ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΘΕΡΜΙΚΗ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΗ

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΕΥΓΕΝΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την προπτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτήν την πορεία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Μπαδογιάννη Ε., Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την άμεση βοήθεια καθώς και την πολύτιμη καθοδήγησή του, συμβάλλοντας με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση στην εκπόνηση της παρούσας προπτυχιακής εργασίας.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στον κ. Νομικό Π., Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. του Τομέα Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. καθώς και στο ερευνητικό και διοικητικό προσωπικό του εργαστηρίου κ. Παπαντωνόπουλο Γ. για τη βοήθεια και την υλικοτεχνική υποστήριξη που μου παρείχε για τη διεξαγωγή σημαντικού τμήματος του πειραματικού μέρους. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον κ. Χουμανίδη Δ., Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για τη συμβολή στην παρασκευή των συνθέσεων σκυροδέματος και για τη συνολική του υποστήριξη σε όλα τα στάδια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Τέλος ευχαριστίες οφείλω στους προπτυχιακούς φοιτητές της ΣΜΜΜ, Τζανέτη Νικόλαο και Kacapari Andrea, καθώς και στον κ. Χουμανίδη Π., για τη συνδρομή τους στην παρασκευή των δοκιμίων σκυροδέματος.

Οφείλω να ευχαριστήσω τις εταιρίες ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε. και Sika Hellas Α.Β.Ε.Ε. για την παροχή των ινών ώστε να διεξαγχθεί με επιτυχία η προπτυχιακή μου εργασία.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Βουγιούκα Ε., Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας προπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη στήριξη τους, με κάθε δυνατό τρόπο, στη μέχρι τώρα πορεία μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές του ιδιότητες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος τόσο με μεταλλικές, όσο και με συνθετικές ίνες, σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος αλλά και σε υψηλές θερμοκρασίες (280°C).

Παρήχθησαν δοκίμια ίδιας βασικής σύνθεσης, που διαφοροποιούταν εξαιτίας της προσθήκης διαφορετικών ίνων σε ποσοστά, 0.5% και 1.0% κ.ο.. Χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικές ίνες τύπου INOMIX (SF) με αγκύρια στις άκρες και δύο εδών συνθετικές της SikaFiber®: α) μακροΐνες PP-540/52 (PPF1), β) μικροΐνες (PPF2). Όλες οι συνθέσεις συγκρίθηκαν με σύνθεση αναφοράς χωρίς ίνες και σε όλες προστέθηκε πυριτική παιπάλη.

Πέραν των κλασσικών δοκιμών χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, προσδιορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος poisson του ινοπλισμένου σκυροδέματος και η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος μέσω της Δοκιμής Barcelona και της Κάμψης Δοκού σε τρία σημεία με εγκοπή. Τέλος μέσω των δοκιμών εφελκυσμού, μελετήθηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων μετά τη ρηγμάτωση και εκτιμήθηκε η δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος κάθε σύνθεσης.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη **θλιπτική αντοχή** μεταφράζεται σε μείωση της τάξης του 30%. Στη σύνθεση PPF2-0.5 καταγράφεται η μικρότερη επίδραση η οποία ακολουθείται και από το **μέτρο ελαστικότητας**. Η μεγάλη σχετικά διακύμανση των τιμών του **λόγου Poisson**, δεν επιτρέπει την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας.

Μικρή μεταβολή του **δείκτη δυσθραυστότητας** στη **δοκιμή Barcelona** καταγράφεται για τις συνθέσεις με μεταλλικές ίνες. Ενδεικτικά η μεταβολή του δεικτη δυσθραυστήτας $I_{1.5}$ μετά τη θερμική καταπόνηση κυμαίνεται μεταξύ 20-60% για τις συνθέσεις με συνθετικές ίνες και για τις υβριδικές συνθέσεις. Στις υβριδικές συνθέσεις η μεταβολή του $I_{1.5}$ είναι σημαντική.

Η μικρότερη μεταβολή του **Δείκτη Δυσθραυστότητας** στη **δοκιμή κάμψης τριών σημείων με εγκοπή** καταγράφεται για τις συνθέσεις με μεταλλικές ίνες. Αντίθετα η μεταβολή του δεικτη δυσθραυστήτας $I_{1.5}$ μετά τη θερμική καταπόνηση κυμαίνεται μεταξύ 70-90% για τις συνθέσεις με συνθετικές ίνες και για τις υβριδικές συνθέσεις.

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, δοκιμή Barcelona, δοκιμή κάμψης, δυσθραυστότητα.

ABSTRACT

The behavior of the concrete is characterized by its mechanical properties. In this diploma thesis we study the mechanical behavior of the fiber-reinforced concrete, both with metalic and synthetic fibers, at ambient and high temperatures (280°C).

The test pieces were produced, by the same composition, and they defer due to the addition of different fibers volume concentration of 0.5% and 1.0%. The used metalic fibers of INOMIX type (SF) had anchors at the edges, while the synthetic SikaFiber® fibers were being of two types: a) macrofibres PP-540/52 (PPF1), b) microfibers (PPF2). All formulations were compared with the same reference composition without fibers and in all compositions silica fume was added.

In addition to the classic characterization testing of fresh and hardened concrete properties, they were also determined the elastic modulus, the poisson ratio of fiber-reinforced concrete and the tensile strength of concrete through the Barcelona Test and through three points bending test, with notch. Finally through the tensile test, it was studied the post cracking behavior of the test specimens and it has been evaluated the fracture toughness of fiber reinforced concrete for each composition.

Based on the results, the effect of temperature on **compressive strength** implies a reduction of 30%. In the composition PPF2-0.5 it was observed the lower impact which it was also replied by the **elastic modulus**. The relatively large variation of **Poisson's ratio** values, does not allow reaching safe conclusions about the effect of temperature.

Based on the results, little change in **toughness index** in **Barcelona test** it was recorded for the compositions with metalic fibers. Indicatively, the change toughness index I1.5 after heat stress, ranges between 20-60% for the compositions with single synthetic fibers and for the hybrid compositions. In hybrid compositions the change of I1.5, was significant.

Based on the results **of three point bending test with notch**, the smallest change in **toughness index** was recorded for the compositions with metalic fibers. On contrast, the change of toughness index I1.5 after the heat stress ranges between 70-90% for the single synthetic fibers' compositions and for the hybrid compositions.

Keywords: fiber reinforced concrete, Barcelona test, flexural test, toughness.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 1

1.1 Συμβατικό σκυρόδεμα 1

1.1.1 Γενικά 1

1.1.2 Κατηγορίες σκυροδέματος 1

1.1.3 Συστατικά σκυροδέματος 3

1.2 Μηχανικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά του σκυροδέματος 12

1.2.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος 12

1.2.2 Ιδιότητες Σκληρυμένου Σκυροδέματος 14

1.2.3 Μέτρο ελαστικότητας 16

1.2.4 Λόγος Παραμορφώσεων - Λόγος Poisson 20

1.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα 23

1.3.1 Γενικά 23

1.4 Πειραματική αξιολόγηση μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος 31

1.4.1 Δοκιμή Barcelona 31

1.4.2 Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής 39

1.5 Θερμική καταπόνηση ινοπλισμένου σκυροδέματος 45

1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση 49

1.6.1 Μέτρο Ελαστικότητας και Λόγος Poisson 49

1.6.2 Δοκιμή Barcelona 52

1.6.3 Δοκιμή Κάμψης – Προσδιορισμός Δυσθραυστότητας 56

1.6.4 Θερμική Καταπόνηση Ινοπλισμένου Σκυροδέματος 61

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 65

2.1 Τοποθέτηση αντικειμένου 65

2.2 Υλικά, πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις 65

2.2.1 Υλικά 65
2.2.2 Παρασκευή Σκυροδέματος 67
2.2.3 Θερμική καταπόνηση σκυροδέματος. 69

2.3 Προσδιορισμός ιδιοτήτων ινοπλισμένου σκυροδέματος 70
2.3.1 Προσδιορισμός της εργασιμότητας του σκυροδέματος 70
2.3.2 Προσδιορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος 71

2.4 Μελέτη των χαρακτηριστικών και της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος. 71
2.4.1 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας και λόγου poisson 71
2.4.2 Δοκιμή Barcelona 75
2.4.3 Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας 77

3 ΑΝΆΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΌΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΆΤΩΝ 81

3.1 Αποτελέσματα νωπού σκυροδέματος 81

3.2 Αποτελέσματα Σκληρυμένου Σκυροδέματος σε δοκίμια που ελέγχονται σε θερμοκρασίες δωματίου 82
3.2.1 Θλιπτική Αντοχή 82
3.2.2 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος poisson. 86
3.2.3 Δοκιμή Barcelona 92
3.2.4 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή. 101

3.3 Αποτελέσματα Σκληρυμένου Σκυροδέματος σε δοκίμια που εκτίθονται σε υψηλές θερμοκρασίες. 110
3.3.1 Θλιπτική Αντοχή 110
3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος poisson 113
3.3.3 Δοκιμή Barcelona 119
3.3.4 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή. 128

3.4 Σύγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες στις μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος. 137
3.4.1 Θλιπτική Αντοχή 137

3.4.2 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος poisson. 140
3.4.1 Δοκιμή Barcelona 144
3.4.1 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή. 150

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 157
Δοκίμια που ελέγχονται σε θερμοκρασία δωματίου (χωρίς θερμική καταπόνηση) 157
Δοκίμια που εκτείθονται σε υψηλές θερμοκρασίες. 158
Αποτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες και στα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος 159

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 161

1 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Συμβατικό σκυρόδεμα

1.1.1 Γενικά

Σκυρόδεμα λέγεται το δομικό υλικό που προκύπτει από την ανάμιξη αδρανών υλικών με τον τσιμεντοπολτό. Ως αδρανή χρησιμοποιούνται συνήθως η άμμος, το ρυζάκι, το χαλίκι και το γαρμπίλι και λέγονται έτσι γιατί είναι χημικά αδρανή ως προς το τσιμέντο. Ως τσιμεντοπολτό εννοούμε το προϊόν της αντίδρασης του νερού με το τσιμέντο.

Το σκυρόδεμα είναι το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως χάρη στην υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητά του, στο χαμηλό του κόστος και στη μεγάλη και άμεση διαθεσιμότητα των συστατικών του.

1.1.2 Κατηγορίες σκυροδέματος

Σύμφωνα με τον EC-2 : «Σχεδιασμός των κατασκευών από σκυρόδεμα» το σκυρόδεμα χωρίζεται στις κατηγορίες που φαίνονται στον **Πίνακα 1** με βάση την αντοχή του σε θλίψη, που είναι και το βασικότερο χαρακτηριστικό του:

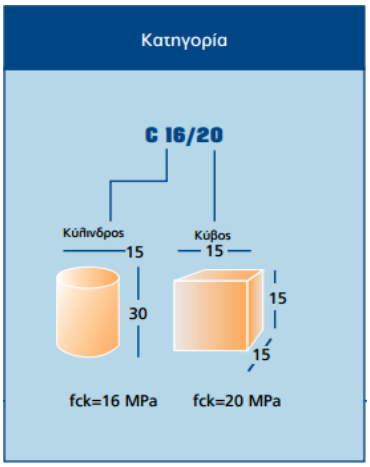
Πίνακας 1: Κατηγορίες Σκυροδέματος σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EC2

Κατηγορία Σκυροδέματος	f_{ck} (MPa)	$f_{ck,cube}$ (MPa)	f_{ctm} (MPa)	E_{cm} (GPa)
C12/15	12	15	1,6	27
C16/20	16	20	1,9	29
C20/25	20	25	2,2	30
C25/30	25	30	2,6	31
C30/37	30	37	2,9	32
C35/45	35	45	3,2	34
C40/50	40	50	3,5	35
C45/55	45	55	3,8	36
C50/60	50	60	4,1	37
C55/67	55	67	4,2	38
C60/75	60	75	4,4	39
C70/85	70	85	4,6	41
C80/95	80	95	4,8	42
C90/105	90	105	5,0	44

Στην πρώτη στήλη από αριστερά φαίνονται οι 14 κατηγορίες σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές. Ο πρώτος αριθμός εκφράζει τη χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου 150 mm και ύψους 300mm, ηλικίας 28 ημερών, η οποία καταγράφεται και στη δεύτερη στήλη του πίνακα.

Ο δεύτερος αριθμός εκφράζει τη χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη κυβικού δοκιμίου ακμής 150 mm, ηλικίας 28 ημερών, η οποία καταγράφεται και στην τρίτη στήλη του πίνακα.

Στην τέταρτη στήλη καταγράφεται η αντοχή σε αξονικό εφελκυσμό ανά κατηγορία και στην πέμπτη στήλη το μέτρο ελαστικότητας ανά κατηγορία σκυροδέματος. Στο **Σχήμα 1** παρατίθεται ένα παράδειγμα κατηγορίας σκυροδέματος με τις χαρακτηριστικές αντοχές κυλινδρικού και κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος.



Σχήμα 1: Παράδειγμα χαρακτηριστικής αντοχής κυλινδρικού και κυβικού δοκιμίου σκυροδέματος.

Η αντοχή του σκυροδέματος, όπως και οι λοιπές ιδιότητές του που ενδιαφέρουν (συστολή ξήρανσης, ερπυσμός, ρηγμάτωση, ανθεκτικότητα), επηρεάζονται άμεσα από τη σύνθεση του. Για το λόγο αυτό, αναλύονται στη συνέχεια τα κύρια συστατικά του.

1.1.3 Συστατικά σκυροδέματος

1.1.3.1 Αδρανή

Ως αδρανή ορίζονται τα κοκκώδη υλικά που μετέχουν στην παρασκευή του σκυροδέματος και καταλαμβάνουν το 60-80% του συνολικού του όγκου.

Χωρίζονται σε κατηγορίες με βάση την προέλευσή τους και την κοκκομετρική τους διαβάθμιση (μέγεθος κόκκων). Τα πιο συνηθισμένα σε χρήση είναι η άμμος, το ρυζάκι, το γαρμπίλι και το χαλίκι.

<u>Κατηγορίες αδρανών με βάση την προέλευσή τους</u>

- Φυσικά ή συλλεκτά.

Είναι τα αδρανή που η λήψη τους γίνεται από φυσικές αποθέσεις (π.χ. ποτάμια, ορυχεία κτλ.)

- Αδρανή λατόμευσης.

Είναι τα αδρανή που προκύπτουν από εξόρυξη και θραύση όγκων πετρώματος.

- Τεχνητά η βιομηχανικά.

Είναι τα αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (πχ τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης, υλικά στίλβωσης, κτλ.).

- Ανακυκλωμένα.

Είναι τα αδρανή που προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλτικών έργων κτλ.).

<u>Κατηγορίες αδρανών με βάση την κοκκομετρική διαβάθμιση</u>

- Χονδρόκοκκα.

Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών (EN-12620) έχουν μέγιστη διάμετρο D> 4 mm και ελάχιστη d> 2 mm. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι, γαρμπίλι, ρυζάκι.

• Λεπτόκοκκα.

Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών (EN-12620) έχουν μέγιστη διάμετρο D< 4 mm. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν διάφορα είδη άμμων.

• Filler.

Σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών (EN-12620) είναι το διαβαθμισμένο λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστη διάμετρο D<2 mm, το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο 0,063 mm. Προστιθέμενο σε δομικά υλικά προσδίδει συγκεκριμένες ιδιότητες.

Ο κοκκομετρικός διαχωρισμός των αδρανών γίνεται με πρότυπα κόσκινα που έχουν κυκλικές ή τετραγωνικές οπές.

Αναλογία ανάμιξης των υλικών

Η αναλογία ανάμιξης των αδρανών προκύπτει από τη μελέτη της σύνθεσης, η οποία γίνεται ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις του εκάστοτε έργου. Οι τελευταίες αφορούν στις ιδιότητες του σκυροδέματος, δηλαδή στην αντοχή, στην ανθεκτικότητα, στην εργασιμότητα, στην αντλησιμότητα και στη στεγανότητα του, αλλά και στην ομοιογένεια του μίγματος.

Η μέτρηση των αδρανών γίνεται κατά βάρος, ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος ανάλογα με τον προορισμό του, και σύμφωνα με το Πρότυπο EN 206-1 με ακρίβεια ±3%.

1.1.3.2 Τσιμέντο

Τα κύρια συστατικά για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ο ασβεστόλιθος και η άργιλος. Αυτά τα δύο υλικά αν ψηθούν σε υψηλή θερμοκρασία σχηματίζουν μια ουσία σε μορφή πετρώματος, το λεγόμενο κλίνκερ (klinker). Το κλίνκερ, αφού αλεστεί για να αποκτήσει την

επιθυμητή κοκκομετρία, και με την προσθήκη γύψου για τον έλεγχο της πήξης, σχηματίζει το τελικό προϊόν, που είναι το τσιμέντο Portland.

Η σημαντικότερη ιδιότητα του τσιμέντου, που το κάνει τόσο χρήσιμο, είναι η χημική του αντίδραση με το νερό, η «ενυδάτωση του τσιμέντου». Αποτέλεσμα αυτής είναι προϊόντα με χαρακτηριστικά πήξης και σκλήρυνσης, όπως και ο λεγόμενος τσιμεντοπολτός, ο οποίος αποτελεί και τη συνδετική ουσία μεταξύ των αδρανών για την παραγωγή του σκυροδέματος.

Κάθε χώρα παρασκευάζει τσιμέντο χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Τα συνηθέστερα κύρια συστατικά του τσιμέντου φαίνονται στον **Πίνακα 2**.

Πίνακας 2: Συστατικά Τσιμέντου

Συστατικό	Συμβολισμός
Κλίνκερ	K
Ποζολάνη φυσική	P
Ποζολάνη φυσική ψημένη	Q
Ιπτάμενη Τέφρα πυριτική	V
Ιπτάμενη Τέφρα ασβεστούχος	W
Ψημένος σχιστόλιθος	T
Ασβεστόλιθος	L
Σκωρία υψικαμίνου	S
Πυριτική παιπάλη	D

Στην Ελλάδα, με βάση το Πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 197-1 «Σύνθεση, Προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα», τα ελληνικά τσιμέντα χαρακτηρίζονται από τον τύπο τους και έναν αριθμό που δηλώνει την αντοχή τους.

Οι βασικοί τύποι τσιμέντου είναι οι εξής:

- CEM I: Τσιμέντο Portland (K > 95%).
- CEM II: Τσιμέντο Portland -σύνθετο (K,P,Q,V,W,T,L,S,D)
  Ποσοστό κλίνκερ: A για 80%<K<94 %, B για 65%<K<79%.
- CEM III: Σκωριοτσιμέντο (K,S)
  Ποσοστό κλίνκερ: A για 35%<K<65%, B για 20%<K<34%, C για 5% <K<19%.
- CEM IV: Ποζολανικό (K,P,Q,V,W,D)
  Ποσοστό κλίνκερ: A για 65% <K<89%, B για 45%<K<64%.
- CEM V: Σύνθετο τσιμέντο (K,S,P,Q,V)
  Ποσοστό κλίνκερ: A για 40%<K<64%, B για 20%<K<39%.

Κατηγορίες αντοχής τσιμέντου:

- Ορίζονται τρεις βασικές κατηγορίες αντοχής: 32,5 42,5 52,5 MPa.
- Η παραπάνω αντοχή είναι η χαρακτηριστική αντοχή του τσιμέντου σε θλίψη.
- Η αντοχή μετράται σε κυβικά δοκίμια τσιμεντοκονιάματος πλευράς 40 mm, με λόγους (κ.β.) τσιμέντο: άμμο: νερό: 1: 3: 0.5 αντίστοιχα.
- Χωρίζονται στις εξής δύο υποκατηγορίες: N για τσιμέντο με κανονικό ρυθμό ανάπτυξης πρώιμων αντοχών και R για τσιμέντο με ταχύ ρυθμό ανάπτυξης πρώιμων αντοχών.

Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται οι μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις τσιμέντου για κάθε κατηγορία αντοχής, ενώ στο **Σχήμα 2** επεξηγείται η κωδικοποίηση των τσιμέντων.

Πίνακας 3: Κατηγορίες Αντοχής Τσιμέντου

Κατηγορία **Αντοχής**	Αντοχή σε Θλίψη **MPa**				Χρόνος **αρχής πήξης min**	Σταθερότητα **όγκου (Διαστολή) mm**
	Πρώιμη αντοχή		Τυπική αντοχή			
	2 ημέρες	**7 ημέρες**	28 ημέρες			
32,5 N	**-**	**>16,0**	>32,5	<52,5	>75	<10
32,5 R	**>10,0**	**-**				
42,5 N	**>10,0**	**-**	>42,5	<62,5	>60	
42,5 R	**>20,0**	**-**				
52,5 N	**>20,0**	**-**	>52,5	-	>45	
52,5 R	**>30,0**	**-**				

Σχήμα 2: Τελική κωδικοποίηση τσιμέντου.

1.1.3.3 Νερό

Το νερό έχει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή του σκυροδέματος, τόσο για τη ρευστότητά του, όσο και στη συνέχεια κατά την ενυδάτωση και συντήρησή του. Αν και η ενυδάτωση απαιτεί λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) της τάξης του 0,3, στην πράξη τεχνικά χρησιμοποιείται λόγος w/c της τάξης του 0,5.

Καταλληλότητα

Η καταλληλότητα του νερού ανάμιξης εξαρτάται από την προέλευσή του. Το πρότυπο EN 1008 κατηγοριοποιεί τους ακόλουθους τύπους:

- Πόσιμο νερό

Κατάλληλο για σκυρόδεμα. Δεν απαιτείται έλεγχός του.

- Νερό που έχει ανακτηθεί μετά από επεξεργασία σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος (π.χ. νερά εκπλύσεων).

Γενικώς κατάλληλο για σκυρόδεμα, αλλά πρέπει να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του παραρτήματος Α του Προτύπου (π.χ. το επιπλέον βάρος στερεών από νερά προερχόμενα από τέτοιου είδους επεξεργασίες, πρέπει να είναι μικρότερο από 1% του ολικού βάρους των αδρανών που περιέχονται στο μίγμα).

- Υπόγεια ύδατα.

Πρέπει να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.

- Νερό φυσικών πόρων και νερό βιομηχανικών διεργασιών.

Πρέπει να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.

- Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό.

Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άοπλο σκυρόδεμα με προϋπόθεση αύξησης της αντοχής του κατά 15%. Δεν είναι κατάλληλο για οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα. Το μέγιστο

επιτρεπόμενο περιεχόμενο σε χλώριο στο σκυρόδεμα πρέπει να τηρείται για σκυρόδεμα με χαλύβδινο οπλισμό ή εμβαπτισμένα μεταλλικά τμήματα.

• Νερά αποβλήτων.

Δεν είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα. Συνδυασμός υδάτων που προέρχεται από μίγμα υδάτων μετά από επεξεργασίες σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος και από νερό άλλης προελεύσεως θα πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις για την καταλληλότητα του νερού.

Ο λόγος w/c

Η τιμή του λόγου του βάρους του νερού (w) προς το βάρος του τσιμέντου (c) έχει μεγάλη σημασία για την τελική ποιότητα του σκυροδέματος.

Μεγάλη τιμή του λόγου w/c μπορεί να σημαίνει τη δημιουργία κενών εντός της μάζας του σκυροδέματος, λόγω παγιδευμένου αέρα ή πλεονάζοντος νερού, άρα και μειωμένη αντοχή.

Μικρή τιμή του λόγου w/c σημαίνει αυξημένη αντοχή του σκυροδέματος, όμως και μειωμένη εργασιμότητα.

Σε κάθε περίπτωση, η τιμή του λόγου w/c εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η φυσική υγρασία των αδρανών και οι συνθήκες περιβάλλοντος της μελλοντικής κατασκευής, όμως δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 0,35.

1.1.3.4 Πρόσμικτα

Ως πρόσμικτα στην παραγωγή του σκυροδέματος ορίζονται τα χημικά λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία μπορεί να προστεθούν για την τροποποίηση ορισμένων χαρακτηριστικών του.

Η ποσότητα ενός πρόσμικτου, που απαιτείται για κάποιο σκοπό, είναι πολύ μικρή σε σχέση με την ποσότητα του τσιμέντου στο σκυρόδεμα.

Η κατηγοριοποίηση των πρόσμικτων με βάση το σκοπό που επιτελούν είναι πολύ δύσκολη, καθώς μπορεί να κάνουν ταυτόχρονα περισσότερες από μία λειτουργίες. Έτσι, η κατηγοριοποίησή τους γίνεται πιο εύκολα α) στα πρόσμικτα που δρουν απευθείας στην επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου και β) στα πρόσμικτα που επηρεάζουν τις αντιδράσεις τσιμέντου και νερού από λίγα λεπτά έως αρκετές ώρες μετά την προσθήκη τους.

Α) Πρόσμικτα επιφανειακής δράσης

Χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:

- Αερακτικά.

Δρουν με σκοπό τη δημιουργία και τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα στη μάζα του τσιμεντοπολτού. Τα κενά που δημιουργούνται έχουν ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να είναι πιο ανθεκτικό σε εναλλαγές ψύξης-απόψυξης και να έχει μεγαλύτερη εργασιμότητα.

- Ρευστοποιητικά.

Επιβραδύνουν την πήξη, ενώ βελτιώνουν ταυτόχρονα την εργασιμότητα και την αντοχή. Η χρήση του ρευστοποιητικού γίνεται αντί της προσθήκης επιπρόσθετου νερού, για την επίτευξη της επιθυμητής εργασιμότητας. Έτσι κρατώντας κατά το δυνατόν χαμηλό το λόγο w/c επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα σκυροδέματος.

- Υπερρευστοποιητικά.

Έχουν την ίδια χρησιμότητα με τα ρευστοποιητικά, όμως αντί για επιβράδυνση προκαλούν επιτάχυνση της πήξης και μεγαλύτερη ρευστότητα (3-4 φορές περισσότερο) από τα απλά ρευστοποιητικά.

Β) Πρόσμικτα ελέγχου της πήξης

Χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:

- Επιταχυντικά της πήξης.

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έργων χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή μικρού χρόνου περάτωσης. Αποτέλεσμα της χρήσης τους είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος, η αύξηση της συστολής ξήρανσης και σε ορισμένες περιπτώσεις η μείωση της αντοχής του σκυροδέματος, γι’αυτό και χρησιμοποιούνται μόνο όταν κρίνεται αναγκαίο.

• Επιβραδυντικά της πήξης.

Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έργων υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή όταν απαιτείται επιβράδυνση του ρυθμού ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Αποτέλεσμα της χρήσης τους μπορεί να είναι η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, αφού τα επιβραδυντικά λειτουργούν και ως ρευστοποιητικά.

• Στεγανοποιητικά.

Χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την υδατοπερατότητα του σκυροδέματος.

• Αναστολείς διάβρωσης.

Χρησιμοποιούνται για την προστασία του χάλυβα του σκυροδέματος από τη διάβρωση.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τα πρόσμικτα δίνονται στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 934-2.

1.1.3.5 Πρόσθετα

Ως πρόσθετα στην παραγωγή του σκυροδέματος ορίζονται τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται με στόχο τη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του ή την επίτευξη κάποιων άλλων.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 τα πρόσθετα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

• Τύπου I.

Είναι τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα, όπου υπάγονται τα φίλλερ αδρανών, με προδιαγραφές σύμφωνες με το EN 12620, και τα χρώματα.

• Τύπου II.

Είναι τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες. Εδώ υπάγονται οι ιπτάμενες τέφρες, σύμφωνα με το EN 450, η πυριτική παιπάλη, κατά EN 13263 και η σκωρία υψικαμίνου, σύμφωνα με το EN 15167.

Πυριτική παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη (Sika Fume), που χρησιμοποιήθηκε στη σύνθεση του σκυροδέματος των πειραμάτων της συγκεκριμένης διπλωματικής, είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας πυριτικών μετάλλων και σιδηροπυριτικών κραμάτων και είναι διαθέσιμη σε διάφορους τύπους, ανάλογα με το ποσοστό πυριτικών οξειδίων που περιέχει. Είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκη (κόκκοι 100 φορές μικρότεροι από τους κόκκους του τσιμέντου, μορφή πούδρας) και βοηθά στον καλύτερο εγκιβωτισμό του τσιμεντοπολτού γύρω από τα αδρανή, βελτιώνοντας αισθητά την ποιότητα της μεταβατικής ζώνης. Επιπλέον, σε αντίθεση με τους γωνιώδεις κόκκους του τσιμέντου, οι κόκκοι της πυριτικής παιπάλης έχουν σφαιρικό σχήμα, πράγμα που ενισχύει περισσότερο την πληρωτική τους ικανότητα.

Η πυριτική παιπάλη δεν αντιδρά με το νερό, χαρακτηρίζεται όμως από την ιδιαίτερα αυξημένη ποζολανικότητα της. Ακόμα, βοηθά με τα πυριτικά οξείδια που περιέχει στη δημιουργία επιπλέον ποσότητας ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH).

Οι παραπάνω λόγοι καθιστούν την πυριτική παιπάλη απαραίτητο συστατικό για σκυροδέματα υψηλής αντοχής και χαμηλής διαπερατότητας.

Δεν έχουν αναφερθεί επιπτώσεις στην υγεία από τη χρήση πυριτικής παιπάλης, όμως μιας και είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο υλικό, το οποίο σε περίπτωση εισπνοής μπορεί να φτάσει ως τους πνεύμονες, συνιστάται να εφαρμόζονται πάντοτε οι οδηγίες ασφαλούς χρήσης όπως αυτές ορίζονται από τον κατασκευαστή [Παπαδάτου Μ., (2014)].

1.2 Μηχανικές ιδιότητες και χαρακτηριστικά του σκυροδέματος

1.2.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

- Εργασιμότητα

Ως εργασιμότητα ορίζεται η ιδιότητα που καθορίζει την ‘προσπάθεια’ (δηλαδή το έργο) που απαιτείται για τη μεταφορά, διάστρωση, συμπύκνωση και τελείωμα του σκυροδέματος χωρίς απόμιξη των υλικών. Η εργασιμότητα εξαρτάται βασικά από την ευκολία ροής, δηλαδή τη ρευστότητα του νωπού σκυροδέματος, και τη συνοχή της μάζας (την ικανότητα του νωπού σκυροδέματος να συγκρατεί τόσο το νερό όσο και τα αδρανή σε μία ομοιόμορφη μάζα), δηλαδή τη συνεκτικότητα. Όπως και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια, η εργασιμότητα δεν αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του σκυροδέματος, αλλα σχετίζεται με τον τύπο της κατασκευής και τις

μεθόδους διάστρωσης, συμπύκνωσης και τελειώματος. Για παράδειγμα, σκυρόδεμα που θεωρείται ικανοποιητικής εργασιμότητας για την κατασκευή ενός φράγματος μπορεί να είναι τελείως ακατάλληλο (από άποψη εργασιμότητας) για την κατασκεύη υποστυλωμάτων και δοκών. Τονίζεται ότι η σημασία της εργασιμότητας στην τεχνολογία του σκυροδέματος είναι τεράστια, αφού είναι γνωστό πλέον ότι σκυροδέματα που διαστρώνονται ή συμπυκνώνονται δύσκολα, συνήθως εμφανίζουν προβληματική αντοχή και ανθεκτικότητα σε διάρκεια.

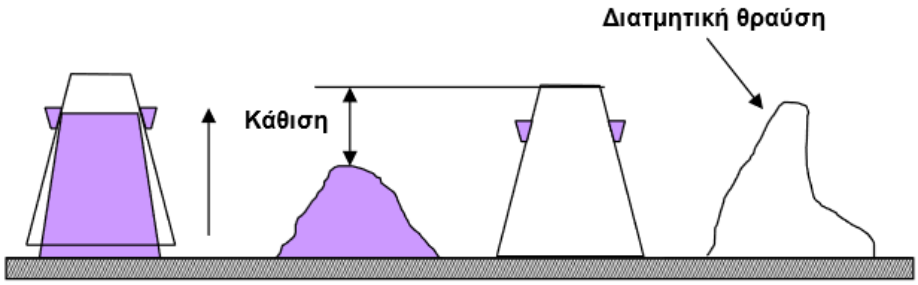
Η εργασιμότητα εξαρτάται από τις συνθήκες του έργου, επόμενως κανένας πειραματικός έλεγχος δεν είναι αρκετός από μόνος του για την μέτρησή της. Ο πρακτικότερος και πιο συνηθισμένος τρόπος μέτρησης της εργασιμότητας είναι η δοκιμή κάθισης (ΕΛΟΤ/ΕΝ 12350-2). Η εργασιμότητα του σκυροδέματος πρέπει να ελέγχεται πριν τη διάστρωση, μετά την αποφόρτωση συγκεκριμένης ποσότητας του αναμίγματος ή του φορτίου του αυτοκινήτου-μπετονιέρα (το 1/3, σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος, 0.3 m^3, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο ΕΝ 12350-1). Τα δοχεία μέτρησης για το συμβατικό σκυρόδεμα έχουν συνήθως χωρητικότητα 8lt, όπως και το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική. Η συμπύκνωση πραγματοποιείται με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης. Στην παρούσα διπλωματική, η συμπύκνωση έγινε σε τράπεζα δόνησης.

Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη δοκιμή και στο **Σχήμα 3** απεικονίζεται η διενέργειά της [Τριανταφύλλου Α., (2011)].

Πίνακας 4: Προδιαγραφές της δοκιμής κάθισης, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΝ 12350-2.

Κατηγορία Κάθισης	Κάθιση (mm)
S1	≤40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5*	≥200

*Λόγω της έλλειψης ευαισθησίας των δοκιμών ποσοτικοποίησης της εργασιμότητας πέρα από συγκεκριμένα όρια, συνιστάται να γίνεται χρήση κάθε δοκιμής για τις περιπτώσεις με κάθιση ≥10 mm και ≤210 mm.



Σχήμα 3: Απεικόνιση της δοκιμής κάθισης (Κόλιας Στ. 2013-2014).

1.2.2 Ιδιότητες Σκληρυμένου Σκυροδέματος

- Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

Η σημαντικότερη ίσως ιδιότητα του σκυροδέματος είναι η θλιπτική του αντοχή. Το σκυρόδεμα, ακόμα και το άοπλο, εμφανίζει μεγάλη αντοχή σε θλίψη γεγονός στο οποίο οφείλεται σε μεγάλο βαθμό η χρήση του υλικού στις κατασκευές.

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος συμβολίζεται ως f_c (c: concrete) στους κανονισμούς οπλισμένου σκυροδέματος και αναφέρεται στη μονοαξονική θλιπτική αντοχή. Η αντοχή αυτή μετράται στις 28 ημέρες σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm ή σε κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος.

Ο κανονισμός οπλισμένου σκυροδέματος ορίζει σα βάση τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή f_{ck}. Χαρακτηριστική αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου f_{ck} ή κυβικού δοκιμίου $f_{ck,cube}$ θεωρείται εκείνη η τιμή αντοχής κάτω της οποίας υπάρχει 5% πιθανότητα να βρεθεί η τιμή αντοχής ενός τυχαίου δοκιμίου.

Όπως είναι φυσικό, η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος f_{cm} (m: mean), δηλαδή η μέση τιμή των αντοχών δύο ή περισσότερων δοκιμίων από το ίδιο δείγμα σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από την χαρακτηριστική αντοχή f_{ck}. Ο κανονισμός συνδέει τα δύο αυτά μεγέθη με την **Εξίσωση 1**:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \qquad \textbf{(1)}$$

Στον **Πίνακα 5** παρουσιάζονται οι κατηγορίες σκυροδέματος οι οποίες ορίζονται με βάση την χαρακτηριστική τιμή (σε MPa) της θλιπτικής αντοχής. Παρατηρείται ότι η χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμίων είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή των αντίστοιχων κυλινδρικών. Στην πράξη όλοι οι υπολογισμοί για τις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος γίνονται με βάση την χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων f_{ck} εκτός αν ο κανονισμός σε κάποιους ελέγχους ορίζει κάτι διαφορετικό [Παναγόπουλος Γ. & Κίρτας Ε., (2005)].

Πίνακας 5: Κατηγορίες σκυροδέματος και αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές, κύβου - κυλίνδρου.

	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (Mpa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ck,cube}$ (Mpa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60

- Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Ο όρος εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αναφέρεται στη μέγιστη τάση την οποία μπορεί να παραλάβει το (άοπλο) σκυρόδεμα όταν υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέχρι να ρηγματωθεί. Συμβολίζεται ως f_{ct} (t: tension) και η τιμή της είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη αντοχή σε θλίψη.

Η μικρή τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος είναι ίσως το σημαντικότερο πρόβλημά του ως δομικό υλικό. Για την αντιμετώπισή του τοποθετούνται στο σκυρόδεμα οπλισμοί από χάλυβα, οι οποίοι είναι αυτοί που καλούνται να παραλάβουν τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία.

Ως τάξη μεγέθους, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι περίπου το 1/10 της αντίστοιχης θλιπτικής αντοχής. Προσεγγιστικά, ο ΕΚΩΣ υπολογίζει τη μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_{ctm} βάσει της χαρακτηριστικής τιμής της θλιπτικής αντοχής μέσω της **Εξισωσης 2**:

$$f_{ctm} = 0.30 f_{ck}^{1/3} \qquad \textbf{(2)}$$

όπου f_{ctm} και f_{ck} σε MPa.

Στον **Πίνακα 6** παρουσιάζεται η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής καθώς και οι χαρακτηριστικές αντοχές $f_{ctk0.05}$ και $f_{ctk0.95}$.

Πίνακας 6: Εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος (MPa).

f_{ck}	12	16	20	25	30	35	40	45	50
$f_{ckt0.05}$	1.10	1.30	1.50	1.80	2.00	2.20	2.50	2.70	2.90
f_{ctm}	1.60	1.90	2.20	2.60	2.90	3.20	3.50	3.80	4.10
$f_{ctk0.95}$	2.00	2.50	2.90	3.30	3.80	4.20	4.60	4.90	5.30

1.2.3 Μέτρο ελαστικότητας

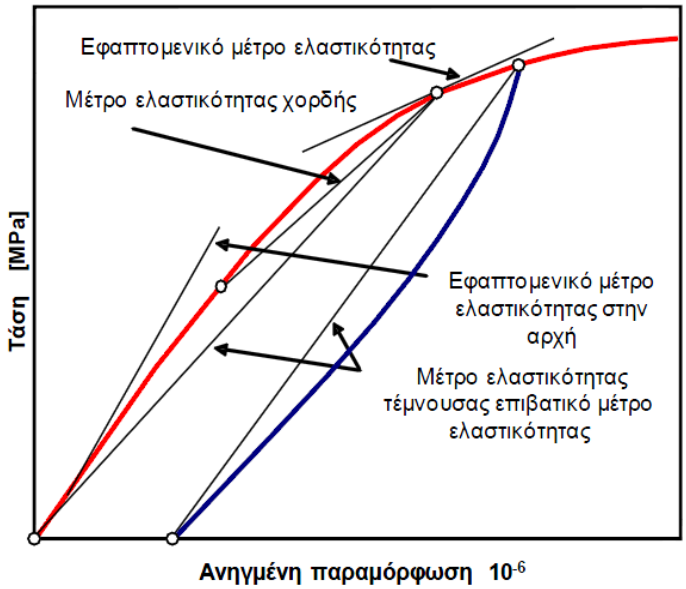
Το μέτρο ελαστικότητας (Ε) εκφράζει τη δυνατότητα που έχει ένα σώμα να ανθίσταται στην παραμόρφωση.

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό φορτίο περιγράφεται από την καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (σ-ε). Για μικρά φορτία (≤ 40% περίπου του φορτίου θραύσεως) μπορεί με ικανοποιητική ακρίβεια να θεωρηθεί ευθύγραμμη. Στην περίπτωση αυτή, το μέτρο ελαστικότητας (αποκαλούμενο και στατικό μέτρο ελαστικότητας, $E=\frac{\sigma}{\varepsilon}$) προσομοιάζει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του υλικού υπό την προϋπόθεση ότι ο χρόνος φόρτισης είναι σύντομος. Σε αντίθετη περίπτωση, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ερπυστικές παραμορφώσεις.

Στην πράξη γίνεται η παραδοχή ότι τα φορτία υπολογισμού μιας κατασκευής προκαλούν άμεσα ¨ελαστικές παραμορφώσεις¨ και η παραμονή των τάσεων αυτών προκαλεί ερπυστικές παραμορφώσεις. Επομένως το μέτρο ελαστικότητας που ορίζεται ως η κλίση της γραμμής από την αρχή των αξόνων μέχρι την τάση που προκαλείται από τα φορτία υπολογισμού (μέτρο ελαστικότητας τέμνουσας) είναι μια αποδεκτή προσέγγιση της συμπεριφοράς του υλικού. Αυτό ισχύει εφόσον το φορτίο δεν είναι μεγάλο (≤ 40% περίπου του φορτίου θραύσεως).

Για μεγαλύτερα φορτία το διάγραμμα σ-ε γίνεται καμπύλο με καμπυλότητα αυξανόμενη όσο το επίπεδο της φόρτισης είναι μεγαλύτερο. Η συμπεριφορά του υλικού στις περιπτώσεις

αυτές αντιπροσωπεύεται με καλή ακρίβεια από το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ή το μέτρο ελαστικότητας χορδής, **(Σχήμα 4)**. Είναι φανερό ότι για μικρές τάσεις, το μέτρο ελαστικότητας δεν εξαρτάται από την τιμή της τάσης, αλλά όσο η τιμή αυξάνεται η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από την τιμή της τάσης γίνεται μεγαλύτερη.



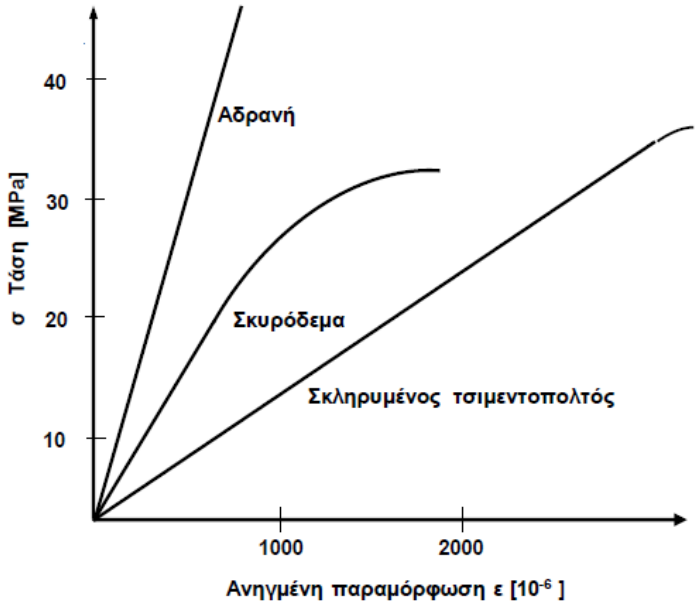
Σχήμα 4: Τυπικό διάγραμμα σ-ε σκυροδέματος σε φόρτιση και αποφόρτιση. Οι κλίσεις των ενδεικνυόμενων ευθειών είναι τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας (Κόλιας Στ. 2014).

Το μέτρο ελαστικότητας εκτός από το μέγεθος της τάσης επηρεάζεται και από το χρόνο που διαρκεί το πείραμα. Όσο αυξάνεται η διάρκεια της δοκιμής ή όσο μειώνεται η ταχύτητα επιβολής της τάσης (dσ/dt), η αντοχή μειώνεται και η παραμόρφωση κατά τη θραύση αυξάνεται (μικρό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας). Αντιθέτως όταν η ταχύτητα επιβολής τάσης είναι μεγάλη η αντοχή αυξάνει και η παραμόρφωση κατά τη θραύση μικραίνει (μεγάλο εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας).

Εκτός από το φορτίο, τη διάρκεια και την ταχύτητα φόρτισης, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος επηρεάζεται και από πολλούς άλλους παράγοντες. Τέτοιοι παράγοντες είναι

ενδεικτικά το είδος των αδρανών, η κακκομετρική σύνθεση, ο λόγος Ν/Τ, η ηλικία του δοκιμίου, η θερμοκρασία, η υγρασία και άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την παραμόρφωση του υλικού.

Οι καμπύλες σ-ε των υλικών που συνθέτουν το σκυρόδεμα, δηλαδή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και των συνήθων αδρανών, είναι ουσιαστικά ευθύγραμμες μέχρι υψηλά ποσοστά της τάσης θραύσης. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι τα υλικά αυτά έχουν διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στο σκυρόδεμα που συντίθενται από τα υλικά αυτά να αναπτύσσονται συγκεντρώσεις τάσεων που προκαλούν μικρορηγματώσεις και επομένως καμπυλώνουν τη γραμμή σ-ε του σκυροδέματος, (**Σχήμα 5)**. Αν χρησιμοποιηθούν αδρανή με μέτρο ελαστικότητας και αντοχή παραπλήσια με αυτά του τσιμεντοπολτού ή αν χρησιμοποιηθούν υλικά που αυξάνουν τη συνάφεια των αδρανών με τον τσιμεντοπολτό, τότε η καμπύλη σ-ε γίνεται περισσότερο ευθύγραμμη. Αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται η μικρορηγμάτωση στη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντοπολτού. Αντίθετα, αν η συνάφεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού ελαττωθεί τότε η καμπυλότητα της γραμμής σ-ε αυξάνει.



Σχήμα 5: Σύγκριση διαγραμμάτων τάσεων-παραμορφώσεων αδρανών, σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και σκυροδέματος (Κόλιας Στ. 2014).

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου d και ύψους 2d (το d μπορεί να πάρει τιμές 100, 113, 150, 200, 250, 300 mm). Μπορούν ωστόσο να χρησιμοποιηθούν και πρισματικά δοκίμια.

Το διάγραμμα σ-ε για τη δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό παρουσιάζεται πιο ευθύγραμμο από το αντίστοιχο της θλίψης. Αυτό οφείλεται στο ότι κατά τον εφελκυσμό το στάδιο ρηγμάτωσης μετά το 50% του μέγιστου φορτίου είναι σχετικά μικρό. Αυτό προκύπτει καθώς κάποια ρωγμή θα αναπτυχθεί τυχαία περισσότερο από τις άλλες, στη συνέχεια θα καταστεί ασταθής και τέλος θα επεκταθεί ανεξέλεγκτα προκαλώντας τη θραύση σε μονοαξονική θλίψη όπου δημιουργούνται πολλά επίπεδα θραύσης. Τα επίπεδα αυτά της θραύσης είναι συγκεντρωμένα περί το μέσον του δοκιμίου σε κάποια απόσταση από τα άκρα του οποίου αναπτύσσεται τριαξονικό θλιπτικό πεδίο. Η τριαξονικότητα προκαλείται λόγω της παρεμπόδισης από τις χαλύβδινες πλάκες της μηχανής και ως εκ τούτου δεν επέρχεται άμεσα θραύση στην περιοχή αυτή.

Ο Ευρωκώδικας 2 (EN 1992-1-1:2004), στον Πίνακα 3.1 «Χαρακτηρισμός αντοχής και παραμόρφωσης σκυροδέματος», δίνει τις κάτωθι αντιστοιχίες (**Πίνακας 7**) των συμβατικών κατηγοριών κυλινδρικής, χαρακτηριστικής αντοχής σκυροδέματος κυλινδρικών δοκιμίων (σε MPa), προς το μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{cm} εκφρασμένο σε GPa.

Πίνακας 7: Αντιστοιχία αντοχής σκυροδέματος κυλινδρικών δοκιμίων (C) και μέσου μέτρου ελαστικότητας (E_{cm}).

C	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
Ecm	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44

Οι τιμές του **Πίνακα 7** δίνονται για σκυρόδεμα 28 ημερών με χαλαζιακά αδρανή. Για ασβεστολιθικά και ψαμμιτικά αδρανή, οι τιμές πρέπει να μειώνονται (κατά τον Ευρωκώδικα) κατά 10% έως 30% αντιστοίχως, και για βασαλτικά αδρανή πρέπει να μειώνονται κατά 20%.

Οι τιμές πρέπει να θεωρούνται ως ενδεικτικές και προσεγγιστικές για γενικές εφαρμογές. Στις περιπτώσεις που η κατασκευή μπορεί να είναι ευαίσθητη σε αποκλίσεις από αυτές, θα πρέπει να εκτιμώνται ιδιαιτέρως.

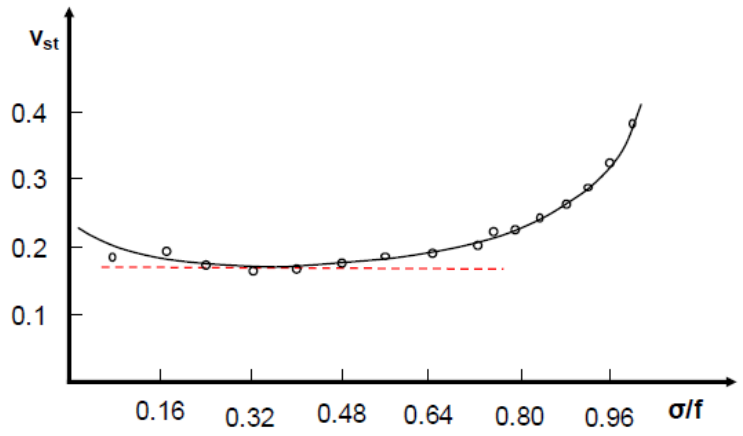
1.2.4 Λόγος Παραμορφώσεων - Λόγος Poisson

Ο λόγος παραμορφώσεων (ν) ή λόγος Poisson, καλείται ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης (ε_x) προς την αξονική παραμόρφωση (ε_y) στην ελαστική περιοχή του διαγράμματος σ-ε όταν το υλικό υποβάλλεται σε απλή μονοαξονική φόρτιση ($\nu=\varepsilon_x/\varepsilon_y$).

Ο συντελεστής ν είναι χαρακτηριστική σταθερά για κάθε υλικό εφόσον αυτό καταπονείται μέσα στα όρια της ελαστικής του συμπεριφοράς και είναι καθαρός αριθμός. Η μέγιστη τιμή του είναι ίση με 0.50 και παρατηρείται σε υλικά όπως το λάστιχο, ενώ υλικά με πολύ μικρό ν είναι ο φελλός που έχει πρακτικά ν=0. Στην πλαστική περιοχή, τα υλικά διατηρούν σταθερό τον όγκο τους και έτσι ο λόγος poisson τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή ν=0.5.

