



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

---

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Τομέας Δομοστατικής

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος

**«Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα -  
σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Αργυρώ Σ. Παπακώστα**

**Αναστασία Α. Τσιάρα**

Επιβλέπων: Ε. Μπαδογιάννης

Αθήνα, Μάρτιος 2015



Παπακώστα Αργυρώ & Τσιάρα Αναστασία (2015)

Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών

Διπλωματική Εργασία

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Papakosta Argyro & Tsiara Anastasia (2015)

Durability of steel fiber reinforced concrete in sulfate environment

Diploma Thesis

Reinforced Concrete Laboratory, National Technical University of Athens, Greece





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

**Διπλωματική εργασία**  
**Αργυρώ Σ. Παπακώστα & Αναστασία Α. Τσιάρα**  
**Επιβλέπων: Ε. Μπαδογιάννης**

**«ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ - ΜΕ ΙΝΕΣ ΧΑΛΥΒΑ -  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΘΕΙΚΩΝ»**

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της ανθεκτικότητας του ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα - σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών.

Παρασκευάστηκαν και εξετάστηκαν τέσσερις συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος με ποσοστά περιεχομένων κ.ο. ινών 0%, 0,25%, 0,375% και 0,5%, από τις οποίες προέκυψαν 90 κυβικά και 18 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων  $70 \times 70 \times 70$  mm και  $285 \times 40 \times 40$  mm, αντίστοιχα. Τα δοκίμια αυτά εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θειικού μαγνησίου υψηλής συγκέντρωσης.

Αρχικά, στο θεωρητικό μέρος, γίνεται περιγραφή του ινοπλισμένου σκυροδέματος και αναλύεται η έννοια της ανθεκτικότητας, μέσω των παραγόντων που την επηρεάζουν, των μηχανισμών φθοράς και των διαβρωτικών μέσων που διεισδύουν στο σκυρόδεμα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην επίδραση των θεικών.

Εν συνεχεία, στο πειραματικό μέρος, ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων και των δοκιμών που διεξήχθησαν. Πιο συγκεκριμένα, η πειραματική διαδικασία περιελάμβανε μετρήσεις βάρους και μήκους, χρόνου διάδοσης υπερήχων, τριχοειδούς απορρόφησης, ανοικτού πορώδους, δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και προσδιορισμό των

ορυκτολογικών χαρακτηριστικών των δοκιμίων σκυροδέματος μέσω ανάλυσης περίθλασης ακτίνων - X (XRD).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει σημαντική μεταβολή του πορώδους και της τριχοειδούς απορρόφησης με την προσθήκη ινών σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, ενώ μικρή μοιάζει και η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής υπό την επίδραση του περιβάλλοντος θεικών μέχρι και τις 180 ημέρες έκθεσης. Από τα διαγράμματα περίθλασης ακτίνων - X διαπιστώθηκε ο σχηματισμός ετρινγκίτη, γεγονός που δικαιολογεί και τη μορφή του διαγράμματος της μεταβολής του χρόνου διάδοσης των υπερήχων. Συγκεκριμένα, παρατηρείται καθοδική πορεία του χρόνου διάδοσης υπερήχων μέχρι και την ηλικία των 56 ημερών, που αποδίδεται στην πλήρωση των κενών του πορώδους με ετρινγκίτη, ενώ μετά την ηλικία αυτή σημειώνεται αύξηση του χρόνου διάδοσης, εξαιτίας της ρηγμάτωσης που προκαλεί η διασταλτική δράση του ετρινγκίτη.

**Λέξεις κλειδιά:** ίνες χάλυβα, ινοπλισμένο σκυρόδεμα, πορώδες, ανθεκτικότητα, αντίσταση στη δράση θεικών



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING  
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING  
REINFORCED CONCRETE LABORATORY

**Diploma Thesis**

**By Papakosta Argyro & Tsiara Anastasia**

**Supervisor: E. Badogiannis**

**“DURABILITY OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE IN SULFATE ENVIRONMENT”**

### **Abstract**

The main goal of this diploma thesis is to research the durability of steel fiber reinforced concrete, in sulfate environment.

Four different fiber reinforced concrete compositions, with fiber rate contents by volume 0%, 0,25%, 0,375% and 0,5%, were prepared and examined, leading to the preparation of 90 cubic and 18 prismatic pieces, measuring  $70 \times 70 \times 70$  mm and  $285 \times 40 \times 40$  mm, respectively. These specimens were immersed in a highly - concentrated magnesium sulfate solution.

Initially, in the theory section, a description of fiber reinforced concrete was made and the durability is analyzed in view of the factors that affect it, the wear mechanisms and corrosive media penetrate the concrete, with particular emphasis on the effects of sulfate solutions.

Subsequently, in the experimental section, the presentation of the outcome of results from measurements and tests conducted comes next. More specifically, the experimental procedure, involved measuring weight and length, as well as ultrasonic propagation time, capillary suction, open porosity, uniaxial compression testing and determining the mineralogical characteristics of the concrete material by X - Ray Diffraction (XRD) analysis.

The results indicated that no significant change in the porosity and capillary absorption took place, by the addition of fibers, as compared to plain concrete, while the change in the

compressive strength under the influence of sulfate environment was also insignificant, within the first 180 days of exposure. By X - ray diffraction testing, evidence of ettringite formation was found, which also explained the shape shown on the ultrasound chart. Specifically, there is a downward trend of ultrasonic propagation time up to the age of 56 days, attributed to the pores refinement action of the ettringite formation, and after that age there is an increase in ultrasound propagation time attributed to cracking caused by the dilatory effect of ettringite.

**Keywords:** steel fibers, fiber reinforced concrete, porosity, durability, sulfate attack resistance



## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μας εργασία, αισθανόμαστε την ανάγκη να εκφράσουμε τις θερμότερες ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα κ. Μπαδογιάννη Ε., Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, τις γνώσεις, την πολύτιμη καθοδήγηση και συμπαράσταση που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας αυτής, καθώς και στους καθηγητές που συμπληρώνουν την τριμελή επιτροπή εξέτασης, κ. Βουγιούκα Ε., Λέκτορα Ε.Μ.Π. και Ζέρη Χ., Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την επιστημονική τους συμμετοχή σε αυτή τη σημαντική εκπαιδευτική διαδικασία.

Ευχαριστίες οφείλουμε επίσης, στο διδακτικό και ερευνητικό προσωπικό του Εργαστηρίου «Ανόργανης και Αναλυτικής Χημείας» της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την υλικοτεχνική υποστήριξή τους κατά τη διεξαγωγή τμήματος των πειραμάτων, καθώς και τους μεταπτυχιακούς σπουδαστές Γιατζίδη Γ., Κορδή Ρ. και Παπαδάτου Μ. για την αδιαμφισβήτητη σημασία συνδρομή τους στην προετοιμασία των συνθέσεων και στις σκυροδετήσεις.

Φτάνοντας στο τέλος, δε θα μπορούσαμε να μην αποδώσουμε εύφημο μνεία σε όλους εκείνους που τάχθηκαν στο πλευρό μας καθόλη τη διάρκεια αυτής της διαδρομής και φυσικά στις οικογένειές μας αλλά και τους φίλους, για την αέναη υποστήριξη και συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια.

Παπακώστα Αργυρώ & Τσιάρα Αναστασία, ΕΜΠ 2015



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Ανθεκτικότητα Ινοπλισμένου - με ίνες χάλυβα - σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών», έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π. και πραγματοποιήθηκε από τις φοιτήτριες Παπακώστα Αργυρώ και Τσιάρα Αναστασία. Η εν λόγω εργασία για πρακτικούς και λειτουργικούς ρόλους χωρίστηκε σε δύο επιμέρους κεφάλαια.

Το πρώτο από αυτά, περιλαμβάνει μία θεωρητική προσέγγιση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, των χαρακτηριστικών και μηχανικών του ιδιοτήτων, με ιδιαίτερη έμφαση στην επιρροή της ύπαρξης περιβάλλοντος θεικών ενώσεων στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, που αποτελεί και το επίκεντρο της δεδομένης διπλωματικής εργασίας.

Το δεύτερο κεφάλαιο από την άλλη, ποσοτικοποιεί με νούμερα τις παραπάνω παρατηρήσεις και παραθέτει την εκπόνηση της πειραματικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε από τον Φεβρουάριο του 2014 έως και τον Ιανουάριο του 2015, καταλήγοντας στη διεξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων που θα ρίξουν τελικά και την αυλαία ετούτης της συλλογικής προσπάθειας.



## Πίνακας περιεχομένων

1. Θεωρητικό Μέρος.....	1
1.1. Ίνες.....	1
1.1.1 Ιδιότητες.....	1
1.1.2 Προέλευση ινών.....	11
1.1.3 Κριτήρια επιλογής ινών.....	25
1.2. Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα.....	29
1.2.1 Ορισμοί.....	29
1.2.2 Ιστορική αναδρομή.....	29
1.2.3 Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	31
1.2.4 Πλεονεκτήματα χρήσης ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	33
1.2.5 Μειονεκτήματα χρήσης ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	34
1.2.6 Διαφοροποιήσεις ινοπλισμένου-συμβατικού σκυροδέματος.....	36
1.3. Ανθεκτικότητα σκυροδέματος.....	36
1.3.1 Ορισμός ανθεκτικότητας.....	37
1.3.2 Σημασία ανθεκτικότητας.....	38
1.3.3 Κανονισμοί.....	39
1.3.4 Ελεγχόμενα μεγέθη.....	53
1.3.5 Μηχανισμοί φθοράς.....	59
1.4. Επίδραση θεικών.....	70
1.4.1 Μηχανισμοί φθοράς.....	70
1.4.2 Μέθοδοι ελέγχου.....	73
1.5. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	77
2 . Πειραματικό Μέρος.....	81
2.1. Συνθέσεις και έλεγχοι νωπού σκυροδέματος.....	81
2.1.1 Συνθέσεις σκυροδέματος.....	81

2.1.2	Έλεγχοι νοπού σκυροδέματος.....	87
2.2.	Πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις .....	90
2.2.1	Μέτρηση πορώδους και υδατο-απορροφητικότητας (Τριχοειδής απορρόφηση)....	90
2.2.2	Έκθεση σε περιβάλλον θεικών .....	92
2.2.3	Μηχανικές δοκιμές.....	93
2.2.4	Μέτρηση χρόνου διάδοσης υπερήχων.....	94
2.2.5	Μέτρηση μήκους και βάρους.....	96
2.2.6	Αξιολόγηση της δράσης των θεικών με αναλυτικές τεχνικές (XRD).....	97
2.3.	Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	99
2.3.1	Μέτρηση πορώδους και υδατο-απορροφητικότητας (Τριχοειδής απορρόφηση)....	99
2.3.2	Μηχανικές ιδιότητες.....	102
2.3.3	Μέτρηση ταχύτητας υπερήχων.....	103
2.3.4	Μέτρηση μήκους και βάρους.....	105
2.3.5	Αξιολόγηση της δράσης των θεικών με αναλυτικές τεχνικές (XRD).....	106
2.3.6	Συμπεράσματα .....	109

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1:</b>	Επιρροή του λόγου μορφής και του ποσοστού των ινών στην εργασιμότητα .....3
<b>Σχήμα 2:</b>	Τομή μιας ίνας μέσα σε μια ρωγμή με γωνία $\theta$ (Bentur and Mindness, 1990) ....4
<b>Σχήμα 3:</b>	Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995) .....4
<b>Σχήμα 4:</b>	Επιρροή του προσανατολισμού των ινών στη δυσθραυστότητα (Maidl, 1995)...5
<b>Σχήμα 5:</b>	Επιρροή της απόστασης των ινών στην εφελκυστική αντοχή (Romualdi, Batson 1963).....6
<b>Σχήμα 6:</b>	Κρίσιμο μήκος ίνας (Midl, 1995).....8
<b>Σχήμα 7:</b>	Κυρίαρχα προφίλ ινών.....8
<b>Σχήμα 8:</b>	Φορτίο-μετατόπιση για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (BHP technical manual, 1981).....9
<b>Σχήμα 9:</b>	Μηχανισμοί απορρόφησης ινών/σκυροδέματος (Fractures Mechanics, Anderson, 1991).....10
<b>Σχήμα 10:</b>	Επιρροή του μεγέθους των αδρανών και του ποσοστού των ινών στην εργασιμότητα .....11
<b>Σχήμα 11:</b>	Τα βασικότερα είδη τεχνητών ινών (BISFA, 2009) .....11
<b>Σχήμα 12:</b>	Βασικά προφίλ ινών .....13
<b>Σχήμα 13:</b>	Ίνες υάλου και περιελιγμένα υαλονήματα (J&J Trading Corporation,2002).....15
<b>Σχήμα 14:</b>	Παραγωγή ινών υάλου (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002) .....15
<b>Σχήμα 15:</b>	Αριστερά: ινίδια ορθογωνικής διατομής, Δεξιά: ίνες κυκλικής διατομής (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese 2002) .....19
<b>Σχήμα 16:</b>	Ίνες πολυπροπυλενίου Duomix, διάμετρος 18 $\mu\text{m}$ , μήκος 6 mm (Bekaert) .....19
<b>Σχήμα 17:</b>	Ίνες νάλιον της Nycon τύπου RC (Nycon).....20
<b>Σχήμα 18:</b>	Διακριτές ίνες πολυπροπυλενίου φέρουν συγκολλημένα ινίδια που αναδεικνύονται κατά τη μίξη (Laning, 1992).....23
<b>Σχήμα 19:</b>	Κατοχυρωμένη ευρεσιτεχνία του G. C. Martin, 1927 (Maidl, 1995) .....30
<b>Σχήμα 20:</b>	Χρήσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος για υποστήριξη σηράγγων .....32
<b>Σχήμα 21:</b>	Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες, Fibermesh 1989 .....33
<b>Σχήμα 22:</b>	Διαδικασία αντίδρασης ενυδάτωσης.....54
<b>Σχήμα 23:</b>	Σχέση αντοχής σκυροδέματος με N/T και πορώδες .....55
<b>Σχήμα 24:</b>	Σχέση αντοχής σκυροδέματος - πορώδους με βάση το λόγο N/T .....56
<b>Σχήμα 25:</b>	Σχέση διείδυσης συναρτήσει του χρόνου .....57

<b>Σχήμα 26:</b>	Πορεία αντίδρασης ενυδάτωσης με βάση την παρουσία ή την έλλειψη νερού..	57
<b>Σχήμα 27:</b>	Αντοχή σκυροδέματος σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια .....	58
<b>Σχήμα 28:</b>	Επιρροή του λόγου N/T στη διαπερατότητα .....	58
<b>Σχήμα 29:</b>	Φυσικά αίτια φθοράς σκυροδέματος.....	61
<b>Σχήμα 30:</b>	Χημικά αίτια φθοράς σκυροδέματος.....	64
<b>Σχήμα 31:</b>	Δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο έχει ψεκάσθει με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο (βάθος ενανθρακώσεως περίπου 3 cm) Το αριστερά τμήματα (χρώματος ροζ - βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί.....	66
<b>Σχήμα 32:</b>	Γέφυρα πεζών στο δεύτερο όροφο νοσοκομείου.....	67
<b>Σχήμα 33:</b>	Διάβρωση οπλισμών από χλωριόντα εκχιονιστικών αλάτων .....	67
<b>Σχήμα 34:</b>	Ίνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική (με γαντζωτά άκρα).	82
<b>Σχήμα 35:</b>	Φούρνος ξήρανσης αδρανών .....	83
<b>Σχήμα 36:</b>	Σειρά κοσκίνων και διάταξη κοσκινίσματος .....	84
<b>Σχήμα 37:</b>	Προτεινόμενη ζώνη για την κοκκομετρική καμπύλη (EFNARC).....	85
<b>Σχήμα 38:</b>	Προτεινόμενη ζώνη για την κοκκομετρική καμπύλη (ACI 506).....	85
<b>Σχήμα 39:</b>	Υλικά προς σκυροδέτηση.....	86
<b>Σχήμα 40:</b>	Προσθήκη αδρανών υλικών, νερού και ανάδευση .....	87
<b>Σχήμα 41:</b>	Μέτρηση κάθισης νοπού σκυροδέματος .....	88
<b>Σχήμα 42:</b>	Ζύγιση πληρωμένου δοχείου μέτρησης φαινόμενου βάρους .....	89
<b>Σχήμα 43:</b>	Ενδεικτικές πρισματικές και κυβικές μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν.....	90
<b>Σχήμα 44:</b>	Πειραματική διάταξη τριχοειδούς απορρόφησης .....	91
<b>Σχήμα 45:</b>	Σχηματική απεικόνιση του πειράματος της τριχοειδούς απορρόφησης S .....	91
<b>Σχήμα 46:</b>	Μέτρηση βάρους δοκιμίων υπό άνοση.....	92
<b>Σχήμα 47:</b>	Συνθέσεις Σ2 και Σ6.....	92
<b>Σχήμα 48:</b>	Συνθέσεις Σ1 και Σ5.....	92
<b>Σχήμα 49:</b>	Συνθέσεις Σ3 και Σ4.....	92
<b>Σχήμα 50:</b>	Μηχανή δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη – Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.....	94
<b>Σχήμα 51:</b>	Εξοπλισμός μέτρησης υπερήχων .....	96
<b>Σχήμα 52:</b>	Ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο εργαστηρίου .....	97
<b>Σχήμα 53:</b>	Ζυγαριά μέτρησης βάρους Ε. Ο. Σ.....	97



<b>Σχήμα 54:</b>	Θρυμματισμός τσιμεντόπαστας .....	97
<b>Σχήμα 55:</b>	Συσκευή περιθλασιμετρίας ακτίνων - X.....	97
<b>Σχήμα 56:</b>	Απόσπασμα διαγράμματος XRD, πάστας τσιμέντου κατόπιν επίδρασης θεικών και αντίστοιχες ορυκτολογικές φάσεις. ....	98
<b>Σχήμα 57:</b>	Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για το δοκίμιο Σ5-3 της σύνθεσης SF-0 .....	100
<b>Σχήμα 58:</b>	Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min <sup>0.5</sup> ), ανά σύνθεση ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	101
<b>Σχήμα 59:</b>	Ανοικτό πορώδες OP (%), για κάθε σύνθεση.....	102
<b>Σχήμα 60:</b>	Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ανά σύνθεση και ηλικία (μέση τιμή τριών δοκιμίων).....	103
<b>Σχήμα 61:</b>	Μεταβολή % χρόνου διάδοσης υπερήχων, σε σχέση με την αρχική τιμή της .	104
<b>Σχήμα 62:</b>	Ποσοστό μεταβολής μήκους ανά σύνθεση και ηλικία .....	105
<b>Σχήμα 63:</b>	Ποσοστό μεταβολής βάρους ανά σύνθεση και ηλικία .....	106
<b>Σχήμα 64:</b>	Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0(a) σε ηλικία 140 ημερών .	107
<b>Σχήμα 65:</b>	Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0 σε ηλικία 140 ημερών .....	107
<b>Σχήμα 66:</b>	Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0,25 σε ηλικία 180 ημερών	108
<b>Σχήμα 67:</b>	Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0,25(a) σε ηλικία 180 ημερών.....	108



## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.</b>	Συντελεστές προσανατολισμού ινών (Maidl, 1995).....	4
<b>Πίνακας 2.</b>	Διάφορα είδη ινών και εφαρμογές τους.....	28
<b>Πίνακας 3.</b>	Διαφοροποιήσεις οπλισμένου - ινοπλισμένου σκυροδέματος .....	36
<b>Πίνακας 4.</b>	Κατηγορίες έκθεσης σχετιζόμενες με τις περιβαλλοντικές συνθήκες σύμφωνα με το EN 206-1.....	42
<b>Πίνακας 5.</b>	Οριακές τιμές συγκέντρωσης χημικών παραγόντων εδάφους και υπόγειων υδάτων για τις κατηγορίες έκθεσης χημικής προσβολής .....	44
<b>Πίνακας 6.</b>	Απαιτήσεις ελάχιστης επικάλυψης $c_{min,b}$ από άποψη συνάφειας .....	47
<b>Πίνακας 7.</b>	Συνιστώμενη κατηγοριοποίηση κατασκευών .....	48
<b>Πίνακας 8.</b>	Απαιτήσεις τιμών ελάχιστης επικάλυψης, $c_{min,dur}$ , από άποψη ανθεκτικότητας σε διάρκεια για χάλυβα οπλισμού .....	48
<b>Πίνακας 9.</b>	Απαιτήσεις τιμών ελάχιστης επικάλυψης, $c_{min,dur}$ , από άποψη ανθεκτικότητας σε διάρκεια για χάλυβα προέντασης .....	49
<b>Πίνακας 10.</b>	Συνιστώμενες οριακές τιμές για την σύνθεση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος στις διάφορες κατηγορίες Έκθεσης EN206-1.....	52
<b>Πίνακας 11.</b>	Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή.....	83
<b>Πίνακας 12.</b>	Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών .....	84
<b>Πίνακας 13.</b>	Ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση.....	87
<b>Πίνακας 14.</b>	Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης.....	88
<b>Πίνακας 15.</b>	Κατηγορία κάθισης ανά κωδικό σύνθεσης .....	88
<b>Πίνακας 16.</b>	Υπολογισμός πυκνότητας σκυροδέματος ανά σύνθεση .....	89
<b>Πίνακας 17.</b>	Πειραματικές μετρήσεις (μέσες τιμές 3 δοκιμίων) τριχοειδούς απορρόφησης $S_v$ για όλες τις συνθέσεις.....	99
<b>Πίνακας 18.</b>	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης.....	100
<b>Πίνακας 19.</b>	Πειραματικές μετρήσεις ανοικτού πορώδους (OP) για όλα τα δοκίμια .....	101
<b>Πίνακας 20.</b>	Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους, για κάθε σύνθεση .....	102
<b>Πίνακας 21.</b>	Μέσοι όροι αντοχών σε MPa ανά σύνθεση και ηλικία.....	103
<b>Πίνακας 22.</b>	Ποσοστά μεταβολής υπερήχων ανά σύνθεση και ηλικία .....	104
<b>Πίνακας 23.</b>	Ποσοστά μεταβολής μηκών ανά σύνθεση και ηλικία .....	105
<b>Πίνακας 24.</b>	Ποσοστά μεταβολής βαρών ανά σύνθεση και ηλικία .....	106



## 1. Θεωρητικό Μέρος

### 1.1. Ίνες

#### Ορισμός

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

#### 1.1.1 Ιδιότητες

##### 1.1.1.1 Χωρικές παράμετροι

#### 1. Μήκος ινών

Τεχνικοί περιορισμοί στο μήκος των ινών, τίθενται για λόγους άντλησης ή εκτόξευσης (Melby, 2001). Έτσι το μήκος τους δε θα πρέπει να ξεπερνά το 50-60% (50% Sika 2007, 2/3 Vandewalle 2008) της διαμέτρου της σωλήνας άντλησης. Αυτό σημαίνει ότι για χειρωνακτικό ψεκασμό το μέγιστο μήκος ίνας είναι 25 mm, ενώ για ρομπότ με σωλήνες άντλησης 65 mm, υπάρχει δυνατότητα ψεκασμού με ίνες μήκους ως και 40 mm. Γενικότερα, το μήκος των ινών θα πρέπει να κυμαίνεται από 12 (για ευκολότερη ανάμιξη, εκτόξευση και λιγότερη ανάκλαση) έως 50 mm (για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα). 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.

#### 2. Λόγος μορφής

Η μορφή των ινών και το υλικό κατασκευής τους είναι οι κυριότεροι παράγοντες επιλογής της ίνας για την εκάστοτε εφαρμογή. Πρακτικά, οι ίνες παράγονται σε πολλές μορφές και μεγέθη, και μπορεί να είναι κυκλικής, πολυγωνικής ή και ακανόνιστης διατομής. Για τις ίνες που δεν είναι κυκλικής ή πρισματικής διατομής, ορίζεται η ισοδύναμη διάμετρος  $d_e$  ως εκείνη που είναι ίση με τη μέση διάμετρό της. Ίνες με μικρή ισοδύναμη διάμετρο έχουν σχετικά μικρή δυσκαμψία κι έτσι έχουν μια συγκεκριμένη ικανότητα να προσαρμόζονται στο σχήμα και στο χώρο που καταλαμβάνουν ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών.

Ο λόγος μήκους προς διάμετρο της ίνας ( $l/d$ ) ονομάζεται **λόγος μορφής** και εκφράζει την ευκαμψία της.

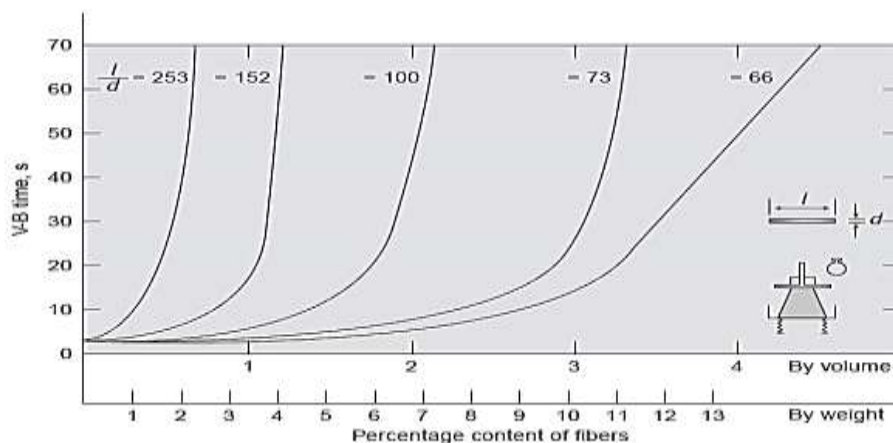
Επιθυμητός θεωρείται ο μεγάλος λόγος μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ), ώστε η αστοχία των ινών να γίνεται με εξόλκευση και όχι με θραύση και να αυξάνεται το έργο παραμόρφωσης: όπως και η όσο το δυνατόν παραμορφωμένη επιφάνεια, ώστε να βελτιώνεται η συνάφειά τους με το σκυρόδεμα και να αυξάνεται το φορτίο που απαιτείται για την αποκόλληση και εξόλκευσή τους.

Ο λόγος μορφής δεν επηρεάζει μόνο την αγκύρωση στο σκυρόδεμα αλλά και τον τρόπο μίξης τους. Έχει διαπιστωθεί ότι για τον 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 το σκυρόδεμα.
- **Λόγος μορφής  $80 < l/d < 120$ :** Με την αύξηση του μήκους των ινών, παρατηρείται συσσωμάτωσή τους. Εντούτοις οι «σβόλοι» των ινών που εμμένουν, διαχωρίζονται κατά τη διάρκεια της μίξης. Η παραγωγή ενός ομοιογενούς μίγματος σκυροδέματος είναι δυνατή με τη βαθμιαία προσθήκη ινών στο μίγμα κατά τη διάρκεια της ανάμιξης. Όταν χρησιμοποιούνται τυποποιημένοι αναμικτές σκυροδέματος, το ποσοστό των ινών που προστίθεται περιορίζεται από την αναλογία  $\mu = 2,5 \cdot d/l$ .
- **Λόγος μορφής  $l/d > 120$ :** Η συσσώρευση των ινών είναι τόσο υψηλή που είναι σχεδόν αδύνατο να παραχθεί ένα μίγμα σκυροδέματος με συμβατικούς αναμικτές. Επομένως, πρέπει να υιοθετηθούν άλλες τεχνολογικές μέθοδοι ανάμιξης σκυροδέματος και ινών, όπως εκείνες που βασίζονται στον ψεκασμό των ινών.

Παρατηρείται λοιπόν πως αν και οι επιδόσεις του εκτοξευόμενου σκυροδέματος βελτιώνονται με την προσθήκη ινών μεγάλου λόγου μορφής, η μίξη γίνεται πιο δύσκολη και το μίγμα έχει περιορισμένη εργασιμότητα. Μία 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 δεν θα τις απομονώσει κι έτσι το πρόβλημα θα παραμείνει. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 1**, αύξηση του λόγου μορφής και της κ.β. συγκέντρωσης ινών χάλυβα στη μάζα του μίγματος του σκυροδέματος συνεπάγεται μείωση της εργασιμότητας, η οποία φαίνεται από την αύξηση του χρόνου στη δοκιμή V-B.



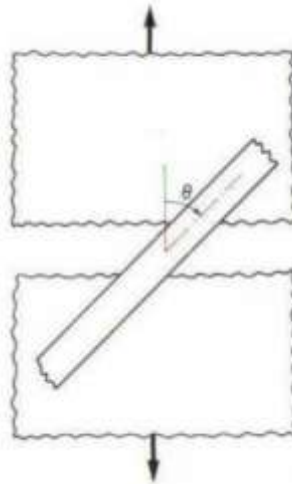
**Σχήμα 1:** Επιρροή του λόγου μορφής και του ποσοστού των ινών στην εργασιμότητα

- ii. Οι ίνες μπορεί να έχουν προστεθεί πολύ γρήγορα στον αναμίκτη κι έτσι αυτός δεν θα προλάβει να τις κατανείμει ομοιόμορφα στο μίγμα. Επίσης, πρόβλημα μπορεί να υπάρξει, ακόμη και όταν η ανάμιξη διαρκεί παραπάνω χρόνο από τον απαραίτητο.
- iii. Υπερβολική ποσότητα ινών έχει προστεθεί στο μίγμα.
- iv. Ο αναμίκτης μπορεί να είναι σε κακή κατάσταση ή ακόμη και ακατάλληλος για την εκτέλεση της εργασίας αυτής.
- v. Οι ίνες μπορεί να έχουν προστεθεί στον αναμίκτη πριν από τα υπόλοιπα υλικά.

Μία πολύ καλή λύση για τον περιορισμό στο ελάχιστο του προβλήματος της συσσωμάτωσης των ινών είναι η χρήση ινών που είναι συγκολλημένες με υδατοδιαλυτή κόλλα.

### 3. Προσανατολισμός ινών στο χώρο

Η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών στο μίγμα επηρεάζει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι ίνες σε τρισδιάστατη διασπορά μέσα στη μάζα του σκυροδέματος παρεμποδίζουν τη διεύρυνση και τη διάδοση των μικρορωγμών, επιτρέποντας ταυτόχρονα την παραλαβή εφελκυστικών τάσεων από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής, δρώντας έτσι ως «γέφυρες συρραφής». Η μορφή των ρωγμών εξαρτάται από τη φύση του φορτίου (εφελκυσμός, θλίψη, διάτμηση) και από τη γεωμετρία του στοιχείου. Οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στη διεύθυνση 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. Η μείωση της αποτελεσματικότητας της ίνας λόγω της λοξότητάς της (**Σχήμα 2**), ως προς τη ρωγμή, μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας (Maidl 1995) συντελεστές προσανατολισμού (**Πίνακας 1**).



**Σχήμα 2:** Τομή μιας ίνας μέσα σε μια ρωγμή με γωνία  $\theta$  (Bentur and Mindness, 1990)

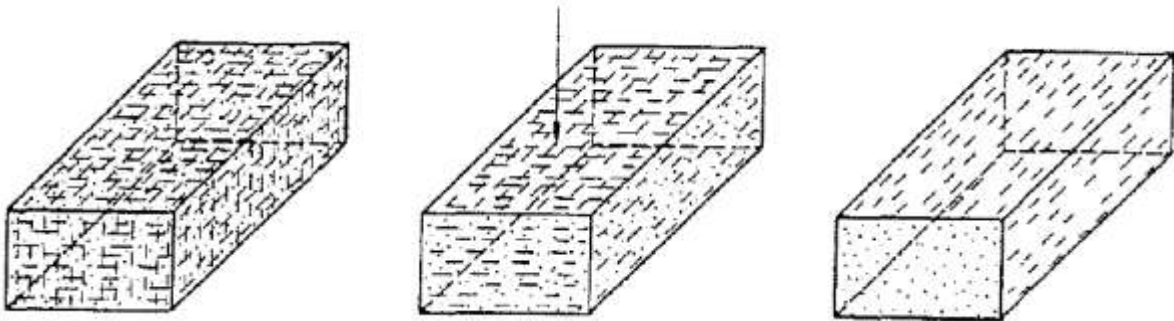
Στο **Σχήμα 3** παρατηρούμε χαρακτηριστικούς προσανατολισμούς των ινών.

3 Διαστάσεις  
Έγχυτο σκυρόδεμα

2 Διαστάσεις  
Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα

1 Διάσταση  
έγχυτο σκυρόδεμα  
Μαγνητικός

δομητής



**Σχήμα 3:** Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995)

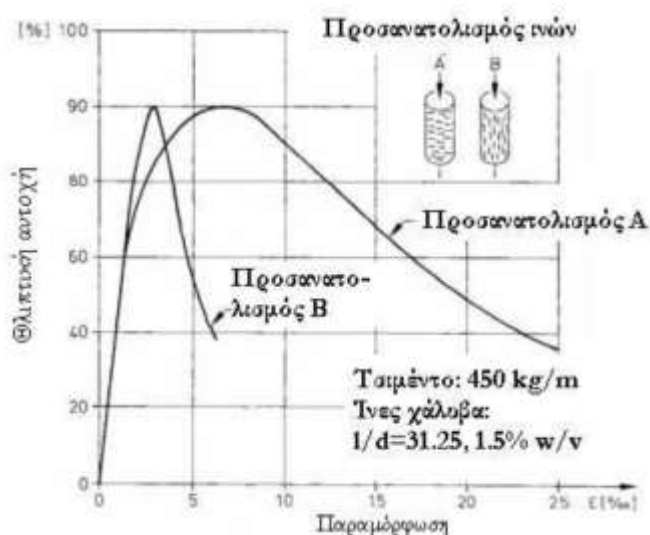
**Πίνακας 1.** Συντελεστές προσανατολισμού ινών (Maidl, 1995)

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

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



Στο εκτοξευόμενο με ίνες σκυρόδεμα, ο προσανατολισμός των ινών είναι συνήθως κάθετος στην κατεύθυνση ψεκασμού. Ποικίλες δοκιμές (**Σχήμα 4**) έχουν δείξει ότι οι πυρήνες που λαμβάνονται παράλληλα στην κατεύθυνση ψεκασμού (A) παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στις δοκιμές θλίψης από ότι αν αποκόπτονται κάθετα (B) στην κατεύθυνση ψεκασμού. Άλλες δοκιμές (Keyter and Dreschert) έχουν δείξει ότι η αντοχή των δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη του ευνοϊκού προσανατολισμού είναι 25% μεγαλύτερη σε σχέση με το δυσμενή και ότι διαθέτουν μεγαλύτερη πλαστικότητα. Έχει παρατηρηθεί, επίσης, 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.



**Σχήμα 4:** Επίρροή του προσανατολισμού των ινών στη δυσθραυστότητα (Maidl, 1995)

#### 4. Ποσότητα και απόσταση ινών

Περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα μεγαλύτερη από  $25 \text{ kg/m}^3$  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, πέρα από το ανώτατο όριο περιεκτικότητας, η εργασιμότητα του μίγματος επηρεάζεται αρνητικά. Το τεχνικό όριο για την περιεκτικότητα των ινών, στις γενικές εφαρμογές, είναι μεταξύ  $50$  και  $100 \text{ kg/m}^3$ , ανάλογα με τη μέθοδο προσθήκης των ινών και τον τύπο τους (Maidl 1995). Για να γεφυρωθεί ο μεγάλος αριθμός μικρορωγμών στο σύμπλεγμα κάτω από την επιβολή του φορτίου και να αποφευχθεί η τοπική συγκέντρωση τάσεων, είναι απαραίτητο να υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός κοντών ινών. Δεν είναι δύσκολο να βελτιστοποιηθούν οι αναλογίες ανάμιξης ώστε να ενσωματωθούν αυτές οι κοντές ίνες και να ληφθεί υψηλή εργασιμότητα. Η

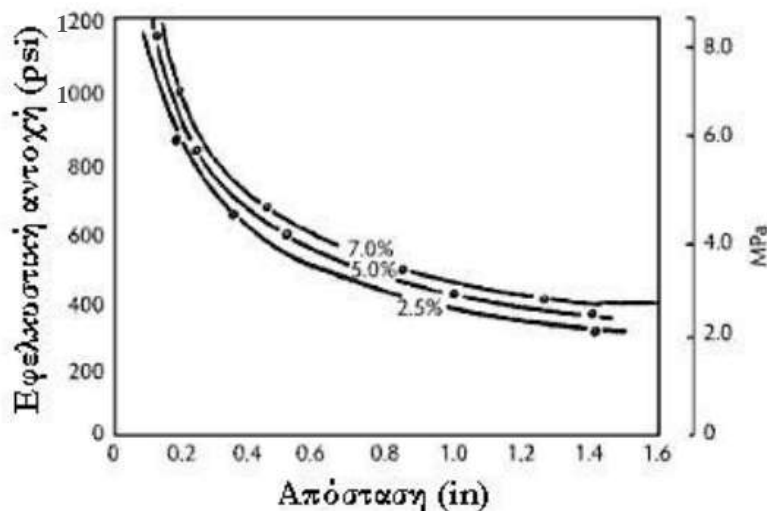
ομοιόμορφη κατανομή των κοντών ινών μπορεί να αυξήσει την αντοχή και την πλαστιμότητα του μίγματος. Οι μακριές ίνες απαιτούνται να γεφυρώσουν τις μακρορωγμές σε υψηλότερα φορτία. Εντούτοις, το ποσοστό όγκου των μακριών ινών μπορεί να είναι πολύ μικρότερο από το ποσοστό όγκου των κοντών ινών. Η παρουσία μακριών ινών μειώνει σημαντικά την εργασιμότητα του μίγματος και το ποσοστό όγκου τους πρέπει να καθοριστεί με προσοχή. Υπάρχει ωστόσο, και μια ειδική διαδικασία που επιτρέπει τη χρήση υψηλών ποσοστών μακριών ινών, και βασίζεται στην αργή ροή των ινών σε ένα καλούπι και στη μετέπειτα διείδυση της τσιμεντόπαστας. Το προκύπτον δομικό υλικό είναι γνωστό ως SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber CONcrete). 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).

