ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ
ΕΡΓΑΣΙΑ
ΖΩΓΡΑΦΙΑ Χ.
ΠΑΠΑΔΑΚΗ**

ΤΜΗΜΑ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΟΡΥΚΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ

# *«ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ»*

Εξεταστική Επιτροπή

Ζαχαρίας Αγιουτάντης, Καθηγητής (Επιβλέπων)
Γεώργιος Εξαδάκτυλος, Καθηγητής
Κωνσταντίνος Προβιδάκης Καθηγητής

Χανιά
Οκτώβριος, 2010

# Περίληψη

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα σε τεχνικά έργα είτε ως εγχυόμενο είτε ως εκτοξευόμενο. Λόγω της ύπαρξης των ινών το σκυρόδεμα αυτό εμφανίζει διαφορετική μηχανική συμπεριφορά από το άοπλο ή οπλισμένο σκυρόδεμα χωρίς ίνες.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμο και της αντοχής σε κάμψη εφελκυστικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος με την χρήση χαλύβδινων ινών και πολυπροπυλενίου με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων άοπλων και ινοπλισμένων δοκιμίων με διαφορετικά μήκη ινών και περιεκτικοτήτων. Εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την αυξομείωση των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος συγκριτικά με το άοπλο.

Τα παραπάνω εξετάζονται με γνώμονα την πιθανή εφαρμογή ινοπλισμένου σκυροδέματος σε τελικές επενδύσεις σηράγγων.

# Πρόλογος

Η παρούσα εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί με επιτυχία χωρίς την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση ορισμένων προσώπων του Πολυτεχνείου Κρήτης τα οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Πολλές ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα μου, στην παρούσα εργασία, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. **Ζαχαρία Αγιουτάντη** για την επιλογή του πολύ ενδιαφέροντος θέματος, την άριστη συνεργασία που είχαμε, την πολύτιμη βοήθεια του όποτε την χρειαζόμουνα, την αμέριστη συμπαράσταση του, καθώς επίσης και για τις συμβουλές και τα εύστοχα σχόλια που έκανε κατά την διόρθωση της εργασίας αυτής.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω και στον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. **Κωνσταντίνο Προβιδάκη**, καταρχάς για την παραχώρηση του εξοπλισμού του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής που ήταν αναγκαίος για την παρασκευή και αποθήκευση των δοκιμίων και την εκτέλεση δοκιμών κάμψης καθώς και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή.

Τον Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. **Γεώργιο Εξαδάκτυλο**, για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας μου

Τον Μηχανικό Μεταλλείων κ. **Στυλιανό Μαυριγιαννάκη** για την υπομονή, συμπαράσταση και την βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας και κυρίως στο πειραματικό κομμάτι.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Μηχανικό Ορυκτών Πόρων κ. **Ευάγγελο Λιαράκο** για την πολύτιμη βοήθεια του τόσο στον σχεδιασμό όσο και στην εκτέλεση των πειραμάτων

Τον Μηχανικό Ορυκτών Πόρων κ. **Διονύση Βαβαδάκη** για την βοήθεια του στην εκτέλεση των πειραμάτων καθώς και τον Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. **Κωνσταντίνο Κακλή** για τις απαραίτητες διορθώσεις επί του κειμένου και την βοήθεια του στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Τέλος ευχαριστώ τον Γεωτεχνικό Μηχανικό κ. **Χρύσανθο Στειακάκη** για την κριτική επιλογή των παραμέτρων περιεκτικότητας ινών στο σκυρόδεμα.

Επίσης ευχαριστίες οφείλω στις εταιρείες **Sika-Fibers** και **Inomix/Sidenor S.A**, οι οποίες μας προμήθευσαν δωρεάν τις απαραίτητες ποσότητες ινών για την ολοκλήρωση των δοκιμών.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Μηχανικό Ορυκτών Πόρων **Λεωνίδα Παγάνη** ο οποίος ολοκλήρωσε την διπλωματική του σε παρόμοιο θέμα και δημιούργησε την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης καθώς και για την αμέριστη συμπαράσταση του σε οποιοδήποτε πρόβλημα προέκυπτε κατά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και την άμεση επίλυση όποιων προβλημάτων και ένα είχα που αφορούσαν την εργασία.

Τέλος ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου **Χαράλαμπο** και **Βαρβάρα** που με στήριξαν ψυχολογικά και ηθικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης κυρίως στις δύσκολες στιγμές.

# Πίνακας Περιεχομένων


| | |
|---|---|
| Κεφάλαιο 1 | 1 |
| Εισαγωγή | 1 |
| Κεφάλαιο 2ο | 3 |
| Σκυρόδεμα–Ινοπλισμένο | 3 |
| 2.1 Το σκυρόδεμα | 3 |
| 2.1.1 Σύσταση και βασικές ιδιότητες | 3 |
| 2.1.2 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος | 4 |
| 2.1.3 Κατηγορίες σκυροδέματος | 4 |
| 2.2. Υλικά Παρασκευής Σκυροδέματος | 5 |
| 2.2.1 Το Τσιμέντο | 5 |
| 2.2.2 Παραγωγή | 5 |
| 2.2.3 Τύποι τσιμέντου | 9 |
| 2.2.4 Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων | 10 |
| 2.3 Το Νερό | 11 |
| 2.3.1 Γενικά | 11 |
| 2.4 Αδρανή | 13 |
| 2.4.1 Προέλευση αδρανών | 13 |
| 2.4.2 Η μορφή των κόκκων | 13 |
| 2.4.3 Αντοχή των αδρανών: | 14 |
| 2.4.4 Γενικά για τα αδρανή υλικά: | 15 |
| 2.5 Οπλισμένο σκυρόδεμα | 16 |
| 2.6 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα | 17 |
| Ιδιοτητες Ινοπλισμενου Σκυροδεματος | 19 |

2.7 Είδη Ινών 19

2.7.1 Χαλύβδινες Ίνες 21

Παραγωγή Χαλύβδινων Ινών 23

2.7.2 Ίνες Υάλου 27

2.7.3 Συνθετικές Ίνες 29

2.7.4. Ανθρακικές ίνες 37

2.7.5 Φυσικές ίνες 38

2.8 Μίξη διαφορετικών ινών 39

2.9 Κριτήρια επιλογής ινών 39

2.10 Πεδίο Εφαρμογής 42

Κεφάλαιο 3ο 48

Σχεδίαση και υλοποίηση πειραματικής διαδικασίας 48

Γενικά 48

3.1 Είδη ινών και χαρακτηριστικά τους 49

3.1.1 Ίνες πολυπροπυλενίου 49

3.1.2 Χαλύβδινες ίνες 50

3.2 Επιλογές για τη σκυροδέτηση δοκιμίων 51

3.3 Σχεδίαση πειραματικής διαδικασίας 52

3.4 Διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος 54

3.5 Εκτέλεση δοκιμών 58

3.5.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης 58

3.5.2 Δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό 60

3.5.3 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων 62

3.5.3.1 Εντατική κατάσταση 64

3.5.3.2 Μετρούμενα Μεγέθη 64

3.5.3.3 Θεωρία της δοκιμής 65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο 67

Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδιακασίας 67

4.1 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης 69

4.2 Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού 71

4.2.1 Ίνες Πολυπροπυλενίου 71

4.2.2 Διαγράμματα με τυπική απόκλιση για ίνες πολυπροπυλενίου 72

4.2.3 Ίνες Χαλύβδινες 74

4.2.4 Διαγράμματα με τυπική απόκλιση για δοκίμια με χαλύβδινες ίνες 76

4.3 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων 79

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο 81

Συμπεράσματα και Προτάσεις 83

5.1 Συμπεράσματα 83

5.2 Προτάσεις 85

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία 86

Ελληνική Βιβλιογραφία 87

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας δημιούργησε τις προϋποθέσεις για εξέλιξη κατασκευή των μεγάλων τεχνικών έργων υποδομής που διευκολύνουν τον άνθρωπο στην καθημερινότητα του και συμβάλουν στην καλύτερη λειτουργία των μεγάλων αστικών κέντρων. Η ανάγκη βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων του συμβατικού σκυροδέματος που χρησιμοποιείται οδήγησαν την έρευνα στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες από χάλυβα (SFRC) και ίνες από πλαστικά υλικά, όπως αμιάντο (AFRP), γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP) και οργανικά υλικά. Οι ίνες αυτές είναι ομοιόμορφα διάσπαρτες με τυχαίο προσανατολισμό .Η ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα σύμφωνα με παλαιότερες έρευνες του προσδίδει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, γι' αυτό και χρησιμοποιείται ευρέως στις επισκευές και ενισχύσεις των κατασκευών. Σημειώνεται ότι το πεδίο εφαρμογών του διευρύνεται διαρκώς .

Από τους αρχαίους χρόνους ο άνθρωπος έκανε προσπάθειες για να βελτιώσει τη συμπεριφορά των οικοδομικών υλικών μέσω της προσθήκης ινών, ούτως ώστε να περιορίσει την ψαθυρή συμπεριφορά τους, δηλαδή να περιορίσει των σχηματισμό ρωγμών και την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς τους.. Έτσι, η προέλευση του ινοπλισμένου σκυροδέματος χρονολογείται περισσότερο από εκατό έτη. Από τότε ξεκίνησε και συνεχίζεται μέχρι τώρα μια διαδικασία εξέλιξης του υλικού αυτού που καλύπτει εκτενείς απαιτήσεις από άποψη αντοχής και παραμόρφωσης, ενώ μπορεί να προσαρμόζεται στην εκάστοτε γεωμετρία.

Σήμερα, χρησιμοποιείται περισσότερο στις κατασκευές βιομηχανικών δαπέδων και λιγότερο σε οικοδομικές εργασίες. Στις σήραγγες, χρησιμοποιούνται ίνες μαζί με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή σκυροκονίαμα, το οποίο καλύπτει συνήθως κατά την πρώτη φάση υποστήριξης, την οροφή και τα τοιχώματα των σηράγγων.

Όλες οι κατασκευές από σκυρόδεμα μπορούν να ρηγματωθούν. Οι ρωγμές είναι αποτέλεσμα διαφόρων αιτίων, που προκαλούν στην κατασκευή τάσεις άρα και παραμορφώσεις. Οι ρηγματώσεις επηρεάζουν την εμφάνιση αλλά πολύ περισσότερο την

αντοχή, τη δυνατότητα δηλαδή της κατασκευής να φέρει με ασφάλεια τα φορτία για τα οποία έχει σχεδιαστεί. Οι ίνες σύμφωνα με μέχρι τώρα μελέτες μειώνουν την ρηγμάτωση και αυτό έχει ως συνέπεια την ολοένα και περισσότερο χρήση της στα τεχνικά έργα.

Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού και δοκιμές κάμψης. Οι δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού αφορούν δύο ομάδες δοκιμίων διαμέτρου 50mm και 75mm, άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν α) χαλύβδινες διαστάσεων 45 mm και 60 mm με περιεκτικότητα ινών 20, 25 και 30 kg/m$^3$ και β) πολυπροπυλενίου μήκους 6, 12 και 18mm και περιεκτικότητας 0.5, 0.7 και 1 kg/m$^3$. Η διερεύνηση επικεντρώθηκε στη μεταβολή των ιδιοτήτων της εφελκυστικής αντοχής και της αντοχής σε κάμψη με τον έλεγχο διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος όσον αφορά την περιεκτικότητα τους σε ίνες. Οι δοκιμές κάμψης έγιναν σε πρισματικά δοκίμια 15*15*75cm με φόρτιση τριών σημείων.

Η διάρθρωση της παρούσας εργασίας έχει ως εξής:

Στο *Κεφάλαιο 2*, γίνεται μια αναφορά σχετικά με την σύσταση του σκυροδέματος, των ινών και των εφαρμογών του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Στο *Κεφάλαιο 3*, περιγράφονται η σχεδίαση και η υλοποίηση της πειραματικής διαδικασίας καθώς και η περιγραφή των δοκιμών που εφαρμόστηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Στο *Κεφάλαιο 4*, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας τόσο για τα άοπλα δοκίμια και τα ινοπλισμένα.

Στο *Κεφάλαιο 5*, εξάγονται συμπεράσματα και γίνονται προτάσεις για βελτίωση της εργασίας αλλά και την περαιτέρω διερεύνηση της.

# Κεφάλαιο 2ο

Σκυρόδεμα–Ινοπλισμένο

## 2.1 Το σκυρόδεμα

### 2.1.1 Σύσταση και βασικές ιδιότητες

Το σκυρόδεμα είναι τεχνητό υλικό που αποτελείται κατά βάση από αδρανή (χαλίκι και άμμο), συγκολλημένα μέσω του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού σε μονολιθική μάζα.

Τα αδρανή αποτελούν το 60-80% του συνολικού όγκου του σκυροδέματος συνεπώς είναι και το κύριο συστατικό του. Είναι μεν το φθηνό συστατικό, αλλά έχουν πολύ ικανοποιητικές βασικές ιδιότητες όπως η μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα σε διάρκεια και περιβαλλοντικές επιδράσεις (χημικές ουσίες, υγρασία, κύκλους ζέστης και παγωνιάς, υψηλές θερμοκρασίες), σταθερότητα όγκου και υδατοστεγανότητα (Smith, 2001).

Ο τσιμεντοπολτός αποτελείται από τσιμέντο και νερό και καλύπτει την επιφάνεια των λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών. Μιά χημική αντίδραση η «ενυδάτωση» προκαλεί τη στερεοποίηση της πάστας που αποκτά έτσι υψηλές αντοχές, δημιουργώντας μιά συμπαγή μάζα - το σκυρόδεμα. Ενώ έχει σημαντικά υψηλότερο κόστος από τα αδρανή, στη σκληρυμένη του μορφή ο τσιμεντοπολτός δεν έχει εξίσου καλές βασικές ιδιότητες. Ο ρόλος του είναι να συνδέει τα κενά μεταξύ των αδρανών και να συνδέει τα αδρανή, μετατρέποντας τα, από σύνολο ισχυρών αλλά ασύνδετων κόκκων σε τεχνητό πέτρωμα. Επιπλέον λειτουργεί σαν λιπαντικό μεταξύ των κόκκων των αδρανών, έτσι ώστε το νωπό σκυρόδεμα να είναι μια ρευστή αλλά συνεκτική μάζα (αποφυγή απόμειξης). Αυτή η διαδικασία αποτελεί και το μεγάλο πλεονέκτημα του σκυροδέματος: είναι εύπλαστο όταν αναμιγνύεται και ανθεκτικό όταν σκληραίνει. Αυτό το χαρακτηριστικό εξηγεί γιατί ένα απλό υλικό μπορεί να είναι ιδανικό γιά το κτίσιμο ουρανοξυστών, γεφυριών, σπιτιών κ.λ. Για να επιτευχθεί η ανθεκτικότητα σκυροδέματος απαιτείται προσεκτική ανάμιξη μελετημένων αναλογιών των συστατικών του. Ένα σωστά σχεδιασμένο σκυρόδεμα διαθέτει καλή εργασιμότητα όταν είναι φρέσκο και εξαιρετική ανθεκτικότητα και αντοχή όταν σκληρύνεται. Ο λόγος νερού προς τσιμέντο στο σκυρόδεμα καθορίζει την ποιότητα της πάστας και κατ'επέκταση την αντοχή.

### 2.1.2 Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος

Από τη φύση του το σκυρόδεμα είναι ανομοιογενές υλικό. Η ανομοιογένεια αυτή οφείλεται σε μικροδιαφορές στην ποιότητα των υλικών (κυρίως των αδρανών) και την αναλογία τους στο μίγμα (λόγω π.χ. απορρύθμισης των ζυγιστηρίων, του αναμικτήρα κλπ) και σε διαφορές στη διάστρωση, συμπύκνωση ή συντήρηση του σκυροδέματος από θέση σε θέση κατασκευής (π.χ. περιοχές μεγάλης ή μικρής πυκνότητας οπλισμού, επιφάνεια ή εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου, κρυφή ή βάση ενός υποστυλώματος ή τοιχώματος κλπ). Λόγω της ανομοιομορφίας αυτής η ποιότητα, και πιο συγκεκριμένα η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε ένα σημείο της κατασκευής, $\mathbf{f_c}$, θεωρείται σαν τυχαία μεταβλητή, χαρακτηρίζεται δηλ από μία πιθανοτική κατανομή, με μέσο όρο, $\mathbf{f_{cm}}$, τυπική απόκλιση **s** κλπ.

Καθοριστικά για την ασφάλεια μιας κατασκευής είναι τα αδύνατα σημεία της. Γι' αυτό ο σχεδιασμός των δομικών στοιχείων βασίζεται όχι στη μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, $\mathbf{f_{cm}}$, αλλά σε μία μικρότερη τιμή, τη χαρακτηριστική αντοχή, $\mathbf{f_{ck}}$. Κατά γενικά αποδεκτή σήμερα σύμβαση, σαν χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου σκυροδέματος (δηλ. αν ολόκληρη η ποσότητα του σκυροδέματος μετατρεπόταν σε δοκίμια, μόνο το ποσοστό υποαντοχής p=5% των αντοχών αυτών των δοκιμίων θα ήταν κάτω από την χαρακτηριστική αντοχή και το υπόλοιπο 95 % θα ήταν πάνω απ' αυτήν). Έτσι αν η αντοχή του σκυροδέματος ακολουθεί την κανονική κατανομή πιθανοτήτων (κατανομή Gauss), με μέση τιμή $\mathbf{f_{cm}}$ και τυπική απόκλιση **s**, είναι :$\mathbf{f_{ck} = f_{cm} - 1{,}645\ s}$ όπου ο συντελεστής –1,645 αντιστοιχεί σε τιμή της σωρευτικής συνάρτησης κατανομής κατά Gauss ίση με 5%. Έτσι δύο σκυροδέματα με διαφορετική διασπορά ή διαφορετικό έλεγχο ποιότητας και επομένως διαφορετικές τιμές της τυπικής απόκλισης, s, θεωρούνται ισοδύναμα από απόψεως ασφάλειας, αν έχουν την ίδια χαρακτηριστική αντοχή, $\mathbf{f_{ck}}$. Αυτό σημαίνει πως αυτό που έχει τη μεγαλύτερη διασπορά ή το χειρότερο έλεγχο ποιότητας (δηλ. τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση), θα πρέπει να έχει μεγαλύτερη μέση τιμή $\mathbf{f_{cm}}$ και επομένως μεγαλύτερο κόστος (Μιχάλης, 2007).

### 2.1.3 Κατηγορίες σκυροδέματος

Για τη μελέτη και κατασκευή των έργων χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες σκυροδέματος του Κανόνισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος (ΚΤΣ-97) (Πίνακας, 2.1), όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή εκφραζόμενη σε MPa που διαπιστώνεται όταν ο έλεγχος γίνεται με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 15 και ύψους 30 cm και ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή όταν ο έλεγχος γίνεται με κυβικά δοκίμια ακμής 15 cm όπου ο πρώτος αριθμός κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου ($f_{ck,κυλ}$), ενώ ο

δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή κύβου ($f_{ck,cube}$) σε MPa, στις 28 ημέρες («Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97», ΦΕΚ 315/Β/17-4-97).

**Πίνακας 2.1** Κατηγορίες σκυροδέματος (πηγή: πίνακας 2.2 από ΚΤΣ-97)

| **Κατηγορία σκυροδέματος** | $f_{ck,κυλ.}$ (MPa) | $f_{ck,κύβου}$ (MPa) |
|---|---|---|
| C8/10 | 8 | 10 |
| C12/15 | 12 | 15 |
| C16/20 | 16 | 20 |
| C20/25 | 20 | 25 |
| C25/30 | 25 | 30 |
| C30/37 | 30 | 37 |
| C35/45 | 35 | 45 |
| C40/50 | 40 | 50 |
| C45/55 | 45 | 55 |
| C50/60 | 50 | 60 |

## 2.2. Υλικά Παρασκευής Σκυροδέματος

### 2.2.1 Το Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι βιομηχανικό κοκκώδες υλικό με υδραυλικές ιδιότητες. Δηλαδή σκληραίνει όταν αναμιγνύεται με το νερό σχηματίζοντας προϊόντα αδιάλυτα στο νερό. Είναι γνωστό ότι το τσιμέντο αποτελεί από αρχαιοτάτων χρόνων εξαίρετη υδραυλική κονία με εξαιρετικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται ευρύτατα και σήμερα σε πολλές πρακτικές εφαρμογές, εκτός από την βιομηχανοποιημένη διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος, καθώς εκτός από υψηλή υδραυλικότητα συνδυάζει και υψηλές αντοχές. Το τσιμέντο είναι τεχνητή λεπτόκοκκη κονία, η οποία παρασκευάζεται με λεπτή άλεση του κλίνκερ. **Κλίνκερ** ονομάζεται διεθνώς το προϊόν που προκύπτει από την όπτηση μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων.

Το τσιμέντο, όταν αναμιχθεί με νερό, πήζει και σκληραίνει τόσο στον αέρα όσο και μέσα στο νερό. Μετά τη σκλήρυνση δεν διαλύεται στο νερό. Συνδυάζει μεγάλη υδραυλική ικανότητα και υψηλές αντοχές, γι' αυτό έχει ευρεία χρήση στις δομικές κατασκευές, όπως επίσης και στα υδραυλικά έργα (Μιχάλης, 2007).

.

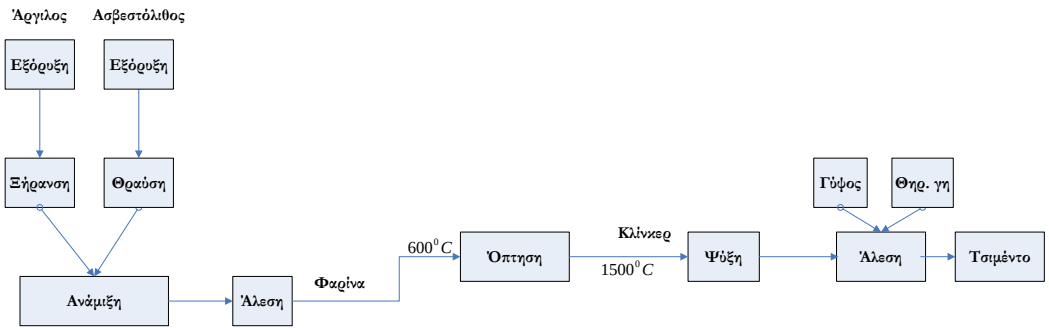
### 2.2.2 Παραγωγή

Το τσιμέντο, σε αντίθεση με άλλες κονίες ,είναι βιομηχανικό προϊόν που παρασκευάζεται από τη σύγχρονη όπτηση **ασβεστόλιθου** και **αργίλου.**

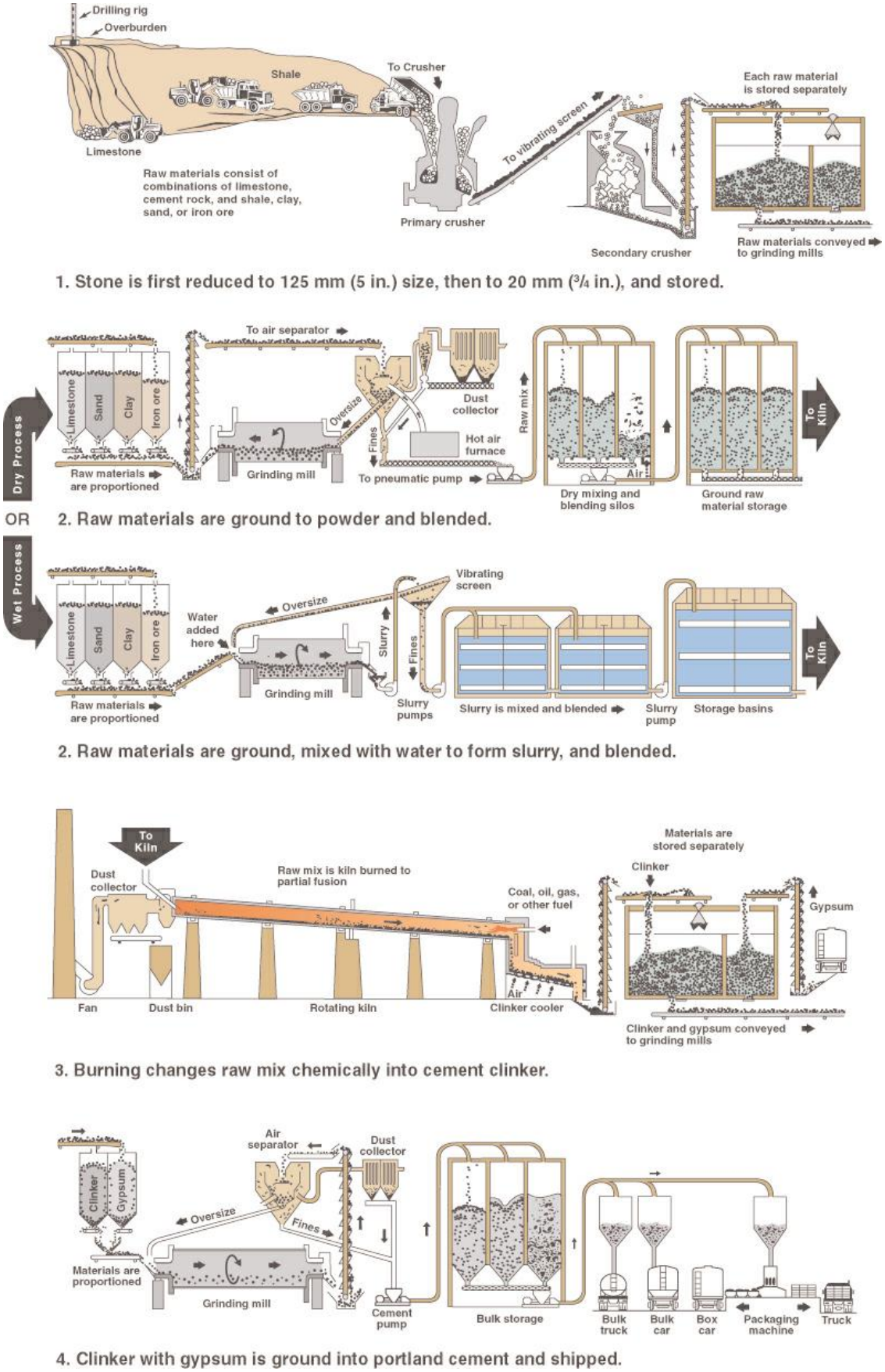
Η σειρά των εργασιών από την εξόρυξη των πρώτων υλών ως το τελικό προϊόν είναι η ακόλου-

θη (σχήμα 2.1) ("THRAKON").

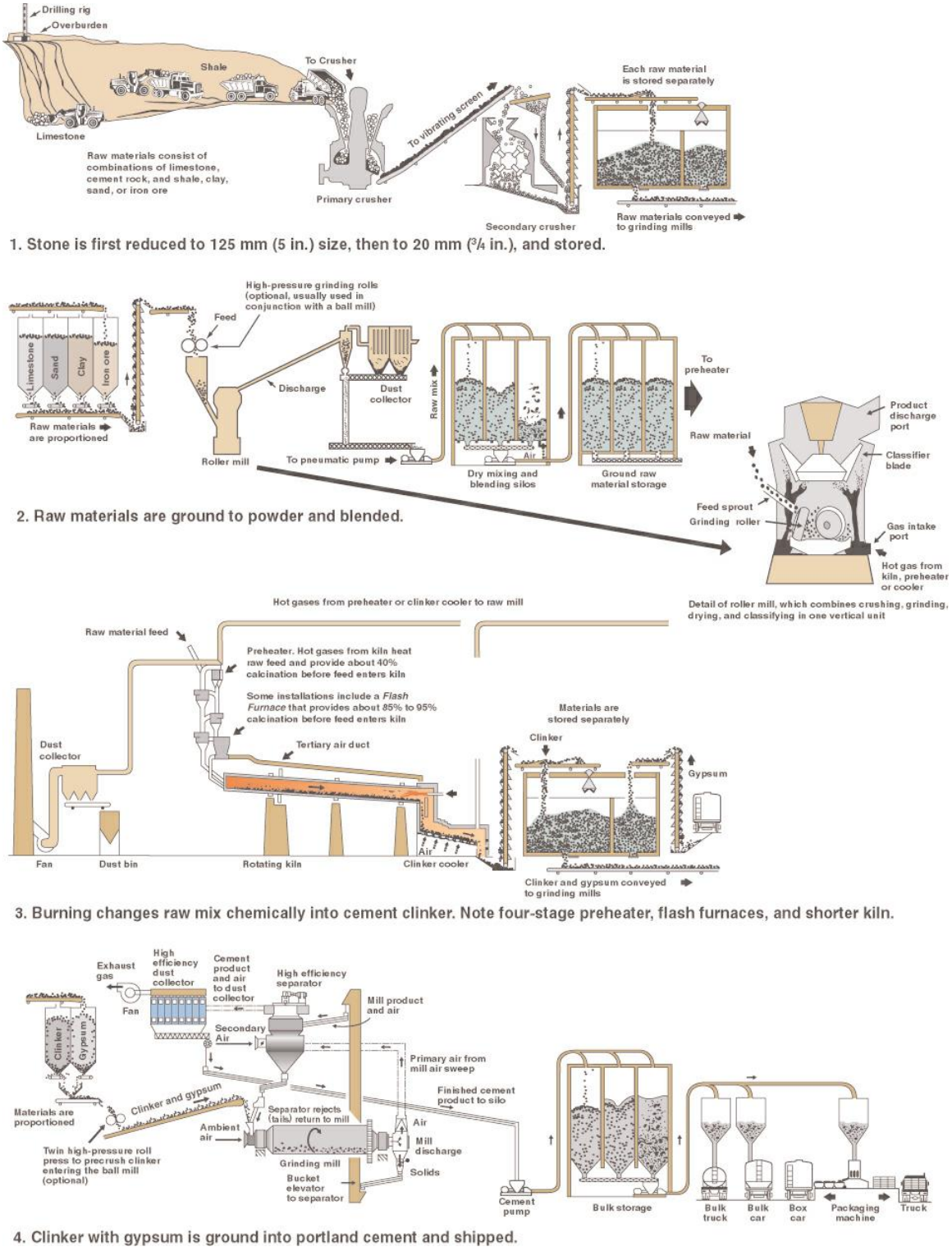
- Αρχικά οι πρώτες ύλες εξωρύσσονται στα λατομεία και μεταφέρονται στις μονάδες θραύσης όπου θραύονται σε μικρά τεμάχια από σπαστήρες ώστε να τεμαχιστούν και να αποκτήσουν διάμετρο μερικών εκατοστών, και στη συνέχεια αποθηκεύονται σε ανεξάρτητους χώρους.
- Μετά την έξοδο τους από τους σπαστήρες γίνεται ανάμειξη των δύο υλικών. (**προομοιογενοποίηση**)
- Στη συνέχεια τροφοδοτούνται οι μύλοι συνάλεσης (σφαιρόμυλοι), με μίγμα ελεγχόμενης δοσολογίας από τις πρώτες ύλες, ώστε να αποκτήσουν διάμετρο λίγων χιλιοστών. Το προϊόν της αλέσεως, λεπτόκοκκο μείγμα ασβεστολιθικής και αργιλικής άμμου, αποθηκεύεται σε σιλό και ονομάζεται **φαρίνα**
- Η φαρίνα αποθηκεύεται σε μεγάλα σιλό όπου συντελείται η ομογενοποίηση.
- Το μείγμα εισάγεται στους προθερμαντάς στο επάνω άκρο κυλινδρικής καμίνου, η οποία περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονα της. όπου γίνεται σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας στους $600^0$C στο κάτω άκρο της και στο επάνω άκρο φτάνει στους 1500 $^o$C που είναι και το σημείο εξόδου των προϊόντων. Τα προϊόντα της οπτήσεως ονομάζονται **εκβολάδες** ή διεθνώς **klinker**. Έχουν διάμετρο λίγων εκατοστών, χρώμα μαυροπράσινο και αποτελούν, κατά κάποιο τρόπο, τα πετρώματα του τσιμέντου.
- Το κλίνκερ, ανάλογα με την επιθυμητή ποιότητα τσιμέντου που πρόκειται να παραχθεί, συναλέθεται με άλλες πρώτες ύλες όπως είναι η γύψος και οι ποζολάνες. Ετσι προκύπτει μια πολύ λεπτή σκόνη, το τσιμέντο (σχήμα 2.4).



