



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

« ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ »



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Των Τζανετή Νικόλαου και Κασαρι Andrea

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

« ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ »

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Των Τζανετή Νικόλαου και Kaspari Andrea

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις ΗΗ/03/2016

Νομικός Παύλος, Επίκουρος Καθηγητής,

Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής,

Μπερνάρδος Αντρέας, Επίκουρος Καθηγητής,

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2016

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή μας κ. Παύλο Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Μεταλλεύτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για την επιστημονική του συμβολή στην εκπόνηση της εργασίας αυτής. Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Λέκτορα του τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ για την αμέριστη βοήθεια που μας προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Ακόμη ευχαριστούμε τον κ. Κωνσταντίνο Τσακαλάκη, Καθηγητή του τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για τη διευκόλυνση που μας παρείχε ως προς τη χρήση εξοπλισμού του εργαστηρίου Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων και τον κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη Επίκουρο Καθηγητή του τομέα Γεωλογικών Επιστημών του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για τη διευκόλυνση ως προς τη χρήση εξοπλισμού του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας. Επιπρόσθετα θα θέλαμε να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στον κ. Δημήτρη Χουμανίδη, υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών ΕΜΠ για την βοήθειά του και την άψογη συνεργασία που είχαμε σε όλα τα στάδια της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και να ευχαρισήσουμε τους: κ. Γιώργο Παπαντωνόπουλο, Ε.ΔΙ.Π. στον τομέα Μεταλλευτικής για την συνεργασία και τη βοήθεια που μας πρόσφερε στις πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, τον κ. Ηλία Σαμμά Ε.Τ.Ε.Π. στον τομέα Μεταλλουργίας και Τεχνολογίας Υλικών για τη βοήθεια που μας προσέφερε στις πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων και τον κ. Παρασκευά Τσαγγαράτο, Ε.ΔΙ.Π. στον τομέα Γεωλογικών Επιστημών για τη βοήθεια που μας προσέφερε στις πειραματικές δοκιμές στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	6
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	8
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	11
ABSTRACT.....	12
Κεφάλαιο 1. ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	13
1.1.Σύσταση και ιδιότητες.....	13
1.2.Κατηγορίες σκυροδέματος.....	13
1.3.Υλικά παρασκευής σκυροδέματος.....	14
1.3.1.Το τσιμέντο.....	15
1.3.1.1.Παραγωγή.....	15
1.3.1.2.Τύποι τσιμέντων.....	16
1.3.1.3.Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων.....	18
1.3.2.Αδρανή υλικά.....	20
1.3.2.1.Προέλευση αδρανών.....	21
1.3.2.2.Προδιαγραφές για τα αδρανή υλικά.....	21
1.3.2.2.1.Μορφή και μέγεθος των κόκκων.....	22
1.3.3.Το νερό.....	23
1.3.3.1.Λόγος Νερού-Τσιμέντου.....	24
1.3.3.2.Προσδιορισμός μέγιστου λόγου W/C.....	25
1.3.4.Πρόσμικτα σκυροδέματος.....	27
1.3.5.Πρόσθετα σκυροδέματος.....	28
Κεφάλαιο 2.ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	30
2.1.Ιδιότητες Ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	30
2.2.Πεδίο εφαρμογής.....	31
2.2.1.Εφαρμογή στα Υπόγεια Έργα.....	32

2.3.Τροφοδότες.....	33
2.4.Είδη ιών.....	37
2.4.1.Χαλύβδινες ίνες.....	40
2.4.1.1.Μηχανισμός αστοχίας.....	44
2.4.2.Συνθετικές ίνες.....	45
2.5.Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα χρήσης των ιών.....	46
Κεφάλαιο 3.ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΟΠΛΟΥ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	50
3.1.Προμήθεια των υλικών.....	51
3.2.Ξήρανση των αδρανών.....	53
3.3.Κοκκομετρική Διαβάθμιση Αδρανών.....	54
3.3.1.Όρια κοκκομετρικών διαβαθμίσεων.....	58
3.4.Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση.....	60
3.5.Σκυροδέτηση.....	62
3.5.1.Πειραματικές δοκιμές σε νωπό σκυρόδεμα.....	65
3.5.1.1.Δοκιμή κάθισης.....	65
3.5.1.2.Μέτρηση καθαρού βάρους σκυροδέματος... ..	68
3.6.Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες.....	70
3.7.Συντήρηση δοκιμίων.....	70
3.8.Προετοιμασία δοκιμίων.....	71
3.9.Εισαγωγή δοκιμίων στο φούρνο.....	71
Κεφάλαιο 4.ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	73
4.1.Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	74
4.2.Δοκιμή κάμψης.....	76
4.2.1.Σχήμα και μέγεθος των δοκιμίων.....	76
4.2.2.Κατασκευή και σκλήρυνση των δοκιμίων.....	76
4.2.3.Εγκόπη των δοκιμίων.....	77
4.2.4.Διαδικασία δοκιμής.....	78
4.2.4.1.Προετοιμασία και τοποθέτηση των δοκιμίων.....	78
4.2.4.2.Δοκιμή κάμψης.....	78
4.2.5.Έκφραση αποτελεσμάτων.....	79

4.2.5.1.Ισοδυναμία μεταξύ CMOD και παρέκλισης.....	79
4.2.5.2.Όριο αναλογικότητας.....	79
4.2.5.3.Υπολιματική καμπτική εφελκιστική δύναμη.....	80
4.3.Δοκιμή Barcelona.....	81
Κεφάλαιο 5.ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	88
5.1.Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.....	88
5.2.Αποτελέσματα δοκιμών καμψής.....	97
5.3.Αποτελέσματα δοκιμών Barcelona.....	103
5.4.Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών καμψής-Barcelona.....	110
Κεφάλαιο 6.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	112
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Κατηγορίες σκυροδέματος, αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές και αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό.....	13
Πίνακας 2. Βασικοί τύποι τσιμέντων ευρωπαϊκού προτύπου.....	16
Πίνακας 3. Συμβολισμοί συστατικών τσιμέντου.....	18
Πίνακας 4. Κατηγορίες αντοχών τσιμέντων.....	19
Πίνακας 5. ΕΛΟΤ EN206/1 Ε.Π.ΣΤ.1-Οριακές τιμές σύνθεσης, ιδιοτήτων σκυροδέματος και επικάλυψης για ανθεκτικότητα.....	26
Πίνακας 6. Τυπικές ιδιότητες επιλεγμένων ινών (9 ^ο Φοιτητικό Συνέδριο «Επισκευές-Ενίσχυσεις Κατασκευών-03», Μάρτιος 2003).....	39
Πίνακας 7. Διάφορα είδη ινών και εφαρμογές τους.....	40
Πίνακας 8. Κύρια χαρακτηριστικά ινών.....	52
Πίνακας 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιητή SikaViscocreteTechno 40.....	53
Πίνακας 10. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης.....	57
Πίνακας 11. Όρια διαβαθμίσεων για μείγμα αδρανών σύμφωνα με το πρότυποASTMC33.....	58
Πίνακας 12. Όρια διαβάθμισης Νο. 3.....	59
Πίνακας 13. Ποσότητες υλικών για τη σύνθεση Σ1(χαλύβδινες ίνες).....	61
Πίνακας 14. Ποσότητες υλικών για τη σύνθεση Σ2(άοπλο σκυρόδεμα).....	61
Πίνακας 15. Ποσότητες υλικών για τη σύνθεση Σ3(ίνες πολυπροπυλενίου PPF2)...	62
Πίνακας 16. Ποσότητες υλικών για τη σύνθεση Σ4(ίνες πολυπροπυλενίου PPF1)...	62
Πίνακας 17. Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης για όλες τις συνθέσεις.....	68
Πίνακας 18. Κατηγορίες κάθισης νωπού σκυροδέματος.....	68
Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά πρότυπου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους σκυροδέματος.....	69
Πίνακας 20. Αποτελέσματα μετρήσεων καθαρού βάρους.....	69

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	31
Εικόνα 2.Χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος για υποστήριξη σηράγγων.....	32
Εικόνα 3.ROBOMIX 7000 AS (Maidl, 1995).....	34
Εικόνα 4. Τροφοδότης ινών DINO 2000 (Fasertechnik, 2007).....	34
Εικόνα 5.Τροφοδοσιά ινών στο παρασκευαστήριο σκυροδέματος(TEPNA, 2009)....	35
Εικόνα 6.Τροφοδότης ινών DINO 60 (Fasertechnik 2007).....	35
Εικόνα 7.Τροφοδότης ινών ElliteII.....	35
Εικόνα 8.MeycoCobra για εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος (www.meyco.basf.com).....	37
Εικόνα 9.MeycoPoca για εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος (www.meyco.basf.com).....	37
Εικόνα 10.Εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος σε μεταλλευτικό έργο με Sika-PM 407 P.....	37
Εικόνα 11.Χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα.....	40
Εικόνα 12.Κύρια προφίλ ινών (επίπεδο,με γαντζωτά άκρα, κυματοειδής, με κωνικά άκρα, μηχανικά παραμορφωμένο) (Katzner, 2006).....	41
Εικόνα 13.Πιθανοί προσανατολισμοί των ινών στο σκυρόδεμα(Maidl, 1995).....	43
Εικόνα 14.Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας ινών/σκυροδέματος (FracturesMechanics,Anderson,1991).....	44
Εικόνα 15.Προσομοίωση αντίδρασης ινών-σκυροδέματος, (BenturandMindness, 1990).....	44
Εικόνα 16.Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου PPF2.....	45
Εικόνα 17.Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου PPF1.....	45
Εικόνα 18.Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες, Fibermesh 1989.....	49
Εικόνα 19.Φούρνος ξήρανσης αδρανών.....	53
Εικόνα 20.Τετραμερισμός ποσότητας αδρανών.....	54
Εικόνα 21.Κόσκινο, σειρά κοσκίνων και συσκευή κοσκινίσματος.....	55
Εικόνα 22.Ζύγιση υλικών.....	60
Εικόνα 23.Υλικά προς σκυροδέτηση.....	60
Εικόνα 24.Ολα τα απαιτούμενα υλικά.....	63
Εικόνα 25.Προσθήκη αδρανών υλικών για ανάδευση.....	64
Εικόνα 26.Προσθήκη τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης μετά από μερική ανάδευση των αδρανών με νερό.....	64
Εικόνα 27.Τελικό μείγμα μετά την προσθήκη ινών και του ρευστοποιητή.....	65
Εικόνα 28.Κώνος κάθισης και ράβδος συμπυκνώσεως.....	66

Εικόνα 29.Μήτρες σκυροδέματος.....	70
Εικόνα 30.Δεξαμενή συντήρησης δοκιμίων.....	70
Εικόνα 31.Δισκοπρίονο.....	71
Εικόνα 32.Λειαντήρας.....	71
Εικόνα 33.Φούρνος θέρμανσης δοκιμίων.....	72
Εικόνα 34.Πλαίσιο δυναμικότητας φόρτισης 150KN και δοκιμών θλίψης δυναμικότητας 500KNκαι μονάδα ελέγχου τριαξονικών δοκιμών Sercomp 7.....	73
Εικόνα 35.Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	75
Εικόνα 36.Δοκίμιο μετά την δοκιμή.....	75
Εικόνα 37.Δοκίμιο στην πρέσα πριν την εκτέλεση δοκιμής κάμψης.....	76
Εικόνα 38.Διαδικασία γεμίσματος της μήτρας.....	77
Εικόνα 39.Θέση του πριονίσματος εγκοπής εντός του δοκιμίου πριν την περιστροφή.....	77
Εικόνα 40.Τυπική διάταξη για μέτρηση CMOD (με κόκκινα γράμματα είναι οι αποστάσεις που χρησιμοποιήσαμε).....	78
Εικόνα 41.Διάγραμμα φορτίου – CMOD και F_L	80
Εικόνα 42.Διάγραμμα φορτίου – CMOD και F_j (1, 2, 3, 4).....	81
Εικόνα 43.Εμφάνιση ρωγμής μετά το πέρας της δοκιμής κάμψης.....	81
Εικόνα 44 . Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Barcelona).....	83
Εικόνα 45 . Απεικόνιση των ρωγμών που προκαλούνται στα κυλινδρικά δοκίμια.....	84
Εικόνα 46 . Διάταξη δοκιμής G-BNCκατά τη μονοαξονική θλίψη. (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013).....	86
Εικόνα 47.Σχηματική απεικόνιση και τύπος του δείκτη δυσθραυστότητας, I_n ,για την γενικευμένη δοκιμή Barcelona. (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013).....	87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Τα είδη ιών.....	38
Διάγραμμα 2. Γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής ανάλυσης.....	59
Διαγραμμα 3. Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου.....	71
Διάγραμμα 4. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε θερμοκρασία 20°C.....	88
Διάγραμμα 5. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε θερμοκρασία 280°C.....	89
Διάγραμμα 6. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών άοπλων δοκιμίων σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	89
Διάγραμμα 7. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών ινοπλισμένων δοκιμίων με χαλύβδινες ίνες SF 0,5% σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	89
Διάγραμμα 8. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών ινοπλισμένων δοκιμίων με συνθετικές ίνες PPF1 0,5% σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	90
Διάγραμμα 9. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών ινοπλισμένων δοκιμίων με συνθετικές ίνες PPF2 0,5% σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	90
Διάγραμμα 10. Τάση αξονική παραμόρφωση άοπλου σκυροδέματος.....	91
Διάγραμμα 11. Τάση αξονική παραμόρφωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(SF 0.5).....	91
Διάγραμμα 12. Τάση αξονική παραμόρφωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF1 0.5).....	92
Διάγραμμα 13. Τάση αξονική παραμόρφωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF2 0.5).....	92
Διάγραμμα 14. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 20°C.....	93
Διάγραμμα 15. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 280°C.....	93
Διάγραμμα 16. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των άοπλων συνθέσεων για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	94
Διάγραμμα 17. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(SF 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	94
Διάγραμμα 18. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF1 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	94
Διάγραμμα 19. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF2 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	94

Διάγραμμα 20. Μέση τιμή λόγου Poisson όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 20°C.....	95
Διάγραμμα 21. Μέση τιμή λόγου Poisson όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 280°C.....	96
Διάγραμμα 22. Μέση τιμή λόγου Poisson των άοπλων συνθέσεων για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	96
Διάγραμμα 23. Μέση τιμή λόγου Poisson των ινοπλισμένων συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(SF 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	96
Διάγραμμα 24. Μέση τιμή λόγου Poisson των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF1 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	97
Διάγραμμα 25. Μέση τιμή λόγου Poisson των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF2 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.....	97
Διάγραμμα 26. Φορτίο-παραμόρφωση στη δοκιμή κάμψης για τη θερμοκρασία των 20°C.....	98
Διάγραμμα 27. Φορτίο-παραμόρφωση στη δοκιμή κάμψης για τη θερμοκρασία των 280°C.....	98
Διάγραμμα 28. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή κάμψης στη θερμοκρασία των 20°C.....	99
Διάγραμμα 29. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή κάμψης στη θερμοκρασία των 280°C.....	99
Διάγραμμα 30. Μέσοι όροι αντοχής του PLAIN για 20°C και 280°C.....	100
Διάγραμμα 31. Μέσοι όροι αντοχής του SF 0,5% για 20°C και 280°C.....	100
Διάγραμμα 32. Μέσοι όροι αντοχής του PPF1 0,5% για 20°C και 280°C.....	100
Διάγραμμα 33. Μέσοι όροι αντοχής του PPF2 0,5% για 20°C και 280°C.....	100
Διάγραμμα 34. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{0,5} για τους 20°C.....	101
Διάγραμμα 35. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{0,5} για τους 280°C.....	101
Διάγραμμα 36. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{1,5} για τους 20°C.....	102
Διάγραμμα 37. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{1,5} για τους 280°C.....	102
Διάγραμμα 38. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{2,5} για τους 20°C.....	102
Διάγραμμα 39. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{2,5} για τους 280°C.....	102
Διάγραμμα 40. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{3,5} για τους 20°C.....	103
Διάγραμμα 41. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{3,5} για τους 280°C.....	103
Διάγραμμα 42. Φορτίο-παραμόρφωση στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 20°C.....	104
Διάγραμμα 43. Φορτίο-αξονική μετατόπιση στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 20°C.....	104

Διάγραμμα 44. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 20°C.....	105
Διάγραμμα 45. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 280°C.....	105
Διάγραμμα 46. Μέσοι όροι αντοχής του PLAIN για τους 20°C και τους 280°C....	106
Διάγραμμα 47. Μέσοι όροι αντοχής του SF 0,5% για τους 20°C και τους 280°C...106	
Διάγραμμα 48. Μέσοι όροι αντοχής του PPF1 0,5% για τους 20°C και τους 280°C.....	106
Διάγραμμα 49. Μέσοι όροι αντοχής του PPF2 0,5% για τους 20°C και τους 280°C.....	106
Διάγραμμα 50. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού για I _{0,5} για τους 20°C.....	107
Διάγραμμα 51. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{0,5} για τους 280°C.....	107
Διάγραμμα 52. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{1,5} για τους 20°C.....	108
Διάγραμμα 53. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{1,5} για τους 280°C.....	108
Διάγραμμα 54. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{2,5} για τους 20°C.....	108
Διάγραμμα 55. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{2,5} για τους 280°C.....	108
Διάγραμμα 56. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{3,5} για τους 20°C.....	109
Διάγραμμα 57. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I _{3,5} για τους 280°C.....	109
Διάγραμμα 58. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση PLAIN σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.....	110
Διάγραμμα 59. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση PLAIN σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 280°C.....	110
Διάγραμμα 60. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση SF 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.....	110
Διάγραμμα 61. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση SF 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 280°C.....	110
Διάγραμμα 62. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση PPF1 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.....	111
Διάγραμμα 63. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση PPF1 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 280°C.....	111
Διάγραμμα 64. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση PPF2 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.....	111
Διάγραμμα 65. Μέσοι όροι εφελκυστικής αντοχής για τη σύνθεση PPF2 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 280°C.....	111

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς σκυροδέματος άοπλου, οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες και ίνες πολυπροπυλενίου (PPF1, PPF2) υπό μονοαξονική θλίψη, κάμψη και έμμεσο εφελκυσμό. Χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες (Inomix) με σταθερά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά και ίνες πολυπροπυλενίου (Sika). Σκοπός ήταν η μέτρηση της αντοχής των δοκιμίων και η σύγκριση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μεταξύ άοπλων και ινοπλισμένων δοκιμίων αλλά και η εξαγωγή συμπερασμάτων από την καταπόνησή τους σε υψηλή θερμοκρασία. 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 σκυροδέμα, τις ιδιότητές του καθώς και την εφαρμογή του στα υπόγεια έργα. Επίσης, παρουσιάζονται κάποια πιο λεπτομερή στοιχεία για τις 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 την σκυροδέτηση και την προετοιμασία των δοκιμίων για τις πειραματικές δοκιμές. Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η εκτέλεση των πειραματικών δοκιμών σε θλίψη, κάμψη και έμμεσο εφελκυσμό (double-punching). Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης, κάμψης και έμμεσου εφελκυσμού με χρήση πινάκων και διαγραμμάτων τόσο για τα άοπλα όσο και για τα ινοπλισμένα δοκίμια.

Στο κεφάλαιο 6, τέλος, εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τα αποτελέσματα, αλλά και την πειραματική διαδικασία.

ABSTRACT

The object of this certain thesis is to investigate the behavior of the unarmed concrete, armed with steel fibers and polypropylenic fibers (PPF1, PPF2) under uniaxial compression, bending and indirect tensile. Steel fibers were used (Inomix) with stable geometrical and mechanical characteristics and polypropylenic fibers (Sika). The goal was the measurement of the strength of the specimens and the comparison and the evaluation of the results between the unarmed and fibre-reinforced specimens, but also the outcome of conclusions from their harassment at high temperatures. All the above are examined aiming at the investigation of the possible use of the fibre-reinforced concrete as a way of supporting the underground works. This thesis follows the following structure: In chapter 1, are briefly presented the properties of concrete which will be studied at this work. In chapter 2, there are references to fibre-reinforced concrete, its properties and its application in underground works. Moreover, some detailed data are presented for the fibers that will be used subsequently. In chapter 3, the experimental procedure that was used and each stage is described in detail, from the procurement of materials until the concreting and the preparation of samples for experimental trials. In chapter 4, the execution of experimental testings in compression, bending and indirect tensile (double-punching) are presented. In chapter 5, there are presented and commented the results of the testings of compression, bending and indirect tensile via tables and diagrams as for the unarmed specimens and as for the fibre-reinforced specimens.

Finally, in chapter 6, conclusions are made according to the results, but also for the experimental procedure.

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. Για την παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων στη μάζα του σκυροδέματος ενσωματώνεται χάλυβας υπό τη μορφή ράβδων, πλεγμάτων ή ινών δηλαδή οπλισμός.

1.2. Κατηγορίες σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον ΕC-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.

1.3. Υλικά παρασκευής σκυροδέματος

Τα τρία κυριότερα συστατικά που αποτελούν το σκυρόδεμα 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.

1.3.1. Το τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι το κύριο συστατικό του σκυροδέματος που σε ανάμειξη με το νερό αποτελεί το συνδετικό 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» .

1.3.1.1. 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 (λειοτρίβηση) 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 (πυροσυσσώματωση 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».

1.3.1.2. Τύποι τσιμέντων

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

Τα σημαντικότερα 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

1.3.1.3. 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	Διόγκωση (Διαστολή)
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή (όρια)			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες			
32.5 N	-	≥ 16	≥ 32.5	≤ 52.5	≥ 75	≤ 10
32.5 R	≥ 10	-				
42.5 N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20	-				
52.5 N	≥ 20	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5 R	≥ 30	-				

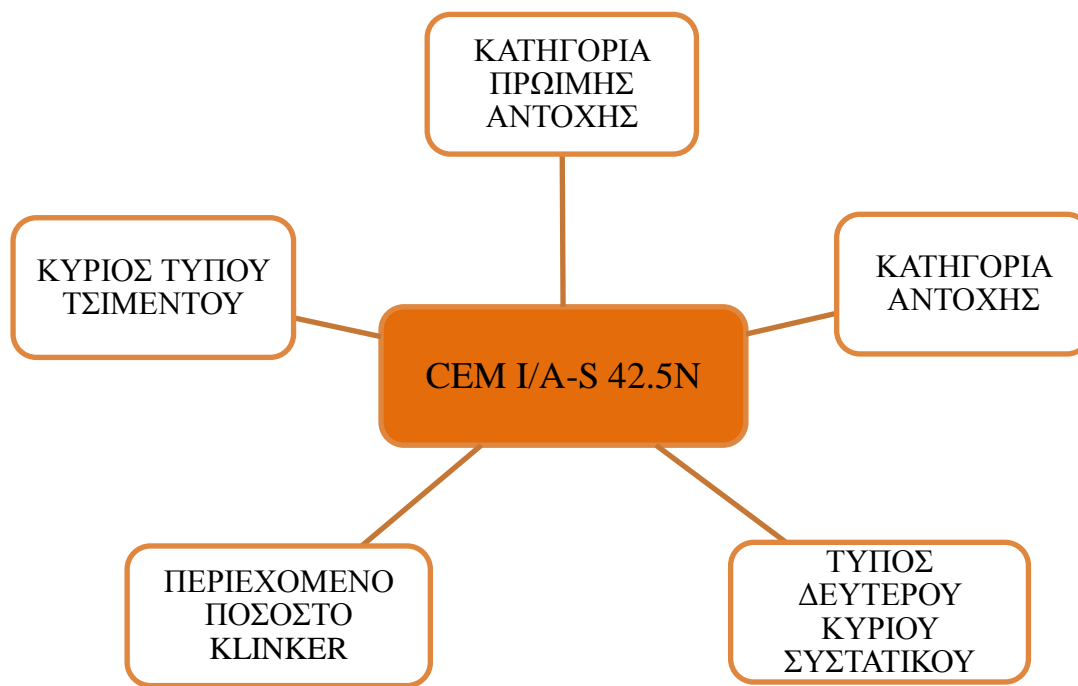
Οι αριθμοί 32.5, 42.5, 52.5 παριστάνουν όπως φαίνεται στον πίνακα την αντοχή των τσιμέντων σε MPa. Ο ρυθμός αύξησης της αντοχής του τσιμέντου επιτυγχάνεται συνήθως με αύξηση της λεπτότητας δηλαδή του Blaine. Ένα λεπτόκοκκο τσιμέντο με τιμή Blaine=4000 cm²/g έχει γρηγορότερο ρυθμό αύξησης της αντοχής 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:

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

1.3.2. Αδρανή υλικά

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

(Smith, 2001). 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 μεγαλύτερη από $2,0 \text{ kg/m}^3$.

1.3.2.1. 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.

1.3.2.2. 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 άσβεστου, εύθραυστα τεμάχια, ξύλα, ρίζες, χαρτόνια, κ.λπ.) και παντός ξένου υλικού ή σώματος που παρεισφρέει 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, ανδেসίτη, ρυόλιθο και δολομίτες γιατί προκαλούν διόγκωση και ζεόλιθους λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου.

1.3.2.2.1. 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.

1.3.3. 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%.

1.3.3.1. 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.

1.3.3.2. 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 η επιλογή του οποίου 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 κατηγορίες 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

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

		Κατηγορίες Έκθεσης																												
		Χωρίς κίνδυνο διάβρωσης ή προσβολής	Διάβρωση λόγω ενανθράκωσης				Διάβρωση λόγω χλωριόντων									Προσβολή από ψύξη/απόψυξη				Χημική προσβολή			Τριβή/απότρυψη							
							Θαλασσινό νερό						Χλωριόντα που δεν προέρχονται από το θαλασσινό νερό																	
							Τσιμέντα II, III, IV (Εκτός B-LL)			Τσιμέντα I (+II/B-LL)																				
Κατηγορία έκθεσης	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	0.45	0.50	0.50	0.45	0.55	0.50	0.45	0.55	0.55	0.50	0.55	0.55	0.50	0.50	0.55	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 ανθεκτικότητα 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 σκυροδέμα					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				

1.3.4. 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% κ.β. τσιμέντου, για υπερρυστοποιητικά. Η χρήση τους είναι σχεδόν απαραίτητη για σκυροδέματα υψηλής αντοχής που αναγκαστικά περιέχουν λιγότερο νερό, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες. Όταν χρησιμοποιούνται υπερρυστοποιητικά 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 ανάμειξη των υλικών του σκυροδέματος γίνεται σε εργοστάσιο ετοιμού σκυροδέματος και ακολουθεί μεταφορά στο έργο σε αυτοκίνητο-αναμικτήρα, ένα μέρος ή και το σύνολο του υπερρυστοποιητικού χρειάζεται να προστίθεται στο μείγμα όχι στο εργοστάσιο παραγωγής αλλά επιτόπου του έργου, λίγο πριν τη σκυροδέτηση.

1.3.5. 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 δραστηρότητας 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 θειικά 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 δραστηρότητας ποζολάνη. Τυπικές δοσολογίες πυριτικής παιπάλης κυμαίνονται μεταξύ 5% έως 10% μέγιστα κατά βάρος τσιμέντου.

Κεφάλαιο 2. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ως ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FiberReinforcedConcrete- FRC) ορίζεται το σκυρόδεμα το οποίο περιέχει ίνες σε διασπορά, με τυχαίο προσανατολισμό (Αμερικανικό ινστιτούτο σκυροδέματος, ACI 116R). Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (FiberReinforcedShotcrete 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 επιπλέον με την προσθήκη ινών. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου. Ειδικά οι ίνες χάλυβα χρησιμοποιούνται ευρύτατα.

