοκρασία από άλλες ρητίνες. Τα κύρια μειονεκτήματα είναι το υψηλότερο κόστος και ο μεγαλύτερος χρόνος σκλήρυνσης σε σχέση με τις ρητίνες πολυεστέρα και βινυλεστέρα. Γενικά, οι μηχανικές ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών εξαρτώνται από τη διαδικασία παρασκευής και τα χημικά που χρησιμοποιούνται, οπότε υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ εποξειδικών ρητινών με συγκεκριμένες ιδιότητες.

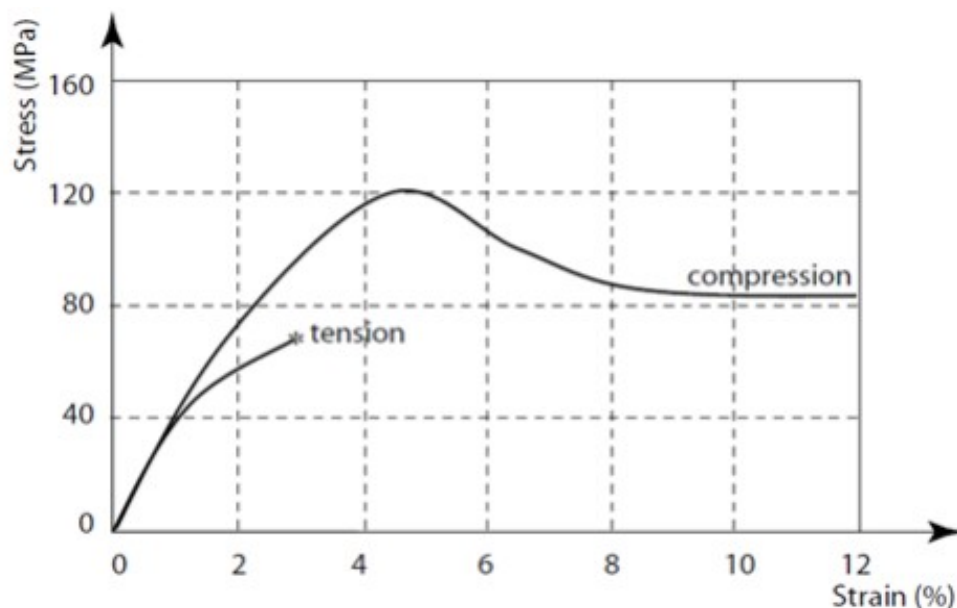


Εικόνα 2.3.2.1.1 διάγραμμα stress – strain για εποξικές ρητίνες

### 2.3.2.2 Πολυεστερικές ρητίνες

Στον τομέα της κατασκευής σύνθετων υλικών, οι πολυεστερικές ρητίνες αποτελούν την πλειοψηφία των υλικών που χρησιμοποιούνται. Γενικά, οι ποιότητες αυτών των ρητινών δεν είναι τόσο καλές όσο αυτές των εποξειδικών ρητινών. Ωστόσο, οι ιδιότητες αυτών των ρητινών μπορεί να βελτιωθούν σημαντικά με την ανάμιξη σε πρόσθετα κατά την επεξεργασία τους. Χρησιμοποιούνται συχνά σε εξωτερικές εφαρμογές λόγω της ανθεκτικότητάς τους στις βλαβερές συνέπειες της υπεριώδους ακτινοβολίας και της έντονης οσμής τους. Το πιο σημαντικό μειονέκτημα είναι η σημαντική μείωση του όγκου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σκλήρυνσης. Ωστόσο, αυτό μπορεί να μετριαστεί με την προσθήκη συστατικών θερμοπλαστικής ρητίνης.





Εικόνα 2.3.2.2.1 διάγραμμα stress – strain για πολυεστερικές ρητίνες

### 2.3.2.3 Βινυλεστερικές ρητίνες

Λόγω της διαφορετικής χημικής σύνθεσης των δύο τύπων ρητινών, οι ρητίνες βινυλεστέρα είναι αισθητά πιο εύκαμπτες από τις πολυεστερικές ρητίνες. Οι εποξειδικές ρητίνες, γενικά, προσφέρουν μερικά πλεονεκτήματα, τα πιο αξιοσημείωτα από τα οποία είναι η υψηλή αντοχή τους σε εφελκυσμό και κυρίως η αντοχή τους στη χημική διάβρωση. Οι πολυεστερικές ρητίνες, από την άλλη πλευρά, έχουν ταχύτερο χρόνο σκλήρυνσης. Επιδεικνύουν επίσης υψηλό επίπεδο αντοχής σε αλκάλια, διαλύτες, οξέα και τελικά υπεροξείδια.

### 2.3.3 Θερμοπλαστικές ρητίνες

Τα θερμοπλαστικά είναι δύσκολο να επεξεργαστούν, κυρίως λόγω του υψηλού ιξώδους τους, γεγονός που καθιστά δύσκολη την επιτυχή ενσωμάτωση των ινών. Μετά τη σκλήρυνση, μπορούν να επαναρροφηθούν υπό την επίδραση της θερμοκρασίας και να μορφοποιηθούν στο επιθυμητό σχήμα ή να επισκευαστούν και στη συνέχεια να σκληρυνθούν εκ νέου. Οι ίνες είναι όλκιμα υλικά και είναι πιο δύσκαμπτα από τα θερμο σκληρυνόμενα πολυμερή. Ωστόσο, είναι γενικά λιγότερο άκαμπτα και ανθεκτικά και έχουν χαμηλότερη αντοχή σε ερπυσμό και διαλύτες σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι το PEEK (πολυαιθερική αιθεροκετόνη), το PPS (πολυφαινυλενοσουλφίδιο) και τέλος το PSUL (πολυσουλφόνη).

## 2.4 Λειτουργία του σύνθετου υλικού

Επειδή η μήτρα και οι ίνες της ρητίνης αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και διασκορπίζουν τις τάσεις που προκαλούνται από εξωτερικές πιέσεις, τα σύνθετα υλικά είναι σε θέση να αντέξουν πολύ μεγαλύτερες ποσότητες καταπόνησης από τα ξεχωριστά συστατικά. Ωστόσο, αυτή η ικανότητα εσωτερικής ανακατανομής φορτίων εξαρτάται από τη συγγένεια των δύο υλικών, όπως η συγγένεια μεταξύ σκυροδέματος και χάλυβα στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτή η ικανότητα ανακατανομής των τάσεων εξαρτάται από τη συγγένεια των δύο υλικών. Οι χημικές και μηχανικές εκτιμήσεις παίζουν ρόλο στη συγγένεια που υπάρχει μεταξύ των ινών και της μήτρας της ρητίνης. Είναι δυνατή η χρήση ορισμένων ενώσεων προκειμένου να ενισχυθεί ο χημικός δεσμός και ο δεσμός που υπάρχει μεταξύ των δύο υλικών.

Ωστόσο, είναι επίσης ζωτικής σημασίας οι μηχανικές ιδιότητες των δύο υλικών να είναι συμβατές προκειμένου το σύνθετο υλικό να λειτουργεί καλά. Για παράδειγμα, η απόκριση των σύνθετων υλικών στην τάση είναι σχεδόν τέλεια γραμμικά ελαστική και η αντοχή αυτών των υλικών υπαγορεύεται από την αντοχή της ίνας. Εξαιτίας αυτού, για να αποφευχθεί η πρόωρη εμφάνιση ρωγμών και για να επιτευχθεί ένα επαρκές επίπεδο αντοχής σε εφελκυσμό, η μήτρα πρέπει να έχει μεγαλύτερη αντοχή εφελκυσμού από τις ίνες. Ωστόσο, προκειμένου να αποφευχθεί ο λυγισμός των ινών και να παρέχεται κατάλληλη εγκάρσια στήριξη όταν εφαρμόζονται θλιπτικές τάσεις, η μήτρα πρέπει να έχει έναν ορισμένο βαθμό ακαμψίας.

Ο προσανατολισμός των ινών, ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται στο χώρο, οι γωνίες που σχηματίζονται από τις τομές τους και ο τρόπος με τον οποίο αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με την κατεύθυνση φόρτωσης είναι πρόσθετα σημαντικά ζητήματα. Όταν οι ίνες τοποθετούνται σε μία μόνο κατεύθυνση και εφαρμόζεται σταθερό φορτίο σε κατεύθυνση που είναι παράλληλη με την κατεύθυνση στην οποία είναι τοποθετημένες οι ίνες, επιτυγχάνεται η βέλτιστη συμπεριφορά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

### 3.1 Γενικά

Τα συνθετικά υλικά έχουν ζωτικής σημασίας και μοναδικά χαρακτηριστικά, τα οποία φυσικά αλλάζουν από τη μια παραγωγή στην άλλη λόγω της επιλογής των συστατικών που μπαίνουν στην κατασκευή τους καθώς και της συγκεκριμένης επεξεργασίας που πραγματοποιείται. Ακολουθεί μια λίστα με ορισμένες γενικές ιδιότητες των συνθετικών πολυμερών υλικών, καθώς και πώς αυτές οι ιδιότητες τροποποιούνται όταν εκτίθενται σε εξωτερικές καταπονήσεις και περιβάλλοντα. Ειδικότερα, είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι οι διαδικασίες για την πιστοποίηση προϊόντων βρίσκονται ακόμη σε προκαταρκτικά στάδια μελέτης και δεν έχουν τυποποιηθεί εκτενώς ούτε σε επιστημονικούς ούτε επιχειρηματικούς κύκλους.

Σε αντίθεση, για παράδειγμα, με τον χάλυβα, τα υλικά που συνθέτουν το ενισχυμένο με ίνες πολυμερές είναι εκείνα που έχουν εγγενή ανισότροπη συμπεριφορά. Αυτό σημαίνει ότι ο πρωτεύων άξονας αντοχής κινείται σε κατεύθυνση που είναι παράλληλη με την κατεύθυνση των ινών που συζητούνται. Επιπλέον, ως προς τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, μπορεί πάντα να παρουσιάζουν αρκετά μεγάλες διαφορές, ανάλογα με την αναλογία όγκου ινών προς ίνα, τη γεωμετρία των ινών, τις υπάρχουσες διαστάσεις και, φυσικά, τον κατάλληλο ποιοτικό έλεγχο σε όλη την διαδικασία παραγωγής. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορούν να έχουν σημαντικό αντίκτυπο. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη παραμέτρων που επηρεάζουν την αντίδραση του υλικού του συστήματος, όπως το ιστορικό φόρτισης, ο χρόνος φόρτισης, η θερμοκρασία και η υγρασία. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να έχουν επίδραση στον τρόπο συμπεριφοράς του συστήματος.

### 3.2 Μικρομηχανική προσέγγιση

Η μικρομηχανική ανάλυση λαμβάνει υπόψη τόσο τη γεωμετρία της μικροδομής όσο και τις ιδιότητες των συστατικών μερών, που στην περίπτωση αυτή είναι οι ίνες και η μήτρα της ρητίνης. Ως όγκος αναφοράς, θα μπορούσαμε να δηλώσουμε ότι ορίζεται ο μικρότερος δυνατός όγκος που υπάρχει στον οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι περιέχονται όλες οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Αυτός θα ήταν ο μικρότερος όγκος στον οποίο είναι εφικτό να περιέχονται όλες οι ιδιότητες του σύνθετου υλικού.

Ορισμοί των συμβόλων της μικρομηχανικής ανάλυσης:

- $c$  ( composite ) = το συνθετικό υλικό
- $m$  ( matrix ) = η μήτρα της ρητίνης
- $f$  ( fiber ) = οι εκάστοτε ίνες που υπάρχουν
- $v$  = ο όγκος του σύνθετου υλικού

- $m$  = η εκάστοτε μάζα του υλικού
- $\rho$  = η πυκνότητα ( συνήθως θεωρείται σταθερή )
- $M$  = το κλάσμα της μάζας
- $V$  = το κλάσμα του όγκου

### 3.3 Φυσικές ιδιότητες

#### 3.3.1 Πυκνότητα

Ένα από τα πολλά πλεονεκτήματα των οπλισμένων πολυμερών υλικών θεωρείται ότι είναι η σχετικά μικρή τους πυκνότητα που υπολογίζεται περίπου το ένα έκτο ( $1/6$ ) έως και το ένα τέταρτο ( $1/4$ ) αυτής ( πυκνότητας ) του χάλυβα =  $7,8 \text{ g/cm}^3$ . Έτσι διευκολύνεται αρκετά έως και σημαντικά ο χειρισμός κάθε φορά των υλικών εντός του εργοταξίου και παράλληλα μειώνεται το κόστος μεταφοράς τους, επίσης μειώνονται τα φορτία από το ίδιο τους το βάρος. Να τονιστεί ότι οι παραπάνω κατηγορίες - μέλη της αλυσίδας παραγωγής και μεταφοράς είναι από τους πλέον κύριους παράγοντες στην δημιουργία, στην υλοποίηση των ιδεών και του επιχειρηματικού πλάνου καθώς και θεωρούνται ακλόνητοι πυλώνες σε μια επιχείρηση - εταιρία ακόμα και οργανισμό ανεξαρτήτως της φύσεως του.

Η πυκνότητα τους μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τον όχι και τόσο γνωστό νόμο της σύνθεσης , κοινός 'rule of mixtures' από την σχέση που δίνεται συνήθως:

$$\rho_c = \rho_m * V_m + \rho_f * V_f$$

Και γενικά η κύμανση του είναι μεταξύ  $1,25$  μέχρι  $2,14 \text{ g/cm}^3$ .

STEEL	GFRP	CFRP	AFRP
7.90	1.25 to 2.14	1.50 to 1.60	1.20 to 1.30

Πίνακας 3.1 Τυπικές τιμές σχετικά με την πυκνότητα των ράβδων οπλισμού (  $\text{g/cm}^3$  )

#### 3.3.2 Συντελεστής θερμικής διαστολής

Αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι οι τιμές που συνήθως λαμβάνει η πυκνότητα ανήκουν στο εύρος  $1,25$  έως  $1,42$ . Ο συντελεστής θερμικής διαστολής παίρνει διαφορετικές τιμές στους διαμήκεις, εγκάρσιους και κατακόρυφους άξονες, σε αντίθεση με τον χάλυβα, ο οποίος είναι ισότροπο υλικό και έχει κοινή τιμή για τον συντελεστή θερμικής διαστολής σε όλες τις διευθύνσεις. Ο συντελεστής θερμικής

διαστολής εξαρτάται από τον τύπο της ίνας και της ρητίνης και την αναλογία όγκου τους. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τον διαμήκη άξονα εξαρτάται από τις ιδιότητες των ινών, ενώ ο συντελεστής θερμικής διαστολής κατά τη διεύθυνση κάθετα στον διαμήκη άξονα εξαρτάται από τις ιδιότητες της ρητίνης. Οι αντίστοιχες τιμές δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Οι αρνητικές τιμές του συντελεστή υποδηλώνουν ότι το υλικό συρρικνώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.

DIRECTION	CTE X 10 <sup>-6</sup> οC	CTE X 10 <sup>-6</sup> οC	CTE X 10 <sup>-6</sup> οC	CTE X 10 <sup>-6</sup> οC
	STEEL	GFRP	CFRP	AFRP
LONGITUDINAL	11.7	6.0 TO 10.1	-9.0 TO 0.00	-6.0 TO -2.0
TRANSVERSE	11.7	21.2 TO 23.0	74.0 TO 104.0	60.0 TO 80.0

Πίνακας 3.2 Τυπικές τιμές του συντελεστή θερμικής διαστολής μόνο για οπλισμένους ράβδους

Όταν τα οπλισμένα πολυμερή υλικά, που συνήθως αναφέρονται ως υλικά ffr, χρησιμοποιούνται ως οπλισμός σκυροδέματος, η συμπεριφορά του σύνθετου υλικού (οπλισμένο σκυρόδεμα) υπό την επίδραση της θερμοκρασίας πρέπει να λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση της δράσης του συντελεστή θερμικής διαστολής του σκυροδέματος και του ffr. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τάσεις μπορεί να εμφανιστούν κυρίως στο διάκενο μεταξύ των δύο επιφανειών των δύο υλικών λόγω κακής ευθυγράμμισης στον διαμήκη άξονα ή λόγω μειωμένου βαθμού σύμπτωσης λόγω κακής ευθυγράμμισης στον διαμήκη άξονα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις κατασκευές από χαλύβδινο σκυρόδεμα το φαινόμενο αυτό συνήθως δεν αναδεικνύεται, καθώς δεν υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ χάλυβα ( $11,7 \cdot 10^{-6}/0^{\circ}\text{C}$ ) και 30 σκυροδέματος ( $7,2 \cdot 10^{-6}$  έως  $10,8 \cdot 10^{-6}/0^{\circ}\text{C}$ ), η οποία είναι κοινή σε όλες τις διευθύνσεις

### 3.4 Μηχανικές ιδιότητες

#### 3.4.1 Συμπεριφορά υπό εφελκυστικά φορτία

Ο παρακάτω πίνακας παρέχει μια σύγκριση των αντοχών σε εφελκυσμό των πολυμερών υλικών από χάλυβα και ενισχυμένα με ίνες. Τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή υλικά βγαίνουν στην κορυφή. Είναι σημαντικό, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης παραμένει γραμμικά ελαστική μέχρι το σημείο αστοχίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Αυτό σημαίνει ότι τα ενισχυμένα πολυμερή υλικά δεν έχουν σημείο διαρροής. Επειδή οι ίνες είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά των περισσότερων τάσεων εφελκυσμού, η αναλογία όγκου των ινών έχει σημαντικό αντίκτυπο στη συνολική αντοχή του σύνθετου υλικού.

Επιπρόσθετα σημαντικά ζητήματα είναι η διαδικασία παραγωγής, ο επαρκής ποιοτικός έλεγχος και ο βαθμός στον οποίο έχει σκληρυνθεί η μήτρα της ρητίνης [2]. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, σε

αντίθεση με τον χάλυβα, η αντοχή σε εφελκυσμό των πολυμερών ενισχυμένων με ίνες αλλάζει ανάλογα με τη διάμετρο. Αυτό το σημείο δεν μπορεί να τονιστεί αρκετά.[2] Έχει βρεθεί ότι η αντοχή των ράβδων GFRP από τρεις διαφορετικούς κατασκευαστές συχνά μειώνεται κατά περισσότερο από σαράντα τοις εκατό όταν η διάμετρος αυξάνεται από εννιάμιση χιλιοστά σε είκοσι δύο και μισό χιλιοστά (Faza and GangaRao 1993b). Μετά την κατασκευή, οι ενισχυμένες με ίνες ράβδοι οποιουδήποτε τύπου, αλλά κυρίως αυτές με θερμοσκληρυνόμενη μήτρα ρητίνης, δεν μπορούν να λυγιστούν. Σε σύγκριση με τις ευθείες ράβδους, η αντοχή των κωνικών ράβδων μπορεί να μειωθεί από 40 έως 50 τοις εκατό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Αυτή η μείωση αποδίδεται κυρίως στη συγκέντρωση της τάσης και στην επακόλουθη κάμψη των ινών (Nanni et al.). Τόσο ο κατασκευαστής των ράβδων ενισχυμένων με ίνες όσο και οι πειραματικές διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή των δειγμάτων είναι υπεύθυνοι για την παροχή ακριβών αριθμών για την αντοχή σε εφελκυσμό των ράβδων.

