

## Μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος, μέσω των δοκιμών Barcelona και κάμψης τεσσάρων σημείων.

**Έλενα/Κομνηνού**

Πολιτικός Μηχανικός, MSc, [ekomninou@hotmail.com](mailto:ekomninou@hotmail.com)

**Παναγιώτης/Οικονόμου**

Πολιτικός Μηχανικός, MSc, [p.oikonomou88@gmail.com](mailto:p.oikonomou88@gmail.com)

**Ξενοφώντας/Λιγνός**

Δρ. Μηχανικός, ΕΔΙΠ, ΣΠΜ ΕΜΠ, [lignosx@central.ntua.gr](mailto:lignosx@central.ntua.gr)

**Εμμανουήλ/Βουγιούκας**

Λέκτορας, ΣΠΜ ΕΜΠ, [manolis@central.ntua.gr](mailto:manolis@central.ntua.gr)

**Ευστράτιος/Μπαδογιάννης**

Επ. Καθηγ., ΣΠΜ ΕΜΠ, [badstrat@central.ntua.gr](mailto:badstrat@central.ntua.gr)

### 1. Εισαγωγή

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα ορίζεται αυτό που συντίθεται από τσιμέντο, λεπτόκοκκα ή/και χονδρόκοκκα αδρανή και ασυνεχείς διακριτές ίνες. Οι ίνες έχουν μήκος λίγων εκατοστών και διάμετρο που είναι συνήθως κλάσματα του χιλιοστού. Κατά την παρασκευή του σκυροδέματος οι ίνες διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού και τοποθετούνται σε ποσοστό της τάξης του 1-3% του συνολικού όγκου. Κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα, γυαλί ή άνθρακα, ενώ υπάρχουν και συνθετικές ίνες (π.χ. πολυπροπυλενίου, πολυαιθυλενίου, πολυολεφινών κ.λ.π.). Οι ίνες ποικίλουν ως προς το σχήμα και τη 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 εφελκυστικής αντοχής. Αποτέλεσμα είναι κυρίως η αύξηση της δυσθραυστότητας του υλικού, δηλαδή της ικανότητας του να απορροφά ενέργεια κατά την παραμόρφωση.

Η δοκιμή κάμψης κυρίως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας και η δοκιμή πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C1609. Με τη συγκεκριμένη δοκιμή μελετάται η μετελαστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος καθώς μετράται η παραμένουσα εφελκυστική αντοχή και δύναται να εκτιμηθεί μέσω κατάλληλων δεικτών η δυσθραυστότητα.

Η δοκιμή Barcelona (BCN) επίσης χρησιμοποιείται για να αξιολογηθεί η επίδραση των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, μετά τη ρηγμάτωση. Πλεονέκτημα αυτής της δοκιμής έναντι άλλων πρότυπων δοκιμών είναι η χρήση μικρών δοκιμών και η μικρή διασπορά μεταξύ των αποτελεσμάτων. Η δοκιμή BCN είναι μια δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού που βασίζεται στην δοκιμή διπλής διάτρησης, η οποία προτάθηκε από τον Chen (1970). Κατά τη δοκιμή αυτή κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη μέσω δύο χαλύβδινων σφηνών οι οποίες τοποθετούνται στο κέντρο της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου και από τις σφήνες παράγεται 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. Συνεπώς, η δοκιμή BCN λαμβάνει υπόψη της τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος μόνο μετά τη ρηγμάτωση. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά τη διάρκεια της φόρτισης, πριν εμφανισθεί το μέγιστο φορτίο, η περιφερειακή

παραμόρφωση είναι αμελητέα. Όταν σχηματιστούν οι ρωγμές, η μετρούμενη περιφερειακή παραμόρφωση (TCOD) αντιστοιχεί στη συνολική παραμόρφωση μετά τη ρηγμάτωση. Μια παραλλαγή της δοκιμής BCN αποτελεί η γενικευμένη δοκιμή BCN (G-BCN) από τον Carmona (Carmona et al, 2012) που υποκαθιστά τη μέτρηση της περιφερειακής παραμόρφωσης TCOD με την αξονική μετατόπιση που προκαλείται από τις φορτιζόμενες σφήνες. Στη συνέχεια με βάση τη αξονική μόνο μετατόπιση και τις τιμές των φορτίων, προσδιορίζεται η παραμένουσα αντοχή ( $f_{ctRx}$ ) και εκτιμάται η δυσθραυστότητα τόσο μέσω της απορροφημένης ενέργειας, όσο και μέσω του δείκτη δυσθραυστότητας  $I_n$  (Carmona et al, 2013).

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της επιρροής της προσθήκης ινών και του μετακαολίνης στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

## 2. Πειραματικό Μέρος

### 2.1 Υλικά και Συνθέσεις

Μελετήθηκαν συνολικά οχτώ (8) διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος, με ποσοστό προσθήκης ινών 0.5 και 1.0 % κατ' όγκο. Και στις οκτώ συνθέσεις σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM II/A-M (P-LL-W) 42.5. Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του σκυροδέματος, ήταν άμμος 0-4 mm και γαρμπίλι 8-16 mm. Τέλος, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής SikaViscocrete. 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 Sika Fiber PP940-50 της εταιρίας SIKΑ Α.Ε, οι οποίες κωδικοποιούνται ως (PFS) και β) τύπου Concrifix ES της εταιρίας BRUGGCONTECAG, CH-8590 Romanshorn, οι οποίες κωδικοποιούνται ως (PFC).

Αρχικά έγινε ανάδευση όλων των υλικών στον αναδευτήρα και στη συνέχεια προστέθηκαν οι ίνες όπου και αναδεύονταν 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 (Metastar 501, Imerys), όπου το μίγμα αναδεύονταν ξανά μέχρι να ομογενοποιηθεί.

Στον Πίνακα 1, δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε τύπου ίνας ενώ στον Πίνακα 2 οι συνθέσεις σκυροδέματος.

Πίνακας 1: Κύρια χαρακτηριστικά ινών.

Κωδ.	SF	PFS	PFC
<b>Χαρακτ.</b>			
<b>Είδος</b>	Χαλύβδινες ίνες	Συνθετικές ίνες	Συνθετικές ίνες
<b>Υλικό</b>	Χάλυβας ψυχρής ολκής, ( $f_t= 1.100 \text{ MPa}$ , $E=200 \text{ GPa}$ )	Πολυολεφίνη ( $f_t= 400 \text{ MPa}$ , $E=7\text{GPa}$ )	Πολυολεφίνη ( $f_t= 510 \text{ MPa}$ , $E > 10\text{GPa}$ )
<b>Μορφή</b>	Ευθύγραμμες με αγκύρια στα άκρα, κυματοειδείς	Μακροΐνες, μονόινες, (κυματοειδούς μορφής)	Μακροΐνες, ευθύγραμμες με αυλακώσεις και αγκύρια
<b>Μήκος (mm)</b>	30	50	50
<b>Διάμετρος (mm)</b>	0.75	0.75	0.50
<b>l/d</b>	40	67	100

Πίνακας 2: Περιεκτικότητα συστατικών των συνθέσεων ( $\text{Kg/m}^3$ ).

