



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

**ΠΜΣ «Αντισεισμική και Ενεργειακή Αναβάθμιση  
Κατασκευών και Αειφόρος Ανάπτυξη»**

**Διπλωματική Εργασία**

**«Συγκριτική μελέτη τριών μεθόδων ενίσχυσης άποπλης δοκού  
σε κάμψη τριών σημείων»**

**ΒΙΛΛΙΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**Δρ. ΑΝΤΩΝΙΟΣ ΚΥΡΙΑΖΟΠΟΥΛΟΣ**

Πειραιάς, Νοέμβριος 2019

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής εργασίας Δρ. Αντώνη Κυριαζόπουλο για την πολύτιμη καθοδήγησή του, τη συνεργασία του και τη συμβολή του στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας καθώς επίσης και την επιχείρηση ξυλείας Βαρδάλος Θεόδωρος για τη χορήγηση των καλουπιών, την SUPER BETON Αιγίου για τη φιλοξενία στις σύγχρονες εγκαταστάσεις της όπου κατασκευάστηκαν τα δοκίμια και τέλος τον Γιάννη Δημόπουλο για την εφαρμογή των ανθρακονημάτων.

Ένα θερμό ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	4
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	5

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Εισαγωγή.....	6
---------------	---

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> –Σκυρόδεμα

1.1 Απλό Σκυρόδεμα.....	7
1.2 Συμβατικά οπλισμένο Σκυρόδεμα.....	11

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα

2.1 Μανδύες .....	12
2.2 Ιδιότητες & συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα .....	13
2.3 Κάμψη ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα.....	14

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> – Ινοπλισμένα πολυμερή

3.1 Γνωρίζοντας τα FRP.....	16
3.2 Ρητίνες.....	16
3.3 Διάρκεια ζωής των ράβδων FRP.....	18
3.4 Διατμητική αντοχή και παραμορφώσεις.....	19

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> – Άλλα υλικά ενίσχυσης

4.1 Συνθετικά υλικά ενίσχυσης.....	20
4.2 Ίνες.....	21
4.3 Ίνες γυαλιού.....	22
4.4 Ίνες άνθρακα.....	23
4.5 Ίνες πολυμερούς.....	24
4.6 Μεταλλικές ίνες.....	24
4.7 Κεραμικές ίνες.....	24
4.8 Τριχίτες.....	25
4.9 Ίνες φυσικών ορυκτών.....	25

4.10 Μεταλλικά ελάσματα.....	25
4.11 Έλασμα άνθρακα.....	26

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5°

5.1 Υλικά και κατασκευή δοκιμίων.....	27
5.2 Υλικά ενίσχυσης.....	27
5.3 Πειραματική διάταξη - Μεθοδολογία.....	28
5.4 Μετρήσεις.....	30

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6°

Αποτελέσματα.....	31
-------------------	----

ΠΗΓΕΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	32
--------------------	----

ΠΗΓΕΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	33
---------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	34
-------------------	----

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1 : Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών.

Πίνακας 2 : Εφαρμογή διαφόρων ινών για ενίσχυση σκυροδέματος.

Πίνακας 3 : Τυπικές ιδιότητες των ινών.

Πίνακας 4 : Μηχανικές ιδιότητες θερμορυθμιζόμενων ρητινών.

Πίνακας 5 : Ιδιότητες εποξειδικών ρητινών. Πηγή : Τριανταφύλλου, Α. 2004.

Πίνακας 6 : Ίνες γυαλιού. Σύσταση και Ιδιότητες.

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 1 : Τυπικές Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεις Σκυροδέματος.

Σχήμα 2 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Σκυροδέματος για διάφορες ταχύτητες αξονικής θλιπτικής φόρτισης.

Σχήμα 3 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Σκυροδέματος υπό επαναλαμβανόμενη αξονική φόρτιση.

Σχήμα 4 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Κυλίνδρων Σκυροδέματος υπό τριαξονική θλιπτική πίεση.

Σχήμα 5 : Τυπικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα σε κάμψη.

Σχήμα 6 : Κατηγορίες σύνθετων υλικών

Σχήμα 7 : Πειραματική διάταξη

## **Εισαγωγή**

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε με την ενίσχυση άοπλης δοκού μέσω διαφορετικών τρόπων, τους οποίους εξετάσαμε πειραματικά, με εκτεταμένη έρευνα και θα αναλύσουμε στο τελευταίο μέρος της εργασίας μας.

Αρχικά, θα εξετάσουμε τους τρόπους ενίσχυσης οπλισμένου σκυροδέματος, ώστε να λειτουργήσουν συγκριτικά με την έρευνά μας. Στο πρώτο, λοιπόν, κεφάλαιο θα μελετήσουμε το άοπλο και το οπλισμένο σκυρόδεμα τους τρόπους παρασκευής, τις ιδιότητες, τα χαρακτηριστικά τους, καθώς και τους τρόπους χρήσης και εφαρμογής τους. Ακολούθως, στο δεύτερο κεφάλαιο, θα ασχοληθούμε με τους μανδύες, τις ιδιότητες και την συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, καθώς και με την κάμψη ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Στα επόμενα δύο κεφάλαια θα αναλυθεί η πειραματική διαδικασία και οι μετρήσεις τα οποία οδηγούν στα συμπεράσματα τα οποία παρατίθενται στο τελευταίο κεφάλαιο (6) της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> – Σκυρόδεμα

### 1.1 Απλό Σκυρόδεμα

Εδώ και πολλούς αιώνες το τσιμεντοκονίαμα ή αλλιώς σκυρόδεμα έχει διατελέσει ρόλο ανθεκτικού υλικού οικοδόμησης. Αφ' ης στιγμής το σκυρόδεμα ενισχύθηκε με χάλυβα, περίπου στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, η χρήση του συγκεκριμένου υλικού εξαπλώθηκε και διευρύνθηκε σημαντικά στους κατασκευαστικούς τομείς. Η ανθεκτικότητά του στις περιβαλλοντικές συνθήκες και στη διάβρωση το κάνει ανθεκτικότερο άλλων υλικών στην υγρασία, τον ήλιο, τις χημικές ουσίες και τους περισσότερους μικροοργανισμούς. Το σκυρόδεμα σε περιπτώσεις υψηλής θλίψης μπορεί να αναπτύξει αντοχή που φτάνει ως 96460 kPa. Παρόλα αυτά, όμως, παρουσιάζει χαμηλή ανθεκτικότητα σε κάμψη και εφελκυσμό. Η απλή παρασκευή, η εύκολη διαμόρφωση και η σχετικά χαμηλή τιμή του τσιμεντοκονιάματος, πάντα σε σχέση με τη διαθεσιμότητα των πρώτων υλών και των δυνητικών προϊόντων κατασκευής και οικοδόμησης της περιοχής στην οποία προτιθέμαστε να οικοδομήσουμε, το κάνουν ιδανικό υλικό για τη συγκεκριμένη χρήση (Nataraja, M.C. & Dhang, N. & Gupta, A.P. 1999 και Bencardino, F. & Rizzuti, L. & Spadea, G. & Swamy, R. N. 2008).

Η παρασκευή του τσιμεντοκονιάματος γίνεται με ανάδευση και μίξη τσιμέντου, νερού, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών στις κατάλληλες αναλογίες. Σε ορισμένες περιπτώσεις, αρκετά συχνά μάλιστα, χρησιμοποιούνται και πρόσμικτα, προκειμένου να βελτιωθούν οι παράμετροι, όπως για παράδειγμα η ταχύτητα της σκλήρυνσης, η εργασιμότητα, κ. α. Το τελικό προϊόν είναι αποτέλεσμα της ποσότητας κάθε υλικού, που προστίθεται στο μίγμα και αναλόγως επηρεάζεται και η ποιότητά του. Καθοριστικότερο όλο παίζει η αναλογία της ποσότητας του τσιμέντου σε αντιστοιχία με εκείνη του νερού που περιέχεται στο εν λόγω μείγμα (Nataraja, M.C. & Dhang, N. & Gupta, A.P. 1999 και Bencardino, F. & Rizzuti, L. & Spadea, G. & Swamy, R. N. 2008).

Η συγκεκριμένη σχέση συμβολίζεται ως w/c και αποτελεί βάση για τον νόμο του Abram, κατά τον οποίο δηλώνεται η άμεση σχέση των χαρακτηριστικών αντοχής του σκυροδέματος με την αναλογία νερού και τσιμέντου. Όσο μικρότερος ο λόγος w/c, τόσο οι φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος θα είναι βελτιωμένες. Κύριο στόχο στην παρασκευή του μίγματος αποτελεί η ποιότητα να είναι τέτοια, ώστε το σκυρόδεμα που θα παραχθεί να είναι ιδιαίτερα εύχρηστο και να είναι εύκολη η τοποθέτηση, η μεταφορά, η συμπίεση, η επεξεργασία και η τοποθέτηση σε καλούπια διαφορετικού είδους και σχήματος, καθώς και



η γρήγορη στερεοποίηση και σταθεροποίησή του, που θα δώσει ένα ανθεκτικό και ισχυρό προϊόν

Η μοναδική ιδιότητα του σκυροδέματος να αλλάζει μορφή σε σύντομο χρόνο – από ρευστή σε στέρα μορφή – γίνεται σε τρεις φάσεις, ώσπου να αποκτήσει την τελική του μορφή και σε κάθε μια από αυτές τις φάσεις αποκτά διαφορετικές ιδιότητες. Αρχικά, μετά τη μίξη των συστατικών προκύπτει ένα μίγμα νωπό και εύπλαστο, το οποίο είναι εύκολο να αποκτήσει διαφορετικά σχήματα, καθώς έχει αυξημένη πλαστικότητα. Η συγκεκριμένη ιδιότητα παίζει σημαντικό ρόλο στη διάστρωση, τη χύτευση και την συμπίεση του τσιμεντοκονιάματος. Ακολούθως, το υλικό σταδιακά γίνεται στερεό και άκαμπτο, αποκτώντας ένα μέρος από της τελικής του αντοχής, εξαιτίας της επαφής με τον ατμοσφαιρικό αέρα, της συμπύκνωσης και της διάστρωσής του. Τέλος, η τρίτη φάση, κατά την οποία αποκτά και την τελική μορφή, την αντοχή και τις ιδιότητες, είναι η φάση της σκλήρυνσης (Nataraja, M.C. & Dhang, N. & Gupta, A.P. 1999 και Bencardino, F. & Rizzuti, L. & Spadea, G. & Swamy, R. N. 2008).

