ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:
"ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ"

ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΓΡΗΓΟΡΗ ΡΟΥΣΑΚΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Α. Σοφιανός, Καθηγητής ΕΜΠ

Επιτροπή Αξιολόγησης: Π. Γιαννόπουλος, Αν. Καθηγητής ΕΜΠ

Π. Νομικός, Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος 9

Εισαγωγή 11

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ 13

Κεφάλαιο 1 : ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 17

1. Ιστορική αναδρομή 19

2. Πεδία Εφαρμογής 21

3. Υπόγεια Έργα 22

3.1 Σήραγγες 22

3.2 Υπόγειοι Θάλαμοι 23

3.3 Μεταλλευτικά Έργα 23

4. Έργα στην επιφάνεια 24

4.1 Πρανή 24

4.2 Τοίχοι Αντιστήριξης 26

4.3 Αποκατάσταση Κατασκευών 26

5. Υπόγεια Έργα 27

5.1 Προκατασκευασμένα Στοιχεία 27

5.2 Έγχυτο Σκυρόδεμα 28

6. Άλλες Εφαρμογές του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος 29

Κεφάλαιο 2 : ΕΙΔΗ ΙΝΩΝ 33

1. Γενικά Στοιχεία 35

2. Χαλύβδινες ίνες 39

2.1 Παραγωγή Χαλύβδινων Ινών 44

3. Ίνες Υάλου 47

4. Συνθετικές Ίνες 48

4.1 Ίνες Πολυπροπυλενίου 51

4.2 Ακρυλικές Ίνες 52

4.3 Αραμιδικές Ίνες 52

4.4 Ίνες από Νάιλον 53

4.5 Πολυεστερικές Ίνες 54
4.6 Ίνες Πολυαιθυλενίου 54
4.7 Ίνες Πολυβινυλικής Αλκοόλης 54
4.8 Ίνες Πολυακρυλονιτριλίου 55
4.9 Ίνες από Καρβίδια του Πυριτίου 55
4.10 Τελευταίες Εξελίξεις στις Συνθετικές Ίνες 55
5. Ανθρακικές Ίνες **57**
6. Φυσικές Ίνες **57**
6.1 Φυτικές Ίνες 58
6.2 Ξύλινες Ίνες 58
6.3 Ίνες Αμιάντου 58
6.4 Κεραμικές Ίνες 58
7. Μίξη Διαφορετικών Ινών **58**
8. Κριτήρια Επιλογής Ινών **59**

Κεφάλαιο 3 : ΧΩΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ **63**

1. Γεωμετρία **65**
2. Προσανατολισμός Ινών **66**
2.1 Επιρροή του Προσανατολισμού Ινών 68
3. Ποσότητα, Επιφάνεια και Απόσταση Ινών - Επιφάνεια Ενίσχυσης **70**
4. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα Χρήσης των ινών **75**

Κεφάλαιο 4 : ΜΙΓΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ **79**

1. Γενικά Στοιχεία Εκτοξευόμενου Σκυροδέματος **81**
2. Σχεδιασμός Του Μίγματος **81**
3. Προετοιμασία των Επιφανειών **83**
4. Διαδικασίες Μίξης Σκυροδέματος **84**
4.1 Ξηρή Μίξη 85
4.2 Υγρή Μίξη 89
4.3 Σύγκριση των δύο Μεθόδων 91
5. Προσθήκη Ινών **96**
5.1 Προσθήκη Χαλύβδινων Ινών 96
5.2 Προσθήκη μη Μεταλλικών Ινών 99
6. Αίτια Συσσωμάτωσης Ινών **100**

7. Πρακτικός Έλεγχος Ποσοστού Μεταλλικών Ινών **101**

Κεφάλαιο 5 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ **103**

1. Εισαγωγή **105**

2. Διαφορές Έγχυτου – Εκτοξευόμενου Ινοπλισμένου Σκυροδέματος **105**

3. Σύγκριση Ινοπλισμένου Σκυροδέματος και Σκυροδέματος με Δομικό Πλέγμα **109**

4. Σύγκριση Άοπλου Σκυροδέματος και Σκυροδέματος με Ίνες **113**

5. Μέγιστο Μέγεθος Κόκκου Αδρανών **117**

6. Μηχανισμός Λειτουργίας και Αγκύρωσης **117**

7. Μηχανισμός Αστοχίας **120**

8. Συντήρηση **123**

9. Συνάφεια Εκτοξευόμενου Ινοπλισμένου Σκυροδέματος – Επιφάνειας **124**

10. Συνηθισμένα λάθη κατά την εκτέλεση της εργασίας **125**

11. Μελέτη της Αναπήδησης **126**

11.1 Γενικά Στοιχεία **126**

11.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την Αναπήδηση στην Ξηρή Μίξη **128**

11.3 Τρόποι Μείωσης της Αναπήδησης **130**

11.4 Υπολογισμός Αναπήδησης στην Ξηρή Μίξη **132**

12. Μηχανικά Χαρακτηριστικά **133**

12.1 Μελέτη Νωπού Σκυροδέματος **134**

12.1.1 *Εργασιμότητα* **134**

12.1.2 *Συμπύκνωση* **137**

12.2 Μελέτη Σκληρυμένου Σκυροδέματος **138**

12.2.1 *Θλιπτική Αντοχή* **140**

12.2.2 *Εφελκυστική Αντοχή* **142**

12.2.2.1 *Αντοχή Αξονικού Εφελκυσμού* **142**

12.2.2.2 *Αντοχή Εφελκυσμού Κάμψεως* **147**

12.2.2.3 *Αντοχή σε Διάρρηξη* **152**

12.2.3 Αντοχή σε Διάτμηση **153**

12.2.4 Δυσθραυστότητα **153**

12.2.5 Ελαστική Παραμόρφωση **155**

12.2.6 Ρωγμάτωση **156**

12.2.7 Αντοχή σε Κρούση **156**

12.2.8 Συμπεριφορά κατά τη Συστολή Ξήρανσης 157
12.2.9 Αντίσταση σε Υψηλές Θερμοκρασίες 160
12.2.10 Αντίσταση σε Μεταβολές της Θερμοκρασίας 164
12.2.11 Αντίσταση σε Διάβρωση 165
12.2.12 Δοκιμή Πτώσης Τεμάχους (Falling Block Test) 167
12.3 Πρώιμες Αντοχές 167
12.4 Συμπεριφορά Υβριδικών Συστημάτων 174
13. Συμπεριφορά Ινοπλισμένου Σκυροδέματος σε Βάθος Χρόνου 174
13.1 Συστολή και Ερπυσμός 176
14. Διαφορές μεταξύ Χαλύβδινων και Μάκρο-συνθετικών Ινών 180
14.1 Σύγκριση με βάση το Κόστος 183

Κεφάλαιο 6 : ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΙΞΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ 185

1. Εισαγωγή 187
2. Μίξη 188
3. Εκτόξευση 191
3.1 Ξηρή Μίξη 192
3.2 Υγρή Μίξη 195
3.3 Μηχανές και για τα δύο Είδη Μίξεων 199
3.4 Ειδικός Εξοπλισμός για Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα 199
3.5 Χειρισμός του Ακροφυσίου 200
4. Κίνδυνοι κατά την Εκτέλεση της Εργασίας 202
5. Πλεονεκτήματα της Εκμηχάνισης 204

Κεφάλαιο 7 : ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 205

1. Εισαγωγή 207
2. Υλικά Μίγματος 207
2.1 Ίνες 207
2.2 Τσιμέντο 210
2.3 Αδρανή 211
2.4 Νερό 212
2.5 Πρόσθετα 212
2.6 Πρόσμικτα 213
2.7 Θερμοκρασία Μίγματος 214
3. Απαιτήσεις για το Τελικό Προϊόν 215

4. Δυσθραυστότητα **216**
5. Ποιοτικός Έλεγχος **217**
6. Πλάκες **218**
6.1 Τετράγωνες Πλάκες – EFNARC **219**
6.2 Κυκλικές Πλάκες - ASTM C 1550-03a **220**
7. Πρισματικά Δοκίμια – Δοκοί **222**
7.1 ASTM C 1018-97 **224**
7.2 JSCE SF4 (JSCE 1984) **227**
7.3 EFNARC **227**
7.4 Ευρωπαϊκοί κανονισμοί **228**
7.5 ASTM C 1609/ASTM C 1609 M-05 **230**
8. Συσχετίσεις Μεταξύ Δοκών και Πλακών **232**
8.1 Καμπτική Αντοχή Δοκών **232**
8.2 Ενέργεια Απορρόφησης Δοκών **233**
8.3 Ενέργεια Απορρόφησης Πλακών **233**
8.4 Ενέργεια Απορρόφησης Δοκών και Πλακών **234**
9. Κύλινδροι **235**
9.1 Δοκιμή Σημειακής Φόρτισης **236**
9.1.1 *Εκτέλεση της Δοκιμής* **236**
9.1.2 *Ισοδυναμία με Δοκούς* **239**
10. Κύβοι **240**

Κεφάλαιο 8 : ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ **243**

1. Γενικά στοιχεία **245**
2. Σχεδιασμός με Ίνες ή Πλέγμα **245**
2.1 Επιρροή Ινών **245**
2.2 Υποθέσεις Σχεδιασμού **246**
2.3 Σύγκριση Ινών με Άοπλο Σκυρόδεμα και Πλέγμα **248**
2.4 Σύγκριση Κόστους **250**
3. Κάμψη σε Δοκούς **251**
3.1 Ίνες **251**
3.2 Συμβατικός Οπλισμός και Ίνες **251**
4. Μέθοδοι Σχεδιασμού **253**
4.1 Εμπειρικές Μέθοδοι **253**

4.2 Ημιεμπειρική Μέθοδος **256**
4.2.1 *Προσωρινή Επένδυση* **256**
4.2.2 *Τελική Επένδυση* **257**
4.3 Αναλυτικές Μέθοδοι **258**
4.4 Αριθμητικές Μέθοδοι **260**
5. Ελάχιστη ποσότητα ινών **261**
6. Εφαρμογή σε Ειδικές Κατηγορίες Εδαφών **263**

Περίληψη **265**

Tutorial Summary **267**

Βιβλιογραφία **269**

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείο με αντικείμενο το Εκτοξευόμενο Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα. Η εργασία διεξήχθη στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών με τίτλο: «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων».

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή κ. Α. Σοφιανό για την καθοριστική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και τον χρόνο που αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς τον Λέκτορα Π. Νομικό για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου παρείχε. Τέλος ευχαριστούμε και την κα Ν. Μποροδίμου από την ΤΕΡΝΑ για τις πληροφορίες που μας προσέφερε.

Με εκτίμηση,

Ρουσάκης Γρηγόρης

Φεβρουάριος 2010

Εισαγωγή

Ο οπλισμός που παραδοσιακά χρησιμοποιείται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι το χαλύβδινο πλέγμα. Αν και η ενίσχυση που αυτό προσφέρει μπορεί να είναι ικανοποιητική σε αρκετές περιπτώσεις, η δυνατότητα αντικατάστασής του με ίνες έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως ταχύτερη εκτέλεση της εργασίας, ασφαλέστερες συνθήκες για το προσωπικό και καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά υπό ορισμένες προϋποθέσεις.

Πλέον μεγάλη ποικιλία ινών διατίθεται στην αγορά και το ζήτημα της επιλογής της καταλληλότερης από αυτές είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία αλλά και την οικονομία του έργου. Στην πράξη έχουν καθιερωθεί οι χαλύβδινες και οι συνθετικές ίνες (κυρίως οι πολυπροπυλενίου). Σημαντική είναι η κατανόηση των διαφορών τους και η αξιοποίηση της κάθε μιας ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Έτσι, ιδιαίτερη αξία έχει η συγκριτική μελέτη των διαφορετικών ινών καθώς και των μιγμάτων που περιέχουν παραπάνω από ένα είδος από αυτές.

Οι χαλύβδινες και οι συνθετικές ίνες έχουν διαφορετική φιλοσοφία ως προς τον μηχανισμό ενίσχυσης που αναπτύσσουν κι έτσι η επιλογή πρέπει να γίνεται μέσα από δοκιμές. Στην πράξη οι χαλύβδινες ίνες παραλαμβάνουν φορτία από τα πρώτα κιόλας στάδια του ανοίγματος της ρωγμής ενώ αντίθετα οι συνθετικές αρχίζουν να λειτουργούν λίγο αργότερα. Υπερέχουν όμως σε συνολική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και σε ανθεκτικότητα αποτελώντας έτσι πολύ καλή επιλογή σε συνθήκες όπου αναμένονται έντονες παραμορφώσεις.

Ο αναγνώστης της εργασίας αυτής καλό θα ήταν επίσης να εστιάσει και στη μέθοδο παραγωγής του υλικού, που εν τέλει καθορίζει τις ιδιότητές του. Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δε θα πρέπει σε καμία περίπτωση να θεωρείται υλικό παρόμοιο με το έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Διαφέρει ως προς τη συμπύκνωση, τον προσανατολισμό των ινών και εν γένει τα μηχανικά χαρακτηριστικά. Στο εκτοξευόμενο οι ίνες τείνουν να προσανατολίζονται προς την επιφάνεια εκτόξευσης και έτσι το υλικό που προκύπτει είναι ανισότροπο. Στο έγχυτο η καλύτερη συμπύκνωση τυπικά δίνει και βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά.

Οι δοκιμές που εκτελούνται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι κυρίως δοκών και πλακών σε κάμψη. Διάφοροι κανονισμοί έχουν καθιερωθεί με τα καλύτερα όμως αποτελέσματα από άποψη διακύμανσης αποτελεσμάτων να δίδονται από τις κυκλικές πλάκες ενώ διαθέσιμες είναι και συσχετίσεις μεταξύ τους. Ο σχεδιασμός με ινοπλισμένο σκυρόδεμα πρέπει να βασίζεται στα αποτελέσματα των δοκιμών και μπορεί να γίνεται είτε με εμπειρικές, είτε με αναλυτικές, είτε με αριθμητικές μεθόδους, με τις τελευταίες να είναι και οι πιο σύγχρονες και αποτελεσματικές.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Ορισμοί

Σκυρόδεμα επί τόπου είναι το σκυρόδεμα που διαστρώνεται σε νωπή κατάσταση στην τελική του θέση.

Νωπό σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα αυτό που δεν έχει ακόμη σκληρυνθεί και είναι ακόμα κατεργάσιμο.

Σκληρυμένο σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα που έχει σκληρυνθεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην είναι πια κατεργάσιμο.

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete ή gunite ή sprayed concrete) ορίζεται το σκυρόδεμα που διαστρώνεται πάνω σε μια επιφάνεια με εκτόξευσή του από ακροφύσιο, ώστε να σχηματίζει στρώση σκυροδέματος με συνάφεια πάνω στην εν λόγω επιφάνεια.

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Concrete ή FRC) ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες σε διασπορά, με τυχαίο προσανατολισμό. (Αμερικανικό ινστιτούτο σκυροδέματος, ACI 116R).

Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Shotcrete ή FRS) ορίζεται το σκυρόδεμα με ίνες, που μέσω ενός ακροφυσίου εκτόξευσης, διαστρώνεται υπό πίεση πάνω σε επιφάνειες.

Ίνες είναι μικρού διακριτού μήκους στοιχεία από χάλυβα, οργανικά πολυμερή, γυαλί ή πολυκαρβονικά υλικά, επαρκώς μικρού μεγέθους ώστε να κατανέμονται και να διασκορπίζονται ομοιόμορφα στη μάζα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Αναπήδηση (rebound) είναι το ποσοστό του υλικού το οποίο έχοντας διέλθει δια του ακροφυσίου και εκτοξευθεί προς την επιφάνεια του υποστρώματος, δεν προσκολλάται σε αυτήν και αναπηδά υπό τύπον απώλειας εκτός της θέσης προσβολής.

Λόγος μορφής (aspect ratio) μίας ίνας είναι ο λόγος του μήκους της προς την ισοδύναμη διάμετρό της.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

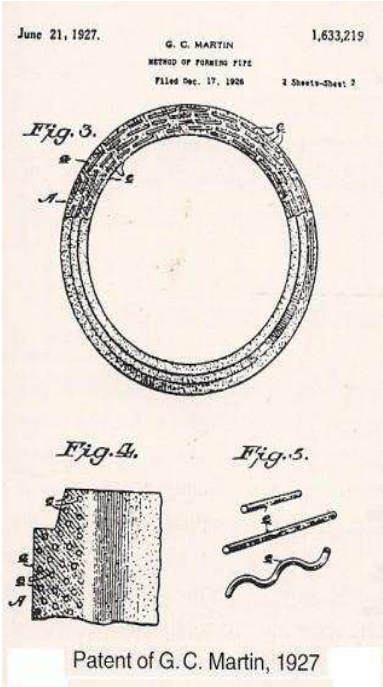
1. Ιστορική αναδρομή

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.

Ο παραπάνω στόχος αφορά και το σκυρόδεμα. 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.

Μέχρι το 1900 περίπου χρησιμοποιούντο ίνες από αμίαντο για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του μίγματος του τσιμέντου. Αργότερα αναπτύχθηκαν οι χαλύβδινες ίνες και έκτοτε έχουν αναπτυχθεί πολλά ακόμη είδη ινών. Στα πρώτα στάδιά τους, οι ίνες ήταν ευθείες και ομαλές με σκοπό την αύξηση της αντοχής και της δυσθραυστότητας του σκυροδέματος. Οι βασικότεροι παράγοντες που παίζουν ρόλο για το σκοπό αυτό είναι η ποσότητα των ινών και ο λόγος μήκος προς διάμετρο. Διάφορα προβλήματα όμως προέκυψαν κατά τη μίξη και ως προς την τελική εργασιμότητα του μίγματος. Το φαινόμενο που διαπιστώθηκε ήταν η συσσωμάτωση των ινών κατά τη μίξη κάνοντας το σκυρόδεμα λιγότερο εργάσιμο, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την ποιότητα του σκυροδέματος και την αντοχή του.

Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα κατοχυρώθηκε το 1874 στην Καλιφόρνια από τον A. Berard. Η ιδέα ήταν να ενισχυθεί το σκυρόδεμα με προσθήκη παλαιοσίδερων ως οπλισμό. Το 1910 ο Porter πρότεινε τη χρήση λεπτών συρμάτων στο σκυρόδεμα για αύξηση της ομοιογένειας του. Έπειτα, το 1918 στη Γαλλία ο H. Alfsen σε δική του ευρεσιτεχνία πρότεινε τη μίξη ινών μεγάλου μήκους από χάλυβα, ξύλο ή άλλα υλικά στο σκυρόδεμα για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του. Επίσης, λαμβάνει υπόψη την επιφάνεια των ινών και την αγκύρωσή τους στη μάζα του σκυροδέματος. Έπειτα, ακολούθησαν νέες ευρεσιτεχνίες σχετικά με τις μορφές των ινών αλλά και τις πιθανές εφαρμογές τους (G. C. Martin, Καλιφόρνια 1927, παραγωγή σωλήνων με χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος κλπ) (εικόνα 1.1). Εκτεταμένη όμως χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν είχε καθιερωθεί κυρίως λόγω του υψηλού του κόστους, της ταχύρυθμης ανάπτυξης του οπλισμένου σκυροδέματος και της μη ύπαρξης κατάλληλων εγκαταστάσεων δοκιμών.



Εικόνα 1.1: Κατοχυρωμένη ευρεσιτεχνία του G. C. Martin, 1927 (Maidl, 1995)

Στις αρχές του 1960 ξεκίνησε μια νέα εποχή για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα καθώς πραγματοποιούνταν δοκιμές με πλαστικές ίνες, με ή και χωρίς χάλυβα ή δομικά πλέγματα. Παράλληλα με τις δοκιμές αυτές, το εύρος των εφαρμογών του ινοπλισμένου σκυροδέματος όλο και διευρυνόταν. Τα πρώτα πειράματα πραγματοποιήθηκαν το 1971 στα εργαστήρια Columbus του Battelle Memorial Institute. Η πρώτη εφαρμογή δεν άργησε και πραγματοποιήθηκε το 1972 για τη σταθεροποίηση πρανούς σε είσοδο σήραγγας στο Idaho. Στη Γερμανία οι πρώτες εφαρμογές ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε υπόγειο στρατιωτικό έργο έγιναν το 1974. Έπειτα έγινε χρήση σε εσωτερικές επενδύσεις του υπόγειου σιδηροδρόμου της Φρανκφούρτης με ίνες χάλυβα (1987) καθώς και στο Bielefeld (1989) με επιτυχία. Συνθετικές ίνες αναπτύχθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του ’90 και έκτοτε χρησιμοποιούνται για τους ίδιους σκοπούς με τις χαλύβδινες.

Σήμερα, πολλά είδη ινών, διαφορετικού σχήματος και ιδιοτήτων έχουν καθιερωθεί και χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών είτε σε εκτοξευόμενο είτε σε έγχυτο σκυρόδεμα επεκτείνοντας τα οφέλη από τη χρήση τους. Όλες αυτές οι ίνες με τα πιο περιπλεγμένα σχήματα και μεγέθη αναπτύχθηκαν κυρίως για να επιτευχθεί καλύτερη σύνδεσή τους με το σκυρόδεμα. Όταν μια ίνα προστίθεται στο μίγμα του σκυροδέματος επικαλύπτεται από μια μικρή ποσότητα αυτού. Οι τροποποιήσεις στο σχήμα των ινών, δηλαδή ίνες με πεπλατυσμένα άκρα κλπ, αυξάνουν την ισχύ του δεσμού της ίνας μέσα στο σκυρόδεμα χωρίς να αυξάνουν το μήκος ενώ μειώνουν και την χημική αντίδραση μεταξύ τσιμέντου και ίνας. Τελικά βελτιστοποιούνται οι μηχανικές ιδιότητες του μίγματος και η συμπεριφορά του στις διάφορες εφαρμογές.

Τέλος, οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί με πρόσθετα και πρόσμικτα εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και με κάθε είδους τσιμέντο παράγοντας κάθε φορά το επιθυμητό αποτέλεσμα.

2. Πεδία 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, όπως:

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

Οι εφαρμογές εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος έργων:

3. Υπόγεια έργα

3.1 Σήραγγες

Η υποστήριξη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι μια από τις πιο βασικές μορφές υποστήριξης πλέον στην διάνοιξη των σηράγγων. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται με πλέγμα για οπλισμό και σε συνδυασμό με αγκύρια ή και πλαίσια. Το βασικό του πλεονέκτημα έναντι του εκτοξευόμενου σκυροδέματος με συμβατικό οπλισμό είναι ότι μειώνεται ο συνολικός χρόνος για την εκτέλεση της εργασίας συνδυάζοντας μεγαλύτερα επίπεδα ασφάλειας για το προσωπικό.

Εικόνα 1.2: Προσωρινή υποστήριξη σήραγγας με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (ΕΤΑΛ)

Στις κατασκευές μονού κελύφους η προσωρινή υποστήριξη αποτελεί μέρος της τελικής επένδυσης. Συνήθως αποτελείται από πολλές στρώσεις σκυροδέματος καθότι αυτό δε μπορεί να διαστρωθεί με μία φορά σε ικανό για τελική επένδυση πάχος. Οι διαδοχικές στρώσεις δε διαχωρίζονται από παρεμβύσματα ή μεμβράνη κι έτσι αποτελεί ένα σύνθετο ενιαίο υλικό που αντιδρά ομοιόμορφα στις φορτίσεις που δέχεται.

Βέβαια, η κατασκευή της προσωρινής, ή ακόμη και της τελικής επένδυσης μιας σήραγγας, δεν είναι η μοναδική εφαρμογή του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος. Συχνή χρήση γίνεται και για την επισκευή επενδύσεων παλαιών σηράγγων, που μπορεί να είναι και λιθόκτιστες. Παράδειγμα εφαρμογής είναι η σήραγγα Baker στο Tennessee των ΗΠΑ που αποκαταστάθηκε με χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Πρόκειται για μια σιδηροδρομική σήραγγα ηλικίας 80 ετών περίπου. Το σκυρόδεμα εκτοξεύθηκε της παρειές και στη στέψη για την αποφυγή καταπτώσεων. Η ποσότητα των χαλύβδινων ινών που προστέθηκαν στο μίγμα ήταν της τάξης των 50kg/m^3 (Novocon 2000).

Τέλος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στη διάνοιξη σηράγγων με τη μέθοδο της περιφερειακής πρότμησης (premill ή pre-cutting, εικόνα 1.3). Το πέτρωμα κόβεται περιφερειακά της διατομής της σήραγγας και μπροστά από το μέτωπο με διάταξη παρόμοια της συρματοκοπής. Στη συνέχεια το κενό που δημιουργείται γεμίζει με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και έτσι έχει δημιουργηθεί η επένδυση της σήραγγας πριν γίνει ακόμη η εκσκαφή.

Εικόνα 1.3: Σιδηρόδρομος υψηλής ταχύτητας Valdarno – Arrezzo (Ιταλία) (Dramix, 2004)

3.2 Υπόγειοι θάλαμοι

Σήμερα οι υπόγειοι θάλαμοι χρησιμοποιούνται για πολλούς σκοπούς, όπως αθλητικές εγκαταστάσεις, αποθηκευτικοί χώροι, ενεργειακοί σταθμοί αλλά και σαν εγκαταστάσεις αποθήκευσης αποβλήτων. Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί ένα πολύ ικανό μέτρο υποστήριξης χάριν στα υψηλά επίπεδα παραμένουσας αντοχής που παρουσιάζει, δηλαδή της αντοχής του μετά την θραύση του πλέγματος του τσιμέντου.

Εκτός όμως από τους υπόγειους θαλάμους, που διανοίγονται τεχνητά, το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται και για την υποστήριξη φυσικών σπηλαίων. Η εκμετάλλευσή τους ξεκίνησε από τη Σκανδιναβία και πλέον είναι παγκοσμίως διαδεδομένη.

3.3 Μεταλλευτικά έργα

Η διαφορά των μεταλλευτικών έργων από τα υπόλοιπα έργα πολιτικού μηχανικού, ως προς τον τομέα της υποστήριξης των υπόγειων ανοιγμάτων, έχει να κάνει με το γεγονός ότι τα πρώτα πρέπει να αντέξουν σε μεγάλα επίπεδα συγκλίσεων που

προκαλούνται από την αύξηση του τασικού πεδίου που ασκείται λόγω της προχώρησης της εκμετάλλευσης (Vandewalle).

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στα μόνιμα έργα του μεταλλείου (φρέατα, κεκλιμένα κά). Προσφέρει υψηλά επίπεδα παραμορφωσιμότητας στην επένδυση, δηλαδή παραλαμβάνει φορτίσεις λόγω των συγκλίσεων, χωρίς όμως να τις περιορίζει υπερβολικά. Έτσι λόγω της ανακατανομής των τάσεων αυξάνει και την φέρουσα ικανότητά του διαμορφώνοντας τελικά ένα περιβάλλον εργασίας ασφαλέστερο για το προσωπικό. Πολύ σημαντικό επίσης στοιχείο είναι ότι με τη μέθοδο αυτή καταργείται η ανάγκη για τοποθέτηση πλέγματος στις παρειές της σήραγγας. Αποτέλεσμα είναι η εξοικονόμηση νεκρού χρόνου, δηλαδή χρόνου κατά τον οποίο οι εκτελούμενες εργασίες δε συμβάλουν στην προχώρηση της σήραγγας, γεγονός πολύ ευνοϊκό για το κόστος της εκμετάλλευσης.

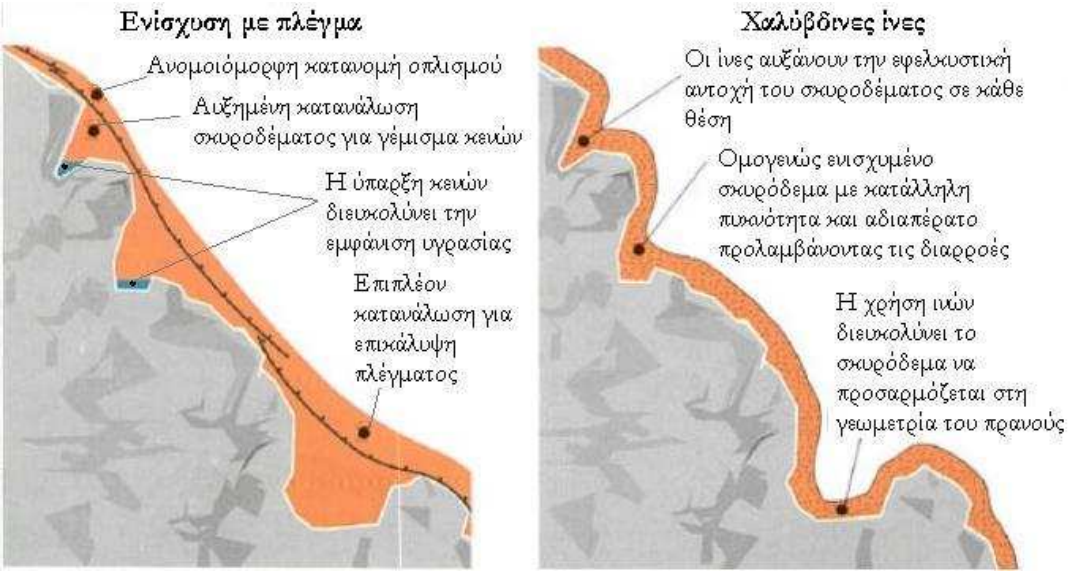
Τα μίγματα που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι τα ξηρά διότι η τεχνολογία μίξης και εκτόξευσής τους απαιτεί σαφώς λιγότερο χώρο σε σχέση με τα υγρά. Έτσι, δεδομένου ότι ο διαθέσιμος χώρος είναι περιορισμένος στα υπόγεια, η ξηρή μίξη διευκολύνει την ροή εργασιών. Επιπλέον, η απαίτηση για σκυρόδεμα δεν είναι συνεχής ενώ συνήθως είναι και περιορισμένη, συνεπώς η υγρή μίξη δεν είναι κατάλληλη για μια τέτοια εφαρμογή.

Παράδειγμα αποτελεί το μεταλλείο Premier Mine, στην Νότια Αφρική. Σε βάθος 600 m, το υπόγειο άνοιγμα έχει πλάτος 4 m και ύψος 4,2 m. Το απαιτούμενο πάχος του κελύφους είναι από 5 έως 20 cm, ανάλογα με τη θέση. Σε αυτήν την περίπτωση, το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτέλεσε μια πολύ καλή εναλλακτική λύση. Η μίξη που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ξηρή και η εκτόξευση έγινε με πίεση 3 έως 5,5 bar. Η αντοχή μονοαξονικής θλίψης ήταν μεταξύ 25 και 35 MPa έπειτα από 28 μέρες.

4. Έργα στην επιφάνεια

4.1 Πρανή

Εδαφικά και βραχώδη πρανή μπορούν να σταθεροποιηθούν με τη χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με ικανοποιητικά αποτελέσματα αλλά και με μειωμένο συγκριτικό κόστος σε σχέση με το συνδυασμό πλέγματος-εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται στο ότι μειώνονται οι απαιτούμενες εργασίες και η ποσότητα του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 1.4: Τομή επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, αριστερά με πλέγμα και δεξιά με ίνες (Bekaert Corp., 2002)

Οι αρχές που βασίζεται η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος στα πρανή δε διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τη χρήση στα υπόγεια. Αναλυτικά αυτά που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό είναι:

- Ύψος και κλίση πρανούς.
- Τραχύτητα της επιφάνειας του πρανούς.
- Υδροφορία πρανούς.
- Πιθανή χρήση αγκυρίων.
- Εκτιμώμενες γεωπιέσεις και πιθανή δημιουργία φαινομένου τοξωτής λειτουργίας
- Επιρροή κλιματολογικών συνθηκών όπως ηλιακή ακτινοβολία, υγρασία, πάγος. Αυτές είναι ικανές να προκαλέσουν ακόμη και θραύση του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ειδικά μίγματα.

Εικόνα 1.5: Επένδυση πρανούς με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χρωματισμό

Σε κάθε πρανές πρέπει να είναι γνωστές οι συνθήκες φόρτισης που επικρατούν. Αυτές είναι που καθορίζουν το είδος της ίνας που πρέπει να χρησιμοποιηθεί και τη

βέλτιστη ποσότητά τους στο μίγμα. Πλέον είναι κοινή πρακτική η χρήση πυριτιακής παιπάλης, είτε στα υγρά είτε στα ξηρά μίγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, όταν αυτό πρόκειται να διαστρωθεί σε σκληρή επιφάνεια. Ο λόγος χρήσης της είναι ότι αυξάνει τη συνοχή μεταξύ σκυροδέματος και πετρώματος κι έτσι υπάρχει μια πολύ καλύτερη συνάφεια μεταξύ τους, ακόμη κι όταν έχουμε επιφάνειες με μεγάλη κλίση.

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει παγκοσμίως πολλές πετυχημένες εφαρμογές. Παράδειγμα αποτελεί η σταθεροποίηση δύο πρανών ύψους 60 και 57 μέτρων αντίστοιχα στο New Jersey των ΗΠΑ όπου χρησιμοποιήθηκαν 180 m^3 ινοσκυροδέματος σε βραχώδεις έντονα διακλασμένους σχηματισμούς.

4.2 Τοίχοι αντιστήριξης

Η αστική ανάπτυξη συχνά επιβάλει την εκσκαφή μεγάλων περιοχών και την δημιουργία κατακόρυφων πρανών. Αυτά για να αντιστηριχτούν και να περιοριστούν στο ελάχιστο οι καθιζήσεις και οι βλάβες στις γειτονικές κατασκευές, απαιτούνται κατάλληλοι τοίχοι. Η συνδυασμένη χρήση αγκυρίων και ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα ακόμη και για υψηλούς τοίχους δίνοντας τη δυνατότητα στην εκσκαφή να φθάσει σε μεγάλο βάθος.

Εικόνα 1.6: Διαφραγματικός τοίχος, Λουκέρνη (Ελβετία) (Dramix, 2004)

4.3 Αποκατάσταση κατασκευών

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία και στην επισκευή σηράγγων, κτηρίων και λοιπών κατασκευών. Μεγάλο ενδιαφέρον για την Ελλάδα έχουν οι εφαρμογές που έχουν να κάνουν με την επισκευή κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος λόγω σεισμών ή ακόμη και η αντισεισμική

θωράκισή τους με μανδύες ινοπλισμένου σκυροδέματος υπερυψηλής αντοχής. Είναι τουλάχιστον εξίσου αποτελεσματικοί με τους συμβατικούς μανδύες από οπλισμένο σκυρόδεμα και αρκετά αποτελεσματικότεροι από τους μανδύες από σύνθετα υλικά FRPs όταν χρησιμοποιούνται για την αντισεισμική ενίσχυση δομικών στοιχείων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Κατσικογιάννη, 2004).

Εξίσου μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό περιλαμβάνει δύο μεγάλες κατηγορίες, τα προκατασκευασμένα στοιχεία ινοσκυροδέματος και το έγχυτο σκυρόδεμα. Στα υπόγεια έργα και οι δύο μορφές του βρίσκουν εφαρμογή στην κατασκευή της υποστήριξης.

5. Μόνιμη Επένδυση

5.1 Προκατασκευασμένα στοιχεία

Τα προκατασκευασμένα τόξα σκυροδέματος (segments) χρησιμοποιούνται ως κομμάτια της τελικής επένδυσης της σήραγγας όταν αυτή διανοίγεται με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής (TBM). Τα στοιχεία αυτά έρχονται συνήθως έτοιμα στο εργοτάξιο και συναρμολογούνται από τα μηχανήματα σε δακτυλίου. Το πλεονέκτημα χρήσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος για το σκοπό αυτό είναι η ομοιομορφία του τελικού προϊόντος και η κατάργηση του συμβατικού οπλισμού που απαιτείται για την παρασκευή του.

Εικόνα 1.7: Συμβατικός οπλισμός προκατασκευασμένου στοιχείου σκυροδέματος (Dramix, 2004)

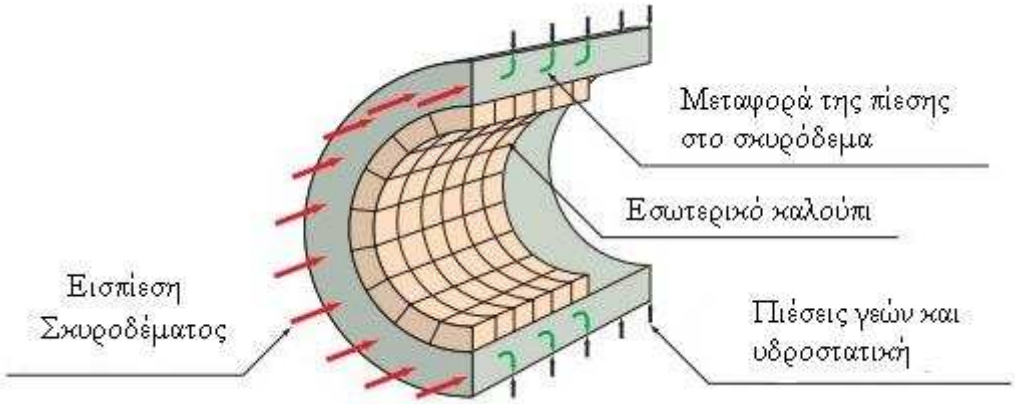
Ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανθεκτικότερο και περιορίζει την πιθανότητα εκδήλωσης ρωγμάτωσης είτε κατά την μεταφορά του είτε κατά την τοποθέτηση, είτε στο στάδιο της μόνιμης λειτουργίας.

Εικόνα 1.8: Σήραγγα επενδεδυμένη με προκατασκευασμένα στοιχεία ινοσκυροδέματος (Dramix, 2004)

5.2 Έγχυτο σκυρόδεμα

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται για την κατασκευή της τελικής επένδυσης σήραγγας, κατά τρόπο όμοιο με το συμβατικό, με τη διαφορά ότι απουσιάζει ο οπλισμός και τη θέση του παίρνουν οι ίνες. Μεταξύ της προσωρινής και τελικής επένδυσης μπορεί να υπάρχει και μεμβράνη, ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου. Η μέθοδος αυτή προσφέρει εύκολη κατασκευή, πιο ομοιογενές υλικό ενώ η απουσία οπλισμού καταργεί την ανάγκη για την επικάλυψή του. Η γερμανική σιδηροδρομική εταιρία (D.B.) υιοθέτησε τη χρήση της παραπάνω μεθόδου για την κατασκευή της τελικής επένδυσης με χαλύβδινες ίνες.

Στην περίπτωση που η σήραγγα ορύσσεται με μηχάνημα ολομέτωπης κοπής και πάλι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή της τελικής επένδυσης. Στην ουρά του μηχανήματος συνεχώς εισπιέζεται ινοπλισμένο σκυρόδεμα διαμορφώνοντας την επένδυση. Η μέθοδος αναπτύχθηκε από την γερμανική εταιρία Hochtief. Επιτυγχάνεται άμεση παραλαβή φορτίων από την επένδυση και το αποτέλεσμα είναι ο περιορισμός των καθιζήσεων. Για το λόγο αυτού του είδους οι σήραγγες αναφέρονται και ως προεντεταμένες (prestressed) που δεν επιτρέπουν την αποτόνωση της βραχομάζας.



Εικόνα 1.9: Περιορισμός των συγκλίσεων με τη μέθοδο εξώθησης επένδυσης σκυροδέματος

6. Άλλες εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος

Οι εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος επεκτείνονται όμως και πέρα από τη σηραγγοποιία σε πλήθος ακόμη κλάδων του κατασκευαστικού τομέα. Στα πρώτα στάδια χρησιμοποιήθηκε για κατασκευή αεροδιαδρόμων. Στις Η.Π.Α. 28 αεροδιάδρομοι κατασκευάστηκαν με ίνες χάλυβα διαφορετικών ειδών, σε περιεκτικότητα από 0,3 έως 2% στο διάστημα μεταξύ 1972 και 1980 (Lankard). Κατά τη διάρκεια ζωής των έργων αυτών, μόνο αραιές ρωγμές και τοπικές ζημιές παρατηρήθηκαν.

Στο αεροδρόμιο O'Here του Σικάγο των ΗΠΑ χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των αεροδιαδρόμων ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Οι χαλύβδινες ίνες προστέθηκαν σε μια ποσότητα της τάξης των 50 kg/m^3 ενώ για πάχος της τάξης των 300 mm επιτυγχάνονται πολύ καλά αποτελέσματα ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά του.

Εικόνα 1.10: Αεροδρόμιο O'Here, Σικάγο (Synthetic Industries Concrete Company, 2000)

Επιπλέον εφαρμογή βρίσκει και στην κατασκευή βιομηχανικών, λιμενικών και λοιπών δαπέδων που καταπονούνται έντονα από κάθε είδους φορτία. Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι κατασκευές τέτοιου είδους δαπέδων παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή στο χρόνο σε σύγκριση με τα δάπεδα με συμβατικό οπλισμό. Είναι πιο ανθεκτικά σε εφελκυσμό και κρούση, ανθίστανται στη διάβρωση ενώ με κατάλληλες τεχνικές αποφεύγεται και η συστολή ξήρανσης. Τα πλεονεκτήματα αυτά αποδίδονται στο ότι οι ίνες επιτρέπουν την ελεγχόμενη μικρορωγμάτωση, η οποία όμως δεν προχωρά σε βάθος, κάνοντας τελικά το σκυρόδεμα πιο πλαστικό. Επίσης η κατασκευή γίνεται πιο γρήγορη και υπό προϋποθέσεις πιο οικονομική. Τέλος, ο συμβατικός οπλισμός έχει το μειονέκτημα ότι απαιτεί προσεκτική τοποθέτηση. Αντίθετα οι ίνες που αναμιγνύονται στο σκυρόδεμα κι έτσι προσανατολίζονται τυχαία στον τριδιάστατο χώρο και προσφέρουν ένα ομοιογενές υλικό.

Εικόνα 1.11: Βιομηχανικό δάπεδο (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 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).

Εικόνα 1.12: 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΔΗ ΙΝΩΝ

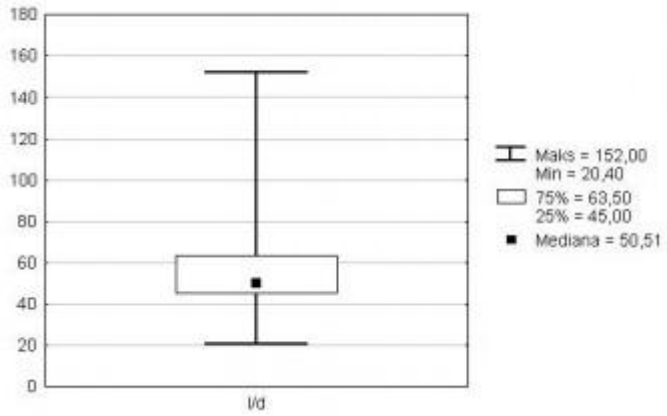
1. Γενικά στοιχεία

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 (Keyvani, 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).

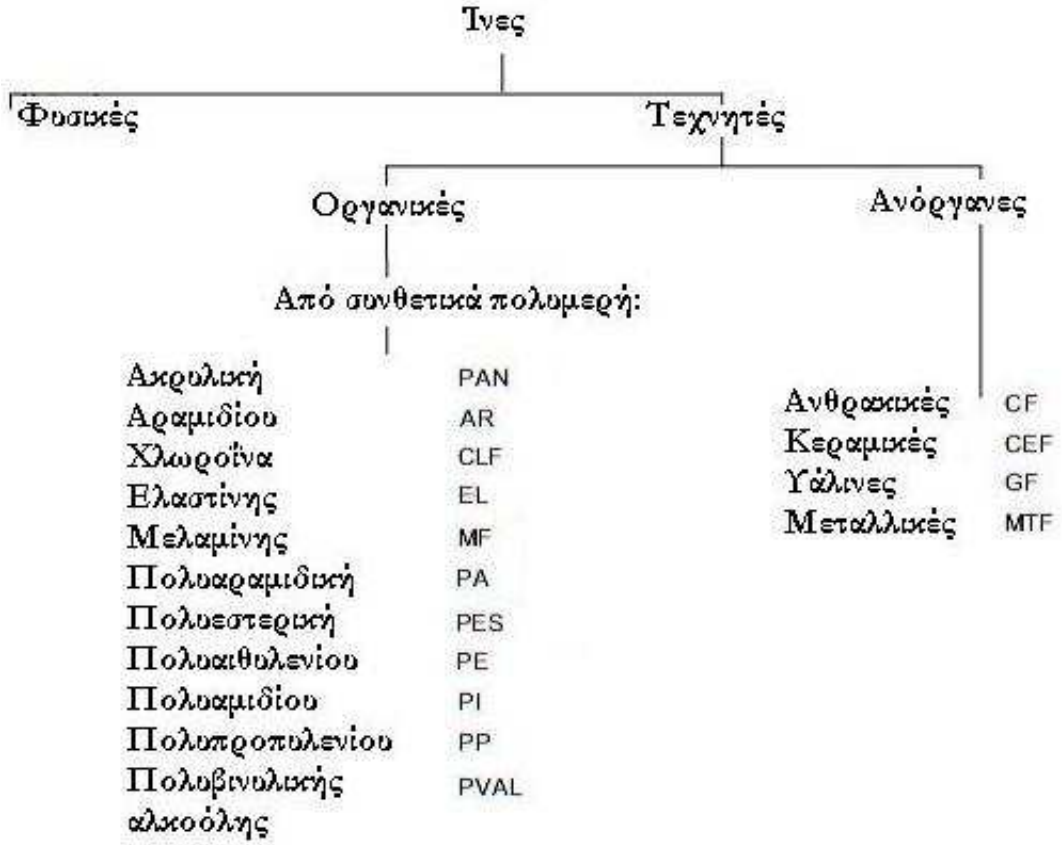
Η αποτελεσματικότητα των ινών ως μέσα ενίσχυσης του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από το είδος που χρησιμοποιείται αλλά από ένα πλήθος παραγόντων. Ο πιο σημαντικός από αυτούς είναι ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο, γνωστός και ως λόγος μορφής (aspect ratio ή l/d). Το μέγεθος αυτό είναι αδιάστατο 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. Στο διάγραμμα 2.1 παρουσιάζεται στατιστική ανάλυση από παγκόσμια δεδομένα για την τιμή του λόγου μορφής. Οι διαθέσιμες ίνες παράγονται με τιμές από 20,4 έως 152. Όπως το διάγραμμα εξηγεί, το 25 % των ινών ανήκει στο διάστημα μεταξύ 20,4 και 45, το 50% στο διάστημα 45 έως 63,5 και τέλος το υπόλοιπο 25% στο διάστημα 63,5 έως 152. Η κεντρική τιμή (διάμεσος) της κατανομής είναι 50,51.



Διάγραμμα 2.1: Κατανομή τιμών λόγου μορφής και κεντρική τιμή περίπου 50.5 (Katzer, 2006)

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).

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:



Πίνακας 2.2: Τα βασικότερα είδη τεχνητών ινών (BISFA, 2009)

Σύμφωνα με το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI Committee 544) υπάρχουν τέσσερις κατηγορίες ινοπλισμένου σκυροδέματος, ανάλογα με το υλικό της ίνας. Έτσι έχουμε τις ίνες από χάλυβα (SFRC), από ύαλο (GFRC), από συνθετικά υλικά,

συμπεριλαμβανομένου και του άνθρακα, (SNFRC) ή από φυσικά υλικά (NFRC). Στον πίνακα 2.3 φαίνονται επιλεγμένα είδη ινών.

Είδος Ίνας	**Ειδικό βάρος**	**Διάμετρος, μm (0.001 in.)**	**Αντοχή σε εφελκυσμό, MPa (ksi)**	**Μέτρο ελαστικότητας, MPa (ksi)**	**Τροπή στην αστοχία, %**
Χαλύβδινες	7.80	100-1,000 (4-40)	500-2,600 (70-380)	210,000 (30,000)	0.5-3.5
Υάλου					
E	2.54	8-15 (0.3-0.6)	2,000-4,000 (290-580)	72,000 (10,400)	3.0-4.8
AR	2.70	12-20 (0.5-0.8)	1,500-3,700 (220-540)	80,000 (11,600)	2.5-3.6
Συνθετικές					
Ακριλικές	1.18	5-17 (0.2-0.7)	200-1,000 (30-145)	17,000-19,000 (2,500-2,800)	28-50
Αραμιδικές	1.44	10-12 (0.4-0.47)	2,000-3,100 (300-450)	62,000-120,000 (9,000-17,000)	2-3.5
Ανθρακικές	1.90	8-0 (0.3-0.35)	1,800-2,600 (260-380)	230,000-380,000 (33,400-55,100)	0.5-1.5
Νάιλον	1.14	23 (0.9)	1,000 (140)	5200 (750)	20
Πολυεστερικές	1.38	10-80 (0.4-3.0)	280-1,200 (40-170)	10,000-18,000 (1,500-2,500)	10-50
Πολυαιθυλενίου	0.96	25-1,000 (1-40)	80-600 (11-85)	5,000 (725)	12-100
Πολυπροπυλενίου	0.90	20-200 (0.8-8)	450-700 (65-100)	3,500-5,200 (500-750)	6-15
Φυσικές					
Ξύλινες	1.50	25-125 (1-5)	350-2000 (51-290)	10,000-40,000 (1,500-5,800)	
Σιζάλ			280-600 (40-85)	13,000-25,000 (1,900-3,800)	3.50
Καρύδας	1.12-1.15	100-400 (4-16)	120-200 (17-29)	19,000-25,000 (2,800-3,800)	10-25

Μπαμπού	1.50	50-400 (2-160)	350-500 (51-73)	33,000-40000 (4,800-5,800)	
Κόρχορος (γιούτα)	1.02-1.04	100-200 (4-8)	250-350 (36-51)	25,000-32,000 (3,800-4,600)	1.5-1.9
Ελεφαντόχορτο		425 (17)	180 (26)	4,900 (750)	3.60

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες επιλεγμένων ινών [PCA (1991) και ACI 544.1R]

Όνομα Ίνας	**Υλικό**	**Κόστος**	
		DM/kg	1%(κατ' όγκο) (DM/m^3)
	Χαλύβδινη	2	157
Cemfil II	Υάλου Α	10	260
Dolanite 10	Ακριλική	6.5	77
Fortafibre	Πολυπροπυλενίου	20	180
Kuralon	Πολυβινυλικής Αλκοόλης	12	156
Sigafril	Ανθρακική	50	825

Πίνακας 2.4: Κόστος ινών στις αρχές του 1990 (Maidl, 1995)

Είδος Ίνας	**Ειδικό βάρος g/cm^3**	**Διάμε-τρος, mm**	**Αντοχή σε εφελκυσμό, MPa**	**Μέτρο ελαστικότη-τας, MPa**	**Αντοχή σε αλκάλια**	**Κόστος DM/kg**
Χαλύβδινες	7.8	<1.00	400-1,500	200,000	++	1.5-2.5
Υάλου Α	2.7	<0.02	2,500	<80,000	+	approx. 10
Υάλου Ε	2.6	<0.02	2,000-3,500	<80,000	-	5-8
Πολυακρι-λο-νιτριλική	1.2	<0.18	900-1,000	17-20,000	++	approx. 8
Πολυαρα-μιδική	1.4	<0.012	3,000	<130,000	(+)	50-100
Πολυπροπυ λενίου	0.9	<0.15	600-700	<18,000	++	approx. 6
Αμιάντου	2.6	<0.0001	3,500	160,000	++	1-2
Ανθρακικές	1.6-1.9	<0.018	450-4,000	30-400,000	++	40-150
Ανρακοπυ-ρίτιο	2.6	<0.15	900-3,600	100-400,000	++	900-3,000
Ινοκρύσταλ-λοι πυριτίου	3.2	<0.001	<10,000	<420,000	++	600
Κυτταρίνη	1.5	<0.006	200-1500	5-40,000	-	1-2

Πίνακας 2.5: Ιδιότητες ινών διαφορετικών υλικών (Maidl, 1995)

Το κόστος ανά μονάδα βάρους δεν πρέπει να αποτελεί την βάση για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους αλλά το κόστος ανά μονάδα όγκου. Σημαντική

διαφορά προκύπτει μεταξύ ινών με μεγάλη απόκλιση στο ειδικό τους βάρος. Επιπλέον, αν το κόστος συσχετίζεται και με την απόδοση των ινών, κι αυτός ο παράγοντας πρέπει να ληφθεί υπόψη.

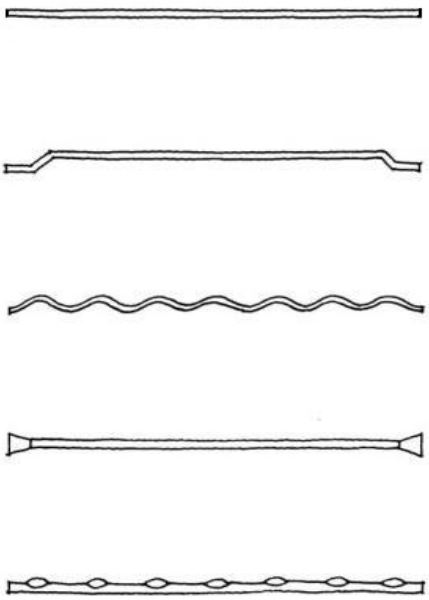
2. Χαλύβδινες Ίνες

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 (Bentur and 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 ανθρακούχοι 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).

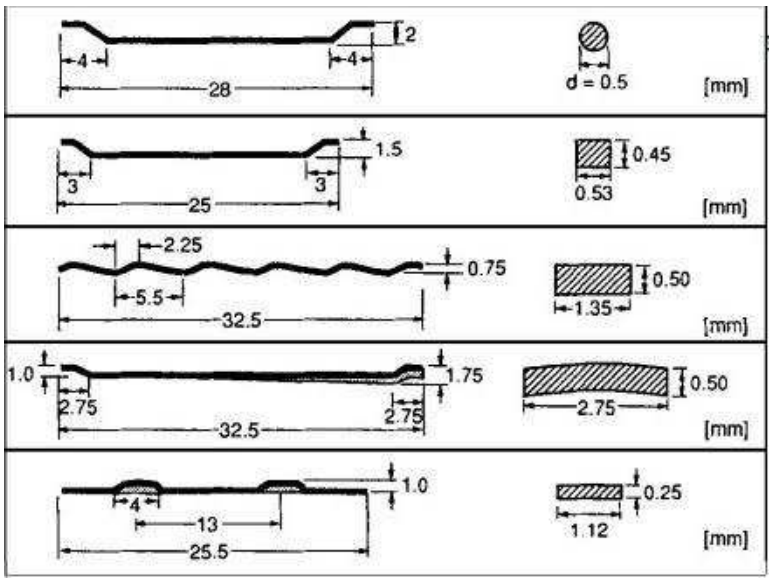
Η ASTM (American Society for Testing and Materials) έχει κατηγοριοποιήσει τις χαλύβδινες ίνες, σύμφωνα με το πρότυπό της A 820, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής τους σε πέντε κατηγορίες, αναθεωρώντας από τις τέσσερις που προέβλεπε παλαιότερα. Ο τύπος I είναι οι ίνες ψυχρής ολκής και είναι εμπορικά ο πιο 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 (mill cut). 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 ή παραμορφωμένες. 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 (εικόνα 2.6) που συνήθως χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του έργου.



Εικόνα 2.6: Κύρια προφίλ ινών (κατά σειρά): Επίπεδο, με γαντζωτά άκρα, κυματοειδές, με κωνικά άκρα, μηχανικά παραμορφωμένο

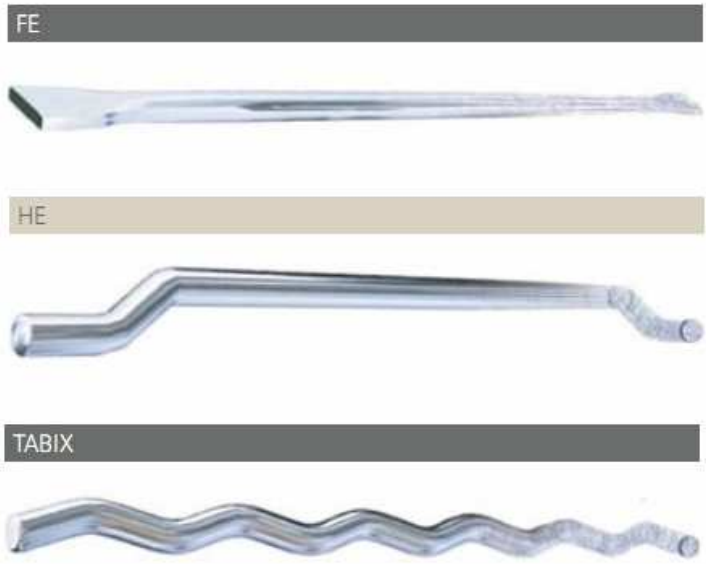
Ειδικότερα για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ενδεικτικές ίνες χάλυβα που χρησιμοποιούνται, με τις αντίστοιχες διαστάσεις τους, φαίνονται στην εικόνα 2.7.



Εικόνα 2.7: Παραδείγματα χαλύβδινων ινών για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Banthia, 1999)

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 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 επιδώσεις, 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.

Ειδικότερα, η εταιρία ArcelorMittal παράγει πολλά είδη χαλύβδινων ινών (εικόνα 2.8), καθένα από το οποίο αποδίδει καλύτερα για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Για εργασίες εκτοξευόμενου σκυροδέματος προτείνει τα τρία παρακάτω είδη ινών (εικόνα 2.8).



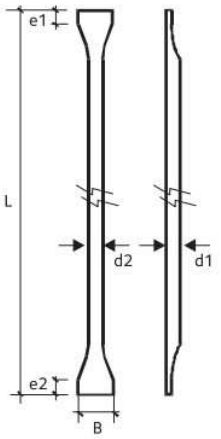
Εικόνα 2.8: Προτεινόμενες ίνες για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα της ArcelorMittal

Οι παραπάνω ίνες έχουν κατά σειρά ως εξής:

- Ίνα με πεπλατυσμένα άκρα (Flat End) για βέλτιστη συνοχή στο μίγμα του σκυροδέματος και ελαχιστοποίηση της αναπήδησης. Έχει αντοχή σε εφελκυσμό 1.200 MPa. Προτείνεται από τον παρασκευαστή λόγος μήκους προς πλάτος 45,54 με διάμετρο 0,65 έως 0,67 mm και μήκος από 30 έως 35 mm.
- Ίνα με γαντζωτά άκρα (Hooked End). Συνηθισμένη δοσολογία για το σκυρόδεμα είναι της τάξης των 25 έως 50 kg/m^3, ανάλογα με το είδος και την κατάσταση του εδάφους που θα εφαρμοστεί. Περιορίζει την αναπήδηση και έχει αντοχή σε εφελκυσμό 1.200 MPa. Προτείνεται από τον παρασκευαστή λόγος μορφής 47,64 με διάμετρο 0,55 έως 0,75 mm και μήκος 35 mm.
- Ίνα τύπου Tabix, είναι κυματοειδής (πτυχωμένη μορφή) με τυπική εφελκυστική αντοχή της τάξης των 1.100 MPa. Προτείνεται από τον παρασκευαστή λόγος μορφής 39 με διάμετρο 0,9 mm και μήκος 35 mm.

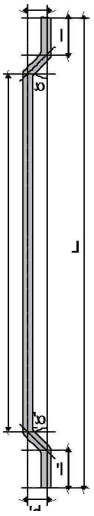
Οι τύποι αυτοί με τις αντίστοιχες διαστάσεις τους και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται παρακάτω.

FE 65/35



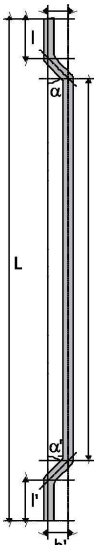
d=0,65 mm ±0,04 mm
d_1>0,50 mm
d_2>0,90 mm
L=35 mm +2/-3 mm
B=>1,30 mm
e1 & e2=1,50 mm ±1,50 mm
L/d=54
Ίνες/kg=10.900
Συνολικό μήκος ινών/10kg=3.841 m
Αντοχή σε εφελκυσμό=1.150 MPa

HE 55/35



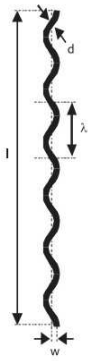
d=0,55 mm ± 0,04 mm
L=35,0 mm + 2/-3 mm
l και l'=1 - 4mm
h και h'=1,80 mm +1/-0 mm
α και α'=45° min 30°
L/d=64
Ίνες/kg=15.300
Συνολικό μήκος ινών/10kg=5.365 m
Αντοχή σε εφελκυσμό=1.100 MPa

HE 75/35



d=0,75 mm ± 0,04 mm
L=35,0 mm + 2/-3 mm
l και l'=1 - 4mm
h και h'=1,80 mm +1/-0 mm
α και α'=45° min 30°
L/d=47
Ίνες/kg=8.200
Συνολικό μήκος ινών/10kg=2.885 m
Αντοχή σε εφελκυσμό=1.100 MPa

Tabix 90/35



d=0,90 mm ± 0,04 mm
l=35,0 mm + 2/-3 mm
w=0,40 - 0,65 mm
λ=8,00 mm
l/d=47
Ίνες/kg=8.200
Συνολικό μήκος ινών/10kg=5.700 m
Αντοχή σε εφελκυσμό=2.003 MPa

Εικόνα 2.9: Οι ίνες συσκευάζονται σε κουτιά των 25 kg ή σε μέγα σάκους των 500 ή 1.000 kg, ενώ απαγορεύεται η τοποθέτηση της μιας παλέτας πάνω στην άλλη (ArcelorMittal)

Οι παραπάνω ίνες πληρούν τις προδιαγραφές και τα απαιτούμενα πρότυπα: EFNARC, SIA, ASTM A 820 type I, EN 14889-1 type I.

Στην πράξη επιθυμούμε τη 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

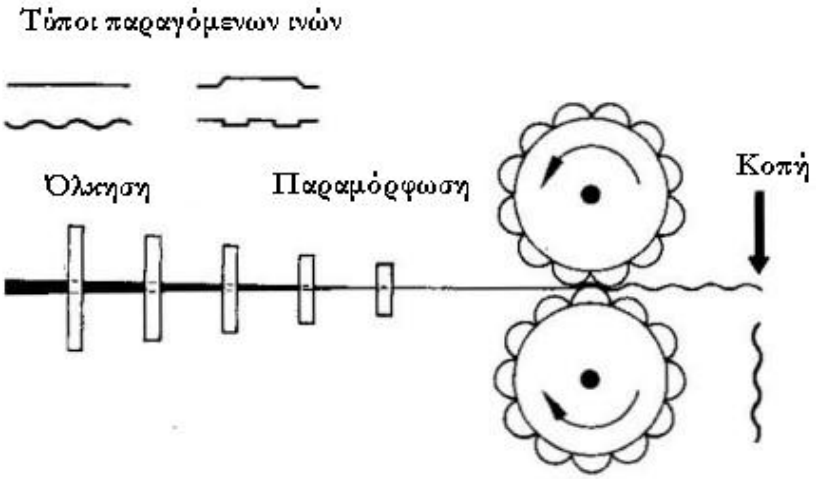
διότι βρίσκονται διασκορπισμένες τυχαία στο μίγμα κι έτσι η διάβρωση μπορεί να επηρεάσει αυτές που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια. Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ισχύει ότι ίνες που έχουν μια επικάλυψη πάνω από 1 mm δεν αλλοιώνονται. Έτσι, η διάβρωση των ινών θεωρείται ένα μη σοβαρό πρόβλημα καθώς δεν επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

2.1 Παραγωγή Χαλύβδινων Ινών

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

I. <u>*Συρματοποίηση*</u>

Οι ίνες από σύρματα παράγονται περνώντας μέσα από ειδική μήτρα. Η διαδικασία συρματοποίησης περιλαμβάνει την ολκή ενός ακατέργαστου σύρματος μέσω κωνικών οπών έως ότου επιτευχθεί η απαιτούμενη διάμετρος. Το σύρμα έπειτα τροφοδοτείται μέσω δύο αντιθέτως περιστρεφόμενων κυλίνδρων για να αποκτήσει την απαραίτητη μορφή. 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. Στην εικόνα 2.10 παρουσιάζει σχηματικά αυτή η διαδικασία παραγωγής και μερικές από τις μορφές ινών που μπορούν να προκύψουν. 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.

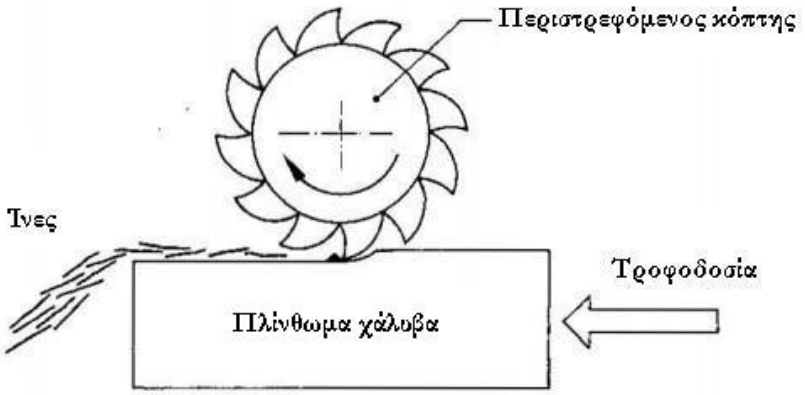


Εικόνα 2.10: Παραγωγή χαλύβδινων ινών από σύρματα με ολκή (Maidl, 1995)

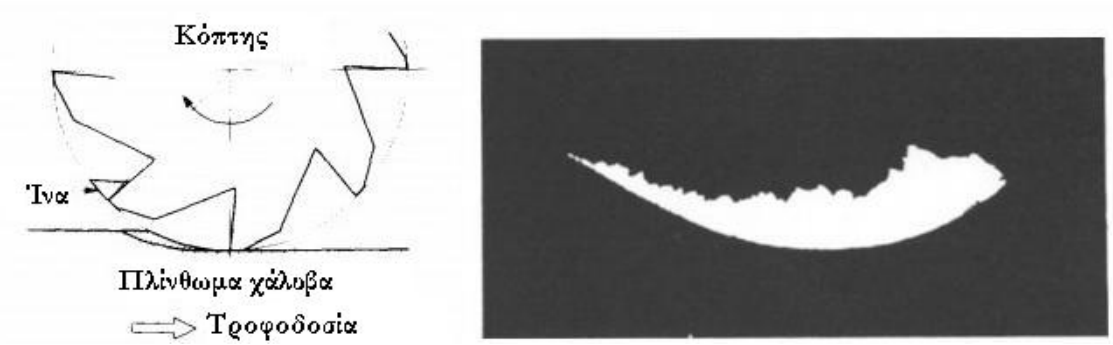
Μια άλλη διαδικασία που είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για σύρματα μικρής διαμέτρου περιλαμβάνει την ολκή μιας δέσμης συρμάτων που αποτελείται μέχρι και από 300 μεμονωμένα σύρματα τα οποία διαχωρίζονται από ένα στιφρό λιπαντικό. Όταν η διαδικασία μορφοποίησης ολοκληρωθεί, η επικάλυψη με λιπαντικό αφαιρείται 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. 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. 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. Στις εικόνες 2.11 και 2.12 παρουσιάζεται η διαδικασία παραγωγής.



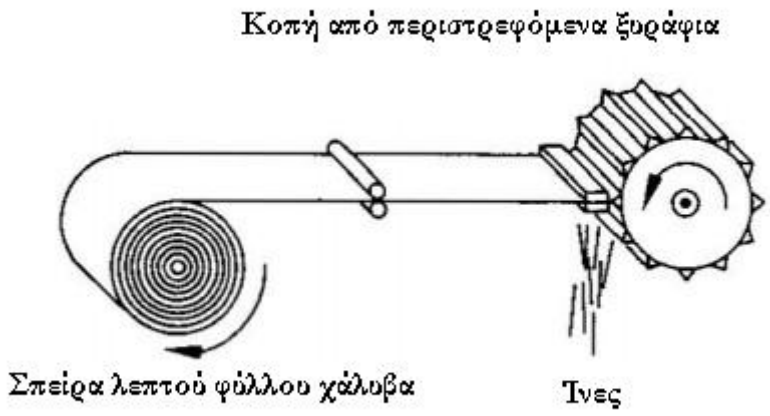
Εικόνα 2.11: Παραγωγή χαλύβδινων ινών με επιφανειακή αποκοπή ρινισμάτων (Maidl, 1995)



Εικόνα 2.12: Κοπή χαλύβδινων ινών και χαρακτηριστική τομή ίνας (Kobayashi, 1983)

III. *Κοπή φύλλων χάλυβα*

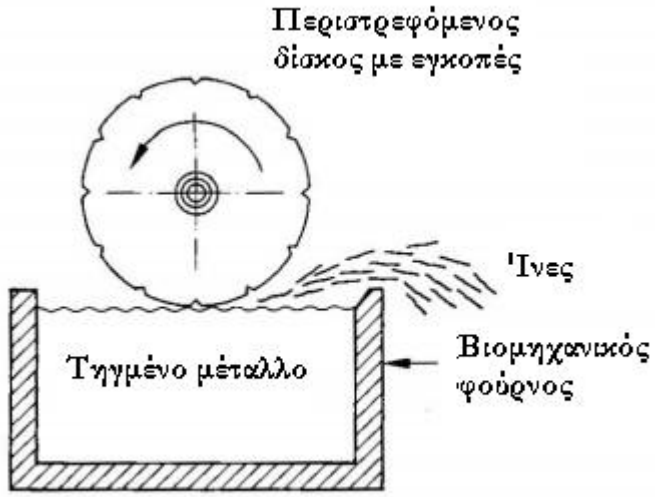
Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει την παραγωγή ινών χάλυβα από την κοπή ενός λεπτού φύλλου μετάλλου. Το φύλλο χάλυβα βρίσκεται υπό μορφή σπείρας και το πλάτος του θα είναι το μήκος της παραγόμενης ίνας. Οι ίνες μπορούν έπειτα να υποβληθούν σε κατάλληλη επεξεργασία ώστε να επιτευχθούν τοπικές παχύνσεις. 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.



Εικόνα 2.13: Παραγωγή χαλύβδινων ινών με κοπή φύλλων (Maidl, 1995)

IV. <u>*Εξαγωγή τήγματος*</u>

Μια άλλη διαδικασία, η οποία χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την παραγωγή ινών χάλυβα στη δεκαετία του 1980, περιλαμβάνει την 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 εκεί πήζει κι έτσι σταθεροποιείται αμέσως. Αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ινών χάλυβα με διαφορετικές διατομές και μήκη, συνδυάζοντας αρίστη ποιότητα.



Εικόνα 2.14: 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 παραγωγικότητας αυτές οι μέθοδοι δεν είναι

ιδιαίτερα εφαρμόσιμες.

3. 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 γυαλιού μέσα στο σκυρόδεμα (Bentur et. al, 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 μετακαολίνης στο σκυρόδεμα με ίνες υάλου για την προστασία τους, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τις αντοχές του και το μέτρο ελαστικότητάς του (Marikunte, Aldea, Shah 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.

Οι ίνες υάλου 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. 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 Ε, 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 μια διαδικασία 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.

Εικόνα 2.15: Ίνες υάλου και περιελιγμένα υαλονήματα (J&J Trading Corporation, 2002)

Εικόνα 2.16: Παραγωγή ινών υάλου (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)

Η εταιρία Nycon παράγει ίνες υάλου τύπου AR κατάλληλες για χρήση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έχουν διάμετρο 14 μm και μήκος 12 mm. Έτσι προκύπτει ένα μήκος ινών της τάξης των 220 έως 330 μέτρων ανά κιλό. Τα δοκίμια σκυροδέματος με τέτοιου είδους ίνες έχουν εξεταστεί με τις πρότυπες δοκιμές και η προτεινόμενη δοσολογία από τον κατασκευαστή είναι 0,6 kg/m^3 σκυροδέματος.

4. 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.

Η Shell Chemical Corp. ξεκίνησε την έρευνα με ίνες πολυπροπυλενίου το 1965 (James, 1990). Η πρώτη χρήση συνθετικών ινών έγινε στην Ευρώπη το 1968 με ίνες πολυπροπυλενίου. Εφαρμογές στη Βόρεια Αμερική τις δεκαετίες του ’70 και ’80 έγιναν με προσθήκη ινών σε ποσοστά από 0,1% έως 0,2% κατ’ όγκο. Το αποτέλεσμα ήταν ο έλεγχος της πλαστικής ξήρανσης του σκυροδέματος και η καλύτερη πρώιμη αντοχή του. Οι δοκιμές συνεχίστηκαν και στη δεκαετία του ’80, με αύξηση του ποσοστού των ινών

(0,5%) και το αποτέλεσμα ήταν η αύξηση της δυσθραυστότητας και της αντοχής σε κρούση. 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.

Όταν αναφερόμαστε στις συνθετικές ίνες για την ενίσχυση του σκυροδέματος (SNFRC), συχνά χρησιμοποιείται ο όρος denier αντί του aspect ratio (λόγος διαστάσεων μήκους προς διάμετρο). Ο όρος αυτός έχει εξελιχθεί από τις βιομηχανίες υφασμάτων και ορίζεται ως το βάρος σε γραμμάρια για μήκος ίνας ίσο με 9.000 m. Άρα:

$$D = \frac{SG \times 9000 \times \pi \times d^2}{4} \quad \text{(Zollo, 1995)}$$

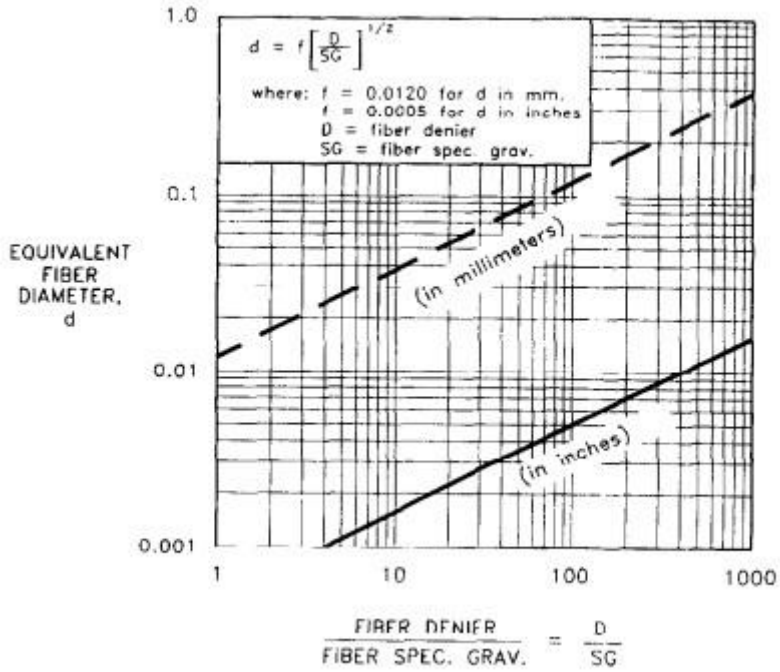
Όπου: D = denier (γραμμική μάζα 9 χιλιομέτρων ίνας)
SG = ειδικό βάρος ίνας
d = ισοδύναμη διάμετρος ίνας

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ισοδύναμη διάμετρος της ίνας και η γραμμική της μάζα για μήκος ίσο με 9.000 μέτρα συνδέονται μαθηματικά με την παρακάτω σχέση:

$$d = f\left(\frac{D}{SG}\right)^{1/2} \quad \text{(ACI 544.1R)}$$

Όπου: f = 0,0120 για d σε χιλιοστά
f = 0,0005 για d σε ίντσες

Το νομόγραμμα 2.17 είναι χρήσιμο για μετατροπή από το ένα μέγεθος στο άλλο.



Νομόγραμμα 2.17: Μεταρτοπή από ισοδύναμη διάμετρο σε γραμμική μάζα και αντίστροφα (Zollo, 1995)

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 (squeezing ground) 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 0.3 mm 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.

4.1 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.

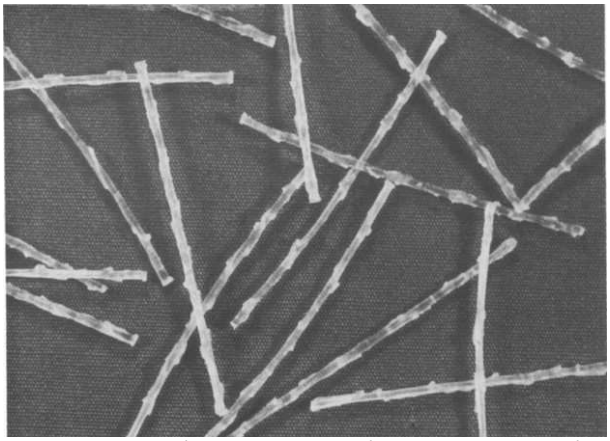
Παράγονται είτε σαν επιμήκεις ίνες κυκλικής διατομής, που στη συνέχεια κόβονται στο κατάλληλο μήκος, είτε σαν ταινίες και κορδέλες που διαμορφώνονται τελικά σε ινίδια ορθογωνικής διατομής, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.18.

Εικόνα 2.18: Αριστερά: ινίδια ορθογωνικής διατομής, Δεξιά: ίνες κυκλικής διατομής (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)

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 165° C, 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.



Εικόνα 2.19: Ίνες πολυπροπυλενίου Duomix, διάμετρος 18 μm, μήκος 6mm (Bekaert)

4.2 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 δεν έχει τόσο μεγάλη αντοχή σε κάμψη όσο το σκυρόδεμα με ίνες αμιάντου, αυτή επαρκεί για πολλές εφαρμογές στην κατασκευή.

4.3 Αραμιδικές ίνες

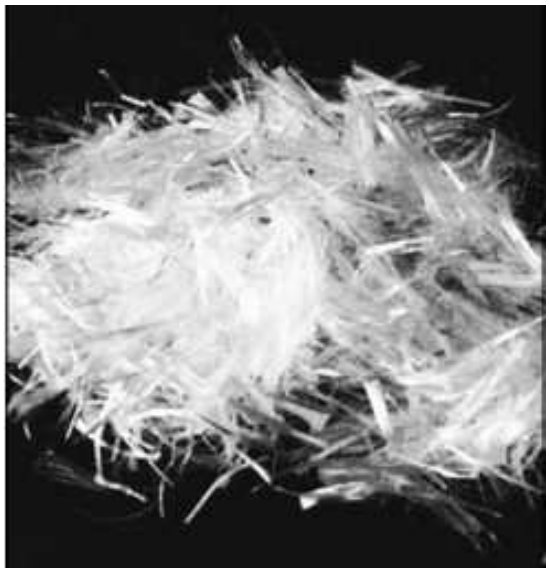
Έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Είναι 2,5 φορές πιο ισχυρές από τις Ε τύπου ίνες υάλου, 43% ελαφρύτερες και 5 φορές πιο ισχυρές από τις χαλύβδινες. Έχουν επιπλέον άριστη συμπεριφορά μέχρι τη θερμοκρασία των 160° C, σταθερότητα διαστάσεων μέχρι τους 200° C, στατική και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

4.4 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

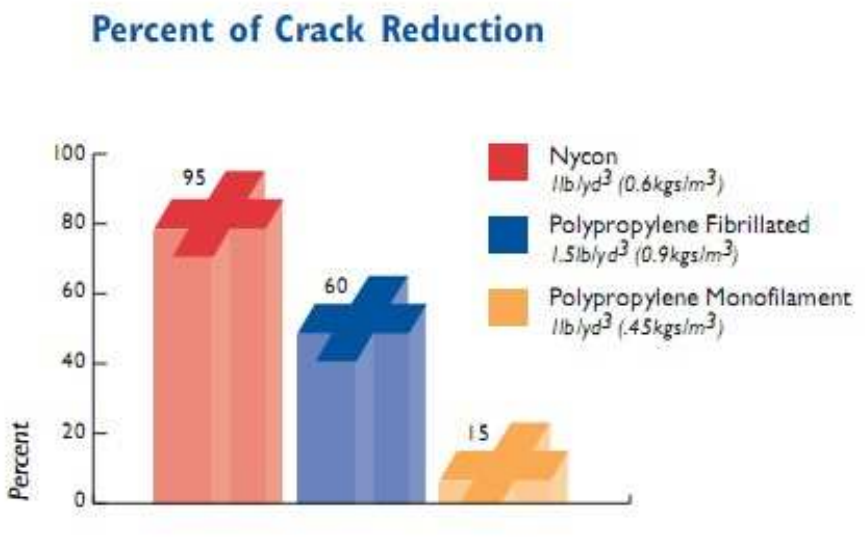
τύπου νάιλον 6 και νάιλον 66. Το νάιλον νηματοποιείται μέσω διαδικασίας θέρμανσης, εξώθησης και τάνυσης πολυμερών υλικών. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, είναι ελαστικές και προσδίδουν υψηλές τιμές δυσθραυστότητας στο σκυρόδεμα. Το νάιλον είναι υδρόφιλο, με κατακράτηση υγρασίας περίπου 4,5%, 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 σε μικρότερες ποσότητες αποδίδοντας τα ίδια αποτελέσματα (Laning, 1992).

Η εταιρία Nycon παράγει ίνες νάιλον κατάλληλες για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οι ίνες NylonRC 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.



Εικόνα 2.20: Ίνες νάιλον της Nycon τύπου RC (Nycon)

Επίσης, έχουν μήκος 19 mm, αντοχή σε εφελκυσμό 896 MPa και σημείο τήξης 220° C με άριστη αντοχή σε αλκάλια. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 2.21, κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι περιορίζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τις ρωγμές που προέρχονται από τη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος.



Διάγραμμα 2.21: Συγκριτική παρουσίαση ποσοστού μείωσης ρωγμών από συστολή ξήρανσης (NyconRC)

Εκτός από τις ίνες RC η ίδια εταιρία παρασκευάζει τις ίνες υψηλών επιδόσεων MultiMesh. Η διαφορά τους είναι ότι σχηματίζουν ιδιαίτερα ισχυρούς δεσμούς μέσα στο σκυρόδεμα και βελτιώνουν σημαντικά τις αντοχές του. Είναι κι αυτές υδρόφιλες, με 19 mm μήκος, συμβατές με τα πρότυπα ASTM C1116 και ICC ES AC32. Προτεινόμενη δοσολογία είναι 0,45 kg/m^3 και έχουν αντοχή σε εφελκυσμό 303 MPa, σημείο τήξης 225° C και ανθεκτικότητα σε αλκάλια ή διάβρωση.

4.5 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).

4.6 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.

4.7 Ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης

Οι ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης είναι διαθέσιμες με ποικίλες διαμέτρους και 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 ότι αναπτύσσουν 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 4,400 αντίστοιχα χρησιμοποιούνται ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις του έργου.

4.8 Ίνες πολυακρυλονιτριλίου

Οι ίνες πολυακρυλονιτριλίου είναι κατάλληλες για τις απαιτήσεις των προϊόντων σκυροδέματος με ίνες. Έχουν σχετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας της τάξεως των 20 GPa, 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).

4.9 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 10 μm ή ίνες άνθρακα θερμαίνονται μέχρι τη θερμοκρασία των 1.200 °C, χρησιμοποιούνται ως υπόστρωμα. Η απόθεση του καρβιδίου του πυριτίου προκύπτει έπειτα από τη 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 αντοχή είναι περίπου 3 GPa και το μέτρο ελαστικότητας 400 GPa (Maidl, 1995).

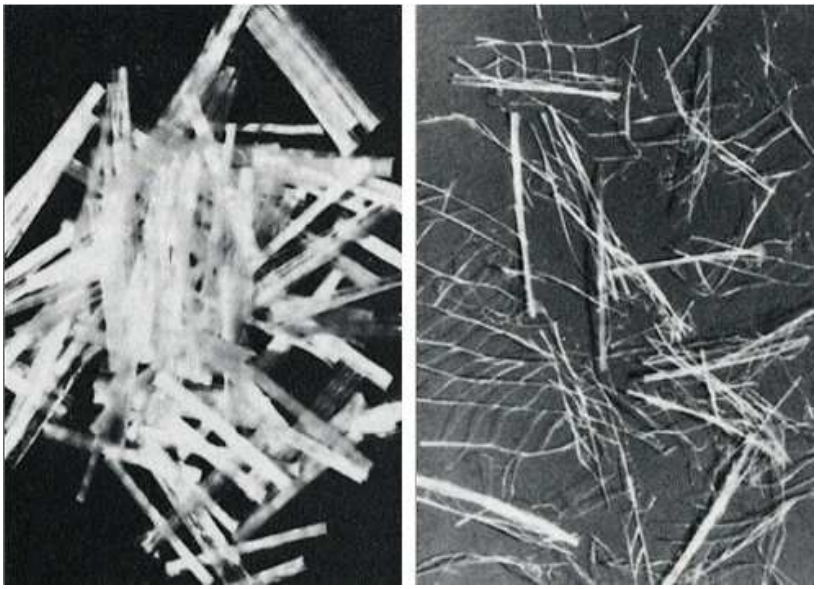
Μερικοί κατασκευαστές παράγουν επίσης νηματοειδείς κρυστάλλους (whiskers) από καρβίδια του πυριτίου. Οι κρύσταλλοι αυτοί είναι τριχοειδείς μονοκρύσταλλοι με διάμετρο από 0.5 έως μερικά μm. Κατασκευάζονται συνήθως με κατακρήμνιση οργανικών ενώσεων μετάλλων από την αέρια φάση, όπως το νιτρίδιο του πυριτίου (Si_3N_4), το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) ή το οξείδιο του αλουμινίου (Al_2O_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).

4.10 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 δοσολογία των συνθετικών ινών για να δώσουν παρεμφερή αποτελέσματα με τις χαλύβδινες στις δοκιμές φορτίου-παραμόρφωσης είναι 1:4 κατά βάρος και 2:1 κατ' όγκο. Αφού το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι το 1/50 των 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, μεταμορφώνοντας τις 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 εικόνα 2.22.



Εικόνα 2.22: Διακριτές ίνες πολυπροπυλενίου φέρουν συγκολλημένα ινίδια που αναδεικνύονται κατά τη μίξη (Laning, 1992)

Το πλεονέκτημά τους 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).

5. Ανθρακικές ίνες

Οι ίνες άνθρακα παρουσιάζουν ευρύ φάσμα καλών μηχανικών ιδιοτήτων. Εκτός του ότι είναι ελαφριές, είναι πολύ ανθεκτικές στην επίδραση των χημικών ουσιών 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 ακολουθείται εν 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 κατεύθυνση του 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 περιεκτικότητα σε 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.

6. 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.

6.1 Φυτικές ίνες

Θεωρητικές και πρακτικές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί 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 ως πιθανό υποκατάστατο των ινών αμιάντου (Maidl, 1995).

6.2 Ξύλινες ίνες

Οι ιδιότητες των ινών αυτών εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο κόβονται και ραφινάρονται. Μία μέθοδος παραγωγής 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.

6.3 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).

6.4 Κεραμικές ίνες

Οι κεραμικές ίνες που προορίζονται για εμπορική χρήση είναι συνήθως κοντές, που παρήχθησαν αρχικά με σκοπό της θερμική μόνωση. 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).

7. 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 100 μm (0,004 in), 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 πολυπροπυλενίου πολύ 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.

8. 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 πολλές περιπτώσεις, 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 συρμάτων 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 γεγονός που 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 επαφή 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 περιορισμό των μικρορωγματώσεων. Τελευταίες όμως εξελίξεις 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 σκυροδέματος στην 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.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΧΩΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

1. Γεωμετρία

Η γεωμετρία των ινών, μαζί με το υλικό κατασκευής τους, είναι οι κυριότεροι παράγοντες που διαμορφώνουν την επιλογή της ίνας για την εκάστοτε εφαρμογή. Τα διάφορα είδη ινών, όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4, έχουν και διαφορετικές γεωμετρίες.

Πρακτικά, οι ίνες παράγονται σε σχεδόν άπειρα σχήματα και μεγέθη και μπορεί να είναι κυκλικής, πολυγωνικής ή ακόμη και ακανόνιστης διατομής. Μπορεί επίσης η ίνα να αποτελείται από πολλά συγκολλημένα ινίδια συνθετικού υλικού που είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να αποκολλώνται μέσα στο σκυρόδεμα κατά τη μίξη.

Για τις ίνες που δεν είναι κυκλικής ή πρισματικής διατομής, είναι χρήσιμο να ορισθεί ποια θα ήταν η διάμετρος μιας ισοδύναμης ίνας με κυκλική ή πρισματική διατομή. Έτσι, ορίζεται η *ισοδύναμη διάμετρος* ως η διάμετρος του κύκλου που έχει μια ίνα και είναι ίση την μέση διάμετρό της (Zollo, 1995).

Έτσι, επί παραδείγματι, αν έχουμε μια ίνα μήκους 25mm και η διατομή της είναι 0.6x0.4mm, τότε η επιφάνειά της A θα είναι:

$$A=0.6x0.4=0.24\ mm^2$$

Η ισοδύναμη διάμετρος προκύπτει ως εξής:

$$d_e = 2\sqrt{\frac{A}{2\pi}} = 0.55\ \text{mm (Zollo, 1995)}$$

Ίνες με μικρή ισοδύναμη διάμετρο έχουν σχετικά μικρή ευκαμψία κι έτσι έχουν μια συγκεκριμένη ικανότητα να προσαρμόζονται στο σχήμα και στο χώρο που καταλαμβάνουν ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών. Σχετικά μεγάλη ευκαμψία αντίστοιχα σημαίνει μεγαλύτερη επίπτωση στη συμπύκνωση των αδρανών κατά τις διαδικασίες μίξης και διάστρωσης (Zollo, 1995).

Στην περίπτωση όμως των χαλύβδινων ινών με ακανόνιστη γεωμετρία, η ισοδύναμη διάμετρος (σε mm) δίδεται από τη σχέση:

$$d_e = 12,74\sqrt{\frac{m}{L}}\ \text{(Maccaferri)}$$

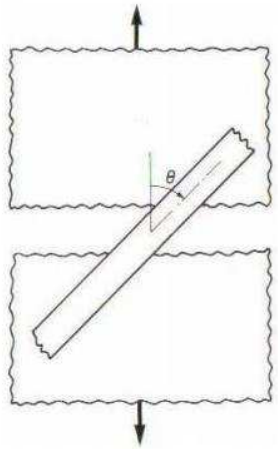
Όπου: m = το μέσο βάρος σε g ενός δεδομένου αριθμού ινών
L = το μέσο μήκος της ίνας (mm)

Το σημαντικότερο όμως γεωμετρικό χαρακτηριστικό είναι ο λόγος μορφής, δηλαδή την αναλογία που προκύπτει μεταξύ μήκους και διαμέτρου της ίνας (l/d). Έτσι, ο λόγος μορφής είναι αδιάστατη παράμετρος, εκφράζει το βαθμό λυγηρότητας της ίνας και είναι μέτρο της ευκαμψίας της.

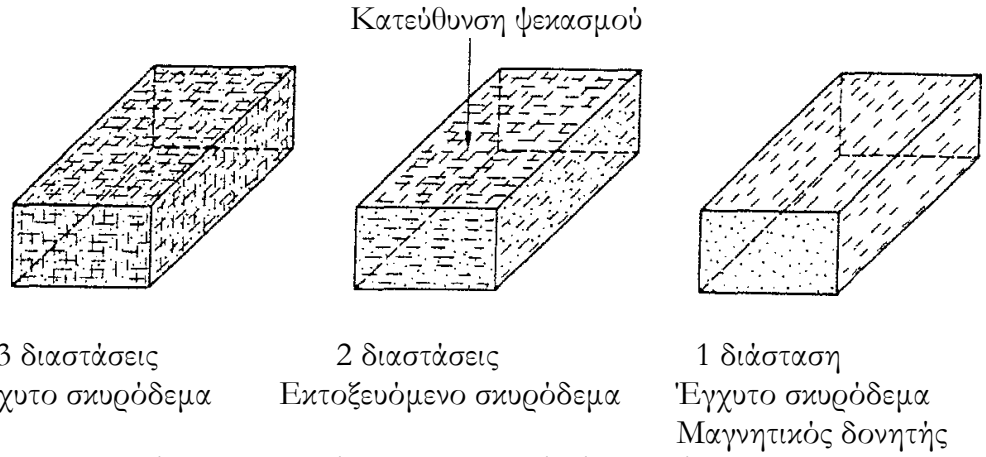
Στην περίπτωση των συνθετικών ινών, όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4, αντί για τον λόγο μορφής η αντίστοιχη κατηγοριοποίηση γίνεται με την γραμμική μάζα 9 χιλιομέτρων ίνας (denier). Πρέπει να επισημανθεί εδώ ότι αυτό δεν παραμένει σταθερό, για μία δεδομένη ίνα, πριν και μετά την μίξη και την διασπορά τους μέσα στο μίγμα. Για το λόγο αυτό ορίζονται οι τιμές γραμμικής μάζας πριν και μετά τη μίξη (pre-mix and post-mix denier) (Zollo, 1995).

2. Προσανατολισμός ινών στο χώρο

Είναι γνωστό ότι στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών στο μίγμα επηρεάζει σημαντικά της μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος (Kobayashi, 1983). Οι ίνες σε τριδιάστατη διασπορά μέσα στη μάζα του σκυροδέματος παρεμποδίζουν τη διεύρυνση και τη διάδοση των μικρορωγμών, επιτρέποντας ταυτόχρονα τη παραλαβή εφελκυστικών τάσεων από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής, δρώντας έτσι ως γέφυρες «συρραφής». Η φύση των ρωγμών εξαρτάται από τη φύση του φορτίου (εφελκυσμός, θλίψη, διάτμηση) και από τη γεωμετρία του στοιχείου. Οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στην κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης. Όπως και στη χρήση οπλισμών χάλυβα, οι ίνες είναι βέλτιστα τοποθετημένες εάν προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης και διασταυρώνονται κάθετα με τη ρωγμή. Επιπλέον, λογικό είναι ότι όσο οι ίνες είναι πιο κοντά μεταξύ τους, τόσο ευεργετικότερα αποτελέσματα θα έχουμε. Εάν η ίνα συναντήσει τη ρωγμή πλάγια, τότε είναι λιγότερο αποτελεσματική. Αυτή η μείωση της αποτελεσματικότητας μπορεί να υπολογιστεί μαθηματικά και να διευκρινιστεί με μηχανικούς όρους χρησιμοποιώντας τους συντελεστές προσανατολισμού (πίνακας 5.3) (Maidl, 1995). Έτσι, επειδή οι ίνες είναι διατεταγμένες προς όλες τις κατευθύνσεις, δεν συμμετέχουν όλες στην ανάληψη δυνάμεων. Μία ίνα συμμετέχει εφόσον η κλίση της, ως προς τη διεύθυνση της δύναμης, δεν είναι μεγαλύτερη από 45°.