Ο στατικός λόγος του Poisson (v_{st}) προσδιορίζεται από τις δοκιμές σε θλίψη με τοποθέτηση μηκυνσιομέτρων εγκάρσια προς τη διεύθυνση της επιβολής του φορτίου, επιπλέον

εκείνων που τοποθετούνται κατά τη διεύθυνση του φορτίου. Ο λόγος poisson μεταβάλλεται σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση σ ή με το λόγο της επιβαλλόμενης τάσης προς την αντοχή σε θλίψη (σ/f), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 6**. Από πειραματικά αποτελέσματα έχει διαπιστωθεί ότι ο λόγος αυξάνει μετά από κάποιο όριο το οποίο είναι περίπου σ/f=0.6. Ο ρυθμός αύξησης γίνεται εντονότερος μετά από σ/f=0.75 ή 0.80 λόγω της αυξανόμενης ρηγμάτωσης του δοκιμίου που μεταβάλλει τη δομή αυτού από συμπαγές υλικό σε σύμπλεγμα διακριτών τεμαχίων υλικού. Για το λόγο αυτό ο λόγος poisson προσδιορίζεται ως ο λόγος των εγκάρσιων προς τις αξονικές παραμορφώσεις για φορτία που δεν υπερβαίνουν το 50% του φορτίου θραύσης.

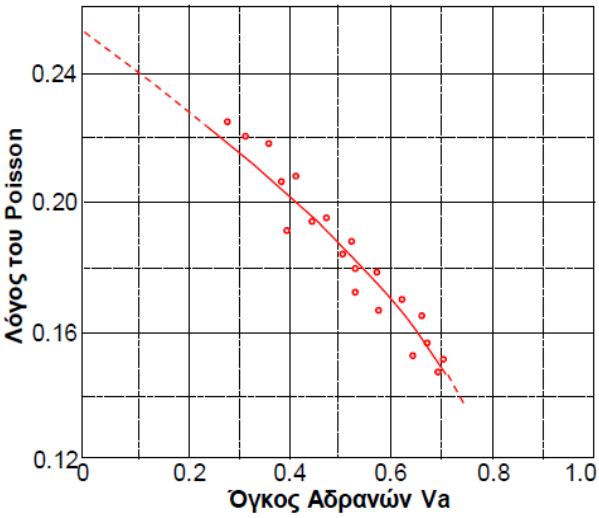


Σχήμα 6: Μεταβολή του λόγου poisson ανάλογα με το επίπεδο της επιβαλλόμενης τάσης (Κόλιας Στ. 2014).

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα η τιμή του λόγου σ/f είναι σταθερή για φορτία από 20% έως 50% του φορτίου θραύσης. Για μικρότερα φορτία φαίνεται ότι οι τιμές έχουν την τάση να αυξάνουν. Η συγκεκριμένη παρατήρηση έχει γίνει σε αρκετές έρευνες ωστόσο δεν είναι βέβαιο ότι αποτελεί πραγματική ιδιότητα του υλικού. Η αβεβαιότητα προκύπτει καθώς σε μικρά φορτία οι εγκάρσιες παραμορφώσεις είναι ιδιαίτερα μικρές και υπόκεινται σε μετρητικές αβεβαιότητες.

Στο σκυρόδεμα οι τιμές του λόγου poisson κυμαίνονται μεταξύ 0.15 και 0.22. Από την υπάρχουσα ερευνητική γνώση δεν έχει διαπιστωθεί κάποια σταθερή σχέση μεταξύ του λόγου ν και των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα ο λόγος νερού/τσιμέντου, ο χρόνος συντήρησης ή διαβάθμιση των αδρανών.

Έχει διαπιστωθεί ερευνητικά η σχέση μεταξύ του ποσοστού κατ' όγκο των αδρανών σε συνάρτηση με το λόγο ν (**Σχήμα 7**). Ο λόγος poisson των συνήθων αδρανών είναι μικρός και επομένως πρέπει να αναμένεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό κατ' όγκο των αδρανών στο σκυρόδεμα, τόσο μικρότερος θα είναι ο λόγος poisson για το σκυρόδεμα.



Σχήμα 7: Μεταβολή του λόγου poisson σε σχέση με τον όγκο των αδρανών μέσα στο μίγμα (Κόλιας Στ. 2014).

Ο λόγος poisson είναι γενικά χαμηλότερος στο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και υψηλότερος για σκυρόδεμα κεκορεσμένης υγρασιακής κατάστασης ή για σκυρόδεμα που φορτίζεται δυναμικά.

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Οπλισμένου Σκυροδέματος (Ε.Κ.Ο.Σ. 2000) στην περιοχή των ελαστικών παραμορφώσεων ο λόγος Poisson λαμβάνεται ίσως με 0.20. Δίνεται η

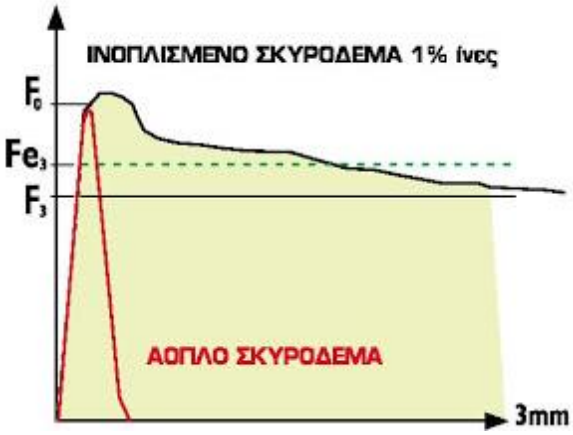
δυνατότητα να ληφθεί ίσος με μηδέν όταν επιτρέπεται η ρηγμάτωση του εφελκυόμενου σκυροδέματος.

Σχετικά με το λόγο poisson σε εφελκυσμό, έχει καταγραφεί ερευνητικά ότι δε διαφέρει από αυτόν σε θλίψη, ενώ οι τιμές του λόγου ν που προσδιορίζονται με δυναμικές μεθόδους είναι μεγαλύτερες κατά περίπου 20%, εκείνων που προσδιορίζονται με στατικές μεθόδους [Κομνηνού Ε. & Οικονόμου Π., (2015)].

1.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

1.3.1 Γενικά

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα ορίζεται αυτό που συντίθεται από υδραυλικά τσιμέντα λεπτόκοκκα ή και χοντρόκοκκα αδρανή, και ασυνεχείς διακριτές ίνες. Οι ίνες έχουν διάσταση λίγων εκατοστών και διαμέτρου που είναι συνήθως κλάσμα χιλιοστού, διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμιξη των συστατικών του σε ποσοστό της τάξης του 1-3% του συνολικού όγκου. Κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα, πολυπροπυλένιο ή γυαλί και από διάφορα άλλα υλικά, όπως το ξύλο. Χρησιμοποιούνται ίνες σε διάφορα σχήματα και μορφή, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη αγκύρωση μέσα στη μάζα. Ο βασικός ρόλος των ινών στο σκυρόδεμα είναι η αύξηση της παραμόρφωσης του υλικού κατά την αστοχία και γενικά ο περιορισμός της ρηγμάτωσης, ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται και αύξηση της αντοχής. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητάς του να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση. Γραφικά αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο **(Σχήμα 8)**.



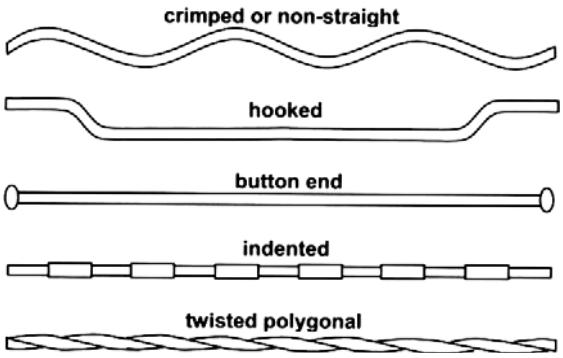
Σχήμα 8: Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Σκοπός των μικρών διασκορπισμένων ινών μέσα στη μάζα του σκυροδέματος είναι να ελέγχουν τη δημιουργία και την επέκταση της ρηγμάτωσης. Οι κυριότερες ίνες που χρησιμοποιούνται είναι:

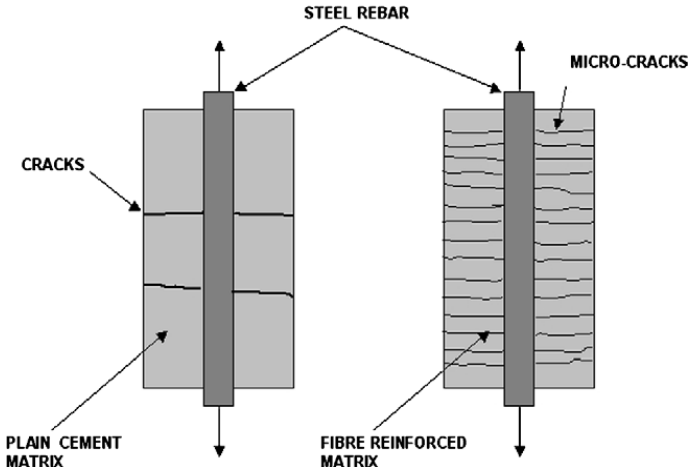
- Μεταλλικές ίνες, διαφόρων μεγεθών και διαστάσεων και μικροΐνες
- Ίνες γυαλιού, που χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται αντίσταση στα αλκάλια
- Συνθετικές ίνες από διάφορα υλικά όπως: πολυπροπυλενίου, πολυαιθυλενίου, πολυολεφινών και πολυβινιλίου (PVA)
- Ίνες άνθρακα, πίσσας και polyacrylonitrile (PAN)

Για το σκυρόδεμα δομοστατικών εφαρμογών, οι πιο σημαντικές ίνες είναι οι μεταλλικές.

Μερικά παραδείγματα μεταλλικών ινών φαίνονται στο **Σχήμα 9**. Υπάρχουν μεταλλικές ίνες με άγκιστρα στα άκρα και με διάφορες παραλλαγές στο σχήμα, προκειμένου να βελτιώνεται η αγκύρωση στη μάζα του σκυροδέματος και να αυξάνεται η αποδοτικότητά τους. Στο **Σχήμα 10** παρουσιάζεται η επιρροή των ινών στη ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Οι μεγάλες ρωγμές αντικαθίστανται από μικρορωγμές, οι οποίες προσδίδουν μεγαλύτερη ασφάλεια και αντοχή στο σκυρόδεμα.

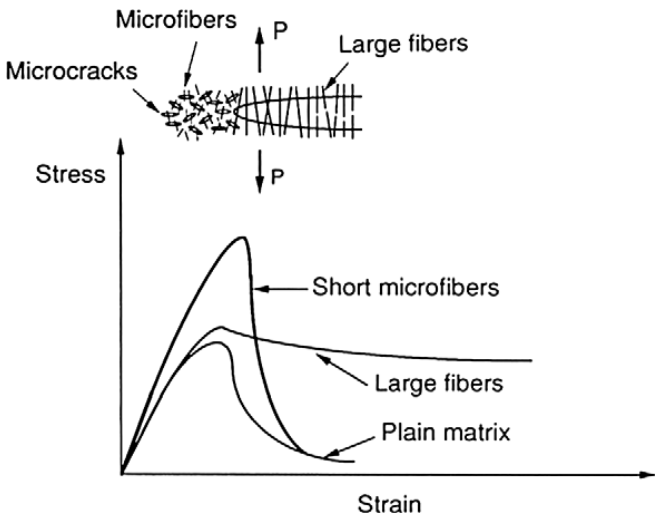


Σχήμα 9: Μεταλλικές ίνες με άγκιστρα στα άκρα και με διάφορες παραλλαγές στο σχήμα τους (Brandt Andrzej M., 2008).

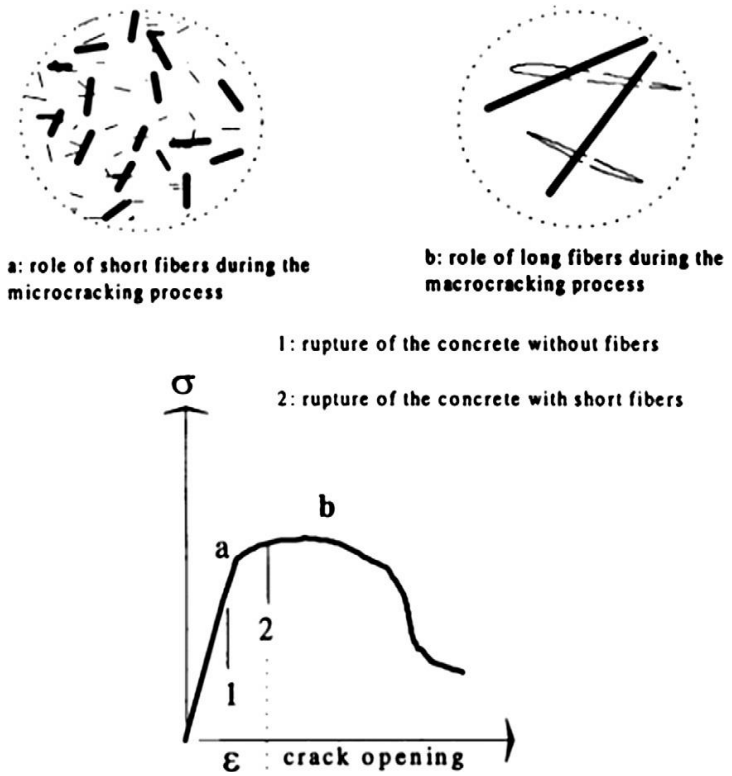


Σχήμα 10: Απεικόνιση της ρηγμάτωσης σε άοπλο (RC) και ινοπλισμένο (FRC) σκυρόδεμα αντίστοιχα, κατά τη φόρτιση (Brandt Andrzej M., 2008).

Το ποσοστό των ινών που θεωρείται αποδεκτό είναι μέχρι 3% κ.ο, γιατί μεγαλύτερα ποσοστά απαιτούν ειδικές τεχνικές. Οι κοντές ίνες ελέγχουν το άνοιγμα και την επέκταση των ρωγμών, καθώς είναι πυκνά διασκορπισμένες μέσα στη μάζα. Οι μακρύτερες ίνες που φτάνουν μέχρι τα 50 ή 80 mm ελέγχουν μεγαλύτερες ρωγμές και συμβάλλουν στην αύξηση της τελικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 11** και **Σχήμα 12**.

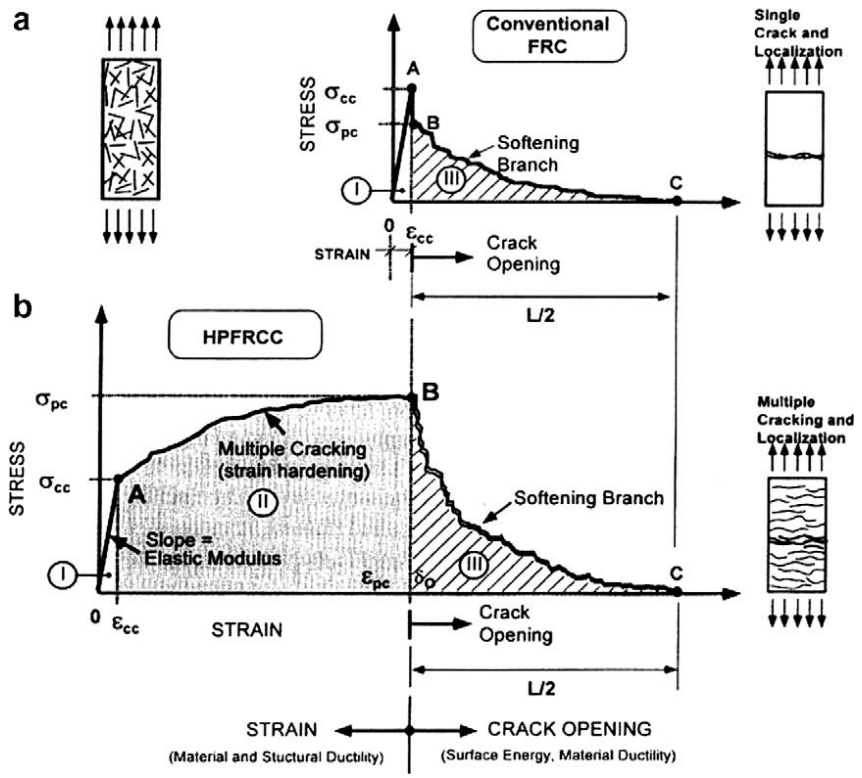


Σχήμα 11: Δομή μακριών και κοντών ινών και μηχανισμός ελέγχου επέκτασης της ρωγμής στην μάζα του σκυροδέματος (Brandt Andrzej M., 2008).



Σχήμα 12: α) Λειτουργία κοντών ινών στις μικρορωγμές, β) Λειτουργία μακριών ινών στις μεγαλύτερες ρωγμές και γ) Ρηγμάτωση (1) χωρίς ίνες και (2) με κοντές ίνες (Brandt Andrzej M., 2008).

Στα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης του **Σχήματος 13** παρουσιάζεται η επιρροή της αύξησης του ποσοστού των ινών και της αποδοτικότητάς τους στη συμπεριφορά του συμβατικού ινοπλισμένου σκυροδέματος (FRC) και του ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας (HPFRCC). Τα συμβατικά ινοπλισμένα σκυροδέματα χαρακτηρίζονται από μία αρχική αύξηση της τάσης και από μία μικρή μείωση μετά την πρώτη ρωγμή. Αντίθετα, στα σκυροδέματα όπου η ενίσχυσή τους είναι επαρκής μετά την πρώτη ρωγμή παρατηρείται αύξηση της παραμόρφωσης (strain hardening stage), η οποία συνοδεύεται από πολλαπλές μικρορωγμές και αξιοσημείωτη απορροφούμενη ενέργεια, η οποία αντιστοιχεί στην περιοχή κάτω από την καμπύλη. Μετά από αυτό το στάδιο ακολουθεί ο φθιττός κλάδος.

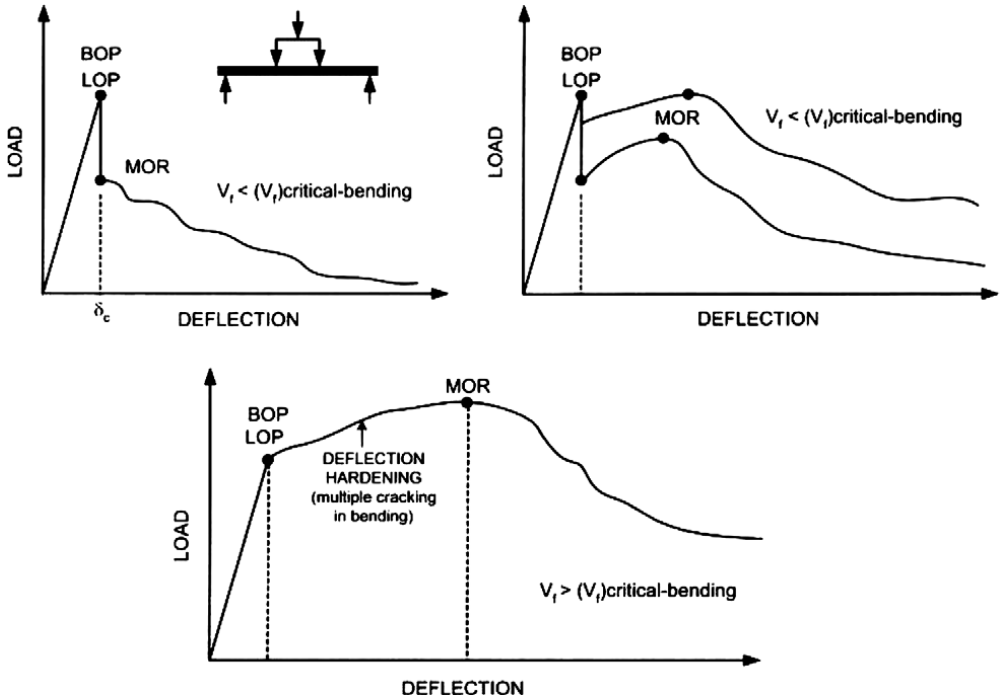


Σχήμα 13: Σύγκριση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του συμβατικού ινοπλισμένου σκυροδέματος (FRC) με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας (HPFRCC) (Brandt Andrzej M., 2008).

Στο **Σχήμα 14** φαίνεται η επιρροή της ενίσχυσης με ίνες ενός στοιχείου υπό κάμψη. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται τα αποτελέσματα του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα για δομοστατικό σχεδιασμό. Οι μεταλλικές ίνες και οι συνθετικές, πολυπροπυλενίου, υψηλής αντοχής με μήκη που κυμαίνονται από 10 έως 80 mm και διάμετρο από 0.5 έως 1.5 mm, χρησιμοποιούνται όταν η ποσότητα των ινών κ.ο. είναι μεγάλη (0.5%-2.0%) για να ενισχύσουν την αντοχή και τη δυσθραυστότητα, καθώς και για να αυξήσουν την αντοχή σε κόπωση και την ικανότητα απορρόφησης κρούσης των κατασκευαστικών στοιχείων από σκυρόδεμα.

Οι ίνες πολυπροπυλενίου, με μικρό μέτρο ελαστικότητας, έχουν δύο εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες (μέχρι 1.0 kg/m^3) για να ελέγχουν τη συστολή ξήρανσης

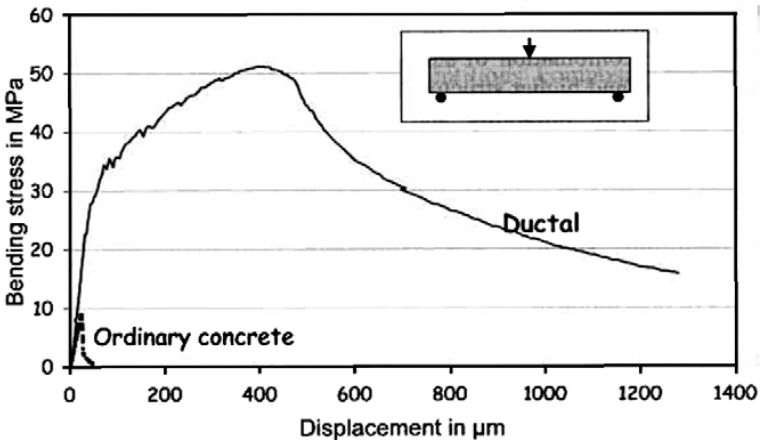
του νωπού σκυροδέματος τις πρώτες ώρες της σκυροδέτησης. Κατά την διάρκεια των πρώτων ωρών το μέτρο ελαστικότητας του νωπού σκυροδέματος είναι περίπου ίδιο με αυτό των ινών. Οι ίνες πολυπροπυλενίου χρησιμοποιούνται επίσης διάσπαρτες στην τοιχοποιϊα από σκυρόδεμα, γιατί σε περίπτωση πυρκαγιάς ή υψηλής θερμοκρασίας, λιώνουν και δημιουργούν κανάλια, τα οποία μπορεί να ανακουφίσουν το σκυρόδεμα από την εσωτερική πίεση και να καθυστερήσουν την καταστροφή του.



Σχήμα 14: Αναμενόμενα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων, τα αποτελέσματα του οποίου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα στο δομοστατικό σχεδιασμό (Brandt Andrzej M., 2008).

Engineered cementitious composites (ECC) or reactive powder concrete (RPC) ονομάζονται τα ειδικά σκυροδέματα, τα οποία έχουν πολύ υψηλή επιτελεστικότητα ακόμα και με χαμηλά ποσοστά κοντών, συνθετικών ινών (2%-5%) διασκορπισμένων στη μάζα τους. Παρασκευάζονται βάσει συγκεκριμένης σύνθεσης, που περιέχει σε υψηλό ποσοστό τσιμέντο

Portland μαζί με άλλα συνδετικά υλικά και υπερπλαστικοποιητή. Το σκυρόδεμα Ductal® αποτελεί παράδειγμα τέτοιου σκυροδέματος. Στο **Σχήμα 15** φαίνεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ενός συμβατικού σκυροδέματος και ενός σκυροδέματος Ductal® υπό κάμψη.



Σχήμα 15: Σύγκριση καμπύλης τάσης-παραμορφωσης δοκών από συμβατικό σκυρόδεμα και σκυροδέματος μεγάλης παραμορφωσιμότητας Ductal® (Brandt Andrzej M., 2008).

Τα εξαιρετικά υψηλής αντοχής σκυροδέματα (UHS) παράχθηκαν στη Γαλλία στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με τη δυνατότητα να μπορούν να αναπτύξουν θλιπτική αντοχή μέχρι 800 MPa και εφελκυστική αντοχή μέχρι 100 MPa. Στη σύνθεσή τους δεν υπάρχουν χονδρόκκοκα αδρανή και το μέγιστο μέγεθος κόκκου που διαθέτουν είναι 0.3 mm. Για τη βελτίωση της πλαστιμότητάς τους προστίθενται μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 5% κ.ο, συμπεριλαμβανομένων μικροϊνών <3 mm μήκους και άλλων συστατικών όπως για παράδειγμα πυριτική παιπάλη, χαλαζία, υπερευστοποιητές και υψηλή ποσότητα τσιμέντου Portland (μέχρι 1000 kg/m^3). Το σκυρόδεμα αυτό ονομάζεται Ductal® και παράγεται στη Γαλλία. Με εφελκυστική αντοχή 100-200 MPa χρησιμοποιείται στην κατασκευή γεφυρών και στην παραγωγή λεπτών προκατασκευασμένων στοιχείων.

Λόγω του ότι η παραμορφωσιμότητα μετά τη θραύση και η απορροφούμενη ενέργεια του σκυροδέματος αυξάνουν σημαντικά με την προσθήκη ινών, το πεδίο χρήσεως του σκυροδέματος επεκτείνεται σημαντικά και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα καθώς και σε πλέον εξειδικευμένες

χρήσεις που απαιτούν αύξηση της πλαστιμότητας (δάπεδα βαριάς χρήσης, ενίσχυση σε κρούση). Εκτός της βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων, με τη χρήση ινών (πολυπροπυλενίου) παρατηρείται και σημαντική βελτίωση της συμπεριφοράς της επικάλυψης του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (αποφυγή αποφλοίωσης).

Η χρήση των ινών στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα εφαρμόζεται ευρέως στην κατασκευή υπογείων έργων, όταν τοποθετείται ως πρώτο κέλυφος στήριξης κατά τη διάνοιξη σηράγγων καθώς και σε εργασίες στήριξης πρανών. Αποφεύγει επίσης τη πτώση κομματιών σε περίπτωση ρηγματωμένου κελύφους αφού οι ίνες ελέγχουν τη ρηγμάτωση και οπλίζουν όλη τη μάζα σκυροδέματος.

Τα λιμενικά δάπεδα που κατασκευάζονται με ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι πλέον ανταγωνιστικά λόγω του χαμηλού συνολικού κόστους κατασκευής και της αυξημένης αποδοτικότητάς τους. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ως σύνθετο υλικό με αυξημένη αντοχή σε εφελκυσμό λόγω των ινών, αντισταθμίζει την αντίστοιχη χαμηλή αντοχή και ελαστικότητα του σκυροδέματος, κάνοντας έτσι τα λιμενικά δάπεδα ανθεκτικότερα κάτω από διαβρωτικές συνθήκες.

Η κατασκευή βιομηχανικών δαπέδων με ινοπλισμένο σκυρόδεμα προσδίδει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έναντι εκείνων με το συμβατικό οπλισμό. Η χρήση ινών χάλυβα κάνει τη ρηγμάτωση στα βιομηχανικά δάπεδα ελεγχόμενη έως αμελητέα. Σε αντίθεση, δάπεδα με συμβατικό οπλισμό παρουσιάζουν μεγαλύτερες σε μήκος και σε βάθος ρωγμές, με αποτέλεσμα τη μειωμένη πλαστιμότητα, η οποία αποτελεί σημαντικό παράγοντα για πλάκες και δάπεδα [Κομνηνού Ε. & Οικονόμου Π., (2015)].

1.4 Πειραματική αξιολόγηση μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος

1.4.1 Δοκιμή Barcelona

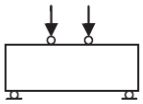
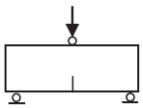
Η Δοκιμή Barcelona αποδείχθηκε αξιόπιστη για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο του ινοπλισμένου σκυροδέματος, καθώς προσφέρει αποτελέσματα με μικρότερη διασπορά από εκείνα που λαμβάνονται από άλλες δοκιμές. Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η επίδραση των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου 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 τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**.

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 στη συγκέντρωση των ινών στο τμήμα που εμφανίζεται η ρωγμή.

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά πρότυπων δοκιμών για τη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013).

Standard		Test set up	Specimen dimension (mm × mm × mm)	Main parameters to characterize FRC
ASTM C-1018			100 × 100 × 350	First crack strength Toughness index
ASTM C-1609				Residual strength
				Toughness
NBN 15-238			150 × 150 × 600	Energy absorbed Equivalent flexural strength
UNE 83-510-89			$d/b < 1{,}5$; $l = 3d$	Energy adsorbed
JCI SF4	$l_f < 40$ mm		$d = b = 100$ mm $l = 3d + 80$ mm	Energy absorbed Equivalent flexural strength
	$l_f > 40$ mm		$d = b = 150$ mm $l = 3d + 80$ mm	
RILEM 162-TDF			150 × 150 × 550	Flexural strength
EN-14651				Residual load

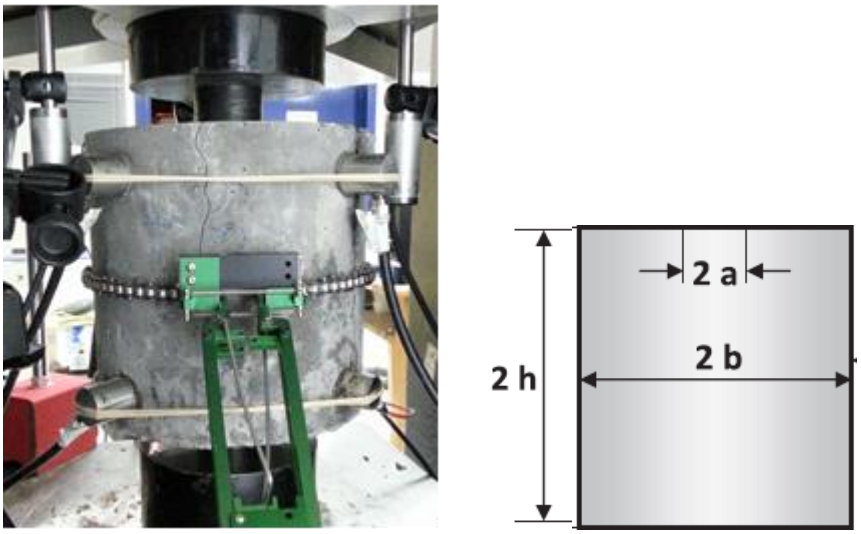
l_f = fiber length.

Τα πλεονεκτήματα της Δοκιμής Barcelona (BCN) έναντι των άλλων πρότυπων δοκιμών για την εύρεση της δυσθραυστότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η χρήση μικρών δοκιμίων με μεγάλη επιφάνεια θραύσης. Οι διαστάσεις τους είναι 150x150 mm και χυτεύονται σε τυπικούς κυλίνδρους διαστάσεων 150X300 mm. Η δοκιμή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τυπικά εργαστήρια ελέγχου ποιότητας.

Η συνολική περιμετρική παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD) μετράται από ειδικό επιμηκυνσιόμετρο το οποίο προσαρμόζεται στην περιφέρεια. Η συσκευή αυτή λόγω του υψηλού κόστους, δε συναντάται συχνά στα εργαστήρια. Για το σκοπό αυτό ο Carmona προκειμένου να γενικευθεί η χρήση της δοκιμής BCN πρότεινε μια σχέση μεταξύ της ενέργειας που προσδιορίζεται από τη συνολική περιμετρική παραμόρφωση και τη δυσθραυστότητα που υπολογίζεται βάσει της μέσης τιμής της αξονικής μετατόπισης που προκαλείται μεταξύ των φορτιζόμενων δίσκων της πρέσσας.

Βάσει μελετών έχουν βρεθεί κάποιοι δείκτες δυσθραυστότητας, μέσω των οποίων ποσοτικοποιείται η επίδραση των ινών στα ινοπλισμένα σκυροδέματα μετά τη ρηγμάτωση.

Η δοκιμή BCN είναι μια δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού που βασίζεται στη δοκιμή διπλής διάτρησης, η οποία προτάθηκε από τον Chen (1970). Στη δοκιμή αυτή, ένα κυλινδρικό δοκίμιο από FRC, με διάμετρο (2b) ίση με το ύψος του (2h), δηλαδή 2b/2h=1, υποβάλλεται όπως φαίνεται στο **Σχήμα 16** σε θλίψη μέσω δύο χαλύβδινων σφηνών οι οποίες τοποθετούνται στο κέντρο της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου. Η αναλογία μεταξύ των διαμέτρων των σφηνών (2α) και του δοκιμίου (2b) είναι 1:4 ή 2a/2b=0,25. Για τον προσδιορισμό της ενέργειας που διαχέεται, το εφαρμοζόμενο φορτίο και η συνολική περιμετρική παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD), η οποία μετράται στο ήμισυ του ύψους του, πρέπει να καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 16: Τοποθέτηση χαλύβδινων σφηνών στο δοκίμιο.

Το φορτίο που ασκείται από τις σφήνες στον κύλινδρο κατά τη διάρκεια της δοκιμής παράγει ένα κώνο υπό τριαξονική ένταση, ο οποίος αυξάνει τη 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 στο συμπιεσμένο κώνο να μετατοπιστεί σημαντικά στο εσωτερικό του κυλίνδρου, αυξάνοντας την ακτίνα του κυλίνδρου και ευνοώντας την εμφάνιση μιας, δύο ή περισσότερων ρωγμών. Στο **Σχήμα 17** φαίνονται η ρηγμάτωση στην τελική κατάσταση του δοκιμίου: δύο ευθυγραμμισμένες ρωγμές, τρεις ρωγμές σε απόσταση 120 μοιρών η μία από την άλλη ή τέσσερις κάθετες ρωγμές.

Σχήμα 17: Απεικόνιση των ρωγμών που προκαλούνται στα κυλινδρικά δοκίμια (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013).

Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, πριν εμφανιστεί το μέγιστο φορτίο, η περιμετρική παραμόρφωση είναι αμελητέα. Όταν σχηματιστούν οι ρωγμές, η μετρούμενη περιμετρική παραμόρφωση αντιστοιχεί στη συνολική παραμόρφωση μετά τη ρηγμάτωση (TCOD), και η ενέργεια που απορροφάται 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 3**.

$$E(TCOD) = \int_0^{TCOD} P(TCOD)d(TCOD) \quad \textbf{(3)}$$

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

Η ενέργεια που υπολογίζεται από την **Εξίσωση 3** δείχνει την επίδραση των ινών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Λαμβάνει υπόψη της την απόκριση του FRC μόνο στη ρηγματωμένη κατάσταση και περιλαμβάνει την ενέργεια που απορροφήθηκε 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 τη δυσθραυστότητα που καθορίζεται από τη 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 ποιοτικό έλεγχο του FRC, όσο και κατά το δομοστατικό σχεδιασμό.

Η παραμένουσα αντοχή, f_{ctRx}, και το φορτίο που αντιστοιχεί σε μία δεδομένη περιμετρική παραμόρφωση R_x, υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο UNE 83-515 με την **Εξίσωση 4**.

$$f_{ctRx} = \frac{4P_{Rx}}{9\pi ah} \quad \textbf{(4)}$$

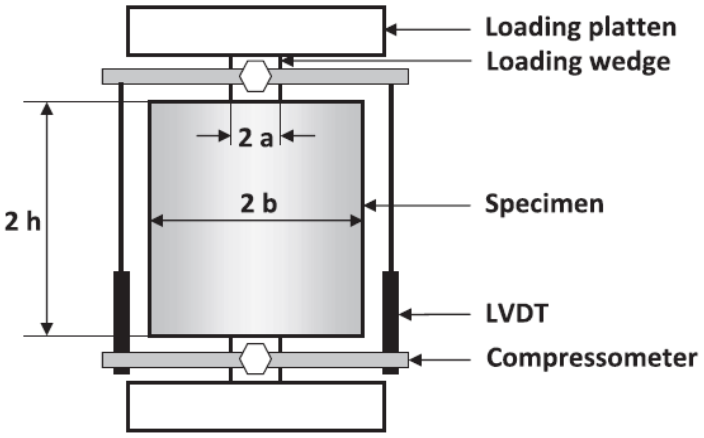
όπου P_{Rx} είναι το φορτίο που αντιστοιχεί στη συνολική περιμετρική παραμόρφωση R_x. Επεκτείνοντας αυτόν τον ορισμό στις αξονικές μετατοπίσεις, η P_{Rx} μπορεί να οριστεί ως το φορτίο που αντιστοιχεί σε μία αξονική μετατόπιση $\delta_{A\chi}$ στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μετά τη ρηγμάτωση. Χρησιμοποιώντας πλέον την **Εξίσωση 4** με τη νέα $P_{\delta x}$, 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 την αξονική μετατόπιση που προκαλείται από τις φορτιζόμενες σφήνες. Για το σκοπό αυτό, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 18**, τρία LVDTs στερεώνονται στις φορτιζόμενες σφήνες μιας πρέσσας. Η δυσθραυστότητα συσχετίζεται με την ικανότητα του FRC να απορροφά ενέργεια κατά τη ρηγμάτωση και υπολογίζεται σύμφωνα με την **Εξίσωση 5**.

$$T(\delta_A) = \int_0^{\delta_A} P(\delta) d(\delta) \quad \textbf{(5)}$$

όπου P (δ) είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο, για το οποίο λαμβάνεται για αξονική μετατόπιση δ, μετά τη ρηγμάτωση.

Με την **Εξίσωση 5** υπολογίζεται η δυσθραυστότητα του FRC. Ωστόσο, επειδή η δοκιμή BCN λαμβάνει υπόψη της τη συμπεριφορά του FRC μόνο μετά τη ρηγμάτωση, η μετατόπιση λαμβάνεται υπόψη μετά από το μέγιστο φορτίο.



Σχήμα 18: Διάταξη δοκιμής 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 αντοχή της πρώτης κορυφής ορίζεται από το πρότυπο UNE 83-515 με την **Εξίσωση 6**.

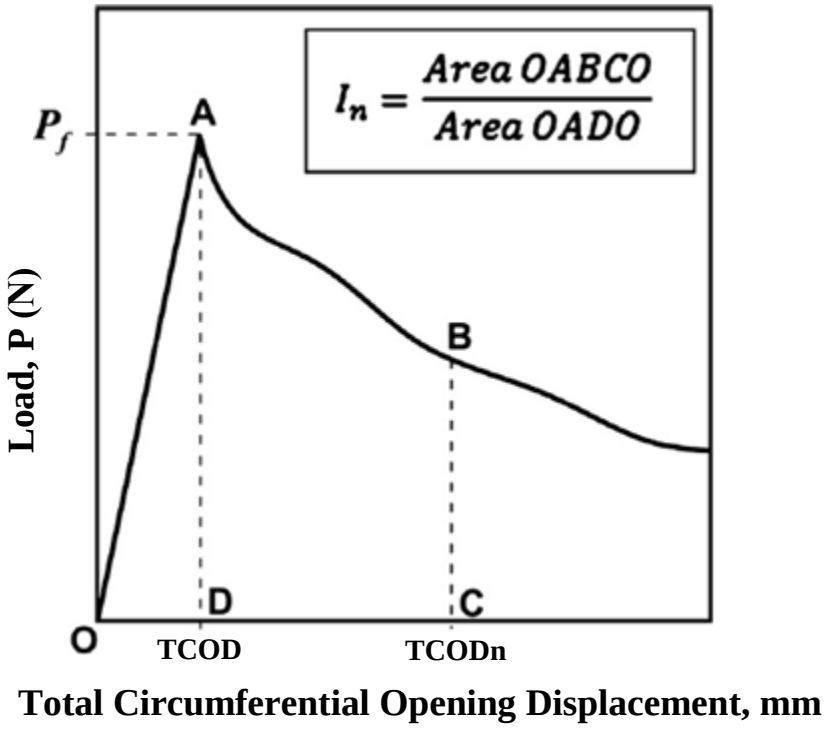
$$f_{ct} = \frac{4P_f}{9\pi a h} \qquad \textbf{(6)}$$

όπου α είναι η διάμετρος της σφήνας και h το ύψος του δοκιμίου.

Όπως είναι γνωστό, στο πρότυπο ASTM C-1018, μέσω της δοκιμής κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων, ορίζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας, οι οποίοι είναι αδιάστατα μεγέθη, με σκοπό να αποτυπωθεί πόσο μεγαλύτερη είναι η δυσθραυστότητα που αναπτύσσει το ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε σχέση με το άοπλο. Ο ορισμός των συγκεκριμένων δεικτών δυσθραυστότητας εφαρμόζεται εκτός από τη 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. Έτσι και στην παρούσα

διπλωματική εργασία, υπολογίζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας ινοπλισμένου σκυροδέματος που ορίζονται στο πρότυπο ASTM C-1018, μέσω της δοκιμής Barcelona.

Ο δείκτης δυσθραυστότητας In στη Δοκιμή Barcelona, ορίζεται ως ο λόγος με αριθμητή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης (P-TCOD) μέχρι μια παραμόρφωση TCODn **(Σχήμα 19)** και παρανομαστή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης (P-TCOD) μέχρι την παραμόρφωση TCOD της πρώτης κορυφής. Όσον αφορά στην παραμόρφωση TCODn, το n είναι ένα προκαθορισμένο πολλαπλάσιο, για παράδειγμα n = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 κ.λ.π.



Σχήμα 19: Σχηματική απεικόνιση και τύπος του δείκτη δυσθραυστότητας, l_n,για τη Δοκιμή Barcelona (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013).

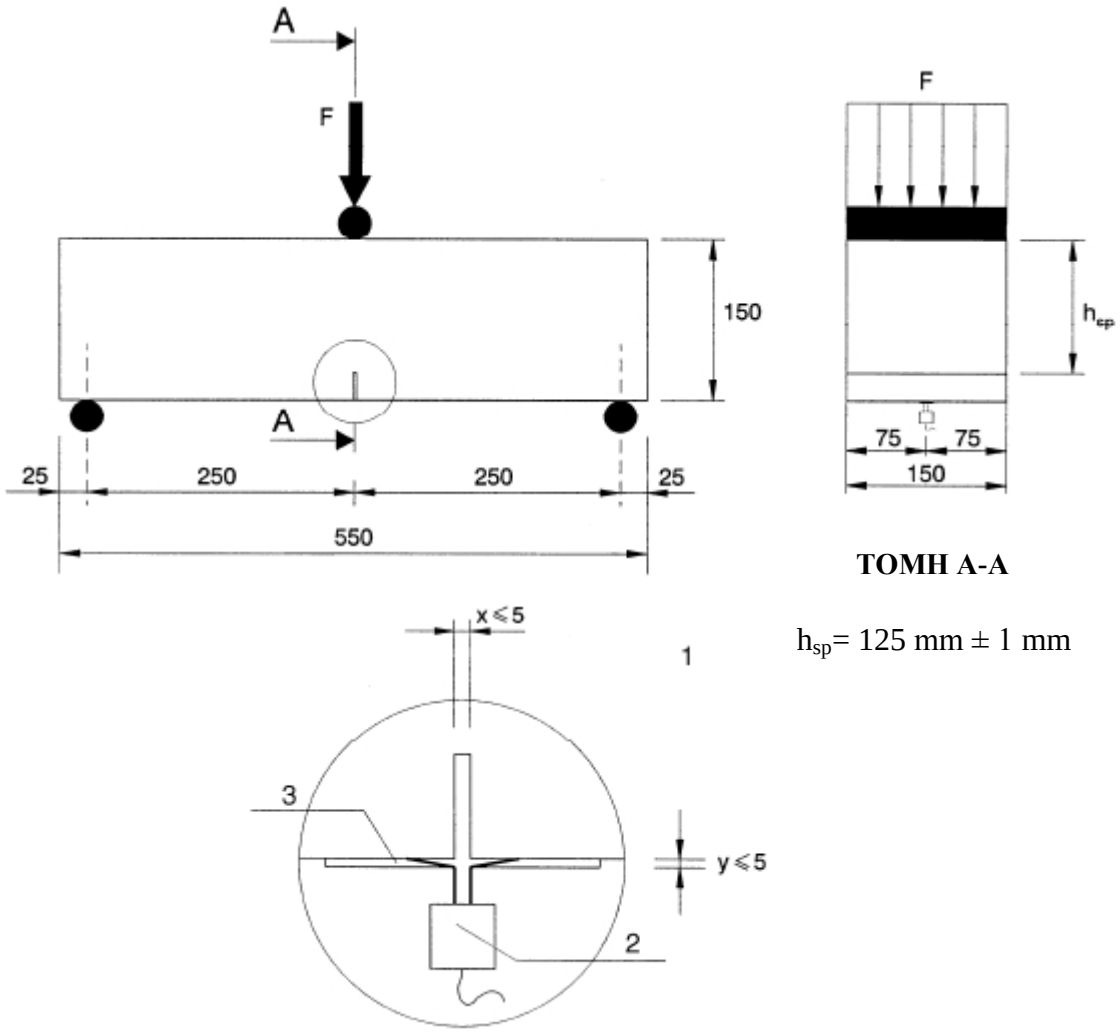
1.4.2 Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής

Η ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να απορροφά ενέργεια, έχει αναγνωριστεί ως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της προσθήκης ινών στο άοπλο σκυρόδεμα (Gopalaratnam 1995). Μία δοκός από σκυρόδεμα που περιέχει ίνες, θραύεται έπειτα από σταδιακή ανάπτυξη μίας ή πολλαπλών ρηγματώσεων με αυξανόμενο βέλος κάμψης, αλλά διατηρεί ως ένα βαθμό τη δομική ακεραιότητα και τη μετα-ρηγματική αντίσταση, ακόμα και όταν αποκτήσει αξιόλογο βέλος κάμψης. Όμοια δοκός χωρίς ίνες, θα θραυτεί απότομα σε μικρό βέλος κάμψης, με διαχωρισμό σε δύο κομμάτια (ACI 544.1R-96).

Η δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής βασίζεται στο πρότυπο EN 14651:2005+A1:2007. Στο συγκεκριμένο πρότυπο, για τον προσδιορισμό της καμπτικής εφελκυστικής αντοχης του ινοπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποιούνται παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται από την καμπύλη φορτίο-άνοιγμα ρωγμής που προκύπτει από τη φόρτιση τριών σημείων μιας απλά εδρασμένης δοκού, με εγκοπή. Αυτή η μέθοδος προτείνεται για τον προσδιορισμό του μέγιστου φορτίου καθώς και των υπόλοιπων φορτίων σε συνδυασμό με την αντίστοιχη παραμόρφωση.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390–1, είναι πρισματικά, οι διαστάσεις των οποίων φαίνονται στο **Σχήμα 20**. Σε αυτό το σχήμα και μέγεθος των προς εξέταση δοκιμίων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σκυρόδεμα με μέγιστο μέγεθος αδρανών μέχρι και τα 31.5 mm και το οποίο μπορεί να περιέχει συνθετικές ίνες με μήκος μέχρι και 60 mm.

Στην παρούσα έρευνα, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι πρισματικά αλλά οι διαστάσεις μειώθηκαν αναλογικά. Πιο συγκεκριμένα οι διαστάσεις σε mm είναι 500*100*100 (μήκος, ύψος, βάθος). Το μέγιστο μέγεθος αδρανών, ήταν επίσης μικρότερο (16 mm). Το άνοιγμα φόρτισης που προκύπτει για αυτές τις διαστάσεις δοκιμίων, είναι τα 300 mm. Το βάθος και το πλάτος της εγκοπής είναι 16.67 mm και 4 mm αντίστοιχα. Το δοκίμιο τοποθετείται κατάλληλα στο πλαίσιο, ώστε να φορτίζεται κάθετα ως προς τη διεύθυνση της σκυροδέτησης. Στο **Σχήμα 20** φαίνονται οι διαστάσεις των δοκιμίων καθώς και η γεωμετρία της διάταξης κατά τη δοκιμή φόρτισης.



Σχήμα 20: Δοκίμιο και πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας σύμφωνα με το πρότυπο EN 14651:2005+A1:2007.