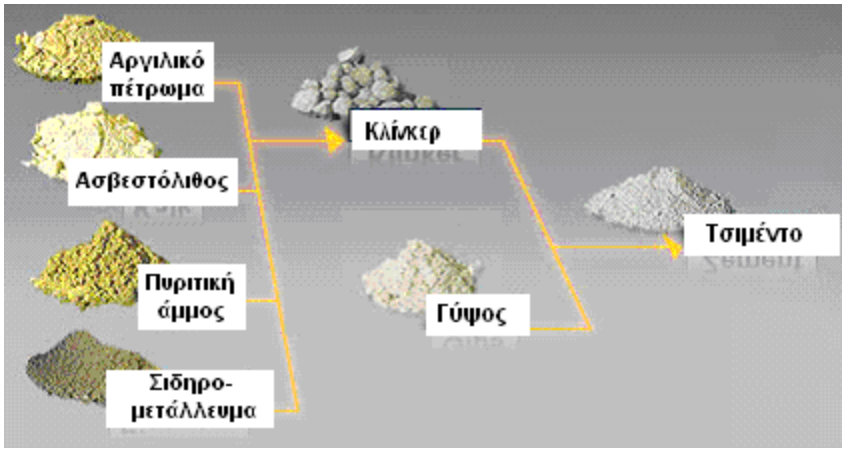

**Σχήμα 2. 1: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής του τσιμέντου Portland**




**Σχήμα 2. 2: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας παρασκευής τσιμέντου Portland (Kosmatka, et.al, 2003)**




**Σχήμα 2. 3: Σχηματική απεικόνιση σύγχρονης ξηρής διαδικασίας παρασκευής τσιμέντου Portland (Kosmatka, et.al, 2003)**




**Σχήμα 2. 4: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010)**

### 2.2.3 Τύποι τσιμέντου

Κάθε χώρα παγκοσμίως παρασκευάζει τσιμέντο, χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Έτσι ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, το τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστολιθική, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθο κλπ. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι τσιμέντου και στον πίνακα 2.3 οι συμβολισμοί των συστατικών του τσιμέντου.

**Πίνακας 2.2:** Βασικοί τύποι τσιμέντου (Τσαματσούλης, 2010)

| Τύπος | Περιγραφή |
|---|---|
| CEM I | Τσιμέντο Πόρτλαντ |
| CEM II | Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ |
| CEM III | Σκωριοτσιμέντο |
| CEM IV | Ποζολανικό Τσιμέντο |
| CEM V | Σύνθετο Τσιμέντο |

**Πίνακας 2.3:** Συμβολισμοί συστατικών του τσιμεντου (Τσαματσούλης, 2010)

| Συστατικό | Συμβολισμός |
|---|---|
| Κλίνκερ | K |
| Ποζολάνη φυσική | P |
| Ποζολάνη φυσική ψημένη | Q |
| Ιπτάμενη Τέφρα πυριτική | V |
| Ιπτάμενη Τέφρα ασβεστούχος | W |

| | |
|---|---|
| Ψημένος σχιστόλιθος | T |
| Ασβεστόλιθος | L |
| Σκωρία υψικαμίνου | S |
| Πυριτική παιπάλη | D |

***Τσιμέντο Τύπου I* (CEM I), Πόρτλαντ αμιγή** ( K >95%)**:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ και γύψου και στα οποία επιτρέπεται η προσθήκη μέχρι 3% προϊόντων που προέρχονται από θραύση ή κονιοποίηση φυσικών ή τεχνητών υλικών, όπως ασβεστολίθων, βασάλτου, σκουριών, γης διατόμων, μπετονιτών, ιπτάμενης τέφρας κ.ά.

***Τσιμέντο Τύπου II* (CEM II), Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ (**K,P,Q,V,W,T,L,S,D) **A: 80%<K<94 %, B: 65%<K<79%:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ - Πόρτλαντ, γύψου και πουζολάνης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης Το ποσοστό της ποζολάνης καθορίζεται από το αδιάλυτο υπόλειμμα του τσιμέντου, το οποίο δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20%. Δεν είναι απαραίτητο να ικανοποιούν τη δοκιμή ποζολανικότητας. Ειδικά το τσιμέντο με 10% αδιάλυτο υπόλειμμα ονομάζεται τσιμέντο πόρτλαντ ελληνικού τύπου.

***Τσιμέντο Τύπου III* (CEM III), Σκωριακά τσιμέντα ή σκωριοτσιμέντα** (K,S) **A: 35%<K<65%, B: 20%<K<34%, C: 5%<K<19%**: χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ, γύψου και σκωρίας μόνο σε ποσοστά από 36-95% κατά μέγιστο.

***Τσιμέντο Τύπου IV* (CEM IV), Πουζολανικά τσιμέντα A: 65% <K<89%, B: 45%<K<64%** :χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση Κλίνκερ - Πόρτλαντ, γύψου και πουζολάνης που μπορεί να είναι φυσική ή ψημένη, ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστούχα και πυριτική παιπάλη. Δεν μπορεί να περιέχει σκωρία.

***Τσιμέντο Τύπου V* (CEM V), Σύνθετα τσιμέντα A: 40%<K<64%, B: 20%<K<39%:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και σε ίσο ποσοστό πουζολάνη φυσική ή ψημένη ή πυριτική ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά από 36-50% κατά μέγιστο. Δεν μπορεί να περιέχει πυριτική παιπάλη (Τσακαλάκης, 2010).

### 2.2.4 Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων

Σύμωνα με τα νεα Ευρωπαϊκα Πρότυπα EN 197-1 και 197-2 προδιαγράφονται 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη σε κονίαμα πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής. Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής των 28 ημερών χαρακτηρί-

ζει την συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παρακάτω (Πίνακας 2.4) περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N, R (Τσαματσούλης, 2010).

**Πίνακας 2.4:** Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές (ΕΛΟΤ ΕΝ 197-1).

| Κατηγορία Αντοχής | Αντοχή σε Θλίψη MPa | | | | Χρόνος αρχής πήξης min | Σταθερότητα όγκου (Διαστολή) mm |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Πρώιμη αντοχή | | Τυπική αντοχή | | | |
| | 2 ημέρες | 7 ημέρες | 28 ημέρες | | | |
| 32,5 N | - | >16,0 | >32,5 | <52,5 | >75 | <10 |
| 32,5 R | >10,0 | - | | | | |
| 42,5 N | >10,0 | - | >42,5 | <62,5 | >60 | |
| 42,5 R | >20,0 | - | | | | |
| 52,5 N | >20,0 | - | >52,5 | - | >45 | |
| 52,5 R | >30,0 | - | | | | |

Οι αριθμοί παριστάνουν την αντοχή των τσιμέντων σε MPa όπως προσδιορίζεται συμβατικά σύμφωνα με τον κανονισμό. Ο ρυθμός αυξήσεως της αντοχής του τσιμέντου επιτυγχάνεται συνήθως με αύξηση της λεπτότητας (Blaine). Ένα λεπτόκοκκο τσιμέντο (Blaine=4000 $cm^2/g$) έχει γρηγορότερο ρυθμό αυξήσεως της αντοχής από ένα χονδροαλεσμένο τσιμέντο (Blaine=2500-3000 $cm^2/g$). Θεωρητικά οι τύποι των τσιμέντων θα ήταν 9. Οι παραγόμενοι όμως τύποι είναι λιγότεροι γιατί είτε δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί πρακτικά εφικτοί, είτε δεν είναι απαραίτητοι στην πράξη.

## 2.3 Το Νερό

### 2.3.1 Γενικά

Ένα από τα κυριότερα συστατικά του σκυροδέματος είναι το νερό. Το νερό που θα χρησιμοποιηθεί, τόσο για την παρασκευή όσο και για τη συντήρηση του σκυροδέματος, πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ-345 και του άρθρου 4.4 και ΚΤΣ-97, δηλαδή να μην περιέχει ελεύθερα οργανικά ή ανόργανα οξέα, οργανικές ουσίες και άργιλο εν αιωρήσεις, διαλυτά σάκχαρα σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 0,25%, θειικά και χλωριούχα άλατα κ.λπ γιατί μπορούν να βλάψουν την ποιότητα του σκυροδέματος και να προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού.. Το πόσιμο νερό είναι γενικώς κατάλληλο για την παρασκευή του συνήθους οπλισμένου ή αόπλου σκυροδέματος, χωρίς ιδιαίτερο έλεγχο.

Θαλασσινό νερό δεν θα χρησιμοποιείται για παρασκευή ωπλισμένου σκυροδέματος, εκτός αν αυτό καθίσταται αναπόφευκτο από την έλλειψη κατάλληλου νερού και επιτρέπεται από τη φύση του έργου. Απαγορεύεται η χρησιμοποίηση θαλασσινού νερού για την παρασκευή προεντεταμένου σκυροδέματος. Ο Νεος Κανονισμός Τεχνολογιας Σκυροδεματος 97 (Ν.Κ.Τ.Σ. 97) επιτρέπει την χρήση θαλασσινού νερού μίξης σε άοπλο φέρων σκυρόδεμα, αν η απαιτούμενη αντοχή αυξηθεί κατά 15%.

Ένα το νερό ανάμιξης δεν είναι καθαρό όχι μόνο μπορεί να επηρεάσει τον καθορισμό του χρόνου και της αντοχής του σκυροδέμταος, αλλά επίσης μπορεί να προκαλέσει διάβρωση του οπλισμού, αστάθεια όγκο, και μειωμένη διάρκεια ζωής. Ως εκ τούτου πρέπει να τεθούν όρια στις συγκεντρώσεις χλωριούχων, θειικών και στερεών στο νερό ανάμιξης ή κατάλληλες δοκιμές δύνανται να διενεργηθούν για να καθοριστεί τι επίπτωση έχει η κάθε πρόσμειξη στις διάφορες ιδιότητες (Kosmatka, Kerkhoff, & and Panarese, 2003).

Η αναλογία του νερού στο μίγμα είναι καθοριστικός παράγοντας επίτευξης των επιθυμητών αντοχών στο σκυρόδεμα, και πρέπει να διατηρείται αυστηρά στα όρια που καθορίζει η Μελέτη σύνθεσης. Εν γένει, λιγότερο νερό συνεπάγεται μεγαλύτερες αντοχές και περισσότερο νερό σημαίνει υψηλότερη εργασιμότητα (ρευστότητα).

Είναι γνωστό ότι στην αντοχή του σκυροδέματος παίζει σπουδαίο ρόλο ο λόγος κατά βάρους του νερού προς τσιμέντο w/z. Όσο μικρότερος είναι ο λόγος αυτός τόσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή του σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι η άριστη αναλογία w/z κυμαίνεται μεταξύ 0,4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0,5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Επίσης παρατηρείται ότι, ενώ μια απόκλιση προς τα επάνω από το άριστο ποσοστό κατά 10% συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15% περίπου, μια ίση απόκλιση προς τα κάτω, συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30% περίπου. Είναι επομένως φρόνιμο, κατά την επιδίωξη της βέλτιστης αναλογίας νερού να παραμένει κανείς πάντοτε για λόγους ασφαλείας προς τα επάνω, παρά να κινδυνεύει η ποσότητα νερού να είναι μικρότερη της βέλτιστης με συνέπεια να υποστεί αλματώδη πτώση η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος. Τέλος η ποσότητα του νερού δεν πρέπει να είναι τόσο λίγη ώστε να παραβλάπτεται η καλή κατεργασία του όλου μίγματος. Στον πίνακα 2.5 δίνεται ο μέγιστος λόγος w/z κατά μέσο όρο για κάθε ποιότητα σκυροδέματος (Μιχάλης, 2007):

**Πίνακας 2.5:** Μέγιστος λόγος w/z για κάθε ποιότητα σκυροδέματος

| α/α | **Ποιότητα σκυροδέματος** | **Μέγιστος λόγος βάρους w/z για $m^3$ σκυροδέματος** |
|---|---|---|
| 1 | C8 | 0,70 |

| | | |
|---|---|---|
| 2 | C12 | 0,575 |
| 3 | C16 | 0,485 |
| 4 | C20 | 0,42 |

## 2.4 Αδρανή

### 2.4.1 Προέλευση αδρανών

Γενικά τα αδρανή (που ονομάζονται έτσι γιατί είναι από χημική άποψη αδρανή προς το τσιμέντο) προέρχονται απευθείας από τη φύση ή με συλλογή από ρέματα κλπ (φυσικά ή συλλεκτά) ή από θραύση πετρωμάτων (θραυστά). Για τα κοινά σκυροδέματα και τις ελληνικές συνθήκες, τα καλύτερα αδρανή προέρχονται από ασβεστολιθικά ή πυριτικά πετρώματα.

### 2.4.2 Η μορφή των κόκκων

Οι κόκκοι μπορεί να είναι στρογγυλοί, κυβόμορφοι, γωνιώδεις, πλακόμορφοι ή επιμήκεις (σχήμα 2.5). Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι στρογγυλοί ή κυβόμορφοι κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος, οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή συνολικά καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς.

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες (πίνακας 2.6):

**α. Άμμος**

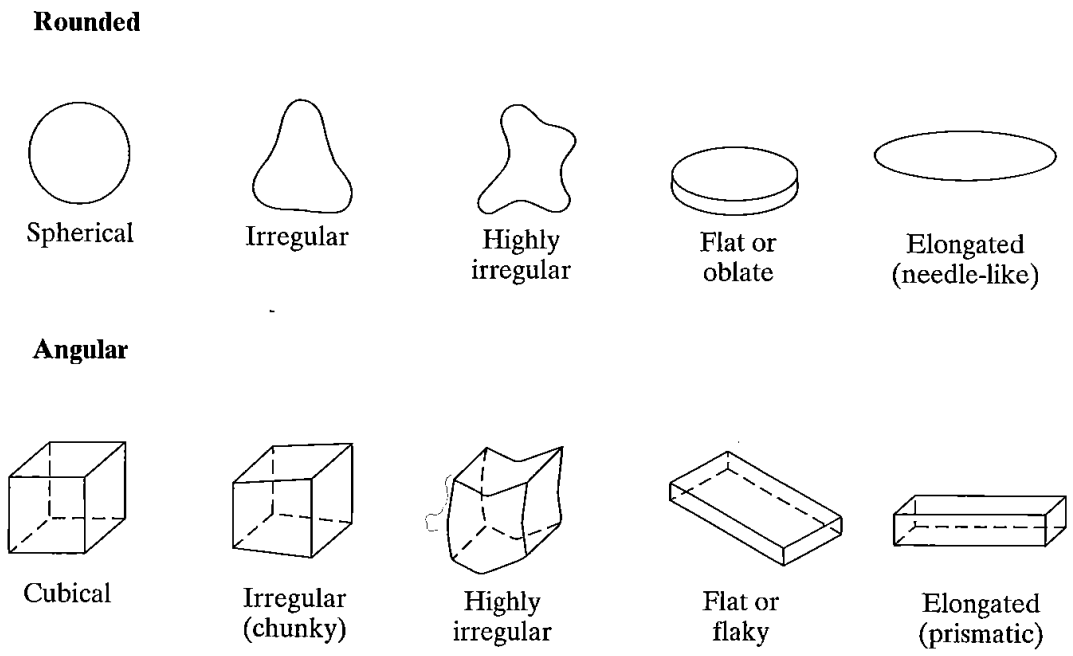
Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους d, ικανοποιεί τη σχέση $0 \leq d < 8$ mm και συμβολίζονται με (0/8). Το τμήμα των αδρανών, το οποίο αποτελείται από τους πιο λεπτούς κόκκους του υλικού και διέρχεται από το αμερικάνικο πρότυπο κόσκινο No 200, που έχει διάμετρο 0,75 mm, ονομάζεται παιπάλη, ενώ το τμήμα των αδρανών, που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $4 \leq d < 8$ mm και συμβολίζονται με (4/8), ονομάζεται ρυζάκι.

**β. Γαρμπίλι**

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $8 \leq d < 16$ mm και συμβολίζονται με (8/16).

**γ. Σκύρα**

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $16 \leq d < 64$ mm και συμβολίζονται με (16/64).




**Σχήμα 2. 5: Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση το σχήμα (S.Mindness, 2003)**

**Πίνακας 2.6** Κατάταξη αδρανών με βάση το μέγεθος του κόκκου.

| **Κατηγορία αδρανών** | **Μέγεθος κόκκων** |
|---|---|
| α) Άμμος | μέχρι 2,5 mm |
| β) Λεπτόκοκκα σκύρα | ριζάκι 2,5-7 mm<br>γαρμπίλι 7-14 mm<br>σκύρα 14-30 mm |
| γ) Χονδρόκοκκα σκύρα | 30-70 mm |

## 2.4.3 Αντοχή των αδρανών:

Για την ικανοποιητική αντοχή του σκυροδέματος, το υλικό των αδρανών (δηλ. το πέτρωμα) πρέπει να έχει μεγάλη μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα στο χρόνο, μικρή επιφανειακή φθορά σε κρούση, χημική αδράνεια σε σχέση με το τσιμέντο και το νερό (και με τις ουσίες που περιέχονται σε αυτό) και σταθερότητα όγκου (π.χ. να μην διογκώνεται λόγω απορρόφησης νερού) .

Ο Ν.Κ.Τ.Σ θεωρεί σαν ικανοποιητική τιμή της αντοχής σε θλίψη του πετρώματος τα 65 MPa, επειδή όμως για τις συνήθεις στην Ελλάδα κατηγορίες σκυροδέματος η αντοχή του τελευταίου ελάχιστα επηρεάζεται από την αντοχή του πετρώματος των αδρανών, ο κανονισμός επιτρέπει και την χρήση αδρανών με αντοχή πετρώματος μεταξύ 45 MPa και 65 MPa, εφόσον με τα αδρανή αυτά είναι δυνατή η επίτευξη της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος που

έχει προδιαγραφεί. Εφόσον πληρούν την προϋπόθεση αυτή, αδρανή από μητρικό πέτρωμα με αντοχή μικρότερη και από 45 MPa μπορούν να χρησιμοποιούνται μόνο για την παρασκευή σκυροδέματος που η επιφάνεια του πρόκειται να επιχριστεί, καθότι με τέτοια αδρανή η αντοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος σε φθορά από τη χρήση και σε κρούση είναι αμφίβολη («Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97», ΦΕΚ 315/Β/17-4-97)

### 2.4.4 Γενικά για τα αδρανή υλικά:

Τα αδρανή υλικά πρέπει να είναι (Λίτινας, Skyrodema.net):

- σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα
- ανθεκτικά από σκληρά πετρώματα θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 65 Mpa (ΕΛΟΤ 408) (γρανίτες και ασβεστόλιθοι)
- καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πυλός, χημικά δραστικές ουσίες, άνθρακες).
- σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας)
- απαλλαγμένα από παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm
- Καλά διαβαθμισμένα με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν όλο το φάσμα ώστε παρουσιάζουν λίγα κενά, απαιτούν μικρότερη ποσότητα συνδετικού ιστού και παρουσιάζουν καλλίτερη συνεκτικότητα και εργασιμότητα.
- Δεν πρέπει να προέρχονται από πετρώματα με συστατικά που περιέχουν: οπάλιο, ανδεσίτη, ρυόλιθο και δολομίτες γιατί προκαλούν διόγκωση και ζεόλιθους λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου

Επίσης ισχύουν τα παρακάτω:

1. Τα αδρανή μέχρι 7 mm – χωρίς τσιμέντο- πρέπει να καλύπτουν το 35-45% της συνολικής ποσότητας των αδρανών

2. Ανάλογα με την ποιότητα του σκυροδέματος τα αδρανή υλικά μπορούν να προσκομίζονται στο εργοτάξιο αναμεμιγμένα ή διαβαθμισμένα.

- Προκειμένου για σκυρόδεμα $C_8$ τα αδρανή υλικά μπορούν να είναι αμμοχάλικα ποταμού ή θραυστά λατομείου αναμεμιγμένα και είναι αρκετό εάν μακροσκοπικά να είναι προφανές ότι περιέχουν και αρκετό χονδρόκοκκο υλικό.
- Προκειμένου όμως για σκυροδέματα ανώτερης ποιότητας πρέπει να προ-

σκομίζονται σε ξεχωριστές ομάδες. Για μεν τα σκυροδέματα $C_{12}$ και $C_{16}$ να προσκομίζονται σε τρεις διαβαθμίσεις (άμμος, γαρμπίλι, σκύρα).

- Για δε τα σκυροδέματα $C_{20}$ και άνω σε τέσσερις διαβαθμίσεις (άμμος, ριζάκι, γαρμπίλι, σκύρα).

3. Όταν χρησιμοποιούνται θραυστά αδρανή και προπαντός θραύστη άμμος καλό είναι να προστίθενται σε αυτά και άμμος ποταμών.

## 2.5 Οπλισμένο σκυρόδεμα

Συχνά σε τεχνικές εφαρμογές απαιτούνται υψηλές τιμές εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Οι αντοχές του σκυροδέματος, είτε θλιπτική, είτε εφελκυστική μπορούν να αυξηθούν με την εισαγωγή στη μάζα του στοιχείων, όπως χαλύβδινος οπλισμός πχ. με τη μορφή χαλύβδινου πλέγματος κα. Το σκυρόδεμα αυτό καλείται **οπλισμένο σκυρόδεμα**. Το κάθε ένα από τα παραπάνω πρόσθετα επηρεάζουν διαφορετικά τη λειτουργία του σκυροδέματος και αναπόφευκτα και την εφαρμογή του στα διάφορα έργα. Η τελική ποιότητα μίας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- Ποιότητα υλικών (σκυροδέματος και χάλυβα)
- Σωστή κατασκευή (καλούπωμα, σκυροδέτηση)
- Σωστή συντήρηση

Αν ένας από αυτούς τους παραπάνω παράγοντες δεν ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της κατασκευής, τότε μπορεί να επηρεαστεί αρνητικά όλη η τελική ποιότητά της. Για παράδειγμα, η κακή κατασκευή και συντήρηση μιας κατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλο περιεχόμενο σε νερό, το οποίο μπορεί να διαβρώσει το χάλυβα του οπλισμού του σκυροδέματος. Η σωστή κατασκευή πρέπει να διασφαλίζει το αλκαλικό περιβάλλον που δημιουργεί το τσιμέντο, το οποίο περιβάλει τον οπλισμό και το οποίο τον προστατεύει από την οξείδωσή του. Η ταχύτητα διάβρωσης του χάλυβα αυξάνεται, τόσο εντός όσο και εκτός σκυροδέματος, με ("Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χάλυβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008", 2008):

- την αύξηση της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας.
- τη μείωση του pH.
- την αύξηση της παρουσίας αλάτων (π.χ. θαλάσσιο περιβάλλον).
- την επαφή του χάλυβα με το έδαφος, το νερό κλπ.
- την επαφή του χάλυβα με διαφορετικά υλικά ή περιβάλλοντα.

- την ύπαρξη ενεργών «κέντρων» στην επιφάνεια του χάλυβα (όπως οξείες αιχμές ή πληγές).
- την ύπαρξη επιφανειακής αλλοίωσης λόγω προϋπάρχουσας διάβρωσης.
- την επαφή χαλύβων διαφορετικού είδους και διαφορετικού ηλεκτροχημικού δυναμικού.
- την ψυχρή κατεργασία (ολκή, έλαση κλπ.).
- το αυξημένο πορώδες του σκυροδέματος.

Στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι σημαντική η **ανθεκτικότητά** του (durability), δηλαδή η αντοχή του στο χρόνο. Αυτή επιτυγχάνεται μεταξύ άλλων και με την ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου, η οποία υπολογίζεται σε 270kg τσιμέντο σε $1m^3$ σκυροδέματος. Έτσι προστατεύεται ο μεταλλικός οπλισμός και περιορίζεται ο βαθμός ενανθράκωσης (Ν.Κ.Τ.Σ, 1997).

## 2.6 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται από τα συστατικά του συμβατικού σκυροδέματος (τσιμέντο + αδρανή + νερό) με την προσθήκη ινών. Από αυτές μεγαλύτερη εφαρμογή βρίσκουν οι ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου. Ειδικά οι ίνες χάλυβα χρησιμοποιούνται με διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

Θεωρητικά οι ίνες εμποδίζουν την εξέλιξη της μικρορηγμάτωσης και αναμένονταν να αυξηθεί η εφελκυστική αντοχή το σκυρ/τος και η έναρξη της ρηγμάτωσης (φορτίο πρώτης ρωγμής). Πειραματικά αποδείχθηκε όμως ότι ενώ η εφελκυστική αντοχή δεν αυξάνεται σημαντικά αυξάνεται θεαματικά η ικανότητα του σκυρ/τος να παραμορφώνεται πριν θραυσθεί δηλαδή η πλαστιμότητα του ινοπλισμένου σκυρ/τος (Ι. Παπαγιάννη, 2008)

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενη ενότητα, ως οπλισμός στο σκυρόδεμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ίνες διαφόρων υλικών, αλλά κατάλληλων αντοχών. Στο εμπόριο διανέμονται πολλά είδη ινών και σε ποικίλες μορφές, όπως:

- χαλύβδινες ίνες
- συνθετικές ίνες (πολυπροπυλενίου, πολυαιθυλένιο, PVA, αμίαντο (AFRP) κλπ)
- ίνες υάλου (GFRP)
- ίνες άνθρακα (CFRP), PA

Η διαφορετική μορφή των ινών αντιστοιχεί σε διαφορετικό είδος εφαρμογής και διαφορετικής ένταση καταπόνηση. Πρέπει να σημειωθεί ότι, από την εξέταση της βιβλιογραφίας, η χρήση

των ινών συνδυάζεται, κατά πλειοψηφία σε μεγάλα τεχνικά έργα, με σκυροδέματα υψηλών και υπερ-υψηλών αντοχών (high strength, ultra-high strength) (Padmarajaiah, 1999).

Ανάλογα με το είδος της καταπόνησης, σε ένα στοιχειώδη όγκο ινοπλισμένου σκυροδέματος προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα (Γεωργακοπούλου, 2006):

- Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνει χώρα η σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.
- Επίσης οι ίνες εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών λόγω της πρόσφυσης μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος και της πυκνότητας των ινών. Λειτουργούν σα «γέφυρες» που μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής.
- Οι ίνες λειτουργούν επίσης ως κινηματικός περιορισμός έναντι της διόγκωσης του υπό φόρτιση σκυροδέματος.
- Επί προσθέτως, βελτιώνουν την στρεπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος
- Η τυχαία διάταξη των ινών στον όγκο του εκάστοτε δοκιμίου, του προσδίδει ομοιογένεια και ισοτροπία.

Ο κύριος ρόλος των διασκορπισμένων ινών είναι να ελέγξουν το άνοιγμα και τη διάδοση των ρωγμών. Χάρη στις ίνες, οι μεγάλες ενιαίες ρωγμές αντικαθίστανται με πυκνά συστήματα «μικρορωγμών», τα οποία μπορούν να είναι αποδεκτά από την άποψη ασφάλειας και διάρκειας (Γεωργακοπούλου, 2006)

Από την υπάρχουσα βιβλιογραφία έγινε γνωστό πως η πρόσθεση ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα αυξάνει τη θλιπτική αντοχή κατά 3.15% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, ποσοστό το οποίο αντιστοιχεί σε ινοπλισμένα δοκίμια με μέση θλιπτική αντοχή της τάξης των 28 MPa. Επίσης, αυξάνεται η εφελκυστική αντοχή κατά 4.3% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα για ινοπλισμένα δοκίμια με μέση εφελκυστική αντοχή 2.5 MPa . Όσον αφορά τις χαλύβδινες ίνες, δεν είναι διαθέσιμα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, στις οποίες να υπολογίζονται η θλιπτική ή η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος (Hsie, 2008).

Η χρήση ινών επηρεάζει την ολκιμότητα καθώς και τη δυναμική ενέργεια που δέχεται το υλικό κατά τη φόρτισή του. Αναλυτικότερα, από προηγούμενες δοκιμές που διεξήχθηκαν έχει υπολογιστεί ότι μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της ολκιμότητας μέχρι και 68% και της δυναμικής ενέργειας κατά τη φόρτισή μέχρι και 88% (Padmarajaiah, 1999).