	Steel	GFRP	CFRP	AFRP
Nominal yield stress MPa	276 to 517	N/A	N/A	N/A
Tensile strength MPa	483 to 690	483 to 1600	600 to 3690	1720 to 2540
Elastic modulus *10 <sup>3</sup> GPa	200.00	35.0 to 51.0	120 to 580	41.0 to 125
Yield strain%	0.14 to 0.25	N/A	N/A	N/A
Rupture strain %	6.0 to 12.0	1.2 to 3.1	0.5 to 1.7	1.9 to 4.4

Πίνακας 3.3 Συνήθεις τιμές για τις ιδιότητες των ράβδων οπλισμού

### 3.4.2 Συμπεριφορά υπό θλιπτικά φορτία

Γενικά, η απόκριση των πολυμερών ενισχυμένων με ίνες στις θλιπτικές τάσεις είναι σημαντικά μικρότερη από την απόκρισή τους σε εφελκυστικά φορτία. Υπάρχει κάποια διαφωνία σχετικά με την ακριβή τιμή της θλιπτικής αντοχής και αυτή η τιμή δεν πρέπει να απεικονίζεται σε στοιχεία συμπίεσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο μηχανισμός της αστοχίας μπορεί να διαφέρει από παράδειγμα σε περίπτωση και δεν υπάρχουν δοκιμές συμπίεσης που παράγουν αξιόπιστα ευρήματα (επειδή αυτές οι δοκιμές εξαρτώνται εξαιρετικά από τη γεωμετρία κάθε δείγματος και διάταξης δοκιμής). Ωστόσο, η αντοχή σε θλίψη δεν είναι κάτι που πρέπει να αγνοηθεί.

Είναι εξαιρετικά δύσκολο για τα θεωρητικά μοντέλα να παρέχουν μια προσέγγιση της αντοχής σε θλίψη των FRP, καθώς αυτή η ιδιότητα εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των ινών και της ρητίνης που

χρησιμοποιούνται καθώς και από την αναλογία όγκου μεταξύ των δύο. Ο λυγισμός των ινών, η αστοχία διάτμησης των ινών και η αστοχία εφελκυσμού στο επίπεδο κάθετο προς το φορτίο λόγω παραμόρφωσης που προκαλείται από την αναλογία Poisson είναι όλες πιθανές αιτίες αστοχίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μπορεί κανείς να προβλέψει ότι οι ράβδοι που έχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό θα έχουν επίσης υψηλή αντοχή σε θλίψη. Η αντοχή σε θλίψη μιας ράβδου είναι συνήθως χαμηλότερη από την αντοχή εφελκυσμού της και μπορεί να διαφέρει από τη μια ράβδο στην άλλη με βάση τη γεωμετρία της ράβδου και τη διαδικασία κατασκευής που χρησιμοποιείται. Οι σημαντικές πληροφορίες πρέπει να παρέχονται από τους κατασκευαστές.

### 3.4.3 Συμπεριφορά σε διάτμηση

Η διατμητική αντοχή (σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση των ινών) των ινοπλισμένων πολυμερών είναι πολύ χαμηλή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ίνες δεν αντιστέκονται στη διάτμηση και το φορτίο πρέπει να αναλαμβάνεται πλήρως από τη μήτρα ρητίνης χαμηλής αντοχής και επιπλέον η διατομή των ινών λειτουργεί ως ασυνέχεια στο υλικό προκαλώντας συγκεντρώσεις τάσεων.

Γενικά, η συμπεριφορά διάτμησης μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την συμπερίληψη ινών σε προσανατολισμούς διαφορετικούς από τους συνηθισμένους. Ο παραγωγός υποχρεούται να παρέχει κάθε σχετική πληροφορία που αφορά κάθε υλικό ράβδου.

### 3.4.4 Σχετικοί μηχανισμοί

Ο σχεδιασμός, η διαδικασία κατασκευής, οι μηχανικές ιδιότητες του οπλισμού και οι κλιματικές μεταβλητές έχουν όλα αντίκτυπο στον δεσμό που σχηματίζεται μεταξύ του σκυροδέματος και του οπλισμού [2]. (Al-Dulaijan et al., Nanni et al., Bakis et al., Freimanis et al., and Bank et al., όλα από το 1998). Η μετάδοση των δυνάμεων από το σκυρόδεμα στον οπλισμό πραγματοποιείται μέσω των ακόλουθων μηχανισμών: ο «αντίσταση» στη διεπιφάνεια λόγω χημικής σύνδεσης (γνωστή και ως αντίσταση πρόσφυσης), η οποία εμφανίζεται κατά τη διαδικασία αγκύρωσης του οπλισμού. · το μέγεθος της αντίστασης στην ολίσθηση που προκαλείται από την τριβή στην αλληλεπίδραση ο μηχανική σύμπλεξη ως αποτέλεσμα της τραχύτητας της επιφάνειας. Είναι σημαντικό να έχουμε κατά νου ότι οι μηχανισμοί ενεργούν επίσης παράλληλα μεταξύ τους.[2] Με τον ίδιο τρόπο που οι χαλύβδινες ράβδοι έχουν νευρώσεις, οι ράβδοι FRP παράγονται με νευρώσεις έτσι ώστε το συνεργιστικό αποτέλεσμα να μπορεί να αυξηθεί ακόμη περισσότερο. Στις επόμενες παραγράφους, οι συνέργειες και τα απαραίτητα μήκη αγκύρωσης θα εξεταστούν σε περαιτέρω βάθος.

## 3.5 Συμπεριφορά υπό μακροχρόνια φόρτιση

### 3.5.1 Διάρρηξη

Η διαδικασία που είναι γνωστή ως ερπυσμός περιγράφεται ως αύξηση της ποσότητας υλικού που έχει παραμορφωθεί με την πάροδο του χρόνου ενώ η φόρτωση παρέμεινε η ίδια [6]. Επειδή οι ίνες άνθρακα και γυαλιού δεν ερπυστούν συνήθως, αλλά Η συντριπτική πλειοψηφία των ρητινών, οι οποίες είναι ιξωδοελαστικά υλικά, ερπυστούν, η αναλογία ινών προς όγκο ρητίνης επηρεάζει σημαντικά την αντοχή ερπυσμού των σύνθετων υλικών]. Μια ράβδος FRP θα μπορούσε να σπάσει απότομα μετά την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου φορτίου σε αυτήν για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (ο χρόνος απόδοσης). Η εμφάνιση αυτού του φαινομένου, το οποίο είναι γνωστό ως αστοχία ερπυσμού, είναι δυνατή με οποιοδήποτε υλικό. Σε περίπτωση πυρκαγιάς, ωστόσο, όπου είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις των υψηλών θερμοκρασιών, αυτός ο παράγοντας συνήθως δεν παίζει ρόλο στο σχεδιασμό κτιρίων κανονικού οπλισμένου σκυροδέματος που περιέχουν χαλύβδινες ράβδους.

Αντίθετα, το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι επιρρεπές σε ερπυσμό και, γενικά, έχει μικρότερο χρόνο αντίστασης. Αυτό συμβαίνει επειδή η αναλογία του μόνιμου φορτίου προς τη βραχυπρόθεσμη αντοχή του υλικού αυξάνεται, γεγονός που κάνει το υλικό να γίνεται ισχυρότερο μακροπρόθεσμα αλλά πιο αδύναμο βραχυπρόθεσμα. Τα πειράματα έχουν δείξει ότι δεν υπάρχει πιθανότητα αστοχίας ερπυσμού για μόνιμα φορτία που είναι μικρότερα από το εξήντα τοις εκατό της αντοχής του υλικού. Αυτό είναι ένα κριτήριο που ικανοποιείται σχεδόν πάντα σε τυπικές εφαρμογές. Ωστόσο, κατά την προένταση ράβδων FRP, πρέπει πραγματικά να είστε ιδιαίτερα προσεκτικοί. Λόγω της επίδρασης της ρήξης ερπυσμού, η προένταση δεν μπορεί να κάνει χρήση του γεγονότος ότι οι ράβδοι FRP έχουν συχνά μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό από τα ισοδύναμα χάλυβα τους. Αυτό συμβαίνει παρά το γεγονός ότι οι ράβδοι FRP είναι συνήθως ισχυρότερες από τις αντίστοιχες χαλύβδινες. Οι υψηλές θερμοκρασίες (συχνά πάνω από το 40% του σημείου τήξης), το υπεριώδες φως, οι πολύ αλκαλικές συνθήκες, η υγρασία και οι συχνές και δραματικές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας είναι όλοι παράγοντες που μπορούν να επιδεινώσουν τα προβλήματα ερπυσμού [6].

### 3.5.2 Αποσύνδεση

Στο πλαίσιο της μηχανολογίας, η "κόπωση" αναφέρεται στην κατάσταση κατά την οποία ένα εξάρτημα που έχει εκτεθεί σε κυκλική φόρτιση αποτυγχάνει πριν το εφαρμοζόμενο εξωτερικό φορτίο φτάσει στο όριο απόδοσης ή αστοχίας του υλικού. Η αστοχία λόγω κόπωσης συνδέεται ουσιαστικά με τα μικροσκοπικά ελαττώματα και τις γεωμετρικές ασυνέχειες που υπάρχουν ή συσσωρεύονται σε οποιοδήποτε υλικό. Αυτές οι ατέλειες και οι ασυνέχειες δεν μπορούν να αποφευχθούν. Εκτεταμένα



πειραματικά δεδομένα και χρόνια εμπειρίας στις αεροπορικές εφαρμογές έχουν δείξει, ότι τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή, γενικά, έχουν πολύ ισχυρή αντοχή στην κόπωση. Αυτό φάνηκε από το γεγονός ότι τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες. Ωστόσο, η ακριβής πρόβλεψη των ορίων κόπωσης είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω της μεγάλης ποικιλίας των πιθανών μηχανισμών αστοχίας κόπωσης, των παραγόντων που επηρεάζουν την αστοχία κόπωσης και της φύσης των σύνθετων υλικών.

Γενικά, η αστοχία μπορεί να προκληθεί από το ράγισμα της μήτρας της ρητίνης, το σπάσιμο των ινών ή την αποκόλληση [6]. Εάν υπάρχουν ασυνέχειες στη μήτρα της ρητίνης, που προκαλούν τη διάβρωση των ινών, τότε η επίδραση του περιβάλλοντος στην επιτάχυνση των φαινομένων κόπωσης μπορεί να είναι σημαντική. Η υψηλή θερμοκρασία και η υγρασία είναι παραδείγματα περιβαλλοντικών παραγόντων που μπορούν να επιταχύνουν την εμφάνιση της κόπωσης. [2]

Η επιτάχυνση του ρυθμού με τον οποίο υποβαθμίζεται η αντοχή του υλικού μπορεί επίσης να προκληθεί από την αύξηση είτε της μέσης τάσης είτε του ρυθμού με τον οποίο εφαρμόζεται η κυκλική φόρτιση. [2] Επειδή οι νευρώσεις είναι ασυνέχειες στο υλικό και ως εκ τούτου θέσεις συγκέντρωσης τάσεων, είναι κυρίως συνεργιστικές στη φύση τους.

Αυτές οι περιοχές υπόκεινται σε τριαξονικές καταπονήσεις, γεγονός που υποδεικνύει ότι η αντίσταση της μήτρας της ρητίνης θα καθορίσει εάν αποτυγχάνουν ή όχι. [2] Όταν το εξάρτημα υπόκειται σε κυκλική καταπόνηση, η λειτουργία που παίζουν οι νευρώσεις στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του μπορεί να είναι κρίσιμη.

### **3.6 Ανθεκτικότητα-Διάβρωση-Παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των FRP**

#### **3.6.1 ΓΕΝΙΚΑ**

Όταν υποβάλλονται σε δυσμενείς περιβαλλοντικές συνθήκες, τα ενισχυμένα με ίνες πολυμερή υφίστανται μετασχηματισμό με τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται οι μηχανικές τους ιδιότητες. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται σε πτυχές όπως η θερμοκρασία, η υπεριώδης ακτινοβολία, η υγρασία, η παρουσία χλωριδίων και η αλκαλικότητα. Οι αλλαγές στα μηχανικά χαρακτηριστικά ενός υλικού, όπως το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε εφελκυσμό και η αντοχή του δεσμού, λαμβάνονται υπόψη ως ενδείξεις της επίδρασης που έχουν διάφορες περιστάσεις στη συμπεριφορά του υλικού. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι η απουσία ευρέως αποδεκτών εκτεταμένων πειραματικών δοκιμών και η ποικιλία των ευρημάτων λόγω των επιμέρους συνθηκών της κάθε περίπτωσης καθιστούν δύσκολη την αληθινή κατανόηση της συμπεριφοράς των υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι δύσκολο να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά των υλικών καθώς είναι δύσκολο να διεξαχθούν ολοκληρωμένες

πειραματικές δοκιμές. Επιπλέον, οι πειραματικές μέθοδοι συνήθως χρησιμοποιούν διαδικασίες επιταχυνόμενης διάβρωσης για την αναπαραγωγή της μακροχρόνιας έκθεσης των υλικών. Αυτό εκθέτει τα δείγματα σε συνθήκες που είναι πολύ πιο επιβλαβείς από αυτές που έχουν σχεδιαστεί πραγματικά να επηρεάσουν οι πειραματικές μέθοδοι.

Ωστόσο, δεν είναι σαφές σε ποιο βαθμό η συμπεριφορά του γνήσιου υλικού αντιπροσωπεύεται από αυτά τα δεδομένα. Επιπλέον, οι πληροφορίες που προέκυψαν από την εμπειρία της χρήσης FRP σε πραγματικές κατασκευές είναι και θα συνεχίσουν να είναι ανεπαρκείς. Έχοντας αυτά τα πράγματα υπόψη, θα γίνει τώρα μια προσπάθεια να δοθεί μια βασική εξήγηση για την ανθεκτικότητα του FRP.

### 3.6.2 Επιδράσεις θερμοκρασίας - φωτός

Αρχικά, ορίζεται η έννοια της θερμοκρασίας αλλαγής φάσης (θερμοκρασία υαλώδους μετάβασης)  $T_g$  ενός πολυμερούς - η  $T_g$  είναι η θερμοκρασία στην οποία η αύξηση της μοριακής κινητικότητας επηρεάζει καθοριστικά τις ιδιότητες της σκληρυμένης ρητίνης - πάνω από αυτή τη θερμοκρασία, η ρητίνη αρχίζει να μαλακώνει και το μέτρο ελαστικότητας και οι μηχανικές της ιδιότητες μειώνονται δραματικά [6]. Η  $f_{FRP}$  είναι η υψηλότερη αναμενόμενη  $T_g$  μιας ρητίνης Συνιστάται να χρησιμοποιείται σε κατασκευές όπου η θερμοκρασία είναι τουλάχιστον  $30^\circ\text{C}$  υψηλότερη από την  $T_g$  της ρητίνης και σε κάθε περίπτωση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται σε μέλη όπου η αντοχή στη φωτιά είναι κρίσιμη για τη σταθερότητα της κατασκευής [6].

Στις περισσότερες περιπτώσεις, ακόμη και σε συνθήκες πυρκαγιάς, το FRP δεν παρουσιάζει κίνδυνο καταστροφής από καύση, καθώς το σκυρόδεμα προστατεύει από την άμεση επαφή με τη φωτιά και η απουσία οξυγόνου καθιστά αδύνατη την εξάπλωση της φωτιάς εντός του δομικού στοιχείου. Ωστόσο, το εσωτερικό του σώματος του σκυροδέματος θερμαίνεται πολύ και οι μηχανικές ιδιότητες του FRP μειώνονται δραματικά μόλις ξεπεραστεί η τιμή  $T_g$  [2]. Αυτή η μείωση της αντοχής έχει ελάχιστη σχέση με τις ίνες, οι οποίες ανταποκρίνονται καλύτερα από τις ρητίνες και μπορούν να υποστηρίξουν φορτία ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες. Επομένως, η αντοχή του εξαρτήματος σε κάμψη και διάτμηση μειώνεται.

Ως αποτέλεσμα, μπορεί να παρατηρηθούν εκτεταμένες ρωγμές και μεγάλα βέλη κάμψης, ενώ η "αποδυνάμωση" του FRP μπορεί να προκαλέσει απώλεια της αγκύρωσης του οπλισμού και πλήρη κατάρρευση του μέλους, εάν η θερμοκρασία υπερβεί το θερμικό όριο των ινών ( $880^\circ\text{C}$  για τις ίνες γυαλιού,  $180^\circ\text{C}$  για τις ίνες αραμιδίου και  $1600^\circ\text{C}$  για τις ίνες άνθρακα) [6]. Για να αποφευχθεί ο κίνδυνος απώλειας της αγκύρωσης, τα άκρα των στοιχείων πρέπει να προστατεύονται επαρκώς από την έκθεση στη φωτιά. Ωστόσο, εάν ένα FRP (ιδίως ένα με μήτρα οργανικής ρητίνης) προσβληθεί από

πυρκαγιά, η συμπεριφορά του θα είναι : ανάφλεξη σε όλη την επιφάνεια του υλικού, απελευθέρωση θερμότητας και αερίων (τα οποία μπορεί να είναι τοξικά, ενώ παράλληλα δημιουργούν ένα μονωτικό στρώμα στην επιφάνεια, δυσχεραίνοντας την εξάπλωση της πυρκαγιάς στο εσωτερικό του υλικού). [6] Εάν το FRP εκτεθεί όχι μόνο σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά και σε θερμικούς κύκλους με ταχείες και βίαιες μεταβολές της θερμοκρασίας, μπορεί να προκληθούν βλάβες στη δομή. Καθώς η θερμοκρασία πέφτει, η μήτρα της ρητίνης σκληραίνει, προκαλώντας μικρορωγμές και απώλεια της συνάφειας μεταξύ της ρητίνης και της μήτρας των ινών. Ως αποτέλεσμα της συνεχούς εναλλαγής της θερμοκρασίας, το υλικό διαστέλλεται και συστέλλεται, οι ιδιότητες του υλικού επιδεινώνονται και γίνεται πιο ευάλωτο σε βλάβες από αλάτι [6].

### **3.6.3 Υπεριώδης ακτινοβολία**

Η διάβρωση του FRP μπορεί να προκληθεί από την έκθεση στον ήλιο. Η έκθεση του ενισχυμένου με ίνες πολυμερούς στο υπεριώδες φως, το οποίο προκαλεί χημικές αντιδράσεις στο πολυμερές υλικό που συνθέτει τη μήτρα της ρητίνης, οδηγεί σε υποβάθμιση των αρχικών μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Ωστόσο, αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα όταν χρησιμοποιείται το FRP ως εσωτερικός οπλισμός, καθώς το σκυρόδεμα παρέχει την απαιτούμενη προστασία. Πρέπει να δίνεται προσοχή κατά την αποθήκευση υλικών FRP ή τη χρήση τους επί τόπου για να διασφαλιστεί ότι το FRP δεν εκτίθεται απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση του FRP σε μια περιοχή που είναι σκιασμένη από τον ήλιο. [2], [6].

### **3.6.4 Υγρασία**

Όταν συνδυάζεται με τη θερμοκρασία και την καταπόνηση, η υγρασία μπορεί να συμβάλει στην απώλεια της αντοχής και της ακαμψίας των υλικών που κατασκευάζονται από πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα (CFRP). Σύμφωνα με τους Bank and Gentry (1995), η απορρόφηση νερού έχει κυρίως επίδραση στη μήτρα της ρητίνης. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μόρια του νερού χρησιμεύουν ως πλαστικοποιητές στη ρητίνη και καταστρέφουν τους δεσμούς van der Waals που υπάρχουν στην αλυσίδα του πολυμερούς. Ως συνέπεια αυτού, μπορεί να συμβούν αλλαγές όπως χαμηλότερο συντελεστή θραύσης, αντοχή σε θραύση και παραμόρφωση, σκληρότητα, ανάπτυξη στελεχών λόγω διόγκωσης και επακόλουθων ρωγμών, φαινόμενα υδρόλυσης και έλλειψη προσκόλλησης μεταξύ ίνας και ρητίνης [Hayes et al.]. Αυτές οι αλλαγές μπορεί να αποδοθούν στη διόγκωση των ινών.