Εικόνα 3.1: Τομή μιας ίνας μέσα σε μια ρωγμή με γωνία θ (Bentur and Mindness, 1990)



Εικόνα 3.2: Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995)

Στατιστικά ο προσανατολισμός των ινών δεν μπορεί να εξασφαλιστεί, ούτε στα δοκίμια ούτε στα πραγματικά στοιχεία, δεδομένου ότι επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. τρόπος και διάρκεια συμπύκνωσης). Παρολαυτά, η ουσία είναι ότι ακολουθούν ένα από τα παραπάνω μοντέλα (εικόνα 3.2). Ο ποιοτικός έλεγχος και οι εργαστηριακές δοκιμές πρέπει να εκτελούνται σε δοκίμια που φέρουν όλα τα χαρακτηριστικά των πραγματικών στοιχείων (γεωμετρία δείγματος, προσανατολισμός ινών, διαδικασία κατασκευής πχ. έγχυτο, εκτοξευόμενο) (Maidl, 1995). Εάν όμως πάλι κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό, τότε οι υπολογισμοί πρέπει να λάβουν υπόψη έναν συντελεστή προσανατολισμού (πίνακας 3.3), όπως φαίνεται στον πίνακα 3.3 για περίπτωση διδιάστατου μοντέλου, όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:

Συντελεστής προσανατολισμού	**Σχόλια, πηγή**
$\eta_{\varphi 2D}$ = 0.444	Το κέντρο της ίνας βρίσκεται σε απόσταση $L_f/2$ από ένα άκρο
$\eta_{\varphi 2D}$ = 0.375	Krenchel, 1964
$\eta_{\varphi 2D}$ = 0.637	Parimi, Rao, 1971
$\eta_{\varphi 2D} = 1 - \frac{2}{15}(1 - V_f)\left(\frac{6(n-1)}{n} + v_c\right)$	Schnütgen, 1975

όπου: V_f=ποσότητα ινών % κατ' όγκο, n=$E_{ίνα}/E_{μίγμα}$, v_c=λόγος Poisson

Πίνακας 3.3: Συντελεστές προσανατολισμού ινών (Maidl, 1995)

Σύμφωνα με τον Kobayashi (1982), ορίζεται ο συντελεστής διασποράς των ινών ως:

$$\alpha = \exp[-\psi(x)] \text{ όπου: } \psi(x) = \frac{\sqrt{\Sigma(X_i - \bar{X})^2}}{\frac{n}{\bar{X}}}$$

Όπου: X_i = αριθμός ινών που περιέχει το κάθε δείγμα
$\bar{X}$ = μέσος αριθμός ινών που περιέχει το κάθε δείγμα
n = ο αριθμός των δειγμάτων

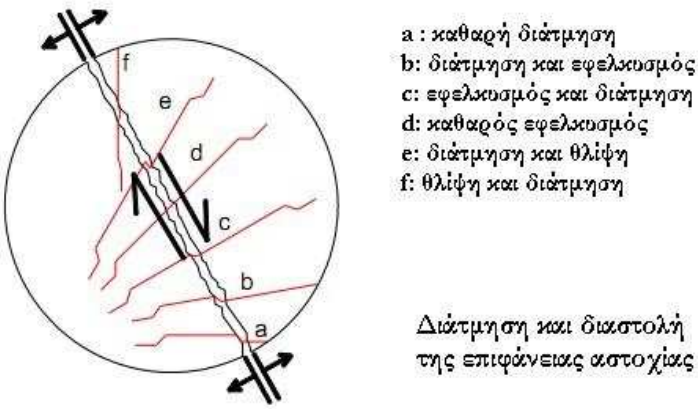
Η τιμή α λογικά θα παίρνει μονάδες από 0 έως 1. Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται μπορεί να είναι είτε νωπά είτε σκληρυμένα.

Ο συντελεστής προσανατολισμού β, προκύπτει από τον αριθμό των ινών σε μια διατομή. Έτσι είναι:

$$\beta = \rho \times \frac{A}{V_f} \text{ με:}$$

Όπου: ρ = το ειδικό βάρος των ινών
A = η επιφάνεια της διατομής
V_f = η ποσότητα των ινών κατ' όγκο

Επίσης, για να είναι αποτελεσματική η παρουσία των ινών στην επιφάνεια θραύσης, πρέπει και οι δύο πλευρές τις να είναι επαρκώς αγκυρωμένες στις δύο πλευρές εκατέρωθεν της ρωγμής. Έτσι, στην περίπτωση αυτή, και ανάλογα με τον εκάστοτε προσανατολισμό, προκύπτουν οι περιπτώσεις που δείχνει η εικόνα 3.4:

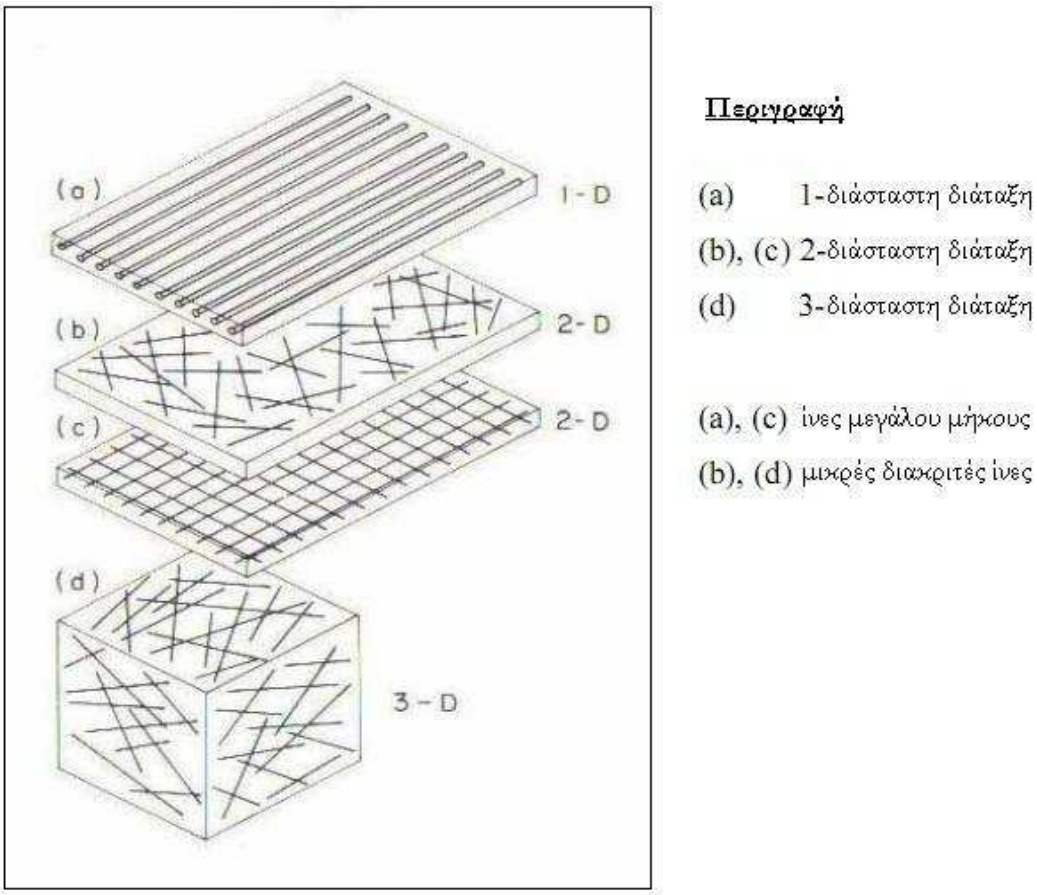


Εικόνα 3.4: Προσανατολισμός ινών και φορτίσεις (Windsor, 1996)

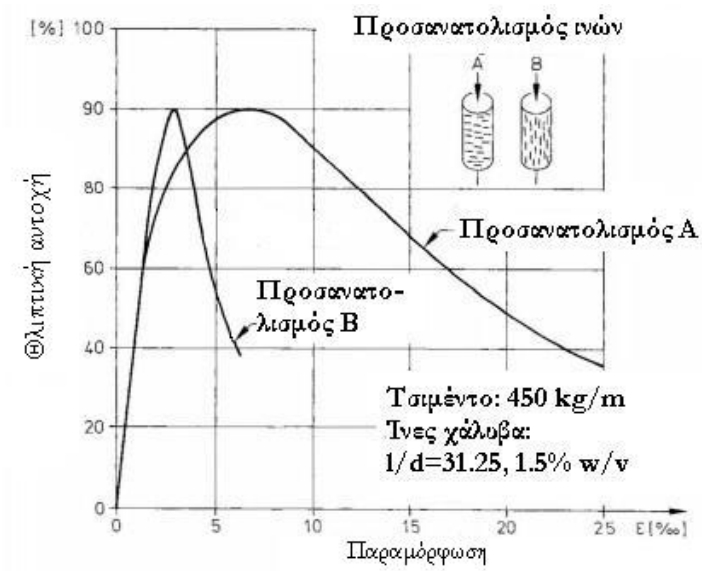
2.1 Επιρροή του προσανατολισμού των ινών στα αποτελέσματα των δοκιμών

Όπως προαναφέρθηκε, οι δυνατοί προσανατολισμοί στο χώρο είναι τρεις και επηρεάζονται από τον τρόπο έγχυσης ή εκτόξευσης του σκυροδέματος. Στην εικόνα 3.5 φαίνονται οι πιθανοί αυτοί προσανατολισμοί.

Είναι τεχνικά εφικτό οι ίνες να ευθυγραμμιστούν σε μια συγκεκριμένη κατεύθυνση κατά τη διάρκεια της παρασκευής του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό μπορεί να γίνει με χρήση δονητή με μαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, στο εκτοξευόμενο με ίνες σκυρόδεμα, ο προσανατολισμός των ινών είναι συνήθως κάθετος στην κατεύθυνση ψεκασμού. Ποικίλες δοκιμές (διάγραμμα 3.6) έχουν δείξει ότι πυρήνες που λαμβάνονται παράλληλα στην κατεύθυνση ψεκασμού (A) παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στις δοκιμές θλίψης απ' ότι όταν αποκόπτονται κάθετα (B) στην κατεύθυνση ψεκασμού. Στο διάγραμμα 3.6 φαίνεται ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζεται από τον προσανατολισμό των ινών. Αυτός πρέπει να ελέγχεται πριν την πραγματοποίηση των δοκιμών (Maidl, 1995).



Εικόνα 3.5: Κατηγοριοποίηση προσανατολισμών ινών (Bentur and Mindness, 1990)



Διάγραμμα 3.6: Επιρροή του προσανατολισμού των ινών στη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος, (Maidl, 1995)

Επίσης, και από το διάγραμμα 3.6 συμπεραίνουμε ότι το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ένα ανισότροπο υλικό. Από άλλες δοκιμές (Keyter and Dreschert) έχει παρατηρηθεί ότι η αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη του ευνοϊκού προσανατολισμού είναι 25% μεγαλύτερη σε σχέση με τον δυσμενή, ενώ διαθέτουν και μεγαλύτερη πλαστικότητα. Επίσης, τα δοκίμια με ευνοϊκό προσανατολισμό ινών έδειξαν ότι απορροφούν και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Έτσι, θα

ήταν λογικό να γίνεται φόρτιση των δοκιμίων σύμφωνα με τη φορά των πραγματικών φορτίσεων που δέχεται το ινοπλισμένο σκυρόδεμα στην επένδυση (Keyter and Dreschert, 2001). Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι στην αρχή της εκτόξευσης οι ίνες τείνουν να προσανατολίζονται ακριβώς παράλληλα με την επιφάνεια διάστρωσης, ενώ όσο αυξάνει το πάχος της επένδυσης ο προσανατολισμός γίνεται πιο τυχαίος.

3. Ποσότητα, επιφάνεια και απόσταση ινών - Επιφάνεια ενίσχυσης

Περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα μεγαλύτερη από 25 kg/m^3 είναι απαραίτητη για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε περίπου 1% κατά βάρος, ή 0.33% κατ' όγκο. Αν και η αποτελεσματικότητα των ινών βελτιώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητάς τους στο σκυρόδεμα, υπάρχει ένα ανώτατο όριο περιεκτικότητας ώστε να επηρεάζεται αρνητικά την εργασιμότητα του μίγματος και κατά συνέπεια το ίδιο το τελικό προϊόν. Το τεχνικό όριο για την περιεκτικότητα των ινών, στις γενικές εφαρμογές, είναι μεταξύ 50 και 100 kg/m^3, ανάλογα βέβαια με τη μέθοδο προσθήκης των ινών, και τον τύπο τους (Maidl, 1995).

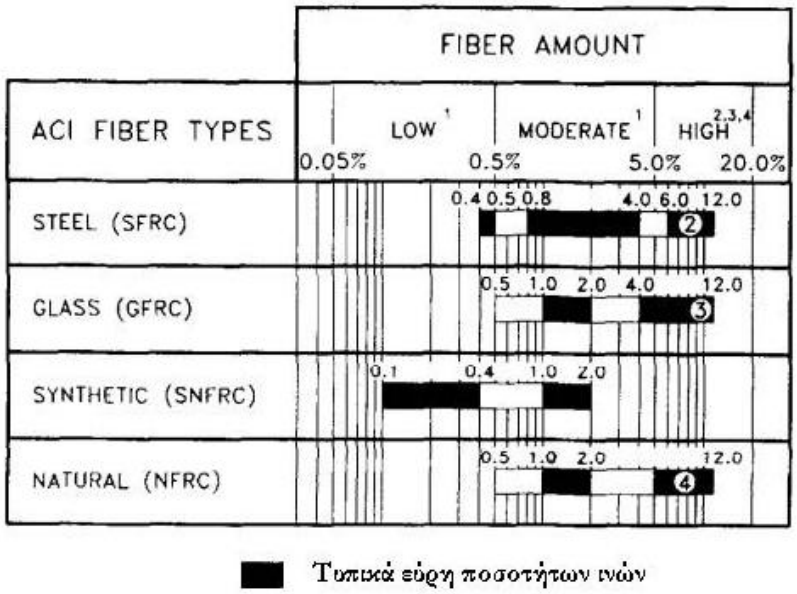
Υπάρχει ωστόσο και μια ειδική διαδικασία που επιτρέπει τη χρήση υψηλών ποσοστών ινών, και βασίζεται στην αργή ροή των ινών σε ένα καλούπι και στη μετέπειτα διείσδυση της τσιμεντόπαστας. Το προκύπτον δομικό υλικό είναι γνωστό ως SIFCON **S**lurry **I**nfiltrated **F**iber **CON**crete). Ανάλογα με τον τύπο της ίνας, αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να επιτευχθεί περιεκτικότητα ινών ακόμη και πάνω από 20% κατ' όγκο. Αυτό το υλικό προορίζεται για ειδικές χρήσεις, όπως στρατιωτικές εφαρμογές, και είναι ιδιαίτερα δαπανηρό λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε ίνες (Maidl, 1995).

Ξεκίνησε να εφαρμόζεται από τα τέλη της δεκαετίας του 1970 και εκτός του υψηλού κόστους απαιτεί πολύ λεπτομερή χειρισμό. Τυπικό μίγμα SIFCON φαίνεται στον πίνακα 3.7.

Υλικό	**Αναλογία (kg/m3)**
Τσιμέντο	1000
Νερό	330
Πυριτική άμμος ≤ 0.7mm	860
Πυριτιακός πολφός	13
Ρευστοποιητής	35
Ίνες χάλυβα	800

Πίνακας 3.7: Σχεδιασμός μίγματος SIFCON (Komatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)

Η ποσότητα των ινών επηρεάζει την επιλογή της μεθόδου παραγωγής του σκυροδέματος. Στο γράφημα 3.8 φαίνονται ποσοστιαία εύρη που συνήθως χρησιμοποιούνται στην πράξη, ανάλογα με το είδος της ίνας (Zollo, 1995)



(1) έγχυτο σκυρόδεμα, (2) SIFCON, (3) εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, (4) υπό πίεση

Γράφημα 3.8: Είδη ινών και ποσότητες κατ' όγκο που συνήθως χρησιμοποιούνται (Zollo, 1995)

Συνεπώς, η κατάλληλη ποσότητα που πρέπει να προστεθεί στο μίγμα είναι ζήτημα του σχεδιασμού του μίγματος και κατ' επέκταση της ίδιας της επένδυσης.

Η ποσότητα των ινών (fiber count FC) και η ειδική επιφάνεια των ινών (fiber specific surface FSS) είναι ο αριθμός των ινών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος και η επιφάνεια των ινών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος αντίστοιχα. Για οποιοδήποτε δεδομένο όγκο ινών στο σκυρόδεμα, η ποσότητα των ινών εξαρτάται από τον όγκο της κάθε ίνας. Ο πραγματικός αριθμός ινών στη μονάδα όγκου μπορεί να υπολογισθεί με μια από τις παρακάτω σχέσεις:

$$FC = [\frac{7.5 \times DRT \times 10^{-4}}{l \times d^2 \times SG}] = [\frac{1.27 \times V}{l \times d^2}] = [\frac{3 \times DRT \times 10^3}{l \times PoMD}] = [\frac{5.08 \times V \times SG \times 10^6}{l \times PoMD}]$$

(ACI 544.1R)

Όπου: V = ο συνολικός όγκος ινών %
l = μήκος ινών (inches)
d = ισοδύναμη διάμετρος ινών (inches)
SG = ειδικό βάρος της ίνας (Specific Gravity)
DRT = δοσολογία ινών (lb/yd^3) (Fiber Dosage Rate)
PoMD = γραμμική μάζα ίνας μετά τη μίξη, για συνθετικές ίνες (PoMD)

Επιπλέον, η ποσότητα των ινών μπορεί να γίνει γνωστή και ανά κιλό, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$FC = \frac{4.000.000}{l \times d \times \pi \times \gamma}$$

Όπου: l = μήκος ινών (mm)
d = ισοδύναμη διάμετρος ινών (mm)

γ = πυκνότητα (kg/m^3)

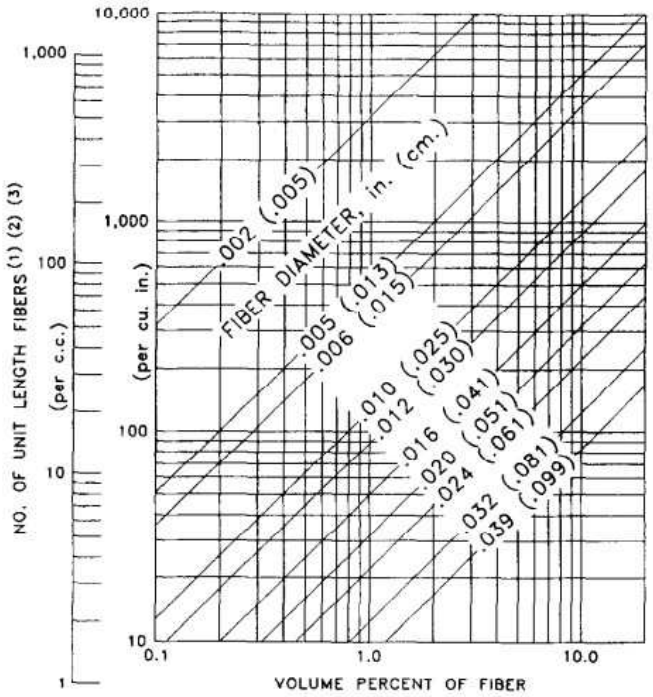
Αντίστοιχα προκύπτει η ειδική επιφάνεια των ινών αν πολλαπλασιάσουμε τον πραγματικό αριθμό τους με την επιφάνεια μιας ίνας, έτσι θα είναι:

$$\mathrm{FSS} = \mathrm{FC} \times \pi \times d \times l \ \text{ ή}$$

$$FSS = [\frac{2.36 \times DRT \times 10^{-3}}{d \times SG}] = [\frac{4 \times V}{d^2}] = [\frac{4.71 \times DRT}{(PoMD \times SG)^{1/2}}] = [\frac{8 \times V \times (SG)^{1/2} \times 10^3}{(PoMD)^{1/2}}]$$

(ACI 544.1R)

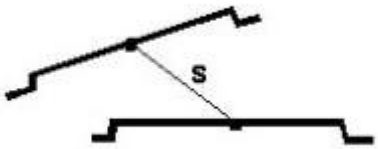
Επίσης, χρήσιμο είναι και το νομόγραμμα 3.9 που δίδει τις τιμές FC και FSS αν γνωρίζουμε την ισοδύναμη διάμετρο της ίνας, τον όγκο της (διάμετρος και μήκος) και την ποσοστιαία συμμετοχή της στο μίγμα. Το αποτέλεσμα που δίδει είναι ανά μονάδα μήκους ίνας.



(1) Προϋπόθεση η κυκλική διατομή
(2) Για τον υπολογισμό των ινών (FC) διαιρούμε με τον αντίστροφο του μήκους της ίνας
(3) Για τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας (FSS) πολλαπλασιάζουμε τον αριθμό των ινών (FC) με το μήκος και τη διάμετρο της χαρακτηριστικής ίνας

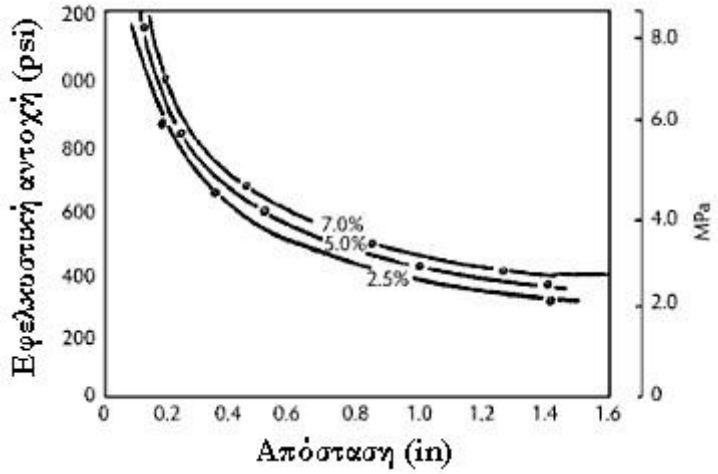
Νομόγραμμα 3.9: Ποσότητα ινών και ειδική επιφάνεια ως συνάρτηση του όγκου και της γεωμετρίας τους (Zollo, 1995)

Η απόσταση των ινών στο χώρο, (s, spacing) ορίζεται ως το μήκος μεταξύ του μέσου δυο ινών, όπως αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.10:



Σχήμα 3.10: Απόσταση (spacing) μεταξύ δύο ινών (Scancem Materials)

Για την απόσταση των ινών γνωρίζουμε γενικά ότι όσο αυτή μειώνεται, τόσο αυξάνει η αντοχή του σκυροδέματος. Το διάγραμμα 3.11 δείχνει τη σχέση μεταξύ απόστασης ινών και αντοχής σε εφελκυσμό, για διάφορες ποσοστιαίες προσθήκες ινών κατ' όγκο (Edward G. Nawy, Concrete construction engineering handbook).



Διάγραμμα 3.11 Επιρροή της απόστασης των ινών στην εφελκυστική αντοχή (Romualdi, Batson, 1963)

Αρκετές σχέσεις έχουν εκφρασθεί για να συσχετίσουν την απόσταση των ινών (s). Μια τέτοια έχει προταθεί από τους Romualdi, Batson (1963):

$$s = 13.8d \times \sqrt{\frac{1}{\rho}}$$

Όπου: d = διάμετρος της ίνας
ρ = ποσοστό ινών % κατ' όγκο στο μίγμα

Μία άλλη πιο διαδεδομένη σχέση είναι αυτή του MacKee (1969):

$$s = \sqrt[3]{\frac{V}{\rho}} \quad \text{ή} \quad s = \sqrt[3]{\frac{\pi d^2 l}{4\rho}}$$

Όπου: V = όγκος των ινών

Με την απόσταση των ινών δημιουργείται μια παρανόηση διότι με τον όρο αυτό υπονοείται πόσο κοντά είναι οι ίνες, αλλά δεν λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η αντοχή της ίνας. Μικρή απόσταση για το σκυρόδεμα, με μια ευρύτερη έννοια, είναι αυτή που εξασφαλίζει περιορισμό των ρωγμών στο ξεκίνημά τους. Έτσι, στην περίπτωση που επιπλέον φορτίο θα επιβληθεί, αυτό θα απορροφηθεί είτε θα ανακατανεμηθεί. Η συμπεριφορά αυτή είναι ενδεικτική του πως λειτουργεί η ενίσχυση στο σκυρόδεμα (Zollo, 1995).

Πέρα όμως από τα παραπάνω, είναι συχνά χρήσιμο να προσδιορίζεται η πραγματική επιφάνεια των ινών που τέμνει κάθε επίπεδη επιφάνεια του ινοπλισμένου

σκυροδέματος. Αυτή είναι και η επιφάνεια ενίσχυσης (A_s), αντίστοιχη με αυτήν που ορίζεται στο συμβατικό οπλισμό των σκυροδεμάτων.

Αναγνωρίζοντας ότι η επιθυμητή διατομή είναι μια επίπεδη διδιάστατη τομή, γίνεται αντιληπτό ότι θα παίζει ρόλο στον υπολογισμό της επιφάνειας ενίσχυσης το μήκος των ινών. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι ίνες δεν προσανατολίζονται ομοιόμορφα αλλά τυχαία στο χώρο, και για το έγχυτο σκυρόδεμα ένας συντελεστής που έχει προταθεί και περιγράφει το ποσοστό των ινών που συμμετέχουν αποτελεσματικά είναι 54% (Zollo, 1995). Έτσι, μια έκφραση που δείχνει την επιφάνεια της διατομής μιας τυχαίας κατανομής ινών θα εξαρτάται από τον προσανατολισμό και το κλάσμα όγκου των ινών, σε σχέση με τον συνολικό όγκο, ο οποίος ενισχύεται. Η συνολική επιφάνεια ενίσχυσης (A_{fx}), με τυχαίο προσανατολισμό των ινών θα υπολογίζεται ως εξής:

$$\mathrm{V}_f = (\mathrm{FC} \times l_f \times a_f) / (l_c \times w_c \times h_c),$$

Όπου: V_f = αναλογία όγκου ινών/σκυροδέματος

l_f = μήκος ίνας

a_f = διατομή μιας συγκεκριμένης ίνας

l_c, w_c, h_c = μήκος, πλάτος, ύψος αντίστοιχα του σκυροδέματος υπό μελέτη

Αν λύσουμε ως προς a_f: $a_f = (\mathrm{V}_f \times l_c \times w_c \times h_c) / (\mathrm{FC} \times l_f)$

και η συνολική επιφάνεια όλων των ινών θα είναι:

$$A_f = FC \times a_f = (\mathrm{V}_f \times l_c \times w_c \times h_c / l_f) \quad (1)$$

Η συνολική επιφάνεια ινών σε έναν όγκο βάθους l_c συσχετίζεται με τη συνολική επιφάνεια των ινών που διέρχονται μέσα από κάθε επιφάνεια του όγκου μέσα από τη σχέση:

$A_{fx} = A_f (l_f / l_c)$, και μέσω της (1): $A_{fx} = V_f \times w_c \times h_c$

Τέλος, αν λάβουμε υπόψη την επιρροή του προσανατολισμού των ινών θα έχουμε:

$$A_{fx} = 0.54 \times V_f \times w_c \times h_c$$

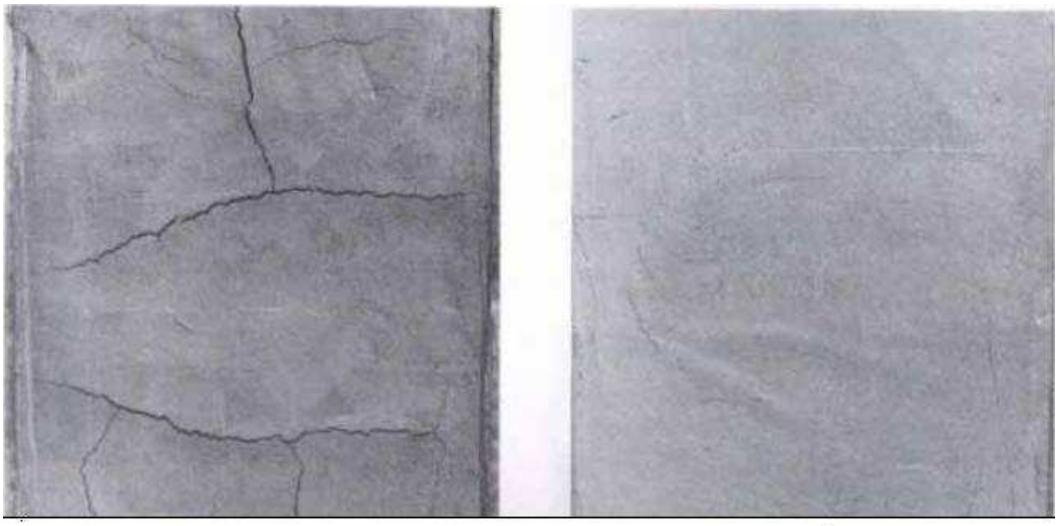
Έτσι για παράδειγμα, για 0,1% προσθήκη ινών σε μια πλάκα σκυροδέματος πλάτους 1 ποδιού και ύψους 4 ιντσών, η συνολική επιφάνεια των ινών που τέμνουν οποιαδήποτε επιφάνεια ενίσχυσης θα είναι:

$A_{fx} = 0.54 \times (0.1/100) \times 12 \times 4 = 0.026 in^2$ (Zollo, 1995).

4. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών

Η χρήση των ινών στο σκυρόδεμα είναι πλέον ευρέως αποδεκτό ότι προσφέρει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού οπλισμού όπως επίσης, είναι γεγονός ότι οι ίνες δεν μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό. Τα πλεονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

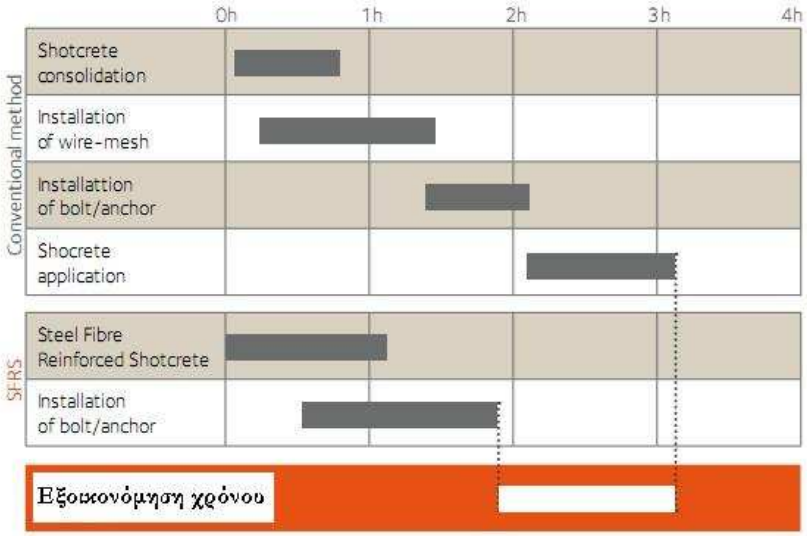
- Οι ίνες διασκορπίζονται ομοιογενώς στο μίγμα και περιορίζουν τις ρωγμές και τις επιπτώσεις της συστολής ξήρανσης. Έτσι, δεν τις αφήνουν να μεγαλώσουν πέρα από ένα πολύ μικρό όριο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην εικόνα 3.12:



Εικόνα 3.12: Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες, Fibermesh 1989

- Εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ασφάλεια στο προσωπικό, αφού δε χρειάζεται να εργάζεται κάτω από ανυποστήρικτο πέτρωμα για να τοποθετήσει το πλέγμα. Η ασφάλεια του προσωπικού μάλιστα μπορεί να είναι σημαντικά καλύτερη όταν χρησιμοποιείται τηλεχειριζόμενο ρομπότ εκτόξευσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος.
- Σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει όχι μόνο καλύτερες πρώιμες αντοχές αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, σε διάτμηση, ενώ έχει και αυξημένη δυσθραυστότητα. Επίσης αναπτύσσει μεγαλύτερη δύναμη συνάφειας με την επιφάνεια που διαστρώνεται σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους σε ένα μίγμα αλλά και να χρησιμοποιηθούν μαζί με συμβατικό οπλισμό, παίζοντας τον ρόλο της δευτερογενούς ενίσχυσης.
- Οι ίνες έχουν πολύ καλό συνδυασμό αντοχής και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας εξασφαλίζοντας μεγάλη ικανότητα παραλαβής φορτίων. Επιπλέον, η χρήση τους κάνει το σκυρόδεμα πιο πλάστιμο, άρα και καταλληλότερο να ενδίδει στις συγκλίσεις, χωρίς όμως να τις περιορίζει σε μεγάλο βαθμό και χωρίς η επένδυση να αστοχεί.
- Η χρήση ινών οδηγεί σε οικονομία υλικών και αύξηση της ταχύτητας κατασκευής. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην κατάργηση του πλέγματος και στην μείωση της ανθρώπινης εργασίας αλλά και στον μικρότερο όγκο εκτοξευόμενου

σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί συνολικά. Οι ίνες δεν απαιτούν ελάχιστη επικάλυψη, όπως το πλέγμα, αλλά ούτε πρέπει να γίνεται γέμισμα των όποιων κενών με σκυρόδεμα, σαν λιθογόμωση. Ενδεικτικό της μείωσης του χρόνου είναι το γράφημα 3.13 του οποίου τα στοιχεία όμως δεν πρέπει να θεωρούνται απόλυτα:



Γράφημα 3.13: Εξοικονόμηση χρόνου λόγω ινών (Arcelormittal, 2008)

- Γενικά δεν απαιτούν ειδικό μηχανικό εξοπλισμό για τη χρήση τους. Ωστόσο, το ακροφύσιο και οι σωληνώσεις πρέπει να είναι ικανού πάχους ώστε οι ίνες να μην τις φράζουν. Επίσης, μπορούν να συνδυαστούν με όλα τα πρόσθετα και πρόσμικτα της αγορά.
- Κατάλληλες ίνες όταν προστίθενται στο σκυρόδεμα αυξάνουν κατά πολύ την ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες, περιορίζοντας τη θραύση του.
- Οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες επισκευών προϋπαρχόντων κατασκευών. Επιπλέον, εάν μια επένδυση ινοπλισμένου σκυροδέματος χρειαστεί επισκευή ή ενίσχυση αυτό γίνεται ευκολότερα σε σχέση με μια επένδυση με συμβατικό οπλισμό.

Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Οι ίνες διασκορπίζονται στο μίγμα αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών τελικά παραλαμβάνει φορτία και περιορίζει το άνοιγμα των ρωγμών. Το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι ακόμη και 25%, που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος τους δεν αξιοποιείται. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι ένα μέρος τους χάνεται και ως υλικό αναπήδησης. Ειδικά στην περίπτωση της ξηρής μίξης μπορεί να φθάσει το 50%.
- Οι χαλύβδινες κυρίως ίνες είναι σχετικά κοφτερές μπορεί να προκαλέσουν εκδορές και μικροτραυματισμούς στο προσωπικό αν δεν γίνεται χρήση τους με προσοχή
- Οι ίνες δε μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δε μπορεί να αναπτύξει τόσο μεγάλη εφελκυστική αντοχή όσο το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα (Wong C., 2004).
- Κατά τη μίξη τους, εάν αυτή δεν εκτελείται σωστά ή αν δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, μπορεί να δημιουργούνται συσσωματώματα ινών που

αργότερα θα φράξουν τις σωληνώσεις ή θα χειροτερέψουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Οι χαλύβδινες ίνες φθείρονται όταν εκτίθενται σε υγρασία ενώ οι υάλινες έχουν μικρή ανθεκτικότητα σε αλκαλικά περιβάλλοντα. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια έχουν από μικρή έως ελάχιστη επικάλυψη, έτσι τείνουν να εμφανίζουν σημεία σκουριάς. Για λόγους αισθητικής και ασφάλειας, προτείνεται ότι η μόνιμη επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα κονιάματος που περιέχει τις νέες HPP 152 πλαστικές ίνες (High Performance Polypropylene Fibres) για τον έλεγχο θερμικού ραγίσματος (Κατσικογιάννη, 2004).

- Φθορά επίσης μπορεί να προκληθεί και από λάθος στη συσκευασία ή στη μεταφορά.
- Η εμπειρία από τη χρήση τους δεν είναι τόσο διαδομένη όσο αυτή του δομικού πλέγματος.
- Ο εξοπλισμός φθείρεται σημαντικά περισσότερο σε σχέση με το κοινό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, το κόστος λόγω φθοράς εξοπλισμού, αυξάνει.
- Είναι συνήθως ακριβότερες σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό και η διαθεσιμότητά τους στον χώρο του έργου μπορεί να είναι περιορισμένη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΙΓΜΑΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1. Γενικά στοιχεία εκτοξευόμενου σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο οικοδομικό υλικό που τείνει να αντικαταστήσει όλα σχεδόν τα υπάρχοντα οικοδομικά υλικά, όπως λίθους, πλίνθους, σιδηροδοκούς, ξυλοδοκούς, κλπ. Με την πρόοδο της τεχνολογίας, συνεχώς αναπτύσσονται νέοι τρόποι με νέες μεθόδους εφαρμογής για τις κατασκευές μας, που γίνονται όλο και πιο πολύπλοκες.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, που είναι μια ειδική μορφή του κοινού σκυροδέματος, απαιτεί πέραν των μηχανημάτων, συσκευών και οργάνων, που είναι απαραίτητα στο κοινό σκυρόδεμα, μηχανήματα μεταφοράς και εκτόξευσης στη θέση που θα εναποτεθεί, όργανα έλεγχου των μηχανών, αλλά και πρόσθετα βελτιωτικά υλικά, για να επιστρωθεί στην επιφάνεια εφαρμογής σωστά, με ρύθμιση του χρόνου σκλήρυνσης, της εργασιμότητας, της αντοχής κλπ.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι σήμερα ένα σημαντικό υλικό - εργαλείο για διάφορες εργασίες εκεί που το κοινό σκυρόδεμα δυσκολεύεται ή και αδυνατεί να δώσει λύσεις. Δεν είναι τίποτα άλλο από σκυρόδεμα λεπτόκοκκων αδρανών, για να διευκολύνεται έτσι η εκτόξευσή του. Συνήθως μαζί με τα αδρανή και το τσιμέντο προστίθενται και διάφορα αλλά υλικά (πρόσμικτα και πρόσθετα) ώστε να εξυπηρετούν καλύτερα τον σκοπό για τον οποίο προορίζονται, δηλαδή την προώθηση και την εκτόξευση του μίγματος, την ταχεία πήξη, την συγκόλληση με το υπόστρωμα, την μικρή αναπήδηση και την αποφυγή ρηγματώσεων.

Το ομοιογενές μίγμα, που διαστρώνεται επάνω στην επιφάνεια που πρόκειται να καλυφθεί με σκυρόδεμα, μετά την εκτόξευσή του, αποτελεί ένα υλικό συμπαγές, με αυξημένες αντοχές όπως και το κοινό σκυρόδεμα, μετά την πάροδο πολύ μικρότερου χρονικού διαστήματος. Εάν μέσα στην μάζα του σκυροδέματος αναμείξουμε ίνες μεταλλικές ή γυάλινες ή πλαστικές τότε το αποτέλεσμα θα είναι ένα νέο σύνθετο υλικό που έχει αρκετή πλαστιμότητα και μπορεί να αναλαμβάνει φορτία πέραν της εμφάνισης ρωγμών λόγω παραμορφώσεων, σε αντίθεση με το ψαθυρό άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Σαπρανίδης, 2002).

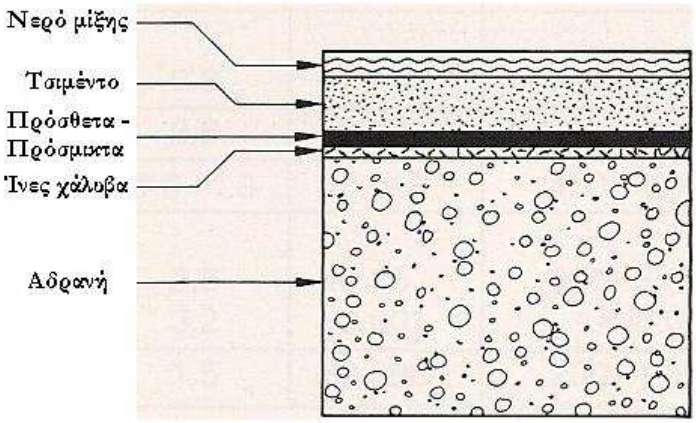
2. Ο σχεδιασμός του μίγματος

Όπως για κάθε είδους σκυρόδεμα, έτσι και για το ινοπλισμένο, οι αναλογίες των υλικών στη μίξη εξαρτώνται από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εργασίας ως προς την αντοχή, την εργασιμότητα κλπ. Γενικά, τα μίγματα ινοπλισμένου σκυροδέματος περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου και υψηλότερα κλάσματα λεπτομερούς προς αδρομερούς υλικού, σε σχέση με τα κανονικά σκυροδέματα. Συχνά, για να μειωθεί η ποσότητα του τσιμέντου, μέχρι και το 35% αυτού μπορεί να αντικατασταθεί με ιπτάμενη τέφρα. Επίσης, για να βελτιωθεί η εργασιμότητα των μιγμάτων με υψηλό ποσοστό ινών, προστίθενται ρευστοποιητές και σε συνδυασμό με αερακτικά (N. Chanh).

Οι βασικές παράμετροι που ελέγχουν την αντοχή και την ποιότητα του σκυροδέματος είναι ο λόγος νερό προς τσιμέντο (w/c), η περιεκτικότητα σε αέρα και ο βαθμός συμπύκνωσης. Εντούτοις, στο σχεδιασμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος υπεισέρχονται πρόσθετοι παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους επιδρούν στη

διαβάθμιση των αδρανών και στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Η επιλογή του μίγματος δε θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη μόνο τις απαιτήσεις του έργου αλλά και τη διαθεσιμότητα των υλικών και ειδικότερα τον τύπο των αδρανών και τη μέθοδο μεταφοράς του σκυροδέματος δηλαδή, με άντληση ή με πεπιεσμένο αέρα. Ο θεωρητικός σχεδιασμός, όπου τα λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή αναμιγνύονται έτσι ώστε να προκύπτει μίγμα με τον ελάχιστο όγκο κενών που θα πρέπει να γεμίσει με νερό και τσιμέντο, είναι γενικά αποδεκτός για μηχανές ξερής μίξης. Ωστόσο, όταν γίνεται άντληση υγρών μιγμάτων απαιτούνται επιπλέον ποσότητες αδρανών πολύ λεπτής διαβάθμισης και τσιμέντου, έτσι ώστε να διευκολύνεται η ροή του μίγματος και να αποκλείεται η του νερού μέσα από αυτό. Αυτό απαιτεί σημαντική εμπειρία και δοκιμές, καθόσον όταν η ποσότητα των αδρανών πολύ λεπτής διαβάθμισης είναι υπερβολική υπάρχει κίνδυνος βουλώματος των σωλήνων, ιδιαίτερα όταν αυτοί είναι μεγάλου μήκους.

Συνεπώς, το μίγμα του ινοπλισμένου σκυροδέματος όταν είναι νωπό πρέπει να έχει μία επιθυμητή ρευστότητα και όταν πήξει να αποκτά αυξημένη αντοχή. Οι ίνες χάλυβα μπορούν γενικά να αντιμετωπισθούν ως πρόσθετο αδρανές υλικό (Maidl, 1995). Το σχήμα 4.1 δείχνει τις αναλογίες κατά βάρος για ένα τυπικό μίγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος για χρήση σε σήραγγες.



Σχήμα 4.1: Μίγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maidl 1995)

Ο συνολικός όγκος των υλικών και των κενών αέρα σε 1m^3 νωπού σκυροδέματος είναι 1.000 dm^3. Πρέπει επομένως να ισχύει η ακόλουθη εξίσωση:

$$1000 = \frac{z}{\rho_{oz}} + \frac{g}{\rho_g} + w + p + \frac{f}{\rho_{st}} \quad \text{(Maidl, 1995)}$$

Όπου: z = Περιεκτικότητα σε τσιμέντο (kg/m^3)

ρ_{oz} = Ειδικό βάρος τσιμέντου (g/cm^3). Αυτό μπορεί να υπολογισθεί ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιείται (DIN 1164).

g = Όγκος αδρανών (kg/m^3).

ρ_g = Ειδικό βάρος αδρανών (g/cm^3). Λαμβάνεται 2,6 kg/dm^3 για τα ξηρά χαλίκια, την άμμο, τις κροκάλες, 2,7 kg/dm^3 για τον ασβεστόλιθο και το γνεύσιο και τέλος 2,9 kg/dm^3 για το βασάλτη, διαβάση, διορίτη.

w = Η περιεκτικότητα σε νερό (kg/dm^3).

p = Όγκος των κενών αέρα στο συμπυκνωμένο νωπό σκυρόδεμα. Τα κενά αέρας στο σωστά αναμιγμένο και σχεδόν πλήρως συμπυκνωμένο νωπό σκυρόδεμα, χωρίς πρόσμικτο αερακτικό, κυμαίνεται γενικά μεταξύ 1 και 2% κατ' όγκο. Για λόγους σχεδιασμού εκτιμάται ως 1.5% κατ' όγκο.

f = Περιεκτικότητα σε ίνες (kg/dm^3).

ρ_{st} = Ειδικό βάρος χάλυβα (kg/dm^3).

Αυτή η εξίσωση δείχνει ότι από την άποψη της τεχνολογίας υλικών, η μίξη του ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν είναι απλά ένα θέμα προσθήκης ινών σε ένα τυποποιημένο μίγμα σκυροδέματος. Οι δοκιμές που συγκρίνουν το ινοπλισμένο και άοπλο σκυρόδεμα, συχνά παραλείπουν την περιεκτικότητα σε ίνες από τον όγκο του σκυροδέματος, κάτι που μπορεί όμως να οδηγήσει σε παρερμηνείες. Επομένως, θα ήταν ακριβέστερο να συσχετίσουμε την περιεκτικότητα των ινών με τον όγκο του μίγματος. Αυτό δεν έχει γίνει εφικτό μέχρι τώρα, κατά συνέπεια η περιεκτικότητα σε ίνες αναφέρεται συνήθως σε kg/m^3, ανεξάρτητα του όγκου του υλικού. Έτσι, συχνά λέμε 50 kg/m^3 ίνες και όχι 2% κατ' όγκο (Maidl, 1995).

3. Προετοιμασία επιφανειών

Η εκτόξευση του σκυροδέματος απαιτεί κάποιες προκαταρκτικές εργασίες στην επιφάνεια του βράχου ή του εδάφους που θα διαστρωθεί. Αυτές προβλέπονται και περιγράφονται από το Σχέδιο Προδιαγραφής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αλλά και από τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Πρωτίστως απαιτείται καθαρισμός της επιφάνειας από σαθρά υλικά ή χαλαρά στοιχεία αφού προηγουμένως υπολογισθεί και χαρτογραφηθεί η επιφάνεια που πρόκειται να ενισχυθεί ή να επικαλυφθεί. Προηγούμενη τράχυνση της επιφάνειας και διαβροχή με νερό υπό πίεση θα κάνει καλύτερη την πρόσφυση με το σκυρόδεμα. Επιπλέον, επιφανειακά νερά θα πρέπει να συλλέγονται με στεγάνωση πριν την επιβολή τον εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Σε περίπτωση σημείων διαρροής στην επιφάνεια διάστρωσης, πρέπει τα νερά να απομακρύνονται ή να σφραγίζεται η ρωγμή από την οποία διαρρέουν.

Εάν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διαστρώνεται επάνω σε προϋπάρχον στρώμα σκυροδέματος που δεν έχει σκληρυνθεί ακόμη, δεν χρειάζεται καμιά προετοιμασία εφ' όσον η επιφάνεια παραμένει καθαρή.

Επίσης, το ακροφύσιο εκτόξευσης θα πρέπει να είναι κάθετο στην επιφάνεια και η εφαρμογή θα πρέπει να αρχίζει από την βάση της και να συνεχίζεται προς τα επάνω. Η ταχύτητα και η απόσταση τον ακροφυσίου θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να επιτυγχάνουν την μέγιστη ενσωμάτωση σκυροδέματος, δηλαδή την ελάχιστη αναπήδηση.

Έτσι, πριν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διαστρωθεί κατ' ευθείαν επάνω στην επιφάνεια της εκσκαφής, αυτή πρέπει προηγούμενα να καθαρισθεί από χαλαρά και ασταθή κομμάτια. Εάν η επιφάνεια αυτή είναι αποσαθρωμένη τότε πρέπει να απογυμνώνεται τελείως το τμήμα αυτό και να καθαρίζεται καλώς. Σε πολλά πτωχά εδάφη δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα για να τύχουν αυτής της προεργασίας επειδή πολύ σύντομα μπορεί να καταρρεύσουν. Τότε το σκυρόδεμα εκτοξεύεται κατ' ευθείαν

επάνω στην επιφάνεια όπως αυτή έχει εκσκαφθεί το συντομότερο δυνατόν, παίρνοντας το ρίσκο της υπερβολικής υπερεκσκαφής.

Εν γένει, στα εδάφη οι επιφάνειες δεν πρέπει να είναι παγωμένες ή με σπογγώδη εμφάνιση. Το νερό, με το οποίο διαβρέχεται το έδαφος εκτός από τον καθαρισμό του αποσκοπεί και στην ύγρανσή του, ούτως ώστε να μην απορροφά το νερό του σκυροδέματος.

Όπου όμως χρησιμοποιείται ήδη εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για την υποστήριξη επιφάνειας σκυροδέματος ή όπου η σταθεροποίηση στοιχείου σκυροδέματος είναι επικίνδυνη, εκτοξεύεται πρώτα ένα ισχυρό συγκολλητικό κονίαμα για την προσωρινή σταθεροποίηση. Μπορεί να χρειαστεί να γίνει αποκοπή τμημάτων επιφάνειας του σκυροδέματος που προεξέχουν ή να χρειαστεί να απομακρυνθούν όλα τα χαλαρά τμήματά του. Εάν τέλος το σκυρόδεμα έχει υποστεί ενανθράκωση και έχει προσβληθεί ο σιδηροπλισμός από επιχλωρίωση θα πρέπει να απομακρυνθούν τα ενανθρακωμένα τμήματα και τα χλωρίδια. Στην συνέχεια, θα πρέπει να ενισχυθεί το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος, αφού προηγουμένως εξυγιανθεί ο οπλισμός και επιχρισθεί με αντιδιαβρωτικό χρώμα. Εάν αυτό δεν είναι δυνατόν, τότε το μολυσμένο σκυρόδεμα θα απομακρύνεται και θα γίνεται πλήρης και άρτια εξυγίανση. Πρέπει τέλος να καθαρισθεί η επιφάνεια από σκόνες και λεπτά υλικά με χρήση αέρα, νερού ή και αμμοβολής.

4. Διαδικασίες μίξης σκυροδέματος

Οι τεχνικές εφαρμογής του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι του ξηρού και του υγρού μίγματος. Επειδή και οι δύο διαδικασίες είναι σύμφωνες με τις συνήθεις απαιτήσεις ποιότητας εκτοξευόμενου σκυροδέματος, η επιλογή της μεθόδου γίνεται βασικά με κριτήρια πρακτικότητας και οικονομικότητας. Ο κατάλληλος εξοπλισμός και η ορθή τεχνική εκτόξευσης έχουν πολύ μεγάλη σημασία στην εξασφάλιση της επί τόπου ποιότητας (Σοφιανός, 2008).

Η ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ότι στην ξηρή μίξη το απαιτούμενο νερό για την ενυδάτωση προστίθεται στο ακροφύσιο ψεκασμού, ενώ στην υγρή μίξη το μεταφερόμενο μίγμα περιέχει ήδη το απαραίτητο νερό για ενυδάτωση. Και στις δύο όμως μεθόδους γίνεται ταυτόχρονα μαζί με την εκτόξευση και η συμπύκνωσή του σκυροδέματος.

Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1990, η μέθοδος ξηρού ψεκασμού κυριαρχούσε, κάτι που αργότερα άλλαξε, ιδιαίτερα όταν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα άρχισε να χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της βραχομάζας σε μεγάλες ποσότητες. Έτσι, η υγρή εκτόξευση επικρατεί σήμερα σε ποσοστό 70-80% παγκοσμίως, καθότι τα συγκριτικά πλεονεκτήματά της είναι περισσότερα από τα μειονεκτήματα (Melbye, Dimmock, 2001).

4.1 Ξηρή μίξη

Η τεχνική της ξηρής μίξης ξεκίνησε πρώτα από την αντίστοιχη της υγρής, λόγω της ευκολότερης τεχνολογικά εκτέλεσής της. Περιλαμβάνει τη μίξη ξηρών ή ύφυγρων αδρανών με τσιμέντου και ίνες και προώθησή του μέχρι το ακροφύσιο εκτόξευσης. Λίγο πίσω από αυτό προστίθεται το νερό με όποια υγρά πρόσθετα ή πρόσμικτα απαιτούνται.

Η επίδραση της τεχνολογίας κατασκευής και της αναπήδησης των υλικών πρέπει να ληφθεί υπόψη στη διαδικασία μίξης του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα της επιρροής της διαδικασίας εκτόξευσης, των παραμέτρων της και του είδους των ινών που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, τότε δοκιμές εκτόξευσης πρέπει να εκτελεστούν με τον δεδομένο εξοπλισμό που θα γίνει η εργασία. Εάν και κατά πόσο η κοκκομετρία των αδρανών και η περιεκτικότητα των ινών του νωπού μίγματος διαφέρουν σε σχέση με αυτά του σκληρυμένου σκυροδέματος στην τελική του θέση πρέπει να εξεταστεί, αφού είναι ιδιαίτερα κρίσιμο. Από την άποψη του κόστους, η απόλυτη μάζα της αναπήδησης είναι επίσης ενδιαφέρουσα. Δοκιμές με τυποποιημένες διαθέσιμες ίνες της αγοράς έχουν δείξει ότι οι παράμετροι της εκτόξευσης ασκούν ακόμα μεγαλύτερη επίδραση στην ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, απ' ότι πιθανές διαφοροποιήσεις των χαρακτηριστικών της αναπήδησης κάθε τύπου ίνας. Οι παράμετροι της εκτόξευσης περιλαμβάνουν τον έλεγχο της πίεσης αέρα, τη φέρουσα ικανότητα των ακροφυσίων, τον έλεγχο αυτών, την απόσταση μεταξύ του ακροφυσίου και της επιφάνειας εφαρμογής καθώς και άλλες παρόμοιες παραμέτρους (Maidl, 1995).

Κύρια μειονεκτήματα της μεθόδου ξηρού μίγματος είναι η απώλεια υλικού αναπήδησης (15-40% περίπου), η μικρή παραγωγικότητα και η ομοιομορφία του σκυροδέματος, σε σχέση με τη μέθοδο του υγρού μίγματος. Επίσης, μειονεκτεί και ως προς το ότι φθείρει τον εξοπλισμό ενώ οι συνθετικές ίνες απαιτούν ειδικό εξοπλισμό (Ballou and Niermann, 2002). Οι απαιτήσεις των υλικών παραγωγής ινοπλισμένου σκυροδέματος με τη μέθοδο ξηρής μίξης είναι οι ακόλουθες:

- *Αδρανή:*

Ο τύπος αδρανών που χρησιμοποιείται πρέπει να αξιολογηθεί και να επιλεχτεί βάσει της οικονομικότητας και των απαραίτητων χαρακτηριστικών που θέλουμε να αποκτήσει το υλικό. Η προσοχή επικεντρώνεται στη χρήση ασβεστολιθικών λεπτομερών τεμαχιδίων. Ειδικές δοκιμές πρέπει να πραγματοποιηθούν πριν από τη χρήση τους. Έχει παρατηρηθεί ότι αυξημένη ποσότητα λεπτομερών αυξάνει τις ρηγματώσεις.

Στην επιλογή της κοκκομετρικής διαβάθμισης, πρέπει να σημειωθεί ότι ο βαθμός αναπήδησης των μεμονωμένων κόκκων μπορεί να διαφέρει. Γενικά, υπάρχουν περισσότερα χονδρόκοκκα απ' ότι λεπτόκοκκα μόρια στην αναπήδηση του ξηρού μίγματος σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, είναι δυνατό να αυξηθεί ο βαθμός κοκκομετρικής διαβάθμισης με ταυτόχρονη αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται επιτρέπεται να έχουν κατά DIN 1045 μέγιστο κόκκο μέχρι 8 mm, αφού έχει αποδειχθεί ότι έτσι έχουμε πετυχημένη εφαρμογή (Maidl, 1995). Ωστόσο, χρησιμοποιούνται συνήθως αδρανή με μέγιστο κόκκο τα 16 mm.

- *Τσιμέντο:*

Λόγω της απαίτησης για αντοχή του σκυροδέματος στα πρώτα στάδια της ωρίμανσής του, στις σήραγγες, προτιμάται συχνά τσιμέντο ταχείας ανάπτυξης αντοχής π.χ. PZ 35 F ή PZ 45 F (σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 1164) και CEM 142.5 R (κατά το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1). Παρατηρήσεις που έχουν γίνει για το πώς η περιεκτικότητα σε τσιμέντο επηρεάζει την αναπήδηση βάσει της ξηρής εκτόξευσης, ισχύουν επίσης και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτός ο παράγοντας εξετάζεται μόνο στην περίπτωση που η περιεκτικότητα των ινών είναι υψηλή, με ποσοστά της είναι της τάξεως του 3% κατ' όγκο, ή και περισσότερο. Πάντως η περιεκτικότητα σε τσιμέντο στην ξηρή ανάμιξη έχει εκτιμηθεί σε 350-450 kg/m^3 και σπάνια μέχρι τα 480 kg/m^3. Λόγω της αυξημένης αναπήδησης, εμφανίζεται μια εικονική αύξηση της περιεκτικότητας σε σκυρόδεμα.

- *Ίνες:*

Οι ίνες προστίθενται μαζί με τα ξηρά υλικά και μεταφέρονται με πεπιεσμένο αέρα μέχρι το ακροφύσιο. Στην τεχνική αυτή, η ποσότητα των ινών που χάνεται λόγω αναπήδησης είναι συνήθως υψηλή, μπορεί και μεγαλύτερη του 50%, με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερες ίνες στο εκτοξευμένο μίγμα απ' ότι στο αρχικό. Το γεγονός αυτό πρέπει να αξιολογηθεί σοβαρά στο σχεδιασμό του μίγματος. Δεν είναι όμως εφικτό να καθιερωθεί ένας γενικός κανόνας που να περιγράφει την παραπάνω ποσότητα καθώς αυτή εξαρτάται από το είδος των ινών που χρησιμοποιούνται, και όχι μόνο. Συνεπώς είναι απαραίτητο να εκτελούνται δοκιμές, με τον εξοπλισμό που θα κάνει και την τελική εκτόξευση. Μια δοσολογία της τάξης των 120 kg/m^3 δεν επηρεάζει την εργασιμότητα του μίγματος (Maidl, 1995).

- *Νερό/Τσιμέντο:*

Η αναλογία νερού/τσιμέντου (w/c) είναι σίγουρα ένας από τους κρισιμότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Το συνολικό νερό που προστίθεται αποτελείται από το νερό που προστίθεται στο ακροφύσιο και από τη φυσική υγρασία των αδρανών. Εν αντιθέσει με την υγρή μέθοδο εκτόξευσης, στην ξηρή δεν έχει προκαθοριστεί η ακριβής τιμή του λόγου w/c διότι το ποσοστό του νερού ελέγχεται και ρυθμίζεται από το χειριστή του ακροφυσίου. Αυτό αποτελεί βεβαίως ένα σημαντικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου εκτόξευσης. Στην πράξη παρολαυτά, ο λόγος νερό προς τσιμέντο είναι σχεδόν σταθερός. Γενικά έχει καθιερωθεί η αναλογία μεταξύ τους να κυμαίνεται μεταξύ 0,45 και 0,5. Επιπλέον προσθήκη νερού από το όριο του 0,5 προκαλεί αύξηση της κάθισης χωρίς βελτίωση της εργασιμότητας, μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος και μπορεί να προκαλέσει εξίδρωση και απόμιξη του μίγματος. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν έχουμε λιγότερο νερό, προκαλείται αύξηση της σκόνης (Melbye, 1994).

Η υγρασία της επιφάνειας εκτόξευσης ή το νερό που εξέρχεται από ρωγμές της βραχομάζας πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη στη μελέτη σύνθεσης μιγμάτων. Εάν αφαιρεθεί λίγο νερό τότε προκύπτει περίσσεια σκόνης, ενώ εάν είναι σε περίσσεια τότε το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δεν προσκολλάται στην επιφάνεια αλλά ρέει. Η αυτοματοποιημένη ρυθμιζόμενη προσθήκη ύδατος, που λαμβάνει υπόψη την έμφυτη

υγρασία του μίγματος, είναι ουσιαστική για τη βέλτιστη ποιότητα του σκυροδέματος.

Μία σημαντική παράμετρος της ξηρής μίξης είναι η φυσική υγρασία των υλικών. Όπως προαναφέρθηκε όταν το μίγμα είναι πολύ ξηρό τότε προκαλείται σκόνη στο χώρο. Εάν η φυσική υγρασία είναι υψηλή, αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως το φράξιμο των μηχανημάτων και των σωλήνων μεταφοράς. Το ποσοστό της φυσικής υγρασίας πρέπει να κυμαίνεται από 3-6% και ιδανικότερα από 2-4%. Τα τελευταία χρόνια συχνά χρησιμοποιούνται ξηρά υλικά συσκευασμένα από εργοστάσια τα οποία δεν περιέχουν καθόλου υγρασία, ή μπορεί τα υλικά προς μίξη να είναι στεγασμένα ή καλυμμένα στο χώρο αποθήκευσής τους. Για να μειωθεί η σκόνη ενδείκνυται η διαβροχή των ξηρών υλικών πριν προστεθούν στο μηχάνημα εκτόξευσης. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ειδικά ακροφύσια προϋγρανσης.

- *Πρόσμικτα:*

<u>Επιταχυντές</u>

Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα ξηρής μίξης το πιο συνηθισμένο πρόσμικτο υλικό είναι οι επιταχυντές. Αυτοί προσδίδουν ταχεία ανάπτυξη αντοχών στο σκυρόδεμα. Ανερχόμενα παγκοσμίως είναι πλέον τα χημικά πρόσμικτα νέα γενιάς, ονομαζόμενα ως επιταχυντές ελεύθεροι αλκαλίων (alkali free), τα οποία είναι πολύ φιλικότερα στο περιβάλλον. Η χρήση επιταχυντών δίδει τη δυνατότητα σε αλλεπάλληλες στρώσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος να διαστρωθούν νωρίτερα και με μεγαλύτερο πάχος, ταυτόχρονα όμως προκαλούν μείωση της τελικής αντοχής της επένδυσης. Ιδιαίτερη προσοχή λοιπόν πρέπει να λαμβάνεται στη δοσολογία αυτών των προσμίξεων, η οποία πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή και με μεγάλη συνέπεια. Το ποσοστό των επιταχυντών καθορίζεται από την ποσότητα του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου (π.χ. 0.5 % κατά βάρος τσιμέντου). Βέβαια, οι ίδιες οι ίνες αυξάνουν την πρώιμη αντοχή του σκυροδέματος, έτσι η απαίτηση για επιταχυντή είναι μικρότερη (Maidl, 1995).

Οι επιταχυντές μπορούν να είναι σε σκόνη ή σε υγρή μορφή. Οι επιταχυντές σε σκόνη (όπως αυτοί της MEYOO SA545 ελεύθεροι αλκαλίων) προστίθενται κατά την τροφοδοσία του μηχανήματος εκτόξευσης. **Η** προσθήκη των πρόσμικτων χειρωνακτικά, όπως γίνεται συχνά, οδηγεί συνήθως σε υπερβολική δόση, ανομοιόμορφα κατανεμημένη στο μίγμα. Πολλές μελέτες απέδειξαν ότι, όταν οι επιταχυντές προστίθενται χειρωνακτικά παρατηρείται μείωση της τελικής αντοχής περίπου 35% σε σύγκριση με το σκυρόδεμα χωρίς επιταχυντές. Η χειρονακτική τροφοδοσία ωστόσο μπορεί να γίνει αποδεκτή σε ειδικές περιπτώσεις ή εκεί που δεν υπάρχει απαίτηση για υψηλή ποιότητα σκυροδέματος. Ο καλύτερος τρόπος για να εξασφαλιστεί η ακριβής δόση των επιταχυντών είναι η χρήση υγρών προϊόντων (όπως το MEYCO SA160), που προστίθενται μαζί με το νερό στο ακροφύσιο μέσω τροφοδότη. Μελέτες έχουν γίνει σχετικά με την επιρροή των επιταχυντών ως προς την τελική αντοχή του μίγματος (Prudencio, 1996) και ως προς την συστολή ξήρανσης και την ανθεκτικότητά του σε χαμηλές θερμοκρασίες (Jolin, 1996).

Οι επιταχυντές σε υγρή μορφή έχουν πολλά πλεονεκτήματα έναντι αυτών σε σκόνη:

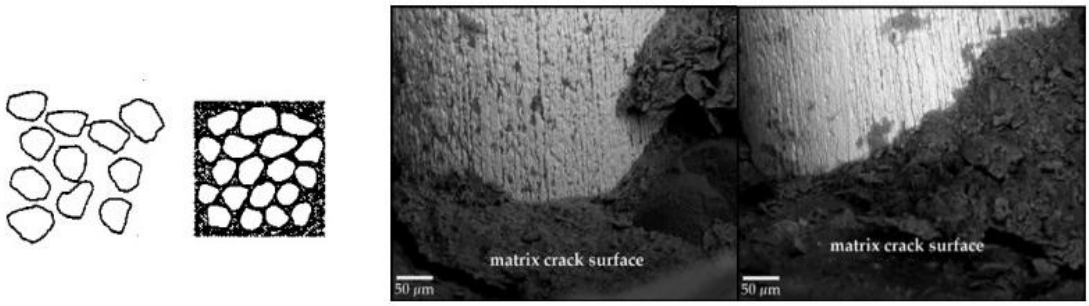
- Το πρόβλημα καυστικών συστατικών στη σκόνη αποφεύγεται.
- Η δοσολογία στο ακροφύσιο αποτρέπει τη στιγμιαία πήξη
- Η ομοιόμορφη μίξη τους με το υλικό προς ψεκασμό συνεπάγεται καλύτερες τελικές αντοχές και μεγαλύτερη οικονομία. Πειράματα έδειξαν ότι σε σύγκριση με το βασικό σκυρόδεμα (χωρίς επιταχυντές), η απώλεια της τελικής αντοχής μειώνεται λιγότερο από 25%.

Εκτός από τους επιταχυντές μπορούν να προστεθούν και πρόσμικτα υλικά μείωσης της σκόνης. Ωστόσο, αυτά δεν τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής (T. Melbye, 1994).

- *Πρόσθετα:*

<u>Μικροπυριτία</u>

Αντίθετα με τις χημικά πρόσμικτα, η δράση των πρόσθετων είναι κυρίως φυσική. Γνωστά παραδείγματα είναι η μικροπυριτία (πυριτιακή παιπάλη ή κάπνα πυριτίας - microsilica ή silica fume) τα οποία όλο και κερδίζουν έδαφος στα έργα. Αυτά τα λεπτομερή υλικά (ειδικής επιφάνειας 20-35 m^2/g) με περιεκτικότητα σε SiO_2 65-97%, ανάλογα με την ποιότητα του προϊόντος, οδηγούν σε μία σημαντική βελτίωση της ποιότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που αποδεικνύεται από την αυξημένη θλιπτική αντοχή και πυκνότητα (εικόνα 4.2). Λόγω της βελτιωμένης συνάφειας, στρώσεις μεγαλύτερου πάχους μπορούν να διαστρωθούν χωρίς τη χρήση επιταχυντών. Συνήθως προστίθενται σε ποσοστό από 8 έως 12% αντικαθιστώντας το τσιμέντο (Wolsiefer and Morgan, 1993). Το μέγεθος του κόκκου είναι από 0.1 έως 0.3 μm και το ειδικό βάρος από 2.2-2.3. Εκτός του ότι είναι ένα καλό υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου έχει ποζολανικές ιδιότητες (αντιδρά χημικά με το σκυρόδεμα) και βελτιώνει τη συνάφεια μεταξύ ινών και σκυροδέματος (εικόνα 4.2 από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο).



Εικόνα 4.2: Αριστερά χωρίς προσθήκη και δεξιά με προσθήκη μικροπυριτίας (Ayan, 2004)

Στη μέθοδο ξηρής μίξης η προσθήκη μικροπυριτίας έχει άλλη μία ενδιαφέρουσα επίδραση. Προσθέτοντας τη με σωστό τρόπο, μπορεί να επιφέρει μείωση της αναπήδησης, μέχρι και 50%, των αδρανών αλλά και των ινών. Επιπλέον πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι καλύτερη αντλησιμότητα του μίγματος, άρα και μειωμένες φθορές στον εξοπλισμό και τις σωληνώσεις, αυξάνει τη συνεκτικότητα και την αντοχή του σκυροδέματος, μειώνει την υδατοπερατότητά του και διευκολύνει την μίξη, την κατανομή και την αγκύρωση των ινών.

Υπάρχουν λίγες πληροφορίες, βασισμένες σε επιστημονικές δοκιμές, για τη χρήση των πυριτικών πρόσθετων στη μέθοδο ξηρής εκτόξευσης. Πειράματα σε μια σιδηροδρομική σήραγγα στη Γερμανία (σήραγγα Schönrain), έδειξαν ότι η αντίσταση του σκυροδέματος στη διάβρωση από το νερό μπορεί να βελτιωθεί μέσω της παρουσίας υλικών Si. Αυτό μειώνει το ποσοστό των πρόσμικτων επιταχυντών σε περίπου 3%, δηλ. στο ήμισυ της αρχικής τιμής (Maidl, 1995).

4.2 Υγρή μίξη

Η μέθοδος υγρής μίξης, χρησιμοποιείται στη βιομηχανική παραγωγή προϊόντων ινοπλισμένου σκυροδέματος μικρού πάχους (thin wall constructions). Η διάστρωση γίνεται σε στρώσεις πάχους 4 - 6 mm και το ελάχιστο τελικό πάχος του στοιχείου ανέρχεται στα 13 mm, για την επίτευξη του οποίου απαιτούνται 2 έως 2,5 στρώσεις. Κυρίως όμως χρησιμοποιείται στις σήραγγες για την υποστήριξη του υπόγειων ανοιγμάτων.

Οι ίνες είτε προστίθενται στο εργοστάσιο παρασκευής είτε επί τόπου, στο έργο. Εάν μεγάλες ποσότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος και ινών χρησιμοποιούνται, τότε μια μεταφορική ταινία είναι ιδανική για την τροφοδοσία με ίνες του μίγματος. Εάν αντίθετα μικρές ποσότητες μόνο παράγονται, είναι ασφαλέστερο να προστίθενται χειρονακτικά οι ίνες από μια υπερυψωμένη πλατφόρμα. Σε μια βαρέλα γεμάτη με σκυρόδεμα, για να προστεθεί η απαιτούμενη ποσότητα ινών, απαιτούνται μόλις επτά λεπτά με τη διαδικασία αυτή (Ballou and Niermann, 2002).

Η χρήση της τεχνικής αυτής στα έργα πολιτικού μηχανικού είναι ακόμη περιορισμένη. Ωστόσο, με τη μέθοδο αυτή βελτιώνεται η ομοιομορφία του σκληρυμένου σκυροδέματος και μειώνεται η αναπήδηση. Οι απαιτήσεις των υλικών παραγωγής ινοπλισμένου σκυροδέματος με τη μέθοδο υγρής μίξης είναι οι ακόλουθες:

- *Αδρανή:*

Όπως συμβαίνει για κάθε σκυρόδεμα, η κοκκομετρία των αδρανών είναι πολύ σημαντική. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται εδώ στην κατανομή των λεπτομερών τεμαχιδίων. Έτσι, στην υγρή μίξη πρέπει να τα ακόλουθα:

- Η μέγιστη διάμετρος των κόκκων πρέπει να είναι 8-10 mm, λόγω περιορισμών του εξοπλισμού άντλησης και για να μειωθεί η απώλεια αδρανών από αναπήδηση (Melbye and Dimmock, 2001).
- Η κοκκομετρική διαβάθμιση είναι επίσης πολύ σημαντική, ιδιαίτερα του λεπτόκοκκου υλικού. Το παραμένον υλικό στο κόσκινο no. 0.125 mm πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο 4-5% και όχι περισσότερο από 8-9% (Melbye and Dimmock, 2001).
- Όταν το ποσοστό του λεπτού υλικού είναι μικρό προκαλείται διαχωρισμός, κακή λίπανση και υπάρχει κίνδυνος να φράξουν τα μηχανήματα. Στην περίπτωση όμως του ινοπλισμένου σκυροδέματος η περίσσεια λεπτόκοκκου υλικού είναι απαραίτητη τόσο για την άντληση όσο και για τη συμπύκνωση. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό δίδει ένα κολλώδες σκυρόδεμα (Melbye

and Dimmock, 2001).

- Η μικρή περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκο υλικό αντισταθμίζεται προσθέτοντας περισσότερο τσιμέντο ή μικροπυριτία, ενώ στην αντίθετη περίπτωση αυξάνεται η δόση των προσμίξεων που περιορίζουν το νερό (μειωτές νερού).
- Τα αδρανή με διάμετρο 8 mm δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 10%. Το χονδρόκοκκο υλικό θα αναπηδήσει κατά τον ψεκασμό στην ελεύθερη επιφάνεια ή θα διατρυπήσει το ήδη εφαρμοσμένο δημιουργώντας κρατήρες που είναι δύσκολο να πληρωθούν. Επίσης οι μεγάλοι κόκκοι μπορούν να μπλοκάρουν το ακροφύσιο και ο καθαρισμός γίνεται χρονοβόρος.

o *Τσιμέντο:*

Ως προς το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, ισχύουν τα ίδια με την ξηρή μίξη. Οι ποσότητες όμως του τσιμέντου στην υγρή είναι μεγαλύτερες. Θα μπορούσε να γίνει μίξη με μικρότερες ποσότητες τσιμέντου, ωστόσο αυτό θα οδηγούσε σε έναν λόγο νερό προς τσιμέντο μεγαλύτερο του 0,5 καθώς και μειωμένη πρώιμη και τελική αντοχή. Επιπλέον, μικρότερες ποσότητες τσιμέντου αυξάνουν δραματικά την αναπήδηση. Είναι γενικά λάθος να προστίθεται τσιμέντο σε ποσότητες 400 kg/m^3, ή ακόμη και λιγότερο διότι εκτός από την αναπήδηση αυξάνεται και η κατανάλωση επιταχυντών ενώ μειώνεται η παραγωγικότητα. Από οικονομικής άποψης, αύξηση 50 kg τσιμέντου αυξάνει 4 έως 5% το συνολικό κόστος, ενώ μόνο το κέρδος λόγω της μειωμένης αναπήδησης και της οικονομίας σε επιταχυντή, οδηγεί σε μείωση του κόστους κατά 8 έως 13% (Melbye and Dimmock, 2001).

o *Ίνες:*

Χρησιμοποιούνται όπως και στην ξηρή ανάμιξη, αλλά η αναπήδηση τους είναι μικρότερη. Στην υγρή μίξη οι ίνες προστίθενται είτε στο χαρμάνι κατά την προσθήκη των υπολοίπων συστατικών, είτε χωριστά στη βαρέλα στο εργοτάξιο λίγο πριν την εκτόξευση.

Για την επί τόπου προσθήκη των ινών είναι σημαντικό να χρησιμοποιούνται ίνες με σύστημα αγκύρωσης (hooked ends) ώστε να μη δημιουργούνται φωλιές ινών και να διασκορπίζονται ομοιόμορφα. Αντιθέτως, οι λοιποί τύποι ινών, ιδιαίτερα αυτοί με υψηλό λόγο μορφής, είναι δύσκολο να διασκορπιστούν και απαιτούν ειδικό εξοπλισμό. Επιπλέον, πολύ ικανές για τον ίδιο σκοπό είναι και οι ίνες που είναι συγκολλημένες με υδατοδιαλυτή κόλλα. Αυτές συσκευάζονται σε πλακέτες και έτσι προστίθενται στο υγρό μίγμα. Εκεί, μετά από ανάδευση, διασκορπίζονται ομοιόμορφα και προσφέρουν καλύτερα αποτελέσματα από τις μεμονωμένες ίνες.

o *Νερό/Τσιμέντο:*

Συνήθως είναι υψηλότερος σε σχέση με τις τιμές της ξηρής μίξης, η προσθήκη όμως πρόσμικτων επιτρέπει τη μείωση της τιμής του. Έτσι, σπάνια προστίθενται λιγότερο από 200 με 210 l/m^3 νερού για να έχει το μίγμα την επιθυμητή εργασιμότητα.

o *Πρόσμικτα:*

Ρευστοποιητές - Υπερευστοποιητές

Οι μειωτές νερού χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν την εργασιμότητα και τη συνεκτικότητα του σκυροδέματος στην πλαστική φάση. Επίσης μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την κάθιση με την ίδια αναλογία w/c. Όπως γνωρίζουμε η μείωση του λόγου w/c συνεπάγεται άμεση αύξηση της αντοχής, ενώ η υψηλή κάθιση αυξημένη αντλησιμότητα.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται συχνά συνδυασμοί λιγνοσουλφιδίων, ναφθαλίνης και μελαμίνης. Οι ναφθαλίνες και μελαμίνες (υπερευστοποιητές) διαφέρουν χημικά από τα λιγνοσουλφίδια (ρευστοποιητές - μειωτές νερού). Συνοπτικά μπορούμε να πούμε ότι η μελαμίνη δημιουργεί ένα λιπαντικό επίστρωμα στην επιφάνεια των μορίων τσιμέντου, η ναφθαλίνη φορτίζει ηλεκτρικά τα μόρια αυτά έτσι ώστε να απωθούνται μεταξύ τους και τέλος τα λιγνοσουλφίδια μειώνουν την τάση συγκράτησης νερού στην επιφάνεια τους. Όταν διασκορπίζονται ομοιόμορφα, τα μόρια του τσιμέντου όχι μόνο ρέουν πιο εύκολα αλλά επίσης περιβάλλουν τα αδρανή πιο αποτελεσματικά. Το αποτέλεσμα είναι ένα σκυρόδεμα πιο εργάσιμο και ισχυρά ανθεκτικά (Melbye, 1994).

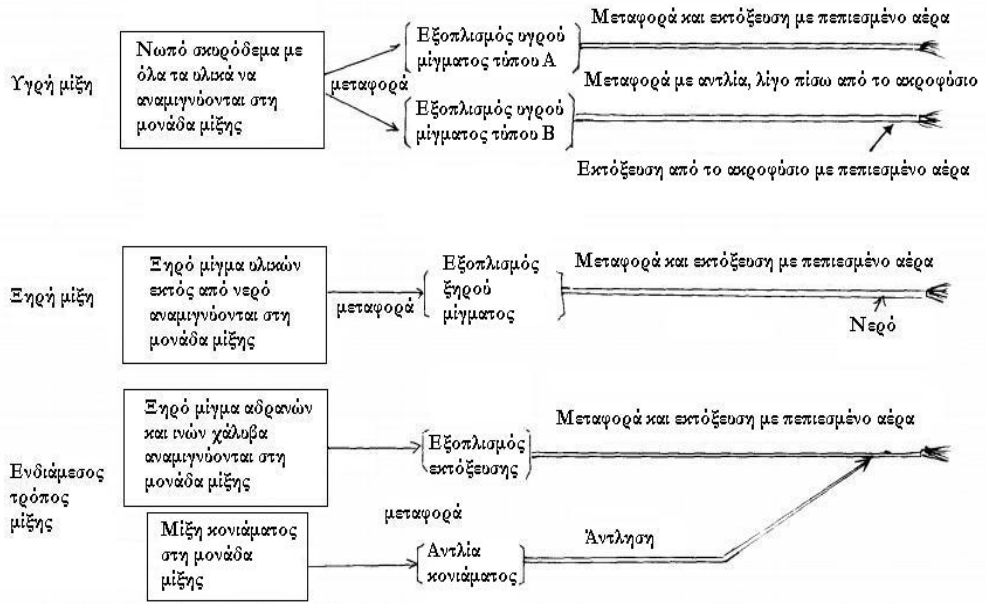
Η ιδιότητα των υπερευστοποιητών - ρευστοποιητών να αναμιγνύουν τα λεπτομερή υλικά τα κάνει να είναι οι απαραίτητες προσμίξεις για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Η αύξηση της κάθισης, που οφείλεται στην προσθήκη υπερευστοποιητών, εξαρτάται από το χρόνο και τη θερμοκρασία. Ωστόσο, η αντλησιμότητα μπορεί να διατηρηθεί για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα (20'-90'). Περίσσεια προσμίξεων οδηγεί σε ολική απώλεια της συνεκτικότητας και σε διαχωρισμό του μίγματος. Η προτεινόμενη δοσολογία κυμαίνεται από 4 έως 10 kg/m^3 ανάλογα βέβαια από τις ποιοτικές απαιτήσεις, το λόγο νερό προς τσιμέντο, την απαιτούμενη συνεκτικότητα, από τον τύπο των αδρανών και του τσιμέντου. Η χρήση υπερευστοποιητών τρίτης γενιάς επιτρέπει w/c<0.38 με κάθιση 15-20 cm.

- *Πρόσθετα:*

Η σωστή χρήση της μικροπυριτίας (ποσοστό 5-10%) βελτιώνει την αντλησιμότητα, αυξάνει τη συνοχή του σκυροδέματος και βελτιώνει τη σύνδεση μεταξύ των αλλεπάλληλων στρώσεων

4.3 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Συγκριτικά, οι δύο μέθοδοι μίξης, και μια ακόμη τρίτη που είναι μια ενδιάμεση τεχνική, παρατίθενται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Μέθοδοι εκτόξευσης ινοπλισμένου σκυροδέματος (Kobayasi, 1983)

Η ενδιάμεση τεχνική μίξης ουσιαστικά συνδυάζει πλεονεκτήματα της υγρής και της ξηρής μεθόδου. Ενδεικτικά επίσης παρουσιάζονται τυπικές αναλογίες μίξης για τα δύο διαφορετικά μίγματα στον πίνακα 4.4.

Υλικό	**Ξηρό μίγμα**		**Υγρό μίγμα**	
	kg/m³	**lb/yd³**	**kg/m³**	**lb/yd³**
Τσιμέντο	400	674	420	708
Πυριτιακή παιπάλη	50	84	40	67
10 mm κόκκος αδρανών	500	843	480	809
Άμμος	1170	1972	1120	1888
Χαλύβδινες ίνες	60	101	60	101
Μειωτής νερού	-	-	2 l/m³	52 fl. oz/yd³
Υπερπλαστικοποιητής	-	-	6 l/m³	156 fl. oz/yd³
Νερό	170	287	180	303
Συνολική υγρή μάζα	**2350**	**3961**	**2300**	**3876**

Πίνακας 4.4: Σύνοψη των αναλογιών των μιγμάτων ξηρής και υγρής μίξης (Morgan, 1990)

Διαφορές επίσης υπάρχουν και στα μηχανικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν από τις δύο διαφορετικές μεθόδους μίξης, δεδομένου ότι έχουμε ίδια προσθήκη ινών. Η υγρή μίξη υπερτερεί λόγω της μικρότερης αναπήδησης ινών. Ο πίνακας 4.5 παρουσιάζει χαρακτηριστικές αντοχές και δείκτες δυσθραυστότητας για ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για διάφορα μίγματα που έχουν διαστρωθεί με τις δύο μεθόδους, όπως φαίνονται στον πίνακα 4.5.

	Ξηρή μίξη					Υγρή μίξη				
	Σκέτο	**Πυριτιακή παιπάλη**				**Σκέτο**	**Πυριτιακή παιπάλη**			
Είδος ίνας	-	-	Γαντζωτά άκρα	Κυμα-τοειδείς	Κυμα-τοειδείς	-	-	Γαντζωτά άκρα	Κυμα-τοειδείς	Κυμα-τοειδείς
Ποσότητα ινών (kg/m^3)	0	0	60.0	60.0	75.0	0	0	60.0	60.0	75.0
Θλίψη, MPa										
7 μέρες	44.5	42.5	42.4	43.0	43.0	44.5	50.3	46.4	48.3	
28 μέρες	49.6	51.9	55.9	60.0	58.0	55.8	65.7	65.0	66.6	44.7 66.1
Κάμψη, MPa										
7 days	-	-	5.4	4.9	5.1	5.1	5.4	5.2	4.8	4.6
28 days	-	-	7.9	8.0	7.4	6.0	6.9	6.6	6.7	5.9
Δυσθραυστό-τητα 7 ημέρες										
I_5	-	-	4.4	2.7	4.1	-	-	4.8	3.4	3.4
I_{10}	-	-	6.2	3.6	6.7	-	-	7.2	5.2	5.2
Δυσθραυστό-τητα, 28 ημ.										
I_5	-	-	2.2	2.1	2.8	-	-	4.3	2.2	3.4
I_{10}	-	-	3.1	2.3	4.0	-	-	6.4	3.2	4.6
Αναπήδηση										
Παρειές	35.0	21.6	22.1	24.5	26.7	3.4	5.4	6.0	6.0	-
Στέψη	54.6	26.6	28.5	30.5	32.8	8.9	10.3	14.9	10.3	-

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά των διαφόρων μιγμάτων, Morgan 1992

Αναλυτικότερα όμως παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6 οι διαφορές των δύο βασικών μεθόδων μίξης για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα:

Παράγοντες	Ξηρή ανάμιξη	Υγρή ανάμιξη
Μηχανολογικός εξοπλισμός	o Μικρότερο συνολικό κόστος επένδυσης. o Μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης	o Λιγότερος εξοπλισμός στο εργοτάξιο o Μικρότερη κατά 60% κατανάλωση αέρα. o Οι διακοπές κατά τον ψεκασμό είναι περιορισμένες.
Ανάμιξη	o Δυνατότητα ανάμιξης στο εργοτάξιο ή εγκατάσταση παραγωγής. o Δυνατότητα προανάμιξης. o Μη ικανοποιητική συμπεριφορά όταν η άμμος είναι υγρή.	o Ακριβείς αναλογίες ανάμιξης o Δυνατότητα χρήσης ξηρής άμμου o Υψηλές απαιτήσεις για την ποιότητα των αδρανών.
Τελικό προϊόν	o Σπανίως υπερβαίνει τα 5 m^3/h επί τόπου. o Δυνατότητα μεταφοράς σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε σχέση με την ξηρή ανάμιξη	o Υψηλότερη παραγωγή σε σύγκριση με την ξηρή ανάμιξη. Η παραγωγή κυμαίνεται, ανάλογα με τον τρόπο ανάμιξης μεταξύ 2-10 m^3/h μέχρι και 20 m^3/h. o Οικονομικότητα.
Αναπήδηση (απώλειες--απορριπτόμενο υλικό)	o Ανέρχεται σε 15-40% για κατακόρυφες επιφάνειες και 20-50% για επικαλύψεις οροφής. o Δημιουργία κοιλοτήτων.	o Χαμηλή αναπήδηση (<10% με σωστή σύνθεση). o Μη εμφάνιση κοιλοτήτων. o Μικρή απώλεια αδρανών.
Ποιότητα	o Υψηλή αντοχή λόγω χαμηλού w/c. o Μειωμένη ομοιογένεια και κακή ποιότητα λόγω παροχής του ύδατος από το χειριστή.	o Αυξημένη δυσκολία επίτευξης υψηλής αντοχής χωρίς πρόσθετα λόγω υψηλού λόγου w/c. Η χρήση όμως των υπερευστοποιητών επιτρέπει τη μείωση του λόγου w/c. o Αυξημένη ομοιογένεια στην ποιότητα.

Ταχύτητα κρούσης	o Καλύτερη πρόσφυση o Ευκολότερη χρήση	o Γενικά είναι επαρκής για εργασίες σε σήραγγες και ορυχεία.
Πρόσμικτα	o Σε μορφή σκόνης στον αναμικτήρα o Σε υγρή μορφή στο ακροφύσιο ή στο νερό ανάμιξης	o Γενικά σε υγρή μορφή.
Σκόνη	o Υψηλή παραγωγή σκόνης. Δυνατότητα μείωσης με προϋγρανση.	o Ελάχιστη παραγωγή σκόνης o Καλύτερη ορατότητα o Αποφυγή κινδύνου αποκόλλησης λόγω σκόνης
Ίνες	o Η χρήση των ινών στην ξηρή μίξη προκαλεί υψηλή αναπήδηση (ακόμη και >50%)	o Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ίνες χάλυβα και νέες βελτιωμένες προσμίξεις. o Η προσθήκη των ινών χάλυβα απαιτεί μόλις το 17% του αντίστοιχου χρόνου για ξηρή ανάμιξη. o Η αναπήδηση των ινών είναι μικρότερη. Η απώλειά τους εκτιμάται 5-10% με τη χρήση κατάλληλου εξοπλισμού και με εκπαιδευμένο προσωπικό.
Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα		o Το πάχος των στρώσεων είναι μεγαλύτερο λόγω της αποτελεσματικής χρήσης των πρόσθετων υλικών o Βελτιωμένη πρόσφυση. o Εξασφαλίζουμε υψηλή θλιπτική αντοχή και ομοιομορφία. o Υψηλές απαιτήσεις για την ποιότητα των αδρανών.

Πίνακας 4.6: Σύγκριση ξηρής - υγρής ανάμιξης ινοπλισμένου σκυροδέματος (Τσώχος, 2000)

5. Προσθήκη ινών

Η προσθήκη των ινών στις απαιτούμενες ποσότητες στο κονίαμα ή στο μίγμα του σκυροδέματος είναι μια σύνθετη διαδικασία, η οποία πρέπει ταυτόχρονα να εξασφαλίζει την απαραίτητη ομοιομορφία τους κατά τη διασπορά. Στις συμβατικές μεθόδους μίξης του σκυροδέματος, η προσθήκη των ινών τείνει να διαμορφώνει σβώλους και σφαίρες, δηλαδή συσσωματώματα, τα οποία εμποδίζουν την ομοιόμορφη διανομή τους στη μάζα του υλικού. Αυτό παρατηρείται με σχεδόν κάθε τύπο ίνας ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο τσιμέντο. Έτσι προκύπτουν καταστάσεις στις οποίες η περιεκτικότητα σε ίνες και ο βαθμός διασποράς τους στο σκυρόδεμα δεν χαρακτηρίζονται από ομοιομορφία. Η ομοιόμορφη διανομή των ινών στο σκυρόδεμα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες αλλά κυρίως από το λόγο μορφής τους l/d, την αναλογία όγκου τους, το μέγεθος των κόκκων των αδρανών, την περιεκτικότητα τους και τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο ανάμιξης.

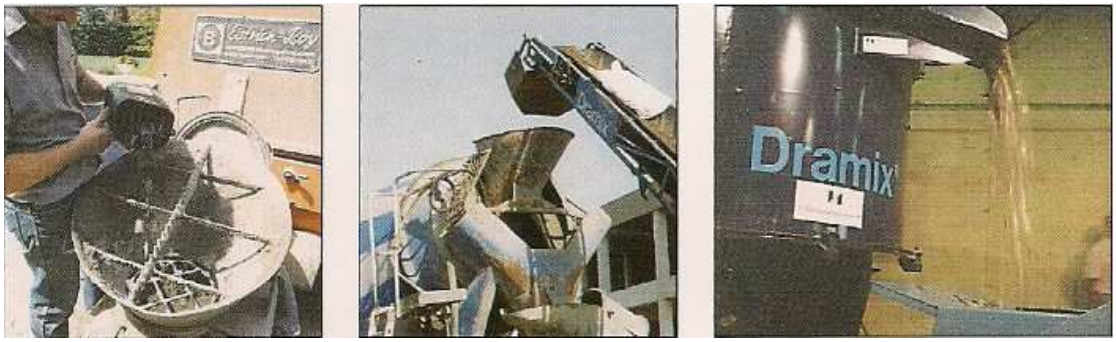
Το μήκος των ινών ασκεί μεγάλη επιρροή ειδικότερα στην τεχνολογική διαδικασία. Εμπειρικά προσδιορίζεται ότι για λόγους καλής αγκύρωσης των ινών, πρέπει το μήκος τους να είναι τουλάχιστον δύο φορές μεγαλύτερο από το μέγιστο κόκκο των αδρανών. Συνεπώς, το αυξημένο μήκος ινών εξασφαλίζει άριστη αγκύρωση στο σκυρόδεμα, ταυτόχρονα όμως εμποδίζει τη σωστή μίξη τους με το μίγμα σκυροδέματος στον αναμίκτη (Κατσικογιάννη, 2004).

5.1 Προσθήκη χαλύβδινων ινών

Οι βασικές τεχνολογικές επιλογές είναι διαθέσιμες για την παραγωγή σκυροδέματος με ίνες χάλυβα είναι οι εξής:

- Ταυτόχρονη προσθήκη των ινών μαζί με τα λοιπά ξηρά συστατικά του μίγματος σκυροδέματος στον αναμίκτη (άμμο, γαρμπίλι, χαλίκι, τσιμέντο).
- Προσθήκη των ινών στον αναμίκτη ή στη βαρέλα, όπου περιέχεται το ήδη έτοιμο μίγμα σκυροδέματος (άμμος, γαρμπίλι, χαλίκι, τσιμέντο, πρόσμικτα, πρόσθετα, νερό).
- Προσθήκη των ινών στο ακροφύσιο λίγο πριν την εκτόξευση.

Υπάρχουν βέβαια πολλές εναλλακτικές μέθοδοι παραγωγής ινοπλισμένου σκυροδέματος. Παραδείγματος χάρη, τα ξηρά αδρανή (άμμος, χαλίκι, γαρμπίλι) αναμιγνύονται αρχικά και το απαραίτητο ποσό ινών προστίθεται κατόπιν. Το τσιμέντο και το νερό προστίθενται εν συνεχεία στο μίγμα, ή μόνο το τσιμέντο ακολουθούμενο από το νερό και τις πρόσθετες ουσίες (π.χ. ρευστοποιητές), και η μίξη συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί ένα ομοιόμορφο μίγμα. Συχνά, εντούτοις οι ίνες προστίθενται στα αδρανή, τα οποία έχουν αναμιχθεί ήδη με ένα μέρος του νερού και στο τέλος προστίθεται το τσιμέντο και το υπόλοιπο νερό. Όταν το μίγμα δεν φέρει χονδρόκοκκα αδρανή τότε οι ίνες προστίθενται συνήθως στο τέλος (Maidl, 1995). Η προσθήκη των ινών στο μίγμα μπορεί να γίνει είτε χειρονακτικά είτε με μεταφορικές ταινίες, είτε με αυτόματο τροφοδότη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Τροφοδοσία ινών στο σκυρόδεμα (Dramix, 2004)

Όπως προαναφέρθηκε, η γεωμετρία των ινών παίζει καθοριστικό ρόλο ως προς τη δυνατότητα διασπορά τους στο μίγμα. Έτσι, ο λόγος μορφής δεν επηρεάζει μόνο την αγκύρωση των ινών στο σκυρόδεμα αλλά και τον τρόπο μίξης τους. Έχει διαπιστωθεί ότι για το εκάστοτε λόγο μορφής παρατηρούμε:

- Λόγος μορφής $l/d<50$: Σε αυτήν την περίπτωση η μάζα των ινών είναι χαλαρή και η παραγωγή ενός ομοιογενούς ινοπλισμένου σκυροδέματος προκύπτει με τη μίξη σε τυποποιημένους αναμικτήρες. Ωστόσο, η χρήση των κοντών ινών γίνεται ασύμφορη όταν το μήκος τους είναι ανεπαρκές για να αγκυρωθεί ικανοποιητικά στο σκυρόδεμα.
- Λόγος μορφής $80<l/d<120$: Με την αύξηση του μήκους των ινών, παρατηρείται συσσωμάτωσή τους. Εντούτοις, οι "σβώλοι" των ινών που εμμένουν, διαχωρίζονται βαθμιαία κατά τη διάρκεια της μίξης. Η παραγωγή ενός ομοιογενούς μίγματος σκυροδέματος είναι δυνατή με τη βαθμιαία προσθήκη των ινών στο μίγμα κατά τη διάρκεια της ανάμιξης. Όταν χρησιμοποιούνται τυποποιημένοι αναμίκτες σκυροδέματος, το ποσοστό των ινών που προστίθεται περιορίζεται από την αναλογία $\mu = 2.5*d/l$.
- Λόγος μορφής $l/d>120$: Η συσσώρευση των ινών είναι τόσο υψηλή που είναι σχεδόν αδύνατο να παραχθεί ένα μίγμα σκυροδέματος με συμβατικούς αναμίκτες. Επομένως πρέπει να υιοθετηθούν άλλες τεχνολογικές μέθοδοι ανάμιξης σκυροδέματος και ινών, όπως εκείνες που βασίζονται στον ψεκασμό των ινών (Κατσικογιάννη, 2004).

Η αναζήτηση βέλτιστων μεθόδων προσθήκης ινών στο μίγμα σκυροδέματος έχει οδηγήσει σε νέες προτάσεις. Μία από αυτές συστήνει ότι η τροφοδότηση των ινών στον αναμίκτη πρέπει να γίνει χρησιμοποιώντας μια ειδική συσκευή η οποία φέρει περιστρεφόμενο τύμπανο πάνω από τον αναμίκτη έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη διασκόρπιση των ινών. Καθώς το τύμπανο περιστρέφεται, οι ίνες που περιέχονται σε αυτό τροφοδοτούνται στον αναμίκτη σταδιακά και ομοιόμορφα με την επίδραση φυγόκεντρης δύναμης.

