

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΙΝΩΝ

Δήμητρα. Σουλιώτη

Πολιτικός Μηχανικός. Υποψήφια Διδάκτωρ. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών Π.Ι.

Θεόδωρος Ματίκας

Αναπληρωτής καθηγητής. Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών Π.Ι.

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, γεωμετρία ινών, ποσοστό όγκου ινών, δυσθραυστότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η συγκεκριμένη έρευνα έχει ως στόχο τη σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετική γεωμετρία και ποσότητα χαλύβδινων ινών. Η πειραματική διαδικασία περιλαμβάνει δοκιμές σε θλίψη και σε κάμψη στα τρίτα, καθώς και δοκιμές νωπού σκυροδέματος. Με τη χρήση της πειραματικής μεθόδου ASTM C1609/C 1609M-05, επιτυγχάνεται η αποτίμηση της δυσθραυστότητας των δοκιμίων σε κάμψη στα τρίτα. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και ιδιαίτερα της δυσθραυστότητας με την αύξηση της περιεκτικότητας των ινών, καθώς και την επίδραση της γεωμετρίας τους στις παραπάνω ιδιότητες.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύνθετο υλικό μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος, τα πλεονεκτήματά του οποίου αποδεικνύονται παγκοσμίως από ένα μεγάλο αριθμό ερευνών και εφαρμογών. Το άοπλο σκυρόδεμα είναι ευρέως γνωστό ότι έχει χαμηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή ικανότητα παραμόρφωσης (ACI 544.1R-96). Τα τελευταία χρόνια, λοιπόν, αυξάνεται σταδιακά η χρήση των ινών για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος.

Οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες από χάλυβα επηρεάζονται από τον τύπο και την ποσότητα της ίνας, από το λόγο μήκος προς διάμετρο, την αντοχή της μήτρας, το μέγεθος, το σχήμα και τη μέθοδο προετοιμασίας του δοκιμίου, καθώς και το μέγεθος των αδρανών (ACI 544.4R-88). Οι ίνες από χάλυβα με σύνηθες μήκος, που κυμαίνεται μεταξύ 12.7 και 63.5 mm, πρέπει να έχουν λόγο μορφής (λόγος μήκος ίνας /

διάμετρος ίνας) μεταξύ 30 και 100, ενώ η ποσότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 0.25 έως 2% κ.ό. (ACI 544.3R-93).

Σύμφωνα με τον Williamson (1974), η αύξηση της θλιπτικής αντοχής στο σκυρόδεμα κυμαίνεται από αμελητέα έως στις περισσότερες περιπτώσεις 23%, για κυλινδρικά δοκίμια 150 x 300 mm με 2% κ.ό. ίνες, $l/d = 100$ και 19 mm μέγιστο κόκκο αδρανούς. Σε άλλη περίπτωση, η χρήση ινών από χάλυβα αύξησε τη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από 4 έως 19 %, όταν εξετάστηκαν διαφορετικοί λόγοι μορφής και ποσοστά όγκου ινών (Semsî Yazıcı 2006). Γενικά, η προσθήκη ινών δεν αυξάνει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή, αλλά αυξάνει τη θλιπτική παραμόρφωση του φορτίου θραύσης (ACI 544.3R-93).

Η καμπτική αντοχή των ινοσκυροδεμάτων με ίνες από χάλυβα, παρουσιάζει ουσιαστικά μεγαλύτερη αύξηση σε σχέση με την αντοχή σε εφελκυσμό ή θλίψη (ACI 544.4R-88). Η μέγιστη καμπτική αντοχή αυξάνει, γενικά, σε σχέση με το ποσοστό όγκου ινών και το λόγο μορφής. Πρισματικές ίνες, ίνες με κεκαμμένα άκρα ή με διαπλατυσμένα άκρα, έχουν επιδράσει στην αύξηση της αντοχής έως 100% σε σχέση με άοπλο σκυρόδεμα (Johnston 1980).

