

Σύγκριση ιδιοτήτων άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Επίδραση της ποσότητας των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος

Α. Γ. Σακελλαρίου
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, μεταλλικές ίνες, περιεκτικότητα ινών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στο άρθρο αυτό που αποτελεί μια εργαστηριακή έρευνα προσδιορίζονται και συγκρίνονται οι ιδιότητες άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Πέραν του κεντρικού στόχου της έρευνας που ήταν η ανάδειξη των ιδιοτήτων που αποκτά το άοπλο σκυρόδεμα μέσω προσθήκης μεταλλικών ινών, η εργασία στόχευε συμπληρωματικά και στην αποτύπωση της επίδρασης που μπορεί να έχει η μεταβολή της περιεκτικότητας των ινών στα μεγέθη αυτών των ιδιοτήτων. Η έρευνα περιορίστηκε σε εργαστηριακές δοκιμές και δεν χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι επί τόπου σκυροδέτησης π.χ. με μηχανές εκτόξευσης, χρήση επιταχυντικών προσμίκτων κλπ. Παρ' όλα αυτά πιστεύουμε ότι, τηρουμένων των αναλογιών, τα συμπεράσματα αυτής της μελέτης δεν επηρεάζονται καθοριστικά από τους παραπάνω περιορισμούς.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έρευνα αυτή πραγματεύεται την συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος ως προς τις μηχανικές ιδιότητές του. Αξιολογούνται τα αποτελέσματα δοκιμών σε θλίψη και κάμψη κυρίως δε η πλαστιμότητα του σκυροδέματος μέσω των δεικτών δυσθραυστότητας. Είναι γνωστό ότι η χρήση των ινών στο σκυρόδεμα είναι που προκαλεί την πλάστιμη συμπεριφορά του, με αποτέλεσμα η αστοχία πλέον να προκαλείται όχι από την ψαθυρότητα του υλικού αλλά από την εξόλκευση των ινών. Η όλη πειραματική εργασία βασίστηκε στην «φιλοσοφία» του εκτοξευόμενου σκυροδέματος ως εργαστηριακή όμως σύνθεση. Δηλαδή ακολουθήθηκε η διαδικασία των εκτοξευόμενων σκυροδεμάτων όπως: μελέτη συνθέσεως, δοκιμαστικές αναμίξεις, αναλογίες τελικού αναμίγματος, χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος, χαρακτηριστικά σκληρυνμένου σκυροδέματος. Η μόνη διαφοροποίηση ήταν ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν επιταχυντές πήξης και για την παρασκευή των δοκιμών δεν χρησιμοποιήθηκε μηχανή εκτόξευσης, για τη διάστρωση και συμπίκνωση.

2 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

2.1 Γενικά

Για να είναι εφικτή η συγκριτική μελέτη των ιδιοτήτων των ινοσκυροδεμάτων είναι απαραίτητο να επιλεγεί μια σύνθεση άοπλου σκυροδέματος.

Η σύνθεση αυτή προσδιορίζει τις αναλογίες και τα συστατικά του σκυροδέματος που θα αποτελέσει τη βάση πάνω στην οποία θα παρασκευασθούν όλα τα σκυροδέματα που θα περιέχουν διαφορετικές περιεκτικότητες ινών. Το άοπλο αυτό σκυρόδεμα θα ονομάζεται στο εξής σκυρόδεμα αναφοράς.

2.2 Απαιτήσεις σύνθεσης σκυροδέματος αναφοράς

Επειδή αφενός οι απαιτήσεις μιας μελέτης σύνθεσης σκυροδέματος ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσης εργασίας και αφ' ετέρου πρόκειται για μια συγκριτική μελέτη των ιδιοτήτων ινοσκυροδεμάτων αποφασίστηκε να υιοθετηθεί μια σύνθεση σκυροδέματος που να έχει χρησιμοποιηθεί στην πράξη (συνήθης σύνθεση εκτοξευόμενου σκυροδέματος σε μεγάλα έργα).

Βάσει της προτεινόμενης σύνθεσης το σκυρόδεμα επιλέχθηκε να περιέχει: 450 kg τσιμέντο ανά 1 m³ σκυροδέματος, λόγο νερού / τσιμέντο περίπου 0.50 αναλογίες αδρανών: άμμος 70% περίπου, γαρμπίλι 30% περίπου, υπερρυστοποιητής: 1% έως 1.5% κ.β. τσιμέντου.

2.3 Δοκιμαστικές αναμίξεις σκυροδέματος αναφοράς

Για να επιβεβαιωθούν οι αναλογίες της σύνθεσης του σκυροδέματος στην πράξη, όπως επίσης και για να προσδιορισθούν οι διάφορες ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (όπως: κάθιση, φαινόμενο βάρους και περιεκτικότητα σε αέρα) έγινε σειρά δοκιμαστικών σκυροδετήσεων στο εργαστήριο της ΔΕΗ. Οι δοκιμαστικές αναμίξεις συνοδεύτηκαν και από παρασκευή δοκιμίων σκυροδέματος.

