

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΤΖΑΝΕΤΑΤΟΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2017

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν στην υλοποίηση της.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω, τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Μπαδογιάννη Ε., Επ. Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την άμεση βοήθεια και τη συνεχή και πολύτιμη καθοδήγησή του. Η άρτια επιστημονική του κατάρτιση και το συνεχές του ενδιαφέρον αποτέλεσαν βασικό καταλύτη στην εκπόνηση της εργασίας.

Θέλω να ευχαριστήσω τον συμφοιτητή μου στο πλαίσιο του Erasmus, Ali Can Erozdemiir για τη συνεργασία μας στην παραγωγή των συνθέσεων και την εκτέλεση των δοκιμών.

Ευχαριστίες οφείλω στον Επ. Καθηγητή της σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κ. Νομικό Π. και τον Χουμανίδη Δ. Διδάκτορα της Σχολής.

Επίσης τον Καθηγητή της ΣΜΜΜ ΕΜΠ κ. Σοφιανό Α., Διευθυντή του Εργαστηρίου Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών και ειδικά τον κ. Παπαντωνόπουλο Γ. για την υλικοτεχνική υποστήριξη κατά την εκτέλεση των δοκιμών. Την κα. Βιντζηλαίου Ε., Διευθύντρια του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος της ΣΠΜ, όπου παρασκευάστηκε το σκυρόδεμα καθώς και το προσωπικό του.

Ευχαριστίες οφείλω στους υποψήφιους διδάκτορες Χρηστίδη Κ. και Στρατούρα Μ. για τις συμβουλές τους ως προς τη σύνταξη της εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Κατάλογος Πινάκων	iv
Κατάλογος Σχημάτων	iv
Περίληψη	vi
Abstract	vii
1. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	1
1.1 Σύσταση.....	1
1.1.1 Μήτρα.....	2
1.1.2 Ίνες.....	2
1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ινών [2].....	3
1.2.1 Ισοδύναμη διάμετρος	3
1.2.2 Λόγος μήκους – διαμέτρου ή λόγος μορφής (Aspect ratio)	3
1.2.3 Δείκτης γραμμικής πυκνότητας – fiber denier.....	4
1.2.4 Δείκτης πυκνότητας πριν και μετά την ανάμιξη	5
1.3 Παράμετροι του σκυροδέματος που σχετίζονται με τη γεωμετρία των ινών	6
1.3.1 Αριθμός ινών και συνολική επιφάνεια ινών [2].....	6
1.3.2 Εμβαδόν σπλισμού [2]	7
1.4 Μηχανική αλληλεπίδρασης ινών – μήτρας	8
Αρηγμάτωτο υλικό	10
Ρηγματωμένο υλικό	12
Μηχανική αγκύρωση.....	14
1.5 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα	16
1.5.1 Δομή ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες.....	17
1.5.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά.....	17
1.5.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	17
1.6 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με συνθετικές ίνες	18
1.6.1 Ίνες πολυπροπυλενίου	19
1.6.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου	19
1.6.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	20
1.7 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή	21
1.7.1 Ελαφροσκυρόδεμα.....	21
1.7.2 Κίσηρης.....	21

1.7.3	Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα – μηχανικά χαρακτηριστικά	21
1.7.4	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	22
1.8	Μηχανικές δοκιμές και αξιολόγηση ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	23
1.8.1	Δοκιμές θλίψης	23
1.8.2	Δοκιμές εφελκυσμού	25
1.8.2.2	Double punch test – Δοκιμή Barcelona.....	26
	Γενικευμένη δοκιμή Barcelona	26
1.9	Χρήσεις – εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος.....	26
1.9.1	Πλάκες και δάπεδα	26
1.9.2	Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα.....	27
1.9.3	Προκατασκευασμένα στοιχεία	27
2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	28
2.1	Υλικά.....	28
2.2	Συνθέσεις.....	29
2.2.1	Διαδικασία παρασκευής σκυροδέματος	31
2.3	Πειραματικές δοκιμές – διατάξεις	32
2.3.1	Υπολογισμός Μέτρου Ελαστικότητας και Λόγου Poisson	32
2.3.2	Δοκιμή διπλής σημειακής φόρτισης – Barcelona	34
2.3.3	Δοκιμή κάμψης τριών σημείων – λυγισμού	37
3.	ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	40
3.1	Αποτελέσματα νωπού σκυροδέματος	40
3.2	Αποτελέσματα δοκιμών στο σκληρωμένο σκυρόδεμα	41
3.2.1	Θλιπτική αντοχή	41
3.2.2	Μέτρο Ελαστικότητας	44
3.2.3	Λόγος Poisson.....	46
3.2.4	Δοκιμή κάμψης τριών σημείων.....	48
3.2.5	Δοκιμή Barcelona	54
4.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	61
	Βιβλιογραφία	63
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α Διαγράμματα δοκιμών θλίψης.....	65
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β Διαγράμματα Φορτίου – CMOD	71
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ Διαγράμματα φορτίου – κατακόρυφης και φορτίου - οριζόντιας μετατόπισης δοκιμής Barcelona.....	76

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Κοινοί τύποι ινών και ιδιότητες.	3
Πίνακας 2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών.	28
Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά ινών.	29
Πίνακας 2.3 Συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος.	31
Πίνακας 3.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.	40
Πίνακας 3.2 Θλιπτική Αντοχή (MPa) κυλινδρικών δοκιμών, Μέση τιμή (AVG – Mpa), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV %).	43
Πίνακας 3.3 Μέτρο Ελαστικότητας (GPa), Μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	44
Πίνακας 3.4 Λόγος Poisson κυλινδρικών δοκιμών, μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	46
Πίνακας 3.5 Μέγιστο φορτίο F_{LOP} (kN) πρισματικών δοκιμών κατά τη δοκμή κάμψης τριών σημείων, μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	48
Πίνακας 3.6 Μέγιστη εφελκυστική τάση (MPa) λόγω κάμψης πρισματικών δοκιμών, μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	49
Πίνακας 3.7 Απορροφούμενη Ενέργεια ($N*m$) πρισματικών δοκιμών στα 3500 μm CMOD, μέση τιμή σύνθεσης (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	51
Πίνακας 3.8 Εφελκυστική τάση δοκιμών (MPa), μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	54
Πίνακας 3.9 Απορροφούμενη Ενέργεια E(TCOD) ($N*m$) των δοκιμών σε χαρακτηριστικές τιμές TCOD.	56
Πίνακας 3.10 Μέση τιμή E(TCOD) ($N*m$) ανά σύνθεση σε χαρακτηριστικές τιμές TCOD.	56
Πίνακας 3.11 Δυσθραυστότητα T ($N*m$) δοκιμών σε χαρακτηριστικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης.	58
Πίνακας 3.12 Μέση τιμή (AVG) δυσθραυστότητας T ($N*m$), ανά σύνθεση, τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).	58

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Σχέση ισοδύναμης διαμέτρου και δείκτη γραμμικής πυκνότητας.	5
Σχήμα 1.2 Μοντέλο εξόλκευσης για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ινών-μήτρας.	9
Σχήμα 1.3 Σκαρίφημα μιας ίνας σε ελαστικό υλικό.	11
Σχήμα 1.4 Παρουσίαση της μετάβασης από την ελαστική μεταφορά τάσεων στην τριβή ολίσθησης.	12
Σχήμα 1.5 Κατανομή διατμητικών τάσεων κατά μήκος ίνας που διατρέχει ρωγμή.	13
Σχήμα 1.6 Μερικώς αποκολλημένη ίνα και κατανομή διατμητικών τάσεων.	14
Σχήμα 1.7 Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα.	15

Σχήμα 1.8 Τυπικά διαθέσιμα σχήματα χαλύβδινων ινών.	16
Σχήμα 2.1 Τελική κοκκομετρική διαβάθμιση και καμπύλη Fuller.	30
Σχήμα 2.2 Διάταξη και αστοχία κατά τη δοκιμή θλίψης για τον προσδιορισμό E και ν .	33
Σχήμα 2.3 Χρονική ιστορία της δομικής θλίψης δοκιμίου σκυροδέματος.	34
Σχήμα 2.4 Διάταξη της δοκιμής Barcelona.	35
Σχήμα 2.5 Τυπικές μορφές αστοχίας κατά τη δοκιμή Barcelona.	35
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση και ορισμός του δείκτη δυσθραυστότητας μέσω της γενικευμένης δοκιμής Barcelona.	37
Σχήμα 2.7 Γεωμετρία, διάταξη και εκτέλεση της δοκιμής κάμψης τριών σημείων.	38
Σχήμα 2.8 Διάγραμμα Φορτίου – CMOD και λήψη της μέγιστης τιμής F_L .	39
Σχήμα 2.9 Κατανομή τάσεων στη δοκιμή κάμψης τριών σημείων.	39
Σχήμα 3.1 Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων.	42
Σχήμα 3.2 Μέση τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας ανά σύνθεση.	45
Σχήμα 3.3 Μέση τιμή Λόγου Poisson ανά σύνθεση.	47
Σχήμα 3.4 Μέση τιμή της Μέγιστης Εφελκυστικής Τάσης λόγω κάμψης ανά σύνθεση.	50
Σχήμα 3.5 Μέσες τιμές απορροφούμενης ενέργειας πρισματικών δοκιμίων ανά σύνθεση.	51
Σχήμα 3.6 Συσχέτιση λόγου μορφής l/d και ενέργειας EA στα 3500 μm της δοκιμής κάμψης.	53
Σχήμα 3.7 Μέση τιμή εφελκυστικής τάσης ανά σύνθεση.	54
Σχήμα 3.8 Μέση τιμή $E(TCOD)$ ανά σύνθεση για δεδομένη TCOD.	57
Σχήμα 3.9 Μέση τιμή δυσθραυστότητας $T (N*m)$ ανά σύνθεση.	59
Σχήμα 3.10 Συσχέτιση λόγου μορφής l/d χαλύβδινων ινών με την $E(TCOD)$ στα 3500 μm περιμετρικής μετατόπισης.	60
Σχήμα 3.11 Συσχέτιση λόγου μορφής l/d χαλύβδινων ινών με τη δυσθραυστότητα T στα 3500 μm κατακόρυφης μετατόπισης.	60

Περίληψη

Η αποτελεσματική χρήση των υλικών στις εφαρμογές του μηχανικού απαιτεί την γνώση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετάται η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος με χαλύβδινες αλλά και συνθετικές ίνες.

Τα δοκίμια παρήχθησαν βάσει της ίδιας σύνθεσης, ώστε τα μετρούμενα μεγέθη να είναι συγκρίσιμα. Στις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκαν τεσσάρων ειδών ίνες. Τρεις χαλύβδινες (SF), διαφορετικών μηκών, ευθύγραμμες με άγκιστρα και μία συνθετική – πολυπροπυλενίου (PF), ευθύγραμμη. Η προσθήκη ινών έγινε σε δύο διαφορετικά ποσοστά κατ'όγκο 0.5% και 1.0%. Όλες οι συνθέσεις συγκρίθηκαν με δύο πανομοιότυπες συνθέσεις αναφοράς.

Εκτός των κλασικών δοκιμών νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, προσδιορίστηκε το Μέτρο Ελαστικότητας, ο λόγος Poisson του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος αλλά και η έμμεση εφελκυστική του αντοχή μέσω της δοκιμής Κάμψης τριών σημείων με εγκοπή και της δοκιμής Διπλής Διάτρησης – Barcelona. Μέσω των δοκιμών έμμεσου εφελκυσμού μελετήθηκε, επίσης, η συμπεριφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση και εκτιμήθηκε η δυσθραυστότητά του.

Διαπιστώθηκε πως η προσθήκη ινών επιδρά σημαντικά στην εργασιμότητα του νωπού ελαφροσκυροδέματος, η οποία αποκαθίσταται εύκολα με την προσθήκη ρευστοποιητών. Η προσθήκη ινών φαίνεται να επηρεάζει και τη θλιπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος, ειδικά για υψηλό λόγο μορφής ινών l/d και για περιεχόμενο ποσοστό 1.0% κ.ο όπου η αύξηση αγγίζει το 30%. Αντίθετα το Μέτρο Ελαστικότητας και ο Λόγος Poisson δεν φαίνεται να επηρεάζονται σημαντικά.

Αναφορικά με τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος μετά τη ρηγμάτωση, τόσο από τη δοκιμή Barcelona, αλλά και τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων, διαπιστώθηκε η ανάπτυξη παραμένουσας αντοχής σε όλα τα δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος. Μάλιστα ειδικά για τις συνθέσεις με χαλύβδινες ίνες, φαίνεται πως με ικανή τιμή λόγου μορφής, η παραμένουσα αντοχή ξεπερνά την εφελκυστική αντοχή θραύσης των δοκιμίων.

Συνολικά διαπιστώθηκε πως η αύξηση του ποσοστού περιεχομένων ινών και του λόγου μορφής τους, βελτιώνουν σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου ελαφροσκυροδέματος. Ως προς τη σύγκριση των ινών, όλα τα αποτελέσματα των δοκιμών συγκλίνουν στο συμπέρασμα ότι οι χαλύβδινες ίνες προσδίδουν την καλύτερη μηχανική συμπεριφορά.

Λέξεις Κλειδιά: μηχανική συμπεριφορά, ινοπλισμένο ελαφροσκυροδέμα, κίσηρης, δυσθραυστότητα, παραμένουσα αντοχή, λόγος μορφής, Μέτρο Ελαστικότητας, Λόγος Poisson, δοκιμή Barcelona

Abstract

The effective use of materials in engineering applications requires the understanding of their mechanical properties. The subject of this thesis is the investigation of the mechanical properties of lightweight fiber reinforced concrete.

In order to obtain comparable results, all specimens were made based on the same concrete synthesis. Four different types of fiber were studied, three steel fibers (SF) of different length with hooks and one synthetic (polypropylene) fiber (PF), in two fiber contents of 0.5% and 1.0% by volume. As a reference, two additional plain lightweight concrete batches were made.

Using the data from the typical compression test, the Modulus of Elasticity and Poisson's ratio were calculated. The three-point bending test and the double punch – Barcelona test were used to determine the tensile strength of the material, evaluate its behavior during the post cracking phase and estimate its toughness.

It is found that in order to obtain sufficient workability when adding fibers in the concrete, the addition of superplasticizers is required. Adding fibers, also effects the compressive strength of lightweight concrete, in the case of high aspect ratio and fiber content of 1.0%, the increase can be up to 30% of that of the plain lightweight concrete. On the other hand, adding fibers has no significant effect on the Modulus of Elasticity and Poisson's ratio.

