

Εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς και της δυσθραυστότητας ινοπλισμένου κίσηροσκυροδέματος μέσω δοκιμής διπλής διάτρησης

Evaluation of the mechanical behavior and the toughness of
pumice fiber-reinforced concrete using the double punch test

Γρηγόρης ΤΖΑΝΕΤΑΤΟΣ¹, Γεώργιος ΠΑΠΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ²,
Ευστράτιος ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ³

Λέξεις-κλειδιά: Σκυρόδεμα, Κίσηρης, Ίνες, Δοκιμή Διπλής Διάτρησης-Barcelona, Εφελκυστική αντοχή, Πλαστιμότητα

Keywords: Concrete, Pumice, Fibers, Double Punch – Barcelona test, tensile strength, ductility

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία αυτή μελετάται η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου κίσηροσκυροδέματος με χαλύβδινες και συνθετικές ίνες. Στόχος της εργασίας είναι να αναδειχτεί η δυνατότητα αξιοποίησης Ελληνικών κοιτασμάτων κίσηρης στην τεχνολογία σκυροδέματος δομοστατικών εφαρμογών. Σε κοινή σύνθεση κίσηροσκυροδέματος προστέθηκαν τρεις χαλύβδινες (SF), διαφορετικών μηκών, ευθύγραμμες με άγκιστρα και μία συνθετική – πολυπροπυλενίου (PF), ευθύγραμμη σε ποσοστά 0.5% και 1.0% κ.ο.. Εκτός των κλασικών δοκιμών νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, προσδιορίστηκε η έμμεση εφελκυστική αντοχή του, μέσω της δοκιμής Διπλής Διάτρησης – Barcelona και μελετήθηκε η συμπεριφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση. Διαπιστώθηκε η ανάπτυξη παραμένουσας αντοχής σε όλα τα δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος.

ABSTRACT: The mechanical behavior and the properties of pumice fiber reinforced concrete are investigated. Aim of this study is the exploitation of Greek pumice deposits in concrete technology and the use of pumice concrete in

¹ Προπτυχιακός Φοιτητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών,
email: grigoristzanetatos@gmail.com

² ΕΔΙΠ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών,
email: gpapanto@metal.ntua.gr

³ Επικ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
email: badstrat@central.ntua.gr

structural applications. Three types of straight and hooked steel fibers (SF) of different lengths and one synthetic (polypropylene) fiber (PF) were added to plain pumice concrete at 0.5% and 1.0% per volume. The typical fresh and hardened concrete tests were conducted and its indirect tensile strength was calculated from the Double Punch – Barcelona test. It is clear that all specimens develop significant residual strength.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κίσηρης είναι το φθηνότερο και πιο διαδεδομένο φυσικό ελαφρό αδρανές. Χαρακτηρίζεται από χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα, έντονο πορώδες και υψηλή υδαταπορροφητικότητα. Το γεγονός αυτό την καθιστά ενδιαφέρουσα μιας και τα φυσικά και τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος εξαρτώνται σημαντικά από τα χρησιμοποιούμενα αδρανή και ειδικότερα από την πυκνότητα τους. Με τη μερική αντικατάσταση, συνήθως του χονδρόκοκκου κλάσματος, των συμβατικών αδρανών με κίσηρη, παράγεται σκυρόδεμα με σαφώς μειωμένο ίδιο βάρος και καλή συνάφεια μεταξύ των φάσεων του υλικού. Παρουσιάζει όμως μειωμένη θλιπτική αντοχή και έντονα ψαθυρή συμπεριφορά. Προκειμένου να βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά του κίσηροσκυροδέματος, προστίθενται ίνες διαφόρων υλικών (χαλύβδινες, συνθετικές, φυσικές) και μορφής.

Στη βιβλιογραφία, οι ερευνητικές εργασίες για το ελαφροσκυρόδεμα αφορούν στη μέθοδο παρασκευής του, στη χρήση ινών για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών του και στη δυνατότητα αξιοποίησης του σε δομοστατικές εφαρμογές (Balaguru et al, 1987, Banthia et al, 1994, Campione et al, 2004, Düzgün et al, 2005, Campione et al, 1999).

