

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»



«Συγκριτική αξιολόγηση μηχανικών χαρακτηριστικών και μηχανικής συμπεριφοράς σκυροδέματος, ινοπλισμένου με μεταλλικές και συνθετικές ίνες»

Κομνηνού Ελένη-Οικονόμου Παναγιώτης
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Επιβλέπων: Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης-Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μας διατριβή, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε όλους όσους μας βοήθησαν και μας στήριξαν σε αυτήν την πορεία.

Αρχικά θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Μπαδογιάννη Ε., Λέκτορα 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 μεταπτυχιακής διατριβής.

Ευχαριστίες οφείλουμε επίσης στον Διευθυντή του Εργαστηρίου «Μεταλλικών Κατασκευών» της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. Καθηγητή Βάγια Ι., καθώς και στο ερευνητικό και διοικητικό προσωπικό του εργαστηρίου κ. Λιγνό Ξ. για την πολύτιμη βοήθεια του. Ευχαριστούμε επίσης τον Διευθυντή του Εργαστηρίου «Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων» της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Καθηγητή Σοφiano Α., καθώς και το ερευνητικό και διοικητικό προσωπικό του εργαστηρίου κ. Παπαντωνόπουλο Γ. για τη βοήθεια και την υλικοτεχνική υποστήριξη που μας παρείχε για τη διεξαγωγή σημαντικού τμήματος του πειραματικού μέρους.

Ευχαριστούμε επίσης, τον κ. Νομικό Π., Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και τον κ. Χουμανίδη Δ., Υποψήφιο Διδάκτορα του Τομέα Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Λεπτοκαρίδη Χ., Προϊστάμενο του εργαστηρίου ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος της TITAN Α.Ε., τον κ. Κυπριώτη Γ., Γεωλόγο του εργαστηρίου ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος της TITAN Α.Ε., καθώς και τον κ. Μποροβίνο Π., τεχνικό προσωπικό του εργαστηρίου ελέγχου ποιότητας σκυροδέματος της TITAN Α.Ε., για τη συνδρομή τους στην παρασκευή των συνθέσεων και την πειραματική μελέτη των δοκιμίων σκυροδέματος.

Επίσης θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κ. Βουγιούκα Ε., Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής.

Τέλος, οφείλουμε ένα μεγάλο ευχαριστώ στις οικογένειες μας για τη στήριξη τους, με κάθε δυνατό τρόπο, στη μέχρι τώρα πορεία μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις μηχανικές του ιδιότητες. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος τόσο με μεταλλικές, όσο και με συνθετικές ίνες.

Τα δοκίμια παράχθηκαν βάσει της ίδιας σύνθεσης, ώστε τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα. Παράχθηκαν δοκίμια με ποσοστά ινών 0.5% και 1.0% κατά όγκο. Οι μεταλλικές ίνες (SF) που χρησιμοποιήθηκαν είχαν αγκύρια στις άκρες ενώ οι συνθετικές ίνες ήταν δύο ειδών: α) με κυματιστή μορφή (PFS), β) πεπλατυσμένες με μικρά αγκύρια στις άκρες τους και πτυχώσεις κατά μήκος τους (PFC). Όλες οι συνθέσεις συγκρίθηκαν με μια ίδια σύνθεση αναφοράς, χωρίς ίνες. Επιπλέον παρασκευάστηκε μια ίδια σύνθεση αναφοράς χωρίς ίνες, αλλά με προσθήκη Μετακαολίνη.

Πέραν των κλασσικών δοκιμών χαρακτηρισμού των ιδιοτήτων του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες δοκιμές. Συγκεκριμένα προσδιορίστηκε το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος παραμορφώσεων του ινοπλισμένου σκυροδέματος και η εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος μέσω της δοκιμής Barcelona και της κάμψης δοκού σε τέσσερα σημεία. Τέλος μέσω των δοκιμών εφελκυσμού, μελετήθηκε η συμπεριφορά των δοκιμίων μετά τη ρηγμάτωση και εκτιμήθηκε η δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος κάθε σύνθεσης.

Με βάση τα αποτελέσματα και αναφορικά με τις ιδιότητες νωπού σκυροδέματος παρατηρήθηκε μείωση της ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος, η οποία όμως εύκολα αποκαταστάθηκε με τη χρήση κοινών ρευστοποιητών, σε σχετικά χαμηλά ποσοστά (έως 3.25 kg/m³). Επίσης, διαπιστώθηκε αύξηση του εγκλωβισμένου αέρα λόγω της προσθήκης ινών ειδικά στην περίπτωση των μακρύτερων συνθετικών ινών PFC, σε ανεκτά όμως επίπεδα (έως 3.6%). Δεν διαπιστώθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, σημαντική επίδραση της προσθήκης ινών στη θλιπτική αντοχή και στο μέτρο ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Αντίθετα η προσθήκη των ινών επηρέασε σημαντικά τον λόγο αξονικών και διατμητικών παραμορφώσεων, όπου καταγράφηκε σημαντική μείωση των τιμών του, από 35% έως 60%.

Με βάση τα αποτελέσματα και αναφορικά με τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση, μέσω των δοκιμών Barcelona και της κάμψης τεσσάρων σημείων, διαπιστώθηκε η ανάπτυξη παραμένουσας εφελκυστικής αντοχής μετά τη θραύση, όλων των ινοπλισμένων δοκιμίων σκυροδέματος. Μάλιστα οι τιμές της παραμένουσας τάσης στην περίπτωση των συνθετικών ινών με υψηλό ποσοστό προσθήκης (1% κ.ο.), αναπτύχθηκαν σε τιμές που αντιστοιχούν στη φέρουσα ικανότητα των δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος, για τα εξεταζόμενα κατά τη μέθοδο όρια μετατόπισης. Τέλος αναφορικά με τη δυσθραυστότητα και με τις δύο δοκιμές εκτιμήθηκε αύξησή της, σε τιμές που έφτασαν μέχρι και το 90%.

Με βάση τα συνολικά αποτελέσματα και με κριτήριο μόνο την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά, είναι σαφές ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, βελτιώνεται τόσο η παραμένουσα αντοχή, όσο και η δυσθραυστότητα. Ωστόσο όσον αφορά στο είδος των ινών, οι 2 μέθοδοι εκτίμησης δεν συγκλίνουν ως προς το συμπέρασμα. Κατά τη δοκιμή Barcelona την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά εμφανίζουν οι μεταλλικές ίνες, ενώ σύμφωνα με τη δοκιμή κάμψης, οι συνθετικές ίνες PFS.

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ρηγμάτωση, παραμένουσα τάση, δυσθραυστότητα, δοκιμή Barcelona.

ABSTRACT

The behavior of the concrete is characterized sufficiently by its mechanical properties. In this thesis we study the mechanical behavior of fiber-reinforced concrete both with metal, and synthetic fibers.

The test pieces were produced using the same composition, in order the results to be comparable. They were produced specimens with fiber levels of 0.5% and 1.0% by volume. The metal fibers (SF) used had anchors at the edges while the synthetic fibers being of two types: a) with a wavy shape (PFS), b) with small anchors flattened at their ends and corrugations in the length (PFC). All formulations were compared to a same reference composition without fibers. Moreover it has been prepared a same reference composition without fibers, but with metakaolin.

In addition to the classic characterization tests of the properties of fresh and hardened concrete, additional tests were performed. It was determined the modulus, the ratio of deformations (poisson ratio) of fiber-reinforced concrete and the tensile strength of concrete through the Barcelona test and bending test four points loading. Finally through the tensile test, it was studied the behavior of the test specimens after cracking and evaluated the fracture toughness of fiber reinforced concrete for each composition.

Based on the results and with respect to the properties of fresh concrete, it was observed reduction of the flow of fresh concrete, but it was easily restored using common plasticizers at relatively low levels (up to 3.25 kg/m³). Also, there was an increase of the entrapped air due to the addition of fibers especially in the case of the longer synthetic fibers PFC, but at acceptable levels (up to 3.6%). It was not found, as expected, a significant effect of adding fiber to the compressive strength and modulus of fiber reinforced concrete. Instead the addition of fibers greatly affect the ratio of axial and shear strain, which recorded a significant reduction of the values from 35% to 60%.

Based on the results and regarding the post-cracking behavior of steel fiber reinforced concrete through the Barcelona test and bending test four points loading, all fiber reinforced concrete specimens were found to develop residual tensile strength after fracture. Indeed, the values of residual stress in the case of synthetic fibers with a high level of addition (1 vol%), grown to values corresponding to the carrying capacity of the steel fiber reinforced concrete beams, in the displacement limits of the method by which it was examined. Finally, regarding toughness increased, in both tests up to 90%.

Based on the overall results and on the basis of, better mechanical behavior only, it is clear that by the increasing of the volume of the fibers, both the residual strength and the toughness are improved. However with regard to the type of fiber, the two estimation methods do not converge to the conclusion. In Barcelona test the best mechanical behavior exhibited by metal fibers, while according to the bending test, synthetic fibers PFS.

Keywords: fiber reinforced concrete, cracking, residual tense, toughness, Barcelona test.

RESUME

Le comportement du béton est caractérisé en grande partie par ses propriétés mécaniques. Dans cette thèse, nous étudions le comportement mécanique du béton renforcé de fibres à la fois avec le métal, et des fibres synthétiques.

Les éprouvettes ont été produites en utilisant la même composition, que les résultats seront comparables. Les échantillons ont été produits avec des niveaux de fibres de 0.5% et 1.0% en volume. Les fibres métalliques (SF) utilisés avaient ancrés les bords tandis que les fibres synthétiques étant de deux types: a) avec un ondulés (PFS), b) avec de petites ancrés aplatis à leurs extrémités et ondulations dans la longueur (PFC). Toutes les formulations ont été comparées à une composition de référence même sans fibres. On a préparé en plus une composition de référence pareil sans fibres, mais avec du métakaolin ajoutée.

En plus des tests de caractérisation classiques des propriétés du béton frais aussi que durci, des tests supplémentaires ont été effectués. On a déterminé le module, la fraction des déformations du béton renforcé par des fibres et la résistance à la traction du béton par les tests Barcelone et du faisceau plié en quatre points. Enfin grâce à l'essai de traction, on a étudié le comportement des éprouvettes après la fissuration et on a évalué la ténacité du béton renforcé de fibres de chaque composition.

Basé sur les résultats et par rapport aux propriétés du béton frais a été observé une réduction de la liquidité de béton frais, la quelle a été facilement restaurée en utilisant des plastifiants ordinaires à des niveaux relativement bas (jusqu'à 3.25 kg/m³). Il y avait en plus, une augmentation de l'air piégé a cause de l'addition de fibres particulièrement dans le cas de la synthèse des fibres plus PFC, mais aux niveaux acceptables (jusqu'à 3.6%). Il n'est pas trouvé, comme a été prévu, un effet significatif de l'ajout de fibres à résistance à la compression et le module de béton renforcé de fibres. Au contraire, l'addition de fibres a affectué considérablement le rapport de la déformation axiale et au cisaillement, ou il y avait enregistré une réduction significative des valeurs de 35% à 60%.

Basé sur les résultats et sur le comportement de la fibre de béton armé post-fissuration par les tests de Barcelone et de flexion en quatre points, il a été trouvé un développement de résiduelle résistance à la traction après la fracture, de les échantillons de béton renforcé de fibres. En effet, les valeurs de contraintes résiduelles dans le cas des fibres synthétiques avec un niveau élevé de plus (1% en volume), cultivées à des valeurs correspondant à la capacité de charge de la fibre d'acier poutres en béton armé, pour l'examen par la méthode des limites de déplacement. Enfin, en ce qui concerne la ténacité de deux tests on a estimé une augmente, des prix qui atteint jusqu'à 90%.

Basé sur les résultats globaux et seulement un meilleur comportement mécanique critère, il est clair que, tant que la proportion des fibres augmente est améliorée la force résiduelle et la ténacité seront meilleurs. Toutefois en ce qui concerne le type de fibre, les deux méthodes d'estimation ne conclure pas. Lors d'un test de Barcelone meilleur comportement mécanique exposées par des fibres métalliques, tandis que, selon le test de flexion, de fibres synthétiques PFS.

Mots-clés: béton renforcé de fibres, fissuration, la tension résiduelle, la ténacité, test de Barcelone.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 1 |
| 1.1 | Ινοπλισμένο σκυρόδεμα | 1 |
| 1.2 | Θεωρητική διερεύνηση των χαρακτηριστικών και της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος | 7 |
| 1.2.1. | Μέτρο ελαστικότητας και λόγος παραμορφώσεων | 7 |
| 1.2.2. | Δοκιμή Barcelona | 12 |
| 1.2.3. | Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας | 16 |
| 1.3 | Αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος-Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 19 |
| 1.3.1 | Μέτρο ελαστικότητας και λόγος παραμορφώσεων (poisson) | 19 |
| 1.3.2 | Δοκιμή Barcelona | 21 |
| 1.3.3 | Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας | 24 |
| 2. | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ | 27 |
| 2.1 | Τοποθέτηση αντικειμένου | 27 |
| 2.2 | Υλικά, πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις | 27 |
| 2.2.1 | Υλικά | 27 |
| 2.2.2 | Παρασκευή σκυροδέματος | 29 |
| 2.3 | Πειραματική μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών και της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος | 33 |
| 2.3.1. | Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας και λόγου παραμορφώσεων (poisson) | 33 |
| 2.3.2. | Δοκιμή Barcelona | 34 |
| 2.3.3. | Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας | 35 |
| 3. | ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 37 |
| 3.1 | Αποτελέσματα νοπού σκυροδέματος | 37 |
| 3.2 | Αποτελέσματα Σκληρυμένου Σκυροδέματος | 38 |
| 3.2.1. | Θλιπτική αντοχή | 38 |
| 3.2.2. | Μέτρο ελαστικότητας και λόγος παραμορφώσεων (poisson) | 42 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2.3. | Εφελκυστική αντοχή μέσω της Δοκιμής Barcelona | 56 |
| 3.2.4. | Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας | 73 |
| 4. | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 87 |
| 4.1 | Μηχανικές Ιδιότητες | 87 |
| 4.2 | Γενικευμένη δοκιμή Barcelona | 87 |
| 4.3 | Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας | 87 |
| | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 88 |

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1.1 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα

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. Υπάρχουν ίνες και από διάφορα άλλα υλικά όπως 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 δισθραυστότητας του υλικού δηλαδή της ικανότητάς του να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση. Γραφικά αντιπροσωπεύεται από το εμβαδόν κατά την καμπύλη φορτίου παραμόρφωσης. Το εμβαδόν αυτό είναι συχνά 10-40 φορές μεγαλύτερο για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα από ότι στο άοπλο (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

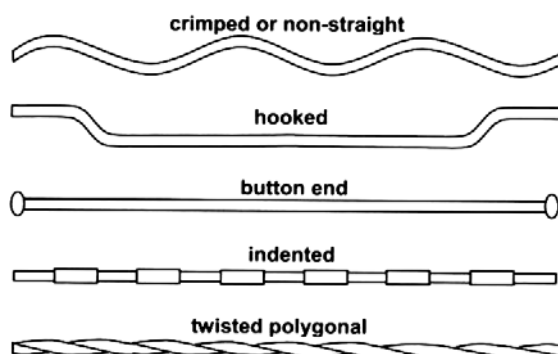
Σκοπός των μικρών διασκορπισμένων ινών μέσα στην μάζα του σκυροδέματος είναι να ελέγχουν την ρωγή που προκαλείται και την επέκτασή της. Οι κυριότερες ίνες που χρησιμοποιούνται στα σκυροδέματα για κατασκευή είναι:

- 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)

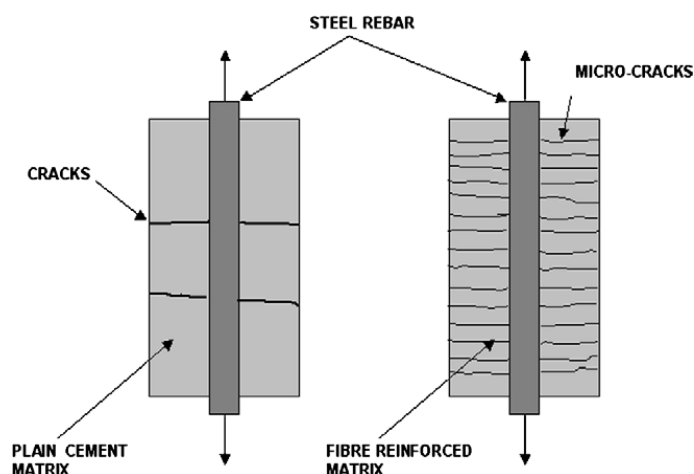
Για τα κατασκευαστικά σκυροδέματα οι πιο σημαντικές ίνες είναι οι μεταλλικές.

Μερικά παραδείγματα μεταλλικών ινών φαίνονται στο Σχήμα 2. 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 3 παρουσιάζεται η επιρροή των ινών στη ρηγμάτωση του σκυροδέματος. Οι

μεγάλες ρωγμές αντικαθίστανται από μικρορωγμές, οι οποίες προσδίδουν μεγαλύτερη ασφάλεια και αντοχή στο σκυρόδεμα.

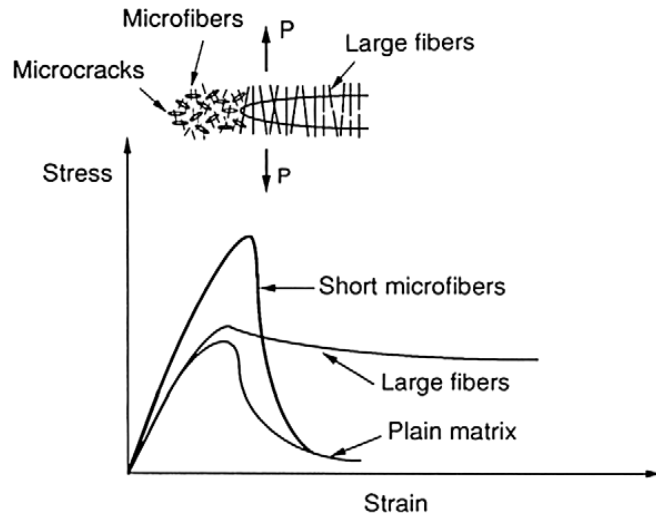


Σχήμα 2: Μεταλλικές ίνες με άγκιστρα στα άκρα και με διάφορες παραλλαγές στο σχήμα τους. (Brandt Andrzej M., 2008)

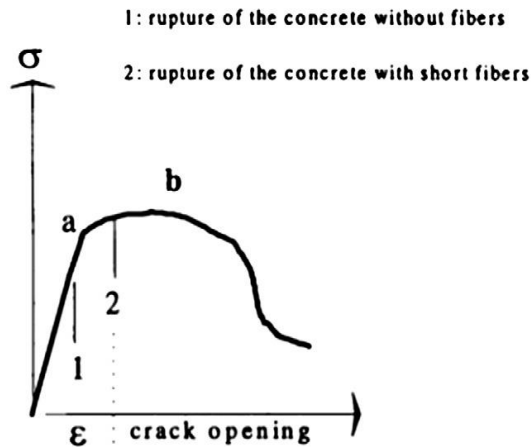
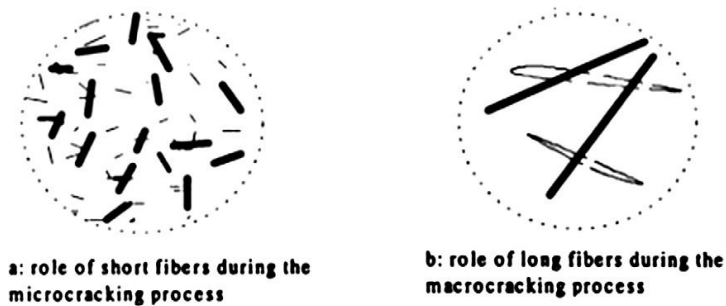


Σχήμα 3: Απεικόνιση των ρωγμών στο άοπλο (RC) και ινοπλισμένο (FRC)σκυρόδεμα αντίστοιχα σε δοκίμια υπό πίεση. (Brandt Andrzej M., 2008)

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 4 και 5**.



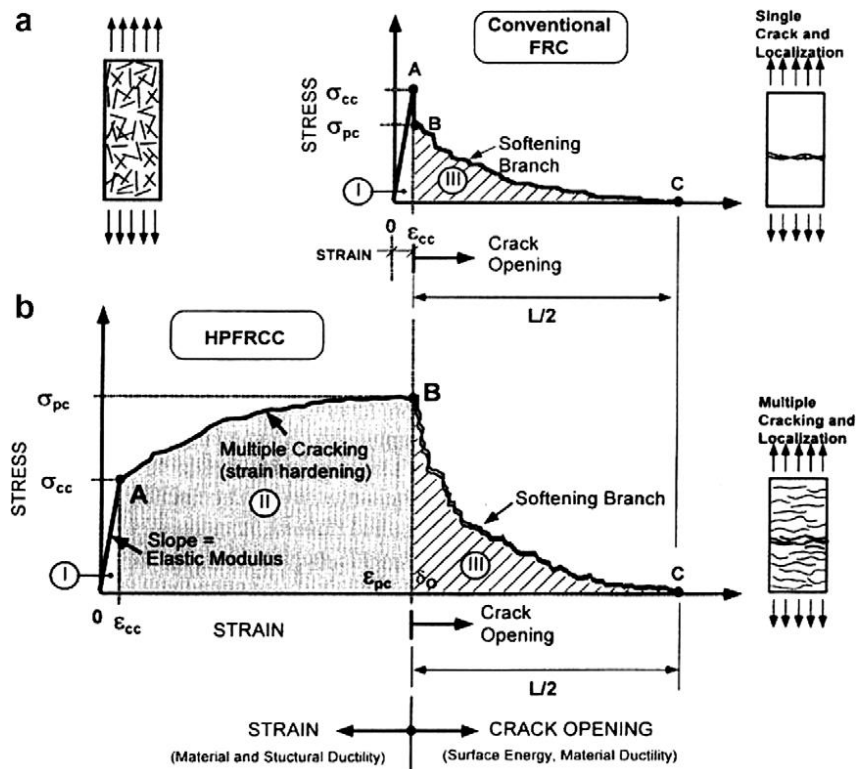
Σχήμα 4: Δομή μακρίων και κοντών ινών και μηχανισμός ελέγχου επέκτασης της ρωγμής στην μάζα του σκυροδέματος. (Brandt Andrzej M., 2008)



Σχήμα 5: α) Λειτουργία κοντών ινών στις μικρορωγμές
 β) Λειτουργία μακρίων 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 6** 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 μετά την πρώτη ρωγμή από μία μικρή μείωση. 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.

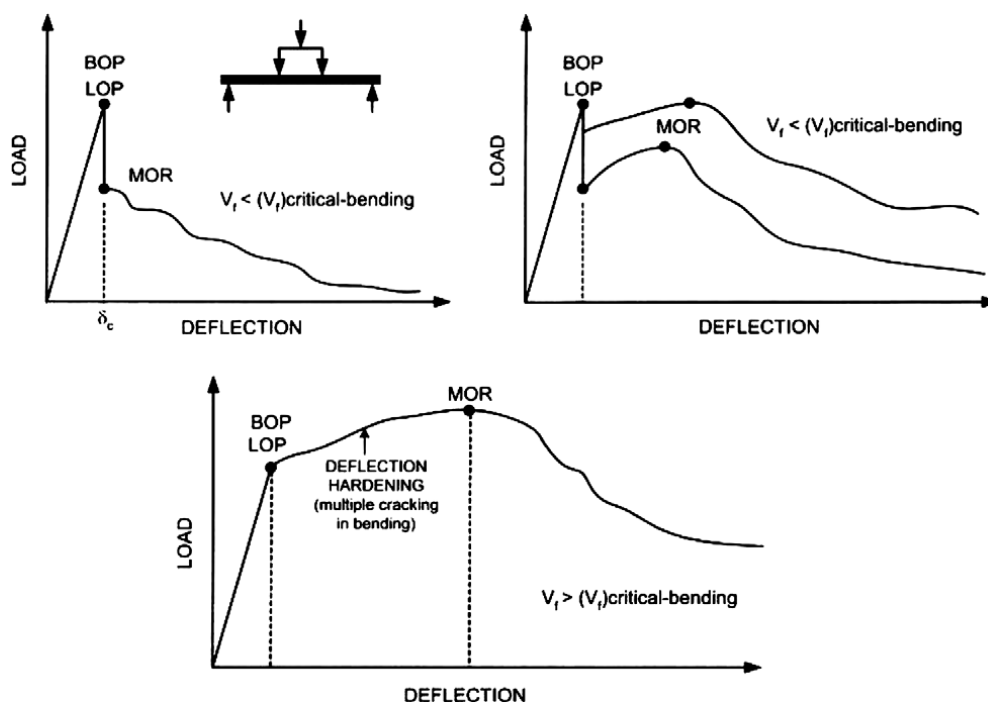


Σχήμα 6: Σύγκριση της καμπύλης τάσης-παραμόρφωσης του συμβατικού ινοπλισμένου σκυροδέματος (FRC) με το ινοπλισμένο σκυροδέμα υψηλής επιτελεστικότητας (HPFRCC). (Brandt Andrzej M., 2008)

Στο **Σχήμα 7** 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 δομικό 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 την δυσθραυστότητα, καθώς και να αυξήσουν την κόπωση και την ικανότητα κρούσης των κατασκευαστικών στοιχείων από σκυρόδεμα.

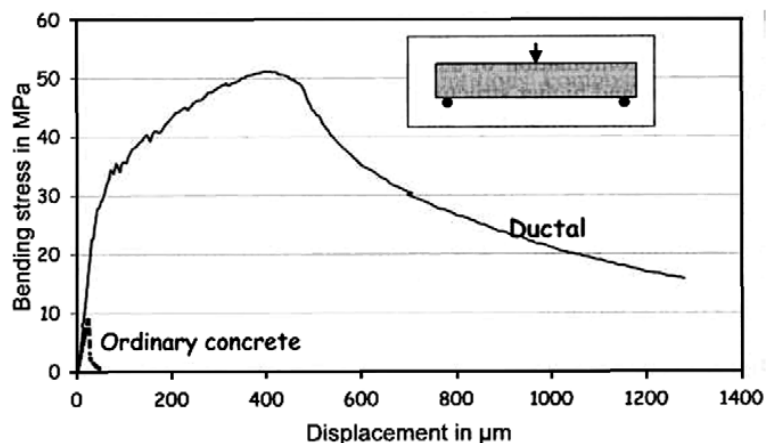
Οι ίνες πολυπροπυλενίου με μικρό μέτρο ελαστικότητας έχουν δύο εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες (μέχρι 1.0 kg/m³) για να ελέγχουν την συστολή ξήρανσης του νωπού σκυροδέματος τις πρώτες ώρες της σκυροδέτησης. Κατά την διάρκεια των πρώτων ωρών το μέτρο ελαστικότητας του νωπού σκυροδέματος είναι περίπου ίδιο με

αυτό των ινών. Οι ίνες πολυπροπυλενίου χρησιμοποιούνται επίσης στα σπίτια στους τοίχους από σκυρόδεμα διάσπαρτες, γιατί σε περίπτωση πυρκαγιάς ή υψηλής θερμοκρασίας λιώνουν και δημιουργούν κανάλια, τα οποία μπορεί να ανακουφίσουν το σκυρόδεμα από την εσωτερική πίεση και να καθυστερήσουν την καταστροφή του.



Σχήμα 7: Αναμενόμενα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων, τα αποτελέσματα του οποίου χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για δομικό σχεδιασμό. (Brandt Andrzej M., 2008)

Engineered cementitious composites (ECC) or reactive powder concrete (RPC) είναι τα ονόματα ειδικών σκυροδεμάτων, τα οποία έχουν πολύ υψηλή επιτελεστικότητα ακόμα και με χαμηλά ποσοστά κοντών, συνθετικών ινών (2%-5%) διασκορπισμένων στην μάζα τους. Παρασκευάζονται βάσει συγκεκριμένης σύνθεσης με υψηλά ποσοστά τσιμέντου Portland και άλλων συνδετικών υλικών και υπερπλαστικοποιητών. Το πατενταρισμένο σκυρόδεμα Ductal αποτελεί παράδειγμα τέτοιου σκυροδέματος. Στο **Σχήμα 8** φαίνεται το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης ενός συμβατικού σκυροδέματος και ενός σκυροδέματος Ductal υπο κάμψη.



Σχήμα 8: Σύγκριση καμπύλης τάσης-παραμορφωσης δοκών από συμβατικό σκυρόδεμα και σκυροδέματος μεγάλης παραμορφωσιμότητας Ductal. (Brandt Andrzej M., 2008)

Τα εξαιρετικά υψηλής αντοχής σκυροδέματα (UHS) παράχθηκαν στην Γαλλία στις αρχές της δεκαετίας του 1990 με την δυνατότητα να μπορούν να αναπτύξουν θλιπτική αντοχή μέχρι 800 MPa και εφελκυστική αντοχή μέχρι 100 MPa. Στην σύνθεσή τους δεν υπάρχουν χονδρόκοκα αδρανή και το μέγιστο μέγεθος κόκκου που διαθέτουν είναι 0.3 mm. Για την 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/m³). Το σκυρόδεμα αυτό ονομάζεται Ductal και παράγεται στην Γαλλία. Με θλιπτική 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 αποφλοιώσης).

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 πτώση κομματιών σε περίπτωση ρηγματομένου 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 τον συμβατικό οπλισμό. Η χρήση ινών χάλυβα κάνει την 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, σημαντικό παράγοντα για πλάκες και δάπεδα.

1.2 Θεωρητική διερεύνηση των χαρακτηριστικών και της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος

1.2.1. Μέτρο ελαστικότητας και λόγος παραμορφώσεων

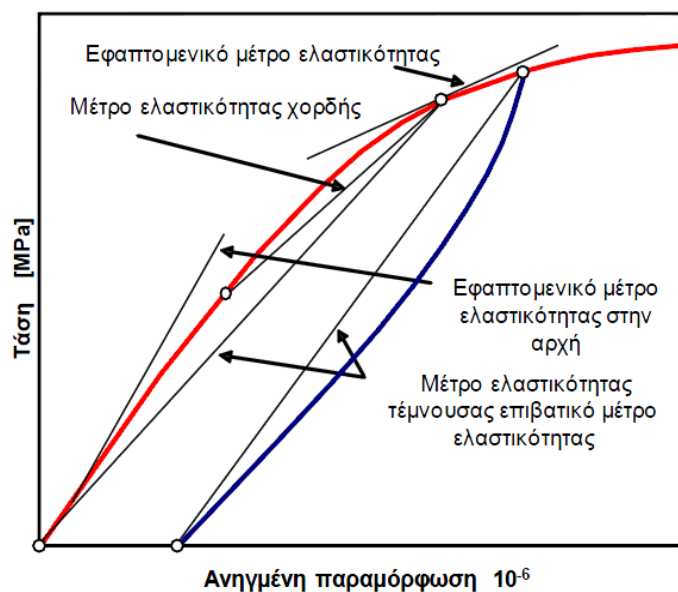
Μέτρο Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας (E) 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 ($\leq 40\%$ περίπου του φορτίου θραύσεως) μπορεί με ικανοποιητική ακρίβεια να θεωρηθεί ευθύγραμμη. Στην περίπτωση αυτή το μέτρο ελαστικότητας (αποκαλούμενο και στατικό μέτρο ελαστικότητας, $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$) προσομοιάζει ικανοποιητικά την συμπεριφορά του υλικού υπό την προϋπόθεση ότι ο χρόνος φόρτισης είναι μικρός. 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 ($\leq 40\%$ 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 9**. 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.

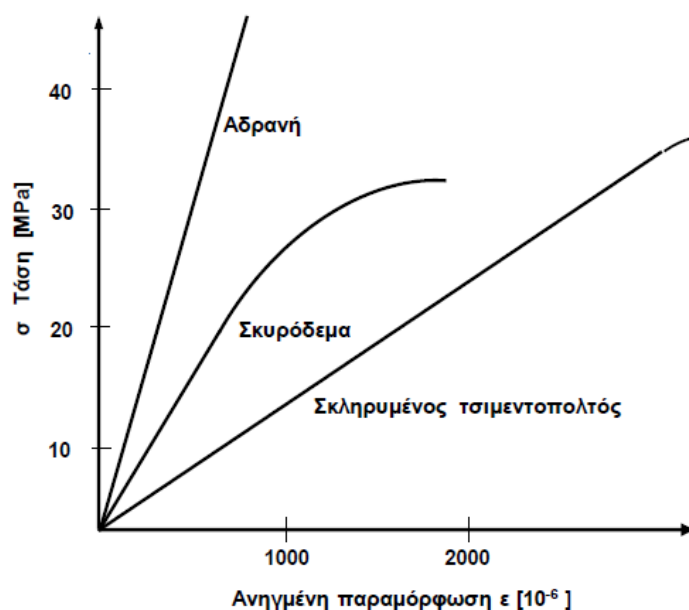


Σχήμα 9: Τυπικό διάγραμμα σ - ϵ σκυροδέματος σε φόρτιση και αποφόρτιση. Οι κλίσεις των ενδεικνυόμενων ευθειών είναι τα αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας. (Κόλιας Στ. 2014)

Το μέτρο ελαστικότητας εκτός από το μέγεθος της τάσης επηρεάζεται και από το χρόνο που διαρκεί το πείραμα. Όσο αυξάνει η διάρκεια της δοκιμής ή όσο μειώνεται η ταχύτητα επιβολής της τάσης ($d\sigma/dt$), η αντοχή μειώνεται και η παραμόρφωση κατά τη θραύση αυξάνει (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 N/T , 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 10**. 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 μικρορηγματώση στη διεπιφάνεια αδρανών-τσιμεντοπολτού. Αντίθετα, αν η συνάφεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού ελαττωθεί τότε η καμπυλότητα της γραμμής σ - ϵ αυξάνει.



Σχήμα 10: 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 1**) των συμβατικών κατηγοριών κυλινδρικής, χαρακτηριστικής αντοχής σκυροδέματος κυλινδρικών δοκιμίων (σε MPa), προς το μέσο μέτρο ελαστικότητας E_{cm} εκφρασμένο σε GPa.

Πίνακας 1: 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 |
| E_{cm} | 27 | 29 | 30 | 31 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 41 | 42 | 44 |

Οι τιμές του **Πίνακα 1** 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%.

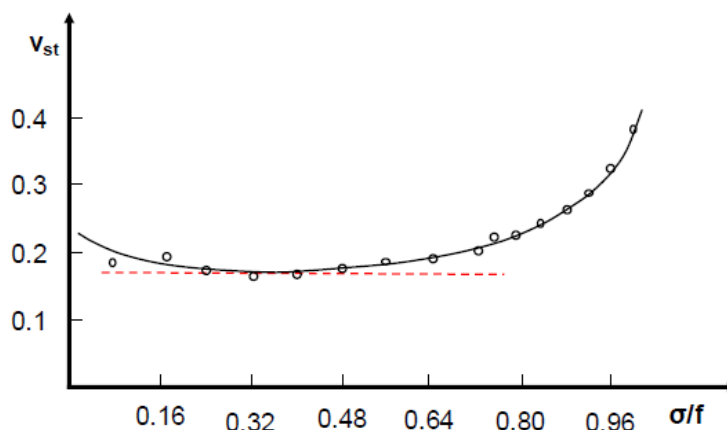
Οι τιμές πρέπει να θεωρούνται ως ενδεικτικές και προσεγγιστικές για γενικές εφαρμογές. Στις περιπτώσεις που η κατασκευή μπορεί να είναι ευαίσθητη σε αποκλίσεις από αυτές, θα πρέπει να εκτιμώνται ιδιαίτέρως.

Λόγος Παραμορφώσεων (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 ($\nu = \epsilon_x / \epsilon_y$).

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 $\nu=0$. Στην πλαστική περιοχή, τα υλικά διατηρούν σταθερό τον όγκο τους και έτσι ο λόγος παραμορφώσεων τείνει ασυμπτωτικά στην τιμή $\nu=0.5$.

Ο στατικός λόγος του Poisson (ν_{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 παραμορφώσεων μεταβάλλεται σε σχέση με την επιβαλλόμενη τάση σ ή με τον λόγο της επιβαλλόμενης τάσης προς την αντοχή σε θλίψη (σ/f), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 11**. Από πειραματικά αποτελέσματα έχει διαπιστωθεί ότι ο λόγος αυξάνει μετά από κάποιο όριο το οποίο είναι περίπου $\sigma/f=0.6$. Ο ρυθμός αύξησης γίνεται εντονότερος μετά από $\sigma/f=0.75$ 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 παραμορφώσεων προσδιορίζεται ως ο λόγος των εγκάρσιων προς τις αξονικές παραμορφώσεις για φορτία που δεν υπερβαίνουν το 50% του φορτίου θραύσης.

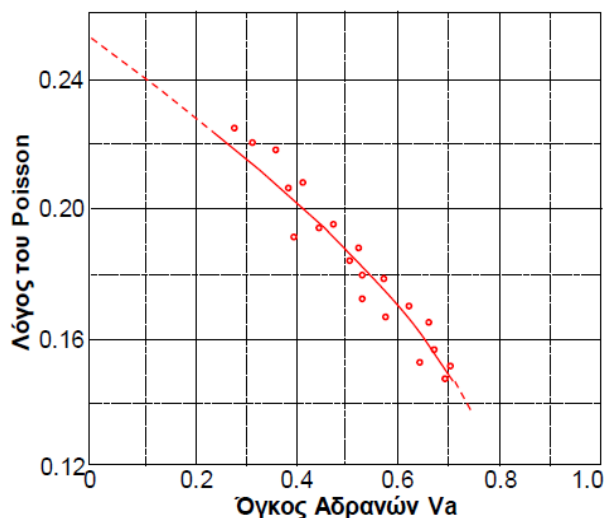


Σχήμα 11: Μεταβολή του λόγου παραμορφώσεων ανάλογα με το επίπεδο της επιβαλλόμενης τάσης. (Κόλιας Στ. 2014)

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 παραμορφώσεων 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 12). Ο λόγος παραμορφώσεων 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 παραμορφώσεων για το σκυρόδεμα.