Αυτά τα φαινόμενα είναι πιο έντονα σε περιβάλλοντα που είναι κορεσμένα και σε θερμοκρασίες υψηλότερες από 60 βαθμούς Κελσίου [6]. Οι ρητίνες, από την άλλη πλευρά, είναι ικανές να επιτύχουν

υψηλό επίπεδο αντοχής στη διάβρωση από την υγρασία εάν η διαδικασία κατασκευής εκτελείται σωστά και τα συστατικά των συστατικών συνδυάζονται.

### **3.6.5 Διάβρωση από χλωρίδια και αλκάλια**

Σε σύγκριση με τον χάλυβα, ένα από τα πιο σημαντικά οφέλη που παρέχουν τα FRP είναι η αντοχή τους στη διάβρωση. Είναι γνωστό ότι ο οπλισμός μπορεί να διαβρωθεί, ιδιαίτερα σε συνθήκες όπου υπάρχει αλάτι. Αυτό προκαλεί αύξηση του όγκου του υλικού, το οποίο με τη σειρά του οδηγεί σε σπασίματα και θρυμματισμό στο σκυρόδεμα. Ωστόσο, όταν κάτι υποβάλλεται σε εξαιρετικά διαβρωτικές περιβαλλοντικές συνθήκες, είναι αδύνατο να αποκλειστεί εντελώς η πιθανότητα διάβρωσης. Οι επιδράσεις των χλωριδίων και των αλκαλίων επισημαίνονται ιδιαίτερα σε όλο το κείμενο. Με βάση την έρευνα που διεξήχθη σε υλικά FRP που υποβλήθηκαν σε περιβάλλοντα σκυροδέματος όταν υπήρχαν συνθήκες συγχρονισμού για το χλώριο και την υγρασία, μπορούν να γενικευθούν τα ακόλουθα: Το υλικό ράβδων CFRP δεν παρουσιάζει σχεδόν καμία διάβρωση ανεξάρτητα από το περιβάλλον φόρτωσης, τη θερμοκρασία ή την ποσότητα χρόνος.

Ωστόσο, οι ράβδοι AFRP και GFRP εμφάνισαν πτώση αντοχής και ακαμψίας έως και 50%, χαλάρωση μεγαλύτερη από 30% υπό προένταση και σε ορισμένες περιπτώσεις μείωση περισσότερο από 20% στις ροπές διαρροής [6]. να τονιστεί, ωστόσο, ότι λόγω της φύσης των δοκιμών, δεν είναι εμφανές ότι η διάβρωση είναι αποτέλεσμα της δράσης των χλωριδίων. Αυτό είναι κάτι που πρέπει να επιστήσουμε την προσοχή σας.

Ωστόσο, η διάβρωση του ίδιου του σκυροδέματος ως αποτέλεσμα της αλκαλικότητας εμπλέκεται ιδιαίτερα στη διάβρωση του GFRP, ενώ η διάβρωση AFRP και CFRP επηρεάζεται λιγότερο από αυτόν τον παράγοντα. Προκειμένου να προβλεφθεί με ακρίβεια το επίπεδο διάβρωσης, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη τόσο το είδος του υαλοβάμβακα που χρησιμοποιείται όσο και η ανθεκτική στα αλκάλια ρητίνη. Η πλειονότητα των ακαδημαϊκών είναι της γνώμης ότι οι ρητίνες βινυλεστέρα έχουν σίγουρα ένα πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες συμβατικές ρητίνες. Πρέπει επίσης να τονιστεί ότι η πλειοψηφία των πειραματικών πειραμάτων μιμείται το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος με αλκαλικά διαλύματα. Αυτά τα διαλύματα είναι πολύ πιο επιζήμια για τα FRP ως αποτέλεσμα της κινητικότητας των ιόντων που περιέχουν και απέχουν πολύ από τις πραγματικές συνθήκες που υπάρχουν μέσα στο σώμα του σκυροδέματος.

### **3.6.6 Παρατηρήσεις**

Υπό την επίδραση μιας μεγάλης ποικιλίας συνθηκών, η αντοχή του f<sub>fr</sub> είναι συχνά αρκετά κοντά. Από την άλλη πλευρά, στην πραγματικότητα, η σύγχρονη επαφή τους, οι ταυτόχρονες τάσεις στο μέλος και η

επίδραση της μακροχρόνιας φόρτισης επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού. Ωστόσο, αυτοί οι παράγοντες δεν ελήφθησαν υπόψη. Η αντοχή σε εφελκυσμό και η ακαμψία του σύνθετου υλικού καθορίζονται κυρίως από τις παραμέτρους που επηρεάζουν τις ιδιότητες των ινών, ενώ η συνεργατική αντοχή καθορίζεται κυρίως από τους παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της μήτρας ρητίνης.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΤΑ FRPs ΩΣ ΣΥΝΔΕΤΗΡΕΣ-ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ENANTI ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ**

### **4.1 Γενικά**

Οι εσωτερικοί μηχανισμοί αντίδρασης υλικού, ο ρόλος και η αλληλεπίδραση των οποίων είναι ακόμη υπό συζήτηση, καθορίζουν την αντοχή στη διάτμηση. Ωστόσο, είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι η αντοχή σε θραύση της θλιπτικής ζώνης, η δράση λυγισμού, οι μηχανισμοί σύμπλεξης και η αντοχή του οπλισμού διάτμησης είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη διατμητική αντοχή του οπλισμένου σκυροδέματος. Η θεωρία λειτουργίας αυτών των μηχανισμών, η οποία απορρέει από την εμπειρία της χρήσης χάλυβα στην κατασκευή, είναι επίσης χαρακτηριστική για τον οπλισμό FRP. Ωστόσο, η ανάλυση και η τελική διατμητική αντοχή επηρεάζονται από τα διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, η ανισότροπη φύση του υλικού frp, η αδυναμία εσωτερικής ανακατανομής των τάσεων λόγω απουσίας πλαστικής συμπεριφοράς και οι γενικά μεγαλύτερες παραμορφώσεις και ανοίγματα ρωγμών που προκαλούνται από το σχετικά μικρό μέτρο ελαστικότητας είναι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

### **4.2 Μηχανισμοί αλληλεμπλοκής**

Μέσω μηχανικής αλληλασφάλισης στα άκρα θραύσης, το σκυρόδεμα μπορεί να βοηθήσει στη λήψη και τη μεταφορά της διατμητικής τάσης στη ζώνη εφελκυσμού του τμήματος. Είναι κοινώς αποδεκτό ότι η χρήση οπλισμού FRP οδηγεί σε σχετικά υψηλότερες παραμορφώσεις και ανοίγματα ρωγμών, και ως αποτέλεσμα, η συμβολή των μηχανισμών αλληλασφάλισης μειώνεται.

### **4.3 Δράση βλήτρου**

Η αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος καθώς και οι αντοχές σε κάμψη και διάτμηση του διαμήκους οπλισμού καθορίζουν τη δράση γεφύρωσης, έναν εσωτερικό μηχανισμό λήψης διάτμησης. Η δράση του φλοιού μπορεί να θεωρηθεί ασήμαντη σε στοιχεία που ενισχύονται με διαμήκη οπλισμό FRP λόγω του ανισότροπου χαρακτήρα τους, ο οποίος έχει ως αποτέλεσμα πολύ μικρή ακαμψία σε άξονες κάθετους προς τον διαμήκη. [Totori and Wakui (1993), Kanakubo and Shindo (1997)].

### **4.4 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ**

Όταν η αντοχή του τμήματος σκυροδέματος εξαντληθεί, χρησιμοποιείται οπλισμός διάτμησης για τη στήριξη των τάσεων διάτμησης. Προκειμένου να ληφθούν και να μεταφερθούν οι τάσεις εφελκυσμού των κεκλιμένων ρωγμών, συχνά εισάγονται κάθετοι συνδετήρες. Η αντοχή διαρροής είναι ο

καθοριστικός παράγοντας για την αντοχή των συνδετήρων από χάλυβα. Ωστόσο, για το FRP, το οποίο εμφανίζει γραμμική ελαστική συμπεριφορά μέχρι αστοχίας, άλλα κριτήρια όπως η μέγιστη τάση είναι πιο κρίσιμα. Είναι επίσης σημαντικό να προσέξετε πώς αγκυρώνονται οι συνδέσεις και πώς συνδέονται τα καμπύλα άκρα τους. Προκειμένου να διασφαλιστεί, ότι όλοι οι μηχανισμοί λήψης διάτμησης συνεισφέρουν επαρκώς και ότι ισχύει η θεμελιώδης προϋπόθεση, ότι ο σπλισμός διάτμησης και οι αντοχές διατομής του σκυροδέματος μπορούν να αυξηθούν, είναι σημαντικό να καθοριστεί μια μέγιστη τιμή παραμόρφωσης.

Η μέγιστη τιμή είναι 0,002 σύμφωνα με τον Καναδικό Κώδικα Γέφυρας Αυτοκινητοδρόμων (CSA2000), αλλά 0,0025 σύμφωνα με το EUROCRETE PROJECT. Παρόλα αυτά, αυτές οι τιμές προτείνονται ως αποδεκτή παραμόρφωση 0,00275, αλλά σε καμία περίπτωση μεγαλύτερη από την τιμή 0,004, τιμή στην οποία η συμβολή των μηχανισμών αλληλασφάλισης μειώνεται δραστικά (Pristley et al. 1996). Αυτό είναι σύμφωνο με το πρότυπο ACI, το οποίο θεωρεί αυτές τις τιμές ως συντηρητικές. Τελευταίο αλλά εξίσου σημαντικό, όσον αφορά την ακτίνα καμπυλότητας, αν και είναι τεχνικά εφικτή η δημιουργία συνδέσεων με πολύ «αιχμηρή» καμπυλότητα, αυτό πρέπει να αποφεύγεται αφού μειώνει σημαντικά την αντοχή τους.  $r_b / d_b = 3$  είναι η χαμηλότερη τιμή που μπορεί να γίνει αποδεκτή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΡΕΨΗΣ

### 5.1 Μηχανική καταπόνηση

Το αποτέλεσμα των δυνάμεων και των ροπών που δρουν στα σώματα, η μηχανική καταπόνηση προκαλεί σημαντική παραμόρφωση. Εκτιμάται ότι τα σώματα είναι αντικείμενα, όπως τα στερεά σώματα, που μπορούν να διατηρήσουν το σχήμα τους από μόνα τους. Αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους ή με τον εαυτό τους για να παράγουν τις δυνάμεις που τους παραμορφώνουν. Τα συστατικά του σώματος που του δίνουν συνοχή και διατηρούν το σχήμα του υπόκεινται σε παραμόρφωση. Η παραμόρφωση επηρεάζει ως επί το πλείστον το μικροσκοπικό επίπεδο, όπως τα άτομα ή τα μόρια μέσα σε ένα υλικό, όπου το φορτίο διαχέεται από δυνάμεις και ροπές που τα αναγκάζουν να κινηθούν το ένα σε σχέση με το άλλο. Όταν το σώμα παραμορφώνεται, συχνά το αντιλαμβανόμαστε μακροσκοπικά, που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιήσουμε μηχανικές συσκευές μέτρησης ή τις αισθήσεις μας για να ανιχνεύσουμε την αλλαγή στο σχήμα. Το σώμα μπορεί επίσης να είναι η πηγή της δικής του πίεσης επειδή υπόκειται σε δυνάμεις από το περιβάλλον του καθώς διαστέλλεται ή συστέλλεται, από τα συστατικά του ως αποτέλεσμα ελαττωμάτων στην κατασκευή ή υλικά που έχουν μνήμη, ή ακόμα και από φαινομενικές δυνάμεις ως αποτέλεσμα της μη στιγμιαίας περιστροφής.

Το στρες μπορεί επίσης να εμφανιστεί σε μη στερεά σώματα, όπως μια σταγόνα νερού που συνθλίβεται και παραμορφώνεται από το βάρος ενός συνδετήρα που ακουμπά πάνω του. Παρόμοια με αυτό, ένα πολύπλοκο σώμα μπορεί να είναι ένα μπαλόκι γεμάτο με νερό ή ακόμα και ένα ουράνιο σώμα σαν πλανήτη που βιώνει δυνάμεις και παλιρροϊκές δονήσεις από άλλα ουράνια σώματα ταυτόχρονα.

### 5.2 Στερεό σώμα

Ένα σώμα θα χαρακτηρίζεται στερεό σώμα, όταν οι αποστάσεις μεταξύ των σωματίων, από τα οποία αποτελείται, παραμένουν σταθερές, δηλαδή το σώμα έχει σταθερό μέγεθος και σχήμα έστω και αν κινείται. Η κίνηση ενός στερεού μπορεί να είναι είτε μεταφορική είτε περιστροφική είτε ακόμα και συνδυαστική, δηλαδή και μεταφορική και περιστροφική στον ίδιο χρόνο. Στη συνέχεια, αναφέρονται οι διάφορες κινήσεις που υπάρχουν σε ένα τυχαίο σώμα.

Η κίνηση ενός στερεού σώματος ονομάζεται, μεταφορική κίνηση, όταν κάθε ευθύγραμμο τμήμα του σώματος ή της επέκτασης του εκάστοτε σώματος του παραμένει παράλληλο προς τον εαυτό του. Στην περίπτωση αυτή κάθε χρονική στιγμή όλα τα σώματα του έχουν την ίδια διανυσματική ταχύτητα.

Περιστροφική κίνηση στερεού γύρω από ένα σταθερό άξονα, ονομάζουμε την κίνηση κατά την οποία δύο τουλάχιστον σημεία του συγκεκριμένου σώματος ή όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, της επέκτασης



του, παραμένουν ακίνητα οπότε ορίζουν τον άξονα περιστροφής του σώματος. Όλα τα επόμενα σημεία του τυχαίου άξονα περιστροφής έχουν ταχύτητα σχεδόν ή ακόμα και μηδέν, ενώ παράλληλα όλα τα υπόλοιπα σημεία του σώματος έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα ( $\omega$ ) και διαγράφουν κυκλικές τροχιές με τα επίπεδα τους που είναι κάθετα στον άξονα.

Όταν ένα σώμα εκτελέσει ή εκτελεί κίνηση γενικότερης μορφής τότε αυτή μπορεί να αναλυθεί κάθε χρονική στιγμή, σε μεταφορική κίνηση καθώς και σε περιστροφική κίνηση πάντα ως προς τον άξονα ως σημείο αναφοράς. Η ανάλυση αυτή μπορεί να γίνει με αρκετούς και διάφορους τρόπους. Η επίπεδη κίνηση, που μπορεί να εξετάζουμε, μπορεί να αναχθεί σε καθαρά περιστροφική κίνηση, γύρω από κάποιο στιγμιαίο άξονα ως σημείο αναφοράς για ένα στιγμιαίο χρονικό διάστημα. Συνήθως, όπως γίνεται μία ανάλυση τυχαίας κίνησης σε μεταφορική κίνηση και σε περιστροφική κίνηση γύρω από το κέντρο μάζας. Η γωνιακή ταχύτητα να τονιστεί σε αυτό το σημείο, ότι παραμένει η ίδια ανεξάρτητα από τον άξονα περιστροφής.

### 5.2.1 Κέντρο μάζας

Το σημείο που, όταν συγκεντρώνεται σε ένα σώμα ή σύστημα σωμάτων, ενεργεί ως η μάζα ολόκληρου του σώματος ή του συστήματος είναι γνωστό ως κέντρο μάζας στη φυσική, και ιδιαίτερα στο πλαίσιο της μηχανικής. Μόνο η μάζα και η θέση κάθε σώματος που είναι μέρος του συστήματος καθορίζουν το κέντρο μάζας. Το κέντρο μάζας ενός μηχανικού στερεού είναι στερεωμένο σε σχέση με το σώμα, αλλά όχι απαραίτητα πάνω του. Το κέντρο μάζας και το κέντρο βάρους συμπίπτουν στην περίπτωση ενός ομοιογενούς βαρυτικού πεδίου, όπου βασικά λέγεται ότι ενεργεί η βαρύτητα.

Είναι συχνά εξαιρετικά χρήσιμο το ότι το κέντρο μάζας ενός σώματος δεν ταιριάζει πάντα με το γεωμετρικό του κέντρο. Οι μηχανικοί σπορ αυτοκινήτων προσπαθούν να κάνουν τα οχήματά τους όσο το δυνατόν πιο ελαφριά, ενώ κατανέμουν το βάρος κυρίως στο κάτω μέρος του αμαξώματος του αυτοκινήτου.

Ένα σύστημα αναφοράς με το κέντρο μάζας του συστήματος να χρησιμεύει ως αρχή του είναι γνωστό ως σύστημα κέντρου βάρους. Το κέντρο μάζας ενός αντικειμένου και το γεωμετρικό κέντρο του σώματος συμπίπτουν αν είναι ομοιογενές ή αν έχει ομοιόμορφη κατανομή πυκνότητας.

### 5.2.2 Βαρυτική δυναμική ενέργεια στερεού σώματος

Έστω ένα στερεό σώμα, σε μια τυχαία θέση σε τυχαία χρονική στιγμή, στο επίπεδο του γήινου βαρυτικού πεδίου. Στην περιοχή που βρίσκεται το σώμα το πεδίο θεωρείται άκρως και σταθερά ομογενές. Θεωρούμε ότι ένα σύστημα αναφοράς με τον άξονα  $y$  ως κατακόρυφο. Θέτουμε επίσης στην συνέχεια

μηδέν την βαρυτική δυναμική ενέργεια στα σημεία του επιπέδου  $xOz$ . Το σώμα αποτελείται από τα σώματα μαζών  $m_1, m_2, \dots, m_n$  που έχουν αντίστοιχα δυναμική ενέργεια  $m_1gy_1, m_2gy_2, \dots, m_n g y_n$ .

Η δυναμική ενέργεια του στερεού σώματος ισούται με το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών των σωματίων, από τα οποία αποτελείται. Άρα μπορούμε να πούμε ότι η δυναμική ενέργεια του σώματος, αναφερόμενη σε ενέργεια στερεού σώματος είναι:

$$U = (M_1 + M_2 + \dots) * g * Y_{cm}$$

Εφόσον  $M_1 + M_2 + \dots = M$  όπου  $M$  η συνολική μάζα του σώματος έχουμε  $U = MgY_{cm}$

Ως συμπέρασμα θεωρούμε ότι η δυναμική ενέργεια στερεού σώματος μέσα σε ομογενές βαρυτικό πεδίο υπολογίζεται υποθέτοντας ότι όλη η μάζα του είναι συγκεντρωμένη στο κέντρο μάζας του.

### 5.3 Είδη καταπόνησης στα στερεά σώματα

Ο τομέας της μηχανικής μελετά τις τάσεις των στερεών σωμάτων και τις ταξινομεί σε έξι βασικά (ή τουλάχιστον πιθανώς βασικά) είδη. Οι υπολογισμοί για πιο περίπλοκες τάσεις προέρχονται από την ανάλυση απλούστερων τάσεων ως συνδυασμό. Οι απλές μορφές τάσης διαμορφώνονται χονδρικά σε ιδανικά στερεά σώματα, συχνά γνωστά ως φορείς φορτίου, με απλή γεωμετρία, ομοιογένεια και ισοτροπία.

#### 5.3.1 Εφελκυσμός

Ένα σώμα λέγεται ότι βρίσκεται σε κατάσταση έντασης όταν υποβάλλεται σε ισχυρές πιέσεις που δρουν σε αντίθεση μεταξύ τους και τείνουν να το τεντώνουν (κορυφαία εικόνα). Μία από τις δύο καταστάσεις μονοαξονικής τάσης που μπορεί να βιώσει ένα παραμορφώσιμο στερεό είναι η κατάσταση εφελκυσμού. Η θλίψη είναι η αντίθετη συνθήκη που είναι μονοαξονική και έντονη. Θεωρείται, ότι δεν υπάρχει καθαρή δύναμη που να ενεργεί στο σύστημα.