2.1. Ιδιότητες Ινοπλισμένου σκυροδέματος

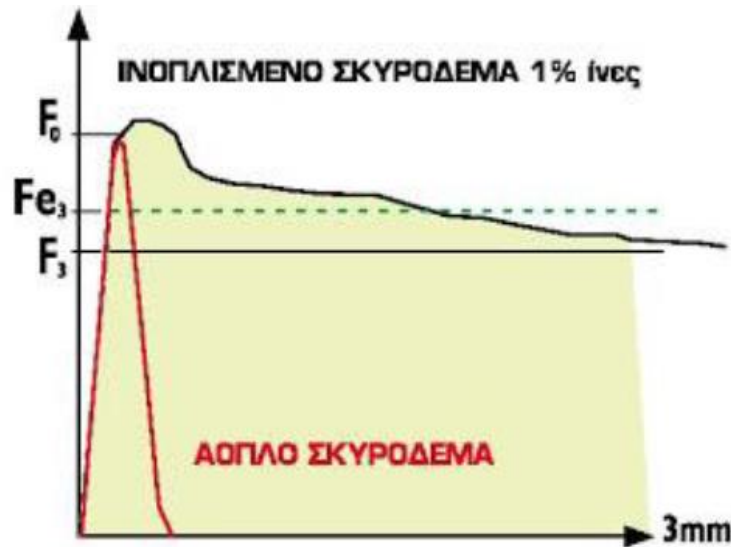
Ο κύριος ρόλος των ινών που προστίθενται στο μίγμα είναι να ελέγξουν το άνοιγμα και τη διάδοση των ρωγμών στο σκυρόδεμα. Οι ενιαίες ρωγμές αντικαθίστανται με πυκνά συστήματα μικρορωγμών, τα οποία χάρη στις ίνες μπορούν να είναι αποδεκτά από άποψη ασφαλείας και διάρκειας. Επίσης η χρήση ινών επηρεάζει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

Βασικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα όλκιμη 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 τόσο πριν το στάδιο της κορυφαίας αντοχής όσο και μετά. 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 αποφλοιώσης

- Μεγαλύτερη δυσθραυστότητα
- Οικονομία στη συντήρηση και μεγαλύτερη διάρκεια χρήσης του έργου
- Μεγαλύτερη αντοχή σε φορτία μετά την θραύση



Εικόνα 1. Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα

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



Εικόνα 2. Χρήση ινοπλισμένου σκυροδέματος για υποστήριξη σηράγγων

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (shotcrete, gunite) με χρήση ινών, κυρίως χαλύβδινων, χρησιμοποιείται για την άμεση υποστήριξη 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 (drymix) με προσθήκη του νερού τη στιγμή της εξόδου του από το στόμιο εκτόξευσης, είτε ως υγρό μίγμα (wetmix), όπου η ανάμιξη του μίγματος με το νερό γίνεται σε αναδευτήρα. Αντλήσιμο σκυρόδεμα, οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες χρησιμοποιείται είτε για την έγχυση της εσωτερικής επένδυσης ή της δεύτερης στρώσης επενδύσεων μονού κελύφους.

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.

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 στον 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 σε τεχνικά και σε μεταλλευτικά έργα όπου συνήθως παρατηρούνται μεγάλες φορτίσεις λόγω συγκλίσεων που καλείται να παραλάβει η υποστήριξη.

2.3. Τροφοδότες

Υπάρχουν αυτοκινούμενα οχήματα που ενσωματώνουν όλες τις λειτουργίες (ανάμιξη και ψεκασμό), (Maidl, 1995). Για το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα το ROBOMIX 7000 (Εικόνα 3) της σουηδικής Vertex έχει τροφοδότη για τις ίνες και στο εμπρός μέρος μπούμα για εκτόξευση του σκυροδέματος.



Εικόνα 3. ROBOMIX 7000 AS (Maidl, 1995)



Εικόνα 4. Τροφοδότης ινών DINO 2000 (Fasertechnik, 2007)

Οι τροφοδότες των ινών είναι συστήματα στα οποία εισάγονται οι ίνες σε μεγάλες ποσότητες από τους μέγα σάκους και αυτοί στη συνέχεια παρέχουν μια σταθερή τροφοδοσία. Ένας τέτοιος τροφοδότης τελευταίας τεχνολογίας πλήρως αυτοματοποιημένος, είναι ο DINO 2000 (Εικόνα 4). Τα πλεονεκτήματά του είναι ότι παρεμποδίζει τη δημιουργία συσσωματωμένων ινών, είναι οικονομικός και φιλικός προς το περιβάλλον αφού οι συσκευασίες των ινών μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, είναι ασφαλής για το προσωπικό, εξοικονομείται χρόνος, η πιθανότητα λάθους στην τροφοδοσία μειώνεται στο ελάχιστο, ενώ εγγυάται για την ποιότητα, διότι έχει πίνακα ελέγχου και δυνατότητα εκτύπωσης των στοιχείων λειτουργίας του, όπως η ποσότητα των ινών που προσθέτει. Τέλος, έχει μεγάλη ικανότητα τροφοδοσίας, που φτάνει τα 200 kg/min. Η τροφοδότηση με ίνες πραγματοποιείται είτε στο εργοτάξιο είτε στο εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος. Στην Εικόνα 5 φαίνεται μια τέτοια περίπτωση, με την τροφοδοσία των ινών να γίνεται μαζί με αυτή των αδρανών και το μίγμα να οδηγείται στον αναμικτή.



Εικόνα 5. Τροφοδοσία ινών στο παρασκευαστήριο σκυροδέματος (ΤΕΡΝΑ, 2009)

Οι ίνες εισάγονται χειρωνακτικά στον τροφοδότη. Το «τύμπανο» στην Εικόνα 5 αποτρέπει τις ίνες από το σχηματισμό συσσωματωμάτων, και έτσι κατανέμονται ομοιόμορφα μαζί με τα αδρανή που διέρχονται στην μεταφορική ταινία. Μικρότεροι και πιο ευέλικτοι τροφοδότες ινών, που μπορούν να μεταφέρονται με μεγάλη ευκολία και να δουλεύουν και στο εργοτάξιο, διαθέτουν σωλήνα που οδηγεί μέχρι την βαρέλα του σκυροδέματος κι έτσι δεν απαιτείται η χρήση μεταφορικής ταινίας για την ανύψωση των ινών. Τέτοιος τροφοδότης είναι ο DINO 60, ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6. Τροφοδότης ινών DINO 60 (Fasertechnik,2007)



Εικόνα 7. Τροφοδότης ινών ElliteII

Ο συγκεκριμένος τροφοδότης μπορεί να εισάγει μέχρι και 50kg ινών/min. Σε αυτές όμως τις περιπτώσεις πρέπει να γίνεται σωστή ανάμιξη των ινών στη βαρέλα. Προτείνεται οπωσδήποτε ένα λεπτό ως χρόνος ανάμιξης για κάθε κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Τροφοδότες, όπως ο Elite II (Εικόνα 7), μπορούν ακόμη και να διοχετεύουν δύο διαφορετικά είδη ινών ταυτόχρονα, εξασφαλίζοντας παράλληλα πολύ καλή ακρίβεια. Αυτό επιτυγχάνεται επειδή είναι χωρισμένος σε δύο τμήματα τα οποία δουλεύουν ανεξάρτητα αλλά και ενιαία αν θέλει κανείς να τροφοδοτήσει ένα μόνο είδος ίνας. Ο συγκεκριμένος τροφοδότης είναι κατάλληλος για τροφοδοσία κομμένων συνθετικών ινών, και δουλεύει κατά βάρος. Επίσης, είναι πλήρως αυτοματοποιημένος και παρέχεται σε τρία διαφορετικά μοντέλα, ανάλογα με τις ανάγκες τροφοδοσίας. Από όλα τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η χειρωνακτική τροφοδοσία των ινών πρέπει να θεωρείται πρακτική του παρελθόντος διότι δεν εξασφαλίζει ομοιογένεια στην τροφοδοσία ενώ θέτει το προσωπικό σε κίνδυνο. Οι τροφοδότες πλέον είναι οικονομικότεροι, σταθεροί και αξιόπιστοι, αποτελώντας μονόδρομο για την εξασφάλιση ενός ποιοτικά ανώτερου σκυροδέματος. Γενικά στο ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα συνηθίζεται η χρήση του υπάρχοντος εξοπλισμού με μερικές ή καθόλου τροποποιήσεις. Οι αλλαγές αυτές, όταν γίνονται, έχουν σκοπό να περιορίζουν το φράξιμο των σωληνώσεων. Έτσι για παράδειγμα αφαιρούνται οι σωληνώσεις με γωνία 90ο ή αποφεύγεται η απότομη αλλαγή μεταξύ διαμέτρου σωλήνωσης και ακροφυσίου. Επιπλέον, ακροφύσια με διάμετρο από 50mm (2 in) και πάνω δουλεύουν ικανοποιητικά ενώ ένας γενικός κανόνας είναι ότι πρέπει να έχουν διάμετρο τουλάχιστον διπλάσια του μήκους της ίνας. Άλλη τροποποίηση που συνήθως γίνεται, είναι η τοποθέτηση εσωτερικής επένδυσης στο ακροφύσιο.

Μηχάνημα με δυνατότητα (Εικόνα 8) του χειριστή να βρίσκεται σε απόσταση από την επιφάνεια διάστρωσης, είναι το Cobra της Meyco, που χρησιμοποιείται και στο συμβατικό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.



Εικόνα 8. Meycocobra για εκτόξευση
ινοπλισμένου σκυροδέματος
(www.meyco.basf.com)



Εικόνα 9. Meycoroca για εκτόξευση
ινοπλισμένου σκυροδέματος
(www.meyco.basf.com)

Για εργασίες σε θέσεις με περιορισμένο διαθέσιμο χώρο, όπως τα μεταλλευτικά έργα, υπάρχει εξειδικευμένος εξοπλισμός σε μικρότερες διαστάσεις που λειτουργεί όμως με την ίδια ακριβώς μέθοδο. Τέτοιο μοντέλο είναι το Roca της Meyco (Εικόνα 9) που προορίζεται για την εκτόξευση υγρών μιγμάτων. Η τροφοδοσία τέτοιων μηχανημάτων γίνεται από αντίστοιχα μικρές βαρέλες. Η εκτόξευση στο μέτωπο φαίνεται στην Εικόνα 10.



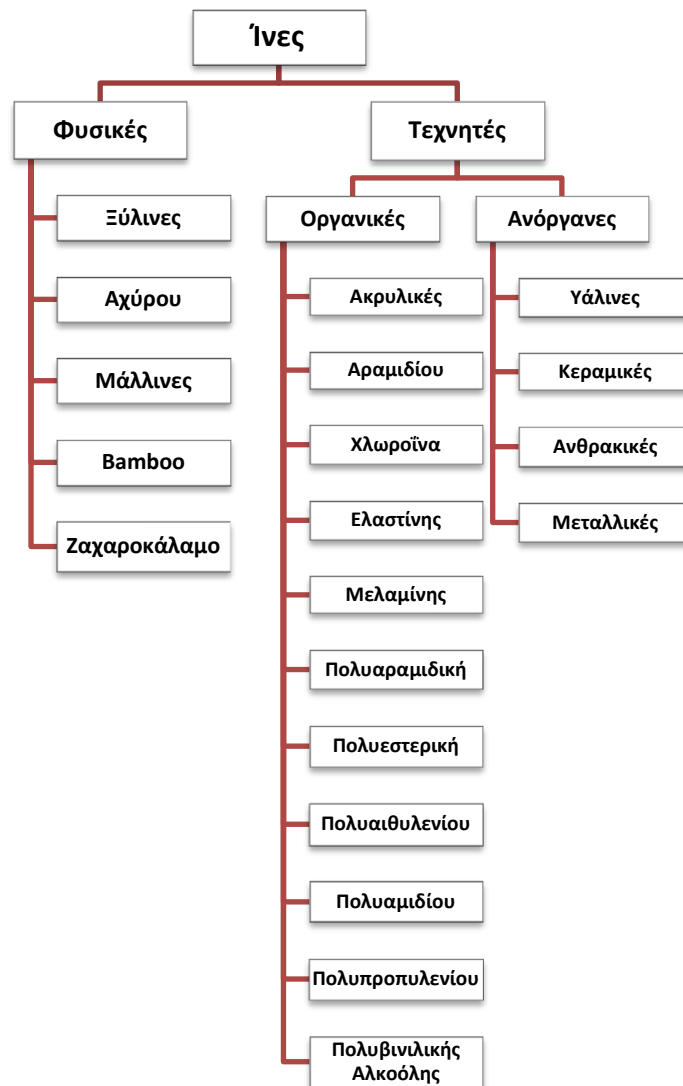
Εικόνα 10. Εκτόξευση ινοπλισμένου σκυροδέματος σε μεταλλευτικό έργο με Sika-PM 407 P

2.4. 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 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)	Παραμόρ. θράυσης (%)	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
-Υψηλού 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, προεντεταμένοι πάσσαλοι, επίχριση πλαισίων, μπαλώματα δρόμων, μανδύες για υποβρύχιους σωλήνες
Πολυολεφινίου	Οδικό δίκτυο, σταθεροποίηση πρανών, προστασία θαλάσσιων κατασκευών, επικάλυψη πεζοδρομίων
Ανθρακικές	Πτυχωτές μονάδες για κατασκευή οροφών, μεμβρανοειδείς κατασκευές μονής και διπλής καμπυλότητας
Φυσικές ίνες	Σε κατασκευές χαμηλού κόστους – αντιπαρέρχεται στη μεγάλη ζήτηση κατοικίας σε τριτοκοσμικές χώρες, διαχωριστικοί τοίχοι

2.4.1. 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

-κυματώδεις

-με κωνικά άκρα

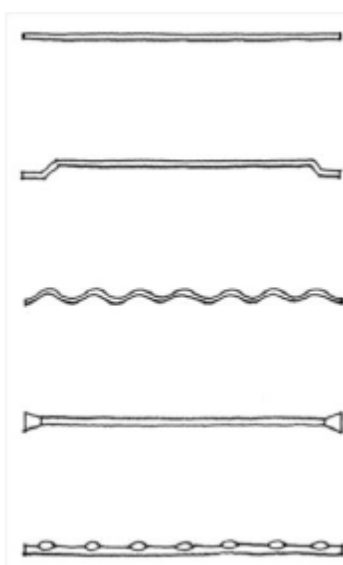
-πτυχωτές, με τομή κυκλική,



Εικόνα 11. Χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα

τετραγωνική ή ακανόνιστη

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 12. 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

σκυροδέμα, 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.

- 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 διάμετρός 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 οπλισμού. 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.



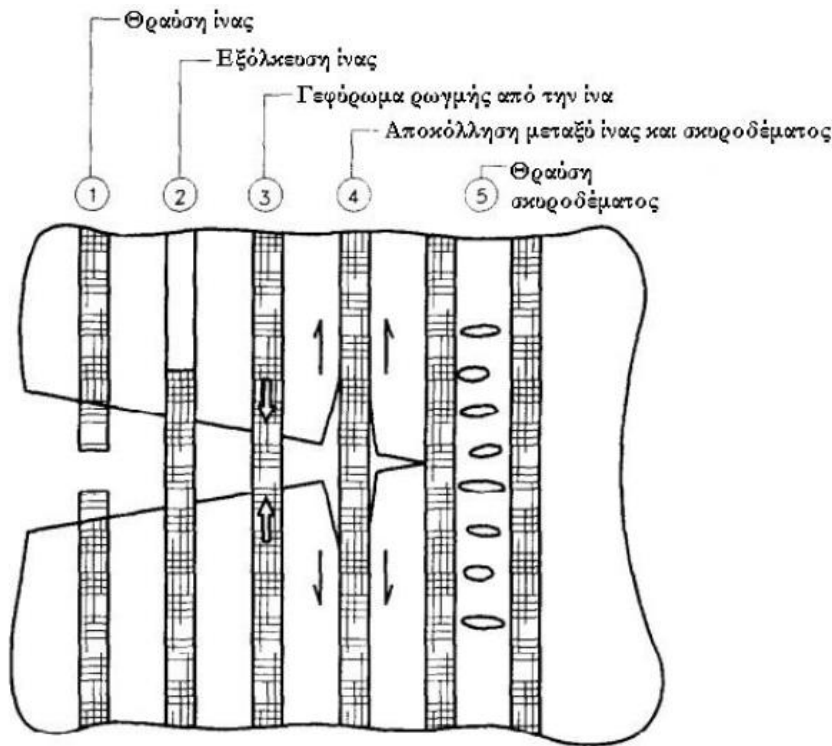
Εικόνα 13. Πιθανοί προσανατολισμοί των ινών στο σκυρόδεμα (Maidl, 1995)

- 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.

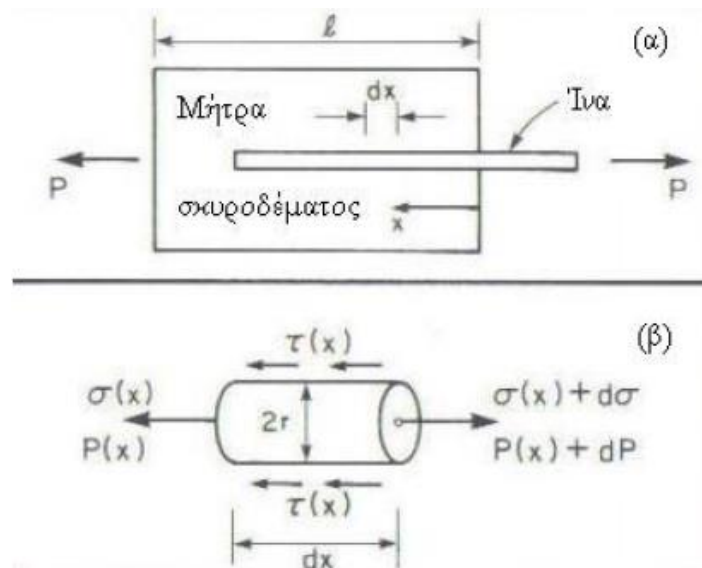
Η περιεκτικότητα σε ίνες μετριέται είτε σε kg ινών ανά m^3 σκυροδέματος, είτε σε % κατ' όγκο, είτε σε % κατά βάρος ($\rho_B \approx 2.4 \div 2.5 t/m^3$, $\rho_{st} \approx 7.85 t/m^3$) δηλαδή για ίνες $100 kg/m^3$ αντιστοιχούν σε 4% κατά βάρος (κ.β.) ή σε 1,25% κατά όγκο (κ.ο.). Συνήθεις περιεκτικότητες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

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



Εικόνα 14. Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας ινών/σκυροδέματος (FracturesMechanics, Anderson, 1991)

2.4.1.1. Μηχανισμός αστοχίας



Εικόνα 15. Προσομοίωση αντίδρασης ινών - σκυροδέματος, (Bentur and Mindness, 1990)

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 σκυρόδεμα.

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

2.4.2.Συνθετικές ίνες



Εικόνα 16.Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου PPF2



Εικόνα 17.Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου PPF1

Οι συνθετικές ίνες παρασκευάζονται από διάφορα υλικά όπως πολυπροπυλενίου, πολυαιθυλενίου, πολυολεφίνων και πολυβινιλίου (PVA).Οι ίνες πολυπροπυλενίου με μικρό μέτρο ελαστικότητας έχουν δύο εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες (μέχρι 1.0 kg/m³) για να ελέγχουν την συστολή ξήρανσης του νωπού σκυροδέματος τις πρώτες ώρες της σκυροδέτησης. Κατά την διάρκεια των πρώτων ωρών το μέτρο ελαστικότητας του νωπού σκυροδέματος είναι περίπου ίδιο με αυτό των ινών. Οι ίνες πολυπροπυλενίου χρησιμοποιούνται επίσης στα σπίτια στους

τοίχους από σκυρόδεμα διάσπαρτες, γιατί σε περίπτωση πυρκαγιάς ή υψηλής θερμοκρασίας λιώνουν και δημιουργούν κανάλια, τα οποία μπορεί να ανακουφίσουν το σκυρόδεμα από την εσωτερική πίεση και να καθυστερήσουν την καταστροφή του. Οι ίνες πολυαιθυλενίου έχουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα και χαμηλή απορρόφηση υγρασίας.

2.5. 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:

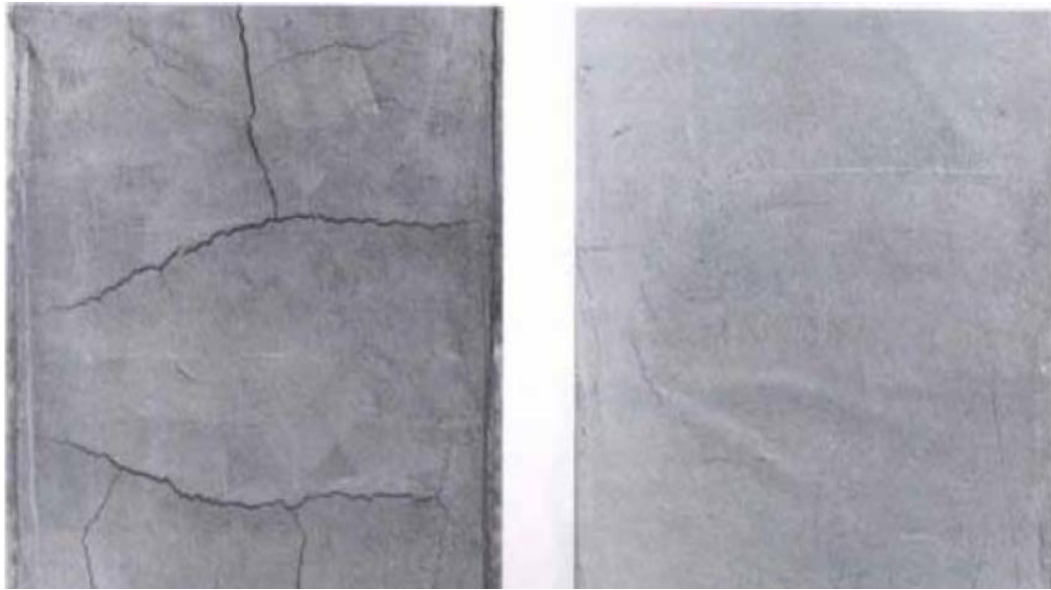
- ✓ Οι ίνες διασκορπίζονται ομοιογενώς στο μίγμα και περιορίζουν τις ρωγμές και τις επιπτώσεις της συστολής ξήρανσης. Έτσι, δεν τις αφήνουν να μεγαλώσουν πέρα από ένα πολύ μικρό όριο.
- ✓ Οι ίνες προσδίδουν στο σκυρόδεμα όλκιμη συμπεριφορά έναντι της ψαθυρής που είχε χωρίς τον οπλισμό. Αυτό συμβαίνει 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 φράξουν τις σωληνώσεις ή θα χειροτερέψουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Οι χαλύβδινες ίνες φθείρονται όταν εκτίθενται σε υγρασία ενώ οι υάλινες έχουν μικρή ανθεκτικότητα σε αλκαλικά περιβάλλοντα. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια έχουν από μικρή έως ελάχιστη επικάλυψη, έτσι τείνουν να εμφανίζουν σημεία σκουριάς. Για λόγους αισθητικής και ασφάλειας, προτείνεται ότι η μόνιμη επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα θα πρέπει να προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα κονιάματος που περιέχει τις νέες HPP 152 πλαστικές ίνες (High Performance Polypropylene Fibres) για τον έλεγχο θερμικού ραγίσματος (Κατσικογιάννη, 2004).
- * Φθορά επίσης μπορεί να προκληθεί και από λάθος στη συσκευασία ή στη μεταφορά.
- * Η εμπειρία από τη χρήση τους δεν είναι τόσο διαδομένη όσο αυτή του δομικού πλέγματος.
- * Ο εξοπλισμός φθείρεται σημαντικά περισσότερο σε σχέση με το κοινό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, το κόστος λόγω φθοράς εξοπλισμού, αυξάνει.
- * Είναι συνήθως ακριβότερες σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό και η διαθεσιμότητά τους στον χώρο του έργου μπορεί να είναι περιορισμένη.



Χωρίς ίνες

Με ίνες

Εικόνα 18. Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες, Fibermesh 1989

Κεφάλαιο 3. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΟΠΛΟΥ ΚΑΙ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. 24 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων (ύψος και διάμετρος) 150x150mm, 24 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων (ύψος και διάμετρος) 200x100mm και 24 πρισματικά διαστάσεων 500x100x100mm προκειμένου να διερευνηθεί η συνεισφορά των ινών στην μονοαξονική θλιπτική, στην καμπτική αντοχή και στην έμμεση εφελκυστική αντοχή (δοκιμή Barcelona) του σκυροδέματος. Άλλο πεδίο διερεύνησης ήταν η συμπεριφορά ινοπλισμένων και άοπλων δοκιμίων ύστερα από θερμική καταπόνηση στους 280°C. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα μισά δοκίμια.

Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης, θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής 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 την πυριτική πιαπάλη, τα δύο είδη ινών πολυπροπυλενίου και τον ρευστοποιητή που χρησιμοποιήσαμε.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 4 συνθέσεις (Σ1,Σ2,Σ3,Σ4) με ίδια σύνθεση σκυροδέματος, ίδια αδρανή υλικά αλλά με διαφορετικά είδη ινών.

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

- Σύνθεση Σ1(άοπλο)
- Σύνθεση Σ2(με χαλύβδινες ίνες)
- Σύνθεση Σ3(με ίνες πολυπροπυλενίου τύπου 1)
- Σύνθεση Σ4(με ίνες πολυπροπυλενίου τύπου 2)

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. Προετοιμασία δοκιμίων
9. Εισαγωγή ορισμένων δοκιμίων στον φούρνο
10. Εργαστηριακές δοκιμές σε σκληρυμένο σκυρόδεμα
11. 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 ΗΡΑΚΛΗΣ και είναι CEM IV/B (P-W) 32,5 R και τα στοιχεία από δοκιμές που έγιναν στο συγκεκριμένο δείγμα είναι τα παρακάτω:

Θλιπτικές αντοχές (EN197-1): 2d-CS: 35.1 MPa

7d-CS: 50.9 MPa

28d-CS: 65.2 MPa

Νερό (EN 196-3) WD: 28.4%.

- 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 παρασχέθηκε 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.(SF)
 - Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου της εταιρείας SIKA με στρογγυλεμένες άκρες, λευκές (PPF2)
 - Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου της εταιρείας SIKA PP-540/52 ορθογώνιες με εγκάρσια τομή, διαφανείς (PPF1)

Πίνακας 8. Κύρια χαρακτηριστικά ινών

Κωδ χαρακτ.	SF	PPF1	PPF2
Είδος	Χαλύβδινες ίνες	Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου	Συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου
Υλικό	Σύρμα χάλυβα ψυχρής όλκησης με υψηλή αντοχή min 1.100 Mpa	Πολυπροπυλένιο με εφελκυστική αντοχή 613 MPa και μέτρο ελαστικότητας E=5,4 GPa	Πολυπροπυλένιο με εφελκυστική αντοχή 400 MPa και μέτρο ελαστικότητας E = 1,6 Gpa
Διαστάσεις	Μήκος 20-60 mm και διάμετρος 0.75-1.00 mm	Μήκος 48-55 mm και διάμετρος 0,44-0,48 mm	Μήκος 6-18 mm και διάμετρος 0,25mm
Πρότυπα	ASTM A820 TYPE 1, EN 10016	EN 14889-2:2006 Ίνες για Σκυρόδεμα ASTM C 1116 Type III 4.1.3	BS EN 14889-2:2006

Η ανάμειξη των 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 +20°C)
Τιμή pH	3,4 -5,4 (στους +20°C)
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



Εικόνα 19. Φούρνος ξήρανσης 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 ξηραθεί για 24 ώρες περίπου στους 105°C.

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:



Εικόνα 20. Τετραμερισμός ποσότητας αδρανών

- 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 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 21. Κόσκινο, σειρά κοσκίνων και συσκευή κοσκινίσματος

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 3/4 in ή 3/4" δηλώνει αμερικάνικο κόσκινο οπής 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 κοσκίνισματος του εργαστηρίου (sieve shaker) .

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 το ποσοστό του διερχόμενου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για την άμμο, το ρυζάκι και το γαρμπίλι οπότε προκύπτουν τα αποτελέσματα όπως φαίνονται στον πίνακα 10 και γραφικά η κοκκομετρική καμπύλη κάθε αδρανούς όπως φαίνονται στο διάγραμμα 2.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ																	
			Άμμος				Ρυζάκι				Γαρμπύλι				Μείγμα		
Συνολικό αρχικό βάρος αδρανών (gr)			3516,72				3409,22				2633,89						
r_i : συκρατούμενο βάρος αδρανών στο κόσκινο i R_i : αθροιστικό βάρος αδρανών, συκρατούμενα μέχρι το κόσκινο $i = v$	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	ΑΜΜΟΣ	ΡΥΖΑΚΙ	ΓΑΡΜΠΥΛΙ
	Νούμερο	(mm)															
$R_v = r_1 + r_2 + \dots + r_v$	7/8in.	22,4	0,00	0	0,00	100,00	0	0	0,00	100,00	16,32	16,32	0,62	99,38		99,8	
	5/8in.	16	0,00	0	0,00	100,00	0	0	0,00	100,00	74,04	90,36	3,44	96,56		99,1	
	1/2in.	12,5	0,00	0	0,00	100,00	0	0	0,00	100,00	422,9	513,26	19,52	80,48		95,1	
	3/8in.	9,5	0,00	0	0,00	100,00	0	0	0,00	100,00	1511,9	2025,16	77,02	22,98		80,7	
$\%R_i$: αθροιστικό βάρος αδρανών, συκρατούμενα μέχρι το κόσκινο $i = v$ $\% R_i = \frac{R_i}{M_{\text{υπ}}}$ * 100	1/4in.	6,3	0,00	0	0,00	100,00	655,22	655,22	19,62	80,38	569,05	2594,21	98,66	1,34		71,4	
	No.5	4	116,25	116,25	3,31	96,69	2089,08	2744,3	82,20	17,80	20,9	2615,11	99,45	0,55		56,9	
	No.8	2,36	774,07	890,32	25,34	74,66	487,89	3232,19	96,81	3,19	0,72	2615,83	99,48	0,52		41,8	
$\%P_i$: αθροιστικό διερχόμενο βάρος αδρανών μέχρι και από το κόσκινο $i=v$ $\% P_i = 100 - \%R_i$	No.16	1,18	889,82	1780,14	50,67	49,33	61,99	3294,18	98,67	1,33	0,68	2616,51	99,50	0,50		27,5	
	No.30	0,6	610,02	2390,16	68,03	31,97	5,08	3299,26	98,82	1,18	2,6	2619,11	99,60	0,40		17,9	
	No.60	0,25	521,02	2911,18	82,86	17,14	3,56	3302,82	98,92	1,08		2619,11	99,60	0,40		9,7	
	No.120	0,125	405,47	3316,65	94,41	5,59	6,95	3309,77	99,13	0,87		2619,11	99,60	0,40		3,3	
		ΤΑΨΙ	196,56	3513,21	100,00	0,00	28,95	3338,72	100,00	0,00	10,45	2629,56	100,00	0,00		0,0	
Άθροισμα			3513,21				3338,72				2629,56						

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	35-65	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 No.3 καθώς έχουμε και χονδρά αδρανή. Στον πίνακα 12 φαίνονται τα όρια της διαβάθμισης No.3.