**Ιδιοτητες Ινοπλισμενου Σκυροδεματος**

- Μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη
- Αντίσταση στη δημιουργία και στην εξάπλωση των ρωγμών
- Αυξημένη αντοχή στην κρούση
- Αυξημένη αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Αντίσταση στο φαινόμενο της αποφλοίωσης
- Μεγαλύτερη δυσθραυστότητα.
- Μεγαλύτερη αντοχή σε φορτία μετά την θραύση
- Οικονομία στη συντήρηση και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης του έργου

## 2.7 Είδη Ινών

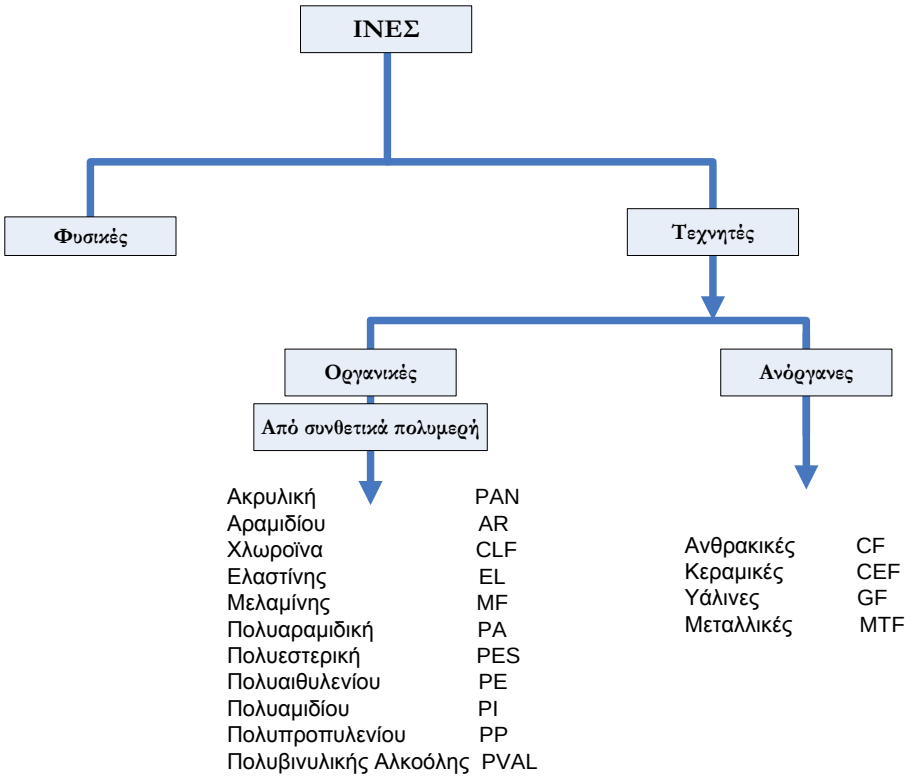
### Γενικά στοιχεία

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση του σκυροδέματος για τις διάφορες κατασκευές μπορεί να είναι διαφόρων ειδών, όχι μόνο ως προς το μέγεθος και το σχήμα τους αλλά και ως προς το είδος του υλικού τους. Οι χαλύβδινες ίνες είναι αυτές που επικρατούν στην αγορά. Πέρα όμως από αυτές υπάρχουν πολλά ακόμα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για παραγωγή ινών. Ίνες υάλου και συνθετικές έχουν γίνει πλέον αρκετά διαδεδομένες.

Το είδος της ίνας που τελικά επιλέγεται για να ενισχύσει το σκυρόδεμα εξαρτάται από την εφαρμογή την οποία αυτό τελικά θα έχει. Η επιλογή αυτή βασίζεται επίσης στο κόστος, τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες, την αποτελεσματικότητα και τη διαθεσιμότητά της στην αγορά. Ειδικού τύπου ίνες, όπως ανθρακικές ή φυσικές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για έργα με ιδιαίτερες προδιαγραφές. Η γεωμετρία των ινών ποικίλει και μπορεί οι ίνες να είναι με γαντζωτά άκρα, επίπεδες, πτυχωμένες, κωνικές, στριμμένες με προφίλ κυκλικό, τετράγωνο ή ακόμη και ακανόνιστο. Επιπλέον, κάθε ίνα διαφέρει σε διάμετρο και μήκος ( (Jamrozy, 1985), (Maidl, 1995)). Ορισμένες φορές μάλιστα αντί για κοινές ίνες παραγωγής για την ενίσχυση του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κομμάτια μετάλλου που προέρχονται από την κοπή του ή θραύσματα που αλλιώς θα ήταν απορρίμματα (A. Kayvani, 1995).

Στατιστικά, το 90% των ινών που παράγονται δεν είναι ευθείες, έχουν δηλαδή κάποιο ιδιαίτερο σχήμα. Οι ιδιαίτερες γεωμετρίες που έχουν οι ίνες αποσκοπούν στην καλύτερη προσαρμογή τους στο σκυρόδεμα. Παγκόσμια στατιστική ανάλυση έχει δείξει ότι το 67,1% των ινών που χρησιμοποιούνται έχουν γαντζωτό άκρο. Τα υπόλοιπα πιο δημοφιλή ήδη ινών είναι ευθείες (9,1%), μηχανικά παραμορφωμένες (9,1%), κυματοειδείς (7,9%) και άλλα είδη ινών διαφόρων τύπων (6,6%) (Katzer, 2006).

Η αποτελεσματικότητα των ινών ως μέσα ενίσχυσης του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από το είδος που χρησιμοποιείται αλλά από ένα πλήθος παραγόντων. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο, γνωστός και ως λόγος μορφής (aspect ratio ή l/d). Το μέγεθος αυτό είναι αδιάστατο και επηρεάζει την εργασιμότητα του σκυροδέματος και την απόσταση των ινών μέσα σε αυτό. Για να επιτυγχάνεται καλή εργασιμότητα ο λόγος αυτός δεν πρέπει ποτέ να ξεπερνά την τιμή 150. Σύμφωνα με την BISFA (The International Bureau For The Standardization Of Man-Made Fibers),τα βασικά είδη των τεχνητών ινών (μαζί με τον συμβολισμό τους) είναι (σχήμα 2.6):




**Σχήμα 2.6: Τα βασικότερα είδη τεχνητών ινών (BISFA, 2009)**

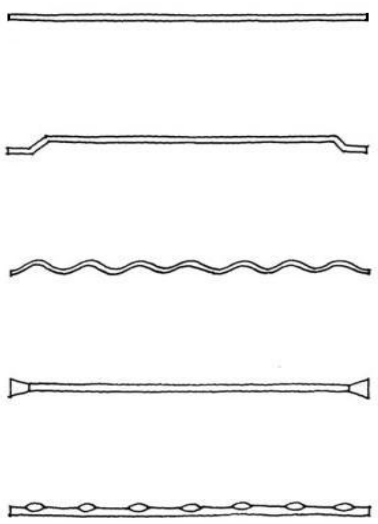
### 2.7.1 Χαλύβδινες Ίνες

Ο παλαιότερος και ταυτόχρονα ο πιο βασικός τύπος ίνας που υπάρχει είναι από χάλυβα. Στην πιο απλοϊκή της μορφή μια τέτοιου είδους ίνα θα ήταν ένα ευθύγραμμο τμήμα ενός λείου σύρματος. Δυστυχώς όμως, τέτοιου είδους ίνες δεν εξασφαλίζουν την μέγιστη δυνατή αντοχή στο σκυρόδεμα διότι δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ αυτού και ίνας.

Οι χαλύβδινες ίνες επικράτησαν λόγω του λογικού κόστους κατασκευής τους, λόγω της διαθεσιμότητάς τους και λόγω της εμπειρίας που προϋπήρχε στον συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος με χάλυβα. Έτσι και οι πρώτες έρευνες στις δεκαετίες του 1950 και 1960 επικεντρώθηκαν στη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα (Benturand Mindness, 1990). Οι ίνες αυτές αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος κι έτσι το μετατρέπουν από ένα ψαθυρό υλικό σε πλαστικό. Έχουν αντίσταση στα αλκαλικά πρόσμικτα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και μηχανικά χαρακτηριστικά που κρίνονται ως ικανοποιητικά. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 400 έως 1.500 MPa ενώ οι ανθρακούχο ι χάλυβες, ειδικά σκληρυμένοι, μπορούν να φθάσουν μέχρι τα 4 GPa. Επίσης, έχουν μέτρο ελαστικότητας περίπου 200 GPa και ειδικό βάρος 8 g/cm$^3$, όσο δηλαδή όλοι οι κοινοί χάλυβες (Maidl, 1995).

Η ASTM (American Society for Testing and Materials) έχει κατηγοριοποιήσει τις χαλύβδινες ινες, σύμφωνα με το πρότυπό της A820, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής τους σε πέντε κατηγορίες, αναθεωρώντας από τις τέσσερις που προέβλεπε παλαιότερα. Ο τύπος I είναι οι ίνες ψυχρής ολκής και είναι εμπορικά ο πιο διαδεδομένος. Παρασκευάζονται από την εν ψυχρώ κατεργασία σύρματος χάλυβα. Ο τύπος II περιλαμβάνει τις ίνες που προέρχονται από κοπή χαλυβδοφύλλων. Ο τύπος III περιλαμβάνει τις ίνες που παράγονται από τηγμένο μέταλλο. Ο τύπος IV περιλαμβάνει τις ίνες που προέρχονται από φρεζάρισμα ή λιμάρισμα (millcut). Ο τύπος V περιλαμβάνει τις ίνες ψυχρής ολκής, όπως ο τύπος I, με τη διαφορά ότι αυτές είναι τροποποιημένες. Επιπλέον, σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο προβλέπεται οι ίνες να είναι ευθείες ήπαραμορφωμένες. Οι αντοχές, τα μήκη, η διάμετρος, ο λόγος μήκους προς διάμετρο, η ελάχιστη εφελκυστική αντοχή και αντοχή σε κάμψη προδιαγράφονται από το πρότυπο ASTM A 820.

Στην αγορά κυκλοφορούν διάφοροι τύποι και ποιότητες χαλύβδινων ινών. Επίσης, αυτές διαφέρουν ανάλογα και με τον τρόπο παραγωγής τους, δηλαδή μπορεί να προέρχονται από κοπή συρμάτων ή τεμαχών χάλυβα, από ψυχρή ολκή ή τέλος από εξαγωγή τήγματος. Έτσι, για τις χαλύβδινες ίνες υπάρχουν πέντε βασικά προφίλ-τύποι (σχήμα 2.7) που συνήθως χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του έργου.



**Σχήμα 2. 7: Κύρια Προφίλ ινών (κατά σειρά): Επίπεδο, με γαντζωτά άκρα, κυματοειδές, με κωνικά άκρα, μηχανικά παραμορφωμένο (Katzer, 2006).**

Γίνεται έτσι φανερό ότι όλες οι ίνες που παράγονται στην αγορά δεν είναι κατάλληλες για χρήση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ίνες με μήκος μεγαλύτερο των 30 cm μπορεί να απαιτούν ειδικά ακροφύσια εκτόξευσης. Γενικά, η διάμετρος κυμαίνεται από 0,25 έως 0,75 mm και το μήκος από 25 έως 90 mm. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ο λόγος μορφής μπορεί ναι προτείνεται από την κάθε εταιρία, και κάθε ένας εξυπηρετεί έναν σκοπό. Η Dramix προτείνει λόγο μορφής 45 για βασική χρήση και οικονομία, 65 για καλύτερες επιδόσεις, ευκολία στη χρήση και λογικό κόστος και 80 για πολύ υψηλές αντοχές, πλαστιμότητα και περιορισμό των ρωγμών. Η ΕΤΑΛ αντίστοιχα προτείνει λόγο μορφής 40 με μήκος 31 cm και διάμετρο 0,75 mm για γενική χρήση.

Στην πράξη είναι επιθυμητή η χρήση ινών μεγάλου μήκους και μικρού πάχους με υψηλή ποιότητα χάλυβα, ίδια ή και ανώτερη από αυτήν του συμβατικού οπλισμού. Όσο όμως αυξάνει η τιμή του λόγου μορφής,πέρα από έναν βαθμό, τόσο αυξάνει και η δυσκολία του χειρισμού του μίγματος.

Το κόστος των ινών εξαρτάται από τη μέθοδο παρασκευής τους αλλά και από την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται. Όσο η διάμετρος της ίνας είναι μικρότερη, τόσο το κόστος της είναι υψηλότερο.

Στο έγχυτο σκυρόδεμα η προσθήκη ινών γίνεται σε ποσοστό 0,5 έως 2% κατ' όγκο ενώ στο εκτοξευόμενο εφαρμόζεται με επιτυχία σε ποσοστό μεγαλύτερο του 2%. Η αύξηση της ποσότητας των ινών μειώνει την εργασιμότητα του σκυροδέματος και απαιτεί ειδικές τεχνικές μίξης και εκτόξευσης.

Οι ίνες χάλυβα δεν επηρεάζουν την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι καθυστερούν τη ρηγμάτωσή του και συντελούν στον ομοιόμορφο καταμερισμό των τάσεων (Altoubat and Lange, 2001).

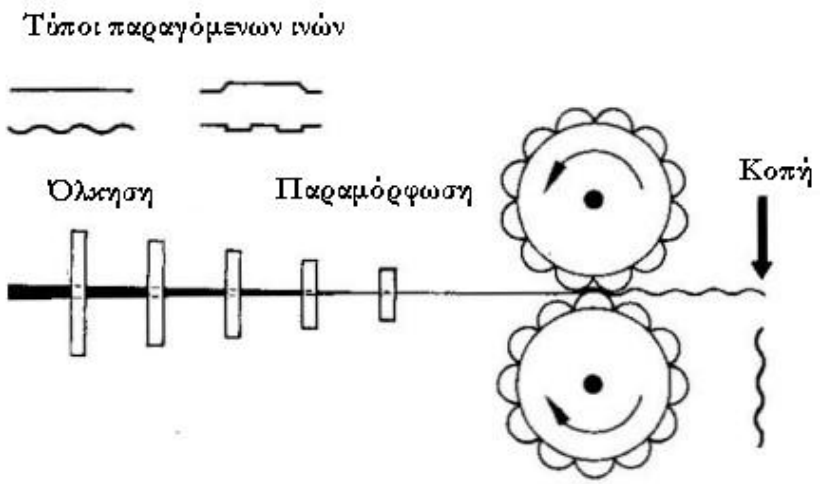
Οι χαλύβδινες ίνες είναι επιρρεπείς ως προς τη διάβρωση, για το λόγο αυτό ενδιαφέρον έχει η μελέτη της συμπεριφοράς τους στο σκυρόδεμα. Στο συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος είναι γνωστό ότι αυτός απαιτεί μια ελάχιστη επικάλυψη ώστε να εξασφαλίζεται από τη διάβρωση. Στις ίνες όμως κάτι τέτοιο δεν είναι τεχνικά εφικτό διότι βρίσκονται διασκορπισμένες τυχαία στο μίγμακι έτσι η διάβρωση μπορείνα επηρεάσει αυτές που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια. Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει ότι ίνες που έχουν μια επικάλυψη πάνω από 1 mm δεν αλλοιώνονται. Έτσι, η διάβρωση των ινών θεωρείται ένα μη σοβαρό πρόβλημα καθώς δεν επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

## Παραγωγή Χαλύβδινων Ινών

Υπάρχουν τέσσερις βασικές μέθοδοι παραγωγής χαλύβδινων ινών κι έχουν ως εξής:

### I. Συρματοποίηση

Οι ίνες από σύρματα παράγονται περνώντας μέσα από ειδική μήτρα. Η διαδικασία συρματοποίησης περιλαμβάνει την ολκή ενός ακατέργαστου σύρματοςμέσω κωνικών οπών έως ότου επιτευχθεί η απαιτούμενη διάμετρος. Το σύρμα έπειτα τροφοδοτείται μέσω δύο αντιθέτως περιστρεφόμενων κυλίνδρων για να αποκτήσει την απαραίτη τη μορφή (σχήμα 2.8). Το σύρμα μορφοποιείται στη στερεά του κατάσταση και η διαδικασία ισχύει για όλα τα όλκιμα μέταλλα. Η χρήση αυτής της μεθόδου περιορίζεται σε καλώδια με διάμετρο μικρότερη από 30 μm και η μορφοποίηση είναι απαγορευτική για ιδιαίτερα άκαμπτα ή ακόμα και εύθραυστα υλικά. Η εφελκυστική αντοχή τέτοιων ινών είναι μεταξύ 800 και 1.000 MPa. Αυτές οι ίνες μπορούν να παραχθούν από μέτριας έως και αρίστης ποιότητας χάλυβα. Είναι επίσης δυνατό η επιφάνεια των συρμάτων να υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία όπως ο γαλβανισμός.

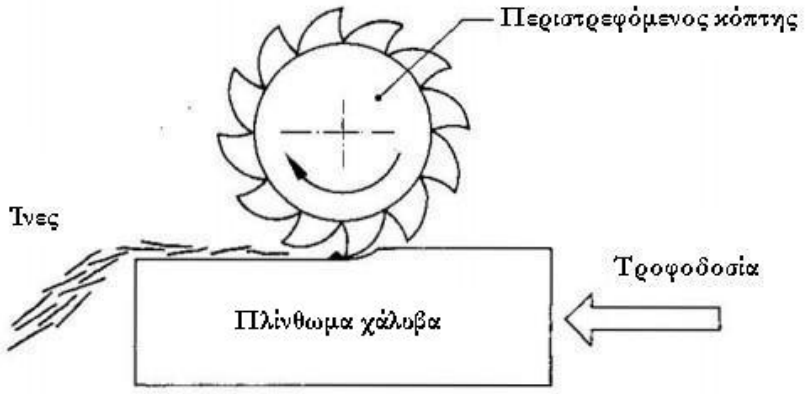



**Σχήμα 2. 8: Παραγωγή χαλύβδινων ινών από σύρματα με ολκή (Maidl, 1995)**

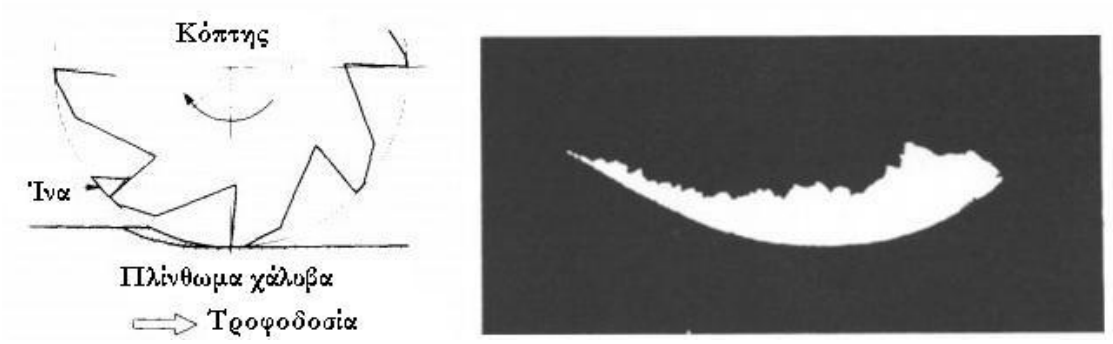
Μια άλλη διαδικασία που είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σύρματα μικρής διαμέτρου περιλαμβάνει την ολκή μιας δέσμης συρμάτων που αποτελείται μέχρι και από 300 μεμονωμένα σύρματα τα οποία διαχωρίζονται από ένα στιφρόλιπαντικό. Όταν η διαδικασία μορφοποίησης ολοκληρωθεί, η επικάλυψη με λιπαντικό αφαιρείται σε ένα όξινο λουτρό. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ινών από 8 έως 25 μm.

## II. Φρεζάρισμα - Λιμάρισμα

Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την παραγωγή ινών αποκόπτοντας επιφανειακά τεμάχια χάλυβα που είναι κατάλληλα για φρεζάρισμα, γνωστά ως πλινθώματα, χρησιμοποιώντας έναν περιστρεφόμενο κόπτη (σχήμα 2.9). Οι παραχθείσες, κατ' αυτόν τον τρόπο, ίνες είναι δρεπανόμορφες με ομαλή εξωτερική και ακατέργαστη εσωτερική επιφάνεια. Η αντοχή τους είναι περίπου 700 MPa. Οι ίνες-ρινίσματα (γρέζι) που παράγονται κατ' αυτό τον τρόπο γίνονται ελαφρώς εύθραυστες κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και έχουν πιο ανώμαλη μορφή σε σχέση με τις ίνες που προέρχονται από την κοπή συρμάτων (σχήμα 2.10). Ως αποτέλεσμα της θερμότητας που παράγεται με τη διαδικασία φρεζαρίσματος, η επιφάνεια τους περιβάλλεται από μεταλλικό - μπλε οξείδιο που προσδίδει στις ίνες ένα βαθμό προστασίας από τη σκουριά.



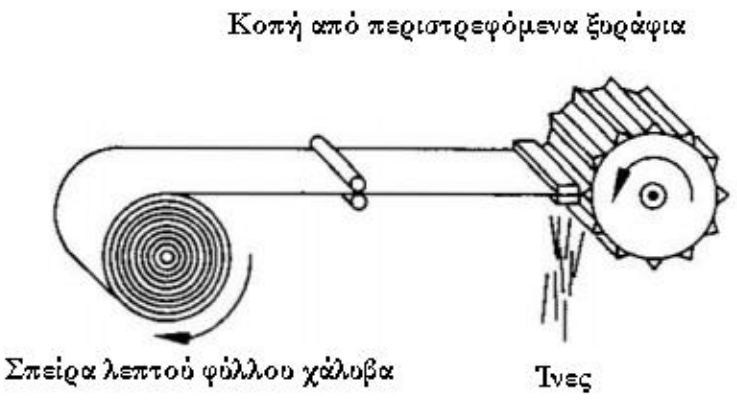

**Σχήμα 2. 9: Παραγωγή χαλύβδινων ινών με επιφανειακή από κοπή ρινισμάτων (Maidl, 1995)**




**Σχήμα 2. 10: Κοπή χαλύβδινων ινών και χαρακτηριστική τομή ίνας (Kobayashi, 1983)**

## III. Κοπή φύλλων χάλυβα

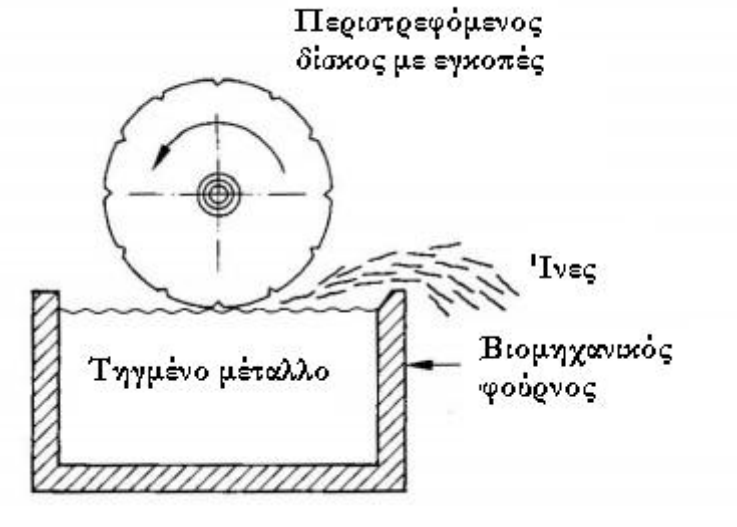
Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την παραγωγή ινών χάλυβα από την κοπή ενός λεπτού φύλλου μετάλλου. Το φύλλο χάλυβα βρίσκεται υπό μορφή σπείρας και το πλάτος του θα είναι το μήκος της παραγόμενης ίνας (σχήμα 2.11). Οι ίνες μπορούν έπειτα να υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να επιτευχθούν τοπικές παχύνσεις. Είναι επίσης δυνατό να διαμορφωθεί τέτοιο σχήμα στην ίνα ώστε να έχει γαντζωτά άκρα. Η αντοχή των ινών που παράγονται χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο είναι μεταξύ 400 και 1.000 MPa.




**Σχήμα 2. 11: Παραγωγή χαλύβδινων ινών με κοπή φύλλων (Maidl, 1995)**

## IV. Εξαγωγή τήγματος

Μια άλλη διαδικασία, η οποία χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την παραγωγή ινών χάλυβα στη δεκαετία του 1980, περιλαμβάνειτην εξαγωγή τους κατευθείαν από ένα λουτρό τηγμένου σιδήρου ή χάλυβα. Ένας δίσκος με εγκοπές περιστρέφεται ακριβώς επάνω από το τηγμένο λουτρό. Το υλικό που αφαιρείται από εκείπ ήζει κι έτσι σταθεροποιείται αμέσως (σχήμα 2.12). Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ινών χάλυβα με διαφορετικές διατομές και μήκη, συνδυάζοντας αρίστη ποιότητα.




**Σχήμα 2. 12: Παραγωγή χαλύβδινων ινών απευθείας από τηγμένο μέταλλο (Maidl, 1995)**

Υπάρχουν άλλες δύο μέθοδοι με τις οποίες οι ίνες μπορούν να παραχθούν άμεσα από το τηγμένο μέταλλο και είναι γνωστές ως διαδικασίες κλώσης και τυμπάνου (melt spinning and melt drag). Στην πρώτη περίπτωση, το τηγμένο μέταλλο εκτοξεύεται με ένα ακροφύσιο και σταθεροποιείται εν πτήση για να γίνει λίγο-πολύ ένα σύρμα κυκλικής διατομής. Στην τεχνική τυμπάνου, το τηγμένο μέταλλο εκτινάσσεται από ένα ακροφύσιο σε ένα ψυχρό τύμπανο χάλυβα που βρίσκεται σε απόσταση 0.25-2 mm. Όταν ο χάλυβας στερεοποιηθεί κόβεται στα απαραίτητα μήκη. Λόγω του υψηλού ρυθμού βαφής, αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την παραγωγή λουρίδων από άμορφα μέταλλα. Λόγω της χαμηλής παραγωγικότητα ςαυτές οι μέθοδοι δεν είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμες.

### 2.7.2 Ίνες Υάλου

Οι πρώτες έρευνες στις ίνες υάλου ξεκίνησαν τις δεκαετίες του 1950 και 1960 και αφορούσε τον τύπο Ε (βοριοπυριτικό γυαλί). Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η αλκαλική δράση του σκυροδέματος κατέστρεφε τις ίνες και μείωνε δραματικά την αντοχή του σκυροδέματος. Από τη δεκαετία του 1960 και μετά αναπτύχθηκαν κατάλληλες ίνες υάλου ώστε να μπορούν να χαρακτηριστούν ως υλικό ενίσχυσης του σκυροδέματος και να ανθίστανται στις υψηλές τιμές pH (James, 1990). Έτσι, οι ίνες αυτές αντέχουν σε αλκαλικό περιβάλλον και είναι τύπου AR (alkali-resistant) διατηρώντας μακροπρόθεσμα σταθερή την αντοχή του σκυροδέματος διότι μειώνουν τη διάβρωση του γυαλιούμέσα στο σκυρόδεμα (Bentur A., 1990).

Εκτός από την ανθεκτικότητά τους στα αλκάλια είναι ειδικά κατασκευασμένες να μην φθείρονται από τη διαδικασία ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Μπορεί όμως να χρησιμοποιηθεί και μετά καολίνης στο σκυρόδεμα με ίνες υάλου για την προστασία τους, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τις αντοχές του και το μέτρο ελαστικότητάς του (Marikunte S., 1997). Οι σύγχρονες ίνες από γυαλί είναι ένα ισχυρό και ελαφρύ υλικό, με αντοχή σε εφελκυσμό από 280 έως 3.500 MPa και μέτρο ελαστικότητας από 3,1 έως 3,5 GPa, ικανές να αντέξουν ακόμη και έντονα αλκαλικό περιβάλλον.

Η δύναμη του γυαλιού δοκιμάζεται και αναφέρεται για εκείνες τις ίνες που μόλις κατασκευάστηκαν. Οι νεότερες, λεπτότερες ίνες είναι οι ισχυρότερες, διότι οι λεπτότερες ίνες είναι όλκιμες. Όσο περισσότερο η επιφάνεια της ίνας είναι γδαρμένη, τοσο μικρότερη είναι η συνεκτικότητ που προκύπτει. Λόγω του ότι το γυαλί έχει μια άμορφη δομή, οι ιδιότητές του είναι οι ίδιες κατά μήκος της ίνας και σε όλη την ίνα. Η υγρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αντοχή σε εφελκυσμό. Η υγρασία εύκολα προσροφάτε, και μπορεί να επιδεινώσει τις μι-

κροσκοπικές ρωγμές και ατέλειες στην επιφάνεια, και να μείωση την συνεκτικότητα (wikipedia, 2010).

Οι ίνες υάλου (σχήμα 2.14)παράγονται κυρίως χρησιμοποιώντας τη διαδικασία νηματοποίησης. Το επεξεργασμένο γυαλί προστίθεται σε ένα λουτρό τήξης λευκόχρυσου-ρόδιου, στη βάση του οποίου υπάρχουν 2.000 οπές διαμέτρου 1 έως 2 mm. Το ρευστό γυαλί ρέει μέσα από αυτές τις σχισμές και μετατρέπεται σε νήματα. Είναι εφικτό να επιτευχθούν ταχύτητες όλκησης μέχρι 3.000 m/min χρησιμοποιώντας αυτήν τη μέθοδο (Maidl, 1995).

Μια άλλη μέθοδος παραγωγής ινών υάλου είναι η διαδικασία συρματοποίησης ράβδων-γυαλιών (σχήμα 2.15). Ράβδοι γυαλιού θερμαίνονται σε ένα φούρνο και στις άκρες τους δημιουργούνται σφαιρίδια. Με την ολκή των τελευταίων από τις ράβδους σχηματίζεται νήμα το οποίο περιτυλίγεται δημιουργώντας σπείρα (Maidl, 1995).