Σχήμα 12: Μεταβολή του λόγου παραμορφώσεων σε σχέση με τον όγκο των αδρανών μέσα στο μίγμα. (Κόλιας Στ. 2014)

Ο λόγος παραμορφώσεων 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 του Poisson λαμβάνεται ίσως με 0.20. Δίνεται η δυνατότητα να ληφθεί ίσος με μηδέν όταν επιτρέπεται η ρηγμάτωση του εφελκόμενου σκυροδέματος.

Σχετικά με το λόγο παραμορφώσεων σε εφελκυσμό, έχει καταγραφεί ερευνητικά ότι δεν 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.

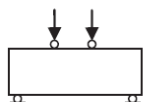
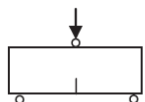
1.2.2. Δοκιμή Barcelona

Η δοκιμή Barcelona αποδείχθηκε επαρκής για τον χαρακτηρισμό και τον έλεγχο του ινοπλισμένου σκυροδέματος, καθώς προσφέρει αποτελέσματα με μικρότερη διασπορά από εκείνα που λαμβάνονται από άλλες δοκιμές. Αυτή η δοκιμή χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η επίδραση των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, μετά τη ρηγμάτωση.

Λαμβάνοντας υπόψη την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας ως μια από τις πιο αντιπροσωπευτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οι δοκιμές σε κάμψη σε πρισματικά δοκίμια ή πάνελ πραγματοποιούνται για να προσδιορισθεί η ενέργεια που απορροφάται κατά τη διάρκεια της θραύσης. Υπάρχουν διάφορα πρότυπα για τον προσδιορισμό της ενέργειας, όπως για παράδειγμα τα ASTM C 1018, ASTM C 1609, EN 14651, NBN B 15-238, JSCE SF-4, UNE 83-510, RILEM TC-162-TDF, UNI 11039 τα οποία παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2**.

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

Πίνακας 2: 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 Residual strength |
| ASTM C-1609 | | | |
| NBN 15-238 |  | 150 × 150 × 600 | Toughness Energy absorbed Equivalent flexural strength |
| UNE 83-510-89 | | $d/b < 1,5; l = 3d$ | Energy adsorbed |
| JCI SF4 | | $d = b = 100 \text{ mm } l = 3d + 80 \text{ mm}$ | Energy absorbed Equivalent flexural strength |
| RILEM 162-TDF | $l_f > 40 \text{ mm}$ | $d = b = 150 \text{ mm } l = 3d + 80 \text{ mm}$ 150 × 150 × 550 | Flexural strength |
| EN-14651 | | | Residual load |

l_f = fiber length.

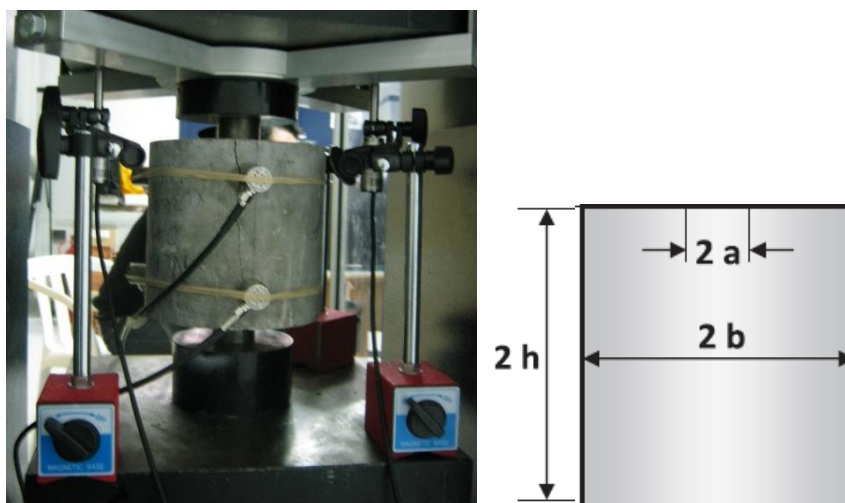
Τα πλεονεκτήματα της δοκιμής Barcelona (BCN) έναντι των άλλων πρότυπων δοκιμών για την εύρεση της δυσθραυστότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η χρήση μικρών δοκιμών, αλλά με μεγάλη επιφάνεια θραύσης. Οι διαστάσεις τους είναι 150x150 mm και χυτεύονται σε τυποποιημένους κυλίνδρους διαστάσεων 150X300 mm. Η δοκιμή λαμβάνει χώρα σε τυποποιημένα εργαστήρια ποιοτικού ελέγχου.

Η συνολική περιφερειακή παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD) μετράται από ειδικό επιμηκυνσιόμετρο το οποίο προσαρμόζεται στην περιφέρεια. Η συσκευή αυτή λόγω του υψηλού κόστους, δεν συναντάται συχνά στα εργαστήρια. Για το σκοπό αυτό ο Carmona προκειμένου να γενικευθεί η χρήση της δοκιμής BCN πρότεινε μια σχέση μεταξύ της ενέργειας που προσδιορίζεται από τη συνολική περιφερειακή 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 ιών στα ινοπλισμένα σκυροδέματα μετά την ρηγμάτωση.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα πειράματα στηρίχτηκαν στην έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Sergio Carmona, Antonio Aguado, και Climent Molins το 2013 σύμφωνα με την οποία επεκτείνεται η εφαρμογή της γενικευμένης δοκιμής Barcelona (G-BCN) που πρότεινε ο Carmona με σκοπό οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό και τον έλεγχο των ιδιοτήτων του FRC να λαμβάνονται μέσω μιας εύκολης δοκιμής. Επιπλέον, η συγκεκριμένη μελέτη προτείνει μια έκφραση για τον υπολογισμό της ενέργειας που διαχέεται στο δοκίμιο από τη δυσθραυστότητα του FRC και η οποία προσδιορίζεται βάσει της αξονικής μετατόπισης φορτίου, μετά τη ρηγμάτωση. Σύμφωνα με το βελγικό πρότυπο NSB 15-23, η ενέργεια και η δυσθραυστότητα που υπολογίζονται από δοκιμές κάμψης συσχετίζονται με αυτές από τη δοκιμή Barcelona, με αποτέλεσμα να επιτρέπεται ευρέως η χρήση της.

Η δοκιμή BCN είναι μια δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού που βασίζεται στην δοκιμή διπλής διάτρησης, η οποία προτάθηκε από τον Chen (1970). Στη δοκιμή αυτή, ένα κυλινδρικό δοκίμιο από FRC, με διάμετρο ($2b$) ίση με το ύψος του ($2h$), δηλαδή $2b/2h=1$, υποβάλλεται όπως φαίνεται στο **Σχήμα 13** 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 ($2a$) 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 περιφερειακή παραμόρφωση του δοκιμίου (TCOD), η οποία μετράται στο ήμισυ του ύψους του, πρέπει να καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 13: 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 την διάμετρο του δοκιμίου και παράγει τάση εφελκυσμού κάθετα προς τα ακτινικά επίπεδα του δοκιμίου. Λόγω της παρουσίας αυτού του πεδίου έντασης με κυλινδρική συμμετρία, όταν η ένταση υπερβεί την αντοχή εφελκυσμού του σκυροδέματος, το δοκίμιο σπάει προκαλώντας ακτινικές ρωγμές κάθετα στο πεδίο της έντασης. Αυτό επιτρέπει στον 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 14** φαίνονται η ρηγμάτωση στην τελική

κατάσταση του δοκιμίου: δύο ευθυγραμμισμένες ρωγμές, τρεις ρωγμές σε απόσταση 120 μοιρών ή μία από την άλλη ή τέσσερις κάθετες ρωγμές.



Σχήμα 14: 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 περιφερειακή παραμόρφωση είναι αμελητέα. Όταν σχηματιστούν οι ρωγμές, η μετρούμενη περιφερειακή παραμόρφωση αντιστοιχεί στη συνολική παραμόρφωση μετά την 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 1**:

$$E(TCOD) = \int_0^{TCOD} P(TCOD)d(TCOD) \quad (1)$$

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

Η ενέργεια που υπολογίζεται από την **Εξίσωση 1** δείχνει την επίδραση των ινών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Λαμβάνει υπόψη της την απόκριση του FRC μόνο στη ρηγματωμένη κατάσταση και περιλαμβάνει 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 την δοκιμή κάμψης του βελγικού προτύπου NBN B 15 238.

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

Η παραμένουσα αντοχή, f_{ctRx} , και το φορτίο που αντιστοιχεί σε μία δεδομένη περιφερειακή παραμόρφωση R_x , υπολογίζεται σύμφωνα με το πρότυπο UNE 83-515 με την **Εξίσωση 2**:

$$f_{ctRx} = \frac{4P_{Rx}}{9\pi ah} \quad (2)$$

όπου P_{Rx} είναι το φορτίο που αντιστοιχεί στη συνολική περιφερειακή 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 δ_{Ax} στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μετά την ρηγμάτωση. Χρησιμοποιώντας πλέον την **Εξίσωση 2** με τη νέα $P_{\delta x}$, υπολογίζεται ευκολότερα η παραμένουσα αντοχή $f_{ct\delta x}$.

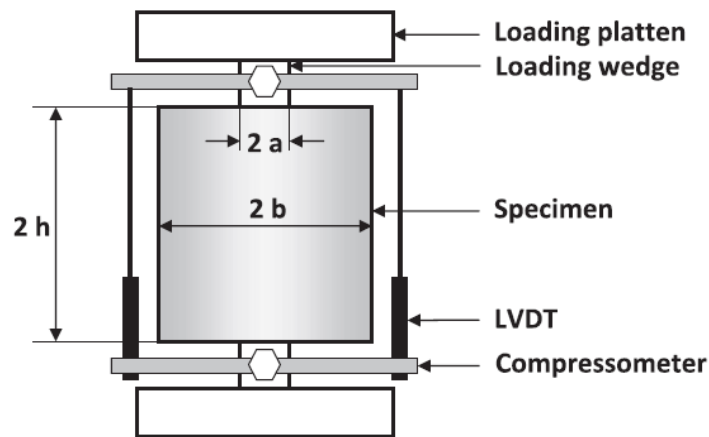
Μια παραλλαγή της δοκιμής Barcelona αποτελεί η γενικευμένη δοκιμή BCN από τον Carmona που υποκαθιστά τη μέτρηση της TCOD με την αξονική μετατόπιση που προκαλείται

από τις φορτιζόμενες σφήνες. Για το σκοπό αυτό, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 15**, τρία LVDTs στερεώνονται στις φορτιζόμενες σφήνες μιας πρέσας. Η δυσθραυστότητα συσχετίζεται με την ικανότητα του FRC να απορροφά ενέργεια κατά τη ρηγμάτωση και υπολογίζεται σύμφωνα με την **Εξίσωση 3**.

$$T(\delta_A) = \int_0^{\delta_A} P(\delta) d(\delta) \quad (3)$$

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

Με την **Εξίσωση 3** υπολογίζεται η δυσθραυστότητα του FRC. Ωστόσο, επειδή η δοκιμή BCN λαμβάνει υπόψη την συμπεριφορά του FRC μόνο μετά την ρηγμάτωση, η μετατόπιση του φορτίου λαμβάνεται μόνο από το μέγιστο φορτίο.



Σχήμα 15: Διάταξη δοκιμής G-BNC κατά τη μονοαξονική θλίψη. (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013)

Το μέγιστο φορτίο αντιστοιχεί στο σημείο που εμφανίζεται η πρώτη κορυφή στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης ($P-\delta$). Η αντοχή της πρώτης κορυφής ορίζεται από το πρότυπο UNE 83-515 με την **Εξίσωση 4**:

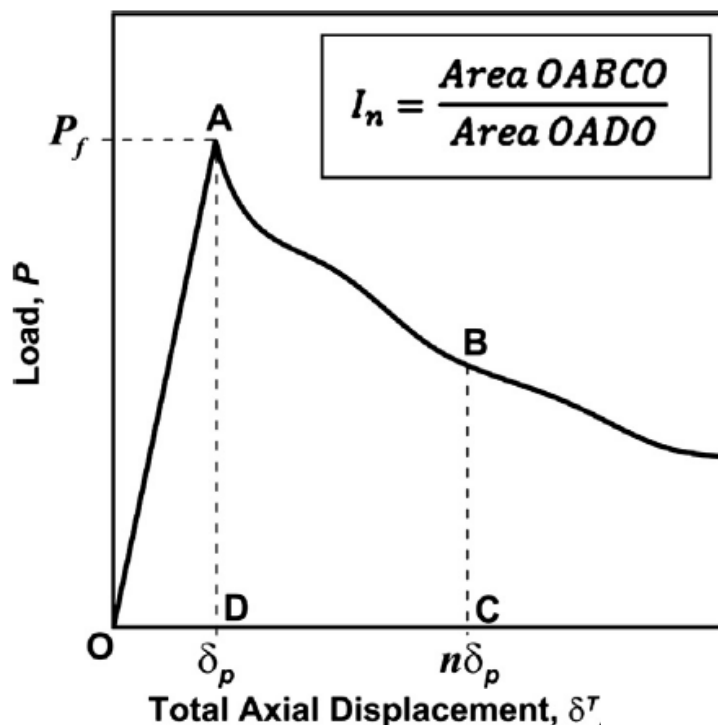
$$f_{ct} = \frac{4P_f}{9\pi a h} \quad (4)$$

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

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

Ο δείκτης δυσθραυστότητας I_n στην γενικευμένη δοκιμή Barcelona, ορίζεται ως ο λόγος με αριθμητή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-μετατόπισης ($P-\delta$) μέχρι μια μετατόπιση δ_p (**Σχήμα 16**) και παρονομαστή την περιοχή κάτω από την καμπύλη φορτίου-

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



Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση και τύπος του δείκτη δυσθραυστότητας, I_n , για την γενικευμένη δοκιμή Barcelona. (Carmona Sergio, Aguado Antonio, Molins Climent, 2013)

1.2.3. Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας

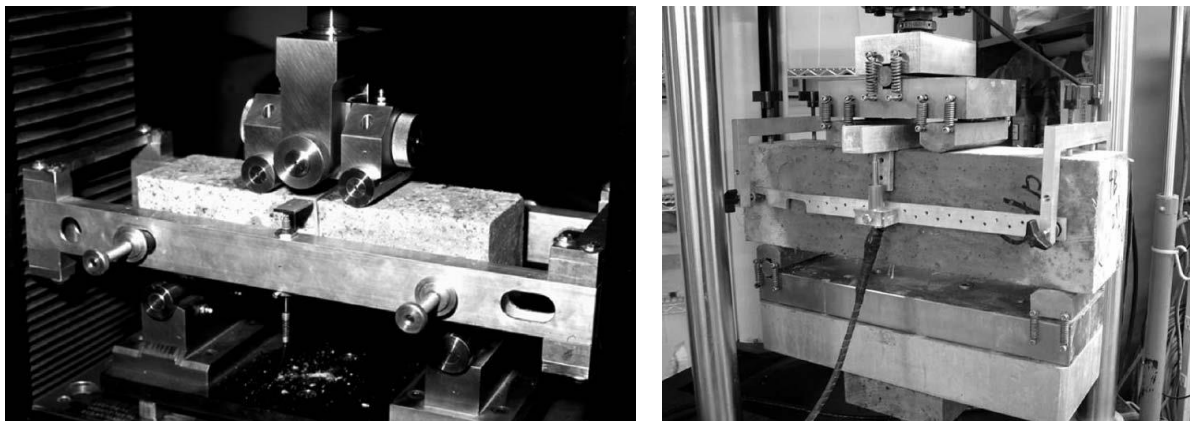
Η ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να απορροφά ενέργεια, έχει αναγνωριστεί ως το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της προσθήκης ινών στο άοπλο σκυρόδεμα (Gopalaratnam 1995). Μία δοκός από σκυρόδεμα που περιέχει ίνες, θραύεται έπειτα από σταδιακή ανάπτυξη μίας ή πολλαπλών ρηγματώσεων με αυξανόμενο βέλος 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 δυσθραυστότητας γίνεται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1609. Το συγκεκριμένο πρότυπο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καμπτικής ικανότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας παραμέτρους οι οποίες λαμβάνονται από την καμπύλη φορτίου-βέλους κάμψης που προκύπτει από την δοκιμή μιας απλά εδραζόμενης δοκού υπό την φόρτιση τριών ή τεσσάρων σημείων. 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 για τη συγκεκριμένη δοκιμή είναι πρισματικά οι διαστάσεις των οποίων μπορούν να διαφοροποιούνται. Αυτό που δεν μπορεί να διαφέρει και καθορίζεται αυστηρά από το πρότυπο είναι το άνοιγμα της δοκού που φορτίζεται κατά την δοκιμή και συμβολίζεται με το γράμμα L. Συγκεκριμένα, ορίζεται πως το μήκος του ανοίγματος

θα πρέπει να είναι τρεις φορές το πλάτος της διατομής του δοκιμίου ή 300 mm. Στην περίπτωση που αυτά τα δύο δεν ταυτίζονται τότε επιλέγεται το μεγαλύτερο. Στην παρούσα έρευνα τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν διαστάσεις σε mm 500*100*100 (μήκος, ύψος, βάθος) και το άνοιγμα φόρτισης που προκύπτει είναι τα 300 mm.

Στο **Σχήμα 17** δίνεται η πειραματική διάταξη που προτείνεται από το ASTM C1609

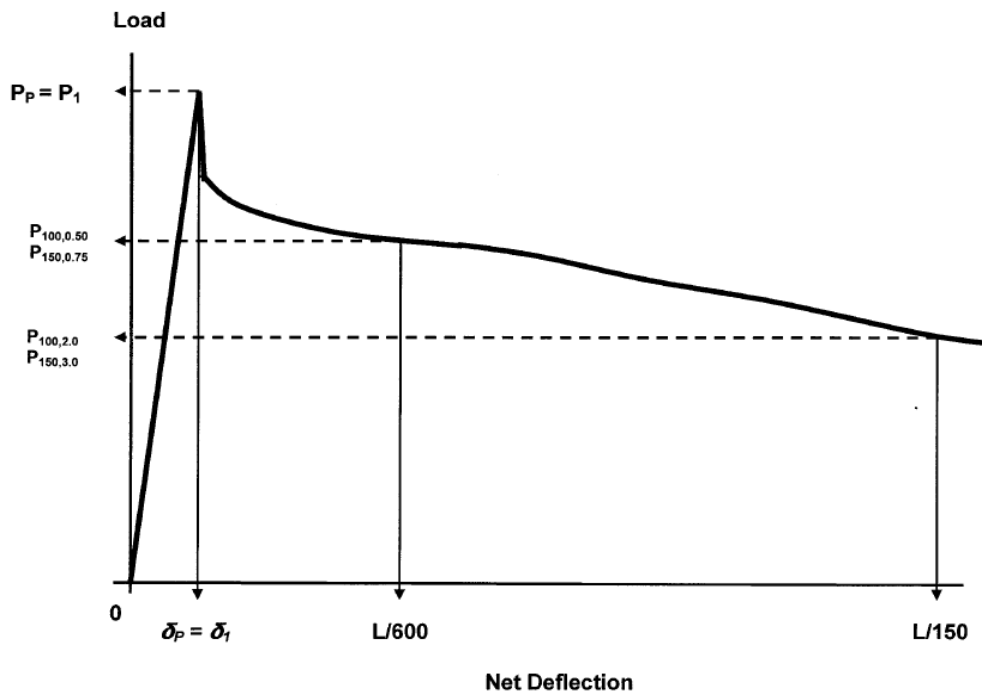


Σχήμα 17: Πειραματική διάταξη δοκιμής κατά το ASTM C1609.

Με τη συγκεκριμένη δοκιμή προσδιορίζεται 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 βέλος κάμψης θα πρέπει να αυξάνεται με ρυθμό από 0.05 έως 0.10 mm ανά λεπτό, για δοκίμια 350*100*100 (mm), και με ρυθμό από 0.06 έως 0.12 mm ανά λεπτό για δοκίμια 500*150*150 (mm).

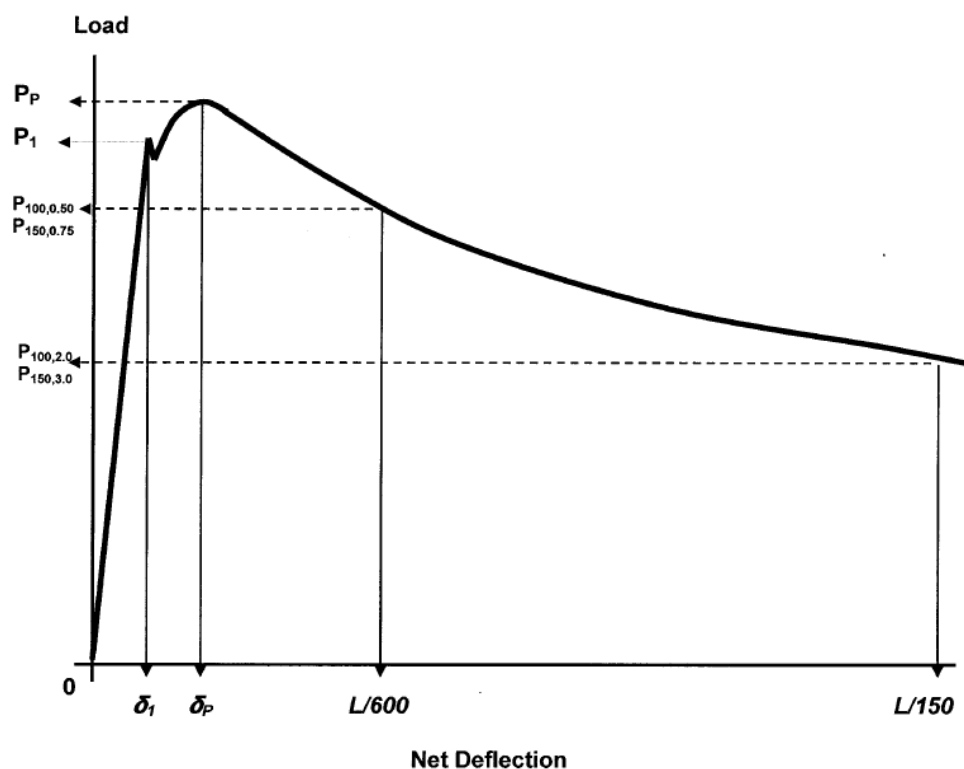
Ο ρυθμός φόρτισης επιβάλλεται να είναι τόσο αργός καθώς σκοπός της δοκιμής είναι να προσδιορίσει την παραμένουσα παραμόρφωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος και η ικανότητα του να απορροφά ενέργεια. Η απορροφούμενη ενέργεια ισοδυναμεί με τη δυσθραυστότητα (T), η οποία υπολογίζεται στο τέλος του πειράματος και είναι το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη και τον άξονα του βέλους κάμψης, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 18**. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν το βέλος κάμψης φτάσει το 1/150 του ανοίγματος του δοκιμίου και μπορούν να υπολογισθούν η μέγιστη αντοχή αιχμής, η μέγιστη καμπτική αντοχή, καθώς και η παραμένουσα αντοχή, όταν το βέλος κάμψης είναι ίσο με L/600 και L/150, όπου L το μήκος κάμψης του δοκιμίου.

Η τιμή της παραμένουσας αντοχής προκύπτει από τον τύπο $f=PL/bd^2$, όπου P το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο, L το μήκος κάμψης του δοκιμίου, b το ύψος της διατομής και d το πλάτος της διατομής.



Σχήμα 18: Διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης όταν η φέρουσα ικανότητα ορίζεται από την τιμή του πρώτου μέγιστου φορτίου. (ASTM C 1609)

Στο πρότυπο διακρίνονται δυο περιπτώσεις που περιγράφουν την καμπύλη φορτίου-βέλους κάμψης. Η πρώτη περίπτωση είναι αυτή που απεικονίζεται στο **Σχήμα 18**. Το χαρακτηριστικό της είναι ότι το πρώτο μέγιστο φορτίο ταυτίζεται με το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου (First-Peak Load Equal to Peak-Load). Στη δεύτερη περίπτωση το μέγιστο φορτίο του δοκιμίου δεν συμπίπτει με το πρώτο μέγιστο φορτίο. Αυτή η περίπτωση απεικονίζεται στο **Σχήμα 19**, και 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 19: Διάγραμμα Φορτίου-Βέλους κάμψης όταν η φέρουσα ικανότητα δεν ορίζεται από την τιμή του πρώτου μέγιστου φορτίου. (ASTM C 1609)

1.3 Αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος- Βιβλιογραφική ανασκόπηση

1.3.1 Μέτρο ελαστικότητας και λόγος παραμορφώσεων

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 πως 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 την 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 σκυροδέμα, 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 δοκιμών 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 τρεις 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 ελέγχθηκαν σε ηλικία 3,7,14,28,56 και 91 ημερών προκειμένου να υπάρξει μια ολοκληρωμένη άποψη για την πρόοδο των χαρακτηριστικών του υλικού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας για το υβριδικό ινοπλισμένο σκυροδέμα 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 κατά 9%, 8% και 3% υψηλότερη από τη μέση τιμή του E για το οπλισμένο με μεταλλικές ίνες, με ίνες πολυπροπυλενίου και το υβριδικά οπλισμένο σκυροδέμα, αντίστοιχα.

Οι **Yoo D., et al. (2013)** μελέτησαν ινοπλισμένο σκυροδέμα υπέρ-υψηλής αντοχής με μικρο-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

$$E_c = \frac{0.4x f_c' - f_{c1}}{\varepsilon_2 - 0.00005} \quad (5)$$

Όπου f_c' είναι η θλιπτική αντοχή, f_{c1} είναι η τάση που αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση 50 με και ε_2 η αξονική παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε τάση ίση με 40% της f_c' .

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 την 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 $0.2f_c$ και $0.7f_c$ (όπου f_c η αντοχή του σκυροδέματος). Σύμφωνα με τους ερευνητές, το μέτρο ελαστικότητας επηρεάστηκε λιγότερο από τον υψηλό ρυθμό επιβαλλόμενης μετατόπισης συγκριτικά με τη θλιπτική αντοχή.

1.3.2 Δοκιμή Barcelona

Το 2012 οι **Carmona Malatesta Sergio, Aguadode 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 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 πτυχωσεις στις άκρες τους. Οι αναλογίες ανάμιξης ήταν 0.25%, 0.5% 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 δεν 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 περιφερειακής παραμόρφωσης με αυτά της αξονικής παραμόρφωσης (μέσω των LVDTs και

επιμηκυνσιομέτρου του εμβόλου), κατέληξαν σε μια γραμμική σχέση μεταξύ τους με συντελεστή γραμμικής συσχέτισης (R^2) πολύ κοντά στην μονάδα. Με βάση τα αποτελέσματα κατέληξαν σε εκφράσεις, οι οποίες προσδιορίζουν την δυσθραυστότητα που προκύπτει από παραμορφώσεις διαφορετικών διευθύνσεων.

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

Μέσω της κινηματικής σχέσης μεταξύ της αξονικής και της περιφερειακής παραμόρφωσης προσδιορίστηκε η γωνία εσωτερικής τριβής σε σκυροδέματα που έχουν μελετηθεί την στιγμή της ρηγμάτωσης και οι τιμές που προέκυψαν είναι σύμφωνες με αυτές που μπορεί να βρει 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 την δοκιμή κάμψης κατά ASTM C1609 με την 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 την 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 τον 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 την δυσθραυστότητα.

Το 2013 ο **Carmona Sergio et al**, προσδιόρισε τις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες μέσω της γενικευμένης δοκιμής Barcelona. Χρησιμοποίησε 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 (f_c), 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 (f_{sp}) 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 $f_{ct}=2.67$

MPa ($cv=4.68\%$) και για το FRC-2 ήταν αντίστοιχα $f_{CT}=3.37$ 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 τρεις ακτινικές ρωγμές στα δοκίμια χωρίς ίνες και στα δοκίμια με ποσοστό ινών $V_f=0.5\%$, και τέσσερις ή περισσότερες ακτινικές ρωγμές στα δοκίμια με ποσοστό ινών $V_f=1.0\%$. Όταν χρησιμοποιήθηκαν ίνες με μεγάλες διαστάσεις παρατηρήθηκε αύξηση στο πορώδες του σκυροδέματος. Η σχέση f_c/f_{CT} αυξανόταν όταν υπήρχαν ίνες και επηρεαζόταν από τον τύπο τους. Επιπλέον, από τον τύπο και την ποσότητα των ινών επηρεαζόταν και ο λόγος f_{sp}/f_{CT} .

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

Τα σκυροδέματα με $V_f=0.5\%$ δεν παρουσίασαν σημαντικές διαφορές στις τιμές των παραμενουσών τάσεων ($f_{ct\delta\chi}$) για αξονική μετατόπιση ($\delta\chi$) μεγαλύτερη ή ίση από 1 mm ($\delta\chi \geq 1$ mm). Ωστόσο, όταν έγινε η ίδια σύγκριση σε ινοπλισμένα σκυροδέματα με $V_f=1.0\%$ παρατηρήθηκε ότι οι παραμένουσες τάσεις επηρεάζονταν κατά πολύ από το σχήμα των ινών, επίδραση που εξασθενούσε, όσο αυξάνονταν 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 $V_f=0.5\%$, 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 $V_f=1.0\%$, 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 δυσθραυστότητα στη ρηγματωμένη κατάσταση σε σχέση με τα άοπλα σκυροδέματα. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη έρευνα οι δείκτες δυσθραυστότητας 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. Χρησιμοποίησαν 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. (V_f) 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 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 την 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 την 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 μικροροηγματώσεις και τη μορφή της διεπιφάνειας μεταξύ των μεταλλικών ινών και της μήτρας.

1.3.3 Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της 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 παρασκευάστηκαν τρεις συνθέσεις στις οποίες η ποσότητα των ινών που χρησιμοποιήθηκε ήταν α) 13 kg/m^3 β) 26 kg/m^3 και γ) 39 kg/m^3 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/m^3 και στις δυο περιπτώσεις. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στις 14 και 28 ημέρες. Τέλος χρησιμοποίησαν ίνες υάλου, ανθεκτικές στα αλκάλια. Με τις συγκεκριμένες ίνες παρασκευάστηκαν τρεις διαφορετικές συνθέσεις με την ίδια περιεκτικότητα (6 kg/m^3) 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 ($13-26 \text{ kg/m}^3$), 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 φθιτός 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 ($L=30\text{mm}$, $D=0.5\text{mm}$), 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 μεταλαστικό 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 τις 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 ($L=13\text{mm}$, $D=0.16\text{mm}$) 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 ($L=40\text{mm}$, $D=0.44\text{mm}$). 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/m^3 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/m^3 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 $f_{100,0.5}=4.00\text{ MPa}$, στα 2.00 mm ήταν $f_{100,2.0}=3.14\text{ MPa}$ ενώ η δυσθραυστότητα προέκυψε $T_{100,2.0}=25.16\text{ J}$. Ομοίως για τα δοκίμια με ίνες πολυπροπυλενίου προέκυψε $f_{100,0.5}=2.47\text{ MPa}$, $f_{100,2.0}=3.09\text{ MPa}$ και $T_{100,2.0}=19.69\text{ J}$. 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 δεν 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, λόγω 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, λόγω 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 λόγω 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 λόγω μορφής 50 (L=30 mm, D=0.6 mm). Συμπεριλήφθησαν 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 λόγω 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 την 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.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Τοποθέτηση αντικειμένου

Για τις ανάγκες των πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας μελετήθηκαν συνολικά οχτώ (8) διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος, οι οποίες παρασκευάστηκαν στο Τμήμα Ελέγχου Ποιότητας Σκυροδέματος της TITAN A.E. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της επιρροής της προσθήκης των ινών και του μετακαολίνης στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Κατά την πειραματική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκαν:

- Δοκιμή θλίψης τόσο σε κυβικά, όσο και σε κυλινδρικά δοκίμια.
- Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού – δοκιμή Barcelona.
- Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού–δοκιμή κάμψης τριών ή τεσσάρων σημείων.

Ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής έγινε στο Τμήμα Ελέγχου Ποιότητας Σκυροδέματος της TITAN A.E.

Η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού - δοκιμή Barcelona και η δοκιμή θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Τέλος, η δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού – δοκιμή κάμψης τριών σημείων έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή, χρησιμοποιήθηκαν πρισματικά δοκίμια.

2.2 Υλικά, πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις

2.2.1 Υλικά

Και στις οκτώ συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM II/A-M (P-LL-W) 42.5, δηλαδή τσιμέντο Πόρτλαντ τύπου II με κύριο συστατικό, πλύν του κλίνκερ, φυσική ποζολάνη (P), λεπτοαλεσμένο ασβεστόλιθο (LL) και ιπτάμενη τέφρα. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του σκυροδέματος, ήταν άμμος 0-4 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 και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (SF). Οι συνθετικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν: α) τύπου μακροΐνες SikaFiber PP940-50 της εταιρίας SIKA A.E και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (PFS) και β) τύπου Concris ES της εταιρίας BRUGGCONTECAG, CH-8590 Romanshorn και για τις ανάγκες της μεταπτυχιακής εργασίας κωδικοποιούνται ως (PFC). Στον **Πίνακα 3**, δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου ίνας και στο **Σχήμα 20** απεικονίζονται οι ίνες.

Σε μία σύνθεση σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης σαν πρόσθετο υλικό σκυροδέματος. Ο μετακαολίνης αποτελεί ένα από τα πιο πρόσφατα ορυκτά πρόσμικτα, που αξιοποιείται εμπορικά στη βιομηχανία παρασκευής σκυροδέματος. Αποτελεί υλικό με αξιόλογη ποζολανική δραστηριότητα και είναι το προϊόν της θερμικής αποσύνθεσης του καολινίτη, της κύριας ορυκτολογικής φάσης του καολίνης (σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 700°C έως 900°C). Ο μετακαολίνης, όντας ένα υλικό με πολύ μεγάλη λεπτότητα (κατόπιν της άλεσής του) και ισχυρά ποζολανικό, μπορεί να θεωρηθεί τσιμεντοειδές υλικό, αφού η

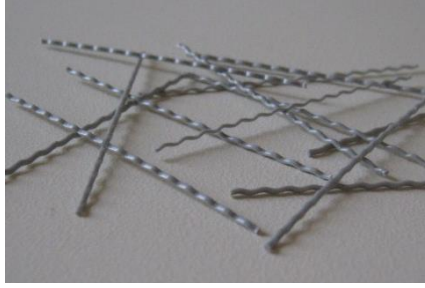
συμπεριφορά του και τα χαρακτηριστικά του προσομοιάζουν το τσιμέντο. Η χρήση του μετακαολίνη στο σκυρόδεμα έχει σημαντικά επίδραση στις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, επηρεάζοντας σημαντικά τη μηχανική αντοχή, αλλά κυρίως την ανθεκτικότητα. Ουσιαστικά η θετική επίδραση του μετακαολίνη οδηγεί στη μείωση της διαπερατότητας και στην αύξηση της μηχανικής αντοχής του σκυροδέματος.

Πίνακας 3: Κύρια χαρακτηριστικά ινών.

| Κωδ. Χαρακτ. | SF | PFS | PFC |
|-------------------------------|---|--|--|
| Είδος | Χαλύβδινες ίνες | Συνθετικές ίνες | Συνθετικές ίνες |
| Υλικό | Σύρμα χάλυβα ψυχρής όλκησης με υψηλή αντοχή min 1.100 MPa | Πολυολεφίνη με εφελκυστική αντοχή 400 MPa και μέτρο ελαστικότητας E=7GPa | Πολυολεφίνη με θλιπτική αντοχή 510 MPa και μέτρο ελαστικότητας E > 10GPa |
| Μορφή | Ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα, κυματοειδείς | Μακροΐνες, μονοΐνες, συνεχούς παραμόρφωσης (κυματοειδούς μορφής), χρώματος γκρι | Μακροΐνες, ευθύγραμμες με αυλακώσεις κατά μήκος και αγκύρια στις δύο άκρες, κατασκευαστικές, χρώματος κίτρινου |
| Διαστάσεις | Μήκος 30 mm και διάμετρος 0.75 mm | Μήκος 50 mm και διάμετρος 0.75 mm | Μήκος 50 mm, διάμετρος 0.50 mm και περίμετρος 1.570 mm |
| Λόγος μορφής (l/d) | 40 | 66.67 | 100 |
| Πρότυπα | ASTM A820 TYPE 1, EN 10016 | ASTM C/1116/C 1116M TYPE III Fiber Reinforced Concrete, EN 14889-2:2006 Ίνες για Σκυρόδεμα, Μέρος 2: Τάξη II (Φέρουν σήμανση CE) | EN 14889-2 |



INOMIX (PS)



SikaFiberPP940-50 (PFS)



ConcrixES (PFC).

Σχήμα 20: Εικόνες ινών. (ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε., INOMIX. Sika Hellas A.B.E.E., Sika® Fiber PP 940-50. Brugg Contec AG, MACROFIBER Concrix)

2.2.2 Παρασκευή σκυροδέματος

Παρασκευάστηκαν οχτώ (8) συνθέσεις και συγκεκριμένα, μία (1) σύνθεση αναφοράς με άοπλο σκυρόδεμα (μάρτυρας-NC), μία (1) σύνθεση με πρόσθετο υλικό τον μετακαολίνη, δύο (2) συνθέσεις με μεταλλικές ίνες και τέσσερις (4) συνθέσεις με συνθετικές ίνες. 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 συνθετικές ίνες ήταν δύο για κάθε τύπο ίνας με ποσοστό 0.5% κ.ο. και 1.0% κ.ο, οι οποίες κωδικοποιούνται ως PFS 0.5 και PFS 1.0 αντίστοιχα για τις ίνες τύπου Sika® Fiber PP 940-50 και PFC 0.5 και PFC 1.0 αντίστοιχα για τις ίνες τύπου Concrix. Η περιεκτικότητα των ινών που χρησιμοποιήθηκε ήταν αποτέλεσμα μελέτης διάφορων σχετικών ερευνών που έχουν λάβει χώρα έως σήμερα 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 τα ήδη υπάρχοντα.