Κωδ. Υλικά ( $\text{kg/m}^3$ )	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		40						
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)			40	80				
Συνθετικές ίνες (PFS)					4.5	9		
Συνθετικές ίνες (PFC)							4.5	9
Ρευστοποιητής	0.87	3.25	1.06	1.00	0.90	1.33	0.90	1.33

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. Την επόμενη μέρα, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τις μήτρες και συντηρήθηκαν, σε δεξαμενή νερού για 28 ημέρες. Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν συνολικά 18 δοκίμια σύμφωνα με τον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Είδος, διαστάσεις και πλήθος δοκιμίων σκυροδέματος.

Είδος δοκιμίου	Διαστάσεις (mm)	Πλήθος
Κυβικό	100 x 100 x 100	9
Κυλινδρικό	Φ100 x 200	4
Πρισματικό	100 x 100 x 500	3
Κυλινδρικό	Φ150 x 180	2

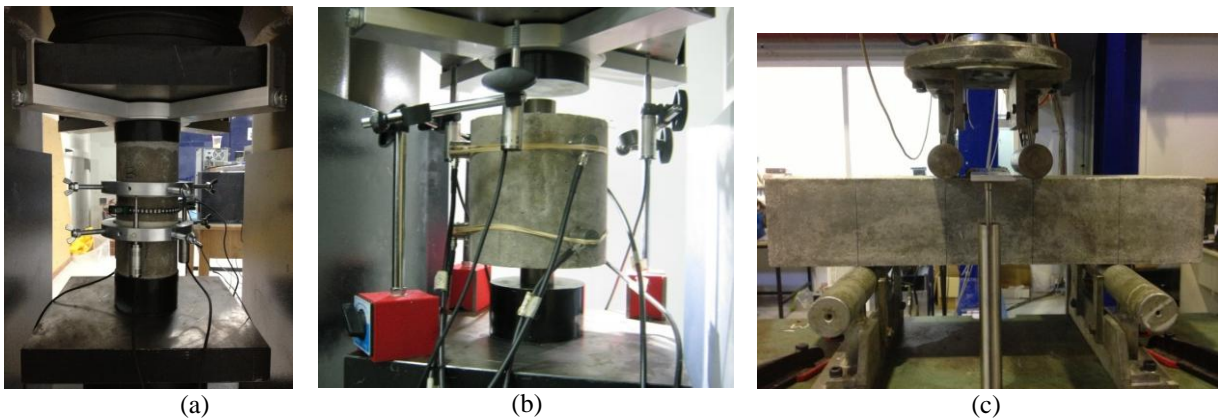
## 2.2 Πειραματικές Μετρήσεις

Για τον χαρακτηρισμό της εργασιμότητας του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ/EN 12350-2. Εκτός της δοκιμής κάθισης μετρήθηκε ο περιεχόμενος αέρας και η πυκνότητα του νωπού σκυροδέματος. Στη συνέχεια προσδιορίστηκε η θλιπτική αντοχή χρησιμοποιώντας κυβικά δοκίμια ακμής 100 mm. Η δοκιμή εκτελέστηκε με ρυθμό επιβολής φορτίου 13,5 kN/s σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών.

Για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (E) και του λόγου παραμορφώσεων ( $\nu$ ) χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την παραμόρφωση του κυλινδρικού δοκιμίου κατά τη δοκιμή θλίψης, η οποία έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-3. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν τα κυλινδρικά δοκίμια ύψους 200 mm και διαμέτρου 100 mm. Η δοκιμή έγινε με ρυθμό φόρτισης 2,5 kN/s. 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 διόγκωση του **Σχήμα 1 (α)**. Η φόρτιση

πραγματοποιήθηκε σε τρία διαδοχικά στάδια. Στα δυο πρώτα στάδια το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι το 40% της μέγιστης μέσης θλιπτικής αντοχής 28 ημερών, όπως αυτή υπολογίστηκε από τη δοκιμή θλίψης των κυβικών δοκιμίων, ενώ στη συνέχεια αποφορτίζεται. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο το δοκίμιο φορτίζεται μέχρι να οδηγηθεί σε αστοχία. 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.



Σχ δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος. 1 Πειραματικές διατάξεις (α) προσδιορισμού μέτρου ελαστικότητας και λόγου poisson, (b) Δοκιμής Barcelona, (c) Δοκιμής κάμψης

Στο Σχήμα 1 (b) απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της γενικευμένης δοκιμής Barcelona, όπου ένα κυλινδρικό δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος  $\Phi 150 \times 150$  (mm), υποβάλλεται σε θλίψη μέσω δύο χαλύβδινων σφηνών οι οποίες τοποθετούνται στο κέντρο της άνω και κάτω επιφάνειας του δοκιμίου. Τρία LVDTs τα οποία στερεώνονται στις φορτιζόμενες πλάκες της πρέσας σε απόσταση 120 μοιρών, αναλαμβάνουν να μετρήσουν την αξονική παραμόρφωση.

Στο Σχήμα 1 (c) απεικονίζεται η πειραματική διάταξη της δοκιμής κάμψης. Κατά τη δοκιμή πρισματικά δοκίμια διαστάσεων  $100 \times 100 \times 500$  (mm) φορτίζονται σε τέσσερα σημεία με άνοιγμα δοκιμίου (μεταξύ των στηριξέων)  $L=300$  mm. Η φόρτιση γίνεται με έλεγχο μετατόπισης με ρυθμό από 0.05 έως 0.10 mm ανά λεπτό. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν το βέλος κάμψης φτάσει στο  $L/150$ . Υπολογίζονται η μέγιστη αντοχή αιχμής, η μέγιστη καμπτική αντοχή, καθώς και η παραμένουσα αντοχή, όταν το βέλος κάμψης είναι ίσο με  $L/600=0.5$  mm και  $L/150=2.0$  mm. Υπολογίζεται επίσης η απορροφούμενη ενέργεια που ισοδυναμεί στη δυσθραυστότητα (T) από το εμβαδόν που περικλείεται από την καμπύλη φορτίου-βέλους κάμψης και τον άξονα του βέλους κάμψης. Έτσι και στην παρούσα εργασία καταγράφηκαν η δυσθραυστότητα και η παραμένουσα αντοχή στο τέλος της δοκιμής (βέλος κάμψης 2.00 mm) και συμβολίζονται  $T_{100,2.0}$  και  $f_{100,2.0}$ , αντίστοιχα. Η τιμή της παραμένουσας αντοχής, υπολογίζεται από τη Σχέση 1:

$$f_{ct,fl} = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

όπου P το φορτίο που ασκείται στο δοκίμιο, L το μήκος κάμψης του δοκιμίου, b το ύψος της διατομής d το πλάτος της διατομής.

### 3. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών νωπού σκυροδέματος. 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 οριακά 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 στη συγκεκριμένη σύνθεση, ήταν η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε αέρα, καθώς είναι γνωστό ότι 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/m<sup>3</sup>. 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 να το μειώνουν.

Πίνακας 4: Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος κάθε σύνθεσης.

