



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ**

Συντονίζουσα Σχολή : **Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών (ΜΜΜ)**
Συμμετέχουσα Σχολή : **Πολιτικών Μηχανικών (ΠΜ)**

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΑΠΟΝΗΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΙΑΤΖΙΔΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων Μεταλλουργών (2010)

Επιβλέπων: Α.Ι. Σοφιανός

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Συντονίζουσα Σχολή : Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών (ΜΜΜ)
Συμμετέχουσα Σχολή : Πολιτικών Μηχανικών (ΠΜ)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΑ ΚΑΤΑΠΟΝΗΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΙΑΤΖΙΔΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ

Διπλωματούχου Μηχανικού Μεταλλείων Μεταλλουργών (2010)

Επιβλέπων: Α.Ι. Σοφιανός

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 24/07/2014

.....
Α.Ι. Σοφιανός

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Π.Π. Νομικός

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ε. Μπαδογιάννης

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2014

.....

ΓΙΑΤΖΙΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κάτοχος

© 2013 - Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος - All rights reserved

Πρόλογος

Στο πλαίσιο του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με συμμετέχουσες σχολές τη σχολή Πολιτικών Μηχανικών και τη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, πραγματοποιήθηκε η παρούσα διπλωματική εργασία.

Παρά τις δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν, η συνεργασία με όλους του εμπλεκόμενους στην διεξαγωγή της εργασίας ήταν άριστη. Πιο συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Αλέξανδρο Σοφιανό, Καθηγητή του τομέα Μεταλλευτικής του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για την επιστημονική του καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, τον κ. Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ, που συνέβαλε ενεργά στην διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας και για τις συμβουλές του κατά τη διάρκεια αυτής. Επιπρόσθετα, θερμές ευχαριστίες αξίζουν στην κα Κορδή Ρεγγίνα, Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό ΑΠΘ, για την αρωγή που μου προσέφερε τόσο κατά την πειραματική διαδικασία όσο και κατά την συγγραφή της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κωνσταντίνο Σακκά, υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ, τον κ. Γιώργο Παπαντωνόπουλο, προσωπικό Ιδιωτικού Δικαίου Αορίστου Χρόνου (Ι.Δ.Α.Χ) στον τομέα Μεταλλευτικής, και τον κ. Δημήτρη Χουμανίδη, υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ, για την πολύτιμη συμβολή τους στην διεξαγωγή αυτής της εργασίας και για τις επιστημονικές γνώσεις που μοιράστηκαν μαζί μου.

Περίληψη

Η εκδήλωση πυρκαγιάς είναι ένα από τα δυσμενέστερα συμβάντα που μπορεί να αντιμετωπιστούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας μίας σήραγγας. Τέτοια περιστατικά έχουν συμβεί αρκετές φορές στο παρελθόν, με το κόστος τους να ανέρχεται σε δεκάδες εκατομμύρια ευρώ αλλά και πολλές εργατοώρες, πρωτίστως δε, σε απώλειες πολλών ανθρώπινων ζωών.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των επιπτώσεων της θερμικής καταπόνησης άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικές περιεκτικότητες ινών, 20, 30 και 40kg/m³, υπό μονοαξονική θλίψη και κάμψη. Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τύπος ινών και η θερμική καταπόνηση πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία 250 °C. Η θερμοκρασία αυτή επιλέχθηκε με την παραδοχή ότι το σκυρόδεμα θα έχει προηγουμένως προστατευτεί με χρήση θερμομονωτικού γεωπολυμερούς, που έχει αναπτυχθεί στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων.

Με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων και τη σύγκρισή τους με μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια ίδιων συστάσεων, που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια άλλης διπλωματικής εργασίας της Κορδή Ρεγγίνας (Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ), εξήχθησαν συμπεράσματα τόσο για την επίδραση αυτών καθαυτών των ινών όσο και της περιεκτικότητάς τους στο θερμικά καταπονημένο σκυρόδεμα καθώς και η βέλτιστη αναλογία ινών για την επίτευξη καλύτερων αντοχών ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Πιο συγκεκριμένα, στα δύο πρώτα κεφάλαια γίνεται αναφορά στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα και ειδικότερα στο εκτοξευόμενο. Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, της θλίψης και της κάμψης, και στο τέταρτο, το φαινόμενο των πυρκαγιών στις σήραγγες και οι επιπτώσεις τους. Τέλος, στο πέμπτο κεφάλαιο, αναλύεται η πειραματική διαδικασία και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που οδηγούν στην εξαγωγή συμπερασμάτων και παρατηρήσεων, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο.

Abstract

Fire in tunnels is one of the worst incidents that can occur during the construction and the operation of a tunnel. Such incidents have occurred several times in the past, costing a lot of money, many man-hours and, mainly, losses of many lives.

The purpose of this thesis is to investigate the effect of thermal stress to non- and reinforced concrete with steel fibers in three different contents of fibers, 20, 30 and 40kg/m³, under uniaxial compression and bending. For the preparation of the specimens on type of fiber was used and the thermal stress was imposed to them at the temperature of 250° C. This temperature was chosen based on the assumption that the concrete was previously protected using thermal insulation geopolymers, which has been developed in the Tunnelling laboratory of NTUA.

Based on the results of the measurements and their comparison with then non heat exposed specimens of the same synthesis, made in the context of another thesis of Kordi Regina (Civil Engineer AUTH), conclusions were reached regarding the effect of both fibers and their content in heat exposed concrete and the optimal ratio of fibers to achieve better strength of fiber reinforced concrete.

More specifically, in the two first chapters, reinforced concrete is being analyzed and shotcrete in particular. In the third chapter, the conducted laboratory tests are described, uniaxial compression and bending test, and in the fourth, fires in tunnels and their effects are listed. Finally, in the fifth chapter the experimental procedure is presented as long as the results of the test which lead to conclusions and observations in the sixth and last chapter.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	i
Περίληψη	ii
Abstract.....	iii
Κατάλογος Πινάκων	vi
Κατάλογος Εικόνων	viii
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	ix
Εισαγωγή.....	1
1 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	2
1.1 Ιστορική αναδρομή	2
1.2 Χρήσεις Ινοπλισμένου Σκυροδέματος.....	3
1.3 Γενικά στοιχεία Ινών.....	5
1.3.1 Χαλύβδινες Ίνες.....	7
1.4 Γεωμετρία	13
1.5 Προσανατολισμός ινών στο χώρο.....	14
1.6 Επίδραση Χωρικών Παραμέτρων	15
1.6.1 Επίδραση του προσανατολισμού	17
1.6.2 Επίδραση της ποσότητας, της απόστασης και της επιφάνειας των ινών	18
1.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών	23
2 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	26
2.1 Δημιουργία μίγματος.....	26
2.2 Παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του σκυροδέματος.....	27
2.3 Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος Ξηρή – Υγρή μίξη	28
2.3.1 Ξηρή μίξη	29
2.3.1.1 Απαιτήσεις	30
2.3.2 Υγρή μίξη.....	34
2.4 Σύγκριση των δύο μεθόδων	37
2.5 Προετοιμασία επιφανειών	38
2.6 Ενδεδειγμένος τρόπος εφαρμογής	39
3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ	40
3.1 Δοκιμή σε νωπό σκυρόδεμα - Εργασιμότητα σκυροδέματος - Δοκιμή κάθισης.....	40
3.2 Δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα.....	43
3.2.1 Δοκιμή Θλίψης	43
3.2.2 Δοκιμή Κάμψης	46
4 ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ	50
4.1 Γενικά.....	50
4.2 Επίδραση της φωτιάς στην σήραγγα ανάλογα με τη μορφή της	53

4.3	Θερμικά φορτία και τυποποιημένα είδη πυρκαγιάς	54
4.3.1	Καμπύλη ISO (ISO-384).....	54
4.3.2	Καμπύλη Υδρογονανθράκων (HC).....	55
4.3.3	Τροποποιημένη Καμπύλη Υδρογονανθράκων (HCM).....	55
4.3.4	Καμπύλες RABT ZTV (car) και RABT ZTV (train)	55
4.3.5	Καμπύλη RWS	56
4.4	Συμπεριφορά δομικών στοιχείων σιηράγγων κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς	56
4.4.1	Συμπεριφορά σκυροδέματος.....	56
4.5	Σύστημα παθητικής πυροπροστασίας με γεωπολυμερή.....	63
5	ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	66
5.1	Υλικά.....	67
5.1.1	Αδρανή.....	67
5.1.2	Τσιμέντο	67
5.1.3	Πυριτική παιπάλη	68
5.1.4	Χαλύβδινες ίνες	68
5.1.5	Ρευστοποιητής	69
5.2	Κοκκομετρική Διαβάθμιση Αδρανών	70
5.3	Όρια καμπύλων κοκκομετρικής διαβάθμισης	74
5.4	Ζύγιση υλικών	76
5.4.1	Δοκιμαστική σύνθεση Δ1	76
5.4.2	Δοκιμαστική σύνθεση Δ2	77
5.4.3	Δοκιμαστική σύνθεση Δ3	77
5.4.4	Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1	77
5.4.5	Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 Α	78
5.4.6	Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 Β	78
5.4.7	Κύρια σύνθεση Σ3 Α.....	78
5.4.8	Κύρια σύνθεση Σ3 Β.....	79
5.4.9	Κύρια σύνθεση Σ3 Γ	79
5.4.10	Κύρια σύνθεση Σ4 Α	79
5.4.11	Κύρια σύνθεση Σ4 Β	80
5.4.12	Κύρια σύνθεση Σ5 Α	80
5.4.13	Κύρια σύνθεση Σ5 Β	80
5.5	Σκυροδέτηση - Εξαγωγή δοκιμίων – Συντήρηση	81
5.6	Έψηση δοκιμίων.....	87
5.7	Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης	88
5.8	Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης	98
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	104
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	106

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1-1: Είδη ινών και χρήσεις τους.....	4
Πίνακας 1-2: Τυπικές ιδιότητες ινών (9 ^ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003).....	7
Πίνακας 1-3: Λόγος μορφής ινών ανάλογα με τη χρήση τους	10
Πίνακας 1-4: Συντελεστής προσανατολισμού ινών	15
Πίνακας 1-6: Σχεδιασμός μίγματος SIFCON (Komatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)	19
Πίνακας 1-5: Είδη ινών και ποσότητες κατ' όγκο που συνήθως χρησιμοποιούνται	19
Πίνακας 1-7: Εξοικονόμηση χρόνου λόγω ινών (Arcelormittal, 2008)	25
Πίνακας 2-1: Σύγκριση των δύο μεθόδων μίξης.....	37
Πίνακας 3-1: Κατηγορίες κάθισης σύμφωνα με τον ΚΤΣ 97	42
Πίνακας 4-1: Περιστατικά πυρκαγιών σε σήραγγες και επιπτώσεις τους	51
Πίνακας 4-2: Επιπτώσεις πυρκαγιάς στο σκυρόδεμα ανάλογα με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία	58
Πίνακας 4-3: Παράγοντες που επηρεάζουν τον τύπο αποκόλλησης	62
Πίνακας 5-1: Χημική ανάλυση τσιμέντου CEM I 42.5R	68
Πίνακας 5-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή Sika Viscocrete Techno 40	69
Πίνακας 5-4: Αποτελέσματα κοκκομετρικής διαβάθμισης.....	73
Πίνακας 5-5: Όρια διαβαθμίσεων για μείγμα αδρανών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 33.....	74
Πίνακας 5-6: Όρια Διαβάθμισης Νο.3.....	75
Πίνακας 5-7: Χρησιμοποιούμενα ποσοστά από κάθε διαβάθμιση αδρανούς	75
Πίνακας 5-8: Ποσότητες υλικών δοκιμαστικής σύνθεσης Δ1	76
Πίνακας 5-9: Ποσότητες υλικών δοκιμαστικής σύνθεσης Δ2	77
Πίνακας 5-10: Ποσότητες υλικών δοκιμαστικής σύνθεσης Δ3	77
Πίνακας 5-11: Ποσότητες υλικών προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ1	77
Πίνακας 5-12: Ποσότητες υλικών προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2Α.....	78
Πίνακας 5-13: Ποσότητες υλικών προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2Β.....	78
Πίνακας 5-14: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ3Α.....	78
Πίνακας 5-15: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ3Β.....	79
Πίνακας 5-16: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ3Γ	79
Πίνακας 5-17: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ4Α.....	79

Πίνακας 5-18: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ4B.....	80
Πίνακας 5-19: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ5A.....	80
Πίνακας 5-20: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ5B.....	80
Πίνακας 5-21: Αποτελέσματα δοκιμών κάθισης	82
Πίνακας 5-22: Βάρος και όγκος πρότυπου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους.....	83
Πίνακας 5-23: Αποτελέσματα μετρήσεων καθαρού βάρους.....	84
Πίνακας 5-24: Παράμετροι της δοκιμής θλίψης.....	89
Πίνακας 5-25: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα)	90
Πίνακας 5-26: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	92
Πίνακας 5-27: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ3 (30kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	93
Πίνακας 5-28: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ4 (40kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	94
Πίνακας 5-29: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ5 (άοπλο σκυρόδεμα)	96
Πίνακας 5-30: Παράμετροι της δοκιμής κάμψης.....	98
Πίνακας 5-31: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ1(άοπλο σκυρόδεμα)	99
Πίνακας 5-32: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	100
Πίνακας 5-33: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ3 (30kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	101
Πίνακας 5-34: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ4 (40kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	102
Πίνακας 5-35: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ5 (άοπλο σκυρόδεμα)	103

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1-1: Χρήσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος στις κατασκευές	5
Εικόνα 1-2: Βασικά είδη ινών (BISFA, 2009).....	6
Εικόνα 1-3: Διάφορες μορφές ινών	7
Εικόνα 1-4: Παραγωγή ινών με εν ψυχρώ κατεργασία χάλυβα	8
Εικόνα 1-5: Κοπή χαλύβδινων φύλλων	8
Εικόνα 1-6: Παραγωγή ινών από τηγμένο μέταλλο	9
Εικόνα 1-7: Φρεζάρισμα χάλυβα	9
Εικόνα 1-8: Διάφορα τύποι ινών και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους	10
Εικόνα 1-9: Προσθήκη χαλύβδινων ινών	11
Εικόνα 1-10: Προσανατολισμός των ινών	14
Εικόνα 1-11: : Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995)	15
Εικόνα 1-12: Λειτουργία των ινών	17
Εικόνα 1-13: Απόσταση(spacing) μεταξύ δύο ινών (Scancem Materials)	21
Εικόνα 2-1: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε τοιχώματα σήραγγας	26
Εικόνα 2-2: Τυπικές αναλογίες σε μείγμα σκυροδέματος	27
Εικόνα 2-3 Επιλογή μεθόδου εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	28
Εικόνα 2-4: Ξηρή μίξη εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος.....	29
Εικόνα 2-5: Διαδικασία υγρής μίξης σκυροδέματος.....	34
Εικόνα 2-6: Απεικόνιση ενδεδειγμένου τρόπου εφαρμογής	39
Εικόνα 3-1: Εικόνα θραύσης μονοαξονικής θλίψης.....	43
Εικόνα 3-2: Ανάλυση τάσεων στη διεπιφάνεια χαλύβδινης πλάκας-σκυροδέματος.....	44
Εικόνα 3-3: Παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη	44
Εικόνα 3-4: Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη.....	45
Εικόνα 3-5: Αστοχία εκρηκτικού τύπου.....	46
Εικόνα 3-6: Δοκιμή κάμψης με φόρτιση στο μέσον (α) και στα τρίτα του ανοίγματος (β)....	47
Εικόνα 3-7: Ροπές που αναπτύσσονται κατά μήκος της δοκού στις δύο περιπτώσεις (α) & (β)	47
Εικόνα 4-1: Τυπικές περιπτώσεις βλαβών ύστερα από εκδήλωση πυρκαγιάς	51
Εικόνα 4-2: Επιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγα	52
Εικόνα 4-3: Εικόνα δοκιμίων μετά από έψηση σε θερμοκρασία 500 °C	60
Εικόνα 5-1: Τετραμερισμός δειγμάτων	70
Εικόνα 5-2: Επιλογή τελικού δείγματος προς κοκκομέτρηση	71
Εικόνα 5-3: Χρησιμοποιούμενα κόσκινα και συσκευή κοσκίνησης.....	72

Εικόνα 5-4: Συγκέντρωση απαραίτητων υλικών προς σκυροδέτηση	76
Εικόνα 5-5: Διαδικασία σκυροδέτησης	81
Εικόνα 5-6: Τελικό προϊόν σκυροδέτησης στον αναδευτήρα	82
Εικόνα 5-7: Διαδικασία δοκιμής κάθισης	83
Εικόνα 5-8: Ζύγιση πληρωμένου δοχείου	85
Εικόνα 5-9: Δόνηση δοκιμίων.....	86
Εικόνα 5-10: Ολοκλήρωση σκυροδέτησης.....	86
Εικόνα 5-11: Φούρνος έψησης δοκιμίων.....	87
Εικόνα 5-13: Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης.....	88
Εικόνα 5-12: Εικόνα δοκιμίων μετά από εκρηκτική αποκόλληση	88
Εικόνα 5-14: Συρραφή μικρορωγμών από τις ίνες	95
Εικόνα 5-15: Δοκιμή Κάμψης	98

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1-1: Επιρροή του προσανατολισμού των ινών στη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος, (Maidl, 1995).....	18
Διάγραμμα 1-2: Ποσότητα ινών και ειδική επιφάνεια ως συνάρτηση του όγκου και της γεωμετρίας τους (Zollo, 1995).....	21
Διάγραμμα 1-3: Επιρροή της απόστασης των ινών στην εφελκυστική αντοχή για διάφορες ποσοστιαίες προσθήκες ινών κατ' όγκο (Romualdi, Batson, 1963).....	22
Διάγραμμα 3-1: Παραμόρφωση καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.....	45
Διάγραμμα 3-2: Σχέση διαστάσεων του δοκιμίου με την αντοχή σε κάμψη για τις δύο περιπτώσεις.....	48
Διάγραμμα 4-1: Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου- θερμοκρασίας.....	54
Διάγραμμα 4-2: Απόδοση Κ-γεωπολυμερούς στην καμπύλη RWS.....	64
Διάγραμμα 5-1: Κοκκομετρικές καμπύλες αδρανών και μείγματος αδρανών	75

Εισαγωγή

Οι αυξανόμενες ανάγκες για κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων καθώς και κατασκευών με ιδιαίτερα αυξημένες απαιτήσεις και προδιαγραφές οδήγησε στην έρευνα για την βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων ενός ευρέως χρησιμοποιούμενου υλικού, του σκυροδέματος. Η έρευνα αυτή ανέδειξε την πολύ καλή συμπεριφορά και ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η ιδέα της χρήσης ινών στα δομικά υλικά υπήρχε από την αρχαιότητα.

Με τον όρο ινοπλισμένο σκυρόδεμα εννοούμε το σκυρόδεμα που περιέχει ίνες οι οποίες είναι διακριτές μεταξύ τους, ομοιόμορφα κατανεμημένες, με τυχαίο προσανατολισμό που σκοπό έχουν την αύξηση της δομικής του ακεραιότητας και των μηχανικών του ιδιοτήτων.

Οι ίνες μπορεί να είναι από χάλυβα (SFRC), από πλαστικά υλικά, αμίαντο (AFRP), γυαλί (GFRP), άνθρακα (CFRP) και οργανικά υλικά.

Η ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα προσδίδει υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό, περιορίζει την ψαθυρή συμπεριφορά του και τον σχηματισμό ρωγμών καθώς και την απώλεια της φέρουσας ικανότητάς του. Ορισμένοι τομείς χρήσης τους είναι οι επισκευές, οι ενισχύσεις κατασκευών, η κατασκευή σηράγγων, βιομηχανικών δαπέδων, θεμελιώσεων και η λίστα συνεχώς διευρύνεται. Στις σήραγγες, οι ίνες χρησιμοποιούνται στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνήθως κατά την πρώτη φάση υποστήριξής τους.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εκτός από τα βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά υπερτερεί έναντι του παραδοσιακά οπλισμένου σκυροδέματος κυρίως στις σήραγγες ως προς τον χρόνο εργασίας και την ασφάλεια τοποθέτησής του.

Η ποικιλία των ινών είναι μεγάλη για αυτό η επιλογή του κατάλληλου τύπου ίνας είναι καθοριστική για τη σωστή συμπεριφορά του σκυροδέματος στην εκάστοτε εφαρμογή. Σημαντικό ρόλο εκτός από το υλικό της ίνας για την απόκτηση των επιθυμητών χαρακτηριστικών παίζει η γεωμετρία της ίνας, ο προσανατολισμός, η παρασκευή και τοποθέτηση του σκυροδέματος (έγχυτο ή εκτοξευόμενο).

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν είναι μόνο να αναδείξει την διαφορά στις ιδιότητες που προσδίδουν οι διαφορετικοί τύποι ίνας ως προς τη γεωμετρία τους αλλά και η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος κάθε τύπου κάτω από συνθήκες πυρκαγιάς.

1 ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Από την αρχαιότητα είχαν γίνει προσπάθειες για τη βελτίωση των οικοδομικών υλικών με χρήση ινών με σκοπό να μειωθεί η ψαθυρή συμπεριφορά τους και η δημιουργία ρωγμών. Οι πρώτες ίνες που κατασκευάστηκαν ήταν από τρίχες από άλογα.

Η ιδέα της μίξης του σκυροδέματος με ίνες στη σύγχρονη εποχή επαναφέρεται περίπου πριν 140 χρόνια με σκοπό την βελτίωση του σκυροδέματος. Σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα γίνονται έρευνες για τη βελτίωση του υλικού αυτού με σκοπό να ανταποκρίνεται στις σύγχρονες απαιτήσεις των κατασκευών.

Έως το 1900 για την παρασκευή ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιούσαν ίνες από αμίαντο όμως εγκαταλείφθηκαν εξαιτίας των βλαβερών συνεπειών του αμιάντου στην ανθρώπινη υγεία.

Η αντικατάσταση το αμιάντου γίνεται με χαλύβδινες ίνες. Στην απλούστερη τους μορφή αρχικά ήταν ευθείες, τώρα πλέον οι διατομές τους και τα γεωμετρικά τους σχήματα ποικίλουν αλλά δύο βασικοί παράγοντες παραμένουν σταθεροί κι αυτοί είναι η ποσότητα των ινών και ο λόγος μήκους προς διάμετρο.

Η μίξη όμως του σκυροδέματος με τις ίνες είχε σαν αποτέλεσμα να ανακύψουν ορισμένα προβλήματα όπως η διαφοροποίηση της τελικής εργασιμότητας του σκυροδέματος εξαιτίας της δημιουργίας συσσωματωμάτων των ινών με αποτέλεσμα η ποιότητα και η αντοχή του σκυροδέματος να είναι υποδεέστερη της αναμενόμενης. Από το 1874 κατοχυρώνονται διπλώματα ευρεσιτεχνίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (A. Berard), ενώ για πρώτη φορά το 1918 ο H. Alfsen λαμβάνει υπόψη του την επιφάνεια των ινών και την αγκύρωσή τους στη μάζα του σκυροδέματος. Οι μετέπειτα ευρεσιτεχνίες αφορούν κυρίως τις μορφές και τις εφαρμογές των ινών.

Μετά το 1960 αρχίζει η εμπειριστατωμένη έρευνα πάνω στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με διεξαγωγή δοκιμών κυρίως με πλαστικές ίνες και τα πεδία εφαρμογής του νέου υλικού αρχίζουν να διευρύνονται. Έτσι, το 1971 πραγματοποιούνται τα πρώτα πειράματα στο Columbus του Battelle Memorial Institute και γίνεται η πρώτη εφαρμογή ινοπλισμένου σκυροδέματος για τη σταθεροποίηση πρανούς σε είσοδο σήραγγας στο Idaho το 1972. Έπειτα ακολούθησε η εφαρμογή του σε στρατιωτικά καταφύγια και επενδύσεις σηράγγων στην Γερμανία.

Στα μέσα της δεκαετίας του 90 άρχισαν να αναπτύσσονται οι συνθετικές ίνες. Η εξέλιξη των ινών αποβλέπει κυρίως στην επίτευξη καλύτερης σύνδεσης με το σκυρόδεμα. Για το λόγο

αυτό αναπτύχθηκαν κυρίως ίνες με πεπλατυσμένα άκρα τα οποία βελτιώνουν την σύνδεση τους με το σκυρόδεμα χωρίς όμως να αυξάνουν το μήκος τους.

Εκτός από τα χαρακτηριστικά των ινών, προκειμένου να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα, χρησιμοποιούνται πρόσμικτα και πρόσθετα.

1.2 Χρήσεις Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα εξαιτίας των βελτιωμένων χαρακτηριστικών του έναντι του συμβατικού σκυροδέματος συνεχώς κερδίζει έδαφος όσον αφορά τις χρήσεις του, είτε με τη μορφή έγχυτου, είτε με τη μορφή εκτοξευόμενου.

Έτσι η εφαρμογή του δεν αφορά μόνο την κατασκευή σηράγγων. Παρακάτω επισημαίνονται μερικά από τα πιο διαδεδομένα πεδία εφαρμογής του.

- Στοιχειώδης ή συμπληρωματική, μόνιμη ή προσωρινή υποστήριξη – τελική επένδυση σηράγγων.
- Έργα ανάπτυξης και προσπέλασης μεταλλείων.
- Στοές διερεύνησης, αποστράγγισης και αποχέτευσης.
- Σταθεροποίηση, επένδυση πρσανών.
- Πάσσαλοι θεμελιώσεως.
- Υποστήριξη θεμελιώσεων.
- Επενδύσεις υδραυλικών έργων και πισίνες.
- 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
- Εγκαταστάσεις αποθήκευσης απορριμμάτων.
- Κατασκευή αρχιτεκτονικών πετασμάτων, ηχοπετασμάτων, αναπλάσεις κοινόχρηστων χώρων, κατασκευή κατοικιών.

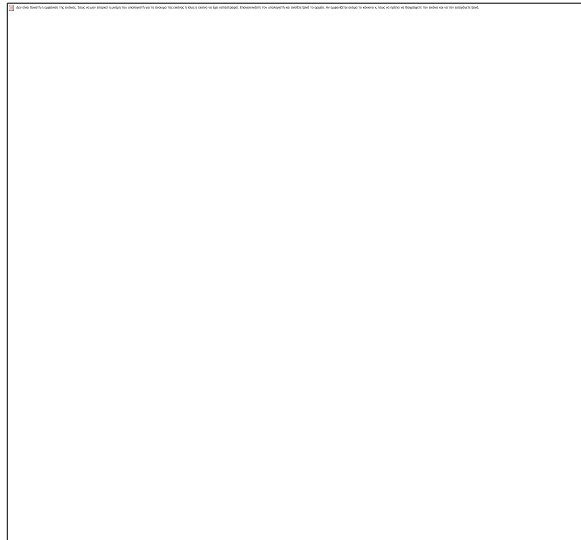
Εκτός όμως από τη χρήση του σαν υλικό κατασκευής χρησιμοποιείται ευρέως και ως υλικό επισκευής.

- Υποστήριξη σηράγγων (βλάβες από σεισμό - πυρκαγιά).
- Γέφυρες.
- Τοιχία αντιστήριξης.

- Αρδευτικά έργα.
- Βιομηχανικές εγκαταστάσεις χημικής επεξεργασίας
- Προβλήτες, κυματοθραύστες, διαφράγματα, φάροι.
- Δεξαμενές νερού.
- Κατασκευή Μανδυών Αντισεισμικής Ενίσχυσης Κτιρίων
- Κτήρια (βλάβες από σεισμό - πυρκαγιά).

Τύπος ινών	Εφαρμογές
Γυαλί	Επίχριση τοίχων πληρώσεως, σωλήνες υπονόμων, κελύφη, κονιάματα, πλαίσια τύπου sandwich, συστήματα περίφραξης
Χάλυβας	Κυψελωτές μονάδες οροφής, επικάλυψη πεζοδρομίων, κατάστρώματα γεφυρών, σωλήνες, διάδρομοι αεροδρομίων, δοχεία πίεσης, κατασκευές ανθεκτικές σε ανεμοριπές, επενδύσεις τούνελ, κατασκευή φλοιού πλοίου
Πολυπροπυλένιο	Πάσσαλοι θεμελίωσης, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, επιράμματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Αμίαντος	Πλέγματα, σωλήνες, μονωτικά υλικά, πυρίμαχα υλικά, ελάσματα οροφής, επένδυση τοίχων
Άνθρακας	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή οροφών, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας, σανίδες
Φυσικές ίνες (ίνα καρύδας, sisal, ζαχαροκάλαμο, bamboo)	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους-αντιπαρέχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι

Πίνακας 1-1: Είδη ινών και χρήσεις τους



Εικόνα 1-1: Χρήσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος στις κατασκευές

1.3 Γενικά στοιχεία Ινών

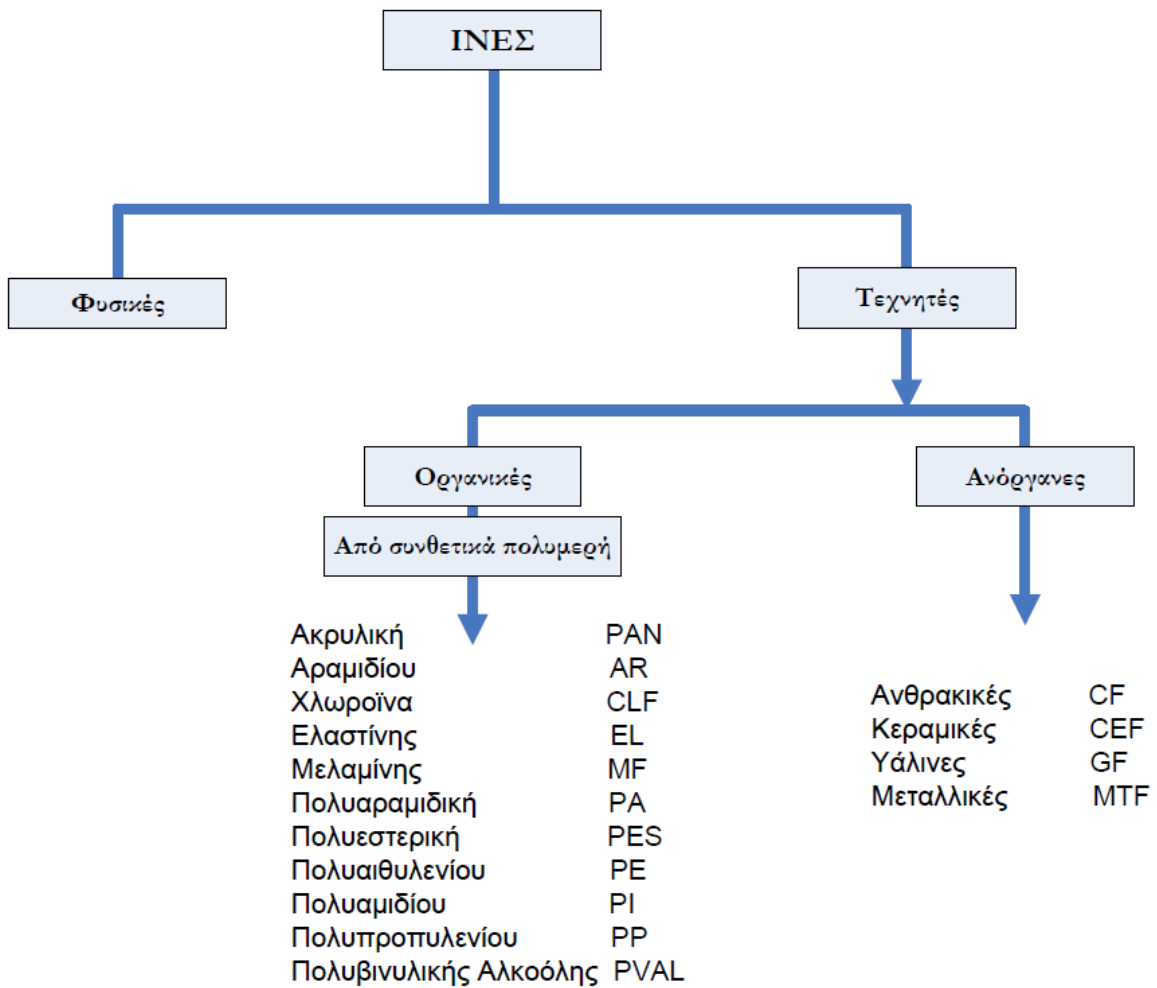
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι ίνες που χρησιμοποιούνται είναι διαφόρων ειδών, όχι μόνο ως προς το μέγεθος και το σχήμα τους αλλά και ως προς το είδος του υλικού τους.

Στην αγορά αυτή τη στιγμή επικρατούν οι χαλύβδινες ίνες όμως υπάρχουν πολλά υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ινών όπως ίνες υάλου, κεραμικές και συνθετικές οι οποίες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ινοπλισμένου σκυροδέματος για συγκεκριμένες χρήσεις. Έτσι ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται το σκυρόδεμα γίνεται και η επιλογή της ίνας.

Όσον αφορά την γεωμετρία της ίνας, εκτός από τη διαφορά στις διαστάσεις και το λόγο μήκους διαμέτρου διαφέρουν ως προς τη γεωμετρία καθώς οι ίνες μπορεί να είναι επίπεδες, με γαντζωτά ή πεπλατυσμένα άκρα, κωνικές, πτυχωτές, με τομή κυκλική, τετραγωνική ή ακανόνιστη. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ίνες οι οποίες είναι προϊόν κοπής μετάλλων.

Πλέον οι περισσότερες ίνες έχουν κάποιο σχήμα το οποίο αποσκοπεί στην καλύτερη σύνδεση της ίνας με το σκυρόδεμα.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας για την χρήση των ινών είναι ο λόγος μορφής δηλαδή ο λόγος του μήκους της ίνας προς τη διάμετρό της (aspect ratio ή l/d) και αυτό διότι το μέγεθος αυτό επηρεάζει την κατανομή των ινών μέσα στο σκυρόδεμα, την μεταξύ τους απόσταση και την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Ο λόγος μορφής δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 150 ώστε να μην επηρεάζεται η εργασιμότητα του σκυροδέματος.



Εικόνα 1-2: Βασικά είδη ινών (BISFA, 2009)

Ίνες	Διαμέτρος (μm)	Μήκος (mm)	Πυκνότητα (Kg/m ³ x10 ³)	Μετρ. Ελαστικ. (GPa)	Λόγος Poisson	Εφελκ. αντοχή (MPa)	Παραμόρφ. θραύσης (%)	Τυπική αναλογία (% κ.ο)
Χάλυβας	100-600	10-60	7,86	200	0,28	700-2000	3,5	0,5-2
Ανοξ. Χαλ	10-330	10-60	7,86	160	0,28	2100	3	0,5-2
Πολυπρο-πυένιο	500-4000	15-75	0,90	3-8	0,30-0,45	400-700	8-25	0,2-1,2
Γυαλί E	8-12	10-50	2,54	72-75	0,25	3500	4,8	2-8
Γυαλί AR	8-12	10-50	2,27	70-76	0,25	2000-3500	3-4,6	2-8
Κέβλαρ 29	10	5-65	1,44	70	0,32	2900	2,1	0,5-2
Κέβλαρ 49	10	5-65	1,45	135	0,35	2900	2,1	0,5-2
Άνθρακας								
υψηλού E	8	10-50	1,90	380	0,35	1800	0,5	2-12
υψηλής f _t	9	10-50	1,90	230	0,35	2600	1,2	2-12
νάυλον	5-200	5-50	1,14	1-5	0,40	750-900	16-20	0,1-6
ξύλο	100-5000	5-50	1,50	50-75	0,2-0,4	700-1000	1-2	2-4

Πίνακας 1-2: Τυπικές ιδιότητες ινών (9^ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003)

1.3.1 Χαλύβδινες Ίνες



Εικόνα 1-3: Διάφορες μορφές ινών

Ο πιο συνηθισμένος τύπος ίνας που χρησιμοποιείται και ιδιαίτερα στα υπόγεια έργα όσον αφορά το υλικό κατασκευής είναι οι χαλύβδινες ίνες.

Η αριστερή όπως φαίνεται στην εικόνα γεωμετρική μορφή ίνας που είναι και η πιο απλή στην ουσία είναι τμήμα ενός λείου σύρματος αλλά μία τέτοια γεωμετρία δεν εξασφαλίζει

ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ του μετάλλου και του σκυροδέματος.

Οι λόγοι που οδήγησαν στην ευρεία διάδοση των χαλύβδινων ινών είναι αρχικά γιατί προϋπήρχε η γνώση και η εμπειρία της σύνδεσης του σκυροδέματος και του χάλυβα στο συμβατικό οπλισμό σκυροδέματος, το μικρό κόστος και η ευκολία παραγωγής τους.

Ουσιαστικά αυτό που προσφέρει η προσθήκη των χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα είναι αύξηση της δυσθραυστότητας του με αποτέλεσμα να του προσδίδουν πλαστιμότητα.