Οι σκυροδετήσεις ήταν των 40lt εκάστη με σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο, ποσότητα αδρανών και κ.ο ποσοστό ινών. Η μόνη διαφορά ήταν στην ποσότητα του ρευστοποιητή. Στην σύνθεση με τον μετακαολίνη, με σκοπό να διατηρηθεί ο λόγος νερού προς τσιμέντο σταθερός, μειώθηκε ελαφρώς η ποσότητα του τσιμέντου. Οι συνθέσεις παρέμειναν κατά τα άλλα αμετάβλητες, ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Στον **Πίνακα 4**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 4: Περιεκτικότητες συστατικών των συνθέσεων (Kg/m³) χαρακτηριστικοί λόγοι νερού προς τσιμέντο.

| Κωδ. Υλικά(kg/m ³) | NC | MC | SF 0.5 | SF 1.0 | PFS 0.5 | PFS 1.0 | PFC 0.5 | PFC 1.0 |
|-----------------------------------|------|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Τσιμέντο | 400 | 360 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Μετακαολίνης | 0 | 40 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Άμμος | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 | 900 |
| Γαρπίλι | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 | 700 |
| Λόγος N/T | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Συνολικό νερό | 228 | 228 | 228 | 228 | 228 | 228 | 228 | 228 |
| Μεταλλικές ίνες (SF) | 0 | 0 | 40 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Συνθετικές ίνες (PFS) | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 9 | 0 | 0 |
| Συνθετικές ίνες (PFC) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.5 | 9 |
| Ρευστοποιητής | 0.87 | 3.25 | 1.06 | 1.00 | 0.90 | 1.33 | 0.90 | 1.33 |

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν συνολικά 18 δοκίμια. Άρα, συνολικά για τις οχτώ διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος παρασκευάστηκαν 8x18=144 μήτρες. Οι 18 μήτρες κάθε σύνθεσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 5**:

Πίνακας 5: Είδος, πλήθος και διαστάσεις κάθε μήτρας.

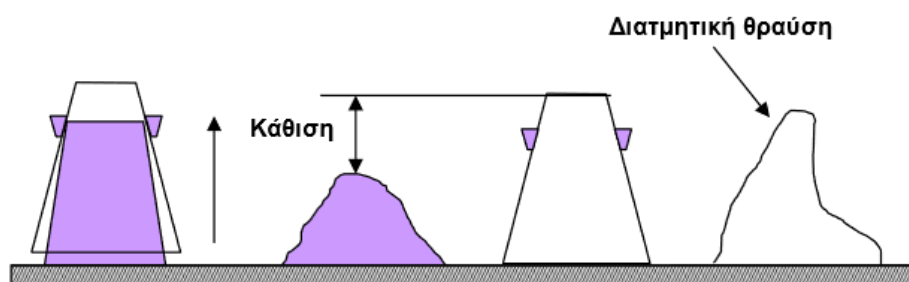
| Είδος μήτρας | Πλήθος | Διαστάσεις σε (χιλιοστά) |
|-------------------|--------|------------------------------|
| Κυβική | 9 | 10x100 |
| Κυλινδρική | 4 | Ύψους 200, διαμέτρου 100 |
| Πρισματική | 3 | Διατομής 100x100, μήκους 500 |
| Κυλινδρική | 2 | 180, διαμέτρου 1500 |

Αρχικά έγινε ανάδευση όλων των υλικών στον αναδευτήρα και στην συνέχεια προστέθηκαν οι ίνες και αναδύονταν ξανά μέχρι να διασκορπιστούν στη μάζα του σκυροδέματος. Στη σύνθεση με τον μετακαολίνη ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία. Έγινε ανάδευση όλων των υλικών στον αναδευτήρα και στην συνέχεια προστέθηκε ο μετακαολίνης, όπου το μίγμα αναδευόταν ξανά μέχρι να ομογενοποιηθεί.

Στη συνέχεια για να χαρακτηριστεί η εργασιμότητα του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης έτσι όπως ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ/EN 12350-2. Στον **Πίνακα 6** παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη δοκιμή και στο **Σχήμα 21** απεικονίζεται η διενέργειά της.

Πίνακας 6: Προδιαγραφές της δοκιμής κάθισης, σύμφωνα με τη EN 12350-2.

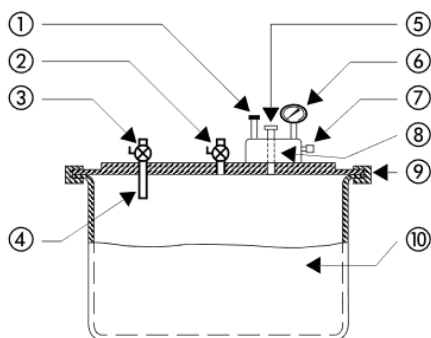
| Δοκιμή | Πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ | Συνιστώμενη Περιοχή Μέτρησης (ΕΛΟΤ/ΕΝ 206) | Ανοχές μετρήσεων | |
|-----------------------|-----------------|--|-----------------------------------|-------------------------|
| | | | Για τιμές | ανοχή |
| Κάθιση (Σχ.21) | 12350-2 | ≥10μμ και <210μμ | ≤40μμ >50μμ <90μμ ≥100μμ | ±10μμ ±20μμ ±30μμ |



Σχήμα 21: Απεικόνιση της δοκιμής κάθισης. (Κόλιας Στ. 2013-2014)

Εκτός της δοκιμής κάθισης μετρήθηκε ο περιεχόμενος αέρας. Γενικά, στο σκυρόδεμα παρά τη συμπίκνωση, εγκλωβίζεται αέρας. Για παράδειγμα σε σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανών 32 mm, ο περιεχόμενος αέρας καταλαμβάνει ποσοστό 1%-2% κ.ο και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό έως και 4% κ.ο, για σκυροδέματα με λεπτά αδρανή. Ο προσδιορισμός του περιεχόμενου κενού αέρα έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-7, βάσει της μεθόδου εξισορρόπησης της πίεσης. Σύμφωνα με αυτή, ένας γνωστός όγκος αέρα σε δεδομένη πίεση, εξισορροπείται με άγνωστο όγκο εγκλωβισμένου σε δείγμα σκυροδέματος αέρα, το οποίο δείγμα βρίσκεται εντός σφραγισμένου θαλάμου. Η ένδειξη του μανόμετρου της διάταξης έχει βαθμονομηθεί έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα που βρίσκεται μέσα στο δείγμα. Στο **Σχήμα 22** αποδίδεται σε σκαρίφημα η συσκευή μέτρησης.

- 1 Αντλία
- 2 Βαλβίδα Β
- 3 Βαλβίδα Α
- 4 Θάλαμοι εκτόνωσης για έλεγχο κατά τη βαθμονόμηση
- 5 Κύρια βαλβίδα αέρα
- 6 Μετρητής πίεσης
- 7 Βαλβίδα εκτόνωσης
- 8 Χώρος αέρα
- 9 Κολάρο σφράγισης
- 10 Δοχείο



Σχήμα 22: Συσκευής μέτρησης εγκλωβισμένου αέρα, με τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης.
(Sica Hellas A.B.E.E, 2007)

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. Το βάρος του συμπυκνωμένου σκυροδέματος 8lt, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πυκνότητας νωπού σκυροδέματος.

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. Συγκεκριμένα, για να γίνει 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.

2.3 Πειραματική μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών και της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος

2.3.1. Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας και λόγου παραμορφώσεων (poisson)

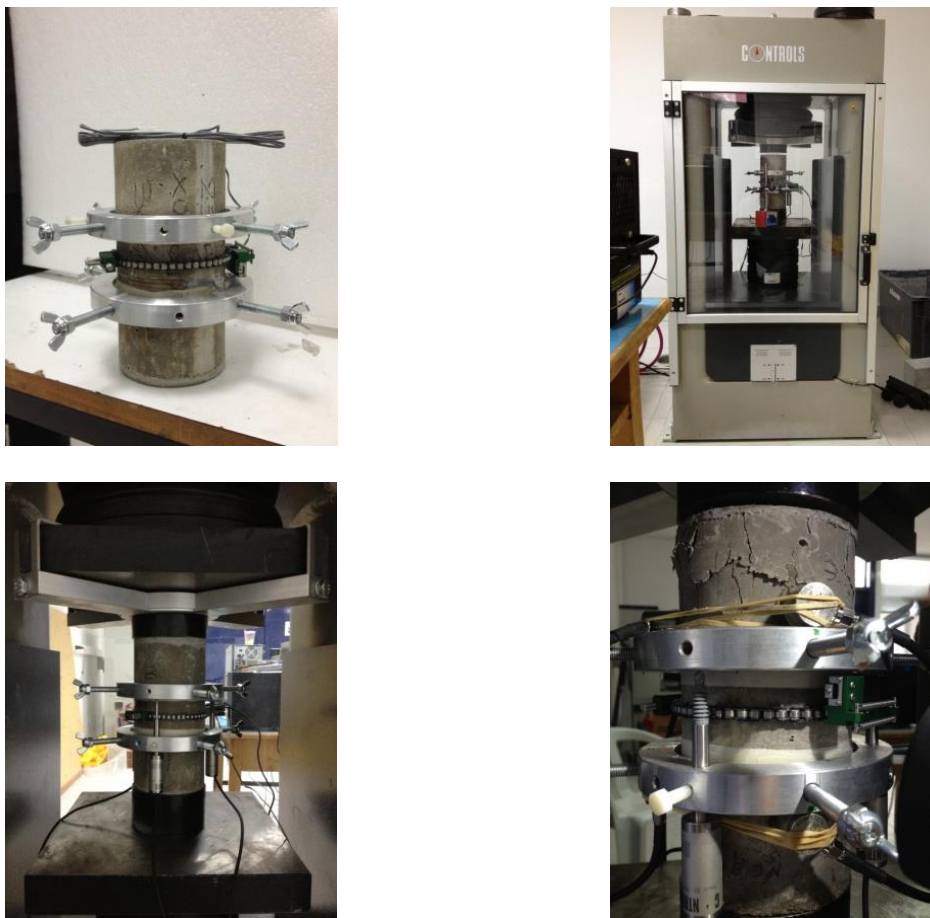
Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου παραμορφώσεων χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε θλίψη, η οποία έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-3. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή θλίψης χρησιμοποιήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια ύψους 200 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 σερβυδραυλικό σύστημα ελέγχου φορτίου ADVANCED 9. Η δοκιμή έγινε με ρυθμό φόρτισης 2500 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 αλυσίδα, το οποίο τοποθετείται στο κέντρο του δοκιμίου, ώστε να μετράται η διάγκωση του (**Σχήμα 23**).

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 της μέγιστης μέσης θλιπτικής αντοχής 28 ημερών όλων των δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπως προσδιορίστηκε αρχικά.

Για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας και του μέτρου διάτμησης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από το τρίτο στάδιο φόρτισης, μόνο. Επιλέχθηκε ως περιοχή πειραματικών δεδομένων αυτή που αντιστοιχεί στο 10% έως 40% του μέγιστου φορτίου του κάθε δοκιμίου. Το μέτρο ελαστικότητας προσδιορίστηκε ως η κλίση της ευθείας που ορίζει το παραπάνω εύρος τιμών της καμπύλης σ-ε, όπως και το μέτρο διάτμησης. Ο λόγος παραμόρφωσης είναι ο λόγος του μέτρου ελαστικότητας προς το μέτρο διάτμησης, και υπολογίστηκε στο 25% του μέγιστου φορτίου της δοκιμής, για όλες τις συνθέσεις.



Σχήμα 23: Προετοιμασία και εκτέλεση δοκιμής θλίψης για τον προσδιορισμό των E, G.

Όσον αφορά τη δοκιμή σε θλίψη των κυβικών δοκιμίων ακμής 100 mm, αυτή εκτελέστηκε στο εργαστήριο σκυροδέματος του εργοστασίου TITAN. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή θλίψης Toni Technik 1142/0230, δυναμικότητας 3000 kN, και η δοκιμή εκτελέστηκε με ρυθμό επιβολής φορτίου 13.5 kN/s.

2.3.2. Δοκιμή Barcelona

Πρόκειται για τη γενικευμένη δοκιμή BCN (G-BCN), η οποία πραγματοποιήθηκε σε μηχανή του ιταλικού οίκου CONTROLS δυναμικότητας 5000 kN. Η δοκιμή εκτελέστηκε με το σερβοϋδραυλικό σύστημα ελέγχου φορτίου ADVANCED 9, με ρυθμό φόρτισης 2500 N/s το οποίο ισοδυναμεί με μετατόπιση 0.5 mm/min. Για την δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού-δοκιμή Barcelona χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια με ύψος 180 mm και διάμετρο 150 mm, αφού κόπηκαν σε ύψος 150 mm κάτι το οποίο προέβλεπε το πρότυπο της δοκιμής.

Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 24** στο κέντρο και μεταξύ των πλακών της μηχανής και των δοκιμίων, τοποθετήθηκαν δύο κυλινδρικές μεταλλικές σφήνες διαμέτρου $2a=37.5$ mm, ($2a/2b=1/4$, 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. Οι μετρήσεις από το φορτίο και τα LVDTs καταγράφηκαν με το πρόγραμμα Controls S.R.L. Advantest. Τέλος, ακτινικά ανά 120 μοίρες εκτός από τα LVDTs τοποθετήθηκαν πάνω στο δοκίμιο αισθητήρες, οι οποίοι ηχογραφούσαν τα ακουστικά γεγονότα που λάμβαναν χώρα λόγω της ρηγματώσης που προκαλούνταν στη μάζα του σκυροδέματος. Τοποθετήθηκαν συνολικά 6 αισθητήρες περιμετρικά του δοκιμίου πάνω σε άξονες που είχαν σχεδιασθεί ανά 120 μοίρες. Συγκεκριμένα κάθε άξονας είχε δύο 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 άλλης μεταπτυχιακής εργασίας και για το λόγο αυτό δεν αναλύονται περαιτέρω.



Σχήμα 24: Απεικόνιση της διάταξης δοκιμής Barcelona.

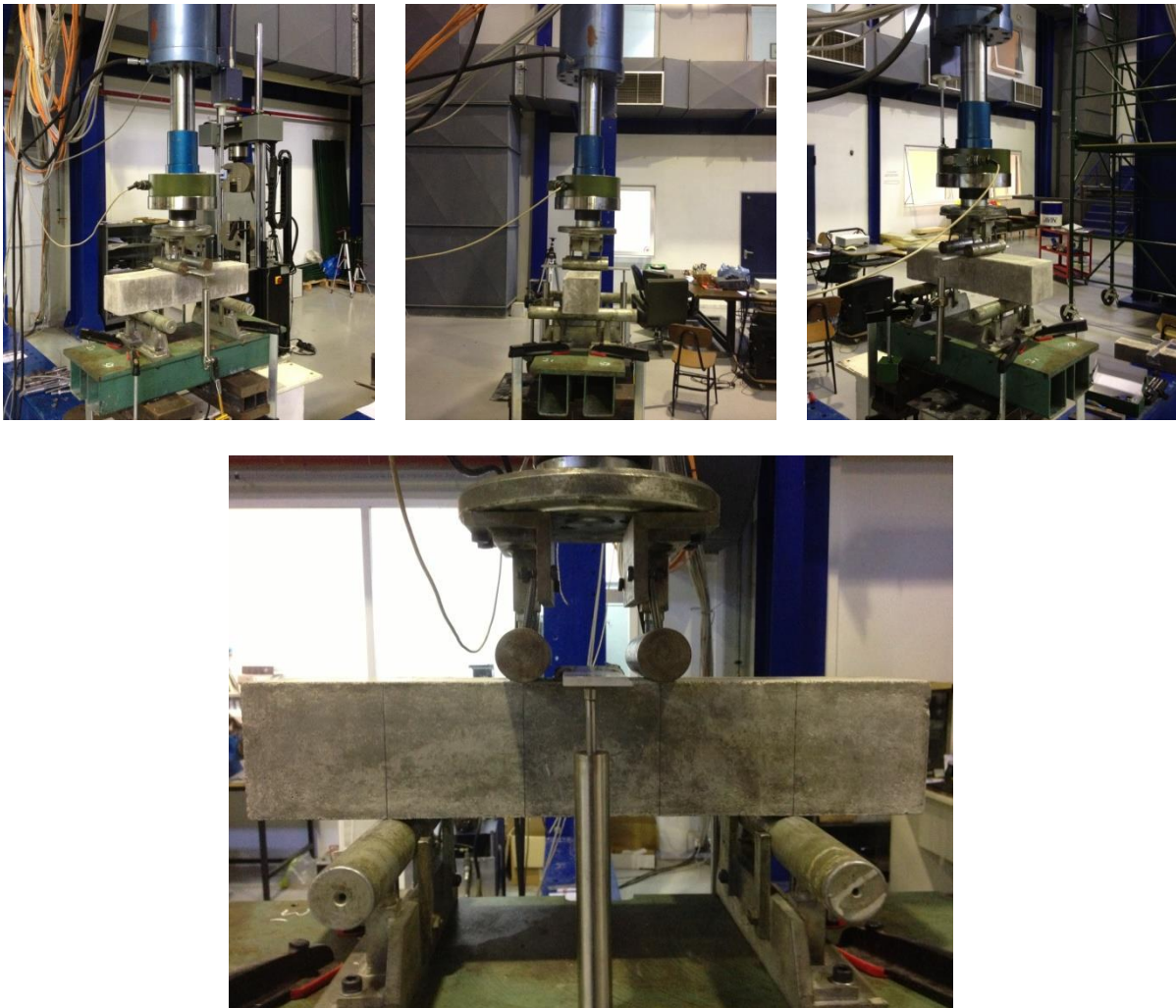
2.3.3. Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας

Ο έλεγχος της καμπτικής εφελκυστικής αντοχής έγινε σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ορίζει το πρότυπο ASTM C1609 και έχει περιγραφεί λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην παρούσα μελέτη, το φορτιζόμενο άνοιγμα των δοκιμίων (span) είναι 300 mm και ο ρυθμός φόρτισης που επιλέχθηκε ήταν 0.06 mm/min (ή 1μm/sec). Το πείραμα έγινε με έλεγχο μετατόπισης και όχι με έλεγχο φορτίου. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν το βέλος κάμψης φτάσει το 1/150 του ανοίγματος του δοκιμίου. Στην εξεταζόμενη περίπτωση αυτό ορίζεται στα 2 mm.

Η δοκιμή εκτελέστηκε με τη χρήση ανεξάρτητου εμβόλου το οποίο μετατοπίζονταν με τον επιθυμητό ρυθμό (0.06 mm/min). Προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο ρυθμός προσαρμόστηκε ηλεκτρονικό επιμηκυνσιόμετρο τύπου Encoder στον υδραυλικό επενεργητή δυνατότητας ± 300 kN, ο οποίος συνδεόταν με Η/Υ. Μέσω του Η/Υ προγραμματίστηκε η ιστορία φόρτισης και δόθηκαν οι απαιτούμενες εντολές για την επιβολή της παραμόρφωσης μέσω υδραυλικής σερβοβαλβίδας. Μέσω της υδραυλικής σερβοβαλβίδας διατηρείτε σταθερός ο ρυθμός επιβολής μετακίνησης του υδραυλικού εμβόλου. Η παραπάνω καταγραφή και ο

έλεγχος του επενεργητή πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια ενός realtime υπολογιστή – data acquisition PXI-SCXI, της National Instrument.

Η δοκός ήταν εδραζόμενη 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 ασκούσε διπλό σημειακό φορτίο, με επιβαλλόμενη μετατόπιση. Η μέτρηση της ασκούμενης παραμόρφωσης έγινε με τη χρήση 2 LVDT'S τα οποία μετρούσαν το βέλος κάμψης από την άνω παρειά της δοκού. Για τη μέτρηση του βέλους κάμψης, χρησιμοποιήθηκε μια λάμα αλουμινίου η οποία προσαρμοζόταν και δεσμευόταν πάνω στο δοκίμιο με τη χρήση κόλλας ταχείας πήξεως που επέτρεπε την ακριβή μέτρηση του βέλους κάμψης. Η διάταξη παρουσιάζεται στο παρακάτω **Σχήμα 25**.



Σχήμα 25: Πειραματική διάταξη για τη δοκιμή σε κάμψη.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Αποτελέσματα νοπού σκυροδέματος

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της παρασκευής του σκυροδέματος ελέγχθηκαν οι ιδιότητες του κατά τη νωπή του φάση. Οι ιδιότητες αυτές περιλαμβάνουν την κάθιση, την περιεκτικότητα σε αέρα και το μοναδιαίο βάρος του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σύνθεση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 7**.

Πίνακας 7: Ιδιότητες νοπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων.

| | NC | MC | SF 0.5 | SF 1.0 | PFS 0.5 | PFS 1.0 | PFC 0.5 | PFC 1.0 |
|---|------|------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Κάθιση (mm) | 150 | 130 | 145 | 165 | 145 | 100 | 140 | 100 |
| Περιεκτικότητα σε Αέρα (%) | 1.8 | 2.4 | 2.5 | 3.6 | 2.2 | 1.6 | 2.1 | 2.2 |
| Μοναδιαίο Βάρος (kg/m³) | 2318 | 2303 | 2342 | 2326 | 2302 | 2305 | 2295 | 2293 |

Όπως προκύπτει από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, όλες οι συνθέσεις ανήκουν στην κατηγορία κάθισης S3 (100-150 mm) σύμφωνα με τον Κανονισμό Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ.). Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση SF1.0 η οποία εντάσσεται στην κατηγορία S4 (160-200 mm). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνθέσεις SF0.5 και SF1.0, στις οποίες παρά το ότι οι αναλογίες αδρανών, τσιμέντου και νερού ήταν ίδιες όπως και η ποσότητα του ρευστοποιητή, η κάθιση αυξήθηκε ελαφρώς αν και αναμενόταν το αντίθετο, λόγω αύξησης του ποσοστού των ινών. Αυτό που προκάλεσε μεγαλύτερη κάθιση στην συγκεκριμένη σύνθεση, ήταν η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αέρα. Κάτι τέτοιο έχει επισημανθεί και στη βιβλιογραφία όπου αναφέρεται πως η αύξηση του ποσοστού του αέρα έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της κάθισης.

Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα, οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν παρουσίασαν περιεκτικότητα από 1.6% έως 2.5%, εντός των αναμενόμενων ορίων. Η σύνθεση SF1.0 παρουσίασε περιεκτικότητα 3.6% κάτι που πρέπει να οφείλεται στο συνδυασμό του μεγάλου ποσοστού και είδους ινών, κυρίως αναφορικά με το σχήμα και το λόγο μορφής τους.

Το υλικό επίσης φαίνεται να επηρεάζει την αύξηση του αέρα καθώς συνθέσεις με ίδια περιεκτικότητα (1.0% κ.ο.) και σχήμα ινών παρεμφερές με αυτό της SF1.0 αλλά με διαφορετικό υλικό ινών παρουσίασαν πολύ μικρότερη περιεκτικότητα σε αέρα. Συγκεκριμένα οι συνθέσεις PFS1.0 και PFC1.0 παρουσίασαν ποσοστό αέρα 1.6% και 2.2% αντίστοιχα.

Αναφορικά με το Μοναδιαίο Βάρος, όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν σχεδόν την ίδια τιμή και είναι της τάξης των 2300 kg/m³. Όπως γίνεται φανερό από τον **Πίνακα 7**, διαφοροποίηση προκαλείται λόγω της παρουσίας ινών με τις μεταλλικές ίνες να αυξάνουν το μοναδιαίο βάρος ενώ οι ίνες πολυπροπυλενίου το μειώνουν.

3.2 Αποτελέσματα Σκληρυμένου Σκυροδέματος

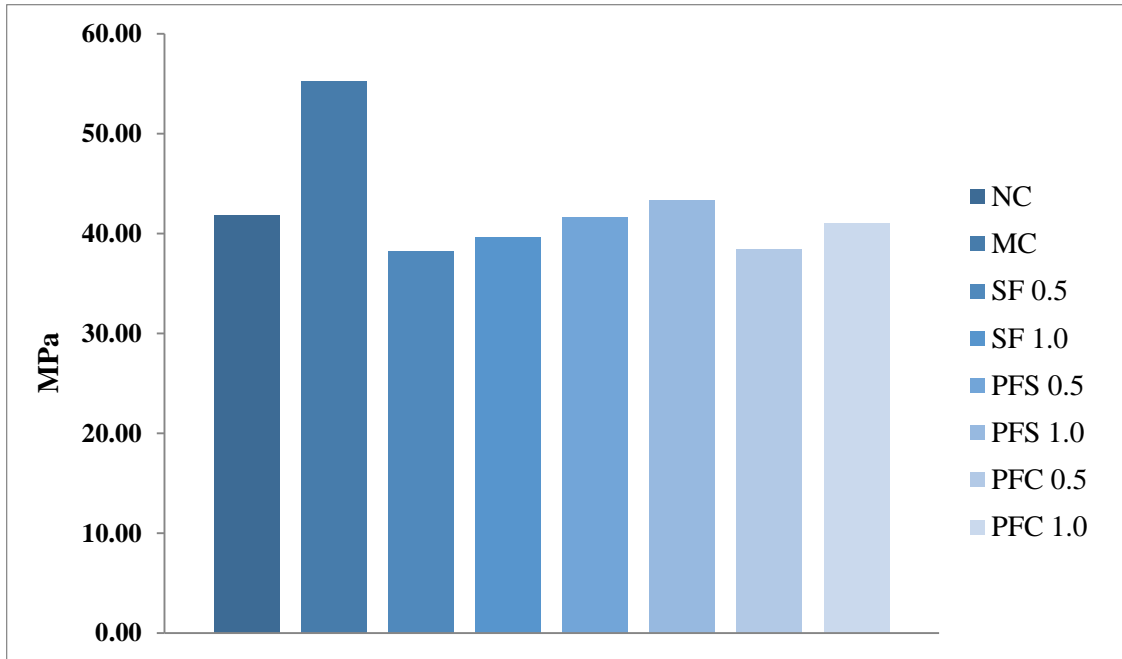
3.2.1. Θλιπτική αντοχή

Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων, με ακμή 100 mm, σε ηλικία 7 και 28 ημερών δίνονται στον **Πίνακα 8**. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται και η μέση τιμή αντοχών για κάθε σύνθεση καθώς και ο συντελεστής μεταβλητότητας (cv,%).

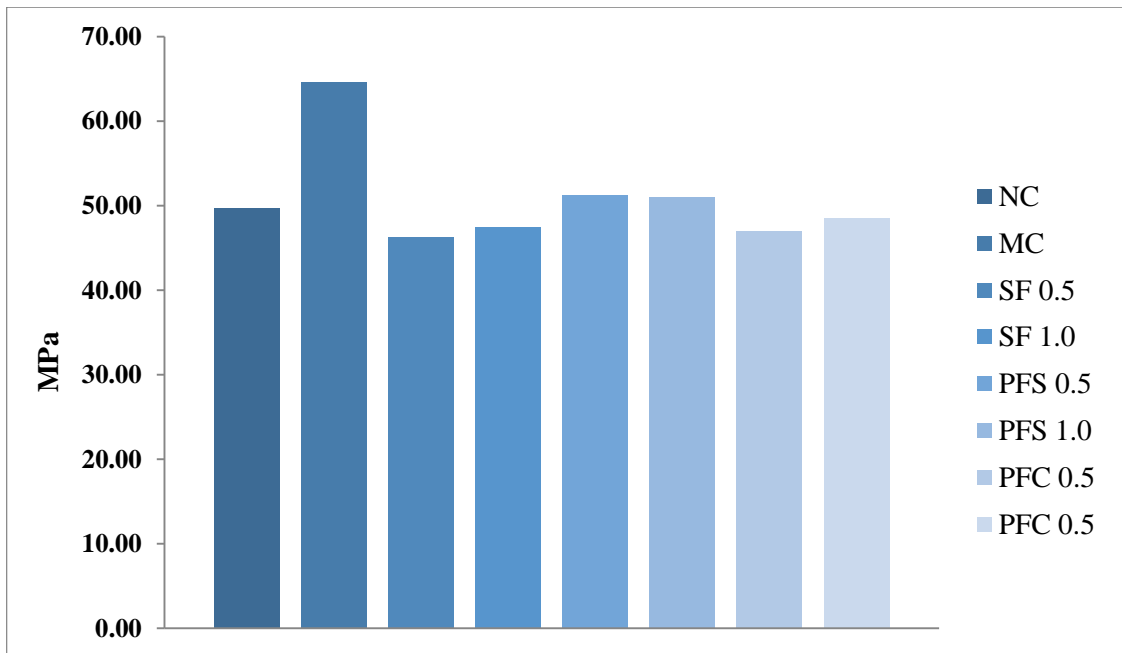
Πίνακας 8: Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | 7 Ημέρες | | | 28 Ημέρες | | |
|-----------|-----------------------|------------|-------|-----------------------|------------|-------|
| | Θλιπτική Αντοχή (MPa) | M.T. (MPa) | cv(%) | Θλιπτική Αντοχή (MPa) | M.T. (MPa) | cv(%) |
| NC A | 41.80 | 41.80 | 1.91 | 48.30 | 49.67 | 2.39 |
| NC B | 41.00 | | | 50.40 | | |
| NC C | 42.60 | | | 50.30 | | |
| MC A | 56.00 | 55.27 | 2.62 | 63.90 | 64.57 | 3.08 |
| MC B | 56.20 | | | 66.80 | | |
| MC C | 53.60 | | | 63.00 | | |
| SF 0.5 A | 38.40 | 38.17 | 0.84 | 47.40 | 46.20 | 2.60 |
| SF 0.5 B | 37.80 | | | 45.00 | | |
| SF 0.5 C | 38.30 | | | 46.20 | | |
| SF 1.0 A | 39.40 | 39.60 | 2.56 | 47.70 | 47.47 | 0.44 |
| SF 1.0 B | 40.70 | | | 47.40 | | |
| SF 1.0 C | 38.70 | | | 47.30 | | |
| PFS 0.5 A | 40.90 | 41.63 | 2.45 | 48.50 | 51.23 | 4.62 |
| PFS 0.5 B | 41.20 | | | 52.60 | | |
| PFS 0.5 C | 42.80 | | | 52.60 | | |
| PFS 1.0 A | 44.50 | 43.30 | 2.40 | 51.70 | 50.93 | 1.34 |
| PFS 1.0 B | 42.70 | | | 50.70 | | |
| PFS 1.0 C | 42.70 | | | 50.40 | | |
| PFC 0.5 A | 38.60 | 38.37 | 1.53 | 45.70 | 46.97 | 2.89 |
| PFC 0.5 B | 38.80 | | | 46.80 | | |
| PFC 0.5 C | 37.70 | | | 48.40 | | |
| PFC 1.0 A | 41.60 | 41.07 | 1.23 | 48.90 | 48.57 | 2.94 |
| PFC 1.0 B | 41.00 | | | 49.80 | | |
| PFC 1.0 C | 40.60 | | | 47.00 | | |

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά ραβδογράμματα για τη θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων χρησιμοποιώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή για την κάθε σύνθεση τη μέση τιμή. Οι τιμές παρουσιάζονται αναλυτικά για τις 7 και 28 ημέρες στα **Σχήματα 26 & 27**, αντίστοιχα. Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει, η μέση θλιπτική αντοχή δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη ινών, ενώ αντίθετα φαίνεται να επηρεάζεται από την προσθήκη μετακαολίνης.



Σχήμα 26: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 7 ημέρες.



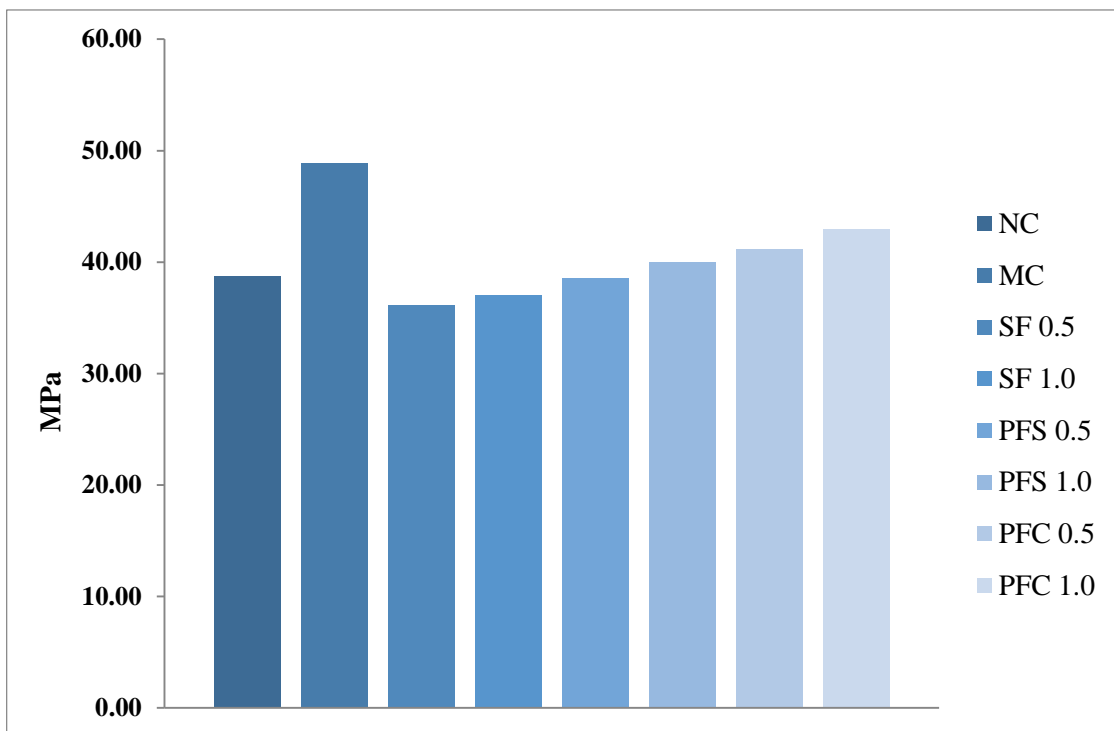
Σχήμα 27: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες.

Κατά τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας και του Λόγου Παραμορφώσεων 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 9** και μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας της κάθε σύνθεσης.

Πίνακας 9: Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών, μέση τιμή (Μ.Τ) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | Θλιπτική Αντοχή (MPa) | Μ.Τ. (MPa) | cv(%) |
|-----------|-----------------------|------------|-------|
| NC A | 38.85 | 38.71 | 0.36 |
| NC B | 38.57 | | |
| MC A | 46.47 | 48.83 | 7.28 |
| MC B | 52.91 | | |
| MC C | 47.10 | | |
| SF 0.5 A | 38.55 | 36.13 | 10.75 |
| SF 0.5 B | 38.20 | | |
| SF 0.5 C | 31.65 | | |
| SF 1.0 A | 36.81 | 37.00 | 4.98 |
| SF 1.0 B | 35.26 | | |
| SF 1.0 C | 38.93 | | |
| PFS 0.5 A | 35.39 | 38.53 | 8.17 |
| PFS 0.5 B | 41.68 | | |
| PFS 1.0 A | 38.43 | 39.95 | 3.80 |
| PFS 1.0 B | 41.47 | | |
| PFC 0.5 A | 35.39 | 41.12 | 12.08 |
| PFC 0.5 B | 44.11 | | |
| PFC 0.5 C | 43.86 | | |
| PFC 1.0 A | 43.33 | 42.96 | 3.54 |
| PFC 1.0 B | 41.28 | | |
| PFC 1.0 C | 44.25 | | |

Στο **Σχήμα 28** που ακολουθεί, παρατίθεται ένα συγκριτικό ραβδόγραμμα για τη θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων χρησιμοποιώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή για την κάθε σύνθεση τη μέση τιμή.



Σχήμα 28: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σε ηλικία 28 ημερών.

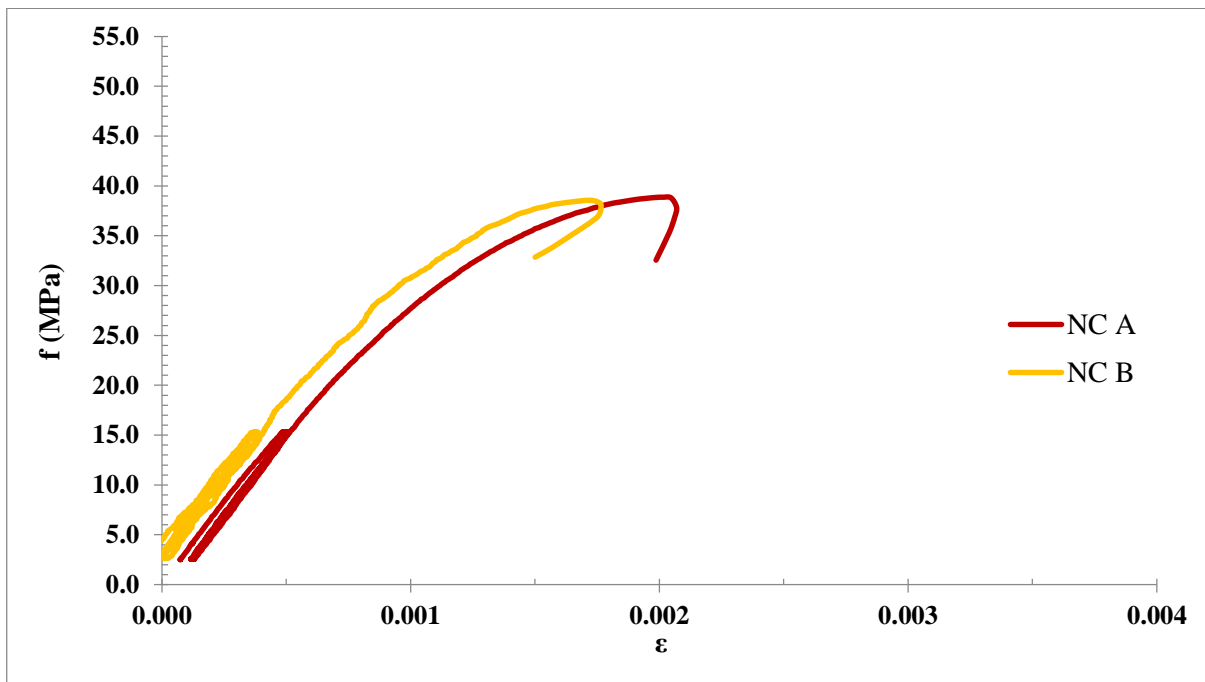
Όπως φαίνεται από τους παραπάνω πίνακες (**Πίνακας 8 & 9**) και τα αντίστοιχα ραβδογράμματα (**Σχήματα 26,27,28**), η θλιπτική αντοχή παρουσίασε μια μικρή μείωση με την προσθήκη ινών, για τις συνθέσεις με ίνες SF και PFS, ανεξάρτητα από το ποσοστό τους. Η μείωση που παρατηρήθηκε ήταν τις τάξης του 5%. Αντίθετα, οι συνθέσεις με ίνες PFC παρουσίασαν μια μικρή αύξηση της θλιπτικής αντοχής, η οποία ήταν της τάξης του 3%.