	NC	MC	SF 0.5	SF 1.0	PFS 0.5	PFS 1.0	PFC 0.5	PFC 1.0
<b>Κάθιση (mm)</b>	150	130	145	165	145	100	140	100
<b>Περιεκτικότητα σε Αέρα (%)</b>	1.8	2.4	2.5	3.6	2.2	1.6	2.1	2.2
<b>Μοναδιαίο Βάρος (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2318	2303	2342	2326	2302	2305	2295	2293

Αναφορικά με τις θλιπτική αντοχή σκληρυμένου σκυροδέματος, στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής σε θλίψη. Για κάθε σύνθεση δίνεται η μέση τιμή των αποτελεσμάτων από τη δοκιμή 3 δοκιμών και ο συντελεστής διακύμανσης (CV, %) ως μέτρο της διασποράς των μετρήσεων. Στο Σχήμα 2 αναπαρίστανται γραφικά τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής 28 ημερών. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2, η μέση θλιπτική αντοχή 28 ημερών δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη ινών, ενώ αντίθετα φαίνεται να επηρεάζεται από την προσθήκη μετακαολίνη.

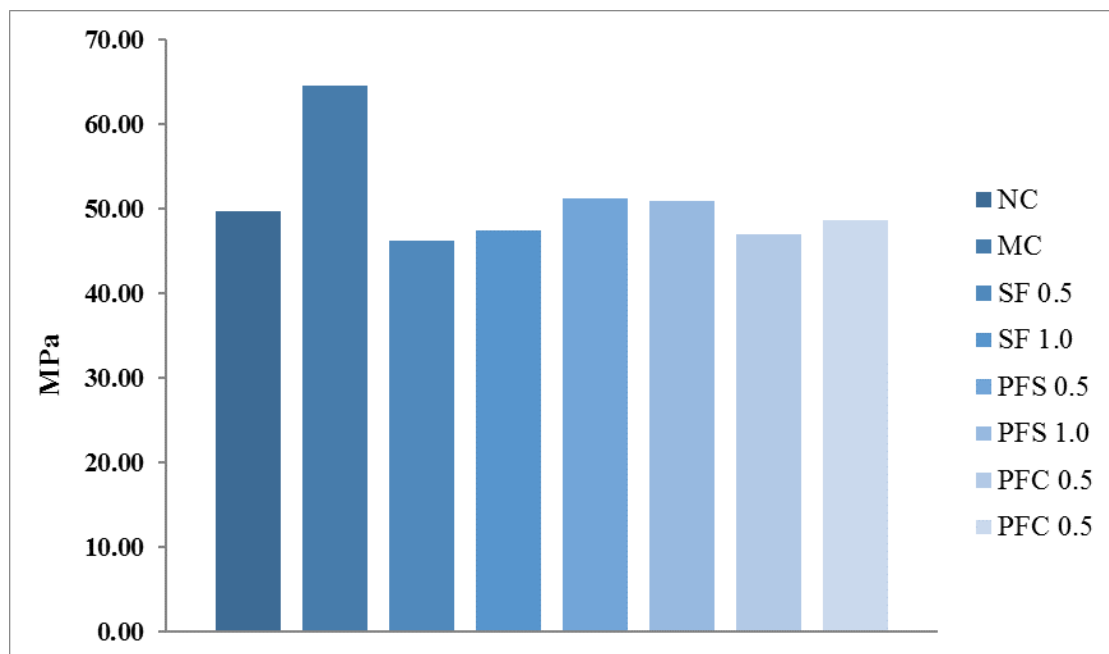
Στον Πίνακα 6, δίνονται τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου poisson. Όπως γίνεται φανερό από τα αποτελέσματα του μέτρου ελαστικότητας, οι περισσότερες συνθέσεις παρουσίασαν ομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας (cv) δεν ξεπερνά την τιμή του 10%. Εξαιρέση αποτελούν οι συνθέσεις NC και PFC0.5 στις οποίες ο συντελεστής διακύμανσης υπερέβη το όριο του 10% (11% και 15% αντίστοιχα). 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. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται η θεωρία κατά την οποία το μέτρο ελαστικότητας επηρεάζεται σημαντικά από την αντοχή του δοκιμίου.

Πίνακας 5: Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών, μέση τιμή (Μ.Τ) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%).

Δοκίμιο	7 Ημέρες		28 Ημέρες	
	Μ.Τ.	cv(%)	Μ.Τ.	cv(%)
NC	41.80	1.91	49.67	2.39
MC	55.27	2.62	64.57	3.08
SF 0.5	38.17	0.84	46.20	2.60
SF 1.0	39.60	2.56	47.47	0.44
PFS 0.5	41.63	2.45	51.23	4.62
PFS 1.0	43.30	2.40	50.93	1.34
PFC 0.5	38.37	1.53	46.97	2.89
PFC 1.0	41.07	1.23	48.57	2.94



Σχ. 2 Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες

Στο Σχήμα 3, απεικονίζονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας για κάθε σύνθεση. 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.

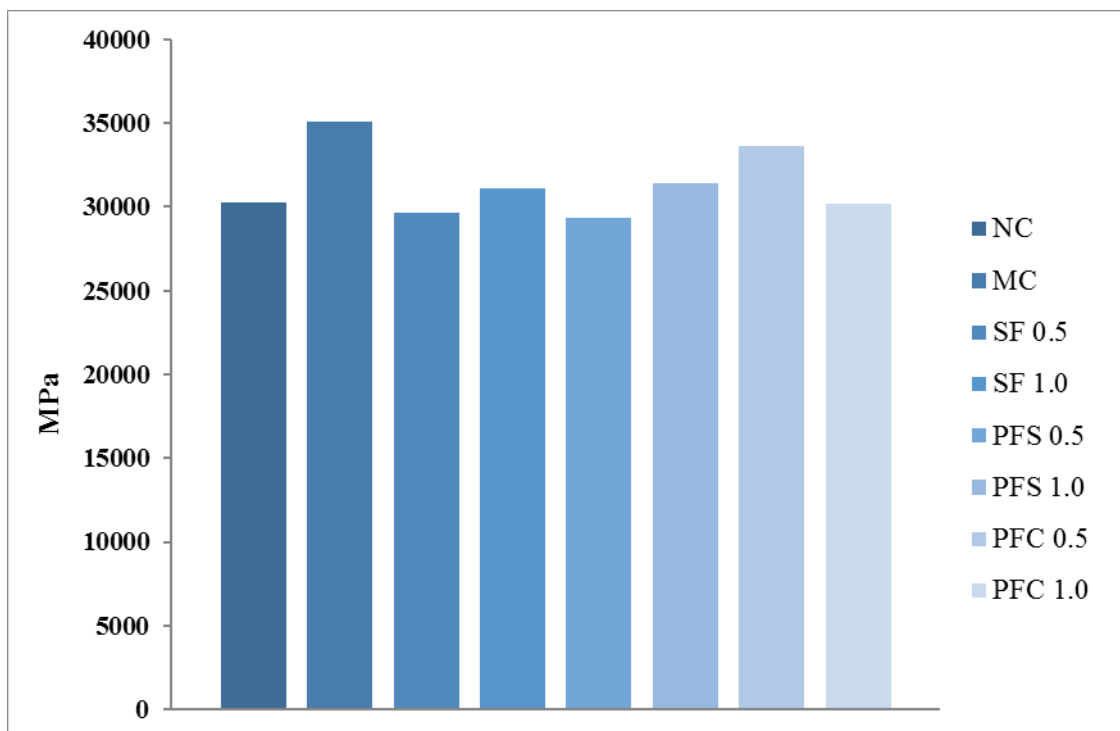
Συγκρίνοντας τις συνθέσεις με ίδιο ποσοστό ινών αλλά διαφορετικό είδος, παρατηρούμε πως για ποσοστό 0.5% κ.ο. η σύνθεση με ίνες PFC παρουσιάζει το μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας ενώ οι συνθέσεις με ίνες SF και PFS έχουν παραπλήσια τιμή. Και πάλι τίθεται το θέμα της περαιτέρω