After evaluating the results of the bending and double punch tests, it is clear that all specimens developed significant residual strength during the post cracking phase. In the case of steel fibers, with high enough aspect ratio, the residual strength is comparable to the initial strength at the cracking point.

In conclusion, it is determined that the increase of fiber content and aspect ratio, greatly enhances the mechanical properties of the lightweight fiber reinforced concrete. Moreover, the tests suggest that steel fibers are more effective, on the mechanical properties of the material, than the synthetic ones.

Key Words: mechanical properties, fiber reinforced lightweight concrete, pumice, toughness, residual strength, aspect ratio, Modulus of Elasticity, Poisson's ratio, Barcelona test

1. ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ο όρος ινοπλισμένο σκυρόδεμα (fiber-reinforced concrete, FRC) περιγράφει το σκυρόδεμα που περιέχει διακριτές, τυχαία προσανατολισμένες ίνες σε όλο του τον όγκο.

Η χρήση ινών, ως μέσο ενίσχυσης υλικών, που είναι σημαντικά ασθενέστερα σε εφελκυσμό απ' ότι σε θλίψη, χρονολογείται από την αρχαιότητα. Ίσως η αρχαιότερη αναφορά τέτοιου υλικού γίνεται στη Βίβλο:

«6. Και την αυτήν ημέραν προσέταξεν ο Φαραώ τους εργοδιώκτας τον λαού και τους επιτρόπους αυτών, λέγων,

7. Δεν θέλετε δώσει πλέον εις τον λαόν τούτον άχυρον καθώς χθές και προχθές, διά να κάμνωσι τας πλίνθους·
ας

υπάγωσιν αυτοί και ας συνάγωσιν εις εαυτούς άχυρον»

(Έξοδος 5:6,7)

Περίπου την ίδια εποχή, τούβλα οπλισμένα με άχυρο χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του λόφου του Aqar – Qyf, κοντά στη σημερινή Βαγδάτη [1].

Το πρώτο ευρέως διαδεδομένο σύνθετο υλικό, στη σύγχρονη εποχή, ήταν το αμιάντο – τσιμέντο. Ο Ludwig Hatschek, περίπου το 1900, κατασκεύασε προϊόντα τσιμέντου, οπλισμένου με ίνες αμιάντου. Από το 1960, και με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των σύνθετων υλικών, οι Romualdi, Batson, και Mandel δημοσίευσαν τις εργασίες που έστρεψαν το ενδιαφέρον της ακαδημαϊκής κοινότητας και της βιομηχανίας στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα [2].

1.1 Σύσταση

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος διαφέρουν, ανάλογα με τη σύνθεση του σκυροδέματος, αλλά και με το υλικό των ινών. Έτσι παρότι ο γενικός όρος «ινοπλισμένο σκυρόδεμα» περιγράφει το υλικό στο σύνολο, δεν είναι αρκετός να συμπεριλάβει ιδιότητες και χαρακτηριστικά χρήσιμα στην ανάλυση και το σχεδιασμό.

Όσον αφορά τη σύνθεση του σκυροδέματος, σημαντικό ρόλο έχει το υλικό και η κοκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, αλλά και η χρήση πρόσθετων με σκοπό την βελτίωση συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Έτσι διακρίνονται κατηγορίες όπως το ινοπλισμένο

σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή (light-weight fiber-reinforced concrete, LWFRC), το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υψηλής αντοχής (high performance fiber-reinforced concrete, HPFRC) κ.α.

Σαφής διάκριση γίνεται και ως προς το υλικό των χρησιμοποιούμενων ινών. Διεθνώς έχουν υιοθετηθεί οι εξείς κατηγορίες: χαλύβδινες ίνες (steel fiber FRC, SFRC), ίνες από γυαλί (glass fiber FRC, GFRC), συνθετικές ίνες (synthetic fiber FRC, SNFRC) και φυσικές – οργανικές ίνες (natural fiber FRC, NFRC) [2].

1.1.1 Μήτρα

Κατά κανόνα, το υλικό της μήτρας είναι σκυρόδεμα από τσιμέντο τύπου Portland. Η ακριβής του σύνθεση μπορεί να ποικίλει, ανάλογα την εφαρμογή και τις επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Σε κάθε περίπτωση, η μήτρα χαρακτηρίζεται ως υλικό με ψαθυρή συμπεριφορά κατά τη θραύση.

Η προσθήκη ινών μπορεί να εξυπηρετεί δύο σκοπούς, ανάλογα με τον όγκο τους στο τελικό υλικό. Σε χαμηλότερη περιεκτικότητα (μικρότερη του 2% κατ' όγκο), οι ίνες ενεργούν ως δευτερεύων οπλισμός, κυρίως για τον περιορισμό της ρωγμάτωσης. Σε υψηλότερη περιεκτικότητα (2-6% κατ' όγκο), οι ίνες μπορούν να θεωρηθούν ως κύριος οπλισμός που συμβάλει στην αντοχή του σκυροδέματος. Στη δεύτερη περίπτωση είναι απαραίτητο να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κατανομή των ινών στο σκυρόδεμα, μέσω κατάλληλης διαβάθμισης των αδρανών και ικανής ρευστότητας του νωπού σκυροδέματος.

1.1.2 Ίνες

Όπως αναφέρθηκε, υπάρχει μεγάλη ποικιλία στις ίνες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ινοπλισμένου σκυροδέματος. Συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι που περιλαμβάνουν χαλύβδινες, συνθετικές (πολυμερή), γυάλινες, φυσικές και όλοι διαφέρουν σημαντικά στην αντοχή, στη συνάφεια, στην ολκιμότητα αλλά και στο κόστος. Μερικά κοινά είδη και τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στον **πίνακα 1.1**.

Πίνακας 4.1 Κοινοί τύποι ινών και ιδιότητες [1].

Υλικό ίνας	Διάμετρος (μm)	Ειδικό βάρος	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Εφελκυστική Αντοχή (GPa)	Επιμήκυνση στη Θραύση (%)
Χάλυβας	5-500	7.84	200	0.5-2.0	0.5-3.5
Γυαλί	9-15	2.60	70-80	2-4	2.0-3.5
Πολυπροπυλένιο	20-400	0.90-0.95	3.5-10	0.45-0.76	15-25
Άνθρακας	8-9	1.60-1.70	230-380	2.5-4.0	0.5-1.5

1.2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά ινών [2]

Οι ίνες παράγονται με μεγάλη ποικιλία ως προς το σχήμα και τη διατομή τους. Μπορεί να είναι: Κανονικής διατομής: Κυκλική, ελλειπτική ή πολυγωνική διατομή καθ' όλο το μήκος, με ομαλή ή και παραμορφωμένη επιφάνεια κατά μήκος ή μόνο στα άκρα.

Ακανόνιστης διατομής: Διατομή που μεταβάλλεται κατά μήκος.

Για τις ανάγκες της μελέτης και σύνθεσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών περιγράφονται με τα ακόλουθα μεγέθη.

1.2.1 Ισοδύναμη διάμετρος

Στις ίνες που δεν έχουν κυκλική διατομή, είναι χρήσιμο να ορίζεται ποια θα ήταν η διάμετρος αν η διατομή τους ήταν καθαρά κυκλική. Η ισοδύναμη διάμετρος της ίνας είναι η διάμετρος του κύκλου που έχει το ίδιο εμβαδόν με το μέσο εμβαδόν της διατομής της.

Ίνες με σχετικά μικρή ισοδύναμη διάμετρο έχουν χαμηλότερη ακαμψία και μπορούν να παραμορφώνονται εύκολα ανάμεσα στα αδρανή κατά τη φάση της ανάμιξης. Αντίστοιχα ίνες με μεγαλύτερη ισοδύναμη διάμετρο, έχουν μεγαλύτερη ακαμψία και συμβάλουν σημαντικά στην κατανομή των αδρανών κατά τη φάση της ανάμιξης και σκυροδέτησης.

1.2.2 Λόγος μήκους – διαμέτρου ή λόγος μορφής (Aspect ratio)

Ο λόγος μήκους-διαμέτρου είναι ένα μέτρο του πάχους της σε σχέση με το μήκος της. Υπολογίζεται ως ο λόγος του μήκους μιας ίνας προς την ισοδύναμη διάμετρό της. Οι ίνες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να έχουν λόγο που κυμαίνεται από 40 έως 1000, αλλά συνήθως λιγότερο από 300. Το μέγεθος αυτό είναι επίσης και ένα μέτρο της δυσκαμψίας της ίνας και επιδρά την ανάμιξη και την σκυροδέτηση.

1.2.3 Δείκτης γραμμικής πυκνότητας – *fiber denier*

Ο δείκτης αυτός χρησιμοποιείται κυρίως στις συνθετικές ίνες και προέρχεται από τη βιομηχανία υφασμάτων. Ορίζεται ως το βάρος, σε γραμμάρια, 9000 μέτρων ίνας. Με γνωστό το ειδικό βάρος της ίνας, ο δείκτης σχετίζεται με την ισοδύναμη διάμετρο σύμφωνα με την σχέση 1.1.

$$d = f * \left(\frac{D}{SG}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

όπου:

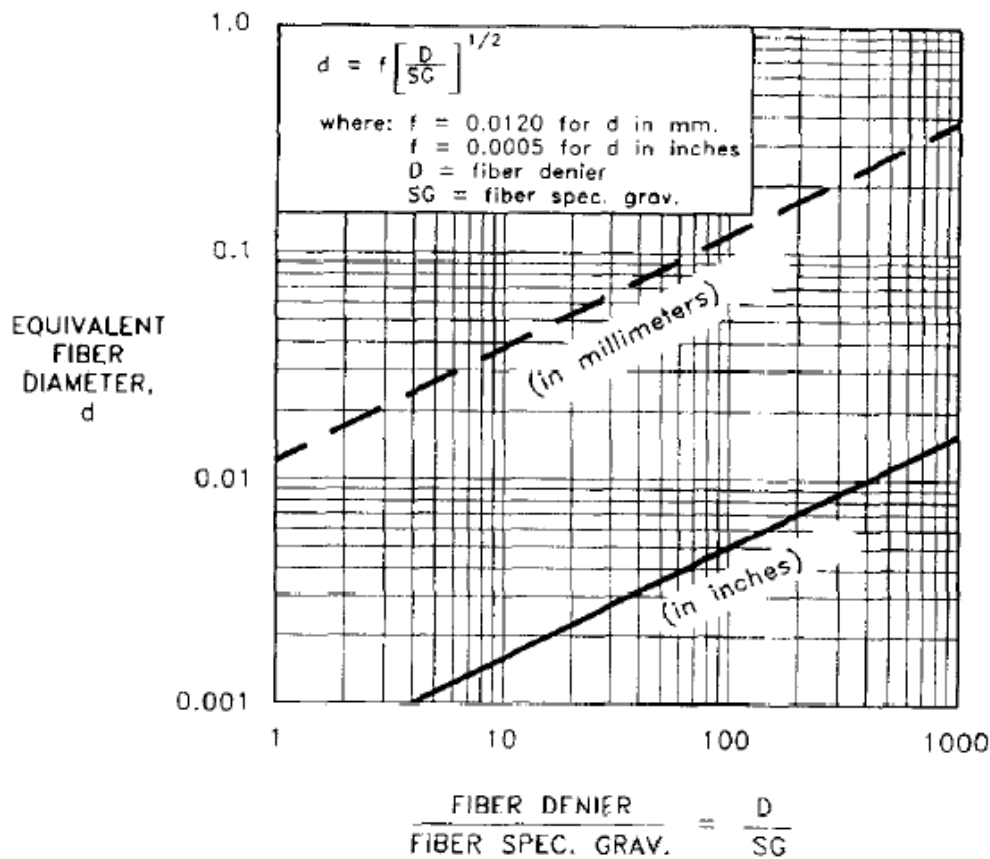
d η ισοδύναμη διάμετρος

f 0.0120 αν d σε χιλιοστά, 0.0005 αν d σε ίντσες

D ο δείκτης γραμμικής πυκνότητας

SG το ειδικό βάρος της ίνας

Το **σχήμα 1.1** αποτελεί ένα νομογράφημα για τη μετατροπή του δείκτη πυκνότητας σε ισοδύναμη διάμετρο και αντίστροφα.



Σχήμα 1.1 Σχέση ισοδύναμης διαμέτρου και δείκτη γραμμικής πυκνότητας [2].

1.2.4 Δείκτης πυκνότητας πριν και μετά την ανάμιξη

Ειδικά για την περίπτωση που οι ίνες είναι σε συσσωματώματα ή δεμάτια, είναι απαραίτητο να γίνεται διαχωρισμός του δείκτη γραμμικής πυκνότητας πριν και μετά την προσθήκη τους στο σκυρόδεμα. Ο διαχωρισμός γίνεται ανεξαρτήτως του υλικού της ίνας.

Κατά την προσθήκη τους στο νωπό σκυρόδεμα οι ίνες σε συσσωματώματα διαχωρίζονται μέσω χημικών διεργασιών, ενώ τα δεμάτια από τη μηχανική δράση κατά την ανάμιξη. Είναι προφανές ότι, με αυτές τις διαδικασίες, ο δείκτης γραμμικής πυκνότητας μεταβάλλεται. Στους υπολογισμούς για την κατανομή των ινών θα πρέπει να χρησιμοποιείται ο νέος δείκτης.

1.3 Παράμετροι του σκυροδέματος που σχετίζονται με τη γεωμετρία των ινών

Η παρουσία ινών στο σκυρόδεμα επηρεάζει την απαιτούμενη ενέργεια για το σχηματισμό και την εξάπλωση των ρωγμών. Συγκεκριμένα, κατά τη φάση της ρηγμάτωσης, η απορροφούμενη ενέργεια σχετίζεται άμεσα με το εμβαδόν, τον αριθμό, και τον προσανατολισμό των ινών σε σχέση με το επίπεδο της ρωγμής. Επιπλέον, η ικανότητα των ινών να μεταφέρουν τάσεις δια μέσου της ρωγμής εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας, τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού και τη συνάφεια μεταξύ ινών και σκυροδέματος. Έτσι κατά την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των ινών στο σκυρόδεμα, συχνά χρησιμοποιούνται παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με τη γεωμετρία των ινών. Ειδικότερα ο αριθμός ινών σε δεδομένο όγκο σκυροδέματος, η συνολική επιφάνεια ινών σε συγκεκριμένο όγκο σκυροδέματος και η διατομή των ινών κατά μήκος ενός συγκεκριμένου επιπέδου, έχουν τη μεγαλύτερη σημασία.

1.3.1 Αριθμός ινών και συνολική επιφάνεια ινών [2]

Ο αριθμός ινών (fiber count, FC) και η συνολική επιφάνεια (fiber specific surface, FSS), είναι ο αριθμός και το εμβαδόν των ινών σε ένα δεδομένο όγκο σκυροδέματος.