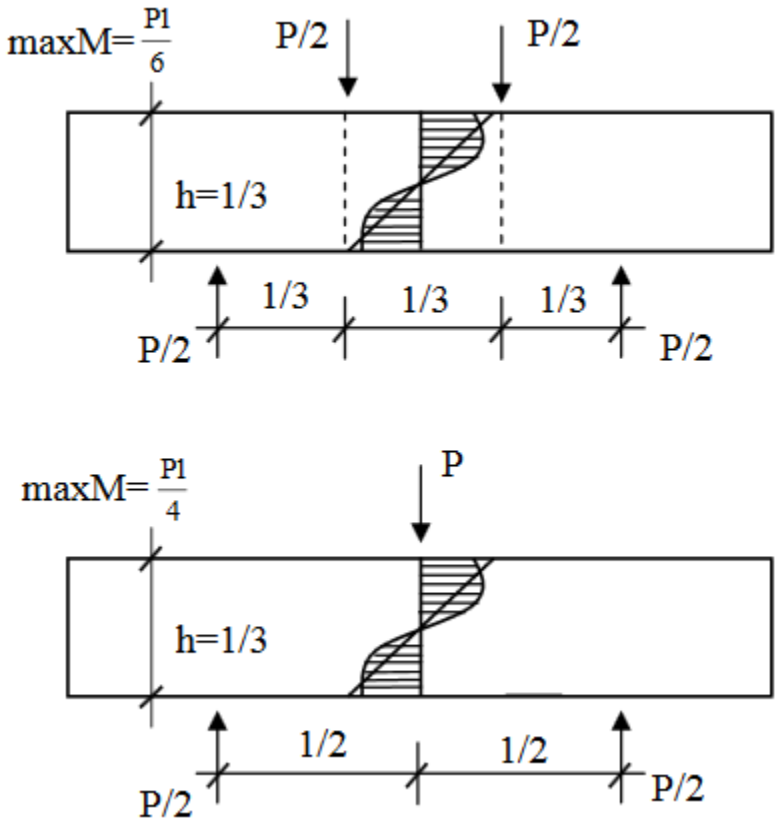
Στη δοκιμή κάμψης [Κωτσοβός Μ.Δ.], πρισματικά δοκίμια-δοκοί με διατομή 150x150 (mm x mm) και μήκος 600 mm ή 700 mm στηρίζονται αμφιέρειστα και επιπονούνται καμπτικά

με ένα ή δύο θλιπτικά φορτία στο μέσον ή στα τρίτα, αντίστοιχα, του ανοίγματος (**Σχήμα 21**). Λόγω της επιβαλλόμενης καμπτικής επιπόνησης αναπτύσσονται ορθές τάσεις καθ' ύψος της εγκάρσιας διατομής της δοκού, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 21** με μέγεθος στις ακραίες ίνες ίσο με σ=M/W. Όταν με την αύξηση του φορτίου η εφελκυστική τάση σ φθάσει την οριακή τιμή της, η δοκός θραύεται στη μεσαία διατομή. Η μέγιστη αυτη τιμή $f_{ct,fl}$ της εφελκυστικής τάσης, οριζόμενη ως αντοχή σε καμπτικό εφελκυσμό, δίνεται από την **Εξίσωση 7**.

$$f_{ct,fl} = \sigma = Mmax/W \qquad \textbf{(7)}$$

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

Η τιμή που προκύπτει απο την **Εξίσωση 7** είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη τιμή σε άμεσο εφελκυσμό. Από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι $f_{ct}\approx 0.5f_{ct,fl}$.



Σχήμα 21: Γεωμετρία δοκιμίων προσδιορισμού Καμπτικής Εφελκυστικής αντοχής 3 και 4 σημείων (Κωτσοβός Μ.Δ, 2010).

Με τη συγκεκριμένη δοκιμή μελετάται η μετελαστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος και μετράται η παραμένουσα παραμόρφωση. Για να επιτευχθεί αυτό, ο ρυθμός φόρτισης είναι πολύ αργός και συγκεκριμένα ορίζεται από το πρότυπο ότι το άνοιγμα ρωγμής θα πρέπει να αυξάνεται με ρυθμό 0.05 mm ανά λεπτό, για δοκίμια 500*150*150 (mm). Η τιμή της παραμένουσας αντοχής προκύπτει από την **Εξίσωση 8**.

$$f=3FL/(2b(h_{sp}^2)), \quad \textbf{(8)}$$

όπου:

F (N) το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο

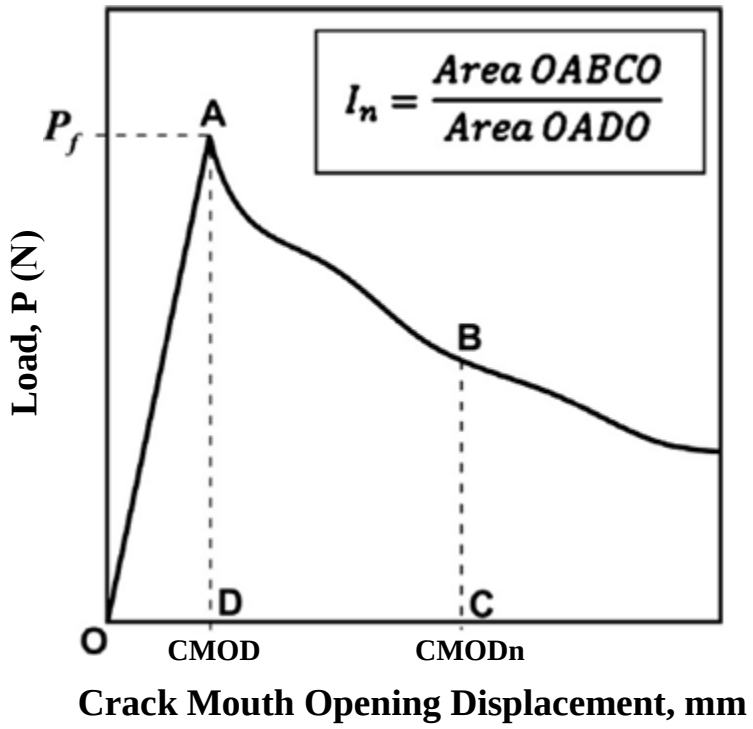
L (mm) το μήκος κάμψης του δοκιμίου,

b (mm) το πλάτος της διατομής και

h_{sp} (mm) το καθαρό ύψος της διατομής.

Ο ρυθμός φόρτισης επιβάλλεται να είναι τόσο αργός καθώς σκοπός της δοκιμής είναι να προσδιορίσει την παραμένουσα παραμόρφωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος και την ικανότητά του να απορροφά ενέργεια. Η απορροφούμενη ενέργεια ισοδυναμεί με τη δυσθραυστότητα (In), η οποία υπολογίζεται στο τέλος του πειράματος. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν το άνοιγμα της ρωγμής (CMOD) ξεπεράσει τα 3.5 mm έτσι ώστε να μπορούν να υπολογισθούν η μέγιστη καμπτική εφελκυστική αντοχή, καθώς και η παραμένουσα αντοχή.

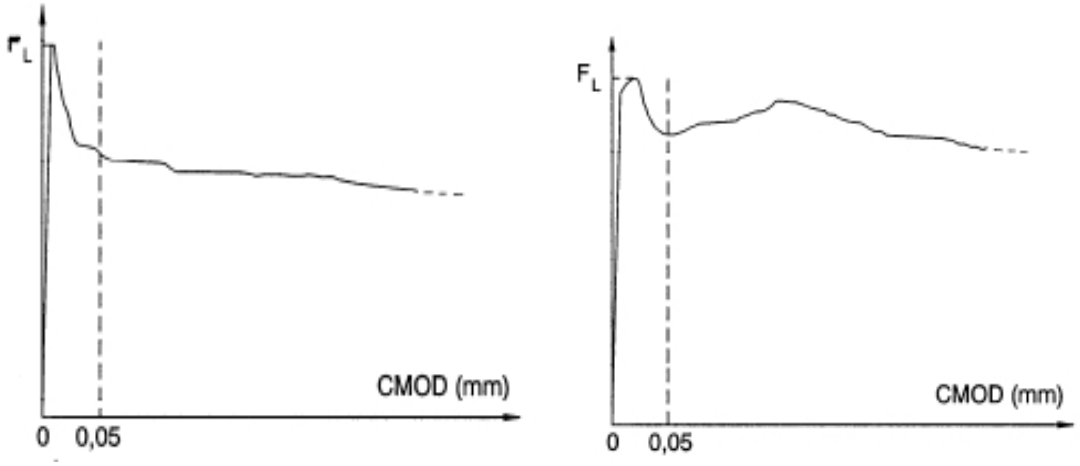
Ο δείκτης δυσθραυστότητας In στη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, ορίζεται ως ο λόγος με αριθμητή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης (P-CMOD) μέχρι μια παραμόρφωση CMODn **(Σχήμα 22)** και παρονομαστή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης (P-CMOD) μέχρι την παραμόρφωση CMOD της πρώτης κορυφής. Όσον αφορά στη παραμόρφωση CMODn, το n είναι ένα προκαθορισμένο πολλαπλάσιο, για παράδειγμα n = 0.5, 1.5, 2.5, 3.5 κ.λ.π.



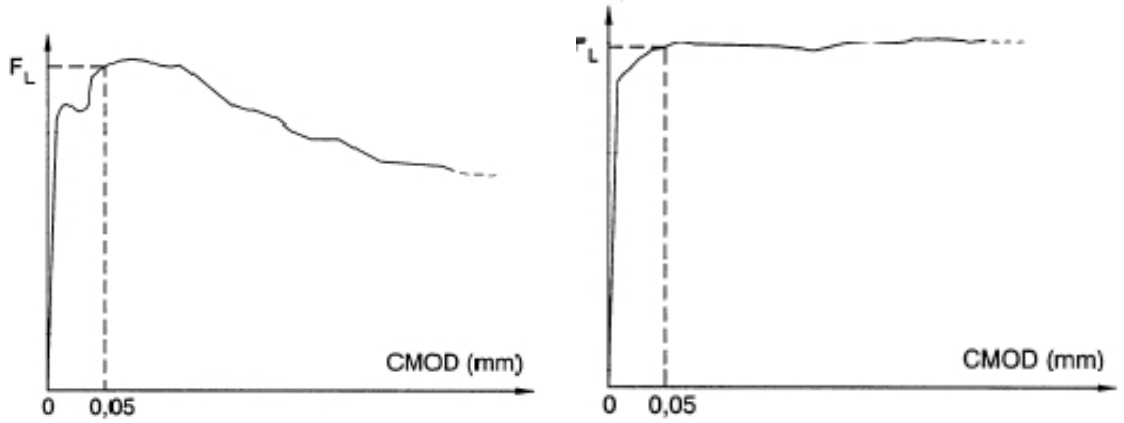
Σχήμα 22: Σχηματική απεικόνιση και τύπος του δείκτη δυσθραυστότητας, l_n, για τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013).

Στο πρότυπο διακρίνονται δυο περιπτώσεις που περιγράφουν την καμπύλη φορτίου-ανοίγματος ρωγμής. Η πρώτη περίπτωση είναι αυτή που απεικονίζεται στο **Σχήμα 23$^{\alpha}$**. Το χαρακτηριστικό της είναι ότι το πρώτο μέγιστο φορτίο ταυτίζεται με το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου (First-Peak Load Equal to Peak-Load) και εμφανίζεται πριν το άνοιγμα της ρωγμής ξεπεράσει τα 0.05 mm.

Η δεύτερη περίπτωση απεικονίζεται στο **Σχήμα 23$^{\beta}$**. Στη δεύτερη περίπτωση το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου δε συμπίπτει με το πρώτο μέγιστο φορτίο, πριν το άνοιγμα της ρωγμής ξεπεράσει τα 0.05 mm. Τότε σα μέγιστο φορτίο ορίζεται το φορτίο που αντιστοιχεί σε άνοιγμα ρωγμής 0.05 mm. Αυτή η περίπτωση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς δείχνει πως το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να ανακτήσει την αντοχή του μετά την πρώτη αστοχία και να οδηγηθεί σε αστοχία για μεγαλύτερο από το αρχικό φορτίο.



Σχήμα 23^{α}: Διαγράμματα Φορτίου-Ανοίγματος ρωγμής όταν η φέρουσα ικανότητα ορίζεται από την τιμή του πρώτου μέγιστου φορτίου (EN 14651:2005+A1:2007).



Σχήμα 23^{β}: Διαγράμματα Φορτίου-Ανοίγματος ρωγμής όταν η φέρουσα ικανότητα δεν ορίζεται από την τιμή του πρώτου μέγιστου φορτίου. (EN 14651:2005+A1:2007)

1.5 Θερμική καταπόνηση ινοπλισμένου σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα αποτελεί ιδανικό δομικό υλικό προκειμένου το δόμημα να έχει τη μεγαλύτερη αντίσταση και την καλύτερη δυνατή απόκριση σε περίπτωση πυρκαγιάς. Σα δομικό υλικό δεν προσθέτει καύσιμη ύλη στο πυροφορτίο ενώ παρέχει, χωρίς την πρόσθετη χρήση

άλλων προστατευτικών υλικών, την απαραίτητη πυροπροστασία και θερμοκρασιακή μόνωση. Έτσι, εμποδίζει τη διάδοση της πυρκαγιάς μεταξύ των πυροδιαμερισμάτων και εξασφαλίζει την ακεραιότητα του δομήματος και συνεπώς οδούς διαφυγής. Σε σύγκριση με άλλα δομικά υλικά, η χρήση του σκυροδέματος παρέχει εύκολα, αξιόπιστα και οικονομικά μια αποτελεσματική πυροπροστασία της κατασκευής.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 13501-1 (2002), κατά το οποίο ταξινομούνται δομικά υλικά και στοιχεία όσον αφορά στην αντοχή τους σε πυρκαγιά, τόσο το σκυρόδεμα, όσο και τα επί μέρους υλικά που το αποτελούν, ταξινομούνται στην ανώτατη προβλεπόμενη κατηγορία, A1: «υλικά που δεν καίγονται στις θερμοκρασίες που εμφανίζονται συνήθως στην πυρκαγιά».

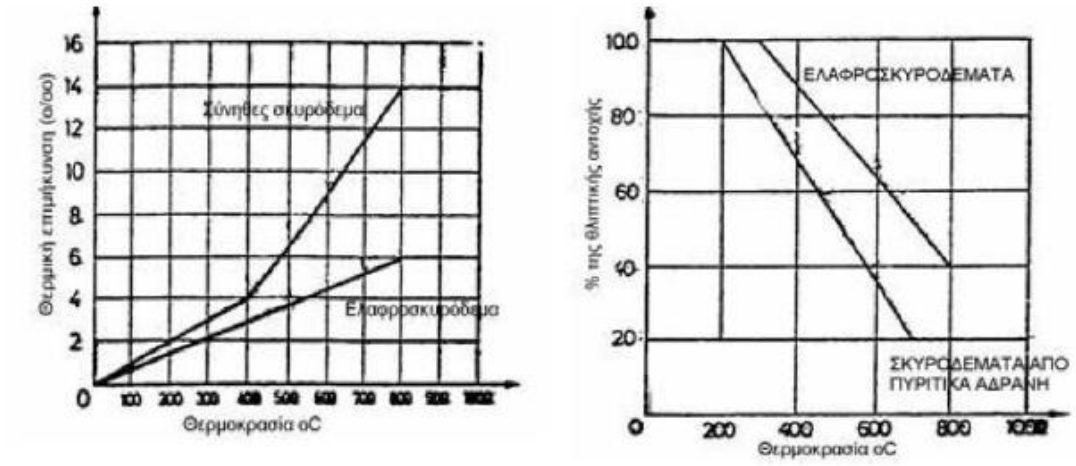
Σε ό,τι αφορά το σκυρόδεμα, οι ιδιότητες που αφορούν την απόκριση ενός μέλους σε πυρκαγιά εξαρτώνται από τη σύνθεσή του, τον τύπο των αδρανών, την περιεχόμενη υγρασία του και την ηλικία του. Συνοπτικά, η επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας στις ιδιότητες του σκυροδέματος:

- σε μικρό μόνο ποσοστό επηρεάζει την πυκνότητα του υλικού (αγνοείται η μεταφορά υγρασίας από τους πόρους που λαμβάνει χώρα κατά την πυρκαγιά) καθώς και τη θερμική αγωγιμότητά του,
- επηρεάζει την ειδική θερμότητα του υλικού, με αύξηση σε σχέση με την τιμή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος έως και 20% όταν η θερμοκρασία της μάζας φτάνει τους 1100 °C, για ασβεστολιθικά αδρανή (η αύξηση αυτή μπορεί να ξεπεράσει την παραπάνω τιμή λόγω της περιεχόμενης υγρασίας),
- μειώνει τη θλιπτική αντοχή του, όταν η θερμοκρασία του υλικού υπερβεί τους 500 °C.

Σε ό,τι αφορά το χάλυβα οπλισμού, η απόκρισή του εξαρτάται από το αν πρόκειται για χάλυβα θερμής ή ψυχρής έλασης. Ο χάλυβας, είναι περισσότερο ευαίσθητος από ότι το σκυρόδεμα στις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς επηρεάζεται (μειώνεται) τόσο η τάση διαρροής του όσο και το μέτρο ελαστικότητας του, ήδη από τους 500 °C και 300 °C, αντίστοιχα. Γι αυτό το λόγο, κατά το σχεδιασμό έναντι πυρκαγιάς (Κανονισμός Πυροπροστασίας, Ευρωκώδικας 2 Μέρος 1-2 EN 1992-1-2), προδιαγράφεται ,η ελάχιστη επικάλυψη του οπλισμού από σκυρόδεμα (αξονική απόσταση του κέντρου της ράβδου από την εκτιθέμενη επιφάνεια), για συγκεκριμένη

διάρκεια πυραντίστασης σχεδιασμού ενός μέλους, ώστε να καθυστερήσει η άνοδος της θερμοκρασίας του, αξιοποιώντας τη θερμομονωτική δράση του σκυροδέματος. Στην ίδια λογική κινείται και η μεθοδολογία ανάλυσης του δομικού στοιχείου βάσει της ισόθερμης των 500 °C (Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμού, βλ. Παρ. Β του EN 1992-1-2). [Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος].

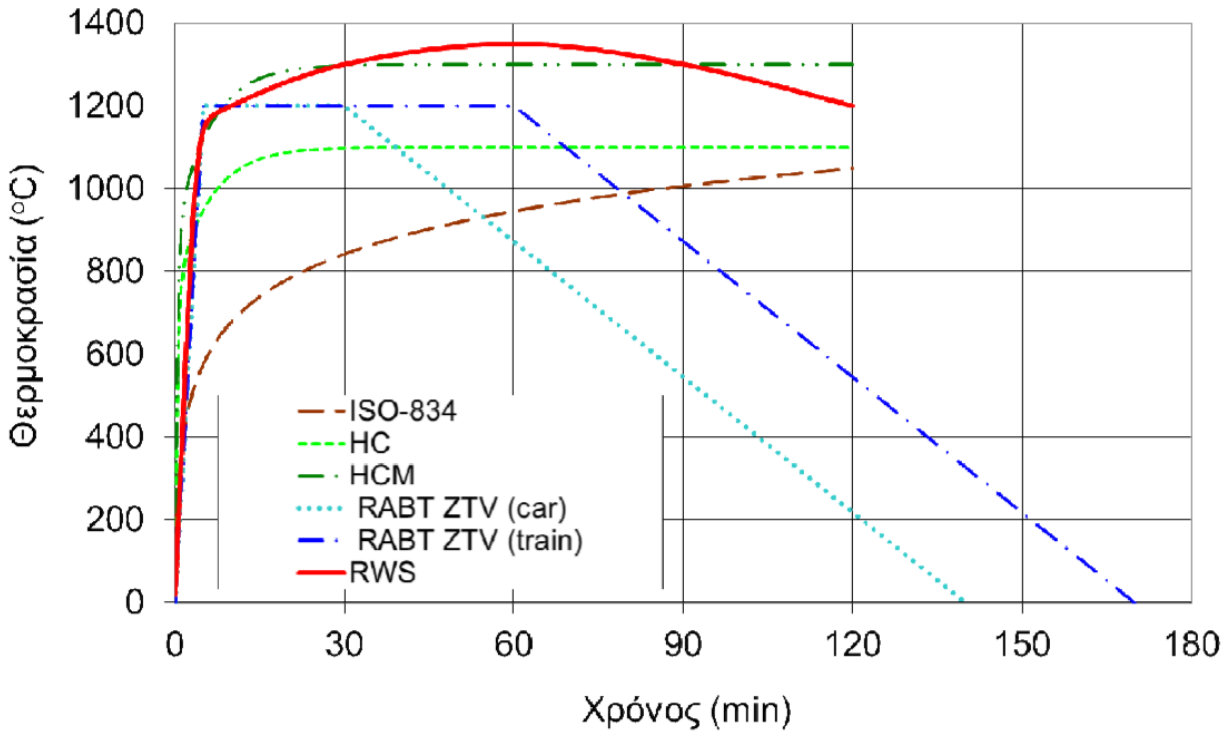
Οι ιδιότητες κάθε δομικού στοιχείου αναπτύσσονται ή υποβαθμίζονται με διαφορετικό τρόπο σε υψηλές θερμοκρασίες. Έτσι, ενώ στο συμβατικό εύρος λειτουργίας τους, τα υλικά συνεργάζονται ομαλά, στις συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, η ομαλή αυτή συνεργασία διαταράσσεται. Στο σκυρόδεμα, σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, προκαλείται μία σειρά φυσικών και χημικών διεργασιών. Η φύση αυτών των διεργασιών ποικίλει ανάλογα με τη σύνθεση του σκυροδέματος, τις αναλογίες των μιγμάτων και τις συνθήκες κατά την άνοδο της θερμοκρασίας (π.χ ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας). Ενδεικτικά, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος στους 300°C, μπορεί να ποικίλει από 60% έως 130% της θλιπτικής αντοχής του σε κανονικές θερμοκρασίες ανάλογα με τη σύνθεση του όπως παρουσιάζεται και στο **Σχήμα 24**. Μία άλλη μοναδική ιδιότητα του σκυροδέματος σε σχέση με τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία είναι η LITS (Load-Induced Thermal Strain), δηλαδή η παραμόρφωση στοιχείου υπό θερμική φόρτιση, η οποία δεν αποτελεί αναστρέψιμη παραμόρφωση, και η οποία παρουσιάζεται μόνο κατά τη διάρκεια της πρώτης φόρτισης εξαιτίας της θέρμανσης και όχι κατά την επαναθέρμανση ή ψύξη του στοιχείου. Αυτή η ιδιότητα συμβάλει στην ανακούφιση του στοιχείου από τις θερμικές τάσεις. Η θερμική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας για θερμοκρασίες άνω των 600 °C ενώ μειώνεται στο ήμισυ για θερμοκρασίες κάτω από 600 °C. Γενικά από έρευνες προκύπτει ότι σκυροδέματα που αποτελούνται από τσιμέντο τύπου Portland, δεν μπορούν να φέρουν συνεχές φορτίο σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600 °C. Το σκυρόδεμα έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα με αποτέλεσμα να ξεπερνά αυτή τη θερμοκρασία μόνο επιφανειακά και το υπόλοιπο να προστατεύεται, εκτός από την περίπτωση που θα γίνει αποκόλληση σκυροδέματος [Γιατζίδης Γ., (2014)].



Σχήμα 24: Θερμική διαστολή και μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος με συμβατικά και ελαφρά αδρανή.

Τα τελευταία χρόνια μία μεγάλη έρευνα έχει λάβει χώρα σε διεθνές επίπεδο για να διαπιστωθεί το είδος της πυρκαγιάς που θα μπορούσε να συμβεί σε μία σήραγγα και γενικότερα σε υπόγειους χώρους. Η έρευνα έλαβε χώρα σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιάς σε εγκαταλελειμμένες σήραγγες αλλά και σε εργαστηριακή κλίμακα. Βάσει των δεδομένων που ελήφθησαν από τα πειράματα αναπτύχθηκε μία σειρά από καμπύλες χρόνου / θερμοκρασίας οι οποίες προστέθηκαν στις ήδη υπάρχουσες και χρησιμοποιούνται πλέον για την εκτίμηση και αξιολόγηση διαφόρων υλικών παθητικής πυροπροστασίας. Διακρίνονται οι εξής έξι πρότυπες καμπύλες ανάπτυξης θερμοκρασίας T σε °C, με το χρόνο t σε min (**Σχήμα 25**):

- καμπύλη φορτίου πυρκαγιάς RWS
- καμπύλη ISO (ISO-834)
- καμπύλη υδρογονανθράκων (HC)
- τροποποιημένη καμπύλη υδρογονανθράκων (HCM)
- καμπύλες RABT και ZTV



Σχήμα 25: Πρότυπες θερμοκρασιακές καμπύλες θερμοκρασίας - χρόνου σε συνθήκες πυρκαγιάς (Σακκάς Κ. Μ., (2014)).

1.6 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.6.1 Μέτρο Ελαστικότητας και Λόγος Poisson

Οι **Ozger O.B., et al. (2013)** μελέτησαν πως επιδρούν οι ίνες από νάιλον στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, επικεντρώθηκαν στην παραγωγή σκυροδέματος για τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας και μελέτησαν πώς επιδρούν οι ίνες πολυαμιδίου στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Οι ίνες πολυαμιδίου που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από ανακυκλώσιμα υλικά καθώς προέρχονταν από χρησιμοποιημένα χαλιά.

Οι ερευνητές επέλεξαν για τις συνθέσεις τους να χρησιμοποιήσουν ίνες σε περιεκτικότητα 5 kg/m^3 και λόγο N/T=0.35. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων οι μελετητές χρησιμοποίησαν ως αναφορά δοκίμια άοπλου σκυροδέματος. Οι τιμές που προέκυψαν για το μέτρο ελαστικότητας ήταν 36±2 (GPa) για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ για το άοπλο 37±1

(GPa). Όπως ανέφεραν και οι ίδιοι, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος παρουσίασε μια μικρή μείωση με την προσθήκη των ινών.

Οι **Noushini A., et al. (2013)** μελέτησαν τα μηχανικά χαρακτηριστικά ινοπλισμένου σκυροδέματος με την ιδιαιτερότητα ότι οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν δεν είχαν επικάλυψη πολυβινυλικής αλκοόλης (PVA fibers). Προστέθηκαν ίνες σε ποσοστό 0.25% και 0.50% κατ' όγκο, με μήκος 6 mm και 12 mm και διάμετρο 0.014 mm. Οι αναλογία διαστάσεων μήκους προς διάμετρο των ινών ήταν 428 και 857, αντίστοιχα. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το στατικό και δυναμικό μέτρο ελαστικότητας και ο συντελεστής απόσβεσης.

Από τις δοκιμές που προέκυψαν παρατηρήθηκε ότι οι ίνες PVA δεν επηρέασαν σημαντικά το στατικό μέτρο ελαστικότητας παρά τις διακυμάνσεις στα αποτελέσματα. Σύμφωνα με τους ερευνητές, κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο λόγω του μικρού ποσοστού συμμετοχής των ινών στις συνθέσεις γεγονός που επιβεβαιώνεται και από άλλες ερευνητικές εργασίες. Αναφέρεται επίσης ότι γενικά η προσθήκη ινών μειώνει το στατικό μέτρο ελαστικότητας, ενώ για το ίδιο ποσοστό ινών οι πιο μακριές ίνες οδηγούν σε επιπλέον μείωση του μέτρου ελαστικότητας.

Συγκρίνοντας το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας με το στατικό για την ίδια σύνθεση και ηλικία σκυροδέματος, καταγράφεται υψηλό ποσοστό συσχέτισης μεταξύ των αποτελεσμάτων. Και στις δυο περιπτώσεις οι τιμές ακολουθούν την ίδια τάση, με τις τιμές του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας να είναι λίγο υψηλότερες. Σύμφωνα και με το πρότυπο ASTM C215 το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι γενικά μεγαλύτερο από το στατικό, κάτι το οποίο εξαρτάται και από την αντοχή του σκυροδέματος.

Οι **Aslani F. and Nejadi S. (2013)** μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Στις συνθέσεις των δοκιμίων χρησιμοποίησαν μεταλλικές ίνες με την ονομασία Dramix RC-80/60-BN και ίνες πολυπροπυλενίου με την ονομασία Synmix 65. Για τις ανάγκες της έρευνας υλοποιήθηκαν τρείς διαφορετικές συνθέσεις στις οποίες η περιεκτικότητα σε ίνες ήταν για τις μεταλλικές 30 kg/m3, για τις ίνες πολυπροπυλενίου 5kg/m3, ενώ η τρίτη σύνθεση περιείχε και από τα δύο είδη ινών (μεταλλικές 15kg/m3, πολυπροπυλενίου 3kg/m3). Οι μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος ελέγθηκαν σε ηλικία 3, 7, 14, 28, 56 και 91 ημερών προκειμένου να υπάρχει μια ολοκληρωμένη άποψη για την πρόοδο των χαρακτηριστικών του υλικού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας για το υβριδικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα ήταν κατά 2%, 4% και 3% υψηλότερη από την αντίστοιχη του άοπλου σκυροδέματος, του σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες και του σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου. Επιπλέον, στις 14 ημέρες, η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας του άοπλου σκυροδέματος ήταν κάτα 9%, 8% και 3% υψηλότερη από τη μέση τιμή του Ε για το οπλισμένο με μεταλλικές ίνες, με ίνες πολυπροπυλενίου και το υβριδικά οπλισμένο σκυρόδεμα, αντίστοιχα.

Οι **Yoo D., et al. (2013)** μελέτησαν ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπέρ-υψηλής αντοχής με μίκρο-μεταλλικές ίνες. Σκοπός τους ήταν να διερευνήσουν τις ιδιότητες του υλικού καθώς και τη συνάφεια που αναπτύσσεται μεταξύ των ινών και του σκυροδέματος. Στις συνθέσεις τους χρησιμοποίησαν μεταλλικές ίνες με μήκος 13 mm, διάμετρο 0.2 mm και αναλογία διαστάσεων 65. Κατασκεύασαν τέσσερις διαφορετικές συνθέσεις στις οποίες το ποσοστό των ινών ήταν 1%, 2%, 3% και 4% κατ' όγκο αντίστοιχα.

Για να υπολογίσουν το μέτρο ελαστικότητας των υλικών χρησιμοποίησαν την **Εξίσωση 9**.

$$Ec = \frac{0.4xfc' - fc1}{\varepsilon 2 - 0.00005} \qquad \textbf{(9)}$$

Όπου fc΄ είναι η θλιπτική αντοχή, fc1 είναι η τάση που αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση 50 με και ε2 η αξονική παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε τάση ίση με 40% της fc΄.

Λαμβάνοντας τα απαραίτητα δεδομένα από το διάγραμμα σ-ε, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C469M. Οι τιμές που προέκυψαν κυμαίνονται από 46 έως 56 GPa, με την αντοχή να κυμαίνεται από 184 έως 215 MPa.

Σύμφωνα με τους ερευνητές, στη σύνθεση με περιεκτικότητα σε ίνες 3% κατ' όγκο εκτιμήθηκε το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας και γενικότερα καταγράφηκαν τα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά. Η σύνθεση με περιεκτικότητα ινών 4% κ.ο. παρουσίασε μείωση του μέτρου ελαστικότητας και γενικότερα αλλοίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών.

Οι **Rostasy F.S. and Hartwitch K., (1985)** διερεύνησαν πως ο υψηλός ρυθμός επιβαλλόμενης μετατόπισης επηρεάζει τη θλιπτική αντοχή και την παραμορφωσιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν δυο είδη μεταλλικών ινών

(ευθύγραμμες και με άγκιστρο στο τέλος) σε ποσοστό 0.75% και 1.50% κατ' όγκο και για τις δυο περιπτώσεις. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε μονοαξονική και έκκεντρη φόρτιση ενώ έγιναν στατικές και δυναμικές φορτίσεις.

Στις δυναμικές φορτίσεις παρατηρήθηκε αύξηση της αντοχής των δοκιμίων κατά 20% ανεξάρτητα από το ποσοστό και το είδος των ινών. Όσον αφορά το μέτρο ελαστικότητας, υπολογίστηκε στην μονοαξονική φόρτιση από το διάγραμμα σ-ε στην περιοχή μεταξύ του 0.2fc και 0.7fc (όπου fc η αντοχή του σκυροδέματος). Σύμφωνα με τους ερευνητές, το μέτρο ελαστικότητας επηρεάστηκε λιγότερο από τον υψηλό ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης συγκριτικά με τη θλιπτική αντοχή.

1.6.2 Δοκιμή Barcelona

Το 2012 οι **Carmona Malatesta Sergio, Aguado de Cea Antonio και Borrell Climent Molins** προκειμένου να διευρύνουν την εφαρμογή της δοκιμής Barcelona για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται κατά την αξονική και την ακτινική διεύθυνση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ινών, μεταλλικές με αγκύρια και συνθετικές με ένα ορθογωνικό τμήμα με πτυχώσεις στις άκρες τους. Οι αναλογίες ανάμιξης ήταν 0.25%, 0.50% και 0.75% κ.ο. για τις χαλύβδινες και 0.13%, 0.26% και 0.39% κ.ο. για τις συνθετικές. Χρησιμοποιήθηκαν κύλινδροι 150x150 (χιλιοστά) για τα σκυροδέματα με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 0.25% και 0.50% (SFRC-25 και SFRC-50). Για τα υπόλοιπα χρησιμοποιήθηκαν κύλινδροι των 150x300 (mm), όπου πριν τη δοκιμή κοπήκαν στο μισό του ύψους τους. Αυτό είχε ως συνέπεια, στα δοκίμια που χητεύθηκαν σε διαστάσεις 150x150, η ρηγμάτωση να εμφανιστεί μόνο στην επιφάνεια φόρτισης, ενώ στα δοκίμια που κόπηκαν ώστε να είναι 150x150 οι ρωγμές εμφανίστηκαν τυχαία σε όλη την κομμένη επιφάνεια, πέρα και από τα όρια της επιφάνειας φόρτισης.

Παρατηρείται ότι με την αύξηση της περιεκτικότητας των ινών η ακαμψία του FRC ελαφρώς μειώνεται, ενώ η αξονική παραμόρφωση, που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο της πρώτης κορυφής, αυξάνεται. Αυτό ήταν αναμενόμενο, γιατί όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των ινών, τόσο αυξάνεται το φορτίο, καθώς οι μικρορωγμές δε διαδίδονται στη μάζα του

σκυροδέματος. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάστηκε τόσο στις συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες, όσο και στις συνθέσεις με τις συνθετικές ίνες.

Ο συντελεστής διακύμανσης των μετρήσεων (cv%) ήταν μικρότερος του 11% για τις συνθέσεις SFRC-25 και SFRC-50, ενώ για τη σύνθεση SFRC-75 ήταν cv=16.5%. Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με συνθετικές ίνες (PFRC) καταγράφηκε 10.27% <CV<12.08%. Η αντοχή που υπολογίστηκε μέσω της αξονικής παραμόρφωσης ήταν μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή που υπολογίζεται μέσω της ακτινικής παραμόρφωσης. Αυτό αποδόθηκε στο γεγονός ότι οι μετρήσεις της αξονικής παραμόρφωσης καταγράφονται από LVDT τα οποία είναι πιο ευαίσθητα σε πιθανές μετακινήσεις των φορτιζόμενων σφηνών εξαιτίας της ασύμμετρης ρηγμάτωσης που προκαλείται στα δοκίμια.

Αυξάνοντας την ποσότητα των ινών στο σκυρόδεμα, αυξανόταν και η διακύμανση των αποτελεσμάτων. Αυτό αποδίδεται στην ανομοιογένεια που προκλήθηκε από τις ίνες, στη μάζα του σκυροδέματος.

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα της δυσθραυστότητας βάσει της περιμετρικής παραμόρφωσης με αυτά της αξονικής παραμόρφωσης (μέσω των LVDTs και επιμηκυνσιομέτρου του εμβόλου), κατέληξαν σε μια γραμμική σχέση μεταξύ τους με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (R2) πολύ κοντά στη μονάδα. Με βάση τα αποτελέσματα κατέληξαν σε εκφράσεις, οι οποίες προσδιορίζουν τη δυσθραυστότητα που προκύπτει από παραμορφώσεις διαφορετικών διευθύνσεων.

Παρατηρήθηκε μια σχέση 1:1 μεταξύ της αξονικής παραμόρφωσης (εύρους 1 έως 4 mm) μετρούμενης από το επιμηκυνσιόμετρο του εμβόλου και αυτής μετρούμενης από τα LVDTs. Έτσι κατέληξαν ότι η αξονική παραμόρφωση μπορεί να μετρηθεί εναλλακτικά από το επιμηκυνσιόμετρο του εμβόλου.

Μέσω της κινηματικής σχέσης μεταξύ της αξονικής και της περιμετρικής παραμόρφωσης προσδιορίστηκε η γωνία εσωτερικής τριβής σε σκυροδέματα που έχουν μελετηθεί τη στιγμή της ρηγμάτωσης και οι τιμές που προέκυψαν είναι σύμφωνες με αυτές που μπορεί να βρεί κανείς σε βιβλιογραφική ανασκόπηση.

Δεν υπήρξε σαφής άποψη για τη σχέση που συνδέει τις ρωγμές με το ποσοστό των ινών στα δοκίμια της έρευνας που έλαβε χώρα στο άρθρο αυτό. Κάτι τέτοιο θα αποτελέσει θέμα μελλοντικής έρευνας.

Το **2012 οι Chao S.-H., Karki N.B., Cho J.-S., και Waweru R.N.** σύγκριναν τη δοκιμή κάμψης κατά ASTM C1609 με τη δοκιμή Barcelona. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη ινών, μεταλλικές με αγκύρια και μεταλλικές στριμμένες. Πραγματοποιήθηκαν δύο αναμίξεις με μεταλλικές ίνες με αγκύρια σε ποσοστό 0.75% και 1.5% αντίστοιχα και μια τρίτη υβριδική ανάμιξη με ποσοστό ινών με αγκύρια 0.75% και ποσοστό στριμμένων μεταλλικών ινών 0.75%. Το συνολικό ποσοστό κατά όγκο που κατείχαν οι ίνες στο υβριδικό σκυρόδεμα ήταν 1.5%. Η θλιπτική αντοχή των τριών αναμιγμάτων ήταν 64 MPa, 43 MPa, και 67MPa αντίστοιχα.

Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων από τη δοκιμή Barcelona χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα κάτω μισά τμήματα των δοκιμίων, γιατί παρατηρήθηκε ότι στα αυτά των κυλίνδρων η δύναμη είναι πιο σταθερή και πιο μεγάλη. Ο συντελεστής διακύμανσης (cv%) της παραμένουσας αντοχής για παραμόρφωση 2.5 mm, ήταν 21% στην άνω επιφάνεια και 5% στην κάτω. Είναι πιθανό το γεγονός αυτό να οφείλεται στο ότι στην άνω επιφάνεια συσσωρεύεται το νερό κατά τη διάρκεια της συμπύκνωσης και της δόνησης του δοκιμίου (εξίδρωση). Η ποιότητα του σκυροδέματος κοντά στην επιφάνεια μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα, γιατί εκεί ασκείται το φορτίο. Για το λόγο αυτό η εκτίμηση του υλικού έγινε βάσει των αποτελεσμάτων της κάτω επιφάνειας. Τα αποτελέσματα της παραμένουσας τάσης με τη δοκιμή Barcelona ήταν μεγαλύτερης ακρίβειας από αυτά της δοκιμής κάμψης ASTM C1609. Όλες οι δοκιμές σταμάτησαν όταν η παραμένουσα αντοχή ήταν (20-25)% της μέγιστης τάσης. Τα υβριδικά δοκίμια είχαν την καλύτερη παραμορφωσιακή ικανότητα, ενώ τα δοκίμια με ποσοστό ινών με αγκύρια 0.75% τη χειρότερη. Το συμπέρασμα αυτής της έρευνας ήταν ότι η δοκιμή Barcelona δίνει καλύτερα αποτελέσματα στην αντοχή, την παραμένουσα τάση και τη δυσθραυστότητα.

Το **2013 ο Carmona Sergio et al,** προσδιόρισε τις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες μέσω της γενικευμένης δοκιμής Barcelona. Χρησιμοποιήσε δύο είδη ινών, κοντές μεταλλικές ίνες με επίπεδα άκρα και μακριές μεταλλικές ίνες με αγκύρια. Οι ίνες προστέθηκαν σε ποσοστά κ.ο. 0.50% και 1.00%. Παρατηρήθηκε ότι στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με τις κοντές ίνες (FRC-1) υπάρχει μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής (fC), ενώ στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα με τις μακριές ίνες (FRC-2) η θλιπτική αντοχή μένει πρακτικά σταθερή. Και τα δύο σκυροδέματα εμφάνισαν μια μικρή αύξηση της εφελκυστικής αντοχής από διάρρηξη (fSP) με την αύξηση του ποσοστού των ινών. Διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο φορτίο μειωνόταν όσο αυξανόταν η ποσότητα των ινών. Ωστόσο δεν υπήρξε σημαντική διαφορά στα

μέγιστα φορτία και η μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής για το σκυρόδεμα FRC-1 ήταν fCT=2.67 MPa (cv=4.68%) και για το FRC-2 ήταν αντίστοιχα fCT=3.37 MPa (cv=6.86%). Η συμπεριφορά του σκυροδέματος μετά το μέγιστο φορτίο, ανεξαρτήτως του είδους της ίνας που χρησιμοποιήθηκε ήταν ομαλή. Επιπλέον, ο συντελεστής διακύμανσης (cv) ήταν μικρότερος από 5% σε όλες τις δοκιμές των FRCs , ενώ με την αύξηση των ινών μειωνόταν.

Στην τελική κατάσταση παρατηρήθηκαν τρείς ακτινικές ρωγμές στα δοκίμια χωρίς ίνες και στα δοκίμια με ποσοστό ινών Vf=0.5%, και τέσσερις ή περισσότερες ακτινικές ρωγμές στα δοκίμια με ποσοστό ινών Vf=1.0%. Όταν χρησιμοποιήθηκαν ίνες με μεγάλες διαστάσεις παρατηρήθηκε αύξηση στο πορώδες του σκυροδέματος. Η σχέση fc/fCT αυξανόταν όταν υπήρχαν ίνες και επηρεαζόταν από τον τύπο τους. Επιπλέον, από τον τύπο και την ποσότητα των ινών επηρεαζόταν και ο λόγος fSP/fCT.

Παρατηρήθηκε ότι με την γενικευμένη δοκιμή Barcelona το FRC-1 με Vf=1.0% είχε παραμένουσες τάσεις 28% μεγαλύτερες από το σκυρόδεμα με Vf=0.5%. Αντιθέτως στο FRC2 οι παραμένουσες τάσεις επηρεάστηκαν περισσότερο από την ποσότητα των ινών, με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα με Vf=1.0% να έχει διπλάσιες παραμένουσες τάσεις από αυτό με Vf=0.5%.

Τα σκυροδέματα με Vf=0.5% δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στις τιμές των παραμενουσών τάσεων (fctdδx) για αξονική μετατόπιση (δχ) μεγαλύτερη ή ίση από 1 mm (δχ≥1 mm). Ωστόσο, όταν έγινε η ίδια σύγκριση σε ινοπλισμένα σκυροδέματα με Vf=1.0% παρατηρήθηκε ότι οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζονταν κατά πολύ από το σχήμα των ινών, επίδραση που εξασθενούσε, όσο αυξάνοταν οι αξονικές παραμορφώσεις.

Γενικά διαπιστώθηκε ότι οι τιμές των παραμενουσών τάσεων είχαν μεγάλη διασπορά, η οποία αυξανόταν με την αύξηση της αξονικής μετατόπισης. Τόσο η δυσθραυστότητα, όσο και ο συντελεστής μεταβολής της, των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων αυξάνονταν αναλογικά με το ποσοστό των ινών. Συγκρίνοντας τα σκυροδέματα με ποσοστό ινών Vf=0.5%, διαπιστώθηκε ότι δεν υπήρξαν σημαντικές διαφορές εξαιτίας των δύο ειδών ινών, αφού ανέπτυξαν την ίδια τάση, για αξονική μετατόπιση 5.0 mm. Για το σκυρόδεμα με ποσοστό ινών Vf=1.0%, παρατηρήθηκε ότι το είδος των ινών επηρέαζε πολύ την παραμένουσα τάση του σκυροδέματος. Συγκρίνοντας συνολικά τα αποτελέσματα, η μεγαλύτερη διασπορά διαπιστώθηκε στο FRC-1 με ποσοστό ινών 0.5%, με cv=16.17% για αξονική μετατόπιση 5 mm. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις ο cv ήταν μικρότερος από 10%.

Είναι γνωστό ότι στα ινοπλισμένα σκυροδέματα αυξάνεται η δισθραυστότητα στη ρηγματωμένη κατάσταση σε σχέση με τα άοπλα σκυροδέματα. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη έρευνα οι δείκτες δισθραυστότητας για το FRC-1, επηρεάστηκαν λιγότερο από το ποσοστό προσθήκης των ινών σε σχέση με αυτούς του FRC-2. Βάσει των αποτελεσμάτων ο συντελεστής διακύμανσης των δεικτών δυσθραυστότητας ήταν μικρότερος από 10% και αυξανόταν όσο αυξανόταν η συνολική αξονική μετατόπιση.

Το **2015 οι Kim Jihwan, Lee Gyu Pil, Moon Do Young** διερεύνησαν (μέσω της δοκιμής Barcelona) τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες, το οποίο εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιήσαν δύο είδη μεταλλικών ινών, στριμμένες και με αγκύρια με λόγο μήκους προς διαμέτρου (l/d) 60 και 80 αντίστοιχα. Οι ίνες προστέθηκαν σε ποσοστά (%) κ.ο. (Vf) 0.25%, 0.5% και 1% και υποβλήθηκαν σε θερμοκρασίες 300 °C, 500 °C και 700 °C αντίστοιχα.

Η αντοχή εφελκυσμού του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες μετά την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες επηρεάστηκε περισσότερο από την κ.ο αναλογία των ινών και τον λόγο μορφής l/d παρά από τον τύπο των ινών. Μετά την έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες διαπιστώθηκε ότι υπάρχει αλλαγή-μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με αυτές στην αρχική κατάσταση (πριν τη θέρμανση). Διαπιστώθηκε ότι η εφελκυστική αντοχή μειώθηκε πολύ περισσότερο από ότι η θλιπτική και η παραμένουσα τάση. Αυξάνοντας το ποσοστό των ινών η εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων πριν τη θέρμανση μειωνόταν, ενώ η παραμένουσα τάση αυξανόταν.

Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρέασαν περισσότερο τις εφελκυστικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος παρά τις θλιπτικές κάτι το οποίο είναι αναμενόμενο, αφού οι εφελκυστικές ιδιότητες είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις εσωτερικές μικρορηγματώσεις και τη μορφή της διεπιφάνειας μεταξύ των μεταλλικών ινών και της μήτρας.

1.6.3 Δοκιμή Κάμψης – Προσδιορισμός Δυσθραυστότητας

Στο συγκεκριμένο άρθρο, οι **Mobasher B., Bakhshi M. και Barsby C., (2014)** προτείνουν ένα αναλυτικό υπολογιστικό μοντέλο για την περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά τη δοκιμή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων,

σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1609. Χρησιμοποιώντας την τεχνική «Backcalculation» συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα των δοκιμών, για διαφορετικές συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος με τέσσερα είδη ινών.

Συγκεκριμένα χρησιμοποίησαν ένα είδος μεταλλικών ινών, με άγκιστρα στο τέλος και αναλογία διαστάσεων L/D=166. Με τις συγκεκριμένες ίνες παρασκευάσθηκαν τρείς συνθέσεις στις οποίες η ποσότητα των ινών που χρησιμοποιήθηκε ήταν α) 13 kg/m3 β) 26 kg/m3 και γ) 39 kg/m3 αντίστοιχα. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις 28 και 56 ημέρες. Δυο είδη πολυμερικών ινών, με το πρώτο να αποτελείται από ένα μείγμα πολυπροπυλενίου και πολυαιθυλενίου ενώ το δεύτερο από τροποποιημένες ολεφίνες. Το μήκος των ινών ήταν 50 mm ενώ η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 3 kg/m3 και στις δυο περιπτώσεις. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις 14 και 28 ημέρες. Τέλος χρησιμοποίησαν ίνες υάλου, ανθεκτικές στα αλκάλια. Με τις συγκεκριμένες ίνες παρασκευάσθηκαν τρείς διαφορετικές συνθέσεις με την ίδια περιεκτικότητα (6 kg/m3) αλλά με διαφορετικό μήκος ινών. Η πρώτη σύνθεση περιείχε ίνες μήκους 6 mm, η δεύτερη 12 mm ενώ η τρίτη 24 mm.

Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα πως τα δοκίμια με μεταλλικές ίνες και για τις συνθέσεις με χαμηλή ποσότητα ινών (13-26 kg/m3), η επίδραση της προσθήκης των ινών παρατηρείται στη συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση, καθώς με την αύξηση των ινών η μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος κατά την κάμψη αλλάζει και καταγράφεται σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας (μετάβαση από strain softening σε strain hardening). Επιπλέον, παρατήρησαν πως η χρήση συνθετικών ινών από πολυμερή δεν παρουσιάζει κάποια σημαντική διαφορά στη συμπεριφορά των δοκιμίων λόγω του διαφορετικού είδους ινών. Διαφορά παρουσιάζεται στη δυσθραυστότητα η οποία αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διάρκεια σκλήρυνσης του δοκιμίου (από 14 σε 28 ημέρες). Στις ίνες από γυαλί το μήκος δεν επηρεάζει την ελαστική δυσκαμψία (ταύτιση ελαστικού κλάδου στις 3 συνθέσεις) ούτε την παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο κάμψης. Η δυσθραυστότητα ωστόσο παρουσιάζει οριακή μείωση με την αύξηση του μήκους των ινών.

Οι **Abbas S., Soliman A. M. και Nehdi M. L., (2014)** μελέτησαν τις μηχανικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα σκυροδέματος υπέρ-υψηλής αντοχής, ενσωματώνοντας σε αυτό μεταλλικές ίνες σε διάφορα μήκη και αναλογίες. Σκοπός τους ήταν να διερευνήσουν κατά πόσο επηρεάζεται η συμπεριφορά του υλικού από το μήκος και το ποσοστό των ινών. Για την πιο

έγκυρη εξαγωγή συμπερασμάτων επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά μήκη ινών και τρία διαφορετικά ποσοστά. Συγκεκριμένα επέλεξαν ίνες με μήκος 8 mm, 12 mm και 16 mm και πραγματοποίησαν συνθέσεις με ποσοστό 1%, 3% και 6% κ.ο. για κάθε είδος. Οι ίνες είχαν λόγο μορφής (L/D) 40, 60 και 80 αντίστοιχα. Από τα πειραματικά δεδομένα προέκυψε πως όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών βελτιώνονται και οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, παρόλο που η θλιπτική αντοχή αυξήθηκε ελάχιστα από την προσθήκη μεταλλικών ινών, με το μήκος των ινών να μην την επηρεάζει καθόλου. Σημαντική αύξηση της καμπτικής αντοχής προέκυψε από την αύξηση του ποσοστού των ινών. Επιπλέον το μήκος των ινών επηρέασε το μέγιστο φορτίο στην κάμψη και τη μορφή της καμπύλης φορτίου παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα, οι συνθέσεις με κοντές ίνες πέτυχαν υψηλότερο μέγιστο φορτίο αλλά στη συνέχεια οδηγήθηκαν πιο απότομα στην αστοχία (απότομος φθιττός κλάδος), ενώ τα δοκίμια με μακριές ίνες παρουσίασαν μικρότερο μέγιστο φορτίο αλλά στη συνέχεια πιο πλάστιμη συμπεριφορά. Τα δοκίμια με το μεγάλο μήκος ινών (16 mm) παρουσίασαν μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από τα δοκίμια με κοντές ίνες. Επίσης τα δοκίμια με μεγαλύτερο ποσοστό ινών (3%, 6%) παρουσίασαν σημαντικά μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από αυτό με το 1% (2 και 3.5 φορές αντίστοιχα) ανεξάρτητα από το μήκος των ινών.