Μια άλλη πρόταση συστήνει ταυτόχρονη παραγωγή και τροφοδότηση των ινών. Οι ίνες παράγονται από ημικατεργασμένο χαλύβδινο σύρμα. Με τη βοήθεια περιστρεφόμενων κυλίνδρων διαμορφώνεται η επιθυμητή διάμετρος του σύρματος και από ένα ρότορα που φέρει ξυράφια πραγματοποιείται η κοπή του. Οι ίνες συγκεντρώνονται σε ένα δοσομετρητή και με έναν ανυψωτήρα μεταφέρονται πάνω από τον αναμίκτη. Εκεί διαχωρίζονται από ένα περιστρεφόμενο τύμπανο και προστίθενται

στο μίγμα σκυροδέματος. Σε αυτή την περίπτωση δεν απαιτείται να συσκευαστούν οι ίνες, να αποθηκευτούν ή να μεταφερθούν, μειώνοντας έτσι το κόστος και το χρόνο παραγωγής του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Ακόμα μια πολύ διαδεδομένη πρόταση για την ομοιόμορφη τροφοδότηση των ινών είναι η προσθήκη τους στο μίγμα σκυροδέματος μέσω ενός δονούμενου προπετάσματος. Οι ίνες αρχικά βρίσκονται μέσα σε τύμπανα και καθώς διέρχονται από το δονούμενο προπέτασμα, διαχωρίζονται. Εν συνεχεία μεταβαίνουν σε μεταφορική ταινία. Με εμφύσηση πεπιεσμένου αέρα οι ίνες εισέρχονται στον αναμίκτη, ο οποίος περιέχει το μίγμα σκυροδέματος. Αυτή η τεχνολογία, σύμφωνα με τους σχεδιαστές, εξάλειψε τη συσσώρευση των ινών και είναι κατάλληλη για την ομοιόμορφη όπλιση του σκυροδέματος με ίνες (Κατσικογιάννη, 2004). Αυτή η διαδικασία φαίνεται στην εικόνα 4.8.

Εικόνα 4.8: Ανάμιξη ινών και τροφοδοσία με μεταφορική ταινία (Tatnall, 2007)

Τέλος, η μέθοδος προσθήκης των ινών στο μίγμα μέσω του ακροφυσίου προσφέρει το πλεονέκτημα ότι είναι δυνατόν να αυξηθεί το μήκος των ινών που αλλιώς θα δημιουργούσε προβλήματα εργασιμότητας (Maidl, 1995).

5.2 Προσθήκη μη μεταλλικών ινών

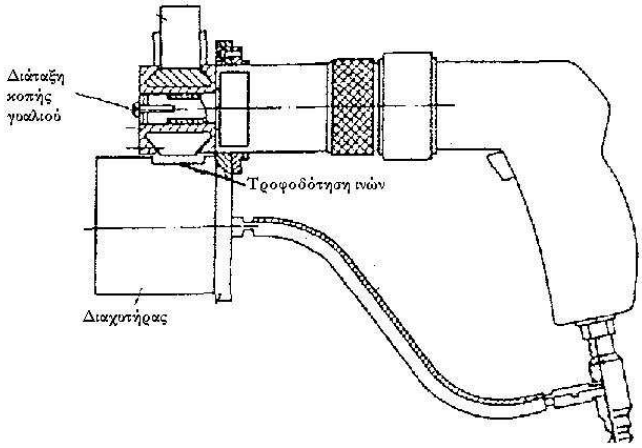
Η προσθήκη μη μεταλλικών ινών πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να μην προκύπτουν τα ίδια προβλήματα που παρουσιάστηκαν κατά τη χρήση χαλύβδινων ινών.

Οι συνθετικές ίνες και οι ίνες υάλου έχουν μικρότερη τάση να συσσωρεύονται κατά τη διάρκεια της μίξης έναντι των μεταλλικών ινών και ως εκ τούτου δεν απαιτούν τη διαλογή πριν προστεθούν στο μίγμα σκυροδέματος. Εντούτοις, για να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη κατανομή, η προσθήκη τους στον αναμίκτη γίνεται καλύτερα με την εμφύσηση τους πριν από την ολοκλήρωση της μίξης. Ικανοποιητικά αποτελέσματα καταγράφηκαν με τη χρήση ενός σπειροειδούς - στροβιλοειδούς αναμίκτη (που σχεδιάστηκε από το Armenian Building Research Institute). Τέτοιοι αναμίκτες εξασφαλίζουν αρκετά ομοιόμορφη διανομή των ινών στο σκυρόδεμα. Διάφορα πρόσθετα μέτρα έχουν προταθεί για τη βελτίωση της ποιότητας του μίγματος. Η τάση της ίνας υάλου να διαμορφώνει σβώλους κατά τη διάρκεια της προσθήκης στο κονίαμα μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη ποσότητας ινών αμιάντου (Κατσικογιάννη, 2004).

Για να βελτιωθεί η αντοχή του σκυροδέματος και να αποκτήσει ένα καλό εξωτερικό φινίρισμα κατά τη διάστρωση και μια ομαλή επιφάνεια, συνίσταται μαζί με τις ίνες η προσθήκη μικρών ποσοτήτων παιπάλης (υπό μορφή σκόνης μαρμάρου), αλεσμένης αργίλου ή άλλων ορυκτών.

Το μέγιστο ποσοστό των ινών υάλου που μπορεί να προστεθεί στο σκυρόδεμα είναι συνήθως από 3-5% κατ' όγκο. Αυτό το ποσοστό μπορεί να αυξηθεί σε 10 έως 12% όταν οι ίνες προσανατολίζονται. Το μήκος των ινών υάλου, όταν ο προσανατολισμός τους είναι τυχαίος κυμαίνεται από 1 έως 5 cm.

Υπάρχουν δύο διαδικασίες παραγωγής μιγμάτων με ίνες υάλου, που χρησιμοποιούνται κυρίως σε κατασκευές μικρού πάχους (13 mm), όπως τα πάνελ. Η πρώτη είναι με εκτόξευση (spray - up process) και η δεύτερη με προανάμιξη (premix process). Στην πρώτη διαδικασία εκτόξευσης, κονίαμα τσιμέντου, άμμος και διαχωρισμένες ίνες γυαλιού, αναμιγνύονται ταυτόχρονα και εκτοξεύονται στην επιφάνεια του καλουπιού κατά 2 ή 3 στρώσεις των 4 - 6 mm, που συμπυκνώνονται (roller compacted) με δονητικές μηχανές. Αυτή είναι και η μέθοδος παραγωγής των fiberglass.



Εικόνα 4.9: Πνευματική κάνη για τον ψεκασμό ινών υάλου (Rabinovich, 1995)

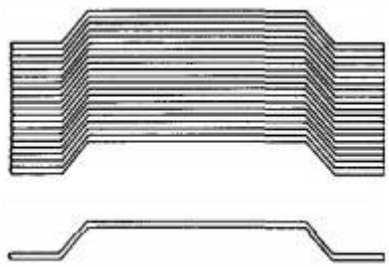
Στη διαδικασία προανάμιξης χρησιμοποιούνται οι αναμικτήρες και οι μέθοδοι δόνησης του συμβατικού σκυροδέματος. Η συνήθης περιεκτικότητα των ινών με αυτή τη διαδικασία παρασκευής είναι 2-3% κατά βάρος και τα μίγματα έχουν μικρότερες αντοχές. Η χρήση ρευστοποιητών ή μειωτών νερού βοηθάει ώστε να διατηρείται χαμηλός ο λόγος νερού/τσιμέντο και να αποφεύγεται η καταστροφή των ινών στη διάρκεια της ανάμιξης (Κατσικογιάννη, 2004).

6. Αίτια συσσωμάτωσης ινών

Το βασικό πρόβλημα με την προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα έχει να κάνει με την προσθήκη ικανής ποσότητας αυτών στο μίγμα με ταυτόχρονη επίτευξη εργασιμότητας καθώς και των επιθυμητών μηχανικών χαρακτηριστικών στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Μπορεί μεν οι επιδόσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος να βελτιώνονται με την προσθήκη ινών μεγάλου λόγου μορφής, στην περίπτωση όμως αυτή η μίξη γίνεται πιο δύσκολη και το μίγμα έχει περιορισμένη εργασιμότητα. Μια από τις κύριες δυσκολίες για την επίτευξη ενός ομοιογενούς μίγματος είναι η τάση που έχουν οι ίνες να συσσωματώνονται. Αυτή μπορεί να οφείλεται σε διάφορες αιτίες όπως:

- Οι ίνες μπορεί να είναι συσσωματωμένες μέσα στη συσκευασία τους, πριν προστεθούν στο μίγμα. Στην περίπτωση αυτή η μίξη φυσιολογικά δε θα τις απομονώσει κι έτσι το πρόβλημα θα παραμείνει.
- Οι ίνες μπορεί να έχουν προστεθεί πολύ γρήγορα στον αναμίκτη κι έτσι αυτός δε θα προλάβει να τις κατανείμει ομοιόμορφα στο μίγμα. Επίσης, πρόβλημα μπορεί να υπάρξει ακόμη κι όταν η ανάμιξη διαρκεί παραπάνω χρόνο από τον απαραίτητο.
- Υπερβολική ποσότητα ινών έχει προστεθεί στο μίγμα.
- Ο αναμίκτης μπορεί να είναι σε κακή κατάσταση ή ακόμη και ακατάλληλος για την εκτέλεση της εργασίας αυτής.
- Οι ίνες μπορεί να έχουν προστεθεί στον αναμίκτη πριν τα υπόλοιπα υλικά.

Αυτό που πρέπει να γίνεται είναι η προσεκτική προσθήκη των ινών, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Η χρήση ινών που είναι συγκολλημένες με υδατοδιαλυτή κόλλα αποτελούν μια πολύ καλή λύση για τον περιορισμό στο ελάχιστο του προβλήματος της συσσωμάτωσης των ινών (Chanh). Σε μια πλακέτα, όπως αυτή της εικόνας 4.10, μπορεί να περιέχονται από 30 έως 50 ίνες (scancem materials).



Εικόνα 4.10: Ίνες χάλυβα της Dramix, συγκολλημένες με υδατοδιαλυτή κόλλα, για χρήση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Kompen, 1989)

7. Πρακτικός έλεγχος ποσοστού μεταλλικών ινών

Όταν η εισαγωγή των μεταλλικών ινών γίνεται στο εργοστάσιο παραγωγής του σκυροδέματος, η εξακρίβωση τον ποσοστού των ινών είναι δύσκολη. Στο νωπό σκυρόδεμα σε συγκεκριμένο όγκο του, που παίρνουμε από το όχημα, ανακτούμε την συνολική ποσότητα των ινών με μαγνήτη ή κάθε άλλο τρόπο και από το βάρος των ινών υπολογίζουμε την αναλογία σε αναγωγή στο βάρος τον τσιμέντου. Όταν η εισαγωγή των ινών γίνεται στο εργοτάξιο, ελέγχουμε την ποσότητα των ινών στο κάθε όχημα ανάλογα με τον όγκο του σκυροδέματος και αντίστοιχα γίνεται αναγωγή στο βάρος τον τσιμέντου. Πάντως για τον έλεγχο της ποσότητας, αλλά και την σωστότερη κατανομή των ινών στην μάζα τον σκυροδέματος πρέπει οι ίνες να εισάγονται με ειδικό τροφοδότη εγκατεστημένο στο εργοστάσιο παραγωγής του σκυροδέματος που θα ελέγχεται από το καταγραφικό του (Σαπρανίδης, 2002).

Στο σκληρυμένο σκυρόδεμα για να γίνει έλεγχος του ποσοστού των ινών πρέπει αυτό να θραυστεί και οι ίνες διαχωρίζονται με μαγνήτη χειρός, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.11. Βέβαια, το αποτέλεσμα που θα πάρουμε θα είναι μικρότερο από το πραγματικό, λόγω της αναπήδησης. Επίσης η διαδικασία είναι χρονοβόρα και απαιτεί λειοτρίβηση του υλικού σε μικρό κόκκο.

Εικόνα 4.11: Διαχωρισμός ινών με μαγνήτη (Maccaferri)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1. Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, οι ίνες οπλισμού πρέπει να διασκορπίζονται ομοιόμορφα στο νωπό σκυρόδεμα. Έτσι, μόνο όταν η παρασκευή του γίνεται με επιμέλεια θα προκύπτει ένα ομοιογενές υλικό, σύμφωνο με τις προδιαγραφές.

Η προσθήκη των ινών στο μίγμα του σκυροδέματος στοχεύει στη βελτίωση ορισμένων ιδιοτήτων του και ειδικότερα στη βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό, σε διάτμηση και κρούση. Ουσιαστικά, οι ίνες μετατρέπουν το σκυρόδεμα από ψαθυρό υλικό σε πλάστιμο και ο ρόλος ο οποίος καλούνται να παίξουν είναι να αποτρέψουν τη σε βάθος διάδοση των μικρορωγμών.

2. Διαφορές έγχυτου – εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος

Αν και οι βασικές αρχές που διέπουν το σκυρόδεμα, είτε είναι συμβατικά οπλισμένο, είτε με ίνες, υπάρχουν ορισμένες χαρακτηριστικές διαφορές μεταξύ τους:

- Οι ίνες διασκορπίζονται όπου διαστρώνεται και το σκυρόδεμα, μέσα σε μία δεδομένη διατομή, ενώ ο συμβατικός χαλύβδινος οπλισμός και το πλέγμα τοποθετούνται μόνο εκεί που χρειάζεται.
- Οι περισσότερες ίνες είναι σχετικά μικρού μήκους και με μικρή απόσταση μέσα στο μίγμα του σκυροδέματος, σε αντίθεση με το συμβατικό οπλισμό.
- Η επιφάνεια που καταλαμβάνει το πλέγμα είναι μεγαλύτερη από αυτήν που καταλαμβάνουν οι ίνες (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)

Το μίγμα όμως του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι διαφορετικό από αυτό του έγχυτου ινοπλισμένου σκυροδέματος ως προς τα ρεολογικά χαρακτηριστικά, την εσωτερική δομή, τους μηχανισμούς σκλήρυνσης και τη μεταφορά του (Banthia 1999a, 1999b). Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα η διάστρωση γίνεται με ταυτόχρονη συμπύκνωση ενώ υπάρχει έλλειψη καλουπιού, που θα δώσει την αντίστοιχη γεωμετρία. Κατά συνέπεια, αυτό πρέπει να είναι πιο συνεκτικό, να συγκολλάται καλά στην επιφάνεια όπου διαστρώνεται και να στέκεται εκεί, χωρίς να ολισθαίνει. Μικρότεροι και στρογγυλεμένοι κόκκοι αδρανών προτιμώνται σε σχέση με τα μεγαλύτερα και πιο γωνιώδη τεμάχη ενώ το συνολικό ποσοστό αδρανών είναι μικρότερο σε σχέση με το έγχυτο σκυρόδεμα. Ο λόγος είναι ότι το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα περιέχει μεγαλύτερα ποσοστά τσιμέντου και πρόσθετων ή πρόσμικτων υλικών.

Επίσης, αφού διαστρωθεί, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει διαφορετική χωρική κατανομή των συστατικών του. Το νερό στην ξηρή μίξη, δεδομένου ότι προστίθεται λίγο πριν το ακροφύσιο εκτόξευσης, δεν προλαβαίνει να κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλο το μίγμα, σε αντίθεση με το έγχυτο σκυρόδεμα. Στην υγρή μίξη όμως, το νερό αναμένεται να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο μίγμα. Και πάλι όμως θα υπάρχει διαφορά με το έγχυτο σκυρόδεμα διότι η πνευματική συμπύκνωση καταλήγει στη δημιουργία κενών, που είναι πολύ διαφορετικά σε μέγεθος και ως προς την χωρική κατανομή τους (Banthia, 2001).

Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω προκύπτει ότι στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνθήκες πλήρους συμπύκνωσης ποτέ δεν επιτυγχάνονται, πράγμα που σημαίνει ότι η

σχέση μεταξύ λόγου τσιμέντου προς νερό και αντοχής δεν είναι μοναδική (Banthia 1999b). Στην πράξη, στην ξηρή μίξη ποτέ δε γνωρίζουμε ακριβώς τη σχέση μεταξύ νερού προς τσιμέντο. Στην υγρή μίξη, ενώ ο λόγος νερό προς τσιμέντο είναι ίδιος με το αρχικό μίγμα, η αντοχή σε θλίψη μπορεί να είναι ακόμη και 30% μικρότερη ενώ η αντοχή σε κάμψη μέχρι και 20% μεγαλύτερη, σε σχέση με το έγχυτο σκυρόδεμα (Banthia et al. 1994a). Για μία δεδομένη αντοχή σε θλίψη, το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να είναι πολύ μικρότερο από το έγχυτο σκυρόδεμα (Banthia, 2001).

Τα εύρη των αναλογιών των συστατικών για το έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες και για το αντίστοιχο εκτοξευόμενο ινοπλισμένο παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 και 5.2.

Υλικό	Κονίαμα	9.5 mm μέγιστος κόκκος αδρανούς (kg/m^3)	19 mm μέγιστος κόκκος αδρανούς (kg/m^3)
Τσιμέντο (kg/m^3)	415-710	355-590	300-535
Λόγος νερό/τσιμέντο	0.3-0.45	0.35-0.45	0.4-0.5
Λεπτομερές/Χονδρομερές υλικό(%)	100	45-60	45-55
Συγκρατούμενος αέρας(%)	7-10	4-7	4-6
Ίνες (%) κατ' όγκο			
Λείος χάλυβας	1-2	0.9-1.8	0.8-1.6
Παραμορφωμένος χάλυβας	0.5-1.0	0.4-0.9	0.3-0.8

Πίνακας 5.1: Έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ACI committee, "State - of - the art report in fibre reinforced concrete" (ACI 554 IR – 82, 1982)

Υλικό	Μίγμα λεπτών αδρανών (kg/m^3)	Μίγμα με αδρανή 9.5mm (kg/m^3)
Τσιμέντο	446-559	445
Αμμοχάλικο (<6.35mm)$^{\alpha}$	1438-1679	697-880
Αδρανή με κόκκο 9.5mm		700-875
Χαλύβδινες ίνες$^{\beta,\gamma}$	35-157	39-150
Επιταχυντής	Ποικίλει	Ποικίλει
Λόγος νερό/τσιμέντο	0.40-0.45	0.40-0.45

α: Η άμμος περιείχε 5% υγρασία
β: 1% χαλύβδινες ίνες=78,6 kg/m^3
γ: Εφόσον η αναπήδηση των ινών γενικά είναι μεγαλύτερη από αυτή των αδρανών, υπάρχει συνήθως μικρότερο ποσοστό ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην τελική του θέση.

Πίνακας 5.2: Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, (Henager : "Steel fibrous shotcrete". A summary of the State - of - the art concrete)

Αξίζει να επισημανθεί εδώ ότι το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αναπτύσσει διαφορετικά μηχανικά και φυσικά χαρακτηριστικά σε σχέση με το έγχυτο σκυρόδεμα. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην δομή τους. Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα οι ίνες, λόγω της μεθόδου διάστρωσης, οι ίνες κατανέμονται, με μικρές αποκλίσεις, σε

ένα τυχαίο διδιάστατο μοντέλο, σε αντίθεση με την τυχαία αλλά τριδιάστατη κατανομή που αποκτούν στο έγχυτο σκυρόδεμα (Banthia, 1999b). Αυτό εισάγει το ζήτημα της ανισοτροπίας στο υλικό κι έχει σίγουρα επιρροή στην ικανότητα ενίσχυσης του σκυροδέματος από τις ίνες (Banthia, 2001). Οι ίνες με μικρό λόγο μορφής δυσκολότερα αναπτύσσουν μια διδιάστατη κατανομή, η οποία είναι γενικά και η προτιμότερη (Allen, 2009).

Αυτό που πρακτικά συμβαίνει, όπως έχει παρατηρηθεί, είναι ότι πολλές ίνες δεν εκτείνονται πάντα κάθετα σε σχέση με τις ρωγμές ή μπορεί ακόμη και να έχουν λιγότερο από το απαιτούμενο μήκος πάκτωσης, αδυνατώντας έτσι να αναπτύξουν ισχυρό δεσμό. Έτσι, μόνο ένα μικρό ποσοστό των ινών που προστίθενται μπορούν τελικά να ανθίστανται αποτελεσματικά σε καμτικές και εφελκυστικές τάσεις. Για να προσδιορισθεί αριθμητικά, κατά το δυνατόν, το ποσοστό των ινών αυτών, ορίζεται ο «συντελεστής ενεργότητας». Αυτός θα είναι περίπου 0,4 για ένα τυπικό διδιάστατο μοντέλο και μόλις μεταξύ του 0,25 και 0,3 για ένα αντίστοιχο τριδιάστατο. Η τιμή αυτού του συντελεστή εξαρτάται από το μήκος των ινών και το μήκος πάκτωσής τους. Συνεπώς, από μια άλλη οπτική γωνία, φαίνεται ότι η ενίσχυση του σκυροδέματος με ίνες δεν είναι πολύ αποδοτική μέθοδος για την επίτευξη των επιθυμητών μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού υλικού (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002).

Όπως και στο έγχυτο σκυρόδεμα, έτσι και στο ινοπλισμένο, ο σχεδιασμός του μίγματος βασίζεται σε εμπειρικές πληροφορίες οι οποίες προέρχονται από δοκιμές (H. Schmidt-Schleicher, German guidelines for steel fiber reinforced shotcrete, 1995). Όταν ένα νέο είδος ίνας ερευνάται ή όταν μια εφαρμογή απαιτεί ειδικές απαιτήσεις, ένα μεγάλο εύρος δοκιμών εκτελούνται για να βρεθεί το πιο κατάλληλο μίγμα. Επειδή όμως η διαδικασία αυτή είναι πιο εύκολη στην εκτέλεση στο έγχυτο σκυρόδεμα, σε σχέση με το εκτοξευόμενο, έχει πολύ μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον να εξετάσει κανείς την δυνατότητα εκτέλεσης των δοκιμών πρώτα με έγχυτο σκυρόδεμα και μέσω αυτών να προκύψουν προκαταρκτικές κατευθύνσεις για το τι θα πρέπει να αναμένουμε στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με μια παρόμοια σύνθεση (Leung, Lai, Lee, 2004). Πρέπει ακόμη να τονιστεί ότι για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, τα αποτελέσματα για να είναι χρήσιμα πρέπει αυτό να είναι ικανό να εκτοξεύεται. Επίσης, λόγω της διαφορετικής μεθόδου συμπύκνωσης, το ινοπλισμένο και το έγχυτο σκυρόδεμα είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες.

Μια έρευνα για τη σύγκριση της θλιπτικής και της καμπτικής αντοχής μεταξύ των δύο έχει γίνει από τους Banthia et al. (1994). Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες κυματοειδούς μορφής, σε πέντε διαφορετικές γεωμετρίες. Μετέπειτα, οι Leung, Lai, Lee (2004) συνέκριναν ίνες από χάλυβα (ST), από πολυπροπυλένιο (PP), από πολυβινυλική αλκοόλη (PVA) και ένα υβρίδιο ινών από πολυπροπυλένιο και πολυβινυλική αλκοόλη. Οι ιδιότητες που συνέκριναν ήταν η αντοχή σε θλίψη και κάμψη, η συμπεριφορά στη συστολή και η διαπερατότητά τους. Συνοπτικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το έγχυτο και το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς τη συστολή και έχουν παρόμοιες αντοχές σε κάμψη, αν και υπερτερεί το εκτοξευόμενο στις πιο πολλές περιπτώσεις. Το έγχυτο υπερτερεί στις παραμένουσες αντοχές και παρουσιάζει διαπερατότητα μικρότερη πάνω από μια τάξη μεγέθους σε σχέση με το εκτοξευόμενο. Το τελικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω μελέτη είναι ότι τα αποτελέσματα από το έγχυτο σκυρόδεμα μπορούν να αξιοποιηθούν

αλλά με την προϋπόθεση ότι το μίγμα του εκτοξευόμενου πρέπει να τροποποιηθεί ούτως ώστε να αποκτήσει μικρότερη διαπερατότητα και μεγαλύτερες παραμένουσες αντοχές.

Τέλος, οι πρακτικές διαφορές του κοινού οπλισμένου σκυροδέματος με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα φαίνονται στον πίνακα 5.3.

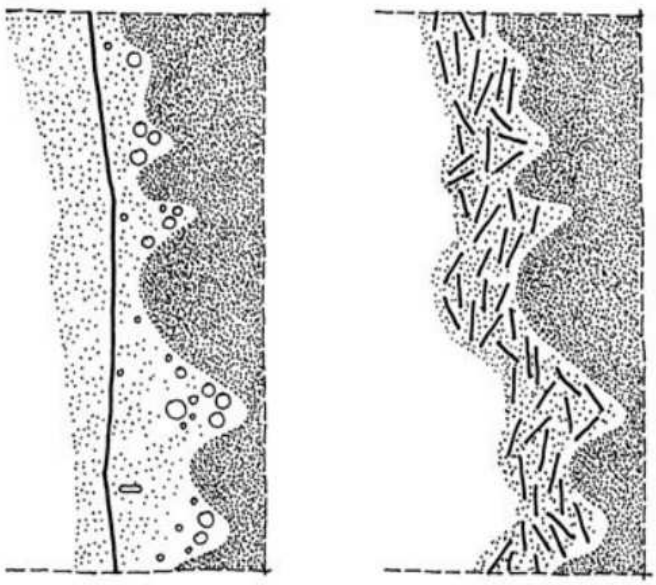
Οπλισμένο σκυρόδεμα	**Ινοπλισμένο σκυρόδεμα**
Παρασκευάζεται από χονδρόκκοκα υλικά και μεταφέρεται στη θέση του με αντλία.	Αποτελείται από λεπτόκκοκα υλικά και μπορεί να μεταφέρεται στη θέση του με εκτόξευση
Χρησιμοποιείται κυρίως επιβραδυντής για να διατηρηθεί μέχρι το πολύ 2 ώρες	Προστίθεται κυρίως επιταχυντής την ώρα που είναι έτοιμο να εκτοξευθεί στην θέση εργασίας
Έχει την ανομοιογένεια των δυο υλικών αποτελούμενο από σίδηρο και σκυρόδεμα	Αποτελεί μαζί με τις ίνες ομοιογενές υλικό γιατί μπορεί να αναμειγνύεται ομοιόμορφα.
Εργάζεται κυρίως στην Ελαστική Περιοχή	Εργάζεται κυρίως στην Πλαστική Περιοχή
Κατάλληλο για στατικά κυρίως φορτία	Κατάλληλο για μεταβαλλόμενα φορτία
Αναλαμβάνει τα φορτία συνήθως πολύ αργά	Αναλαμβάνει τα φορτία πολύ γρήγορα, αμέσως
Μικρή ικανότητα σε κρούση & ανθεκτικότητα	Μεγάλη αντοχή σε κρούση & ανθεκτικότητα
Έχει μειωμένη αντοχή σε φθορές τριβής	Έχει αυξημένες αντοχές σε φθορές τριβής
Ρηγματώσεις αμέσως μετά την διάστρωση	Καθόλου σχεδόν ρήγματα μετά την διάστρωση
Ρήγματα εφελκυσμού μετά την φόρτιση	Μειωμένα ρήγματα ακόμη και μετά την φόρτιση
Μικρές παραμορφώσεις αλλά με ρήγματα	Μεγάλες παραμορφώσεις με λίγα μόνο ρήγματα
Αυξημένη συρρίκνωση και ερπυσμός	Μειωμένες βλάβες από συρρίκνωση κα ερπυσμό
Ελέγχεται στο εργοστάσιο κυρίως κατά την παραγωγή του	Ελέγχεται στο εργοτάξιο επειδή εκεί μπαίνει ο επιταχυντής

Μπορεί να ελεγχθεί και κατά την διανομή του στο εργοτάξιο με διαφορά κάθισης	Δεν μπορεί να ελεγχθεί αλλού επειδή περιέχει σταθεροποιητή και δεν είναι ενεργό
Η διάρκεια ζωής του είναι μόνο 1.30' ώρες από την φόρτωση του στο εργοστάσιο	Η διάρκεια ζωής του μπορεί να υπερβαίνει τις 12 ώρες λόγω ανάμιξης σταθεροποιητή
Μπορεί να φθάσει και μέχρι τις δύο ώρες αν έχει αναμιχθεί επιβραδυντικό	Μπορεί όμως να φθάσει και τις δύο ή τρεις ημέρες αν απαιτηθεί λόγω ειδικών εργασιών
Συνήθως μπορεί να περιέχει αδρανή με κόκκο 36 mm αλλά και μέχρι 63 mm	Συνήθως μπορεί να περιέχει αδρανή μέχρι 12 ή και 16 mm ανάλογα με το μηχάνημα
Το τσιμέντο συνήθως αρχίζει από 270 kg και φθάνει 350 kg εκτός ορισμένων εργασιών	Το τσιμέντο κατά βάρος συνήθως κυμαίνεται από 350 kg και μέχρι 450 kg
0 λόγος Νερό / Τσιμέντο ανάλογα με τις εργασίες κυμαίνεται από 0.70 - 0.50	0 λόγος Νερού / Τσιμέντο ανάλογα με τις εργασίες κυμαίνεται από 0.50- 0.35
Γίνεται χρήση δονητών για να αποκτηθεί μεγαλύτερη πυκνότητα σκυροδέματος	Δεν γίνεται χρήση δονητών αλλά εκτοξεύεται με μεγάλη πίεση στην επιφάνεια

Πίνακας 5.3: Διαφορές του κοινού οπλισμένου σκυροδέματος με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, (Σαπρανίδης, 2002)

3. Σύγκριση ινοπλισμένου σκυροδέματος και σκυροδέματος με δομικό πλέγμα

Εκεί που οι επιφάνειες δεν είναι ομαλές, όπως στα βραχώδη πρανή, στις σήραγγες κλπ με το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να κατασκευαστεί μια επένδυση σταθερού πάχους, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4. Ως προς τον όγκο των υλικών που καταναλώνονται, αυτό προσφέρει πολύ μεγάλη οικονομία. Η τοποθέτηση του συμβατικού οπλισμού (πλέγμα) γίνεται στα σημεία που «προεξέχουν» επιβάλλοντας το γέμισμα των κενών που δημιουργούνται με σκυρόδεμα, που είναι σίγουρα πολύ παχύτερο από το μέσο πάχος της επένδυσης. Η χρήση ινών σε πρανή όπου έχουμε χαλαρά υλικά μπορούμε βάσιμα να υποθέσουμε ότι έχει μια επιπλέον ευεργετική λειτουργία. Οι ίνες εισχωρούν μέσα σε αυτά βελτιώνοντας έτσι την αγκύρωσή τους και την συνοχή της επένδυσης αφού υπάρχει «μηχανικό αλληλοκλείδωμα» μεταξύ των υλικών. Τέλος, στα πρανή που βρίσκονται σε κοινή θέα τίθεται και το αισθητικό ζήτημα. Μία επένδυση με ινοπλισμένο σκυρόδεμα ταιριάζει πολύ περισσότερο με το φυσικό περιβάλλον (Johnston, 1982).



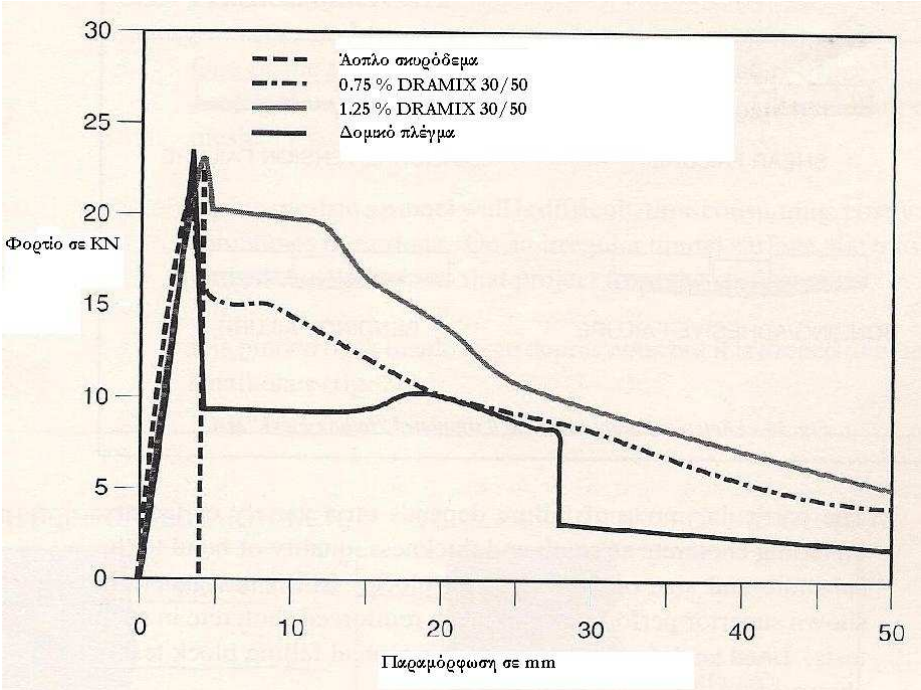
Εικόνα 5.4: Αριστερά: χρήση πλέγματος,
Δεξιά: χρήση ινών για εξασφάλιση σταθερού πάχους επένδυσης (Katzer, 2006)

Ο Holmgren άρχισε την έρευνά του το 1972, σε συνεργασία με το σουηδικό ίδρυμα εφαρμοσμένης βραχομηχανικής (BeFo) και τη σουηδική διοίκηση οχυρώσεων (FortF). Σκοπός του ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος και ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζονται οι αγκυρώσεις σε συνδυασμό με αυτό. Στην έκθεσή του "επενδύσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με αγκύρια" παρουσιάζει ορισμένα συμπεράσματα εκ των οποίων ορισμένα αναφέρονται ακολούθως:

- Είναι δυνατό να παραχθούν επενδύσεις από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα που να είναι τουλάχιστον εξίσου ισχυρές και όλκιμες στην κάμψη με τις συμβατικά οπλισμένες. Δοκιμές έδειξαν ότι μια επένδυση που ενισχύεται σε ποσοστό 0.5% κατ' όγκο, με ίνες με σύστημα αγκύρωσης, είναι συγκρίσιμη με μια επένδυση που φέρει συμβατική ενίσχυση πλέγματος.
- Το πλέγμα με ελασμένους εν ψυχρώ οπλισμούς δεν είναι κατάλληλο για την υποστήριξη βράχου όπου η ολκιμότητα είναι επιθυμητή. Σε αυτή την περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί μαλακός χάλυβας.
- Μετά την εκδήλωση ρωγμών, η διατμητική ικανότητα μιας επένδυσης από ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ανώτερη από τη συμβατικά οπλισμένη.

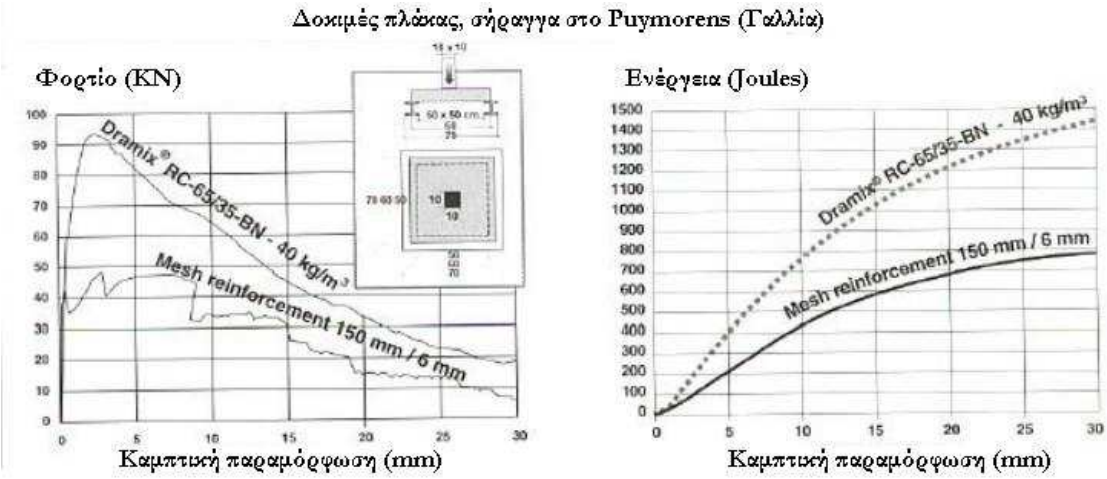
Αυτά τα συμπεράσματα βέβαια ισχύουν για ίνες χάλυβα που φέρουν σύστημα αγκύρωσης (hooked ends) και με αρκετά υψηλή αντοχή που επιτρέπει στην ίνα να «ολισθήσει» στο σώμα του σκυροδέματος κατά την αστοχία. Η πλαστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος εξαρτάται από τις ιδιότητες ολίσθησης - αντοχής της ίνας.

Το 1979 οι Morgan και Mowatt ανέλαβαν μια λεπτομερή συγκριτική αξιολόγηση του άοπλου σκυροδέματος, του οπλισμένου με ίνες και με δομικό πλέγμα. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5.5.



Διάγραμμα 5.5: Σύγκριση της φέρουσας ικανότητας άοπλου, ινοπλισμένων και συμβατικά οπλισμένου σκυροδέματος, Vandewalle 1993

Δοκιμές καμπτικής παραμόρφωσης σε μεγάλα πάνελ, έδειξαν ότι το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα από το πλέγμα σε μικρές παραμορφώσεις μετά την πρώτη ρωγμή και την ίδια σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Αυτά τα συμπεράσματα υποστηρίζονται και από τα αποτελέσματα δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τη British Columbia Hydro and Power Authority (Vandewalle, 1993).



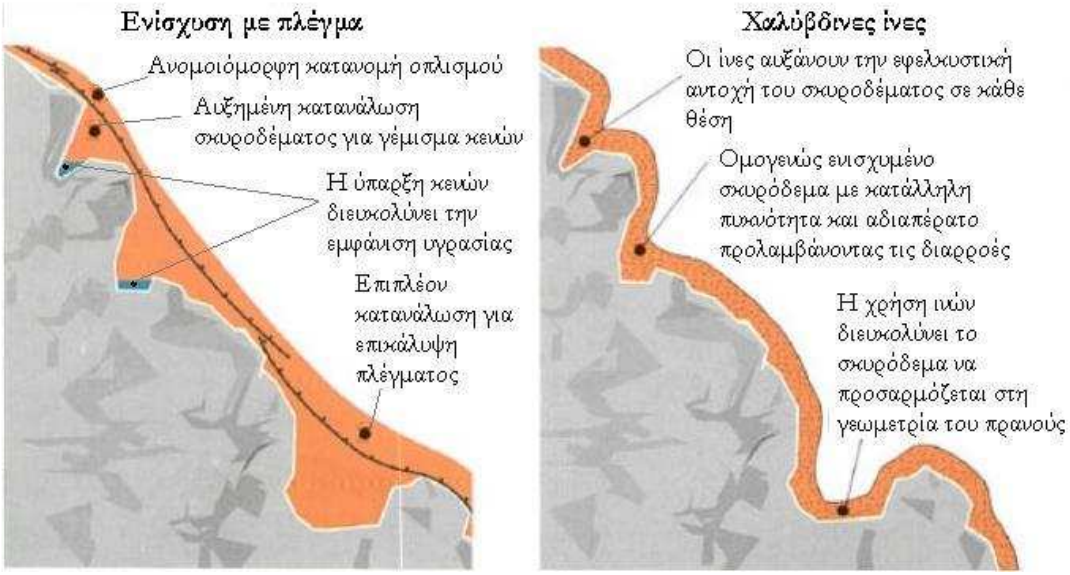
Διάγραμμα 5.6: Μέτρηση βέλους κάμψης και απορροφούμενης ενέργειας (Bekaert, 1998)

Η πρακτική όμως διαφορά μεταξύ τους, που ίσως είναι και η σημαντικότερη, είναι ότι με την συμβατική εκτόξευση σκυροδέματος δημιουργούνται κενά πίσω από το πλέγμα. Επιπλέον, το πλέγμα μπορεί να δονείται κατά την εκτόξευση κάτι που αποτρέπει έναν καλό δεσμό μεταξύ αυτού και του σκυροδέματος. Με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η απώλεια του υλικού κατά την εκτόξευση μειώνεται κατά 50% σε σχέση με το σκυρόδεμα χωρίς ίνες (Jamrozy, 2002). Έτσι, εκτός από το γεγονός ότι έχουμε μικρότερου πάχους επενδύσεις, αυτές είναι και πιο ανθεκτικές στις ρωγμές (Katzer, 2006). Ακόμη, το πλέγμα απαιτεί μια επικάλυψη της τάξης των 30 έως 50 mm, ενώ κάτι αντίστοιχο δεν γίνεται με

τις ίνες (Vandewalle, 1993). Τέλος, στη διεπιφάνεια μεταξύ πλέγματος και βράχου, λόγω των κενών που συχνά δημιουργούνται, το νερό συσσωρεύεται και κυκλοφορεί ευκολότερα κάνοντας έτσι την διάβρωσή του ακόμη πιο γρήγορη (Bekaert, 1998).

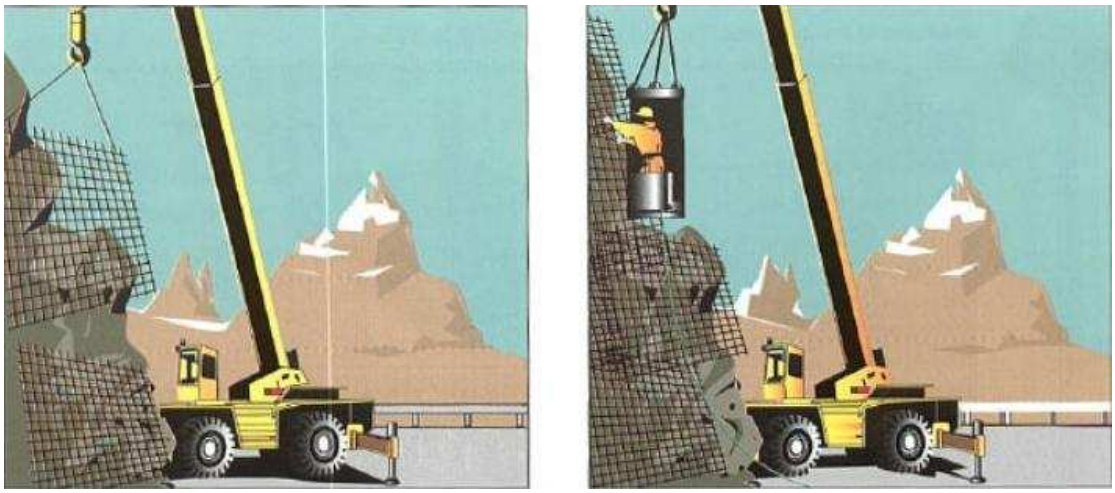
Ένας από τους παράγοντες που κάνει το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ιδιαίτερα ελκυστικό στους αναδόχους των έργων, είναι ότι αποτελεί εναλλακτική λύση του δομικού πλέγματος. Η τοποθέτηση του πλέγματος στα τοιχώματα σήραγγας είναι δύσκολη, χρονοβόρα, δαπανηρή και μερικές φορές επικίνδυνη (Vandewalle, 1993). Τέλος, η χρήση των ινών είναι ευεργετική και σε εκσκαφές μεγάλου βάθους όπου εμφανίζεται το φαινόμενο των εκτοξεύσεων βράχων (rock bursts) (Armelin, 1990).

Όλες οι παραπάνω συγκριτικές διαφορές μεταξύ πλέγματος και ινών φαίνονται στην εικόνα 5.7.



Εικόνα 5.7: Τομή επένδυσης εκτοξευόμενου σκυροδέματος, σύγκριση πλέγματος (αριστερά) – ινών (δεξιά), (Bekaert, 2002)

Ειδικότερα, στα πρανή υπάρχουν μερικά ακόμη πλεονεκτήματα από τη χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος. Εκτός του καλύτερου αισθητικά αποτελέσματος που προκύπτει, η εγκατάσταση του πλέγματος απαιτεί ειδικό εξοπλισμό ενώ η εκτέλεση της εργασίας είναι σχετικά επικίνδυνη (εικόνα 5.8). Τέλος, καταργείται η ανάγκη για μεταφορά πλέγματος στο έργο, μια διαδικασία σχετικά δύσκολη λόγω του μεγάλου μεγέθους που αυτό έχει. Συχνά πρέπει να κλείσει η κυκλοφορία του δρόμου για να καταστεί δυνατή η ασφαλής μεταφορά του στην τοποθεσία του έργου (Ballou, 2004).



Δυσκολίες στην εγκατάσταση ***Απαιτείται ειδικός εξοπλισμός***

Εικόνα 5.8: Εγκατάσταση δομικού πλέγματος (Bekaert, 1998)

Το πιο ενδιαφέρον όμως στοιχείο όμως ως προς τη σύγκριση μεταξύ πλέγματος και ινών δεν μπορεί να είναι άλλο από το κόστος χρήσης τους. Με βάση τα υλικά που χρησιμοποιούνται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, αυτό κατά πάσα πιθανότητα θα είναι πιο ακριβό. Παρολαυτά, όταν το κόστος περιλαμβάνει τις συνολικές δαπάνες, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει αποδειχθεί πιο οικονομικό.

Ο K. Garshol αναφέρει ότι μια επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πάχους 100 mm, που ενισχύεται με μονό δομικό πλέγμα, απαιτεί τρεις στρώσεις σκυροδέματος και έχει ένα εκτιμώμενο κόστος 125 NOK/m^2. Μια επένδυση από εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 100 mm, συμπεριλαμβανομένων των ινών χάλυβα καλής ποιότητας και σε δοσολογία της τάξης των 50-70 kg/m^3, μπορεί να αποτελείται από μία στρώση και επιτρέπει μείωση δαπανών τουλάχιστον 50%.

Αν λάβουμε υπόψη την ανώμαλη επιφάνεια του βράχου και αντίστοιχα τη γεωμετρία της επένδυσης, η οικονομικότητα της λύσης του ινοσκυροδέματος μπορεί να είναι ακόμα υψηλότερη. Δεν είναι ασυνήθιστο σε βράχους με έντονο τεκτονισμό να καταναλωθεί μέχρι και 40% περισσότερο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα όταν χρησιμοποιείται οπλισμός πλέγματος έναντι ινών (Vandewalle, 1993).

Επίσης η μείωση του χρόνου κατασκευής έχει θετική επιρροή στη σύγκριση των συνολικών δαπανών. Για την κατασκευή της οδικής σήραγγας Reveston μήκους 300m στην Γαλλία, ο ανάδοχος αντικατέστησε το πλέγμα με τις ίνες χάλυβα Dramix ZP 30/.50. Ο ιδιοκτήτης της DDE des Alpes Maritimes αναφέρει ότι χρησιμοποιώντας τις ίνες χάλυβα έχει επιτευχθεί μείωση του κόστους κατά 1.2 εκατομμύρια FF, η οποία αντιστοιχεί στο 40% του συνολικού κόστους του εκτοξευόμενου σκυροδέματος (Vandewalle, 1993).

4. Σύγκριση άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με ίνες

Είναι γνωστό ότι η χρήση των ινών στο σκυρόδεμα είναι που προκαλεί την πλάστιμη συμπεριφορά του, με αποτέλεσμα η αστοχία πλέον να προκαλείται όχι από την ψαθυρότητα του υλικού αλλά από την εξόλκευση των ινών (Σακελλαρίου, 2006). Το υλικό έχει πλέον ελαστοπλαστικές ιδιότητες και μεγάλη δυνατότητα παραλαβής φορτίων

μετά την αστοχία. Έτσι, εδώ γίνεται μια προσπάθεια ανάδειξης αυτού του ρόλου των ινών στο σκυρόδεμα και με αριθμητικά παραδείγματα επισημαίνεται η ποσοστιαία μεταβολή των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Η Radmix, εταιρία παρασκευής ινών, αναφέρει ότι για τις δικές της ίνες και ανάλογα με τις προδιαγραφές του σκυροδέματος και τη δοσολογία των ινών στο μίγμα, οι φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος μπορούν να τροποποιηθούν σύμφωνα με τις αναλογίες που φαίνονται στον πίνακα 5.9.

Φυσικές ιδιότητες τροποποιημένες από ίνες Radmix	
Φυσική ιδιότητα	**Θετικό αποτέλεσμα**
Αντοχή σε κάμψη	1-2 x απλό σκυρόδεμα
Αντοχή σε διάτμηση	1,25-2 x απλό σκυρόδεμα
Αντοχή σε στρέψη	1,25-2 x απλό σκυρόδεμα
Απορρόφηση ενέργειας	2-15 x απλό σκυρόδεμα
Αντίσταση σε κόπωση	1,2-2 x απλό σκυρόδεμα
Αντίσταση σε φθορά και σπηλαίωση	1-1,4 x απλό σκυρόδεμα
Περιορισμός ρωγμών από συστολή	Περιορισμένο άνοιγμα ρωγμών
Αντοχή σε διάβρωση	Δεν παρατηρήθηκε καθολική διάβρωση

Πίνακας 5.9: Βελτίωση μηχανικών χαρακτηριστικών (Radmix technical manual 2006)

Παρακάτω παρατίθεται μέρος της εργαστηριακής έρευνας από τον Α. Σακελλαρίου (2008), η οποία μελετά της φυσικές ιδιότητες του άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες.

Για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, δεν έχει γίνει προσθήκη επιταχυντή πήξης και για την παρασκευή τους δεν χρησιμοποιήθηκε μηχανή εκτόξευσης, για τη διάστρωση και συμπύκνωση. Το άοπλο σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα αναφοράς με τις αναλογίες του να παρουσιάζονται στον πίνακα 5.10.

Υλικό	**Ποσότητα για 1 m^3 σκυροδέματος (kg)**
Τσιμέντο τύπου Ι42.5	450
Νερό	229
Άμμος	1090
Γαρμπίλι	468
Υπερευστοποιητής	3,6
ΣΥΝΟΛΟ	2241

Πίνακας 5.10: Μίγμα άοπλου σκυροδέματος

Αντίστοιχα, για τα δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος η σύνθεση έχει όπως φαίνεται στον πίνακα 5.11.

Υλικό	**Ποσότητα για 1 m³ σκυροδέματος (kg)**
Τσιμέντο τύπου I42.5	450
Νερό	229
Άμμος	1075
Γαρμπίλι	460
Υπερευστοποιητής	4,5
Ίνες	50
ΣΥΝΟΛΟ	2269

Πίνακας 5.11: Μίγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος

Οι δοκιμές που έγιναν ήταν σε δοκούς και οι μετρήσεις έγιναν σε ηλικία 7 και 28 ημερών. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις θλιπτικές αντοχές για δοκίμια έχουν όπως φαίνεται στον πίνακα 5.12.

Αντοχή σε θλίψη (MPa)	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
7 ημ.	36.8	38.7	36.6	34.2
28 ημ.	44.1	44.6	40.8	42.6
28 ημ.	43.1	44.9	41.4	41.4

Πίνακας 5.12: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη για τρία διαφορετικά δοκίμια

Αντίστοιχα, οι δοκιμές σε κάμψη για τα δύο δοκίμια 28 ημερών έχουν όπως φαίνεται στον πίνακα 5.13.

Αντοχή σε κάμψη (MPa)	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
R_f	4.5	4.9	5.4	5.9
	4.7	4.7	5.5	4.8

Πίνακας 5.13: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη για δύο διαφορετικά δοκίμια

Οι τιμές του σκυροδέματος με ίνες 50 kg/m3 έχουν αναχθεί στο 100%. Η ηλικία όλων των δοκιμίων όλων των σκυροδεμάτων ήταν 28 ημέρες Έτσι, οι συγκριτικές τιμές των ιδιοτήτων για τα διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14.

Ιδιότητα	Συμβολισμός	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες	Χωρίς ίνες
Αντοχή σε θλίψη	-	100	109	102	106
Αντοχή σε κάμψη	-	100	88	98	84
Δείκτες δυσθραυστότητας	I_5	100	94	112	-
	I_{10}	100	87	132	-
	I_{20}	100	83	152	-
	I_{30}	100	79	144	-
Παράμετροι παραμένουσας αντοχής	$R_{5,10}$	100	81	163	-
	$R_{10,20}$	100	76	182	-
	$R_{10,30}$	100	74	150	-

Πίνακας 5.14: Αποτελέσματα δοκιμών στις 28 ημέρες

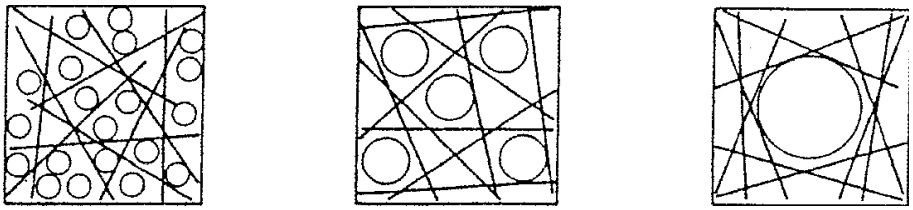
Από τις συγκρίσεις αυτές φαίνεται ότι η περιεκτικότητα των ινών παίζει ρόλο στη βελτίωση των ιδιοτήτων που προσφέρουν στο σκυρόδεμα. Έτσι, παραδείγματος χάρη, ξεκινώντας από την θέση ότι οι δείκτες δυσθραυστότητας του ινοσκυροδέματος με ίνες 50 kg/m^3 επιτυγχάνονται κατά 100%, μείωση των ινών στα 30 kg/m^3 μειώνει τους δείκτες (από το 94% έως το 79%) αυξανόμενης της μείωσης για τους δείκτες που αφορούν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Αντίθετα αύξηση των ινών σε 70 kg/m^3 βελτιώνει θεαματικά τους δείκτες μέχρι και στο 150%. Ανάλογες είναι και οι μεταβολές για τις παραμέτρους παραμένουσας αντοχής.

Τέλος, ένας παράγοντας που θα έπρεπε να σχολιαστεί είναι η απάντηση στο ερώτημα: βελτιώνουν οι ίνες πέραν των ελαστοπλαστικών παραμέτρων τις αντοχές αυτές καθ' εαυτές των σκυροδεμάτων, τόσο της αντοχής σε θλίψη όσο και της αντοχής σε κάμψη; Η σύγκριση των αντοχών στον πίνακα 5.14 δείχνει ότι τουλάχιστον με τα δεδομένα της παρούσας μελέτης η αντοχή σε θλίψη δεν αυξάνεται ουσιαστικά. Η αντοχή σε κάμψη δείχνει να αυξάνεται από 4% μέχρι και 19% περίπου αλλά όχι σε ευθεία αναλογία με την περιεκτικότητα των ινών. Βέβαια λόγω μικρού πλήθους δοκιμίων αφενός και αφετέρου λόγω διασποράς των αποτελεσμάτων της ίδιας της δοκιμής η μελέτη αυτή δεν μπορεί, ιδιαίτερα για την αντοχή σε κάμψη, να καταλήξει σε πλήρη συμπεράσματα. Μία νέα μελέτη εστιασμένη σ' αυτά τα προβλήματα θα μπορούσε να φωτίσει περισσότερο το θέμα.

Συνεπώς, τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της μελέτης επιβεβαιώνουν τις εξαιρετικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων, όταν στη μάζα τους προστίθενται μεταλλικές ίνες. Η κυρίαρχη ιδιότητα που αποκτούν είναι η έννοια της απορροφούμενης ενέργειας κατά τη θραύση, ιδιότητα που μετατρέπει το σκυρόδεμα από ψαθυρό υλικό σε υλικό με ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά. Η νέα αυτή συμπεριφορά των ινοσκυροδεμάτων έγινε δυνατό να αποτιμηθεί μέσω της έννοιας της δυσθραυστότητας, έτσι όπως ορίζεται από τους δείκτες δυσθραυστότητας και τις παραμέτρους της παραμένουσας αντοχής, ορισμοί που προσδιορίζονται στην προδιαγραφή ASTM C 1018 (Σακελλαρίου, 2008).

5. Μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών

Το μέγεθος των κόκκων των αδρανών (διάμετρος) επηρεάζει την κατανομή των ινών και τον προσανατολισμό τους, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.15.



Αδρανή 5mm ***Αδρανή 10 mm*** ***Αδρανή 20mm***

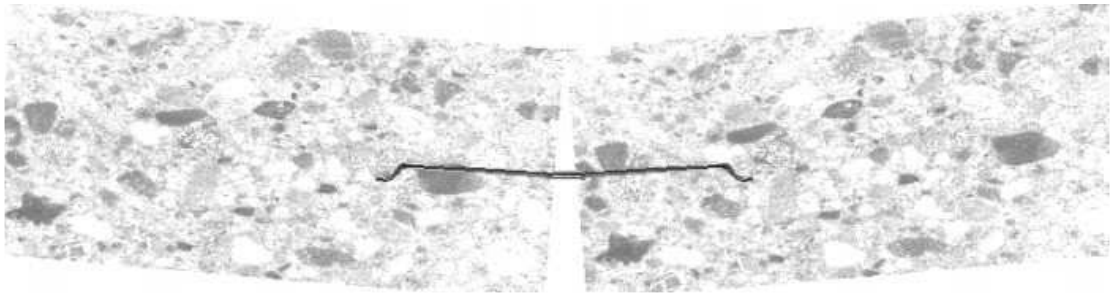
Σχήμα 5.15: Η επίδραση του μεγέθους των αδρανών στην κατανομή των ινών, τον προσανατολισμό τους και την εργασιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maidl, 1995)

Οι ίνες στο κονίαμα χωρίζονται μόνο από το λεπτόκοκκο υλικό το οποίο μπορεί να κινηθεί ελεύθερα μεταξύ τους. Στο σκυρόδεμα, όλοι οι κόκκοι αδρανών που είναι μεγαλύτεροι από τη μέση απόσταση μεταξύ των ινών, αναγκάζουν τις ίνες να συγκεντρωθούν σε «φωλιές» (συσσωμάτωση) και προκαλούν έτσι την ανομοιόμορφη κατανομή τους. Αυτό το φαινόμενο είναι πιο έντονο ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων και δρα αρνητικά στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος (Maidl, 1995).

Περίπου το 55% του "τυποποιημένου σκυροδέματος" αποτελείται από αδρανή μικρότερα από 5 mm. Αυτό είναι το μόνο μέρος του σκυροδέματος που μπορεί να κινηθεί ελεύθερα κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης. Δοκιμές έχουν δείξει ότι για να επιτύχουμε την πλήρη απόδοση των ινών, το ποσοστό λεπτοκόκκων στο σκυρόδεμα πρέπει να είναι περίπου 70% κατ' όγκο, ενώ το υπόλοιπο 30% πρέπει να αποτελείται από κόκκους μεταξύ 5 και 10 mm. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών που δεν περιλαμβάνει κάποια από τα παραπάνω μεγέθη πρέπει να αποφεύγεται (Maidl, 1995).

6. Μηχανισμός λειτουργίας και αγκύρωσης

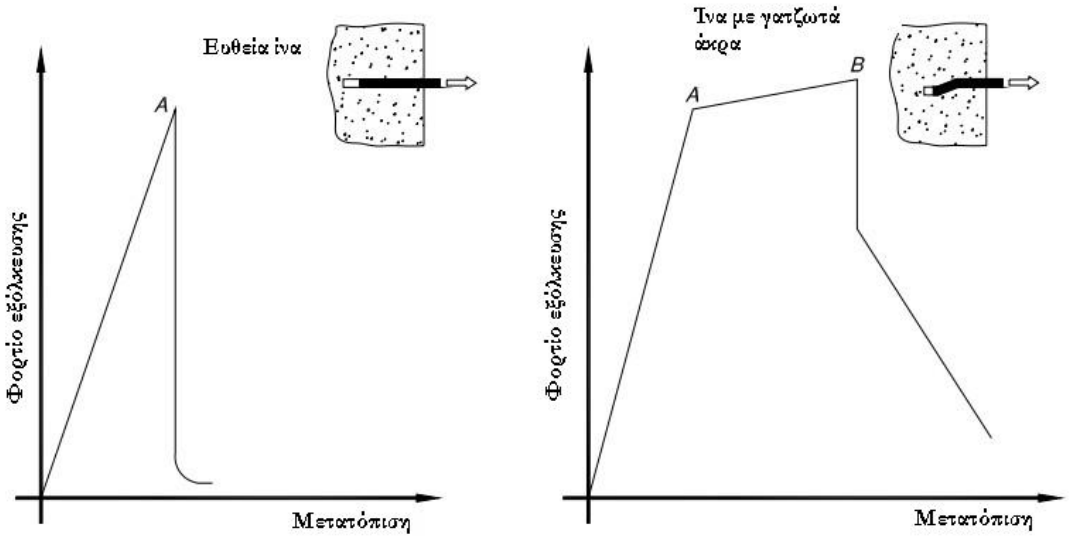
Ο πρωταρχικός ρόλος των ινών είναι να παρέχουν στο σκυρόδεμα έναν μηχανισμό ανάσχεσης των ρωγμών. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα της χρήσης τους στο γίνονται φανερά μετά τη δημιουργία των πρώτων ρωγμών, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.16, διότι τότε οι εφελκυστικές τάσεις ανακατανέμονται και παραλαμβάνονται πλέον από τις ίνες.



Εικόνα 5.16: Αρχή λειτουργίας ινών στο σκυρόδεμα, Wang 2006

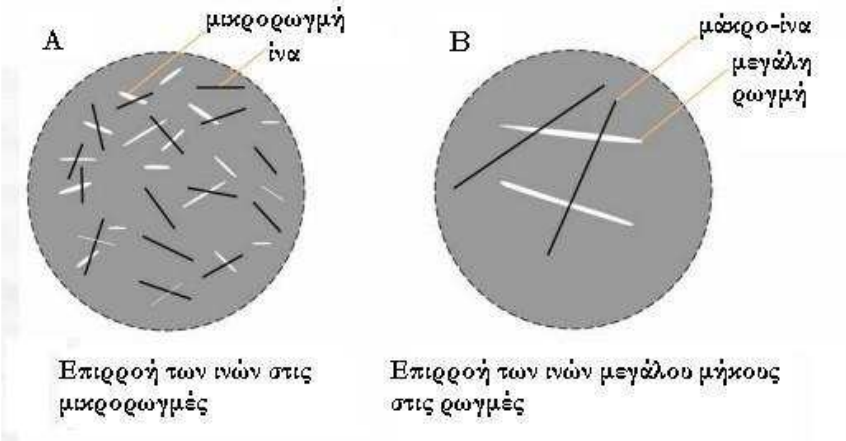
Το φορτίο στο οποίο πραγματοποιείται εξόλκευση ή θραύση των ινών επηρεάζεται άμεσα από την πρόσφυση μεταξύ της μήτρας του σκυροδέματος και των ινών και από το μήκος αγκύρωσής τους. Επομένως η πρόσφυση επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος στην πρώτη ρωγμή και τη συμπεριφορά του μετά την αστοχία. Πριν τη δημιουργία των ρωγμών, η επιρροή των ινών χάλυβα υπολογίζεται συγκρίνοντας το δικό τους μέτρο ελαστικότητας με αυτό του σκυροδέματος. Λόγω όμως του μικρού ποσοστού των ινών χάλυβα σε σχέση με το συνολικό όγκο του σκυροδέματος, αυτή η επιρροή είναι ελάχιστη (Maidl, 1995).

Η πρόσφυση των ινών στη μήτρα του σκυροδέματος εξαρτάται από τη φύση της επιφάνειας των ινών. Έτσι, τραχιές επιφάνειες ινών επιτρέπουν μεγαλύτερα επίπεδα πρόσφυσης. Με την προσθήκη των ινών δεν αποτρέπεται η δημιουργία ρωγμών αλλά η διεύρυνση τους, διατηρώντας τη συνοχή της δομής. Μετά τη ρωγμάτωση οι ίνες εξακολουθούν να αναλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις και έτσι προσδίδουν πλαστιμότητα στο υλικό. Ίνες με τραχείες επιφάνειες μπορούν να κατασκευαστούν κατά τη διάρκεια παραγωγής τους, όπως περιγράφεται στο αντίστοιχο κεφάλαιο (Maidl, 1995). Η επιρροή της γεωμετρίας των ινών φαίνεται στα αποτελέσματα των παρακάτω δοκιμών φορτίου - μετατόπισης (βύθισης) (διάγραμμα 5.17).

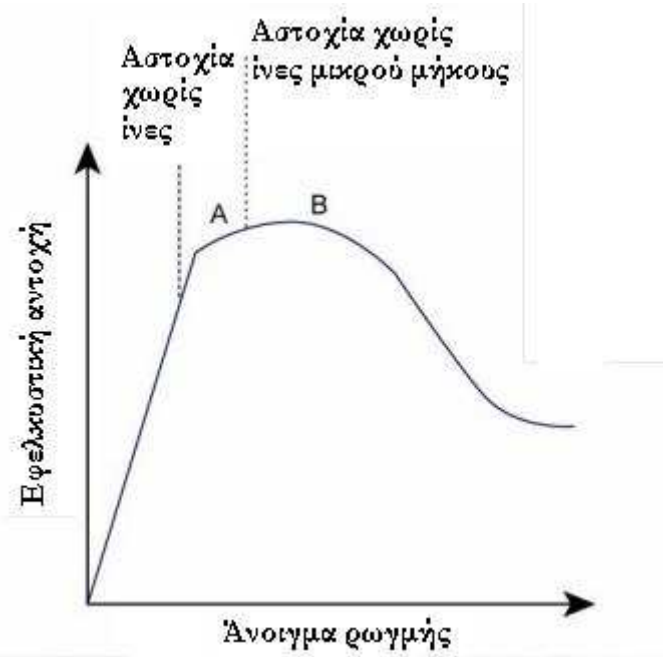


Διάγραμμα 5.17: Αύξηση της δύναμης εξόλκευσης και της πρόσφυσης με την αλλαγή του σχήματος της ίνας (Maccaferri)

Τέλος, στην εικόνα 5.18 φαίνεται ο διαφορετικός τρόπος λειτουργίας των ινών μικρού και μεγάλου μήκους, με τις πρώτες να περιορίζουν τις ρωγμές πριν πάρουν μεγαλύτερες διαστάσεις. Το διάγραμμα 5.19 δείχνει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για οπλισμό με ίνες μικρού και μεγαλύτερου μήκους.



Εικόνα 5.18: Μηχανισμός λειτουργίας ινών διαφορετικού μήκους (Mehta and Monteiro)



Διάγραμμα 5.19: Αντοχή σε εφελκυσμό ως προς το είδος των ινών (Mehta and Monteiro)

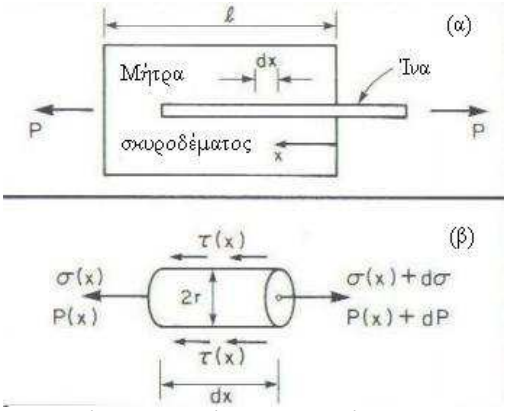
Βέβαια όλα τα παραπάνω ισχύουν για τις χαλύβδινες ίνες που βασίζουν τη λειτουργία τους στην αγκύρωση των άκρων τους και την παραλαβή φορτίων κατ' αυτόν τον τρόπο. Στις συνθετικές ίνες ο μηχανισμός λειτουργίας αλλάζει ριζικά. Η ικανοποιητική αγκύρωση μόνο στα άκρα, λόγω του χαμηλού μέτρου ελαστικότητας, θα σήμαινε ότι η ρωγμή πρέπει να ανοίξει 50 έως 100 φορές περισσότερο, σε σχέση με την αντίστοιχη ρωγμή των χαλύβδινων ινών, ώστε να έχουμε παραλαβή των ίδιων φορτίων. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι για τις ίνες χάλυβα όταν το άνοιγμα ρωγμής γίνει 0.1 mm πρέπει να αντίστοιχα να γίνει 5-10 mm στις συνθετικές για να αρχίσουν αυτές να λειτουργούν. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με:

- Αύξηση της δοσολογίας των συνθετικών ινών για περιορισμό των τάσεων που αναπτύσσονται και κατά συνέπεια την επιμήκυνση των ινών για ένα συγκεκριμένο φορτίο.
- Μείωση του μήκους των ινών μεταξύ των αγκυρώσεων για να αυξηθεί η σχετική επιμήκυνση της ίνας και μαζί με αυτήν οι παραλαμβανόμενες τάσεις (Grant, Ratcliffe, Papwoth, 2001).
- Κατασκευή ινών με δυνατότητα αγκύρωσης σε όλο τους το μήκος.

7. Μηχανισμός αστοχίας

Η αστοχία των ινών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να προέλθει από δύο βασικές διαφορετικές περιπτώσεις:

- Αστοχία λόγω εξόλκευσης των ινών (α)
- Αστοχία λόγω θραύσης των ινών (β)



Εικόνα 5.20: Προσομοίωση αντίδρασης ινών - σκυροδέματος, (Bentur and Mindness, 1990)

Η διαδικασία αστοχίας με εξόλκευση περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

- Προοδευτική αποκόλληση των ινών με βραδεία μετάδοση των ρηγμάτων.
- Αποκόλληση των ινών και ταχεία επέκταση της ρηγμάτωσης.
- Ενεργοποίηση των ινών που δεν επιτρέπουν την ολίσθηση (Γεωργακοπούλου)

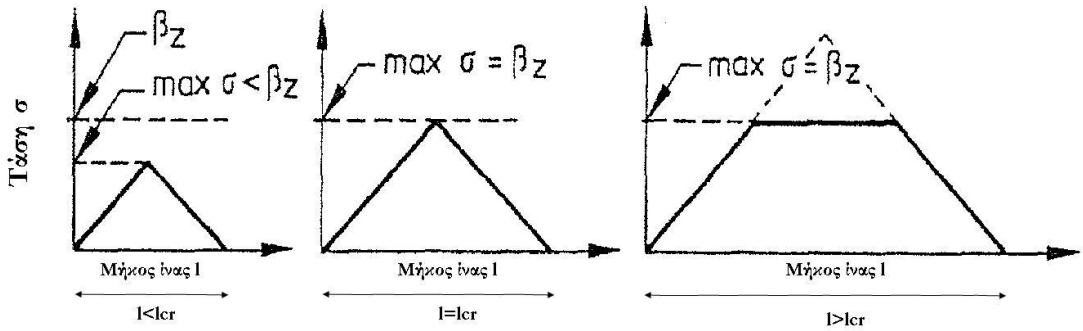
Γενικά, ο τρόπος με τον οποίον ο μηχανισμός αστοχίας εκδηλώνεται εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους:

- Λόγος μορφής
- Αγκύρωση
- Εφελκυστική αντοχή της ίνας
- Πρόσφυση ίνας - σκυροδέματος

Οι πρώτοι τρεις παράγοντες εξαρτώνται εξολοκλήρου από τα χαρακτηριστικά της ίνας. Ο βαθμός πρόσφυσης εξαρτάται και από την ποιότητα της επιφάνειας της ίνας και από την αντοχή της περιβάλλουσας μήτρας σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, οι ίδιες ίνες μπορούν να παρουσιάσουν απολύτως διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας σε διαφορετικά σκυροδέματα (Maidl, 1995).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ευθύγραμμες ίνες με μικρό μήκος, η αστοχία της αντοχής του ινοσκυροδέματος οφείλεται κυρίως στην εξόλκευση και όχι στη διαρροή των ινών. Αντί της αναμενόμενης αστοχίας ψαθυρής μορφής του κοινού σκυροδέματος, στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζεται σταδιακή ενεργοποίηση των ινών, η οποία προσδίδει χαρακτηριστικά πλάστιμης συμπεριφοράς. Έτσι, είναι σημαντικό να ορίσουμε το κρίσιμο, δηλαδή το κατάλληλο, μήκος ίνας, για την ισορροπία των υπολογισμών. Αυτό το μήκος θα είναι τέτοιο ώστε ο μέγιστη τάση που μπορεί να εξασφαλίσει η υπάρχουσα πρόσφυση, στο μισό μήκος της ίνας, να αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή της ίνας. Ίνες με υπερκρίσιμα μήκη (l>lcr) αστοχούν αρχικά

σε θραύση. Αντίθετα, όταν οι ίνες έχουν υποκρίσιμα μήκη (l<lcr) ολισθαίνουν στη μήτρα του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.21 (Maidl, 1995).



Διάγραμμα 5.21: Κρίσιμο μήκος ίνας (Maidl, 1995)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κρίσιμο μήκος (lcr) ίνας θα είναι:

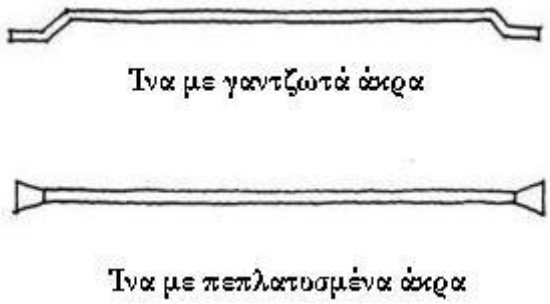
$$lcr = \frac{d \times \beta_z}{2 \times \tau_m}, \text{ (James, 1990)}$$

Όπου: d = διάμετρος ίνας
β_z = εφελκυστική αντοχή ίνας
τ_m = μέση τάση πρόσφυσης

Ωστόσο, με την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης προκύπτει ότι για να επιτευχθεί εύλογη τάση αγκύρωσης, απαιτούνται ίνες με πολύ υψηλό λόγο μορφής. Αυτές είναι δύσχρηστες και είναι δυνατόν να τις αντικαταστήσουμε με ίνες κυματοειδούς μορφής ή με άγκιστρα στα άκρα.

Οι τυποποιημένες ίνες χάλυβα με λόγο μορφής μεταξύ 50 και 100 έχουν γενικά υποκρίσιμο μήκος. Συνήθως η αστοχία οφείλεται σε εξόλκευση και όχι σε διαρροή του χάλυβα. Έτσι, οι ίνες δε χρησιμοποιούνται στο μέγιστό τους βαθμό, ως προς την αντοχή τους σε εφελκυσμό. Ξαφνική αστοχία δεν προέρχεται σε ινοπλισμένα σκυροδέματα, με κατάλληλες ίνες, και σε ποσοστά της τάξης του 0,7% κατ' όγκο. Αυτή η πλάστιμη συμπεριφορά είναι χρήσιμη εκεί που μπορούν να μειωθούν οι συντελεστές ασφαλείας (Maidl, 1995).

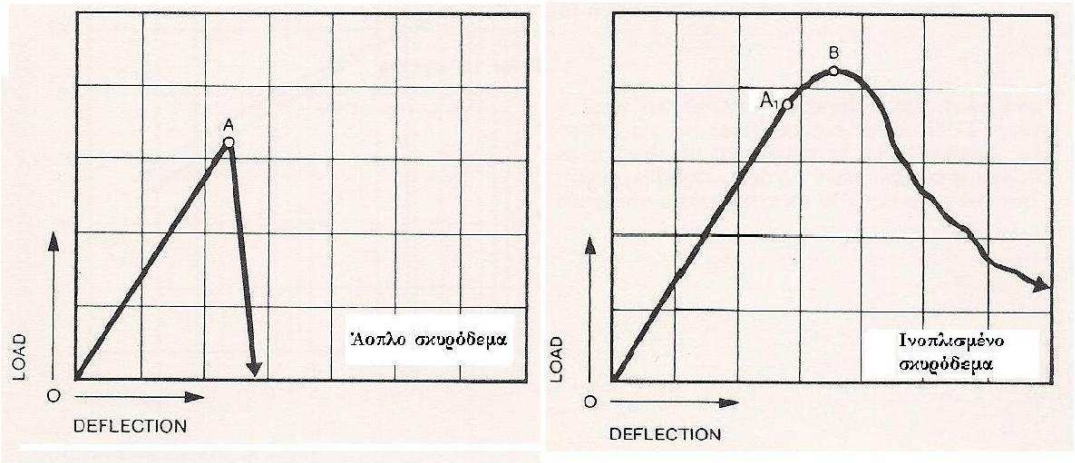
Στις χαλύβδινες ίνες όπως είδαμε, επικρατούν κυρίως αυτές με τα άγκιστρα στα άκρα αλλά και αυτές με τα διευρυμένα ή πεπλατυσμένα άκρα.



Εικόνα 5.22: Κυρίαρχα προφίλ ινών

Σε μία ίνα με άγκιστρα, όταν έχουμε εφελκυσμό, αυτή είναι γενικά σχεδιασμένη να αστοχεί σε εξόλκευση και όχι σε θραύση. Έχουν ικανή αντοχή σε εξόλκευση, λόγω του σχεδιασμού τους, ωστόσο το μειονέκτημά τους είναι ότι μετά την αστοχία έχουν μικρή ικανότητα να περιορίζουν το άνοιγμα της ρωγμής. Αντίθετα, οι ίνες με πεπλατυσμένα άκρα, σε μία αντίστοιχη φόρτιση, αναπτύσσουν αυξημένη τριβή με το σκυρόδεμα και ανθίστανται σαφώς καλύτερα στο άνοιγμα της ρωγμής. Το δικό τους όμως μειονέκτημα είναι ότι δεν έχουν τόσο μεγάλη αντοχή πριν την αστοχία, δηλαδή αστοχούν σε εξόλκευση σαφώς ευκολότερα σε σχέση με τις ίνες με τα γαντζωτά άκρα (Banthia, Armelin, 2001).

Για την καλύτερη όμως κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας των ινών, πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, συγκριτικά με το άοπλο σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας δοκιμής φαίνονται στο διάγραμμα 5.23.



Διάγραμμα 5.23: Τάση - παραμόρφωση για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (BHP technical manual, 1981)

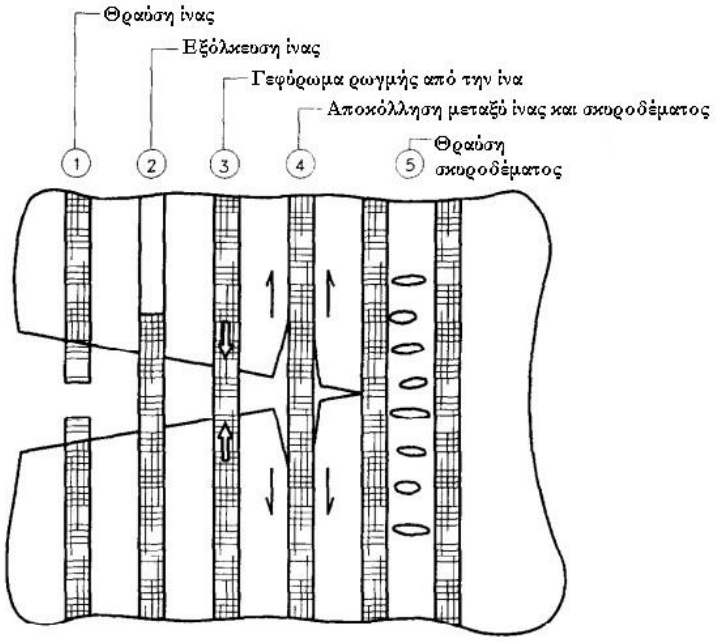
Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπάρχουν τα εξής σημεία που πρέπει να τονισθούν:

- Το σημείο A_1 είναι λίγο υψηλότερα σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο Α (όρια διαρροής). Έως το σημείο αυτό έχουμε το ελαστικό στάδιο, με πλήρη επαφή των ινών και περιβάλλοντος υλικού.
- Μέχρι το σημείο Β είναι η περιοχή που αρχίζουν να εκδηλώνονται οι μικρορωγμές, ενώ έχουμε τις πρώτες αποκολλήσεις ινών.
- Στο σημείο Β, εκεί που εκδηλώνεται δηλαδή η αστοχία, έχουμε το μέγιστο φορτίο ενώ είναι εμφανείς τώρα οι ρωγμές.
- Πέρα από το σημείο Β, έχουμε εξόλκευση ινών και οι ρωγμές σταδιακά επεκτείνονται. Μπορεί να ονομαστεί και στάδιο τριβής διότι η μετάδοση των τάσεων γίνεται με δυνάμεις τριβής (BHP technical manual, 1981).

Αν παρατηρήσουμε αντίστοιχα το άοπλο σκυρόδεμα, μέχρι το σημείο Α υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, εκεί έχουμε διαρροή και μετέπειτα το υλικό δεν μπορεί να παραλάβει περεταίρω φορτία.

Το σχήμα 5.24 δείχνει τους τρόπους με τους οποίους οι ίνες αντιδρούν στην απορρόφηση ενέργειας και στον τρόπο με τον οποίο περιορίζουν το άνοιγμα των ρωγμών. Ξεκινώντας από τα αριστερά, στην πρώτη περίπτωση έχουμε θραύση της

χαλύβδινης ίνας. Στη δεύτερη περίπτωση, η αστοχία οφείλεται σε εξόλκευσή της. Στην τρίτη περίπτωση έχουμε συγκράτηση της ρωγμής και η ίνα εφελκύεται. Στην τέταρτη περίπτωση έχουμε αστοχία καθότι σπάει ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας του σκυροδέματος, ενώ στην πέμπτη περίπτωση έχουμε απλά θραύση της ίδιας της μήτρας του σκυροδέματος. Είναι σημαντικό να επισημανθεί εδώ ότι οι παραπάνω μηχανισμοί δεν επηρεάζονται από την απόσταση (s) μεταξύ των ινών. Αυτό που παίζει κυρίως ρόλο είναι το συνολικό μοντέλο λειτουργίας των ινών στο σκυρόδεμα (Zollo, 1996).



Σχήμα 5.24: Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας ινών/σκυροδέματος (Fractures Mechanics, Anderson, 1991)

8. Συντήρηση

Η σημασία της συντήρησης στα μηχανικά χαρακτηριστικά του συμβατικού και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος αναλύεται από τον Neville (1996). Η συντήρηση είναι απαραίτητη για τη σωστή ενυδάτωση του τσιμέντου. Αστοχία στην επίτευξη σωστής ενυδάτωσης σημαίνει ότι το σκυρόδεμα θα έχει μικρές αντοχές, χαμηλή ανθεκτικότητα σε φθορά και υψηλή διαπερατότητα. Τυπικά, τα δοκίμια εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα χρησιμεύσουν στον ποιοτικό έλεγχό του, συντηρούνται σε ειδικούς θαλάμους και η ενυδάτωσή τους είναι αρκετά καλύτερη από αυτήν που έχει το σκυρόδεμα στη θέση του έργου. Παρολαυτά, η χρήση πανέλων εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν επιτυγχάνει την ίδια καλή ενυδάτωση με τα κυλινδρικά δοκίμια, και τούτο διότι τα πανέλα έχουν αρκετά μεγαλύτερο μέγεθος (Bernard, Clemens, 2001).

Έτσι, η συντήρηση του σκυροδέματος πρέπει να γίνει μέσα σε συνθήκες υγρασίας που επιτυγχάνονται με διαβροχή μέσω σχετικού υλικού διατήρησης της υγρασίας του σκυροδέματος ή με ενσωμάτωση του πρόσμικτου αυτού στο σκυρόδεμα ή με φύλλα που καλύπτουν την επιφάνεια του σκυροδέματος που έχει διαστρωθεί και διατηρούν την υγρασία, εκτός αν χώρος στον οποίον βρίσκεται η επιφάνεια διατηρεί μια σχετικά μεγάλη υγρασία όπως είναι οι υπόγειοι χώροι σε σήραγγες, χωρίς όμως ρεύματα αέρα.

Από τον κανονισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, προκύπτει ότι η συντήρηση τον έργου είναι υποχρεωτική. Αρχίζει αμέσως μετά την ολοκλήρωση της εκτόξευσης και διαρκεί για χρονικό διάστημα που εξαρτάται από τις συνθήκες τον περιβάλλοντος και τις ειδικές απαιτήσεις του έργου.

Όταν πρόκειται για κατακόρυφες επιφάνειες, τότε πρέπει να επενδύεται η επιφάνεια με βρεγμένα υφάσματα και να διατηρούνται βρεγμένα για διάστημα μεγαλύτερο των 7 ημερών. Άλλος τρόπος, όπως είπαμε προηγουμένως, είναι ο συνεχής ψεκασμός των επιφανειών με ειδικά υγρά που σχηματίζουν επιφανειακή μεμβράνη. Τέλος μπορεί να γίνει ενσωμάτωση στην μάζα τον σκυροδέματος, όπως αναφέρθηκε, στη φάση της ανάμιξης, ειδικών υλικών που δημιουργούν εσωτερικό διάφραγμα.

Για την σκυροδέτηση με υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος ή χαμηλή θερμοκρασία με πάγο, ισχύουν τα αναφερόμενα στον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Ιδιαίτερο όμως ενδιαφέρον έχει η συντήρηση σκυροδέματος σε υπόγειους, κλειστούς και τεχνητώς αεριζόμενους χώρους. Οι σήραγγες και αλλά υπόγεια έργα πιστεύεται ότι έχουν ιδανικές συνθήκες περιβάλλοντος για την συντήρηση του εκτοξευμένου σκυροδέματος. Αυτή η αντίληψη όμως είναι εσφαλμένη και οφείλεται στις συνθήκες που συνήθως επικρατούν σε υπόγεια έργα. Από διάφορα σημεία εισρέουν νερά και υγραίνουν την ατμόσφαιρα, ενώ όταν υπάρχει άπνοια λόγω βάθους και δεν υπάρχει καθόλου ήλιος να εξατμίσει το νερό, η υγρασία αυξάνει. Στην πράξη όμως, υπάρχει και ο εξαερισμός τον έργου που με τη συνεχή δημιουργία ρεύματος αέρα μειωμένης σχετικής υγρασίας από το ύπαιθρο, δημιουργεί ταχεία απώλεια της υγρασίας τον σκυροδέματος. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να εξομοιώσουν την κατάσταση αυτή με το σκυρόδεμα που βρίσκεται συνεχώς υπό την επίδραση ρεύματος αέρα. Έτσι χάνονται οι ευεργετικές συνθήκες που υπάρχουν στις σήραγγες από έντονης υγρασίας που συνήθως επικρατεί σε αυτούς, λόγω του εξαερισμού.

Κάποιοι άλλοι λόγοι που επιβαρύνουν την διαδικασία σκλήρυνσης, πέραν αυτών που προαναφέρθηκαν, είναι η χρήση επιταχυντών για την γρήγορη σκλήρυνση προς όφελος της ασφάλειας τον έργου. Οι επιταχυντές ως εκ της φύσεως τους, επιταχύνουν την διαδικασία ενυδάτωσης του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την γρήγορη συρρίκνωση. Η συνεχής όμως υποχρεωτική εναλλαγή τον αέρα μέσα σε σήραγγα ή σε υπόγειους χώρους μειώνει σημαντικά την σχετική υγρασία που υπάρχει μέσα στο χώρο αυτό και επιταχύνει το φαινόμενο. Επίσης ένας άλλος λόγος που στεγνώνει γρήγορα το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ότι εφαρμόζεται σε λεπτά στρώματα σε κάθε διαδρομή του ακροφυσίου. Από την άλλη όμως, οπωσδήποτε η χρήση των υλικών συντήρησης που επικαλύπτουν την επιφάνεια τον σκυροδέματος έχει και περιορισμούς (Σαπρανίδης, 2002).

9. Συνάφεια ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος - επιφάνειας

Ο σχεδιασμός μιας σήραγγας πρέπει να λαμβάνει υπόψη και την αλληλεπίδραση μεταξύ εδάφους και επένδυσης. Έτσι, η εκτόξευση πρέπει να γίνεται στην ελάχιστη απόσταση από το έδαφος. Από την άλλη όμως πλευρά, αυτό πρέπει να παραμείνει κατά το δυνατόν αδιατάρακτο ούτως ώστε να διατηρεί την αντοχή του.

Η δύναμη συνάφειας μεταξύ επένδυσης και εδάφους αυξάνει με το χρόνο με την προϋπόθεση ότι το δεύτερο είναι σταθερό, καθαρό και ξηρό. Η συνάφεια σε εδάφη μαλακά και υγρά είναι γενικά αδύναμη. Έτσι αυτή μπορεί να φθάσει μέχρι 1.4 MPa για γρανιτικούς βράχους αλλά μπορεί να είναι μηδενική σε πτωχά και υγρά εδάφη. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η εκτόξευση πρέπει να ξεκινά από το ανάστροφο τόξο (δάπεδο) έτσι ώστε να μεταφέρεται εκεί το φορτίο του ιδίου βάρους της επένδυσης και να μην παραλαμβάνεται από τη δύναμη συνάφειας.

Οι ρωγμές λόγω της συστολής ξήρανσης τείνουν να μειώνουν τη δύναμη συνάφειας μεταξύ επένδυσης και επιφάνειας εδάφους. Έτσι, δεδομένου ότι οι ίνες στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα περιορίζουν τις ρωγμές λόγω συστολής ξήρανσης, το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θα υπερτερεί του συμβατικού. Επίσης, η πυριτιακή παιπάλη έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τη συνάφεια ακόμη και σε πτωχές βραχόμαζες.

Το χαλύβδινο πλέγμα επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη ισχυρής δύναμης συνάφειας μεταξύ εδάφους και επένδυσης. Τα σύρματα του πλέγματος αποτελούν εμπόδιο για το σκυρόδεμα να προσκολληθεί στο βράχο. Επιπλέον, λόγω της συχνά ακανόνιστης γεωμετρίας της επιφάνειας, το πλέγμα ορισμένες φορές εφάπτεται σε αυτήν ενώ σε άλλες μπορεί να απέχει ακόμη και 40 cm. Έτσι, για να εξασφαλισθεί η υποστήριξη του εδάφους πρέπει να εκτοξευθούν πολύ μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος. Το βάρος του σκυροδέματος μπορεί να γίνει αρκετό ώστε να σπάσει ο δεσμός μεταξύ αυτού και της επιφάνειας με αποτέλεσμα να φορτίζει επιπλέον το ίδιο το πλέγμα. Τέλος, το σκυρόδεμα που περνά ανάμεσα από τα κενά του πλέγματος μπορεί να προσκολληθεί σε αυτό και σταδιακά να αποτρέπει το φρέσκο υλικό να φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους (Vandewalle, 1993).

10. Συνηθισμένα λάθη κατά την εκτέλεση της εργασίας

Στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα τα πιθανά λάθη που μπορεί να γίνουν, και αφορούν στη χρήση των ινών, έχουν κυρίως να κάνουν με τις τεχνικές εκείνες που αποσκοπούν στην ομοιόμορφη κατανομή τους στο μίγμα του σκυροδέματος. Συνεπώς, αν δεν προαναμιχθούν με κατάλληλο τρόπο τότε ενδέχεται να δημιουργήσουν συσσωματώματα τα οποία μπορούν να φράξουν το ακροφύσιο με άσχημα αποτελέσματα ενώ μπορεί να φράξουν οι αγωγοί μεταφοράς και το αντλητικό συγκρότημα. Η απόφραξη γενικά απαιτεί σημαντικό χρόνο, μπορεί όμως το φράξιμο να είναι ισχυρό και το σύστημα ακροφυσίου να εκραγεί και να προκληθούν τραυματισμοί και σημαντικές ζημίες.

Οι μεταλλικές ίνες λοιπόν, πρέπει να αναμιχθούν στο εργοστάσιο στην μονάδα παραγωγής για 4 λεπτά τουλάχιστον και με ταχύτητα περιστροφής την μέγιστη αφού πρώτα αναμιχθούν τα άλλα αδρανή υλικά και το τσιμέντο. Μπορεί όμως να αναμιχθούν και στον περιστρεφόμενο κάδο του αυτοκινήτου μεταφοράς για 30 έως 40 στροφές.

Η ταχύτητα προσθήκης των ινών, που είναι ίσως ο πιο σημαντικός παράγοντας, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 60 kg/min. κατά την περιστροφή τον κάδου. Για την επίτευξη της επιθυμητής κάθισης πρέπει να λογαριάζουμε 5-8 cm μείωση της κανονικής

κάθισης, από το άοπλο σκυρόδεμα. Έτσι θα πρέπει να προστεθεί ρευστοποιητής που θα αυξήσει την κάθιση και την εργασιμότητα.

Μπορεί κατά την διάρκεια της εργασίας να δημιουργηθεί διαταραχή των αναλογιών των ινών και να έχομε διαφοροποιήσεις τον τελικού υλικού και της ποιότητας, ιδίως στην περίπτωση που έχουμε μεγάλη απώλεια από αναπήδηση ινών. Κάτι τέτοιο είναι σύνηθες κυρίως στην ξηρή μίξη. Για όλους αυτούς τους λόγους που προκύπτουν από την μη ομογενοποίηση του τελικού προϊόντος, είναι απαραίτητο να δοθεί μεγάλη προσοχή στην διανομή και ανάμιξη του υλικού των ινών με τα υλικά τον σκυροδέματος (Σαπρανίδης, 2002).

Άλλα συχνά λάθη κατά την εκτέλεση της εργασίας είναι παρόμοια με αυτά του συμβατικού οπλισμένου σκυροδέματος, και συνοπτικά έχουν να κάνουν με τα εξής:

- *Χειρισμός του ακροφυσίου:* Ο χειριστής πρέπει να έχει την απαιτούμενη εμπειρία και γνώση. Η κατεύθυνση εκτόξευσης, η απόσταση από την επιφάνεια, η ταχύτητα και η δύναμη εκτόξευσης είναι παράμετροι πολύ σημαντικοί για την επίτευξη ενός καλού αποτελέσματος. Τέλος, σημασία έχει και η φορά της εκτόξευσης, που πρέπει να γίνεται από τη βάση προς τα επάνω, σε οριζόντιες ή ελλειπτικές γραμμές.
- *Δοσολογία επιταχυντή:* Πρέπει να διατηρείται σε ποσοστό όπως αυτή έχει υπολογισθεί και να προστίθεται με δοσομετρική αντλία. Σημαντικό επίσης είναι να ελέγχεται και η ημερομηνία λήξης του διότι έχει μικρή διάρκεια ζωής (6 μήνες συνήθως).
- *Αναλογίες υλικών:* Είναι συνήθης περίπτωση η μη τήρηση της σωστής αναλογίας μεταξύ των υλικών (αδρανή, τσιμέντο, πρόσθετα). Έτσι, γίνεται έλεγχος στα δελτία αποστολής αλλά και στο καταγραφικό στο εργοστάσιο παραγωγής.
- *Συντήρηση σκυροδέματος:* Είναι πολύ σημαντική, ιδίως όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται σε ρεύμα αέρος ή στον ήλιο.
- *Επιφάνεια εκτόξευσης:* Παίζει σημαντικό ρόλο διότι αν είναι πολύ απορροφητική και στεγνή απορροφά το νερό του σκυροδέματος κάνοντας προβληματική την ενυδάτωσή του.

11. Μελέτη αναπήδησης

11.1 Γενικά στοιχεία

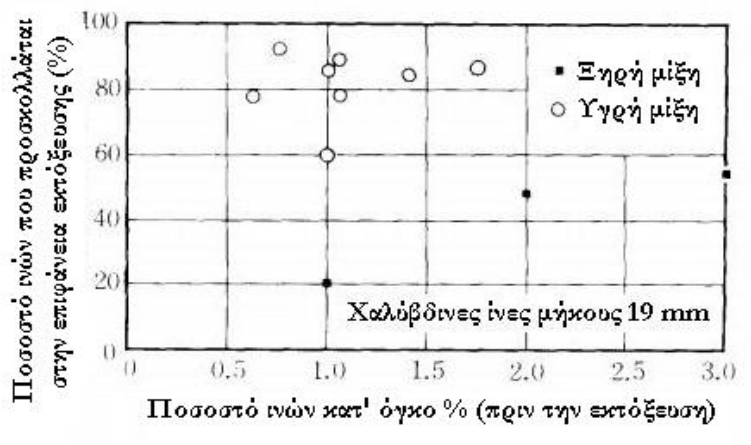
Η αναπήδηση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι ένα μεγάλο επιπρόσθετο κόστος για το έργο. Έτσι, από την πλευρά του εργολάβου είναι πολύ σημαντικό αυτή να περιορίζεται στο ελάχιστο δυνατό. Το φαινόμενο της αναπήδησης εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες και γίνεται ακόμη πιο πολύπλοκο με τη χρήση των ινών. Το σκυρόδεμα που τελικά καταναλώνεται συνολικά σε ένα έργο είναι σχεδόν πάντα μεγαλύτερο από αυτό που απαιτείται για την κατασκευή της επένδυσης και αυτό οφείλεται στις απώλειες. Από την πλευρά του εργολάβου του έργου μπορούμε να πούμε πως ισχύει η παρακάτω σχέση:

Απώλειες σκυροδέματος = Αναπήδηση + Λιθογόμωση κενών + Απορριπτέο σκυρόδεμα M. Vandewalle, 1993

Το συνολικό σκυρόδεμα μπορεί να φθάνει το 150 έως το 200% της προβλεπόμενης ποσότητας και μέρος του πλεονάσματος αυτού οφείλεται στην αναπήδηση.