Όσον αφορά τη σύνθεση με μετακαολίνη, παρουσίασε μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή από τη σύνθεση του άοπλου σκυροδέματος κατά 30%.

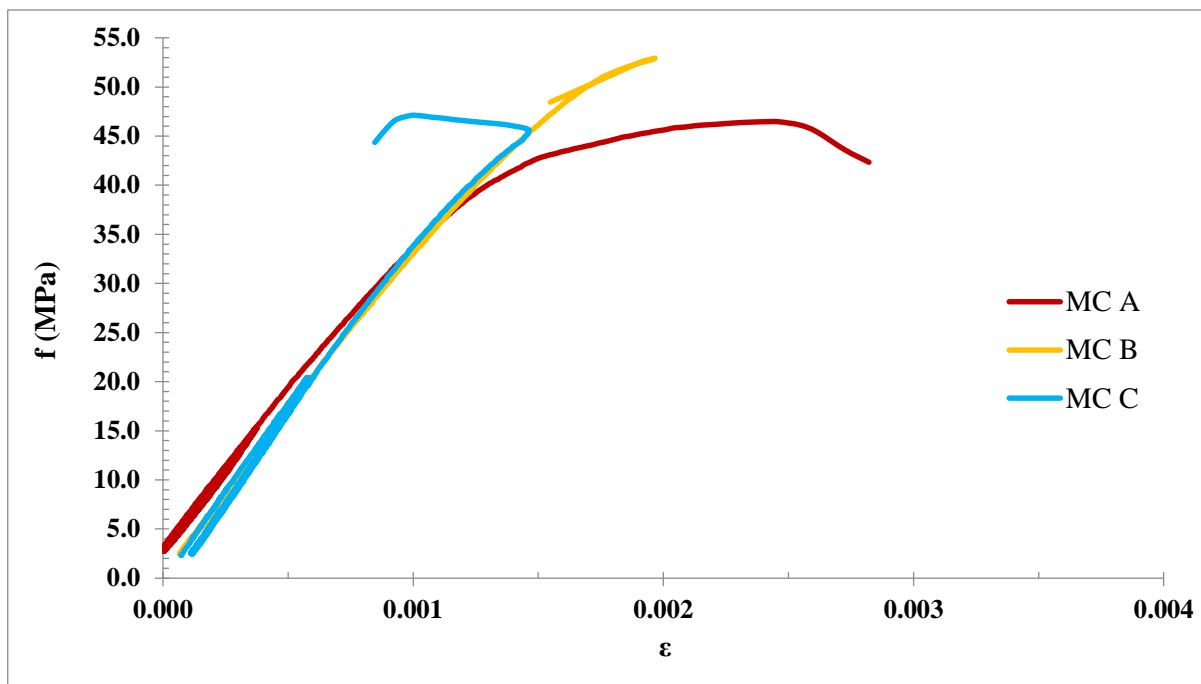
3.2.2. Μέτρο ελαστικότητας και λόγος παραμορφώσεων (poisson)

Μέτρο Ελαστικότητας

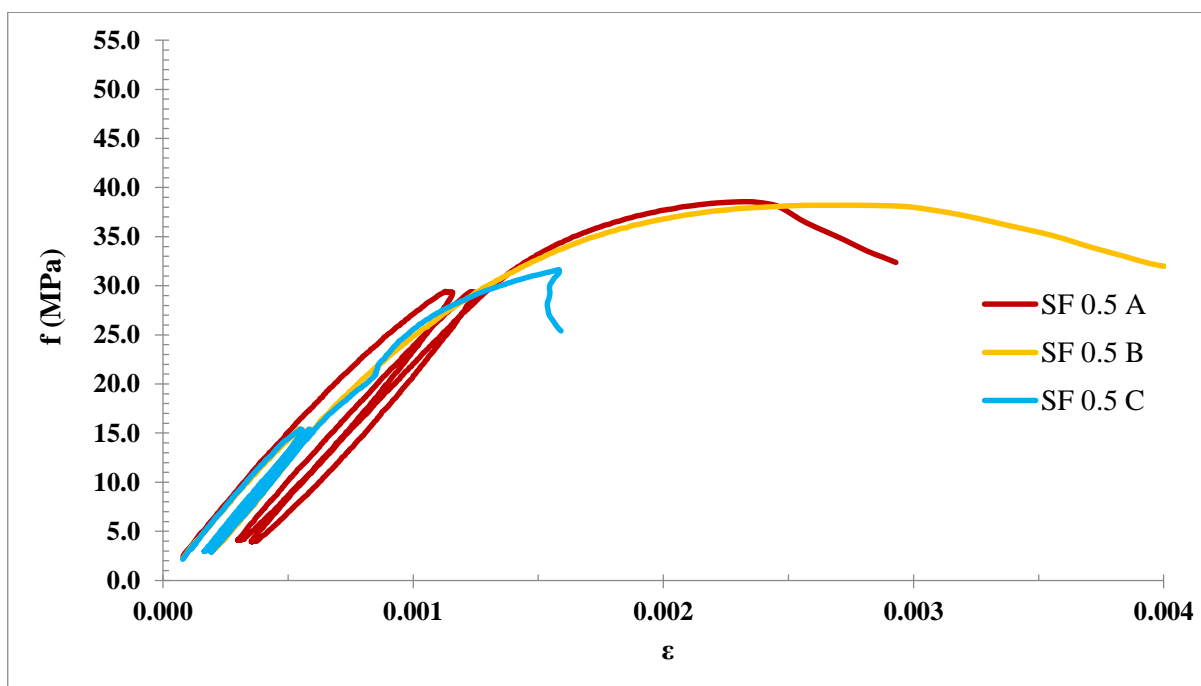
Στα **Σχήματα 29** έως **36** που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης όπως προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις της δοκιμής σε θλίψη για τα κυλινδρικά δοκίμια. Η τάση παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα και συμβολίζεται με το γράμμα f , ενώ η αξονική παραμόρφωση παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα και συμβολίζεται με το γράμμα ϵ .



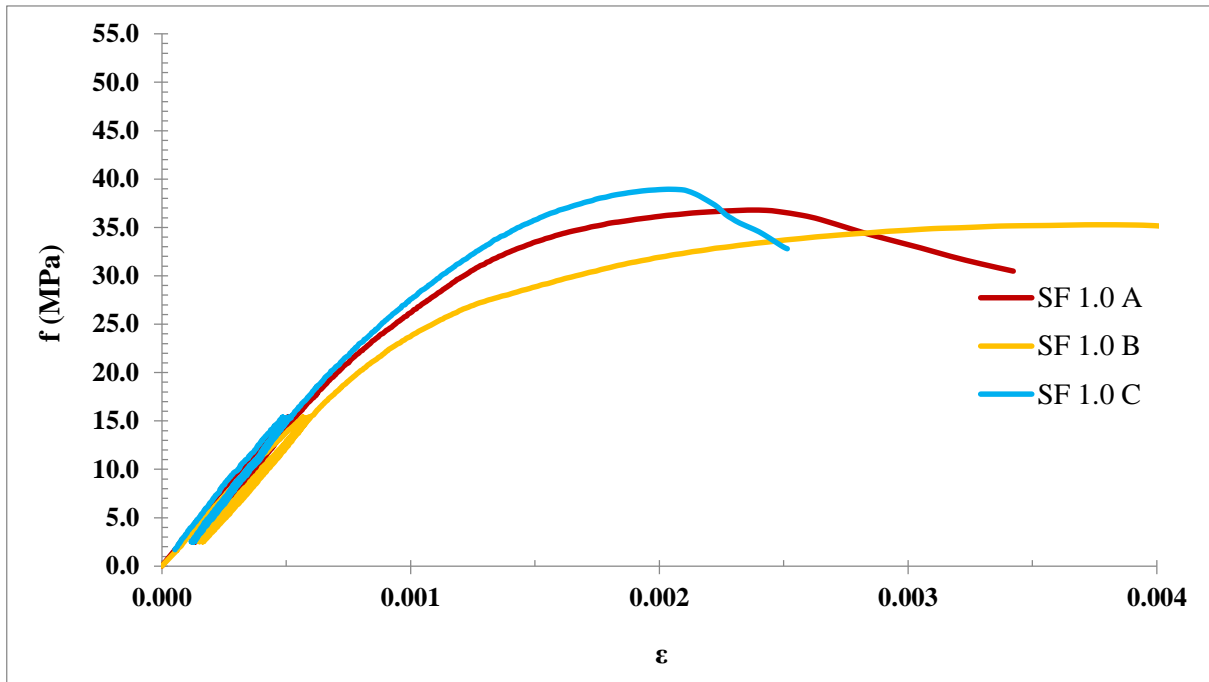
Σχήμα 29: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης άοπλου σκυροδέματος (NC).



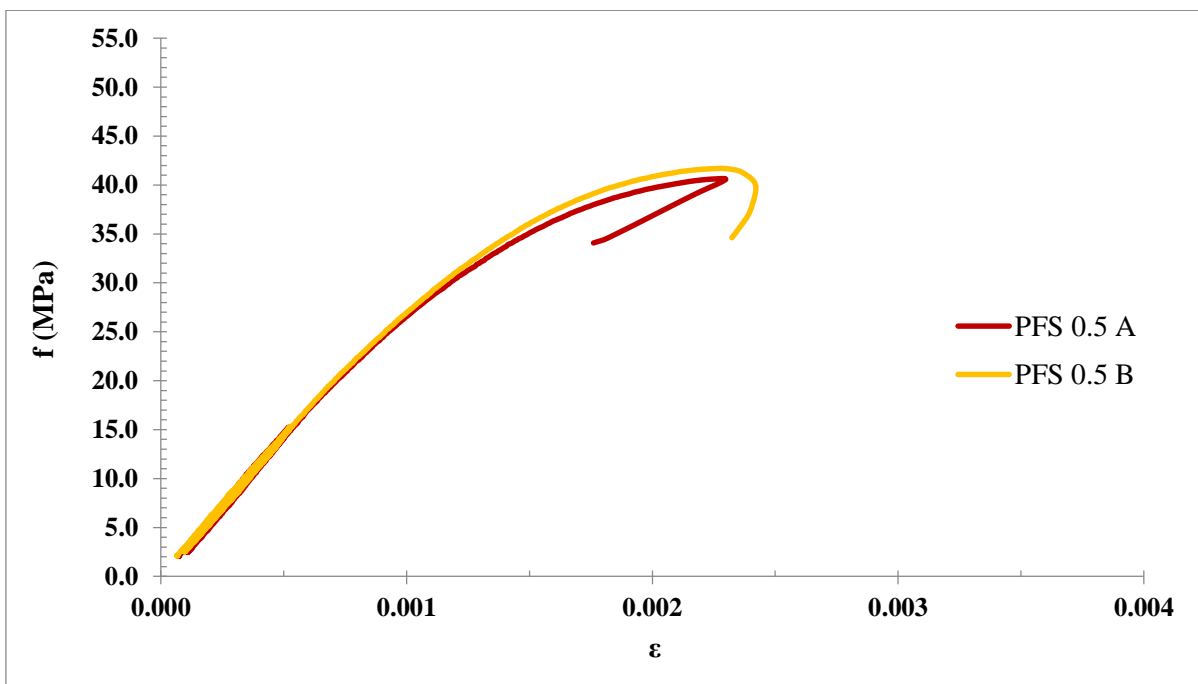
Σχήμα 30: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης άοπλου σκυροδέματος με μετακαολίνη (MC).



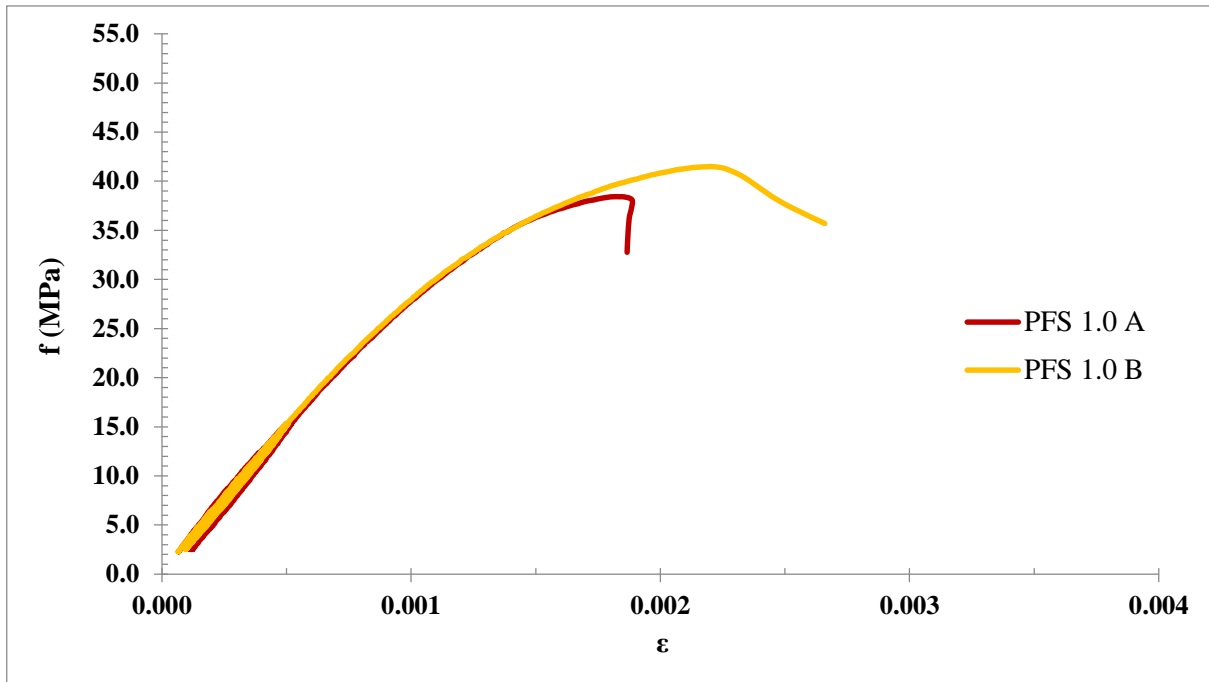
Σχήμα 31: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (SF 0.5).



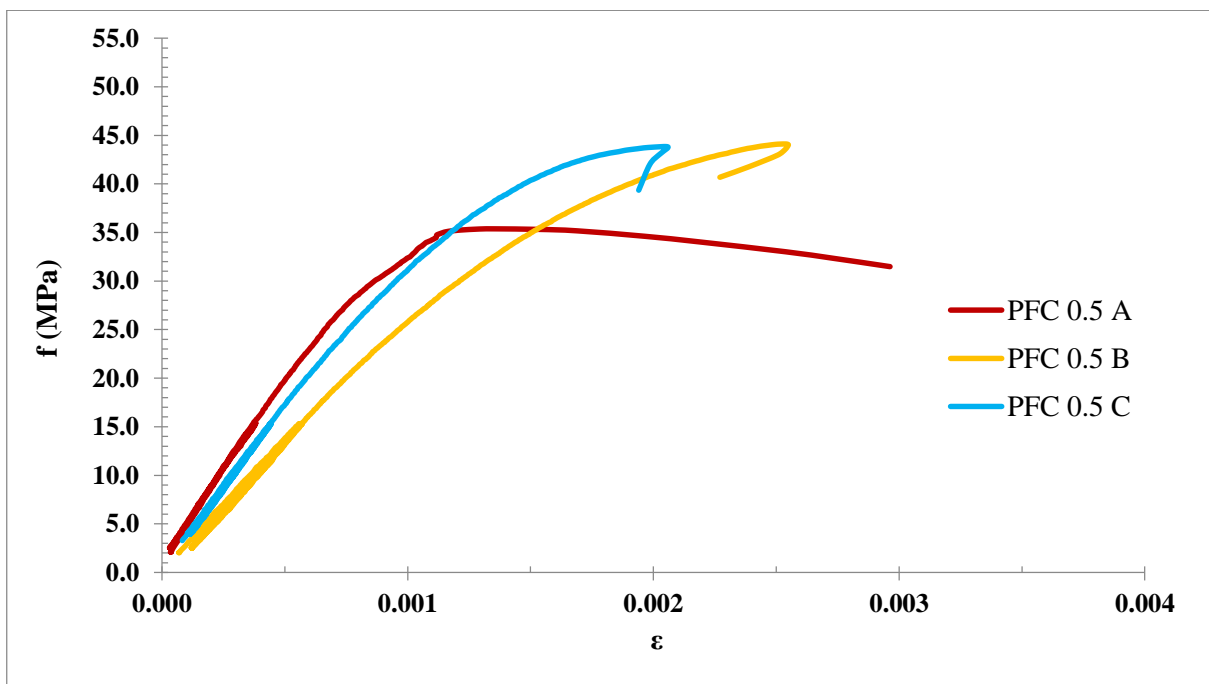
Σχήμα 32: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (SF 1.0).



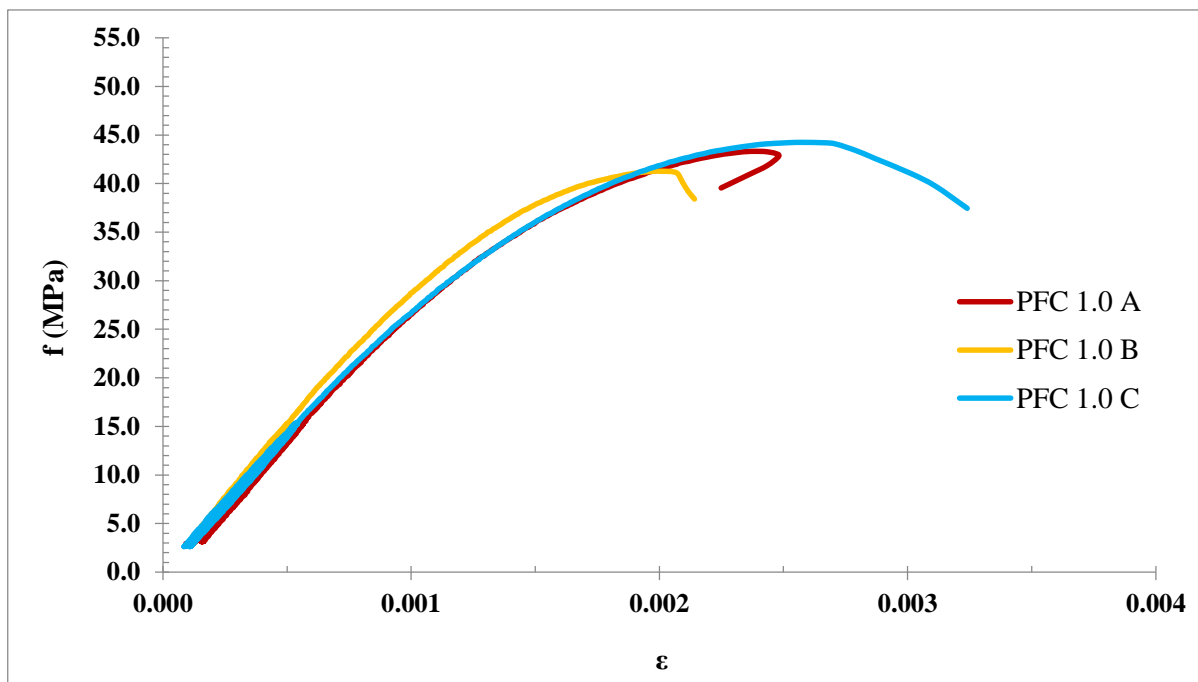
Σχήμα 33: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PFS 0.5).



Σχήμα 34: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (PFS 1.0).



Σχήμα 35: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5 % κ.ο. (PFC 0.5).



Σχήμα 36: Διάγραμμα τάσης-αξονικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (PFC 1.0).

Τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις δίνονται στον **Πίνακα 10**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης.

Όπως γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα, οι περισσότερες συνθέσεις παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας (cv) δεν ξεπερνά την τιμή του 10%. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι συνθέσεις PFS0.5 και PFS1.0 στις οποίες ο συντελεστής διακύμανσης παρουσίασε πολύ χαμηλή τιμή (1% και 2% αντίστοιχα). Εξαιρέση αποτελούν οι συνθέσεις NC και PFC0.5 στις οποίες ο συντελεστής διακύμανσης υπερέβη το όριο του 10% (11% και 15% αντίστοιχα) καθιστώντας τα αποτελέσματα των συγκεκριμένων συνθέσεων ανομοιογενή.

Όπως ήταν αναμενόμενο όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν 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. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της σύνθεσης με τον Μετακαολίνη, η οποία είναι η σύνθεση με τη μεγαλύτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Η συγκεκριμένη σύνθεση έχει παρουσιάσει και τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς φαίνεται να επιβεβαιώνεται η θεωρία, κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζεται σημαντικά από την αντοχή του δοκιμίου.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με το ίδιο είδος ινών αλλά διαφορετικό ποσοστό, παρατηρούμε πως για τις συνθέσεις με ίνες SF και PFS η αύξηση του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση του μέτρου ελαστικότητας. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τις συνθέσεις με ίνες PFC στις οποίες αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως αποτέλεσμα μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Ωστόσο, πρέπει να παρατηρηθεί πως οι τιμές του E των συνθέσεων με ίνες SF και PFS παρουσιάζουν ομοιογένεια. Σε αντίθεση, οι τιμές της σύνθεσης PFC0.5 αποκλίνουν

σημαντικά από τη μέση τιμή του E με συνέπεια τα αποτελέσματα της να επιδέχονται περαιτέρω ανάλυση.

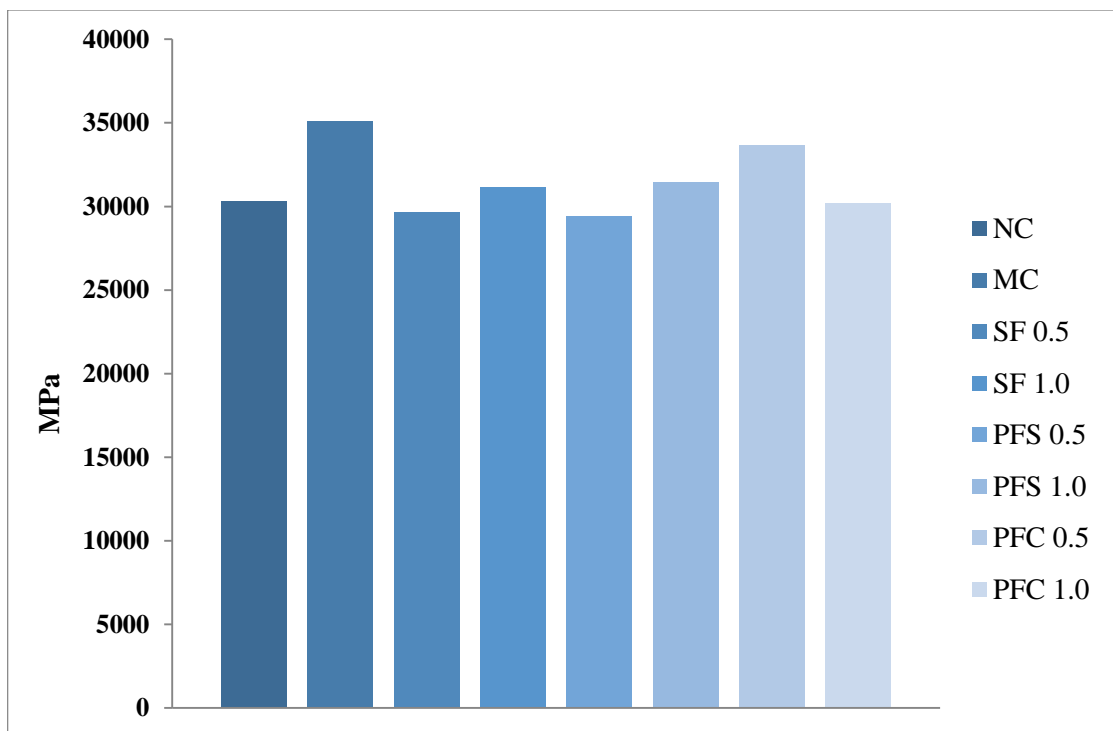
Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με ίδιο ποσοστό ινών αλλά διαφορετικό είδος, παρατηρούμε πως για ποσοστό 0.5% κ.ο. η σύνθεση με ίνες PFC παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PFS έχουν παραπλήσια τιμή. Και πάλι τίθεται το θέμα της περαιτέρω διερεύνησης για τη συγκεκριμένη παρατήρηση, καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας των τιμών του E για τη σύνθεση PCF0.5 είναι μεγάλος. Όσον αφορά τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο., παρατηρούμε πως οι συνθέσεις με ίνες SF και PFS έχουν και πάλι παραπλήσια τιμή του E ενώ η σύνθεση με ίνες PFC παρουσιάζει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας καθώς διαφέρει από τις άλλες δυο κατά 1 GPa.

Παρατηρώντας τον παρακάτω Πίνακα 10 και συγκρίνοντάς τον με τους Πίνακες 8 και 9 που αφορούν τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων, παρατηρούμαι πως η αύξηση της θλιπτικής αντοχής συνεπάγεται την αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Πίνακας 10: Μέτρο ελαστικότητας όλων των δοκιμίων, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | Μέτρο Ελαστικότητας (MPa) | M.T. (MPa) | cv (%) |
|-----------|---------------------------|------------|--------|
| NC A | 32580 | 30281 | 11 |
| NC B | 27981 | | |
| MC A | 33848 | 35107 | 5 |
| MC B | 34221 | | |
| MC C | 37251 | | |
| SF 0.5 A | 28597 | 29622 | 3 |
| SF 0.5 B | 30398 | | |
| SF 0.5 C | 29870 | | |
| SF 1.0 A | 31521 | 31143 | 6 |
| SF 1.0 B | 29095 | | |
| SF 1.0 C | 32813 | | |
| PFS 0.5 A | 29557 | 29372 | 1 |
| PFS 0.5 B | 29187 | | |
| PFS 1.0 A | 31831 | 31441 | 2 |
| PFS 1.0 B | 31051 | | |
| PFC 0.5 A | 38247 | 33661 | 15 |
| PFC 0.5 B | 28170 | | |
| PFC 0.5 C | 34565 | | |
| PFC 1.0 A | 29911 | 30175 | 5 |
| PFC 1.0 B | 31821 | | |
| PFC 1.0 C | 28793 | | |

Στο **Σχήμα 37** παρατίθεται ένα συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα με το μέτρο ελαστικότητας όλων των συνθέσεων. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμών της κάθε σύνθεσης.

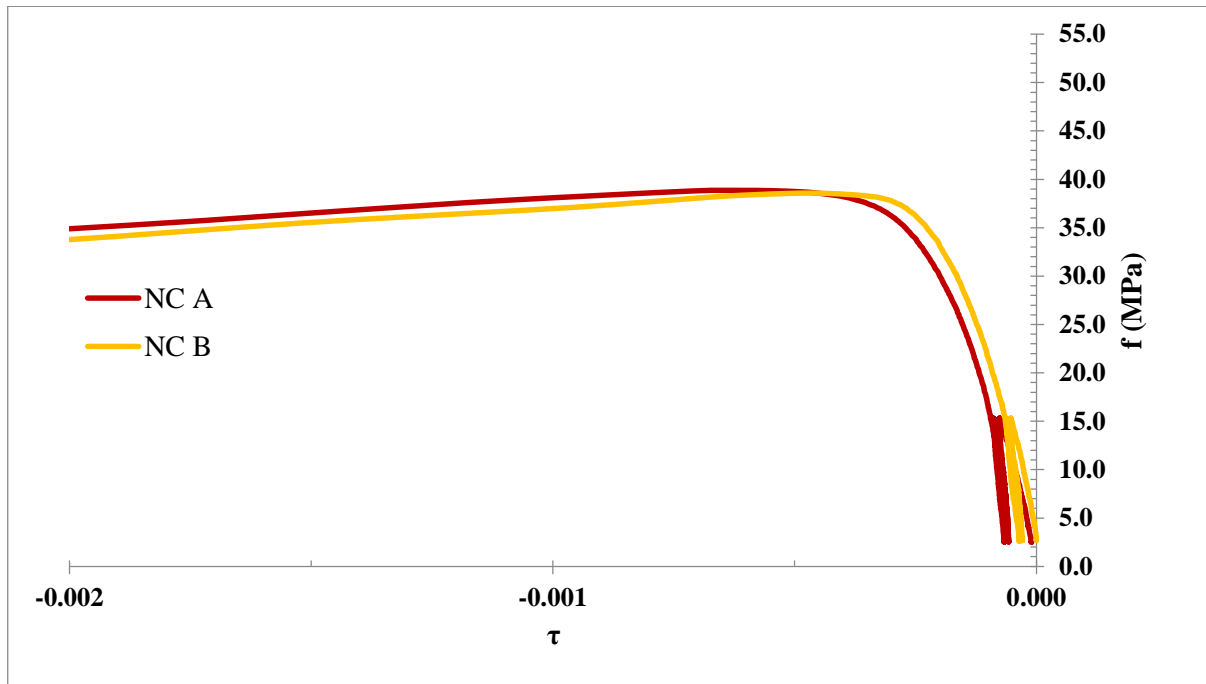


Σχήμα 37: Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας όλων των συνθέσεων.

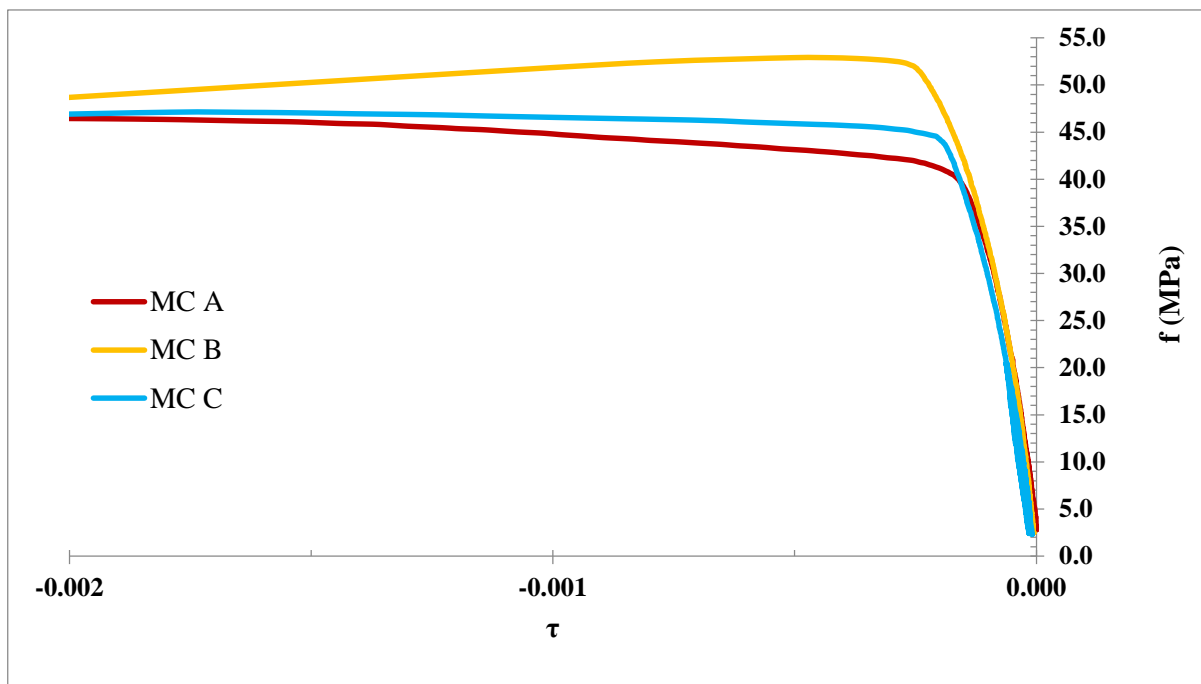
Όπως φαίνεται από τον παραπάνω **Πίνακας 10** και το αντίστοιχο ραβδόγραμμα του **Σχήματος 37**, η μεγαλύτερη τιμή του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζεται στη σύνθεση με μετακαολίνη, ενώ όσον αφορά τις συνθέσεις που περιέχουν ίνες, το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας παρουσιάζεται στη σύνθεση PFC 0.5.

Λόγος Παραμορφώσεων

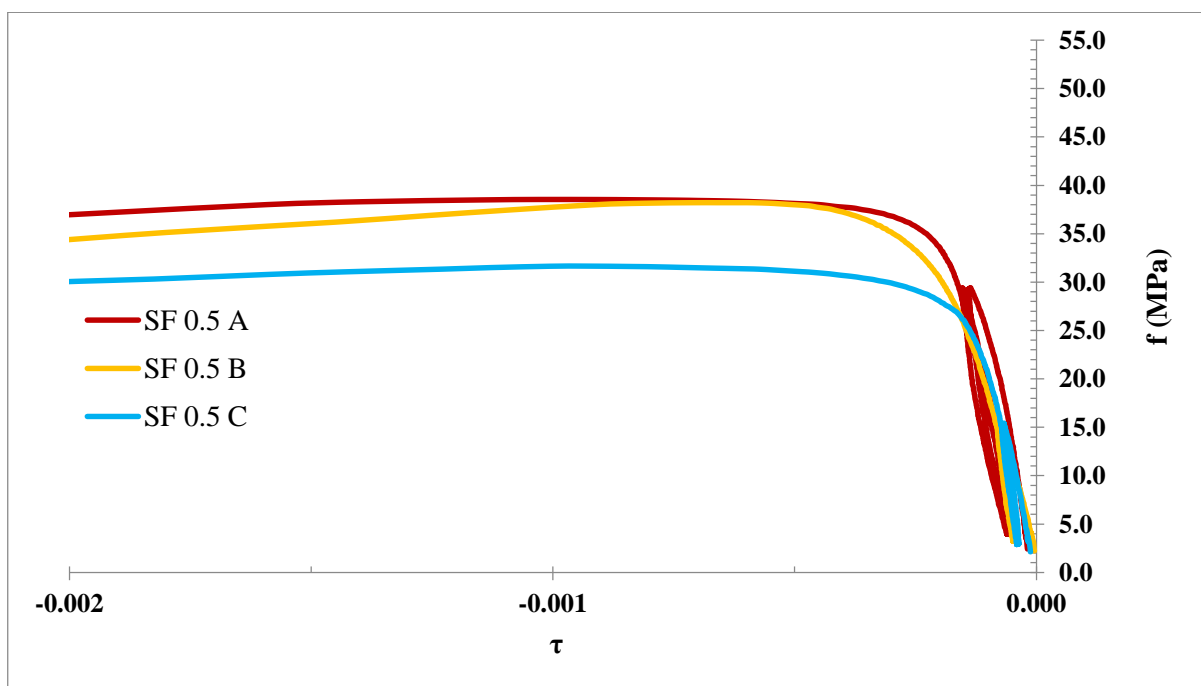
Στα **Σχήματα 38 έως 45** που ακολουθούν, παρουσιάζονται αναλυτικά τα διαγράμματα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης όπως προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις της δοκιμής σε θλίψη για τα κυλινδρικά δοκίμια. Η τάση παρουσιάζεται στον κατακόρυφο άξονα και συμβολίζεται με το γράμμα f , ενώ η διατμητική παραμόρφωση παρουσιάζεται στον οριζόντιο άξονα και συμβολίζεται με το γράμμα τ .



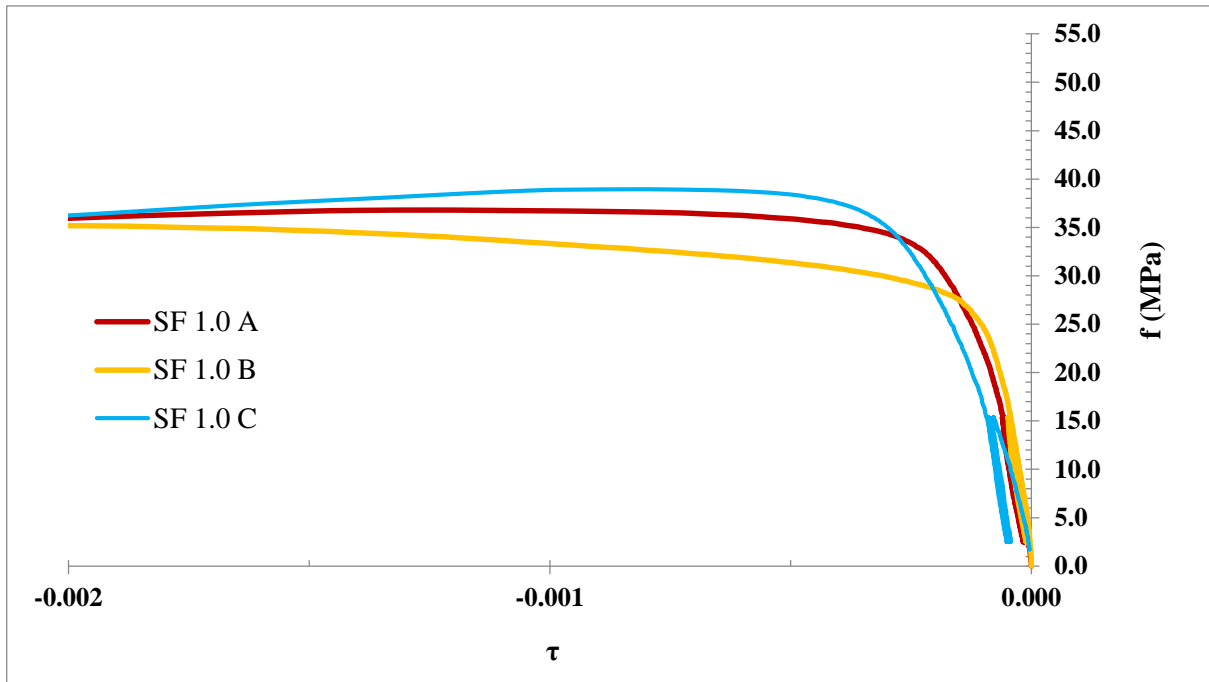
Σχήμα 38: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης άοπλου σκυροδέματος (NC).