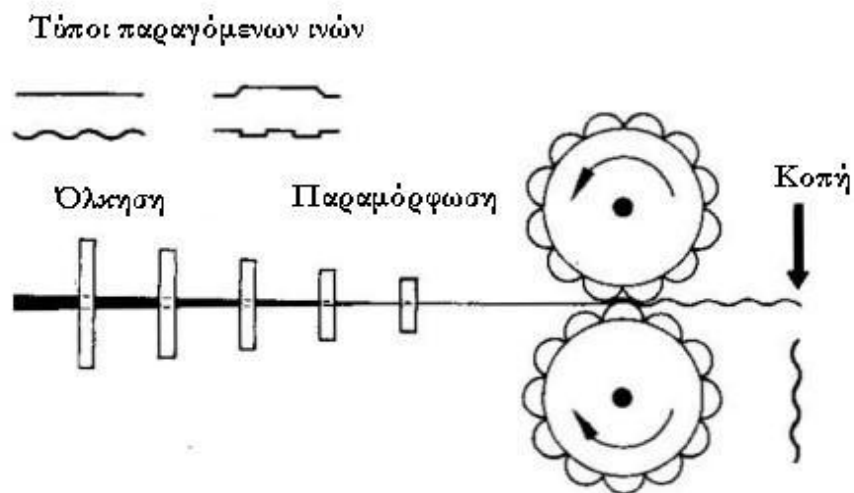
Η εφελκυστική αντοχή των ινών κυμαίνεται μεταξύ 400MPa – 1,5GPa ενώ γίνεται να φτάσει και στα 4GPa όταν χρησιμοποιείται ειδικά σκληρυμένος χάλυβας. Το μέτρο ελαστικότητας και το ειδικό βάρος είναι ίδιο με τους κοινούς χάλυβες δηλαδή 200GPa και

7,5-8 g/cm³.

Οι χαλύβδινες ίνες διαχωρίζονται σε πέντε κατηγορίες ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής τους (American Society for Testing and Materials πρότυπό A 820). Επίσης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM A 820 προδιαγράφονται και η αντοχή σε κάμψη και εφελκυσμό, το μήκος, η διάμετρος και συνεπώς και ο λόγος μορφής.

1) Τύπος I: Ίνες ψυχρής ολκής, οι οποίες αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο και παρασκευάζονται με την εν ψυχρώ κατεργασία σύρματος χάλυβα.

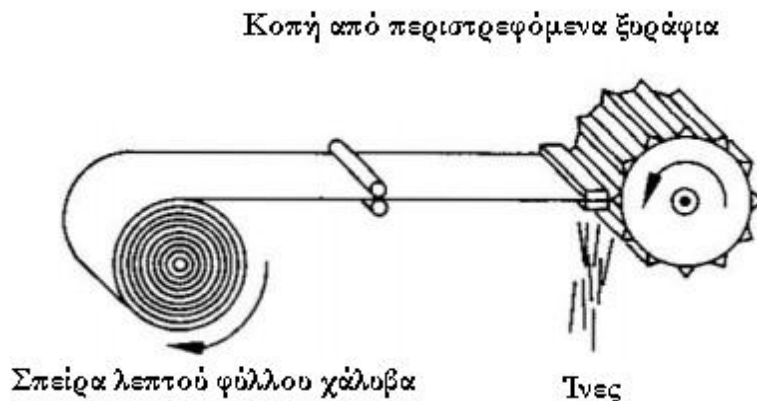
Η εφελκυστική αντοχή σε αυτού του τύπου ίνας είναι 800 - 1.000 MPa. Οι ίνες που παράγονται με αυτή τη διαδικασία επηρεάζονται από την ποιότητα του χάλυβα που μπορεί να είναι μέτριας έως και αρίστης ποιότητας. Στη συνέχεια γίνεται να γίνει γαλβάνισμα του σύρματος.



Εικόνα 1-4: Παραγωγή ινών με εν ψυχρώ κατεργασία χάλυβα

2) Τύπος II: Ίνες που παράγονται από την κοπή χαλύβδινων φύλλων

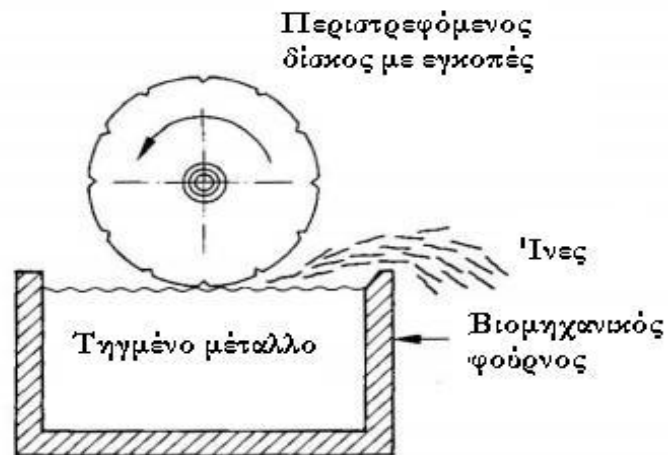
Μετά την κοπή των ινών είναι δυνατόν να επεξεργαστούν ώστε να αποκτήσουν το επιθυμητό σχήμα. Οι ίνες με αυτή τη μέθοδο παραγωγής έχουν εύρος αντοχής 400-1000MPa



Εικόνα 1-5: Κοπή χαλύβδινων φύλλων

3) Τύπος III: Ίνες που παράγονται από τηγμένο μέταλλο

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορούν να δημιουργηθούν ίνες με διάφορες διατομές και μήκη άριστης ποιότητας. Εκτός από την διαδικασία παραγωγής με τον περιστρεφόμενο δίσκο υπάρχουν και οι κλώσης και τυμπάνου (melt spinning and melt drag) οι οποίες όμως δεν χρησιμοποιούνται συχνά εξαιτίας του μικρού ρυθμού παραγωγής



Εικόνα 1-6: Παραγωγή ινών από τηγμένο μέταλλο

4) Τύπος IV: Ίνες που παράγονται με φρεζάρισμα

Οι ίνες που παράγονται με αυτό τον τρόπο αναπτύσσουν αντοχές των 700MPa αλλά είναι πιο εύθραυστες από αυτές που παράγονται με συρματοποίηση εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που παράγεται λόγω της τριβής κατά το φρεζάρισμα. Το σχήμα τους είναι δρεπανοφόρο και η εσωτερική επιφάνεια τους (κοίλη) είναι πιο ανώμαλη σε σχέση με την εξωτερική (κυρτή).



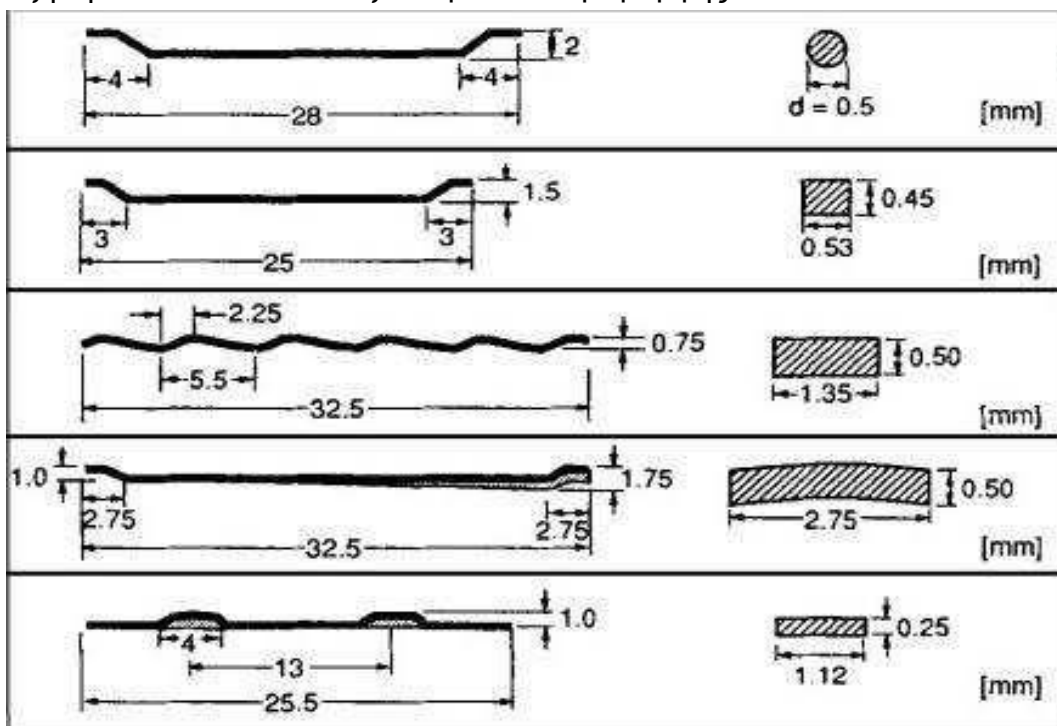
Εικόνα 1-7: Φρεζάρισμα χάλυβα

5) Τύπος V: Ίνες τροποποιημένες που παράγονται όπως αυτές του τύπου I

Όλες οι ίνες δεν είναι κατάλληλες για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα κυρίως λόγω του μεγέθους τους για παράδειγμα ίνες με μήκος μεγαλύτερο από 30cm απαιτούν ειδικά ακροφύσια.

1.3.1.1 Λόγος μορφής

Κάθε εταιρία παραγωγής ινών προτείνει κάποιους λόγους μορφής ώστε να ανταποκρίνεται το σκυρόδεμα σε κάθε χρήση. Για γενική χρήση ο προτεινόμενος λόγος μορφής είναι 40-45 ενώ για αύξηση των επιδόσεων αυξάνουμε τον λόγο μορφής.



Εικόνα 1-8: Διάφορα τύποι ινών και γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους

Dramix		ΕΤΑΛ	
Χρήση	Λόγος μορφής	Χρήση	Λόγος μορφής
Βασική χρήση	45	Γενική χρήση	40
Καλύτερες επιδώσεις, οικονομία, ευκολία χειρισμού	65		
Πολύ υψηλές αντοχές, πλαστιμότητα και περιορισμό των ρωγμών	80		

Πίνακας 1-3: Λόγος μορφής ινών ανάλογα με τη χρήση τους

Τα χαρακτηριστικά των ινών που θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε είναι το μεγάλο μήκος και το μικρό πάχος, ενώ η ποιότητα του χάλυβα θέλουμε να είναι όπως του χάλυβα του συμβατικού οπλισμού η ανώτερη. Ωστόσο το μεγάλο μήκος των ινών δημιουργεί προβλήματα στον χειρισμό του σκυροδέματος. Τα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν το

κόστος των ινών είναι η ποιότητα του χάλυβα, η μέθοδος παραγωγής τους και η διάμετρος των ινών με το κόστος να αυξάνει όσο μειώνεται η διάμετρος. Το ποσοστό των ινών που θα τοποθετηθεί στο σκυρόδεμα εξαρτάται από το αν το σκυρόδεμα είναι έγχυτο ή εκτοξευόμενο και την χρήση για την οποία προορίζεται. Ενδεικτικά στο έγχυτο σκυρόδεμα οι ίνες συμμετέχουν σε ένα ποσοστό της τάξεως του 0,5-2% κατ' όγκο ενώ στο εκτοξευόμενο μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερη αναλογία, όσο όμως αυξάνεται το ποσοστό αυτό έχει σαν συνέπεια την μείωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος καθώς και τη χρήση ειδικών τεχνικών εκτόξευσης και μίξης.

1.3.1.2 Προσθήκη χαλύβδινων ινών



Εικόνα 1-9: Προσθήκη χαλύβδινων ινών

Η προσθήκη των χαλύβδινων ινών μπορεί να γίνει στις ακόλουθες φάσεις παραγωγής ινοπλισμένου σκυροδέματος:

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

Η γεωμετρία των ινών παίζει σημαντικό ρόλο ως προς τη δυνατότητα διασποράς τους στο μίγμα. Έτσι, ο λόγος μορφής δεν επηρεάζει μόνο την αγκύρωση των ινών στο σκυρόδεμα αλλά και τον τρόπο μίξης τους.

Έχει παρατηρηθεί ότι:

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

Με την αύξηση της χρήσης των ινών και την πρόοδο της τεχνολογίας δημιουργούνται νέες λύσεις στην τροφοδοσία των ινών. Οι περισσότερες στηρίζονται στη χρήση περιστρεφόμενων τυμπάνων όπου με την βοήθεια της φυγόκεντρου δύναμης επιτυγχάνεται αύξηση της ομοιομορφίας κατανομής τους στο μίγμα. Άλλες προτάσεις υποδεικνύουν την δημιουργία ινών αμέσως πριν την εισαγωγή τους στο μίγμα με τη χρήση ημικατεργασμένου χαλύβδινου σύρματος το οποίο διέρχεται διαμέσου κυλίνδρων ώστε να ρυθμιστεί η διάμετρος του και στη συνέχεια γίνεται η κοπή του με τη βοήθεια λεπίδων. Οι ίνες συγκεντρώνονται σε ένα δοσομετρητή από τον οποίο όταν παραχθεί η απαιτούμενη ποσότητα ινών μεταφέρονται σε περιστρεφόμενο τύμπανο και προστίθενται στο μίγμα. Η τελευταία μέθοδος έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση του κόστους εξαιτίας της μείωσης του χρόνου παραγωγής του ινοπλισμένου σκυροδέματος και της εξάλειψης του κόστους μεταφοράς και της αποθήκευσης των ινών.

Προκειμένου να χρησιμοποιήσουμε ίνες με μεγαλύτερο μήκος χρησιμοποιούμε τη μέθοδο της προσθήκης των ινών μέσω του ακροφυσίου ώστε να μειώσουμε τον κίνδυνο απόφραξης των σωληνώσεων.

1.3.1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα χαλύβδινων ινών

Στα πλεονεκτήματα της χρήσης των χαλύβδινων ινών εκτός από το κόστος και την ευρεία διαθεσιμότητα τους, συγκαταλέγονται και ότι βοηθούν τον ομοιόμορφο καταμερισμό των τάσεων, δεν επηρεάζουν την συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος και καθυστερούν την ρηγμάτωση.

Στον συμβατικό οπλισμό σκυροδέματος έχει θεσπιστεί κανονισμός ο οποίος αναφέρει ότι πρέπει να επικαλύπτεται ο χάλυβας με ένα ορισμένο πάχος σκυροδέματος προκειμένου να αποφευχθεί η διάβρωσή του (20-50mm).

Οι χαλύβδινες ίνες εξαιτίας και της μεγάλης επιφάνειας τους σαν σύνολο οπλισμού είναι πιο επιρρεπείς στην διάβρωση και ειδικότερα στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα στο οποίο είναι ανέφικτο να υπολογιστεί η ελάχιστη επικάλυψη εξαιτίας της διασκόρπισης των ινών στο μίγμα. Γίνεται αποδεκτό ότι μία επικάλυψη της τάξεως του 1mm είναι αρκετή για να μην επιφέρει διάβρωση στις ίνες.

Άλλα προβλήματα στη χρήση των ινών γενικότερα έχουν να κάνουν κυρίως με την ποσότητα, το μέγεθός τους και τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται. Γενικά όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της ίνας και το ποσοστό τους στο μίγμα, τόσο δυσκολότερη γίνεται η διαχείριση του μίγματος με αποτέλεσμα να χρειάζονται ειδικοί εκτοξευτήρες στην περίπτωση του εκτοξευόμενου και τεχνικές μίξης.

1.4 Γεωμετρία

Το υλικό κατασκευής και η γεωμετρία των ινών καθορίζουν την καταλληλότητα της ίνας για την εκάστοτε εφαρμογή. Η ποικιλία των ινών είναι πολύ μεγάλη τόσο όσον αφορά την γεωμετρία τους (πολυγωνικής, κυκλικής διατομής, με άγκιστρα ή χωρίς) όσο και το υλικό κατασκευής τους όπως προαναφέρθηκε.

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

Η ισοδύναμη διάμετρος ίνας κυκλικής διατομής προκύπτει ως εξής:

$$d_e = 2 \cdot \sqrt{\frac{A}{2\pi}} \quad (1.1)$$

όπου A : επιφάνεια διατομής ίνας

Ενώ η ισοδύναμη διάμετρος χαλύβδινων ινών με ακανόνιστη μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$d_e = 12,74 \cdot \sqrt{\frac{m}{L}} \quad (1.2)$$

όπου:

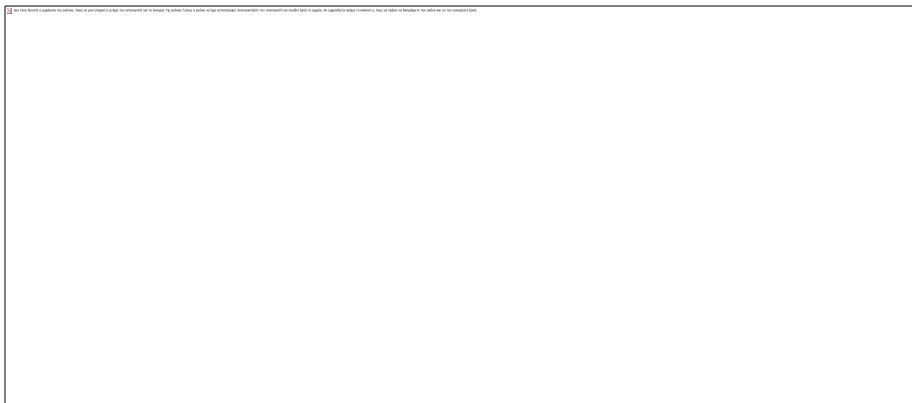
m: μέσο βάρος σε γραμμάρια ενός δεδομένου αριθμού ινών

L: το μέσο μήκος της ίνας σε χιλιοστά

Η ισοδύναμη διάμετρος καθορίζει την ευκαμψία της ίνας. Έτσι μικρή ισοδύναμη διάμετρος σημαίνει μικρή ευκαμψία η οποία προσδίδει στις ίνες μία συγκεκριμένη ικανότητα να προσαρμόζονται στο χώρο και στο σχήμα ανάμεσα στα αδρανή. Αντίθετα μεγάλη ισοδύναμη διάμετρος σημαίνει μεγάλη ευκαμψία η οποία επηρεάζει τη συμπύκνωση, την ανάμιξη και τη διάσπρωση.

Το σημαντικότερο μέγεθος για την περιγραφή της ίνας, το οποίο καθορίζει το βαθμό λυγηρότητας και αποτελεί το μέτρο ευκαμψίας της, είναι ο λόγος μορφής δηλαδή η αναλογία μεταξύ μήκους και διαμέτρου της ίνας (l/d).

1.5 Προσανατολισμός ινών στο χώρο



Εικόνα 1-10: Προσανατολισμός των ινών

Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα σημαντική επιρροή στις μηχανικές ιδιότητες παίζει η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών στον χώρο.

Οι ίνες διασπείρονται τρισδιάστατα μέσα στο σκυρόδεμα και συρράπτουν τις αντικριστές επιφάνειες των ρωγμών παραλαμβάνοντας εφελκυστικές τάσεις παρεμποδίζοντας τη διάδοση των ρωγμών. Οι ίνες έχουν βέλτιστο προσανατολισμό όταν αναπτύσσονται προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης διότι οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα σε αυτήν. Όσο πυκνότερη είναι η συγκέντρωση των ινών τόσο ευκολότερα παραλαμβάνουν φορτία αφού δρουν συνδυαστικά πλέον, γεγονός που κάνει τη χρήση τους περισσότερο

αποτελεσματική. Επειδή δεν είναι δυνατόν όλες οι ίνες να βρίσκονται στην κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης που τείνει να προκαλέσει τη ρωγμή είναι πολύ πιθανό να συναντούν τη ρωγμή πλάγια και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να μειώσει την δράση τους. Η μείωση της αποτελεσματικότητας τους υπολογίζεται μαθηματικά με κατάλληλους συντελεστές. Μία ίνα συμμετέχει στην ανάληψη δυνάμεων όταν η κλίση της ως προς τη διεύθυνση της δύναμης δεν είναι μεγαλύτερη των 45°.

1.6 Επίδραση Χωρικών Παραμέτρων



Εικόνα 1-11: : Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995)

Ο προσανατολισμός των ινών δεν είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί, ούτε στις εργαστηριακές δοκιμές ούτε στην πραγματική εφαρμογή επειδή επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες (π.χ. τρόπος και διάρκεια συμπύκνωσης). Ο προσανατολισμός τους όμως εντάσσεται σε ένα από τα παραπάνω μοντέλα (εικόνα 1-11). Οι εργαστηριακές δοκιμές για τον ποιοτικό έλεγχο πρέπει να προσομοιώνουν τα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος κατά την εφαρμογή του στο έργο, κάτι όμως που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθεί για αυτό πρέπει να χρησιμοποιούνται συντελεστές προσανατολισμού όπως του παρακάτω πίνακα.

Συντελεστής προσανατολισμού	Σχόλια, πηγή
$\eta_{f2D} = 0.444$	Το κέντρο της ίνας βρίσκεται σε απόσταση $L_f/2$ από ένα άκρο
$\eta_{f2D} = 0.375$	Krenchel, 1964
$\eta_{f2D} = 0.637$	Parimi, Rao, 1971
$\eta_{f2D} = 1 - \frac{2}{15}(1 - V_f) \left(\frac{6(n-1)}{n} + v_c \right)$	Schnütgen, 1975

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

Πίνακας 1-4: Συντελεστής προσανατολισμού ινών

Σύμφωνα με τον Kobayashi (1982), ορίζεται ο συντελεστής διασποράς των ινών ως (σχέση 1.3):

$$\alpha = \exp[-\psi(x)]$$

Όπου (σχέση 1.4):

$$\psi(x) = \frac{\sqrt{\sum (X_i - X)^2}}{X}$$

και:

X_i = αριθμός ινών που περιέχει το κάθε δείγμα

X = μέσος αριθμός ινών που περιέχει το κάθε δείγμα

n = ο αριθμός των δειγμάτων

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

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

Έτσι είναι (σχέση 1.5):

$$\beta = \frac{\rho \times A}{V_f}$$

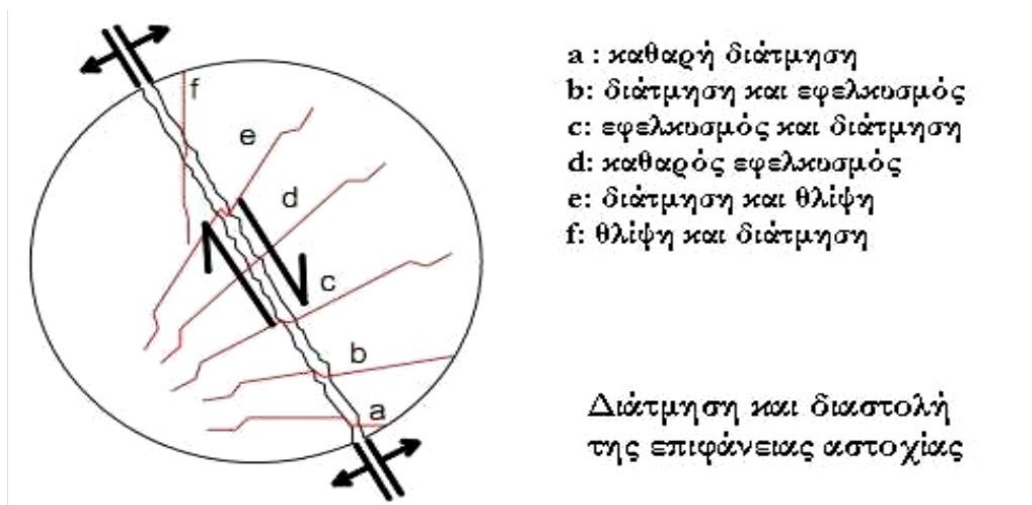
Όπου:

ρ = το ειδικό βάρος των ινών

A = η επιφάνεια της διατομής

V_f = η ποσότητα των ινών κατ' όγκο

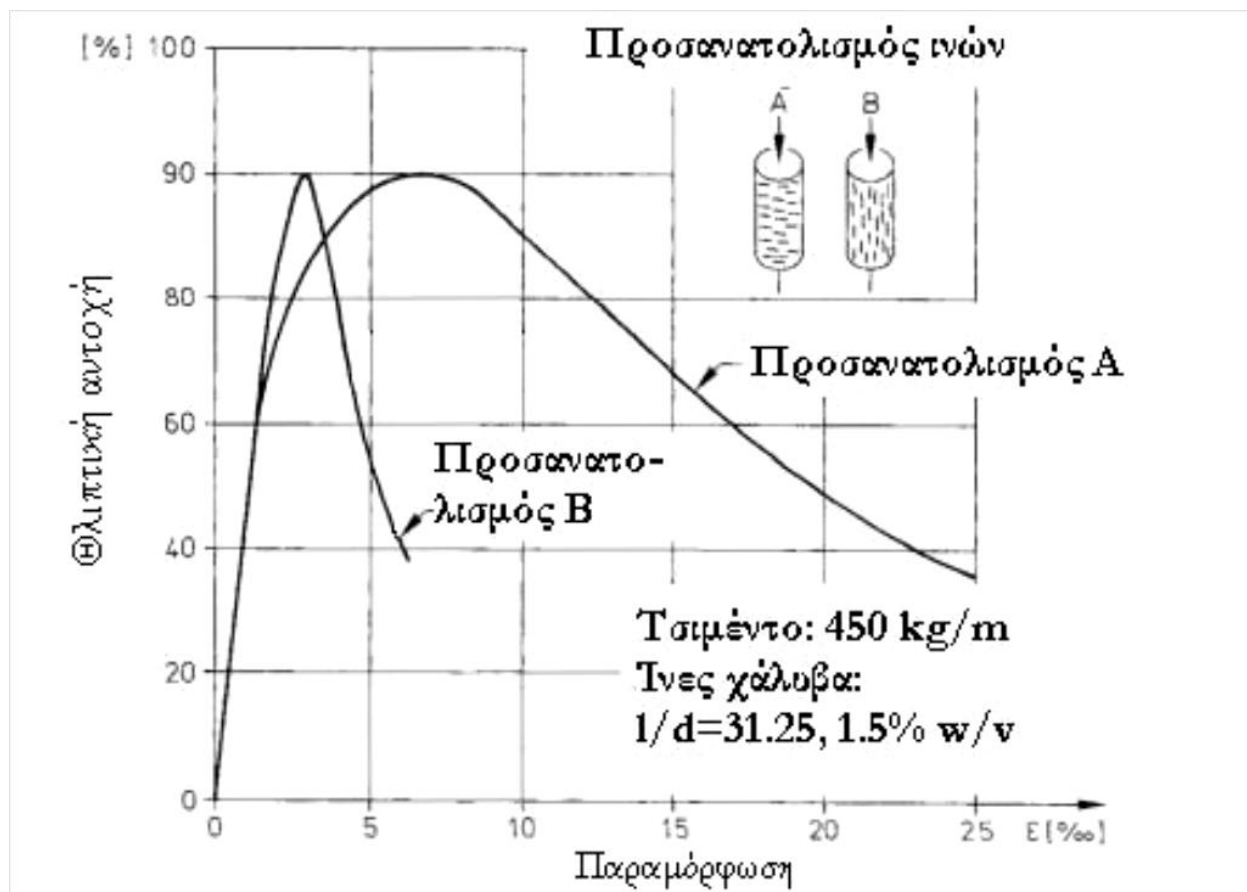
Προκειμένου η ίνα να παραλαμβάνει φορτία και να επιτελεί το έργο της, δηλαδή να εμποδίζει τη διάδοση των ρωγμών, τα άκρα της ίνας πρέπει να είναι επαρκώς αγκυρωμένα στις πλευρές της ρωγμής.



Εικόνα 1-12: Λειτουργία των ινών

1.6.1 Επίδραση του προσανατολισμού

Οι δυνατοί προσανατολισμοί των ινών στο χώρο είναι τρεις όπως φαίνεται και στην εικόνα 1-11 ωστόσο ο ένας εξ αυτών όπου απεικονίζονται οι ίνες να έχουν ευθυγραμμιστεί προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση επιτυγχάνεται στο έγχυτο σκυρόδεμα με τη βοήθεια μαγνητικού δονητή. Όσον αφορά το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, ο προσανατολισμός των ινών είναι συνήθως κάθετος στην κατεύθυνση ψεκασμού για αυτό το λόγο πειραματικά αποτελέσματα πυρήνων, οι οποίοι έχουν ληφθεί παράλληλα στην κατεύθυνση ψεκασμού, έχουν δείξει καλύτερα αποτελέσματα από αυτούς που έχουν ληφθεί κάθετα στην κατεύθυνση ψεκασμού.



Διάγραμμα 1-1: Επιρροή του προσανατολισμού των ινών στη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος, (Maidl, 1995)

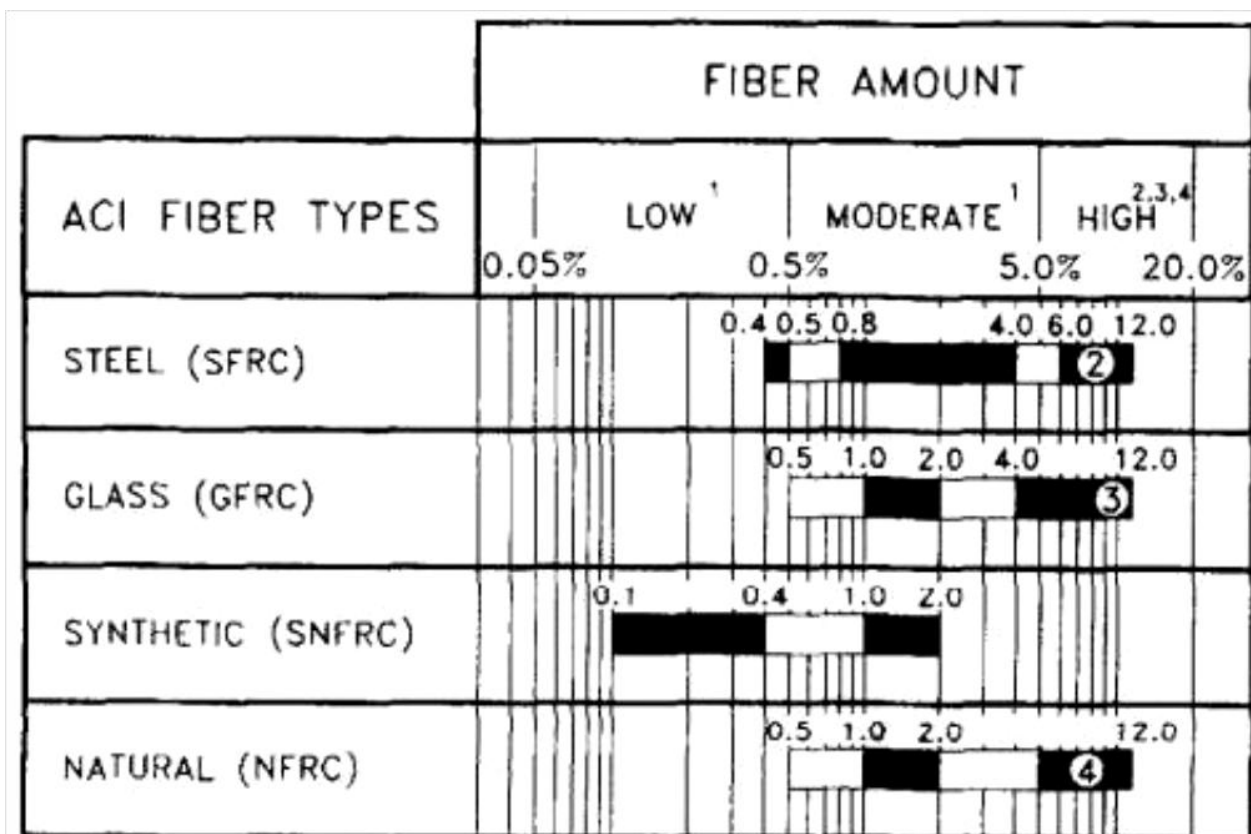
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα ανισότροπο υλικό.

Έχει παρατηρηθεί από εργαστηριακές δοκιμές (Keyter and Dreschert) ότι τα δοκίμια ευνοϊκού προσανατολισμού έχουν 25% μεγαλύτερη αντοχή σε μονοαξονική θλίψη συγκριτικά με αυτά που έχουν ληφθεί με δυσμενή προσανατολισμό ενώ εμφανίζουν και μεγαλύτερη πλαστικότητα και απορροφούν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Κατά τη διάστρωση έχει παρατηρηθεί ότι αρχικά οι ίνες τείνουν να προσανατολίζονται παράλληλα με την επιφάνεια διάστρωσης και με την αύξηση του πάχους της στρώσης ο προσανατολισμός των ινών τείνει να γίνει πιο τυχαίος.

1.6.2 Επίδραση της ποσότητας, της απόστασης και της επιφάνειας των ινών

Γενικά για να έχουμε βέλτιστη απόδοση των ινών πρέπει η περιεκτικότητα στο σκυρόδεμα να είναι μεγαλύτερη από 25kg/m³ δηλαδή 1% κατά βάρος ή 0,33% κατ' όγκο.

Η αύξηση της περιεκτικότητας των ινών όμως επηρεάζει την εργασιμότητα του σκυροδέματος για αυτό στις συνήθεις εφαρμογές η περιεκτικότητα των ινών κυμαίνεται μεταξύ 50-100kg/m³ ανάλογα με τον τύπο των ινών και την μέθοδο προσθήκης.



■ Τυπικά εύρη ποσοτήτων ινών

Πίνακας 1-5: Είδη ινών και ποσότητες κατ' όγκο που συνήθως χρησιμοποιούνται (Zollo, 1995)

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

Κατά την παρασκευή ενός ειδικού δομικού υλικού του SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber CONcrete), το οποίο προορίζεται για ειδικά έργα, το παραπάνω όριο υπερκαλύπτεται εξαιτίας της μεθόδου παρασκευής αυτού του υλικού.

Υλικό	Αναλογία (kg/m ³)
Τσιμέντο	1000
Νερό	330
Πυριτική άμμος ≤ 0.7mm	860
Πυριτικός πολφός	13
Ρευστοποιητής	35
Ίνες γάλυβα	800

Πίνακας 1-6: Σχεδιασμός μίγματος SIFCON (Komatka, Kerkhoff, Panarese, 2002)

Από το παράδειγμα του SIFCON βλέπουμε ότι η επιθυμητή περιεκτικότητα των ινών στο μίγμα μπορεί αν υποδείξει την μέθοδο παραγωγής του σκυροδέματος.

Ο πραγματικός αριθμός ινών στη μονάδα όγκου μπορεί να υπολογισθεί με μια από τις παρακάτω σχέσεις (1.6-1.10) :

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

(ACI 544.1R)

Όπου:

FC(fiber count)= ποσότητα των ινών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος

FSS (fiber specific surface)= ειδική επιφάνεια των ινών ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος

V = ο συνολικός όγκος ινών (%)

l = μήκος ινών (inches)

d = ισοδύναμη διάμετρος ινών (inches)

SG (Specific Gravity)= ειδικό βάρος της ίνας

DRT (Fiber Dosage Rate) = δοσολογία ινών (lb/yd³)

PoMD = γραμμική μάζα ίνας μετά τη μίξη, για συνθετικές ίνες (PoMD)

Ποσότητα των ινών ανά κιλό (σχέση 1.11):

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

Όπου:

l = μήκος ινών (mm)

d = ισοδύναμη διάμετρος ινών (mm)

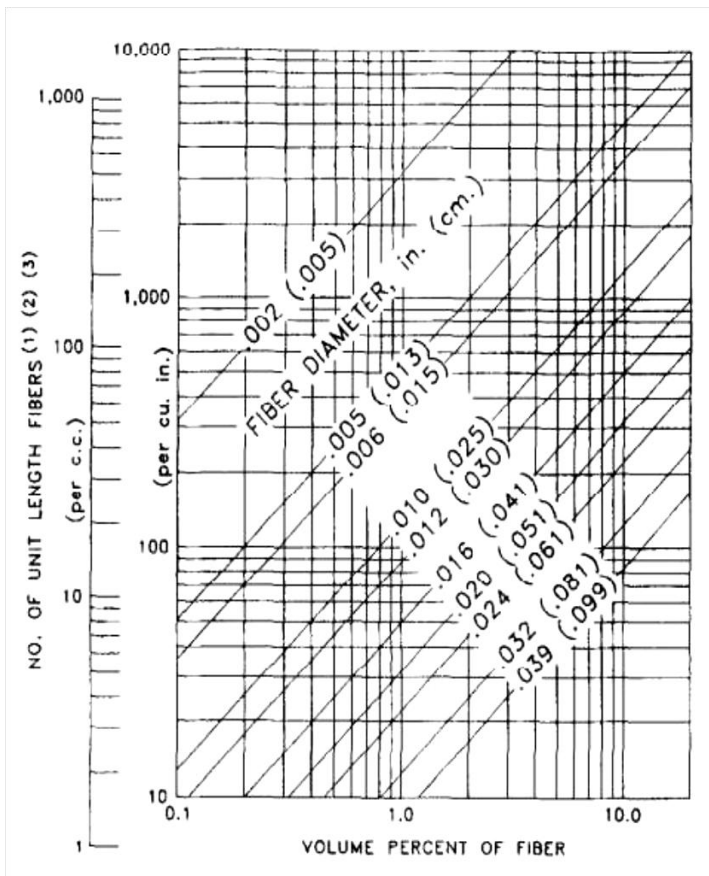
γ = πυκνότητα (kg/m³)

Ειδική επιφάνεια ινών (σχέση 1.12):

$$FSS = FC \times \pi \times d \times l \quad \dot{\eta}$$

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

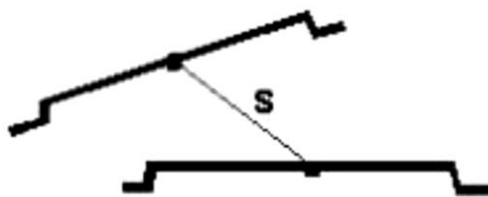
(ACI 544.1R)



Διάγραμμα 1-2: Ποσότητα ινών και ειδική επιφάνεια ως συνάρτηση του όγκου και της γεωμετρίας τους (Zollo, 1995)

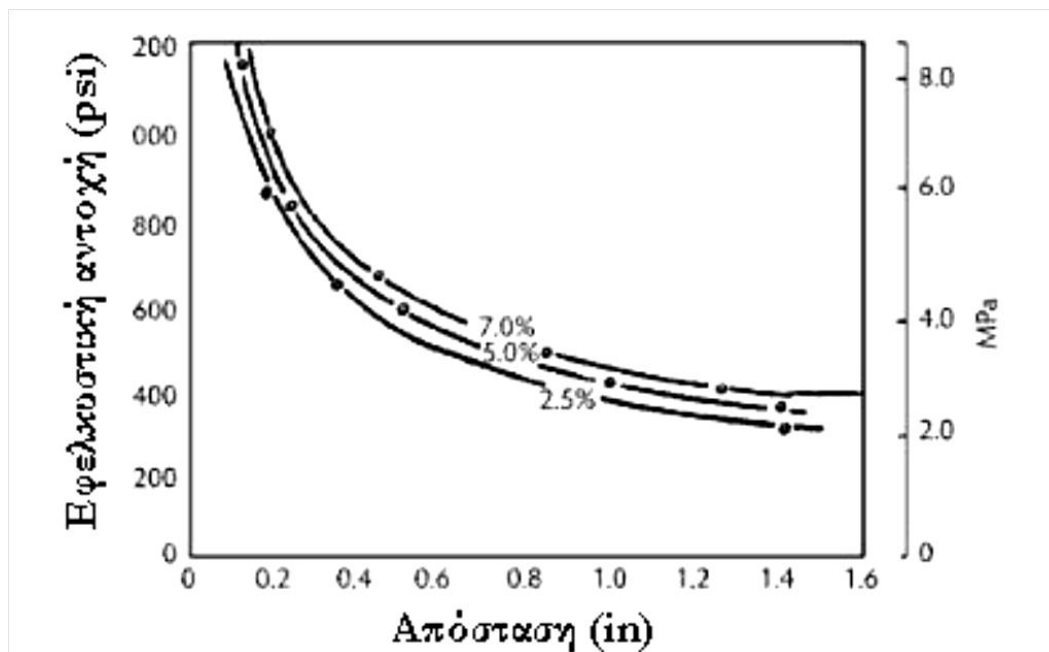
1. Προϋπόθεση η κυκλική διατομή
2. Για τον υπολογισμό των ινών (FC) διαιρούμε με τον αντίστροφο του μήκους της ίνας
3. Για τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας των ινών (FSS) πολλαπλασιάζουμε τον αριθμό των ινών (FC) με το μήκος και τη διάμετρο της χαρακτηριστικής ίνας.