διερεύνησης για τη συγκεκριμένη παρατήρηση, καθώς ο συντελεστής διακύμανσης των τιμών του  $E$  για τη σύνθεση PCF0.5 είναι συγκριτικά 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.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα υπολογισμού του λόγου poisson. Τα αποτελέσματα για τις περισσότερες συνθέσεις παρουσίασαν μια πολύ μεγάλη ανομοιογένεια καθώς ο συντελεστής μεταβλητότητας (cv) ξεπερνά κατά πολύ το 10%. Εξάιρεση αποτελούν οι τιμές για τις συνθέσεις NC, SF0.5 και PFS0.5 για τις οποίες ο συντελεστής διακύμανσης δεν ξεπέρασε το όριο του 10%. Τη μικρότερη τιμή του λόγου poisson παρουσιάζεται στη σύνθεση με μετακαολίνη, ενώ όσον αφορά τις συνθέσεις που περιέχουν ίνες, ο μικρότερος λόγος poisson παρουσιάζεται στη σύνθεση PFS 0.5.

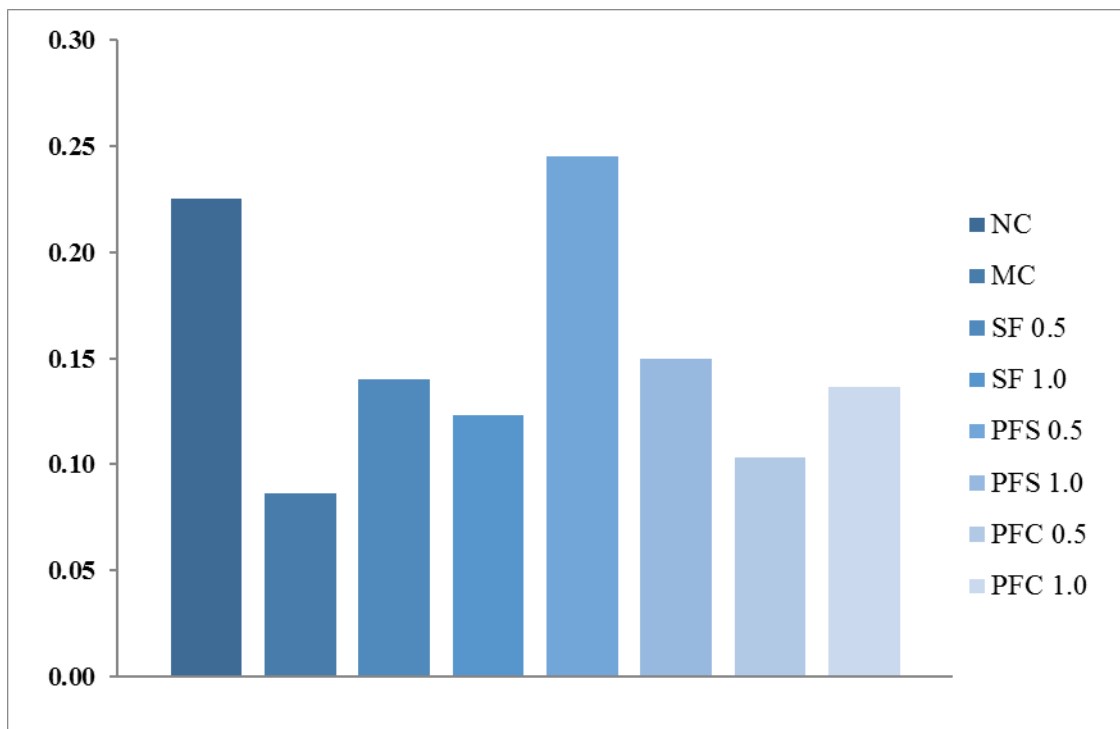
Πίνακας 6: Μέτρο ελαστικότητας και λόγος Poisson κάθε σύνθεσης, μέση τιμή (Μ.Τ.) και % συντελεστής διακύμανσης (cv,%).

Δοκίμιο	Μέτρο Ελαστικότητας (Μ.Τ.) (MPa)	cv (%)	Λόγος Poisson (Μ.Τ.)	cv (%)
NC	30281	11	0.23	3.14
MC	35107	5	0.09	13.32
SF 0.5	29622	3	0.14	7.14
SF 1.0	31143	6	0.12	63.00
PFS 0.5	29372	1	0.25	8.66
PFS 1.0	31441	2	0.15	94.28
PFC 0.5	33661	15	0.10	49.66
PFC 1.0	30175	5	0.14	59.14



Σχ. 3 Μέση τιμή μέτρου ελαστικότητας όλων των συνθέσεων

Στο Σχήμα 4, αναπαρίστανται οι τιμές του λόγου poisson. Παρατηρώντας την τιμή του λόγου poisson για την κάθε σύνθεση παρατηρούμε μια μεγάλη διακύμανση καθώς κυμαίνεται από 0.08 έως 0.25. Λόγω της πολύ μεγάλης μεταβλητότητας δεν μπορούν να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα για τον τρόπο που επιδρούν οι ίνες στην τιμή του λόγου poisson. Αυτό που μπορεί ωστόσο να παρατηρηθεί, συγκρίνοντας τη μέση τιμή από κάθε σύνθεση, είναι πως η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λόγου poisson του. Σε όλες τις συνθέσεις (εκτός από τη PFS0.5) καταγράφεται μείωση του λόγου poisson, με τα ποσοστά να κυμαίνονται από 35% έως 60%. Η μικρότερη τιμή του λόγου poisson παρουσιάζεται στη σύνθεση με μετακαολίνη, ενώ όσον αφορά τις συνθέσεις που περιέχουν ίνες, ο μικρότερος λόγος poisson παρουσιάζεται στη σύνθεση PFS 0.5.