Μπορούμε να υπολογίσουμε τις εφελκυστικές και κανονικές τάσεις στη διατομή λαμβάνοντας υπόψη μια φανταστική τομή σε κάποιο σημείο και στη συνέχεια εφαρμόζοντας την ισορροπία δυνάμεων σε αυτό το τμήμα. Η δοκιμή εφελκυσμού είναι αυτή που χρησιμοποιείται συχνότερα στις μηχανικές δοκιμές. Συνεπάγεται την υποβολή ενός δείγματος του υλικού που πρόκειται να χαρακτηριστεί σε τάση εφελκυσμού και την καταγραφή της επαγόμενης επιμήκυνσης  $l$  που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης της διαδικασίας.

Η τάση λέγεται, ότι είναι κεντρική, όταν μια εξωτερική δύναμη εφαρμόζεται στη θέση, που θα θεωρηθεί, ότι είναι το κέντρο βάρους της διατομής. Εάν το μέλος είναι ευθύγραμμο, η διατομή δεν αλλάζει και η

εξωτερική δύναμη παρέχεται με ομοιόμορφο τρόπο, τότε οι τάσεις θα κατανεμηθούν ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή. Με  $\sigma$  την εφελκυστική τάση,  $F$  την εξωτερική δύναμη και  $A$  το εμβαδόν της διατομής. Ακόμα και στην περίπτωση που η εξωτερική δύναμη δεν ασκείται ομοιόμορφα στα άκρα του στοιχείου, μετά από κάποιο μήκος η κατανομή γίνεται ομοιόμορφη λόγω της αρχής του Saint Venant. Στα γραμμικά ελαστικά υλικά ισχύει ο νόμος του Χούκ και η επιμήκυνση θα είναι όπου:

- $\sigma$  η εφελκυστική τάση
- $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού
- $L$  το αρχικό μήκος.

Για να ισχύει ο νόμος του Hooke, η τάση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από μια ορισμένη τιμή που είναι τυπική για το υλικό. Στα εύθραυστα υλικά, η υπέρβαση της αντοχής σε εφελκυσμό οδηγεί σε θραύση, αλλά στα όλκιμα υλικά, εάν οι τάσεις φτάσουν στο σημείο διαρροής, θα δούμε αρχικά πλαστική παραμόρφωση και στη συνέχεια θραύση του στοιχείου. Αυτό συμβαίνει επειδή τα εύθραυστα υλικά έχουν χαμηλότερο σημείο διαρροής από τα όλκιμα υλικά.

Ο όρος "έκκεντρη τάση" αναφέρεται σε μια κατάσταση στην οποία η εξωτερική δύναμη δεν εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους της διατομής.

Η απόσταση της συνιστώσας της δύναμης από το κέντρο βάρους της διατομής αναφέρεται ως εκκεντρότητα, που συμβολίζεται με το γράμμα  $e$ . Οι πραγματικές τάσεις διατομής μπορούν εύκολα να υπολογιστούν μεταφέροντας την εξωτερική δύναμη στο κέντρο βάρους ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζεται μια ροπή κάμψης στην κατασκευή. Αυτή είναι μια απλή μέθοδος. Η απάντηση προκύπτει ως συνέπεια της υπέρθεσης της κεντρικής τάσης που προκαλείται από το  $F$  και της κάμψης που προκαλείται από το  $M$ . Οι συνολικές παραμορφώσεις πρέπει να συνεχίσουν να βρίσκονται εντός του ελαστικού εύρους για να θεωρηθεί έγκυρη η υπέρθεση. Αυτή είναι μια από τις προϋποθέσεις όπου:

- η ροπή αδράνειας ως προς τον κεντρομόλο άξονα, που είναι παράλληλος προς τον άξονα κάμψης.
- την απόσταση, μετρούμενη από τον παραπάνω άξονα, μεταξύ του σημείου με την τάση και της αρχής.

### 5.3.2 Θλίψη

Η οξεία κατάσταση που είναι γνωστή ως θλίψη χαρακτηρίζεται από πιέσεις που δρουν προς την αντίθετη κατεύθυνση σε ένα σώμα, οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα να προκαλούν το σώμα να συρρικνώνεται. Μία από τις δύο καταστάσεις μονοαξονικής τάσης που μπορεί να βιώσει ένα παραμορφώσιμο στερεό είναι η συμπίεση. Η τάση εφελκυσμού είναι ο άλλος τύπος κατάστασης μονοαξονικής τάσης. Δεν υπάρχει καμία αλλαγή στην ισορροπία δυνάμεων. Μπορούμε να προσδιορίσουμε τις θλιπτικές κανονικές τάσεις στη διατομή λαμβάνοντας υπόψη μια φανταστική τομή σε κάποιο σημείο από την ισορροπία δυνάμεων.

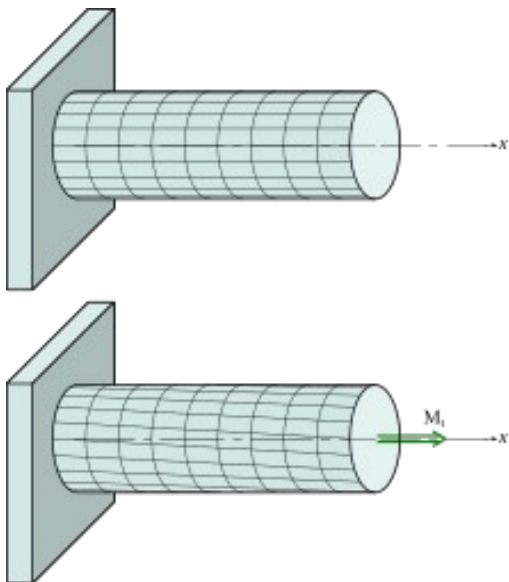
Ο όρος «κεντρική τάση» αναφέρεται σε μια κατάσταση κατά την οποία η εξωτερική δύναμη, που ασκείται στη διατομή, εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους της διατομής. Εάν το μέλος είναι ευθύγραμμο, η διατομή δεν αλλάζει και η εξωτερική δύναμη παρέχεται με ομοιόμορφο τρόπο, τότε οι τάσεις θα κατανεμηθούν ομοιόμορφα σε όλη τη διατομή.

### 5.3.3 Διάτμηση

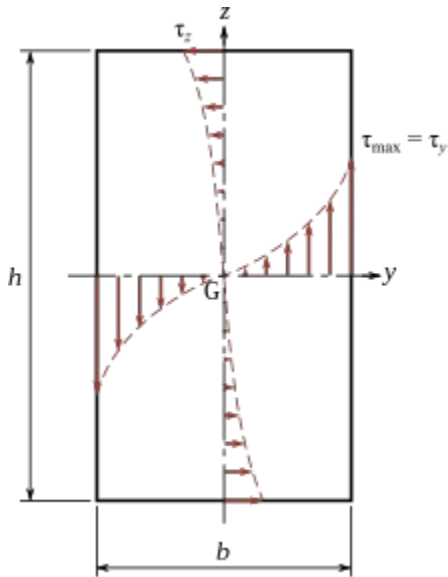
Η τάση που προκύπτει από δύο ίσες και αντίθετες πιέσεις που δρουν κάθετα στον άξονα ενός σώματος είναι γνωστή ως διάτμηση.

Το πηλίκο της παράλληλης ή εφαπτομενικής δύναμης που εφαρμόζεται στη διατομή ενός υλικού και στην επιφάνεια της διατομής είναι γνωστό ως μηχανική διατμητική τάση. Διαφορετικά, η τάση παράλληλη στο επίπεδο της τομής είναι γνωστή ως διατμητική τάση. Το ελληνικό μικρογραμμάριο  $\tau$  το αντιπροσωπεύει. Το Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) χρησιμοποιεί το pascal ως μονάδα διατμητικής τάσης, η οποία είναι ισοδύναμη με ένα Newton (η μονάδα SI της εφαρμοζόμενης δύναμης) ανά τετραγωνικό μέτρο (η μονάδα SI της εφαρμοζόμενης επιφάνειας).

#### Διάτμηση λόγω στρέψης



Παραμόρφωση κυλίνδρου υπό στρέψη. Κάθε διατομή στρίβει σε σχέση με την επόμενη.



### Διατμητικές τάσεις σε διατομή ορθογώνιου που στρέφεται.

Διατμητικές τάσεις εμφανίζονται και στο εσωτερικό στοιχείων που καταπονούνται από στρέψη λόγω της στροφής κάθε διατομής σε σχέση με την επόμενη.

### Διάτμηση στα ρευστά

Συγκεκριμένα, η διατμητική τάση - ανεξάρτητα από το μέγεθός της - είναι η δύναμη που παραμορφώνει τα ρευστά στη ροή τους πιο συχνά στη μηχανική των ρευστών. Ο ορισμός της διατμητικής τάσης είναι ο λόγος του εμβαδού μιας επιφάνειας ρευστού προς την παράλληλη ή εφαπτομενική δύναμη που εφαρμόζεται σε αυτήν. Ως αποτέλεσμα της έννοιας που δόθηκε παραπάνω, η διατμητική τάση δεν εμφανίζεται σε κανένα ρευστό - αέριο ή υγρό - που βρίσκεται σε ισορροπία. Σε αντίθεση με την πίεση που παρέχεται κάθετα στην επιφάνεια του ρευστού, η διατμητική τάση εφαρμόζεται εφαπτομενικά.

- Τύπος:  $\tau = F / A$ , όπου F η παράλληλη συνιστώσα της δύναμης εφαρμογής και A η επιφάνεια εφαρμογής.

### 5.3.4 Στρέψη

Στη γλώσσα της μηχανικής, ένα σώμα βιώνει στρέψη όταν εφαρμόζεται μια ροπή γύρω από τον άξονά του, η οποία τείνει να το στρίψει. Το Newton ανά μέτρο (Nm) είναι η μονάδα μέτρησης της ροπής στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI). Οι διατμητικές τάσεις προκαλούνται από στρέψη στην επιφάνεια της διατομής του αμαξώματος. Σε κινητήριους άξονες, δομές, στο ανθρώπινο σώμα και σε άλλα μέρη, παρατηρείται συχνά στρέψη.

## 5.4 Δυσκαμψία δοκών

Για πολλά διαφορετικά είδη κτιρίων, ειδικά εκείνα με στενές μορφές, η ακαμψία της δοκού είναι μια κρίσιμη ιδέα. Μεγάλες παραμορφώσεις, σημαντικά τοπικά φορτία και υψηλός κίνδυνος αστοχίας μπορεί να προκύψουν από την ανεπαρκή ακαμψία της δοκού σε αυτή τη θέση. Τέτοιες κατασκευές μπορεί να εμφανίσουν ροπές (στιγμές) συστροφής ή στρέψης εκτός από τις ροπές κάμψης. Στην πραγματικότητα, οι κύριες εφαρμοσμένες ροπές συχνά επηρεάζουν σχεδόν όλες τις κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων πολλών φυσικών κατασκευών (δέντρα, οστά, κ.λπ.) και κτιρίων. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα εφαρμοζόμενα φορτία, τα χαρακτηριστικά του υλικού και η γεωμετρία της δομής επηρεάζουν την πρόβλεψη των ροπών, των παραμορφώσεων και των κατανομών τάσεων είναι ζωτικής σημασίας. Ο σκοπός αυτού του TLP είναι να παρέχει τα απαραίτητα δεδομένα για τη διευκόλυνση της πρόβλεψης και της κατανόησης των ροπών κάμψης και στρέψης, των παραμορφώσεων (ελαστοπλαστικών και ελαστικών) και των κατανομών τάσεων.

Ο όρος "ακαμψία δοκού" ή περιστασιακά "καμπτική ακαμψία" αναφέρεται στο προϊόν EI. Συνήθως αποδίδεται το γράμμα S. Εκφράζει την αντοχή με την οποία η δοκός αντέχει την παραμόρφωση έναντι των δυνάμεων κάμψης. Υπό μονοαξονική φόρτιση, είναι ανάλογο με το μέτρο του Young (με ροπή κάμψης που αντιστοιχεί σε μονοαξονική τάση και καμπυλότητα ανάλογη με τη μονοαξονική τάση). Η μεγιστοποίηση της τιμής του I μεγιστοποιεί την ακαμψία της δοκού για ένα δεδομένο υλικό. Η χρήση μορφών διατομής με το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής διατομής τους μακριά από τον ουδέτερο άξονα το επιτρέπει. Επειδή ο κύκλος έχει μεγαλύτερο ποσοστό της διατομής του κοντά στον ουδέτερο άξονα, μια δοκός με τετράγωνη διατομή, για παράδειγμα, είναι πιο άκαμπτη από μια κυκλική δοκό της ίδιας περιοχής. Ακόμη πιο άκαμπτη είναι μια κοίλη τετράγωνη διατομή. Εάν αυτό το σκεπτικό χρησιμοποιηθεί περαιτέρω, προκύπτουν πάνελ σάντουιτς και δοκοί I. Η συστροφή μιας δοκού, που προκαλείται από μια ροπή (ροπή), είναι γνωστή ως στρέψη. Δημιουργείται πιο τυχαία υπό επιχειρησιακές συνθήκες σε αμαξώματα αυτοκινήτων, γάστρα σκαφών, ατράκτους αεροπλάνων, γέφυρες, ελατήρια και πολλές άλλες κατασκευές και εξαρτήματα. Εφαρμόζεται συστηματικά σε βίδες, παξιμάδια, άξονες, κινητήριους άξονες κ.λπ. Οι μονάδες μιας ροπής, T, και μιας ροπής κάμψης, M, είναι ίδιες (N m). Το αποτέλεσμα μιας δύναμης και μιας απόστασης είναι και τα δύο. Όταν πρόκειται για ροπή, η ακτινική απόσταση μεταξύ της εφαπτομένης και του άξονα περιστροφής αντιπροσωπεύει την απόσταση και τη δύναμη, αντίστοιχα.

## 5.5 Στρέψη κυλινδρικής δοκού

Η στρέψη μιας κυλινδρικής ράβδου απεικονίζεται στο σχήμα. Φαίνεται, ότι η διαμητική παραμόρφωση σε ένα στοιχείο της ράβδου δίνεται από τη σχέση

$$\gamma = r d\theta/dL$$

Η εξίσωση αυτή ισχύει τόσο στην επιφάνεια της ράβδου, όπως φαίνεται, όσο και για οποιαδήποτε άλλη ακτινική θέση, χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τιμή του  $r$ . Προφανώς, η διατμητική παραμόρφωση μεταβάλλεται γραμμικά με το  $r$ , από μηδέν στο κέντρο της ράβδου έως μια μέγιστη τιμή στην ελεύθερη επιφάνεια.

Η διατμητική τάση,  $\tau$ , σε οποιαδήποτε ακτινική θέση, σχετίζεται με τη διατμητική παραμόρφωση ως εξής

$$\tau = G\gamma$$

Η ροπή,  $T$ , μπορεί επομένως να γραφεί ως εξής

$$T = \int A dT = \int A \tau r dA = \int A G r^2 d\theta/dL dA$$

Όπως και στην περίπτωση κάμψης της δοκού, το γεωμετρικό ολοκλήρωμα αναπαρίσταται ως (πολική) δεύτερη ροπή της επιφάνειας

$$I_P = \int A r^2 dA$$

Για έναν συμπαγή κύλινδρο διαμέτρου  $w$ , αυτό μπορεί να γραφεί ως εξής

$$I_P = \int A r^2 dA = \int d/20 r^2 2\pi r dr = \pi [r^4/2] w/20 = \pi w^4/32$$

Η ροπή στρέψης δίνεται συνεπώς από τη σχέση

$$T = G I_P d\theta/dL$$

Συγκρίνοντας την εξίσωση αυτή με την αντίστοιχη για την κάμψη της δοκού

$$M = E I K$$

Διαπιστώνεται, ότι το ανάλογο της στρέψης για την καμπυλότητα μιας λυγισμένης δοκού είναι ο ρυθμός στροφής κατά μήκος της ράβδου. Αυτό μπορεί να μετρηθεί πειραματικά, αν και όχι τόσο εύκολα όσο η καμπυλότητα (επειδή το μακροσκοπικό σχήμα της ράβδου δεν αλλάζει στην πραγματικότητα - τουλάχιστον όταν είναι ευθεία - δείτε την επόμενη σελίδα για ένα σημαντικό παράδειγμα μιας περίπτωσης που ΔΕΝ είναι ευθεία).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

### 6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναφέρουμε και θα αναλύσουμε στο σύνολο τους, τρία (3) πειράματα ( **TS01**, **TS02**, **TS03** ) που πραγματοποιήθηκαν σε χώρο μηχανουργείου, προδιαγραφών κλίμακας 2 σε διεθνές σύστημα αξιοποίησης και απόδοσης μηχανολογικών και πειραματικών εξαρτημάτων - υπό βοηθημάτων μηχανικού κλάδου, εντός Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) με ήδη υπάρχουσα πρέσα, άκρως αποδοτική και σχετική με φαινόμενα στρέψης και στρεπτικής τάσης κυρίως σε δοκούς, όπως και στην συγκεκριμένη εργασία. Ιδανικές συνθήκες και θερμοκρασίες δεν μπορούσαν να γίνουν επιτρεπτά λόγω φυσικών περιορισμών και ανθρώπινων παραγόντων.

Αρχικές κινήσεις και σκέψεις όπως θα παρουσιαστούν σε επόμενα υπό κεφάλαια και κεφάλαια, ήταν η επιλογή του μοντέλου που θα υποστεί την στατική δύναμη, η επιλογή φυσικά της στατικής δύναμης, το ή τα υλικά που θα αποτελούν τον βασικό κορμό - σκελετό του μοντέλου, η εισαγωγή ή όχι εξωτερικών υλικών στο μοντέλο και σε τι ποσοστό, οι εξωτερικές συνθήκες που θα επικρατούν πριν, μετά και κατά την διάρκεια του πειράματος ή στο σύνολο των πειραμάτων και τέλος αν και κατά πόσο μπορεί και θα γίνει πραγματική και σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων και η αντίστοιχη επαρκή ερμηνεία τους από τον εκάστοτε μηχανικό είτε επιβλέπων - χειριστή του πειράματος.

Σκοπός των πειραμάτων στην παρούσα εργασία, σε πρώτο χρόνο, είναι να γίνει λήψη όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών που σχετίζονται με τη στρεπτική, κατά κύριο λόγο, συμπεριφορά των ινοπλισμένων συνθετικών υλικών σε συνδυασμό με δοκούς σχήματος «T». Ανάλυση των πληροφοριών μέσω του πειράματος σαν στόχος της εργασίας έγινε διότι μέχρι την συγκεκριμένη χρονική στιγμή (έτος 2023) δεν υπάρχουν αρκετές και ικανοποιητικές πληροφορίες, δεδομένα και έρευνες που να εμφανίζουν την αδιάσπαστη ύπαρξη βοήθειας από το μέρος των συνθετικών υλικών και κυρίως των ινοπλισμένων υλικών σε θέματα μηχανικής και κατά βάση σε κλάδους της μηχανολογίας, της ηλεκτρολογίας και των πολιτικών μηχανικών, ώστε να γίνουν πρώτες σκέψεις όταν τα θέματα αφορούν εισαγωγή υλικών εκτός των κοινών και πολύ - δοκιμασμένων υλικών. Για το λόγο αυτό, πέντε ομάδες δοκιμών διαφορετικών συστάσεων και δομών δοκιμάζονται σε καθαρή στρέψη και τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε συνέχεια της εργασίας.