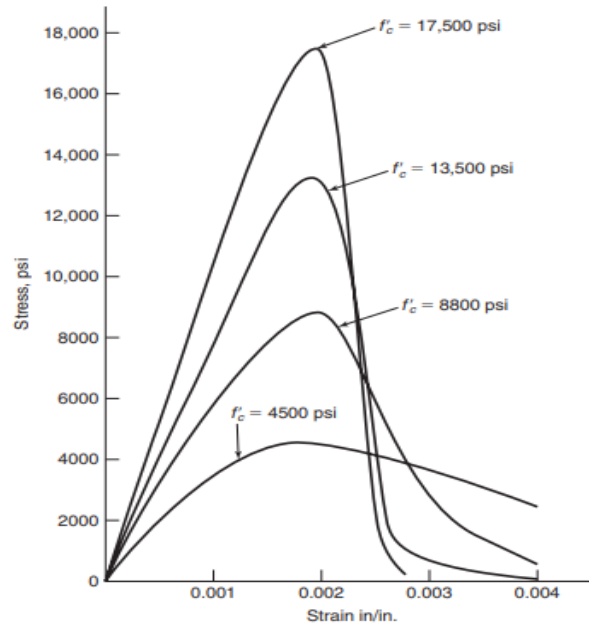
Ο ρυθμός σκλήρυνσης του σκυροδέματος ποικίλει, όμως συνήθως αποκτά το 50% της τελικής του αντοχής σε 72 ώρες, σε 7 ημέρες φτάνει στο 70% και σε 28 μέρες φτάνει στο 90% της συνολικής αντοχής του, ενώ το 100% είναι αποτέλεσμα παρόδου πολλών ετών. Σε καλές περιβαλλοντικές συνθήκες το σκυρόδεμα μπορεί να ξεπεράσει κατά πολύ τα 100 χρόνια αντοχής στον χρόνο και μάλιστα χωρίς σημαντικές αλλοιώσεις. Βασικότερες ιδιότητες του σκυροδέματος μπορούν να θεωρηθούν :

- ➔ η εργασιμότητα
- ➔ η ντοχή
- ➔ η ανθεκτικότητα – όσον αφορά στον χρόνο – και,
- ➔ η ανεκτικότητα

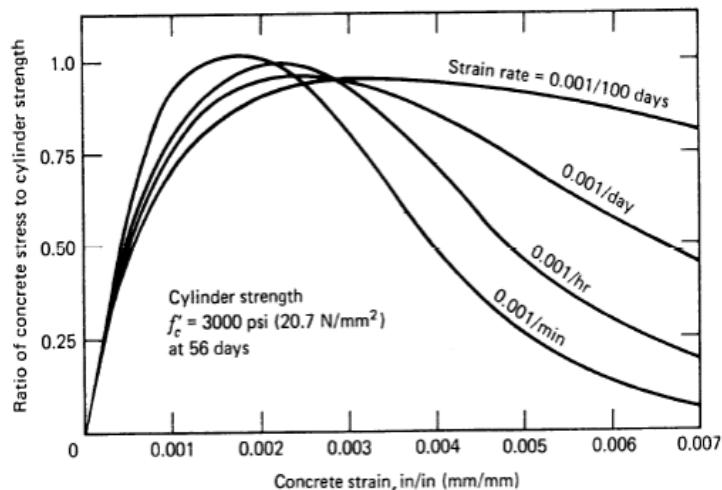
Το άοπλο σκυρόδεμα έχει μεγάλη αντοχή θλίψης, πολύ χαμηλή διατμητική αντοχή, καθώς και σχεδόν μηδενική εφελκυστική αντοχή. Αντιθετικά, το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες έχει ιδιότητες που το κάνουν πιο ανθεκτικό από το άοπλο. Έτσι. Το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει πολύ μεγάλη αντοχή θλίψης, υψηλή διατμητική αντοχή, καθώς και πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή (Nataraja, M.C. & Dhang, N. & Gupta, A.P. 1999 και Bencardino, F. & Rizzuti, L. & Spadea, G. & Swamy, R. N. 2008).

Άοπλο θεωρείται, λοιπόν, το τσιμεντοκονίαμα που δεν έχει ενισχυθεί με ίνες ή ράβδους οπλισμού από οποιοδήποτε υλικό. Η παρασκευή του προκύπτει από τη μίξη κοινού

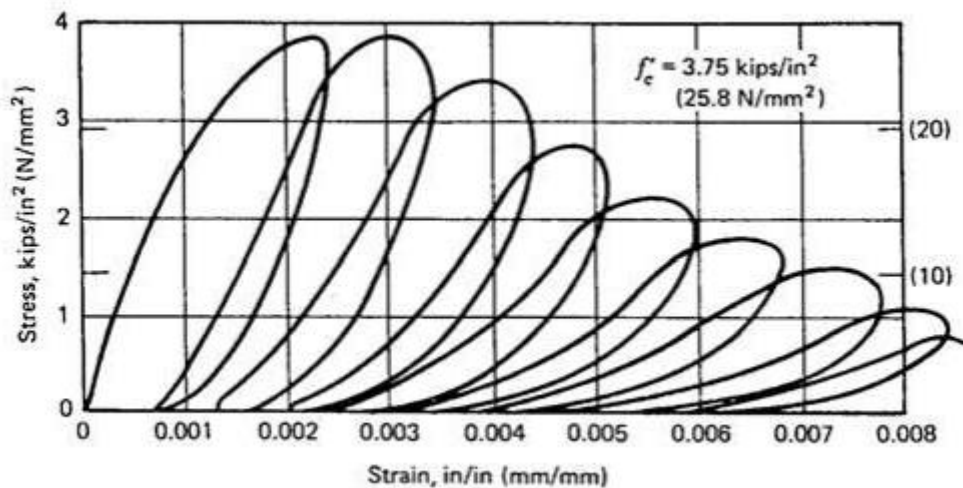
τσιμέντου πόρτλαντ, αδρανών υλικών και νερού. Περιέχει μικρό ποσοστό τσιμέντου και συνήθως λέγεται γκρομπετόν ή ισχνό σκυροδέμα. Η συνηθέστερη χρήση του είναι σε υποστυλώματα για πέδιλα, δάπεδα και πρόχειρες κατασκευές, καθώς το υλικό του είναι ψαθυρό, ιδιαίτερα σε εφελκυσμό. Τα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζουν καμπύλες τάσεων και παραμορφώσεων σκυροδέματος σε εφελκυσμό, επαναλαμβανόμενη θλίψη και θλίψη.



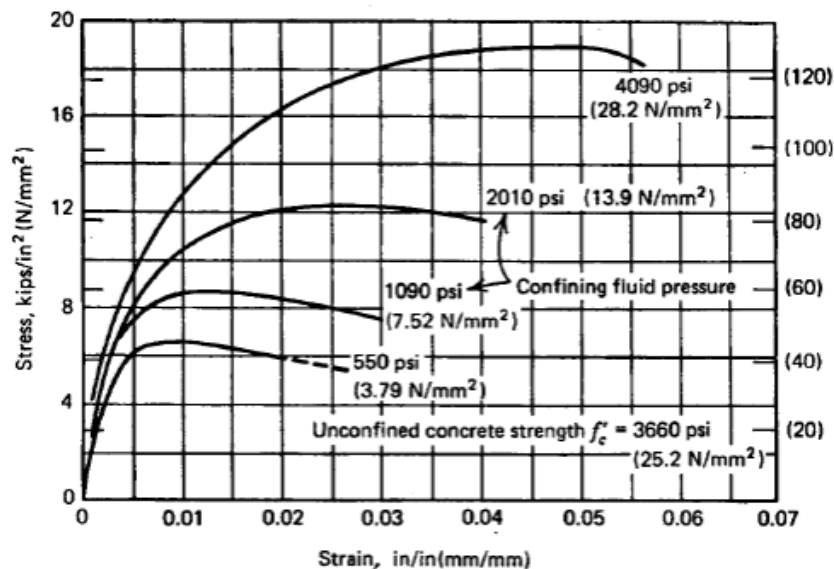
Σχήμα 1 : Τυπικές Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεις Σκυροδέματος. Πηγή : Wight, J. K. & McGregor, J. G. 2012.



Σχήμα 2 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Σκυροδέματος για διάφορες ταχύτητες αξονικής θλιπτικής φόρτισης. Πηγή : Rüsçh, H. 1960.



Σχήμα 3 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Σκυροδέματος υπό επαναλαμβανόμενη αξονική φόρτιση. Πηγή : Sinha, B. P. & Gerstle, K. H. & Tulin, L. G. 1964.



Σχήμα 4 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Κυλίνδρων Σκυροδέματος υπό τριαξονική θλιπτική πίεση. Πηγή : Richart, F. E. & Brandtzaeg, A. & Brown, R. L. 1928.

Μέχρι πρόσφατα, η κλασική χρήση του τσιμεντοκονιάματος απαιτούσε να είναι οπλισμένο, γεγονός το οποίο απαιτούσε τη μάζα του μίγματος να είναι ενισχυμένη με «σιδηρό οπλισμό», δηλαδή, χάλυβα. Επιπλέον, του προσθέτει τη διατμητική και την θλιπτική αντοχή, που εκ φύσεως δεν έχει και ταυτόχρονα βοηθά στην «παραλαβή των θλιπτικών τάσεων, ενώ τα δύο υλικά έχουν άριστη «συνεργασία» και παρατηρούμε ίδια θερμοκρασιακή διαστολή, αμοιβαία πρόσφυση, και προστασία των χαλύβδινων στοιχείων από τη σκουριά εξαιτίας του τσιμέντου που τα περικλείει. Πρώτη φορά οπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε το 1867 από τον Γάλλο Monier (Καλαγασίδη Α. 2012.)

## 1.2 Συμβατικά οπλισμένο Σκυρόδεμα

Οι ιδιότητες του σκυροδέματος το καθιστούν κατάλληλο για μια ποικιλία κατασκευών και καινοτομιών, δεν πρόκειται μόνο για την ευκολία διαμόρφωσης σε μια ποικιλία σχημάτων, αλλά και για την ακαμψία, τη θλιπτική αντοχή, τη χαμηλή αναφλεξιμότητα και τοξικότητα, καθώς και τη χαμηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα. Οι ιδιότητες του που περιορίζουν τη χρήση του είναι η μικρή αντοχή του στον εφέλκυσμό και το ότι είναι ψαθυρό, ωστόσο τη δεκαετία του 1980 τέθηκε μια τεχνική βάση αντιμετώπισης των δύο «μειονεκτημάτων» των μιγμάτων τσιμεντοκονιάματος, με την ανάπτυξη των ινοπλισμένων μιγμάτων. Η προσθήκη μια μικρής ποσότητας αδρανών και διακριτών ινών στο μίγμα του υδραυλικού τσιμέντου, ενίσχυσε το λεγόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Concrete). Έχουν δοκιμαστεί και χρησιμοποιηθεί και δοκιμαστεί διάφορα υλικά και οι μήτρες παρασκευής μπορεί να είναι από κονίαμα ή διαφορετικά μίγματα με συγκεκριμένες αναλογίες, κατά περίπτωση εφαρμογής. Το μήκος και η διάμετρος των ινών ποικίλει, αλλά δεν υπερβαίνουν τα 80mm και το 1mm αντίστοιχα (Καλαγασίδη Α. 2012).

Τα ινώδη συνθετικά υλικά αναπτύχθηκαν προκειμένου να προσδώσουν σε εύθραυστα υλικά όλκιμο χαρακτήρα και μηχανικές ιδιότητες, τις οποίες τα ψαθυρά υλικά δεν έχουν και ιδιαίτερα με τη ρηγμάτωση. Είναι σύνηθες, το άοπλο τσιμεντοκονίαμα έπειτα από εφελκυστική φόρτιση, να παραμορφώνεται ελαστικά και να δημιουργούνται μικρορηγματώσεις, οι οποίες αργότερα θα εξελιχθούν σε διευρυμένα ρήγματα και θραύση. Η προσέγγιση της αστοχίας του σκυροδέματος από φορτία που του επιβάλλονται, στις περισσότερες των περιπτώσεων προκαλεί ρωγμές, οι οποίες διευρύνονται εξαιρετικά γρήγορα (Καλαγασίδη Α. 2012).