Από το ευρύ φάσμα των τύπων γυαλιού, τα γυαλιά E, S και R, που διαφέρουν μόνο στην αναλογία των συστατικών τους, είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα στην παραγωγή των ινών υάλου. Ωστόσο, δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις για την όπλιση του σκυροδέματος, δεδομένου ότι η έκθεση στα αλκάλια καταστρέφει το δίκτυο γυαλιού και μειώνει έτσι την αντοχή των ινών υάλου. Επιπλέον, οι παραγόμενες ίνες από ύαλο είναι επιρρεπείς σε μιαδιαδικασία γήρανσης που μπορεί να επιταχυνθεί από την υγρασία (Maidl, 1995). Ένας ακόμη τύπος υάλινων ινών που υπάρχει στην αγορά είναι οι ίνες AC (alkali-control) αλλά δεν είναι κατάλληλες για χρήση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Οι ίνες υάλου είναι αρκετά πιο ακριβές από τις χαλύβδινες. Το ειδικό τους βάρος είναι περίπου το ένα τρίτο των χαλύβδινων. Επίσης, αύξηση της διαμέτρου της υάλινης ίνας έχει σα συνέπεια τη μείωση της αντοχής της και την αύξηση του μέτρου ελαστικότητάς της. Τα πάνελ από ινοπλισμένο σκύροδεμα από γυαλί είναι φωτεινά και αρκετά ισχυρά για να μειώσουν αυτού του κτιρίου του σχήματος 2.13 τις κατασκευαστικές απαιτήσεις

**Σχήμα 2. 13: Κτήριο κατασκευασμένο από ινοπλισμένο σκυρόδεμα από γυαλί (Kosmatka, Kerkhoff, & and Panarese, 2003)**

**Σχήμα 2. 14: Ίνες υάλου και περιελιγμένα υαλονήματα (J & J International Trading Corp., 2010)**

**Σχήμα 2. 15: Παραγωγή ινών υάλου (Kosmatka, Kerkhoff, & and Panarese, 2003)**

### 2.7.3 Συνθετικές Ίνες

Οι συνθετικές ίνες είναι προϊόντα που προέρχονται έπειτα από έρευνα, από τις πετροχημικές και υφαντουργικές βιομηχανίες. Μερικές από τις ίνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα είναι οι πολυπροπυλενίου, οι ανθρακικές, οι ακρυλικές, και οι πολυαιθυλενίου.

Συνθετικές ίνες μπορούν να μειώσουν συρρίκνωση του ραγίσματος και μπορεί να βοηθήσει το σκυρόδεμα συγκεκριμένα μετά την θραύση. Προβλήματα που σχετίζονται με τις συνθετικές ίνες περιλαμβάνουν (Kosmatka, Kerkhoff, & and Panarese, 2003):

- χαμηλή οπτική ίνα έως μήτρα συγκόλλησης,

- ασαφής δοκιμές επιδόσεων για χαμηλό ποσοστό χρήσης ίνας με πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, πολυεστέρα και νάιλον,
- χαμηλό μέτρο ελαστικότητας για το πολυπροπυλένιο και πολυαιθυλένιο και
- το υψηλό κόστος του άνθρακα και των ινών αραμιδίου.

Μεγάλη πρόοδος ωστόσο επετεύχθη στη δεκαετία του '90 με ίνες νέας γενιάς που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ποσοστό ακόμη και μεγαλύτερο του 2% στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υγρής μίξης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε τέτοιου είδους δοκίμια σκυροδέματος έδειξαν τελικά ότι οι σύγχρονες συνθετικές ίνες μπορούν να προσφέρουν μηχανικά χαρακτηριστικά (κυρίως δυσθραυστότητα) εφάμιλλα ή ακόμη και ανώτερα σε σχέση με το συμβατικό οπλισμό (πλέγμα) ή τις χαλύβδινες ίνες. Συνεπώς, τέτοιου είδους ινοπλισμένο σκυρόδεμα θα ήταν κατάλληλο για εφαρμογές στη μεταλλευτική, όπου οι επενδύσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος συνήθως υπόκεινται σε μεγάλες πιέσεις, άρα παραμορφώσεις ή και θραύσεις (Morgan, 1999).

Έτσι σήμερα υπάρχουν συνθετικές ίνες που συνδέονται ικανοποιητικά μέσα στο πλέγμα του σκυροδέματος ενισχύοντάς το (James, 1990). Γενικά έχουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το μέτρο ελαστικότητάς τους καθότι κάποιες έχουν υψηλό και κάποιες άλλες αρκετά χαμηλότερο. Οι περισσότερες ανήκουν στην κατηγορία με μικρό μέτρο ελαστικότητας, όπως επί παραδείγματι οι ίνες πολυπροπυλενίου και νάιλον. Τα κυριότερα πλεονέκτημα των ινών αυτών είναι ότι είναι ανθεκτικές στα αλκάλια, και ότι η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παρασκευή τους είναι οικονομική. Τα μειονεκτήματα είναι η μικρή ανθεκτικότητα της επένδυσης σε περίπτωση πυρκαγιάς, η μη άριστη σύνδεση των ινών στο πλέγμα του σκυροδέματος καθώς και η ευαισθησία που παρουσιάζει το σκυρόδεμα στο οξυγόνο και την ηλιακή ακτινοβολία. Το μικρό μέτρο ελαστικότητας δείχνει τη μη συνεισφορά των ινών στην αύξηση της δυσθραυστότητας. Τέλος, μειονέκτημα αποτελεί και το υψηλό κόστος πολλών από αυτές, ειδικά των ινών άνθρακα, σε σχέση με τις χαλύβδινες.

Ως προς την ανθεκτικότητά τους, οι συνθετικές ίνες χαρακτηρίζονται ως χημικά αδρανείς και μη τοξικές μέσα στο σκυρόδεμα (James, 1990). Παρολαυτά παρατηρήθηκε ότι σε υψηλές θερμοκρασίες οξειδώνονται. Για να επιλυθεί αυτό το πρόβλημα προτάθηκε η αύξηση της επικάλυψης των ινών.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα χρήσης συνθετικών ινών, σε σχέση με τις χαλύβδινες, είναι τα εξής:

- Ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα συνθετικών ινών, με μεγάλο ποσοστό συμμετοχής τους στο μίγμα, είναι συνήθως πιο φιλικό προς το χρήστη ως προς την άντληση και την εκτόξευση.
- Η χρήση συνθετικών ινών απαιτεί μικρότερη πίεση στις αντλίες και τις φθείρει λιγότερο καθώς και τον υπόλοιπο εξοπλισμό, δηλαδή τους σωλήνες και το ακροφύσιο.
- Οι τελειωμένες επιφάνειες από σκυρόδεμα με συνθετικές ίνες είναι ευκολότερο να λειανθούν ή να κοπούν, εφόσον απαιτείται.
- Τα μίγματα με υψηλό κατ' όγκο ποσοστό σε συνθετικές ίνες είναι ικανά να αποκτήσουν μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή, σε συνθήκες μεγάλων παραμορφώσεων. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε συνθλίβοντες σχηματισμούς (squeezingground) και σε μεταλλευτικές δραστηριότητες,όπου υπάρχουν μεγάλα ανοίγματα και συχνές εκτινάξεις βράχων (rock bursts).
- Οι χαλύβδινες ίνες όταν εκτίθενται φθείρονται λόγω διάβρωσης. Έτσι σταδιακά μπορεί να χάνουν μέρος τις ικανότητάς τους να «γεφυρώνουν» τις ρωγμές. Σε έντονες συνθήκες διάβρωσης (π.χ. παραθαλάσσιες σήραγγες) έχει παρατηρηθεί ότι ρωγμές μεγαλύτερες των 0.3mm οδηγούν σε γρήγορη φθορά των χαλύβδινων ινών.Τέτοιες σήραγγες στην Νορβηγία έχουν υποστεί αλλοίωση μόλις στα 15-20 χρόνια λειτουργίας (Bernard, 2009). Αντίθετα, οι συνθετικές ίνες δεν αλλοιώνονται αφού είναι χημικά αδρανείς.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε συνθήκες ισχυρής χημικής καταπόνησης, όπως σε υποθαλάσσιες ή παραθαλάσσιες περιοχές, όπου οι χαλύβδινες ίνες διαβρώνονται ενώ αυτές όχι.
- Οι συνθετικές ίνες δεν τραυματίζουν εύκολα το προσωπικό, σε αντίθεση με τις χαλύβδινες, που είναι πιο κοφτερές.

### 2.7.3.1 Ίνες πολυπροπυλενίου

Λόγω της υψηλής αλκαλικής αντίστασής τους, οι ίνες πολυπροπυλενίου διευρύνουν συνεχώς τις εφαρμογές τους. Για το λόγο αυτό είναι το πιο δημοφιλές είδος συνθετικής ίνας. Οι σύγχρονες ίνες πολυπροπυλενίου έχουν μέτρο ελαστικότητας 18 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό από 600 έως 700 MPa (Maidl, 1995). Είναι χημικά αδρανείς, υδρόφοβες (δηλαδή δεν απορροφούν νερό), ελαφριές ανθεκτικές στο χρόνο και στη χρήση. Επίσης, οι μηχανικές ιδιότητες τους είναι παρόμοιες με εκείνες του σκυροδέματος και επομένως δεν μπορούν να το βελτιώσουν ή να το κάνουν πιο ιξώδες. Αυτό καθιστά τις πλαστικές ίνες ακατάλληλες για χρήση στην υποστήριξη της βραχομάζας όπου πρέπει να παραληφθούν υψηλές πιέσεις. Εντούτοις, για εφαρμογές όπου απαιτείται μόνο ενίσχυση ενάντια στη συρρίκνωση, όπως στις επιδιορθώσεις με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οι πλαστικές ίνες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες. Είναι πολύ αποτελεσματικές στη διανομή μικρορωγμών κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης ή της σκλήρυνσης του σκυροδέματος και βοηθούν επίσης στη μείωση της αναπήδησης στην υγρή μίξη. Επιπρόσθετα,

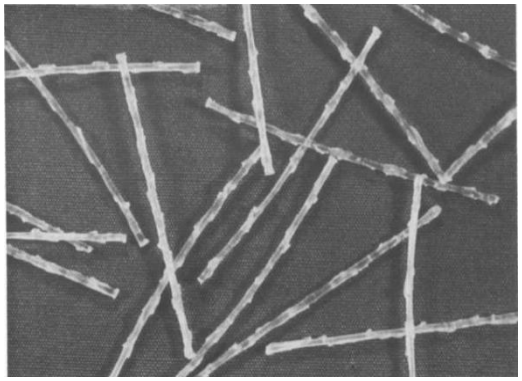
κάνουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανθεκτικό στη φωτιά (Kosmatka, Kerkhoff, & and Panarese, 2003).

Παράγονται είτε σαν επιμήκεις ίνες κυκλικής διατομής, που στη συνέχεια κόβονται στο κατάλληλο μήκος, είτε σαν ταινίες και κορδέλες που διαμορφώνονται τελικά σε ινίδια ορθογωνικής διατομής, όπως φαίνεται στην σχήμα 2.16.

**Σχήμα 2. 16: Αριστερά: ινίδια ορθογωνικήςδιατομής, Δεξιά: ίνες κυκλικής διατομής (Kosmatka, Kerkhoff, & and Panarese, 2003)**

Μπορούν να συσκευάζονται και σε υδατοδιαλυτούς σάκους. Σε προσθήκη σε ποσοστό τουλάχιστον 0,1% κατ'όγκο στο σκυρόδεμα, οι ίνες πολυπροπυλενίου μειώνουν τις ρηγματώσεις λόγω συστολής ξήρανσης του σκυροδέματος (Suprenant and Malisch, 1999).

Η εταιρία Nycon παράγει τις ίνες πολυπροπυλενίου ProConF κατάλληλες για χρήση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αντιστέκονται στη διάβρωση, είναι μη μαγνητικές με μήκος 19 mm, σύμφωνες με τα πρότυπα ASTM C1116 και ICC ES AC32. Το ειδικό τους βάρος είναι 0,91, η θερμοκρασία τήξης οι 165oC, η αντοχή σε εφελκυσμό τα 379 MPa ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι 4.137 MPa. Τυπική δοσολογία που προτείνεται από τον κατασκευαστή είναι 0,9 kg/m$^3$ σκυροδέματος αλλά αυτή μπορεί να κυμαίνεται από 0,45 έως 6,25 kg/m$^3$ ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Είναι επίσης συμβατές με όλα τα πρόσθετα και πρόσμικτα της αγοράς.



**Σχήμα 2. 17: Ίνες πολυπροπυλενίου Duomix, διάμετρος 18 μm, μήκος 6mm (Bekaert)**

#### 2.7.3.2 Ακρυλικές ίνες

Έχουν αποδειχθεί ότι είναι οι πιο υποσχόμενες να αντικαταστήσουν τις ίνες αμιάντου. Παρόμοια μηχανική συμπεριφορά με αυτές επιτυγχάνεται για προσθήκη ινών σε ποσοστό πλέον του 3%. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ακρυλικές ίνες παρουσιάζει υψηλή αντοχή και μετά τη θραύση και πλαστικότητα. Αν και δενέχει τόσο μεγάλη αντοχή σε κάμψη όσο το σκυρόδεμα με ίνες αμιάντου, αυτή επαρκεί για πολλές εφαρμογές στην κατασκευή.

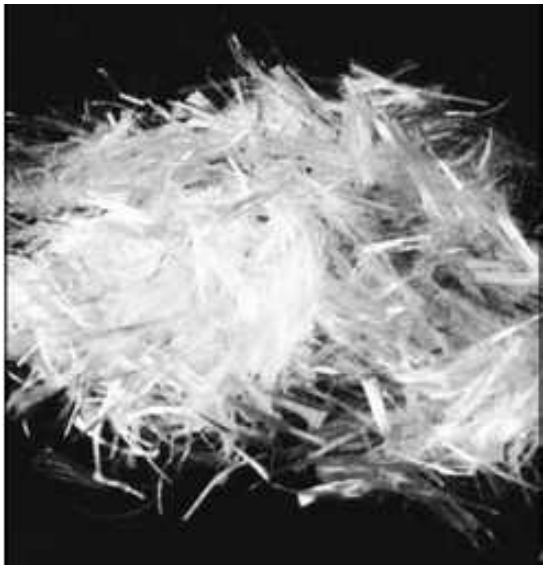
#### 2.7.3.3 Αραμιδικές ίνες

Έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Είναι 2,5 φορές πιο ισχυρές από τις Ε τύπου ίνες υάλου, 43% ελαφρύτερες και 5 φορές πιο ισχυρές από τις χαλύβδινες. Έχουν επιπλέον άριστη συμπεριφορά μέχρι τη θερμοκρασία των 160oC, σταθερότητα διαστάσεων μέχρι τους 200oC, στατική και δυναμική αντοχή σε φαινόμενα κόπωσης ή ερπυσμού. Προσφέρονται σε μεγάλο εύρος διαστάσεων.

#### 2.7.3.4 Ίνες από νάιλον

Υπάρχουν σε διάφορους τύπους στην αγορά για πολλές χρήσεις, και σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Για το σκυρόδεμα προδιαγράφονται δύο τύποι ινών, οι ίνες τύπου νάιλον 6 και νάιλον 66. Το νάιλον νηματοποιείται μέσω διαδικασίας θέρμανσης, εξώθησης και τάνυσης πολυμερών υλικών. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, είναιελαστικές καιπροσδίδουν υψηλές τιμέςδυσθραυστότητας στο σκυρόδεμα. Το νάιλον είναι υδρόφιλο, με κατακράτηση υγρασίας περίπου 4,5%, γεγονός που αυξάνει τη ζήτηση νερού στο σκυρόδεμα. Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει την ενυδάτωση του σκυροδέματος και την εργασιμότητά του σε μικρές προσθήκες ινών, της τάξης του 0,1 έως 0,2% κατ' όγκο, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για προσθήκες σε μεγαλύτερο ποσοστό.Αυτή όμως η μικρή προσθήκη ινών θεωρείται πως προσφέρει καλύτερη ενίσχυση σε σχέση με τις ίνες πολυπροπυλενίου ή πολυεστέρα, για την αντίστοιχη πάντα προσθήκη ινών. Το νάιλον είναι σχετικά αδρανές και ανθεκτικό σε ένα μεγάλο εύρος οργανικών ή μη υλικών, συμπεριλαμβανομένων και των ισχυρά αλκαλικών.Οι κατασκευαστές τέτοιων ινών αναφέρουν ότι οι ίνες τους έχουν μεγαλύτερο λόγο μορφής από τις αντίστοιχες πολυπροπυλενίου με συνέπεια να μπορούν να προστίθενται σεμικρότερες ποσότητες αποδίδοντας τα ίδια αποτελέσματα (Laning, 1992).

Η εταιρία Nycon παράγει ίνες νάιλον κατάλληλες για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οι ίνες NylonRC (σχήμα 2.18) είναι συμβατές με τα πρότυπα ASTM C1116 και ICC ES AC32 ενώ η προτεινόμενη δοσολογία τους είναι από 0,3 kg/m$^3$ έως 0,6 kg/m$^3$.



**Σχήμα 2. 18: Ίνες νάιλον της Nycon τύπου RC (Nycon)**

Επίσης, έχουν μήκος 19 mm, αντοχή σε εφελκυσμό 896 MPa και σημείο τήξης 220oC με άριστη αντοχή σε αλκάλια. Κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι περιορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις ρωγμές που προέρχονται από τη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος.

Εκτός από τις ίνες RC η ίδια εταιρία παρασκευάζει τις ίνες υψηλών επιδόσεων MultiMesh. Η διαφοράτους είναι ότι σχηματίζουν ιδιαίτερα ισχυρούς δεσμούς μέσα στο σκυρόδεμα και βελτιώνουν σημαντικά τις αντοχές του. Είναι κι αυτές υδρόφιλες, με 19mm μήκος, συμβατές με τα πρότυπα ASTM C1116. Προτεινόμενη δοσολογία είναι 0,45 kg/m$^3$ και έχουν αντοχή σε εφελκυσμό 303 MPa, σημείο τήξης 225 $^o$C και ανθεκτικότητα σε αλκάλια ή διάβρωση.

### 2.7.3.5 Πολυεστερικές ίνες

Οι ίνες πολυεστέρα είναι υδρόφοβες, σταθερές στα όξινα και αλκαλικά περιβάλλοντα αλλά παρουσιάζουν ασθενή πρόσφυση με τη μάζα του σκυροδέματος. Το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι κάτω από 19 GPa, και η αντοχή σε εφελκυσμό είναι περίπου 1 GPa (Maidl, 1995). Το μήκος τους κυμαίνεται από ¾ έως 2 in (Laning, 1992).

### 2.7.3.6 Ίνες Πολυαιθυλενίου

Είναι ίνες με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό και μεγάλο μέτρο ελαστικότητας. Έχουν χαμηλή πυκνότητα, χαμηλή απορρόφηση υγρασίας, υψηλή αντοχή σε διάβρωση αλλά χαμηλή θερμική αντοχή. Η ιαπωνική Bonfix παράγει τέτοιου είδους ίνες, διαμέτρου 0,9 mm και μήκους 40 mm, με μέτρο ελαστικότητας 5 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 200 MPa.

### 2.7.3.7 Ίνες Πολυβινυλικής αλκοόλης

Οι ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης είναι διαθέσιμεςμεποικίλες διαμέτρουςκαι μέτρο ελαστικότητας μέχρι 25 GPa. Είναι ιδιαίτερα ανθεκτικές στα αλκάλια, στη φθορά και στη γήρανση. Μπορούν να επιτευχθούν αντοχές σε εφελκυσμό μέχρι 1 GPa (Maidl, 1995). Κύριο χαρακτηριστικό τους που τις κάνει πολύ ελκυστικές για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ότιαναπτύσσουν πολύ ισχυρό δεσμό με το σκυρόδεμα. Η εταιρία Nycon παράγει ίνες PVA (πολυβινυλικής αλκοόλης) σε τρία είδη για επενδύσεις σηράγγων, τις ίνες RECS100, RSC15 και RF4000. Με μήκη 12, 8 και 30 mm και γραμμική μάζα (denier) 100, 15 και 4,400αντίστοιχα χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του έργου.

### 2.7.3.8 Ίνες Πολυακρυλονιτριλίου

Οι ίνες πολυακρυλονιτριλίου είναι κατάλληλες για τις απαιτήσεις των προϊόντων σκυροδέματος με ίνες. Έχουν σχετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας της τάξεως των 20GPa,υψηλή αλκαλική αντίσταση και καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό είναι μέχρι 1 GPa. Η προσθήκη αυτού του τύπου ινών μπορεί να μειώσει την τάση συρρίκνωσης του σκυροδέματος, να βελτιώσει την ενεργειακή απορρόφηση και την αντοχή σε κάμψη (Maidl, 1995).

### 2.7.3.9 Ίνες από καρβίδια του πυριτίου

Οι ίνες από καρβίδια του πυριτίου (silicon carbide) με διάμετρο από 100 έως 150 μm, παρασκευάζονται μέσω της απόθεσης στην αέρια φάση.Καλώδια βολφραμίου πάχους περίπου 10μm ή ίνες άνθρακα θερμαίνονται μέχρι τη θερμοκρασία των 1.200°C, χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα. Ηαπόθεσητου καρβιδίου του πυριτίου προκύπτει έπειτα απότη θερμική αναγωγή του τετραχλωριδίου του πυριτίου από το οξυγόνο. Με ταχύτητα περίπου 2,5 μm/sec, ο ρυθμός αναγωγής είναι αρκετά μικρός.Οι ίνες από καρβίδια του πυριτίου έχουν μικρό ειδικό βάρος, είναι θερμικά σταθερές και ανθεκτικές στις χημικές ουσίες. Η εφελκυστική τους αντοχήείναι περίπου 3 GPa και το μέτρο ελαστικότητας 400 GPa (Maidl, 1995).

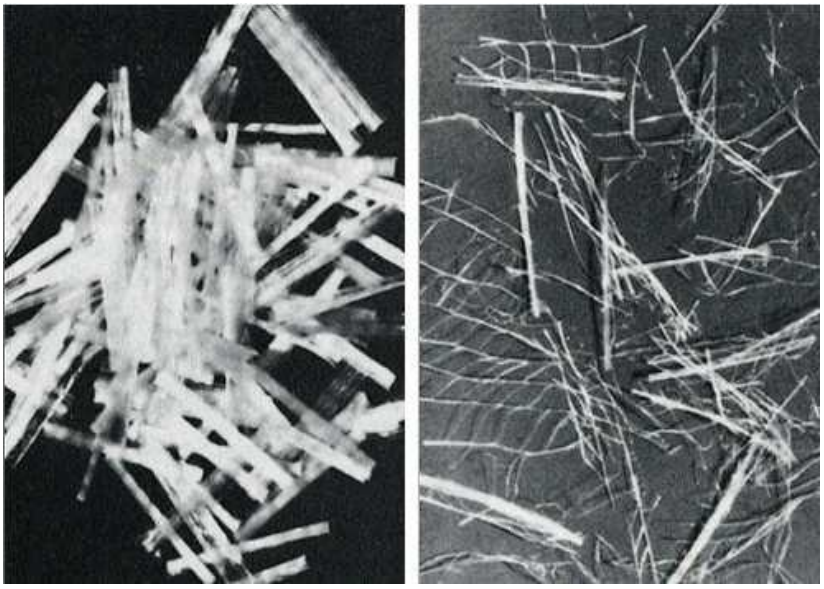
Μερικοί κατασκευαστές παράγουν επίσης νηματοειδείς κρυστάλλους (whiskers) από καρβίδια του πυριτίου. Οι κρύσταλλοι αυτοί είναι τριχοειδείς μονο κρύσταλλοι με διάμετρο από 0.5 έως μερικά μm. Κατασκευάζονται συνήθως με κατακρήμνιση οργανικών ενώσεων μετάλλων από την αέρια φάση, όπως το νιτρίδιο του πυριτίου ($Si_3N_4$),το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) ή το οξείδιοτου αλουμινίου ($Al_2 O_3$). Οι νηματοειδείς κρύσταλλοι έχουν επικριθεί για την ελάχιστη διάμετρο τους, μικρότερη του 1 μm,δεδομένου ότι μπορεί να παρουσιάσουν παρόμοιες καρκινογόνες συνέπειες με τις ίνες αμιάντου. Οι νηματοειδείς κρύσταλλοι από καρβίδια του πυριτίου

(SiC) μπορούν να επιτύχουν εφελκυστική αντοχή μέχρι 10 GPa και μέτρο ελαστικότητας 420 GPa (Maidl, 1995).

### 2.7.3.10 Τελευταίες εξελίξεις στις συνθετικές ίνες

Οι συνθετικές ίνες, και μάλιστα κυρίως οι ίνες πολυπροπυλενίου, είναι αυτές που τείνουν να χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε εφαρμογές εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Όπως έχει ήδη επισημανθεί, οι χαλύβδινες ίνες έχουν πολύ μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (200 GPa) και έτσι περιορίζουν στο ελάχιστο το άνοιγμα των ρωγμών του σκυροδέματος. Η τυπική δοσολογίατων συνθετικών ινών για να δώσουν παρεμφερή αποτελέσματαμε τις χαλύβδινεςστις δοκιμές φορτίου-παραμόρφωσης είναι 1:4 κατά βάρος και 2:1 κατ'όγκο. Αφού το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι το 1/50των χαλύβδινων, οι συνθετικές ίνες πρέπει να έχουν μήκος πάνω από το 1:25 σε σχέση με τις χαλύβδινες για να δώσουν τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά στο σκυρόδεμα. Έτσι, οι συνθετικές ίνες έχουν κατασκευασθεί με σκοπό να αναπτύσσουν μεγάλη δύναμη συνάφειας και αγκύρωσης σε μήκος 2 mm περίπου (Papworth, 2002).

Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, κατασκευάστηκαν ειδικές ίνες πολυπροπυλενίου και πολυαιθυλενίου οι οποίες έχουν μορφή παρόμοια με τις χαλύβδινες στη φυσιολογική τους κατάσταση. Αφού εισαχθούν στον αναμίκτη, έχουν την ικανότητα να αλλάζουν τη μορφή τους. Ινίδια αρχίζουν να προεξέχουν από τα άκρα τους, μεταμορφώνονταςτις διακριτές αυτές ίνες σε στοιχεία ενίσχυσης με πολύ καλή συνάφεια με το σκυρόδεμα(Trottier, Mahoney, 2004). Η γεωμετρία των ινών αυτών πριν και μετά την ανάμιξη φαίνεται στην σχήμα 2.19.



**Σχήμα 2. 19:** Διακριτές ίνες πολυπροπυλενίου φέρουν συγκολλημένα ινίδια που αναδεικνύονται κατά τη μίξη **(Laning, 1992)**

Το πλεονέκτημάτους είναι ότι πριν την ανάμιξη μπορούν να συσκευάζονται με ευκολία και να μεταφέρονται όπως όλες οι ίνες. Επιπλέον, στην ανάμιξη δε δημιουργούνται προβλήματα και έχει φανεί ότι το μίγμα που παράγεται είναι ομοιογενές. Πλέον οι ίνες αυτές διατίθενται στην αγορά με αντοχή σε εφελκυσμό μεγαλύτερη των 500 MPa και μέτρο ελαστικότητας 4,3 GPa. Ο δεσμός που αναπτύσσεται οφείλεται στην φυσική και χημική συνοχή μεταξύ ίνας και σκυροδέματος, στην τριβή, στην μηχανική αγκύρωση αλλά και στο αλληλοκλείδωμα μεταξύ τους (Trottier, Mahoney, 2004).

### 2.7.4. Ανθρακικές ίνες

Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν ευρύ φάσμα καλών μηχανικών ιδιοτήτων. Εκτός του ότι είναι ελαφριές, είναι πολύ ανθεκτικές στην επίδραση των χημικώνουσιών και των υψηλών θερμοκρασιών. Είναι κατάλληλες για την ενίσχυση των πλαστικών και των μετάλλων. Μέχρι τώρα, εντούτοις, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στο σκυρόδεμα, δεδομένου ότι είναι ακόμα σχετικά ακριβές. Αρχικά αναπτύχθηκαν σε εφαρμογές στην αεροναυπηγική , λόγω των άριστων μηχανικών χαρακτηριστικών τους.

Οι ίνες άνθρακα παράγονται μέσω της ενανθράκωσης της κυτταρίνης, των υφαντών ινών ή του πολυακρυλονιτριλίου, και σε μερικές περιπτώσεις της πίσσας. Οι υφαντές ίνες, παραδείγματος χάρη, υποβάλλονται αρχικά σε μία διαδικασία κυκλοποίησης(cyclisation)και ακολουθείταιεν συνεχεία διαδικασία οξείδωσης στους 200 έως 300 °C, κατά τη διάρκεια της οποίας εφαρμόζεται εφελκυστική τάση στις ίνες για να αποτρέψει τις διαδικασίες συρρίκνωσης.

Η πραγματική ενανθράκωση διενεργείται στη συνέχεια στους 1.200 °C σε αδρανές αέριο. Η γραφιτοποίηση εκτελείται με την επίδραση του αργού σε θερμοκρασίες μέχρι 3.000 °C. Εδώ επίσης μια εφελκυστική τάση εφαρμόζεται στην κατεύθυνσητου άξονα των ινών, έτσι ώστε οι διαμορφωμένοι κρύσταλλοι να κατευθύνονται κατά μήκος του άξονα των ινών. Όπως συμβαίνει με τα μέταλλα, είναι δυνατό να επιτευχθούν διαφορετικές ιδιότητες βάσει της θερμικής επεξεργασίας. Κατά συνέπεια, οι εξαιρετικά σκληρές ίνες άνθρακα έχουν αντοχή σε εφελκυσμό 4,6 GPa και μέτρο ελαστικότητας 250 GPa (Maidl, 1995).

Οι ίνες πίσσας παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον από την άποψη της μαζικής παραγωγής δεδομένου ότι η πρώτη ύλη έχει ήδη μια περιεκτικότηταση άνθρακα περίπου 99.5% και έτσι, οι ίνες αυτές μπορούν να παραχθούν με πολύ χαμηλότερο κόστος. Η ενανθράκωση εκτελείται σε θερμοκρασίες περίπου 1.200°C ενώ η γραφιτοποίηση είναι επίσης εφικτή (Maidl, 1995). Τυπικά, έχουν ίδιο μέτρο ελαστικότητας με τις χαλύβδινες ίνες, είναι όμως πολύ ελαφρύτερες.

### 2.7.5 Φυσικές ίνες

Ίνες από υλικά όπως αυτά υπάρχουν στη φύση χρησιμοποιήθηκαν από τους αρχαίους χρόνους για την ενίσχυση των δομικών υλικών και μετέπειτα του σκυροδέματος. Πολλά τέτοια υλικά μπορούν να αποκτηθούν με μικρό κόστος, λόγω της ευκολίας στην παραγωγή τους. Οι αντίστοιχες ίνες που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για σκυρόδεμα με μικρή απαίτηση σε ενίσχυση ή για επικαλύψεις σκληρυμένου σκυροδέματος.