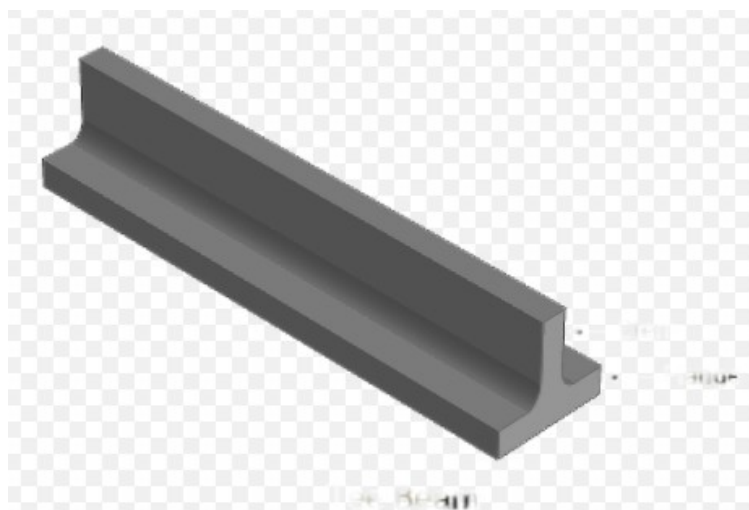
### 6.2 Επιλογή μοντέλου

Ως μοντέλο για το πειραματικό μέρος της έρευνας χρησιμοποιήθηκε δοκός τύπου T. Στο σύνολο και των πέντε πειραμάτων επίσης υπήρχαν δοκοί τύπου T. Οι δοκοί T διαθέτουν μικρό όγκο σκυροδέματος. Επιπλέον, μειώνουν το ύψος του δαπέδου από το δάπεδο, δεδομένου ότι η φλάντζα είναι ήδη μέρος της

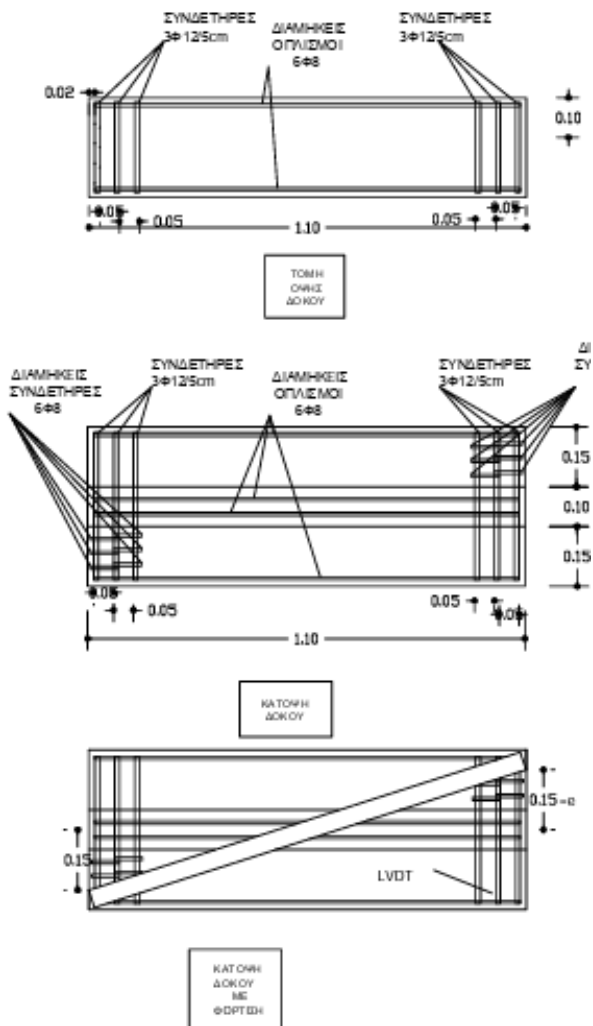


πλάκας. Αυτά τα δύο πράγματα σε συνδυασμό μειώνουν σημαντικά το σκυρόδεμα που απαιτείται για το κτίριο, μειώνοντας τόσο το κόστος όσο και το νεκρό φορτίο της κατασκευής. Αυτός ο τύπος δοκού έχει μεγαλύτερη δεύτερη ροπή αδράνειας σε σύγκριση με τις συμβατικές ορθογώνιες δοκούς, οπότε έχουν μεγαλύτερη ικανότητα να αντιστέκονται αποτελεσματικά στην κάμψη, συνθήκη που βοηθάει τον σκοπό του πειράματος διότι θα υπάρχει χρόνος δράσης - αντίδρασης και από το μέρος της δοκού και από το μέρος της πρέσας και θα μπορούμε να εξάγουμε αποτελέσματα με περισσότερες τιμές. Εφόσον έχει ολοκληρωθεί το μέρος που αφορά την επιλογή του μοντέλου, ως επόμενο βήμα είναι η επιλογή του τύπου της δοκού T. Η δοκός των πειραμάτων είναι συμμετρικού τύπου που σημαίνει ότι έχει συμμετρική διατομή, με τις εκάστοτε φλάντζες της να έχουν ίδιες διαστάσεις καθώς και ο ιστός έχει ίδιες διαστάσεις. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω, το φορτίο που ασκείται ή υπάρχει ήδη κατανέμεται εντελώς ομοιόμορφα μεταξύ των φλαντζών και του ιστού.

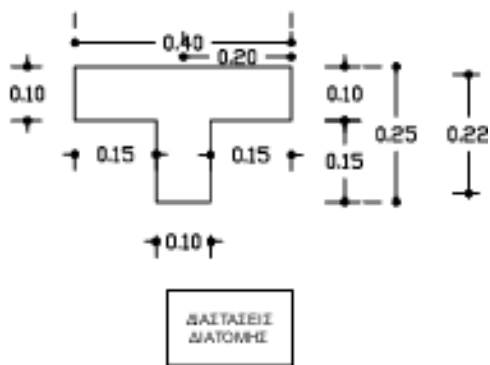
Στην εικόνα 6.2.1 παρουσιάζεται η εξωτερική μορφή της δοκού του πειράματος και στην συνέχεια στις υπόλοιπες εικόνες παρουσιάζονται τα σχέδια της δοκού με τις αντίστοιχες διαστάσεις, τομές και όψεις ώστε να γίνει αντιληπτό στο έπακρον το μοντέλο που επιλέχθηκε και δημιουργήθηκε.



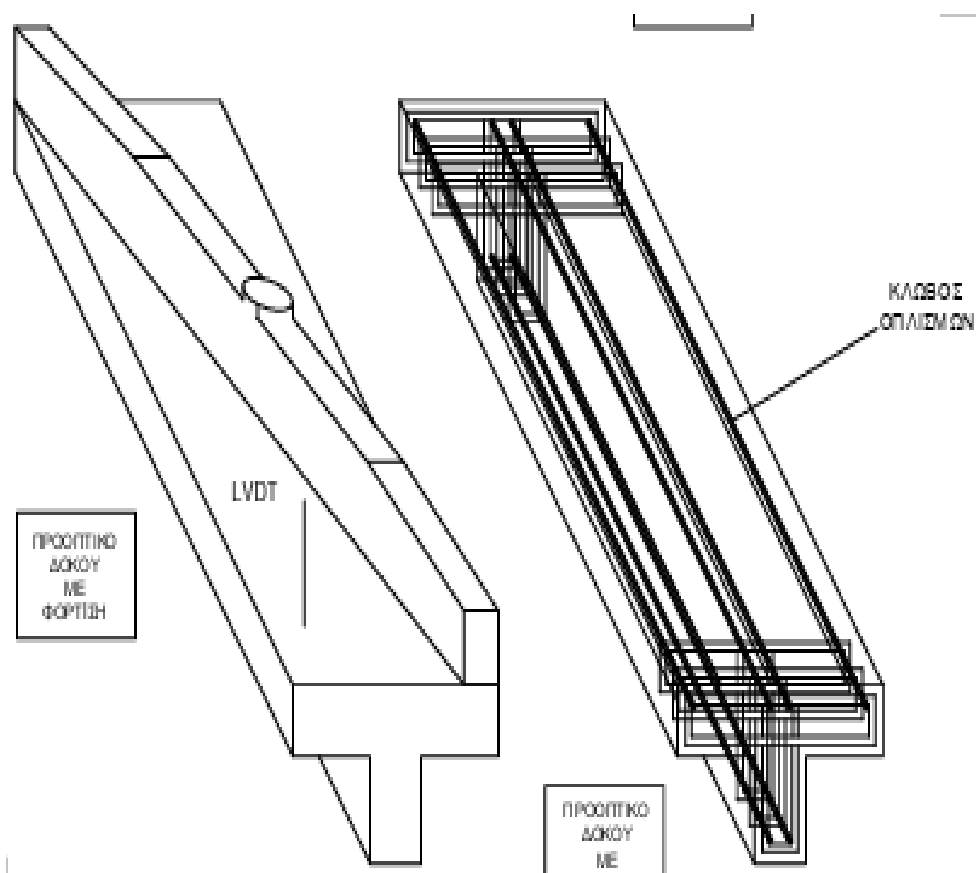
Εικόνα 6.2.1 Εξωτερική μορφή δοκού πειράματος



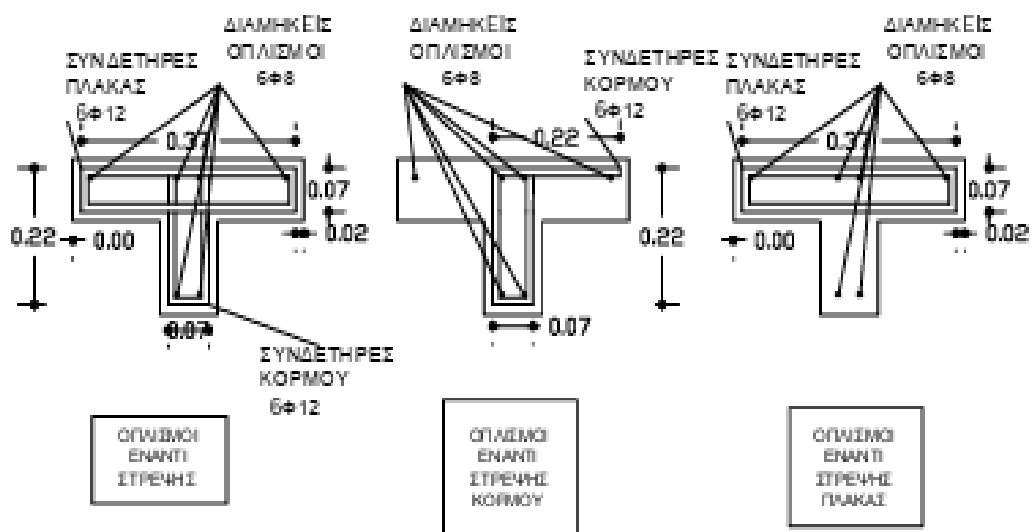
Εικόνα 6.2.2 Τομή, κάτοψη και κάτοψη δοκού με φόρτιση



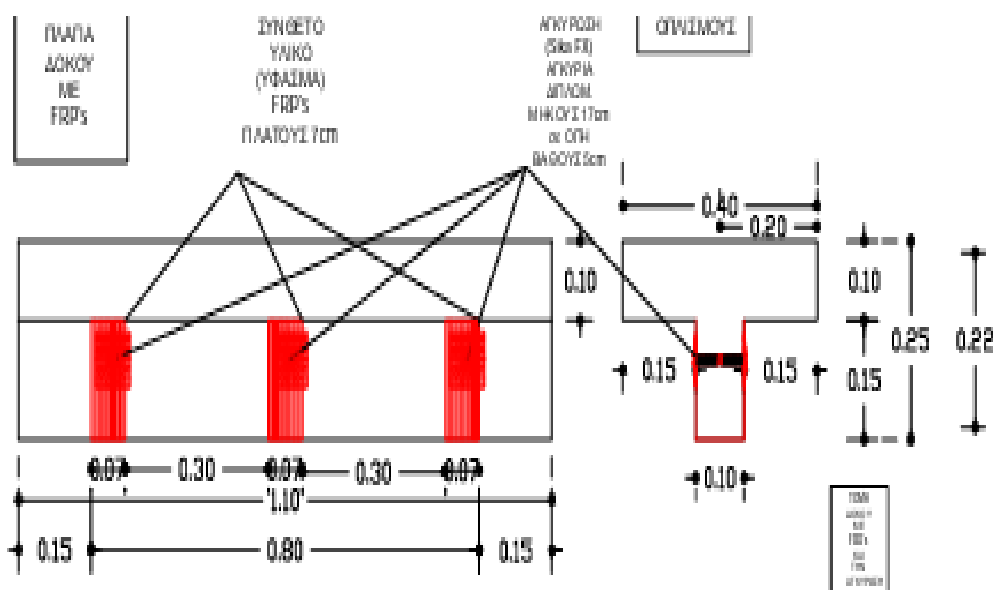
Εικόνα 6.2.3 Διαστάσεις διατομής



Εικόνα 6.2.4 Προσπικτικό δοκού με φόρτιση



Εικόνα 6.2.5 Οπλισμός έναντι στρέψης



Εικόνα 6.2.6 Πλάγια όψη οπλισμένης δοκού

### 6.3 Επιλογή υλικού

Εφόσον το πείραμα που έχουμε αναλάβει ως προς την μελέτη του, έχει αντικείμενο την αντοχή ( ως προς την στρέψη ) σε σχέση με δοκούς όπου χρησιμοποιούνται σε κτήρια, γέφυρες και σε συναφείς δομικές κατασκευές, είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι το γνωστό μπετόν αρμέ ή αλλιώς σκυρόδεμα. Έχοντας ως στόχο να εισάγουμε ινοπλισμένα πολυμερή υλικά, έγινε η επιλογή των παρακάτω υλικών στον σκελετό της δοκού.

- SICADUR -330

Η θιξοτροπική εποξειδική ρητίνη για εμποτισμό και συγκόλληση είναι ένα από τα δύο κύρια συστατικά του προϊόντος SICADUR-330. Χρησιμοποιώντας τεχνική ξηρής εφαρμογής, το προϊόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρητίνη εμποτισμού και αστάρι για το αντίστοιχο σύστημα δομικής ενίσχυσης. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δομικό υλικό συγκόλλησης για το πρωτεύον περίβλημα των διαφορετικών ελασμάτων σε σχισμές, καθώς και ως ρητίνη ασταρώματος για το αντίστοιχο σύστημα δομικών έργων και ενισχύσεων με την τεχνική της υγρής εφαρμογής. Όπως ορίζεται από τα σχετικά κριτήρια σχεδιασμού, το υπόστρωμα πρέπει να είναι σταθερό και να έχει αρκετή αντοχή εφελκυσμού ώστε να παρέχει ελάχιστη αντοχή συγκόλλησης 1 N/mm<sup>2</sup>.

Τα χαρακτηριστικά του υλικού είναι:

- Ευκολία στην ανάμειξη και την εφαρμογή με μυστρί και ρολό εμποτισμού.
- Σχεδιασμένη για τη χειρωνακτική μέθοδο εμποτισμού.

- Εξαιρετική συμπεριφορά εφαρμογής σε κατακόρυφες επιφάνειες και επιφάνειες οροφής.
- Πολύ καλή πρόσφυση σε πολλά διαφορετικά υποστρώματα.
- Υψηλές μηχανικές ιδιότητες.
- Δεν απαιτείται χρήση άλλου υλικού για αστάρωμα.

Παραπάνω πληροφορίες επί του υλικού παρουσιάζονται στον ακόλουθη εικόνα.

<b>Διάρκεια ζωής</b>	24 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής	
<b>Συνθήκες αποθήκευσης</b>	Αποθηκεύστε στην αρχική, κλειστή και σφραγισμένη συσκευασία, σε ξηρές συνθήκες σε θερμοκρασίες μεταξύ +5°C και +30°C. Προστατέψτε το από άμεση ηλιακή ακτινοβολία.	
<b>Πυκνότητα</b>	1,30 ± 0,1 kg/l (μείγμα A+B) (στους +23 °C)	
<b>Ιξώδες</b>	Ρυθμός διάτμησης: 50 /s	
	<b>Θερμοκρασία</b>	<b>Ιξώδες</b>
	+10 °C	~10 000 mPas
	+23 °C	~6 000 mPas
	+35 °C	~5 000 mPas

### ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

<b>Μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη</b>	~ 3 800 N/mm <sup>2</sup> (7 ημέρες στους +23 °C)	(DIN EN 1465)		
<b>Εφελκυστική αντοχή</b>	~ 30 N/mm <sup>2</sup> (7 ημέρες στους +23°C)	(ISO 527)		
<b>Μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό</b>	~ 4 500 N/mm <sup>2</sup> (7 ημέρες στους +23 °C)	(ISO 527)		
<b>Επιμήκυνση θραύσης</b>	<b>0,9 %</b> (7 ημέρες στους +23 °C)	(ISO 527)		
<b>Αντοχή πρόσφυσης σε εφελκυσμό</b>	Θραύση σκυροδέματος (> 4 N/mm <sup>2</sup> ) σε αμμοβολημένο υπόστρωμα	(EN ISO 4624)		
<b>Συντελεστής θερμικής διαστολής</b>	4,5 × 10 <sup>-3</sup> 1/K (Θερμοκρασιακό εύρος -10 °C – +40 °C)	(EN 1770)		
<b>Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης</b>	<b>Χρόνος ωρίμανσης</b> 30 ημέρες	<b>Θερμοκρασία ωρίμανσης</b> +30 °C	<b>TG</b> +58 °C	(EN 12614)
<b>Θερμοκρασία θερμοπλαστικής παραμόρφωσης</b>	<b>Χρόνος ωρίμανσης</b> 7 ημέρες	<b>Θερμοκρασία ωρίμανσης</b> +10 °C	<b>HDT</b> +36 °C	(ASTM D 648)
	7 ημέρες	+23 °C	+47 °C	
	7 ημέρες	+35 °C	+53 °C	
	Ανθίσταται σε συνεχή έκθεση μέχρι τους +45 °C.			
<b>Θερμοκρασία λειτουργίας</b>	-40 °C έως +45 °C			

Εικόνα 6.3.1 Τεχνικές πληροφορίες για το υλικό SIDACUR -330

- SIKAWRAP –230 C

Το ύφασμα από ανθρακονήματα μεσαίας αντοχής, υφασμένο σε μία κατεύθυνση και προοριζόμενο για στεγνή ή υγρή εφαρμογή ονομάζεται SIKAWRAP. Τα προαναφερθέντα μπορούν να ισχύουν μόνο σε περιπτώσεις όπου το απαιτούν τα αντίστοιχα κριτήρια σχεδιασμού υλικού ή όταν το υπόστρωμα πρέπει να είναι σταθερό και να έχει την αντοχή εφελκυσμού ώστε να παρέχει ελάχιστη αντοχή σύνδεσης 1 N/mm<sup>2</sup>. Σκοπός της δομικής ενίσχυσης φέρουσας τοιχοποιίας από οπλισμένο σκυρόδεμα, τοιχοποιία

πλήρωσης και δομικά στοιχεία ξυλείας είναι η αύξηση της φέρουσας ικανότητας σε κάμψη και διάτμηση (στοιχείο που απαιτείται για αυτήν την εργασία).