Με τη δοκιμή διπλής διάτρησης είναι δυνατός ο έμμεσος προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Κατά τη δοκιμή, χρησιμοποιούνται κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 150 mm, τα οποία φορτίζονται θλιπτικά μέσω δύο μεταλλικών κυλίνδρων διαμέτρου 37.5 mm, τοποθετημένων στο κέντρο τους, που κατά τη φόρτιση λειτουργούν ως σφήνες. Όταν η επιβαλλόμενη ένταση υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το δοκίμιο αστοχεί προκαλώντας ακτινικές ρωγμές κάθετα στο πεδίο της έντασης. Η επίδραση των ινών αποτυπώνεται μέσω του εμβαδού της καμπύλης φορτίου – περιμετρικής διόγκωσης του σκυροδέματος (Carmona et al, 2013).

Στην εργασία αυτή μελετάται η επίδραση χαλύβδινων όσο και συνθετικών ινών, αλλά και η αξιολόγηση της μηχανικής συμπεριφοράς του κίσηροσκυροδέματος μέσω της δοκιμής διπλής διάτρησης (Barcelona).

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Υλικά

Για την παρασκευή του κίσηροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM IV/B (P-W) 32.5R, δηλαδή τσιμέντο που περιέχει φυσική ποζολάνη και ιπτάμενη τέφρα. Η κίσηρης που χρησιμοποιήθηκε είναι ελληνικής προέλευσης, με κοκκομετρική διαβάθμιση 8–16 mm. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ασβεστολιθική άμμος και ριζάκι, μεγέθους 0-4 και 4–8 mm, αντίστοιχα. Στον **Πίνακα 1** δίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των χρησιμοποιούμενων αδρανών. Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής Sika Viscocrete και πυριτιακή παιπάλη τύπου Sika Fume HR-D, ως πρόσθετο σκυροδέματος.

Πίνακας 1. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

Κόσκινο, i (mm)	% διερχόμενο βάρος αδρανών από το κόσκινο i		
	Κίσηρης	Ριζάκι	Άμμος
31.50	100.0	100.0	100.0
16.00	100.0	100.0	100.0
12.70	87.9	97.8	100.0
9.51	45.3	57.1	100.0
6.30	25.0	6.1	100.0
4.76	10.1	0.5	100.0
2.38	8.2	0.0	75.0
2.00	8.0	0.0	69.5
1.00	0.0	0.0	46.9
0.50	0.0	0.0	31.1
0.25	0.0	0.0	20.2

Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν είναι τριών ειδών χαλύβδινες και μικροΐνες πολυπροπυλενίου. Οι χαλύβδινες ίνες είναι ευθύγραμμες με άγκιστρα, τριών διαφορετικών μηκών: 60, 36 και 30 mm, οι οποίες για τις ανάγκες των δοκιμών κωδικοποιούνται ως SF60, SF36 και SF30, αντίστοιχα. Οι μικροΐνες πολυπροπυλενίου είναι ευθύγραμμες και κωδικοποιούνται ως PF. Στον **Πίνακα 2** δίνονται τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων ινών αντίστοιχα.

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά ινών

	SF30	SF36	SF60	PF
Υλικό	Χάλυβας	Χάλυβας	Χάλυβας	Πολυπροπυλένιο
Μορφή	Ευθύγραμμη, άγκιστρα	Ευθύγραμμη, άγκιστρα	Ευθύγραμμη, άγκιστρα	Ευθύγραμμη
Μήκος (mm)	30	36	60	52
Διάμετρος (mm)	0.55	0.63	0.92	0.46
Λόγος μορφής	55	57	65	113
Αντοχή Θραύσης (MPa)	1100	δ.δ.	δ.δ.	613
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	200	200	200	5.4