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 αυξανόμενη παραμόρφωση, αλλά διατηρεί ως ένα βαθμό τη δομική ακεραιότητα και τη μετα-ρηγματική αντίσταση, ακόμα και όταν αποκτήσει αξιόλογη παραμόρφωση. Όμοια δοκός χωρίς ίνες, θα θραυτεί απότομα σε μικρή παραμόρφωση, με διαχωρισμό σε δύο κομμάτια (ACI 544.1R-96).

Έρευνες έχουν αποδείξει ότι η αύξηση του ποσοστού όγκου των ινών οδηγεί σε αύξηση της δυσθραυστότητας (Σακελλαρίου 2006). Οι S.A. Saif Eldeen και Takeo Taniguchi (2007) μελετώντας αρκετά μοντέλα με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών (1%, 2%, 3%), απέδειξαν ότι οι χαλύβδινες ίνες μπορούν να αυξήσουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας. Κάθε 1% ποσότητα ινών αυξάνει την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας περίπου 50% σε σχέση με την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του άοπλου σκυροδέματος και αυξάνει το μέγιστο βέλος κάμψης πάνω από 20%.

Στην παρούσα έρευνα, παρουσιάζεται η επίδραση της γεωμετρίας και του ποσοστού όγκου ινών από χάλυβα στη θλιπτική και καμπτική αντοχή, τη δυσθραυστότητα, καθώς και στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικές γεωμετρίες χαλύβδινων ινών, για κάθε μία από τις οποίες, επιλέχθηκαν τρία διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών.

2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Σύνθεση σκυροδεμάτων

Για το σκοπό της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν ίνες κυματοειδείς και με κεκαμένα άκρα της εταιρείας ΕΤΑΛ Α.Ε. Για κάθε μία από τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες, χρησιμοποιούνται ποσοστά όγκου 0.5%, 1% και 1.5% κ.ό. σκυροδέματος. Παράχθηκαν, συνολικά, επτά διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος από τις οποίες η μία ήταν χωρίς ίνες. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες των ινών και στον Πίνακα 2 οι αναλογίες των υλικών των διαφορετικών συνθέσεων.

Πίνακας 1. Ιδιότητες ινών

Είδος μίγματος	Γεωμετρία	Ποσοστό όγκου %	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)	Λόγος μορφής
Άοπλο	-	-	-	-	-
ΙΟΠ 1	Κεκαμένα άκρα	0.5	0.75	31	41
ΙΟΠ 2	Κεκαμένα άκρα	1	0.75	31	41
ΙΟΠ 3	Κεκαμένα άκρα	1.5	0.75	1	41
ΙΟΠ4	Κυματοειδείς	0.5	0.75	25	33
ΙΟΠ 5	Κυματοειδείς	1	0.75	25	33
ΙΟΠ 6	Κυματοειδείς	1.5	0.75	25	33

Πίνακας 2. Αναλογίες υλικών αναμιγμάτων σκυροδέματος σε 1 m³ (kg)

Υλικό	Άοπλο	ΙΟΠ1	ΙΟΠ2	ΙΟΠ3	ΙΟΠ4	ΙΟΠ5	ΙΟΠ6
Τσιμέντο Π42.5	440	440	440	440	440	440	440
Νερό	220	220	220	220	220	220	220
Άμμος θραυστή	1225	1215	1205	1193	1215	1205	1193
Ψηφίδα	366	363	360	356	363	360	356
Υπερ/ποιητής	3	3.2	3.7	4	3.2	3.7	4
Ίνες	-	39	79	118	39	79	118
ΣΥΝΟΛΟ	2254	2280	2308	2331	2280	2308	2331

Οι αναλογίες των αδρανών αποτελούνται από θραυστή άμμο 77% και ψηφίδα 23%, ενώ ο λόγος νερού / τσιμέντο ισούται με 0.50. Επιλέχθηκαν συνθέσεις σκυροδέματος, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, χωρίς όμως να χρησιμοποιηθούν επιταχυντές και μηχανές εκτόξευσης για την παρασκευή των δοκιμών.