Οι **Banthia N., et al, (2013)** διερεύνησαν τη συνεργασία των ινών σε υβριδικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Για να το πετύχουν αυτό εξέτασαν πρισματικά δοκίμια υπό καμπτική και διατμητική ένταση. Για τα πειράματά τους επέλεξαν να χρησιμοποιήσουν μεταλλικές ίνες δύο ειδών καθώς και ίνες κυτταρίνης. Το πρώτο είδος μεταλλικών ινών ήταν διαμορφωμένο με άγκιστρο στο τέλος και λόγο μορφής 60 (L=30mm, D=0.5mm), ενώ το δεύτερο είχε διπλή παραμόρφωση στα άκρα και διαστάσεις όμοιες με το πρώτο. Και τα δύο είδη προστέθηκαν στις συνθέσεις σε ποσοστό 0.3% και 0.5% κατ’ όγκο. Υβριδικό σκυρόδεμα παρήχθη με συνδυασμό ινών χάλυβα και κυτταρίνης. Ο συνδυασμός αυτός είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας του FRC. Οι ίνες κυτταρίνης απέτρεψαν τις έντονες διακυμάνσεις στο διάγραμμα Φορτίου-Βέλους Κάμψης μετά το μέγιστο φορτίο και δημιούργησαν ένα πιο ομαλό μετελαστικό κλάδο. Επιπλέον η παρουσία των ινών κυτταρίνης σε ποσοστό 0.5% κ.ο., είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής κατά 5 έως 10 MPa.

Οι **Wang J., Banthia N. και Zhang M., (2012)** παρουσίασαν τα αποτελέσματα της ερευνητικής τους εργασίας για το πώς επιδρούν τα πρόσθετα μείωσης της συστολής του

σκυροδέματος στην καμπτική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Στις συνθέσεις που εξέτασαν χρησιμοποίησαν μεταλλικές ίνες και ίνες πολυπροπυλενίου. Οι μεταλλικές ίνες ήταν ευθύγραμμες με λόγο μορφής 81 (L=13mm, D=0.16 mm) και ποσοστό 0.5% κ.ο. Οι ίνες πολυπροπυλενίου είχαν και αυτές ευθύγραμμο σχήμα και ποσοστό 0.5% κ.ο., αλλά ο λόγος μορφής ήταν 90 (L=40mm, D=0.44mm). Αυτό που άλλαζε από σύνθεση σε σύνθεση ήταν η περιεκτικότητα του πρόσθετου μείωσης της συστολής.

Στα αποτελέσματά τους αναφέρουν ότι η σύνθεση με μεταλλικές ίνες χωρίς πρόσθετο παρουσίασε θλιπτική αντοχή 50 MPa, μοναδιαίο βάρος 2078 kg/m3 και περιεκτικότητα σε αέρα 11.6%. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τη σύνθεση με ίνες πολυπροπυλενίου χωρίς πρόσθετο ήταν θλιπτική αντοχή 54.4 MPa, μοναδιαίο βάρος 2157 kg/m3 και περιεκτικότητα σε αέρα 6.7%.

Από τη δοκιμή σε κάμψη προέκυψαν επίσης ενδιαφέροντα αποτελέσματα καθώς για τα δοκίμια με μεταλλικές ίνες προέκυψε πως η παραμένουσα αντοχή στα 0.5 mm βέλους κάμψης ήταν f100,0.5=4.00 MPa, στα 2.00 mm ήταν f100,2.0=3.14 MPa ενώ η δυσθραυστότητα προέκυψε T100,2.0=25.16 J. Ομοίως για τα δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου προέκυψε f100,0.5=2.47 MPa, f100,2.0=3.09 MPa και T100,2.0=19.69 J. Σύμφωνα με αυτά τα αποτελέσματα τα δοκίμια με μεταλλικές ίνες συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από αυτά με ίνες πολυπροπυλενίου καθώς για το ίδιο βέλος κάμψης ανέπτυξαν μεγαλύτερη τάση ενώ στο τέλος της δοκιμής είχαν απορροφήσει μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας.

Οι **Heard W.F., et al, (2011)** διερεύνησαν τη συμπεριφορά ενός σύνθετου ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό την επίδραση ημιστατικών και δυναμικών φορτίων. Στη σύνθεση τους χρησιμοποίησαν ίνες πολυπροπυλενίου με μήκος 41 mm. Για την πιο ολοκληρωμένη διερεύνηση του υλικού πραγματοποιήθηκαν τέσσερα ξεχωριστά πειράματα. Στο πρώτο εξετάστηκε μεμονωμένα η εφελκυστική αντοχή της ίνας. Στο δεύτερο η εφελκυστική αντοχή του μητρικού υλικού, ενώ στο τρίτο η συνάφεια των υλικών. Στο τέταρτο και σημαντικότερο πείραμα ελέγχθηκε η καμπτική συμπεριφορά του υλικού. Το ενδιαφέρον στη συγκεκριμένη εργασία είναι ότι σε όλες τις δοκιμές σε κάμψη παρουσιάστηκε η δεύτερη μορφή αστοχίας κατά την οποία το μέγιστο φορτίο της δοκιμής δε συμπίπτει με το πρώτο μέγιστο φορτίο.

Οι **Altoubat S., et al, (2006)** παρουσίασαν μια απλοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού με ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Για την εξαγωγή των αναλυτικών σχέσεων πραγματοποίησαν πειράματα στα οποία χρησιμοποίησαν μεταλλικές ίνες και συνθετικές ίνες πολυπροπυλενίου και

πολυαιθυλενίου. Οι μεταλλικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δυο ειδών. Οι πρώτες είχαν άγκιστρο στο τέλος, λόγο μορφής 65 (L=60 mm, D=0.92 mm) και τοποθετήθηκαν στη σύνθεση σε ποσοστό 0.35% κατ' όγκο. Οι δεύτερες ήταν διαμορφωμένες σε κυματοειδή μορφή, λόγο μορφής 40 (L=50 mm, D=1.3 mm) και συμπεριλήφθησαν στη σύνθεση σε ποσοστό 0.5% κατ' όγκο. Οι συνθετικές ίνες που επιλέχθηκαν είχαν λόγο μορφής 90 (L=90 mm, ορθογώνια διατομή) και τοποθετήθηκαν στη σύνθεση σε ποσοστό 0.32% και 0.48% κατ' όγκο.

Οι **Cengiz O. και Turanli L., (2003)** έκαναν μια συγκριτική αξιολόγηση του οπλισμένου σκυροδέματος και επέλεξαν να ελέγξουν δοκίμια τα οποία είχαν ως οπλισμό μεταλλικές ράβδους, μεταλλικές ίνες, ίνες πολυπροπυλενίου υψηλής αντοχής καθώς και συνδυασμό των παραπάνω ινών (υβριδικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Οι μεταλλικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πεπλατυσμένα άκρα και λόγο μορφής 50 (L=30 mm, D=0.6 mm). Συμπεριλήφθηκαν στη σύνθεση σε ποσοστό 0.45% και 0.64% κ.ο., το οποίο ισοδυναμεί με 35 kg/m3 και 50 kg/m3 αντίστοιχα. Οι ίνες πολυπροπυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν είχαν λόγο μορφής 33 (L=30 mm, D=0.9 mm) και συμπεριλήφθησαν σε ποσοστό 0.78% και 1.1% κ.ο., το οποίο ισοδυναμεί με 7 kg/m3 και 10 kg/m3 αντίστοιχα. Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να προσδιορισθούν χαρακτηριστικά όπως η σκληρότητα, η καμπτική εφελκυστική αντοχή, η απορρόφηση ενέργειας και το μέγιστο φορτίο του οπλισμένου σκυροδέματος. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αύξησε τη σκληρότητα, την καμπτική ικανότητα, την απορρόφηση ενέργειας, την ικανότητα ανάληψης φορτίου και τη διατμητική αντοχή. Συγκρίνοντας το φαινόμενο του «rebound» κατά την εκτόξευση του σκυροδέματος, προέκυψε ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου το μειώνουν , άρα μειώνεται και η απώλεια των ινών με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται σημαντικό οικονομικό όφελος, καθώς οι ίνες είναι το πιο ακριβό συστατικό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η αύξηση των ινών πολυπροπυλενίου από 0.78% σε 1.1% δεν είχε ως αποτέλεσμα σημαντική αύξηση της σκληρότητας ενώ προκάλεσε μείωση του μέγιστου φορτίου. Κατά τους συγγραφείς προτείνεται ένα ποσοστό ινών της τάξης του 0.78% κ.ο. ως βέλτιστο, καθώς όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, αυξάνεται και η περιεκτικότητα των πρόσθετων που απαιτούνται για την επίτευξη εργασιμότητας στο σκυρόδεμα, κάτι που μπορεί να προκαλέσει αρνητικό αποτέλεσμα στην αντοχή. Συγκρίνοντας τα δοκίμια με ποσοστό ινών πολυπροπυλενίου 0.78% και μεταλλικών ινών 0.45%, προκύπτει ότι για αυτό το ποσοστό θα μπορούσε να

επιτευχθεί αντικατάσταση των μεταλλικών με ίνες πολυπροπυλενίου με αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες. Στο υβριδικό σκυρόδεμα, η συνεργασία μεταλλικών και ινών πολυπροπυλενίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής, της ολκιμότητας και της σκληρότητας. Για το λόγο αυτό προτείνεται από τους μελετητές να χρησιμοποιούνται δύο είδη ινών καθώς προσδίδουν καλύτερες ιδιότητες και συμπεριφορά σε σχέση με τη χρήση ενός.

1.6.4 Θερμική Καταπόνηση Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Οι **Balázs Nagy, et al. (2015),** μέσα από την έρευνά τους προσπάθησαν να προσδιορίσουν τις θερμικές ιδιότητες (θερμική αγωγιμότητα) και την πυκνότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες από χάλυβα, πλαστικό και γυαλί. Οι μελετητές επικεντρώθηκαν στη χρήση θερμικών μοντέλων για να υπολογίσουν τις ισοδύναμες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες (SFRC).

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι υπάρχει ουσιαστική διαφορά μεταξύ των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας που μετρήθηκαν και των πρότυπων τιμών για ινοπλισμένο σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα υψηλής πυκνότητας. Η αύξηση του ποσοστού των χαλύβδινων ινών δεν αυξάνει αναγκαστικά τη θερμική αγωγιμότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η προσθήκη ινών αυξάνει το πορώδες με αποτέλεσμα να μειώνεται η πυκνότητα και η θερμική αγωγιμότητα. Έτσι προέκυψε ότι οι αλλαγές της θερμικής αγωγιμότητας του SFRC επηρεάζονται από την πυκνότητα που έχει άμεση σχέση με το πορώδες.

Οι **Bangi M.R. και Horiguchi T. (2012),** διεξήγαγαν δοκιμές σε ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (HSC) όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Χρησιμοποιήθηκαν ίνες προπυλενίου, πολυβινυλικής αλκοόλης και ίνες χάλυβα διαφόρων μηκών και διαμέτρων.

Οι μελετητές διεξήγαγαν πειραματική και στατιστική μελέτη για να διερευνήσουν την επίδραση του τύπου και της γεωμετρίας της ίνας στις πιέσεις που αναπτύσσονται στους πόρους. Οι πιέσεις μετρήθηκαν σε διαφορετικά βάθη καθ’ύψος των δοκιμίων μετά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι μετρήσεις έδειξαν ότι η προσθήκη οργανικών ινών, ανεξάρτητα από το τύπο, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση των πιέσεων στους πόρους του ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής μετά την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι μελετητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου ήταν πιο αποτελεσματικές στη μείωση των μέγιστων πιέσεων στους πόρους σε σύγκριση με τις ίνες πολυβινυλικής αλκοόλης, ενώ οι ίνες χάλυβα είχαν μικρή επίδραση. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι οι μεγαλύτερες οργανικές ίνες μήκους 12 mm με τη μικρότερη διάμετρο 18 μm είχαν καλύτερη απόδοση από τις οργανικές ίνες μήκους 6 mm με διάμετρο από 28 μm εώς 40 μm.

Οι **Sideris K.K. και Manita P. (2013),** μελέτησαν την επίδραση των ινών από πολυπροπυλένιο στις ιδιότητες (θλιπτική αντοχή, εφελκυστική αντοχή (splitting tensile strength), τριχοειδή απορρόφηση νερού (water capillary absorption) και ταχύτητα υπερήχων) του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος (SCC) διαφορετικών κατηγοριών αντοχής (C25/30 και C30/37), όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Για το σκοπό αυτό, παρασκευάστηκαν έξι διαφορετικά μίγματα SCC και δύο κανονικά μίγματα σκυροδέματος (NVC).

Σε ηλικία 120 ημερών, οι ερευνητές τοποθέτησαν τα δείγματα σε έναν ηλεκτρικό κλίβανο και πραγματοποίησαν τη δοκιμή με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας 5 °C /min. Οι θερμοκρασίες που ελέγχθησαν ήταν 300 °C και 600 °C. Η θερμοκρασία των 600 °C διατηρήθηκε για μία ώρα. Στη συνέχεια, τα δείγματα ψύχονται φυσικά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος εντός του κλιβάνου.

Οι μελετητές, μέσω της έρευνας αυτής, παρατήρησαν πως η τάση για αποφλοίωση αυξήθηκε για τα δείγματα με την υψηλότερη κατηγορία αντοχής C30/37, ανεξάρτητα από το είδος του μίγματος (SCC ή NVC). Οι υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες (θλιπτική και εφελκυστική αντοχή) του αυτοσυμπυκνούμενου και του συμβατικού σκυροδέματος που εξετάστηκαν και ανήκουν στην ίδια κατηγορία αντοχής, επηρεάστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Όμως, η επιρροή των υψηλών θερμοκρασιών βρέθηκαν να είναι πιο επιζήμια για την εφελκυστική αντοχή όλων των μιγμάτων που ελέγχθηκαν σε αυτή την έρευνα.

Ωστόσο, δεν παρατηρήθηκε η ίδια συμπεριφορά όταν προστέθηκαν στα μίγματα ίνες πολυπροπυλενίου. Όσον αφορά το συμβατικό σκυρόδεμα, οι μελετητές παρατήρησαν ότι η προσθήκη των ινών αύξησε ελαφρώς το συνολικό πορώδες. Επομένως αυξήθηκε και η διαπερατότητα, η οποία μείωσε τον κίνδυνο αποφλοίωσης. Όμως, παρατηρήθηκε πως σε θερμοκρασίες άνω των 160 °C οι ίνες λιώνουν δημιουργώντας μία πρόσθετη δίοδο στο εσωτερικό της κατασκευής από σκυρόδεμα.

Αντίθετα, στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα διαπιστώθηκε πως οι ίνες από πολυπροπυλένιο δεν καταστράφηκαν σε καμία από τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες. Με αποτέλεσμα, να αυξηθεί η αντίσταση στην αποφλοίωση των μιγμάτων SCC. Παρ'όλα αυτά, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη των ινών μείωσε τη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

Κατά συνέπεια, οι μελετητές συνιστούν να χρησιμοποιούνται ίνες από πολυπροπυλένιο ως μέρος μιας συνολικής μεθόδου σχεδιασμού για την προστασία από την αποφλοίωση σε συνδυασμό με άλλα υλικά.

Οι **Bing Chen και Juanyu Liu (2004),** μελέτησαν τη συμπεριφορά του σκυροδέματος υψηλής αντοχής (HSC) και του υβριδικού σκυροδέματος υψηλής αντοχής (HFR HSC) μετά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι μελετητές συμπέραναν ότι το σκυρόδεμα υψηλής αντοχής είναι επιρρεπές στην αποφλοίωση όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μεγαλύτερη είναι η αποφλοίωση. Η προσθήκη ινών άνθρακα και χάλυβα σε HSC, μπορούν να καθυστερήσουν την εμφάνιση της αποφλοίωσης ενώ η προσθήκη ινών από πολυπροπυλένιο μπορεί να την εξαλείψει. Ακόμα, μέσα από την έρευνά τους κατέληξαν πως η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, μπορεί να βελτιώσει τις μηχανικές του ιδιότητες όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Τέλος, οι μελετητές συμπέραναν πως τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής με υβριδικές ίνες, κυρίως ίνες πολυπροπυλενίου, βελτιώνουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητές τους. Οι υψηλές θερμοκρασίες λιώνουν τις ίνες πολυπροπυλενίου με αποτέλεσμα να δημιουργούνται εσωτερικές μικρές ρωγμές οι οποίες συντελούν στην εκτόνωση της πίεσης ατμών που αναπτύσσεται εξαιτίας της εξάτμισης της εσωτερικής υγρασίας του σκυροδέματος.

Οι **Pliya P., et al. (2011),** μελέτησαν την επιρροή της προσθήκης ινών από πολυπροπυλένιο (PP-F) και χάλυβα (S-F) στη συμπεριφορά του σκυροδέματος υψηλής αντοχής που εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν, υποβλήθηκαν σε διάφορους κύκλους θέρμανσης – ψύξης. Για το σκοπό αυτό, παρήχθησαν τέσσερις ομάδες σκυροδέματος. Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (C3), με ίνες πολυπροπυλενίου (CP3), με χαλύβδινες ίνες (CS3) και με ανάμιξη ινών πολυπροπυλενίου και χάλυβα (CSP3). Οι μελετητές εξήγαγαν συμπεράσματα για το πορώδες, την απώλεια μάζας και τις παραμένουσες μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Αρχικά, παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος από τη θερμοκρασία των 300 °C με λιγότερη αύξηση για το σκυρόδεμα CS3 απ' ότι για το σκυρόδεμα CP3. Μετά τους 300 °C, το πορώδες του σκυροδέματος CSP3 με περιεκτικότητα σε ίνες PP-F 1 kg/m^3 αυξάνεται πιο γρήγορα απ' ότι με περιεκτικότητα 2 kg/m^3. Στα σκυροδέματα CP3 και CS3 η εξέλιξη του πορώδους δεν ήταν ίδια με του σκυροδέματος CSP3. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι η μάζα των διαφορετικών ομάδων του σκυροδέματος μειώνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Μια πρόσθετη απώλεια μάζας παρατηρήθηκε στο σκυρόδεμα που περιέχει ίνες PP-F. Μετά τη θέρμανση του σκυροδέματος στους 300 °C και 600 °C, η απώλεια της μάζας του σκυροδέματος CSP3 είναι μικρότερη από τα σκυροδέματα C3 και CP3 αλλά υψηλότερη από το σκυρόδεμα CS3.

Ακόμα, από την έρευνα, προέκυψε ότι σε σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα C3, η σχετική παραμένουσα αντοχή μειώθηκε στο σκυρόδεμα CP3 αλλά αυξήθηκε στο σκυρόδεμα CS3. Πιο συγκεκριμένα, μετά τους κύκλους θέρμανσης-ψύξης των 600 °C, διαπιστώθηκε αύξηση 27% της παραμένουσας εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη του σκυροδέματος CS3 και βελτίωση της θλιπτικής αντοχής σε ποσοστό 6% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα C3. Επιπρόσθετα, η προσθήκη ινών S-F βελτιώνει το Μέτρο Ελαστικότητας (βελτίωση 5% στους 450 °C ενώ στους 600 °C μετρήθηκε σχεδόν ίδιο για όλες τις ομάδες σκυροδέματος). Όσον αφορά το σκυρόδεμα CSP3, οι μελετητές παρατήρησαν ότι τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι μειωμένα από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος CS3 αλλά πιο αυξημένα από του σκυροδέματος C3. Μετά τη θέρμανση στους 300 °C και 600 °C, η σχετική μείωση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος CSP3 ήταν περίπου 10% αλλά το Μέτρο Ελαστικότητας και η θλιπτική αντοχή του, μεταβάλλεται ελαφρώς με την προσθήκη ινών S-F. Τέλος, παρατηρήθηκε ότι στο σκυρόδεμα CSP3 η πλαστιμότητα διατηρήθηκε σχεδόν σταθερή.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Τοποθέτηση αντικειμένου

Για τις πειραματικές ανάγκες της παρούσας προπτυχιακής εργασίας μελετήθηκαν συνολικά δέκα (10) διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος, οι οποίες παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της επιρροής της προσθήκης των ινών και της πυριτικής παιπάλης στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος πριν και μετά από τη θερμική καταπόνηση. Κατά την πειραματική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκαν:

- Δοκιμή θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια.
- Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού – δοκιμή Barcelona.
- Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού–δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

2.2 Υλικά, πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις

2.2.1 Υλικά

Και στις δέκα συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM IV/B (P-W) 32.5R, δηλαδή Ποζολανικό τσιμέντο με κύρια συστατικά, πλην του κλίνκερ, φυσική ποζολάνη (P) και ιπτάμενη τέφρα (W). Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του σκυροδέματος, ήταν άμμος 0-4 mm, ρυζάκι 4-8 mm και γαρμπίλι 8-16 mm. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής Sika Viscocrete.

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μεταλλικές και συνθετικές δύο ειδών. Οι μεταλλικές ίνες ήταν τύπου INOMIX της εταιρίας ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε που για τις ανάγκες της προπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (SF). Οι συνθετικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: α) μακροΐνες SikaFiber® PP-540/52 της εταιρίας SIKA Α.Ε που για τις ανάγκες της προπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (PPF1) και β) μικροΐνες SikaFiber® της εταιρίας SIKA Α.Ε που για τις ανάγκες της προπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (PPF2). Στον **Πίνακα 9,**

δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου ίνας και στο **Σχήμα 26** απεικονίζονται οι ίνες. Σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε πυριτική παιπάλη τύπου Sika Fume HR-D της εταιρίας SIKA A.E σαν πρόσθετο υλικό σκυροδέματος.

Πίνακας 9: Κύρια χαρακτηριστικά ινών.

	SF	**PPF1**	**PPF2**
Υλικό	Χάλυβας	Πολυπροπυλένιο	Πολυπροπυλένιο
Μορφή	Ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα, κυματοειδείς	Ευθύγραμμες με στρογγυλεμένες άκρες, λευκές	Ευθύγραμμες ορθογώνιας διατομής,διαφανείς
Μήκος (mm)	30	52	12
Διάμετρος (mm)	0.800	0.460	0.025
Λόγος Μορφής(l/d)	37.50	113.00	480.00
Αντοχή Θραύσης (MPa)	1100	613	400
Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	200000	5400	1600
ΠΡΟΤΥΠΑ	ASTM A820 TYPE 1, EN 10016	ASTM C 1116 Τύπος III 4.1.3	EN 14889-2:2006 (Επίπεδο πιστοποίησης 3: Πίνακας ZA1)

α)INOMIX (SF)

β)SikaFiber® PP-540/52 (PPF1)

γ)SikaFiber® (PPF2)

Σχήμα 26: Εικόνες ινών. α) INOMIX. β) SikaFiber®. PP-540/52 γ) SikaFiber®.

2.2.2 Παρασκευή Σκυροδέματος

Παρασκευάστηκαν δέκα (10) συνθέσεις και συγκεκριμένα, μία (1) σύνθεση αναφοράς με άοπλο σκυρόδεμα (Plain), δύο (2) συνθέσεις με μεταλλικές ίνες, δύο (2) συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου τύπου SikaFiber PP-540/52, δύο (2) συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου τύπου SikaFiber® και τρεις (3) υβριδικές συνθέσεις . Αναλυτικότερα παρασκευάστηκε μία σύνθεση με μεταλλικές ίνες με ποσοστό 0.5% κ.ο. και μία με ποσοστό 1.0% κ.ο., οι οποίες κωδικοποιούνται ως SF-0.5 και SF-1.0 αντίστοιχα. Οι σκυροδετήσεις με τις ίνες πολυπροπυλενίου ήταν δύο για κάθε τύπο ίνας με ποσοστό 0.5% κ.ο. και 1.0% κ.ο., οι οποίες κωδικοποιούνται ως PPF1-0.5 και PPF1-1.0 αντίστοιχα για τις ίνες τύπου SikaFiber® PP-540/52 και PPF2-0.5 και PPF2-1.0 αντίστοιχα για τις ίνες τύπου SikaFiber®. Οι υβριδικές συνθέσεις παρασκευάστηκαν με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. για κάθε τύπο ίνας. Πιο συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν μία συνθεση με συνδυασμό ινών από χάλυβα και πολυπροπυλένιο τύπου SikaFiber® PP-540/52 η οποία κωδικοποιείται ως SF/PPF1, μία σύνθεση με συνδυασμό ινών από χάλυβα και πολυπροπυλένιο τύπου SikaFiber® η οποία κωδικοποιείται ως SF/PPF2 και μία σύνθεση με συνδυασμό των δύο τύπων ινών από πολυπροπυλένιο, η οποία κωδικοποιείται ως, PPF1/PPF2.

Η περιεκτικότητα των ινών επιλέχθηκε κατόπιν βιβλιογραφικής ανασκόπησης και ήταν μέσα στα όρια που έχουν οριστεί με σκοπό να μην είναι απαραίτητο να εφαρμοστούν ειδικές τεχνικές σκυροδέτησης, αλλά και για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής με ήδη υπάρχοντα.

Οι σκυροδετήσεις ήταν των 40 lt εκάστη με σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο, ποσότητα αδρανών και κ.ο. ποσοστό ινών. Η μόνη διαφορά ήταν στην ποσότητα του ρευστοποιητή. Οι συνθέσεις παρέμειναν κατά τα άλλα αμετάβλητες, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Στον **Πίνακα 10**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν συνολικά 18 δοκίμια. Άρα, συνολικά για τις δέκα διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος παρασκευάστηκαν 10x18=180 μήτρες. Οι 18 μήτρες κάθε σύνθεσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 11**.

Πίνακας 10: Περιεκτικότητα συστατικών των συνθέσεων (Kg/m^3).

ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ (Kg/m^3)		PLAIN	SF-0.5	PPF1-0.5	PPF2-0.5	SF-1	PPF1-1	PPF2-1	SF/PPF1	SF/PPF2	PPF1/PPF2
Τσιμέντο (C)		400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Πυριτική Παιπάλη (si)		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Άμμος (0-4 mm)		922	922	922	922	922	922	922	922	922	922
Ρυζάκι (4-8 mm)		335	335	335	335	335	335	335	335	335	335
Γαρμπίλι (8-16 mm)		419	419	419	419	419	419	419	419	419	419
Νερό (w)		219	219	219	219	219	219	219	219	219	219
Ίνες	SF	-	40	-	-	80	-	-	40	40	-
	PPF1	-	-	4.55	-	-	9.10	-	4.55	-	4.55
	PPF2	-	-	-	4.55	-	-	9.10	-	4.55	4.55
Ρευστοποιητής		1.97	2.33	3.61	3.98	2.33	4.39	5.5	4.69	3.89	4.66
w/(c+si)		0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
Ίνες (% κ.ο.)	SF	-	0.5	-	-	1.0	-	-	0.5	0.5	-
	PPF1	-	-	0.5	-	-	1.0	-	0.5	-	0.5
	PPF2	-	-	-	0.5	-	-	1.0	-	0.5	0.5
Ρευστοποιητής (% κ.β.)		0.74	0.67	0.86	0.95	0.67	1.05	1.31	0.93	1.12	1.11

Πίνακας 11: Είδος, πλήθος και διαστάσεις κάθε μήτρας.

ΕΙΔΟΣ ΜΗΤΡΑΣ	ΠΛΗΘΟΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (mm)
Κυλινδρική	6	Ύψους 200, διαμέτρου100
Πρισματική	6	Διατομής 100x100, μήκους 500
Κυλινδρική	6	Ύψους 150, διαμέτρου 150

Στην αρχή αναδεύτηκαν για 2 min τα αδρανή, με το 20% περίπου του νερού της σύνθεσης. Στη συνέχεια προστέθηκε το τσιμέντο, η πυριτική παιπάλη και το υπόλοιπο νερό και συνεχίστηκε η ανάδευση για 2 min. Μετά διασκορπίστηκαν ομοιόμορφα οι ίνες, προστέθηκε ο ρευστοποιητής και αναδεύτηκαν για 5 min, προκειμένου να επιτευχθεί ομογενής σύσταση σκυροδέματος. Για να χαρακτηριστεί η εργασιμότητα του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης (ΕΛΟΤ/EN 12350-2) και μετρήθηκε το μοναδιαίο βάρος του σκυροδέματος του νωπού σκυροδέματος (EN 12350-6).

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων που αφορούν στο νωπό σκυρόδεμα σκυροδετήθηκαν τα δοκίμια στις μήτρες, όπου και συμπυκνώθηκαν στη μηχανή δόνησης για τριάντα δευτερόλεπτα ανά στρώση. Για την καλύτερη συμπύκνωση γεμίζονταν οι μήτρες μέχρι την μέση, δονούνταν για τριάντα δευτερόλεπτα και στη συνέχεια πληρώνονταν με το υπόλοιπο υλικό, το οποίο εκ νέου δονήθηκε για τριάντα δευτερόλεπτα.

Την επόμενη μέρα, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τις μήτρες και συντηρήθηκαν, σε δεξαμενή νερού για 28 ημέρες.

2.2.3 Θερμική καταπόνηση σκυροδέματος.

Η έκθεση των δοκιμίων σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, είχε ως σκοπό την ανάδειξη του ρόλου των ινών κατά τη θερμική καταπόνηση. Έτσι, μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες θερμικά καταπονημένων δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Η θερμοκρασία έκθεσης των δοκιμίων καθορίστηκε στους 280 °C και επιλέχθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα προηγούμενης εργασίας [Sakkas, K. & Panias, D. & Nomikos, P.P. & Sofianos A.I. (2014)]. Σύμφωνα με αυτή, μετά την παρέλευση δύο ωρών από

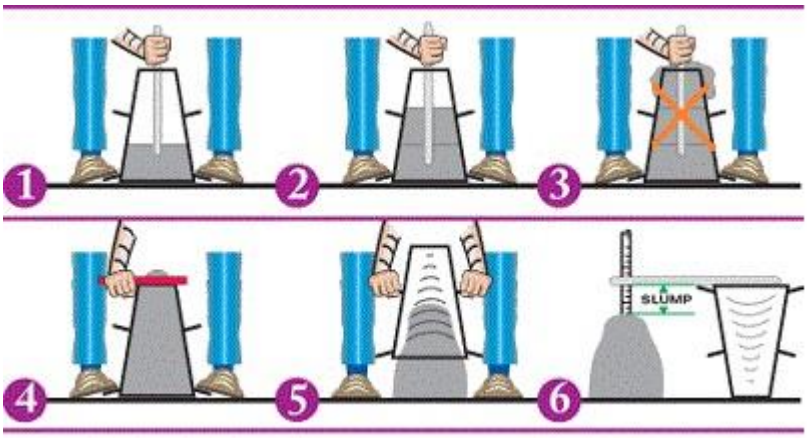
την έκθεση σε πυρκαγιά θερμικά μονωμένου σκυροδέματος που ακολουθεί την καμπύλη φορτίου πυρκαγιάς RWS (RijksWaterStaat) [EFNARC 2009], η θερμοκρασία στην επιφάνεια του σκυροδέματος είναι μικρότερη από 280 °C.

Έτσι, τα μισά από τα συνολικά δοκίμια που παρήχθησαν (90 δοκίμια), ελέγχθησαν μετά την έκθεση τους στους 280 °C. Συγκεκριμένα, σε ηλικία 28 ημερών, τα δοκίμια τοποθετούνται σε ηλεκτρονικό κλίβανο με ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας σε 2 °C ανά min. Όταν η θερμοκρασία εντός του κλιβάνου έφτανε στους 280 °C, αυτά παρέμειναν σε αυτή για 30 min. Στη συνέχεια, τα δείγματα ψύχονταν φυσικά εντός του κλιβάνου, μέχρι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

2.3 Προσδιορισμός ιδιοτήτων ινοπλισμένου σκυροδέματος.

2.3.1 Προσδιορισμός της εργασιμότητας του σκυροδέματος

Ο καθορισμός της εργασιμότητας του νωπού σκυροδέματος γίνεται σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-2. Ο κώνος κάθισης γέμισε με τη σέσουλα σε τρεις στρώσεις. Η κάθε στρώση συμπυκνώθηκε με 25 χτύπους της χαλύβδινης ράβδου. Κατά τη δόνηση, προσέχθηκε η ράβδος να μην εισέρχεται στην προηγούμενη στρώση παρά μόνο 1-2 εκατοστά. Μετά από τη γέμιση του κώνου και τη συμπύκνωση του σκυροδέματος, αφαιρέθηκε το σκυρόδεμα που πλεονάζει και επιπεδώθηκε η άνω επιφάνειά του με παλινδρομική κύλιση της ράβδου συμπυκνώσεως στην κορυφή του κώνου. Καθαρίστηκε η περιοχή γύρω από τη βάση του κώνου και ο κώνος ανασύρθηκε αργά, με σταθερή και κατακόρυφη προς τα πάνω κίνηση. Μετρήθηκε, σε χιλιοστά, η διαφορά ανάμεσα στο ύψος του κώνου και του υψηλότερου σημείου του σκυροδέματος που αποτελεί και την κάθιση του σκυροδέματος. Στο **Σχήμα 27** παρουσιάζεται η διενέργεια της δοκιμής κάθισης [Βουδικλάρης Θ.Γ.].



Σχήμα 27: Απεικόνιση της δοκιμής κάθισης (EN 12350-2).

2.3.2 Προσδιορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος

Ο καθορισμός της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος γίνεται σύμφωνα με το Πρότυπο EN 12350-6. Το δοχείο μέτρησης, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, για το σκυρόδεμα είχε χωρητικότητα 8lt. Η συμπύκνωση πραγματοποιήθηκε με τράπεζα δόνησης. Το βάρος του συμπυκνωμένου σκυροδέματος 8lt, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πυκνότητας νωπού σκυροδέματος.

2.4 Μελέτη των χαρακτηριστικών και της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος.

2.4.1 Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας και λόγου poisson

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου poisson χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε θλίψη, η οποία έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C469-02. 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.

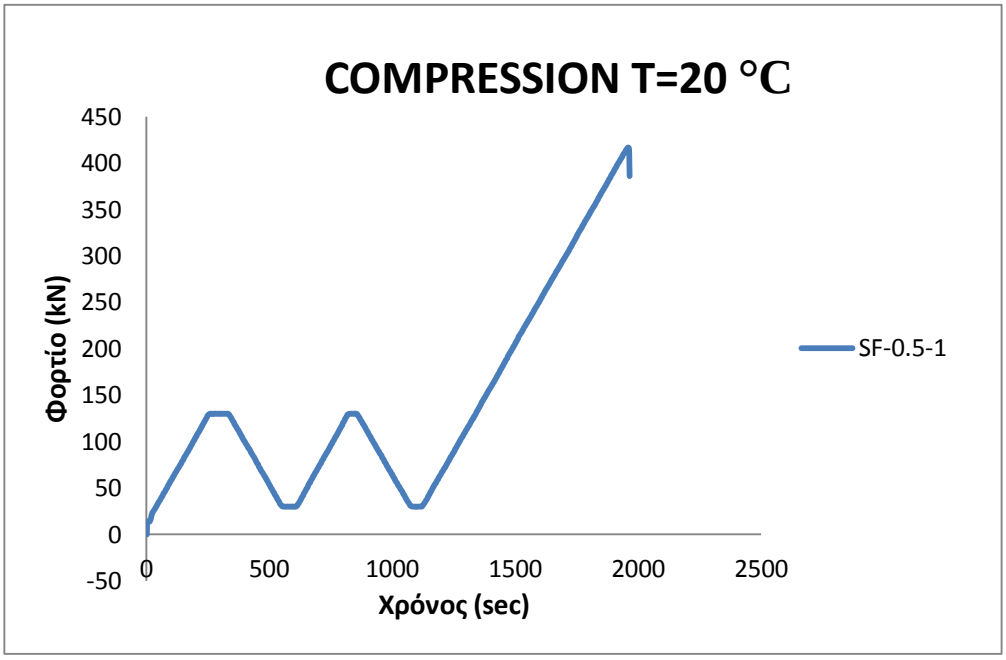
Για την εκτέλεση του πειράματος τοποθετήθηκαν στο κέντρο των πλακών της μηχανής δυο επιπλέον μικρότερες πλάκες, διαμέτρου 100 mm, ενώ για τον υπολογισμό της αξονικής

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 μέσο του ύψους του δοκιμίου. Στην άκρη της αλυσίδας τοποθετείται επιμηκυνσιόμετρο τύπου 3544 EPSILON ώστε να μετράται η διόγκωσή του **(Σχήμα 28)**. Τέλος, ακτινικά ανά 120 μοίρες εκτός από τα LVDTs τοποθετήθηκαν πάνω στο δοκίμιο αισθητήρες, οι οποίοι κατέγραφαν τα ακουστικά γεγονότα που λάμβαναν χώρα λόγω της ρηγμάτωσης που προκαλούνταν στη μάζα του σκυροδέματος. Τοποθετήθηκαν συνολικά 8 αισθητήρες περιμετρικά του δοκιμίου πάνω σε άξονες που είχαν σχεδιασθεί ανά 90 μοίρες. Συγκεκριμένα κάθε άξονας είχε 4 αισθητήρες σε απόσταση 2 cm από την άνω επιφάνεια του δοκιμίου και 2 cm από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Οι μετρήσεις αυτές αποτέλεσαν αντικείμενο έρευνας του Δ. Χουμανίδη και για το λόγο αυτό δεν αναλύονται περαιτέρω.

Σχήμα 28: Προετοιμασία και εκτέλεση δοκιμής θλίψης για τον προσδιορισμό του Ε.

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 20kN. Στο δεύτερο στάδιο, το δοκίμιο ξαναφορτίζεται πάλι μέχρι τα 120kN (περίπου) και εκ νέου αποφορτίζεται μέχρι τα 20 kN. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι να οδηγηθεί σε αστοχία. Η τιμή των 120 kN αντιστοιχεί στο 40% περίπου του αναμενόμενου μέγιστου φορτίου όλων των δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπως προσδιορίστηκε αρχικά. Στο **Σχήμα 29** παρατίθεται ενδεικτικά το διάγραμμα φορτίου-χρόνου της δοκιμής σε θλίψη σε ένα από τα δοκίμια όλων των συνθέσεων.



Σχήμα 29: Διάγραμμα Φορτίου-Χρόνου της σύνθεσης SF με ποσοστό ινών 0.5% σε θερμοκρασία δωματίου ηλικίας 28 ημερών.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το τρίτο στάδιο φόρτισης, μόνο. Επιλέχθηκε ως περιοχή πειραματικών δεδομένων αυτή που αντιστοιχεί στο 20% 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 (**Σχήμα 30**). Ο λόγος poisson προσδιορίστηκε ως ο λόγος της μεταβολής της εγκάρσιας παραμόρφωσης από το 20% στο 40% του μέγιστου φορτίου προς τη μεταβολή της διαμήκη παραμόρφωσης από το 20% στο 40% του μέγιστου φορτίου, για όλες τις συνθέσεις. Πιο αναλυτικά, ο λόγος poisson προσδιορίστηκε από την **Εξίσωση 10**.

$$\nu = (\varepsilon_{t2}-\varepsilon_{t1}) / (\varepsilon_2-\varepsilon_1) \qquad \textbf{(10)}$$

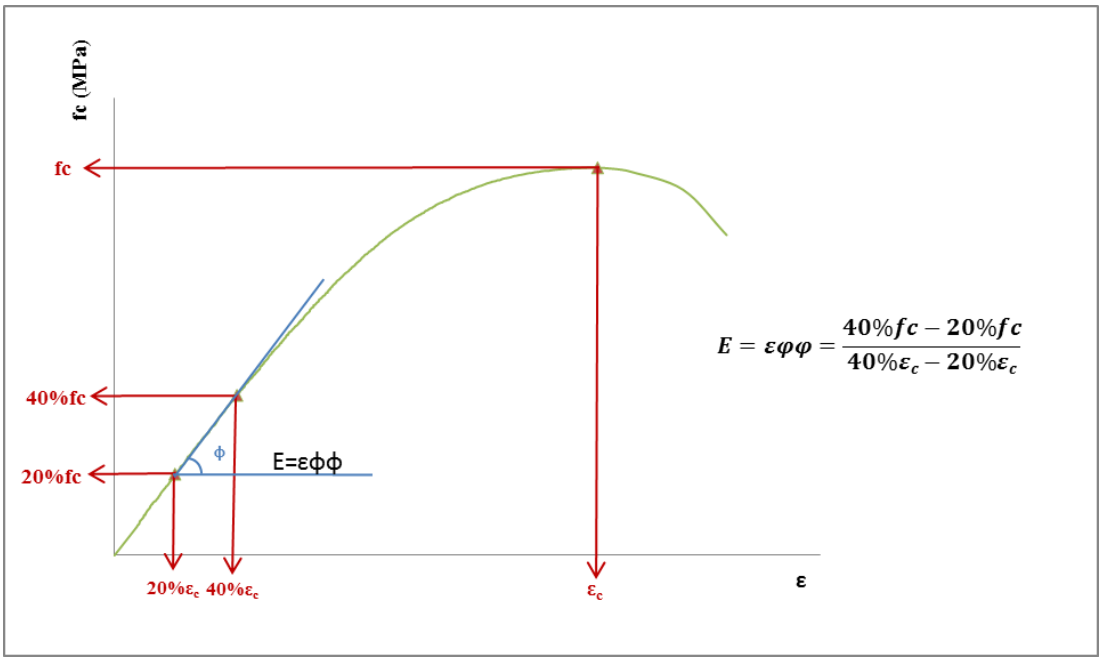
όπου

ε_{t2} η εγκάρσια παραμόρφωση στο 40% του μέγιστου φορτίου

ε_{t1} η εγκάρσια παραμόρφωση στο 20% του μέγιστου φορτίου

ε_2 η εδιαμήκης παραμόρφωση στο 40% του μέγιστου φορτίου

ε_1 η εγκάρσια παραμόρφωση στο 20% του μέγιστου φορτίου



Σχήμα 30: Γραφική απεικόνιση υπολογισμού μέτρου ελαστικότητας χορδής.

2.4.2 Δοκιμή Barcelona

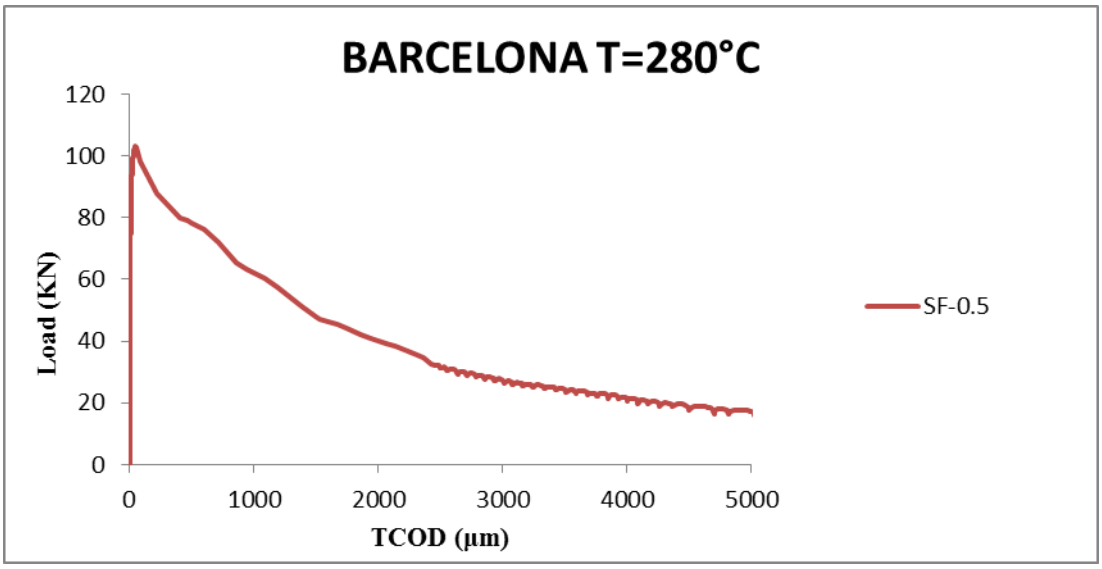
Πρόκειται για τη Δοκιμή Barcelona (BCN), η οποία πραγματοποιήθηκε σε μηχανή του ιταλικού οίκου CONTROLS δυναμικότητας 5000 kN. Ο έλεγχος έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο AENOR. UNE 83515:2010. Η δοκιμή εκτελέστηκε με το σερβοϋδραυλικό σύστημα ελέγχου φορτίου ADVANCED 9, με μετατόπιση 0. 5 mm/min. Για τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού-δοκιμή Barcelona σκυροδετήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια με ύψος 180 mm και διάμετρο 150 mm και στη συνέχεια κόπηκαν σε ύψος 150 mm σύμφωνα με το πρότυπο της δοκιμής.

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 31** στο κέντρο και μεταξύ των πλακών της μηχανής και των δοκιμίων, τοποθετήθηκαν δύο κυλινδρικές μεταλλικές σφήνες διαμέτρου 2α=37.5 mm, (2α/2b=1/4, όπου 2b, η διάμετρος του δοκιμίου). Η αξονική μετατόπιση μεταξύ των μεταλλικών σφηνών μετρήθηκε με τρία LVDTs εύρους 10 mm ανά 120 μοίρες στερεωμένα πάνω σε μεταλλικές μαγνητικές βάσεις, οι οποίες είχαν τοποθετηθεί στην κάτω πλάκα της πρέσσας. Για τον υπολογισμό της εγκάρσιας παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκε επιμηκυνσιόμετρο εγκάρσιας μετατόπισης, με μορφή αλυσίδας, το οποίο τοποθετείται στο μέσο του ύψους του δοκιμίου. Στην

άκρη της αλυσίδας τοποθετείται επιμηκυνσιόμετρο τύπου 3544 EPSILON ώστε να μετράται η διόγκωσή του. Έτσι, μετρήθηκε η περιμετρική παραμόρφωση του δοκιμίου TCOD (Total Circumferential Opening Displacement). Οι μετρήσεις από το φορτίο και τα LVDTs καταγράφηκαν με το πρόγραμμα Controls S.R.L. Advantest. Τέλος, ακτινικά ανά 90 μοίρες εκτός από τα LVDTs τοποθετήθηκαν πάνω στο δοκίμιο αισθητήρες, οι οποίοι κατέγραφαν τα ακουστικά γεγονότα που λάμβαναν χώρα λόγω της ρηγμάτωσης που προκαλούνταν στη μάζα του σκυροδέματος. Τοποθετήθηκαν συνολικά 8 αισθητήρες περιμετρικά του δοκιμίου πάνω σε άξονες που είχαν σχεδιασθεί ανά 90 μοίρες. Συγκεκριμένα κάθε άξονας είχε 4 αισθητήρες σε απόσταση 2 cm από την άνω επιφάνεια του δοκιμίου και 2 cm από την κάτω επιφάνεια του δοκιμίου. Οι μετρήσεις αυτές αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής που βρίσκεται σε εξέλιξη.

Σχήμα 31: Απεικόνιση της διάταξης Δοκιμής Barcelona.

Στο **Σχήμα 32,** παρατίθεται ενδεικτικά διάγραμμα Φορτίου-Περιμετρικής Μετατόπισης της Δοκιμής Barcelona σε ένα από τα δοκίμια όλων των συνθέσεων που εκτίθοναι σε υψηλές θερμοκρασίες 280°C.



Σχήμα 32: Διάγραμμα Φορτίου-Περιμετρικής Μετατόπισης της σύνθεσης SF με ποσοστό ινών 0.5% σε υψηλές θερμοκρασίες ηλικίας 28 ημερών.

2.4.3 Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας

Ο έλεγχος της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο EN 14651:2005+A1:2007 και έχει περιγραφεί λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η δοκιμή εκτελέστηκε σε πλαίσιο του ιταλικού οίκου CONTROLS δυναμικότητας 150 kN. Για τη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού-δοκιμή Κάμψης τριων σημείων με εγκοπή στην παρούσα μελέτη, το φορτιζόμενο άνοιγμα των δοκιμίων (span) είναι 300 mm και ο ρυθμός φόρτισης που επιλέχθηκε ήταν 0.05 mm/min. Το πείραμα έγινε με έλεγχο ανοίγματος ρωγμής CMOD (Crack Mouth Opening Displacement) και όχι με έλεγχο φορτίου. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν το άνοιγμα ρωγμής ξεπεράσει τα 4 mm.