Οι αναλογίες των υλικών φαίνονται αναλυτικά στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αναλογίες αναμίγματος του σκυροδέματος αναφοράς

Υλικό	Ποσότητα για 1m ³ σκυροδέματος (kg)
Τσιμέντο τύπου Ι42.5	450
Νερό	229
Άμμος	1090
Γαρμπίλι	468
Υπερρυστοποιητής	3.6
ΣΥΝΟΛΟ	2241

Στο σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε έγιναν οι δοκιμές κάθισης, φαινόμενου βάρους και περιεκτικότητας σε αέρα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στον παρακάτω πίνακα 2.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά νωπού σκυροδέματος αναφοράς

Δοκιμές	Νωπό σκυρόδεμα
Κάθιση (slump) (cm)	24
Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)	2292
Ποσοστό αέρα (%)	4.0

Από το παραπάνω ανάμιγμα παρασκευάστηκαν δοκίμια στα οποία έγιναν δοκιμές αντοχής σε θλίψη και κάμψη σε ηλικίες 7 ημερών και 28 ημερών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στον παρακάτω πίνακα 3.

Πίνακας 3. Αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε θλίψη και κάμψη δοκιμών σκυροδέματος αναφοράς

Δοκίμια	Αντοχή σε θλίψη (MPa)		Αντοχή σε κάμψη (MPa)	
	7 ΗΜΕΡΩΝ	28 ΗΜΕΡΩΝ	7 ΗΜΕΡΩΝ	28 ΗΜΕΡΩΝ
Κυβικά ακμής 15 cm	36.8	44.1 43.6	—	—
Πρισματικά 10x10x50 cm	—	—	2.6	4.9 5.3

2.4 Μελέτη συνθέσεως, δοκιμαστικές αναμίξεις και χαρακτηριστικά σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες

Με τη βοήθεια των εργαστηριακών ελέγχων που αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους οριστικοποιήθηκαν τα υλικά, οι αναλογίες τους, το είδος των δοκιμών που θα παρασκευάζονταν καθώς και οι βασικές ιδιότητες τόσο του νωπού (κάθιση, αέρας κλπ.) όσο και του σκληρυνμένου σκυροδέματος (αντοχή σε θλίψη, σε κάμψη, ηλικίες αντοχών κλπ.).

Με βάση τα παραπάνω ήταν πλέον εύκολο να προστεθούν ίνες στο σκυρόδεμα (αντικαθιστώντας ανάλογο μέρος των αδρανών) για την παρασκευή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Έτσι όπως αναλύεται παρακάτω παρασκευάστηκαν αναμίγματα ινοσκυροδέματος με περιεκτικότητα σε ίνες 50 kg/m³ αντίστοιχα. Από τα αναμίγματα αυτά, παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια για να εκτελεσθούν δοκιμές δυσθραυστότητας. Δοκιμές δυσθραυστότητας έγιναν και σε δοκίμια χωρίς ίνες. Οι δοκιμές αυτές περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια. Επί πλέον παρασκευάστηκαν και δοκίμια για να γίνουν οι κλασσικές δοκιμές.

Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω δοκιμών παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.5 Αναμίξεις σκυροδεμάτων και παρασκευή δοκιμών: με 50 kg ίνες ανά 1m³ σκυροδέματος

Η σύνθεση που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή που αναφέρεται προηγουμένως ως σύνθεση σκυροδέματος αναφοράς με μικροαλλαγές ως προς την ποσότητα των αδρανών όταν προστίθονταν στο ανάμιγμα με ίνες, όπως και στην ποσότητα του υπερρευστοποιητή (από 0.8 – 1.5 % κ.β τσιμέντου), ώστε η κάθιση να είναι περίπου η ίδια όπως και πριν. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινες με άγκιστρα μήκους 30mm και διαμέτρου 0.60mm (AR: 50). Οι αναλογίες των αναμιγμάτων δίνονται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αναλογίες αναμίγματος σκυροδέματος με 50 kg ίνες

Υλικό	Ποσότητα για 1m ³ σκυροδέματος (kg)
Τσιμέντο τύπου Ι42.5	450
Νερό	229
Άμμος	1075
Γαρμπίλι	460
Υπερρευστοποιητής	4.5
Ίνες	50
ΣΥΝΟΛΟ	2269

Οι δοκιμές στο νωπό σκυρόδεμα (κάθιση, περιεκτικότητα σε αέρα κλπ.) είναι αυτές που φαίνονται στον πίνακα 5.

Η σκυροδέτηση χωρίς ίνες αναφέρεται σαν σκυροδέτηση αναφοράς, ενώ η δεύτερη σκυροδέτηση χαρακτηρίζεται από την ποσότητα των ινών που περιέχει ανά 1 m³ σκυροδέματος, δηλαδή σκυροδέτηση των 50 kg.

Πίνακας 5. Τιμές ιδιοτήτων νεοπού σκυροδέματος

Δοκιμές	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες
Κάθιση (slump) (cm)	24	25
Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)	2292	2260
Περιεκτικότητα σε αέρα (%)	4.0	6.0

Στον παρακάτω πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής σε θλίψη.

Πίνακας 6. Θλιπτικές αντοχές 7 ημ. και 28 ημ. κυβικών δοκιμών για τα δύο είδη σκυροδεμάτων.

Αντοχή σε θλίψη	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες
Αντοχή σε θλίψη 7 ημ. (Μρα)	36.8	36.6
Αντοχή σε θλίψη 28 ημ. (Μρα)	44.1	40.8
	43.6	41.4

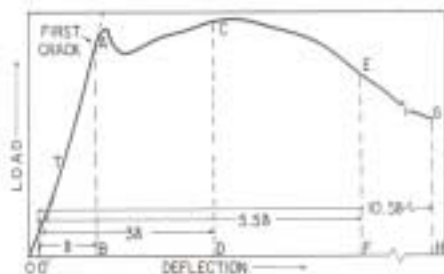
2.6 Δοκιμές δυσθραυστότητας ινοπλισμένων σκυροδεμάτων

Για τον ποσοτικό προσδιορισμό της βελτίωσης που επιτυγχάνεται στο σκυρόδεμα με την προσθήκη μεταλλικών ινών εδώ χρησιμοποιήθηκε μια πειραματική μέθοδος (ASTM C 1018), η οποία εκτιμά την επίδραση των ινών στην δυσθραυστότητα (toughness) μέσω της δοκιμής κάμψης στα τρίτα (ASTM C 78). Στην δοκιμή αυτή καταγράφεται το φορτίο σύμφωνα με μια εφαρμοζόμενη παραμόρφωση.