2.2 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές κάθισης και περιεκτικότητας σε αέρα σε όλες τις συνθέσεις νωπού σκυροδέματος. Η ποσότητα του υπερρευστοποιητή προσαρμόστηκε σε κάθε μίγμα, ώστε η κάθιση στα μίγματα με ίνες να κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων των συνθέσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Οι ιδιότητες του ινοσκυροδέματος στη νωπή του κατάσταση επηρεάζονται από το λόγο μορφής, τη γεωμετρία και το ποσοστό όγκου των ινών, τις αναλογίες της μήτρας και τη συνάφεια μεταξύ της διεπιφάνειας ίνας και μήτρας. (ACI 544.1R-96) Γενικά, η κάθιση ινοπλισμένου σκυροδέματος με

Πίνακας 3. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Δοκιμές	Άοπλο	ΙΟΠ1	ΙΟΠ2	ΙΟΠ3	ΙΟΠ4	ΙΟΠ5	ΙΟΠ6
Κάθιση (mm)	140	70	70	50	75	75	70
Ποσοστό αέρα (%)	2.90	2.70	3.5	3.6	2.70	3.20	3.60

χαλύβδινες ίνες πρέπει να είναι τουλάχιστον 1 ίντσα, αλλά όχι μεγαλύτερη από 4 ίντσες (25 με 100mm) (ACI 544.3R-93).

2.3 Θλιπτική αντοχή

Από κάθε σύνθεση σκυροδέματος παρασκευάστηκαν 3 κυβικά δοκίμια μεγέθους 15x15x15 cm. Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν μετά από συντήρηση 28 ημερών σε μηχανή μέγιστου φορτίου 2000 kN. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

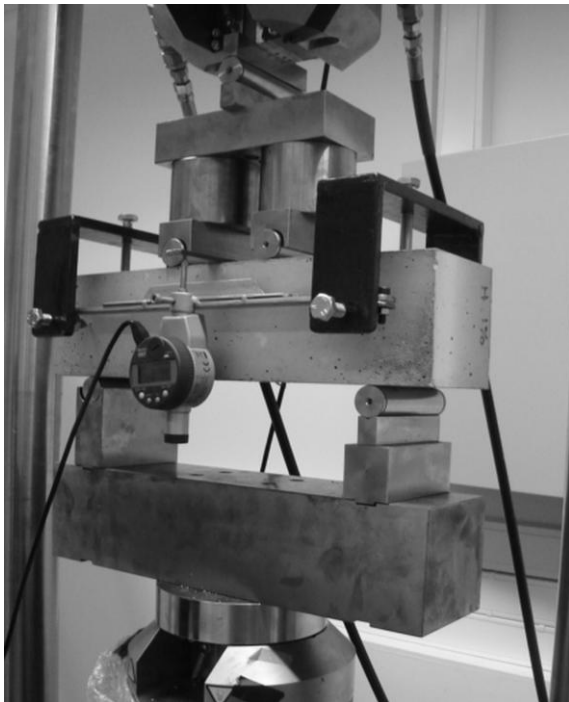
Πίνακας 4. Θλιπτική Αντοχή 28 ημερών

Είδος σκυροδέματος	Άοπλο	ΙΟΠ1	ΙΟΠ2	ΙΟΠ3	ΙΟΠ4	ΙΟΠ5	ΙΟΠ6
Θλιπτική αντοχή (MPa)	45.3 48.4 46.2	49.5 50.2 51.5	44.4 44.0 43.5	51.1 50.7 48.9	49.1 52.0 48.4	44.9 45.8 47.3	54.8 54.6 55.1
Μέση τιμή (MPa)	46.6	50.4	43.9	50.2	49.8	46.0	54.8
Τυπική Απόκλιση	1.59	1.01	0.45	1.17	1.91	1.21	0.25

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα για ποσοστό όγκου ινών 0.5% και 1.5% κ.ό. και για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες ινών, σε αντίθεση με το ποσοστό όγκου 1% στο οποίο παρατηρείται μείωση της θλιπτικής αντοχής.