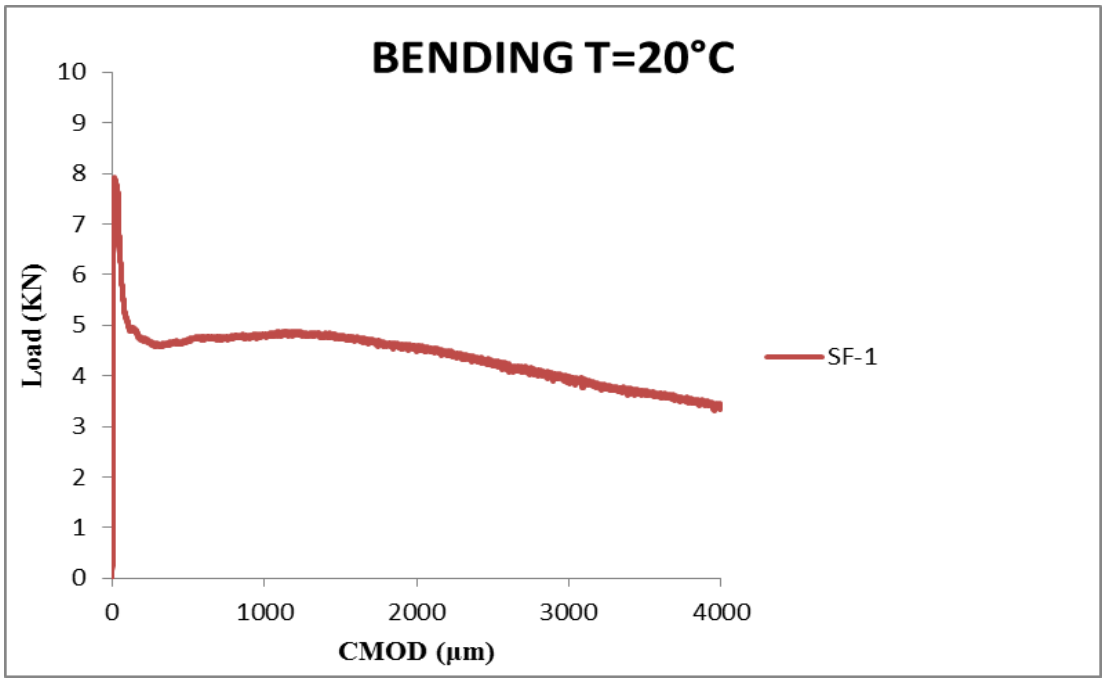
Η δοκιμή εκτελέστηκε με τη χρήση του εμβόλου του πλαισίου το οποίο μετατοπίζονταν με τον επιθυμητό ρυθμό ώστε να επιτευχθεί ρυθμός ανοίγματος ρωγμής 0.05 mm/min. Η δοκός εδράζοταν σε κατάλληλη διάταξη και η θέση των στηρίξεων ικανοποιούσε το απαιτούμενο από το πρότυπο άνοιγμα. Στο έμβολο είχε προσαρμοστεί με άρθρωση κατάλληλη διάταξη, η οποία ασκούσαι σημειακό φορτίο, με επιβαλλόμενη μετατόπιση. Η μέτρηση του ανοίγματος της

ρωγμής έγινε με τη χρήση επιμηκυνσιομέτρου τύπου 3544 EPSILON, το οποίο μετρούσε το άνοιγμα ρωγμής από την κάτω παρειά της δοκού. Για τη μέτρηση του ανοίγματος ρωγμής, χρησιμοποιήθηκαν δύο μικρές λάμες αλουμινίου με οπές οι οποίες προσαρμοζόντουσαν και δεσμεύονταν πάνω στο δοκίμιο με τη χρήση κόλλας ταχείας πήξεως που επέτρεπε την ακριβή μέτρηση του ανοίγματος ρωγμής. Η διεύθυνση της εγκοπής είναι κάθετη στο επίπεδο σκυροδέτησης. Η διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω **Σχήμα 33**.

Ακόμα, τοποθετήθηκαν συνολικά 8 αισθητήρες περιμετρικά του δοκιμίου πάνω σε κάνναβο που είχε σχεδιάστει. Οι μετρήσεις αυτές αποτέλεσαν αντικείμενο μελέτης στο πλαίσιο διδακτορικής διατριβής που βρίσκεται σε εξέλιξη.

Στο **Σχήμα 34** παρατίθεται ενδεικτικά διαγράμμα φορτίου-ανοίγματος ρωγμής της δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, δοκιμίων που συντηρήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.

Σχήμα 33: Πειραματική διάταξη για τη Δοκιμή σε Κάμψη τριών σημείων με εγκοπή.



Σχήμα 34: Διάγραμμα Φορτίου-Ανοίγματος ρωγμής της σύνθεσης SF με ποσοστό ινών 1.0% σε θερμοκρασία δωματίου μετά από 28 ημέρες.

3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Αποτελέσματα νωπού σκυροδέματος

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της παρασκευής του σκυροδέματος ελέγχθηκαν οι ιδιότητες του κατά τη νωπή του φάση. Οι ιδιότητες αυτές περιλαμβάνουν την κάθιση και το μοναδιαίο βάρος του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σύνθεση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 12**.

Πίνακας 12: Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων.

	PLAIN	SF-0.5	PPF1-0.5	PPF2-0.5	SF-1	PPF1-1	PPF2-1	SF-0.5+ PPF1-0.5	SF-0.5+ PPF2-0.5	PPF1-0.5+ PPF2-0.5
ΚΑΘΙΣΗ (mm)	110	135	100	110	130	0	130	130	150	135
ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΒΑΡΟΣ (Kg/lt)	2.329	2.345	2.280	2.017	2.366	2.299	2.206	2.341	2.036	2.029

Όπως προκύπτει από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όλες οι συνθέσεις εντάσσονται στην κατηγορία κάθισης S3 (100-150 mm) σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.). Εξαίρεση αποτελεί η σύνθεση PPF1-1 η οποία εντάσσεται στην κατηγορία S1 (0-40 mm). Οι συνθέσεις SF-0.5 και SF-1.0, στις οποίες οι αναλογίες αδρανών, τσιμέντου και νερού ήταν ίδιες όπως και η ποσότητα του ρευστοποιητή, η κάθιση μειώνεται ελαφρώς λόγω αύξησης του ποσοστού των ινών.

Αναφορικά με το Μοναδιαίο Βάρος, παρατηρείται ότι η παρουσία των μεταλλικών ινών αυξάνει το μοναδιαίο βάρος ενώ οι ίνες πολυπροπυλενίου το μειώνει. Στις υβριδικές συνθέσεις, μόνο η σύνθεση SF/PPF1 παρουσιάζει μικρή αύξηση του μοναδιαίου βάρους.

3.2 Αποτελέσματα Σκληρυμένου Σκυροδέματος σε δοκίμια που ελέγχονται σε θερμοκρασίες δωματίου.

3.2.1 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 στον **Πίνακα 13** και μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας της κάθε σύνθεσης. Οι τιμές της θλιπτικής αντοχής των διαφορετικών συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια, καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνθέσεις PPF1-0.5+PPF2-0.5 στην οποία ο συντελεστής μεταβλητότητας παρουσίασε πολύ χαμηλή τιμή (0.9%). Η θλιπτική αντοχή του άοπλου σκυροδέματος (σύνθεση PLAIN) παρουσίασε παραπλήσια τιμή με τη θλιπτική αντοχή για την υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF2. Για την υβριδική σύνθεση με ίνες PPF1+PPF2 και τη σύνθεση PPF2-0.5 προέκυψε μείωση της θλιπτικής αντοχής σε σύγκριση με το άοπλο σκυρόδεμα, με τη σύνθεση PPF2-0.5 να παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μείωση από όλες τις υπόλοιπες συνθέσεις που εξετάστηκαν της τάξης του 15%. Η μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή παρουσιάζεται στην σύνθεση SF-0.5.

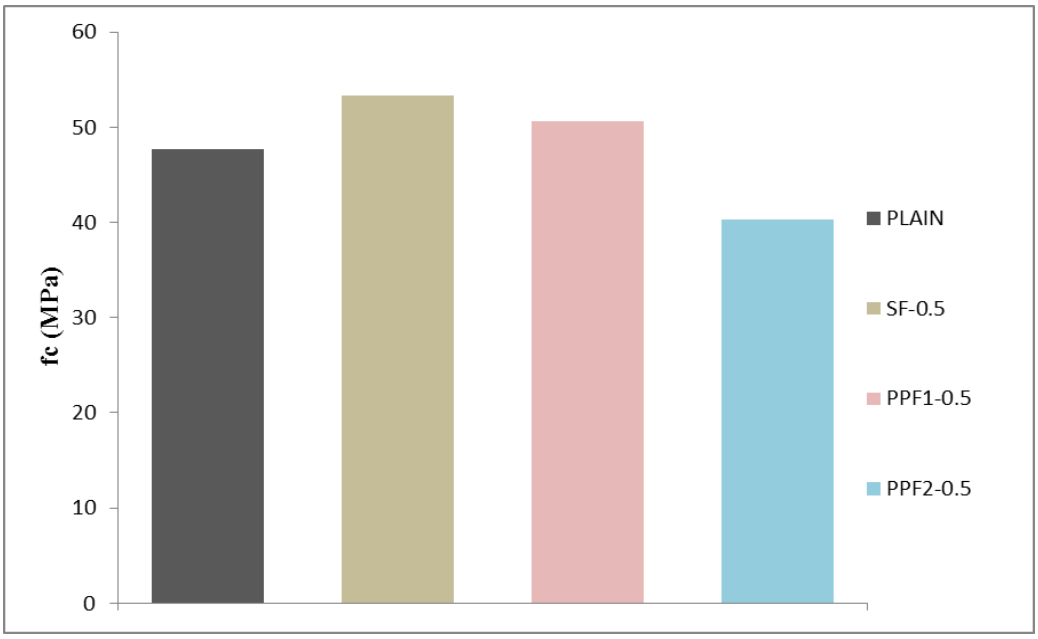
Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με το ίδιο είδος ινών αλλά διαφορετικό ποσοστό, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση της θλιπτικής αντοχής με τις συνθέσεις PPF2 να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη αύξηση της τάξεως του 30% με την αύξηση του ποσοστού των ινών, ενώ για τις συνθέσεις με ίνες SF η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και μείωση της θλιπτικής αντοχής της τάξεως του 5%.

Στα **Σχήματα 35$^{\alpha}$** και **35$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό ινών. Τα **Σχήματα 35$^{\alpha}$** και **35$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο., (**Σχήμα 35$^{\alpha}$**) η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή ενώ οι συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους με τη σύνθεση PPF2 να παρουσιάζει τη μικρότερη θλιπτική αντοχή. Για τη συγκεκριμένη παρατήρηση τίθεται το θέμα της περαιτέρω διερεύνησης,

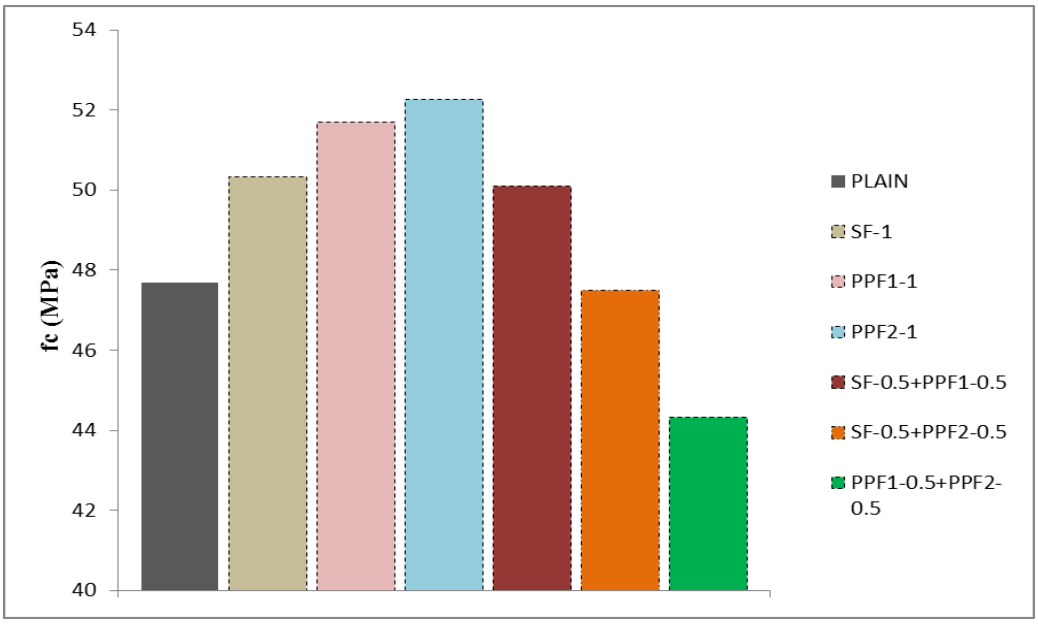
καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας των τιμών του fc για τις συνθέσεις PPF2 είναι ο μεγαλύτερος. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 35$^{\beta}$**), παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Οι συνθέσεις με ίνες SF και οι υβριδικές συνθέσεις με SF+PPF1 παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή της θλιπτικής αντοχής ενώ οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF2 και PPF1+PPF2 παρουσιάζουν μικρότερη θλιπτική αντοχή.

Πίνακας 13: Θλιπτική αντοχή (MPa) κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή (MPa) και συντελεστής διακύμανσης της κάθε σύνθεσης.

Δοκίμιο	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση
PLAIN A	46.41	47.70	2.15%
PLAIN B	47.76		
PLAIN C	48.92		
SF-0.5 A	54.28	53.35	2.37%
SF-0.5 B	54.20		
SF-0.5 C	51.56		
PPF1-0.5 A	52.13	50.68	4.73%
PPF1-0.5 B	47.30		
PPF1-0.5 C	52.61		
PPF2-0.5 A	43.88	40.35	6.22%
PPF2-0.5 B	38.86		
PPF2-0.5 C	38.30		
SF-1 A	50.52	50.32	2.53%
SF-1 B	51.77		
SF-1 C	48.66		
PPF1-1 A	53.16	51.71	2.43%
PPF1-1 B	51.86		
PPF1-1 C	50.10		
PPF2-1 A	53.05	52.25	1.27%
PPF2-1 B	51.42		
PPF2-1 C	52.28		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	50.88	50.10	2.21%
SF-0.5+PPF1-0.5 B	50.89		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	48.54		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	46.29	47.49	1.81%
SF-0.5+PPF2-0.5 B	47.93		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	48.24		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	44.85	44.33	0.90%
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	44.26		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	43.89		



Σχήμα 35^{α}: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 35^{β}: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0 %.

3.2.2 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος poisson.

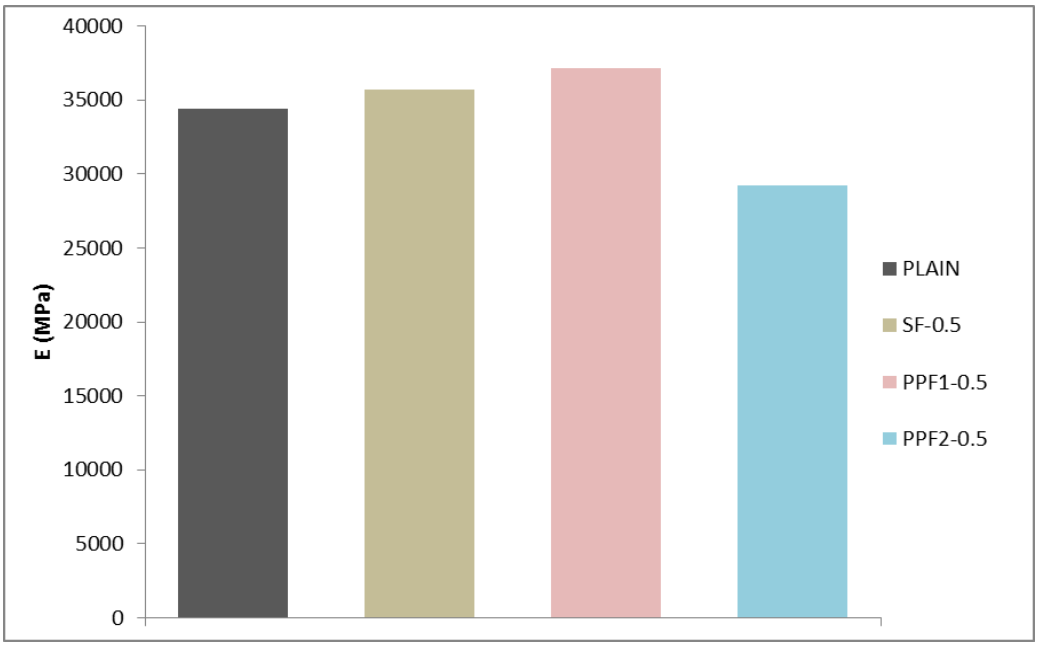
Τα αποτελέσματα του **μέτρου ελαστικότητας** για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις δίνονται στον **Πίνακα 14**, όπου επίσης παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Όλες οι συνθέσεις έχουν παρόμοια τιμή μέτρου ελαστικότητας καθώς το στάδιο πριν από την πρώτη αστοχία δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την προσθήκη ή το ποσοστό των ινών, το οποίο και θεωρείται χαμηλό, αλλά κυρίως από την αναλογία αδρανών, τσιμέντου και νερού. Τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζει η σύνθεση PPF1-0.5, και όχι η σύνθεση SF-0.5 παρά το γεγονός ότι η σύνθεση SF-0.5 έχει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 5%. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνθέσεις SF-0.5 και PPF1-1 στις οποίες ο συντελεστής διακύμανσης παρουσίασε πολύ χαμηλή τιμή (0.44% και 0.91% αντίστοιχα).

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τις συνθέσεις με ίνες PPF1 στις οποίες αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές του Ε της σύνθεσης με ίνες PPF1-0.5 παρουσιάζουν το μεγαλύτερο συντελεστή διακύμανσης (5%).

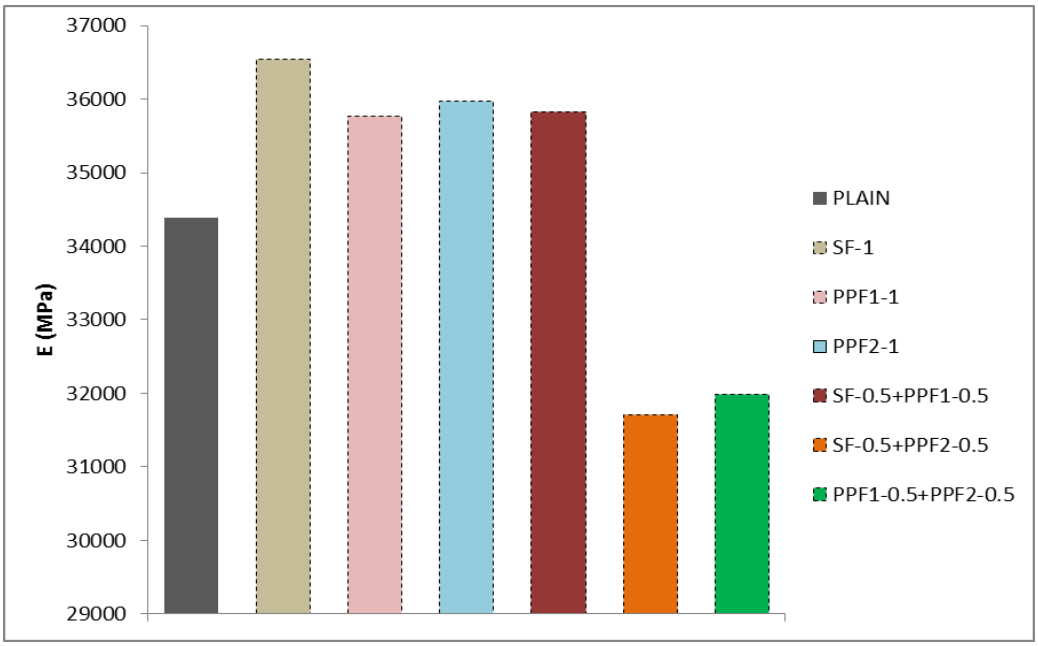
Στα **Σχήματα 36$^{\alpha}$** και **36$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό ινών. Τα **Σχήματα 36$^{\alpha}$** και **36$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 36$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας ενώ η σύνθεση PPF2 παρουσιάζει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 36$^{\beta}$**), παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με ίνες SF, PPF1 και PPF2 καθώς και η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF1 έχουν παραπλήσια τιμή του Ε, ενώ οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF2 και PPF1+PPF2 παρουσιάζουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, παραπλήσιας τιμής.

Πίνακας 14: Μέτρο ελαστικότητας (MPa), μέση τιμή (MPa) και συντελεστής διακύμανσης της κάθε σύνθεσης.

Δοκίμιο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση
PLAIN A	33188	34389	3.03%
PLAIN B	35729		
PLAIN C	34251		
SF-0.5 A	35695	35741	0.44%
SF-0.5 B	35953		
SF-0.5 C	35574		
PPF1-0.5 A	34956	37149	4.49%
PPF1-0.5 B	39003		
PPF1-0.5 C	37488		
PPF2-0.5 A	30626	29238	3.95%
PPF2-0.5 B	27797		
PPF2-0.5 C	29292		
SF-1 A	36080	36539	1.62%
SF-1 B	36164		
SF-1 C	37373		
PPF1-1 A	36090	35765	0.91%
PPF1-1 B	35885		
PPF1-1 C	35319		
PPF2-1 A	36583	35976	1.93%
PPF2-1 B	36343		
PPF2-1 C	35003		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	34505	35826	2.89%
SF-0.5+PPF1-0.5 B	37037		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	35934		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	31482	31701	1.20%
SF-0.5+PPF2-0.5 B	31387		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	32235		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	32255	31978	1.25%
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	31412		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	32265		



Σχήμα 36^{α}: Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 36^{β}: Μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

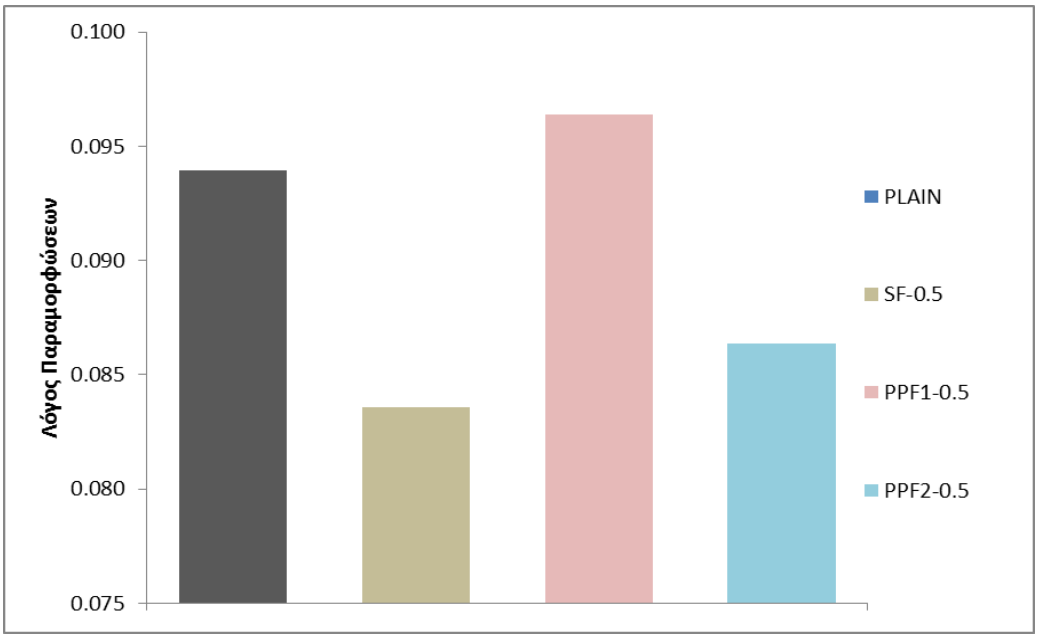
Τα αποτελέσματα του **λόγου poisson** για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις δίνονται στον **Πίνακα 15**, όπου επίσης παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές για τις συνθέσεις SF-0.5 και PPF1-0.5 καθώς και για τις υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF2 και PPF1+PPF2 παρουσίασαν μεγάλη ανομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους ξεπερνά το 10%. Ωστόσο παρατηρείται μικρή διακύμανση στη μέση τιμή του λόγου poisson της κάθε σύνθεσης καθώς κυμαίνεται από 0.084 έως 0.103. Ακόμα συγκρίνοντας τη μέση τιμή από κάθε σύνθεση, παρατηρείται πως η προσθήκη ινών στο αμιγές σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου poisson.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με το ίδιο είδος ινών αλλά διαφορετικό ποσοστό, παρατηρείται πως για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου το λόγο poisson ενώ για τις συνθέσεις με ίνες PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση του λόγου poisson της τάξεως 7%.

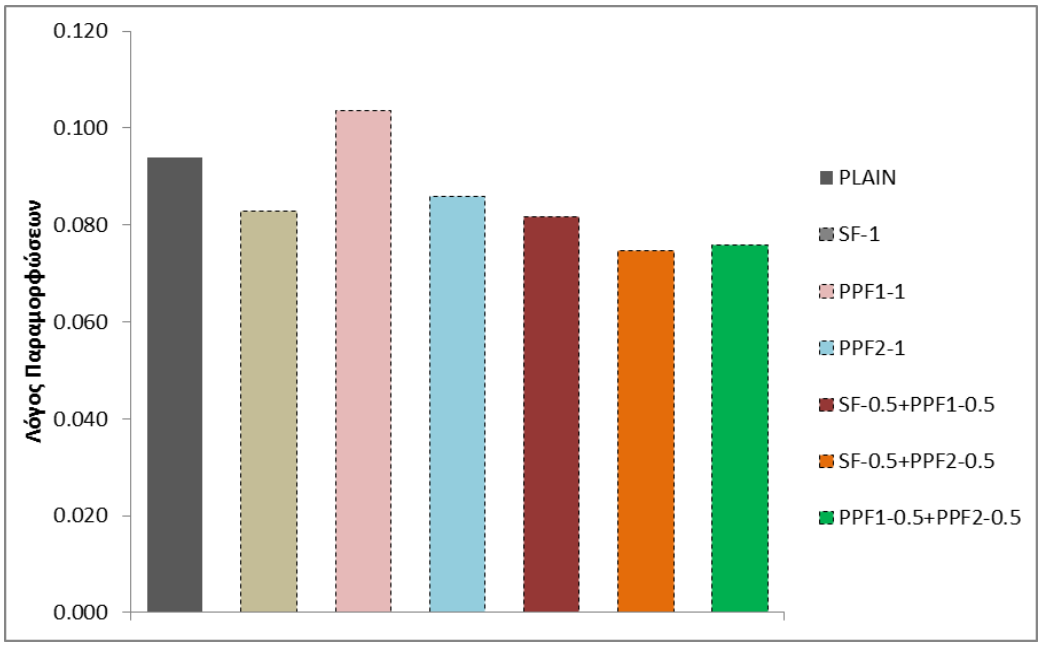
Στα **Σχήματα 37$^{\alpha}$** και **37$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή του λόγου poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, όπου φαίνεται χαρακτηριστικά ο μικρότερος λόγος poisson που παρουσιάζεται στην υβριδική σύνθεση SF+PPF2. Τα **Σχήματα 37$^{\alpha}$** και **37$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 37$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει το μεγαλύτερο λόγο poisson ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 έχουν παραπλήσιο λόγο poisson. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 37$^{\beta}$**), παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει το μεγαλύτερο λόγο poisson ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 καθώς και η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF1 έχουν σχετικά παραπλήσια τιμή. Οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF2 και PPF1+PPF2 παρουσιάζουν λόγο poisson παραπλήσιας τιμής, αλλά και τη μικρότερη όλων των συνθέσεων.

Πίνακας 15: Λόγος poisson, μέση τιμή και συντελεστής διακύμανσης της κάθε σύνθεσης.

Δοκίμιο	Λόγος Poisson	Μέση Τιμή	Διακύμανση
PLAIN A	0.089	0.094	5.16%
PLAIN B	0.092		
PLAIN C	0.100		
SF-0.5 A	0.095	0.084	17.39%
SF-0.5 B	0.092		
SF-0.5 C	0.063		
PPF1-0.5 A	0.124	0.096	20.48%
PPF1-0.5 B	0.084		
PPF1-0.5 C	0.081		
PPF2-0.5 A	0.090	0.086	3.25%
PPF2-0.5 B	0.083		
PPF2-0.5 C	0.087		
SF-1 A	0.085	0.083	2.20%
SF-1 B	0.082		
SF-1 C	0.081		
PPF1-1 A	0.107	0.103	3.03%
PPF1-1 B	0.100		
PPF1-1 C	0.103		
PPF2-1 A	0.077	0.086	8.86%
PPF2-1 B	0.085		
PPF2-1 C	0.096		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	0.082	0.082	0.60%
SF-0.5+PPF1-0.5 B	0.082		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	0.081		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	0.067	0.075	13.40%
SF-0.5+PPF2-0.5 B	0.089		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	0.068		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	0.063	0.076	14.09%
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	0.075		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	0.089		



Σχήμα 37^{α}: Μέση τιμή λόγου poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 37^{β}: Μέση τιμή λόγου poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

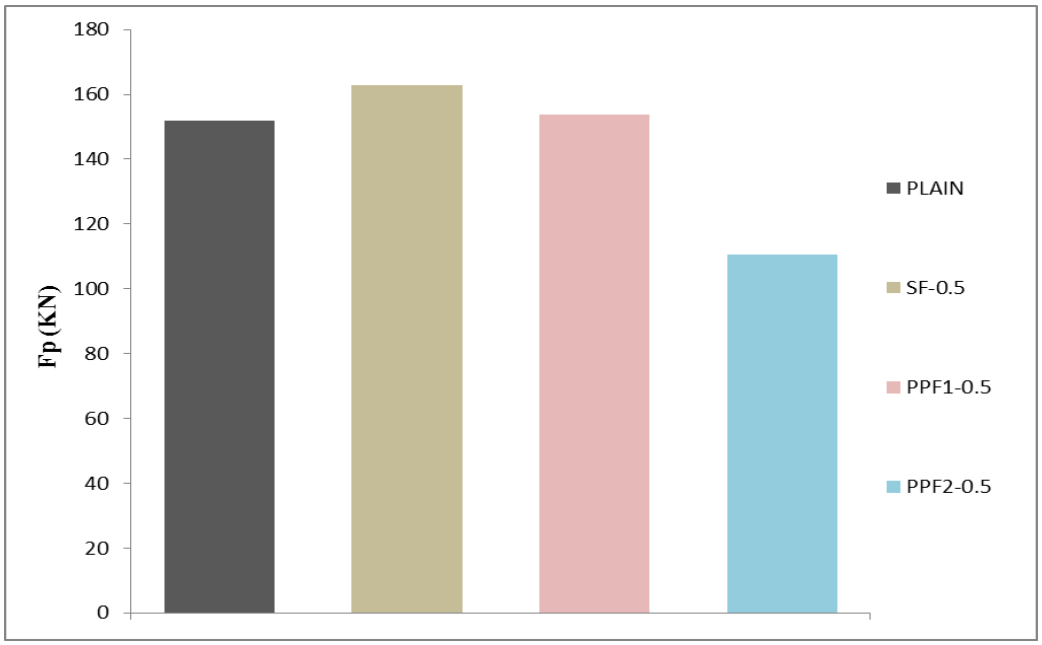
3.2.3 Δοκιμή Barcelona

Τα αποτελέσματα των **μέγιστων φορτίων** στη Δοκιμης Barcelona για κάθε δοκίμιο δίνονται στον **Πίνακα 16**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%. Παρατηρείται επίσης ότι μόνο στις συνθέσεις με ίνες SF, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, η τιμή του μέγιστου φορτίου ελαττώνεται. Αντιθέτως στις συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 με την αύξηση του ποσοστού των ινών, αυξάνεται το μέγιστο φορτίο. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στη σύνθεση PPF2 με ποσοστό αύξησης 44%. Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση.

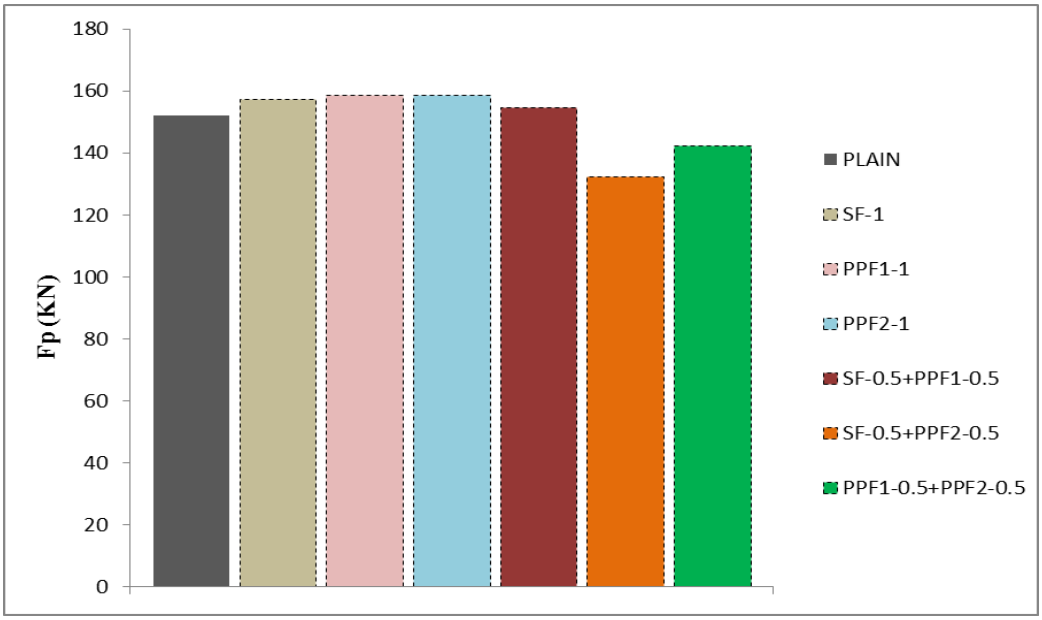
Στα **Σχήματα 38$^{\alpha}$** και **38$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με το μέγιστο φορτίο της Δοκιμής Barcelona, της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Τα **Σχήματα 38$^{\alpha}$** και **38$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 38$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες PPF2 έχει μικρότερο μέγιστο φορτίο και από τη σύνθεση αναφοράς ενώ η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου φορτίου. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 38$^{\beta}$**), οι συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 παρουσιάζουν σχεδόν ίδια τιμή μέγιστου φορτίου. Από τις υβριδικές συνθέσεις μόνο η σύνθεση SF+PPF1 έχει μέγιστο φορτίο μεγαλύτερο από το μέγιστο φορτίο που παρουσιάζεται στο αμιγές σκυρόδεμα, με τη μικρότερη τιμή να εμφανίζεται στην υβριδική σύνθεση SF+PPF2.

Πίνακας 16: Μέγιστο φορτίο (KN), μέση τιμή (KN) και συντελεστής διακύμανσης (%) της κάθε σύνθεσης όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Barcelona.

Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (KN)	Μέση Τιμή (KN)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	146.59	151.93	2.54
PLAIN B	155.55		
PLAIN C	153.66		
SF-0.5 A	166.00	162.84	2.71
SF-0.5 B	156.59		
SF-0.5 C	165.92		
PPF1-0.5 A	152.24	153.76	1.95
PPF1-0.5 B	157.95		
PPF1-0.5 C	151.11		
PPF2-0.5 A	107.08	110.63	5.67
PPF2-0.5 B	105.36		
PPF2-0.5 C	119.44		
SF-1 A	157.44	157.32	0.47
SF-1 B	156.36		
SF-1 C	158.16		
PPF1-1 A	~	158.68	2.04
PPF1-1 B	155.44		
PPF1-1 C	161.91		
PPF2-1 A	161.91	158.61	1.61
PPF2-1 B	158.25		
PPF2-1 C	155.68		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	154.51	154.46	2.27
SF-0.5+PPF1-0.5 B	158.73		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	150.13		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	139.96	132.14	5.40
SF-0.5+PPF2-0.5 B	122.72		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	133.74		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	146.31	142.17	2.54
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	137.51		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	142.69		



Σχήμα 38^{α}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 38^{β}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

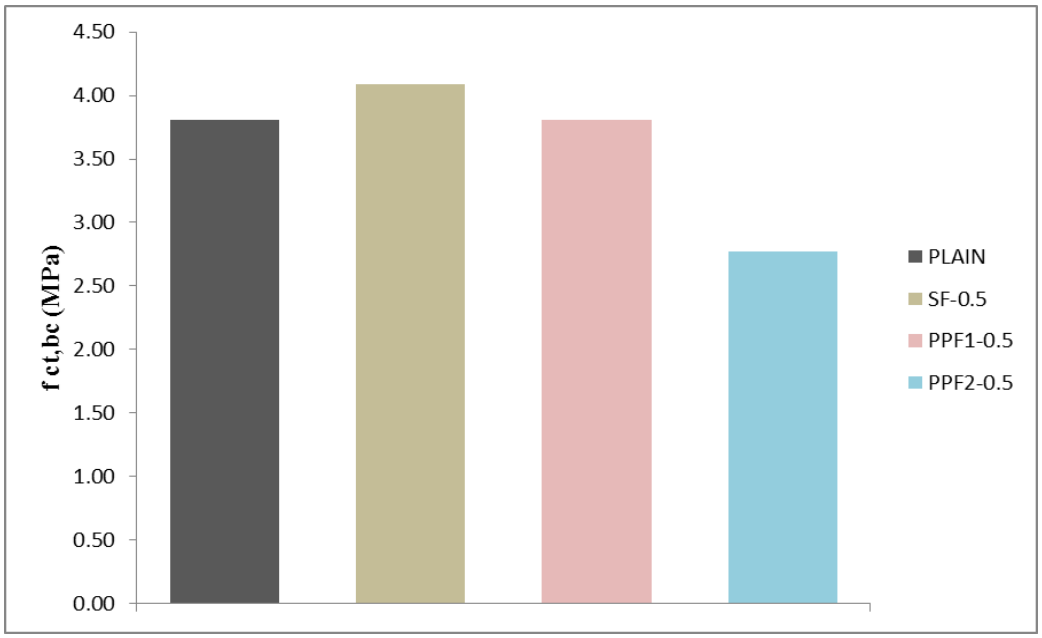
Τα αποτελέσματα της **εφελκυστικής αντοχής** στη Δοκιμης Barcelona για κάθε δοκίμιο δίνονται στον **Πίνακα 17**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας (%) των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και μείωση της εφελκυστικής αντοχής ενώ στις συνθέσεις με ίνες PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής κατά 45%.

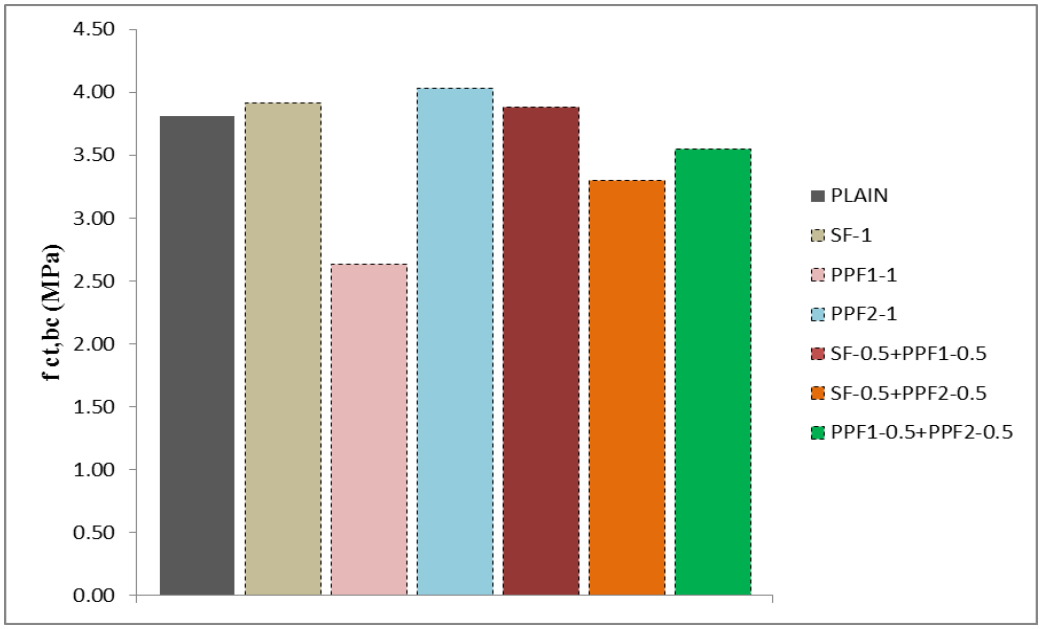
Στα **Σχήματα 39$^{\alpha}$** και **39$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με την εφελκυστική αντοχή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Τα **Σχήματα 39$^{\alpha}$** και **39$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 39$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή ενώ η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει την ίδια τιμή με την εφελκυστική αντοχή της σύνθεσης αναφορας. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 39$^{\beta}$**), παρατηρείται ότι η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εφελκύστική αντοχή ενώ η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή όλων των συνθέσεων. Όλες οι υβριδικές συνθέσεις έχουν παραπλήσια τιμή εφελκυστικής αντοχής.

Πίνακας 17: Εφελκυστική αντοχή (MPa), μέση τιμη (MPa) και συντελεστής διακύμανσης (%) όλων των συνθέσεων όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Barcelona.

Δοκίμιο	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	3.68	3.81	2.34
PLAIN B	3.87		
PLAIN C	3.87		
SF-0.5 A	4.17	4.09	2.99
SF-0.5 B	3.92		
SF-0.5 C	4.18		
PPF1-0.5 A	3.76	3.81	1.84
PPF1-0.5 B	3.91		
PPF1-0.5 C	3.76		
PPF2-0.5 A	2.67	2.77	5.64
PPF2-0.5 B	2.66		
PPF2-0.5 C	2.99		
SF-1 A	3.92	3.92	0.88
SF-1 B	3.87		
SF-1 C	3.96		
PPF1-1 A	~	2.63	1.66
PPF1-1 B	3.88		
PPF1-1 C	4.01		
PPF2-1 A	4.00	4.03	2.45
PPF2-1 B	3.93		
PPF2-1 C	4.16		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	3.85	3.88	1.49
SF-0.5+PPF1-0.5 B	3.96		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	3.83		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	3.48	3.30	4.94
SF-0.5+PPF2-0.5 B	3.09		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	3.33		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	3.67	3.55	2.86
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	3.42		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	3.56		



Σχήμα 39^{α}: Μέση τιμή εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 39^{β}: Μέση τιμή εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

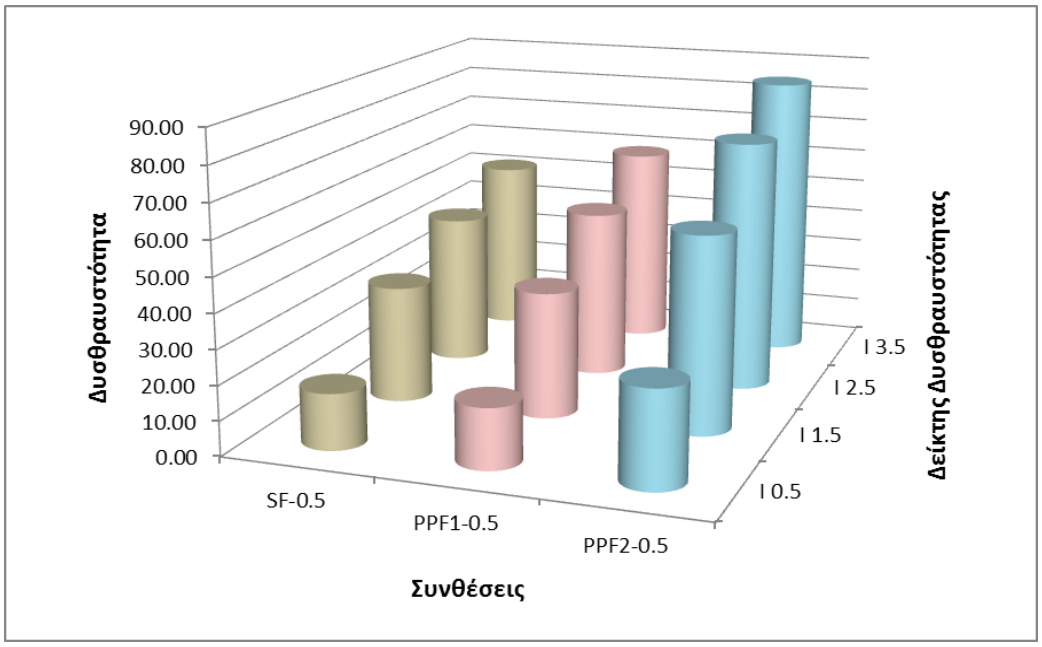
Τα αποτελέσματα των **δεικτών δυσθραυστότητας** της Δοκιμής Barcelona για κάθε σύνθεση δίνονται στον **Πίνακα 18**. Μαζί παρατίθεται ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση. Οι τιμές των περισσοτέρων συνθέσεων δεν παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους ξεπερνά την τιμή του 10%.

Για τους τέσσερις δείκτες δυσθραυστότητας (I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5), παρατηρείται πως στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, αυξάνονται και οι δείκτες δυσθραυστότητας. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει και στις συνθέσεις με ίνες PPF2.

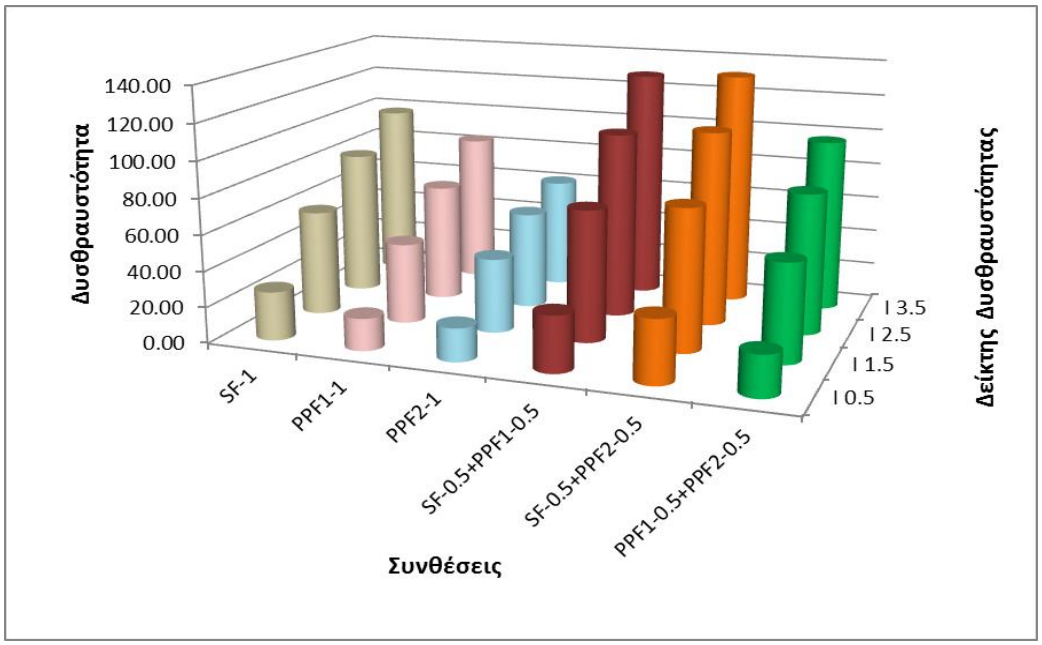
Στα **Σχήματα 40$^{\alpha}$** και **40$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τους δείκτες δυσθραυστότητας I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5 των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Μέσω των **Σχημάτων 40$^{\alpha}$** και **40$^{\beta}$**, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του ίδιου ποσοστού ινών κ.ο. στις ίνες διαφορετικού είδους. Για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 40$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει μεγαλύτερο δείκτη δυσθραυστότητας στα 3.5 mm από τις άλλες συνθέσεις. Το ίδιο συμπέρασμα παρατηρείται για τη σύνθεση με ίνες PPF2 και στους υπόλοιπους δείκτες δυσθραυστότητας. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. **(Σχήμα 40$^{\beta}$)**, παρατηρείται πως η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF2 φαίνεται να απορροφάει τη μεγαλύτερη ενέργεια, για όλες τις τιμές παραμόρφωσης, ενώ η σύνθεση με ίνες PPF2, τη μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια για μετατόπιση 1.5, 2.5, και 3.5 mm όπως φαίνεται και από τους αντίστοιχους συντελεστές I1.5, I2.5 και I3.5. Ο δείκτης I0.5 είχε τη μικρότερη τιμή στη σύνθεση με ίνες PPF1.

Πίνακας 18: Δείκτες δυσθραυστότητας και συντελεστές διακύμανσης ινοπλισμένων σκυροδεμάτων όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Barcelona.

Δοκίμιο		I 0.5	I 1.5	I 2.5	I 3.5
PLAIN	Μέση Τιμή	~	~	~	~
	Διακύμανση	~	~	~	~
SF-0.5	Μέση Τιμή	16.27	34.11	44.23	51.63
	Διακύμανση	9.71%	9.76%	10.07%	10.60%
PPF1-0.5	Μέση Τιμή	17.56	36.79	49.51	59.25
	Διακύμανση	38.45%	40.32%	40.76%	40.86%
PPF2-0.5	Μέση Τιμή	28.04	57.41	74.19	84.70
	Διακύμανση	3.13%	2.13%	3.08%	5.25%
SF-1	Μέση Τιμή	27.10	58.74	80.80	97.94
	Διακύμανση	9.37%	5.76%	4.12%	3.47%
PPF1-1	Μέση Τιμή	17.94	45.02	65.77	83.88
	Διακύμανση	15.49%	15.51%	14.90%	13.92%
PPF2-1	Μέση Τιμή	18.51	41.55	54.34	61.65
	Διακύμανση	22.53%	20.25%	20.95%	21.78%
SF-0.5+PPF1-0.5	Μέση Τιμή	31.14	73.44	104.06	128.96
	Διακύμανση	42.76%	43.47%	43.68%	43.64%
SF-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	35.22	79.24	108.81	131.41
	Διακύμανση	8.57%	8.05%	6.81%	6.71%
PPF1-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	22.81	55.10	78.98	97.10
	Διακύμανση	27.83%	36.30%	40.40%	42.53%



Σχήμα 40^{α}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Barcelona των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 40^{β}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Barcelona των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

3.2.4 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

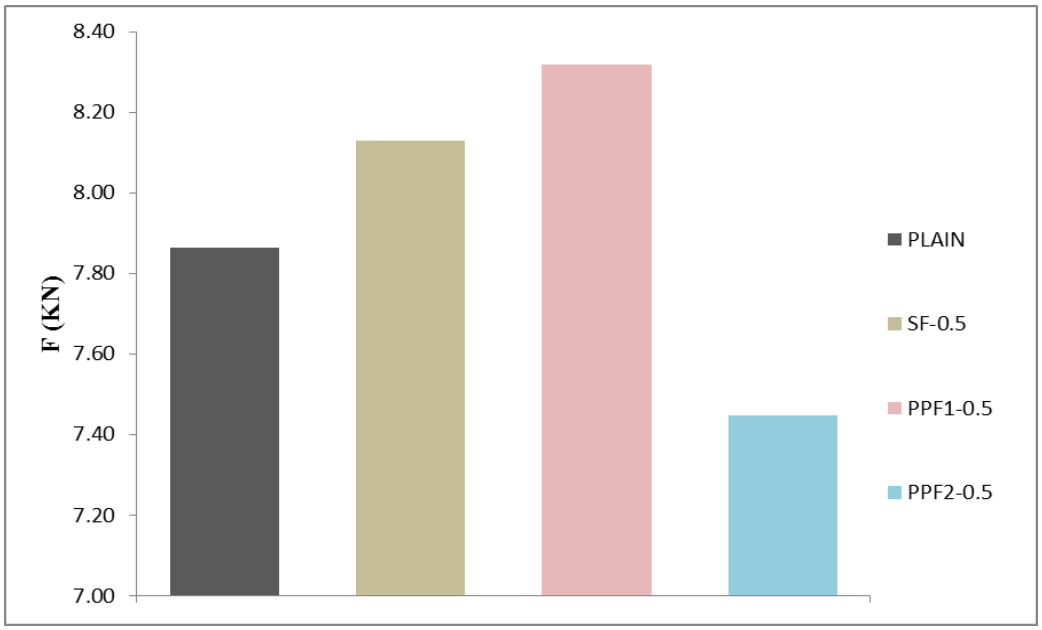
Τα αποτελέσματα των **μέγιστων φορτίων** στη Δοκιμή κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, για κάθε δοκίμιο δίνονται στον **Πίνακα 19**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με το ίδιο είδος ινών αλλά διαφορετικό ποσοστό, παρατηρούμε πως για τις συνθέσεις με ίνες SF, PPF1 και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση του μέγιστου φορτίου.