Σε ένα δεδομένο όγκο ινοπλισμένου σκυροδέματος, ο περιεχόμενος όγκος ινών V , εκφρασμένος ως λόγος ή ποσοστό, μπορεί να θεωρηθεί ως μία «μεγάλη» ίνα, ή ως ο όγκος των πραγματικών «μικρότερων» ινών. Ο πραγματικός αριθμός (FC) ινών σε δεδομένο όγκο σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί με μία από τις ακόλουθες και ισοδύναμες σχέσεις 1.2.

$$FC = \frac{7.5 \cdot DRT \cdot 10^4}{l \cdot d^2 \cdot SG} = \frac{1.27 \cdot V}{l \cdot d^2} = \frac{3.0 \cdot DRT \cdot 10^3}{l \cdot PoMD} = \frac{(5.08 \cdot V \cdot SG \cdot 10^6)}{l \cdot PoMD} \quad (1.2)$$

Όπου:

V ποσοστό συνολικού όγκου ινών

l μήκος ίνας (ίντσες)

d ισοδύναμη διάμετρος ίνας (ίντσες)

SG ειδικό βάρος του υλικού της ίνας

DRT περιεκτικότητα ινών (lb/yd³)

$PoMD$ δείκτης γραμμικής πυκνότητας μετά την ανάμιξη

Πολλαπλασιάζοντας τον αριθμό ινών FC με το εμβαδόν μιας μεμονωμένης, χαρακτηριστικής ίνας, προκύπτει η συνολική επιφάνεια FSS

$$FSS = FC * \pi * d * L \quad (1.3)$$

Εναλλακτικά η συνολική επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί με μία από τις ακόλουθες, ισοδύναμες σχέσεις 1.4.

$$FSS = \frac{2.36 * DRT * 10^{-3}}{d * SG} = \frac{4 * V}{d} = \frac{4.71 * DRT}{(PoMD * SG)^{\frac{1}{2}}} = \frac{8 * V * SG^{\frac{1}{2}} * 10^3}{PoMD^{\frac{1}{2}}} \quad (1.4)$$

1.3.2 Εμβαδόν οπλισμού [2]

Κατ' αναλογία με μια συμβατικά οπλισμένη δοκό σκυροδέματος, με εμβαδόν οπλισμού A_s σε μία τυχαία διατομή, είναι χρήσιμο να υπολογίζεται το εμβαδόν των ινών σε μία τυχαία διατομή ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Σε αντίθεση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα, το εμβαδόν του οπλισμού σε μια διατομή ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται άμεσα από το μήκος των ινών. Ως παράδειγμα, μπορεί να θεωρηθεί η ιδανική περίπτωση, δύο ινών να είναι τέλεια κάθετες στη διατομή του σκυροδέματος, κατ' αντιστοιχία με τη συμβατικά οπλισμένη δοκό. Έστω ότι το μήκος των ινών είναι το μισό του μήκους του υπό μελέτη τμήματος σκυροδέματος. Είναι προφανές, ότι για να είναι το εμβαδόν των ινών ίδιο σε κάθε διατομή σκυροδέματος, θα πρέπει οι δύο ίνες να είναι τέλεια διατεταγμένες σε συνεχόμενη σειρά. Επιπλέον, κάθε επίπεδο του υπό μελέτη τμήματος θα έπρεπε ακριβώς το μισό αριθμό ινών.

Στην πραγματικότητα όμως, οι ίνες είναι τυχαία προσανατολισμένες και κατανεμημένες στον όγκο του σκυροδέματος. Για τον υπολογισμό του ενεργού εμβαδού όπλισης προτείνονται μειωτικοί συντελεστές που εκφράζουν τον τυχαίο προσανατολισμό των ινών. Μία τέτοια τιμή είναι το 0.54, που δηλώνει πως η συνεισφορά μιας τυχαία προσανατολισμένης ίνας είναι το 54% της ίδιας ίνας εάν ήταν τελείως κάθετη στο υπό μελέτη επίπεδο.

Ενσωματώνοντας τις παραμέτρους που συζητήθηκαν παραπάνω, η έκφραση του εμβαδού όπλισης τυχαία προσανατολισμένων ινών A_{Fk} , προκύπτει ως εξής:

V_f ποσοστό κατ' όγκο των ινών στο σκυρόδεμα

FC	αριθμός ινών
l_f	χαρακτηριστικό μήκος ίνας
α_f	εμβαδόν διατομής ίνας
l_c, w_c, h_c	μήκος, πλάτος, ύψος του υπό μελέτη όγκου σκυροδέματος αντίστοιχα

θα είναι:

$$V_f = \frac{FC * l_f * \alpha_f}{l_c * w_c * h_c} \quad (1.5)$$

Λύνοντας ως προς α_f :

$$\alpha_f = \frac{V_f * l_c * w_c * h_c}{FC * l_f} \quad (1.6)$$

Το συνολικό εμβαδόν των ινών στο σκυρόδεμα A_f , είναι:

$$A_f = FC * \alpha_f = \frac{V_f * l_c * w_c * h_c}{l_f} \quad (1.7)$$

Το εμβαδόν των ινών σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο είναι:

$$A_{fx} = A_f * \left(\frac{l_f}{l_c}\right) = V_f * w_c * h_c \quad (1.8)$$

Ενσωματώνοντας και το μειωτικό συντελεστή προσανατολισμού:

$$A_{fx} = 0.54 * V_f * w_c * h_c \quad (1.9)$$

1.4 Μηχανική αλληλεπίδρασης ινών – μήτρας

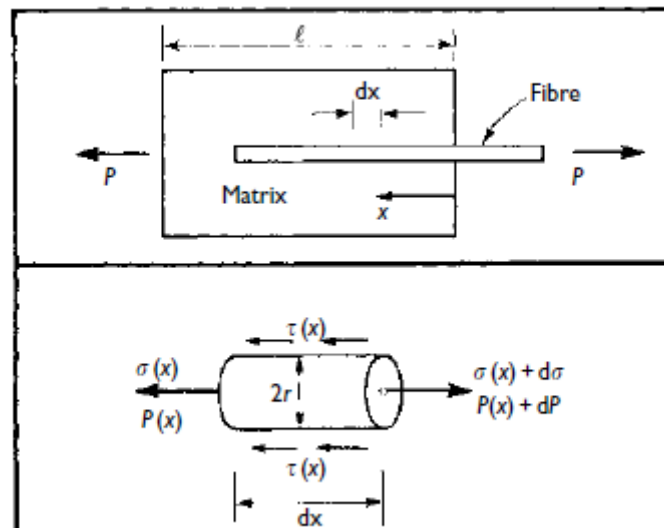
Η μηχανική αλληλεπίδραση ινών μήτρας, όταν αυτές αποτελούν υλικό ενίσχυσης του σκυροδέματος, περιγράφεται από τρεις βασικούς μηχανισμούς:

- 1) Συνάφεια στη διεπιφάνεια ινών-σκυροδέματος
- 2) Τριβή

3) Μηχανική αγκύρωση μέσω του σχήματος και της γεωμετρίας των ινών

Πρέπει εδώ να σημειωθεί, ότι στους πιο κοινούς τύπους ινοπλισμένου σκυροδέματος η επιφάνεια που καταλαμβάνουν οι ίνες στο υλικό είναι μικρή, καθώς οι ίνες έχουν διάμετρο 0.1 mm ή και μεγαλύτερη και ότι το υλικό της μήτρας είναι σχετικά χαμηλής εφελκυστικής αντοχής. Έτσι ο μηχανισμός της συνάφειας είναι συγκριτικά ασθενέστερος και κυρίαρχο ρόλο έχει η μηχανική αγκύρωση των ινών.

Κοινό σημείο, στην ανάλυση των παραπάνω μηχανισμών, είναι η περιγραφή της αλληλεπίδρασης ινών και σκυροδέματος μέσω ενός απλού μοντέλου εξόλκευσης, όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.2**.



Σχήμα 1.2 Μοντέλο εξόλκευσης για την προσομοίωση της αλληλεπίδρασης ινών-μήτρας [1].

Κατά τη μελέτη του ινοπλισμένου σκυροδέματος, η μήτρα χαρακτηρίζεται ως υλικό με ψαθυρή συμπεριφορά. Η αλληλεπίδραση των ινών με τη μήτρα πρέπει να εξετάζεται πριν και μετά την δημιουργία ρωγμών, αφού η μεταφορά των τάσεων είναι διαφορετική στις δύο περιπτώσεις.

Πριν τη δημιουργία ρωγμών, η μεταφορά των τάσεων είναι ελαστική και η παραμόρφωση των ινών και της μήτρας είναι κοινή. Η τάση που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια είναι διατμητική, απαραίτητη για την κατανομή του φορτίου μεταξύ ινών και σκυροδέματος, αφού τα δύο υλικά έχουν διαφορετικό

μέτρο ελαστικότητας. Αυτός είναι βασικός μηχανισμός για τον υπολογισμό του ορίου της αναλογικότητας και της τάσης κατά τη δημιουργία της πρώτης ρωγμής.

Με την αύξηση της φόρτισης, η διεπιφάνεια των δύο υλικών αποκολλάται και οι τάσεις μεταφέρονται μέσω τριβής ολίσθησης. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει σχετική μετατόπιση μεταξύ των δύο υλικών. Αυτός ο μηχανισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός στη ρωγματωμένη φάση, όπου οι ίνες διατρέχουν - «γεφυρώνουν» τις ρωγμές. Μεγέθη όπως, η μέγιστη αντοχή και παραμόρφωση εξαρτώνται από αυτόν τον μηχανισμό.

Η μετάβαση από την ελαστική συμπεριφορά στην μεταφορά τάσεων μέσω τριβών, συμβαίνει όταν η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια υπερβεί τη διατμητική αντοχή λόγω συνάφειας. Καθώς η αντοχή αυτή ξεπερνάται, οι ίνες αποκολλώνται από το σκυρόδεμα και ξεκινά η δράση της διατμητικής τριβής. Παρότι συχνά η τιμή της μέγιστης διατμητικής τριβής θεωρείται σταθερή, στην πραγματικότητα μπορεί είτε να μειώνεται (slip softening) ή και να αυξάνεται (slip hardening), ανάλογα με τη βλάβη που έχει γίνει στη διεπιφάνεια κατά τη φάση της ολίσθησης. Η παραπάνω διαδικασία εξελίσσεται προοδευτικά και συχνά και οι δύο μηχανισμοί συμβαίνουν ταυτόχρονα. Ανάλογα με τη μέγιστη τάση συνάφειας και την εφελκυστική αντοχή της μήτρας, μπορεί η αποκόλληση των ινών να συμβεί πριν τη δημιουργία ρωγμών.

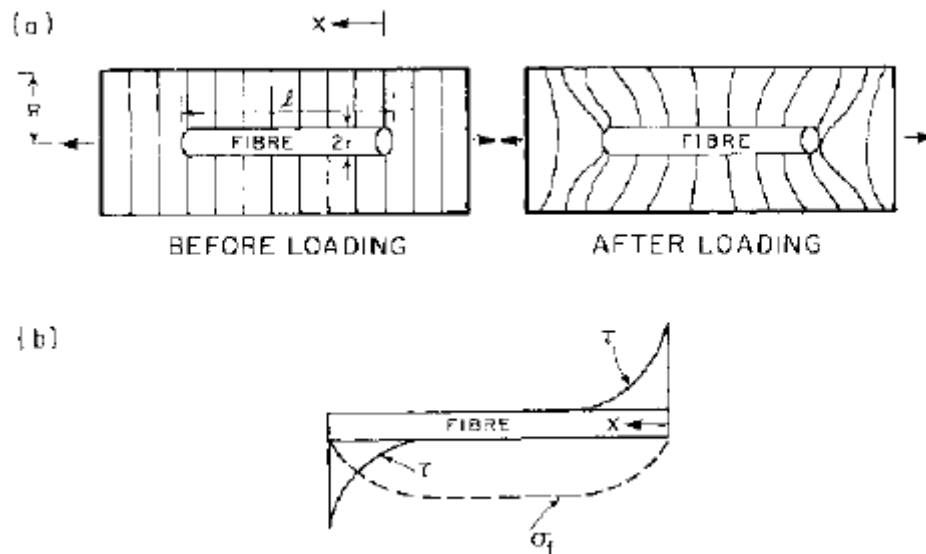
Στην περίπτωση που η μήτρα χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντοχή σε εφελκυσμό, η ρωγμάτωση μπορεί να συμβεί πριν την αποκόλληση των ινών. Σε αυτήν την περίπτωση, η αποκόλληση είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης των ρωγμών καθώς αυτές συναντούν τις ίνες. Η αναλυτική περιγραφή αυτού του φαινομένου στηρίζεται στη θεωρία της θραυστομηχανικής και λαμβάνει υπόψη το πεδίο των τάσεων στην ακμή μιας ρωγμής καθώς αυτή συναντά την ίνα. Σε μία τέτοια ανάλυση πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα διαφορετικά χαρακτηριστικά των δύο υλικών καθώς και η μικροδομή της μήτρας στην περιοχή κοντά στις ίνες.

Αρηγμάτωτο υλικό

Κατά το αρχικό στάδιο της φόρτισης, η αλληλεπίδραση των ινών και της μήτρας είναι ελαστική. Το πρώτο αναλυτικό μοντέλο για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης αυτής δόθηκε από τον Cox [3], με μεταγενέστερα μοντέλα να διαφέρουν μόνο σε αριθμητικές παραμέτρους. Η ανάλυση αυτή θεωρεί μια μεμονωμένη ίνα πεπερασμένου μήκους, βυθισμένη σε ελαστικό υλικό. Η κατανομή των παραμορφώσεων πριν και μετά τη φόρτιση φαίνονται στο **σχήμα 1.3 a**. Η υπολογιζόμενη διατμητική

τάση στην διεπιφάνεια και η εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στην ίνα παρουσιάζονται στο **σχήμα 1.3 b**.

Η διατμητική τάση λαμβάνει μέγιστο στα άκρα της ίνας και μηδενίζεται στο κέντρο. Στην περιοχή των άκρων μεταφέρεται η τάση από τη μήτρα στην ίνα, εντείνοντας την ίνα σε εφελκυσμό. Οι εφελκυστικές τάσεις στην ίνα λαμβάνουν μέγιστη τιμή στο κέντρο της.