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



Εικόνα 1-13: Απόσταση(spacing) μεταξύ δύο ινών (Scancem Materials)

Μικρή απόσταση για το σκυρόδεμα, με μια ευρύτερη έννοια, είναι αυτή που εξασφαλίζει περιορισμό των ρωγμών στο ξεκίνημά τους.



Διάγραμμα 1-3: Επιρροή της απόστασης των ινών στην εφελκυστική αντοχή για διάφορες ποσοστιαίες προσθήκες ινών κατ' όγκο (Romualdi, Batson, 1963)

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ινών μειώνεται η αντοχή του σκυροδέματος.

Σχέσεις συσχέτισης απόστασης ινών και ποσότητας ινών στο μίγμα:

$$s = 13.8d \times \sqrt{\frac{1}{\rho}} \quad \text{Romualdi, Batson (1963) (1.12)}$$

$$s = \sqrt[3]{\frac{V}{\rho}} \quad \text{ή} \quad s = \sqrt[3]{\frac{\pi d^2 l}{4\rho}} \quad \text{MacKee (1969) (1.13)}$$

Όπου:

d = διάμετρος της ίνας

ρ = ποσοστό ινών % κατ' όγκο στο μίγμα

V = όγκος των ινών

Επίσης είναι χρήσιμο πολλές φορές να προσδιορίζεται η πραγματική επιφάνεια των ινών που τέμνει κάθε επίπεδη επιφάνεια του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

1.7 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών

Η χρήση των ινών έχει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά έναντι του συμβατικού οπλισμού στο σκυρόδεμα παρόλα αυτά οι ίνες δεν μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό. Τα πλεονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

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

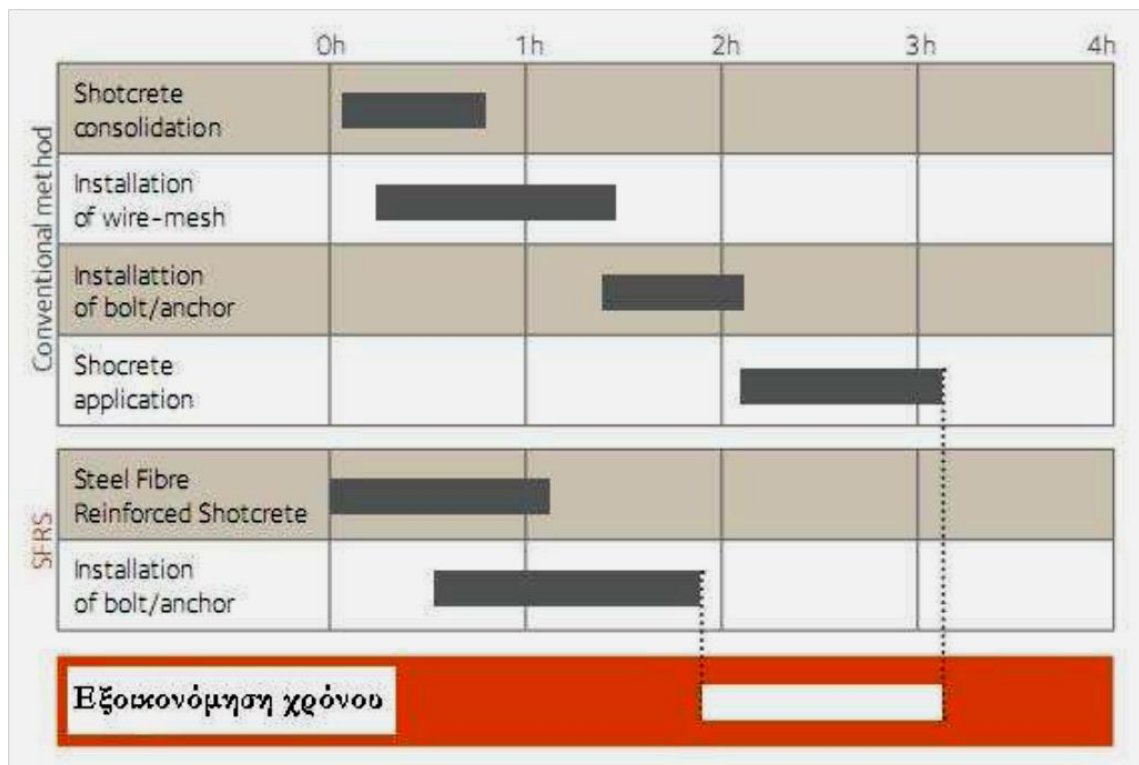
- Κατάλληλες ίνες όταν προστίθενται στο σκυρόδεμα αυξάνουν κατά πολύ την ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες, περιορίζοντας τη θραύση του.
- Οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες επισκευών προϋπαρχόντων κατασκευών.

Επιπλέον, εάν μια επένδυση ινοπλισμένου σκυροδέματος χρειαστεί επισκευή ή ενίσχυση αυτό γίνεται ευκολότερα σε σχέση με μια επένδυση με συμβατικό οπλισμό. Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Οι ίνες διασκορπίζονται στο μίγμα αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών τελικά παραλαμβάνει φορτία και περιορίζει το άνοιγμα των ρωγμών. Το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι ακόμη και 25%, που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος τους δεν αξιοποιείται. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι ένα μέρος τους χάνεται και ως υλικό αναπήδησης. Ειδικά στην περίπτωση της ξηρής μίξης μπορεί να φθάσει το 50%.
- Οι χαλύβδινες κυρίως ίνες είναι σχετικά κοφτερές μπορεί να προκαλέσουν εκδορές και μικροτραυματισμούς στο προσωπικό αν δεν γίνεται χρήση τους με προσοχή.
- Οι ίνες δε μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δε μπορεί να αναπτύξει τόσο μεγάλη εφελκυστική αντοχή όσο το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα (Wong C., 2004).
- Κατά τη μίξη τους, εάν αυτή δεν εκτελείται σωστά ή αν δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, μπορεί να δημιουργούνται συσσωματώματα ινών που αργότερα θα φράξουν τις σωληνώσεις ή θα χειροτερέψουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Οι χαλύβδινες ίνες φθείρονται όταν εκτίθενται σε υγρασία ενώ οι υάλινες έχουν μικρή ανθεκτικότητα σε αλκαλικά περιβάλλοντα. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια έχουν από μικρή έως ελάχιστη επικάλυψη, έτσι τείνουν να εμφανίζουν σημεία σκουριάς. Για λόγους αισθητικής και ασφάλειας, προτείνεται ότι η μόνιμη επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα κονιάματος που περιέχει τις νέες HPP 152 πλαστικές ίνες (High Performance Polypropylene Fibres) για τον έλεγχο θερμικού ραγίσματος (Κατσικογιάννη, 2004).
- Φθορά επίσης μπορεί να προκληθεί και από λάθος στη συσκευασία ή στη μεταφορά.
- Η εμπειρία από τη χρήση τους δεν είναι τόσο διαδομένη όσο αυτή του δομικού πλέγματος.
- Ο εξοπλισμός φθείρεται σημαντικά περισσότερο σε σχέση με το κοινό εκτοξευόμενο

σκυρόδεμα. Έτσι, το κόστος λόγω φθοράς εξοπλισμού, αυξάνει.

- Είναι συνήθως ακριβότερες σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό και η διαθεσιμότητά τους στον χώρο του έργου μπορεί να είναι περιορισμένη.



Πίνακας 1-7: Εξοικονόμηση χρόνου λόγω ινών (Arcelormittal, 2008)

2 ΕΚΤΟΞΕΥΟΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ



Εικόνα 2-1: Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα σε τοιχώματα σήραγγας

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αποτελεί ανάπτυξη του έγχυτου σκυροδέματος με σκοπό να το αντικαταστήσει όταν η εφαρμογή του δεύτερου και η ανάπτυξη καλουπιού είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη. Για την τοποθέτησή του είναι απαραίτητη ορισμένες φορές η πρόσμιξη του με πρόσμικτα και πρόσθετα καθώς και η χρήση κατάλληλου εξοπλισμού τόσο για την μεταφορά όσο και για την εκτόξευση.

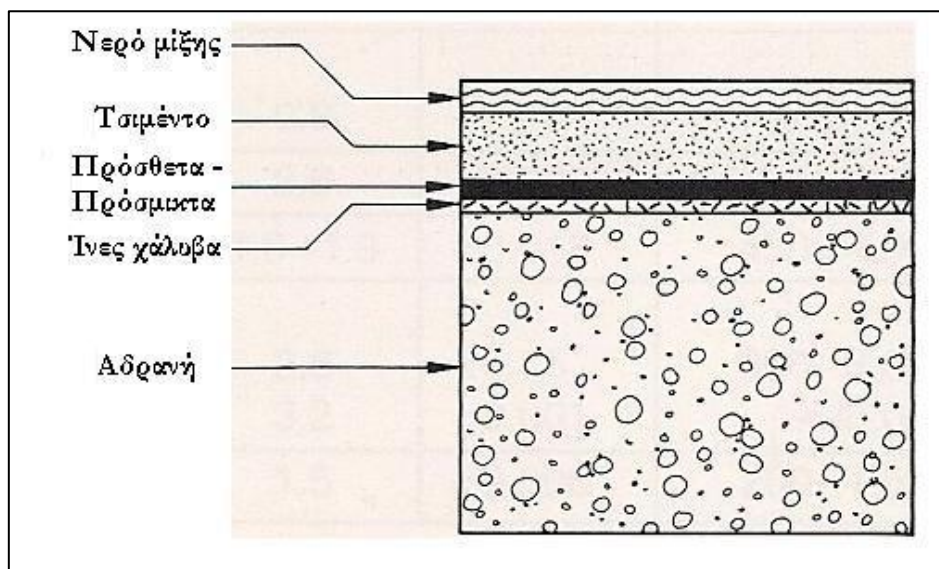
Στην πραγματικότητα είναι ένα

σκυρόδεμα λεπτόκοκκων αδρανών και η χρήση των πρόσμικτων αποσκοπεί στην βελτίωση της συγκόλλησης του νέου στρώματος με το προηγούμενο, την μείωση της αναπήδησης, την μείωση των ρωγματώσεων, την διευκόλυνση της εκτόξευσης, την ταχεία πήξη και την ταχεία απόκτηση αντοχών.

Η προσθήκη ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα του δίνει τη δυνατότητα της ανάληψης φορτίων ακόμα και μετά την δημιουργία ρωγμών.

2.1 Δημιουργία μίγματος

Τα μίγματα ινοπλισμένου σκυροδέματος περιέχουν υψηλότερα κλάσματα λεπτόκοκκων αδρανών και μεγαλύτερη ποσότητα τσιμέντου συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα, πολλές φορές για να αποφευχθεί η μεγάλη κατανάλωση τσιμέντου αυτό αντικαθίσταται με ιπτάμενη τέφρα ($\leq 35\%$). Όπως συνηθίζεται και στο συμβατικό σκυρόδεμα έτσι και στο ινοπλισμένο η χρήση για την οποία προορίζεται το σκυρόδεμα υποδεικνύει την σύσταση του μίγματος ως προς τις αναλογίες των υλικών που συμμετέχουν σε αυτό. Η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της εργασιμότητας του σκυροδέματος, για να ανταπεξέλθουμε σε αυτή την δυσλειτουργία χρησιμοποιούμε ρευστοποιητικά και αερακτικά.



Εικόνα 2-2: Τυπικές αναλογίες σε μείγμα σκυροδέματος

2.2 Παράμετροι που καθορίζουν την ποιότητα του σκυροδέματος

Τρεις είναι οι βασικές παράμετροι που προδιαγράφουν την ποιότητα του σκυροδέματος γενικά:

- Λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c)
- Περιεκτικότητα αέρα
- Βαθμός συμπίκνωσης

Στο εκτοξευόμενο σκυροδέμα εκτός από αυτούς τους τρεις βασικούς παράγοντες υπάρχουν κι άλλοι οι οποίοι παίζουν ρόλο στην ποιότητα του σκυροδέματος (όσον αφορά αποκλειστικά το μίγμα και όχι την τοποθέτηση) όπως:

- Διαβάθμιση αδρανών
- Περιεκτικότητα τσιμέντου
- Πρόσμικτα – πρόσθετα

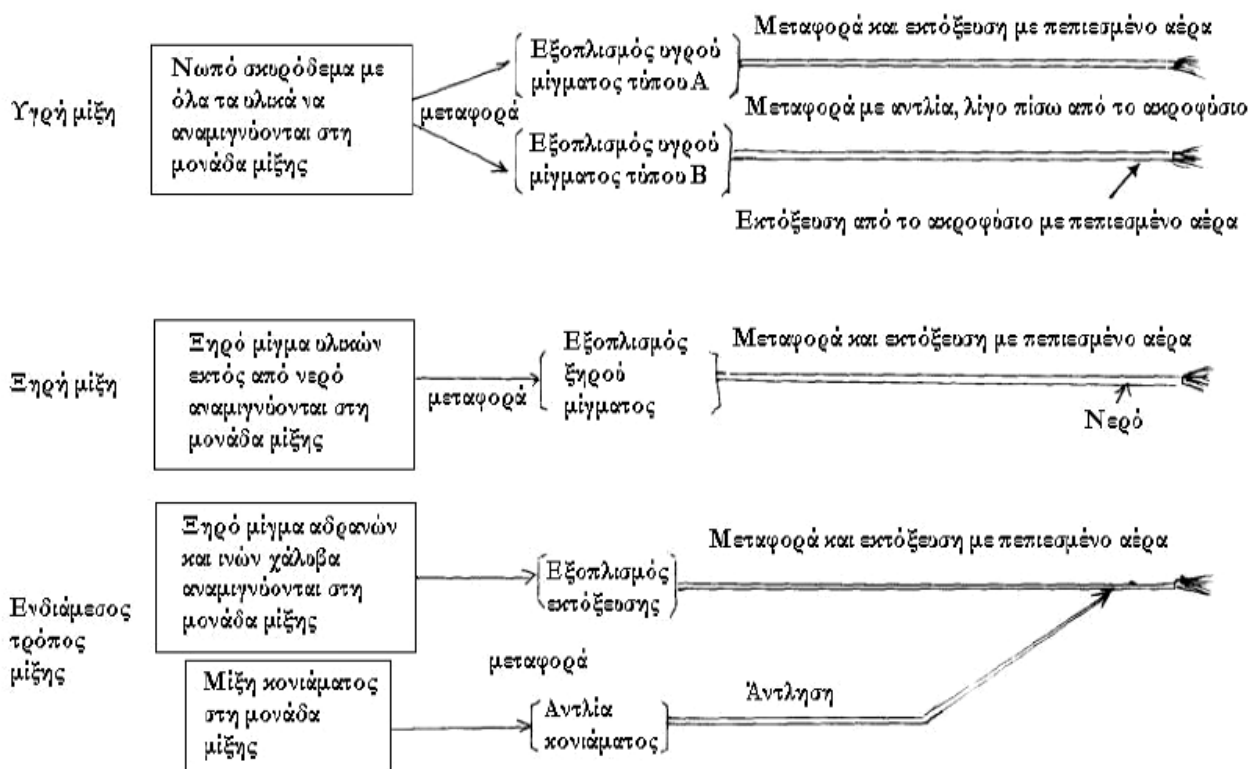
Εκτός από τις απαιτήσεις του έργου σοβαρά υπόψη κατά την επιλογή του μίγματος θα πρέπει να λαμβάνονται η διαθεσιμότητα των υλικών και αν η μεταφορά του σκυροδέματος γίνεται με άντληση ή πεπιεσμένο αέρα κι αυτό γιατί ενώ στις μηχανές με πεπιεσμένο αέρα, ξηρή μίξη, ο κατάλληλος συνδυασμός χονδροκόκκων και λεπτομερών αδρανών έχει σαν αποτέλεσμα μίγμα με ελάχιστο όγκο κενών, στις μηχανές με άντληση υγρού μίγματος και προκειμένου να ευνοηθεί η ροή του διευρύνουμε τη χρήση λεπτομερών και τσιμέντου ώστε να μειώσουμε την ποσότητα του νερού με αποτέλεσμα να διακινδυνεύουμε την απόφραξη των σωλήνων μεταφοράς. Οι ίνες χάλυβα αντιμετωπίζονται ως πρόσθετο αδρανές υλικό.

2.3 Εφαρμογή εκτοξευόμενου σκυροδέματος Ξηρή – Υγρή μίξη

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την εκτόξευση του σκυροδέματος είναι της ξηρής και τις υγρής μίξης.

Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων είναι ότι στην ξηρή μίξη το νερό που απαιτείται για την ενυδάτωση του σκυροδέματος προστίθεται στο ακροφύσιο ενώ στην υγρή μίξη το μίγμα είναι ενυδατωμένο πριν προσεγγίσει το ακροφύσιο.

Η συμπύκνωση του σκυροδέματος τόσο στην ξηρή όσο και στην υγρή μίξη γίνεται κατά την εκτόξευση του σκυροδέματος.



Εικόνα 2-3 Επιλογή μεθόδου εφαρμογής εκτοξευόμενου σκυροδέματος

2.3.1 Ξηρή μίξη



Εικόνα 2-4: Ξηρή μίξη εφαρμογής εκτόξευόμενου σκυροδέματος

Η ξηρή μίξη αρχικά επικράτησε έναντι της υγρής εξαιτίας της ευκολίας που παρουσίαζε όσον αφορά τις τεχνολογικές απαιτήσεις που έχει.

Κατά την ξηρή μίξη το τσιμέντο αναμιγνύεται με ξηρά ή ύφυγρα αδρανή και λίγο πίσω από το ακροφύσιο εκτόξευσης προστίθεται το νερό και τα πρόσμικτα υγρής μορφής που απαιτούνται. Η προσθήκη ινών επηρεάζει την αναπήδηση του σκυροδέματος. Γι αυτό το λόγο εάν δεν διαθέτουμε στοιχεία για το αποτέλεσμα της εκτόξευσης μετά την προσθήκη ινών με τον ίδιο εξοπλισμό που θα χρησιμοποιήσουμε και για τον ίδιο τύπο ινών τότε πρέπει να γίνουν δοκιμές εκτόξευσης για τον συγκεκριμένο τύπο ινοπλισμένου σκυροδέματος και τον συγκεκριμένο εξοπλισμό που θα χρησιμοποιήσουμε στο έργο.

Επίσης σημαντικό είναι να προσδιοριστούν οι διαφορές, τόσο στην κοκκομετρία των αδρανών και της περιεκτικότητας ινών, μεταξύ του αρχικού μίγματος και του σκληρυμένου μίγματος στη θέση εφαρμογής του. Σημαντικό για τον προσδιορισμό του κόστους είναι ο υπολογισμός της απόλυτης μάζας αναπήδησης.

Μειονεκτήματα ξηρής μίξης:

- Μεγάλη αναπήδηση (απώλεια υλικού 15-40%)
- Μικρή παραγωγικότητα συγκριτικά με την υγρή μίξη
- Μικρότερη ομοιομορφία συγκριτικά με την υγρή μίξη
- Φθορά εξοπλισμού
- Η εισαγωγή ινών απαιτεί ειδικό εξοπλισμό

2.3.1.1 Απαιτήσεις των υλικών ξηρής μίξης

Αδρανή:

Στην αναπήδηση κατά την ξηρή μίξη παρατηρείται μεγαλύτερη αναπήδηση χονδρόκοκκων από ότι λεπτόκοκκων αδρανών γι αυτό γίνεται προσεκτική επιλογή κοκκομετρικής διαβάθμισης και αύξηση της με χρήση λεπτόκοκκου υλικού. Κατά DIN 1045 ο μέγιστος κόκκος αδρανών πρέπει αν είναι 8mm αλλά στην πράξη χρησιμοποιούνται και αδρανή με κόκκο έως 16mm. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην χρήση ασβεστολιθικών λεπτομερών αδρανών με την εκτέλεση ειδικών δοκιμών πριν την εφαρμογή τους. Η δημιουργία ρηγματώσεων ευνοείται από την αυξημένη ποσότητα λεπτομερών. Ένας ακόμα παράγοντας που καθορίζει τη χρήση των αδρανών είναι το κόστος.

Τσιμέντο:

Κατά τη χρήση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος στις σήραγγες σημαντικό ρόλο παίζει η γρήγορη απόκτηση αντοχών γι αυτό χρησιμοποιείται τσιμέντο ταχείας ανάπτυξης αντοχής όπως PZ 35 F ή PZ 45 F (σύμφωνα με τον κανονισμό DIN 1164) και CEM I42.5 R (κατά το νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1).

Η περιεκτικότητα του τσιμέντου στην ξηρή μίξη είναι συνήθως της τάξεως των 350-450 kg/m³ και σπάνια μέχρι τα 480 kg/m³. Λόγω της αυξημένης αναπήδησης, εμφανίζεται μια εικονική αύξηση της περιεκτικότητας σε σκυρόδεμα.

Η αναπήδηση δεν επηρεάζεται από τη χρήση ινών παρά μόνο στην περίπτωση που η περιεκτικότητάς τους είναι υψηλή σε ποσοστό άνω του 3% κατ' όγκο.

Ίνες:

Στην τεχνική της ξηρής μίξης οι ίνες όπως και τα υπόλοιπα ξηρά υλικά μεταφέρονται με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα στο ακροφύσιο όπου και ενυδατώνονται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μεγάλο μέρος των ινών να χάνεται κατά την αναπήδηση τους. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος το αρχικό μίγμα έχει μεγαλύτερο ποσοστό ινών συγκριτικά με αυτό που

εφαρμόζεται, κάτι το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό του μίγματος. Η ποσότητα των ινών που αναπηδά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος των ινών. Για να έχουμε λοιπόν όσο το δυνατόν πληρέστερα στοιχεία για το τελικό προϊόν πρέπει να εκτελούνται δοκιμές με τον ίδιο εξοπλισμό που θα κάνει και την τελική εκτόξευση.

Νερό/Τσιμέντο:

Η αναλογία νερού/τσιμέντου (w/c) είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του σκυροδέματος το ίδιο ισχύει και την περίπτωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Στην ξηρή μίξη το νερό κυρίως προστίθεται στο ακροφύσιο και το ποσοστό που προστίθεται καθορίζεται από τον χειριστή του ακροφυσίου γι αυτό το λόγο δεν προκαθορίζεται ακριβής τιμή του λόγου w/c όπως στην υγρή μέθοδο εκτόξευσης.

Αν και αυτό το γεγονός αποτελεί μειονέκτημα της μεθόδου πρακτικά ο λόγος w/c κυμαίνεται μεταξύ 0,45-0,5. Αύξηση αυτού του λόγου προκαλεί αύξηση της κάθισης χωρίς βελτίωση της εργασιμότητας, μειώνει την αντοχή του σκυροδέματος και μπορεί να προκαλέσει εξίδρωση και απόμιξη του μίγματος. Μείωση του λόγου w/c προκαλεί αύξηση της σκόνης. Η υγρασία της επιφάνειας εκτόξευσης ή το νερό που εξέρχεται από ρωγμές της βραχομάζας πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη στη μελέτη σύνθεσης μιγμάτων.

Εάν αφαιρεθεί λίγο νερό τότε προκύπτει περίσσεια σκόνης, ενώ εάν είναι σε περίσσεια τότε το εκτοξευόμενο σκυροδέμα δεν προσκολλάται στην επιφάνεια αλλά ρέει. Η αυτοματοποιημένη ρυθμιζόμενη προσθήκη ύδατος, που λαμβάνει υπόψη την έμφυτη υγρασία του μίγματος, είναι ουσιαστική για τη βέλτιστη ποιότητα του σκυροδέματος.

Η φυσική υγρασία των υλικών αποτελεί σημαντικό παράγοντα της ξηρής μίξης, το ποσοστό της πρέπει να κυμαίνεται από 3-6% και ιδανικότερα από 2-4%. Εάν το ποσοστό φυσικής υγρασίας είναι μεγάλο τότε μπορεί να προκαλέσει φράξιμο των σωλήνων μεταφοράς και των μηχανημάτων εκτόξευσης ενώ στην αντίθετη περίπτωση δημιουργείται σκόνη στον χώρο εκτόξευσης.

Για να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα πολλές φορές τα ξηρά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι συσκευασμένα και τους έχει αφαιρεθεί η υγρασία και για την μείωση της σκόνης γίνεται διαβροχή αυτών των υλικών πριν τη χρήση τους ή χρησιμοποιούνται ακροφύσια προϋγρανσης

Πρόσμικτα:

Τα πρόσμικτα έχουν σαν σκοπό να βελτιώσουν κάποιες ιδιότητες του σκυροδέματος. Το πιο συνηθισμένο πρόσμικτο στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα ξηρής μίξης είναι οι επιταχυντές. Η προσθήκη τους έχει σαν σκοπό την ταχεία ανάπτυξη αντοχών.

Η δοσολογία των πρόσμικτων πρέπει να είναι η ελάχιστη δυνατή διότι η χρήση τους επιτρέπει μεν την ταχύτερη διάστρωση διαδοχικών στρώσεων αλλά προκαλεί μείωση της τελικής αντοχής. Οι ίδιες οι ίνες αυξάνουν την πρώιμη αντοχή του σκυροδέματος γεγονός που καθιστά την δοσολογία επιταχυντών μικρότερη. Το ποσοστό των επιταχυντών καθορίζεται από την ποσότητα του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου (π.χ. 0.5 % κατά βάρος τσιμέντου).

Οι επιταχυντές μπορούν να είναι σε σκόνη ή σε υγρή μορφή. Οι επιταχυντές σε σκόνη προστίθενται κατά την τροφοδοσία του μηχανήματος και πολλές φορές γίνεται χειρονακτικά με αποτέλεσμα να προστίθεται υπερβολική δόση ανομοιόμορφα κατανεμημένη και έτσι να παρατηρείται μείωση έως και 35% της τελικής αντοχής συγκριτικά με σκυρόδεμα στο οποίο δεν έχουν χρησιμοποιηθεί επιταχυντές.

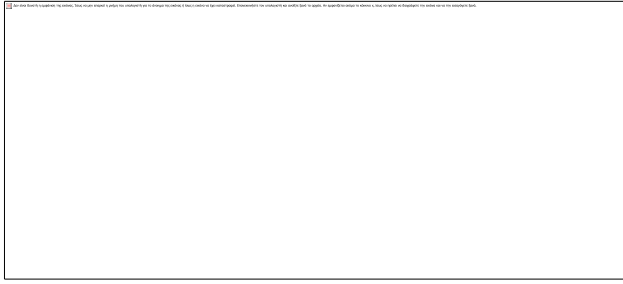
Η χρήση των επιταχυντών σε υγρή μορφή έρχεται να δώσει λύση στα προηγούμενα προβλήματα. Η τροφοδότηση τους στο μίγμα γίνεται μαζί με το νερό στο ακροφύσιο εκτόξευσης μέσω τροφοδότη.

Τα πλεονεκτήματα των επιταχυντών σε υγρή μορφή συγκριτικά με αυτούς σε σκόνη είναι:

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

Εκτός από τους επιταχυντές υπάρχουν και άλλα πρόσμικτα υλικά όπως αυτά για τη μείωση της σκόνης αλλά η χρήση τους δεν είναι διαδομένη και η εφαρμογή τους περιορισμένη.

Πρόσθετα:



Αντίθετα με τις χημικά πρόσμικτα, η δράση των πρόσθετων είναι κυρίως φυσική. Γνωστά παραδείγματα είναι η μικροπυριτία (πυριτιακή παιπάλη ή κάπνα πυριτίας - microsilica ή silica fume) τα οποία όλο και κερδίζουν έδαφος στα έργα. Αυτά τα λεπτομερή υλικά

(ειδικής επιφάνειας 20-35 m²/g) με περιεκτικότητα σε SiO₂ 65-97%, ανάλογα με την ποιότητα του προϊόντος, οδηγούν σε μία σημαντική βελτίωση της ποιότητας του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, που αποδεικνύεται από την αυξημένη θλιπτική αντοχή και πυκνότητα. Λόγω της βελτιωμένης συνάφειας, στρώσεις μεγαλύτερου πάχους μπορούν να διαστρωθούν χωρίς τη χρήση επιταχυντών. Συνήθως προστίθενται σε ποσοστό από 8 έως 12% αντικαθιστώντας το τσιμέντο.

Το μέγεθος του κόκκου είναι από 0.1 έως 0.3 μm και το ειδικό βάρος από 2.2-2.3. Εκτός του ότι είναι ένα καλό υλικό αντικατάστασης του τσιμέντου έχει ποζολανικές ιδιότητες (αντιδρά χημικά με το σκυρόδεμα) και βελτιώνει τη συνάφεια μεταξύ ινών και σκυροδέματος.

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

Πειράματα σε μια σιδηροδρομική σήραγγα στη Γερμανία (σήραγγα Schonrain), έδειξαν ότι η αντίσταση του σκυροδέματος στη διάβρωση από το νερό μπορεί να βελτιωθεί μέσω της παρουσίας υλικών Si. Αυτό μειώνει το ποσοστό των πρόσμικτων επιταχυντών σε περίπου 3%, δηλαδή στο ήμισυ της αρχικής τιμής.

2.3.2 Υγρή μίξη



Εικόνα 2-5: Διαδικασία υγρής μίξης σκυροδέματος

Ως μέθοδος χρησιμοποιείται στη βιομηχανική παραγωγή προϊόντων ινοπλισμένου σκυροδέματος μικρού πάχους (thin wall constructions), με πάχος διάστρωσης 4-6mm και ελάχιστο πάχος 13mm, και στην υποστήριξη υπόγειων ανοιγμάτων στις σήραγγες.

Οι ίνες είναι δυνατόν να προστίθενται στο μίγμα κατά την παρασκευή του σκυροδέματος στο εργοστάσιο είτε να προστίθενται στο έργο επί τόπου. Στην τελευταία περίπτωση ο τρόπος που γίνεται αυτό εξαρτάται από την ποσότητα υλικού που θα χρησιμοποιηθεί, για μεγάλη ποσότητα είναι επιθυμητή η ύπαρξη ταινιόδρομου ενώ για μικρή η τροφοδοσία των ινών μπορεί να γίνει με χειρονακτικά.

Η μέθοδος πλεονεκτεί έναντι αυτής της ξηρής μίξης ως προς την ομοιομορφία του τελικού σκληρυμένου σκυροδέματος και την αναπήδηση υλικού.

2.3.2.1 Απαιτήσεις των υλικών ξηρής μίξης

Αδρανή:

Στην υγρή μίξη όπως και στην ξηρή πολύ σημαντικό ρόλο έχει η κοκκομετρική διαβάθμιση

των αδρανών.

Για βέλτιστα αποτελέσματα στην υγρή μίξη θα πρέπει:

- I. Η διάμετρος κόκκου να είναι 8-10 mm, εξαιτίας της αδυναμίας άντλησης του εξοπλισμού και του περιορισμού απώλειας αδρανών εξαιτίας της αναπήδησης.
- II. Το υλικό που δεσμεύεται από το κόσκινο (0,125mm) να κυμαίνεται μεταξύ 4-9%

Το ποσοστό των αδρανών με διάμετρο 8mm δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 10% διότι θα έχουμε αύξηση της αναπήδησης του χονδρόκοκκου υλικού και την δημιουργία κρατήρων στο υποκείμενο στρώμα σκυροδέματος εάν υπάρχει. Επίσης υπάρχει ο κίνδυνος απόφραξης του ακροφυσίου.

Μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε διαχωρισμό και κακή λίπανση του εξοπλισμού με αποτέλεσμα απόφραξη των σωληνώσεων. Η μικρή περιεκτικότητα λεπτόκοκκου αντισταθμίζεται με αύξηση του τσιμέντου ή της πυριτικής παιπάλης. Ιδιαίτερα στη περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος χρειαζόμαστε περίσσεια λεπτόκοκκου υλικού.

Τσιμέντο:

Η διαφορά στο τσιμέντο μεταξύ υγρής και ξηρής μίξης αφορά την ποσότητα του και όχι το είδος του τσιμέντου που χρησιμοποιούμε. Έτσι στην υγρή μίξη έχουμε μεγαλύτερες ποσότητες τσιμέντου. Μικρότερο ποσοστό τσιμέντου θα είχε σαν αποτέλεσμα ο λόγος w/c να είναι μεγαλύτερος του 0,5, μείωση της πρώιμης και της τελικής αντοχής και αύξηση της αναπήδησης. Όταν χρησιμοποιούμε ποσότητες μικρότερες από 400 kg/m^3 μειώνεται η παραγωγικότητα και αυξάνεται η κατανάλωση επιταχυντών. Ενδεικτικά μία αύξηση κατά 50 kg/m^3 αυξάνει το κόστος κατά 4%-5% αλλά εξαιτίας της μειωμένης χρήσης πρόσθετων αλλά και η μείωση της αναπήδησης οδηγούν σε μία μείωση τελικά του κόστους της τάξης του 8%-13%

Ίνες:

Στην υγρή μίξη οι ίνες προστίθενται στο μίγμα είτε κατά την παρασκευή του στο εργοστάσιο είτε στο εργοτάξιο. Στη δεύτερη περίπτωση προτιμούνται ίνες με πεπλατυσμένα άκρα (hooked ends) για να μη δημιουργούνται συσσωματώματα ινών και να κατανέμονται ομοιόμορφα στο μίγμα. Καλά αποτελέσματα έχει και η χρήση ινών συγκολλημένων με υδατοδιαλυτή κόλλα. Αντίθετα οι υπόλοιπες ίνες και ιδιαίτερα αυτές με μεγάλο λόγο μορφής απαιτούν ειδικό εξοπλισμό ανάμιξης και εκτόξευσης. Η αναπήδηση των ινών είναι μικρότερη σε αυτή τη μέθοδο συγκριτικά με την ξηρή μίξη.

Νερό/Τσιμέντο:

Ο λόγος νερού προς τσιμέντο είναι ψηλότερος σε σχέση με την ξηρή μίξη, για αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε πρόσμικτα ώστε να μπορέσουμε να μειώσουμε την τιμή του.

Πρόσμικτα:

Τα πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται ευρέως στην υγρή μίξη είναι ρευστοποιητές και υπερευστοποιητές. Σκοπός τους είναι να μειώσουν τις απαιτήσεις για νερό ώστε να βελτιώσουν την εργασιμότητα και τη συνεκτικότητα του σκυροδέματος και να αυξήσουν την κάθιση διατηρώντας σταθερή την αναλογία w/c. Αύξηση της κάθισης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αντλησιμότητας ενώ η μείωση του λόγου w/c αυξάνει την αντοχή.

Σήμερα, χρησιμοποιούνται συχνά συνδυασμοί λιγνοσουλφιδίων, ναφθαλίνης και μελαμίνης. Κάθε ένα από τα παραπάνω συστατικά επιδρά στο σκυροδέμα ως εξής:

- η μελαμίνη δημιουργεί ένα λιπαντικό επίστρωμα στην επιφάνεια των μορίων τσιμέντου
- η ναφθαλίνη φορτίζει ηλεκτρικά τα μόρια αυτά έτσι ώστε να απωθούνται μεταξύ τους
- τα λιγνοσουλφίδια μειώνουν την τάση συγκράτησης νερού στην επιφάνεια τους.

Όταν διασκορπίζονται ομοιόμορφα, τα μόρια του τσιμέντου όχι μόνο ρέουν πιο εύκολα αλλά επίσης περιβάλλουν τα αδρανή πιο αποτελεσματικά. Το αποτέλεσμα είναι ένα σκυροδέμα πιο εργάσιμο και ισχυρά ανθεκτικά. Η προτεινόμενη δόσολογία κυμαίνεται από 4 έως 10 kg/m³.