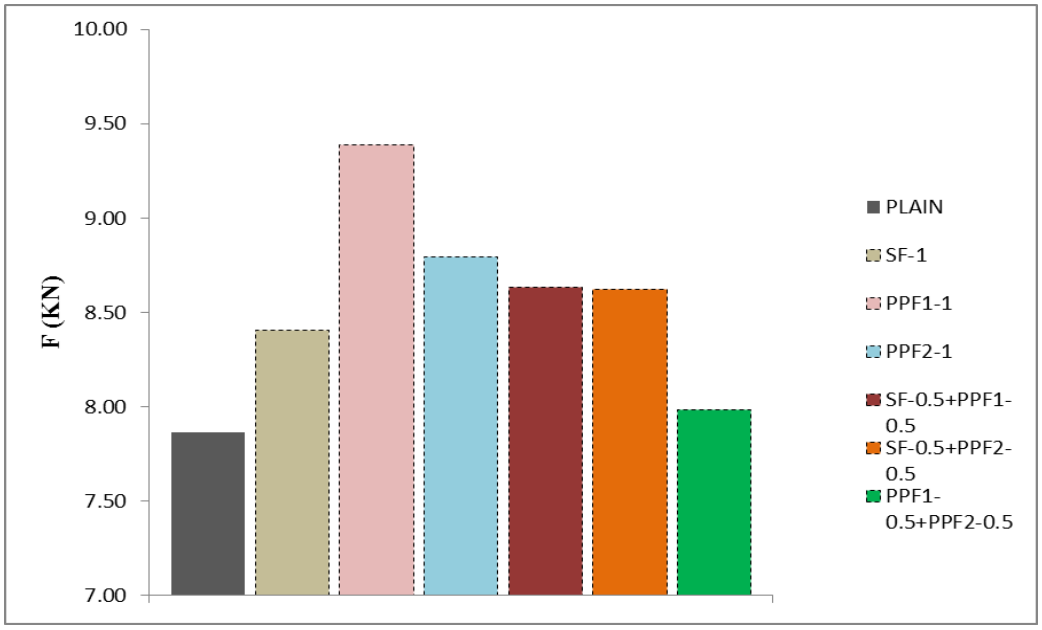
Στα **Σχήματα** 41$^{\alpha}$ και **41**$^{\beta}$, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με το μέγιστο φορτίο της Δοκιμής Κάμψης, της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Μέσω των **Σχημάτων 41**$^{\alpha}$ και **41**$^{\beta}$, μπορεί να γίνει σύγκριση των συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών αλλά διαφορετικό είδος. Για ποσοστό 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 41**$^{\alpha}$**)**, παρατηρείται πως οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 έχουν παραπλήσια τιμή μέγιστου φορτίου ενώ η σύνθεση με ίνες PPF2 έχει μικρότερο μέγιστο φορτίο από τη σύνθεση αναφοράς. Για ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 41**$^{\beta}$), η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μεγιστού φορτίου ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 καθώς και οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF1 και SF+PPF2 παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή μεγίστου φορτίου.

Πίνακας 19: Μέγιστο φορτίο (KN), μέση τιμή (KN) και συντελεστής διακύμανσης (%) της κάθε σύνθεσης όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (KN)	Μέση Τιμή (KN)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	7.92	7.87	1.02
PLAIN B	7.92		
PLAIN C	7.75		
SF-0.5 A	8.20	8.13	0.85
SF-0.5 B	8.15		
SF-0.5 C	8.04		
PPF1-0.5 A	8.59	8.32	2.37
PPF1-0.5 B	8.14		
PPF1-0.5 C	8.22		
PPF2-0.5 A	7.86	7.45	4.16
PPF2-0.5 B	7.11		
PPF2-0.5 C	7.37		
SF-1 A	8.94	8.41	4.96
SF-1 B	8.35		
SF-1 C	7.93		
PPF1-1 A	9.09	9.39	2.59
PPF1-1 B	9.69		
PPF1-1 C	9.39		
PPF2-1 A	8.69	8.79	1.06
PPF2-1 B	8.92		
PPF2-1 C	8.78		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	8.71	8.63	2.20
SF-0.5+PPF1-0.5 B	8.37		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	8.82		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	9.09	8.62	3.89
SF-0.5+PPF2-0.5 B	8.49		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	8.30		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	8.35	7.99	3.26
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	7.78		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	7.83		



Σχήμα 41^{α}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 41^{β}: Μέση τιμή μεγίστων φορτίων Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

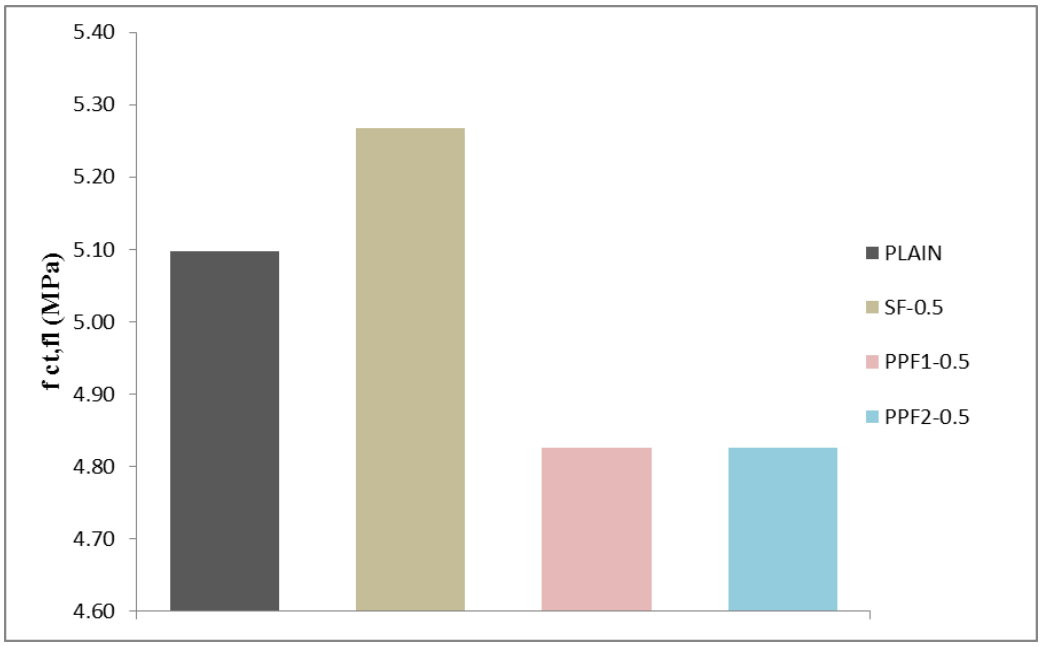
Για κάθε δοκίμιο υπολογίστηκε η **εφελεκυστική καμπτική αντοχή** μέσω Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, η οποία δίνεται στον **Πίνακα 20**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής ενώ στις συνθέσεις με ίνες SF η μέση τιμή της καμπτικής αντοχής είναι παραπλήσια.

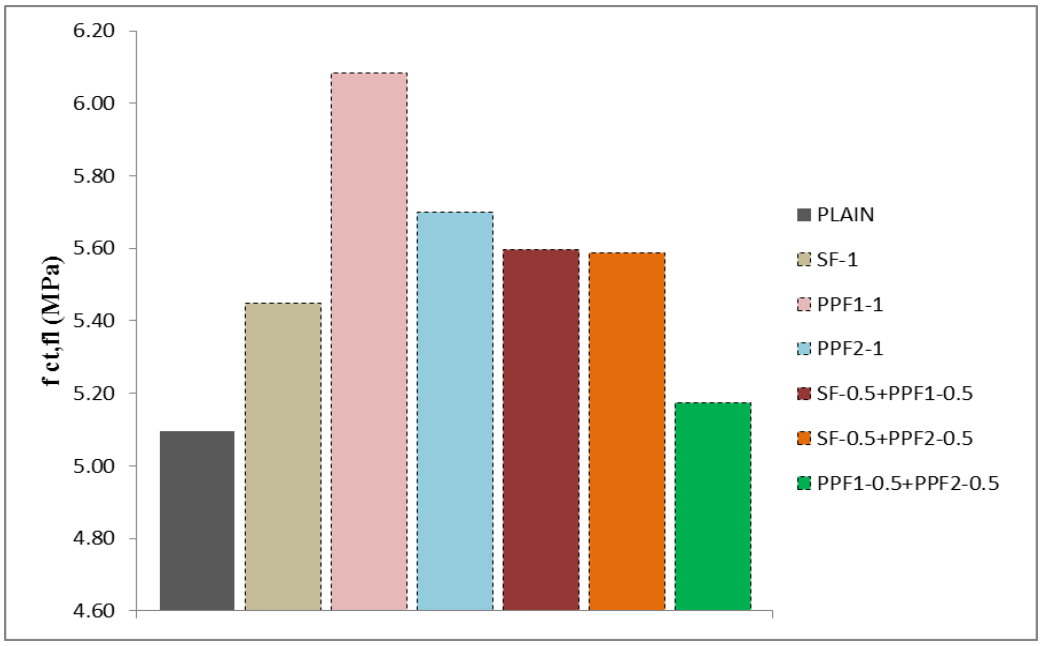
Στα **Σχήματα 42$^{\alpha}$** και **42$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με την καμπτική εφελκυστική αντοχή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Μέσω των **Σχημάτων 42$^{\alpha}$** και **42$^{\beta}$**, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του ίδιου ποσοστού ινών κ.ο. στις ίνες διαφορετικού είδους. Για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 42$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει μικρότερη καμπτική εφελκυστική αντοχή από το αμιγές σκυρόδεμα ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή με την καμπτική εφελκυστική αντοχή του αμιγούς σκυροδέματος. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. **(Σχήμα 42$^{\beta}$)**, η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 καθώς και οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF1, SF+PPF2 και PPF1+PPF2 έχουν παραπλήσια τιμή καμπτικής εφελκυστικής αντοχής.

Πίνακας 20: Καμπτική εφελκυστική αντοχή (MPa), μέση τιμη (MPa) και συντελεστής διακύμανσης (%) όλων των συνθέσεων όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Δοκίμιο	Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή (Mpa)	Μέση Τιμή (Mpa)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	5.13	5.10	1.02
PLAIN B	5.13		
PLAIN C	5.02		
SF-0.5 A	5.32	5.27	0.85
SF-0.5 B	5.28		
SF-0.5 C	5.21		
PPF1-0.5 A	5.57	5.39	2.37
PPF1-0.5 B	5.28		
PPF1-0.5 C	5.32		
PPF2-0.5 A	5.09	4.83	4.16
PPF2-0.5 B	4.61		
PPF2-0.5 C	4.78		
SF-1 A	5.80	5.45	4.96
SF-1 B	5.41		
SF-1 C	5.14		
PPF1-1 A	5.89	6.08	2.59
PPF1-1 B	6.28		
PPF1-1 C	6.09		
PPF2-1 A	5.63	5.70	1.06
PPF2-1 B	5.78		
PPF2-1 C	5.69		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	5.64	5.60	2.20
SF-0.5+PPF1-0.5 B	5.43		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	5.72		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	5.89	5.59	3.89
SF-0.5+PPF2-0.5 B	5.50		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	5.38		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	5.41	5.18	3.26
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	5.04		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	5.07		



Σχήμα 42^{α}: Μέση τιμή καμπτικών εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



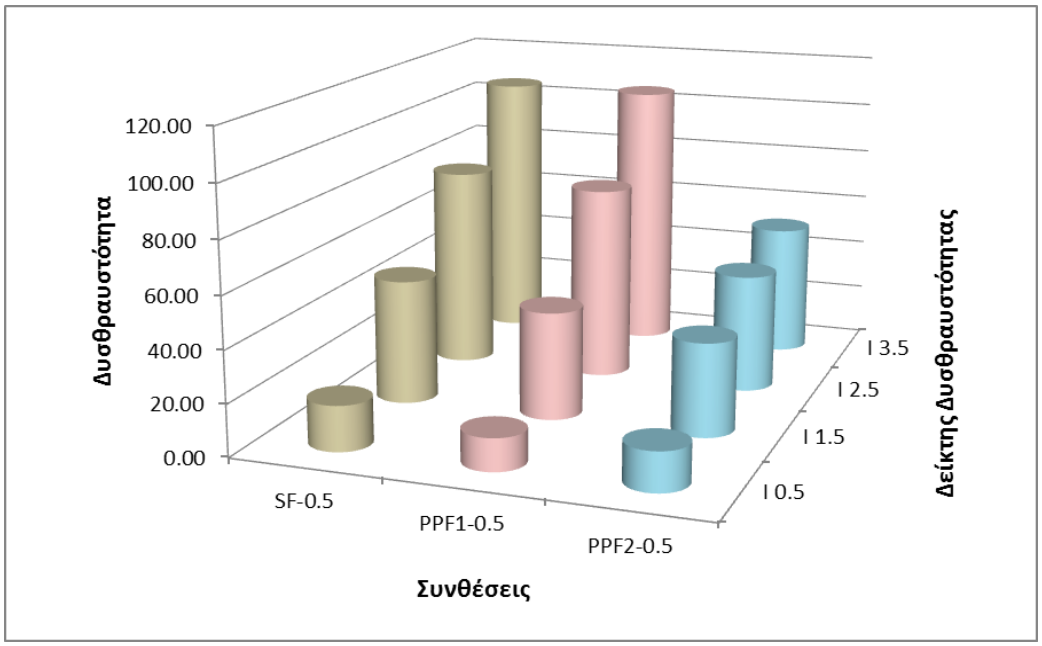
Σχήμα 42^{β}: Μέση τιμή καμπτικών εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

Τα αποτελέσματα των **δεικτών δυσθραυστότητας** της Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή για κάθε σύνθεση δίνονται στον **Πίνακα 21**. Μαζί παρατίθεται ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση. Οι τιμές των περισσότερων συνθέσεων δεν παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας ξεπερνά την τιμή του 10%.
Για το δείκτη δυσθραυστότητας I3.5, παρατηρείται πως στις συνθέσεις με ίνες SF, PPF1 και PPF2 όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, αυξάνονται και ο δείκτης δυσθραυστότητας. Πιο συγκεκριμένα για τις συνθέσεις με ίνες PPF2 παρατηρείται διπλασιασμός της τιμής του δείκτη δυσθραυστότητας. Ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στους υπόλοιπους δείκτες δυσθραυστότητας I0.5, I1.5, I2.5.

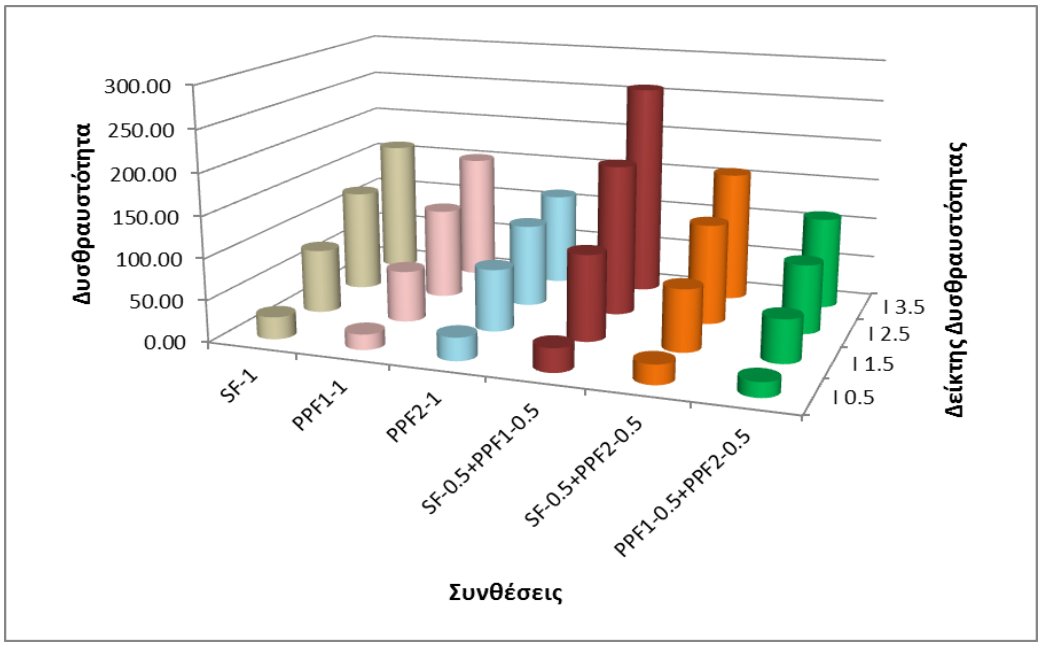
Στα **Σχήματα 43$^{\alpha}$** και **43$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή των δεικτών δυσθραυστότητας I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5 των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Μέσω των **Σχημάτων 43$^{\alpha}$** και **43$^{\beta}$**, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του ίδιου ποσοστού ινών κ.ο. στις ίνες διαφορετικού είδους στους τέσσερις δείκτες δυσθραυστότητας. Για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 43$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει το μικρότερο δείκτη δυσθραυστότητας στα 3.5 mm ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 παρουσιάζουν σχεδον ίδια τιμή I3.5. Στους υπόλοιπους δείκτες δυσθραυστότητας οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 δεν παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή αλλά η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή από τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. Για τους δείκτες δυσθραυστότητας I1.5 και I2.5 η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει το μικρότερο δείκτη ενώ για το δείκτη I0.5 η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει το μικρότερο δείκτη. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. **(Σχήμα 43$^{\beta}$)**, παρατηρείται πως η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απορροφούμενη ενέργεια σε όλους τους συντελεστές διακύμανσης ενώ η υβριδική σύνθεση με ίνες PPF1+PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια στους δείκτες I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5.

Πίνακας 21: Δείκτες δυσθραυστότητας και συντελεστές διακύμανσης ινοπλισμένων σκυροδεμάτων όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Δοκίμιο		I 0.5	I 1.5	I 2.5	I 3.5
PLAIN	Μέση Τιμή	~	~	~	~
	Διακύμανση	~	~	~	~
SF-0.5	Μέση Τιμή	17.57	48.47	78.73	105.90
	Διακύμανση	25.66%	21.22%	20.87%	21.14%
PPF1-0.5	Μέση Τιμή	12.59	41.82	75.96	105.63
	Διακύμανση	10.45%	7.41%	6.98%	7.97%
PPF2-0.5	Μέση Τιμή	15.17	36.27	46.22	51.55
	Διακύμανση	14.88%	18.83%	18.38%	17.93%
SF-1	Μέση Τιμή	26.81	77.66	123.88	162.55
	Διακύμανση	12.20%	16.67%	17.87%	18.61%
PPF1-1	Μέση Τιμή	18.55	62.17	110.42	153.19
	Διακύμανση	2.00%	4.19%	5.78%	8.04%
PPF2-1	Μέση Τιμή	27.82	75.69	100.81	113.22
	Διακύμανση	14.55%	16.43%	16.18%	14.97%
SF-0.5+PPF1-0.5	Μέση Τιμή	28.62	104.70	184.23	259.48
	Διακύμανση	18.43%	16.69%	15.35%	15.10%
SF-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	23.47	75.37	121.77	159.02
	Διακύμανση	10.84%	12.10%	11.62%	11.16%
PPF1-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	17.74	52.33	84.12	112.09
	Διακύμανση	30.36%	33.35%	34.84%	35.94%



Σχήμα 43^{α}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%.



Σχήμα 43^{β}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%.

3.3 Αποτελέσματα Σκληρυμένου Σκυροδέματος σε δοκίμια που εκτίθονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

3.3.1 Θλιπτική Αντοχή

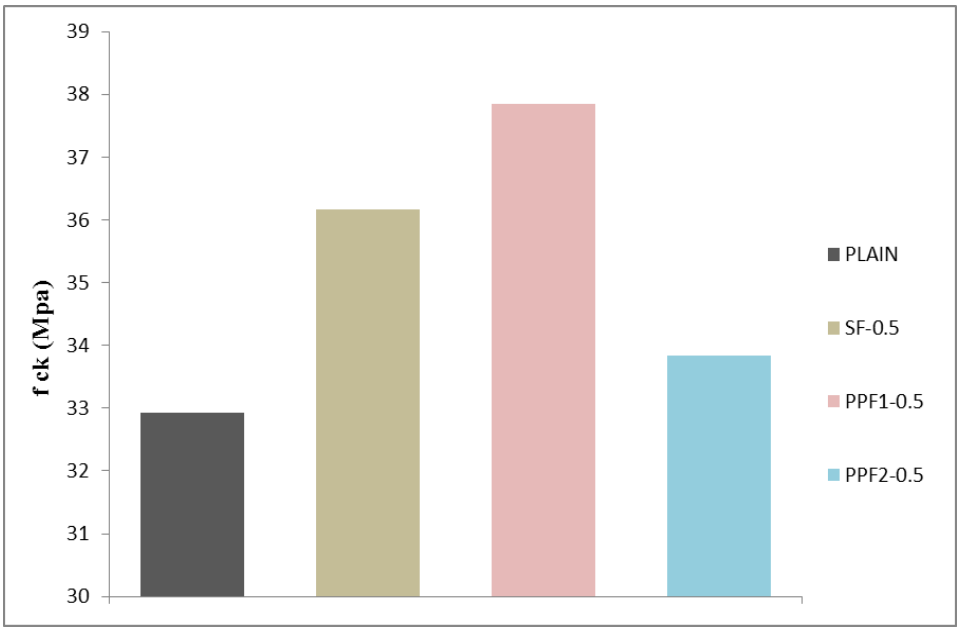
Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις δίνονται στον **Πίνακα 22**, όπου επίσης παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 5%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και μείωση της θλιπτικής αντοχής ενώ για τις συνθέσεις με ίνες PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αντοχής.

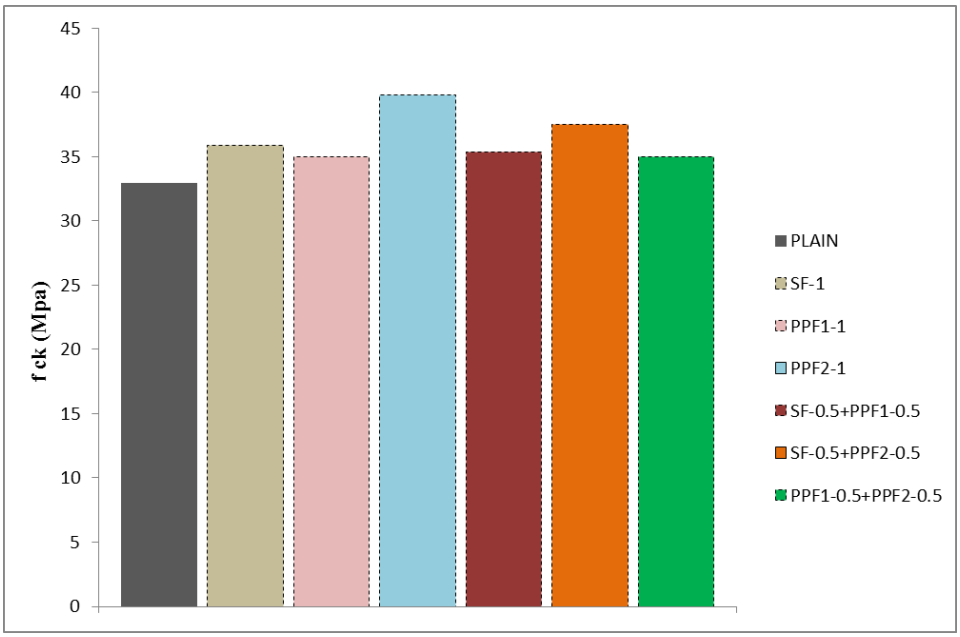
Στα **Σχήματα 44$^{\alpha}$** και **44$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή της θλιπτικής αντοχής της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό των ινών που περιέχουν μετά την έκθεση τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Τα **Σχήματα 44$^{\alpha}$** και **44$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 44$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής ενώ η σύνθεση PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή της θλιπτικής αντοχής. Για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 44$^{\beta}$**), παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με ίνες SF, PPF1 καθώς και οι υβριδικες συνθέσεις με ίνες SF+PPF1 και PPF1+PPF2 έχουν παραπλήσια τιμή της θλιπτικής αντοχής, ενώ η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή.

Πίνακας 22: Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή και συντελεστής διακύμανσης της κάθε σύνθεσης, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	33.80	32.93	1.93%
PLAIN B	32.31		
PLAIN C	32.68		
SF-0.5 A	37.43	36.17	3.01%
SF-0.5 B	34.78		
SF-0.5 C	36.29		
PPF1-0.5 A	39.88	37.85	3.98%
PPF1-0.5 B	36.29		
PPF1-0.5 C	37.38		
PPF2-0.5 A	32.58	33.84	5.43%
PPF2-0.5 B	36.45		
PPF2-0.5 C	32.51		
SF-1 A	36.28	35.88	1.13%
SF-1 B	36.03		
SF-1 C	35.33		
PPF1-1 A	~	35.02	1.35%
PPF1-1 B	34.54		
PPF1-1 C	35.49		
PPF2-1 A	42.06	39.77	4.64%
PPF2-1 B	37.54		
PPF2-1 C	39.72		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	35.24	35.33	3.85%
SF-0.5+PPF1-0.5 B	37.03		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	33.71		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	40.15	37.48	5.44%
SF-0.5+PPF2-0.5 B	35.20		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	37.08		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	34.42	34.99	4.09%
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	33.60		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	36.96		



Σχήμα 44^{α}: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 44^{β}: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες.

3.3.2 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος poisson

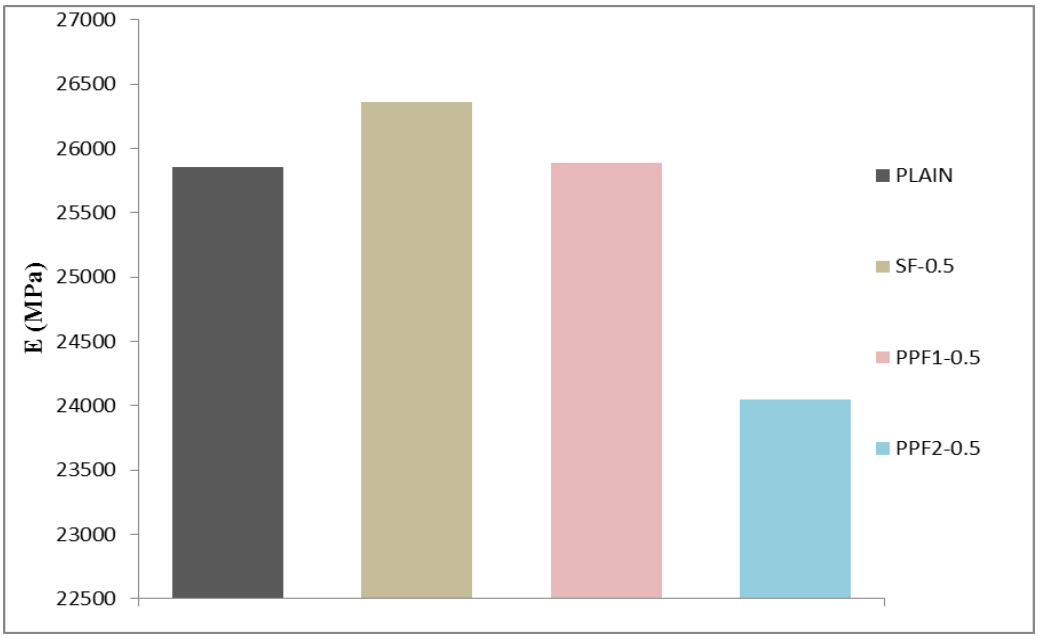
Τα αποτελέσματα του **μέτρου ελαστικότητας** όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις δίνονται στον **Πίνακα 23**, όπου επίσης παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Όλες οι συνθέσεις έχουν παρόμοια τιμή μέτρου ελαστικότητας καθώς το στάδιο πριν από την πρώτη αστοχία δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την προσθήκη ή το ποσοστό των ινών, το οποίο και θεωρείται χαμηλό, αλλά κυρίως από την αναλογία αδρανών, τσιμέντου και νερού. Τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζει η σύνθεση PPF2-1, καθώς έχει και τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών δεν επηρεάζει κατά πολύ την τιμή του μέτρου ελαστικότητας καθώς έχουν παραπλήσια τιμή. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τη σύνθεση με ίνες PPF2 στην οποία αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας σε ποσοστό αύξησης 10%. Επίσης πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές του Ε της σύνθεσης με ίνες PPF2-0.5 παρουσιάζουν το μεγαλύτερο συντελεστή διακύμανσης (9%).

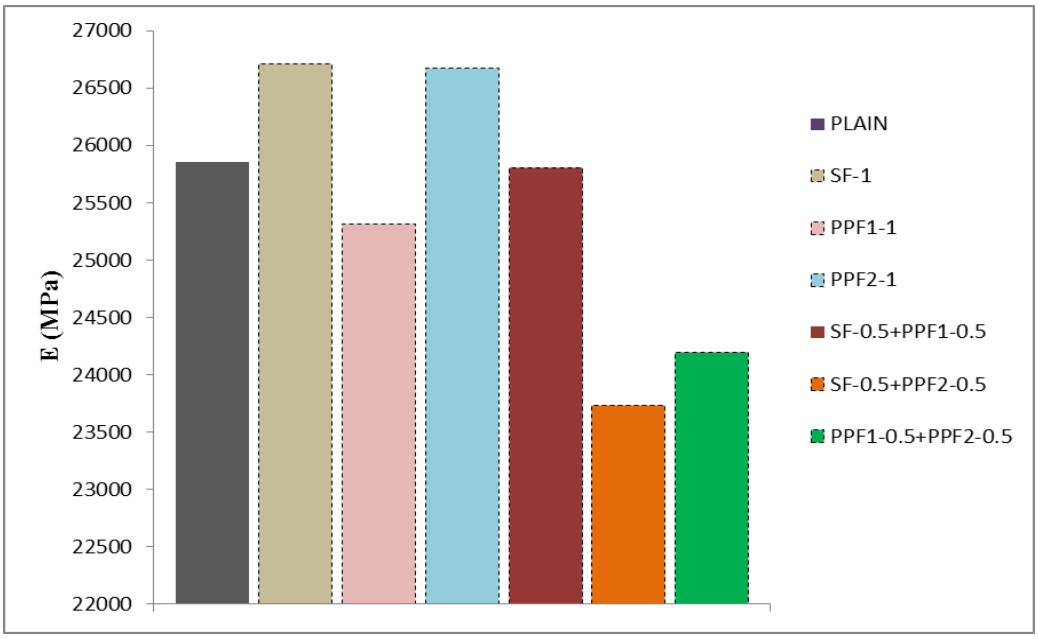
Στα **Σχήματα 45$^{\alpha}$** και **45$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες. Τα **Σχήματα 45$^{\alpha}$** και **45$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 45$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας ενώ η σύνθεση PPF2 παρουσιάζει το μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 45$^{\beta}$**), παρατηρείται ότι οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 έχουν παραπλήσια τιμή του Ε, καθώς και η σύνθεση με ίνες PPF1 και η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF1 παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή. Οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF2 και PPF1+PPF2 παρουσιάζουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας, παραπλήσιας τιμής.

Πίνακας 23: Μέτρο ελαστικότητας (MPa), μέση τιμή (MPa) και συντελεστής διακύμανσης της κάθε σύνθεσης, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση
PLAIN A	25275	25857	1.72%
PLAIN B	26358		
PLAIN C	25936		
SF-0.5 A	26434	26361	2.10%
SF-0.5 B	27001		
SF-0.5 C	25648		
PPF1-0.5 A	24491	25889	5.20%
PPF1-0.5 B	25469		
PPF1-0.5 C	27708		
PPF2-0.5 A	22147	24046	8.99%
PPF2-0.5 B	22923		
PPF2-0.5 C	27069		
SF-1 A	25612	26709	3.07%
SF-1 B	27579		
SF-1 C	26935		
PPF1-1 A	~	25316	6.34%
PPF1-1 B	23711		
PPF1-1 C	26921		
PPF2-1 A	27136	26669	2.23%
PPF2-1 B	27042		
PPF2-1 C	25829		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	26605	25806	2.40%
SF-0.5+PPF1-0.5 B	25721		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	25092		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	23509	23736	3.49%
SF-0.5+PPF2-0.5 B	22853		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	24845		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	24866	24197	2.42%
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	24287		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	23438		



Σχήμα 45^{α}: Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 45^{β}: Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, όταν εκτίθονται σε υψήλες θερμοκρασίες.

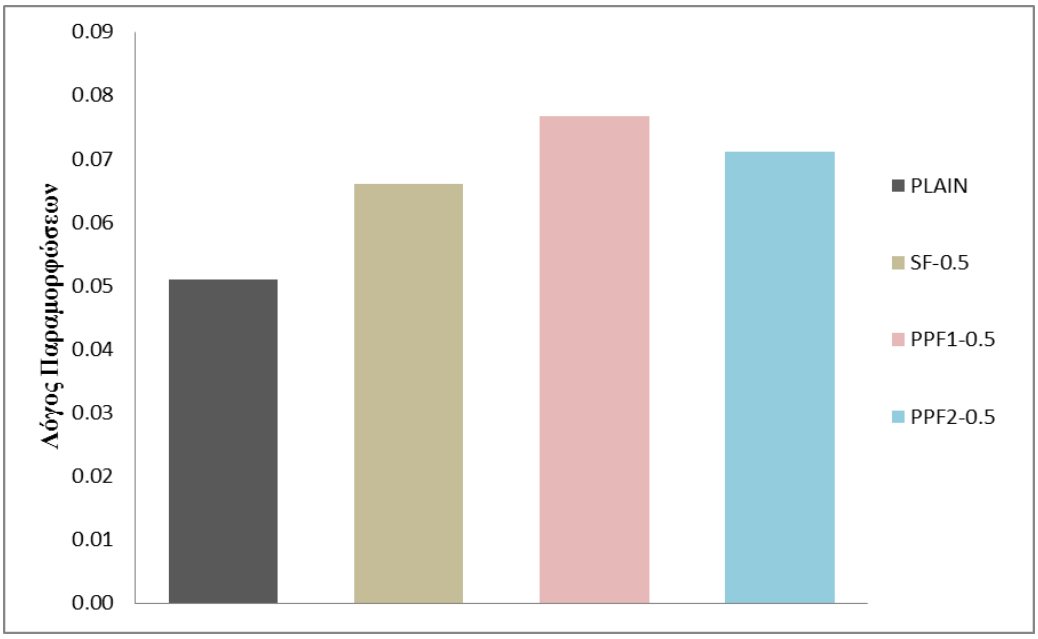
Τα αποτελέσματα του **λόγου poisson** για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις, μετά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 24**, όπου επίσης παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές για τις συνθέσεις SF-0.5, PPF1-0.5 και PPF2-0.5 καθώς και για την υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF2 παρουσίασαν μεγάλη ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους δεν ξεπερνά το 10%. Ωστόσο παρατηρείται μικρή διακύμανση στη μέση τιμή του λόγου poisson της κάθε σύνθεσης καθώς κυμαίνεται από 0.045 έως 0.077. Ακόμα συγκρίνοντας τη μέση τιμή από κάθε σύνθεση, παρατηρείται πως η προσθήκη ινών στο αμιγές σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του λόγου poisson με εξαίρεση την υβριδική σύνθεση με ίνες PPF1+PPF2.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με το ίδιο είδος ινών αλλά διαφορετικό ποσοστό, παρατηρείται πως για τη σύνθεση με ίνες SF η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση του λόγου poisson της τάξεως 15% ενώ για τις συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και μείωση του λόγου poisson της τάξεως 32% και 17% αντίστοιχα.

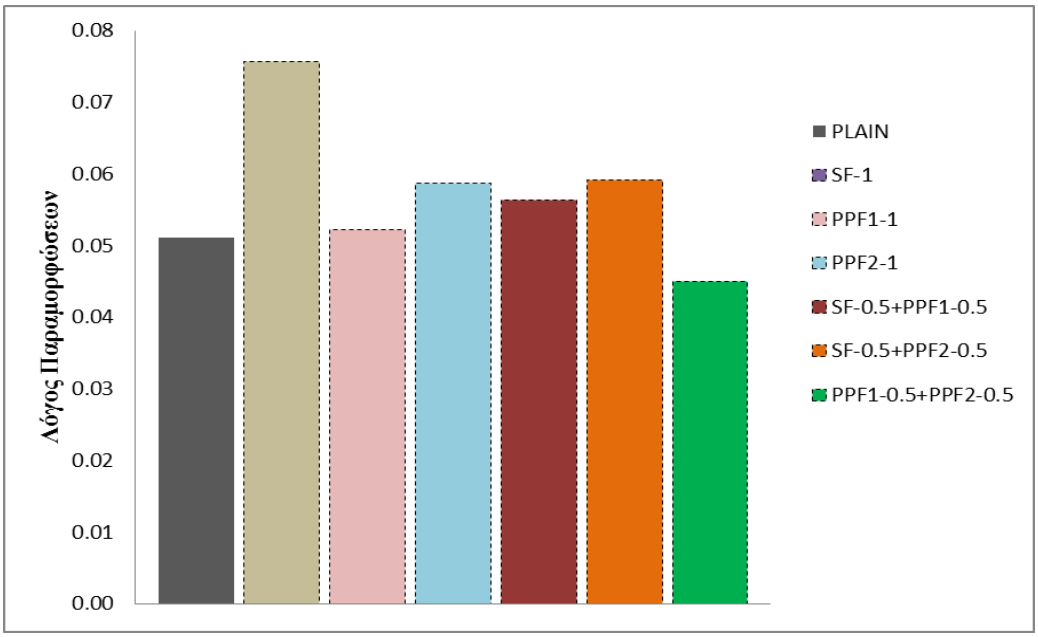
Στα **Σχήματα 46$^{\alpha}$** και **46$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή του λόγου poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Τα **Σχήματα 46$^{\alpha}$** και **46$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 46$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζει το μεγαλύτερο λόγο poisson. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 46$^{\beta}$**), παρατηρείται πως οι συνθέσεις με ίνες PPF1, PPF2 καθώς και οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες SF+PPF1 και SF+PPF2 παρουσιάζουν παραπλήσιο ν ενώ η υβριδική σύνθεση με ίνες PPF1+PPF2 έχουν μικρότερο λόγο poisson.

Πίνακας 24: Λόγος poisson, μέση τιμή και συντελεστής διακύμανσης της κάθε σύνθεσης, μετά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Λόγος Poisson	Μέση Τιμή	Διακύμανση
PLAIN A	0.049	0.051	2.98%
PLAIN B	0.053		
PLAIN C	0.052		
SF-0.5 A	0.058	0.066	8.53%
SF-0.5 B	0.071		
SF-0.5 C	0.070		
PPF1-0.5 A	0.082	0.077	4.75%
PPF1-0.5 B	0.073		
PPF1-0.5 C	0.076		
PPF2-0.5 A	0.071	0.071	6.60%
PPF2-0.5 B	0.065		
PPF2-0.5 C	0.077		
SF-1 A	0.066	0.076	17.42%
SF-1 B	0.094		
SF-1 C	0.067		
PPF1-1 A	~	0.052	18.68%
PPF1-1 B	0.062		
PPF1-1 C	0.042		
PPF2-1 A	0.073	0.059	17.40%
PPF2-1 B	0.055		
PPF2-1 C	0.048		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	0.049	0.056	10.67%
SF-0.5+PPF1-0.5 B	0.057		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	0.063		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	0.062	0.059	4.10%
SF-0.5+PPF2-0.5 B	0.058		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	0.057		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	0.039	0.045	18.53%
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	0.039		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	0.057		



Σχήμα 46^{α}: Μέση τιμή λόγου poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 46^{β}: Μέση τιμή λόγου poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

3.3.3 Δοκιμή Barcelona

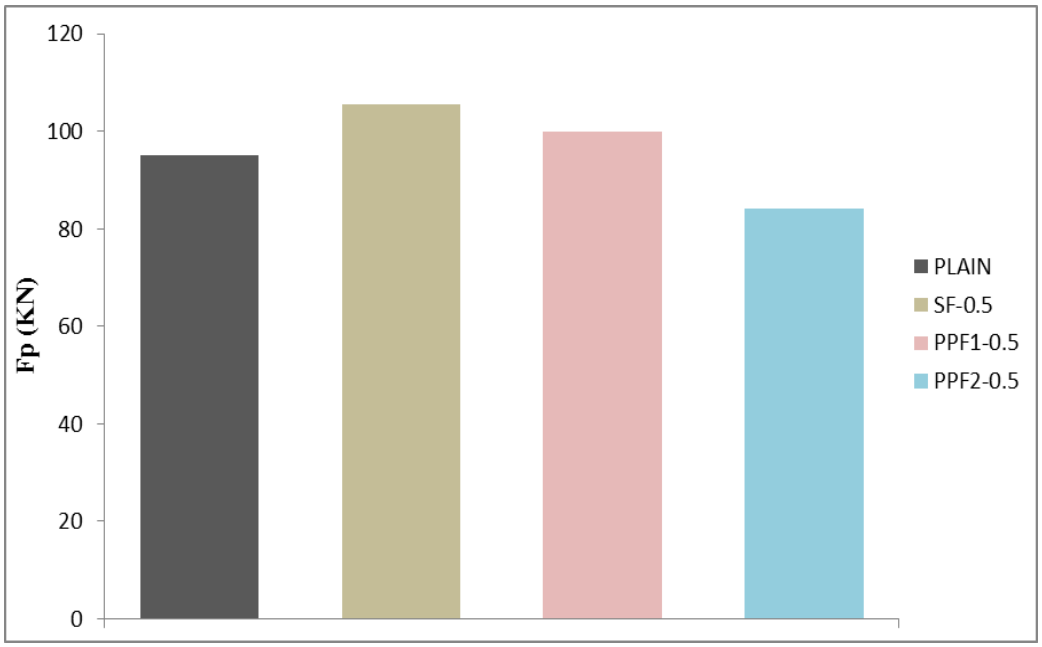
Τα αποτελέσματα των **μέγιστων φορτίων** στη Δοκιμή Barcelona, για κάθε δοκίμιο, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 25**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας (%) των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων, εκτός από τη σύνθεση PPF2-0.5, παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι μόνο στις συνθέσεις με ίνες SF, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, η τιμή του μέγιστου φορτίου ελαττώνεται. Αντιθέτως στις συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 με την αύξηση του ποσοστού των ινών, αυξάνεται το μέγιστο φορτίο. Η μεγαλύτερη αύξηση παρατηρείται στη σύνθεση PPF2 με ποσοστό αύξησης 45%. Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση.

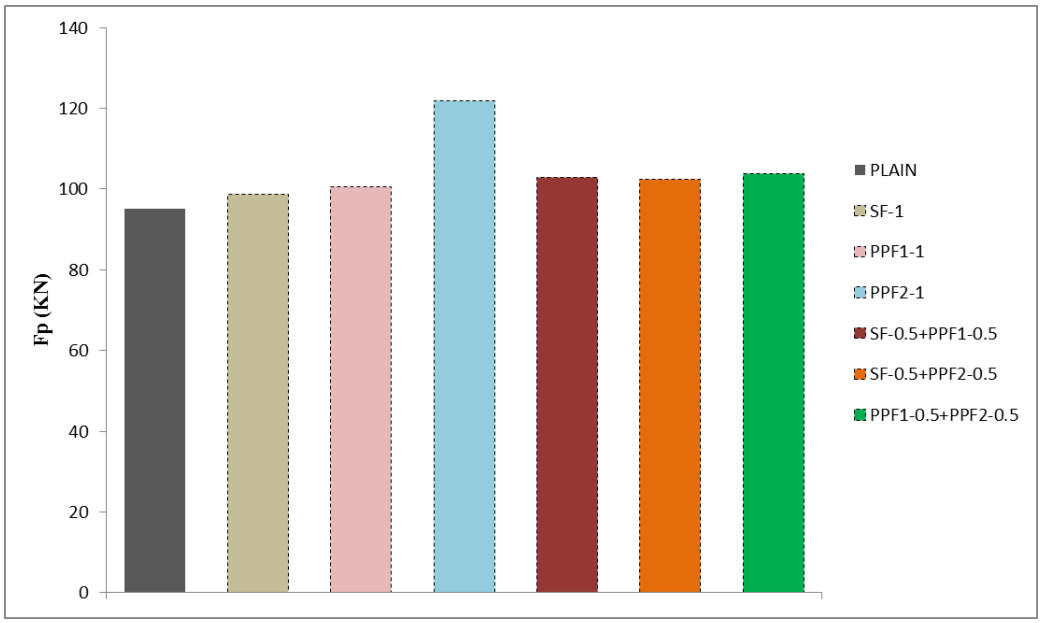
Στα **Σχήματα 47$^{\alpha}$** και **47$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με το μέγιστο φορτίο της Δοκιμής Barcelona, μετά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Τα **Σχήματα 47$^{\alpha}$** και **47$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 47$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες PPF2 έχει μικρότερο μέγιστο φορτίο και από τη σύνθεση αναφοράς ενώ η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή του μέγιστου φορτίου. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 47$^{\beta}$**), η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μέγιστου φορτίου. Οι υβριδικές συνθέσεις έχουν μέγιστο φορτίο παραπλήσιας τιμής ενώ η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει μικρότερη τιμή μεγιστού φορτίου.

Πίνακας 25: Μέγιστο φορτίο (KN), μέση τιμή (KN) και συντελεστής διακύμανσης (%) της κάθε σύνθεσης, όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Barcelona, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (KN)	Μέση Τιμή (KN)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	103.78	95.01	7.18
PLAIN B	94.13		
PLAIN C	87.14		
SF-0.5 A	100.48	105.45	4.90
SF-0.5 B	103.29		
SF-0.5 C	112.58		
PPF1-0.5 A	103.28	99.91	2.41
PPF1-0.5 B	97.81		
PPF1-0.5 C	98.65		
PPF2-0.5 A	82.81	84.09	14.71
PPF2-0.5 B	69.62		
PPF2-0.5 C	99.85		
SF-1 A	94.01	98.82	4.26
SF-1 B	104.26		
SF-1 C	98.19		
PPF1-1 A	98.88	100.61	1.22
PPF1-1 B	101.58		
PPF1-1 C	101.37		
PPF2-1 A	125.85	121.93	3.33
PPF2-1 B	123.60		
PPF2-1 C	116.33		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	103.47	102.97	0.53
SF-0.5+PPF1-0.5 B	103.22		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	102.22		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	102.26	102.46	0.20
SF-0.5+PPF2-0.5 B	102.74		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	102.38		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	97.75	103.77	5.09
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	102.94		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	110.61		



Σχήμα 47^{α}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 47^{β}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

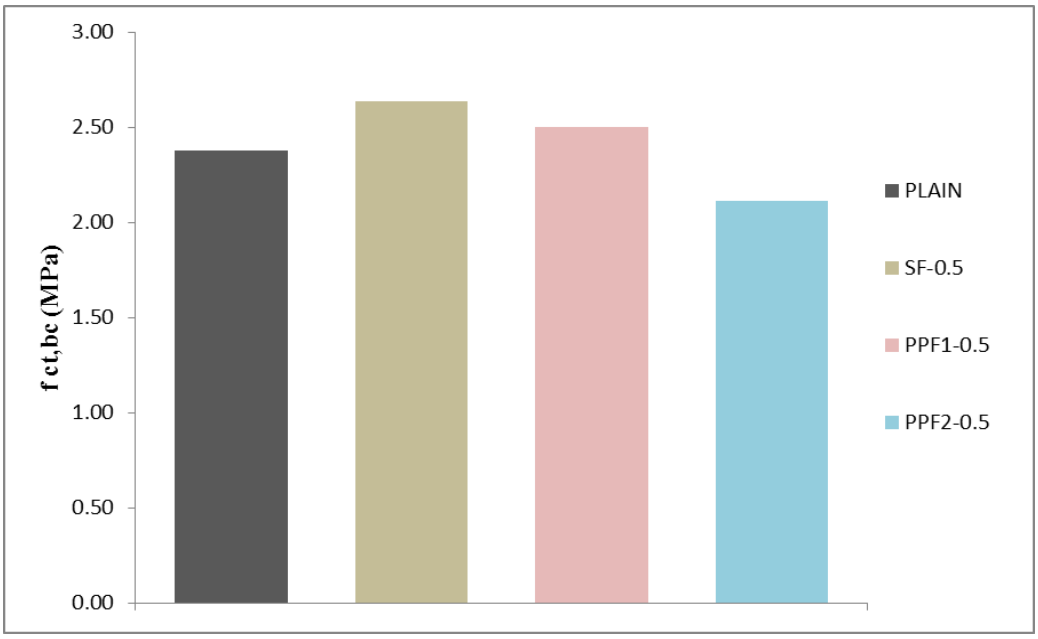
Τα αποτελέσματα της **εφελκυστικής αντοχής** στη Δοκιμή Barcelona για κάθε δοκίμιο, μετά την έκθεσή τους σε υψηλές θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 26**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας (%) των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων, εκτός από τη σύνθεση με ίνες PPF2-0.5, παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες SF η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και μείωση της εφελκυστικής αντοχής ενώ στις συνθέσεις με ίνες PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής κατά 45%. Για τις συνθέσεις με ίνες PPF1, η αύξηση του ποσοστού τον ινών έχει παραπλήσια τιμή εφελκυστικής αντοχής.