δ.δ.: δεν διατίθεται

Παρασκευή σκυροδέματος και πειραματικές μετρήσεις

Συνολικά παρασκευάστηκαν εννέα συνθέσεις κίσηροσκυροδέματος, που περιλαμβάνουν μία σύνθεση αναφοράς (LC1) και από δύο συνθέσεις για κάθε διαφορετικό τύπο ίνας, με ποσοστό περιεχόμενων ινών 0.5% και 1.0% κ.ο.. Σε όλες τις συνθέσεις ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) διατηρήθηκε σταθερός στο 0.40. Η ποσότητα τσιμέντου, όπως και της πυριτιακής παιπάλης παρέμεινε σταθερή σε όλες τις συνθέσεις. Η μόνη διαφοροποίηση έγγειται στην ποσότητα ρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε. Στον **Πίνακα 3** παρουσιάζονται αναλυτικά οι συνθέσεις με τα συστατικά τους: τσιμέντο (C), πυριτιακή παιπάλη (SF), άμμος (S), ριζάκι (G), κίσηρης (K), ίνες (F), νερό (W) και ρευστοποιητή (SP). Όλες οι ποσότητες αναφέρονται σε κιλά (kg) ανά κυβικό μέτρο (m³) παραγόμενου σκυροδέματος.

Στο νωπό σκυροδέμα μετρήθηκαν σύμφωνα με το σχετικό πρότυπο (ΕΛΟΤ/EN 12350-2, 2009), η κάθιση και το μοναδιαίο βάρος. Για κάθε σύνθεση σκυροδετήθηκαν τρία κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm για τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής και τρία κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 150 mm για τη δοκιμή διπλής διάτρησης. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δεξαμενή νερού και με το πέρας 28 ημερών εκτελέστηκαν οι δοκιμές.

Πίνακας 3. Συνθέσεις και συστατικά κισσηροσκυροδέματος

Κωδικός σύνθεσης	Υλικό (kg/m ³)							
	C	SF	S	G	K	F	W	SP
LC1	380	20	600	175	415	-	228	2
LCSF60-0.5	380	20	600	175	415	40	228	5
LCSF60-1.0	380	20	600	175	415	80	228	5
LCSF36-0.5	380	20	600	175	415	40	228	5
LCSF36-1.0	380	20	600	175	415	80	228	5
LCSF30-0.5	380	20	600	175	415	40	228	5
LCSF30-1.0	380	20	600	175	415	80	228	6
LCPF-0.5	380	20	600	175	415	4.6	228	5
LCPF-1.0	380	20	600	175	415	9.1	228	10

Στην παρούσα εργασία εκτελέστηκε η δοκιμή Barcelona κατά την κλασσική και τη γενικευμένη της μορφή, σύμφωνα με το πρότυπο (UNE 83-515, 2008). Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου $2b = 150$ mm και ύψους $2h = 150$ mm. Στο κέντρο των δοκιμίων και μεταξύ αυτών και των πλακών της πρέσας τοποθετήθηκαν δύο μεταλλικοί κύλινδροι, διαμέτρου $2a = 37.5$ mm. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής η αξονική μετατόπιση μετράται μέσω τριών μηκυσιόμετρων τα οποία τοποθετούνται στις πλάκες της πρέσας και με γωνία 120° ως προς το κέντρο του δοκιμίου. Η περιφερειακή μετατόπιση του δοκιμίου μετράται από ειδικό περιμετρικό μηκυσιόμετρο που τοποθετείται στο μέσο ύψος του δοκιμίου, $h = 75$ mm. Ο ρυθμός φόρτισης παραμένει σταθερός στα 0.5 mm/min κατακόρυφης μετατόπισης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται συνεχώς η περιμετρική μετατόπιση (TCOD), η κατακόρυφη μετατόπιση και το επιβαλλόμενο φορτίο (P).

Πριν την εμφάνιση του μέγιστου φορτίου, η περιμετρική μετατόπιση αμελείται. Μετά τον σχηματισμό των ρωγμών, η απορροφούμενη ενέργεια από το ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να υπολογιστεί ως το εμβαδόν την καμπύλης P – TCOD και αποτυπώνει την επίδραση των ινών στο σκυρόδεμα. Λαμβάνει υπόψη την απόκριση του ινοπλισμένου σκυροδέματος στη ρωγματωμένη φάση και περιλαμβάνει την ενέργεια που απορροφάται από τις ίνες αλλά και τις τριβές που εμφανίζονται μεταξύ του κώνου που δημιουργείται κατά τη δοκιμή και που μετακινείται προς το εσωτερικό του δοκιμίου.