Ο ρόλος των ινών στο μίγμα του τσιμέντου είναι περιοριστικός και παρεμποδίζει τη δημιουργία ρωγμών, αλλά παράλληλα διαφοροποιεί τη συμπεριφορά του υλικού, αυξάνοντας την λόγω εφέλκυσμού παραμόρφωση, μετά την ελαστική περιοχή, έπειτα από την πρώτη ρηγμάτωση. Διάφοροι παράγοντες μπορεί να επηρεάσουν αυτή τη διαφοροποίηση όπως το είδος των ινών, το μέτρο ελαστικότητας των ινών, η αντοχή της μήτρας, η αντοχή των ινών και η αναλογία διαστάσεών τους, το ποσοστό περιεκτικότητας του μίγματος σε ίνες και ο προσανατολισμός τους σε σχέση με την επιφάνεια συγκόλλησης, τα χαρακτηριστικά συγκόλλησης της επιφάνειας των ινών σε περιπτώσεις συσσωματωμάτων, καθώς και το πόσο επιδρούν στο συγκεκριμένο μίγμα τα μεγέθη των αδρανών (Καλαγασίδη Α. 2012).

Η περίπτωση προσθήκης χαλύβδινων ράβδων στο απλά οπλισμένο σκυρόδεμα έχει τα ίδια θετικά αποτελέσματα, καθώς οι ράβδοι λειτουργούν ως συνεχείς, επιμήκεις ίνες. Συνήθως, οι ίνες είναι συσσωματωμένες σε ομάδες, για να ενδυναμώνεται η συνάφεια του τσιμεντοκονιάματος, αλλά οι μικρού μήκους, μεμονωμένες, ασυνεχείς έχουν το πλεονέκτημα ότι διασπείρονται ομοιόμορφα σε όλη τη μάζα του μίγματος. Η αντοχή της μήτρας συνήθως δεν αυξάνεται εξαιτίας αυτού, αυξάνεται όμως η δυσθραυστότητα του υλικού, εφόσον οι ίνες απορροφούν μέρος της ενέργειας κατά την παραμόρφωση, «η οποία εκφράζεται από το εμβαδόν της περιοχής κάτω από την καμπύλη φορτίου – παραμόρφωσης». Σε αρκετές των περιπτώσεων το εμβαδόν αυτό φτάνει να είναι μεγαλύτερο 10 έως 40 φορές για το ινοπλισμένο από ότι για το άοπλο σκυρόδεμα (Καλαγασίδη Α. 2012).

Η σωστή σχεδίαση και κατασκευή του ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να βελτιώσει τη λειτουργικότητά του μακροπρόθεσμα, όσον αφορά στην κατασκευή ή στο τελικό προϊόν. Ως λειτουργικότητα ορίζεται η ικανότητα τμήματος ή ολοκληρωμένης κατασκευής να εκπληρώσει τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε στον προβλεπόμενο χρόνο, εφόσον, φυσικά, διατηρήσει την ακεραιότητα και την αντοχή της. Η χρήση ιών μπορεί να θεωρηθεί εξασφάλιση για τη λειτουργικότητα και οι ίνες είναι δυνατόν να αποτρέψουν την εμφάνιση μεγάλου πλάτους ρωγμών. Η εμφάνιση ρωγμών πέρα από την αντιαισθητική πλευρά, επιτρέπει την προσβολή του σκυροδέματος από νερό ή άλλα υλικά, τα οποία είναι δυνατόν να προκαλέσουν διάβρωση ή ακόμα και αλλοιώσεις στη δομή του τσιμεντοκονιάματος. Η χρήση ιών στο μίγμα του σκυροδέματος μπορεί, πέρα από όλα τα άλλα, να αυξήσει την εφελκυστική του αντοχή σε σημαντικό βαθμό. (Καλαγασίδη Α. 2012).

Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται οι ίνες μπορεί να χάλυβας, γυαλί, προπυλένιο, άλλα και διάφορα άλλα φυσικά ή συνθετικά υλικά. Στον Πίνακα 1 μπορούμε να δούμε τις ιδιότητες των ιών ανά υλικό από το οποίο προέρχονται.

Ίνες	Διάμετρος ( $\mu\text{m}$ )	Μήκος (mm)	Πυκνότητα	Παραμόρφωση θραύσης (%)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Τυπική αναλογία (% κ. ό.)
Χάλυβας	100-600	10-60	7.86	3.5	200	700-2000	0.5-2
Ανοξ. Χάλυβας	10-330	10-60	7.86	3	160	2100	0.5-2
Γυαλί E	8-12	10-50	2.54	4.8	72-75	3500	2-8
Γυαλί AR	8-12	10-50	2.27	3-4.6	70-76	2000-3500	2-8
Πολυπροπυλένιο	500-4000	15-75	0.90	8-25	3-8	400-700	0.2-1.2
Άνθρακας							
Υψηλού E	8	10-50	1.90	0.5	380	1800	2-12
Υψηλής $f_t$	9	10-50	1.90	1.2	230	2600	2-12
Νάυλον	5-200	5-50	1.14	16-20	1-5	750-900	0.1-6
Ξύλο	100-5000	5-50	1.50	1-2	50-75	700-1000	2-4

Πίνακας 1 : Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών. Πηγή : Καλαγασίδη Α. 2012.

Η ελαστικότητα της ίνας βοηθά στην μεταφορά της φόρτισης και με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό. Επιπλέον, η διάμετρος της ίνας είναι εκείνη που αυξάνει την ανθεκτικότητα και την καμπτική αντοχή του τσιμεντοκονιάματος. Το μήκος της ίνας θα πρέπει να περιοριστεί μεταξύ 100 – 200mm, καθώς μεγαλύτερα μήκη έχουν αποδειχτεί ακατάλληλα, καθώς τείνουν να μπλέκονται μέσα στο μείγμα και να μειώνουν την εργασιμότητα του υλικού. Η προσθήκη του είδους της ίνας είναι ανάλογη με την εφαρμογή για την οποία προορίζεται. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μερικές από τις εφαρμογές:

<b>ΤΥΠΟΣ ΙΝΑΣ</b>	<b>ΕΦΑΡΜΟΓΗ</b>
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, καταστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλασιών, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμιάντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Άνθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή ορόφων, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Νιφάδες μαρμαρυγία	Μερική αντικατάσταση αμιάντου σε πλαίσια, σωλήνες από σκυρόδεμα, υλικά επιδιόρθωσης
Φυσικές ίνες (ίνα καρύδας, sisal, bamboo, ζαχαροκάλαμο)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους – αντιπαρέρχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι
Συνδυασμοί περισσότερων από ένα τύπο ινών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ειδικούς σκοπούς.	

Πίνακας 2 : Εφαρμογή διαφόρων ινών για ενίσχυση σκυροδέματος. Πηγή : Καλαγασίδη Α. 2012.

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup> – Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα

### 2.1 Μανδύες.

Η έντονη σεισμικότητα της Ελλάδας αλλά και το γεγονός ότι τα πλείστα κτίρια της χώρας είναι δομημένα πριν το 1980, έχει προκύψει το θέμα της επέμβασης σε κτίρια που ήδη υπάρχουν, προκειμένου να βελτιωθεί η σεισμική συμπεριφορά τους σε περίπτωση μελλοντικών σεισμών ή να δημιουργηθούν εξ αρχής συνθήκες μεγαλύτερης αντοχής σε παρόμοιες περιπτώσεις σε νέα κτίρια. Οι συνήθεις επεμβάσεις είναι η επισκευή, η οποία επαναφέρει το κτίριο στην αρχική του μορφή και η ενίσχυση μιας κατασκευής, η οποία ανεβάζει σε μεγαλύτερο επίπεδο την ικανότητά του να αντέχει σε ισχυρότερες σεισμικές δονήσεις από ότι αρχικά.

Υπάρχουν δύο επιλογές ενίσχυσης : η συνολική ενίσχυση του κτιρίου και η μερική ενίσχυση των στοιχείων που έχουν υποστεί ζημιά ή παρουσιάζονται ιδιαίτερα αδύναμα λόγω φθοράς ή αστοχίας υλικών και επιθυμείται η βελτίωση της κατασκευής εν γένει. Μια από τις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται προς ενίσχυση κτιρίων, στα οποία έχει χρησιμοποιηθεί οπλισμένο σκυρόδεμα – και κυριότερα όταν θέλουμε να ενισχύσουμε υποστυλώματα είναι οι μανδύες. Επιπλέον, θα μπορούσαν να κατασκευαστούν τοιχώματα εντός πλαισίου, να εφαρμοστεί δικτυωτό πλέγμα και πάλι εντός πλαισίου, να κατασκευαστούν πλευρικά τοιχώματα ως συνέχεια υποστυλωμάτων, καθώς και διάφορες άλλες μέθοδοι, όπως η ενσωμάτωση συστημάτων απορρόφησης ενέργειας.

Με τη χρήση του μανδύα αυξάνεται η διατομή του συγκριμένου στοιχείου εξ αιτίας της προσθήκης νέων οπλισμών, ώστε να αυξηθούν παράλληλα με τη διατομή και η πλαστιμότητα, η καμπτική αντοχή και η δυσκαμψία. Τα είδη των μανδύων είναι δύο και αφορούν στην κάλυψη του στοιχείου στο οποίο εφαρμόζονται. Έτσι έχουμε τον ανοιχτό μανδύα, ο οποίος καλύπτει τρεις πλευρές του εν λόγω στοιχείου και τον κλειστό, ο οποίος καλύπτει περιμετρικά όλη τη διατομή του. η κατασκευή των μανδύων γίνεται είτε με έγχυτο τσιμεντοκονίαμα ή σκυρόδεμα, όταν πρόκειται για μεγάλα πάχη (<100mm), είτε με εκτοξευμένο τσιμεντοκονίαμα όταν τα πάχη είναι μικρά (>100mm). Έπειτα από την σκυροδέτηση, η συντήρηση του μανδύα θεωρείται επιβεβλημένη, καθώς η αυξημένη συστολή ξήρανσης μπορεί να δημιουργήσει παρόμοια προβλήματα με τα προϋπάρχοντα.