2.4 Δοκιμές δυσθραυστότητας

Για την αποτίμηση της δυσθραυστότητας των δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που προδιαγράφεται στο ASTM C1609/C 1609M-05. Τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε πειράματα κάμψης στα τρίτα ήταν 10x10x40 cm, με άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων 30 cm. Η φόρτιση έγινε με σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN, ενώ το σύστημα εφαρμογής και υποστήριξης του δοκιμίου σχεδιάστηκε σύμφωνα με την προδιαγραφή C78-02 και τις διαστάσεις των δοκιμίων, ώστε να παράγει φόρτιση τεσσάρων σημείων χωρίς εκκεντρότητα ή στρέψη. Η μηχανή παράγει μία ελεγχόμενη και σταθερή αύξηση του βέλους κάμψης του δοκιμίου ίση με 0.08 mm/min. Για την ακριβή μέτρηση του βέλους κάμψης, χρησιμοποιείται ένα ηλεκτρονικό μηκυνσιόμετρο (mitutoyo) το οποίο τοποθετείται πάνω σε ένα ζυγό (yoke). Με τον τρόπο αυτό, το βέλος κάμψης μετρείται από τον ουδέτερο άξονα μέχρι την επάνω επιφάνεια του δοκιμίου (Εικ.1).

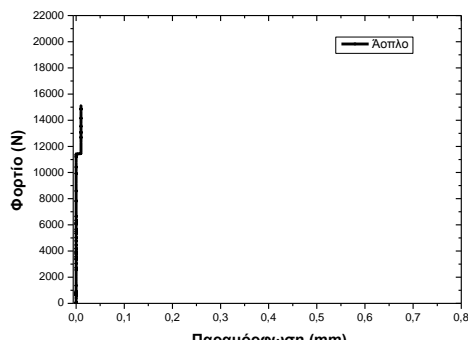


Εικόνα 1. Διάταξη δοκιμής δυσθραυστότητας

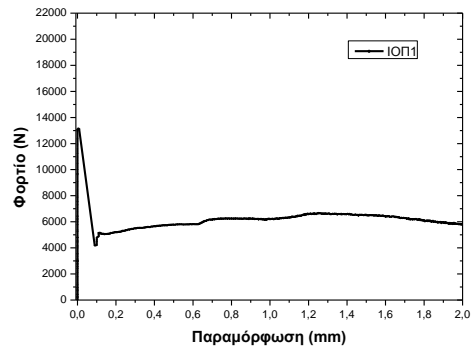
Η δοκιμή τερματίζει, όταν το βέλος κάμψης φθάσει τουλάχιστον το 1/150 του ανοίγματος του δοκιμίου, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τα 2 mm. Στην πειραματική αυτή μέθοδο δεν υπολογίζονται δείκτες

δυσθραυστότητας, όπως στη μέθοδο C1018-97. Υπολογίζεται η δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$, ως η ενέργεια, η οποία είναι ισοδύναμη με τη συνολική επιφάνεια κάτω από την καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης μέχρι η παραμόρφωση να φθάσει τα 2mm. Μπορούν, επιπλέον, να υπολογισθούν η μέγιστη αντοχή αιχμής, η μέγιστη καμπτική αντοχή, καθώς και η παραμένουσα αντοχή, όταν το βέλος κάμψης είναι 0.5 και 2 mm.

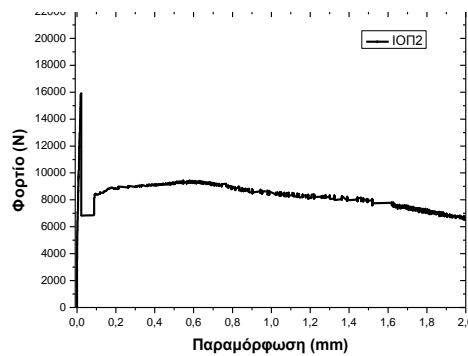
Για όλες τις συνθέσεις, οι δοκιμές έγιναν σε ηλικία 28 ημερών, αντιπροσωπευτικά διαγράμματα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.