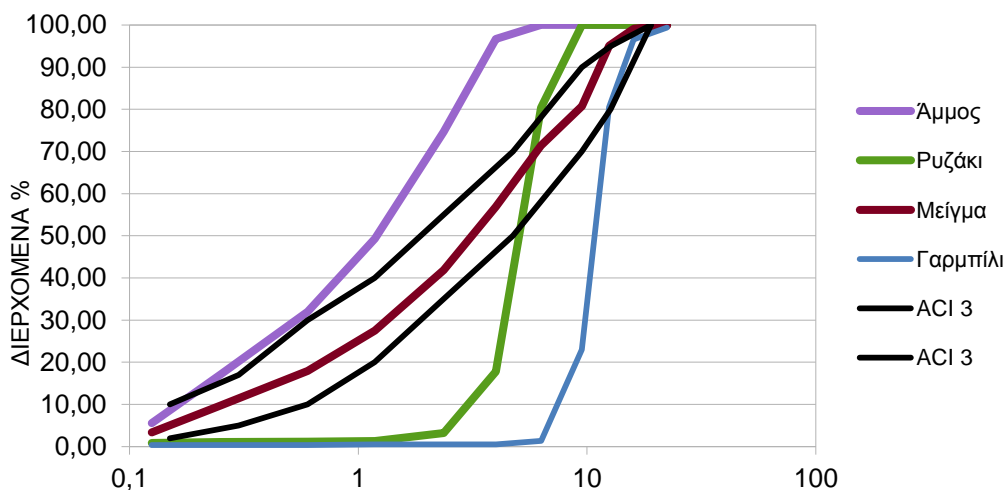
Επίσης στο πρότυπο αναφέρεται ότι τα υπερμεγέθη τεμάχια θα πρέπει να απορρίπτονται από τον έλεγχο, καθώς είναι πιθανό να προκαλέσουν έμφραξη του σωλήνα ή του ακροφύσιου κατά την εκτόξευσή τους όταν πρόκειται για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Πίνακας 12. Όρια Διαβάθμισης No.3

ΚΟΣΚΙΝΑ		ACI 3	ACI 3
	(mm)	Κάτω όριο	Άνω όριο
3/4in.	19,05	100	100
1/2in.	12,7	80	95
3/8in.	9,5	70	90
No.4	4,75	50	70
No.8	2,36	35	55
No.16	1,18	20	40
No.30	0,6	10	30
No.50	0,3	5	17
No.100	0,15	2	10

Στη γραφική παράσταση φαίνονται οι 3 κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών και η καμπύλη AC3 δηλαδή το κατώτερο και το ανώτερο όριο της διαβάθμισης No.3. Μέσω αυτών προέκυψε η καμπύλη του μείγματος που θα αποτελείται από:

55% άμμο & 20% ρυζάκι & 25% γαρμπίλι



Διάγραμμα 2. Γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της κοκκομετρικής ανάλυσης

3.4. Υπολογισμός και ζύγιση υλικών για κάθε σύνθεση



Εικόνα 22. Ζύγιση υλικών



Εικόνα 23. Υλικά προς σκυροδέτηση

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 ξεκίναγε η σκυροδέτηση.

Παρακάτω παρατίθενται σε πίνακες οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε μία από τις 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 +10%.

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.

➤ ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗΣ

Σύνθεση:	Σ1		
Υλικά	%(c+si)	Kg/m ³	Tot. Lit.(64,345)
Τσιμέντο		400	25,7238
Πυριτική παιπάλη		20	1,287
Αδρανή0-4mm		921	59,316
Αδρανή 4-8mm		335	21,569
Αδρανή 8-16mm		419	26,962
Νερό		219	14,104
Κενά 4,5%			
Ρευστοποιητής	0,744	3,13	0,201

Πίνακας 13. Ποσότητες υλικών για την σύνθεση Σ1(άοπλο)

Σύνθεση:	Σ2			
Υλικά	%(c+si)	%vol	Kg/m ³	Tot. Lit.(64,345)
Τσιμέντο			400	25,7238
Πυριτική παιπάλη			20	1,287
Αδρανή0-4mm			921	59,316
Αδρανή 4-8mm			335	21,569
Αδρανή 8-16mm			419	26,962
Νερό			219	14,104
Κενά 4,5%				
Χαλύβδινες ίνες		0,5	40	2,574
Ρευστοποιητής	0,67		2,81	0,181

Πίνακας 14. Ποσότητες υλικών για σύνθεση Σ2(χαλύβδινες ίνες)

Σύνθεση:	Σ3			
Υλικά	%(c+si)	%vol	Kg/m ³	Tot. Lit.(64,345)
Τσιμέντο			400	25,7238
Πυριτική παιπάλη			20	1,287
Αδρανή0-4mm			921	59,316
Αδρανή 4-8mm			335	21,569
Αδρανή 8-16mm			419	26,962
Νερό			219	14,104
Κενά 4,5%				
PPF1 ίνες		0,5	4,55	0,293
Ρευστοποιητής	0,86		3,61	0,232

Πίνακας 15. Ποσότητες υλικών για σύνθεση Σ3(ίνες πολυπροπυλενίου PPF1)

Σύνθεση:	Σ4			
Υλικά	%(c+si)	%vol	Kg/m ³	Tot. Lit.(64,345)
Τσιμέντο			400	25,7238
Πυριτική παιπάλη			20	1,287
Αδρανή0-4mm			921	59,316
Αδρανή 4-8mm			335	21,569
Αδρανή 8-16mm			419	26,962
Νερό			219	14,104
Κενά 4,5%				
PPF2 ίνες		0,5	4,55	0,293
Ρευστοποιητής	0,947		3,98	0,256

Πίνακας 16. Ποσότητες υλικών για σύνθεση Σ4(ίνες πολυπροπυλενίου PPF2)

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.Ίνες (Χαλύβδινες, Συνθετικές)

8.Ρευστοποιητής σε δόσεις



Εικόνα 24. 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 25. Προσθήκη αδρανων υλικών για ανάδευση



Εικόνα 26. Προσθήκη τσιμέντου και πυριτικής παιπάλης μετά από μερική ανάδευση των αδρανών με νερό



Εικόνα 27. Τέλειο μίγμα μετά την προσθήκη ινών 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 (κόνος 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 ως προς 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



Εικόνα 28. Κώνος κάθισης και ράβδος συμπτκνώσεως

συμπτκνώσεως 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.

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 συμπτκνώνεται με 25 κτυπήματα της ράβδου συμπτκνώσεως, 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 ανασύρση 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 αποτελεσμα- απαιτείται η δοκιμή Vebe. Αν διαπιστωθεί κατάρρευση του σκυροδέματος από διάτμηση (κατάρρευση τμήματος του κώνου κατά μήκος κεκλιμένου επιπέδου), η μέτρηση δεν λαμβάνεται υπ' όψη, η δοκιμή πρέπει να επαναληφθεί σε νέο τμήμα του δείγματος. Αν και η δεύτερη δοκιμή δείξει την ίδια συμπεριφορά δοκιμίου, θεωρείται ότι το σκυρόδεμα δεν έχει την αναγκαία πλαστικότητα και συνοχή για την εφαρμογή της δοκιμής κάθισης. Αν η κάθιση είναι μεγαλύτερη από 175 mm , τότε η δοκιμή κάθισης δεν είναι κατάλληλη για τη μέτρηση της εργασιμότητας αυτού του σκυροδέματος και πρέπει να αντικατασταθεί από τη δοκιμή εξαπλώσεως.

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 17. Αποτελέσματα δοκιμής κάθισης για όλες τις συνθέσεις

Συνθέσεις	Κάθιση(mm)
Σ1	100
Σ2	110
Σ3	100
Σ4	110

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

Πίνακας 18. Κατηγορίες κάθισης νωπού σκυροδέματος

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

Στην περίπτωση μας η κατηγορία κάθισης και για τις τέσσερις σκυροδετήσεις είναι η S3.

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 19. Χαρακτηριστικά πρότυπου δοχείου μέτρησης καθαρού βάρους σκυροδέματος

Απόβαρο	4,850 kg
Όγκος δοχείου	0,008 m ³

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

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέτρηση του καθαρού βάρους του κάθε μίγματος.

Πίνακας 20. Αποτελέσματα μετρήσεων καθαρού βάρους

ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ				
	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4
Μικτό Βάρος(kg)	23,448	23,514	23,090	20,990
Καθαρό Βάρος(kg)	18,598	18,664	18,240	16,140
Kg/m³	2,324	2,333	2,279	2,017

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 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 150x150mm, κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 200x100mm και πρισματικά 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 τουλάχιστον έως το μέσον του ύψους της και δονείται στην τράπεζα δόνησης για 25 δευτερόλεπτα και αφού πληρωθεί για άλλα 25. Κατά τη διάρκεια της δόνησης, οι μήτρες συγκρατούνται ώστε να μην αναπηδούν ανεξέλεγκτα και να έχουμε την επιθυμητή δόνηση του μίγματος.

Έπειτα μετά και την ολοκλήρωση της διαδικασίας πλήρωσης του απαιτούμενου

αριθμού μητρών, τοποθετούνται σε κατάλληλο χώρο στο εργαστήριο όπου και καλύπτονται με λινάτσες έως ότου γίνει η αφαίρεση των καλουπιών.

3.6.Εξαγωγή δοκιμίων από τις μήτρες

Μετά το πέρας 24 ωρών από τη σκυροδέτηση οι μήτρες λύνονται με τα κατάλληλα κλειδιά ώστε να εξαχθούν από αυτές τα δοκίμια. Αφού εξαχθούν τα δοκίμια, οι μήτρες καθαρίζονται και βιδώνονται πάλι ώστε να είναι έτοιμες για την επόμενη σκυροδέτηση. Τέλος, οι μήτρες λαδώνονται για την καλύτερη δυνατή συντήρησή τους.



Εικόνα 29. Μήτρες σκυροδέματος

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 των 28 ημερών.



Εικόνα 30. Δεξαμενή συντήρησης δοκιμίων

3.8. Προετοιμασία δοκιμίων

Αφού τα δοκίμια παραμείνουν στη δεξαμενή συντήρησης για 28 ημέρες χρειάζονται κάποια περαιτέρω διαδικασία για να εκτελεστούν οι εργαστηριακές τους δοκιμές.

Τα πρισματικά δοκίμια πρέπει να κοπούν στο μέσο του μήκους τους με το δισκοπρίονο σε βάθος 1,67mm. Τα κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 15 cm τα κόβουμε ακριβώς στα 15cm ύψος για την δοκιμή Barcelona. Τα κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο 10 cm τα κόβουμε στο δισκοπρίονο στα 20 cm ύψος και στη συνέχεια τα λειάνουμε στον λειαντήρα ώστε να αποκτήσουν την επιθυμητή επιπεδότητα.

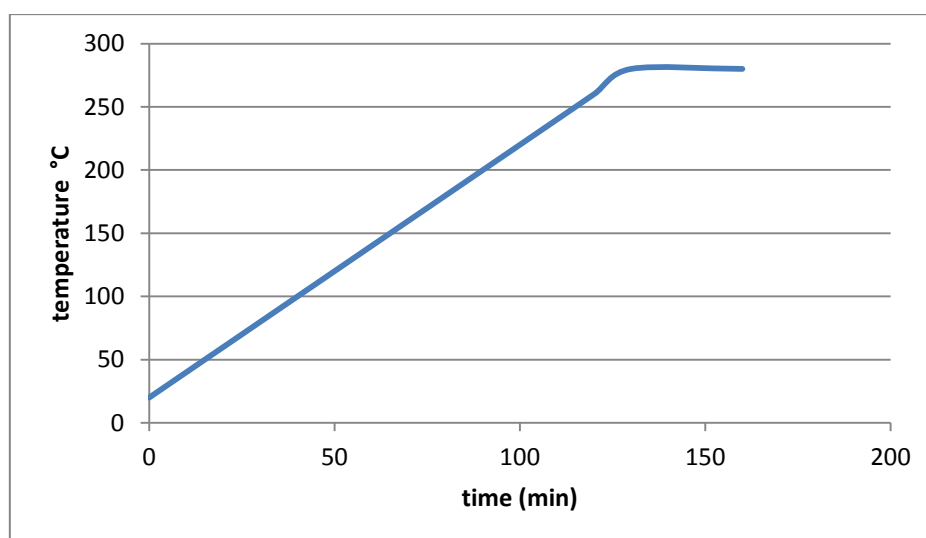


Εικόνα 31. Δισκοπρίονο



Εικόνα 32. Λειαντήρας

3.9. Εισαγωγή δοκιμίων στο φούρνο



Διαγραμμα 3. Ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας φούρνου

Τα μισά δοκίμια πριν από τις εργαστηριακές δοκιμές τοποθετήθηκαν στο φούρνο,

όπου υποβλήθηκαν σε περιοδική αύξηση της θερμοκρασίας κατά 20 °C ανά δέκα λεπτά μέχρι την επιθυμητή θερμοκρασία των 280°C. Στη θερμοκρασία αυτή παρέμειναν για μισή ώρα έως ότου έσβηνε ο φούρνος και εξάγονταν μετά από 24 ώρες.



Εικόνα 33. Φούρνος θέρμανσης δοκιμίων

Κεφάλαιο 4.ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ

ΔΟΚΙΜΩΝ

Οι εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων του τμήματος Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών Ε.Μ.Π αφορούσαν 6 πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x500mm, 6 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 200x100mm και 6 κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 150x150mm από κάθε σύνθεση δηλαδή συνολικά 72 δοκίμια που υποβλήθηκαν σε δοκιμές κάμψης, θλίψης και έμμεσου εφελκυσμού αντίστοιχα και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Από κάθε σύνθεση 3 πρισματικά δοκίμια 100x100x500mm, 3 κυλινδρικά δοκίμια 200x100mm και 3 κυλινδρικά δοκίμια 150x150mm υπέστησαν αύξηση της θερμοκρασίας τους μέχρι τους 280 βαθμούς κελσίου και παρέμειναν στο φούρνο για 24 ώρες, πριν μεταφερθούν στο εργαστήριο για τις εργαστηριακές δοκιμές. Τα υπόλοιπα δοκίμια εξετάστηκαν αμέσως μετά την έξοδό τους από τη δεξαμενή συντήρησης. Για τις δοκιμές έγινε χρήση της σερβουδραυλικής μηχανή φόρτισης του εργαστηρίου.



Εικόνα 34.Πλαίσιο κάμψης δυναμικότητας φόρτισης 150kN και δοκιμών θλίψης δυναμικότητας 5000 kN και μονάδα ελέγχου τριαξονικών δοκιμών Sercomp 7

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

- Πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας 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.

4.1. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

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

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 λειάνθηκαν έτσι ώστε το φορτίο να επιβάλλεται σε λεία επιφάνεια και όχι στην επιφάνεια έγχυσης.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε θλίψη, η οποία έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 469-02. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή θλίψης χρησιμοποιήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια ύψους 200 mm και διαμέτρου 100 mm.

Το πλαίσιο στο οποίο πραγματοποιήθηκε το πείραμα είναι του ιταλικού οίκου CONTROLS δυναμικότητας 5000 kN και η δοκιμή εκτελέστηκε με το σερβοϋδραυλικό σύστημα ελέγχου φορτίου ADVANCED 9. Η δοκιμή έγινε με ρυθμό φόρτισης 2000 N/s.

Για την εκτέλεση του πειράματος τοποθετήθηκαν στο κέντρο των πλακών της μηχανής δυο επιπλέον μικρότερες πλάκες, διαμέτρου 100 mm, ενώ για τον υπολογισμό της αξονικής παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν τρία LVDTs εύρους 10 mm τα οποία τοποθετήθηκαν ανά 120 μοίρες. Τα LVDTs προσαρμόστηκαν πάνω στο δοκίμιο με δυο δακτυλίους αλουμινίου.

Για τον υπολογισμό της εγκάρσιας παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε επιμηκυνσιόμετρο εγκάρσιας μετατόπισης, με μορφή αλυσίδας, το οποίο τοποθετείται στο κέντρο του δοκιμίου, ώστε να μετράται η διόγκωσή του (Εικόνα 35).

Για τον προσδιορισμό του μέτρου Ελαστικότητας, η δοκιμή σε θλίψη πραγματοποιήθηκε σε τρία διαδοχικά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το οποίο αποτελεί και την έναρξη του πειράματος, το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι τα 120 kN (περίπου) και στη συνέχεια αποφορτίζεται μέχρι τα 30kN. Στο δεύτερο στάδιο, το δοκίμιο ξαναφορτίζεται πάλι μέχρι τα 120kN (περίπου) και εκ νέου αποφορτίζεται μέχρι τα 30 kN. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι να οδηγηθεί σε

αστοχία. Η τιμή των 120 kN αντιστοιχεί στο 40% περίπου της μέγιστης μέσης θλιπτικής αντοχής 28 ημερών όλων των δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπως προσδιορίστηκε αρχικά.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το τρίτο στάδιο φόρτισης. Επιλέχθηκε ως περιοχή πειραματικών δεδομένων αυτή που αντιστοιχεί στο 10% έως 40% του μέγιστου φορτίου του κάθε δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκε ως η κλίση της ευθείας που ορίζει το παραπάνω εύρος τιμών της καμπύλης σ-ε. Ο λόγος παραμόρφωσης ισούται με τον λόγο της διαφοράς εγκάρσιων παραμορφώσεων προς την διαφορά αξονικών παραμορφώσεων για τα φορτία που αντιστοιχούν στο 10 και 40% του μέγιστου φορτίου.

Μέτρο ελαστικότητας χορδής: $E=(\sigma_2-\sigma_1)/(\epsilon_2-\epsilon_1)$, όπου E = μέτρο ελαστικότητας, σ_2 = τάση 40% του μέγιστου φορτίου, σ_1 = τάση 10% του μέγιστου φορτίου, ϵ_2 = αξονική παραμόρφωση της τάσης του 40% του μέγιστου φορτίου, ϵ_1 = αξονική παραμόρφωση της τάσης του 10% του μέγιστου φορτίου.

Λόγος Poisson: $\nu=(\epsilon_2-\epsilon_{t1})/(\epsilon_2-\epsilon_1)$, όπου ν = λόγος Poisson, ϵ_{t2} = εγκάρσια παραμόρφωση στο μέσο του ύψους που προκλήθηκε από την τάση σ_2 , ϵ_{t1} = εγκάρσια παραμόρφωση στο μέσο του ύψους που προκλήθηκε από την τάση σ_1 .

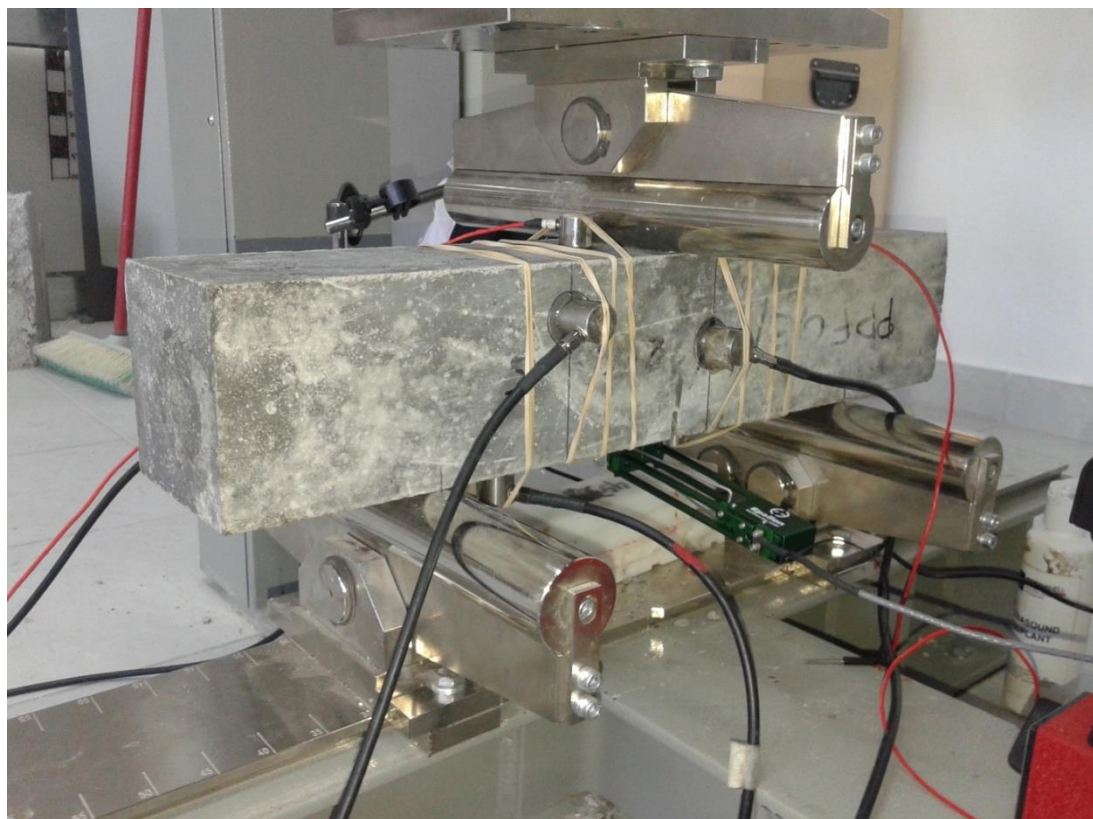


Εικόνα 35. Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης



Εικόνα 36. Δοκίμιο μετά την δοκιμή

4.2. Δοκιμή κάμψης



Εικόνα 37. Δοκίμιο στην πρέσα πριν την εκτέλεση δοκιμής κάμψης

4.2.1. Σχήμα και μέγεθος των δοκιμίων

Τα δοκίμια θα πρέπει να είναι πρισματικά τα οποία συμμορφώνονται με το EN 12390-1 με ένα ονομαστικό μέγεθος (πλάτος και ύψος) 150 mm και μήκος L τέτοιο ώστε να ισχύει $550 \text{ mm} \leq L \leq 700 \text{ mm}$.

Τα προσδιοριζόμενα σχήμα και μέγεθος των δοκιμίων είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα με μέγιστο μέγεθος των αδρανών όχι μεγαλύτερο από 32 mm και μεταλλικές ίνες όχι μεγαλύτερες από 60 mm.

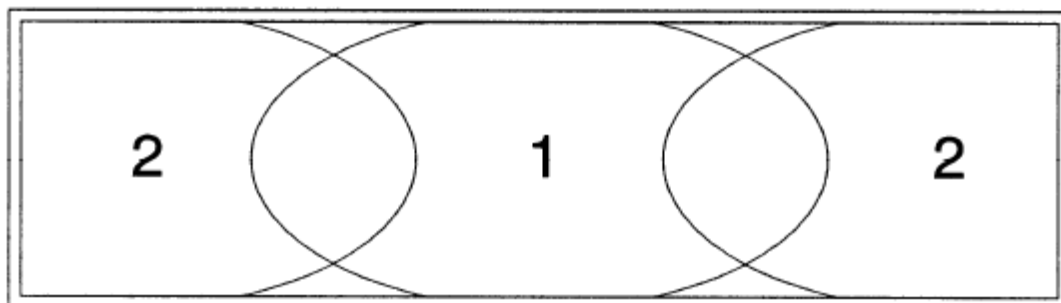
Στην περίπτωσή μας χρησιμοποιήσαμε πλάτος δοκιμίου 100 mm και μήκος L 500 mm. Επίσης, ο μέγιστος κόκκος αδρανών που χρησιμοποιήθηκε ήταν $\leq 16 \text{ mm}$ και το μέγιστο μήκος ινών $\leq 54 \text{ mm}$.

4.2.2 Κατασκευή και σκλήρυνση των δοκιμίων

Τα δοκίμια πρέπει να εκχύνονται και σκληραίνουν σε συμμόρφωση με τα EN 12350-1 και EN 12390-2 με εξαίρεση συγκεκριμένων περιπτώσεων.

Η διαδικασία γεμίσματος της μήτρας υποδεικνύεται στην εικόνα 38, το μέγεθος του

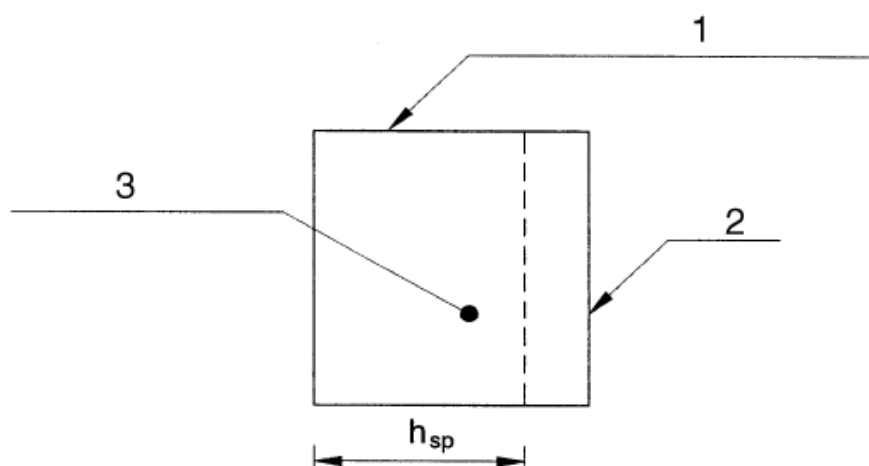
γεμίματος 1 πρέπει να είναι διπλάσιο του γεμίματος 2. Η μήτρα πρέπει να γεμίζεται περίπου μέχρι το 90% του ύψους του δοκιμίου πριν τη συμπίεση. Η μήτρα πρέπει να ξεχειλίσει και να σταθεροποιείται κατά τη διάρκεια της συμπίεσης η οποία διενεργείται με εξωτερική δόνηση.



Εικόνα 38. Διαδικασία γεμίματος της μήτρας

4.2.3 Εγκοπή των δοκιμίων

Το τρόχισμα σε νερό πρέπει να χρησιμοποιείται για την εγκοπή των δοκιμίων. Το δοκίμιο πρέπει να περιστρέφεται πάνω από 90° γύρω από τον διαμήκη άξονα έγχυσης και έπειτα να πριονίζεται στο μέσο του μήκους του. (βλ. Εικόνα 39)



1. Άνω επιφάνεια κατά την έκχυση
2. Εγκοπή
3. Εγκάρσια τομή του δοκιμίου

Εικόνα 39. Θέση του πριονίσματος εγκοπής εντός του δοκιμίου πριν την περιστροφή

Το πλάτος της εγκοπής πρέπει να είναι 5 mm ή λιγότερο, η απόσταση h_{sp} πρέπει να είναι $125 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ (βλ.εικόνα 40)

Στην περιπτώσή μας το πλάτος της εγκοπής είναι 3 mm και η απόσταση h_{sp} είναι :
 $100 \text{ mm} - 16,7 \text{ mm} = 83,3 \text{ mm}$.