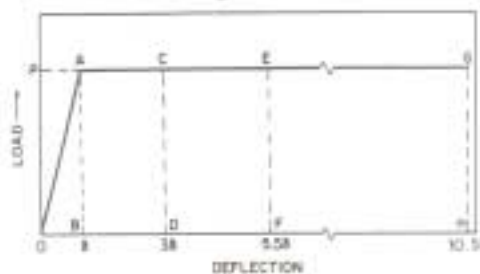
Αναλυτικότερα ένα πρισματικό δοκίμιο (10x10x35 cm) υφίσταται καμπτική φόρτιση στα τρίτα και σχεδιάζεται το διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης (Σχ. 1). Σύμφωνα μ' αυτή την προδιαγραφή, η καμπτική αντοχή f ορίζεται στην θέση της πρώτης ρωγμής και αντίστοιχα ορίζονται οι διάφοροι δείκτες δυσθραυστότητας: I. Η πρώτη ρωγή ορίζεται σαν το σημείο στο οποίο η καμπύλη φορτίου-παραμόρφωσης αποκλίνει από την ευθεία γραμμή.

Οι δείκτες δυσθραυστότητας είναι οι λόγοι της απορροφούμενης ενέργειας μέχρι κάποια συγκεκριμένη παραμόρφωση, προς την απορροφούμενη ενέργεια μέχρι την πρώτη ρωγή.

Οι δείκτες που προδιαγράφονται στην προδιαγραφή είναι οι I5, I10, I20, I30 που προσδιορίζονται για παραμορφώσεις 3δ, 5.5δ, 10.5δ και 15.5δ (Σχ. 1). Για συμπεριφορά πλήρως ελαστοπλαστικού υλικού μετά την πρώτη ρωγή (δηλαδή ικανότητα παραμόρφωσης, χωρίς μεταβολή του φορτίου) οι τιμές των δεικτών θα ήταν I5 = 5, I10 = 10, I20 = 20 και I30 = 30 (Σχ. 2).



Σχήμα 1. Τυπικό διάγραμμα φορτίου- παραμόρφωσης για σκυρόδεμα με μεταλλικές ίνες



Σχήμα 2. Τυπικό διάγραμμα φορτίου-παραμόρφωσης για πλήρως ελαστοπλαστικό σώμα.

Οι δοκοί του ινοσκυροδέματος ελέγχονται σε κάμψη με φόρτιση διπλού φορτίου στα τρίτα (ASTM C78). Η μηχανή επιβολής του φορτίου έχει σταθερό ρυθμό αύξησης της παραμόρφωσης (deflection) του δοκιμίου λιγότερο από 1 μm ανά δευτερόλεπτο. Τοποθετείται ένας ηλεκτρικός μορφοτροπέας (transducer) στο μέσον των στηρίξεων του δοκιμίου για να κάνει συνεχή ανάγνωση της παραμόρφωσης, ενώ ένας δεύτερος μορφοτροπέας κάνει συνεχή ανάγνωση του αντίστοιχου φορτίου (φωτ. Νο 1). Οι δύο αναγνώσεις περνούν μέσα σε Η/Υ και με την βοήθεια γραφικού προγράμματος χαράσσεται η καμπύλη φορτίο-παραμόρφωση. Για τα συγκεκριμένα δοκίμια η παραμόρφωση δ, ήταν της τάξης των 0.30 mm. Η δοκιμή σταματά όταν η παραμόρφωση υπερβεί τα 30 ή 50δ. Το δοκίμιο παρά το εύρος της ρηγμάτωσης που υφίσταται πολλές φορές δεν διαχωρίζεται αλλά συνεχίζει να είναι «ραμμένο» από τις ίνες (φωτ. 1).

Μετά την χάραξη των διαγραμμάτων ακολουθούν οι υπολογισμοί των διαφόρων μεγεθών (φορτίο πρώτης ρωγμής Ρδ, αντοχή πρώτης ρωγμής Rδ, παραμόρφωση πρώτης ρωγμής δ, εμβαδόν κάτω από την καμπύλη μέχρι την παραμόρφωση της πρώτης ρωγμής Eδ, τα εμβαδά που αντιστοιχούν στην παραμόρφωση που είναι ίση με 3δ, 5.5δ, 10.5δ και 15.5δ, τους δείκτες δυσθραυστότητας $I5 = E 3δ/Eδ$, $I10 = E 5.5δ/Eδ$, $I20 = E 10.5δ/Eδ$ και $I30 = E 15.5δ/Eδ$ κλπ).

Η μηχανή κάμψης που χρησιμοποιήθηκε στις αντίστοιχες δοκιμές φαίνεται στη φωτογραφία (φωτ. 1) και είναι ένα προηγμένο ψηφιακό τριαξονικό σύστημα, αγγλικής προέλευσης.



Φωτ. 1. Διάταξη δοκιμής δυσθραυστότητας



Σχήμα 3. Διάταξη φόρτισης πρισματικών δοκιμίων

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να παρέχει με ένα μόνο μηχάνημα όλες τις βασικές λειτουργίες που απαιτούνται για την εκτέλεση εξειδικευμένων δοκιμών.