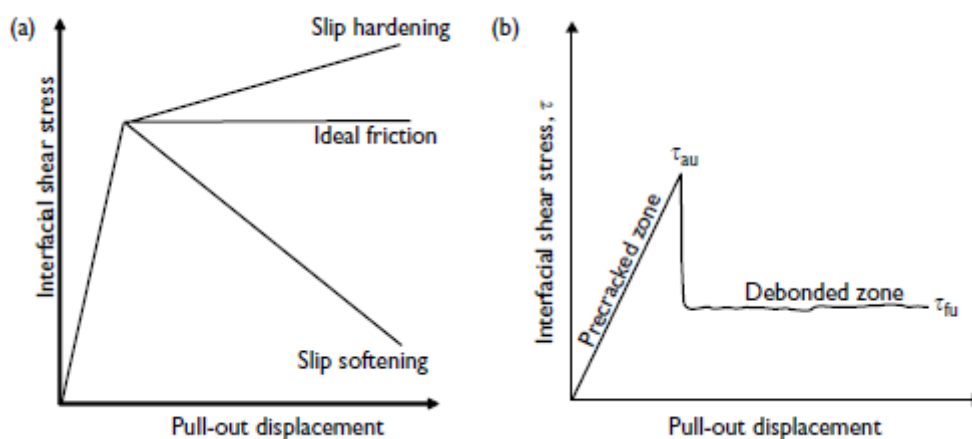
Σχήμα 1.3 Σκαρίφημα μιας ίνας σε ελαστικό υλικό. α. Παραμόρφωση της μήτρας στην περιοχή της ίνας πριν και μετά τη φόρτιση, β. Κατανομή διατμητικών και εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος της ίνας. [1].

Η αποτελεσματικότητα των ινών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφελκυστική τάση που μπορεί να μεταφερθεί σε αυτές.

Στην περίπτωση που η αποκόλληση των ινών γίνει πριν τη ρωγμάτωση, υπάρχουν δύο πιθανές περιπτώσεις.

- 1) Πλήρης απώλεια συνάφειας και αστοχία του υλικού
- 2) Ολίσθηση στην αποκολλημένη ζώνη και ενεργοποίηση του αντίστοιχου μηχανισμού

Η δεύτερη περίπτωση, που είναι και η πιο συχνή στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, παρουσιάζεται στο **σχήμα 1.4**. Όταν η διατμητική τάση υπερβεί τη μέγιστη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας, δημιουργείται μια ζώνη αποκόλλησης με σταθερή διατμητική τάση. Πέρα από αυτή τη ζώνη η τάση αυτή μειώνεται ακολουθώντας το μοντέλο που αναφέρθηκε παραπάνω.

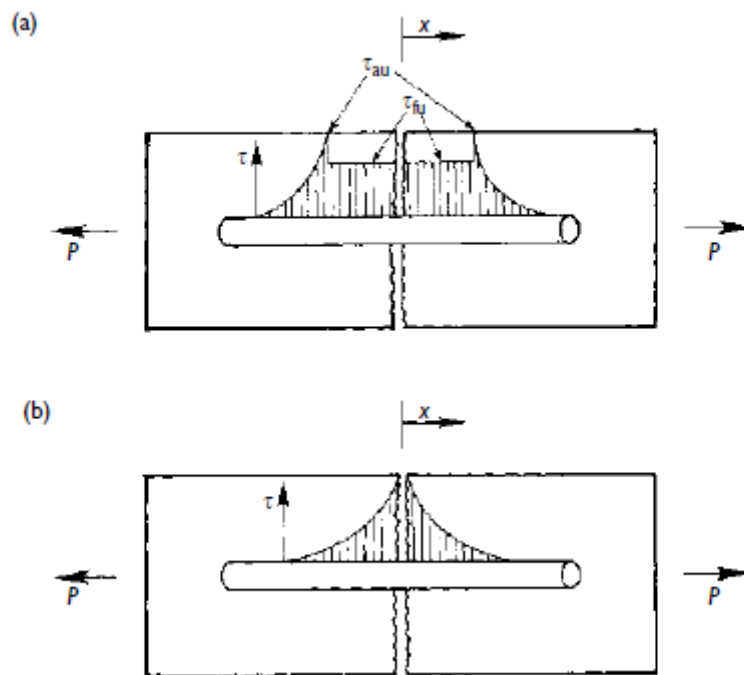


Σχήμα 1.4 Παρουσίαση της μετάβασης από την ελαστική μεταφορά τάσεων στην τριβή ολίσθησης.

Ρηγματωμένο υλικό

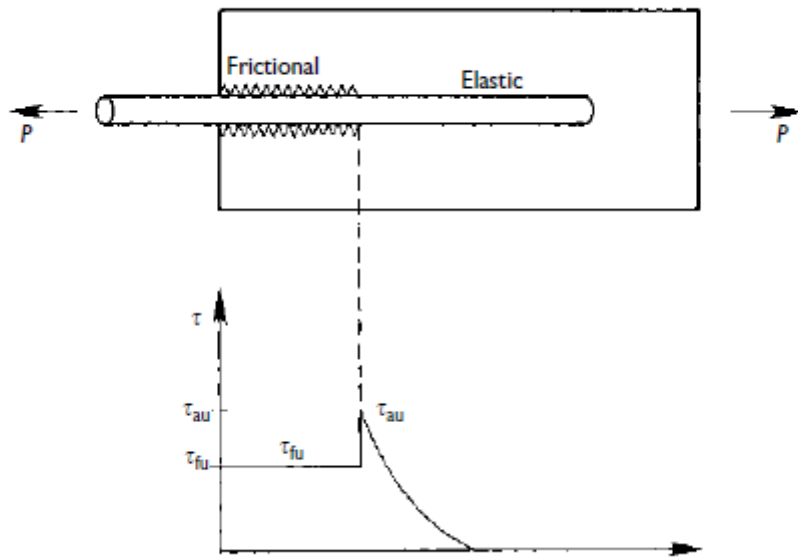
Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η συνεισφορά των ινών είναι ιδιαίτερα σημαντική μετά τη δημιουργία των ρωγμών, όπου οι ίνες διατρέχουν τις ρωγμές (bridging) και αποτρέπουν την αστοχία του υλικού. Το θέμα αυτό έχει διερευνηθεί εκτενώς τόσο αναλυτικά όσο και πειραματικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι ρωγμές θεωρούνται επίπεδες και οι ίνες λαμβάνονται απολύτως εγκάρσιες στο επίπεδο της ρωγμής. Οι παραδοχές αυτές διαφέρουν κατά πολύ από την πραγματική φύση του υλικού όπου η αλληλεπίδραση της ρωγμής με την ίνα είναι περίπλοκη, με συχνή εμφάνιση μικρορωγμών μεταξύ των δύο υλικών, αλλά και καθώς οι ίνες είναι τυχαία προσανατολισμένες ως προς τις ρωγμές.

Η μεταφορά των τάσεων κατά την εξόλκευση ή όταν οι ίνες διατρέχουν μια ρωγμή, μπορεί ουσιαστικά να περιγραφεί όπως και στο αρηγμάτωτο υλικό, με ελαστικές τάσεις συνάφειας και το μηχανισμό τριβής ολίσθησης. Η διαφορά είναι ότι στο ρηγματωμένο υλικό η μέγιστη διατμητική τάση συμβαίνει στο σημείο όπου η ίνα εισέρχεται στο σκυρόδεμα. Εάν έχει προηγηθεί και αποκόλληση σε αυτό το σημείο, η κατανομή των διατμητικών τάσεων θα είναι ένας συνδυασμός διατμητικής τριβής κοντά στη ρωγμή και μειούμενης διατμητικής τάσης μακριά της ρωγμής, όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.5 a**. Εάν κατά τη ρωγμάτωση δεν έχει προηγηθεί αποκόλληση, **σχήμα 1.5 b**, η κατανομή των διατμητικών τάσεων στην διεπιφάνεια θα είναι ελαστικής μορφής, όπως στο αρηγμάτωτο υλικό, και μόνο σε μεγάλες τιμές φορτίου θα συνδυάζεται με τάσεις από τριβή ολίσθησης.



Σχήμα 1.5 Κατανομή διατμητικών τάσεων κατά μήκος ίνας που διατρέχει ρωγμή: α) αποκόλληση πριν τη ρηγμάτωση, β) χωρίς αποκόλληση πριν τη ρηγμάτωση [1].

Όταν, στο σημείο όπου η ίνα εισέρχεται στο σκυρόδεμα, η διατμητική τάση στην διεπιφάνεια υπερβεί τη διατμητική της αντοχή, η ίνα θα αποκολληθεί από το σκυρόδεμα. Θεωρώντας ότι η αποκόλληση περιορίζεται εκεί όπου η διατμητική τάση είναι μεγαλύτερη της αντοχής, τότε η μεταφορά του φορτίου γίνεται από διατμητική τάση λόγω ολίσθησης στην αποκολλημένη περιοχή και από ελαστική διατμητική τάση στο υπόλοιπο μήκος της ίνας. Το φαινόμενο αυτό δηλώνει πως δεν είναι αναγκαίο να υπάρξει αστοχία όταν η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας εξαντληθεί. Ένα σκαρίφημα της μερικής αποκόλλησης μιας ίνας δίνεται στο **σχήμα 1.6**, όπου φαίνεται η σταθερή διατμητική τάση λόγω ολίσθησης στο αποκολλημένο τμήμα και η μειούμενη ελαστική, διατμητική τάση στο υπόλοιπο τμήμα.



Σχήμα 1.6 Μερικώς αποκολλημένη ίνα και κατανομή διατμητικών τάσεων [1].

Μηχανική αγκύρωση

Στις συνήθεις εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος, η συνάφεια μεταξύ σκυροδέματος και ίνας δεν είναι ικανή να παρέχει ενίσχυση στο υλικό. Για το λόγο αυτό, συχνά χρησιμοποιούνται ίνες με αλλοιωμένη μορφή ή και άγκιστρα. Η συνοχή που επιτυγχάνεται είναι κατά πολύ πιο αποτελεσματική από την συνάφεια στην διεπιφάνεια των δύο υλικών.

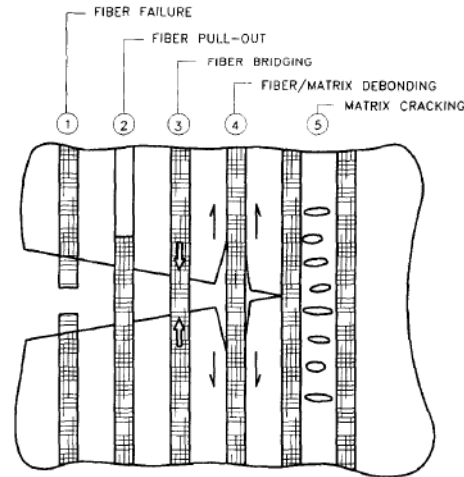
Κατά τη μηχανική αγκύρωση, δύο είναι οι μηχανισμοί που συνδράμουν στην αυξημένη συνοχή.

- 1) Κατά την εξόλκευση η ίνα παραμορφώνεται πλαστικά, με συνέπεια την απορρόφηση επιπλέον ενέργειας
- 2) Η ζώνη επιρροής της ίνας είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή μιας απλής ευθύγραμμης ίνας

Και οι δύο αυτοί μηχανισμοί συνιστούν ότι οι ιδιότητες του υλικού των ινών, αλλά και του σκυροδέματος έχουν σημαντική επίδραση στη συνάφεια των δύο υλικών. Πράγματι πειραματικά δεδομένα αποδεικνύουν ότι, στην περίπτωση χαλύβδινων ινών, χάλυβας υψηλότερης αντοχής απέδωσε καλύτερη συνάφεια και χαρακτηριστικά εξόλκευσης.

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί [4] [5], πως η μηχανική αγκύρωση έχει σημαντικό ρόλο στην πλαστική περιοχή, αυξάνοντας την παραμένουσα τάση, με τη συνεισφορά της συνάφειας των υλικών στη

διεπιφάνεια να θεωρείται αμελητέα. Μάλιστα, τόσο στις συνθετικές, αλλά και στις χαλύβδινες ίνες η συνεισφορά του σχήματος και των αγκίστρων αντίστοιχα είναι ανεξάρτητη του μήκους της ίνας.



Σχήμα 1.7 Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα [2].

1.4.2 Μηχανική συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος

Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η κύρια συνεισφορά των ινών είναι στη φάση της ρωγμάτωσης του υλικού, όπου οι ίνες διατρέχουν τις ρωγμές της μήτρας (bridging). Σε ένα καλά σχεδιασμένο υλικό, οι ίνες συνεισφέρουν σε αυτή τη φάση, με δύο τρόπους:

- 1) Αυξάνουν την παραμένουσα τάση του υλικού, μεταφέροντας τις τάσεις διαμέσου των ρωγμών. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται από την ανοδική κλίση της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων, μετά την πρώτη ρωγή και αυτή η συμπεριφορά αναφέρεται ως σκλήρυνση λόγω καταπόνησης (strain hardening).
- 2) Αυξάνουν τη δυσθραυστότητα του υλικού μέσω απορρόφησης επιπλέον ενέργειας που σχετίζεται με την αποκόλληση και την εξόλκευση των ινών που διατρέχουν ρωγμές. Αυτό συμβαίνει όταν η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων έχει καθοδική κλίση μετά το σημείο της πρώτης ρωγμής (strain softening) [1].