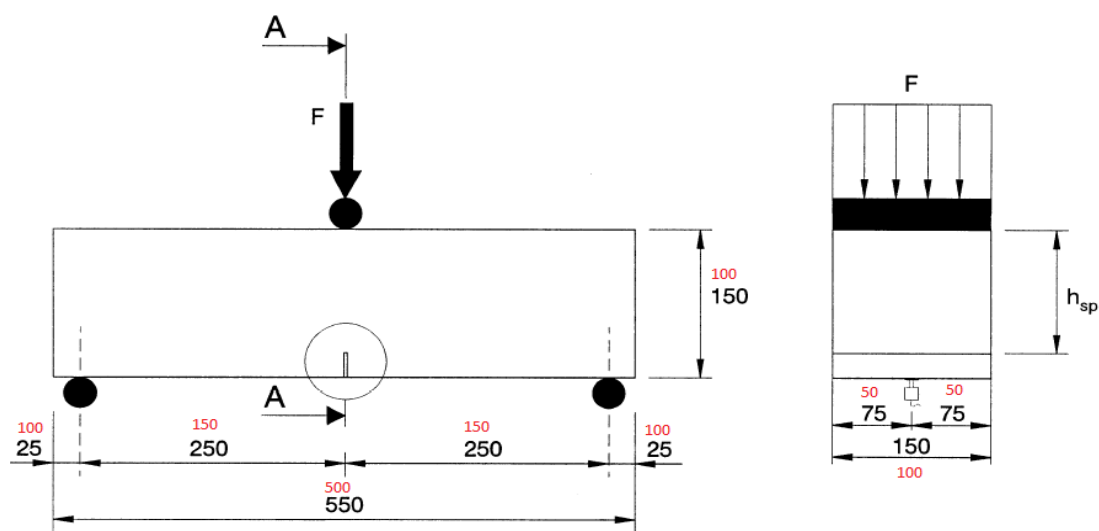
Τα δοκίμια πρέπει να σκληραίνουν σύμφωνα με το EN 12390-2, με εξαίρεση συγκεκριμένων περιπτώσεων, για τουλάχιστον τρεις μέρες μετά το τρόχισμα και όχι περισσότερο από τρεις ώρες πριν τη δοκιμή (αφήνοντας επαρκή χρόνο για προετοιμασία που περιλαμβάνει συσκευές τοποθεσίας για τους μετατροπείς). Η δοκιμή πρέπει να πραγματοποιείται γενικά στις 28 ημέρες.

4.2.4. Διαδικασία δοκιμής

4.2.4.1 Προετοιμασία και τοποθέτηση των δοκιμίων

Όταν μετριέται το άνοιγμα της ρωγμής, ένας μετατροπέας μετατόπισης πρέπει να τοποθετείται κατά μήκος του διαμήκου άξονα στο μέσο του πλάτους του δοκιμίου, τέτοιο ώστε η απόσταση του κάτω μέρους του δοκιμίου και της γραμμής μέτρησης να είναι 5 mm ή λιγότερο.

Στις δοκιμές μας, η απόσταση του κάτω μέρους του δοκιμίου και της γραμμής μέτρησης είναι 10 mm.



Εικόνα 40. Τυπική διάταξη για μέτρηση CMOD (με κόκκινα γράμματα είναι οι αποστάσεις που χρησιμοποιήσαμε ενώ με μαύρο χρώμα οι προτεινόμενες διαστάσεις του προτύπου)

4.2.4.2. Δοκιμή κάμψης

Σε περίπτωση που μια μηχανή δοκιμής ελέγχει το ρυθμό αύξησης του CMOD, η μηχανή πρέπει να λειτουργεί έτσι ώστε το CMOD να αυξάνεται με ένα συνεχή ρυθμό 0,05 mm/min. Όταν το CMOD φτάσει την τιμή= 0,1 mm, η μηχανή πρέπει να

λειτουργεί έτσι ώστε το CMOD να αυξάνει με ένα συνεχή ρυθμό 0,2 mm/min.
Η δοκιμή πρέπει να τερματίζεται για μια τιμή του CMOD όχι μικρότερη από 4 mm.
Στις πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, όταν το CMOD έφτασε την τιμή των 0,5 mm ο ρυθμός αυξήθηκε σε 0.1 mm/min μέχρι το τέλος των δοκιμών.

4.2.5. Έκφραση αποτελεσμάτων

4.2.5.1. Ισοδυναμία μεταξύ CMOD και παρέκκλισης

Σε περίπτωση που η γραμμή μέτρησης είναι σε μια απόσταση y κάτω από το κάτω μέρος του δοκιμίου, η τιμή του CMOD πρέπει να προέρχεται από τη μετρήσιμη τιμή $CMOD_y$, χρησιμοποιώντας τη σχέση: $CMOD = CMOD_y [h/(h+y)]$

Όπου h : το συνολικό ύψος του δοκιμίου

Στην περίπτωσή μας $CMOD = CMOD_{10} [100/(100+10)]$

4.2.5.2 Όριο αναλογικότητας

Το όριο αναλογικότητας LOP δίνεται από τη σχέση: $f_{ct,L} = 3F_L l / 2bh_{sp}^2$

Όπου

$f_{ct,L}$: το LOP, σε N/mm^2

F_L : το φορτίο που αντιστοιχεί στο LOP, σε N (βλ.εικόνα 40)

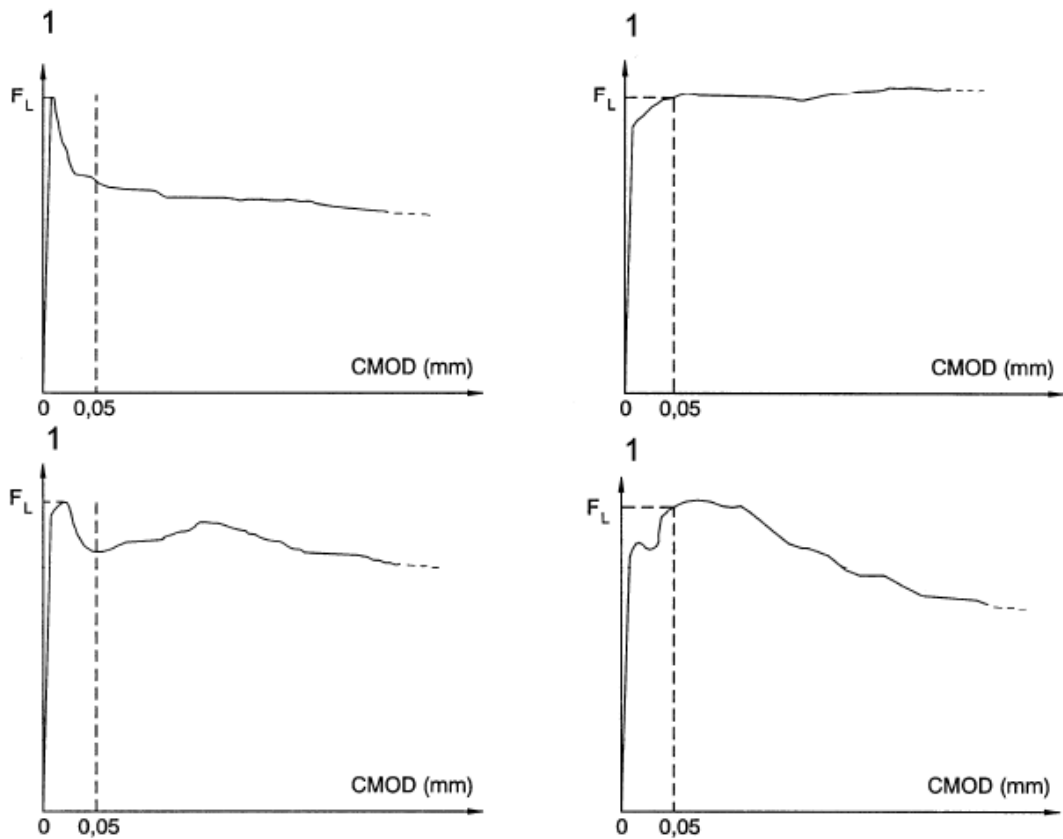
l : το μήκος της έκτασης μεταξύ των δύο στηριγμάτων

b : το πλάτος του δοκιμίου σε mm

h_{sp} : η απόσταση μεταξύ του άκρου της εγκοπής και της κορυφής του δοκιμίου σε mm

Η τιμή του φορτίου F_L πρέπει να καθορίζεται τραβώντας μια γραμμή σε απόσταση 0,05 mm και παράλληλη στον άξονα του φορτίου στο διάγραμμα φορτίου-CMOD ή στο διάγραμμα φορτίου αναλογικότητας και παίρνοντας ως F_L την υψηλότερη τιμή φορτίου μέσα στο διάστημα 0,05 mm.

Το LOP πρέπει να εκφράζεται στο πλησιέστερο 0,1 N/mm^2 .



Εικόνα 41. Διάγραμμα φορτίου-CMOD και F_L

4.2.5.3. Υπολειμματική καμπτική εφελκυστική δύναμη

Η υπολειμματική καμπτική εφελκυστική δύναμη $f_{R,j}$ δίνεται από τη σχέση:

$$f_{R,j} = 3F_j l / 2bh_{sp}^2 \quad \text{όπου:}$$

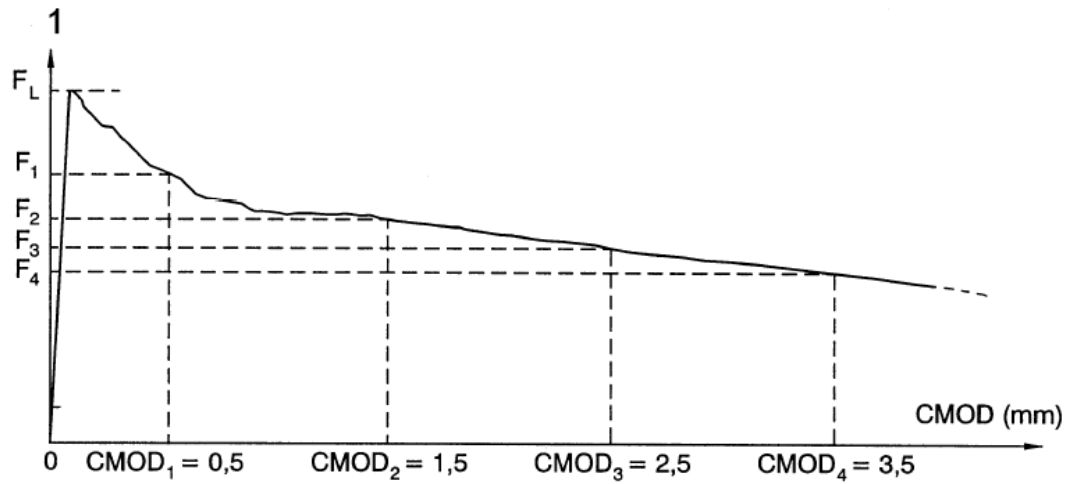
$f_{R,j}$: η υπολειμματική καμπτική εφελκυστική δύναμη που αντιστοιχεί στο $CMOD = CMOD_j$ ή $\delta = \delta_j$ ($j=1, 2, 3, 4$), σε N/mm^2

F_j : το φορτίο που αντιστοιχεί στο $CMOD = CMOD_j$ ή $\delta = \delta_j$ ($j=1, 2, 3, 4$), σε N

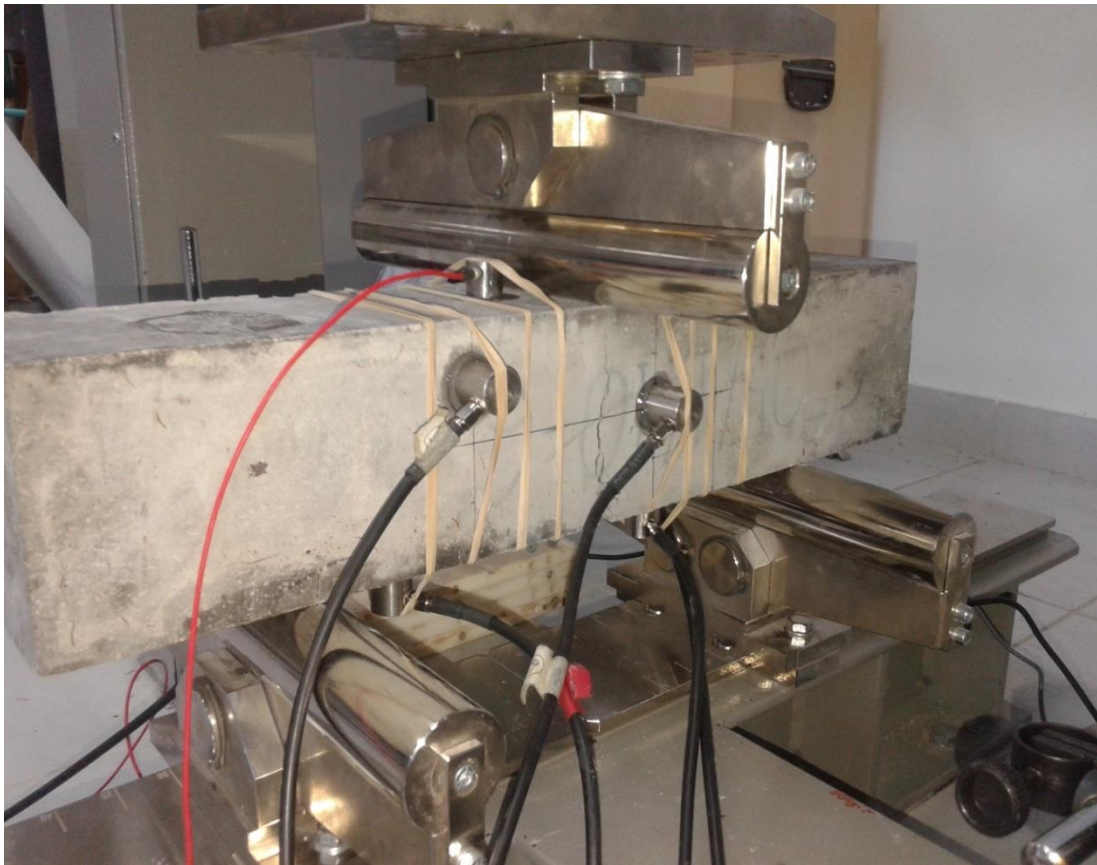
l : το μήκος της έκτασης μεταξύ των δύο στηριγμάτων, σε mm

b : το πλάτος του δοκιμίου σε mm

h_{sp} : η απόσταση μεταξύ του άκρου της εγκοπής και της κορυφής του δοκιμίου σε mm



Εικόνα 42. Διάγραμμα φορτίου-CMOD και F_j (1, 2, 3, 4)



Εικόνα 43. Εμφάνιση ρωγμής μετά το πέρας της δοκιμής κάμψης

4.3. Δοκιμή Barcelona

Η δοκιμή Barcelona αποδείχθηκε επαρκής για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο του ινοπλισμένου σκυροδέματος, καθώς προσφέρει αποτελέσματα με μικρότερη διασπορά από εκείνα που λαμβάνονται από άλλες δοκιμές. Αυτή η δοκιμή

χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η επίδραση των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, μετά τη ρηγμάτωση.

Λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ως μια από τις πιο αντιπροσωπευτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι δοκιμές σε κάμψη σε πρισματικά δοκίμια ή πάνελ πραγματοποιούνται για να προσδιορισθεί η ενέργεια που απορροφάται κατά τη διάρκεια της θραύσης. Υπάρχουν διάφορα πρότυπα για τον προσδιορισμό της ενέργειας, όπως για παράδειγμα τα ASTM C 1018, ASTM C 1609, EN 14651, NBN B 15-238, JSCE SF-4, UNE 83-510, RILEM TC-162-TDF, UNI 11039.

Οι δοκιμές αυτές αποσκοπούν στο να χαρακτηρίσουν τις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, αλλά απαιτούν δοκίμια αρκετά βαριά και πολύπλοκες πειραματικές διαδικασίες. Επίσης, τα αποτελέσματα έχουν σημαντική διασπορά, η οποία οφείλεται στην συγκέντρωση των ινών στο τμήμα που εμφανίζεται η ρωγμή.

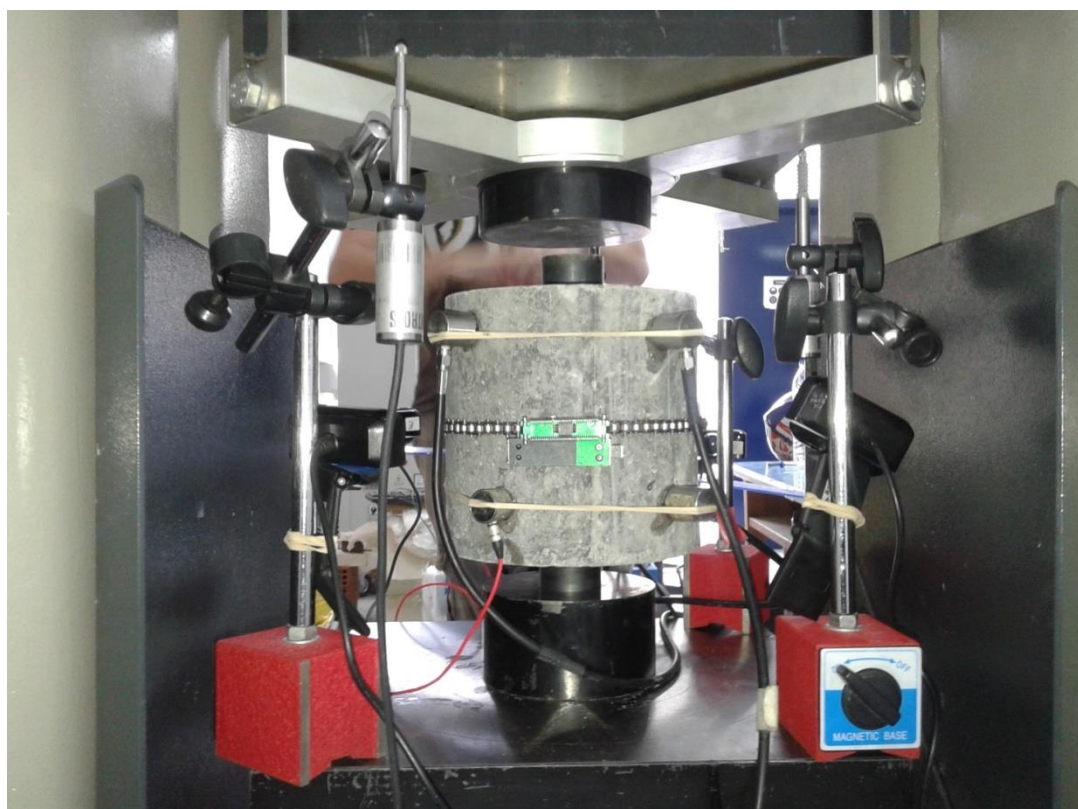
Τα πλεονεκτήματα της δοκιμής Barcelona (BCN) έναντι των άλλων πρότυπων δοκιμών για την εύρεση της αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η χρήση μικρών δοκιμίων, αλλά με μεγάλη επιφάνεια θραύσης. Οι διαστάσεις τους είναι (ύψος και διάμετρος) 150x150 mm και χυτεύονται σε τυποποιημένους κυλίνδρους διαστάσεων 150x300 mm ή αποτελούν πυρήνες σκυροδέματος. Η δοκιμή λαμβάνει χώρα σε τυποποιημένα εργαστήρια ποιοτικού ελέγχου.

Η συνολική περιφερειακή παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD) μετράται από ειδικό επιμηκυνσιόμετρο το οποίο προσαρμόζεται στην περιφέρεια. Η συσκευή αυτή λόγω του υψηλού κόστους, δεν συναντάται συχνά στα εργαστήρια. Για το σκοπό αυτό ο Carmona προκειμένου να γενικευθεί η χρήση της δοκιμής BCN για τον προσδιορισμό της ενέργειας, πρότεινε, τη συσχέτιση της συνολικής περιφερειακής μετατόπισης με τη μέση αξονική μετατόπιση μεταξύ των πλακών φόρτισης. Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης είναι ικανοποιητικά κάτι που αποτυπώνεται και από την καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μετατοπίσεων στο θραυσμένο δοκίμιο.

Βάσει μελετών έχουν βρεθεί κάποιοι δείκτες αντοχών, μέσω των οποίων ποσοτικοποιείται η επίδραση των ινών στα ινοπλισμένα σκυροδέματα μετά την ρηγμάτωση. Η επιτυχία αυτών των δεικτών φαίνεται στα αποτελέσματα διαφορετικών πειραματικών προγραμμάτων, όπου η αντοχή του χάλυβα στο

ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FRC) προσδιορίζεται μέσω της τυποποιημένης δοκιμής BCN.

Η δοκιμή BCN είναι μια δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού που βασίζεται στην δοκιμή διπλής διάτρησης, η οποία προτάθηκε από τον Chen (1970). Στη δοκιμή αυτή, ένα κυλινδρικό δείγμα από FRC, με διάμετρο ($2b$) ίση με το ύψος του ($2h$), δηλαδή $2b / 2h = 1$, υποβάλλεται όπως φαίνεται στην εικόνα 37 σε θλίψη μέσω δύο χαλύβδινων δίσκων οι οποίοι τοποθετούνται στο κέντρο της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου. Η αναλογία μεταξύ των διαμέτρων των δίσκων ($2a$) και του δείγματος ($2b$) είναι 1: 4 ή $2a / 2b = 0,25$. Για τον προσδιορισμό της ενέργειας που διαχέεται, το εφαρμοζόμενο φορτίο και η συνολική περιφερειακή παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD), η οποία μετράται στο ήμισυ του ύψους του, πρέπει να καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Εικόνα 44 . Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Barcelona)

Το φορτίο που ασκείται από τους δίσκους στον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της δοκιμής παράγει ένα κώνο υπό τριαξονική ένταση, ο οποίος αυξάνει την διάμετρο του δοκιμίου και παράγει τάση εφελκυσμού κάθετα προς τα ακτινικά επίπεδα του δοκιμίου. Λόγω της παρουσίας αυτού του πεδίου έντασης με κυλινδρική συμμετρία, όταν η ένταση υπερβεί την αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος, το δοκίμιο σπάει

προκαλώντας ακτινικές ρωγμές κάθετα στο πεδίο της έντασης. Αυτό επιτρέπει στον συμπίεσμένο κώνο να μετατοπιστεί σημαντικά στο εσωτερικό του κυλίνδρου, αυξάνοντας την ακτίνα του κυλίνδρου και ευνοώντας την εμφάνιση μιας, δύο ή περισσότερων ρωγμών. Στην εικόνα 43 φαίνονται η ρηγμάτωση στην τελική κατάσταση του δοκιμίου: δύο ευθυγραμμισμένες ρωγμές, τρεις ρωγμές σε απόσταση 120 μοιρών ή μία από την άλλη ή τέσσερις κάθετες ρωγμές.



Εικόνα 45. Ρωγμές που προκαλούνται στα κυλινδρικά δοκίμια

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, πριν το μέγιστο φορτίο, η περιφερειακή παραμόρφωση είναι αμελητέα. Όταν σχηματιστούν οι ρωγμές, η μετρούμενη περιφερειακή παραμόρφωση αντιστοιχεί στη συνολική μετατόπιση λόγω της ρηγμάτωσης (TCOD), και η ενέργεια που διαχέεται από το FRC κατά τη διαδικασία της θραύσης μπορεί να υπολογιστεί ως η περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-συνολικής μετατόπισης TCOD (P-TCOD) με την ακόλουθη Εξίσωση 1:

$$E(TCOD) = \int^{TCOD} P(TCOD) d(TCOD) / TCOD_0 \quad (1)$$

όπου $E(TCOD)$ είναι η ενέργεια που μετράται για μια δεδομένη τιμή της TCOD.

Η ενέργεια που υπολογίζεται από την Εξίσωση 1 δείχνει την επίδραση των ινών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Λαμβάνει υπόψη της την απόκριση του FRC μόνο στη ρηγματωμένη κατάσταση και περιλαμβάνει το έργο που προκλήθηκε από τις ίνες κοντά στις ρωγμές και από την τριβή πάνω στους μικρούς κώνους που δημιουργούνται κάτω από τις φορτιζόμενες σφήνες. Η ενέργεια αυτή σχετίζεται άμεσα με την αντοχή που καθορίζεται από την δοκιμή κάμψης του βελγικού προτύπου NBN B 15 238.

Το πρότυπο UNE 83-515 ορίζει τις εκφράσεις για τον υπολογισμό της ρωγμής και των παραμενουσών τάσεων, οι οποίες μαζί με την ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο κατά τον έλεγχο ποιότητας του FRC, όσο και κατά τον δομοστατικό σχεδιασμό.

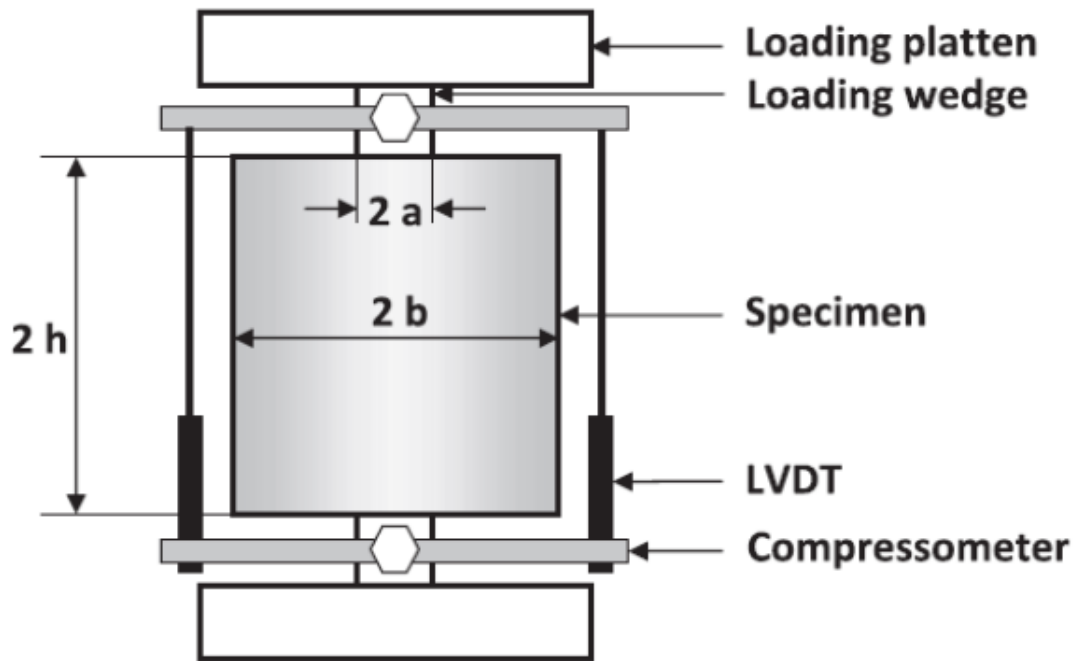
Η παραμένουσα αντοχή, f_{ctR_x} , και το φορτίο που αντιστοιχεί σε μία δεδομένη περιφερειακή παραμόρφωση R_x , υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο UNE 83-515 με την Εξίσωση 2: $f_{ctR_x} = 8P_{R_x} / 9\pi a h$ (2) όπου P_{R_x} είναι το φορτίο που αντιστοιχεί στη συνολική περιφερειακή παραμόρφωση R_x . Επεκτείνοντας αυτόν τον ορισμό στις αξονικές μετατοπίσεις, η P_{R_x} μπορεί να οριστεί ως το φορτίο που αντιστοιχεί σε μία αξονική μετατόπιση δ_{A_x} στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μετά την ρηγμάτωση. Χρησιμοποιώντας πλέον την Εξίσωση 2 με τη νέα P_{δ_x} , υπολογίζεται ευκολότερα η παραμένουσα αντοχή $f_{ct\delta_x}$.

Μια παραλλαγή της δοκιμής Barcelona αποτελεί η γενικευμένη δοκιμή BCN από τον Carmona που υποκαθιστά τη μέτρηση της TCOD με τη μέτρηση της αξονικής μετατόπισης που μετράται μεταξύ των δίσκων φόρτισης. Για το σκοπό αυτό, όπως φαίνεται στην εικόνα 44, τρία LVDTs στερεώνονται στους δίσκους φόρτισης κατά τη δοκιμή σε θλίψη. Η αντοχή συσχετίζεται με την ικανότητα του FRC να απορροφά ενέργεια, η οποία ισούται με το έργο που παράγει το φορτίο κατά τη διάρκεια της ρηγμάτωσης και υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση 3.

$$T(\delta A) = \int P(\delta) d(\delta) \delta A \quad (3)$$

όπου $P(\delta)$ είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο, για το οποίο λαμβάνεται αξονική μετατόπιση δ μετά την ρηγμάτωση.

Με την Εξίσωση 2 υπολογίζεται η αντοχή του FRC και το έργο που παράγεται από το φορτίο κατά την ρηγμάτωση του FRC. Ωστόσο, προκειμένου να ληφθούν τιμές συγκρίσιμες με την τυποποιημένη δοκιμή, η μετατόπιση του φορτίου λαμβάνεται υπόψη από το μέγιστο φορτίο, γιατί η δοκιμή BCN ποσοτικοποιεί την συμπεριφορά του FRC μόνο μετά την ρηγμάτωση.