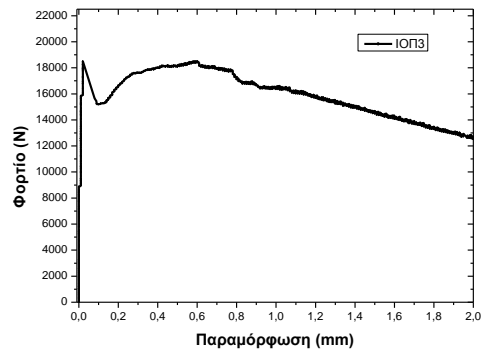
Εικόνα 2. Διάγραμμα Φορτίου-Παραμόρφωσης Ασπλου σκυροδέματος



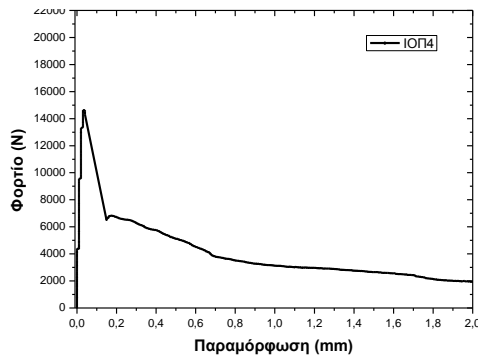
Εικόνα 3. Διάγραμμα Φορτίου - Παραμόρφωσης IOPI1



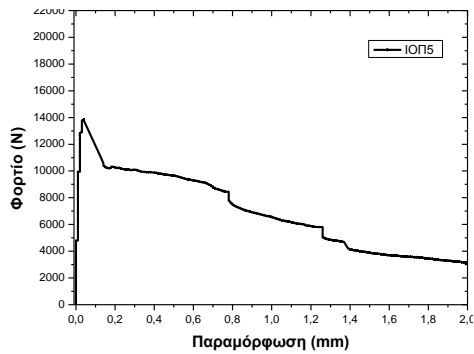
Εικόνα 4. Διάγραμμα Φορτίου-Παραμόρφωσης IOPI2



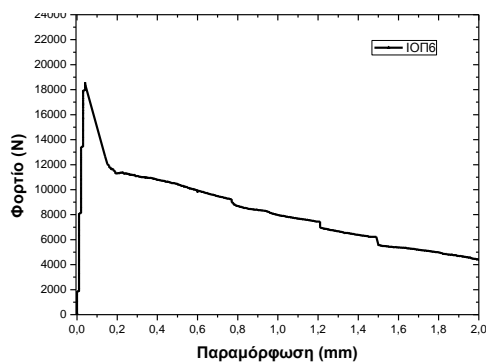
Εικόνα 5. Διάγραμμα Φορτίου - Παραμόρφωσης IOPI3



Εικόνα 6. Διάγραμμα Φορτίου-Παραμόρφωσης ΙΟΠ4



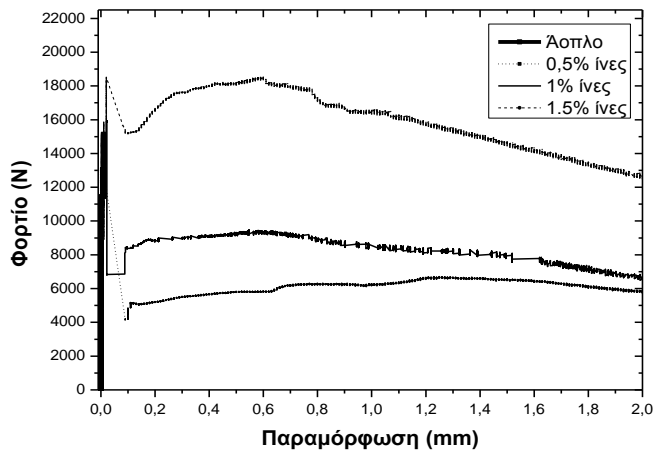
Εικόνα 7. Διάγραμμα Φορτίου - Παραμόρφωσης ΙΟΠ5