Η εμφάνιση ρωγμών στο υλικό δεν οδηγεί στην αστοχία, αλλά στην ανακατανομή των τάσεων μεταξύ ινών και μήτρας. Συγκεκριμένα το φορτίο που καταπονεί τη μήτρα στη ρωγματωμένη περιοχή,

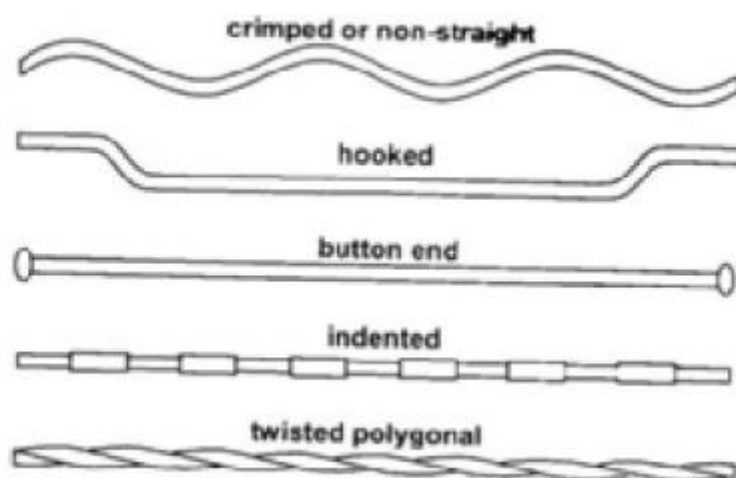
θα αναληφθεί από τις ίνες και η μήτρα στις ακμές των ρωγμών θα παραμείνει πρακτικά αφόρτιστη. Αύξηση του φορτίου θα σημάνει τη δημιουργία επιπρόσθετων ρωγμών, έως ότου η μήτρα να χωριστεί σε τμήματα διαχωρισμένα από παράλληλες ρωγμές. Μετά την ολοκλήρωση της ρωγμάτωσης, το επιπρόσθετο φορτίο, άρα και οι εφελκυστικές τάσεις, θα εντείνουν αποκλειστικά τις ίνες, οδηγώντας στην πλαστική τους παραμόρφωση, την αποκόλληση και την εξόλκευση. Στο **σχήμα 1.7** φαίνονται εποπτικά οι μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

1.5 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα

Οι ίνες χάλυβα είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος ινών στις εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος, αυξάνοντας σημαντικά τη δυσθραυστότητά του. Αρχικά χρησιμοποιούνταν για τον περιορισμό των ρωγμών, ως δευτερεύων οπλισμός, σε πλάκες, επενδύσεις σηράγγων και δάπεδα. Σήμερα, παρότι εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται εκτενώς σε τέτοιες εφαρμογές, ολοένα και αυξάνεται η χρήση τους ως φέροντα οπλισμό, είτε αντικαθιστώντας τις συμβατικές ράβδους χάλυβα, είτε επικουρικά σε αυτές.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ινών είναι κοινός δομικός χάλυβας ή και σε ειδικές εφαρμογές ανοξειδωτος. Ανάλογα με τον χάλυβα που χρησιμοποιείται, οι ίνες μπορεί να έχουν εφελκυστική αντοχή της τάξης 345 - 2100 MPa και μέγιστη παραμόρφωση ϵ_y από 0.5 – 35%. [1]

Όπως φαίνεται στο **σχήμα 1.8**, οι ίνες χάλυβα παράγονται σε διαφορετικά σχήματα με σκοπό τη βελτιστοποίηση της μηχανικής αγκύρωσης που παρέχουν στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 1.8 Τυπικά διαθέσιμα σχήματα χαλύβδινων ινών [1].

1.5.1 Δομή ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες

Καθοριστικό ρόλο στη δομή του ινοπλισμένου σκυροδέματος έχει το ποσοστό (κατ' όγκο) των ινών που χρησιμοποιούνται. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος βελτιώνονται με την αύξηση του όγκου ινών, αλλά και με τη χρήση ινών με υψηλό λόγο μορφής (aspect ratio), αφού έτσι επιτυγχάνεται η βέλτιστη συνεργασία των δύο υλικών. Όμως η ο υψηλός λόγος μορφής και το μεγάλο ποσοστό περιεχόμενων ινών επηρεάζουν την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος και δεν εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή των ινών. Έτσι, ακόμα και με τη χρήση ρευστοποιητών και ινών που επιτυγχάνουν αυξημένη συνάφεια μέσω μηχανικής αγκύρωσης, το ποσοστό των ινών που μπορεί να χρησιμοποιηθούν, με απλές μεθόδους ανάμιξης, δεν ξεπερνά το 2%.

Η κατανομή των αδρανών στο σκυρόδεμα είναι άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζεται από την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Στα απλά σκυροδέματα η βέλτιστη κατανομή επιτυγχάνεται με τη χρήση περίπου 40% λεπτόκοκκων αδρανών. Στη περίπτωση ινοπλισμένου το ποσοστό αυτό είναι αρκετό μόνο για χαμηλή περιεκτικότητα ινών (μικρότερη του 0.5%), ενώ για μεγαλύτερες τιμές απαιτούνται μέχρι και 60% λεπτόκοκκα αδρανή [1].

1.5.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά

Είναι κοινώς αποδεκτό πως οι ίνες έχουν μικρή επίδραση στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, δευτερευούσης σημασίας. Προσδίδουν όμως στο υλικό πλάστικη συμπεριφορά και αυξάνουν την απορροφούμενη ενέργεια μετά τη ρωγμάτωση.

Η κύρια επίδραση των χαλύβδινων ινών είναι στην καμπτική αντοχή και τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος. Η αύξηση και στα δύο αυτά μεγέθη φαίνεται να εξαρτάται άμεσα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών, με το λόγο μορφής (αύξησή του) αλλά και το σχήμα (**σχήμα 1.7**), να προσδίδουν αυξημένη αντοχή και δυσθραυστότητα.

1.5.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι **Düzgün et al.** [6] μελέτησαν την επίδραση της προσθήκης ινών σε ελαφροσκυρόδεμα. Στην έρευνά τους αντικατέστησαν τα συμβατικά αδρανή κατά 25%, 50%, 75% και 100% με κίσηρης. Οι ίνες προστέθηκαν σε 3 διαφορετικά ποσοστά 0.5%, 1.0% και 1.5% κατ' όγκο και η ποσότητα του σκυροδέματος διατηρήθηκε σταθερή στα 300 kg/m³. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι η

αύξηση της περιεχόμενης κίσηρης οδηγεί στη μείωση του ειδικού βάρους και των μηχανικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Συγκριτικά με τα δοκίμια που δεν περιείχαν ίνες, η προσθήκη ινών απέδωσε αύξηση μέχρι και 8.5%, 21.1%, 61.2% και 120.2% στο ειδικό βάρος, την θλιπτική αντοχή, την εφελκυστική αντοχή και την καμπτική αντοχή αντίστοιχα.

Οι **P.S. Song και S.Hwang** [7] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλής αντοχής με χαλύβδινες ίνες. Οι ίνες χρησιμοποιήθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές περιεκτικότητες κατ' όγκο 0.5%, 1.0%, 1.5% και 2.0%. Η θλιπτική αντοχή παρουσίασε τη μέγιστη τιμή στις συνθέσεις που περιείχαν ίνες σε ποσοστό 1.5% κατ' όγκο, παρουσιάζοντας αύξηση 15.3% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Ο δείκτης δυσθραυστότητας παρουσίασε αύξηση σε αντιστοιχία με το περιεχόμενο ποσοστό ινών, με τις μέγιστες τιμές να λαμβάνονται για περιεκτικότητα ινών 2.0%.

Οι **Yazici et al.** [8] μελέτησαν την επίδραση του λόγου μορφής και της περιεκτικότητας των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Χρησιμοποίησαν χαλύβδινες ίνες με άγκιστρα, σε μορφή δεματίων με λόγους μορφής (l/d) 45, 65 και 80. Επιπλέον οι ίνες προστέθηκαν σε τρεις διαφορετικές περιεκτικότητες 0.5%, 1.0% και 1.5% κατ' όγκο και συνολικά παρασκεύασαν δέκα συνθέσεις.

Για σταθερό λόγο μορφής παρατηρήθηκε πως η θλιπτική, εφελκυστική και καμπτική αντοχή αυξάνουν με την αύξηση της περιεκτικότητας ινών. Η ίδια συμπεριφορά ισχύει και για σταθερή περιεκτικότητα και διαφορετικούς λόγους μορφής. Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση με λόγο μορφής 80 και περιεκτικότητα 1.5% όπου όλα τα μετρούμενα μεγέθη ήταν μικρότερα συγκριτικά με χαμηλότερο λόγο μορφής ή περιεχόμενο ποσοστό ινών.

1.6 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με συνθετικές ίνες

Οι συνθετικές χρησιμοποιούνται εκτενώς στην παραγωγή σκυροδέματος, με πολλές από τις διαθέσιμες στο εμπόριο να έχουν σχεδιαστεί ειδικά ως υλικό σπλισμού για ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Οι ιδιότητες των ινών αυτών ποικίλουν ανάλογα με τις ιδιότητες (εφελκυστική αντοχή και μέτρο ελαστικότητας) του πολυμερούς που τις συνθέτει.

Στα περισσότερα σκυροδέματα το μέτρο ελαστικότητας κυμαίνεται μεταξύ 15 – 50 GPa, με τις περισσότερες συνθετικές ίνες να έχουν σαφώς χαμηλότερο. Έτσι προκειμένου οι ίνες να δρουν αποτελεσματικά ως σπλισμός, συχνά χρησιμοποιούνται ίνες με μέτρο ελαστικότητας μεγαλύτερα του σκυροδέματος. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο διαχωρισμό των συνθετικών ινών σε δύο κατηγορίες, χαμηλού και υψηλού μέτρου ελαστικότητας. [1] Ο διαχωρισμός αυτός αφορά κυρίως τη μελέτη των

ινών και δεν αποκλείει τη χρήση ινών με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας ως οπλισμό. Μάλιστα, το πιο διαδεδομένο είδος συνθετικών ινών, οι ίνες πολυπροπυλενίου, ανήκει σε αυτήν την κατηγορία και έχει χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος της εργασίας.

1.6.1 Ίνες πολυπροπυλενίου

Οι ίνες πολυπροπυλενίου παράγονται σε διαφορετικά σχήματα και ιδιότητες ανάλογα με τον κατασκευαστή. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι η αντίστασή τους σε αλκαλικό περιβάλλον, το σχετικά ψηλό σημείο τήξης (165°C) και το χαμηλό κόστος. Τα μειονεκτήματά τους είναι η χαμηλή πυραντοχή, η ευαισθησία τους στον ήλιο, το χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (1-8 GPa) και η κακή συνάφεια με το σκυρόδεμα αφού το πολυπροπυλένιο είναι υλικό υδρόφοβο. Τα μειονεκτήματα αυτά αντισταθμίζονται με κατάλληλη επεξεργασία των ινών [1].

Η χρήση των ινών διαφέρει ανάλογα με την περιεκτικότητά τους στο σκυρόδεμα. Σε δομικά στοιχεία μικρού πάχους, οι ίνες χρησιμοποιούνται ως κύριος οπλισμός και συμμετέχουν στην ανάληψη του φορτίου. Το ποσοστό των ινών σε αυτές τις εφαρμογές υπερβαίνει το 5% κατ' όγκο. Σε σαφώς χαμηλότερη περιεκτικότητα, μικρότερη του 0.5% κατ' όγκο, οι ίνες χρησιμοποιούνται ως δευτερεύων οπλισμός για τον περιορισμό των ρωγμών. Πρόσφατα, με τη χρήση ινών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά, οι ίνες πολυπροπυλενίου χρησιμοποιούνται και με ενδιάμεση περιεκτικότητα (0.5 – 5% κατ' όγκο) για την ανάληψη φορτίου και τον έλεγχο των ρωγμών, αν και η απόδοσή τους είναι υποδεέστερη σε σχέση με τις ίνες χάλυβα, για ίδια συγκέντρωση ινών κατ' όγκο.

1.6.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες πολυπροπυλενίου

Η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο σκυρόδεμα δεν επιδρά στην θλιπτική του αντοχή. Σε αντίθεση με τις ίνες από χάλυβα, δεν φαίνεται να υπάρχει και σημαντική αύξηση στην καμπτική αντοχή (μέγιστο καμπτικό φορτίο) του σκυροδέματος, κυρίως λόγω τις ασθενέστερης συνάφειας του πολυπροπυλενίου με τη μήτρα. Προσδίδουν όμως πλάσιμη συμπεριφορά και αυξάνουν την απορροφούμενη ενέργεια από το σκυρόδεμα μετά τη ρωγμάτωση

1.6.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι **A. M. Alhozaimy et al.** [9] διερεύνησαν την επίδραση ινών πολυπροπυλενίου υπό τη μορφή συσσωμάτων και σε χαμηλή περιεκτικότητα (μικρότερη του 0.3% κατ'όγκο) στα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος. Οι πειραματικές συνθέσεις περιείχαν 0%, 0.05%, 0.1%, 0.2% και 0.3% κατ'όγκο ίνες και χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια 152x305 mm για τη δοκιμή θλίψης και πρισματικά 102x102x356 mm για την δοκιμή κάμψης. Τα αποτελέσματα δεν έδειξαν καμία ουσιαστική επίδραση των ινών στην θλιπτική και καμπτική αντοχή του σκυροδέματος. Αντίθετα, οι ίνες επιρρεάζουν σημαντικά τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος και συγκεκριμένα η προσθήκη 0.1%, 0.2% και 0.3% ινών οδήγησε στην αύξηση της δυσθραυστότητας κατά 44%, 271% και 387% αντίστοιχα, σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης απέδωσε αύξηση 48% και 79% σε σχέση με το άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, αντίστοιχα.

Οι **Cengiz O. και Turanli L., (2003)** έκαναν μια συγκριτική αξιολόγηση του οπλισμένου σκυροδέματος και επέλεξαν να ελέγξουν δοκίμια τα οποία είχαν ως οπλισμό μεταλλικές ράβδους, μεταλλικές ίνες, ίνες πολυπροπυλενίου υψηλής αντοχής καθώς και συνδυασμό των παραπάνω ινών (υβριδικό ινοπλισμένο σκυρόδεμα). Οι μεταλλικές ίνες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν πεπλατυσμένα άκρα και λόγο μορφής 50 (L=30 mm, D=0.6 mm). Συμπεριλήφθηκαν στη σύνθεση σε ποσοστό 0.45% και 0.64% κ.ο., το οποίο ισοδυναμεί με 35 kg/m³ και 50 kg/m³ αντίστοιχα. Οι ίνες πολυπροπυλενίου που χρησιμοποιήθηκαν είχαν λόγο μορφής 33 (L=30 mm, D=0.9 mm) και συμπεριλήφθηκαν σε ποσοστό 0.78% και 1.1% κ.ο., το οποίο ισοδυναμεί με 7 kg/m³ και 10 kg/m³ αντίστοιχα. Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν να προσδιορισθούν χαρακτηριστικά όπως η σκληρότητα, η καμπτική εφελκυστική αντοχή, η απορρόφηση ενέργειας και το μέγιστο φορτίο του οπλισμένου σκυροδέματος. Από τις δοκιμές προέκυψε ότι η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα αύξησε τη σκληρότητα, την καμπτική ικανότητα, την απορρόφηση ενέργειας, την ικανότητα ανάληψης φορτίου και την διατμητική αντοχή. Συγκρίνοντας το φαινόμενο του «rebound» κατά την εκτόξευση του σκυροδέματος, προέκυψε ότι οι ίνες πολυπροπυλενίου το μειώνουν, άρα μειώνεται και η απώλεια των ινών με αποτέλεσμα να εξασφαλίζεται σημαντικό οικονομικό όφελος, καθώς οι ίνες είναι το πιο ακριβό συστατικό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος.