Η χρήση τους ωστόσο δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη διότι απορροφούν υψηλές ποσότητες νερού και έχουν μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, συγκριτικά με τα άλλα είδη ινών. Σημαντικό πρόβλημα με αυτές τις ίνες είναι η τάση τους να θραύονται σε αλκαλικό περιβάλλον. Ειδικά πρόσμικτα πρέπει να προστίθενται ώστε να βελτιώνουν την ανθεκτικότητά τους και να μειώνουν την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Έτσι, αναπτύχθηκαν οι κατεργασμένες φυσικές ίνες, δηλαδή ίνες που προέρχονται από φυσικά υλικά αλλά υπόκεινται σε κατεργασία για να αποδίδουν καλύτερα μέσα στο σκυρόδεμα.

#### 2.7.5.1 Φυτικές ίνες

Θεωρητικές και πρακτικές δοκιμές έχουνπραγματοποιηθεί σε ίνες κυτταρίνης. Επιτεύχθηκε ένα ευρύ φάσμα αντοχής σε εφελκυσμό μεταξύ 200 και 1.500 MPa και το μέτρο ελαστικότητας ποικίλει επίσης μεταξύ 5 και 40 GPa. Αυτό το υλικό είναι, φυσικά, διαθέσιμο σχεδόν σε απεριόριστες ποσότητες σε όλο τον κόσμο. Οι ίνες κυτταρίνης, επομένως, θεωρούνται πια ωςπιθανό υποκατάστατο των ινών αμιάντου (Maidl, 1995).

#### 2.7.5.2 Ξύλινες ίνες

Οι ιδιότητες των ινών αυτών εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο κόβονται και ραφινάρονται. Η διαδικασία με την οποία το ξύλο γίνεται μία ινώδη μάζα καλείται πολτοποίησης περιλαμβάνει βρασμό του ξύλο μέσα σε διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, ανθρακικού νατρίου και θειούχου νατρίου. Έχουν σχετικά καλή συμπεριφορά σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνητές ίνες. Έτσι, η αντοχή τους σε εφελκυσμό φθάνει τα 2 GPa σε περιπτώσεις επιμελούς επεξεργασίας, διαφορετικά αντοχή της τάξης των 500 MPa μπορεί να επιτευχθεί με πιο οικονομικά μέσα (Kosmakta and et.al, 2002).

#### 2.7.5.3 Ίνες αμιάντου

Ο αμίαντος εξορύσσεται ως πέτρωμα στα υπαίθρια μεταλλεία. Θραύεται σε ίνες και διαχωρίζεται μέσω κοσκινίσματος σύμφωνα με το μήκος των ινών. Λόγω του υψηλού σημείου τήξης των 1.550 °C, είναι εξαιρετικά ανθεκτικός στη φωτιά και επίσης πολύ ανθεκτικός στα ισχυρά διαλύματα, με εξαίρεση το μεταλλικό οξύ. Έχει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό που φτάνει τα 3,5

GPa, υψηλό μέτρο ελαστικότητας της τάξης των 160 GPa και άριστη ηλεκτρική μόνωση. Είχε επίσης επικρατήσει και λόγω του μικρού κόστους παραγωγής του. Ωστόσο, λόγω της καρκινογόνου δράσης των ινών αμιάντου έχει μειωθεί σημαντικά η χρήση τους ως οικοδομικό υλικό (Maidl, 1995).

#### 2.7.5.4 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες που προορίζονται για εμπορική χρήση είναι συνήθως κοντές, πουπαρήχθησαναρχικάμεσκοπότηςθερμικήμόνωση.Παράγονται βάσει των πυριτικών αλάτων αλουμινίου και ποικίλουν σε περιεκτικότητα οξειδίων του αλουμινίου. Παρασκευάζονται μέσω του διαχωρισμού της τηγμένης μάζας, η οποία ακολουθεί διαδικασίες περιστροφής, φυγοκέντρησης ή εμφύσησης. Αυτές οι ίνες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν ως οπλισμός όταν υποβάλλονται σε κατάλληλη επεξεργασία. Οι κοντές ίνες φτιαγμένες από καθαρό τριοξείδιο του αργιλίου ($Al_2O_3$) με διάμετρο 3 μm έχουν εφελκυστική αντοχή 2 GPa και μέτρο ελαστικότητας 300 GPa (Maidl, 1995).

## 2.8 Μίξη διαφορετικών ινών

Σε ένα πολλαπλό σύστημα μίξης ινών, δύο ή περισσότερα είδη αναμειγνύονται σε ένα μίγμα.Το'υβριδικό-ινοπλισμένο'σκυρόδεμα που προκύπτει συνδυάζει μάκρο και μίκρο ίνες. Ως μίκρο-ίνες ορίζονται αυτές που έχουν κάτω από 10 mm (0,4 in) μήκος και διάμετρο κάτω από 100μm (0,004in), ενώ μάκρο-ίνες είναι οι μεγαλύτερες από αυτές.Το αποτέλεσμα του συνδυασμού είναι η μείωση της απόστασης των ινών, γεγονός το οποίο οδηγεί στον περιορισμό των μικρορωγμών και την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής. Εφαρμόζεται κυρίως σε επισκευές και επιδιορθώσεις (Banthia and Bindiganavile, 2001). Ένα μίγμα ινών χάλυβα και πολυπροπυλενίου συνδυάζει αυξημένη δυσθραυστότητα και αντοχή σε κρούση λόγω του χάλυβα, αλλά και περιορισμένη πλαστική θραύση λόγω του πολυπροπυλενίου. Για μία εφαρμογή στο Σικάγο (Wojtysiak και άλλοι, 2001), ένα μίγμα με 30 kg/m$^3$ ινών χάλυβα και 0,9 kg/m$^3$ ινών πολυπροπυλενίουπολύ μικρού πάχους χρησιμοποιήθηκε για ενίσχυση πλακών υπό κλίση. Το σκυρόδεμα με ίνες μπορεί μεν να παρουσίαζε μεγαλύτερη κάθιση σε σχέση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα, ωστόσο φαίνεται ότι έχει αυξημένη αντοχή.

## 2.9 Κριτήρια επιλογής ινών

Όπως ήδη τονίστηκε παραπάνω, οι χαλύβδινες ίνες είναι αυτές που επικρατούν μέχρι τώρα στην αγορά λόγω του χαμηλού συγκριτικά κόστους τους, της ανθεκτικότητάς τους και της σχετικής εμπειρίας που έχει αποκτηθεί. Βέβαια, το κόστος ανά κιλό στις ίνες δεν πρέπει να είναι η

μοναδική παράμετρος για επιλογή της βέλτιστης λύσης. Έτσι, όσο το κόστος παραγωγής των άλλων ινών μειώνεται και η έρευνα κατευθύνεται προς αυτές, τόσο θα κερδίζουν έδαφος.

Βέβαια, δεν καλύπτουν όλες οι ίνες τις απαιτήσεις για την ενίσχυση του σκυροδέματος. Πρωταρχικές απαιτήσεις είναι η αντοχή, η χημική αντίσταση, η παραμορφωσιμότητα και η συνάφειά τους με το σκυρόδεμα. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες, που παίζουν αποφασιστικό ρόλο σε πολλέςπεριπτώσεις, είναι το κόστος των υλικών αυτών και η διαθεσιμότητα τους (Maidl, 1995).

Οι τύποι των ινών που χρησιμοποιούνται κυρίως στην παραγωγή ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι οι ακόλουθοι: ίνες που προέρχονται από την κοπή χαλύβδινων συρμά των μικρής διαμέτρου (ASTM, type I) και ίνες πολυπροπυλενίου. Αυτά τα υλικά διαφέρουν στις ιδιότητες και ως εκ τούτου απαιτείται μια διαφορετική προσέγγιση.

Γενικά, επικρατεί η άποψη ότι οι ίνες χάλυβα, με μέτρο ελαστικότητας έξι φορές αυτού-του σκυροδέματος,είναι η αποτελεσματικότερη ενίσχυση στις κατασκευές. Ωστόσο, οι ίνες άνθρακα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για να βελτιώσουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Δεν υπόκεινται σε διάβρωση κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και αυξάνουν πολύ την εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκληρυμένου τσιμέντου. Το κόστος τους είναι όμως πολύ μεγαλύτερο από αυτό των ινών χάλυβα και υάλου.

Ίνες υάλου με διάμετρο 8 έως 10 μm έχουν αντοχή αντίστοιχη ενός σύρματος ψυχρής ολκής υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (1.800 έως 2.500 MPa) ενώ ταυτόχρονα είναι 3,5 φορές ελαφρύτερες. Το μέτρο ελαστικότητας των ινών υάλου είναι σχεδόν το μισό σε σχέση με αυτό του χάλυβα,διπλάσιο αυτού του σκυροδέματος και, κατά μέσον όρο, έξι φορές αυτού του γύψου. Έτσι οι προοπτικές για τη χρήση αυτών των ινών υάλου ως οπλισμού του σκυροδέματος είναι ευνοϊκές.

Έχει παρατηρηθεί ότι οι ευθύγραμμες ίνες με ομαλή επιφάνεια και μήκος l=lcr δεν είναι κατάλληλες για χρήση. Μπορεί ωστόσο, να μειωθεί το κρίσιμο μήκος τραχύνοντας την επιφάνεια των ινών γεγονόςπου θα αυξήσει την αγκύρωση στη μάζα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την ανάληψη μεγαλύτερης διατμητικής τάσης. Για λόγους εργασιμότητας, ακόμα και αν μπορούν να κατεργαστούν αυτές οι ίνες, οι περισσότερες από τις διαθέσιμες ίνες στην αγορά έχουν μήκος μικρότερο του lcr και χαρακτηρίζονται ως υποκρίσιμες.

Οι ίνες με επιφανειακές παραμορφώσεις (κυματοειδής μορφή) ή με γαντζωτά άκρα, προκαλούν προβλήματα εργασιμότητας και με ορισμένους τύπους ινών είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποφευχθεί ο σχηματισμός συσσωμάτωσης. Ο ειδικός εξοπλισμός δοσομέτρησης και διαχωρισμού μπορεί να αποτελεί λύση σε αυτό το πρόβλημα. Μια άλλη επιτυχής μέθοδος για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος επίσης περιλαμβάνει τη χρήση των συγκολλημένων

ινών με υδροδιαλυτή κόλλα (πλακίδια ινών), οι οποίες ωστόσο είναι λίγο ακριβότερες. Οι ίνες αυτές διαχωρίζονται κατά τη διάρκεια της μίξης όταν έρχονται σε επαφ ή με το νερό. Τέλος,οι ίνες που προέρχονται από φρεζάρισμα κατάλληλων τεμαχίων χάλυβα έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτικές όσον αφορά την εργασιμότητα.

Οι συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου χαρακτηρίζονται από υψηλή παραμορφωσιμότητα. Το μέτρο ελαστικότητας τέτοιων ινών δεν είναι περισσότερο από το ένα τέταρτο του μέτρου ελαστικότητας των σκυροδεμάτων. Επομένως, οι ίνες πολυπροπυλενίου μπορούν μετά βίας να επιτελέσουν το ρόλο του οπλισμού για το σκυρόδεμα. Η χρήση τους, ωστόσο, βοηθά την παρεμπόδιση της φθοράς και ρήξης του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και εφαρμογής, τη μερική αύξηση της αντοχής σε κρούση, την αντίσταση στην τριβή και τον περιορισμότων μικρορωγματώσεων. Τελευταίες όμωςεξελίξεις στο χώρο αυτό έχουν ανατρέψει ριζικά την κατάσταση αυτή. Πλέον, στην αγορά υπάρχουν συνθετικές ίνες υψηλών επιδόσεων (High Performance Polymer HPP), με μέτρο ελαστικότητας και όριο διαρροής ικανά να ενισχύσουν το σκυρόδεμα ισάξια με τις χαλύβδινες.

Κατά συνέπεια, όπως και στους συμβατικούς οπλισμούς, η λειτουργική αποτελεσματικότητα των ινών στις κατασκευές καθορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από την παραμορφωσιμότητά τους. Για το λόγο αυτό οι ίνες ταξινομούνται σε δύο τύπους:

1 . Χαμηλού μέτρου παραμορφωσιμότητας (ίνες κυρίως συνθετικές και φυτικές) με χαρακτηριστικά υψηλή επιμήκυνση κατά τη διαρροή.

2 . Υψηλού μέτρου παραμορφωσιμότητας (ίνες χάλυβα, υάλου και άνθρακα).

Στην πρώτη περίπτωση η ενίσχυση αναμένεται να βελτιώσει κυρίως την αντοχή του σκυροδέματοςστην κρούση και στη δεύτερη να βελτιώσει πρόσθετα την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό.

Ως προς τη δυνατότητα χρήσης φυσικών υλικών οπλίσεως όπως οι ίνες αμιάντου, ένα συχνό πρόβλημα έχει να κάνει με το σχετικά μικρό μήκος τους και τις δυσκολίες που συνδέονται με τη διάχυση τους στη μάζα του σκυροδέματος.Η περιορισμένη διαθεσιμότητα φυσικών πόρων υψηλής ποιότητας αμιάντου πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη.Όλα αυτά τα προβλήματα συνάγουν στην αναζήτηση νέων τύπων υλικών ενίσχυσης (π.χ. από πολυπροπυλένιο, πολυαιθυλένιο, νάιλον, ακρυλικό, πολυεστέρα, βαμβάκι, κά).

Τέλος, σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της ίνας αποτελεί και η μέθοδος εκτόξευσης του μίγματος. Έτσι, ενώ οι συνθετικές μάκρο-ίνες είναι πολύ αποτελεσματικές στην υγρή μίξη, στην ξηρή αντιμετωπίζονται πολλά προβλήματα κυρίως ως προς την εκτοξευσιμότητα του μίγματος και την αναπήδηση

Αυτήν την στιγμή παγκοσμίως υπάρχουν περίπου 30 μεγάλες εταιρίες παραγωγής ινών χάλυβα για ενίσχυση του σκυροδέματος και συνολικά παράγουν πάνω από 100 διαφορετικά είδη ινών(Katzer, 2003 and Odelberg, 1985).Ίνες χρησιμοποιούνται πλέον όχι μόνο σε Αμερική και Ευρώπη αλλά και σε χώρες όπως η Αυστραλία, η Νότιος Αφρική και η Νότιος Κορέα (Katzer, 2006).

## 2.10 Πεδίο Εφαρμογής

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (fiber reinforced concrete) χρησιμοποιήθηκε σε έργα για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1960 ενώ το εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα (fiber reinforced shotcrete) έπειτα από περίπου μια δεκαετία. Έκτοτε οι εφαρμογές τους όλο και διευρύνονται σε νέους τομείς και αυτό χάρι στο γεγονός ότι προσφέρει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού οπλισμένου σκυροδέματος. Βέβαια, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν είναι δυνατόν να αντικαταστήσει τον προκάτοχό του.

Οι εφαρμογές των ινών δεν περιορίζονται μόνο στην υποστήριξη των σηράγγων αλλά και σε πλήθος άλλων τομέων του κατασκευαστικού κλάδου, όπως φαίνεται παρακάτω:

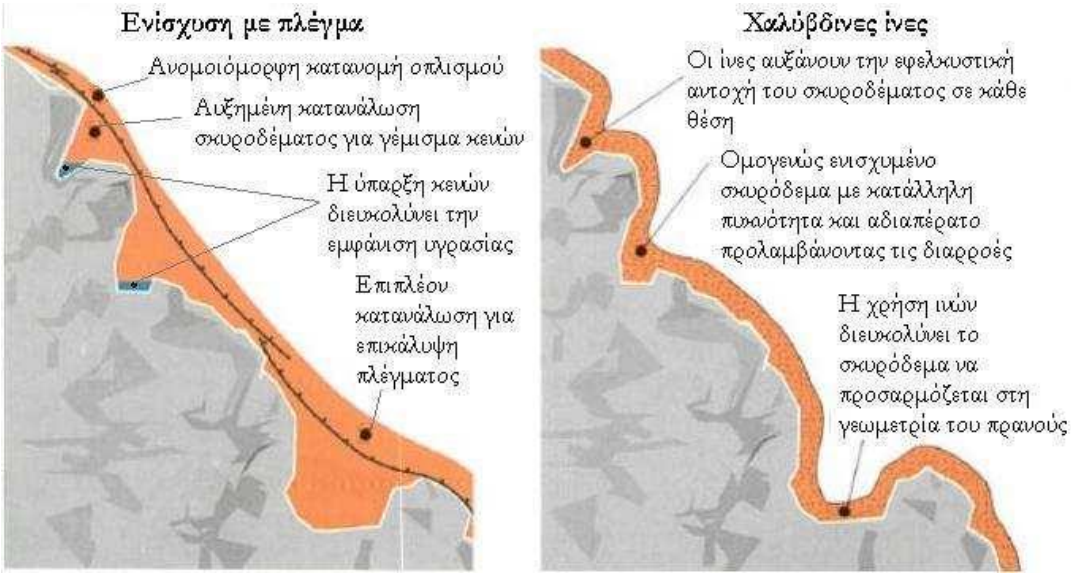
- Στοιχειώδης ή συμπληρωματική, μόνιμη ή προσωρινή υποστήριξη–τελική επένδυση σηράγγων.
- Σταθεροποίηση, επένδυση πρανών.
- Μεταλλεία, κυρίως για έργα ανάπτυξης.
- Στοές διερεύνησης, αποστράγγισης και αποχέτευσης.
- Επενδύσεις υδραυλικών έργων και πισίνες.
- Υποστήριξη θεμελιώσεων.
- Πάσσαλοι θεμελιώσεως.
- Κατασκευή αρχιτεκτονικών πετασμάτων, ηχοπετασμάτων, αναπλάσεις κοινόχρηστων χώρων, κατασκευή κατοικιών.
- Υποδομή σιδηροδρόμων, οδικών δικτύων, οδοστρωσία, αεροδιάδρομοι.
- Κατασκευή υλικών ανθεκτικών σε δυναμικές φορτίσεις και ανατινάξεις.
- Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος.
- Βιομηχανικά, λιμενικά δάπεδα, φράγματα, κανάλια.
- Υδροηλεκτρικά έργα, πυρηνικοί αντιδραστήρες, φούρνοι καύσης(θερμομονωτική επένδυση).
- Εγκαταστάσεις αποθήκευσης απορριμμάτων.

Επιπλέον, ευρέως χρησιμοποιείται και σε επισκευές έργων από σκυρόδεμα ή ακόμη και μεταλλικές κατασκευές (σχήματα 2.20-2.25), όπως:

- Υποστήριξη σηράγγων (βλάβες από σεισμό, πυρκαγιά) .
- Γέφυρες.
- Κτήρια.
- Τοιχία αντιστήριξης.
- Δεξαμενές νερού.
- Αρδευτικά έργα.
- Προβλήτες, κυματοθραύστες, διαφράγματα, φάροι.
- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις χημικής επεξεργασίας.

**Σχήμα 2. 20: Προσωρινή υποστήριξη σήραγγας με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ΕΤΑΛ)**

**Σχήμα 2. 21 : Σιδηρόδρομος υψηλής ταχύτητας Valdarno – Arrezzo (Ιταλία) (Dramix, 2004)**




**Σχήμα 2. 22: Τομή επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αριστερά με πλέγμα και δεξιά με ίνες(Bekaert Corp., 2002)**

**Σχήμα 2. 23 : Διαφραγματικός τοίχος, Λουκέρνη (Ελβετία) (Dramix, 2004)**

**Σχήμα 2. 24: Συμβατικός οπλισμός προκατασκευασμένου στοιχείου σκυροδέματος (Dramix, 2004)**

**Σχήμα 2. 25: Σήραγγα επενδεδυμένη με προκατασκευασμένα στοιχεία ινοσκυροδέματος (Dramix, 2004)**

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για οικοδομικές εργασίες, παίρνοντας τη θέση του δομικού πλέγματος. Έτσι οι ίνες παίζουν ρόλο δευτερογενούς οπλισμού. Τα πλεονεκτήματα της μη χρήσης του πλέγματος είναι τα ίδια με τα παραπάνω και σε αυτήν την περίπτωση.

Η τάση που παρουσιάζει το ινοπλισμένο σκυρόδεμα να μην συστέλλεται κατά την ξήρανση και να αποτρέπει την εμφάνιση μεγάλων ρωγμών, ευνοεί την καλύτερη επικάλυψη του χάλυβα και προλαμβάνει τη διάβρωσή του. Οι χαλύβδινες ίνες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν την πυκνότητα του οπλισμού σε θέσεις με αυξημένο συγκεντρωμένο φορτίο. Συνεπώς, σε κατασκευές που απαιτούν πολύπλοκο σχεδιασμό ενίσχυσης, το κόστος και ο χρόνος περιορίζονται (Maidl, 1995).

Τέλος, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για την παρασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων σκυροδέματος για διάφορες εφαρμογές όλο και περισσότερο (Shah,1985). Παράδειγμα αποτελούν τσιμεντένιοι αγωγοί (σχήμα 2.26) που το μήκος τους μπορεί να ξεπερνά τα 13 m. Η διαδικασία παραγωγής τους είναι σαφώς πιο εύκολο να παρακολουθηθεί ενώ εξωτερικοί παράγοντες, όπως υψηλές θερμοκρασίες,δεν επηρεάζουν το προϊόν. Επιπλέον, οι πρώιμες και τελικές αντοχές του υπερτερούν έναντι του συμβατικά οπλισμένου σκυροδέματος, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για μειωμένων διαστάσεων και βάρους προϊόντα, καθιστώντας τα πιο εύχρηστα. Τέλος, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα που παράγεται στο εργοστάσιο είναι μικρότερης υδατοπερατότητας σε σχέση με αυτό που παράγεται στο εργοτάξιο (Katzer, 2006).

**Σχήμα 2. 26: Αγωγοί ομβρίων - Μονομπλόκ κατασκευή (Dramix, 2004)**

Βέβαια οι χρήσεις των ινών δεν είναι μόνο οι παραπάνω. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα συνεχώς επεκτείνει το πεδίο εφαρμογών του και αυτό οφείλεται στο ότι το κόστος χρήσης τους όλο και μειώνεται ενώ τα συγκριτικά πλεονεκτήματά τους είναι πλέον αδιαμφισβήτητα.

# Κεφάλαιο 3ο

Σχεδίαση και υλοποίηση πειραματικής διαδικασίας

## Γενικά

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, σχεδιάστηκαν και εκτελέστηκαν δοκιμές αντοχής του σκυροδέματος με σκοπό την διερεύνηση της επίδρασης των ινών (χαλύβδινων και πολυπροπυλενίου) στη σύνθεσή του. Όπως εξηγείται αναλυτικά και στη συνέχεια, επιλέχτηκαν συγκεκριμένοι τύποι ινών καθώς και συγκεκριμένη διαδικασία χύτευσης δοκιμίων με σκοπό τη διεξαγωγή σειράς πειραμάτων από τα οποία προκύπτουν αποτελέσματα σχετικά με την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό των αντίστοιχων δοκιμίων.

Η πειραματική διαδικασία σχεδιάστηκε έτσι ώστε να προκύψουν αποτελέσματα για την μηχανική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος και πιο συγκεκριμένα την **αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό και την αντοχή των δοκιμίων σε κάμψη τριών σημείων.**

Για τον προσδιορισμό αυτών των εντατικών μεγεθών κατασκευάστηκαν δοκίμια σκυροδέματος διαστάσεων 15*15*15 cm, μέσω χύτευσης και σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου **ASTM C 1116-03**, σε καλούπια μαζί με συγκεκριμένη μάζα ινών.

Επιλέχθηκε διαφορετική περιεκτικότητα ινών για κάθε είδος ινών, με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εύρεση του βέλτιστου περιεχόμενου ινών στο σκυρόδεμα. Ως **βέλτιστο περιεχόμενο σε ίνες** εννοείται η ποσότητα των ινών, η οποία επιφέρει τη μέγιστη αύξηση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό και σε κάμψη.

Ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας βασίστηκε στα αποτελέσματα του Παγάνη (2009) καθώς και σε προτεινόμενες περιεκτικότητες από κατασκευαστή ινών και γραφεία μελετών. Έτσι, όσον αφορά τις ίνες πολυπροπυλενίου συγκρίθηκαν αποτελέσματα για περιεχόμενο ινών ίσο με **0.5, 0.7 και 1 kg/m$^3$**. Αντίστοιχα, για τις χαλύβδινες ίνες χρησιμοποιήθηκαν περιεχόμενα ίσα με **20, 25 και 30 kg/m$^3$** για μήκη ινών 45mm και 60mm.

## 3.1 Είδη ινών και χαρακτηριστικά τους

Σήμερα, διατίθενται πολλές μορφές ινών όπως αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης επιλέχτηκαν οι ίνες πολυπροπυλενίου και οι χαλύβδινες ίνες, ως οι πιο ευρέως διαδεδομένες σε τεχνικά έργα.

### 3.1.1 Ίνες πολυπροπυλενίου

Οι ίνες πολυπροπυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν από την εταιρεία **Sika® Hellas** (Εικόνα 3.1). Οι ίνες πολυπροπυλενίου είναι λευκές με στρογγυλεμένες άκρες, ειδικής επεξεργασίας και προσφέρονται σε υδροδιαλυόμενα σακουλάκια των 600 gr. Το μήκος των ινών ποικίλει. Προτιμήθηκαν τα μήκη των 6, 12 και 18 mm για τις εργαστηριακές δοκιμές. Όπως φαίνεται στο φυλλάδιο προϊόντος του κατασκευαστή Sika® - Fibers, η κύρια χρήση των ινών πολυπροπυλενίου είναι η μείωση των ρηγματώσεων κατά την ξήρανση, η βελτίωση της αντοχής σε κρούση και της στεγανότητας του σκληρυμένου κονιάματος. Όμως, υπάρχουν και άλλα οφέλη από τη χρήση των ινών όπως είναι η αύξηση στην θλιπτική και εφελκυστική αντοχή και η ενίσχυση των ελαστικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος (μέτρο ελαστικότητας, πλαστικότητα).

**Εικόνα 3. 1: Ίνες της εταιρείας Sika® - Fibers**

Ο κατασκευαστής προειδοποιεί πως οι ίνες δεν αντικαθιστούν τον στατικό οπλισμό, αλλά είναι δυνατόν να αντικαταστήσουν τον οπλισμό έναντι ρηγματώσεων. Χρησιμοποιούνται για:

- Πλάκες, πίστες, μεγάλες επιφάνειες σκυροδέματος
- Σκυρόδεμα και κονιάματα υποκείμενα σε κρούσεις
- Κονιάματα ή σκυρόδεμα που απαιτούν μεγάλη συνεκτικότητα κατά τη
- διάστρωση όπως σε κεκλιμένες επιφάνειες ή παραγωγή προκατασκευών
- Εκτοξευόμενα κονιάματα μικρού πάχους
- Προκατασκευασμένα στοιχεία για τη βελτίωση των αντοχών σε γωνίες

- Επιχρίσματα, σοβάδες

**Πίνακας 3. 1: Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών πολυπροπυλενίου (Sika)**

| **Τεχνικά χαρακτηριστικά ινών πολυπροπυλενίου** | |
|---|---|
| **Μήκος (mm)** | 12 και 18 |
| **Διάμετρος (μm)** | 25 |
| **Επιμήκυνση θραύσης** | 29% (±10%) **(EN ISO 2062)** |
| **Εφελκυστική αντοχή** | 400 (±10%) N/mm$^2$ **(EN ISO 2062)** |
| **Χημική αντοχή** | Εξαιρετική |

### 3.1.2 Χαλύβδινες ίνες

Οι χαλύβδινες ινες είναι κατασκευής της εταιρείας **Inomix/Sidenor S.A** (Εικόνα 3.2). Οι ίνες INOMIX λειτουργώντας στο μέγεθος του κόκκου του σκυροδέματος προσδίδουν πλασιμότητα και οπλισμό τριών διαστάσεων. Παράγονται σε πλήθος διαστάσεων και καλύπτουν όλο το εύρος αναγκών της αγοράς από το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έως την κατασκευή δαπέδων (βιομηχανικών, λιμενικών, στρατιωτικών, κλπ).

**Εικόνα 3. 2: Ίνες εταιρείας Inomix/Sidenor S.A.**

**Πίνακας 3. 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά χαλύβδινων ινών (Inomix/Sidenor S.A)**

| **Τεχνικά χαρακτηριστικά χαλύβδινων ινών** | |
|---|---|
| **Μήκος (mm)** | 45 και 60 |
| **Διάμετρος (mm)** | 0,75 |

## 3.2 Επιλογές για τη σκυροδέτηση δοκιμίων

Για την έγκαιρη ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας ήταν απαραίτητη η χύτευση 15 σειρών δοκιμίων όπου η κάθε σειρά αποτελούνταν από 6 κυβικά δοκίμια και 1πρισματικό δοκίμιο. Η επιλογή αυτή έγινε λόγω του ότι ήταν διαθέσιμες μόνο 6 μεταλλικές μήτρες χύτευσης διαστάσεων 15*15*15cm και 1 μεταλλική μήτρα διαστάσεως 15*15*75cm. Σημειώνεται ότι το πλάτος ανοίγματος της δοκιμής κάμψης που περιγράφεται στην συνέχεια ήταν σταθερό και ίσο με 45cm. Πολλοί ερευνητές συνιστούν τη χρήση μόνο μεταλλικών μητρών χύτευσης, προκειμένου να αποφευχθεί η οποιαδήποτε παραμόρφωση των δοκιμίων κατά τη χύτευσή τους.

Όσον αφορά, το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε για τα δοκίμια υπήρχαν δύο επιλογές:

1. η κατασκευή σκυροδέματος με βάση συγκεκριμένη σύνθεση.

2. η χρήση σκυροδέματος, το οποίο παράγεται από μονάδα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος.