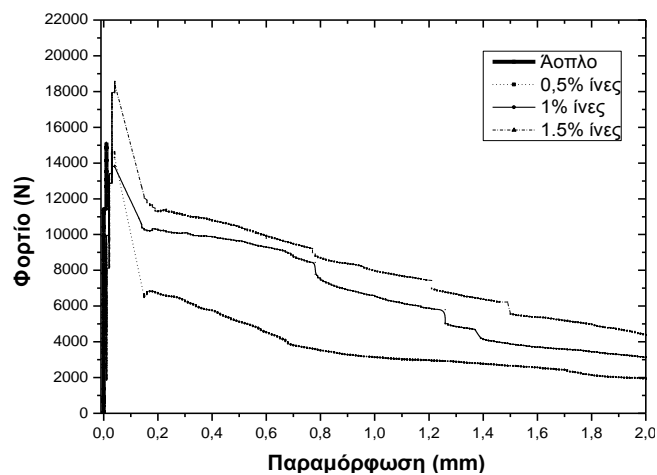
Εικόνα 8. Διάγραμμα Φορτίου- Παραμόρφωσης ΙΟΠ6

Η γραφική παράσταση φορτίου – παραμόρφωσης μετά τη ρηγμάτωση εξαρτάται πολύ από το είδος της ίνας και από το ποσοστό του όγκου των ινών που θα χρησιμοποιηθούν (ACI 544.4R-88). Η αντοχή του πρώτου ρηγματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα χαρακτηριστικά της μήτρας, τα οποία επηρεάζουν την αντοχή τους και κυρίως το βαθμό συμύκνωσης και το λόγο νερού/τσιμέντο. Ελάχιστα επηρεάζεται από τις παραμέτρους των ινών, όπως τον τύπο, το μέγεθος και την ποσότητά τους (Johnston 1992).

Η επίδραση της μεταβολής του ποσοστού όγκου των ινών στο σκυρόδεμα για κάθε είδος ινών παρουσιάζεται στα παρακάτω αντιπροσωπευτικά διαγράμματα.



Εικόνα 9. Διαγράμματα Φορτίου-Παραμόρφωσης με διαφορετικά ποσοστά όγκου ινών με κεκαμένα άκρα και άοπλου σκυροδέματος.



Εικόνα 10. Διαγράμματα Φορτίου-Παραμόρφωσης με διαφορετικά ποσοστά όγκου κυματοειδών ινών και άοπλου σκυροδέματος.

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζονται μία σειρά στοιχείων, τα οποία προκύπτουν από τα δεδομένα των διαγραμμάτων για κάθε δοκίμιο. Η μέγιστη αντοχή αιχμής (f_1) και η μέγιστη αντοχή (f_p) υπολογίστηκαν από το μέγιστο φορτίο αιχμής (P_1) και από το μέγιστο φορτίο (P_p), με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$

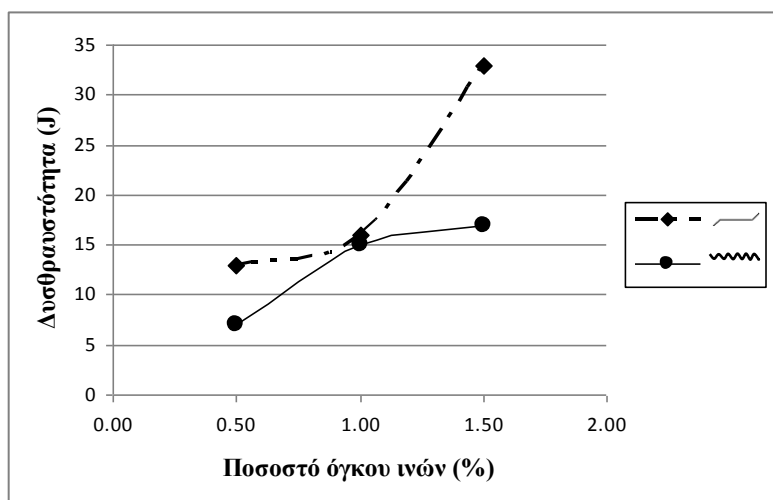
Πίνακας 5. Αποτελέσματα δοκιμών δυσθραυστότητας.