Η αύξηση των ινών πολυπροπυλενίου από 0.78% σε 1.1% δεν αύξησε σημαντικά τη σκληρότητα ενώ προκάλεσε μείωση του μέγιστου φορτίου. Κατά τους συγγραφείς προτείνεται ένα ποσοστό ινών της τάξης του 0.78% κ.ο. ως βέλτιστο, καθώς όσο αυξάνεται το ποσοστό των ινών, αυξάνεται και η περιεκτικότητα των πρόσθετων που απαιτούνται για την επίτευξη εργασιμότητας στο σκυρόδεμα, κάτι που μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην αντοχή. Συγκρίνοντας τα δοκίμια με ποσοστό ινών πολυπροπυλενίου 0.78% και μεταλλικών ινών 0.45%, προκύπτει ότι για αυτό το ποσοστό θα

μπορούσε να επιτευχθεί αντικατάσταση των μεταλλικών με ίνες πολυπροπυλενίου με αντίστοιχες μηχανικές ιδιότητες. Στο υβριδικό σκυρόδεμα, η συνεργασία μεταλλικών και ινών πολυπροπυλενίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής, της ολκιμότητας και της σκληρότητας. Για το λόγο αυτό προτείνεται από τους μελετητές να χρησιμοποιούνται δύο είδη ινών καθώς προσδίδουν καλύτερες ιδιότητες και συμπεριφορά σε σχέση με τη χρήση ενός.

1.7 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή

1.7.1 Ελαφροσκυρόδεμα

Ο γενικός όρος ελαφροσκυρόδεμα (Lightweight Concrete, LWC) αναφέρεται σε οποιοδήποτε σκυρόδεμα που, μετά από πρότυπη ξήρανση σε κλίβανο, έχει πυκνότητα μικρότερη των 2000 kg/m³. Η συνηθέστερη μέθοδος μείωσης του βάρους του σκυροδέματος είναι η μερική αντικατάσταση των κανονικής πυκνότητας αδρανών, συνήθως του χονδρόκοκκου κλάσματος, με ελαφρά αδρανή, διατηρώντας στο μείγμα τα κανονικής πυκνότητας λεπτόκοκκα αδρανή [10].

Η χρήση του ελαφροσκυροδέματος ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπου τα μόνιμα φορτία της κατασκευής υπερβαίνουν σημαντικά τα ωφέλιμα. Ειδικότερα σε πολυόροφα κτίρια, η μείωση του ίδιου βάρους σε οριζόντια και κατακόρυφα διαφράγματα, με μέτριες απαιτήσεις σε φέρουσα ικανότητα, μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα επωφελής στο συνολικό κόστος της κατασκευής. Εξαιτίας του πορώδους των ελαφρών αδρανών, το ελαφροσκυρόδεμα παρέχει αυξημένη μόνωση και συχνά χρησιμοποιείται και ως θερμομονωτικό υλικό υπό τη μορφή προκατασκευασμένων πάνελ.

1.7.2 Κίσηρης

Η κίσηρης είναι το φθηνότερο και πιο διαδεδομένο φυσικό ελαφρό αδρανές. Πρόκειται για ηφαιστιογενές πέτρωμα που δημιουργείται μετά από την ταχεία ψύξη της λάβας, που έχει ως αποτέλεσμα να εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρα. Χαρακτηρίζεται από χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα (300-800 kg/m³), έντονο πορώδες και υψηλή υδαταπορροφητικότητα.

1.7.3 Ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα – μηχανικά χαρακτηριστικά

Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος εξαρτώνται γενικά από τα χρησιμοποιούμενα αδρανή και ειδικότερα από το ειδικό βάρος τους. Υψηλότερης πυκνότητας αδρανή οδηγούν σε σκυρόδεμα με καλύτερα χαρακτηριστικά. Τα ελαφρά αδρανή εξασφαλίζουν ομοιότητα στο μέτρο ελαστικότητας, καλή συνάφεια των φάσεων του υλικού και μειωμένο ίδιο

βάρος, έχουν όμως μειωμένη αντοχή και το παραγόμενο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη θλιπτική αντοχή και ιδιαίτερα ψαθυρή συμπεριφορά.

Μία συνήθης τακτική στην παραγωγή ελαφροσκυροδέματος είναι η χρήση σπλισμού ινών. Τα τελευταία 25 χρόνια, η χρήση των ινών στο ελαφροσκυρόδεμα έχει διερευνηθεί διεξοδικά και είναι κοινώς αποδεκτό πως η προσθήκη ινών βελτιώνει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά του, ειδικότερα τη συμπεριφορά του έναντι ψαθυρής αστοχίας.

1.7.4 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Banthia, N. και Trottier, J. [11] με τα αποτελέσματα της ερευνητικής τους εργασίας πάνω σε μεταλλικές, παραμορφωμένες ίνες, προτείνουν ότι η προσθήκη ινών στο ελαφροσκυρόδεμα οδηγεί σε σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής του.

Οι Balaguru, P. και Ramakrishnan V. [12] κατά την έρευνά τους διαπίστωσαν πως οι ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος είναι παρόμοιες του συμβατικού, εκτός από το ποσοστό του περιεχόμενου κενού αέρα. Κατά την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος προτείνουν τη χρήση πρόσθετων που μειώνουν το απαιτούμενο νερό, ώστε να βελτιώνεται η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος.

Οι Campione et al [13] με την έρευνά τους διαπίστωσαν πως τόσο στο κανονικό όσο και στο ελαφοκυρόδεμα οι ίνες σε συνδυασμό με το συμβατικό σπλισμό βελτιώνουν την ψαθυρή συμπεριφορά του υλικού. Οι ίνες αυξάνουν την πλαστιμότητα και μειώνουν τον απαιτούμενο εγκάρσιο σπλισμό στις κρίσιμες ζώνες.

Οι Campione et al [14] προτείνουν ότι, παρά τη ψαθυρή συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος, είναι δυνατόν να επιτευχθεί η απαιτούμενη πλαστιμότητα, για τη χρήση του σε σεισμικά φορτία, με την προσθήκη ικανού ποσοστού ινών μικρού μήκους.

1.8 Μηχανικές δοκιμές και αξιολόγηση ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η αξιολόγηση των μηχανικών χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί βασικό παράγοντα στην εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του υλικού. Κάποια από τα χαρακτηριστικά του, όπως η θλιπτική αντοχή, εξαρτώνται κυρίως από τη μήτρα και μπορούν να μετρηθούν με τις συμβατικές δοκιμές σκυροδέματος. Άλλα χαρακτηριστικά του όμως εξαρτώνται άμεσα από την παρουσία των ινών και την αλληλεπίδρασή τους με τη μήτρα. Ιδιότητες όπως η δυσθραυστότητα, ο περιορισμός των ρωγμών απαιτούν εξειδικευμένες δοκιμές που θα αποτυπώνουν την επίδρασή της προσθήκης ινών στα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος.

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι, παρά το γεγονός πως πολλές δοκιμές έχουν τυποποιηθεί υπό τη μορφή προτύπων, επικρατεί ασυμφωνία ως προς τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων με βάση και τη διασπορά που αυτά παρουσιάζουν ανάλογα με το εφαρμοζόμενο πρότυπο, αλλά και την αναγκαιότητα της χρήσης εξειδικευμένου εργαστηριακού εξοπλισμού για την εκτέλεση των δοκιμών. Το γεγονός αυτό, αποτελεί επίσης βασικό εμπόδιο για την πρακτική εφαρμογή του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

1.8.1 Δοκιμές θλίψης

1.8.1.1 Θλιπτικής αντοχής

Η επίδραση των ινών στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι πρακτικά αμελητέα. Έτσι δεν απαιτούνται εξειδικευμένες δοκιμές. Οι ίδιες δοκιμές που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της θλιπτικής αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και λόγου παραμορφώσεων, που χρησιμοποιούνται στο άοπλο σκυρόδεμα είναι εξίσου αξιόπιστες και στην περίπτωση ινοπλισμένου σκυροδέματος.

1.8.1.2 Μέτρο ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας E εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται στην παραμόρφωση. Η συμπεριφορά του σκυροδέματος περιγράφεται από την καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων σ - ϵ και για σχετικά μικρό φορτίο ($\leq 40\%$ του μέγιστου φορτίου θραύσεως) θεωρείται ευθύγραμμη. Σε αυτήν την περίπτωση το μέτρο ελαστικότητας υπολογίζεται ως $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ και με την προϋπόθεση ότι ο χρόνος φόρτισης είναι μικρός, θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το υλικό. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και ερπυστικές παραμορφώσεις.

Σε μεγαλύτερες τιμές φορτίου, η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων γίνεται μη γραμμική και η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται καλύτερα από το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας. Για

τιμές μεγαλύτερες του 75% της μέγιστης αντοχής θραύσεως, το υλικό παύει να βρίσκεται στην ελαστική περιοχή παραμορφώσεων και ο υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας θα πρέπει να αποφεύγεται.

Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται και από την ταχύτητα επιβολής του φορτίου. Όσο μειώνεται η ταχύτητα φόρτισης η αντοχή μειώνεται και η παραμόρφωση κατά τη θραύση αυξάνει, με αποτέλεσμα μικρότερο μέτρο ελαστικότητας. Αντίθετα με μεγάλη ταχύτητα φόρτισης η αντοχή αυξάνεται και η παραμόρφωση κατά τη θραύση μειώνεται, αποτέλεσμα είναι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας.

Εκτός από το φορτίο και την ταχύτητα φόρτισης, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως η ηλικία του δοκιμίου, η θερμοκρασία, η υγρασία, το είδος των αδρανών και η κοκκομετρική σύνθεση.

Τόσο τα αδρανή όσο και ο σκληρυμένος τσιμεντοπολτός έχουν καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων που παραμένουν ευθύγραμμες για υψηλό ποσοστό της μέγιστης τάσης θραύσης. Όμως τα δύο αυτά υλικά έχουν διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η συγκέντρωση τάσεων στην διεπιφάνεια των υλικών και η δημιουργία μικρορωγμών που καμπυλώνουν την γραμμή τάσεων – παραμορφώσεων. Στην περίπτωση ελαφροσκυροδέματος, όπου τα αδρανή και ο τσιμεντοπολτός έχουν μικρή διαφορά στο μέτρο ελαστικότητας τους, η μικρορωγμάτωση μειώνεται και η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων γίνεται πιο ευθύγραμμη.

1.8.1.3 Λόγος παραμορφώσεων – Poisson

Ο λόγος παραμορφώσεων ή λόγος Poisson ν , είναι ο λόγος της εγκάρσιας παραμόρφωσης ϵ_x προς την αξονική παραμόρφωση ϵ_y , στην ελαστική περιοχή της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων, όταν το υλικό υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη, $\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$

Ο λόγος παραμορφώσεων αποτελεί χαρακτηριστική σταθερά για κάθε υλικό που καταπονείται ελαστικά και είναι αδιάστατος αριθμός. Η μέγιστη τιμή του είναι 0.5 και τη λαμβάνουν υλικά όπως το λάστιχο, ενώ η ελάχιστη είναι το 0.

Ο λόγος παραμορφώσεων υπολογίζεται από τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, με τη χρήση μηκυνσιομέτρων παράλληλα και εγκάρσια στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Έχει διαπιστωθεί πως ο λόγος παραμορφώσεων αυξάνεται μετά από κάποιο όριο της τάσης ως προς τη μέγιστη τάση θραύσης. Για το λόγο αυτό ο υπολογισμός του γίνεται σε τιμές έως και 40% της μέγιστης τάσης θραύσης.

1.8.2 Δοκιμές εφελκυσμού

1.8.2.1 Δοκιμή κάμψης - λυγισμού

Οι δοκιμές αυτές έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην αξιολόγηση του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Κατά κανόνα υπολογίζεται η πλήρης καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων (φορτίου – μετατόπισης), η οποία αποτυπώνει την επίδραση των ινών στη δυσθραυστότητα του υλικού και τον περιορισμό των ρωγμών.

Στις δοκιμές κάμψης, ο υπολογισμός της τάσης κατά την πρώτη ρωγμή (δηλαδή στο σημείο όπου η καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων αποκλίνει σημαντικά από τη γραμμικότητα, επίσης γνωστό και ως όριο της αναλογικότητας) και η μέγιστη καμπτική τάση υπολογίζονται με ελαστική θεώρηση, κάτι που δεν ισχύει στη μετελαστική περιοχή.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η ερμηνεία της καμπύλης στη μετελαστική και πλαστική της περιοχή που αντιπροσωπεύει την ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται (υπό σταθερή τάση) και τη συνολική δυσθραυστότητά του. Η περιοχή αυτή είναι και η βασική στην αξιολόγηση του ινοπλισμένου σκυροδέματος με το πιο άμεσα μετρήσιμο μέγεθος να είναι η απορροφούμενη ενέργεια υπό τη μορφή του εμβαδού της καμπύλης σε συγκεκριμένα όρια παραμόρφωσης.

Ιδανικά οι μετρούμενες παράμετροι που αφορούν τη δυσθραυστότητα και την παραμένουσα αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος θα πρέπει να ικανοποιούν τις ακόλουθες συνθήκες [15]:

1. Θα πρέπει να έχουν φυσική ερμηνεία που να είναι άμεσα κατανοητή και θεμελιώδους σημασίας, ώστε να χρησιμοποιούνται στον έλεγχο της ποιότητας του σκυροδέματος.
2. Κατά τον υπολογισμό μεγεθών που αντιπροσωπεύουν τη δυσθραυστότητα, θα πρέπει να εξασφαλίζεται ότι λαμβάνονται υπόψιν οι μέγιστες συνθήκες λειτουργικότητας που αναμένονται στην συγκεκριμένη πρακτική εφαρμογή.
3. Η διασπορά των αποτελεσμάτων θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή, ώστε αυτά να είναι συγκρίσιμα τόσο σε επίπεδο σύνθεσης αλλά και εργαστηρίων.
4. Θα πρέπει να ποσοτικοποιούν τουλάχιστον μια παράμετρο της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος.
5. Θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητες της γεωμετρίας και του μεγέθους του δοκιμίου.

Οι δοκιμές κάμψης, ως οι πιο διαδεδομένες, έχουν τυποποιηθεί σε πρότυπα τόσο σε διεθνές όσο και εθνικό επίπεδο. Δυστυχώς, κανένα από τα υπάρχοντα πρότυπα δεν μπορεί να ικανοποιήσει όλες τις παραπάνω συνθήκες, ειδικότερα δεν παρέχουν ένα κοινό και σαφές μέτρο της δυσθραυστότητας

και συχνά αμφισβητείται η ικανότητα τους να περιγράψουν αξιόπιστα τη συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος ιδιαίτερα στην πλαστική περιοχή.