Διεκπεραιώνει τον έλεγχο μιας πλάκας φόρτισης που λειτουργεί με βηματιστικό κινητήρα σε ταχύτητες που κυμαίνονται από 0.00000 έως 9.99999 mm/min. Στην συγκεκριμένη εργασία επιλέχθηκε σταθερή ταχύτητα ίση με 0.05mm/min.

Παρέχει υποστήριξη για μέχρι 4 εισόδους αναλογικού μορφοτροπέα, καλύπτοντας την εμβέλεια από 15 έως 80 mV. Ο έλεγχος των μηχανών και των λοιπών επιλογών, η διαμόρφωση των παραμέτρων και η παρουσίαση των αποτελεσμάτων, γίνεται μέσω οθόνης LCD και ταμπλό με 20 πλήκτρα μεμβράνης.

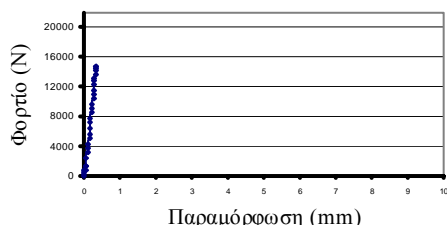
Η διάταξη της δοκιμής φαίνεται στο Σχήμα 3. Το φορτίο του εμβόλου υποδιπλασιάζεται στο άκρο του μέσω της διάταξης αυτής και κάθε τμήμα του φορτίου εφαρμόζεται στα τρίτα του ανοίγματος. Η απόσταση των στηρίξεων στους δοκούς με διαστάσεις 10x10x50 cm που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν 30 cm, ενώ το καμπτόμενο μήκος της δοκού ήταν 10 cm (I/3). Η εφαρμογή του φορτίου όπως προείπαμε έγινε με έλεγχο επιβαλλόμενης μετατόπισης με περίοδο 0.05 mm/min μέχρι παραμόρφωση 3 mm, οπότε η ταχύτητα γινόταν 0.1 mm/min. Η όλη διάταξη της δοκιμής καταγράφονταν σε βίντεο έτσι ώστε να λαμβάνονται ευκολότερα τα αποτελέσματα αλλά και να

είναι δυνατός ο επανέλεγχός τους ανά πάσα στιγμή. Η εφαρμογή του φορτίου γίνεται κάθετα στην επιφάνεια της δοκού και η παραμόρφωση που μετρείται είναι η βύθιση της άνω πλάκας της μηχανής (ίση με την συνισταμένη των παραμορφώσεων στο μέσο της δοκού).

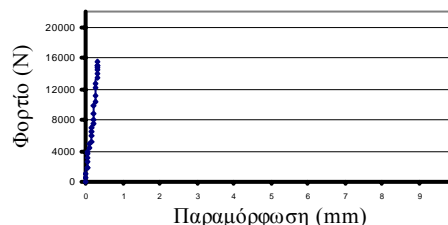
2.7 Αποτελέσματα δοκιμών δυσθραυστότητας

Δοκιμές δυσθραυστότητας έγιναν σε ηλικία 28 ημερών και για τις δύο συνθέσεις σκυροδεμάτων (με ίνες και χωρίς ίνες). Από κάθε σύνθεση έγιναν δοκιμές σε δύο δοκίμια. Ας σημειωθεί ότι δοκιμές δυσθραυστότητας έγιναν αντίστοιχα και σε ηλικίες 7 ημ. από κάθε σύνθεση που δεν αξιολογούνται στην παρούσα εργασία. Η διαδικασία των δοκιμών έγινε όπως αναλυτικά αναφέρεται παραπάνω. Βάσει της δοκιμής αυτής προέκυψαν τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου-παραμόρφωσης που παρουσιάζονται στην συνέχεια (σύνολο 4 διαγράμματα με συμβολισμούς No 1, No 2, No 3 και No 4).

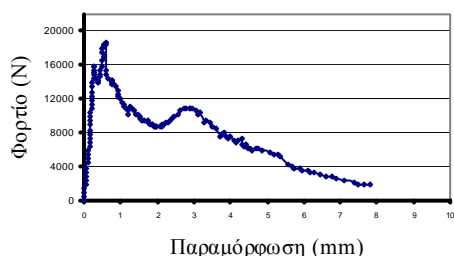
Διάγραμμα No 1. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου σκυροδέματος χωρίς ίνες ηλικίας 28 ημερών



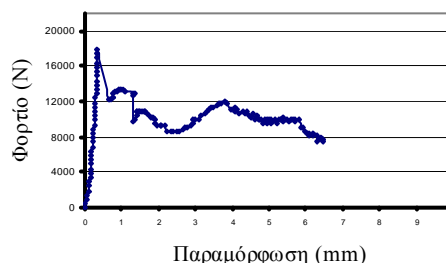
Διάγραμμα No 2. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου σκυροδέματος χωρίς ίνες ηλικίας 28 ημερών



Διάγραμμα No 3. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος με 50 kg ίνες ηλικίας 28 ημερών



Διάγραμμα No 4. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος με 50 kg ίνες ηλικίας 28 ημερών



Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει μια σειρά στοιχείων που δίδονται παρακάτω υπό την μορφή πινάκων. Στον παρακάτω πίνακα 7 παρουσιάζεται η αντοχή των δοκιμών σε κάμψη.

Πίνακας 7. Αντοχή σε κάμψη 28 ημερών πρισματικών δοκιμών για τα τέσσερα διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων.