Η απόσταση των ινών στο χώρο, ( $s$ , spacing) ορίζεται ως το μήκος μεταξύ του μέσου δύο ινών. Όσο μειώνεται η απόσταση, τόσο αυξάνει η αντοχή του σκυροδέματος.

$$s = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot d_f^3 \cdot l_f}{4 \cdot v_f}} \leq 0.45 \cdot l_f \Rightarrow v_f \geq \frac{8.6}{\left(\frac{l_f}{d_f}\right)^2} \quad (1.1)$$

$l_f$  και  $d_f$  το μήκος και η διάμετρος κάθε ίνας, και  $v_f$  η αναλογία τους στο σκυρόδεμα κατ' όγκο

Το διάγραμμα στο **Σχήμα 5** δείχνει τη σχέση μεταξύ απόστασης ινών και αντοχής σε εφελκυσμό, για διάφορα ποσοστά ινών κατ' όγκο. Σύμφωνα με τη θεωρία του McKee:



**Σχήμα 5:** Επιρροή της απόστασης των ινών στην εφελκυστική αντοχή (Romualdi, Batson 1963)

### 1.1.1.2 Μηχανισμός αστοχίας

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

- Αστοχία λόγω εξόλκευσης των ινών
- Αστοχία λόγω θραύσης των ινών

Η διαδικασία αστοχίας με εξόλκευση περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

- Προοδευτική αποκόλληση των ινών με βραδεία επέκταση της ρηγμάτωσης
- Αποκόλληση των ινών και ταχεία επέκταση της ρηγμάτωσης
- Ενεργοποίηση των ινών που δεν επιτρέπουν την ολίσθηση

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

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

Οι πρώτοι τρεις παράγοντες εξαρτώνται εξ ολοκλήρου 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).

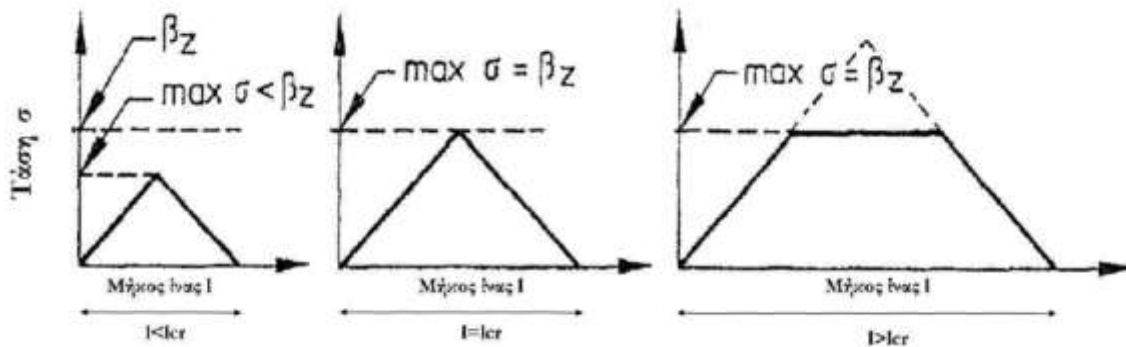
Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ευθύγραμμες ίνες με μικρό μήκος, η αστοχία του ινοσκυροδέματος οφείλεται κυρίως στην εξόλκευση και όχι στη διαρροή των ινών. Αντί της αναμενόμενης αστοχίας, ψαθυρής μορφής, του κοινού σκυροδέματος στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζεται σταδιακή ενεργοποίηση των ινών, η οποία προσδίδει χαρακτηριστικά πλαστικής συμπεριφοράς. Επομένως, απαιτείται ο ορισμός του κρίσιμου μήκους ίνας (**Σχέση 1.2**). Αυτό το μήκος είναι τέτοιο ώστε η 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 ( $l > l_{cr}$ ) αστοχούν αρχικά σε θραύση. Αντίθετα, όταν οι ίνες έχουν υποκρίσιμα μήκη ( $l < l_{cr}$ ) ολισθαίνουν στη μήτρα του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6** (Maidl, 1995).

$$l_{cr} = \frac{d \cdot \beta_z}{2 \cdot \tau_m}, \text{ (James, 1990)} \quad (1.2)$$

Όπου:  $d$  = διάμετρος ίνας

$\beta_z$  = εφελκυστική αντοχή ίνας

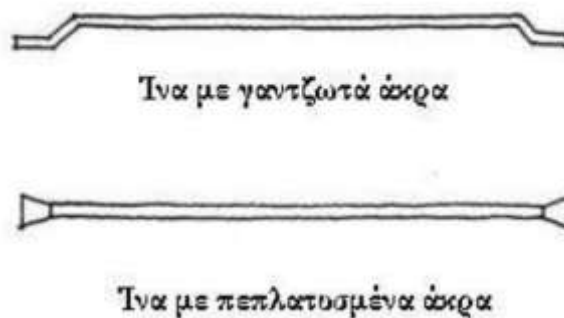
$\tau_m$  = μέση τάση πρόσφυσης



Σχήμα 6: Κρίσιμο μήκος ίνας (Midl, 1995)

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 αντικατασταθούν από ίνες κυματοειδούς μορφής ή με άγκιστρα στα άκρα.

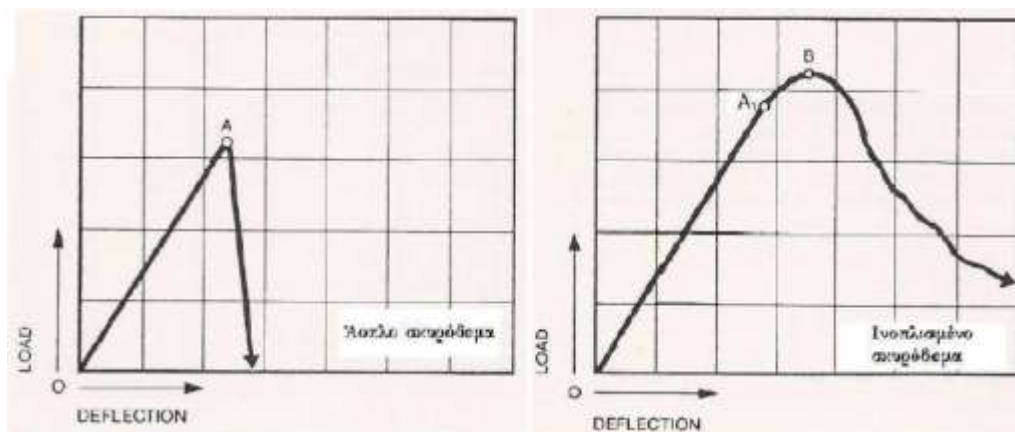
Οι τυποποιημένες ίνες χάλυβα με λόγο μορφής μεταξύ 50 και 100 έχουν γενικά υποκρίσιμο μήκος. Συνήθως η αστοχία οφείλεται σε εξόλκευση και όχι σε διαρροή του χάλυβα. Έτσι, οι ίνες δε χρησιμοποιούνται στο μέγιστο τους βαθμό, ως προς την αντοχή τους σε εφελκυσμό. Αιφνίδια αστοχία δεν παρατηρείται σε ινοπλισμένα σκυροδέματα, με κατάλληλες ίνες, και σε ποσοστά της τάξης του 0,7% κατ' όγκο. Αυτή η πλαστική συμπεριφορά δίνει τη δυνατότητα μείωσης των συντελεστών ασφαλείας (Maidl, 1995). Στις χαλύβδινες ίνες επικρατούν αυτές με τα άγκιστρα στα άκρα αλλά και αυτές με τα διευρυμένα ή πλατυσμένα άκρα (Σχήμα 7).



Σχήμα 7: Κυρίαρχα προφίλ ινών

Μία ίνα με άγκιστρα είναι γενικά σχεδιασμένη να αστοχεί σε εξόλκευση και όχι σε θραύση. Έχει ικανή αντοχή σε εξόλκευση, λόγω του σχεδιασμού της, ωστόσο το μειονέκτημά της είναι ότι μετά τη διαρροή έχει μικρή ικανότητα να περιορίζει 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 **Σχήμα 8**.



**Σχήμα 8:** Φορτίο-μετατόπιση για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (BHP technical manual, 1981)

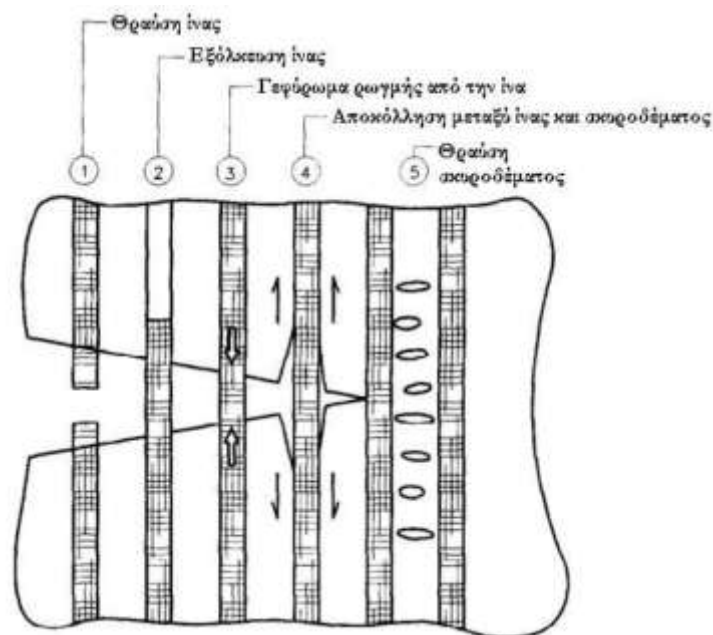
Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα (δεξιά) υπάρχουν τα εξής σημεία που πρέπει να τονισθούν:

Το σημείο A είναι λίγο υψηλότερα σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο A (όρια διαρροής). Έως το σημείο αυτό έχουμε το ελαστικό στάδιο, με πλήρη επαφή των ινών και περιβάλλοντος υλικού.

- Μέχρι το σημείο B είναι η περιοχή που αρχίζουν να εκδηλώνονται οι μικρορωγμές, ενώ έχουμε τις πρώτες αποκολλήσεις ινών.
- Στο σημείο B, εκεί που εκδηλώνεται δηλαδή η αστοχία, έχουμε το μέγιστο φορτίο ενώ είναι εμφανείς τώρα οι ρωγμές.
- Πέρα από το σημείο B, 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 σκυροδέμα (αριστερά), μέχρι το σημείο Α υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, εκεί έχουμε αστοχία και μετέπειτα το υλικό δεν μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία.

Το **Σχήμα 9** παρουσιάζει τρόπους με τους οποίους οι ίνες περιορίζουν το άνοιγμα των ρωγμών. Ξεκινώντας από τα αριστερά, στην πρώτη έχουμε θραύση της χαλύβδινης ίνας. Στη δεύτερη η αστοχία οφείλεται σε εξόλκευσή της. Στην τρίτη έχουμε συγκράτηση της ρωγμής και η ίνα εφελκύεται. Στην τέταρτη έχουμε αστοχία καθότι σπάει ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας του σκυροδέματος, ενώ στην πέμπτη 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 σκυροδέμα (Zollo, 1996).

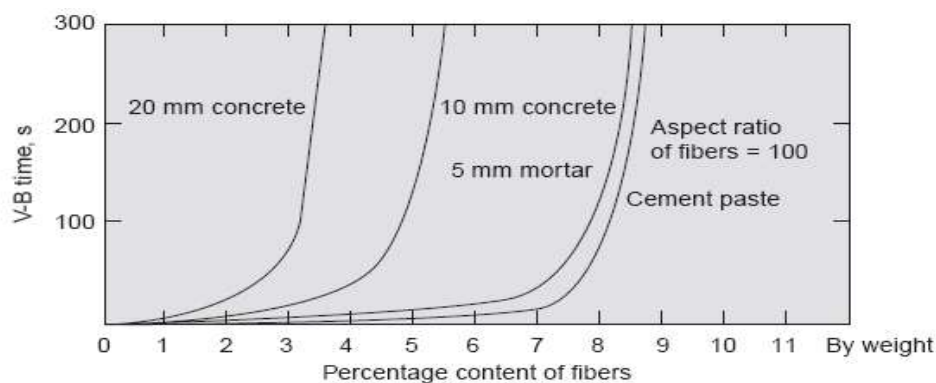


**Σχήμα 9:** Μηχανισμοί απορρόφησης ινών/σκυροδέματος (*Fractures Mechanics, Anderson, 1991*)

### 1.1.1.3 Ιδιότητες του νοπού σκυροδέματος

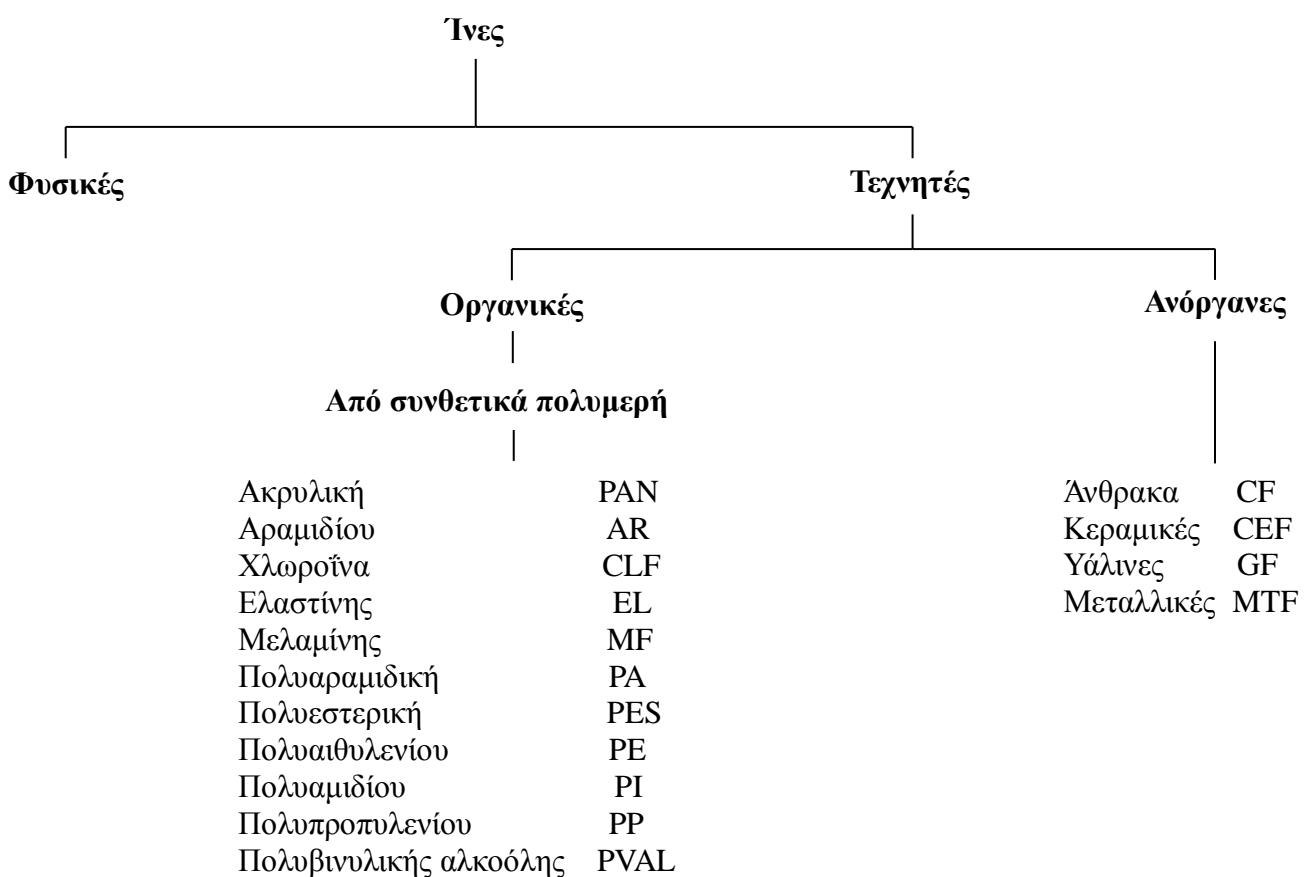
Είναι η εργασιμότητα και η ευκολία συμπύκνωσης. Η μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα ινών μειώνεται με την αύξηση του μεγέθους των αδρανών του μίγματος και του λόγου μορφής. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 10**, αύξηση της κ.β. συγκέντρωσης ινών χάλυβα στη μάζα του μίγματος του σκυροδέματος συνεπάγεται μείωση της εργασιμότητας, η οποία φαίνεται από την αύξηση του χρόνου στη δοκιμή V-B. Όσον αφορά τη συμπύκνωση του εκτοξευμένου

σκυροδέματος, μικρή διαφορά, στην περιεκτικότητα σε αέρα, βρέθηκε μεταξύ άοπλου και ινοπλισμένου με 1% κατ' όγκο ίνες.



Σχήμα 10: Επιρροή του μεγέθους των αδρανών και του ποσοστού των ινών στην εργασιμότητα

### 1.1.2 Προέλευση ινών



Σχήμα 11: Τα βασικότερα είδη τεχνητών ινών (BISFA, 2009)

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 άνθρακα ή φυσικές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για έργα με ιδιαίτερες προδιαγραφές. Η γεωμετρία των ινών ποικίλει και μπορεί οι ίνες να είναι με γαντζωτά άκρα, επίπεδες, πτυχωμένες, κωνικές, στριμμένες με προφίλ κυκλικό, τετράγωνο ή ακόμη και ακανόνιστο. Επιπλέον, κάθε ίνα διαφέρει σε διάμετρο και μήκος (Jamrozy, 1985, Maidl, 1995). Ορισμένες φορές μάλιστα αντί για κοινές ίνες παραγωγής για την ενίσχυση του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται κομμάτια μετάλλου που προέρχονται από την κοπή του ή θραύσματα που αλλιώς θα ήταν απορρίμματα (A. Kayvani, 1995).

Σύμφωνα με την BISFA (The International Bureau For The Standardization Of Man-Made Fibers), τα βασικά είδη των τεχνητών ινών (μαζί με το συμβολισμό τους) παρουσιάζονται διαγραμματικά στο **Σχήμα 11**.

### 1.1.2.1 Χαλύβδινες Ίνες

Για τον οπλισμό του σκυροδέματος οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ίνες είναι οι χαλύβδινες, αν και η χρήση υάλινων ή άνθρακα αρχίζει να γίνεται πιο συχνή.

Στην πιο απλοϊκή της μορφή μια χαλύβδινη ίνα θα ήταν ένα ευθύγραμμο τμήμα ενός λείου σύρματος. Δυστυχώς όμως, τέτοιου είδους ίνες δεν εξασφαλίζουν την μέγιστη δυνατή αντοχή σκυροδέματος διότι δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ τους.

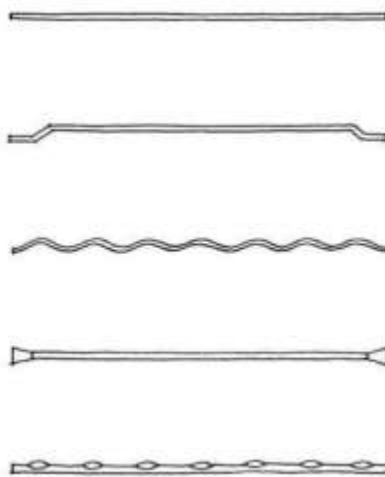
Οι χαλύβδινες ίνες επικράτησαν λόγω του λογικού κόστους κατασκευής, λόγω της διαθεσιμότητάς τους και λόγω της εμπειρίας που προϋπήρχε στον συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος με χάλυβα. Έτσι και οι πρώτες έρευνες στις δεκαετίες του 1950 και 1960 επικεντρώθηκαν στη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χάλυβα (Benturand Mindness, 1990). Οι ίνες αυτές αυξάνουν κατά πολύ τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος κι έτσι το μετατρέπουν από ένα ψαθυρό υλικό σε πλαστικό. Έχουν αντίσταση στα αλκαλικά πρόσμικτα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος καθώς και μηχανικά χαρακτηριστικά που κρίνονται ως ικανοποιητικά. Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 400 έως 1.500 MPa στους ειδικά σκληρυμένους χάλυβες, μπορεί να φθάσει μέχρι τα 4 GPa. Επίσης, έχουν



μέτρο ελαστικότητας περίπου 200 GPa και ειδικό βάρος  $8 \text{ g/cm}^3$ , 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 A820, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής τους σε πέντε κατηγορίες, αναθεωρώντας από τις τέσσερις που προέβλεπε παλαιότερα. Ο τύπος I είναι οι ίνες ψυχρής έλασης και είναι εμπορικά ο πιο διαδεδομένος. Παρασκευάζονται από την εν ψυχρώ κατεργασία σύρματος χάλυβα. Ο τύπος II περιλαμβάνει τις ίνες που προέρχονται από κοπή χαλυβδοφύλλων. Ο τύπος III περιλαμβάνει τις ίνες που παράγονται από τηγμένο μέταλλο. Ο τύπος IV περιλαμβάνει τις ίνες που προέρχονται από φρεζάρισμα ή λιμάρισμα (millcut). Ο τύπος V περιλαμβάνει τις ίνες ψυχρής έλασης, 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 ινών χάλυβα, από ψυχρή έλαση ή τέλος από εξαγωγή τήγματος. Έτσι, για τις χαλύβδινες ίνες υπάρχουν πέντε βασικά προφίλ-τύποι (**Σχήμα 12**) που συνήθως χρησιμοποιούνται, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του έργου.



**Σχήμα 12:** Βασικά προφίλ ινών

Γίνεται έτσι φανερό ότι όλες οι ίνες που παράγονται στην αγορά δεν είναι κατάλληλες για χρήση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Ίνες με μήκος μεγαλύτερο των 30 cm μπορεί να απαιτούν ειδικά ακροφύσια εκτόξευσης. Γενικά, η διάμετρος κυμαίνεται από 0,25 έως 0,75 mm και το μήκος από 25 έως 90 mm. Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ο λόγος μορφής

μπορεί να προτείνεται από την κάθε εταιρία, και κάθε ένας εξυπηρετεί έναν σκοπό. Η Dramix προτείνει λόγο μορφής 45 για βασική χρήση και οικονομία, 65 για καλύτερες επιδόσεις, ευκολία στη χρήση και λογικό κόστος και 80 για πολύ υψηλές αντοχές, πλαστιμότητα και περιορισμό των ρωγμών. Η ΕΤΑΛ αντίστοιχα προτείνει λόγο μορφής 40 με μήκος 31 cm και διάμετρο 0,75 mm για γενική χρήση.

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

### 1.1.2.2 Ίνες υάλου

Οι πρώτες έρευνες στις ίνες υάλου ξεκίνησαν τις δεκαετίες του 1950 και 1960 και αφορούσε τον τύπο E (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 από το σκυρόδεμα (Bentur A., 1990).

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

Οι ίνες υάλου (**Σχήμα 13**) παράγονται κυρίως χρησιμοποιώντας τη διαδικασία νηματοποίησης. Το επεξεργασμένο γυαλί προστίθεται σε ένα λουτρό τήξης λευκόχρυσου - ρόδιου, στη βάση του οποίου υπάρχουν 2.000 οπές διαμέτρου 1 έως 2 mm. Το ρευστό γυαλί ρέει μέσα από αυτές τις σχισμές και μετατρέπεται σε νήματα. Είναι εφικτό να επιτευχθούν ταχύτητες όλκησης μέχρι 3.000 m/min χρησιμοποιώντας αυτήν τη μέθοδο (Maidl, 1995).

Μια άλλη μέθοδος παραγωγής ινών υάλου είναι η διαδικασία συρματοποίησης ράβδων - γυαλιών (**Σχήμα 14**). 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).



**Σχήμα 13:** Ίνες υάλου και περιελιγμένα υαλονήματα (J&J Trading Corporation, 2002)



**Σχήμα 14:** Παραγωγή ινών υάλου (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)

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 σαν συνέπεια τη μείωση της αντοχής της και την αύξηση του μέτρου ελαστικότητάς της.

Από το ευρύ φάσμα των τύπων γυαλιού, τα γυαλιά E, S και R, που διαφέρουν μόνο στην αναλογία των συστατικών τους, είναι τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα στην παραγωγή των ινών υάλου. Ωστόσο, δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις για την όπλιση του σκυροδέματος, 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 σε εκτοξευόμενο κατάλληλες για χρήση σκυροδέμα.

### 1.1.2.3 Συνθετικές Ίνες

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

Οι συνθετικές ίνες μπορούν να μειώσουν τη ρηγμάτωση λόγω συρρίκνωσης και να βοηθήσουν το σκυρόδεμα μετά τη θραύση.

Μεγάλη πρόοδος 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 πλεονεκτήματα 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

κακή συνάφεια των ινών με το σκυρόδεμα, καθώς και η ευαισθησία που παρουσιάζει το σκυρόδεμα στο οξυγόνο και την ηλιακή ακτινοβολία. Το μικρό μέτρο ελαστικότητας υποδηλώνει μικρή συνεισφορά των ινών στην αύξηση της δυσθραυστότητας. Τέλος, μειονέκτημα αποτελεί και το υψηλό κόστος πολλών από αυτές σε σχέση με τις χαλύβδινες, ειδικά των ινών άνθρακα.

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

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

- Ινοπλισμένο σκυρόδεμα 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 0.3mm οδηγούν σε γρήγορη φθορά των χαλύβδινων ινών. Τέτοιες σήραγγες στην Νορβηγία έχουν υποστεί αλλοίωση μόλις στα 15-20 χρόνια λειτουργίας (Bernard, 2009). Αντίθετα, οι συνθετικές ίνες δεν αλλοιώνονται αφού είναι χημικά αδρανείς.
- Είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σε συνθήκες ισχυρής χημικής προσβολής, όπως σε υποθαλάσσιες ή παραθαλάσσιες περιοχές, όπου οι χαλύβδινες ίνες διαβρώνονται.

#### 1.1.2.4 Ίνες πολυπροπυλενίου

Λόγω της υψηλής αλκαλικής τους αντίστασης, 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 βραχώμαζας, όπου πρέπει να παραληφθούν υψηλές πιέσεις. Εντούτοις, για εφαρμογές όπου απαιτείται μόνο ενίσχυση ενάντια στη συρρίκνωση, όπως στις επιδιορθώσεις με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, οι πλαστικές ίνες είναι ιδιαίτερα χρήσιμες. Είναι πολύ αποτελεσματικές στη διανομή μικρορωγμών κατά τη διάρκεια της πλαστικής παραμόρφωσης ή της σκλήρυνσης του σκυροδέματος και βοηθούν επίσης στη μείωση της αναπήδησης στην υγρή μίξη. Επιπρόσθετα, κάνουν το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ανθεκτικό στη φωτιά (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2003).

Παράγονται είτε σαν επιμήκεις ίνες κυκλικής διατομής, που στη συνέχεια κόβονται στο κατάλληλο μήκος, είτε σαν ταινίες και κορδέλες που διαμορφώνονται τελικά σε ινίδια ορθογωνικής διατομής, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 15**.

Μπορούν να συσκευάζονται και σε υδατοδιαλυτούς σάκους. Με 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, συμμορφώνονται με τα πρότυπα ASTM 0116 και ICC ES AC32. Το ειδικό τους βάρος είναι 0,91, η θερμοκρασία τήξης 165 °C, η αντοχή σε εφελκυσμό 379 MPa ενώ το μέτρο ελαστικότητας είναι 4137 MPa. Τυπική δοσολογία που προτείνεται από τον κατασκευαστή είναι 0,9 kg/m<sup>3</sup> σκυροδέματος αλλά αυτή μπορεί να κυμαίνεται από 0,45 έως 6,25 kg/m<sup>3</sup> ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Είναι επίσης συμβατές με όλα τα πρόσθετα και πρόσμικτα της αγοράς.



**Σχήμα 15:** Αριστερά: ινίδια ορθογωνικής διατομής, Δεξιά: ίνες κυκλικής διατομής (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese 2002)



**Σχήμα 16:** Ίνες πολυπροπυλενίου Duomix, διάμετρος 18  $\mu\text{m}$ , μήκος 6 mm (Bekaert)

### 1.1.2.5 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.

### 1.1.2.6 Αραμιδικές ίνες

Έχουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Είναι 2,5 φορές πιο ισχυρές από τις E 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.

### 1.1.2.7 Ίνες από νάιλον

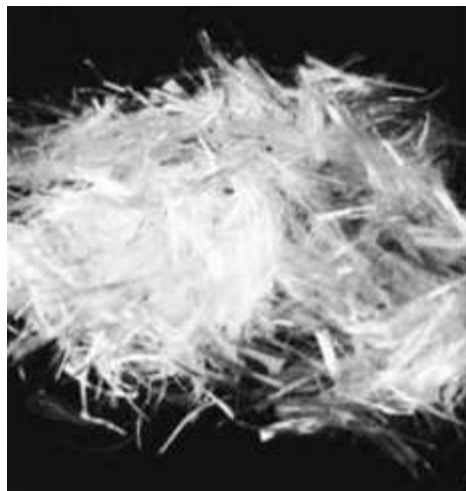
Υπάρχουν σε διάφορους τύπους στην αγορά για πολλές χρήσεις, και σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Για το σκυρόδεμα προδιαγράφονται δύο τύποι ινών, οι ίνες τύπου νάιλον 6 και νάιλον 66. Το νάιλον νηματοποιείται μέσω διαδικασίας θέρμανσης, εξώθησης και τάνυσης πολυμερών υλικών. Παρουσιάζουν υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, είναι ελαστικές και προσδίδουν υψηλές τιμές δυσθραυστότητας στο σκυρόδεμα. Το νάιλον είναι υδρόφιλο, με κατακράτηση υγρασίας περίπου 4,5%, γεγονός που αυξάνει την απαίτηση 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 Nycor παράγει ίνες νάιλον κατάλληλες για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Οι ίνες NylonRC (**Σχήμα 17**) είναι συμβατές με τα πρότυπα ASTM 0116 και ICC ES AC32 ενώ η προτεινόμενη δοσολογία τους είναι από  $0,3 \text{ kg/m}^3$  έως  $0,6 \text{ kg/m}^3$ .

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

Εκτός από τις ίνες RC η ίδια εταιρία παρασκευάζει τις ίνες υψηλών επιδόσεων MultiMesh. Η διαφορά τους είναι ότι σχηματίζουν ιδιαίτερα ισχυρούς δεσμούς μέσα στο σκυρόδεμα και βελτιώνουν σημαντικά τις αντοχές του. Είναι κι αυτές υδρόφιλες, με 19mm μήκος, συμβατές με τα πρότυπα ASTM 0116. Προτεινόμενη δοσολογία είναι  $0,45 \text{ kg/m}^3$  και έχουν αντοχή σε εφελκυσμό 303 MPa, σημείο τήξης  $225^\circ\text{C}$  και ανθεκτικότητα σε αλκάλια ή διάβρωση.



*Σχήμα 17: Ίνες νάιλον της Nycor τύπου RC (Nycor)*

#### **1.1.2.8 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 3/4 έως 2 in (Laning, 1992).



### 1.1.2.9 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.

### 1.1.2.10 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 Nycor 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.

### 1.1.2.11 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).

### 1.1.2.12 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 1200°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 μόνο κρύσταλλοι με διάμετρο από 0,5 έως μερικά μm. Κατασκευάζονται συνήθως με κατακρήμνιση οργανικών ενώσεων μετάλλων από την αέρια φάση, όπως το νιτρίδιο του πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) ή το οξείδιο του αλουμινίου ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Οι νηματοειδείς κρύσταλλοι έχουν επικριθεί για την ελάχιστη διάμετρο τους, μικρότερη του 1 μm, δεδομένου ότι μπορεί να παρουσιάσουν παρόμοιες καρκινογόνες συνέπειες με τις ίνες αμιάντου. Οι νηματοειδείς κρύσταλλοι από καρβίδια του πυριτίου (SiC) μπορούν να επιτύχουν εφελκυστική αντοχή μέχρι 10 GPa και μέτρο ελαστικότητας 420 GPa (Maidl, 1995).

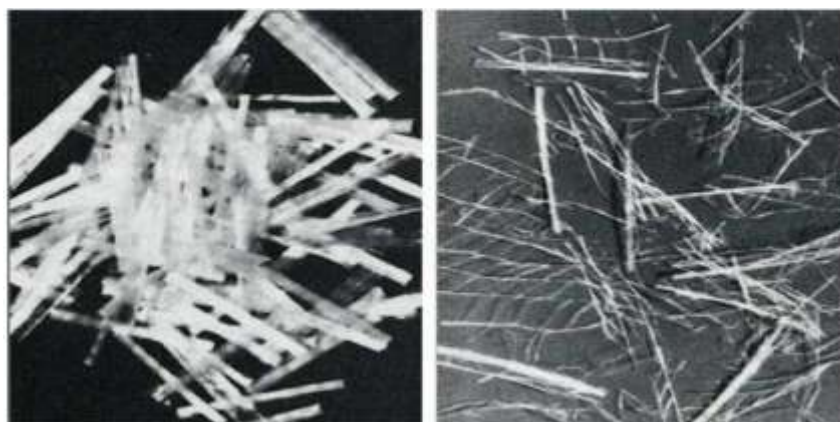
#### 1.1.2.13 Τελευταίες εξελίξεις στις συνθετικές ίνες

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 (Parworth, 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 στο **Σχήμα 18**.

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 στην εμπλοκή μεταξύ τους (Trottier, Mahoney, 2004).



*Σχήμα 18: Διακριτές ίνες πολυπροπυλενίου φέρουν συγκολλημένα ινίδια που αναδεικνύονται κατά τη μίξη (Laning, 1992)*

#### 1.1.2.14 Ίνες Άνθρακα

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, για παράδειγμα, 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 1200 °C σε αδρανές αέριο. Η γραφίτιοποίηση 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 1200°C ενώ η γραφίτιοποίηση είναι επίσης εφικτή (Maidl, 1995). Τυπικά, έχουν ίδιο μέτρο ελαστικότητας με τις χαλύβδινες ίνες, είναι όμως πολύ ελαφρύτερες.

#### **1.1.2.15 Φυσικές ίνες**

Ίνες από υλικά όπως αυτά που 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.

#### **1.1.2.16 Φυτικές ίνες**

Θεωρητικές και πρακτικές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε ίνες κυτταρίνης. Επιτεύχθηκε ένα ευρύ φάσμα αντοχής σε εφελκυσμό μεταξύ 200 και 1500 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).

#### **1.1.2.17 Ξύλινες ίνες**

Οι ιδιότητες των ινών αυτών εξαρτώνται από τον τρόπο με τον οποίο κόβονται και ραφινάρονται. Η διαδικασία με την οποία το ξύλο γίνεται μία ινώδης μάζα καλείται πολτοποίηση και περιλαμβάνει βρασμό του ξύλου 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 φτάνει τα 2 GPa σε περιπτώσεις

επιμελούς επεξεργασίας, διαφορετικά αντοχή της τάξης των 500 MPa μπορεί να επιτευχθεί με πιο οικονομικά μέσα (Kosmakta and et.al, 2002).

#### **1.1.2.18 Ίνες αμιάντου**

Ο αμιάντος 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 1550 °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).

#### **1.1.2.19 Κεραμικές ίνες**

Οι κεραμικές ίνες που προορίζονται για εμπορική χρήση είναι συνήθως κοντές, που παρήχθησαν αρχικά με σκοπό τη 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, φυγοκέντρωσης 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  $\mu m$  έχουν εφελκυστική αντοχή 2 GPa και μέτρο ελαστικότητας 300 GPa (Maidl, 1995).

#### **1.1.3 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  $\mu\text{m}$  έχουν αντοχή αντίστοιχη ενός σύρματος ψυχρής έλασης υψηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (1800 έως 2500 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  $l=l_{cr}$  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  $l_{cr}$  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, κ.ά.).

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

Αυτή τη στιγμή παγκοσμίως υπάρχουν περίπου 30 μεγάλες εταιρίες παραγωγής ινών χάλυβα για ενίσχυση του σκυροδέματος και συνολικά παράγουν πάνω από 100 διαφορετικά είδη ινών (Katzner, 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 (Katzner, 2006).

**Πίνακας 2.** Διάφορα είδη ινών και εφαρμογές τους

ΤΥΠΟΣ ΙΝΩΝ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Γυάλινες	Επίχριση τοίχων πλήρωσης, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χαλύβδινες	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, καταστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμορριπές, επενδύσεις σηράγγων, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλενίου	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, μπαλώματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμιάντου *	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Ανθρακικές	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή οροφών, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Φυσικές ίνες	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους - αντιπαρέρχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι

*\*δεν χρησιμοποιείται πλέον*



## 1.2. Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα

### 1.2.1 Ορισμοί

#### Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

- Ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Shotcrete ή FRC) ονομάζεται το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες σε διασπορά, με τυχαίο προσανατολισμό. (Αμερικανικό Ινστιτούτο σκυροδέματος, ACI 116R).
- Το σκυρόδεμα που περιέχει υδραυλικό τσιμέντο, ύδωρ, αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες καλείται ινοπλισμένο σκυρόδεμα. (Mehta P., Monteiro P., Concrete: Microstructure, Properties, and Materials)

### 1.2.2 Ιστορική αναδρομή

Ο καθηγητής Alberto Fava του πανεπιστημίου La Plata στην Αργεντινή επισημαίνει ότι πολύ πριν από την εμφάνιση των ανθρώπων, τα hornos (μικροσκοπικά πουλιά εγγενή στην Αργεντινή, τη Χιλή, τη Βολιβία και άλλες νότιες αμερικανικές χώρες) έχτιζαν με πολύ κόπο τις αχυρο-ενισχυμένες φωλιές από πηλό στις κορυφές των δέντρων.

Από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος έκανε προσπάθειες βελτίωσης της συμπεριφοράς των οικοδομικών υλικών, μέσω της προσθήκης ιών, ούτως ώστε να περιορίσει την ψαθυρή συμπεριφορά τους, δηλαδή να περιορίσει το σχηματισμό ρωγμών και την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς τους.

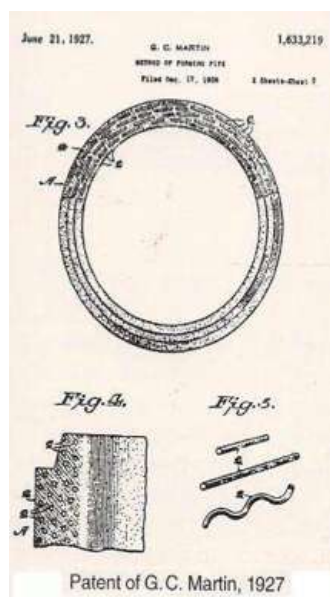
Η έννοια της όπλισης με ίνες χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε υλικά δόμησης, σύμφωνα με την Έξοδο 5:6, από τους Αιγύπτιους οι οποίοι χρησιμοποίησαν το άχυρο για να ενισχύσουν ωμόπλινθους. Υπάρχουν στοιχεία ότι οι ίνες αμιάντου χρησιμοποιήθηκαν ως οπλισμός δοχείων πηλού περίπου 5000 έτη πριν.