- Βελτίωση της σεισμικής απόκρισης κατασκευών φέρουσας τοιχοποιίας
- Αναπλήρωση του απαιτούμενου χαλύβδινου οπλισμού
- Αύξηση των αντοχών και της ολκιμότητας των υπό στυλωμάτων
- Αύξηση της φέρουσας ικανότητας των δομικών στοιχείων
- Σχεδιαστικές τροποποιήσεις λόγω αλλαγής χρήσης ή στην κάτοψη - αποκατάσταση
- Διόρθωση αρχικών στατικών σχεδιαστικών ή κατασκευαστικών ατελειών
- Αύξηση της αντίστασης έναντι σεισμικών μετακινήσεων
- Αύξηση του χρόνου ζωής και της ανθεκτικότητας
- Δομική αναβάθμιση για συμμόρφωση με τους εν ισχύ κανονισμούς

Ως χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα του παραπάνω υλικού εισαγωγής στην δοκό ως οπλισμός είναι τα παρακάτω:

- Χρησιμοποιείται η μέθοδος ύφανσης με στημόνι για την σταθεροποίηση κυρίως των ινών με την διαδικασία θερμικής επεξεργασίας
- Πολλαπλής χρήσης ύφασμα για κάθε απαίτηση δομητικής ενίσχυσης
- Εύκαμπτο, δηλαδή που μορφοποιείται ακολουθώντας την γεωμετρία του δομικού μέλους όπως δοκοί, υποστηλώματα, υψικάμινοι, βάθρα και τοίχοι
- Διαθέσιμο σε διαφορετικά πλάτη για διευκόλυνση στην εφαρμογή
- Χαμηλής πυκνότητας για αποφυγή επιπρόσθετου ιδίου βάρους
- Υψηλής οικονομικής απόδοσης συγκρινόμενο πάντα με τις παραδοσιακές τεχνικές ενίσχυσης

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα υπόλοιπα τεχνικά στοιχεία του παραπάνω υλικού.

Διάρκεια ζωής	24 μήνες από την ημερομηνία παραγωγής		
Συνθήκες αποθήκευσης	Αποθηκεύστε στην αρχική, κλειστή και σφραγισμένη συσκευασία, σε ξηρές συνθήκες και σε θερμοκρασίες μεταξύ +5 °C και +35 °C. Προστατέψτε από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία.		
Πυκνότητα ξηρών ινών	1,82 g/cm <sup>3</sup>		
Πάχος ξηρών ινών	0,129 mm (βάσει περιεχομένου ινών)		
Πυκνότητα επιφάνειας	235 g/m <sup>2</sup> ± 10 g/m <sup>2</sup> (αποκλειστικά των ινών άνθρακα)		
Εφελκυστική αντοχή ξηρών ινών	4 000 N/mm <sup>2</sup>		(ISO 10618)
Μέτρο ελαστικότητας ξηρών ινών σε εφελκυσμό	230 000 N/mm <sup>2</sup>		(ISO 10618)
Επιμήκυνση θραύσης ξηρών ινών	1,7 %		(ISO 10618)

## ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ

Ονομαστικό πάχος φύλλου	0,129 mm		
Ονομαστική διατομή φύλλου	129 mm <sup>2</sup> ανά μέτρο πλάτους		
Εφελκυστική αντοχή φύλλου	Μέση	Χαρακτηριστική	(EN 2561*)
	3 500 N/mm <sup>2</sup>	3 200 N/mm <sup>2</sup>	(ASTM D 3039*)
Μέτρο ελαστικότητας φύλλων σε εφελκυσμό	Μέση	Χαρακτηριστική	(EN 2561*)
	225 kN/mm <sup>2</sup>	220 kN/mm <sup>2</sup>	
	Μέση	Χαρακτηριστική	(ASTM D 3039*)
	220 kN/mm <sup>2</sup>	210 kN/mm <sup>2</sup>	
* τροποποίηση: δείγμα πλάτους 50 mm Οι τιμές ελήφθησαν κατά τη διαμήκη διεύθυνση των ινών Μονή στρέψη, κατ' ελάχιστο 27 δείγματα ανά σειρά δοκιμής			
Επιμήκυνση θραύσης φύλλων	1,56 %		(βάσει EN 2561)
	1,59 %		(βάσει ASTM D 3039)
Αντοχή σε εφελκυσμό	Μέση	Χαρακτηριστική	(βάσει EN 2561)
	452 kN/m	413 kN/m	(βάσει ASTM D 3039)
Εφελκυστική ακαμψία	Μέση	Χαρακτηριστική	(βάσει EN 2561)
	29,0 MN/m	28,4 MN/m	
	29,0 kN/m ανά % επιμήκυνση	28,4 kN/m ανά % επιμήκυνση	
	Μέση	Χαρακτηριστική	(βάσει ASTM D 3039)
	28,4 MN/m	27,1 MN/m	
	28,4 kN/m ανά % επιμήκυνση	27,1 kN/m ανά % επιμήκυνση	

Εικόνα 6.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά υλικού εισαγωγής σε δοκό πειράματος SIKAWRAP –230C

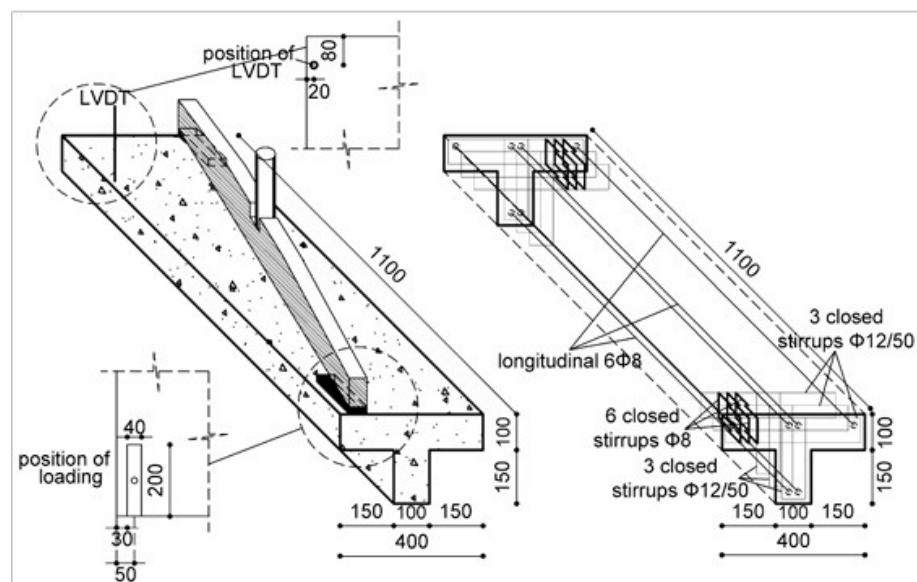
## 6.4 Μέθοδος, επεξήγηση και εκκίνηση πειράματος

Η πειραματική έρευνα περιλαμβάνει πέντε ομάδες δοκιμών που δοκιμάστηκαν υπό καθαρή στρέψη. Δύο ενδεικτικά δοκίμια χωρίς υφάσματα ινοπλισμένων πολυμερών υλικών FRP (σημειωμένα ως TV01 και TV02) αναφέρθηκαν ως δοκίμια ελέγχου και τρία ενδεικτικά δοκίμια αναφέρθηκαν ως ενισχυμένα με

χρήση εποξειδικά συνδεδεμένων ανθρακούχων υλικών FRP ως εξωτερικός εγκάρσιος οπλισμός και σημειώθηκαν ως TS01, TS02, TS03.

#### 6.4.1. Χαρακτηριστικά δοκιμίων και διάταξη δοκιμής

Η διαμόρφωση των δοκών αποτελούνταν από διατομή σχήματος T με πλάτος  $b_w = 100 \text{ mm}$ , ύψος  $h = 250 \text{ mm}$ , αποτελεσματικό πλάτος  $b_{eff} = 400 \text{ mm}$  και βάθος φλάντζας  $h_f = 100 \text{ mm}$ . Το συνολικό μήκος των δοκών ήταν  $1100 \text{ mm}$ . Η φόρτιση εφαρμόζόταν μέσω μιας πλάκας στις απέναντι φλάντζες της δοκού. Χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά στηρίγματα, έτσι ώστε τα δοκίμια να είναι ελεύθερα να στρέφονται (Εικόνα 6.4.1.1).



Εικόνα 6.4.1.1 Στρέψη δοκού πειράματος

Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε χυτοσιδηρό σκυρόδεμα επί τόπου. Ο διαμήκης και ο εγκάρσιος οπλισμός όλων των δοκιμαζόμενων δοκών ήταν ο ίδιος. Δύο ράβδοι οπλισμού διαμέτρου 8 mm τοποθετήθηκαν στην κορυφή, ομοίως δύο στο κάτω μέρος του και δύο ακόμη ράβδοι οπλισμού της ίδιας διαμέτρου στην άνω φλάντζα, δηλαδή συνολικά τοποθετήθηκαν έξι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού σε όλη την δοκό. Ο εγκάρσιος οπλισμός ήταν τρεις κλειστοί αναβολείς στο πέλαμα και τη φλάντζα διαμέτρου 12 mm σε απόσταση 50 mm σε κάθε άκρο της δοκού. Οι εικόνες που παρατίθενται (Εικόνα 6.4.1.2, Εικόνα 6.4.1.3 και 6.4.1.4) τραβήχτηκαν κατά την διάρκεια πραγματοποίησης του πειράματος. Ημερομηνίες ορόσημα αποτελούν οι 15/2/2023, 20/2/2023 και 23/5/2023 που κατασκευάστηκαν στο εργαστήριο-μηχανουργείο τα δοκίμια TS01, TS02 και TS03 αντίστοιχα.





Εικόνα 6.4.1.2 Κατασκευή δοκιμίου TS01(15/2/2023)

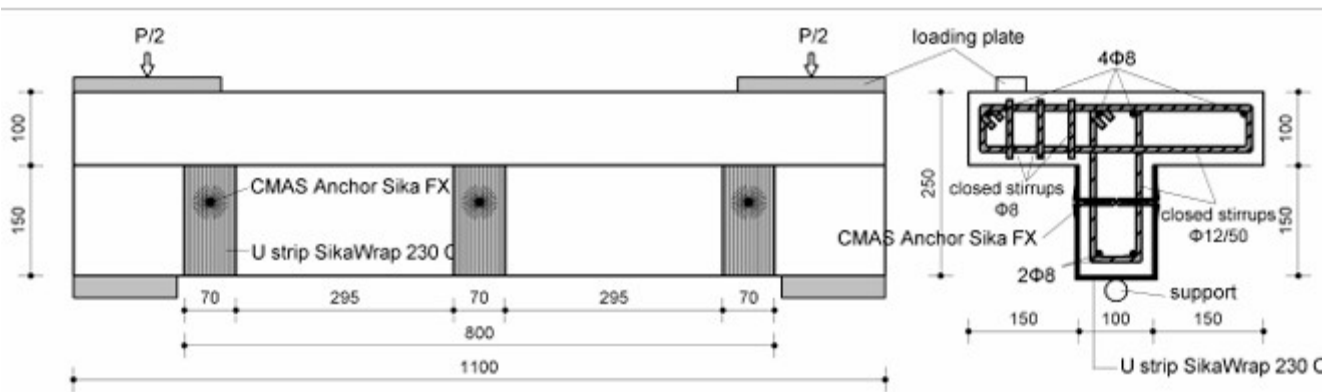


Εικόνα 6.4.1.3 Κατασκευή δοκιμίου TS02(20/2/2023)



Εικόνα 6.4.1.4 Κατασκευή δοκιμίου TS03 (25/2/2023)

Επιπλέον, στη φλάντζα και σε κοντινή απόσταση εφαρμόζεται η φόρτιση, προκειμένου να αποφευχθεί η διατμητική αστοχία της πλάκας, τοποθετήθηκαν κλειστοί αναβολείς διαμέτρου 8 mm σε αποστάσεις 50 mm, κατά τη διαμήκη διεύθυνση της δοκού, όπως φαίνεται άλλωστε και στην εικόνα 6.4.1.5.



Εικόνα 6.4.1.5 Σχέδια με ταινία επίστρωσης SIKAWRAP

Για την ενίσχυση των δοκών που δοκιμάστηκαν, οι λωρίδες U από FRP τυλίχθηκαν στο κάτω μέρος και στις πλευρές του ιστού. Το πλάτος των λωρίδων ήταν 70 mm, τοποθετημένες σε απόσταση 150 mm από κάθε άκρο της δοκού και στη μέση της δοκού, όπως φαίνεται στις εικόνες (6.4.1.6 και 6.4.1.7). Για την αγκύρωση των λωρίδων χρησιμοποιήθηκαν τούφες από ανθρακονήματα SikaWrap FX.



Εικόνα 6.4.1.6 Τοποθέτηση λωρίδων FRP



Εικόνα 6.4.1.7 Δοκίμιο μετά την τοποθέτηση του FRP

Προκειμένου να αποφευχθεί η αποκόλληση των άκρου των υφασμάτων και της σημαντικής μείωσης της συνολικής αντοχής του μέλους, δημιουργήθηκε μια ενσωματωμένη ακραία αγκύρωση με τη χρήση αγκυρίων SikaWrap FX. Το ένα τμήμα του SikaWrap FX επικολλήθηκε σε οπές που είχαν προηγηθεί στο υπόστρωμα και το άλλο μέρος απλωνόταν σε σχισμές που είχαν κοπεί στην επιφάνεια του σκυροδέματος.

Με την εφαρμογή αυτής της προσέγγισης, το υπόστρωμα και το δομική σύνδεση ενισχύονται αμφότερα, με αποτέλεσμα τη σημαντική ενίσχυση της αντίστασης του συστήματος στην αποκόλληση.

Για κάθε ομάδα δοκών χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μίγματα σκυροδέματος. Η μέση αντοχή σε θλίψη 28 ημερών του κύβου σκυροδέματος κυμάνθηκε από 14,5 MPa για την 1η ομάδα δοκών ελέγχου (TV01) έως 37,5 MPa για τη 2η ομάδα δοκών ελέγχου δοκών (TV02), ενώ για την ομάδα των ενισχυμένων δοκών επιτεύχθηκε 19,5 MPa για την 3η ομάδα δοκών (TS01), 27,5 MPa για την 4η ομάδα δοκών (TS02) και 34,7 MPa για την 5η ομάδα δοκών (TS03). Οι σπλισμοί υποβλήθηκαν σε δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού για την αξιολόγηση των παραμέτρων τους. Το μέτρο ελαστικότητας Young βρέθηκε ίσο με 189 GPa., ενώ η τάση διαρροής και η τάση διαρροής ήταν 528 MPa και 643 MPa, αντίστοιχα.

Το SikaWrap 230 C, ένα υφαντό ύφασμα από ανθρακονήματα μιας κατεύθυνσης για τη διαδικασία ξηρής εφαρμογής, χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωση των μανδύων U από FRP. Ο προσανατολισμός των ισχυρών ινών ήταν κάθετος στον διαμήκη άξονα της δοκού. Το Sikadur -330 εφαρμόστηκε ως ρητίνη εμποτισμού μεταξύ FRP και σκυροδέματος. Για το ξηρό ύφασμα SikaWrap 230C, όπως δόθηκε από τον προμηθευτή, το μέτρο ελαστικότητας Young είναι 225 GPa, η αντοχή σε εφελκυσμό είναι 30 MPa.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Έχοντας πραγματοποιήσει πειράματα στα τρία δοκίμια-δοκούς που είχαν ενισχυθεί με υλικά FRP προκύπτουν και τα αντίστοιχα αποτελέσματα όπως θα αναλυθούν πιο κάτω συνοδευόμενα με το κατάλληλο φωτογραφικό υλικό που είχε τραβηχτεί στο εργαστήριο καθ' όλη την διάρκεια των δοκιμών. Πρόκειται ουσιαστικά για (3) πειράματα όσα δηλαδή ήταν και τα ενισχυμένα δοκίμια.

**Στο 1<sup>ο</sup> πείραμα** που πραγματοποιήθηκε έχουμε τα εξής:

Πρόκειται για πλακοδοκό με σκυρόδεμα (C15.58/19.47) με κωδικό όνομα «TS01» , το πείραμα πραγματοποιήθηκε στις 15/2/2023. Ενεργήθηκε η φόρτιση μέσω μιας πλάκας στις απέναντι φλάντζες της δοκού και χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά στηρίγματα, έτσι ώστε τα δοκίμια να είναι ελεύθερα να στρέφονται (Εικόνα 6.4.1.8).



Εικόνα 6.4.1.8 Εφαρμογή φορτίου πάνω σε δοκό (TS01)

Όπως αποδεικνύεται και στις παρακάτω φωτογραφίες (Εικόνα 6.4.1.9. και 6.4.1.10) μετά την εφαρμογή της φόρτισης έχουν δημιουργηθεί ρηγματώσεις στην δοκό.



Εικόνα 6.4.1.9 Κατάσταση δοκού μετά την εφαρμογή φορτίου (δοκίμιο TS01)



Εικόνα 6.4.1.10 Αστοχία δοκιμίου TS01 έπειτα από φόρτιση (1<sup>ο</sup> πείραμα)



0,015		f <sub>yk</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	3500000	TS01/15-2-2023				
9,03E-06	η/ε αρμόζ των στρώσεων FRP	μήτρο πλάτος της λωρίδας FRP (m)	επιμέγεθος κάθε στρώσης (m)					
225000000	1	0,07	0,000129	Δοκίμιο	Διαστάσεις (mm)	Ενδειξη Φορτίου (kN)	Έξοδος θρούσεως (MPa)	
90	(deg) → (μm)	1,570796327		No.1 Δοκίμιο	150x150	427kN	18,97	
0,295				No.2 Δοκίμιο	150x150	457kN	20,31	→ f <sub>ck</sub> (θλιπτική αντοχή κύβου)(MPa)= 19,4767
0,0039918	←	ε/σ <sub>0</sub> =(ε/σ <sub>max</sub> *k)/γ <sub>α</sub>		No.3 Δοκίμιο	150x150	431kN	19,15	
0,3991808		k	0,8					
		γ <sub>α</sub>	1,3					
0,8247821								
23,581333	f <sub>yk</sub> (θλιπτική αντοχή κυλινδρού)(MPa)	15,58133333						
225								
0,0111888	ε/σ <sub>0</sub> (χαρακτηριστική τιμή σχεδιασμού της παρουρούμενης βλάβης)(MPa)	0,014545455	ε/σ <sub>0</sub> (χαρακτηριστική εσθκ. Αντοχή)(GPa)	3,2				
	γ <sub>α</sub> (ο συντελεστής ασφαλείας για ίνες άνθρακα)	1,3	Ε/σ <sub>0</sub> (χαρακτηριστικό μέτρο ελαστικότητας FRP)(GPa)	220				
0,0006122	επιμέγεθος κάθε στρώσης (m)	0,000129	επιμέγεθος λωρίδας (m)	0,07				
	επιμέγεθος διατομής (m)	0,1	σ/επιτόσημα λωρίδων (m)	0,295				

Εικόνα 6.4.1.13 Υπολογισμός μεγέθους f<sub>ck</sub> (θλιπτική αντοχή κύβου) κατά το 1<sup>ο</sup> πείραμα

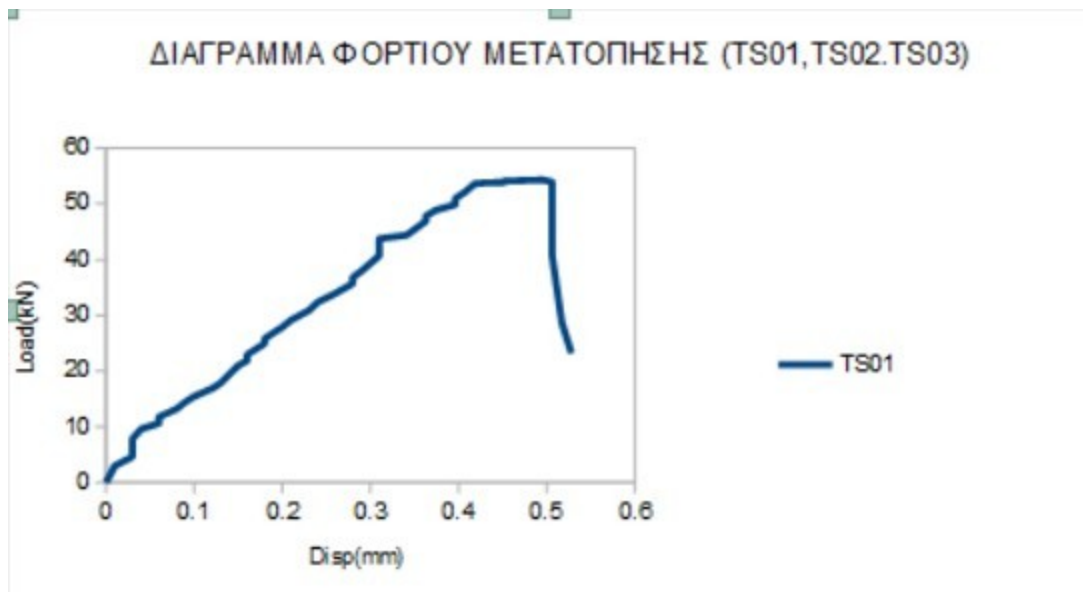
Από τον υπολογισμό προκύπτει ότι η θλιπτική αντοχή κατά την διάρκεια διεξαγωγής του 1<sup>ου</sup> πειράματος ισούται με **19,47 (MPa)**.