1.8.2.2 Double punch test – Δοκιμή Barcelona

Η δοκιμή Barcelona (BCN test) για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα προτάθηκε από τους Molins et al [16] και είναι μια έμμεση δοκιμή της εφελκυστικής αντοχής που βασίζεται στη δοκιμή διπλής διάτρησης (double punch test) όπως προτάθηκε, για το απλό σκυρόδεμα, από τον Chen [17].

Τα αποτελέσματα της δοκιμής παρουσιάζουν πολύ μικρή διασπορά συγκριτικά με τις δοκιμές κάμψης. Επιπλέον τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται είναι σχετικά μικρά (κύλινδροι 150x150mm) αλλά με μεγάλη επιφάνεια ρωγμών, ενώ η δοκιμή γίνεται με το συμβατικό εξοπλισμό που υπάρχει σε όλα τα εργαστήρια αντοχής υλικών.

Η δοκιμή γίνεται υποβάλλοντας το δοκίμιο σε θλίψη μέσω δύο χαλύβδινων σφηνών στο κέντρο του. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης μετρούνται το φορτίο και η περιμετρική μετατόπιση στη μέση του δοκιμίου αλλά τα μεγέθη αυτά αγνοούνται πριν το σημείο της μέγιστης αντοχής. Μετά τη ρωγμάτωση η απορροφούμενη ενέργεια υπολογίζεται ως το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου – περιμετρικής μετατόπισης και συσχετίζεται άμεσα με τη δυσθραυστότητα του σκυροδέματος.

Γενικευμένη δοκιμή Barcelona

Η μέτρηση της περιμετρικής μετατόπισης απαιτεί ακριβό εξοπλισμό και αποτελεί τη βασική δυσκολία της δοκιμής. Κατά τη γενίκευση της δοκιμής όπως προτάθηκε από τους Carmona et al [18], η μέτρηση της περιμετρικής μετατόπισης αντικαθίσταται με τη μέτρηση της κατακόρυφης μετατόπισης και η δυσθραυστότητα υπολογίζεται ως το έργο της κατακόρυφης μετατόπισης σε σχέση με το ασκούμενο φορτίο.

1.9 Χρήσεις – εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος

1.9.1 Πλάκες και δάπεδα

Περίπου το 60% του παραγόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος παγκοσμίως αφορά εφαρμογές σε πλάκες και δάπεδα. Αν και δεν πρόκειται για αμιγώς φέροντα στοιχεία, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα στις εφαρμογές αυτές περιορίζει τη ρωγμάτωση υπό τα φορτία λειτουργίας και αποτρέπει τη ψαθυρή αστοχία των στοιχείων μέσω της ανακατανομής των τάσεων μεταξύ των ινών που διατρέχουν τις ρωγμές.

Σε σχέση με τα συμβατικά πλέγματα οπλισμού που χρησιμοποιούνται σε τέτοιες εφαρμογές το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δεν παρουσιάζει διαφορές ως προς την αντοχή και τη μορφή της αστοχίας. Είναι όμως πιο απλό στην εφαρμογή και παρέχει μείωση των ρωγμών που εμφανίζονται λόγω συστολής ξηράνσεως του σκυροδέματος.

1.9.2 Εκτοξευόμενο ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Περίπου το 25% του παραγόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιείται ως εκτοξευόμενο. Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται τόσο χαλύβδινες αλλά και συνθετικές ίνες σε ποσοστό κατ' όγκο μέχρι και 2%. Οι κυριότερες εφαρμογές εκτοξευόμενου ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η επισκευή οργανισμών σκυροδέματος και η επένδυση σηράγγων. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό αφού η εκτόξευση εξασφαλίζει ότι οι ίνες είναι σχεδόν τέλεια προσανατολισμένες σε ένα επίπεδο [1].

Η πιο ταχεία αναπτυσσόμενη χρήση του είναι η υποστήριξη του εδάφους, ειδικά σε σήραγγες και ορυχεία, με πολλές εφαρμογές στον Καναδά, την Αυστραλία, τη Νότιο Αφρική και αλλού. Σε περιπτώσεις όπου οι παραμορφώσεις πρέπει να περιορίζονται προτιμώνται χαλύβδινες ίνες, αντίθετα όπου ο περιορισμός των παραμορφώσεων δεν είναι μείζονος σημασίας χρησιμοποιούνται συνθετικές ίνες αφού είναι πιο οικονομικές και εξαλείφεται ο κίνδυνος οξείδωσης των μεταλλικών ινών [1].

1.9.3 Προκατασκευασμένα στοιχεία

Σε πολλά προκατασκευασμένα στοιχεία σκυροδέματος ο οπλισμός δεν εξυπηρετεί την ανάληψη φορτίου, αλλά των περιορισμό των ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές είναι αποτέλεσμα δευτερευόντων φορτίων (θερμοκρασιακή μεταβολή, άνεμος, υγρασία) ή αποτέλεσμα ατυχημάτων κατά τη μεταφορά των στοιχείων. Το σχήμα τέτοιων στοιχείων είναι συχνά περίπλοκο (σωλήνες, δεξαμενές, μη φέροντα διαφράγματα).

Σε αυτήν την περίπτωση το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού πλέγματος οπλισμού. Παρέχει ίδια ή και βελτιωμένη συμπεριφορά ως προς τις ρωγμές, παρουσιάζει αυξημένη αντοχή σε κρούσεις κατά τη μεταφορά των στοιχείων και εξαλείφοντας την προσαρμογή του συμβατικού πλέγματος σε περίπλοκα σχήματα, διευκολύνει κατά πολύ την κατασκευή τους [1].

Παραδοσιακά σε τέτοια στοιχεία χρησιμοποιούνται χαλύβδινες ίνες, πρόσφατα όμως ειδικά για στοιχεία που έρχονται σε επαφή με νερό χρησιμοποιούνται συνθετικές ίνες προσφέροντας εξαιρετική ανθεκτικότητα ειδικά σε σύγκριση με το συμβατικό πλέγμα οπλισμού [1].

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Για τις ανάγκες των πειραμάτων της παρούσας εργασίας μελετήθηκαν δέκα διαφορετικές συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος, οι οποίες παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός των πειραμάτων ήταν ο προσδιορισμός της επίδρασης της προσθήκης διαφόρων τύπων ινών στις μηχανικές ιδιότητες του ελαφροσκυροδέματος. Κατά την πειραματική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκαν:

- Δοκιμή θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια
- Δοκιμή σημειακής διπλής φόρτισης – δοκιμή Barcelona
- Δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού – κάμψης τριών σημείων σε πρισματικά δοκίμια

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μεταλλειολόγων Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

2.1 Υλικά

Και στις δέκα συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM IV/B (P-W) 32.5R, δηλαδή τσιμέντο με κύρια συστατικά εκτός του κλίνκερ, φυσική ποζολάνη (P) και ιπτάμενη τέφρα (W). Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν άμμος 0-4 mm, ασβεστολιθικό ρυζάκι 4-8 mm και κίσηρης 8-16 mm. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών φαίνεται στον **πίνακα 2.1**. Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής Sika Viscocrete και πυριτιακή παιπάλη τύπου Sika Fume HR-D ως πρόσθετο (4^ο συστατικό) σκυροδέματος.

Πίνακας 5.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών

Κόσκινο (mm)	% αθροιστικό διερχόμενο βάρος αδρανών μέχρι και από το κόσκινο i		
	Κίσηρης	Ρυζάκι	Άμμος
31.5	100.0	100.9	100.0
16	100.0	100.0	100.0
12.7	87.9	97.8	100.0
9.51	45.3	57.1	100.0
6.3	25.0	6.1	100.0
4.76	10.1	0.5	100.0
2.38	8.2	0.0	75.0
2	8.0	0.0	69.5
1	0.0	0.0	46.9
0.5	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 mm που για τις ανάγκες της εργασίας κωδικοποιούνται ως SF60, 36 mm που κωδικοποιούνται ως SF36 και 30 mm που κωδικοποιούνται ως SF30. Οι μικροΐνες πολυπροπυλενίου είναι ευθύγραμμες και για τις ανάγκες της εργασίας κωδικοποιούνται ως PF. Στον **πίνακα 2.2** παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων ινών.

Πίνακας 2.2 Χαρακτηριστικά ινών

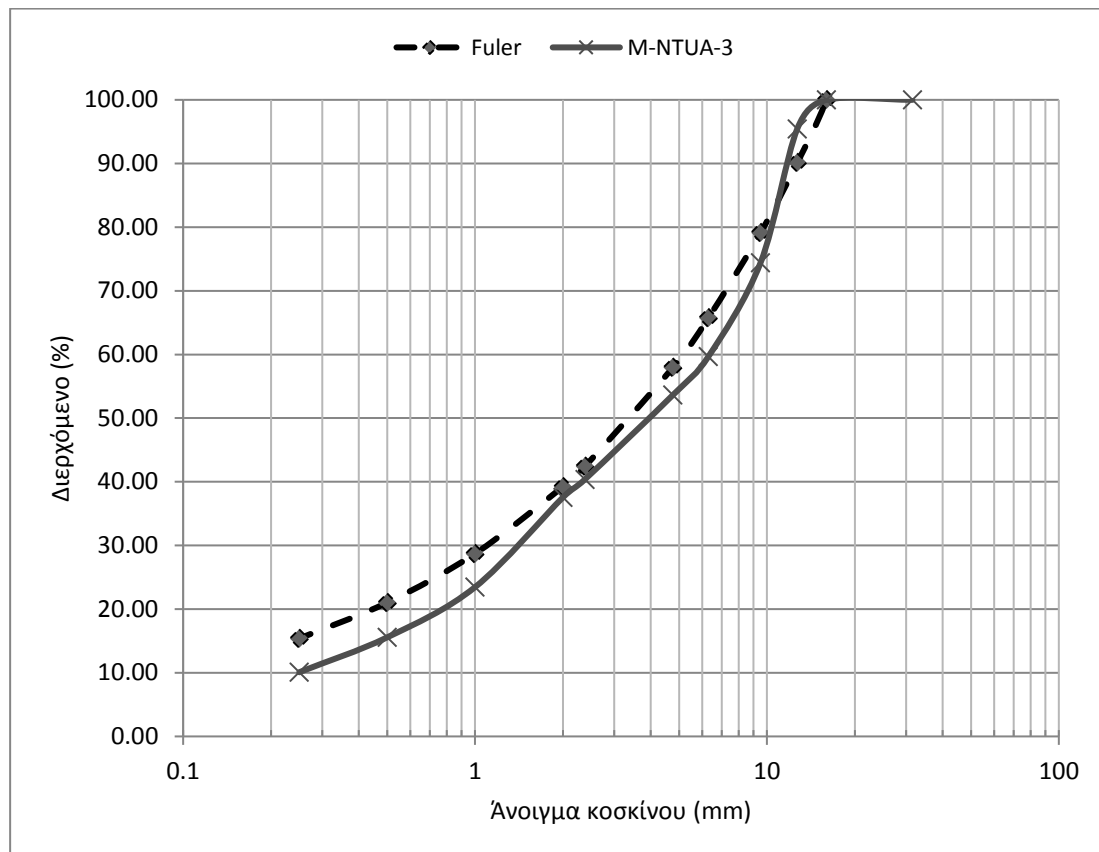
	SF30	SF36	SF60	PF
Υλικό	Χάλυβας	Χάλυβας	χάλυβας	Πολυπροπυλένιο
Μορφή	Ευθύγραμμη, άγκιστρα	Ευθύγραμμη, άγκιστρα	Ευθύγραμμη, άγκιστρα	Ευθύγραμμη
Μήκος (mm)	30	36	60	52
Διάμετρος (mm)	0.55	0.63	0.92	0.46
Λόγος μοφής	55	57	65	113
Αντοχή Θραύσης (MPa)	1100	δ.δ.	δ.δ.	613
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	200	200	200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

2.2 Συνθέσεις

Αρχικά πραγματοποιήθηκαν οκτώ δοκιμαστικές συνθέσεις 10 lt, σκυροδέματος, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αναλογίας των αδρανών. Στο **σχήμα 2.1** φαίνεται η τελικά χρησιμοποιούμενη διαβάθμιση του μείγματος των αδρανών σε σχέση με την αντίστοιχη καμπύλη Fuller. Στη συνέχεια έγιναν δύο δοκιμαστικές συνθέσεις με χαλύβδινες ίνες SF60 και SF36 σε περιεκτικότητα 0.5%

κατ' όγκο, για τη βελτιστοποίηση του βάρους του χρησιμοποιούμενου ρευστοποιητή, με βάση τον έλεγχο των ρεολογικών χαρακτηριστικών και της εργασιμότητας του σκυροδέματος.

Συνολικά οι δέκα συνθέσεις περιλαμβάνουν: δύο συνθέσεις αναφοράς (LC1 και LC2), και δύο συνθέσεις με 0.5% και 1.0% ποσοστό ινών κατ' όγκο αντίστοιχα, για κάθε τύπο ίνας.



Σχήμα 2.1 Τελική κοκκομετρική διαβάθμιση και καμπύλη Fuler.

Σε όλες τις συνθέσεις ο λόγος νερού προς τσιμέντο N/T διατηρήθηκε σταθερός στο 0.40. Η απορροφητικότητα των αδρανών έχει ληφθεί υπόψιν και το συνολικό νερό περιλαμβάνει εκτός του ενεργού νερού και την απορροφούμενη από τα αδρανή ποσότητα έως τον κορεσμό. 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 2.3** παρουσιάζονται αναλυτικά και οι δέκα συνθέσεις, όλες οι ποσότητες αναφέρονται σε ένα κυβικό μέτρο (m^3) παραγόμενου σκυροδέματος.

Πίνακας 2.3 Συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος

Κωδικός Υλικό (kg/m ³)	LC1	LC2	LCSF60- 0.5	LCSF60- 1	LCSF36- 0.5	LCSF36- 1	LCSF30- 0.5	LCSF30- 1	LCPF0.5	LCPF1
Τσιμέντο	380.0	380.0	380.0	380.0	380.0	380.0	380.0	380.0	380.0	380.0
Πυριτιακή Παιπάλη	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
Άμμος 0-4 mm	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0	600.0
Ρυζάκι 4-8 mm	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0
Κίσηρις 9-16 mm	415.0	415.0	415.0	415.0	415.0	415.0	415.0	415.0	415.0	415.0
Ίνες			40.00	80.00	40.00	80.00	40.00	80.00	4.55	9.10
Νερό	227.6	227.6	227.6	227.6	227.6	227.6	227.6	227.6	227.6	227.6
Ρευστοποιητής	2.14	4.20	5.00	5.23	4.98	5.23	5.12	6.44	5.04	9.80

2.2.1 Διαδικασία παρασκευής σκυροδέματος

Αρχικά, τοποθετήθηκαν στον αναδευτήρα τα αδρανή με επαρκή ποσότητα νερού για 30 λεπτά, ώστε να απορροφήσουν κατά το δυνατό περισσότερο νερό. Στη συνέχεια ο αναδευτήρας τέθηκε σε λειτουργία και προστέθηκαν το τσιμέντο και η πυριτιακή παιπάλη. Όταν το μείγμα έγινε ομογενές προστέθηκαν και οι ίνες. Τέλος προστέθηκε ο ρευστοποιητής ώστε το μείγμα να αποκτήσει τα κατάλληλα χαρακτηριστικά.