Σύμφωνα με το πρότυπο (UNE 83-515, 2008) η παραμένουσα τάση f_{ctR_x} μπορεί να υπολογιστεί για δεδομένη περιφερειακή παραμόρφωση R_x από τη σχέση:

$$f_{ctR_x} = 4 * P_{R_x} / (9 * \pi * a * h) \quad (1)$$

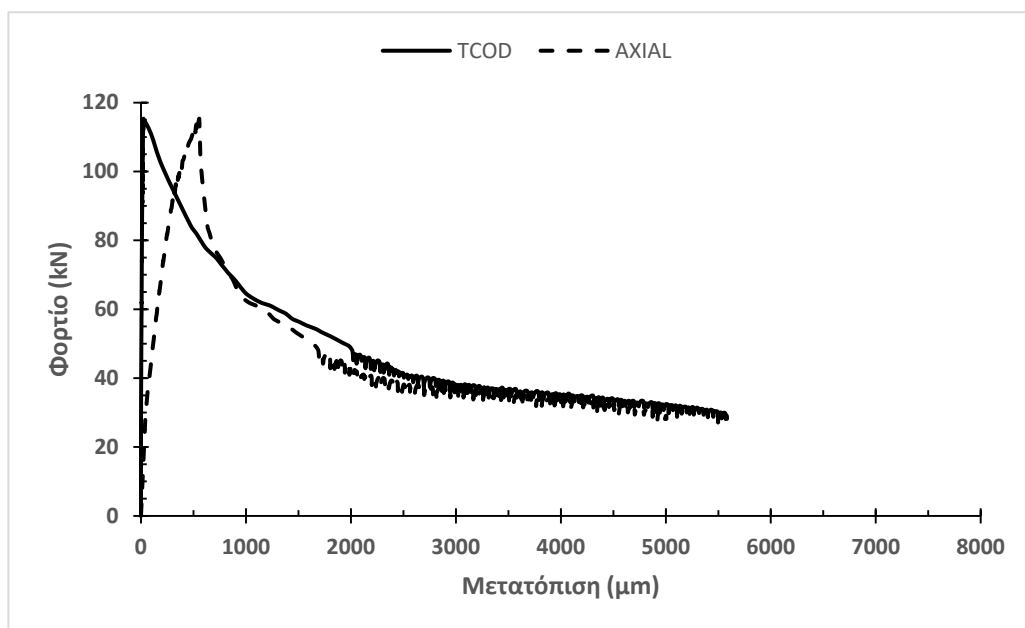
Όπου P_{R_x} είναι το φορτίο που αντιστοιχεί στην περιφερειακή μετατόπιση R_x .

Με τη γενίκευση της δοκιμής από τους Carmona et al, (2013), η απορροφούμενη ενέργεια υπολογίζεται ως το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου - κατακόρυφης μετατόπισης P – AXIAL T, ενώ η σχέση 1 γενικεύεται με τη μορφή:

$$f_{ct\delta_x} = 4 * P_{\delta_x} / (9 * \pi * a * h) \quad (2)$$

Όπου η παραμένουσα τάση $f_{ct\delta_x}$ υπολογίζεται για δεδομένη κατακόρυφη μετατόπιση δ_x και το αντίστοιχο φορτίο P_{δ_x} . Το τυπικό διάγραμμα της δοκιμής παρουσιάζεται στο **Σχήμα 1**, τόσο για την κατακόρυφη (AXIAL), όσο και την πλευρική μετατόπιση (TCOD).

Η δυσθραυστότητα του κισσηροσκυροδέματος ορίζεται ως το εμβαδόν της καμπύλης της γενικευμένης δοκιμής, που αντιστοιχεί στην ενέργεια που καταναλώνεται από την παραμόρφωση των ινών και την τριβή που δημιουργείται στο δοκίμιο μετά τη θραύση.



Σχήμα 1. Τυπικό διάγραμμα φορτίου μετατόπισης δοκιμής Διπλής Διάτρησης.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Χαρακτηριστικές ιδιότητες νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος

Στον **Πίνακα 4** παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος. Σύμφωνα με το πρότυπο (EN 206, 2014), οι περισσότερες συνθέσεις εντάσσονται στην κατηγορία S2-S3. Συγκριτικά με τη σύνθεση αναφοράς LC1, οι συνθέσεις που περιείχαν ίνες απαίτησαν μεγαλύτερο ποσοστό ρευστοποιητή. Οι ίνες και ιδιαίτερα οι χαλύβδινες, λόγω της ακαμψίας τους, δεν εντάσσονται εύκολα στον περιβάλλοντα όγκο, διαταράσσοντας την ομοιογένεια του σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται και στη δοκιμή κάθισης, όπου οι συνθέσεις με ίνες καθιζάνουν 20 – 380% περισσότερο από τη σύνθεση αναφοράς, για παρόμοια ποσοστά προσθήκης ρευστοποιητή (**Πίνακας 3**). Αντίθετα, οι συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου (LCPF-0.5 και LCPF-1.0) έχουν πολύ χαμηλή κάθιση σε σχέση με τις χαλύβδινες ίνες, με μετρήσεις κοντά σε αυτές της σύνθεσης αναφοράς (LC1), παρά την αύξηση της ποσότητας του ρευστοποιητή (**Πίνακας 3**). Όσον αφορά στο μοναδιαίο βάρος, διαπιστώνεται πως η αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος με ελαφρύ αδρανές είναι αρκετή για να χαρακτηριστεί το υλικό ως ελαφροσκυρόδεμα (κατά βάση στην κατηγορία D2,0 σύμφωνα με το πρότυπο (EN 206, 2014). Αναφορικά με τις ίνες, η προσθήκη χαλύβδινων ινών οδηγεί σε αύξηση του μοναδιαίου βάρους του ελαφροσκυροδέματος, ενώ η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου σε μείωση.

Πίνακας 4 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Ιδιότητα	Σύνθεση								
	LC1	LCSF 30-0.5	LCSF 30-1.0	LCSF 36-0.5	LCSF 36-1.0	LCSF 60-0.5	LCSF 60-1.0	LCPF- 0.5	LCPF- 1.0
Μ.βάρος (kg/m ³)	1775	1829	1807	1832	1841	1803	1805	1712	1708
Κάθιση (mm)	50	100	100	90	60	120	190	50	70

Στον **Πίνακα 5** δίνεται η μέση θλιπτική αντοχή (f_{cm}) των δοκιμίων ανά σύνθεση και περιεχόμενο ποσοστό ινών και ο συντελεστής διακύμανσης των μετρήσεων 3 δοκιμίων (COV%). Σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς LC1, όλες οι συνθέσεις που περιείχαν ίνες παρουσιάζουν αύξηση στη μέση θλιπτική αντοχή. Η αύξηση αυτή είναι της τάξης του 14 – 46% σε σχέση με την LC1. Γενικά η αύξηση της θλιπτικής αντοχής που φαίνεται να προσδίδουν οι ίνες μπορεί να αποδοθεί στον τρόπο με τον οποίο αυτές λειτουργούν κυρίως κατά τη ρωγμάτωση του σκυροδέματος. Διατρέχοντας τις μικρορωγμές και όντας τυχαία (άρα και εγκάρσια στην φόρτιση) προσανατολισμένες, περιορίζουν την παραμόρφωση και τη διόγκωση του σκυροδέματος, αυξάνοντας έτσι την θλιπτική του αντοχή.

Συγκρίνοντας συνθέσεις με τον ίδιο τύπο ίνας, φαίνεται η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ινών, συνεπώς και της συνολικής επιφάνειας οπλισμού στη θλιπτική αντοχή. Για κάθε τύπο ίνας, η σύνθεση με 0.5% ανέπτυξε σαφώς μικρότερη θλιπτική αντοχή. Ανάμεσα στις συνθέσεις με ποσοστό ινών 0.5% μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή αναπτύσσει η LCSF36-0.5. Μικρότερη θλιπτική αντοχή παρουσιάζει η σύνθεση LCSF30-0.5. Αντίστοιχα για τις συνθέσεις με 1% περιεχόμενες ίνες, μέγιστη αντοχή έδωσε η LCSF60-1.0, ενώ ελάχιστη η LCPF-1.0.