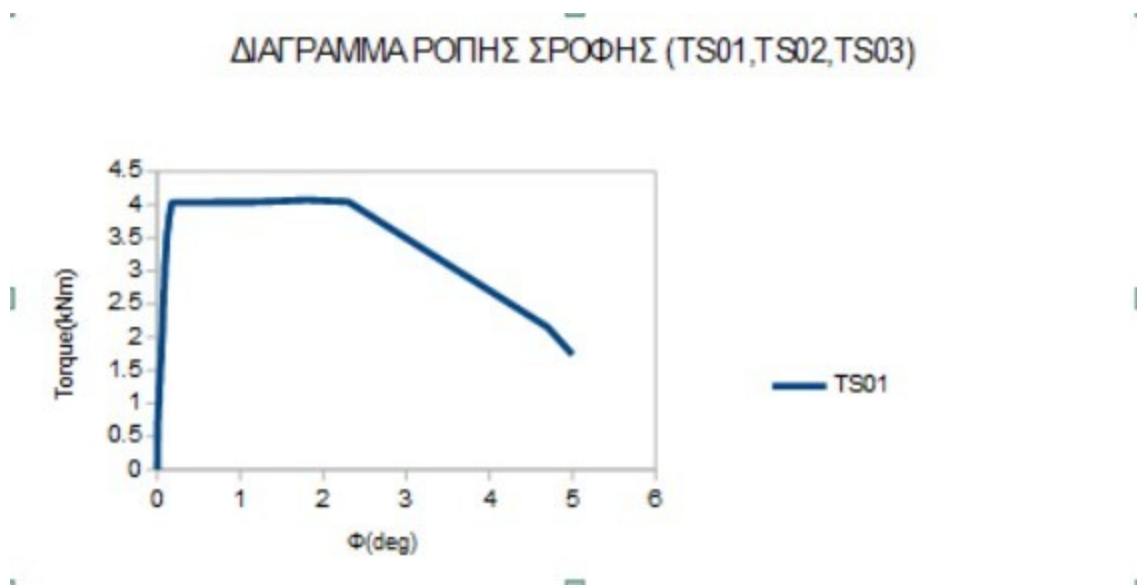
TS01				TS02				TS03			
Disp (mm)	Load (kN)	Torque(kN·m)	Φ(deg)	Disp (mm)	Load (kN)	Torque(kN·m)	Φ(deg)	Disp (mm)	Load (kN)	Torque(kN·m)	Φ(deg)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	2.99	0.22425	0.004	0.04	1.96	0.147	0.015	0.04	1.7	0.1275	0.003
0.03	4.83	0.34725	0.004	0.04	2.35	0.17825	0.026	0.07	3.71	0.27825	0.06
0.03	5.78	0.4335	0.004	0.05	4.97	0.37275	0.035	0.09	5.8	0.435	0.43
0.03	6.95	0.52125	0.005	0.06	19.3	1.4475	0.037	0.09	6.85	0.51375	0.566
0.03	7.57	0.59025	0.005	0.06	20.31	1.52325	0.039	0.09	7.87	0.59025	0.718
0.04	9.62	0.7215	0.005	0.06	21.31	1.59825	0.052	0.09	8.91	0.66825	0.805
0.06	10.84	0.798	0.013	0.06	22.36	1.677	0.059	0.09	9.94	0.7455	0.866
0.06	11.77	0.88275	0.013	0.06	23.4	1.755	0.064	0.09	10.96	0.822	0.935
0.08	13.2	0.99	0.018	0.06	24.47	1.83525	0.069	0.09	11.99	0.89925	0.988
0.09	14.48	1.0645	0.025	0.06	25.47	1.91025	0.074	0.09	13.03	0.97725	1.031
0.1	15.48	1.1595	0.025	0.06	26.49	1.98875	0.077	0.09	14.06	1.0645	1.088
0.12	16.85	1.26375	0.026	0.06	27.6	2.07	0.077	0.09	15.08	1.131	1.135
0.13	17.87	1.34025	0.033	0.06	28.65	2.14875	0.082	0.09	16.12	1.209	1.178
0.14	19.47	1.46025	0.035	0.06	29.5	2.235	0.082	0.09	17.15	1.28625	1.23
0.15	20.99	1.57425	0.041	0.06	30.93	2.31975	0.085	0.09	18.19	1.36425	1.26
0.16	21.89	1.64175	0.046	0.06	31.95	2.39825	0.087	0.09	19.22	1.4415	1.295
0.16	22.93	1.71975	0.051	0.06	32.94	2.4705	0.09	0.09	20.24	1.518	1.32
0.17	23.95	1.79825	0.051	0.06	33.98	2.5485	0.087	0.09	21.24	1.593	1.35
0.18	24.96	1.872	0.051	0.06	35	2.625	0.094	0.09	22.27	1.67025	1.375
0.18	25.83	1.93725	0.056	0.06	36.05	2.70375	0.094	0.09	23.36	1.752	1.401
0.2	27.9	2.0925	0.063	0.06	37.09	2.78175	0.094	0.09	24.38	1.8285	1.426
0.21	29.16	2.187	0.065	0.06	38.1	2.8575	0.1024	0.09	25.38	1.9035	1.448
0.23	30.87	2.31525	0.07	0.06	39.7	2.9775	0.11374	0.09	26.38	1.9785	1.471
0.24	32.36	2.427	0.07	0.06	40.72	3.054	0.125114	0.09	27.41	2.05575	1.493
0.26	33.92	2.544	0.078	0.06	41.94	3.1455	0.1376254	0.09	28.5	2.1375	1.515
0.28	35.75	2.68125	0.078	0.06	42.04	3.163	0.1513879	0.09	29.54	2.2155	1.545
0.28	36.84	2.763	0.086	0.06	43.64	3.273	0.1665267	0.09	30.57	2.29275	1.565
0.29	37.99	2.84925	0.086	0.06	45.01	3.37575	0.1831784	0.09	31.57	2.36775	1.581
0.3	39.38	2.952	0.091	0.06	46.01	3.45075	0.2014973	0.09	32.57	2.44275	1.6
0.31	40.74	3.0555	0.091	0.06	47.14	3.5355	0.2216471	0.09	33.62	2.5215	1.621
0.31	42.17	3.16275	0.1	0.07	48.83	3.66225	0.2438118	0.09	34.62	2.5965	1.635
0.31	43.75	3.28125	0.106	0.07	50.09	3.75675	0.268193	0.09	35.71	2.67825	1.651
0.341	44.41	3.33075	0.108	0.08	51.09	3.83175	0.2950123	0.09	36.69	2.75175	1.67
0.352	45.67	3.42625	0.111	0.09	51.9	3.8925	0.3245135	0.09	37.71	2.82825	1.691
0.363	46.95	3.52125	0.115	0.09	53.05	3.97875	0.35689648	0.09	38.71	2.90325	1.708
0.363	47.84	3.588	0.121	0.11	54.71	4.10325	0.3926613	0.09	39.72	2.979	1.725
0.374	48.89	3.66675	0.133	0.11	55.84	4.188	0.4319275	0.09	40.76	3.057	1.743
0.396	49.89	3.74175	0.138	0.12	57.05	4.281	0.4751202	0.09	41.79	3.13425	1.776
0.396	50.96	3.822	0.143	0.13	58.79	4.40925	0.5226322	0.09	42.79	3.20925	1.793
0.407	52.11	3.90825	0.16	0.13	59.92	4.494	0.5748955	0.09	43.83	3.28725	1.816
0.418	53.83	4.02225	0.173	0.14	60.96	4.572	0.632385	0.09	44.88	3.3645	1.838
0.428	55.78	4.0335	0.18	0.14	62.76	4.707	0.6966235	0.11	45.84	3.438	1.866
0.451	53.9	4.0425	1.18	0.15	63.76	4.782	0.7651858	0.11	46.86	3.5145	1.888
0.451	54.09	4.05675	1.5	0.16	64.89	4.86875	0.8417044	0.12	47.86	3.5895	1.915
0.495	54.33	4.07475	1.8	0.16	65.96	4.947	0.9258749	0.12	48.89	3.66675	1.933
0.506	53.95	4.04625	2.3	0.16	67.81	5.08575	1.1203086	0.13	49.91	3.74325	1.958
0.506	40.7	3.0525	3.56	0.16	68.54	5.1405	1.2323395	0.13	50.94	3.8205	1.983
0.517	25.71	2.15325	4.7	0.18	66.23	4.96725	2.5	0.14	51.9	3.8925	2.006
0.528	23.19	1.73925	5	0.19	48.23	3.61725	4.3	0.14	52.92	3.969	2.035
				0.21	34.98	2.6235	5	0.17	53.92	4.044	2.07
								0.17	54.9	4.1175	2.091
								0.17	55.93	4.19475	2.108
								0.17	56.93	4.26975	2.136
								0.17	57.95	4.34825	2.175
								0.17	58.91	4.41825	2.208
								0.18	59.92	4.494	2.243
								0.18	60.88	4.566	2.288
								0.18	61.94	4.6455	2.311
								0.18	62.99	4.72425	2.356

Εικόνα 6.4.1.14 Υπολογισμοί μεγεθών φορτίων-μετατόπισης-ροπής-στροφής

Ταυτόχρονα με το πείραμά μας από τις μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο προέκυψαν τιμές που δείχνουν πως εξελίσσονται οι τιμές των φορτίων της μετατόπισης της ροπής και της στροφής κατά την διάρκεια φόρτισης της πλακοδοκού στο 1<sup>ο</sup> πείραμα. Οι τιμές αυτές καταγράφηκαν σε ένα φύλλο excel και με βάσει αυτές προέκυψαν τα διαγράμματα που απεικονίζουν την σχέση ανάμεσα στα φορτία και τη μετατόπιση (Διάγραμμα 6.4.1) και στη ροπή με την στροφή (Διάγραμμα 6.4.2).



Διάγραμμα 6.4.1 Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (1<sup>ο</sup> πείραμα)



Διάγραμμα 6.4.2 Διάγραμμα ροπής στρόφης (1<sup>ο</sup> πείραμα)

Προχωρώντας στο **2<sup>ο</sup> πείραμα** που πραγματοποιήθηκε (20/2/2023), πρόκειται και πάλι για πλακοδοκό με σκυρόδεμα διαφορετικής σύστασης (C 21,97/27.47) με κωδικό όνομα «TS02». Ενεργήθηκε και πάλι η φόρτιση μέσω μιας πλάκας στις απέναντι φλάντζες της δοκού και χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά στηρίγματα, έτσι ώστε τα δοκίμια να είναι ελεύθερα να στρέφονται (Εικόνα 6.4.1.15).



Εικόνα 6.4.1.15 Εφαρμογή φορτίου σε πλακοδοκό (TS02) 2ο πείραμα 20/2/2023

Αποτελέσματα αυτής της φόρτισης γίνονται ορατά μέσω των φωτογραφιών που τραβήχτηκαν κατά την διεξαγωγή του 2<sup>ου</sup> πειράματος.



Εικόνα 6.4.1.16 Αποτελέσματα άσκησης φορτίου σε πλακοδοκό (TS02)



Εικόνα 6.4.1.17 Ρηγματώσεις που προκλήθηκαν στην πλακοδοκό (TS02)



Εικόνα 6.4.1.18 Τελική κατάσταση δοκιμίου μετά τη φόρτιση κατά το 2<sup>ο</sup> πείραμα

Η γωνία στρέψης παραμένει ίδια και στο 2<sup>ο</sup> πείραμα ( $\theta=21,8^\circ$ ) όπως και οι διαμήκεις οπλισμοί όπως είχαμε δει και πιο πάνω κατά το στάδιο της κατασκευής των δοκιμίων ( $f_y=520\text{MPa}$ ) . Ωστόσο, παρατηρούμε ότι μεγαλώνουν οι τιμές των ροπών διαμήκων οπλισμών ( $T_{Asl}$ ) και των ροπών του σκυροδέματος ( $T_c$ ) και κατά συνέπεια μεγαλώνει και η τιμή της συνολικής ροπής στρέψης **5,1174kNm** η οποία ισούται με το άθροισμα των άλλων δύο (Εικόνα 6.4.1.19).

**ΠΛΑΚΟΔΟΚΟΣ ( TS02/20-02-2023 )**  
**ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ( C 21.97/27.47 )**

$$v=0.7*(0.7-f_{cd}/200) , f_{cd}=21.97\text{MPa} , \theta=21.8^\circ$$

$$TRd1=T_c=2*v*a*f_{cd}*A_k*tef*\sin\theta*\cos\theta = 2*(0.4130)*(1)*(21.97*10^3)*(0.0137)*(0.0357)*\sin 21.8^\circ*\cos 21.8^\circ = \mathbf{3.0621kNm}$$

**ΔΙΑΜΗΚΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΟΙ (  $f_y=520\text{MPa}$  )**

$$TRd3=T_{Asl}=\{(Asl*2*A_k*f_{yd})/U_k\}*tan\theta = \{(200.96*10^{(-6)}*2*0.0137*520*1000)/0.5572\}*tan 21.8^\circ = \mathbf{2.0553kNm}$$

Συνολική Ροπή Στρέψης της Μη ενισχυμένης δοκού TS01/15-02-2023 είναι :  
**Τμη ενισχ.δοκ.=  $T_c + T_{Asl} = \mathbf{5.1174kNm}$**

Εικόνα 6.4.1.19 Υπολογισμός ροπής στρέψης δοκού TS02 (2<sup>ο</sup> πείραμα)

TS02/20-2-2023		TS02/20-2-2023	
$T_{c2}$ (Ροπή σκυροδέματος)(kNm)= $2 \cdot v \cdot a \cdot f_{cd} \cdot 2 \cdot A_k \cdot t_e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$	3,062162598	$T_{c2}$ (Ροπή σκυροδέματος)(kNm)= $2 \cdot v \cdot a \cdot f_{cd} \cdot 2 \cdot A_k \cdot t_e \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta$	3,062162598
$T_{As12}$ (Ροπή διαμήκων οπλισμών)(kNm)= $[(A_s l^2 \cdot 2 \cdot A_k \cdot f_{yd}) / U_k] \cdot \tan \theta$	2,055329371	$T_{As12}$ (Ροπή διαμήκων οπλισμών)(kNm)= $[(A_s l^2 \cdot 2 \cdot A_k \cdot f_{yd}) / U_k] \cdot \tan \theta$	2,055329371
$T_{fd2}$ = $((2 \cdot A_o \cdot A_r \cdot E_r \cdot \epsilon_{fde}) / s) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)$ (kNm)	1,977887875	$T_{fd2}$ = $((2 \cdot A_o \cdot A_r \cdot E_r \cdot \epsilon_{fde}) / s) \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha)$ (kNm)	1,977887875
Τενισχυμένης δοκού2=( $T_{c2} + T_{As12} + T_{fd2}$ )(kNm)	7,095379844	Τενισχυμένης δοκού2=( $T_{c2} + T_{As12} + T_{fd2}$ )(kNm)	7,095379844
(P/2)=(Τενισχυμένη)(e)(kN)	47,3025323	(P/2)=(Τενισχυμένη)(e)(kN)	47,3025323
Τμη ενισχυμένης δοκού2=( $T_{c2} + T_{As12}$ )(kNm)	5,11749197		
(P/2)=(Τμη ενισχυμένη)(e)(kN)	34,11661313		

Εικόνα 6.4.1.20 Υπολογισμός μεγεθών  $T_c$ ,  $T_{fd}$ ,  $T$  μη ενισχυμένης δοκού κατά το 2<sup>ο</sup> πείραμα

23	sl(απόσταση λωρίδων)(m)	0,295						
24								
25			TS02/20-2-2023					
26								
27		0,006805685						
28								
29		3500000						
30			TS02/20-2-2023					
31	tt(πόχος κάθε στρώσης)(m)	0,000129	Δοκίμιο	Διαστάσεις(mm)	Ενδειξη Φορτίου(kN)	Ίσση Θραύσεως(MPa)		← είναι οι αντοχές των δοκιμών σκυροδέματος της σκυροδέτησης της 2ης Πλακοδοκού τ
32			No.1 Δοκίμιο	150x150	623kN	27,68		
33			No.2 Δοκίμιο	150x150	616kN	27,37	→	$f_{ck}$ (θλιπτική αντοχή κύβου)(MPa)= 27,4733 → Άρα είναι κατηγορίας C(21,97/27,47)
34			No.3 Δοκίμιο	150x150	616kN	27,37		
35		0,8						
36		1,3						
37								
38								
39								
40								
41								
42								

Εικόνα 6.4.1.21 Υπολογισμός θλιπτικής αντοχής κύβου  $f_{ck}$  κατά το 2<sup>ο</sup> πείραμα

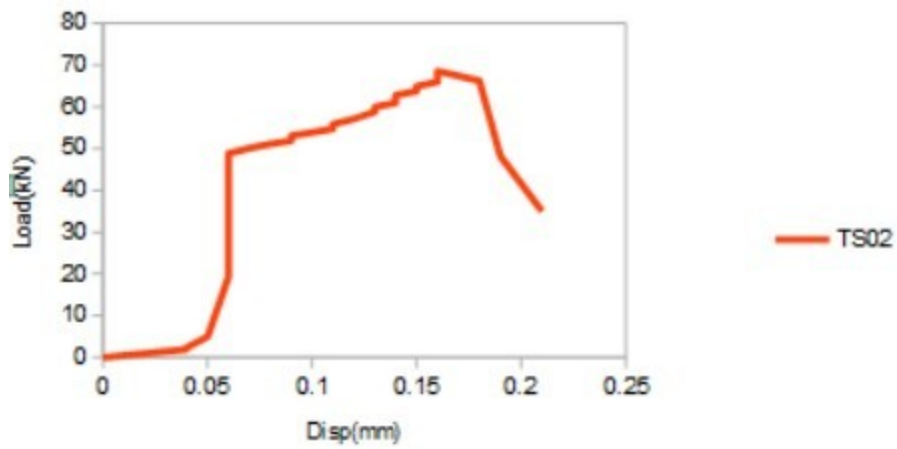
Η τιμή της θλιπτικής αντοχής ( $f_{ck}$ ) κατά το 2<sup>ο</sup> πείραμα άλλαξε και σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έγιναν βρέθηκε ότι είναι ίση με 27,47MPa.

Όπως και στο 1<sup>ο</sup> πείραμα έτσι και στο 2<sup>ο</sup> ταυτόχρονα με τις δοκιμές έγιναν μετρήσεις στο εργαστήριο και προέκυψαν τιμές που δείχνουν πως εξελίσσονται οι τιμές των φορτίων της μετατόπισης της ροπής και της στροφής κατά την διάρκεια φόρτισης της πλακοδοκού. Οι τιμές αυτές καταγράφηκαν σε ένα φύλλο excel και με βάσει αυτές προέκυψαν τα διαγράμματα που απεικονίζουν την σχέση ανάμεσα στα φορτία και τη μετατόπιση (Διάγραμμα 6.4.3) και στη ροπή με την στροφή (Διάγραμμα 6.4.4).