Στη μέθοδο της ξηρής μίξης εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι πολύ σημαντική η γνώση της αναπήδησης διότι το 20 έως το 40% του συνολικού υλικού χάνεται και πάνω από το 75% των ινών μπορεί να αναπηδήσουν (Armelin 1997). Δυστυχώς, το υλικό που χάνεται ως αναπήδηση κυρίως αποτελείται από αδρανή και απώλεια αρκετού όγκου αδρανών κάνει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επιρρεπές σε μεταβολές του όγκου και σε φαινόμενα ρωγμάτωσης και ερπυσμού (Banthia et al, 1998). Απώλεια ινών μέσω της αναπήδησης, μεταφράζεται σε μεγάλη απώλεια αντοχής σε θραύση, πλαστιμότητας και παραμένουσας αντοχής (Banthia, 2001).

Η διαφορά μεταξύ ξηρής και υγρής μίξης, ως προς το ποσοστό της αναπήδησης, είναι εμφανής και από το διάγραμμα 5.25 που απεικονίζει μετρήσεις για δεδομένες ίνες συγκριτικά και για τις δύο μεθόδους εκτόξευσης.



Διάγραμμα 5.25: Σύγκριση ξηρής και υγρής μίξης ως προς την αναπήδηση, Kobayashi 1983

Οι θεωρίες ως προς την επιρροή των ινών στην αναπήδηση δεν ταυτίζονται απόλυτα. Ερευνητές αναφέρουν ότι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είχε μικρότερη αναπήδηση από το συμβατικό. Άλλοι απλά αναφέρουν ότι δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ τους (ACI, 506.1R-98). Ωστόσο, οι ερευνητές συμφωνούν στο ότι η αναπήδηση των ινών είναι μεγαλύτερη από αυτή των άλλων υλικών. Στην ξηρή μίξη, χρήση κάμερας πολύ υψηλής ταχύτητας έχει δείξει ότι οι περισσότερες ίνες βρίσκονται στην εξωτερική πλευρά του μίγματος, καθώς αυτό εκτοξεύεται με ταχύτητα. Πολλές από τις ίνες αυτές αποτυγχάνουν να φθάσουν στην επιφάνεια εκτόξευσης κι έτσι χάνονται σαν υλικό αναπήδησης (Austin, Peaston, Robins, 1997).

Ο μηχανισμός δημιουργίας του στρώματος του εκτοξευόμενου σκυροδέματος έχει ως εξής: Όλα τα υλικά κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα προς την επιφάνεια. Τα ελαφρύτερα (τσιμέντο, λεπτόκοκκα αδρανή, ίνες) κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα σε

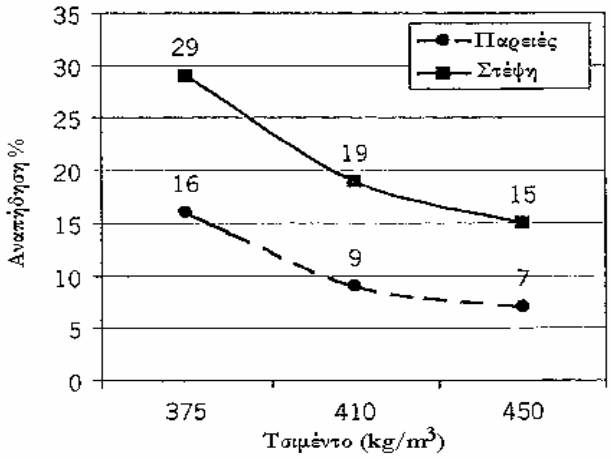
σχέση με τα βαρύτερα. Πρακτικά, αυτό που γίνεται είναι ότι στην αρχή της διαδικασίας, όλο το υλικό που εκτοξεύεται αναπηδά. Τελικά, δημιουργείται μια λεπτή στρώση από τσιμέντο, άμμο και νερό κι έτσι σταδιακά η αναπήδηση μειώνεται, ακόμη και κάτω από 20%. Εάν το σκυρόδεμα διαστρώνεται σε δύο στρώσεις, πάλι θα υπάρχει μια πρώτη φάση υψηλής αναπήδησης. Επίσης, αν γίνεται χρήση πλέγματος, η δόνηση που προκαλούν τα υλικά καθώς το χτυπούν αυξάνει την αναπήδηση (Vandewalle, 1993).

Τέλος, σε καμία περίπτωση δεν πρέπει το υλικό αναπήδησης να χρησιμοποιείται ξανά σαν δομικό υλικό, καθότι κάτι τέτοιο προκαλεί μείωση της ποιότητας και των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος (Vandewalle, 1993).

11.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την αναπήδηση στην ξηρή μίξη

Όπως προαναφέρθηκε, το πρόβλημα της αναπήδησης είναι πολυσύνθετο. Εξαρτάται από τρία βασικά στοιχεία, τη μίξη, την τεχνική εκτόξευσης και τη γεωμετρία της ίνας.

Η κύρια παράμετρος που σχετίζεται με το σχεδιασμό του μίγματος και την αναπήδηση, είναι η συνεκτικότητα του σκυροδέματος κατά την εκτόξευση. Αυτή ελέγχεται από την ποσότητα του νερού που προστίθεται από τον χειριστή του ακροφυσίου. Μία άλλη παράμετρος που είναι ευρέως αποδεκτή ως προς την επιρροή της στην αναπήδηση είναι η ποσότητα του τσιμέντου, με τα μίγματα που είναι πλουσιότερα σε τσιμέντο να παρουσιάζουν μικρότερα ποσοστά αναπήδησης (Armelin, 1997). Έρευνα από τον Austin (1995) σε οκτώ μίγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, με δύο διαφορετικά ποσοστά τσιμέντου (αδρανή/τσιμέντο 1:3 και 1:4 αντίστοιχα) έδειξε ότι η αύξηση του τσιμέντου οδήγησε σε μείωση της αναπήδησης συνολικά όλων των υλικών κατά 5%. Τέλος, η μέθοδος προσθήκης των ινών στο μίγμα δεν σημαντικό παίζει ρόλο στην αναπήδηση (Austin S., Peaston C., Robins P., 1997).



Διάγραμμα 5.26: Μείωση της αναπήδησης με αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου στην υγρή μίξη (Melbye, Dimmock, 2001)

Όπως ήταν αναμενόμενο, η κατανομή των αδρανών είναι παράγοντας που επηρεάζει την αναπήδηση. Τα πιο αδρόκοκκα αδρανή τείνουν να αναπηδούν περισσότερο από τα λεπτόκοκκα (περίπου τέσσερις φορές περισσότερο). Έτσι, τα

κλάσματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα προτιμώνται έναντι των λεπτόκοκκων (Armelin, 1997).

Μία προσθήκη που κέρδισε έδαφος στην ξηρή μίξη σκυροδέματος και είναι γνωστό ότι επηρεάζει την αναπήδηση είναι η πυριτιακή παιπάλη. Ο Austin (1995) αναφέρει ότι υπάρχει μία γραμμική σχέση που συνδέει τη συνολική αναπήδηση με την ποσότητα της ιπτάμενης τέφρας και συμπεραίνει ότι αντικατάσταση του τσιμέντου σε ποσοστό μόλις 10% από ιπτάμενη τέφρα οδηγεί σε μείωση της αναπήδησης κατά 6 έως 7%. Κατά τον Morgan (1988) αν το ποσοστό αντικατάστασης ανέβει σε 15%, τότε η μείωση της αναπήδησης ανεβαίνει κι αυτή σε ποσοστά πάνω από 15%.

Αν και οι επιταχυντές είναι γνωστό ότι μειώνουν την αναπήδηση στα υγρά μίγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος, το αποτέλεσμα που έχουν στην ξηρή μίξη δεν είναι ξεκάθαρο (Armelin, 1997). Σύμφωνα με τους Melbey et. al (1995) αναφέρουν ότι οι επιταχυντές τείνουν να μειώνουν την αναπήδηση. Σύμφωνα με τον Schultz (1982) για τα υγρά μίγματα, οι επιταχυντές τείνουν να αυξάνουν την αναπήδηση των αδρανών ενώ σύμφωνα με άλλες μελέτες (Jolin, 1996) δεν υπάρχει επιρροή από τη χρήση επιταχυντών στην αναπήδηση.

Η δεύτερη κατηγορία παραμέτρων που επηρεάζουν την αναπήδηση αφορά την τεχνική εκτόξευσης. Το πιο σημαντικό στοιχείο της κατηγορίας αυτής είναι η ταχύτητα εκτόξευσης του υλικού. Και στον τομέα αυτό υπάρχει διάσταση απόψεων καθώς ταχύτητες εκτόξευσης της τάξης των 10 έως 100 m/s προτείνονται για βέλτιστα αποτελέσματα (Glassgold, 1989). Αν και ο ακριβής προσδιορισμός της καταλληλότερης ταχύτητας εκτόξευσης είναι δύσκολος και απαιτεί ειδικό εξοπλισμό (κάμερα υψηλής ταχύτητας), είναι γενικά αποδεκτό ότι για έναν δεδομένο μηχανικό εξοπλισμό εκτόξευσης, είναι η ταχύτητα ροής του αέρα που καθορίζει την ταχύτητα ροής των υλικών. Έτσι, ένας μετρητής της ταχύτητας του αέρα είναι ιδιαίτερης σημασίας όργανο για την μέτρηση της ταχύτητας εκτόξευσης (Armelin, 1997).

Ένας ακόμη παράγοντας που καθορίζει την αναπήδηση είναι το πάχος της απαιτούμενης επένδυσης. Έχει παρατηρηθεί ότι επενδύσεις μικρού πάχους παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά αναπήδησης (Armelin, 1997). Σύμφωνα με τον Parker (1976), για τα πρώτα 10 mm της επένδυσης το ποσοστό της αναπήδησης μπορεί να ανέρχεται ακόμη και σε 80% και έπειτα μειώνεται σταδιακά. Επίσης, στα πρώτες στρώσεις της επένδυσης έχουμε υψηλό λόγο νερό/τσιμέντο, κι έτσι χαμηλές αντοχές (Vandewalle, 1993).

Η θέση τέλος της εκτόξευσης επηρεάζει την αναπήδηση, με την κατακόρυφη εκτόξευση να είναι η δυσμενέστερη περίπτωση. Σύμφωνα με έρευνα σε πέντε διαφορετικά μίγματα που εκτοξεύθηκαν σε παρειές και σε οροφή, η ποσοστιαία αύξηση της αναπήδησης ανέρχεται σε 6% (Morgan, 1993). Είναι βέβαια εδώ δεδομένο ότι τηρούνται ακριβώς οι κανόνες σωστής εκτόξευσης, δηλαδή ότι αυτή εκτελείται κατά το δυνατόν κατακόρυφα στην επιφάνεια εκτόξευσης και από τη σωστή απόσταση. Τέλος, κρίσιμο ρόλο στον περιορισμό της αναπήδησης παίζει και ο χειριστής του μηχανήματος, ο οποίος με τη γνώση και την εμπειρία του προσαρμόζει κάθε φορά το ακροφύσιο στην καλύτερη δυνατή θέση (Melbey, 1997).

Τρίτος παράγοντας που παίζει σημαντικό επίσης ρόλο στην αναπήδηση είναι οι ίδιες οι ίνες. Αν και δεν υπάρχει συμφωνία για το πώς ακριβώς η γεωμετρία των ινών επηρεάζει την αναπήδηση, παραμένει γεγονός ότι οι ίνες που χρησιμοποιούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ίδιες ή σχεδόν ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στο έγχυτο. Αυτό έχει ως συνέπεια ότι δεν είναι ειδικά σχεδιασμένες για χρήση σε ξηρό μίγμα (Armelin, 1997). Έτσι υπάρχει ανάγκη για κατασκευή μιας ίνας ειδικά για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα η οποία θα του παρέχει μέγιστη δυσθραυστότητα αλλά θα παρουσιάζει και ελάχιστη αναπήδηση (Morgan, 1995).

Σε πιο πρόσφατες μελέτες (Armelin et al. 1998b) επισημάνθηκε ότι υπάρχει μία γραμμική σχέση που συνδέει την αναπήδηση των ινών με τον τροποποιημένο λόγο μορφής ($\frac{l}{\sqrt{d}}$). Από την πλευρά της δυσθραυστότητας είναι καλό να χρησιμοποιούνται ίνες με υψηλό λόγο μορφής. Αυτό όμως είναι αντιφατικό με την απαίτηση για χαμηλή αναπήδηση καθότι αυτή αυξάνει όσο αυξάνει και ο λόγος μορφής (Banthia, Armelin, 2001).

11.3 Τρόποι μείωσης της αναπήδησης

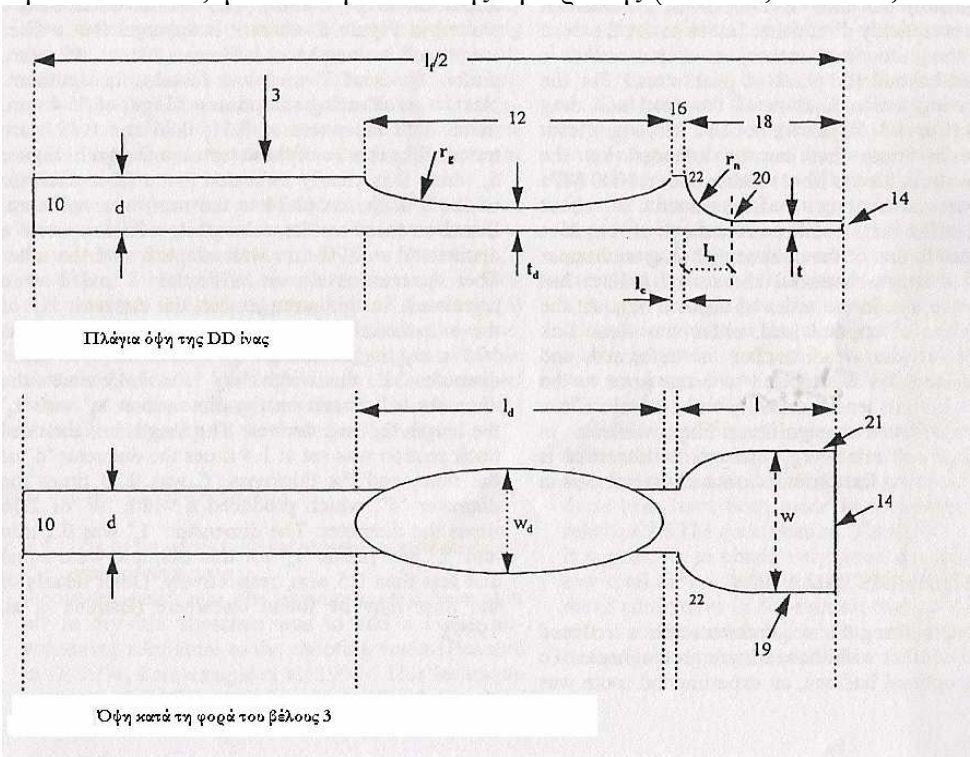
Σύμφωνα με τα παραπάνω, για να μειωθεί η συνολική αναπήδηση πρέπει όλοι αυτοί οι παράγοντες να λαμβάνονται υπόψη και να τροποποιούνται για την επίτευξη καλύτερων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η χρήση ποικίλων πρόσμικτων, όπως η ιπτάμενη τέφρα, η μικροπυριτία και ο μετακαολίνης, μειώνουν την αναπήδηση. Ωστόσο η ακριβής επιρροή στο μέγεθος, στο σχήμα και στην κοκκομετρική κατανομή δεν είναι πλήρως κατανοητή (Bindigavile et al. 2000a). Τα ίδια ισχύουν και για τις προσπάθειες προσομοίωσης της κίνησης των υλικών του σκυροδέματος και των ινών, αλλά πολύ ακόμη προσπάθεια απαιτείται σε αυτόν τον τομέα (Armelin et al. 1998, 1999, Banthia et al. 1997).

Σύμφωνα με την ACI (506.1R) τα πιο αποτελεσματικά από τα παραπάνω, τα οποία ισχύουν και για το κοινό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, είναι η μείωση της πίεσης του αέρα, η αύξηση του ποσοστού των λεπτομερών και η χρήση μικρότερων και παχύτερων ινών.

Το ακροφύσιο της εκτόξευσης όταν είναι μεγάλης διαμέτρου εξασφαλίζει όχι μόνο περιορισμό της αναπήδησης αλλά και λιγότερη φθορά, καλύτερο αποτέλεσμα, οικονομία σε ενέργεια και αυξημένη ασφάλεια (Vandewalle, 1993).

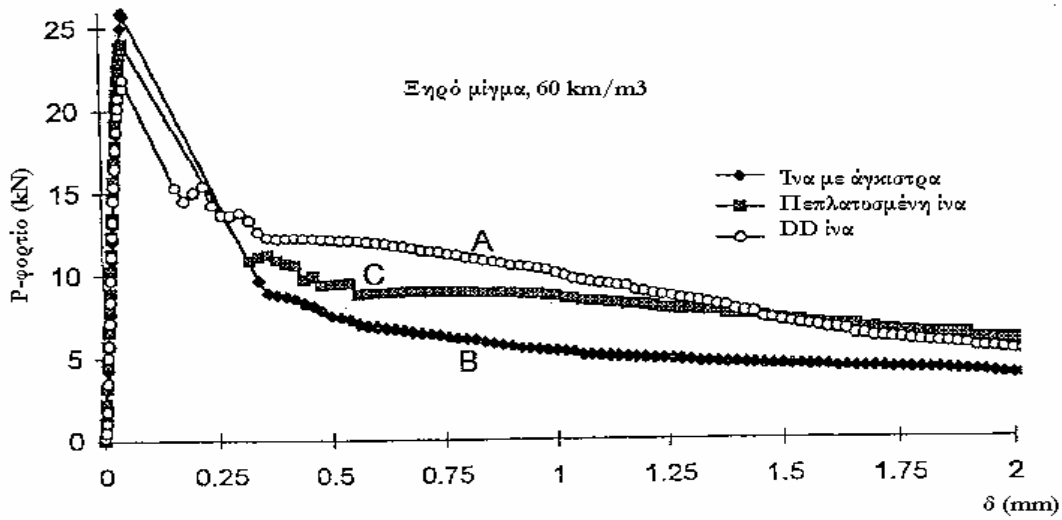
Μία καλή εναλλακτική λύση προσφέρει η ειδικά διαμορφωμένη ίνας διπλής αγκύρωσης (Double Anchored ή DD) που προτείνεται από τους Banthia και Armelin (2001) ειδικά για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους οδήγησαν στο σχεδιασμό της ίνας αυτής που είναι τροποποιημένη έτσι ώστε να πληροί τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή ικανοποιητική δυσθραυστότητα και μειωμένη αναπήδηση. Ο σχεδιασμός της καταφέρνει να εξασφαλίσει συμπεριφορά που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των ινών με γαντζωτά άκρα και των ινών με απλά πεπλατυσμένα άκρα. Έτσι, το πλεονέκτημά της είναι ότι δεν αστοχεί εύκολα σε εξόλκευση (χαρακτηριστικό των ινών με γαντζωτά άκρα) αλλά και μετά την αστοχία της, αναπτύσσει τριβή και περιορίζει το άνοιγμα της ρωγμής (χαρακτηριστικό των ινών με

πεπλατυσμένα άκρα). Ταυτόχρονα όμως, η ίνα διπλής αγκύρωσης έχει χαμηλό ανηγμένο λόγο μορφής ($\frac{l}{\sqrt{d}}$), με μήκος μεταξύ 20 και 35 mm και διάμετρο μεταξύ 0.6 και 1 mm. Στην εικόνα 5.27, φαίνεται η ίνα διπλής αγκύρωσης (Banthia, Armelin, 2001).



Εικόνα 5.27: Σχέδιο ίνας DD για μικρή αναπήδηση και μεγάλη αντοχή (Banthia, Armelin, 2001)

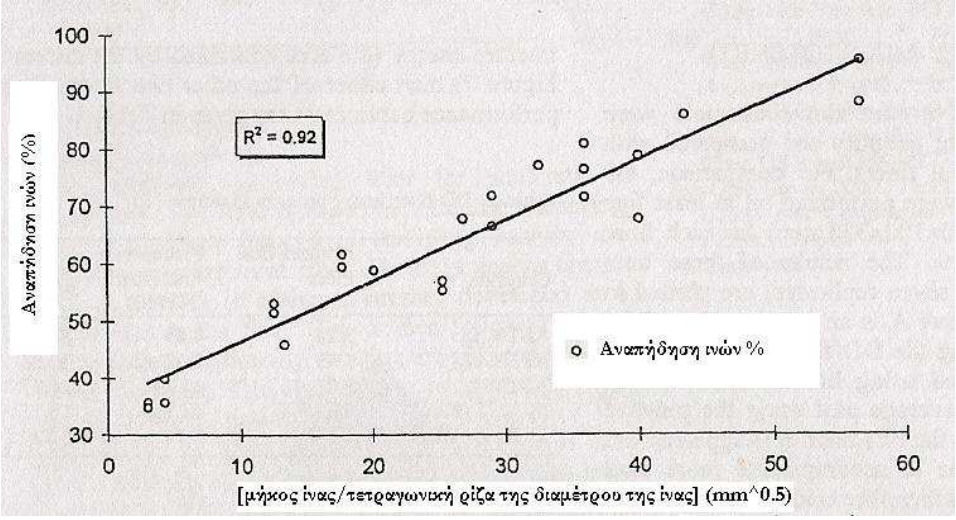
Συγκριτικά με άλλες ίνες της αγοράς, η ίνα διπλής αγκύρωσης δίδει υψηλότερα επίπεδα δυσθραυστότητας, σύμφωνα με τη δοκιμή της ASTM C1018. Αυτό δείχνει το διάγραμμα 5.27 για ξηρή μίξη σκυροδέματος με προσθήκη όλων των ινών σε ίδια ποσότητα, δηλαδή 60 kg/m^3. Τα αποτελέσματά του προέκυψαν από το μέσο όρο των τιμών τεσσάρων έως επτά δοκιμίων.



Διάγραμμα 5.28: Μέτρηση τιμών δυσθραυστότητας για διάφορα είδη ινών, (Banthia, Armelin, 2001)

11.4 Υπολογισμός αναπήδησης ινών στην ξηρή μίξη

Για τον υπολογισμό των ινών που χάνονται από αναπήδηση, οι Banthia και Armelin (2001) έκαναν μια σειρά από δοκιμές με ίνες κυκλικής διατομής, διαμέτρου 0.5, 0.61, 0.65, 0.76 και 1 mm και μήκους 3, 12.5, 19, 24.5 και 40 mm. Για κάθε διάμετρο ίνας από τις παραπάνω, έγινε συνδυασμός με όλα τα μήκη. Τέλος, το σκυρόδεμα εκτοξεύθηκε με τη μέθοδο της ξηρής μίξης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών τους φαίνονται στο διάγραμμα 5.29.



Διάγραμμα 5.29: Αναπήδηση% ως συνάρτηση του ανηγμένου λόγου μορφής των ινών (Banthia, Armelin, 2001)

Η παλινδρόμηση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ αναπήδησης και γεωμετρίας των ινών, και μάλιστα με πολύ καλό συντελεστή συσχέτισης (R^2=0.92). Συνεπώς:

$$R_f = f\,\frac{l_f}{\sqrt{\varphi}}, \text{ (Banthia, Armelin, 2001)}$$

Όπου: R_f = η αναπήδηση των ινών

l_f = το μήκος της ίνας

φ = η διάμετρος της ίνας

Ο υπολογισμός της αναπήδησης των ινών είναι κι αυτός αντικείμενο χωρίς απόλυτη ταύτιση των απόψεων των μελετητών. Σύμφωνα με τον Peaston (1993) η αναπήδηση των ινών είναι συνδεδεμένη με τη συνολική αναπήδηση των υλικών. Για το λόγο αυτό, κριτική γίνεται στις εξισώσεις που για τον υπολογισμό των ινών που χάνονται ως αναπήδηση (R) περιλαμβάνουν μόνο την ποσότητα των ινών του σχεδιασμού (V_f) και του επί τόπου ποσότητα (V_f'), χωρίς να λογαριάζουν τη συνολική αναπήδηση (Armelin, 1997).

Πρώτη προσπάθεια για υπολογισμό των ινών που χάνονται ως αναπήδηση έγινε από τους Robins και Austin (1985). Παρολαυτά, ο υπολογισμός είναι δύσκολος διότι απαιτεί τη γνώση του λόγου νερό/τσιμέντο και αδρανών/τσιμέντο. Οι λόγοι αυτοί εκτός

του ότι είναι δύσκολο πρακτικά να υπολογισθούν, είναι και επισφαλείς ως προς το αποτέλεσμα που θα δώσουν. Έτσι, η σχέση που προτείνουν έχει ως εξής:

$$FC_i = WFC_i \frac{(1 + WCR + ACR_i)}{(1 + ACR_i)} (\%)$$

και:

$$R_f = 100 - \frac{WFC_i (1 + WCR + ACR_i)}{FCR_{dm}} (\%)$$

Όπου: FC_i = οι ίνες επί τόπου (του ξηρού υλικού)
WFC_i = οι ίνες επί τόπου (του υγρού υλικού)
WCR = ο λόγος νερό/τσιμέντο
ACR_i = ο λόγος αδρανών/τσιμέντο
FCR_{dm} = ο λόγος ινών/τσιμέντο (του υγρού μίγματος)
R_f = η αναπήδηση των ινών

Με παρόμοιες σχέσεις υπολογίζουν και τη συνολική αναπήδηση (R_t) ή μόνο την αναπήδηση των υλικών (R_m). Μετέπειτα, οι Armelin και Helen (1995) πρότειναν μια πιο απλή λύση του προβλήματος. Για τον υπολογισμό των ινών που χάνονται ως αναπήδηση (R_f) χρειάζεται να γνωρίζουμε την επί τόπου ποσότητά τους (V_f'), την ποσότητα σχεδιασμού (V_f) και τη συνολική αναπήδηση του σκυροδέματος (R). Έτσι θα ισχύει ότι:

$$R_f\% = 100 - T + \left(T \times \frac{R(\%)}{100} \right)$$

Όπου: T = η κατακράτηση ινών = $\frac{V_f'}{V_f}$

Συνεπώς, η παραπάνω σχέση, μπορεί να υπολογίσει το πραγματικό ποσοστό των ινών (V_f') ως συνάρτηση των ινών του σχεδιασμού (V_f), των ινών που χάνονται λόγω αναπήδησης (R_f) και της συνολικής αναπήδησης των υλικών (R) ως εξής:

$$V_f'\% = \frac{V_f (100 - R_f(\%))}{(100 - R(\%))}$$

12. Μηχανικά χαρακτηριστικά

Οι ίνες προστίθενται στο σκυρόδεμα για να βελτιώσουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του. Αυτό που κυρίως προσφέρουν στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι πλαστιμότητα και περιορισμό των ρωγμών. Έτσι, έχει ιδιαίτερη σημασία η συμπεριφορά του υλικού τόσο στην νωπή του όσο και στην τελική του κατάσταση.

12.1 Μελέτη νωπού σκυροδέματος

Η γνώση των ιδιοτήτων του νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι μεγάλης σημασίας για την ομαλή εκτέλεση όλων των εργασιών που περιλαμβάνουν τη χρήση του. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δε είναι πιο δύσκολο στην ανάμιξη και διάστρωση από το άοπλο. Παρολαυτά, οι δυσκολίες μπορούν εύκολα να ξεπεραστούν με τη σχετική γνώση της συμπεριφοράς των υλικών και της λήψης των κατάλληλων μέτρων. Η λάθος κατασκευή οδηγεί σε αστοχίες του τελικού προϊόντος. Οι κύριοι λόγου που επηρεάζουν τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος είναι:

- Τύπος ινών (υλικό, γεωμετρία)
- Περιεκτικότητα ινών
- Μέγιστος κόκκος αδρανών
- Μέθοδος προσθήκης ινών στο μίγμα

Η ακριβής επιρροή του τύπου ινών, της περιεκτικότητάς τους, του μέγιστου κόκκου αδρανών και της μεθόδου προσθήκης των ινών στο μίγμα πρέπει να καθοριστεί από τις δοκιμές καταλληλότητας, δηλαδή από τον ποιοτικό έλεγχο. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας σε είδη ινών, είναι αδύνατον να υπάρξουν γενικοί κανονισμοί. Η συνεκτικότητα γενικά καθορίζεται από την προσθήκη ρευστοποιητών (Maidl, 1995).

12.1.1 Εργασιμότητα

Η σπουδαιότερη ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος είναι η εργασιμότητα, η οποία χαρακτηρίζει την ευκολία με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται. Μικρότερη εργασιμότητα δυσχεραίνει την αντλησιμότητα του σκυροδέματος με αποτέλεσμα την προσθήκη νερού σε βάρος της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

Η συνεκτικότητα μειώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες, έως ότου δεν είναι πλέον δυνατό να επιτευχθεί ομοιόμορφη κατανομή των ινών στο μίγμα. Επιπλέον, πολλοί τύποι ινών τείνουν να συσσωματώνονται και να διαμορφώνουν «φωλιές» ινών εάν δεν προστίθενται στο μίγμα με μια συνεχή διαδικασία, ή εάν το ποσοστό των ινών ή των χονδρόκοκκων αδρανών είναι υψηλό. Στο αντλούμενο και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το γεγονός αυτό οδηγεί σε εμφράξεις του εξοπλισμού, προκαλώντας διαταραχές στην κατασκευαστική διαδικασία καθώς και στην ποιότητα της κατασκευής. Ακόμη μεγαλύτερο πρόβλημα προκύπτει από τις συσσωματωμένες ίνες που περνούν απαρατήρητες κατά την εκτόξευση και ανιχνεύονται αργότερα ως ατέλειες στο υλικό. Συνεπώς, η εργασιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι κρίσιμη για την ποιότητά του. Οι κατασκευαστές ινών δίνουν ένα μέγιστο όριο που μπορεί να προστεθεί κάθε είδος ίνας ώστε να υπάρχει ικανή εργασιμότητα στο μίγμα. Στις οδηγίες αυτές, ρόλο επίσης παίζει η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (έγχυτο ή εκτοξευόμενο) αλλά και ο μέγιστος κόκκος των αδρανών (Maidl, 1995).

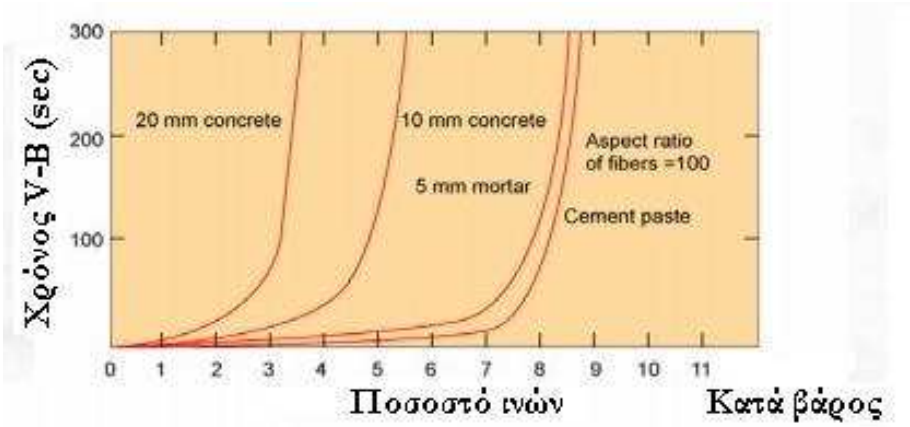
Αν και η εργασιμότητα έχει συνδεθεί με το πόσο εύκολα μπορεί το σκυρόδεμα να αναμιχθεί και να εκτοξευθεί, στην πραγματικότητα ο όρος αυτός συσχετίζεται με

παραπάνω στοιχεία όπως: α) την ευκολία συμπύκνωσής του, β) την ικανότητά του να ρέει και γ) την σταθερότητά του. Έτσι, δε θα μπορούσε μόνο μια δοκιμή να εκφράζει ικανοποιητικά όλα τα παραπάνω Στην πράξη παρολαυτά, γίνεται κυρίως μέτρηση της συνεκτικότητας για την προσέγγιση της εργασιμότητας μέσω της δοκιμής του κώνου (slump test), της δοκιμής που δίδει συντελεστή συμπίεσης (compacting factor) και της δοκιμής VB (compaction by vibration), δηλαδή συμπύκνωση με δόνηση (Kong, Evans., 1998). Ενδεικτικά, για τη σύγκριση των τιμών που προκύπτουν από την εκτέλεση των δοκιμών αυτών παρατίθεται ο πίνακας 5.30.

Τεστ κώνου (mm)	**Χρόνος VB (sec)**	**Συντελεστής Συμπίεσης**
0	πάνω από 20	0.65-0.75
0-10	20-12	0.75-0.85
10-30	12-6	0.85-0.90
30-60	6-3	0.90-0.93
60-180	3-0	πάνω από 0.93

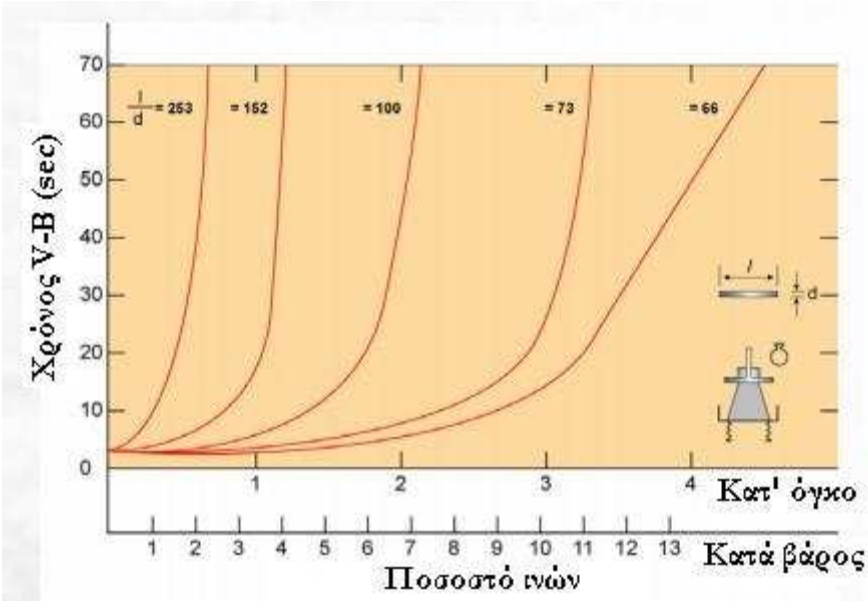
Πίνακας 5.30: Σύγκριση τιμών από δοκιμές εργασιμότητας στο σκυρόδεμα (Kong, Evans, 1998)

Ένα μίγμα με δεδομένο είδος και ποσότητα ινών, καθώς και προσανατολισμό στο χώρο, παρουσιάζει τάση μείωσης της εργασιμότητας όσο το μέγεθος και η ποσότητα των αδρανών αυξάνει πάνω από τα 5mm, όπως δείχνει το διάγραμμα 5.31. Για μέγεθος κόκκου κάτω από 5 mm παρατηρούμε ότι η επιρροή στην εργασιμότητα είναι πολύ μικρή (Chanh).

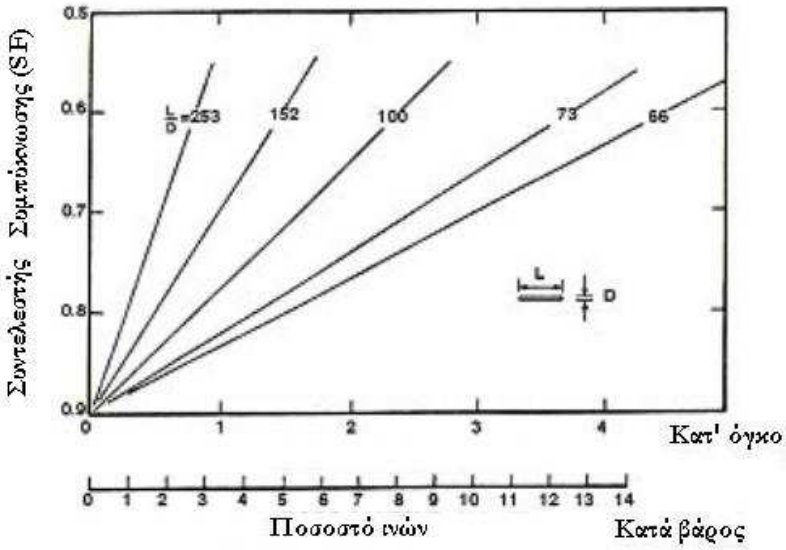


Διάγραμμα 5.31: Εργασιμότητα μίγματος εξαρτώμενη από την ποσότητα των ινών και το μέγεθος των αδρανών (Mehta and Monteiro)

Αντίστοιχα, αν θεωρήσουμε δεδομένο μίγμα αδρανών και μεταβάλλουμε την ποσότητα και το λόγο μορφής των ινών, προκύπτουν οι αντίστοιχες τιμές εργασιμότητας. Από το διάγραμμα 5.32 παρατηρούμε ότι ίνες με λόγο μορφής μεγαλύτερο του 100 είναι δύσκολο να δώσουν ομοιόμορφα κατανεμημένα μίγματα.



Διάγραμμα 5.32: Εργασιμότητα μίγματος εξαρτώμενη από την ποσότητα και τον λόγο μορφής των ινών (Mehta and Monteiro)



Διάγραμμα 5.33: Εργασιμότητα μίγματος εξαρτώμενη από την ποσότητα και τον λόγο μορφής των ινών (Chanh)

Όπως έχει επισημανθεί, η αύξηση του ποσοστού και του λόγου μορφής των ινών έχει αρνητική επιρροή στην εργασιμότητα. Οι Yazici, Inan και Tabak (2006) χρησιμοποίησαν ίνες με λόγο μορφής 45, 65 και 80 και σε δοσολογία 0.5%, 1.0% και 1.5% κατ' όγκο σκυροδέματος. Οι δοκιμές κάθισης για τα εννέα αυτά μίγματα που προκύπτουν αλλά και για το άοπλο σκυρόδεμα παρατίθενται στον πίνακα 5.34.

Μίγμα	l/d	V_f (%)	Κάθιση (mm)	Ειδικό βάρος (kg/m³)
CC	-	-	230	2200
SFRC1	45	0.5	220	2243
SFRC2	45	1.0	205	2308
SFRC3	45	1.5	200	2398
SFRC4	65	0.5	210	2333
SFRC5	65	1.0	195	2305
SFRC6	65	1.5	125	2367
SFRC7	80	0.5	200	2313
SFRC8	80	1.0	150	2367
SFRC9	80	1.5	145	2353

Πίνακας 5.34: Κάθιση και ειδικό βάρος μιγμάτων ινοπλισμένου σκυροδέματος (Yazici, Inan, Tabak, 2006)

Τώρα γίνεται φανερό, και με αριθμητικά δεδομένα, ότι το ειδικό βάρος αυξάνεται με την προσθήκη ινών μεγαλύτερου λόγου μορφής, ενώ η εργασιμότητα στην αντίστοιχη περίπτωση μειώνεται, και μάλιστα δραματικά όταν οι ίνες βρίσκονται σε μεγάλο ποσοστό στο μίγμα (Yazici, Inan, Tabak, 2006). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το πρότυπο της ASTM C 995 για μέτρηση εργασιμότητας με δοκιμές κώνου κάθισης έχει αποσυρθεί, διότι δεν είναι αντιπροσωπευτικό, και έχει αντικατασταθεί από το πρότυπο C 143 (Tatnall, 2007).

12.1.2 Συμπύκνωση

Η συμπύκνωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται κατά την εκτόξευση, στην επιφάνεια όπου αυτό διαστρώνεται, μέσω της κρούσης. Στο έγχυτο όμως σκυρόδεμα, η συμπύκνωση είναι απαραίτητη.

Η διάρκεια δόνησης επηρεάζει σημαντικά την ομοιόμορφη διανομή των ινών στη μάζα του σκυροδέματος. Η παρατεταμένη δόνηση του σκυροδέματος πέρα από τα καθορισμένα όρια (τα οποία εξαρτώνται από τη σύνθεση του σκυροδέματος) μπορεί να προκαλέσει το διαχωρισμό του μίγματος σε στρώματα. Κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι ίνες του μίγματος τείνουν να καταβυθίζονται υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως αποτέλεσμα της διαφορετικής πυκνότητας του σκυροδέματος και του χάλυβα. Έτσι το μίγμα διαχωρίζεται σε ζώνες με διαφορετική περιεκτικότητα σε ίνες. Αυτή η ιδιότητα μερικές φορές είναι επιθυμητή όταν για λόγους σχεδιασμού απαιτείται ένα υψηλό επίπεδο ενίσχυσης σε κάποιο μέρος (ζώνη) του υλικού. Η διάρκεια της δόνησης πρέπει να είναι ελεγχόμενη έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ομοιόμορφη ή κατά ζώνες ενίσχυση κατά το στάδιο της παραγωγής (Κατσικογιάννη, 2004).

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα απαιτεί περισσότερη ενέργεια συμπύκνωσης από το άοπλο σκυρόδεμα. Εάν ο ίδιος χρόνος συμπύκνωσης επιλέγεται για διαφορετικά ποσοστά ινών, τα κενά αέρος αυξάνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες. Για να μειώσουμε τον όγκο των κενών αέρα, ο χρόνος συμπύκνωσης πρέπει να αυξηθεί σχεδόν ανάλογα με το ποσοστό των ινών. Εντούτοις, ακόμα και μετά τη συμπύκνωση, τα κενά αέρος του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι περισσότερα από αυτά του άοπλου (Maidl, 1995).

12.2 Μελέτη σκληρυμένου σκυροδέματος

Οι κύριοι παράγοντες που περιγράφουν με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα και είναι σχετικοί με τη χρήση του στα υπόγεια έργα είναι η αντοχή σε κάμψη, μέσω της οποίας προκύπτουν τα μεγέθη της δυσθραυστότητας και οι δείκτες παραμένουσας αντοχής και η ροπή κάμψης που μπορεί να παραλάβει.

Με το πέρασμα των χρόνων, πολλές δοκιμές έχουν αναπτυχθεί για να μετρήσουν και να καθορίσουν την απόδοση του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι πιο διαδεδομένες από αυτές είναι οι δοκιμές σε δοκούς και σε πλάκες, κυλινδρικές ή τετράγωνες, με την κάθε μια από αυτές να προδιαγράφεται ακριβώς από διεθνή και εθνικά πρότυπα. Το κοινό σημείο ανάμεσα στις παραπάνω δοκιμές είναι ότι μετρούν την ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να φέρει φορτία και μετά τη θραύση του. Άλλωστε, αυτό είναι και το νόημα χρήσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος ως δομικό υλικό (Ridout, 2009).

Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, οι πιο σημαντικές παράμετροι που επηρεάζουν τις ιδιότητές του είναι ο λόγος μορφής (l/d) της ίνας και η δοσολογία των ινών (V_f), δηλαδή το ποσοστό τους μέσα στο μίγμα (Yazici, Inan, Tabak, 2006). Έτσι, έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να μελετηθεί η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε θλιπτικές, καμπτικές και εφελκυστικές φορτίσεις όταν αυτοί οι παράγοντες μεταβάλλονται.

Η πειραματική διαδικασία που ακολούθησαν οι Yazici, Inan και Tabak περιελάμβανε ίνες με γαντζωτά άκρα, κολλημένες σε πλακέτες με λόγους μορφής 45, 65 και 80 και σε δοσολογία 0.5%, 1.0% και 1.5% κατ' όγκο σκυροδέματος. Τα δοκίμια ήταν κυβικά με ακμή 150 mm και οι δοκιμές έγιναν στις 28 ημέρες σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ASTM (C597). Έτσι, προέκυψαν εννέα διαφορετικά μίγματα και ένα ακόμη, το οποίο είναι το άοπλο σκυρόδεμα και αποτελεί το μέτρο σύγκρισης. Τα αποτελέσματα από τις δοκιμές παρατίθενται στον πίνακα 5.35.

Μίγμα	**l/d**	**V_f (%)**	**f_c (MPa)**	**f_c (%)**	**f_{st} (MPa)**	**f_{st} (%)**	**f_f (MPa)**	**f_f (%)**
CC	–	–	49.1	100	4.06	100	5.94	100
SFRC1	45	0.5	50.8	104	4.50	111	6.14	103
SFRC2	45	1.0	53.7	109	4.69	116	6.32	106
SFRC3	45	1.5	57.7	117	5.69	140	7.75	130
SFRC4	65	0.5	53.5	109	4.51	111	6.24	105
SFRC5	65	1.0	58.3	119	4.77	117	8.08	136
SFRC6	65	1.5	56.4	115	6.26	154	9.33	157
SFRC7	80	0.5	56.0	114	4.58	113	6.42	108
SFRC8	80	1.0	58.3	119	5.18	128	9.74	164
SFRC9	80	1.5	52.1	106	5.9	145	10.76	181

Πίνακας 5.35: Μηχανικά χαρακτηριστικά ινοπλισμένου σκυροδέματος (από μέσο όρο έξι διαφορετικών δειγμάτων), Yazici, Inan, Tabak, 2006

Από τα παραπάνω στοιχεία προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η αντοχή σε θλίψη αυξήθηκε με την προσθήκη των ινών σε ποσοστό από 4 έως 19% αλλά σε μεγάλες προσθήκες και για μεγάλο λόγο μορφής δεν παρατηρείται αύξηση της αντοχής αλλά μείωση.
- Η αντοχή σε εφελκυσμό και η καμτική αντοχή σημειώνουν ιδιαίτερα σημαντική αύξηση με την προσθήκη ινών, σε ποσοστά από 11-54% και 3-81% αντίστοιχα. Επίσης, η καμτική αντοχή είναι μεγαλύτερη από οποιαδήποτε άλλη και βελτιώνεται σημαντικά με την προσθήκη περισσότερων και μεγαλύτερου λόγου μορφής ινών.
- Επιβεβαιώθηκε ότι η αντοχή σε θλίψη δεν επηρεάζεται σημαντικά από τις ίνες, αντίθετα με την αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη.

Στατιστική ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν από τις δοκιμές των Yazici, Inan και Tabak έχει ως στόχο να προβλέψει την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη, εφελκυσμό και κάμψη αν είναι γνωστός ο λόγος μορφής και το ποσοστό προσθήκης των ινών. Έτσι, πολλαπλή ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε για να συνδέσει το λόγο μορφής και την ποσότητα των ινών με τις χαρακτηριστικές αντοχές του σκυροδέματος (f_c, f_{st}, f_f). Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

$f_c\ (MPa) = 50.4869 + 0.0434 \times l/d + 1.9667 \times V_f(\%)$	$R^2 = 0.10$
$f_{st}\ (MPa) = 2.2121 + 0.0077 \times l/d + 1.4233 \times V_f(\%)$	$R^2 = 0.72$
$f_f\ (MPa) = 0.8261 + 0.0638 \times l/d + 3.0000 \times V_f(\%)$	$R^2 = 0.77$

Οι συντελεστές συσχέτισης ανάμεσα στις πραγματικές και θεωρητικές τιμές των αντοχών ήταν της τάξης του 32%, 85% και 88% για τις fc, fst και f_f αντίστοιχα. Έτσι διαπιστώνουμε ότι στην αντοχή σε θλίψη σχεδόν δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση του λόγου μορφής και της ποσότητας των ινών σε αντίθεση με την αντοχή σε εφελκυσμό και κάμψη, όπου εκεί υπάρχει σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ τους.

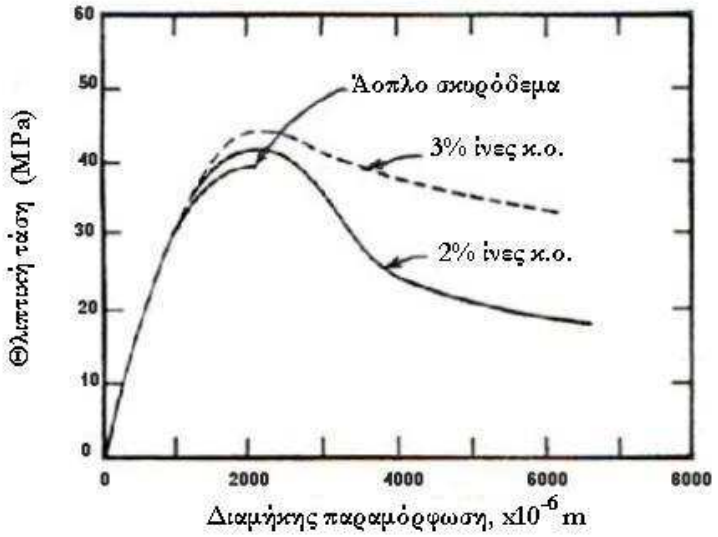
Παρακάτω γίνεται ανάλυση των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος ξεχωριστά. Ωστόσο, πρέπει να γίνει σαφές ότι οι τιμές και συσχετίσεις που παρατίθενται δε μπορεί να είναι ίδιες για όλα τα είδη των ινών και αποτελούν απλώς ενδείξεις για την εκτιμώμενη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αυτό που πρέπει να γίνεται είναι πειραματικές διαδικασίες που θα προσδιορίζουν τις ιδιότητες του υλικού για την κάθε εργασία που προορίζεται (Allen, 2009). Έτσι, είναι σημαντικό να αναγνωρίζεται ότι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, σχεδιασμένο και ελεγμένο με ένα συγκεκριμένο είδος ίνας, που προέρχεται από μία συγκεκριμένη εταιρία, δε μπορεί να έχει τις ίδιες ιδιότητες με άλλα σκυροδέματα, ακόμη και αν οι ίνες εξ' όψεως μοιάζουν (Cement and Concrete Association of New Zealand, 11/2009). Μια εκτενής μελέτη για όλα τα είδη των ινών και τις μηχανικές ιδιότητες που θα παρουσιάζει το ινοπλισμένο σκυρόδεμα για το κάθε είδος ξεχωριστά, γίνεται από την ACI (State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI 544.1-R)

12.2.1 Θλιπτική αντοχή

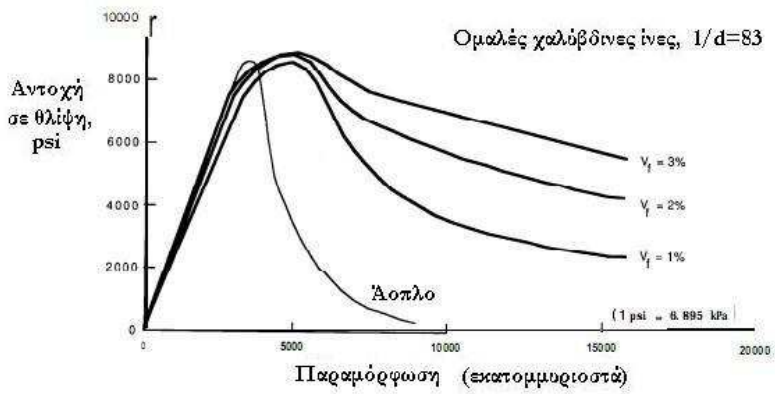
Το σκυρόδεμα μπορεί να αντέξει μεγάλα θλιπτικά φορτία αλλά τελικά θα αστοχήσει εξαιτίας της δημιουργίας των ρωγμών που προέρχονται από εφελκυστικές τάσεις κάθετα στη διεύθυνση της θλίψης. Όταν το σκυρόδεμα ενισχύεται με ίνες σε μικρά ποσοστά, δεν αυξάνεται παρά ελάχιστα η θλιπτική αντοχή του (Bekaert, 1998). Ωστόσο, ακόμη και σε μεγαλύτερες προσθήκες (3% κατ' όγκο) η αύξηση δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορεί να φθάσει το 25% (διάγραμμα 5.36) ή το 30% (Maidl, 1995). Η συνεισφορά τους όμως έχει να κάνει στην πλαστιμότητα μετά τη θραύση ή την απορροφούμενη ενέργεια του υλικού (Chanh).

Εάν μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές απαιτούνται, τότε μπορεί να προστεθεί πυριτιακή παιπάλη σε συνδυασμό και με άλλα πρόσμικτα. Έτσι, η αντοχή μπορεί να φθάσει και τα 70 MPa (Vandewalle, 1993).

Το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson δεν μεταβάλλονται ουσιαστικά για ίνες με περιεκτικότητα κάτω από 2%. Επιπλέον, τα δοκίμια για τις δοκιμές αυτές είναι είτε κυβικά (100 ή 150 mm) είτε κυλινδρικά (διάμετρος 150 mm και ύψος 300 mm). Τα πρότυπα που ισχύουν είναι τα ίδια για το άοπλο σκυρόδεμα (ASTM C39, EN 12390-3 κλπ) (Maccaferri).

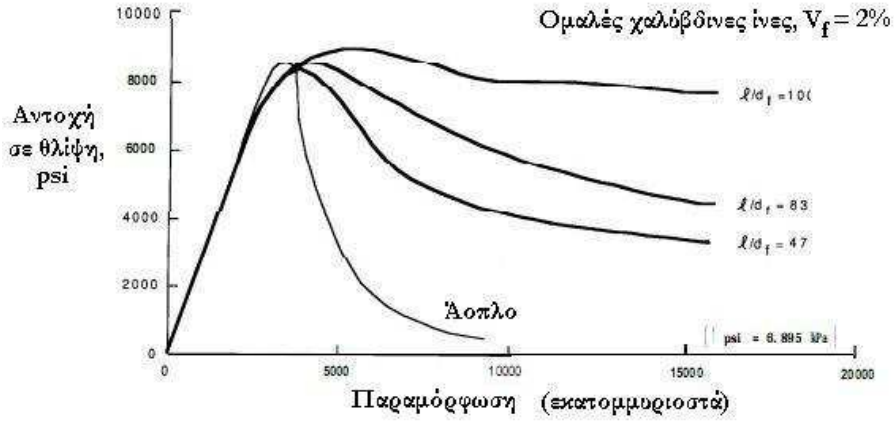


Διάγραμμα 5.36: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για θλίψη σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα, Chanh



Διάγραμμα 5.37: Επιρροή του όγκου των ινών στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης, ACI 544.4R

Σημαντικό όμως ρόλο, πέρα από το ποσοστό των ινών, παίζει και ο λόγος μορφής τους στην αντοχή σε θλίψη. Στο διάγραμμα 5.38 φαίνεται ότι ίνες με μεγαλύτερο λόγο μορφής, για την ίδια δοσολογία, δίδουν ελαφρώς αυξημένες αντοχές.



Διάγραμμα 5.38: Επιρροή του λόγου μορφής των ινών στην καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης (ACI 544.4R)

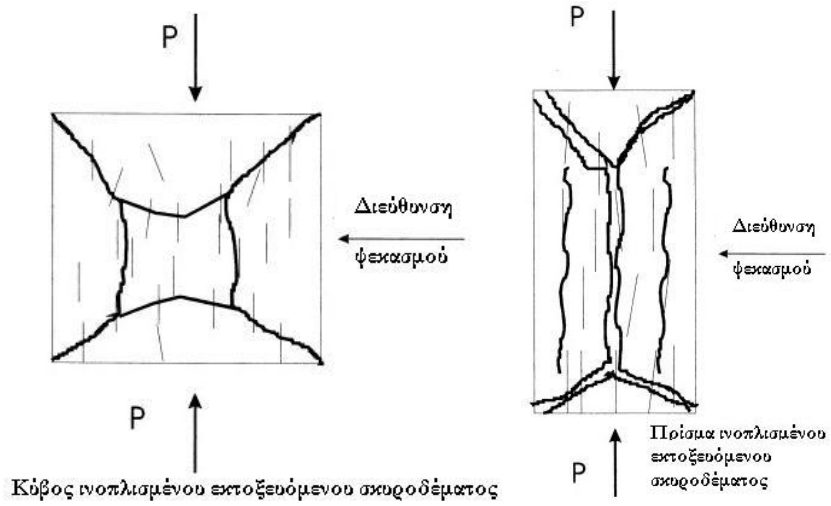
Δοκιμές θλίψης εκτελέστηκαν από τους Leung, Lai, Lee (2003) σε δοκίμια εκτοξευόμενου και έγχυτου ινοπλισμένου σκυροδέματος, με σκοπό τη συγκριτική αποτίμηση των δύο. Τα δοκίμια είναι κυλινδρικά με διάμετρο 100 mm και ύψος 200 mm και οι δοκιμές έγιναν στις 28 ημέρες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών, ως προς το είδος των ινών που έγινε χρήση, παρατίθενται στον πίνακα 5.39.

Σύνθεση	**Εκτοξευόμενο σ_c (MPa)**	**Έγχυτο σ_c (MPa)**
Άοπλο	32.4	42.9
0.5% πολυπροπυλενίου	32.2	38.6
0.5% πολυβινυλικής αλκοόλης	25.7	36.8
0.5% χαλύβδινες	33.4	58
0.5% πολυπροπυλενίου και 0.3% πολυβινυλικής αλκοόλης	26.6	44.5

Πίνακας 5.39: Δοκιμές σε θλίψη για διάφορα μίγματα ινών (Leung, Lai, Lee 2003)

Η αιτία που οι αντοχές του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες του έγχυτου οφείλεται στη διαφορετική συμπύκνωση του σκυροδέματος. Στο έγχυτο έχουμε συμπύκνωση με συμβατικό τρόπο, δηλαδή δονητή, και στο εκτοξευόμενο αυτή γίνεται μόνο με την κρούση (Leung, Lai, Lee, 2003).

Στο σχήμα 5.40 φαίνεται ποιοτικά η μορφή της αστοχίας σε δοκίμια υπό θλίψη, λόγω διάτμησης (πλάγιες ρωγμές) και λόγω εφελκυσμού (κατακόρυφες ρωγμές).



Σχήμα 5.40: Αστοχία και μηχανισμός ενίσχυσης σε κυβικά και πρισματικά δοκίμια (Ding, Kusterle, 1999)

Το σκυρόδεμα θεωρείται ένα ετερογενές υλικό. Οι ίνες βελτιώνουν την ανακατανομή των τάσεων, μειώνουν την συγκέντρωση των παραμορφώσεων και «γεφυρώνουν» τις μικρορωγμές. Πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι όταν ο λόγος της πραγματικής τάσης που ασκείται προς την θλιπτική αντοχή φθάσει και ξεπεράσει το 60%, τότε ξεκινούν οι μικρορωγμές.

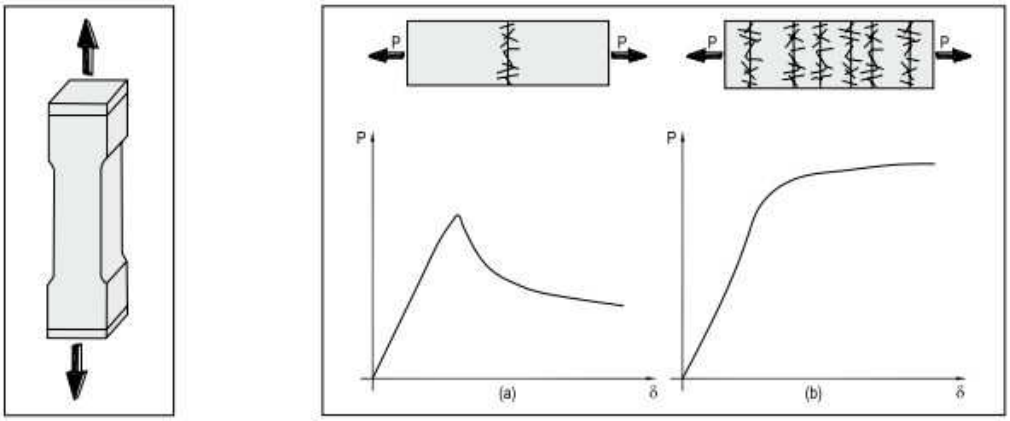
Αναφέρεται συχνά ότι η αστοχία των κύβων ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται κυρίως λόγω της εμφάνισης παράλληλων ρωγμών προς την κατεύθυνση φόρτισης. Παρολαυτά, σύμφωνα με τη γεωμετρία των δοκιμίων, η μορφή αστοχίας θεωρείται αποτέλεσμα δράσης των τοπικών μηχανισμών εφελκυστικών τάσεων ή συνδυασμό εφελκυσμού και διάτμησης. Έτσι, γνωρίζοντας ότι ο προσανατολισμός των ινών είναι διδιάστατος και τα κύρια θλιπτικά φορτία εμφανίζονται παράλληλα με αυτόν, συμπεραίνουμε ότι οι ίνες μπορούν μόνο να βελτιώσουν τη συμπεριφορά σε θραύση στις ζώνες διάτμησης (πλάγιες ρωγμές). Στη ζώνη εφελκυσμού οι ίνες δε βελτιώνουν τη συμπεριφορά μετά τη θραύση. Η ικανότητά τους εκεί εξαρτάται από το μήκος τους. Επίσης, όσο πιο μεγάλη είναι η ζώνη που εμφανίζεται η αστοχία λόγω εφελκυσμού, τόσο η ενίσχυση που προσφέρουν οι ίνες είναι μικρότερη (Ding, Kusterle, 1999).

12.2.2 Εφελκυστική αντοχή

Είναι απαραίτητο να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα στους διάφορους τύπους εφελκυστικής τάσης (αξονικός εφελκυσμός, καμπτικός εφελκυσμός και αντοχή σε διάρρηξη), διότι κάθε δοκιμή μπορεί να δώσει διαφορετικά αποτελέσματα παραμόρφωσης (Maidl, 1995).

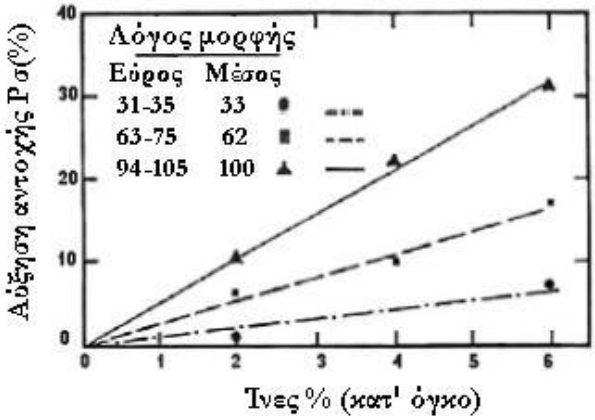
12.2.2.1 Αντοχή αξονικού εφελκυσμού

Η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε αξονικό εφελκυσμό επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία των ινών, ειδικά στην φάση που ακολουθεί την πρώτη ρωγμή. Στα πειραματικά αποτελέσματα, μόνο για προσθήκες ινών από 1.5-2% και πάνω παρατηρείται σημαντική αύξηση της μέγιστης τιμής του φορτίου (Maccaferri).



Διάγραμμα 5.41: Δοκιμή αξονικού εφελκυσμού και επιρροή αποτελεσμάτων από την περιεκτικότητα σε ίνες (Maccaferri)

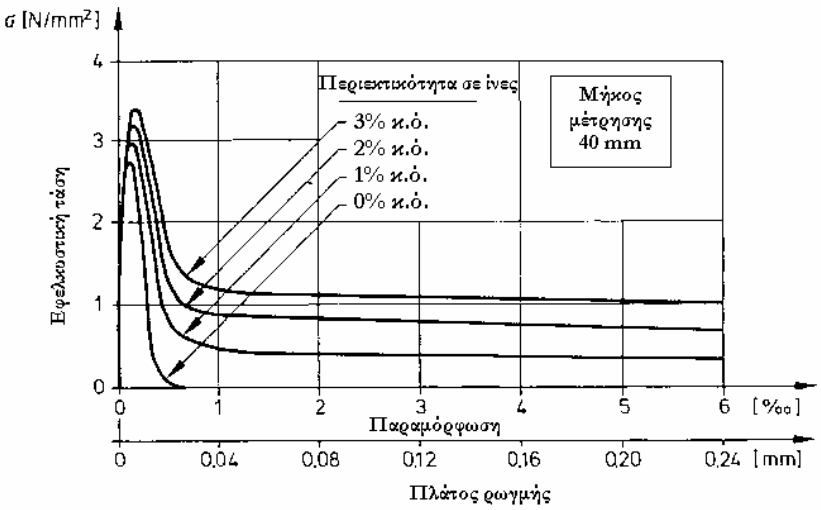
Οι ίνες που είναι προσανατολισμένες κατά τη φορά της εφελκυστικής τάσης μπορούν να αυξήσουν κατά πολύ την αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό, σε ποσοστό έως 133% για 5% ευθείες και ομαλές ίνες. Παρολαυτά, για ίνες με τυχαίο προσανατολισμό, η αύξηση της αντοχής γίνεται από ελάχιστη έως και 60%, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα 5.42 (Chanh).



Διάγραμα 5.42: Επιρροή της ποσότητας και του λόγου μορφής των ινών στην εφελκυστική αντοχή (Chanh)

Δεν είναι εύκολο να καθοριστεί η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό την αξονική εφελκυστική τάση. Οι δυσκολίες προκύπτουν στην εφαρμογή του φορτίου, δεδομένου ότι είναι σημαντικό να αποφευχθεί κάθε διαταραχή κατά την επιβολή τάσεων στο δείγμα. Επίσης, η συμπεριφορά του υλικού μετά την αστοχία προκαλεί περαιτέρω προβλήματα.

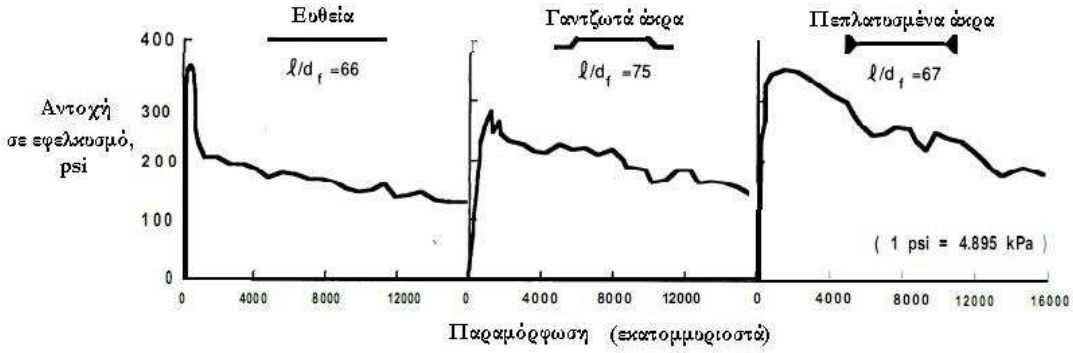
Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αντιδρά αρχικά στην αξονική εφελκυστική τάση με γραμμική ελαστικότητα. Με το σχηματισμό των μικρορωγμών, οι τάσεις συγκεντρώνονται στις ίνες. Αυτός ο μηχανισμός μπορεί να παρατηρηθεί στο σημείο του μέγιστου φορτίου, όπου έχουμε μια δυσανάλογη αύξηση. Όταν επιτυγχάνεται το μέγιστο φορτίο, η παραμόρφωση είναι περίπου 0.1‰, ο σχηματισμός ρωγμών αυξάνεται και ταυτόχρονα μειώνεται η εφελκυστική αντοχή. Τα αποτελέσματα δοκιμών παρουσιάζουν ξαφνική μείωση στη φέρουσα ικανότητα, η οποία ακολουθείται από σταθεροποίηση και τέλος από την εξόλκευση των ινών, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.43.



Διάγραμμα 5.43: Εφελκυστική τάση σα συνάρτηση της παραμόρφωσης ή του πλάτους της ρωγμής (Maidl, 1995)

Βέβαια, οι παραπάνω συνθήκες φόρτισης δεν αντιστοιχούν τις περισσότερες φορές με τις πραγματικές συνθήκες φόρτισης στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της καμπύλης φόρτισης - βύθισης, υπό σταθερή αύξηση της τάσης και του ανοίγματος των ρωγμών. Έτσι, προκύπτει με μαθηματικές σχέσεις η μέγιστη φέρουσα ικανότητα του σκυροδέματος στην εφελκυστική τάση, πριν από το σχηματισμό των ρωγμών, και η εφελκυστική τάση κατά τη διάρκεια της εξόλκευσης των ινών, δηλαδή μετά των σχηματισμό των ρωγμών (Maidl, 1995).

Σύμφωνα με την ACI, δεν υπάρχουν πρότυπες δοκιμές για τη μέτρηση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης σε συνθήκες αξονικού εφελκυσμού. Έτσι, οι καμπύλες που προκύπτουν θα εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων και το μέγεθος των δοκιμίων, ο τύπος της μηχανής κλπ. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων καμπυλών είναι όπως παρακάτω (διάγραμμα 5.44).



Διάγραμμα 5.44: Καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για ινοπλισμένα σκυροδέματα (ίνες 1.73% κ.ό.) (ACI 544.4R)

Το πτωτικό κομμάτι της καμπύλης επηρεάζεται από τις παραμέτρους της ενίσχυσης, δηλαδή τη γεωμετρία, το ποσοστό και το λόγο μορφής των ινών. Εάν μόνο μια ρωγμή δημιουργηθεί στο δοκίμιο, τότε η παραμόρφωση συγκεντρώνεται εκεί και η παραμόρφωση μετά τη ρωγμή πρέπει να μεταφράζεται με προσοχή στην περιοχή της καμπύλης μετά τη θραύση.

Η αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε αξονικό εφελκυσμό είναι περίπου ίδια με αυτήν του άοπλου (2-4 MPa). Παρολαυτά, η δυσθραυστότητα (όπως αυτή ορίζεται από το πρότυπο της ASTM C1018), μπορεί να είναι μια ή δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη, κυρίως λόγω της μεγάλης ενέργειας τριβής των ινών κατά την εξόλκευσή τους, που δημιουργείται και στις δύο πλευρές της ρωγμής και εξαιτίας της παραμόρφωσης στις πολλαπλές ρωγμές, όταν αυτές προκαλούνται (ACI 544.R).

Πειραματικά αποτελέσματα για αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό, σε έγχυτο και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, έχουν γίνει από τους Leung, Lai, Lee (2003). Τα αποτελέσματα αυτών, καθώς και οι δείκτες δυσθραυστότητας κατά ASTM C1018 παρατίθενται στον πίνακα 5.45.

Σύνθεση	**Αντοχή σε κάμψη (MPa)**	**Δείκτες δυσθραυστότητας C1018**		
		I_5	I_{10}	I_{20}
Άοπλο εκτοξευόμενο	5.25	1.0	1.0	1.0
Άοπλο έγχυτο	4.79	1.0	1.0	1.0
0.5% πολυπροπυλενίου FRS	4.43	2.2	3.2	4.1
0.5% πολυπροπυλενίου FRC	4.3	2.3	3.9	6.1
0.5% πολυβινυλικής αλκοόλης FRS	5.49	1.5	1.7	1.8
0.5% πολυβινυλικής αλκοόλης FRC	4.68	2.0	2.3	2.4
0.5% χαλύβδινες FRS	4.87	2.9	5.6	10.0
0.5% χαλύβδινες FRC	4.66	3.8	7.0	11.5
0.5% πολυπροπυλενίου και 0.3% πολυβινυλικής αλκοόλης FRS	4.57	2.0	3.0	3.9
0.5% πολυπροπυλενίου και 0.3% πολυβινυλικής αλκοόλης FRC	5.72	2.2	3.6	5.1

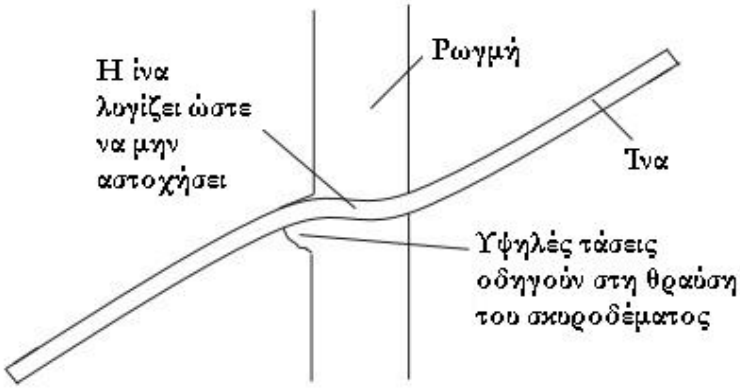
Πίνακας 5.45: Δοκιμές σε κάμψη για διάφορα μίγματα ινών (Leung, Lai, Lee, 2003)

Από τα παραπάνω παρατηρούμε ότι οι αντοχές του έγχυτου σκυροδέματος είναι από 10-20% μικρότερες από αυτές του εκτοξευόμενου, για όλες τις περιπτώσεις εκτός από την τελευταία, όπου έχουμε ένα υβρίδιο ινών. Οι δείκτες δυσθραυστότητας του έγχυτου σκυροδέματος όμως, είναι σε κάθε περίπτωση μεγαλύτεροι από αυτούς του εκτοξευόμενου. Αυτή η συμπεριφορά της αντοχής εδώ είναι αντίθετη σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή, όπου το έγχυτο σκυρόδεμα υπερτερούσε. Μια πιθανή εξήγηση για το γεγονός αυτό μπορεί να δοθεί αν λάβει κανείς υπόψη το διττό ρόλο των ινών. Πρώτον κάνουν τη συμπύκνωση πιο δύσκολη κι έτσι αυξάνει το πορώδες του σκυροδέματος. Δεύτερον, διευκολύνουν την ανακατανομή των τάσεων και γεφυρώνουν τις ρωγμές, μη

επιτρέποντάς τους την περεταίρω διεύρυνσή τους. Στη θλίψη, η αστοχία οφείλεται στην συνένωση των ρωγμών που αρχικά δημιουργήθηκαν. Μεγαλύτερο πορώδες ευνοεί κατά πολύ την αστοχία αυτού του τύπου καθότι υπάρχουν περισσότερες ασθενείς ζώνες για τις ρωγμές να δημιουργηθούν. Έτσι, από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει ότι οι τάσεις για γεφύρωση που προσφέρουν οι ίνες δεν υπερκαλύπτουν τη διάδοση των ρωγμών λόγω της αυξημένης παρουσίας κενών. Έτσι, η αντοχή σε θλίψη καθορίζεται κυρίως από το πορώδες, με το έγχυτο σκυρόδεμα να πλεονεκτεί.

Στην καμπτική τώρα φόρτιση, η αστοχία οφείλεται σε εφελκυστικές τάσεις και κυριαρχείται από την μεγαλύτερη ρωγμή που θα σχηματιστεί στο δοκίμιο. Με το αυξημένο πορώδες, αυξάνει και η πιθανότητα να σχηματισθούν ρωγμές μεγάλου μεγέθους. Παρολαυτά, για την επέκταση της μεμονωμένης ρωγμής που θα προκαλέσει την αστοχία η γεφύρωση που προσφέρουν οι ίνες είναι πολύ αποτελεσματική κι έτσι καθυστερούν την αστοχία αυξάνοντας το φορτίο θραύσης. Στο εκτοξευόμενο όμως σκυρόδεμα υπάρχουν δύο ακόμη παράγοντες που επιδρούν θετικά στην αντοχή σε κάμψη. Η πίεση που δέχεται το μίγμα στο ακροφύσιο αυξάνει την διεπιφάνεια μεταξύ ίνας και σκυροδέματος με αποτέλεσμα αυτά να συγκολλούνται ισχυρότερα. Δεύτερο, και ίσως σημαντικότερο, είναι ότι κατά την εκτόξευση οι ίνες αποκτούν ευνοϊκό προσανατολισμό, δηλαδή παράλληλο με την επιφάνεια εκτόξευσης και κάθετο στην εφελκυστική τάση. Έτσι, μεγαλύτερη καμπτική αντοχή έχουν τα περισσότερα δοκίμια εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Εξαίρεση στα παραπάνω αποτελούν τα μίγματα αυτά με δύο είδη ινών. Σε αυτήν την περίπτωση, η μεγάλη ποσότητα των ινών δημιουργεί ακόμη μεγαλύτερα κενά στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα που τελικά δεν μπορούν να υπερνικηθούν από τη θετική επίδραση των ινών στη γεφύρωση των ρωγμών. Αυτό μπορεί να υποστηριχθεί και από τη μικρότερη θλιπτική αντοχή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος από το έγχυτο.

Ως προς τους δείκτες δυσθραυστότητας τώρα, φαίνεται ότι το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει μικρότερες τιμές από το έγχυτο, παρότι έχει μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη. Επίσης, η έρευνα των Leung, Lai, Lee (2003) έδειξε ότι ακόμη μεγαλύτερη από τους δείκτες δυσθραυστότητας είναι η αύξηση των τιμών παραμένουσας αντοχής, όπως αυτή ορίζεται από το πρότυπο της ASTM, C1018. Τα παραπάνω ισχύουν τώρα και για το υβριδικό μίγμα σκυροδέματος, με δύο είδη ινών. Αυτό το δεδομένο έρχεται μεν σε αντίθεση με άλλες παλαιότερες μελέτες, έχει όμως λογική εξήγηση. Το έγχυτο σκυρόδεμα έχει μεν μικρότερη καμπτική αντοχή αλλά αυξημένη ικανότητα να παραλαμβάνει φορτία μετά τη θραύση. Όπως εξηγήσαμε πριν, στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάρχει καλύτερος προσανατολισμός των ινών στο χώρο κι έτσι παραλαμβάνουν μεγαλύτερα φορτία πριν την πρώτη θραύση. Μετά όμως από αυτήν, υπάρχουν λιγότερες ίνες που «γεφυρώνουν» το κενό. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται υπό κλίση σε σχέση με τη ρωγμή, λόγω των υψηλών τάσεων που δέχονται θα πιέζουν αντίστοιχα περισσότερο τα σημεία γύρω από την περιφέρειά τους. Το γεγονός αυτό αυξάνει κατά πολύ την πιθανότητα τοπικής αστοχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.46. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί είναι ικανοί να οδηγήσουν σε μείωση του φορτίου που μπορεί να παραλαμβάνεται μετά τη θραύση. Τέλος, το μίγμα με δύο είδη ινών με το μεγάλο πορώδες, επηρεάζεται και ως προς το μέγιστο φορτίο πριν τη θραύση αλλά και ως προς τις παραμένουσες αντοχές (Leung, Lai, Lee, 2003).

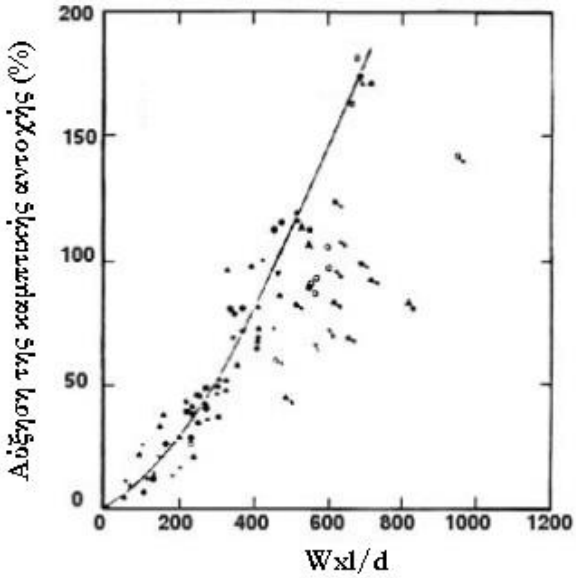


Σχήμα 5.46: Θρυμματισμός του σκυροδέματος που επιφέρει μείωση της δύναμης «γεφύρωσης» της ίνας (Leung, Lai, Lee, 2003)

12.2.2.2 Αντοχή εφελκυσμού κάμψεως

Η αντοχή σε κάμψη αυξάνει όσο αυξάνει ο λόγος μορφής και η ποσότητα των ινών. Βέβαια, η αύξηση αυτή δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική (για 80 kg/m^3 ίνες, περίπου 20%). Όταν αυξημένη αντοχή απαιτείται, τότε επιτυγχάνεται πιο εύκολα και οικονομικά αυξάνοντας την αντοχή της μήτρας του σκυροδέματος, προσθέτοντας υλικά όπως κάπνα πυριτίας, υπερευστοποιητές ή πολυμερές λατέξ. Έτσι, μόνο για τη βελτίωση της καμπτικής αντοχής δεν ενδείκνυται η χρήση ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Vandewalle, 1993).

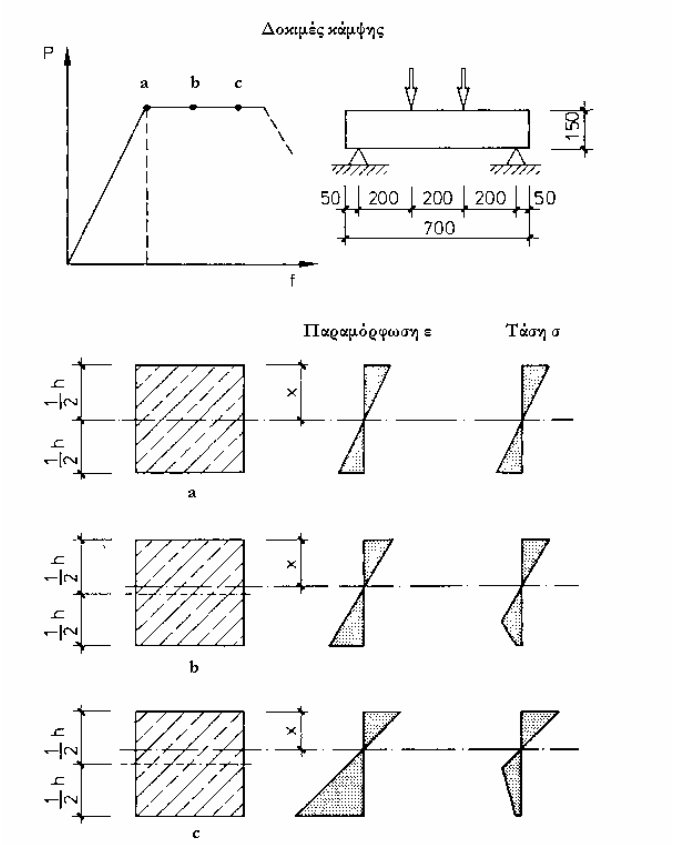
Η επιρροή της ποσότητας και του είδους των ινών φαίνεται στο διάγραμμα 5.47. Με την αύξηση του λόγου μορφής (l/d), παρατηρήθηκε αύξηση και της αντοχής. Ως W ορίζεται το ποσοστιαίο βάρος των ινών και έτσι προκύπτει το γινόμενο W*l/d στον οριζόντιο άξονα. Όταν το γινόμενο αυτό παίρνει τιμές πάνω από 600, τότε τα μίγματα που προκύπτουν έχουν προβλήματα εργασιμότητας. Επίσης, ίνες μηχανικά παραμορφωμένες δίδουν τα ίδια αποτελέσματα με μικρότερες όμως αναλογίες στο μίγμα, λόγω της καλύτερης αγκύρωσης στο σκυρόδεμα (Chanh).



Διάγραμμα 5.47: Η επιρροή του γινομένου W*l/d στην καμπτική αντοχή, Chanh

Ο εφελκυσμός κάμψης διαφέρει από τον αξονικό εφελκυσμό ως προς τη κατανομή της παραμόρφωσης. Ενώ με τον αξονικό εφελκυσμό ολόκληρη η διατομή παρουσιάζει (σχεδόν) σταθερή καταπόνηση, στην περίπτωση της καμπτικής τάσης η διατομή της καταπόνησης είναι γραμμική, υποθέτοντας ότι η διατομή παραμένει επίπεδη (υπόθεση Bernouilli). Εάν η κάμψη προκαλείται από έκκεντρη, ομαλή θλιπτική δύναμη έξω από το εγκάρσιο τμήμα του πυρήνα (δοκίμιο), θα συνοδεύεται πάντα και από θλιπτικές τάσεις. Στην ακραία περίπτωση άπειρης εκκεντρότητας, πραγματοποιείται καθαρή κάμψη.

Αυτές οι αρχές είναι βασικές για την κατανόηση της συμπεριφοράς σε κάμψη. Στις παραπάνω περιπτώσεις, το ενισχυμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα μπορεί να μεταφέρει τάση στη διατομή κάτι που είναι αδύνατο στην περίπτωση της αξονικής φόρτισης. Έτσι, εάν για παράδειγμα η εφελκυστική τάση στην περιοχή των μέγιστων τάσεων μειώνεται, τότε ο ουδέτερος άξονας μετακινείται προς την πλευρά των θλιπτικών τάσεων, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.48 (Maidl, 1995).

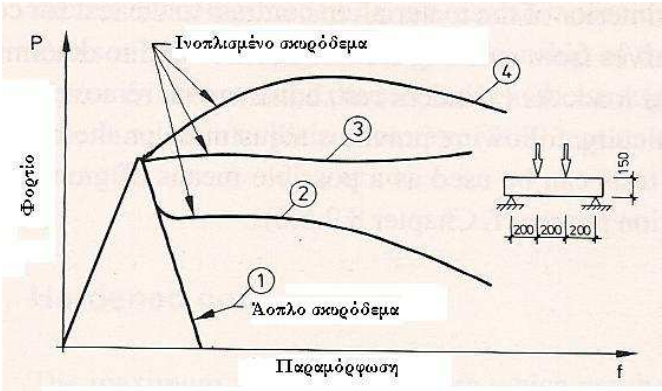


Διάγραμμα 5.48: Ανακατανομή των τάσεων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπό κάμψη (ποιοτικό) (Maidl, 1995)

Κατά συνέπεια η εφελκυστική ζώνη αυξάνεται και η θλιπτική ζώνη μειώνεται. Δεδομένου ότι η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του και η τελευταία δε μηδενίζεται αμέσως με το σχηματισμό ρωγμών, είναι δυνατό να επέλθει μία νέα ισορροπία.

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι αντίθετα με το άοπλο σκυρόδεμα, το ινοπλισμένο εξακολουθεί να παραλαμβάνει εφελκυστικές δυνάμεις. Το διάγραμμα 5.49 παρουσιάζει χαρακτηριστικές καμπύλες φορτίου - καμπτικής παραμόρφωσης για το

άοπλο και το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, όπως αυτές προέκυψαν από δοκιμές κάμψης (Maidl, 1995).



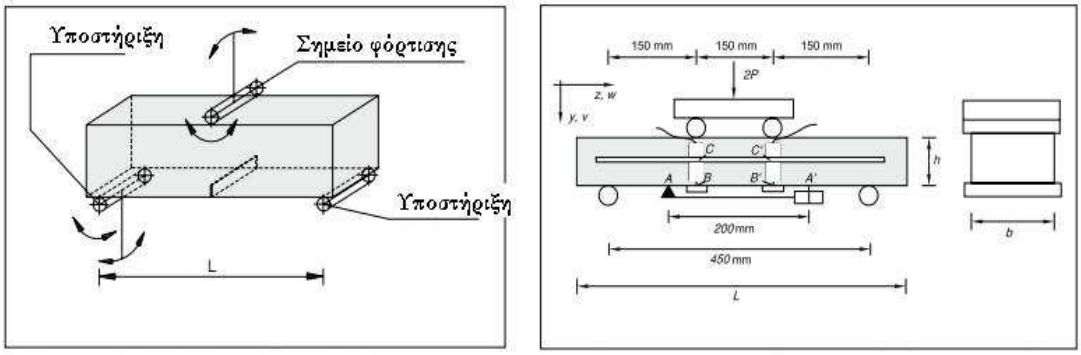
Διάγραμμα 5.49: Δοκιμές κάμψης σε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος (ποιοτικό) (Maidl, 1995)

Η καμπύλη 1 παρουσιάζει άοπλο σκυρόδεμα στο οποίο η αστοχία πραγματοποιείται αμέσως μετά την πρώτη ρωγμή. Οι καμπύλες 2 έως 4 παρουσιάζουν σκυροδέματα οπλισμένα με ίνες χάλυβα, με διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τον τύπου και τον όγκο των ινών. Μείωση του φορτίου, εφόσον έχει διαρρεύσει το δοκίμιο (καμπύλη 2), μπορεί να οφείλεται σε:

- Σχετικά μικρή περιεκτικότητα σε ίνες, μέχρι 0.7% κατ' όγκο περίπου.
- Ίνες με κακή πρόσφυση στο σκυρόδεμα, που προσφέρουν μικρή αντίσταση στην εξόλκευση όταν η στατική τριβή είναι μικρότερη της ασκούμενης τάσης.
- Ίνες με υπερκρίσιμο μήκος, που δεν αστοχούν σε εξόλκευση αλλά διαρρέουν.

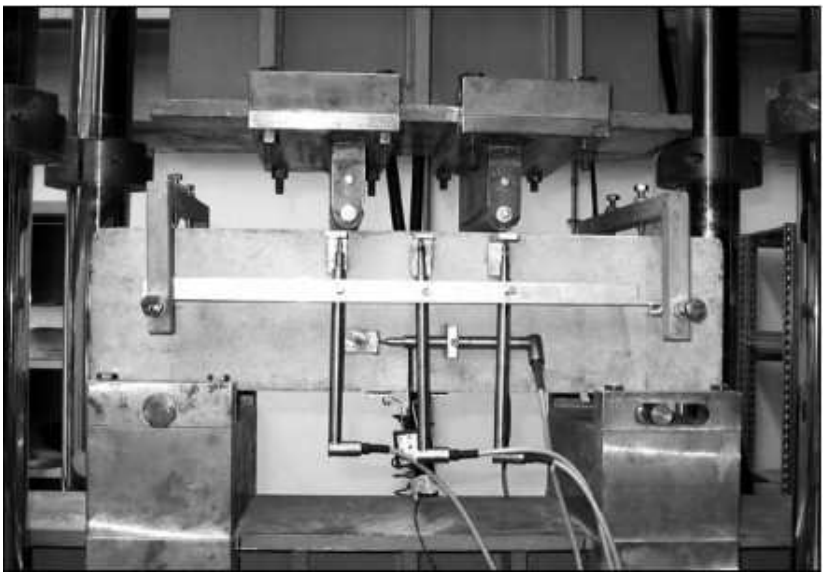
Οι καμπύλες 3 και 4 έχουν έντονο μετελαστικό στάδιο και πλάστιμη συνολική συμπεριφορά. Αυτό επιτυγχάνεται με ίνες που διαμορφώνουν αυξημένες τριβές με το σκυρόδεμα, με παράδειγμα τις ίνες με γαντζωτά άκρα. Σε αυτά τα δοκίμια η εφελκυστική τάση μετά τη ρωγμάτωση παραμένει σε υψηλά επίπεδα ή και αυξάνεται, ενώ η μετέπειτα φθίνουσα πορεία του διαγράμματος είναι ιδιαίτερα ομαλή. Η αύξηση του φορτίου, όπως αυτή συμβαίνει στην καμπύλη 4, δηλαδή μετά από το σχηματισμό ρωγμών, εξαρτάται πρώτιστα από την περιεκτικότητα σε ίνες (Maidl, 1995).

Οι δοκιμές κάμψεις εκτελούνται σε δοκούς και πλάκες. Η διάταξη της δοκιμής κάμψης για δοκούς φαίνεται στην εικόνα 5.50.



Εικόνα 5.50: Μέτρηση καμπτικής αντοχής με τη δοκιμή τριών και τεσσάρων σημείων (Maccaferri)

Από τις δοκιμές κάμψης προέρχονται και οι δείκτες δυσθραυστότητας, όπως θα δούμε και παρακάτω. Η δοκός, στη δοκιμή τριών σημείων, φορτίζεται στο μέσον του πάνω τμήματός της ενώ στη δοκιμή τεσσάρων σημείων έχουμε χωρισμό σε τρία ίσα τμήματα του συνολικού μήκους της δοκού, όπως φαίνεται και στην εικόνα 5.51.



Εικόνα 5.51: Δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων (Maccaferri)

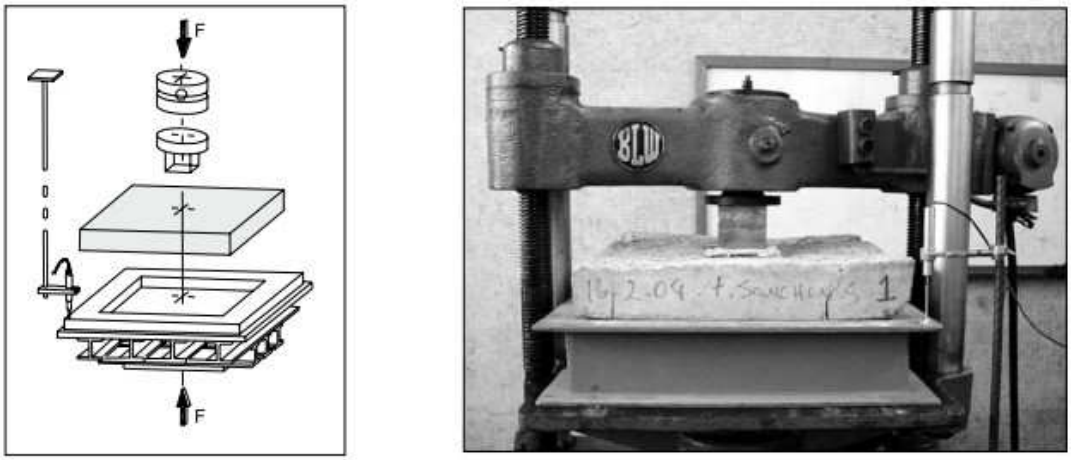
Η αντοχή στην πρώτη ρωγμή, σύμφωνα με τον κανονισμό UNI 11039 δίδεται από τη σχέση:

$$f = \frac{P \times l}{b \times (h - a_0)},$$

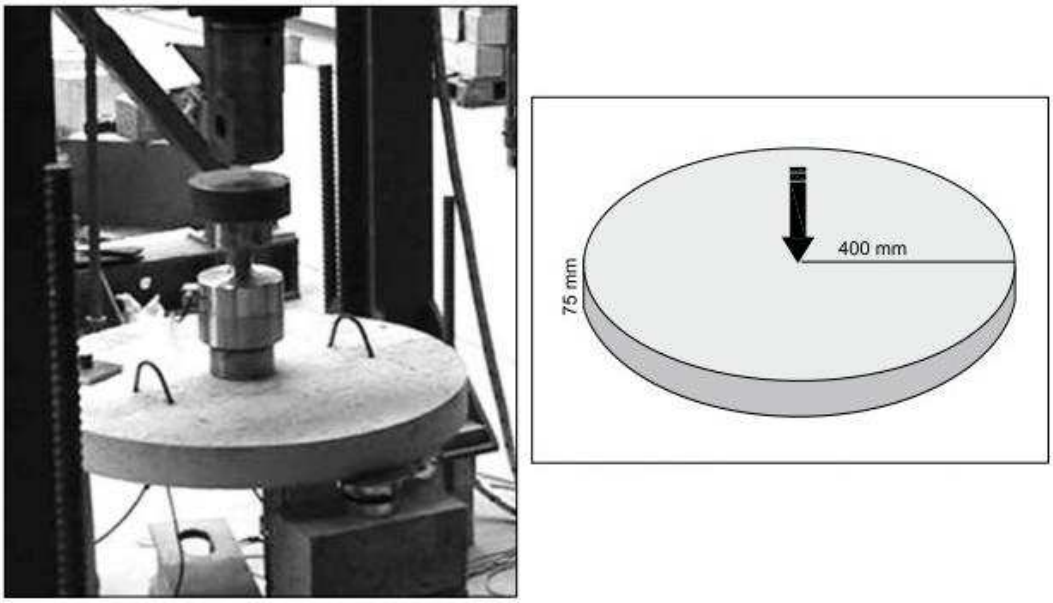
Όπου: f = αντοχή πρώτης ρωγμής
l = η απόσταση μεταξύ των υποστηριγμάτων, στην κάτω πλευρά
h = το ύψος της δοκού
a_0 = το βάθος της χάραξης, στο κάτω μέρος του δοκιμίου

Όλες οι παραπάνω διαστάσεις είναι σε χιλιοστά και εξαρτώνται από τους εκάστοτε κανονισμούς, σύμφωνα με τους οποίους εκτελείται η δοκιμή (Maccaferri).

Δοκιμές επίσης μπορούν να εκτελεστούν και σε πλάκες, κυκλικές ή τετράγωνες. Οι πλάκες εδώ δέχονται μια κεντρική φόρτιση, έτσι ώστε να υπολογισθεί η απορροφούμενη ενέργεια για μια προκαθορισμένη τιμή βύθισης του εμβόλου. Η δοκιμή αυτή τυγχάνει ευρείας εφαρμογής, λόγω της εύκολης σχετικά εκτέλεσής της. Τα αποτελέσματα όμως που δίδει σημειώνουν μια σημαντική στατιστική απόκλιση. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε η δοκιμή για κυκλικές πλάκες με τρεις σφαιρικές αρθρώσεις.



