



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 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΟΡΑΗ ΡΕΓΓΙΝΑΣ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΑΠΘ (2012)

Επιβλέπων: Α.Ι. Σοφριανός

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 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΟΡΑΗ ΡΕΓΓΙΝΑΣ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΑΠΘ (2012)

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

.....

ΡΕΓΓΙΝΑ ΚΟΡΔΗ

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

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διεξήχθη 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.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κο. Αλέξανδρο Σοφιανό, Καθηγητή του τομέα Μεταλλευτικής του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για την επιστημονική του συμβολή στην εκπόνηση της εργασίας αυτής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κο. Ευστράτιο Μπαδογιάννη Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων αλλά και έπειτα για τις παρατηρήσεις του κατά τη συγγραφή της εργασίας. Επιπρόσθετα θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον κο. Γεώργιο Γιατζίδη υποψήφιο διδάκτωρ του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλα τα στάδια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και να ευχαριστήσω τους Κωνσταντίνο Σακκά, υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ, Δημήτρη Χουμανίδη, υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ και Γιώργο Παπαντωνόπουλο, προσωπικό Ιδιωτικού Δικαίου Αορίστου Χρόνου (Ι.Δ.Α.Χ) στον τομέα Μεταλλευτικής, για την συνεργασία και τη βοήθεια που μου προσέφεραν να διεκπεραιώσω τις πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου την οικογένεια μου για τη διαρκή τους υποστήριξη καθώς και σε όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου για την πολύ όμορφη πορεία που διαγράψαμε μαζί.

Υπάρχει σίγουρα μια πορεία που μπορεί, με πολλούς τρόπους, να είναι προσωπική και μοναδική. Ο τρόπος είναι να ανακαλύψεις την πορεία και ν' αρχίσεις να βαδίζεις προς τα εκεί. Είναι πιθανόν να ξεκινήσεις μόνος, αλλά θα εκπλαγείς όταν συναντήσεις, αργότερα στο δρόμο, όλους εκείνους που σίγουρα πορεύονται προς την ίδια κατεύθυνση. Είθε να συναντηθούμε εκεί. Θα σημαίνει πως θα έχετε φτάσει. Θα σημαίνει πως κι εγώ θα τα έχω καταφέρει...

Χορχέ Μπουκάϊ, Ο δρόμος της αυτοεξάρτησης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	i
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	ii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	vii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ.....	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT.....	2
Κεφάλαιο 1 : ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	3
1.1. Σύσταση και ιδιότητες	3
1.2. Αντοχές σκυροδέματος	3
1.2.1. Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	3
1.2.2. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος.....	4
1.3. Κατηγορίες σκυροδέματος.....	4
1.4. Υλικά παρασκευής σκυροδέματος.....	6
1.4.1. Το τσιμέντο	6
1.4.1.1. Παραγωγή.....	6
1.4.1.2. Τύποι τσιμέντων	8
1.4.1.3. Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων	10
1.4.2. Αδρανή υλικά.....	12
1.4.2.1. Προέλευση αδρανών	12
1.4.2.2. Προδιαγραφές για τα αδρανή υλικά	13
1.4.2.2.1. Μορφή και μέγεθος των κόκκων.....	14
1.4.3. Το νερό.....	15
1.4.3.1. Λόγος Νερού-Τσιμέντου	15
1.4.3.2. Προσδιορισμός μέγιστου λόγου W/C.....	16
1.4.4. Πρόσμικτα σκυροδέματος	19
1.4.5. Πρόσθετα σκυροδέματος.....	20
Κεφάλαιο 2 : ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	22
2.1. Ιδιότητες Ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	22
2.2. Πεδίο εφαρμογής	23
2.2.1. Εφαρμογή στα Υπόγεια Έργα	24
2.3. Είδη ινών.....	26
2.3.1. Χαλύβδινες ίνες	28

2.3.1.1. Μηχανισμός αστοχίας.....	32
2.4. Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών	33
Κεφάλαιο 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	36
3.1. Προμήθεια των υλικών	38
3.2. Ξήρανση των αδρανών	40
3.3. Κοκκομετρική Διαβάθμιση Αδρανών	40
3.3.1. Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων	44
3.4. Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση	47
3.5. Σκυροδέτηση.....	51
3.5.1. Πειραματικές δοκιμές σε νωπό σκυρόδεμα	53
3.5.1.1. Δοκιμή κάθισης	53
3.5.1.2. Μέτρηση καθαρού βάρους σκυροδέματος.....	57
3.6. Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες	60
3.7. Συντήρηση δοκιμίων.....	60
3.8. Εργαστηριακές δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα	60
3.8.1. Δοκιμή θλίψης.....	61
3.8.2. Δοκιμή κάμψης 4 σημείων.....	62
Κεφάλαιο 4 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	64
4.1. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.....	64
4.2. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης.....	72
Κεφάλαιο 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	80
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Κατηγορίες σκυροδέματος, αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές και αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό.....	5
Πίνακας 2: Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου.....	8
Πίνακας 3: Συμβολισμοί συστατικών του τσιμέντου	10
Πίνακας 4: Κατηγορίες αντοχών τσιμέντων	11
Πίνακας 5: ΕΛΟΤ EN206-1 Ε.Π.ΣΤ.1- Οριακές τιμές σύνθεσης, ιδιοτήτων σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα	18
Πίνακας 6: Τυπικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών (9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003)	27
Πίνακας 7: Διάφορα είδη ινών και εφαρμογές τους	28
Πίνακας 8: Χημική ανάλυση τσιμέντου.....	38
Πίνακας 9: Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή Sika Viscocrete Techno 40.....	39
Πίνακας 10: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης.....	43
Πίνακας 11: Όρια διαβαθμίσεων για μείγμα αδρανών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 33.....	44
Πίνακας 12: Όρια Διαβάθμισης No.3	45
Πίνακας 13: Ποσότητες υλικών στις δοκιμαστικές συνθέσεις Δ1, Δ2, Δ3	48
Πίνακας 14: Ποσότητες υλικών στις προπαρασκευαστικές συνθέσεις Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα) , Σ2 (ίνες 20 kg/m ³)	48
Πίνακας 15: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ3 (ίνες 30 kg/m ³).....	49
Πίνακας 16: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ4 (ίνες 40 kg/m ³).....	49
Πίνακας 17: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ5 (άοπλο σκυρόδεμα)	50
Πίνακας 18: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ6 (ίνες 20 kg/m ³).....	50
Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης για όλες τις συνθέσεις	55
Πίνακας 20: Κατηγορίες κάθισης νεπού σκυροδέματος.....	56
Πίνακας 21: Χαρακτηριστικά πρότυπου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους σκυροδέματος.....	57
Πίνακας 22: Αποτελέσματα μετρήσεων καθαρού βάρους.....	58
Πίνακας 23: Παράμετροι σερβοϋδραυλικής μηχανής για την δοκιμή θλίψης.....	64
Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ1(άοπλο σκυρόδεμα)	65
Πίνακας 25: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος).....	66
Πίνακας 26: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ3 (30kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³	

σκυροδέματος)	67
Πίνακας 27: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ4(40kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος)	68
Πίνακας 28: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ5(άοπλο σκυρόδεμα)	69
Πίνακας 29: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ6 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος)	70
Πίνακας 30: Παράμετροι σερβοϋδραυλικής μηχανής για την δοκιμή κάμψης	72
Πίνακας 31: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ1(άοπλο σκυρόδεμα)	73
Πίνακας 32: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος)	74
Πίνακας 33: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ3(30kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος)	75
Πίνακας 34: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ4(40kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος)	76
Πίνακας 35: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ5(άοπλο σκυρόδεμα)	77
Πίνακας 36: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ6 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m ³ σκυροδέματος)	78
Πίνακας 37: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης δοκιμαστικών συνθέσεων	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Παράδειγμα χαρακτηριστικής αντοχής κύβου και κυλίνδρου για σκυρόδεμα C20/25.....	5
Εικόνα 2: Αναλυτικό διάγραμμα ροής των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου	8
Εικόνα 3: Σύνθεση ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maidl 1995)	22
Εικόνα 4: Μηχανισμός αύξησης της πλαστιμότητας κάμψης του σκυροδέματος με χρήση ινών	22
Εικόνα 5: Χρήσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος για υποστήριξη σηράγγων.....	25
Εικόνα 6: Σήραγγα επενδεδυμένη με ινοπλισμένα προκατασκευασμένα στοιχεία	26
Εικόνα 7: Ίνες με γαντζωτά άκρα	28
Εικόνα 8: Κύρια προφίλ ινών (επίπεδο, με γαντζωτά άκρα, κυματοειδής, με κωνικά άκρα, μηχανικά παραμορφωμένο) (Katzner, 2006).	29
Εικόνα 9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ινών	30
Εικόνα 10: Πιθανοί προσανατολισμοί των ινών στο σκυρόδεμα(Maidl, 1995).....	31
Εικόνα 11: Αντίδραση ινών-σκυροδέματος (Bentur and Mindness, 1990).....	32
Εικόνα 12: Χρησιμοποιούμενες ίνες.....	39
Εικόνα 13: Φούρνος ξήρανσης αδρανών	40
Εικόνα 14: Τετραμερισμός ποσότητας αδρανών	41
Εικόνα 15: Σειρά κοσκίνων και συσκευή κοσκινίσματος.....	42
Εικόνα 16: Υλικά προς σκυροδέτηση	47
Εικόνα 17: Όλα τα απαιτούμενα υλικά.....	51
Εικόνα 18: Προσθήκη αδρανών υλικών, ποσότητας νερού και ανάδευση.....	51
Εικόνα 19: Προσθήκη τσιμέντου και υπόλοιπης ποσότητας νερού και συνέχιση της ανάδευσης του μείγματος.....	52
Εικόνα 20: Τελικό μείγμα μετά και την προσθήκη των ινών, της πυριτικής παιπάλης και του ρευστοποιητή	52
Εικόνα 21: Μέτρηση κάθισης νωπού σκυροδέματος	53
Εικόνα 22: Μετρούμενη κάθιση σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1	56
Εικόνα 23: Ζύγιση πληρωμένου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους.....	57
Εικόνα 24: Δόνηση πρισματικής μήτρας στην τράπεζα δόνησης.....	59
Εικόνα 25: Πρισματικές και κυβικές μήτρες πληρωμένες με σκυρόδεμα	59
Εικόνα 26: Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150kN και δοκιμών θλίψης δυναμικότητας 5000kN και μονάδα ελέγχου τριαξονικών δοκιμών Sercomp 7	60
Εικόνα 27: Θλίψη κυβικού δοκιμίου	61
Εικόνα 28: Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη	62
Εικόνα 29: Δοκιμή κάμψης 4 σημείων	63

Εικόνα 30: Διάταξη δοκιμής κάμψης 4 σημείων	72
---	----

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Τα είδη των ινών	27
Διάγραμμα 2: Γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής ανάλυσης.....	46
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ1	65
Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ2	66
Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ3	67
Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ4	68
Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ5	69
Διάγραμμα 8: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ6	70
Διάγραμμα 9: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης 7 & 28 ημερών συνθέσεων Σ1- Σ6.....	71
Διάγραμμα 10: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ1	73
Διάγραμμα 11: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ2	74
Διάγραμμα 12: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ3	75
Διάγραμμα 13: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ4	76
Διάγραμμα 14: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ5	77
Διάγραμμα 15: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ6	78
Διάγραμμα 16: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης 7 & 28 ημερών συνθέσεων Σ1-Σ6.....	79
Διάγραμμα 17: Αποτελέσματα δοκιμαστικών συνθέσεων.....	85

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

f_c	Μονοαξονική Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
f_{cm}	Μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
f_{ck}	Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη
f_{ct}	Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
f_{ctm}	Μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
$f_{t,fl}$	Αντοχή σε κάμψη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς σκυροδέματος άοπλου και οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες (SFRC-steel fibre reinforced concrete) υπό μονοαξονική θλίψη και κάμψη. Χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος ίνας (Inomix) με σταθερά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά σε τρεις διαφορετικές περιεκτικότητες (20,30 και 40kg στο κυβικό μέτρο σκυροδέματος) και με τυχαίο προσανατολισμό στον όγκο του σκυροδέματος.

Σκοπός ήταν η μέτρηση της αντοχής των δοκιμών και η σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μεταξύ ινοπλισμένων δοκιμών αλλά και η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αυξομείωση των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα και, τέλος, η εύρεση του βέλτιστου περιεχόμενου ινών στο σκυρόδεμα.

Όλα τα παραπάνω εξετάζονται με στόχο τη διερεύνηση της πιθανής χρήσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος ως μέσο υποστήριξης υπόγειων έργων.

Η εργασία ακολουθεί την παρακάτω διάρθρωση:

Στο κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται εν συντομία οι ιδιότητες του σκυροδέματος που θα μελετηθούν στην εργασία όπως και τα υλικά παρασκευής του σκυροδέματος.

Στο κεφάλαιο 2, γίνεται αναφορά στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, τις ιδιότητές του καθώς και την εφαρμογή του στα υπόγεια έργα. Επίσης, παρουσιάζονται κάποια πιο λεπτομερή στοιχεία για τις χαλύβδινες ίνες που θα χρησιμοποιηθούν.

Στο κεφάλαιο 3, περιγράφεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε και κάθε στάδιο της αναλυτικά, από την προμήθεια των υλικών έως και τις πειραματικές δοκιμές.

Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης και κάμψης με χρήση πινάκων και διαγραμμάτων τόσο για τα άοπλα όσο και για τα ινοπλισμένα δοκίμια.

Στο κεφάλαιο 5, τέλος, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα αλλά και την πειραματική διαδικασία.

Λέξεις-κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, δοκιμή θλίψης, δοκιμή κάμψης, περιεκτικότητα σε ίνες

ABSTRACT

The subject of this thesis is to study the behavior of both unreinforced and reinforced concrete with steel fibers (SFRC-steel fibre reinforced concrete) under uniaxial compression and bending. One type of fiber was used (Inomix) with standard geometric and mechanical characteristics at three different proportions and with random orientation in the concrete.

The purpose was to measure the strength of the specimens and the comparison and evaluation of the results between fiber reinforced specimens and draw conclusions about the variation of the properties of fiber-reinforced compared with unreinforced concrete, and finally , finding the optimum fiber content in concrete.

All the above are discussed on the possible application of fiber reinforced concrete as support measure in underground works .

The study follows the following structure :

In Chapter 1, there are briefly presented the properties of concrete which will be studied and the materials that consist concrete.

In Chapter 2, a reference is made to fiber-reinforced concrete, its properties and its application in underground works . Also, I present some more details on the steel fibers that are used.

In Chapter 3, the followed experimental procedure is presented and every step in detail , from the sourcing of materials until the experimental tests .

In Chapter 4, the results of compression and bending tests are presented and discussed using tables and diagrams for both unreinforced and for the fiber reinforced specimens .

In Chapter 5, finally, conclusions are drawn on the results and the whole experimental procedure.

Key words: fiber reinforced concrete, compression test, bending test, fiber contents

Κεφάλαιο 1 : ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1. Σύσταση και ιδιότητες

Το σκυρόδεμα είναι το τεχνητό υλικό - τεχνητός λίθος που προκύπτει από τη σκλήρυνση ενός μίγματος που αποτελείται από:

- αδρανή υλικά (άμμος, σκύρα κτλ)

- τσιμέντο (συνδετική κονία)

- νερό και

- πρόσθετα

σε κατάλληλες αναλογίες.

Το σκυρόδεμα έχει μεγάλη αντοχή σε θλίψη αλλά αρκετά μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση. Για την παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων στη μάζα του σκυροδέματος ενσωματώνεται χάλυβας υπό τη μορφή ράβδων, πλεγμάτων ή ινών δηλαδή οπλισμός.

1.2. Αντοχές σκυροδέματος

1.2.1. Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η θλιπτική αντοχή μετρούμενη μετά το πέρας 28 ημερών από τη σκυροδέτηση σε κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300mm και διαμέτρου 150mm ή σε κυβικά δοκίμια με διαστάσεις 150x150x150mm σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος συμβολίζεται ως f_c και η μέση θλιπτική αντοχή ως f_{cm} .

Βάση για το σχεδιασμό θεωρείται η χαρακτηριστική αντοχή f_{ck} , κυλινδρικού δοκιμίου ή $f_{ck,cube}$ κυβικού δοκιμίου, η οποία ορίζεται ως η τιμή εκείνη κάτω από την οποία έχει πιθανότητα 5% να βρεθεί η αντοχή ενός τυχαίου δοκιμίου του δείγματος σκυροδέματος, δηλαδή στα 100 δοκίμια που ελέγχονται επιτρέπεται να αστοχήσουν παρουσιάζοντας αντοχή μικρότερη από την προβλεπόμενη μόνο τα 5.

Η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ck} και η μέση θλιπτική αντοχή f_{cm} , εφόσον

ληφθεί υπόψη μια κανονική κατανομή του πλήθους των πειραματικών αποτελεσμάτων και το όριο 5% για τη χαρακτηριστική αντοχή, συνδέονται μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8MPa \quad (1.1)$$

που υποδεικνύει ότι η μέση αντοχή δηλαδή η μέση τιμή των αντοχών δύο ή περισσότερων δοκιμίων από το ίδιο δείγμα σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη της χαρακτηριστικής κατά 1,465 επί την τυπική απόκλιση σ που λαμβάνεται προσεγγιστικά ίση με $5N/mm^2$, ανεξάρτητα από την θλιπτική αντοχή, δηλαδή κατά 8MPa.

1.2.2. Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε εφελκυσμό καθορίζεται από τις τιμές της εφελκυστικής αντοχής του σε αξονικό εφελκυσμό, κάμψη ή διάρρηξη. Συμβολίζεται ως f_{ct} και είναι αρκετά μικρότερη από τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Είναι περίπου το 1/10 της θλιπτικής αντοχής και πιο συγκεκριμένα ο κανονισμός ορίζει ότι η μέση εφελκυστική αντοχή f_{ctm} σε αξονικό εφελκυσμό υπολογίζεται βάσει της χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής ως εξής:

$$f_{ctm} = 0.30f_{ck}^{2/3} \approx \frac{1}{10}f_{ck} \quad \text{για κατηγορίες σκυροδέματος} \leq C50/60 \quad (1.2)$$

$$f_{ctm} = 2.12 \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10} \right) \quad \text{για κατηγορίες σκυροδέματος} > C50/60 \quad (1.3)$$

Για την αντιμετώπιση της αδυναμίας του σκυροδέματος να παραλάβει μεγάλες τιμές εφελκυστικής αντοχής τοποθετούνται στο σκυρόδεμα οπλισμοί από χάλυβα προκειμένου να παραλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις μέσω της συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος.

1.3. Κατηγορίες σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον EC-2: "Σχεδιασμός των κατασκευών από σκυρόδεμα" οι κατηγορίες σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των δομικών έργων είναι οι παρακάτω:

Πίνακας 1: Κατηγορίες σκυροδέματος, αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές και αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό

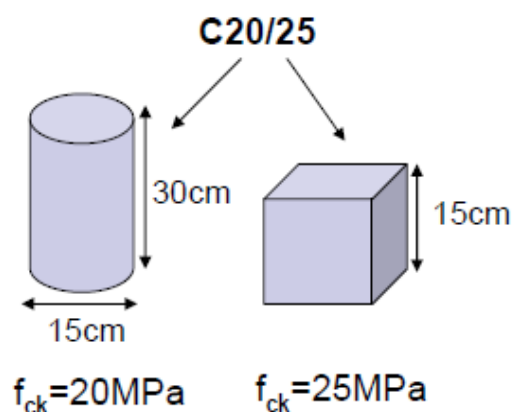
Κατηγορία Σκυροδέματος	$f_{ck,κυλ}$ (MPa)	$f_{ck,κύβου}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)
C12/15	12	15	1,6
C16/20	16	20	1,9
C20/25	20	25	2,2
C25/30	25	30	2,6
C30/37	30	37	2,9
C35/45	35	45	3,2
C40/50	40	50	3,5
C45/55	45	55	3,8
C50/60	50	60	4,1
C55/67	55	67	4,2
C60/75	60	75	4,4
C70/85	70	85	4,6
C80/95	80	95	4,8
C90/105	90	105	5,0

Εκφράζονται μέσω δύο αριθμών εκ των οποίων ο πρώτος κάθε κατηγορίας ορίζει την χαρακτηριστική αντοχή (εκφραζόμενη σε MPa) που διαπιστώνεται όταν ο έλεγχος γίνεται με κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 και ύψους 300 mm δηλαδή την f_{ck} και ο δεύτερος την χαρακτηριστική αντοχή όταν ο έλεγχος γίνεται με κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, δηλαδή την $f_{ck,cube}$ (ηλικία δοκιμίων 28 ημέρες).

Συχνά οι κατηγορίες αναφέρονται παραλείποντας την αντοχή των κυβικών δοκιμίων δηλαδή για

παράδειγμα ως C20 δηλαδή μόνο με τη χρήση του πρώτου αριθμού, της χαρακτηριστικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων που εδώ είναι $f_{ck}=20\text{MPa}$.

Όπως φαίνεται η αντοχή του σκυροδέματος σε αξονικό εφελκυσμό κυμαίνεται μεταξύ 1,6 και 5 MPa ενώ σε κάμψη κυμαίνεται περίπου μεταξύ 3 και 8MPa για τα συνήθη σκυροδέματα.



Εικόνα 1: Παράδειγμα χαρακτηριστικής αντοχής κύβου και κυλίνδρου για σκυρόδεμα C20/25

1.4.Υλικά παρασκευής σκυροδέματος

Τα τρία κυριότερα συστατικά που αποτελούν το σκυροδέμα είναι το τσιμέντο, τα αδρανή και το νερό. Συχνά προστίθενται στο μίγμα και διάφορες χημικές ουσίες για τη βελτιστοποίηση ορισμένων χαρακτηριστικών που λέγονται πρόσθετα.

Ότι και αν χρησιμοποιηθεί πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

1.4.1. Το τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι το κύριο συστατικό του σκυροδέματος που σε ανάμειξη με το νερό αποτελεί το συνδετικό του υλικό των ασβεστολιθικών κυρίως αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα είναι κονία με εξαιρετικές υδραυλικές ιδιότητες καθώς όταν αναμειχθεί με το νερό λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληραίνει σχηματίζοντας προϊόντα αδιάλυτα ακόμα και κάτω από το νερό.

Σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ, από 01/04/01 τα τσιμέντα, που θα παράγονται και θα κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη, πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα, τα οποία είναι:

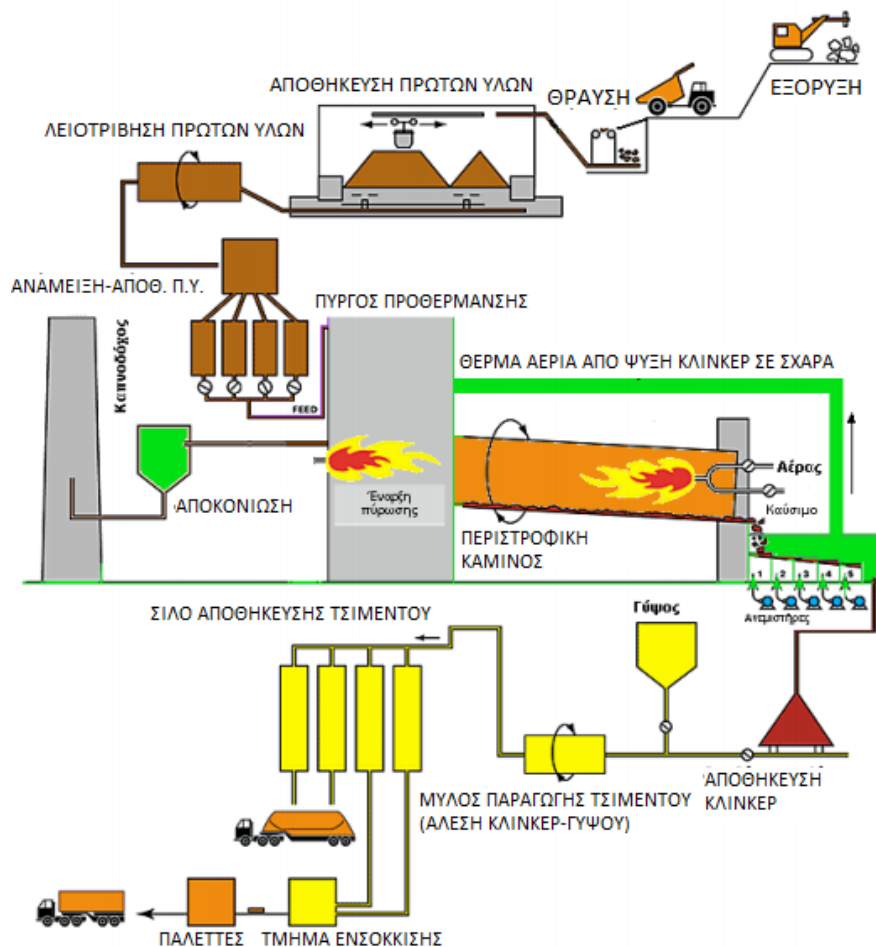
- EN 197-1: Τσιμέντο Μέρος-1 : «Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα» και
- EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος-2 : «Αξιολόγηση συμμόρφωσης» .

1.4.1.1. Παραγωγή

Το τσιμέντο είναι τεχνητή λεπτόκοκκη κονία και είναι το τελικό προϊόν που προκύπτει μετά από όπτηση ασβεστόλιθου και αργίλου. Οι διεργασίες που ακολουθούνται για την παρασκευή του είναι με τη σειρά οι παρακάτω:

- i. Οι πρώτες ύλες που θα χρησιμοποιηθούν εξορύσσονται στα λατομεία. Χωριστά γίνεται η εξόρυξη των πετρωμάτων του ασβεστόλιθου και των αργιλικών εδαφών.

- Στη συνέχεια θραύονται με τη βοήθεια σπαστήρων σε μικρότερα τεμάχια ώστε να αποκτήσουν το κατάλληλο μέγεθος κόκκου δηλαδή μερικά εκατοστά. (**Θραύση**)
- ii. Έπειτα από τη θραύση τους αναμειγνύονται τα δύο υλικά δηλαδή γίνεται **προομοιογενοποίηση**.
 - iii. Στη συνέχεια προκειμένου να αποκτήσουν διάμετρο μερικών χιλιοστών αλέθονται σε μύλους συνάλεσης (**λειοτριβήση**) με ελεγχόμενη δοσολογία και το λεπτόκοκκο πλέον μείγμα ασβεστολιθικής και αργιλικής άμμου αποθηκεύεται σε σιλό και το λειοτριβημένο μείγμα ονομάζεται φαρίνα. Κατά την αποθήκευση συντελείται η **ομογενοποίηση**.
 - iv. Το μείγμα εισάγεται στο επάνω άκρο κυλινδρικής καμίνου (rotary kiln) η οποία περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονα της και στην οποία με χρήση καυσίμων η θερμοκρασία είναι περίπου 600°C στο επάνω άκρο φτάνοντας τους 1500 °C στο κάτω άκρο όπου είναι και το σημείο εξόδου των προϊόντων (**πυροσυσσωμάτωση** ή **κλινκεροποίηση**). Η όλη διαδικασία καταλήγει στην παραγωγή των εκβολάδων ή όπως λέγεται διεθνώς του klinker δηλαδή του προϊόντος που προκύπτει από την όπτηση μίγματος ασβεστολιθικών και αργιλοπυριτικών πετρωμάτων. Έχει διάμετρο λίγων εκατοστών, χρώμα γκριζοπράσινο και αποτελεί κατά κάποιο τρόπο, τα πετρώματα του τσιμέντου.
 - v. Οι εκβολάδες- klinker μετά την **άλεση** τους σε λεπτή σκόνη με την προσθήκη άλλων πρώτων υλών όπως γύψου και ποζολάνης είναι το τελικό προϊόν που ονομάζεται «τσιμέντο Portland».



Εικόνα 2: Αναλυτικό διάγραμμα ροής των διεργασιών παραγωγής τσιμέντου

1.4.1.2. Τύποι τσιμέντων

Βάσει τις σύστασής τους διακρίνονται 27 διαφορετικοί τύποι τσιμέντων. Ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες που είναι διαθέσιμες σε κάθε χώρα που παρασκευάζει τσιμέντο αλλά και βάσει της ζήτησης κάθε τύπου δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που μπορούν να παραχθούν και που επομένως δεν κυκλοφορούν όλοι σε κάθε χώρα. Συνηθέστερος τύπος είναι το τσιμέντο Portland (OPC, Ordinary Portland Cement). Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 προδιαγράφει τους εξής πέντε τύπους:

Πίνακας 2: Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου

ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Κοινό τσιμέντο Portland
CEM II	Σύνθετο τσιμέντο Portland
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

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

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

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

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

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

Τα κύρια δευτερεύοντα συστατικά ή αλλιώς πρόσθετα υλικά (Π.Υ.), που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή σύνθετων τσιμέντων δηλαδή τσιμέντων τύπου II δίνονται παρακάτω με το χαρακτηριστικό κεφαλαίο λατινικό γράμμα που αναφέρεται σε κάθε ένα από αυτά:

Πίνακας 3: Συμβολισμοί συστατικών του τσιμέντου

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ	ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ
D	Πυριτική παιπάλη (silica fume)
K	Κλίνκερ
P	Ποζολάνη φυσική
Q	Ποζολάνη φυσική ψημένη
V	Πυριτική ιπτάμενη τέφρα
W	Ασβεστιτική ιπτάμενη τέφρα
T	Τέφρα καύσης βιτουμενιούχων σχιστολίθων
L, LL	Ασβεστόλιθος
S	Σκωρία υψικαμίνων
M	Μείγμα των παραπάνω

1.4.1.3. Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων

Σήμερα το τσιμέντο χρησιμοποιείται ευρέως στις κατασκευές λόγω της γρήγορης ανάπτυξης θλιπτικής αντοχής που παρουσιάζει αλλά και της συνήθως υψηλής τιμής αυτής. Ανάλογα με το ρυθμό εξέλιξης της σκλήρυνσης δηλαδή το ρυθμό που το σκυρόδεμα αναπτύσσει την αντοχή του στο χρόνο διακρίνουμε 4 τύπους:

- βραδείας σκλήρυνσης (SL), στα οποία η πήξη αρχίζει μετά από 8 ώρες
- κανονικά (N), για τη σκυροδέτηση δομικών στοιχείων μεγάλων διαστάσεων με χρόνο πήξης που κυμαίνεται από 6 έως 8 ώρες,
- ταχείας σκλήρυνσης (R), στα οποία η πήξη γίνεται σε διάστημα μικρότερο της μισής ώρας και χρησιμοποιούνται όταν υπάρχουν απαιτήσεις για γρήγορη απομάκρυνση των ξυλοτύπων και για σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες και
- ταχείας σκλήρυνσης και υψηλής αντοχής (RS).

Τα τσιμέντα με κανονικό (N) και ταχύ (R) ρυθμό σκλήρυνσης κατατάσσονται σε 6 κατηγορίες αντοχών ανάλογα με τη θλίψη κονιάματος πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής, σε ηλικία 28 ημερών και τις απαιτήσεις της πρώτης αντοχής τους μετά την παρέλευση 2 ημερών, και 7 ημερών για την κατηγορία 32,5N (σύμφωνα με τα πρότυπα EN 197-1 και 197-2). Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτατο και ένα ανώτατο όριο αντοχής όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Κατηγορίες αντοχών τσιμέντων

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή σε θλίψη, MPa (N/mm ²)			Αρχικός χρόνος πήξης min	Διόγκωση Διαστολή) mm
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή (όρια)		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5	≤ 10
32.5 R	≥ 10.0	-			
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5	
42.5 R	≥ 20.0	-			
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	
52.5R	≥ 30.0	-			

Οι αριθμοί 32.5, 42.5, 52.5 παριστάνουν όπως φαίνεται στον πίνακα την αντοχή των τσιμέντων σε MPa. Ο ρυθμός αυξήσεως της αντοχής του τσιμέντου επιτυγχάνεται συνήθως με αύξηση της λεπτότητας δηλαδή του Blaine. Ένα λεπτόκοκκο τσιμέντο με τιμή Blaine=4000 cm²/g έχει γρηγορότερο ρυθμό αυξήσεως της αντοχής από ένα χονδροαλεσμένο τσιμέντο (Blaine=2500-3000 cm²/g). Θεωρητικά οι τύποι των τσιμέντων θα ήταν 9, ωστόσο οι παραγόμενοι είναι λιγότεροι γιατί είτε δεν είναι όλοι οι συνδυασμοί πρακτικά εφικτοί, είτε δεν είναι απαραίτητοι.

Συμπερασματικά προκύπτει ο ακόλουθος συμβολισμός για τα διάφορα τσιμέντα όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα και καθορίζεται από τα εξής:



1. τον κύριο τύπο τσιμέντου (I, II, III, IV, V)
2. το ποσοστό klinker που περιέχεται στο τσιμέντο (A, B ή C)
3. τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού (π.χ. S = Slag, σκωρία)
4. την κατηγορία αντοχής (ελάχιστη 32.5, 42.5, 52.5 MPa)
5. το επίπεδο της πρώιμης αντοχής (N ή R)

Οι συνηθέστεροι τύποι τσιμέντου που χρησιμοποιούνται στην ελληνική αγορά για την παρασκευή έτοιμου σκυροδέματος είναι οι παρακάτω:

- CEM III/B-M 32,5N και CEM IV/B 32,5N
- CEM II/42,5N δηλαδή υψηλής αντοχής
- CEM I/42,5N , CEM I/42,5R δηλαδή το «καθαρό» τσιμέντο
- Το τσιμέντο SR με ονομαστική αντοχή 55MPa, τύπου IV
- Το λευκό τσιμέντο με κατηγορία αντοχής 52,5MPa

1.4.2. Αδρανή υλικά

Τα αδρανή υλικά είναι το κύριο συστατικό του σκυροδέματος καθώς αποτελούν το 60 με 80% του όγκου του σκυροδέματος. Είναι μεν το φθινό συστατικό, αλλά έχουν πολύ ικανοποιητικές βασικές ιδιότητες όπως η μηχανική αντοχή, ανθεκτικότητα σε διάρκεια και περιβαλλοντικές επιδράσεις (χημικές ουσίες, υγρασία, κύκλους ζέστης και παγωνιάς, υψηλές θερμοκρασίες), σταθερότητα όγκου και υδατοστεγανότητα (Smith, 2001). Η ονομασία προέρχεται από το γεγονός ότι από χημική άποψη είναι αδρανή προς το τσιμέντο διότι δεν συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης.

Γενικά ως αδρανή ορίζονται τα κοκκώδη υλικά που προκύπτουν από την επεξεργασία φυσικών ή βιομηχανικά παρασκευασμένων ή και ανακυκλωμένων υλικών που έχουν ξηρή πυκνότητα μμεγαλύτερη από 2,0 kg/m³.

1.4.2.1. Προέλευση αδρανών

Τα αδρανή υλικά των σκυροδεμάτων (άμμος,χαλίκι,γαρμπίλι σκύρα) είναι:

- φυσικά ή συλλεκτά, αποτελούμενα από λίθινους κόκκους που προέρχονται από τη φύση (ποτάμια, παραλίες κτλ) είτε
- θραυστά δηλαδή να έχουν προέλθει από θραύση κατάλληλων όγκων πετρώματος ή φυσικών αδρανών είτε
- τεχνητά αδρανή που προέρχονται από επεξεργασία βιομηχανικών προϊόντων όπως η σκωρία υψικαμίνων, η διογκωμένη άργιλος, ο διογκωμένος σχιστόλιθος, κουρασάνι, μπεντονίτης, περλίτης κ.α.. Σήμερα χρησιμοποιούνται και τεχνητά αδρανή υλικά που προέρχονται από ραδιενεργά απόβλητα. Τα ραδιενεργά

απόβλητα από αντιδραστήρες ή οπλικά συστήματα ψήνονται σε υψηλή θερμοκρασία και το υλικό μετατρέπεται σε αδρανές μη ραδιενεργό.

- Πρόσφατα εισήχθη και η έννοια των ανακυκλούμενων αδρανών που περιλαμβάνεται στον Ευρωπαϊκό Κανονισμό ΕΛΟΤ 12620 όπως η ιπτάμενη τέφρα λιγνιτών και κυρίως τα αδρανή υλικά από κατεδαφίσεις κτιρίων.

1.4.2.2. Προδιαγραφές για τα αδρανή υλικά

Η καταλληλότητα των αδρανών υλικών προδιαγράφεται από το Πρότυπο ΕΛΟΤ-408 και του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος 97 ενώ σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές από το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 12620.

Σύμφωνα με τα πρότυπα τα αδρανή που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι (Λιτίνας,2008) :

- ✓ σταθερά ώστε να μην θρυμματίζονται εύκολα
- ✓ ανθεκτικά δηλαδή να προέρχονται από σκληρά πετρώματα με θλιπτική αντοχή τουλάχιστον 65 MPa (ΕΛΟΤ 408) (γρανίτες και ασβεστόλιθοι). Ο ΚΤΣ 97 προβλέπει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μικρότερης αντοχής (45-65MPa) εφόσον αποδειχθεί ότι επιτυγχάνεται η απαιτούμενη θλιπτική αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος για το έργο που προορίζονται. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμα και αδρανή από μητρικό πέτρωμα με αντοχή μικρότερη από 45 MPa μόνο για την παρασκευή σκυροδέματος που η επιφάνεια του πρόκειται να επιχριστεί, καθότι με τέτοια αδρανή η αντοχή της επιφάνειας του σκυροδέματος σε φθορά από τη χρήση και σε κρούση είναι αμφίβολη.
- ✓ καθαρά και απαλλαγμένα από φυτικές και άλλες επιβλαβείς προσμίξεις (πυλό, άνθρακες, άργιλο, θειικά, θειούχες και οργανικές ενώσεις, τεμάχια οπτής άσβестου, εύθραυστα τεμάχια, ξύλα, ρίζες, χαρτόνια, κ.λπ.) και παντός ξένου υλικού ή σώματος που παρεισφρεί κατά την συγκέντρωσή τους σε σωρούς για αποθήκευση.
- ✓ σταθερά στις καιρικές αλλαγές (μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας)
- ✓ απαλλαγμένα από παιπάλη με διάμετρο μικρότερη από 0,075 mm
- ✓ Καλά διαβαθμισμένα με διαστάσεις κόκκων που να καλύπτουν όλο το φάσμα ώστε να παρουσιάζουν λίγα κενά, να απαιτούν μικρότερη ποσότητα συνδετικού ιστού και να παρουσιάζουν καλύτερη συνεκτικότητα και εργασιμότητα.

- ✓ Δεν πρέπει να προέρχονται από πετρώματα με συστατικά που περιέχουν: οπάλιο, ανδεσίτη, ρυόλιθο και δολομίτες γιατί προκαλούν διόγκωση και ζεόλιθους λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου.

1.4.2.2.1. Μορφή και μέγεθος των κόκκων

Οι κόκκοι των αδρανών μπορεί να είναι από άποψη μορφής σφαιρικοί, κυβικοί, γωνιώδεις, πλακοειδείς ή επιμήκεις. Από πλευράς εργασιμότητας καλύτεροι είναι οι σφαιρικοί ή κυβικοί κόκκοι ενώ από πλευράς μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος οι κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια. Δηλαδή, συνολικά, καλύτερα είναι τα θραυστά αδρανή με κόκκους που δεν είναι επιμήκεις και πλακοειδείς.

Τα αδρανή για σκυρόδεμα κατατάσσονται σε 4 βασικές κατηγορίες ανάλογα με το μέγεθός τους και εκφράζονται με ένα κατώτερο (d) και ένα ανώτερο (D) μέγεθος κόσκινου όπως προκύπτουν από κατάλληλη κοκκομετρική διαβάθμιση δηλαδή ως d/D (mm) όπως φαίνονται παρακάτω:

- 1) Άμμος (0-4mm): δηλαδή τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους d , ικανοποιεί τη σχέση $0 \leq d < 4$ mm και συμβολίζονται με (0/4)
- 2) Ρυζάκι (4-8mm) : δηλαδή το τμήμα των αδρανών που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $4 \leq d < 8$ mm και συμβολίζονται με (4/8)
- 3) Γαρμπίλι (8-16mm): στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $8 \leq d < 16$ mm και συμβολίζονται με (8/16).
- 4) Χαλίκι (16-31,5mm): ή αλλιώς σκύρα που είναι τα αδρανή που η διάμετρος των κόκκων τους ικανοποιεί τη σχέση $16 \leq d < 31,5$ mm και συμβολίζονται με (16/31,5).

Ουσιαστικά, το d είναι η ελάχιστη διάμετρος κόκκων που συμπεριλαμβάνονται στην εκάστοτε κατηγορία και D η μέγιστη και προκύπτουν από τα κόσκινα που συμπεριλαμβάνονται στην κοκκομετρική ανάλυση.

1.4.3. Το νερό

Μεγάλο ποσοστό του σκυροδέματος καταλαμβάνει το νερό αναμείξεως τσιμέντου και αδρανών. Επίσης, αρκετό νερό χρησιμοποιείται και για τη συντήρηση του σκυροδέματος.

Το νερό που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να είναι καθαρό και απαλλαγμένο από επιβλαβείς ουσίες, δηλαδή να μην περιέχει ελεύθερα οργανικά ή ανόργανα οξέα, οργανικές ουσίες και αιώρημα αργίλου, διαλυτά σάκχαρα σε περιεκτικότητα μεγαλύτερη του 0,25%, θειικά και χλωριούχα άλατα κλπ. που μπορεί να προκαλέσουν μείωση της αντοχής του σκυροδέματος ή διάβρωση του οπλισμού. Δηλαδή θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις του προτύπου ΕΛΟΤ-345 και του άρθρου 4.4 του ΚΤΣ-97.

Κατάλληλο θεωρείται το νερό των δικτύων ύδρευσης που είναι πόσιμο χωρίς να γίνεται ιδιαίτερος έλεγχος καθώς και το νερό των γεωτρήσεων αφού ελεγχθεί. Θαλασσινό νερό πρέπει γενικά να αποφεύγεται κυρίως λόγω των αλάτων που περιέχει εκτός και αν αυτό επιτρέπεται από τη φύση του έργου και τη σύμβαση αυτού, ενώ απαγορεύεται ρητά για την παραγωγή προεντεταμένου σκυροδέματος. Επίσης προβλέπεται ότι μπορεί να γίνει χρήση θαλασσινού νερού για την παραγωγή άοπλου φέροντος σκυροδέματος μόνον εφόσον η απαιτούμενη αντοχή του αυξηθεί κατά 15%.

1.4.3.1. Λόγος Νερού-Τσιμέντου

Η αναλογία του βάρους του νερού W (water) προς το βάρος του τσιμέντου C (cement) δηλαδή ο συντελεστής νερού-τσιμέντου (W/C) στο μίγμα είναι καθοριστικός παράγοντας επίτευξης των επιθυμητών αντοχών στο σκυρόδεμα. Αυτό συμβαίνει διότι η παρουσία κενών στον τσιμεντοπολτό επηρεάζει καθοριστικά την αντοχή του. Τα κενά αυτά μπορεί να δημιουργηθούν είτε από αέρα ο οποίος έχει παγιδευτεί στον τσιμεντοπολτό είτε από πλεονάζον νερό το οποίο δεν ήταν απαραίτητο για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου και δεν απομακρύνθηκε.

Ο λόγος νερού προς τσιμέντο καθορίζεται από διάφορους παράγοντες που εξαρτώνται από την απαιτούμενη αντοχή του σκυροδέματος, από το είδος του σκυροδέματος που σχεδιάζεται να παραχθεί και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος οι οποίες αναμένεται να επικρατήσουν μετά τη διάστρωσή του.

Όταν αναφερόμαστε στην ποσότητα του νερού πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η υγρασία των αδρανών και το νερό που προστίθεται κατά την ανάμειξη των στερεών υλικών.

Όσο αυξάνεται στο μίγμα η ποσότητα νερού που εξατμίζεται δηλαδή για μεγάλες τιμές του λόγου νερού-τσιμέντου τόσο περισσότεροι πόροι σχηματίζονται με αποτέλεσμα τη μείωση της ανθεκτικότητάς του. Ενώ όταν ο λόγος W/C είναι πολύ μικρός, το τσιμέντο δεν ενυδατώνεται σωστά με αποτέλεσμα να αναπτύσσει ανεπαρκείς αντοχές.

Γενικά, λιγότερο νερό συνεπάγεται μεγαλύτερες αντοχές και περισσότερο νερό σημαίνει υψηλότερη εργασιμότητα (ρευστότητα). Ωστόσο, ενώ γενικά ο λόγος κυμαίνεται συνήθως από 0,35 έως 0,70 για κατασκευές έργων από σκυρόδεμα, έχει παρατηρηθεί ότι η άριστη αναλογία W/C κυμαίνεται μεταξύ 0,4 για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και 0,5 για σκυροδέματα χαμηλότερης αντοχής. Επίσης παρατηρείται ότι, ενώ μια απόκλιση προς τα επάνω από το άριστο ποσοστό κατά 10% συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 15% περίπου, μια ίση απόκλιση προς τα κάτω, συνεπάγεται μείωση της αντοχής του σκυροδέματος κατά 30% περίπου. Είναι επομένως συνετό, κατά την επιδίωξη της βέλτιστης αναλογίας νερού να παραμένει κανείς πάντοτε για λόγους ασφαλείας προς τα επάνω, παρά να κινδυνεύει η ποσότητα νερού να είναι μικρότερη της βέλτιστης με συνέπεια να υποστεί αλματώδη πτώση η αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος.

1.4.3.2. Προσδιορισμός μέγιστου λόγου W/C

Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα ο λόγος του νερού προς το τσιμέντο (W/C) στο μίγμα του σκυροδέματος είναι καθοριστικός παράγοντας ο οποίος εξαρτάται από την απαιτούμενη αντοχή του σκυροδέματος, από το είδος του σκυροδέματος που σχεδιάζεται να παραχθεί και από τις συνθήκες του περιβάλλοντος οι οποίες αναμένεται να επικρατήσουν μετά τη διάστρωσή του.

Όσον αφορά τις συνθήκες του περιβάλλοντος, το πρότυπο του ΕΛΟΤ EN 206-1 τις κατηγοριοποιεί ως τάξεις έκθεσης, τις οποίες ορίζει ανάλογα με την περιοχή χρήσης του σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν εφαρμογή προστατευτικών μέτρων, χρήση ανοξειδώτου χάλυβα ή άλλου μετάλλου με αντοχή σε διάβρωση και χρήση προστατευτικών βαφών για το σκυρόδεμα ή τον οπλισμό.