Μέση εφελκυστική αντοχή $f_{ctm,B}$ κατά τη δοκιμή διπλής διάτρησης

Στον Πίνακα 5 δίνεται η μέση εφελκυστική αντοχή ($f_{ctm,B}$) κατά τη δοκιμή διπλής διάτρησης. Γενικά η προσθήκη ινών στο κισσηροσκυρόδεμα, ανεξαρτήτως του τύπου και του περιεχόμενου ποσοστού, δεν φαίνεται να επιδρά σημαντικά στην εφελκυστική αντοχή. Όλες οι συνθέσεις αναπτύσσουν παραπλήσια μέγιστη εφελκυστική τάση της τάξης των 2.3-2.8 MPa. Η μικρή αυτή επίδραση οφείλεται στη φύση της δοκιμής, αφού πριν την αστοχία κατά την οποία μετράται η μέγιστη τάση, η παραμόρφωση των δοκιμίων δεν είναι σημαντική ώστε οι ίνες να αναλάβουν σημαντικό μέρος της έντασης. Ενδεικτικά αναφέρεται πως ελάχιστη τιμή εφελκυστικής αντοχής (2.38 MPa) αναπτύσσει η σύνθεση με ίνες πολυπροπυλενίου, σε περιεχόμενο ποσοστό 0.5% κατ' όγκο και μέγιστη (2.80 MPa) η σύνθεση με χαλύβδινες ίνες SF60 σε περιεχόμενο ποσοστό κατ' όγκο 1.0%, ενώ η σύνθεση αναφοράς παρουσιάζει μέση αντοχή 2.49 MPa.

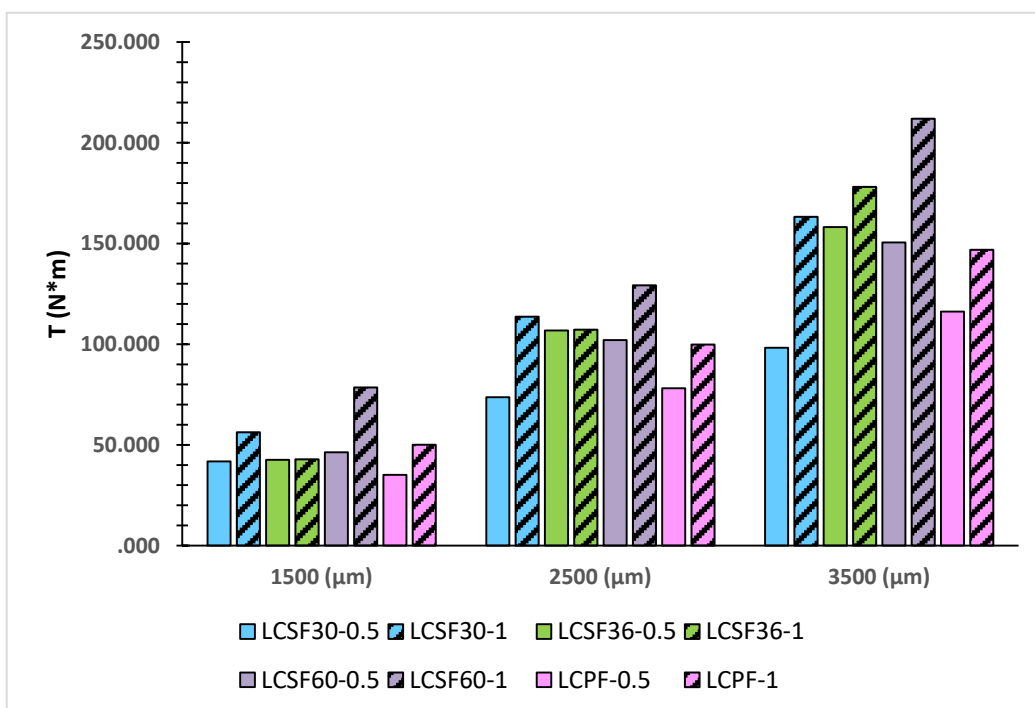
Πίνακας 5. Ιδιότητες σκληρυμένου σκυροδέματος

Ιδιότητα	LC1	Σύνθεση						LCPF-0.5	LCPF-1.0
		LCSF 30-0.5	LCSF 30-1.0	LCSF 36-0.5	LCSF 36-1.0	LCSF 60-0.5	LCSF 60-1.0		
f_{cm}	18.55	21.54	26.57	24.45	31.357	22.417	32.71	22.26	24.00
COV%	7.09	7.56	14.01	15.29	4.88	7.03	8.16	2.88	0.79
$f_{ctm,B}$	2.49	2.60	2.65	2.52	2.68	2.61	2.80	2.38	2.48
COV%	4.03	5.75	2.44	6.90	3.155	13.84	10.18	6.64	5.64