Εικόνα 46 . Διάταξη δοκιμής G-BNC κατά τη μονοαξονική θλίψη. (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013)

Το μέγιστο φορτίο αντιστοιχεί στο σημείο που εμφανίζεται η πρώτη κορυφή στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης (P-δ). Η πρώτη κορυφή ορίζεται από το πρότυπο UNE 83-515 με την Εξίσωση 4:

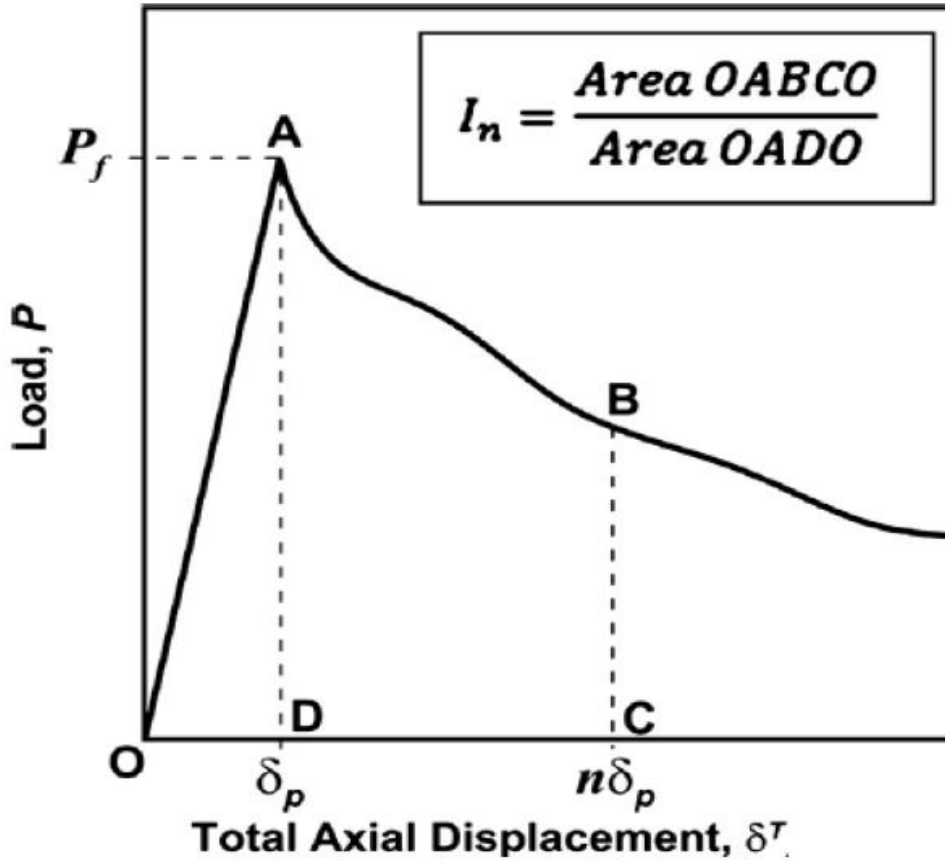
$$f_{ct} = 8P_f / 9\pi a h \quad (4)$$

όπου a είναι η ακτίνα της πλάκας φόρτισης και h το ύψος του δοκιμίου.

Όπως είναι γνωστό, το πρότυπο ASTM C-1018, μέσω της δοκιμής κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων, ορίζει κάποιους δείκτες δυσθραυστότητας, οι οποίοι είναι αδιάστατα μεγέθη, με σκοπό να καταγραφεί κατά πόσο μεγαλύτερη είναι η δυσθραυστότητα που αναπτύσσει το ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε σχέση με το άοπλο. Ο ορισμός των συγκεκριμένων δεικτών δυσθραυστότητας εφαρμόζεται εκτός από την δοκιμή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων και σε άλλες δοκιμές όπως για παράδειγμα στη δοκιμή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων σε δοκίμια με εγκοπές, στην έμμεση κάμψη μέσω της δοκιμής Brazilian και στην έμμεση διάτμηση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται επέκταση του προτύπου ASTM C-1018 και υπολογίζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας ινοπλισμένου σκυροδέματος μέσω της δοκιμής Barcelona.

Ο δείκτης δυσθραυστότητας I_n στην δοκιμή Barcelona, ορίζεται ως ο λόγος με αριθμητή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (P-δ) μέχρι μια

μετατόπιση $n\delta_p$ (εικόνα 45) και παρονομαστή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης (P- δ) μέχρι την μετατόπιση δ_p της πρώτης κορυφής. Όσον αφορά στη μετατόπιση $n\delta_p$, το n είναι ένα προκαθορισμένο πολλαπλάσιο, για παράδειγμα $n = 2, 3, 4$ και 5 .



Εικόνα 47. Σχηματική απεικόνιση και τύπος του δείκτη δυσθραυστότη, I_n , για την γενικευμένη δοκιμή Barcelona. (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013)

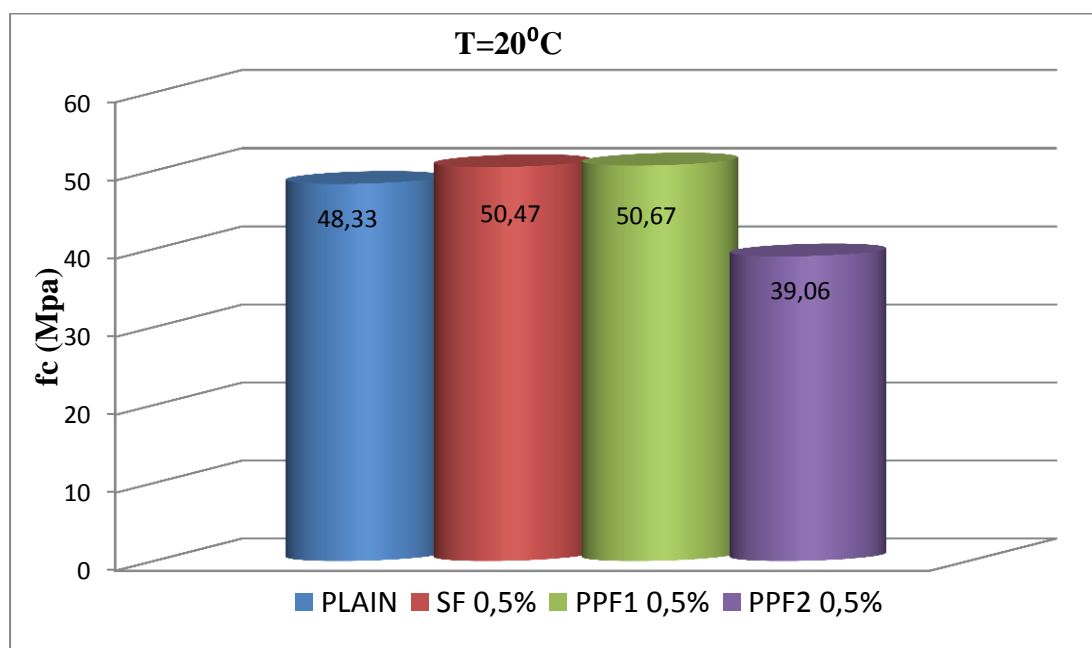
Κεφάλαιο 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1. Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Θλιπτική αντοχή

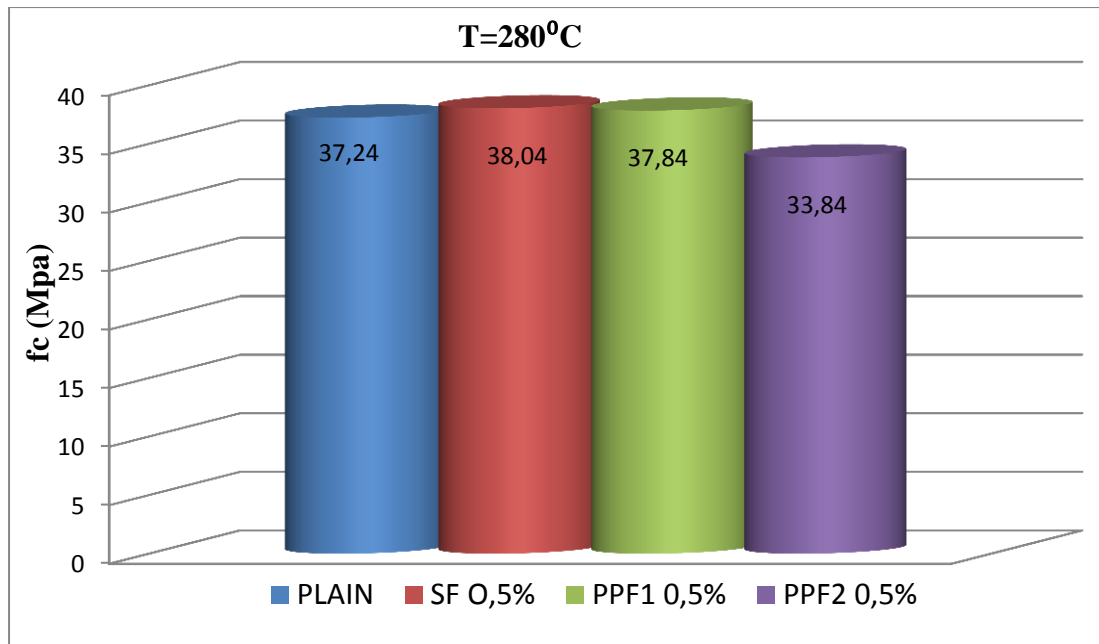
Κατά τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου Poisson κυλινδρικών δοκιμίων με διάμετρο $D=100$ mm και ύψος $H=200$ mm, προσδιορίστηκε επίσης η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων. Η μέτρηση έγινε για δοκίμια ηλικίας 28 ημερών. Τα αποτελέσματα της εν λόγω μέτρησης παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα και μαζί παρατίθενται η μέση τιμή της κάθε σύνθεσης.

Στα διαγράμματα 4, 5 που ακολουθούν, παρατίθενται συγκριτικά ραβδογράμματα για τη θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων στους 20°C και στους 280°C χρησιμοποιώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή για την κάθε σύνθεση τη μέση τιμή.



Διάγραμμα 4. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε θερμοκρασία 20°C

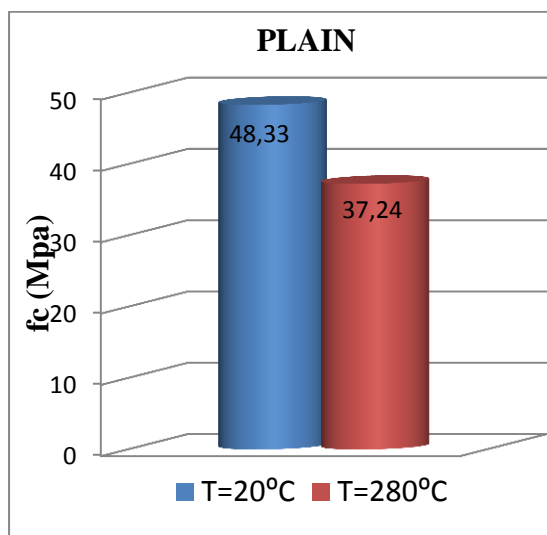
Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι η σύνθεση PPF1 0,5% έχει τη μεγαλύτερη μέση τιμή θλιπτικής αντοχής συγκεκριμένα 5% περισσότερο από την PLAIN. Η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει 4% μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από το άοπλο. Ένω η σύνθεση PPF2 0,5% έχει την μικρότερη τιμή και σε ποσοστό 19% λιγότερο από το άοπλο.



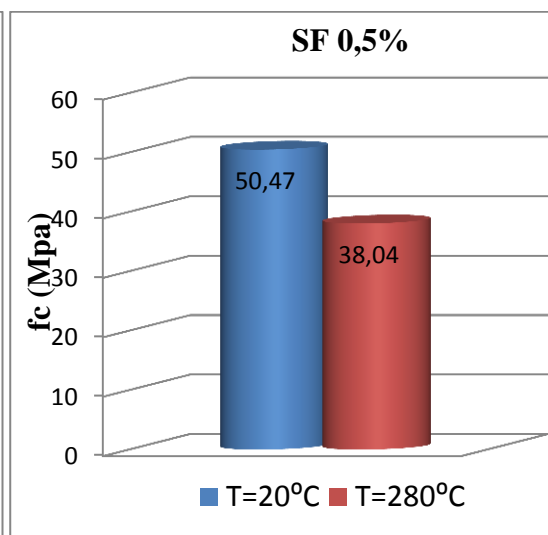
Διάγραμμα 5. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε θερμοκρασία 280°C.

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι οι συνθέσεις SF 0,5% και PPF1 0,5% παρουσιάζουν την μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή και σε ποσοστό 2% μεγαλύτερη από την PLAIN. Η PPF2 0,5% έχει τη μικρότερη θλιπτική αντοχή και 9% μικρότερη από την PLAIN.

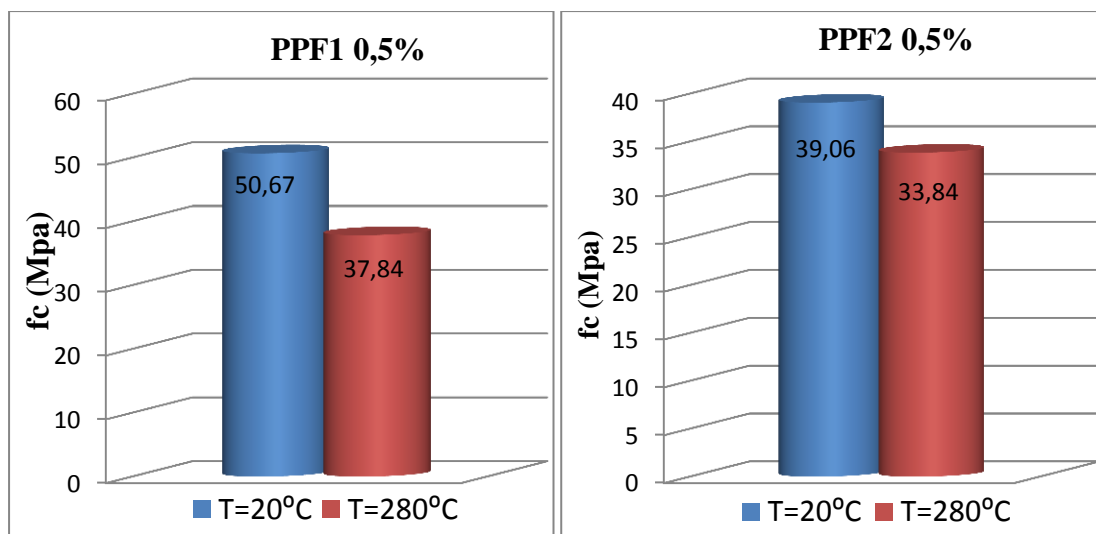
Στα διαγράμματα 6, 7, 8, 9 παρουσιάζονται οι διαφορές των θλιπτικών αντοχών στους 20°C και στους 280°C για κάθε σύνθεση ξεχωριστά.



Διάγραμμα 6. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών άοπλων δοκιμίων σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.



Διάγραμμα 7. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών ινοπλισμένων δοκιμίων με χαλύβδινες ίνες SF 0,5% σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.



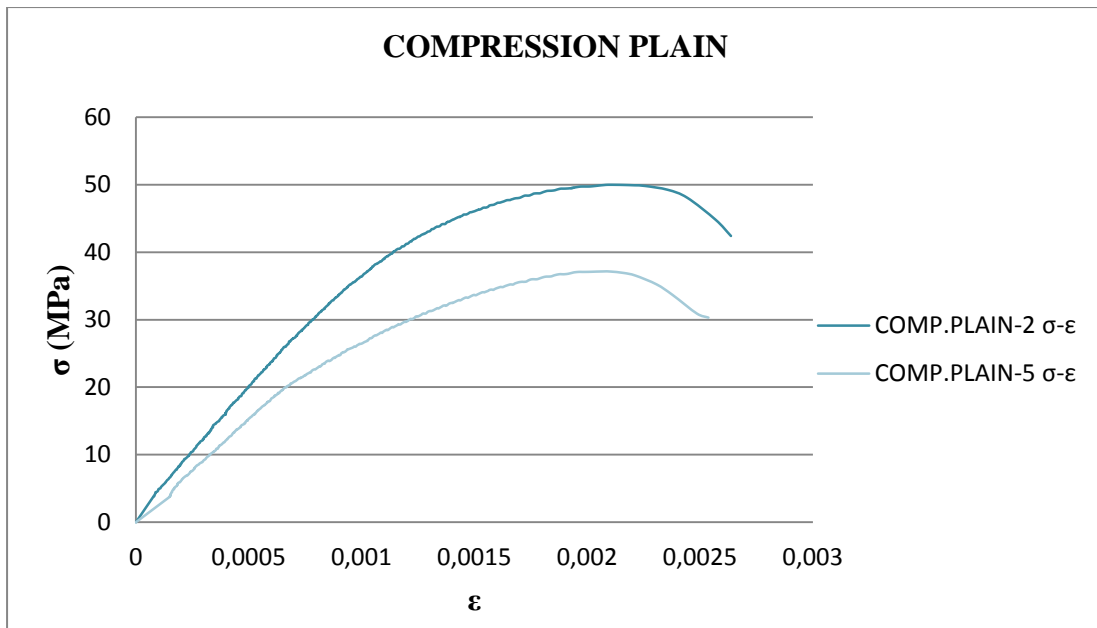
Διάγραμμα 8. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών ινοπλισμένων δοκιμίων με συνθετικές ίνες PPF1 0.5% σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.

Διάγραμμα 9. Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών ινοπλισμένων δοκιμίων με συνθετικές ίνες PPF2 0.5% σε θερμοκρασίες 20°C και 280°C.

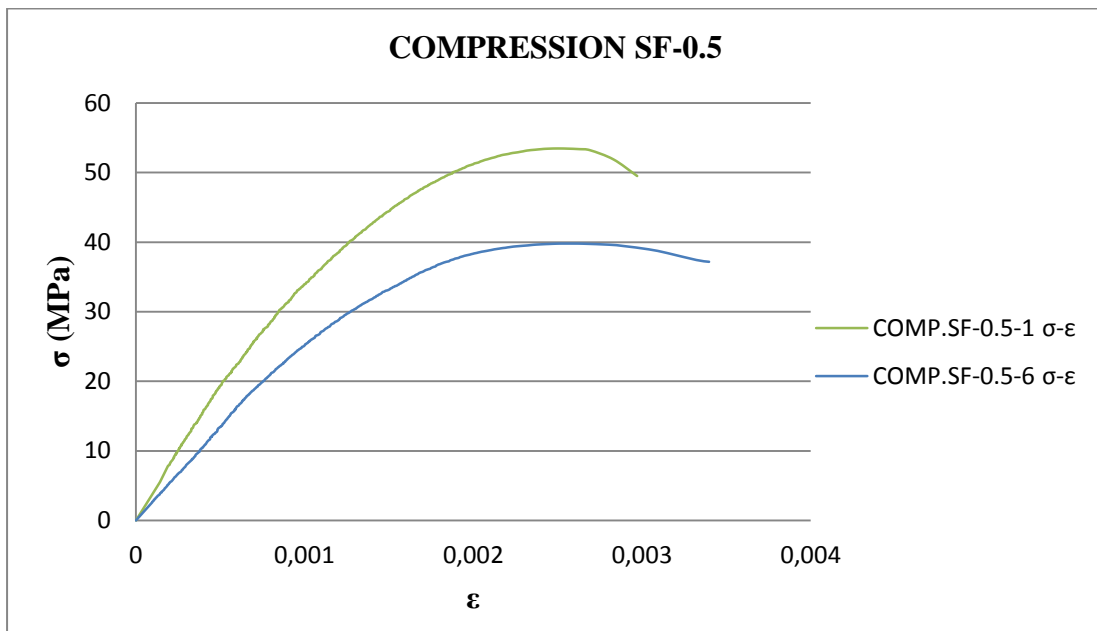
Αυτό που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι σε κάθε σύνθεση η μέση θλιπτική αντοχή στους 20°C είναι μεγαλύτερη από ότι στους 280°C. Συγκεκριμένα η μέση θλιπτική αντοχή στους 280°C μειώνεται στην σύνθεση PLAIN κατά 23%, στην SF 0,5% κατά 25%, στην PPF1 0,5% κατά 25% και στην PPF2 0,5% 13%.

Μέτρο ελαστικότητας

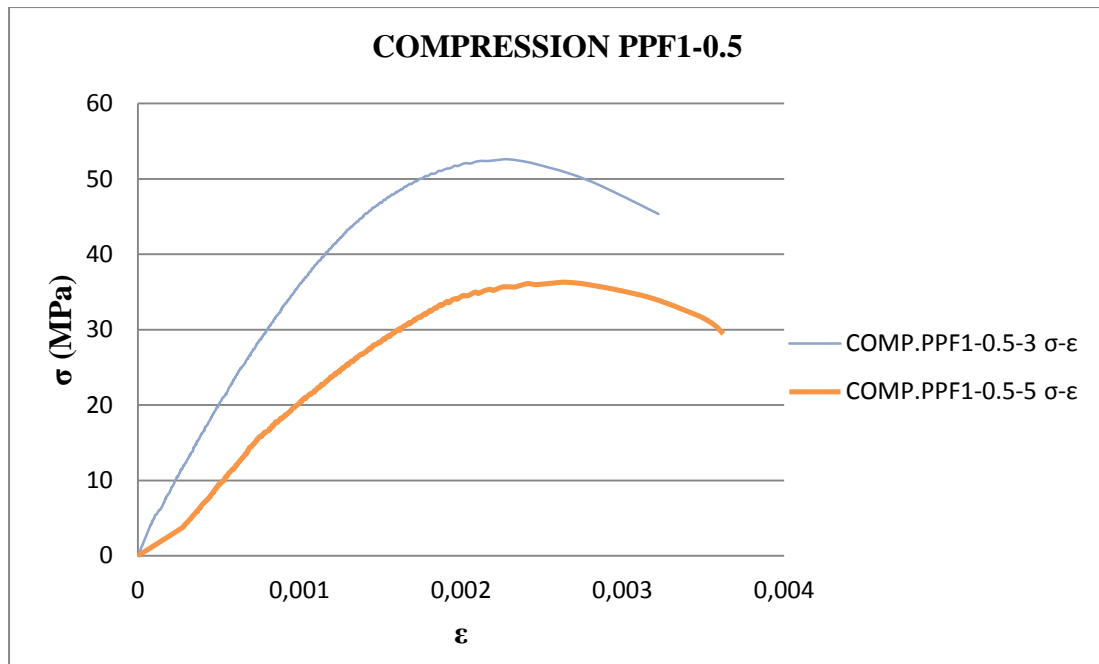
Στα διαγράμματα που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης όπως προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις της δοκιμής σε θλίψη για τα κυλινδρικά δοκίμια. Η τάση παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα και συμβολίζεται με το γράμμα σ , ενώ η αξονική παραμόρφωση παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα και συμβολίζεται με το γράμμα ϵ



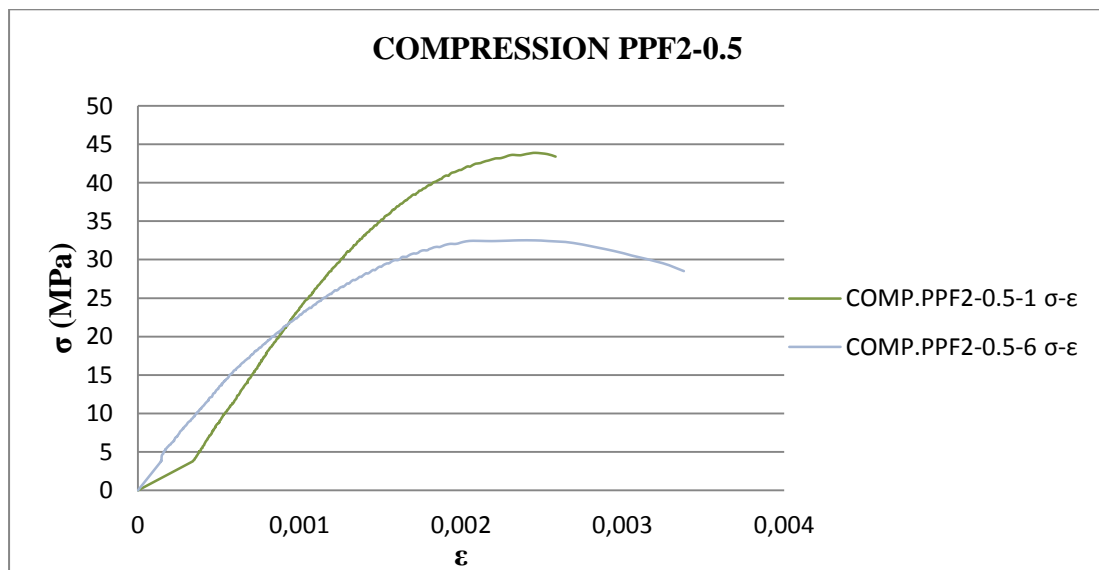
Διάγραμμα 10. Τάση-αξονική παραμόρφωση άοπλου σκυροδέματος.



Διάγραμμα 11. Τάση-αξονική παραμόρφωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (SF 0.5)

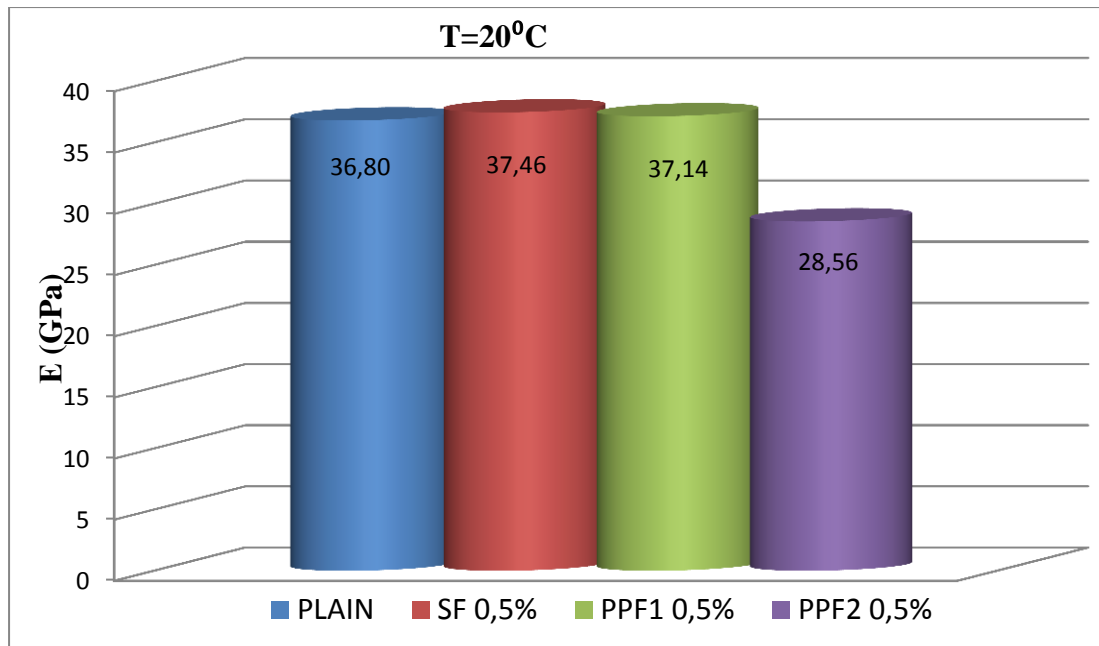


Διάγραμμα 12. Τάση-αξονική παραμόρφωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PPF1 0.5)



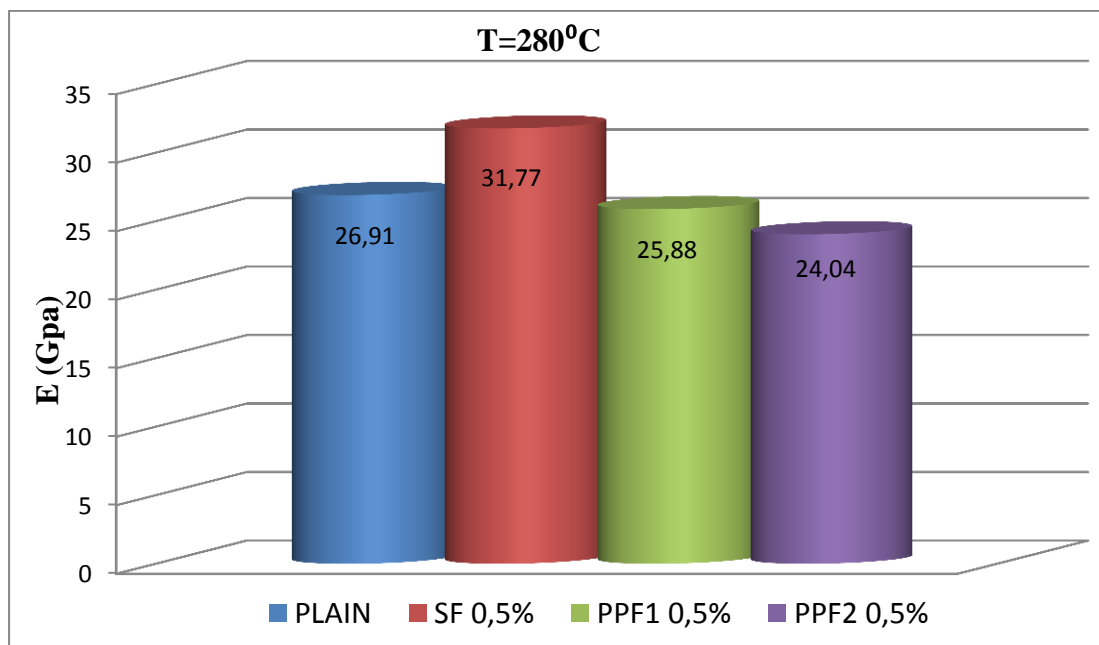
Διάγραμμα 13. Τάση-αξονική παραμόρφωση ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PPF2 0.5)

Στα διαγράμματα 14, 15 παρατίθενται συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με το μέτρο ελαστικότητας των συνθέσεων στους 20°C και στους 280°C. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης.