Αντοχή σε κάμψη	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες
R_F (Mpa)	4.5	5.4
	4.7	5.5

Στον παρακάτω πίνακα 8 παρουσιάζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας για κάθε δοκίμιο. Προφανώς δείκτες δυσθραυστότητας δεν υπάρχουν για τα δοκίμια της σύνθεσης χωρίς ίνες,

ακριβώς διότι μετά την πρώτη ρωγμή το δοκίμιο δεν μπορεί να συγκρατήσει καθόλου φορτίο και ως εκ τούτου διαχωρίζεται στα δύο (ψαθυρά θραύση) σε αντίθεση με τα δοκίμια που περιέχουν ίνες. Αυτό παραστατικά φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα. Στον ίδιο πίνακα φαίνονται και οι τιμές της παραμένουσας αντοχής όπως προέκυψαν από τους υπολογισμούς των δεικτών δυσθραυστότητας.

Πίνακας 8. Δείκτες δυσθραυστότητας και παράμετροι παραμένουσας αντοχής πρισματικών δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών για το σκυρόδεμα με 50 kg ίνες

Δείκτες δυσθραυστότητας/			
Παράμετροι παραμένουσας αντοχής	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)		Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες
I ₅	-----		4.6
			4.2
I ₁₀	-----		8.0
			7.8
I ₂₀	-----		13.4
			13.4
I ₃₀	-----		19.1
			20.0
R5,10	-----		60
[R5,10 = 20 (I10 – I5)]			73
R10,20	-----		54
[R10,20 = 10 (I20 – I10)]			56
R10,30	-----		56
[R10,30 = 5 (I30 – I10)]			61

2.8 Μελέτη συνθέσεως, αναμίξεις και χαρακτηριστικά ινοπλισμένου σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες διαφορετικής περιεκτικότητας

Για την αξιολόγηση της επίδρασης του ποσοστού των ινών στα ινοσκυροδέματα, παρασκευάστηκαν με την ίδια πειραματική διαδικασία και ελέγχθηκαν οι ιδιότητές τους δύο ακόμα είδη ινοσκυροδεμάτων. Το πρώτο με περιεκτικότητα ινών 30 kg/m³ και το δεύτερο με 70 kg/m³ σκυροδέματος. Οι ποσότητες αυτές πέραν του ότι κυμαίνονται αμφίπλευρα του ορίου των 50kg/m³ κατά ±40% κ.β. ινών αποτελούν και τα συνήθη ακραία όρια εμπλουτισμού των ινοσκυροδεμάτων με ίνες.

Στη συνέχεια δίνεται μια σειρά πινάκων (πίνακας 9, 10, 11, 12, 13) που αποτυπώνουν τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και τέσσερα διαγράμματα φορτίου – παραμόρφωσης για τα δύο είδη ινοσκυροδεμάτων με 30 kg/m³ και με 70 kg/m³ ίνες αντίστοιχα.

Πίνακας 9. Τιμές ιδιοτήτων νωπού σκυροδέματος για τα 4 διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων.

Δοκιμές	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
Κάθιση (slump) (cm)	24	27	25	24
Φαινόμενο βάρος (kg/m ³)	2292	2301	2260	2268
Περιεκτικότητα σε αέρα (%)	4.0	3.2	6.0	5.5

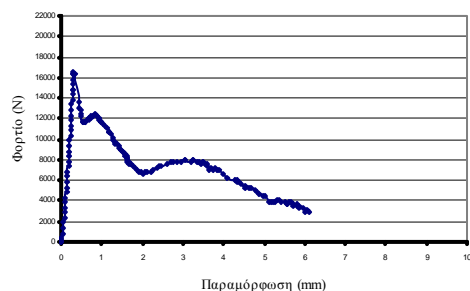
Πίνακας 10. Θλιπτικές αντοχές 7 ημ. και 28 ημ. κυβικών δοκιμίων για τα 4 διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων.

Αντοχή σε θλίψη	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
Αντοχή σε θλίψη 7 ημ. (Mpa)	36.8	38.7	36.6	34.2
Αντοχή σε θλίψη 28 ημ. (Mpa)	44.1	44.6	40.8	42.6
	43.1	44.9	41.4	41.1

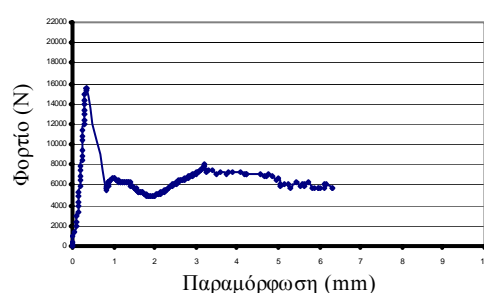
Πίνακας 11. Αντοχή σε κάμψη 28 ημερών πρισματικών δοκιμίων για τα τέσσερα διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων.

Αντοχή σε κάμψη	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
R_F (Mpa)	4.5	4.9	5.4	5.9
	4.7	4.7	5.5	4.8

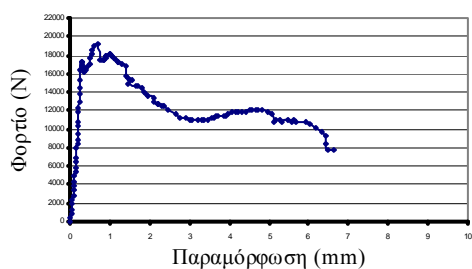
Διάγραμμα Νο 5. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος με 30 kg ίνες ηλικίας 28 ημερών



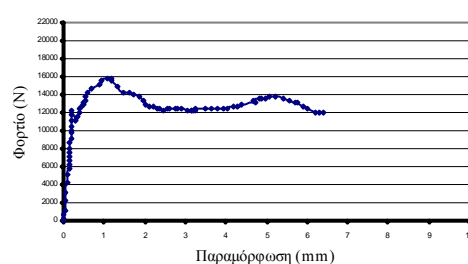
Διάγραμμα Νο 6. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος με 30 kg ίνες ηλικίας 28 ημερών



Διάγραμμα Νο 7. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος με 70 kg ίνες ηλικίας 28 ημερών.