Η δεύτερη λύση η οποία είχε επιλεχθεί στην εργασία του Παγάνη (2009) είχε ένα μειονέκτημα. Καθώς οι σταθμοί έτοιμου σκυροδέματος παράγουν σκυρόδεμα σε μεγάλες ποσότητες (6, 8, 10$m^3$ κάθε μία φορά), δεν ήταν δυνατή η λήψη σκυροδέματος της τάξεως των μερικών λίτρων. Επομένως, έπρεπε να γίνει πρώτα από το σταθμό σκυροδέματος φόρτωση του αυτοκινήτου μεταφοράς σκυροδέματος (βαρέλα) (Εικόνα 3.3) και στη συνέχεια από τη βαρέλα να γίνει έκχυση μικρής ποσότητας σκυροδέματος (Εικόνα .3.4).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και βασιζόμενη στην εργασία του Παγάνη (2009) κατασκευάστηκε σκυρόδεμα C 20/25 με ονομαστική αντοχή κύβου ≥25MPa με την συνεργασία του προσωπικού του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Μηχανικής με υπεύθυνο καθηγητή τον κ. Κ. Προβιδάκη.

**Εικόνα 3. 3: Φόρτωση σκυροδέματος από τη βαρέλα, στο καρότσι μεταφοράς (Παγάνης, 2009)**

**Εικόνα 3. 4: Μήτρες πολυουρεθάνης κατά το στάδιο της χύτευσης (Παγάνης, 2009)**

## 3.3 Σχεδίαση πειραματικής διαδικασίας

Ο σχεδιασμός αφορούσε τρία περιεχόμενα ινών 0.5, 0.7 και 1 kg/m$^3$ για κάθε μήκος ίνας πολυπροπυλενίου 6, 12 και 18mm και 20, 25 και 30 kg/m$^3$ για κάθε είδος χαλύβδινης ίνας μήκους 45mm και 60mm. Με βάση αυτόν τον προγραμματισμό, προέκυψαν δεκαπέντε σειρές δοκιμίων, όπου κάθε σειρά αποτελείται από έξι δοκίμια και μία δοκό. Από τα **έξι δοκίμια** σκυροδέματος, 3 ήταν ινοπλισμένα και 3 ήταν άοπλα (ελέγχου). Από αυτά, **δύο δοκίμια** (1 άοπλο και 1 ινοπλισμένο) δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη, **δύο δοκίμια**

ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 50 και 75mm τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού και **δύο δοκίμια** από άοπλο σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή άοπλων κυλινδρικών δοκιμίων διαμέτρου 50 και 75mm για τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού. Η δοκός χρησιμοποιήθηκε για δοκιμή σε κάμψη τριών σημείων.

Για τον προυπολογισμό των ποσοτήτων σκυροδέματος Επειδή το δοκίμιο δοκός ισοδυναμεί με **5 κυβικά δοκίμια**, ο συνολικός αριθμός δοκιμίων είναι 13 (8 κυβικά και ένα δοκίμιο δοκός). Δεδομένης της πιθανής απώλειας υλικού κατά τις δοκιμές κάθισης αλλά και για να υπάρχει επαρκής ποσότητα για την ανάδευση του σκυροδέματος μετά την προσθήκη των ινών, για την ποσότητα παρασκευής του σκυροδέματος λήφθηκαν υπόψη ποσότητες που αντιστοιχούν σε **τουλάχιστον 20 κυβικά δοκίμια**, συνολικού όγκου **0.068m$^3$** και συνολικού βάρους **158 kg** όπως φαίνεται στους πίνακες 3.3.α και 3.3.β.

**Πίνακας 3. 3.α: Υπολογισμός σύστασης σκυροδέματος C20/25 για την μέγιστη ποσότητα τσιμέντου. (Εργαστήριο εφαρμοσμένης μηχανικής Πολυτεχνείου Κρήτης, 2009)**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Μέγιστος κόκκος | | ASTM | 1" |
| | | mm | 25 |
| **Σύσταση σκυροδέματος ανα κυβικό μέτρο [m$^3$]** | | | |
| (1)Εγκλωβισμένος αέρας [%] | | | 1,5 |
| Επιθυμητή κάθιση [cm] | | | 10 |
| (2)Μέγιστη ποσότητα τσιμέντου [kg] | | | 330 |
| (3)Ποσότητα νερού [kg] | | | 205 |
| Λόγος N/T<0.7 | | | **0,621** |
| Ειδικό βάρος τσιμέντου [kg/m$^3$] | | | 3100 |
| Όγκος αδρανών υλικών [m$^3$] | | | **0,674** |
| Ειδικό βάρος αδρανών υλικών [kg/m$^3$] | | | 2680 |
| Αδρανή υλικά | Σύσταση μίγματος | Όγκος αδρανών [m$^3$] | Μάζα αδρανών [kg] |
| Άμμος | 0,25 | **0,168** | **449** |
| Γαρμπίλι | 0,25 | **0,167** | **447** |
| Χαλίκι | 0,50 | **0,339** | **909** |
| Βάρος Παραγόμενου Σκυροδέματος | | | **2340** |

**Πίνακας 3.3.β: Κατά βάρος σύσταση δοκιμίων C20/25 για την μέγιστη ποσότητα τσιμέντου.**

| **Σύσταση σκυροδέματος για δοκίμια 150x150x150mm** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Αριθμός δοκιμίων | 4 | 8 | 10 | 16 | **20** | 25 |
| Συν. Όγκος δοκιμίων [$m^3$] | **0,014** | **0,027** | **0,034** | **0,054** | **0,068** | **0,084** |
| Νερό [kg] | 2,77 | 5,54 | 6,92 | 11,07 | **13,84** | 17,30 |
| Τσιμέντο [kg] | 4,46 | 8,91 | 11,14 | 17,82 | **22,28** | 27,84 |
| Άμμος [kg] | 6,07 | 12,13 | 15,16 | 24,26 | **30,33** | 37,91 |
| Γαρμπίλι [kg] | 6,03 | 12,06 | 15,08 | 24,13 | **30,16** | 37,70 |
| Χαλίκι [kg] | 12,27 | 24,54 | 30,68 | 49,09 | **61,36** | 76,70 |
| Συνολικό βάρος [kg] | **31,59** | **63,18** | **78,98** | **126,37** | **157,96** | **197,45** |

(1) Υπολογισμός από πίνακες προδιαγραφών συναρτήσει του μεγέθους μέγιστου κόκκου.
(2) Σύμφωνα με προδιαγραφές η ποσότητα τσιμέντου για σκυρόδεμα C20/25 κυμαίνεται από 300-330kg/$m^3$.
(3) Υπολογισμός από νομόγραμμα συναρτήσει της επιθυμητής κάθισης και του μεγέθους μέγιστου κόκκου.

Αντίστοιχα με το σκυρόδεμα έτσι και η μάζα των ινών, υπολογίστηκε αναλογικά με τον όγκο του σκυροδέματος, ώστε να διασφαλιστεί το σωστό ποσοστό περιεχόμενων ινών.

## 3.4 Διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος

Ξεκινώντας την διαδικασία της παραγωγής σκυροδέματος αρχικά τοποθετήθηκαν στην μπετονιέρα (εικόνα 3.5) η μισή ποσότητα από τα συνολικά χαλίκια, γαρμπίλι και ¾ του συνολικού νερού για 2 λεπτά να ξεπλυθούν και στην συνέχεια σιγά-σιγά όλη η ποσότητα τσιμέντου μαζί με τα υπόλοιπα αδρανή και το υπόλοιπο νερό, με συνολικό χρόνο ανάδευσης για 5 λεπτά. Εν συνεχεία σταμάτησε η μπετονιέρα και γινόταν η χύτευση των δοκιμίων ελέγχου.

Στη συνέχεια, εισάγετο στην μπετονιέρα η απαιτούμενη ποσότητα ινών και ξεκινούσε η ανάμειξη των δύο υλικών. Μετά από παρέλευση ικανού χρονικού διαστήματος (περίπου 10 λεπτά) μέσα στο οποίο το μίγμα στη μπετονιέρα θεωρήθηκε επαρκώς ομογενοποιημένο, σταματούσε η ανάμιξη και ξεκινούσε η χύτευση του μίγματος (εικόνα 3.6).

**Εικόνα 3. 5: Φόρτωση και ανάμειξη σκυροδέματος και ινών σε μικρή μπετονιέρα**

**Εικόνα 3. 6: Αναπαράσταση σκυροδέτησης δοκιμίων**

Όταν ολοκληρωνόταν αυτό το στάδιο, οι μήτρες κωδικοποιούνταν και σφραγίζονταν για διάστημα έως 48 ώρες. Οι προδιαγραφές του σκυροδέματος που αναφέρονται στον Ν.Κ.Τ.Σ 1997, αναφέρουν πως οι μήτρες ανοίγονται σε χρονικό διάστημα μεταξύ 20 και 36 ωρών μετά τη σκυροδέτηση τους. Με την παρέλευση του απαραίτητου χρονικού διαστήματος τα κυβικά δοκίμια αποκτούσαν συμπαγή χαρακτήρα.

Τότε εξέρχονταν της μήτρας και φυλάσσονταν για 28 μέρες σε νερό. Μετά την παρέλευση των 28 ημερών ελάμβανε χώρα η εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών. Για τις

περιπτώσεις που έπρεπε να μορφοποιηθούν κυλινδρικοί δίσκοι έμμεσου εφελκυσμού το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε έναν εργαστηριακό πυρηνολήπτη (Εικόνα 3.7) από τον οποίο προέκυψαν κυλινδρικά δοκίμια μήκους 15cm με γενέτειρα διάμετρο 5,0 cm και 7,5 cm (Εικόνα 3.8) στη συνέχεια τα κυλινδρικά δοκίμια κοβόντουσαν στο κατάλληλο ύψος με την βοήθεια εργαστηριακού κόπτη (εικόνα 3.9).

**Εικόνα 3. 7: Εργαστηριακός πυρηνολήπτης δοκιμίων**

**Εικόνα 3. 8: Κυλινδρικά δοκίμια**

**Εικόνα 3. 9: Εργαστηριακός δίσκος κοπής πετρωμάτων του εργαστηρίου Μηχανικής Πετρωμάτων**

Υπολογίζοντας τη μάζα των ινών για κάθε κατηγορία περιεχόμενου ποσοστού και για κάθε κατηγορία ίνας, προέκυψαν ο πίνακας 3.4 για τις απαιτήσεις σε ίνες για κάθε σειρά δοκιμίων. Η διαφορά της τιμής της συνολικής θεωρητικής και πραγματικής μάζας των ινών ήταν αποτέλεσμα της αναγωγής της απαιτούμενης μάζας ινών από τον όγκο του δοκιμίου στον συνολικό όγκο του σκυροδέματος που αναμειγνύεται με τις ίνες στη μπετονιέρα. Ο αρχικός υπολογισμός έγινε για την περιεχόμενη μάζα ινών σε ένα δοκίμιο σκυροδέματος όγκου 0,0035m$^3$, ενώ στην ανάμειξη του σκυροδέματος με τις ίνες υπολογίστηκε ο όγκος των 0.054m$^3$, ο οποίος αποτελούσε τον όγκο του σκυροδέματος μίας σειράς δοκιμίων.

**Πίνακας 3. 4: Υπολογισμός μάζας ινών ανά κατηγορία**

| **Περιεχόμενο Σε ίνες** | **Είδος Ινών** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Χαλύβδινες** | | **Πολυπροπυλενίου** | | |
| **ΣΕ kg/m$^3$** | **Μήκους 60mm (g)** | **Μήκους 45mm (g)** | **Μήκους 18mm (g)** | **Μήκους 12mm (g)** | **Μήκους 12mm (g)** |
| **0.5** | | | 28.75 | 28.75 | 28.75 |
| **0.7** | | | 40.25 | 40.25 | 40.25 |
| **1** | | | 57.5 | 57.5 | 57.5 |
| **20** | | 1150 | | | |
| **25** | | 1437.5 | | | |
| **30** | | 1725 | | | |
| **30** | 1150 | | | | |
| **40** | 1437.5 | | | | |
| **60** | 1725 | | | | |

Στη συνέχεια το δείγμα του δοκιμίου διαιρέθηκε από ένα δισκοπρίονο σε 3 ή 4 κυλινδρικά δοκίμια πάχους περίπου 3cm και ίδιας διαμέτρου (Εικόνα 4.8).

## 3.5 Εκτέλεση δοκιμών

Τα δοκίμια που κατασκευάστηκαν, εξετάστηκαν σε τρία είδη δοκιμών, οι οποίες περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.

### 3.5.1 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Αντικειμενικός σκοπός της δοκιμής αυτής ήταν ο προσδιορισμός της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη των κυβικών δοκιμίων. Το θλιπτικό φορτίο ασκήθηκε από συσκευή φόρτισης, υπό σταθερό ρυθμό (περίπου 0,5-1 MPa/s) με δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής του επιβαλλόμενου φορτίου.

Ο ρυθμός φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή είναι ανάλογος με αυτόν που συνιστούν τα διεθνή πρότυπα, ο οποίος κυμαίνεται μεταξύ 0,2-1 MPa/s (Βουδικλάρης 2009). Το φορτίο εφαρμόστηκε πάνω στο δοκίμιο μέσω της σφαιρικής κεφαλής έδρασης.

Η σφαιρική κεφαλή τοποθετήθηκε στην ανώτερη επιφάνεια του δοκιμίου και ο άξονάς της ήταν ευθυγραμμισμένος με τον άξονα του δοκιμίου και των πλακών φόρτισης. Για την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου πάνω στο δοκίμιο, χρησιμοποιήθηκαν πλάκες φόρτισης.

Η συσκευή φόρτισης περιλάμβανε **χαλύβδινους δίσκους** (platens), οι οποίοι τοποθετούνταν ανάμεσα στις πλάκες φόρτισης, με σκοπό την μείωση της πλευρικής παραμόρφωσης των δοκιμίων λόγω δυνάμεων τριβής στα σημεία επαφής και **άκαμπτο πλαίσιο φόρτισης** (1600kN θλίψη) του οίκου MTS (Εικόνα 3.10).

Για την κατάλληλη εκτέλεση των δοκιμών ήταν απαραίτητη η άσκηση του επιβαλλόμενου φορτίου σε ομαλή και λεία επιφάνεια. Παρατηρήθηκε πως αρκετά δοκίμια έχουν ανώμαλες επιφάνειες ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της σκυροδέτησης καθώς μάζες αδρανών υλικών, τσιμέντου και ινών εμποδίζουν την σωστή μορφοποίηση των επιφανειών. Για το λόγο αυτό πριν την εκκίνηση των δοκιμών προσδιορίσθηκαν σε κάθε δοκίμιο οι επιφάνειες που θεωρούνταν κατάλληλες για την επιβολή του φορτίου (Εικόνα 3.11).

**Εικόνα 3. 10: Συσκευή φόρτισης MTS**

**Εικόνα 3. 11: Δοκίμιο μονοαξονικής θλίψης**

Τα δοκίμια τα οποία όπως προαναφέρθηκε ήταν κυβικά διαστάσεων 15cm τοποθετούνταν στη μηχανή φόρτισης και φορτίζονταν έως ότου αστοχήσουν. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη $C_0$ προσδιορίσθηκε σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$C_0 = \frac{F_{max}}{A} \qquad \textbf{(Σχέση 3.1)}$$

όπου $\mathbf{F_{max}}$ είναι το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του και **A** είναι η επιφάνεια που ασκήθηκε το φορτίο.

### 3.5.2 Δοκιμή έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής σε εφελκυσμό

Αντικειμενικός σκοπός της δοκιμής αυτής ήταν ο έμμεσος προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό των κυλινδρικών δοκιμίων (Εικόνα 3.12).

Εφαρμόζεται η μέθοδος Brazil, σύμφωνα με την οποία τα δοκίμια που φορτίζονται αντιδιαμετρικά, αστοχούν σε εφελκυσμό με διεύθυνση του επιπέδου αστοχίας παράλληλη με τον άξονα φόρτισης.

Το θλιπτικό φορτίο ασκήθηκε από συσκευή φόρτισης, υπό σταθερό ρυθμό (περίπου 200 N/s) με δυνατότητα ταυτόχρονης καταγραφής του επιβαλλόμενου φορτίου.

Τα δοκίμια φορτίζονταν μέσω δύο χαλύβδινων σιαγόνων (Εικόνα 3.13) με τοξωτό άνοιγμα τέτοιο ώστε η ακτίνα καμπυλότητάς του να είναι 1,5 φορές η ακτίνα του δοκιμίου.

**Εικόνα 3. 12: Δοκίμιο δίσκου Brazil**

Το άνοιγμα αυτό επέτρεπε την έδραση των δοκιμίων, που είχαν μορφή δίσκου, έτσι ώστε οι σιαγόνες και το δοκίμιο να βρίσκονταν σε επαφή κατά τόξο $10^o$ τη στιγμή της αστοχίας. Αυτό επετεύχθη όταν η ακτίνα του ημικυλίνδρου ήταν 1,5 φορές η ακτίνα του δοκιμίου (Αγιουτάντης, 2002).

Οι πύρροι ευθυγράμμισης που συγκρατούσαν τις δύο σιαγόνες επέτρεπαν την κίνηση μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και ήταν έτσι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να επέτρεπαν παρέκκλιση από το επίπεδο των σιαγόνων της τάξης των $4*10^{-3}$ ακτινίων (Αγιουτάντης, 2002).

Αρχικά, μετρούνταν η διάμετρος και το πλάτος των δοκιμίων με ακρίβεια 0,1 mm. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν μέσα στις σιαγόνες έτσι ώστε ο άξονας συμμετρίας του δοκιμίου να ταυτιζόταν με τον άξονα συμμετρίας του συστήματος σιαγόνων.

Δοκιμάστηκαν δύο ομάδες δοκιμίων, η πρώτη ομάδα είναι διαμέτρου 50mm και ύψους 25mm ενώ η δεύτερη ομάδα είναι διαμέτρου 75mm και ύψους 27,5mm.

**Εικόνα 3. 13: Σιαγόνες φόρτισης και πύρροι ευθυγράμμισης δοκιμής έμμεσου εφελκυσμού. (Διακρίνεται μονάδα καταγραφής μετατόπισης πίσω από τις σιαγόνες φόρτισης)**

Προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή επαφή του δίσκου με τις σιαγόνες φόρτισης, τα δοκίμια τυλίγονταν με χαρτοταινία, πάχους 0,2-0,4mm και πλάτος ίσο με το πλάτος των δοκιμίων.

Παρόλο που μετά την αστοχία του δοκιμίου ο δίσκος δεν έχανε τη φέρουσα ικανότητά του και συνέχιζε να παραλαμβάνει θλιπτικά φορτία μέχρι την οριστική του αστοχία, η αντοχή σε εφελκυσμό υπολογίζεται με βάση την πρώτη αστοχία του δοκιμίου.

Η αντοχή σε εφελκυσμό ($T_0$) υπολογίσθηκε, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\boldsymbol{T_0 = \frac{2*F_{max}}{\pi*D*T} = \frac{0.637*F_{max}}{D*T}} \qquad \textbf{(Σχέση 3.2)}$$

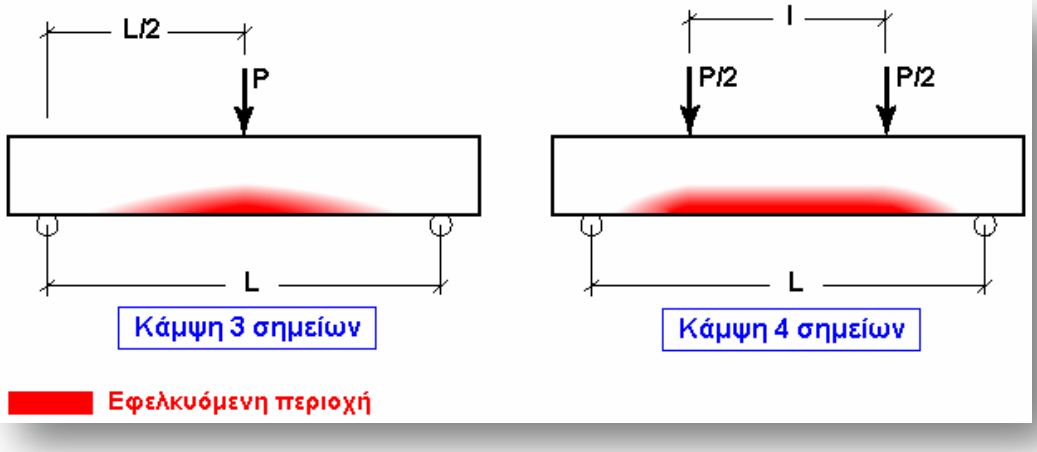
όπου $\mathbf{F_{max}}$ είναι το φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του σε εφελκυσμό, **D** είναι η διάμετρος και t είναι το πλάτος του δοκιμίου.

### 3.5.3 Δοκιμή κάμψης 3 σημείων

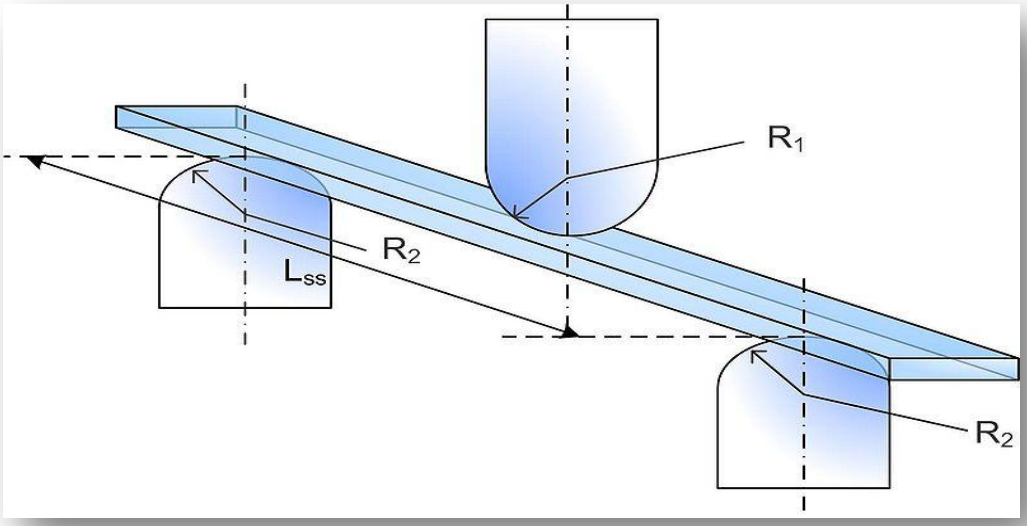
Κατά τη δοκιμή αυτή κατάλληλα διαμορφωμένα πρισματικά δοκίμια υποβάλλονται σε σημειακή φόρτιση περί το μέσο τους (εικόνα 3.14). Σκοπός είναι να μελετηθεί η καμπτική φόρτιση τους σε συνάρτηση με την δύναμη που προκαλέι την κα΄μψη , τις διαστάσεις της ράβδου και τέλος με την απόσταση των σημείων στήριξης του δοκιμίου. Στο τέλος υπολογίζεται η αντοχή σε κάμψη (MPa). Η μελέτη αυτή απαιτείται για τον προσδιορισμό της δυναμικής φόρτισης και της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής.

Υπάρχουν δύο είδη κάμψης (Εικόνα 3.14):

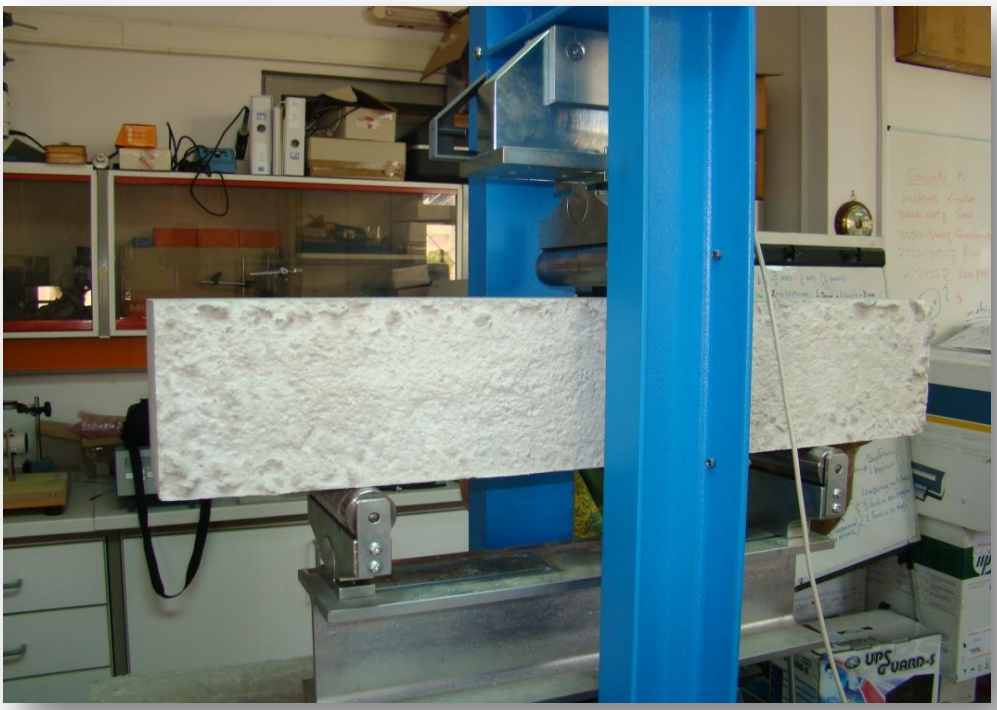
- Δοκιμή κάμψης τριών σημείων (3-point bending test)
- Δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (4-point bending test)




**Εικόνα 3. 14: Σχηματική παράσταση της δοκιμής κάμψης (ntua)**




**Εικόνα 3. 15: Σχηματική παράσταση δοκιμής κάμψης 3 σημείων, (Wikipedia, 2010)**



**Εικόνα 3. 16: Μηχανή δοκιμής κάμψης τριών σημείων του Εργαστηρίου Εγαρμοσμένης Μηχανικής**

### 3.5.3.1 Εντατική κατάσταση

Στη φορτιζόμενη (άνω) περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσεται θλιπτική εντατική κατάσταση (βράχυνση μήκους, μέγιστη στην ακρότατη ίνα και βαθμιαία αυξανόμενη προς το εσωτερικό του δοκιμίου). Στην αφόρτιστη (κάτω) περιοχή του δοκιμίου αναπτύσσεται εφελκυστική εντατική κατάσταση (επιμήκυνση, μέγιστη στην ακρότατη ίνα και βαθμιαία μειούμενη προς το εσωτερικό του δοκιμίου). Στο διαμήκη ουδέτερο άξονα του δοκιμίου (διάμηκες επίπεδο συμμετρίας) δεν παρατηρείται μεταβολή (επιμήκυνση ή βράχυνση) μήκους. Η πιο επικίνδυνη περιοχή ως προς την πιθανότητα αστοχίας (θραύση) του υλικού είναι η εφελκυστική περιοχή (Σοφιανός).

### 3.5.3.2 Μετρούμενα Μεγέθη

Η ένταση της καταπόνησης μετράται στην ακρότατη εφελκυστική ίνα μέσω της αναπτυσσόμενης καμπτικής τάσης $\sigma_{\mathbf{max}}$.

$$\sigma_{\max} = \frac{3PL}{2bh^2} \qquad \textbf{(Σχέση 3.3)}$$

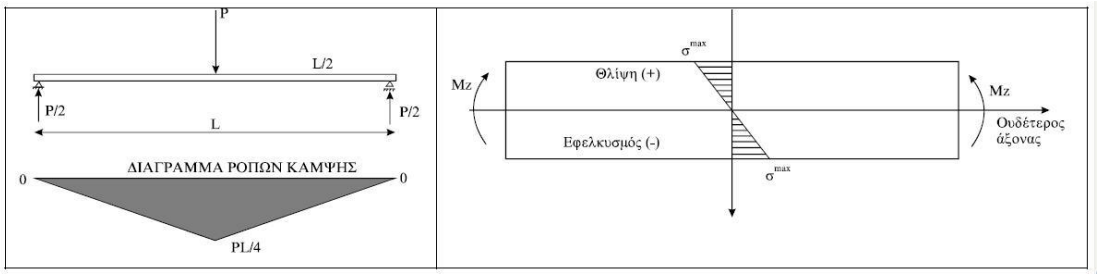
$$\sigma_{\max} = \frac{3P(L-l)}{2bh^2} \qquad \textbf{(Σχέση 3.4)}$$

**Θεωρία της δοκιμής**

Η εντατική κατάσταση δοκού, που καταπονείται σε κάμψη, είναι μονοαξονική, και μεταβάλλεται σε κάθε διατομή της δοκού. Υποθέτοντας ότι η τιμή της ροπής κάμψης είναι τέτοια, ώστε το υλικό παραμένει εντός της ελαστικής περιοχής, οι τάσεις σε μία διατομή δίνονται από τη σχέση (Σοφιανός):

$$\sigma^k = \frac{M_z}{W} = \frac{M_z}{I_z / y} = \frac{M_z}{I_z} y \quad \textbf{(Σχέση 3.2)}$$

Στην Εικόνα 3.17 υπολογίζεται η ροπή κάμψης δοκού που φορτίζεται με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο του μήκους της και δίνεται η κατανομή των τάσεων στην μεσαία διατομή της δοκού.




**Εικόνα 3. 17: Στατικά μεγέθη δοκιμής σε κάμψη (Σοφιανός)**

Από το διάγραμμα του σχήματος συνάγεται ότι η κρίσιμη διατομή της δοκού είναι η μεσαία, στην οποία αναπτύσσεται η μέγιστη ροπή κάμψης.

Η μηχανή κάμψης τριών σημείων που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Μηχανικής με δυνατότητα εφαρμογής μέγιστης καμπτικής ροπής 150kNm της εταιρείας MATEST Srl που αποτελείται από δύο μέρη: α) το έμβολο όπου γίνεται η εφαρμογή της ροπής και η θραύση του δοκιμίου και β) από την κονσόλα ελέγχου της μηχανής.

Η κίνηση του εμβόλου της μηχανής γίνεται μέσω ηλεκτροκινητήρα που ελέγχεται από κατάλληλο σερβο-μηχανισμό. Ο χειρισμός της μηχανής γίνεται από παρακείμενη κονσόλα.