Οι τάξεις έκθεσης ορίζουν την ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο, την ελάχιστη κατηγορία αντοχής αλλά και το μέγιστο λόγο νερού τσιμέντου W/C ή N/T όπως φαίνεται στον πίνακα 5, ανάλογα αν το σκυρόδεμα είναι σε:

- Εσωτερικό/εξωτερικό χώρο
- Περιβάλλον διαβρωτικό με χλωριόντα, σε θαλάσσιο περιβάλλον
- Περιβάλλον με κίνδυνο παγοπληξίας
- Περιβάλλον με κίνδυνο από ενανθράκωση
- Περιβάλλον με κίνδυνο από δράση θεικών

Κατηγορίες Έκθεσης																														
	Κατηγορία Έκθεσης	Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης						Διάβρωση λόγω χλωριόντων									Προσβολή από ψύξη/απόψυξη				Χημική Προσβολή			Τριβή/Απότριψη					
									Θαλασσινό νερό						Χλωριόντα που δεν προέρχονται από το θαλασσινό νερό															
									Τσιμέντα II,III,IV (Εκτός B-LL)			Τσιμέντα I(+II/B-LL)																		
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XT1	XT2	XT3						
1	Max N/T	-	0.65	0.60	0.55	0.50	0.50	0.50	0.45	0.50	0.50	0.45	0.55	0.50	0.45	0.55	0.55	0.50	0.55	0.50	0.45	0.50	0.45	0.40						
2	Min κατηγορία αντοχής	C12/15	C20/25	C25/30	C25/30	C30/37	C25/30	C26/32	C25/30	C26/32	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C32/40	C35/45	C20/35	C25/30	C32/40	C25/30	C35/45	C30/37	C20/35	C30/37	C35/45	C35/45	C40/50	C50/60	
3	Min περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m ³	-	280	300	300	320	330	330	330	330	350	330	330	350	330	330	350	320	300	320	300	320	320	320	320	340	360	320	340	360
4	Min επικάλυψη για ανθεκτικ. mm		25	25	35	35	45	40	45	40	50	40	40	50	35	40	50								35	35	35			
5	Min περιεκτικότητα σε αέρα	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0	-	4.0	-	4.0	-	-	-	-	-	-	
6	Άλλες απαιτήσεις	Άοπλο Σκυρόδεμα					Παραθαλάσσιο	Μόνιμα μέσα στη θάλασσα	Διαβρεχόμενες ζώνες									Αδρανή σύμφωνα με prEN12620: 2000 με ικανοπ. Αντοχή σε παγετό					Τσιμέντο ανθεκτικό σε θειικά	LA=27	LA=25	LA=22				

Πίνακας 5: ΕΛΟΤ EN206-1 Ε.Π.ΣΤ.1- Οριακές τιμές σύνθεσης, ιδιοτήτων σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα

1.4.4. Πρόσμικτα σκυροδέματος

Τα πρόσμικτα σκυροδέματος είναι χημικά λεπτόκοκκα υλικά τα οποία προστίθενται στο μίγμα του σκυροδέματος κατά τη φάση της ανάμιξης με σκοπό να βελτιώσουν, μέσω φυσικοχημικής αντίδρασης, ορισμένα χαρακτηριστικά του ή ακόμα για να προσδώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες στο νωπό ή στο σκληρυμένο σκυρόδεμα. Η κατά όγκο αναλογία τους είναι πολύ μικρή και σε σύγκριση με τα λοιπά συστατικά του σκυροδέματος τα πρόσθετα έχουν σημαντικό ανά μονάδα βάρους ή όγκου κόστος.

Η χρήση τους γίνεται σύμφωνα με το άρθρο 4.5 του ΚΤΣ-97 και των ειδικών προδιαγραφών ΣΚ-307, ΣΚ-308, ΣΚ-316 του ΚΕΔΕ/ΥΠΕΧΩΔΕ και του προτύπου ΕΛΟΤ EN 934-2.

Κατηγορίες πρόσμικτων υλικών

Τα πρόσμικτα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες και προστίθενται στο σκυρόδεμα για να βελτιώσουν κάποια από τις ιδιότητές του:

- ❖ Ρευστοποιητικά ή υπερρευστοποιητικά: για τη μείωση της ποσότητας του νερού με συνέπεια και την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος και τη βελτίωση της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος. Ορίζονται από τις προδιαγραφές ΣΚ-308 και ΣΚ-316.
- ❖ Επιταχυντικά της πήξης: για σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες σύμφωνα με την ειδική προδιαγραφή ΣΚ-308.
- ❖ Επιβραδυντικά της πήξης: για να βελτιώσουν – αυξήσουν τον χρόνο πήξης και για σκυροδέτηση σε πολύ ζεστό καιρό. Προστίθενται μόνο στον αναμεικτήρα και η χρήση τους γίνεται σύμφωνα με την ειδική προδιαγραφή ΣΚ-308.
- ❖ Αερακτικά: που αναπτύσσουν στη μάζα του σκληρυμένου σκυροδέματος μικροσκοπικές (0,02-0,2 mm) φυσαλίδες με σκοπό την αύξηση του ποσοστού αέρα στο σκυρόδεμα και άρα της ανθεκτικότητάς του σε κύκλους ζέστης- παγετού. Χρησιμοποιούνται σύμφωνα με την ειδική προδιαγραφή ΣΚ-307.
- ❖ Στεγανοποιητικά: χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την υδατοπερατότητα του σκυροδέματος.
- ❖ Αναστολείς διάβρωσης: σκοπός τους είναι να εμποδίσουν τη διάβρωση του χάλυβα.

Τα παραπάνω προστίθενται με το νερό ανάμιξης ή απευθείας στο μίγμα σε δοσολογίες 0,2-0,4% κατά βάρος τσιμέντου για τα επιβραδυντικά/αερακτικά είτε 0,5-1,2% κτ.β. τσιμέντου, 0,5-1,2% για υπερρρευστοποιητικά. Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής αντοχής που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρρευστοποιητικά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι η επίδρασή τους στην ρευστότητα του μίγματος κατά κανόνα εξαφανίζεται μετά από 20-30 λεπτά από την προσθήκη τους στο μίγμα. Για τον λόγο αυτό, αν η ανάμιξη των υλικών του σκυροδέματος γίνεται σε εργοστάσιο ετοιμού σκυροδέματος και ακολουθεί μεταφορά στο έργο σε αυτοκίνητο-αναμικτήρα, ένα μέρος ή και το σύνολο του υπερρρευστοποιητικού χρειάζεται να προστίθεται στο μείγμα όχι στο εργοστάσιο παραγωγής αλλά επιτόπου το έργου, λίγο πριν τη σκυροδέτηση.

1.4.5. Πρόσθετα σκυροδέματος

Τα πρόσθετα σκυροδέματος είναι λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία προστίθενται στο σκυρόδεμα εν γένει σε αρκετά μεγάλες αναλογίες (περίπου 5-20%). Χρησιμοποιούνται για να βελτιώσουν ή να προσδώσουν συγκεκριμένες ιδιότητες στο νωπό και / ή στο σκληρυμένο σκυρόδεμα.

Το Πρότυπο EN 206-1 περιλαμβάνει 2 τύπους ανόργανων προσθέτων σκυροδέματος:

Τύπος I:

Πρακτικά ανενεργά υλικά, όπως ασβεστολιθική πούδρα, χαλαζιακή σκόνη και χρωστικές ουσίες.

- Χρωστικές ουσίες που προστίθενται για να χρωματίσουν το σκυρόδεμα σε ποσοστά της τάξης του 0,5-5% κατά βάρος τσιμέντου.
- Πούδρα αδρανών (φίλερ): χαλαζιακή είτε ασβεστολιθική πούδρα που στην πλειοψηφία της διέρχεται από το κόσκινο με οπή 0,063mm. Τα φίλερ προστίθεται προκειμένου να βελτιώσουν την περιεκτικότητα σε λεπτά αδρανή δηλαδή για βελτίωση της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών. Τα φίλερ σε μικρές ποσότητες επιδρούν ευνοϊκά στο εργάσιμο και την υδατοπερατότητα.

Τύπος II

Ποζολανικά ή λανθάνοντα υδραυλικά υλικά, όπως φυσικές ποζολάνες, ιπτάμενες τέφρες και πυριτική πούδρα.

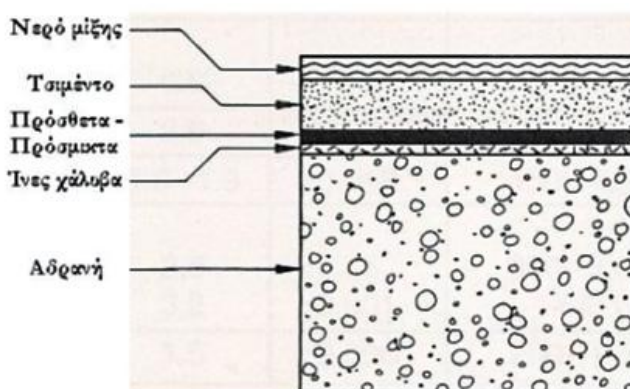
- Ποζολάνες: πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά που έχουν την δυνατότητα να ενώνονται με την υδράσβεστο Ca(OH)_2 και να σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις, που με το χρόνο σκληραίνουν και αποκτούν μικρές ή μεγαλύτερες αντοχές. Η δράση αυτή οφείλεται κυρίως στο άμορφο πυριτικό υλικό των ποζολανών. Για να χρησιμοποιηθεί μια ποζολάνη για την παρασκευή τσιμέντων τύπου II ή III πρέπει να ικανοποιεί την δοκιμή δραστηριότητας που προβλέπει ο Κανονισμός, δηλαδή να παρουσιάζει συμβατική αντοχή τουλάχιστον 5MPa. Στην Ελλάδα υπάρχουν ηφαιστιογενείς γαίες με ποζολανικές ιδιότητες σε πολλές περιοχές, όπως η Θήρα (θηραϊκή γη), η νήσος Μήλος (Μηλαϊκή γη), τα νησιά Γιαλί και Νίσυρος των Δωδεκανήσων, στο νομό Πέλλας και αλλού.
- Ιπτάμενη τέφρα: είναι στάχτη που προέρχεται από σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών. Η σύνθεσή της εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του γαιάνθρακα, την προέλευση και τις συνθήκες καύσης του.
- Πυριτική πούδρα ή πυριτική παιπάλη (Silica Fume - SF) χρησιμοποιείται για σκυρόδεμα με απαιτήσεις υψηλών αντοχών, αυξημένη στεγανότητα, βελτιωμένη αντλησιμότητα και για βελτιωμένη αντοχή σε θεικά καλύπτοντας τις σημερινές απαιτήσεις εκτοξευόμενου σκυροδέματος, βοηθώντας επίσης στην αγκύρωση των ινών. Αποτελείται κυρίως από σφαιρικά σωματίδια άμορφου διοξειδίου του πυριτίου προερχόμενα από την παραγωγή πυριτίου και κραμάτων πυριτίου. Έχει ειδική επιφάνεια περίπου 18-25 m² ανά γραμμάριο και αποτελεί μια πολύ ισχυρής δραστηριότητας ποζολάνη. Τυπικές δοσολογίες πυριτικής παιπάλης κυμαίνονται μεταξύ 5% έως 10% μέγιστα κατά βάρος τσιμέντου.

Κεφάλαιο 2 : ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Fiber Reinforced Concrete- FRC) ορίζεται το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες σε διασπορά, με τυχαίο προσανατολισμό (Αμερικανικό ινστιτούτο σκυροδέματος, ACI 116R).

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

Αποτελείται από τα συστατικά του συμβατικού σκυροδέματος δηλαδή από τσιμέντο, αδρανή, νερό και πρόσθετα με την προσθήκη ινών. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου. Ειδικά οι ίνες χάλυβα χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

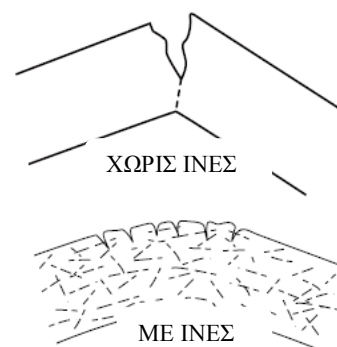


Εικόνα 3: Σύνθεση ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maidl 1995)

2.1. Ιδιότητες Ινοπλισμένου σκυροδέματος

Ο κύριος ρόλος των ινών που προστίθενται στο μίγμα είναι να ελέγξουν το άνοιγμα και τη διάδοση των ρωγμών στο σκυρόδεμα. Οι ενιαίες ρωγμές αντικαθίστανται με πυκνά συστήματα μικρορωγμών, τα οποία χάρη στις ίνες μπορούν να είναι αποδεκτά από άποψη ασφαλείας και διάρκειας. Επίσης η χρήση ινών επηρεάζει την ολκιμότητα καθώς και τη δυναμική ενέργεια που δέχεται το υλικό κατά τη φόρτισή του.

Βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι ίνες προσδίδουν στο



Εικόνα 4: Μηχανισμός αύξησης της πλαστιμότητας κάμψης του σκυροδέματος με χρήση ινών

σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνει χώρα η σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.

Ειδικότερα το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει, σε σχέση με το άοπλο, τις παρακάτω ιδιότητες:

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

2.2.Πεδίο εφαρμογής

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

- ❖ Τελική επένδυση σηράγγων, μόνιμη ή προσωρινή υποστήριξη
- ❖ Σταθεροποίηση και επένδυση πρανών
- ❖ Μεταλλεία, κυρίως για έργα ανάπτυξης
- ❖ Στοές διερεύνησης, αποστράγγισης και αποχέτευσης
- ❖ Επενδύσεις υδραυλικών έργων και πισίνες
- ❖ Υποστήριξη θεμελιώσεων
- ❖ Πάσσαλοι θεμελιώσεως
- ❖ Κατασκευή αρχιτεκτονικών πετασμάτων, ηχοπετασμάτων, αναπλάσεις κοινόχρηστων χώρων, κατασκευή κατοικιών
- ❖ Υποδομή σιδηροδρόμων, οδικών δικτύων, οδοστρωσία, αεροδιάδρομοι

- ❖ Κατασκευή υλικών ανθεκτικών σε δυναμικές φορτίσεις και ανατινάξεις
- ❖ Προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος
- ❖ Βιομηχανικά, λιμενικά δάπεδα, φράγματα, κανάλια
- ❖ Υδροηλεκτρικά έργα, πυρηνικοί αντιδραστήρες, φούρνοι καύσης (θερμομονωτική επένδυση)
- ❖ Εγκαταστάσεις αποθήκευσης απορριμμάτων

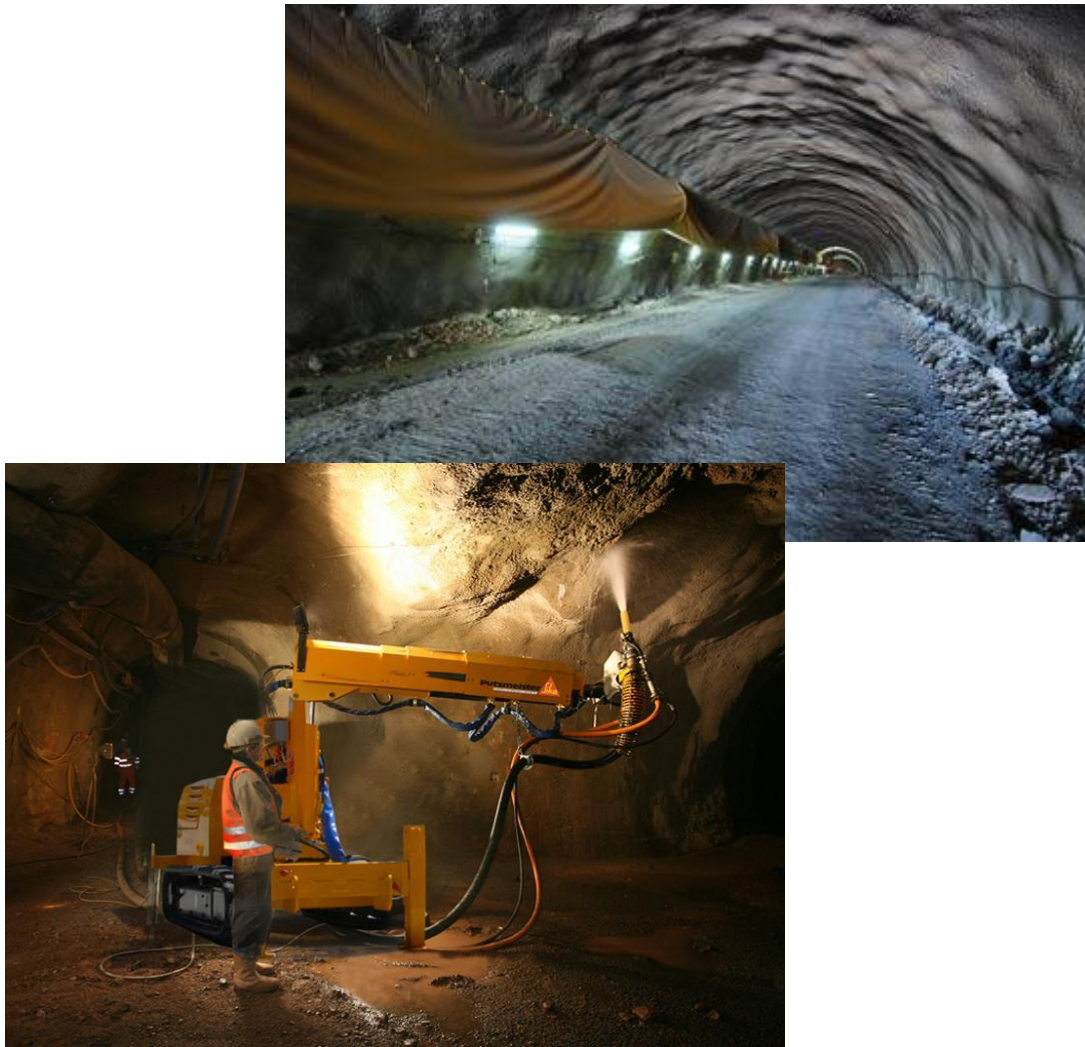
Επιπλέον, ευρέως χρησιμοποιείται και σε επισκευές έργων από σκυρόδεμα ή ακόμη και μεταλλικές κατασκευές, όπως:

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

2.2.1. Εφαρμογή στα Υπόγεια Έργα

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

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



Εικόνα 5: Χρήσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος για υποστήριξη σηράγγων

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

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



Εικόνα 6: Σήραγγα επενδεδυμένη με ινοπλισμένα προκατασκευασμένα στοιχεία

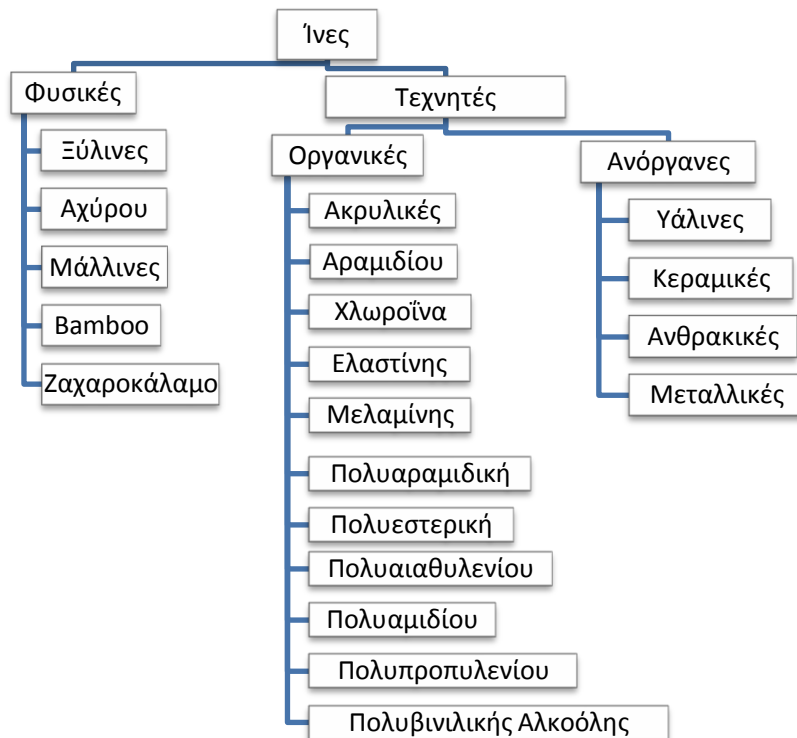
2.3. Είδη ινών

Οι ίνες που χρησιμοποιούνται κατηγοριοποιούνται είτε ανάλογα με το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται είτε ανάλογα με το σχήμα και το μέγεθός τους.

Όσον αφορά το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται, για τον οπλισμό του σκυροδέματος επικρατούν οι χαλύβδινες ίνες. Ωστόσο υπάρχουν πολλά ακόμη υλικά που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ινών όπως γυαλί, κεραμικές και συνθετικές ίνες οι οποίες χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ινοπλισμένου σκυροδέματος για συγκεκριμένες χρήσεις. Αρκετά διαδεδομένες είναι οι ίνες πολυπροπυλενίου, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και της χημικής τους αδράνειας. Οι ίνες γυαλιού (E) είναι αρκετά διαδεδομένες και είναι επίσης χαμηλού κόστους, αλλά βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι προσβάλλονται από το αλκαλικό περιβάλλον του σκυροδέματος. Περισσότερο ανθεκτικές στο περιβάλλον αυτό είναι οι ίνες γυαλιού (AR) που όμως κοστίζουν αρκετά παραπάνω.

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

Οι κύριοι τύποι ίνας που υπάρχουν είναι αυτοί που φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 1: Τα είδη των ινών

Τυπικές ιδιότητες για διάφορες τεχνητές ίνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 6: Τυπικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών (9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003)

Ίνες	Διάμετρος (μm)	Μέγεθος (mm)	Πυκνότητα (kg/m ³ *10 ³)	Μέτρο 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. χάλυβας	10-330	10-60	7,86	160	0,28	2100	3	0,5-2
Πολυπροπυλεν.	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 fi	9	10-50	1,90	230	0,35	2600	1,2	2-12
Νάιλον	5-200	5-50	1,14	1-5	0,40	750-900	16-20	0,1-6
Ξύλο	100-5000	5-50	1,5	50-75	0,2-0,4	700-1000	1-2	2-4

Το είδος της ίνας που τελικά επιλέγεται σε κάθε κατασκευή για να ενισχύσει το σκυρόδεμα εξαρτάται κάθε φορά από την φύση του έργου στο οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί. Η επιλογή αυτή βασίζεται στο κόστος των ινών, τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες, την αποτελεσματικότητα και τη διαθεσιμότητά τους στην αγορά. Ειδικού τύπου ίνες, όπως ανθρακικές ή φυσικές μπορεί να χρησιμοποιηθούν για έργα με ιδιαίτερες προδιαγραφές.