Η πρώτη ευρεσιτεχνία ινοπλισμένου σκυροδέματος καταχωρήθηκε το 1874 στην Καλιφόρνια από τον A. Berard. Η ιδέα ήταν να ενισχυθεί το σκυρόδεμα με την προσθήκη ακανόνιστου παλαιοσιδήρου. Στη συνέχεια, καταχωρήθηκαν ευρεσιτεχνίες στις ΗΠΑ, Αγγλία, Γαλλία, και Γερμανία. Το 1910 ο Porter πρότεινε τη χρήση λεπτών συρμάτων στο σκυρόδεμα για αύξηση της ομοιογένειάς του. Έπειτα, το 1918 στη Γαλλία ο H. Alfsen σε δική του ευρεσιτεχνία πρότεινε τη μίξη ιών μεγάλου μήκους από χάλυβα, ξύλο ή άλλα υλικά στο σκυρόδεμα για την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του. Επίσης, λαμβάνει υπόψη την επιφάνεια των ιών και την αγκύρωσή τους στη μάζα του σκυροδέματος. Έπειτα, ακολούθησαν νέες ευρεσιτεχνίες σχετικά με τις μορφές των ιών αλλά και τις πιθανές εφαρμογές τους (G. C.

Martin, Καλιφόρνια 1927, παραγωγή σωλήνων με χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος κλπ) (Σχήμα 19). Εν τούτοις, η ευρεία εφαρμογή παρεμποδίστηκε, μέχρι και τη δεκαετία του 1960, από το υψηλό κόστος, τα ανεπαρκή εργαστήρια ελέγχου, και κυρίως από την ταχεία ανάπτυξη του οπλισμένου σκυροδέματος.

Στις αρχές του 1960 ξεκίνησε μια νέα εποχή για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα καθώς πραγματοποιούνταν δοκιμές με πλαστικές ίνες, με ή 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 σιδηρόδρομου 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.



**Σχήμα 19:** Κατοχυρωμένη ευρεσιτεχνία του G. C. Martin, 1927 (Maidl, 1995)

### 1.2.3 Εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χάρη στα πολλά πλεονεκτήματα που έχει έναντι του συμβατικά οπλισμένου έχει εφαρμογή σε ένα μεγάλο εύρος έργων όπως φαίνεται παρακάτω:

- Τελική επένδυση σηράγγων, μόνιμη ή προσωρινή υποστήριξη
- Σταθεροποίηση και 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
- Κτίρια
- Τοιχία αντιστήριξης
- Δεξαμενές νερού
- Αρδευτικά έργα
- Προβλήτες, κυματοθραύστες, διαφράγματα, φάροι
- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις χημικής επεξεργασίας

### Εφαρμογή στα Υπόγεια Έργα

Εκτοξεύσιμο σκυρόδεμα (shotcrete, gunitite) με χρήση ινών, κυρίως χαλύβδινων, χρησιμοποιείται για την υποστήριξη της άμεσης επένδυσης στη διάνοιξη σηράγγων αλλά και ως τελική επένδυση ορισμένες φορές. Εφαρμόζεται στο μέτωπο και στα τοιχώματα της σήραγγας με εκτόξευση από κατάλληλο μηχανοκίνητο εξοπλισμό με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Ενδέχεται, να παρασκευάζεται είτε ως ξηρό μίγμα (dry mix) με προσθήκη του νερού τη στιγμή της εξόδου του από το στόμιο εκτόξευσης, είτε ως υγρό μίγμα (wet mix), όπου η ανάμιξη του μίγματος με το νερό γίνεται σε αναδευτήρα.

Πλεονεκτεί έναντι της όπλισης με δομικό πλέγμα που χρησιμοποιείται συνήθως σε συνδυασμό με αγκύρια ή πλαίσια καθώς μειώνεται σημαντικά ο χρόνος εκτέλεσης των εργασιών και το ποσοστό αναπήδησης του σκυροδέματος. Επίσης, επιτρέπει την σύνδεση επάλληλων στρώσεων σκυροδέματος με πιο αποδοτικό τρόπο καθώς αποφεύγονται τα κενά που δημιουργούνται πίσω από τις ράβδους του δομικού πλέγματος αλλά και οι ρωγμές που δημιουργούνται από τις ταλαντώσεις του πλέγματος.



*Σχήμα 20: Χρήσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος για υποστήριξη σηράγγων*

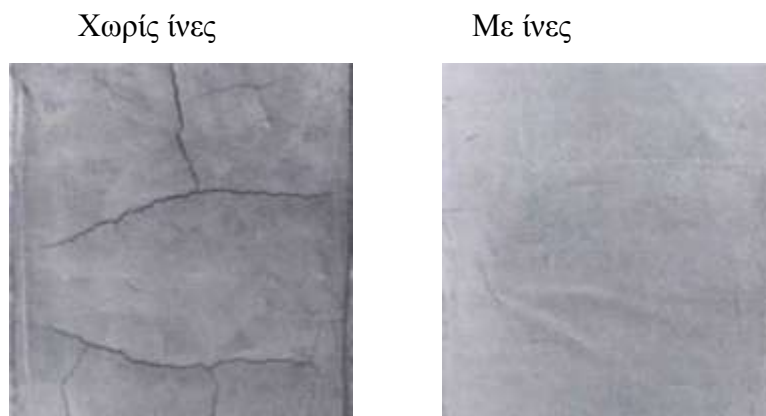
Στις σήραγγες γίνεται επίσης χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος για την κατασκευή προκατασκευασμένων τμημάτων (segments) του δακτυλίου της τελικής επένδυσης που τους προσδίδει ομοιομορφία και καταργεί τον συμβατικό οπλισμό που απαιτείται για την κατασκευή τους. Χρησιμοποιείται ευρέως για επισκευή της επένδυσης παλαιών σηράγγων όπως στην Αγγλία για την ανακαίνιση της σήραγγας του Brunel στο Τάμεση και στις ΗΠΑ όπου η σήραγγα Baker στο Tennessee αποκαταστάθηκε με χρήση ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Άλλες εφαρμογές των ινών συναντάμε σε υπόγειους θαλάμους που διανοίγονται τεχνητά και σε μεταλλευτικά έργα όπου συνήθως παρατηρούνται μεγάλες φορτίσεις λόγω συγκλίσεων που καλείται να παραλάβει η υποστήριξη.

### 1.2.4 Πλεονεκτήματα χρήσης ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η χρήση των ινών στο σκυρόδεμα προσφέρει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού οπλισμού χωρίς να μπορεί γενικά να τον αντικαταστήσει. Τα πλεονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλάστιμη συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που θα είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν από το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμη και μετά την αστοχία ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.
2. Επίσης, οι ίνες εμποδίζουν τη διεύρυνση των ρωγμών και των επιπτώσεων της συστολής ξήρανσης και της θερμοκρασίας, λόγω της πρόσφυσης μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος και της πυκνότητας των ινών (**Σχήμα 21**). Λειτουργούν σαν «γέφυρες» που μεταβιβάζουν τις εφελκυστικές τάσεις από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής.



**Σχήμα 21:** Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες, Fibermesh 1989

3. Οι ίνες λειτουργούν ακόμη και ως κινηματικός περιορισμός έναντι της διόγκωσης του υπό φόρτιση σκυροδέματος.
4. Επιπλέον, βελτιώνουν τη στρεπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος.
5. Η τυχαία διάταξη των ινών στον όγκο του εκάστοτε δοκιμίου του προσδίδει ομοιογένεια και ισοτροπία.
6. Σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει -όχι μόνο καλύτερες πρώιμες αντοχές- αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε κάμψη, σε κρούση, σε διάτμηση και σε κόπωση, ενώ έχει και

αυξημένη δυσθραυστότητα. Επίσης, αναπτύσσει μεγαλύτερη δύναμη συνάφειας στην επιφάνεια που διαστρώνεται σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα.

**7.** Εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ασφάλεια στο προσωπικό, αφού δε χρειάζεται να εργάζεται κάτω από ανυποστήρικτο πέτρωμα για την τοποθέτηση του πλέγματος. Η ασφάλεια του προσωπικού μάλιστα μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται τηλεχειριζόμενο ρομπότ εκτόξευσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

**8.** Μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικό οπλισμό, παίζοντας το ρόλο της δευτερογενούς ενίσχυσης.

**9.** Η χρήση ινών οδηγεί σε οικονομία υλικών και αύξηση της ταχύτητας κατασκευής. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην κατάργηση του πλέγματος και στη μείωση της ανθρώπινης εργασίας, αλλά και στο μικρότερο όγκο εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί συνολικά.

**10.** 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 αγοράς.

**11.** Οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες επισκευών προϋπαρχουσών κατασκευών. Επιπλέον, αν μια επένδυση ινοπλισμένου σκυροδέματος χρειαστεί επισκευή ή ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται ευκολότερα σε σχέση με μια επένδυση με συμβατικό οπλισμό.

**12.** Η ανθεκτικότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι πολύ καλή, κυρίως λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε τσιμέντο.

**13.** Η τυχόν διάβρωση των ινών χάλυβα είναι μόνο επιφανειακή και χωρίς δυσμενείς επιπτώσεις, επειδή η διάμετρος των ινών είναι μικρή και επομένως οι τάσεις λόγω διόγκωσης που προκαλούν τα οξειδία σιδήρου είναι αμελητέες.

**14.** Αντίσταση στο φαινόμενο της αποφλοιώσης λόγω απουσίας επικάλυψης.

### **1.2.5 Μειονεκτήματα χρήσης ινοπλισμένου σκυροδέματος**

**1.** 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%.

2. Οι χαλύβδινες, κυρίως, ίνες είναι σχετικά κοφτερές και μπορεί να προκαλέσουν εκδορές και μικροτραυματισμούς στο προσωπικό αν δεν γίνεται χρήση τους με προσοχή.
3. 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).
4. 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 (Κατσκογιάννη, 2004).
5. Φθορά επίσης μπορεί να προκληθεί και από λάθος στη συσκευασία ή στη μεταφορά.
6. Η εμπειρία από τη χρήση τους δεν είναι τόσο διαδομένη όσο αυτή του δομικού πλέγματος.
7. Ο εξοπλισμός φθείρεται σημαντικά περισσότερο σε σχέση με το κοινό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, το κόστος λόγω φθοράς εξοπλισμού αυξάνει.
8. Οι ίνες είναι συνήθως ακριβότερες σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό και η διαθεσιμότητά τους στο χώρο του έργου μπορεί να είναι περιορισμένη.

### 1.2.6 Διαφοροποιήσεις ινοπλισμένου-συμβατικού σκυροδέματος

**Πίνακας 3.** Διαφοροποιήσεις οπλισμένου - ινοπλισμένου σκυροδέματος

Οπλισμένο Σκυρόδεμα	Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα
Παρασκευάζεται από χονδρόκοκκα υλικά και μεταφέρεται στη θέση του με αντλία	Αποτελείται από λεπτόκοκκα υλικά και μπορεί να μεταφέρεται στη θέση του με εκτόξευση
Χρησιμοποιείται κυρίως επιβραδυντής για να διατηρηθεί μέχρι το πολύ δύο ώρες	Προστίθεται κυρίως επιταχυντής την ώρα που είναι έτοιμο να εκτοξευθεί στη θέση εργασίας
Έχει την ανομοιογένεια των δύο υλικών αποτελούμενο από σίδηρο και σκυρόδεμα	Αποτελεί μαζί με τις ίνες ομοιογενές υλικό γιατί μπορεί να αναμιγνύεται ομοιόμορφα
Λειτουργεί κυρίως στην ελαστική περιοχή	Λειτουργεί 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 και ανθεκτικότητα	Μεγάλη αντοχή σε κρούση και ανθεκτικότητα
Έχει μειωμένη αντοχή σε φθορές τριβής	Έχει αυξημένη αντοχή σε φθορές τριβής
Ρηγματώσεις αμέσως μετά τη διάστρωση	Σχεδόν καθόλου ρήγματα μετά τη διάστρωση
Ρήγματα εφελκυσμού μετά τη φόρτιση	Μειωμένα ρήγματα ακόμη και μετά τη φόρτιση
Μικρές παραμορφώσεις με ρήγματα	Μεγάλες παραμορφώσεις με λίγα μόνο ρήγματα
Αυξημένη συρρίκνωση και ερπυσμός και συνεπώς ρηγμάτωση	Μειωμένες βλάβες από συρρίκνωση και ερπυσμό
Ελέγχεται στο εργοστάσιο κυρίως κατά την παραγωγή του	Ελέγχεται στο εργοτάξιο επειδή εκεί μπαίνει ο επιταχυντής
Μπορεί να ελεγχθεί και κατά τη διανομή του στο εργοτάξιο με δοκιμή κάθισης	Δεν μπορεί να ελεγχθεί αλλού επειδή περιέχει σταθεροποιητή και δεν είναι ενεργό
Η διάρκεια ζωής του είναι μόνο μιάμιση ώρες από τη φόρτωσή του στο εργοστάσιο	Η διάρκεια ζωής του μπορεί να υπερβαίνει τις 12 ώρες λόγω ανάμιξης σταθεροποιητή
Μπορεί να φτάσει και μέχρι τις δύο ώρες αν έχει αναμιχθεί επιβραδυντικό	Μπορεί όμως να φτάσει 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 τον εξοπλισμό εκτόξευσης
Το τσιμέντο συνήθως κυμαίνεται από 270 kg έως 350 kg εκτός ορισμένων εργασιών	Το τσιμέντο κατά βάρος συνήθως κυμαίνεται από 350 kg μέχρι και 450 kg
Ο λόγος Νερό/Τσιμέντο ανάλογα με τις εργασίες κυμαίνεται από 0,70 – 0,50	Ο λόγος Νερό/Τσιμέντο ανάλογα με τις εργασίες κυμαίνεται από 0,50 - 0,35

### 1.3. Ανθεκτικότητα σκυροδέματος

Το πρόβλημα της ανθεκτικότητας σε διάρκεια θεωρείται σήμερα από τη διεθνή κοινότητα των μηχανικών σαν το υπ' αριθμόν ένα επιστημονικό και πρακτικό πρόβλημα του σκυροδέματος. Πέρα από τις προφανείς επιδράσεις στην ασφάλεια και το περιβάλλον,



υπάρχει σημαντική οικονομική διάσταση. Ήδη, στις αναπτυγμένες χώρες, το ετήσιο κόστος επισκευών υπερβαίνει κατά πολύ αυτό των νέων κατασκευών.

Οι σχεδιαστές των κατασκευών από σκυρόδεμα ενδιαφέρονται ως επί το πλείστον για τα χαρακτηριστικά της αντοχής του υλικού, για μια σειρά από λόγους, και έτσι είναι καιρός να γίνει συνείδηση η σημαντικότητα της ανθεκτικότητας. Ενώ το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται, διαστρώνεται και συντηρείται κατάλληλα μπορεί να είναι ανθεκτικό, κάτω από τις περισσότερες συνθήκες φυσικού και βιομηχανικού περιβάλλοντος εμφανίζονται συχνά και περιπτώσεις πρόωμης φθοράς των κατασκευών από σκυρόδεμα, και παρέχουν πολύτιμα μαθήματα για τον έλεγχο των παραγόντων που είναι υπεύθυνοι για την έλλειψη ανθεκτικότητας.

Το νερό σχετίζεται γενικά με κάθε μορφής φθορά, και στα πορώδη στερεά, η ευκολία της διείσδυσης του νερού μέσα στο στερεό καθορίζει συνήθως και το ρυθμό φθοράς του.

Οι φυσικές επιδράσεις που επηρεάζουν δυσμενώς την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος περιλαμβάνουν την επιφανειακή φθορά, τη ρηγμάτωση λόγω κρυστάλλωσης των αλάτων στους πόρους και την έκθεση σε ακραίες θερμοκρασίες, όπως κατά τη διάρκεια παγετού ή πυρκαγιάς. Οι επιβλαβείς χημικές επιδράσεις περιλαμβάνουν την έκπλυση της τσιμεντόπαστας από όξινα διαλύματα και τις διασταλτικές δράσεις που περιλαμβάνονται στη θειική προσβολή, στην αλκαλιοπυριτική αντίδραση και στη διάβρωση του ενσωματωμένου στο σκυρόδεμα χάλυβα.

Δεδομένου ότι πολυάριθμα φυσικά και χημικά αίτια φθοράς εμφανίζονται ταυτόχρονα όταν μια κατασκευή από σκυρόδεμα εκτίθεται σε θαλασσινό νερό, η μελέτη της συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο θαλασσινό νερό παρέχει μια εξαιρετική ευκαιρία εκτίμησης της πολυπλοκότητας των προβλημάτων ανθεκτικότητας του σκυροδέματος που εμφανίζονται συνήθως στην πράξη.

### **1.3.1 Ορισμός ανθεκτικότητας**

Ο μεγάλος χρόνος ζωής μιας κατασκευής θεωρείται συνώνυμο της ανθεκτικότητας. Σύμφωνα με την ACI Committee 201, ως ανθεκτικότητα του σκυροδέματος ορίζεται η δυνατότητά του να ανθίσταται στη φθοροποιό δράση, στη χημική προσβολή, στην απότριψη ή σε οποιαδήποτε άλλη διαδικασία φθοράς. Με άλλα λόγια ένα ανθεκτικό σκυρόδεμα διατηρεί την αρχική του μορφή, την ποιότητα και τη λειτουργικότητά του όταν εκτίθεται στο περιβάλλον που πρόκειται να λειτουργήσει.

Κανένα υλικό δεν είναι από τη φύση του ανθεκτικό. Ως αποτέλεσμα των περιβαλλοντικών αλληλεπιδράσεων, η μικροδομή και συνεπώς οι ιδιότητες αλλάζουν με το χρόνο. Ένα υλικό θεωρείται ότι έχει ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής του όταν οι ιδιότητές του, κάτω από δεδομένες συνθήκες λειτουργίας έχουν απομειωθεί μέχρι ένα σημείο που η περαιτέρω χρήση του θεωρείται είτε επισφαλής είτε αντιοικονομική.

Μία ανθεκτική κατασκευή ευνοεί τη διατήρηση των περιβαλλοντικών πόρων και τη μείωση των αποβλήτων, ενώ ταυτόχρονα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιδράσεις λόγω επισκευής και αντικατάστασης.

Το σκυρόδεμα ανθίσταται στις περιβαλλοντικές επιδράσεις, στη χημική προσβολή και στη φθορά, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί τις επιθυμητές μηχανικές του ιδιότητες. Οι κατασκευές ανάλογα με τη χρήση και τη λειτουργία τους απαιτούν διαφορετικό βαθμό ανθεκτικότητας που εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης του περιβάλλοντος και τις επιθυμητές ιδιότητες. Τα συστατικά του σκυροδέματος, η αναλογία τους και η αλληλεπίδραση αυτών, ο τρόπος ανάμιξης και συντήρησης και οι συνθήκες περιβάλλοντος καθορίζουν τελικά την ανθεκτικότητα και τη ζωή του σκυροδέματος.

### **1.3.2 Σημασία ανθεκτικότητας**

Υπάρχει σήμερα πλέον, μια γενική επίγνωση ότι κατά το σχεδιασμό των κατασκευών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και να αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας των δομικών υλικών το ίδιο προσεκτικά όσο άλλα θέματα, όπως τα μηχανικά χαρακτηριστικά και το αρχικό κόστος. Καταρχάς, υπάρχει πλέον μια καλύτερη εκτίμηση των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων της μειωμένης ανθεκτικότητας. Εξάλλου, τα έξοδα της επισκευής και αντικατάστασης των κατασκευών που προκύπτουν από την αστοχία των υλικών πρέπει να αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι του συνολικού προϋπολογισμού της κατασκευής. Εκτιμάται ότι, στις βιομηχανικά αναπτυγμένες χώρες, το 40% των συνολικών πόρων της κατασκευαστικής βιομηχανίας χρησιμοποιείται για την επισκευή και συντήρηση των υπάρχουσών κατασκευών και μόνο το 60% για νέες εγκαταστάσεις. Η κλιμάκωση των δαπανών αντικατάστασης των κατασκευών και η αυξανόμενη έμφαση στο κόστος του κύκλου ζωής πέραν του αρχικού κόστους, αναγκάζει τους μηχανικούς να δίνουν ιδιαίτερη προσοχή στα θέματα ανθεκτικότητας. Έπειτα, υπάρχει η πεποίθηση ότι υπάρχει στενή σχέση μεταξύ ανθεκτικότητας των υλικών και οικολογίας. Η διατήρηση των φυσικών πόρων με την παραγωγή υλικών που διαρκούν περισσότερο είναι συνεπώς ένα οικολογικό βήμα. Η αστοχία παράκτιων μεταλλικών κατασκευών στη Νορβηγία, στη Newfoundland, και σε άλλα μέρη

του κόσμου κατέδειξε το γεγονός ότι και το ανθρώπινο αλλά και το οικονομικό κόστος που σχετίζεται με την ξαφνική αστοχία του υλικού κατασκευής μπορεί να είναι πολύ υψηλό. Καθώς μάλιστα, οι χρήσεις του σκυροδέματος επεκτείνονται όλο και περισσότερο σε έντονες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως οι παράκτιες πλατφόρμες στη Βόρεια Θάλασσα, και τα εμπορευματοκιβώτια (containers) για τη διαχείριση υγροποιημένων αερίων σε κρυογενικές θερμοκρασίες, οι απαιτήσεις για την ανθεκτικότητα των κατασκευών αυξάνουν.

### 1.3.3 Κανονισμοί

Για να εξασφαλιστεί η ανθεκτικότητα μιας κατασκευής, θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα υπόψη οι ακόλουθοι παράγοντες:

- τα κριτήρια σχεδιασμού
- η πιθανολογούμενη χρήση, συντήρηση και επιθεώρηση, κατά τη διάρκεια της ζωής του έργου
- τα τυχόν ειδικά προστατευτικά μέτρα
- η μορφολογία των δομικών στοιχείων και οι κατασκευαστικές τους λεπτομέρειες
- η σύνθεση, οι ιδιότητες και η συμπεριφορά των υλικών
- οι συνθήκες περιβάλλοντος

Ειδικότερα, οι συνθήκες περιβάλλοντος που θα επικρατούν κατά την ενεργό ζωή της κατασκευής, θα πρέπει να εκτιμηθούν κατά το σχεδιασμό του έργου έτσι ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση της επίδρασής τους στην ανθεκτικότητα και να προβλέπονται τα κατάλληλα μέτρα. Βασικό μεταξύ των μέτρων αυτών είναι το μέγεθος της εκ σκυροδέματος επικάλυψης των οπλισμών (καθώς και η ελάχιστη διάμετρος των ράβδων οπλισμού, σύμφωνα με το Κεφ. 18).

Σύμφωνα με τον ΕΚΩΣ 2000, η ελάχιστη τιμή της επικάλυψης σχετίζεται και με τις απαιτήσεις για εξασφάλιση ικανοποιητικής συνάφειας και πυρασφάλειας. Ορίζονται τέσσερις κατηγορίες συνθηκών περιβάλλοντος ως εξής:

#### **Κατηγορία 1: Ελάχιστα διαβρωτικό περιβάλλον**

- Εσωτερικοί χώροι κτιρίων κατοικιών ή γραφείων
- Χώροι όπου η σχετική υγρασία φθάνει σε υψηλή τιμή για ένα μικρό χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του έτους (π.χ. σχετική υγρασία 80%, για χρονικό διάστημα λιγότερο από 3 μήνες το χρόνο)

#### **Κατηγορία 2: Μετρίως διαβρωτικό περιβάλλον**

- Εσωτερικοί χώροι κτιρίων όπου η σχετική υγρασία είναι υψηλή και όπου υπάρχει κίνδυνος πρόσκαιρης παρουσίας διαβρωτικών ουσιών
- Φυσικό νερό (σύνηθες) που ρέει με βραδύτητα (ή είναι στάσιμο)
- Εξωτερικοί χώροι κτιρίων, κατοικιών ή γραφείων σε αγροτικές ή αστικές περιοχές με ατμόσφαιρα χωρίς υψηλή περιεκτικότητα σε διαβρωτικές ουσίες

*Σημ.: Δομικά στοιχεία (π.χ. περιμετρικά) που τμήμα τους βρίσκεται σε συνθήκες κατ. 1 ενώ άλλο τμήμα τους βρίσκεται σε συνθήκες κατ. 2, θα σχεδιάζονται ολόκληρα για τη δυσμενέστερη κατηγορία.*

### **Κατηγορία 3: Παραθαλάσσιο περιβάλλον**

Βλ. και Κ.Τ.Σ., παρ. 12.6.

### **Κατηγορία 4: Πολύ διαβρωτικό περιβάλλον**

Βλ. και Κ.Τ.Σ., παρ. 12.4, για σκυρόδεμα που εκτίθεται σε προσβολή χημικών ουσιών που περιέχονται στο έδαφος ή στο υπόγειο νερό.

Η τιμή  $c_{nom}$  πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τον σχεδιασμό (και αναγράφεται στα τεύχη και στα σχέδια), ενώ η τιμή  $c_{min}$  πρέπει να εξασφαλίζεται κατά την κατασκευή.

Αν το τελικό πάχος επικάλυψης με σκυρόδεμα είναι  $> 50$  mm επιβάλλεται η χρήση πρόσθετου ειδικού λεπτού επιδερμικού οπλισμού (βλ. παρ. 15.6).

Θεωρούμε ότι το ελάχιστο που πρέπει να εξασφαλίζεται είναι οι απαιτήσεις των κανονισμών ως προς την περιεκτικότητα σε τσιμέντο, N/T κλπ. Ο Κ.Τ.Σ. επιβάλλει σε παραθαλάσσιο σκυρόδεμα ελάχιστο τσιμέντο  $330 \text{ kg/m}^3$ . Η απαίτηση δεν είναι άμεσα ούτε έμμεσα ελέγξιμη, γι' αυτό προτείνεται ο σχεδιασμός με ελάχιστη κατηγορία σκυροδέματος C25/30, για την επίτευξη της οποίας απαιτείται η προαναφερόμενη ποσότητα τσιμέντου. Να αποφεύγεται η προσθήκη νερού στο έργο. Για τις απαιτήσεις υψηλής εργασιμότητας να χρησιμοποιείται μόνον υπερρευστοποιητής. Να επιβάλλεται ο αυστηρός έλεγχος, όχι μόνο για τη χρήση, αλλά και για την ορθή χρήση αποστατήρων. Πρέπει να αποφεύγεται το ξεκαλούπωμα των κατακόρυφων στοιχείων την επόμενη μέρα της σκυροδέτησης.

**Περιβαλλοντολογικές συνθήκες σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2**

(1) Συνθήκες έκθεσης είναι οι χημικές και φυσικές συνθήκες στις οποίες η κατασκευή είναι εκτεθειμένη επιπροσθέτως των μηχανικών δράσεων.

(2) Οι περιβαλλοντικές συνθήκες ταξινομούνται σύμφωνα με τον **Πίνακα 4** ο οποίος βασίζεται στο EN 206-1.

(3) Πλέον των συνθηκών του **Πίνακα 5**, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη συγκεκριμένες μορφές επιβλαβούς ή έμμεσης δράσης συμπεριλαμβανομένων των ακολούθων:

Χημική προσβολή προκύπτουσα από π.χ.:

- τη χρήση του κτιρίου ή της κατασκευής (αποθήκευση υγρών κλπ)
- διαλύματα οξέων ή θεικών αλάτων (EN 206-1, ISO 9690)
- χλωριόντα που περιέχονται στο σκυρόδεμα (EN 206-1)
- αλκαλικές αντιδράσεις αδρανών (EN 206-1, Εθνικά Πρότυπα)

Σύμφωνα με τον **Ευρωκώδικα 2** σχετικά με την ανθεκτικότητα και την επικάλυψη οπλισμών ισχύουν τα παρακάτω:

(1) Μια ανθεκτική κατασκευή πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις λειτουργικότητας, αντοχής και ευστάθειας καθόλη τη διάρκεια του επιδιωκόμενου χρόνου ζωής σχεδιασμού, χωρίς σημαντικές απώλειες χρηστικότητας ούτε υπερβολική και απρόβλεπτη συντήρηση.

(2) Η απαιτούμενη προστασία της κατασκευής πρέπει να υλοποιείται λαμβάνοντας υπόψη την επιδιωκόμενη χρήση της, τον χρόνο ζωής της (βλ. EN 1990), το πρόγραμμα συντήρησης και τις αντίστοιχες δράσεις.

(3) Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανή σημασία των άμεσων και έμμεσων δράσεων, των περιβαλλοντικών συνθηκών (4.2 EC2) και των συνακόλουθων επιδράσεων.

*Σημείωση: Παραδείγματα περιλαμβάνουν παραμορφώσεις εξαιτίας ερπυσμού και συστολής συρρίκνωσης (βλ. 2.3.1.2 EC2).*

**Πίνακας 4. Κατηγορίες έκθεσης σχετιζόμενες με τις περιβαλλοντικές συνθήκες σύμφωνα με το EN 206-1**

Χαρακτηρισμός Κατηγορίας	Περιγραφή περιβάλλοντος	Πληροφοριακά παραδείγματα όπου οι κατηγορίες έκθεσης θα μπορούσαν να συμβούν
<b>1. Χωρίς διακινδύνευση διάβρωσης ή προσβολής</b>		
<b>X0</b>	Για άοπλο σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα χωρίς ενσωματωμένο μέταλλο: όλες οι συνθήκες έκθεσης εκτός περιπτώσεων ύπαρξης ψύξης/απόψυξης, επιφανειακής τριβής ή χημικής προσβολής. Για οπλισμένο σκυρόδεμα: πολύ ξηρό	Σκυρόδεμα εντός κτιρίων με πολύ χαμηλή υγρασία αέρος
<b>2. Διάβρωση από ενανθράκωση</b>		
<b>XC1</b>	Ξηρό ή μόνιμα υγρό	Σκυρόδεμα εντός κτιρίων με μέτρια ή υψηλή υγρασία αέρος Σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο στο νερό
<b>XC2</b>	Υγρό, σπανίως ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος υπό μακροχρόνια επαφή με το νερό Πληθώρα θεμελιώσεων
<b>XC3</b>	Μέτρια υγρασία	Σκυρόδεμα εντός κτιρίων με πολύ χαμηλή υγρασία αέρος Εξωτερικό σκυρόδεμα προσβαλλόμενο από τη βροχή
<b>XC4</b>	Περιοδικά υγρό και ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος σε επαφή με το νερό, εκτός της κατηγορίας έκθεσης XC2
<b>3. Διάβρωση από χλωριόντα</b>		
<b>XD1</b>	Μέτρια υγρασία	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε αερομεταφερόμενα χλωριόντα
<b>XD2</b>	Υγρό, σπανίως ξηρό	Πισίνες. Στοιχεία σκυροδέματος εκτεθειμένα σε βιομηχανικά απόβλητα που περιέχουν χλωριόντα
<b>XD3</b>	Περιοδικά υγρό και ξηρό	Τμήματα γεφυρών εκτεθειμένα σε ψεκασμό χλωριόντων. Πεζοδρόμια. Πλάκες χώρων στάθμευσης αυτοκινήτων
<b>4. Διάβρωση από χλωριόντα θαλασσινού νερού</b>		
<b>XS1</b>	Εκτεθειμένο σε άλατα θαλάσσης αερομεταφερόμενα αλλά χωρίς άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό	Κατασκευές κοντά ή επί της Ακτής

<b>XS2</b>	Μόνιμα βυθισμένο σε θαλασσινό νερό	Τμήματα λιμενικών έργων
<b>XS3</b>	Ζώνες παλίρροιας, παφλασμού και πιτσιλίσματος	Τμήματα λιμενικών έργων
<b>5. Προσβολή ψύξης / απόψυξης</b>		
<b>XF1</b>	Μέτριας κλίμακας υδρεμοτισμός χωρίς παράγοντα απόψυξης	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και τον πάγο
<b>XF2</b>	Μέτριας κλίμακας υδρεμοτισμός με παράγοντα απόψυξης	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος κατασκευών οδοποιίας εκτεθειμένες σε ψύξη και παράγοντες απόψυξης που μεταφέρονται με τον αέρα
<b>XF3</b>	Εκτεταμένος υδρεμοτισμός χωρίς παράγοντα απόψυξης	Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και τον πάγο
<b>XF4</b>	Εκτεταμένος υδρεμοτισμός με παράγοντα απόψυξης ή θαλασσινό νερό	Καταστρώματα οδών ή γεφυρών εκτεθειμένα σε παράγοντες απόψυξης Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε άμεσο ψεκασμό με παράγοντες απόψυξης Ζώνες παφλασμού σε λιμενικά έργα εκτεθειμένα σε πάγο
<b>6. Χημική προσβολή</b>		
<b>XA1</b>	Ελαφρώς επιθετικό χημικό περιβάλλον σύμφωνα με το EN 206-1, Πίνακας 5	Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα
<b>XA2</b>	Μετρίως επιθετικό χημικό περιβάλλον σύμφωνα με το EN 206-1, Πίνακας 5	Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα
<b>XA3</b>	Ιδιαίτερος επιθετικό χημικό περιβάλλον σύμφωνα με το EN 206-1, Πίνακας 5	Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα

*Σημείωση: Η σύνθεση του σκυροδέματος επιδρά τόσο στην προστασία του οπλισμού όσο και στην αντοχή του σκυροδέματος έναντι προσβολής. Το παράρτημα E παρέχει ενδεικτικές κατηγορίες αντοχής για τις συγκεκριμένες κατηγορίες περιβαλλοντικής έκθεσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγεί στην επιλογή κατηγορίας ανώτερης αντοχής από αυτή που θα απαιτούνταν σύμφωνα με το δομοστατικό σχεδιασμό. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η τιμή του  $f_{cm}$  που εισάγεται πρέπει να αντιστοιχεί στην υψηλότερη αντοχή κατά τον υπολογισμό του ελάχιστου οπλισμού και τον έλεγχο του εύρους των ρωγμών (βλ. 7.3.2 -7.3.4 EC2).*

**Πίνακας 5.** Οριακές τιμές συγκέντρωσης χημικών παραγόντων εδάφους και υπόγειων υδάτων για τις κατηγορίες έκθεσης χημικής προσβολής

Χημικός παράγοντας	Πρότυπη μέθοδος προδιορισμού	ΧΑ1	ΧΑ2	ΧΑ3
<i>Υπόγειο νερό</i>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	EN 196-2	≥200 and ≤ 600	> 600 and ≤ 3000	> 3000 and ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 and ≥ 5,5	< 5,5 and ≥ 4,5	< 4,5 and ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg/l aggressive	prEN 13577:1999	≥ 15 and ≤ 40	> 40 and ≤ 100	> 100, πάνω από το βαθμό κορεσμού
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1 or ISO 7150-2	≥ 15 and ≤ 30	> 30 and ≤ 60	> 60 and ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	ISO 7980	≥ 300 and ≤ 1000	> 1000 and ≤ 3000	> 3000, πάνω από το βαθμό κορεσμού
<i>Έδαφος</i>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> - mg/kg <sup>a</sup> total	EN 196-2 <sup>b</sup>	≥ 2000 and ≤ 3000 <sup>3</sup>	> 3000 <sup>c</sup> and ≤ 12000	> 12000 and ≤ 24000
Οξύτητα ml/kg	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	Δεν καταγράφεται στην πράξη	

(4) Η προστασία του χάλυβα οπλισμού από διάβρωση εξαρτάται από την πυκνότητα, την ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος (βλ. 4.4 EC2), καθώς και τις ρηγματώσεις (βλ. 7.3 EC2). Η πυκνότητα και η ποιότητα της επικάλυψης επιτυγχάνεται ελέγχοντας το μέγιστο λόγο νερού/τσιμέντο και την ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου (βλ. EN 206-1) και μπορεί να σχετίζεται με την κατηγορία ελάχιστης αντοχής του σκυροδέματος.

(5) Όπου οι μεταλλικοί σύνδεσμοι επιδέχονται επιθεώρησης και αντικατάστασης, μπορεί σε περιπτώσεις έκθεσης να χρησιμοποιούνται με προστατευτικές επιστρώσεις. Διαφορετικά, πρέπει να είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο υλικό.

(6) Σε ειδικές περιστάσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη περισσότερες απαιτήσεις από όσες δίνονται στην παρούσα ενότητα (π.χ. για κατασκευές μνημειακού χαρακτήρα, κατασκευές υποκειμένες σε ακραίες και μη συνήθεις δράσεις κ.λ.π.)

Συμπληρωματικά με τους ανωτέρω κανονισμούς, υπάρχουν και κανονισμοί που αναφέρονται στη σύνθεση σκυροδεμάτων με ειδικές απαιτήσεις. Ενδεικτικά αναφέρονται οι ελάχιστες



ποσότητες τσιμέντου, ανθεκτικό σε χημικά ή σε θαλασσινό νερό του **Πίνακα 4**, οι οποίες ισχύουν για μέγιστο κόκκο αδρανών 31,5 mm ή 1". Για αδρανή με μέγιστο κόκκο 63 mm ή 1 ½", ο όγκος των κενών του μίγματος των αδρανών είναι μικρότερος και η απαίτηση σε τσιμέντο μειώνεται κατά 30 kg/m<sup>3</sup>. Αντίστοιχα, για μέγιστο κόκκο 16 mm ή 1/2" η απαίτηση σε τσιμέντο αυξάνεται κατά 30 kg/m<sup>3</sup>. Για σκυρόδεμα μέσα στη θάλασσα υπάρχουν αυστηρότερες απαιτήσεις: μέγιστη τιμή του λόγου N/T = 0,48 και ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο 400 kg/m<sup>3</sup>. Τέλος, για την αποφυγή διαστολής σκυροδέματος λόγω παγετού, συνιστάται η χρήση αερακτικών προσθέτων. Η ποσότητα του αερακτικού πρέπει να είναι τέτοια που να δημιουργείται συνολικός όγκος φυσαλίδων αέρα στο σκυρόδεμα ίσος με 6% του όγκου του σκυροδέματος για μέγιστο κόκκο αδρανών 31,5 mm ή 1" και 3% για μέγιστο κόκκο 8 mm ή 3/8", με 4,5% για μέγιστο κόκκο 16 mm ή 1/2", 3,5% για μέγιστο κόκκο 31,5 mm ή 1" και 3% για μέγιστο κόκκο 63 mm 1½".