Όπως προαναφέρθηκε για την δοκιμή κάμψης τριών σημείων χρησιμοποιήθηκαν πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 15*15*75cm με πλάτος ανοίγματος 45cm και βάρος 40-41kg. Ένα τυπικό δελτίο αυτής της δοκιμής φαίνεται στο σχήμα 3.19.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

Αποτελέσματα Πειραματικής Διαδιακασίας

Τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης παρουσιάζονται σε διαγράμματα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης. Η τάση παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα ως ποσοστιαίο μέγεθος, ώστε να διευκολυνθεί η παρουσίαση των διαφορετικών τιμών τάσης.

Η τιμή της τάσης μετατρέπεται σε ποσοστό σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\boldsymbol{\sigma}(\%) = \frac{\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{MPa})}{\boldsymbol{\sigma_{control}}(\boldsymbol{MPa})} * \mathbf{100}\% \qquad \text{Σχέση 4.1}$$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού παρουσιάζονται σε διαγράμματα φορτίου – μετατόπισης. Το φορτίο παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα ως ποσοστιαίο μέγεθος, ώστε να διευκολυνθεί η παρουσίαση των διαφορετικών τιμών φορτίου.

Η τιμή της τάσης μετατρέπεται σε ποσοστό σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\boldsymbol{T}(\%) = \frac{\boldsymbol{\tau}(\mathbf{MPa})}{\boldsymbol{\tau_{control}}(\boldsymbol{MPa})} * \mathbf{100}\% \qquad \text{Σχέση 4.2}$$

Οι καμπύλες τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης και φορτίου-μετατόπισης που αντιστοιχούν στα ινοπλισμένα δοκίμια, αναπαριστούν τα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμίων εκείνων που προσέγγιζαν όσο το δυνατό καλύτερα το μέσο όρο των τιμών τάσης και μέτρου ελαστικότητας ή φορτίου που προέκυπταν από την εκάστοτε σειρά δοκιμίων.

Στη συνέχεια στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ανά είδος και περιεκτικότητα ινών, για κάθε σειρά δοκιμίων.

Σημειώνεται ότι, στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας, παρουσιάζονται όλοι οι πίνακες αναλυτικά με τις τιμές των αντοχών σε μονοαξονική θλίψη, αντοχών σε έμμεσο εφελκυσμό και του μέτρου ελαστικότητας για κάθε σειρά σκυροδέτησης με διαφορετική περιεκτικότητα ινών.

**Πίνακας 4. 1:** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων αντοχής σε εφελκυσμό και μονοαξονικής θλίψεις όλων των σειρών σκυροδέτησης

| | | | | Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα | | | | Δοκίμια Ελέγχου | | | | Μ.Θ Ινοπλισμένων δοκιμίων | Μ.Θ Δοκιμίων Ελέγχου |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ΤΥΠΟΣ** | **ΔΙΑΣΤΑΣΗ (mm)** | **% (kg/m^3)** | | **Μ.Τ 50 (MPa)** | **STDEV 50** | **Μ.Τ 75 (MPa)** | **STDEV 75** | **Μ.Τ 50 (MPa)** | **STDEV 50** | **Μ.Τ 75 (MPa)** | **STDEV 75** | | |
| Π | **6** | **0,5** | **p-06-05** | 2,858 | 0,287 | 2,459 | 0,293 | | | | | 26,4 | |
| Π | **6** | **0,7** | **p-06-07** | 2,994 | 0,404 | 2,602 | 0,309 | 2,905 | 0,637 | 2,634 | 0,303 | 23,8 | 22,5 |
| Π | **6** | **1** | **p-06-10** | 2,553 | 0,371 | 2,562 | 0,617 | 2,877 | 0,732 | 2,776 | 0,851 | 24,1 | 23,8 |
| Π | **12** | **0,5** | **p-12-05** | 3,561 | 0,706 | 3,112 | 0,650 | 3,056 | 0,588 | 2,998 | 0,461 | 29,3 | 24,5 |
| Π | **12** | **0,7** | **p-12-07** | 2,933 | 0,322 | 3,142 | 0,618 | 3,001 | 0,297 | 3,132 | 0,351 | 29,1 | 30,3 |
| Π | **12** | **1** | **p-12-10** | 4,024 | 0,750 | 3,015 | 0,706 | 3,416 | 0,768 | 3,006 | 0,426 | 34,5 | 28,7 |
| Π | **18** | **0,5** | **p-18-05** | 2,987 | 0,441 | 3,250 | 0,342 | 2,942 | 0,525 | 2,647 | 0,390 | 28,7 | 25,4 |
| Π | **18** | **0,7** | **p-18-07** | 3,282 | 0,341 | 3,679 | 0,296 | 3,436 | 0,680 | 3,002 | 0,487 | 30,8 | 29,9 |
| Π | **18** | **1** | **p-18-10** | 3,615 | 0,346 | 3,239 | 0,604 | 3,258 | 0,311 | 2,584 | 0,464 | 32,6 | 28,7 |
| Χ | **45** | **20** | **x-45-20** | 4,494 | 0,545 | 2,903 | 0,462 | 4,367 | 0,365 | 2,958 | 0,501 | 30,8 | 32,9 |
| Χ | **45** | **25** | **x-45-25** | 3,584 | 0,248 | 2,810 | 0,480 | 3,316 | 0,707 | 2,512 | 0,359 | 33,1 | 29,4 |
| Χ | **45** | **30** | **x-45-30** | 3,636 | 0,425 | 3,238 | 0,455 | 3,814 | 0,375 | 2,983 | 0,554 | 33,8 | 29,0 |
| Χ | **60** | **20** | **x-60-20** | 3,377 | 0,557 | 2,701 | 0,462 | 2,872 | 0,461 | 2,544 | 0,277 | 31,9 | 30,5 |
| Χ | **60** | **25** | **x-60-25** | 3,548 | 0,650 | 2,423 | 0,271 | 3,458 | 0,618 | 2,777 | 0,397 | 29,1 | 32,6 |
| Χ | **60** | **30** | **x-60-30** | 3,560 | 0,692 | 2,714 | 0,240 | 3,725 | 0,310 | 2,197 | 0,328 | 30,0 | 31,7 |

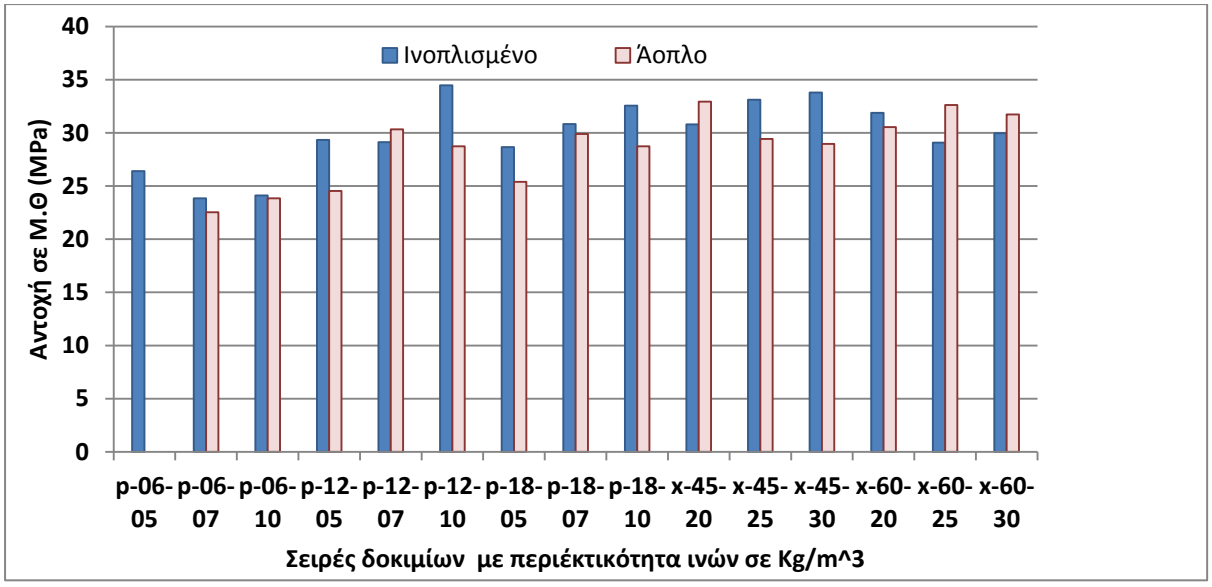
## 4.1 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Τα διαγράμματα τάσης με ποσοστό ινών και χωρίς που φαίνονται στο διάγραμμα 4.1, αποτελεί μια συνολική εικόνα των τιμών αντοχών σε θλίψη για όλες τις σειρές δοκιμίων.

Στον πίνακα 4.1 φαίνονται όλες οι τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη για όλες τις σειρές σκυροδέτησης ανάλογα με τις διαφορετικές περιεκτικότητες σε ίνες και το είδος των ινών. Στο σύνολο οι σειρές σκυροδέτησης ήταν 15. Από αυτές οι 9 περιείχαν ίνες πολυπροπυλενίου και οι 6 χαλύβδινες ίνες.

**Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα τιμών μονοαξονικής θλίψης για ινοπλισμένα και άοπλα δοκίμια σκυροδέτησης**

| | | | | **Μονοαξονική θλίψη (Μ.Θ)** | |
|---|---|---|---|---|---|
| **ΤΥΠΟΣ** | **ΔΙΑΣΤΑΣΗ (mm)** | **% (kg/m^3)** | | **Αντοχή Μ.Θ δοκιμίων με ίνες (MPa)** | **Αντοχή Μ.Θ δοκιμίων ελέγχου (MPa)** |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 6 | 0,5 | p-06-05 | 26,4 | |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 6 | 0,7 | p-06-07 | 23,8 | 22,5 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 6 | 1 | p-06-10 | 24,1 | 23,8 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 12 | 0,5 | p-12-05 | 29,3 | 24,5 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 12 | 0,7 | p-12-07 | 29,1 | 30,3 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 12 | 1 | p-12-10 | 34,5 | 28,7 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 18 | 0,5 | p-18-05 | 28,7 | 25,4 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 18 | 0,7 | p-18-07 | 30,8 | 29,9 |
| ΠΟΛΥΠΡΟΠΥΛΕΝΙΟ | 18 | 1 | p-18-10 | 32,6 | 28,7 |
| ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ | 45 | 20 | x-45-20 | 30,8 | 32,9 |
| ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ | 45 | 25 | x-45-25 | 33,1 | 29,4 |
| ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ | 45 | 30 | x-45-30 | 33,8 | 29,0 |
| ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ | 60 | 20 | x-60-20 | 31,9 | 30,5 |
| ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ | 60 | 25 | x-60-25 | 29,1 | 32,6 |
| ΧΑΛΥΒΔΙΝΕΣ | 60 | 30 | x-60-30 | 30,0 | 31,7 |




**Διάγραμμα 4. 1: Ραβδόγραμμα τάσης μονοαξονικής θλίψης ινοπλισμένων δοκιμίων και άοπλων**

Στο διάγραμμα 4.1 παρατηρείται ότι σε 10 σειρές σκυροδέτησης τα δοκίμια τα οποία περιείχαν ίνες είχαν μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (Μ.Θ) και σε 4 σειρές τα δοκίμια χωρίς ίνες παρουσίαζαν μεγαλύτερη αντοχή σε Μ.Θ. Για την πρώτη σειρά δεν υπάρχουν συγκριτικά στοιχεία γατί καταστράφηκαν τα δοκίμια ελέγχου.

Η υψηλότερη τιμή αντοχής Μ.Θ παρουσιάζεται στα μεν δοκίμια με ίνες για την σειρά πολυπροπυλενίου 12mm περιεκτικότητας 1 kg/m$^3$ με τιμή 34.5 MPa στα δε δοκίμια ελέγχου στην σειρά με χαλύβδινες ίνες 45mm περιεκτικότητας 20 kg/m$^3$ με τιμή 33.0 MPa. Η χαμηλότερη τιμή στα δοκίμια με ίνες είναι 23.8 MPa και στα δοκίμια ελέγχου 22.5 MPa και μάλιστα είναι και στην ίδια σειρά.

## 4.2 Αποτελέσματα δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού

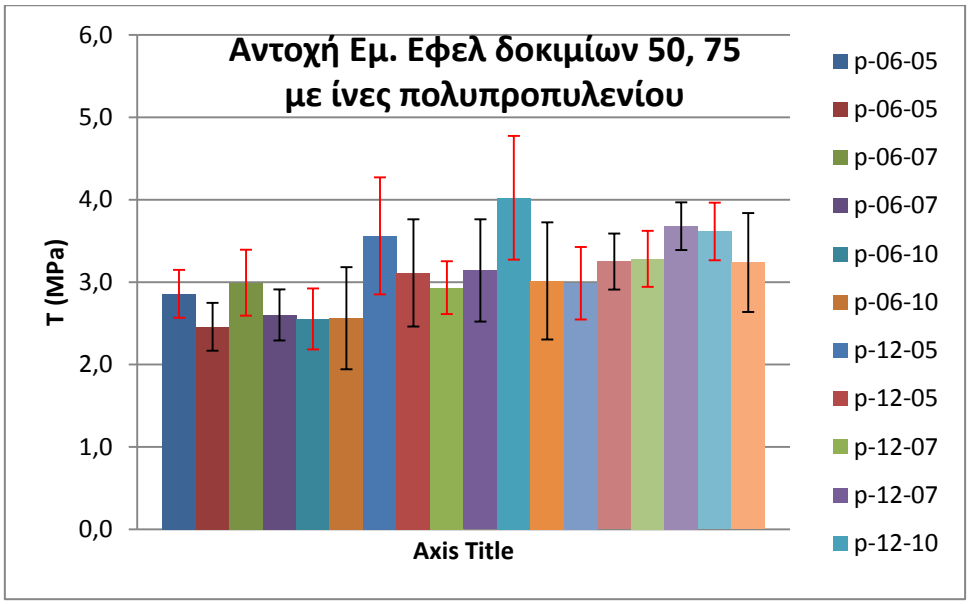
### 4.2.1 Ίνες Πολυπροπυλενίου

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού παρουσιάζονται σε διαγράμματα σύγκρισης αντοχής σε εφελκυσμό με κάθε σειρά σκυροδέτησης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα αυτά ανά είδος και περιεκτικότητα ινών, ανά διαμέτρο βραζιλιανού δίσκου για κάθε σειρά δοκιμίων.

Για να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό των δοκιμίων ελέγχου. Η αντοχή αυτή υπολογίσθηκε για κάθε σειρά σκυροδέτησης χωριστά, κατά μέσο όρο των 15 σειρών σκυροδέτησης είναι ίση με 3.32 MPa για δοκίμια 50mm και 2.77 MPa για δοκίμια Brazil 75mm για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25. Επίσης, υπολογίζοντας την παράμετρο του μεγέθους του αδρανούς μέσα στο κυλινδρικό δίσκο, έγιναν δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια Brazil 50 και 75mm.

Για τις πρώτες σειρές δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 6, 12 και 18mm και για περιεκτικότητες ινών 0.5, 0.7 και 1 kg/m$^3$.

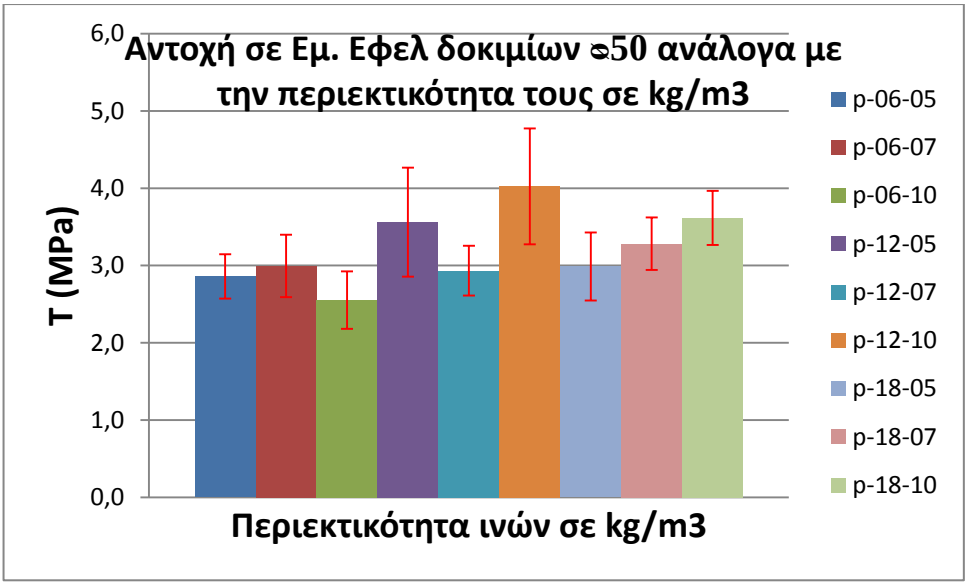
Όσον αφορά τα δοκίμια 50mm και 75mm με ίνες πολυπροπυλενίου από το διάγραμμα 4.2 παρατηρείται ότι τα δοκίμια 50mm παρουσιάζουν μεγαλύτερο αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό στις 5 από τις 9 σειρές σκυροδέτησης με μέγιστη τιμή 4 MPa για μήκος ινών πολυπροπυλενίου 12mm και περιεκτικότητα ινών 1 kg/m$^3$. Σε 3 σειρές παρατηρείται ότι τα δοκίμια 75mm έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό απ'ότι τα αντίστοιχα δοκίμια 50mm.




**Διάγραμμα 4. 2: Ραβδόγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής (MPa) με σειρές σκυροδέτησης με ίνες πολύπροπυλένιο (p) 50mm και 75mm.**

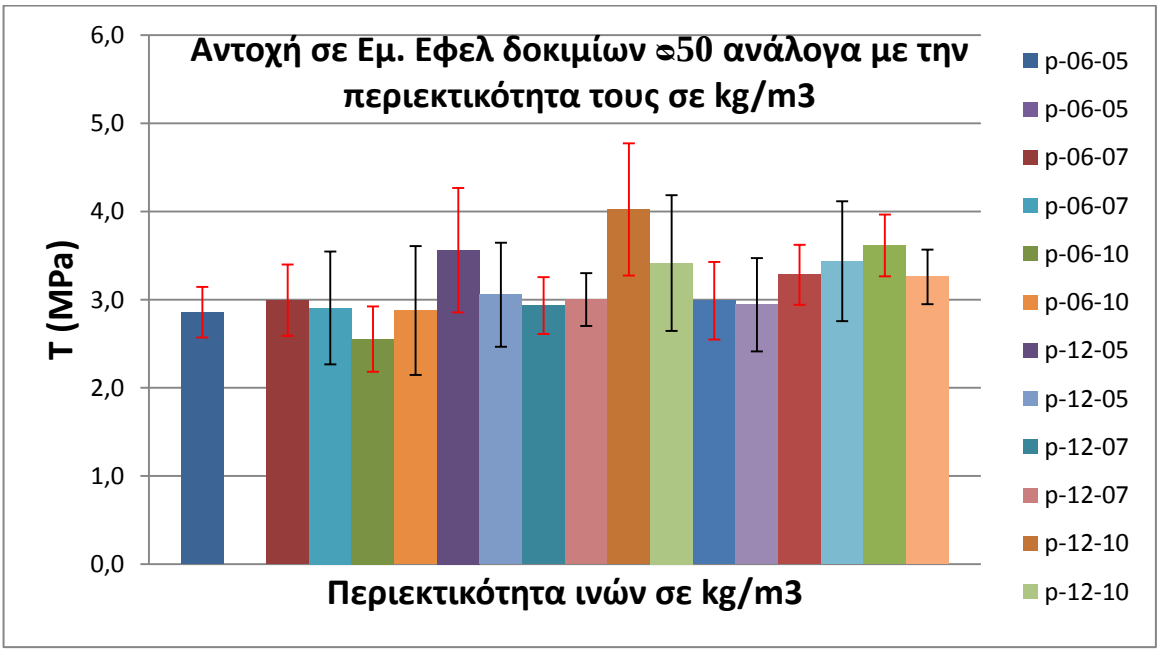
### 4.2.2 Διαγράμματα με τυπική απόκλιση για ίνες πολυπροπυλενίου

Στο διάγραμμα 4.3 παρουσιάζονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής σε δοκίμια 50mm με ίνες πολυπροπυλενίου μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.



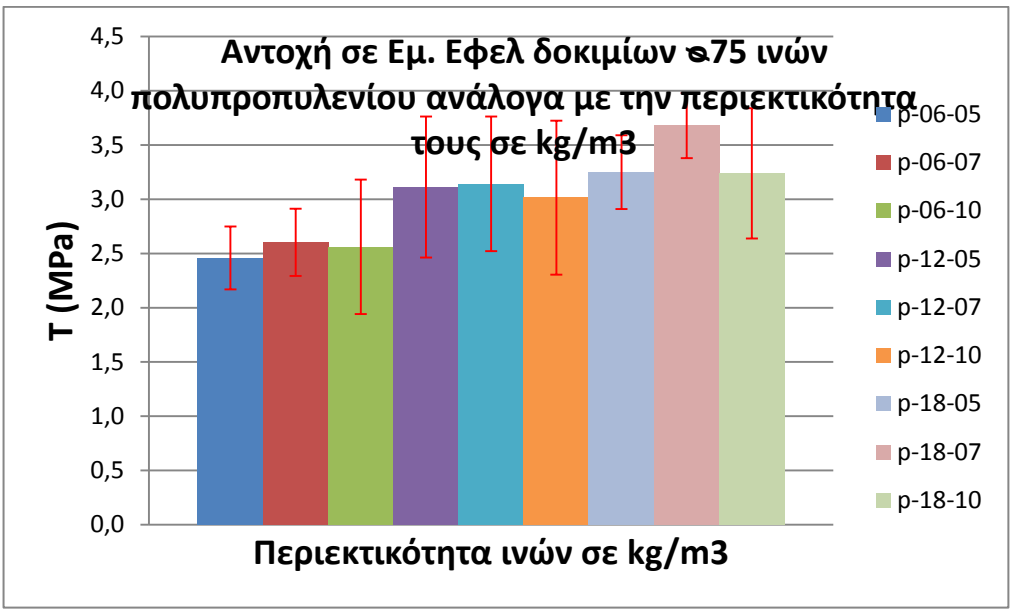

**Διάγραμμα 4. 2: Ραβδόγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης με ίνες πολυπροπυλενίου για δοκίμια 50mm**

Στο διάγραμμα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές αντοχής σε άοπλα και ινοπλιμσένα δοκίμια 50mm μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.



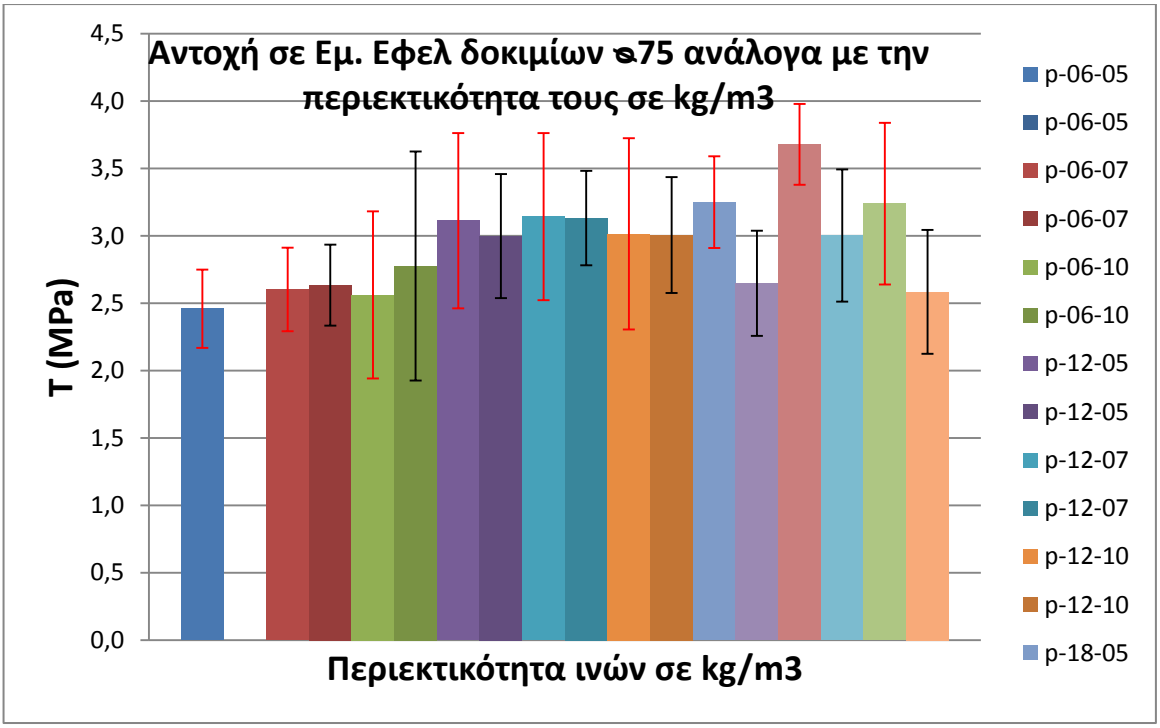

**Διάγραμμα 4. 4: Διάγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης για δοκίμια ελέγχου και ινοπλισμένα δοκίμια 50mm**

Στο διάγραμμα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής σε δοκίμια 75mm με ίνες πολυπροπυλενίου μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.




**Διάγραμμα 4. 5: Ραβδόγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης με ίνες πολυπροπυλενίου για δοκίμια 75mm**

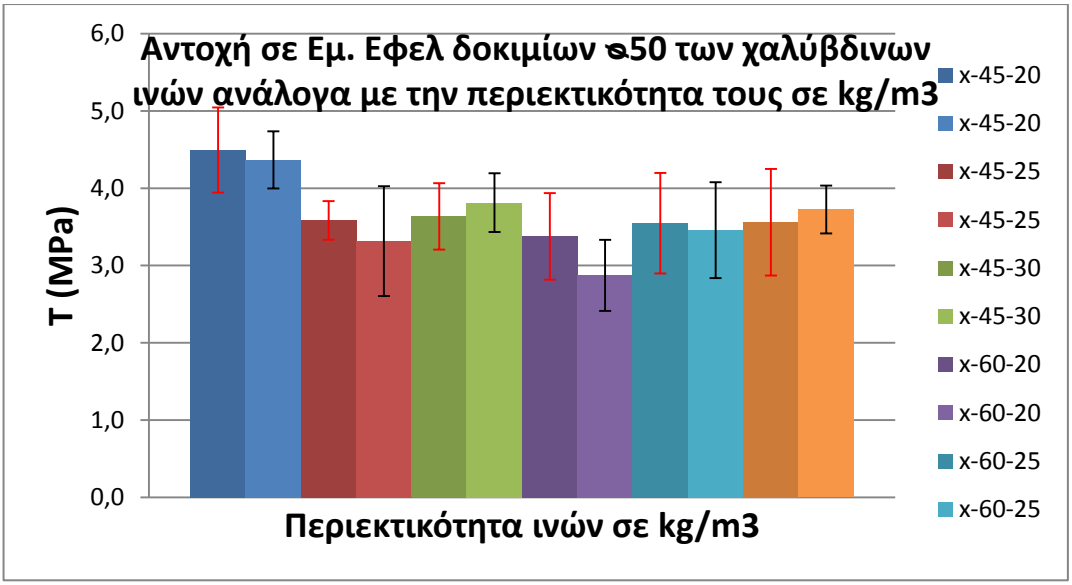
Στο διάγραμμα 4.6 παρουσιάζονται οι τιμές αντοχής σε άοπλα και ινοπλισμένα δοκίμια 75mm μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.




**Διάγραμμα 4. 6: Ραβδόγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης για δοκίμια ελέγχου 75mm**

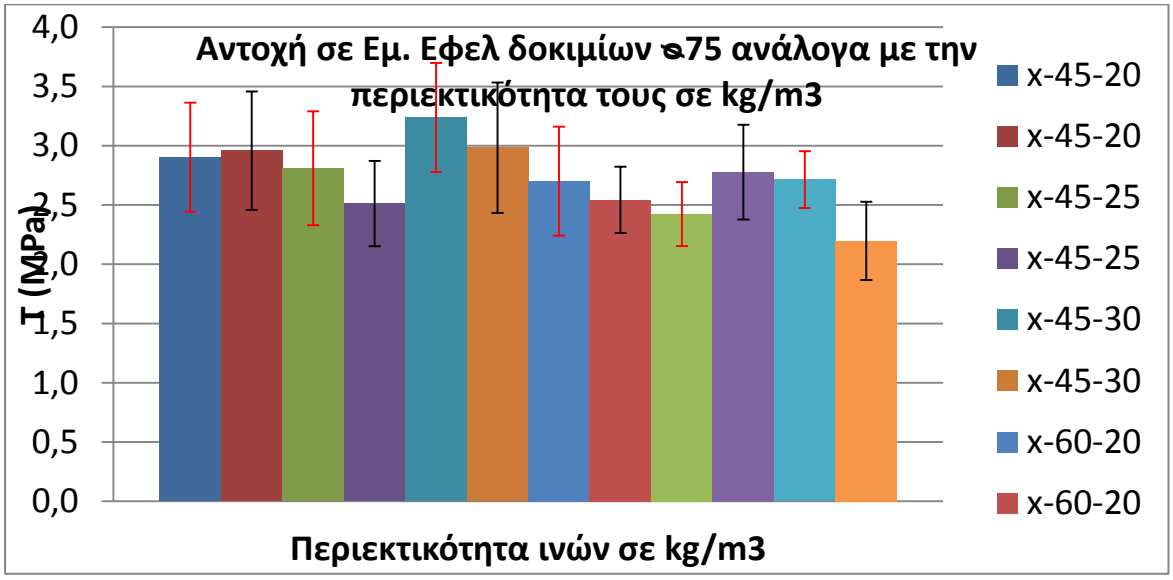
### 4.2.3 Ίνες Χαλύβδινες

Στο διάγραμμα 4.7 παρουσιάζονται τα δοκίμια ελέγχου 50mm και με χαλύβδινες ίνες. Η μέγιστη τιμή αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό παρατηρείται για μήκος ίνων 45mm και περιεκτικότητα ινών 20 kg/m$^3$ και είναι ίση με 4.5 MPa. Στις 4 σειρές σκυροδέτησης από τις 6 στις οποίες τοποθετήθηκαν χαλύβδινες ίνες η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια με ίνες απ'ότι χωρίς και σε 2 σειρές ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια ελέγχου απ'ότι με ίνες.