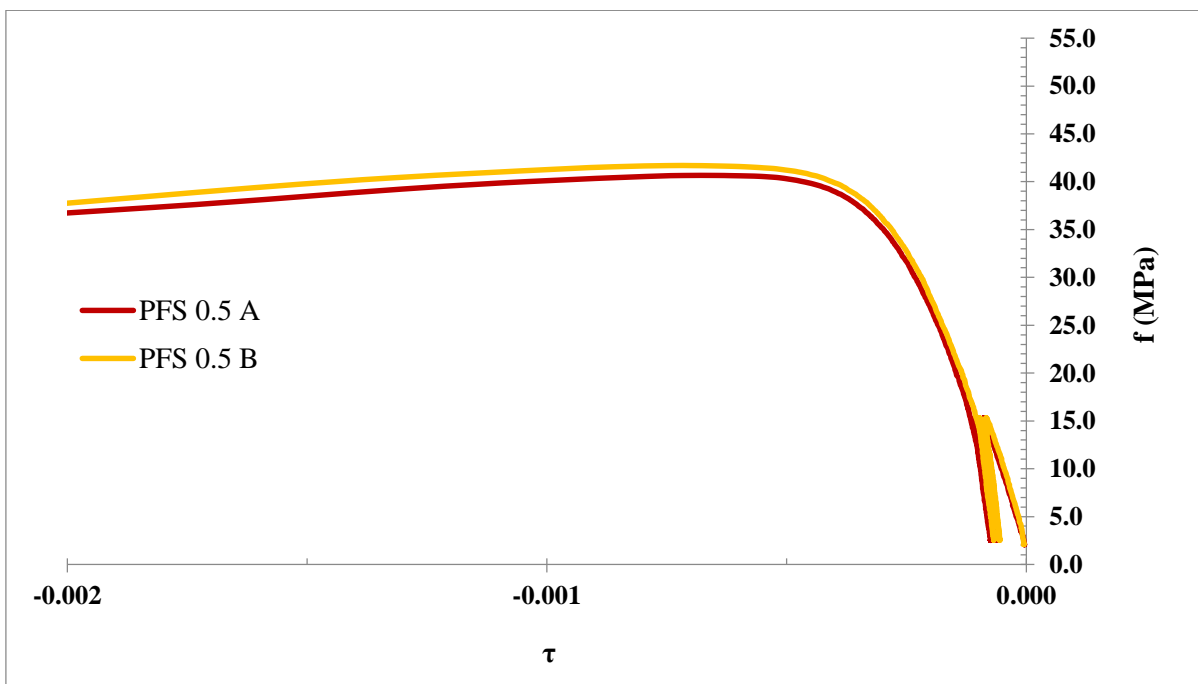
Σχήμα 39: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης άοπλου σκυροδέματος με μετακαολίνη (MC).



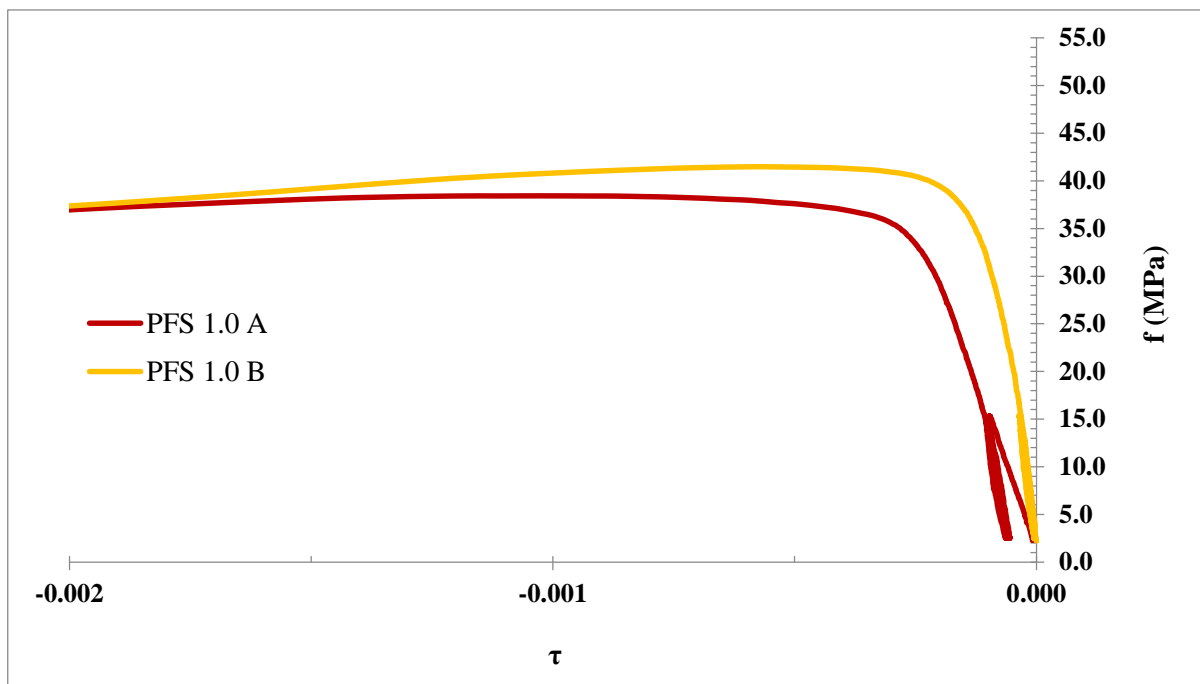
Σχήμα 40: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (SF 0.5).



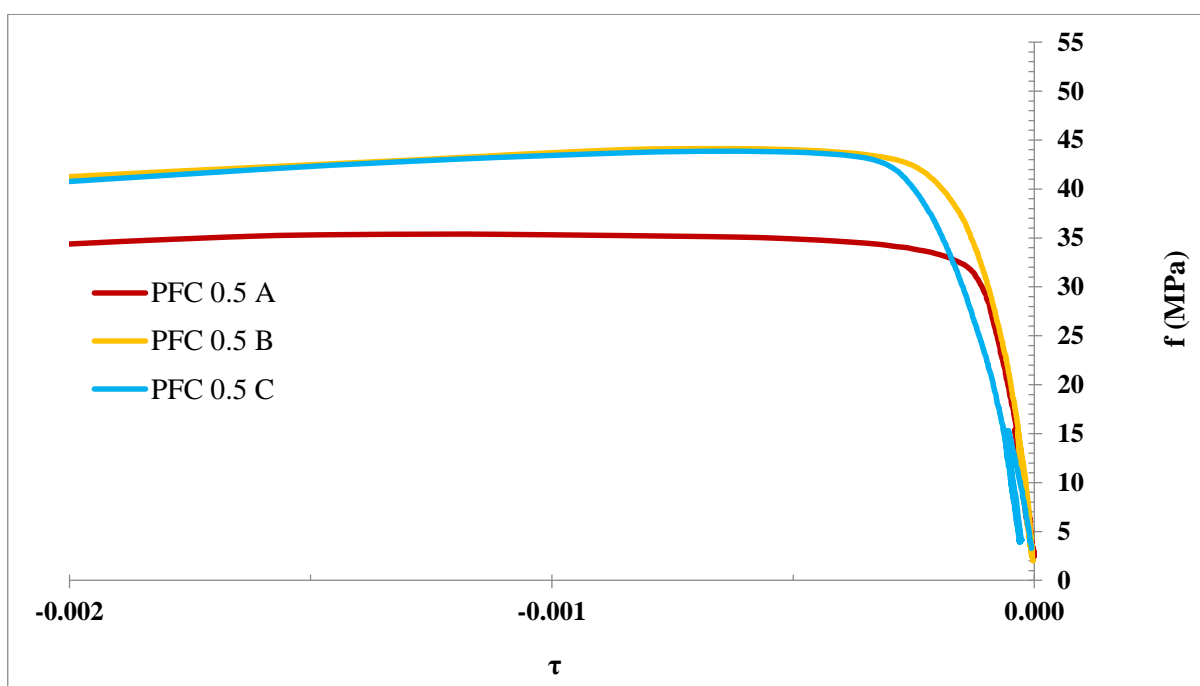
Σχήμα 41: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (SF 1.0).



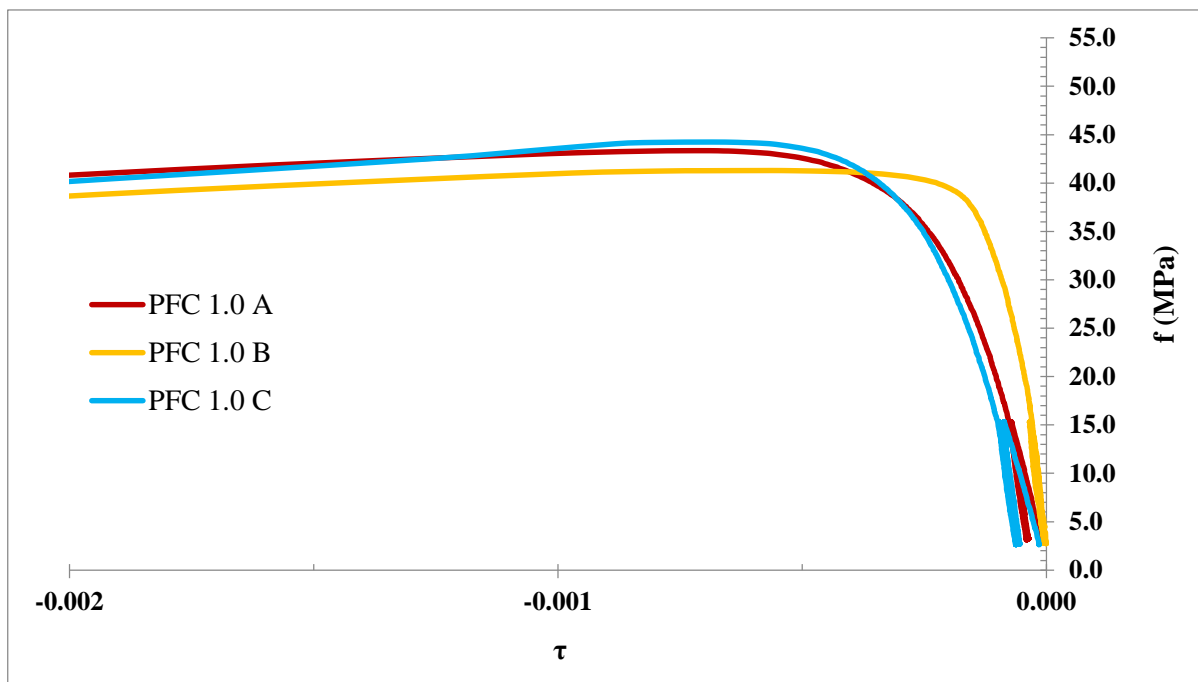
Σχήμα 42: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PFS 0.5).



Σχήμα 43: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (PFS 1.0).



Σχήμα 44: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PFC 0.5).



Σχήμα 45: Διάγραμμα τάσης-διατμητικής παραμόρφωσης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (PFC 1.0).

Τα αποτελέσματα του λόγου παραμόρφωσης για κάθε δοκίμιο από όλες τις συνθέσεις δίνονται στον **Πίνακα 11**. Μαζί παρατίθενται η μέση τιμή και ο συντελεστής μεταβλητότητας των μετρήσεων κάθε σύνθεσης.

Όπως γίνεται φανερό, τα αποτελέσματα για τις περισσότερες συνθέσεις παρουσίασαν μια πολύ μεγάλη ανομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας (cv) ξεπερνά κατά πολύ το 10%. Εξαίρεση αποτελούν οι τιμές για τις συνθέσεις NC, SF0.5 και PFS0.5 για τις οποίες ο συντελεστής διακύμανσης δεν ξεπέρασε το όριο του 10%.

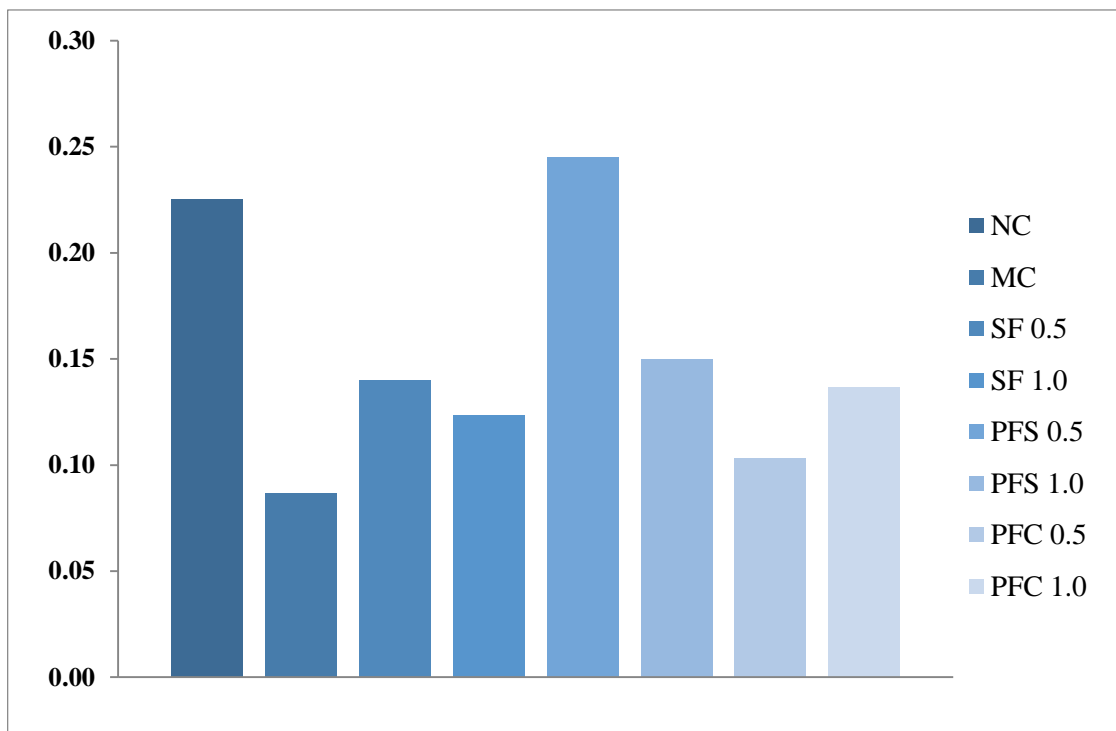
Παρατηρώντας την τιμή του λόγου παραμόρφωσης για την κάθε σύνθεση παρατηρούμε μια μεγάλη διακύμανση καθώς κυμαίνεται από 0.08 έως 0.25. Λόγω της πολύ μεγάλης μεταβλητότητας δεν μπορούμε να προχωρήσουμε σε εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων για τον τρόπο που επιδρούν οι ίνες στην τιμή του λόγου παραμόρφωσης.

Αυτό που μπορούμε ωστόσο να παρατηρήσουμε συγκρίνοντας τη μέση τιμή από κάθε σύνθεση, είναι πως η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου παραμόρφωσης του. Σε όλες τις συνθέσεις (εκτός από τη PFS0.5) έχουμε μείωση του λόγου παραμόρφωσης με τα ποσοστά να κυμαίνονται από 35% έως 60%.

Πίνακας 11: Λόγος παραμόρφωσης όλων των δοκιμίων, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | Λόγος Παραμόρφωσης | M.T. | cv (%) |
|-----------|--------------------|------|--------|
| NC A | 0.23 | 0.23 | 3.14 |
| NC B | 0.22 | | |
| MC A | 0.08 | 0.09 | 13.32 |
| MC B | 0.08 | | |
| MC C | 0.10 | | |
| SF 0.5 A | 0.13 | 0.14 | 7.14 |
| SF 0.5 B | 0.15 | | |
| SF 0.5 C | 0.14 | | |
| SF 1.0 A | 0.10 | 0.12 | 63.00 |
| SF 1.0 B | 0.06 | | |
| SF 1.0 C | 0.21 | | |
| PFS 0.5 A | 0.26 | 0.25 | 8.66 |
| PFS 0.5 B | 0.23 | | |
| PFS 1.0 A | 0.25 | 0.15 | 94.28 |
| PFS 1.0 B | 0.05 | | |
| PFC 0.5 A | 0.09 | 0.10 | 49.66 |
| PFC 0.5 B | 0.06 | | |
| PFC 0.5 C | 0.16 | | |
| PFC 1.0 A | 0.15 | 0.14 | 59.14 |
| PFC 1.0 B | 0.05 | | |
| PFC 1.0 C | 0.21 | | |

Στη συνέχεια παρατίθεται στο **Σχήμα 46** ένα συγκεντρωτικό ραβδόγραμμα με το λόγο παραμόρφωσης όλων των συνθέσεων. Ως τιμή για την κάθε σύνθεση έχει ληφθεί η μέση τιμή των δοκιμίων της κάθε σύνθεσης

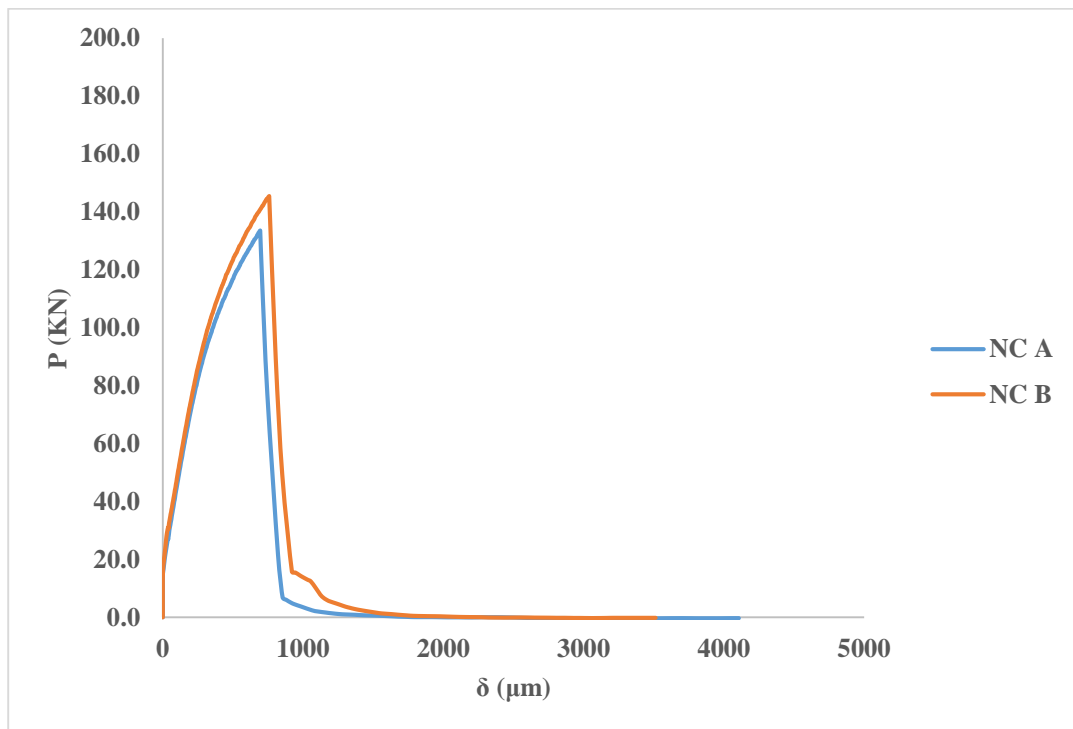


Σχήμα 46: Μέση τιμή λόγου παραμόρφωσης όλων των συνθέσεων.

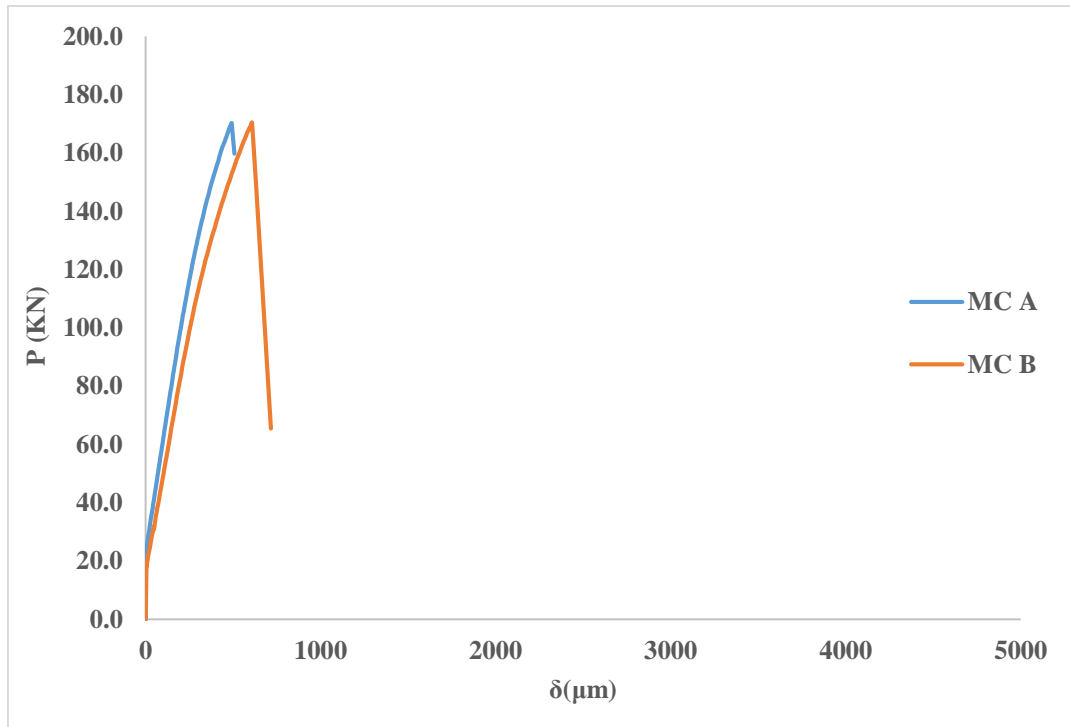
Όπως φαίνεται από τον παραπάνω **Πίνακας 11** και το αντίστοιχο ραβδόγραμμα του **Σχήματος 46**, η μικρότερη τιμή του λόγου παραμόρφωσης παρουσιάζεται στη σύνθεση με μετακαολίνη, ενώ όσον αφορά τις συνθέσεις που περιέχουν ίνες, ο μικρότερος λόγος παραμόρφωσης παρουσιάζεται στη σύνθεση PFS 0.5.

3.2.3. Εφελκυστική αντοχή μέσω της Δοκιμής Barcelona

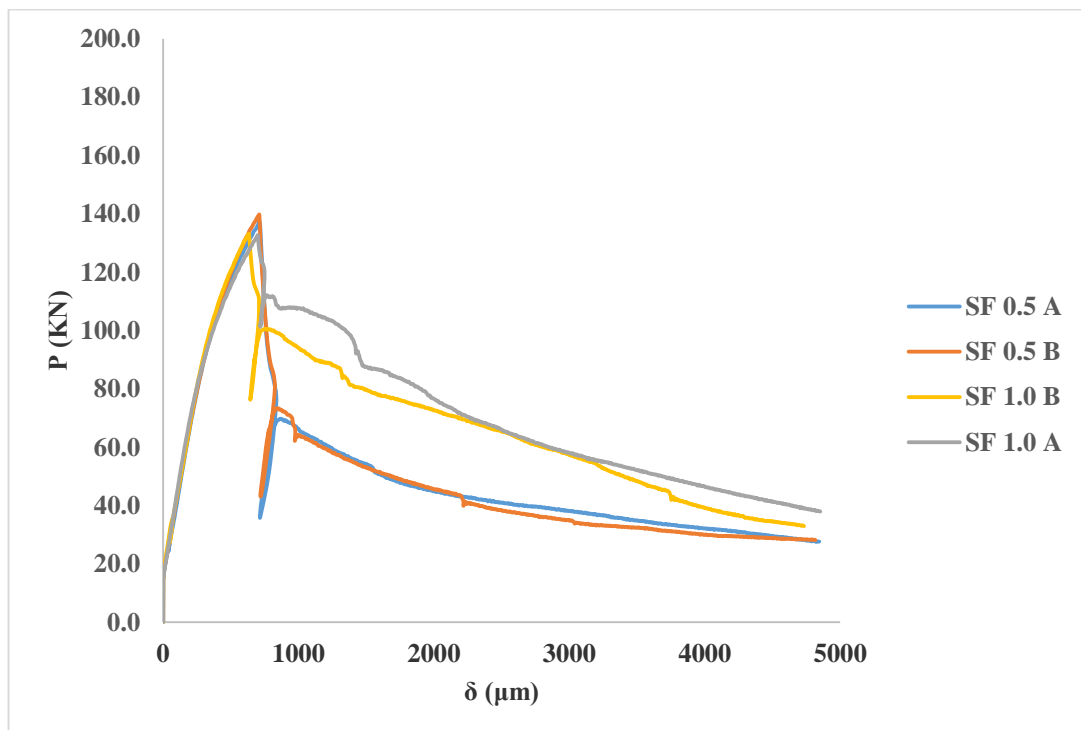
Στα **Σχήματα 47-51** απεικονίζονται το συνολικό φορτίο σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (P- δ) με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών G-BCN στις συνθέσεις αναφοράς NC και MC και στις συνθέσεις ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με μεταλλικές ίνες (SF) και με συνθετικές ίνες (PFS) και (PFC) σε ποσοστό 1.0% και 0.5% αντίστοιχα. Για κάθε σύνθεση σκυροδέματος δοκιμάστηκαν δύο δοκίμια.



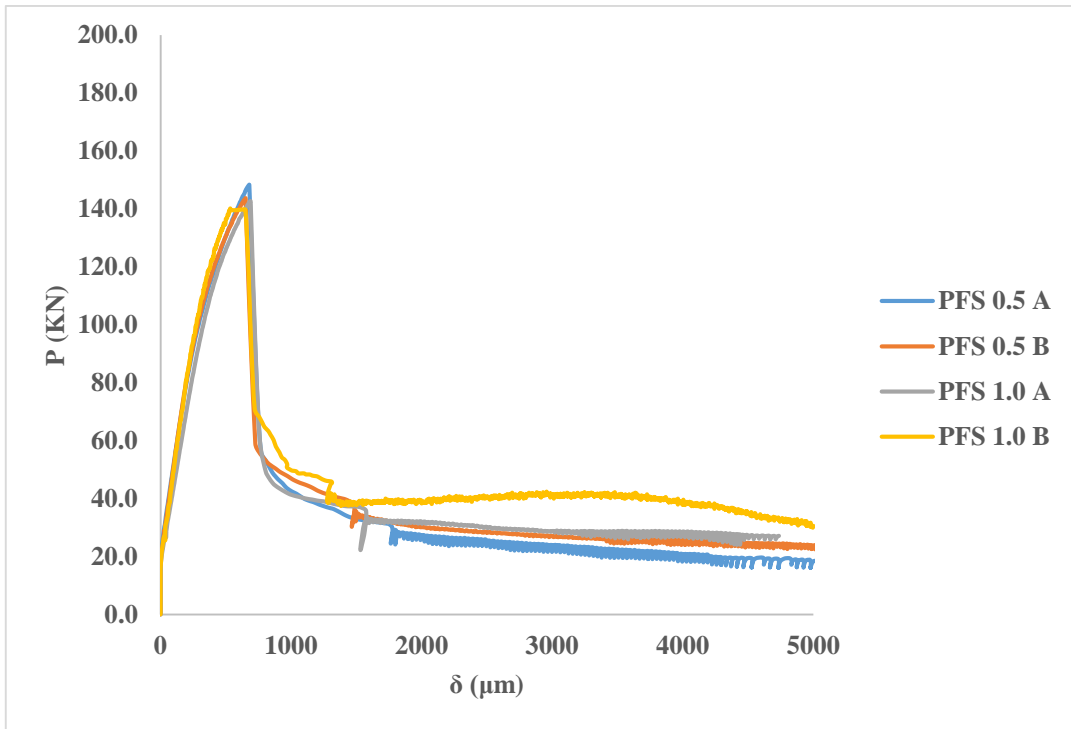
Σχήμα 47: Φορτίο (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ) των συνθέσεων αναφοράς (NC).



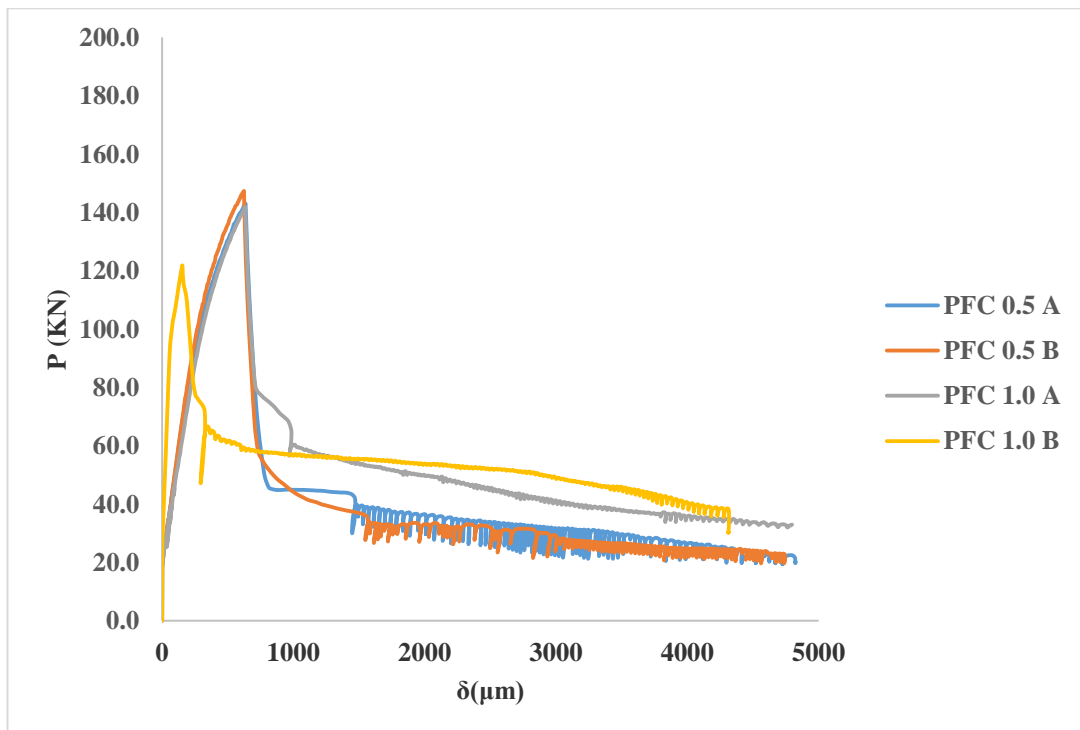
Σχήμα 48: Φορτίο (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ) των συνθέσεων αναφοράς (MC).



Σχήμα 49: Φορτίο (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ) των συνθέσεων με μεταλλικές ίνες (SF).



Σχήμα 50: Φορτίο (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ) των συνθέσεων με μεταλλικές ίνες (PFS).



Σχήμα 51: Φορτίο (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ) των συνθέσεων με μεταλλικές ίνες (PFC).

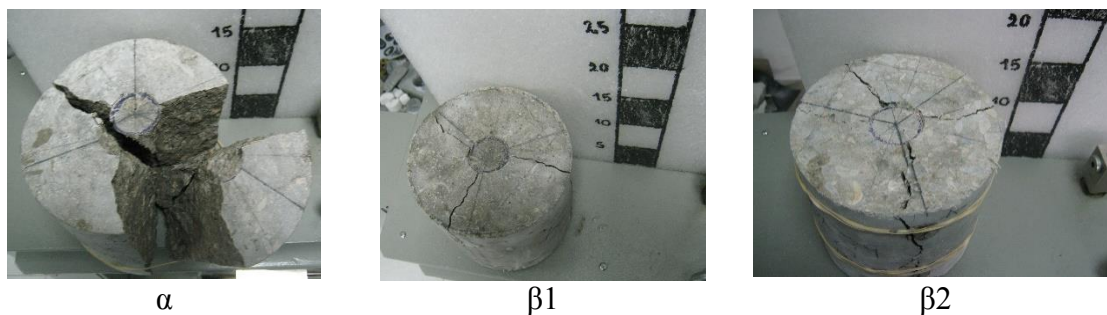
Στα **Σχήματα 47 και 48** παρατηρείται στις συνθέσεις αναφοράς γραμμική συμπεριφορά του σκυροδέματος πριν την ρηγμάτωση περίπου μέχρι το 80% της τιμής που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο και μη γραμμική συμπεριφορά από αυτή την τιμή μέχρι την τιμή του μέγιστου φορτίου της πρώτης κορυφής. Στα **Σχήματα 48-51** παρατηρείται ότι στις συνθέσεις με ίνες όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών η τιμή του μέγιστου φορτίου ελαττώνεται. Κάτι τέτοιο συμβαίνει, γιατί όλα τα FRC παρασκευάστηκαν βάσει της ίδιας σύνθεσης και αυξάνοντας το κ.ο. ποσοστό των ινών, αυξάνεται το πορώδες του σκυροδέματος, το οποίο πρέπει να αντισταθμίζεται με αύξηση του ποσοστού των λεπτών υλικών.

Στα δοκίμια αναφοράς τα οποία δεν περιείχαν ίνες, τόσο για του αμιγούς τσιμέντου όσο και για εκείνα με μετακαολίνη, διαπιστώθηκε ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο με αποτέλεσμα να μην καταγράφονται αποτελέσματα μετά τη ρηγμάτωση. Αντιθέτως, με την προσθήκη ινών παρατηρήθηκε ομαλή συμπεριφορά του σκυροδέματος μετά το μέγιστο φορτίο, ανεξαρτήτως του είδους της ίνας που χρησιμοποιήθηκε. Αναλυτικότερα, φαίνεται ότι για κάθε είδος ίνας, η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής της στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, προκαλεί ελάχιστη μείωση στη τιμή του μέγιστου φορτίου. Στον **Πίνακα 12** φαίνεται αναλυτικά το μέγιστο φορτίο κάθε σύνθεσης και η μέση τιμή (M.T.).

Πίνακας 12: Μέγιστο φορτίο και αντίστοιχη μετατόπιση συνθέσεων.

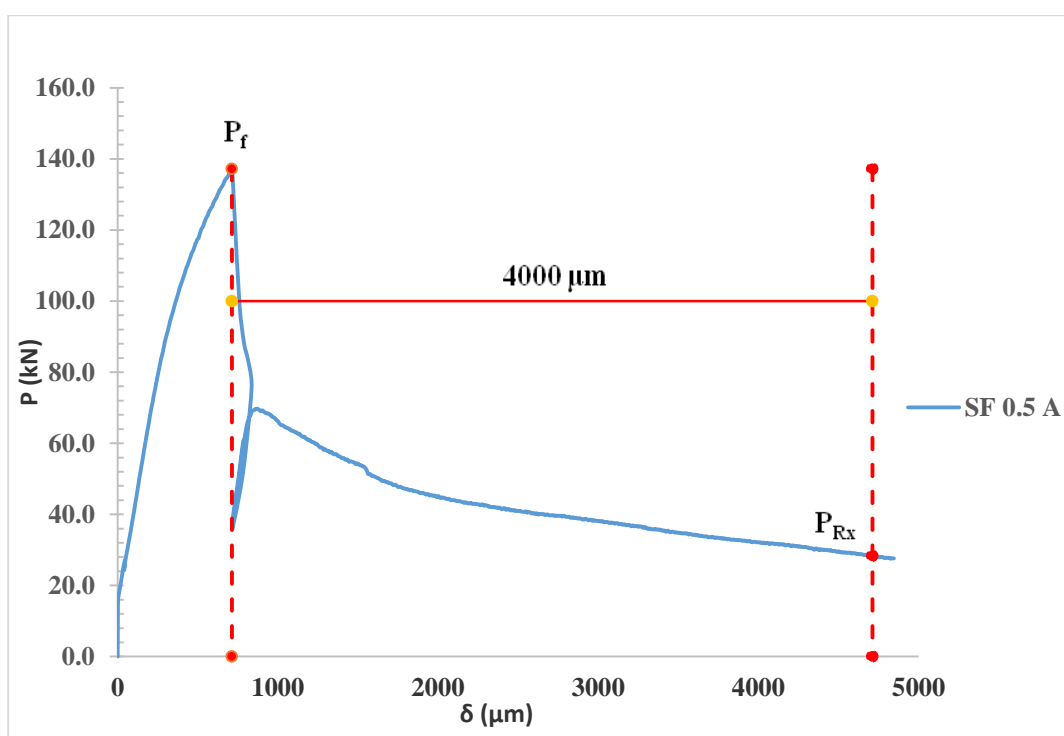
| Κωδικός Δοκιμίων | Μέγιστο φορτίο (kN) | M.T. (kN) | Μετατόπιση δ (μm) |
|------------------|---------------------|-----------|-------------------|
| NC A | 133.57 | 139.52 | 694.20 |
| NC B | 145.47 | | 758.70 |
| MC A | 170.29 | 170.40 | 490.60 |
| MC B | 170.51 | | 606.90 |
| SF 0.5 A | 137.20 | 138.47 | 712.90 |
| SF 0.5 B | 139.74 | | 708.90 |
| SF 1.0 A | 132.70 | 132.94 | 699.30 |
| SF 1.0 B | 133.18 | | 634.40 |
| PFS 0.5 A | 148.42 | 146.11 | 679.90 |
| PFS 0.5 B | 143.80 | | 652.10 |
| PFS 1.0 A | 142.70 | 141.47 | 690.30 |
| PFS 1.0 B | 140.24 | | 534.60 |
| PFC 0.5 A | 143.06 | 145.21 | 635.700 |
| PFC 0.5 B | 147.36 | | 623.600 |
| PFC 1.0 A | 141.85 | 131.86 | 631.400 |
| PFC 1.0 B | 121.87 | | 154.00 |

Στην τελική κατάσταση παρατηρήθηκαν τρεις ακτινικές ρωγμές σε δοκίμια χωρίς ίνες και σε δοκίμια με ποσοστό ινών $V_f=0.5\%$, και τέσσερις ή περισσότερες ακτινικές ρωγμές σε δοκίμια με ποσοστό ινών $V_f=1.0\%$. Η τελική εικόνα των δοκιμίων είναι παρόμοια με αυτή που φαίνεται στο **Σχήμα 52**.