Πίνακας 7: Διάφορα είδη ινών και εφαρμογές τους

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

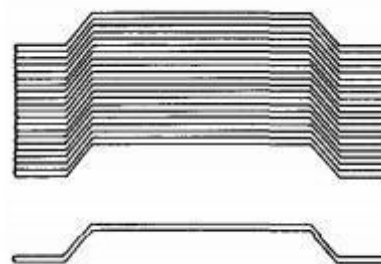
*δεν χρησιμοποιείται πλέον

2.3.1. Χαλύβδινες ίνες

Ο πιο συνηθισμένος τύπος ίνας που χρησιμοποιείται ως προς το υλικό κατασκευής είναι από χάλυβα. Αυτό συμβαίνει λόγω της ευρείας διάδοσης του χάλυβα σαν συμβατικό οπλισμό σκυροδέματος και της επακόλουθης γνώσης και εμπειρίας που υπάρχει στο υλικό αυτό αλλά και λόγω του μικρού κόστους και της ευκολίας παραγωγής τους. Επίσης σημαντικό ρόλο έχει και η άμεση διαθεσιμότητα του χάλυβα.

Όσον αφορά το σχήμα τους μπορεί να είναι:

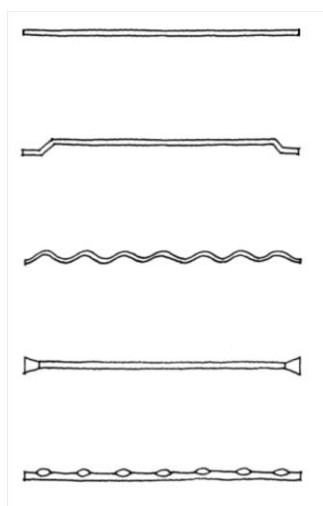
- επίπεδες
- με γαντζωτά άκρα,
- κυματοειδείς
- με κωνικά άκρα
- πτυχωτές, με τομή κυκλική, τετραγωνική ή ακανόνιστη



Εικόνα 7: Ίνες με γαντζωτά άκρα

Ο λόγος που οδήγησε στην παραγωγή ινών με διαφορετική γεωμετρία είναι ότι οι απλές επίπεδες ίνες, που προφανώς είναι και οι πιο εύκολες να παραχθούν, δεν εξασφαλίζουν την μέγιστη δυνατή αντοχή στο σκυρόδεμα διότι δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ αυτού και των ινών.

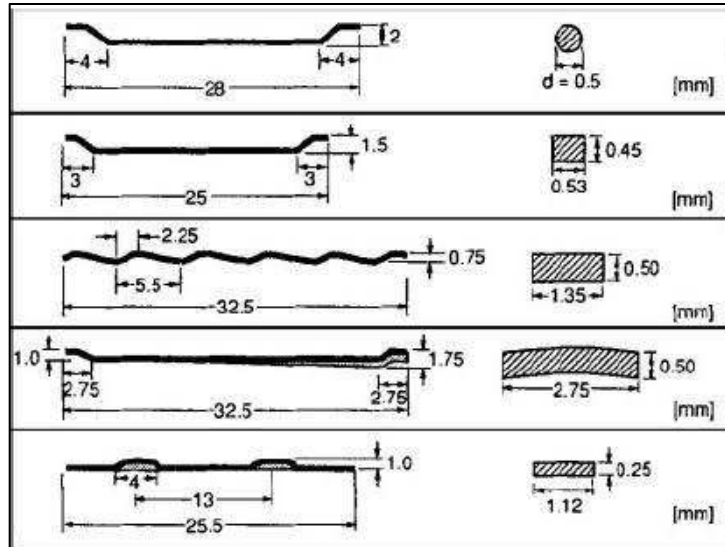
Πιο συχνά, όπως και στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιούνται ίνες με γαντζωτά άκρα.



Εικόνα 8: Κύρια προφίλ ινών (επίπεδο, με γαντζωτά άκρα, κυματοειδής, με κωνικά άκρα, μηχανικά παραμορφωμένο) (Katzner, 2006).

Οι χαλύβδινες ίνες έχουν επίσης τις παρακάτω ιδιότητες:

- ❖ Η αντοχή τους σε εφελκυσμό κυμαίνεται από 400MPa έως 1,5GPa ενώ μπορούν να φθάσουν μέχρι και τα 4 GPa οι ανθρακούχοι χάλυβες, ειδικά σκληρυμένοι. Το μέτρο ελαστικότητάς τους είναι 200 GPa και το ειδικό βάρος τους 8 gr/cm³, όσο δηλαδή όλοι οι κοινοί χάλυβες (Maidl, 1995).
- ❖ Έχουν αντίσταση στα αλκαλικά πρόσμικτα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.
- ❖ Λόγος μορφής:
είναι ο λόγος του μήκους της ίνας προς τη διάμετρό της (aspect ratio ή l/d) και είναι το μέγεθος αυτό που επηρεάζει την κατανομή των ινών μέσα στο σκυρόδεμα, την μεταξύ τους απόσταση και την εργασιμότητα του σκυροδέματος. Ο λόγος αυτός εκφράζει την ευκαμψία των ινών δηλαδή την ικανότητά τους να προσαρμόζονται στο σχήμα και στο χώρο που καταλαμβάνουν ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών. Ο λόγος μορφής δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 150 ώστε να μην επηρεάζεται η εργασιμότητα του σκυροδέματος. Για γενική χρήση ο προτεινόμενος λόγος είναι 40-45 ενώ για καλύτερες επιδόσεις και ευκολία χειρισμού προτείνεται να είναι 65.



Εικόνα 9: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ινών

❖ Μήκος και διάμετρος ινών:

Για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το μήκος των ινών δεν πρέπει να ξεπερνά το 50-60% της διαμέτρου του σωλήνα άντλησης και δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το διπλάσιο του μέγιστου κόκκου των αδρανών. Γενικά, η διάμετρος τους κυμαίνεται από 0,25 έως 0,75 mm και το μήκος τους από 25 έως 90 mm. Στην πράξη είναι επιθυμητή η χρήση ινών μεγάλου μήκους και μικρού πάχους με υψηλή ποιότητα χάλυβα, ίδια ή και ανώτερη από αυτήν του συμβατικού σπλισμού. Όσο όμως αυξάνει η τιμή του λόγου μορφής, πέρα από έναν βαθμό, τόσο αυξάνει και η δυσκολία του χειρισμού του μίγματος.

❖ Προσανατολισμός ινών στο χώρο

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

Οι ίνες κατά την ανάμειξη διασκορπίζονται μέσα στον όγκο του σκυροδέματος και «συρράπτουν» τις αντικριστές επιφάνειες των ρωγμών παραλαμβάνοντας εφελκυστικές τάσεις και ταυτόχρονα παρεμποδίζοντας τη διάδοση των μικρορωγμών. Οι ίνες έχουν βέλτιστο προσανατολισμό όταν αναπτύσσονται προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης διότι οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα σε αυτήν την κατεύθυνση. Φυσικά επειδή δεν είναι εφικτό όλες είναι να έχουν συγκεκριμένη κατεύθυνση υπάρχουν και κάποιες που συναντούν τις ρωγμές πλάγια μειώνοντας έτσι τη δράση τους. Αυτή η μείωση της αποτελεσματικότητας υπολογίζεται μαθηματικά. Η ίνα θεωρείται ότι είναι αποτελεσματική όταν η κλίση της ως προς τη διεύθυνση της δύναμης δεν είναι μεγαλύτερη των 45°.

Τέλος όσο πυκνότερη είναι η συγκέντρωση των ινών, έως ένα λογικό σημείο σαφώς, τόσο ευκολότερα παραλαμβάνουν φορτία αφού δρουν συνδυαστικά, γεγονός που κάνει τη χρήση τους περισσότερο αποτελεσματική.



Εικόνα 10: Πιθανοί προσανατολισμοί των ινών στο σκυρόδεμα (Maidl, 1995)

❖ Περιεκτικότητα σε ίνες

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, δηλαδή τις απαιτήσεις ανάλυσης φορτίου. 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.

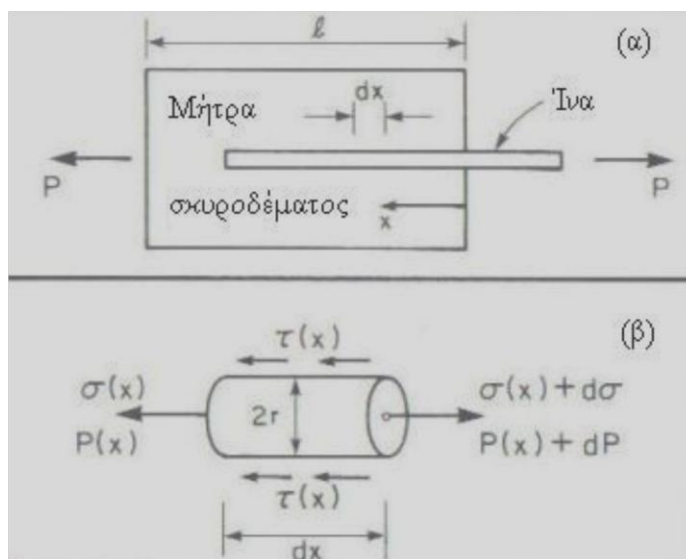
Η περιεκτικότητα σε ίνες μετριέται είτε σε kg ινών ανά m^3 σκυροδέματος, είτε σε % κατ' όγκο, είτε σε % κατά βάρος ($\rho_B \approx 2.4 \div 2.5 t/m^3$, $\rho_{st} \approx 7.85 t/m^3$) δηλαδή για ίνες $100 kg/m^3$ αντιστοιχούν σε 4% κατά βάρος (κ.β.) ή σε 1,25% κατά όγκο (κ.ο.). Συνήθεις περιεκτικότητες στην άμεση επένδυση σηράγγων είναι $30-40 kg/m^3$ (δηλαδή 1.2 ÷ 1.6% κ.β., ή 0.4 ÷ 0.5% κ.ο.)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν ποσοστά ινών 20, 30, 40 kg/m^3 ή αλλιώς 5, 7.5 και 10 % κ.β. τσιμέντου όπως φαίνεται στο κεφάλαιο 3 μαζί με τις υπόλοιπες αναλογίες των υλικών.

2.3.1.1. Μηχανισμός αστοχίας

Οι ίνες μπορεί να αστοχήσουν είτε λόγω διαρροής-θραύσης είτε λόγω εξόλκευσης που είναι και η συνηθέστερη μορφή αστοχίας.

Ο τρόπος με τον οποίο εκδηλώνεται κάθε φορά ο μηχανισμός αστοχίας, επηρεάζεται από το λόγο μορφής, την αγκύρωση, την εφελκυστική αντοχή της ίνας και την πρόσφυση ανάμεσα στις ίνες και το σκυροδέμα.



Εικόνα 11: Αντίδραση ινών-σκυροδέματος (Bentur and Mindness, 1990)

Οι ίνες χάλυβα, συγκεκριμένα, δεν επηρεάζουν την συστολή

ξήρανσης του σκυροδέματος. Έχει παρατηρηθεί ότι καθυστερούν τη ρηγμάτωσή του και συντελούν στον ομοιόμορφο καταμερισμό των τάσεων. Οι χαλύβδινες ίνες είναι επιρρεπείς ως προς τη διάβρωση, για το λόγο αυτό ενδιαφέρον έχει η μελέτη της συμπεριφοράς τους στο σκυροδέμα. Στο συμβατικό οπλισμό του σκυροδέματος είναι γνωστό ότι αυτός απαιτεί μια ελάχιστη επικάλυψη ώστε να εξασφαλίζεται από τη διάβρωση.

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

2.4.Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ινών είναι πολλά σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό. Σε κάθε περίπτωση βέβαια και ανάλογα με την φύση του έργου οι ίνες δεν θεωρείται ότι μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό.

Κάποια από τα πλεονεκτήματα χρήσης των ινών είναι τα παρακάτω:

- 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.
- Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα πλαστική συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει διότι λαμβάνει χώρα η σταδιακή ενεργοποίηση των ινών λόγω της φόρτισης, με άμεσο αποτέλεσμα την απορρόφηση ενέργειας πριν το στάδιο της αστοχίας. Οι ίνες απορροφούν την ενέργεια, η οποία σε διαφορετική περίπτωση θα οδηγούσε σε αστοχία του δοκιμίου και παραμορφώνονται προφυλάσσοντας το δοκίμιο. Οι ίνες εξακολουθούν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.
- Εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ασφάλεια στο προσωπικό, αφού δε χρειάζεται να εργάζεται κάτω από ανυποστήρικτο πέτρωμα για να τοποθετήσει το πλέγμα. Η ασφάλεια του προσωπικού μάλιστα μπορεί να είναι σημαντικά καλύτερη όταν χρησιμοποιείται τηλεχειριζόμενο ρομπότ εκτόξευσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος.
- Σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει όχι μόνο καλύτερες πρώιμες αντοχές αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, σε διάτμηση, ενώ έχει και αυξημένη δυσθραυστότητα. Επίσης αναπτύσσει μεγαλύτερη δύναμη συνάφειας με την επιφάνεια που διαστρώνεται σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Μπορούν να συνδυαστούν μεταξύ τους σε ένα μίγμα αλλά και να χρησιμοποιηθούν μαζί με συμβατικό οπλισμό, παίζοντας τον ρόλο της δευτερογενούς ενίσχυσης.
- Οι ίνες έχουν πολύ καλό συνδυασμό αντοχής και ικανότητας απορρόφησης ενέργειας εξασφαλίζοντας μεγάλη ικανότητα παραλαβής φορτίων. Επιπλέον, η χρήση τους κάνει το σκυρόδεμα πιο πλάστιμο, άρα και καταλληλότερο να ενδίδει στις συγκλίσεις, χωρίς όμως να τις περιορίζει σε μεγάλο βαθμό και χωρίς η

επένδυση να αστοχεί.

- Η χρήση ινών οδηγεί σε οικονομία υλικών και αύξηση της ταχύτητας κατασκευής. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην κατάργηση του πλέγματος και στην μείωση της ανθρώπινης εργασίας αλλά και στον μικρότερο όγκο εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί συνολικά. Οι ίνες δεν απαιτούν ελάχιστη επικάλυψη, όπως το πλέγμα, αλλά ούτε πρέπει να γίνεται γέμισμα των όποιων κενών με σκυρόδεμα, σαν λιθογόμωση.
- 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 προϋπάρχουσας κατασκευής.

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 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 φράζουν τις σωληνώσεις ή θα χειροτερέψουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Οι χαλύβδινες ίνες φθείρονται όταν εκτίθενται σε υγρασία ενώ οι υάλινες έχουν μικρή

ανθεκτικότητα σε αλκαλικά περιβάλλοντα. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια έχουν από μικρή έως ελάχιστη επικάλυψη, έτσι τείνουν να εμφανίζουν σημεία σκουριάς. Για λόγους αισθητικής και ασφάλειας, προτείνεται ότι η μόνιμη επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα κονιάματος που περιέχει τις νέες HPP 152 πλαστικές ίνες (High Performance Polypropylene Fibres) για τον έλεγχο θερμικού ραγίσματος (Κατσκογιάννη, 2004).

- ☒ 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.

Κεφάλαιο 3 : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. 75 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x100mm και 54 πρισματικά διαστάσεων 500x100x100mm προκειμένου να διερευνηθεί η συνεισφορά των χαλύβδινων ινών στην μονοαξονική θλιπτική και στην καμπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Από αυτά στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν 46 πρισματικά και 49 κυβικά δοκίμια τα οποία υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης και θλίψης αντίστοιχα στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. και τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο τέταρτο κεφάλαιο .

ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

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 κάποια από τα υλικά που χρησιμοποιήσαμε.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 9 συνθέσεις από τις οποίες οι τρεις πρώτες (Δ1,Δ2,Δ3) ήταν δοκιμαστικές, οι δύο επόμενες (Σ1,Σ2) προπαρασκευαστικές με άλλα αδρανή από τα τελικά και οι υπόλοιπες (Σ3-Σ6) πραγματοποιήθηκαν με ίδια σύνθεση σκυροδέματος, ίδια αδρανή υλικά αλλά με διαφορετική περιεκτικότητα ινών με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων και την εύρεση του βέλτιστου περιεχόμενου ινών στο σκυρόδεμα δηλαδή του ποσοστού εκείνου που επιφέρει τη μέγιστη αντοχή σε θλίψη και κάμψη.

Πιο αναλυτικά οι συνθέσεις με τις ονομασίες τους είναι οι παρακάτω:

- Δοκιμαστική σύνθεση Δ1
- Δοκιμαστική σύνθεση Δ2
- Δοκιμαστική σύνθεση Δ3
- Κύρια σύνθεση Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα)
- Κύρια σύνθεση Σ2 (Α) και

Σ2 (Β) με 20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος

- Κύρια σύνθεση Σ3 (Α) και
Σ3 (Β) και
Σ3 (Γ) με 30kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος
- Κύρια σύνθεση Σ4 (Α) και
Σ4 (Β) με 40kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος
- Κύρια σύνθεση Σ5 (Α) και
Σ5 (Β) (άοπλο σκυρόδεμα)
- Κύρια σύνθεση Σ6 με 20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος.

Κάποιες από τις παραπάνω συνθέσεις πραγματοποιήθηκαν σε δύο ή σε τρεις δόσεις λόγω του μεγάλου όγκου του προς σκυροδέτηση υλικού και της επακόλουθης δυσκολίας χειρισμού του αναμεικτήρα. Οι συνθέσεις αυτές συνήθως ήταν οι μισές της τελικής όταν χωρίζονταν σε δύο τμήματα και σκυροδετούνταν την ίδια ημέρα με εξαίρεση τις Σ2 (Α) και Σ2 (Β).

Επίσης οι συνθέσεις Σ5 και Σ6 αποτελούν επαναληπτικές συνθέσεις των Σ1 και Σ2 αντίστοιχα για λόγους ομοιογένειας καθώς από τη σύνθεση Σ3 και έπειτα, έως και τη Σ6 δηλαδή, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά αδρανή η κοκκομετρική διαβάθμιση των οποίων φαίνεται στην ενότητα 3.3 και στον πίνακα 10.

Συνοπτικά η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Προμήθεια των χρησιμοποιούμενων υλικών
2. Ξήρανση των αδρανών
3. Κοκκομετρική ανάλυση αδρανών
4. Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση
5. Σκυροδέτηση & δοκιμές σε νωπό σκυρόδεμα
6. Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες
7. Συντήρηση δοκιμίων
8. Εργαστηριακές δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα
9. Συλλογή και ανάλυση αποτελεσμάτων

Αναλυτικά τα παραπάνω στάδια μαζί με όλες τις ενδιάμεσες εργασίες που πραγματοποιήθηκαν θα περιγραφούν στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου.

3.1. Προμήθεια των υλικών

Για την παρούσα διπλωματική εργασία χρειαστήκαμε και προμηθευτήκαμε τα παρακάτω υλικά:

- Τσιμέντο:

Το τσιμέντο που χρησιμοποιήσαμε το προμηθευτήκαμε από την εταιρεία ΕΚΕΤ και είναι CEM I 42,5 R και τα στοιχεία 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 τσιμέντου CEM I 42,5 R είναι η παρακάτω:

Πίνακας 8: Χημική ανάλυση τσιμέντου

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

- Αδρανή υλικά:

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ασβεστολιθικά και ήταν τριών διαβαθμίσεων :

Άμμος 0-4mm

Ρυζάκι 4-8mm

Γαρμπίλι 8-16mm

- Πυριτική παιπάλη: μας προμηθεύτηκε από την εταιρεία Sika και είναι το προϊόν με ονομασία Sika Fume - HR. Είναι σε μορφή σκόνης, μαύρου χρώματος με πυκνότητα 300kg/m³.

- Ίνες: χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες της εταιρείας INOMIX ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα συγκολλημένες. Είναι κατασκευασμένες με χάλυβα ψυχρής όλκησης με υψηλή αντοχή min 1100MPa. Το μήκος τους είναι 29mm και η διάμετρός τους είναι 0,90mm (Λόγος μορφής: 32,222). Είναι



Εικόνα 12: Χρησιμοποιούμενες ίνες

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.

- Ρευστοποιητής: προμηθευτήκαμε το προϊόν της εταιρείας Sika με ονομασία Sika Viscocrete Techno 40 που είναι ισχυρός υπερρευστοποιητής σκυροδέματος για υψηλή διατήρηση εργασιμότητας με τα παρακάτω τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 9: Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή Sika Viscocrete Techno 40

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

Το προϊόν Sika® ViscoCrete® Techno 40 προστίθεται στο νερό ανάμειξης ή στο νωπό σκυρόδεμα και προστέθηκε με διαφορετική αναλογία κάθε φορά ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες.

3.2. Ξήρανση των αδρανών

Αφού συγκεντρώσαμε όλα τα απαραίτητα υλικά για τις σκυροδετήσεις, επόμενο βήμα είναι να καθορίσουμε την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που έχουμε στη διάθεσή μας. Ωστόσο πριν από αυτό απαιτείται ξήρανση των αδρανών σε κατάλληλο φούρνο ξήρανσης.

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

Η ξήρανση των αδρανών πραγματοποιούνται την προηγούμενη μέρα της σκυροδέτησης για τον όγκο αδρανών που θα χρησιμοποιούνται έτσι ώστε μέχρι την σκυροδέτηση τα αδρανή να έχουν ξηρανθεί για 24 ώρες περίπου.



Εικόνα 13: Φούρνος ξήρανσης αδρανών

3.3. Κοκκομετρική Διαβάθμιση Αδρανών

Η διαβάθμιση των αδρανών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη σύνθεση του σκυροδέματος και για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν κοκκομετρικές αναλύσεις για τις 3 διαφορετικές διαβαθμίσεις αδρανών που θα χρησιμοποιούσαμε κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, προκειμένου να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι αναλογίες με τις οποίες περιέχονται τα διάφορα μεγέθη κόκκων στο εκάστοτε αδρανές υλικό.

Για την εκτέλεση της κοκκομετρίας ακολουθούνται αρχικά τα παρακάτω βήματα για τη λήψη του τελικού δείγματος προς κοκκομέτρηση:

- 1) Λαμβάνεται ποσότητα τυχαία από το αδρανές υλικό προς κοκκομέτρηση τετραπλάσια από αυτήν που χρειάζεται για το τελικό δείγμα.
- 2) Φτιάχνεται ένας σωρός με το υλικό αυτό και αφού αναδευθεί κατάλληλα παίρνοντας υλικό από τη βάση και αδειάζοντάς το στην κορυφή του κώνου, διαμορφώνεται σε έναν ισοπαχή δίσκο,
- 3) ο οποίος χωρίζεται στη συνέχεια σε 4 ίσα τεταρτημόρια από τα οποία τα απομακρύνονται τα 2 κατά κορυφή.

- 4) Με το εναπομείναν υλικό επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία
- 5) Τα 2 εναπομείναντα τεταρτημόρια που είναι το $\frac{1}{4}$ του αρχικού δείγματος αποτελούν το τελικό δείγμα.



Εικόνα 14: Τετραμερισμός ποσότητας αδρανών

Το εναπομείναν δείγμα κοσκινίζεται με τη βοήθεια κατάλληλων κόσκινων. Οι σειρές κόσκινων που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και υιοθετούνται από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN-408 και από τον Ν.Κ.Τ.Σ είναι η γερμανική σειρά των DIN 4187 και 4188 και η αμερικανική σειρά κόσκινων της προδιαγραφής ASTM E 11.