Διάγραμμα Νο 8. Καμπύλη φορτίου – καμπτικής παραμόρφωσης δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος με 70 kg ίνες ηλικίας 28 ημερών



Πίνακας 12. Δείκτες δυσθραυστότητας πρισματικών δοκιμών ηλικίας 28 ημερών για τα τρία διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων.

Δείκτες δυσθραυστότητας	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
I ₅	-----	4.5	4.6	5.5
		3.8	4.2	4.4
I ₁₀	-----	8.1	8.0	11.3
		5.7	7.8	9.5
I ₂₀	-----	13.1	13.4	20.8
		9.0	13.4	19.9
I ₃₀	-----	18.2	19.1	26.6
		12.8	20.0	29.5

Πίνακας 13. Παράμετροι παραμένουσας αντοχής πρισματικών δοκιμών ηλικίας 28 ημερών για τα τρία διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων.

Παράμετροι παραμένουσας αντοχής	Σκυρόδεμα χωρίς ίνες (αναφοράς)	Σκυρόδεμα με 30 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 50 kg ίνες	Σκυρόδεμα με 70 kg ίνες
R _{5,10}	-----	70	60	116
[R _{5,10} = 20 (I ₁₀ - I ₅)]		38	73	101
R _{10,20}	-----	50	54	96
[R _{10,20} = 10 (I ₂₀ - I ₁₀)]		33	56	104
R _{10,30}	-----	51	56	76
[R _{10,30} = 5 (I ₃₀ - I ₁₀)]		36	61	100

3 ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Σύγκριση ιδιοτήτων άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες

Από το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων που διεξήχθησαν σ' αυτήν την εργαστηριακή μελέτη προέκυψε μια σειρά στοιχείων που βοήθησαν στην ποσοτική αποτίμηση των ιδιοτήτων τόσο του νωπού όσο και του σκληρυνμένου σκυροδέματος.

Το πλαίσιο της πειραματικής εργασίας, όπως ήδη γράφτηκε, ήταν να καθορισθεί ένα σκυρόδεμα με σύνθεση αντιπροσωπευτική των συνήθων έργων εκτοξευόμενου σκυροδέματος (π.χ. για υπόγεια έργα κλπ.).

Το σκυρόδεμα αυτό διακρινόταν τόσο για την πλούσια περιεκτικότητά του σε τσιμέντο Portland (τύπου I 42.5 με περιεκτικότητα 450 kg/m³) όσο και για τον μικρό λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T = 0.50), στοιχείο που του δίνει χαρακτηριστικά ανθεκτικότητας στο χρόνο και υψηλών αντοχών (αντοχή σε θλίψη: 45 MPa περίπου). Το σκυρόδεμα αυτό τέλος είχε μεγάλη κάθιση (slump: 25 cm περίπου), όπως εξάλλου συνηθίζεται στα υπόγεια έργα, ιδιότητα που εξασφαλίζεται με την χρήση υπερρευστοποιητών.

Ας σημειωθεί από τώρα ότι αυτή η έρευνα περιορίστηκε σε καθαρά εργαστηριακές δοκιμές και δεν χρησιμοποιήθηκαν π.χ. μέθοδοι επί τόπου σκυροδέτησης με μηχανές εκτόξευσης, χρήση επιταχυντών προσμίκτων κλπ. Παρόλα αυτά πιστεύουμε ότι, τηρουμένων των αναλογιών, τα

συμπεράσματα αυτής της μελέτης δεν επηρεάζονται καθοριστικά από τους παραπάνω περιορισμούς.

Το σκυρόδεμα αυτό που λόγω σύνθεσης και συστατικών εντάσσεται στα εκτοξευόμενα σκυροδέματα κατά του κανονισμούς (π.χ. EFNARC κλπ), εμπλουτίστηκε με μεταλλικές ίνες για να βελτιωθούν οι ελαστοπλαστικές του ιδιότητες και να αποκτήσει δυνατότητα ανάληψης ικανών παραμορφώσεων, υπό φόρτιση. Η πολιτική αυτή τείνει σήμερα να γίνει κυρίαρχη στην υποστήριξη π.χ. σηράγγων στα υπόγεια έργα αντικαθιστώντας έτσι το μεταλλικό πλέγμα με την ενσωμάτωση των ινών στο σκυρόδεμα. Η βελτίωση αυτή μετρήθηκε με δοκιμές δυσθραυστότητας κατά τα πρότυπα της Αμερικάνικης προδιαγραφής ASTM C 1018. Η επίδραση της προσθήκης των ινών φαίνεται παραστατικά στα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών με την δημιουργία των καμπυλών φορτίου-παραμόρφωσης πέραν της πρώτης ρηγμάτωσης όπως δείχνουν τα αντίστοιχα διαγράμματα της § 2.7. Αποτέλεσμα της ύπαρξης αυτών των καμπυλών είναι η «δημιουργία» των δεικτών δυσθραυστότητας (I_i). Ας σημειωθεί εδώ ότι οι δείκτες δυσθραυστότητας, έτσι όπως ορίζονται από την προδιαγραφή ASTM C1018, μπορούν να ειδωθούν και ως ένας τρόπος μέτρησης της απορροφούμενης ενέργειας από το ινοπλισμένο σκυρόδεμα όταν αυτό φορτίζεται, ρηγματώνεται και εξακολουθεί να φέρει τμήμα του φορτίου εμφανίζοντας ουσιαστικές παραμορφώσεις. Οι διάφορες κατηγορίες των δεικτών (I_5 , I_{10} , I_{20} κλπ) δείχνουν αυτήν την ικανότητα απορρόφησης για συγκεκριμένες τιμές παραμόρφωσης (ουσιαστικά του βέλους κάμψης στο πείραμα).