#### **Απαιτήσεις ανθεκτικότητας σε διάρκεια**

(1) Προκειμένου να εξασφαλιστεί ο απαιτούμενος χρόνος ζωής σχεδιασμού της κατασκευής, πρέπει να λαμβάνονται επαρκή μέτρα ώστε να προστατεύονται τα δομικά στοιχεία από σχετικές περιβαλλοντικές δράσεις.

(2) Οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας σε διάρκεια πρέπει να συνεκτιμώνται όταν εξετάζονται τα παρακάτω:

- σύλληψη σχεδιασμού
- επιλογή των υλικών
- κατασκευαστικές λεπτομέρειες
- εκτέλεση
- έλεγχος ποιότητας
- επίβλεψη
- έλεγχοι
- ειδικά μέτρα (π.χ. χρήση ανοξειδωτου χάλυβα, επιστρώσεις, καθοδική προστασία)

## Μέθοδοι ελέγχου

### Επικάλυψη οπλισμών

(1) Η επικάλυψη των οπλισμών είναι η απόσταση μεταξύ της επιφάνειας του οπλισμού εγγύτερα στην πλησιέστερη επιφάνεια του σκυροδέματος (συμπεριλαμβανομένων συνδέσμων, συνδετήρων και επιφανειακού οπλισμού, όπου απαιτείται) και της πλησιέστερης επιφάνειας σκυροδέματος.

(2) Η ονομαστική επικάλυψη πρέπει να καθορίζεται στα σχέδια. Ορίζεται ως η ελάχιστη επικάλυψη  $c_{min}$  (βλ. 4.4.1.2 EC2) συν τη σχεδιαστική ανοχή για την αντιμετώπιση αποκλίσεων,  $\Delta c_{dev}$  (βλ. 4.4.1.3 EC2):

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

### Ελάχιστη επικάλυψη, $c_{min}$

*Σημείωση: Στις προτεινόμενες τιμές: 1,5 αντί 2,0, 2,5 αντί 3,0.*

(1) Πρέπει να προβλέπεται ελάχιστη επικάλυψη  $c_{min}$ , προκειμένου να διασφαλιστεί:

- ασφαλής μεταφορά των δυνάμεων συνάφειας
- η προστασία του χάλυβα έναντι διάβρωσης (ανθεκτικότητα σε διάρκεια)
- επαρκής πυροπροστασία (βλ. EN 1992-1-2)

(2) Πρέπει να χρησιμοποιείται η μεγαλύτερη τιμή  $c_{min}$  που να ικανοποιεί τις απαιτήσεις τόσο για τις συνθήκες συνάφειας όσο και για τις περιβαλλοντικές.

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm} \}$$

όπου:

$c_{min,b}$  = ελάχιστη επικάλυψη βάση απαίτησης συνάφειας

$c_{min,dur}$  = ελάχιστη επικάλυψη βάση περιβαλλοντικών συνθηκών

$\Delta c_{dur,\gamma}$  = πρόσθετη ασφάλεια στοιχείου

$\Delta c_{dur,st}$  = απομείωση της ελάχιστης επικάλυξης σε περίπτωση χρήσης ανοξείδωτου χάλυβα

$\Delta c_{dur}$  = απομείωση της ελάχιστης επικάλυξης σε περίπτωση πρόσθετης προστασίας

(3) Προκειμένου να μεταφερθούν με ασφάλεια οι δυνάμεις συνάφειας και να διασφαλιστεί επαρκής συμπίκνωση του σκυροδέματος, η ελάχιστη επικάλυψη δεν πρέπει να είναι μικρότερη της  $c_{min,b}$ , η οποία δίνεται στον **Πίνακα 6**.

**Πίνακας 6.** Απαιτήσεις ελάχιστης επικάλυψης  $c_{min,b}$  από άποψη συνάφειας

Απαίτηση συνάφειας	
Διάταξη ράβδων	Ελάχιστη επικάλυψη $c_{min,b}$ *
Μεμονωμένες	Διάμετρος ράβδου
Δεσμίδα	Ισοδύναμη διάμετρος ( $\varnothing_n$ ) (βλ. 8.9.1)
* Εάν η μέγιστη ονομαστική διάσταση των αδρανών είναι μεγαλύτερη από 32 mm, τότε η $c_{min,b}$ πρέπει να προσαυξάνεται κατά 5 mm	

*Σημείωση:* Οι τιμές της  $c_{min,b}$  για προένταση μετά τη σκλήρυνση, για τένοντες με ενσωμάτωση εντός σωλήνων κυκλικής ή ορθογωνικής διατομής, καθώς και για προεντεταμένους τένοντες πριν από την έγχυση του σκυροδέματος, παρέχονται σε κάθε χώρα στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Οι συνιστώμενες τιμές για τάνυση μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος είναι:

- κυλινδρικοί σωλήνες: διάμετρος
- ορθογωνικοί σωλήνες: μεγαλύτερη της ελάχιστης διάστασης ή το ήμισυ της μεγαλύτερης διάστασης

Δεν υπάρχει απαίτηση για μεγαλύτερη τιμή από 80 mm για σωλήνες είτε κυκλικής, είτε ορθογωνικής διατομής.

Οι συνιστώμενες τιμές για τένοντες προεντεταμένους πριν την έγχυση του σκυροδέματος είναι:

- 2,0 x διάμετρος του συρματόσχοινου ή του απλού σύρματος
- 3,0 x διάμετρος του πλεγμένου σύρματος

(4) Για χάλυβες προέντασης, η ελάχιστη επικάλυψη της αγκύρωσης πρέπει να είναι σύμφωνη με την κατάλληλη Ευρωπαϊκή Τεχνική Έγκριση.

(5) Οι τιμές ελάχιστης επικάλυψης για τον οπλισμό και τένοντες προέντασης για σκυρόδεμα κανονικού βάρους και λαμβάνοντας υπόψη τις κατηγορίες έκθεσης και τις κατηγορίες κατασκευών δίνονται από την  $c_{min,dur}$ .

*Σημείωση:* Η κατηγοριοποίηση των κατασκευών και οι τιμές της  $c_{min,dur}$  για χρήση σε κάθε χώρα μπορούν να ληφθούν στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη Κατηγορία Κατασκευής (για χρόνο ζωής σχεδιασμού 50 έτη) είναι S4 για τις ενδεικτικές αντοχές του σκυροδέματος του Παραρτήματος E ενώ οι συνιστώμενες τροποποιήσεις της Κατηγορίας Κατασκευής δίνονται στον **Πίνακα 7**. Η συνιστώμενη ελάχιστη Κατηγορία Κατασκευής είναι S1. Οι συνιστώμενες τιμές της  $c_{min,dur}$  δίνονται στον **Πίνακα 8** (χάλυβας οπλισμού) και στον **Πίνακα 9** (χάλυβας προέντασης).

Σημειώσεις στον **Πίνακα 7** σύμφωνα με το EN 10080:

1. Η κατηγορία αντοχής και ο λόγος νερού/τσιμέντου, w/c, θεωρούνται ότι είναι συσχετιζόμενες τιμές. Μπορεί να προβλέπεται μια ειδική σύνθεση (είδος σκυροδέματος, λόγος νερού/τσιμέντου, w/c, λεπτόκοκκο υλικό) με σκοπό να προκύψει χαμηλή διαπερατότητα.

2. Το όριο μπορεί να μειώνεται κατά μία κατηγορία αντοχής εάν προβλέπονται αεροπηκτικά σε ποσοστό φυσαλίδων μεγαλύτερο του 4%.

**Πίνακας 7.** Συνιστώμενη κατηγοριοποίηση κατασκευών

Κατηγορία Κατασκευής							
Κριτήριο	Κατηγορία έκθεσης σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/ XS3
Χρόνος ζωής σχεδιασμού 100 χρόνια	Αύξηση κατηγορίας κατά 2	Αύξηση κατηγορίας κατά 2	Αύξηση κατηγορίας κατά 2	Αύξηση κατηγορίας κατά 2	Αύξηση κατηγορίας κατά 2	Αύξηση κατηγορίας κατά 2	Αύξηση κατηγορίας κατά 2
Κατηγορία αντοχής	≥ C30/37 μείωση κατηγορίας κατά 1	≥ C30/37 μείωση κατηγορίας κατά 1	≥ C35/45 μείωση κατηγορίας κατά 1	≥ C40/50 μείωση κατηγορίας κατά 1	≥ C40/50 μείωση κατηγορίας κατά 1	≥ C40/50 μείωση κατηγορίας κατά 1	≥ C45/55 μείωση κατηγορίας κατά 1
Δομικό στοιχείο με γεωμετρία πλάκας (η θέση του οπλισμού δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία κατασκευής)	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1
Διασφάλιση ειδικού ελέγχου ποιότητας παραγωγής σκυροδέματος	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1

**Πίνακας 8.** Απαιτήσεις τιμών ελάχιστης επικάλυψης,  $c_{min,dur}$ , από άποψη ανθεκτικότητας σε διάρκεια για χάλυβα οπλισμού

Περιβαλλοντολογική απαίτηση για την $c_{min,dur}$ (mm)							
Κατηγορία Κατασκευής	Κατηγορία έκθεσης σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

**Πίνακας 9.** Απαιτήσεις τιμών ελάχιστης επικάλυψης,  $c_{min,dur}$  από άποψη ανθεκτικότητας σε διάρκεια για χάλυβα προέντασης

Περιβαλλοντολογική απαίτηση για την $c_{min,dur}$ (mm)							
Κατηγορία Κατασκευής	Κατηγορία έκθεσης σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	15	20	25	30	35	40
S2	10	15	25	30	35	40	45
S3	10	20	30	35	40	45	50
S4	10	25	35	40	45	50	55
S5	15	30	40	45	50	55	60
S6	20	35	45	50	55	60	65

(6) Η επικάλυψη των οπλισμών πρέπει να αυξάνεται κατά μια πρόσθετη παράμετρο ασφαλείας  $\Delta c_{dur,\gamma}$ .

*Σημείωση:* Η τιμή της  $\Delta c_{dur,\gamma}$  για χρήση σε κάθε χώρα παρατίθεται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή είναι 0 mm.

(7) Όπου χρησιμοποιείται ανοξειδωτος χάλυβας, ή όπου έχουν ληφθεί άλλα ειδικά μέτρα, η ελάχιστη επικάλυψη μπορεί να μειωθεί κατά  $\Delta c_{dur,st}$ . Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι επιδράσεις επί όλων των ιδιοτήτων του υλικού, συμπεριλαμβανομένης της συνάφειας.

*Σημείωση:* Η τιμή της  $\Delta c_{dur,st}$  για χρήση σε κάθε χώρα παρατίθεται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή, χωρίς άλλη προδιαγραφή, είναι 0 mm.

(8) Για σκυρόδεμα με πρόσθετη προστασία επίστρωσης η ελάχιστη επικάλυψη μπορεί να μειώνεται κατά  $\Delta c_{dur,add}$ .

*Σημείωση:* Η τιμή της  $\Delta c_{dur,add}$  για χρήση σε κάθε χώρα παρατίθεται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή, χωρίς άλλη προδιαγραφή, είναι 0 mm.

(9) Όπου το χυτό επί τόπου σκυρόδεμα εντοπίζεται επί άλλων στοιχείων σκυροδέματος (προκατασκευασμένων ή χυτών επί τόπου), η ελάχιστη επικάλυψη σκυροδέματος στη διεπιφάνεια δεν επιτρέπεται να είναι μικρότερη από την τιμή που αντιστοιχεί στην απαίτηση συνάφειας (βλ. (3) ανωτέρω) υπό την προϋπόθεση ότι:

- η κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος είναι τουλάχιστον C25/30
- ο χρόνος έκθεσης της επιφάνειας του αρχικού σκυροδέματος σε περιβάλλον υπαίθρου είναι μικρός (< 28 ημερών)
- η επιφάνεια έχει εκτραχυνθεί

(10) Για τένοντες χωρίς ενσωμάτωση η επικάλυψη πρέπει να παρέχεται σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Τεχνική Έγκριση.

(11) Για ανώμαλες επιφάνειες, (π.χ. εκτεθειμένα αδρανή) η ελάχιστη επικάλυψη πρέπει να αυξάνεται κατά τουλάχιστον 5 mm.

(12) Όπου αναμένεται ψύξη/απόψυξη ή χημική προσβολή στο σκυρόδεμα (Κατηγορίες XF και XA) πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στη σύνθεση του σκυροδέματος (βλ. EN 206-1 Ενότητα 6). Η επικάλυψη πρέπει φυσιολογικά να είναι επαρκής για τέτοιες περιπτώσεις.

(13) Αναφορικά με τη φθορά στο σκυρόδεμα από επιφανειακή τριβή πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα αδρανή σύμφωνα με το EN 206-1. Προαιρετικά, η επιφανειακή φθορά από τριβή στο σκυρόδεμα μπορεί να επιτρέπεται διά της αύξησης της επικάλυψης του σκυροδέματος (στρώμα προς απώλεια). Στην περίπτωση αυτή, η ελάχιστη επικάλυψη  $c_{min}$  πρέπει να αυξάνεται κατά  $k_1$  για την Κατηγορία εκδοράς XM1, κατά  $k_2$  για την XM2 και κατά  $k_3$  για την XM3.

*Σημείωση:* Η Κατηγορία επιφανειακής φθοράς XM1 υποδηλώνει τη μέτρια επιφανειακή φθορά όπως στην περίπτωση στοιχείων σε βιομηχανοστάσια όπου συναθροίζονται οχήματα με ελαστικά αέρος. Η κατηγορία επιφανειακής φθοράς από τριβή XM2 υποδηλώνει έντονες επιφανειακές φθορές στην περίπτωση στοιχείων σε βιομηχανοστάσια όπου συναθροίζονται μηχανήματα ανύψωσης με ελαστικά αέρος ή καουτσούκ. Η κατηγορία επιφανειακής φθοράς XM3 υποδηλώνει ακραίες καταστάσεις όπως στην περίπτωση στοιχείων σε βιομηχανοστάσια όπου συναθροίζονται κλαρκ με ελαστομερή ή χαλύβδινα επίσωτρα καθώς και φορτηγά. Οι τιμές των  $k_1$ ,  $k_2$  και  $k_3$  για χρήση σε κάθε χώρα μπορούν να ληφθούν από το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Οι συνιστώμενες τιμές είναι 5 mm, 10 mm και 15 mm.

### **Ανοχές σχεδιασμού για παρεκκλίσεις**

(1) Προκειμένου να υπολογιστεί η ονομαστική επικάλυψη,  $c_{nom}$ , πρέπει να γίνει μια προσαύξηση στην ελάχιστη επικάλυψη ώστε να ληφθούν υπόψη οι αποκλίσεις ( $\Delta c_{dev}$ ). Η απαιτούμενη ελάχιστη επικάλυψη πρέπει να αυξάνεται κατά την απόλυτη τιμή της αποδεκτής αρνητικής παρέκκλισης.

(2) Για τα κτίρια, το ENV 13670-1 δίνει την τιμή της ανεκτής παρέκκλισης. Αυτό είναι επίσης αρκετό και για άλλα είδη κατασκευών. Η προσαύξηση αυτή πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν επιλέγεται η τιμή της ονομαστικής επικάλυψης του σκυροδέματος. Η ονομαστική τιμή της επικάλυψης του σκυροδέματος πρέπει να χρησιμοποιείται στους

υπολογισμούς και να δηλώνεται στα σχέδια, εκτός εάν προδιαγράφεται τιμή άλλη εκτός της ονομαστικής (π.χ. η ελάχιστη τιμή).

*Σημείωση:* Η τιμή της  $\Delta c_{dev}$  για χρήση σε κάθε χώρα παρατίθεται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Η συνιστώμενη τιμή είναι 10 mm.

**(3)** Σε ορισμένες περιπτώσεις, πρέπει να μειώνεται η ανεκτή παρέκκλιση και η συνακόλουθη ανοχή  $\Delta c_{dev}$ .

*Σημείωση:* Η μείωση της  $\Delta c_{dev}$  στις περιστάσεις αυτές για χρήση σε κάθε χώρα παρατίθεται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Οι συνιστώμενες τιμές είναι:

- όπου η κατασκευή υπόκειται σε σύστημα διασφάλισης ποιότητας, στο οποίο ο έλεγχος περιλαμβάνει μετρήσεις της επικάλυψης του σκυροδέματος, είναι δυνατό να μειώνεται η ανοχή κατά τον σχεδιασμό έναντι παρέκκλισης  $\Delta c_{dev}$ :  $10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 5 \text{ mm}$
- όπου μπορεί να διασφαλιστεί ότι χρησιμοποιείται ένα πολύ ακριβές όργανο μέτρησης και απορρίπτονται όσα στοιχεία δεν συμμορφώνονται (π.χ. προκατασκευασμένα στοιχεία), η ανοχή κατά τον σχεδιασμό έναντι παρέκκλισης  $\Delta c_{dev}$  μπορεί να μειωθεί:

$$10 \text{ mm} \geq \Delta c_{dev} \geq 0 \text{ mm}$$

**(4)** Για σκυρόδεμα χυτό επί τραχέων επιφανειών, η ελάχιστη επικάλυψη πρέπει γενικά να αυξάνεται επιτρέποντας μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά το σχεδιασμό. Η αύξηση πρέπει να συμμορφώνεται με τη διαφορά που προκαλείται από την ύπαρξη τραχιάς επιφάνειας, αλλά η ελάχιστη επικάλυψη πρέπει να είναι τουλάχιστον  $k_1$  mm για σκυρόδεμα χυτό επί διαμορφωμένου εδάφους (συμπεριλαμβανομένου του gross-beton) και  $k_2$  mm για σκυρόδεμα χυτό απευθείας επί του εδάφους. Η επικάλυψη του οπλισμού για κάθε ιδιαιτερότητα της ορατής επιφάνειας, όπως τελειώματα με νευρώσεις ή εκτεθειμένα αδρανή πρέπει να αυξάνεται ώστε να λαμβάνει υπόψη την ύπαρξη ανώμαλης επιφάνειας.

*Σημείωση:* Οι τιμές  $k_1$  και  $k_2$  για χρήση σε κάθε χώρα μπορούν να ληφθούν από το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα. Οι συνιστώμενες τιμές είναι 40 mm και 75 mm.

**Πίνακας 10.** Συνιστώμενες οριακές τιμές για την σύνθεση και τις ιδιότητες του σκυροδέματος στις διάφορες κατηγορίες Έκθεσης EN206-1

Κατηγορίες έκθεσης																													
Κατηγορία έκθεσης	Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης										Διάβρωση λόγω χλωριόντων								Προσβολή από ψύξη/απόμυξη				Χημική προσβολή			Τριβή / Απότριψη		
		Θαλασσινό νερό										Χλωριόντα που δεν προέρχονται από θαλασσινό νερό																	
		Τσιμέντα II, III, IV (Εκτός B-LL)					Τσιμέντα I (+ II / B-LL)																						
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3					
1	max N/T	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,55	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50	0,55	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40			
2	min κατηγορία αντοχής	C 12/15	C 20/25	C 25/30	C25 /30	C 30/37	C 26/32	C 26/32	C 30/37	C 30/37	C 35/45	C 30/37	C 32/40	C 35/45	C 28/35	C 25/30	C 32/40	C 25/30	C 35/45	C 30/37	C 28/35	C 30/37	C 35/45	C 35/45 (C 32/40)	C 40/50 (C 35/45)	C 50/60 (C 45/55)			
3	min περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m3	---	280	300	300	320	330	330	350	330	330	350	330	330	350	320	300	320	300	320	320	320	340	360	320 (300)	340 (320)	360 (320)		
4	min επικάλυψη η μη		25	25	35	35	40	40	50	40	40	50	35	40	50							35	35	35					
5	min περιεκτικότητα σε αέρα (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4,0	---	4,0	---	4,0	---	---	---	---					
6	Άλλες απαιτήσεις	Σημ.: Μη οπλισμένο σκυρόδεμα					Σημ.: Παραθαλάσσιο 1,5			Σημ.: Μόνιμα μέσα στη θάλασσα			Σημ.: Διαβρεχόμενες ζώνες			Αδρανή σύμφωνα με prEN12620: 2000 με ικανοποιητική αντοχή σε παγετό								Τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά			LA ≤ 27 (LA ≤ 20)	LA ≤ 25 (LA ≤ 20)	LA ≤ 22 (LA ≤ 20)



### 1.3.4 Ελεγχόμενα μεγέθη

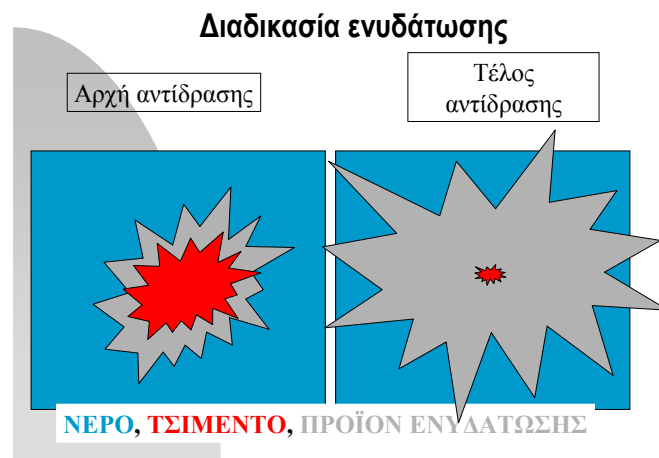
Οι βασικοί παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών είναι:

1. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες έκθεσης της κατασκευής
  2. Η διαπερατότητα του σκυροδέματος, που συνδέεται με το πορώδες, τη σωστή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και νερό, τη συμπύκνωση και τη συντήρηση
  3. Η δυνατότητα πραγματοποίησης μιας συγκεκριμένης φυσικής ή χημικής επιδράσεως
  4. Η χρησιμοποίηση σκληρών υλικών αδρανών με κανονική κοκκομετρική διαβάθμιση
- Αναλυτικότερα, όσον αφορά τις συνθήκες έκθεσης της κατασκευής, ποικίλουν σημαντικά από περιοχή σε περιοχή και είναι αυτές που καθορίζουν τη διάρκεια ζωής των κατασκευών δεδομένου ότι έχει εξασφαλιστεί καλή ποιότητα κατασκευής. Η εμπειρία και οι γνώσεις που είναι σήμερα διαθέσιμες στην τεχνολογία παρασκευής σκυροδέματος μπορεί να παράξει υψηλής ποιότητας υλικό και να μειώσει τελικά το κόστος συνολικά στη διάρκεια ζωής της κατασκευής αν και το αρχικό κόστος μπορεί να είναι αρκετά υψηλό.

Η διάρκεια ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει εξεταστεί σε διάφορα διαβρωτικά περιβάλλοντα (παραθαλάσσια, αγροτικά, βιομηχανικά) και διάφορα μοντέλα έχουν προταθεί για την περιγραφή της συμπεριφοράς τους και της διάρκειας ζωής τους. Αντίθετα, η περιγραφή των φαινομένων αυτών σε συνθήκες εναλλασσόμενου περιβάλλοντος έκθεσης, ιδιαίτερα σε έντονες συνθήκες εναλλαγής, δεν έχει εξεταστεί επαρκώς.

Η διαπερατότητα της μάζας του σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον όγκο των τριχοειδών πόρων και των κενών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Επομένως, σε κατασκευές όπου απαιτείται αυξημένη υδατοστεγανότητα, όπως υδατόπυργοι ή υδατοδεξαμενές, τοίχοι και δάπεδα υπογείων που βρίσκονται κάτω από τον υπόγειο ορίζοντα, χρειάζεται καλή συμπύκνωση του σκυροδέματος, μίγμα αδρανών με λίγα κενά και κυρίως μικρός λόγος νερού προς τσιμέντο.

Ο μηχανισμός δημιουργίας των ρηγματώσεων και μικρορηγματώσεων στο σκυρόδεμα, σχετίζεται με το βασικό μηχανισμό σκλήρυνσης του σκυροδέματος και της αύξησης της αντοχής του, τη χημική αντίδραση του νερού με το τσιμέντο, που ονομάζεται «ενυδάτωση του τσιμέντου». Στο **Σχήμα 22** φαίνεται ενδεικτικά ο μηχανισμός ενυδάτωσης του τσιμέντου.



*Σχήμα 22: Διαδικασία αντίδρασης ενυδάτωσης*

Κατά τη γενική περιγραφή της αντίδρασης, στην αρχή της ο κόκκος του τσιμέντου που περιβάλλεται από νερό, αντιδρά με το νερό δημιουργώντας σύμπλοκα άλατα σε μορφή βελόνας. Στην αρχή αντιδρά η εξωτερική επιφάνεια του κόκκου και όσο προχωρεί η αντίδραση προς το εσωτερικό του κόκκου, τόσο πιο πολλά άλατα δημιουργούνται καταλαμβάνοντας μεγαλύτερο όγκο. Η αντίδραση προχωράει με την πάροδο του χρόνου, οπότε ο όγκος των αλάτων καταλαμβάνει το μέγιστο όγκο που μπορεί να καταλάβει. Η πρόοδος της αντίδρασης με την πάροδο του χρόνου είναι ασυμπτωτική και ποτέ δεν πραγματοποιείται η πλήρης ενυδάτωση του τσιμέντου.

Οι «βελόνες» των συμπλόκων αλάτων – προϊόντων αντίδρασης τσιμέντου – νερού των κόκκων που γειτνιάζουν, «μπλέκονται» μεταξύ τους, δημιουργώντας ένα στερεό σύμπλεγμα, το οποίο αποτελεί τη στερεά τσιμεντόπαστα. Η σκληρυμένη τσιμεντόπαστα μαζί με τα περιεχόμενα αδρανή, αποτελούν το σκληρυμένο σκυρόδεμα.

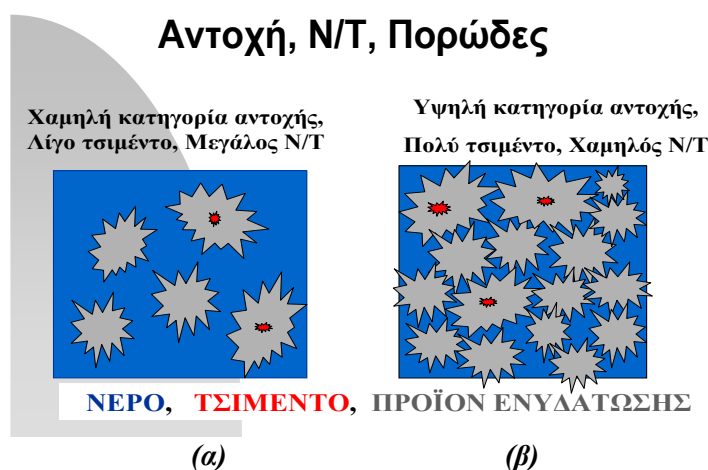
Το σύνολο των κενών που απομένει μεταξύ των προϊόντων της ενυδάτωσης, αποτελεί το πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες και την απόσταση του κάθε τμήματος του σκυροδέματος από την ελεύθερη επιφάνεια, μπορεί να είναι πλήρες νερού ή αέρα.

Το νερό που απαιτείται για την πλήρη αντίδραση του τσιμέντου με το νερό είναι περίπου το 22-23% του βάρους του τσιμέντου, δηλαδή  $N/T = 0,23$ . Στην περίπτωση αυτή, δεν υπάρχει περίσσεια νερού για τις υπόλοιπες ιδιότητες που πρέπει να έχει το σκυρόδεμα, όπως η εργασιμότητα, αντλησιμότητα κλπ. Για να αποκτήσει το σκυρόδεμα αυτές τις ιδιότητες, εκτός

των άλλων, απαιτείται περίσσεια νερού. Στο **Σχήμα 23**, φαίνεται ενδεικτικά η επίδραση της σχέσης N/T στην αντοχή και στα κενά - πορώδες του σκυροδέματος.

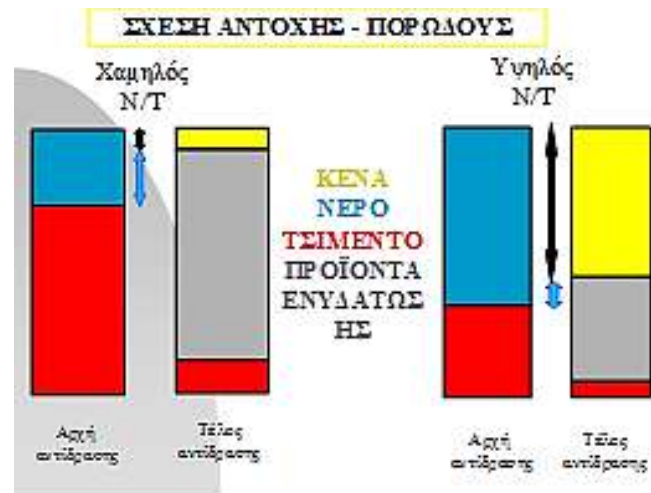
Όσο περισσότερο είναι το νερό σε σχέση με το τσιμέντο (μεγάλος N/T), οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης «μπλέκονται» λίγο μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ των προϊόντων ενυδάτωσης (πορώδες) των διπλανών κόκκων είναι σχετικά μεγάλα, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να σπάσει αυτός ο «δεσμός», να είναι σχετικά μικρή, οπότε και η αντοχή είναι μικρή (**Σχήμα 23(α)**).

Όταν το νερό σε σχέση με το τσιμέντο είναι λιγότερο (μικρός N/T), οι βελόνες των προϊόντων ενυδάτωσης είναι «σφιχτά μπλεγμένες» μεταξύ τους, τα κενά που σχηματίζονται μεταξύ τους είναι σχετικά μικρά, με αποτέλεσμα η τάση που απαιτείται για να «σπάσει» αυτός ο δεσμός να είναι μεγαλύτερη από το πρώτο παράδειγμα (**Σχήμα 23(β)**). Οι λόγοι N/T για τα συνηθισμένα έργα κυμαίνονται από 0,45 - 0,70. Για ειδικά σκυροδέματα μπορούμε να φτάσουμε και την τιμή  $N/T = 0,30 - 0,35$ .



**Σχήμα 23:** Σχέση αντοχής σκυροδέματος με N/T και πορώδες

Στο διάγραμμα του **Σχήματος 24** απεικονίζονται ογκομετρικά οι δύο παραπάνω περιπτώσεις.



**Σχήμα 24:** Σχέση αντοχής σκυροδέματος - πορώδους με βάση το λόγο  $N/T$

Το βέλος  $\updownarrow$  δείχνει το μέρος του νερού που αντιδρά με το τσιμέντο. Το υπόλοιπο ή παραμένει εντός ή εξατμίζεται, όταν οι συνθήκες το επιτρέψουν.

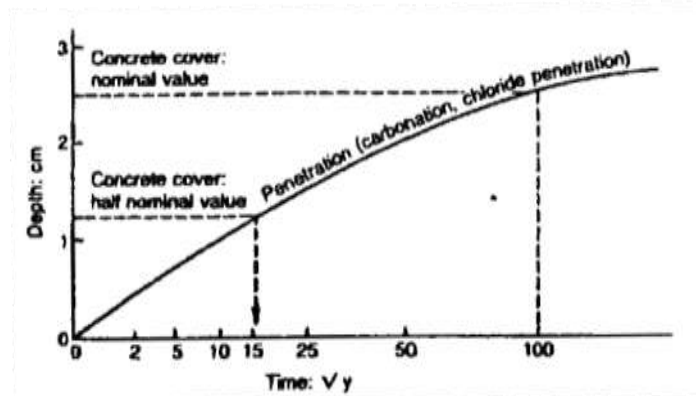
Η επίπτωση στο πορώδες, τη «δίοδο» μέσω της οποίας εισέρχονται οι παράγοντες που προσβάλλουν τον οπλισμό, των διαφόρων παραμέτρων, για σταθερά όλα τα υπόλοιπα, είναι:

- Μεγάλη ποσότητα τσιμέντου  $\rightarrow$  μικρό πορώδες
- Μικρός λόγος  $N/T$   $\rightarrow$  μικρό πορώδες
- Μεγάλη αντοχή  $\rightarrow$  μικρό πορώδες

Για τον οπλισμό, το στοιχείο του σκυροδέματος που είναι αποφασιστικής σημασίας για τη διάρκεια ζωής του, είναι η επικάλυψη. Όσο πυκνότερη είναι η επικάλυψη, τόσο μεγαλύτερη η αντοχή, μικρότερος ο λόγος  $N/T$ , μεγαλύτερη η ποσότητα τσιμέντου και σε τελική ανάλυση, τόσο μικρότερο είναι το πορώδες.

Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος της επικάλυψης, τόσο μεγαλύτερος χρόνος απαιτείται για να φτάσουν οι επιβλαβείς παράγοντες στον οπλισμό.

Σημειώνεται ότι η ταχύτητα διείσδυσης ακολουθεί νόμο  $\sqrt{t}$ , όπου  $t$  ο χρόνος. Παράδειγμα της σχέσης διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου δίνεται στο **Σχήμα 25**.

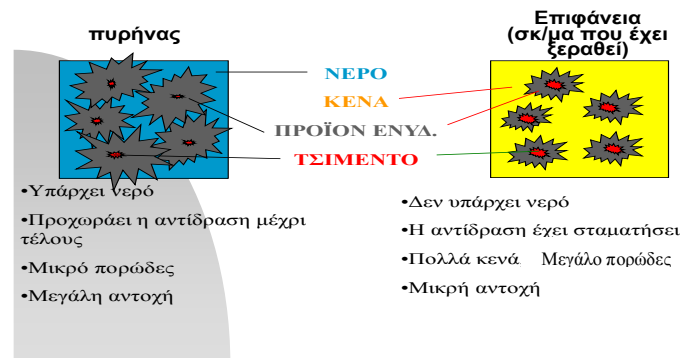


Σχήμα 25: Σχέση διείσδυσης συναρτήσει του χρόνου

Η σημαντικότητα του πάχους της επικάλυψης φαίνεται από το ότι όταν η επικάλυψη μειωθεί κατά το μισό, η διάρκεια ζωής μειώνεται κατά 85% περίπου.

Στην Ελλάδα η συνηθισμένη πρακτική είναι να συντηρούνται τα οριζόντια στοιχεία για μερικές ημέρες και τα κατακόρυφα σχεδόν καθόλου. Αυτή η πρακτική έχει ουσιαστική επίδραση στο πορώδες της επικάλυψης του σκυροδέματος.

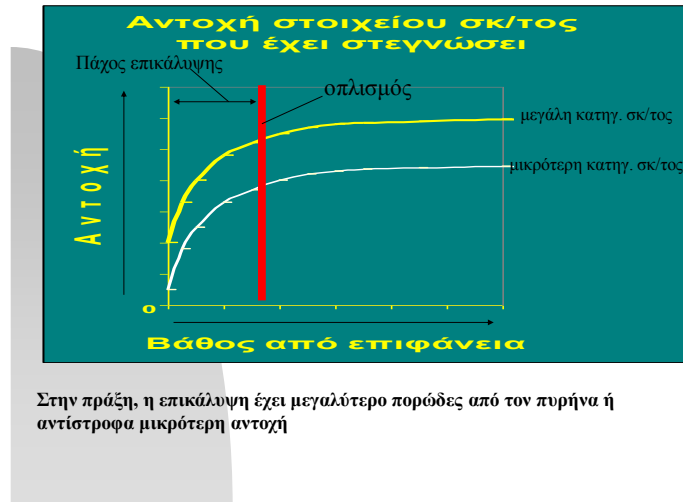
Τα αναφερόμενα στην αντίστοιχη παράγραφο, ισχύουν με την βασική προϋπόθεση της ύπαρξης των συστατικών για την αντίδραση, νερού και τσιμέντου. Όταν για οποιοδήποτε λόγο κατά την πρόοδο της ενυδάτωσης υπάρξει έλλειψη νερού, η πρόοδος της αντίδρασης διακόπτεται, οπότε σταματά και η αύξηση του όγκου των προϊόντων ενυδάτωσης. Σχηματικά, αυτό φαίνεται στο Σχήμα 26:



Σχήμα 26: Πορεία αντίδρασης ενυδάτωσης με βάση την παρουσία ή την έλλειψη νερού

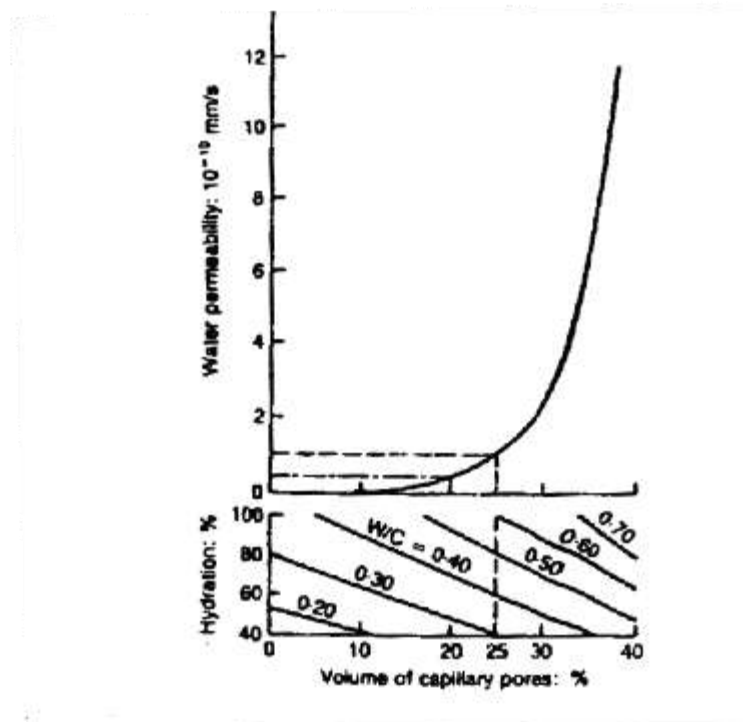
Ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, όταν η συντήρηση σταματήσει, το νερό που δεν έχει ακόμη αντιδράσει με το τσιμέντο αρχίζει να εξατμίζεται. Η εξατμηση είναι μεγάλη στην επιφάνεια και μειώνεται κατά το βάθος. Έτσι ενώ στον πυρήνα του σκυροδέματος η ενυδάτωση του τσιμέντου προχωρά, στις επιφανειακές στιβάδες του σκυροδέματος, η ενυδάτωση σταματά. Έτσι, το πορώδες του σκυροδέματος ή η αντοχή του σε σχέση με την

απόσταση από την επιφάνεια, για συγκεκριμένη αρχική κατηγορία αντοχής, μπορεί σχηματικά να απεικονιστεί κατά το **Σχήμα 27**:



**Σχήμα 27:** Αντοχή σκυροδέματος σε συνάρτηση με το βάθος από την επιφάνεια

Έτσι, η διαπερατότητα του σκυροδέματος κοντά στην επιφάνεια, όταν η συντήρηση δεν έχει διαρκέσει το απαραίτητο χρονικό διάστημα, είναι μεγάλη στην επιφάνεια και μειώνεται συναρτήσει του βάθους μέχρι το ελάχιστο που μπορεί να φτάσει, το οποίο εξαρτάται από τη συμβατική αντοχή του σκυροδέματος, κάτι που αποτυπώνεται διαγραμματικά στο **Σχήμα 28**.