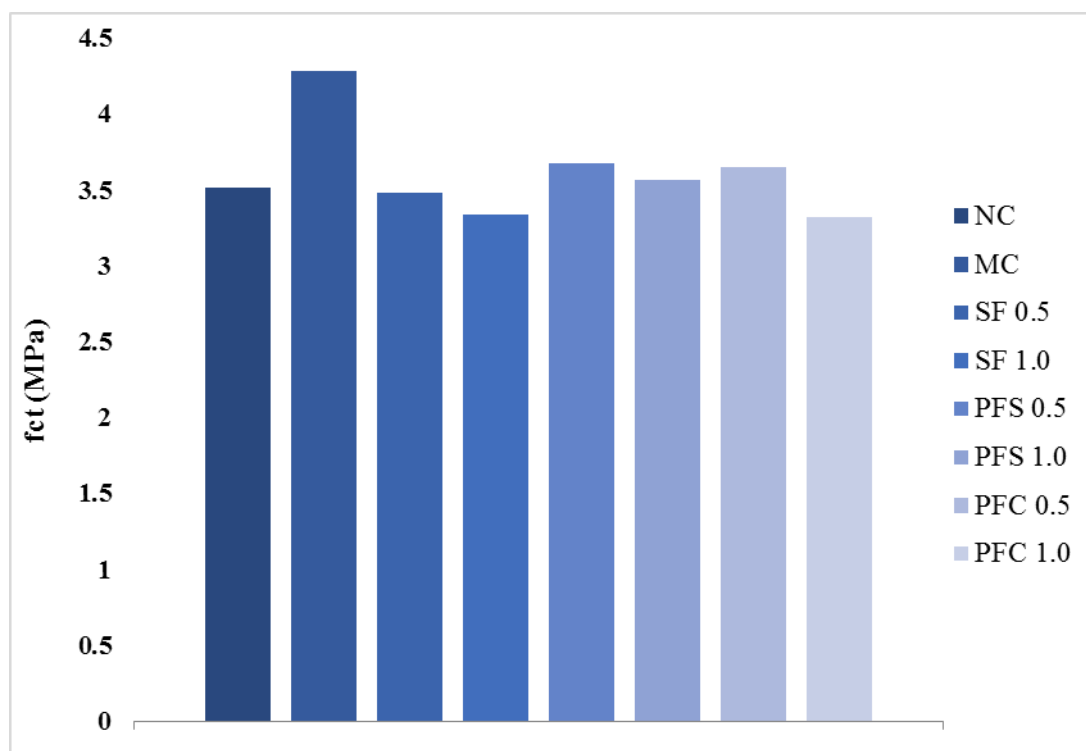
Σχ. 4 Μέση τιμή λόγου Poisson όλων των συνθέσεων

Στον Πίνακα 7 και στα Σχήμα 5 & 6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντοχών πρώτης κορυφής  $f_{ct}$  και της παραμένουσας τάσης ( $f_{ctRk}$ ) κατόπιν της δοκιμής BCN. Παρατηρείται ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στις αντοχές που αντιστοιχούν στην πρώτη κορυφή κάθε σύνθεσης. Η  $f_{ct}$  επηρεάζεται από το ποσοστό των ινών. Με την αύξηση του ποσοστού των ινών 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 των ινών επηρεάζει την αντοχή της πρώτης κορυφής, ενώ το είδος και η μορφή των ινών 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 ( $f_{ctRk}$ ) 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. Τέλος συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται το κ.ο ποσοστό των ινών, τόσο αυξάνεται η παραμένουσα τάση.



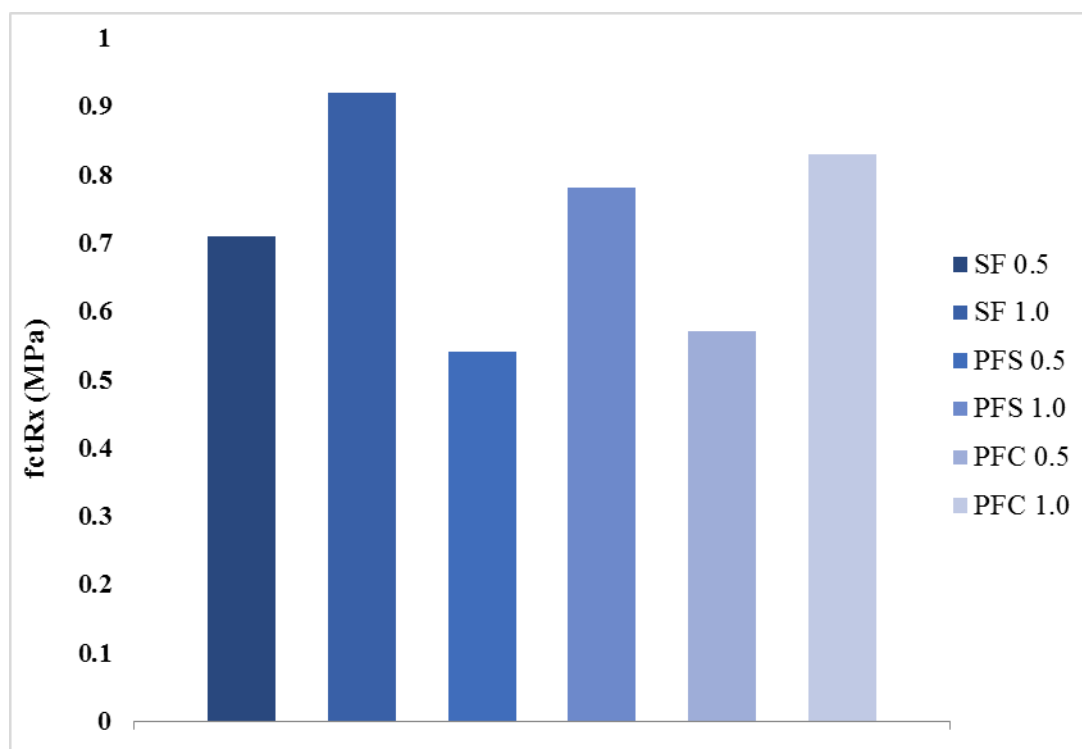
Πίνακας 7: Αντοχή πρώτης κορυφής  $f_{ct}$ , παραμένουσα τάση  $f_{ctRx}$  κάθε σύνθεσης

Δοκίμιο	$f_{ct}$ (M.T.)	cv(%)	$f_{ctRx}$ (M.T.)	cv(%)
NC	3.51	14.97	-	-
MC	4.285	0.5	-	-
SF 0.5	3.485	3.19	0.71	0.1
SF 1.0	3.345	0.61	0.92	6.98
PFS 0.5	3.675	5.82	0.535	7.49
PFS 1.0	3.56	3.1	0.775	9.31
PFC 0.5	3.655	5.41	0.565	0.71
PFC 1.0	3.32	25.14	0.83	-

Σχ. 5 Μέση τιμή αντοχής πρώτης κορυφής ( $f_{ct}$ ) δοκιμίων σκυροδέματος, κατά τη δοκιμή Barcelona

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα της απορροφούμενης ενέργειας και του δείκτη δυσθραυστότητας κατόπιν της δοκιμής BCN, ενώ στα Σχήματα 7 & 8 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα παραπάνω αποτελέσματα. Σύμφωνα με το συντελεστή διακύμανσης (cv,%) τα πειραματικά αποτελέσματα της απορροφούμενης ενέργειας είχαν μικρή διασπορά σε όλες τις συνθέσεις εκτός από το PFS 1.0 (1.8%). Η μέγιστη τιμή απορροφούμενης ενέργειας εμφανίστηκε στις συνθέσεις με 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%. 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,