Η περίσσεια προσμίξεων όμως μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια της συνεκτικότητας και διαχωρισμό του μίγματος. Η χρήση υπερευστοποιητών τρίτης γενιάς επιτρέπει w/c<0.38 με κάθιση 15-20 cm.

Πρόσθετα:

Όπως και στη ξηρή μίξη έτσι και στην υγρή το πρόσθετο που χρησιμοποιείται συνήθως είναι η μικροπυριτία σε ποσοστό 5-10% για την βελτίωση της αντλησιμότητας, της συνοχής και της αντοχής του σκυροδέματος καθώς επίσης και για την βελτίωση της σύνδεσης των αλληπάλληλων στρώσεων σκυροδέματος

2.4 Σύγκριση των δύο μεθόδων

Παράγων	Ξηρή μίξη	Υγρή μίξη
Εξοπλισμός	Χαμηλή ολική επένδυση Συντήρηση σχετικά απλή και αραιή	Λιγότερος επιτόπου εξοπλισμός Λιγότερη φθορά στην αντλία, στις σωλήνες και στο ακροφύσιο. Λιγότερο από 60 % κατανάλωση πεσμένου αέρα.
Μείξη	Στο εργοτάξιο ή στο εργοστάσιο Έτοιμα αναμιγμένα ξηρά συστατικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά δεν μπορούν να παραμείνουν ανοικτά σε ύφυγρο ή υγρό περιβάλλον Η συμπεριφορά βλάπτεται από την υγρασία της άμμου.	Ακριβής ανάμιξη στη μονάδα ανάμειξης. Χρήση έτοιμου σκυροδέματος. Αποδεκτή η υγρή άμμος.
Παραγωγή	Σπανίως ξεπερνά επιτόπου τα 5 m ³ /h. Μπορεί να μεταφερθεί σε μεγαλύτερες αποστάσεις από ότι τα υγρά μείγματα.	Μεγαλύτερη από ότι αντίστοιχες μηχανές ξηρής μίξης. 2-10m ³ /h από ακροφύσιο χειριστή ως 20m ³ /h με βραχίονα χειρισμού
Αναπήδηση	Μπορεί να είναι 15-40% από κατακόρυφα τοιχώματα και 20 - 50% από την οροφή. Δημιουργεί θύλακες αναπήδησης. Η απώλεια αδρανών κάνει τη συμφωνία με τη μελέτη σύνθεσης δύσκολη, και το προστιθέμενο τσιμέντο είναι συνήθως πολύ.	Χαμηλή κάτω του 10% για σωστό μίγμα. Μη δημιουργία θυλάκων αναπήδησης Μικρή απώλεια αδρανών
Ποιότητα	Υψηλή αντοχή λόγω του χαμηλού λόγου N/T. Λιγότερο ομοιογενής καθόσον η προσθήκη νερού κανονίζεται από τον χειριστή και την ασυνεχή προώθηση του υλικού..	Δυσκολία επίτευξης υψηλής αντοχής, λόγω του υψηλότερου λόγου N/T, αν δεν χρησιμοποιείται ρευστοποιητής. Πιο ομοιογενής ποιότητα
Ταχύτητα κρούσης	Υψηλή, με καλή πρόσφυση και ευκολότερη χρήση στην οροφή	Γενικά επαρκής για τα υπόγεια έργα
Πρόσθετα	Σα σκόνη στο μείκτη ή στη χοάνη Υγρά στο ακροφύσιο	Γενικά σε υγρή μορφή στο ακροφύσιο
Σκόνη	Μεγάλη παραγωγή σκόνης που μπορεί να μειωθεί με 5-15% προϋγρανση, ή με μετακίνηση του δακτυλίου του νερού προς τα πίσω του ακροφυσίου.	Πολύ μικρή ποσότητα Καλύτερη ορατότητα Κανένας κίνδυνος δημιουργίας στρώσεων από τη σκόνη.
Άλλη χρήση	Αμμοβολή	Άντληση σκυροδέματος

Πίνακας 2-1: Σύγκριση των δύο μεθόδων μίξης

2.5 Προετοιμασία επιφανειών

Πριν την εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος απαιτείται προεργασία των επιφανειών στις οποίες θα εφαρμοστεί κι αυτό γίνεται για να έχουμε όσο καλύτερη συνεργασία γίνεται της επιφάνειας με το σκυρόδεμα. Οι εργασίες προετοιμασίας των επιφανειών προβλέπονται από τις Προσωρινές Εθνικές Προδιαγραφές και το Σχέδιο Προδιαγραφής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Αρχικά θα πρέπει να διασφαλιστεί η όσο το δυνατόν καλύτερη πρόσφυση του σκυροδέματος στην επιφάνεια που μας ενδιαφέρει, προκειμένου να το επιτύχουμε αυτό γίνεται καθαρισμός της επιφάνειας από σαθρά και χαλαρά υλικά και τράχυνση της επιφάνειας εφαρμογής με νερό υπό πίεση.

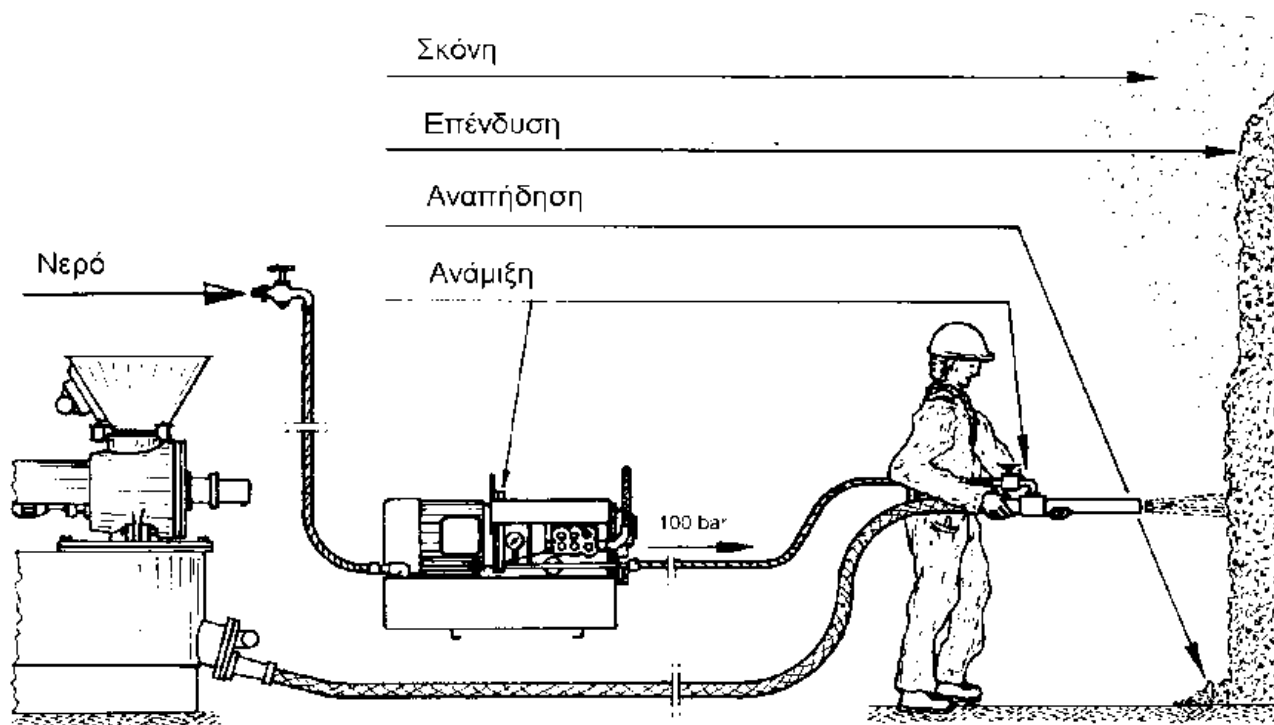
Η επιφάνεια εφαρμογής του σκυροδέματος θα πρέπει να είναι αποδεσμευμένη από επιφανειακά νερά και οι ρωγμές με πιθανές διαρροές πρέπει να σφραγίζονται πριν την εκτόξευση.

Το έδαφος διαβρέχεται ώστε να κορεστεί από νερό και να μην απορροφά το νερό του σκυροδέματος.

Η εφαρμογή του εκτοξευόμενου σκυροδέματος γίνεται συνήθως σε περισσότερες των μία στρώσεων, αυτό σημαίνει ότι πολλές φορές ως επιφάνεια εφαρμογής έχουμε την εξωτερική επιφάνεια της προηγούμενης στρώσης. Σε αυτή την περίπτωση και αν έχει διατηρηθεί η επιφάνεια αυτή καθαρή δεν χρειάζεται καμία επιπλέον προετοιμασία.

Όταν όμως χρησιμοποιούμε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα για επιδιόρθωση ή στήριξη επιφάνειας ή στοιχείου σκυροδέματος έγχυτου τότε απαιτείται η εκτόξευση αρχικά ενός ισχυρού συγκολλητικού κονιάματος. Στην περίπτωση που ο οπλισμός του προγενέστερου σκυροδέματος έχει διαβρωθεί και το σκυρόδεμα έχει ενανθρακωθεί πρέπει πριν την εφαρμογή του εκτοξευόμενου να γίνει εξυγίανση του οπλισμού, αν η βλάβη είναι εκτεταμένη τότε απομακρύνουμε πλήρως το σκυρόδεμα.

2.6 Ενδειγμένος τρόπος εφαρμογής



Εικόνα 2-6: Απεικόνιση ενδειγμένου τρόπου εφαρμογής

Κατά την εκτόξευση του σκυροδέματος είναι σημαντικό να μειωθεί η αναπήδηση διότι στην ουσία αποτελεί χαμένο υλικό το οποίο όμως κοστίζει. Προκειμένου να πετύχουμε όσο το δυνατό μικρότερη αναπήδηση προτείνεται η σκυροδέτηση να ξεκινά από κάτω προς τα πάνω και το ακροφύσιο να είναι όσο το δυνατόν πιο κάθετα στην επιφάνεια σκυροδέτησης. Στην μείωση της αναπήδησης συμβάλει η ταχύτητα εκτόξευσης και η απόσταση του ακροφυσίου από την επιφάνεια διάστρωσης.

3 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.1 Δοκιμή σε νωπό σκυρόδεμα - Εργασιμότητα σκυροδέματος - Δοκιμή κάθισης

Εργασιμότητα του σκυροδέματος ονομάζουμε την ευκολία με την οποία το σκυρόδεμα μεταφέρεται, τοποθετείται, δονείται και φινιρίζεται. Εξαρτάται σαφώς από το λόγο νερού/τσιμέντο ή αλλιώς υδατοτσιμεντοσυντελεστή και μεταβάλλεται αναλογικά με αυτόν. Γνωρίζουμε, όμως, ήδη ότι το περίσσιο νερό δημιουργεί πόρους που ρίχνουν την αντοχή του μπετόν. Βρισκόμαστε συνεπώς μπροστά σε δύο αλληλοαναιρούμενους στόχους: μεγάλη εργασιμότητα και υψηλές αντοχές. Πολύτιμη αρωγή σε αυτό το δίλημμα προσφέρουν οι λεγόμενοι (υπερ)ρευστοποιητές που επιτρέπουν τη μείωση του νερού μίξης διατηρώντας παράλληλα την εργασιμότητα σε υψηλά επίπεδα.

Για την μέτρηση της εργασιμότητας χρησιμοποιούμε την δοκιμή κάθισης.

Κάθιση είναι το μέτρο της εργασιμότητας του σκυροδέματος που 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.

Για τη μέτρηση της κάθισης χρησιμοποιούνται:

α) Ο κώνος κάθισης, ήτοι μεταλλική μήτρα σχήματος ορθού κόλουρου κώνου, με διάμετρο κάτω βάσεως 200 ± 2 mm, διάμετρο άνω βάσεως 100 ± 2 mm, ύψος 300 ± 2 mm (ήτοι περιεκτικότητα 0,0055 m³ ή 5,5 κυβ. παλάμες). Οι δύο βάσεις είναι ανοικτές, παράλληλες μεταξύ τους και κάθετες στον άξονα του κώνου. Η μήτρα έχει στην εξωτερική της επιφάνεια δύο χειρολαβές, προσαρμοσμένες στα δύο τρίτα του ύψους της από την κάτω βάση και δύο ανηδιαμετρικά εξωτερικά πτερύγια στηρίξεως, στο επίπεδο της κάτω βάσεως, για την ακινητοποίηση της. Το μέταλλο κατασκευής της πρέπει να είναι απρόσβλητο από το σκυρόδεμα, η εσωτερική της επιφάνεια να είναι λεία, χωρίς ανωμαλίες, και το πάχος του τοιχώματος να είναι τουλάχιστον 1,5 mm.

β) Η χαλύβδινη ράβδος συμπτκνώσεως, ευθύγραμμη, μήκους 60 cm, κυκλικής διατομής $\Phi 16$ mm, με στρογγυλεμένα άκρα.

Η μέθοδος εφαρμόζεται για σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανούς 40 mm. Η κάθιση θα μετριέται πριν από τη διάστρωση του σκυροδέματος, σε δείγμα που θα λαμβάνεται μετά την αποφόρτωση του ενός τρίτου περίπου του αναμίγματος ή του ενός τρίτου του φορτίου αυτοκινήτου, αν πρόκειται για έτοιμο σκυρόδεμα (εργοστασιακό ή εργοταξιακό), ώστε το

δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό. Η τιμή της κάθισης θα προκύπτει ως μέσος όρος των μετρήσεων δύο δοκιμών, που θα γίνονται στο ίδιο δείγμα, εντός συνολικού χρόνου 15 λεπτών.

1. Ο κώνος κάθισης τοποθετείται πάνω σε επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια και διαβρέχεται εσωτερικά, αυτός και η επιφάνεια έδρασης.
2. Ο κώνος γεμίζεται με τη σέσουλα (όχι μυστρί) σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους, με σκυρόδεμα από το δείγμα που έχει ληφθεί σύμφωνα με την Προδιαγραφή ΣΚ-350. Ο κώνος διατηρείται ακίνητος καθ' όλη τη διάρκεια του γεμίσματος, με τη βοήθεια των δύο πτερυγίων στηρίξεως, πάνω στα οποία πατάει με το πόδια του ο παρασκευαστής.
3. Κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπυκνώσεως, που κατανέμονται κατά το δυνατόν ομοιόμορφα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα κτυπήματα ξεκινούν από την περίμετρο της μήτρας και με σπειροειδή κίνηση φθάνουν στο κέντρο. Κατά την συμπύκνωση της κατώτερης (πρώτης) στρώσης, η ράβδος βυθίζεται σε όλο το βάθος του σκυροδέματος και, κατά την έμπηξή της, έχει στην αρχή μια μικρή κλίση που βαθμιαία ελαπώνεται, τείνοντας προς την κατακόρυφο. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση η ράβδος βυθίζεται σε όλη τη στρώση, εισερχόμενη λίγο (περίπου 1 - 2 cm) και στην αμέσως από κάτω της, Στην ανώτερη (τρίτη) στρώση ο κώνος γεμίζεται με περίσσεια σκυροδέματος, που συμπληρώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης. Ειδικά για το ύφυργο σκυρόδεμα της κατηγορίας κάθισης S1 (1 ως 4 cm), η συμπύκνωση γίνεται με δονητή ή δονητική πλάκα και όχι με τη ράβδο.
4. Ύστερα από τη συμπύκνωση και της ανώτερης στρώσης, αφαιρείται το σκυρόδεμα που πλεονάζει και επιπεδώνεται η άνω επιφάνεια του, με παλινδρομική κύλιση της ράβδου συμπυκνώσεως στα χείλη του κώνου.
5. Αμέσως μετά το γέμισμα του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, καθαρίζεται η περιοχή γύρω από τη βάση του και ο κώνος ανασύρεται αργά, από τις πλευρικές χειρολαβές. Η ανάσυρση πρέπει να γίνεται ομαλά, με σταθερή ταχύτητα και κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση, χωρίς στροφή και τραντάγματα, και να ολοκληρώνεται μέσα σε 5 -10 sec (ο παρασκευαστής μετράει αργά από το 1001 έως το 1005). Ολόκληρη η διαδικασία της δοκιμής από την έναρξη του γεμίσματος μέχρι την αφαίρεση του κώνου πρέπει να ολοκληρώνεται σε χρόνο μικρότερο των 150 sec.
6. Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, που ελευθερούμενο από το μεταλλικό περίβλημα "κάθισε", μετρείται με προσέγγιση 5 mm, εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται.

7. Αν η κάθιση είναι μικρότερη από 10 mm, το σκυρόδεμα είναι τόσο ύφυγρο ώστε η μέθοδος ελέγχου να μην είναι κατάλληλη -δεν υπάρχει αποτέλεσμα- απαιτείται η δοκιμή Vebe . Αν διαπιστωθεί κατάρρευση του σκυροδέματος από διάτμηση (κατάρρευση τμήματος του κώνου κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου), η μέτρηση δεν λαμβάνεται υπ' όψη, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί σε νέο τμήμα του δείγματος. Αν και η δεύτερη δοκιμή δείξει την ίδια συμπεριφορά δοκιμίου, θεωρείται ότι το σκυρόδεμα δεν έχει την αναγκαία πλαστικότητα και συνοχή για την εφαρμογή της δοκιμής κάθισης. Αν η κάθιση είναι μεγαλύτερη από 175 mm , τότε η δοκιμή κάθισης δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας αυτού του σκυροδέματος και πρέπει να αντικατασταθεί από τη δοκιμή εξαπλώσεως.

Κατηγορία	Κάθιση σε mm
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220

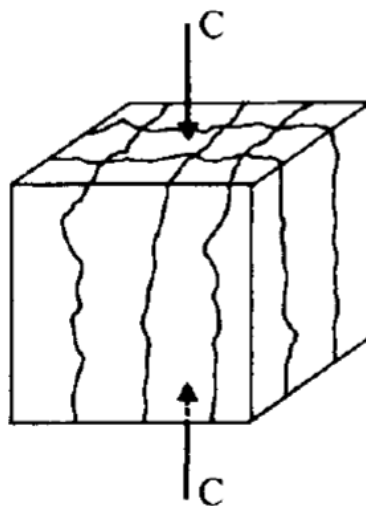
Πίνακας 3-1: Κατηγορίες κάθισης σύμφωνα με τον ΚΤΣ 97

3.2 Δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα

3.2.1 Δοκιμή Θλίψης

Η δοκιμή σε θλίψη αποτελεί την πιο κοινή ίσως δοκιμή για το σκυρόδεμα, κυρίως λόγω του ότι είναι απλή στη διεξαγωγή της. Επίσης η αντοχή σε θλίψη είναι ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος απαραίτητο για κάθε υπολογισμό.

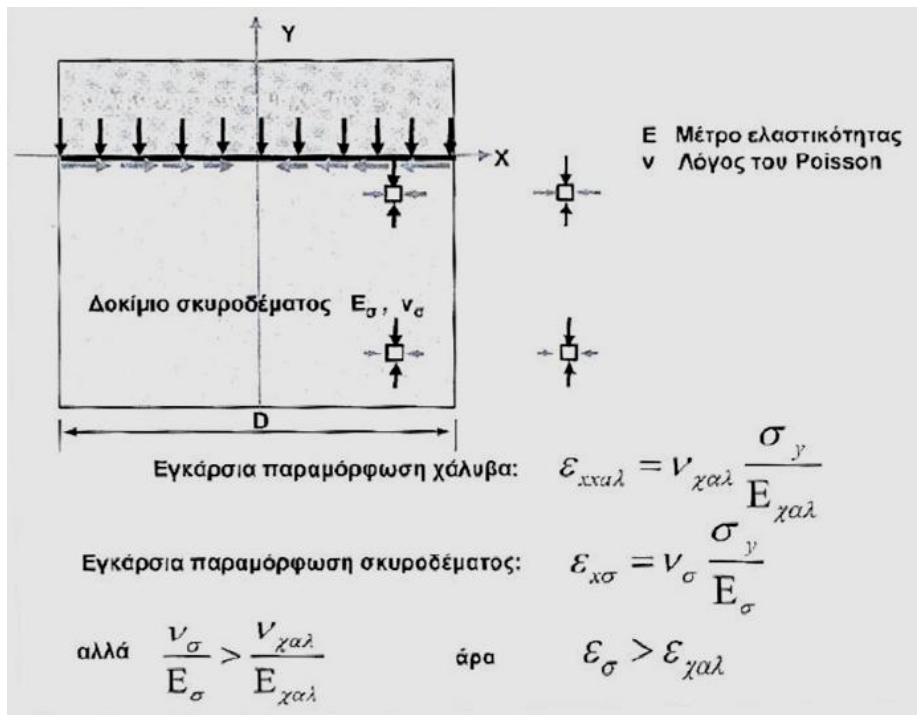
Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή και οι επιβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και παραμόρφωσης στα σημεία επιβολής του φορτίου. Στη συνέχεια απεικονίζεται η μορφή θραύσης κυβικού δοκιμίου υπό μονοαξονική θλίψη.



Εικόνα 3-1: Εικόνα θραύσης μονοαξονικής θλίψης

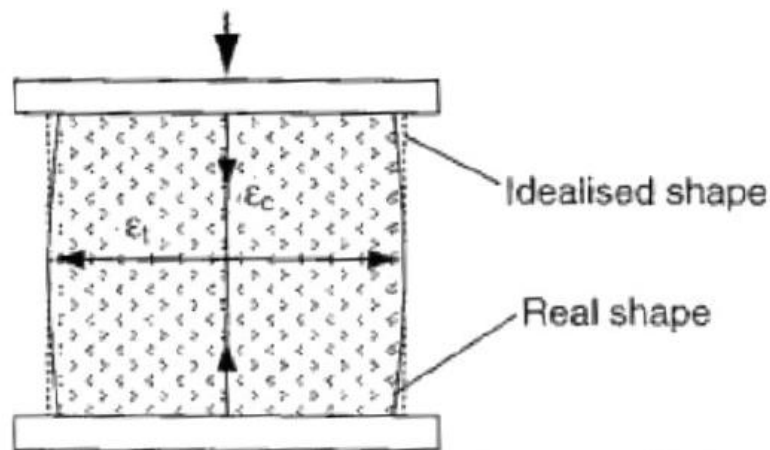
Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές κυρίως παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία. Οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και τελικά το δοκίμιο αστοχεί σχηματίζοντας «κολωνάκια».

Στις πραγματικές δοκιμές όμως οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες της μηχανής στην οποία γίνεται η δοκιμή. Το σκυρόδεμα κατά τη θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια περισσότερο από τις χαλύβδινες πλάκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται, λόγω τριβής, η οριζόντια παραμόρφωση και να αναπτύσσονται συνθήκες τριαξονικής θλίψης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αποτέλεσμα της τριαξονικής θλίψης είναι να αυξάνεται φαινομενικά η αντοχή του δοκιμίου.

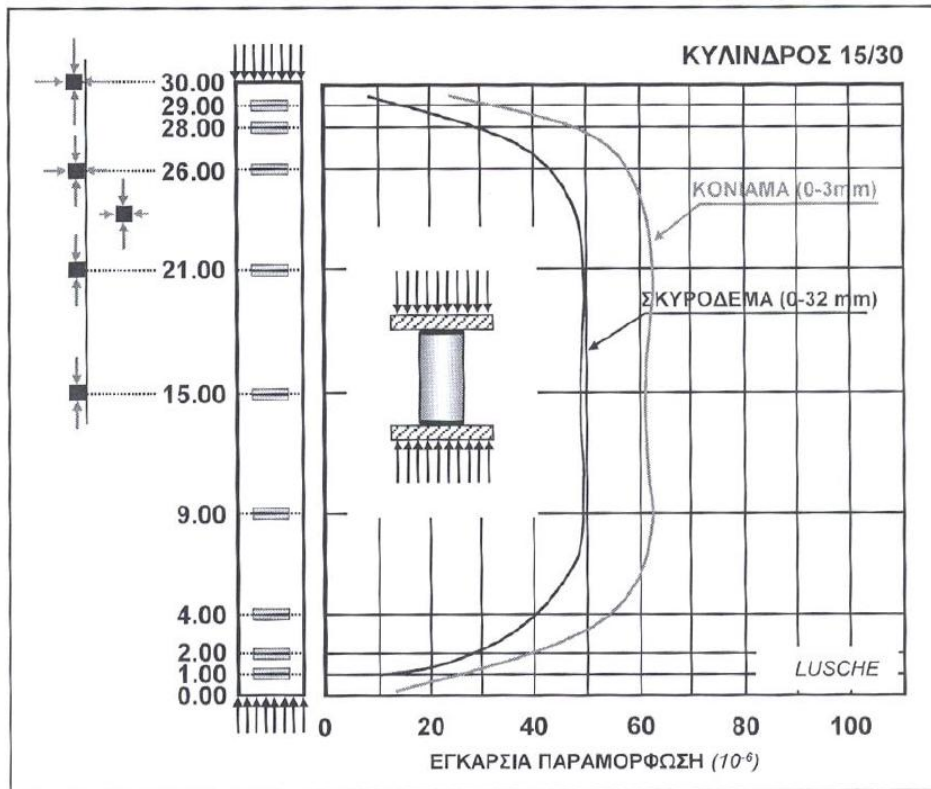


Εικόνα 3-2: Ανάλυση τάσεων στη διεπιφάνεια χαλύβδινης πλάκας-σκυροδέματος

Οι εγκάρσιες αυτές δυνάμεις εξασθενούν καθώς απομακρυνόμαστε από τις πλάκες. Όταν το ύψος του δοκιμίου είναι μεγαλύτερο από δύο φορές το πλάτος του στο μέσο του δοκιμίου έχουμε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης. Έτσι εξηγείται το ότι στα κυλινδρικά δοκίμια όπου ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη ($H/D \geq 2$) η αντοχή είναι μικρότερη από ότι στα κυβικά δοκίμια ($H/D=1$). Η αντοχή του κυλίνδρου είναι ανάλογη της αντοχής του κύβου και είναι περίπου το 80% αυτής. Η σχέση των δύο αντοχών εξαρτάται και από το μέγεθος της μέγιστης επιβαλλόμενης δύναμης αλλά και από τις συνθήκες υγρασίας. Στη συνέχεια φαίνεται η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου και η σχέση της αντοχής με την αναλογία ύψους-διαμέτρου (ASTM c 42-04).



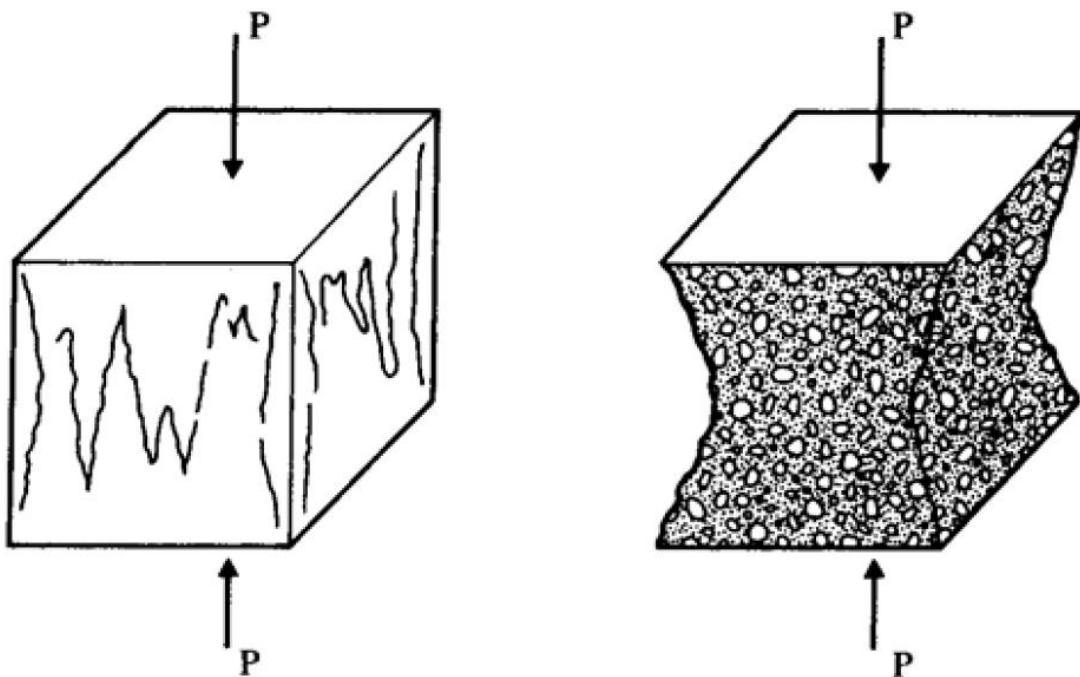
Εικόνα 3-3: Παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη



Διάγραμμα 3-1: Παραμόρφωση καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη

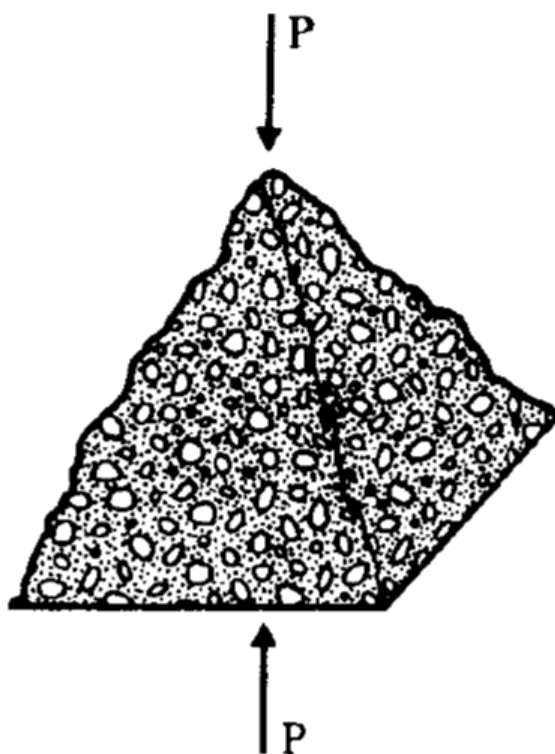
Η χρήση κυλινδρικών δοκιμίων υπερέχει λόγω του ότι επιτυγχάνουμε πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Ωστόσο τα κυβικά δοκίμια είναι πιο εύχρηστα κυρίως διότι δεν απαιτείται απίσωση (καπέλωμα).

Στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται η ακόλουθη μορφή αστοχίας.



Εικόνα 3-4: Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη

Οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου. Οι πλευρές του δοκιμίου είτε εμφανίζουν κατακόρυφες ρωγμές, είτε διασπώνται τελείως και ο πυρήνας παραμένει πρακτικά άθικτος. Εάν η μηχανή στην οποία γίνεται η δοκιμή δεν είναι αρκετά δύσκαμπτη υπάρχει η περίπτωση να εμφανισθεί αστοχία εκρηκτικού τύπου όπως φαίνεται παρακάτω.

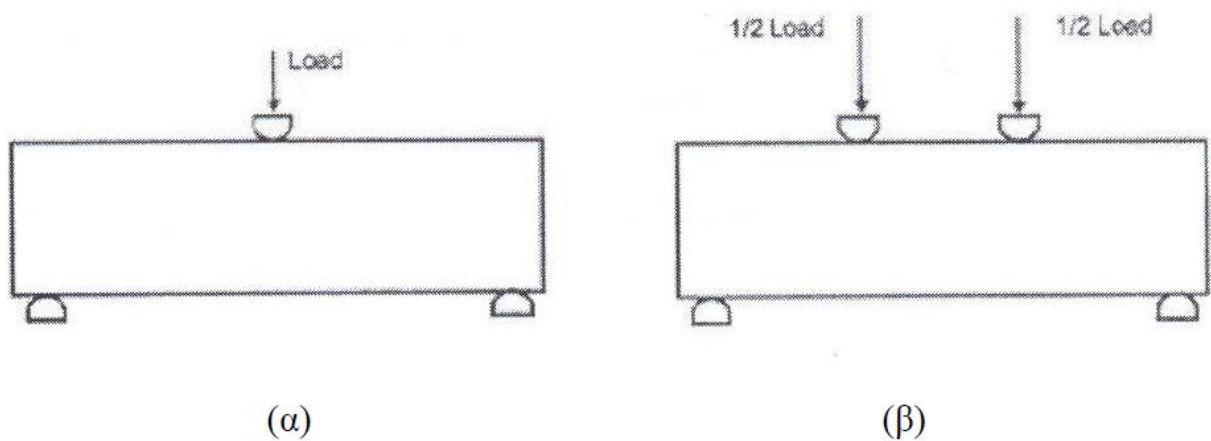


Εικόνα 3-5: Αστοχία εκρηκτικού τύπου

3.2.2 Δοκιμή Κάμψης

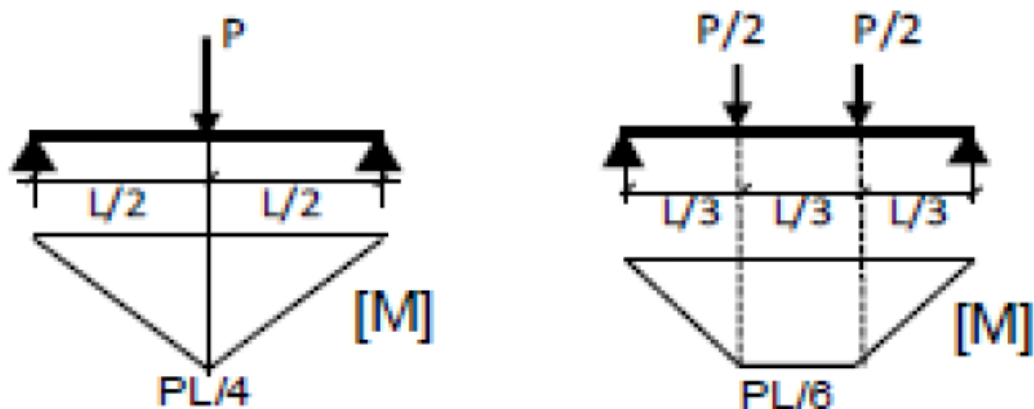
Η εφελκυστική αντοχή είναι ιδιαίτερα σημαντική, ωστόσο η πραγματοποίηση της δοκιμής είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί εξαιτίας της δυσκολίας που παρουσιάζει η προετοιμασία για την πραγματοποίησή της. Εναλλακτικά λοιπόν χρησιμοποιούμε την δοκιμή κάμψης η οποία είναι ευκολότερη αλλά και αντιπροσωπεύει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης.

Η δοκιμή πραγματοποιείται είτε με την επιβολή φορτίου σε δύο σημεία τα οποία χωρίζουν το άνοιγμα το οποίο δημιουργείται από τα σημεία στήριξης σε τρία ίσα τμήματα, είτε με την επιβολή φορτίου σε ένα σημείο στο μέσο του δοκιμίου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα σημεία επιβολής φορτίου ανάλογα με τον αριθμό σημείων επιβολής του.



Εικόνα 3-6: Δοκιμή κάμψης με φόρτιση στο μέσον (α) και στα τρίτα του ανοίγματος (β)

Η κάθε δοκιμή δίνει διαφορετικές τιμές αντοχής και πιο συγκεκριμένα η δοκιμή με τα δύο σημεία επιβολής φορτίου δίνει χαμηλότερες τιμές αντοχής και καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων. Αυτό οφείλεται στο ότι ο όγκος του δοκιμίου που βρίσκεται υπό τη μέγιστη τιμή της ροπής κάμψεως είναι διαφορετικός στις δύο περιπτώσεις, όπως και η κατανομή των τεμνουσών. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι και άλλοι παράγοντες όπως ο λόγος μήκος προς ύψος επηρεάζουν τα αποτελέσματα.



Εικόνα 3-7: Ροπές που αναπτύσσονται κατά μήκος της δοκού στις δύο περιπτώσεις (α) & (β)

Η αντοχή σε κάμψη για τις δύο περιπτώσεις δίνεται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$f_{t,fl} = \frac{3PL}{bd^2} \quad \text{και} \quad f_{t,fl} = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.1) - (3.2)$$

όπου:

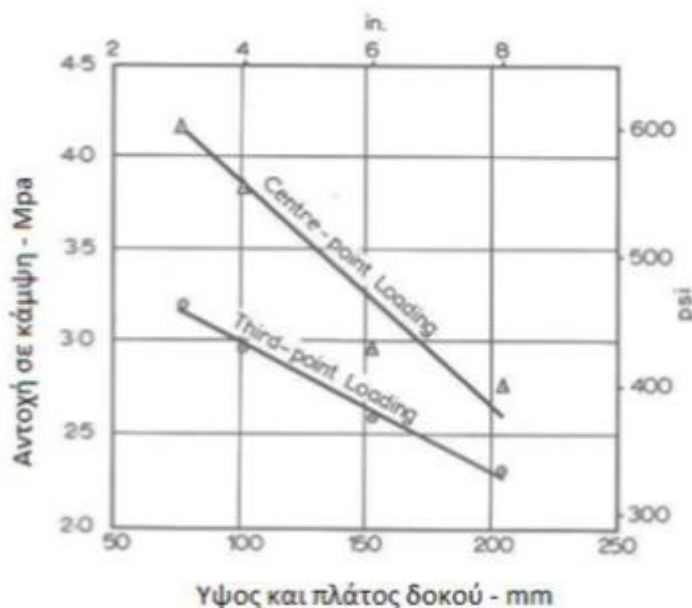
$f_{t,fl}$: η αντοχή σε κάμψη

P: το επιβαλλόμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων

d: το ύψος του δοκιμίου

b: το πλάτος του δοκιμίου



Διάγραμμα 3-2: Σχέση διαστάσεων του δοκιμίου με την αντοχή σε κάμψη για τις δύο περιπτώσεις

Σε δοκιμές που εκτέλεσε ο P.J.Wright παρατηρήθηκε ότι για σταθερό λόγο μήκους προς ύψος ίσο με 3 και με μεταβολή του ύψους από 3 ίντσες σε 8 υπήρξε μείωση των αντοχών κατά 33% στη δοκιμή με την επιβολή φορτίου στο μέσο και 28% στην δοκιμή με την επιβολή φορτίου σε δύο σημεία. Επίσης παρατηρήθηκε και μεγαλύτερη επαναληψιμότητα των αποτελεσμάτων.