**Σχήμα 28:** Επιρροή του λόγου  $N/T$  στη διαπερατότητα

Συμπερασματικά, για καλή προστασία του οπλισμού απαιτούνται:

1. Μεγάλο πάχος επικάλυψης
2. Επικάλυψη με μειωμένη διαπερατότητα (μεγάλη αντοχή, πολύ τσιμέντο, χαμηλό N/T)
3. Καλή συντήρηση εξωτερικής επιφάνειας, ώστε να αξιοποιηθεί η μειωμένη διαπερατότητα που έχει σχεδιαστεί
4. Καλή συμπίκνωση, ιδίως της εξωτερικής επιφάνειας (νέες τεχνολογίες, αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα)

Σκοπός της συμπίκνωσης είναι να αφαιρέσει τα κενά αέρος, τα οποία δημιουργούνται κατά την τοποθέτηση του νωπού σκυροδέματος. Παραμονή κενών στο σκυρόδεμα αυτόματα σημαίνει μείωση της αντοχής του.

Τα πιο κάτω στοιχεία είναι χαρακτηριστικά της κακής συμπίκνωσης:

- Χαμηλή αντοχή σκυροδέματος
- Κακή ένωση οπλισμού και σκυροδέματος
- Κίνδυνος οξείδωσης του οπλισμού

Το σχήμα των σωματιδίων και η υφή της επιφάνειας επηρεάζουν επίσης τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος περισσότερο από τις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ανώμαλα, γωνιακά και επιμήκη αδρανή απαιτούν περισσότερο νερό για την παραγωγή σκυροδέματος από τα λεία, στρογγυλεμένα και συμπαγή. Κατά συνέπεια, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο πρέπει επίσης να αυξηθεί για να διατηρηθεί η αναλογία νερού - τσιμέντου. Γενικά, τα επίπεδα και επιμήκη σωματίδια πρέπει να αποφεύγονται ή να περιορίζονται σε περίπου 15 τοις εκατό κατά βάρος των συνολικών. Το ποσοστό των κενών μεταξύ των σωματιδίων επηρεάζει την ποσότητα της τσιμεντόπαστας που απαιτείται για τη μίξη. Τα γωνιακά αδρανή αυξάνουν την περιεκτικότητα σε κενά. Μεγαλύτερα μεγέθη καλά διαβαθμισμένων αδρανών μειώνουν το ποσοστό των κενών. Η απορροφητικότητα και η επιφανειακή υγρασία των αδρανών μετρώνται κατά την επιλογή τους επειδή η εσωτερική δομή των αδρανών αποτελείται από στερεό υλικό και κενά που μπορεί να περιέχουν νερό ή όχι. Η ποσότητα του νερού στο μίγμα του σκυροδέματος πρέπει να ρυθμιστεί ώστε να συμπεριληφθούν σε αυτή οι συνθήκες υγρασίας των αδρανών. Σκληρότερα αδρανή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνθήκες έντονης τριβής με στόχο την ελαχιστοποίηση της φθοράς.

### 1.3.5 Μηχανισμοί φθοράς

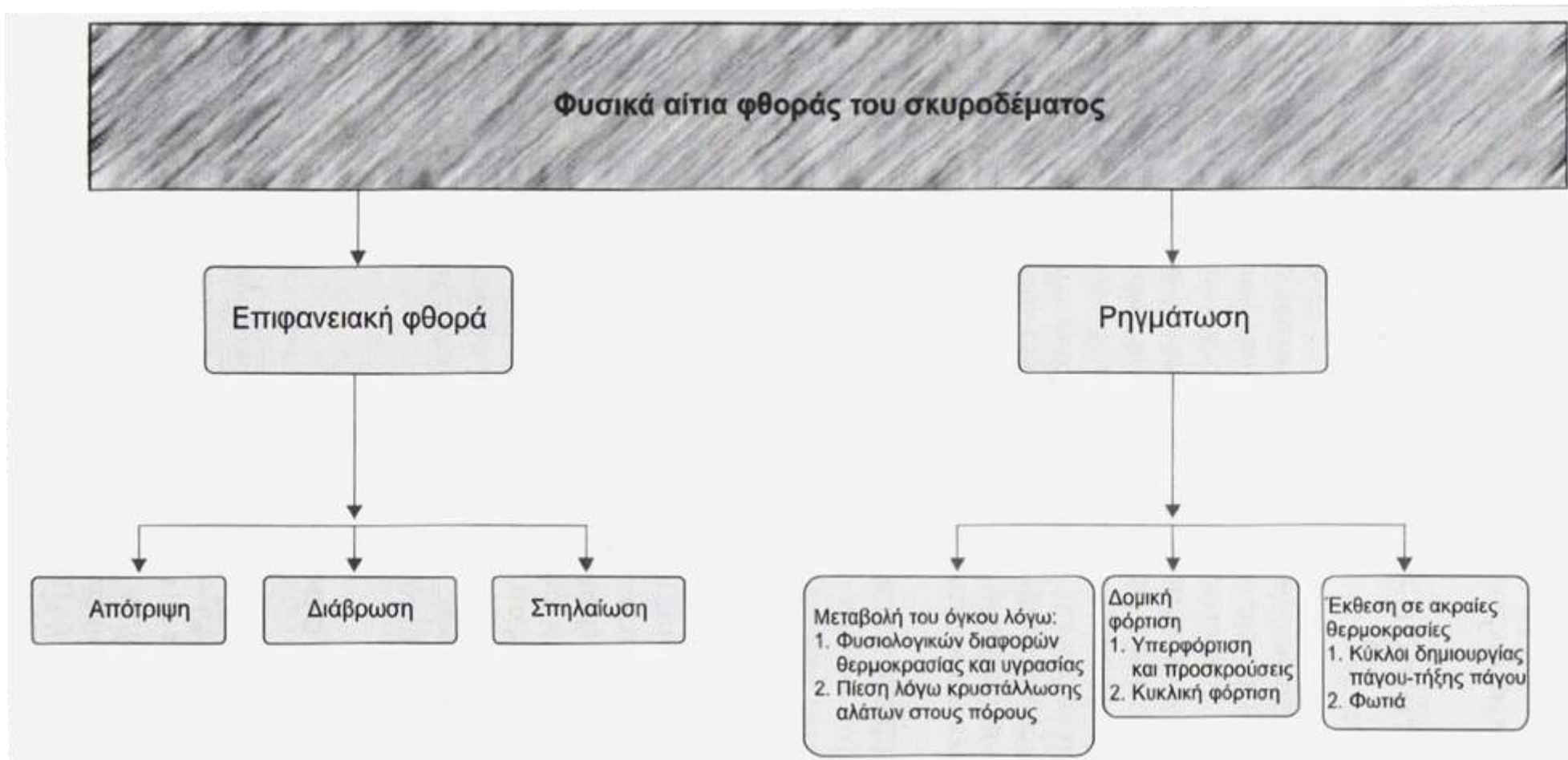
Οι Mehta και Gerwick ομαδοποίησαν τις φυσικές αιτίες φθοράς του σκυροδέματος σε δύο κατηγορίες: (α) επιφανειακή φθορά ή απώλεια μάζας λόγω απότριψης, διάβρωσης και

σπηλαίωσης· (β) ρηγμάτωση λόγω κανονικών μεταβολών θερμοκρασίας και υγρασίας, κρυστάλλωσης των αλάτων στους πόρους, δομικής φόρτισης και έκθεσης σε ακραίες θερμοκρασίες όπως σε παγετό ή πυρκαγιά. Ομοίως, ομαδοποιήθηκαν και οι χημικές αιτίες της φθοράς σε τέσσερις κατηγορίες: (1) υδρόλυση των συστατικών της τσιμεντόπαστας από μαλακό νερό· (2) αντιδράσεις ανταλλαγής κατιόντων μεταξύ των επιβλαβών ρευστών και της τσιμεντόπαστας· (3) αντιδράσεις που οδηγούν στο σχηματισμό διασταλτικών προϊόντων, όπως στην περίπτωση της θεικής προσβολής, της αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης, και της διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού στο σκυρόδεμα και (4) βιολογική επίδραση από τη δράση φυτικών ή ζωικών μικροοργανισμών.

Πρέπει να υπογραμμιστεί ότι η διάκριση μεταξύ των φυσικών και χημικών αιτιών της διάβρωσης είναι καθαρά αυθαίρετη στην πράξη, τα δύο επιβάλλονται συχνά το ένα στο άλλο. Παραδείγματος χάρη, η απώλεια μάζας από την επιφανειακή φθορά και η ρηγμάτωση αυξάνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, η οποία γίνεται έπειτα η πρωταρχική αιτία μιας ή περισσότερων διαδικασιών χημικής φθοράς. Διαγραμματικά οι χημικές αιτίες φθοράς παρουσιάζονται στο **Σχήμα 30**. Ομοίως, τα καταστρεπτικά αποτελέσματα των χημικών φαινομένων είναι φυσικά· για παράδειγμα, η έκπλυση των συστατικών της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας από μαλακό νερό ή από όξινα ρευστά αυξάνει το πορώδες του σκυροδέματος, καθιστώντας έτσι το υλικό πιο ευαίσθητο στην απότριψη και τη διάβρωση. Με τον όρο μαλακό νερό νοείται το νερό της βροχής το οποίο περιέχει ελάχιστα ιόντα ασβεστίου που σε επαφή με το σκυρόδεμα διαλύει τα προϊόντα ασβεστίου που υπάρχουν στον τσιμεντοπολτό προκαλώντας τη χαλάρωση του ιστού του σκυροδέματος. Συγκεντρωτικά, οι φυσικές αιτίες φθοράς παρουσιάζονται στο **Σχήμα 29**.



### 1.3.5.1 Φυσικά αίτια φθοράς του σκυροδέματος



Σχήμα 29: Φυσικά αίτια φθοράς σκυροδέματος

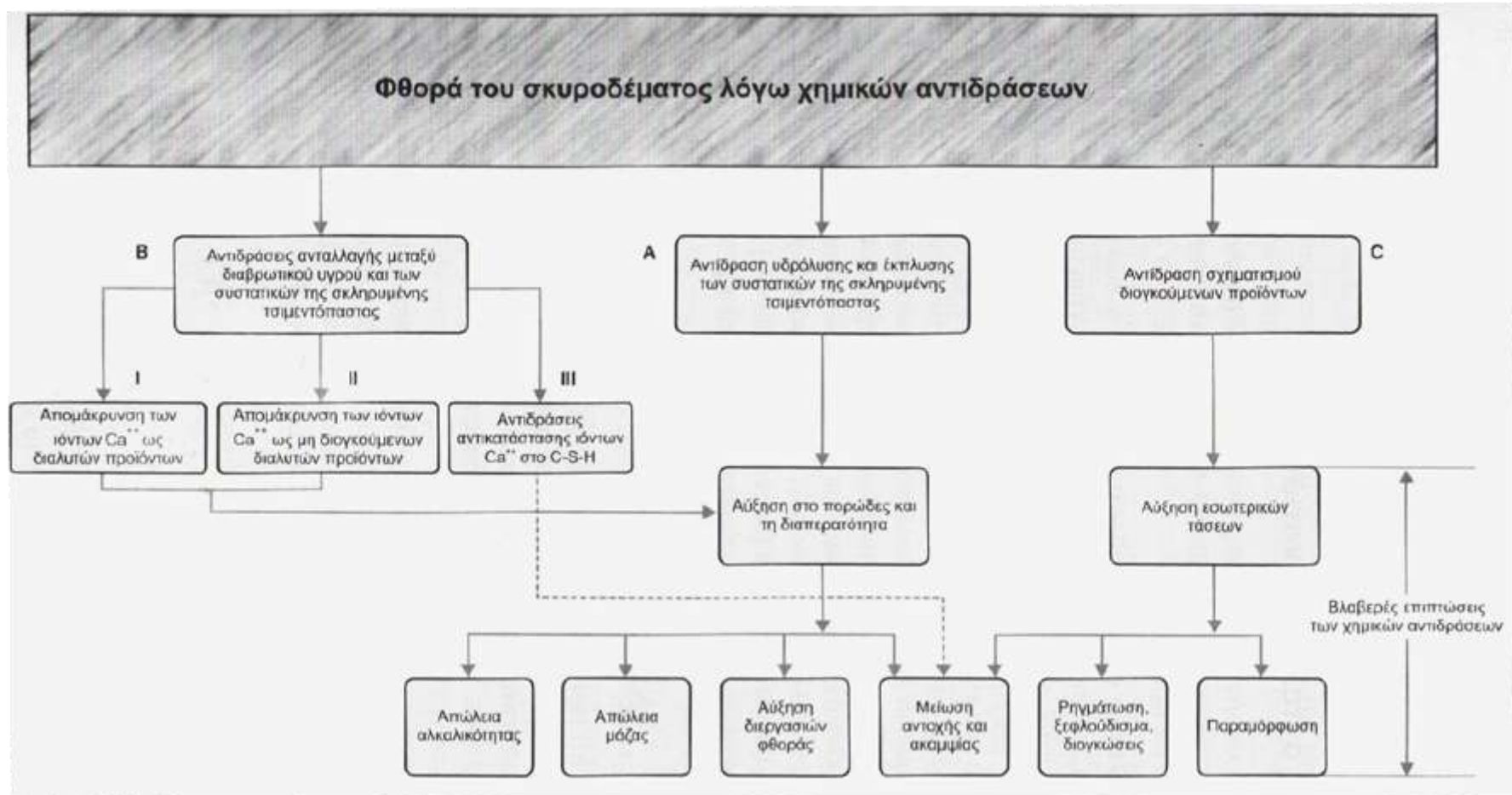
Η προοδευτική απώλεια μάζας από μια επιφάνεια σκυροδέματος μπορεί να εμφανιστεί λόγω απότριψης, διάβρωσης και σπηλαιώσης. Ο όρος **απότριψη (abrasion)** αναφέρεται γενικά στην ξηρά τριβή, όπως στην περίπτωση της φθοράς στα οδοστρώματα και τα βιομηχανικά δάπεδα από την οδική κυκλοφορία. Ο όρος **διάβρωση (erosion)** χρησιμοποιείται κανονικά για να περιγράψει τη φθορά από την αποτριπτική και διαβρωτική δράση των ρευστών που περιέχουν στερεά μόρια σε αιώρηση. Η διάβρωση πραγματοποιείται σε υδραυλικές κατασκευές, για παράδειγμα επενδύσεις καναλιών, υπερχειλιστές, και σωλήνες από σκυρόδεμα για τη μεταφορά νερού ή λυμάτων. Μια άλλη περίπτωση βλάβης στις υδραυλικές κατασκευές είναι από τη **σπηλαιώση (cavitation)**, η οποία σχετίζεται με την απώλεια μάζας από το σχηματισμό φυσαλίδων και της επακόλουθης κατάρρευσής τους λόγω της ξαφνικής αλλαγής κατεύθυνσης σε ένα ταχέως κινούμενο νερό.

Τα αίτια της ρηγμάτωσης επίσης ποικίλουν. Η **κρυστάλλωση των αλάτων** στους πόρους από τα υπερκορεσμένα διαλύματά τους αναπτύσσουν μεγάλες πιέσεις που έχουν ως αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση και το ξεφλούδισμα σε βράχους και πέτρινα μνημεία. Υπό ορισμένες συνθήκες περιβάλλοντος, παραδείγματος χάρη, όταν μία πλευρά ενός τοίχου αντιστήριξης ή μιας πλάκας ενός διαπερατού στερεού είναι σε επαφή με ένα διάλυμα αλάτων και οι άλλες πλευρές υπόκεινται σε απώλεια υγρασίας από εξάτμιση, το υλικό μπορεί να φθαρεί από τις τάσεις που προκαλούνται από την κρυστάλλωση των αλάτων μέσα στους πόρους. Όταν ο ρυθμός της εξάτμισης είναι χαμηλότερος από το ρυθμό τροφοδότησης νερού στο εσωτερικό της τοιχοποιίας, η κρυστάλλωση των αλάτων πραγματοποιείται στην εξωτερική επιφάνεια, χωρίς να προκαλεί οποιαδήποτε βλάβη. Μόνο όταν ο ρυθμός μετακίνησης του διαλύματος αλάτων μέσω των διασυνδεδεμένων πόρων του υλικού είναι πιο αργός από το ρυθμό αναπλήρωσης, η ζώνη ξήρανσης εμφανίζεται ουσιαστικά κάτω από την επιφάνεια. Η κρυστάλλωση των αλάτων κάτω από τέτοιες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε διαστολή ικανή να προκαλέσει ξεφλούδισμα ή επιφανειακό θρυμματισμό (spalling).

Η αποσάθρωση λόγω **παγετού** οφείλεται στην εναλλαγή κύκλων ψύξης-απόψυξης του σκυροδέματος με παρουσία υγρασίας ή νερού, το οποίο κατά τη φάση της ψύξης λόγω της μετατροπής του σε πάγο διογκώνεται και αποσαθρώνει το σκυρόδεμα που περικλείει πόρους ή ρωγμές γεμάτες με νερό. Η ικανότητα του σκυροδέματος να υποστεί τη δράση του παγετού χωρίς φθορά εξαρτάται κυρίως από τη ποιότητά του. Το φαινόμενο στη χώρα μας λόγω ήπιου κλίματος, περιορίζεται σε λίγες περιοχές.

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος έναντι **πυρκαγιάς** εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι σχετίζονται με την ποιότητα του τσιμεντοπολτού και των αδρανών που αποσυντίθενται σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Δύο μηχανισμοί έχουν προταθεί από τον Bazant για να εξηγήσουν το εκρηκτικό θερμικό ξεφλούδισμα: (α) η ανάπτυξη υψηλής πίεσης ατμών στους πόρους που προκαλείται από τον υπερκορεσμό στο μέτωπο θέρμανσης και (β) η διάδοση της ψαθυρής θραύσης. Η δημιουργία μιας υψηλής πίεσης ατμών στους πόρους φαίνεται να είναι σημαντική στην πρόκληση εκρηκτικού ξεφλούδίσματος δεδομένου ότι αυτός ο μηχανισμός αστοχίας δεν έχει παρατηρηθεί στο ξηρό σκυρόδεμα. Εντούτοις, καθώς οι ρωγμές ανοίγουν, ένας μεγαλύτερος όγκος νερού διατίθεται, προκαλώντας τη μείωση της πίεσης ατμών στους πόρους. Η ενέργεια για τη διάδοση της ρωγμής μπορεί να παρασχεθεί από την ενέργεια παραμόρφωσης που παράγεται από τις θερμικές τάσεις. Το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής είναι πιο ψαθυρό από το συμβατικό σκυρόδεμα και κατά συνέπεια είναι πιο ευαίσθητο στην ψαθυρή ανάπτυξη ρωγμών και συνεπώς, στο εκρηκτικό ξεφλούδισμα όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

### 1.3.5.2 Χημικά αίτια φθοράς του σκυροδέματος



Σχήμα 30: Χημικά αίτια φθοράς σκυροδέματος

Το νερό από το έδαφος, τις λίμνες και τα ποτάμια περιέχει μικρές ποσότητες χλωριόντων, θεικών αλάτων και διττανθρακικών αλάτων του ασβεστίου και του μαγνησίου. Αυτά τα αποκαλούμενα σκληρά νερά γενικά δεν προσβάλλουν τα συστατικά της τσιμεντόπαστας Portland. Το καθαρό νερό από τη συμπύκνωση της ομίχλης ή των υδρατμών και το μαλακό νερό από τη βροχή ή από την πήξη του χιονιού και του πάγου περιέχουν ελάχιστα ή καθόλου ιόντα ασβεστίου. Όταν αυτά τα νερά έρχονται σε επαφή με την τσιμεντόπαστα Portland τείνουν να **υδρολύσουν** ή να διαλύσουν τα προϊόντα που περιέχουν ασβέστιο. Εάν το διάλυμα επαφής έρθει σε χημική ισορροπία, η περεταίρω υδρόλυση της τσιμεντόπαστας σταματά. Εντούτοις, στην περίπτωση του τρεχούμενου νερού ή της διήθησης υπό πίεση, η διάλυση του διαλύματος επαφής θα πραγματοποιηθεί, παρέχοντας κατά συνέπεια τη συνθήκη για συνεχή υδρόλυση. Θεωρητικά, η υδρόλυση της τσιμεντόπαστας συνεχίζεται έως ότου το μεγαλύτερο μέρος του υδροξειδίου του ασβεστίου έχει εκπλυθεί· αυτό εκθέτει τα τσιμεντοειδή συστατικά της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας σε χημική αποσύνθεση. Τελικά, η διαδικασία αφήνει πίσω τζελς πυριτίου και αλουμίνας με ελάχιστη ή καμία αντοχή. Σύμφωνα με τον Terzaghi, σε ένα σκυρόδεμα που χάθηκε περίπου το ένα τέταρτο της αρχικής περιεκτικότητάς του σε ασβέστιο, αναμένεται μείωση, της αρχικής αντοχής του στο μισό.

Το σκυρόδεμα παρέχει αλκαλικό περιβάλλον. Τα μέταλλα ως γνωστόν διαβρώνονται σε όξινο περιβάλλον, ενώ προστατεύονται από τη διάβρωση σε αλκαλικό περιβάλλον. Λέγοντας πως το σκυρόδεμα είναι αλκαλικό εννοούμε πως περιέχονται στους μικροσκοπικούς του πόρους οξειδία ασβεστίου, νατρίου και καλίου σε υψηλές συγκεντρώσεις. Οι ουσίες αυτές αποτελούν προϊόντα της ενυδάτωσης των συστατικών του τσιμέντου. Αυτά τα οξειδία σχηματίζουν υδροξειδία με την προσθήκη νερού, δημιουργώντας έτσι εξαιρετικά αλκαλικές συνθήκες με τιμές pH 12,1-13,9. Αποτέλεσμα της υψηλής τιμής του pH είναι η συντήρηση μιας παθητικής στρώσης στην επιφάνεια του χάλυβα. Με τον όρο παθητική στρώση εννοούμε ένα πυκνό μη διαπερατό στρώμα οξειδίων, το οποίο εάν δημιουργηθεί επαρκώς και διατηρηθεί επαρκώς αποτρέπει την περεταίρω διάβρωση του χάλυβα. Η στρώση που σχηματίζεται πάνω στο χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα είναι κατά ένα μέρος οξείδιο/υδροξείδιο του σιδήρου και κατά ένα άλλο μέρος ανόργανη ύλη από το σκυρόδεμα. Δύο διαδικασίες μπορούν να καταστρέψουν το σκυρόδεμα: η ενανθράκωση και η ύπαρξη χλωριόντων. Τότε λέμε ότι ο οπλισμός αποπαθητικοποιείται και η διάβρωση ξεκινά.

Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9 οφείλεται στη χημική επίδραση του  $\text{Ca(OH)}_2$  του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου

τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακος ( $\text{CO}_2$ ) της ατμόσφαιρας, που σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη μετατροπή του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) σύμφωνα με την αντίδραση:



Η όλη διαδικασία ονομάζεται **ενανθράκωση** του σκυροδέματος. Το βάθος ενανθράκωσης του σκυροδέματος είναι προσεγγιστικά ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου ζωής της κατασκευής. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση είναι οι συνθήκες περιβάλλοντος, η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης και το είδος τσιμέντου.



**Σχήμα 31:** Δοκίμιο σκυροδέματος το οποίο έχει ψεκάσθει με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Το τμήμα στο οποίο δεν παρουσιάζεται αλλαγή χρώματος (δεξιά) είναι ενανθρακωμένο (βάθος ενανθρακώσεως περίπου 3cm) Το αριστερά τμήματα (χρώματος ροζ - βυσσινί) δεν έχει ενανθρακωθεί.

Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από **ιόντα χλωρίου  $\text{Cl}^-$**  αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβεί το 0,4% έως 0,6% του βάρους του τσιμέντου. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος είτε από το εξωτερικό περιβάλλον που περικλείει το σκυρόδεμα. Τα χλωριόντα που μπορεί να διατηρήσουν το προστατευτικό στρώμα προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, εάν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλάσσιο νερό για το σκυρόδεμα, ή από πρόσθετα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριόντα άλατα. Χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον είναι πολύ συνηθισμένα σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπως και

σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή όπου ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριόντα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά. Στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, η βασική πηγή χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνουν στους δρόμους για την τήξη του χιονιού. Χλωριούχα άλατα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται το χειμώνα επειδή το σκυρόδεμα πήζει αργά ή καθόλου. Η ενανθράκωση και η διεϊσδυση των χλωριόντων δεν είναι ανεξάρτητες διαδικασίες, καθώς η πρώτη επιταχύνει σημαντικά τη δράση των χλωριόντων. Το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  του τσιμεντοπολτού αντιδρά με τα χλωριόντα και τα δεσμεύει, περιορίζοντας την ποσότητα αυτών που διαχέονται προς τον οπλισμό κάτω από 0,4% έως 0,6% που απαιτείται για τη διάτρηση του προστατευτικού οξειδίου. Με την αντίδραση όμως του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  κατά την ενανθράκωση τα δεσμευμένα χλωριόντα απελευθερώνονται προσβάλλοντας έτσι τον χάλυβα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από τα χλωριόντα είναι η ποιότητα και το πάχος της επικάλυψης, η περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο-πρόσθετα, το είδος και η συγκέντρωση των χλωριόντων και το περιβάλλον.



*Σχήμα 32: Γέφυρα πεζών στο δεύτερο όροφο νοσοκομείου*



*Σχήμα 33: Διάβρωση οπλισμών από χλωριόντα εκχιονιστικών αλάτων*

Η **διάβρωση** του οπλισμού σε γενικές γραμμές οφείλεται στο  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας και στην ύπαρξη χλωριόντων. Το  $\text{CO}_2$  αλλάζει το pH του σκυροδέματος που περιβάλλει τον οπλισμό, με αποτέλεσμα να καταστρέφεται η προστατευτική στρώση που περιβάλλει τον οπλισμό. Τα χλωριόντα διαβρώνουν τον οπλισμό με ηλεκτροχημική δράση. Οι επιβλαβείς παράγοντες  $\text{CO}_2$  και χλωριόντα εισέρχονται στη μάζα του σκυροδέματος από τα κενά που υπάρχουν σε αυτήν, τα οποία οφείλονται σε ρηγματώσεις και μικρορηγματώσεις, καθώς και στο πορώδες

του σκυροδέματος. Τα ηλεκτροχημικά δυναμικά που σχηματίζουν τα γαλβανικά στοιχεία της διάβρωσης μπορούν να παραχθούν με δύο τρόπους:

1. Γαλβανικά στοιχεία μπορεί να σχηματιστούν όταν δύο ανόμοια μέταλλα ενσωματώνονται στο σκυρόδεμα, όπως ράβδοι χάλυβα και σωλήνες αλουμινίου, ή όταν υπάρχουν σημαντικές παραλλαγές στα χαρακτηριστικά επιφάνειας του χάλυβα.
2. Κοντά στις ράβδους οπλισμένου χάλυβα μπορεί να σχηματιστούν γαλβανικά στοιχεία λόγω των τοπικών διαφορών στη συγκέντρωση των διαλυμένων ιόντων, όπως τα αλκάλια και τα χλωριόντα.

Κατά συνέπεια, ένα από τα δύο μέταλλα (ή μερικά τμήματα του μετάλλου όταν υπάρχει μόνο ένας τύπος μετάλλου) γίνεται ανοδικό και το άλλο καθοδικό.

Η ταχύτητα διείσδυσης του CO<sub>2</sub>, εκτός από το μέγεθος του πορώδους του σκυροδέματος, εξαρτάται από τη συγκέντρωσή του, τη θερμοκρασία και το ύψος της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας. Η μέγιστη διείσδυση, επιτυγχάνεται με σχετική υγρασία στην περιοχή 50% - 70% περίπου. Η ταχύτητα διείσδυσης-διάχυσης των χλωριόντων, εκτός από το μέγεθος του πορώδους, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τη χημική σύσταση του τσιμέντου. Τσιμέντα που περιέχουν ποζολάνες και σκωρία υψικαμίνων επιβραδύνουν την ταχύτητα διείσδυσης των χλωριόντων σε σχέση με τα αμιγή τσιμέντα. Γενικά η προσβολή των χλωριόντων είναι εντονότερη από την προσβολή από CO<sub>2</sub>. Η διάβρωση του χάλυβα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διατομής της ράβδου κατά την ποσότητα του χάλυβα που μετατρέπεται σε οξείδιο. Η διάβρωση μειώνει επίσης και μάλιστα δυσανάλογα την ολκιμότητα του χάλυβα, γεγονός με πολύ δυσμενείς επιπτώσεις στην πλάστιμη συμπεριφορά του μέλους. Επιπλέον, επειδή η σκουριά έχει δύο έως έξι φορές μεγαλύτερο όγκο από αυτόν του σιδήρου από τον οποίο έχει παραχθεί, προκαλεί ρηγμάτωση αποτινάσσοντας την επικάλυψη, μειώνοντας ή και μηδενίζοντας τη συνάφεια και εκθέτοντας ακόμη περισσότερο τη ράβδο σε διάβρωση. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η μείωση της αντοχής.

Η **αποσάθρωση λόγω αλκαλιοπυριτικής αντίδρασης** οφείλεται σε αντίδραση των αλκαλίων του τσιμέντου με συγκεκριμένο είδος πυριτικών αδρανών που περιέχουν συγκεκριμένο είδος άμορφου SiO<sub>2</sub>. Η αντίδραση αυτή προκαλεί διόγκωση, στην οποία οφείλεται η αποσάθρωση του σκυροδέματος. Το φαινόμενο έχει μεγάλες διαστάσεις στη Βόρεια Ευρώπη και Αμερική, όπου χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο πυριτικά αδρανή. Ο κίνδυνος για τη χώρα μας είναι πολύ μειωμένος διότι κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούμε ασβεστολιθικά αδρανή και επιπλέον, όπου χρησιμοποιούνται πυριτικά αδρανή, αυτά δεν είναι



ενεργά. Τρόποι αντιμετώπισης είναι η χρησιμοποίηση τσιμεντών με χαμηλά αλκάλια «low alkali» και ο εμπειριστατωμένος έλεγχος της πηγής των αδρανών πριν τη χρήση.

Με βάση την **ανταλλαγή κατιόντων**, οι τρεις τύποι επιβλαβών αντιδράσεων που μπορούν να εμφανιστούν μεταξύ των διαβρωτικών χημικών διαλυμάτων και των συστατικών της τσιμεντόπαστας Portland είναι ως εξής:

### **1. Σχηματισμός των διαλυτών αλάτων ασβεστίου**

Τα όξινα διαλύματα που περιέχουν ανιόντα, τα οποία σχηματίζουν διαλυτά άλατα ασβεστίου, συναντώνται συχνά σε βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η αντίδραση ανταλλαγής κατιόντων μεταξύ των όξινων διαλυμάτων και των συστατικών της τσιμεντόπαστας Portland δίνει αφορμή στα διαλυτά άλατα του ασβεστίου να απομακρύνονται με έκπλυση. Μέσω της αντίδρασης ανταλλαγής κατιόντων, τα διαλύματα του χλωριδίου του αμμωνίου και του θεικού άλατος αμμωνίου, τα οποία βρίσκονται στη βιομηχανία λιπασμάτων και τη γεωργία, είναι ικανά να μετασχηματίσουν τα συστατικά της τσιμεντόπαστας σε ιδιαίτερα διαλυτά προϊόντα, για παράδειγμα:



Πρέπει να σημειωθεί ότι αφού και τα δύο προϊόντα της αντίδρασης είναι διαλυτά, οι επιδράσεις της προσβολής είναι σημαντικότερες από αυτές ενός διαλύματος με αδιάλυτα προϊόντα, όπου ο σχηματισμός τους δεν θα προκαλούσε αύξηση του πορώδους και της διαπερατότητας του συστήματος.

### **2. Σχηματισμός των αδιάλυτων και μη διαστελλόμενων αλάτων ασβεστίου**

Ορισμένα ανιόντα όταν είναι παρόντα στο διαβρωτικό νερό μπορεί να αντιδράσουν με την τσιμεντόπαστα για να σχηματίσουν αδιάλυτα άλατα του ασβεστίου· ο σχηματισμός τους μπορεί να μην προκαλέσει βλάβη στο σκυρόδεμα εκτός κι αν το προϊόν της αντίδρασης είναι διασταλτικό.

### **3. Χημική προσβολή από διαλύματα που περιέχουν άλατα μαγνησίου**

Τα διαλύματα του μαγνησίου αντιδρούν εύκολα με το υδροξείδιο του ασβεστίου που υπάρχει στην τσιμεντόπαστα Portland για να δημιουργήσουν διαλυτά άλατα του ασβεστίου. Το διάλυμα  $\text{MgSO}_4$  είναι πολύ διαβρωτικό λόγω της θεικής προσβολής των ένυδρων αργιλικών ενώσεων που υπάρχουν στην τσιμεντόπαστα Portland. Ένα χαρακτηριστικό γνώρισμα της προσβολής της τσιμεντόπαστας Portland από ιόντα μαγνησίου είναι ότι η προσβολή τελικά επεκτείνεται στα ένυδρα πυριτικά άλατα του ασβεστίου που είναι το κύριο συνδετικό συστατικό του τσιμεντού. Κατά την παρατεταμένη επαφή με ένα διάλυμα μαγνησίου, το C-S-

Η στην ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα Portland χάνει βαθμιαία τα ιόντα ασβεστίου, τα οποία μερικώς ή εντελώς, αντικαθίστανται από τα ιόντα μαγνησίου. Το τελικό προϊόν αυτής της αντίδρασης αντικατάστασης είναι μία ένυδρη ένωση πυριτικών αλάτων μαγνησίου, ο σχηματισμός της οποίας συνδέεται με την απώλεια της συνδετικής ικανότητας του τσιμέντου.

## **1.4. Επίδραση θεικών**

### **1.4.1 Μηχανισμοί φθοράς**

Η κλασική μορφή της επίθεσης θεικών αλάτων αποτελεί ένα πρόβλημα που, συνήθως σχετίζεται με υπόγεια τμήματα κατασκευών, τα οποία έρχονται σε επαφή με εδάφη ή υπόγεια νερά πλούσια σε συγκεντρώσεις θεικών αλάτων, κυρίως του νατρίου ή τμήματα κατασκευών τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή με το θαλασινό νερό. Άλλες πηγές θεικών που μπορεί να προκαλέσουν θεική προσβολή αποτελούν η οξείδωση των θειούχων μεταλλευμάτων σε πηλό δίπλα στο σκυρόδεμα – αυτό μπορεί να παράγει θεικό οξύ το οποίο αντιδρά με το σκυρόδεμα – και η βακτηριακή δράση σε υπονόμους, δηλαδή η αναερόβια βακτηριακή παραγωγή διοξειδίου του θείου το οποίο διαλύεται στο νερό και στη συνέχεια οξειδώνεται για να σχηματιστεί θεικό οξύ. Στην τοιχοποιία θειικά υπάρχουν σε τούβλα και μπορεί βαθμιαία να απελευθερώνονται επί μακρά χρονική περίοδο προκαλώντας θεική προσβολή του κονιάματος ειδικά όταν τα θειικά συμπυκνώνονται λόγω της κίνησης της υγρασίας. Η καταστροφή του σκυροδέματος επέρχεται ως συνδυασμός δύο διαφορετικών καταστροφικών μηχανισμών: της ρηγμάτωσης λόγω της διόγκωσης που προκαλείται κυρίως από το σχηματισμό του ετρινγκίτη και της διάρρηξης του ιστού των ένυδρων της τσιμεντόπαστας.

Όταν το σκυρόδεμα ρηγματώνεται, η διαπερατότητά του αυξάνεται και το διαβρωτικό νερό διεισδύει ευκολότερα στο εσωτερικό, επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία της φθοράς. Η θεική προσβολή μπορεί επίσης να λάβει τη μορφή μιας προοδευτικής μείωσης στην αντοχή και ταυτόχρονα απώλεια μάζας λόγω της έλλειψης συνεκτικότητας των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου. Τα ένυδρα του τριασβεστίου του αργιλίου και το υδροξείδιο του ασβεστίου αντιδρούν με τα θειικά άλατα και σχηματίζουν στερεά προϊόντα με όγκο μεγαλύτερο από αυτόν που καταλαμβάνουν. Ο ετρινγκίτης και η γύψος είναι τα κύρια προϊόντα των αντιδράσεων αυτών. Η επακόλουθη διόγκωση μπορεί να συνοδεύεται και από πτώση της θλιπτικής αντοχής, συνέπεια της διάδοσης των ρωγμών και της απώλειας συνοχής.

Στην περίπτωση που το σκυρόδεμα έρχεται σε επαφή με άλατα θεικού μαγνησίου ( $MgSO_4$ ) με τον ίδιο τρόπο που μπορεί να έρθει σε επαφή και με τα υπόλοιπα θειικά άλατα, αυτά αντιδρούν με το υδροξείδιο του ασβεστίου και σχηματίζουν υδροξείδιο του μαγνησίου

(μπρουσίτη). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση του pH σε τιμή ίση με 10,5 που είναι σαφώς χαμηλότερη από την τιμή του 12,4 σε κορεσμένο διάλυμα  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Το  $\text{CaO}$  που απελευθερώνεται προκειμένου να ισοσταθμιστεί η τιμή του pH αντιδρά με το υπάρχον άλας του θεικού μαγνησίου ελευθερώνοντας περισσότερο  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Τα ένυδρα του θεικού μαγνησίου που τελικά σχηματίζονται δεν έχουν υδραυλικές ιδιότητες και αποτελούν ένα ινώδες άμορφο υλικό χωρίς συνδετικές ιδιότητες.