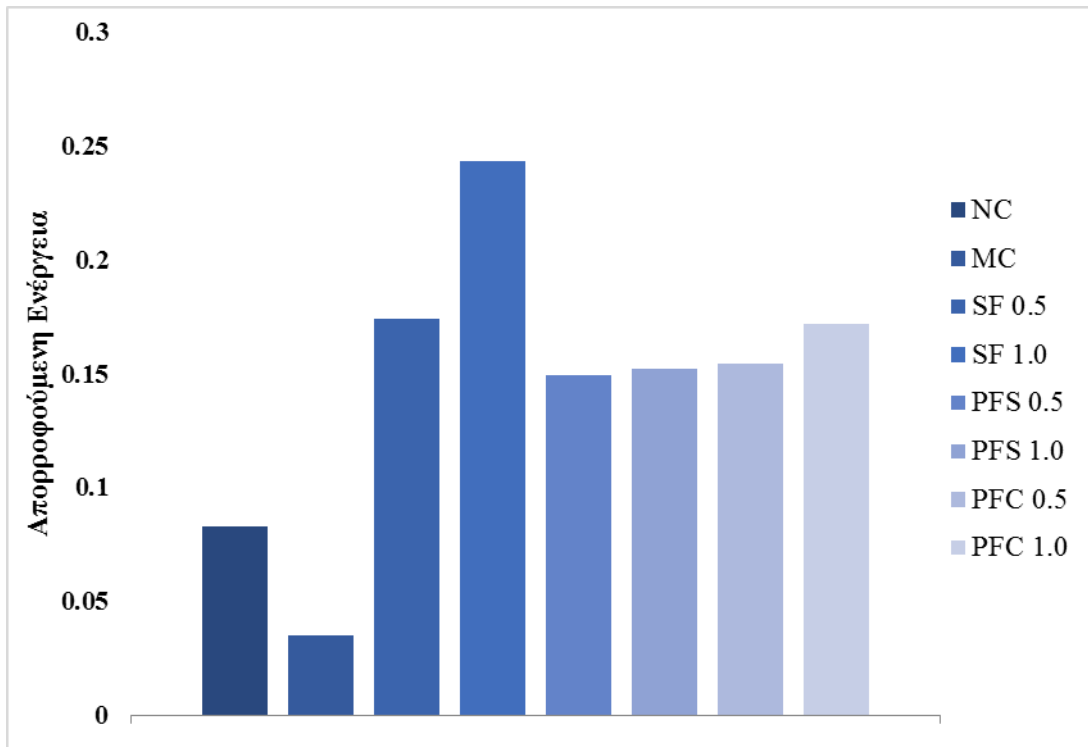
όσον αφορά στις συνθετικές ίνες, δεν φαίνεται να επηρεάζεται η συνολική ενέργεια που απορροφάται από το ποσοστό και το είδος των ινών.



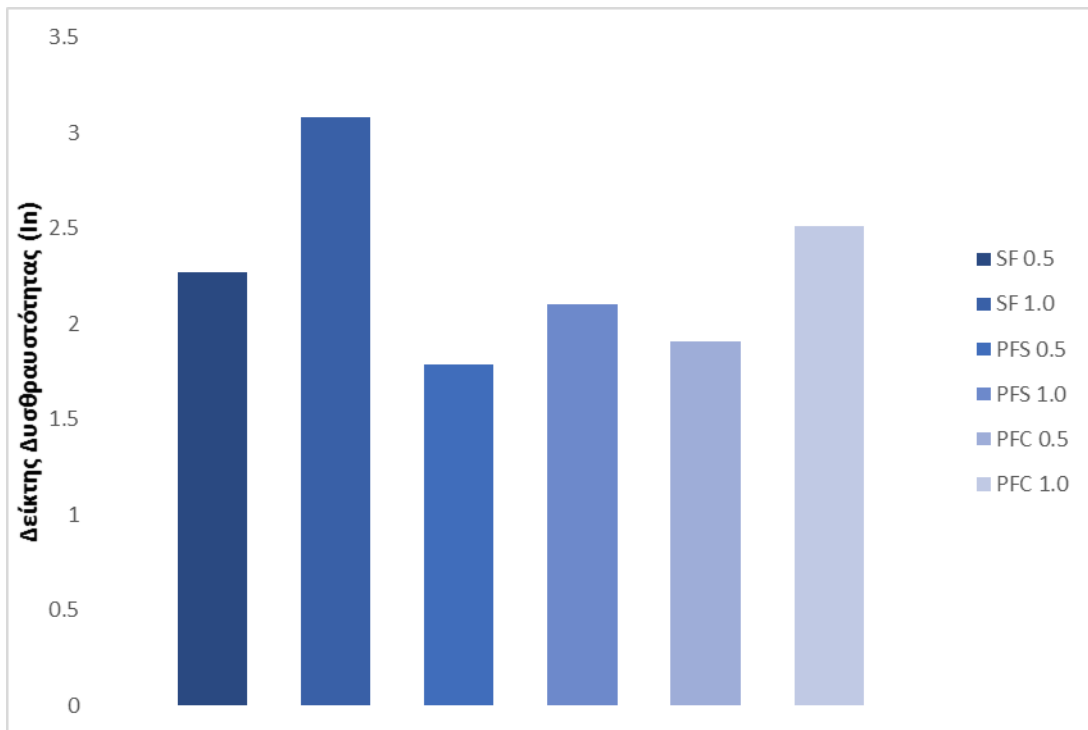
Σχ. 6 Μέση τιμή παραμένουσας τάσης ( $f_{ctRx}$ ) δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος, κατά τη δοκιμή Barcelona

Πίνακας 8: Απορροφούμενη ενέργεια και Δείκτης δυσθραυστότητας ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με τη γενικευμένη δοκιμή Barcelona.

Δοκίμιο	Απορρ.Ενεργ. (Μ.Τ.)	εν%	Δείκτης δυσθρ. (In)	εν%
NC	0.083	0.85	-	-
MC	0.035	1.50	-	-
SF 0.5	0.174	0.35	2.27	0.02
SF 1.0	0.243	0.70	3.08	4.75
PFS 0.5	0.149	0.25	1.79	6.39
PFS 1.0	0.152	1.80	2.10	28.12
PFC 0.5	0.154	0.65	1.91	5.43
PFC 1.0	0.172	0.20	2.51	18.86



Σχ. 7 Μέση τιμή απορροφούμενης ενέργειας δοκιμίων σκυροδέματος, κατά τη δοκιμή Barcelona.



Σχ. 8 Μέση τιμή δείκτη δυσθραυστότητας (In) δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος, κατά τη δοκιμή Barcelona.

Όσον αφορά στα αποτελέσματα της Δοκιμής Κάμψης, στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμένουσας αντοχής για βέλος κάμψης 0.5 και 2.0 mm, αντίστοιχα. Η παραμένουσα αντοχή, στα 0.5 mm βέλους κάμψης, είναι σχεδόν η ίδια για όλες τις συνθέσεις. Κάτι

τέτοιο είναι λογικό καθώς στα 0.5 mm όλα τα δοκίμια βρίσκονται κοντά στη στιγμή της πρώτης αστοχίας και επομένως δεν έχει προλάβει να ενεργοποιηθεί η λειτουργία των ινών και να επηρεαστεί η δοκιμή από το ποσοστό ή το είδος τους. Οι τιμές της παραμένουσας αντοχής των επιμέρους δοκιμίων ανά σύνθεση παρουσιάζουν ανομοιογένεια, καθώς ο συντελεστής διακύμανσης εμφανίζει τιμές μεγαλύτερες του 10%.

Πίνακας 9: Παραμένουσα αντοχή ( $f_{100,0.5}$ ) και ( $f_{100,2.0}$ ) δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος για βέλος κάμψης 0.5 και 2.0 mm, αντίστοιχα.