Η αύξηση του λόγου μήκος /ύψος προκαλεί μείωση της αντοχής σε κάμψη και μείωση του συντελεστή μεταβλητότητας.

Με βάση τα αποτελέσματα του P.J.Wright η δοκιμή με ένα σημείο επιβολής της φόρτισης έδωσε 20-25% μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τη δοκιμή με δύο σημεία. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί επαρκώς με τη θεωρία του «αδύναμου κρίκου» (weakest link), καθώς όπως προαναφέραμε στην πρώτη περίπτωση μεγαλύτερο τμήμα του δοκιμίου βρίσκεται σε μέγιστη καταπόνηση και άρα είναι πιθανότερο να βρεθεί περιοχή με μικρότερη αντοχή

ώστε να ξεκινήσει η θραύση. Επίσης ο συντελεστής μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων ήταν μικρότερος στην πρώτη περίπτωση, πράγμα που εξηγείται με την ίδια θεωρία.

Συνοψίζοντας, η δοκιμή κάμψης δίνει γενικά μεγαλύτερες φαινόμενες αντοχές σε σχέση με τις άλλες δοκιμές. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι ο συνολικός όγκος του δοκιμίου που υπόκειται στη μέγιστη ένταση είναι μικρότερος και άρα η πιθανότητα να βρísκεται μια ατέλεια στην κρίσιμη περιοχή είναι μικρότερη. Επίσης η ένταση που υπολογίζεται μέσω της ελαστικής θεώρησης είναι ανεπαρκής καθώς υπάρχει πλαστική παραμόρφωση καθώς πλησιάζουμε στην θραύση με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η αντοχή.

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης για μικρά φορτία ο ρυθμός της παραμόρφωσης είναι ίδιος τόσο για την άνω όσο και για την κάτω ίνα του δοκιμίου και συγκεκριμένα μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος.

Με την αύξηση της ροπής η παραμόρφωση στην κάτω επιφάνεια αυξάνεται γρηγορότερα απ' ό τι στην πάνω επιφάνεια, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο ουδέτερος άξονας μετακινείται προς τα επάνω.

Η αντοχή της δοκού σε κάμψη θα ταυτιζόταν με την αντοχή σε εφελκυσμό σύμφωνα με την σχέση:

$$f_{cb} = \frac{M}{V} = 6M/bh^2 \quad (3.3)$$

αν η συμπεριφορά του σκυροδέματος είναι γραμμική και ελαστική μέχρι την θραύση. Στην πραγματικότητα όμως δεν υπάρχει γραμμική κατανομή των τάσεων στην εφελκυσόμενη περιοχή του δοκιμίου. Έτσι η ακραία κάτω ίνα εισέρχεται στην πλαστική περιοχή πριν επέλθει η αστοχία του δοκιμίου και γίνει ανάληψη του φορτίου από τα ανώτερα επίπεδα, με αποτέλεσμα η φαινόμενη αντοχή είναι μεγαλύτερη από την πραγματική.

Το φαινόμενο γίνεται εντονότερο στην περίπτωση σκυροδέματος με μικρότερη αντοχή όπου η πλαστική συμπεριφορά και η δημιουργία μικρορωγματώσεων συμβαίνει γρηγορότερα.

Σύμφωνα με τον CEB η σχέση που συνδέει την αντοχή σε κάμψη με την αντοχή σε εφελκυσμό είναι:

$$f_{t,axl} = f_{t,fl} \cdot \frac{1.5 \cdot \left(\frac{h_b}{0.1}\right)^{0.7}}{1 + 1.5 \cdot \left(\frac{h_b}{0.1}\right)^{0.7}} \quad (3.4)$$

όπου:

$f_{t,axl}$: η αντοχή σε εφελκυσμό

$f_{t,fl}$: η αντοχή σε κάμψη κατά την αστοχία

h_b : το πάχος του δοκιμίου

4 ΠΥΡΚΑΓΙΑ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΑ

4.1 Γενικά

Η πυρκαγιά σε σήραγγα αποτελεί ένα από τα πιο επικίνδυνα και δύσκολα αντιμετωπίσιμα συμβάντα που μπορεί να εκδηλωθούν μέσα σε μία σήραγγα κυρίως κατά την διάρκεια λειτουργίας της. Οι συνέπειες συνήθως είναι πολύ σοβαρές σε οικονομικό και κοινωνικό κόστος αλλά κυρίως σε ανθρώπινες ζωές. Η έκταση των επιπτώσεων πυρκαγιάς σε μία σήραγγα ποικίλουν λόγω διαφόρων παραγόντων όπως τα υλικά που εκτίθενται στην φωτιά και τα υλικά καύσης, η διάρκεια της φωτιάς που εξαιτίας της δυσκολίας κατάσβεσης μπορεί να ξεπεράσει τις 2 ώρες, η μορφολογία της σήραγγας, το σύστημα αερισμού που διαθέτει η σήραγγα κ.α.

Δυστυχώς πολλά από τα δεδομένα πάνω στο συγκεκριμένο θέμα, τρόποι αντιμετώπισης τέτοιων καταστάσεων καθώς και υποχρεωτική νομοθεσία συλλέχθηκαν και αναπτύχθηκαν ύστερα από αντιμετώπιση πραγματικών πυρκαγιών σε σήραγγες ανά τον κόσμο. Παραδείγματα τέτοιων ατυχημάτων αποτελούν οι πυρκαγιές στη σήραγγα της Μάγχης στην Αγγλία, του Mont-Blanc στη Γαλλία, του Tauern στην Αυστρία και του Gothard στην Ελβετία, του Great Belt Tunnel στην Δανία 1994 και του Channel Tunnel στην Αγγλία-Γαλλία. Συγκεκριμένα στο Great Belt Tunnel, το ατύχημα έγινε κατά την κατασκευή της σήραγγας εξαιτίας διαρροής πετρελαίου από μηχανήμα εκσκαφής και δημιουργήθηκαν εντός της σήραγγας θερμοκρασίες μέχρι 800 °C με αποτέλεσμα τα 2/3 της επικάλυψης από σκυρόδεμα να καταστραφούν από το φαινόμενο της εκρηκτικής αποκόλλησης (explosive spalling). Στην περίπτωση του Channel Tunnel, τα γεγονότα ήταν περισσότερο ακραία. Η φωτιά κράτησε για 9 ώρες εξαιτίας των υλικών που καιγόntonουσαν ενώ η θερμοκρασία έφτασε τους 1100 °C με αποτέλεσμα να καταστραφεί σχεδόν το 100% της επικάλυψης από σκυρόδεμα. Τα πράγματα θα μπορούσαν να είναι χειρότερα στην συγκεκριμένη περίπτωση εάν είχε τρυπηθεί το στεγανό στρώμα ασβέστου το οποίο προστάτευσε την σήραγγα από το να πλημμυρίσει.

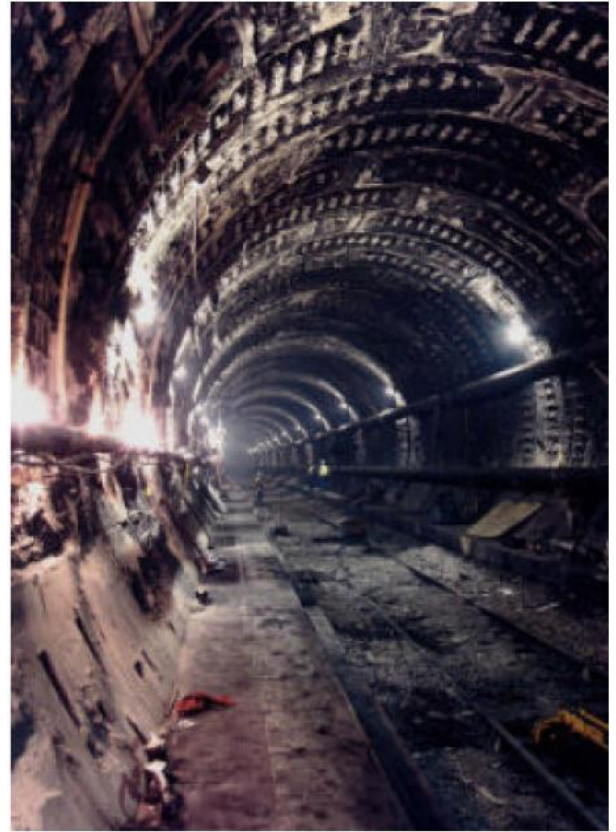
Σε όλες τις περιπτώσεις οι απώλειες σε ανθρώπινες ζωές ήταν μεγάλες, το κόστος επισκευής σε πολλές περιπτώσεις ανερχόταν σε εκατοντάδες εκατομμύρια ευρώ ενώ ο χρόνος επισκευής που απαιτήθηκε ήταν από μήνες έως χρόνια. Σημαντικό κόστος, όχι άμεσο όπως τα προηγούμενα, αποτελεί ο φόβος και η αμφιβολία στην επαναχρησιμοποίηση των σηράγγων αυτών από τους χρήστες τους κυρίως όταν πρόκειται για σήραγγες μεγάλου μήκους.

Σήραγγα	Θύματα/ Τραυματίες	Οικονομικές απώλειες (εκ. €)	Χρόνος Επισκευής (έτη)	Καταστροφή Σκυροδέματος (cm)
Μάγχης (Αγγλία)	30 τραυμ.	250	>1	35
Mont Blanc (Γαλλία/Ιταλία)	39 νεκροί 34 τραυμ.	450	3	40
Tauern (Αυστρία)	12 νεκροί 49 τραυμ.	30		35
Gotthard (Ελβετία)	11 νεκροί		2 μήνες	35

Πίνακας 4-1: Περιστατικά πυρκαγιών σε σήραγγες και επιπτώσεις τους



Εικόνα 4-1: Τυπικές περιπτώσεις βλαβών ύστερα από εκδήλωση πυρκαγιάς

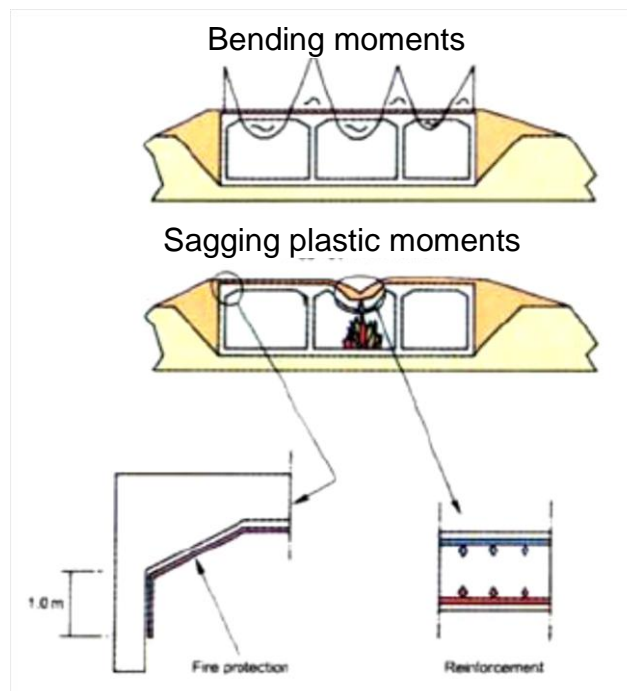


Εικόνα 4-2: Επιπτώσεις πυρκαγιάς σε σήραγγα



4.2 Επίδραση της φωτιάς στην σήραγγα ανάλογα με τη μορφή της

Καθοριστικό ρόλο στην ικανότητα της σήραγγας να αντιστέκεται στην φωτιά έχει η μορφή της. Σήραγγες ορθογώνιας διατομής (τύπου cut and cover) καταπονούνται κυρίως από εντάσεις λόγω κάμψης με αποτέλεσμα η φωτιά σε μία τέτοια κατασκευή να προκαλεί αποκόλληση σκυροδέματος στην εσωτερική επιφάνεια αλλά και σοβαρή μείωση της καμπτικής αντοχής του στοιχείου επηρεάζοντας την σταθερότητα της κατασκευής.



Οι σήραγγες κυκλικής διατομής συμπεριφέρονται διαφορετικά. Καταπονούνται κυρίως σε θλιπτικές τάσεις στον θόλο οι οποίες αυξάνονται κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς εξαιτίας της παρεμπόδισης της διαστολής κοντά στην θερμαινόμενη επιφάνεια.

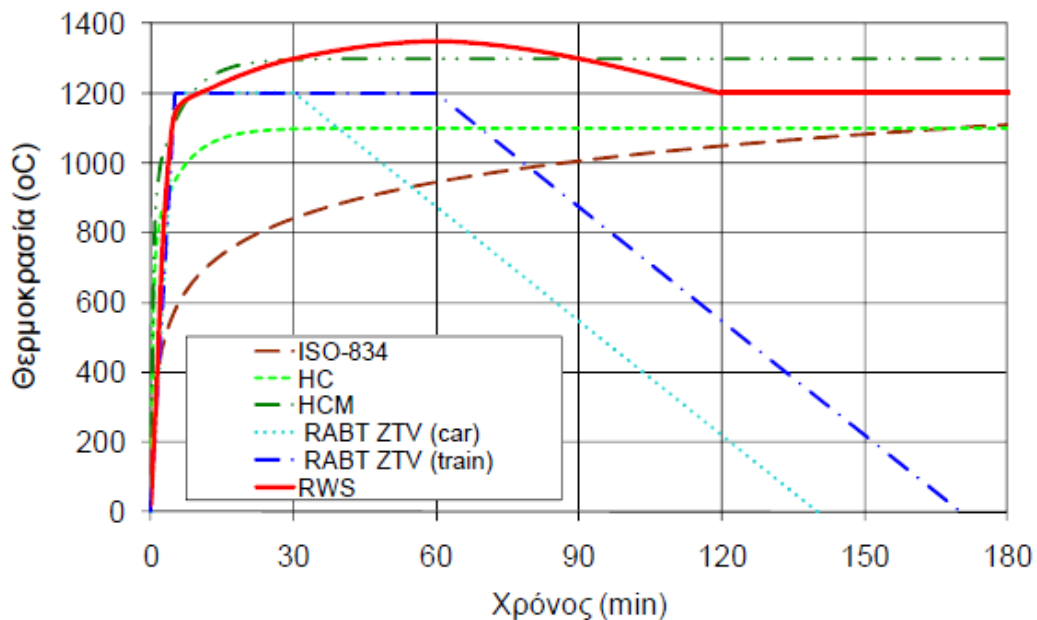
4.3 Θερμικά φορτία και τυποποιημένα είδη πυρκαγιάς

Η πυρκαγιά είναι αντίδραση καύσης με ταυτόχρονη έκλυση φωτός και θερμότητας. Μια τυπική πυρκαγιά αποτελείται από τρεις φάσεις:

1. Τη φάση της επώασης
2. Τη φάση της πλήρους ανάπτυξης
3. Τη φάση της απόσβεσης

(Τάσιος και Δεοδάτης, 1984).

Επίσης η συμπεριφορά των υλικών διαφοροποιείται στις διάφορες θερμοκρασίες για αυτό το λόγο Εθνικοί και Διεθνείς κανονισμοί έχουν θεσπιστεί με βάση τις παρακάτω χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου – θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 4-1: Χαρακτηριστικές καμπύλες χρόνου- θερμοκρασίας

4.3.1 Καμπύλη ISO (ISO-384)

Η καμπύλη αυτή προκύπτει με βάση το ρυθμό καύσης υλικών τα οποία χρησιμοποιούνται στις κατασκευές κτιρίων. Σε 30 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς η θερμοκρασία ανέρχεται στους 842 °C ενώ η συνολική διάρκεια της είναι τρεις ώρες και η μέγιστη θερμοκρασία 1110 °C. Η θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$T = 20 + 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad (4.1)$$

T: θερμοκρασία σε °C

t: χρόνος σε min

4.3.2 Καμπύλη Υδρογονανθράκων (HC)

Η καμπύλη αυτή προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη την καύση πετρελαίου ή άλλων χημικών υλικών που χρησιμοποιούνται στην πετρελαϊκή βιομηχανία και δεν χρησιμοποιούνται στα συνήθη οικοδομικά έργα. Η καμπύλη αυτή έχει εφαρμογή σε περιπτώσεις πυρκαγιών οι οποίες προέρχονται από καύση καύσιμων υλών. Βασικό χαρακτηριστικό της καμπύλης αυτής είναι η ταχύτερη αύξηση της θερμοκρασίας αφού στα 15 πρώτα λεπτά έχει φτάσει τους 1100 °C και παραμένει σε αυτή τη θερμοκρασία για 3 ώρες. Η θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$T = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) \quad (4.2)$$

T: θερμοκρασία σε °C

t: χρόνος σε min

4.3.3 Τροποποιημένη Καμπύλη Υδρογονανθράκων (HCM)

Η διαφορά αυτής με την παραπάνω καμπύλη έγκειται στο ότι η θερμοκρασία τα 15 πρώτα λεπτά φτάνει στους 1300 °C. Η θερμοκρασία κάθε χρονική στιγμή προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$T = 20 + 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167t} - 0,675 \cdot e^{-2,5t}) \quad (4.3)$$

T: θερμοκρασία σε °C

t: χρόνος σε min

4.3.4 Καμπύλες RABT ZTV (car) και RABT ZTV (train)

Οι καμπύλες αυτές αναπτύχθηκαν στη Γερμανία και σύμφωνα με αυτές και στις δύο περιπτώσεις η θερμοκρασία ανέρχεται στους 1200 °C μέσα στα 5 πρώτα λεπτά και παραμένει εκεί για 30 και 60 λεπτά αντίστοιχα από όπου αρχίζει και μειώνεται. Η φάση της απόσβεσης και στις δύο περιπτώσεις είναι 110 λεπτά.

4.3.5 Καμπύλη RWS

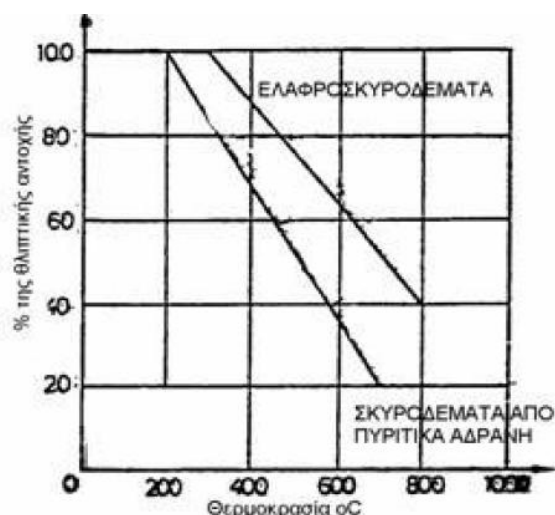
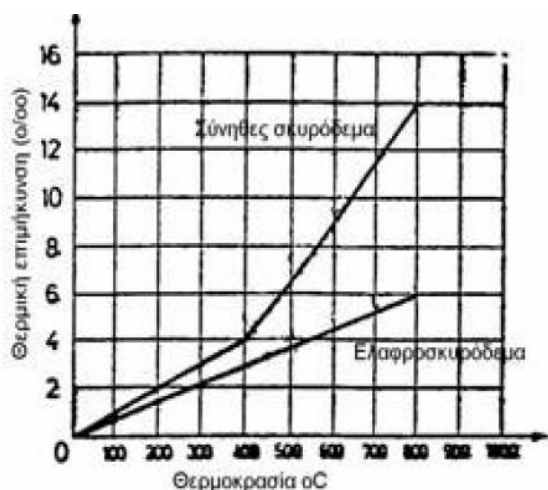
Η καμπύλη αυτή αποτελεί τη δυσμενέστερη περίπτωση από όλες τις προηγούμενες και αναπτύχθηκε από το υπουργείο συγκοινωνιών της Ολλανδίας. Σύμφωνα με αυτό το σενάριο, για την πραγματοποίηση αυτής της καμπύλης, εκδηλώνεται πυρκαγιά σε φορηγό με 50 m³ πετρέλαιο και η ισχύς της είναι 300 MW με διάρκεια 120 λεπτά σε κλειστό χώρο. Η πραγματοποίηση των πειραμάτων έλαβε χώρα στη σήραγγα Runehamar στη Νορβηγία. Η καμπύλη αυτή είναι η μόνη, σε αντίθεση με όλες τις άλλες, που η πυρκαγιά πραγματοποιείται σε κλειστό χώρο όπως μία σήραγγα. Το γεγονός αυτό την καθιστά την πιο απαιτητική καμπύλη για υπολογισμό θερμικών φορτίων σχεδιασμού σε σήραγγα ενώ η απότομη αύξηση της θερμοκρασίας που παρουσιάζει οδηγεί σε αποφλοίωση του σκυροδέματος χωρίς την λήψη κατάλληλων μέτρων για την αποφυγή του φαινομένου.

4.4 Συμπεριφορά δομικών στοιχείων σηράγγων κατά τη διάρκεια πυρκαγιάς

Κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς σε σήραγγα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται όπως αναφέρθηκε ξεπερνούν τους 1000 °C για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα που σημαίνει ότι τα δομικά της στοιχεία καταπονούνται θερμικά σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών εκτός των ορίων της συμβατικής τους λειτουργίας. Κάθε στοιχείο αναπτύσσει και χάνει διαφορετικές ιδιότητες σε ακραίες θερμοκρασίες και ενώ στο συμβατικό εύρος λειτουργίας τους συνεργάζονται ομαλά στις συνθήκες που επικρατούν κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς αυτή η ομαλή συνεργασία διαταράσσεται.

4.4.1 Συμπεριφορά σκυροδέματος

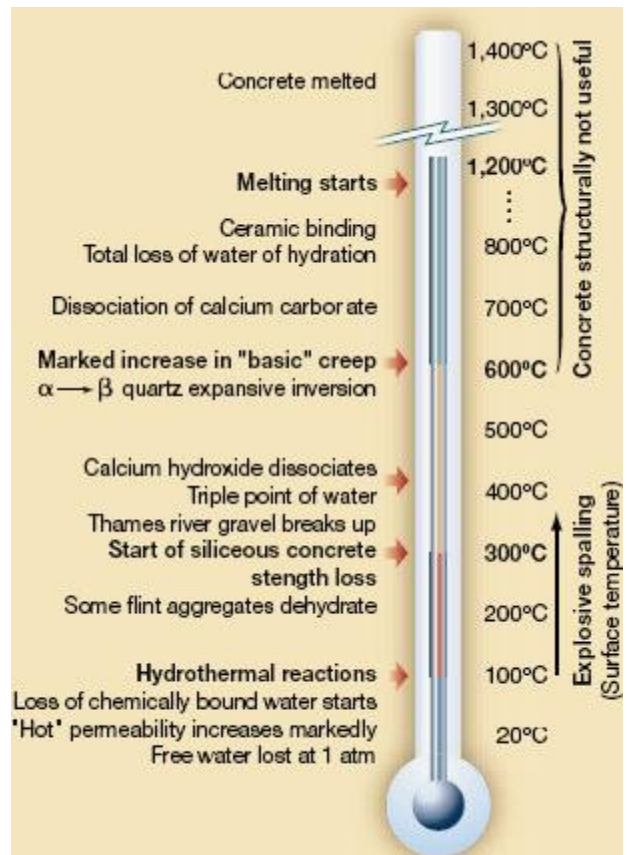
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω κατά την εκδήλωση μίας πυρκαγιάς σε μία σήραγγα η θερμοκρασία προσεγγίζει πολύ υψηλά επίπεδα. Σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες στο σκυρόδεμα προκαλείται μία σειρά φυσικών και χημικών διεργασιών. Η φύση αυτών των διεργασιών ποικίλει ανάλογα με τη σύνθεση του σκυροδέματος, τις αναλογίες των μιγμάτων και τις συνθήκες κατά την άνοδο της θερμοκρασίας (π.χ ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας). Ενδεικτικά η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος μπορεί να ποικίλει από 60% έως 130% στους 300 °C της θλιπτικής αντοχής του σε κανονικές θερμοκρασίες ανάλογα με τη σύνθεση του όπως παρουσιάζεται και στα επόμενα διαγράμματα.



Μία άλλη μοναδική ιδιότητα του σκυροδέματος σε σχέση με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία είναι η LITS (Load-Induced Thermal Strain) δηλαδή η θερμική παραμόρφωση στοιχείου υπό φόρτιση, η οποία αποτελεί μία μη ανακτήσιμη παραμόρφωση που παρουσιάζεται μόνο κατά την διάρκεια της πρώτης θέρμανσης υπό φόρτιση και όχι κατά την επαναθέρμανση ή ψύξη του στοιχείου. Αυτή η ιδιότητα συμβάλει στην ανακούφιση του στοιχείου από τις θερμικές τάσεις. Επίσης ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η θερμική παραμόρφωση ενός αφόρτιστου στοιχείου εξαρτάται από τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την σύνθεση του σκυροδέματος ενώ την θερμική παραμόρφωση ενός φορτισμένου στοιχείου την καθορίζει το θλιπτικό φορτίο και το επίπεδο της θερμοκρασίας. Γενικά από έρευνες προκύπτει ότι σκυροδέματα που προκύπτουν από τσιμέντο τύπου Portland, δεν μπορούν να φέρουν συνεχές φορτίο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600 °C. Το σκυρόδεμα έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα με αποτέλεσμα να ξεπερνά αυτή τη θερμοκρασία μόνο επιφανειακά και το υπόλοιπο να προστατεύεται, εκτός από την περίπτωση που θα γίνει αποκόλληση σκυροδέματος. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας για θερμοκρασίες άνω των 600 °C ενώ μειώνεται στο ήμισυ για θερμοκρασίες κάτω από 600 °C.

Θερμοκρασία	Φυσικές διεργασίες	Επίδραση στις ιδιότητες
0-100 °C	Εξάτμιση του φυσικά ροφημένου νερού	Μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής και μείωση του μέτρου ελαστικότητας
100-400 °C	Πραγματοποιούνται υδροθερμικές αντιδράσεις και εξάτμιση του μηχανικά συνδεδεμένου νερού.	Επίτευξη της τελικής θλιπτικής αντοχής και περαιτέρω μείωση του μέτρου ελαστικότητας
400-500 °C	Το συνδεδεμένο με τα υδροξείδια του ασβέστου νερό ελευθερώνεται μέσω της πίεσης των υδρατμών και ενεργεί ιαρρηκτικά. Ξεκινά η αποφλοίωση του σκυροδέματος	Ισχυρή πτώση της αντοχής του σκυροδέματος αλλά και του μέτρου ελαστικότητας
500-1000 °C	Τα περιέχοντα χαλαζιακά συστατικά του σκυροδέματος (άμμος, χαλίκι) μεταβάλλουν αλματωδώς τον όγκο τους στους 600 °C	Μικρή παραμένουσα αντοχή
>1000 °C		Αρχίζει η τήξη του σκυροδέματος

Πίνακας 4-2: Επιπτώσεις πυρκαγιάς στο σκυροδέμα ανάλογα με την αναπτυσσόμενη θερμοκρασία



4.4.1.1 Αποκόλληση (Spalling)

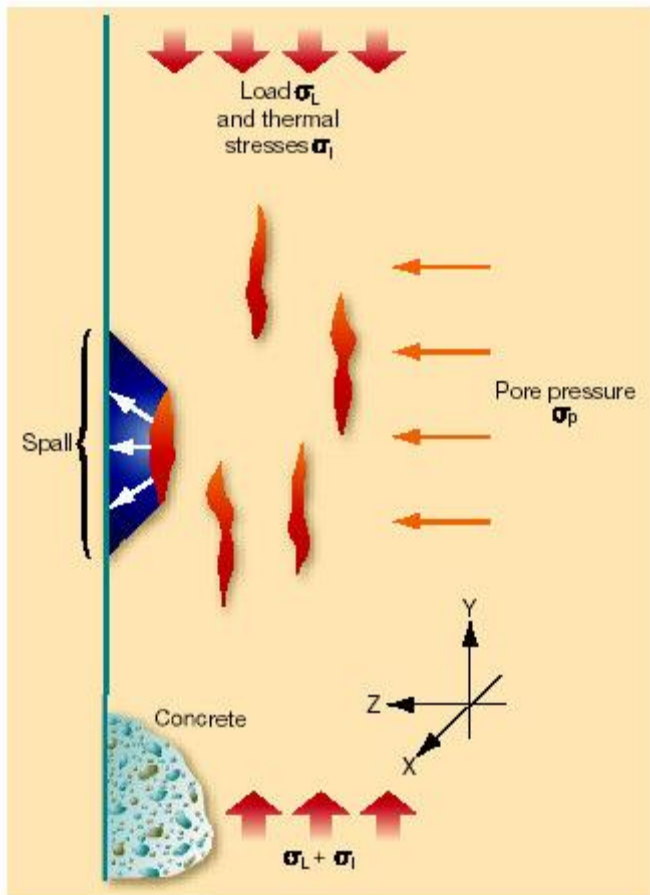
Η αποκόλληση είναι η βίαιη ή μη βίαιη διακοπή στρωμάτων ή κομματιών του σκυροδέματος από την επιφάνεια ενός δομικού στοιχείου όταν υπάρχει ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας. Συνήθως συμβαίνει στα πρώτα 20-30 λεπτά.

Το φαινόμενο παρουσιάζεται με τέσσερις μορφές:

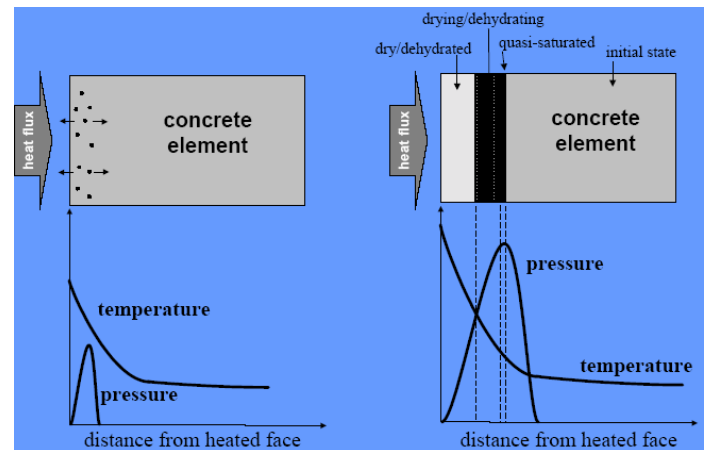
- Επιφανειακή αποκόλληση
- Γωνιακή αποκόλληση
- Αποκόλληση αδρανών
- Εκρηκτική αποκόλληση

Εκτός από τη γωνιακή αποκόλληση η οποία εκδηλώνεται στα 30-60 λεπτά από την έναρξη της πυρκαγιάς και επηρεάζεται από την μέγιστη θερμοκρασία, οι άλλες τρεις μορφές εκδηλώνονται τα πρώτα 20-30 λεπτά και επηρεάζονται από τον ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας. Η επιφανειακή και η εκρηκτική αποκόλληση είναι βίαιες μορφές αποκόλλησης και οι επιπτώσεις τους είναι σοβαρότερες από της γωνιακής.

Η εκρηκτική αποφλοίωση πραγματοποιείται λόγω τριών παραγόντων:



1. Λόγω πίεσης των πόρων
2. Λόγω θερμικών εφελκυστικών τάσεων
3. Λόγω συνδυασμού των δύο παραπάνω



Στην πρώτη περίπτωση δηλαδή στην αποκόλληση λόγω της πίεσης των πόρων η αποκόλληση επηρεάζεται από την διαπερατότητα, το αρχικό επίπεδο κορεσμού των πόρων και το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας.

Η δεύτερη περίπτωση δηλαδή η αποκόλληση λόγω των θερμικών εφελκυστικών τάσεων συμβαίνει επειδή κατά την θέρμανση αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις κοντά στην εξωτερική επιφάνεια λόγω περιορισμού της θερμικής διαστολής και εφελκυστικές τάσεις στα ενδότερα του σκυροδέματος όπου επικρατούν χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Στην τελευταία περίπτωση, στην αρχή αναπτύσσονται μικρορωγμές στην επιφάνεια και στη συνέχεια το σύνολο των τάσεων υπερβαίνει την εφελκυστική αντοχή του υλικού με αποτέλεσμα τη βίαιη αστοχία του υλικού και την απότομη απελευθέρωση ενέργειας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποφλοίωση είναι οι παρακάτω:

- Η αντοχή, η ηλικία και η αγωγιμότητα του σκυροδέματος
- Ο ρυθμός αύξησης της θερμότητας
- Το σχήμα της διατομής της σήραγγας
- Το μέγεθος και ο τύπος των αδρανών
- Η περιεκτικότητα σε υγρασία
- Η παρουσία μικρορωγμών



Εικόνα 4-3: Εικόνα δοκιμίων μετά από έψηση σε θερμοκρασία 500 °C

4.4.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την εκρηκτική αποκόλληση

Στις συνηθισμένες συνθέσεις σκυροδέματος η αποκόλληση παρουσιάζεται μέσα στα πρώτα 20 λεπτά. Οι αιτίες που επηρεάζουν το φαινόμενο παρουσιάζονται παρακάτω:

1. Διαστολή χαλαζιακών αδρανών.

Στους 570 °C πραγματοποιείται διαστολή των κρυστάλλων χαλαζία με αποτέλεσμα να γίνεται αύξηση των μικρορωγμών περιφερειακά των αδρανών αυτών.

2. Αποκόλληση αδρανών

Κατά το φαινόμενο αυτό ξεχωριστά κομμάτια αδρανών εκρήγνυνται και δημιουργούνται

επιφανειακοί κρατήρες. Επειδή το μέγεθος των αδρανών είναι συνήθως μικρότερο των 25mm για χρήση σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και θεωρώντας ότι η περιοχή η οποία προσβάλλεται από το φαινόμενο μαζί με το κομμάτι που αποκολλήθηκε δεν ξεπερνά σε βάθος από την επιφάνεια του σκυροδέματος τα 25mm, οι συνέπειες του φαινομένου στην αντοχή των στοιχείων δεν είναι ιδιαίτερα σοβαρές.

3. Χαμηλή εφελκυστική αντοχή

Η μικρή εφελκυστική αντοχή μειώνει την απαραίτητη ενέργεια και πίεση για την έκρηξη του σκυροδέματος με αποτέλεσμα να ευνοεί την εκρηκτική αποκόλληση. Ο κίνδυνος γίνεται εντονότερος από τη χρήση αδρανών με μεγαλύτερο πορώδες, το οποίο μειώνει περαιτέρω την εφελκυστική αντοχή, και μπορεί να περιέχουν και μεγαλύτερο ποσοστό νερού.

4. Πυκνή ενίσχυση

Ο συνδυασμός πυκνής ενίσχυσης και μεγάλου κόκκου αδρανών προκαλεί αύξηση των εφελκυστικών τάσεων λόγω θερμότητας εξαιτίας της μεγάλης θερμικής διαστολής.

5. Ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας

Η γρήγορη αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί γρήγορη ατμοποίηση της υγρασίας του σκυροδέματος με αποτέλεσμα λόγω της ραγδαίας αύξησης της πίεσης που δημιουργούν οι ατμοί (λόγος όγκων νερού προς ατμό: 1/1700) να αναπτύσσονται μεγάλες εφελκυστικές τάσεις.

6. Ασύμμετρη θέρμανση

Η ασύμμετρη θέρμανση έχει ως συνέπεια την αύξηση των θερμικών τάσεων και την δημιουργία μεγάλων διαφορών μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής υγρασίας.

7. Λεπτά μέρη των διατομών

Στα λεπτά μέρη των στοιχείων μπορούν να γίνουν απότομες αυξήσεις της θερμοκρασίας.

8. Σταθερά άκρα

Η ύπαρξη σταθερών άκρων εμποδίζει την θερμική διαστολή με αποτέλεσμα την αύξηση των θερμικών τάσεων και των πρόσθετων φορτίων ανάλογα με τα άλλα μέλη της κατασκευής.

9. Θερμικές τάσεις

Οι θερμικές τάσεις προκαλούνται από τις διαφορές θερμοκρασίας οι οποίες αυξάνονται από την ασύμμετρη θέρμανση, τις μεταβλητού πάχους διατομές και την ύπαρξη σταθερών άκρων.

10. Ελεύθερο νερό και ποσοστό υγρασίας στο σκυρόδεμα

Η κύρια αιτία για την εκρηκτική αποκόλληση είναι το ελεύθερο νερό και η διαφορά υγρασίας μεταξύ των μερών της διατομής του σκυροδέματος. Όλοι οι άλλοι παράγοντες που αναφέρονται συμβάλλουν στο φαινόμενο αλλά δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν

χωρίς την ύπαρξη νερού. Έχει παρατηρηθεί ότι σκυρόδεμα που αρχικά ήταν ευαίσθητο στο φαινόμενο της εκρηκτικής αποκόλλησης μετά από ξήρανση δεν παρουσίασε βλάβη.