## 2.2 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Χαρακτηριστικό του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η ποσότητα, περίπου 3% του συνολικού όγκου του μείγματος. διακριτών ινών, οι οποίες βρίσκονται διασκορπισμένες μέσα στο μείγμα. Η χρήση των ινών συνιστά τον περιορισμό της ρηγματώσης, η αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας, καθώς και η άσκηση επιρροής σε άλλα μηχανικού τύπου θέματα, όπως η διάτμηση, η στρέψη, η αντοχή σε κάμψη, η κόπωση και η κρούση.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ινών, συνήθως είναι το πολυπροπυλένιο, ο χάλυβας, το ξύλο και το γυαλί. Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν χαμηλό κατασκευαστικό κόστος και χημική αδράνεια και το μήκος τους είναι μόλις μερικά εκατοστά, ενώ η διάμετρος τους δεν ξεπερνά μερικά δέκατα του χιλιοστού. Η προσθήκη τους προκαλεί τη μείωση της εργασιμότητας του τσιμεντοκονιάματος και θα πρέπει να προσεχθεί κατά την ανάμειξη, η δημιουργία συσσωματώσεων και η ανομοιογένεια της μάζας του μείγματος. Οι ίνες γυαλιού (E) είναι χαμηλού κόστους, αλλά είναι ευαίσθητες στα αλκάλια που περιέχει το τσιμεντοκονίαμα, ενώ οι ίνες γυαλιού (AR) είναι πιο ανθεκτικές στα συγκεκριμένα στοιχεία αλλά το κόστος τους είναι μεγαλύτερο. Ιδιαίτερα ανθεκτικές και με ευνοϊκή συνεισφορά είναι οι ίνες άνθρακα και αραμιδίου, όμως η διεύρυνση της χρήσης τους δυσχεραίνεται από το υψηλό κόστος τους. Τέλος, μπορούν να κατασκευαστούν ίνες από φυσικά υλικά όπως το φοινικόδεντρο ή η γιούτα (Hannant, D. J. 1978 και Μαρκαντωνάτος, Ν. & Δεμαρτίνος, Κ. 2003).

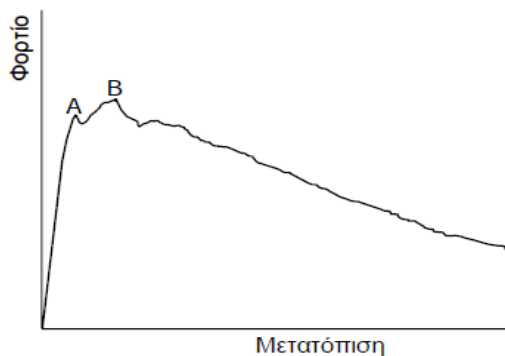
Οι ίνες που θα χρησιμοποιηθούν για να έχουμε καλύτερη συνάφεια με το σκυρόδεμα, με συνέπεια την επίτευξη απόκτησης μεγαλύτερης δύναμης εξόλκευσής τους, θα πρέπει να έχουν το ανάλογο σχήμα. Επίσης, το μέτρο της ελαστικότητάς τους θα πρέπει να είναι μεγάλο, ώστε να είναι δυνατή η μεταφορά των τάσεων από το τσιμεντοκονίαμα στις ίνες και ο λόγος Poisson να είναι αντίστοιχος με εκείνον του σκυροδέματος, ώστε να μην αποκολλούνται. Στον παρακάτω πίνακα μπορούμε να δούμε τις τυπικές ιδιότητες των ινών αναλυτικά (Hannant, D. J. 1978) (Πίνακας 3):

Ίνες	Διάμετρος, d (μm)	Μήκος, ℓ (mm)	ρ (Kg/m x10)	E (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκυστική Αντοχή (GPa)	ε Θραύσης (%)	Τυπική V <sub>f</sub> (% κ.ο.)
Χάλυβας	100-600	10-60	7,86	200	0,28	70-200	3,5	0,5-2
Ανοξείδωτος χάλυβας	10-330	10-60	7,86	160	0,28	210	3	0,5-2
Πολυπροπυλένιο	500-4000	15-75	0,90	3-8	0,30-0,45	40-70	8-25	0,2-1,2
Γυαλί (E)	8-12	10-50	2,54	72-75	0,25	350	4,8	2-8
Γυαλί (AR)	8-12	10-50	2,27	70-76	0,25	200-350	3-4,6	2-8
Κέβλαρ 29	12	5-65	1,44	70	0,32	290	4	0,5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1,45	135	0,32	290	2,1	0,5-2
Άνθρακας								
-Υψηλού E	8	10-50	1,90	380	0,35	180	0,5	2-12
-Υψηλής f <sub>t</sub>	9	10-50	1,90	230	0,35	260	1,2	2-12
Νάυλον	5-200	5-50	1,14	1-5	0,40	75-90	16-20	0,1-6
Ξύλο	100-5000	5-50	1,50	50-75	0,20-0,40	70-100	1-2	2-4

Πίνακας 3 : Τυπικές ιδιότητες των ινών. Πηγή : Hannant, D. J. 1978.

### 2.3 Κάμψη ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Διάγραμμα 1 την τυπική συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, κατά την οποία φαίνεται ένας ελαστικός κλάδος στον οποίο πραγματοποιείται μεταφορά τάσης από τις ίνες στο μείγμα και αντίστροφα μέσω διάτμησης, μέχρι την πραγμάτωση της αρχικής ρηγμάτωσης στο σημείο (A). Βαθμιαία οι τάσεις μεταβιβάζονται στις ίνες, ώστε όσο το φορτίο αυξάνεται τόσο να τείνουν να εξολκευτούν, εφόσον παρουσιάζουν μικρή άνοδο μέχρι το σημείο μέγιστης αντοχής (B).



Σχήμα 5 : Τυπικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα σε κάμψη. Πηγή : Παπαθεοχάρης, Θ. 2012.

Στη συνέχεια, όσον αφορά σε μετατοπίσεις που υπερβαίνουν εκείνη της μέγιστης αντοχής, παρατηρούμε επαναλαμβανόμενες, μικρού μεγέθους αυξήσεις της αντοχής, όμως αφορούν μικρότερο μέγιστο φορτίο. Επιπλέον, παρατηρείται συνεχής ενεργοποίηση και εξόλκευση νέων ινών, οι οποίες εντέλει οδηγούν σε βαθμιαία πτώση της αντοχής, εξαιτίας της συνεχούς επιμήκυνσης των ρωγμών προς μια θλιβόμενη ζώνη σε στοιχεία που κάμπτονται. Η τάση των ινών χάλυβα υπό μέγιστο φορτίο είναι συνήθως μικρότερη από την τάση διαρροής τους και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αστοχία και μάλιστα όχι λόγω θραύσης, αλλά λόγω εξόλκευσης. Η συγκεκριμένη συμπεριφορά των ινών συνήθως είναι αποτέλεσμα της ενέργειας που απορροφά το συγκεκριμένο στοιχείο και είναι αντίστοιχο του εμβαδού, που περικλείεται από το φορτίο μετατόπισης του φορτίου μέχρι μια συγκεκριμένη τιμή της μετατόπισης. Είναι εμφανές, ότι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος σε κάμψη είναι ιδιαίτερα αυξημένη σε σχέση με το συμβατικό και η αύξηση αφορά στη μέγιστη φέρουσα ικανότητα και όχι στο φορτίο της ρηγμάτωσης που υπήρχε εξ αρχής. Οι παράγοντες που είναι πιθανόν να επηρεάζουν την καμπτική αντοχή είναι το μήκος  $lf$  και ο τύπος των ινών που χρησιμοποιούνται, το ογκομετρικό ποσοστό  $V_f$  και ο λόγος  $lf/df$ , καθώς και η μορφή, ο προσανατολισμός και η αντοχή τους. Χαρακτηριστικό είναι ότι σε τέτοιες περιπτώσεις αποτελεσματικότερη φαίνεται να είναι η χρήση ινών με κεκαμμένα άκρα (hooked – end).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> – Ινοπλισμένα πολυμερή.

### 3.1 Γνωρίζοντας τα FRP

Όταν αναφερόμαστε σε ινοπλισμένα πολυμερή (FRP = Fiber – Reinforced Polymers) περιγράφουμε ένα σύνολο υλικών, τα οποία αποτελούνται από ανόργανες ή οργανικές ίνες με διάμετρο 5 – 25mm και οι οποίες τοποθετούνται σε καλούπι – μήτρα εποξειδικής ρητίνης. Με αυτόν τον τρόπο οι ίνες γίνονται φορέας ανάληψης δυνάμεων, που ασκούνται παράλληλα στη διεύθυνση τους και είναι κατά κύριο λόγο εφελκυστικές. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των FRP είναι η σε υψηλά επίπεδα γραμμικά ελαστική τους συμπεριφορά και εφελκυστική τους αντοχή μέχρι το σημείο θραύσης τους (Αλεξάνδρου, Στ & Τρουπάκης, Β. 2006).

Ινοπλισμένα πολυμερή μπορούμε να προσθέσουμε στο τσιμεντοκονίαμα, ώστε να αυξήσουμε την αντοχή και την καμπτικότητα τους. Τα συγκεκριμένα στοιχεία είναι κατασκευασμένα από ίνες άνθρακα (CFRP) πυκνότητας 1800 – 1900kg/m<sup>3</sup> και το υλικό τους αποτελείται είτε από απόσταξη άνθρακα, είτε από γυαλί G, είτε προέρχονται από «θερμική επεξεργασία πολυακρυλονιτριλίου» (Μιτολίδης, Γ. 2009 και Αλεξάνδρου, Στ & Τρουπάκης, Β. 2006). Οι ίνες που προέρχονται από πολυακρυλονιτρίλιο είναι μεγαλύτερης αντοχής και διαθέτουν πιο εκτεταμένα μέτρα ελαστικότητας από ότι εκείνες που προέρχονται από απόσταξη άνθρακα και είναι διαθέσιμα σε μορφή υφάσματος χωρίς εμπότιση ρητίνης ή σε μορφή ελασμάτων, τα οποία έχουν εμποτιστεί με ρητίνη. Στην περίπτωση εφαρμογής στο πρώτο η εφαρμογή γίνεται με την ίδια τη ρητίνη, η οποία ταυτόχρονα εμποτίζει και συγκολλά το ύφασμα, ενώ στο δεύτερο είναι απαραίτητη η χρήση συγκολλητικής ρητίνης πάνω στην επιφάνεια του τσιμεντοκονιάματος. Η εφαρμογή των ελασμάτων προϋποθέτει οι ίνες να καλύπτουν το 50 – 70% του συνολικού όγκου, ενώ στην περίπτωση του υφάσματος η κάλυψη αφορά στο 20 – 35%. Η αντοχή των πολυμερών είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του χάλυβα και η κύρια καταπόνησή τους προέρχεται από εφελκυσμό, κατά τη διάρκεια του οποίου η οριακή παραμόρφωση είναι 0,2 – 2,3%. (Μιτολίδης, Γ. 2009).

### 3.2 Ρητίνες

Η κατάλληλη μήτρα είναι πολύ σημαντικός παράγοντας της κατασκευής των σύνθετων υλικών, αφού οι θερμικές και οι φυσικές της ιδιότητες επηρεάζουν και τη διαδικασία κατασκευής αλλά και τις τελικές μηχανικές ιδιότητες τους. Η μήτρα προκειμένου να

δύναται να εκμεταλλευτεί πλήρως την αντοχή των ινών, θα πρέπει να αναπτύξει υψηλότερη αντοχή από αυτές και θα πρέπει να τις καλύπτει, καθώς και να τις προστατεύει από εκδορές, αλλά και να μεταφέρει τις τάσεις ανάμεσα στις ίνες. Επιπλέον ρόλοι της μήτρας είναι η πλευρική υποστήριξη στις ίνες, προκειμένου να μην υπάρξει στρέβλωση όταν προκύπτουν φορτία πίεσης και η μεταφορά της διελασμάτικης και επίπεδης τέμνουσας στο συνθετικό υλικό (Beaumont, P. W. R. 1989).