Η θεική προσβολή είναι δυνατόν να εμφανιστεί σε δύο μορφές ανάλογα με:

- τη χημική μορφή των θεικών και
- το ατμοσφαιρικό περιβάλλον στο οποίο το σκυρόδεμα εκτίθεται και μπορεί να είναι εσωτερική ή εξωτερική.

Η **εξωτερική θεική προσβολή**, είναι η πιο συχνή και προέρχεται από τη διείσδυση των θεικών σε διάλυμα, όπως για παράδειγμα στα υπόγεια νερά, στο εξωτερικό σκυρόδεμα, σε έδαφος που περιέχει υπερβολικές ποσότητες γύψου ή άλλων θεικών και σε βιομηχανικά λύματα. Μία εμφανής ζώνη αντίδρασης απαντάται συχνά σε λεία τμήματα: μπροστά από αυτή τη ζώνη, το σκυρόδεμα είναι φυσιολογικό ή σχεδόν φυσιολογικό. Πίσω από τη ζώνη αντίδρασης, η σύνθεση και η μικροδομή του σκυροδέματος έχει αλλάξει. Οι αλλαγές ποικίλουν ανάλογα τον τύπο ή τη σοβαρότητα, αλλά συνήθως περιλαμβάνουν:

- Εκτεταμένες ρωγμές
- Διαστολή
- Απώλεια του δεσμού μεταξύ τσιμεντόπαστας και αδρανών

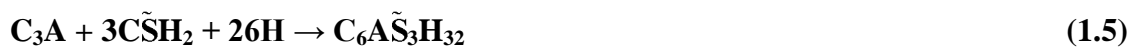
Η **εσωτερική θεική προσβολή** είναι πιο σπάνια και συμβαίνει όταν μια πηγή θεικών αναμιγνύεται στο σκυρόδεμα. Παραδείγματα αποτελούν η χρήση πλούσιων σε θεικά αδρανών, η περίσσεια προστιθέμενης γύψου στο τσιμέντο ή η μόλυνση. Οι αυστηρές διαδικασίες ελέγχου ποιότητας των υλικών του σκυροδέματος όπως τσιμέντα, ιπτάμενη τέφρα, αδρανή και πρόσθετα, γενικά αποτρέπουν την εσωτερική θεική προσβολή. Ωστόσο, μπορούν να αποτελέσουν σημαντικές πηγές θεικών:

- τα τσιμέντα Portland πλούσια σε θεικά,
- η παρουσία φυσικής γύψου στα αδρανή και
- τα πρόσθετα

Κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου, οι αργλικές φάσεις του κλίνκερ ( $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ) και οι θεικές φάσεις (π.χ. η γύψος που είναι ιδιαίτερα διαλυτή ένωση), μετά την προσθήκη νερού, δίστανται και αντιδρούν πολύ γρήγορα μεταξύ τους και με μεγάλη έκλυση θερμότητας

σχηματίζοντας ενώσεις τύπου γέλης – gel, που είναι πρόδρομες ενώσεις σχηματισμού του ετρινγκίτη. Οι ενώσεις αυτής της μορφής παρεμποδίζουν την πρόσβαση του νερού στις απομένουσες αργλικές φάσεις, οπότε οι αντιδράσεις ενυδάτωσής τους επιβραδύνονται και η έκλυση θερμότητας μειώνεται, λόγω και του σχετικά μικρού επί τοις εκατό ποσοστού των αργλικών φάσεων στο τσιμέντο. Η συνάλεση γύψου – κλίνκερ (και τελικώς η παρουσία του στο τσιμέντο) έχει στόχο τον έλεγχο της ταχύτητας ενυδάτωσης των αργλικών φάσεων και την αποφυγή της ακαριαίας πήξης (flash set) της τσιμεντόπαστας. Οπότε, όταν η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε θεικές ενώσεις είναι χαμηλή (έλλειψη γύψου), αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ταχεία (σχεδόν ακαριαία) πήξη της τσιμεντοκοινίας, ενώ μεγάλη περιεκτικότητά τους προκαλεί την παραγωγή ιζήματος ή κακή πήξη (false set), η οποία όμως διορθώνεται με επιπλέον αναμόχλευση του μίγματος. Οι ενώσεις τύπου γέλης μετατρέπονται σε στερεή φάση βελονοειδούς μορφής (ετρινγκίτης) και συμβάλλουν ελάχιστα στην πρώιμη αντοχή.

Ο σκοπός της προσθήκης γύψου  $\text{CSH}_2$  στο κλίνκερ του τσιμέντου Portland είναι για να αποτραπεί το ενδεχόμενο της ταχύτατης αντίδρασης  $\text{C}_3\text{A}$  – νερού. Έτσι η παρουσία των θεικών ιόντων  $\tilde{\text{S}}=\text{SO}_3^-$  οδηγεί το  $\text{C}_3\text{A}$  στην παρακάτω αντίδραση ενυδάτωσης:



Όπου το  $\text{C}_6\text{A}\tilde{\text{S}}_3\text{H}_{32}$  είναι το ορυκτό ετρινγκίτης, ενώ η κατανάλωση όλης της γύψου πριν την ολοκλήρωση της ενυδάτωσης όλου του  $\text{C}_3\text{A}$ , προκαλεί την παρακάτω αντίδραση σχηματισμού του μονοθεικού άλατος  $\text{C}_4\text{A}\tilde{\text{SH}}_{12}$  από το υπόλοιπο  $\text{C}_3\text{A}$  και τον ετρινγκίτη:



Η πρωτογενής γύψος  $\tilde{\text{CSH}}_2$  του τσιμέντου δεσμεύει μέρος μόνο του  $\text{C}_3\text{A}$  προς ετρινγκίτη, ενώ η γύψος που παράγεται δευτερογενώς από τις άλλες θεικές ενώσεις και το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σχηματίζει με το υπόλοιπο  $\text{C}_3\text{A}$  πάλι ετρινγκίτη. Έτσι, η παρουσία περίσσειας θεικών οδηγεί τελικά στην κατανάλωση όλου του  $\text{C}_3\text{A}$  προς ετρινγκίτη, οπότε δεν περισσεύει καθόλου  $\text{C}_3\text{A}$  για την παραγωγή μονοθεικού άλατος (από ετρινγκίτη +  $\text{C}_3\text{A}$ ), περίπτωση που θα ήταν ευνοϊκή.

Τα προϊόντα των αντιδράσεων, γύψος και θειαργλικό ασβέστιο, έχουν αξιοσημείωτα μεγαλύτερο όγκο από αυτόν των συστατικών που αντικαθιστούν, και επομένως οι αντιδράσεις με θεικά οδηγούν σε διόγκωση και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος. Οδηγεί σε μείωση της αντοχής του σκυροδέματος, ενώ ακολουθεί διόγκωση, ρηγμάτωση και μετατροπή του υλικού σε πολτώδη και μη συνεκτική μάζα.

Ωστόσο, μεθύτερος σχηματισμός ετρινγκίτη DEF μπορεί να συμβεί και κάτω από ειδικές συνθήκες (υψηλές θερμοκρασίες) κατά τη φάση της σκλήρυνσης του σκυροδέματος. Αποτελεί ειδική περίπτωση χημικής προσβολής θεικών, όπου η πηγή των ιόντων θεικού άλατος τυγχάνει να είναι εσωτερική (μέσα στο σκυρόδεμα). Θα συμβεί όταν ο ετρινγκίτης που έχει σχηματιστεί κανονικά κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης αποσυντεθεί και επανασχηματιστεί στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Η βλάβη στο σκυρόδεμα συμβαίνει καθώς οι κρύσταλλοι ετρινγκίτη ασκούν μια διογκωτική δύναμη εντός του σκυροδέματος καθώς μεγαλώνουν. Η διόγκωση μπορεί να προκαλέσει ρωγμές και ο ετρινγκίτης ακολούθως, μπορεί να αποτεθεί σε αυτές χωρίς αυτό κατά ανάγκη να σημαίνει πως ήταν η αρχική αιτία που τις προκάλεσε. Καθώς η τσιμεντόπαστα διογκώνεται, τα αδρανή διατηρούν τον αρχικό τους όγκο. Οι ρωγμές σχηματίζονται γύρω από αυτές τις μη διογκούμενες νησίδες μέσα στην τσιμεντόπαστα και όσο μεγαλύτερα τα αδρανή τόσο μεγαλύτερα τα κενά που σχηματίζονται. Προϋποθέσεις γι' αυτή την περίπτωση εμφάνισης μεθύτερου σχηματισμού ετρινγκίτη αποτελούν:

- Η υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 65-70 °C), που μερικές φορές αναπτύσσεται και κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης
- Η ύπαρξη νερού
- Συνεπώς, εμφανίζεται είτε σε σκυροδέματα συντηρημένα σε ατμό, είτε σε σκυροδέματα που έχουν φτάσει σε υψηλή θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσης π.χ., ως αποτέλεσμα της εξώθερμης αντίδρασης ενυδάτωσης του τσιμέντου.

#### **1.4.2 Μέθοδοι ελέγχου**

Σύμφωνα με την BRE Digest, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θεική προσβολή είναι:

1. η ποσότητα και η φύση του θεικού άλατος που υπάρχει
2. η περιοδική εποχιακή εναλλαγή του επιπέδου της στάθμης του νερού
3. η ροή του υπόγειου νερού και το πορώδες του εδάφους
4. η μορφή της κατασκευής
5. η ποιότητα του σκυροδέματος

Εάν το επιβαρυνόμενο με θεικά νερό δε μπορεί να παρεμποδιστεί από το να φτάσει το σκυρόδεμα, η μόνη άμυνα ενάντια στη θεική προσβολή βρίσκεται πλέον στον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος. Η καλύτερη επιλογή προς την κατεύθυνση αυτή είναι σκυροδέματα μικρής διαπερατότητας. Αυτή εξασφαλίζεται με επαρκή πυκνότητα

σκυροδέματος, υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο, μικρό λόγο νερού προς τσιμέντο και καλή συμπύκνωση του σκυροδέματος.

Ο ρυθμός της προσβολής από θειικά αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας του διαλύματος, όμως από μια συγκέντρωση και κάτω, (περίπου 0,5% για το  $MgSO_4$  ή 1% για το  $Na_2SO_4$ ), ο ρυθμός της αύξησης της έντασης της προσβολής γίνεται μικρότερος. Η ταχύτητα προσβολής του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από τη συγκέντρωση των θεικών αλλά και από το ρυθμό αναπλήρωσης των θεικών που αντιδρούν με το τσιμέντο. Όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται από τη μια πλευρά σε πίεση νερού που φέρει θειικά, ο ρυθμός προσβολής είναι μεγαλύτερος. Ομοίως, εναλλαγή κορεσμού και ύγρανσης οδηγεί σε ταχεία φθορά. Το ευπρόσβλητο του σκυροδέματος από τα θειικά μπορεί να μειωθεί με τη χρήση τσιμέντου με χαμηλό  $C_3A$ .

Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε θειικά είναι δυνατόν να επιλεγεί ο κατάλληλος τύπος τσιμέντου. Στις περισσότερες περιπτώσεις αρκεί ένα τσιμέντο με  $C_3A < 5\%$ . Για μια μεγάλη όμως περιεκτικότητα θεικών που συνοδεύεται και με υψηλό περιεχόμενο  $C_3S$ , τα πειραματικά δεδομένα έχουν δείξει ότι συμπεριφέρονται καλύτερα τσιμέντα που κατά την ενυδάτωσή τους παρουσιάζουν λίγο ή καθόλου υδροξείδιο του ασβεστίου. Στην κατηγορία αυτή συμπεριλαμβάνονται τα αλουμινικά τσιμέντα, τα ποζολανικά τσιμέντα καθώς και τα τσιμέντα με σκωρία υψικαμίνου. Πρακτικά, έχει βρεθεί ότι το όριο του  $C_3A$  για το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς σε νερό των τσιμέντων με θειικά είναι το 7%.

Βελτίωση της αντοχής σε θειικά επιτυγχάνεται επίσης με την προσθήκη ή με τη μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με ποζολάνες. Ακόμη, σκλήρυνση σκυροδέματος με υψηλής πίεσης ατμό, βελτιώνει την αντοχή του στα θειικά. Αντιθέτως, προσθήκη χλωριούχου ασβεστίου στο μίγμα οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε θειικά για οποιοδήποτε τύπο τσιμέντου.

Η προσθήκη νιτρώδους ασβεστίου στον τσιμεντοπολτό μπορεί να οδηγήσει σε επιτάχυνση της καταστροφής της πάστας του τσιμέντου λόγω της προσβολής του από άλατα του θεικού νατρίου. Η επισήμανση αυτή είναι ιδιαίτερα ανησυχητική, δεδομένου ότι περιορίζει σημαντικά τη χρήση του συγκεκριμένου αναστολέα διάβρωσης σε περιπτώσεις κατασκευών που έρχονται σε επαφή με θειικά άλατα. Σε άλλες περιπτώσεις, όπου η κατασκευή δέχεται τη δράση θεικού μαγνησίου ή ακόμα χειρότερα την ταυτόχρονη δράση αλάτων χλωρίου και θεικών, ο τύπος τσιμέντου ανθεκτικός στα θειικά δεν αποτελεί την καλύτερη λύση και αυτό

γιατί το μικρότερο ποσοστό του  $C_3A$  δεν επιτρέπει τη δέσμευση μεγάλων ποσοτήτων χλωριόντων, αυξάνοντας έτσι τον κίνδυνο οξειδωσης του οπλισμού.

### **Δοκιμές πλήρους εμβάπτισης**

#### **1. US Bureau of Reclamation (USBR 4908)**

Η διαδικασία χρησιμοποιεί κυλίνδρους σκυροδέματος διαστάσεων  $150 \times 300$  mm και οι αλλαγές μήκους και μάζας παρακολουθούνται υπό τρεις συνθήκες έκθεσης σε θειικά:

Μέθοδος Α: εμβάπτιση σε διάλυμα  $14$  g/l  $Na_2SO_4$

Μέθοδος Β: εμβάπτιση σε διάλυμα  $68$  g/l  $Na_2SO_4$

Μέθοδος Γ: εναλλακτική εμβάπτιση σε διάλυμα  $14$  g/l  $Na_2SO_4$  για  $16$  ώρες και ξήρανση με αέρα για  $8$  ώρες στους  $54$  °C

Το πρόβλημα που εμφανίζεται είναι ότι ακόμη και οι επιθετικές μέθοδοι Β και Γ απαιτούν τουλάχιστον  $1 - 2$  χρόνια προτού να παρατηρηθούν σημαντικά αποτελέσματα.

#### **2. BRE, UK**

Η διαδικασία χρησιμοποιεί κύβους σκυροδέματος πλευράς  $100$  mm. Η φθορά του σκυροδέματος εκτιμάται σε σχέση με την απώλεια της μάζας και την αλλαγή στην εμφάνιση.

Το πρόβλημα εδώ είναι πως η αξιολόγηση είναι υποκειμενική.

#### **3. NTUA**

Κυλινδρικά δείγματα σκυροδέματος διαστάσεων  $150 \times 300$  mm (ή  $100 \times 200$  mm) κόβονται στη μέση. Μετά από συντήρηση  $40$  ημερών το πρώτο μισό βυθίζεται σε διάλυμα  $3\%$   $H_2SO_4$  και το δεύτερο μισό σε διάλυμα νερού κορεσμένο με  $Ca(OH)_2$ . Παρακολουθούνται η απώλεια στη μάζα, η αλλαγή στην εμφάνιση και η αντοχή σε θλίψη.

### **Δοκιμές μερικής εμβάπτισης**

#### **4. PCA**

Η διαδικασία χρησιμοποιεί δοκούς σκυροδέματος διαστάσεων  $152 \times 152 \times 762$  mm. Τοποθετούνται οριζοντίως σε βάθος  $75$  mm σε έδαφος πλούσιο σε θειικό νάτριο. Η συγκέντρωση  $SO_4^{2-}$  είναι  $65.000$  ppm κατά μάζα του εδάφους. Τα δείγματα υποβάλλονται σε δέκα κύκλους διαβροχής και ξήρανσης το χρόνο.

Το πρόβλημα της δοκιμής αυτής είναι η μακρά διάρκεια. Επιπροσθέτως, ο κύριος μηχανισμός φθοράς φάνηκε να είναι περισσότερο φυσικός παρά χημικός και αποδόθηκε σε κυκλική κρυστάλλωση των αλάτων θειικού νατρίου.

#### **5. ACI**

Η διαδικασία χρησιμοποιεί κυλίνδρους διαστάσεων  $150 \times 300$  mm. Αυτοί χυτεύονται με ένα κωνικό ένθετο, το οποίο οδήγησε σε ένα κεντρικό κενό διαμέτρου 35 mm που μειώθηκε σε 30 mm στο τελικό σημείο του το οποίο ήταν 60 mm πάνω από τη βάση του κυλίνδρου. Το κεντρικό κενό είναι σχεδόν γεμάτο με αποσταγμένο νερό (π.χ. υδροστατική πίεση για την επιτάχυνση της διείδυσης του διαλύματος θεικού), και ο κύλινδρος βυθίζεται στο ίδιο επίπεδο σε ένα συμπυκνωμένο διάλυμα θεικού νατρίου ( $54 \text{ g/l SO}_4^{-2}$ ). Η φθορά του σκυροδέματος παρακολουθείται μέσω της απώλειας βάρους.

*Σημείωση: Σκυρόδεμα τύπου CEM I παρουσίασε σημαντική επιδείνωση μέσα σε λίγες εβδομάδες*

## 6. Ecoserve

Η διαδικασία χρησιμοποιεί δείγματα σκυροδέματος (πιθανώς κυλινδρικά) αφού εξασφαλιστεί η τριχοειδής απορρόφηση. Η κάτω βάση κάθε δοκιμίου βυθίζεται στο διάλυμα δοκιμής ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  0,5 mol/l) που έφτασε στο ύψος 30 mm στην πλευρική επιφάνεια. Η εναπομένουσα πλευρική επιφάνεια είναι επικαλυμμένη με ένα μέσο στεγανοποίησης. Η δοκιμή διεξάγεται σε κλιματιζόμενο περιβάλλον ( $20 \pm 2$  °C,  $50 \pm 5$  % σχετική υγρασία) για 28 ημέρες. Στο τέλος της δοκιμής τα δείγματα χωρίζονται και μετρίεται το βάθος της διείδυσης.

*Σημείωση: Ανίχνευση προφίλ: Στεγνώνεται η διαχωρισμένη επιφάνεια της μήτρας σε κλίβανο, στη συνέχεια ψεκάζεται με διάλυμα 3:1 του  $\text{BaCl}_2$  (2,1 mol/l) και  $\text{KMnO}_4$  (2,1 mol/l) και τελικά διαβρέχεται με απιονισμένο νερό.*

## Εναλλακτική διαβροχή και ξήρανση

### 7. Swiss standard for concrete SN 505 262/1

Οι πυρήνες σκυροδέματος ξηραίνονται για δύο ημέρες στους  $50$  °C και έπειτα εμβαπτίζονται σε διάλυμα  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  συμπεριλαμβανομένων  $34 \text{ g/l SO}_4^{-2}$  για πέντε ημέρες στους  $20$  °C. Οι μεταβολές στο μήκος μετά από τέσσερις κύκλους συγκρίνονται με αυτές παράλληλων πυρήνων οι οποίοι υπόκεινται στους ίδιους κύκλους ξήρανσης αλλά εμβαπτισμένοι στο νερό. Εφαρμόζεται ξήρανση με αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (8 ώρες στον αέρα, 16 σε θεικό διάλυμα) με σκοπό την επιτάχυνση της δοκιμής.

## Δείκτες απόδοσης (θέματα που χρήζουν προσοχής)

- Αλλαγή στη μάζα: η απώλεια μάζας επηρεάζεται έντονα από τους χειρισμούς του χειριστή και συγκεκριμένα από την ένταση του βουρτσίσματος για την απομάκρυνση του χαλαρού υλικού.



- Αντοχή σε θλίψη: Καταστρεπτική – απαιτείται μεγάλος αριθμός δειγμάτων. Επίσης, στις πρώιμες ηλικίες θεικής έκθεσης τα δείγματα θα παρουσιάσουν μια αύξηση που αποδίδεται στο σχηματισμό των προϊόντων της αντίδρασης.
- Αλλαγή στην εμφάνιση: υποκειμενική και επηρεάζεται από τους χειρισμούς του χειριστή.

### 1.5. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, η ανθεκτικότητα είναι ένα θέμα που ενδιαφέρει ιδιαίτερος τους μηχανικούς τις τελευταίες δεκαετίες. Εκτενείς έρευνες πραγματοποιούνται σε παγκόσμιο επίπεδο από επιστήμονες, πανεπιστημιακούς, μηχανικούς και φοιτητές σχετικά με τους παράγοντες που την επηρεάζουν, με τελικό στόχο την επίτευξη της διατήρησης της αντοχής και της λειτουργικότητας των κατασκευών σε όλη τη διάρκεια της ζωής τους.

Η ανάπτυξη και εντατική χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε πληθώρα κατασκευών, ώθησε πολλούς να το μελετήσουν και να διαπιστώσουν την ενίσχυση ή μη της ανθεκτικότητας του υλικού με την προσθήκη των ινών. Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα βασικά συμπεράσματα ερευνών που έχουν διεξαχθεί σχετικά με την ανθεκτικότητα του ινοπλισμένου, με ίνες χάλυβα, σκυροδέματος σε περιβάλλον θεικών.

Ο **Amr S. El-Dieb**, το 2009 [29], μελέτησε τα χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος και, πιο συγκεκριμένα, την επιρροή του ποσοστού των χαλύβδινων ινών στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σε περιβάλλον θεικών. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα περιείχε τσιμέντο Portland τύπου I, πυριτική παιπάλη, θραυστά φυσικά αδρανή, υπερρευστοποιητή πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (modified polycarboxylic ether superplasticizer) και χαλύβδινες ίνες σε ποσοστά 0,08%, 0,12% και 0,52% κ.ο.. Τα δοκίμια εμβαπτίστηκαν σε διάλυμα θεικού νατρίου υψηλής συγκέντρωσης (5% κ.β.) σε υψηλή θερμοκρασία (50 °C) στην ηλικία των 28 ημερών. Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σε διάφορες ηλικίες (3, 6, 9 και 12 μήνες) και συγκρίθηκε με την αρχική αντοχή. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν αύξηση της αντοχής για μικρές περιόδους βύθισης (3 μήνες) που μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή θερμοκρασία και μείωση της αντοχής για μεγάλες περιόδους βύθισης (έως 12 μήνες) περίπου 12% που υποδεικνύει μικρή επίδραση των συνθηκών έκθεσης στο σκυρόδεμα. Ακόμη, η επιρροή του ποσοστού των ινών που παρατηρήθηκε στη θλιπτική αντοχή δεν ήταν σημαντική καθώς εξαρτάται κυρίως από το πορώδες του σκυροδέματος.

Ο **Abbas S. Al-Ameeri**, το 2013 [30], διερεύνησε την επιρροή των θεικών στις μηχανικές ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος, και πιο συγκεκριμένα την επιρροή στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και στην ταχύτητα διάδοσης των υπερήχων. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα περιείχε τσιμέντο Portland με  $\text{SO}_3$  2,6%, χονδρόκοκκα αδρανή με  $\text{SO}_3$  0,07%, λεπτόκοκκα αδρανή με  $\text{SO}_3$  0,4%, υπερρευστοποιητή, ασβεστολιθικά αδρανή με  $\text{SO}_3$  1,9%, και χαλύβδινες ίνες σε ποσοστά 0%, 0,5%, 0,75%, 1,0%, 1,25% και 1,5% κ.ο. Η θλιπτική αντοχή μετρήθηκε σε διάφορες ηλικίες (7, 28 και 90 ημέρες) και συγκρίθηκε με την αρχική αντοχή. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν αύξηση της αντοχής με την ηλικία. Όσον αφορά τα ποσοστά των ινών σημειώθηκε αύξηση της θλιπτικής αντοχής για ποσοστά έως 0,75% κ.ο. και μείωση για τα μεγαλύτερα. Η ταχύτητα των υπερήχων αυξήθηκε με την πάροδο των ημερών για σταθερό ποσοστό ινών, ενώ μείωση παρατηρήθηκε με την αύξηση του ποσοστού των ινών, πράγμα που μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του ποσοστού των κενών εξαιτίας των συσσωματωμάτων ινών που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της ανάμιξης καθώς και στον τυχαίο προσανατολισμό που ενδέχεται να προκαλέσει εκτροπή της ευθύγραμμης πορείας του υπερηχητικού κύματος.

Ο **Dr. Mohammad Jamal Al-Shannag**, το 2007 [31], επιχείρησε να διερευνήσει την καταλληλότητα του ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος για χρήση σε περιβάλλον θεικών και ειδικότερα, την επίδραση των ινών στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν: τσιμέντο Portland τύπου I, φυσική πυριτική άμμος, ίνες με γαντζωτά άκρα σε ποσοστά 1% και 2% κ.ο. του μίγματος κονιάματος και υψηλή αναλογία νερού προς τσιμέντο προκειμένου να επιταχυνθεί η επίδραση των θεικών. Τα δοκίμια διαστάσεων  $50 \times 50 \times 50$  mm βυθίστηκαν σε διαλύματα συγκέντρωσης 5%  $\text{MgSO}_4$ , 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  και σε αποσταγμένο νερό. Για τη δοκιμή θλίψης ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C 109 και χρησιμοποιήθηκε μηχανή θλίψης δυναμικότητας 1800 KN. Αξιοσημείωτο είναι πως τους τρεις πρώτους μήνες, τα εμβαπτισμένα σε θεικά διαλύματα δοκίμια, παρουσίασαν αυξημένη αντοχή σε σχέση με εκείνα που ήταν βυθισμένα στο νερό. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός πως τα δοκίμια με ποσοστό ινών 1% ανέπτυξαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή συγκριτικά με εκείνα με ποσοστό ινών 2%, που μπορεί να αποδοθεί στη δημιουργία συσσωματωμάτων ινών και στην τυχαία κατανομή των ινών στο

σκυρόδεμα. Τελικά, τα αποτελέσματα έδειξαν πως η επιρροή των θεικών στη θλιπτική αντοχή δεν ήταν σημαντική και τα πειράματα τερματίστηκαν.



## 2 . Πειραματικό Μέρος

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. 90 κυβικά δοκίμια διαστάσεων  $70 \times 70 \times 70$  mm και 18 πρισματικά διαστάσεων  $285 \times 40 \times 40$  mm προκειμένου να διερευνηθεί η επιρροή του περιβάλλοντος θεικών στην ανθεκτικότητα του ινοπλισμένου, με χαλύβδινες ίνες, σκυροδέματος.

### 2.1. Συνθέσεις και έλεγχοι νοπού σκυροδέματος

#### 2.1.1 Συνθέσεις σκυροδέματος

Η επιλογή της τελικής σύνθεσης του σκυροδέματος έγινε με σκοπό την παρασκευή σκυροδέματος ελάχιστης κατηγορίας C30/37. Για την καλύτερη εργασιμότητα, κατά τη σκυροδέτηση κάθε δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 6 συνθέσεις από τις οποίες οι (SF-0(a), SF-0,25(a)) ήταν προπαρασκευαστικές (με διαφορετικά από τα αδρανή που τελικά χρησιμοποιήθηκαν) και οι υπόλοιπες (SF-0, SF-0,25, SF-0,375, SF-0,5) πραγματοποιήθηκαν με ίδια σύνθεση σκυροδέματος, ίδια αδρανή υλικά αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα ινών, με σκοπό τη διερεύνηση της επιρροής του ποσοστού των ινών, τόσο στη μηχανική συμπεριφορά όσο και στην ανθεκτικότητά του. Αναλυτικότερα, οι συνθέσεις με τις ονομασίες τους είναι:

- Σύνθεση SF-0(a) (άοπλο σκυροδέμα)
- Σύνθεση SF-0,25(a) με 20 kg χαλύβδινες ίνες (5% κ.β. του τσιμέντου) ανά  $m^3$  σκυροδέματος
- Σύνθεση SF-0,375 με 30 kg χαλύβδινες ίνες (7,5% κ.β. του τσιμέντου) ανά  $m^3$  σκυροδέματος
- Σύνθεση SF-0,5 με 40 kg χαλύβδινες ίνες (10% κ.β. του τσιμέντου) ανά  $m^3$  σκυροδέματος
- Σύνθεση SF-0 (άοπλο σκυροδέμα)
- Σύνθεση SF-0,25 με 20 kg χαλύβδινες ίνες (5% κ.β. του τσιμέντου) ανά  $m^3$  σκυροδέματος

Συνοπτικά, η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Προμήθεια των χρησιμοποιούμενων υλικών
2. Ξήρανση των αδρανών
3. Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών

4. Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση
5. Σκυροδέτηση και δοκιμές σε νωπό σκυρόδεμα
6. Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες
7. Συντήρηση δοκιμίων
8. Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις σε σκληρυμένο σκυρόδεμα
9. Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Χρησιμοποιήθηκαν:

1. Τσιμέντο Portland CEM-I-42.5-R (Θλιπτικές αντοχές κατά EN196-1: 35,1 MPa στις 2 ημέρες, 50,9 MPa στις 7 ημέρες και 65,2 MPa στις 28 ημέρες)
2. Νερό κανονικής πλαστικότητας (WD: 28,4% κατά EN196-3)
3. Ασβεστολιθικά αδρανή τριών διαβαθμίσεων: άμμος 0-4 mm, ρυζάκι 4-8 mm, γαρμπίλι 8-16 mm. Η κοκκομετρική τους διαβάθμιση φαίνεται στον **Πίνακα 12**
4. Πυριτική παιπάλη Sika Fume-HR με πυκνότητα 300 kg/m<sup>3</sup>
5. Ίνες ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα, συγκολλημένες (**Σχήμα 34**), από χάλυβα ψυχρής έλασης με ελάχιστη αντοχή 1100 MPa. Μήκος ίνας  $l = 29$  mm και διάμετρος  $d = 0,90$  mm (λόγος μορφής  $l/d = 32,2$ ). Κατασκευή με βάση τα πρότυπα ASTM A820 TYPE 1, EN 1001B, ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΤΟΕ 534,1/32
6. Ρευστοποιητής Sika Viscocrete Techno 40 με τα χαρακτηριστικά του **Πίνακα 11**



*Σχήμα 34: Ίνες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική (με γαντζωτά άκρα)*

*Πίνακας 11. Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή*

Χημική βάση	Υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυκαρβοξυλικών πολυμερών
Πυκνότητα	~1,05 kg/l (στους +200°C)
Τιμή pH	3,4-5,4 (στους +200°C)
Ολικό περιεχόμενο σε χλωριόντα	Ελεύθερο χλωριόντων

Αφού συγκεντρώθηκαν όλα τα απαραίτητα υλικά για τις σκυροδετήσεις προσδιορίστηκε η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών. Ωστόσο, πριν από αυτό απαιτείται ξήρανση των αδρανών σε κατάλληλο φούρνο ξήρανσης (**Σχήμα 35**).

Από τη εργασία αυτή εξαρτάται η υγρασία των αδρανών και επομένως η ποσότητα του νερού που θα προστεθεί στο μίγμα και γενικά η ποιότητα του σκυροδέματος.

Η ξήρανση των αδρανών πραγματοποιούνταν την προηγούμενη μέρα της σκυροδέτησης για τον όγκο αδρανών που θα χρησιμοποιούνταν, έτσι ώστε μέχρι τη σκυροδέτηση τα αδρανή να έχουν ξηρανθεί για 24 ώρες περίπου. Για την κοκκομετρική διαβάθμιση χρησιμοποιήθηκαν Αμερικάνικα κόσκινα του εργαστηρίου (**Σχήμα 36**).

*Σχήμα 35: Φούρνος ξήρανσης αδρανών*



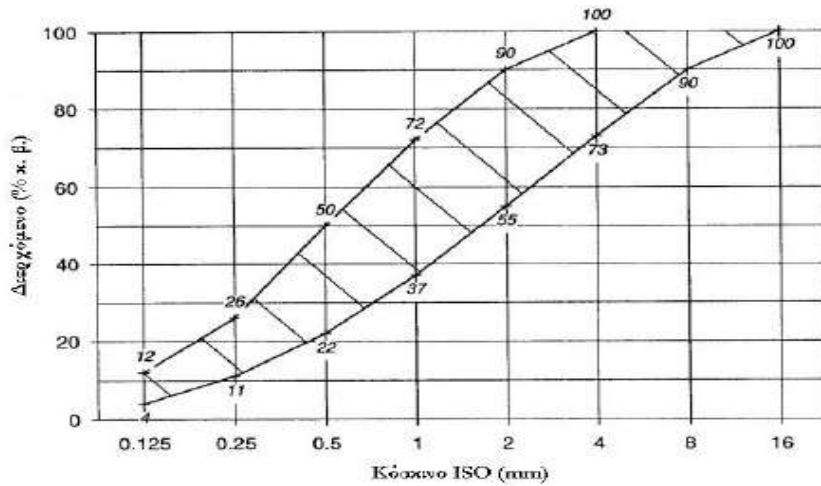
Σχήμα 36: Σειρά κοσκίνων και διάταξη κοσκινίσματος

Πίνακας 12. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

Κόσκινα					Μίγμα		
		Άμμος	Ρυζάκι	Γαρμπίλι	Άμμος 49%	Ρυζάκι 12%	Γαρμπίλι 39%
Νούμερο	(mm)	Διερχόμενο P <sub>i</sub> %					
3/4in	19	100,0	100,0	100,0	100,0		
1/2in	12,5	100,0	100,0	89,8	96,0		
3/8in	9,5	100,0	100,0	65,3	86,5		
1/4in	6,3	100,0	87,8	27,7	70,3		
No.5	4,0	98,0	22,8	8,5	54,0		
No.8	2,4	81,7	3,0	8,5	43,6		
No.16	1,2	57,0	0,7	8,5	31,3		
No.30	0,6	32,1	0,7	8,5	19,1		
No.50	0,3	16,5	0,7	8,5	11,5		
No.120	0,2	4,7	0,7	8,5	5,7		

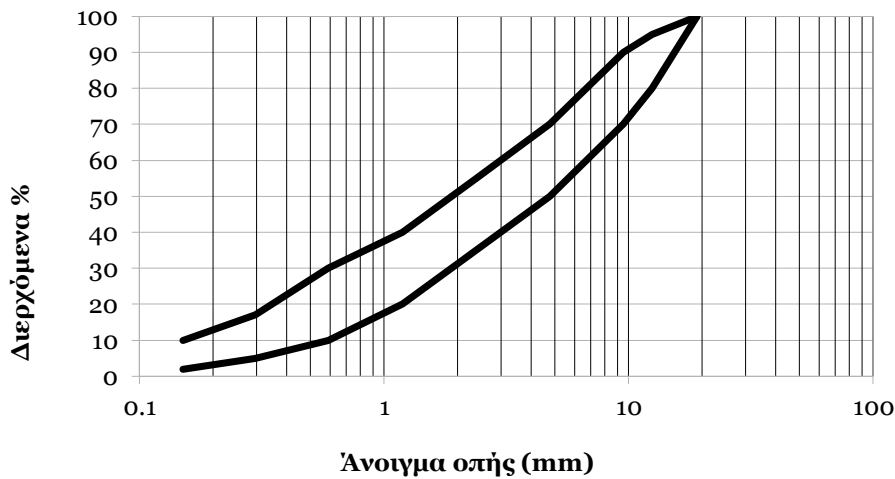
Ο ελληνικός κανονισμός για τα αδρανή συνιστά το πρότυπο EN 12620, ενώ υπάρχει και το πρότυπο ΕΛΟΤ-408. Σύμφωνα με τον EFNARC (European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for Structures), τα όρια μέσα στα οποία πρέπει να κινείται η καμπύλη της κοκκομετρικής διαβάθμισης για τα αδρανή φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα.





**Σχήμα 37:** Προτεινόμενη ζώνη για την κοκκομετρική καμπύλη (EFNARC)

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 37**, το ποσοστό των αδρανών με κόκκο μεγαλύτερο από 8 mm πρέπει να είναι το πολύ 10%, ενώ οι κόκκοι με μέγεθος μεγαλύτερο από 12 mm πρέπει να αποφεύγονται. Η αντίστοιχη καμπύλη κατά το ACI 506 απεικονίζεται στο διάγραμμα του **Σχήματος 38**.



**Σχήμα 38:** Προτεινόμενη ζώνη για την κοκκομετρική καμπύλη (ACI 506)

Μετά το πέρας της κοκκομετρικής ανάλυσης ακολούθησε η ζύγιση των υλικών στις ποσότητες που θα χρειαστούν από το καθένα για κάθε σύνθεση. Αφού συγκεντρώθηκαν όλα τα υλικά στις απαιτούμενες ποσότητες, στη συνέχεια ξεκίνησε η σκυροδέτηση (**Σχήμα 39**).



*Σχήμα 39: Υλικά προς σκυροδέτηση*

Στον υπολογισμό των ποσοτήτων, δεδομένης της πιθανής απώλειας υλικού κατά τις δοκιμές κάθισης, αλλά και για να υπάρχει επαρκής ποσότητα για την ανάδευση του σκυροδέματος μετά την προσθήκη των ινών, υπολογίστηκαν οι ποσότητες με μια προσαύξηση συνήθως της τάξης του 9%. Η προσθήκη του ρευστοποιητή κυμαινόταν για κάθε σύνθεση και γινόταν ανάλογα με τις τιμές που προέκυπταν από ενδιάμεσες δοκιμές κάθισης κατά την παρασκευή του μίγματος. Συγκεντρωτικά, οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε σύνθεση φαίνονται αναλυτικά στον **Πίνακα 13**.