Δοκίμιο	$f_{100,0.5}$ (MPa) (M.T.)	cv(%)	$f_{100,2.0}$ (MPa) (M.T.)	cv(%)
SF 0.5	2.64	6.82	0.85	26.89
SF 1.0	3.31	16.07	1.87	18.78
PFS 0.5	2.84	35.93	1.35	25.18
PFS 1.0	2.57	12.07	3.62	25.14
PFC 0.5	2.70	15.27	1.90	8.07
PFC 1.0	2.40	22.19	2.85	21.66

Στο Σχήμα 9 απεικονίζεται διαγραμματικά η παραμένουσα αντοχή των δοκιμίων για βέλος κάμψης 0.5 mm. Αξίζει να σημειωθεί πως με την αύξηση του ποσοστού των ινών από 0.5% σε 1.0% κ.ο. παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά στις 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. Επίσης από τις συνθέσεις με ποσοστό 1.0% κ.ο. η σύνθεση SF1.0 κατέγραψε παραμένουσα αντοχή 30% μεγαλύτερη από αυτή των συνθέσεων PFS1.0 και PFC1.0.

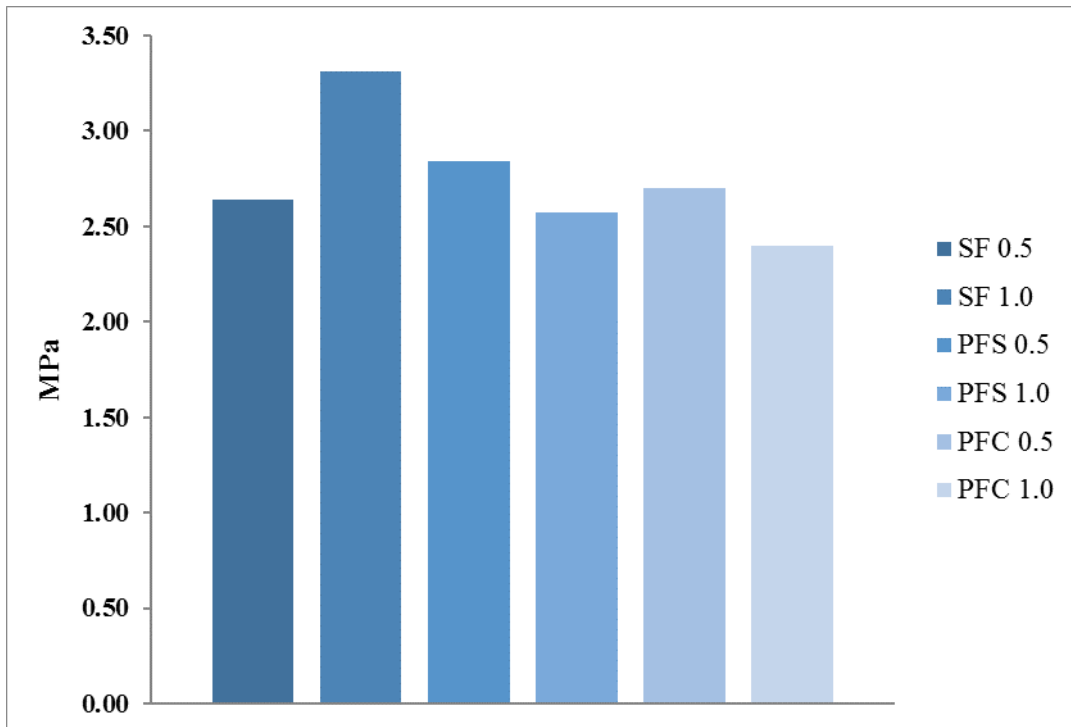
Αντίθετα, η παραμένουσα αντοχή στο τέλος της δοκιμής ( $L/150=2.00$  mm βέλος κάμψης) επηρεάζεται σημαντικά από την αύξηση του ποσοστού των ινών. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού των ινών από 0.5% σε 1.0% κ.ο., είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραμένουσας αντοχής από 50% έως και 168%, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 10.

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.

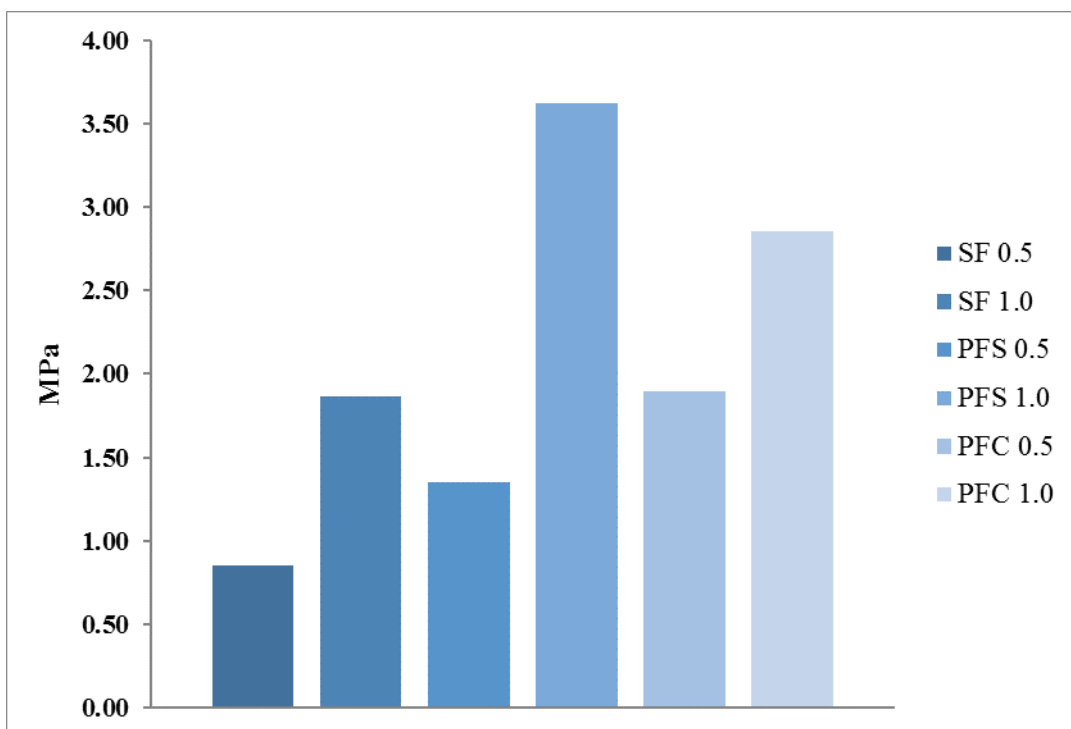
Η δυσθραυστότητα επίσης επηρεάζεται σημαντικά με την αύξηση του ποσοστού των ινών ανεξάρτητα από το είδος τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, όπου απεικονίζονται οι τιμές του δείκτη δυσθραυστότητας  $T_{100,2.0}$ , όπως αυτές υπολογίστηκαν για κάθε σύνθεση. Συγκεκριμένα, η αύξηση του ποσοστού των ινών έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της δυσθραυστότητας. Αυτό που επίσης φαίνεται είναι ότι οι τιμές του δείκτη επηρεάζονται περισσότερο από το σχήμα και όχι το υλικό.