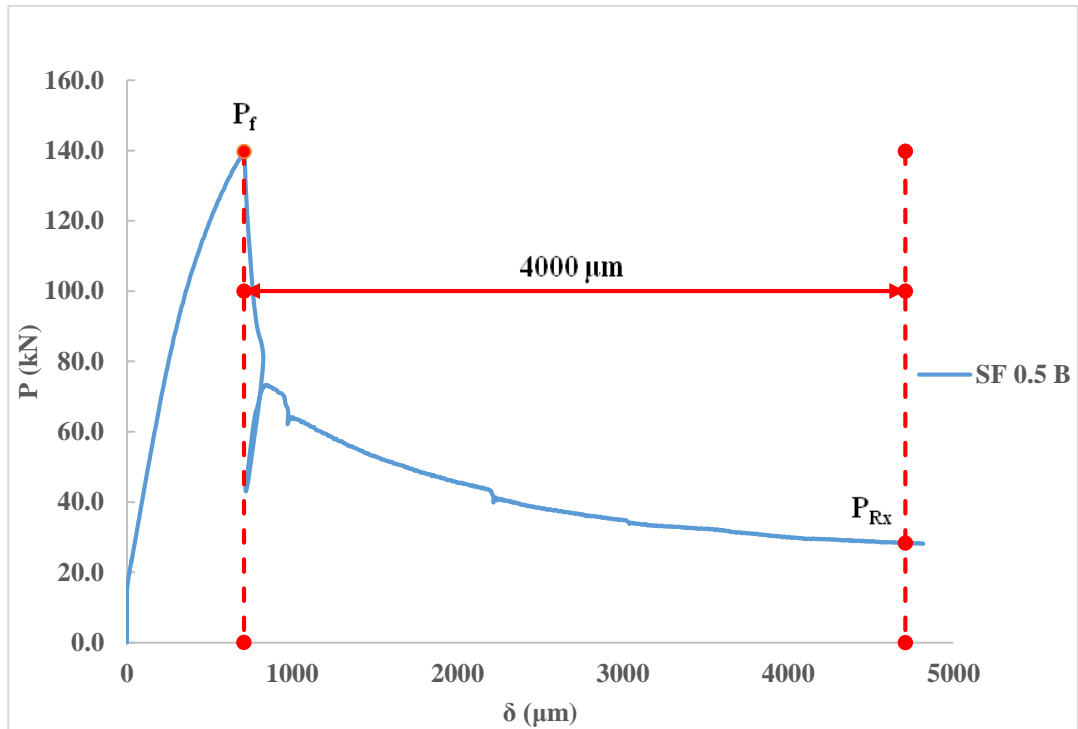


Σχήμα 52: Απεικόνιση των ρωγμών μετά την αστοχία, α) σε άοπλο δοκίμιο και β) σε ινοπλισμένα δοκίμια με συνθετικές ίνες σε ποσοστό β1) 0.5% και β2) 1.0% αντίστοιχα.

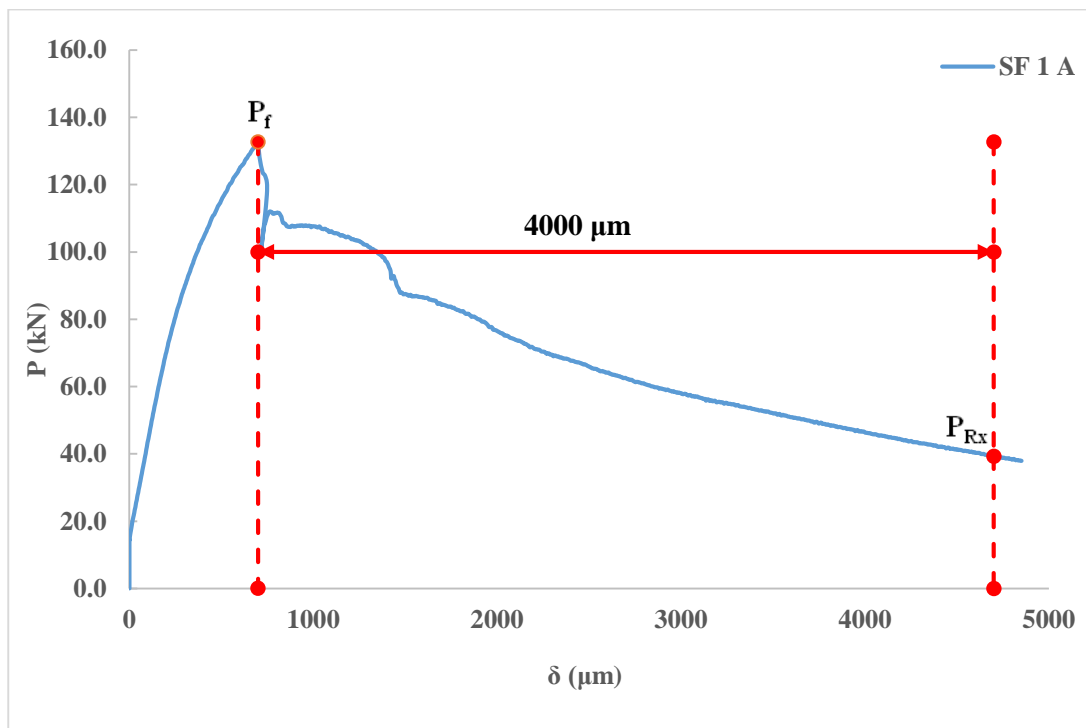
Τα **Σχήματα 53-63** απεικονίζουν το διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ) κάθε σύνθεσης και επισημαίνεται το φορτίο (P_f) που αντιστοιχεί στην αντοχή της πρώτης κορυφής και το φορτίο (P_{Rx}) που αντιστοιχεί στην παραμένουσα τάση (f_{ciRx}) των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων μετά την ρηγάτωση.



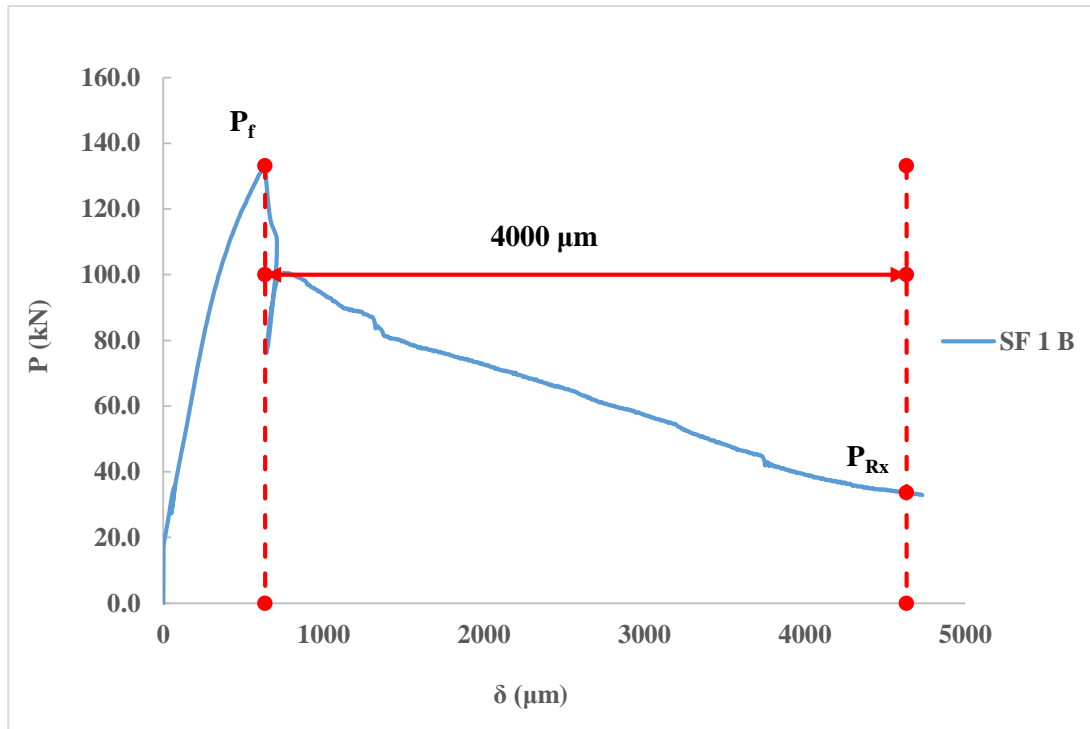
Σχήμα 53: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες (SF). Δοκίμιο SF 0.5 A.



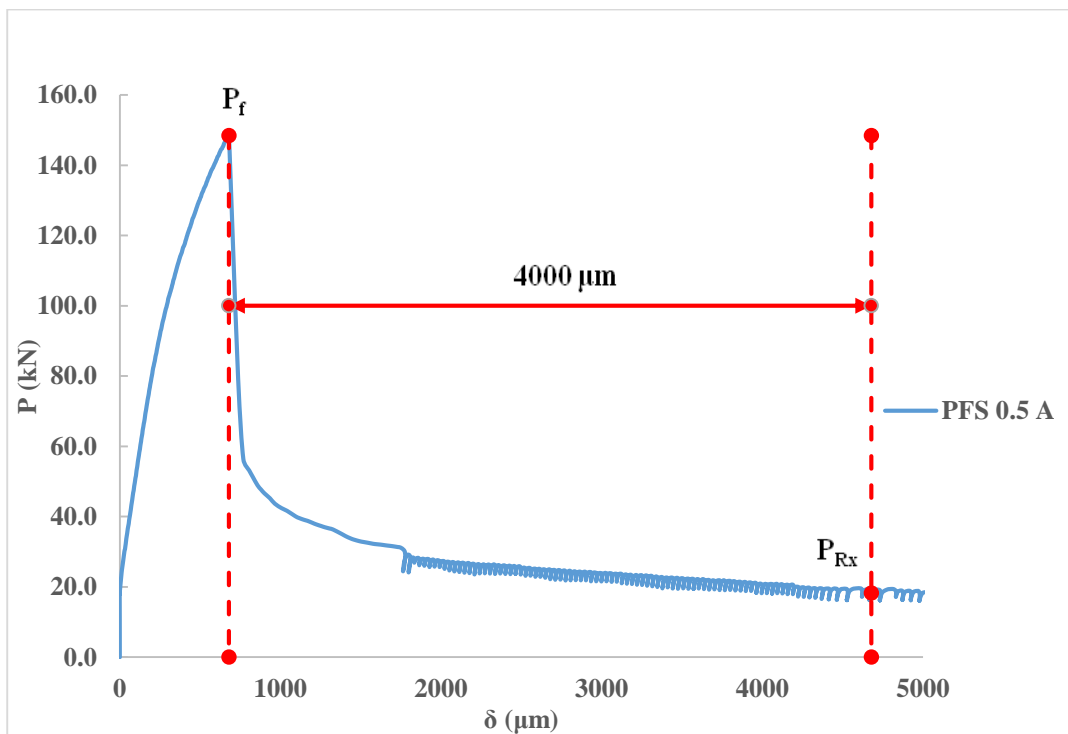
Σχήμα 54: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες (SF). Δοκίμιο SF 0.5 B.



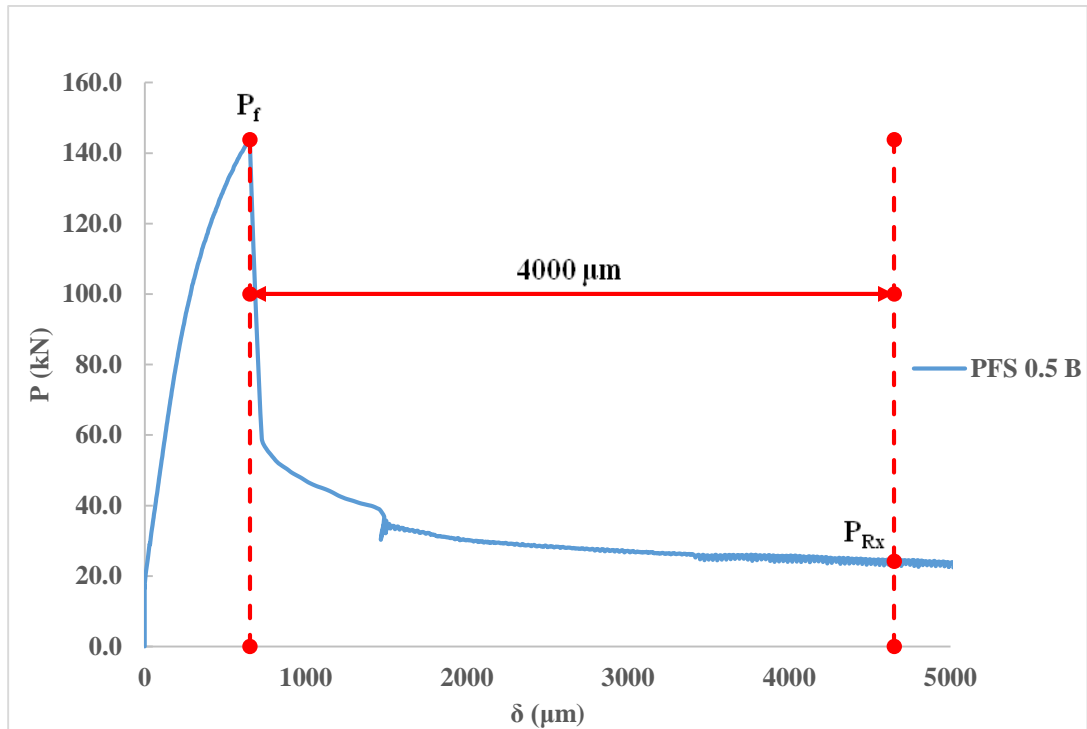
Σχήμα 55: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες (SF). Δοκίμιο SF 1.0 A.



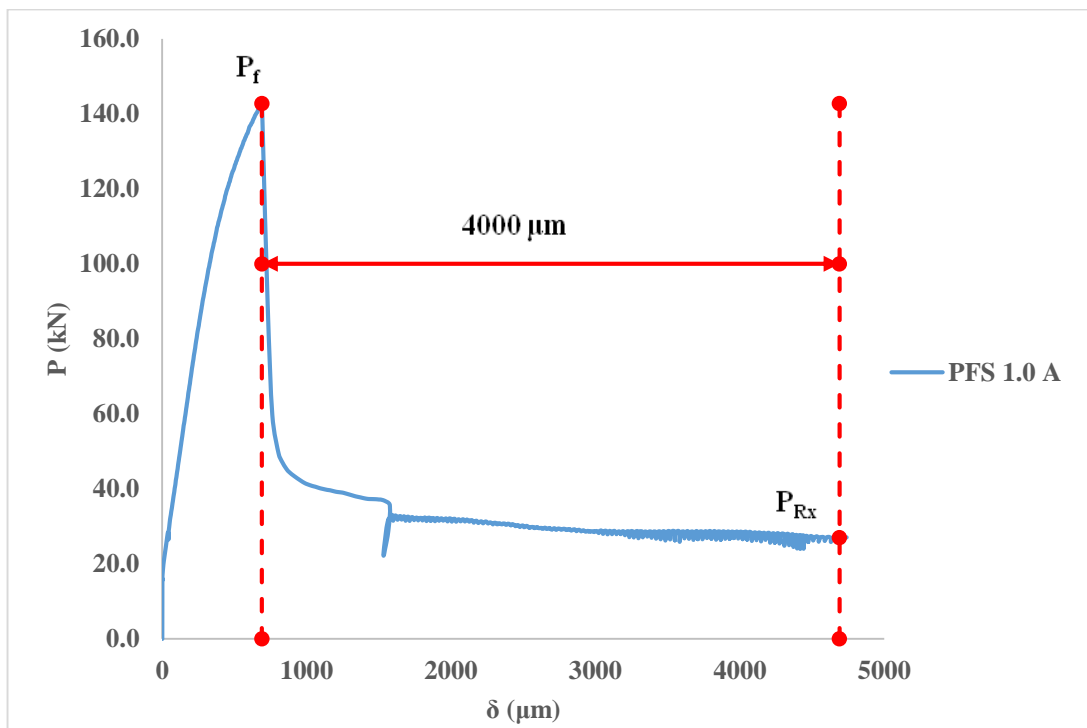
Σχήμα 56: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες (SF). Δοκίμιο SF 1.0 B.



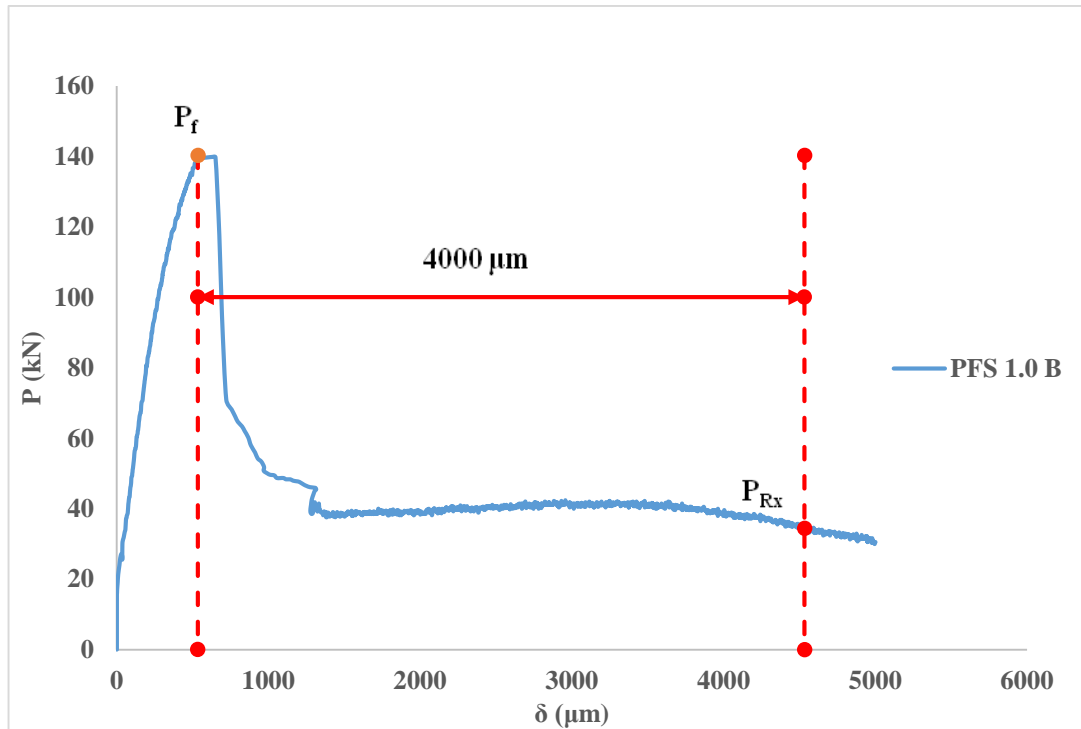
Σχήμα 57: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες (PFS). Δοκίμιο PFS 0.5 A.



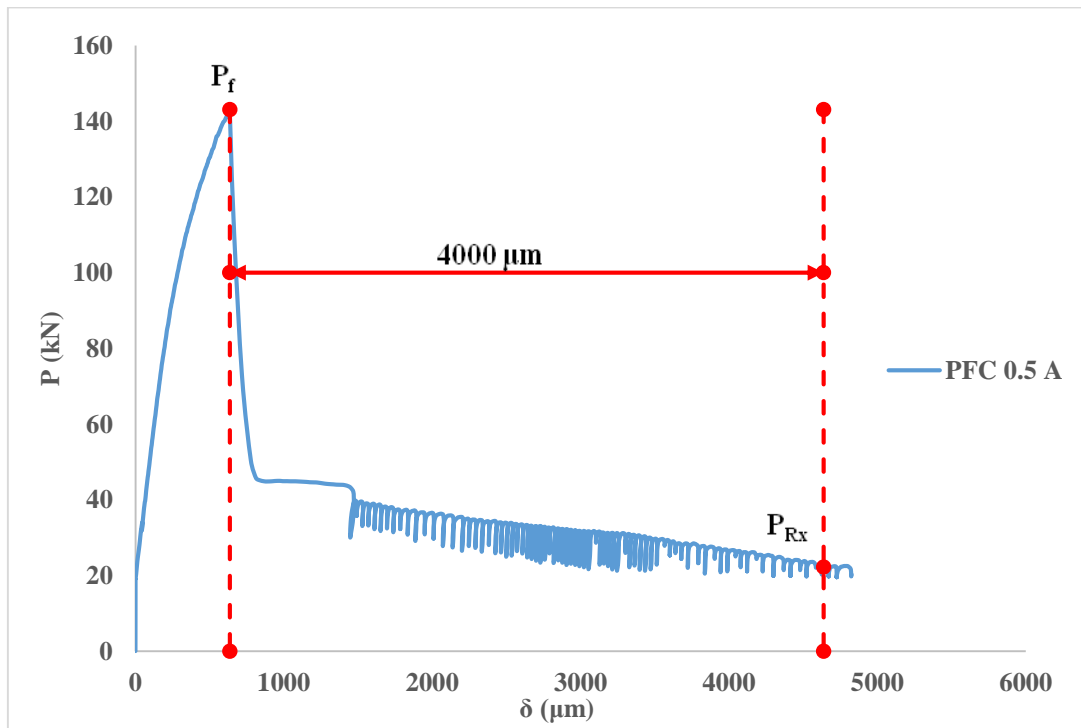
Σχήμα 58: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες (PFS). Δοκίμιο PFS 0.5 B.



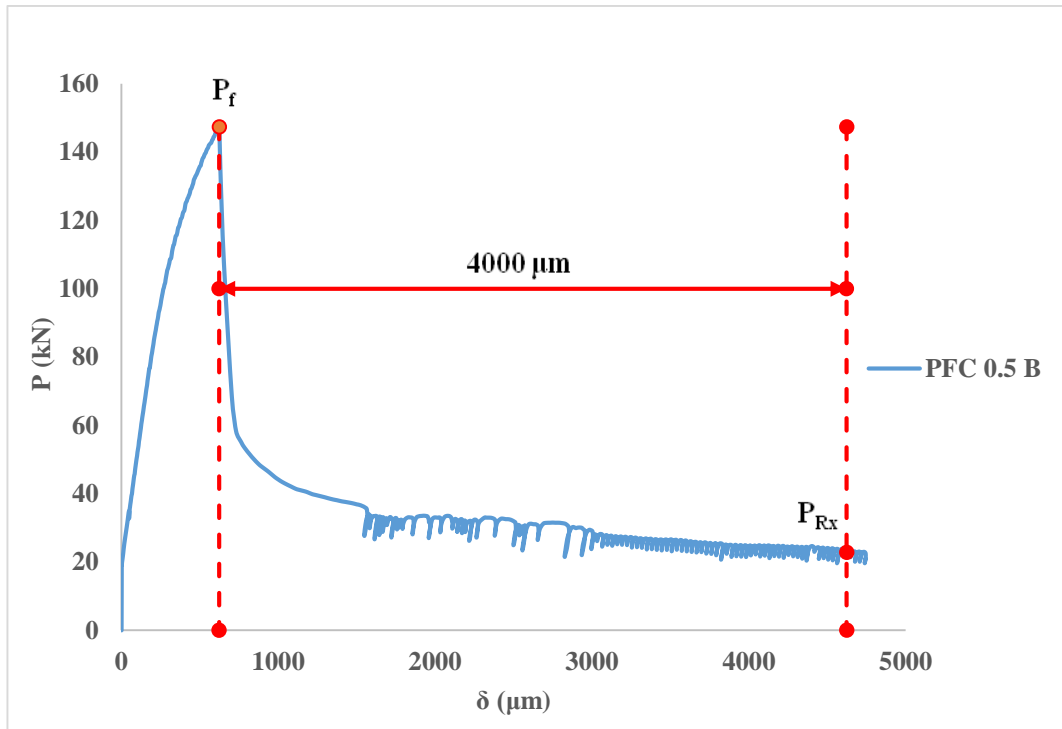
Σχήμα 59: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες με συνθετικές ίνες (PFS). Δοκίμιο PFS 1.0 A



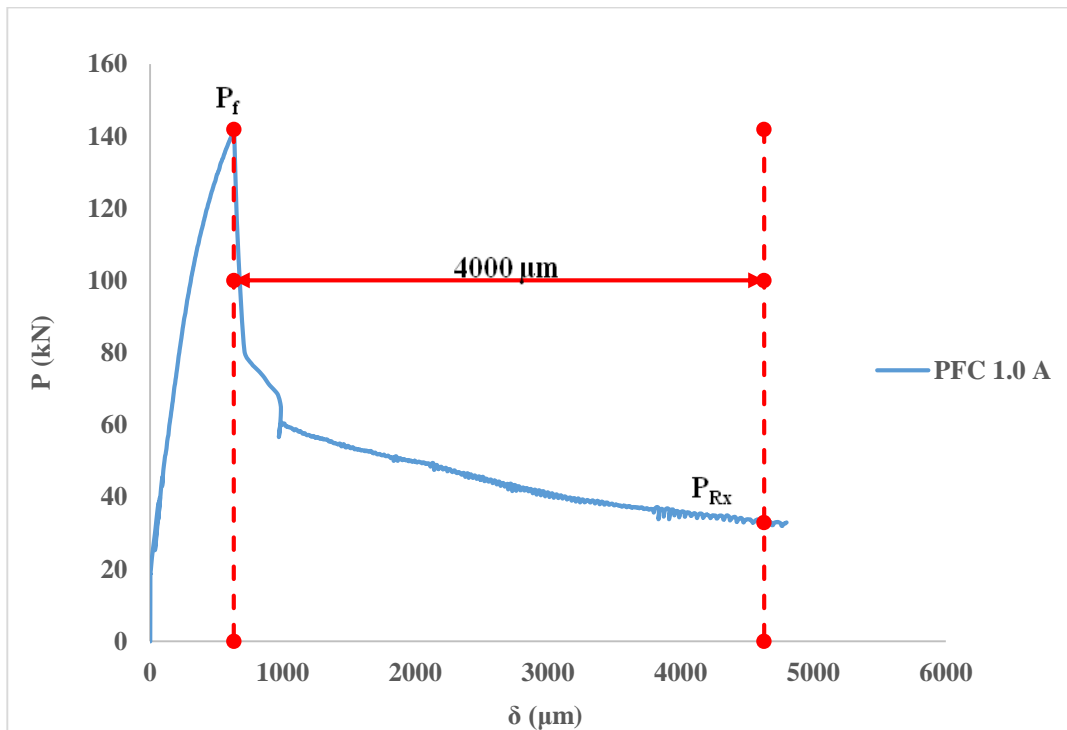
Σχήμα 60: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες συνθετικές ίνες (PFS). Δοκίμιο PFS 1.0 B .



Σχήμα 61: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες συνθετικές ίνες (PFC). Δοκίμιο PFC 0.5 A.



Σχήμα 62: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες συνθετικές ίνες (PFC). Δοκίμιο PFC 0.5 B.



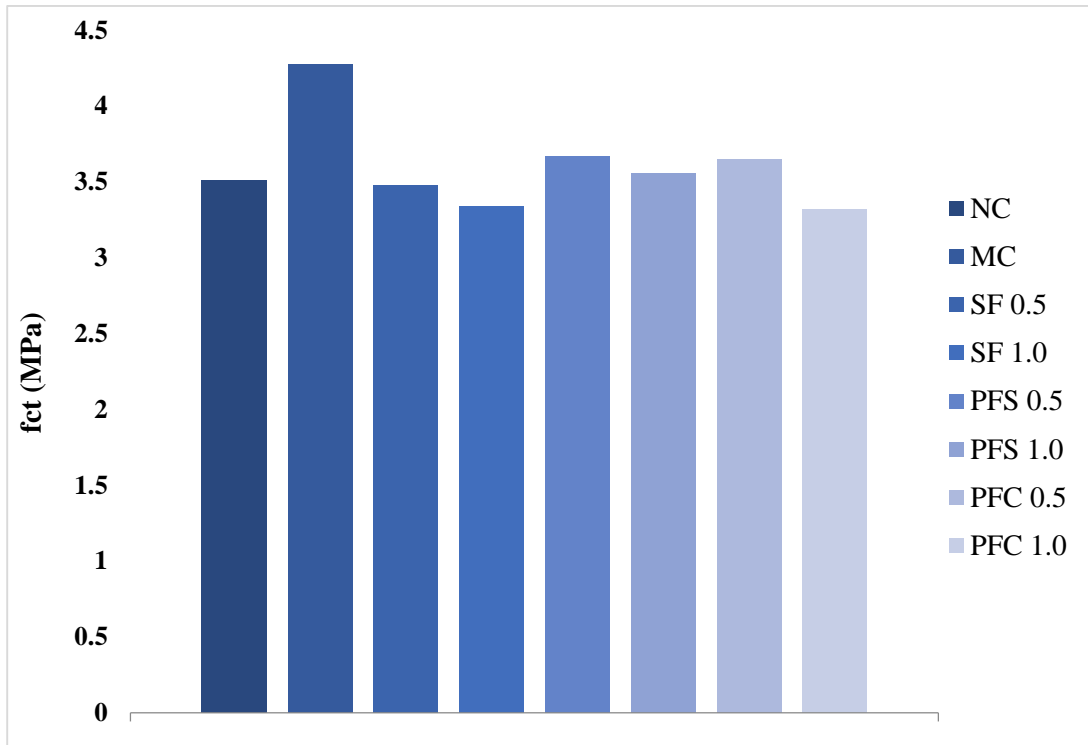
Σχήμα 63: Διάγραμμα φορτίου (P) σε σχέση με την αξονική μετατόπιση (δ), ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες συνθετικές ίνες (PFC). Δοκίμιο PFC 1.0 A.

Από τα **Σχήματα 53-63** παρατηρείται ότι μετά τη ρηγμάτωση τα διαγράμματα όλων των εξεταζόμενων FRCs δείχνουν την ύπαρξη παραμένουσας αντοχής, ανάλογης του τύπου και του ποσοστού των ινών που περιέχουν κάθε φορά.

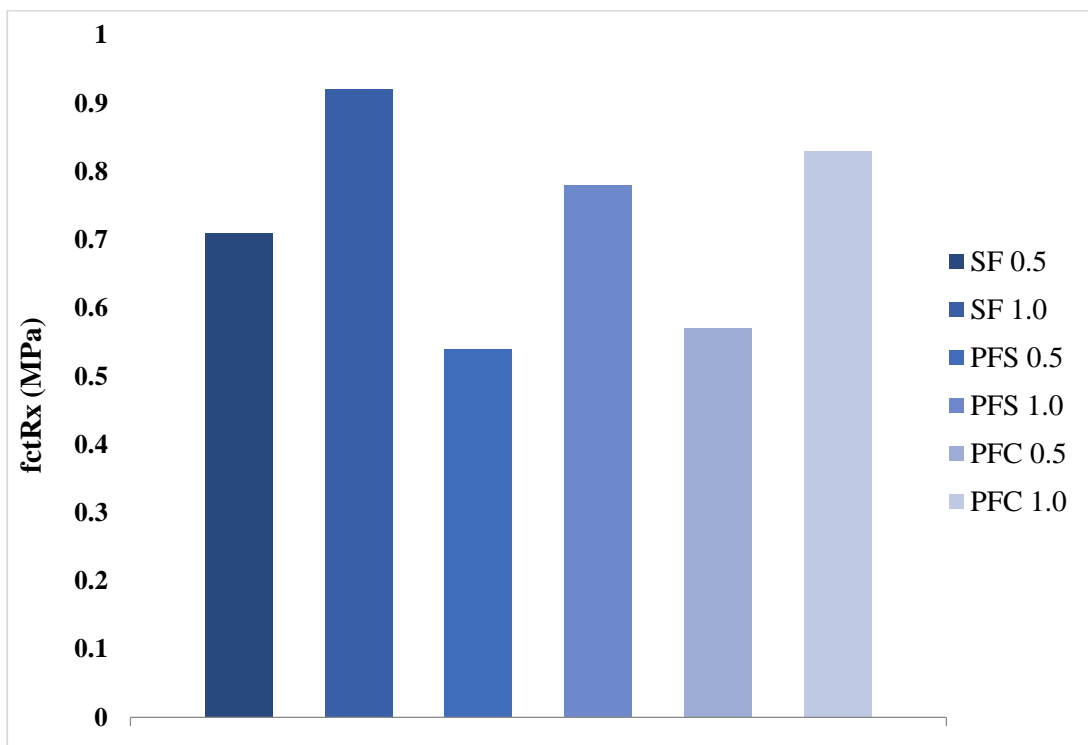
Στον **Πίνακα 13** παρουσιάζονται για κάθε μια σύνθεση, τα αποτελέσματα για την αντοχή της πρώτης κορυφής (f_{ct}), την παραμένουσα τάση (f_{ctRx}), μαζί με τη μέση τιμή (M.T.) κάθε παραμέτρου, και τους αντίστοιχους συντελεστές διακύμανσης (cv,%). Επίσης παρουσιάζεται ο λόγος θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{ct}). Οι μέσες τιμές αυτών των παραμέτρων αποδίδονται γραφικά στα αντίστοιχα ραβδογράμματα (**Σχήματα 64-66**).

Πίνακας 13: Αντοχή πρώτης κορυφής f_{ct} , παραμένουσα τάση f_{ctRx} δοκιμίων, μέση τιμή (M.T.) αντίστοιχοι συντελεστές διακύμανσης (cv%) και λόγος f_c/f_{ct} .

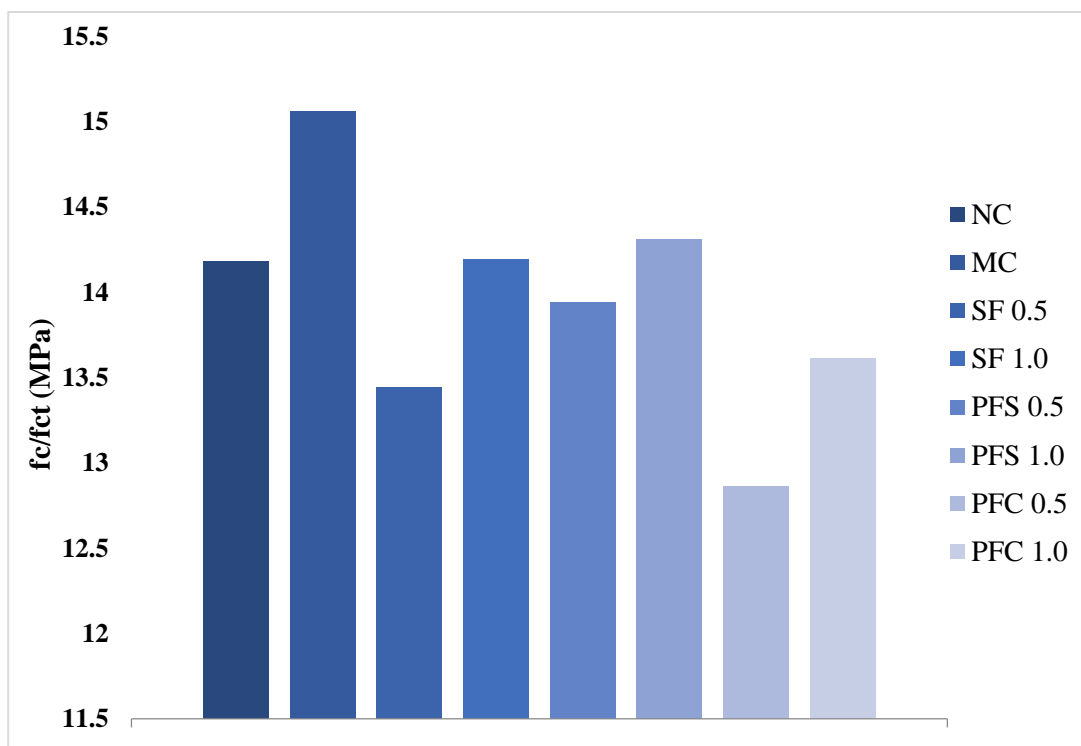
| Δοκίμιο | f_{ct} | M.T. | cv(%) | f_{ctRx} | M.T. | cv(%) | f_c/f_{ct} | M.T. |
|-----------|----------|-------|-------|------------|-------|-------|--------------|-------|
| NC A | 3.36 | 3.51 | 14.97 | - | - | - | 14.78 | 14.18 |
| NC B | 3.66 | | | - | - | | 13.57 | |
| MC A | 4.28 | 4.285 | 0.5 | - | - | - | 15.07 | 15.06 |
| MC B | 4.29 | | | - | - | | 15.05 | |
| SF 0.5 A | 3.45 | 3.485 | 3.19 | 0.71 | 0.71 | 0.1 | 13.73 | 13.44 |
| SF 0.5 B | 3.52 | | | 0.71 | | | 13.14 | |
| SF 1.0 A | 3.34 | 3.345 | 0.61 | 0.99 | 0.92 | 6.98 | 14.22 | 14.19 |
| SF 1.0 B | 3.35 | | | 0.85 | | | 14.16 | |
| PFS 0.5 A | 3.73 | 3.675 | 5.82 | 0.46 | 0.535 | 7.49 | 13.72 | 13.94 |
| PFS 0.5 B | 3.62 | | | 0.61 | | | 14.16 | |
| PFS 1.0 A | 3.59 | 3.56 | 3.1 | 0.68 | 0.775 | 9.31 | 14.18 | 14.31 |
| PFS 1.0 B | 3.53 | | | 0.87 | | | 14.43 | |
| PFC 0.5 A | 3.6 | 3.655 | 5.41 | 0.56 | 0.565 | 0.71 | 13.05 | 12.86 |
| PFC 0.5 B | 3.71 | | | 0.57 | | | 12.67 | |
| PFC 1.0 A | 3.57 | 3.32 | 25.14 | 0.83 | 0.83 | - | 13.61 | 13.61 |
| PFC 1.0 B | 3.07 | | | - | | | - | |



Σχήμα 64: Ραβδόγραμμα Μ.Τ. αντοχής πρώτης κορυφής (f_{ct}).



Σχήμα 65: Ραβδόγραμμα Μ.Τ. παραμένουσας τάσης (f_{ctRx}).



Σχήμα 66: Ραβδόγραμμα Μ.Τ. λόγου θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής(f_c/f_{ct}).

Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις αντοχές που αντιστοιχούν στην πρώτη κορυφή κάθε σύνθεσης. Οι συνθετικές ίνες PFS εμφάνισαν τη μέγιστη αντοχή πρώτης κορυφής (f_{ct}) τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο, όσο και σε ποσοστό 1.0% κ.ο. προσθήκης. Την ελάχιστη τιμή όσον αφορά στην αντοχή της πρώτης κορυφής σε ποσοστό 0.5% κ.ο. έφεραν οι μεταλλικές ίνες SF και σε ποσοστό 1.0% κ.ο. οι συνθετικές ίνες PFC. Η f_{CT} επηρεάζεται από το ποσοστό των ιών κ.ο. Με την αύξηση του κ.ο. ποσοστού των ιών η f_{CT} μειώνεται. Αυτό δικαιολογείται, γιατί η επιφάνεια φόρτισης στη δοκιμή G-BCN είναι μικρή και ορίζεται από την περιοχή που ασκούνται οι σφήνες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να προκαλέσουν διάτρηση στον κύλινδρο. Οι διαφορές, όμως, στα αποτελέσματα είναι αμελητέες. Έτσι, το ποσοστό κ.ο. των ιών επηρεάζει την αντοχή της πρώτης κορυφής, ενώ το είδος και η μορφή των ιών δεν έχουν σημαντική επιρροή.

Η σύνθεση SF 1.0 εμφάνισε τα καλύτερα αποτελέσματα, και το γεγονός ότι οι μετρήσεις που αφορούν στην εν λόγω σύνθεση, έχουν τη μικρότερη διασπορά, ενισχύει περαιτέρω αυτό το συμπέρασμα.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της παραμένουσας τάσης, οι μεταλλικές ίνες SF εμφάνισαν την μέγιστη παραμένουσα τάση (f_{ctRx}) τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο, όσο και σε ποσοστό 1.0% κ.ο. Την ελάχιστη τιμή παραμένουσας τάσης (f_{ctRx}) εμφάνισαν οι συνθέσεις με τις συνθετικές ίνες PFS τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο, όσο και σε ποσοστό 1.0% κ.ο. Οι διαφορές στα αποτελέσματα των συνθέσεων με συνθετικές ίνες PFS και PFC ήταν ελάχιστες. Σημαντικές διαφορές παρουσιάστηκαν στις συνθέσεις με την αύξηση του ποσοστού κ.ο. των ιών. Αναλυτικότερα, το SF 1.0 έχει παραμένουσα τάση κατά 30% μεγαλύτερη από το SF 0.5. Το PFS 1.0 έχει σχεδόν 44% μεγαλύτερη παραμένουσα τάση από το PFS 0.5 και το PFC 1.0 έχει 47% μεγαλύτερη παραμένουσα τάση από το PFC 0.5. Ειδικότερα, συγκρίνοντας τις δύο κατηγορίες συνθετικών ιών, το PFC 0.5 έχει μόλις 6% μεγαλύτερη παραμένουσα τάση από το

PFS 0.5 και το PFC 1.0 έχει πάλι μόλις 7% μεγαλύτερη παραμένουσα τάση από ότι το PFS 1.0. Συμπεραίνεται ότι η παραμένουσα τάση επηρεάζεται κυρίως από το είδος και το ποσοστό των ινών. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το κ.ο ποσοστό των ινών, τόσο αυξάνεται η παραμένουσα τάση.

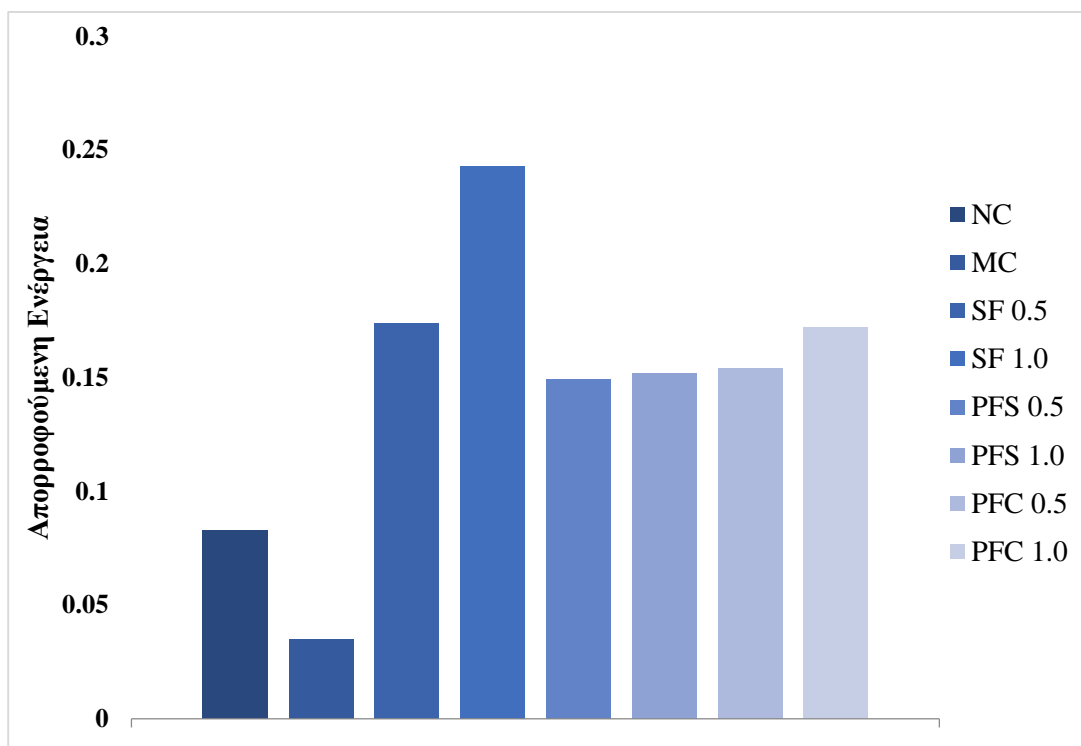
Βάσει του συντελεστή διακύμανσης (cv,%), η μικρότερη διασπορά πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάστηκε στις συνθέσεις SF 0.5 (0.71%) και PFC 0.5 (0.71%).

Όσον αφορά στον λόγο θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{CT}) την μέγιστη τιμή σε ποσοστό 0.5% κ.ο. εμφάνισαν οι συνθέσεις PFS 0.5 και σε ποσοστό 1.0% κ.ο οι συνθέσεις SF 1.0. Την ελάχιστη τιμή του λόγου (f_c/f_{CT}) εμφάνισαν οι συνθέσεις με τις συνθετικές ίνες PFC τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο, όσο και σε 1.0% κ.ο. Ο λόγος θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{CT}) επηρεάζεται από το κ.ο. ποσοστό, το είδος και την μορφή των ινών. Συγκεκριμένα, ο λόγος θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{CT}) τείνει να αυξηθεί με την αύξηση του ποσοστού των ινών κ.ο.

Στον **Πίνακα 14** και στο ραβδόγραμμα του **Σχήματος 67**, παρουσιάζεται για κάθε σύνθεση σκυροδέματος η απορροφούμενη ενέργεια των δοκιμών μέχρι τη μετατόπιση των 5000 μm κατόπιν υπολογισμού σύμφωνα με την μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 1.2.3.

Πίνακας 14: Απορροφούμενη ενέργεια συνθέσεων.

| Δοκίμιο | Απορρ.Ενεργ. | M.T. | cv% |
|-----------|--------------|-------|------|
| NC A | 0.074 | 0.083 | 0.85 |
| NC B | 0.091 | | |
| MC A | 0.020 | 0.035 | 1.50 |
| MC B | 0.050 | | |
| SF 0.5 A | 0.177 | 0.174 | 0.35 |
| SF 0.5 B | 0.170 | | |
| SF 1.0 A | 0.250 | 0.243 | 0.70 |
| SF 1.0 B | 0.236 | | |
| PFS 0.5 A | 0.151 | 0.149 | 0.25 |
| PFS 0.5 B | 0.146 | | |
| PFS 1.0 A | 0.134 | 0.152 | 1.80 |
| PFS 1.0 B | 0.170 | | |
| PFC 0.5 A | 0.160 | 0.154 | 0.65 |
| PFC 0.5 B | 0.147 | | |
| PFC 1.0 A | 0.174 | 0.172 | 0.20 |
| PFC 1.0 B | 0.170 | | |



Σχήμα 67: Ραβδόγραμμα Μ.Τ. απορροφούμενης ενέργειας συνθέσεων.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή απορροφούμενης ενέργειας εμφανίστηκε στις συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες SF, τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο., όσο και σε ποσοστό 1.0% κ.ο. Η ελάχιστη τιμή απορροφούμενης ενέργειας εμφανίστηκε στις συνθέσεις με τις συνθετικές ίνες PFS τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο., όσο και σε ποσοστό 1.0%. Αναλυτικότερα, οι συνθέσεις SF 1.0 είχαν τη μεγαλύτερη απορροφούμενη ενέργεια από όλες και απορρόφησαν 40% μεγαλύτερη ενέργεια από τις συνθέσεις SF 0.5 για ίδια παραμόρφωση.

Οι συνθετικές ίνες PFS και PFC είχαν ανάλογη συμπεριφορά στη μηχανική καταπόνηση, σχετικά με την επίδραση του ποσοστού προσθήκης στην ενέργεια που απορροφάται κατά τη μηχανική καταπόνηση. Η ενέργεια που απορροφάται στις συνθέσεις αυτές ήταν της ίδιας τάξης (0.15).

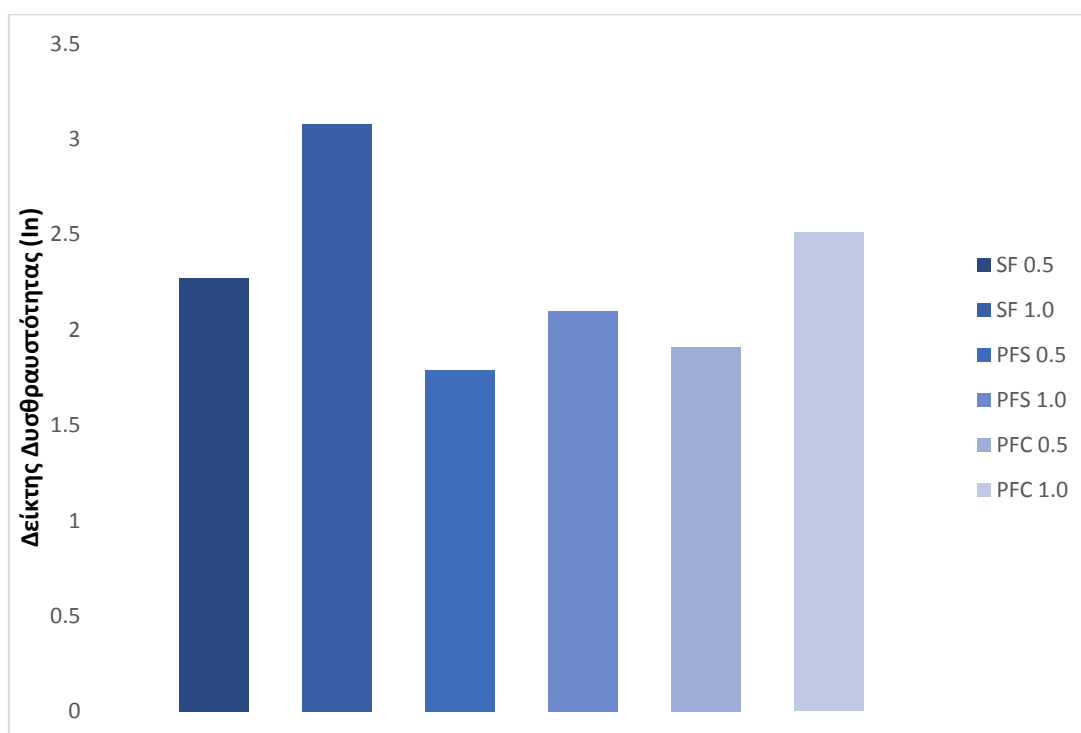
Οι συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες SF παρουσίασαν τα καλύτερα αποτελέσματα σχετικά με την απορροφούμενη ενέργεια, και τα αποτελέσματα φαίνεται να επηρεάζονται μόνο από το ποσοστό συμμετοχής τους. Άρα, στην περίπτωση των συνθέσεων με μεταλλικές ίνες η αύξηση του ποσοστού των ινών αυξάνει τη συνολική ενέργεια που απορροφάται κατά την μηχανική καταπόνηση μέσω της δοκιμής Barcelona. Αντίθετα, όσον αφορά στις συνθετικές ίνες, δεν φαίνεται να επηρεάζεται η συνολική ενέργεια που απορροφάται από το κ.ο ποσοστό και το είδος των ινών.

Σύμφωνα με το συντελεστή διακύμανσης (cv,%) τα πειραματικά αποτελέσματα είχαν μικρή διασπορά σε όλες τις συνθέσεις εκτός από το PFS 1.0 (1.8%).

Στον **Πίνακα 15** παρουσιάζονται, οι δείκτες δυσθραυστότητας μαζί με τη μέση τιμή (Μ.Τ.) και τον συντελεστή διακύμανσης. Ακολουθεί το **Σχήμα 68** στο οποίο απεικονίζονται γραφικά με την βοήθεια ραβδογράμματος ο δείκτης δυσθραυστότητας (In) κάθε σύνθεσης.

Πίνακας 15: Δείκτης δυσθραυστότητας και συντελεστές διακύμανσης ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με την γενικευμένη δοκιμή Barcelona.

| Δοκίμιο | Δείκτες δυσθρ. (In) | M.T. | cv% |
|-----------|---------------------|------|-------|
| SF 0.5 A | 2.27 | 2.27 | 0.02 |
| SF 0.5 B | 2.27 | | |
| SF 1.0 A | 3.13 | 3.08 | 4.75 |
| SF 1.0 B | 3.03 | | |
| PFS 0.5 A | 1.72 | 1.79 | 6.39 |
| PFS 0.5 B | 1.85 | | |
| PFS 1.0 A | 1.82 | 2.10 | 28.12 |
| PFS 1.0 B | 2.38 | | |
| PFC 0.5 A | 1.96 | 1.91 | 5.43 |
| PFC 0.5 B | 1.85 | | |
| PFC 1.0 A | 2.33 | 2.51 | 18.86 |
| PFC 1.0 B | 0.37 | | |



Σχήμα 68: Ραβδόγραμμα M.T. δεικτών δυσθραυστότητας (In).

Από τα αποτελέσματα του **Πίνακα 15** και του **Σχήματος 68** φαίνεται ότι την μέγιστη τιμή του δείκτη δυσθραυστότητας (In) εμφανίζουν οι συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες SF τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο, όσο και σε ποσοστό 1.0% κ.ο. Την ελάχιστη τιμή του δείκτη δυσθραυστότητας (In) εμφανίζουν οι συνθέσεις με τις συνθετικές ίνες PFS τόσο σε ποσοστό 0.5% κ.ο, όσο και σε ποσοστό 1.0% κ.ο.

Αναλυτικότερα, οι συνθέσεις SF 1.0 είχαν τη μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από όλες και συγκεκριμένα είχαν κατά 36% μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από τις συνθέσεις SF 0.5. Οι

συνθέσεις PFS 1.0 είχαν 17% μεγαλύτερες τιμές In από τις συνθέσεις PFS 0.5. Τέλος, η PFC 1.0 είχε 31% μεγαλύτερες τιμές In από το PFC 1.0. Συγκεκριμένα οι συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες SF εμφάνισαν τα καλύτερα αποτελέσματα In. Συνεπώς, ο δείκτης δυσθραυστότητας (In) επηρεάζεται από το ποσοστό κ.ο. και το είδος των ινών και συγκεκριμένα όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών κ.ο, τόσο αυξάνεται ο δείκτης δυσθραυστότητας (In).

Οι συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες SF 0.5 είχαν την μικρότερη διασπορά αποτελεσμάτων βάσει του συντελεστή διακύμανσης (0.02%).

3.2.4. Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας

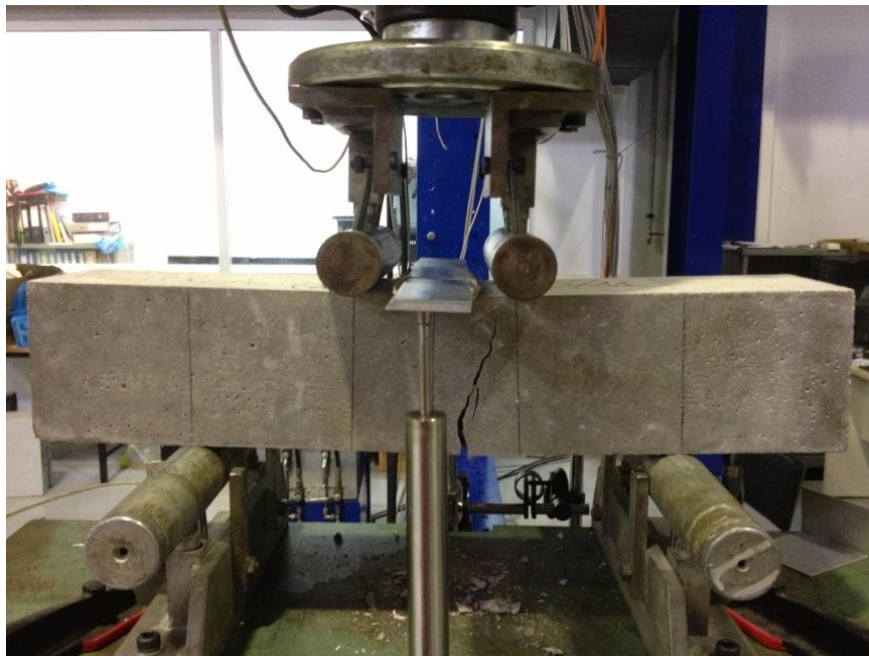
Για την ασφαλέστερη εξαγωγή συμπερασμάτων επιλέχθηκε ο έλεγχος τριών δοκιμίων από κάθε σύνθεση. Οι συνθέσεις που δεν περιείχαν ίνες παρουσίασαν ξαφνική αστοχία όταν έφτασαν στο μέγιστο φορτίο τους χωρίς να παρουσιάσουν μετελαστική συμπεριφορά. Αντιθέτως, οι συνθέσεις οι οποίες είχαν οπλισθεί με ίνες παρουσίασαν αξιόλογη μετελαστική συμπεριφορά μετά το μέγιστο φορτίο με τα πειραματικά δεδομένα να διαφέρουν ανάλογα με το είδος και την περιεκτικότητα των ινών.

Το μήκος κάμψης των δοκιμίων ήταν $L=300$ mm. Επομένως ενδιέφερε και καταγράφηκε η μηχανική συμπεριφορά των δοκιμίων (δυσθραυστότητα, παραμένουσα αντοχή, κτλ.) όταν το βέλος κάμψης ήταν $L/600=0.5$ mm και $L/150=2.00$ mm αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το πρότυπο, αναμένονται δυο τύποι μηχανικής συμπεριφοράς των δοκιμίων. Στον πρώτο τύπο, η φέρουσα ικανότητα του δοκιμίου αντιστοιχεί στο πρώτο μέγιστο φορτίο, ενώ στον δεύτερο τύπο η φέρουσα ικανότητα δεν αντιστοιχεί στο πρώτο μέγιστο φορτίο. Στη δεύτερη περίπτωση το δοκίμιο ανακτά την αντοχή του μετά την πρώτη αστοχία και φτάνει τελικά σε αστοχία σε φορτίο μεγαλύτερο από το αρχικό.

Στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκαν και οι δυο αυτές μορφές αστοχίας. Μάλιστα στο δεύτερο τύπο αστοχίας, το δοκίμιο συνέχισε να αναλαμβάνει φορτίο και μετά από 2 mm βέλος κάμψης, που ήταν το όριο του προτύπου που επιλέχθηκε, και παρουσίασε μέγιστη φέρουσα ικανότητα για βέλος κάμψης περίπου 2.5 mm.

Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων στα δοκίμια είχαν αναπτυχθεί μια ή δυο βασικές ρωγμές ανάλογα με τον τύπο συμπεριφοράς που είχε το εκάστοτε δοκίμιο. Η εικόνα που παρουσίασαν στο τέλος του πειράματος δίνεται στο **Σχήματα 69 και 70**.

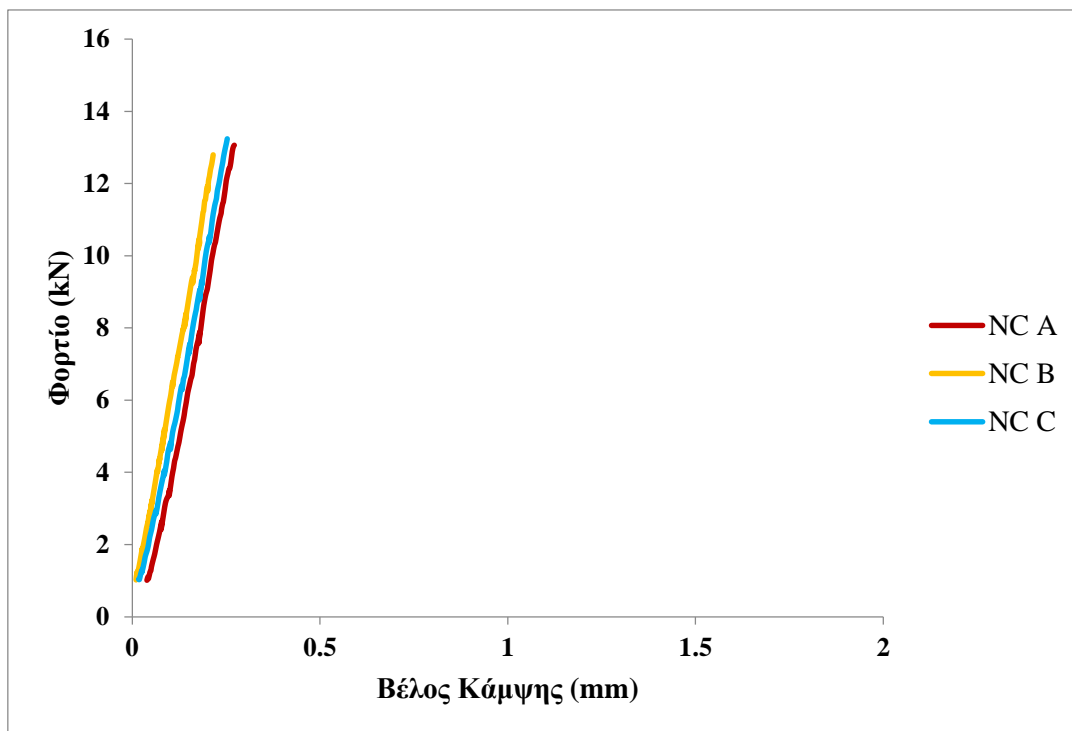


Σχήμα 69: Μορφή αστοχίας όταν η φέρουσα ικανότητα ορίζεται από την τιμή του πρώτου μέγιστου φορτίου.

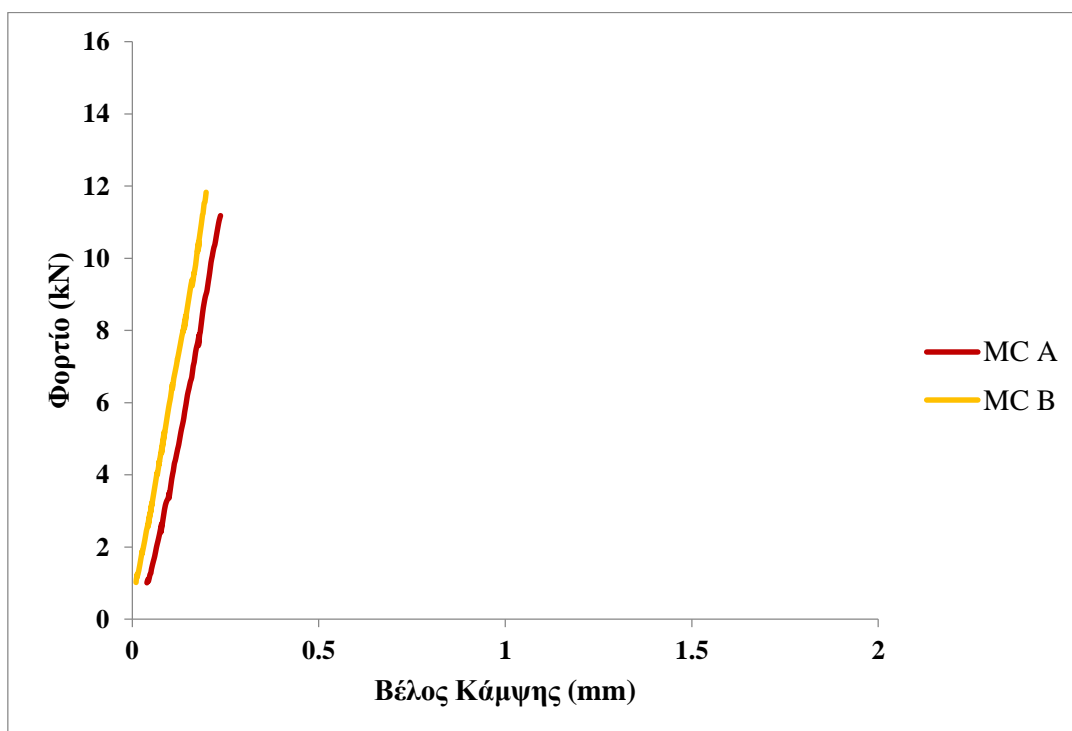


Σχήμα 70: Μορφή αστοχίας όταν η φέρουσα ικανότητα δεν ορίζεται από την τιμή του πρώτου μέγιστου φορτίου.

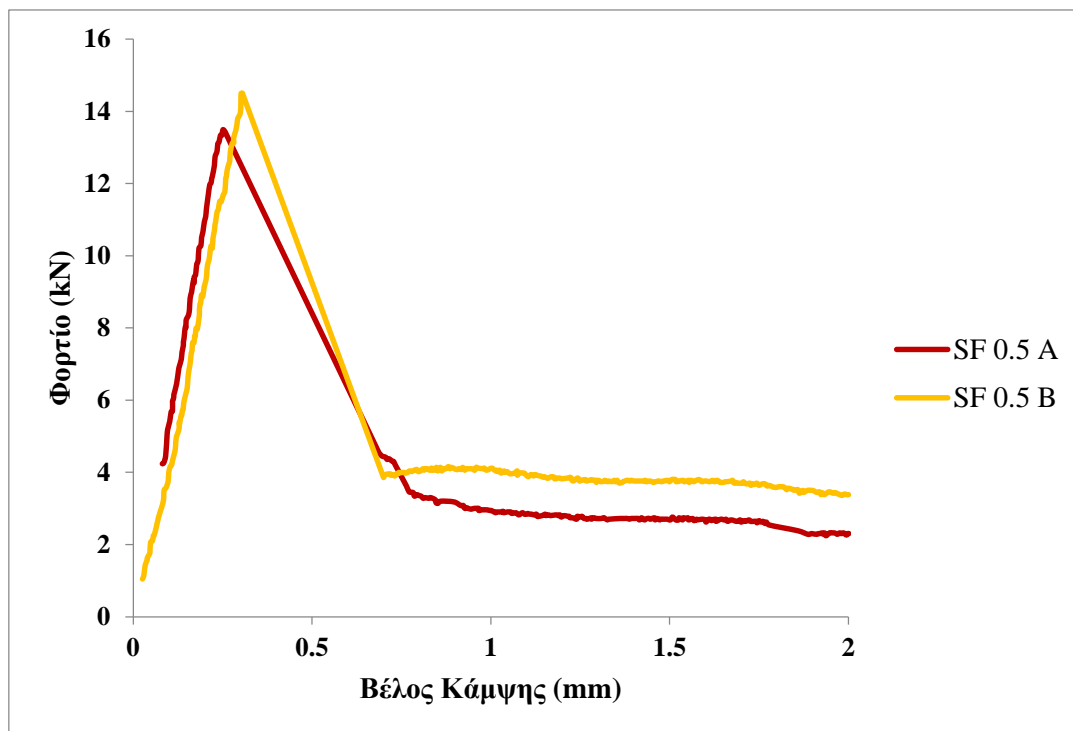
Στα **Σχήματα 71 έως 78** παρατίθενται τα διαγράμματα Φορτίου-Βέλους κάμψης όπως προέκυψαν από τη δοκιμή κάμψης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1609 και για ρυθμό μετατόπισης 0.06 mm/min. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και από τα τρία δοκίμια κάθε σύνθεσης (με εξαίρεση τις συνθέσεις MC και SF0.5 όπου παρουσιάζονται αποτελέσματα από δυο δοκίμια).



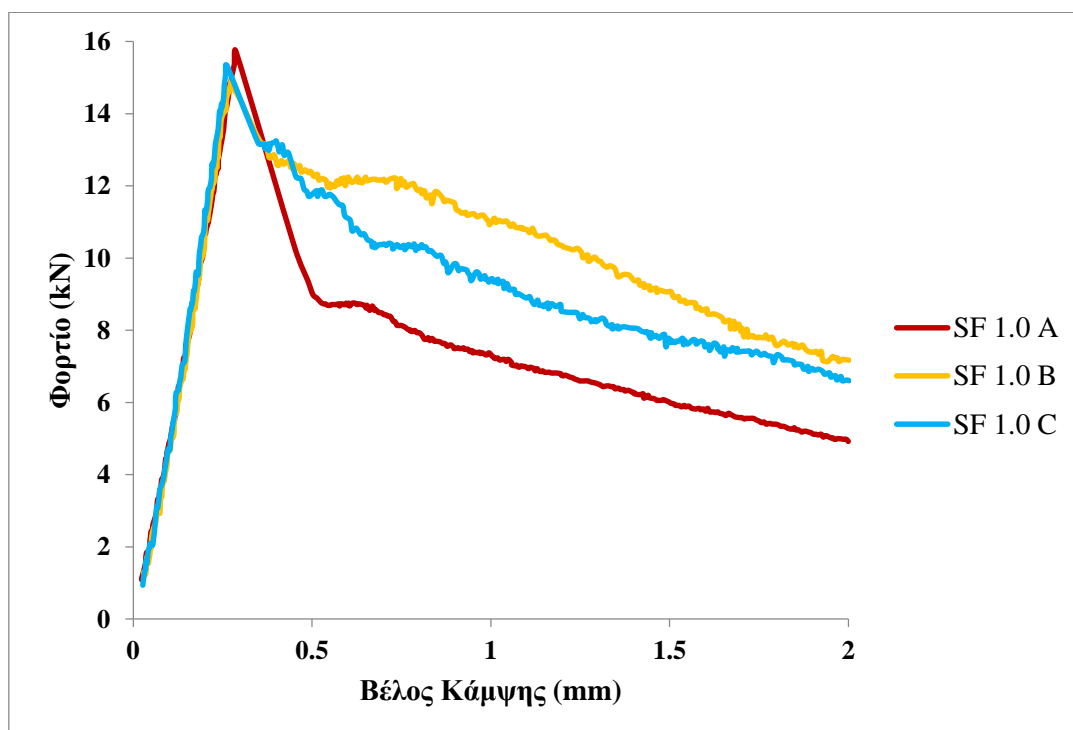
Σχήμα 71: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης άοπλου σκυροδέματος (NC).



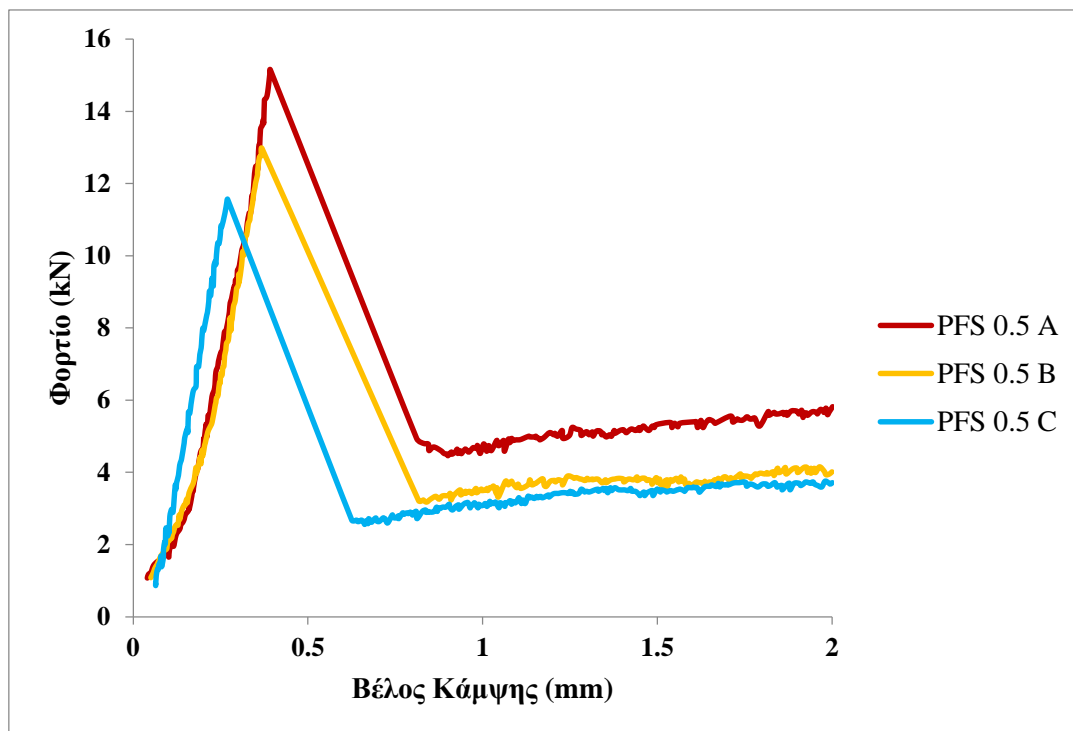
Σχήμα 72: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης άοπλου σκυροδέματος με μετακαολίνη (MC).



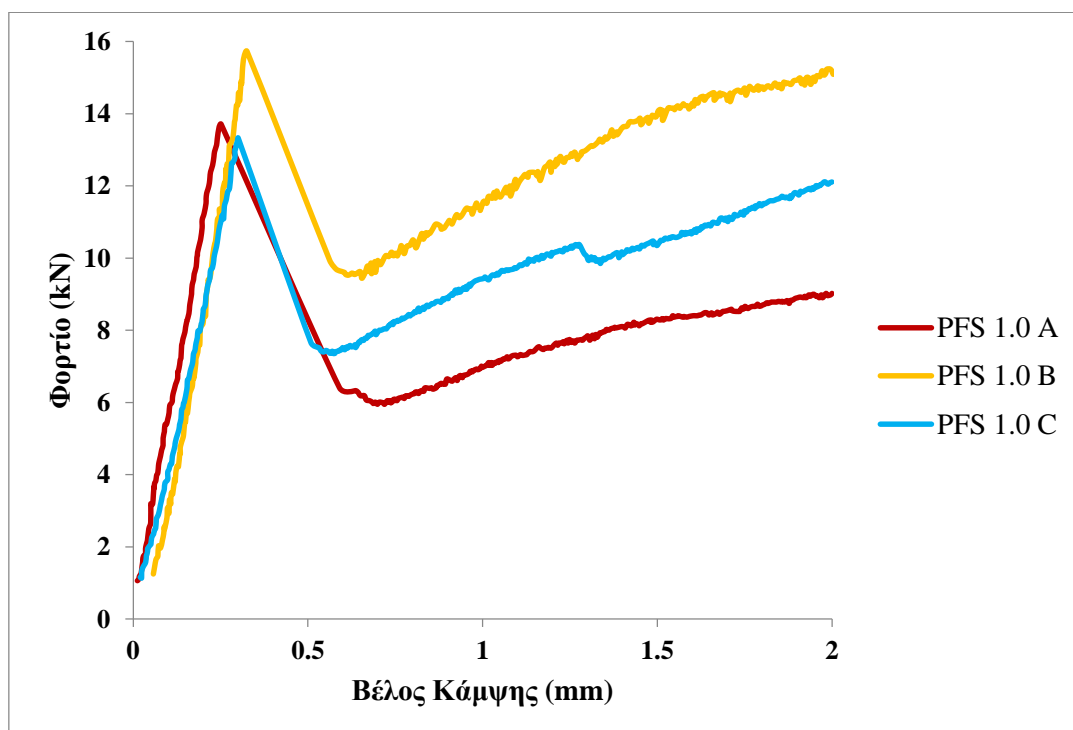
Σχήμα 73: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (SF 0.5).



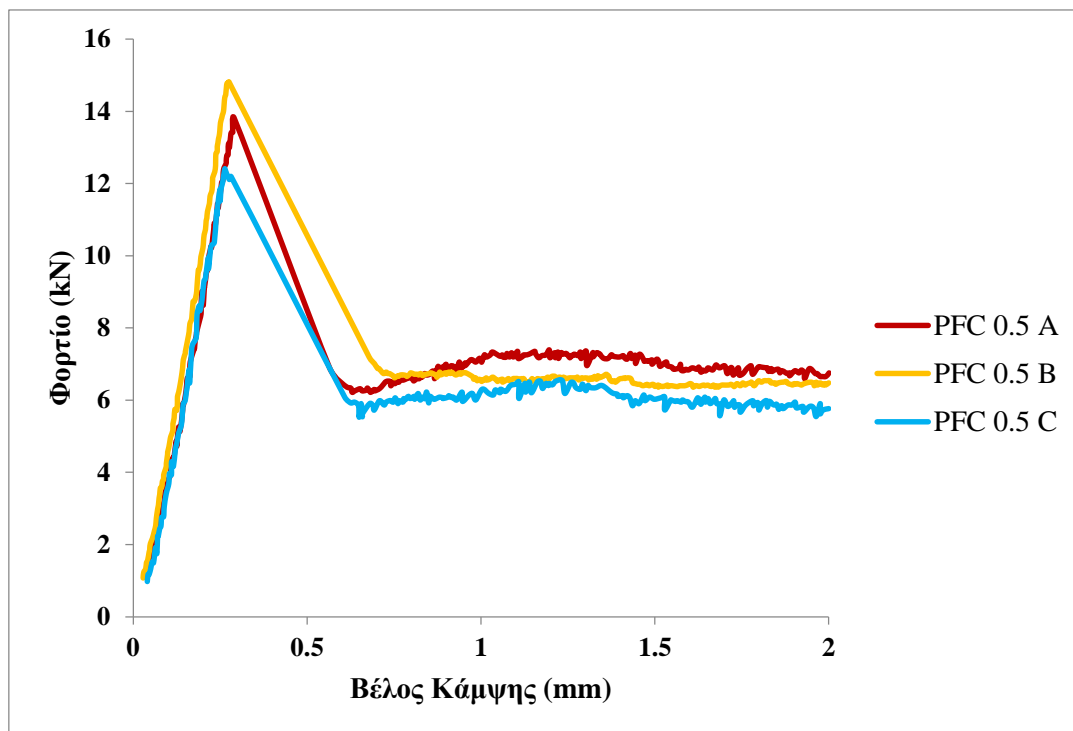
Σχήμα 74: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (SF 1.0).