Κατά τη διαδικασία της σκυροδέτησης προστίθενται στον αναμκτήρα τα υλικά με την παρακάτω σειρά:

1. Χονδρόκοκκα αδρανή
2. Λεπτόκοκκα αδρανή
3. Ποσότητα νερού αρκετή για την διαβροχή των παραπάνω
4. Τσιμέντο
5. Υπόλοιπη ποσότητα νερού
6. Πυριτική παιπάλη
7. Χαλύβδινες ίνες
8. Ρευστοποιητής σε δόσεις

Πίνακας 13. Ποσότητες των υλικών ανά σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	SF-0(a)	SF-0,25(a)	SF-0	SF-0,25	SF-0,375	SF-0,5
<b>Υλικά</b> <b>Συνθέσεις</b>	<b>Kg/m<sup>3</sup></b>					
Τσιμέντο	400	400	400	400	400	400
Πυριτική παιπάλη	20	20	20	20	20	20
Αδρανή 0-4 mm	930	930	828	828	828	828
Αδρανή 4-8 mm	775	775	207	207	207	207
Αδρανή 8-16 mm	-	-	672	672	672	672
Ενεργό Νερό	196	196	196	196	196	196
Χαλύβδινες ίνες	0	20	0	20	30	40
Ρευστοποιητής	1,33	1,835	2,30	1,92	2,34	2,38



Σχήμα 40: Προσθήκη αδρανών υλικών, νερού και ανάδευση

## 2.1.2 Έλεγχοι νωπού σκυροδέματος

### 2.1.2.1 Δοκιμή κάθισης

Εκτιμήθηκε η κάθιση που αποτελεί μέτρο της εργασιμότητας του σκυροδέματος, δηλαδή της ευκολίας με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται, όπως αυτή εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος κάθισης) με την οποία μορφώθηκε (¶ 3.20. ΚΤΣ 97).

Η μέτρησή της πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C143 (Σχήμα 41).



*Σχήμα 41: Μέτρηση κάθισης νοπού σκυροδέματος*

Στον **Πίνακα 14** φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κάθισης για κάθε μια από τις πραγματοποιούμενες συνθέσεις. (Η μετρούμενη κάθιση πρέπει να στρογγυλεύεται στα πλησιέστερα 5 mm.)

*Πίνακας 14. Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης*

Κωδικός Σύνθεσης	Κάθιση (mm)
SF-0(a)	85
SF-0	145-170
SF-0,25(a)	97,5-130
SF-0,25	110
SF-0,375	105-110
SF-0,5	75-122,5

*Πίνακας 15. Κατηγορία κάθισης ανά κωδικό σύνθεσης*

Κωδικός Σύνθεσης	Κάθιση (mm)	Κατηγορία κάθισης
SF-0(a)	85	S2
SF-0	145-170	S3-S4
SF-0,25	110	S3
SF-0,25(a)	97,5-130	S3
SF-0,375	105-110	S3
SF-0,5	75-122,5	S2-S3

Όπως φαίνεται και από τον **Πίνακα 15** οι συνθέσεις κατά βάση εντάσσονται στις κατηγορίες S3 - S4, δηλαδή κάθιση από 100 έως 210 mm.

### 2.1.2.2 Πυκνότητα νωπού σκυροδέματος

Μετά το πέρας της ανάδευσης ακολουθεί η μέτρηση του μοναδιαίου βάρους του σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C138 (**Σχήμα 42**), προκειμένου να υπολογιστεί η πυκνότητα του σκυροδέματος (**Πίνακας 16**).



**Σχήμα 42:** Ζύγιση πληρωμένου δοχείου μέτρησης φαινόμενου βάρους

**Πίνακας 16.** Υπολογισμός πυκνότητας σκυροδέματος ανά σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	SF-0(a)	SF-0	SF-0,25(a)	SF-0,25	SF-0,375	SF-0,5
Πυκνότητα (kg/m <sup>3</sup> )	2,405	2,409	2,403	2,394	2,407	2,411

Στη συνέχεια, το μίγμα χυτεύθηκε στις μήτρες. Η κάθε μήτρα αρχικά γεμίζεται με υλικό έως το μέσον της και δονείται στην τράπεζα δόνησης για 30 δευτερόλεπτα και αφού πληρωθεί, για άλλα 30. Πληρώθηκαν 90 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 70 × 70 × 70 mm και 18 πρισματικά διαστάσεων 285 × 40 × 40 mm. Μετά και την ολοκλήρωση της διαδικασίας πλήρωσης του απαιτούμενου αριθμού μητρών, τοποθετούνται σε κατάλληλο χώρο στο εργαστήριο, όπου και καλύπτονται με υγρές λινάτσες έως ότου γίνει η αφαίρεση των καλουπιών. Στα δοκίμια που εξάγονται από τις μήτρες αναγράφεται το όνομα της σύνθεσης και η ημερομηνία σκυροδέτησης και τοποθετούνται σε δεξαμενή με νερό το οποίο καλύπτει ολοκληρωτικά τα δοκίμια. Τα δοκίμια θα παραμείνουν στη δεξαμενή για 28 ημέρες.



*Σχήμα 43: Ενδεικτικές πρισματικές και κυβικές μήτρες που χρησιμοποιήθηκαν*

## 2.2. Πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις

### 2.2.1 Μέτρηση πορώδους και υδατο-απορροφητικότητας (Τριχοειδής απορρόφηση)

Η δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης νερού από το σκυρόδεμα αποσκοπεί στην ποσοτική εκτίμηση του τριχοειδούς πορώδους του υλικού, εκφρασμένο σε μονάδες απορροφητικότητας.

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν 7 κυβικά δοκίμια (100 x 100 x 100mm). Τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τη δεξαμενή νερού όπου συντηρούνταν και εν συνεχεία ξηράθηκαν σε φούρνο στους 91<sup>0</sup>C μέχρι σταθερού βάρους (διαφορά βάρους μεταξύ δύο διαδοχικών μετρήσεων σε 24 ±2 h, <0,1%). Η διαδικασία της ξήρανσης των δοκιμίων διήρκησε από 6 έως 8 ημέρες, και κατόπιν σταθεροποιήσεως του βάρους των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε η δοκιμή.

Η διεξαγωγή του πειράματος τριχοειδούς απορρόφησης βασίζεται σε οδηγία της RILEM (TC 116-PCD: Permeability of concrete as a criterion of its durability) που αναφέρεται στην προσρόφηση νερού μέσω τριχοειδούς απορρόφησης.

Η διάταξη (**Σχήμα 44**) που χρησιμοποιήθηκε για το πείραμα αποτελείται από:

- Μία πλαστική δεξαμενή νερού μέσα στην οποία πραγματοποιήθηκε η δοκιμή

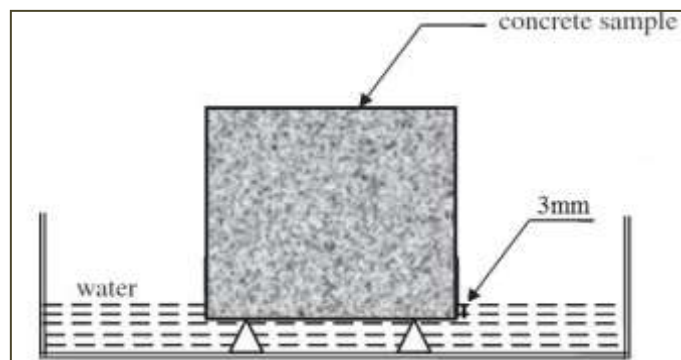
- Μία ειδικά διαμορφωμένη ανοξείδωτη μεταλλική βάση, η οποία τοποθετήθηκε μέσα στη δεξαμενή και πάνω στην οποία εδράζονταν τα δοκίμια κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης του πειράματος

Επίσης, για τις ανάγκες του πειράματος έγινε χρήση ζυγού με ακρίβεια 0,1 gr, καθώς και χρήση χρονομέτρου.



**Σχήμα 44:** Πειραματική διάταξη τριχλοειδούς απορρόφησης

Η δοκιμή της τριχλοειδούς απορρόφησης πραγματοποιήθηκε με την καταγραφή της αύξησης του βάρους του δοκιμίου, σε συνάρτηση με το χρόνο από την αρχική επαφή του δοκιμίου με το νερό. Πριν την έναρξη της δοκιμής πραγματοποιήθηκε καταγραφή του βάρους του δοκιμίου με ακρίβεια 0,1 gr. Εν συνεχεία, τοποθετήθηκε η ειδικά διαμορφωμένη βάση μέσα στη δεξαμενή και έγινε συμπλήρωση της δεξαμενής με νερό (δικτύου) σε στάθμη τέτοια, ώστε η μέγιστη βύθιση του δοκιμίου να είναι 3 mm μετά την τοποθέτηση του πάνω στη βάση (Σχήμα 45).



**Σχήμα 45:** Σχηματική απεικόνιση του πειράματος της τριχλοειδούς απορρόφησης S

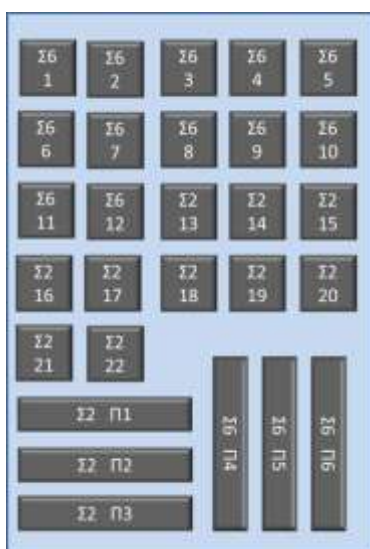
Η καταγραφή του βάρους του δοκιμίου πραγματοποιήθηκε σε χρόνους τέτοιους, ώστε η τετραγωνική ρίζα του χρόνου (σε min) να είναι φυσικός αριθμός. Σκοπός των δοκιμών είναι η καταγραφή των χαρακτηριστικών τριχλοειδούς πορώδους, προκειμένου αυτά να συσχετιστούν

με την δράση των θεικών ριζών. Στο **Σχήμα 46** παρουσιάζεται η μέθοδος μέτρησης βάρους των δοκιμίων υπό άνωση. Στον **Πίνακα 18** του κεφαλαίου 2.3.1 παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές της τριχοειδούς απορρόφησης, που αφορούν σε όλα τα δοκίμια.



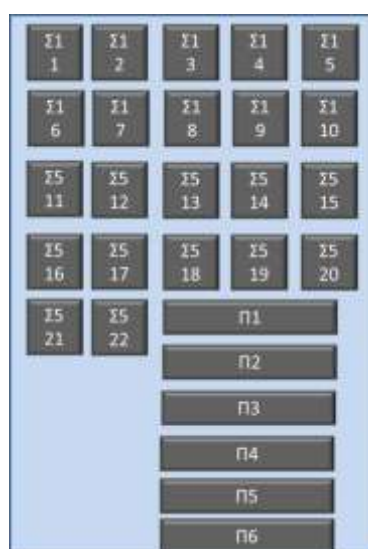
**Σχήμα 46:** Μέτρηση βάρους δοκιμίων υπό άνωση

### 2.2.2 Έκθεση σε περιβάλλον θεικών



**Σχήμα 47:** Συνθέσεις

Σ2 και Σ6



**Σχήμα 48:** Συνθέσεις

Σ1 και Σ5



**Σχήμα 49:** Συνθέσεις

Σ3 και Σ4

Για τη μελέτη της επίδρασης των θεικών ριζών στο σκυρόδεμα, παρασκευάστηκε διάλυμα θεικού μαγνησίου  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  συνολικού όγκου 35 l κατόπιν διαλυτοποίησης 538,3 g θεικού μαγνησίου. Έτσι, επιτεύχθηκε συγκέντρωση διαλύματος 15,38 g/l.

Εν συνεχεία, εμβαπτίστηκαν 68 κυβικά ( $70 \times 70 \times 70$  mm) και 18 πρισματικά ( $285 \times 40 \times 40$  mm) δοκίμια σκυροδέματος, ηλικίας μεγαλύτερης των 28 ημερών, σε τρεις λεκάνες όπως φαίνεται στα **Σχήματα 47, 48, 49**. Η επιλογή του όγκου διαλύματος έγινε σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο ASTM. Λήφθηκε απλοποιητικά η απαίτηση ανώτατου – κατώτατου ορίου του συνολικού όγκου διαλύματος



$$V_{\text{διαλ}} = V_{\text{min}} = 3 \times V_{\text{δοκ}} \sim V_{\text{max}} = 5 \times V_{\text{δοκ}},$$

όπου  $V_{\text{δοκ}}$  ο όγκος που καταλαμβάνει το σύνολο των δοκιμίων κάθε λεκάνης,

ενώ η επιλογή της συγκέντρωσης του διαλύματος έγινε έτσι ώστε να ικανοποιείται η απαίτηση η τελική συγκέντρωση του διαλύματος να βρίσκεται μεταξύ των τιμών 3000 ~ 6000 ppm = 3000 ~ 6000 mg/l με βάση το EN 206 (κατηγορία έκθεσης ΧΑ3).

Εξασφαλίστηκαν επαρκή κενά μεταξύ των δοκιμίων και των τοιχωμάτων της λεκάνης με στόχο την εξασφάλιση της ανεμπόδιστης διάχυσης των θεικών. (Επιπλέον, σημειώθηκε η αρχική στάθμη του διαλύματος ώστε να παραμείνει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, προς αποφυγή της αλλαγής συγκέντρωσης του διαλύματος.) Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (0 (28 ημέρες από τη σκυροδέτηση), 14, 28, 56, 90, 140, 180, 270 ημέρες), πραγματοποιήθηκε εκτίμηση της επίδρασης των θεικών ριζών με έμμεσες (παρακολούθηση βάρους, μήκους και ταχύτητας υπερήχων) και καταστρεπτικές δοκιμές (αντοχή σε θλίψη) όπως αυτές περιγράφονται στη συνέχεια. Επίσης με κατάλληλες αναλυτικές τεχνικές (Περίθλαση ακτίνων Χ), καταγράφηκε ο σχηματισμός νέων φάσεων εξαιτίας της δράσης των θεικών.

### 2.2.3 Μηχανικές δοκιμές

Η θλιπτική αντοχή  $f_c$  του σκυροδέματος προσδιορίστηκε με καταπόνηση σε μονοαξονική θλίψη κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 70 x 70 x 70 mm. Ως θλιπτική αντοχή,  $f_c$ , του δοκιμίου ορίζεται η τάση θραύσεως και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_c = \frac{P_{max}}{b \times d} \quad (2.1)$$

όπου  $P_{max}$  = το μέγιστο φορτίο που ασκείται στο φορτίο μέχρι την αστοχία του (N)

$b, d$  = οι διαστάσεις της επιφάνειας που ασκείται το φορτίο (mm), εδώ  $b = d = 70$  mm

Προσδιορίστηκε η αντοχή των παραγόμενων σκυροδεμάτων σε μονοαξονική θλίψη, χρησιμοποιώντας τη διάταξη TONI TECHNIK (Σχήμα 50), δυναμικότητας 600 kN. Τα αποτελέσματα της δοκιμής θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 22 του κεφαλαίου 2.3.2.



*Σχήμα 50: Μηχανή δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη – Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ*

Σκοπός της δοκιμής είναι η καταγραφή τόσο της αρχικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων, όσο και η μεταβολή της μετά από έκθεση σε περιβάλλον θεικών. Συνεπώς, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, θραύστηκαν δείγματα των συνθέσεων και εκτιμήθηκε η μεταβολή της αντοχής τους.

#### **2.2.4 Μέτρηση χρόνου διάδοσης υπερήχων**

Οι μη καταστρεπτικές μέθοδοι (ή και έμμεσες μέθοδοι) είναι μέθοδοι έμμεσου προσδιορισμού της αντοχής του σκυροδέματος μιας κατασκευής. Στις μεθόδους αυτές ανήκει και η μέθοδος των υπερήχων. Η συσκευή των υπερήχων αποτελείται από μια γεννήτρια παραγωγής υπερηχητικών κυμάτων, από δύο κρυστάλλους (έναν πομπό και ένα δέκτη) και από ένα μετρητή του χρόνου που χρειάζεται ο υπέρηχος για να διανύσει το προς εξέταση δοκίμιο σκυροδέματος. Αν το πάχος του δοκιμίου είναι ίσο με  $L$  και ο χρόνος που χρειάστηκε το υπερηχητικό κύμα για να το διανύσει  $T$ , τότε η ταχύτητα των υπερήχων  $V$  (συνήθως σε km/s) δίνεται από τον τύπο:

$$V = L/T \quad (2.2)$$

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι μετρήσεις με τη μέθοδο των υπερήχων έγιναν τοποθετώντας τους δύο κρυστάλλους σε αντικριστές θέσεις του προς εξέταση δοκιμίου (direct transmission), διαδικασία που αποτελεί και τον ακριβέστερο τρόπο μετρήσεως της ταχύτητας των υπερήχων. Για να είμαστε σίγουροι ότι όλη η ενέργεια των υπερηχητικών κυμάτων, που διοχετεύονται από τον κρύσταλλο πομπό, περνά μέσα στη μάζα του

σκυροδέματος, τοποθετούμε μεταξύ των κρυστάλλων και του σκυροδέματος κατάλληλο μέσο σύζευξης, το οποίο καλύπτει τις ατέλειες της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου που περιέχουν αέρα. Το μέσο ακουστικής σύζευξης μπορεί να είναι γράσο, βαζελίνη ή γενικά κάποιο παράγωγο του πετρελαίου και πρέπει να τοποθετείται σε μικρή ποσότητα, γιατί διαφορετικά προκαλεί αθέλητες διαφοροποιήσεις στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι η ταχύτητα διαδόσεως των υπερήχων είναι διαφορετική στο σκυρόδεμα από ότι στη χρησιμοποιούμενη λιπαντική ουσία. Οι κρύσταλλοι τοποθετήθηκαν στις αντικριστές λείες επιφάνειες των κυβικών δοκιμίων. Πριν από κάθε μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων πρέπει να ελέγχεται η ένδειξη του οργάνου. Η ένδειξη του οργάνου βαθμονομήσεως πρέπει να είναι τόση όση δίνεται πάνω στην ράβδο του οργάνου (55,7  $\mu\text{sec}$  εν προκειμένω). Η ακρίβεια πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ  $\pm 1\%$  κατά

ISO ή  $\pm 2\%$  κατά ASTM. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων είναι οι εξής:

- Υγρασία (Όταν στο δοκιμαζόμενο στοιχείο το ποσοστό υγρασίας είναι υψηλό παρατηρείται μια αύξηση της μετρούμενης ταχύτητας των υπερήχων.)
- Θερμοκρασία του Σκυροδέματος (Όταν η θερμοκρασία κυμαίνεται από  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  έως  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  δεν παρατηρείται καμία σημαντική διαφοροποίηση στην μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων. Αντίθετα, όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη από  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ή υψηλότερη από  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , τότε διαπιστώνονται σημαντικές μεταβολές.)
- Μήκος Διαδρομής (path length) (Το B.S. 1881 και τα I.S.O. αναφέρουν ότι το ελάχιστο μήκος διαδρομής εξαρτάται από το μέγιστο κόκκο αδρανών, ενώ το μέγιστο μήκος από την κατάσταση της εξωτερικής επιφάνειας του στοιχείου, όπως επίσης και από τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος, από το οποίο είναι κατασκευασμένο.)
- Σχήμα και Διαστάσεις δοκιμίου (Η ταχύτητα των υπερήχων δεν εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις των δοκιμαζόμενων στοιχείων, εκτός και αν η διάσταση είναι μικρότερη από την επιτρεπομένη. Όταν η διάσταση του δοκιμίου είναι μικρή, τότε έχουμε μία μείωση και στην ταχύτητα των υπερήχων.)
- Ράβδοι Οπλισμού (Η μετρούμενη ταχύτητα των υπερήχων, στις περιοχές των δομικών στοιχείων που περιέχουν ράβδους οπλισμού, είναι συνήθως υψηλότερη σε σχέση με την ταχύτητα που μετράται σε περιοχές ελεύθερες από οπλισμό.)
- Ύπαρξη ατελειών στη μάζα του σκυροδέματος

- Εντατική κατάσταση (Οι Poronics αναφέρουν ότι η ταχύτητα των υπερήχων αυξάνει ελαφρά όταν το σκυρόδεμα φορτίζεται προοδευτικά, αλλά μειώνεται απότομα όταν η εξωτερική τάση γίνει ίση με το 70% της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.)
- Μέθοδος συσχέτισεως αντοχής συμβατικών δοκιμών και ταχύτητας υπερήχων (Τα δοκίμια που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μεγάλα, ούτως ώστε να μειωθεί η επίδραση του μεγέθους από τα αποτελέσματα.)

Σκοπός της εφαρμοζόμενης στην παρούσα διπλωματική εργασία μεθόδου, είναι η συσχέτιση της δράσης των θεικών ριζών με τη μεταβολή της δομής του σκυροδέματος, όπως αυτή καταγράφεται μέσω της ταχύτητας υπερήχων.



*Σχήμα 51: Εξοπλισμός μέτρησης υπερήχων*

### **2.2.5 Μέτρηση μήκους και βάρους**

Για τη μέτρηση του βάρους των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά με ακρίβεια 0,001 g που φαίνεται στο **Σχήμα 52**. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν ανά τακτά χρονικά διαστήματα όπως αυτά κρίθηκαν κατάλληλα. Ομοίως, μετρούνταν και τα μήκη των πρισματικών δοκιμών με τη χρήση μηκυσιομέτρου ακριβείας 0,001 mm. Μετρήσεις λήφθηκαν σε τέσσερα επίπεδα από τις οποίες τελικά υπολογίστηκε ο μέσος όρος (**Σχήμα 53**).



**Σχήμα 53:** Ζυγαριά μέτρησης βάρους E. O. Σ.



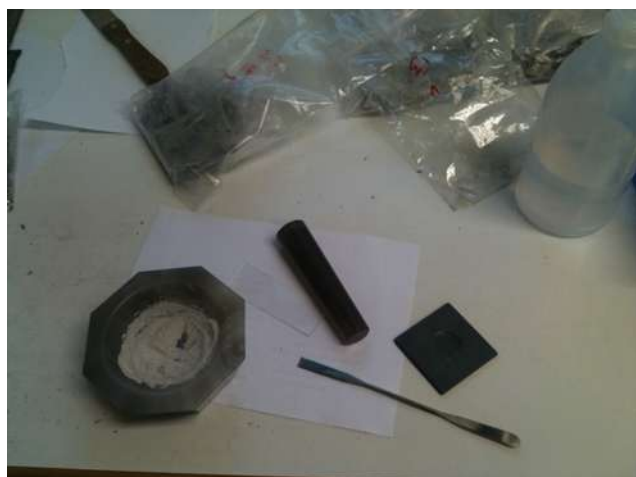
**Σχήμα 52:** Ηλεκτρονικό μηκονσιόμετρο εργαστηρίου

### 2.2.6 Αξιολόγηση της δράσης των θεικών με αναλυτικές τεχνικές (XRD)

Η περίθλαση ακτίνων X (x - ray diffraction, XRD) από δείγματα σε μορφή σκόνης (**Σχήμα 54**), είναι από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές σε πολλούς κλάδους της επιστήμης και της τεχνολογίας, για τον προσδιορισμό κυρίως ορυκτολογικών χαρακτηριστικών των υλικών. Με τη συγκεκριμένη τεχνική μπορούμε να προσδιορίσουμε π.χ. ποιοτικά και ποσοτικά την ύπαρξη διαφορετικών φάσεων σε ένα υλικό, τη μοναδιαία κυψελίδα και τη δομή ενός κρυστάλλου, το μέγεθος των κρυσταλλιτών, τον προσανατολισμό των κρυσταλλιτών κ.ά.



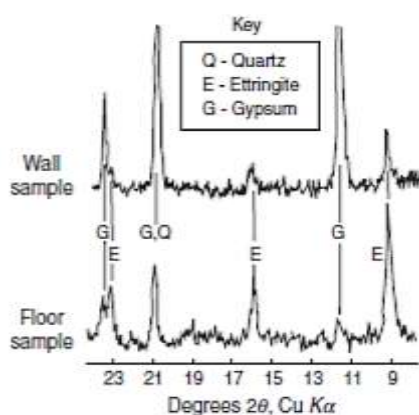
**Σχήμα 55:** Συσκευή περιθλασιμετρίας ακτίνων - X



**Σχήμα 54:** Θρυμματισμός τσιμεντόπαστας

Το σύστημα (**Σχήμα 55**) λειτουργεί στη γεωμετρία  $\theta - 2\theta$  και είναι ικανό να μετρά από ελάχιστη γωνία  $1^\circ$  έως  $90^\circ$ . Τα δείγματα που είναι δυνατόν να μελετηθούν μπορεί να είναι είτε λεπτή σκόνη είτε υμένια. Η δέσμη των ακτίνων - X παράγεται από ειδική λυχνία και μέσω διαφραγμάτων προσπίπτει στο δείγμα, το οποίο βρίσκεται σε ειδική υποδοχή. Η ανακλώμενη από το δείγμα ακτινοβολία, αφού περάσει από διαφράγματα, καταλήγει στον ανιχνευτή και καταγράφεται από το ειδικό υπολογιστικό σύστημα. Το διάγραμμα περίθλασης ακτίνων - X αποτελεί την καταγραφή της γωνίας και του αντίστοιχου αριθμού ακτίνων - X που ανιχνεύτηκαν στην συγκεκριμένη γωνία περίθλασης. Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με κατάλληλη βάση δεδομένων στην οποία περιέχονται στοιχεία όλων των γνωστών ενώσεων που έχουν μελετηθεί, γεγονός που καθιστά ευκολότερη την ταυτοποίηση των διαφόρων κρυσταλλικών ενώσεων που υπάρχουν στο δείγμα. Επίσης, έχουν εγκατασταθεί προγράμματα διερεύνησης και πιστοποίησης ακτινογραφημάτων που καταγράφονται.

Σκοπός της εφαρμογής της παραπάνω μεθόδου, είναι η καταγραφή των αναμενόμενων φάσεων που σχηματίζονται (κυρίως αυτής του ετρινγκίτη), εξαιτίας της δράσης των θεικών ριζών του διαλύματος έκθεσης. Συγκεκριμένα, ανά τακτά χρονικά διαστήματα και κατόπιν της θραύσης των κυβικών δοκιμίων, λαμβάνονται δείγματα κατά το δυνατόν πάστας τσιμέντου, στα οποία πραγματοποιείται ανάλυση XRD. Σύμφωνα με τη θεωρία της ενυδάτωσης του τσιμέντου και το μηχανισμό και τις συνθήκες της χημικής προσβολής του σκυροδέματος από τα θειικά, αναμένεται ο σχηματισμός της φάσης του ετρινγκίτη. Αναμένεται η λήψη αντίστοιχων διαγραμμάτων με το απόσπασμα του διαγράμματος του **Σχήματος 56**, όπου ανιχνεύεται η φάση του ετρινγκίτη σε γωνίες  $2\theta$ , περίπου  $9^\circ$ ,  $16^\circ$ ,  $23^\circ$ .



**Σχήμα 56:** Απόσπασμα διαγράμματος XRD, πάστας τσιμέντου κατόπιν επίδρασης θεικών και αντίστοιχες ορυκτολογικές φάσεις.

## 2.3. Συζήτηση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

### 2.3.1 Μέτρηση πορώδους και υδατο-απορροφητικότητας (Τριχοειδής απορρόφηση)

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατο-απορροφητικότητας. Στο διάγραμμα του Σχήματος 57 παρουσιάζεται για το δοκίμιο Σ5-3 της σύνθεσης SF-0 η καμπύλη αθροιστικής απορρόφησης του νερού  $\Sigma(\Delta W/A)/\rho_w$  σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου  $T^{1/2}$ . Από τη μορφή του διαγράμματος φαίνεται ότι τα αποτελέσματα μπορούν να αποτελέσουν σημεία μιας γραμμικής καμπύλης της μορφής  $y = ax+b$ , όπου  $y = \Sigma(\Delta W/A)/\rho_w$  και  $x = T^{1/2}$ , καθώς οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης κυμαίνονται μεταξύ 0,9932-0,9985 για όλα τα δοκίμια. Από την κλίση της ευθείας προκύπτει η τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης  $S$ . Για το δοκίμιο Σ5-3 η τριχοειδής απορρόφηση είναι  $S = 0,1854 \text{ mm/min}^{0.5}$ .

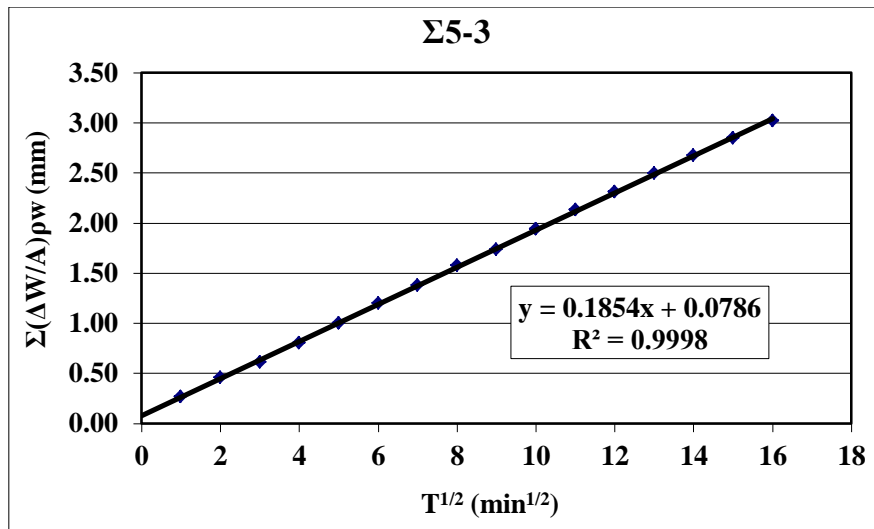
Όπου:  $\Delta W$  = η μεταβολή του βάρους των δοκιμίων

$A$  = το εμβαδό της επιφάνειας των δοκιμίων

$\rho_w$  = η πυκνότητα του νερού

Πίνακας 17. Πειραματικές μετρήσεις (μέσες τιμές 3 δοκιμίων) τριχοειδούς απορρόφησης  $S$ , για όλες τις συνθέσεις

Κωδικός σύνθεσης	SF-0	SF-0,25	SF-0,375	SF-0,5	
A/A	$T^{1/2}$ (min <sup>1/2</sup> )	$\Sigma(\Delta W/A)/\rho_w$ (mm)			
1	0	-	-	-	-
2	1	0,19	0,33	0,16	0,13
3	2	0,33	0,51	0,27	0,21
4	3	0,41	0,68	0,41	0,30
5	4	0,53	0,85	0,52	0,40
6	5	0,66	1,00	0,64	0,50
7	6	0,78	1,17	0,76	0,59
8	7	0,91	1,36	0,89	0,70
9	8	1,04	1,54	1,02	0,81
10	9	1,17	1,72	1,13	0,91
11	10	1,31	1,90	1,25	1,00
12	11	1,46	2,09	1,36	1,10
13	12	1,59	2,25	1,49	1,20
14	13	1,74	2,43	1,61	1,30
15	14	1,87	2,56	1,73	1,39
16	15	2,01	2,71	1,84	1,47
17	16	2,15	2,87	1,96	1,55



*Σχήμα 57: Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για το δοκίμιο Σ5-3 της σύνθεσης SF-0*

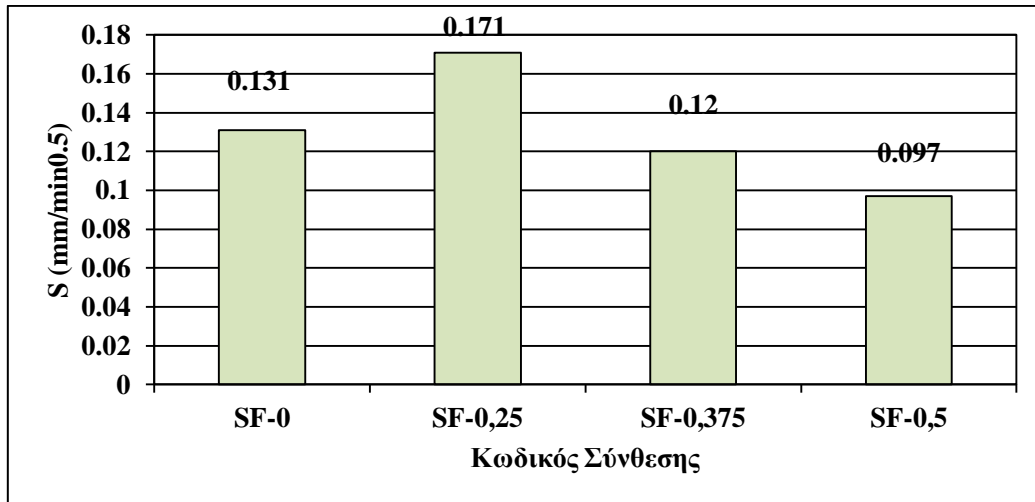
Σχεδιάζοντας τα διαγράμματα και για τα υπόλοιπα δοκίμια προκύπτουν όλες οι τιμές της τριχοειδούς απορρόφησης, οι οποίες εμφανίζονται συνολικά στον **Πίνακα 18**. Επίσης, δίνονται και οι τιμές των αντίστοιχων συντελεστών γραμμικής συσχέτισης.

*Πίνακας 18. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης*

Κωδικός Σύνθεσης	Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min <sup>0.5</sup> )	% Μεταβολής S ως προς το άοπλο σκυρόδεμα	Συντ. γραμμικής συσχέτισης R <sup>2</sup>
SF-0	0,131	-	0,9954
SF-0,25	0,171	30,5	0,9987
SF-0,375	0,12	-8,4	0,9974
SF-0,5	0,097	-26,0	0,9961

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα του **Σχήματος 58**, η προσθήκη των ινών χάλυβα στο σκυρόδεμα δεν οδήγησε σε σημαντική αύξηση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Για ποσοστό ινών 0,25% κ.ο. παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή κατά 30,5%, ενώ για τα ποσοστά ινών 0,375% και 0,5% κ.ο. ο συντελεστής μειώθηκε κατά 8,4% και 26% αντίστοιχα.





Σχήμα 58: Τριχοειδής απορρόφηση  $S$  (mm/min<sup>0.5</sup>), ανά σύνθεση ινοπλισμένου σκυροδέματος

### Ανοικτό πορώδες (OP)

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι ζυγίσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δοκίμια στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Στην τελευταία στήλη του πίνακα έχει υπολογιστεί το ανοικτό πορώδες, σύμφωνα με τη σχέση:

$$OP \% = \frac{\alpha - \beta}{\alpha - \gamma} \times 100 \quad (2.3)$$

Όπου  $\alpha$  = το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου (gr)

$\beta$  = το βάρος του δοκιμίου μετά την ξήρασή του

$\gamma$  = το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου υπό άνωση

Πίνακας 19. Πειραματικές μετρήσεις ανοικτού πορώδους (OP) για όλα τα δοκίμια

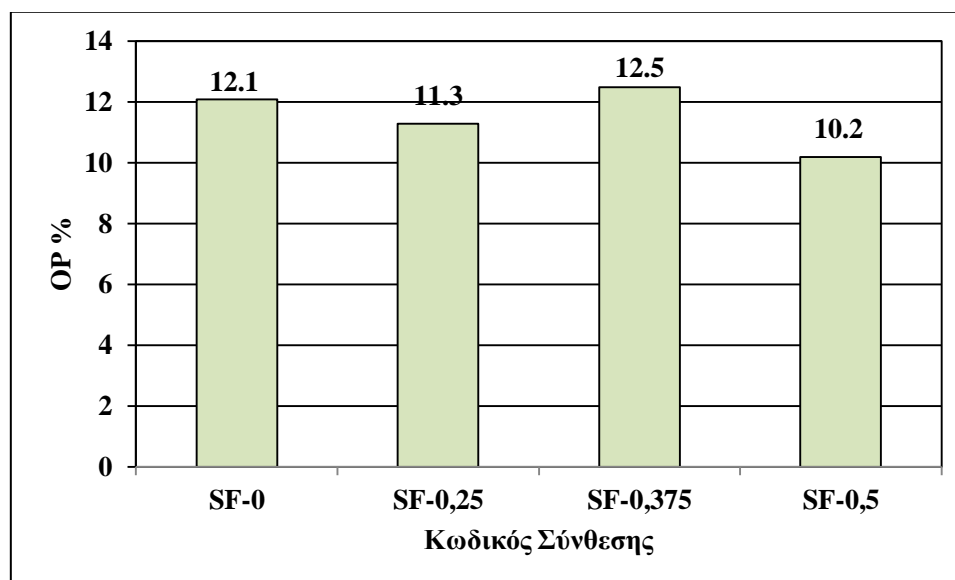
Κωδικός Σύνθεσης	Αριθμός δοκιμίου	Μέτρηση βάρους ξηρών δοκιμίων (gr)	Μέτρηση βάρους κορεσμένων δοκιμίων (gr)	Μέτρηση βάρους δοκιμίων υπό άνωση (gr)	Ανοικτό πορώδες
SF-0	1	2281,58	2399,29	1402,35	11,8%
	2	2302,53	2424,85	1410,30	12,1%
	3	2263,39	2388,49	1391,31	12,5%
SF-0,25	1	2305,97	2417,79	1410,77	11,1%
	2	2224,94	2340,51	1372,27	11,9%
	3	2286,57	2395,36	1398,19	10,9%
SF-0,375	1	2274,38	2393,14	1401,25	12,0%
	2	2285,70	2414,54	1410,05	12,8%
	3	2274,99	2400,14	1407,75	12,6%
SF-0,5	1	2297,76	2410,63	1415,74	11,3%
	2	2303,57	2421,46	1426,98	11,9%
	3	2296,85	2369,48	1376,99	7,3%

Στον **Πίνακα 20** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του ανοικτού πορώδους (OP %) συνολικά για όλες τις συνθέσεις, ως μέση τιμή των μετρήσεων των τριών δοκιμίων για κάθε τύπο σύνθεσης.

**Πίνακας 20.** Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους, για κάθε σύνθεση

Κωδικός Σύνθεσης	Ανοικτό Πορώδες OP (%)	% Μεταβολής OP ως προς το άοπλο σκυρόδεμα
SF-0	12,1	-
SF-0,25	11,3	-6,6
SF-0,375	12,5	3,3
SF-0,5	10,2	-15,7

Όπως φαίνεται και από τον **Πίνακα 20**, παρατηρήθηκε αύξηση του ανοικτού πορώδους κατά 3,3% για προσθήκη ινών χάλυβα σε ποσοστό 0,375% κ.ο. σκυροδέματος (SF-0,375). Αντίθετα, καταγράφηκε μείωση του ανοικτού πορώδους κατά 15,7% για τη σύνθεση SF-0,5 και μικρότερη μείωση, 6,6%, για την SF-0,25 σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (SF-0). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται γραφικά στο **Σχήμα 59**.