Διάγραμμα 14. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 20°C

Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε ότι οι συνθέσεις SF 0,5%, PPF1 0,5% και PLAIN δεν παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους σε ότι αφορά το μέτρο ελαστικότητας. Η SF 0,5% παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή κατά 2% από την PLAIN και η PPF1 0,5% κατά 1%. Η PPF2 0,5% παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή η οποία είναι κατά 22% μικρότερη από της PLAIN.

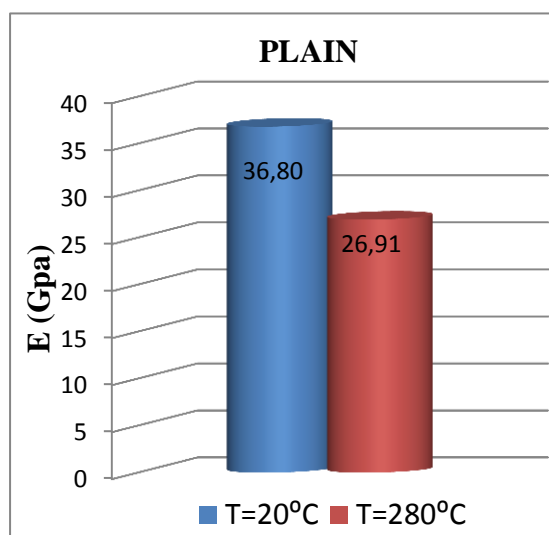


Διάγραμμα 15. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 280°C

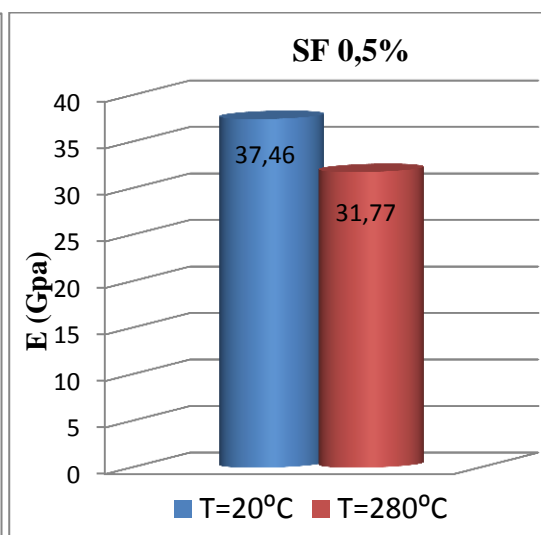
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει σαφώς ότι η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μέτρου ελαστικότητας η οποία είναι κατά 18% μεγαλύτερη από

την PLAIN. Η τιμή της PPF1 0,5% είναι 4% μικρότερη από της PLAIN και η τιμή της PPF2 0,5% που γενικά είναι η μικρότερη από όλες, είναι κατά 11% μικρότερη από της PLAIN.

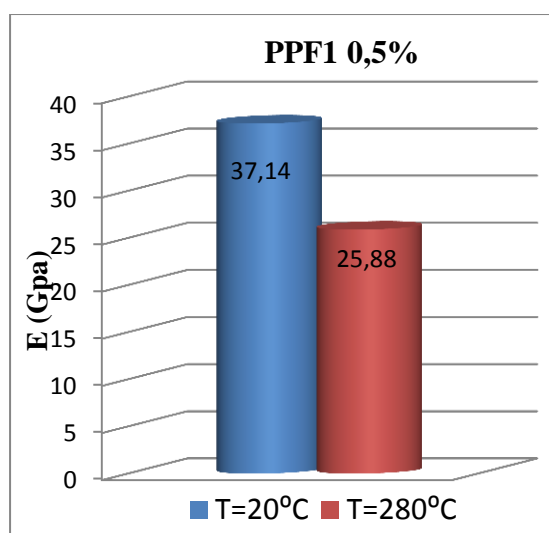
Στα διαγράμματα 16, 17, 18, 19 παρουσιάζονται οι διαφορές των τιμών του μέτρου ελαστικότητας στους 20°C και στους 280°C για κάθε σύνθεση ξεχωριστά.



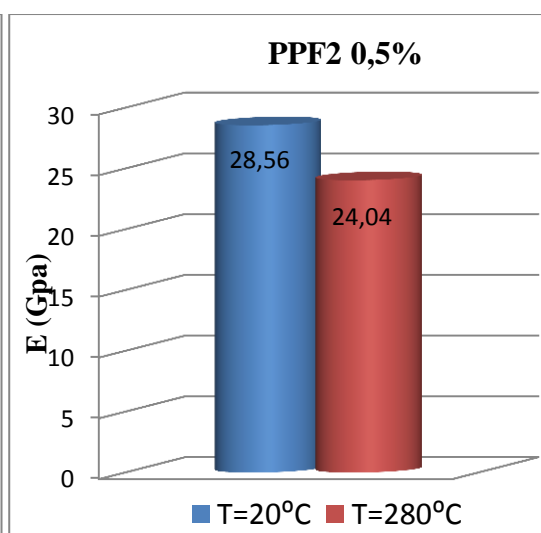
Διάγραμμα 16. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των άοπλων συνθέσεων για θερμοκρασίες 20°C και 280°C



Διάγραμμα 17. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(SF0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C



Διάγραμμα 18. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF1 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C

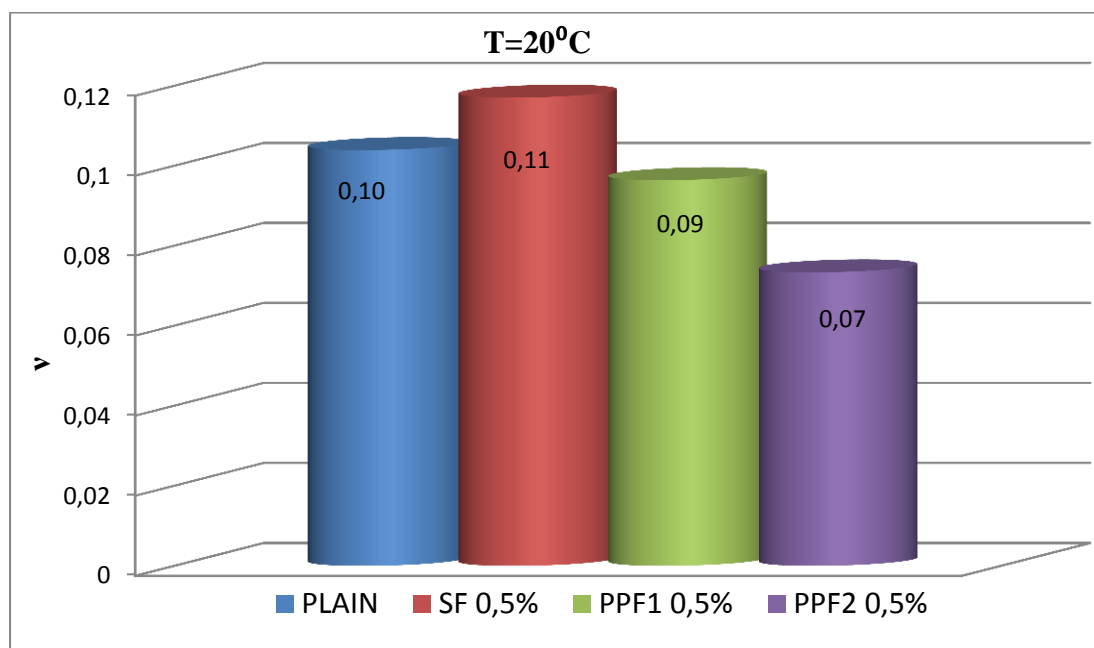


Διάγραμμα 19. Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF2 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C

Αυτό που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι σε κάθε σύνθεση η μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας στους 20°C είναι μεγαλύτερη από ότι στους 280°C. Συγκεκριμένα η μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας στους 280°C μειώνεται στην σύνθεση PLAIN κατά 27%, στην SF 0,5% κατά 15%, στην PPF1 0,5% κατά 30% και στην PPF2 0,5% 16%.

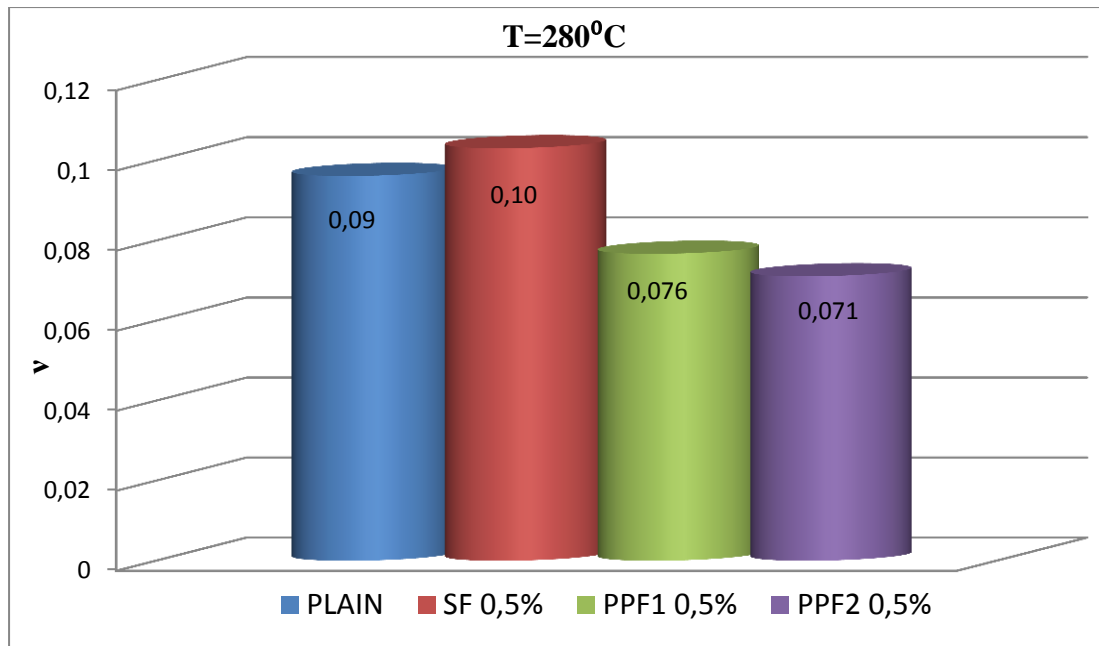
Λόγος Poisson

Στα διαγράμματα 20, 21 παρατίθενται συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με το λόγο Poisson όλων των συνθέσεων στους 20°C και στους 280°C. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης.



Διάγραμμα 20. Μέση τιμή λόγου Poisson όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 20°C.

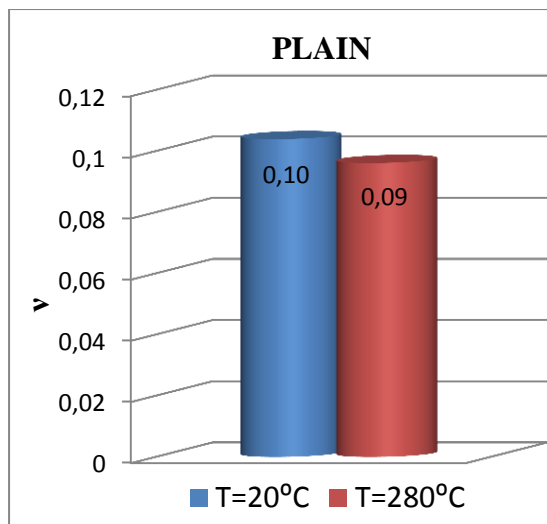
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή του λόγου Poisson της σύνθεσης SF 0,5% είναι η μεγαλύτερη και κατά 13% περισσότερο από της PLAIN. Η τιμή της PPF1 0,5% είναι μικρότερη κατά 7% από την τιμή της PLAIN και η τιμή της PPF2 0,5% που είναι και η μικρότερη από όλες τις συνθέσεις υπολείπεται της τιμής της PLAIN κατά 29%.



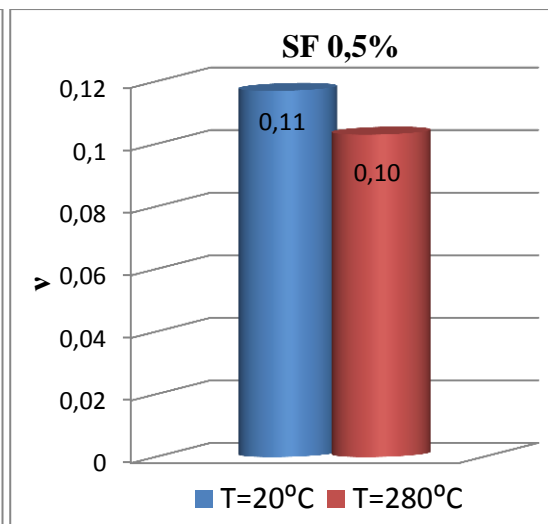
Διάγραμμα 21. Μέση τιμή λόγου Poisson όλων των συνθέσεων για θερμοκρασία 280°C.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή του λόγου Poisson της σύνθεσης SF 0,5% είναι η μεγαλύτερη και κατά 7% περισσότερο από της PLAIN. Η τιμή της PPF1 0,5% είναι μικρότερη κατά 20% από την τιμή της PLAIN και η τιμή της PPF2 0,5% που είναι και η μικρότερη από όλες τις συνθέσεις υπολείπεται της τιμής της PLAIN κατά 26%.

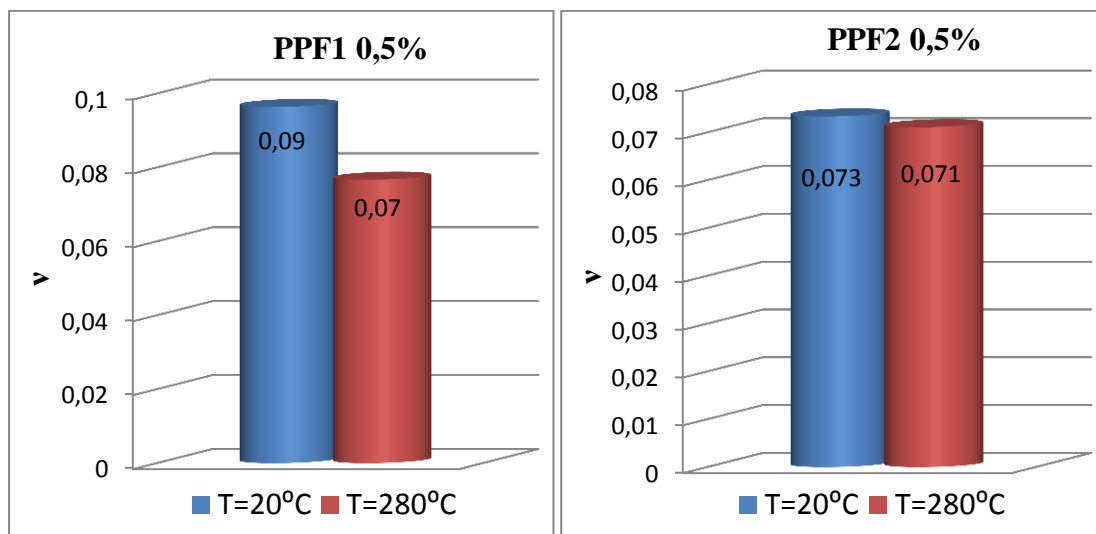
Στα διαγράμματα 22, 23, 24, 25 παρουσιάζονται οι διαφορές των τιμών του λόγου Poisson στους 20°C και στους 280°C για κάθε σύνθεση ξεχωριστά.



Διάγραμμα 22. Μέση τιμή λόγου Poisson των άοπλων συνθέσεων για θερμοκρασίες 20°C και 280°C



Διάγραμμα 23. Μέση τιμή λόγου Poisson των ινοπλισμένων συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο. (SF 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.



Διάγραμμα 24. Μέση τιμή λόγου Poisson των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF1 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.

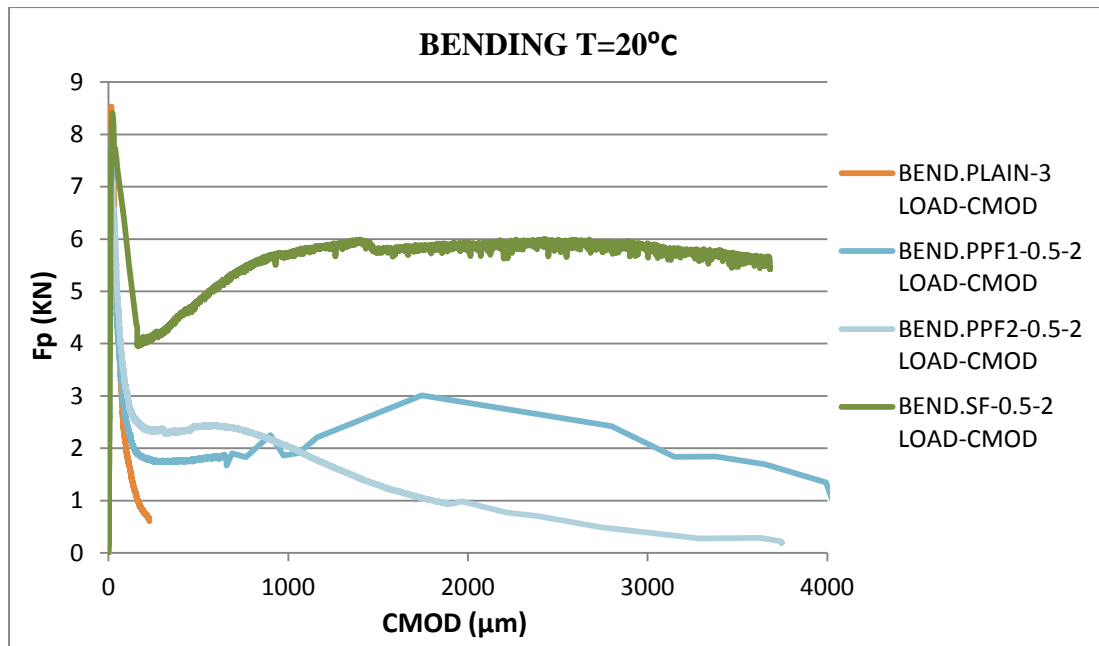
Διάγραμμα 25. Μέση τιμή λόγου Poisson των ινοπλισμένων συνθέσεων με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0,5% κ.ο.(PPF2 0,5%) για θερμοκρασίες 20°C και 280°C.

Αυτό που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι σε κάθε σύνθεση η μέση τιμή του λόγου Poisson στους 20°C είναι μεγαλύτερη από ότι στους 280°C. Συγκεκριμένα η μέση τιμή του λόγου Poisson στους 280°C μειώνεται στην σύνθεση PLAIN κατά 8%, στην SF 0,5% κατά 12%, στην PPF1 0,5% κατά 20% και στην PPF2 0,5% 3%.

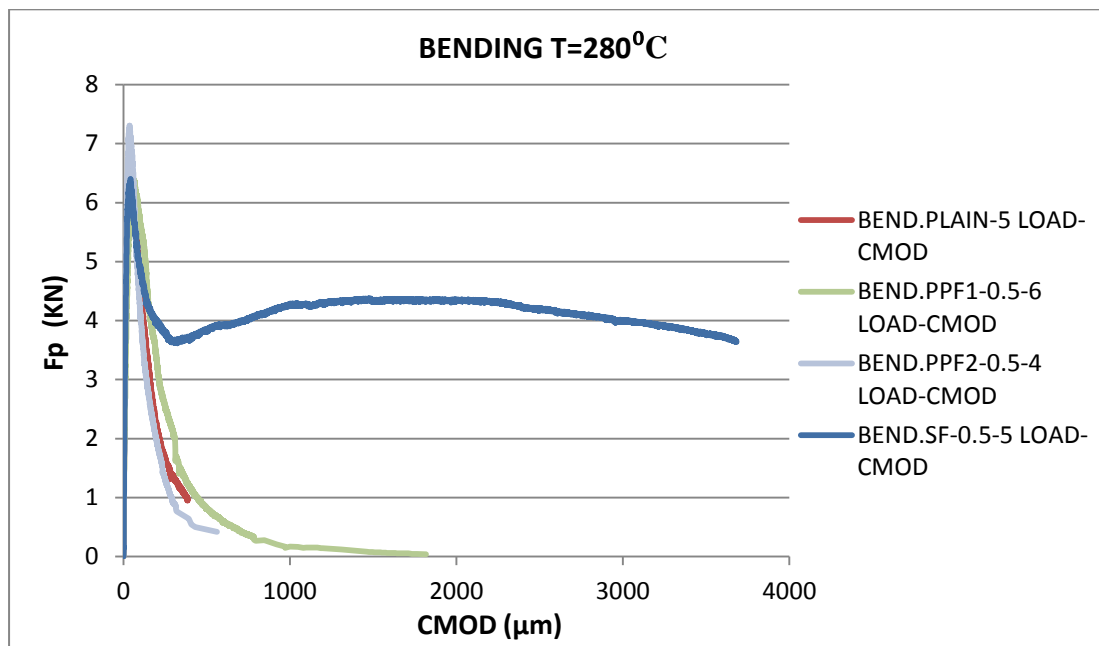
5.2. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Κατά τη δοκιμή κάμψης πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 50cm × 10cm × 10cm μετρήθηκαν τόσο η καμπτική αντοχή όσο και ο λόγος του εμβαδού (I) των δοκιμίων. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης.

Για τον λόγο εμβαδού (I) των δοκιμίων υπολογίσαμε τους λόγους I_{0,5}, I_{1,5}, I_{2,5}, I_{3,5} που αντιστοιχούν στους λόγους εκλυόμενης ενέργειας για μετατόπιση 500μm, 1500μm, 2500μm, 3500μm αντίστοιχα προς την εκλυόμενη ενέργεια που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο ή σε μετατόπιση 50μm αναλόγως ποιά κατάσταση προηγείται.

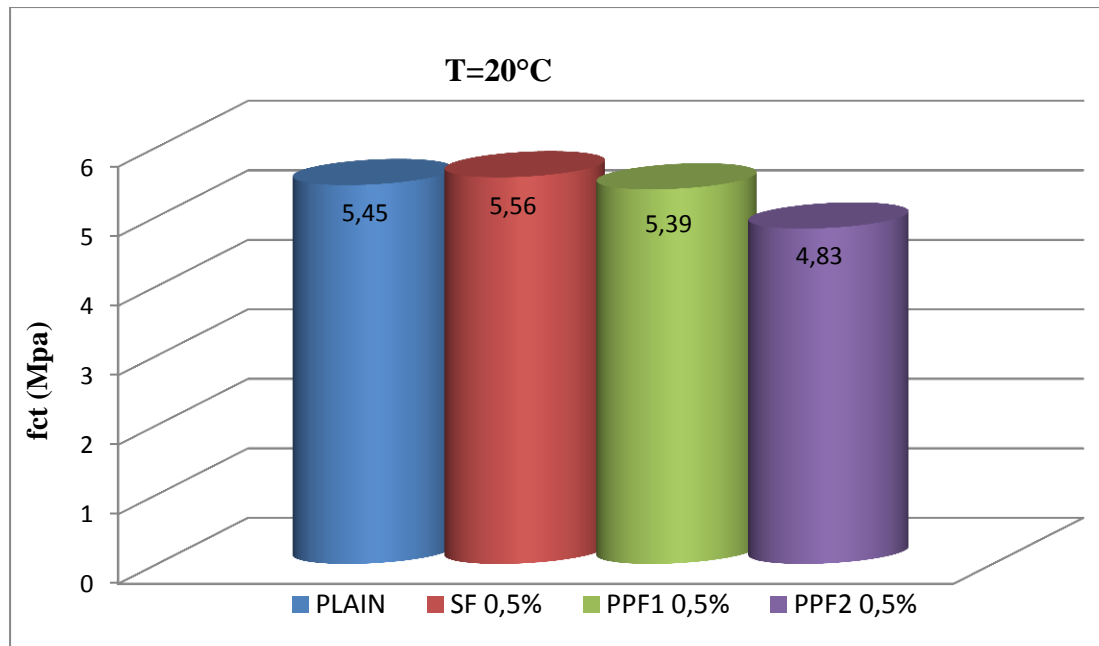


Διάγραμμα 26. Φορτίο-παραμόρφωση στη δοκιμή κάμψης για τη θερμοκρασία των 20°C



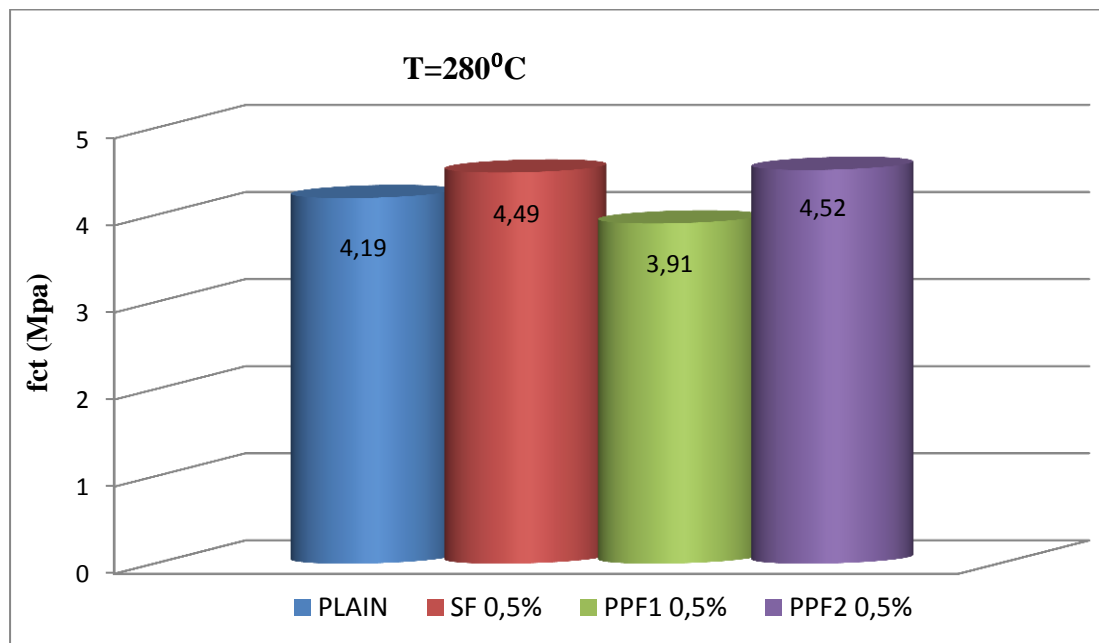
Διάγραμμα 27. Φορτίο-παραμόρφωση στη δοκιμή κάμψης για τη θερμοκρασία των 280°C

Στα δύο παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές της καμπτικής αντοχής όλων των συνθέσεων σε θερμοκρασία 20°C και σε 280°C.



Διάγραμμα 28. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή κάμψης στη θερμοκρασία των 20°C

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή της καμπτικής αντοχής της σύνθεσης SF 0,5% είναι η μεγαλύτερη και κατά 2% περισσότερο από της PLAIN. Η τιμή της PPF1 0,5% είναι μικρότερη κατά 1% από την τιμή της PLAIN. Η τιμή της PPF2 0,5% που είναι και η μικρότερη από όλες τις συνθέσεις υπολείπεται της τιμής της PLAIN κατά 11%.