Το ίδιο εκφράζουν και οι παράμετροι παραμένουσας αντοχής (δηλαδή οι παράμετροι $R_{10,30}$ κλπ) που επισημαίνουν την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας σε συγκεκριμένες «ζώνες» παραμόρφωσης (η $R_{10,30}$ π.χ. το εμβαδόν της απορροφούμενης ενέργειας μεταξύ των παραμορφώσεων που αντιστοιχούν στους δείκτες I_{30} και I_{10} ανηγμένου στο εμβαδόν απορροφούμενης ενέργειας του σκυροδέματος χωρίς ίνες). Το εύχρηστο αυτών των παραμέτρων είναι ότι μπορούν να αξιολογηθούν (τουλάχιστον ποιοτικά), αν κανείς αναλογισθεί ότι σώμα με τέλεια ελαστοπλαστική συμπεριφορά έχει μέγεθος παραμέτρων παραμένουσας αντοχής ίση με την τιμή: 100.

Έτσι μέσα από αυτές τις δοκιμές και κυρίως μέσα από αυτούς τους δείκτες δυσθραυστότητας και τις παραμέτρους παραμένουσας αντοχής γίνεται φανερή η απόκτηση ιδιοτήτων που το ψαθυρό σκυρόδεμα είναι αδύνατον να έχει. Προσθήκη ινών στρέφει συμπεριφορά του σώματος σε ελαστοπλαστική. Το αν αυτή η συμπεριφορά επιτυγχάνεται και πόσο προσδιορίζεται από τις αριθμητικές τιμές των δεικτών και το εμβαδόν των διαγραμμάτων φορτίου-βέλους κάμψης.

3.2 Επίδραση της ποσότητας ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος

Ένας άλλος μεγάλος στόχος αυτής της πειραματικής εργασίας ήταν να απαντήσει στο ερώτημα: αν αυξάνοντας την περιεκτικότητα των ινών βελτιώνονται οι παραπάνω ιδιότητες και μεγέθη. Έτσι αποφασίστηκε να ελεγχθούν ινοσκυροδέματα με διαφορετικές περιεκτικότητες ινών μέσα στην ζώνη που απαντάται στα διάφορα έργα. Οι περιεκτικότητες αυτές ήταν: 30 kg ινών, 50 kg και 70 kg ανά $1m^3$ ινοσκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στα διαγράμματα και τους πίνακες της § 2.8. Για την ευχέρεια της σύγκρισης υιοθετήθηκαν σαν βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών με ινοσκυρόδεμα που περιέχει 50 kg ίνες. Η αναγωγή αυτή αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα 14. Στον πίνακα αυτό όλα τα μεγέθη των ινοσκυροδεμάτων με ίνες $50kg/m^3$ έχουν αναχθεί στο 100% του επιδιωκόμενου στόχου. Αντίστοιχα τα μεγέθη των άλλων σκυροδεμάτων ανήχθησαν σε ποσοστό αυτού του στόχου. Ας σημειώσουμε ότι προφανώς αυτές οι απλουστεύσεις γίνονται για να δείξουν κάποιες τάσεις των υλικών και μόνον για χάρη συγκρίσεως.

Πίνακας 14. Συγκριτικές τιμές ιδιοτήτων για τα διαφορετικά είδη σκυροδεμάτων. Οι τιμές του σκυροδέματος με ίνες 50kg/m³ έχουν αναχθεί στο 100%. Η ηλικία όλων των δοκιμών όλων των σκυροδεμάτων ήταν 28 ημέρες.

Ιδιότητα	Συμβολισμός	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες 50 kg/m ³	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες 30 kg/m ³	Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες 70 kg/m ³	Άοπλο σκυρόδεμα χωρίς ίνες
Αντοχή σε θλίψη	-	100	109	102	106
Αντοχή σε κάμψη	-	100	88	98	84
Δείκτες δυσθραυστότητας	I ₅	100	94	112	-
	I ₁₀	100	87	132	-
	I ₂₀	100	83	152	-
	I ₃₀	100	79	144	-
Παράμετροι παραμένουσας αντοχής	R _{5,10}	100	81	163	-
	R _{10,20}	100	76	182	-
	R _{10,30}	100	74	150	-

Από τις συγκρίσεις αυτές φαίνεται ότι η περιεκτικότητα των ινών παίζει σημαντικό ρόλο στη βελτίωση των ιδιοτήτων που προσφέρουν στο σκυρόδεμα. Έτσι π.χ. ξεκινώντας από την θέση ότι οι δείκτες δυσθραυστότητας του ινοσκυροδέματος με ίνες 50 kg/m³ επιτυγχάνονται κατά 100%, μείωση των ινών στα 30 kg/m³ μειώνει τους δείκτες (από το 94% έως το 79%) αυξανόμενης της μείωσης για τους δείκτες που αφορούν σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Αντίθετα αύξηση των ινών σε 70 kg/m³ βελτιώνει θεαματικά τους δείκτες μέχρι και στο 150%. Ανάλογες είναι και οι μεταβολές για τις παραμέτρους παραμένουσας αντοχής.