11. Χαμηλή διαπερατότητα

Εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας οι ατμοί δυσκολεύονται να βρουν διέξοδο με αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης και την δημιουργία εφελκυστικών τάσεων

12. Κλειστοί πόροι με νερό

Οι πόροι στο σκυρόδεμα χωρίζονται σε ανοιχτούς και κλειστούς. Στη ζώνη πίσω από την πραγματοποιούμενη εξάτμιση οι κλειστοί πόροι περιέχουν το νερό και τους ατμούς. Η αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται και την αύξηση της πίεσης στους κλειστούς πόρους με συνέπεια την ρήξη των τοιχωμάτων μεταξύ των κλειστών και των ανοιχτών πόρων εξαιτίας της διαφοράς πίεσης. Σιγά το σκυρόδεμα οδηγείται σε μία προοδευτική κατάρρευση της μικροδομής του.

13. Ηλικία σκυροδέματος

Η ωρίμανση του σκυροδέματος συνεπάγεται και μείωση της υγρασίας του.

Τύπος αποκόλλησης	Χρόνος εκδήλωσης (min)	Φύση	Ήχος	Επιρροή βλαβών	Κυριότεροι παράγοντες
Αποκόλληση αδρανών	7-30	Σφοδρός διαχωρισμός	✓	Μικρή	(1), (5), (10), (14)
Γωνιακή αποκόλληση	30-90	Μη βίαιη	-	Μπορεί να εξελιχθεί σε σοβαρή	(1), (3), (4), (15)
Επιφανειακή αποκόλληση	7-30	Βίαιη	✓	Μπορεί να εξελιχθεί σε σοβαρή	(5), (10), (11), (16)
Εκρηκτική αποκόλληση	7-30	Βίαιη	✓	Σοβαρή	(1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16)

1	Διαστολή χαλαζιακών αδρανών	9	Σταθερά άκρα
2	Αποκόλληση αδρανών	10	Θερμικές τάσεις
3	Χαμηλή εφελκυστική αντοχή	11	Ελεύθερο νερό και ποσοστό υγρασίας στο σκυρόδεμα
4	Πυκνή ενίσχυση	12	Χαμηλή διαπερατότητα
5	Ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας	13	Κλειστοί πόροι με νερό
6	Ασύμμετρη θέρμανση	14	Ηλικία σκυροδέματος
7	Λεπτά μέρη των διατομών	15	Μέγεθος αδρανών
8	Μέγιστη θερμοκρασία	16	Διατμητική αντοχή σκυροδέματος

Πίνακας 4-3: Παράγοντες που επηρεάζουν τον τύπο αποκόλλησης

4.5 Σύστημα παθητικής πυροπροστασίας με γεωπολυμερή

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το φαινόμενο της αποκόλλησης μπορεί να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα στη δομή και τη στατικότητα μιας σήραγγας, προβλήματα που γίνονται εντονότερα όταν η αποκόλληση είναι εκρηκτική. Είναι πολύ σημαντικό, επομένως, το σκυρόδεμα που αποτελεί την επένδυση της σήραγγας να διατηρηθεί κάτω από μία θερμοκρασία κατά την διάρκεια μιας πυρκαγιάς. Σύμφωνα με όσα έχουν ήδη αναφερθεί, η εκρηκτική αποκόλληση αναμένεται σε θερμοκρασίες μεταξύ 300 °C και 450 °C (American National Institute for Standards and Testing NIST, Graham 2005). Επίσης, σημαντικά προβλήματα δημιουργούνται και χωρίς την ύπαρξη εκρηκτικής αποκόλλησης. Το σκυρόδεμα χάνει τη φέρουσα ικανότητα του όταν εκτίθεται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 380 °C και πλέον πρέπει να απομακρυνθεί και να επισκευαστεί το συγκεκριμένο τμήμα. Η θερμοκρασία αυτή είναι κοντά και στην θερμοκρασία αφυδάτωσης του υδροξειδίου του ασβεστίου (400 °C) όπου παρατηρείται σημαντική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Εκτός από το σκυρόδεμα όμως από τις υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζεται και ο μεταλλικός οπλισμός του είτε πρόκειται για τις κλασσικές ράβδους οπλισμού είτε για μεταλλικές ίνες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Τα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για την αντιμετώπιση πυρκαγιών και των συνεπειών τους στις σήραγγες διακρίνονται σε ενεργητικά και παθητικά. Τα ενεργητικά περιλαμβάνουν συστήματα πυρανίχνευσης, εγκατάσταση πυροσβεστικού δικτύου, καταιονητήρες κλπ. Κύριος στόχος των μέτρων αυτών είναι ο περιορισμός της έκτασης της φωτιάς.

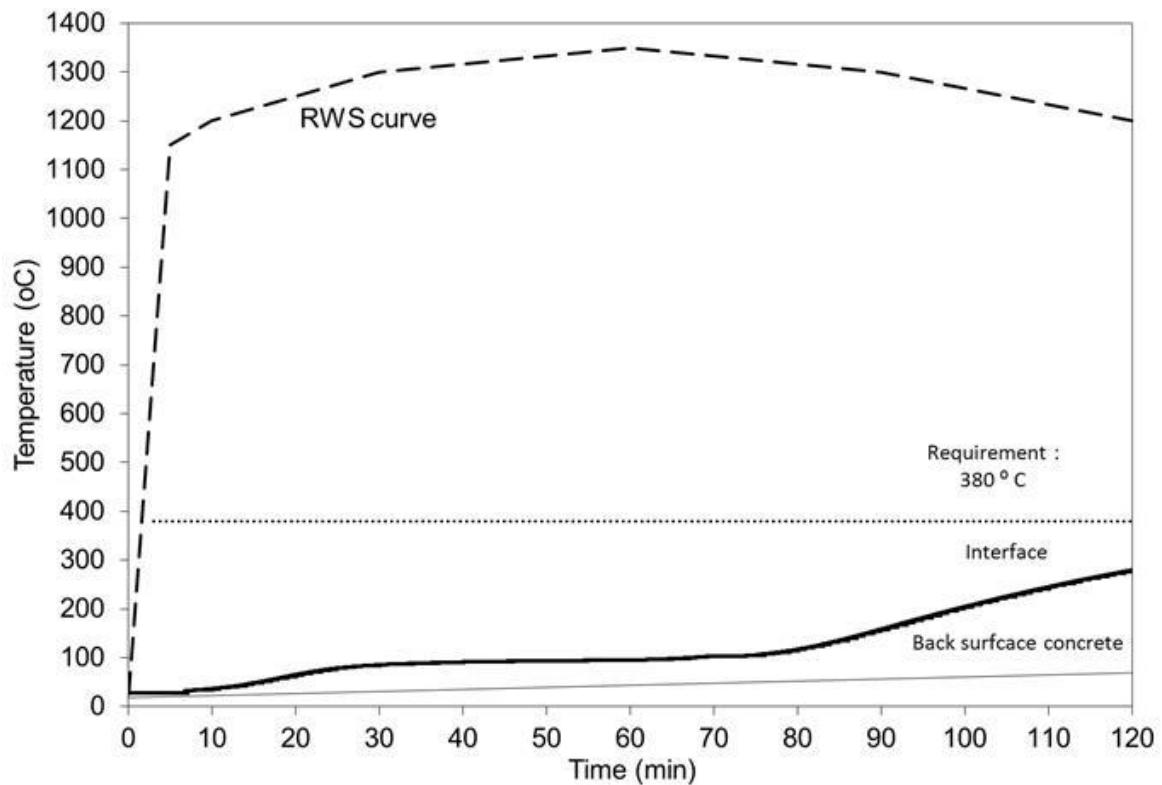
Τα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας έχουν σαν στόχο την μετρίαση των συνεπειών της πυρκαγιάς. Τα παθητικά προστατεύουν την επένδυση της σήραγγας και μειώνουν το χρόνο επισκευής της. Η παθητική πυροπροστασία προσδίδει πυραντοχή στην επένδυση και μπορεί να αποτρέψει κατάρρευσή της και κατά συνέπεια τραυματισμό ή θάνατο του προσωπικού πυρόσβεσης. Το κόστος αυτών των μέτρων πυροπροστασίας είναι αρκετά υψηλό γι αυτό η χρήση τους έχει άμεση σχέση με αυτό.

Η παθητική πυροπροστασία της επένδυσης επιτυγχάνεται με τη χρήση:

- πυράντοχων πλακών,
- με την εφαρμογή εκτοξευόμενων κονιαμάτων,
- με την προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα,
- με το σχεδιασμό πυράντοχου σκυροδέματος.

Στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων έχει αναπτυχθεί ένα γεωπολυμερές από τους κυρίους Σακκά Κ., Πανιά Δ., Νομικό Π. και Σοφιανό Αλ. η χρήση του οποίου εμποδίζει

την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στο σκυροδέμα της επένδυσης το οποίο καλύπτει. Η θερμοκρασία του σκυροδέματος με τη χρήση αυτού του υλικού διατηρείται σε θερμοκρασίες κάτω των 280 °C γι αυτό το λόγο και κατά την πειραματική διαδικασία η θερμοκρασία που επιλέχθηκε για την θερμική καταπόνηση του σκυροδέματος είναι 250 °C.



Διάγραμμα 4-2: Απόδοση K-γεωπολυμερούς στην καμπύλη RWS

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

5 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια:

- Προμήθεια πρώτων υλών
- Ξήρανση αδρανών
- Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών
- Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση
- Σκυροδέτηση
- Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες
- Συντήρηση δοκιμίων
- Έψηση δοκιμίων
- Δοκιμές
- Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Στα περισσότερα από τα παραπάνω στάδια έγιναν ενδιάμεσες εργασίες όπως η δοκιμή κάθισης και η μέτρηση καθαρού βάρους στις οποίες όμως θα γίνει εκτενής αναφορά στις παρακάτω ενότητες.

Η επιλογή της τελικής σύνθεσης του σκυροδέματος έγινε με δεδομένη προδιαγραφή για σκυρόδεμα C30/37. Για την καλύτερη εργασιμότητα, κατά τη σκυροδέτηση κάθε δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής. Γενικότερα, η επιλογή των συνθέσεων στηρίχθηκε στην πρότυπη σύνθεση που προτείνει η εταιρεία Sika από την οποία προμηθευτήκαμε και τα περισσότερα υλικά.

Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει συνολικά 9 συνθέσεις στις οποίες, εκτός από τις τρεις πρώτες οι οποίες αποτελούσαν δοκιμαστικές συνθέσεις, κύρια διαφορά ήταν η περιεκτικότητα τους σε ίνες. Οι συνθέσεις εξαιτίας του μεγάλου όγκου του προς σκυροδέτηση υλικού και τη δυσκολία που παρουσίαζε ο χειρισμός του χωρίστηκαν σε δύο ή και 3 τμήματα τα οποία σκυροδετούνταν την ίδια ημέρα με τις ίδιες αναλογίες υλικών. Προκύπτουν λοιπόν οι εξής συνθέσεις:

- Δοκιμαστική σύνθεση Δ1
- Δοκιμαστική σύνθεση Δ2
- Δοκιμαστική σύνθεση Δ3
- Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα)
- Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 (Α) και Σ2 (Β) με 20kg χαλύβδινες ίνες στο m³

σκυροδέματος

- Κύρια σύνθεση Σ3 (Α) και Σ3 (Β) και Σ3 (Γ) με 30kg χαλύβδινες ίνες στο m^3 σκυροδέματος
- Κύρια σύνθεση Σ4 (Α) και Σ4 (Β) με 40kg χαλύβδινες ίνες στο m^3 σκυροδέματος
- Κύρια σύνθεση Σ5 (Α) και Σ5 (Β) (άοπλο σκυρόδεμα)
- Κύρια σύνθεση Σ6 με 20kg χαλύβδινες ίνες στο m^3 σκυροδέματος

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω η σύνθεση του άοπλου σκυροδέματος επαναλήφθηκε. Αυτό έγινε γιατί χρησιμοποιήθηκαν νέα αδρανή με διαφορετική διαβάθμιση.

Μετά τη σκυροδέτηση ακολουθούσε η αφαίρεση των δοκιμών από τις μήτρες και η βύθιση τους σε νερό για 28 ημέρες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία από κάθε κύρια σύνθεση υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης και θλίψης 3 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x50cm και 3 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x10cm. Συνολικά όμως σκυροδετήθηκαν πολύ περισσότερα τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης και θλίψης χωρίς να γίνει έψησή τους για τους σκοπούς άλλης διπλωματικής εργασίας, με τα αποτελέσματα τις οποίας θα γίνει σύγκριση για να διαπιστωθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

5.1 Υλικά

5.1.1 Αδρανή

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθικά και χωρίζονται σε 3 κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος κόκκου του καθενός έτσι έχουμε:

- Άμμος 0-4mm
- Ρυζάκι 4-8mm
- Γαρμπίλι 8-16mm

5.1.2 Τσιμέντο

Το τσιμέντο που προμηθευτήκαμε είναι CEM I 42,5R. Τα στοιχεία που έχουμε στην διάθεση μας από δοκιμές που έγιναν στο συγκεκριμένο δείγμα είναι τα παρακάτω:

Θλιπτικές αντοχές (EN196-1)

2d-CS: 35.1 MPa

7d-CS: 50.9 MPa

28d-CS: 65.2 MPa

Νερό κανονικής πλαστικότητας (EN 196-3)

WD: 28.4%.

Η χημική ανάλυση του τσιμέντου CEM I 42,5 R είναι:

SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	SO ₃ (%)
20.839	5.159	3.261	65.037	3.131	0.504	0.359	2.493

Πίνακας 5-1: Χημική ανάλυση τσιμέντου CEM I 42.5R

5.1.3 Πυριτική παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη που χρησιμοποιήσαμε είναι από την εταιρία Sika και είναι το προϊόν με ονομασία Sika Fume HR.

Η παρουσία της ουσίας αυτής προσδίδει βελτιωμένη σε μεγάλο βαθμό εσωτερική συνοχή και κατακράτηση νερού. Το σκυρόδεμα καθίσταται εξαιρετικά μαλακό και η άντληση βελτιώνεται σημαντικά.

Εμφάνιση / Χρώμα Γκρι σκόνη

Πυκνότητα 300 kg/m³

5.1.4 Χαλύβδινες ίνες

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινες, της εταιρείας INOMIX, ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα και συγκολλημένες. Είναι κατασκευασμένες με χάλυβα ψυχρής όγκησης με υψηλή αντοχή (min 1100MPa). Το μήκος τους είναι 29mm και η διάμετρός τους είναι 0,90mm (Λόγος μορφής: 32,222). Είναι κατασκευασμένες σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM A820 TYPE 1, EN 1001B και ΚΩΔΙΚΟΣ ΑΤΟΕ 534,1/32. Η ανάμειξη των χαλύβδινων ινών έγινε «εν υγρώ» με προσθήκη στον αναμεικτήρα και ο διαχωρισμός τους έγινε με τη βοήθεια του ρευστοποιητή.

5.1.5 Ρευστοποιητής

Ο ρευστοποιητής που χρησιμοποιήσαμε ήταν προϊόν της εταιρείας Sika με ονομασία Sika Viscocrete Techno 40. Είναι ισχυρός υπερρευστοποιητής σκυροδέματος για υψηλή διατήρηση εργασιμότητας με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Χημική Βάση	Υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυκαρβοξυλικών πολυμερών
Πυκνότητα	~1,05 Kg/l (στους +200C)
Τιμή pH	3,4 – 5,4 (στους +200C)
Ολικό Περιεχόμενο σε Χλωριόντα	Ελεύθερο χλωριόντων

Πίνακας 5-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή Sika Viscocrete Techno 40

5.2 Κοκκομετρική Διαβάθμιση Αδρανών

Στην αρχή της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση αδρανών για τις 3 διαφορετικές διαβαθμίσεις των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία της σύνθεσης του σκυροδέματος ώστε να προσδιοριστούν οι ακριβείς αναλογίες αδρανών που θα χρησιμοποιούνταν στη σύνθεση του σκυροδέματος.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για τον προσδιορισμό της κοκκομετρίας των αδρανών περιγράφονται παρακάτω:

1. Από τον συνολικό όγκο των αδρανών κάθε διαβάθμισης λαμβάνεται τυχαίο δείγμα τέσσερις φορές μεγαλύτερο από το απαιτούμενο για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης.
2. Το δείγμα αυτό συγκεντρώνεται σε σωρό και αναδεύεται παίρνοντας υλικό από τη βάση του σωρού και αποθέτοντάς το στην κορυφή.
3. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι ένας κωνικού σχήματος όγκος αδρανών ο οποίος στη συνέχεια διαμορφώνεται σε έναν ισοπαχή δίσκο.



Εικόνα 5-1: Τετραμερισμός δειγμάτων

4. Στη συνέχεια ο δίσκος χωρίζεται σε 4 ίσα τεταρτημόρια και απομακρύνονται τα δύο κατά κορυφή.
5. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με το παραμένον δείγμα.
6. Τα δύο εναπομείναντα τεταρτημόρια που αποτελούν το 1/4 του αρχικού δείγματος αποτελούν το τελικό δείγμα που θα κοσκινιστεί ώστε να προσδιοριστεί η κοκκομετρία.



Εικόνα 5-2: Επιλογή τελικού δείγματος προς κοκκομέτρηση

Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται, η γερμανική σειρά κοσκίνων DIN 4187 και 4188 και η αμερικανική προδιαγραφής ASTM E 11, οι οποίες υιοθετούνται από τον Ν.Κ.Τ.Σ και το πρότυπο ΕΛΟΤ EN-408.

Κατά την πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν τα αμερικάνικα κόσκινα με πλέγμα οπών τετραγωνικής διατομής. Τα κόσκινα αυτά συμβολίζονται με Νο και ακολουθεί ο αριθμός των οπών που φέρουν ανά γραμμική ίντσα πλέγματος έως το Νο.4 για τα λεπτά κόσκινα ενώ τα μεγαλύτερου ανοίγματος κόσκινα συμβολίζονται με έναν αριθμό ο οποίος αντιπροσωπεύει το άνοιγμα των οπών τους σε ίντσες.

Τα κόσκινα τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο σχηματίζοντας μία στήλη, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, στην οποία στο κάτω μέρος βρίσκεται το ταψί και ακολουθούν τα κόσκινα κατά σειρά μεγέθους ανοίγματος οπής. Έτσι στην κορυφή βρίσκεται το κόσκινο με το μεγαλύτερο άνοιγμα οπής 3/4" ή 3/4in (≈19mm) και στη βάση πριν το ταψί το κόσκινο Νο 120 το οποίο φέρει 120 οπές ανά γραμμική ίντσα.

Το δείγμα εισέρχεται στη στήλη από το κόσκινο με τη μεγαλύτερη οπή και τοποθετούμε το πώμα της στήλης. Στη συνέχεια η στήλη οδηγείται στην μηχανή κοσκίνισης (sieve shaker).



Εικόνα 5-3: Χρησιμοποιούμενα κόσκινα και συσκευή κοσκίνισης

Κατά τη διάρκεια κοσκίνισματος από κάθε κόσκινο διέρχονται τα υλικά που είναι μικρότερα από τις οπές του.

Όταν σταματήσει η κοσκίνιση, αποσυναρμολογείται η στήλη και ζυγίζεται το υλικό που έχει παραμείνει σε κάθε κόσκινο. Στη συνέχεια, με βάση την ολική ποσότητα υλικού προς κοσκίνιση υπολογίζεται το βάρος του διερχόμενου υλικού και το ποσοστό του. Τα υλικά στα οποία έγινε κοκκομετρική ανάλυση είναι το ρυζάκι, το γαρμπίλι και η άμμος. Το μέγεθος του μέγιστου κόκκου από τον οποίο προκύπτει και ο χαρακτηρισμός του δείγματος είναι η διάσταση του μικρότερου από την σειρά των κόσκινων από τη οποία περνάει το 95% τουλάχιστον της ποσότητας των αδρανών. Ανάλογα με το μέγιστο κόκκο των αδρανών ορίζονται και οι ζώνες Δ, Ε και Ζ των κοκκομετρικών διαβαθμίσεων. Στην Ελλάδα ο μέγιστος κόκκος θραυστών αδρανών είναι συνήθως 31,5 mm.

Τα αποτελέσματα φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα.

		ΑΔΡΑΝΗ ΕΟΣ (ΕΠΙ ΤΟΠΙΑ ΚΟΚΚ. ΑΝΑΛΥΣΗ)															
		Άμμος				Ρυζάκι				Γαρμπίλι				Μείγμα			
Συνολικό αρχικό βάρος αδρανών (gr)		2000				2000				2000							
r _i : συγκρατούμενο βάρος αδρανών στο κόσκινο i	Κόσκινα		r _i (g)	R _i (g)	%R _i	%P _i	r _i (g)	R _i (g)	%R _i	%P _i	r _i (g)	R _i (g)	%R _i	%P _i	Άμμος	Ρυζάκι	Γαρμπίλι
	Νούμερο	(mm)															
R _i : αθροιστικό βάρος αδρανών, συγκρατούμενα μέχρι το κόσκ. i = v $R_i = r_1 + r_2 + \dots + r_v$	3/4in.	19	0	0	0	100	0	0	0	100	0	0	0,00	100	100,00		
	1/2in.	12,5	0	0	0	100	0	0	0	100	200	200	10,21	89,79	96,02		
%R _i : αθροιστικό βάρος αδρανών, συγκρατούμενα μέχρι το κόσκ. i = v $\%R_i = \frac{R_i}{M_{\xi\eta\rho}} * 100$	3/8in.	9,5	0	0	0	100	0	0	0	100	480	680	34,73	65,27	86,46		
	1/4in.	6,3	0	0	0	100	239	239	12,16	87,84	736	1416	72,32	27,68	70,34		
	No.5	4	40	40	2,	98	1278	1517	77,2	22,8	376	1792	91,52	8,48	54,06		
%P _i : αθροιστικό διερχόμενο βάρος αδρανών μέχρι και από το κόσκ. i=v $\%P_i = 100 - \%R_i$	No.8	2,38	326	366	18,3	81,7	390	1907	97,05	2,95	0	1792	91,52	8,48	43,69		
	No.16	1,19	494	860	43	57	44	1951	99,29	0,71	0	1792	91,52	8,48	31,32		
	No.30	0,59	498	1358	67,9	32,1	0	1951	99,29	0,71	0	1792	91,52	8,48	19,12		
	No.50	0,297	312	1670	83,5	16,5	0	1951	99,29	0,71	0	1792	91,52	8,48	11,48		
	No.120	0,125	236	1906	95,3	4,7	0	1951	99,29	0,71	0	1792	91,52	8,48	5,69		
	Ταψί		94	200	100	0	14	1965	100	0	166	1958	100	0	0,00		
Άθροισμα			2000				1965				1958						

Πίνακας 5-3: Αποτελέσματα κοκκομετρικής διαβάθμισης

5.3 Όρια καμπύλων κοκκομετρικής διαβάθμισης

Για κάθε χρήση του σκυροδέματος ορίζονται με πρότυπα τα όρια τα οποία θα πρέπει να έχουν τα αδρανή ώστε να αποκτά το σκυρόδεμα τα βέλτιστα μηχανικά χαρακτηριστικά για τη χρήση του αλλά και να διευκολύνεται η τοποθέτηση του. Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα όταν προορίζεται για εκτόξευση είναι σημαντικό εκτός από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του και η διευκόλυνση εξόδου του από τα ακροφύσια. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούμε το πρότυπο ASTM C 33, έτσι το τελικό μείγμα που θα προκύψει πρέπει να ικανοποιεί μία από τις επόμενες τρεις διαβαθμίσεις.

Μέγεθος Αμερικάνικου κόσκινου (πρότυπο τετραγωνικό κάναβο)	Ποσοστό διερχόμενου βάρους σε κάθε κόσκινο			
	(mm)	Διαβάθμιση No.1	Διαβάθμιση No.2	Διαβάθμιση No.3
3/4in.	19	-	-	100
1/2in.	12,5	-	100	80-95
3/8in.	9,5	100	90-100	70-90
No.4	4,75	95-100	70-85	50-70
No. 8	2,38	80-100	50-70	35-55
No. 16	1,19	50-85	35-55	20-40
No.30	0,59	25-60	20-35	10-30
No.50	0,297	10-30	8-20	5-17
No.100	0,15	2-10	2-10	2-10

Πίνακας 5-4: Όρια διαβαθμίσεων για μείγμα αδρανών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 33

Μετά την κοκκομετρική διαβάθμιση των υλικών μας θα προσπαθήσουμε η καμπύλη που θα σχηματίσει το τελικό μίγμα των αδρανών μας να βρίσκεται εντός των ορίων των καμπύλων που σχηματίζει η Διαβάθμιση No.3 εξαιτίας της περιεκτικότητας των αδρανών μας σε χονδρά αδρανή. Σύμφωνα με το πρότυπο ορισμένα υπερμεγέθη τεμάχια απομακρύνθηκαν.

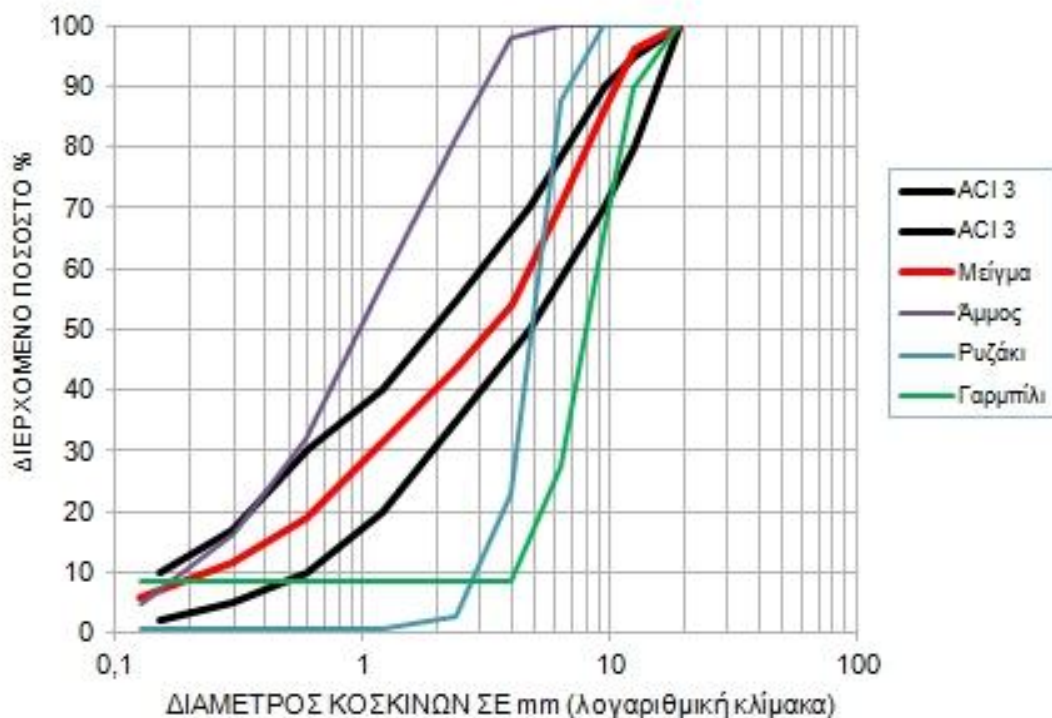
ΚΟΣΚΙΝΑ		ACI 3	ACI 3
	(mm)	Κάτω όριο	Άνω όριο
3/4in.	19	100	100
1/2in.	12,5	80	95
3/8in.	9,5	70	90
No.4	4,75	50	70
No. 8	2,38	35	55
No. 16	1,19	20	40
No.30	0,59	10	30
No.50	0,297	5	17
No.100	0,15	2	10

Πίνακας 5-5: Όρια Διαβάθμισης No.3

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των 3 διαφορετικών αδρανών που χρησιμοποιήσαμε, τα όρια της Διαβάθμισης No.3 καθώς και το μίγμα που θα χρησιμοποιήσουμε το οποίο περικλείεται από τα όρια της Διαβάθμισης No.3.

Τελικό μείγμα αδρανών		
Άμμος	Ρυζάκι	Γαρμπίλι
49%	12%	39%

Πίνακας 5-6: Χρησιμοποιούμενα ποσοστά από κάθε διαβάθμιση αδρανούς



Διάγραμμα 5-1: Κοκκομετρικές καμπύλες αδρανών και μίγματος αδρανών

5.4 Ζύγιση υλικών

Μετά την κοκκομετρική ανάλυση το μόνο που απομένει πριν την παραγωγή του σκυροδέματος είναι η ζύγιση των υλικών με ζυγαριά ακριβείας. Στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι ποσότητες για κάθε υλικό και για κάθε σύνθεση. Η απορροφητικότητα των αδρανών για τον υπολογισμό των ποσοτήτων νερού λήφθηκε για την άμμο 0,02 και για το ρυζάκι και το γαρμπίλι 0,01. Η προσθήκη ρευστοποιητή κυμαινόταν για κάθε σύνθεση και γινόταν ανάλογα με τις τιμές που προέκυπταν από ενδιάμεσες δοκιμές κάθισης κατά την παρασκευή του μείγματος.

Συνολικά δημιουργήθηκαν 9 συνθέσεις εκ των οποίων οι τρεις πρώτες με το γράμμα Δ πριν τον αριθμό της σύνθεσης ήταν δοκιμαστικές και οι υπόλοιπες έξι είναι οι κύριες στις οποίες κυμαινόταν η περιεκτικότητα τους σε χαλύβδινες ίνες.



Εικόνα 5-4: Συγκέντρωση απαραίτητων υλικών προς σκυροδέτηση

5.4.1 Δοκιμαστική σύνθεση Δ1

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,012m ³
Τσιμέντο	425	5,1
Πυριτική παιπάλη	21,25	0,255
Αδρανή 0-4mm	930	11,16
Αδρανή 4-8mm	789	9,468
Αδρανή 8-16mm		
Νερό	181,5	2,178
Κενά 4,5%		
Χαλύβδινες ίνες	21,25	0,255
Ρευστοποιητής		0,125

Πίνακας 5-7: Ποσότητες υλικών δοκιμαστικής σύνθεσης Δ1

5.4.2 Δοκιμαστική σύνθεση Δ2

Στη σύνθεση Δ2 και στη σύνθεση Δ3 διαμορφώθηκε ο λόγος ενεργού νερού/τσιμέντο στο 0,43 και του ολικού στο 0,49 από τον ενεργό λόγο νερού 0,36 και ολικό λόγο νερού 0,43 της σύνθεση Δ1.

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,012m ³
Τσιμέντο	425	5,1
Πυριτική παιπάλη	21.25	0,255
Αδρανή 0-4mm	930	11,16
Αδρανή 4-8mm	789	9,468
Αδρανή 8-16mm		
Νερό	207,5	2,490
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	21,25	0,255
Ρευστοποιητής		0,06

Πίνακας 5-8: Ποσότητες υλικών δοκιμαστικής σύνθεσης Δ2

5.4.3 Δοκιμαστική σύνθεση Δ3

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,012m ³
Τσιμέντο	425	5,1
Πυριτική παιπάλη	21.25	0,255
Αδρανή 0-4mm	930	11,16
Αδρανή 4-8mm	789	9,468
Αδρανή 8-16mm		
Νερό	207,5	2,490
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	21,25	0,255
Ρευστοποιητής		0,03

Πίνακας 5-9: Ποσότητες υλικών δοκιμαστικής σύνθεσης Δ3

5.4.4 Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,09m ³
Τσιμέντο	400	36
Πυριτική παιπάλη	20	1,8
Αδρανή 0-4mm	930	83,7
Αδρανή 4-8mm	775	69,75
Αδρανή 8-16mm		
Νερό	196	17,64
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	0	0
Ρευστοποιητής		0,316

Πίνακας 5-10: Ποσότητες υλικών προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ1

5.4.5 Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 Α

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,095m ³ +11%
Τσιμέντο	400	42,18
Πυριτική παιπάλη	20	2,109
Αδρανή 0-4mm	930	98,1
Αδρανή 4-8mm	775	81,7
Αδρανή 8-16mm		
Νερό	196	20,67
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	20	2,11
Ρευστοποιητής		0,180

Πίνακας 5-11: Ποσότητες υλικών προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2Α

5.4.6 Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 Β

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%
Τσιμέντο	400	19,18
Πυριτική παιπάλη	20	0,96
Αδρανή 0-4mm	930	44,6
Αδρανή 4-8mm	775	37,17
Αδρανή 8-16mm		
Νερό	196	9,4
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	20	0,96
Ρευστοποιητής		0,150

Πίνακας 5-12: Ποσότητες υλικών προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2Β

5.4.7 Κύρια σύνθεση Σ3 Α

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%
Τσιμέντο	400	19,18
Πυριτική παιπάλη	20	0,959
Αδρανή 0-4mm	828	39,725
Αδρανή 4-8mm	207	9,919
Αδρανή 8-16mm	672	32,238
Νερό	196	9,4
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	30	1,439
Ρευστοποιητής		0,12

Πίνακας 5-13: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ3Α

5.4.8 Κύρια σύνθεση Σ3 Β

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,034m ³ +9%
Τσιμέντο	400	14,824
Πυριτική παιπάλη	20	0,741
Αδρανή 0-4mm	828	30,696
Αδρανή 4-8mm	207	7,665
Αδρανή 8-16mm	672	24,911
Νερό	196	7,264
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	30	1,112
Ρευστοποιητής		0,08

Πίνακας 5-14: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ3Β

5.4.9 Κύρια σύνθεση Σ3 Γ

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,01m ³ +9%
Τσιμέντο	400	4,36
Πυριτική παιπάλη	20	0,218
Αδρανή 0-4mm	828	9,03
Αδρανή 4-8mm	207	2,254
Αδρανή 8-16mm	672	7,327
Νερό	196	2,136
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	30	0,327
Ρευστοποιητής		0,02

Πίνακας 5-15: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ3Γ

5.4.10 Κύρια σύνθεση Σ4 Α

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%
Τσιμέντο	400	19,18
Πυριτική παιπάλη	20	0,959
Αδρανή 0-4mm	828	39,725
Αδρανή 4-8mm	207	9,919
Αδρανή 8-16mm	672	32,238
Νερό	196	9,4
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	40	1,918
Ρευστοποιητής		0,11

Πίνακας 5-16: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ4Α

5.4.11 Κύρια σύνθεση Σ4 Β

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%
Τσιμέντο	400	19,18
Πυριτική παιπάλη	20	0,959
Αδρανή 0-4mm	828	39,725
Αδρανή 4-8mm	207	9,919
Αδρανή 8-16mm	672	32,238
Νερό	196	9,4
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	40	1,918
Ρευστοποιητής		0,118

Πίνακας 5-17: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ4Β

5.4.12 Κύρια σύνθεση Σ5 Α

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,042m ³ +9%
Τσιμέντο	400	18,312
Πυριτική παιπάλη	20	0,916
Αδρανή 0-4mm	828	37,919
Αδρανή 4-8mm	207	9,468
Αδρανή 8-16mm	672	30,772
Νερό	196	8,973
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	0	0
Ρευστοποιητής		0,1

Πίνακας 5-18: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ5Α

5.4.13 Κύρια σύνθεση Σ5 Β

Υλικά	Kg/m ³	Kg/0,042m ³ +9%
Τσιμέντο	400	18,312
Πυριτική παιπάλη	20	0,916
Αδρανή 0-4mm	828	37,919
Αδρανή 4-8mm	207	9,468
Αδρανή 8-16mm	672	30,772
Νερό	196	8,973
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	0	0
Ρευστοποιητής		0,11

Πίνακας 5-19: Ποσότητες υλικών κύριας σύνθεσης Σ5Β

5.5 Σκυροδέτηση - Εξαγωγή δοκιμίων – Συντήρηση

Μετά τη ζύγιση των υλικών ακολουθεί η διαδικασία της σκυροδέτησης. Κατά τη διαδικασία της σκυροδέτησης προσθέτουμε στον αναμεικτήρα τα υλικά με την ακόλουθη σειρά:

- Χονδρόκοκκα αδρανή
- Λεπτόκοκκα αδρανή
- Ένα μέρος της συνολικής ποσότητας του νερού
- Τσιμέντο
- Υπολειπόμενη ποσότητα του νερού
- Πυριτική παιπάλη
- Χαλύβδινες ίνες
- Ρευστοποιητής σε δόσεις

Μετά την εισαγωγή των λεπτόκοκκων αδρανών και ενός μέρους του νερού ακολουθεί μία πρώτη ανάδευση.



Εικόνα 5-5: Διαδικασία σκυροδέτησης



Εικόνα 5-6: Τελικό προϊόν σκυροδέτησης στον αναδευτήρα

Κατόπιν προσθέτουμε το τσιμέντο με την υπολειπόμενη ποσότητα του νερού και ξεκινάμε την ανάδευση. Καθώς το μείγμα αναδεύεται προσθέτουμε την πυριτική παιπάλη και στη συνέχεια τις χαλύβδινες ίνες. Ο ρευστοποιητής προστίθεται σταδιακά μέχρι το σκυρόδεμα να αποκτήσει μία επιθυμητή ρευστότητα και στη συνέχεια γίνεται δοκιμή κάθισης. Αν τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης δεν είναι αποδεκτά τότε προσθέτουμε κι άλλο ρευστοποιητή. Αν γίνει προσθήκη ρευστοποιητή ακολουθεί και δεύτερη δοκιμή κάθισης. Αφού η δοκιμή κάθισης γίνει αποδεκτή το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το σκοπό ξανατοποθετείται στον αναδευτήρα και ακολουθεί ανάδευση για σύντομο χρονικό διάστημα. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών κάθισης.

Σύνθεση		Κάθιση (mm)
Δ1		125
Δ2		230
Δ3		160
Σ1		85
Σ2	A	97,5
	B	130
Σ3	A	110
	B	170
	Γ	105
Σ4	A	122,5
	B	75
Σ5	A	170
	B	145
Σ6		110

Πίνακας 5-20: Αποτελέσματα δοκιμών κάθισης

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα οι τιμές της κάθισης διαφοροποιούνται από σύνθεση σε σύνθεση ακόμα και για τα ίδια μίγματα, αυτό μπορεί να οφείλεται σε ένα πλήθος παραγόντων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία του περιβάλλοντος ή η προηγούμενη χρήση του αναδευτήρα και των εργαλείων. Επίσης, τα αποτελέσματα δεν ήταν πάντα τα επιθυμητά δηλαδή στην περίπτωση μας ανάμεσα στις κατηγορίες S3-S4 δηλαδή κάθιση από 100 έως 210 mm.