Χρησιμοποιήθηκαν Αμερικάνικα κόσκινα του εργαστηρίου τα οποία φέρουν οπές τετραγωνικής μορφής από πλέγμα και συμβολίζονται με το σύμβολο No πριν από τον αριθμό των οπών που φέρουν ανά γραμμική ίντσα μέχρι και το κόσκινο No4 δηλαδή για τα λεπτά κόσκινα, ενώ αυτά που είναι μεγαλύτερου ανοίγματος συμβολίζονται με βάση το άνοιγμα της οπής σε ίντσες. Έτσι το κόσκινο $\frac{3}{4}$ in ή $\frac{3}{4}$ " δηλώνει αμερικάνικο κόσκινο οπής $\frac{3}{4}$ της ίντσας (19 mm περίπου). Αντίστοιχα η ονομασία No 120 δηλώνει αμερικάνικο κόσκινο που φέρει 120 οπές ανά γραμμική ίντσα (1 in=2,54 cm). Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται τα κόσκινα που χρησιμοποιήθηκαν σε σειρά με το «ταψί» στο κάτω μέρος δηλαδή τον υποδοχέα συλλογής του λεπτότερου υλικού και το

κόσκινο με το μεγαλύτερο μέγεθος οπής στο πάνω μέρος αλλά και η συσκευή κοσκινίσματος του εργαστηρίου (sieve shaker) .



Εικόνα 15: Σειρά κοσκίνων και συσκευή κοσκινίσματος

Το προς εξέταση δείγμα τοποθετείται στο κόσκινο με τη μεγαλύτερη οπή, από το οποίο, ανάλογα με το είδος του δείγματος, πρέπει να διέρχεται όλη η ποσότητα. Το κοσκίνισμα θεωρείται ότι έληξε όταν τοποθετώντας ένα άσπρο χαρτί κάτω από το κόσκινο διαπιστώνουμε ότι δεν διέρχεται άλλο υλικό.

Στη συνέχεια καταγράφονται τα βάρη που έχουν παραμείνει σε κάθε κόσκινο δηλαδή το συγκρατούμενο και υπολογίζονται μέσω της ολικής ποσότητας το διερχόμενο και στη συνέχεια και το ποσοστό του διερχόμενου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για την άμμο, το ρυζάκι και το γαρμπίλι οπότε προκύπτουν τα αποτελέσματα όπως και φαίνονται στον πίνακα 10 και γραφικά η κοκκομετρική καμπύλη κάθε αδρανούς όπως φαίνονται στο διάγραμμα 2.

Πίνακας 10: Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

		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
	R _i : αθροιστικό βάρος αδρανών, συγκρατούμενα μέχρι το κόσκ. i = v $R_i = r_1 + r_2 + \dots + r_v$	Νούμερο													(mm)	0,49	0,12
	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		
	No.8	2,38	326	366	18,3	81,7	390	1907	97,05	2,95	0	1792	91,52	8,48	43,69		
%P _i : αθροιστικό διερχόμενο βάρος αδρανών μέχρι και από το κόσκ. i=v $\%P_i = 100 - \%R_i$	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						

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.

3.3.1. Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων

Μετά από την διεξαγωγή των κοκκομετρικών αναλύσεων και για τα τρία αδρανή (άμμος, ρυζάκι, γαρμπίλι) ορίζονται οι περιοχές μέσα στις οποίες συνιστάται να βρίσκονται οι κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών υλικών, ώστε αυτά να είναι κατάλληλα για την παρασκευή του σκυροδέματος και αυτό να αποκτά βέλτιστα μηχανικά χαρακτηριστικά αλλά και να είναι εύκολη η τοποθέτησή του.

Για την παρούσα διπλωματική, η χρήση των αδρανών προβλέπεται για ινοπλισμένο σκυρόδεμα επομένως σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ASTM C 33 το μείγμα των αδρανών που θα προκύψει από τις τρεις επιμέρους κατηγορίες αδρανών θα πρέπει να ικανοποιεί μία από τις ακόλουθες διαβαθμίσεις του παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 11: Όρια διαβαθμίσεων για μείγμα αδρανών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 33

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

Σύμφωνα με τα δεδομένα των υλικών που έχουμε προς χρήση απαιτείται η καμπύλη του μείγματος των αδρανών που θα προκύψει να βρίσκεται εντός των ορίων της Διαβάθμισης Νο.3 καθώς έχουμε και χονδρά αδρανή. Στον πίνακα 12 φαίνονται τα όρια της διαβάθμισης Νο.3.

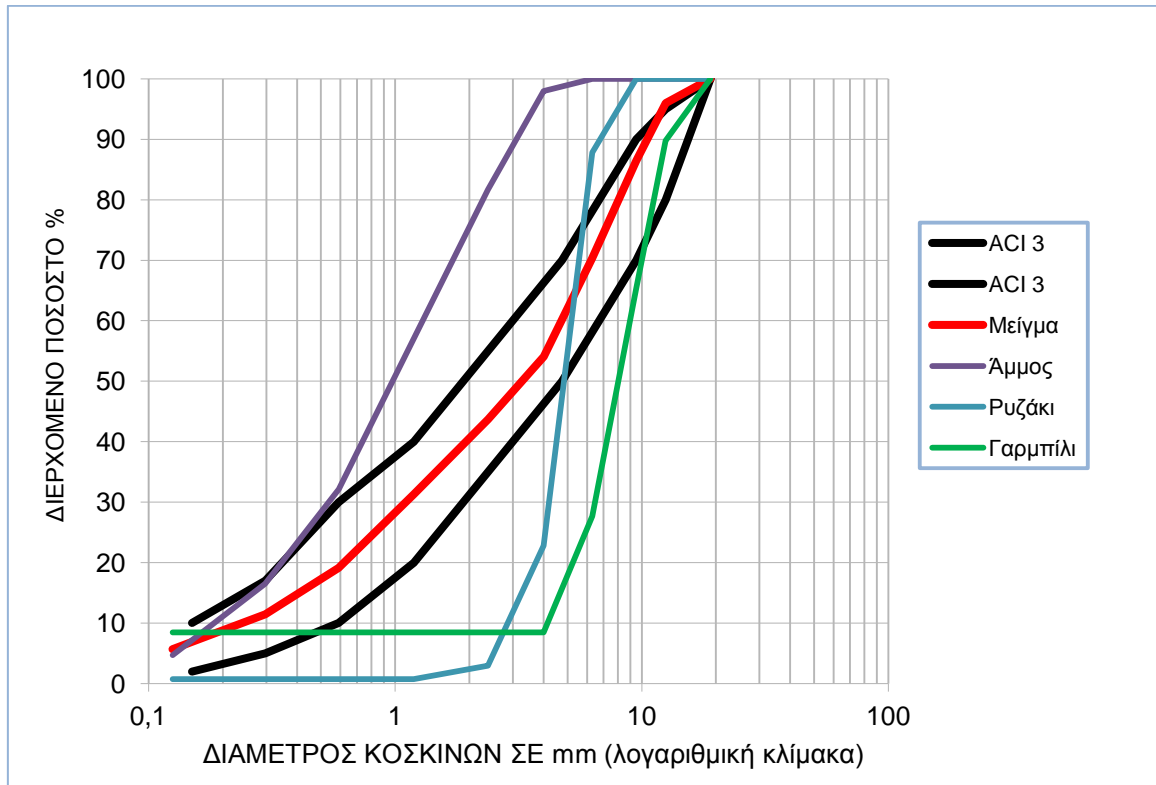
Επίσης στο πρότυπο αναφέρεται ότι τα υπερμεγέθη τεμάχια θα πρέπει να απορρίπτονται από τον έλεγχο, καθώς είναι πιθανό να προκαλέσουν έμφραξη του σωλήνα ή του ακροφύσιου κατά την εκτόξευσή τους όταν πρόκειται για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Πίνακας 12: Όρια Διαβάθμισης Νο.3

ΚΟΣΚΙΝΑ		ACI 3 Κάτω όριο	ACI 3 Άνω όριο
	(mm)		
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

Στη γραφική παράσταση φαίνονται οι 3 κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών και οι καμπύλες AC1 και AC3 δηλαδή το κατώτερο και το ανώτερο όριο της διαβάθμισης Νο.3. Μέσω αυτών προέκυψε η καμπύλη του μείγματος που θα αποτελείται από:

49% άμμος & 12% ρυζάκι & 39% γαρμπίλι



Διάγραμμα 2: Γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής ανάλυσης

3.4. Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση

Μετά και το πέρας της κοκκομετρικής ανάλυσης ακολουθεί η ζύγιση των υλικών με ζυγό ακριβείας στις ποσότητες που θα χρειαστούν από το κάθε ένα για κάθε σύνθεση.

Αφού συγκεντρώναμε όλα τα υλικά στις απαιτούμενες ποσότητες στη συνέχεια ξεκίνησε η σκυροδέτηση.



Εικόνα 16: Υλικά προς σκυροδέτηση

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες οι ποσότητες των υλικών κατά όγκο και κατά βάρος που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μία από τις συνθέσεις τόσο στις δοκιμαστικές και στις προπαρασκευαστικές όσο και στις κύριες συνθέσεις.

Στον υπολογισμό των ποσοτήτων δεδομένης της πιθανής απώλειας υλικού κατά τις δοκιμές κάθισης αλλά και για να υπάρχει επαρκής ποσότητα για την ανάδευση του σκυροδέματος μετά την προσθήκη των ινών, υπολογίσθηκαν οι ποσότητες με μια προσαύξηση συνήθως της τάξεως του +9%.

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 του ρευστοποιητή κυμαινόταν για κάθε σύνθεση και γινόταν ανάλογα με τις τιμές που προέκυπταν από ενδιάμεσες δοκιμές κάθισης κατά την παρασκευή του μείγματος.

Είναι προφανές ότι το ποσοστό των αδρανών και του τσιμέντου είναι μεγαλύτερο όταν οι αναλογίες παρουσιάζονται κατά βάρος λόγω του μεγαλύτερου ειδικού βάρους των υλικών αυτών σε σχέση με το ειδικό βάρος του νερού.

➤ Δοκιμαστικές συνθέσεις

Στις δοκιμαστικές συνθέσεις Δ2 και Δ3 αλλάξαμε το λόγο νερού προς τσιμέντο από 0,36 τον ενεργό και 0,43 τον ολικό σε 0,43 και 0,49 αντίστοιχα καθώς δεν ήμασταν ευχαριστημένοι από τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης. Αυτός εξάλλου ήταν και ο σκοπός των δοκιμαστικών συνθέσεων δηλαδή να διαμορφωθούν οι βασικοί άξονες των κύριων συνθέσεων. Σε όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις διατηρήθηκαν αυτοί οι λόγοι W/C.

Πίνακας 13: Ποσότητες υλικών στις δοκιμαστικές συνθέσεις Δ1, Δ2, Δ3

ΣΥΝΘΕΣΗ:	Δ1		Δ2		Δ3	
ΥΛΙΚΑ	Kg/m ³	Kg/0,012m ³	Kg/m ³	Kg/0,012m ³	Kg/m ³	Kg/0,012m ³
Τσιμέντο	425	5,100	425	5,100	425	5,100
Πυριτική παιπάλη	21,25	0,255	21,25	0,255	21,25	0,255
Αδρανή 0-4mm	930	11,160	930	11,160	930	11,160
Αδρανή 4-8mm	789	9,468	789	9,468	789	9,468
Αδρανή 8-16mm	-	-	-	-	-	-
Νερό	181,5	2,178	207,5	2,490	207,5	2,490
Κενά 4,5%						
Χαλύβδινες ίνες	21,25	0,255	21,25	0,255	21,25	0,255
Ρευστοποιητής		0,125		0,060		0,03

➤ Προπαρασκευαστικές συνθέσεις

Πίνακας 14: Ποσότητες υλικών στις προπαρασκευαστικές συνθέσεις Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα) , Σ2 (ίνες 20 kg/m³)

ΣΥΝΘΕΣΗ:	Σ1		Σ2			
	Kg/m ³	Kg/0,09m ³	Σ2A		Σ2B	
ΥΛΙΚΑ	Kg/m ³	Kg/0,09m ³	Kg/m ³	Kg/0,095m ³ +11%	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%
Τσιμέντο	400	36	400	42,180	400	19,184
Πυριτική παιπάλη	20	1,8	20	2,109	20	0,959
Αδρανή 0-4mm	930	83,700	930	98,069	930	44,603
Αδρανή 4-8mm	775	69,750	775	81,724	775	37,169
Αδρανή 8-16mm						
Νερό	196	17,640	196	20,668	196	9,400
Κενά 4,5%						
Χαλύβδινες ίνες	0	0	20	2,109	20	0,959
Ρευστοποιητής		0,316		0,180		0,150

➤ **Κύριες συνθέσεις**

Πίνακας 15: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ3 (ίνες 30 kg/m³)

ΣΥΝΘΕΣΗ:	Σ3					
	Σ3Α		Σ3Β		Σ3Γ	
ΥΛΙΚΑ	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%	Kg/m ³	Kg/0,034m ³ +9%	Kg/m ³	Kg/0,01m ³ +9%
Τσιμέντο	400	19,184	400	14,824	400	4,360
Πυριτική παιπάλη	20	0,959	20	0,741	20	0,218
Αδρανή 0-4mm	828	39,725	828	30,696	828	9,028
Αδρανή 4-8mm	207	9,919	207	7,665	207	2,254
Αδρανή 8-16mm	672	32,238	672	24,911	672	7,327
Νερό	196	9,400	196	7,264	196	2,136
Κενά 4,5%						
Χαλύβδινες ίνες	30	1,439	30	1,112	30	0,327
Ρευστοποιητής		0,120		0,080		0,020

Πίνακας 16: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ4 (ίνες 40 kg/m³)

ΣΥΝΘΕΣΗ:	Σ4			
	Σ4Α		Σ4Β	
ΥΛΙΚΑ	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%	Kg/m ³	Kg/0,044m ³ +9%
Τσιμέντο	400	19,184	400	19,184
Πυριτική παιπάλη	20	0,959	20	0,959
Αδρανή 0-4mm	828	39,725	828	39,725
Αδρανή 4-8mm	207	9,919	207	9,919
Αδρανή 8-16mm	672	32,238	672	32,238
Νερό	196	9,400	196	9,400
Κενά 4,5%				
Χαλύβδινες ίνες	40	1,918	40	1,918
Ρευστοποιητής		0,110		0,118

Πίνακας 17: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ5 (άοπλο σκυρόδεμα)

ΣΥΝΘΕΣΗ:	Σ5			
	Σ5Α		Σ5Β	
ΥΛΙΚΑ	Kg/m ³	Kg/0,042m ³ +9%	Kg/m ³	Kg/0,042m ³ +9%
Τσιμέντο	400	18,312	400	18,312
Πυριτική παιπάλη	20	0,916	20	0,916
Αδρανή 0-4mm	828	37,919	828	37,919
Αδρανή 4-8mm	207	9,468	207	9,468
Αδρανή 8-16mm	672	30,772	672	30,772
Νερό	196	8,973	196	8,973
Κενά 4,5%				
Χαλύβδινες ίνες	0	0	0	0
Ρευστοποιητής		0,100		0,110

Πίνακας 18: Ποσότητες υλικών στην κύρια σύνθεση Σ6 (ίνες 20 kg/m³)

ΣΥΝΘΕΣΗ:	Σ6	
ΥΛΙΚΑ	Kg/m ³	Kg/0,042m ³ +9%
Τσιμέντο	400	20,928
Πυριτική παιπάλη	20	1,046
Αδρανή 0-4mm	828	43,336
Αδρανή 4-8mm	207	10,821
Αδρανή 8-16mm	672	35,255
Νερό	196	10,255
Κενά 4.5%		
Χαλύβδινες ίνες	20	1,046
Ρευστοποιητής		0,100

3.5. Σκυροδέτηση

Μετά τη ζύγιση όλων των υλικών πραγματοποιήθηκε η σκυροδέτηση. Κατά τη διαδικασία της σκυροδέτησης προστίθενται στον αναμεικτήρα τα υλικά με την παρακάτω σειρά:

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



Εικόνα 17: Όλα τα απαιτούμενα υλικά

Μετά την εισαγωγή των δύο πρώτων υλικών δηλαδή του συνόλου των αδρανών υλικών και μέρους του νερού γίνεται μια πρώτη ανάδευση και στη συνέχεια προστίθενται το τσιμέντο και το υπόλοιπο νερό και αναμειγνύονται ξανά τα υλικά. Κατά τη διάρκεια της ανάδευσης προστίθενται η πυριτική παιπάλη και οι ίνες. Τέλος, γίνεται σταδιακά η προσθήκη της ποσότητας του ρευστοποιητή που κρίνεται απαραίτητη για να επιτύχουμε την ζητούμενη ρευστότητα και άρα κάθιση και γίνεται η μέτρηση της κάθισης. Αν τα αποτελέσματα δεν είναι τα αναμενόμενα προστίθεται και άλλη ποσότητα ρευστοποιητή μέχρι ενός χρονικού σημείου πάντα έτσι ώστε να μην πήξει το μείγμα που έχει δημιουργηθεί.



Εικόνα 18: Προσθήκη αδρανών υλικών, ποσότητας νερού και ανάδευση



Εικόνα 19: Προσθήκη τσιμέντου και υπόλοιπης ποσότητας νερού και συνέχιση της ανάδευσης του μείγματος



Εικόνα 20: Τελικό μείγμα μετά και την προσθήκη των ινών, της πυριτικής παιπάλης και του ρευστοποιητή

3.5.1. Πειραματικές δοκιμές σε νωπό σκυρόδεμα

3.5.1.1. Δοκιμή κάθισης

Κάθιση είναι ένα μέτρο της εργασιμότητας του σκυροδέματος δηλαδή της ευκολίας με την οποία αυτό μεταφέρεται, διαστρώνεται και συμπυκνώνεται και εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος καθίσης) με την οποία μορφώθηκε (§ 3.20. ΚΤΣ 97).

Εργασιμότητα του σκυροδέματος ονομάζουμε την ευκολία με την οποία το σκυρόδεμα μεταφέρεται, τοποθετείται, δονείται και φινίρεται. Εξαρτάται σαφώς από το λόγο νερού/τσιμέντου και μεταβάλλεται αναλογικά με αυτόν. Η περίσσια νερού, ωστόσο, δημιουργεί πόρους που μειώνουν την αντοχή του μπετόν. Επομένως, επιζητούμε και μεγάλη εργασιμότητα αλλά ταυτόχρονα και υψηλές αντοχές. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται οι υπερρευστοποιητές, όπως ο Sika Viscocrete Techno 40 που προσθέσαμε, που επιτρέπουν τη μείωση της ποσότητας του νερού μίξης διατηρώντας παράλληλα την εργασιμότητα σε υψηλά επίπεδα.

Για τη μέτρηση που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C143, χρειαστήκαμε έναν κώνο κάθισης συγκεκριμένων διαστάσεων (διάμετρο κάτω βάσεως 200 ± 2 mm, διάμετρο άνω βάσεως 100 ± 2 mm, ύψος 300 ± 2 mm), μια σέσουλα, μία ράβδο συμπυκνώσεως κυκλικής διατομής $\Phi 16$ mm με στρογγυλεμένα άκρα με την οποία πραγματοποιήθηκαν 25 χτύποι για τις τρεις διαδοχικές ισοπαχείς στρώσεις σκυροδέματος στον κώνο και ένα μέτρο για τη μέτρηση της κάθισης.



Εικόνα 21: Μέτρηση κάθισης νωπού σκυροδέματος

Η διαδικασία μέτρησης της τιμής της κάθισης του σκυροδέματος έχει ως εξής:

- Ο κώνος κάθισης τοποθετείται πάνω σε επίπεδη, άκαμπτη, οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια και διαβρέχεται εσωτερικά, αυτός και η επιφάνεια έδρασης.
- Ο κώνος γεμίζεται με τη σέσουλα σε τρεις στρώσεις ίσου ύψους, με σκυρόδεμα από το δείγμα που έχει ληφθεί σύμφωνα με την Προδιαγραφή ΣΚ-350.
- 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 ελαττώνεται, τείνοντας προς την κατακόρυφο. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση η ράβδος βυθίζεται σε όλη τη στρώση, εισερχόμενη λίγο (περίπου 1 - 2cm) και στην αμέσως από κάτω της, Στην ανώτερη (τρίτη) στρώση ο κώνος γεμίζεται με περίσσεια σκυροδέματος, που συμπληρώνεται συνεχώς κατά τη διάρκεια συμπύκνωσης
- 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.
- 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 ανάσχυση 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.
- Η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος, που ελευθερούμενο από το μεταλλικό περίβλημα "κάθισε", μετριέται με προσέγγιση 5 mm, εκφράζεται σε ακέραια εκατοστά του μέτρου και αποτελεί την κάθιση του σκυροδέματος που ελέγχεται.
- 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 εξάπλωσης.

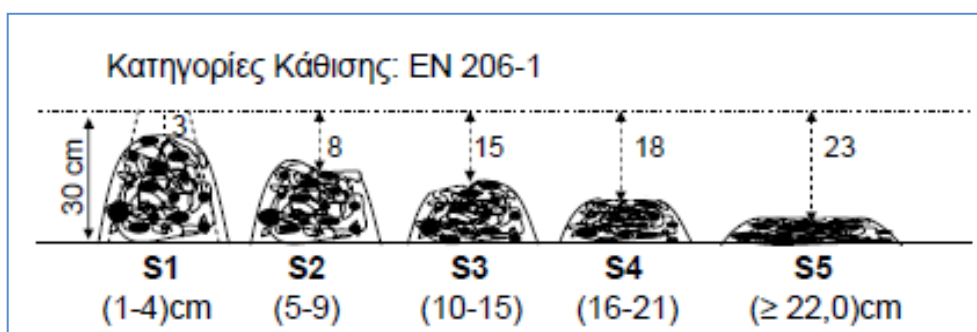
Αν γίνει προσθήκη ρευστοποιητή ακολουθεί και δεύτερη δοκιμή κάθισης. Αφού η δοκιμή κάθισης γίνει αποδεκτή το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε για αυτό το σκοπό επανατοποθετείται στον αναδευτήρα και ακολουθεί ανάδευση για σύντομο χρονικό διάστημα.

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

Πίνακας 19: Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης για όλες τις συνθέσεις

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ	ΚΑΘΙΣΗ (mm)
Δ1	125
Δ2	230
Δ3	160
Σ1	85
Σ2 Α	97,5
Σ2 Β	130
Σ3 Α	110
Σ3 Β	170
Σ3 Γ	105
Σ4 Α	122,5
Σ4 Β	75
Σ5 Α	170
Σ5 Β	145
Σ6	110

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 οι κατηγορίες κάθισης είναι πέντε και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα και στον πίνακα 20.



Εικόνα 22: Μετρούμενη κάθιση σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1

Πίνακας 20: Κατηγορίες κάθισης νωπού σκυροδέματος

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

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα οι κατηγορίες κάθισης που προέκυπταν κάθε φορά δεν ήταν πάντα οι επιθυμητές δηλαδή στην περίπτωση μας οι κατηγορίες S3-S4 δηλαδή κάθιση από 100 έως 210 mm. Ιδίως στις δοκιμαστικές συνθέσεις που όπως φανερώνει και η ονομασία τους έγιναν δοκιμές για την αναλογία τσιμέντου-ρευστοποιητή. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και σε άλλες συνθέσεις ακόμα και αν επρόκειτο για το ίδιο μείγμα χωρισμένο σε δύο φάσεις. Αυτό συμβαίνει λόγω τυχόν διαφορετικών θερμοκρασιακών συνθηκών που μπορεί να επικρατούσαν σε κάθε σκυροδέτηση, της υγρασίας του περιβάλλοντος ή ακόμη από προηγούμενη χρήση των εργαλείων και της μπετονιέρας.