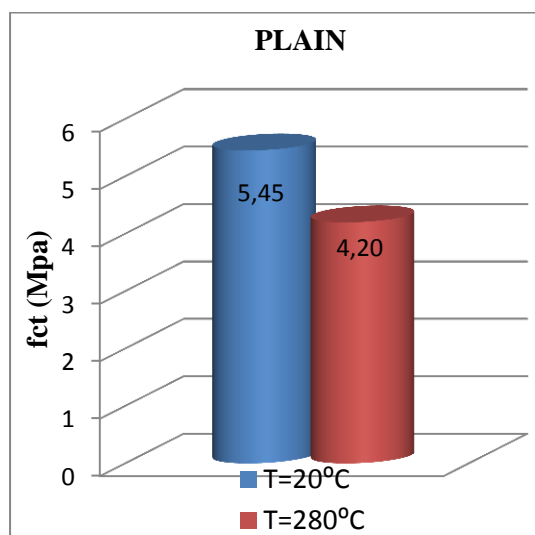


Διάγραμμα 29. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή κάμψης στη θερμοκρασία των 280°C

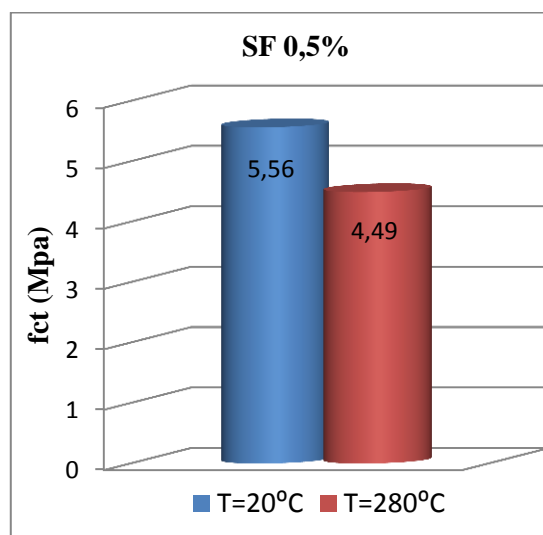
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή της καμπτικής αντοχής της σύνθεσης PPF2 0,5% είναι η μεγαλύτερη και κατά 8% περισσότερο από της PLAIN.

Η τιμή της SF 0,5% είναι μεγαλύτερη κατά 7% από την τιμή της PLAIN. Η τιμή της PPF1 0,5% που είναι και η μικρότερη από όλες τις συνθέσεις υπολείπεται της τιμής της PLAIN κατά 7%.

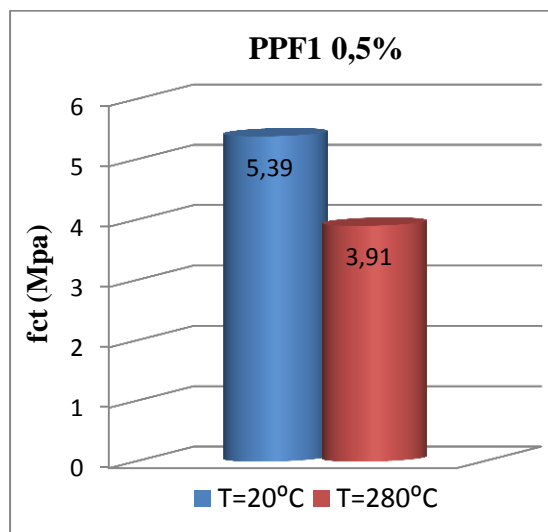
Στα διαγράμματα 30, 31, 32, 33 παρουσιάζονται οι διαφορές των τιμών της καμπτικής αντοχής στους 20°C και στους 280°C για κάθε σύνθεση ξεχωριστά.



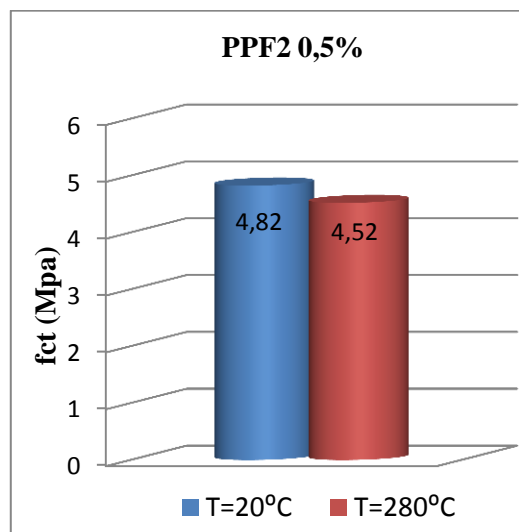
Διάγραμμα 30 .Μέσοι όροι αντοχής του PLAIN για τους 20°C και τους 280°C



Διάγραμμα 31 .Μέσοι όροι αντοχής του SF 0,5% για τους 20°C και τους 280°C



Διάγραμμα 32.Μέσοι όροι αντοχής του PPF1 0,5% για τους 20°C και τους 280°C

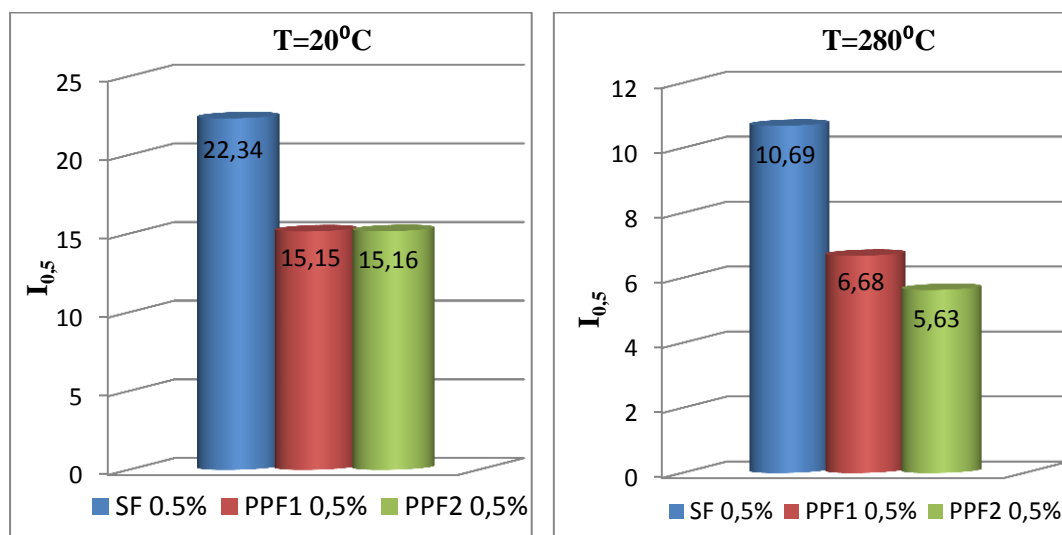


Διάγραμμα 33.Μέσοι όροι αντοχής του PPF2 0,5% για τους 20°C και τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της καμπτικής αντοχής είναι μεγαλύτερη στους 20°C από ότι στους 280°C και για τις τέσσερις συνθέσεις. Η

μέση τιμή της καμπτικής αντοχής μειώνεται στους 280°C κατά 23% στην PLAIN, κατά 19% στην SF 0,5%, κατά 27% στην PPF1 0,5% και κατά 6% στην PPF2 0,5%.

Στα διαγράμματα 34 έως 41, εξετάζουμε τη μεταβολή του λόγου εμβαδού (I) για τις τρεις ινοπλισμένες συνθέσεις (SF 0,5%, PPF1 0,5%, PPF2 0,5%) στους 20°C και στους 280°C.



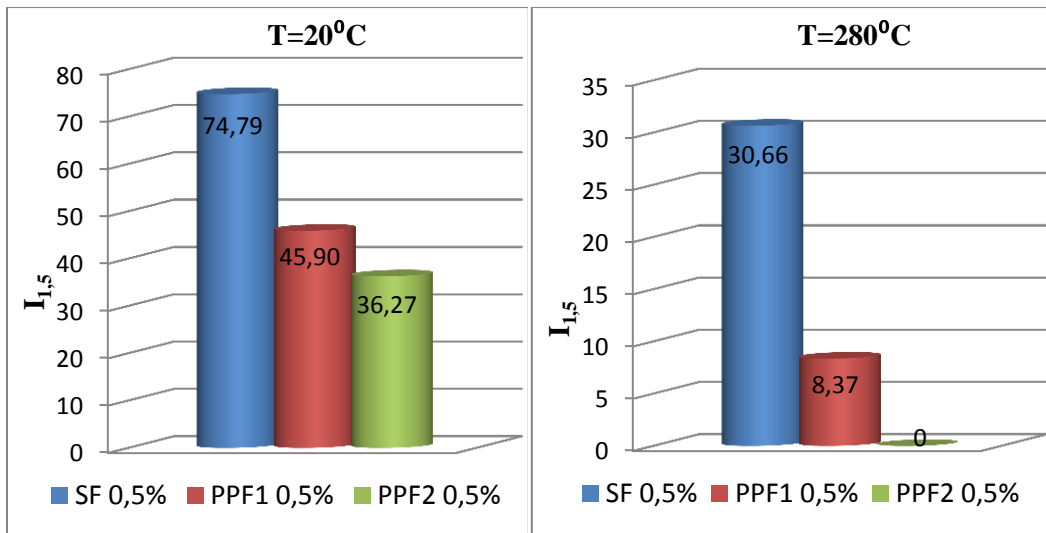
Διάγραμμα 34 .Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα $I_{0,5}$ για τους 20°C

Διάγραμμα 35 .Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα $I_{0,5}$ για τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για $I_{0,5}$ στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με τις PPF1 0,5% και PPF2 0,5% που είναι σχεδόν ίσες.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% έχει τη μεγαλύτερη τιμή ακολουθεί η PPF1 0,5% και μετά η PPF2 0,5%.

Ο λόγος εμβαδου για $I_{0,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C και στις τρεις συνθέσεις. Κατά 52% στην SF 0,5%, 56% στην PPF1 0,5% και 63% στην PPF2 0,5%.



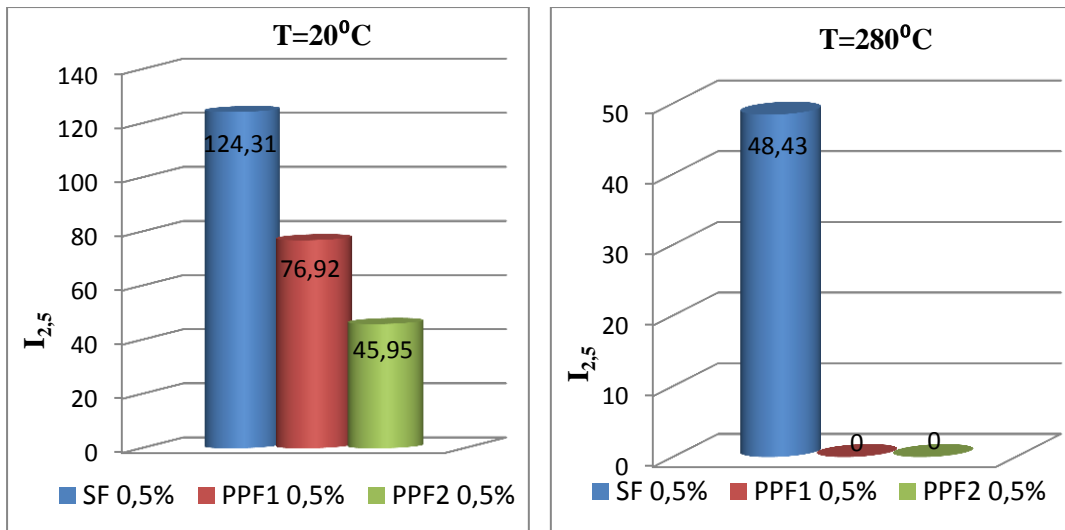
Διάγραμμα 36. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I_{1,5} για τους 20°C

Διάγραμμα 37. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I_{1,5} για τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για I_{1,5} στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή, ακολουθεί η PPF1 0,5% και μετά η PPF2 0,5%.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% έχει τη μεγαλύτερη τιμή ακολουθεί η PPF1 0,5% ενώ η PPF2 0,5% λόγω αστοχίας δοκιμίων δεν λαμβάνει κάποια τιμή.

Ο λόγος εμβαδού για I_{1,5} μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C και στις δύο συνθέσεις. Κατά 59% στην SF 0,5% και 82% στην PPF1 0,5%.



Διάγραμμα 38. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I_{2,5} για τους 20°C

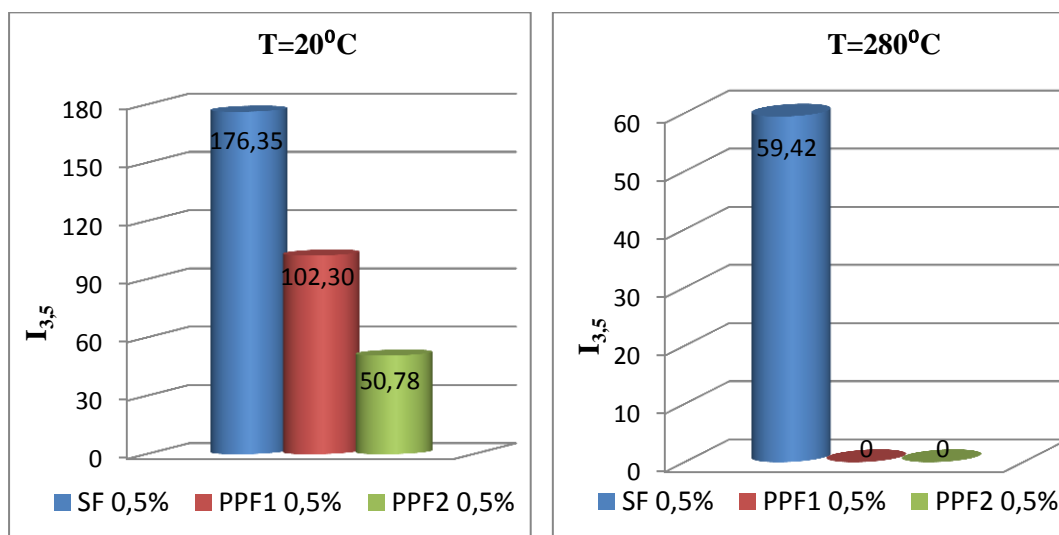
Διάγραμμα 39. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα I_{2,5} για τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για I_{2,5} στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή, ακολουθεί η PPF1 0,5% και μετά η

PPF2 0,5%.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% έχει τη μοναδική τιμή ενώ οι συνθέσεις PPF1 0,5% και PPF2 0,5% δεν λαμβάνουν κάποια τιμή λόγω αστοχίας των δοκιμίων τους..

Ο λόγος εμβαδου για $I_{2,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C κατά 61% στην SF 0,5%.



Διάγραμμα 40. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα $I_{3,5}$ για τους 20°C

Διάγραμμα 41. Μέσοι όροι λόγων εμβαδού στα $I_{3,5}$ για τους 280°C

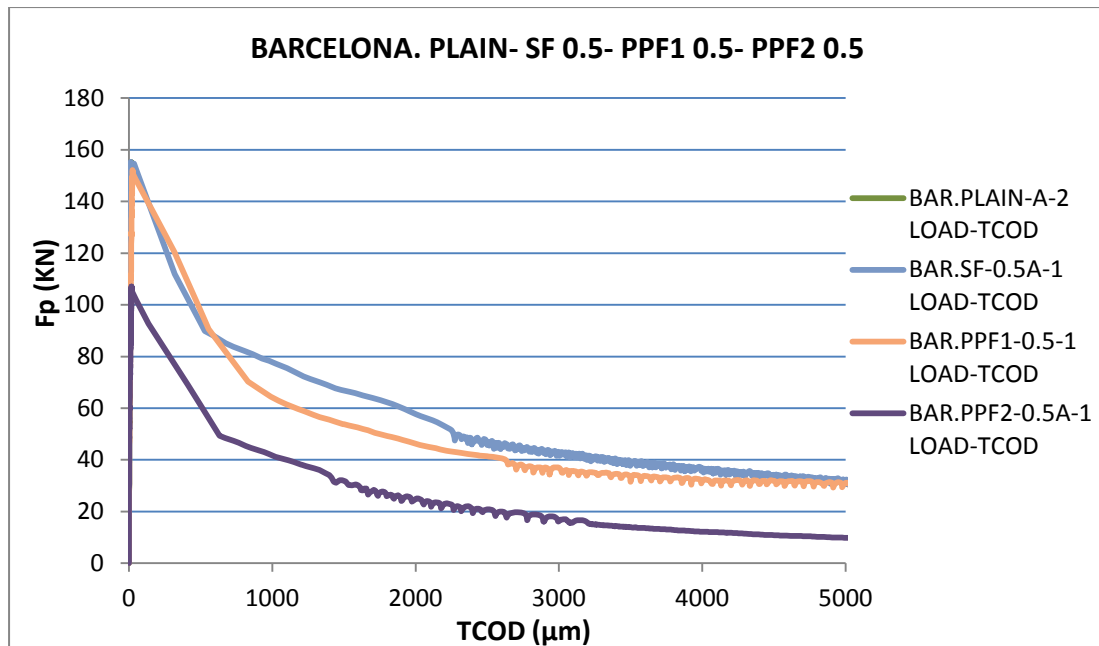
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για $I_{3,5}$ στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή, ακολουθεί η PPF1 0,5% και μετά η PPF2 0,5%.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% έχει τη μοναδική τιμή ενώ οι συνθέσεις PPF1 0,5% και PPF2 0,5% δεν λαμβάνουν κάποια τιμή λόγω αστοχίας των δοκιμίων τους..

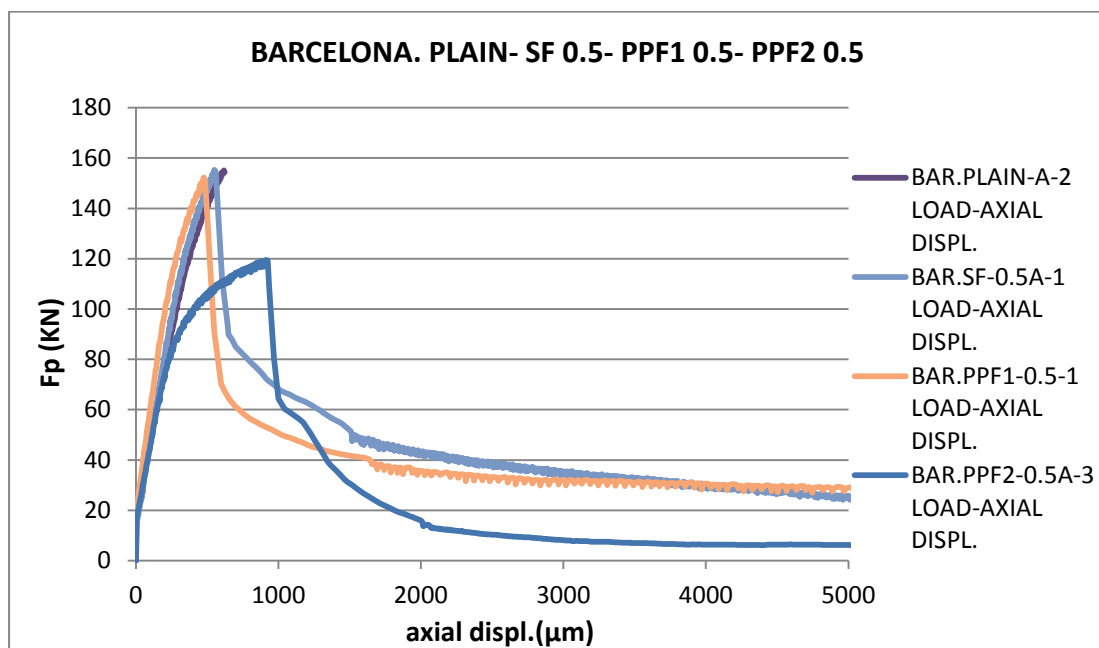
Ο λόγος εμβαδου για $I_{3,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C κατά 66% στην SF 0,5%.

5.3. Αποτελέσματα δοκιμών Barcelona

Κατά τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού (Barcelona) κυλινδρικών δοκιμίων διαστάσεων με διάμετρο $D=150\text{mm}$ και ύψος $H=150\text{mm}$ μετρήθηκαν η εφελκυστική αντοχή και ο λόγος εμβαδού (I) των δοκιμίων. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης.

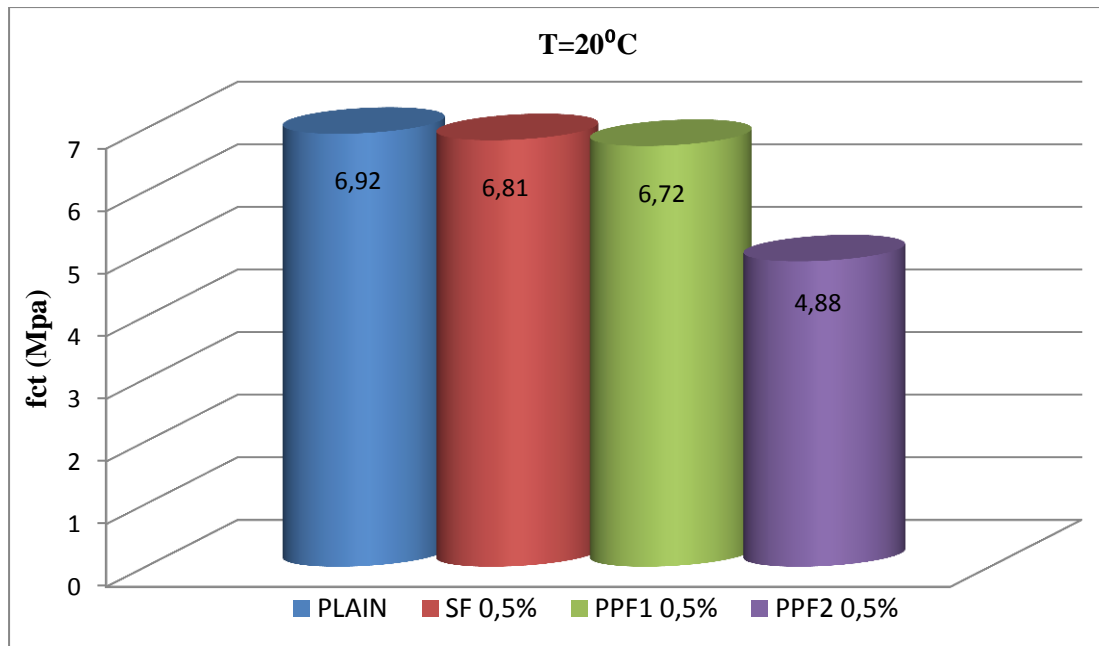


Διάγραμμα 42. Φορτίο-παραμόρφωση στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 20°C



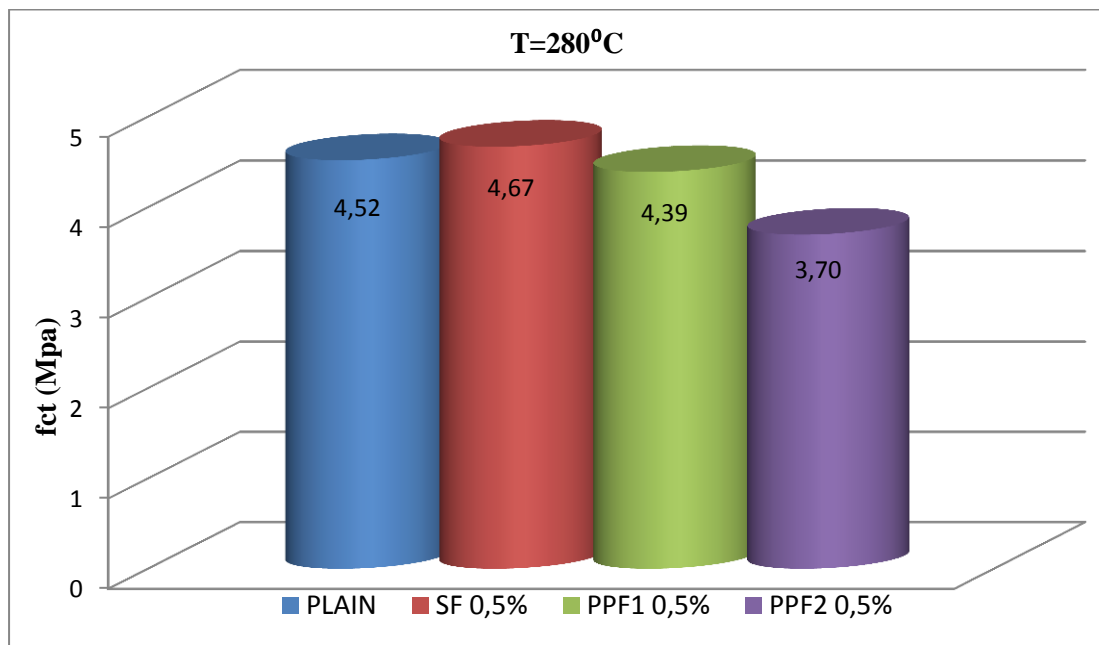
Διάγραμμα 43. Φορτίο-αξονική μετατόπιση στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 20°C

Στα διαγράμματα 44, 45 παρουσιάζονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής όλων των συνθέσεων στη δοκιμή Barcelona για θερμοκρασία 20°C και 280°C.



Διάγραμμα 44. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή Barcelona στη θερμοκρασία των 20°C

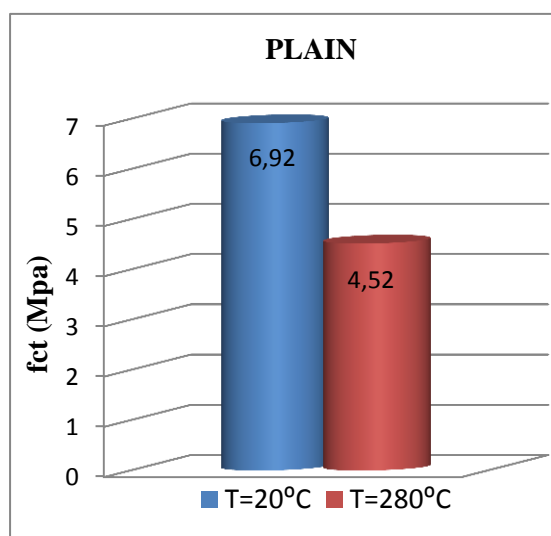
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της σύνθεσης PLAIN παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή. Η SF0,5% υπολείπεται της PLAIN κατά 1%. Η τιμή της PPF1 0,5% είναι μικρότερη κατά 3% από την τιμή της PLAIN. Η τιμή της PPF2 0,5% που είναι και η μικρότερη από όλες τις συνθέσεις υπολείπεται της τιμής της PLAIN κατά 29%.



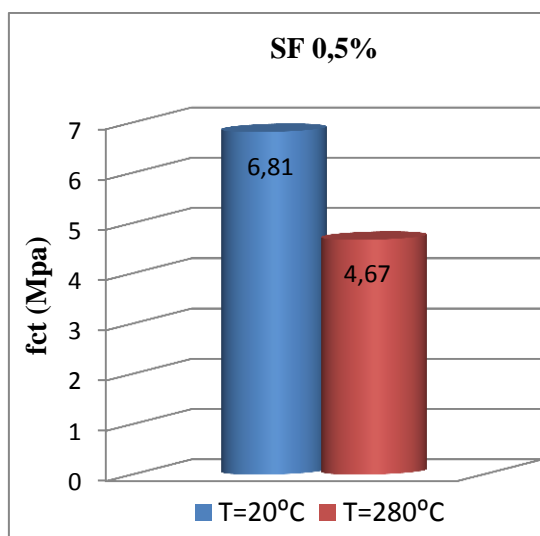
Διάγραμμα 45. Μέσοι όροι αντοχής στη δοκιμή barcelona στη θερμοκρασία των 280°C

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ότι η τιμή της εφελκυστικής αντοχής της σύνθεσης SF 0,5% είναι η μεγαλύτερη και κατά 3% περισσότερο από της PLAIN. Η τιμή της PPF1 0,5% είναι μικρότερη κατά 3% από την τιμή της PLAIN. Η τιμή της PPF2 0,5% που είναι και η μικρότερη από όλες τις συνθέσεις υπολείπεται της τιμής της PLAIN κατά 18%.

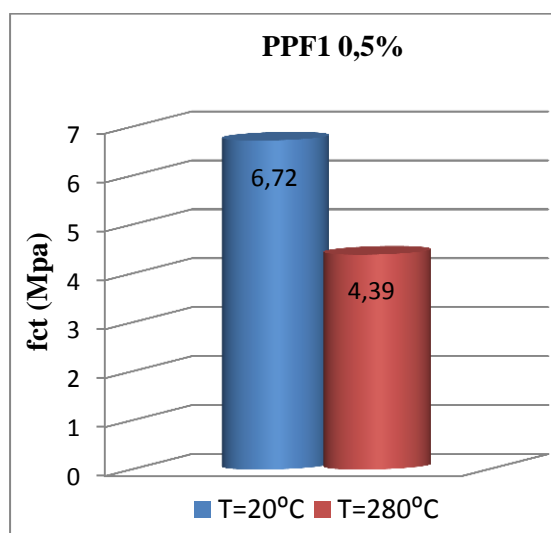
Στα διαγράμματα 46, 47, 48, 49 παρουσιάζονται οι διαφορές των τιμών της εφελκυστικής αντοχής στους 20°C και στους 280°C για κάθε σύνθεση ξεχωριστά.