Δύο είναι οι τύποι πολυμερών μητρών, που συνήθως χρησιμοποιούνται για σύνθετα υλικά, οι θερμοπλαστικές και οι θερμοσκληρυνόμενες. Με τις δεύτερες να χρησιμοποιούνται συχνότερα καθώς τα θερμοσκληρυνόμενα συνθετικά έχουν χαμηλό μοριακό βάρος και είναι υγρά με πολύ χαμηλό ιξώδες, με αποτέλεσμα να δημιουργούν μια τρισδιάστατη, άκαμπτη μορφή μη αναμορφούμενη με εφαρμογή πίεσης ή θερμότητας. Τα εν λόγω πολυμερή μπορούν σε υγρή μορφή να υποβληθούν σε επεξεργασία και να αποβάλλουν τις ίνες και κάποια από αυτά είναι πολυεστέρες, εποξειδικά και βινυλιοεστέρες. Τα συγκεκριμένα υλικά έχουν ικανοποιητική θερμική σταθερότητα, χαμηλό ερπυσμό, χαλάρωση και χημική αντίσταση, παρόλα αυτά ως μειονέκτημα μπορεί να υπολογιστεί η μετά την αστοχία τους χαμηλή αντοχή, η οποία συνεπάγεται χαμηλή αντοχή σε κρούση. Στον Πίνακα 4 μπορούμε να δούμε τις μηχανικές ιδιότητες κάποιων θερμορρυθμιζόμενων ρητινών (Beaumont, P. W. R. 1989):

Είδος Ρητίνης:	Ίδιο Βάρος (kN/m <sup>2</sup> )	Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Μέγιστη Ανοιγμένη Παραμόρφωση (%)
Εποξειδικές	1.20-1.30	55.00-130.00	2.75-4.10	1.00-5.00
Πολυεστερικές	1.10-1.40	34.50-103.50	2.10-3.45	5.00-12.00
Βινυλιοεστερικές	1.12-1.32	73.00-81.00	3.00-3.35	5.40-10.30

Πίνακας 4 : Μηχανικές ιδιότητες θερμορρυθμιζόμενων ρητινών. Πηγή : ISIS Canada2004.

Γεγονός είναι ότι οι θερμοσκληρυνόμενες μήτρες δημιουργούνται με μόρια, που βρίσκονται σε γραμμική μορφή δομής, η οποία μπορεί να καταστραφεί από την πίεση και τη θερμότητα, έπειτα από την ψύξη οι συγκεκριμένες μήτρες αποκτούν στερεή μορφή,

αλλά μπορούν να ανασχηματιστούν έπειτα από αναθέρμανση, ανάλογα με τις ανάγκες. Οι ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών φαίνονται στον Πίνακα 5.

Ιδιότητα (σε 20 °C)	Εποξειδική ρητίνη	Σκυρόδεμα	Χάλυβας
Πυκνότητα (kg/ m <sup>3</sup> )	1100-1700	2350	7800
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	0,5-20	20-50	205
Μέτρο διάτμησης	0,2-8	8-21	80
Λόγος Poisson	0,3-0,4	0,2	0,3
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	9-30	1-4	200-600
Διατμητική αντοχή (MPa)	10-30	2-5	150-400
Θλιπτική αντοχή (MPa)	55-110	25-150	200-600
Οριακή παραμόρφωση σε εφελκυσμό (%)	0,5-5	0,015	20-25
Ενέργεια θραύσης (Jm <sup>-2</sup> )	200-1000	100	105-106
Συντελεστής θερμικής διαστολής (10 <sup>-6</sup> °C)	25-100	11-13	10-15
Υδαταπορροφητικότητα: 7 ημ.-25 °C (% κ.β.)	0,1-3	5	0
Θερμοκρασία ναλώδους μετάπτωσης (°C)	50-80	-	-

Πίνακας 5 : Ιδιότητες εποξειδικών ρητινών. Πηγή : Τριανταφύλλου, Α. 2004.

### 3.3 Διάρκεια ζωής των ράβδων FRP.

Η διάβρωση των ράβδων χάλυβα όταν υπόκεινται σε σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες κάνει τις ράβδους FRP ιδανικές για την ενίσχυση του σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα ως ιδιαίτερα αλκαλικό (PH = 12,5 – 13,5) και η χρήση του άνθρακα μειώνει αυτή την αλκαλικότητα (Coomarasamy, A. & Goodman, S. 1997). Η συνήθης διάρκεια ζωής που δίνεται στις ράβδους μετά από δοκιμές είναι από 50 – 100 έτη και η μείωση της αντοχής τους έρχεται λόγω της φυσικής γήρανσης. Η ραγδαία αύξηση της χρήσης των

FRP οδήγησε σε περαιτέρω έρευνες για την γήρανση την μακροπρόθεσμη εκτίμηση αντοχής τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η θερμοκρασία, η ηχορρύπανση, η υγρασία, ο παγετός και το PH επηρεάζουν τη διάρκεια ζωή των ράβδων και κάθε μεταβολή σε συνθήκες ή το υλικό κατασκευής παίζει σημαντικό ρόλο στη διάρκεια της ζωή τους (Coomarasamy, A. & Goodman, S. 1997 και Gerritse, A, 1992 και Porter, M. L. & Mehus, J. & Young, K. A. & O'Neil, E. F. & Barnes, B. A. 1997).

### **3.4 Διατμητική αντοχή και παραμορφώσεις.**

Ο συνδυασμός των αντιστάσεων είναι αυτός που επηρεάζει, ως φαίνεται, τη διατμητική αντοχή μιας τυχαίας διατομής. Οι εν λόγω αντιστάσεις προέρχονται από την εφελκώμενη περιοχή του σκυροδέματος, τη συνάφεια του οπλισμού με το σκυρόδεμα, αλλά και τη θλιβόμενη περιοχή του σκυροδέματος και είναι αναμενόμενο να μειωθούν από τη χρήση των FRP. Εν προκειμένω, η θλιπτική αντοχή του τσιμεντοκονιάματος θα μειωθεί, εξαιτίας του ουδέτερου άξονα της διατομής, ο οποίος θα πλησιάσει το θλιβόμενο άκρο, η συνάφεια δεν θα είναι καλύτερη και η εφελκυστική αντοχή επίσης θα μειωθεί, εφόσον, η ρηγμάτωση θα είναι πιο έντονη.

Όλα αυτά μπορούν να δημιουργήσουν περαιτέρω και σημαντικότερες παραμορφώσεις στη διάτμηση των στοιχείων του σκυροδέματος. Σε πειράματα στο πανεπιστήμιο του Sheffield χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εκδοχές για τη σχεδίαση των συνδετήρων η μια είναι βασισμένη στην ισοδύναμη αντοχή, ενώ η άλλη στην ισοδύναμη ακαμψία με τον χάλυβα (.Katz, A. & Berman, N. & Bank, L.C. 1999).

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> – Άλλα υλικά ενίσχυσης

### 4.1 Ταξινόμηση σύνθετων υλικών.

Σύνθετο αποκαλείται ένα υλικό, όταν αποτελείται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά, εκ των οποίων το ένα υπερισχύει σε ιδιότητες των άλλων τουλάχιστον πέντε φορές. Ως διαφορετικά υλικά ορίζονται εκείνα που έχουν διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Το υλικό που προκύπτει έχει διαφορετικές ιδιότητες από τα υλικά που το συνθέτουν και ως αποτέλεσμα αυτό μας δίνει ένα νέο υλικό.

Αν θέλουμε να δώσουμε έναν σαφή ορισμό των σύνθετων υλικών, θα θεωρήσουμε ότι σύνθετα υλικά είναι τα υλικά εκείνα που αποτελούν συνένωση δύο ή και περισσότερων χημικά ευδιάκριτων συστατικών μερών, τα οποία διαθέτουν ξεχωριστή διαχωριστική επιφάνεια. Το ένα από τα συστατικά είναι το συστατικό ενίσχυσης, το οποίο θα προσδώσει στο σύνθετο υλικό τις μηχανικές του ιδιότητες, βελτιωμένες. Ενώ, ένα δεύτερο συστατικό, το οποίο ονομάζεται μήτρα και συνήθως έχει χαμηλή πυκνότητα, βρίσκεται στο μίγμα για να εξασφαλίσει κατά το μέγιστο την ολοκληρωτική εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης (Agarwal, B. D. & Broutman, L. J. 1990).

#### Ταξινόμηση σύνθετων υλικών

Η ταξινόμηση των σύνθετων συστατικών μπορεί να γίνει σύμφωνα με το συστατικό ενίσχυσης και έτσι δημιουργούνται τρεις κατηγορίες:

→Κοκκώδη σύνθετα υλικά : Με την ενίσχυση να αποτελείται από διασκορπισμένα σωματίδια στο υλικό της μήτρας.

→Ινώδη σύνθετα υλικά : Τα οποία δημιουργούνται με εμπότιση των ινών στο υλικό της μήτρας και προσθήκη τους σε αυτό ως ενίσχυση.

→Στρωματικά σύνθετα υλικά : Τα οποία δημιουργούνται με εναπόθεση επάλληλων στρώσεων υλικών.

Η ταξινόμηση των ινωδών σύνθετων συστατικών θα μπορούσε να γίνει σύμφωνα με την κατεύθυνση και τη διάταξη των ινών μέσα στη μήτρα, έτσι έχουμε :

→Πολυδιευθυντικά σύνθετα υλικά : των οποίων οι ίνες έχουν διαφορετικές κατευθύνσεις, και

→Μονοδιευθυντικά σύνθετα υλικά : των οποίων οι ίνες είναι προσανατολισμένες όλες προς την ίδια κατεύθυνση.

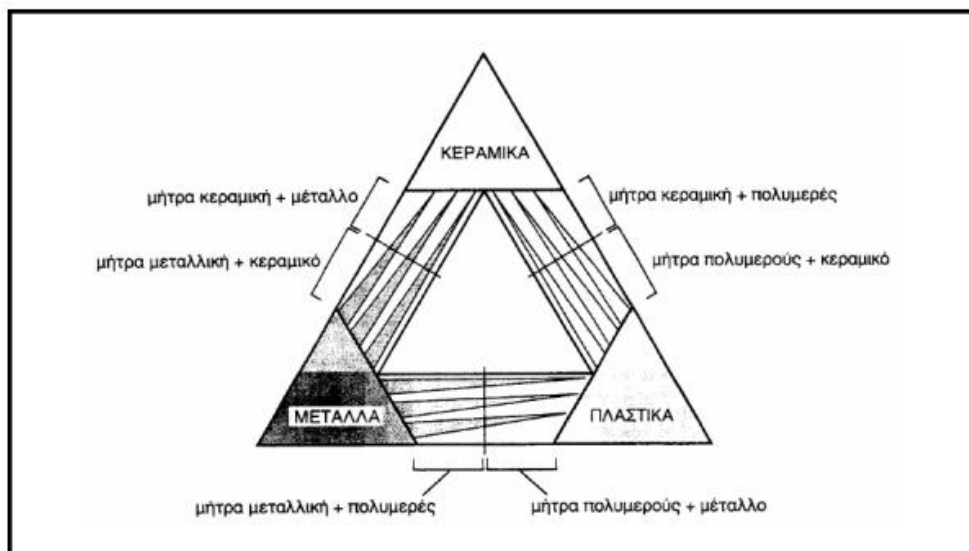
Η ιδιότητα των πολυδιευθυντικών σύνθετων υλικών να έχουν διαφορετικές διευθύνσεις οι ίνες μέσα στη μήτρα, οδηγεί σε έναν νέο διαχωρισμό :



- Σύνθετα υλικά με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα υλικά με ίνες σε τρισσορθογώνια ύφανση.
- Σύνθετα υλικά με ίνες σε τυχαία διεύθυνση.