3.5.1.2. Μέτρηση καθαρού βάρους σκυροδέματος

Μετά το πέρας της ανάδευσης ακολουθεί η μέτρηση του καθαρού βάρους του σκυροδέματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C138. Αυτή πραγματοποιείται με την βοήθεια κατάλληλου δοχείου με συγκεκριμένο όγκο και βάρος. Αφού γεμίσουμε το δοχείο μέχρι το μέσον του δονείται στην τράπεζα δόνησης και στη συνέχεια δονείται ξανά αφού γεμίσει μέχρι το χείλος του. Τέλος, μετράται σε ζυγαριά ακριβείας ουσιαστικά το μεικτό



βάρος του σε κιλά και αφού αφαιρέσουμε το βάρος του δοχείου που είναι γνωστό προκύπτει το καθαρό βάρος του σκυροδέματος του κάθε μείγματος.

Πίνακας 21: Χαρακτηριστικά πρότυπου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους σκυροδέματος

Απόβαρο	4,795 kg
Όγκος δοχείου	0.008 m ³

Το φαινόμενο βάρος του νωπού σκυροδέματος συνήθως κυμαίνεται από 2350 έως 2400 kg στο κυβικό μέτρο.



Εικόνα 23: Ζύγιση πληρωμένου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση του καθαρού βάρους του κάθε μίγματος.

Πίνακας 22: Αποτελέσματα μετρήσεων 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/m³	2,419	2,408	2,408

Προπαρασκευαστικές συνθέσεις			
	Σ1	Σ2Α	Σ2Β
Μικτό βάρος (kg)	24,037	24,014	24,030
Καθαρό βάρος (kg)	19,242	19,219	19,235
kg/m³	2,405	2,402	2,404

Κύρια σύνθεση Σ3			
	Σ3Α	Σ3Β	Σ3Γ
Μικτό βάρος (kg)	24,250	23,850	24,450
Καθαρό βάρος (kg)	19,455	19,055	19,655
kg/m³	2,432	2,382	2,457

Κύριες συνθέσεις Σ4, Σ5, Σ6					
	Σ4Α	Σ4Β	Σ5Α	Σ5Β	Σ6
Μικτό βάρος (kg)	24,018	23,136	24,030	24,100	23,964
Καθαρό βάρος (kg)	19,223	19,341	19,235	19,305	19,151
kg/m³	2,403	2,418	2,404	2,413	2,394

Μετά και την μέτρηση του καθαρού βάρους και την επανατοποθέτηση της ποσότητας του σκυροδέματος που χρειαστήκαμε για αυτή μέτρηση αυτή στην μπετονιέρα και μετά από μία τελική ανάμειξη, το μίγμα είναι έτοιμο για να το εισάγουμε στις μήτρες. Στην παρούσα εργασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιήθηκαν κυβικές μήτρες διαστάσεων 100x100x100mm και πρισματικές διαστάσεων 500x100x100mm.

Οι μήτρες πρέπει να είναι καθαρισμένες από τυχόν υπολείμματα από προηγούμενες σκυροδετήσεις και να είναι περασμένες με ειδικό λάδι που βοηθάει στην εξαγωγή των δοκιμίων από αυτές.

Η κάθε μήτρα αρχικά γεμίζεται με υλικό έως το μέσον της και δονείται στην τράπεζα δόνησης για 30 δευτερόλεπτα και αφού πληρωθεί για άλλα 30. Κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι μήτρες συγκρατούνται ώστε να μην αναπηδούν ανεξέλεγκτα και να έχουμε την επιθυμητή δόνηση του μίγματος.



Εικόνα 24: Δόνηση πρισματικής μήτρας στην τράπεζα δόνησης

Έπειτα μετά και την ολοκλήρωση της διαδικασίας πλήρωσης του απαιτούμενου αριθμού μητρών, τοποθετούνται σε κατάλληλο χώρο στο εργαστήριο όπου και καλύπτονται με υγρές λινάτσες έως ότου γίνει η αφαίρεση των καλουπιών.



Εικόνα 25: Πρισματικές και κυβικές μήτρες πληρωμένες με σκυρόδεμα

3.6. Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες

Μετά το πέρας 24 ωρών από τη σκυροδέτηση οι μήτρες λύνονται ώστε να εξαχθούν από αυτές τα δοκίμια, καθαρίζονται και λαδώνονται για να είναι έτοιμες την επόμενη σκυροδέτηση.

3.7. Συντήρηση δοκιμίων

Στα δοκίμια που εξάγονται από τις μήτρες αναγράφεται το όνομα της σύνθεσης και η ημερομηνία σκυροδέτησης και τοποθετούνται σε δεξαμενή με νερό το οποίο καλύπτει ολοκληρωτικά τα δοκίμια. Τα δοκίμια θα παραμείνουν στη δεξαμενή έως ότου έρθουν στην επιθυμητή ηλικία δηλαδή είτε για 7 ημέρες είτε για 28 ημέρες.

3.8. Εργαστηριακές δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα

Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π αφορούσαν 3 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x50mm και 3 κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x10mm από κάθε σύνθεση δηλαδή συνολικά 46 πρισματικά και 49 κυβικά δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης και θλίψης αντίστοιχα και τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Τα δοκίμια αυτά αφού παρέμειναν για ένα 24ωρο μέσα στο νερό μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για δοκιμές.

Για τις δοκιμές έγινε χρήση της σερβοϋδραυλικής μηχανή φόρτισης του εργαστηρίου.



Εικόνα 26: Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150kN και δοκιμών θλίψης δυναμικότητας 5000kN και μονάδα ελέγχου τριαξονικών δοκιμών Sercomp 7

Η Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης δοκιμίων διαθέτει μεταξύ άλλων τις ακόλουθες διατάξεις:

- Πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας τουλάχιστον 5000 kN για την εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης σε υψηλής αντοχής πετρώματα και σκυρόδεμα.
- Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150 kN για την εκτέλεση δοκιμών κάμψης σε δοκούς σκυροδέματος και δυσθραυστότητας σε μικρές πλάκες εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

3.8.1. Δοκιμή θλίψης

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που αποτελεί και βασικό δείκτη της ποιότητας του σκληρυμένου σκυροδέματος προσδιορίζεται με επιπόνηση σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίων από σκυρόδεμα οριζόμενη ως η μέγιστη τάση θραύσεων των δοκιμίων.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο θλίψης της φωτογραφίας με τις παραμέτρους που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

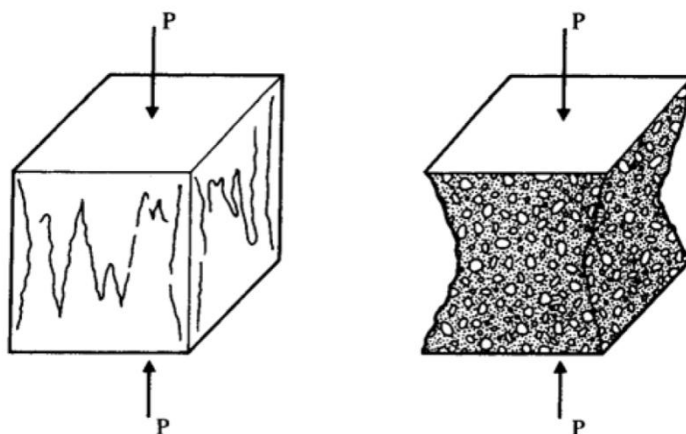
Για την μονοαξονική θλίψη χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες πλάκες ανάμεσα στις κεφαλές επιβολής φορτίου έτσι ώστε να κατανέμεται ομοιόμορφα το φορτίο στην πάνω επιφάνεια του δοκιμίου με το δοκίμιο τοποθετημένο στο κέντρο των πλακών σύμφωνα με οδηγούς πάνω σε αυτές.

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν έτσι ώστε το φορτίο να επιβάλλεται σε κάποια λεία πλευρά και όχι στην ελεύθερη επιφάνεια κατά τη σκυροδέτηση.



Εικόνα 27: Θλίψη κυβικού δοκιμίου

Τα δοκίμια φορτίζονται έως ότου αστοχήσουν. Το δοκίμιο κατά την θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια λόγω της επαφής του με τις χαλύβδινες πλάκες. Οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου. Η εικόνα, επομένως, των δοκιμίων κατά την αστοχία είναι ο σχηματισμός κατακόρυφων ρωγμών δηλαδή παράλληλων στο επιβαλλόμενο φορτίο ενώ ο πυρήνας παραμένει πρακτικά άθικτος.



Εικόνα 28: Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη

Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη f_c προσδιορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$f_c = \frac{P_{max}}{b \cdot d} \quad (4.1)$$

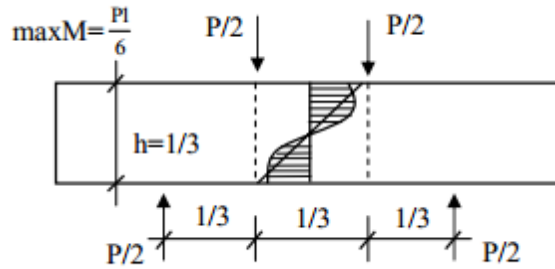
όπου P είναι το μέγιστο φορτίο που ασκήθηκε στο δοκίμιο μέχρι την αστοχία του και

b, d οι διαστάσεις του δοκιμίου δηλαδή η επιφάνεια που ασκήθηκε το φορτίο.

3.8.2. Δοκιμή κάμψης 4 σημείων

Λόγω του μικρού μεγέθους της, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος θεωρείται σε αρκετές περιπτώσεις αμελητέα κατά το σχεδιασμό κατασκευών. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις στις οποίες λαμβάνεται υπόψη (π.χ. περιορισμένη προένταση, έλεγχος ανοίγματος ρωγμών) και για το λόγο αυτό απαιτείται ο προσδιορισμός της. Λόγω των δυσχερειών των πειραμάτων, για τον άμεσο προσδιορισμό της έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις έκφρασης της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη και έχουν αναπτυχθεί έμμεσες δοκιμές για τον προσδιορισμό της, όπως οι δοκιμές εφελκυσμού σε διάρρηξη ή σε κάμψη.

Η δοκιμή κάμψης πραγματοποιήθηκε σε αμφιέριστα πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x500mm που επιπονούνται καμπτικά με επιβολή θλιπτικών φορτίων σε δύο σημεία που χωρίζουν το άνοιγμα σε τρία ίσα τμήματα όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 29: Δοκιμή κάμψης 4 σημείων

Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής επιπόνησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις καθ' ύψος της εγκάρσιας διατομής της δοκού, με μέγεθος στις ακραίες ίνες ίσο με $\sigma = M/W$. Όταν με την αύξηση του φορτίου η εφελκυστική τάση σ φθάσει την οριακή τιμή της η δοκός θραύεται περί τη μεσαία διατομή. Η μέγιστη αυτή οριακή τιμή $f_{t,fl}$ της εφελκυστικής τάσης, οριζόμενη ως αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό, δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_{max} = f_{t,fl} = \frac{max M}{W} \quad (4.2)$$

Όπου: $maxM$ η μέγιστη ροπή στη διατομή $PL/6$ και

W η ροπή αντίστασης ($=bh^2/6$ για ορθογωνική διατομή).

Επομένως η αντοχή σε κάμψη δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$f_{t,fl} = \frac{PL}{bd^2} \quad (4.3)$$

όπου:

P: το επιβαλλόμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων που είναι 300mm

b: το πλάτος του δοκιμίου (100mm)

d: το ύψος του δοκιμίου (100mm)

Κεφάλαιο 4 : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

4.1.Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης για όλες τις συνθέσεις σε πίνακες αλλά και διαγραμματικά στις δύο χρονικές περιόδους των δοκιμών. Παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά, ο μέσος όρος των αντοχών τους, τα βάρη και οι τυπικές αποκλίσεις αυτών. Τέλος, για όλες τις συνθέσεις, συνολικά, συγκρίνονται διαγραμματικά οι μέσες τιμές των αντοχών των δοκιμών για 7 και 28 ημέρες.

Οι τιμές των αντοχών παρατίθενται σε kN και μέσω της σχέσης (4.1) μετατρέπονται σε MPa (1 MPa = 1000 kN/m²). Ουσιαστικά λόγω των διαστάσεων των δοκιμών b,d που είναι 0,1m προκύπτει ότι η τιμή σε MPa είναι το 1/10 κάθε φορά της τιμής της αντοχής σε kN.

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν, όπως αναφέρθηκε, με την Σερβοϋδραυλική μηχανή φόρτισης στην οποία εισήχθησαν οι παρακάτω παράμετροι.

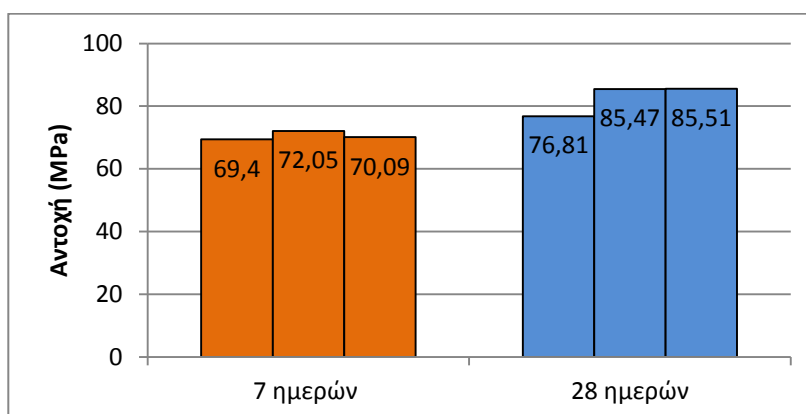
Πίνακας 23: Παράμετροι σερβοϋδραυλικής μηχανής για την δοκιμή θλίψης

Παράμετροι	Τιμές
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

Όσον αφορά την εικόνα θραύσης των δοκιμών η πλειοψηφία των κυβικών δοκιμών θραύτηκε μετά από αρχική αποφλοίωση και με κατακόρυφες ρωγμές.

Πίνακας 24: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ1 (άοπλο σκυροδέμα)

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1 7 ημερών		Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1 28 ημερών	
Δοκίμιο Cube 1.1		Δοκίμιο Cube 1.4	
Φορτίο kN:	694	Φορτίο kN:	768,1
MPa:	69,4	MPa:	76,81
Βάρος (kg):	2,428	Βάρος (kg):	2,404
Δοκίμιο Cube 1.2		Δοκίμιο Cube 1.5	
Φορτίο kN:	720,5	Φορτίο kN:	854,7
MPa:	72,05	MPa:	85,47
Βάρος (kg):	2,419	Βάρος (kg):	2,4004
Δοκίμιο Cube 1.3		Δοκίμιο Cube 1.6	
Φορτίο kN:	700,9	Φορτίο kN:	855,1
MPa:	70,09	MPa:	85,51
Βάρος (kg):	2,416	Βάρος (kg):	2,4209
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	70,5133	Μ.Ο Φορτίου (MPa)	82,5967
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,37478	Τ.Α Φορτίου (MPa)	5,011
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,421	Μ.Ο Βάρους (kg)	2,40843
Τ.Α Βάρους (kg)	0,006245	Τ.Α Βάρους (kg)	0,01095



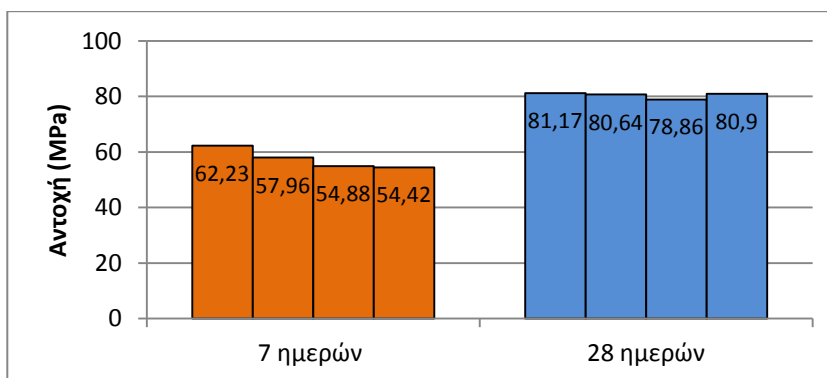
Διάγραμμα 3: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ1

Τα αποτελέσματα της σύνθεσης του άοπλου σκυροδέματος ήταν παραπάνω από ικανοποιητικά όσον αφορά της τιμές της αντοχής που λάβαμε καθώς έδωσαν αρκετά μεγάλες τιμές αντοχής τόσο στις 28 ημέρες αλλά και στις 7, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στην προσθήκη της πυριτικής παιπάλης που επιταχύνει την ανάπτυξη πρώιμων αντοχών. Επίσης, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες συνθέσεις που έγιναν στη συνέχεια υπήρχε ευκολία κατά την ανάμειξη λόγω της απουσίας των ινών.

Πίνακας 25: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 A&B 7 ημερών	
Δοκίμιο Cube 2a.1	
Φορτίο kN:	622,3
MPa:	62,23
Βάρος (kg):	2,406
Δοκίμιο Cube 2a.2	
Φορτίο kN:	579,6
MPa:	57,96
Βάρος (kg):	2,419
Δοκίμιο Cube 2a.3	
Φορτίο kN:	548,8
MPa:	54,88
Βάρος (kg):	2,413
Δοκίμιο Cube 2a.4	
Φορτίο kN:	544,2
MPa:	54,42
Βάρος (kg):	2,404
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	57,3725
Τ.Α Φορτίου (MPa)	3,59955
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,4105
Τ.Α Βάρους (kg)	0,00686

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 A & B 28 ημερών	
Δοκίμιο Cube 2a.5	
Φορτίο kN:	811,7
MPa:	81,17
Βάρος (kg):	2,400
Δοκίμιο Cube 2a.6	
Φορτίο kN:	806,4
MPa:	80,64
Βάρος (kg):	2,4141
Δοκίμιο Cube 2a.7	
Φορτίο kN:	788,6
MPa:	78,86
Βάρος (kg):	2,3974
Δοκίμιο Cube 2b.8	
Φορτίο kN:	809,0
MPa:	80,90
Βάρος (kg):	2,4581
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	80,393
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,210
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,417
Τ.Α Βάρους (kg)	0,02811



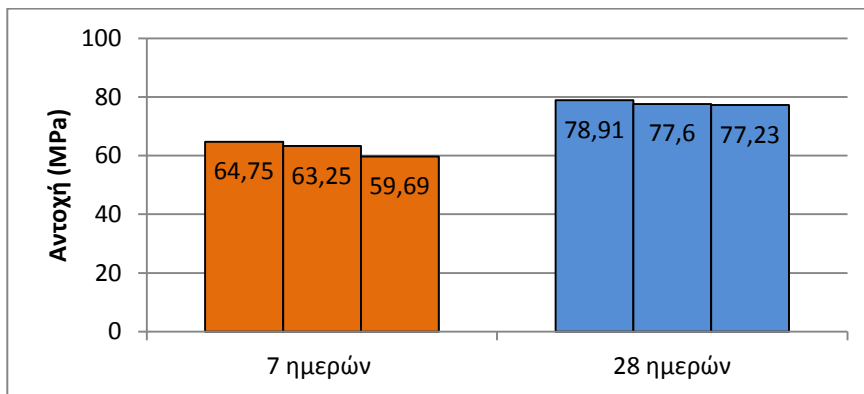
Διάγραμμα 4: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ2

Με την προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα, σε ποσότητα 20kg/m³, παρατηρήθηκε μείωση της αντοχής των δοκιμών των 7 ημερών αλλά και των 28 ημερών σε μικρότερο ποσοστό, γεγονός που οφείλεται στη δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά την ανάμειξη λόγω της παρουσίας των ινών και του μεγάλου όγκου του μίγματος. Παρόλα αυτά, οι αντοχές των 28 ημερών είναι πολύ υψηλές γενικότερα αλλά και σε σχέση με αυτές των 7 ημερών.

Πίνακας 26: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ3 (30kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ 7ημερών	
Δοκίμιο Cube 3a.1	
Φορτίο kN:	647,5
MPa:	64,75
Βάρος (kg):	2,404
Δοκίμιο Cube 3b.2	
Φορτίο kN:	632,5
MPa:	63,25
Βάρος (kg):	2,404
Δοκίμιο Cube 3c.3	
Φορτίο kN:	596,9
MPa:	59,69
Βάρος (kg):	2,433
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	62,5633
Τ.Α Φορτίου (MPa)	2,59895
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,41367
Τ.Α Βάρους (kg)	0,01674

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ 28 ημερών	
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



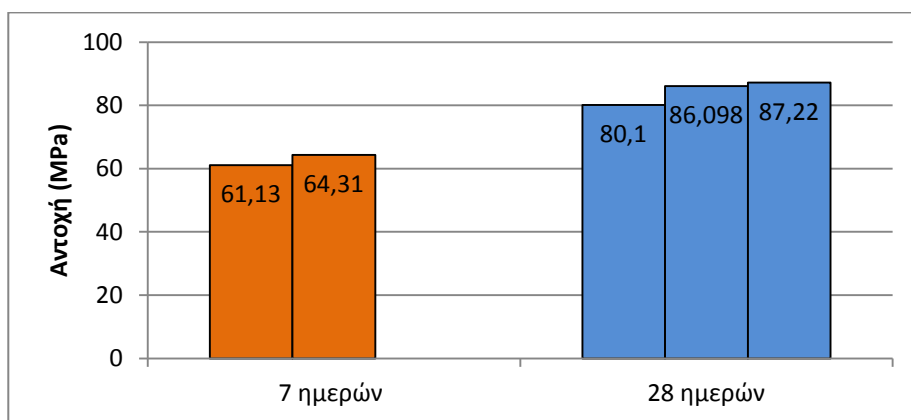
Διάγραμμα 5: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ3

Με την περαιτέρω αύξηση του ποσοστού των ιών που προστέθηκαν φαίνεται ότι επηρεάστηκαν αρνητικά τα δοκίμια των 28 ημερών, σε πολύ μικρό βαθμό βέβαια, καθώς παρουσίασαν ελάχιστα χαμηλότερες αντοχές. Ωστόσο, τα δοκίμια των 7 ημερών παρουσίασαν αύξηση των αντοχών τους σε θλίψη σε σχέση με την προηγούμενη σύνθεση Σ2 γεγονός που οφείλεται στην αύξηση της ποσότητας των ιών.