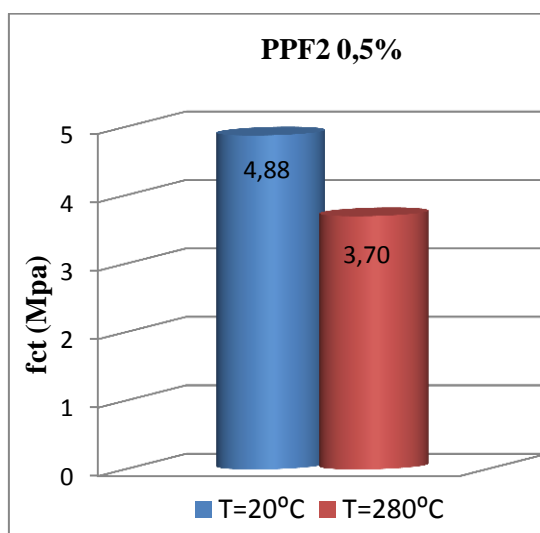
Διάγραμμα 46. Μέσοι όροι αντοχής του PLAIN για τους 20°C και τους 280°C



Διάγραμμα 47. Μέσοι όροι αντοχής του SF 0,5% για τους 20°C και τους 280°C



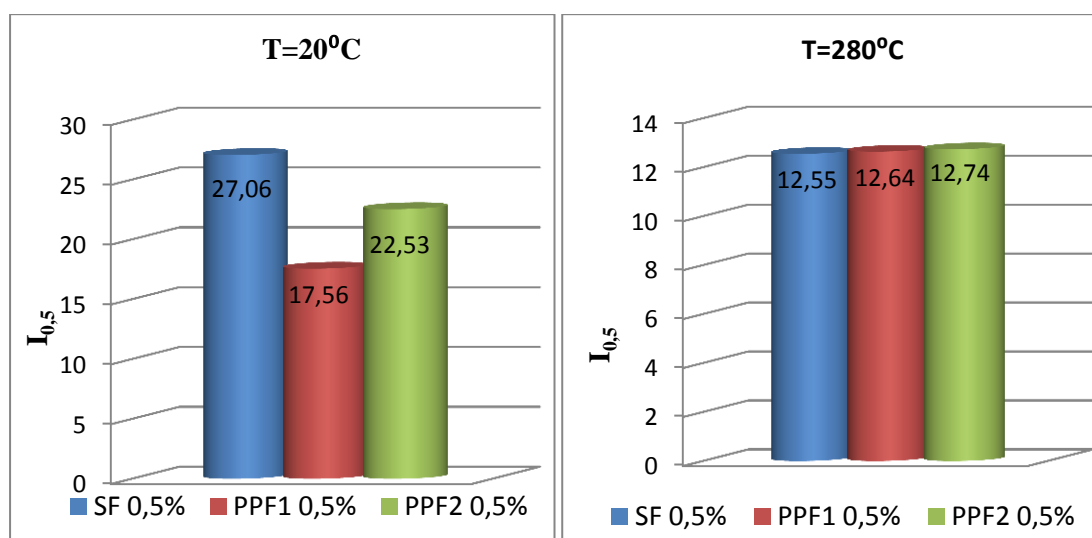
Διάγραμμα 48. Μέσοι όροι αντοχής του PPF1 0,5% για τους 20°C και τους 280°C



Διάγραμμα 49. Μέσοι όροι αντοχής του PPF2 0,5% για τους 20°C και τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής είναι μεγαλύτερη στους 20°C από ότι στους 280°C και για τις τέσσερις συνθέσεις. Η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής μειώνεται στους 280°C κατά 35% στην PLAIN, κατά 31% στην SF 0,5%, κατά 35% στην PPF1 0,5% και κατά 24% στην PPF2 0,5%.

Στα διαγράμματα 50 έως 57, εξετάζουμε τη μεταβολή του λόγου εμβαδού (I) για τις τρεις ινοπλισμένες συνθέσεις (SF 0,5%, PPF1 0,5%, PPF2 0,5%) στους 20°C και στους 280°C.



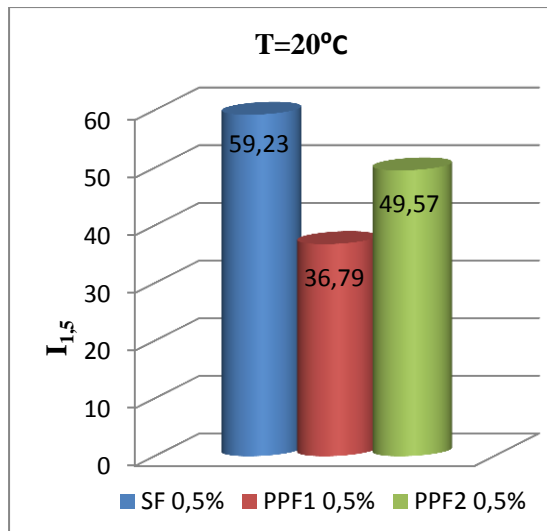
Διάγραμμα 50. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{0,5}$ για τους 20°C

Διάγραμμα 51. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{0,5}$ για τους 280°C

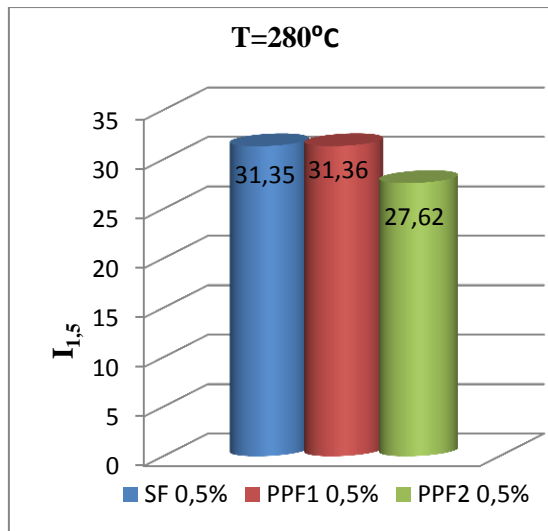
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για $I_{0,5}$ στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή. Η PPF2 0,5% παρουσιάζει μικρότερη τιμή από την SF 0,5% και μεγαλύτερη από την PPF1 0,5% .

Αντίστοιχα για τους 280°C και οι τρεις συνθέσεις παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές χωρίς ιδιαίτερη διαφορά μεταξύ τους.

Ο λόγος εμβαδου για $I_{0,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C και στις τρεις συνθέσεις. Κατά 54% στην SF 0,5%, 28% στην PPF1 0,5% και 43% στην PPF2 0,5%



Διάγραμμα 52. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{1,5}$ για τους 20°C

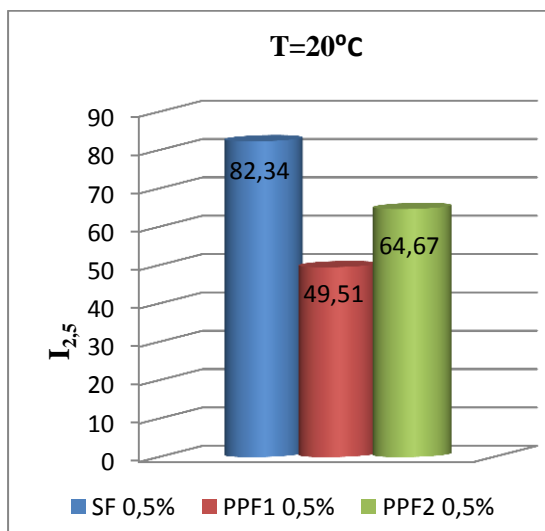


Διάγραμμα 53. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{1,5}$ για τους 280°C

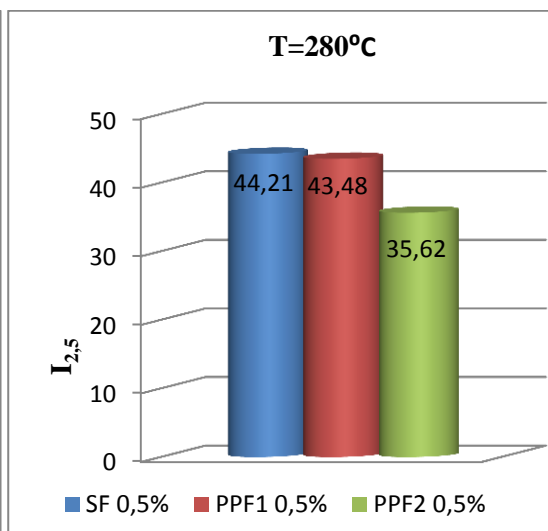
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για $I_{1,5}$ στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή. Η PPF2 0,5% έχει μικρότερη τιμή από την SF 0,5% και μεγαλύτερη από την PPF1 0,5%.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% και η PPF1 0,5 παρουσιάζουν την ίδια τιμή ενώ η PPF2 0,5% έχει λίγο μικρότερη τιμή.

Ο λόγος εμβαδου για $I_{1,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C και στις τρεις συνθέσεις. Κατά 47% στην SF 0,5%, 15% στην PPF1 0,5% και 44% στην PPF2 0,5%.



Διάγραμμα 54. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{2,5}$ για τους 20°C

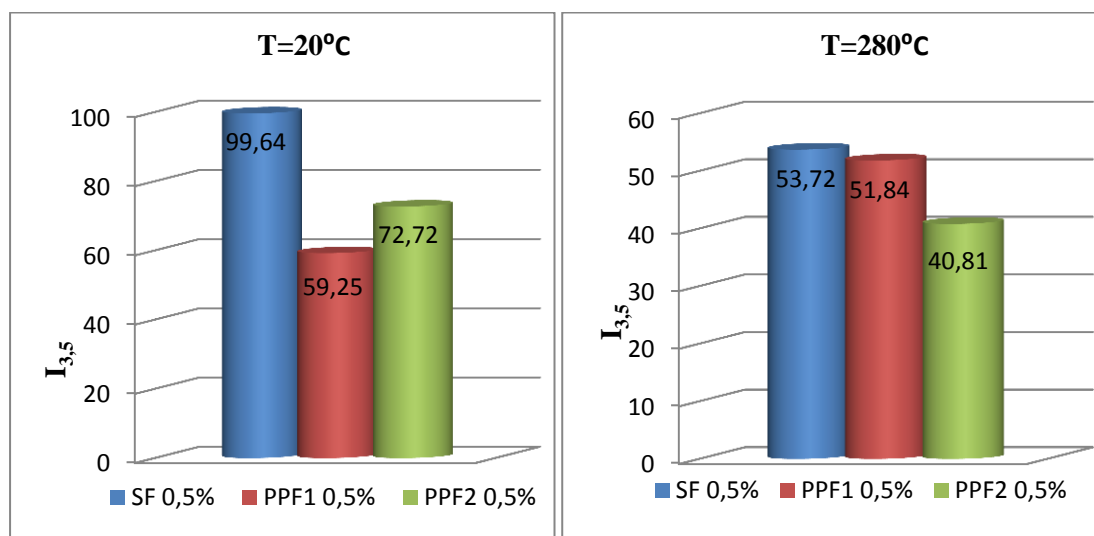


Διάγραμμα 55. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{2,5}$ για τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για $I_{2,5}$ στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή, ακολουθεί η PPF2 0,5% και μετά η PPF1 0,5%.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% έχει τη μεγαλύτερη τιμή ακολουθεί η PPF1 0,5% με λίγο μικρότερη τιμή και μετά η PPF2 0,5% με τη μικρότερη τιμή από όλες.

Ο λόγος εμβαδου για $I_{2,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C και στις τρεις συνθέσεις. Κατά 46% στην SF 0,5%, 12% στην PPF1 0,5% και 45% στην PPF2 0,5% .



Διάγραμμα 56. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{3,5}$ για τους 20°C

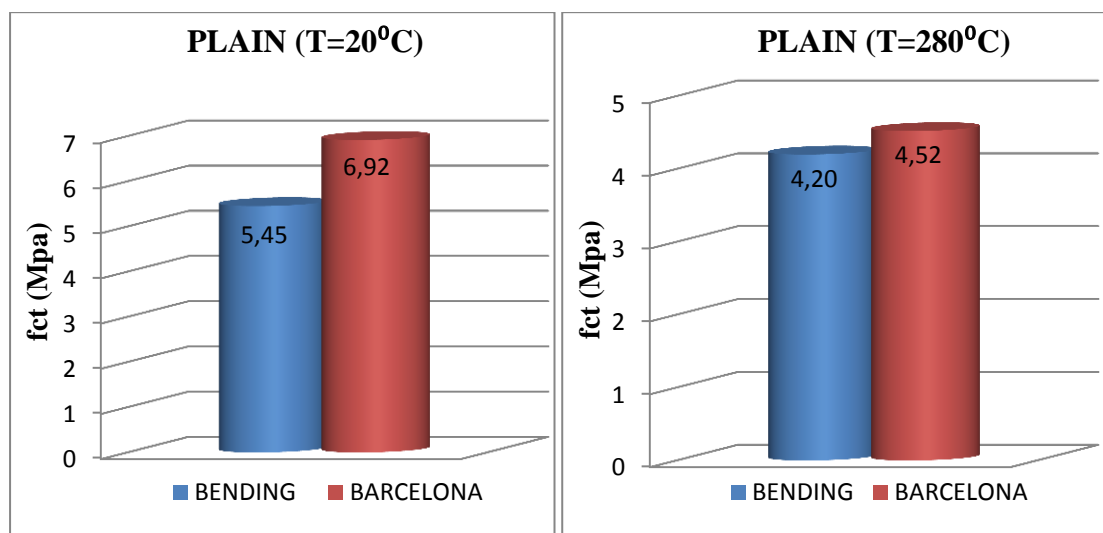
Διάγραμμα 57. Μέσοι όροι λόγου εμβαδού στα $I_{3,5}$ για τους 280°C

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι για $I_{3,5}$ στους 20°C η σύνθεση SF 0,5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή, ακολουθεί η PPF2 0,5% και μετά η PPF1 0,5%.

Αντίστοιχα για τους 280°C η SF 0,5% έχει τη μεγαλύτερη τιμή ακολουθεί η PPF1 0,5% με λίγο μικρότερη τιμή και μετά η PPF2 0,5% με τη μικρότερη τιμή από όλες.

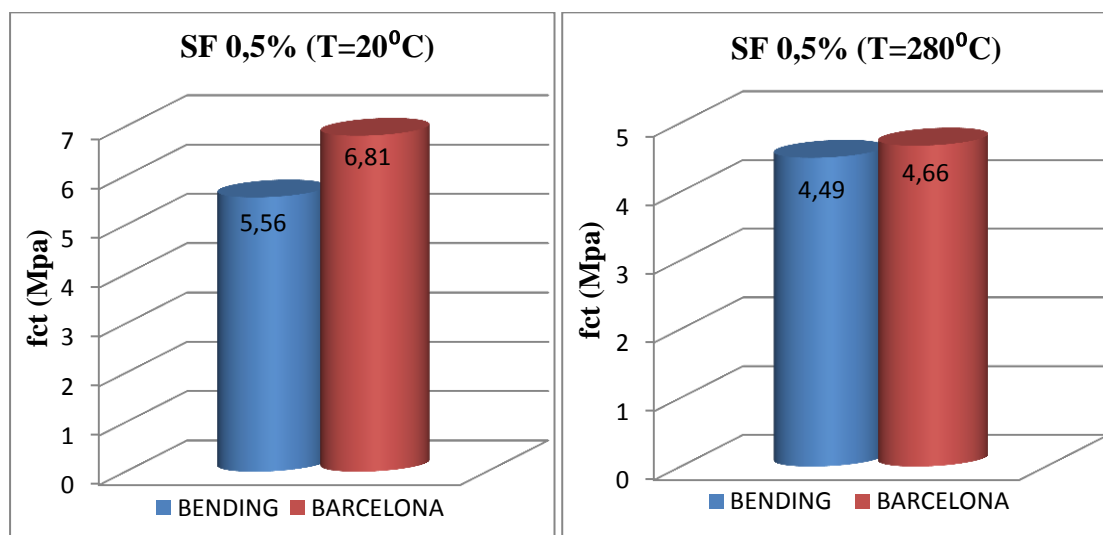
Ο λόγος εμβαδου για $I_{3,5}$ μειώνεται στους 280°C σε σχέση με τους 20°C και στις τρεις συνθέσεις. Κατά 46% στην SF 0,5%, 13% στην PPF1 0,5% και 44% στην PPF2 0,5% .

5.4. Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών κάμψης – Barcelona



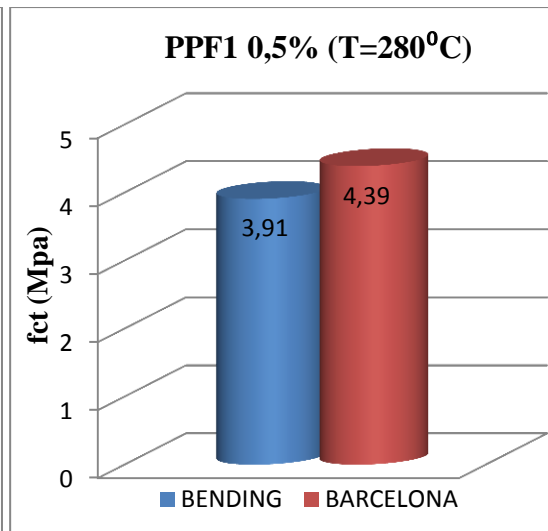
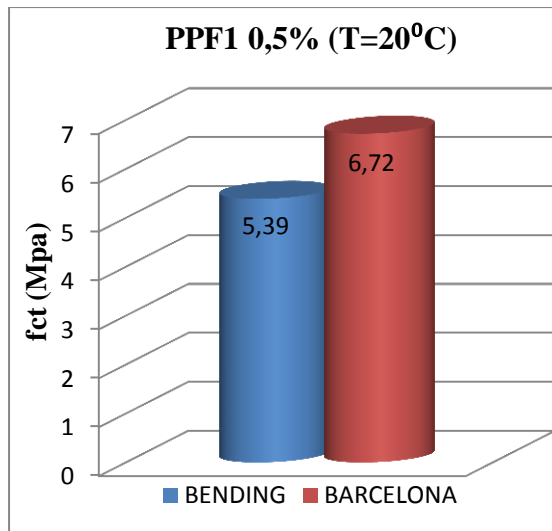
Διάγραμμα 58. Μέσοι όροι αντοχής για τη Διάγραμμα 59. Μέσοι όροι αντοχής για τη σύνθεση PLAIN σε δοκιμή κάμψης και σύνθεση PLAIN σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέση αντοχή στη σύνθεση PLAIN στους 20°C είναι μεγαλύτερη κατά 21% στη δοκιμή Barcelona. Στους 280°C η μέση αντοχή είναι μεγαλύτερη στη δοκιμή Barcelona κατά 7%.



Διάγραμμα 60. Μέσοι όροι αντοχής για τη Διάγραμμα 61. Μέσοι όροι αντοχής για τη σύνθεση SF 0,5% σε δοκιμή κάμψης και σύνθεση SF 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.

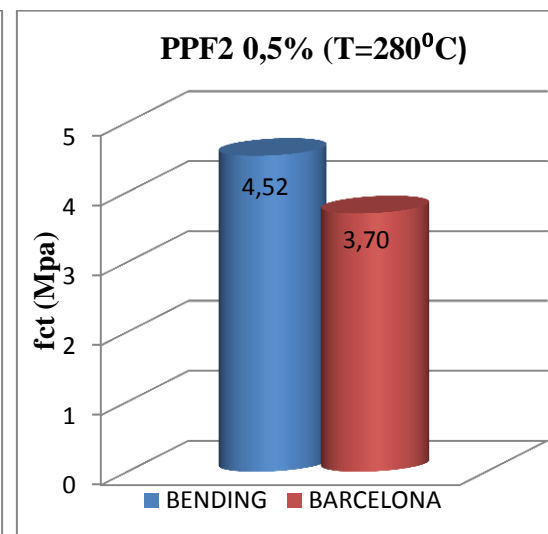
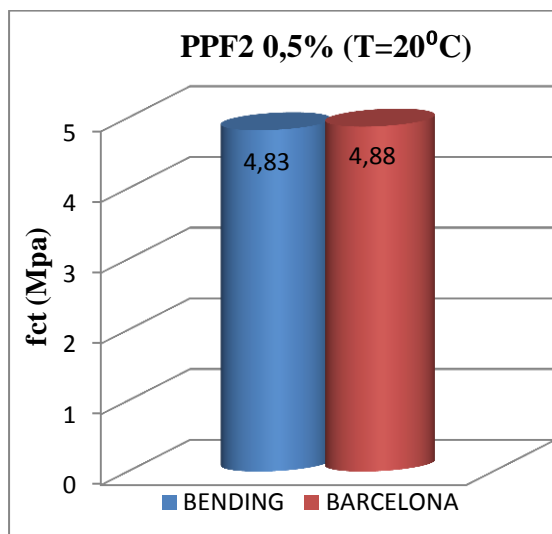
Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέση αντοχή στη σύνθεση SF 0,5% στους 20°C είναι μεγαλύτερη κατά 18% στη δοκιμή Barcelona. Στους 280°C η μέση αντοχή είναι μεγαλύτερη στη δοκιμή Barcelona κατά 4%.



Διάγραμμα 62. Μέσοι όροι αντοχής για τη σύνθεση PPF1 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.

Διάγραμμα 63. Μέσοι όροι αντοχής για τη σύνθεση PPF1 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 280°C.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέση αντοχή στη σύνθεση PPF1 0,5% στους 20°C είναι μεγαλύτερη κατά 20% στη δοκιμή Barcelona. Στους 280°C η μέση αντοχή είναι μεγαλύτερη στη δοκιμή Barcelona κατά 11%.



Διάγραμμα 64. Μέσοι όροι αντοχής για τη σύνθεση PPF2 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 20°C.

Διάγραμμα 65. Μέσοι όροι αντοχής για τη σύνθεση PPF2 0,5% σε δοκιμή κάμψης και Barcelona στους 280°C.

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ότι η μέση αντοχή στη σύνθεση PPF2 0,5% στους 20°C είναι μεγαλύτερη κατά 1% στη δοκιμή Barcelona. Στους 280°C η μέση αντοχή είναι μικρότερη στη δοκιμή Barcelona κατά 18%.

Κεφάλαιο 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Θλίψη: Στις δοκιμές της μονοαξονικής θλίψης που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά στην αντοχή των συνθέσεων PLAIN, SF 0,5% και PPF1 0,5% σε αντίθεση με τη σύνθεση PPF2 0.5% η οποία παρουσιάζει κατά πολύ χαμηλότερη αντοχή από τις παραπάνω συνθέσεις στους 20°C. Ενώ στους 280°C μετά από θερμική καταπόνηση οι συνθέσεις PLAIN, SF 0,5% και PPF1 0,5% έχουν πίο αισθητή πτώση αντοχής σε σχέση με τη σύνθεση PPF2 0.5%.

Αντίστοιχη συμπεριφορά στους 280°C παρουσιάζεται στο μέτρο ελαστικότητας και στο λόγο Poisson όπου οι συνθέσεις PLAIN, SF 0,5% και PPF1 0,5% έχουν πίο αισθητή πτώση σε σχέση με τη σύνθεση PPF2 0.5%.

Κάμψη: Η καμπτική αντοχή στους 20°C για τη σύνθεση PPF2 0.5% μπορεί να είναι μικρότερη σε σχέση με τις άλλες τρεις συνθέσεις αλλά αυτό δεν παρατηρείται στους 280°C όπου η σύνθεση PPF2 0.5% παρουσιάζει τη μεγαλύτερη καμπτική αντοχή ενώ οι άλλες τρεις συνθέσεις έχουν μεγαλύτερη πτώση στην αντοχή τους.

Από τους δείκτες δυσθραυστότητας παρατηρείται καλύτερη συμπεριφορά στα SF 0,5% κατά πολύ σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις μετά το πρώτο μέγιστο φορτίο. Στους 280°C οι συνθέσεις PPF1 0,5% και PPF2 0,5% δεν παρουσίασαν κάποια παραμένουσα αντοχή σε μεγάλες παραμορφώσεις άνω των 1500 μm .

Barcelona: Στην έμμεση εφελκυστική αντοχή η σύνθεση PPF2 0,5% παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη αντοχή και στους 20°C και στους 280°C σε σχέση με τις άλλες τρεις συνθέσεις. Επίσης για τη σύνθεση PPF2 0,5% έχει μικρότερη μείωση στους 280°C σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις.

Για τους δείκτες δυσθραυστότητας παρατηρούμε ότι στους 20°C η παραμένουσα αντοχή για τη σύνθεση SF 0,5% είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις άλλες συνθέσεις ενώ στους 280°C παρατηρείται μια εξισορρόπηση των παραμένουσων αντοχών για όλες τις συνθέσεις.

Σύγκριση κάμψης – Barcelona: Στη δοκιμή Barcelona παρατηρείται για τις συνθέσεις PPF1 0,5% και PPF2 0,5% να εμφανίζουν παραμένουσες αντοχές στους 280°C για μεγάλες μετατοπίσεις κάτι που δεν παρατηρείται στη δοκιμή κάμψης για τις ίδιες συνθέσεις. Αυτό οφείλεται στη γεωμετρία των δοκιμίων για τις δύο αυτές

διαφορετικές δοκιμές, τα πρισματικά δοκίμια της δοκιμής κάμψης έχουν διαστάσεις 500×100×100 mm με αποτέλεσμα οι πλαστικές ίνες να λιώνουν ύστερα από την θερμική καταπόνηση ενώ τα κυλινδρικά δοκίμια της δοκιμής Barcelona έχουν διαστάσεις 150×150 mm με αποτέλεσμα οι πλαστικές ίνες που βρίσκονται στο εσωτερικό των δοκιμίων αυτών να μην επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την θερμική καταπόνηση. Παρατηρείται στη δοκιμή Barcelona στις συνθέσεις PLAIN, SF 0,5% και PPF1 0,5% στους 20°C να παρουσιάζουν 20% παραπάνω αντοχή από ότι στη δοκιμή κάμψης ενώ στους 280°C παρατηρείται 10% αυξημένη αντοχή της δοκιμής κάμψης σε σχέση με τη δοκιμή Barcelona. Σε ότι αφορά τη σύνθεση PPF2 0,5% στους 20°C δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των δύο δοκιμών αλλά στους 280°C η αντοχή που παρουσιάζεται στη κάμψη είναι μεγαλύτερη σε σχέση με της Barcelona.

Για τη σύνθεση PPF2 0,5% σύμφωνα με τη δοκιμή κάθισης παρατηρείται ότι η σύνθεση αυτή έχει υψηλό πορώδες λόγω του είδους των ιών της. Για αυτό το λόγο η σύνθεση αυτή παρουσιάζει κακές συμπεριφορές στις δοκιμές κάμψης και Barcelona στους δείκτες δυσθραυστότητας.

Σε ότι αφορά τον ινοπλισμό του σκυροδέματος οι χαλύβδινες ίνες παρουσιάζουν γενικά την καλύτερη συμπεριφορά στις δοκιμές που υποβλήθηκαν τα δοκίμια σε σχέση με τις άλλες ίνες και το άοπλο σκυρόδεμα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ❖ Σοφιανός, Α.Ι. , *Μέτρα Υποστήριξης Σηράγγων*, Αθήνα 2010
- ❖ Μιχάλης Α.Π.-Δημητρίου Σ., (2007), *Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος, Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Πολιτικών Έργων Υποδομής, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης
- ❖ Σαρρής, Β., (2008). *Πειραματική διερεύνηση δοκών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα εναλλακτικών συνθέσεων υπό μονότονη φόρτιση, Διπλωματική Εργασία*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ
- ❖ Κόρδη, Ρ., (2012). Πειραματική διερεύνηση θλιπτικής και καμπτικής αντοχής ινοπλισμένου σκυροδέματος, *Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία*, Διατμητικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων, 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
- ❖ Ρουσάκης, Γ., (2010). *Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα, 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
- ❖ 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- 1ο 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
- ❖ Carmona Malatesta Sergio, Aguado de Cea Antonio, Molins Borrell Climent, Sergio Carmona, Antonio Aguado, Climent Molins, 2013,. «Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test», *Construction and Building Materials*. 48:pp592-600,. Available at: <<http://www.ScienceDirect.com>, www.elsevier.com/locate/conbuildmat ή ScienceDirect.
- ❖ EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens.
- ❖ BS EN 14651:2005+A1:2007, Test method for metallic fibre concrete — Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP),residual)
- ❖ ΣΙΑΕΝΟΡ Α.Ε., INOMIX χαλύβδινες ίνες, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.
- ❖ SikaFiber PP-540/52, Graded macro-synthetic fibers for Concrete and Shotcrete
- ❖ SikaFibers , Ίνες Πολυπροπυλενίου για Σκυρόδεμα και Κονιάματα