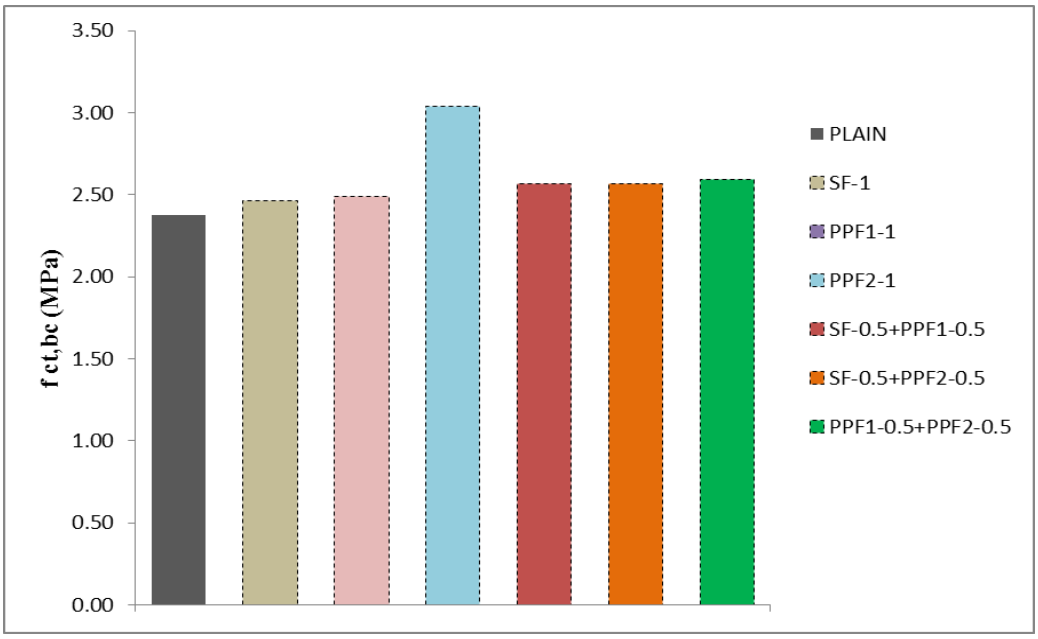
Στα **Σχήματα 48$^{\alpha}$** και **48$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με την εφελκυστική αντοχή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Τα **Σχήματα 48$^{\alpha}$** και **48$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 48$^{\alpha}$**), η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει μεγαλύτερη εφελκυστική αντοχή ενώ η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη εφελκυστική αντοχή και από τη σύνθεση αναφορας. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 48$^{\beta}$**), παρατηρείται ότι η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εφελκύστική αντοχή ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 παρουσιάζουν μικρότερη τιμή αλλά παραπλήσια εφελκυστική αντοχή. Όλες οι υβριδικές συνθέσεις έχουν παραπλήσια τιμή εφελκυστικής αντοχής.

Πίνακας 26: Εφελκυστική αντοχή (MPa), μέση τιμη (MPa) και συντελεστής διακύμανσης (%) όλων των συνθέσεων, όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Barcelona, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	2.58	2.38	6.71
PLAIN B	2.36		
PLAIN C	2.19		
SF-0.5 A	2.50	2.63	4.99
SF-0.5 B	2.59		
SF-0.5 C	2.81		
PPF1-0.5 A	2.59	2.50	2.36
PPF1-0.5 B	2.45		
PPF1-0.5 C	2.47		
PPF2-0.5 A	2.08	2.11	14.58
PPF2-0.5 B	1.75		
PPF2-0.5 C	2.50		
SF-1 A	2.34	2.46	4.37
SF-1 B	2.60		
SF-1 C	2.45		
PPF1-1 A	2.46	2.49	1.09
PPF1-1 B	2.48		
PPF1-1 C	2.53		
PPF2-1 A	3.15	3.04	3.59
PPF2-1 B	3.08		
PPF2-1 C	2.89		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	2.56	2.57	0.16
SF-0.5+PPF1-0.5 B	2.57		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	2.56		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	2.55	2.57	0.44
SF-0.5+PPF2-0.5 B	2.58		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	2.57		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	2.44	2.59	5.27
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	2.57		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	2.77		



Σχήμα 48^{α}: Μέση τιμή εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 48^{β}: Μέση τιμή εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Τα αποτελέσματα των **δεικτών δυσθραυστότητας** της Δοκιμής Barcelona για κάθε σύνθεση, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 27**. Μαζί παρατίθεται ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση. Οι τιμές των περισσοτέρων συνθέσεων δεν παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους ξεπερνά την τιμή του 10%.

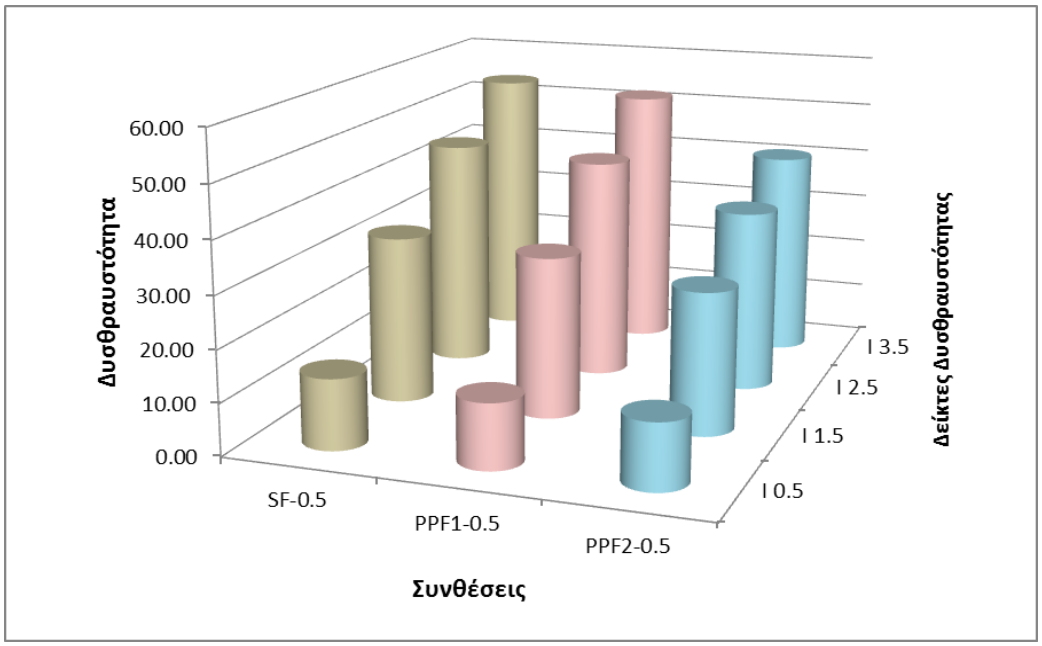
Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για το δείκτη δυσθραυστότητας I3.5, στις συνθέσεις με ίνες SF, PPF1 και PPF2 όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, αυξάνονται και οι δείκτες δυσθραυστότητας I3.5 σε ποσοστό 86%, 3% και 28% αντίστοιχα. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει και για τους υπόλοιπους δείκτες δυσθραυστότητας I0.5, I1.5 και I2.5. Για τους υπόλοιπους δείκτες, οι συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 παρουσιαζουν αύξηση των δεικτών με την αύξηση του ποσοστού των ινών αλλλα στις συνθέσεις με ίνες PPF1, παρατηρείται μείωση των δεικτών.

Στα **Σχήματα 49$^{\alpha}$** και **49$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τους δείκτες δυσθραυστότητας I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5 των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Μέσω των **Σχημάτων 49$^{\alpha}$** και **49$^{\beta}$**, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του ίδιου ποσοστού ινών κ.ο. στις ίνες διαφορετικού είδους. Για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 49$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει μεγαλύτερο δείκτη δυσθραυστότητας στα 3.5 mm από τις άλλες συνθέσεις. Το ίδιο παρατηρείται για τη σύνθεση με ίνες SF και στους υπόλοιπους δείκτες δυσθραυστότητας. Στο δείκτη δυσθαυστότητας I3.5 η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει μικρότερο δείκτη από τις άλλες δύο συνθέσεις. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρείται και στους δείκτες δυσθραυστότητας I05, I1.5 και I2.5. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. **(Σχήμα 49$^{\beta}$)**, παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απορροφούμενη ενέργεια σε όλους τους συντελεστές διακύμανσης. Η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια στο συντελεστή I3.5, η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF1 παρουσιάζει τη μικρότερη

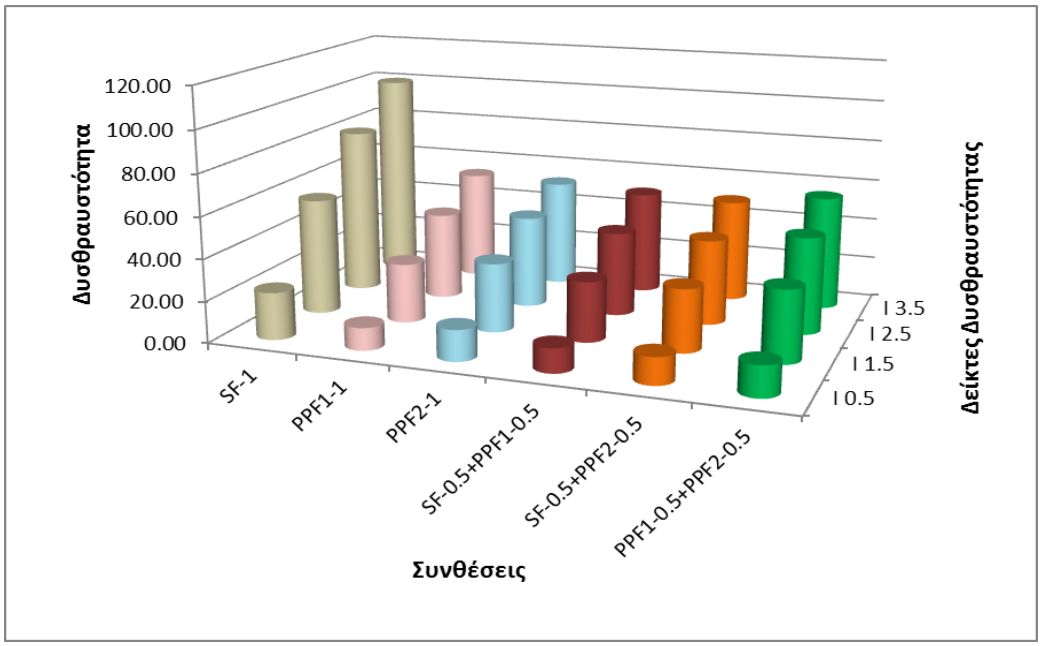
απορροφούμενη ενέργεια στους συντελεστές I1.5 και I2.5 ενώ στο συντελεστή I0.5 μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια παρατηρείται στις συνθέσεις με ίνες PPF1.

Πίνακας 27: Δείκτες δυσθραυστότητας και συντελεστές διακύμανσης ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Barcelona, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο		I 0.5	I 1.5	I 2.5	I 3.5
PLAIN	Μέση Τιμή	~	~	~	~
	Διακύμανση	~	~	~	~
SF-0.5	Μέση Τιμή	13.69	32.57	44.85	53.63
	Διακύμανση	16.46%	13.65%	13.72%	14.03%
PPF1-0.5	Μέση Τιμή	12.64	31.36	43.48	51.84
	Διακύμανση	6.38%	6.51%	6.42%	5.74%
PPF2-0.5	Μέση Τιμή	12.74	27.62	35.62	40.81
	Διακύμανση	9.25%	8.74%	12.14%	15.05%
SF-1	Μέση Τιμή	22.75	56.28	80.91	100.10
	Διακύμανση	5.45%	3.79%	4.69%	6.43%
PPF1-1	Μέση Τιμή	10.85	28.72	42.33	53.35
	Διακύμανση	3.97%	5.23%	6.88%	9.33%
PPF2-1	Μέση Τιμή	15.02	33.33	44.59	52.20
	Διακύμανση	21.11%	17.14%	16.29%	16.60%
SF-0.5+PPF1-0.5	Μέση Τιμή	11.67	29.12	40.96	50.15
	Διακύμανση	9.70%	7.61%	7.08%	6.96%
SF-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	13.03	30.43	41.39	49.81
	Διακύμανση	21.88%	23.97%	25.26%	26.48%
PPF1-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	14.78	34.89	46.92	55.45
	Διακύμανση	38.39%	40.65%	43.59%	45.52%



Σχήμα 49^{α}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Barcelona των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 49^{β}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Barcelona των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

3.3.4 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

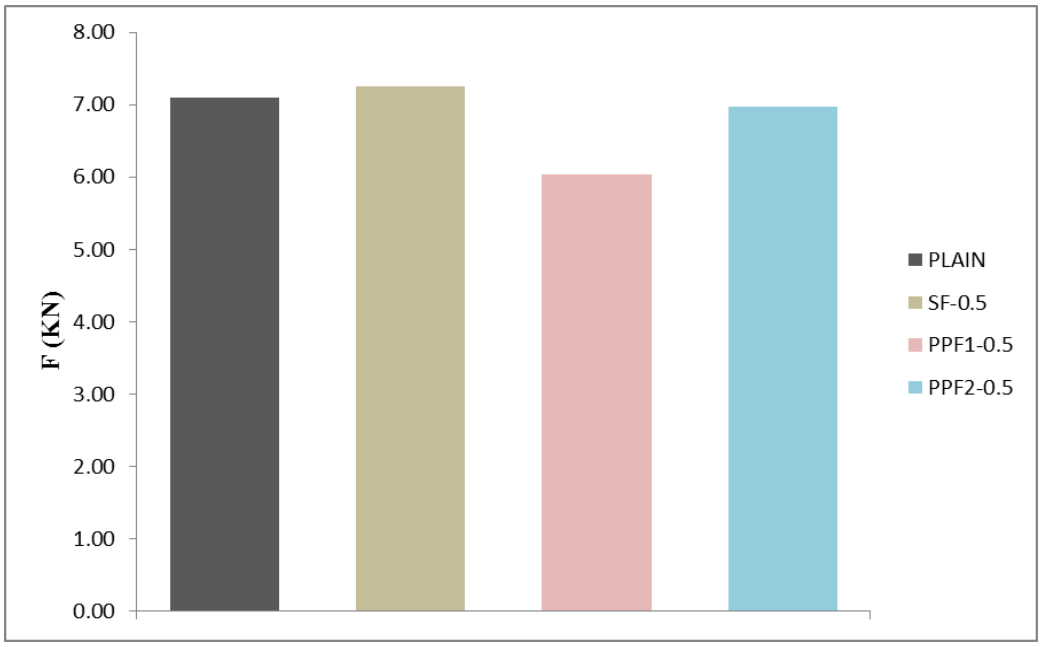
Τα αποτελέσματα των **μέγιστων φορτίων** στη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή για κάθε δοκίμιο, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 28**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με το ίδιο είδος ινών αλλά διαφορετικό ποσοστό, παρατηρείτε πως για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF2, η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση του μέγιστου φορτίου ενώ για τη σύνθεση με ίνες PPF1, η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται μείωση του μέγιστου φορτίου.

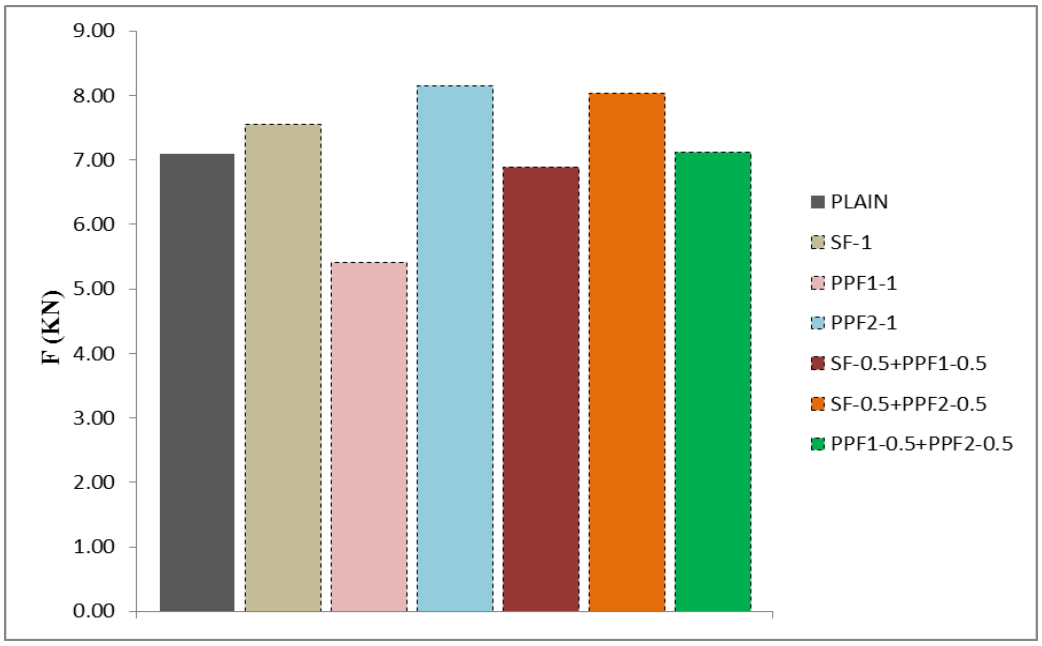
Στα **Σχήματα 50$^{\alpha}$** και **50$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με το μέγιστο φορτίο της Δοκιμής Κάμψης, της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Μέσω των **Σχημάτων 50$^{\alpha}$** και **50$^{\beta}$**, μπορεί να γίνει η σύγκριση των συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών αλλά διαφορετικό είδος. Για ποσοστό 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 50$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως μόνο η σύνθεση με ίνες SF έχει μεγαλύτερη τιμή μέγιστου φορτίου από τη σύνθεση αναφοράς ενώ η σύνθεση με ίνες PPF1 έχει το μικρότερο μέγιστο φορτίο από τις τρεις συνθέσεις. Για ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 50$^{\beta}$**), η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή μεγιστού φορτίου από όλες τις συνθέσεις καθώς και η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή μεγιστού φορτίου. Από τις υβριδικές συνθέσεις, οι συνθέσεις με ίνες SF+PPF1 και PPF1+PPF2 παρουσιάζουν παραπλήσια τιμή.

Πίνακας 28: Μέγιστο φορτίο (KN), μέση τιμή (KN) και συντελεστής διακύμανσης (%) της κάθε σύνθεσης, όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Μέγιστο Φορτίο (KN)	Μέση Τιμή (KN)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	7.23	7.09	4.48
PLAIN B	7.39		
PLAIN C	6.65		
SF-0.5 A	7.57	7.26	3.48
SF-0.5 B	7.27		
SF-0.5 C	6.95		
PPF1-0.5 A	5.62	6.03	5.22
PPF1-0.5 B	6.08		
PPF1-0.5 C	6.39		
PPF2-0.5 A	7.31	6.98	3.35
PPF2-0.5 B	6.85		
PPF2-0.5 C	6.78		
SF-1 A	7.73	7.54	3.61
SF-1 B	7.74		
SF-1 C	7.16		
PPF1-1 A	4.99	5.42	5.73
PPF1-1 B	5.54		
PPF1-1 C	5.72		
PPF2-1 A	8.06	8.15	3.64
PPF2-1 B	8.55		
PPF2-1 C	7.84		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	~	6.88	0.00
SF-0.5+PPF1-0.5 B	~		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	6.88		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	7.90	8.04	1.54
SF-0.5+PPF2-0.5 B	8.20		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	8.02		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	6.71	7.13	5.39
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	7.03		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	7.64		



Σχήμα 50^{α}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 50^{β}: Μέση τιμή μέγιστων φορτίων Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

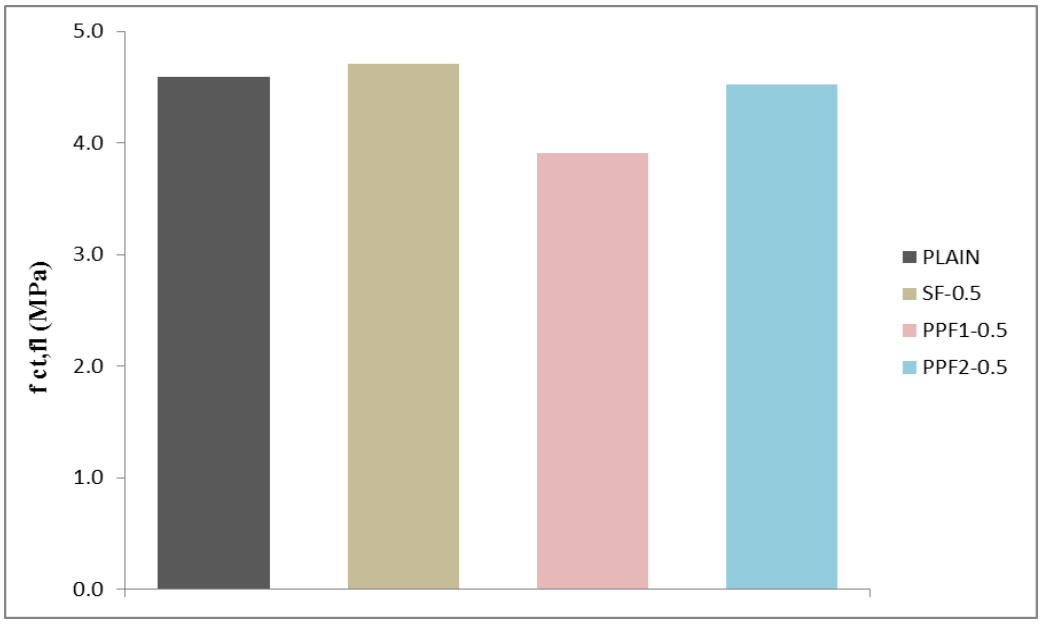
Τα αποτελέσματα της **καμπτικής εφελκυστικής αντοχής** στη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή για κάθε δοκίμιο, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 29**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας (%) των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Οι τιμές όλων των συνθέσεων παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητάς τους δεν ξεπερνά την τιμή του 10%.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής σε αντίθεση με τις συνθέσεις με ίνες PPF1 που η μέση τιμή της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής μειώνεται.

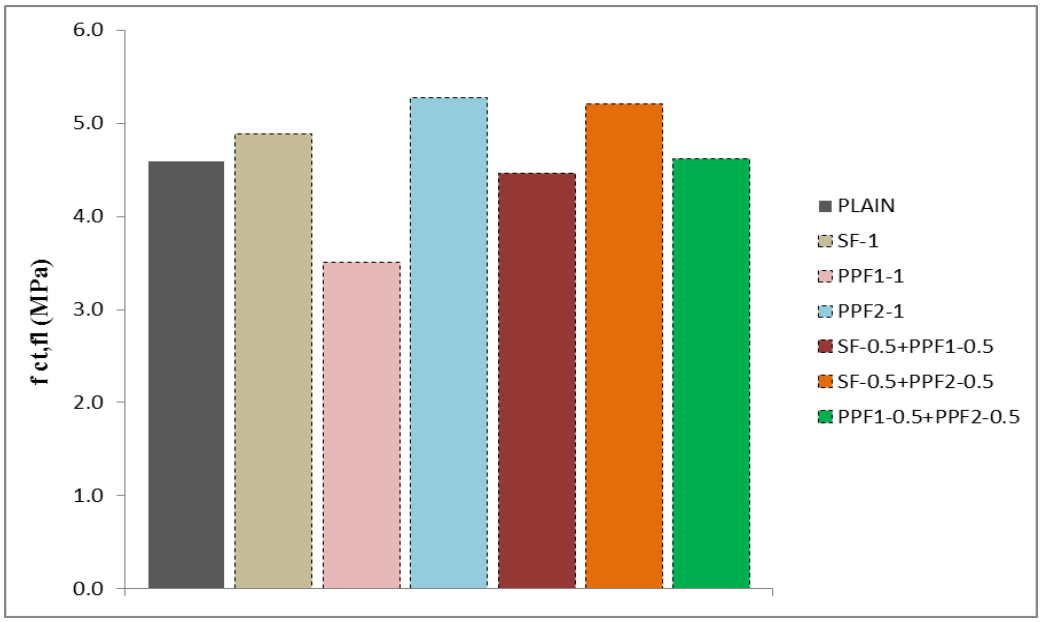
Στα **Σχήματα 51$^{\alpha}$** και **51$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με την καμπτική εφελκυστική αντοχή της Δοκιμής Κάμψης, της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Μέσω των **Σχημάτων 51$^{\alpha}$** και **51$^{\beta}$**, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του ίδιου ποσοστού ινών κ.ο. στις ίνες διαφορετικού είδους. Για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 51$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως οι συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 παρουσιάζουν μικρότερη καμπτική εφελκυστική αντοχή από το αμιγές σκυρόδεμα ενώ η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή με την καμπτική εφελκυστική αντοχή του αμιγούς σκυροδέματος. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. **(Σχήμα 51$^{\beta}$)**, η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής ενώ η σύνθεση με ίνες SF καθώς και οι υβριδικές συνθέσεις με ίνες PPF1+PPF2 παρουσιάζουν παραπλήσια καμπτική εφελκυστική αντοχή μικρότερης τιμής. Η σύνθεση με ίνες PPF1 καθώς και η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF1 παρουσιάζουν μικρότερη καμπτική εφελκυστική αντοχή από το αμιγές σκυρόδεμα.

Πίνακας 29: Καμπτική εφελκυστική αντοχή (MPa), μέση τιμη (MPa) και συντελεστής διακύμανσης (%) όλων των συνθέσεων, όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο	Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή (MPa)	Μέση Τιμή (MPa)	Διακύμανση (%)
PLAIN A	4.68	4.59	4.48
PLAIN B	4.79		
PLAIN C	4.31		
SF-0.5 A	4.90	4.71	3.48
SF-0.5 B	4.71		
SF-0.5 C	4.50		
PPF1-0.5 A	3.64	3.91	5.22
PPF1-0.5 B	3.94		
PPF1-0.5 C	4.14		
PPF2-0.5 A	4.73	4.52	3.35
PPF2-0.5 B	4.44		
PPF2-0.5 C	4.39		
SF-1 A	5.01	4.89	3.61
SF-1 B	5.02		
SF-1 C	4.64		
PPF1-1 A	3.23	3.51	5.73
PPF1-1 B	3.59		
PPF1-1 C	3.70		
PPF2-1 A	5.22	5.28	3.64
PPF2-1 B	5.54		
PPF2-1 C	5.08		
SF-0.5+PPF1-0.5 A	~	4.46	0.00
SF-0.5+PPF1-0.5 B	~		
SF-0.5+PPF1-0.5 C	4.46		
SF-0.5+PPF2-0.5 A	5.12	5.21	1.54
SF-0.5+PPF2-0.5 B	5.31		
SF-0.5+PPF2-0.5 C	5.19		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 A	4.35	4.62	5.39
PPF1-0.5+PPF2-0.5 B	4.56		
PPF1-0.5+PPF2-0.5 C	4.95		



Σχήμα 51^{α}: Μέση τιμή καμπτικών εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 51^{β}: Μέση τιμή καμπτικών εφελκυστικών αντοχών Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

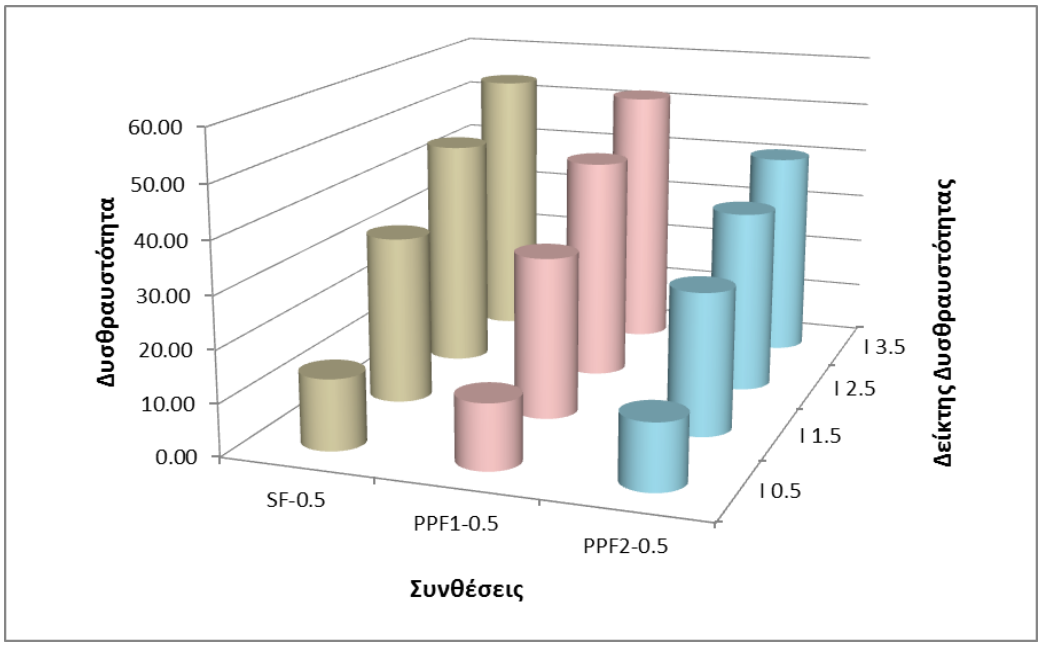
Τα αποτελέσματα των **δεικτών δυσθραυστότητας** της Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή για κάθε σύνθεση, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες, δίνονται στον **Πίνακα 30**. Μαζί παρατίθεται ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης. Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση. Οι τιμές των περισσοτέρων συνθέσεων δεν παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας ξεπερνά την τιμή του 10%.

Για το δείκτη δυσθραυστότητας I3.5, παρατηρείται πως στις συνθέσεις με ίνες SF, και PPF1 όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, αυξάνονται και ο δείκτης δυσθραυστότητας ενώ για τη σύνθεση με ίνες PPF2, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών μειώνεται ο δείκτης I3.5. Στους δείκτες δυσθραυστότητας I0.5, I1.5, I2.5, στις συνθέσεις με ίνες SF, PPF1 και PPF2 όσο αυξάνεται το ποσοστό των ίνων, αυξάνονται και οι δείκτες.

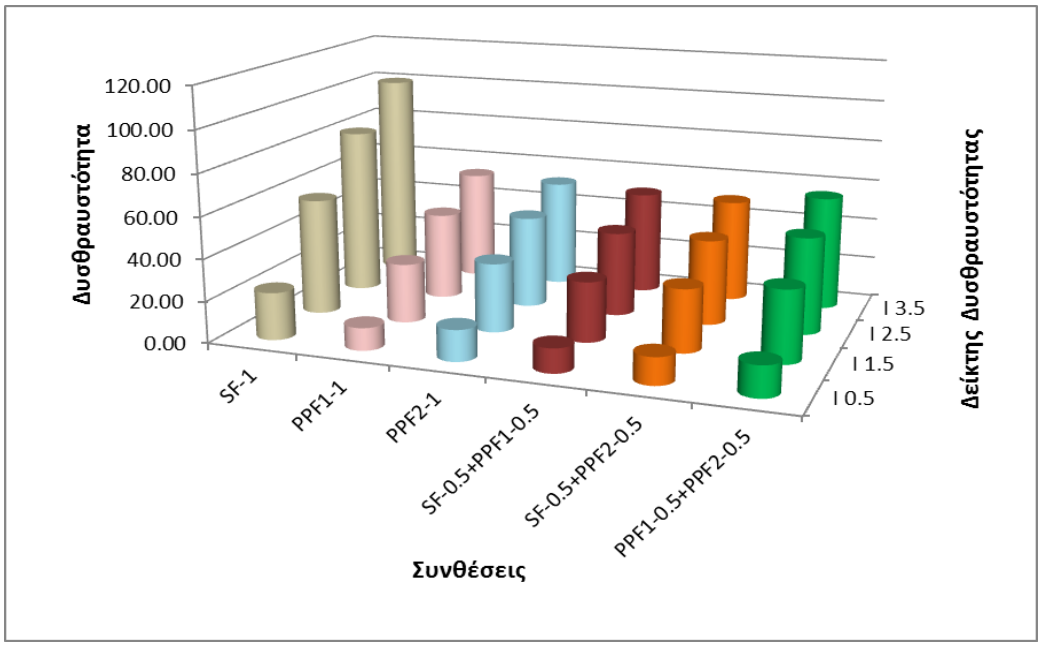
Στα **Σχήματα 52$^{\alpha}$** και **52$^{\beta}$**, παρατίθονται δύο συγκεντρωτικά ραβδογράμματα με τη μέση τιμή των δεικτών δυσθραυστότητας I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5 των συνθέσεων ανάλογα με το ποσοστό της ίνας που περιέχουν, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες. Μέσω των **Σχημάτων 52$^{\alpha}$** και **52$^{\beta}$**, γίνεται αντιληπτή η επίδραση του ίδιου ποσοστού ινών κ.ο. στις ίνες διαφορετικού είδους στους τέσσερις δείκτες δυσθραυστότητας. Για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. **(Σχήμα 52$^{\alpha}$)**, παρατηρείται πως η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει το μεγαλύτερο δείκτη δυσθραυστότητας στα 3.5 mm ενώ η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη τιμή από τις συνθέσεις SF, PPF1 και PPF2. Στους υπόλοιπους δείκτες δυσθραυστότητας παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά των συνθέσεων. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. **(Σχήμα 52$^{\beta}$)**, παρατηρείται πως η υβριδική σύνθεση με ίνες SF+PPF2 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απορροφούμενη ενέργεια σε όλους τους συντελεστές διακύμανσης ενώ η σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζει τη μικρότερη απορροφούμενη ενέργεια στους δείκτες I0.5, I1.5, I2.5 και I3.5. Για την υβριδική σύνθεση PPF1+PPF2, δεν καταγράφηκαν οι δείκτες I2.5 και I3.5.

Πίνακας 30: Δείκτες δυσθραυστότητας και συντελεστές διακύμανσης ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, όπως προσδιορίστηκαν με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

Δοκίμιο		I 0.5	I 1.5	I 2.5	I 3.5
PLAIN	Μέση Τιμή	7.27	~	~	~
	Διακύμανση	21.91%	~	~	~
SF-0.5	Μέση Τιμή	10.30	27.00	43.61	58.50
	Διακύμανση	18.27%	17.61%	15.52%	14.78%
PPF1-0.5	Μέση Τιμή	6.70	8.39	8.79	9.02
	Διακύμανση	7.24%	9.13%	10.43%	11.24%
PPF2-0.5	Μέση Τιμή	5.91	7.25	8.10	8.73
	Διακύμανση	2.62%	8.88%	15.34%	19.10%
SF-1	Μέση Τιμή	12.08	35.76	56.92	74.92
	Διακύμανση	9.70%	12.05%	11.39%	10.39%
PPF1-1	Μέση Τιμή	7.10	10.51	11.82	12.43
	Διακύμανση	1.13%	9.54%	13.80%	16.29%
PPF2-1	Μέση Τιμή	6.78	7.77	8.18	8.48
	Διακύμανση	13.15%	13.40%	16.03%	18.18%
SF-0.5+PPF1-0.5	Μέση Τιμή	7.88	18.70	27.80	34.57
	Διακύμανση	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SF-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	8.71	21.56	34.50	46.60
	Διακύμανση	16.90%	20.78%	21.62%	21.55%
PPF1-0.5+PPF2-0.5	Μέση Τιμή	5.56	6.29	~	~
	Διακύμανση	0.90%	0.00%	~	~



Σχήμα 52^{α}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.



Σχήμα 52^{β}: Μέση τιμή δεικτών δυσθραυστότητας Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0%, μετά την έκθεσή τους σε υψήλες θερμοκρασίες.

3.4 Σύγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες στις μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Προκειμένουν να αξιολογηθεί η επίδραση της έκθεσης υπολογίστηκαν για όλες τις μηχανικές ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι λόγοι P/Po, όπου P η τιμή της οποιασδήποτε ιδιότητας μετά την έκθεση του σκυροδέματος σε υψηλή θερμοκρασία και Po η τιμή της, μετά από δοκιμή σε ήπια θερμοκρασία. Για τιμές του λόγου P/Po κοντά στη μονάδα, συμπεραίνεται μικρή επίδραση της έκθεση του σκυροδέματος σε υψηλή θερμοκρασία στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του, επίδραση η οποία μεγιστοποιείται όσο ο λόγος P/Po τείνει στο 0.

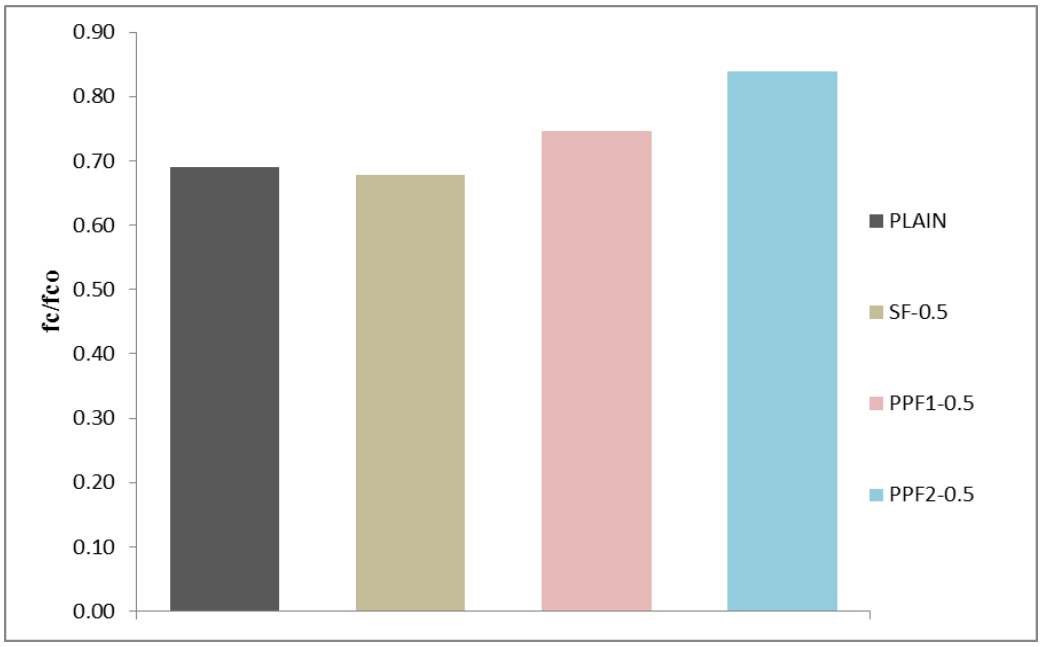
3.4.1 Θλιπτική Αντοχή

Στον **Πίνακα 31**, υπολογίστηκε ο λόγος P/Po για τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται κατά βάση αύξηση της επίδρασης της έψησης με εξαίρεση το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα.

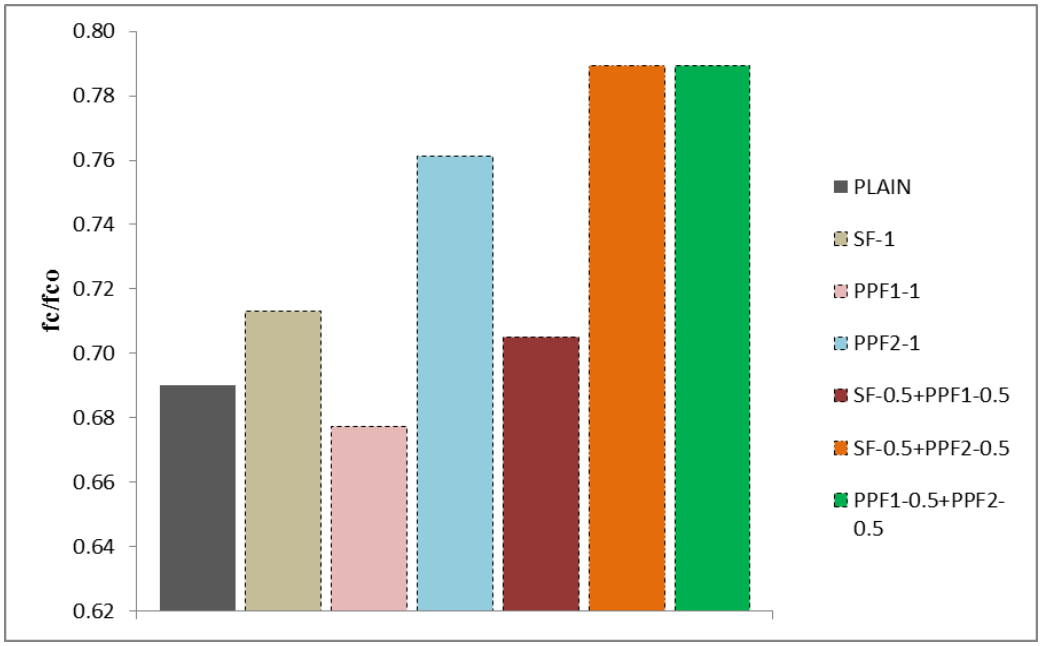
Τα **Σχήματα 53$^{\alpha}$** και **53$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 53$^{\alpha}$**), στη σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζεται η μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή ενώ στη σύνθεση με ίνες PPF2, παρουσιάζεται η μικρότερη επίδραση. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 53$^{\beta}$**), παρατηρείται πως στη σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσίαζεται επίσης η μεγαλύτερη επίδραση (ίδια μείωση με τη σύνθεση SF-0.5).

Πίνακας 31: Λόγος fc/fco ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή.

Θλιπτική Αντοχή (MPa)	
Δοκίμιο	**fc/fco**
PLAIN	**0.69**
SF-0.5	**0.68**
PPF1-0.5	**0.75**
PPF2-0.5	**0.84**
SF-1	**0.71**
PPF1-1	**0.68**
PPF2-1	**0.76**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.71**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.79**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.79**



Σχήμα 53^{α}: Λόγος f_c/f_{co} ως έκφραση της επίδραση της θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



Σχήμα 53^{β}: Λόγος f_c/f_{co} ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη θλιπτική αντοχή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

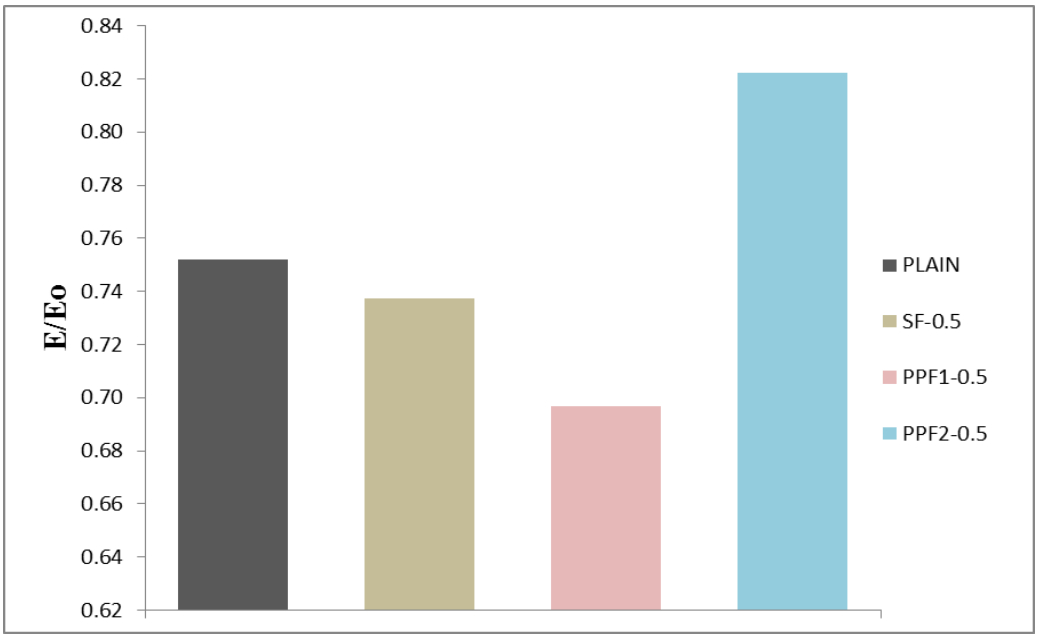
3.4.2 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος poisson.

Στον **Πίνακα 32**, υπολογίστηκε ο λόγος P/Po για το **μέτρο ελαστικότητας** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι μόνο στη σύνθεση με ίνες PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της έψησης των δοκιμίων.Στις υπόλοιπες συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 η επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας είναι πολύ μικρή.

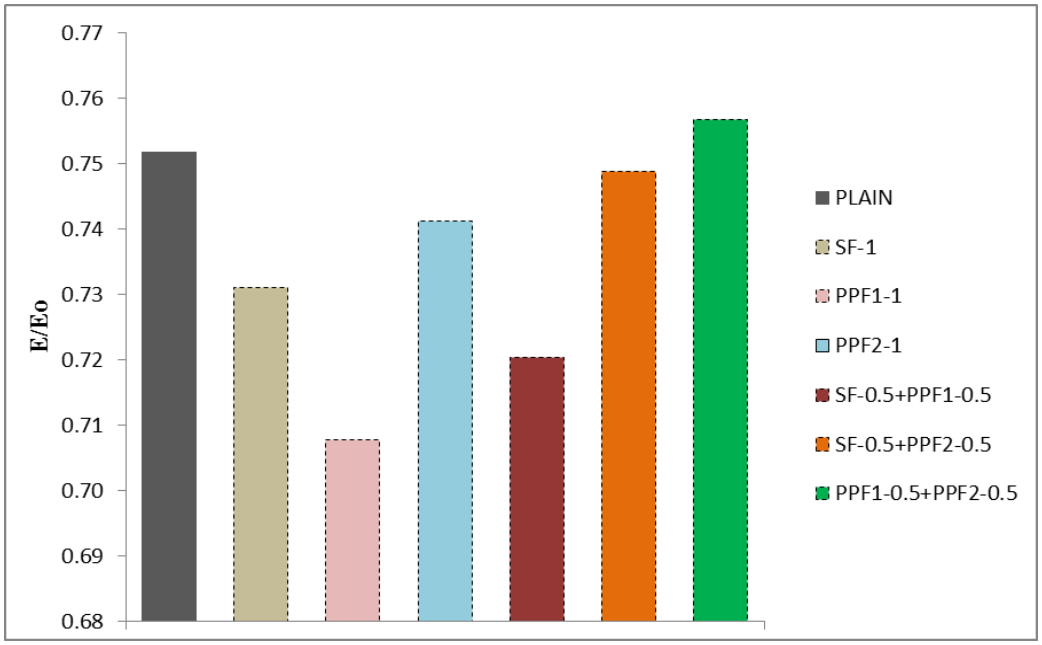
Τα **Σχήματα 54$^{\alpha}$** και **54$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 54$^{\alpha}$**), στη σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας ενώ στη σύνθεση με ίνες PPF2, παρουσιάζεται η μικρότερη επίδραση. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 54$^{\beta}$**), παρατηρείται πως στην υβριδική σύνθεση με ίνες PPF1/PPF2 παρουσιάζεται μικρότερη επίδραση της θερμοκρασίας από τις υπόλοιπες υβριδικές συνθέσεις.

Πίνακας 32: Λόγος E/Eo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας.

Μέτρο Ελαστικότητας (Mpa)	
Δοκίμιο	**E/Eo**
PLAIN	**0.75**
SF-0.5	**0.74**
PPF1-0.5	**0.70**
PPF2-0.5	**0.82**
SF-1	**0.73**
PPF1-1	**0.71**
PPF2-1	**0.74**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.72**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.75**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.76**



Σχήμα 54^{α}: Λόγος E/Eo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



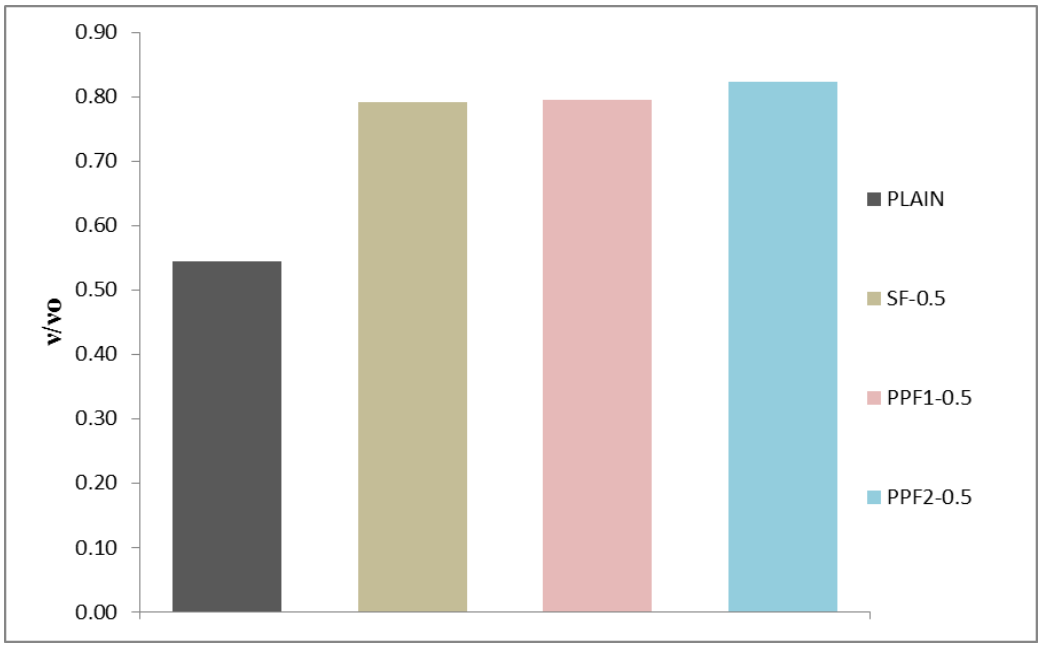
Σχήμα 54^{β}: Λόγος E/Eo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέτρο ελαστικότητας της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

Στον **Πίνακα 33**, υπολογίστηκε ο λόγος P/Po για το **λόγο poisson** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι στη σύνθεση με ίνες PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται τη μεγαλύτερη αύξηση της επίδρασης της έψησης των δοκιμίων σε ποσοστό 30% ενώ στη σύνθεση με ίνες SF η επίδραση της θερμοκρασίας στο λόγο Poisson μειώνεται.