Δυσθραυστότητα

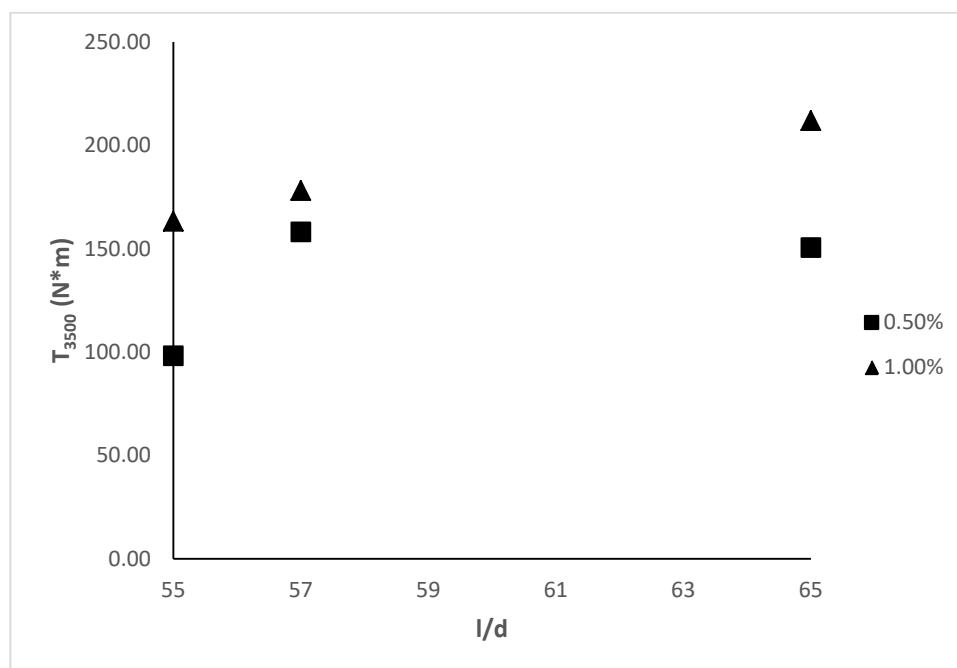
Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μέση τιμή δυσθραυστότητας (T) τριών δοκιμίων του κισσηροσκυροδέματος σε συγκεκριμένες τιμές κατακόρυφης μετατόπισης, ως

η απορροφούμενη ενέργεια των δοκιμών (εμβαδόν καμπύλης φορτίου-κατακόρυφης παραμόρφωσης). Για τη σύνθεση αναφοράς δεν λαμβάνεται μέτρηση, αφού λόγω της φύσης της δοκιμής η περιοχή πριν τη θραύση είναι αμελητέα. Για κάθε τιμή κατακόρυφης μετατόπισης και για τις συνθέσεις με ποσοστό προσθήκης ινών 0.5%, μέγιστη δυσθραυστότητα ανέπτυξε η σύνθεση LCSF60-0.5, ενώ ελάχιστη η σύνθεση LCPF-0.5. Το ίδιο είναι αληθές και για τις συνθέσεις με ποσοστό ινών 1.0%. Με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού ινών σημειώνεται και σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας. Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση LCSF36 όπου η αύξηση από 0.5% σε 1.0% δε φαίνεται να επηρεάζει τη δυσθραυστότητα παρά μόνο σε υψηλές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης (3500 μm). Για το συγκεκριμένο είδος ίνας η σύνθεση LCSF36-1.0 παρουσιάζει μικρότερη δυσθραυστότητα και από την LCS30-1.0. Ειδικά στην κατακόρυφη μετατόπιση των 3500 μm , είναι φανερό πως οι χαλύβδινες ίνες συνεισφέρουν περισσότερο από τις συνθετικές, ενώ η διαφορά μήκους μεταξύ τους, (30, 36, 60 mm με λόγο μορφής 55, 57, 65 αντίστοιχα) έχει καθοριστικό ρόλο στην ικανότητά τους να διατρέχουν ρωγμές και συνεπώς να απορροφούν ενέργεια.