Τέλος, ένας παράγοντας που θα έπρεπε να σχολιαστεί είναι η απάντηση στο ερώτημα: βελτιώνουν οι ίνες πέραν των ελαστοπλαστικών παραμέτρων τις αντοχές αυτές καθ' εαυτές των σκυροδεμάτων, τόσο της αντοχής σε θλίψη όσο και της αντοχής σε κάμψη; Η σύγκριση των αντοχών στον παραπάνω πίνακα δείχνει ότι τουλάχιστον με τα δεδομένα της παρούσας μελέτης η αντοχή σε θλίψη δεν αυξάνεται. Η αντοχή σε κάμψη δείχνει να αυξάνεται από 4% μέχρι και 19% περίπου αλλά όχι σε ευθεία αναλογία με την περιεκτικότητα των ινών. Βέβαια λόγω μικρού πλήθους δοκιμών αφενός και αφετέρου λόγω διασποράς των αποτελεσμάτων της ίδιας της δοκιμής η μελέτη αυτή δεν μπορεί, ιδιαίτερα για την αντοχή σε κάμψη, να καταλήξει σε πλήρη συμπεράσματα. Μία νέα μελέτη εστιασμένη σ' αυτά τα προβλήματα θα μπορούσε να φωτίσει περισσότερο το θέμα.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της μελέτης επιβεβαιώνουν τις εξαιρετικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων, όταν στη μάζα τους προστίθενται μεταλλικές ίνες. Η κυρίαρχη ιδιότητα που αποκτούν είναι η έννοια της απορροφούμενης ενέργειας κατά τη θραύση, ιδιότητα που μετατρέπει το σκυρόδεμα από ψαθυρό υλικό σε υλικό με ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά. Η νέα αυτή συμπεριφορά των ινοσκυροδεμάτων έγινε δυνατό να αποτιμηθεί μέσω της έννοιας της δυσθραυστότητας, έτσι όπως ορίζεται από τους δείκτες δυσθραυστότητας και τις παραμέτρους της παραμένουσας αντοχής, ορισμοί που προσδιορίζονται στην προδιαγραφή ASTM C 1018.

Οι μετρήσεις, τα αποτελέσματα και οι υπολογισμοί αυτής της εργαστηριακής έρευνας, εστιάστηκαν στις κύριες ιδιότητες των ινοσκυροδεμάτων, τόσο σ' αυτές του νωπού όσο και του

σκληρυνμένου σκυροδέματος. Ανέδειξαν τη θεαματική βελτίωση που υφίσταται το άοπλο σκυρόδεμα μέσω των διαγραμμάτων φορτίου-παραμόρφωσης σε δοκιμές κάμψης, πράγμα που αποδεικνύει την αλήθεια των παραπάνω διαπιστώσεων.

Τέλος και συμπληρωματικά με τα ανωτέρω, αποδείχθηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας, ότι το μέγεθος της βελτίωσης των ιδιοτήτων των ινοσκυροδεμάτων είναι συνάρτηση της περιεκτικότητάς τους σε ίνες. Έτσι, εμπλουτίζοντας τη μάζα των σκυροδεμάτων με ίνες, βελτιώνονται τα χαρακτηριστικά της δυσθραυστότητας, ενώ μειώνοντας τη δοσολογία των ινών, τα χαρακτηριστικά αυτά υποβαθμίζονται.

5 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο συγγραφέας επιθυμεί να ευχαριστήσει τον Πολιτικό Μηχανικό κ. Ν. Παναγούλια για τη σημαντική του βοήθεια κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Επίσης ευχαριστεί όλο το προσωπικό του Εργαστηρίου Σκυροδέματος του ΚΔΕΠ/ΔΕΗ.

6 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος. Έκδοση 1997
2. Σακελλαρίου Α.Γ. και Συνεργάτες 1994. Δοκιμές δυσθραυστότητας (flexural toughness) δοκιμών σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Κέρκυρα: 11^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος ΤΕΕ. Τόμος 1: 167-179
3. Σακελλαρίου Α.Γ 2000. Ποιοτικός έλεγχος ινοπλισμένων σκυροδεμάτων μέσω των δεικτών δυσθραυστότητας. Ξάνθη: 1^ο Συνέδριο Σύνθετων Υλικών ΔΠΘ-ΤΕΕ.
4. ASTM A 820-90. Steel fibers for fiber reinforced concrete.
5. ASTM C 78-84. Flexural strength of concrete using simple beam with third-point loading.
6. ASTM C 1018-85. Flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete using beam with third-point loading.
7. ASTM C 1018-92. Τροποποίηση του ASTM C 1018-85.
8. EFNARC. 1996. European Specification for Sprayed Concrete
9. H.A.D. Kirsten. 1997. Fibre-reinforced shotcrete. World tunneling. 411-414.
10. Recommendations of RILEM TC 162-TDF: σ - ϵ design method. January-February 2000. Test and design methods for steel fiber reinforced concrete by L. Vandewalle. Materials and structures, Vol.33, No 225: 3-5.
11. Recommendations of RILEM TC 162-TDF: σ - ϵ design method. March 2000. Materials and structures, Vol.33, No 226: 75-81.
12. Vandewalle, M., 1991. Tunneling the world. N.V. Bekaert S.A.. Belgium.