	δ_1 (mm)	P_1 (N)	f_1 (MPa)	δ_p (mm)	P_p (N)	f_p (MPa)	$P_{100,0.50}$ (N)	$f_{100,0.50}$ (MPa)	$P_{100,2.0}$ (N)	$f_{100,2.0}$ (MPa)	$T_{100,2.0}$ (J)
Αοπλο	0.01	13830	4.1	0.01	13830	4.1	-	-	-	-	-
	0.01	15140	4.5	0.01	15140	4.5	-	-	-	-	-
	0.03	15630	4.7	0.03	15630	4.7	-	-	-	-	-
ΙΟΠ1	0.04	12740	3.8	0.04	12740	3.8	3010	0.9	1840	0.6	6
	0.01	13150	3.9	0.01	13150	3.9	5770	1.7	5840	1.8	12
	0.04	12140	3.6	0.04	12140	3.6	6520	2.0	5180	1.6	13
ΙΟΠ2	0.03	14280	4.3	0.03	14280	4.3	9060	2.7	5690	1.7	15
	0.02	15940	4.8	0.02	15940	4.8	9280	2.8	6600	2.0	17
	0.03	15250	4.5	0.03	15250	4.6	10660	3.2	6680	2.0	17
ΙΟΠ3	0.02	18520	5.6	0.56	18530	5.6	18200	5.5	12710	3.8	32
	0.05	15800	4.7	0.70	19890	6.0	18930	5.7	14570	4.4	34
	0.04	16320	4.9	0.04	16320	4.9	10280	3.1	9340	2.8	22
ΙΟΠ4	0.02	13140	3.9	0.02	13140	3.9	3120	0.9	1610	0.5	7
	0.03	14620	4.4	0.03	14620	4.4	5120	1.5	1930	0.6	8
	0.02	11970	3.6	0.02	11970	3.6	3240	1.0	970	0.3	6
ΙΟΠ5	0.01	16670	5.0	0.01	16670	5.0	9630	2.9	5150	1.6	16
	0.01	16770	5.0	0.01	16770	5.0	9400	2.8	4770	1.4	16
	0.04	13870	4.2	0.04	13870	4.2	9650	2.9	3140	0.9	14
ΙΟΠ6	0.03	22480	6.7	0.03	22480	6.7	10650	3.2	3620	1.1	17
	0.04	18580	5.6	0.04	18580	5.6	10400	3.1	4400	1.3	17
	0.03	18730	5.6	0.03	18730	5.6	11810	3.5	3870	1.2	18

Η αντοχή f_1 αντιστοιχεί στην μέγιστη παραμόρφωση αιχμής δ_1 , ενώ η αντοχή f_p στην παραμόρφωση δ_p (παραμόρφωση μέγιστου φορτίου). Ο υπολογισμός των παραμενουσών αντοχών $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ προκύπτει από τις παραμένουσες δυνάμεις $P_{100,0.50}$ και $P_{100,2.0}$, οι οποίες αντιστοιχούν σε παραμόρφωση 0.50 και 2mm αντίστοιχα, και την Εξίσωση 1. Η δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$, τέλος, καθορίστηκε από τη συνολική επιφάνεια

κάτω από την καμπύλη φορτίου - παραμόρφωσης μέχρι η παραμόρφωση να φθάσει τα 2mm.

Στην Εικόνα 11, παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης τιμής της δυσθραυστότητας σε κάθε μίγμα σε σχέση με το ποσοστό όγκου ινών (έχουν απορριφθεί η τιμή του πρώτου δοκιμίου του ΙΟΠ1 και του τρίτου δοκιμίου του ΙΟΠ3). Είναι εμφανές, ότι αύξηση του ποσοστού όγκου ινών οδηγεί στην αύξηση της δυσθραυστότητας. Ιδιαίτερα αυξημένη δυσθραυστότητα παρατηρείται στις ίνες με κεκαμμένα άκρα σε σχέση με τις κυματοειδείς ίνες.



Εικόνα 11. Διάγραμμα μεταβολής δυσθραυστότητας συναρτήσει του ποσοστού όγκου ινών.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν είναι εμφανής η επιρροή των ινών τόσο στη νωπή κατάσταση, όσο και στις δοκιμές δυσθραυστότητας και θλιπτικής αντοχής.