**Σχήμα 59:** Ανοικτό πορώδες OP (%), για κάθε σύνθεση

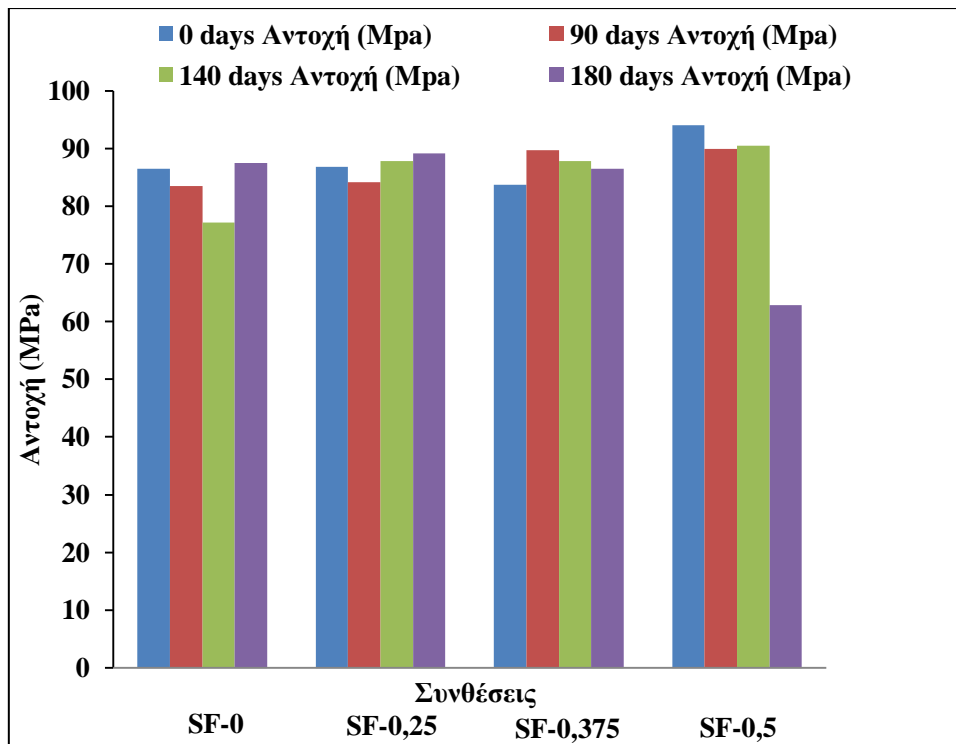
### 2.3.2 Μηχανικές ιδιότητες

Τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 21**. Διαγραμματικά απεικονίζονται στο **Σχήμα 60**.

**Πίνακας 21.** Μέσοι όροι αντοχών σε MPa ανά σύνθεση και ηλικία

Συνθέσεις \ Ημέρες	0	90	140	180
Αντοχή	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
SF-0	86,5	83,5	77,1	87,5
SF-0,25	86,8	84,2	87,8	89,1
SF-0,375	83,7	89,7	87,8	86,5
SF-0,5	94,05	90,0	90,53	62,8

Παρατηρείται μικρή έως ασήμαντη μεταβολή της θλιπτικής αντοχής, στο χρόνο, για κάθε σύνθεση. Σημαντική μεταβολή καταγράφεται μόνο στην περίπτωση της σύνθεσης SF-0,5 και μετά τις 180 ημέρες. Τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Διαγραμματικά:

**Σχήμα 60:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ανά σύνθεση και ηλικία (μέση τιμή τριών δοκιμών)

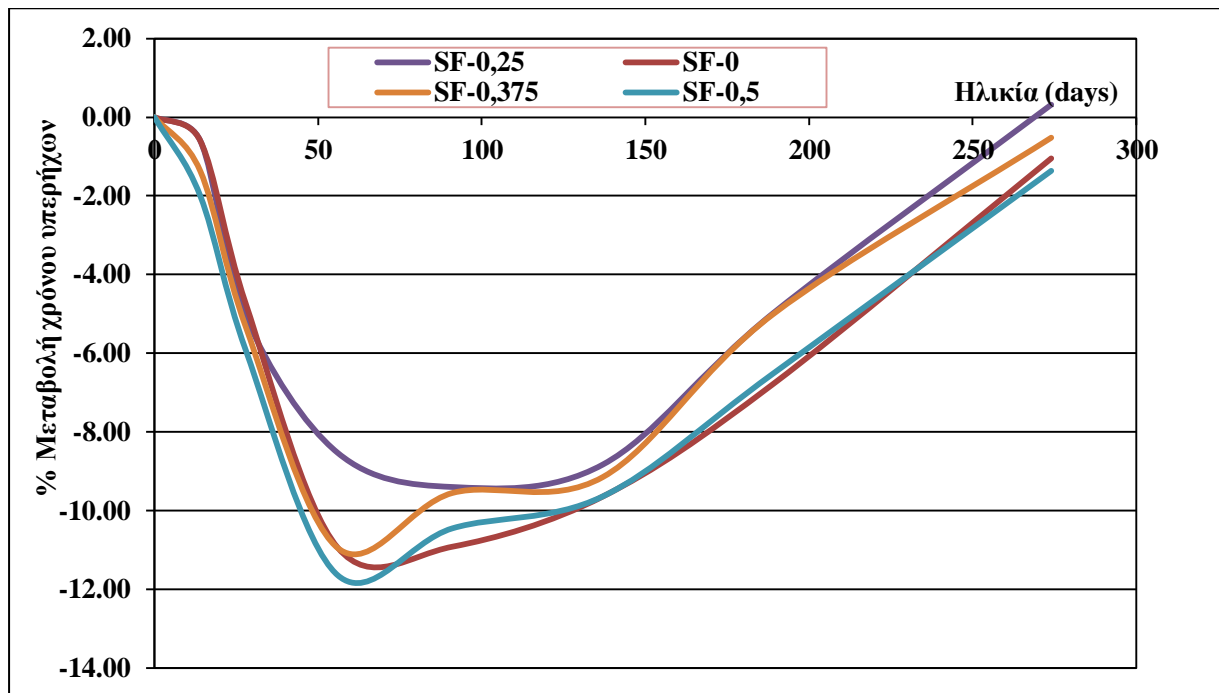
### 2.3.3 Μέτρηση χρόνου διάδοσης υπερήχων

Στον Πίνακα 22 παρουσιάζονται τα ποσοστά μεταβολής του χρόνου διάδοσης των υπερήχων ανά σύνθεση και ηλικία. Η μεταβολή (%), υπολογίζεται σε σχέση με την αρχική της τιμή, όπως αυτή μετρήθηκε ακριβώς πριν την εμφάνιση των δοκιμών στο διάλυμα θεικών. Διαγραμματικά, αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 61.

**Πίνακας 22.** Ποσοστά μεταβολής υπερήχων ανά σύνθεση και ηλικία

Συνθέσεις \ Ημέρες	0	14	28	56	90	140	180	270
SF-0	0,00	-0,60	-4,77	-10,94	-10,92	-9,64	-6,78	-1,05
SF-0,25	0,00	-0,60	-5,09	-8,53	-9,40	-8,83	-4,99	0,32
SF-0,375	0,00	-1,37	-5,36	-10,95	-9,55	-9,15	-5,01	-0,52
SF-0,5	0,00	-2,01	-5,95	-11,64	-10,45	-9,64	-6,52	-1,37

\*Η ηλικία των μηδέν ημερών αναφέρεται στις 28 ημέρες από κάθε σκυροδέτηση



**Σχήμα 61:** Μεταβολή % χρόνου διάδοσης υπερήχων, σε σχέση με την αρχική τιμή της

Όπως φαίνεται από το **Σχήμα 61**, ο χρόνος διάδοσης των υπερήχων μειώνεται σημαντικά στις πρώτες 56 ημέρες χημικής προσβολής από τα θειικά. Στη συνέχεια, καταγράφεται αύξηση του χρόνου διάδοσης υπερήχων. Στην ηλικία των 270 ημερών φαίνεται ότι ο χρόνος διάδοσης επανέρχεται σε παραπλήσιες με τις αρχικές τιμές. Η μείωση του χρόνου διάδοσης των υπερήχων, που αντιστοιχεί σε αύξηση της ταχύτητας τους, υποδηλώνει τη δημιουργία μιας πιο συμπαγούς δομής. Ενδεχομένως, ο αναμενόμενος σχηματισμός ετρινγκίτη, που διαπιστώνεται και κατόπιν της ανάλυσης με περίθλαση ακτίνων X, όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 2.3.5 συντελεί στο φαινόμενο.

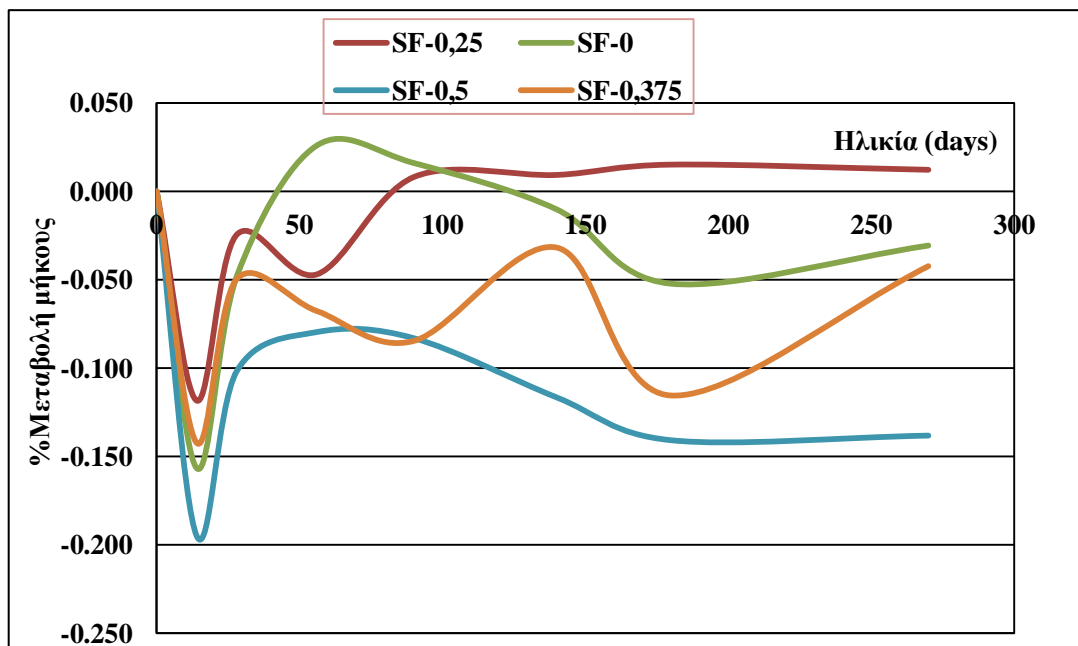
### 2.3.4 Μέτρηση μήκους και βάρους

Τα ποσοστά μεταβολής του μήκους και του βάρους των δοκιμίων ανά σύνθεση και ηλικία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 23** και **Πίνακα 24**, αντίστοιχα. Η μεταβολή αυτή απεικονίζεται διαγραμματικά στο **Σχήμα 62** και **Σχήμα 63**.

*Πίνακας 23. Ποσοστά μεταβολής μηκών ανά σύνθεση και ηλικία*

Συνθέσεις \ Ημέρες	0	14	28	56	90	140	180	270
SF-0	0,000	-0,157	-0,048	0,026	0,016	-0,010	-0,052	-0,031
SF-0,25	0,000	-0,118	-0,024	-0,047	0,008	0,009	0,015	0,012
SF-0,375	0,000	-0,142	-0,050	-0,068	-0,085	-0,032	-0,115	-0,042
SF-0,5	0,000	-0,195	-0,102	-0,080	-0,083	-0,117	-0,141	-0,138

*\*Η ηλικία των μηδέν ημερών αναφέρεται στις 28 ημέρες από κάθε σκυροδέτηση*



*Σχήμα 62: Ποσοστό μεταβολής μήκους ανά σύνθεση και ηλικία*

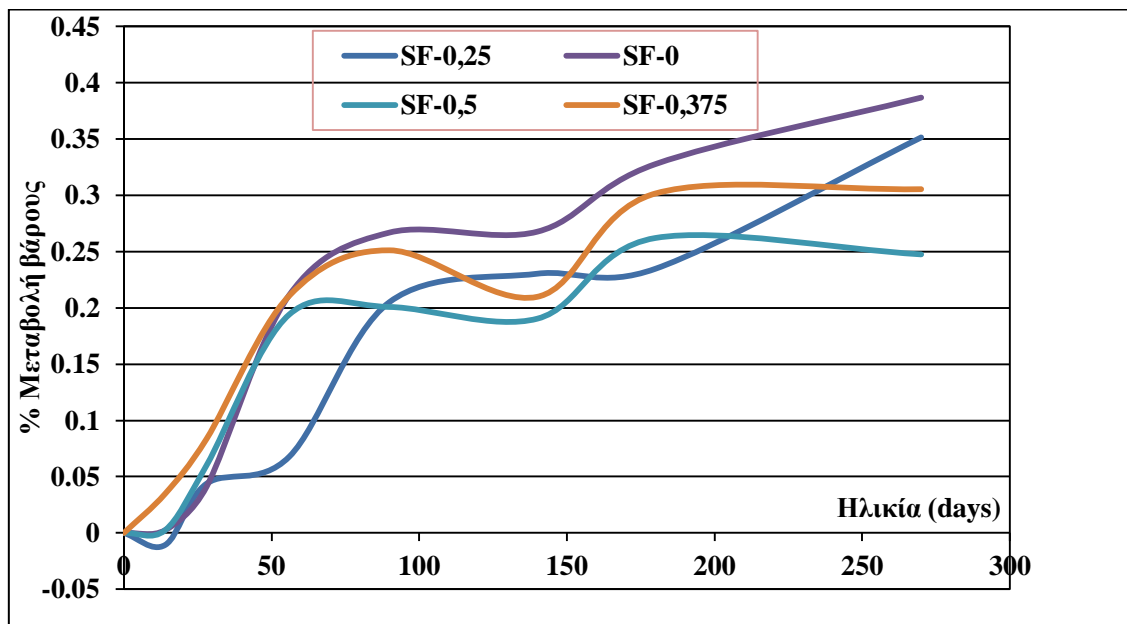
Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 62**, καταγράφεται αρχικά συρρίκνωση των δοκιμίων μέχρι την ηλικία των 14 ημερών. Στη συνέχεια, παρατηρείται ότι η συρρίκνωση περιορίζεται και βαθμιαία μεταβάλλεται σε μικρή διόγκωση. Ωστόσο, καθώς η διακύμανση των μετρήσεων είναι σημαντική, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα. Παρόλ' αυτά είναι σαφής η αντιστροφή του φαινομένου και μια τάση διόγκωσης σε όλα τα δοκίμια.

Αντίστοιχα στον **Πίνακα 24**, παρουσιάζονται τα ποσοστά μεταβολής της μάζας των δοκιμίων με το χρόνο. Τα αποτελέσματα αυτά απεικονίζονται γραφικά στο **Σχήμα 63**.

**Πίνακας 24.** Ποσοστά μεταβολής βαρών ανά σύνθεση και ηλικία

Συνθέσεις \ Ημέρες	0	14	28	56	90	140	180	270
SF-0	0	0,003	0,041	0,211	0,267	0,268	0,328	0,387
SF-0,25	0	-0,011	0,044	0,068	0,205	0,230	0,235	0,352
SF-0,375	0	0,003	0,060	0,194	0,201	0,190	0,262	0,248
SF-0,5	0	0,035	0,084	0,211	0,251	0,210	0,302	0,305

\*Η ηλικία των μηδέν ημερών αναφέρεται στις 28 ημέρες από κάθε σκυροδέτηση



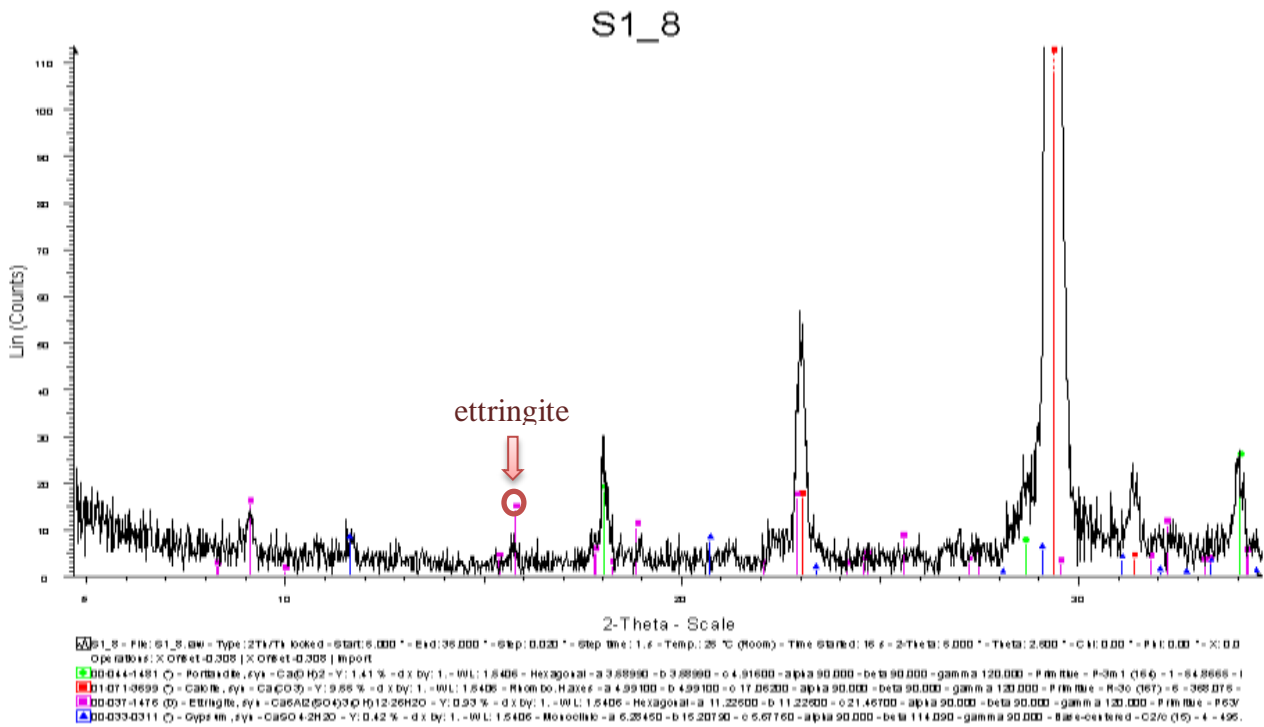
**Σχήμα 63:** Ποσοστό μεταβολής βάρους ανά σύνθεση και ηλικία

Όπως φαίνεται, καταγράφεται βαθμιαία αύξηση του βάρους των δοκιμίων και παρά τη σημαντική διακύμανση των μετρήσεων, η αυξητική τάση είναι σαφής. Η αύξηση αυτή αποδίδεται στο βαθμιαίο σχηματισμό του ετρινγκίτη.

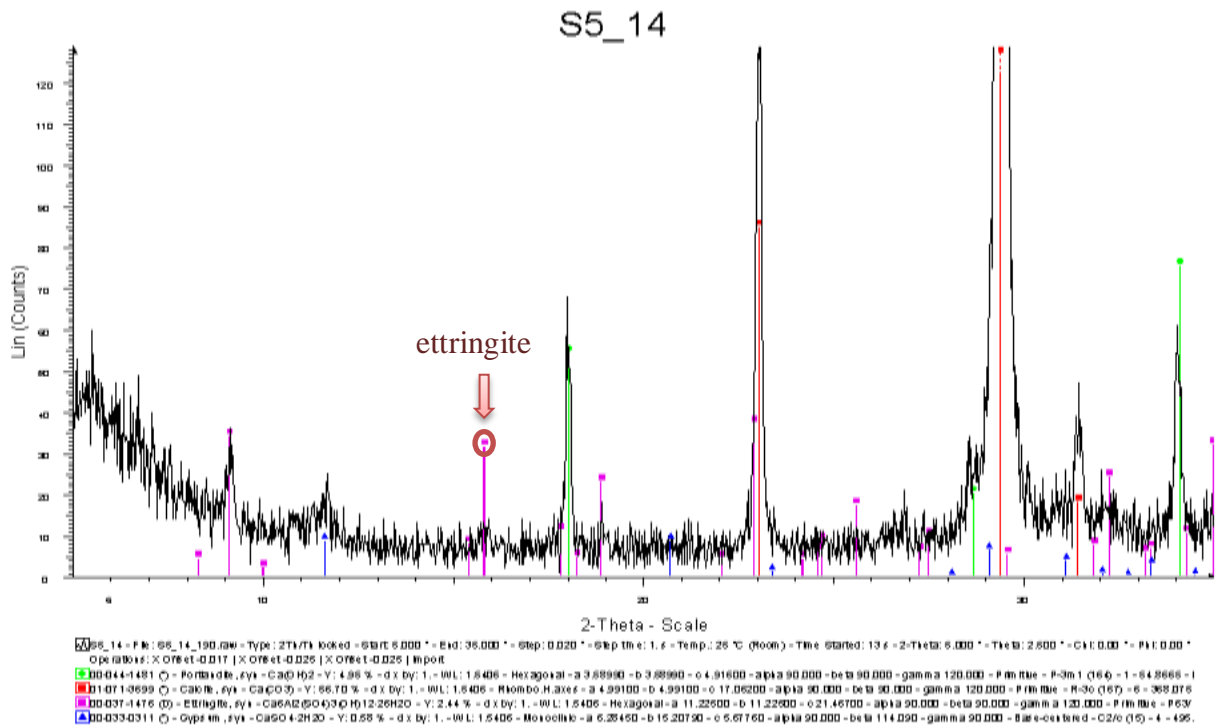
### 2.3.5 Αξιολόγηση της δράσης των θεικών με αναλυτικές τεχνικές (XRD)

Στα Σχήματα 64 - 67, δίνονται ενδεικτικά, χαρακτηριστικά διαγράμματα XRD από τις συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος, μετά από έκθεσή τους για 140 και 180 ημέρες.

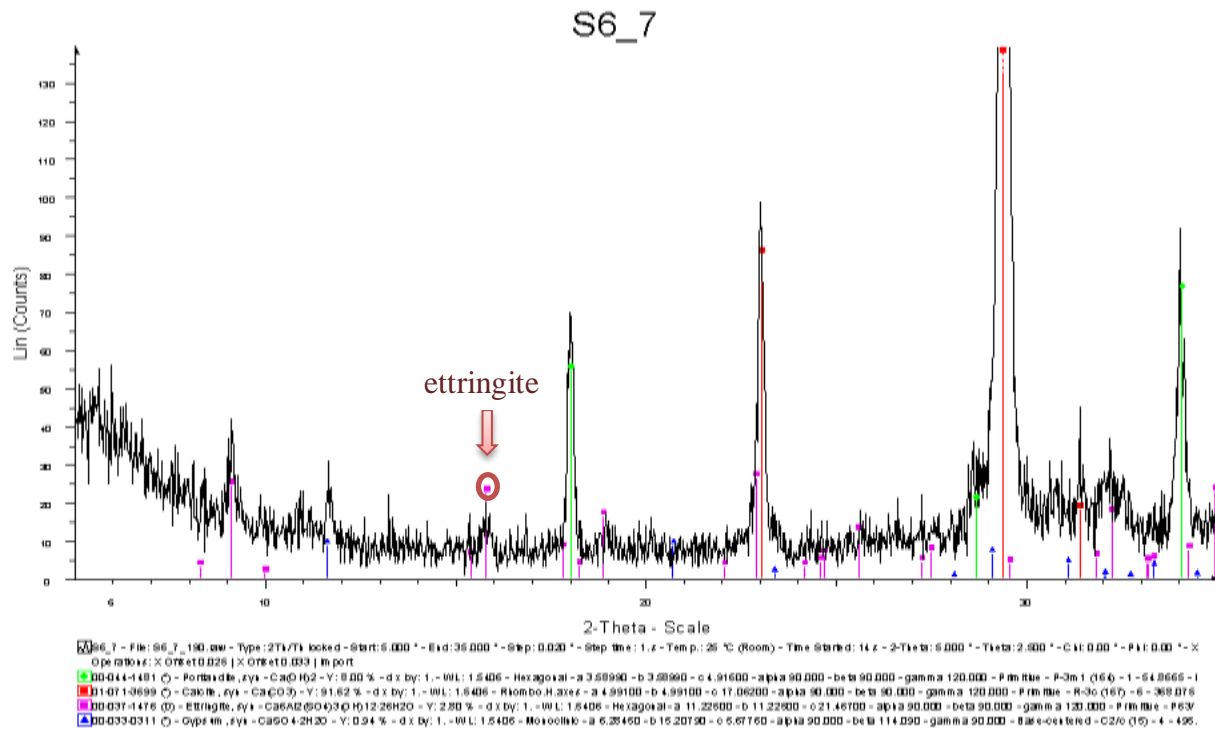
Διαπιστώνεται ο αναμενόμενος σχηματισμός του ετρινγκίτη, για όλες τις συνθέσεις, όπως φαίνεται μέσω των χαρακτηριστικών ανακλάσεων του, στις γωνίες 2θ, 9°, 16°, 23°, περίπου.



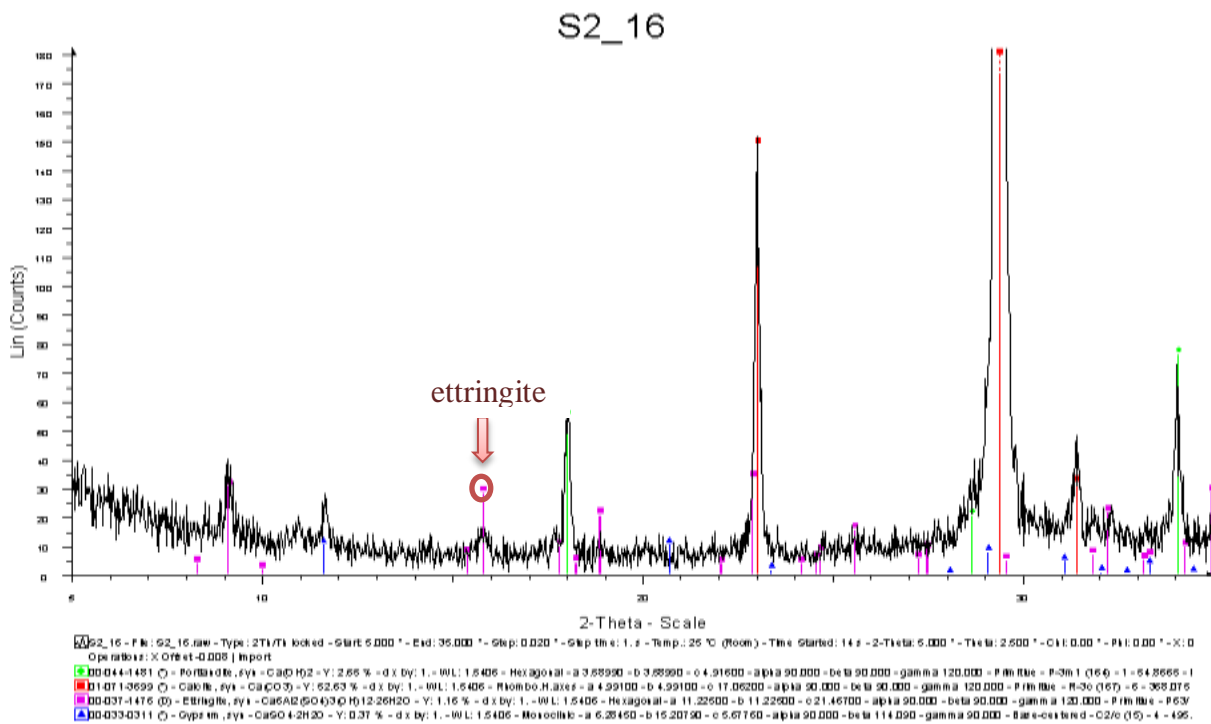
Σχήμα 64: Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0(a) σε ηλικία 140 ημερών



Σχήμα 65: Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0 σε ηλικία 140 ημερών



Σχήμα 66: Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0,25 σε ηλικία 180 ημερών



Σχήμα 67: Διάγραμμα περίθλασης ακτίνων X σύνθεσης SF-0,25(a) σε ηλικία 180 ημερών



### 2.3.6 Συμπεράσματα

- Από τα αποτελέσματα των δοκιμών υδαταπορροφητικότητας και πορώδους δεν παρατηρήθηκε σημαντική επιβάρυνση του πορώδους και του συντελεστή υδατο-απορροφητικότητας ως προς το αμιγές, με την προσθήκη ιών χάλυβα. Η μεγαλύτερη αύξηση υδατο-απορροφητικότητας ως προς το αμιγές (χωρίς ίνες) σκυρόδεμα, καταγράφηκε για τη σύνθεση SF-0,25 με τιμή  $0,171 \text{ mm/min}^{1/2}$  και η μεγαλύτερη μείωση για ποσοστό ιών 0,5% κ.ο. όπου παρατηρήθηκε τιμή του συντελεστή  $0,097 \text{ mm/min}^{1/2}$ . Το πορώδες δε μεταβλήθηκε σημαντικά. Αύξηση σε σχέση με το αμιγές παρατηρήθηκε για ποσοστό ιών 0,375% κ.ο. της τάξης του 3,3% και αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο ανοικτό πορώδες, 12,5%, ενώ η μεγαλύτερη μείωση καταγράφηκε για ποσοστό ιών 0,5% κ.ο. της τάξης του 15,7% και αντιστοιχεί στο μικρότερο ανοικτό πορώδες, 10,2%.
- Μετά από έκθεση σε περιβάλλον  $\text{SO}_4^{-2}$ , δε διαπιστώνεται σημαντική μείωση των αντοχών σε θλίψη, για όλες τις συνθέσεις, μέχρι και τις 180 ημέρες. Μείωση καταγράφεται μόνο για τη σύνθεση SF-0,5 στις 180 ημέρες.
- Κατά τη δοκιμή με τη διάταξη υπερήχων, στα δοκίμια που εκτέθηκαν σε περιβάλλον  $\text{SO}_4^{-2}$  παρατηρήθηκε αρχική μείωση του χρόνου διάδοσης υπερήχων, ο οποίος αυξάνεται για μεγαλύτερες ηλικίες έκθεσης. Η αρχική μείωση του χρόνου διάδοσης, ενδεχομένως αποδίδεται στον –ήπιο αρχικά– σχηματισμό ετρινγκίτη, ο οποίος λειτουργεί πληρωτικά στο πορώδες του σκυροδέματος.
- Οι μετρήσεις μεταβολής της μάζας των αντίστοιχων δοκιμίων, αποδίδουν την επίδραση του σχηματισμού του ετρινγκίτη, εξαιτίας του οποίου βαθμιαία παρατηρείται, τόσο διόγκωση όσο και αύξηση του βάρους των δοκιμίων.
- Με την ανάλυση περίθλασης ακτίνων (XRD) διαπιστώθηκε ο σχηματισμός ετρινγκίτη, μετά από 140 και 180 ημέρες έκθεσης, αντίστοιχα.

#### **2.4. Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

- 1.** Διεξαγωγή πειραμάτων με **ποσοστά ιών** μεγαλύτερα από 1%
- 2.** Χρήση **ιών** διαφορετικής **προέλευσης**
- 3.** Διενέργεια πειραματικής διαδικασίας με χρήση διαφόρων **ποσοστών** πυριτικής παιπάλης ή και άλλων **πρόσθετων**
- 4.** Διεξαγωγή πειραμάτων με άλλα θειικά άλατα, όπως  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$
- 5.** Επέκταση του **διαστήματος μελέτης** για ασφαλέστερα συμπεράσματα
- 6.** Μελέτη δοκιμίων **μεγαλύτερων διαστάσεων** προς αποφυγή φαινομένων κλίμακας

**Βιβλιογραφικές Αναφορές**

1. Γρηγόρης Ρουσάκης, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με θέμα «Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα», Επιβλέπων Καθηγητής: Α. Σοφριανός, Καθηγητής ΕΜΠ, 2010, Αθήνα
2. ΑΙ Σοφριανός, Καθηγητής ΕΜΠ, «Μέτρα υποστήριξης σηράγγων», Κεφάλαιο 6, Μάρτιος 2010
3. Ζωγραφιά Χ. Παπαδάκη, Μεταπτυχιακή εργασία με θέμα «Διερεύνηση εφελκυστικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος», Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Οκτώβριος 2010, Χανιά  
<http://poseidon.library.tuc.gr/artemis/MT2000-0007/MT2000-0007.pdf>
4. Ν. Μαρκαντωνάτος - Κ. Δεμαρτίνος, Μάρτιος 2003, «Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα - Συμπεριφορά SFRC υπό φόρτιση και ικανότητα σε διάτμηση δοκών», 9<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών - 03»
5. Θεοδώρου Χάρης, Φεβρουάριος 2013, «Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, συγκρίσεις του και μηχανικές του ιδιότητες», 19<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές και Ενισχύσεις Κατασκευών - Αφιέρωμα στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.», Πάτρα
6. Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, καθηγητής πανεπιστημίου Πατρών, Τμήμα πολιτικών μηχανικών, Εργαστήριο Μηχανικής και Τεχνολογίας υλικών, 2005, «Δομικά Υλικά», Πάτρα, 7<sup>η</sup> έκδοση
7. Χαρίτου Δ., Κάδογλου Σ. και Τοτολίδου Ε., Πτυχιακή εργασία με θέμα «Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στην κατασκευή, αποκατάσταση και ενίσχυση τεχνικών έργων» με επιβλέπουσα την Κινικλή Μαρία, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, 2013, Θεσσαλονίκη
8. Κ. Κ. Σιδέρης, επίκουρος καθηγητής Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Δομικών Υλικών, Σ. Χ. Ζάρρας, Μηχανικός Περιβάλλοντος, Ζάρρας Σκυρόδεμα Α. Ε. «Η σημασία της συντήρησης στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος λόγω ενανθράκωσης», 15<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, 25 - 27 Οκτωβρίου, 2006, Αλεξανδρούπολη
9. ΕΚΩΣ 2000, Ελληνικός κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος 2000, Απρίλιος 2001, Αθήνα, Εκτυπωτική Αττικής Α.Ε.

10. Παναγιώτης Α. Μιχάλης, Πτυχιακή εργασία με θέμα «Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος» υπό την επίβλεψη του Κονιτόπουλου Γεώργιου, ΑΤΕΙ Θεσσαλονίκης, Δεκέμβριος 2007, Θεσσαλονίκη
11. Κ. Γεωργίου, Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ, «Αποσάθρωση του σκυροδέματος - Κύριες αιτίες», Ομιλία
12. Ευρωκώδικας 2, Σχεδιασμός Κατασκευών από σκυρόδεμα, EN 1992 - 1 - 1: 2004 EL
13. Ευρυδόγλου Ευάγγελος, Πτυχιακή εργασία με θέμα «Συντήρηση και έλεγχος δομικών στοιχείων από σκυρόδεμα» υπό την επίβλεψη του Κονιτόπουλου Γεώργιου, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό εκπαιδευτικό ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Μάιος 2013, Θεσσαλονίκη
14. Δέσποινα Τεταγιώτη, Διδακτορική Διατριβή με θέμα «Πρόβλεψη της διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό εναλλασσόμενες διαβρωτικές συνθήκες», ΕΜΠ, Αθήνα 2011
15. Παναγιώτης Τσίκας, Χαράλαμπος Παπασπυριδάκος, «Ανθεκτικότητα οπλισμένου σκυροδέματος σε διάρκεια», 12<sup>ο</sup> Φοιτητικό Συνέδριο «Ενισχύσεις - Επισκευές Κατασκευών και ανασχεδιασμός υφιστάμενων κατασκευών», Φεβρουάριος 2006, Πάτρα
16. Τσακαλάκης Κώστας, καθηγητής ΕΜΠ, Σχολή Μεταλλειολόγων Μηχανικών, «Ενυδάτωση κοινού τσιμέντου και ποζολανική αντίδραση», 2013
17. Σ. Τσίμας, Καθ. ΕΜΠ και Σ. Τσιβιλής, Αν. Καθ. ΕΜΠ, «Επιστήμη και τεχνολογία τσιμέντου», 2004, Αθήνα, Εκδόσεις ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εργαστήριο ανόργανης και αναλυτικής Χημείας
18. Βασιλείου Δημήτριος, Πτυχιακή εργασία με θέμα «Επιρροή παραθαλάσσιου περιβάλλοντος στην ανθεκτικότητα μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα» με επιβλέποντα καθηγητή τον Μαγείρου Γεώργιο, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, 2014, Αθήνα
19. Τρέζος Γ. Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, Εργαστήριο οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ, «Εκτίμηση της επιτόπου αντοχής του σκυροδέματος (Πυρηνοληψία, υπέρηχοι, κρουσίμετρο)», Ημερίδα ΤΕΕ, Μάρτιος 1999
20. Βασίλης Δρακόπουλος, Κύριος Ε.Λ.Ε. ΙΤΕ/ΕΙΧΗΜΥΘ, «Αρχές, λειτουργία και εφαρμογές περίθλασης ακτίνων - Χ», Τεχνικό Σεμινάριο, Φεβρουάριος 2010, Πάτρα

21. Μονάδα Περίθλασης Ακτίνων - Χ κόνεως, Δίκτυο εργαστηρίων υποστήριξης έρευνας, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
22. Κατσικογιάννη, 2004
23. [www.cement.org](http://www.cement.org)
24. Mehta P., Monteiro P., 2006, Τρίτη Αμερικανική έκδοση, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, McGraw - Hill Companies, Inc, Μετάφραση/επιστημονική επιμέλεια ελληνικής έκδοσης: Παπαγιάννη Ιωάννα, 2011, καθηγήτρια Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
25. [www.understanding-cement.com/sulfate.html](http://www.understanding-cement.com/sulfate.html)
26. <http://theconstructor.org/concrete/sulfate-attack-in-concrete-and-its-prevention/2162/>
27. Popovic S, Popovic J, 1991, "Effect of stresses on the Ultrason pulse velocity in concrete", *Science Magazine "Mater + Struct 24"*, pages 15 - 23
28. Wong C., 2004
29. Amr S. El-Die, "Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra - high - strength self - compacting concrete incorporating steel fibers", *Materials and Design*, April 2009, United Arab Emirates
30. Abbas Al - Ameer, "The effect of steel fiber on some mechanical properties of self-compacting concrete", *American Journal of Civil Engineering*, November 2013, Babylon City, Iraq
31. Dr. Mohammad Jamal Al - Shannag, "Durability of Steel Fiber Reinforced Concrete in Sulfate Environment", King Saud University, College of engineering, Research center, Final Research Report No. 38/426, March 2007, Riyadh, Saudi Arabia