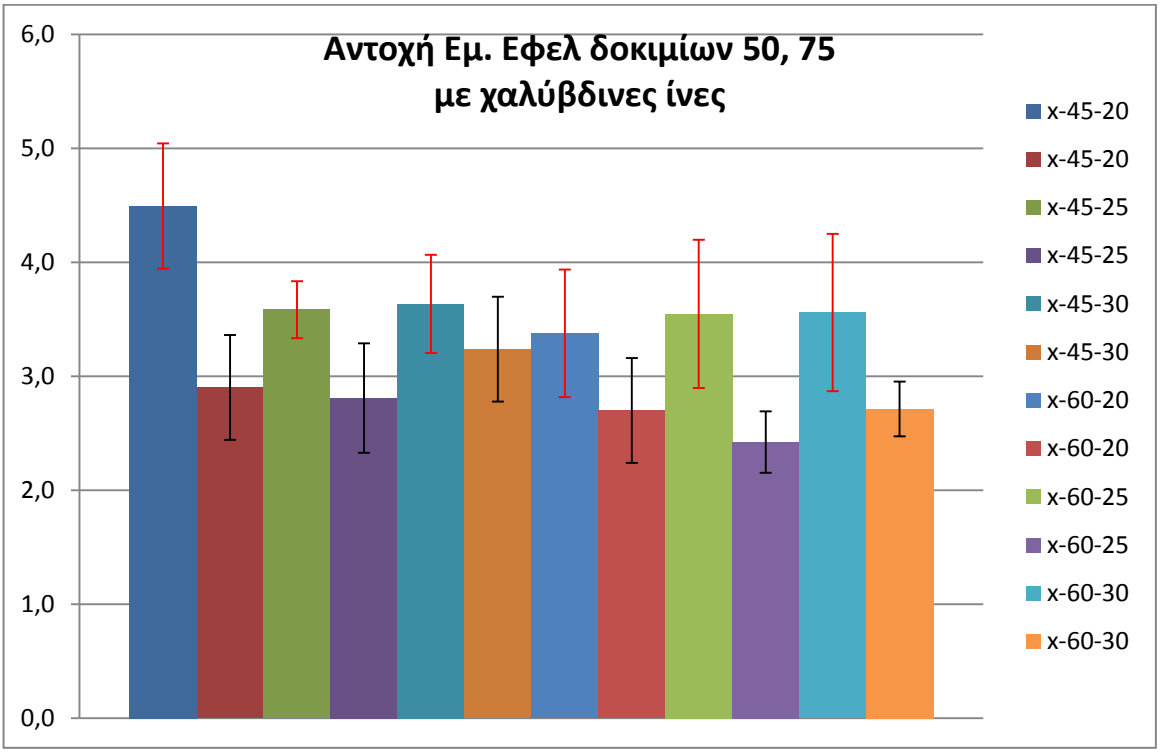

**Διάγραμμα 4.7: Ραβδόγραμμα σύγκρισης έμμεσης εφελκυστικής αντοχής T(MPa) για brazil 50mm με ίνες χαλύβδινες (x) και δοκίμια ελέγχου**

Στο διάγραμμα 4.8 παρουσιάζονται τα δοκίμια ελέγχου και ινοπλισμένα με χαλύβδινες ίνες 75mm. Η μέγιστη τιμή αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό παρατηρείται για μήκος ίνων 45mm και περιεκτικότητα ινών 30 kg/m$^3$ και είναι ίση με 3.2 MPa. Στις 4 σειρές σκυροδέτησης από τις 6 στις οποίες τοποθετήθηκαν χαλύβδινες ίνες η αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια με ίνες απ'ότι χωρίς και σε 2 σειρές ήταν μεγαλύτερη στα δοκίμια ελέγχου απ'ότι με ίνες με μέγιστη τιμή 2.95 MPa.




**Διάγραμμα 4.8: Ραβδόγραμμα σύγκρισης έμμεσης εφελκυστικής αντοχής T(MPa) για brazil 75mm με ίνες χαλύβδινες (x) και brazil control**

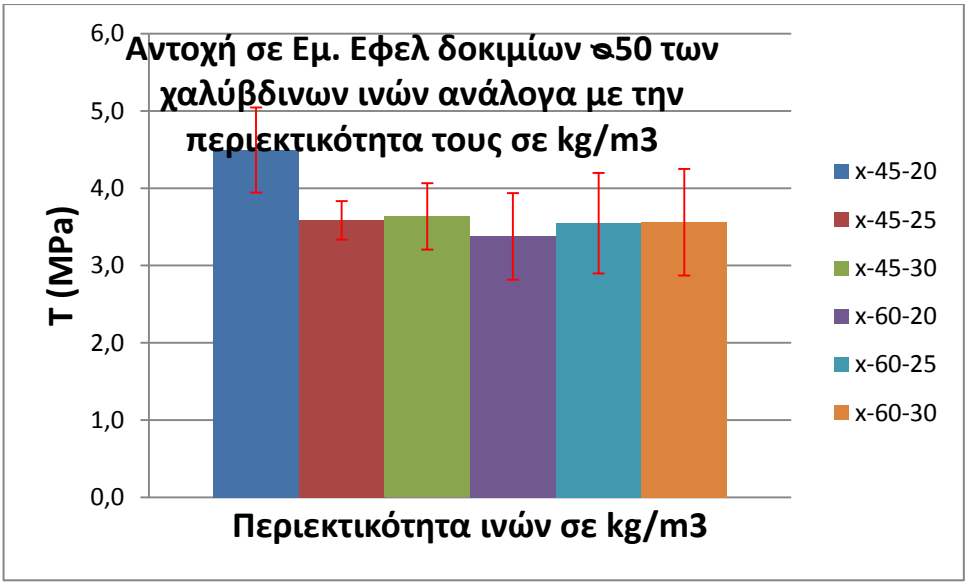
Στο διάγραμμα 4.9 παρουσιάζονται τα δοκίμια 75 mm και 50 mm με χαλύβδινες ίνες. Η μέγιστη τιμή αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό παρατηρείται για μήκος ίνων 45mm και περιεκτικότητα ινών 20 kg/m$^3$ και είναι ίση με 4.5 MPa. Παρατηρείται επίσης ότι σε όλες τις σειρές σκυροδέτησης η μέγιστη τιμή αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό παρουσιάζεται στα δοκίμια 50 mm δηλαδή έχουμε καλύτερη συμπεριφορά σε μικρότερης διαμέτρου δοκίμια απ'ότι σε μεγαλύτερης.




**Διάγραμμα 4.9: Ραβδόγραμμα σύγκρισης έμμεσης εφελκυστικής αντοχής T(MPa) για brazil 50mm και 75mm με ίνες χαλύβδινες (x)**

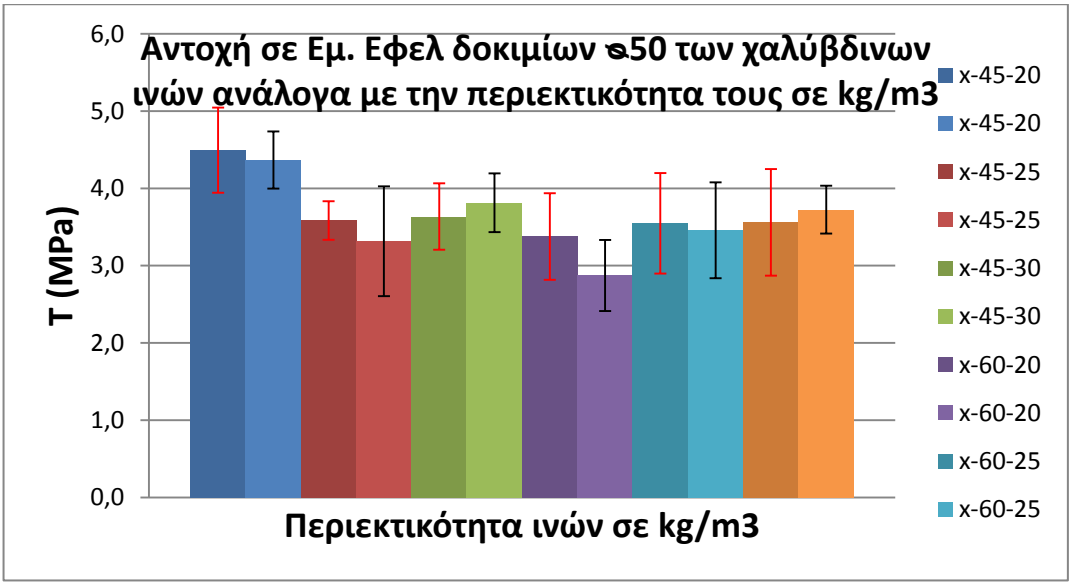
### 4.2.4 Διαγράμματα με τυπική απόκλιση για δοκίμια με χαλύβδινες ίνες

Στο διάγραμμα 4.10 παρουσιάζονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής σε δοκίμια 50mm με χαλύβδινες ίνες μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση προκύπτει ότι η σειρά μήκους 45mm και περιεκτικότητας 20kg/m$^3$ υπερτερεί σαφώς των άλλων.



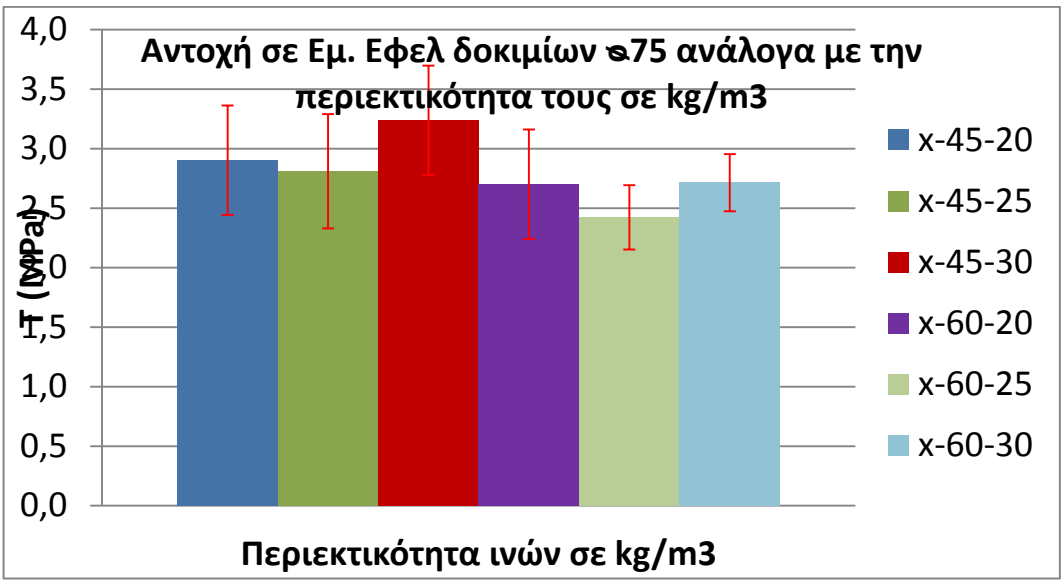

**Διάγραμμα 4.10: Ραβδόγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης με περιεκτικότητα σε χαλύβδινες ίνες για δοκίμια 50mm**

Στο διάγραμμα 4.11 παρουσιάζονται οι τιμές αντοχής σε άοπλα και ινοπλισμένα δοκίμια 50mm μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.



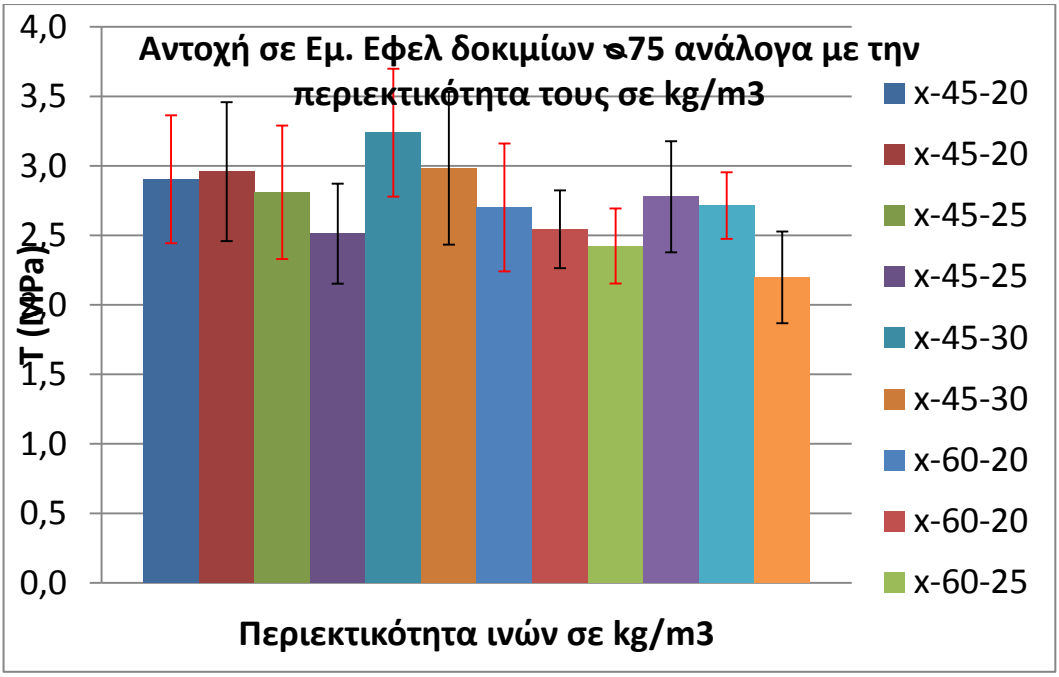

**Διάγραμμα 4.11: Ραβδόγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης για δοκίμια ελέγχου 50mm**

Στο διάγραμμα 4.12 παρουσιάζονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής σε δοκίμια 75mm με χαλύβδινες ίνες μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.




**Διάγραμμα 4.12: Διάγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης με περιεκτικότητα σε χαλύβδινες ίνες για δοκίμια 75mm**

Στο διάγραμμα 4.13 παρουσιάζονται οι τιμές αντοχής σε άοπλα και ινολισμένα δοκίμια 75mm μαζί με την αντίστοιχη τυπική απόκλιση κάθε σειράς. Λαμβάνοντας υπόψη την μέση αντοχή κάθε σειράς μαζί με την τυπική απόκλιση δε προκύπτει ότι κάποια σειρά υπερτερεί σαφώς των άλλων.




**Διάγραμμα 4. 13: Διάγραμμα έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με τυπική απόκλιση για σειρές σκυροδέτησης για δοκίμια ελέγχου 75mm**

## 4.3 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης τριών σημείων

Τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε πρισματικά δοκίμια φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 4.3.

**Πίνακας 4.2: Συγκεντρωτικός πίνακας αντοχών σε κάμψη τριών σημείων για κάθε σειρά σκυροδέτησης**

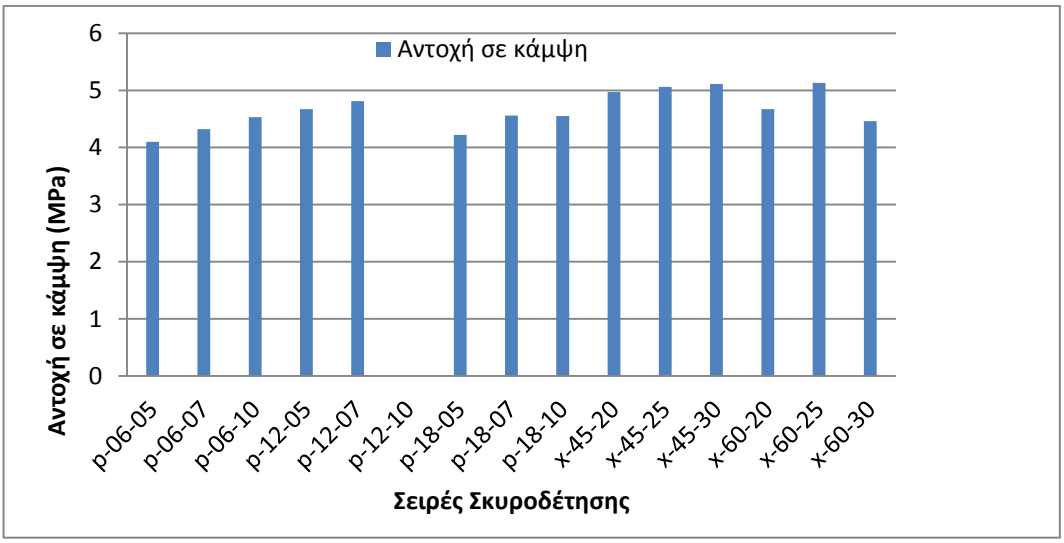
| ΤΥΠΟΣ | ΔΙΑΣΤΑΣΗ (mm) | % (kg/m^3) | | Μέγιστη Φόρτιση (kN) | Άντοχή σε Κάμψη (Mpa) |
|---|---|---|---|---|---|
| **Π** | **6** | **0,5** | **p-06-05** | 20.51 | 4,1 |
| **Π** | **6** | **0,7** | **p-06-07** | 21,62 | 4,32 |
| **Π** | **6** | **1** | **p-06-10** | 22,65 | 4,53 |
| **Π** | **12** | **0,5** | **p-12-05** | 24,34 | 4,67 |
| **Π** | **12** | **0,7** | **p-12-07** | | 4,81 |
| **Π** | **12** | **1** | **p-12-10** | | |
| **Π** | **18** | **0,5** | **p-18-05** | 21,12 | 4,22 |
| **Π** | **18** | **0,7** | **p-18-07** | 22,78 | 4,56 |
| **Π** | **18** | **1** | **p-18-10** | 22,75 | 4,55 |
| **Χ** | **45** | **20** | **x-45-20** | 24,83 | 4,97 |
| **Χ** | **45** | **25** | **x-45-25** | 25,29 | 5,06 |
| **Χ** | **45** | **30** | **x-45-30** | 25,55 | 5,11 |
| **Χ** | **60** | **20** | **x-60-20** | 23,33 | 4,67 |
| **Χ** | **60** | **25** | **x-60-25** | 25,64 | **5,13** |
| **Χ** | **60** | **30** | **x-60-30** | 22,29 | 4,46 |

Στο διάγραμμα 4.14 παρουσιάζονται οι αντοχές σε κάμψη των δοκών που σκυροδετήθηκαν για κάθε σειρά σκυροδέτησης και με συγκεκριμένες περιεκτικότητες σε ίνες. Παρατηρείται ότι για τις ίνες πολυπροπυλενίου μήκους 6mm και 12mm υπάρχει μία σταθερή αύξηση της αντοχής καθώς που κυμαίνεται από 4.1 έως 4.8 MPa καθώς αυξάνεται το ποσοστό περιεκτικότητας των ινών. Για την σειρά σκυροδέτησης 12mm, 1kg/m$^3$ δεν υπάρχουν τιμές.

Για τις ίνες πολυπροπυλενίου 18mm και περιεκτικότητες από 0.5 έως 1kg/m$^3$ παρατηρείτε μία αυξομείωση της τιμής αντοχής σε κάμψης σε σταθερά επίπεδα από 4.2 έως 4.5 MPa.

Όσον αφορά τα πρίσματα με χαλύβδινες ίνες εκεί παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές με μέγιστη τιμή 5.13 MPa για την σειρά σκυροδέτησης με μήκος 60mm και περιεκτικότητα ινών 25 kg/m$^3$.

Γενικά οι τιμές αντοχής σε κάμψη τριών σημείων για όλες τις σειρές σκυροδέτησης κυμαίνονται από 4.1 έως 5.1 MPa.




**Διάγραμμα 4. 14: Αντοχή σε κάμψη τριών σημείων σε κάθε σειρά σκυροδέτησης**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

Συμπεράσματα και Προτάσεις

## 5.1 Συμπεράσματα

Από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος αυτό που συχνότερα αναφέρεται είναι συμπεριφορά του σε κάμψη. Μέσω δοκιμών σε πρίσματα και πλάκες μετράται το βέλος κάμψης και η απορροφούμενη ενέργεια, στοιχεία που εξαρτώνται κυρίως από την ποσότητα και το είδος των ινών. Βασική παράμετρος όλων των δοκιμών είναι η παρασκευή των δοκιμίων. Αυτά πρέπει να είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές αλλιώς τα αποτελέσματα που θα προκύπτουν δε θα είναι ούτε αντιπροσωπευτικά ούτε συγκρίσιμα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία θα προστεθούν στις μέχρι τώρα μελέτες και έρευνες με σκοπό να βοηθήσουν τις νέες εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

1. Η προσθήκη ινών είτε χαλύβδινων, είτε πολυπροπυλενίου στη μάζα του σκυροδέματος, γενικά μας δείχνει ότι δεν υπάρχει σαφής αύξηση ή σαφής μείωση της αντοχής σε έμμεσο εφελκυσμό όταν η περιεκτικότητα σε ίνες κυμαίνεται σε συγκεκριμένα εύρη.
2. Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε άοπλα και οπλισμένα δοκίμια δεν έγινε με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αντοχή τους αλλά για να ελεγχθεί ενδεικτικά το κατά πόσο τα δοκίμια είχαν την ονομαστική αντοχή της σύνθεσης που χρησιμοποιήθηκε. Το σκυρόδεμα σε όλες τις σειρές είχε αντοχή μέσα στα πλαίσια που ορίζει ο Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος.
3. Όσον αφορά την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σε δοκίμια Brazil 50mm με **χαλύβδινες ίνες** διακρίνεται ότι η σύνθεση σκυροδέματος με ίνες 45mm και περιεκτικότητα 20 kg/m$^3$ υπερτερεί ελαφρώς των υπολοίπων

4. Όσον αφορά την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σε δοκίμια Brazil 50mm με **ίνες πολυπροπυλενίου** δεν διακρίνεται σαφώς να έχει πλεονέκτημα κάποια σύνθεση σκυροδέματος έναντι των υπολοίπων.
5. Όσον αφορά την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σε δοκίμια Brazil 75mm με **χαλύβδινες ίνες** δεν διακρίνεται σαφώς να έχει πλεονέκτημα κάποια σύνθεση σκυροδέματος έναντι των υπολοίπων.
6. Όσον αφορά την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό σε δοκίμια Brazil 75mm με **ίνες πολυπροπυλενίου** δεν διακρίνεται σαφώς να έχει πλεονέκτημα κάποια σύνθεση σκυροδέματος έναντι των υπολοίπων.
7. Στο μεγαλύτερο ποσοστό τα δοκίμια Brazil 50mm έδιναν καλύτερες τιμές αντοχής σε εφελκυσμό σε σύγκριση με τα δοκίμια 75mm και στα δύο είδη ινών.
8. Επιπλέον, η μεγάλη συγκέντρωση ινών στο σκυρόδεμα θεωρείται ότι δημιουργεί επίπεδα ολίσθησης στο εσωτερικό των δοκιμίων, καθώς αυξάνεται η φόρτιση, με αποτέλεσμα να επικρατεί η πλαστική συμπεριφορά καθώς αυξάνεται η τάση και η παραμόρφωση των δοκιμίων. Ως αποτέλεσμα, τα δοκίμια αποκτούν καλύτερη συμπεριφορά μετά την αστοχία όπως πιστοποιείται από την δοκιμή κάμψης.

Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των εργαστηριακών δοκιμών, παρατηρήθηκαν τα εξής:

1. Δόθηκε μεγάλη προσοχή στην πολύ καλή ανάμειξη του σκυροδέματος και των ινών (περισσότερο από 10 λεπτά), ώστε το μείγμα να καταστεί όσο πιο ομοιογενές γίνεται.
2. Στη σκυροδέτηση και τη χύτευση δεν χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα, όπως ρευστοποιητές, επιταχυντές πήξης κα.

Ενας σημαντικός παράγων που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο στον πειραματικό σχεδιασμό όσο και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου του σκυροδέματος σε σχέση με το μέγεθος του δοκιμίου. Από διεθνή πρότυπα είναι γνωστό ότι το μέγεθος του δοκιμίου πρέπει να είναι περί τις 10 φορές μεγαλύτερο από το μέγεθος του μεγαλύτερου κόκκου. Στα υπόψη πειράματα, ακόμη και στα πειράματα κάμψης, το παραπάνω καταστρατηγείται, καθώς η μέγιστη διάμετρος αδρανούς είναι της τάξεως των 25mm.

## 5.2 Προτάσεις

1. Θα ήταν χρήσιμο για τις δοκιμές κάμψης να υπήρχαν και τα αντίστοιχα άοπλα πρισματικά δοκίμια ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση με τα ινοπλισμένα δοκίμια και συνεπώς η καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων για την αντοχή σε κάμψη. Αυτό σε αυτή την εργασία δεν ήταν δυνατό λόγω του ότι δεν υπήρχε παραπάνω από μία διαθέσιμη μήτρα.
2. Επιπρόσθετα, θα ήταν δυνατή η εξαγωγή στατιστικών μεγεθών για την αντοχή σε κάμψη των ινοπλισμένων δοκιμίων αν μπορούσαν να χυτευθούν περισσότερες από μία πρισματικές δοκοί.
3. Τέλος θα ήταν σημαντικό για την ανάλυση αν υπήρχε η δυνατότητα μέτρησης του βέλους κάμψης των πρισματικών δοκών

## Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία


Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Χάλυβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008. (2008). *(ΦΕΚ 1416/Β/17-07-2008 και ΦΕΚ 2113/Β/13-10-2008).*

*J & J International Trading Corp.* (2010). Retrieved August 2010, from http://www.jnjitc.com/glass%20firbe.htm

*ASTM C 293: Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading).* (n.d.).

*ASTM D790: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating meterial.* (n.d.).

Bentur, A., & Mindness, S. (1990). *Fibre reinforced cementitious composites.* Elsevier Science Publishers Ltd.

BISFA. (2009). In *Terminology of man-made fibers.* Bruxelles.

*Dramix.* (n.d.). Retrieved 2010, from http://www.bosfa.com/docs/DramixSteelFibres.pdf

Inomix/Sidenor. (2008). Μεταλλικές ίνες. *Φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.*

*ISO 178: Plastics--Determination of flexural properties.*

Jamrozy, Z. (1985). *Drutobeton.*

Katzer, J. (2006, May). Steel Fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering. *The Pacific Journal of Science and Technology.*

Kayvani, A., Saeki, N., & Shimura, K. (1995). "Applying Waste Shavings in Concrete". *Proceedings of the Eleventh International Conference on Solid Waste Technology and Management.* Philadelphia, USA.

Kobayashi, K. (1983). Development Of Fiber Reinforced Concrete in Japan. *The International Journal of Concrete Composites and Lightweight Concrete.*

Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W. (2003). *Design and Control of Concrete Mixtures.* Skokie, Illinois, USA: Portland Cement Association.

Lange, S. A. (2002). The Pickett Effect at early age and experiment separating its mechanisms in tension. *Materials and Structures*, pp. 211-218.

Laning, A. (1992). Synthetic fibers Primarily used to reduce shrikage cracking, polypropylene, nylon, and polyster fibers offer other benefits as well.

Maidl, B. (1995). *Steel Fibre Reinforced Concrete.* Berlin: Ernst & Sohn.

Marikunte, S., Aldea, C., & Shah, S. (1997, April-May). Durability of glass fiber reinforced cement composites: Effect of silica fume and metakaolin. *Advanced Cement Based Materials*, pp. 100-108.

Mindness, S. F. (2003). *Concrete.* Pearson Educations.

Morgan, D. (1999). Shotcrete Reinforcement. *Shotcrete Magazine.*

*National Texcnikal Univercity of Athens.* (n.d.). Ανάκτηση 2010, από Μηχανικές ιδιότητες και μηχανικές δοκιμές (ΙΙ): http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/lipes%20mixanikes%20dokimes.pdf

Padmarajaiah, S. K. (1999). Flexural and shear studies of high strength fiber reinforced prestressed concrete beams. *Proceedings of the Fifth International Conference on Concrete Technology for Developing Countries, National Council for Cement and Building Material*, (pp. 45-43). New Delhi, INDIA.

Papworth, F. (2002). Design Guidelines for the Use of Fiber-Reinforced Shotcrete in Ground Support. *Shotcrete Magazine.*

Sika-Fibers. (2008). Συνθετικές Ίνες. *Φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.*

Smith, M. R. (2001). *Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes.* London: Engineering Geology Special Publications.

*THRAKON*. (n.d.). Ανάκτηση 2010, από http://www.thrakon.com

Trottier, J., & Mahoney, M. (2004). Innovative Synthetic Fibers. *Shotcrete Magazine.*

## Ελληνική Βιβλιογραφία

Αγιουτάντης, Ζ. (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής-Μηχανική Πετρωμάτων.* Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος ΙΩΝ.

Γεωργακοπούλου, Μ. (2006). Ενίσχυση Στοιχείων με Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα απο Χάλυβα και Πλαστικά Υλικά, Εργασία Προπτυχιακού Φοιτητή, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Λιτινας, Ν. (n.d.). Ανάκτηση 2010, από Skyrodema: http://www.skyrodema.net

Μιχάλης, Π., & Δημητρίου, Σ. (2007). *Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος, Διπλωματική Εργασία, ΑΠΘ.*

Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97, ΦΕΚ 315/Β/17-4-97. (n.d.).

Παγάνης, Λ. (2009). *"Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος με πιθανές εφαρμογές στην υποστήριξη υπογείων τεχνικών έργων", Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείου Κρήτης.*

Παπαγιάννη, Ι., & Αναστα'σίου, Ε. (2008). Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ινοπλισμένων Σκυροδεμάτων. *1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ.* ΑΘΗΝΑ.

Ρουσάκης, Ε. (2010). "Ινοπλισμένο Εκτοξευμένο Σκυρόδεμα", Μεταπτυχιακή Εργασία. *Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.* Αθήνα.

Σοφιανός, Α., & Νομικός, Π. (2008, Οκτώβριος). *Κεφάλαιο 2: Τυποποιημένες εργαστηριακές δοκιμές αντοχής.* Ανάκτηση 2010, από Προχωρημένη Μηχανική Πετρωμάτων.

Τσακαλάκης, Κ. (2010). *"Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος", Πανεπιστημιακές Σημεώσεις.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Τσαματσούλης, Δ. (2010). *Τα Ευρωπαϊκα Πρότυπα Τσιμέντου ΕΛΟΤ ΕΝ 197.* Ανάκτηση 2010, από http://www.papadiotis.probabel.de/