Αναφορικά, λοιπόν, με το νωπό σκυρόδεμα, παρατηρείται μικρή κάθιση με την προσθήκη των ινών. Εξαιτίας των μοναδικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες, οι μετρήσεις εργασιμότητας ή οι απαιτήσεις κάθισης είναι κάπως διαφορετικές από το συμβατικό σκυρόδεμα (ACI 544.3R-93). Στα μίγματα με μεγάλη περιεκτικότητα ινών (ΙΟΠ2, ΙΟΠ3, ΙΟΠ5, ΙΟΠ6) το ποσοστό αέρα είναι αρκετά αυξημένο σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα και τα σκυροδέματα με μικρή περιεκτικότητα ινών (ΙΟΠ1, ΙΟΠ4).

Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή, δεν παρατηρείται σημαντική αύξηση με την προσθήκη ινών. Για ποσοστό όγκου ινών 0.5% και 1.5% κ.ό. και για τις δύο διαφορετικές γεωμετρίες ινών αυξάνεται η θλιπτική αντοχή, σε αντίθεση με ποσοστό όγκου 1% στο οποίο παρατηρείται μείωσή της.

Από τις δοκιμές δυσθραυστότητας παρατηρείται ότι, μετά το πρώτο ρήγμα, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα διατηρεί ακόμα την ικανότητά του να φέρει φορτία. Η ικανότητα αυτή, την οποία προσδίδουν στο σκυρόδεμα οι ίνες, οδηγεί στην αύξηση της δυσθραυστότητάς του. Το άοπλο σκυρόδεμα, αντίθετα, δεν έχει τη δυνατότητα να φέρει φορτία μετά την πρώτη ρωγμή και διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 5 παρατηρείται και η σημαντική επίδραση του ποσοστού όγκου των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Η αύξηση του ποσοστού όγκου των ινών, αυξάνει σημαντικά τη μέγιστη αντοχή αιχμής, την καμπτική αντοχή, την παραμένουσα αντοχή, καθώς και τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος.

Οι ίνες με κεκαμένα άκρα εμφανίζουν αυξημένη παραμένουσα αντοχή για βέλος κάμψης 0.5 mm και 2mm και δυσθραυστότητα σε σχέση με τις κυματοειδείς ίνες, οι οποίες εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή αιχμής και μεγαλύτερη καμπτική αντοχή.

4. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε πολύ την εταιρεία GEOTEST και ιδιαιτέρως τον κ. Ζωΐδη Νικόλαο για την αμέριστη βοήθεια στην παρασκευή των δοκιμίων, καθώς και την εταιρεία ΕΤΑΛ Α.Ε και τον κ. G.Periers για την προσφορά των ινών που χρησιμοποιήθηκαν και τη συμπαράστασή τους καθ'όλη την πορεία της έρευνας.

5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ACI 544.1R-96, Report on fiber reinforced concrete, American Concrete Institute (1996)

ACI 544.3R-93, Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete, American Concrete Institute (1993)

ACI 544.4R-88, Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, American Concrete Institute (1988)

ASTM C78-02, Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading), American Society for Testing and Materials (2002)

ASTM C1018-97, Standard test method for toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), American Society for Testing and Materials (1997)

ASTM C1609/C 1609M-05, Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), American Society for Testing and Materials (2005)

Gopalaratnam V.S. & Gettu R., "On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes". *Cement & Concrete Composites*, 17, (1995) 239-254

Johnston C.D., "Properties of steel fibre reinforced mortar and concrete", in *Proceedings of International Symposium on Fibrous Concrete (CI-80)*, Construction Press, Lancaster (1980) 29-47

Johnston C.D. & Skarendahl Å., "Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters". *Materials and Structures*, 25 (1992) 191-200

Saif Eldeen S.A. & Taniguchi T., "Numerical study of strengthening concrete using short steel fibers". *Japan Society for Computational Engineering and Science*, No 20060003 (2006)

Williamson, G.R., "The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete". *American Concrete Institute, Fiber Reinforced Concrete SP-44* (1974) 195-207

Yazıcı Ş., İnan G. & Tabak V., "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC". *Construction and Building Materials*, 21 (2007) 1250-1253

Σακελλαρίου Α.Γ , "Σύγκριση ιδιοτήτων άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Επίδραση της ποσότητας των ιών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος" Πρακτικά 15^ο συνεδρίου σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, Οκτώβριος 25-27 (2006)