Σχήμα 2. Δυσθραυστότητα (T) δοκιμών στα 1500, 2500 και 3500 μm κατακόρυφης μετατόπισης.

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής Barcelona και ειδικότερα της δυσθραυστότητας που αναπτύσσουν τα δοκίμια, μπορεί να εκτιμηθεί και η απόδοση των ινών σε σχέση με το λόγο μορφής τους. Ως χαρακτηριστικό μέγεθος των ινών, ο λόγος μορφής l/d εκτός της γενικής τους μορφολογίας χαρακτηρίζει και την ακαμψία τους. Ειδικά για τις χαλύβδινες ίνες, που είναι άμεσα συγκρίσιμες, η αύξηση του λόγου μορφής δίνει στις ίνες τη δυνατότητα να παραμορφώνονται περισσότερο οπότε και απορροφούν περισσότερη ενέργεια αυξάνοντας τη δυσθραυστότητα των δοκιμίων. Στο **Σχήμα 3** φαίνεται η σχέση του λόγου μορφής των χαλύβδινων ινών με τη δυσθραυστότητα των δοκιμίων στα 3500 μm κατακόρυφης μετατόπισης.



Σχήμα 3. Συσχέτιση λόγου μορφής l/d χαλύβδινων ινών με τη δυσθραυστότητα T στα 3500 μm κατακόρυφης μετατόπισης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη των ιδιοτήτων νωπού και σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος με ίνες προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

- Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο ελαφροσκυρόδεμα οδηγεί στην αύξηση του μοναδιαίου βάρους σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς, ενώ οι ίνες πολυπροπυλενίου σε μείωση. Οριακά οι συνθέσεις με ίνες χάλυβα

εντάσσονται την κατηγορία D2.0, ενώ οι υπόλοιπες συνθέσεις στην κατηγορία D1.8.

- Η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη ινών με αποτέλεσμα να απαιτείται η προσθήκη ικανοποιητικής ποσότητας υπερευστοποιητή.
- Η προσθήκη ινών αυξάνει τη θλιπτική αντοχή από 14% έως 46%. Καθοριστικό ρόλο έχουν το υλικό των ινών, η συνολική επιφάνεια οπλισμού (ποσοστό περιεχομένων ινών κ.ο.) και ο λόγος μορφής l/d.
- Η μέγιστη μέση εφελκυστική τάση $f_{ctm,B}$ των δοκιμίων, όπως εκτιμάται κατά τη δοκιμή Barcelona, δεν φαίνεται να επηρεάζεται από την προσθήκη ινών.
- Η δυσθραυστότητα T, κατά τη δοκιμή Barcelona, κατά βάση αυξάνεται με την αύξηση του ποσοστού των περιεχομένων ινών και με την αύξηση του λόγου l/d, ειδικά για τις χαλύβδινες ίνες.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Balaguru P., Ramakrishnan V., «Properties of lightweight fiber reinforced concrete», ACI Structural Journal, Vol. 105, (1987) 305-322.

Banthia N., Trottier J., «Concrete reinforced deformed steel fibers, part 1: Bond-slip mechanisms», ACI Material Journal, Vol. 91, (1994) 435-446.

Campione G., Mindess S., Zingone G., «Compressive stress-strain behavior of normal and high-strength carbon-fiber concrete reinforced with steel spirals» Vol. 96, (1999), 27-34.

Campione G., Calogero C., Mendolaand L. La, Papia M., «Experimental investigation on local bond-slip behavior in lightweight fiber reinforced concrete under cyclic actions», in 13th World conference on earthquake Engineering, Vancouver, (2004).

Carmona S., Aguado A., Molins C., «Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test», Construction and Building Materials, Vol. 48, (2013) 592-600.

Düzgün O. A., Gül R., Aydın A. C., «Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete», Material Letters, Vol. 59, (2005) 3357–3363.

EN 12350-2, Δοκιμές Νωπού Σκυροδέματος, Δοκιμή Κάθισης, ΕΛΟΤ (2009).

UNE 83-515, Ινοπλισμένο σκυρόδεμα, Προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής, της δυσθραυστότητας και της παραμένουσας εφελκυστικής τάσης Μαδρίτη, Aenor (2008).

EN 206, Concrete - Specification, Performance, Production and Conformity, European Committee for Standardization, (2014).