Γίνεται επίσης φανερό 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, ως προς τη δυσθραυστότητα, μεταξύ των διαφορετικών ειδών τείνει

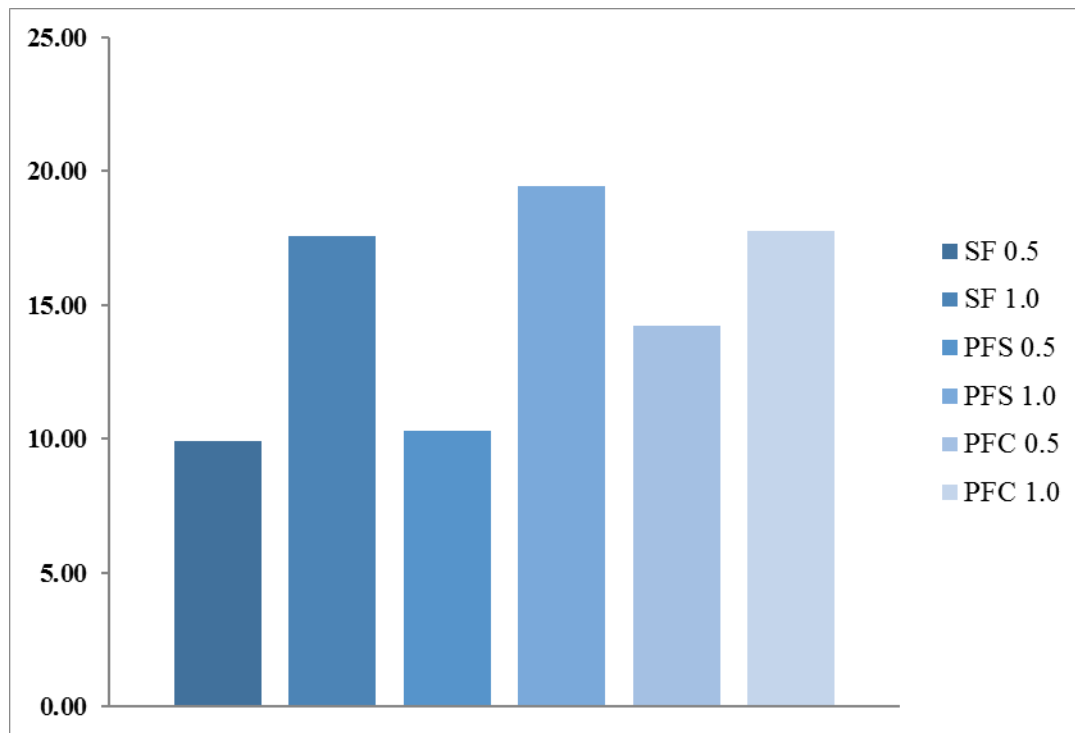
να μειώνεται. Το ποσοστό του 1.0% κ.ο. φαίνεται να είναι το βέλτιστο καθώς η διαφορά μεταξύ των συνθέσεων είναι μικρότερη από 10%.



Σχ. 9 Μέση τιμή παραμένουσας αντοχής για βέλος κάμψης 0.5 mm ( $f_{100,0.5}$ ) δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων.



Σχ. 10 Μέση τιμή παραμένουσας αντοχής στο τέλος της δοκιμής ( $f_{100,2.0}$ ) για βέλος κάμψης 2.0 mm δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος κατά τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων.



Σχ. 11 Μέση τιμή Δείκτη δυσθραυστότητας  $T_{100,2}$  δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος, για βέλος κάμψης 2.0 mm, κατά τη δοκιμή κάμψης 4 σημείων

#### 4. Συμπεράσματα

Η Θλιπτική αντοχή όπως και το Μέτρο ελαστικότητας, δεν επηρεάστηκε σημαντικά από την παρουσία των ινών. Σε όλες οι συνθέσεις το μέτρο ελαστικότητας ήταν της τάξης των 30 GPa και οι διαφορές που παρατηρήθηκαν ήταν της τάξης του 1 GPa. Αντίθετα ο Λόγος Poisson, 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%.

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής BCN και όσον αφορά στην παραμένουσα αντοχή ( $f_{ctRk}$ ), φάνηκε να επηρεάζεται η τιμή της από το ποσοστό των ινών και το είδος του και συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, τόσο αυξάνεται η παραμένουσα τάση.

Η ενέργεια που απορροφάται και η οποία εκφράζει τη δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των ινών, μόνο στην περίπτωση των συνθέσεων με μεταλλικές ίνες. Αντίθετα, ο δείκτης δυσθραυστότητας ( $I_n$ ) επηρεάζεται από το ποσοστό και το είδος των ινών. Όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, τόσο αυξάνεται ο δείκτης δυσθραυστότητας ( $I_n$ ). Η μεγαλύτερη τιμή του δείκτη  $I_n$  καταγράφεται για τις συνθέσεις με τις μεταλλικές ίνες.

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης φαίνεται ότι η δυσθραυστότητα των δοκιμίων, επηρεάζεται σημαντικά και από το ποσοστό και από 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%.

Τέλος η παραμένουσα αντοχή των δοκιμίων, επηρεάζεται επίσης από το ποσοστό και το είδος των ινών, αλλά ο βαθμός επιρροής διαφέρει ανάλογα με το βέλος κάμψης στο οποίο μελετάται. Ωστόσο



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.

### Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά την εταιρία TITAN για την παροχή υλικοτεχνικής βοήθειας και υποδομών, τις εταιρίες ΣΙΑΕΝΟΡ και SIKA HELLAS για την προσφορά υλικών, το διευθυντή του εργαστηρίου «Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων» της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Καθηγητή Σοφιανό Α., καθώς και τον κ. Παπαντωνόπουλο Γ. για τη βοήθεια και την υλικοτεχνική υποστήριξη που μας παρείχαν για τη διεξαγωγή σημαντικού τμήματος του πειραματικού μέρους. Τέλος ευχαριστούμε τον κ. Νομικό Π., Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και τον κ. Χουμανίδη Δ., Υποψήφιο Διδάκτορα της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

### Βιβλιογραφία

- ASTM (2006), “Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) C 1609/C 1609M-05”.
- Brandt, A. M. (2008), “Fibre reinforced cement-based (FRC) composites after over 40 years of development in building and civil engineering”, *Composite Structures*, 86, pp. 3-9.
- Brugg Contec, A. G., “MACROFIBER Concris Bi component and high performance”, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος, [www.bruggcontec.com](http://www.bruggcontec.com).
- Carmona, M. S., Aguado de Cea, A., Molins, B. C. (2012), “Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC”, *Materials and Structures*, 45, pp. 1053-1069.
- Carmona, M. S., Aguado de Cea, A., Molins, B. C. (2013), “Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test”, *Construction and Building Materials*, 48, pp. 592-600.
- Chen, W. (1970), “Double punch test for tensile strength of concrete”, *ACI Mater J.*, Vol. 67, No. 2, pp. 993-995.
- CEN (2009), “Testing hardened concrete □ Part 3: Compressive strength of test specimens EN 12390-3”.
- Sika Hellas A.B.E.E., “Sika® Fiber PP 940-50, συνθετικές μακροΐνες για σκυρόδεμα και εκτοξευόμενο σκυρόδεμα”, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.
- ΣΙΑΕΝΟΡ Α.Ε., INOMIX “Χαλύβδινες ίνες”, φύλλο ιδιοτήτων προϊόντος.