Εικόνα 5.52: Μηχανή φόρτισης για τετράφωνες πλάκες, UNI 10834 ή κατά EFNARC (Maccaferri)



Εικόνα 5.53: Δοκιμή σε κυκλικές πλάκες κατά ASTM C1550 (Maccaferri)

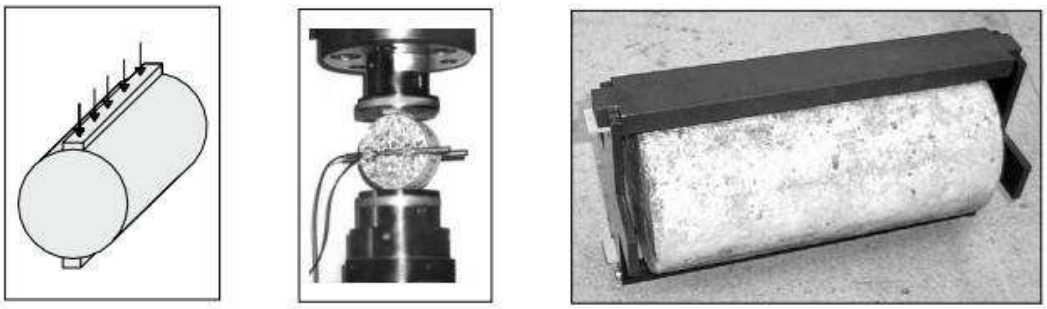
Οι παραπάνω δοκιμές εκτελούνται για μεγάλα επίπεδα βύθισης (περίπου το 1/20 του μήκους) μέχρις ότου δημιουργηθεί πολύ μεγάλη ρωγμή και πάνω από μια μεγάλη ορατή ρωγμή (Maccaferri). Δείγμα πλάκας ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, έπειτα από μια τέτοια θραύση φαίνεται στην εικόνα 5.54.

Εικόνα 5.54: Πλάκα εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος με βύθιση 150 mm (5,6 in.) (Morgan, 1999)

12.2.2.3 Αντοχή σε διάρρηξη

Η αντοχή σε διάρρηξη του ινοπλισμένου σκυροδέματος παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με την αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό. Παρολαυτά, η προσθήκη ινών μόνο για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής δεν είναι η κατάλληλη επιλογή (Chanh N.).

Η προσθήκη των ινών χάλυβα αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό λόγω διάρρηξης αναλογικά με τα αποτελέσματα δοκιμών αξονικού εφελκυσμού. Από δοκιμές αναφέρεται βελτίωση της αντοχής διαρρήξεως περίπου 30%, για περιεκτικότητα σε ίνες 8% κατά βάρος. Αυτές οι τιμές προήλθαν από δοκίμια κυβικά αλλά και κυλινδρικά. Άλλες δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού, έδειξαν γρήγορη μείωση στο φορτίο μετά την πρώτη ρωγμή, ενώ οι δοκιμές κάμψης σε δοκίμια ίδιων χαρακτηριστικών (περιεκτικότητα σε ίνες, ποιότητα σκυροδέματος, κτλ.) αποκάλυψαν μια σχεδόν όλκιμη συμπεριφορά. Εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι αδύνατον να καθοριστεί η εντατική κατάσταση στο εσωτερικό του υλικού στις δοκιμές διάρρηξης, σε αντίθεση με τις δοκιμές αξονικού εφελκυσμού, καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν εδώ για την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συμπεριφορά του υλικού μετά την αστοχία. Τέλος, εφόσον κυλινδρικά δοκίμια μπορούν να αφαιρεθούν από τις προϋπάρχουσες κατασκευές, χωρίς μεγάλη δυσκολία, οι δοκιμές διαρρήξεως μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα πιθανό μέσο παρακολούθησης της εφελκυστικής αντοχής κατά τη διάρκεια της κατασκευαστικής φάσης (Maidl, 1995).



Εικόνα 5.55: Διάταξη δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού (Maccaferri)

12.2.3 Αντοχή σε διάτμηση

Όπως και στην περίπτωση του άοπλου σκυροδέματος, η διατμητική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος καθορίζεται από την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Τα στοιχεία από ινοπλισμένο σκυρόδεμα, χωρίς συμβατικούς χαλύβδινους οπλισμούς, φυσιολογικά επηρεάζονται από διατμητικές τάσεις, οι οποίες τα οδηγούν μέχρι την αστοχία. Αυτό βρίσκει εφαρμογή, για παράδειγμα στις δοκούς με μήκος τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το ύψος τους. Εάν οι χαλύβδινοι οπλισμοί χρησιμοποιούνται για να παραλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις, οι ίνες χάλυβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μεταφορά της διατμητικής τάσης.

Δοκιμές έχουν δείξει ότι υπάρχει σημαντική αύξηση στη διατμητική αντοχή με τη χρήση των ινών. Αυτή η αύξηση μπορεί να εξηγηθεί από τους ακόλουθους παράγοντες:

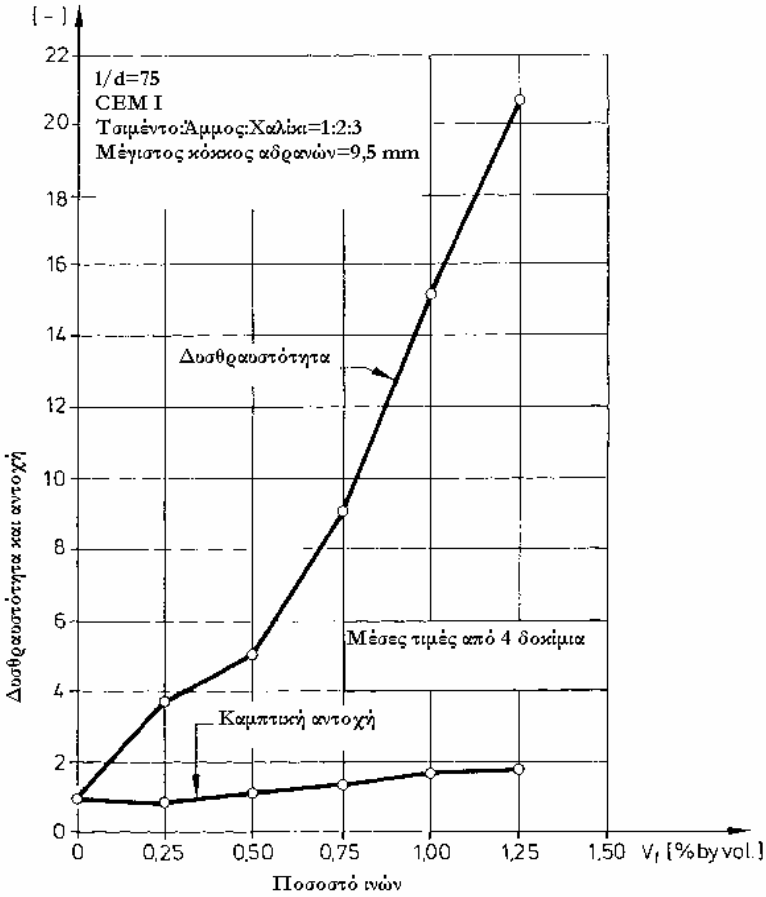
- Οι ίνες χάλυβα διανέμονται ομοιόμορφα στο σκυρόδεμα και η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη αυτής των οπλισμών χάλυβα. Κατά συνέπεια, μπορούν άμεσα να επιβραδύνουν την ανάπτυξη των ρωγμών.
- Οι ίνες χάλυβα αυξάνουν την αντοχή της πρώτης ρωγμής και την τελική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.
- Η μείωση του πλάτους των ρωγμών βελτιώνει τη διάδοση της διάτμησης εκατέρωθεν της ρωγμής (Maidl, 1995).

11.2.4 Δυσθραυστότητα

Είναι πλέον δεδομένο ότι για την αποτίμηση της βελτίωσης που επιτυγχάνεται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με την προσθήκη μεταλλικών ινών εξετάζεται το διάγραμμα φορτίου - καμπτικής παραμόρφωσης. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας οι οποίοι εκφράζουν την ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να απορροφά τμήμα της μηχανικής ενέργειας που προκαλείται όταν τα φορτία της κατασκευής υπερβούν την ικανότητα παραμόρφωσης του άοπλου σκυροδέματος. Το οπλισμένο σκυρόδεμα, ακόμη και όταν φτάσει στο όριο διαρροής, έχει παραμένουσα αντοχή. Αυτή η ιδιότητα μπορεί να αξιολογηθεί με τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας, δηλαδή με την ενέργεια που αντιστοιχεί στην περιοχή (εμβαδόν) κάτω από την καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης μέχρι μια καθορισμένη τιμή αυτής. Βεβαίως θα πρέπει να υπογραμμισθεί ότι η αξιολόγηση του ινοπλισμένου σκυροδέματος

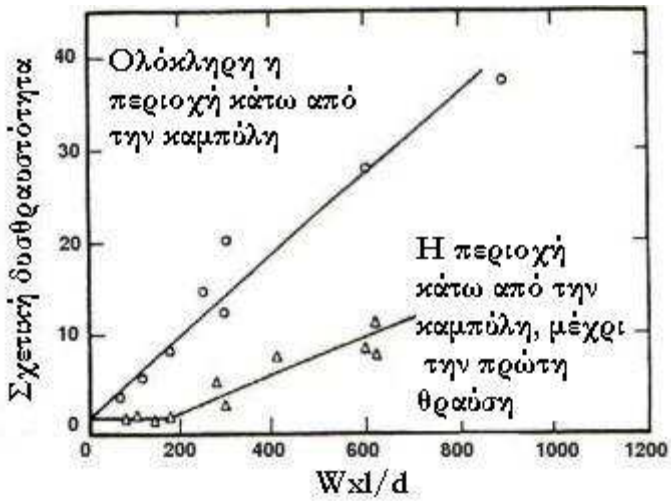
δεν μπορεί να γίνει μόνο από ένα μέγεθος, δηλαδή τους δείκτες δυσθραυστότητας. Έτσι, η δυσθραυστότητα είναι ένας χονδρικός παράγοντας για την περιγραφή των ιδιοτήτων. Παρολαυτά, παίζει έναν ρόλο στην αξιολόγηση της αντίστασης του υλικού υπό καταστροφικές συνθήκες, όπως δυναμικές φορτίσεις κλπ.

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, ακόμη και η ελάχιστη περιεκτικότητα σε ίνες για το σκυρόδεμα, αυξάνει την απορρόφηση ενέργειας. Αυτή είναι και η σημαντικότερη διαφορά του ινοπλισμένου με το άοπλο σκυρόδεμα. Το διάγραμμα 5.56 επεξηγεί την εξέλιξη της δυσθραυστότητας με την αυξανόμενη περιεκτικότητα σε ίνες. Η μεγάλη αύξηση της δυσθραυστότητας στα δοκάρια που υφίστανται κάμψη είναι εμφανής. Είναι δυνατό να επιτευχθεί αύξηση της τάξης του 1500% με περιεκτικότητα σε ίνες μόλις 1% κατ' όγκο. Ακόμη και ελάχιστη αύξηση του ποσοστού των ινών, που δεν έχει επίδραση στην αντοχή του υλικού, έχει σημαντική επιρροή στη δυσθραυστότητά του (Maidl, 1995).



Διάγραμμα 5.56: Επιρροή της ποσότητας των ινών στην αντοχή και στη δυσθραυστότητα (Maidl, 1995)

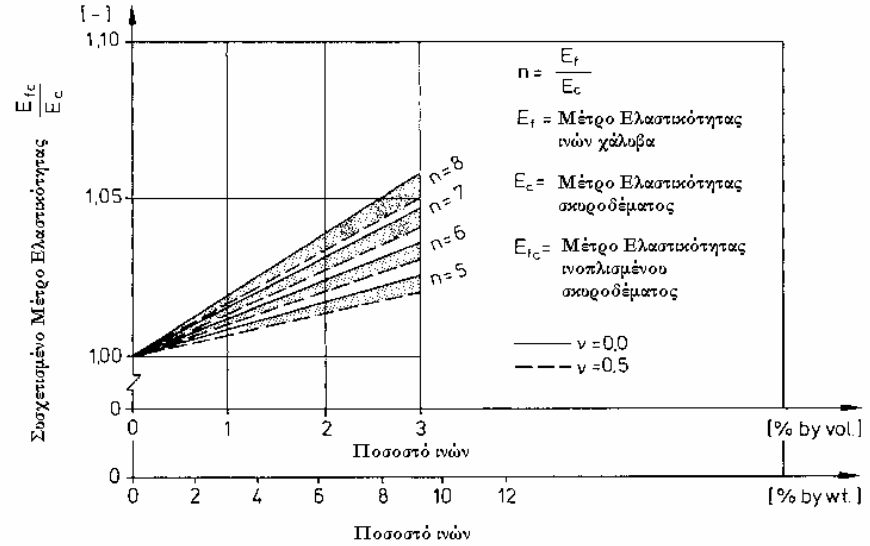
Όπως συνέβαινε και στην καμπτική αντοχή, έτσι κι εδώ, η δυσθραυστότητα αυξάνει με την αύξηση της τιμής του γινομένου W*l/d. Κάτι τέτοιο φαίνεται και στο διάγραμμα 5.57 (όπου W το ποσοστιαίο βάρος των ινών στο μίγμα).



Διάγραμμα 5.57: Η επιρροή του γινομένου W*l/d στην καμπτική δυσθραυστότητα (Chanh)

12.2.5 Ελαστική παραμόρφωση

Σκοπός εδώ είναι η μελέτη της ελαστικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η επίδραση των ινών στην ελαστική παραμόρφωση είναι αμελητέα στην ελαστική περιοχή, πριν δηλαδή τη θραύση. Με περιεκτικότητα ινών συνήθως όχι παραπάνω από 1% κατ' όγκο, η συγκέντρωση τους σε μια διατομή είναι ελάχιστη για να ασκήσει σημαντική επιρροή στις ιδιότητες του σκυροδέματος, λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας που έχει ο χάλυβας. Το διάγραμμα 5.58 δείχνει την υπολογισμένη σχέση ανάμεσα στο ποσοστό των ινών και το μέτρο ελαστικότητας, βασισμένο από δεδομένα με ίνες με μήκος $l=l_{cr}$ (Maidl, 1995).



Διάγραμμα 5.58: Επιρροή των ινών στο μέτρο ελαστικότητας, $l= l_{cr}$, (Maidl, 1995)

Η μέγιστη αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, για περιεκτικότητα ινών 8% κατά βάρος, είναι 5%. Για ίνες με υποκρίσιμο μήκος, οι οποίες δεν υποβάλλονται στη μέγιστη δυνατή τάση, η αύξηση είναι ακόμα χαμηλότερη. Καμία σημαντική αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας δεν καταγράφηκε επίσης ούτε για το εκτοξευόμενο ινοπλισμένου σκυρόδεμα. Έτσι, οι τιμές για το μέτρο ελαστικότητας και το λόγο Poisson για το οπλισμένο σκυρόδεμα που αναφέρονται στα πρότυπα ή στους κανονισμούς, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τους υπολογισμούς στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Maidl, 1995).

12.2.6 Ρωγμάτωση

Ο σπουδαιότερος ρόλος των ινών είναι η ανακατανομή φορτίων μετά τη δημιουργία των πρώτων ρωγμών στις εκατέρωθεν περιοχές αυτών. Μετά τη ρωγμάτωση όμως οι ίνες εξακολουθούν να αναλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις και έτσι προσδίδουν στο υλικό πλαστιμότητα. Η έκταση της παραμόρφωσης εξαρτάται αφενός από τον τύπο ινών και την περιεκτικότητα τους, και αφετέρου από τη φύση του φορτίου. Γιαυτό, ο εφελκυσμός κάμψεως θα προκαλέσει σχεδόν όλκιμη παραμόρφωση ενώ αξονικός εφελκυσμός θα προκαλέσει ξαφνική αστοχία.

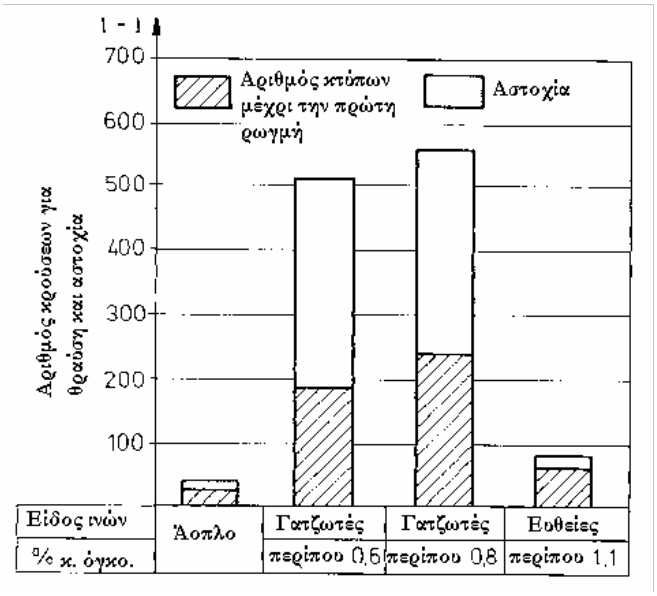
Οι ίνες χάλυβα βοηθούν επίσης στη βελτίωση της διανομής των ρωγμών. Ο αριθμός των ρωγμών αυξάνεται, αλλά μειώνεται το πλάτος και η απόσταση μεταξύ τους. Η προσθήκη των ινών αυξάνει την αντοχή του σκυροδέματος μετά τη ρωγμάτωση και όχι την αντοχή μέχρι το σχηματισμό της πρώτης ρωγμής. Η τελευταία καθορίζεται κυρίως από το ποσό και όχι από τον τύπο των ινών. Τέλος, στις καμπτικές δυνάμεις, όταν αυτές αναπτύσσονται, η κατανομή των ρωγμών είναι καλύτερη όταν έχουμε ενίσχυση με ίνες σε σχέση με το συμβατικό οπλισμό.

Η συμπεριφορά μετά την αστοχία βελτιώνεται σημαντικά με την προσθήκη των ινών. Η παραμόρφωση στην αστοχία μπορεί να είναι ακόμη και δεκαπλάσια από αυτήν του άοπλου σκυροδέματος. Έτσι, αυξάνει η ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να απορροφά ενέργεια (Maidl, 1995).

11.2.7 Αντοχή σε κρούση

Το κύριο χαρακτηριστικό της αντοχής στην κρούση είναι η αύξηση της ενέργειας θραύσεως. Η αύξηση της αντοχής στην κρούση στα ινοπλισμένα σκυροδέματα είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του άοπλου σκυροδέματος. Ο λόγος για το γεγονός αυτό βρίσκεται στην ενέργεια που απαιτείται για την εξόλκευση των ινών. Αυτή η αυξανόμενη αντοχή συνοδεύεται από μεγαλύτερη αντίσταση στη διάρρηξη και θρυμματοποίηση του υλικού.

Η αύξηση της ενέργειας θραύσεως στα ινοπλισμένα σκυροδέματα με ίνες χάλυβα κατά τη δοκιμή κρούσης είναι 2.5 έως 3.5 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του άοπλου σκυροδέματος (για σύνηθες σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, ACI 544, IR-96). Δοκιμές κρούσης έχουν δείξει ότι ο αριθμός των κτύπων που απαιτείται για να σπάσει το σκυρόδεμα εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε ίνες και από το λόγο μορφής, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.59. Παρατηρούμε επίσης ότι η χρήση ινών με σύστημα αγκύρωσης έχει μεγαλύτερη επιρροή απ' ότι η αύξηση του ποσοστού των ινών στο μίγμα (Maidl, 1995).



Διάγραμμα 5.59: Επιρροή των ινών στην αντοχή σε κρούση (Maidl, 1995)

Η συμπεριφορά του υλικού σε κρουστικές φορτίσεις (εκρήξεις, πτώσεις τεμαχών κλπ) χαρακτηρίζεται από την αντοχή και την ενέργεια θραύσης. Δύο δοκιμές για μετρήσεις της αντοχής σε κρούση περιγράφονται στην οδηγία της ACI 544.2R. Ο αριθμός των κρούσεων που χρειάζονται για την αστοχία του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι μερικές εκατοντάδες συγκρινόμενες με τις 30 ή 50 χτύπους για το συμβατικό σκυρόδεμα (Maidl, 1995).

11.2.8 Συμπεριφορά κατά τη συστολή ξήρανσης

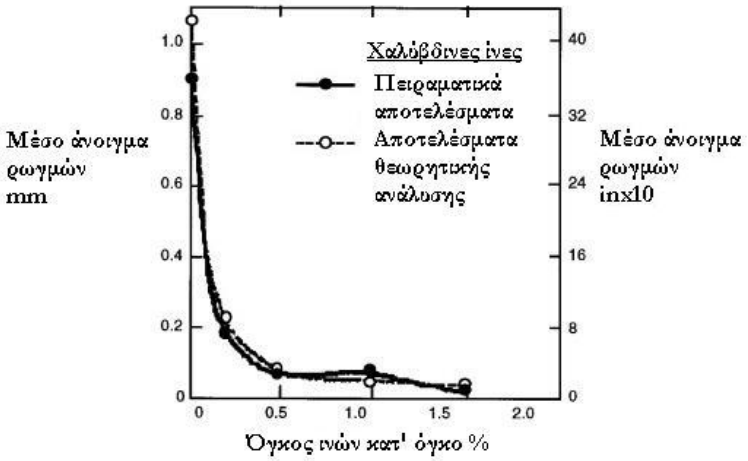
Το σκυρόδεμα συστέλλεται όταν βρίσκεται σε ξηρό περιβάλλον. Το μέγεθος της συστολής αυτής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως από τις ιδιότητες των υλικών, τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος, την ηλικία στην οποία το σκυρόδεμα υπόκειται στη διαδικασία αυτή και τον όγκο του. Εάν το σκυρόδεμα είναι περιορισμένο στο χώρο, τότε εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται και μπορεί τελικά να παρουσιάσει ρωγμές. Η θραύση αυτή, λόγω της συστολής ξήρανσης είναι μια από τις πιο κοινές αιτίες θραύσης για τοίχους και δάπεδα από σκυρόδεμα. Μία μέθοδος για να μειωθεί αυτό το φαινόμενο είναι η ενίσχυση του σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες, μικρού μήκους και τυχαία κατανεμημένες στη μάζα του σκυροδέματος.

Αφού το σκυρόδεμα είναι σχεδόν πάντα υπό περιορισμό, έχει την τάση να σπάει. Οι χαλύβδινες ίνες έχουν τρεις ευεργετικές ιδιότητες σε αυτήν την περίπτωση: (1) επιτρέπουν την πολλαπλή ρωγμάτωση, (2) επιτρέπουν τη μεταφορά εφελκυστικών τάσεων δια μέσω των ρωγμών, έτσι το ίδιο το σκυρόδεμα διατηρεί την αντοχή του ακόμη και όταν δημιουργηθούν ρωγμές και (3) μεταφορά τάσεων μπορεί να συμβαίνει για μεγάλη χρονική περίοδο, επιτρέποντας ακόμη και κλείσιμο των ρωγμών με τον χρόνο.

Δεν υπάρχει κάποια πρότυπη δοκιμή για την εκτίμηση της ρωγμάτωσης λόγω συστολής ξήρανσης. Ωστόσο, μια δοκιμή είναι απαραίτητη για να εκτιμήσει την ικανότητα των διάφορων ινών, και στις σωστές δοσολογίες, να περιορίζουν τη θραύση λόγω συστολής ξήρανσης. Σύμφωνα με την ASTM (C 157) προτείνεται η χρήση

μεγάλων, πρισματικών δοκιμίων (δοκάρια) για την μέτρηση της ελεύθερης συστολής λόγω ξήρανσης. Εάν υποθέσουμε ότι το μήκος του δοκιμίου είναι πολύ μεγαλύτερο από τις υπόλοιπες διαστάσεις του, τότε η παρατήρηση στην αλλαγή των διαστάσεών του με το χρόνο, θα δίνουν μια τάξη μεγέθους για την συστολή σε μια διάσταση του χώρου. Έτσι, σε αυτό το δοκίμιο, στην περίπτωση που έχουμε εφελκυστικές τάσεις λόγω συστολής ξήρανσης, αυτές θα είναι ομοιόμορφες και μπορούν να θεωρήσουμε ότι αυτή η εντατική κατάσταση είναι παρεμφερής με τον μονοαξονικό εφελκυσμό.

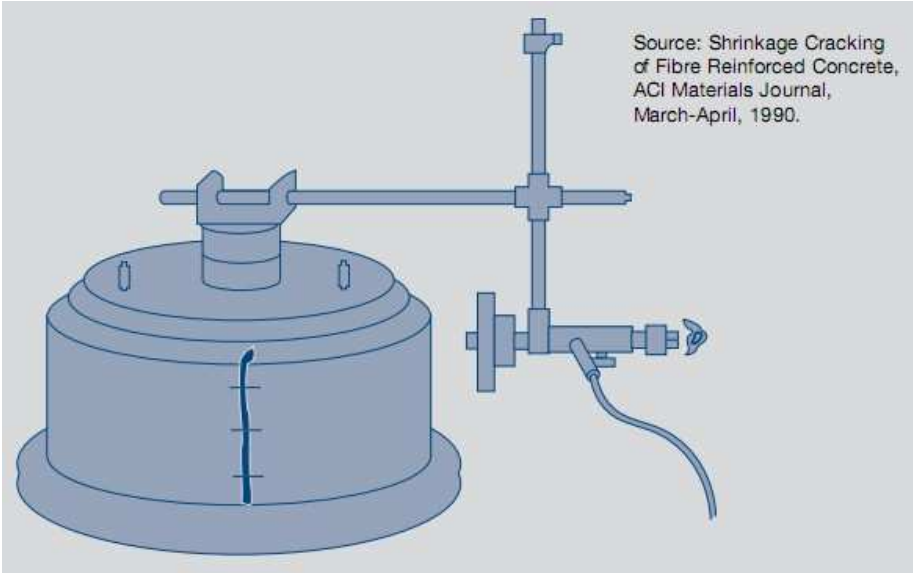
Μια απλούστερη εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση δοκιμίων σχήματος δακτυλιδιού (ring-type). Η χρήση των χαλύβδινων ινών μπορεί να μην μειώνει τη συνολική συστολή ξήρανση αλλά μπορεί να αυξήσει τον αριθμό των ρωγμών κι έτσι να μειώσει το μέσο πλάτος τους. Αποτελέσματα από τέτοιου είδους δοκιμές φαίνονται στο διάγραμμα 5.60.



Διάγραμμα 5.60: Μέσο άνοιγμα των ρωγμών ως προς την ποσότητα των ινών (ACI 544.1R)

Παρατηρούμε ότι για προσθήκες ακόμη και μικρής ποσότητας ευθείων και ομαλών ινών (0.25% κατ' όγκο), μήκους 25 mm και διαμέτρου 0.4 mm, μπορεί να μειώσει το μέσο πλάτος των ρωγμών, στο 1/5 περίπου της τιμής του άοπλου σκυροδέματος (ACI 544.1R).

Τέτοιες δοκιμές γίνονται με την χρήση καλουπιών, όπως αυτό της εικόνας 5.61, και καθώς το τσιμέντο συρρικνώνεται, καταγράφεται το άνοιγμα των ρωγμών συναρτήσει του χρόνου. Οι δοκιμές επαναλαμβάνονται για διάφορες προσθήκες ινών.

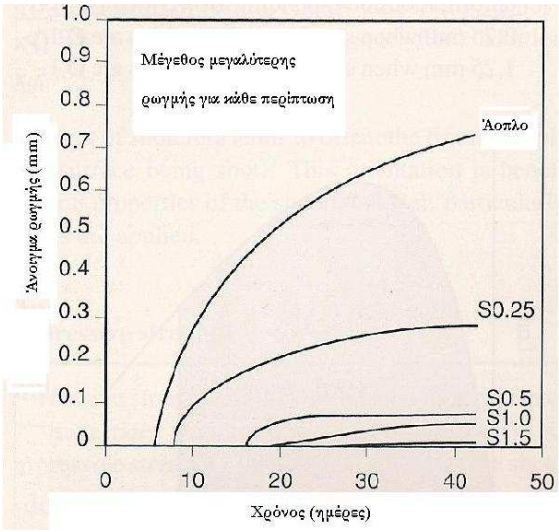


Εικόνα 5.61: Δοκιμή μέτρησης ανοίγματος ρωγμών με μικροσκόπιο (Radmix, 2006)

Σαν αποτέλεσμα της μείωσης του πλάτους των ρωγμών, οι εφελκυστικές τάσεις θα προκαλούν παραμορφώσεις, οι οποίες με την πάροδο του χρόνο θα μειώνονται, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.62.

Διάγραμμα 5.62: Εξέλιξη των παραμορφώσεων με το χρόνο (Radmix, 2006)

Δοκιμές σε ίδιου τύπου δοκίμια, για διάφορες ποσότητες ινών αλλά και για άοπλο σκυρόδεμα, έγιναν και από τους Grzybowski και Shah. Στο διάγραμμα 5.63 φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών. Αυτό που προκύπτει είναι ότι ακόμη και για μικρές προσθήκες ινών (0.25% κατ' όγκο ή 20 kg/m^3), μειώνεται σημαντικά το πλάτος της μέγιστης ρωγμής στο 1/9 περίπου (Vandewalle 1993).



Διάγραμμα 5.63: Άνοιγμα ρωγμών σε σχέση με το χρόνο για διάφορες ποσότητες ινών (Vandewalle, 1993)

Στην περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι κοινώς αποδεκτό ότι το υλικό κοντά στα άκρα του καλουπιού δεν έχει την ίδια καλή συμπύκνωση με το υπόλοιπο υλικό. Έτσι, σε ένα δοκίμιο σχήματος δακτυλιδιού η θραύση θα είναι μη αντιπροσωπευτική και το αποτέλεσμα μη αξιοποιήσιμα. Ένας εναλλακτικός τρόπος προτείνεται, σύμφωνα με τον οποίο το σκυρόδεμα πρέπει να εκτοξευτεί σε ένα πανέλο και έπειτα από αυτό να αποκοπεί το δοκίμιο από το κεντρικό κομμάτι και να συγκολληθεί σε μια άλλη επιφάνεια. Όταν η συστολή ξήρανσης ξεκινήσει πρέπει να έχει αναπτυχθεί πολύ καλό δέσιμο μεταξύ του σκυροδέματος και της νέας αυτής επιφάνειας αλλιώς οι ρηγματώσεις δε θα ξεκινήσουν να διαμορφώνονται. Έτσι, η επιφάνεια αυτή πρέπει να είναι σκληρή και άκαμπτη αλλά όχι μεγάλη και βαριά διότι τότε θα δυσκόλευε την εκτέλεση της δοκιμής (Leung, ASCE, Lee, Lai, 2005).

12.2.9 Αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες

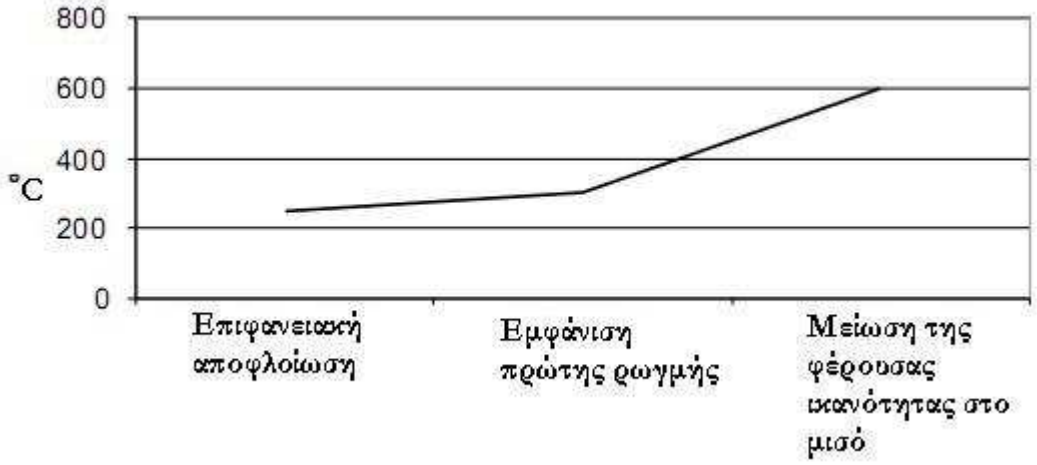
Ο σχεδιασμός των σηράγγων λαμβάνει υπόψη τους παράγοντες από τους οποίους επηρεάζονται στη διάρκεια της ζωής τους. Ένα σημαντικό στοιχείο που υπάρχει ακόμη και που δεν πρέπει να παραλείπεται είναι η πιθανή έκθεση σε φωτιά και το πώς αυτή αντιδρά με την επένδυση. Ο κίνδυνος φωτιάς είναι μεγάλος στα υπόγεια έργα ενώ υπάρχουν πολλά παραδείγματα από το παρελθόν που δεν προκάλεσαν μόνο υλικές καταστροφές αλλά και απώλεια ανθρώπινων ζωών (Maccaferri). Συνεπώς, πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος αλληλεπίδρασης της φωτιάς με τις ίνες και το σκυρόδεμα και να εξετάσουμε αν και κατά πόσον είναι ευεργετική η παρουσία τους μέσα σε αυτό.

Η παρουσία ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα αντανακλάται στη θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα, είναι δυνατόν να επιτευχθεί αύξηση στη θερμική αγωγιμότητα μέχρι και 40% σε σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα, παρόλο που το ινοπλισμένο έχει συνήθως μεγαλύτερο ποσοστό κενών αέρα. Έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση είναι μεγαλύτερη εάν χρησιμοποιηθούν χαλαζιακά αδρανή αντί ασβεστιτικών. Ο συντελεστής θερμικής διαστολής δεν επηρεάζεται από την παρουσία ινών.

Έχει αποδειχθεί επίσης ότι το οπλισμένο με ίνες χάλυβα σκυρόδεμα παρουσιάζει

μεγαλύτερη αντίσταση στις υψηλές θερμοκρασίες αφού αυτές βοηθούν να αποτραπεί το ράγισμα. Αντίθετα, στο συμβατικό οπλισμό παρατηρείται αποφλοίωση της επικάλυψής του. Κατά συνέπεια, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι κατάλληλο για εξειδικευμένες εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή θερμική αντίσταση, όπως επιστρώσεις στους βιομηχανικούς φούρνους ή για την προστασία κατασκευών υπό υψηλές θερμοκρασίες (Maidl, 1995).

Η έκθεση των δομικών υλικών σε υψηλές θερμοκρασίες έχει σα συνέπεια την μεταβολή των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών αυτών. Στο σκυρόδεμα, αυτό που παρατηρείται είναι επιφανειακές φθορές, δηλαδή αποφλοίωση τμημάτων του με συνέπεια τη μείωση του πάχους του. Το διάγραμμα 5.64 δείχνει το φαινόμενο αυτό με την αύξηση της θερμοκρασίας:



Διάγραμμα 5.64: Υποβάθμιση ποιότητας άοπλου σκυροδέματος με αύξηση της θερμοκρασίας (Maccaferri)

Το παραπάνω φαινόμενο εξελίσσεται ως εξής: Με την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σκυροδέματος, η υγρασία που αυτό περιέχει αρχίζει να εξατμίζεται και να μετακινείται στην εσωτερική πλευρά, όπου υπάρχει χαμηλότερη θερμοκρασία. Συνέπεια αυτού του φαινομένου είναι η αύξηση της εσωτερικής πίεσης και όταν αυτή ξεπεράσει τη χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος αρχίζουν να αποφλοιώνονται τα πρώτα τμήματα (Maccaferri).

Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι σκοπός είναι να περιορισθούν οι αρνητικές συνέπειες από την αύξηση της θερμοκρασίας στο σκυρόδεμα. Ειδικότερα, τα στοιχεία αυτά που πρέπει να εγγυηθούν την ασφάλεια σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι:

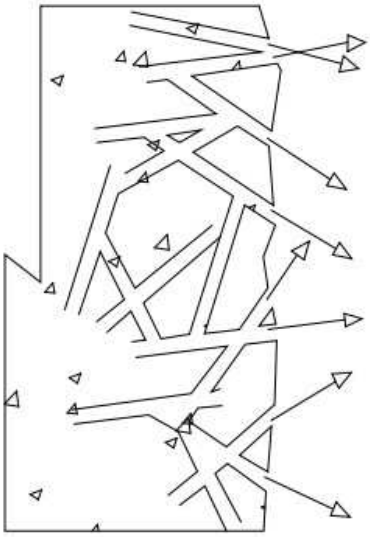
- Διατήρηση της ικανότητας υποστήριξης της επένδυσης.
- Αποφυγή εκπομπής εύφλεκτων αερίων στο μέτωπο που εκτίθεται στη φωτιά.
- Αποφυγή διασποράς αερίων ή της ίδιας της φλόγας.
- Θερμική μόνωση του εσωτερικού τμήματος του δομικού υλικού

Για να επιτευχθούν τα παραπάνω, δηλαδή η συνολική παθητική προστασία του σκυροδέματος, σπουδαίο ρόλο παίζουν τα πρώτα λεπτά από την έναρξη της φωτιάς. Επιπλέον, τότε είναι που πρέπει να γίνεται και η εκκένωση του χώρου.

Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι προσθήκη ινών μικρού μεγέθους (διάμετρος

μικρότερη από 20 μm και μήκος μικρότερο από 6 mm) από πολυπροπυλένιο, ή ακόμη και κυτταρίνης, έχουν πολύ ευεργετικά αποτελέσματα, αφού περιορίζουν σημαντικά το φαινόμενο της αποφλοίωσης. Επίσης, έδειξαν ότι υπάρχει άμεση συσχέτιση μεταξύ του ποσοστού των ινών αυτών και του βαθμού βελτίωσης της απόδοσης του σκυροδέματος.

Ο μηχανισμός που λειτουργούν οι ίνες αυτές είναι απλός. Όταν η θερμοκρασία φθάσει και ξεπεράσει τους 160° C αρχίζουν να λιώνουν μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Στη θερμοκρασία των 360° C, το πολυπροπυλένιο εξατμίζεται αφήνοντας κενό τον χώρο που καταλάμβανε μέχρι πριν. Τα κενά αυτά ενώνονται και φθάνουν μέχρι την επιφάνεια επιτρέποντας στο νερό που έχει πλέον εξατμιστεί να διαφύγει μέσα από αυτά και έτσι να μην ασκεί μεγάλες πιέσεις στο σκυρόδεμα. Ο μηχανισμός αυτός φαίνεται στην εικόνα 5.65.



Εικόνα 5.65: Δημιουργία κενών που δρουν ως δρόμοι διαφυγής για τα αέρια μέσα από το σκυρόδεμα (Maccaferri)

Πολλές απόψεις υπάρχουν σχετικά με την ποσότητα των ινών που πρέπει να προστεθούν ούτως ώστε να αποκτήσει το σκυρόδεμα ικανοποιητικά αποτελέσματα. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η προσθήκη ινών, τόσο καλύτερα αποτελέσματα θα έχουμε. Οδηγίες αναφέρουν ότι η προσθήκη πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 0.2 % κ.ό., ωστόσο αυτό εξαρτάται και από παράγοντες όπως η ποιότητα του σκυροδέματος και την εφαρμογή για την οποία προορίζεται.

Δοκίμια με ίνες προπυλενίου και άλλα χωρίς ίνες αλλά με συμβατικό οπλισμό δοκιμάστηκαν σε υψηλές θερμοκρασίες και τα αποτελέσματα είναι εμφανή από τις εικόνες 5.66 και 5.67.

Εικόνα 5.66: Δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες προπυλενίου μετά το τέλος της δοκιμής (Maccaferri)

Εικόνα 5.67: Δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες προπυλενίου μετά το τέλος της δοκιμής (Maccaferri)

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των παραπάνω δοκιμών γίνεται μέσω της μέτρησης της ποσοστιαίας απώλειας μάζας. Έτσι, ενώ στο σκυρόδεμα με ίνες έχουμε μια απώλεια της τάξης του 6% σε διάρκεια 90 λεπτών, για τον ίδιο χρόνο η αντίστοιχη τιμή της απώλειας είναι 18% για το σκυρόδεμα με το πλέγμα (Maccaferri).

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι οι μίκρο-συνθετικές ίνες, για τις οποίες έγινε λόγος παραπάνω, δε δίδουν καμία σχεδόν βελτίωση στα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Επίσης, αντίθετα σε ότι πιστεύεται, οι μάκρο-συνθετικές ίνες δεν έχουν σημαντική επίδραση στην αποφλοίωση του σκυροδέματος.

Οι φωτιές στις σήραγγες μπορεί να ανεβάσουν τις θερμοκρασία ακόμη και τους 1400° C. Το σημείο τήξης των συνθετικών ινών είναι από 150° έως 180° C, γεγονός ευνοϊκό στην περίπτωση των μίκρο-συνθετικών ινών αφού περιορίζουν το φαινόμενο της θραύσης του σκυροδέματος. Στην περίπτωση όμως των μάκρο-συνθετικών ινών, όταν εκτεθούν σε φωτιά, η κατάσταση από δομικής άποψης είναι πιο επικίνδυνη. Θα μαλακώσουν πολύ σύντομα και θα χάσουν την ικανότητά τους να παραλαμβάνουν

φορτία. Συνεπώς, καλό είναι να αποφεύγεται η χρήση των μάκρο-συνθετικών ινών για να παρέχει ενίσχυση στο σκυρόδεμα, η οποία μπορεί να χαθεί σε περίπτωση πυρκαγιάς.

Αντίθετα, οι χαλύβδινες ίνες δεν λιώνουν πριν τη θερμοκρασία των 1130° C κι έτσι έχουν την ικανότητα να ενισχύσουν καλύτερα το σκυρόδεμα. Έρευνα σε προκατασκευασμένα στοιχεία ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες, έδειξε βελτίωση της συμπεριφοράς του σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα. Στο τελευταίο, λόγω της θερμικής αγωγιμότητας των οπλισμών του, προκαλείται ταχεία αποφλοίωση και εκτίναξη των επιφανειακών τμημάτων του σκυροδέματος. Η προσθήκη όμως ινών πολυπροπυλενίου βοηθά στον περιορισμό του φαινομένου αυτού. Βέβαια, υπάρχει και η δυνατότητα να γίνει συνδυασμός των χαλύβδινων ινών με ίνες πολυπροπυλενίου για την ενίσχυση των προκατασκευασμένων τμημάτων, του έγχυτου αλλά και του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για τα υπόγεια έργα.

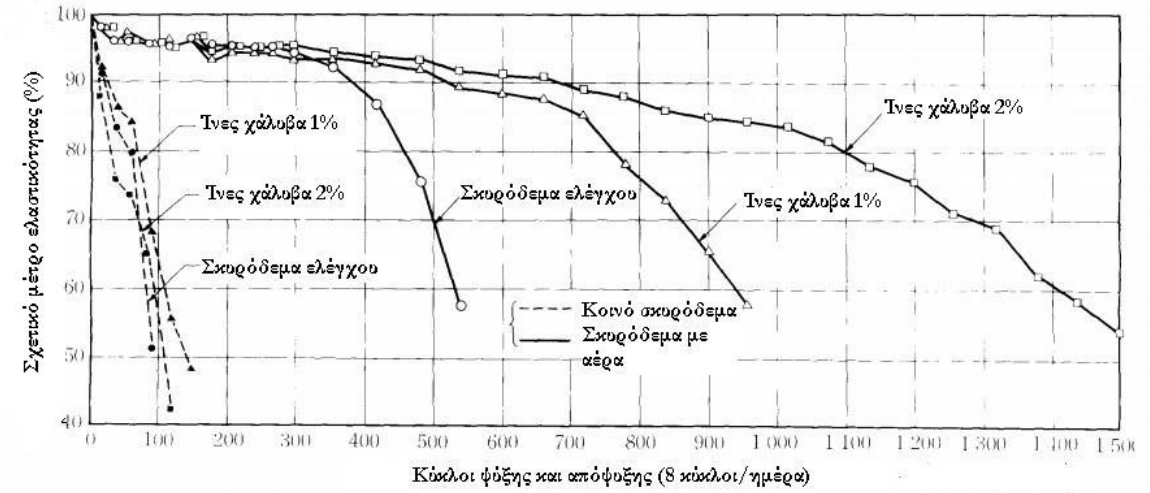
Τα παρακάτω συμπεράσματα προέρχονται απευθείας από την οδηγία CNR DT 204 2006. Με βάση την εμπειρία που έχει αποκτηθεί ως προς την επίδραση της φωτιάς στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα γνωρίζουμε ότι:

- Μικρές προσθήκες ινών (λιγότερο από 1%) δεν επηρεάζουν σημαντικά τη θερμική αγωγιμότητα, η οποία παραμένει μετρήσιμη με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα
- Η φθορά που προκλήθηκε σε ένα υλικό που θερμάνθηκε σε έναν κύκλο με θερμοκρασία 800° C, φάνηκε πως κυρίως συσχετίζεται με τη μέγιστη θερμοκρασία του κύκλου και έχει μη αντιστρέψιμα αποτελέσματα.
- Καθώς η θερμοκρασία της δοκιμής μπορεί να ποικίλει, η αντοχή της πρώτης ρωγμής συνδέεται άμεσα με αυτήν του σκυροδέματος. Από τη θερμοκρασία των 800° C και πάνω, οι ίνες βελτιώνουν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος.
- Καθώς η θερμοκρασία της δοκιμής μπορεί να ποικίλει, το μέτρο ελαστικότητας δεν επηρεάζεται λίγο από την παρουσία των ινών, ακόμη και όταν αυτές προστίθενται σε μικρό ποσοστό (<1%).

Για τις ίνες προπυλενίου, αναφέρεται ότι είναι αποτελεσματικές στον περιορισμό των συνεπειών από την αποφλοίωση του σκυροδέματος. Οι ίνες αυτές, σε θερμοκρασία 170° C αρχίζουν σταδιακά να λιώνουν, αφήνοντας ελεύθερα κενά στο σκυρόδεμα.

12.2.10 Αντίσταση σε μεταβολές της θερμοκρασίας

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ανθίσταται πολύ καλύτερα σε καταστάσεις γρήγορης μεταβολής της θερμοκρασίας (ψύξη και απόψυξη) όταν περιέχει αυξημένη ποσότητα αέρα στη μάζα του σε ποσότητα 5-6%. Όταν όμως έχουμε κοινό σκυρόδεμα, χωρίς αυξημένη ποσότητα αέρα, τότε οι ίνες φαίνεται ότι δεν αυξάνουν την ανθεκτικότητά του.



Διάγραμμα 5.68: Επιρροή της ψύξης και απόψυξης σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Kobayashi, 1983)

12.2.11 Αντίσταση σε διάβρωση

Η αντίσταση που παρουσιάζει το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στη διάβρωση κυριαρχείται από τους ίδιες παράγοντες που επηρεάζουν το συμβατικά οπλισμένο εκτοξευόμενο ή μη σκυρόδεμα. Όσο η δομή του παραμένει ακέραιη, δηλαδή χωρίς ρωγμές, και διατηρεί την αλκαλικότητα του, υποβάθμισή του δεν είναι πιθανό να συμβεί. Έχει παρατηρηθεί ότι όταν καλής ποιότητας ινοπλισμένα σκυροδέματα με ίνες χάλυβα (εκτοξευόμενα ή έγχυτα) εκτεθούν σε συνθήκες με όξινο περιβάλλον, όπως ατμοσφαιρική ρύπανση, αποθειωμένα χημικά ή θαλάσσιο περιβάλλον, θα ενανθρακωθούν σε βάθος λίγων χιλιοστών μετά από πολλά χρόνια. Οι χαλύβδινες ίνες που βρίσκονται επιφανειακά γρήγορα φθείρονται προκαλώντας την εμφάνιση μιας επιφάνειας σκωρίας. Το εσωτερικό όμως τμήμα παρολαυτά, παραμένει άθικτο, υπό την προϋπόθεση πάντα ότι το σκυρόδεμα δεν παρουσιάζει ρωγμές (Vandewalle, 1993).

Τα επιφανειακά μικροραγίσματα με τη διεύρυνση και τη μετάδοση τους σε βάθος ευνοούν αφενός την ενανθράκωση και κατ' επέκταση την προσβολή του σκυροδέματος από τα χλωριόντα του περιβάλλοντος και αφετέρου τη διάβρωση του χάλυβα από το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Κατά συνέπεια, η προσθήκη ινών σε ποσοστά της τάξεως του 1% κατά βάρος, προστατεύει το σιδηρό οπλισμό από τη διάβρωση. Το φαινόμενο της ενανθράκωσης του σκυροδέματος, είναι η ένωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) της ατμόσφαιρας με το υδροξείδιο του ασβεστίου που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και τη δημιουργία ανθρακικού ασβεστίου. Γίνεται με ρυθμό περίπου 1 mm το χρόνο, μειώνοντας την αλκαλικότητα του σκυροδέματος με επιπτώσεις στην προστασία του χάλυβα (Κατσικογιάννη, 2004).

Σε περίπτωση ρωγμάτωσης, οι ίνες που εκτίθενται στη ρωγμή θα υπόκεινται στη διάβρωση. Αυτή όμως δεν θα επεκταθεί σε όλο τον οπλισμό. Μέχρι πότε οι ίνες θα παραλαμβάνουν φορτία κατά μήκος της ρωγμής και θα περιορίζουν την διεύρυνσή της εξαρτάται από παράγοντες όπως:

- Από το πλάτος και το βάθος της ρωγμής.
- Από τον τύπο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών.
- Από τη σφοδρότητα του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

Μελέτες έχουν δείξει ότι παρόλη τη διαβρωτική δράση του θαλάσσιου περιβάλλοντος όταν το εύρος της ρωγμής είναι από 0.10 έως 0.30 mm, διατηρείται μέρος της αντοχής του υλικού, παρόλο που υφίσταται διάβρωση διότι οι ίνες μπορούν να αντέξουν μια σημαντική μείωση της διαμέτρου του πριν αστοχήσουν. Σε έντονες συνθήκες διάβρωσης, ενδείκνυται η χρήση ανοξείδωτου χάλυβα ή γαλβανισμένων ινών χάλυβα, προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με το πλέγμα είναι δεν επιτρέπουν την επέκταση της διάβρωσης όταν αυτή ξεκινήσει από τις επιφάνεια που εκτίθεται στο διαβρωτικό παράγοντα. Αυτό συμβαίνει διότι οι ίνες είναι μικρού μήκους και φυσιολογικά δεν έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, σε αντίθεση με το συμβατικό οπλισμό που είναι ενιαίος. Έτσι, δε δίδουν τη δυνατότητα στη διάβρωση να προχωρήσει μέσα από τη μάζα τους σε βάθος, μέσα στο σκυρόδεμα.

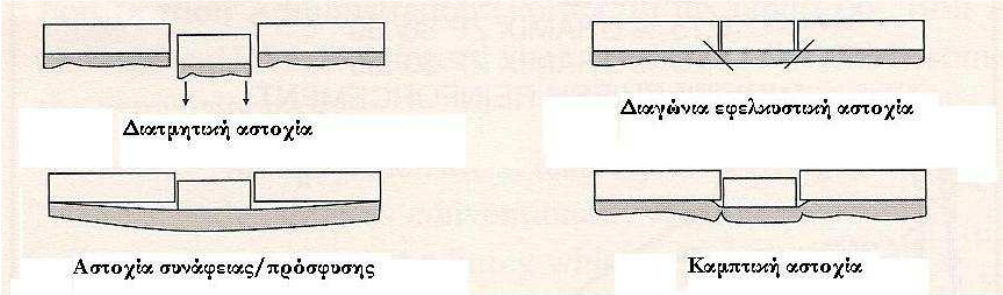
Στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, πολλές ίνες μπορεί να βρίσκονται στην επιφάνεια ή ακόμη και να προεξέχουν. Αυτές οι ίνες μπορεί να διαβρωθούν και να κηλιδώσουν την επιφάνεια, αλλά δεν προκαλούν αδυναμία στην κατασκευή. Σε περίπτωση όμως που ακόμη και η σκουριά του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι αισθητικά ανεπιθύμητη, μία λεπτή επιφανειακή επίστρωση από άοπλο σκυρόδεμα (γνωστό και ως επικάλυψη ή τελείωμα) μπορεί να εφαρμοστεί για να καλύψει τις εκτεθειμένες και ίνες. Το πάχος αυτού του στρώματος είναι τουλάχιστον 10 mm και πρέπει να διαστρωθεί ως τελική επένδυση πριν τη σκλήρυνση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Vandewalle, 1993). Ο κανονισμός DIN 1045 περιέχει προδιαγραφές για την ελάχιστη επικάλυψη του χαλύβδινου οπλισμού η οποία ποικίλλει σύμφωνα με το περιβάλλον (Maidl, 1995).

Οι δοκιμές για τη μελέτη διάβρωσης γίνονται σε πολύ έντονες συνθήκες, ούτως ώστε να γίνεται συντομότερα η δοκιμή. Αυτό πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη στην κρίση των αποτελεσμάτων αυτών των δοκιμών. Εκτός από την όποια επιφανειακή σκουριά, δεν υπάρχουν αποδείξεις για διάβρωση σε υπάρχουσες επενδύσεις σηράγγων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Maidl, 1995).

Όπου υπάρχουν ακραίες συνθήκες διαβρωτικής δράσης ή όπου γίνεται ένας πιο συντηρητικός σχεδιασμός για λόγους ασφαλείας μπορεί να γίνει χρήση χαλύβδινων ινών με γαλβανισμένο χάλυβα. Μία ακόμη εναλλακτική λύση είναι η χρήση δομικών συνθετικών ινών. Αυτές δεν επηρεάζονται σημαντικά από την έκθεση σε αλμυρό νερό ή χλωριούχο νάτριο σε θερμοκρασίες από 20 έως 40 ^{o}C. Παρολαυτά μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία για να μην υπάρξει πρόβλημα στη λειτουργία τους είναι οι 60 ^{o}C. Έτσι, για περιπτώσεις που θεωρούμε ότι η διάβρωση επηρεάζει τις ίνες, υπάρχουν μοντέλα που προβλέπουν το βαθμό της ενανθράκωσης εάν εισάγουμε δεδομένα σχετικά με τις συνθήκες του περιβάλλοντος και του υλικού. Εάν καθορίσουμε μαζί με τα παραπάνω και τη διάρκεια ζωής του έργου, τότε αυτό που θα μας δώσει το μοντέλο είναι το βάθος επιρροής της. Στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, η απώλεια ινών λόγω διάβρωσης καθορίζει το πάχος του σκυροδέματος το οποίο θα θεωρείται άοπλο και δε θα συνεισφέρει στην καμτική αντοχή. Το πάχος αυτό θα πρέπει να μη λαμβάνεται υπόψη στο σχεδιασμό, δηλαδή να θεωρείται ότι δεν παραλαμβάνει φορτία, και μια τιμή της τάξης του 20% συνήθως χρησιμοποιείται (Wimpenny, Angerer, Cooper, Bernard, 2007).

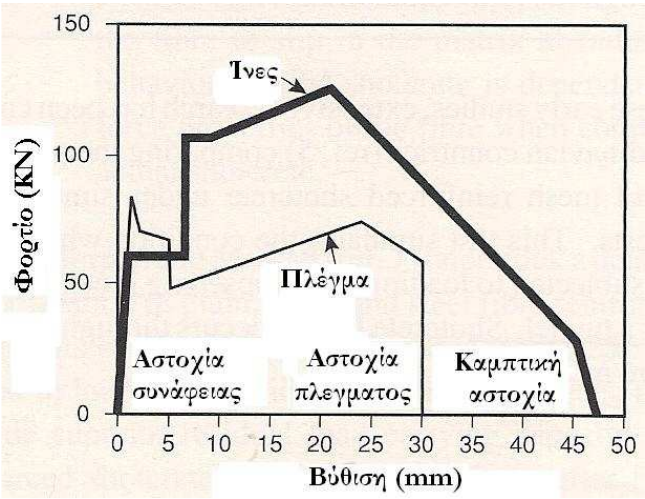
12.2.12 Δοκιμή πτώσης τεμάχους (falling block test)

Από τις πρώτες κιόλας έρευνες γύρω από το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και το πώς αυτό συγκρίνεται με το πλέγμα, μελετήθηκαν οι πιθανές μορφές αστοχίας της επένδυσης. Οι δοκιμές αυτές προσομοιώνουν τις συνθήκες εκείνες στις οποίες η επένδυση φορτίζεται από μια σφήνα, δηλαδή από ένα χαλαρωμένο τέμαχος βράχου. Οι αστοχίες έχουν την μορφή όπως φαίνεται στην εικόνα 5.69.



Εικόνα 5.69: Μορφές αστοχίας εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε δοκιμές πτώσης τεμάχους (Vandewalle, 1993)

Η μορφή της αστοχίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η αντοχή της επένδυσης, το πάχος της, η συνάφειά της με την επιφάνεια διάστρωσης και το μέγεθος του χαλαρωμένου τεμάχους. Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες έδειξε πολύ καλύτερη συμπεριφορά σε σχέση με το πλέγμα σε τέτοιες δοκιμές, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.70 (Vandewalle, 1993).

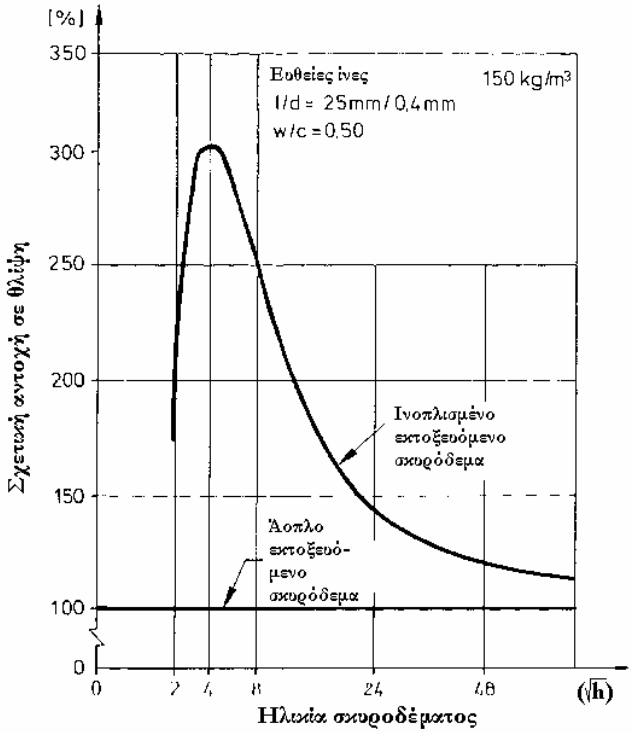


Διάγραμμα 5.70: Δοκιμή πτώσης τεμάχους για ίνες και πλέγμα (Vandewalle, 1993)

12.3 Πρώιμες αντοχές

Αμέσως μετά τη διάστρωση του, το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να προσφέρει αντίσταση στα φορτία μέσω της καλής του συνάφειας με την επιφάνεια διάστρωσης. Τότε είναι που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική αύξηση στη θλιπτική αντοχή. Η παρουσία των ινών εμποδίζει τις εσωτερικές δομικές μετατοπίσεις. Αυτή η επίδραση των ινών μειώνεται καθώς προωθείται η διαδικασία σκλήρυνσης έως ότου ο μόνος ρόλος που διαδραματίζουν, από την άποψη της φέρουσας ικανότητας, είναι στη σχέση των μέτρων ελαστικότητας του χάλυβα και του σκυροδέματος. Το διάγραμμα

5.71 παρουσιάζει την ανάπτυξη της αντοχής του οπλισμένου με ίνες χάλυβα εκτοξευόμενου σκυροδέματος κατά τη διάρκεια του χρόνου σε σχέση με το άοπλο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Maidl, 1995).



Διάγραμμα 5.71: Αρχική θλιπτική αντοχή ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε σχέση με το άοπλο εκτοξευόμενο (Maidl, 1995)

Αν και οι περισσότερες δοκιμές δίνουν μια ένδειξη της καμπτικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι δοκιμές θλίψης θεωρούνται καλύτερες για την μελέτη της συμπεριφοράς του στα υπόγεια έργα, στις πρώτες ώρες μετά την διάστρωση διότι σε πολλές περιπτώσεις οι επενδύσεις των σηράγγων φορτίζονται σε θλίψη. Γενικά υπάρχει η αντίληψη ότι οι ίνες δεν προσφέρουν σημαντικά στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, λόγω του μικρού όγκου που καταλαμβάνουν. Η άποψη αυτή είναι σωστή για το σκυρόδεμα 28 ημερών. Οι πρώιμες αντοχές όμως επηρεάζονται σημαντικά όπως φαίνεται παρακάτω (Ding, Kusterle, 1999).

Δοκιμές σε κυβικά δοκίμια με ακμή 200 mm έγιναν από τους Ding, Kusterle (1999) με ρυθμό βύθισης του εμβόλου 1 mm/min. Έτσι, για διάφορες προσθήκες χαλύβδινων ινών (με γαντζωτά άκρα, λόγου μορφής 60) εκτελέσθηκε η δοκιμή έπειτα από τα χρονικά διαστήματα που φαίνονται στον πίνακα 5.72.

Ηλικία σκυροδέματος (h)	Θλιπτική αντοχή (N/mm²)					
	8	10	18	30	48	72
Σκυρόδεμα χωρίς ίνες	1.86	4.03	13.89	25.87	32.56	36.06
SFRC 20 kg/m³	2.35	5.11	18.63	26.33	32.65	37.52
SFRC 40 kg/m³	2.5	5.08	15.5	23.5	32.44	37.13
SFRC 60 kg/m³	1.8	3.8	15	25	33.3	37

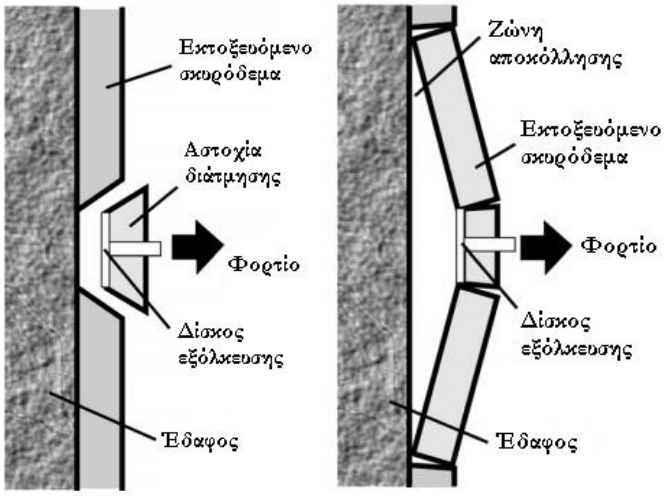
Πίνακας 5.72: Ανάπτυξη θλιπτικών αντοχών με το χρόνο (Ding, Kusterle, 1999)

Από τα στοιχεία του πίνακα 5.72 φαίνεται ότι οι καλύτερες τιμές θλιπτικής αντοχής εξασφαλίζονται για 40 kg/m^3 στις 8 και 10 ώρες. Πιθανότατα λόγω της κακής συμπύκνωσης και της μεγάλης ποσότητας αέρα η αντοχή με 60 kg/m^3 ινών δε βελτιώνεται ή ακόμη και μειώνεται. Ωστόσο, αν και δεν είχε τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή παρουσίασε την μεγαλύτερη πλαστιμότητα σε θλιπτικά φορτία στις 8 και 10 ώρες. Το φορτίο συνέχισε να αυξάνει ακόμη και μετά από την εμφάνιση μεγάλων ρωγμών στο δοκίμιο. Επίσης, αφού επετεύχθη η μέγιστη αντοχή, το φορτίο διατηρήθηκε σε υψηλά επίπεδα για μερικά λεπτά ενώ στα υπόλοιπα δοκίμια υποχωρούσε σημαντικά λίγο μετά τη θραύση (Ding, Kusterle, 1999).

Όταν το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται σαν στοιχείο υποστήριξης, η μελέτη των πρώιμων αντοχών είναι ιδιαίτερα σημαντική και από οικονομικής άποψης, αφού επηρεάζει τον συνολικό ρυθμό προχώρησης της εκσκαφής. Πέρα από τις σήραγγες, το πρόβλημα αυτό γίνεται δυσκολότερο σε μεταλλευτικά έργα όπου η γεωμετρία ποικίλει συνεχώς και τα ανοίγματα μπορεί να γίνονται μεγαλύτερα. Έτσι, μέχρι σήμερα ο χρόνος που πρέπει να περάσει για να μπορέσει το προσωπικό να μπει με ασφάλεια στο μέτωπο υπολογίζεται με διάφορους τρόπους. Η επί τόπου μέθοδος δίνει αποτελέσματα που διαφέρουν συνήθως από μεταλλείο σε μεταλλείο. Άλλη μέθοδος είναι να βασισθεί κανείς στην εμπειρία από το έργο και να καθορίσει μια σταθερή χρονική περίοδο αναμονής μέχρι την ασφαλή είσοδο στο μέτωπο. Τέλος, μπορεί να γίνει μέτρηση της αντοχής των πρώιμων αντοχών του ινοπλισμένου σκυροδέματος και έτσι να καθορίζεται η δυνατότητα ασφαλούς εισόδου. Δυστυχώς, καμία από αυτές τις μεθόδους δεν έχει πλήρως μελετηθεί ή αναπτυχθεί ως μια επιστημονική προσέγγιση της αντοχής της επένδυσης. Το αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το όριο μεταξύ ασφάλειας και κινδύνου μεταξύ του προσωπικού δεν είναι επακριβώς γνωστό (Bernard, 2007).

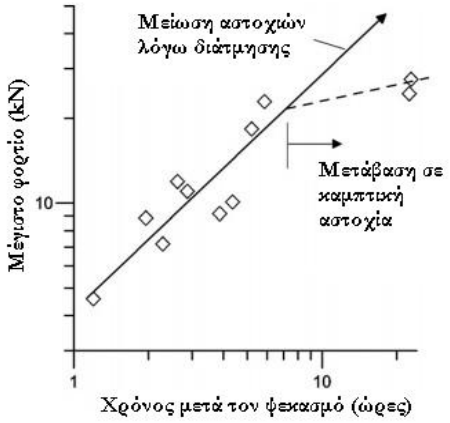
Συνεπώς, αυτό που χρειάζεται είναι μια μελέτη της επένδυσης που θα λαμβάνει υπόψη τις φορτίσεις, τις μορφές αστοχίας και τις επιδόσεις των υλικών, σα συνάρτηση του χρόνου. Για την ακόλουθη ανάλυση, δύο μορφές αστοχίας περιλαμβάνονται και αφορούν αποκλειστικά αστοχίες πρώιμου ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος που συναντήθηκαν με τη μεγαλύτερη συχνότητα σε μεταλλεία. Οι αστοχίες αυτές έχουν να κάνουν με αποκόλληση πλακών από την υπόλοιπη επένδυση και από την επιφάνεια εκτόξευσης ή αστοχίες τύπου καταρροών όπου αποκολλάται τμήμα της επένδυσης η οποία είναι όμως συγκολλημένη σε χαλαρά υλικά. Μεγάλης έκτασης αστοχίες μετά την εκτόξευση του σκυροδέματος παρατηρούνται πολύ σπάνια κι έτσι δεν περιλαμβάνονται εδώ (Bernard, 2007).

Εργαστηριακές και επί τόπου δοκιμές σε επενδύσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος έδειξαν ότι υπάρχουν δύο κύρια είδη αστοχιών, δηλαδή σε διάτμηση και κάμψη. Αρχικά γίνεται η εκτόξευση του ινοπλισμένου σκυροδέματος και έπειτα από διάφορα χρονικά διαστήματα ακολουθούν οι δοκιμές εξόλκευσης για την παρατήρηση των μορφών αστοχίας. Αυτές είναι δύο μορφών και φαίνονται στην εικόνα 5.73.



Εικόνα 5.73: Αστοχία σε διάτμηση και κάμψη κατά την εξόλκευση του δίσκου (Bernard, 2007)

Η αστοχία σε διάτμηση είναι η βασική μορφή αστοχίας που λαμβάνει χώρα τις πρώτες ώρες μετά την εκτόξευση. Με την πάροδο όμως του χρόνου, η μορφή αστοχίας τείνει να αλλάζει και οφείλεται σε κάμψη. Στην αστοχία λόγω διάτμησης έχουμε υψηλή αρχικό φορτίο, το οποίο όμως μετά τη θραύση μειώνεται απότομα. Αντίθετα, στην αστοχία λόγω κάμψης το φορτίο συνεχίζει να αυξάνει και μετά τη θραύση, όχι όμως με τόσο μεγάλο ρυθμό, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.74



Διάγραμμα 5.74: Μετάβαση από αστοχία διάτμησης σε κάμψης με την πάροδο του χρόνου στις δοκιμές εξόλκευσης (Bernard, 2007)

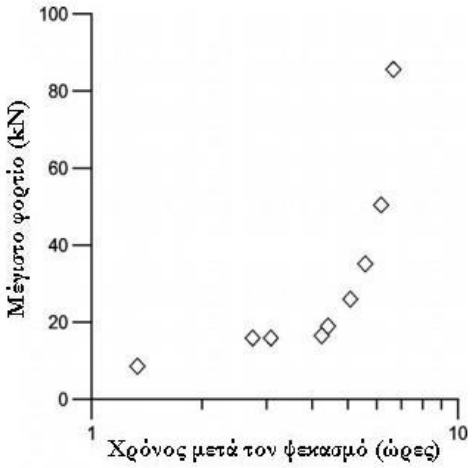
Η μετάβαση από τη μια μορφή αστοχίας στην άλλη ελέγχεται από το ξεκίνημα της αποκόλλησης της επένδυσης από την επιφάνεια εκτόξευσης και έτσι εξαρτάται από τη δύναμη συνάφειας που αυτές αναπτύσσουν μεταξύ τους.

Η πειραματική διαδικασία επίσης περιελάμβανε και μέτρηση της πρώιμης θλιπτικής αντοχής καθώς και της δύναμης συνάφειας μεταξύ εδάφους και επένδυσης. Επειδή το σκυρόδεμα δεν έχει αποκτήσει υψηλές αντοχές, η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής δε μπορεί να γίνει με κυλινδρικά δοκίμια κι έτσι γίνεται είτε έμμεσα είτε μέσω δοκών που έχουν κατασκευαστεί για το σκοπό αυτό.

Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας έδειξαν ότι πιο συχνή μορφή αστοχίας είναι αυτή της διάτμησης. Η αστοχία λόγω κάμψης κυρίως συνδέεται με το φαινόμενο της μη ικανοποιητικής συνάφειας μεταξύ επένδυσης και εδάφους. Τα παραπάνω

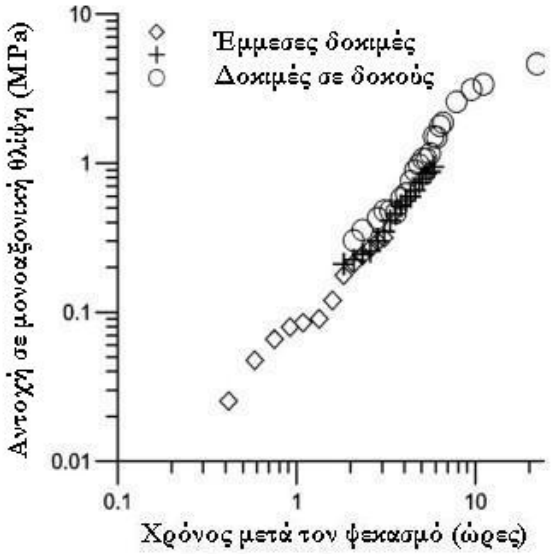
συμπεράσματα επιβεβαιώνονται εκτός από τις πειραματικές διαδικασίες και από τις επί τόπου παρατηρήσεις των αστοχιών.

Από όλες τις δοκιμές εξόλκευσης και τις αντίστοιχες καμπύλες φορτίου - παραμόρφωσης προέκυψε ότι το μέγιστο φορτίο αυξάνεται σχετικά γρήγορα σα συνάρτηση του χρόνου. Ωστόσο, η συμπεριφορά μετά τη θραύση χαρακτηρίζεται από απότομη αλλαγή της παραμόρφωσης. Ωστόσο, αυτό που ενδιαφέρει εδώ είναι το μέγιστο φορτίο καθώς αυτό συνδέεται με την ανάπτυξη της διατμητικής δύναμης στο χρόνο. Κάτι τέτοιο φαίνεται στο διάγραμμα 5.75, το οποίο προέκυψε από στοιχεία για μία δοκιμή.



Διάγραμμα 5.75: Μέγιστο φορτίο συναρτήσει του χρόνου, μετά την εκτόξευση, για διατμητικές αστοχίες, (Bernard, 2007)

Όταν γίνει συνδυασμός των παραπάνω με στοιχεία που αφορούν την ανάπτυξη της αντοχής σε θλίψη σε σχέση με το χρόνο, τότε μπορεί να προκύψει μια σχέση μεταξύ διατμητικής και θλιπτικής αντοχής. Το διάγραμμα 5.76 έχει προκύψει από μια τυπική δοκιμή.



Διάγραμμα 5.76: Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συναρτήσει του χρόνου μετά την εκτόξευση (Bernard, 2007)

Τέλος, οι δοκιμές συνάφειας ήταν επιτυχημένες, υπό την έννοια ότι η αστοχία προήλθε από την αποκόλληση του σκυροδέματος από την επιφάνεια εκτόξευσης και όχι από διάτμηση.

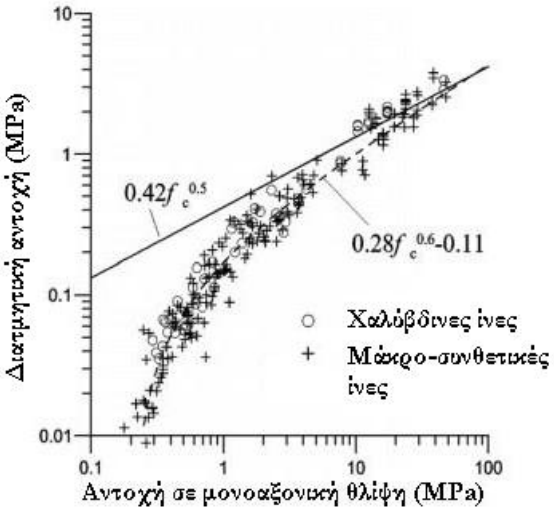
Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς της επένδυσης σύμφωνα με όσα προέκυψαν από τις πειραματικές διαδικασίες. Βασισμένοι σε παρατηρήσεις αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε διάτμηση, φαίνεται ότι τα μοντέλα που προβλέπουν την αντοχή του σκληρυμένου σκυροδέματος μπορούν να εφαρμοσθούν κι εδώ. Έτσι, η πρώιμη αντοχή (V) σε διάτμηση της επένδυσης θα υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$V = v \times p \times t \quad (1) \text{ (Bernard, 2007)}$$

Όπου: v = η αντοχή σε διάτμηση του σκυροδέματος
p = η κρίσιμη περίμετρος
t = το πάχος της επένδυσης

Το παραπάνω μοντέλο βασίζεται ότι η ζώνη που αστοχεί αντιστοιχεί σε έναν κώνο ο οποίος περιβάλλεται από μια κρίσιμη περίμετρο. Η ευαισθησία των γεωμετρικών της χαρακτηριστικών δεν έχει επακριβώς καθορισθεί, ωστόσο είναι επαρκής για τον σκοπό που χρησιμοποιείται. Η φυσική επιφάνεια αστοχίας του τμήματος που έχει αποκολληθεί λόγω διάτμησης κυμαίνεται από 45^0 έως 70^0, ωστόσο στο σχεδιασμό η τιμή των 45^0 είναι αυτή που χρησιμοποιείται. Η τιμή της αντοχής v υπολογίζεται εμπειρικά διαιρώντας τη μετρούμενη τιμή V στην αστοχία προς την επιφάνεια p*t.

Στη συνέχεια, εκφράζεται η σχέση μεταξύ διατμητικής και θλιπτικής αντοχής. Αυτή δείχνει μια καλή, μη γραμμική όμως, συσχέτιση μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.77.



Διάγραμμα 5.77: Διατμητική αντοχή συναρτήσει της θλιπτικής, από όλες τις δοκιμές (Bernard, 2007)

Η σχέση ανάμεσα στην διατμητική και θλιπτική αντοχή για το σκληρυμένο σκυρόδεμα δίδεται από τη σχέση:

$$v = 0.34\sqrt{f_c'} \quad (2) \text{ (AS3600, 2001)}$$

Όπου: f_c' = η χαρακτηριστική αντοχή σε μονοαξονική θλίψη (συνήθως λαμβάνεται ως το 90% της αντοχής f_c.

Επειδή όμως η σχέση (2) είναι σχετικά συντηρητική, χρησιμοποιείται η σχέση:

$$v = 0.42\sqrt{f_c} \quad (3) \text{ (Bernard, 2007)}$$

Παρολαυτά, και οι δύο αυτές σχέσεις δείχνουν να υπερεκτιμούν τις δυνατότητες της αντοχής σε διάτμηση των πρώιμων αντοχών του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Έτσι, για το λόγο αυτό η σχέση (3) προσαρμόσθηκε ως εξής:

$$v = 0.28 f_c^{0.6} - 0.11 \quad (4) \text{ (Bernard, 2007)}$$

Η σχέση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τα δεδομένα του διαγράμματος 5.77 ενώ συμφωνεί και με τη σχέση (3) στο επάνω μέρος της.

Τέλος, έγινε και προσπάθεια της εύρεσης της διατμητικής τάσης που μπορεί να φέρει η επένδυση. Βέβαια, τα παρακάτω ισχύουν με την προϋπόθεση να έχουμε αστοχία σε διάτμηση, και όχι κάμψη, γεγονός που σημαίνει ότι έχουμε ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και εδάφους. Επίσης, δε λαμβάνεται υπόψη η περίπτωση μεγάλης έκτασης αστοχίας εδάφους. Έτσι, θεωρούμε μια κυκλική περιοχή ακτίνας r, με σκοπό να εκτιμήσουμε την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ώστε να είναι αυτό ικανό να σταθεροποιήσει το χαλαρό υλικό. Το φορτίο P που δρα είναι άθροισμα του βάρους της ίδιας της επένδυσης και του επιφόρτισης P' που σχετίζεται με το υλικό:

$$P = \rho \times \pi \times r^2 \times t + P' \quad (5) \text{ (Bernard, 2007)}$$

Όπου: ρ = η πυκνότητα του σκυροδέματος (συνήθως 2,350 kg/m^3)

Η αντίσταση της επένδυσης V σε διάτμηση μπορεί να υπολογισθεί, σύμφωνα με την (1), ως εξής:

$$V = 2 \times v \times \pi \times r \times t \quad (6) \text{ (Bernard, 2007)}$$

Η αστοχία θα συμβεί όταν το φορτίο P υπερβεί την αντίσταση V, δηλαδή όταν:

$$v < \frac{\rho \times r}{2} + \frac{P'}{2 \times \pi \times r \times t} \quad (7) \text{ (Bernard, 2007)}$$

Συνεπώς, από τη σχέση (7), γνωρίζοντας το βάρος και την κρίσιμη ακτίνα μιας δυνητικής σφήνας τότε μπορούμε να βρούμε την ελάχιστη διατμητική τάση που πρέπει να αποκτήσει το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για να τη σταθεροποιήσει με ασφάλεια. Στη συνέχεια, από τη διατμητική αντοχή μπορούμε μέσω της (4) να υπολογίσουμε την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη που απαιτείται και η οποία είναι στην πράξη πιο εύκολο να μετρηθεί.

Επιπλέον, για τον υπολογισμό του χρόνου ασφαλούς εισόδου στο μέτωπο μπορεί να γίνει και η αντίστροφη διαδικασία. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να δώσει την αντίστοιχη διατμητική και αυτή με τη σειρά της να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής της επένδυσης. Εάν η τελευταία ξεπερνά με αρκετή διαφορά τα φορτία που σχετίζονται με τα χαλαρά υλικά που πιθανόν υπάρχουν, τότε η επένδυση είναι έτοιμη να υποδεχθεί ξανά το προσωπικό. Πρέπει όμως για να ισχύει αυτό να έχει εξασφαλισθεί η ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ επένδυσης και εδάφους, διότι σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να έχουμε αστοχίες λόγω κάμψης. Εάν αυτό συμβεί, ισχύει εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της πίεσης υποστήριξης.

12.4 Συμπεριφορά Υβριδικών Συστημάτων

Τα υβριδικά συστήματα ινών, δηλαδή αυτά που περιέχουν παραπάνω από ένα είδος ινών, προσφέρουν τα πλεονεκτήματα του κάθε ενός είδους ξεχωριστά. Η συνηθισμένη ανάμιξη είναι ίνες από χάλυβα με συνθετικές. Σύμφωνα με πειράματα των Eswari, Raghunath και Suguna (2008), ένα σύστημα με ίνες 2% κατ' όγκο και ποσοστό χαλύβδινων - μάκρο-συνθετικών ίσο με 70 - 30 αντίστοιχα, βελτιώνει σημαντικά την πλαστιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η καμπτική αντοχή (Modulus of Rupture) του αυξάνει έως και 72.52% σε σχέση με το κοινό ινοπλισμένο σκυρόδεμα και 186.49% σε σχέση με το άοπλο. Επιπλέον παρουσιάζουν μειωμένο άνοιγμα ρωγμών, έως και 80%, ενώ απορροφούν πολύ μεγαλύτερα ποσά ενέργειας (έως και 83%).

Σύμφωνα με στοιχεία άλλης έρευνας (Z. Deng και J. Li, 2006), που αναφέρεται σε δοκιμές με χαλύβδινες ίνες και συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου υψηλών επιδόσεων (HPP), η ενέργεια θραύσης (G_f κατά RILEM 1985) στο σκυρόδεμα με 1% συνθετικές και 0.5% χαλύβδινες είναι δύο φορές μεγαλύτερη από αυτή του άοπλου και 23% μεγαλύτερη από αυτή του σκυροδέματος με 1.5% συνθετικές.

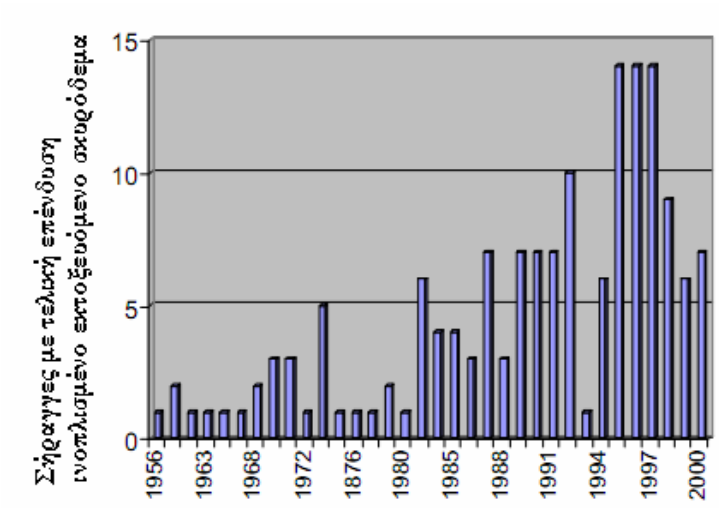
13. Συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος σε βάθος χρόνου

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν τελική επένδυση σε μια σήραγγα. Στην περίπτωση αυτή, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της συμπεριφοράς του σε βάθος χρόνου και όχι μόνο σε ορίζοντα 28 ημερών, όπου γίνονται οι περισσότερες εργαστηριακές δοκιμές.

Η χρήση των επιταχυντών χωρίς αλκάλια (alkali-free) και της τεχνολογίας υγρής εκτόξευσης, οι προσωρινές επενδύσεις των σηράγγων μπορούν να γίνουν η μόνιμη επένδυση. Πρόκειται για μια κατασκευή μονού κελύφους που για να γίνει τελική επένδυση απαιτεί ένα λεπτότερο εξωτερικό στρώμα για να περιορισθεί η υδατοπερατότητά της και να βελτιωθεί η αισθητική της. Βέβαια εκεί που αυτοί οι παράμετροι δεν είναι σημαντικοί, το λεπτότερο αυτό στρώμα δε χρειάζεται (Melbey, Dimmock, 2001).

Με τη χρήση της παραπάνω τεχνικής, δηλαδή υγρή μίξη και επιταχυντές ελεύθεροι αλκαλίων, στη σήραγγα North Downs (U.K.) παρατηρήθηκε μείωση του κόστους κατά £10M από τα £80M που αρχικά είχε εκτιμηθεί (Melbey, Dimmock,

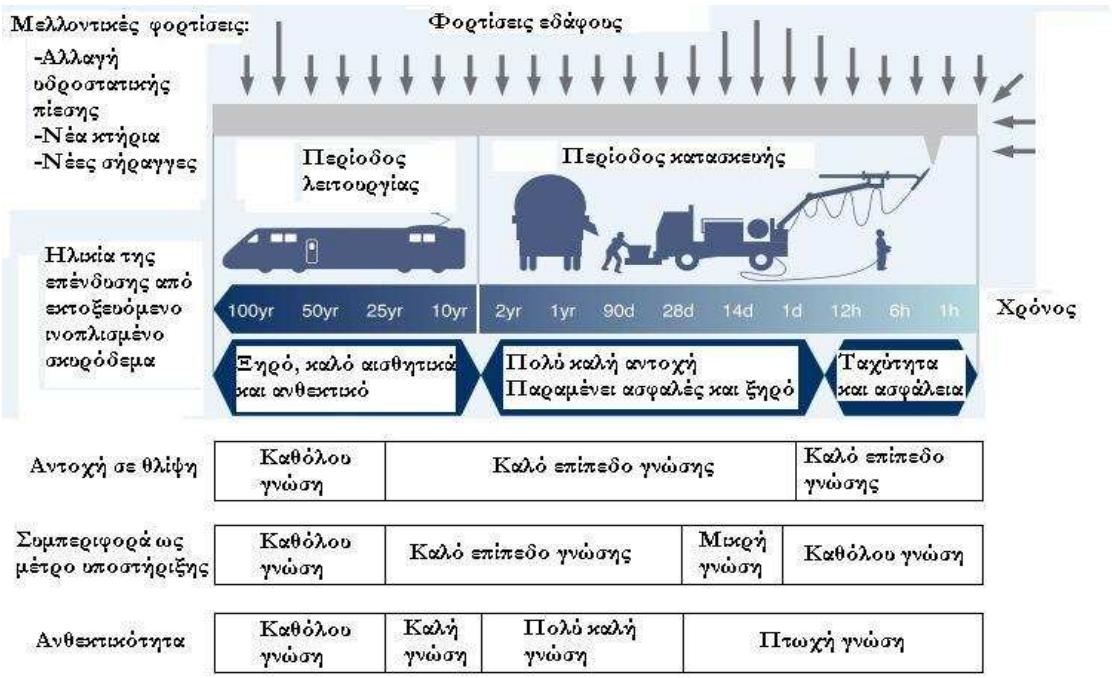
2001). Έτσι, με αυτό κατά νου, η χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως προϊόν τελικής επένδυσης συνεχώς κερδίζει έδαφος στις σήραγγες όπως φαίνεται στο γράφημα 5.78.



Γράφημα 5.78: Αριθμός σηράγγων από όλο τον κόσμο με τελική επένδυση ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανά χρονολογία (ITA-AITES, 2000).

Με τη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος για τελική επένδυση, οι ιδιότητες που πρέπει να εξετάζονται σε βάθος χρόνου είναι κυρίως η συνοχή, η πυκνότητα, η υδατοπερατότητα και η αντοχή σε θλίψη και σε διάβρωση (Melbey, Dimmock, 2001).

Η εικόνα 5.79 απλοποιεί τις γνώσεις που έχουμε μέχρι σήμερα σχετικά με το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις τελικές επενδύσεις σηράγγων. Τόσο στην περίοδο κατασκευής, όσο και στην περίοδο λειτουργίας, φαίνονται οι πληροφορίες που είναι πλέον διαθέσιμες.



Εικόνα 5.79: Μακροπρόθεσμη και βραχυπρόθεσμη γνώση για το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις τελικές επενδύσεις (Melbey, Dimmock, 2001)

Για μια πληρέστερη κατανόηση της συμπεριφοράς των παραπάνω, πρέπει να γίνουν ορισμένες επισημάνσεις:

- Για τις πρώιμες αντοχές σε θλίψη έχουμε αποτελέσματα μέσω έμμεσων δοκιμών.
- Καθώς το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα άρχισε να ανθεί από τη δεκαετία του 70 κι έπειτα, η εκτίμηση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε βάθος χρόνου που έχει γίνει βασίζεται σε δοκίμια που έχουν ληφθεί επί τόπου, πολύ περισσότερο στη Νορβηγία. Τα συμπεράσματα από αυτές τις μελέτες έδειξαν ότι οι αντοχές σε θλίψη παρόμοιες με αυτές των 28 ημερών. Οι ίνες παρουσίαζαν σημάδια διάβρωσης κοντά στις πλευρές που εκτίθενται στην επιφάνεια, ωστόσο στο εσωτερικό της επένδυσης βρέθηκαν ελάχιστα δείγματα διάβρωσης. Επίσης, αν υπολογίσουμε ότι τα μίγματα αυτά είχαν λόγο νερό/τσιμέντο πάνω από 0.45, η ανθεκτικότητα των σημερινών επενδύσεων που έχουν τον αντίστοιχο λόγο χαμηλότερο, θα είναι σαφώς καλύτερη.
- Όπως φαίνεται από την εικόνα 5.79, σημαντικές πιέσεις ασκούνται στην επένδυση σε απόσταση πίσω από μία διάμετρο εκσκαφής από το μέτωπο. Εκεί, το σκυρόδεμα είναι ηλικίας περίπου μιας ημέρας και έτσι στο στάδιο αυτό συμπεριφέρεται πλαστικά, επιτρέποντας τις παραμορφώσεις και την ανακατανομή των τάσεων. Παρολαυτά, ο ρόλος που παίζουν οι ίνες σε αυτό το στάδιο δεν έχει αναλυτικά εκτιμηθεί.
- Πολλές πληροφορίες υπάρχουν για την μετά τη θραύση συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος που είναι πολύ χρήσιμες για τους σκληρούς βράχους. Στις πτωχότερες όμως βραχομάζες, δεν έχει τόσο μεγάλο ενδιαφέρον η συμπεριφορά αυτή. Σημαντικοί παράγοντες είναι η καμπτική αντοχή σα συνάρτηση του είδους της ίνας και η κατασκευή μιας επένδυσης που δε θα ρηγματώνεται (Melbey, Dimmock, 2001).

13.1 Συστολή και ερπυσμός

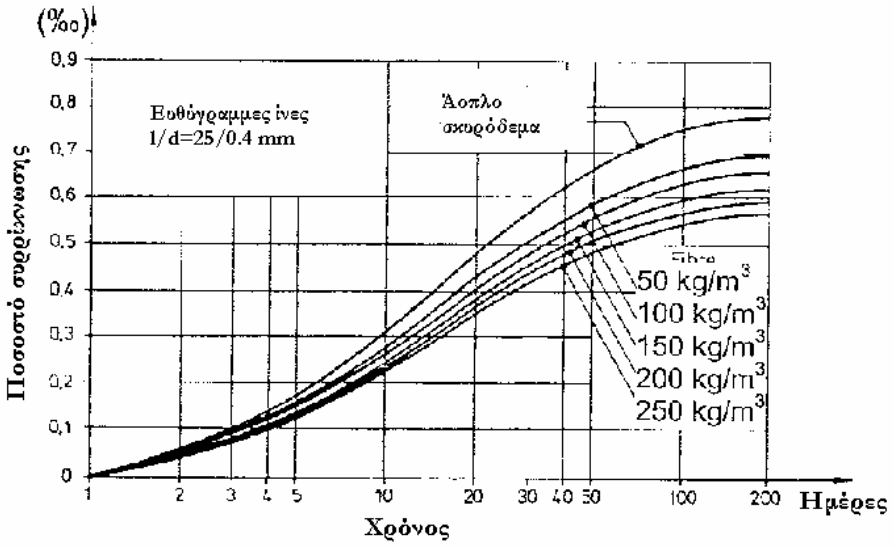
Σκοπός εδώ είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε καθεστώς φόρτισης σε βάθος χρόνου. Μετά την πρώτη θραύση του σκυροδέματος, οι εφελκυστικές τάσεις ανακατανέμονται στις ίνες, οι οποίες λειτουργούν σαν «γέφυρες». Εφόσον το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εξακολουθεί να φέρει φορτία καθώς και νέες ρωγμές αρχίζουν να αναπτύσσονται, τότε γίνεται κατανοητό ότι ο ερπυσμός των ινών είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος (Allen, 2009).

Το σκυρόδεμα αντιδρά στις μεταβολές της υγρασίας με διαστολή. Η απώλεια υγρασίας οδηγεί στη συρρίκνωση της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας και στο σχηματισμό μικρορωγμών συστολής ξηράνσεως. Εφόσον η τσιμεντόπαστα δεν ενανθρακώνεται, η συρρίκνωση και η αφυδάτωση αναπτύσσονται σχεδόν ανάλογα. Εάν η συστολή δεν πραγματοποιείται υπό περιορισμό, οι χαλύβδινες ίνες παρέχουν «εσωτερική» αντίσταση στη διαστολή του σκυροδέματος, λόγω του υψηλότερου μέτρου ελαστικότητας. Ωστόσο, εάν το ποσοστό χαλύβδινων ινών σε σχέση με το συνολικό όγκο σκυροδέματος είναι χαμηλό (1% κατ' όγκο ή λιγότερο), η επίδραση των ινών στην έκταση της συστολής δεν είναι αξιοσημείωτη. Εάν, εντούτοις, αναπτυχθεί εσωτερική τάση λόγω καταπόνησης, η οποία είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος, τότε θα αναπτυχθούν ρωγμές στο υλικό. Σε αυτήν την περίπτωση, χαρακτηριστικά όπως η το ελάχιστο πλάτος της ρωγμής και η κατανομή των

ρωγμών, θα παίζουν τώρα ρόλο.

Σημαντική είναι και η αύξηση θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης που μπορεί να οδηγήσει σε ρωγμές. Είναι όμως αδύνατο να ελεγχθεί αυτή η παράμετρος επαρκώς με τη βοήθεια της τεχνολογίας και της κατανομής του οπλισμού (Maidl, 1995).

Ο ερπυσμός της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας είναι μια εξαιρετικά σύνθετη διαδικασία. Η κύρια αιτία βρίσκεται στη μετατόπιση του νερού μεταξύ των ορίων του κολλοειδούς πήγματος. Κατά συνέπεια, η διαδικασία ερπυσμού εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε νερό. Μία εντελώς αφυδατωμένη τσιμεντόπαστα δεν θα παρουσιάσει σχεδόν καθόλου το φαινόμενο του ερπυσμού. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, που γεννάται συνήθως από θλιπτικές τάσεις και δεν συνδέεται με το σχηματισμό ρωγμών, η επιρροή των ινών είναι ελάχιστη. Δεδομένου ότι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι δυσκολότερο ως προς την εργασιμότητά του, ο όγκος των κενών αέρα στην τσιμεντόπαστα είναι γενικά υψηλότερος απ' ότι στο άοπλο σκυρόδεμα. Ως αποτέλεσμα αυτού, παρά την προσθήκη των ινών, μπορεί να υπάρξει μια ονομαστική αύξηση στην τιμή του ερπυσμού, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.80 (Maidl, 1995).



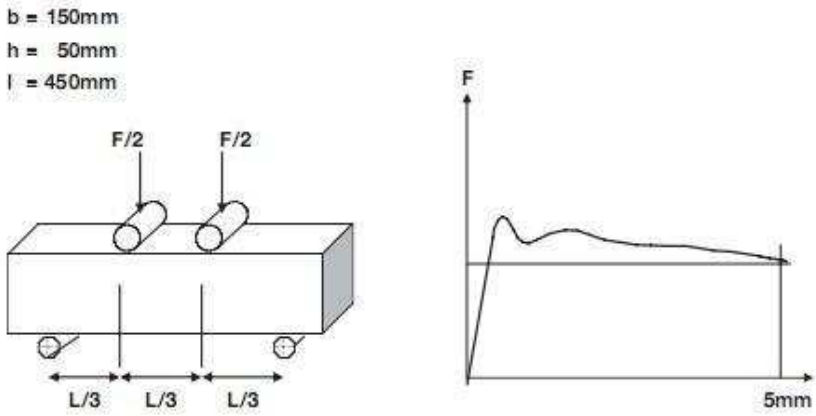
Διάγραμμα 5.80: Επιρροή ινών χάλυβα στη συρρίκνωση του σκυροδέματος (Maidl, 1995)

Δοκιμές της εταιρίας Bekaert για την μελέτη του ερπυσμού του ινοπλισμένου σκυροδέματος έδειξαν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ χαλύβδινων και συνθετικών ινών. Όπως ήδη τονίσαμε, κάθε είδος ίνας πρέπει να αντιμετωπίζεται εντελώς διαφορετικά. Έτσι, όπως θα δούμε παρακάτω, οι ίνες πολυπροπυλενίου τείνουν να έρπουν 10 έως 30 φορές περισσότερο από τις ίνες χάλυβα.