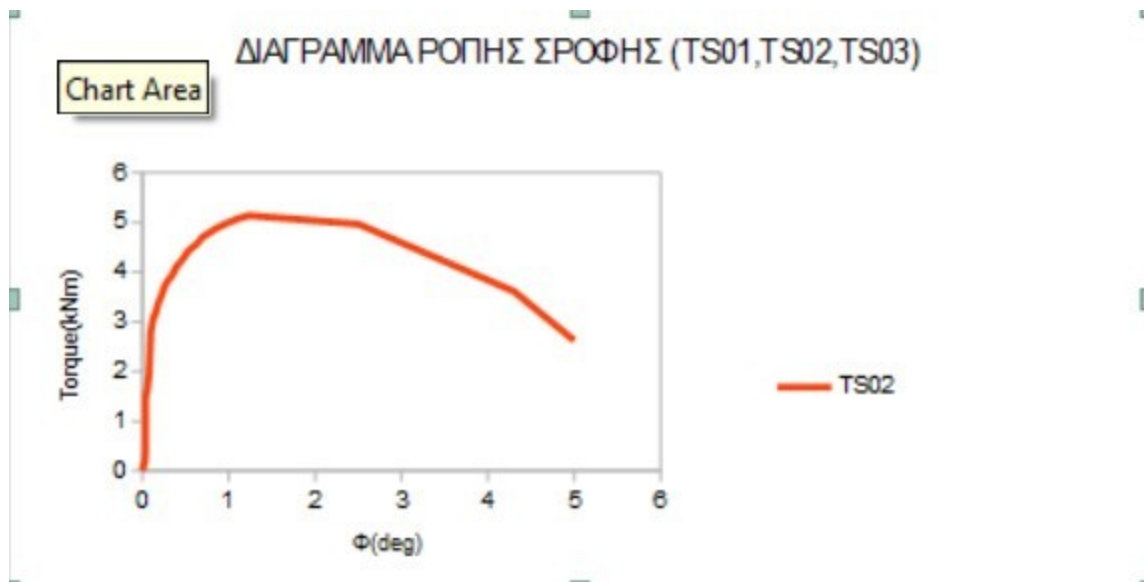
Disp (mm)	Load (kN)	Torque(kNm)	$\Phi$ (deg)
0	0	0	0
0,04	1,98	0,147	0,015
0,04	2,35	0,17625	0,026
0,05	4,57	0,37275	0,035
0,06	19,3	1,4475	0,037
0,06	20,31	1,52325	0,039
0,06	21,31	1,59825	0,052
0,06	22,38	1,677	0,059
0,06	23,4	1,755	0,064
0,06	24,47	1,83525	0,069
0,06	25,47	1,91025	0,074
0,06	26,49	1,98675	0,077
0,06	27,8	2,07	0,077
0,06	28,65	2,14875	0,082
0,06	29,8	2,235	0,082
0,06	30,93	2,31975	0,085
0,06	31,95	2,39825	0,087
0,06	32,94	2,4705	0,09
0,06	33,98	2,5485	0,097
0,06	35	2,625	0,094
0,06	36,05	2,70375	0,094
0,06	37,09	2,78175	0,094
0,06	38,1	2,8575	0,1034
0,06	39,7	2,9775	0,11374
0,06	40,72	3,054	0,125114
0,06	41,94	3,1455	0,1376254
0,06	42,04	3,153	0,15138794
0,06	43,84	3,273	0,16652673
0,06	45,01	3,37575	0,18317541
0,06	46,01	3,45075	0,20149735
0,06	47,14	3,5355	0,22164708
0,06	48,83	3,66225	0,24381179
0,07	50,09	3,75675	0,26819297
0,08	51,09	3,83175	0,29501227
0,09	51,9	3,8925	0,32451349
0,09	53,05	3,97875	0,35696484
0,11	54,71	4,10325	0,39266133
0,11	55,84	4,188	0,43192746
0,12	57,08	4,28	0,47512021
0,13	58,79	4,40925	0,52263223
0,13	59,92	4,494	0,57489545
0,14	60,98	4,572	0,632385
0,14	62,78	4,707	0,69562349
0,15	63,78	4,782	0,76519584
0,15	64,89	4,86675	0,84170443
0,16	65,98	4,947	0,92587487
0,16	66,87	5,01525	1,01846236
0,16	67,81	5,08575	1,12030859
0,16	68,54	5,1405	1,23233945
0,18	68,23	4,96725	2,5
0,19	48,23	3,61725	4,3
0,21	34,98	2,6235	5

Εικόνα 6.4.1.22 Υπολογισμοί μεγεθών φορτίων-μετατόπισης-ροπής-στροφής (2<sup>ο</sup> πείραμα)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ (TS01,TS02,TS03)



Διάγραμμα 6.4.3 Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης (2<sup>ο</sup> πείραμα)



Διάγραμμα 6.4.4 Διάγραμμα ροπής στρόφης (2<sup>ο</sup> πείραμα)



Στο 3<sup>ο</sup> και τελευταίο πείραμα που διεξήχθη (23/5/2023), σε πλακοδοκό με σκυρόδεμα διαφορετικής σύστασης από τις δύο προηγούμενες φορές (C 27,75/34,69) και κωδικό όνομα «TS03», ενεργήθηκε και πάλι η φόρτιση μέσω μιας πλάκας στις απέναντι φλάντζες της δοκού και χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά στηρίγματα, έτσι ώστε τα δοκίμια να είναι ελεύθερα να στρέφονται (Εικόνα 6.4.1.23).



Εικόνα 6.4.1.23 Εφαρμογή φορτίου πάνω σε δοκό (TS03)

Μετά την επιβολή της φόρτισης στην πλακοδοκό κατά το 3<sup>ο</sup> πείραμα που διεξήχθη στο εργαστήριο, συλλέχτηκε φωτογραφικό υλικό το οποίο δείχνει επακριβώς ποια ήταν τα οπτικά αποτελέσματα εξαιτίας αυτής της φόρτισης (Εικόνες 6.4.1.24, 6.4.1.25).



Εικόνα 6.4.1.24



Εικόνα 6.4.1.25

Η γωνία στρέψης παραμένει ίδια και στο 3<sup>ο</sup> πείραμα ( $\theta=21,8^\circ$ ) όπως και οι διαμήκεις οπλισμοί όπως είχαμε δει και πιο πάνω κατά το στάδιο της κατασκευής των δοκιμίων ( $f_y=520\text{MPa}$ ) . Ωστόσο, παρατηρούμε και σε αυτό το πείραμα ότι μεγαλώνουν οι τιμές των ροπών διαμήκων οπλισμών ( $T_{AsI}$ ) και των ροπών του σκυροδέματος ( $T_c$ ) και κατά συνέπεια μεγαλώνει και η τιμή της συνολικής ροπής στρέψης **5,7331KNm** η οποία ισούται με το άθροισμα των άλλων δύο (Εικόνα 6.4.1.26).

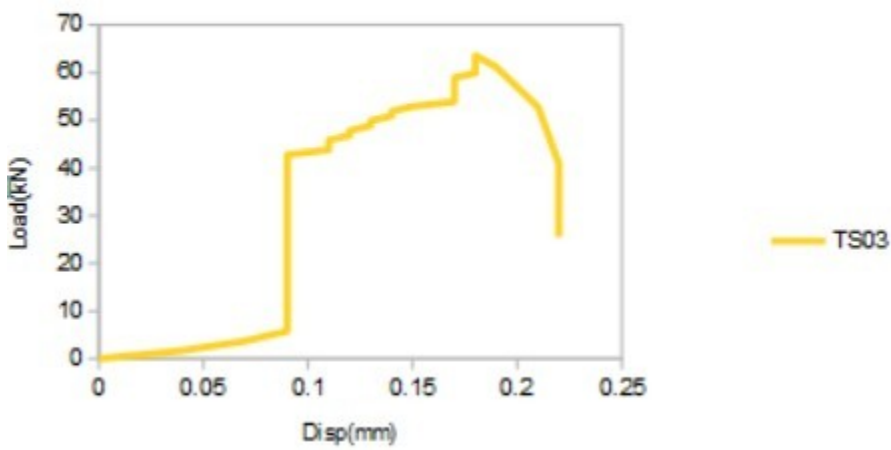


Την ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στο 3<sup>ο</sup> και τελευταίο πείραμα όπου ταυτόχρονα με τις δοκιμές έγιναν μετρήσεις στο εργαστήριο και προέκυψαν τιμές που δείχνουν πως εξελίσσονται οι τιμές των φορτίων της μετατόπισης της ροπής και της στροφής κατά την διάρκεια φόρτισης της πλακοδοκού. Τέλος προέκυψαν τα διαγράμματα που απεικονίζουν την σχέση ανάμεσα στα φορτία και τη μετατόπιση (Διάγραμμα 6.4.5) και στη ροπή με την στροφή (Διάγραμμα 6.4.6).

Disp (mm)	Load (kN)	Torque(kNm)	Φ(deg)
0	0		0
0,04	1,7	0,1275	0,003
0,07	3,71	0,27825	0,06
0,09	5,8	0,435	0,43
0,09	6,85	0,51375	0,558
0,09	7,87	0,59025	0,716
0,09	8,91	0,66625	0,805
0,09	9,94	0,7455	0,886
0,09	10,96	0,822	0,935
0,09	11,99	0,89925	0,988
0,09	13,03	0,97725	1,031
0,09	14,06	1,0545	1,086
0,09	15,08	1,131	1,135
0,09	16,12	1,209	1,178
0,09	17,15	1,28825	1,23
0,09	18,19	1,36425	1,28
0,09	19,22	1,4415	1,295
0,09	20,24	1,518	1,32
0,09	21,24	1,593	1,35
0,09	22,27	1,67025	1,375
0,09	23,36	1,752	1,401
0,09	24,38	1,8285	1,426
0,09	25,38	1,9035	1,448
0,09	26,38	1,9785	1,471
0,09	27,41	2,05575	1,493
0,09	28,5	2,1375	1,515
0,09	29,54	2,2155	1,545
0,09	30,57	2,29275	1,565
0,09	31,57	2,36775	1,581
0,09	32,57	2,44275	1,6
0,09	33,62	2,5215	1,621
0,09	34,62	2,5965	1,635
0,09	36,69	2,75175	1,67
0,09	37,71	2,82825	1,691
0,09	38,71	2,90325	1,708
0,09	39,72	2,979	1,725
0,09	40,76	3,057	1,743
0,09	41,79	3,13425	1,776
0,09	42,79	3,20925	1,793
0,11	43,83	3,28725	1,816
0,11	44,86	3,3645	1,838
0,11	45,84	3,438	1,866
0,12	46,85	3,5145	1,888
0,12	47,86	3,5895	1,915
0,13	48,89	3,66675	1,933
0,13	49,91	3,74325	1,958
0,14	50,94	3,8205	1,983
0,14	51,9	3,8925	2,006
0,15	52,92	3,969	2,035
0,17	53,92	4,044	2,07
0,17	54,9	4,1175	2,091
0,17	55,93	4,19475	2,108
0,17	56,93	4,26975	2,136
0,17	57,95	4,34625	2,175

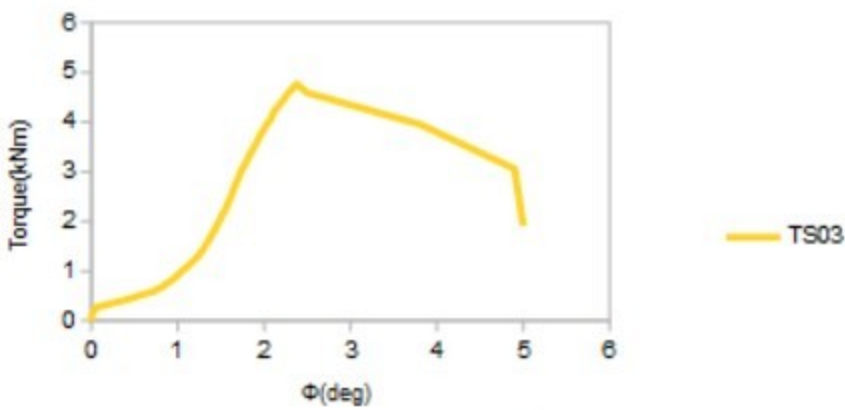
Εικόνα 6.4.1.29 Υπολογισμοί μεγεθών φορτίων-μετατόπισης-ροπής-στροφής (3<sup>ο</sup> πείραμα)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕΤΑΤΟΠΗΣΗΣ (TS01,TS02,TS03)



Διάγραμμα 6.4.5 Διάγραμμα φορτίου μετατόπισης TS03 (3<sup>ο</sup> πείραμα)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΠΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ (TS01,TS02,TS03)



Διάγραμμα 6.4.6 Διάγραμμα ροπής στρώσης TS03 (3<sup>ο</sup> πείραμα)

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τη μοντελοποίηση και επίλυση των Δοκών με τη χρήση του Excel, τα οποία συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες πειραματικές τιμές των Δοκών σε Στρέψη, βρέθηκε ότι υπάρχει μικρή απόκλιση μεταξύ τους . Αναλυτικότερα τα ευρήματα συνοψίζονται στα κάτωθι **συμπεράσματα** :

- Με έμφαση στην υψηλή αντοχή και την ολκιμότητα, το ιδιαίτερο σχήμα των σύνθετων δοκών παρουσιάζει μάλλον εξαιρετική συμπεριφορά κάτω από την πρόσκρουση διαφορετικών δυνάμεων στρέψης και ροπών.
- Κατά τη μοντελοποίηση των δειγμάτων, αποδείχθηκε, ότι η αύξηση των εγκάρσιων συνδέσεων βελτιώνει τα επίπεδα με βάση τη διάτμηση ενώ παράλληλα αυξάνει τη στεγανότητα. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση δεν άλλαξε σημαντικά τη συμπεριφορά του μοντέλου. Το πρόγραμμα θεωρεί το σκυρόδεμα ως επαρκώς συνδεδεμένο λόγω του εκτεταμένου εσωτερικού οπλισμού. Έτσι, η προσθήκη περισσότερων συνδέσεων δεν αλλάζει σημαντικά τη συμπεριφορά.
- Με εξαίρεση τα μοντέλα δειγμάτων από το τρίτο σύνολο μελετών, τα οποία είναι αισθητά πιο άκαμπτα, η αρχική ακαμψία των μοντέλων είναι αρκετά κοντά σε αυτήν των πειραματικών δειγμάτων.
- Όσον αφορά τη στρεπτική αντοχή, τα μοντέλα από το πρώτο σύνολο δοκιμών επιδεικνύουν μεγαλύτερη αντοχή στρέψης από 10,4% έως 22,1%, αλλά τα αναλυτικά μοντέλα είναι λίγο πιο συντηρητικά.
- Όσον αφορά την αξιοπιστία των ακτίνων, σημειώθηκε, ότι κατά το πείραμα ήταν δύσκολο να ολοκληρωθούν όλες οι χρονικές φάσεις της μεθόδου, προκειμένου τα διαγράμματα να συγκλίνουν τελικά σε μια τιμή συγκεκριμένης εργασίας. Ως αποτέλεσμα, είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί με βεβαιότητα, εάν οι δοκοί δοκιμής είναι όλκιμες.
- Όπως φαίνεται στα συνημμένα διαγράμματα σύγκρισης, η ακαμψία στο πλαστικό κλάδο των περισσότερων μοντέλων είναι επαρκής με βάση τις αναλυτικές δοκιμές που διεξήχθησαν μετά τις δοκιμές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.ΓΕΩΡΓΙΟΥ Ι.,ΜΕΛΕΤΗ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ  
ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΙΣΤΙΑ,2018
- 2.ΜΟΥΡΟΥΤΣΟΣ Ε,ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ – ΜΕΛΕΤΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΟΛΥΣΤΡΩΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ,2013
- 3.Vahid Monfared , Seeram Ramakrishna , As’ad AlizadehA systematic study on composite materials in civil engineering,2023
- 4.K. Jagath Narayana, Ramesh Gupta Burela,A review of recent research on multifunctional composite materials and structures with their applications,2018,India
5. Luigi Solazzi,Advanced Composite Materials: Theory, Design and Applications»,2020, Italy
- 6.»Current Research and Development in Composite Materials»,Kheng-Lim Goh,Malaysia,2018
7. Marius stanescu , Alendru Bolcu Study of the Mechanical Properties in Composite Materials with a Dammar Based Hybrid Matrix and Reinforcement from Crushed Shells of Sunflower Seeds,2022
- 8.Maria Kashtalyan, Peter W.R. Beaumont, Costas Soutis, Applied Composite Materials,Manchester,2022
9. Mohammad R.M. Jamir, Mohammad S.A. Majid, Azduwin Khasri, Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications,2018
- 10.Ana Balea, Elena Fuente, M<sup>a</sup> Concepción Monte, Ángeles Blanco, Carlos Negro,Fiber reinforced cement based composites,2021
11. Victor Li, An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites,1987  
Synthetic Materials: The Artificial Wonders,2022
12. Anshool Deshmukh, Synthetic Materials That Will Shape the FutThat, 2022

13. Valeria Arrighi, Five synthetic materials with the power to change the world,2015, UK
14. Irene Lostale, Javier Montenegro, Synthetic materials at the forefront of gene delivery, 2018
15. Susobhan Mandal, Effect of torsion on the radiation fields in curved spacetime,2020, India
16. Wei Zhang, The effects of torsion on horizontal motor fusion and stereopsis,2023,UK
17. Spine Phila , Ana Barbir, Effects of Torsion on Intervertebral Disc Gene Expression and Biomechanics, Using a Rat Tail Model, 2012
18. Moorak Son ,Effect of Torsion on the Structural Response to Ground Movements, 2020, Tokyo
19. Shriya S ,Torsion: Effect and Significance | Phylum Mollusca,2020,India
20. Rajalakshmi K R , S, Jiji Anna Varughese , Girija,Study of Torsion Effects on Building Structures Having Mass and Stiffness Irregularities,2015, India
21. Subother s Patil,A STUDY OF TORSIONAL EFFECT ON MULTI-STORIED BUILDING WITH PLAN-IRREGULARITY,2017,India
22. Laura Orel, Experimental Study of the Effects of Torsional Loading on Three Types of Nickel-Endodontic Instruments,1989 ,Romania
23. Viktor Gribniak,Torsion—Resistant Structures: A Nature Addressed Solution, 2021, UK
24. Muhammad Haroon , Torsional Behavior Evaluation of Reinforced Concrete Beams Using Artificial Neural Network,2020 ,USA



25. Kongjian Shen a, Shui Wan a, Y.L. Mo b, Zhengwen Jiang, Theoretical analysis on full torsional behavior of RC beams strengthened with FRP materials, 2018, China
26. Study of torsional behavior of reinforced concrete beams strengthened with aramid fiber strips, Department of Civil Engineering, Late G. N. Sapkal College of Engineering, , India, 2018
27. National Astronomical Observatories, Torsion Fields Generated by the Quantum Effects of Macro-bodies, Chinese, 2022
28. Masayuki Kohiyama, Torsional Response Induced by Lateral Displacement and Inertial Force, 2018, Japan
29. D Whittaker, Analysis for torsion in multistorey buildings, 1989, New Zealand,
30. Yueping Li, The effects of torsion on horizontal motor fusion and stereopsis, 2023 Japan
31. Constantin E. Chaliotis, Torsional strengthening of rectangular and flanged beams using carbon fibre-reinforced-polymers – Experimental study, 16 November 2006