Πίνακας 27: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ4(40kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Κύρια σύνθεση Σ4 A & B 7 ημερών	
Δοκίμιο Cube 4a.1	
Φορτίο kN:	611,27
MPa:	61,127
Βάρος (kg):	2,445
Δοκίμιο Cube 4b.2	
Φορτίο kN:	643,1
MPa:	64,310
Βάρος (kg):	2,430
Δοκίμιο Cube 4b.3	
Φορτίο kN:	
MPa:	
Βάρος (kg):	
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	62,7185
Τ.Α Φορτίου (MPa)	2,25072
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,4375
Τ.Α Βάρους (kg)	0,01061

Κύρια σύνθεση Σ4 A & B 28 ημερών	
Δοκίμιο Cube 4a.4	
Φορτίο kN:	801,07
MPa:	80,107
Βάρος (kg):	2,4075
Δοκίμιο Cube 4b.5	
Φορτίο kN:	860,98
MPa:	86,098
Βάρος (kg):	2,3976
Δοκίμιο Cube 4b.6	
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



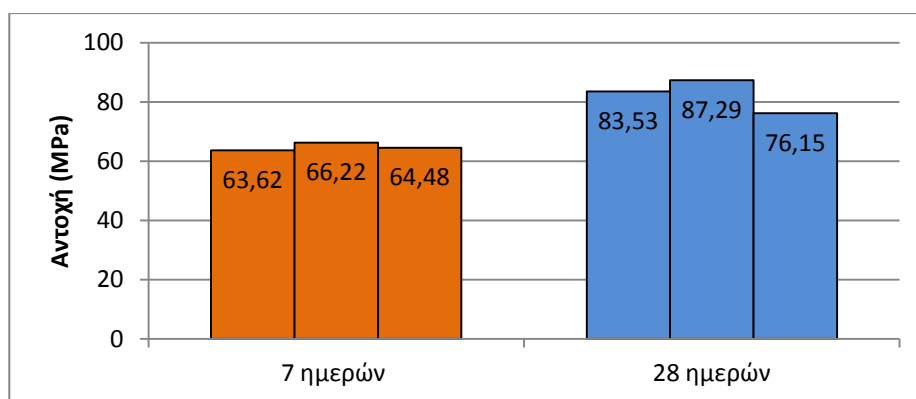
Διάγραμμα 6: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ4

Η μεγάλη ποσότητα των ινών σε αυτή τη σύνθεση, 40kg στο κυβικό μέτρο σκυροδέματος, φαίνεται να βελτιστοποιεί τα αποτελέσματα αντοχών 28 ημερών σε θλίψη καθώς οι ίνες συνεργάζονται καλύτερα με το σκυρόδεμα και εξουδετερώνουν την ανάπτυξη των μικρορωγμών, ενώ στα δοκίμια των 7 ημερών δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις. Η απουσία μέτρησης για το δοκίμιο 4b.3 οφείλεται στο γεγονός ότι η μέτρηση της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη πραγματοποιήθηκε εκτός των προδιαγραφών της δοκιμής καθώς λόγω λάθους τοποθετήθηκε στην μηχανή θλίψης με την ελεύθερη επιφάνεια να δέχεται τη φόρτιση.

Πίνακας 28: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ5(άοπλο σκυρόδεμα)

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B 7 ημερών	
Δοκίμιο Cube 5a.1	
Φορτίο kN:	636,2
MPa:	63,62
Βάρος (kg):	2,3813
Δοκίμιο Cube 5b.2	
Φορτίο kN:	662,2
MPa:	66,22
Βάρος (kg):	2,4221
Δοκίμιο Cube 5b.3	
Φορτίο kN:	644,8
MPa:	64,48
Βάρος (kg):	2,4166
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	64,772
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,3219
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,4067
Τ.Α Βάρους (kg)	0,02214

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B 28 ημερών	
Δοκίμιο Cube 5a.4	
Φορτίο kN:	835,3
MPa:	83,53
Βάρος (kg):	2,388
Δοκίμιο Cube 5a.5	
Φορτίο kN:	872,9
MPa:	87,29
Βάρος (kg):	2,385
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

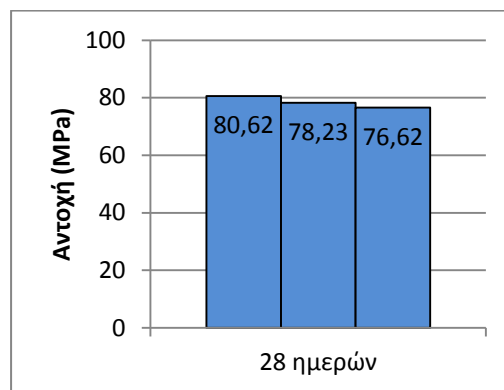


Διάγραμμα 7: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ5

Παρατηρούμε ότι οι δύο συνθέσεις άοπλου σκυροδέματος, Σ1 και Σ5, παρά την διαφοροποίηση των αδρανών παρουσιάζουν σχετικά παρόμοια αποτελέσματα στις αντοχές που έχουν λάβει στις 28 ημέρες. Σε κάθε περίπτωση, παρατηρήθηκε ότι η απουσία ινών στο σκυρόδεμα έδωσε αρκετά μεγάλες αντοχές κυρίως λόγω της ευκολίας στην ανάμειξη του μίγματος καθώς ο αναδευτήρας λειτουργούσε χειροκίνητα. Ωστόσο, στην εικόνα που παρουσίασαν τα δοκίμια κατά τη θραύση στο άοπλο σκυρόδεμα παρατηρήθηκαν μεγαλύτερες αποφλοιώσεις.

Πίνακας 29: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης κύριας σύνθεσης Σ6 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Κύρια σύνθεση Σ6 28 ημερών	
Δοκίμιο Cube 6.1	
Φορτίο kN:	806,2
MPa:	80,62
Βάρος (kg):	2,412
Δοκίμιο Cube 6.2	
Φορτίο kN:	782,3
MPa:	78,23
Βάρος (kg):	2,406
Δοκίμιο Cube 6.3	
Φορτίο kN:	766,2
MPa:	76,62
Βάρος (kg):	2,417
M.O Φορτίου (MPa)	78,490
T.A Φορτίου (MPa)	2,013
M.O Βάρους (kg)	2,411667
T.A Βάρους (kg)	0,00551

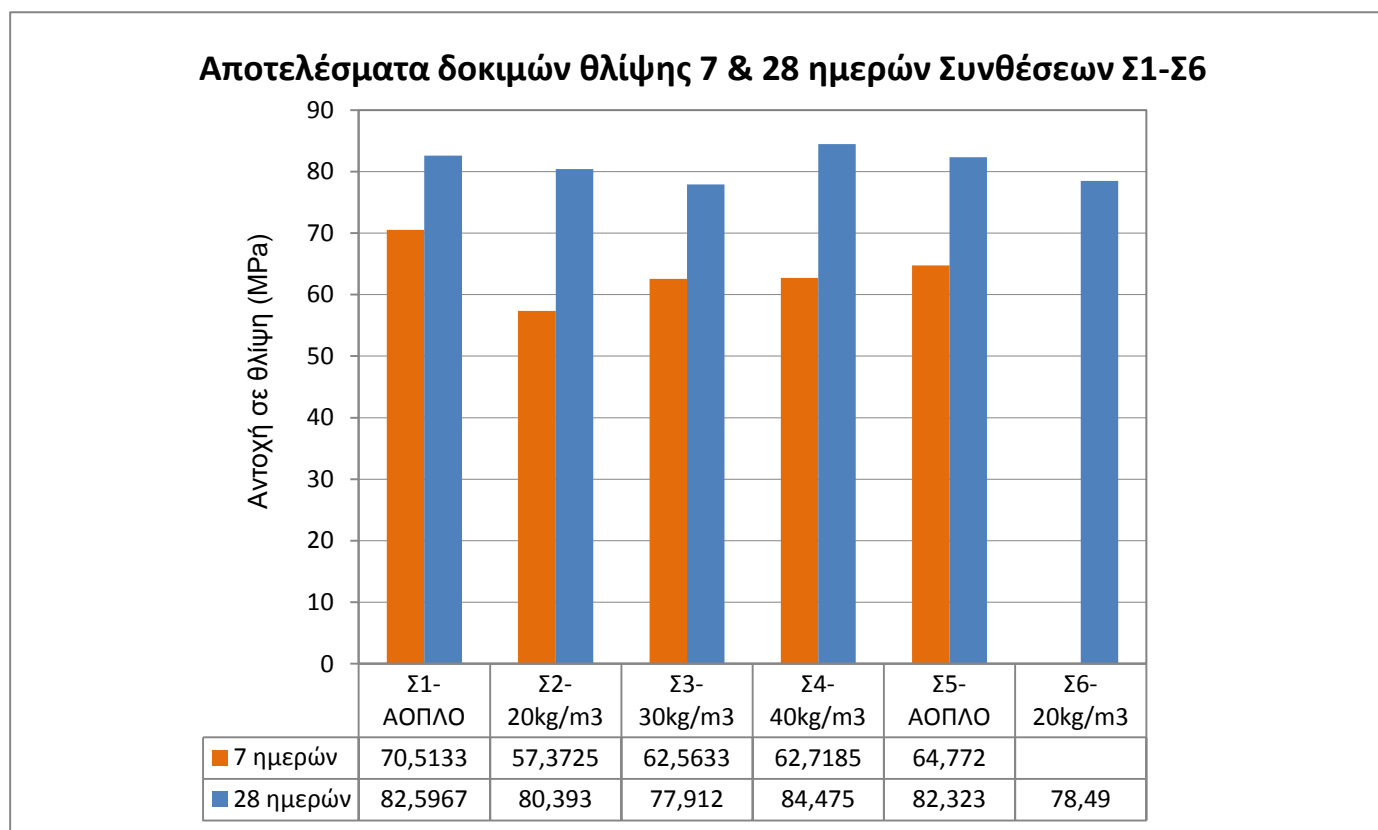


Διάγραμμα 8: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης σύνθεσης Σ6

Η σύνθεση Σ6 αποτελεί επαναληπτική της Σ2 με τα νέα αδρανή κατά την οποία παρασκευάστηκαν 3 δοκίμια για έλεγχο της αντοχής τους στις 28 ημέρες έτσι ώστε να διερευνηθούν τυχόν διαφορές ανάμεσα στις δύο συνθέσεις. Παρόλα αυτά βλέπουμε ότι οι διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών των 28 ημερών είναι αρκετά μικρές με μία μείωση της τάξης του 2,36% που είναι πρακτικά ελάχιστη.

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγραμματικά οι μέσες τιμές των αντοχών στις 7 και 28 ημέρες για τις 6 συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν. Αμέσως γίνεται εμφανές ότι οι αντοχές των 28 ημερών όπως αναμενόταν ήταν αρκετά μεγαλύτερες από αυτές των δοκιμών ηλικίας 7 ημερών.

Επίσης, η προσθήκη χαλύβδινων ινών με περιεκτικότητα 40kg στο κυβικό αυξάνει την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη του σκυροδέματος, κατά 2,61% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, τουλάχιστον όσον αφορά την αντοχή των δοκιμών των 28 ημερών, καθιστώντας τη την προτιμότερη σύνθεση από τα ινοπλισμένα καθώς και οι συνθέσεις Σ1 και Σ5 το άοπλου σκυροδέματος παρουσίασαν πολύ καλά αποτελέσματα κυρίως όμως λόγω της ευκολίας των αναμειξέων.



Διάγραμμα 9: Αποτελέσματα δοκιμών θλίψης 7 & 28 ημερών συνθέσεων Σ1- Σ6

4.2.Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης για τις 6 πραγματοποιούμενες συνθέσεις καθώς επίσης και οι μέσες τιμές των αντοχών τους διαγραμματικά.



Εικόνα 30: Διάταξη δοκιμής κάμψης 4 σημείων

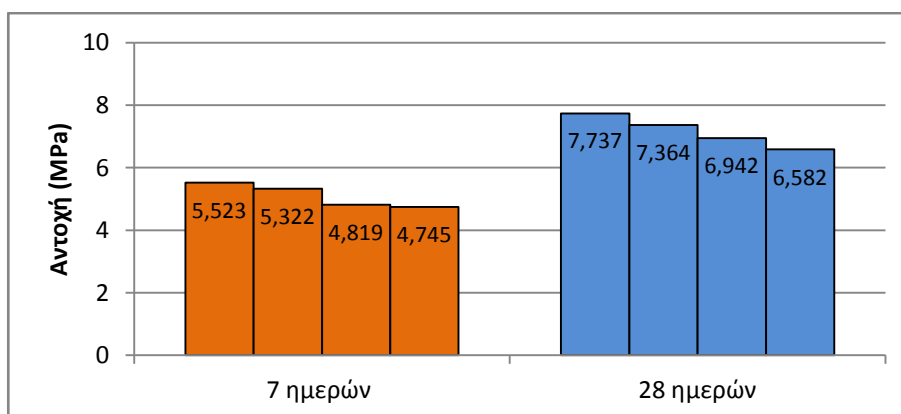
Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο της ASTM C1609/ C1609M-05 “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading)” και κατά τη δοκιμή εισήχθησαν στη μηχανή παράμετροι όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 30: Παράμετροι σερβοϋδραυλικής μηχανής για την δοκιμή κάμψης

Παράμετροι	Τιμές
Test speed	5-50 μ m/min
Set Point	10.0 kN
Peak Sensitivity	40.0 kN
Ramp Offset	1600 bit
Max. Correction -	500 bit
Max. Correction +	5000 bit

Πίνακας 31: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ1 (άοπλο σκυρόδεμα)

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1 7 ημερών		Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ1 28 ημερών	
Δοκίμιο Beam 1.1		Δοκίμιο Beam 1.5	
Φορτίο kN:	18,41	Φορτίο kN:	25,79
MPa:	5,523	MPa:	7,737
Βάρος (kg):	12,287	Βάρος (kg):	12,276
Δοκίμιο Beam 1.2		Δοκίμιο Beam 1.6	
Φορτίο kN:	17,74	Φορτίο kN:	24,547
MPa:	5,322	MPa:	7,3641
Βάρος (kg):	11,92	Βάρος (kg):	12,187
Δοκίμιο Beam 1.3		Δοκίμιο Beam 1.7	
Φορτίο kN:	16,064	Φορτίο kN:	23,139
MPa:	4,819	MPa:	6,942
Βάρος (kg):	11,905	Βάρος (kg):	11,876
Δοκίμιο Beam 1.4		Δοκίμιο Beam 1.8	
Φορτίο kN:	15,816	Φορτίο kN:	21,914
MPa:	4,745	MPa:	6,582
Βάρος (kg):	11,831	Βάρος (kg):	12,153
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	5,1023	Μ.Ο Φορτίου (MPa)	7,15628
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,38	Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,50197
Μ.Ο Βάρους (kg)	11,98575	Μ.Ο Βάρους (kg)	12,12295
Τ.Α Βάρους (kg)	0,20457	Τ.Α Βάρους (kg)	0,17256



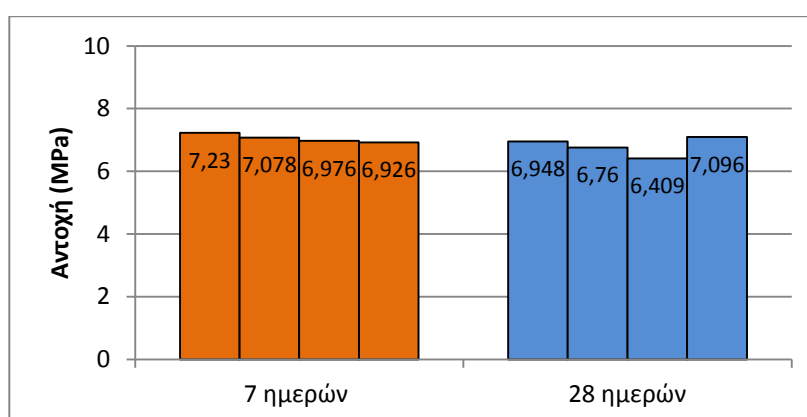
Διάγραμμα 10: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ1

Στην σύνθεση Σ1 παρατηρείται αρκετά μεγάλη διαφορά ανάμεσα στις αντοχές των 7 και 28 ημερών, σε σχέση και με τις υπόλοιπες συνθέσεις, και με τις δύο να κυμαίνονται, ωστόσο, σε πολύ υψηλά επίπεδα από άποψη τελικών αντοχών. Παρόλα αυτά, όπως ήταν αναμενόμενο, τα πρισματικά δοκίμια του άοπλου σκυροδέματος εμφάνισαν πολύ ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη θραύση.

Πίνακας 32: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης προπαρασκευαστικής σύνθεσης Σ2 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 Α&Β 7 ημερών	
Δοκίμιο Beam 2b.1	
Φορτίο kN:	24,101
MPa:	7,2303
Βάρος (kg):	12,065
Δοκίμιο Beam 2b.2	
Φορτίο kN:	23,595
MPa:	7,0785
Βάρος (kg):	12,0004
Δοκίμιο Beam 2b.3	
Φορτίο kN:	23,253
MPa:	6,9759
Βάρος (kg):	12,3622
Δοκίμιο Beam 2b.4	
Φορτίο kN:	23,086
MPa:	6,9258
Βάρος (kg):	12,193
M.O Φορτίου (MPa)	7,052625
T.A Φορτίου (MPa)	0,134424
M.O Βάρους (kg)	12,15515
T.A Βάρους (kg)	0,159559

Προπαρασκευαστική σύνθεση Σ2 Α & Β 28 ημερών	
Δοκίμιο Beam 2a.5	
Φορτίο kN:	23,16
MPa:	6,948
Βάρος (kg):	12,028
Δοκίμιο Beam 2a.6	
Φορτίο kN:	22,533
MPa:	6,760
Βάρος (kg):	12,104
Δοκίμιο Beam 2a.7	
Φορτίο kN:	21,363
MPa:	6,409
Βάρος (kg):	12,200
Δοκίμιο Beam 2b.8	
Φορτίο kN:	23,653
MPa:	7,096
Βάρος (kg):	12,0737
M.O Φορτίου (MPa)	6,803
T.A Φορτίου (MPa)	0,29664
M.O Βάρους (kg)	12,1014
T.A Βάρους (kg)	0,07276



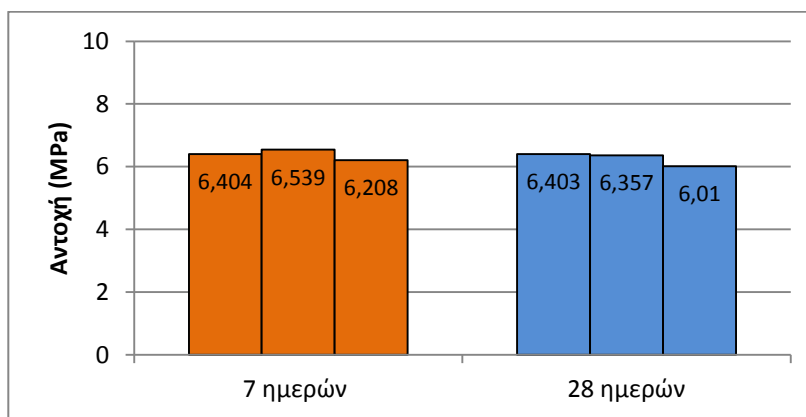
Διάγραμμα II: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ2

Η προσθήκη ινών βελτίωσε τα αποτελέσματα των αντοχών των δοκιμών στις 7 ημέρες ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κάποια αύξηση στα δοκίμια των 28 ημερών που αντίθετα είχαν πτώση σε ποσοστό 4,93%. Και τα δύο, ωστόσο, παρουσιάζουν ικανοποιητικές τιμές αντοχών αν και η ανάμειξη όπως αποδείχθηκε από την τελική εικόνα των δοκιμών μετά τη θραύση δεν ήταν η επιθυμητή.

Πίνακας 33: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ3(30kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ 7 ημερών	
Δοκίμιο Beam 3a.1	
Φορτίο kN:	21,347
MPa:	6,404
Βάρος (kg):	12,080
Δοκίμιο Beam 3a.2	
Φορτίο kN:	21,798
MPa:	6,539
Βάρος (kg):	12,049
Δοκίμιο Beam 3b.3	
Φορτίο kN:	20,694
MPa:	6,208
Βάρος (kg):	12,150
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,383667
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,166434
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,093
Τ.Α Βάρους (kg)	0,05174

Κύρια σύνθεση Σ3 Α, Β & Γ 28 ημερών	
Δοκίμιο Beam 3a.4	
Φορτίο kN:	21,344
MPa:	6,403
Βάρος (kg):	12,097
Δοκίμιο Beam 3a.5	
Φορτίο kN:	21,189
MPa:	6,357
Βάρος (kg):	12,133
Δοκίμιο Beam 3b.6	
Φορτίο kN:	20,032
MPa:	6,010
Βάρος (kg):	11,857
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,257
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,214854
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,02907
Τ.Α Βάρους (kg)	0,150109



Διάγραμμα 12: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ3

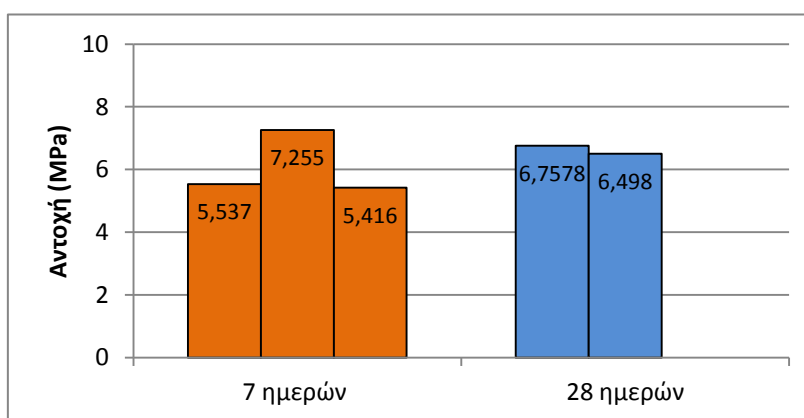
Στη σύνθεση Σ3 με την αύξηση του ποσοστού των ινών, παρατηρήθηκε μείωση των αντοχών συγκριτικά με τη Σ2 τόσο στις αντοχές των 7 όσο και των 28 ημερών. Αυτό οφείλεται, και πάλι, όπως έδειξαν και οι τομές των δοκιμίων που προέκυψαν μετά την θραύση στην διασπορά των ινών που δεν ήταν η ενδεδειγμένη καθώς φάνηκε η συγκέντρωσή τους στην κάτω ίνα των δοκιμίων.

Γενικά στη συγκεκριμένη σύνθεση όπως και στην προηγούμενη, αντιμετωπίστηκαν προβλήματα κυρίως με την ανάμειξη και τη δόνηση των δοκιμίων που φάνηκε τόσο από τις τιμές των αντοχών όσο και από την εικόνα των δοκιμίων.