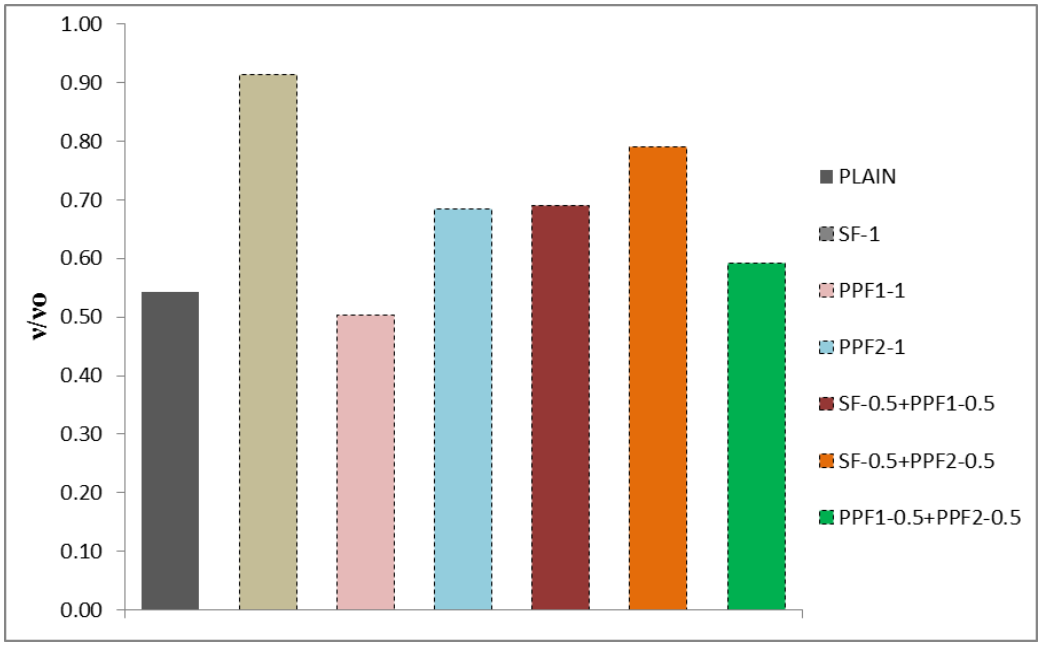
Τα **Σχήματα 55$^{\alpha}$** και **55$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 55$^{\alpha}$**), στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 παρουσιάζεται σχεδόν ίδια μεταβολή του ν. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 55$^{\beta}$**), παρατηρείται πως στη σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζεται η μικρότερη μεταβολή μετά την έψηση των δοκιμίων ενώ στη σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας από τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Πίνακας 33: Λόγος ν/νο ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο λόγο Poisson.

Λόγος Παραμορφώσεων	
Δοκίμιο	**ν/νο**
PLAIN	**0.54**
SF-0.5	**0.79**
PPF1-0.5	**0.80**
PPF2-0.5	**0.82**
SF-1	**0.91**
PPF1-1	**0.50**
PPF2-1	**0.68**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.69**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.79**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.59**



Σχήμα 55^{α}: Λόγος ν/νο ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο λόγο Poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



Σχήμα 55^{β}: Λόγος ν/νο ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο λόγο Poisson της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

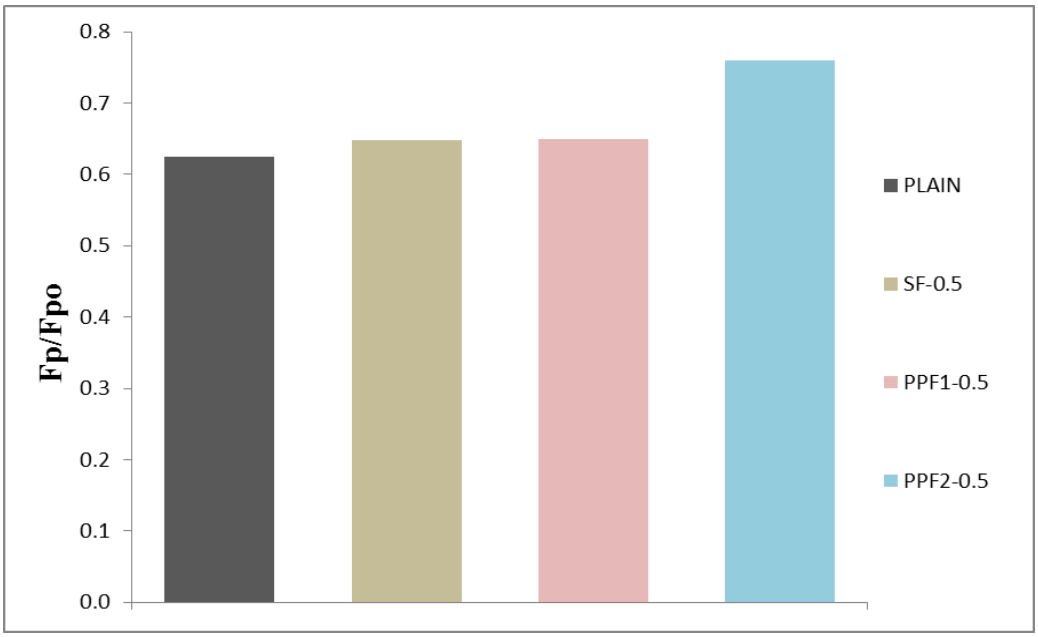
3.4.1 Δοκιμή Barcelona

Στον **Πίνακα 34**, υπολογίστηκε στη Δοκιμή Barcelona ο λόγος P/Po το **μέγιστο φορτίο** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της έψησης των δοκιμίων.

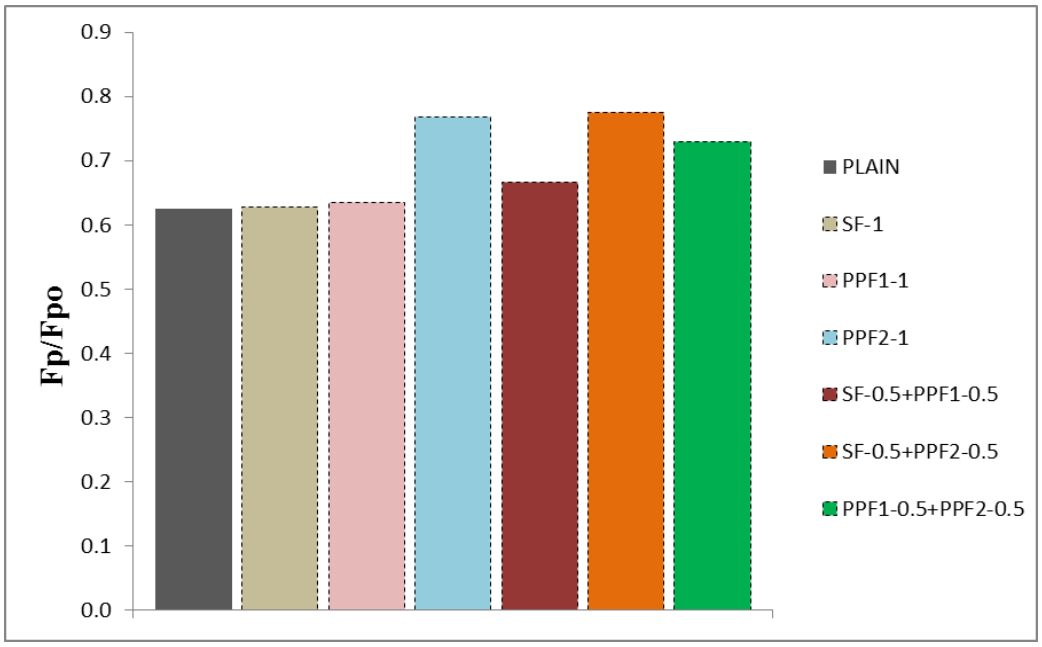
Τα **Σχήματα 56$^{\alpha}$** και **56$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 56$^{\alpha}$**), στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 παρουσιάζεται ίδια μεταβολή του μέγιστου φορτίου. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 56$^{\beta}$**), παρατηρείται πως στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 παρουσιάζεται ίδια μεταβολή με το αμιγές σκυρόδεμα ενώ στην υβριδική σύνθεση με ίνες SF/PPF1 παρουσιάζεται η μικρότερη επίδραση της θερμοκρασίας από τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Πίνακας 34: Λόγος Fp/Fpo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο, όπως προσδιορίστηκε με τη Δοκιμή Barcelona.

Μέγιστο Φορτίο (KN)	
Δοκίμιο	**Fp/Fpo**
PLAIN	**0.63**
SF-0.5	**0.65**
PPF1-0.5	**0.65**
PPF2-0.5	**0.76**
SF-1	**0.63**
PPF1-1	**0.63**
PPF2-1	**0.77**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.67**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.78**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.73**



Σχήμα 56^{α}: Λόγος Fp/Fpo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



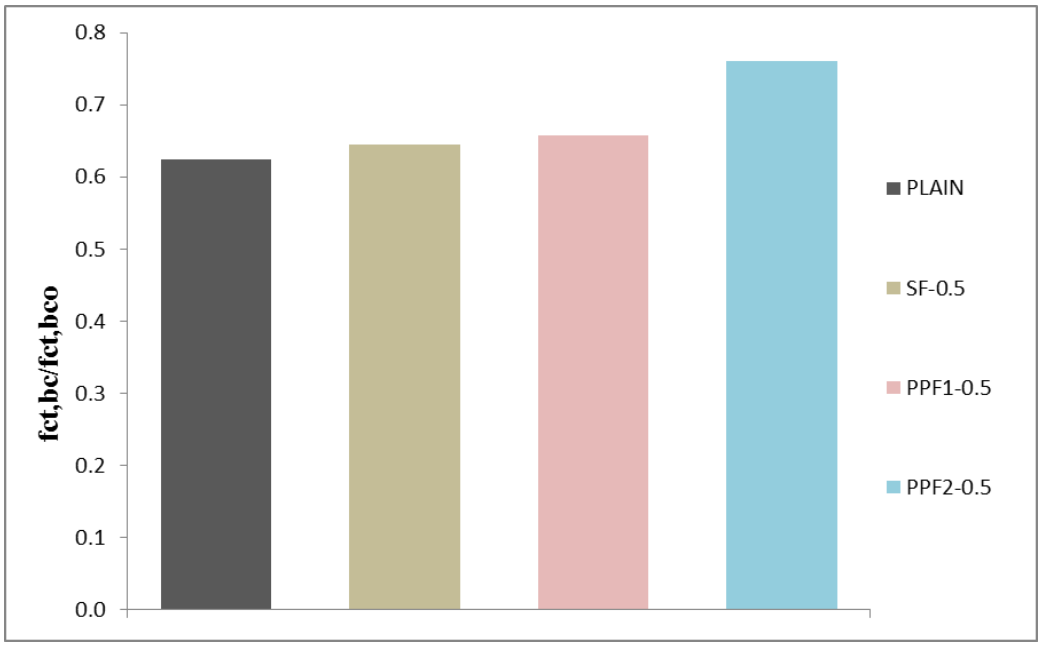
Σχήμα 56^{β}: Λόγος Fp/Fpo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

Στον **Πίνακα 35**, υπολογίστηκε στη Δοκιμή Barcelona ο λόγος P/Po για την **εφελκυστική αντοχή** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της έψησης των δοκιμίων σε αντίθεση με τη σύνθεση PPF1 όπου παρατηρείται η μικρότερη επίδραση της μεταβολής της θερμοκρασίας στα δοκίμια.

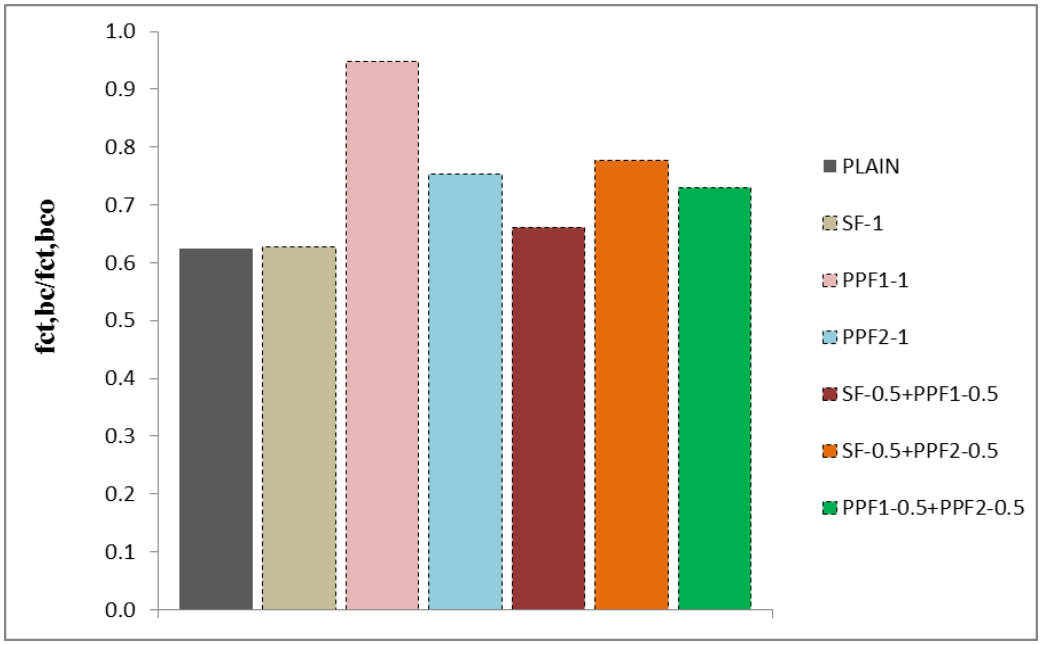
Τα **Σχήματα 57$^{\alpha}$** και **57$^{\beta}$**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 57$^{\alpha}$**), στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF2 παρουσιάζεται μεγάλη και μικρή μεταβολή, αντίστοιχα, της εφελκυστικής αντοχής. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 57$^{\beta}$**), παρατηρείται πως στη σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζεται η μικρότερη μεταβολή ενώ στη σύνθεση με ίνες SF παρουσίαζεται η μεγαλύτερη επίδραση της θερμοκρασίας από τις υπόλοιπες συνθέσεις πλην του αμιγούς σκυροδέματος.

Πίνακας 35: Λόγος fct,bc/fct,bco της επίδρασης της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων όπως προσδιορίστηκε με τη Δοκιμή Barcelona.

Εφελκυστική Αντοχή (Mpa)	
Δοκίμιο	**fct,bc/fct,bco**
PLAIN	**0.62**
SF-0.5	**0.64**
PPF1-0.5	**0.66**
PPF2-0.5	**0.76**
SF-1	**0.63**
PPF1-1	**0.95**
PPF2-1	**0.75**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.66**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.78**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.73**



Σχήμα 57^{α}: Λόγος fct,bc/fct,bco της επίδρασης της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



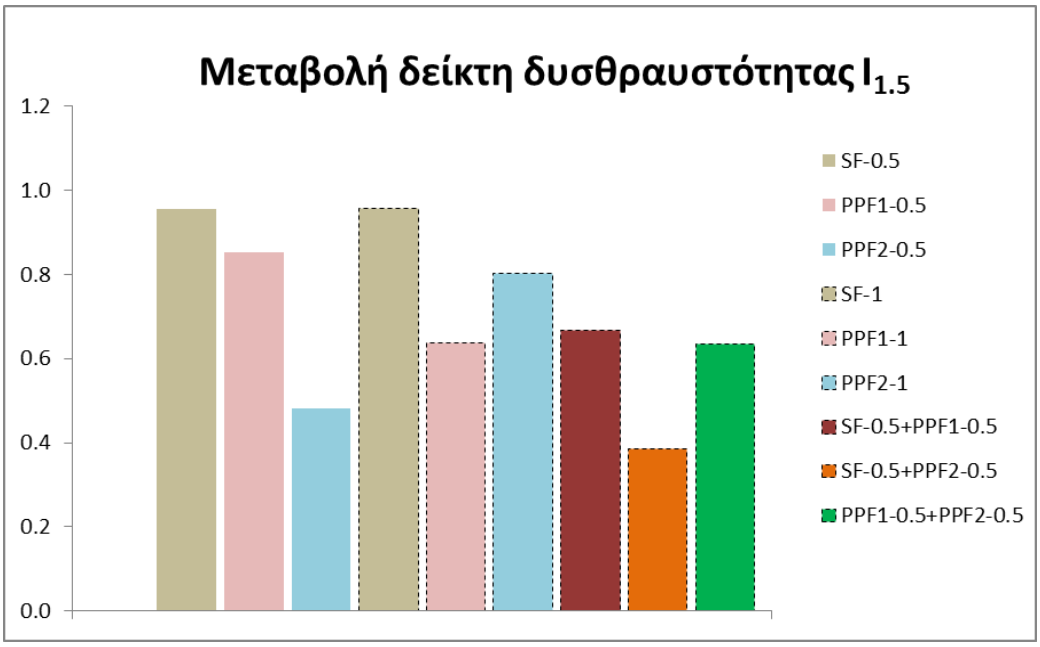
Σχήμα 57^{β}: Λόγος fct,bc/fct,bco της επίδρασης της θερμοκρασίας στην εφελκυστική αντοχή Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

Στον **Πίνακα 36**, υπολογίστηκε στη Δοκιμή Barcelona οι λόγοι P/Po για τους **δείκτες δυσθραυστότητας** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται, σε όλους τους λόγους των δεικτών, ότι στις συνθέσεις με ίνες PPF1, η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της έψησης των δοκιμίων σε αντίθεση με τη σύνθεση SF και PPF2, όπου παρατηρείται μείωση της επίδρασης της θερμοκρασίας στη δυσθραυστότητα των δοκιμίων.

Το **Σχήμα 58**, επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους ενδεικτικά για το δείκτη δυσθραυστότητας I1.5. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο., στη σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζεται η μικρότερη μεταβολή του I1.5. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο., παρατηρείται πως στην υβριδική σύνθεση με ίνες SF/PPF2 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μεταβολή.

Πίνακας 36: Λόγοι In/Ino της επίδρασης της θερμοκρασίας στους δείκτες Δυσθραυστότητας των δοκιμίων όπως προσδιορίστηκεμε τη Δοκιμή Barcelona.

Δείκτες Δυσθραυστότητας (In)				
Δοκίμιο	**I 0.5/I 0.5o**	**I 1.5/I 1.5o**	**I 2.5/I 2.5o**	**I 3.5/I 3.5o**
PLAIN	**~**	**~**	**~**	**~**
SF-0.5	**0.84**	**0.95**	**1.01**	**1.04**
PPF1-0.5	**0.72**	**0.85**	**0.88**	**0.87**
PPF2-0.5	**0.45**	**0.48**	**0.48**	**0.48**
SF-1	**0.84**	**0.96**	**1.00**	**1.02**
PPF1-1	**0.60**	**0.64**	**0.64**	**0.64**
PPF2-1	**0.81**	**0.80**	**0.82**	**0.85**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.37**	**0.40**	**0.39**	**0.39**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.37**	**0.38**	**0.38**	**0.38**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.65**	**0.63**	**0.59**	**0.57**



Σχήμα 58: Λόγος I1.5/I1.5o της επίδρασης της θερμοκρασίας στο δείκτη δυσθραυστότητας I1.5 Δοκιμής Barcelona της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% και 1.0% κ.ο.

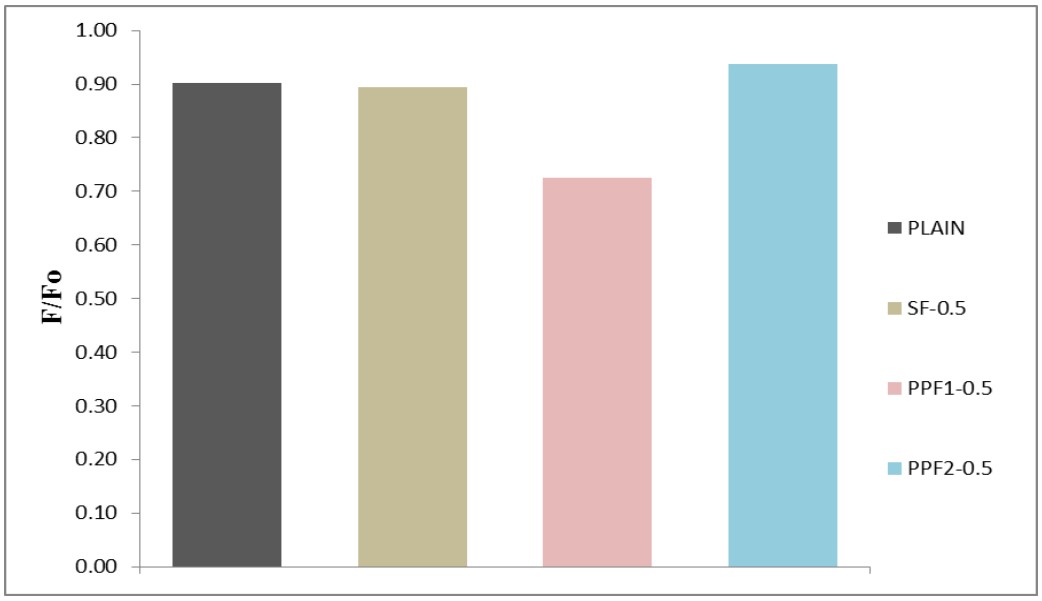
3.4.1 Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Στον **Πίνακα 37**, υπολογίστηκε στη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή ο λόγος P/Po για το **μέγιστο φορτίο** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι μόνο στη σύνθεση με ίνες PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο των δοκιμίων. Στις συνθέσεις SF και PPF2 υπάρχει πολύ μικρή μεταβολή λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας.

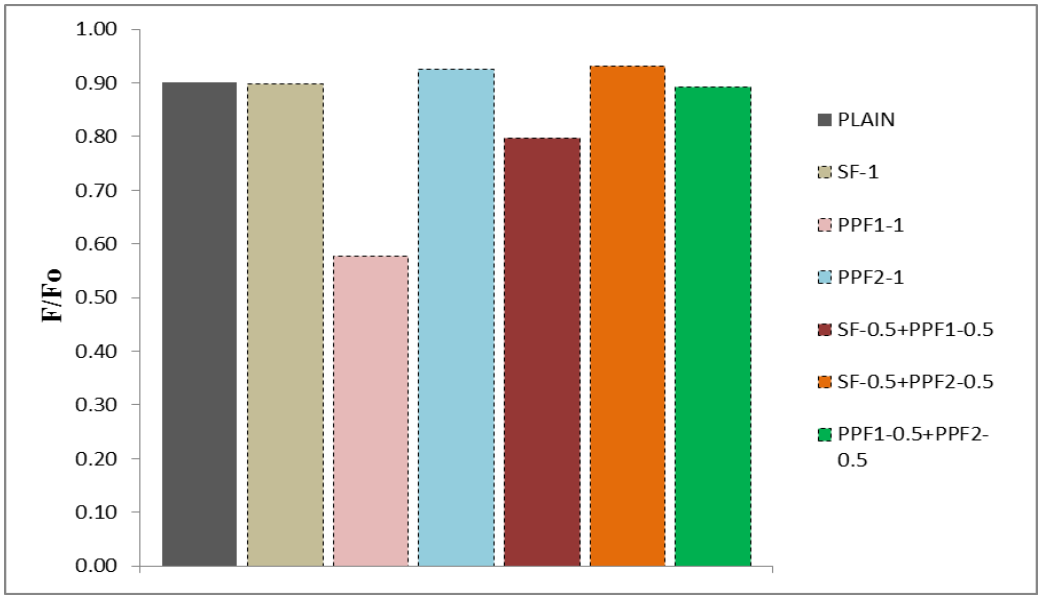
Τα **Σχήματα 59^{α}** και **59^{β}**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 59^{α}**), στη σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζεται η μικρότερη μεταβολή του μέγιστου φορτίου. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 59^{β}**), παρατηρείται πως στη σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μεταβολή ενώ στην υβριδική σύνθεση με ίνες SF/PPF2 και στη σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσίαζεται μικρή επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Πίνακας 37: Λόγος F/Fo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο των συνθέσεων, όπως προσδιορίστηκε με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Μέγιστο Φορτίο (KN)	
Δοκίμιο	**F/Fo**
PLAIN	**0.90**
SF-0.5	**0.89**
PPF1-0.5	**0.73**
PPF2-0.5	**0.94**
SF-1	**0.90**
PPF1-1	**0.58**
PPF2-1	**0.93**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.80**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.93**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.89**



Σχήμα 59^{α}: Λόγος F/Fo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



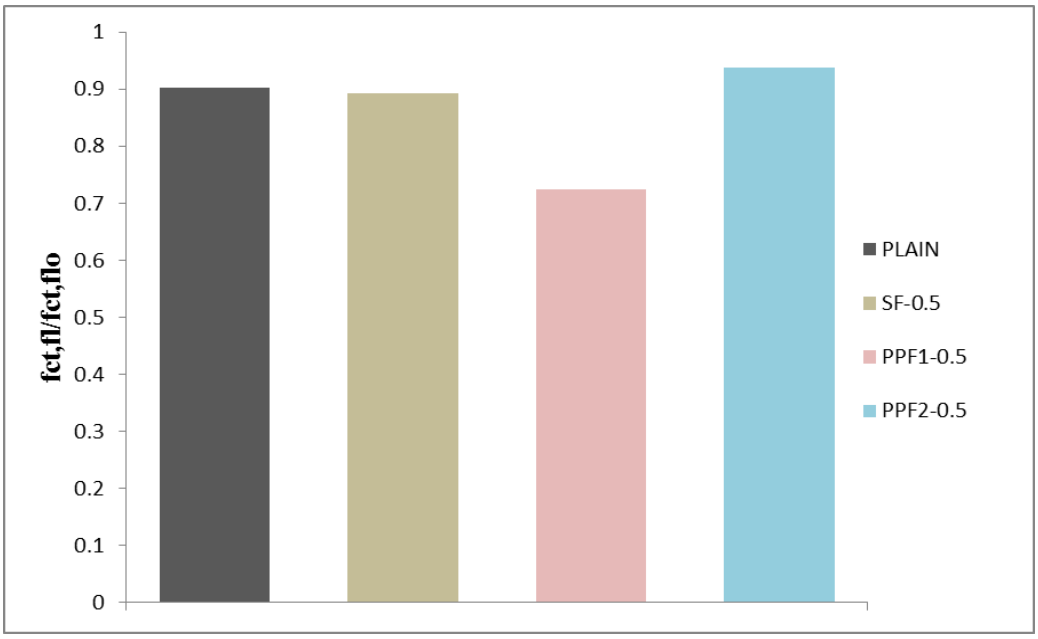
Σχήμα 59^{β}: Λόγος F/Fo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στο μέγιστο φορτίο Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

Στον **Πίνακα 38**, υπολογίστηκε στη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή ο λόγος P/Po για την **καμπτική εφελκυστική αντοχή** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται ότι μόνο στη σύνθεση με ίνες PPF1 η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην καμπτική εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων. Στις συνθέσεις SF και PPF2 υπάρχει πολύ μικρή μεταβολή λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας.

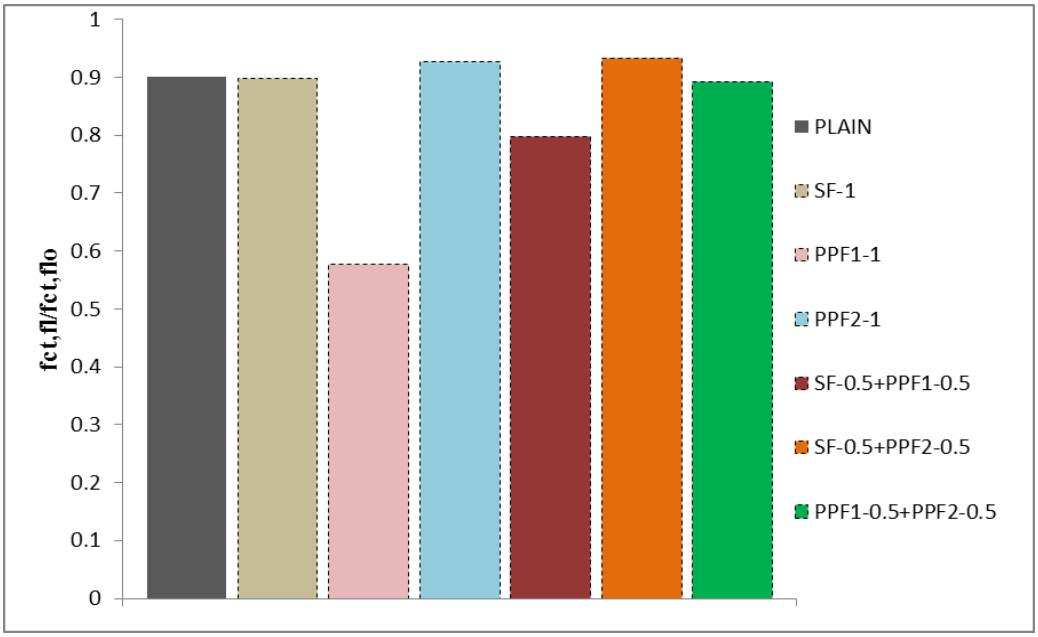
Τα **Σχήματα 60^{α}** και **60^{β}**, επιτρέπουν τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο. (**Σχήμα 60^{α}**), στη σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζεται η μικρότερη μεταβολή του μέγιστου φορτίου. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. (**Σχήμα 60^{β}**), παρατηρείται πως στη σύνθεση με ίνες PPF1 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μεταβολή ενώ στην υβριδική σύνθεση με ίνες SF/PPF2 και στη σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσίαζεται μικρή επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με τις υπόλοιπες συνθέσεις.

Πίνακας 38: Λόγος fct,fl/fct,flo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην καμπτική εφελκυστική αντοχή των συνθέσεων, όπως προσδιορίστηκε με τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή.

Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή (Mpa)	
Δοκίμιο	**fct,fl/fct,flo**
PLAIN	**0.90**
SF-0.5	**0.89**
PPF1-0.5	**0.73**
PPF2-0.5	**0.94**
SF-1	**0.90**
PPF1-1	**0.58**
PPF2-1	**0.93**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.80**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.93**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.89**



Σχήμα 60^{α}: Λόγος fct,fl/fct,flo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην καμπτική εφελκυστική αντοχή Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο.



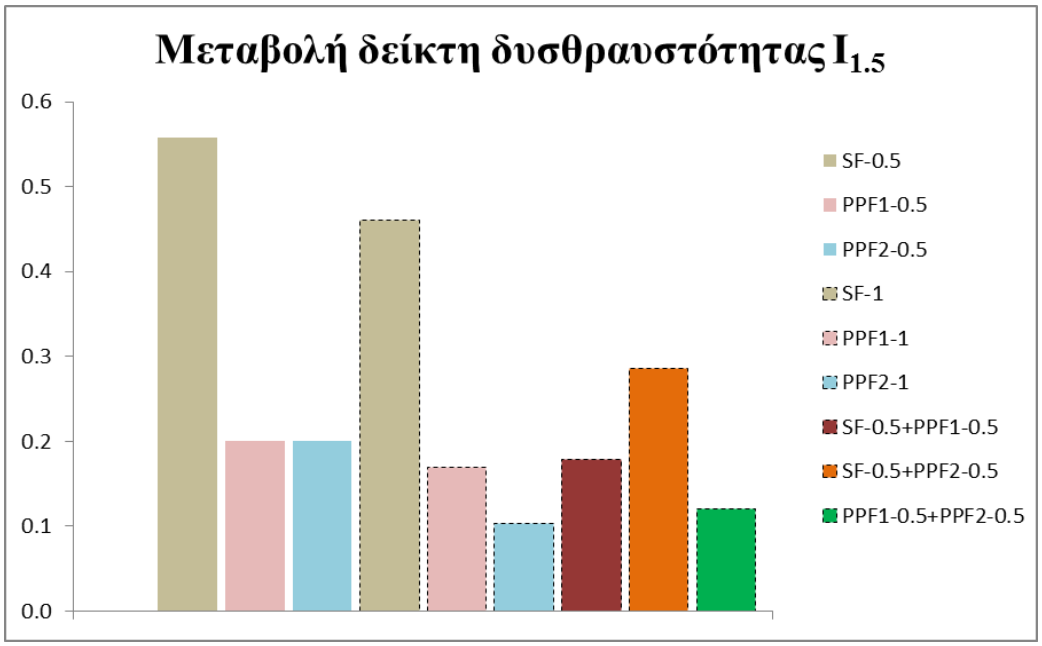
Σχήμα 60^{β}: Λόγος fct,fl/fct,flo ως έκφραση της επίδρασης της θερμοκρασίας στην καμπτική εφελκυστική αντοχή Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

Στον **Πίνακα 39**, υπολογίστηκε στη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή οι λόγοι P/Po γιατους **δείκτες δυσθραυστότητας** των δοκιμίων. Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ως προς το ποσοστό προσθήκης κάθε είδους ινών, παρατηρείται, σε όλους τους λόγους των δεικτών, ότι σε όλες τις συνθέσεις η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται αύξηση της επίδρασης της έψησης των δοκιμίων.

Το **Σχήμα 61**, επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση συνθέσεων με ίδιο ποσοστό ινών, διαφορετικού είδους ενδεικτικά για το δείκτη δυσθραυστότητας I1.5. Για ποσοστό προσθήκης ινών 0.5% κ.ο., στη σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζεται η μικρότερη μεταβολή του I1.5 ενώ για τις συνθέσεις με ίνες PPF1 και PPF2 παρατηρείται ίδια μεταβολή του I1.5. Για τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο., παρατηρείται πως στη σύνθεση με ίνες PPF2 παρουσιάζεται η μεγαλύτερη μεταβολή.

Πίνακας 39: Λόγοι In/Ino της επίδρασης της θερμοκρασίας στο δείκτη δυσθραυστότητας I1.5 των δοκιμίων όπως προσδιορίστηκεμε τη Δοκιμή Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή .

Δείκτες Δυσθραυστότητας (In)				
Δοκίμιο	**I 0.5/I 0.5o**	**I 1.5/I 1.5o**	**I 2.5/I 2.5o**	**I 3.5/I 3.5o**
PLAIN	**~**	**~**	**~**	**~**
SF-0.5	**0.59**	**0.56**	**0.55**	**0.55**
PPF1-0.5	**0.53**	**0.20**	**0.12**	**0.09**
PPF2-0.5	**0.39**	**0.20**	**0.18**	**0.17**
SF-1	**0.45**	**0.46**	**0.46**	**0.46**
PPF1-1	**0.38**	**0.17**	**0.11**	**0.08**
PPF2-1	**0.24**	**0.10**	**0.08**	**0.07**
SF-0.5+PPF1-0.5	**0.28**	**0.18**	**0.15**	**0.13**
SF-0.5+PPF2-0.5	**0.37**	**0.29**	**0.28**	**0.29**
PPF1-0.5+PPF2-0.5	**0.31**	**0.12**	**~**	**~**



Σχήμα 61: Λόγος I1.5/I1.5o της επίδρασης της θερμοκρασίας στο δείκτη δυσθραυστότητας I1.5 Δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή της σύνθεσης αναφοράς και των συνθέσεων με ποσοστό ινών 0.5% και 1.0% κ.ο.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

Δοκίμια που ελέγχονται σε θερμοκρασία δωματίου (χωρίς θερμική καταπόνηση)

Η **θλιπτική αντοχή** των δοκιμίων παρουσιάζει αύξηση για τα δοκίμια με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. (με εξαίρεση τα δοκίμια που περιέχουν χαλύβδινες ίνες SF). Αύξηση της θλιπτικής αντοχής παρουσιάζουν και οι υβριδικές συνθέσεις με τη συμμετοχή των χαλύβδινων ινών.

Το **Μέτρο Ελαστικότητας** των δοκιμίων, παρουσιάζει αύξηση για τα δοκίμια με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. (με εξαίρεση τα δοκίμια που περιέχουν ίνες πολυπροπυλενίου PPF1). Μείωση του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζουν οι υβριδικές συνθέσεις με τη συμμετοχή των ινών πολυπροπυλενίου PPF1/PPF2.

Ο **Λόγος Poisson** των δοκιμίων παρουσιάζει μείωση στα δοκίμια με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. (με εξαίρεση τα δοκίμια που περιέχουν ίνες πολυπροπυλενίου PPF1) καθώς και στις υβριδικές συνθέσεις. Ο λόγος Poisson, παραμένει σχεδόν αμετάβλητος για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο..

Η **εφελκυστική αντοχή** που προσδιορίστηκε μέσω της **δοκιμής Barcelona** (**BCN**) παρουσιάζει κατά βάση μικρή αύξηση σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση της εφελκυστικής αντοχής μόνο των συνθέσεων με ίνες PPF2.

Οι **Δείκτες Δυσθραυστότητας** που προσδιορίζονται μέσω της **δοκιμής Barcelona** (**BCN**), για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση για τη σύνθεση με ινες PPF2, ενώ για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 1.0% κ.ο., αυξημένες τιμές δεικτών δυσθραυστότητας, παρουσιάζουν μόνο οι υβριδικές συνθέσεις στις οποίες συμμετέχουν χαλύβδινες ίνες.

Η **Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή** των δοκιμίων που προσδιορίστηκε μέσω της **δοκιμής κάμψης τριών σημείων με εγκοπή** παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση του ποσοστού των ινών, σε όλες τις συνθέσεις καθώς και στις υβριδικές συνθέσεις, εκτός της σύνθεσης PPF1/PPF2.

Οι **Δείκτες Δυσθραυστότητας** των δοκιμίων που προσδιορίστηκαν μέσω της **δοκιμής κάμψης τριών σημείων με εγκοπή**, για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο., παρουσιάζουν μεγάλες τιμές στις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο., οι συνθέσεις με ίνες SF καθώς και οι υβριδικές συνθέσεις με συμμετοχή των ινών SF, παρουσιάζουν επίσης μεγάλη απορροφούμενη ενέργεια.

Δοκίμια που εκτείθονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Η **θλιπτική αντοχή** των δοκιμίων παρουσιάζει αύξηση για τις συνθέσεις με ίνες SF και PPF1 όταν αυξάνεται το ποσοστό των ινών. Η θλιπτική αντοχή των υβριδικών συνθέσεων παρουσιάζει επίσης αύξηση.

Το **Μέτρο Ελαστικότητας** των δοκιμίων παρουσιάζει αύξηση για τα δοκίμια με ίνες PPF2, μικρή μείωση για τις συνθέσεις με ίνες PPF1. Μικρή αύξηση παρουσιάζει το μέτρο ελαστικότητας των συνθέσεων με ίνες SF ενώ για τις υβριδικές συνθέσεις παρουσιάζεται μείωση του Ε.

Ο **Λόγος Poisson** των δοκιμίων παρουσιάζει αύξηση για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (λόγω αύξησης του Ε) ενώ ο λόγος Poisson παραμένει αμετάβλητος για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο.

Η **Εφελκυστική Αντοχή** που προσδιορίστηκε μέσω της **δοκιμής Barcelona (BCN)** είναι σχεδόν αμετάβλητη για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο. και 1.0% κ.ο. με εξαίρεση τη σύνθεση PFF2-1 που παρουσιάζει αύξηση.

Οι **Δείκτες Δυσθραυστότητας** που προσδιορίζονται **μέσω της δοκιμής Barcelona (BCN)**, παρουσιάζουν σχεδόν ίδια αύξηση στις συνθέσεις SF και PPF1 για ποσοστό των ινών 0.5% κ.ο. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο. η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζει το μεγαλύτερο δείκτη δυσθραυστότητας ενώ οι υπόλοιπες συνθέσεις καθώς και οι υβριδικές παρουσιάζουν ίδιους δείκτες δυσθραυστότητας.

Η **Καμπτική Εφελκυστική Αντοχή** των δοκιμίων που προσδιορίστηκε μέσω της **δοκιμής κάμψης τριών σημείων με εγκοπή** για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο., παρουσιάζει μικρή αύξηση για τη σύνθεση με ίνες SF από το αμιγές σκυρόδεμα. Για ποσοστό ινών 1.0% κ.ο., η καμπτική εφελκυστική αντοχή παρουσιάζει μικρή αύξηση με εξαίρεση τη σύνθεση με ίνες PPF1 και την υβριδική σύνθεση με ίνες SF/PPF1.

Οι **Δείκτες Δυσθραυστότητας** των δοκιμίων που προσδιορίστηκαν μέσω της **δοκιμής κάμψης τριών σημείων με εγκοπή** για ποσοστό ινών 0.5% κ.ο., μόνο η σύνθεση με ίνες SF παρουσιάζουν μεγάλη τιμή. Για ποσοστό ινών με 1.0% κ.ο., πάλι η σύνθεση με ίνες SF καθώς και οι υβριδικές συνθέσεις με τη συμμετοχή των ινών SF, παρουσιάζουν μεγάλες τιμές απορροφούμενης ενέργειας.

<u>Αποτίμηση της επίδρασης της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες και στα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος</u>

Η επίδραση της θερμοκρασίας στη **θλιπτική αντοχή** συνεπάγεται μείωση της τάξης του 30%. Στη σύνθεση PPF2-0.5 καταγράφεται η μικρότερη επίδραση η οποία ακολουθείται και από το **μέτρο ελαστικότητας**. Η μεγάλη σχετικά διακύμανση των τιμών του **λόγου Poisson**, δεν επιτρέπει την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας.

Μικρή μεταβολή του **δείκτη δυσθραυστότητας** στη **δοκιμή Barcelona** καταγράφεται για τις συνθέσεις με μεταλλικές ίνες. Η μεταβολή του δεικτη δυσθραυστήτας $I_{1.5}$ μετά τη θερμική καταπόνηση κυμαίνεται μεταξύ 20-60% για τις συνθέσεις με συνθετικές ίνες και για τις υβριδικές συνθέσεις. Στις υβριδικές συνθέσεις η μεταβολή του $I_{1.5}$ είναι σημαντική.

Η μικρότερη μεταβολή του **Δείκτη Δυσθραυστότητας** στη **δοκιμή κάμψης τριών σημείων με εγκοπή** καταγράφεται για τις συνθέσεις με μεταλλικές ίνες. Η μεταβολή του δεικτη δυσθραυστήτας $I_{1.5}$ μετά τη θερμική καταπόνηση κυμαίνεται μεταξύ 70-90% για τις συνθέσεις με συνθετικές ίνες και για τις υβριδικές συνθέσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Abbas S. & Soliman A. M. & Nehdi M. L., 2014. Exploring mechanical and durability properties of ultra-high performance concrete incorporating various steel fiber lengths and dosages. *Construction and Building Materials* 75: 429–441.

AENOR. UNE 83515:2010. Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona, Asociación Española de Normalización y Certificación Madrid.

Altoubat S. A. & Roesler J. R. & Lange D. A. & Rieder K., 2006. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. *Construction and Building Materials* 22: 384–393.

Aslani F., Nejadi S., 2013. Self-compacting concrete incorporating steel and polypropylene fibers: Compressive and tensile strengths, moduli of elasticity and rupture, compressive stress–strain curve, and energy dissipated under compression. *Composites* 53(Part B): 121-133.

ASTM C469-02. Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression.

Balázs Nagy & Salem Georges Nehme & Dóra Szagri, (2015). Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes. *Energy Procedia* 78: 2742-2747.

Bangi M.R. & Horiguchi T., 2012. Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* 42(2): 459-466.

Banthia N. & Majdzadeh F. & Wu J. & Bindiganavile V., 2014. Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear. *Cement & Concrete Composites* 48: 91-97.

Bing Chen & Juanyu Liu, 2004. Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research* 34: 1065–1069.

Brandt Andrzej M., 2008. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures* 86: 3-9. Available at: www.elsevier.com/locate/compstruct or http://www.sciencedirect.com

British Standard EN 14651:2005+A1:2007, Test method for metallic fibre concrete- Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).

Carmona Malatesta Sergio & Aguado de Cea Antonio & Molins Borrell Climent, 2012. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. *Materials and Structures* 45: 1053-1069. Available at: http://www.sciencedirect.com

Carmona Malatesta Sergio & Aguado de Cea Antonio & Molins Borrell Climent, 2013. Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test. *Construction and Building Materials* 48: 592-600. Available at: http://www.sciencedirect.com

Cengiz O. & Turanli L., 2004. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and highperformance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research* 34: 1357-1364. Available at: http://www.sciencedirect.com

Chao S.-H. & Karki N.B. & Cho J.-S. & R.N. Waweru., 2012. In: Use of double punch test to evaluate the mechanical performance of fiber reinforced concrete. Gustavo J. ParraMontesinos,

Hans W. Reinhardt, A.E. Naaman, 2012. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* 6: 27-34. Available at: http://www.sciencedirect.com

Chen, W. Double punch test for tensile strength of concrete. ACI-Mater J 1970;67:993–5.

EFNARC, European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete, 2009. Specification and guidelines for testing of passive fire protection for concrete Tunnels lining.

Heard W.F. & Basu P.K. & Slawson T. & Nordendale N.A., 2011. Characterization and performance optimization of a cementitious composite for quasi-static and dynamic loads. *Procedia Engineering* 10: 3020-3025.

Kim Jihwan & Lee Gyu Pil & Moon Do Young, 2015. Evaluation of mechanical properties of steelfibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test. *Construction and Building Materials* 79: 182-191. Available at: http://www.sciencedirect.com

Mobasher B. & Bakhshi M. & Barsby C., 2014. Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests. *Construction and Building Material*, 70: 243–253.

Noushini A. & Samali B. & Vessalas K., 2013. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 49: 374–383.

Ozger O.B. & Girardi F. & Giannuzzi G.M. & Salomoni V.A. & Majorana C.E. & Fambri L. & Baldassino N. & Di Maggio R., 2013. Effect of nylon fibres on mechanical and thermal properties of hardened concrete for energy storage systems. *Materials and Design* 51: 989-997. Available at: http://www.sciencedirect.com

Rostasy F.S. & Hartwich K., 1985. Compressive strength and deformation of steel fiber reinforced concrete under high rate of strain. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 7(Number 1): 21-28.

Pliya P. & Beaucour A-L. & Noumowe A., 2011. Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behavior of high strength concrete subjected to high temperature. *Construction and Building Materials* 25: 1926-1934. Available at: http://www.sciencedirect.com

Sakkas, K. & Panias, D. & Nomikos, P.P. & Sofianos A.I., 2014. Potassium based geopolymer for passive fire protection of concrete tunnels linings. *Tunnelling and Underground Space Technology* 43: 148-156. Available at: http://www.sciencedirect.com

Sideris K.K. & Manita P., 2013. Residual mechanical characteristics and spalling resistance of fiber reinforced self-compacting concretes exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials* 41: 296-302. Available at: http://www.sciencedirect.com

Sika, 2013. Datasheet Sika®Fiber PP 940-50: Construction.

Wang J. & Banthia N. & Zhang M., 2012. Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviors of fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites* 34: 443-450. Available at: http://www.sciencedirect.com

Yoo D. & Shin H. & Yang J. & Yoon Y., 2013. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforcedconcrete with micro steel fibers. *Composites* 58(Part B): 122-133. Available at: http://www.sciencedirect.com

Βουδικλάρης Θ.Γ., Πολιτικός Μηχανικός. Οδηγίες Εκτέλεσης της Δοκιμής Κάθισης. Available at: < http://papadiotis.8m.com/kat1.htm

Γιατζίδης Γ., 2014. Πειραματική Διερεύνηση Θλιπτικής και Καμπτικής Αντοχής Ινοπλισμένου και Θερμικά Καταπονημένου Σκυροδέματος, Μεταπτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Α.Ι. Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Available at: https://dspace.lib.ntua.gr

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, Το τσιμέντο σε πυρκαγιά. Available at: http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/uses-concrete/mellon_skurodema_purkagia/

Κόλιας Στ., 2013-2014,. Σημειώσεις διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών Ε.Μ.Π., Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος, Αθήνα.

Κόλιας Στ., 2010-2011. Προχωρημένη τεχνολογία σκυροδέματος. Σημειώσεις διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Ε.Μ.Π. «Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών», Αθήνα.

Κωτσοβός Μ.Δ., 2010. Οπλισμένο Σκυρόδεμα. Εισαγψγή στο σχεδιασμό με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο των κανονισμών. Αθήνα. Έκδοση Συμεών.

Κομνηνού Ε. & Οικονόμου Π., 2015. Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος, ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες. Μεταπτυχιακή εργασία διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Γ. Ευστράτιος, Λέκτορας Ε.Μ.Π. Available at: https://dspace.lib.ntua.gr/

Κωνσταντίνος- Μιλτιάδης Γ. Σακκάς, 2014. Προστασία των μέτρων στήριξης σηράγγων από πυρκαγιά. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μεταλλείων-Μεταλλουργών Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Α.Ι. Σοφιανός, Καθηγητής Ε.Μ.Π. Available at: https://dspace.lib.ntua.gr/

Παναγόπουλος Γ. & Κίρτας Ε., 2005. Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος Ι. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών - Τμήμα Δομικών Έργων, Τομέας Δομοστατικών Εφαρμογών. Available at: https://dspace.lib.ntua.gr/

Παπαδάτου Μ., 2014. Ανθεκτικότητα ινοπλισμένου με ίνες χάλυβα σκυροδέματος. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Γ. Ευστράτιος, Λέκτορας Ε.Μ.Π. Available at: https://dspace.lib.ntua.gr/

ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε., ΙΝΟΜΙΧ χαλύβδινες ίνες, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.

Τριανταφύλλου Α., 2011. Δομικά Έργα. 9η Έκδοση. Πάτρα. Αυτοέκδοση.