Ένας ακόμη τρόπος ταξινόμησης των σύνθετων υλικών έχει να κάνει με το μήκος των ινών που προσθέτουμε στη μήτρα:

- Μεγάλου μήκους ή συνεχείς ίνες (continuous fibers) εφόσον είναι  $A/d > 100$ .
- Κοντές ή ασυνεχείς ίνες (discontinuous fibers) εφόσον είναι  $A/d < 100$ .
- Νηματίδια ή Τριχίτες (whiskers) εφόσον είναι  $A \approx 100\mu\text{m}$  και  $d < 1\mu\text{m}$ . Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε λεπτούς μονοκρυστάλλους, οι οποίοι προέρχονται από κεραμικό υλικό.



Σχήμα 6 : Κατηγορίες σύνθετων υλικών. Πηγή : Πετρόπουλος Φ. 2014.

#### 4.2 Ίνες.

Οι ίνες προορίζονται για να προσφέρουν ενίσχυση στις μηχανικές ιδιότητες της μήτρας και προκειμένου η συγκεκριμένη ενίσχυση να αποδειχθεί ικανοποιητική η επιλογή του υλικού παρασκευής τους θα πρέπει να επιλέγεται με βάση κάποιους παράγοντες. Οι παράγοντες αυτοί είναι :

- Η μεγάλη ακαμψία (stiffness).
- Το υψηλό μέτρο ελαστικότητας (E).
- Η χαμηλή δυσθραυστότητα (toughness).
- Η υψηλή τάση θραύσης σε εφελκυσμό (UTS).
- Η μικρή πυκνότητα ( $\rho$ ).

### 4.3 Ίνες γυαλιού.

Από το 1940 έχουν χρησιμοποιηθεί οι ίνες γυαλιού στα σύνθετα πρώτης γενιάς και είναι μέχρι και σήμερα από τους πιο επιτυχημένους τρόπους ενίσχυσης συνθετικών υλικών με πολυμερική μήτρα. Είναι από τα πιο οικονομικά σε κόστος ενισχυτικά υλικά και η βάση τους μπορεί να είναι τα οξείδια ασβεστίου, πυριτίου, βορίου και αλουμινίου.

Type	(SiO <sub>2</sub> )	(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	(CaO)	(MgO)	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
E-glass	55.0	14.0	0.2	7.0	22.0	1.0	0.5	0.3	–
C-glass	64.6	4.1	–	5.0	13.4	3.3	9.6	0.5	–
S-glass	65.0	25.0	–	–	–	10.0	–	–	–
A-glass	67.5	3.5	–	1.5	6.5	4.5	13.5	3.0	–
D-glass	74.0	–	–	22.5	–	–	1.5	2.0	–
R-glass	60.0	24.0	–	–	9.0	6.0	0.5	0.1	–
EGR-glass	61.0	13.0	–	–	22.0	3.0	–	0.5	–
Basalt	52.0	17.2	1.0	–	8.6	5.2	5.0	1.0	5.0

Χημική σύσταση ινών γυαλιού ως ποσοστό βάρους επί τοις εκατό (wt%)

Fiber	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Tensile strength GPa	Young's modulus (GPa)	Elongation (%)	Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-7</sup> /°C)	Poisson's ratio	Refractive index
E-glass	2.58	3.445	72.3	4.8	54	0.2	1.558
C-glass	2.52	3.310	68.9	4.8	63	–	1.533
S <sub>2</sub> -glass	2.46	4.890	86.9	5.7	16	0.22	1.521
A-glass	2.44	3.310	68.9	4.8	73	–	1.538
D-glass	2.11–2.14	2.415	51.7	4.6	25	–	1.465
R-glass	2.54	4.135	85.5	4.8	33	–	1.546
EGR-glass	2.72	3.445	80.3	4.8	59	–	1.579
AR glass	2.70	3.241	73.1	4.4	65	–	1.562

Πίνακας 6 : Ίνες γυαλιού. Σύσταση και Ιδιότητες. Πηγή : Sathishkumar T.P. & Satheeshkumar, S. & Naveen, J. 2014. σελ. 1258 – 1275.

Ανάλογα με τη σύστασή τους υπάρχουν διάφοροι τύποι ινών γυαλιού, όμως πιο διαδεδομένη είναι οι χρήση των E, των C και των S. Έτσι αν θελήσουμε να δώσουμε μια ανάλυση για την καταλληλότητα αναλογικά με τη χρήση έχουμε :

- ❖ Τα E – glass (E = electrical) είναι τα πιο διαδεδομένα υαλονήματα, καθώς διαθέτουν ηλεκτρικές ιδιότητες σε καλό επίπεδο, δυσκαμψία και αντοχή, ενώ ταυτόχρονα έχουν ιδιαίτερα καλή συμπεριφορά στις καιρικές αλλαγές. Ως μειονέκτημα μπορεί να προσμετρηθεί ή όχι και τόσο καλή αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.
- ❖ Τα C – glass (C = corrosion) είναι υαλονήματα με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τα E – glass και με μεγαλύτερη αντοχή σε χημικές αντιδράσεις έχουν όμως πολύ υψηλότερο κόστος.

- ❖ Τα S – glass (S = stiffness) πρόκειται για υαλονήματα με υψηλότερη δυσκαμψία και υψηλότερη θερμική αντοχή από τα E – glass, τα οποία όμως έχουν πολύ υψηλότερο κόστος και γι' αυτό η χρήση τους είναι συνηθέστερη στην αεροπορική βιομηχανία (Πετρόπουλος, Φ. 2015).

Τα βασικά μειονεκτήματα της χρήσης των υαλονημάτων είναι η μικρή αντοχή τους σε φθορά εκτριβής και το χαμηλό μέτρο ελαστικότητάς τους, ενώ στα πλεονεκτήματα συγκαταλέγονται η υψηλή αντοχή και το χαμηλό κόστος σε σχέση με άλλα υλικά ενίσχυσης. Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού οφείλονται κατά κύριο λόγο στην τρισδιάστατη δομή και την διάταξη των συστατικών των οξειδίων του και εξαιτίας αυτής της συγκεκριμένης δομής παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά και θεωρούνται ισότροπα υλικά. Αλλαγές στις φυσικοχημικές αντιδράσεις των ινών μπορεί να προκαλέσει η συμμετοχή μεταλλικών οξειδίων.

#### **4.4 Ίνες άνθρακα.**

Η πιο συνηθισμένη και δημοφιλής ενίσχυση υψηλής ποιότητας και επιδόσεων συνθετικού υλικού ρητινικής μήτρας είναι οι ίνες άνθρακα – γραφίτη. Όταν, λοιπόν, το ζητούμενο είναι ο βέλτιστος συνδυασμός χαμηλού βάρους και μηχανικής συμπεριφοράς, ιδανική ενίσχυση αποτελούν οι ίνες άνθρακα. Επιπλέον, όταν η προτεραιότητα είναι να κρατηθεί χαμηλά η θερμική διαστολή ή η συμβατότητα των μηχανικών χαρακτηριστικών δύο διαφορετικών υλικών είναι προαπαιτούμενο προτιμούνται και πάλι οι ίνες άνθρακα. Από τη φύση του το στοιχείο του άνθρακα έχει ιδιότητες που βοηθούν στο να σχηματιστούν ενδοατομικοί δεσμοί με άλλα άτομα άνθρακα και το γεγονός αυτό κάνει τα ανθρακονήματα να υπερέχουν σε σχέση με άλλα στοιχεία ενίσχυσης. Η ανισοτροπία των πολυκρυσταλλιτών του άνθρακα εξαρτάται από τις συνθήκες παρασκευής τους και ο ισχυρός προσανατολισμός τους παράλληλα προς τον άξονα των ανθρακονημάτων προσδίδει στο μίγμα αντοχή σε θραύση και υψηλή στιβαρότητα (Γκρέτσα, E & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 17 – 18).

Η παραγωγή ανθρακονημάτων χρησιμοποιεί τεχνητό μετάξι, δηλαδή rayon, πίσσα και πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτριλίου (PAN) και χρειάζεται τρία στάδια για να ολοκληρωθεί. Οι πολυμερικές ίνες πολυακρυλονιτριλίου θα πρέπει να οξειδωθούν σε χαμηλή θερμοκρασία και παράλληλη εφαρμογή τάσης, η οποία είναι αναγκαία για την ευθυγράμμιση των αλυσίδων του πολυμερούς. Ακολουθεί πυρόλυση σε ουδέτερη ή αναγωγική ατμόσφαιρα και σε αυτό το στάδιο οι ίνες ονομάζονται υψηλής αντοχής ίνες άνθρακα με αντοχή που φτάνει τα 3.000 MPa. Στο τρίτο στάδιο η θερμοκρασία φτάνει

τους 2.500 – 3.000 °C και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η γραφίτιωση και η ταυτόχρονη ανακρυστάλωση, η οποία οδηγεί σε ισχυρό προσανατολισμό των κρυστάλλων και χαρακτηρίζονται ως ίνες άνθρακα υψηλού μέτρου ελαστικότητας, η οποία μπορεί να φτάσει τα 400GPa και η διάμετρός τους τα 10μm (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 18 – 19).

Οι ιδιότητες των ανθρακονημάτων εξαρτώνται άμεσα από την αρχιτεκτονική των ινών PAN και ο τρόπος με τον οποίο διευθετούνται οι ίνες καθορίζει το ποσοστό ανισοτροπίας τους. Η μέγιστη θερμοκρασία, την οποία μπορούν να αντέξουν οι ίνες άνθρακα είναι οι 500 °C. Το κόστος παραγωγής των ινών γραφίτη είναι δεκαπλάσιο από εκείνο των ινών γυαλιού. Η επιλογή κατά την παρασκευή των ινών διαφόρων θερμοκρασιών μπορεί να αποδώσει διαφορετικά είδη ίνας, τα οποία όπως είναι φυσικό έχουν και διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 19 – 20).

#### **4.5 Ίνες πολυμερούς.**

Οι πιο διαδεδομένες ίνες πολυμερούς είναι από Kevlar, Nylon και πολυαιθυλένιο. Τα νήματα πολυεστέρα και Nylon δημιουργούνται με φυγόκεντρο περιδίνηση τήγματος, ενώ με φυγόκεντρο περιδίνηση διαλύματος δημιουργούνται τα κυτταρινικά και τα ακρυλικά νήματα και ακολουθούν τεχνικές καθίζησης ιζήματος. Η μηχανική αντοχή τους φτάνει τα 10Pa και το μέτρο ελαστικότητας ως και 1.000 Pa και ενώ δεν έχουν υψηλή απόδοση το κόστος παραγωγής τους είναι τέτοιο, ώστε να τις καθιστά δημοφιλείς στην αγορά (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 20 – 21).