Εικόνα 5-7: Διαδικασία δοκιμής κάθισης

Στη συνέχεια παίρνουμε δείγμα για την μέτρηση του καθαρού βάρους του σκυροδέματος. Η μέτρηση του καθαρού βάρους γίνεται γεμίζοντας με το σκυρόδεμα ένα πρότυπο δοχείο με συγκεκριμένο όγκο και βάρος ($0,008\text{m}^3$ και $4,795\text{kg}$). Κατά το ήμισυ της πλήρωσης του δοχείου δονείται στην τράπεζα και συμπληρώνουμε με σκυρόδεμα έως την πλήρωση του μετά την οποία ξαναδονούμε το δοχείο. Κατόπιν ζυγίζουμε το πληρωμένο δοχείο στη ζυγαριά ακριβείας από όπου προκύπτει το μικτό βάρος και στη συνέχεια αφαιρείται το βάρος του δοχείου. Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα δεδομένα που προέκυψαν από τη μέτρηση του καθαρού βάρους του κάθε μίγματος.

Πρότυπο δοχείο	
Βάρος δοχείου (kg)	Όγκος δοχείου (m^3)
4,795	0,008

Πίνακας 5-21: Βάρος και όγκος πρότυπου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους

Δοκιμαστικές συνθέσεις

	Δ1	Δ2	Δ3
Μικτό βάρος (kg)	24,147	24,061	24,057
Καθαρό βάρος (kg)	19,352	19,266	19,262
kg/m ³	2,419	2,408	2,408

Κύριες συνθέσεις

	Σ1	Σ2 (A)	Σ2 (B)	Σ3 (A)	Σ3 (B)	Σ3 (Γ)
Μικτό Βάρος (kg)	24,037	24,014	24,030	24,250	23,850	24,450
Καθαρό βάρος (kg)	19,242	19,219	19,235	19,455	19,055	19,655
Πυκνότητα kg/m ³	2,405	2,402	2,404	2,432	2,382	2,457

	Σ4 (A)	Σ4 (B)	Σ5 (A)	Σ5 (B)	Σ6
Μικτό Βάρος (kg)	24,018	23,135	24,030	24,100	23,964
Καθαρό βάρος (kg)	19,223	19,341	19,235	19,305	19,151
Πυκνότητα kg/m ³	2,403	2,418	2,404	2,413	2,394

Πίνακας 5-22: Αποτελέσματα μετρήσεων καθαρού βάρους



Εικόνα 5-8: Ζύγιση πληρωμένου δοχείου

Όταν πλέον το σκυρόδεμα είναι έτοιμο αρχίζει η εισαγωγή του στις μήτρες, οι οποίες έχουν καθαριστεί και λαδωθεί. Η εισαγωγή γίνεται ως εξής: εισάγουμε το σκυρόδεμα στη μήτρα και την πληρώνουμε μέχρι τη μέση και ακολουθεί δόνηση για 20 δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια πληρώνεται η μήτρα ως το χείλος της και ξαναδονείται για ακόμα 20 δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια της δόνησης οι μήτρες συγκρατούνται ώστε να μην αναπηδούν και δημιουργείται έντονος διαχωρισμός των υλικών.



Εικόνα 5-9: Δόνηση δοκιμίων

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία πλήρωσης των μητρών και η δόνησή τους, τοποθετούνται στον πάγκο εργασίας όπου και σκεπάζονται με νωπό ύφασμα.



Εικόνα 5-10: Ολοκλήρωση σκυροδέτησης

Την επόμενη μέρα της σκυροδέτησης οι μήτρες λύνονται, καθαρίζονται και λαδώνονται για την επόμενη σκυροδέτηση. Στα δοκίμια που εξάγονται από τις μήτρες αναγράφονται η σύνθεση, η ονομασία του μείγματος και η ημερομηνία σκυροδέτησης και τοποθετούνται σε δεξαμενή με νερό το οποίο καλύπτει ολοκληρωτικά τα δοκίμια.

5.6 Έψηση δοκιμίων

Μετά από 28 ημέρες τα δοκίμια βγήκαν από την δεξαμενή με το νερό και παρέμειναν για ένα εικοσιτετράωρο στο περιβάλλον του εργαστηρίου. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στο φούρνο έψησης. Κάθε φορά στο φούρνο τοποθετούταν το σύνολο των δοκιμίων που αντιστοιχούσε σε κάθε σύνθεση δηλαδή τρία κυβικά δοκίμια 10x10x10cm και τρία πρισματικά δοκίμια 50x10x10cm όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 5-11: Φούρνος έψησης δοκιμίων

Η θερμοκρασία του φούρνου ρυθμίστηκε στους 250 °C. Η θερμοκρασία αυτή επετεύχθη σε χρονικό διάστημα 25 λεπτών. Ο φούρνος παρέμεινε σε λειτουργία για ακόμα 65 λεπτά με σταθερή θερμοκρασία 250 °C. Στη συνέχεια ο φούρνος απενεργοποιείται ενώ τα δοκίμια παραμένουν μέσα σε αυτόν για 24 ώρες με αποτέλεσμα η πτώση της θερμοκρασίας να είναι σταδιακή.

Επιχειρήθηκε, επιπλέον, έψηση σε μεγαλύτερη θερμοκρασία αλλά είχε σαν αποτέλεσμα εκρηκτική αποκόλληση. Η θερμοκρασία στην οποία είχε ρυθμιστεί ο φούρνος ήταν 500 °C. Στα πρώτα 40 λεπτά, με την θερμοκρασία στους 400 °C, σημειώθηκε η πρώτη εκρηκτική αποκόλληση και 10 λεπτά αργότερα η δεύτερη. Αποτέλεσμα των δύο αυτών εκρηκτικών αποκολλήσεων ήταν η ολοκληρωτική καταστροφή των δοκιμίων όπως φαίνεται και στην εικόνα 5-12.



Εικόνα 5-12: Εικόνα δοκιμίων μετά από εκρηκτική αποκόλληση

5.7 Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

Ένα εικοσιτετράωρο μετά την έψησή τους τα δοκίμια μεταφέρονται στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων όπου θα πραγματοποιηθούν οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης και κάμψης.

Αρχικά όλα τα δείγματα ζυγίζονται. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής φαίνονται στους παρακάτω πίνακες. Μετά τη ζύγιση των δοκιμίων οδηγούνται στη σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης.



Εικόνα 5-13: Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης

Η Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης δοκιμίων έχει την δυνατότητα ελέγχου τεσσάρων πλαισίων φόρτισης με ηλεκτρονική επιλογή του ενεργού πλαισίου και περιλαμβάνει τον ακόλουθο εξοπλισμό:

- Πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας τουλάχιστον 5000 kN για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε υψηλής αντοχής πετρώματα και σκυρόδεμα.
- Πλαίσιο θλίψης με δύο έμβολα δυναμικότητας 15 και 250 kN αντίστοιχα, για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χαμηλής αντοχής πετρώματα, δοκιμών κάμψης σε μικρών διαστάσεων δοκούς πετρώματος, δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού.
- Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150 kN για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης σε δοκούς σκυροδέματος και δυσθραυστότητας σε μικρές πλάκες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- Αυτόματη μονάδα εφαρμογής και ελέγχου πλευρικής πίεσης σε δοκιμές τριαξονικής θλίψης.
- Αισθητήρες/μορφοτροπείς για την μέτρηση της απόκρισης πετρωμάτων και σκυροδέματος κατά τις δοκιμές.
- Βοηθητικός εξοπλισμός, συσκευές και εξαρτήματα για την προετοιμασία και εκτέλεση των απαιτούμενων δοκιμών και την απόληψη των μετρήσεων.

Οι παράμετροι που εισήχθησαν στην μηχανή πριν την φόρτιση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

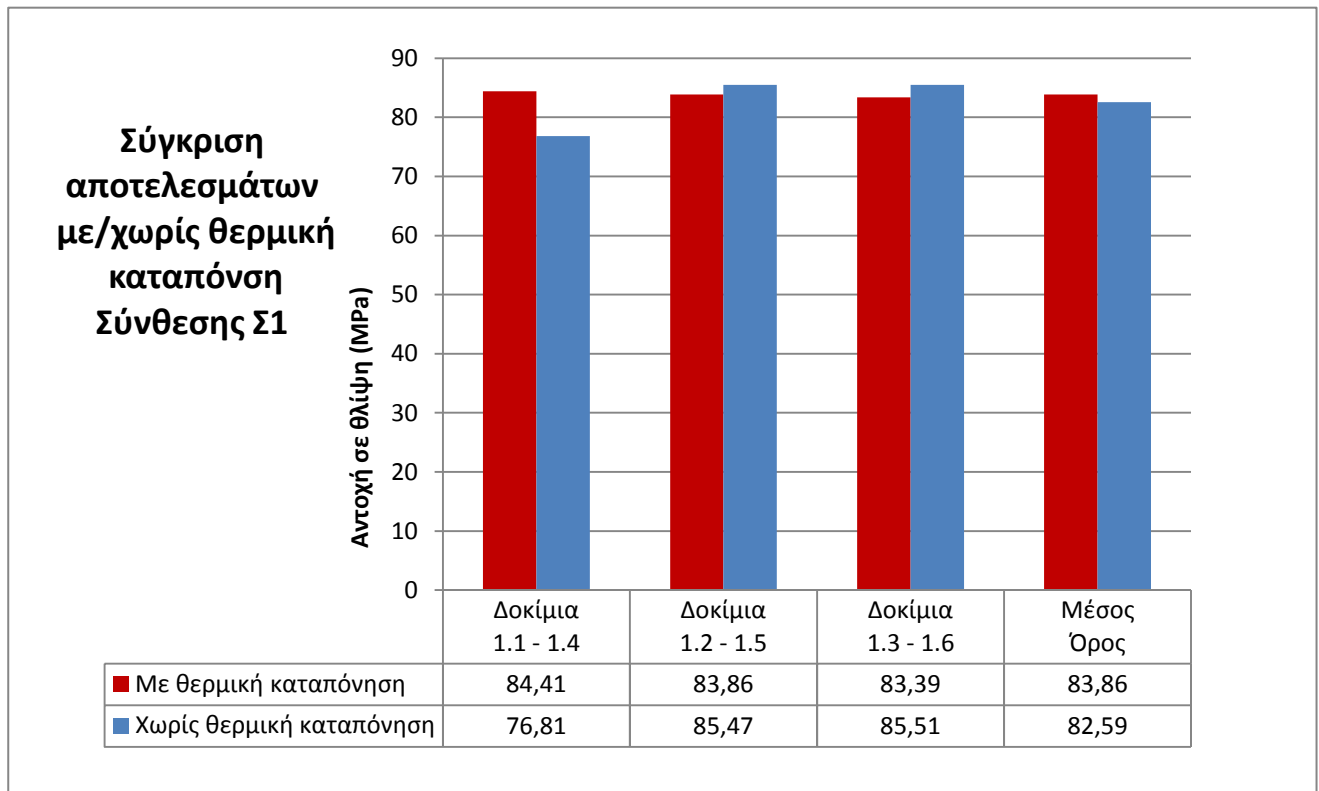
Test speed	4000 N/s
Set Point	1.0 kN
Target	1100.0 kN
Peak Sensitivity	30.0 kN
Ramp Offset	1600 bit
Max. Correction -	500 bit
Max. Correction +	5000 bit
Sample Area	10000.0 mm ²

Πίνακας 5-23: Παράμετροι της δοκιμής θλίψης

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1	
Δοκίμιο Cube 1.1	
Φορτίο kN:	844,1
MPa:	84,41
Βάρος (kg):	2,261
Δοκίμιο Cube 1.2	
Φορτίο kN:	838,6
MPa:	83,86
Βάρος (kg):	2,2488
Δοκίμιο Cube 1.3	
Φορτίο kN:	833,9
MPa:	83,39
Βάρος (kg):	2,257
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	83,886
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,5105
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,2556
Τ.Α Βάρους (kg)	0,006219

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1	
Δοκίμιο Cube 1.4	
Φορτίο kN:	768,1
MPa:	76,81
Βάρος (kg):	2,404
Δοκίμιο Cube 1.5	
Φορτίο kN:	854,7
MPa:	85,47
Βάρος (kg):	2,4004
Δοκίμιο Cube 1.6	
Φορτίο kN:	855,1
MPa:	85,51
Βάρος (kg):	2,4209
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	82,5967
Τ.Α Φορτίου (MPa)	5,011
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,40843
Τ.Α Βάρους (kg)	0,01095

Πίνακας 5-24: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα)



Όπως προκύπτει από τα πάραπάνω, διάγραμμα και πίνακα, οι τιμές της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων πριν και μετά την καταπόνησή τους δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις.

Ωστόσο, τα αποτελέσματα των αντοχών των δοκιμίων 1.1 και 1.4 όπως φαίνεται και από την μεταξύ τους σύγκριση είναι μη αναμενόμενα καθώς το θερμικά καταπονημένο δοκίμιο εμφανίζει, οριακά βέβαια, μεγαλύτερη αντοχή από το αντίστοιχο μη θερμικά καταπονημένο, το οποίο έχει και την μικρότερη αντοχή συγκριτικά με τα άλλα δύο μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια. Εξετάζοντας επιπλέον τα βάρη των δοκιμίων προκειμένου να δικαιολογηθεί αυτή η συμπεριφορά δεν γίνεται αντιληπτή κάποια σοβαρή διαφοροποίηση.

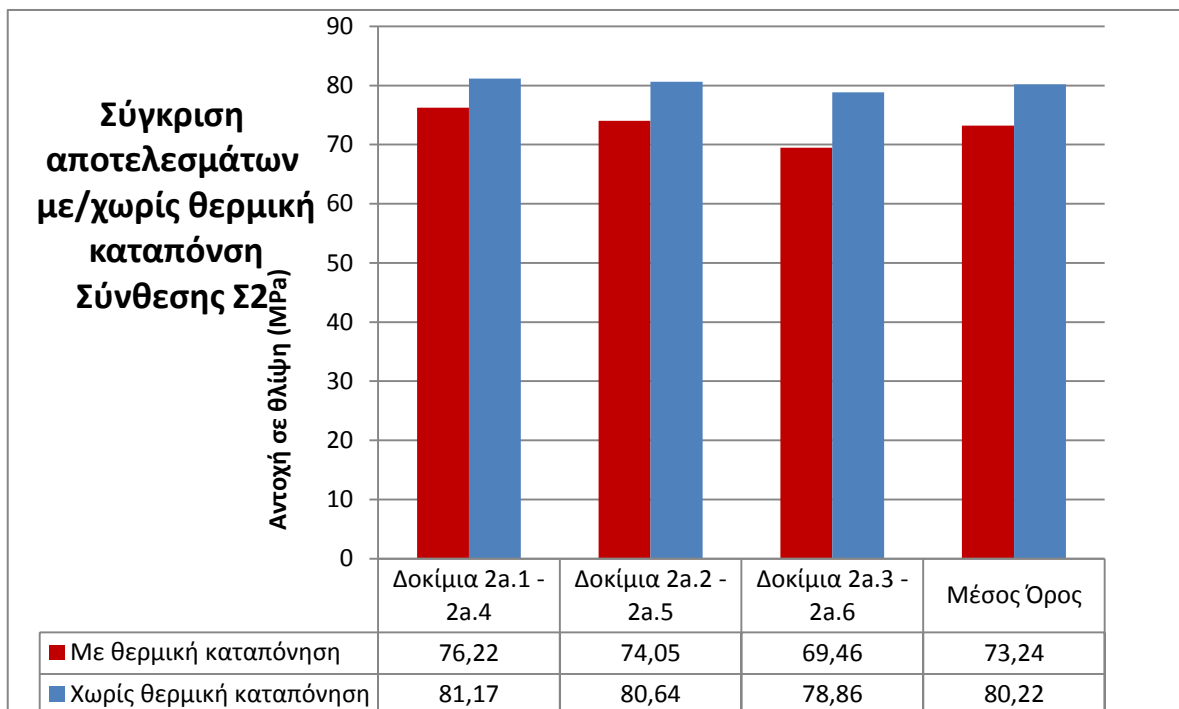
Έχει παρατηρηθεί ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος καταπονημένου στη θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ 100-300 °C ποικίλει μεταξύ 60%-130% της θλιπτικής αντοχής του μη θερμικά καταπονημένου σκυροδέματος. Επομένως, αυτό εξηγεί την μεγαλύτερη αντοχή που εμφάνισε το δοκίμιο 1.1.

Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι η διαφορά της αντοχής του σκυροδέματος μη θερμικά και θερμικά καταπονημένου σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 - 300 °C είναι μικρή. Επιπρόσθετα, σημαντικό ρόλο στην διαφοροποίηση των αντοχών διαδραματίζει και ο ρυθμός αύξησης/μείωσης της θερμοκρασίας μετά τη θερμική καταπόνηση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση τα δοκίμια παρέμειναν μέσα στο φούρνο μετά το πέρας του πειράματος με αποτέλεσμα η μείωση της θερμοκρασίας να είναι σταδιακή με πολύ μικρή απομείωση. Μία τόσο μικρή απομείωση υποδεικνύει ότι το σκυρόδεμα δεν υπέστη αιφνιδιαστική ψύξη που θα είχε σαν αποτέλεσμα σημαντική μείωση της αντοχής του. Επίσης η χρήση της πυριτικής παιπάλης βελτιώνει την συμπύκνωση του σκυροδέματος με αποτέλεσμα λιγότερα κενά εγκλεισμένου αέρα. Έτσι, οι ατμοί δεν μπορούν να συγκεντρωθούν σε υψηλή περιεκτικότητα εντός των κενών αυτών και να αναπτύξουν σημαντική πίεση στα τοιχώματά τους και να δημιουργήσουν στο εσωτερικό του δοκιμίου μικρορωγμές και να τις διευρύνουν.

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 A & B	
Δοκίμιο Cube 2a.1	
Φορτίο kN:	762,2
MPa:	76,22
Βάρος (kg):	2,2538
Δοκίμιο Cube 2a.2	
Φορτίο kN:	740,5
MPa:	74,05
Βάρος (kg):	2,2843
Δοκίμιο Cube 2a.3	
Φορτίο kN:	694,6
MPa:	69,46
Βάρος (kg):	2,2926
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	73,2433
Τ.Α Φορτίου (MPa)	3,4514
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,2769
Τ.Α Βάρους (kg)	0,020431

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 A & B	
Δοκίμιο Cube 2a.4	
Φορτίο kN:	811,7
MPa:	81,17
Βάρος (kg):	2,400
Δοκίμιο Cube 2a.5	
Φορτίο kN:	806,4
MPa:	80,64
Βάρος (kg):	2,4141
Δοκίμιο Cube 2a.6	
Φορτίο kN:	788,6
MPa:	78,86
Βάρος (kg):	2,4581
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	80,223
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,210
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,404
Τ.Α Βάρους (kg)	0,00899

Πίνακας 5-25: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

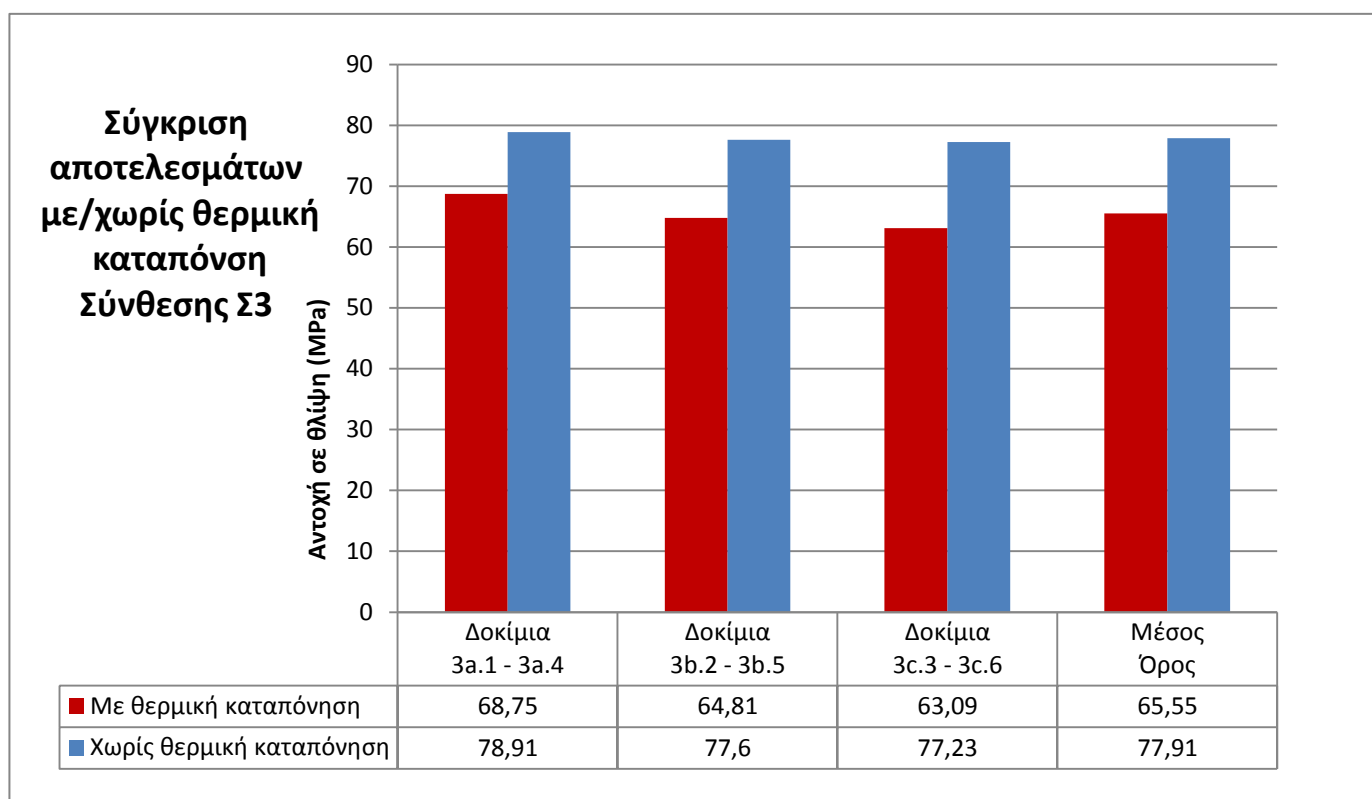


Με την προσθήκη των ινών στο μίγμα παρατηρείται αύξηση της διαφοράς της αντοχής μεταξύ θερμικά και μη θερμικά καταπονημένων δοκιμίων. Η προσθήκη ινών, επιπλέον, έχει σαν αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να μην αναμειγνύεται τόσο καλά όσο το άοπλο. Αυτό έχει επιπτώσεις στο μη θερμικά καταπονημένο σκυρόδεμα αλλά και στο θερμικά καταπονημένο μειώνοντας τις αντοχές αμφοτέρων. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της κακής ανάμιξης τα κενά που δημιουργούνται είναι μεγαλύτερα και όπως προαναφέρθηκε η συγκέντρωση των υδρατμών αυξάνεται σε αυτά, συνεπώς και οι πιέσεις που ασκούν στα τοιχώματα των κενών. Αυτή η διαδικασία έχει σαν συνέπεια τη μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος.

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ	
Δοκίμιο Cube 3a.1	
Φορτίο kN:	687,5
MPa:	68,75
Βάρος (kg):	2,2703
Δοκίμιο Cube 3b.2	
Φορτίο kN:	648,1
MPa:	64,81
Βάρος (kg):	2,2543
Δοκίμιο Cube 3c.3	
Φορτίο kN:	630,9
MPa:	63,09
Βάρος (kg):	2,2643
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	65,55
Τ.Α Φορτίου (MPa)	2,901655
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,2629
Τ.Α Βάρους (kg)	0,008083

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ	
Δοκίμιο Cube 3a.4	
Φορτίο kN:	789,1
MPa:	78,91
Βάρος (kg):	2,4347
Δοκίμιο Cube 3b.5	
Φορτίο kN:	776
MPa:	77,6
Βάρος (kg):	2,4222
Δοκίμιο Cube 3c.6	
Φορτίο kN:	772,3
MPa:	77,23
Βάρος (kg):	2,4345
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	77,912
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,884292
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,43047
Τ.Α Βάρους (kg)	0,007160

Πίνακας 5-26: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ3 (30kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

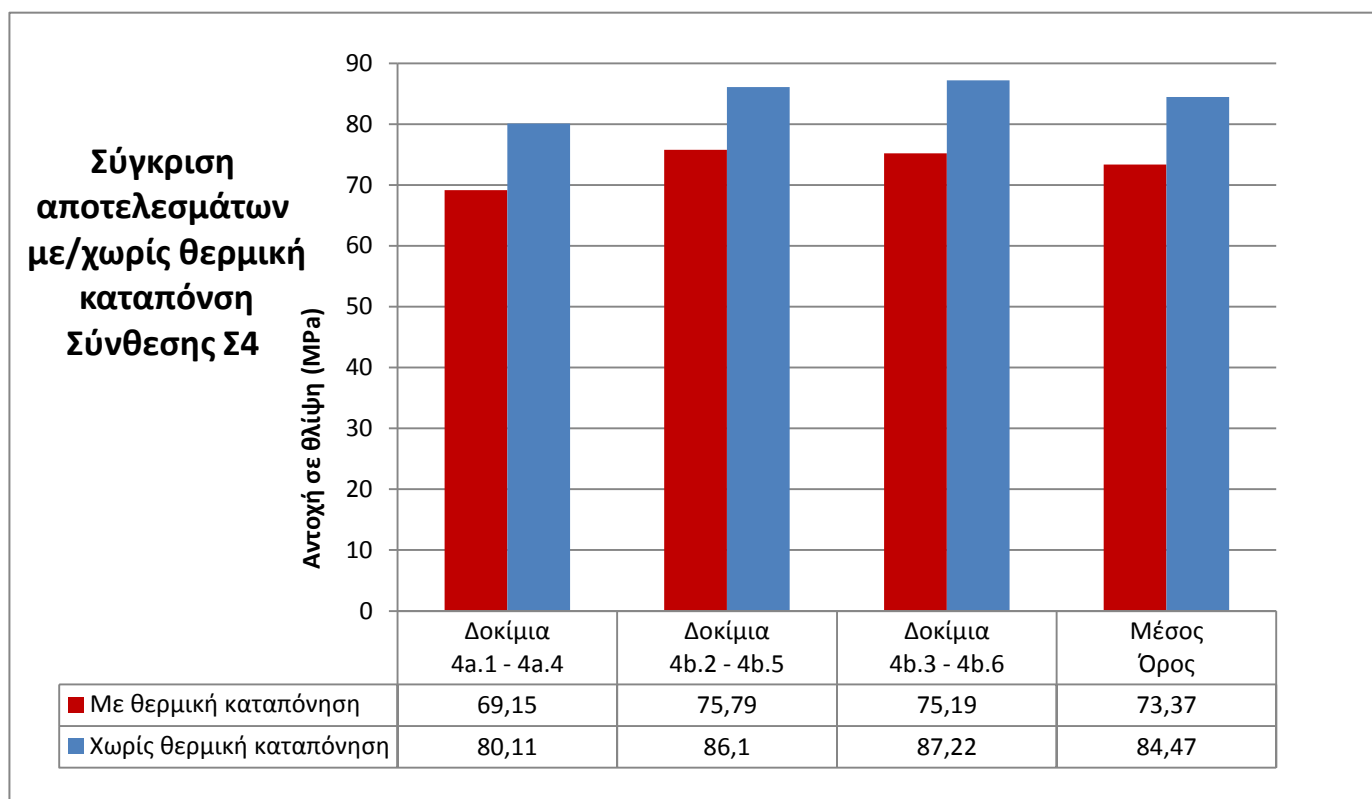


Αυξάνοντας την περιεκτικότητα των ινών παρατηρείται και πάλι αύξηση της διαφοράς μεταξύ θερμικά και μη θερμικά καταπονημένων δοκιμίων με ταυτόχρονη μείωση των αντοχών όλων των δοκιμίων εξαιτίας της ακόμα δυσμενέστερης ανάμιξης. Στην περίπτωση αυτής της σύνθεσης, βέβαια, καθώς και όλων όσων ακολουθούν έγινε αλλαγή των αδρανών υλικών.

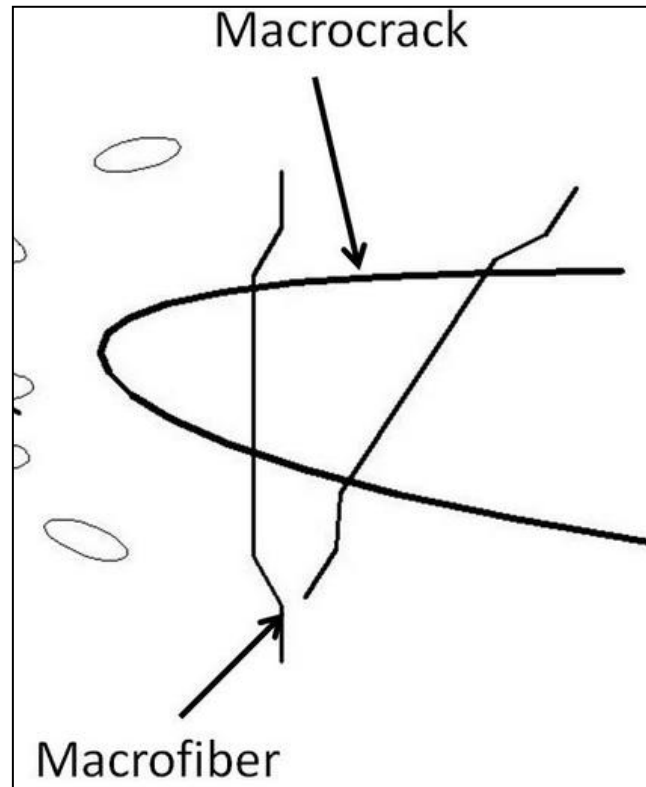
Κύρια σύνθεση Σ4 Α & Β	
Δοκίμιο Cube 4a.1	
Φορτίο kN:	691,5
MPa:	69,15
Βάρος (kg):	2,2932
Δοκίμιο Cube 4b.2	
Φορτίο kN:	757,9
MPa:	75,79
Βάρος (kg):	2,3068
Δοκίμιο Cube 4b.3	
Φορτίο kN:	751,9
MPa:	75,19
Βάρος (kg):	2,2878
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	73,3766
Τ.Α Φορτίου (MPa)	3,672674
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,2959
Τ.Α Βάρους (kg)	0,009735

Κύρια σύνθεση Σ4 Α & Β	
Δοκίμιο Cube 4a.4	
Φορτίο kN:	801,1
MPa:	80,11
Βάρος (kg):	2,4075
Δοκίμιο Cube 4b.5	
Φορτίο kN:	860,98
MPa:	86,098
Βάρος (kg):	2,3976
Δοκίμιο Cube 4b.3	
Φορτίο kN:	872,2
MPa:	87,22
Βάρος (kg):	2,4356
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	84,475
Τ.Α Φορτίου (MPa)	3,824
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,41357
Τ.Α Βάρους (kg)	0,01971

Πίνακας 5-27: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ4 (40kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)



Στην περίπτωση της σύνθεσης Σ4 παρατηρείται αύξηση των αντοχών και στις δύο περιπτώσεις. Πιθανότατα αυτό συμβαίνει διότι οι ίνες σε αυτή τη μεγάλη περιεκτικότητα συνεργάζονται καλύτερα με το σκυρόδεμα καθώς αποτελούν αρκετά μεγάλο μέρος του όγκου του δοκιμίου και όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα βοηθούν στην αντιμετώπιση των μικρορωγμών που πιθανώς δημιουργούνται με την συρραφή αυτών αλλά και των κενών.

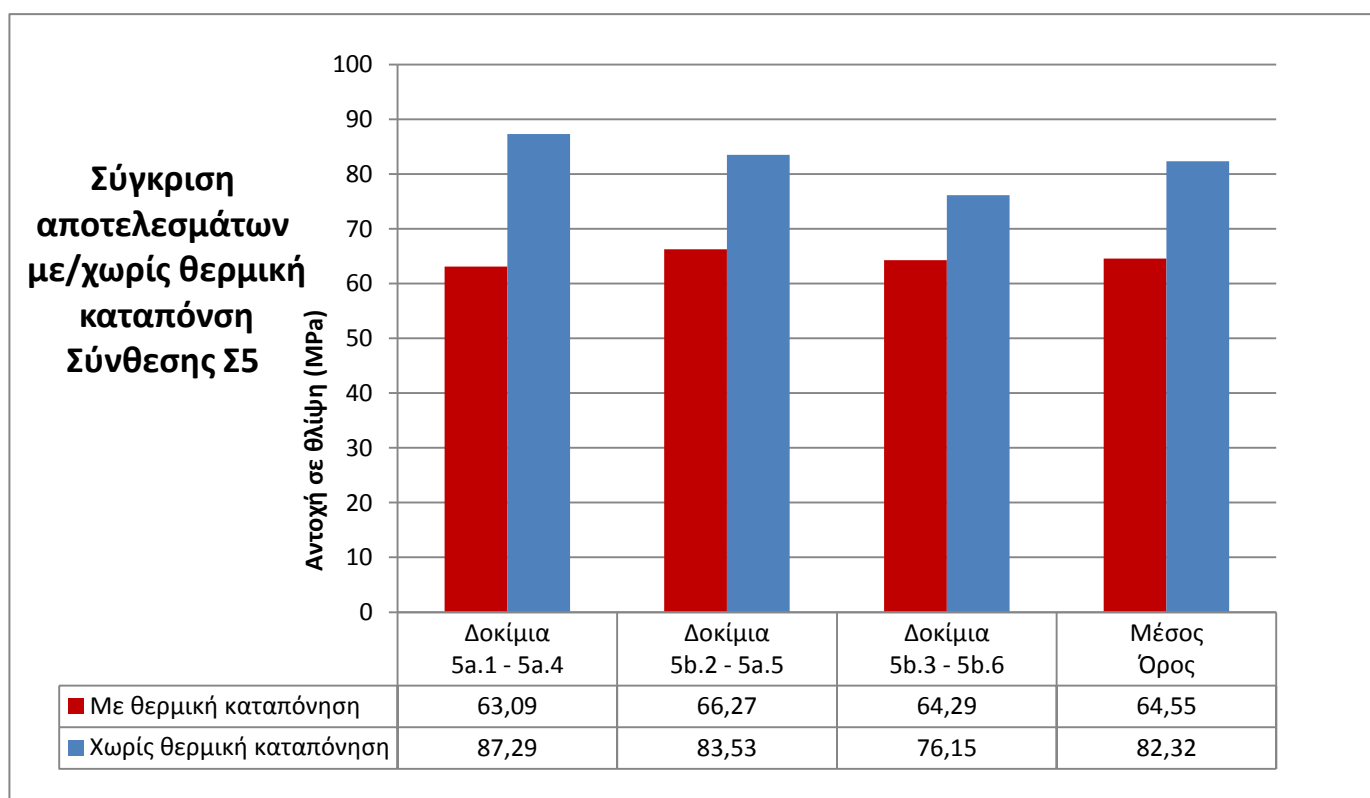


Εικόνα 5-14: Συρραφή μικρορωγμών από τις ίνες

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B	
Δοκίμιο Cube 5a.1	
Φορτίο kN:	630,9
MPa:	63,09
Βάρος (kg):	2,2221
Δοκίμιο Cube 5b.2	
Φορτίο kN:	662,7
MPa:	66,27
Βάρος (kg):	2,277
Δοκίμιο Cube 5b.3	
Φορτίο kN:	642,9
MPa:	64,29
Βάρος (kg):	2,265
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	64,55
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,605864
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,2547
Τ.Α Βάρους (kg)	0,02863

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B	
Δοκίμιο Cube 5a.4	
Φορτίο kN:	872,9
MPa:	87,29
Βάρος (kg):	2,385
Δοκίμιο Cube 5a.5	
Φορτίο kN:	835,3
MPa:	83,53
Βάρος (kg):	2,388
Δοκίμιο Cube 5b.6	
Φορτίο kN:	761,5
MPa:	76,15
Βάρος (kg):	2,409
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	82,323
Τ.Α Φορτίου (MPa)	5,667
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,394
Τ.Α Βάρους (kg)	0,01308

Πίνακας 5-28: Αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη σύνθεσης Σ5 (άοπλο σκυρόδεμα)



Στην σύνθεση Σ5 δεν χρησιμοποιήθηκαν και πάλι ίνες και τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν είναι διαφορετικά από της Σ1, που είναι και αυτή χωρίς ίνες όπως φαίνεται από τους πίνακες των υλικών στην ενότητα 5.4.

Εκτός της σύνθεσης Σ4, η οποία διαθέτει τα βέλτιστα αποτελέσματα αντοχών με χρήση ινών, όλες οι άλλες συνθέσεις στις οποίες εισήχθησαν ίνες είναι υποδεέστερες της Σ5 και της Σ1 όσον αφορά τα μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτει ότι στα μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια ο μέσος όρος του φορτίου και ο μέσος όρος του βάρους στις συνθέσεις Σ1 και Σ5 είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα. Αντίθετα, στα θερμικά καταπονημένα δοκίμια των δύο αυτών συνθέσεων υπάρχει μεγάλη διακύμανση των μέσων όρων της αντοχής σε θλίψη σε ποσοστό περίπου 23%. Επίσης η αντοχή σε θλίψη στην Σ1 ήταν μεγαλύτερη κατά μέσο όρο στα θερμικά καταπονημένα δοκίμια από ότι στα μη θερμικά καταπονημένα κάτι το οποίο δεν συνέβη στην σύνθεση Σ5. Ο μέσος όρος του βάρους είναι πολύ κοντά και στις δύο δοκιμές.