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε δοκίμια που είχαν υποστεί την πρώτη θραύση και έπειτα τοποθετήθηκαν στην ειδική μηχανή φόρτισης με δυνατότητα μέτρησης της βύθισης (εικόνα 5.81), όπως συνήθως περιγράφεται από τα περισσότερα διεθνή πρότυπα.

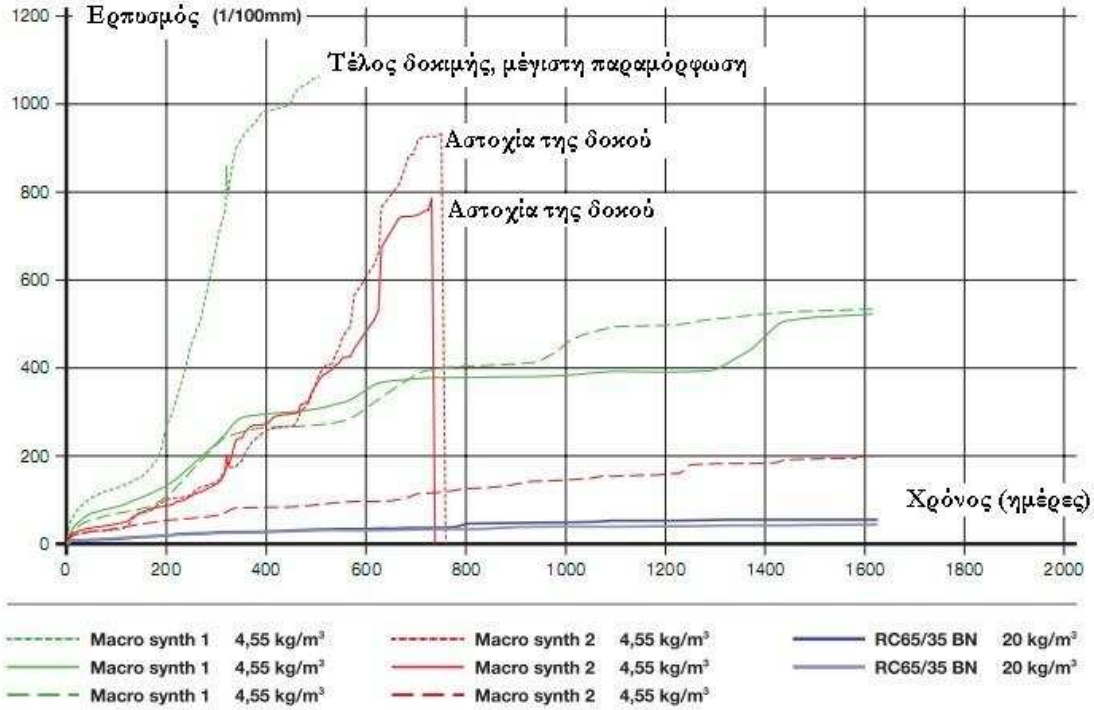
Εικόνα 5.81: Δοκιμή ερπυσμού, δοκίμιο με χαλύβδινες ίνες μετά από 1.600 ημέρες (Bekaert, 2008)

Όταν η βύθιση έφθασε τα 5 mm, το φορτίο αφαιρέθηκε. Το παραμένον φορτίο στην φάση αυτή μπορεί να βρεθεί μέσω του διαγράμματος 5.83.



Εικόνα 5.82: Φορτίο εφαρμογής = 50% του παραμένοντος φορτίου στα 5mm (Bekaert, 2008)

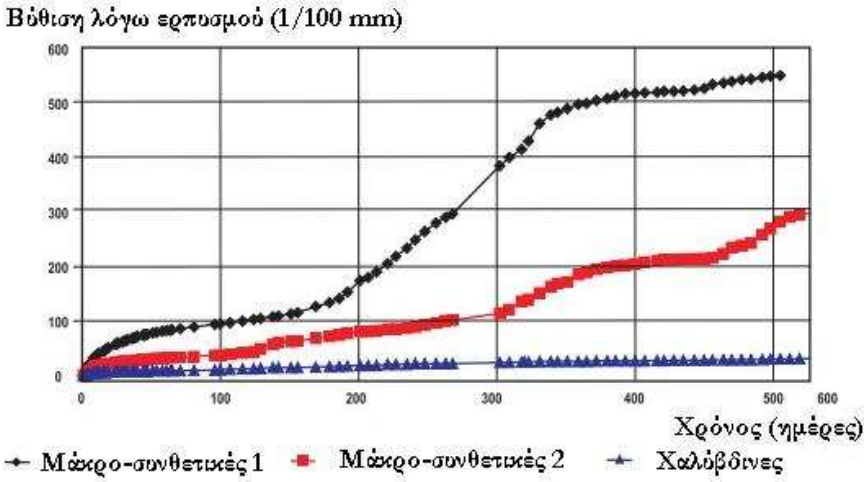
Τα δοκίμια είναι τώρα έτοιμα και τοποθετούνται στη συσκευή φόρτισης τεσσάρων σημείων (εικόνα 5.82). Αυτό που μετράται είναι η βύθιση, όπως αποτυπώνεται στο διάγραμμα 5.83. Επιρροές από θερμοκρασία και υγρασία δε λαμβάνονται υπόψη.



Διάγραμμα 5.83: Δοκιμές ερπυσμού σε ίνες πολυπροπυλενίου και χάλυβα (Bekaert, 2008)

Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν μάκρο-συνθετικές ίνες δύο τύπων και χαλύβδινες ενός τύπου. Από τις καμπύλες του διαγράμματος 5.83 προκύπτει ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου τείνουν να έρπουν 10 έως 30 φορές περισσότερο από τις αντίστοιχες χαλύβδινες. Επιπλέον, ένα ζευγάρι ινών προπυλενίου δεν κατάφερε καν να ολοκληρώσει το τεστ και έσπασε σε δύο κομμάτια μετά από 700 ημέρες. Τέλος, ο ερπυσμός των μάκρο-συνθετικών ινών δεν έχει τελειώσει ακόμη στην καμπύλη, καθότι αυτή δεν έχει σταθεροποιηθεί. Έτσι, αναμένεται επιπλέον ερπυσμός για τις συγκεκριμένες ίνες (Bekaert, 2008).

Παρόμοιο πείραμα ερπυσμού περιγράφεται και από τον Ratcliffe (2007) με σύγκριση χαλύβδινων και μάκρο-συνθετικών ινών, όπως φαίνονται στο διάγραμμα 5.84.



Διάγραμμα 5.84: Βύθιση λόγω ερπυσμού ως προς το χρόνο (Ratcliffe, 2007)

Όπως φαίνεται, οι μάκρο-συνθετικές ίνες τείνουν να έρπουν 7 έως 20 φορές περισσότερο μετά από έναν χρόνο. Επίσης, και μετά από το διάστημα αυτό συνεχίζουν

να επηρεάζονται σημαντικά από το φορτίο κι έτσι αναμένεται ότι με το χρόνο θα οδηγήσουν σε αστοχία (Ratcliffe, 2007).

Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι 200 GPa ενώ το αντίστοιχο των μάκρο-συνθετικών ινών ποικίλει από 2 έως 10 GPa. Έτσι, οι δεύτερες παρουσιάζουν μια ελαστοπλαστική συμπεριφορά και έτσι είναι απλό στο να καταλήξει κανείς στο ότι θα παρουσιάζουν υψηλότερα επίπεδα ερπυσμού απ' ότι οι χαλύβδινες (Allen, 2009).

14. Διαφορές μεταξύ χαλύβδινων και μάκρο-συνθετικών ινών

Γύρω στις αρχές της χιλιετίας, οι προμηθευτές μίκρο-συνθετικών ινών άρχισαν να διαθέτουν στην αγορά και μάκρο-συνθετικές ίνες ισχυριζόμενοι ότι μπορούν να παρέχουν τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά με τις χαλύβδινες, σε μικρότερο κόστος ανά κυβικό μέτρο και σε συνδυασμό με καλύτερη ανθεκτικότητα (δε σκουριάζουν). Το γεγονός όμως είναι ότι κάθε ίνα είναι διαφορετική και έχει αντίστοιχα τις εφαρμογές της και τα συμπεράσματα για τη χρήση τους δεν πρέπει να προκύπτουν μόνο από μια καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης.

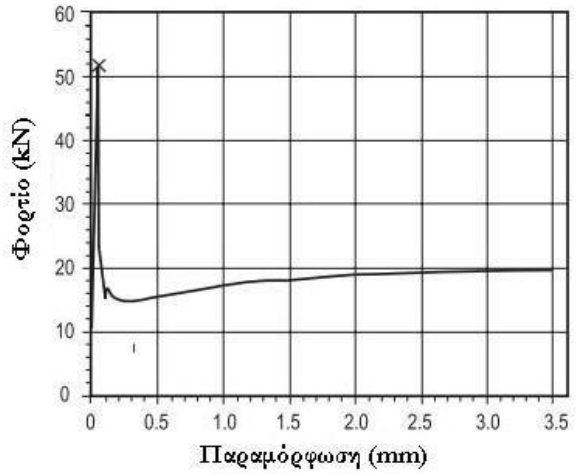
Οι μίκρο-συνθετικές ίνες έχουν συνήθως μήκος από 6 έως 12 mm και διάμετρο από 16 έως 35 μm και χρησιμοποιούνται για να μειώσουν τις μικρορωγμές κατά την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος αλλά και για προστασία από φωτιά. Έχουν μέτρο ελαστικότητας συνήθως από 3,000 έως 5,000 MPa και προφανώς χάνουν σταδιακά την όποια ενίσχυση προσφέρουν αφού το σκυρόδεμα σταδιακά αποκτά μέτρο ελαστικότητας 30,000 MPa. Οι μάκρο-συνθετικές ίνες έχουν διαστάσεις παρόμοιες με τις χαλύβδινες (μήκος συνήθως πάνω από 38 mm) και αναφέρεται συχνά ότι επιτελούν το ίδιο έργο (Ratcliffe, 2007).

Ένας περιορισμός των μάκρο-συνθετικών ινών είναι η χρήση τους σε ξηρά μίγματα εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Οι προσπάθειες που έχουν γίνει σε αυτόν τον τομέα έχουν αποτύχει διότι υπάρχει δυσκολία στην επίτευξη ενός ομοιογενούς μίγματος. Έτσι οι ίνες στη συνέχεια τείνουν να φράζουν τις σωληνώσεις σε όλο το μήκος του δικτύου μεταφοράς, μέχρι και το ακροφύσιο. Επιπλέον πρόβλημα είναι και η αυξημένη αναπήδηση με συνέπεια την πτωχή ποιότητα του υλικού της επένδυσης.

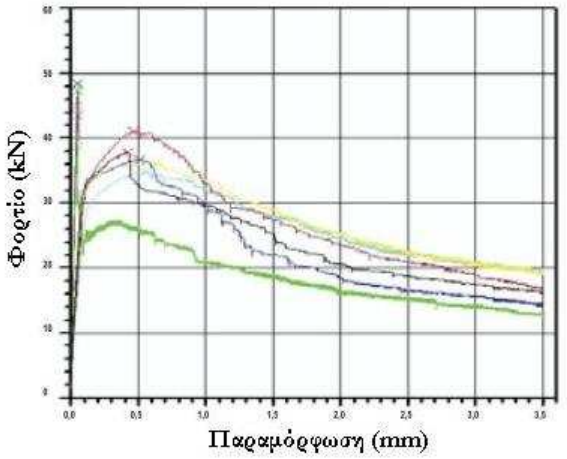
Υπάρχουν μερικές πιθανές αιτίες που εξηγούν τον λόγο για τον οποίο η αναπήδηση στην ξηρή μίξη είναι αυξημένη. Οι συνθετικές ίνες έχουν μικρό ειδικό βάρος (0.9) σε σχέση με τις χαλύβδινες (7.8) και αυτό μπορεί να τις οδηγεί στο διαχωρισμό τους από το μίγμα αμέσως μετά την εκτόξευση. Το φαινόμενο αυτό δε συμβαίνει στην υγρή μίξη διότι τότε οι ίνες είναι πιο καλά επικαλυμμένες με την τσιμεντόπαστα και κατά συνέπεια βαρύτερες όταν εξέρχονται από το ακροφύσιο. Τέλος, είναι ιδιαίτερα πιθανό ότι το μεγάλο τους μήκους στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (50 έως 65 mm) σε σχέση με τις χαλύβδινες (30 έως 35 mm) είναι υπεύθυνο για τα προβλήματα στη μίξη, μεταφορά και άντληση (Dufour, Trottier, Forgeron, 2006).

Ως προς τα χαρακτηριστικά τους, δύο είναι οι βασικές διαφορές μεταξύ μάκρο-συνθετικών και χαλύβδινων ινών. Το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα είναι 210,000 MPa με αντοχή σε εφελκυσμό από 800 έως 2,000 MPa. Οι συνθετικές ίνες έχουν τυπικά αντοχή σε εφελκυσμό από 300 έως 600 MPa και μέτρο ελαστικότητας γύρω στα 30,000

MPa. Αυτό που σημαίνουν τα παραπάνω δεδομένα είναι ότι οι ίνες χάλυβα παίρνουν φορτία από την δημιουργία των πρώτων κιόλας ρωγμών, οι οποίες έχουν πολύ μικρό πλάτος. Οι συνθετικές από την άλλη πλευρά, αρχίζουν να ενεργούν όταν έχουν ήδη δημιουργηθεί αρκετά μεγαλύτερες ρωγμές. Έτσι, ενώ οι χαλύβδινες αρχίζουν να ενεργούν όταν το άνοιγμα των ρωγμών είναι από 0.3-1 mm, οι συνθετικές ενεργούν στο άνοιγμα ρωγμών από 3 mm και πάνω. Η διαφορά μεταξύ τους σε δοκιμές σε δοκούς φαίνεται στα διαγράμματα 7.85 και 7.86. Για συνθετικές ίνες, το μίγμα περιέχει 1% κατ' όγκο (9.1 kg/m^3) και για χαλύβδινες 0.5% κατ' όγκο (40 kg/m^3). Η επιλογή αυτή έγινε έτσι ώστε να έχουμε και στα δύο μίγματα περίπου τον ίδιο αριθμό ινών ανά κυβικό μέτρο (Ratcliffe, 2007).



Διάγραμμα 5.85:Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης για μάκρο-συνθετικές ίνες 1% κατ' όγκο (Ratcliffe, 2007)



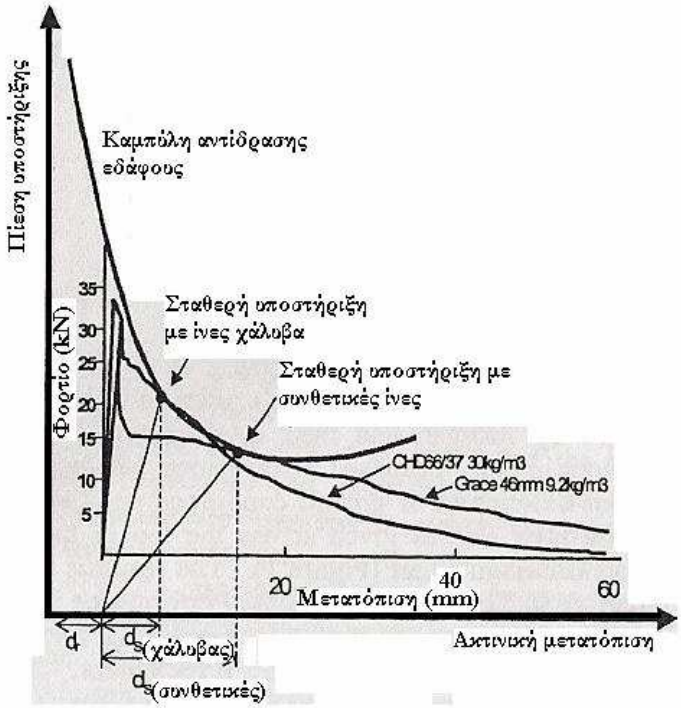
Διάγραμμα 5.86: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης για χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα 0.5% κατ' όγκο (Ratcliffe, 2007)

Έτσι, δεν υπάρχει αμφιβολία ότι οι μάκρο-συνθετικές ίνες μπορούν να παρέχουν ένα ικανοποιητικό επίπεδο ενίσχυσης, αν η δοσολογία τους είναι ικανή. Ωστόσο, οι καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης και αντίστοιχα οι δείκτες δυσθραυστότητας που συχνά χρησιμοποιούνται για να πείσουν προς την κατεύθυνση αυτή δεν περιλαμβάνουν παράγοντες όπως το πλάτος των ρωγμών ή την εργασιμότητα του μίγματος, που είναι εξίσου σημαντικοί. Τέλος, δεν ενδιαφέρει μόνο η τιμή του εμβαδού αλλά και το σχήμα της καμπύλης διότι έχει να κάνει με το πότε η ίνα αρχίζει να παραλαμβάνει φορτία

(Ratcliffe, 2007). Από τις καμπύλες φαίνεται ότι οι χαλύβδινες ίνες υπερτερούν σε ενέργεια απορρόφησης αλλά οι συνθετικές διατηρούν καλύτερα το φορτίο τους.

Στα υπόγεια έργα, όταν είναι επιθυμητό να διατηρούνται οι συγκλίσεις και οι ρωγμές στην επένδυση στο ελάχιστο δυνατό, τότε η χρήση των συνθετικών ινών δεν είναι η κατάλληλη επιλογή. Αντίθετα, σε μεταλλευτικά έργα όπου μπορεί να έχουμε πολύ μεγάλες συγκλίσεις και οι ρωγμές στην επένδυση δεν αποτελούν απαραίτητα πρόβλημα, οι μάκρο-συνθετικές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με πολύ καλά αποτελέσματα (Allen, 2009). Σα συμπέρασμα από τη σύγκριση των δύο ινών και με βάση δοκιμές σε 57 διαφορετικά μίγματα που δοκιμάστηκαν σε κάμψη σε δοκούς (Bernard 1999, 2000) τελικά προκύπτει ότι:

- Οι χαλύβδινες ίνες παρέχουν καλύτερη αντίσταση στο άνοιγμα των ρωγμών όταν αυτές ακόμη είναι πολύ μικρές
- Οι συνθετικές ίνες διατηρούν καλύτερα το φορτίο κατά μήκος των μεγάλων ρωγμών, σε αντίθεση με τις χαλύβδινες ίνες που τείνουν να χάνουν την ιδιότητά τους αυτή.



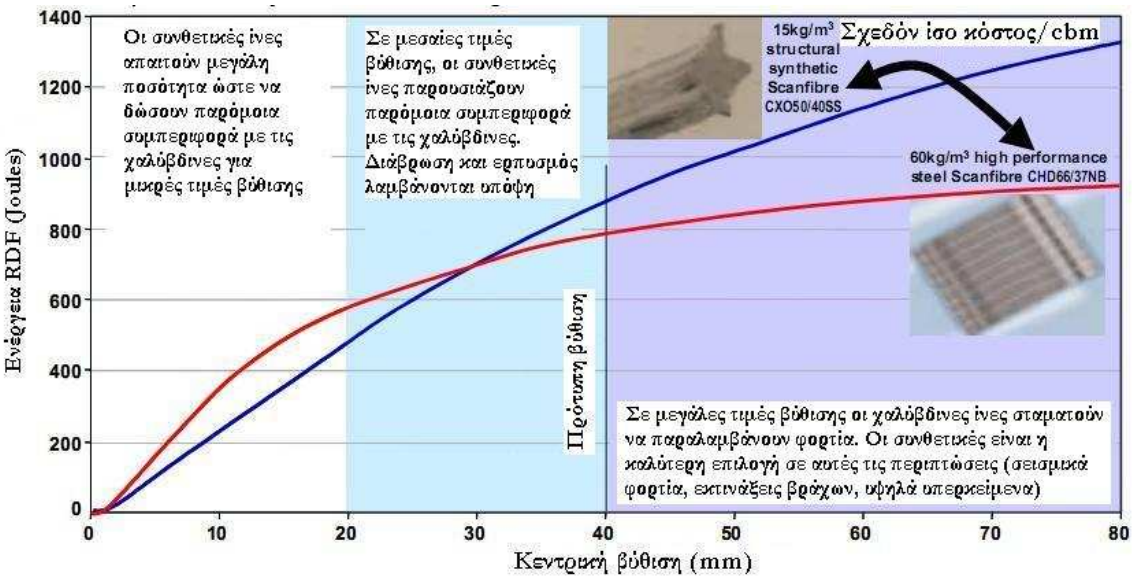
Διάγραμμα 5.87: Υποθετική αντίδραση εδάφους για χαλύβδινες και συνθετικές ίνες (Grant, Ratcliffe, Papworth, 2001)

Τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούμε να τα διαπιστώσουμε με την αντιπαραβολή των καμπύλων φορτίου - παραμόρφωσης με την αντίδραση του εδάφους (αποτόνωσης) (διάγραμμα 5.87). Από αυτό φαίνεται ότι οι συνθετικές ίνες δε μπορούν να ανταγωνιστούν τις χαλύβδινες σε χαμηλά επίπεδα βύθισης. Οι καμπύλες των χαλύβδινων και των συνθετικών ινών προέκυψαν από δοκιμές σε κυκλικές πλάκες (Bernard, 2000).

Στο διάγραμμα 5.87, ως d_r συμβολίζεται η ακτινική μετατόπιση πριν τοποθετηθεί η υποστήριξη και ως d_s η ακτινική μετατόπιση του υποστηριγμένου εδάφους που πρέπει να επιτευχθεί για να προκύψει ισορροπία.

14.1 Σύγκριση με βάση το κόστος

Ένα από τα πλεονεκτήματα που προβάλλεται συχνά για τη χρήση των συνθετικών ινών είναι η οικονομικότητά τους ως προς τις χαλύβδινες. Τυπικά, οι συνθετικές ίνες κοστίζουν τέσσερις φορές περισσότερο, με βάση την τιμή ανά κιλό, σε σχέση με τις χαλύβδινες. Το διάγραμμα 5.88 δείχνει τις επιδόσεις των χαλύβδινων και συνθετικών ινών που έχουν προστεθεί στο μίγμα με κριτήριο την επίτευξη ίσου κόστους ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος.



Διάγραμμα 5.88: Ενέργεια απορρόφησης για ίδιο κόστος ινών (Papworth, 2002)

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η συμπεριφορά τους δε διαφέρει σημαντικά μέχρι την πρότυπη βύθιση (η μέγιστη βύθιση που προβλέπει το πρότυπο ASTM C 1550 είναι 40 cm), με τις χαλύβδινες να υπερτερούν σε απορρόφηση ενέργειας σε μικρότερα επίπεδα βύθισης. Όσο όμως αυτή αυξάνει τόσο η διαφορά υπέρ των συνθετικών ινών γίνεται μεγαλύτερη. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι συνθετικές ίνες είναι αντιοικονομικές για χαμηλά επίπεδα παραμορφώσεων και πολύ οικονομικότερες σε εφαρμογές που αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις. Πρακτικά, από τα 40 mm βύθισης και πάνω η ενέργεια απορρόφησης των χαλύβδινων ινών σταματά να αυξάνει, γεγονός που σημαίνει ότι το φορτίο που παραλαμβάνουν τείνει προς το 0. Αντίθετα οι συνθετικές συνεχίζουν να παραλαμβάνουν φορτία (Papworth 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΙΞΗΣ ΚΑΙ ΕΚΤΟΞΕΥΣΗΣ

1. Εισαγωγή

Τυπικά, για τη μίξη και την εκτόξευση του ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος εξοπλισμός με αυτόν του συμβατικού εκτοξευόμενου σκυροδέματος. Η θέση αυτή υποστηρίζεται και από τους κατασκευαστές των ινών για την προώθηση του προϊόντος τους. Αντίθετα, οι εργολάβοι του έργου θέλουν να περιορίσουν στο ελάχιστο τις φθορές του εξοπλισμού τους, για το λόγο αυτό αντιμετωπίζουν πολλές φορές τις ίνες με επιφύλαξη.

Βέβαια, η επιρροή των ινών πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή του εξοπλισμού για πολλούς λόγους. Η εργασιμότητα του μίγματος είναι ένας από τους παράγοντες που μπορεί να δημιουργήσει πολλά εμπόδια στην επιτυχημένη εκτέλεση της εργασίας καθώς συχνά υπάρχει η τάση για φράξιμο των σωληνώσεων. Το μήκος των ινών είναι ένας από τους κυριότερους παράγοντες που παίζουν ρόλο στην εκδήλωση του φαινομένου αυτού. Για τεχνικούς λόγους, πρέπει να είναι περιορισμένο στα 2/3 της διαμέτρου της σωλήνωσης. Επίσης προτείνεται το μήκος τους να μην είναι μεγαλύτερο από το 1/3 της διαμέτρου του ακροφυσίου. Τέλος, περιορισμοί επιβάλλονται και στην ποσότητα των ινών, με προσθήκες από 2% κατ' όγκο και πάνω να προκαλούν συνήθως προβλήματα εργασιμότητας (Maidl, 1995).

Γίνεται έτσι κατανοητό ότι μεταξύ ινών και εξοπλισμού υπάρχει αμφίδρομη σχέση. Η εφαρμογή του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ακατάλληλο εξοπλισμό πιθανότατα θα καταστρέψει όλες τις προσπάθειες που έγιναν για την ανάπτυξη ενός καλά σχεδιασμένου μίγματος και όλες τις υπόλοιπες ενέργειες που έγιναν για να παραχθεί υψηλής ποιότητας προϊόν. Μόνο ένα ισορροπημένο και αξιόπιστο σύστημα μίξης και εκτόξευσης μπορεί να εξασφαλίσει την απαιτούμενη ποιότητα και αποτελεσματικότητα.

Παράλληλα με την ανάπτυξη στην τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, υπάρχει και αντίστοιχα σταθερή ανάπτυξη στον τομέα του εξοπλισμού ώστε τα μηχανήματα να είναι συμβατά με τα νέα προϊόντα αλλά και τις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες στον κατασκευαστικό κλάδο. Το αποτέλεσμα είναι ότι πλέον υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία εξοπλισμού που καλύπτει όλες τις ανάγκες, από μεγάλες σήραγγες όπου απαιτούνται υψηλές παραγωγικότητες, μέχρι πολύ μικρότερες εργασίες. Κοινό στοιχείο σε όλες αυτές τις καινοτομίες στο μηχανικό εξοπλισμό είναι η τάση για αυτοματισμό της εργασίας εξασφαλίζοντας υψηλότερη παραγωγικότητα, συνέπεια και έλεγχο στην ποιότητα καθώς και ασφάλεια στο προσωπικό που χειρίζεται έναν φιλικό προς το χρήστη εξοπλισμό σε απόσταση από το σημείο της εκτέλεσης της εργασίας.

Η ανάπτυξη στην ξηρή μίξη θεωρείται ότι έχει φθάσει σε τέλμα και υπολογίζοντας την παγκόσμια τάση προς την εφαρμογή της υγρής μίξης η εξέλιξη του εξοπλισμού πλέον γίνεται σχεδόν αποκλειστικά στον τομέα της υγρής μίξης (Melbey, Dimmock, 2001).

Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, όπως έχει προαναφερθεί, οι ίνες προσανατολίζονται κάθετα προς την επιφάνεια ψεκασμού και ο βαθμός αυτός του προσανατολισμού αυξάνεται όσο αυξάνει και η ποσότητα και το μήκος των ινών. Επίσης, η χρήση των ινών

επηρεάζει και την αναπήδηση αφού αυτές τείνουν να αναπηδούν περισσότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα συστατικά του μίγματος. Οι παράμετροι αυτοί πρέπει να αξιολογούνται προσεκτικά στη φάση του σχεδιασμού και της επιλογής του εξοπλισμού (Maidl, 1995).

Τέλος, η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού γίνεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου, τη μελέτη σύνθεσης του μίγματος αλλά και τη διαθεσιμότητά του.

2. Μίξη

Η προσθήκη των χαλύβδινων ινών στο μίγμα αναλύθηκε στην παράγραφο 5 του κεφαλαίου 6. Συνεπώς, ο απαιτούμενος μηχανικός εξοπλισμός για την εκτέλεση της εργασίας είναι η βαρέλα του σκυροδέματος και οι τροφοδοτικές ταινίες, για την υγρή μίξη και οι αυτόματοι τροφοδότες για την υγρή και ξηρή μίξη.

Επιπλέον, υπάρχουν και φορητά συστήματα ανάμιξης για επί τόπου εκτέλεση της εργασίας. Τέτοιο μηχάνημα είναι για το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το ROBOMIX 7000 (εικόνα 6.1) της σουηδικής Vertex το οποίο έχει τροφοδότη για της ίνες και στο εμπρός μέρος μπούμα για εκτόξευση του σκυροδέματος. Υπάρχει μια αυξανόμενη τάση προς την κατασκευή τέτοιων μηχανημάτων που ενσωματώνουν όλες τις λειτουργίες (ανάμιξη και ψεκασμό) αφού προσφέρουν μειωμένο συνολικό κόστος (Maidl, 1995).

Εικόνα 6.1: ROBOMIX 7000 AS (Maidl, 1995)

Οι τροφοδότες των ινών είναι συστήματα στα οποία εισάγονται οι ίνες σε μεγάλες ποσότητες από τους μέγα σάκους και αυτοί στη συνέχεια παρέχουν μια σταθερή τροφοδοσία. Ένας τέτοιος τροφοδότης τελευταίας τεχνολογίας πλήρως αυτοματοποιημένος, είναι ο DINO 2000 (εικόνα 6.2). Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι παρεμποδίζει τη δημιουργία συσσωματωμένων ινών, είναι οικονομικός και φιλικός προς το περιβάλλον αφού οι συσκευασίες των ινών μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, είναι ασφαλής για το προσωπικό, εξοικονομείται χρόνος, η πιθανότητα λάθους στην τροφοδοσία μειώνεται στο ελάχιστο ενώ εγγυάται για την ποιότητα διότι έχει πίνακα ελέγχου και δυνατότητα εκτύπωσης των στοιχείων λειτουργίας του, όπως η ποσότητα των ινών που προσθέτει. Τέλος, έχει μεγάλη ικανότητα τροφοδοσίας, έως 200 kg/min.

Εικόνα 6.2: Τροφοδότης ινών DINO 2000 (Fasertechnik, 2007)

Η τροφοδοσία των ινών γίνεται είτε στο εργοτάξιο είτε στο εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος. Στην εικόνα 6.3 φαίνεται μια τέτοια περίπτωση, με την τροφοδοσία των ινών να γίνεται μαζί με αυτή των αδρανών και το μίγμα να οδηγείται στον αναμίκτη.

Εικόνα 6.3: Τροφοδοσία ινών στο παρασκευαστήριο σκυροδέματος (ΤΕΡΝΑ, 2009)

Εικόνα 6.4: Εξωτερική και εσωτερική όψη τροφοδότη (ΤΕΡΝΑ, 2009)

Οι ίνες εισάγονται χειροκίνητα στον τροφοδότη. Το «τύμπανο» στην εικόνα 6.4 αποτρέπει τις ίνες να σχηματίζουν συσσωματώματα και έτσι κατανέμονται ομοιόμορφα μαζί με τα αδρανή που διέρχονται στην μεταφορική ταινία.

Μικρότεροι και πιο ευέλικτοι τροφοδότες ινών, που μπορούν να μεταφέρονται με μεγάλη ευκολία και να δουλεύουν και στο εργοτάξιο, διαθέτουν σωλήνα που οδηγεί μέχρι την βαρέλα του σκυροδέματος κι έτσι δεν απαιτείται η χρήση μεταφορικής ταινίας για την ανύψωση των ινών. Τέτοιος τροφοδότης είναι ο DINO 60, ο οποίος φαίνεται στην εικόνα 6.5.

Εικόνα 6.5: Τροφοδότης ινών DINO 60 (Fasertechnik, 2007)

Ο συγκεκριμένος τροφοδότης μπορεί να εισάγει μέχρι και 50 kg ινών/min. Σε αυτές όμως τις περιπτώσεις πρέπει να γίνεται σωστή ανάμιξη των ινών στη βαρέλα. Προτείνεται οπωσδήποτε ένα λεπτό ως χρόνος ανάμιξης για κάθε κυβικό μέτρο σκυροδέματος.

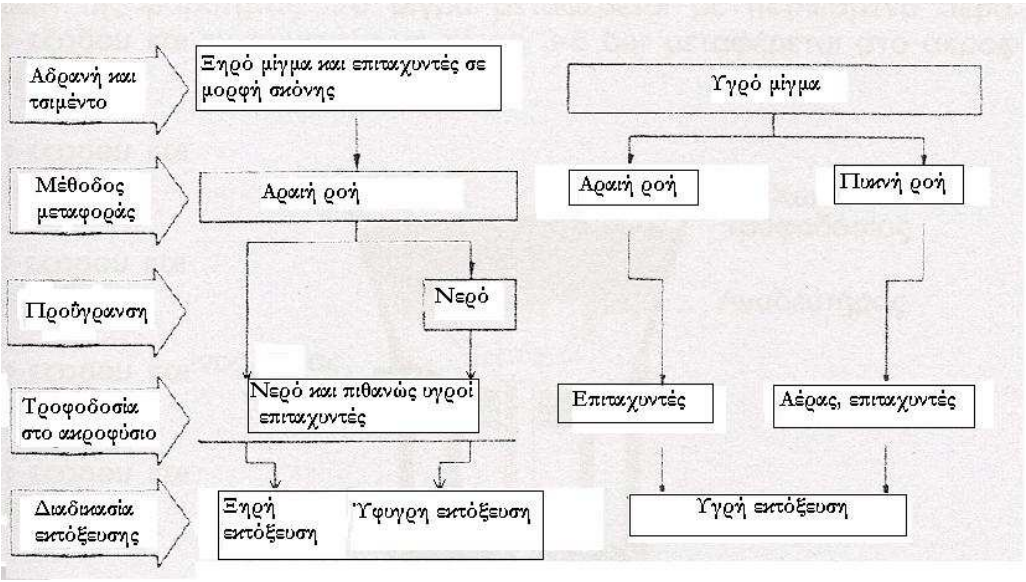
Τροφοδότες, όπως ο Elite II (εικόνα 6.6), μπορούν ακόμη και να διοχετεύουν δύο διαφορετικά είδη ινών ταυτόχρονα, εξασφαλίζοντας παράλληλα πολύ καλή ακρίβεια. Αυτό το επιτυγχάνει διότι είναι χωρισμένος σε δύο τμήματα τα οποία δουλεύουν ανεξάρτητα αλλά και ενιαία αν θέλει κανείς να τροφοδοτήσει ένα μόνο είδος ίνας. Ο συγκεκριμένος τροφοδότης είναι κατάλληλος για τροφοδοσία κομμένων συνθετικών ινών και δουλεύει κατά βάρος. Επίσης, είναι πλήρως αυτοματοποιημένος και παρέχεται σε τρία διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τις ανάγκες τροφοδοσίας.

Εικόνα 6.6: Τροφοδότης ινών Ellite II

Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η χειρονακτική τροφοδοσία των ινών πρέπει να θεωρείται πρακτική του παρελθόντος διότι δεν εξασφαλίζει ομοιογένεια στην τροφοδοσία ενώ θέτει το προσωπικό σε κίνδυνο. Οι τροφοδότες πλέον είναι οικονομικότεροι, σταθεροί και αξιόπιστοι αποτελώντας μονόδρομο για την εξασφάλιση ενός ποιοτικά ανώτερου σκυροδέματος.

3. Εκτόξευση

Στην παραγωγή του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, η τεχνολογία ψεκασμού χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τις γνωστές τεχνικές μίξης, δηλαδή την ξηρή και την υγρή. Ένα γενικό πλάνο με τα στάδια ροής της διαδικασίας φαίνεται στο διάγραμμα 6.7.



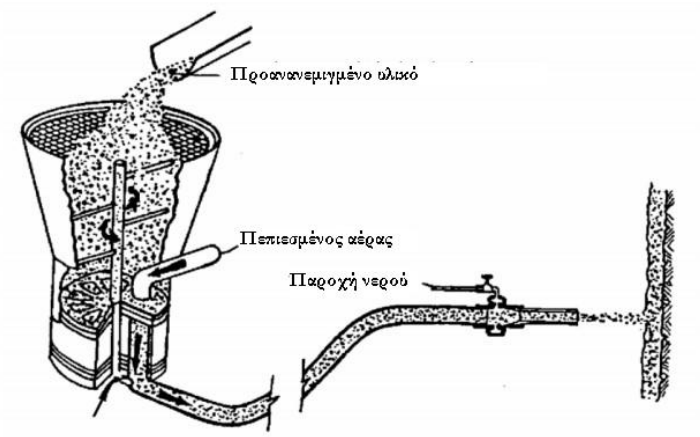
Διάγραμμα 6.7: Μέθοδοι ψεκασμού του σκυροδέματος (Maidl, 1995)

Έτσι, φαίνεται ότι ανάλογα με τη διαδικασία παραγωγής και την υπάρχουσα τεχνολογία του εξοπλισμού, στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μπορεί να υπάρχουν διαφορές στον τρόπο με τον οποίο τα βασικά συστατικά εισάγονται στο μίγμα (ξηρή ή υγρή μίξη) και στον τρόπο μεταφοράς μέχρι την επιφάνεια διάστρωσης.

Επιπλέον παραλλαγές που έχουν να κάνουν κυρίως σχετικά με την προσθήκη νερού και των απαραίτητων πρόσθετων, για παράδειγμα επιταχυντές, είναι επίσης διαθέσιμες. Οι δύο βασικές μέθοδοι, η ξηρή και η υγρή αναλύονται παρακάτω (Maidl, 1995).

3.1 Ξηρή μίξη

Στη μέθοδο ξηρής μίξης, ένα ξηρά μίγμα από τσιμέντο, αδρανή και ίνες, μαζί με επιταχυντές σε σκόνη αν απαιτείται, αφού αναμιχθούν μεταφέρονται από τον αναμίκτη στο ακροφύσιο ψεκασμού με πεπιεσμένο αέρα. Το νερό προστίθεται στο ακροφύσιο και το μίγμα εκτοξεύεται με μια ταχύτητα 20-30 m/s. Επίσης, η προσθήκη των επιταχυντών μπορεί να γίνει σε υγρή μορφή, στο ακροφύσιο. Η μέτρηση και η μίξη του νερού γίνεται από τον χειριστή του ακροφυσίου (Maidl, 1995). Έτσι, η μέθοδος αυτή έχει τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματά της, όπως αυτά αναλύθηκαν στο κεφάλαιο των μιγμάτων. Συνοπτικά, η μέθοδος παρουσιάζεται στην εικόνα 6.8.



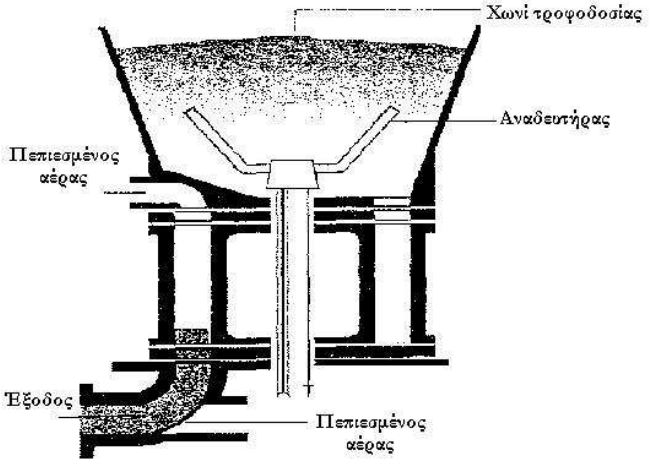
Εικόνα 6.8: Απλοποιημένη διάταξη της ξηρής μίξης (Mahar et al, 1975)

Η τροφοδοσία των ξηρών υλικών φαίνεται στην εικόνα 6.9.

Εικόνα 6.9: Τροφοδοσία ξηρού προαναμεμιγμένου υλικού (Hoek, 2007)

Το ποσοστό της φυσικής υγρασίας των αδρανών πρέπει να είναι 3-6%. Εάν το ποσοστό αυτό είναι μικρότερο τότε η παρουσία σκόνης θα είναι έντονη, κάτι που θα δυσκολέψει κατά πολύ τη διαδικασία εκτόξευσης. Μίγματα με υγρασία μεγαλύτερη του 6% προκαλεί πρόωρη σκλήρυνση του τσιμέντου κι έτσι φράξιμο του εξοπλισμού και παρεμπόδιση της εκτόξευσης.

Η πρώτη μηχανή ξηρού ψεκασμού πιστεύεται ότι εφευρέθηκε στην Pennsylvania το 1907 από τον Carl Ethan Akeley. Ο σχεδιασμός της εξελίχθηκε το 1915 από την Cement Gun Company (Vandewalle, 1993). Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως μηχανήματα που λειτουργούν με στροφεία. Το μίγμα σκυροδέματος εισέρχεται στο χωνί τροφοδοσίας το οποίο συνδέεται με τον αναμίκτη. Ο τελευταίος είναι ένας κάθετος ρότορας με θαλάμους. Καθώς περιστρέφεται ο ρότορας, το μίγμα κατέρχεται με την επίδραση της βαρύτητας. Το μίγμα μεταφέρεται με πεπιεσμένο αέρα στο στόμιο εξόδου και εν συνεχεία με πίεση 3-6 bar μεταφέρεται στο ακροφύσιο (Maidl, 1995). Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην εικόνα 6.10.



Εικόνα 6.10: Μηχανή ξηρού μίγματος (Vandevalle, 1993)

Η παραπάνω διάταξη (εικόνα 6.10) βρίσκεται προσαρμοσμένη σε τροχούς ώστε να μπορεί να μεταφέρεται εύκολα. Η πίσω όψη μιας τέτοιας μηχανής φαίνεται στην εικόνα 6.11.

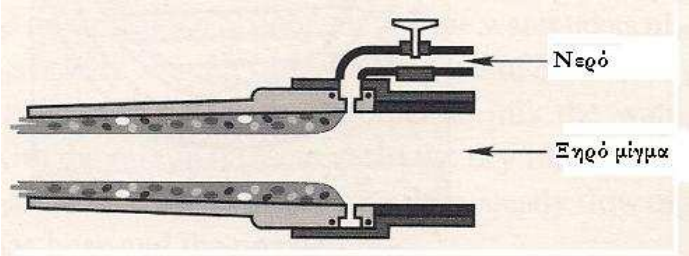
Εικόνα 6.11: Μηχανή ξηρής εκτόξευσης (www.gunitesupply.com)

Αν και οι μηχανές αυτές προσφέρουν ευκολία στη χρήση, σταθερότητα και ευελιξία στις συνθήκες του εργοταξίου, έχουν όλα τα γνωστά μειονεκτήματα της ξηρής μίξης. Επιπλέον, η προσθήκη ινών αυξάνει τη φθορά και την ανάγκη για συντήρηση των μηχανημάτων αυτών (Maidl, 1995). Στην εικόνα 6.12 φαίνεται το μοντέλο GM της

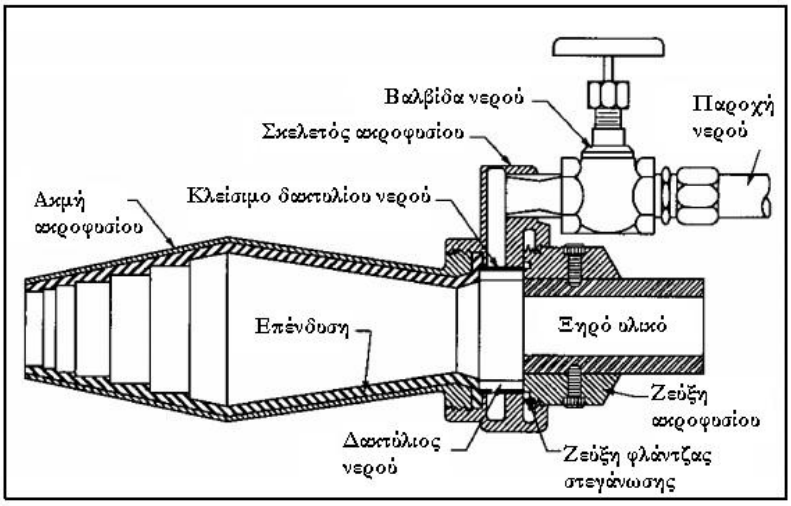
Meyco με ρότορα, κατάλληλο για ξηρά μίγματα.

Εικόνα 6.12: Μηχανή ξηρής εκτόξευσης της Meyco τύπου GM (www.meyco.basf.com)

Στη μέθοδο ξηρής μίξης το νερό προστίθεται υπό πίεση στο ακροφύσιο μέσω στρόφιγγας (σχήματα). Η γραμμή παροχής του νερού είναι παράλληλη με τον αγωγό παροχής του ξηρού μίγματος (Vandevalle, 1993).



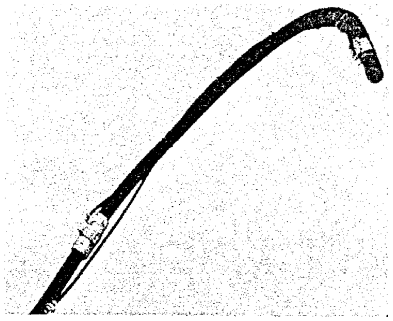
Εικόνα 6.13: Ακροφύσιο σε τομή, για ξηρή εκτόξευση (Vandevalle, 1993)



Εικόνα 6.14: Λεπτομέρεια ακροφυσίου ξηρής μίξης (ACI)

Έχει παρατηρηθεί ότι η μεταφορά του δακτυλίου εισροής νερού σε απόσταση 1-3 m πίσω από το ακροφύσιο, εξασφαλίζει καλύτερη διαβροχή του μίγματος. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως προϋγρανση, και προσφέρει μειωμένη σκόνη και αναπήδηση. Η πραγματική ανάμιξη του μίγματος με το νερό γίνεται στην επιφάνεια διάστρωσης, για αυτόν τον λόγο πρέπει να κινείται κυκλικά το ακροφύσιο (Vandevalle, 1993).

Τα ακροφύσια που χρησιμοποιούνται για τα μίγματα που έχουν προϋγρανθεί διαφέρουν από τα συμβατικά ακροφύσια της ξηρής μίξης. Ένα τέτοιο ακροφύσιο είναι αυτό της εικόνας 6.15.



Εικόνα 6.15: Ακροφύσιο Meynadier Premix (Maidl, 1995)

Κατασκευαστές και μηχανικοί αναγνωρίζουν τα πλεονεκτήματα του βιομηχανικά ζυγισμένου και συσκευασμένου υλικού για το μπετόν που περιέχει όλα υλικά εκτός από το νερό, το οποίο προστίθεται στο ακροφύσιο. Το κόστος τους ωστόσο είναι αρκετά υψηλό. Όταν χρησιμοποιείται συσκευασμένο ξηρό μίγμα σκυροδέματος, πρέπει να προστίθεται προϋγραντής ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη υγρασία του μίγματος (3-6%), πριν τη μεταφορά του στο ακροφύσιο ψεκασμού (Vandevalle, 1993).

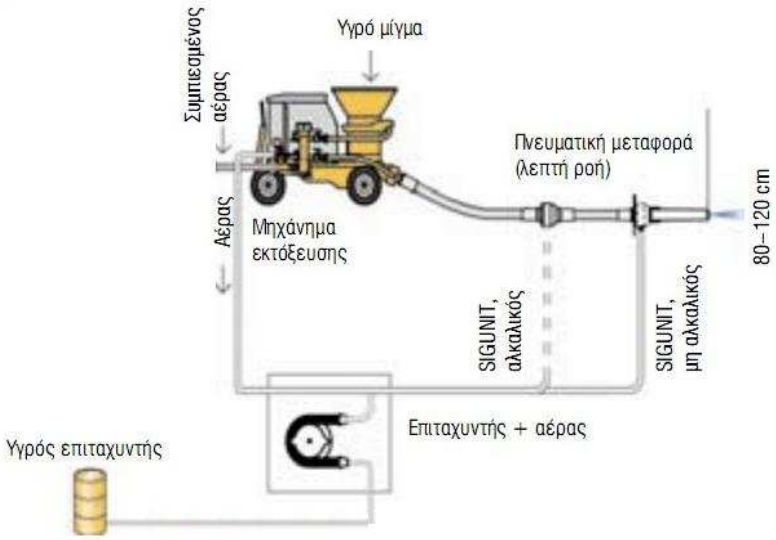
Στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, η προσθήκη των ινών γίνεται είτε στο ξηρό μίγμα του τσιμέντου με τα αδρανή, είτε στο ακροφύσιο λίγο πριν την εκτόξευση, με την πρώτη μέθοδο να είναι η πιο συνηθισμένη. Η παρουσία των ινών προκαλεί υψηλότερη φθορά του εξοπλισμού. Αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με την ενίσχυση της εσωτερικής επένδυσή του.

3.2 Υγρή μίξη

Στη μέθοδο υγρής μίξης, η καθορισμένη ποσότητα νερού προστίθεται στο ξηρό μίγμα σκυροδέματος μαζί με τις ίνες και τα απαιτούμενα πρόσθετα ή πρόσμικτα πριν τη μεταφορά του στο ακροφύσιο. Το υγρό πλέον μίγμα εισέρχεται στο χωνί τροφοδοσίας της μηχανής ψεκασμού και από εκεί με πεπιεσμένο αέρα ή αντλίες μεταφέρεται στο ακροφύσιο. Πεπιεσμένος αέρας προστίθεται και πριν την εκτόξευση για να εξασφαλίσει την απαιτούμενη συνάφεια του μίγματος στην επιφάνεια διάστρωσης Η μέθοδος ενδείκνυται για χρήσεις όπου έχουμε μεγάλες ποσότητες σκυροδέματος προς εκτόξευση. Βασικό της μειονέκτημα είναι ότι δεν είναι κατάλληλη για μεταφορά του μίγματος για μεγάλες αποστάσεις και ότι για την ομαλή λειτουργία πρέπει να εξασφαλίζεται συνεχής λειτουργία.

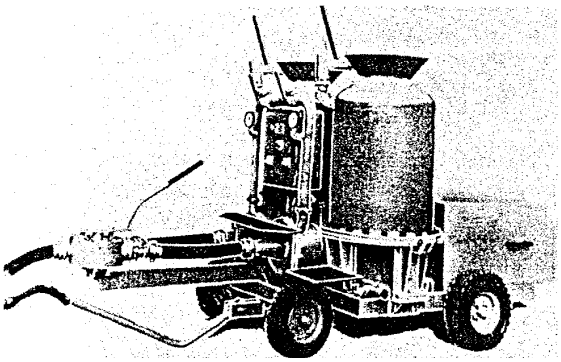
Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι μεταφοράς του υλικού στην υγρή μέθοδο (σχήμα), η μέθοδος της πυκνής και της αραιής ροής.

Η μέθοδος της λεπτής ροής φαίνεται στην εικόνα 6.16.



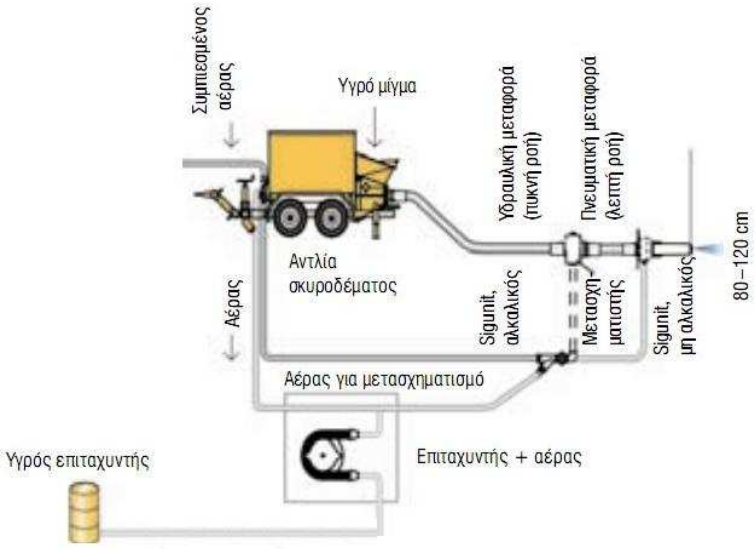
Εικόνα 6.16: Λεπτή ροή σκυροδέματος (Sika)

Η μεταφορά του υγρού μίγματος με αραιή ροή σχεδόν δεν χρησιμοποιείται πλέον για το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, λόγω της υψηλής κατανάλωσης αέρα και της κακής ανάμιξης των επιταχυντών. Ωστόσο, μια μέθοδος για να χρησιμοποιηθεί είναι αυτή της χρήσης μηχανήματος της ξηρής μίξης, με τη διαφορά ότι εδώ το υλικό είναι υγρό. Μια δεύτερη εναλλακτική είναι η χρήση μηχανήματος με δύο παρακείμενους θαλάμους που φέρουν το υγρό μίγμα σκυροδέματος και που συνδέονται με τη μονάδα ψεκασμού (εικόνα 6.17). Η παροχή υλικού στο ακροφύσιο γίνεται συνδέοντας εναλλάξ τους θαλάμους με τη μονάδα εκτόξευσης και με χρήση πεπιεσμένου αέρα (Maidl, 1995).



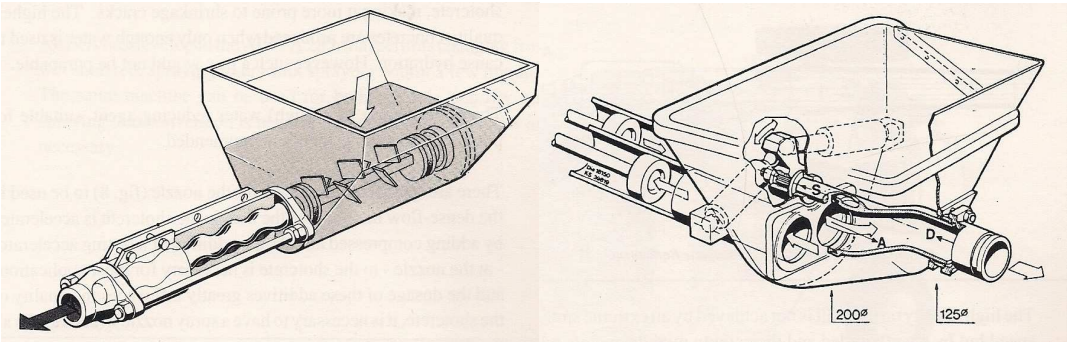
Εικόνα 6.17: Sperno 208, μηχανή με δύο θαλάμους για λεπτή ροή (Maidl, 1995)

Η δεύτερη, και πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος, είναι αυτή της πυκνής ροής. Η διάταξή της φαίνεται στην εικόνα 6.18.



Εικόνα 6.18: Πυκνή ροή σκυροδέματος (Sika)

Με τη μέθοδο μεταφοράς πυκνής ροής, το υγρό μίγμα μεταφέρεται στο ακροφύσιο μέσω αντλιών οφιοειδούς λειτουργίας (worm pump) ή προτιμότερα από αντλίες διπλού εμβόλου, οι οποίες φαίνονται στην εικόνα 6.19.

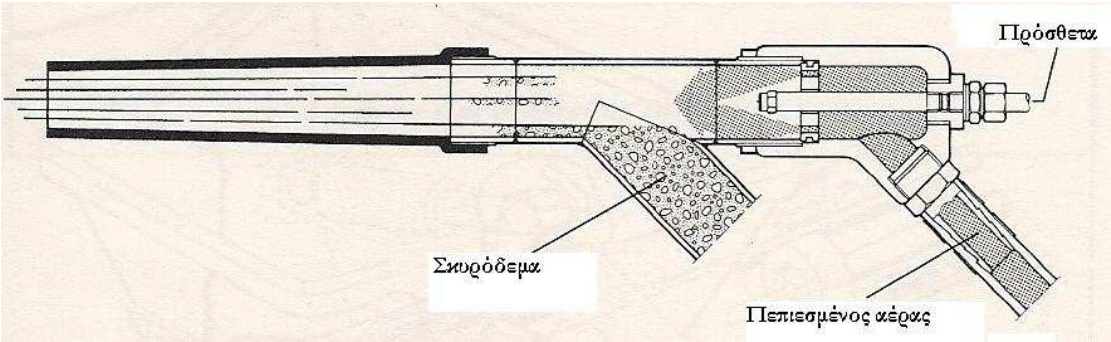


Εικόνα 6.19: Αντλία οφιοειδούς λειτουργίας και αντλία με διπλό έμβολο (Vandevalle, 1993)

Οι αντλίες διπλού εμβόλου, που έχουν πλέον επικρατήσει, φέρουν και δοσομετρητή για τα πρόσμικτα (συνήθως επιταχυντές). Αυτό γίνεται για να επιτυγχάνεται ακρίβεια στην προσθήκη τους. Παρακάτω παρουσιάζεται μια τέτοια μηχανή της Meyco. Η συγκεκριμένη είναι κατάλληλη για μικρής έκτασης εργασίες και για χειρισμό του ακροφυσίου με το χέρι. Τα κύρια τμήματα της μηχανής αυτής είναι η αντλία του σκυροδέματος και ο θάλαμος ανάμιξης, όπου γίνεται και η τροφοδοσία των πρόσθετων (Maidl, 1995).

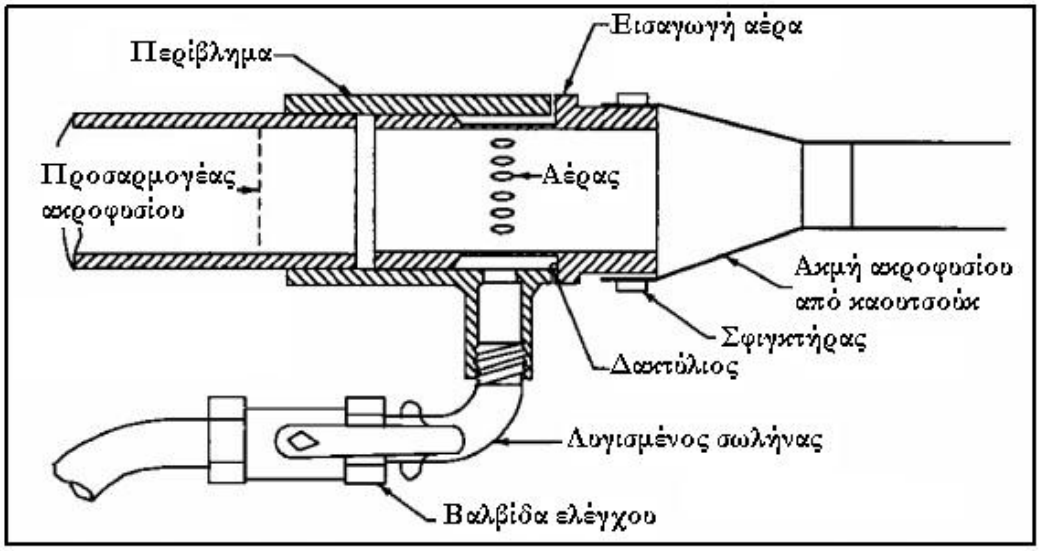
Εικόνα 6.20: Μηχανή υγρής εκτόξευσης της Meyco τύπου Altera (www.meyco.basf.com)

Για τη μέθοδο της πυκνής ροής υπάρχουν ειδικές απαιτήσεις από τα ακροφύσια. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα επιταχύνει εκεί με την προσθήκη πεπιεσμένου αέρα. Επιπλέον, στο ακροφύσιο γίνεται και ορισμένες φορές η προσθήκη των πρόσθετων υλικών, οπότε αυτό πρέπει να είναι ικανό να ικανοποιεί όλες αυτές τις απαιτήσεις. Ένα τέτοιο τυπικό ακροφύσιο είναι αυτό της εικόνας 6.21



Εικόνα 6.21: Ακροφύσιο υγρού ψεκασμού (Vandewalle, 1993)

Ένα παρόμοιο ακροφύσιο σε λεπτομέρεια φαίνεται στην εικόνα 6.22.



Εικόνα 6.22: Λεπτομέρεια ακροφυσίου υγρής μίξης (ACI)

3.3 Μηχανές και για τα δύο είδη μίξης

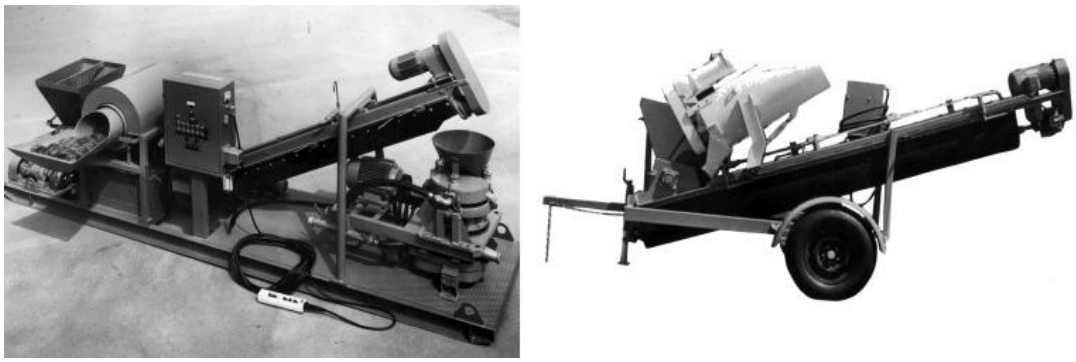
Μηχανές ικανές να λειτουργούν σε ξηρή και σε υγρή μίξη έχουν κατασκευαστεί εδώ και πολλά χρόνια. Η μετατροπή αυτή γίνεται μέσα σε λίγα λεπτά, χωρίς να απαιτείται κάποια τροποποίηση στο μηχάνημα ή επιπλέον εξαρτήματα. Τέτοια μοντέλα είναι τα 263 και 285 της Aliva (εικόνα 6.23), τα οποία είναι ικανά να συνδεθούν με ρομποτική εκτόξευση.

Εικόνα 6.23: Aliva 263 και 285 είτε για ξηρή είτε για υγρή μίξη (www.aliva.co.uk)

3.4 Ειδικός εξοπλισμός για ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

Γενικά στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνηθίζεται η χρήση του υπάρχοντος εξοπλισμού με μερικές ή καθόλου τροποποιήσεις. Οι αλλαγές αυτές, όταν γίνονται, έχουν σκοπό να περιορίζουν το φράξιμο των σωληνώσεων. Έτσι για παράδειγμα αφαιρούνται οι σωληνώσεις με γωνία 90° ή αποφεύγεται η απότομη αλλαγή μεταξύ διαμέτρου σωλήνωσης και ακροφυσίου. Επιπλέον, ακροφύσια με μέγεθος από 50 mm (2 in) και πάνω δουλεύουν ικανοποιητικά ενώ ένας γενικός κανόνας είναι ότι πρέπει να έχουν διάμετρο τουλάχιστον διπλάσια του μήκους της ίνας. Άλλες τροποποιήσεις που συνήθως γίνονται είναι η τοποθέτηση εσωτερικής επένδυσης στο ακροφύσιο ή μπορεί να χρησιμοποιείται πιο δυνατό μηχάνημα σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα.

Ειδικός εξοπλισμός για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει κατασκευαστεί και διαθέτει ξεχωριστό τροφοδότη ινών και διαφορετικό ρεύμα τροφοδοσίας μέχρι το ακροφύσιο. Ο εξοπλισμός αυτός διατίθεται και για υγρή και για ξηρή μίξη. Επιτρέπει τη χρήση ινών με μεγάλο λόγο μορφής (μέχρι και 125) και εξαλείφει το πρόβλημα της συσσωμάτωσης των ινών. Τέτοια μηχανήματα φαίνονται στην εικόνα 6.24 (ACI 506.1R):



Εικόνα 6.24: Μηχάνημα υγρής και ξηρής μίξης για ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ACI 506.1R)

3.5 Χειρισμός του ακροφυσίου

Ο χειρισμός του ακροφυσίου εκτόξευσης παλαιότερα γινόταν χειρονακτικά, κάτι που πλέον έχει πλήρως αντικατασταθεί με την ρομποτική εκτόξευση, στα μεγάλα τουλάχιστον έργα. Οι απαιτήσεις για εξασφάλιση τελικού προϊόντος υψηλής ποιότητας και η δύσκολη χειρωνακτική εργασία είναι οι αιτίες οδήγησαν στη αυξανόμενη χρήση εξοπλισμού ψεκασμού με τηλεχειρισμό (manipulators) ή πλήρως αυτοματοποιημένου (robots). Χάρη στον αυτοματοποιημένο εξοπλισμό, μεγάλες ποσότητες εκτοξευόμενου σκυροδέματος, υγρής ή ξηρής μίξης, μπορούν να εφαρμοστούν υπό άριστες συνθήκες.

Όταν ο εξοπλισμός ψεκασμού λειτουργεί με τηλεχειρισμό, τότε το ακροφύσιο ελέγχεται μέσω μίας πλατφόρμας, η οποία βρίσκεται πάνω στην κινητή μονάδα, ή μέσω μίας κινητής συσκευής ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο ο χειριστής απελευθερώνεται από τη χειρωνακτική λειτουργία του ακροφυσίου και συντονίζει τον εξοπλισμό εκτόξευσης από ασφαλή θέση (Maidl, 1995). Αυτό που πλέον έχει επικρατήσει είναι η χρήση κινητών μονάδων ελέγχου. Έχουν δυνατότητα μετακίνησης όχι μόνο του ακροφυσίου αλλά και του συστήματος από το οποίο συγκρατείται (μπούμα). Αυτή είναι μια τηλεσκοπική δοκός μερικών μέτρων που μπορεί να περιστραφεί προς όλες σχεδόν τις διευθύνσεις και κατευθύνσεις και να βρίσκεται σε βέλτιστη απόσταση από την επιφάνεια εκτόξευσης και κάθετη προς αυτήν. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν μεγάλη βοήθεια και ασφάλεια στον χειριστή. Έτσι βοηθά στο να εκτοξεύεται το σκυρόδεμα σε χώρους και θέσεις που είναι πολύ δύσκολο ως και αδύνατον να διαστρωθεί, λόγω του ύψους, της στενότητας τον χώρου ή της ασφάλειας από τυχόν καταπτώσεις. Ενώ παλαιότερα οι κατασκευαστές ενσωμάτωναν καμπίνες στο μηχάνημα ή επάνω στην μπούμες, τώρα προτιμάται ο από έξω από το μηχάνημα έλεγχός του για τα υπόγεια έργα. Η εκτόξευση σκυροδέματος σε πρανή όμως είναι ευνοϊκότερη όταν η θέση του χειριστή είναι κοντά στην επιφάνεια διάστρωσης.

Εικόνα 6.25: Ρομποτική εκτόξευση σε πρανές (Sika, 2004)

Μηχάνημα με δυνατότητα τηλεχειρισμού με τον χειριστή να βρίσκεται σε απόσταση από την επιφάνεια διάστρωσης, είναι το Cobra της Meyco, που χρησιμοποιείται και στο συμβατικό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Εικόνα 6.26: Meyco Cobra για εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος (www.meyco.basf.com)

Για εργασίες σε θέσεις με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο, όπως τα μεταλλευτικά έργα, υπάρχει εξειδικευμένος εξοπλισμός σε μικρότερες διαστάσεις που λειτουργεί όμως με την ίδια ακριβώς μέθοδο. Τέτοιο μοντέλο είναι το Poca της Meyco που προορίζεται για την εκτόξευση υγρών μιγμάτων.

Εικόνα 6.27: Meyco Poca για εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος (www.meyco.basf.com)

Η τροφοδοσία τέτοιων μηχανημάτων γίνεται από αντίστοιχα μικρές βαρέλες. Η εκτόξευση στο μέτωπο φαίνεται στην εικόνα 6.28.

Εικόνα 6.28: Εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος σε μεταλλευτικό έργο με Sika-PM 407 P

Οι τελευταίες εξελίξεις όμως στα συστήματα εκτόξευσης δεν είναι τα απλά τηλεχειριζόμενα μηχανήματα αλλά αυτά με μεγαλύτερη ακόμη δυνατότητα αυτοματισμού. Το μηχάνημα μπορεί να σαρώνει και να χαρτογραφεί την επιφάνεια

εκτόξευσης και αυτόματα να ελέγχει την γωνία ψεκασμού, την απόσταση του ακροφυσίου από το μέτωπο και αλλά και την ταχύτητα εκτόξευσης του υλικού. Ελέγχεται από υπολογιστή και το αντίστοιχο λογισμικό περιορίζοντας έτσι στο ελάχιστο τον ανθρώπινο παράγοντα. Η αυτοματοποίηση αυτή εξασφαλίζει σταθερό πάχος επένδυσης, ανεξάρτητα από το ανάγλυφο της επιφάνειας. Τέτοιο μηχάνημα εκτόξευσης είναι το Logica της Meyco που έχει δυνατότητα πλήρως αυτόματης εργασίας, ημιαυτόνομης αλλά και φυσιολογικής λειτουργίας με όλον τον έλεγχο στο χειριστή.

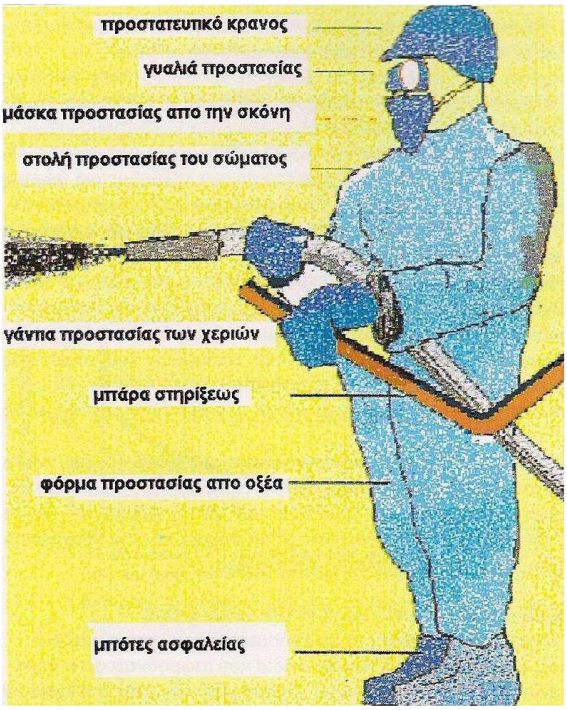
4. Κίνδυνοι κατά την εκτέλεση της εργασίας

Για την παρασκευή και διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος απαιτούνται μέτρα προστασίας παραπάνω από το σύνηθες οπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι πιθανοί κίνδυνοι που υπάρχουν έχουν να κάνουν με τα διάφορα πρόσμικτα που συνήθως χρησιμοποιούνται και είναι καυστικά, όπως οι επιταχυντές πρώτης και δεύτερης γενιάς, που είναι πολύ υψηλής αλκαλικότητας, αλλά μπορεί να είναι και δηλητηριώδεις. Επιπλέον κίνδυνοι στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, και μάλιστα όταν οι ίνες είναι χαλύβδινες, οφείλονται στο ότι μαζί με το υλικό εκτοξεύονται και ίνες που μπορούν να παρομοιασθούν με χαλύβδινες βελόνες (Maidl, 1995). Έτσι, το υλικό αναπήδησης είναι πολύ πιο επικίνδυνο για το προσωπικό αν βρίσκεται κοντά στη θέση ψεκασμού. Επίσης στην περίπτωση των μεταλλικών ινών, επικίνδυνη είναι η δημιουργία συσσωμάτωσης με συνέπεια την απόφραξη του ελαστικού αγωγού και σε ακραίες περιπτώσεις την έκρηξη του ακροφυσίου. Σημαντικός επίσης κίνδυνος υπάρχει και από τη σκόνη, που δημιουργείται κυρίως στην ξηρή μίξη, και έχει συνδεθεί με ασθένειες στο δέρμα, στα μάτια, στους πνεύμονες και με άλλες αρνητικές συνέπειες για τον ανθρώπινο οργανισμό. Άλλοι κίνδυνοι που δημιουργούνται είναι λόγω της τραχείας επιφάνειας της επένδυσης, λόγω στατικού ηλεκτρισμού, τα υψηλά επίπεδα θορύβου και βέβαια οι επιπτώσεις στο περιβάλλον λόγω της ρύπανσης που προκαλούν τα χημικά πρόσθετα με υψηλό pH (Archibald, Espley, DeGagne, Bickis).

Η τέχνη της εκτόξευσης είναι μια σημαντική εργασία που πρέπει να γίνεται από ειδικευμένο προσωπικό. Οι εργασίες κοντά στο ακροφύσιο από όπου εκτοξεύεται το σκυρόδεμα είναι επικίνδυνες, επειδή το υλικό εκτοξεύεται με δύναμη και διασκορπίζεται στο χώρο. Δεν πρέπει λοιπόν να πλησιάζουν στο ακροφύσιο άτομα που δεν έχουν σχέση με το αντικείμενο της εργασίας.

Τα μέτρα προστασίας για το προσωπικό που εκτελεί την εργασία είναι απαραίτητα και περιλαμβάνουν τα προστατευτικά γυαλιά, τα προστατευτικά άρβυλα, τα γάντια, το κράνος, τη φόρμα, και τη μάσκα, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.29. Επίσης, πινακίδες πρέπει να είναι αναρτημένες στο εργοτάξιο που να προειδοποιούν για το επικίνδυνο των εργασιών (Σαπρανίδης, 2002).



Εικόνα 6.29: Μέτρα προστασίας προσωπικού (Σαπρανίδης, 2002)

Ειδικές διόπτρες, γάντια και ειδικό κράνος (εικόνα 6.30) πρέπει να χρησιμοποιείται όταν η εκτόξευση γίνεται χειροκίνητα. Για το λόγο αυτό, αλλά και για εξασφάλιση καλύτερης ποιότητας, συστήνεται το ινοπλισμένο σκυρόδεμα να διαστρώνεται με τη χρήση ρομποτικών συστημάτων (Maidl, 1995).

Εικόνα 6.30: Ειδικό κράνος προστασίας για εκτόξευση σκυροδέματος (STUVA-News, 1987)

5. Πλεονεκτήματα εκμηχάνισης

Συνοψίζοντας από όλα τα παραπάνω, προκύπτουν τα εξής πλεονεκτήματα από την αυξανόμενη εκμηχάνιση και τον αυτοματισμό την εκτόξευση του σκυροδέματος:

- Οι τροφοδότες ινών είναι εύκολοι στο χειρισμό και εξασφαλίζουν ομοιόμορφο μίγμα με μικρό σχετικά κόστος.
- Η υγρή μίξη με ρομποτικά συστήματα σε σχέση με την ξηρή μίξη με χειρονακτική εκτόξευση προσφέρει ταχύτερη, ασφαλέστερη, ποιοτικότερη και οικονομικότερη κατασκευή.
- Βελτίωση των συνθηκών εργασίας και της ασφάλειας του προσωπικού.
- Μείωση της συνολικής αναπήδησης αλλά και της αναπήδησης των ινών, που είναι το πιο ακριβό υλικό από το μίγμα του σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1. Εισαγωγή

Οι υπάρχοντες κανονισμοί εκτοξευόμενου και κατ' επέκταση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, έχουν εθνικό ή ηπειρωτικό χαρακτήρα. Τέτοιοι κανονισμοί και οδηγίες προέρχονται από την Ευρώπη (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures EFNARC 1996, Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux RILEM), από την Αμερική (πρότυπα της American Society for Testing and Materials ASTM και οδηγίες του American Concrete Institute ACI) αλλά και από διάφορα κράτη (Ιαπωνία κλπ) ή από τις δικές μας εθνικές προδιαγραφές.

Οι πρώτες οδηγίες που εκδόθηκαν για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ήταν από την ACI (ACI 544) το 1973 και από την RILEM (19-FRC) το 1977. Μέχρι σήμερα έχουμε πολλούς ακόμη αντίστοιχους κανονισμούς και προδιαγραφές με το πρόβλημα πλέον να είναι ότι υπάρχει συχνά σύγχυση για το ποιός από όλους αυτούς τελικά θα επιλεχθεί. Επιπλέον, οι κανονισμοί αυτοί συνήθως δε δίνουν οδηγίες για σχεδιασμό, γεγονός που μεγαλώνει το παραπάνω πρόβλημα (Maidl, 1995). Στη χώρα μας έχουμε το Σχέδιο Προδιαγραφής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και τις Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές. Οι κανονισμοί αυτοί βασίζονται κυρίως στα ευρωπαϊκά πρότυπα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Τυποποίησης (European Standard organization, CEN).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση εδώ και πολλά χρόνια έχει αποφασισθεί να προσαρμοσθούν όλοι οι σημαντικοί εθνικοί τεχνικοί κανονισμοί σε έναν κοινό ευρωπαϊκό με σκοπό αυτός να ανταποκρίνεται στις σύγχρονες ανάγκες και να εφαρμόζεται παντού στις χώρες μέλη. Έτσι, ο κανονισμός που προέκυψε για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (χρησιμοποιείται ο όρος sprayed concrete και όχι shotcrete) είναι ο EN 206 (Schorn, 2001).

Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια ανασκόπησης των κανονισμών που προδιαγράφουν τα υλικά του μίγματος του εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, με έμφαση όμως στις ίνες. Οι πληροφορίες αυτές αποτελούν περισσότερο μια σύνοψη των πιο σημαντικών κανονισμών παρά επιστημονικά τεκμηριωμένα συμπεράσματα. Σύμφωνα και με τον ελληνικό κανονισμό, όλα τα ενσωματούμενα υλικά θα είναι καθαρά και δεν θα περιέχουν επιβλαβή συστατικά σε τέτοιες ποσότητες που να μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την ανθεκτικότητα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ή να προκαλέσουν διάβρωση του οπλισμού. Όλα τα υλικά θα χρησιμοποιούνται μόνο εάν είναι αποδεδειγμένης καταλληλότητας.

2. Υλικά του μίγματος

2.1 Ίνες

Το πρότυπο C 1116 της ASTM διαχωρίζει το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (έγχυτο και εκτοξευόμενο) σύμφωνα με το είδος των ινών που χρησιμοποιούνται. Ο λόγος για τον οποίο ο διαχωρισμός γίνεται με βάση αυτό το κριτήριο είναι διότι οι επιδόσεις του σκυροδέματος εξαρτώνται από τις ιδιότητές τους και την χημική συμβατότητά τους με το σκυρόδεμα. Έτσι, υπάρχουν τρεις κατηγορίες ινών σύμφωνα με το πρότυπο αυτό (2003):

- **Χαλύβδινες:** Δεν επηρεάζονται από τη διαδικασία της ανάμιξης και εκτόξευσης και δεν αλλοιώνονται από το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Επικαλύψεις, όπως από αλουμίνιο, μπορεί να είναι επιβλαβείς για το σκυρόδεμα. Οι ανθρακούχοι χάλυβες θα διαβρώνονται σε συνθήκες ίδιες με αυτές των κοινών χαλύβων.
- **Υάλου:** Είναι επιρρεπείς σε διάβρωση από την υγρασία αλλά και από το ίδιο το σκυρόδεμα. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν οι ίνες AR (alkali-resistant) που είναι ανθεκτικότερες και κατάλληλες για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Σε βάθος χρόνου όμως και αυτές θα διαβρωθούν και θα χάσουν την αντοχή τους.
- **Συνθετικές:** Έχουν διαπιστωμένα υψηλή αντοχή σε διάβρωση από την υγρασία και τα αλκάλια. Υπάρχουν όμως και ίνες από κάποια πολυμερή υλικά που επηρεάζονται από την υγρασία, τα αλκάλια του σκυροδέματος και τα χημικά πρόσμικτα.

Για τις φυσικές ίνες πρόσφατα καθιερώθηκε το πρότυπο D 7357 της ASTM. Για τις χαλύβδινες ίνες, υπάρχει το πρότυπο A 820 της ASTM που τις κατηγοριοποιεί αναλυτικά ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής τους ως εξής (2004):

- **Ψυχρή ολκή**
- **Κοπή φύλλων**
- **Εξαγωγή από τήγμα**
- **Φρεζάρισμα**
- **Επεξεργασία ινών ψυχρής ολκής**

Για κάθε ένα από τα παραπάνω είδη, και ανάλογα με τη γεωμετρία τους, ορίζεται αντίστοιχα και η ισοδύναμη διάμετρος. Αυτή είναι ένα μέγεθος πολύ χρήσιμο διότι σύμφωνα με αυτήν υπολογίζεται ο λόγος μορφής της ίνας. Ως προς τις επιτρεπόμενες αποκλίσεις των ινών σε μήκος, διάμετρο ή ισοδύναμη διάμετρο και λόγο μορφής, πρέπει τουλάχιστον το 90% των ινών που δοκιμάζονται (τουλάχιστον 10 δοκιμές ανά 4,500 kg ινών) να είναι εντός των αποδεκτών αποκλίσεων. Για το μήκος και τη διάμετρο η απόκλιση είναι ±10% ενώ για την ισοδύναμη διάμετρο είναι ±15%.

Ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά, η μέση εφελκυστική αντοχή, που θα προκύπτει από τουλάχιστον 10 δοκιμές ανά 4,500 kg ινών, δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 310 MPa. Οι ίνες επίσης πρέπει να έχουν αντοχή ικανή ώστε να μην αστοχούν όταν κάμπτονται υπό γωνία 90° γύρω από βελόνα διαμέτρου 3.2 mm και σε θερμοκρασία όχι κάτω από 16° C. Ψεγάδια και επιφανειακές φθορές δεν αποτελούν αιτία απόρριψης του προϊόντος, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι διατηρούνται τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Τέλος, το πρότυπο A 820 προδιαγράφει και τις λεπτομέρειες που αφορούν την συσκευασία, μεταφορά αλλά και τις διαδικασίες που πρέπει να ακολουθούνται για την πιστοποίηση ή την απόρριψη των ινών.

Άλλες πηγές συστήνουν επίσης σημαντικά στοιχεία για τις ίνες. Από τον EFNARC (1996) προτείνεται ότι οι ίνες δεν πρέπει να έχουν μήκος μεγαλύτερο από το 0.7 της εσωτερικής διαμέτρου των σωληνώσεων και των ακροφυσίων που χρησιμοποιούνται, εκτός αν δοκιμές έχουν δείξει ότι πιο μεγάλες ίνες μπορούν να εκτοξευθούν χωρίς να δημιουργούν μπλοκαρίσματα. Σύμφωνα με τον ίδιο κανονισμό, το

περιεχόμενο των ινών πρέπει να εκφράζεται σε kg/m^3 και αυτό θα εξαρτάται από την χρήση για την οποία προορίζεται το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στις δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, το ποσοστό ινών που θα προσδιορίζεται δεν πρέπει να είναι ποτέ μικρότερο του 75% της προβλεπόμενης ποσότητας και κατά μέσο όρο να είναι μεγαλύτερο του ελάχιστου συμφωνηθέντος ποσοστού.

Σύμφωνα με τον Ιαπωνικό κανονισμό (JCI, 1991) οι ίνες πρέπει να είναι στεγνές, απαλλαγμένες από λιπαντικά, σκουριά ή άλλες πηγές επιμόλυνσης ενώ ορίζεται και το ποσοστό % της επιμήκυνσής τους μέχρι την αστοχία και από 12-22%.

Ο Ιταλικός κανονισμός (CNR-DT 204/2006) κατατάσσει τις ίνες σε κατηγορίες R1, R2, R3 ανάλογα με την ελάχιστη εφελκυστική αντοχή τους. Αυτή ορίζεται από τον λόγο της μέγιστης δύναμης προς την αντίστοιχη ισοδύναμη επιφάνεια. Τα όρια ανάμεσα τις κατηγορίες αυτές δεν είναι απόλυτα, αφού εξαρτώνται από την ισοδύναμη διάμετρο της κάθε ίνας. Τέλος, διαχωρίζει τις συνθετικές ίνες ανάλογα με το μήκος τους σε μίκρο-ίνες και μάκρο-ίνες. Οι πρώτες έχουν μήκος λίγων mm ενώ οι δεύτερες από 80 mm και πάνω.

Σύμφωνα με την ACI (506.1R-98) οι ίνες έχουν μήκος από 13 έως 64 mm και διάμετρο από 0.25 έως 0.76 mm. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνήθως γίνεται χρήση ινών μήκους από 19 έως 32 mm και διαμέτρου 0.4 mm. Οι ίνες αυτές τυπικά δεν παρουσιάζουν προβλήματα κατά την εκτόξευση σε σωληνώσεις διαμέτρου 50 mm. Ειδικότερα για τις συνθετικές ίνες, ο κανονισμός αυτός αναφέρει ότι έχουν μήκος από 12 έως 50 mm και μπορεί να είναι μεμονωμένες διακριτές ή να αποτελούνται από πλεγμένες πολύ λεπτές ίνες. Τέλος, σύμφωνα με την ίδια οδηγία, οι συνθετικές ίνες τείνουν να συσσωματώνονται ή να φρακάρουν τις σωληνώσεις πολύ λιγότερο από τις χαλύβδινες.

Η ACI έχει επίσης εκδώσει οδηγίες για την προδιαγραφή των υλικών, την μίξη και τοποθέτηση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (ACI 544.3R-93). Στην οδηγία αυτή αναφέρεται ότι η ελάχιστη απαιτούμενη εφελκυστική αντοχή των ινών πρέπει να είναι 345 MPa ενώ υπάρχουν και ίνες με αντοχή μέχρι 2,068 MPa. Επίσης, οι ίνες με τα συνηθισμένα μήκη (12.7-63.5 mm) έχουν τυπικά λόγο μορφής από 30 έως 100. Τέλος, ως προς την αποθήκευσή τους αναφέρει ότι πρέπει να προστατεύονται από υγρασία και από επιμολύνσεις από ξένα υλικά. Σε διαφορετική περίπτωση δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Στη χώρα μας, η χρήση των ινών συμμορφώνεται με το προσάρτημα Α και Β του προτύπου prEN 14487 καθώς και των prEN 14889-1 για τις χαλύβδινες και του prEN 14889-2 για τις συνθετικές.

2.2 Τσιμέντο

Τα τσιμέντα που χρησιμοποιούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα γενικά ακολουθούν τις απαιτήσεις των κοινών τσιμέντων τύπου Portland και συνήθως με απαίτηση για γρήγορη σκλήρυνση. Εθνικά πρότυπα που τα προδιαγράφουν είναι το DIN 1164 και το ASTM C 150. Σύμφωνα με το δεύτερο, τα τσιμέντα portland διαχωρίζονται σε οκτώ τύπους, και από τους οποίους κατάλληλοι για το εκτοξευόμενο είναι οι I και III. Στον τύπο I ανήκουν τα τσιμέντα για εφαρμογές όπου οι απαιτήσεις δεν είναι τέτοιες ώστε να χρειάζεται κάποιος άλλος από τους επτά τύπος και ο τύπος III για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή πρώιμη αντοχή. Και άλλοι τύποι τσιμέντου μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν, όπως περιγράφονται στο πρότυπο της ASTM C 595 (Blended Hydraulic Cements), όπου περιγράφονται πέντε κατηγορίες τσιμέντων αναμεμιγμένων με διάφορα ποζολανικά υλικά.

Σύμφωνα με την ACI (1983) προτείνεται χρήση τσιμέντου χαμηλού με όχι πολύ υψηλό pH όπου τα αδρανή αντιδρούν με αυτά. Επίσης, συστήνει σύμφωνα με το πρότυπο της ASTM C 150 τύπο τσιμέντου III για γρήγορη σκλήρυνση ή τύπο V για σκυροδέματα που εκτίθενται σε περιβάλλον με θειικές ενώσεις.

Ο πίνακας 7.1 δείχνει συγκριτικά κάποια στοιχεία του αυστριακού και ιαπωνικού κανονισμού για τα τσιμέντα σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα:

Οδηγία	**Πηγή**
Χρόνος πήξης: 1.5-4 ώρες	Austrian Concrete Society 1990
Χρόνος πήξης: ≥ 1 ώρα	Japan Tunneling Association 1991
Λεπτότητα: 3,500-4,500 cm^2/g	Austrian Concrete Society 1990
Λεπτότητα: ≥ 2,500 cm^2/g	Japan Tunneling Association 1991

Πίνακας 7.1: Αυστριακές και Ιαπωνικές οδηγίες για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Tunnelling and Underground Space Technology, 1992)

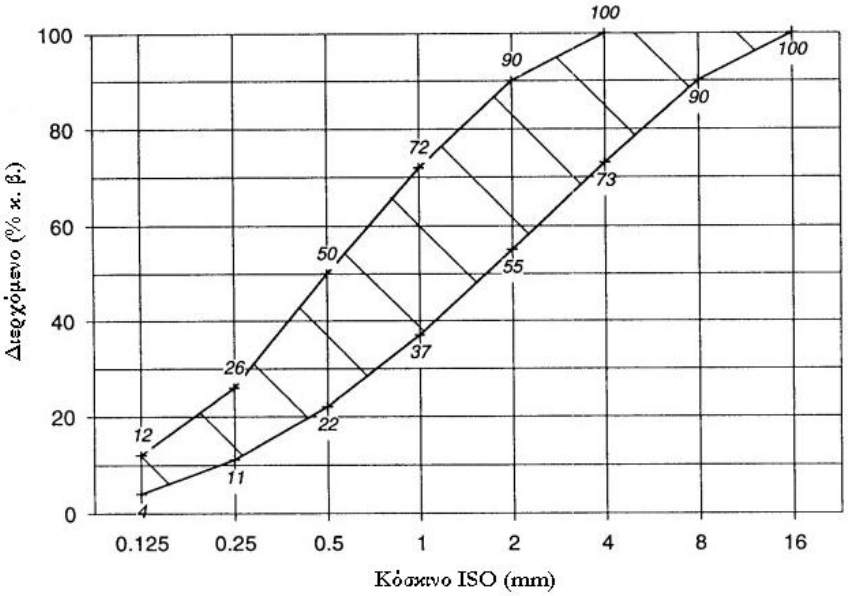
Σύμφωνα με τις ελληνικές προδιαγραφές, το τσιμέντο για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει να ακολουθεί το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 197. Τα τσιμέντα αυτά είναι πλούσια σε C_3S και έχουν λεπτότητα 4,000 έως 4,500 cm^2/g. Ο συντελεστής νερού προς τσιμέντο πρέπει να είναι το πολύ 0.45, η προσθήκη τσιμέντου να είναι τουλάχιστον 350 kg/m^3, να εμφανίζουν σε 24 ώρες θλιπτική αντοχή μεγαλύτερη των 10 MPa και σε 1-2 ώρες 1 MPa περίπου. Σύμφωνα με τον EFNARC, για το τσιμέντο πρέπει να ακολουθείται το πρότυπο EN 205 (μέρος 5) με τις παρακάτω εξαιρέσεις:

- Ο λόγος νερό προς τσιμέντο δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0.55.
- Ελάχιστη προσθήκη τσιμέντου είναι τα 300 kg/m^3 (φυσιολογικά 350-450 kg/m^3 για την ξηρή μίξη και 400-500 kg/m^3 για την υγρή μίξη).
- Η αντίσταση σε ψύξη πρέπει να μετράται από δοκιμές ψύξης και απόψυξης και όχι σύμφωνα με το ελάχιστο ποσοστό περιεχόμενου αέρα
- Η ελάχιστη επικάλυψη αφορά τον οπλισμό με πλέγμα και ράβδους και όχι τις ίνες.

2.3 Αδρανή

Ο τύπος αδρανών που χρησιμοποιείται αξιολογείται και επιλέγεται βάσει της οικονομικότητας και των απαραίτητων χαρακτηριστικών που θέλουμε να αποκτήσει το υλικό. Για το λόγο αυτό, σύμφωνα με τον EFNARC ο εργολάβος του έργου είναι υπεύθυνος για την επιλογή της πιο κατάλληλης κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών.

Τα εθνικά πρότυπα για τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα είναι κατά την ASTM τα C 33 και C 330, από τη Γερμανία το DIN 4226, 1045, 1025 κά. Ο ελληνικός κανονισμός συνιστά το πρότυπο EN 12620 ενώ υπάρχει και το πρότυπο ΕΛΟΤ-408. Από τον EFNARC προτείνονται κάποια όρια μέσα στα οποία πρέπει να κινείται η καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης για τα αδρανή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.2.



Διάγραμμα 7.2: Προτεινόμενη ζώνη για κοκκομετρική καμπύλη (EFNARC, 1996)

Προτείνει επίσης ότι το λεπτότερο τμήμα είναι πιο κατάλληλο για ξηρά μίγματα, αν και ένα μεγάλο ποσοστό κόκκων κάτω από 0.25 mm μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της σκόνης εάν δεν προϋγρανθούν σωστά. Το ποσοστό των αδρανών με κόκκο μεγαλύτερο των 8 mm πρέπει να είναι το πολύ 10% ενώ κόκκοι μεγαλύτεροι των 12 mm πρέπει να αποφεύγονται. Επίσης, αναφέρεται ότι για τα ξηρά μίγματα η φυσική υγρασία των αδρανών δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη του 6%.

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των αδρανών παρατίθενται συγκριτικά στον πίνακα 7.3.

Αδρόκοκκα αδρανή	**Οδηγία**	**Πηγή**
Μέγιστος κόκκος:		
Ξηρή μίξη	16 mm φυσιολογικά 10 mm	Japan Tunnelling Association 1991 Sprayed Concrete Association 1990
Υγρή μίξη	8 mm 16 mm	Japan Tunnelling Association 1991 Sprayed Concrete Association 1990
Ειδικό βάρος	≥ 2.5 kg/dm^3	Japan Tunnelling Association 1991
Απορρόφηση νερού	≥ 3.0%	Japan Tunnelling Association 1991
Άμμος	**Οδηγία**	**Πηγή**
Ειδικό βάρος	≥ 2.5 kg/dm^3	Japan Tunnelling Association 1991
Απορρόφηση νερού	≤ 3.0%	Japan Tunnelling Association 1991
Υγρασία	4-6% συνίσταται 2-4% μέγιστο 7%	Japan Tunnelling Association 1991 AFTES 1992 AFTES 1992

Πίνακας 7.3: Οδηγίες για αδρανή (Tunnelling and Underground Space Technology, 1992)

2.4 Νερό

Το νερό που χρησιμοποιείται γενικά πρέπει να είναι απαλλαγμένο από ιόντα. Το πρότυπο που ακολουθείται είναι από τον ΕΛΟΤ-345 ή το ευρωπαϊκό ΕΝ 1008. Θαλασσινό νερό δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιείται παρά μόνο για άοπλο και χωρίς μεταλλικές ίνες σκυρόδεμα, επειδή τα ιόντα χλωρίου διαβρώνουν το σίδηρο. Ακατάλληλο είναι επίσης το θαλασσινό νερό και για εργασίες συντήρησης σκυροδέματος που περιέχει σιδηροπλισμό.

Το πρότυπο C 1116 της ASTM προδιαγράφει το νερό που χρησιμοποιείται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Πρέπει να είναι καθαρό και οπτικά διαυγές. Εάν περιέχει ουσίες που του αλλάζουν το χρώμα, την οσμή ή τη γεύση δεν πρέπει να χρησιμοποιείται εκτός εάν υπάρχουν ενδείξεις ότι δεν είναι επιβλαβές για το σκυρόδεμα.

Το νερό που προέρχεται από το πλύσιμο του αναμίκτη μπορεί κι αυτό να χρησιμοποιηθεί μετέπειτα αρκεί κι αυτό να πληροί τις αντίστοιχες προϋποθέσεις που θέτει το πρότυπο.

2.5 Πρόσθετα

Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πρόσθετα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι η ιπτάμενη τέφρα, οι σκωρίες και η πυριτιακή παιπάλη. Τα πρόσθετα αυτά, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών fillers και των χρωμάτων πρέπει να συμμορφώνονται προς τις απαιτήσεις που εξειδικεύονται στο πρότυπο ΕΝ 206-1.

Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) είναι ένα ανόργανο ποζολανικό υλικό που μπορεί να προστεθεί στο σκυρόδεμα για να βελτιώσει ορισμένες ιδιότητές του στην πρώιμη αλλά και στην σκληρυμένη του κατάσταση. Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα η ιπτάμενη τέφρα

πρέπει να είναι συμβατή με το πρότυπο EN 450 ή σύμφωνη με τους εκάστοτε εθνικούς κανονισμούς (EFNARC, 1996). Επιπλέον, η ιπτάμενη τέφρα εκτός του ότι μειώνει την ποσότητα του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, αυξάνει και την εργασιμότητα του μίγματος. Τέλος, το πρότυπο C 618 της ASTM προδιαγράφει τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει για να είναι κατάλληλη για χρήση σε σκυρόδεμα. Ο πίνακας 7.4 συνοψίζει τις προτάσεις για προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε διάφορα είδη τσιμέντου. Τα αναγραφόμενα ποσοστά είναι επί τις ποσότητας τσιμέντου και όχι σε αντικατάστασή του.

Χαρακτηριστικό	**Σύσταση**	**Πηγή**
Μέγιστη επιτρεπτή προσθήκη		
Τσιμέντο Portland	≤ 15%	Austrian Concrete Society 1990
	≤ 30%	ITA 1991, EFNARC 1996
Τσιμέντο με ιπτάμενη τέφρα	≤ 15%	EFNARC 1996
Τσιμέντο με σκωρία	≤ 20%	EFNARC 1996, Austrian Concrete Society 1990
Ειδική επιφάνεια	≥ 450 kg/m^3	Austrian Concrete Society 1990
Άνθρακας	≤ 5%	SANCOT 1991

Πίνακας 7.4: Συστάσεις για τη χρήση ιπτάμενης τέφρας (Tunnelling and Underground Space Technology, 1992)

Πρόσθετο είναι και η πυριτιακή παιπάλη (silica fume) η οποία είναι ένα ανόργανο ποζολανικό υλικό που προσδίδει στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αυξημένη συνοχή και καλύτερη συνάφεια με την επιφάνεια που διαστρώνεται. Με τη χρήση της είναι δυνατή η αύξηση του πάχους των στρώσεων.

Η πυριτιακή παιπάλη που χρησιμοποιείται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα πρέπει να είναι σύμφωνη με τα ευρωπαϊκά πρότυπα ή με τους εκάστοτε εθνικούς κανονισμούς (EFNARC 1996). Επίσης, προδιαγράφεται και από την ASTM με το πρότυπο C 1240. Ο πίνακας συνοψίζει τις προτάσεις για προσθήκη πυριτιακής παιπάλης σε διάφορα είδη τσιμέντου 7.5.

Χαρακτηριστικό	**Σύσταση**	**Πηγή**
Συνιστώμενη προσθήκη (υγρή μίξη)		
	8-13%	Morgan 1992
	≤ 15%	EFNARC 1996
Επιτρεπτά όρια	3-15%	Norwegian Concrete Assoc. 1992

Πίνακας 7.5: Συστάσεις για τη χρήση πυριτιακής παιπάλης (Tunnelling and Underground Space Technology, 1992)

Λιγότερο δημοφιλή πρόσθετα είναι διάφορες σκωρίες. Αυτές έχουν το μειονέκτημα ότι μειώνουν την πρώιμη αντοχή. Ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιούνται ακόμη και σε ένα ποσοστό της τάξης του 30% του τσιμέντου (EFNARC, 1996).

2.6 Πρόσμικτα

Τα πρόσμικτα πρέπει να είναι σύμφωνα με το πρότυπο EN 934-5 για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Στον EFNARC επίσης υπάρχει ειδικό ένθετο που αναφέρεται στα πρόσμικτα. Στον εθνικό μας κανονισμό αναφέρεται επίσης ότι τα πρόσθετα πρέπει

να είναι συμβατά με την προδιαγραφή C 1141 της ASTM, η οποία τα κατατάσσει διαφορετικά για τα ξηρά και τα υγρά μίγματα. Άλλα πρότυπα που αναφέρονται σε πρόσμικτα της ASTM είναι τα C 260 (αερακτικά), C 494 (χημικά πρόσμικτα για το σκυρόδεμα) και το C 1017 (ρευστοποιητές).

Οι οδηγίες για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αφορούν κυρίως τους επιταχυντές. Από αυτούς συχνότερα χρησιμοποιείται η υδρύαλος (water glass) και πρέπει να προσαρμόζεται στο τσιμέντο λαμβάνοντας υπόψη τις πρώιμες αντοχές, το χρόνο μέχρι να ξεκινήσει η πήξη του σκυροδέματος αλλά και την μείωση της αντοχής στο ώριμο σκυρόδεμα. Η χρήση τους πρέπει να εξασφαλίζει καλή συνοχή στο υλικό, να μη διαβρώνει τον οπλισμό, να είναι λειτουργικοί στη χρήση και ακίνδυνοι για τους ανθρώπους και το περιβάλλον. Μια τυπική δοσολογία πρέπει να καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της υπερβολικής δόσης στις μακροπρόθεσμες αντοχές (Sprayed Concrete Association, 1990). Ο πίνακας 7.6 συνοψίζει τις προτάσεις για προσθήκη επιταχυντών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Χαρακτηριστικό	**Σύσταση**	**Πηγή**
Συνιστώμενη προσθήκη		
Σκόνη	6-8%	Austrian Concrete Society 1990
	μ.ό. 6%	EFNARC 1992
Υγροί	4-6%	Austrian Concrete Society 1990
	6-8%	EFNARC 1992
Υδρύαλος	10-15%	Austrian Concrete Society 1990
Δεν προσδιορίζεται	2-5%	Morgan 1991
Ξηρή μίξη	4-7%	Japan Tun. Association 1991
Υγρή μίξη	5-10%	Japan Tun. Association 1991
Επιτρεπτά όρια		
Σκόνη	≤ 10%	Austrian Concrete Society 1990
Υγρή μίξη	≤ 8%	Austrian Concrete Society 1990
Δεν προσδιορίζεται	≤ 3%	SANCOT 1991

Πίνακας 7.6: Συστάσεις για τη χρήση επιταχυντών (Tunnelling and Underground Space Technology, 1992)

Πέρα από τους επιταχυντές, άλλα πρόσμικτα που συχνά χρησιμοποιούνται είναι οι μειωτές νερού και οι υπερπλαστικοποιητές. Οι μειωτές νερού προστίθενται τυπικά σε ποσοστό 0.5% κατά βάρος επί του τσιμέντου ενώ οι υπερπλαστικοποιητές σε ποσοστά από 1 έως 1.5%. Τέλος, όταν χρησιμοποιούνται αερακτικά το πορώδες του υλικού στην αντλία αναμένεται να είναι 10-12% και μετά την εκτόξευση 4-6% (Shotcrete for rock support, Tunnelling and Underground Space Technology, 1992).

2.7 Θερμοκρασία μίγματος

Σύμφωνα με τον EFNARC, οι χαμηλές θερμοκρασίες καθυστερούν τη σκλήρυνση του σκυροδέματος και οι πρώιμες αντοχές που απαιτούνται δεν θα επιτευχθούν παρά μόνον αν προστεθεί παραπάνω ποσότητα επιταχυντή. Κάτι τέτοιο όμως θα επηρεάσει την τελική αντοχή. Στις υψηλές θερμοκρασίες παρατηρείται μείωση του χρόνου που παραμένει εργάσιμο το μίγμα και έτσι χάνει την απαιτούμενη

πλαστικότητά του. Συνέπεια αυτού είναι η μειωμένη πρόσφυση στην επιφάνεια εκτόξευσης.

Από τον κανονισμό αυτό προτείνεται η θερμοκρασία μίξης να κυμαίνεται μεταξύ των +10 και +26 ^{0}C. Εάν η θερμοκρασία είναι εκτός αυτού του εύρους τότε ειδικά μέτρα πρέπει να λαμβάνονται όπως διαφορετική αποθήκευση των αδρανών, θέρμανση ή ψύξη των αδρανών ή του νερού.

3. Απαιτήσεις για το τελικό προϊόν

Οι απαιτήσεις δοκιμίων για το σκληρυμένο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα δίνονται από τις προσωρινές μας εθνικές προδιαγραφές όπως φαίνεται στον πίνακα 7.7.

Μετρούμενη παράμετρος	**Πρότυπο**
Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής	Αν προδιαγράφεται, η μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής θα εκφράζεται σαν η μέση τιμή της μέγιστης αντοχής, καθοριζόμενη σε τρία δείγματα, σύμφωνα με το prEN 14488-3. Η δοκιμή κανονικά εκτελείται στις 28 ημέρες.
Καμπτική αντοχή κατά την αστοχία	Αν προδιαγράφεται, η καμπτική αντοχή κατά την αστοχία θα εκφράζεται σαν f_n όταν καθορίζεται σύμφωνα με το prEN 14488-3. Αν δεν ορίζεται διαφορετικά η δοκιμή εκτελείται στις 28 ημέρες.
Παραμένουσα αντοχή	Αν προδιαγράφεται η κατηγορία παραμένουσας αντοχής, αυτό θα γίνεται για ένα προδιαγεγραμμένο επίπεδο παραμόρφωσης. Η καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων θα καθορίζεται σε τρία δοκίμια σύμφωνα με το prEN 14488-3. Η δοκιμή κανονικά εκτελείται στις 28 ημέρες.

Πίνακας 7.7: Απαιτήσεις για το σκληρυμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες (ΠΕΤΕΠ εκτοξευόμενου σκυροδέματος)

Από τον ίδιο κανονισμό προβλέπεται επίσης ότι για τις ίνες είναι απαραίτητο σε κάθε παραλαβή να επιθεωρείται το μήκος, η διάμετρος και το σχήμα τους. Η δοκιμή για την επιβεβαίωση της ποσότητας των ινών στο νωπό αλλά και στο σκληρυμένο σκυρόδεμα γίνεται σύμφωνα με το prEN 14488-7. Η συμμόρφωση επιτυγχάνεται όταν καμία μέση τιμή μετρούμενης ποσότητας ινών από μια ομάδα τουλάχιστον 6 δοκιμίων δεν είναι μικρότερη από V_f–4 kg/m^3, όπου V_f είναι η απαιτούμενη τιμή για την περιεκτικότητα των ινών που έχει προσδιορισθεί με τις δοκιμές από την έναρξη της κατασκευής. Σύμφωνα με τον ENRARC, πρέπει να προκαθορίζεται το ελάχιστο ποσοστό ινών, είτε επί τόπου είτε στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, και σύμφωνα με το ποσοστό αυτό να γίνονται οι δοκιμές του ποιοτικού ελέγχου. Καθορίζει ότι καμία από τις δοκιμές που θα προκύψουν δεν πρέπει να είναι μικρότερη από το 75% της συμφωνηθείσας τιμής ενώ ο μέσος όρος πρέπει να προκύψει μεγαλύτερος από αυτήν. Το γεγονός ότι και οι δύο κανονισμοί δίνουν ένα τέτοιο περιθώριο λάθους προς τα κάτω έχει να κάνει με το ότι η αναπήδηση των ινών είναι μεγαλύτερη από αυτήν των υπόλοιπων συστατικών του μίγματος.

Παρόμοια κριτήρια συμμόρφωσης με αυτά των ινών δίδονται και για τις αντοχές του σκυροδέματος σε θλίψη και κάμψη, για την αντίστασή του σε διείσδυση νερού, στον παγετό κλπ.

Αντίστοιχα, οι αμερικάνικοι κανονισμοί προδιαγράφουν τις δοκιμές με τις οποίες μετράται η αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη και θλίψη, όπως δείχνει ο πίνακα 7.8. Όλες οι παρακάτω δοκιμές πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με το πρότυπο C 1077. Αυτό περιγράφει τις ελάχιστες απαιτήσεις του εργαστηρίου και του προσωπικού ώστε να είναι κατάλληλο να εκτελέσει τις δοκιμές αυτές.

Μετρούμενη παράμετρος	**Πρότυπα**
Καμπτική δυσθραυστότητα - Αντοχή πρώτης ρωγμής - Μέση παραμένουσα αντοχή	C 1018, C 1399, C 1609/C 1609 M
Καμπτική αντοχή	C 1018 και C 42/C 42 M ή C 78
Θλιπτική αντοχή	C 39/C 39 M ή C 42/ C 42 M

Πίνακας 7.8: Πρότυπα για μέτρηση παραμέτρων ινοπλισμένου σκυροδέματος (ASTM, C 1116)

Βέβαια, η αξιολόγηση δεν πρέπει να βασίζεται μόνο στην καμπτική ή θλιπτική αντοχή χωρίς να λαμβάνεται υπόψη και η δυσθραυστότητα.

4. Δυσθραυστότητα

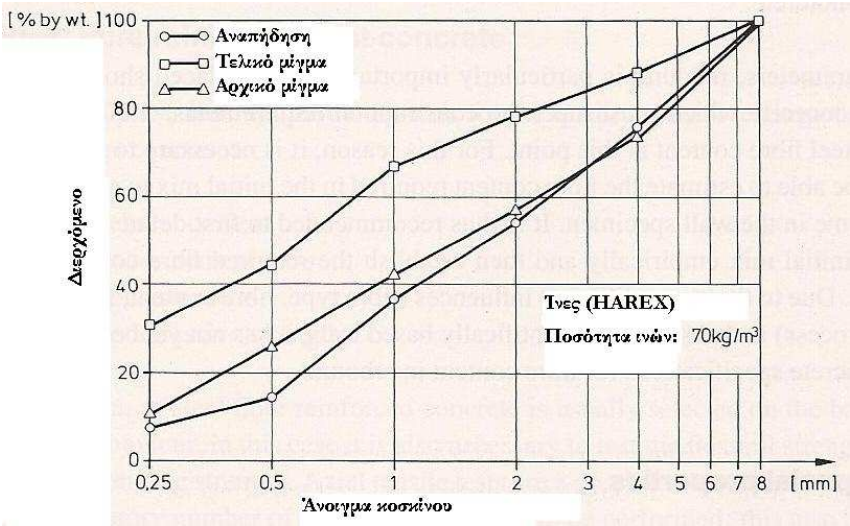
Η δυσθραυστότητα είναι το μέγεθος εκείνο που πρακτικά χρησιμοποιείται περισσότερο για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Περιγράφει την ενέργεια που απορροφάται πριν και μετά τη θραύση του δοκιμίου. Δεν είναι ένα μέγεθος που δείχνει κάποιου είδους αντοχή και μάλιστα δε συσχετίζεται με τη θλιπτική και καμπτική αντοχή (Malmgren). Βέβαια, εκτός από την τιμή της, πολύ σημαντική είναι και η εξέταση της μορφής της ίδιας της καμπύλης. Σύμφωνα με τον EFNARC (1996) καθορίζεται είτε από την κλάση παραμένουσας αντοχής στην οποία ανήκει (από δοκιμές σε δοκάρια) είτε από την δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας (δοκιμές σε πλάκες). Οι τιμές αυτές δεν είναι συγκρίσιμες μεταξύ τους αφού τα δοκίμια είναι διαφορετικού τύπου. Ωστόσο προσπάθειες έχουν γίνει για το συσχετισμό μεταξύ τους (Bernard, 2001). Πέρα από τον EFNARC, υπάρχουν και άλλα ακόμη πρότυπα για τον υπολογισμό της δυσθραυστότητας, ανάλογα με τον τύπο του δοκιμίου. Έτσι, για τα πρισματικά δοκίμια (δοκοί) χρησιμοποιούνται συχνότερα τα πρότυπα C 1018 και C 1609 της ASTM και το ιαπωνικό πρότυπο JSCE SF4. Στις τετράγωνες πλάκες αναφέρεται ο EFNARC ενώ στις αμερικάνικες προδιαγραφές (ASTM, C 1550) γίνεται χρήση κυκλικών πλακών. Τέλος, υπάρχουν και κάποιες ακόμη, όχι τόσο διαδεδομένες, όπως η δοκιμή σημειακής φόρτισης (Double Punch ή Barcelona Test) που μετρά εφελκυσμό και μέσω συσχέτισης δίνει την απορρόφηση ενέργειας.

Ο υπολογισμός της τιμής της δυσθραυστότητας είναι ευκολότερο να γίνει μέσω δοκιμών κάμψης. Εκτός αυτού, οι καμπτικές φορτίσεις προσομοιώνουν καλύτερα την επί τόπου εντατική κατάσταση του ινοπλισμένου σκυροδέματος (ACI 544.2R-89).

Στο κεφάλαιο 10 παρατίθενται οι πιο σημαντικές πρότυπες δοκιμές σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ανάλογα με το είδος του δοκιμίου που εξετάζεται. Για κάθε μία από τις δοκιμές αυτές προκύπτει και η τιμή της δυσθραυστότητας.

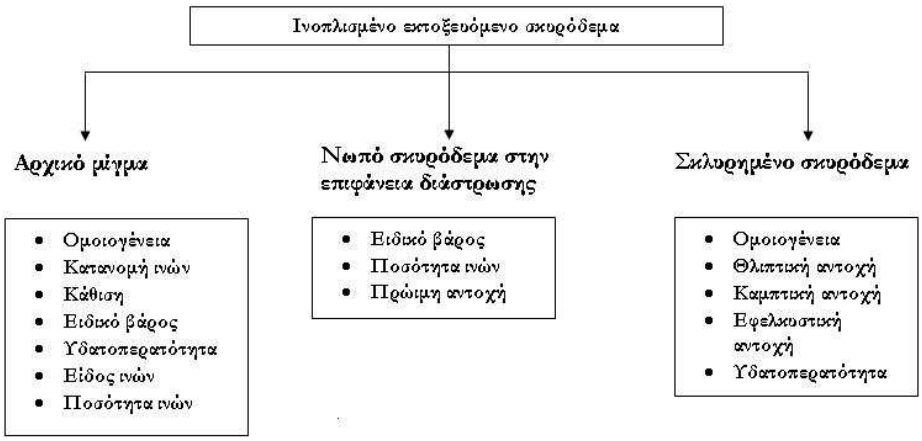
5. Ποιοτικός έλεγχος

Όταν γίνεται χρήση εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος, είναι σημαντικό ότι τόσο το αρχικό μίγμα όσο και το τελικό να συμπεριλαμβάνονται στις δοκιμές του ποιοτικού ελέγχου. Οι διαφορές των δύο μιγμάτων οφείλονται στην αναπήδηση και την αλλοιωμένη τελική κοκκομετρική καμπύλη. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.9, οι μεγαλύτεροι κόκκοι είναι αυτοί που τείνουν να αναπηδούν περισσότερο (Maidl, 1995).



Διάγραμμα 7.9: Σύγκριση κοκκομετρικής κατανομής πριν και μετά την εκτόξευση και της αναπήδησης για χαλύβδινες ίνες (Maidl, 1995)

Έτσι η σύνθεση δεν παραμένει σταθερή και οι έλεγχοι που πρέπει να γίνονται εξακριβώνουν τους παράγοντες που φαίνονται στο διάγραμμα 7.10.



Διάγραμμα 7.10: Εξέταση ικανοτήτων για ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (Maidl, 1995)

Επίσης είναι απαραίτητο να δοκιμάζεται και ο εξοπλισμός που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί διότι η επιρροή του μπορεί να είναι καθοριστική στην ποιότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maidl, 1995).

Για τον ποιοτικό έλεγχο του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι πιο διαδεδομένες δοκιμές είναι αυτές της δυσθραυστότητας και της απορρόφησης ενέργειας από δοκούς και πλάκες αντίστοιχα. Οι δοκιμές σε πλάκες (πανέλα) γενικά θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν καλύτερα τη σχετική συμπεριφορά των διάφορων ινοπλισμένων σκυροδεμάτων στις επενδύσεις των σηράγγων. Η εκτίμηση των επιδόσεων των πλακών είναι πιο επιθυμητή επειδή αυτές αστοχούν λόγω ενός συνδυασμού φορτίσεων που αντιπροσωπεύουν τις επί τόπου πιέσεις καλύτερα από όλες τις άλλες δοκιμές των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων (Cengiz, Turanli, 2001).

Η ACI με την οδηγία 544.2R περιγράφει τις μεθόδους με τις οποίες πρέπει να παρασκευάζονται τα δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος και τις αντίστοιχες δοκιμές τους σε θλίψη, κάμψη, αξονικό εφελκυσμό, κρούση, ψύξη - απόψυξη και συστολή ξήρανσης. Αναλύεται επίσης και η μέθοδος υπολογισμού της δυσθραυστότητας.

6. Πλάκες

Οι δοκιμές κάμψης σε πλάκες ξεκίνησαν από τη γαλλική εταιρία σιδηροδρόμων το 1989. Αντίθετα με τις δοκούς, οι πλάκες υπόκεινται σε κεντρική φόρτιση στο κέντρο τους. Οι πλάκες μπορεί να είναι κυκλικές ή τετράγωνες. Και στις δύο περιπτώσεις ο ρυθμός βύθισης του εμβόλου είναι ίσος με το 1/20 του ελεύθερου εύρους της πλάκας έτσι ώστε να δημιουργεί ένα μεγάλο εύρος αστοχίας που θα περιλαμβάνει πάνω από μια μεγάλη ρωγμή αστοχίας (Maccaferri).

Αυτού του είδους οι δοκιμές έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής στην πράξη λόγω της απλότητάς τους. Από την άλλη πλευρά, τα αποτελέσματα των δοκιμών τους εμφανίζουν μεγάλα εύρη τιμών (η στατιστική διασπορά είναι μεγάλη) γεγονός που οφείλεται και στην ύπαρξη μιας παραπάνω στήριξης της πλάκας. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η δοκιμή της κυκλικής πλάκας που στηρίζεται σε τρεις αρθρώσεις (Maccaferri). Στον πίνακα 7.11 φαίνονται τα πρότυπα που ακολουθούνται για τις δοκιμές πλάκας ανά χώρα.

Χώρα	**Δοκιμή**	**Έτος**	**Διαστάσεις axbxd(mm)**
UE	EFNARC, CEN TC229	1996 -	600x600x100
Ελβετία	SIA 162/6	1999	600x600x100
Νορβηγία	NB έκδοση n^0 7	1999	600x600x100
Αυστρία	OBV	1998	600x600x100
ΗΠΑ	ASTM C 1550	2005	Ø800x75

Πίνακας 7.11: Δοκιμές κάμψης σε πλάκες (Maccaferri)

Οι παραπάνω δοκιμές εκτελούνται όλες με στήριξη των πλακών σε όλη τους την περίμετρο, εκτός από αυτήν της ASTM που η πλάκα στηρίζεται σε τρία σημεία. Η κατάταξη γίνεται σε κλάσεις ανάλογα με την απορρόφηση ενέργειας (Joules), με τους περισσότερους κανονισμούς να υιοθετούν τρείς κλάσεις.

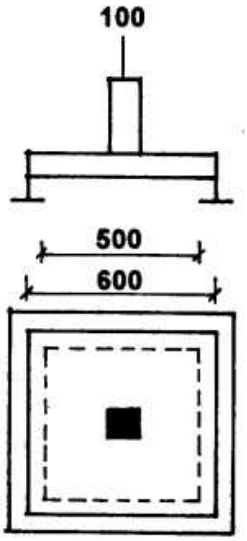
Οι δοκιμές σε πλάκες αντιπροσωπεύουν καλύτερα από τις δοκούς τη μορφή της επένδυσης και τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται το φορτίο. Επίσης, στην

πραγματικότητα οι ίνες δρουν τουλάχιστον σε δύο διαστάσεις και όχι μόνο σε μια, όπως συμβαίνει με τις δοκιμές δοκών. Τέλος, για σύγκριση των ινών με το πλέγμα η δοκιμή σε πλάκες είναι πιο αντικειμενική (Vandewalle, 1993).

Η διαδοχική ρωγμάτωση της πλάκας κατά τη φόρτιση, εξαναγκάζει την ενεργοποίηση των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών και την ανακατανομή των τάσεων. Η μορφή και η αντοχή των ινών καθορίζουν αν οι τελευταίες θα αστοχήσουν σε θραύση ή θα εξολκευθούν (Π. Κατσικογιάννη, Π. Νομικός, Guy Perrier d' Auxion, Μ. Μιχαηλίδης, Α. Σοφιανός, 2008).

6.1 Τετράγωνες πλάκες - EFNARC

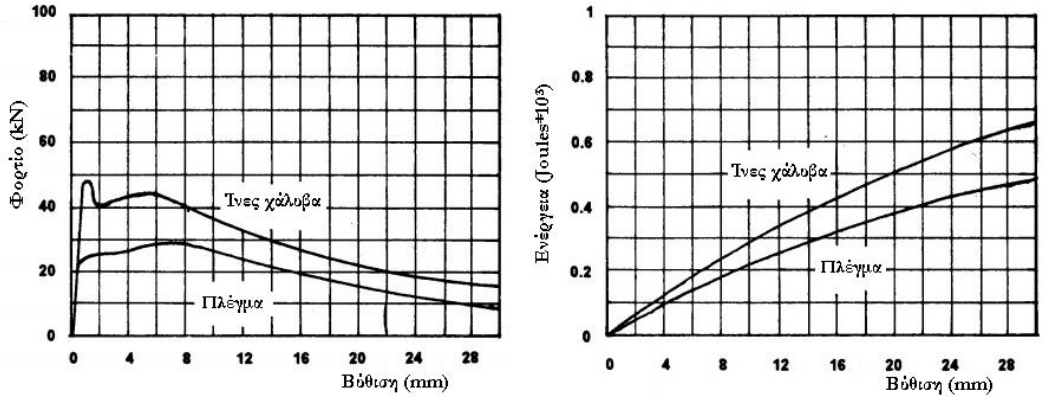
Η δοκιμή γίνεται σε πλάκα διαστάσεων 600x600x100 mm. Η τετραέρειστη αυτή πλάκα φορτίζεται κεντρικά από τετραγωνική επιφάνεια πλευράς 100 mm. Τοποθετείται με την τραχεία επιφάνεια στην κάτω πλευρά, έτσι το φορτίο επιβάλλεται αντίθετα από την κατεύθυνση ψεκασμού. Προτείνεται ρυθμός βύθισης του εμβόλου στο κέντρο της πλάκας ίσος με 1.5 mm/min. Η διάταξη της δοκιμής φαίνεται στην εικόνα 7.12.



Εικόνα 7.12: Δοκιμή δοκιμής πλάκας (EFNARC, 1996)

Η πλάκα πρέπει να είναι προϊόν εκτόξευσης σκυροδέματος σε πανέλο, σε μια μόνο στρώση. Το πάχος πρέπει να είναι 100 mm με απόκλιση ±10 mm. Εάν υπάρχουν προεξοχές στην τελική επιφάνεια αυτές κόβονται στο εργαστήριο. Οι έτοιμες πλάκες πρέπει να τοποθετηθούν σε νερό για τουλάχιστον τρεις μέρες πριν τη δοκιμή και να παραμείνουν υγρές και κατά τη διάρκειά της.

Η καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης πρέπει να καταγράφεται μέχρις ότου η βύθιση φθάσει τα 25 mm στο κεντρικό σημείο της πλάκας. Από την καμπύλη αυτή μπορεί να προκύψει μια ακόμη που δείχνει την απορροφούμενη ενέργεια σα συνάρτηση της βύθισης. Η απαίτηση για συγκεκριμένη τιμή δυσθραυστότητας εκφράζεται εδώ σαν απορροφούμενη ενέργεια για μια συγκεκριμένη τιμή βύθισης. Το διάγραμμα 7.13 δείχνει παραδείγματα χαρακτηριστικών καμπύλων φορτίου - παραμόρφωσης και αντίστοιχα φορτίου - βέλους κάμψης.



Διάγραμμα 7.13: Καμπύλη φορτίου - βύθισης και ενέργειας απορρόφησης - βύθισης, EFNARC 1996

Σύμφωνα με τον κανονισμό, διακρίνονται τρεις κατηγορίες ινοπλισμένου σκυροδέματος από πλευράς απορροφούμενης ενέργειας, όπως φαίνονται στον πίνακα 7.14. Η ενέργεια αυτή αντιστοιχεί σε βύθιση 25 mm.

Κλάση	Ενέργεια (J)	Χρήση
a	500	Για υγιείς συνθήκες εδάφους/βράχου
b	700	Για μέτριες συνθήκες εδάφους/βράχου
c	1000	Για δύσκολες συνθήκες εδάφους/βράχου

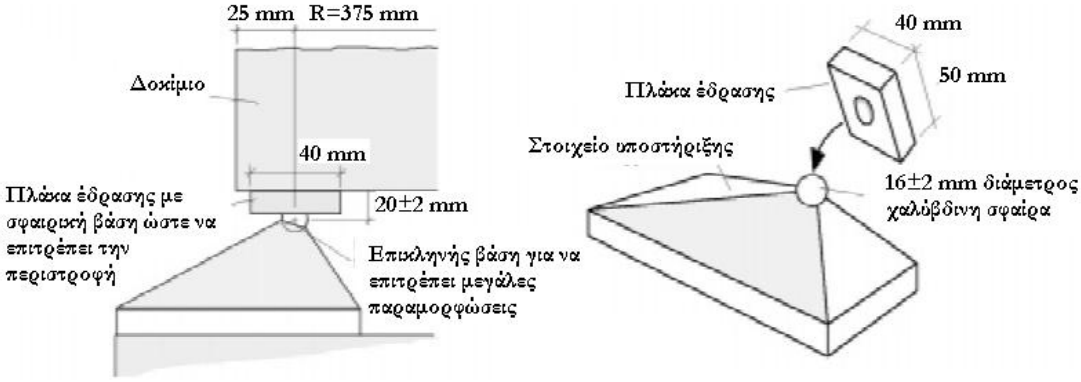
Πίνακας 7.14: Κλάσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος (EFNARC, 1996)

6.2 Κυκλικές πλάκες - ASTM C 1550-03a

Στη δοκιμή αυτή, κυκλικές πλάκες στηρίζονται σε τρία συμμετρικά τοποθετημένα σημεία. Το φορτίο επιβάλλεται στο κέντρο και έτσι αναπτύσσεται επίπεδη κάμψη. Οι επιδόσεις του υλικού μετρώνται μέσω της απορροφούμενης ενέργειας, μέχρι ένα σημείο βύθισης. Αυτή εκφράζει την ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να ανακατανέμει τις τάσεις, μετά τη ρωγμή. Στη διάταξη με τις τρεις στηρίξεις, οι τάσεις που ασκούνται σε αυτές είναι γνωστές πριν τη θραύση και άγνωστες μετά από αυτήν, διότι είναι άγνωστη η κατανομή της καμπτικής αντίστασης στις ρωγμές. Πλεονεκτήματα χρήσης της δοκιμής αυτής είναι η κατάργηση της ανάγκης για κόψιμο των δοκιμίων και η μικρή μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων που δίνει. Έτσι, ενώ στις δοκιμές πλάκας του EFNARC έχουμε μεταβλητότητα από 13 έως 18%, στην δοκιμή κυκλικής πλάκας αυτή μειώνεται σε 6 έως 13%. Έτσι, εκτεταμένη χρήση της δοκιμής αυτής στην Αυστραλία έχει μειώσει το κόστος του ποιοτικού ελέγχου στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα κατά 40% (Bernard, 2003).

Η ενέργεια που απορροφάται μέχρι μια συγκεκριμένη βύθιση σχετίζεται με τη δυσθραυστότητα του υλικού αλλά είναι συγκεκριμένη για αυτό το δοκίμιο. Η επιλογή της πιο κατάλληλης τιμής βέλους κάμψης για το υλικό εξαρτάται από τη χρήση που αυτό τελικά θα έχει. Έτσι, ενώ για μια τελική επένδυση σήραγγας, όπου μικρές έως ελάχιστες μετακινήσεις αναμένονται, ενδιαφέρει η ενέργεια απορρόφησης μέχρι τα 5 mm. Αντίθετα, σε προσωρινές επενδύσεις σηράγγων όπου μπορεί να υπάρχουν συνθλίβοντα ή διογκούμενα υλικά, ή και σε μεταλλευτικά έργα, ενδιαφέρει η ενέργεια απορρόφησης μέχρι τα 40 mm.

Η μηχανή που χρησιμοποιείται πρέπει να έχει την ικανότητα να επιβάλλει σταθερό ρυθμό βύθισης και όχι σταθερό ρυθμό φόρτισης. Η πλάκα εδράζεται επάνω σε τρεις αρθρώσεις, χωρίς να εφάπτεται σε κανένα άλλο σημείο της μηχανής. Οι αρθρώσεις επιτρέπουν την περιστροφή των σπασμένων τμημάτων της πλάκας. Η διάταξη αυτή φαίνεται στην εικόνα 7.15.



Εικόνα 7.15: Λεπτομέρεια της στήριξης της πλάκας (ASTM, C 1550-03a)

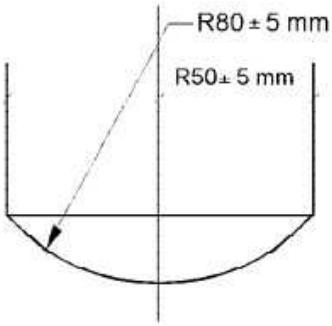
Τα δοκίμια είναι έχουν διάμετρο 800±10 mm και πάχος 75±15 mm. Οι διαστάσεις αυτές πρέπει να διατηρούνται ανεξάρτητα από το χρησιμοποιούμενο μέγεθος αδρανών και ινών. Για δοκιμές σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, καλό είναι το σκυρόδεμα στο πανέλο να εκτοξεύεται με τον ίδιο τρόπο με τον οποίο γίνεται η εκτόξευση επί τόπου (εικόνα). Το πάχος της πλάκας παίζει πολύ μεγαλύτερο ρόλο στα αποτελέσματα σε σχέση με τη διάμετρο. Συντελεστές διόρθωσης προτείνονται σε περίπτωση που οι πλάκες δεν έχουν τις προδιαγραφόμενες διαστάσεις.

Οι δοκιμές με κυκλικές πλάκες μπορούν να γίνουν και πολύ σύντομα μετά την εκτόξευση του σκυροδέματος, ακόμη και δύο ώρες αργότερα, ανάλογα με τη δόση του επιταχυντή. Έτσι γίνεται ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των πρώιμων αντοχών του υλικού.

Εικόνα 7.16: Κυκλικές πλάκες σκυροδέματος στον Καναδά (Bernard, 2003)

Η εκτέλεση της δοκιμής γίνεται με τοποθέτηση της επιφάνειας της πλάκας στην επάνω πλευρά. Έτσι το φορτίο επιβάλλεται κατά τη φορά εκτόξευσης από ειδικό ημισφαιρικό χαλύβδινο πιστόνι με διαστάσεις όπως φαίνονται στην εικόνα 8.7. Ο ρυθμός

βύθισης πρέπει να είναι 4.0±1.0 mm/min μέχρι να επιτευχθεί βύθιση τουλάχιστον 45.0 mm.



Εικόνα 7.17: Απόληξη πιστονιού φόρτισης της πλάκας (ASTM, C 1550-03a)

Η βύθιση που θα προκαλέσει την αστοχία του σκυροδέματος έχει παρατηρηθεί ότι είναι περίπου 0.50 mm για πλάκες πάχους 75 mm. Έτσι, με ρυθμό φόρτισης 4.0 mm/min η αστοχία θα προκύψει στα 8 sec περίπου. Η εμπειρία έχει δείξει ότι λίγο μετά την επαφή του πιστονιού στην πλάκα αρχίζουν κάποιες τοπικές μικροθραύσεις. Έρευνα έχει επίσης δείξει ότι μικρές αλλαγές στον ρυθμό της βύθισης επηρεάζουν ελάχιστα την απορρόφηση ενέργειας (για ρυθμό από 0.5 έως 10 mm/min).

Μια επιτυχημένη δοκιμή περιλαμβάνει αστοχία της πλάκας με τρεις τουλάχιστον ακτινικές μεγάλες ρωγμές. Οι πλάκες ορισμένες φορές αστοχούν με παρόμοιο τρόπο με τις δοκούς, δηλαδή με μία μόνο ρωγμή που χαρακτηρίζεται από χαμηλή απορρόφηση ενέργειας. Τα αποτελέσματα από τέτοιες δοκιμές πρέπει να απορρίπτονται. Μετά την εκτέλεση της δοκιμής πρέπει να γίνεται καταμέτρηση των ακτινικών ρωγμών ανάμεσα στο κέντρο και την περίμετρο. Λαμβάνονται υπόψη ρωγμές με μέσο άνοιγμα μεγαλύτερο των 0.5 mm.

Γενικά, μικρές ποσότητες ενέργειας απορροφούνται από την πλάκα στην ελαστική φάση της δοκιμής. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας απορροφάται κατά τη διαδικασία της εξόλκευσης των ινών και της παραμόρφωσης που συμβαίνει καθώς μεγαλώνει το άνοιγμα των ρωγμών. Ρωγμές που δεν έχουν μεγάλο άνοιγμα δεν απορροφούν σημαντικά ποσά ενέργειας και έτσι δε λαμβάνονται υπόψη. Δεδομένου ότι το μέσο μέγιστο άνοιγμα ρωγμής για κάθε μια από τις τρεις ακτινικές είναι τα 10 mm στα 40 mm βύθισης, μια ρωγμή με άνοιγμα λιγότερο από 0.5 mm θεωρείται αμελητέα.

Ανάλογα με τη διάταξη που έχει γίνει η καταγραφή της βύθισης και κατά συνέπεια το διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης, το πρότυπο αναλύει τη μέθοδο υπολογισμού της απορροφούμενης ενέργειας. Η δυσθραυστότητα σε αυτή τη δοκιμή τυπικά ορίζεται για βέλη κάμψης στα 5, 10, 20 ή 40 mm.

7. Πρισματικά δοκίμια - Δοκοί

Στα δοκίμια αυτού του τύπου γίνονται δοκιμές τριών και τεσσάρων σημείων, με σκοπό την κάμψη τους και τη μέτρηση της δυσθραυστότητας. Έτσι, το δοκίμιο πατάει πάντα σε δύο σημεία και ανάλογα με τη δοκιμή φορτίζεται σε ένα ή δύο ακόμη σημεία.

Τα δοκίμια προέρχονται από κοπή των πλακών που έχουν προκύψει από την εκτόξευση σε πανέλα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές τις ASTM, η φόρτιση των δοκιμίων

στη μηχανή πρέπει να γίνεται με την ίδια φορά με την οποία έγινε και η εκτόξευση (ASTM C 1609/1609-05). Ο λόγος για τον οποίο πρέπει να γίνεται αυτό είναι ότι ο προσανατολισμός των ινών δεν είναι τυχαίος και δημιουργεί ανισοτροπία στο σκυρόδεμα.

Μειονέκτημα των δοκιμών αυτών είναι η αυξημένη διακύμανση των αποτελεσμάτων τους. Ιδιαίτερα στη δοκιμή τεσσάρων σημείων αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η θραύση μπορεί να συμβεί ανάμεσα στα δύο σημεία φόρτισης ενώ η βύθιση μετράται πάντα στο κέντρο (William, Hustrulid, 2001).

Οι δοκιμές μπορούν να γίνουν σύμφωνα με πολλούς διαφορετικούς κανονισμούς. Ενδεικτικός της ποικιλίας αυτής είναι ο πίνακας 7.18 που παρουσιάζει τον τύπο της δοκιμής και τις απαιτούμενες διαστάσεις της δοκού.

Δοκιμή	**Χώρα**	**Έτος**	**Φόρτιση**	**Διαστάσεις wxdxl(mm)**
RILEM TC 162-TDF	Παγκόσμιο	2000	3 σημείων	150x150x550
ASTM C 1018	ΗΠΑ	1997	3 & 4 σημείων	100x100x350 150x150x500
EFNARC	Ευρώπη	1996	3 & 4 σημείων	125x75x600
JSCE-SF4	Ιαπωνία	1984	3 & 4 σημείων	100x100x380 150x150x530
DVB tunneling	Γερμανία	1996	3 & 4 σημείων	150x150x700
OBV guide	Αυστρία	1998	3 & 4 σημείων	100x100x400 150x150x600
NBN B-15-238	Βέλγιο	1992	3 & 4 σημείων	150x150x600
NF P 18-409	Γαλλία	1993	-	140x140x560
AENOR UNE 83-5xx	Ισπανία	2000	3 & 4 σημείων	150x150x600
UNI 11039	Ιταλία	2003	4 σημείων	150x150x600

Πίνακας 7.18: Σύγκριση διάφορων κανονισμών φόρτισης δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος, (Maccaferri)

Εκτός των παραπάνω διαφορών που αφορούν στις διαστάσεις, μερικές από τις δοκιμές αυτές (RILEM, UNI κά) προβλέπουν την ύπαρξη εγκοπής στο μέσον του κάτω μέρος της δοκού. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιβάλλουν τη μέγιστη αστοχία και τη θραύση να συμβεί σε ελεγχόμενο σημείο (Hillerborg, 1985 και Lee & Barr, 2003). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με τις υπόλοιπες. Σκοπός της ύπαρξης της εγκοπής είναι να περιορίζει τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δοκιμές. Ωστόσο καθιστά αδύνατη την εκτίμηση της πραγματικής τιμής της αντοχής, αφού πλέον η αστοχία γίνεται σε δεδομένη θέση ανεξάρτητα από την ύπαρξη μιας ασθενούς ζώνης στο υλικό (Schorn 2001).

7.1 ASTM C 1018-97

Από τις προαναφερθείσες δοκιμές, στη βιβλιογραφία αυτή που έχει εφαρμοσθεί περισσότερο είναι C 1018 της ASTM. Σκοπός της δοκιμής αυτής είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς σε κάμψη και της δυσθραυστότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε δοκιμή τεσσάρων σημείων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται οι δείκτες δυσθραυστότητας και παραμένουσας αντοχής. Κατά την εκτέλεση της δοκιμής, σε σέρβο-ελεγχόμενη πάντα μηχανή, καταγράφεται σε ένα διάγραμμα Χ-Υ η καμπύλη βύθισης (βέλος κάμψης) - φορτίου.

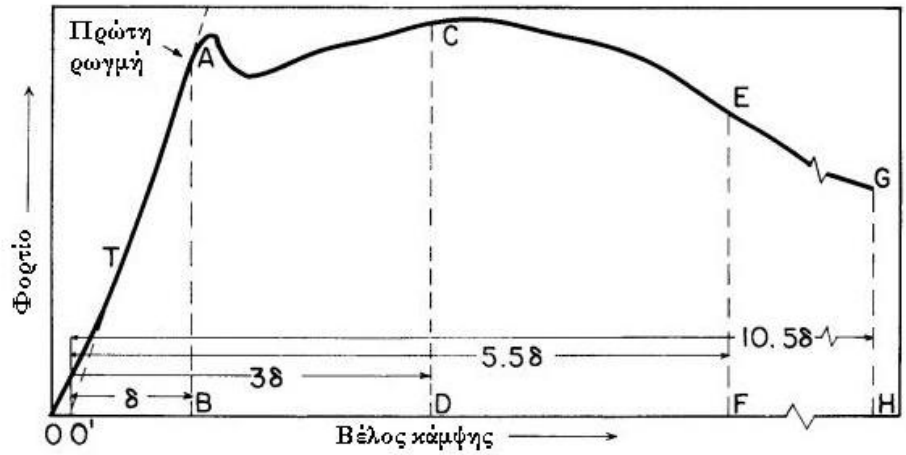
Τα δοκίμια μπορεί να είναι από εκτοξευόμενο ή έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Ιδιαίτερη σημασία για τη σωστή εκτέλεση της δοκιμής στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα παίζει ο προσανατολισμός των ινών. Επειδή αυτές τείνουν να είναι παράλληλα με την επιφάνεια εκτόξευσης, τα δοκίμια πρέπει να έχουν ύψος όσο το πάχος της επένδυσης και να φορτίζονται με την ίδια φορά με την οποία έχουν εκτοξευθεί.

Η δοκιμή εκτελείται όχι με σταθερή επιβολή φορτίου αλλά με σταθερή αύξηση της βύθισης. Αυτή μετριέται συνήθως με ηλεκτρονικά παραμορφωσίμετρα (LVDT), που τοποθετούνται ακριβώς στο μέσον του δοκιμίου και με τη βοήθεια καταγραφικού απεικονίζεται στην οθόνη του υπολογιστή οι μετρήσεις αυτές. Ο ρυθμός βύθισης του εμβόλου πρέπει να είναι της τάξης των 0.05 έως 0.10 mm/min έως ότου ολοκληρωθεί η δοκιμή. Στην περίπτωση που οι δοκοί δεν έχουν τις προδιαγραφόμενες διαστάσεις (350x100x100), πρέπει να επιλεχθεί τέτοιος ρυθμός βύθισης του εμβόλου ώστε η εμφάνιση της πρώτης ρωγμής να γίνεται μέσα σε 30 - 60 sec. Η πρώτη ρωγμή στο δοκίμιο είναι στην καμπύλη το σημείο όπου αυτή πρώτη φορά γίνεται μη γραμμική, δηλαδή εκεί που έχει σπάσει πλέον εμφανώς το σκυρόδεμα. Στη δοκιμή τεσσάρων σημείων μπορεί να υπολογισθεί το βέλος κάμψης στο σημείο αυτό, υποθέτοντας ελαστική συμπεριφορά μέχρι την πρώτη ρωγμή, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\delta = \frac{23 * P * L^2}{1296 * E * I} * \left[1 + \frac{216 * D^2 * (1+\mu)}{115 * L^2} \right], \text{ ASTM C 1018-97}$$

Όπου: δ = το βέλος κάμψης κατά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής
P = το φορτίο πρώτης ρωγμής
L = το εύρος φόρτισης
E = το εκτιμώμενο μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος
I = ροπή αδρανείας της διατομής
D = ύψος του δοκιμίου
μ = ο λόγος Poisson

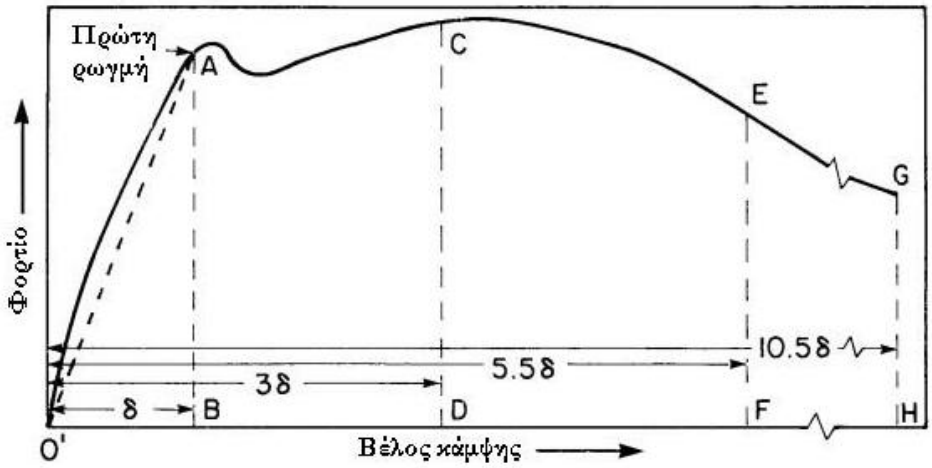
Οι υπολογισμοί των δεικτών δυσθραυστότητας και παραμένουσας αντοχής βασίζονται στην καμπύλη που προκύπτει από τη δοκιμή. Το πρότυπο αναγνωρίζει δύο περιπτώσεις ανάλογα με τη μορφή της καμπύλης και το πώς στρέφονται τα κοίλα της στο ελαστικό κομμάτι της συμπεριφοράς του υλικού. Στην πρώτη περίπτωση, η καμπύλη είναι κοίλη, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.19.



Διάγραμμα 7.19: Κοίλη μορφή καμπύλης φορτίου - βέλους κάμψης (ASTM, C 1018-97)

Για την εύρεση του σημείου πρώτης θραύσης από το διάγραμμα, υποθέτουμε ένα γραμμικό κομμάτι της καμπύλης και βρίσκουμε το σημείο από το οποίο η κλίση αλλάζει απότομα, όπως συμβαίνει στο σημείο Α. Για να διορθώσουμε όμως τα αποτελέσματα, προσδιορίζουμε το γραμμικό αυτό τμήμα που χρησιμοποιήθηκε πριν και είναι το ΑΤ σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα. Στη συνέχεια, προεκτείνουμε μέχρι το σημείο Ο' με σκοπό να χρησιμοποιείται το ευθύγραμμο τμήμα Ο'ΤΑ στους υπολογισμούς αντί της περιοχής που ορίζει η καμπύλη ΟΤΑ.

Η καμπύλη όμως, σύμφωνα πάντα με το ίδιο πρότυπο, μπορεί να έχει κυρτή μορφή, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.20.



Διάγραμμα 7.20: Κυρτή μορφή καμπύλης φορτίου - βέλους κάμψης (ASTM, C 1018-97)

Το σημείο στης καμπύλης που αντιπροσωπεύει την πρώτη ρωγμή είναι εκεί όπου η κυρτότητα αυξάνει απότομα και η κλίση της καμπύλης παρουσιάζει μια εμφανή αλλαγή, όπως συμβαίνει κι εδώ για το σημείο Α. Στην περίπτωση αυτή η διόρθωση που πρέπει να γίνεται για τον περιορισμό του σφάλματος, είναι η χάραξη του τμήματος ΑΟ'. Στους υπολογισμούς των δεικτών θα χρησιμοποιείται η ευθεία ΑΟ' και όχι η αντίστοιχη καμπύλη.

Και στις δύο περιπτώσεις, από τις διορθώσεις που έγιναν και μετά, θα ισχύουν οι ίδιες σχέσεις. Το βέλος κάμψης (δ) ορίζεται ως το ευθύγραμμο τμήμα Ο'Β. Αυτό που

πρέπει να υπολογισθεί στη συνέχεια είναι η επιφάνεια AO'B. Οι δείκτες δυσθραυστότητας που ορίζει το πρότυπο είναι οι I_5, I_{10}, I_{20} και έχουν ως εξής:

$$I_5 = \frac{O'ACD}{O'AB},\ I_{10} = \frac{O'AEF}{O'AB},\ I_{20} = \frac{O'AGH}{O'AB}$$

Οι δείκτες αυτοί αντιπροσωπεύουν το λόγο της απορροφούμενης ενέργειας μέχρι ένα συγκεκριμένο επίπεδο βύθισης προς την απορροφούμενη ενέργεια μέχρι το βέλος κάμψης, δηλαδή μέχρι την πρώτη ρωγμή. Οι δείκτες παραμένουσας αντοχής που ορίζει το πρότυπο είναι:

$$R_{5,10} = 20*(I_{10} - I_5),\ R_{10,20} = 10*(I_{20} - I_{10})$$

Προέρχονται κατευθείαν από τη δυσθραυστότητα και καθορίζουν το επίπεδο της τάσης που διατηρείται μετά την πρώτη ρωγμή εκφράζοντας το μέσο φορτίο μετά τη θραύση ανάμεσα σε συγκεκριμένες τιμές βέλους κάμψης σαν ποσοστό του φορτίου της πρώτης ρωγμής. Η δοκιμή γενικά πρέπει να εκτελείται μέχρι η βύθιση να φθάσει στο σημείο Η της καμπύλης (10.5δ).

Έτσι, σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο υπολογίζονται στις εργαστηριακές δοκιμές οι αντίστοιχοι δείκτες για το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Το άοπλο σκυρόδεμα αστοχεί σχεδόν αμέσως μετά την πρώτη ρωγμή. Για την αξιολόγηση όμως των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις εργαστηριακές δοκιμές για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ο πίνακας 7.21 κατηγοριοποιεί την ποιότητά του σε τέσσερις ομάδες, ανάλογα με τους δείκτες I_{10} και I_{20}. Ο διαχωρισμός αυτός έχει γίνει βάση εκτεταμένων ερευνών, σαν αποτέλεσμα του ποιοτικού ελέγχου, που έχουν γίνει στον Καναδά μέχρι το 1985.

Κατηγορία	**Ποιότητα**	**I_{10}**	**I_{20}**
I	Πτωχή	<4	<12
II	Μέτρια	4	12
III	Καλή	6	18
IV	Άριστη	8	24

Πίνακας 7.21: Προτεινόμενη περιγραφή για δείκτη δυσθραυστότητας I_{10} και I_{20}, Vandewalle 1993

Η οδηγία 544.1R της ACI αναφέρεται στον υπολογισμό της δυσθραυστότητας μέσω της δοκιμής C 1018 της ASTM. Η καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης που προκύπτει θα εξαρτάται εκτός των άλλως και από:

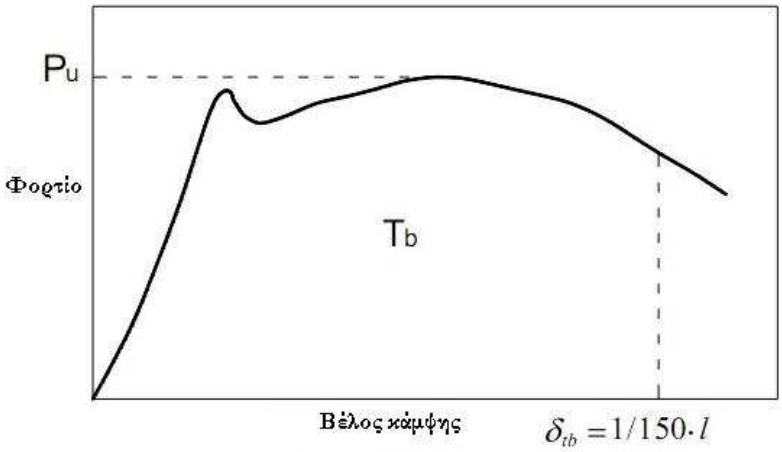
- Μέγεθος των δοκιμίων
- Είδος φόρτισης (τριών ή τεσσάρων σημείων)
- Ρυθμό φόρτισης
- Είδος του ελέγχου

Για να ελαχιστοποιηθεί η επιρροή αυτών των παραμέτρων, είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση της τιμής της απορροφούμενης ενέργειας. Για να γίνει αυτό, η απορροφούμενη ενέργεια που ορίζεται από το ινοπλισμένο σκυρόδεμα διαιρείται με την αντίστοιχη του άοπλου σκυροδέματος. Τα δύο δοκίμια πρέπει να είναι ίδιας σύνθεσης, ίδιου μεγέθους και να δοκιμασθούν υπό όμοιες συνθήκες. Το αποτέλεσμα θα είναι ένας

αδιάστατος δείκτης I_t που δείχνει τη σχετική βελτίωση στην απορρόφηση ενέργειας λόγω της προσθήκης των ινών. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μιγμάτων ινών (ACI 544.1R-89).

7.2 JSCE SF4 (JSCE 1984)

Σύμφωνα με το ιαπωνικό πρότυπο JSCE SF4 (1984) η αντοχή σε κάμψη (P_u) είναι η τιμή του φορτίου που αντιστοιχεί από το σημείο της καμπύλης φορτίου - βέλους κάμψης στη δοκιμή κάμψης.



Διάγραμμα 7.22: Καμπύλη φορτίου - βέλους κάμψης στο πρότυπο JSCE SF4 (Vandewalle, 1993)

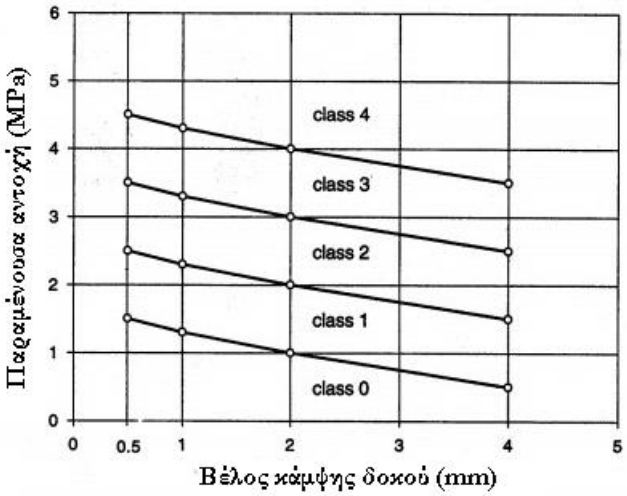
Η δυσθραυστότητας (T_b) ορίζεται ως το εμβαδόν της καμπύλη μέχρι το σημείο δ_{tb} (βέλος κάμψης), το οποίο είναι ίσο με το 1/150 του ανοίγματος της δοκού. Ορίζεται επίσης και ο συντελεστής δυσθραυστότητας (f_e) για δοκίμιο μήκους l, ύψους h και πλάτους b ως εξής:

$$f_e = \frac{T_b * l}{\delta_{tb} * b * h^2}, \text{JSCE SF4}$$

Όπου: $\delta_{tb} = \frac{1}{150} * l$

7.3 EFNARC

Δοκιμές σε δοκούς προβλέπονται και από τον EFNARC με σκοπό τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας μέσω της παραμένουσας αντοχής. Έτσι, ανάλογα με το διάγραμμα φορτίου - βύθισης προκύπτει η αντίστοιχη κλάση στην οποία ανήκει το υλικό. Υπάρχουν πέντε κλάσεις παραμένουσας αντοχής, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.23 και αντίστοιχα στον πίνακα 7.24.



Διάγραμμα 7.23: Κλάσεις παραμένουσας αντοχής (EFNARC, 1996)

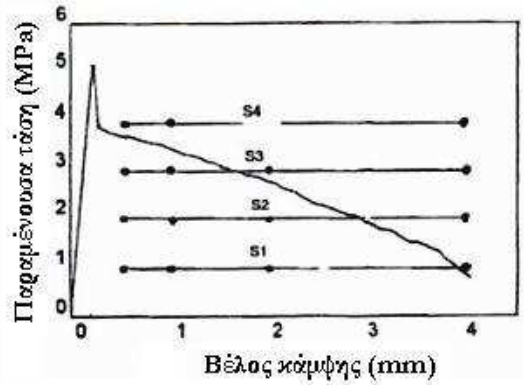
Κλάση παραμόρφωσης	**Βέλος κάμψης (mm)**	**Παραμένουσα αντοχή (MPa) για την κλάση**			
		1	**2**	**3**	**4**
	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5
Χαμηλή	1	1.3	2.3	3.3	4.3
Κανονική	2	1.0	2.0	3.0	4.0
Υψηλή	4	0.5	1.5	2.5	3.5

Πίνακας 7.24: Όρια μεταξύ των κλάσεων (EFNARC, 1996)

Ο πίνακας 7.24 καθορίζει ακριβώς τα όρια μεταξύ των κλάσεων παραμένουσας αντοχής. Τουλάχιστον δύο από τα τρία δοκίμια πρέπει να έχουν μια τιμή ίση ή μεγαλύτερη από την οριακή για να ανήκουν στην κλάση αυτή. Σκοπός των κλάσεων αυτών είναι να δώσουν στους σχεδιαστές τη δυνατότητα να έχουν ευελιξία στην επιλογή της παραμόρφωσης στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στις συγκεκριμένες απαιτήσεις του έργου.

7.4 Ευρωπαϊκοί κανονισμοί

Ο ευρωπαϊκός κανονισμός EN 206 αν και δεν προορίζεται για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, χρησιμοποιείται για να το κατατάξει σε κατηγορίες ανάλογα με τη συμπεριφορά του όπως αυτή αντικατοπτρίζεται στην καμπύλη φορτίου - βέλους κάμψης. Έτσι, αυτό που παίζει κι εδώ ρόλο είναι η παραμένουσα (διάγραμμα) αντοχή ενώ η κατάταξη σε κλάσεις γίνεται όπως και στον EFNARC σύμφωνα με τη βύθιση, με τη διαφορά ότι αυτή πλέον μετράται σύμφωνα μη τη γωνιακή παραμόρφωση (πίνακας) του δοκιμίου. Έτσι, κάθε κλάση βύθισης μπορεί να εκφρασθεί με μια αντίστοιχη γωνιακή στροφή, για παράδειγμα για ένα δοκίμιο με διαστάσεις 450mm x 125mm x 75 mm (Schorn 2001).



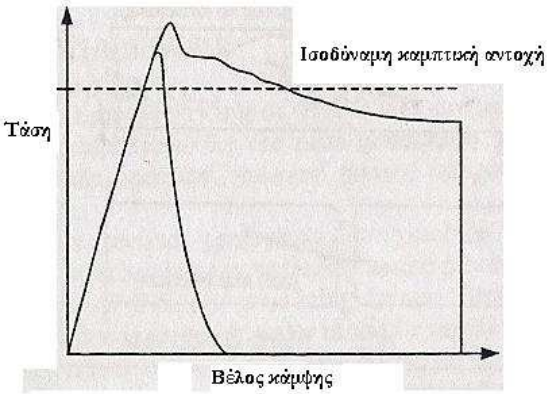
Διάγραμμα 7.25: Κλάσεις παραμένουσας αντοχής (European Standard on Sprayed Concrete, 2001)

Κλάση Παραμόρφωσης	Αντίστοιχη γωνιακή παραμόρφωση
D1	1/250
D2	1/125
D3	1/56

Πίνακας 7.26: Κλάσεις παραμόρφωσης (Schorn, 2001)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, τέσσερα επίπεδα παραμένουσας αντοχής (S1 - S4) ορίζονται, τα οποία σε συνδυασμό με τα εύρη παραμόρφωσης D μπορούν να προσδιορίζουν την κλάση παραμένουσας αντοχής. Έτσι, για το δοκίμιο του διαγράμματος 7.25, ισχύει ότι ικανοποιεί τις απαιτήσεις της κλάσης παραμένουσας αντοχής D1S3 (αντίστοιχα και τις D2S2 και D2S1).

Διαφορετική οπτική για τις κλάσεις παραμένουσας αντοχής υπάρχει στον γερμανικό κανονισμό (DBV 2001) και από την RILEM (2000). Αντίθετα με τους άλλους κανονισμούς που αναφέρονται στην παραμένουσα αντοχή, η ισοδύναμη καμπτική αντοχή (διάγραμμα 7.27) είναι το μέγεθος που πλέον εισάγεται και αποτελεί το απαιτούμενο κριτήριο.



Διάγραμμα 7.27: Ισοδύναμη καμπτική αντοχή (Schorn, 2001)

Η ισοδύναμη καμπτική αντοχή είναι μια τιμή που προκύπτει από τον μέσο όρο των μετρούμενων τιμών τάσης στην καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης που επηρεάζεται από το φαινόμενο της γεφύρωσης των ινών. Με άλλα λόγια, η ισοδύναμη καμπτική αντοχή προκύπτει από τη μετατροπή της περιοχής της αποτόνωσης της ενέργειας σε ένα σχήμα με μια οριζόντια πάνω γραμμή.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της μετατροπής είναι ότι προκύπτει ένα μέγεθος με μικρότερη διακύμανση αποτελεσμάτων σε σχέση με τους δείκτες δυσθραυστότητας. Έτσι, η κατάταξη σε κλάσεις γίνεται σε μικρότερα εύρη, όπως δείχνει ο πίνακας 7.28.

Κλάση παραμένουσας αντοχής (ευρωπαϊκό πρότυπο)	**Παραμένουσα τάση (MPa)**	**Κλάση (DVB 2001)**	**Ισοδύναμη καμπτική αντοχή (MPa)**
		0	<1.0
S1	>1	1	>1.0
		1.5	>1.5
S2	>2	2	>2.0
		2.5	>2.5
S3	>3	3	>3.0
S4	>4		

Πίνακας 7.28: Σύγκριση κατατάξεων παραμένουσας αντοχής και ισοδύναμης καμπτικής τάσης (Schorn, 2001)

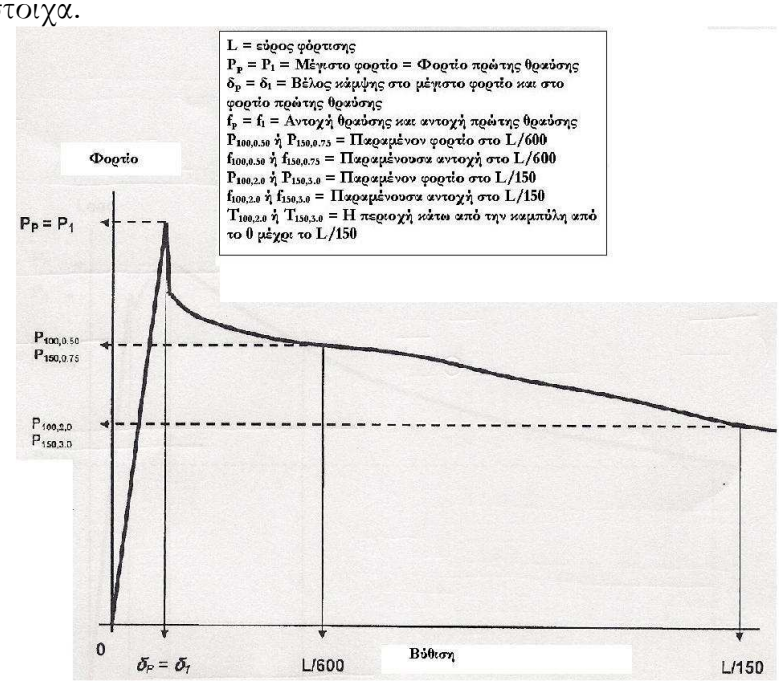
Η κατάταξη γίνεται σύμφωνα με την παραμόρφωση και εξαρτάται από τη μέγιστη τιμή της. Τα ευρωπαϊκά πρότυπα προβλέπουν τρία επίπεδα παραμόρφωσης ενώ οι γερμανικές οδηγίες χρησιμοποιούν αντίστοιχα δύο (Schorn 2001).

7.5 ASTM C 1609/C 1609M - 05

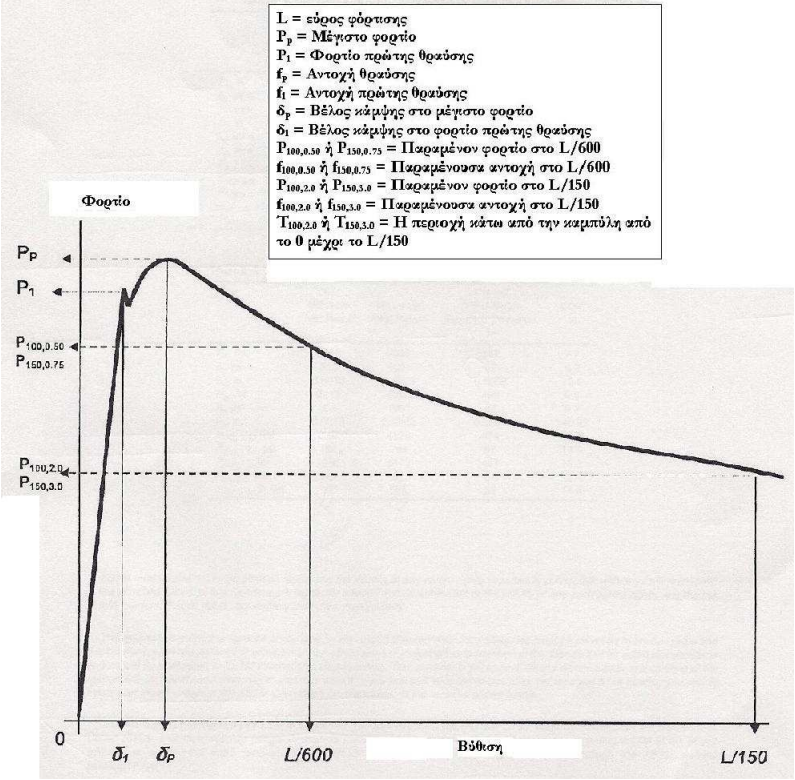
Η δοκιμή αυτή έχει σκοπό την αξιολόγηση της καμπτικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος με φόρτιση τεσσάρων σημείων σε δοκούς. Ουσιαστικά καλύπτει το ίδιο αντικείμενο με τη δοκιμή C 1018, διαφοροποιείται όμως στη μέθοδο υπολογισμού της παραμένουσας αντοχής. Στη δοκιμή C 1018 το σημείο που αντιστοιχεί στην πρώτη ρωγμή της καμπύλης φορτίου - παραμόρφωσης υπολογίζεται υποκειμενικά. Η ακρίβεια του καθορισμού του πάντα ήταν ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα. Επίσης, οι δείκτες I_5 και I_{10} δεν είναι πολύ χρήσιμοι για την έκφραση της φέρουσας ικανότητας του υλικού μετά τη θραύση διότι πέφτουν πιθανώς μέσα στη ζώνη αστάθειας της καμπύλης φορτίου - παραμόρφωσης. Για όλους αυτούς τους λόγους εισάγεται το πρότυπο C 1609 το οποίο ορίζει έναν καινούργιο και πιο αντικειμενικό τρόπο υπολογισμού της παραμένουσας αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Leung, Lai, Lee 2003).

Το πρότυπο ορίζει το μέγιστο φορτίο θραύσης (P_p), που είναι το υψηλότερο σημείο στην καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης, τη βύθιση στο σημείο αυτό (δ_P) και την αντίστοιχη αντοχή (f_p) που είναι η τάση που ασκείται και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (1). Ορίζονται επίσης οι παράμετροι παραμένοντος φορτίου και παραμένουσας αντοχής ανάλογα με το εύρος φόρτισης της δοκού (L) και ανάλογα βέβαια με το βέλος κάμψης. Τέλος, ορίζεται και η δυσθραυστότητα πάλι ανάλογα με το εύρος φόρτισης της δοκού αλλά για βέλος κάμψης ίσο με 1/150 του εύρους αυτού. Έτσι, η διαφοροποίηση του προτύπου αυτού έχει να κάνει στον τρόπο υπολογισμού της δυσθραυστότητας και της παραμένουσας αντοχής. Ενώ στο πρότυπο C 1018 αυτό γινόταν μέσω του βέλους κάμψης (δ) και αντίστοιχα στα σημεία 3δ, 5.5δ και 10.5δ τώρα θα γίνεται σε δύο σημεία, στα L/600 και L/150. Τα σημεία αυτά είναι δεδομένα, ανάλογα με το μήκος της δοκού, κι έτσι οι υπολογισμοί είναι αντικειμενικότεροι.

Η διαδικασία της δοκιμής είναι ίδια με την αντίστοιχη C 1018. Το δοκίμιο φορτίζεται σε τέσσερα σημεία, με προσανατολισμό φόρτισης ίδιον με αυτόν που έγινε η εκτόξευση, σε μηχανή που έχει ικανότητα να επιβάλει σταθερό ρυθμό βύθισης, από 0.05 έως 0.1 mm/min. Σκοπός είναι η εξαγωγή του διαγράμματος φορτίου - παραμόρφωσης, που σύμφωνα με το πρότυπο μπορεί να πάρει τις δύο μορφές των διαγραμμάτων 7.29 και 7.30 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 7.29: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης (ASTM, C 1609/C 1609 M)



Διάγραμμα 7.30: Καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης, (ASTM, C 1609/C 1609 M)

Το βέλος κάμψης μπορεί κι εδώ να υπολογισθεί με μαθηματικό τύπο, όπως και στη δοκιμή C 1018. Επίσης, όταν γνωρίζουμε το φορτίο πρώτης θραύσης P (N) υπολογίζεται και η αντίστοιχη τάση f (MPa), σύμφωνα με τη σχέση:

$$f = \frac{P \times L}{b \times d^2} \quad (1)$$

Όπου: b = το μέσο πλάτος του δοκιμίου (mm), στη θραύση
d = το μέσο ύψος του δοκιμίου (mm), στη θραύση

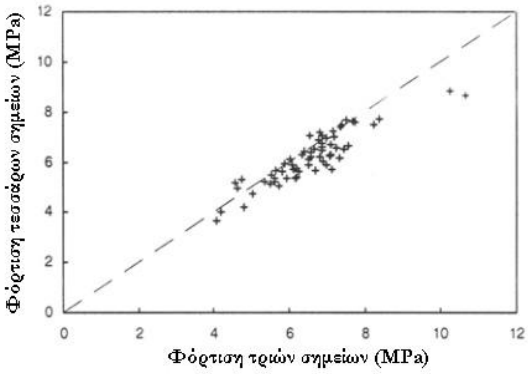
Ανάλογα με τη μορφή της καμπύλης που θα προκύψει υπολογίζονται όλοι οι παραπάνω παράμετροι, δηλαδή τα φορτία με τις αντίστοιχες τάσεις και η δυσθραυστότητα $T_{150,3.0}$ ή $T_{100,2.0}$.

8. Συσχετίσεις μεταξύ δοκιμών σε δοκούς και πλάκες

Για την επιλογή της δοκιμής για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος για μια συγκεκριμένη εφαρμογή, προκύπτει το ερώτημα ποια δοκιμή είναι η καταλληλότερη. Ο σχεδιασμός του μίγματος πλέον δεν γίνεται με συνταγές αλλά μέσω πειραματικών διαδικασιών. Έτσι, συσχετίσεις μεταξύ των πιο διαδεδομένων δοκιμών (πλάκες και δοκοί) θα ήταν πολύ χρήσιμες για την εκτίμηση του υλικού. Μια τέτοια έρευνα έχει γίνει από τον E. Bernard (2001) συσχετίζοντας τις δοκιμές τριών και τεσσάρων σημείων σε δοκούς, τις δοκιμές σε τετράγωνες και κυκλικές πλάκες καθώς και τις δοκιμές μεταξύ δοκών και πλακών.

8.1 Καμπτική αντοχή δοκών

Η συσχέτιση της καμπτικής αντοχής σε δοκούς με φόρτιση σε τρία και τέσσερα σημεία είναι αρκετά ικανοποιητική, αν και στη φόρτιση τριών σημείων τα αποτελέσματα είναι λίγο μεγαλύτερα, πιθανώς επειδή η αστοχία εξαναγκάζεται να συμβεί κοντά στο σημείο φόρτισης. Αντίθετα, στη φόρτιση τεσσάρων σημείων η αντίστοιχη περιοχή είναι σαφώς μεγαλύτερη αφού μπορεί να συμβεί οπουδήποτε ανάμεσα στα δύο σημεία φόρτισης. Αυτό επιτρέπει την αστοχία στην πιο αδύναμη ζώνη της περιοχής αυτής. Η συσχέτιση μεταξύ των δύο δοκιμών φαίνεται στο διάγραμμα 7.31.

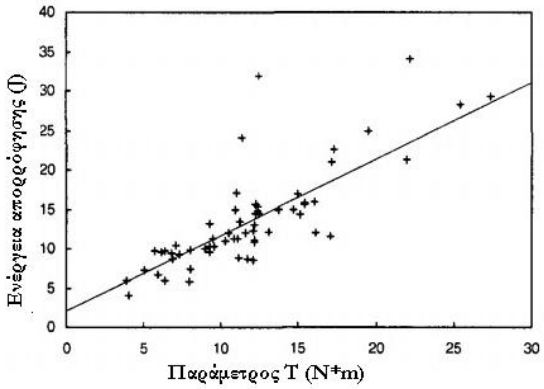


Διάγραμμα 7.31: Συσχέτιση μέσω τιμών καμπτικής αντοχής για δοκιμές τριών και τεσσάρων σημείων (Bernard, 2001)

Ωστόσο, στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν ενδιαφέρει τόσο η καμπτική αντοχή όσο η δυσθραυστότητα.

8.2 Ενέργεια απορρόφησης δοκών

Η ενέργεια απορρόφησης των δοκών σε κάμψη με φόρτιση σε τρία και τέσσερα σημεία συσχετίστηκε όπως φαίνεται στο διάγραμμα 4.22.

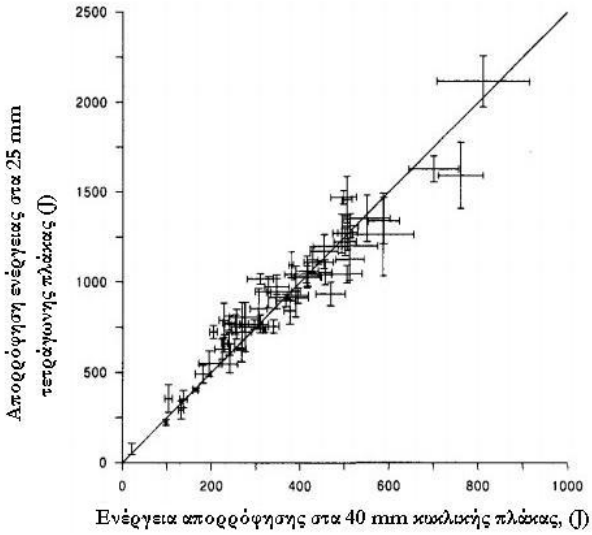


Διάγραμμα 8.32: Συμπεριφορά μετά τη θραύση των δοκών για δοκιμές τριών και τεσσάρων σημείων (Bernard, 2001)

Για τη δοκιμή τριών σημείων η ενέργεια απορρόφησης μετράται σε σχετικά μεγάλη βύθιση (5mm) κι έτσι γίνεται χρήση του ιαπωνικού προτύπου και της παραμέτρου T_{JSCE}. Η συσχέτιση των δύο μεγεθών δεν είναι πολύ ικανοποιητική.

8.3 Ενέργεια απορρόφησης πλακών

Η συσχέτιση της ενέργειας απορρόφησης μεταξύ των δύο διαφορετικών πλακών παρουσιάζεται στο διάγραμμα 7.33. Η συσχέτιση είναι σχεδόν γραμμική (r^2=0.90).



Διάγραμμα 7.33: Συσχέτιση ενέργειας απορρόφησης σε δοκιμές πλακών (Bernard, 2001)

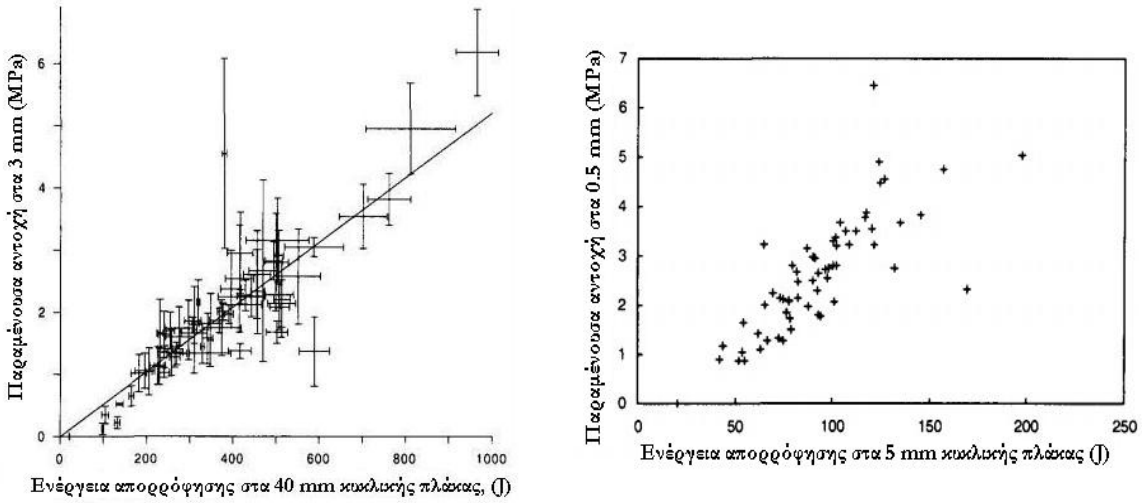
Η γραμμικότητα της συσχέτισης αυτής δείχνει ότι η συμπεριφορά του υλικού στις δύο δοκιμές είναι παρεμφερής και γνωρίζοντας την ενέργεια απορρόφησης στην μια περίπτωση μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη της άλλης δοκιμής με μικρό σφάλμα. Η συσχέτιση που προέκυψε είναι ότι για 1000 Joules ενέργειας στα 25 mm

βύθισης στη δοκιμή τετράγωνης πλάκας του EFNARC αντιστοιχούν 400 Joules ενέργειας στα 40 mm βύθισης στη δοκιμή κυκλικής πλάκας. Έτσι ισχύει:

$$EFNARC_{25mm}\ (J) = 2.5 * RDP_{40mm}$$

4.4 Ενέργεια απορρόφησης δοκών και κυκλικών πλακών

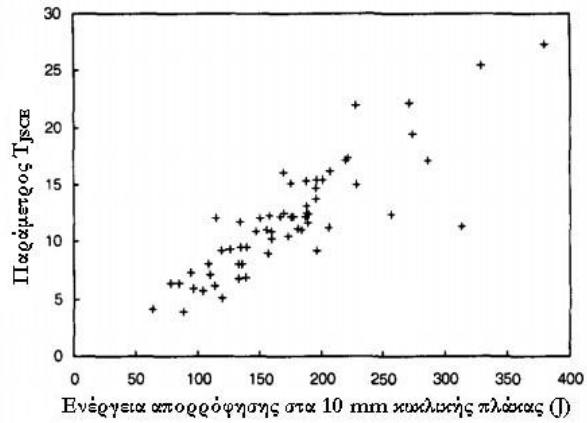
Η συμπεριφορά των δοκών σε φόρτιση τεσσάρων σημείων μετά τη θραύση συσχετίστηκε με την αντίστοιχη των κυκλικών πλακών, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.34.



Διάγραμμα 7.34: Συσχέτιση ενέργειας απορρόφησης σε δοκό και κυκλική πλάκα (Bernard, 2001)

Από τα παραπάνω γίνεται προφανές ότι η παραμένουσα αντοχή στα 3 mm βύθισης της δοκιμής συσχετίζεται με την ενέργεια στις κυκλικές πλάκες. Παρολαυτά, οι επιδόσεις των δοκών σε χαμηλά επίπεδα βύθισης δείχνουν μικρή τάση για συσχέτιση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε πλάκες.

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα από τις δοκούς που φορτίστηκαν σε τέσσερα σημεία σε σχέση με τις κυκλικές πλάκες προκύπτει το διάγραμμα 7.35. Η τιμή κεντρικής βύθισης των 10 mm επιλέχθηκε διότι αντιστοιχεί σε παρόμοια ρωγμή με αυτήν που προκύπτει στις δοκούς στα 3 mm βύθισης. Το διάγραμμα δείχνει ότι υπάρχει μια σχετικά καλή συσχέτιση ανάμεσα στη συμπεριφορά μετά τη θραύση των δοκών και των πλακών, αλλά πάντα σε συγκρίσιμες τιμές βύθισης.



Διάγραμμα 7.35: Συσχέτιση ενέργειας απορρόφησης δοκών και κυκλικής πλάκας (Bernard, 2001)

Από την παραπάνω έρευνα που είχε σκοπό τη συσχέτιση των δοκιμών προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Καλές συσχετίσεις μεταξύ δοκών και πλακών προκύπτουν για παρόμοιο άνοιγμα ρωγμών και για μεγάλες σχετικά τιμές βύθισης
- Η καλή συσχέτιση μεταξύ κυκλικών και τετραγωνικών πλακών δείχνει ότι οποιαδήποτε από αυτές τις δύο μπορεί να αποτελέσει μια καλή μέθοδο εκτίμησης της συμπεριφοράς μετά τη θραύση του υλικού, ειδικά εκεί που αναμένονται υψηλά επίπεδα παραμορφώσεων.
- Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων διαφέρει μεταξύ των δοκών και των πλακών με τις πρώτες να παρουσιάζουν υψηλότερη διακύμανση των αποτελεσμάτων ενώ οι κυκλικές πλάκες παρουσιάζουν συγκριτικά τη χαμηλότερη.
- Για εφαρμογές σκυροδέματος όπου απαιτείται μικρή παραμόρφωση η αξιολόγηση πρέπει να γίνεται με δοκιμή σε μικρό επίπεδο βύθισης, με άνοιγμα ρωγμής γύρω στα 0.5 mm, ενώ για εφαρμογές που αναμένονται έντονες παραμορφώσεις οι δοκιμές πρέπει να φθάνουν σε μεγάλα ανοίγματα ρωγμής.
- Ως προς την οικονομικότητα των δοκιμών, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως το κόστος και η διάρκεια της δοκιμής, το κόστος των δοκιμίων και η αξιοπιστία του αποτελέσματος. Οι δοκοί είναι ακριβότεροι στην παραγωγή διότι απαιτούν κόψιμο σε ακριβείς διαστάσεις. Αντίθετα, οι πλάκες χρειάζονται μόνο ένα καλούπι, που είναι οικονομικό, και παρουσιάζουν υψηλότερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα (Bernard, 2001).

9. Κύλινδροι

Οι δοκιμές που τυπικά εκτελούνται σε κυλινδρικά δοκίμια είναι η αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό, αν και δεν είναι τόσο διαδεδομένες όσο οι δοκιμές σε κάμψη. Κύλινδροι διαστάσεων 150x300 mm που τυπικά χρησιμοποιούνται στο κοινό σκυρόδεμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στο ινοπλισμένο για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής. Τα υπάρχοντα πρότυπα που χρησιμοποιούνται είναι της ASTM τα C 31, C 39, C 192 (ACI 544-2R), το πρότυπο EN 12390-3 (Maccaferri) ενώ αντίστοιχα υπάρχει και ο ελληνικός Κ.Τ.Σ. Στη θλιπτική αντοχή επίσης αναφέρεται και το ιαπωνικό πρότυπο που χρησιμοποιεί την ισοδύναμη θλιπτική αντοχή, η οποία είναι παρόμοια με τη γνωστή ισοδύναμη καμπτική αντοχή (Vandewalle, 1993).

Στις δοκιμές εφελκυσμού, κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της αντοχής σε διάρρηξη, δηλαδή πρόκειται για δοκιμές έμμεσου εφελκυσμού. Τέτοιο πρότυπο, το οποίο χρησιμοποιείται και στο κοινό σκυρόδεμα, είναι της ASTM το C 496 (ACI 544-2R) και το πρότυπο EN 12390-6 (Maccaferri).

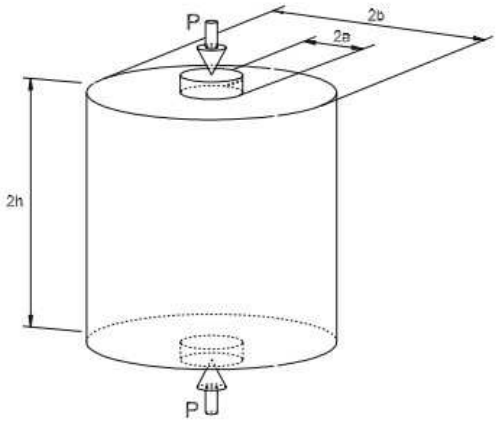
Ιδιαίτερα για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει αναπτυχθεί μια δοκιμή σημειακής φόρτισης σε κυλινδρικά δοκίμια (Double Punch ή Barcelona test) που μετρά την αντοχή, την πλαστιμότητα και την παραμένουσα εφελκυστική αντοχή.

9.1 Δοκιμή σημειακής φόρτισης

9.1.1 Εκτέλεση της δοκιμής

Πολλές δοκιμές υπάρχουν για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, οι οποίες όμως δε φορτίζουν συμμετρικά τα δοκίμια ενώ συχνά παρουσιάζουν μεγάλες τιμές διακύμανσης στα αποτελέσματά τους. Για το λόγο αυτό προτείνεται η δοκιμή αυτή, η οποία είναι μια εναλλακτική της Βραζιλιανής δοκιμής για την έμμεση μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής.

Η διάταξη της δοκιμής είναι σχετικά απλή, αφού αποτελείται από μια πρέσα θλίψης που πιέζει κατακόρυφα ένα κυλινδρικό δοκίμιο που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο χαλύβδινες πλάκες (εικόνα 7.36).



Εικόνα 7.36: Διάταξη δοκιμής σημειακής φόρτισης (Molins, Aguado, Saludes, 2007)

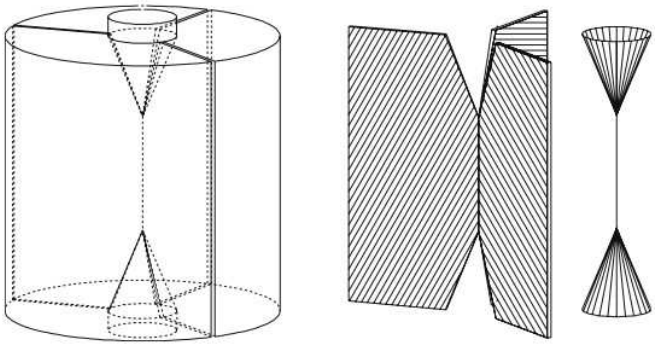
Οι δύο αυτές πλάκες έρχονται σε επαφή με το δοκίμιο και είναι αυτές που το φορτίζουν. Πρέπει να έχουν διάμετρο ίση με το 1/4 της διαμέτρου του δοκιμίου (2a/2b=0.25) και ύψος το μεγαλύτερο από τις ακόλουθες δύο τιμές: το 1/5 του ύψους του δοκιμίου ή τα 15 mm. Η σκληρότητα πρέπει να είναι τουλάχιστον 55 HRC και οι επιφάνειές του να είναι επίπεδες. Η επάνω πλευρά της πλάκας πρέπει να στηρίζεται σε άρθρωση

Το δοκίμιο πρέπει να είναι κύλινδρος του οποίου το ύψος είναι περίπου ίσο με τη διάμετρο (2b/2h=1). Το προτεινόμενο μέγεθος για τη δοκιμή είναι τα 150 mm. Στη συνέχεια, δοκίμιο και πλάκες πρέπει να κεντραριστούν σωστά, αν και έχει φανεί εμπειρικά ότι σφάλματα μέχρι 5 mm δεν επηρεάζουν σημαντικά.

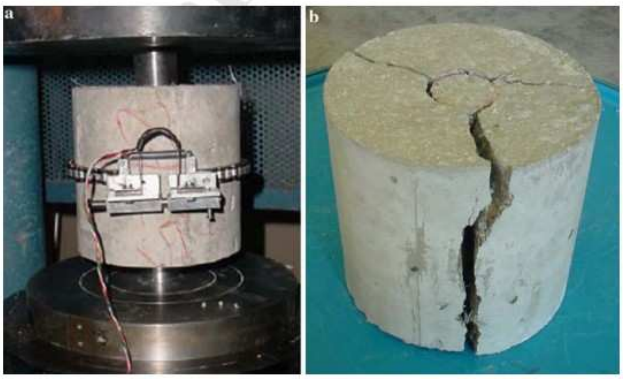
Η μέτρηση της συνολικής περιφερειακής μετατόπισης, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, γίνεται με χρήση ηλεκτρικού μηκυνσιόμετρου με ευαισθησία 0.005 mm και τοποθετείται στο μέσον του ύψους του δοκιμίου.

Η δοκιμή εκτελείται με σταθερό ρυθμό βύθισης του εμβόλου με ταχύτητα 0.5±0.05 mm/min καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν η συνολική περιφερειακή μετατόπιση (σε σχέση με την αρχική) φθάσει τα 6 mm.

Ο μηχανισμός αστοχίας φυσιολογικά παρουσιάζει τρεις ακτινικές ρωγμές, αν και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να παρουσιαστούν τέσσερις. Ο συνηθέστερος μηχανισμός αστοχίας φαίνεται στην εικόνα 7.37.



Εικόνα 7.37: Μηχανισμός και επιφάνειες αστοχίας (Molins, Aguado, Saludes, 2007)

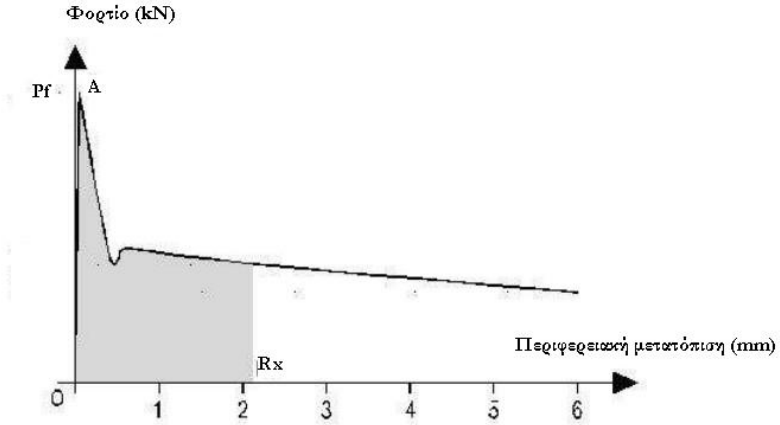


Εικόνα 7.38: Δοκίμιο πριν και μετά την αστοχία (Molins, Aguado, Saludes, 2007)

Το φορτίο θραύσης P_f είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να παραλάβει ο κύλινδρος και αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή στην καμπύλη φορτίου - περιφερειακής μετατόπισης (διάγραμμα 7.39), δηλαδή στο σημείο Α της καμπύλης του διαγράμματος 8.29. Η τάση αστοχίας (f_{ct}) εκφράζεται σε N/mm^2 και δίνεται από τη σχέση:

$$f_{ct} = \frac{4 \times P_f}{9 \times \pi \times \alpha \times \mathrm{H}}, \text{ prUNE 83515}$$

Όπου: α = η διάμετρος των χαλύβδινων πλακών
H = το ύψος του δοκιμίου

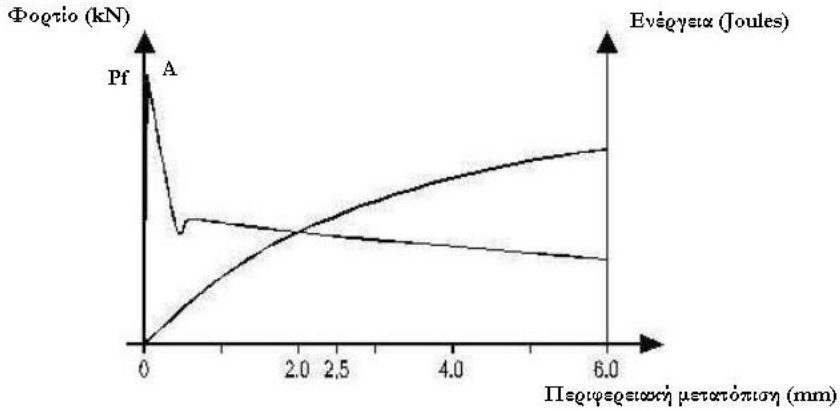


Διάγραμμα 7.39: Φορτίο ως προς τη συνολική περιφερειακή μετατόπιση (prUNE 83515)

Η παραμένουσα εφελκυστική αντοχή (f_{ctRx}) του ινοπλισμένου σκυροδέματος εκφράζεται σε N/mm^2 και είναι η τάση που αντιστοιχεί από την καμπύλη για μετατόπιση R_x.

$$f_{ctRx} = \frac{4 \times P_{Rx}}{9 \times \pi \times \alpha \times \mathrm{H}}, \text{ prUNE 83515}$$

Η ικανότητα διαστολής του υλικού εκφράζεται από την ενέργεια που απορροφά (Joules) μέχρι μία συγκεκριμένη τιμή παραμόρφωσης. Σε αυτή τη δοκιμή ελέγχεται μέσω του διαγράμματος φορτίου - περιφερειακής μετατόπισης (διάγραμμα 8.29) και την περιοχή T_{Rx}. Η τελική μορφή των αποτελεσμάτων πρέπει να παρουσιάζεται όπως φαίνεται στο διάγραμμα 7.40, δηλαδή να περιέχει την καμπύλη φορτίου - περιφερειακής μετατόπισης μαζί με την καμπύλη της ενέργειας. Η ενέργεια (T_{Rx}), το φορτίο (P_{Rx}) και η παραμένουσα εφελκυστική αντοχή (f_{ctRx}) του σκυροδέματος εκφράζονται για τιμές μετατόπισης στα 2, 2.5, 4 και 6 mm.



Διάγραμμα 7.40: Ενέργεια και φορτίο ως προς τη συνολική περιφερειακή μετατόπιση (prUNE 83515)

Τα πλεονεκτήματα της δοκιμής αυτής συνοψίζονται στα εξής:

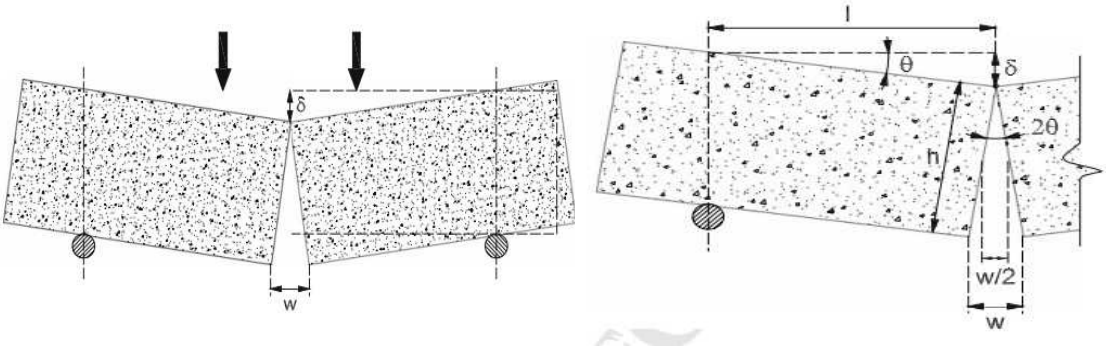
- Απαιτείται μικρότερη ποσότητα υλικού σε σχέση με τις πλάκες και τις δοκούς
- Οικονομία σε χρόνο, άρα και περιορισμός του κόστους
- Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν μικρή διακύμανση
- Τα δοκίμια είναι ελαφρύτερα

- Επιτρέπει την εξαγωγή δειγμάτων από υπάρχουσες κατασκευές ινοπλισμένου σκυροδέματος για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών.