#### **4.6 Μεταλλικές ίνες.**

Εξαιρετικά ενισχυτικά συνθετικών υλικών θα μπορούσαν να αποτελέσουν το βόριο (B), το βολφρέμιο (W), το βηρύλλιο (Be), καθώς επιδεικνύουν υψηλές τιμές ακαμψίας σε σχέση πάντα με το ειδικό βάρος τους. Ενώ, οι ιδιότητες τους είναι πολλά υποσχόμενες η παρασκευή τους είναι απαγορευτικά δαπανηρή και η παραγωγή τους ακολουθεί δυο διαφορετικές διαδικασίες αυτή της αναγωγής από αλογονίδιο του βορίου ή απόθεση με τεχνική CVD, η οποία έχει χαμηλότερο κόστος, όμως αποδίδει χαμηλότερη μηχανική αντοχή (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 29).

#### **4.7 Κεραμικές ίνες.**

Οι κεραμικές ίνες χαρακτηρίζονται από αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, θερμική ευστάθεια και στιβαρότητα και οι πιο συνηθισμένες είναι οι κεραμικές ίνες αλουμίνας, και

καρβιδίου του πυριτίου. Η παραγωγή τους μπορεί να προέλθει από πολυμερικές ίνες (Nicalon), Τριχίτες SiC από φλοιό ρυζιού, χημική εναπόθεση ατμών (CVD) χλωριούχου σιλανίου σε ίνες άνθρακα (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 24 – 25).

#### **4.8 Τριχίτες.**

Τριχίτες ονομάζονται οι νηματικού μονοκρυσταλλοί, που παράγονται σε αναγωγική ατμόσφαιρα με αποσύνθεση άλατος μετάλλου σε πολύ αυστηρές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Η διάμετρός τους είναι 1μm και μπορεί να έχουν μήκος ως μερικά χιλιοστά και διαθέτουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός τέλειου κρυστάλλου. Τα υλικά που συνήθως χρησιμοποιούνται για να πραχθούν οι τριχίτες είναι το αλουμίνιο, βηρυλλία, καρβίδιο του πυριτίου, νιτρίδιο του πυριτίου και γραφίτης (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 26).

#### **4.9 Ίνες φυσικών ορυκτών.**

Ένα φθινό ενισχυτικό, αλλά με χαμηλές προδιαγραφές, μπορούν να αποτελέσουν ορυκτά σε φυλλώδη ή ινώδη μορφή. Τέτοιου είδους ορυκτά μπορεί να είναι η μαρμαρυγία (mica) και ο αμιάντος. Οι ίνες αμιάντου συνίστανται από περίπου 500 στοιχειώδη ινίδια, τα οποία έχουν διάμετρο -20nm και μήκος αρκετά εκατοστά. Η αντοχή τους σε θερμότητα φτάνει τους 500 °C και αυτό σημαίνει αρκετά χαμηλή μηχανική αντοχή, μέτρο ελαστικότητας ως και 160GPa και αντοχή μέχρι 5.500GPa. Λόγω του χαμηλού κόστους του αμιάντου οι ίνες του χρησιμοποιούνται ευρύτατα. Οι ίνες μαρμαρυγίας από την άλλη έχουν αντοχή 2.500MPa, αλλά λόγω των ατελειών στις άκρες των φυλλιδίων, οι τιμές πέφτουν στα 700 + 900 MPa. Η πυκνότητά τους είναι 2,8g/cm<sup>3</sup> και το μέτρο ελαστικότητάς τους φτάνει ως και 220GPa (Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017, σελ. 25).

#### **4.10 Μεταλλικό έλασμα.**

Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εξαιρετικές περιπτώσεις όπως:

- Όταν είναι τελείως απαγορευτική η αύξηση των διαστάσεων μίας δοκού.
- Όταν η ενίσχυση γίνεται εντελώς τοπικά.
- Όταν τα στοιχεία του φέροντα οργανισμού που έχουν ρηγματωθεί πρέπει να

αποκατασταθούν και να ενισχυθούν με την επικόλληση λεπτών μεταλλικών ελασμάτων στην επιφάνειά τους .

Με την εφαρμογή της μεθόδου επιτυγχάνεται:

- η αύξηση της καμπτικής ικανότητας και ακαμψίας

- η μείωση των παραμορφώσεων
- η μείωση της αναμενομένης ρηγματώσης

Για τα ελάσματα προτιμάται ο ανοξείδωτος χάλυβας. Πρέπει να είναι λεπτά για να μην έχουν τάση αποκολλήσεως και επίσης να είναι εύκαμπτα ώστε να κολλήσουν καλά και να συνεργασθούν με την παλαιά δοκό.

#### **4.11 Έλασμα άνθρακα**

Τα ανθρακοελάσματα επικολλημένα εξωτερικά των δομικών στοιχείων με την εποξειδική πάστα, χρησιμοποιούνται ως εξωτερικά επικολλημένος οπλισμός για την αύξηση της αντοχής σε κάμψη πλακών, δοκών, τοιγίων και υποστυλωμάτων καθώς και για τη μείωση των βελών κάμψης και την αποφυγή ρηγματώσεων σε περιπτώσεις όπως:

- Προσεισμική ενίσχυση κατασκευών και προσαρμογή σε αλλαγή κανονισμών.
- Γήρανση των δομικών υλικών, διάβρωση του οπλισμού ή/και κατασκευαστικών ελαττωμάτων.
- Αύξηση των φορτίων ή αλλαγή χρήσης του χώρου.
- Επισκευή στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος μετά από σεισμό.

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> – Πειραματικό μέρος

### 5.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για το πειραματικό μέρος κατασκευάστηκαν οκτώ δοκίμια από σκυρόδεμα διαστάσεων 15 εκ. x 15 εκ. x 80 εκ., ένα κατηγορίας C16/20, έξι κατηγορίας C20/25 και άλλο ένα κατηγορίας C30/37 και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ωρίμανσης για ένα μήνα ώστε να αποκτήσουν την απαιτούμενη αντόχη.



Εικόνα 1: Δοκίμια στα καλούπια μετά την ωρίμανση

### 5.2 ΥΛΙΚΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ

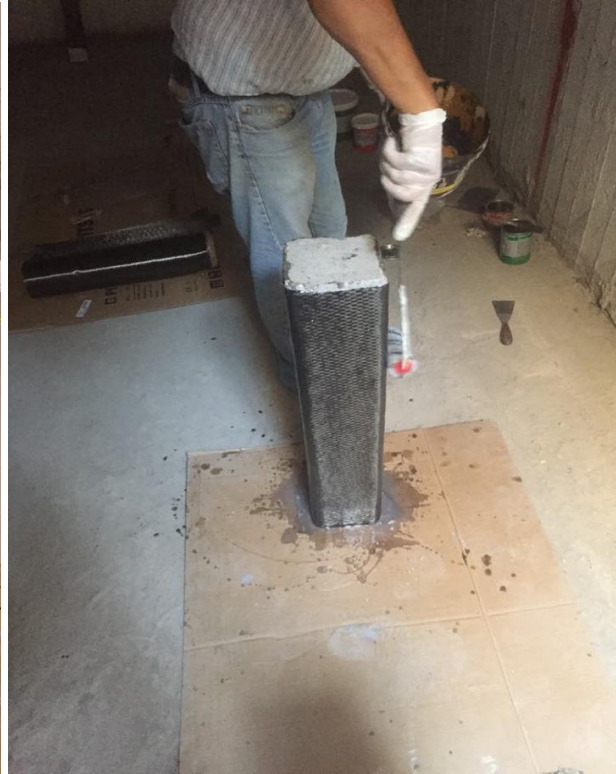
Στα δύο δοκίμια κατηγορίας C20/25 που τοποθετήθηκε μανδύας FRP έγινε λείανση στις γωνίες τους και αναμίξαμε με ιδιαίτερη προσοχή την εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών sinmast S2WV ως κόλλα εμποτισμού και μέσο συγκόλλησης του υφάσματος FRP τύπου S&P C-SHEET 240 με τα δοκίμια μας.

Στα δύο δοκίμια κατηγορίας C20/25 τοποθετήθηκαν στο μεν ένα ανθρακοέλασμα τύπου S&P C-Laminates SM(150/2000) και για την αγκύρωση αυτού χρησιμοποιήθηκε η εποξειδική ρητίνη σε μορφή πάστας (στόκου) 2-συστατικών SINMAST P103. Στο μεν δεύτερο δοκίμιο χρησιμοποιήθηκε μεταλλικό έλασμα πλάτους 15 εκ., πάχους 3χιλ. και μήκους όσο το μήκος της δοκού στο οποίο εφαρμόστηκε ο ίδιος τρόπος χημικής αγκύρωσης με το παραπάνω επιπλέον όμως τοποθετήθηκαν στα 5 εκατοστά από τα άκρα μηχανικά αγκύρια.

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν απεικονίζονται παρακάτω:



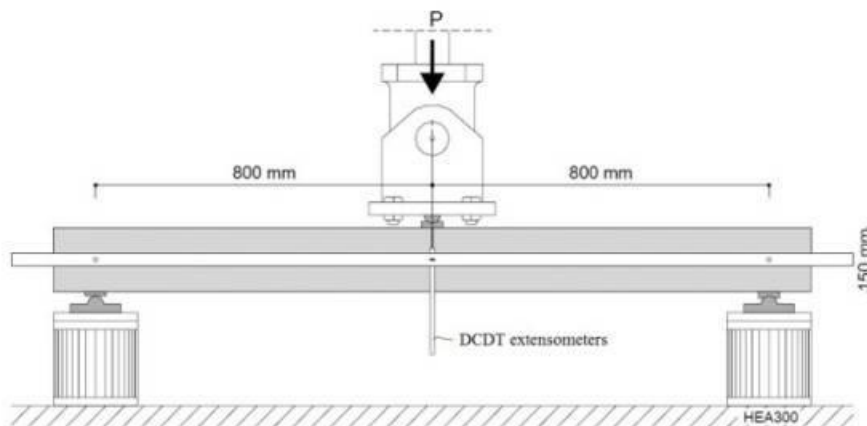
Εικόνα 2: Δοκίμιο με ανθρακοέλασμα



Εικόνα 3: Δοκίμιο με FRP

### 5.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ-ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

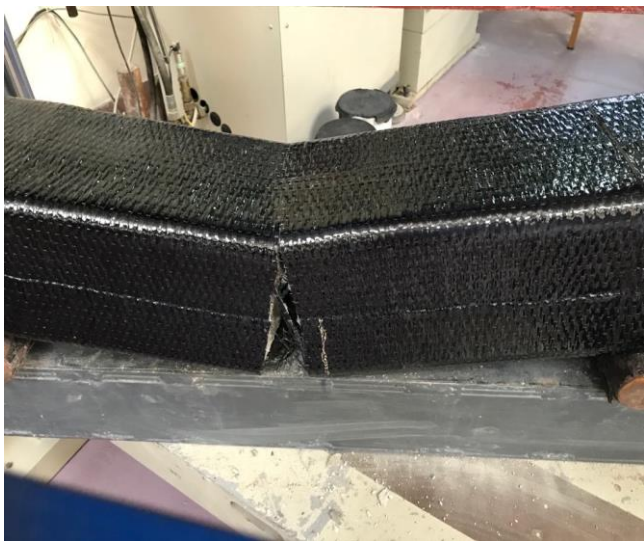
Οι δοκοί δοκιμάστηκαν σε στατική μονοτονική κάμψη τριών σημείων. Στην κάμψη τριών σημείων, οι δοκοί φορτίστηκαν σε ένα σημείο που βρίσκεται στο μέσο του ανοίγματος της δοκού. Όλες οι δοκοί ήταν αμφιέριστες με άνοιγμα 0,80μ. Το μέγιστο βέλος κάμψης των δοκών μετρήθηκε με ένα μηκυσιόμετρο στο μέσο περίπου της δοκού, το οποίο τοποθετήθηκε σε ειδικό βοηθητικό σύστημα αμφιέριστων πρισματικών ράβδων από αλουμίνιο που στηριζόταν στις διατομές στήριξης των δοκών. Οι πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 7: Πειραματική διάταξη