Συμπεράσματα δοκιμών θλίψης:

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης προκύπτουν τα εξής:

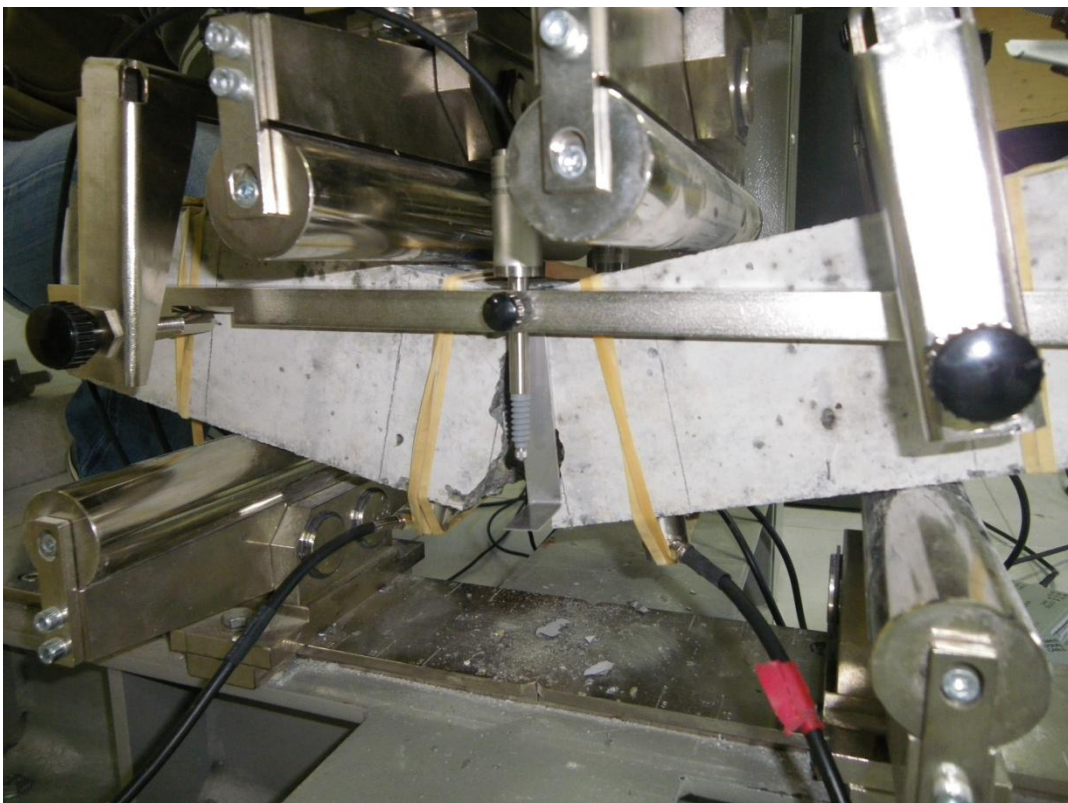
- Οι ίνες, σε ποσοστό μικρότερο από 10% κατά βάρος, εξαιτίας των προβλημάτων που προκαλούν στην ανάμιξη και τη συμπύκνωση μειώνουν την αντοχή των δοκιμίων τόσο στα θερμικά όσο και στα μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια.
- Στο άοπλο σκυρόδεμα είναι δυνατόν να παρατηρηθεί αύξηση της θλιπτικής αντοχής μετά από θερμική καταπόνηση.
- Αύξηση του ποσοστού των ινών, δεδομένου ότι αυτό παραμένει κάτω από το 10% κατά βάρος, προκαλεί μείωση των αντοχών τόσο στα θερμικά όσο και στο μη θερμικά καταπονημένο σκυρόδεμα.

5.8 Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης

Όπως και με τη δοκιμή θλίψης έτσι και στη δοκιμή κάμψης τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στη σερβοϋδραυλική μηχανή για τη δοκιμή κάμψης με τις παρακάτω παραμέτρους που εισήχθησαν στην μηχανή.

Test speed	5-50μm/min
Set Point	10.0 kN
Target	1100.0 kN
Peak Sensitivity	40.0 kN
Ramp Offset	1600 bit
Max. Correction -	500 bit
Max. Correction +	5000 bit

Πίνακας 5-29: Παράμετροι της δοκιμής κάμψης

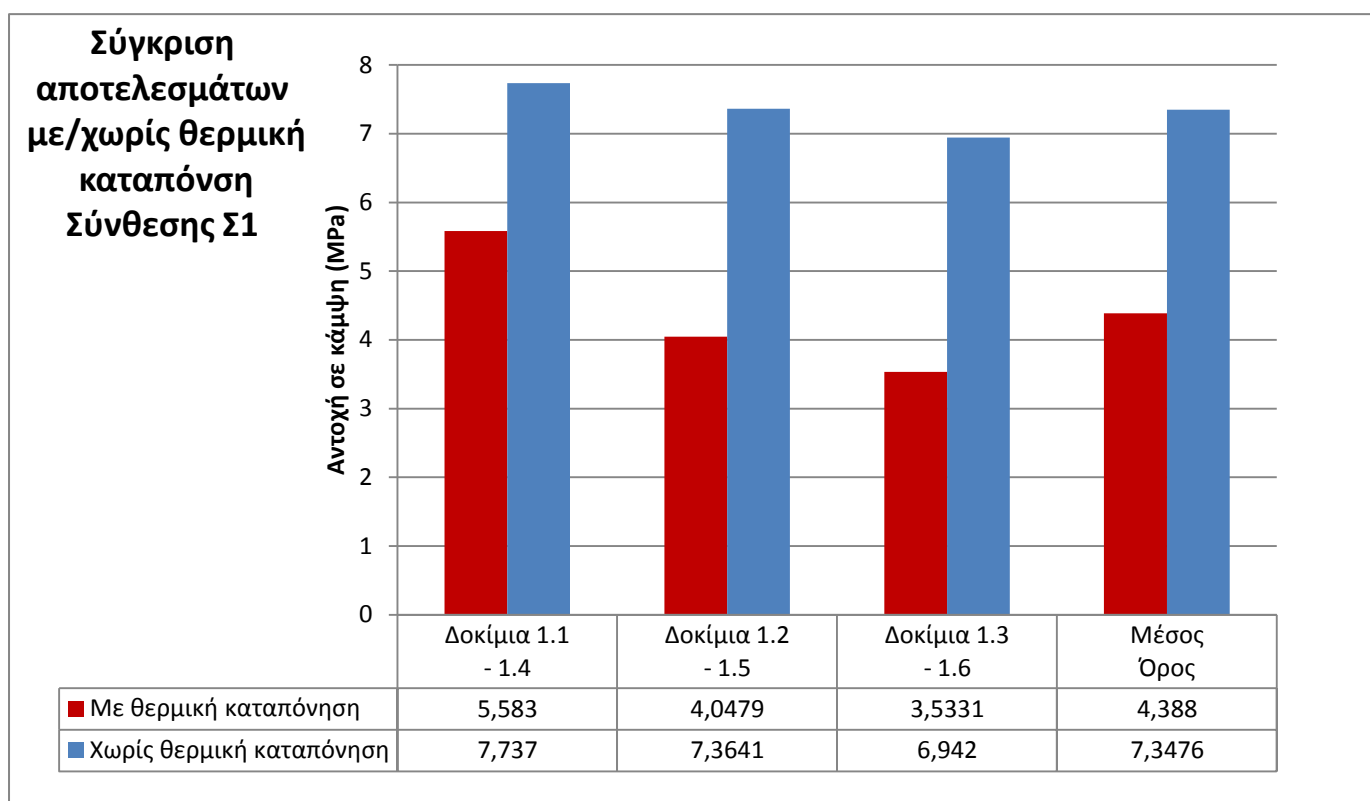


Εικόνα 5-15: Δοκιμή Κάμψης

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1	
Δοκίμιο Beam 1.1	
Φορτίο kN:	18,610
MPa:	5,583
Βάρος (kg):	11,5264
Δοκίμιο Beam 1.2	
Φορτίο kN:	13,493
MPa:	4,0479
Βάρος (kg):	11,0961
Δοκίμιο Beam 1.3	
Φορτίο kN:	11,777
MPa:	3,5331
Βάρος (kg):	11,3243
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	4,388
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,06643
Μ.Ο Βάρους (kg)	11,3156
Τ.Α Βάρους (kg)	0,215282

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1	
Δοκίμιο Beam 1.4	
Φορτίο kN:	25,79
MPa:	7,737
Βάρος (kg):	12,276
Δοκίμιο Beam 1.5	
Φορτίο kN:	24,547
MPa:	7,3641
Βάρος (kg):	12,187
Δοκίμιο Beam 1.6	
Φορτίο kN:	23,139
MPa:	6,942
Βάρος (kg):	11,876
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	7,3476
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,39791
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,11293
Τ.Α Βάρους (kg)	0,20991

Πίνακας 5-30: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ1(άοπλο σκυρόδεμα)

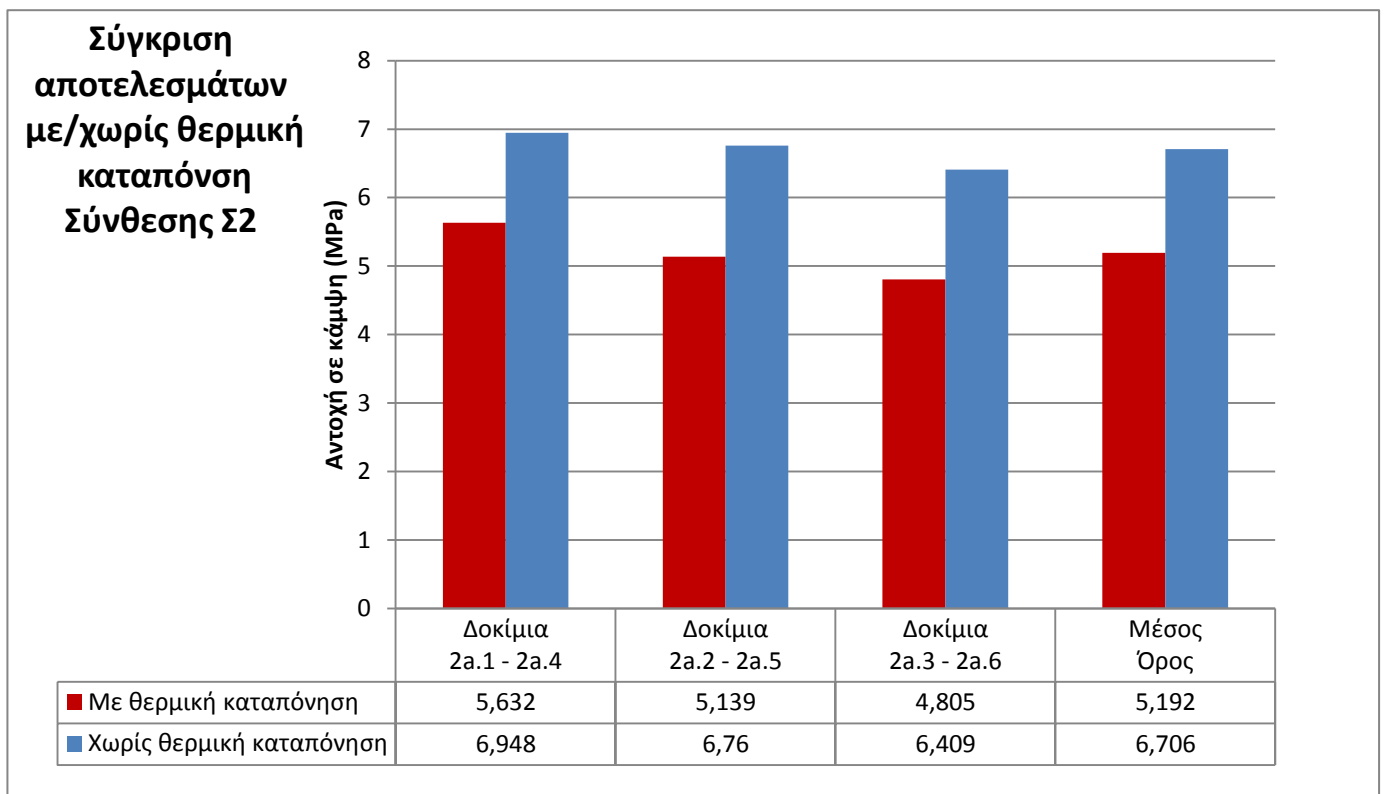


Στην δοκιμή κάμψης γίνεται αμέσως αντιληπτό ότι στο άοπλο σκυρόδεμα οι αντοχές των θερμικά καταπονημένων δοκιμίων είναι εμφανώς μικρότερες από αυτές των μη θερμικά καταπονημένων. Η μείωση αυτή της αντοχής, που είναι σημαντική, σε ορισμένα δοκίμια πλησιάζει το 50%.

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 A & B	
Δοκίμιο Beam 2a.1	
Φορτίο kN:	18,773
MPa:	5,6319
Βάρος (kg):	11,5505
Δοκίμιο Beam 2a.2	
Φορτίο kN:	17,130
MPa:	5,139
Βάρος (kg):	11,5033
Δοκίμιο Beam 2a.3	
Φορτίο kN:	16,019
MPa:	4,8057
Βάρος (kg):	11,1979
M.O Φορτίου (MPa)	5,1922
T.A Φορτίου (MPa)	0,41566
M.O Βάρους (kg)	11,4172
T.A Βάρους (kg)	0,19141

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 A & B	
Δοκίμιο Beam 2a.4	
Φορτίο kN:	23,16
MPa:	6,948
Βάρος (kg):	12,028
Δοκίμιο Beam 2a.5	
Φορτίο kN:	22,533
MPa:	6,760
Βάρος (kg):	12,104
Δοκίμιο Beam 2a.6	
Φορτίο kN:	21,363
MPa:	6,409
Βάρος (kg):	12,200
M.O Φορτίου (MPa)	6,706
T.A Φορτίου (MPa)	0,27362
M.O Βάρους (kg)	12,1107
T.A Βάρους (kg)	0,08619

Πίνακας 5-31: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

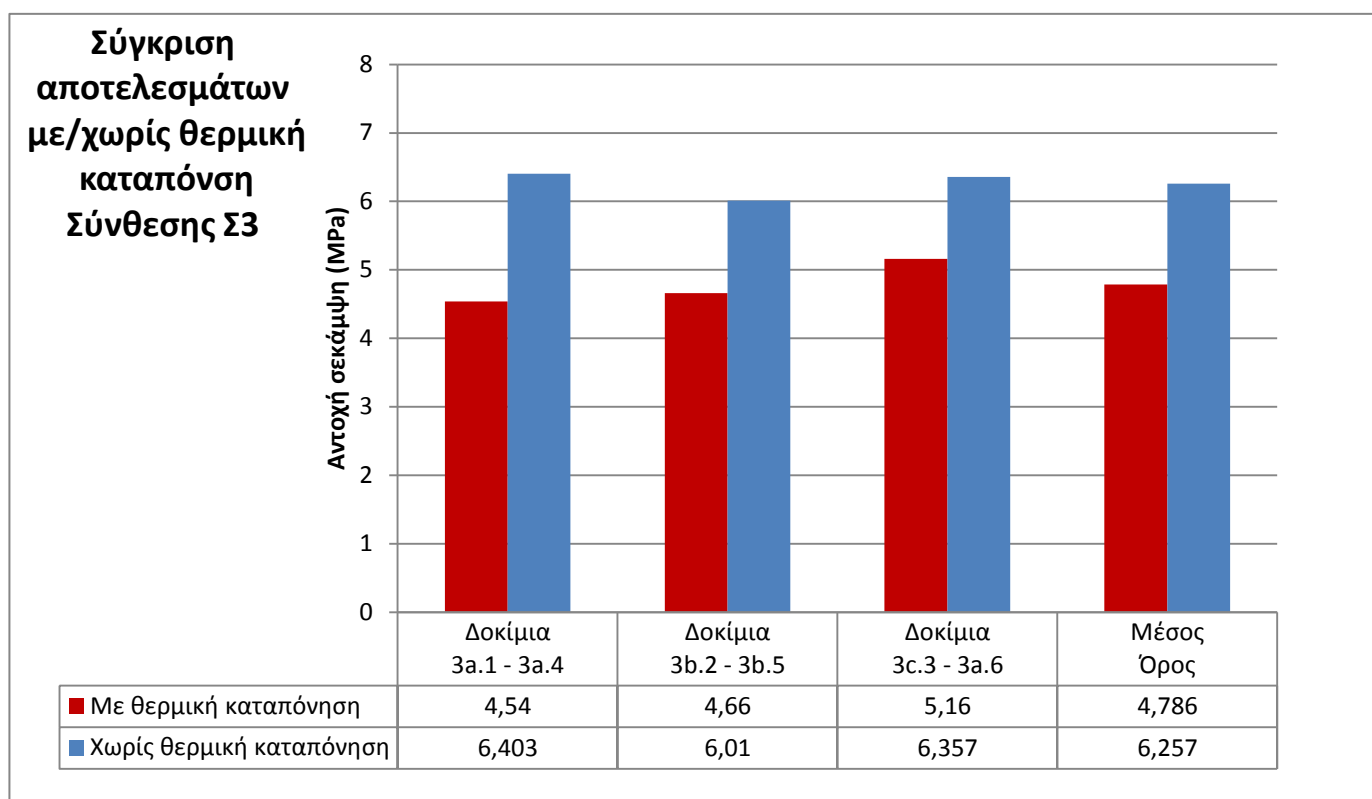


Η προσθήκη ινών έχει άμεσα και εμφανή αποτελέσματα. Παρατηρείται μία μικρή πτώση της αντοχής σε κάμψη των μη θερμικά καταπονημένων δοκιμίων αλλά βλέπουμε αύξηση στην περίπτωση των θερμικά καταπονημένων και ,έτσι, μειώνεται σημαντικά η διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων.

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ	
Δοκίμιο Beam 3a.1	
Φορτίο kN:	15,133
MPa:	4,54
Βάρος (kg):	11,3992
Δοκίμιο Beam 3b.2	
Φορτίο kN:	15,542
MPa:	4,66
Βάρος (kg):	11,2144
Δοκίμιο Beam 3c.3	
Φορτίο kN:	17,185
MPa:	5,16
Βάρος (kg):	11,4894
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	4,78633
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,32599
Μ.Ο Βάρους (kg)	11,3677
Τ.Α Βάρους (kg)	0,14019

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ	
Δοκίμιο Beam 3a.4	
Φορτίο kN:	21,344
MPa:	6,403
Βάρος (kg):	12,097
Δοκίμιο Beam 3b.5	
Φορτίο kN:	21,032
MPa:	6,01
Βάρος (kg):	11,857
Δοκίμιο Beam 3a.6	
Φορτίο kN:	21,189
MPa:	6,357
Βάρος (kg):	12,133
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,257
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,21485
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,0291
Τ.Α Βάρους (kg)	0,15011

Πίνακας 5-32: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ3 (30kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

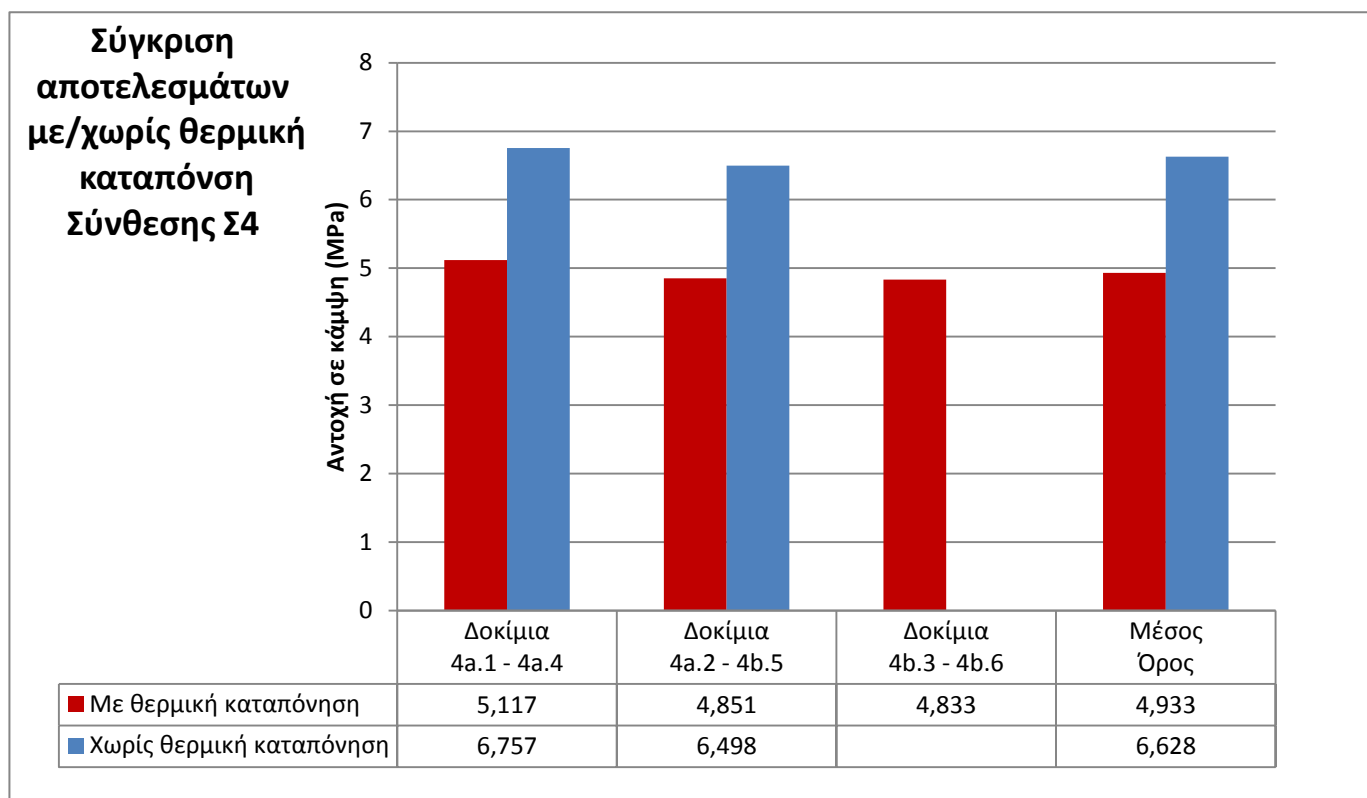


Η περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των ινών οδηγεί σε μείωση της αντοχής σε κάμψη τόσο στα θερμικά όσο και στα μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια σε σχέση με τη Σ2. Ωστόσο, οι διαφορές των μέσων όρων και στις δύο συνθέσεις (Σ.1-Σ.2) κυμαίνονται στα ίδια ποσοστά (22,5%-23,4%).

Κύρια σύνθεση Σ4 A & B	
Δοκίμιο Beam 4a.1	
Φορτίο kN:	17,056
MPa:	5,117
Βάρος (kg):	11,4588
Δοκίμιο Beam 4a.2	
Φορτίο kN:	16,169
MPa:	4,851
Βάρος (kg):	11,4449
Δοκίμιο Beam 4b.3	
Φορτίο kN:	16,109
MPa:	4,833
Βάρος (kg):	11,5242
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	4,93347
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,1592
Μ.Ο Βάρους (kg)	11,476
Τ.Α Βάρους (kg)	0,04235

Κύρια σύνθεση Σ4 A & B	
Δοκίμιο Beam 4a.4	
Φορτίο kN:	22,526
MPa:	6,7578
Βάρος (kg):	12,133
Δοκίμιο Beam 4b.5	
Φορτίο kN:	21,66
MPa:	6,498
Βάρος (kg):	12,091
Δοκίμιο Beam 4b.6	
Φορτίο kN:	
MPa:	
Βάρος (kg):	
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,628
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,18371
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,1119
Τ.Α Βάρους (kg)	0,02949

Πίνακας 5-33: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ4 (40kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)



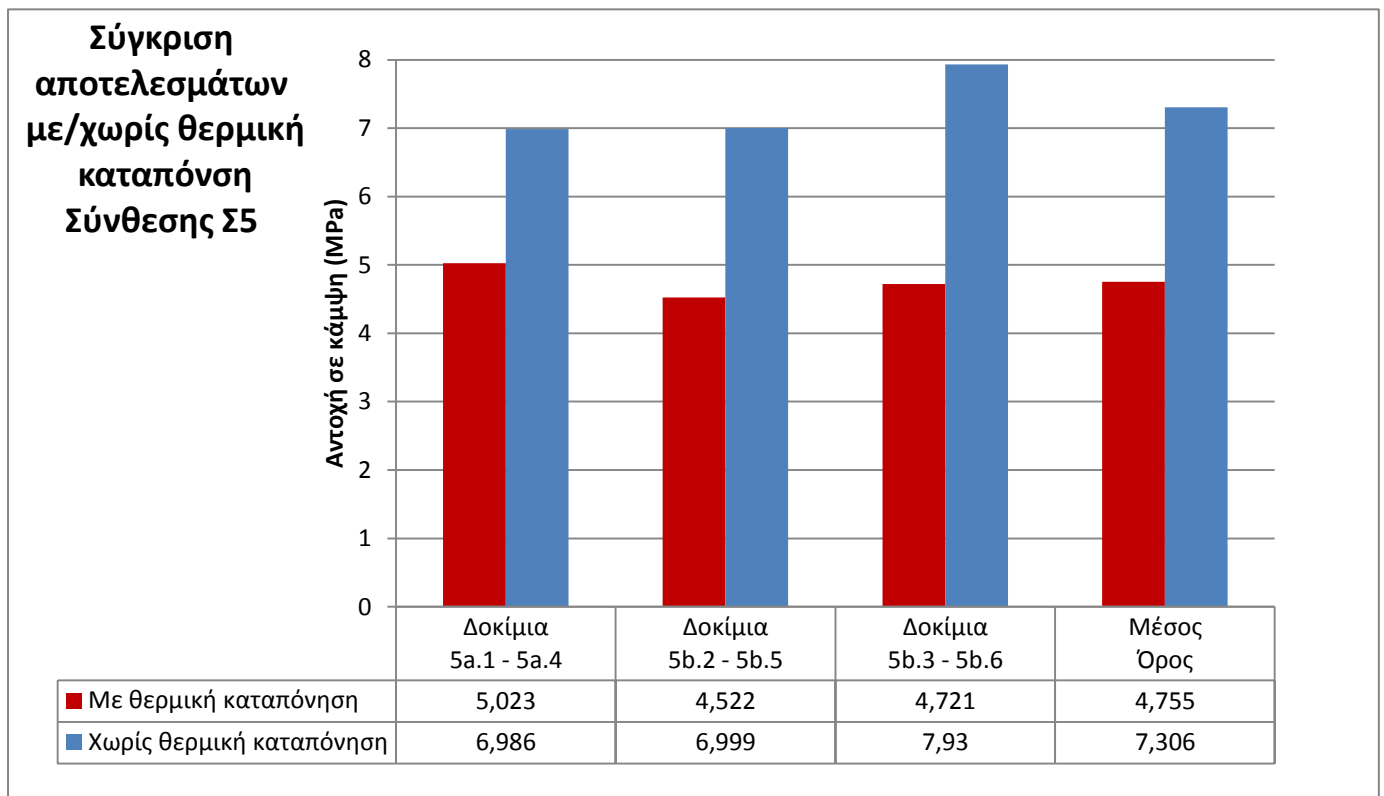
Στη σύνθεση Σ4 παρατηρείται αύξηση των αντοχών συγκριτικά με την σύνθεση Σ3 αλλά η σύνθεση Σ2 παρά το γεγονός ότι περιέχει μικρότερο ποσοστό ινών εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα από τη σύνθεση Σ4 και στις δύο περιπτώσεις. Η διαφορά που εμφανίζεται ωστόσο είναι αρκετά μικρή.

Η μέτρηση που δεν εμφανίζεται στο διάγραμμα οφείλεται σε αστοχία της δοκιμής κάμψης.

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B	
Δοκίμιο Beam 5a.1	
Φορτίο kN:	16,743
MPa:	5,023
Βάρος (kg):	11,445
Δοκίμιο Beam 5b.2	
Φορτίο kN:	15,073
MPa:	4,522
Βάρος (kg):	11,254
Δοκίμιο Beam 5b.3	
Φορτίο kN:	15,736
MPa:	4,721
Βάρος (kg):	11,270
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	4,7552
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,25226
Μ.Ο Βάρους (kg)	11,323
Τ.Α Βάρους (kg)	0,10596

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B	
Δοκίμιο Beam 5a.4	
Φορτίο kN:	23,295
MPa:	6,989
Βάρος (kg):	12,200
Δοκίμιο Beam 5b.5	
Φορτίο kN:	13,329
MPa:	6,999
Βάρος (kg):	11,776
Δοκίμιο Beam 5b.6	
Φορτίο kN:	26,432
MPa:	7,930
Βάρος (kg):	12,121
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	7,306
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,540423
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,032
Τ.Α Βάρους (kg)	0,2255

Πίνακας 5-34: Αποτελέσματα δοκιμών σε κάμψη σύνθεσης Σ5 (άοπλο σκυρόδεμα)



Η σύνθεση Σ5 όπως και η σύνθεση Σ1 είναι χωρίς ίνες και όπως φαίνεται τα αποτελέσματα τους είναι παρόμοια. Και στην σύνθεση Σ5 παρατηρείται υψηλότερη αντοχή σε κάμψη στα μη θερμικά καταπονημένα δοκίμια από τις ινοπλισμένες συνθέσεις αλλά η μείωση των αντοχών μετά τη θερμική καταπόνηση είναι μεγάλη συγκριτικά με τα μη θερμικά καταπονημένα. Όμως κυμαίνεται σχετικά κοντά στις τιμές των θερμικά καταπονημένων δοκιμίων από τις ινοπλισμένες συνθέσεις.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την έναρξη της διπλωματικής εργασίας αντιμετωπίστηκε το πρόβλημα της εύρεσης εργαστηρίου το οποίο θα μας φιλοξενούσε για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου του υλικού που είχε προγραμματιστεί να παρασκευαστεί, έπρεπε το εργαστήριο να διαθέτει μηχανή ανάδευσης μεγάλης χωρητικότητας, η οποία υπήρχε στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της σχολής των Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ. Επόμενη δυσκολία που αντιμετωπίστηκε ήταν η εύρεση των αδρανών υλικών και του τσιμέντου. Όσον αφορά τα αδρανή, υπήρχε δυσκολία στην ανεύρεση της απαιτούμενης ποσότητας με συγκεκριμένο μέγεθος κόκκου. Τελικά, επιλέχθηκαν δύο μεγέθη τα οποία με τις σωστές αναλογίες που προέκυψαν από την κοκκομετρική καμπύλη μας έδωσαν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κατά την πρόοδο των πειραμάτων παρατηρήθηκε έλλειψη των αρχικών αδρανών και η εύρεση των ίδιων αδρανών ήταν πολύ δύσκολη. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν τα αδρανή που υπήρχαν στο εργαστήριο οπλισμένου σκυροδέματος για τα οποία υπολογίστηκαν εκ νέου αναλογίες μετά από τη διεξαγωγή κοκκομετρικής ανάλυσης. Όσον αφορά το τσιμέντο, εξαιτίας της εξειδικευμένης χρήσης του τύπου που επιλέξαμε, ήταν δύσκολη η εύρεση των ποσοτήτων που θέλαμε σε τοπικές επιχειρήσεις προμήθειας υλικών οικοδομής. Τελικά, ο συγκεκριμένος τύπος σκυροδέματος έγινε παραγγελία και μας προμηθεύτηκε από την εταιρία ΕΚΕΤ. Η κοκκομετρική ανάλυση και η ζύγιση των υλικών δεν παρουσίασαν ιδιαίτερες δυσκολίες.

Κατά την παραγωγή των συνθέσεων το κυριότερο πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε ήταν ο προσδιορισμός της ποσότητας του ρευστοποιητή που θα χρησιμοποιούσαμε καθώς με κάθε προσθήκη ποσότητας ρευστοποιητή έπρεπε να ακολουθεί μέτρηση της κάθισης του δείγματος. Επίσης, υπήρχε δυσκολία στον χειρισμό της μηχανής ανάδευσης με μεγάλη ποσότητα μίγματος και για το λόγο αυτό οι περισσότερες συνθέσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο ή ακόμα και τρεις δόσεις με φυσικό επακόλουθο ακόμα και συνθέσεις με τις ίδιες ακριβώς αναλογίες υλικών να παρουσιάζουν κάπως διαφορετική συμπεριφορά τόσο όσον αφορά την ποσότητα του ρευστοποιητή που απαιτούνταν όσο και τα αποτελέσματα των δοκιμών. Άλλη μία διεργασία που χρειαζόταν μεγάλη προσοχή ήταν η δόνηση των δοκιμών διότι γινόταν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στο οποίο έπρεπε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα και αποφυγή της αναπήδησης των μητρών πάνω στην τράπεζα δόνησης.

Σχετικά με τα αποτελέσματα των δοκιμών παρατηρήθηκαν τα εξής:

- Η προσθήκη ινών δυσκολεύει την ανάμιξη του μίγματος και διευκολύνει την δημιουργία κενών με αποτέλεσμα τόσο τα καταπονημένα όσο και τα μη καταπονημένα δοκίμια που περιέχουν ίνες να εμφανίζουν μικρότερη αντοχή από το

άοπλο σκυρόδεμα.

- Μετά την έψηση υπάρχει η πιθανότητα τα δοκίμια να εμφανίσουν μεγαλύτερη αντοχή από τα μη θερμικά καταπονημένα.
- Στη δοκιμή θλίψης υπήρχε «αναμενόμενη» συμπεριφορά των δοκιμίων καθώς τα θερμικά καταπονημένα δοκίμια παρουσίασαν μικρότερη αντοχή από τα μη θερμικά καταπονημένα αλλά σε αποδεκτά επίπεδα που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά του σκυροδέματος που έχει καταπονηθεί σε θερμοκρασία 250° C μπορεί να προβλεφθεί σε ικανοποιητικό βαθμό.
- Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης αναδεικνύουν την συνεισφορά της χρήσης ινών στην αντοχή του σκυροδέματος όσον αφορά τα δοκίμια που έχουν υποστεί θερμική καταπόνηση.
- Και από τις δύο δοκιμές προκύπτει ότι ενώ αρχικά η σύνθεση Σ1, δηλαδή το άοπλο σκυρόδεμα, είχε καλύτερα αποτελέσματα από πλευράς αντοχής στη δοκιμή θλίψης, οι συνθέσεις που περιείχαν ίνες έδωσαν τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά τη δοκιμή κάμψης και από πλευράς αντοχής αλλά και όσον αφορά την εικόνα θραύσης καθώς παρατηρήθηκε όχι τόσο ψαθυρή θραύση. Πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση Σ4 με 40kg ίνες στο m³ παρουσίασε τα βέλτιστα αποτελέσματα όσον αφορά τα θερμικά καταπονημένα δοκίμια, αποτέλεσμα που συμβαδίζει με τη βιβλιογραφία που προτείνει προσθήκη ινών τουλάχιστον 30kg στο m³.
- Η προσθήκη των ινών παρόλο που επιφέρει μείωση των αντοχών δίνει τη δυνατότητα στο σκυρόδεμα να παραλαμβάνει φορτία ακόμα και μετά από την θραύση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ Σοφιανός, Α.Ι. , *Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων*, Αθήνα 2010
- ❖ Τσακαλάκης, Κ. (2010), *Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος*
- ❖ Μαρσέλλος, Ν., *Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος-Από τον Κ.Τ.Σ. 97 στον Κ.Τ.Σ. 2013*, Εκδόσεις Δεδεμάδη (2013)
- ❖ Sika (T.Hirschi, H.Knauber, M.Lanz, J.Schlumpf, J.Schrabbach, C.Spirig, U.Waeber), *Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Sika* (2007)
- ❖ Peskova, S. - Prochazka. P.P., *Impact of high temperature on different combinations of fiber reinforced concrete*, 36th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, August 14-16, 2011
- ❖ Kaspar W, Yunping Xi , Keun Lee,Byunhun Kim, (2009), *Thermal response of reinforced concrete structures in nuclear power plants*, Departments of Civil, Environmental and Architectural Engineering, College of Engineering and Applied Science, University of Colorado at Boulder
- ❖ Σακκάς Κ., Πανιάς Δ., Νομικός Π., Σοφιανός Αλ., *Προστασία σηράγγων απο πυρκαγιά*, 6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09-1/10 2010, Βόλος
- ❖ Sakkas K., Panias D., Nomikos P.P., Sofianos A.I., (2014), *Potassium based Geopolymer for Passive Fire Protection of Concrete Tunnels Linings*
- ❖ Λίτινας, Ν , *Νέες απαιτήσεις για τα αδρανή υλικά στις κατασκευές Εμπειρία από την εφαρμογή της σήμανσης CE στην Ελλάδα- 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων*, ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου 2008
- ❖ Κορδή Ρ., (2014). *Διερεύνηση θλιπτικής και καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος*, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ
- ❖ http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/index.pl/presa_gr
- ❖ Ρουσάκης, Γ., (2010). *Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ
- ❖ Σαρρής, Β., (2008). *Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονότονη φόρτιση*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μ

- ❖ Παπαδάκη, Ζ., (2010). *Διερεύνηση Εφελκυστικής Αντοχής Ινοπλισμένου Σκυροδέματος*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης Μηχανικών, ΕΜΠ
- ❖ Maidl B.R.,(1995). *Steel fibre Reinforced Concrete*, Ernst & Sohn
- ❖ □ Vanderwalle M.,(1993). *Tunneling the World*, Dramix