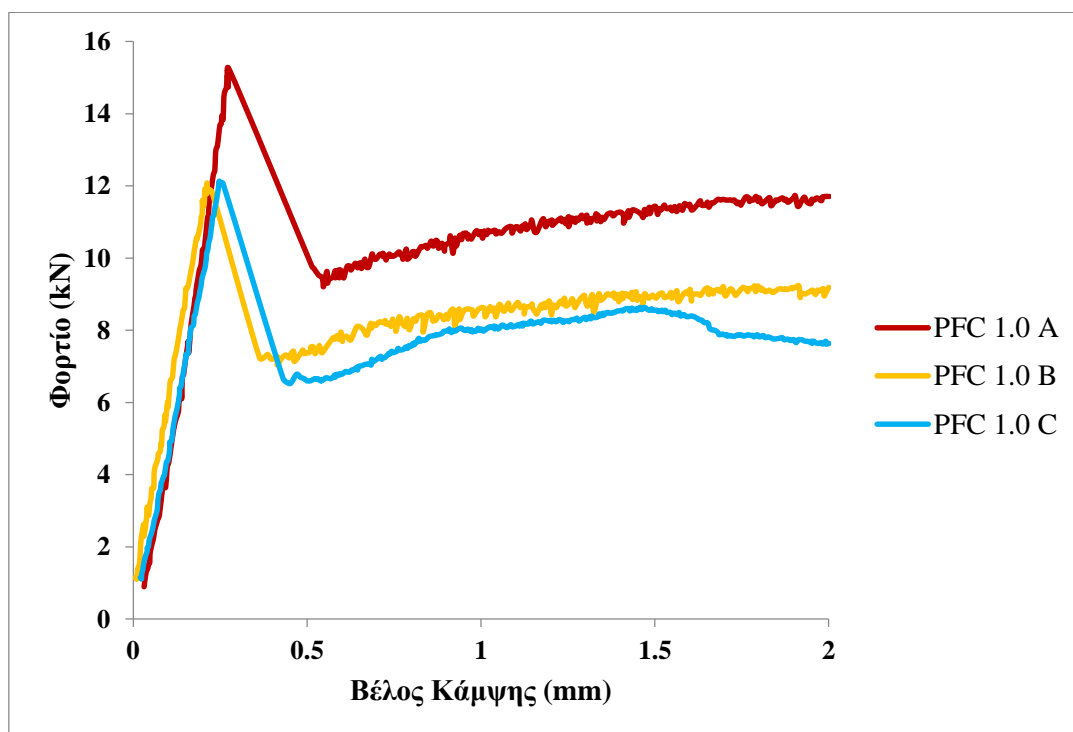
Σχήμα 75: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PFS 0.5).



Σχήμα 76: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (PFS 1.0).



Σχήμα 77: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 0.5% κ.ο. (PFC 0.5).



Σχήμα 78: Διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης ινοπλισμένου σκυροδέματος με συνθετικές ίνες σε ποσοστό 1.0% κ.ο. (PFC 1.0).

Από τα διαγράμματα Φορτίου-Βέλους κάμψης παρατηρείται ότι σε όλες τις δοκιμές το μέγιστο φορτίο ήταν περίπου το ίδιο και δεν επηρεάστηκε από την παρουσία, το ποσοστό ή το είδος των ινών. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς η μέγιστη αντοχή του δοκιμίου εξαρτάται από το ποσοστό των αδρανών, την περιεκτικότητα σε τσιμέντο και το λόγο N/T, τα οποία διατηρήθηκαν σταθερά για όλες τις συνθέσεις. Η επίδραση των ινών γίνεται εμφανής μετά την πρώτη αστοχία. Κάθε σύνθεση, ανάλογα με το ποσοστό και το είδος των ινών που περιέχει παρουσιάζει διαφορετική μετελαστική συμπεριφορά.

Τα δοκίμια που περιείχαν ίνες παρουσίασαν ομαλή συμπεριφορά μετά το μέγιστο φορτίο η οποία διατηρήθηκε μέχρι το τέλος του πειράματος. Αυτό που διαφοροποιείται ανάλογα με το ποσοστό και το είδος των ινών είναι το φορτίο που μπορεί να παραλάβει το δοκίμιο μετά την πρώτη αστοχία αλλά και η δυνατότητα ή μη, αύξησης του πρώτου μέγιστου φορτίου. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια με συνθετικές ίνες τη στιγμή της αστοχίας παρουσιάζουν μια ακαριαία ανάπτυξη ρωγμής, (η οποία συνοδεύεται από ένα δυνατό ήχο) κατά την εκτέλεση του πειράματος ενώ στα γραφήματα εμφανίζεται ως ένα μεγάλο άλμα στην καμπύλη φορτίου-βέλους κάμψης. Κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε στα δοκίμια με μεταλλικές ίνες και ποσοστό 1% (SF1.0) ενώ παρατηρήθηκε σε μικρότερο βαθμό στα δοκίμια με μεταλλικές ίνες και ποσοστό 0.5% (SF0.5).

Όσον αφορά τη δυνατότητα διατήρησης ή αύξησης της φέρουσας ικανότητας μετά την αστοχία, στα δοκίμια με μεταλλικές ίνες δεν καταγράφηκε τέτοια ικανότητα. Συγκεκριμένα, τα δοκίμια SF0.5 διατήρησαν το φορτίο στο οποίο ισορρόπησαν μετά την αστοχία μέχρι το τέλος της δοκιμής, ενώ τα δοκίμια SF1.0 παρουσίασαν σταδιακή μείωση του παραλαμβανόμενου φορτίου.

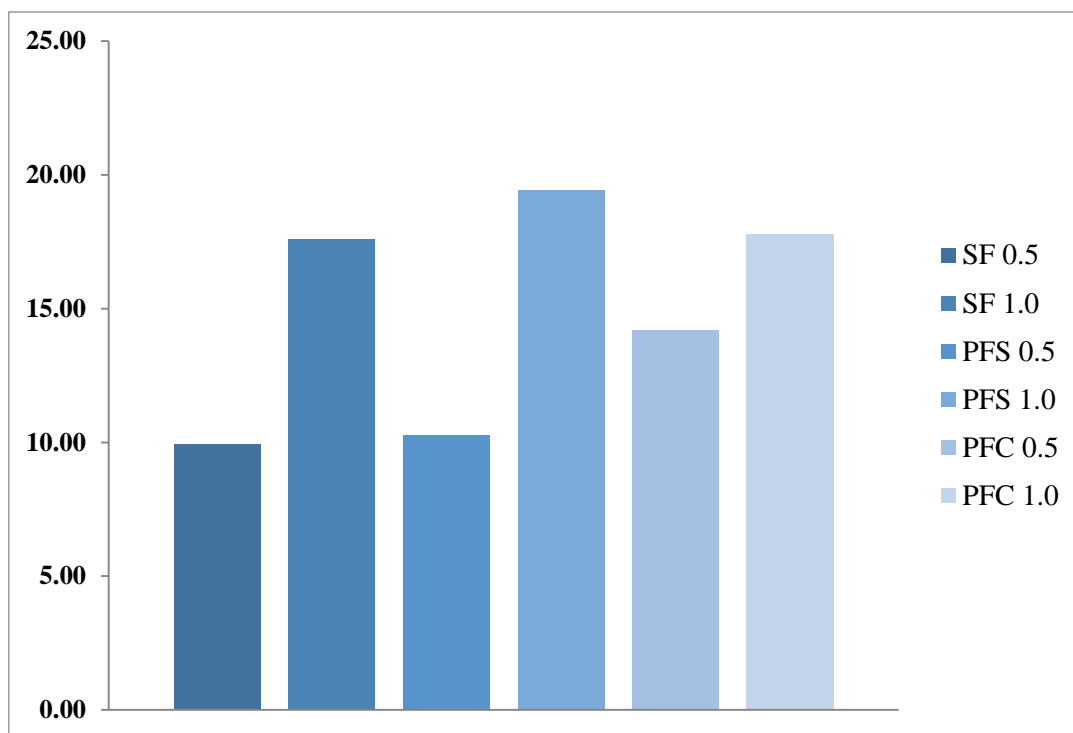
Τα δοκίμια που περιείχαν συνθετικές ίνες παρουσίασαν την ικανότητα να αυξάνουν το παραλαμβανόμενο φορτίο μετά την αστοχία. Η ικανότητα αυτή εμφανίστηκε σε μικρό βαθμό στις συνθέσεις με ποσοστό 0.5% ενώ αυξήθηκε σημαντικά στις συνθέσεις με ποσοστό 1.0%. Αναλυτικά, τα δοκίμια PFS 0.5 παρουσίασαν μια μικρή αύξηση του ασκούμενου φορτίου κατά 2 kN ενώ τα δοκίμια PFC0.5 διατήρησαν σταθερό το φορτίο μέχρι το τέλος του πειράματος. Τα δοκίμια PFC1.0 μπόρεσαν να αυξήσουν το παραλαμβανόμενο φορτίο μέχρι και 3 kN ενώ τα δοκίμια PFS1.0 παρουσίασαν μια εντυπωσιακή αύξηση του φορτίου μέχρι και 5 kN. Για τη συγκεκριμένη σύνθεση, συνεχίστηκε η καταγραφή της αύξησης του παραλαμβανόμενου φορτίου και μετά τα 2.00 mm βέλους κάμψης, που προβλέπει το πρότυπο. Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν πως τα δοκίμια PFS1.0 ανέκτησαν την αντοχή τους και οδηγήθηκαν σε δεύτερη αστοχία για φορτίο μεγαλύτερο από αυτό της πρώτης αστοχίας. Αυτή η συμπεριφορά προβλέπεται από το πρότυπο της δοκιμής, αλλά στα πλαίσια του πειράματος, δηλαδή για βέλος κάμψης μέχρι 2.00 mm. Στην παρούσα εργασία αυτή η συμπεριφορά παρατηρήθηκε αρκετά αργότερα (περίπου στα 2.5mm) και χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη συμπεριφορά περιγράφεται και στη βιβλιογραφία, όπου η επίδραση από την προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα παρατηρείται στη συμπεριφορά του δοκιμίου μετά τη ρηγμάτωση. Με την αύξηση των ινών η μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος, κατά την κάμψη, αλλάζει και καταγράφεται σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας. Συγκεκριμένα, οι Mobasher, Bakhshi και Barsby (2014) αναφέρουν πως έχουμε μετάβαση της συμπεριφοράς από "strain softening" σε "strain hardening" καθώς ενεργοποιείται ο μηχανισμός λειτουργίας των ινών.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πίνακες με τα αριθμητικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών μεγεθών της δοκιμής σε κάμψη και τα αντίστοιχα ραβδογράμματα λαμβάνοντας ως αντιπροσωπευτική τιμή για κάθε σύνθεση τη μέση τιμή. Πρώτα παρουσιάζεται η δυσθραυστότητα (T) η οποία υπολογίστηκε στο τέλος της δοκιμής για βέλος κάμψης $L/150=2.00$ mm (Πίνακας 16), και στη συνέχεια παρουσιάζεται η παραμένουσα

αντοχή (f) για βέλος κάμψης L/600=0.5 mm και L/600=2.00 mm (Πίνακας 17 & 18 αντίστοιχα).

Πίνακας 16: Δυσθραυστότητα δοκιμίων ($T_{100,2.0}$) ινοπλισμένου σκυροδέματος, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | $T_{100,2.0}$ | M.O. | cv(%) |
|-----------|---------------|-------|-------|
| SF 0.5 A | 9.21 | 9.93 | 10.33 |
| SF 0.5 B | 10.66 | | |
| SF 1.0 A | 14.85 | 17.59 | 14.39 |
| SF 1.0 B | 19.84 | | |
| SF 1.0 C | 18.07 | | |
| PFS 0.5 A | 12.59 | 10.28 | 20.89 |
| PFS 0.5 B | 9.89 | | |
| PFS 0.5 C | 8.35 | | |
| PFS 1.0 A | 15.93 | 19.42 | 19.69 |
| PFS 1.0 B | 23.50 | | |
| PFS 1.0 C | 18.83 | | |
| PFC 0.5 A | 14.56 | 14.21 | 7.07 |
| PFC 0.5 B | 14.99 | | |
| PFC 0.5 C | 13.07 | | |
| PFC 1.0 A | 21.04 | 17.78 | 16.32 |
| PFC 1.0 B | 16.80 | | |
| PFC 1.0 C | 15.49 | | |



Σχήμα 79: Μέση τιμή δυσθραυστότητας (T_{100,2.0}) όλων των συνθέσεων.

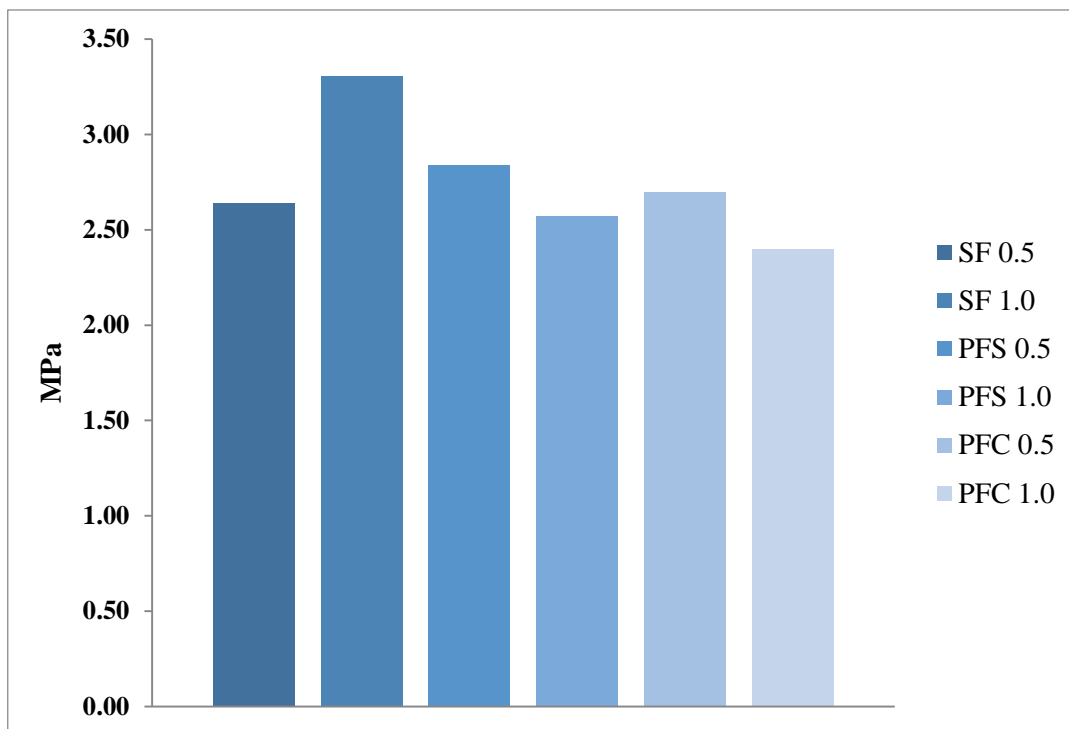
Όπως γίνεται φανερό από τον **Πίνακα 16** και το ραβδόγραμμα του **Σχήματος 79**, η μεγαλύτερη τιμή της δυσθραυστότητας παρατηρείται στη σύνθεση PFS1.0 ενώ η μικρότερη στη σύνθεση SF0.5. Αυτό που γίνεται άμεσα φανερό, είναι ότι δυσθραυστότητα αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού των ινών ανεξάρτητα από το είδος τους. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού των ινών από 0.5% σε 1.0% κ.ο. είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας από 25.1% έως και 88.9%. Το μικρότερο ποσοστό αύξησης παρουσιάστηκε για τις συνθετικές ίνες PFC, ενώ το μεγαλύτερο για τις συνθετικές ίνες PFS. Οι μεταλλικές ίνες SF συμπεριφέρθηκαν εξίσου καλά καθώς με την αύξηση του ποσοστού των ινών υπήρξε αντίστοιχη αύξηση της δυσθραυστότητας κατά 77.1%. Όπως παρατηρείται η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας. Αυτό που φαίνεται ωστόσο να επηρεάζει περισσότερο είναι το σχήμα και όχι το υλικό καθώς για τις συνθετικές ίνες παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη και η μικρότερη αύξηση, ενώ και οι μεταλλικές ίνες παρουσίασαν αξιοσημείωτη αύξηση.

Συγκριτικά με το είδος των ινών, παρατηρείται ότι για ποσοστό 0.5% κ.ο., η μεγαλύτερη δυσθραυστότητα παρουσιάστηκε για τις συνθετικές ίνες PFC ενώ οι συνθετικές ίνες PFS και οι μεταλλικές SF παρουσίασαν μικρότερη τιμή κατά 27.7% και 30.1% αντίστοιχα. Για ποσοστό 1.0% κ.ο., η μεγαλύτερη δυσθραυστότητα παρουσιάστηκε για τις συνθετικές ίνες PFS ενώ οι συνθετικές ίνες PFC και οι μεταλλικές SF παρουσίασαν μικρότερη τιμή κατά 8.4% και 9.4% αντίστοιχα. Αυτό που γίνεται φανερό είναι πως οι συνθετικές ίνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή δυσθραυστότητας σε σχέση με τις μεταλλικές για το ίδιο ποσοστό προσθήκης. Παρατηρείται ωστόσο, πως όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών η διαφορά μεταξύ των διαφορετικών ως προς τη δυσθραυστότητα ειδών τείνει να μειώνεται. Το ποσοστό του 1.0% κ.ο. φαίνεται να είναι το βέλτιστο καθώς η διαφορά μεταξύ των συνθέσεων είναι μικρότερη από 10%

Οι επιμέρους τιμές της κάθε σύνθεσης παρουσιάζουν ανομοιογένεια καθώς έχουν συντελεστή διακύμανσης μεγαλύτερο από 10%. Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση με συνθετικές ίνες PFC.

Πίνακας 17: Παραμένουσα αντοχή ($f_{100,0.5}$) δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος για βέλος κάμψης 0.5 mm, μέση τιμή (M.T) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | $f_{100,0.5}$ (MPa) | M.O. | cv(%) |
|-----------|---------------------|------|-------|
| SF 0.5 A | 2.52 | 2.64 | 6.82 |
| SF 0.5 B | 2.77 | | |
| SF 1.0 A | 2.70 | 3.31 | 16.07 |
| SF 1.0 B | 3.68 | | |
| SF 1.0 C | 3.54 | | |
| PFS 0.5 A | 3.76 | 2.84 | 35.93 |
| PFS 0.5 B | 3.03 | | |
| PFS 0.5 A | 1.74 | | |
| PFS 1.0 A | 2.50 | 2.57 | 12.07 |
| PFS 1.0 B | 2.91 | | |
| PFS 1.0 C | 2.30 | | |
| PFC 0.5 A | 2.53 | 2.70 | 15.27 |
| PFC 0.5 B | 3.17 | | |
| PFC 0.5 C | 2.39 | | |
| PFC 1.0 A | 2.99 | 2.40 | 22.19 |
| PFC 1.0 B | 2.21 | | |
| PFC 1.0 C | 1.98 | | |



Σχήμα 80: Μέση τιμή παραμένουσας αντοχής ($f_{100,0.5}$) όλων των συνθέσεων.

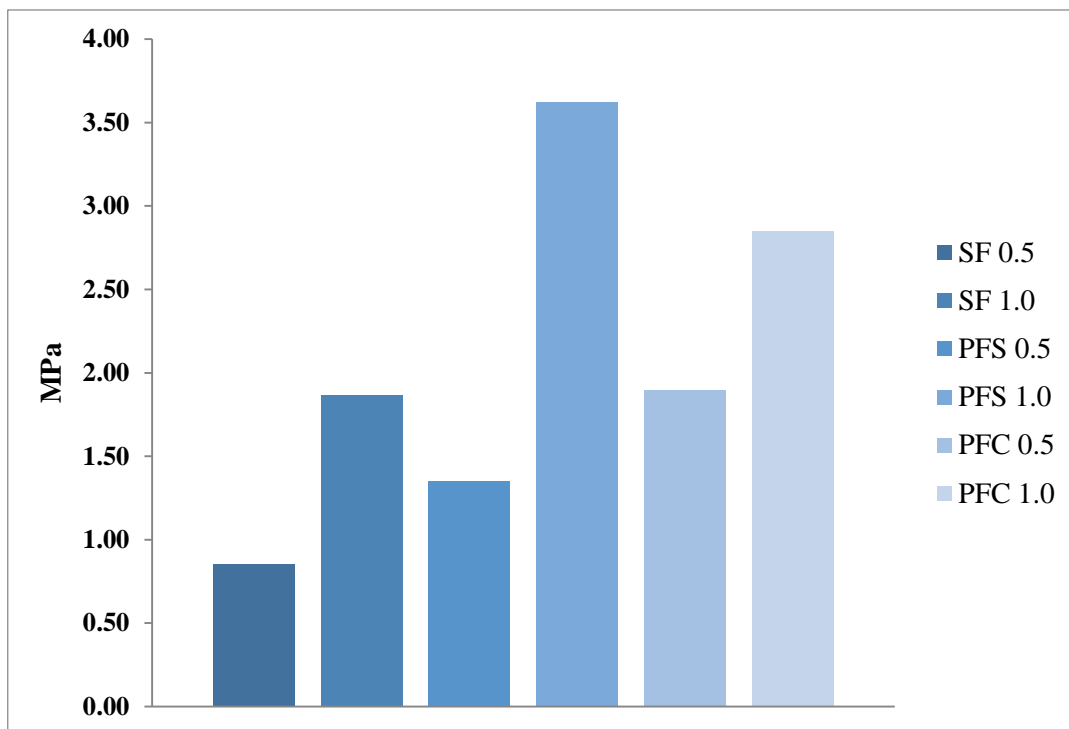
Από τον **Πίνακα 17**, γίνεται φανερό πως η παραμένουσα αντοχή στα 0.5 mm βέλους κάμψης είναι σχεδόν η ίδια για όλες τις συνθέσεις καθώς η τιμή της κυμαίνεται από 2.40 έως 3.31 MPa. Κάτι τέτοιο είναι λογικό καθώς στα 0.5 mm όλα τα δοκίμια βρίσκονται κοντά στη στιγμή της πρώτης αστοχίας. Επομένως δεν έχει προλάβει να ενεργοποιηθεί η λειτουργία τους και να επηρεάσει την δοκιμή το ποσοστό ή το είδος των ιών που περιέχονται στο δοκίμιο.

Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί πως με την αύξηση του ποσοστού των ιών από 0.5% σε 1.0% κ.ο. παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά για τις συνθέσεις που περιέχουν μεταλλικές ίνες από τις συνθέσεις με συνθετικές ίνες. Συγκεκριμένα παρατηρείται αύξηση της παραμένουσας αντοχής κατά 25% στα δοκίμια με μεταλλικές ίνες SF, ενώ αντίθετα παρατηρείται μείωση στα δοκίμια με συνθετικές ίνες PFS και PFC κατά 9% και 11% αντίστοιχα. Όσον αφορά τις συνθέσεις με ίδιο ποσοστό ιών, οι συνθέσεις με ποσοστό 0.5% κ.ο. παρουσιάζουν ελάχιστη διαφορά στην τιμή της παραμένουσας αντοχής (περίπου 7.0%), ενώ οι συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. παρουσιάζουν αρκετά μεγαλύτερη διαφορά καθώς η σύνθεση SF1.0 κατέγραψε παραμένουσα αντοχή 30% μεγαλύτερη από αυτή των συνθέσεων PFS1.0 και PFC1.0.

Οι τιμές της παραμένουσας αντοχής των επιμέρους δοκιμίων ανά σύνθεση παρουσιάζουν ανομοιογένεια, καθώς ο συντελεστής διακύμανσης εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες του 10%. Εξάιρεση αποτελεί η σύνθεση SF0.5

Πίνακας 18: Παραμένονσα αντοχή ($f_{100,2.0}$) δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος για βέλος κάμψης 2 mm, μέση τιμή (Μ.Τ.) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%) της κάθε σύνθεσης.

| Δοκίμιο | $f_{100,2.0}$ (MPa) | M.O. | cv(%) |
|------------------|---------------------------------------|-------------|--------------|
| SF 0.5 A | 0.69 | 0.85 | 26.89 |
| SF 0.5 B | 1.01 | | |
| SF 1.0 A | 1.48 | 1.87 | 18.78 |
| SF 1.0 B | 2.15 | | |
| SF 1.0 C | 1.98 | | |
| PFS 0.5 A | 1.74 | 1.35 | 25.18 |
| PFS 0.5 B | 1.20 | | |
| PFS 0.5 A | 1.11 | | |
| PFS 1.0 A | 2.71 | 3.62 | 25.14 |
| PFS 1.0 B | 4.53 | | |
| PFS 1.0 C | 3.63 | | |
| PFC 0.5 A | 2.03 | 1.90 | 8.07 |
| PFC 0.5 B | 1.94 | | |
| PFC 0.5 C | 1.73 | | |
| PFC 1.0 A | 3.51 | 2.85 | 21.66 |
| PFC 1.0 B | 2.75 | | |
| PFC 1.0 C | 2.29 | | |



Σχήμα 81: Μέση τιμή παραμένουσας αντοχής ($f_{100,2.0}$) όλων των συνθέσεων.

Όπως γίνεται φανερό από τον **Πίνακα 18** και το ραβδόγραμμα του **Σχήματος 81**, η μεγαλύτερη τιμή της παραμένουσας αντοχής παρατηρείται στη σύνθεση PFS1.0 ενώ η μικρότερη στη σύνθεση SF0.5.

Αυτό που γίνεται άμεσα φανερό, είναι ότι η παραμένουσα αντοχή στο τέλος της δοκιμής ($L/150=2.00$ mm βέλος κάμψης) επηρεάζεται σημαντικά από την αύξηση του ποσοστού των ινών. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού των ινών από 0.5% σε 1.0% κ.ο., είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραμένουσας αντοχής από 50% έως και 168%. Το μικρό ποσοστό αύξησης παρουσιάστηκε για τις συνθετικές ίνες PFC ενώ το μεγάλο για τις συνθετικές ίνες PFS. Οι μεταλλικές ίνες SF συμπεριφέρθηκαν εξίσου καλά καθώς με την αύξηση του ποσοστού των ινών υπήρξε αντίστοιχη αύξηση της παραμένουσας αντοχής κατά 120%. Όπως παρατηρείται, η αύξηση του ποσοστού των ινών επηρεάζει την παραμένουσα αντοχή αντίστοιχα με τη δυσθραυστότητα και ως εκ τούτου εξάγονται αντίστοιχα συμπεράσματα. Αυτό σημαίνει πως η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της παραμένουσας αντοχής κατά ένα πολύ μεγάλο βαθμό. Αυτό που φαίνεται ωστόσο να επηρεάζει περισσότερο είναι το σχήμα και όχι το υλικό καθώς για τις συνθετικές ίνες παρουσιάστηκε η μεγαλύτερη και η μικρότερη αύξηση, ενώ και οι μεταλλικές ίνες παρουσίασαν αξιοσημείωτη αύξηση.

Συγκριτικά με το είδος των ινών, παρατηρείται ότι για ποσοστό 0.5% κ.ο., η μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή καταγράφεται για τις συνθετικές ίνες PFC ενώ για τις συνθετικές ίνες PFS και τις μεταλλικές SF καταγράφηκε μικρότερη τιμή, κατά 28.9% και 55.2% αντίστοιχα. Για ποσοστό 1.0% κ.ο., η μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή παρουσιάστηκε για τις συνθετικές ίνες PFS ενώ οι συνθετικές ίνες PFC και οι μεταλλικές SF παρουσίασαν μικρότερη τιμή κατά 21.3% και 48.3% αντίστοιχα. Από τα προηγούμενα γίνεται φανερό πως οι συνθετικές ίνες

έχουν την τάση να παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή παραμένουσας αντοχής σε σχέση με τις μεταλλικές για το ίδιο ποσοστό.

Οι τιμές της παραμένουσας αντοχής των επιμέρους δοκιμίων ανά σύνθεση παρουσιάζουν ανομοιογένεια, καθώς ο συντελεστής διακύμανσης εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες του 10%. Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση PFC0.5.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 Μηχανικές Ιδιότητες

Από τη δοκιμή σε θλίψη που πραγματοποιήθηκε προέκυψαν τα αποτελέσματα των μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέσεων που αφορούν στη θλιπτική αντοχή, στο μέτρο ελαστικότητας και στο λόγο παραμορφώσεων

Η **Θλιπτική αντοχή**, δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την παρουσία των ινών. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως τα δοκίμια με μεταλλικές ίνες SF και τα δοκίμια με συνθετικές ίνες PFC παρουσίασαν ελαφρώς μικρότερη θλιπτική αντοχή από τη σύνθεση που δεν περιείχε ίνες, ενώ τα δοκίμια με συνθετικές ίνες PFS ανέπτυξαν παρόμοια αντοχή

Το **Μέτρο ελαστικότητας**, δεν επηρεάστηκε από την παρουσία των ινών σχεδόν καθόλου. Σε όλες οι συνθέσεις το μέτρο ελαστικότητας ήταν της τάξης των 30 GPa και οι διαφορές που παρατηρήθηκαν ήταν της τάξης του 1 GPa.

Ο **Λόγος Παραμορφώσεων**, επηρεάζεται σημαντικά από την παρουσία ινών. Σε όλες τις συνθέσεις (εκτός από τη PFS0.5) προέκυψε μείωση του λόγου παραμόρφωσης, με τα ποσοστά της μείωσης να κυμαίνονται από 35% έως 60%.

4.2 Γενικευμένη δοκιμή Barcelona

Από την γενικευμένη δοκιμή Barcelona (BCN-G) που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, καθορίστηκε η αντοχή της πρώτης κορυφής (f_{ct}), η παραμένουσα τάση (f_{ctR_x}), ο λόγος θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{ct}), το συνολικό έργο και οι δείκτες δυσθραυστότητας (I_n).

Όσον αφορά στην αντοχή της πρώτης κορυφής (f_{ct}) το ποσοστό κ.ο. των ινών επηρεάζει την αντοχή της πρώτης κορυφής, ενώ το είδος και η μορφή των ινών δεν έχουν σημαντική επιρροή. Αναλυτικότερα, με την αύξηση του ποσοστού των ινών η αντοχή της πρώτης κορυφής (f_{ct}) ελαφρώς ελαττώνεται.

Στη περίπτωση της παραμένουσας τάσης (f_{ctR_x}), το κ.ο ποσοστό των ινών και το είδος την επηρεάζουν και συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το κ.ο ποσοστό των ινών, τόσο αυξάνεται η παραμένουσα τάση.

Ο λόγος θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{ct}) επηρεάζεται από το κ.ο. ποσοστό, το είδος και την μορφή των ινών. Συγκεκριμένα, ο λόγος θλιπτικής αντοχής προς αντοχή πρώτης κορυφής (f_c/f_{ct}) τείνει να αυξηθεί με την αύξηση του ποσοστού των ινών κ.ο.

Η ενέργεια που απορροφάται κατά την μηχανική καταπόνηση μέσω της δοκιμής Barcelona στην περίπτωση των συνθέσεων με μεταλλικές ίνες αυξάνεται με την αύξηση του κ.ο. ποσοστού των ινών. Αντίθετα, όσον αφορά στις συνθετικές ίνες, δεν φαίνεται η απορροφούμενη ενέργεια να επηρεάζεται από το κ.ο ποσοστό και το είδος των ινών

Ο δείκτης δυσθραυστότητας (I_n) επηρεάζεται από το ποσοστό κ.ο. και το είδος των ινών. Όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών κ.ο, τόσο αυξάνεται ο δείκτης δυσθραυστότητας (I_n). Η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη I_n καταγράφεται για τις συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες.

4.3 Δοκιμή κάμψης για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας

Από τη δοκιμή σε κάμψη που πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1609, προσδιορίστηκαν η δυσθραυστότητα και η παραμένουσα αντοχή των δοκιμίων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Η ομοιογένεια των αποτελεσμάτων για την κάθε σύνθεση

αξιολογήθηκε βάσει του συντελεστή διακύμανσης (cv) και παρατηρήθηκαν τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Η **Δυσθραυστότητα** των δοκιμίων, επηρεάζεται σημαντικά από το ποσοστό και το είδος των ινών. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού των ινών από 0.5% σε 1.0% κ.ο. είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας έως και 90%. Αυτό που φαίνεται ωστόσο να επηρεάζει περισσότερο είναι το σχήμα και όχι το υλικό ενώ το ποσοστό του 1.0% κ.ο. φαίνεται να είναι το βέλτιστο, καθώς η διαφορά μεταξύ των συνθέσεων είναι μικρότερη από 10%.

Η **Παραμένουσα αντοχή** των δοκιμίων, επηρεάζεται και αυτή από το ποσοστό και το είδος των ινών, αλλά διαφέρει ο βαθμός επιρροής ανάλογα με το βέλος κάμψης στο οποίο μελετάται. Για βέλος κάμψης $L/150=2.00$ mm που αντιστοιχεί στο τέλος της δοκιμής, οι συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. παρουσίασαν τιμές παραμένουσας τάσης αντίστοιχες με αυτές της φέρουσας ικανότητας.

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, pp.429–441.

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, pp.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), pp.121-133.

ASTM C 1609/C 1609M-05, 2006. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), ASTM, USA

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, pp.91-97.

Brandt Andrzej M., 2008. Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures*. 86:pp3-9. Available at: www.elsevier.com/locate/comstruct or <http://www.ScienceDirect.com>

Brugg Contec AG, MACROFIBER Concrix Bi component and high performance, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος, www.bruggcontec.com.

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:pp1053-1069. 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:pp592-600. Available at: <http://www.ScienceDirect.com>

Cengiz O., Turanli L., 2004. Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test, *Cement and Concrete Research*, 34, pp.1357-1364.

Chao S.-H., Karki N.B., Cho J.-S., and R.N. Waweru, 2012. In: Use of double punch test to evaluate the mechanical performance of fiber reinforced concrete. Gustavo J. Parra-Montesinos, Hans W. Reinhardt, A.E. Naaman, 2012. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. 6 pp 27-34. Available at: <http://www.Springer.com>

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, pp.3020-3025.

Kim Jihwan, Lee Gyu Pil, Moon Do Young, 2015. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test, *Construction and Building Materials*. 79:pp182-191. Available at: www.elsevier.com/locate/conbuildmat or <http://www.ScienceDirect.com>.

Mobasher B., Bakhshi M. and Barsby C., 2014. Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests. *Construction and Building Materials*, 70, pp.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, pp.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, pp.989-997.

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), pp.21-28.

Sika Hellas A.B.E.E, 2007. Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος, EN 206-1:2000. Available at: http://grc.sika.com/content/dam/Greece/Main/01_General/PUB_Documents/Concrete%20Handbook.pdf

Sika Hellas A.B.E.E., Sika® Fiber PP 940-50, συνθετικές μακροίνες για σκυρόδεμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.

Tabatabaei Z. S., Volz J. S., Keener D. I., Gliha B. P., 2013. Comparative impact behavior of four long carbon fiber reinforced concretes. *Materials and Design*, 55, pp.212-223.

Wang J., Banthia N., Zhang M., 2012. Effect of shrinkage reducing admixture on flexural behaviors of fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, 34, pp.443-450.

Yoo D., Shin H., Yang J., Yoon Y., 2013. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. *Composites*, 58(Part B), pp.122-133.

EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens.

Brandt Andrzej M. Brandt, 2008,. «Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering», *Composite Structures*. 86:pp3-9,. Available at: www.elsevier.com/locate/comstruct or <http://www.ScienceDirect.com> ScienceDirect.

Sergio Carmona Malatesta Sergio, Antonio Aguado de Cea Antonio, Climent Molins Borrell Climent, 2012,. «Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC.», *Materials and Structures*. 45:pp1053-1069,. Available at: <http://www.ScienceDirect.com>

Gustavo J. Parra-Montesinos, Hans W. Reinhardt, A.E. Naaman, 2012, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6 pp 27-34*, Chao S.-H., Karki N.B., Cho J.-S., and R.N. Waweru, 2012. In: «Use of double punch test to evaluate the mechanical performance of fiber reinforced concrete»,. S.-H. Chao, N.B. Karki, J.-S. Cho, and R.N. Waweru, 2012, Department of Civil Engineering, University of Texas at Arlington, USA, Gustavo J. Parra-Montesinos, Hans W. Reinhardt, A.E. Naaman, 2012. *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*. 6 pp 27-34. Available at: <http://www.Springer.com> Springer.

Carmona Malatesta Sergio, Aguado de Cea Antonio, Molins Borrell Climent, Sergio Carmona, Antonio Aguado, Climent Molins, 2013,. «Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test», *Construction and Building Materials*. 48:pp592-600,. Available at: <http://www.ScienceDirect.com> www.elsevier.com/locate/conbuildmat ή ScienceDirect.

Kim Jihwan Kim, Lee Gyu Pil Lee, Moon Do Young Moon, 2015,. Evaluation of mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete exposed to high temperatures by double-punch test, *Construction and Building Materials*. 79:pp182-191,. Available at: www.elsevier.com/locate/conbuildmat ή <http://www.ScienceDirect.com> ScienceDirect.

Sika Hellas A.B.E.E., Sika® Fiber PP 940-50, συνθετικές μακροΐνες για σκυρόδεμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.

Brugg Contec AG, MACROFIBER Concrix Bi component and high performance, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος, www.bruggcontec.com.

Sika Hellas A.B.E.E, 2007,. Εγχειρίδιο Τεχνολογίας Σκυροδέματος, EN 206-1:2000. Available at: http://grc.sika.com/content/dam/Greece/Main/01_General/PUB_Documents/Concrete%20Handbook.pdf

Βούκια Δήμητρα, 2013. Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη. Μεταπτυχιακή εργασία διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Γ. Ευστράτιος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Ενημερωτικό blog για μηχανικούς «Κατασκευή-Constructing and Design News»,. *Οπλισμένο Σκυρόδεμα*,. Available at: <http://kataskevnh.blogspot.gr>

Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος, *Ινοπλισμένο σκυρόδεμα*, http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/uses-concrete/paron_inoplismeno_skurodema

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

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