Οι δοκοί στις οποίες ασκήθηκε κάμψη απεικονίζονται παρακάτω:



Εικόνα 4: Δοκίμιο με FRP μετά την αστοχία



Εικόνα 5: Δοκίμιο με ανθρακοέλασμα μετά την αστοχία



Εικόνα 6: Δοκίμιο με μεταλλικό έλασμα μετά την αστοχία



Εικόνα 7: Λεπτομέρεια αστοχίας δοκιμίου με μεταλλικό έλασμα

#### 5.4 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα από την κάμψη των δοκών συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα:

<b>ΔΟΚΙΜΙΟ</b>	<b>ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ(mm)</b>	<b>ΑΣΚΟΥΜΕΝΗ ΔΥΝΑΜΗ (KN)</b>
<b>C16/20</b>	<b>1,51</b>	<b>15,42</b>
<b>C20/25</b>	<b>1,37</b>	<b>18,77</b>
<b>C20/25</b>	<b>1,43</b>	<b>19,34</b>
<b>C20/25 FRP</b>	<b>2,77</b>	<b>33,88</b>
<b>C20/25 FRP</b>	<b>2,35</b>	<b>27,22</b>
<b>C20/25 ΑΝΘΡΑΚΟΕΛΑΣΜΑ</b>	<b>3,89</b>	<b>58,25</b>
<b>C20/25 ΜΕΤΑΛΛΙΚΟ ΕΛΑΣΜΑ</b>	<b>3,9</b>	<b>96,48</b>
<b>C30/37</b>	<b>2,35</b>	<b>38,46</b>

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup> – Αποτελέσματα**

Απο τον παραπάνω πίνακα γίνεται αντιλήπτο πως ο πιο αποτελεσματικός τρόπος να ενισχύσουμε με δοκό σε κάμψη είναι το μεταλλικό έλασμα αφού παραλαμβάνει τέσσερις φορές μεγαλύτερη δύναμη απο τα μη ενισχυμένα δοκίμια.

Το ανθρακοέλασμα παρουσιάζει ύψηλη παραμόρφωση σχεδόν ίδια με το μεταλλικό έλασμα αλλά πολυ μικρότερη αντοχή στην ασκούμενη δύναμη, περίπου δύο φορές πανω απο το μη ενισχυμένο, όπου και αστοχεί η χημική αγκύρωση.

Η αστοχία στο μεταλλικό έλασμα ξεκινά απο το σημείο άσκησης της δύναμης και καταλήγει στο ακρο και ακριβως πανω στο αγκύριο.

Τα FRP φαίνεται να καλύπτουν μία πιο μικρής αντοχής ενίσχυση αφού παραλαμβάνουν κατα μεσο όρο μια φορά παραπάνω την ασκούμενη δύναμη του μη ενισχυμένου δοκιμίου πρίν την θραυση.

## **ΠΗΓΕΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1 : Φυσικές και Μηχανικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών. Πηγή : Καλαγασίδη Α. 2012.

Πίνακας 2 : Εφαρμογή διαφόρων ινών για ενίσχυση σκυροδέματος. Πηγή : Καλαγασίδη Α. 2012.

Πίνακας 3 : Τυπικές ιδιότητες ινών. Πηγή : Hannant, D. J. 1978.

Πίνακας 4 : Μηχανικές ιδιότητες θερμορρυθμιζόμενων ρητινών. Πηγή : ISIS Canada 2004.

Πίνακας 5 : Ιδιότητες εποξειδικών ρητινών. Πηγή : Τριανταφύλλου, Α. 2004.

Πίνακας 6 : Ίνες γυαλιού. Σύσταση και Ιδιότητες. Πηγή : Sathishkumar T.P. & Satheeshkumar, S. & Naveen, J. 2014. σελ. 1258 – 1275.

## ΠΗΓΕΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1 : Τυπικές Καμπύλες Τάσεων – Παραμορφώσεις Σκυροδέματος. Πηγή : Wight, J. K. & McGregor, J. G. 2012.

Σχήμα 2 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Σκυροδέματος για διάφορες ταχύτητες αξονικής θλιπτικής φόρτισης. Πηγή : Rüsçh, H. 1960.

Σχήμα 3 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Σκυροδέματος υπό επαναλαμβανόμενη αξονική φόρτιση. Πηγή : Sinha, B. P. & Gerstle, K. H. & Tulin, L. G. 1964.

Σχήμα 4 : Σχέση Τάσης – Παραμόρφωσης Κυλίνδρων Σκυροδέματος υπό τριαξονική θλιπτική πίεση. Πηγή : Richart, F. E. & Brandtzaeg, A. & Brown, R. L. 1928.

Σχήμα 5: Τυπικό διάγραμμα φορτίου - μετατόπισης για Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα σε κάμψη. Πηγή : Παπαθεοχάρης, Θ. 2012.

Σχήμα 6 : Κατηγορίες σύνθετων υλικών. Πηγή : Πετρόπουλος Φ. 2014.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agarwal, B. D. & Broutman, L. J. 1990. *Analysis and Performance of Fiber Composites*. New York : Wiley.

Αλεξάνδρου, Στ & Τρουπάκης, Β. 2006. Συγκριτική μελέτη συμπεριφοράς δοκών οπλισμένων με GFRP και χάλυβα. Βόλος : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας Πολυτεχνική Σχολή : Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Alhozaimy, A. M. & Soroushiad, P. & Mirza, F. 1996. « Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials » στο *Cement and Concrete Composites*, v. 18, is. 3. σ. 85 – 92.

Beaumont, P. W. R. 1989. *In Design with Advanced Composite Materials*, ed. Phillips, L. N. Berlin : Springer – Verlag.

Bencardino, F. & Rizzuti, L. & Spadea, G. & Swamy, R. N. 2008. «Stress – Strain Behavior of Steel Fiber – Reinforced Concrete in Compression » στο *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, v. 20, n. 3. σ. 255–263.

Γκρέτσα, Ε & Φλαμιάτος, Μ. 2017. Ενίσχυση τοιχοποιίας με υαλονήματα, ανθρακονήματα, ανθρακολάμες και ρητίνες. Πτυχιακή Εργασία. Πάτρα : ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας : Σχολή Σ. Τ. Ε. : Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Coomarasamy, A. & Goodman, S. 1997. «Investigation of the Durability Characteristics of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Materials in Concrete Environment» στο *America Society for Composites – Twelfth Technical Conference*, Michigan : Dearborn.

Gerritse, A, 1992. «Durability Criteria for Non-Metallic Tendons in an Alkaline Environment» στο *Proceedings of the First International Conference on Advance Composite Materials in Bridges and Structures (ACMBS – I)* Sherbrooke, Quebec : Canadian Society of Civil Engineers. σ. 129 – 137.

Hannant, D. J. (1978) *Fibre Cements and Fibre Composites*, J. Wiley & Sons Ltd., Chichester, England.

ISIS. 2004., «Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers» στο *Design Manual No .3 September 2004*. Canada.

Καλαγασίδη Α. 2012. Φράγματα Λιθορριπής με Ανάντη Πλάκα Ινοσκυροδέματος. Διπλωματική Εργασία. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. Πολυτεχνική Σχολή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

Katz, A. & Berman, N. & Bank, L.C. 1999. «Effect of High Temperature on the

- Bond Strength of FRP Rebars» στο *Journal of Composites for Construction*, May 1999.
- Μαρκαντωνάτος, Ν. & Δεμαρτίνος, Κ. 2003. Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα – συμπεριφορά SFRC υπό φόρτιση και ικανότητα σε διάτμηση δοκών (προσέγγιση με την μηχανική των θραύσεων). Πάτρα : 9<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών – 03», Μάρτιος 2003.
- Μιτολίδης, Γ. 2009. Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς δοκών από σκυρόδεμα ενισχυμένων με πολυμερή οπλισμένα με χάλυβα ή άνθρακα. Διπλωματική εργασία. Θεσσαλονίκη : Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Πολυτεχνική Σχολή – Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών : Τομέας Επιστήμης και Τεχνολογίας των Κατασκευών.
- Nataraja, M.C. & Dhang, N. & Gupta, A.P. 1999. « Stress – strain curves for steel – fiber reinforced concrete under compression » στο *Cement & Concrete Composites*, v. 21, is. 5 – 6. σ. 383 – 390.
- Παπαθεοχάρης, Θ. 2012. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία. Πειραματική Μελέτη Συμπεριφοράς σε Κάμψη Συμβατικά Οπλισμένων Δοκών Σκυροδέματος Ενισχυμένων με Μανδύες Ινοπλισμένου Τσιμεντοκονιάματος. Βόλος : Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Π.Μ.Σ.
- Πετρόπουλος, Φ. 2015. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού, παρασκευή και χαρακτηρισμός σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών άνθρακα. Μεταπτυχιακή εργασία Ειδίκευσης. Πάτρα : Τμήμα Επιστήμης των Υλικών.
- Porter, M. L. & Mehus, J. & Young, K. A. & O’Neil, E. F. & Barnes, B. A. 1997. «Aging of Fiber Reinforcement in Concrete» στο *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS – 3)*, v. 2. Japan, Sapporo : Japan Concrete Institute. σ. 59 – 66.
- Porter, M. L. & Barnes, B. A. 1998. «Accelerated Durability of FRP Reinforcement for Concrete Structures» στο *Proceedings of the First International Conference on Composites for Construction (CDCC 1998)*. Quebec, Sherbrooke. σ. 191 – 198.
- Richart, F. E. & Brandtzaeg, A. & Brown, R. L. 1928. «A study of the failure of concrete under combined compressive stresses.» *Bulletin No. 185, Univ. of Illinois Engrg. Experimental Station*, Urbana.
- Rüsch, H. 1960. «Researches toward a general flexural theory for structural concrete.» *ACI Journal*, v. 57, is.1. σ. 1 – 28.
- Sathishkumar T.P. & Satheeshkumar, S. & Naveen, J. 2014. Glass fiber – reinforced polymer composites – A review στο *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, v. 33, is. 13. σελ. 1258 – 1275.

Sinha, B. P. & Gerstle, K. H. & Tulin, L. G. 1964. "Stress-strain relation for concrete under cyclic loading." *ACI Journal*, v. 61, is.2. σ. 195 – 211.

Τριανταφύλλου, Α. 2004. *Ενισχύσεις κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος με σύνθετα υλικά*. Πάτρα : Τριανταφύλλου Α.

Wight, J. K. & McGregor, J. G. 2012. *Reinforced Concrete. Mechanics and Design*. USA : Pearson.