Πίνακας 34: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ4(40kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

Κύρια σύνθεση Σ4 A & B 7 ημερών	
Δοκίμιο Beam 4a.1	
Φορτίο kN:	18,456
MPa:	5,5368
Βάρος (kg):	11,914
Δοκίμιο Beam 4b.2	
Φορτίο kN:	24,183
MPa:	7,255
Βάρος (kg):	12,461
Δοκίμιο Beam 4b.3	
Φορτίο kN:	18,053
MPa:	5,416
Βάρος (kg):	12,148
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,0692
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,02862
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,17433
Τ.Α Βάρους (kg)	0,274449

Κύρια σύνθεση Σ4 A & B 28 ημερών	
Δοκίμιο Beam 4a.4	
Φορτίο kN:	22,526
MPa:	6,7578
Βάρος (kg):	12,133
Δοκίμιο Beam 4b.5	
Φορτίο kN:	21,659
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)	0,183706
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,11185
Τ.Α Βάρους (kg)	0,029486

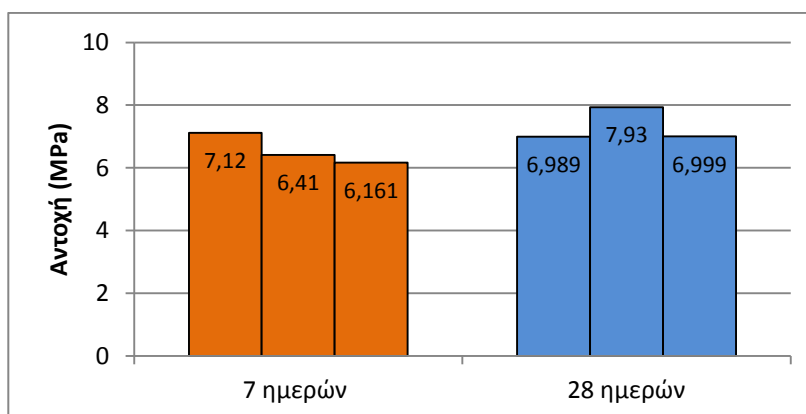


Διάγραμμα 13: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ4

Με την περαιτέρω προσθήκη ινών δεν παρατηρήθηκε κάποια αύξηση των αντοχών των δοκιμίων, αντιθέτως παρατηρήθηκε μείωση των αντοχών των 7 ημερών ενώ οι αντοχές των 28 ημερών διατηρούνται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια αυτής της σύνθεσης είχαν την καλύτερη συμπεριφορά κατά τη θραύση καθώς ήταν τα μόνα που δεν θραύτηκαν ψαθυρά και είχαν παραμένονσα αντοχή αρκετά μεγάλη. Ουσιαστικά, οι ίνες εξακολουθούσαν να παραλαμβάνουν εφελκυστικά φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του δοκιμίου, ενισχύοντας την πλαστική πλέον φύση του.

Πίνακας 35: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ5(άοπλο σκυρόδεμα)

Κύρια σύνθεση Σ5 A & B 7 ημερών		Κύρια σύνθεση Σ5 A & B 28 ημερών	
Δοκίμιο Beam 5a.1		Δοκίμιο Beam 5a.4	
Φορτίο kN:	23,734	Φορτίο kN:	23,295
MPa:	7,1202	MPa:	6,989
Βάρος (kg):	12,1437	Βάρος (kg):	12,200
Δοκίμιο Beam 5a.2		Δοκίμιο Beam 5b.5	
Φορτίο kN:	21,376	Φορτίο kN:	26,432
MPa:	6,4128	MPa:	7,930
Βάρος (kg):	11,9364	Βάρος (kg):	12,121
Δοκίμιο Beam 5a.3		Δοκίμιο Beam 5b.6	
Φορτίο kN:	20,535	Φορτίο kN:	23,329
MPa:	6,1605	MPa:	6,999
Βάρος (kg):	12,105	Βάρος (kg):	11,776
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,5645	Μ.Ο Φορτίου (MPa)	7,306
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,49751	Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,540423
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,0617	Μ.Ο Βάρους (kg)	12,032
Τ.Α Βάρους (kg)	0,11022	Τ.Α Βάρους (kg)	0,2255

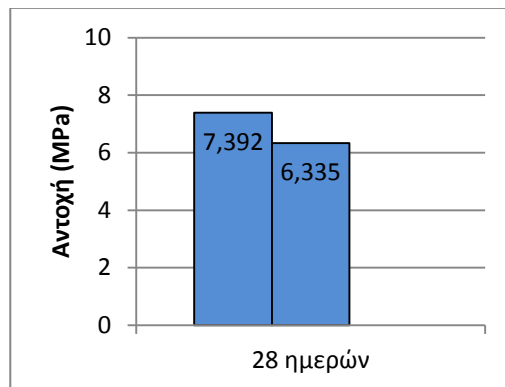


Διάγραμμα 14: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ5

Η σύνθεση Σ5 συγκριτικά με τη Σ1 παρουσιάζει βελτιωμένα αποτελέσματα κυρίως στα δοκίμια των 7 ημερών. Γενικότερα, διατηρήθηκαν οι αντοχές σε πολύ ικανοποιητικά επίπεδα με αναμενομένη όπως ήταν φυσικό ψαθυρή θραύση των πρισματικών δοκιμίων κατά την κάμψη.

Πίνακας 36: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης κύριας σύνθεσης Σ6 (20kg χαλύβδινες ίνες ανά m³ σκυροδέματος)

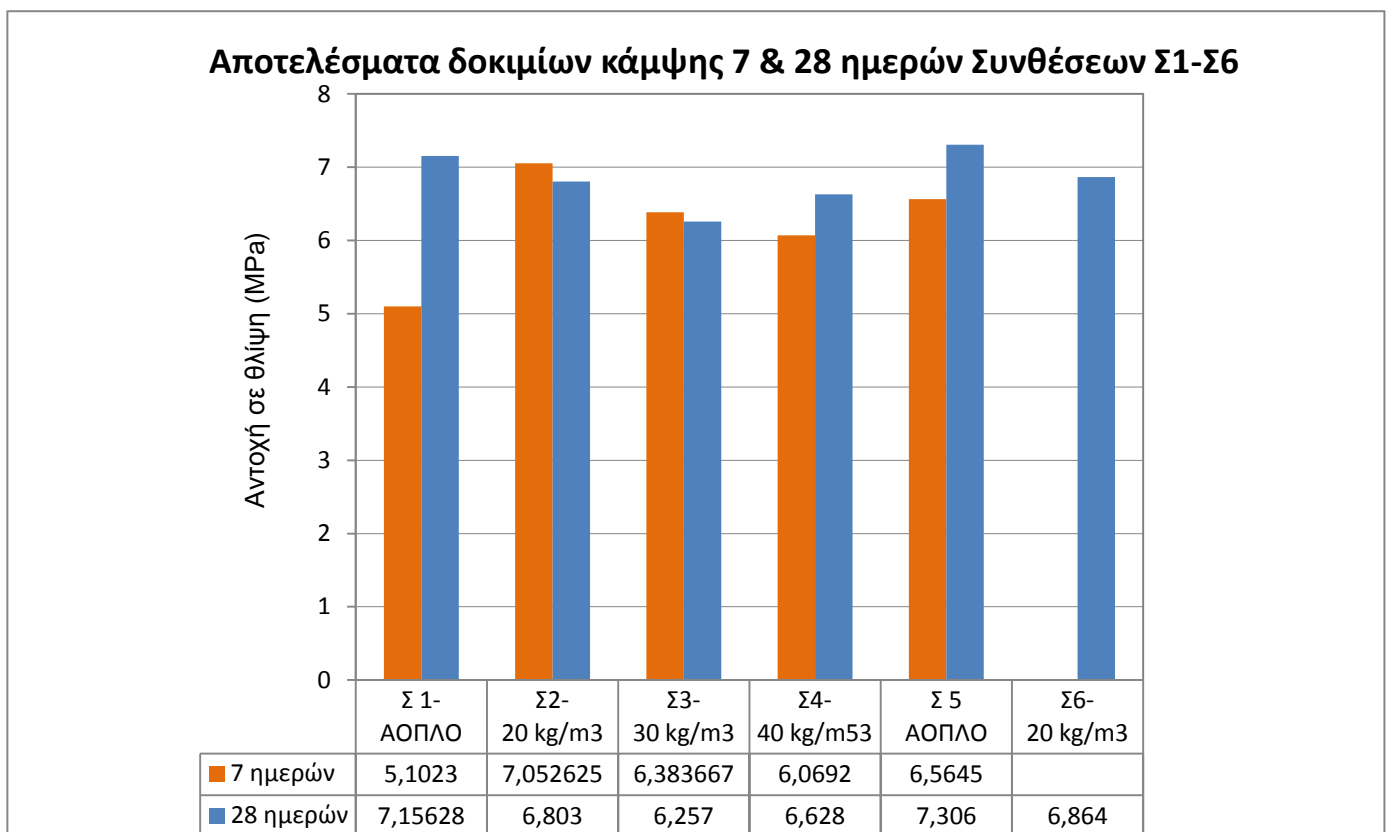
Κύρια σύνθεση Σ6 28 ημερών	
Δοκίμιο Beam 6.1	
Φορτίο kN:	24,640
MPa:	7,392
Βάρος (kg):	12,239
Δοκίμιο Beam 6.2	
Φορτίο kN:	21,118
MPa:	6,335
Βάρος (kg):	12,204
Δοκίμιο Beam 6.3	
Φορτίο kN:	
MPa:	
Βάρος (kg):	
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	6,864
Τ.Α Φορτίου (MPa)	0,747129
Μ.Ο Βάρους (kg)	12,222
Τ.Α Βάρους (kg)	0,0247



Διάγραμμα 15: Αποτελέσματα δοκιμής κάμψης σύνθεσης Σ6

Παρά την χρήση διαφορετικών αδρανών η σύνθεση Σ6 παρουσίασε σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα με τη σύνθεση Σ2 με ένα από τα δοκίμια να θραύεται εκτός της περιοχής που ορίζει το πρότυπο της δοκιμής και για το λόγο αυτό η μέτρηση θεωρήθηκε άκυρη. Γενικά, οι κύριες συνθέσεις που αποτελούσαν επαναληπτικές προηγούμενων συνθέσεων λόγω της χρήσης νέων αδρανών υλικών ελάχιστες διαφορές είχαν στις τιμές των αντοχών.

Όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, τα αποτελέσματα δεν ήταν ακριβώς τα αναμενόμενα. Το άοπλο σκυρόδεμα έφτασε σε αρκετά υψηλά επίπεδα αντοχών σε σχέση με το ινοπλισμένο. Από την αστοχία του όμως φάνηκε πως, σαφώς, έχει εντελώς ψαθυρή συμπεριφορά χωρίς δυνατότητα παραλαβής επιπλέον φόρτισης μετά τη θραύση του. Από την άλλη μεριά, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε όλες τις συνθέσεις, Σ2-Σ4, παρουσίασε αυξημένες αντοχές στις 7 ημέρες χωρίς σημαντικές αυξομειώσεις στα αποτελέσματα των 28 ημερών, εκτός ίσως από την Σ4 που παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής αλλά και της παραμένουσας.



Διάγραμμα 16: Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης 7 & 28 ημερών συνθέσεων Σ1-Σ6

Κεφάλαιο 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την αρχική φάση προγραμματισμού των εργασιών της διπλωματικής εργασίας, αντιμετωπίστηκε δυσκολία στην ανεύρεση εργαστηρίου που θα μας φιλοξενούσε για την διεξαγωγή των πειραμάτων μας καθώς έπρεπε να διαθέτει κατάλληλη μηχανή ανάδευσης. Τελικά, τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών αλλά όχι και οι εργαστηριακές δοκιμές καθώς αυτές πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων καθώς εκεί υπήρχε κατάλληλη μηχανή φόρτισης. Για το λόγο αυτό, όλα τα δοκίμια έπρεπε να μεταφέρονται παρά το βάρος τους σε άλλη σχολή κάθε φορά.

Επιπλέον, προβλήματα αντιμετωπίστηκαν και κατά την συλλογή των υλικών που θα χρησιμοποιούσαμε. Ιδιαίτερα δύσκολη αναδείχθηκε η ανεύρεση αδρανών υλικών καθώς θέλαμε σαφώς συγκεκριμένου μεγέθους αδρανή. Επίσης, τη δεύτερη φορά που χρειάστηκε να προμηθευτούμε αδρανή, λόγω έλλειψης, δεν μπορέσαμε να βρούμε τα ίδια και χρησιμοποιήθηκαν τα αδρανή του εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος και για το λόγο αυτό, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, κάποιες συνθέσεις πραγματοποιήθηκαν δύο φορές ώστε εν τέλει όλες οι συνθέσεις να γίνουν με τα ίδια αδρανή. Για κάθε παρτίδα αδρανών πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές κοκκομετρικές αναλύσεις. Έτσι, ο κύκλος των εργασιών μας παρουσίασε αρκετές επαναλαμβανόμενες εργασίες που θα μπορούσαν να είχαν αποφευχθεί. Όσον αφορά το τσιμέντο, η ανεύρεση του συγκεκριμένου τύπου που απαιτούνταν για ινοπλισμένο σκυρόδεμα αλλά και η ποσότητα που χρειαζόμασταν αποδείχθηκε εξίσου δύσκολη, καθώς έπρεπε να το παραλάβουμε μόνοι μας.

Κατά την παραγωγή των συνθέσεων στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων αντιμετωπίστηκε πλήθος δυσχερειών που αναλύονται παρακάτω και από τις οποίες εξήχθησαν οι παρακάτω παρατηρήσεις-προτάσεις.

Αρχικά, στις περισσότερες από τις συνθέσεις υπήρξε δυσκολία στο χειρισμό του αναδευτήρα που έπρεπε να γίνει χειροκίνητα. Για το λόγο αυτό, κάποιες συνθέσεις διαιρέθηκαν σε δύο ή και τρεις δόσεις με αποτέλεσμα 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 στα αποτελέσματα των δοκιμών.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι σε κάποιες περιπτώσεις ο διασκορπισμός των ινών δεν ήταν ο

επιθυμητός. Έτσι, προτείνεται όταν αυτό είναι εφικτό, ακόμα και για εργαστηριακές δοκιμές, το σκυρόδεμα να προέρχεται από σταθμό παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος και να δίνεται μεγαλύτερος χρόνος στην ανάμειξη και δόνηση του σκυροδέματος με τις ίνες για να γίνεται καλύτερη απομάκρυνση του εγκλωβισμένου αέρα αλλά και καλύτερος διασκορπισμός των ινών, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία συσσωματώσεων ινών. Γενικότερα, οι συνθέσεις πρέπει να παρασκευάζονται με προσοχή ώστε τα μίγματα που παράγονται να είναι ομοιόμορφα και να ανταποκρίνονται στα επιτόπου.

Συγκεντρωτικά, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- ❖ Με την προσθήκη των ινών στο μίγμα φάνηκε ότι αυξήθηκαν κυρίως η καμπτική αντοχή στα δοκίμια των 7 ημερών αλλά και η θλιπτική για μεγάλη περιεκτικότητα σε ίνες.
- ❖ Στη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, πιο συγκεκριμένα, η σύνθεση Σ4, με περιεκτικότητα σε ίνες 40kg στο κυβικό μέτρο σκυροδέματος, είχε τα βέλτιστα αποτελέσματα καθώς παρουσίασε τη μέγιστη αντοχή στα δοκίμια των 28 ημερών και ταυτόχρονα, η αντοχή των 7 ημερών παρέμεινε σε αρκετά υψηλά επίπεδα.
- ❖ Στη δοκιμή κάμψης ενώ το «first crack» δηλαδή η αντοχή που έλαβαν τα δοκίμια στη θραύση φαίνεται να είναι μεγαλύτερη στο άοπλο σκυρόδεμα, παρατηρήθηκε ότι οι συνθέσεις με χρήση ινών είχαν καλύτερη συμπεριφορά κατά τη θραύση αφού συνέχιζαν να παραλαμβάνουν φορτία ακόμα και μετά από αυτή. Ειδικότερα, η χρήση μεγάλων ποσοστών ινών στη μάζα του μίγματος αλλάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος με συνέπεια τη μεταβολή τους. Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης, επομένως, ανέδειξαν την συνεισφορά της χρήσης ινών στην αντοχή του σκυροδέματος.
- ❖ Συγκεκριμένα, η σύνθεση Σ4 με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε ίνες, με 40 kg ινών στο m^3 σκυροδέματος, είχε ως εικόνα κατά τη δοκιμή κάμψης τα δοκίμια να χάνουν εντελώς τον ψαθυρό τους χαρακτήρα και να επικρατήσει η πλαστική συμπεριφορά με την αύξηση της τάσης και της παραμόρφωσης των δοκιμίων. Το αποτέλεσμα αυτό συμβαδίζει και με την προτεινόμενη περιεκτικότητα σε ίνες που ορίζεται σε προσθήκη ινών τουλάχιστον 30kg στο m^3 .
- ❖ Για χρήση σε υπόγεια έργα συνιστάται, επομένως, η χρήση ινών στο σκυρόδεμα καθώς όπως φάνηκε μέσω της ανακατανομής των τάσεων στο πέτρωμα προσέδωσε

στο σκυρόδεμα την απαραίτητη πλαστιμότητα ώστε να δεχτεί μεγάλα φορτία ακόμα και μετά την αστοχία του, γεγονός που το καθιστά ασφαλές σε περίπτωση ατυχήματος ή ακόμα και κακοτεχνίας διότι εξασφαλίζει ικανοποιητικό χρόνο αντίδρασης.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Σοφιανός, Α.Ι. , *Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων*, Αθήνα 2010
- Καραβεζύρογλου-Βέμπερ, Μ. (2011), *Στοιχεία υπολογισμού και διαμόρφωσης ολόσωμων κατασκευών*, Εκδόσεις Τζιόλα
- Μαρσέλλος, Ν., Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος-Από τον Κ.Τ.Σ. 97 στον Κ.Τ.Σ. 2013, Εκδόσεις Δεδεμάδη (2013)
- Παναγόπουλος Γ. Και Κίρτας Ε., (2005), *Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος Ι*
- Maidl, B.R.,(1995). *Steel fibre Reinforced Concrete*, Ernst & Sohn
- Vanderwalle, M.,(1993). *Tunneling the World*, Dramix
- Τσακαλάκης, Κ. (2010), *Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος*
- Μαρκαντωνάτος, Ν.-Δεμαρτίνο, Κ., *Ινοπλισμένο σκυρόδεμα- Συμπεριφορά SFRC υπό φόρτιση και ικανότητα σε διάτμηση δοκών (Προσέγγιση με την μηχανική των θραύσεων)*, στο 9ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενισχύσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003
- Παπαχαρίσης, Ν -Γραμματικόπουλος, Ι-Μάνου Ανδρεάδη, Ν , *Γεωτεχνική Μηχανική, Έρευνα, Γεωτρήσεις, Εργαστήριο*, Εκδόσεις Κυριακίδη (2003)
- 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
- Sika (T.Hirschi, H.Knauber, M.Lanz, J.Schlumpf, J.Schrabbach, C.Spirig, U.Waeber), *Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος Sika* (2007)
- Ortigao JAR and Davidovitch A. and Vallejos D., *Fiber reinforced shotcrete at the Conanca Tunnel*, at World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises, Sao Paulo
- http://www.tunnelling.metal.ntua.gr/index.pl/presa_gr
- Γιατζίδης, Γ., (2014). *Πειραματική διερεύνηση θλιπτικής και καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου και θερμικά καταπονημένου σκυροδέματος*, Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ

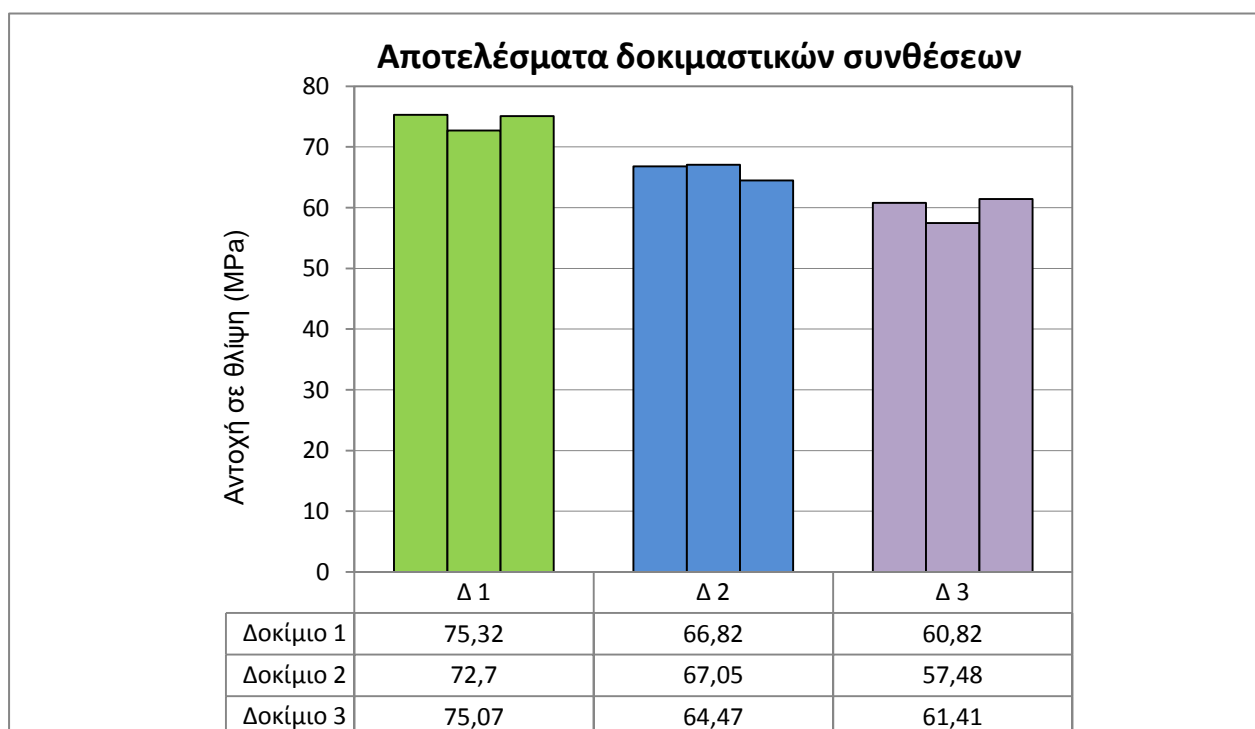
- Παπαδάκη, Ζ., (2010). *Διερεύνηση Εφελκυστικής Αντοχής Ινοπλισμένου Σκυροδέματος*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Ρουσάκης, Γ., (2010). *Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, ΕΜΠ
- Παγάνης, Λ., (2009), *Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος με πιθανές εφαρμογές στην υποστήριξη υπόγειων τεχνικών έργων*, Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Σαρρής, Β., (2008). *Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονότονη φόρτιση*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- Μιχάλης Α.Π.-Δημητρίου Σ., (2007), *Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Οι τρεις δοκιμαστικές συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν αποτελούνταν από 3 κυβικά δοκίμια έκαστη τα οποία επεβλήθησαν σε δοκιμή θλίψης σε ηλικία 7 ημερών.

Πίνακας 37: Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης δοκιμαστικών συνθέσεων

	Δοκιμαστική σύνθεση Δ1	Δοκιμαστική σύνθεση Δ2	Δοκιμαστική σύνθεση Δ3
Δοκίμιο Cube 1			
Φορτίο kN:	753,2	668,2	608,2
MPa:	75,32	66,82	60,82
Βάρος (kg) :	2,451	2,458	2,444
Δοκίμιο Cube 2			
Φορτίο kN:	726,9	670,5	574,8
MPa:	72,7	67,05	57,48
Βάρος (kg) :	2,434	2,427	2,426
Δοκίμιο Cube 3			
Φορτίο kN:	750,7	644,7	614,1
MPa:	75,07	64,47	61,41
Βάρος (kg) :	2,462	2,446	2,409
Μ.Ο Φορτίου (MPa)	74,3633	66,2633	59,9033
Τ.Α Φορτίου (MPa)	1,4459	1,58985	2,1193
Μ.Ο Βάρους (kg)	2,449	2,42967	2,42633
Τ.Α Βάρους (kg)	0,01411	0,0271	0,0175



Διάγραμμα 17: Αποτελέσματα δοκιμαστικών συνθέσεων