9.1.2 Ισοδυναμία με δοκούς

Η ισοδυναμία της δοκιμής σημειακής φόρτισης κυλίνδρων με τις δοκιμές κάμψης σε δοκούς εκφράζεται μέσω της απορρόφησης ενέργειας. Για να επιτευχθεί μια συσχέτιση είναι απαραίτητο να εκφρασθεί η συνολική περιφερειακή μετατόπιση σαν ένα περιφερειακό άνοιγμα ($\Delta\phi$) και το κατακόρυφο βέλος κάμψης (δ) που δημιουργεί τη ρωγμή με συγκεκριμένο άνοιγμα (w).

Υποθέτουμε ότι η αστοχία στη δοκιμή κάμψης των δοκών είναι όπως δείχνει η εικόνα 7.41.



Εικόνα 7.41: Ιδεατή κατάσταση μετά την αστοχία δοκών (Molins, Aguado, Saludes, 2007)

Όταν υπάρχει μία μόνο ρωγμή κοντά στο κέντρο και το ύψος της είναι σχεδόν ίσο με αυτό της δοκού, τότε θα ισχύει (για μικρές γωνίες θ):

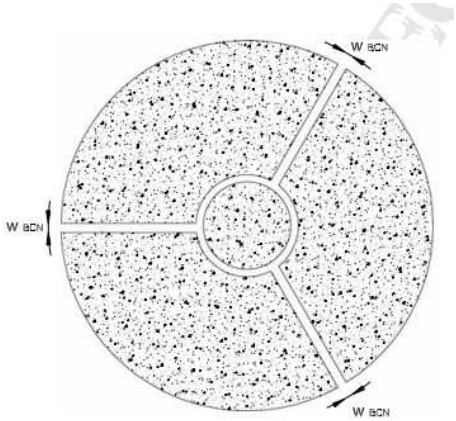
$$\theta = \frac{\delta}{l} \Rightarrow \theta = \frac{w/2}{h} = \frac{\overline{w}}{h}, \ (1)$$

Όπου: $\overline{w}$ = το μέσο άνοιγμα της ρωγμής στη δοκό

Αν λάβουμε υπόψη ότι το δοκίμιο είναι 150x150x600 mm, η (1) γίνεται:

$$\overline{w} = \frac{w}{2} = \frac{2}{3} \times \delta, \ (2)$$

Μια παρόμοια συσχέτιση μπορεί να γίνει και για τα κυλινδρικά δοκίμια. Για το σκοπό αυτό υποθέτουμε πάλι τη συνηθισμένη μορφή αστοχίας τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.42.



Εικόνα 7.42: Ιδεατή κατάσταση μετά την αστοχία κυλίνδρων (Molins, Aguado, Saludes, 2007)

Φυσιολογικά, οι κύλινδροι αστοχούν με τρεις ακτινικές ρωγμές που έχουν ίδιο άνοιγμα μεταξύ τους αλλά και σε όλο τους το μήκος. Σύμφωνα με αυτήν την υπόθεση, ισχύει:

$$\Delta\phi = 3 \times \overline{w'} \quad (3)$$

Όπου: $\overline{w'}$ = το μέσο άνοιγμα της ρωγμής κατά μήκος του κυλίνδρου

Απαιτώντας τα δύο αυτά ανοίγματα ρωγμών, δηλαδή της δοκού και του κυλίνδρου, να είναι ίσα προκύπτει:

$$\overline{w'} = \frac{\Delta\phi}{3} = \overline{w} = \frac{2}{3} \times \delta \quad (4)$$

Η σχέση (4) δίνει τις τιμές τις οποίες η ενέργεια απορρόφησης είναι συγκρίσιμη, διότι αντιστοιχεί σε παρόμοιο μέσο άνοιγμα ρωγμής. Στην προτεινόμενη συσχέτιση, η δυσθραυστότητα στη δοκιμή σημειακής φόρτισης μετράται από την θραύση και μετά, δηλαδή από το μέγιστο φορτίο, διότι μέχρι το σημείο αυτό η συνολική περιφερειακή μετατόπιση είναι αμελητέα (0.03 mm). Αντίθετα, στις δοκούς η ενέργεια απορρόφησης μετράται από την αρχή της δοκιμής. Το γεγονός αυτό δεν επηρεάζει παρά ελάχιστα το τελικό αποτέλεσμα.

10. Κύβοι

Κυβικά δοκίμια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δοκιμές θλίψης σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα, όπως και στο άοπλο. Ωστόσο, λίγες διαθέσιμες σχετικές αναφορές υπάρχουν για τέτοιου είδους δοκίμια και η σχέση μεταξύ της αντοχής τους και της αντίστοιχης των κυλίνδρων δεν έχει καθορισθεί (ACI 544.2R-89).

Στο κοινό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ορίζονται οι κλάσεις θλιπτικής αντοχής σύμφωνα με το πρότυπο EN 206 ως εξής:

Ελάχιστη θλιπτική αντοχή (MPa)							
Κλάση	C24/30	C28/35	C32/40	C36/45	C40/50	C44/55	C48/60
Κύλινδρος	24	28	32	36	40	44	48
Κύβος	30	35	40	45	50	55	60

Πίνακας 7.43: Κλάσεις θλιπτικής αντοχής εκτοξευόμενου σκυροδέματος (EFNARC, 1996)

Για να εξακριβωθεί αν το σκυρόδεμα πληροί τις απαιτήσεις της θλιπτικής αντοχής του πίνακα 8.33, γίνονται επί τόπου δοκιμές σε κυλινδρικά δοκίμια. Αυτά έχουν 50 mm διάμετρο και 100 mm ύψος. Οι τιμές θλιπτικής αντοχής που πρέπει να επιτευχθούν από 3 δείγματα στις 28 μέρες πρέπει να είναι στο 85% των τιμών του πίνακα 7.43. Επίσης, καμία τιμή δε μπορεί να είναι κάτω από το 75%.

Οι δοκιμές θλιπτικής αντοχής πρέπει να γίνονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 4012 σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου τουλάχιστον 50 mm και με λόγο ύψος προς διάμετρο από 1.0 έως 2.0. Αποτελέσματα με δοκίμια διαφορετικών διαστάσεων πρέπει να διορθώνονται σύμφωνα με τον πίνακα 7.44.

Ύψος/Διάμετρος (κυλίνδρου)	**Συντελεστής κύβου**	**Συντελεστής κυλίνδρου**
2.00	1.15	1.00
1.75	1.12	0.97
1.50	1.10	0.95
1.25	1.07	0.93
1.10	1.03	0.89
1.00	1.00	0.87
0.75	0.88	0.76

Πίνακας 7.44: Συντελεστές μετατροπής σε ισοδύναμο κύβο ή κύλινδρο (EFNARC, 1996)

Εναλλακτικά, η θλιπτική αντοχή υπολογίζεται και από κυβικά δοκίμια διαστάσεων 60x60x60 mm, σύμφωνα με το EN 4012. Οι κύβοι αυτοί προέρχονται από σκυρόδεμα που έχει εκτοξευθεί σε πανέλα και στη συνέχεια έχει κοπεί στις διαστάσεις αυτές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ ΜΕ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1. Γενικά στοιχεία

Τα ζητούμενα του σχεδιασμού με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνήθως περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως το πάχος της επένδυσης, την αντοχή της, την πλαστιμότητά της, τη συμπεριφορά της στο χρόνο και την απαιτούμενη δοσολογία των ινών. Επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η συνάφεια μεταξύ βράχου και σκυροδέματος αλλά και ο συνδυασμός του με άλλα μέτρα υποστήριξης, όπως αγκύρια (Vandewalle, 1993).

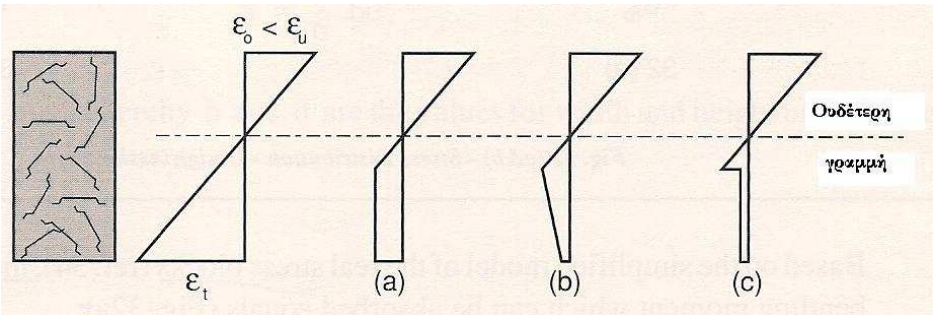
Σύμφωνα με την ACI (544.4R-88) ο σχεδιασμός των κατασκευών με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί το συμβατικό σχεδιασμό για θόλους σκυροδέματος με τη διαφορά ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία των ινών. Αυτή αυξάνει την θλιπτική, διατμητική και καμπτική αντοχή του.

Οι υπάρχοντες κανονισμοί και οδηγίες δίνουν πολύ λίγες πληροφορίες για το πώς γίνεται ο σχεδιασμός με ίνες. Ο πρώτος τέτοιος κανονισμός της RILEM εκδόθηκε μόλις το 2003 (RILEM TC 162-TDF) με συνέπεια ο σχεδιασμός, ιδιαίτερα στο παρελθόν, να γίνεται με εμπειρικές μεθόδους, δηλαδή από δεδομένα από κατασκευές σηράγγων. Αναλυτικά μοντέλα είναι επίσης διαθέσιμα αλλά εκτεταμένες δοκιμές σε άοπλα και οπλισμένα σκυροδέματα έχουν γίνει για να τα βελτιώσουν. Αναπτύχθηκαν επίσης και βάσει έρευνας σε αστοχίες εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε εργαστήρια καθώς και επί τόπου στα έργα (Vandewalle, 1993).

2. Σχεδιασμός με ίνες ή πλέγμα

2.1 Επιρροή ινών

Η παρουσία ινών αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό του σκυροδέματος αφού επιτρέπει την παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος των ρωγμών. Η ανακατανομή τους εξαρτάται από τον τύπο της ίνας, το ποσοστό τους και την παραμόρφωση. Στην εικόνα 8.1 φαίνεται η κατανομή τάσεων και παραμορφώσεων σε δοκίμιο υπό κάμψη.

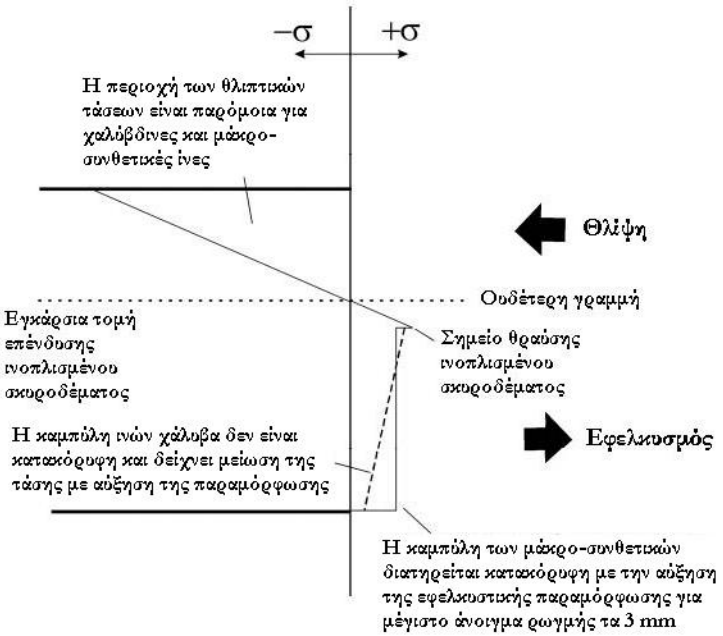


Εικόνα 8.1: Τάσεις - παραμορφώσεις σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα (Vandewalle, 1993)

Το σχήμα (a) περιγράφει την περίπτωση όπου έχουμε προσθήκη ινών ίση με την κρίσιμη. Αυτή ορίζεται ως η ποσότητα των ινών που μπορούν να παραλάβουν εξ' ολοκλήρου το φορτίο του υλικού αμέσως πριν τη θραύση του κι έτσι να το διατηρήσουν

και μετά από αυτήν. Τα σχήματα (b) και (c) δείχνουν περιπτώσεις υποκρίσιμης ποσότητας ινών (Vandewalle, 1993).

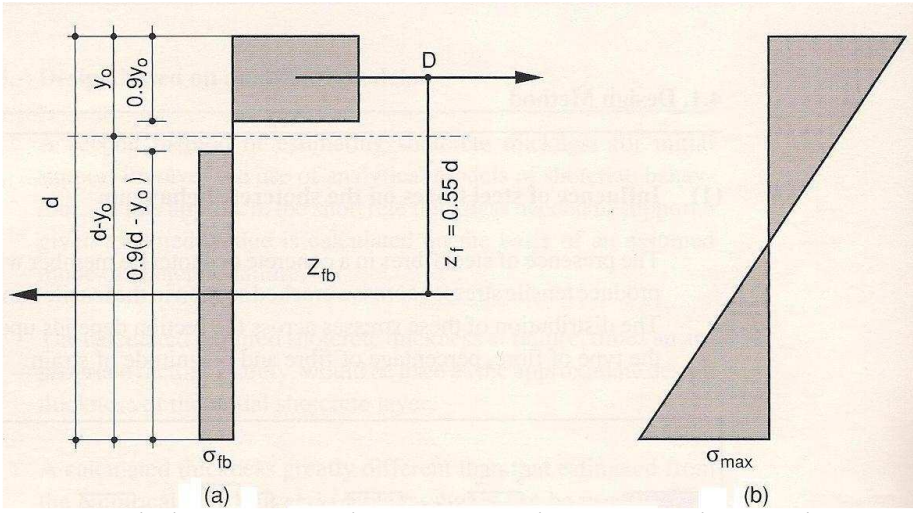
Για τις μάκρο-συνθετικές ίνες, αντίθετα από τις χαλύβδινες, θεωρείται ότι τείνουν να παρουσιάζουν ομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων μετά τη θραύση. Έτσι το κέντρο του σχήματος που δημιουργείται από τις εφελκυστικές τάσεις στις συνθετικές ίνες είναι πιο κοντά στη μέγιστη εφελκυστική τάση και αντίστοιχα ο μοχλοβραχίονας που προκύπτει είναι μεγαλύτερος από αυτόν των χαλύβδινων ινών (Bernard, 2009). Συγκριτικά η κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων στις μάκρο-συνθετικές και τις χαλύβδινες ίνες φαίνεται στην εικόνα 8.2.



Εικόνα 8.2: Κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπό κάμψη (Bernard, 2009)

2.2 Υποθέσεις σχεδιασμού

Οι χαλύβδινες ίνες με υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό ανθίστανται στη θραύση του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Ένα απλοποιημένο μοντέλο των πραγματικών κατανομών των τάσεων φαίνεται στην εικόνα 8.3.



Εικόνα 8.3: Κατανομή τάσεων και υποθέσεις σχεδιασμού για ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Vandewalle, 1993)

Σύμφωνα με την εικόνα 8.3, η ροπή κάμψης (M) θα ισούται με:

$$M = Z_{fb}*z_f, \text{ Vandewalle 1993}$$

Όπου: $Z_{fb} = 0.90*(d-y_0)*b*\sigma_{fb}$
$z_f = 0.55*d$

Έτσι θα ισχύει ότι:

$$M = 0.495*(d-y_0)*b*d*\sigma_{fb} \ (1), \text{ Vandewalle 1993}$$

Η αντοχή σε καθαρό εφελκυσμό δεν είναι εύκολο να υπολογισθεί. Έτσι, για την απλοποίηση του σχεδιασμού το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα θεωρείται ως ένα ομοιογενές υλικό (8.3 b). Η τιμή της καμπτικής αντοχής (σ_{max}) υπολογίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$\sigma_{max} = M/S \ (2), \text{ Vandewalle 1993}$$

Όπου: $S = b*d^2/6$ (ροπή αδρανείας)
b, d = το πλάτος και το ύψος της φορτιζόμενης διατομής

Η ροπή κάμψης (M) όμως, όπως υπολογίστηκε στην εξίσωση (1), πρέπει να επαληθεύει και την εξίσωση (2). Έτσι θα ισχύει ότι:

$$M = S*\sigma_{max} = b*d^2*\sigma_{max}/6 = 0.495*(d-y_0)*b*d*\sigma_{fb}$$

Κατά συνέπεια θα ισχύει ότι:

$$\sigma_{max} = \frac{2.97*(d-y_0)*\sigma_{fb}}{d}, \text{ Vandewalle 1993}$$

Και για $d-y_0 \approx 0.9*d$ θα έχουμε:

$$\sigma_{\max} = 2.763 * \sigma_{fb} \text{ (3), Vandewalle 1993}$$

Ως σ_{fb} ορίζεται η εφελκυστική τάση στην ρηγματωμένη διατομή. Η σ_{max} είναι χαρακτηριστική της πλάστιμης συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Κάνοντας μια απλούστευση, υπέρ της ασφαλείας, θεωρούμε την σ_{max} ισοδύναμη με την καμπτική αντοχή (f_e).

2.3 Σύγκριση ινών με άοπλο σκυρόδεμα και πλέγμα

Σκοπός είναι η σύγκριση της επένδυσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με την αντίστοιχη του άοπλου και του οπλισμένου με μονό ή διπλό πλέγμα. Σε κάθε μια από τις παρακάτω περιπτώσεις θεωρούμε ελαστικό σώμα και αυτό που υπολογίζεται είναι η ροπή κάμψης.

- Άοπλο σκυρόδεμα

$$M_p = \frac{f_u}{s} * b * \frac{d^2}{6} \text{ (1), Vandewalle 1993}$$

Όπου: M_p = ροπή κάμψης άοπλου σκυροδέματος (Nm/m)
f_u = καμπτική αντοχή άοπλου σκυροδέματος (N/mm^2)
s = συντελεστής ασφαλείας
b = πλάτος φορτιζόμενης περιοχής (mm)
d = συνολικό πάχος της επένδυσης (mm)

- Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

$$M_{D,p} = f_e * b * \frac{d^2}{6} \text{ (2), Vandewalle 1993}$$

Όπου: $M_{D,p}$ = ροπή κάμψης για ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Nm/m)
f_e = ισοδύναμη καμπτική αντοχή ινοπλισμένου σκυροδέματος (εξαρτάται από το είδος των ινών) (N/mm^2)

- Μονό πλέγμα (θεωρείται ότι βρίσκεται στο μέσον του πάχους της επένδυσης)

$$M_{m,u} = 0.9 * \frac{d}{2} * A_s * \sigma_{s,u} \text{ (3), Vandewalle 1993}$$

Όπου: $M_{m,u}$ = ροπή κάμψης για μονό πλέγμα (Nm/m)
A_s = διατομή ράβδων του πλέγματος (mm)
$\sigma_{s,u}$ = εφελκυστική αντοχή των ράβδων του πλέγματος (N/mm^2)

- Διπλό πλέγμα

$$M_{2m,u} = 0.9 * h * A_s * \sigma_{s,u} \text{ (4), Vandewalle 1993}$$

Όπου: $M_{2m,u}$ = ροπή κάμψης για διπλό πλέγμα (Nm/m)
h = d-a (mm)
a = πάχος επικάλυψης του πλέγματος με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (mm)

Από τα παραπάνω, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η αντιπαραβολή της υποστήριξης με μονό πλέγμα και με ίνες. Κάτι τέτοιο εκφράζει την ισοδυναμία μεταξύ τους και δίνει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή να περάσει από τις ίνες στο πλέγμα, όπου η εμπειρία είναι σαφώς μεγαλύτερη. Επίσης δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης των δύο μεθόδων υποστήριξης ως προς το πάχος τους, ώστε να προσφέρουν ίση δύναμη υποστήριξης στην εκσκαφή. Για να εκφρασθεί η ισοδυναμία αυτή εξισώνονται οι σχέσεις (2) και (3), δηλαδή θεωρείται ίση ροπή κάμψης για μήκος φόρτισης (b) ίσο με 1000 mm. Από την ισοδυναμία αυτή θα προκύπτει:

$$f_e = 0.0027 * A_s * \sigma_{s,u} / d \quad (5) \text{ ή}$$

$$d = 0.0027 * A_s * \sigma_{s,u} / f_e \text{, (6) Maccaferri}$$

Η χαρακτηριστική ισοδύναμη καμπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος πρέπει να προκύπτει από δοκιμές σε δοκούς. Εάν τέτοια αποτελέσματα δεν είναι διαθέσιμα, μπορεί να προκύπτουν από εμπειρικές συσχετίσεις με βάση το άοπλο σκυρόδεμα και τον τύπο και τη δοσολογία των ινών (Maccaferri). Έτσι, αν είναι γνωστή η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όπως αυτή μετράται σε κύβους (f'_{cm}), τότε η καμπτική αντοχή του άοπλου σκυροδέματος (f_o) δίδεται από τη σχέση:

$$f_o = 0.4\sqrt[3]{f'^{\,2}_{cm}} \text{, Vandewalle 1993}$$

Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της αντίστοιχης αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος απαιτείται η γνώση των χαρακτηριστικών και της δοσολογίας των ινών, στοιχεία που δίδονται συνήθως από τον κατασκευαστή.

Έτσι, το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός της δοσολογίας των ινών όταν έχουμε ως δεδομένη τη χρήση συγκεκριμένου πλέγματος, ή το αντίστροφο. Κατά συνέπεια, αν έχουμε πλέγμα (παράδειγμα 4x100x100) με δεδομένη ποιότητα σκυροδέματος (παράδειγμα C24/30), μπορούμε να υπολογίσουμε την ισοδύναμη χαρακτηριστική καμπτική αντοχή ινοπλισμένου σκυροδέματος (f_e).

Εφαρμόζοντας τη σχέση (5) υπολογίζονται οι ελάχιστες απαιτούμενες αντοχές (πίνακας 8.4) για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, για κάθε ένα από τα προβλεπόμενα πάχη, ώστε να έχουμε ισοδυναμία με το πλέγμα (Maccaferri).

Πάχος επένδυσης (cm)	10 (P-a)	14 (P-b)	16 (P-c)	20 (P-d/e)
f_e (MPa)	1.40	1.00	0.88	0.70

Πίνακας 8.4: Ισοδύναμη καμπτική αντοχή ινοπλισμένου σκυροδέματος ως προς το πάχος (Maccaferri)

Για σκυρόδεμα τύπου C24/30 (που αντιστοιχεί σε χαρακτηριστική αντοχή κυλίνδρου f'_c = 240 kg/cm^2) οι ευρωπαϊκοί κανονισμοί (EFNARC) προτείνουν μια εφελκυστική αντοχή, στην πρώτη θραύση, ίση με f_{lf} = 3.4 MPa. Έτσι, για παράδειγμα

για τις χαλύβδινες ίνες Wirand FS3N (Maccaferri) ο κατασκευαστής δίνει τον πίνακα 8.5 ως συσχέτιση μεταξύ πλαστιμότητας και δοσολογίας.

Πλαστιμότητα (f_e/ f_{lf})	50%	40%	30%	25%	20%
Ίνες FS3 (kg/m³)	33	26	23	21	20

Πίνακας 8.5: Συσχέτιση πλαστιμότητας και ποσότητας ινών (Maccaferri)

Τελικά, συσχετίζοντας τους δύο παραπάνω πίνακες (8.4 και 8.5) προκύπτει η ισοδυναμία μεταξύ δοσολογίας και ισοδύναμης καμπτικής αντοχής (πίνακας 8.6).

Ίνες FS3 (kg/m³)	33	26	23	21	20
f_e (MPa)	1.70	1.36	1.02	0.85	0.68

Πίνακας 8.6: Συσχέτιση ποσότητας ινών και ισοδύναμης καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maccaferri)

2.4 Σύγκριση κόστους

Μια προσπάθεια σύγκρισης του κόστους κατασκευής μιας πλάκας με πλέγμα και με ίνες γίνεται από την εταιρία Dramix. Η επιφάνεια της πλάκας είναι 7,000 m² και η απαιτούμενη αντοχή της τα 32 MPa. Η σύγκριση, με τιμές όπως τις ορίζει η εταιρία (2008), φαίνεται στον πίνακα 8.7.

Πλέγμα	**Ίνες**
πάχος πλάκας: 150 cm	πάχος πλάκας: 140 cm
όγκος σκυροδέματος: 1,050 m³	όγκος σκυροδέματος: 1,050 m³
κόστος σκυροδέματος /m³: 180 $	κόστος σκυροδέματος/m³: 180 $
κόστος σκυροδέματος: 189,000 $	ίνες: 20 kg
κόστος σκυροδέματος/m²: 27 $	κόστος ινών/kg: 3.25 $
πλέγμα, εργατικά, απώλειες: 11.5 $/m²	κόστος σκυροδέματος: 240,100 $
άντληση: 1.50 $/m²	
Τελικό κόστος/m²: **40$**	Τελικό κόστος/m²: **34,3 $**

Πίνακας 8.7: Σύγκριση κόστους πλέγματος και ινών (Dramix, 2008)

Το παραπάνω παράδειγμα δείχνει μείωση του κόστους κατασκευής της πλάκας κατά 14%. Βέβαια οι τιμές είναι ενδεικτικές και μπορούν να λειτουργήσουν μόνο ως οδηγός. Στις απώλειες στο πλέγμα συμπεριλαμβάνονται τα κομμάτια που κόβονται και απορρίπτονται. Επίσης, για εφαρμογές σε πλάκες με ινοπλισμένο σκυρόδεμα σπάνια χρησιμοποιείται αντλία, με αποτέλεσμα να αφαιρείται αυτό το επιπλέον κόστος στην περίπτωση αυτή (Dramix, 2008). Τέλος, αν θελήσει κανείς να τροποποιήσει το σχεδιασμό με τις ίνες και να αυξήσει τη δοσολογία τους από 20 σε 25 κιλά ανά κυβικό μέτρο, τότε θα υπάρχει και πάλι συγκριτικά οικονομικό όφελος αφού το κόστος θα έχει μειωθεί κατά 8.5%.

3. Κάμψη σε δοκούς

3.1 Ίνες

Αρκετές μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την πρόβλεψη της καμπτικής αντοχής μικρών δοκών που περιέχουν μόνο ίνες. Μερικές χρησιμοποιούν εμπειρικά δεδομένα από εργαστηριακές δοκιμές και άλλες έχουν ως βάση την περιοχή λειτουργίας των ινών λαμβάνοντας υπόψη έναν συντελεστή προσανατολισμού, τη δύναμη συνάφειας και την αντοχή των ινών.

Οι εξισώσεις που ακολουθούν (Swamy et al. 1974) έχουν σχηματισθεί με βάση τη θεωρία και οι συντελεστές τους με ανάλυση παλινδρόμησης των δεδομένων. Έχουν προέλθει από δοκιμές με διάφορα είδη ινών, μιγμάτων και τσιμέντων. Ο πρώτος συντελεστής σε κάθε εξίσωση θα έπρεπε να είναι ίσος με τη μονάδα. Οι εξισώσεις είναι εφαρμόσιμες μόνο για δοκούς διαστάσεων 100x100x350 mm και δεν πρέπει να γίνεται χρήση τους για μεγαλύτερα δοκίμια ή για περιεκτικότητες ινών εκτός των φυσιολογικών ορίων.

$$\sigma_{cf} = 0.843 * f_r * V_m + 425 * V_f * \frac{l}{d_f}, \text{ ACI 544.4R}$$

$$\sigma_{cu} = 0.97 * f_r * V_m + 494 * V_f * \frac{l}{d_f}, \text{ ACI 544.4R}$$

Όπου: σ_{cf} = αντοχή πρώτης θραύσης (psi)

σ_{cu} = μέγιστη καμπτική αντοχή (psi)

f_r = τάση στη μήτρα σκυροδέματος (καμπτική αντοχή άοπλου σκυροδέματος)

V_m = ποσοστό μήτρας σκυροδέματος κατ' όγκο = 1 - V_f

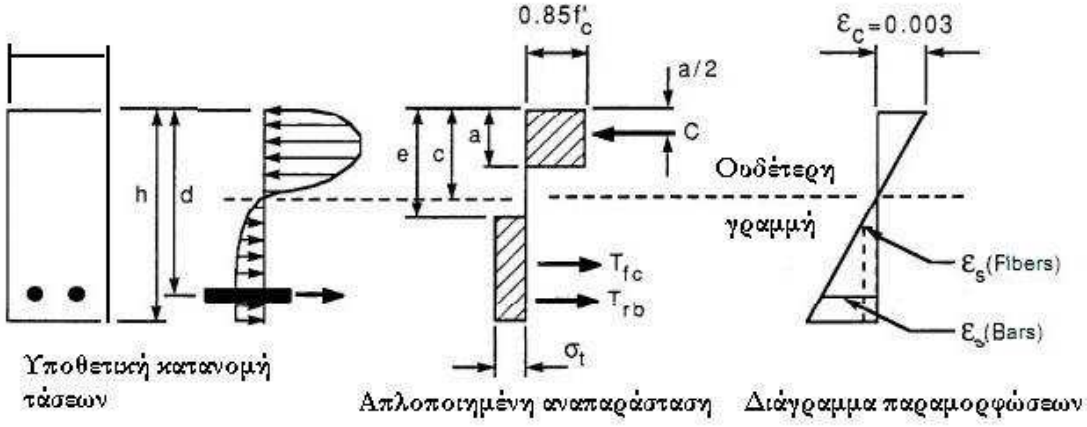
V_f = ποσοστό ινών κατ' όγκο = 1 - V_m

$\frac{l}{d_f}$ = λόγος μορφής των ινών

Οι εξισώσεις αυτές συσχετίζονται καλά με δοκιμές στο εργαστήριο. Παρολαυτά, αν χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των επί τόπου αντοχών, οι προβλέψεις θα είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές τιμές, έως και 50%.

3.2 Συμβατικός οπλισμός και ίνες

Μία μέθοδος έχει αναπτυχθεί (Henager and Doherty, 1976) για την πρόβλεψη της αντοχής των δοκών που περιέχουν ίνες και ράβδους. Η εφελκυστική αντοχή που υπολογίζεται για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα προστίθεται σε αυτήν που προσφέρουν οι ράβδοι. Οι βασικές παραδοχές του σχεδιασμού παρατίθενται στην εικόνα 8.7 (ACI 544.4R).



Εικόνα 8.7: Υποθέσεις σχεδιασμού για οπλισμένη δοκό με ίνες και ράβδους, Henager and Doherty 1976

Η εξίσωση που υπολογίζει την ονομαστική ροπή (M_n) σε μια δοκό είναι:

$$M_n = A_s * f_y * (d - \frac{a}{2}) + \sigma_t * b * (h - e) * (\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - \frac{a}{2})$$

$$e = [\varepsilon_s(\text{ίνες}) + 0.003] * c / 0.003$$

Όπου: $\sigma_t = \dfrac{0.00772 * l}{d_f * \rho_f * F_{be}}$ (μονάδες SI, MPa)

l = μήκος ίνας

d_f = διάμετρος ίνας

ρ_f = ποσοστό κατ' όγκο ινών χάλυβα

F_{be} = ικανότητα συνάφειας των ινών, ποικίλει από 1.0 έως 1.2, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της ίνας

b = πλάτος της δοκού

ε_s = εφελκυστική παραμόρφωση στο χάλυβα, για ράβδους = f_y/E_s, για ίνες = σ_f/E_s, βασισμένο στις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εξόλκευση

ε_c = θλιπτική παραμόρφωση στο σκυρόδεμα (0.3%)

f'_c = θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

f_y = τάση διαρροής ράβδων

A_s = περιοχή ενίσχυσης

C = θλιπτική τάση

σ_t = εφελκυστική τάση στο σκυρόδεμα (λόγω ινών)

E_s = μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα

T_{fc} = εφελκυστική δύναμη λόγω ινών = $\sigma_t * b * (h - e)$

T_{rb} = εφελκυστική δύναμη λόγω ράβδων = $A_s * f_y$

Στην παραπάνω ανάλυση η μέγιστη παραμόρφωση στην ακραία θλίψη του σκυροδέματος θεωρείται 0.3%. Η τιμή αυτή, σύμφωνα με πολλές αναφορές, θεωρείται συντηρητική. Οι Hassoun και Sahebjam (1985) προτείνουν παραμόρφωση αστοχίας 0.35% για σκυρόδεμα με 1% σε ίνες και 0.4% για σκυρόδεμα με 1-3% σε ίνες (ACI 544.4R).

4. Μέθοδοι σχεδιασμού

4.1 Εμπειρικές μέθοδοι

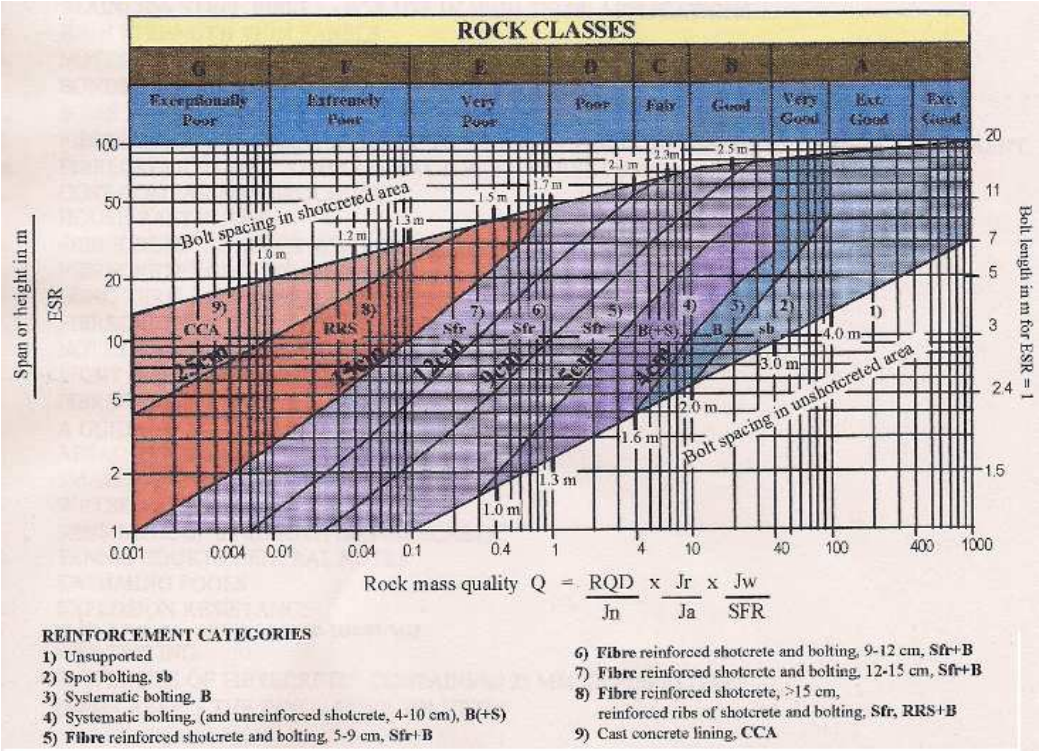
Οι πρώτες οδηγίες από τις εμπειρικές μεθόδους έδιναν πολύ απλοϊκές οδηγίες ως προς την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος που βασίζονταν σε ελάχιστα δεδομένα, όπως το RQD (Cecil 1970). Τα αποτελέσματα προέρχονταν από εφαρμογές όπου δεν εμφανίστηκαν αστοχίες, αλλά ο συντελεστής ασφαλείας μπορεί να ήταν πάρα πολύ μεγάλος ή ακόμα και λίγο μεγαλύτερος της μονάδος (Vandewalle, 1993). Ακόμη και τώρα υπάρχει η τάση σε μεταλλεία (Αυστραλία) στη χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος με βάση την εμπειρία τους ή με δοκιμές και με όχι τόσο επιστημονικό τρόπο (Grant, Ratcliffe, Papworth 2001).

Το ζητούμενο πλέον είναι να υπάρχουν κανονισμοί που να συσχετίζουν τη δυσθραυστότητα σαν παράμετρο για την κατασκευή των επενδύσεων με ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Η δυσθραυστότητα είναι το μέγεθος εκείνο που πλέον έχει επικρατήσει στον χαρακτηρισμό του ινοπλισμένου σκυροδέματος και προκύπτει μέσω των δοκιμών κάμψης σε δοκούς ή πλάκες.

Μια προσπάθεια συσχέτισης της δυσθραυστότητας με την χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος γίνεται από τον Morgan (1998). Το κατατάσσει σε τρεις κατηγορίες και για κάθε μια από αυτήν προτείνει την αντίστοιχη εφαρμογή. Έτσι ορίζει τα επίπεδα δυσθραυστότητας (Toughness Performance Levels, TPL) ως εξής:

- TPL IV: Κατάλληλο για εδάφη όπου αναμένονται υψηλές παραμορφώσεις με πιθανή αστοχία της επένδυσης. Για συνθλίβοντα εδάφη σε σήραγγες και μεταλλεία, όπου πρόσθετη υποστήριξη όπως αγκυρώσεις, μπορεί να χρειάζεται.
- TPL III: Κατάλληλο για σχετικά ευσταθείς βράχους, σε μεταλλεία ή σήραγγες, όπου μικρά επίπεδα τάσεων και παραμορφώσεων αναμένονται. Το ενδεχόμενο αστοχίας της επένδυσης είναι μικρό.
- TPL II: Κατάλληλο για περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις είναι σχεδόν αδύνατον να προκαλέσουν αστοχία (ή όπου οι συνέπειες της αστοχίας είναι μικρές) και για περιπτώσεις όπου οι ίνες χρησιμοποιούνται για προστασία έναντι συστολής ξήρανσης, θερμότητας ή αντοχής σε κρούση.

Οι παραπάνω συστάσεις του Morgan (1998) μπορούν να ενσωματωθούν στο Νορβηγικό σύστημα ταξινόμησης βραχομάζας, το γνωστό Q-system (Barton). Ανάλογα με τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας προκύπτει το Q. Έπειτα, σύμφωνα με τη χρήση του χώρου προτείνονται αντίστοιχα και τα μέτρα υποστήριξης. Στην πρώτη του έκδοση (1974) το Q δεν περιελάμβανε στα μέτρα υποστήριξης το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Κάτι τέτοιο όμως έγινε στην αναθεωρημένη έκδοση του 1994, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 8.8.



Διάγραμμα 8.8: Σύστημα ταξινόμησης Q (Norwegian Geotechnical Institute, 1994)

Το διάγραμμα 8.8 συσχετίζει όμως ποιότητα βραχομάζας, διαστάσεις και υποστήριξη. Έτσι, είναι αναγκαίο να συσχετισθεί η δυσθραυστότητα με τις διάφορες ποιότητες βράχου (A-G). Το αποτέλεσμα φαίνεται στον πίνακα 8.9.

Επίπεδα δυσθραυστότητας (TPL)	**Ποιότητα βραχομάζας**
IV	E & F
III	D
II	C
I	B
0	A

Πίνακας 8.9: Συσχέτιση δυσθραυστότητας – Q (Grant, Ratcliffe, Papworth, 2001)

Και πάλι όμως υπάρχει δυσκολία στο σχεδιασμό της επένδυσης λόγω της μεγάλης ποικιλίας των ινών που διατίθενται στην αγορά. Έτσι, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να αποκτήσει ενέργεια απορρόφησης από 400 έως 1400+ J στην δοκιμή πλάκας του EFNARC (1996). Δεδομένης της χρήσης της επένδυσης η διακύμανση αυτή δεν είναι επιθυμητή. Επίσης, τα επίπεδα δυσθραυστότητας (TPL) του Morgan (1998), βασίζονται σε δοκιμές σε δοκούς. Ως γνωστόν όμως, οι δοκιμές σε πλάκες είναι προτιμότερες ως πιο αντιπροσωπευτικές για το σκυρόδεμα. Έτσι, με βάση την εμπειρία, τις τιμές του Morgan και τη συσχέτιση των τιμών απορρόφησης ενέργειας του EFNARC με τις δοκιμές κυκλικής πλάκας (RDP) έχουν προκύψει οι τιμές του πίνακα 8.10.

Δυσθραυστότητα TPL	Ποιότητα βραχομάζας	EFNARC (Joules)	RPD_{40mm} (Joules)	RPD_{80mm} (Joules)
IV	F	>1400	>560	>840
	E	>1000	>400	>600
III	D	>700	>280	>420
II	C	>500	>200	>300
I	B			
0	A	0	0	0

Πίνακας 8.10: Συσχέτιση δυσθραυστότητας με ποιότητα βράχου και επιδόσεις σε δοκιμές πλάκας (Papworth, 2002)

Για αυτές τις τιμές απορρόφησης ενέργειας στις πλάκες, το πιο κατάλληλο είδος ινών και η αντίστοιχη δοσολογία πρέπει να εκτιμηθούν λαμβάνοντας υπόψη και μια αναπήδηση το πολύ 20% για την υγρή μίξη και πιθανόν μέχρι 40% για την ξηρή (Papworth, 2002).

Βέβαια η παραπάνω μεθοδολογία σχεδιασμού έχει κάποιους περιορισμούς. Βασίζεται σε δοκιμές με μικρές τιμές βύθισης. Για το λόγο αυτό, και επειδή οι ίνες όταν εξολκεύονται από ένα άνοιγμα ρωγμής και πάνω γίνονται αναποτελεσματικές, η προσέγγιση αυτή μπορεί να είναι μη ικανοποιητική σε περιπτώσεις μεγάλων παραμορφώσεων. Κατά συνέπεια, σε αυτές τις συνθήκες προτείνεται και χρήση πλέγματος ή παραπάνω μέσων υποστήριξης. Η κατηγορία βραχομάζας G απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή, ιδιαίτερα εκεί που η παραμόρφωση μεταξύ των αγκυρίων αναμένεται να είναι μεγαλύτερη από 0.05 φορές της απόστασης (καννάβου) μεταξύ των αγκυρίων (Grant, Ratcliffe, Papworth 2001).

Επειδή οι επιδόσεις του ινοπλισμένου σκυροδέματος διαφέρουν ανάλογα με τη τιμή της βύθισης που τους επιβάλλεται κατά τη δοκιμή, πρέπει να προδιαγράφονται για δεδομένες τιμές βέλους κάμψης. Έτσι, μπορεί να γίνει ένας διαχωρισμός, για παράδειγμα στις κυκλικές πλάκες, με βέλος κάμψης 10 mm (μικρές παραμορφώσεις) και βέλος κάμψης 80 mm (μεγάλες παραμορφώσεις).

Για μικρές τιμές βέλους κάμψης η ρωγμάτωση αποτελεί βασικό ζήτημα καθώς συνδέεται και με την υδατοπερατότητα του υλικού, τη διάβρωση των χαλύβδινων ινών και την αισθητική. Για τόσο χαμηλές τιμές παραμόρφωσης, η χρήση συνθετικών ινών είναι οικονομικά ασύμφορη σε σχέση με τις χαλύβδινες.

Για μεγάλες τιμές βέλους κάμψης, οι συνθετικές ίνες μπορούν να ανταπεξέλθουν χωρίς να υπάρχει ο κίνδυνος διάβρωσής τους και με μικρότερο κόστος ανά m^3. Επειδή οι μετρήσεις σε βύθιση της τάξης των 80 mm είναι δύσκολη μπορεί να γίνεται και μέχρι τα 40 mm, που αποτελεί και κατάλληλο κριτήριο για πολλές εφαρμογές. Για τον υπολογισμό της τιμής της ενέργειας στα 80 mm μπορεί να γίνει αύξηση κατά 50% των τιμών (πίνακας 8.10) που προέκυψαν στα 40 mm (Papworth, 2002).

4.2 Ημιεμπειρική μέθοδος

4.2.1 Προσωρινή επένδυση

Η προτεινόμενη μεθοδολογία σχεδιασμού περιλαμβάνει συγκεκριμένα μέτρα υποστήριξης που εφαρμόζονται ανάλογα με τα υπάρχοντα φορτία και την ποιότητα της βραχομάζας, που μπορεί να εκφρασθεί και με τον δείκτη GSI. Κατά συνέπεια, για μια εκσκαφή με ισοδύναμη διάμετρο ίση με 10 m τα προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης παρουσιάζονται στον πίνακα 8.11.

Τύπος υποστήριξης	**Ινοπλισμένο σκυρόδεμα (cm)**	**Μεταλλικά πλαίσια**	**Δοκίδες προπορείας**	**Φέρουσα ικανότητα (kg/cm²)**
SP-a	10	-	-	1.5
SP-b	14	2 IPN140 ανά 150 cm	2x4 ανά 2 πλαίσια	2.5
SP-c	16	2 IPN160 ανά 125 cm	4x6 ανά 2 πλαίσια	3.5
SP-d	20	2 IPN200 ανά 100 cm	6x6 ανά 2 πλαίσια	4.5
SP-e	20	2 IPN200 ανά 075 cm	10x6 ανά 2 πλαίσια	6.5

Πίνακας 8.11: Προτεινόμενα μέτρα υποστήριξης (Maccaferri)

Ανάλογα με το ύψος των υπερκειμένων, ο πίνακας 8.12 κατευθύνει προς τον καταλληλότερο τύπο υποστήριξης που πρέπει να χρησιμοποιηθεί.

Υπερκείμενα: Κατάσταση πετρώματος	**H (m) 5-10**	**H (m) 10-20**	**H (m) 20-100**	**H (m) 100-150**	**H (m) 150-200**	**H (m) 200-300**	**H (m) 300-500**
GSI<=20	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e	SP-e
20<GSI<40	SP-e	SP-d	SP-d	SP-d	SP-d	SP-d	SP-e
30<GSI<50	SP-d	SP-c	SP-c	SP-c	SP-c	SP-d	SP-d
40<GSI<60	SP-c	SP-b	SP-b	SP-a	SP-b	SP-b	SP-c
GSI>60	SP-c	SP-b	SP-a	SP-a	SP-a	SP-a	SP-a

Πίνακας 8.12: Επιλογή των μέτρων υποστήριξης σα συνάρτηση του GSI και των υπερκειμένων (Maccaferri)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο πίνακας 8.13 για την προσωρινή υποστήριξη, σύμφωνα με τα μέτρα που ήδη έχουν προταθεί. Ο πίνακας μπορεί να εφαρμοσθεί σε ένα πρώτο στάδιο για σήραγγες με ισοδύναμη διάμετρο ίση με 10 m. Τα αποτελέσματά του προέρχονται από όλες τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν, σύμφωνα με τα παραπάνω. Αρχικά γίνεται η επιλογή της υποστήριξης βάση της συμπεριφοράς της εκσκαφής με κριτήρια το GSI και το ύψος των υπερκειμένων. Όταν όμως αυτά ξεπερνούν τα 100 m το GSI (Geological Strength Index) δε θεωρείται κατάλληλος δείκτης (οι ασυνέχειες δεν είναι πλέον αντιπροσωπευτικές της ποιότητας του πετρώματος) και αντικαθίσταται από τον δείκτη IC (Index of Competence), ο οποίος προκύπτει από τη σχέση:

$$IC = \frac{\sigma_{cm}}{\gamma * \mathrm{H}} = \frac{(0.0034 * m_i^{0.8}) * \sigma_{ci}[1.029 + 0.025e^{(-0.1m_i)}]^{GSI}}{\gamma * \mathrm{H}} \quad \text{(Maccaferri)}$$

Τύπος συμπεριφοράς της εκσκαφής σα συνάρτηση των H, σci

G.Ferri, 2002

H/σci (m/MPa)	mi	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	23	25	28	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
		ABILITY INDEX (IC = σcm/γH)																										
GSI <=20	5	0,11	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	7,5	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
	10	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
	15	0,24	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
	20	0,29	0,26	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
	25	0,35	0,30	0,27	0,24	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	30	0,40	0,35	0,31	0,28	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
	35	0,45	0,39	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
GSI =(20-40)	5	0,17	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
	7,5	0,22	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	E	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
	10	0,26	0,23	0,20	0,18	0,17	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	15	0,33	0,29	0,26	0,23	0,21	0,20	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	20	0,40	0,35	0,31	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
	25	0,47	0,41	0,37	0,33	D	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,09	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03
	30	0,54	0,47	0,42	0,38	0,34	0,31	0,29	0,27	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04
	35	0,60	0,53	0,47	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,19	0,17	0,15	0,14	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
GSI = (30-50)	5	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02
	7,5	0,32	0,28	0,25	0,23	0,21	0,19	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	10	0,38	0,33	0,29	0,26	0,24	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
	15	0,47	0,41	0,37	0,33	0,30	0,27	0,25	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03
	20	0,56	0,49	0,43	0,39	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,22	0,20	0,19	0,17	0,16	0,14	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04
	25	0,64	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	C	0,32	0,30	0,28	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04
	30	0,72	0,63	0,56	0,51	0,46	0,42	0,39	0,36	0,34	0,32	0,30	0,28	0,27	0,25	0,22	0,20	0,18	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05
	35	0,80	0,70	0,63	0,56	0,51	0,47	0,43	0,40	0,38	0,35	0,33	0,31	0,30	0,28	0,25	0,23	0,20	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06
GSI =(40-60)	5	0,43	0,38	0,34	0,30	0,28	0,26	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
	7,5	0,52	0,46	0,41	0,37	0,33	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,22	0,20	0,19	0,18	0,16	0,15	0,13	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,04
	10	0,59	0,52	0,46	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24	0,23	0,22	0,21	0,18	0,17	0,15	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04
	15	0,71	0,62	0,55	0,49	0,45	0,41	0,38	0,35	0,33	0,31	0,29	0,27	0,26	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
	20	0,81	0,71	B	0,57	0,52	0,47	0,44	0,41	0,38	0,36	0,34	0,32	0,30	0,28	0,25	0,23	0,21	0,19	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06	0,06
	25	0,92	0,81	0,72	0,65	0,59	0,54	0,50	0,46	0,43	0,40	0,38	0,36	0,34	0,32	0,29	0,26	0,23	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06
	30	1,03	0,90	0,80	0,72	0,66	0,60	0,56	0,52	0,48	0,45	0,42	0,40	0,38	0,36	0,32	0,29	0,26	0,24	0,21	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07
	35	1,14	1,00	0,89	0,80	0,73	0,67	0,62	0,57	0,53	0,50	0,47	0,44	0,42	0,40	0,36	0,32	0,29	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
GSI > 60	5	0,94	0,82	0,73	0,66	0,60	0,55	0,51	0,47	0,44	0,41	0,39	0,37	0,35	0,33	0,29	0,26	0,24	0,22	0,19	0,16	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08	0,07	0,07
	7,5	1,07	0,94	0,83	0,75	0,68	0,63	0,58	0,54	0,50	0,47	0,44	0,42	0,40	0,38	0,33	0,30	0,27	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15	0,13	0,11	0,09	0,08	0,08
	10	1,16	1,02	0,90	0,81	0,74	0,68	0,63	0,58	0,54	0,51	0,48	0,45	0,43	0,41	0,36	0,33	0,30	0,27	0,23	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08
	15	1,30	1,14	1,01	0,91	0,83	0,76	0,70	0,65	0,61	0,57	0,54	0,51	0,48	0,46	0,41	0,36	0,33	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09
	20	1,44	1,26	1,12	1,01	0,92	0,84	0,78	0,72	A	0,63	0,59	0,56	0,53	0,51	0,45	0,40	0,37	0,34	0,29	0,25	0,22	0,20	0,17	0,14	0,13	0,11	0,10
	25	1,60	1,40	1,24	1,12	1,02	0,93	0,86	0,80	0,75	0,70	0,66	0,62	0,59	0,56	0,50	0,45	0,41	0,37	0,32	0,28	0,25	0,22	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11
	30	1,76	1,54	1,37	1,23	1,12	1,03	0,95	0,88	0,82	0,77	0,73	0,69	0,65	0,62	0,55	0,49	0,45	0,41	0,35	0,31	0,27	0,25	0,21	0,18	0,15	0,14	0,12
	35	1,94	1,70	1,51	1,36	1,23	1,13	1,04	0,97	0,91	0,85	0,80	0,75	0,71	0,68	0,60	0,54	0,49	0,45	0,39	0,34	0,30	0,27	0,23	0,19	0,17	0,15	0,14

Πίνακας 8.13: Συμπεριφορά εκσκαφής και προτεινόμενη υποστήριξη (Maccaferri)

Κατά συνέπεια, ο πίνακας 8.13 χρησιμοποιείται για εφαρμογές με υπερκείμενα άνω των 100 m. Έτσι, ο σχεδιασμός θα γίνεται σύμφωνα με τον πίνακα 11.14.

Υπερκείμενα <20 m		**Υπερκείμενα 20 - 100 m**		**Υπερκείμενα > 100 m**	
GSI<=20	SP-e	GSI<=20	SP-e	IC<=0.15	SP-e
20<GSI<=40	SP-e	20<GSI<40	SP-d	0.15<IC<0.20	SP-d
30<GSI<=50	SP-d	30<GSI<50	SP-c	0.20<IC<0.30	SP-c
40<GSI<=60	SP-c	40<GSI<60	SP-b	0.30<IC<=0.45	SP-b
GSI>60	SP-c	GSI>60	SP-a	IC>0.45	SP-a

Πίνακας 8.14: Σχεδιασμός προσωρινής επένδυσης (Maccaferri)

Οι τύποι υποστήριξης A, B, C, D, E στους οποίους παραπέμπει ο πίνακας 8.13 είναι οι προαναφερθέντες στον πίνακα 8.11 με αντίστοιχα ισοδύναμη καμπτική αντοχή (f_e) για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ίση με 1.0, 1.1, 1.2, 1.3 και 1.4 MPa

4.2.2 Τελική επένδυση

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα μπορεί να γίνει και σχεδιασμός της τελικής επένδυσης σηράγγων από έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Η προσωρινή επένδυση κατασκευάζεται με την προοπτική ότι δε θα υποστηρίζει για μεγάλο χρονικό διάστημα το πέτρωμα κι έτσι έχει μικρό συντελεστή ασφαλείας. Αντίθετα, η τελική επένδυση θεωρείται ότι πρέπει να παραλαμβάνει όλο το φορτίο για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου, κι έτσι ο συντελεστής ασφαλείας πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερος.

Η κατασκευή της τελικής επένδυσης θα μπορούσε να γίνεται και με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, αλλά λόγω του αυξημένης ισοδύναμης καμπτικής αντοχής (f_e) που αυτή πρέπει να έχει, το πάχος της επένδυσης θα γινόταν ακόμη μεγαλύτερο σε σχέση με το έγχυτο. Η τελική επένδυση πρέπει να έχει κατ' ελάχιστο πάχος 20 cm και f_e=1.5 MPa.

Για τις αναλύσεις που εκτελέστηκαν επιλέχθηκε σκυρόδεμα ποιότητας C32/40, για πάχη επένδυσης ίσα με 30, 40 και 50 cm αντίστοιχα. Τα υπόγεια ανοίγματα χωρίζονται επίσης σύμφωνα με το ύψος των υπερκειμένων (αβαθή και βαθιά) και σύμφωνα με το GSI (GSI>40 ή GSI<40). Έτσι, η προτεινόμενη υποστήριξη με έγχυτο ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζεται στον πίνακα 8.15.

Χαρακτηριστικά έγχυτου ινοπλισμένου σκυροδέματος	
RF (50 cm)	f_e>=5 MPa
RF (40 cm)	f_e>=4 MPa
RF (30 cm)	f_e>=3 MPa

Πίνακας 8.15: Πάχη και ισοδύναμες καμπτικές αντοχές έγχυτου ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maccaferri)

Υπερκείμενα ≤ Hi	**Hi < Υπερκείμενα ≤ Hs**	**Υπερκείμενα > Hs**
	GSI≤20, RF 50	
20<GSI≤40, RF 50	20<GSI≤40, RF 50	0.20<IC≤0.30, RF 40
40<GSI≤60, RF 50	40<GSI≤60, RF 40	0.30<IC≤0.45, RF 40
GSI>60, RF 40	GSI>60, RF 30	IC>0.45, RF 30

Πίνακας 8.16: Προτάσεις τελικής επένδυσης (Maccaferri)

Εν κατακλείδι, πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι για τις επενδύσεις από ινοπλισμένο σκυρόδεμα (εκτοξευόμενο ή έγχυτο) οι παραπάνω μεθοδολογίες δίδουν απλά ενδεικτικά αποτελέσματα και σε καμία περίπτωση δεν αποτελούν μονόδρομο για το σχεδιασμό σηράγγων. Επίσης δε λαμβάνει υπόψη τις γεωλογικές και άλλες ιδιαιτερότητες που εμφανίζονται συνήθως στην πραγματικότητα σε κάθε έργο.

4.3 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι βασίζουν τη λειτουργία τους στον υπολογισμό του πάχους του κελύφους προϋποθέτοντας την ύπαρξη μιας δεδομένης σφήνας και με βάση την υποτιθέμενη μορφή αστοχίας της επένδυσης. Στο αποτέλεσμα που θα προκύψει πρέπει να ληφθεί υπόψη κι ένας συντελεστής ασφαλείας για να έχουμε τελικά το πραγματικό πάχος της επένδυσης που απαιτείται σε πρώτο στάδιο υποστήριξης της εκσκαφής. Ένα τελικό αποτέλεσμα που θα διαφέρει σημαντικά από αυτό που υπολογίζεται μέσω των εμπειρικών μεθόδων δε θα πρέπει να χρησιμοποιείται, εκτός εάν υπάρχει σημαντική και τεκμηριωμένη αιτία (Vandewalle, 1993).

Μια αναλυτική λύση που να προσδιορίζει την ακτινική μετατόπιση συναρτήσει της επένδυσης με ινοπλισμένο σκυρόδεμα και των γεωπιέσεων παρουσιάζεται από τον M. Hisatake (2003). Η μέθοδος που παρουσιάζει λαμβάνει υπόψη την χρονική εξάρτηση των παραμορφώσεων διότι είναι προσαρμοσμένη για εφαρμογή σε συνθλίβοντα εδάφη.

Οι παραδοχές που γίνονται για την αναλυτική επίλυση είναι οι εξής:

- Κυκλική σήραγγα και ομοιόμορφο αρχικό εντατικό πεδίο.
- Σταθερός ρυθμός προχώρησης της εκσκαφής
- Βισκοελαστική συμπεριφορά του εδάφους.
- Επιρροή και των τριών διαστάσεων στην εκσκαφή.
- Εξαρτώμενη από το χρόνο σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των χαλύβδινων υποστηρίξεων (πλαίσια).
- Σταθερές αποστάσεις ανάμεσα στις χαλύβδινες υποστηρίξεις και ανάμεσα σε αυτές και το μέτωπο.

Η αναλυτική λύση που προτείνεται βασίζεται στο γεγονός ότι υπάρχει μια ακτινική μετατόπιση των χαλύβδινων υποστηριγμάτων (u^s) και άλλη μια της επένδυσης από ινοπλισμένο σκυρόδεμα (u^c), με κάθε μια από αυτές να οφείλεται στις αντίστοιχες γεωστατικές πιέσεις (p_s και p_c). Έτσι προκύπτει ότι για τα διάφορα χρονικά όρια (t_k) θα ισχύει:

$$u^s\left(t_m+1\right)=\frac{a_0^2 L}{A}\sum_{k=1}^{m}\frac{p_s(t_{k+1})-p_s(t_k)}{E_s(t_k)}$$
$$u^c\left(t_m+1\right)=\frac{a_0^2}{h_0}\sum_{k=1}^{m}\frac{p_c(t_{k+1})-p_c(t_k)}{E_c(t_k)}$$
(1), Hisatake 2003

Όπου: t_k = (k=1, 2, …, (m+1)), για $t_1=0$

t_m+1 = t_i ο χρόνος μετά την ταυτόχρονη κατασκευή της επένδυσης από ινοπλισμένο σκυρόδεμα και της τοποθέτησης των χαλύβδινων υποστηρίξεων

A = η διατομή της χαλύβδινης υποστήριξης

E_s = το μέτρο ελαστικότητας μιας χαλύβδινης υποστήριξης

a_0 = σταθερά εξαρτώμενη από το χρόνο

L = η απόσταση μεταξύ των χαλύβδινων υποστηρίξεων

E_c = το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας σε μια τυχαία θέση (μέγεθος χρονικά εξαρτώμενο)

h_0 = το πάχος της επένδυσης από ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Οι συνολικές γεωπιέσεις (p_w) που ασκούνται στο όριο της σήραγγας δίδονται από τη σχέση:

$$p_w(t_{m+1}) = p_s(t_{m+1}) + p_c(t_{m+1})$$ (2), Hisatake 2003

Είναι δυνατόν γίνει η υπόθεση ότι οι χαλύβδινες υποστηρίξεις κατασκευάζονται ταυτόχρονα, δηλαδή:

$$u^s\left(t_m+1\right)=u^c\left(t_m+1\right)$$ (3), Hisatake 2003

Επιλύοντας τις (1), (3) ως προς $p_c(t_{m+1})$ και αντικαθιστώντας το στην (2) προκύπτει η σχέση μεταξύ $p_w(t_{m+1})$ και $p_s(t_{m+1})$. Η αναλυτική αυτή μέθοδος εφαρμόστηκε σε σήραγγα με συνθλίβον έδαφος και χρονικά εξαρτώμενη κίνηση του εδάφους. Οι επί τόπου μετρήσεις έδειξαν ότι πρόκειται για μια αποτελεσματική μέθοδο εκτίμησης των μετακινήσεων όταν γίνεται ταυτόχρονη χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος και μεταλλικών πλαισίων για προσωρινή υποστήριξη σε συνθλίβον έδαφος.

4.4 Αριθμητικές μέθοδοι

Για την διαστασιολόγηση και τον υπολογισμό της επένδυσης με ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπάρχουν και πιο περίπλοκοι αλλά και πιο ευπροσάρμοστοι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων, όπως ο κώδικας SAP 2000 ή και το ακόμα πιο σύνθετο ABAQUS που εργάζεται σε περιβάλλον δύο ή τριών διαστάσεων.

Τα απαραίτητα δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα περιλαμβάνουν τη γεωμετρία της εκσκαφής, τα αναμενόμενα φορτία, τις παραμέτρους της βραχομάζας (k κλπ) αλλά και την ισοδύναμη καμπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος καθώς και το μέτρο ελαστικότητάς του.

Αναλύσεις που έγιναν με τον κώδικα SAP (Structural Analysis Program) του πανεπιστημίου του Berkley (Καλιφόρνια) έδειξαν ότι οι μεγαλύτερες εφελκυστικές τάσεις που παρατηρήθηκαν στην επένδυση εμφανίζονται στην περίπτωση που τα πλευρικά φορτία είναι μειωμένα. Αντίθετα, οι χαμηλότερες εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται όταν η προσομοίωση γίνεται για ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου σε όλη την περίμετρο της επένδυσης.

Η πιο επικίνδυνη θέση για πρόκληση αστοχιών λόγω εφελκυστικών τάσεων είναι η επαφή του μετώπου με τον θόλο. Όταν οι αναλύσεις γίνονται για ομοιόμορφη κατανομή πιέσεων εφελκυστικές τάσεις σχεδόν δεν εμφανίζονται στην περιοχή του θόλου. Αντίθετα για τις αναλύσεις με μειωμένες πλευρικές πιέσεις δείχνουν ότι οι εφελκυστικές τάσεις στο θόλο καταλήγουν να είναι πάντα μικρότερες σε σχέση με αυτές που αναπτύσσονται στο μέτωπο.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με το πρόγραμμα SAP για σήραγγα με διάμετρο ίση με 10 m παρουσιάζονται στον πίνακα 8.17. Τα είδη της υποστήριξης τα οποία μελετήθηκαν είναι, όπως αυτά αναφέρονται και παραπάνω, τα P-b (14 cm), P-c (16 cm) και P-d/e (20 cm). Η υποστήριξη τύπου P-a δε συμπεριλαμβάνεται στις αναλύσεις διότι έχει πολύ μικρή φέρουσα ικανότητα και η χρήση της είναι περιορισμένη έως ελάχιστη.

Δοκιμές φόρτισης	**Σταθερό έδαφος**	**Ασταθές έδαφος**	**Μειωμένες πλευρικές πιέσεις**		**Είδος υποστήριξης**
	Εφελκυσμός στις παρειές (kg/cm^2)		Εφελκυσμός στις παρειές (kg/cm^2)	Εφελκυσμός στο θόλο (kg/cm^2)	
1	0.80	0.94	2.50	2.10	P-c
2	0.55	0.56	2.00	1.30	P-c
3	2.50	2.53	8.20	3.30	P-d
4	1.30	1.50	5.70	2.60	P-d
5	0.45	0.51	2.30	1.50	P-d
6	0.35	0.41	1.50	0.90	P-c
7	1.10	1.54	7.30	4.10	P-e
8	2.80	2.80	**9.00**	3.70	P-d
9	0.20	1.30	2.40	1.50	P-e
10	1.10	2.90	3.90	2.20	P-d

Πίνακας 8.17: Τιμές μέγιστης εφελκυστικής τάσης στην υποστήριξη (Maccaferri)

Οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται είναι συνάρτηση της ποιότητας του εδάφους αλλά και του συντελεστή ωθήσεων. Η υψηλότερη εφελκυστική τάση που εμφανίστηκε ήταν ίση με 9.0 kg/cm^2 (0.9 MPa). Έτσι, διαπιστώνουμε ότι ακόμη και σε πολύ δυσμενείς συνθήκες η χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, με ποιότητα C24/30 και ελάχιστη δοσολογία ινών ίση με 25 kg/m^3, μπορεί να ανταπεξέλθει ως υλικό υποστήριξης σηράγγων, στις πιο πολλές εφαρμογές ως προς τη γεωμετρία της εκσκαφής και τη γεωλογία της περιοχής, καθώς αυτό αποκτά εφελκυστική αντοχή από 1 έως 1.5 MPa (Maccaferri).

5. Ελάχιστη ποσότητα ινών

Εκτός από το πάχος της επένδυσης, ένας ακόμη παράγοντας που ενδιαφέρει στο σχεδιασμό είναι και η δοσολογία των ινών, δηλαδή η ποσότητά τους ανά m^3. Αυτή προτείνεται συνήθως από τον ίδιο τον παρασκευαστή, ανάλογα με το είδος της ίνας και τη χρήση της, ή μπορεί να δίδεται ένα κατώτερο και ανώτερο όριο δόσης. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται κυρίως δύο μέθοδοι.

Πρώτη μέθοδος είναι οι δοκιμές σύμφωνα με τα διάφορα πρότυπα για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτά βασίζονται κυρίως σε δοκιμές κάμψης και στους δείκτες που προκύπτουν ανάλογα με τη συμπεριφορά των ινών.

Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της ελάχιστης απόστασης που πρέπει να εξασφαλίζεται μεταξύ των ινών. Βασίζεται στην υπόθεση ότι οι ίνες καθυστερούν το άνοιγμα των μικρορωγμών κι έτσι βελτιώνουν την αντοχή του υλικού. Η αποτελεσματικότητα των ινών αξιολογείται μόνο από την απόσταση μεταξύ τους. Όσο αυτή μικραίνει τόσο αυξάνει η αντοχή αφού αυξάνει και η αντίσταση ενάντια στη ρωγμάτωση (Maidl, 1995).

Οι Romualdi και Batson (1961) πρώτοι προσπάθησαν να περιγράψουν τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας αυτό το μοντέλο (Maidl, 1995). Η σχέση που προτείνουν συνδέει τη διάμετρο και την ποσότητα των ινών

με την απόστασή τους και περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.3. Έπειτα, μια ακόμη τέτοια σχέση προτάθηκε από τον MacKee (1969) η οποία επίσης περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.3.

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν για τον ενδεικτικό υπολογισμό μιας ελάχιστης δοσολογίας ινών όταν είναι γνωστά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους και όταν ορίζεται μια ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους. Ένας κανονισμός που ορίζει την απόσταση αυτή προέρχεται από μια τεχνική επιτροπή (Design of concrete structures Steel wire fibre reinforced concrete structures with or without ordinary reinforcement, Ministry of the Flemish Community Dept. for the Environment, 1995) και προβλέπει ότι η μέγιστη μέση απόσταση μεταξύ των ινών πρέπει να είναι 0.45 φορές το τυπικό μήκος της ίνας (Scancem Materials).

Έτσι, υποθέτοντας ότι s=0,45*l, η σχέση του MacKee, που είναι αυτή που έχει επικρατήσει, θα γίνει:

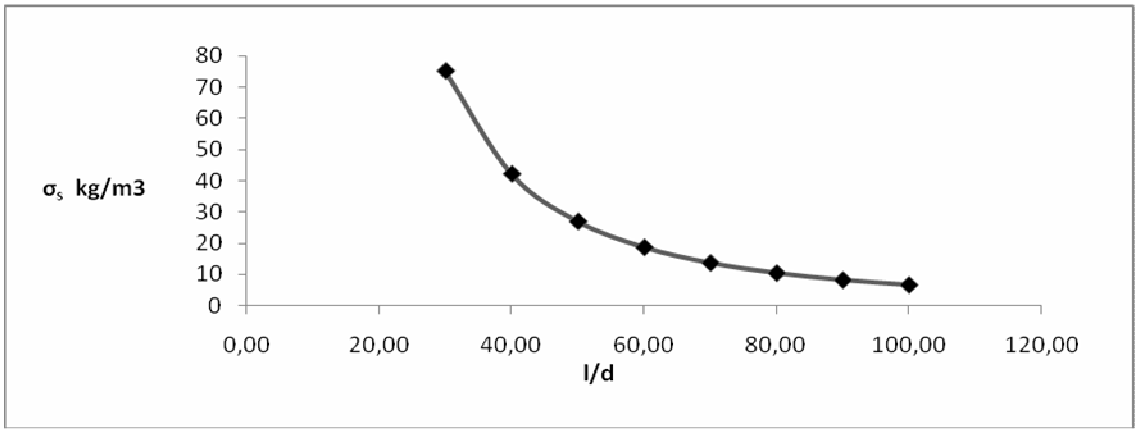
$$\sigma = \frac{8,6145}{(\frac{l}{d})^2} \quad (1)$$

Όπου: l/d = ο λόγος μορφής των ινών
σ = το ποσοστό των ινών στο μίγμα (κατ' όγκο)

Η σχέση (1) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για χαλύβδινες ίνες αν ληφθεί υπόψη ότι το ειδικό βάρος του χάλυβα είναι ίσο με 78.5 kg/m^3. Έτσι, η (1) θα υπολογίζει τη δοσολογία των ινών χάλυβα κατά βάρος (σ_s) ως εξής:

$$\sigma_s = \frac{67,624}{(\frac{l}{d})^2} \quad (2)$$

Η καμπύλη που προκύπτει από τη σχέση (2) παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.18. Βέβαια πρόκειται για μια προτεινόμενη ελάχιστη προσθήκη ινών χάλυβα και όχι για ακριβή μέθοδο υπολογισμού της δοσολογίας των ινών. Επίσης η σχέση (1) δε μπορεί να εφαρμόζεται σε μίκρο-ίνες ή σε συνθετικές ίνες που έχουν περίπλοκη γεωμετρία.



Διάγραμμα 8.18: Ελάχιστη ποσότητα ινών ανάλογα με τον λόγο μορφής

6. Εφαρμογή σε ειδικές κατηγορίες εδαφών

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έχει εφαρμοσθεί και σε δύσκολες γεωλογικές συνθήκες, όπως σε συνθλίβοντα εδάφη ή εκεί όπου παρουσιάζονται εκτινάξεις βράχων, με μεγάλη επιτυχία.

Εκτινάξεις βράχων (rockburst) εμφανίζονται σε πετρώματα καλής ποιότητας, σε μεγάλα συνήθως βάθη. Οι ταχύτητες που κινούνται τα τεμάχη είναι μεγαλύτερες από 8 m/s ενώ μπορεί να φθάσουν και τα 50 m/s. Η εκτίναξη ενός τεμάχους πάχους ενός μέτρου με ταχύτητα από 5 έως 10 m/s μπορεί να δικαιολογήσει κατάλληλο σχεδιασμό ενάντια στο φαινόμενο αυτό. Το κριτήριο σχεδιασμού που πρέπει να πληρείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι η φέρουσα ικανότητα της υποστήριξης να είναι ικανή ώστε να μπορεί να απορροφήσει και να διασκορπίσει αρκετή ενέργεια χωρίς να αστοχήσει. Αυτό πρέπει βέβαια να γίνεται μέσα σε ένα λογικό εύρος παραμόρφωσης. Ενδεικτική τιμή για την απορρόφηση ενέργειας σε τέτοιες περιπτώσεις είναι τα 100 kJ/m^2 (Stacey, Ortlepp, Kirsten, 1995).

Σε περιπτώσεις που έχουμε συνθλίβοντα εδάφη έχει παρατηρηθεί ότι η επένδυση από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συμπεριφέρεται πλέον όπως το πέτρωμα, λόγω των υψηλών τάσεων. Αυτό σημαίνει ότι το σκυρόδεμα αστοχεί όπως και το πέτρωμα. Για παράδειγμα στη σήραγγα Laerdal (Νορβηγία), η κυρίαρχη μορφή αστοχίας ήταν σε διάτμηση τόσο στο πέτρωμα όσο και στην επένδυση, αν και γενικά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αστοχεί συχνότερα σε κάμψη. Η εμπειρία, από ίδια σήραγγα, έδειξε επίσης ότι ακόμη και μετά τη χαλάρωση της επένδυσης δεν παρατηρήθηκαν εκτεταμένες καταπτώσεις και αυτό αποδίδεται στις ίνες. Μπροστά στα έντονα φαινόμενα σύνθλιψης καμία επένδυση ίσως δεν είναι ικανή να εκμηδενίσει τις παραμορφώσεις. Αυτό που πρέπει όμως να επιτυγχάνεται είναι έλεγχός τους και πρόληψη των αστοχιών που οδηγούν σε υπερεκσκαφές.

Σε συνθήκες με υψηλές επί τόπου τάσεις συχνά εμφανίζεται διατμητική αστοχία στην επένδυση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα έναν διαφορετικό τρόπο αστοχίας των ινών καθότι κι αυτές αστοχούν κυρίως σε διάτμηση και όχι σε εφελκυσμό, όπου παρατηρείται εξόλκευσή τους. Κατά συνέπεια χαλύβδινες ίνες υψηλής ποιότητας θα προσφέρουν μεγαλύτερη αντίσταση σε διάτμηση σε σχέση με ίνες μικρότερης αντοχής. Κατά την διάτμηση, η επένδυση από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα μεγάλου πάχους συμπεριφέρεται σαν επένδυση από έγχυτο σκυρόδεμα ή ως επέκταση του ίδιου του πετρώματος. Έτσι, οι ίνες καλής ποιότητας προλαμβάνουν την εκτόξευση τμημάτων της επένδυσης μετά το σχηματισμό των ρωγμών. Η δοσολογία και ο τύπος των ινών είναι σημαντικά στην παραμένουσα αντοχή του σκυροδέματος μετά τη μεγάλη επικειμένη παραμόρφωση. Εργαστηριακές δοκιμές πρέπει να γίνουν ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της επένδυσης σε διάτμηση (Grimstad, 2001).

Περίληψη Εργασίας

Το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα έκανε τα πρώτα του βήματα την δεκαετία του '70. Η χρήση του από τότε όλο και διευρύνεται λόγω των πλεονεκτημάτων του έναντι του συμβατικού οπλισμού. Οι εφαρμογές του δεν περιορίζονται μόνο στα υπόγεια έργα αλλά σε κάθε είδους έργο στήριξης μιας επιφάνειας. Τα είδη που πλέον διατίθενται στην αγορά είναι πολλά με τις χαλύβδινες όμως να αποτελούν την πιο συνηθισμένη και αξιόπιστη επιλογή τις περισσότερες φορές.

Το βασικότερο στοιχείο των ινών είναι ο λόγος μορφής τους, δηλαδή ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο. Ίνες με μεγάλο λόγο μορφής αναμιγνύονται και εκτοξεύονται δυσκολότερα, ωστόσο είναι πιο αποτελεσματικές. Τα μίγματα καθώς και ο μηχανικός εξοπλισμός που χρησιμοποιούνται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι σε γενικές γραμμές τα ίδια με το συμβατικό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Αυτό που πρέπει όμως να διασφαλίζεται είναι η επάρκεια του εξοπλισμού ως προς τη διάμετρο των σωληνώσεων ούτως ώστε οι ίνες να μην μπλοκάρουν μέσα σε αυτές. Έτσι το μήκος τους πρέπει να είναι ίσο ή μικρότερο με τα 2/3 της διαμέτρου των σωληνώσεων.

Από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος αυτό που συχνότερα αναφέρεται είναι συμπεριφορά του σε κάμψη. Μέσω δοκιμών σε δοκούς 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.

Ο σχεδιασμός με ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με την εμπειρική μέθοδο, που βασίζεται στην ταξινόμηση σύμφωνα με το Q (Barton), μπορεί μεν να δίνει μια εύκολη και γρήγορη εκτίμηση για την υποστήριξη αλλά δεν σχολιάζει ούτε το είδος ούτε τη δοσολογία των ινών ενώ δεν είναι αποτελεσματική εκεί όπου αναμένονται μεγάλες παραμορφώσεις. Έτσι πιο εξελιγμένοι μέθοδοι σχεδιασμού έχουν αναπτυχθεί, οι οποίες προσομοιώνουν πολύ καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες. Με τη χρήση του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος αντιμετωπίζονται πλέον οι δύσκολες γεωλογικές συνθήκες (συνθλίβοντα εδάφη) καθώς και φαινόμενα εκτινάξεων βράχων.

Tutorial Summary

The use of ***Fiber Reinforced Shotcrete***, that took it' s first steps during the 1970s, has began to be more and more popular in modern construction technology thanks to the variety of the advantages offered in comparison with the conventional reinforcement. Its applications are not only limited in underground works but it can also be used to support almost every structure on the surface. There is a wide range of fibers available on the market with the steel fibers being the most common and reliable choice.

The most important parameter of fibers is the *aspect ratio*, that is measured by the fraction of the length to the diameter of the fiber. Fibers with high aspect ratio are more difficult to mix but tend to be much more efficient. The technology used for the conventional shotcrete is also convenient for the fiber reinforced shotcrete although extra care should be taken concerning the equipment, in order to avoid fiber blockages. This is achieved when fiber' s length is not greater than 2/3 the times of the diameter of the pipe.

One of the truly important mechanical characteristics of the fiber reinforced shotcrete is what we call "flexural strength". Tests in plates and prismatic beams are conducted in order to measure the deflection and the absorbed energy, factors that strongly depend on the type and the fiber dosage. The production of the test items is of a significant importance when it comes to obtain some representative results, so the appropriate standards must be followed.

Designing with fiber reinforced shotcrete using the empirical method, which is based on the rock mass classification with the Q system (Barton), can be quite convenient but doesn't give us any information concerning the fiber type or the proper fiber dosage. As a result, a lot of sophisticated design methods based on the realistic simulation of the material performance, have been developed. Concluding with the benefits of the fiber reinforced shotcrete, it should be mentioned that this kind of support could be used in squeezing rock or in order to avoid rockbustrs in high depths.

Βιβλιογραφία

1. ACI Committee 506.1R (1998), Report on Fiber Reinforced Shotcrete, ACI Detroit
2. ACI Committee 544.1R (2002), State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Detroit
3. ACI Committee 544.2R (1989), Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, ACI Detroit
4. ACI Committee 544.3R (1998), Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Detroit
5. ACI Committee 544.4R (1999), Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Detroit
6. C. Allen, 2009, Fibre decider, Tunnels and Tunneling International
7. J. Archibald, S. Espley, D. DeGagne, U. Bickis, Occupational Hazards of Spray-on Liner Applications in Underground Environments: Truths & Myths, Canada
8. H. Armelin, 1997, Rebound and Toughening Mechanisms in Steel Fiber Reinforced Dry-Mix Shotcrete, University of British Columbia
9. ASTM A 820/A 820 M (2004), Standard Specification for Steel Fibers for Fiber-Reinforced Concrete
10. ASTM C 1018 (1997), Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete
11. ASTM C 1116 (2003), Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete and Shotcrete
12. ASTM C 1550 (2003a), Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete
13. ASTM C 1609/C 1609 M (2005), Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete
14. S. Austin, C. Peaston, P. Robins, 1997, Material and Fibre Losses with Fibre Reinforced Sprayed Concrete, Construction and Building Materials, Vol. II
15. BISFA, 2009, Terminology of man-made fibers, Bruxelles
16. CNR-DT 204/2006, Guide for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures
17. M. Ballou, M. Niermann, 2002, Soil and Rock Slope Stabilization using Fiber Reinforced Shotcrete in North America, Shotcrete
18. E. Bernard, 2001, Correlations in the behaviour of fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens, Materials and Structures Vol. 35.
19. E. Bernard, 2001, Shotcrete: More Engineering Developments, Swets & Zeitlinger, Australia
20. E. Bernard, 2004, Shotcrete: More Engineering Developments, Australia

21. E. Bernard, 2007, Early-age load resistance of fibre reinforced shotcrete linings, Elsevier, Australia
22. E. Bernard, 2009, Early age re-entry under fresh fiber-reinforced shotcrete, ECI Conference on Shotcrete for Underground Support
23. E. Bernard, 2009, Design of Fiber Reinforced Shotcrete Linings With Macro-Synthetic Fibres, 2009 ECI Conference on Shotcrete for Underground Support
24. S. Bernard, 2003, Release of New ASTM Round Panel Test, Shotcrete
25. G. Bracher, Worldwide Sprayed Concrete: State-of-the-Art Report, Sika
26. O. Cengiz, L. Turanli, 2001, Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test, Turkey
27. M. Clements, 2003, Shotcreting in Australian Underground Mines: A Decade of Rapid Improvement, Shotcrete
28. Z. Deng και J. Li, 2006, Mechanical behaviors of concrete combined with steel and synthetic macro-fibers, International Journal of Physical Sciences Vol. 1
29. J. Denny & P. Hagan, The effect of fibre type and dosage rate on the performance of Fibre Reinforced Shotcrete, The University of New South Wales (UNSW), Sydney
30. Y. Ding, W. Kusterle, 2000, Compressive stress –strain relationship of steel fibre-reinforced concrete at early age
31. J. Dufour, J.Donnell, M. Ballou, 2003, Determination of Early-Age Ductility of Steel Fiber-Reinforced Shotcrete Lining System at INCO's Stobie Mine, Shotcrete
32. EFNARC, 1996, The European Specification for Sprayed Concrete, UK
33. EFNARC, 2002, Checklist for Specifiers and Contractors, UK
34. S. Eswari, P. Raghunath and K. Suguna, 2008, Ductility Performance of Hybrid Fibre Reinforced Concrete, American Journal of Applied Sciences 5
35. R. Hameed, A. Turatsinze, F. Duprat and A. Sellier, 2009, Metallic Fiber Reinforced Concrete: Effect of Fiber Aspect Ratio on the Flexural Properties, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences
36. B. Hathaway, 2007, A comparison of macro-synthetic-and steel-fibre-reinforced concretes
37. M. Hisatake, 2003, Effects of steel fiber reinforced high-strength shotcrete in a squeezing tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology 18
38. E. Hoek, 2007, Practical Rock, Engineering
39. ITA/AITES REPORT 2006 on Shotcrete for Rock Support
40. D. Journeaux, 2004, Rock Stabilization of two Historically Sensitive Rock Slopes using Shotcrete, Shotcrete

41. J. Katzer, 2006, Steel Fibers and Steel Fiber Reinforced Concrete in Civil Engineering, Poland
42. C. Keith, 2001, Designing with High Performance Polymer fibers
43. G. Keyter and K. Drescher, 2001, Test results on compressive strength anisotropy in steel fibre reinforced shotcrete, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy
44. H. Kirsten, 1992, Comparative efficiency and ultimate strength of mesh- and fibre-reinforced shotcrete as determined from full-scale bending tests, J. S. Atr. Inst. Min. Metal, vol. 92
45. K. Kobayashi, 1983, Development of Fiber Reinforced Concrete in Japan, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Volume 5
46. S. Kosmatka, B. Kerkhoff, W. Panarese, 2002, Design and Control of Concrete Mixtures, 14th Edition
47. A. Lambrechts, 2005, The Technical Performance of Steel and Polymer based Fibre Content, Bekaert, Belgium
48. A. Lamontagne, M. Pigeon, 1995, The Influence of Polypropylene Fibers and Aggregate Grading on the Properties of the Dry-Mix Shotcrete, Cement and Concrete Research, Vol. 25
49. A. Laning, 1992, Synthetic fibers Primarily used to reduce shrinkage cracking, polypropylene, nylon, and polyester fibers offer other benefits as well, Aberdeen
50. C. Leung, R. Lai, A. Lee, 2003, Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition, Cement and Concrete Research 35, Hong Kong
51. B. Maidl, 1995, Steel Fibre Reinforced Concrete, Ernst & Sohn, Berlin
52. Bo Malmberg, 1993, Shotcrete for Rock Support: a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 8, No. 4
53. L. Malmgren, 2005, Strength, Toughness and Stiffness of Fiber Reinforced Shotcrete, Doctoral Thesis, Sweeden
54. P. Mehta, P. Monteiro, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials
55. T. Melbye, 1994, Sprayed Concrete for Rock Support, Master Builders Technologies, Zurich
56. D. Metcatf, D. Latiin, 1992, Channel Lining with Fiber Reinforced Shotcrete, Arizona, USA
57. C. Molins, A. Aguado, S. Saludes, 2007, Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test), UPS, Spain
58. D. Morgan, 1999, Shotcrete Reinforcement, Shotcrete Magazine
59. E. Nawy, 2008, Concrete construction engineering handbook, CRC Press

60. J. Ortigao, A. Davidovitch, A. Moraes, D. Vallejos, 1998, Fibre Reinforced Shotcrete lining at the Covanca Tunnel

61. F. Papworth, 2002, Design Guidelines for the Use of Fiber-Reinforced Shotcrete in Ground Support, Shotcrete

62. G. Pittino, R. Gallery, 2009, X-Ray Tomographie of Steel Fibre Reinforced Shotcrete (SFRS), 2009 ECI Conference on Shotcrete for Underground Support

63. PrUNE 83511, Fibre reinforced concrete Determination of cracking strength, ductility and residual tensile strength, Barcelona test

64. H. Sahranavard, R. Aghanoori, 2006, Use of Polymer Fiber (HPP) Reinforced Shotcrete instead of Final Lining in Khomary Tunnel

65. T. Stacey, W. OrtIepp, and A. Kirsten, 1995, Energy-absorbing capacity of reinforced shotcrete, with reference to the containment of rockburst damage, The Joumal of The South African Institute of Mining and Metallurgy

66. P. Tatnall, 2007, Workshop on: Fiber Reinforced Concrete, Toronto

67. J. Trottier, M. Mahoney, 2004, Innovative Synthetic Fibers, Shotcrete

68. N. Van Chanh, Steel Fiber Reinforced Concrete

69. M. Vandewalle, 1993, Tunnelling The World, Bekaert S.A., Belgium

70. M. Vandewalle, 1998, The use of steel fibre reinforced shotcrete for the support of mine openings, The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy

71. C. Wang, 2006, Experimental Investigation on Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete, University of Canterbury

72. D. Wimpenny, W. Angerer, T. Cooper, S. Bernard, The use of Steel and Synthetic Fibres in Concrete under Extreme Conditions

73. C. Wong, 2004, Use of Short Fibres in Structural Concrete to Enhance Mechanical Properties, University of Southern Queensland

74. S. Yazıcı, G Inan, V. Tabak, 2005, E□ect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC, Construction and Building Materials 21

75. R. Zollo, 1995, Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development

76. Χ. Αλεξοπούλου, 2003, 'Εκτοξεύοντας το σκυρόδεμα', Παρατηρήσεις και Παραλήψεις του Σχεδίου Προδιαγραφής, Παρουσίαση Στοιχείων για το Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, Πρόσμικτα, Υγιεινή και Οικολογία

77. Μ. Γεωργακοπούλου, Ενίσχυση Στοιχείων με Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα από Χάλυβα και Πλαστικά υλικά

78. Π. Κατσικογιάννη, Π. Νομικός, G. Auxion, Μ. Μιχαηλίδης, Α. Σοφιανός, 2008, Ποιοτικός Έλεγχος Ινοπλισμένου Σκυροδέματος στη Σηραγγοποιία, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα

79. Π. Κατσικογιάννη, 2004, Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, Εφαρμογές στην Ελλάδα, ΕΜΠ

80. Ι. Παπαγιάννη, Ε. Αναστασίου, 2008, Μηχανικά Χαρακτηριστικά Ινοπλισμένων Σκυροδεμάτων, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα

81. Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, Ι.Ο.Κ., 1η έκδοση

82. Α. Σακελλαρίου, 2006, Σύγκριση ιδιοτήτων άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Επίδραση της ποσότητας των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη

83. Μ. Σαπρανίδης, 2002, Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, Αττικό Μετρό

84. Δ. Σουλιώτη, Θ. Ματίκας, 2008, Μηχανικές Ιδιότητες Ινοπλισμένου Σκυροδέματος με Διαφορετική Γεωμετρία και Ποσότητα Χαλύβδινων Ινών, 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ

85. Α. Σοφιανός, 2008, Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων, ΕΜΠ, Αθήνα

86. Κ. Στυλιανίδης, Κ. Παπανικολάου, Θ. Σαλονικιός, 1998, Αξιολόγηση Δεικτών Μηχανικών Χαρακτηριστικών Ινοπλισμένου Σκυροδέματος, ΤΕΕ, τεύχος 2

87. Σχέδιο Προδιαγραφής για το Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, 1999

Ηλεκτρονικές Πηγές

- http://www.shield-method.gr.jp/english/ecl/index.html, 3/10/09
- http://www.gunitesupply.com/guniteequipment.html, 14/12/09
- http://www.aliva.co.uk/#/263-285-machines/451954454, 14/12/09
- http://www.thiessenteam.com/shotcrete/products/application_equip.htm, 14/12/09
- http://minequip.kpmindustries.com/Product_Catalogue/ByCategory/ALIVA-Shotcrete-Equipment.aspx, 14/12/09
- http://www.alibaba.com/showroom/Shotcrete_Machine.html, 14/12/09
- http://www.gunitesupply.com/gunitecyclone.html, 14/12/09
- http://www.meyco.basf.com/en/meyco_solutions/equipment/equipment-range/Pages/default.aspx, 14/12/09
- http://www.pmw.co.in/cps/rde/xchg/pm_india/hs.xsl/485_ENU_HTML.hht, 14/12/09

Ενημερωτικό και διαφημιστικό υλικό από τις εταιρείες:

- Arcelormittal
- BASF gr
- Bekaert (BOSFA technical manual)
- Fasertechnik
- Harex
- Hookfiber
- Maccaferri (technical manual)
- Master Builders Technologies – Meyco
- Novocon
- Nycon
- Propex
- Radmix (technical manual)
- Scancem Materials
- Sika
- ΕΤΑΛ Α.Ε.

Πρόσθετη βιβλιογραφία

1. ACI 506.5R-09, 2009. 'Guide for specifying underground shotcrete', ACI Detroit
2. ASTM C1399-07a, 2007. 'Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete'
3. Austin S.A. & Robins P. J., 1995. 'Sprayed Concrete: Properties, Design and Application', Whittles Publishing, Scotland
4. N. Banthia, P. Gupta and C. Yan, 1999, Impact resistance of fiber reinforced wet-mix shotcrete, Materials and Structures, Vol. 32
5. E. Bernard, M. Pircher, 2000, Influence of geometry on the performance of round determinate panels made with fiber-reinforced concrete: Civil Engineering Report CE10. School of Civil Engineering and Environment, University of Western Sydney, Nepean
6. W. Brown, 1993, Engineering and Design, Standard Practice for Shotcrete, US Army Corps of Engineers, Washington
7. BS 8110-1, 1997, (2005). 'Structural use of Concrete', BSI

8. BS 8500-2, 2006.. 'Concrete-Complementary to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for constituent materials and concrete', BSI
9. BS EN 1992-1.1, 2004, 'Eurocode 2 Design of Concrete Structures', BSI
10. BS EN 1997-1, 2004. Eurocode 7. Geotechnical Design – General Rules, BSI
11. BS EN 206-1, 2000 (2006). 'Concrete-Specification, Performance, Production and Conformity', BSI
12. BS EN 14487-1, 2005. 'Sprayed Concrete-Definitions, specifications and conformity', BSI
13. BS EN 14651-1, 2007. 'Test method for metallic fibered Concrete – Measuring the flexural strength (LOP, residual), BSI
14. BS EN 14487-2, 2006. 'Sprayed Concrete – Execution', BSI
15. BS EN 14487-2, 2006. 'Fibres for Concrete – Steel Fibres - Definitions, specifications and conformity', BSI
16. BS EN 14489-2, 2006. 'Fibres for Concrete –Polymer Fibres - Definitions, specifications and conformity', BSI
17. P. Chryssanthakis, N. Barton, L. Lorig, M. Christianson, 1997, Numerical Simulation of Fiber Reinforced Shotcrete in a Tunnel Using the Discrete Element Method, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol. 34
18. CS TR63, 2007. 'Guidance for the Design of Steel-Fibre – Reinforced Concrete', Concrete Society Technical Report, 63, Surrey, UK
19. DIN 1045, 1988. ' Structural use of concrete – design and construction', DIN, Berlin
20. DIN 1048-1, 1991. 'Part 1, Testing of fresh concrete, post-crack load capacity of fibre reinforced concrete' (in German), DIN, Berlin
21. DIN 18551, 1992. 'Sprayed Concrete. Testing and Inspection' DIN Berlin
22. Y. Ding, W. Kusterle, 1999, Comparative study of steel fibre-reinforced concrete and steel mesh-reinforced concrete at early ages in panel tests, Cement and Concrete Research 29
23. EFNARC, 2008. 'Specification and Guidelines on thin Spray-on Liners for ng and Tunneling', EFNARC, UK
24. JSCE-SF4, 1985. 'Method of test of flexural strength and flexural toughness for steel-fibre reinforced concrete', JSCE-SF4, 1985
25. JSCE, 2008. 'Recommendations for design and construction of high performance fibre reinforced cement composite with multiple fine cracks', Concrete Engineering Series 82, JSCE-SF4, 1985
26. F. Jeng, M. Lin, S. Yuan, 2001, Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete, Tunnelling and Underground Space Technology 17
27. C. Leung, M. ASCE, A. Lee, R. Lai, 2005, A New Testing Configuration for Shrinkage Cracking of Shotcrete and Fiber Reinforced Shotcrete, Cement and Concrete Research

28. L. Lourenço, J. Barros and S. Santos, High Strength and Ductile Fibrous Concrete of Enhanced Fire Resistance, Portugal
29. P. Kalifa, G. Chene, C. Galle, 2001, High-temperature behavior of HPC with polypropylene fibres From spalling to microstructure, Cement and Concrete Research 31
30. F. Kamalodeen and A. K. Sharma, 2002, Fibre Reinforced Concrete Rectangular Memebers Under Combined Bending, Shear and Torsion, 15th ASCE Engineering Mechanics Conference, New York
31. RILEM TC162-TDF, 2002. 'Bending Test – Final Recommendation. RILEM: Tests and Design Methods for steel fibre reinforced concrete', Materials and Structures, 35, November, pp. 579-582
32. RILEM TC162-TDF, 2003. 'σ-ε Design Method – Final Recommendation. RILEM: Tests and Design Methods for steel fibre reinforced concrete', Materials and Structures, 36, October, pp. 560-567
33. R. Ratcliffe, 2007, Fibre Reinforcement: Steel versus Macro (Structural) Synthetic, Concrete Beton, Concrete Society of Southern Africa
34. H. Saw, E. Villaescusa, C. Windsor A. Thompson, 2009, Non-Linear, Elastic-Plastic Response of Steel Fibre Reinforced Shotcrete to Uniaxial and Triaxial Compression Testing
35. P. Song, J. Wu, S. Wang, B. Sheu, 2004, Statistical analysis of impact strength and strength reliability of steel-polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete. Constr. Build. Mater
36. ΕΛΟΤ ΕΝ 197-1:2000, Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για τα κοινά τσιμέντα
37. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΣ-97 (ΦΕΚ 315/Β/17-4-97)