Στη συνέχεια, για να χαρακτηριστεί η εργασιμότητα του σκυροδέματος, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης, όπως ορίζεται από το πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ 12350-2. Στη συνέχεια μετρήθηκε το βάρος του νωπού σκυροδέματος σε δοχείο 8lt, ύστερα από συμπύκνωση για 30" στη τράπεζα δόνησης. Το βάρος αυτό χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της πυκνότητας του νωπού σκυροδέματος. Τέλος μετρήθηκε ο συνολικά παραγόμενος όγκος σκυροδέματος ώστε να υπολογιστεί η απόδοση των συνθέσεων.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων που αφορούν το νωπό σκυρόδεμα, σκυροδετήθηκαν τα δοκίμια στις μήτρες, όπου συμπυκνώνονταν στην τράπεζα δόνησης για 30" ανά στρώση. Συγκεκριμένα, οι μήτρες γεμίζονταν έως τη μέση, συμπυκνώνονταν και στη συνέχεια πληρώνονταν και συμπυκνώνονταν ξανά.

Την επόμενη μέρα τα δοκίμια απομακρύνονταν από τις μήτρες και τοποθετούνταν σε δεξαμενή νερού για 28 μέρες. Με το πέρας των 25 ημερών η άνω πλευρά των κυλινδρικών δοκιμίων, εξομαλύνθηκε με την προσθήκη λεπτής (< 10 mm) στρώσης κονιάματος σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 617. Εξαιρέση αποτελεί η σύνθεση LC2 όπου σε τρία από τα συνολικά έξι κυλινδρικά δοκίμια, η άνω πλευρά λειάνθηκε μέσω απόξεσης, ώστε να διαπιστωθεί η επίδραση της στρώσης κονιάματος στη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων.

2.3 Πειραματικές δοκιμές – διατάξεις

2.3.1 Υπολογισμός Μέτρου Ελαστικότητας και Λόγου Poisson

Για τον υπολογισμό του Μέτρου Ελαστικότητας και του Λόγου Poisson χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή θλίψης, η οποία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το αμερικάνικο πρότυπο ASTM C469-02. Για τη συγκεκριμένη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια ύψους τριάντα εκατοστών και διαμέτρου δεκαπέντε εκατοστών (15x30 cm).

Το πλαίσιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι του ιταλικού οίκου CONTROLS δυναμικότητας 5000 kN και η δοκιμή εκτελέστηκε στο σερβοϋδραυλικό σύστημα ελέγχου φορτίου ADVANCED 9. Η δοκιμή έγινε με σταθερό ρυθμό φόρτισης 4250 N/s.

Για τον υπολογισμό της αξονικής και της εγκάρσιας παραμόρφωσης χρησιμοποιήθηκαν LVDTs, τα οποία προσαρμόστηκαν στα δοκίμια μέσω ειδικής συσκευής, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.2**.

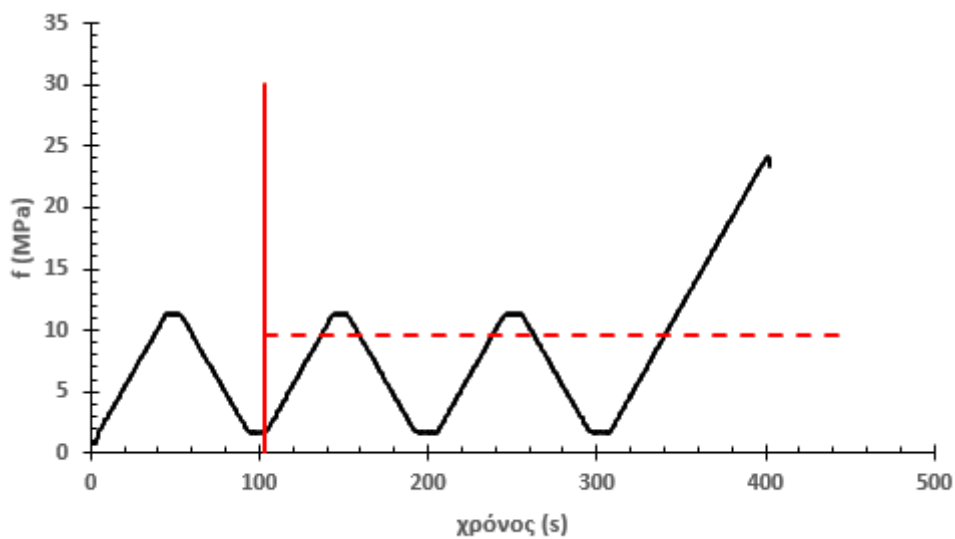
Η δοκιμή εκτελείται σε δύο στάδια. Με την έναρξη του πειράματος τα δοκίμια φορτίζονται στο 40% της μέγιστης θλιπτικής αντοχής, όπως αυτή έχει προσδιοριστεί από κυβικά δοκίμια. Στη συνέχεια τα δοκίμια αποφορτίζονται έως περίπου το 5% της μέγιστης αντοχής. Ακολουθούν τρεις κύκλοι φόρτισης, όπου τα δοκίμια φορτίζονται έως το 40% και αποφορτίζονται στο 5%. Στο δεύτερο στάδιο, δηλαδή μετά την αποφόρτιση του τρίτου κύκλου, τα δοκίμια φορτίζονται έως την αστοχία.

Το Μέτρο Ελαστικότητας αλλά και ο Λόγος Poisson υπολογίζονται ως ο μέσος όρος της κλίσης της καμπύλης τάσης – αξονικής παραμόρφωσης και εγκάρσιας – αξονικής παραμόρφωσης αντίστοιχα. Η περιοχή χρήσιμων πειραματικών δεδομένων ορίζεται ως τα δεδομένα των ενδιάμεσων κύκλων

φόρτισης και τμήμα του τελικού κλάδου που οδηγεί στην αστοχία. Στον υπολογισμό δεν λαμβάνονται υπόψιν τα δεδομένα από τον πρώτο κύκλο φόρτισης αλλά και τιμές μεγαλύτερες του 40% της μέγιστης θλιπτικής αντοχής του εκάστοτε δοκιμίου. Στο **σχήμα 2.3** φαίνονται οι κύκλοι φόρτισης αλλά και η περιοχή δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του Μέτρου Ελαστικότητας και του Λόγου Poisson.



Σχήμα 2.2 Διάταξη και αστοχία κατά τη δοκιμή θλίψης για τον προσδιορισμό E και ν .

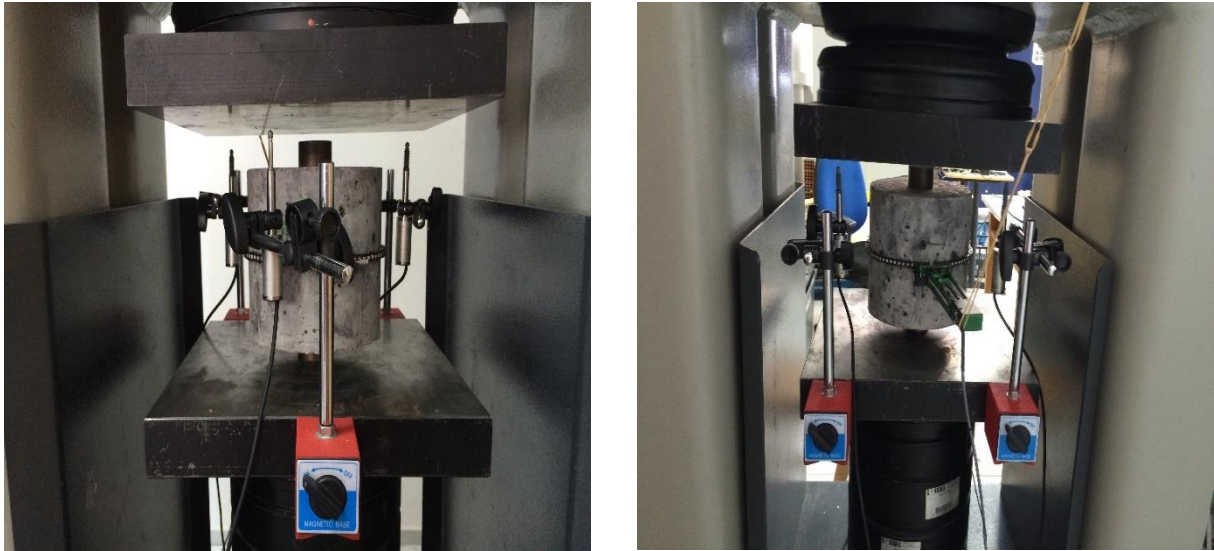


Σχήμα 2.3 Χρονική ιστορία της δομικής θλίψης δοκιμίου σκυροδέματος. Εντός των κόκκινων γραμμών περικλείονται τα χρησιμοποιούμενα στους υπολογισμούς δεδομένα.

2.3.2 Δοκιμή διπλής σημειακής φόρτισης - Barcelona

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εκτελέστηκε η κλασική δοκιμή Barcelona σύμφωνα με το ισπανικό πρότυπο UNE 83-515 αλλά και η γενικευμένη της μορφή όπως έχει προταθεί από τους Carmona et al [18]. Για την εκτέλεση της δοκιμής χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου $2b = 150 \text{ mm}$ και ύψους $2h = 150 \text{ mm}$. Το πλαίσιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε είναι του ιταλικού οίκου CONTROLS δυναμικότητας 5000 kN και η δοκιμή εκτελέστηκε στο σερβοϋδραυλικό σύστημα ελέγχου φορτίου ADVANCED 9.

Στο κέντρο των δοκιμίων και μεταξύ αυτών και των πλακών της πρέσας τοποθετήθηκαν δύο κυλινδρικές μεταλλικές σφήνες διαμέτρου $2a = 37.5 \text{ mm}$. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής η αξονική μετατόπιση μετράται μέσω τριών LVDTs τα οποία τοποθετούνται στις πλάκες της πρέσας και με γωνία 120° ως προς το κέντρο του δοκιμίου. Η αξονική παραμόρφωση μετράται από ειδικό περιμετρικό μηκυνσιόμετρο που τοποθετείται στο μέσο ύψος του δοκιμίου $h = 75 \text{ mm}$. Ο ρυθμός φόρτισης παραμένει σταθερός στα 0.5 mm/min κατακόρυφης μετατόπισης. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής η περιμετρική μετατόπιση (TCOD), η κατακόρυφη μετατόπιση και το επιβαλλόμενο φορτίο καταγράφονται συνεχώς. Στο **σχήμα 2.4** παρουσιάζεται η διάταξη της δοκιμής.



Σχήμα 2.4 Διάταξη της δοκιμής Barcelona.

Το φορτίο που ασκείται από τις σφήνες στο δοκίμιο παράγει έναν κώνο, υπό τριαξονική φόρτιση, ο οποίος αυξάνει τη διάμετρο του δοκιμίου και παράγει εφελκυστικές τάσεις κάθετες στα ακτινικά επίπεδα του δοκιμίου. Όταν η επιβαλλόμενη ένταση υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το δοκίμιο αστοχεί προκαλώντας ακτινικές ρωγμές κάθετα στο πεδίο της έντασης. Αυτό επιτρέπει στον κώνο να μετατοπιστεί σημαντικά προς το εσωτερικό του κυλίνδρου, αυξάνοντας την περιμέτρό του. Σαν αποτέλεσμα δημιουργούνται ακτινικές ρωγμές όπως φαίνονται στο **σχήμα 2.5**.



Σχήμα 2.5 Τυπικές μορφές αστοχίας κατά τη δοκιμή Barcelona [18].

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 – TCO_D και αποτυπώνει την επίδραση των ινών στο σκυρόδεμα. Λαμβάνει υπόψιν της 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 μετακινείται προς το εσωτερικό του δοκιμίου.

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

$$f_{ctRx} = 4 * \frac{P_{Rx}}{9 * \pi * \alpha * h} \quad (2.1)$$

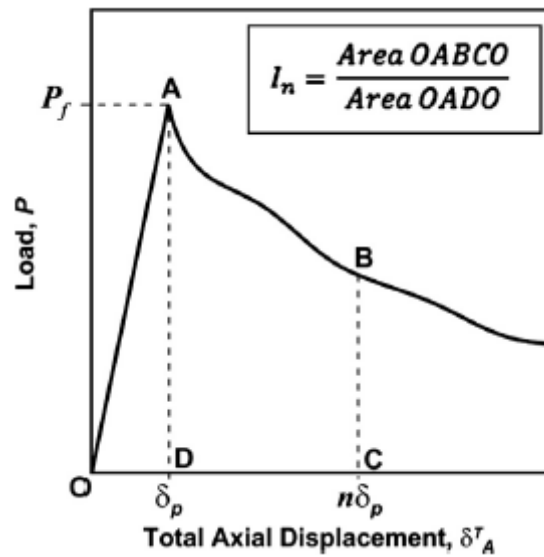
Όπου P_{Rx} είναι το φορτίο που αντιστοιχεί στην περιφερειακή μετατόπιση R_x .

Με τη γενίκευση της δοκιμής από τους Carmona et al. η απορροφούμενη ενέργεια υπολογίζεται ως το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου - κατακόρυφης μετατόπισης P – AXIALT, ενώ η σχέση 2.1 γενικεύεται με τη μορφή:

$$f_{ct\delta x} = \frac{4 * P_{\delta x}}{9 * \pi * a * h} \quad (2.2)$$

Όπου η παραμένουσα τάση $f_{ct\delta x}$ υπολογίζεται για δεδομένη κατακόρυφη μετατόπιση δ_x και το αντίστοιχο φορτίο $P_{\delta x}$.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα της γενικευμένης δοκιμής Barcelona, στην παρούσα εργασία υπολογίζονται και δείκτες δυσθραυστότητας I_n όπως ορίζονται από το πρότυπο ASTM 1018. Στη δοκιμή Barcelona ως δείκτης δυσθραυστότητας ορίζεται ο λόγος με αριθμητή την ενέργεια έως μια τιμή της κατακόρυφης μετατόπισης και παρονομαστή την ενέργεια από την έναρξη της φόρτισης έως το σημείο θραύσης, στο πρώτο μέγιστο της καμπύλης.



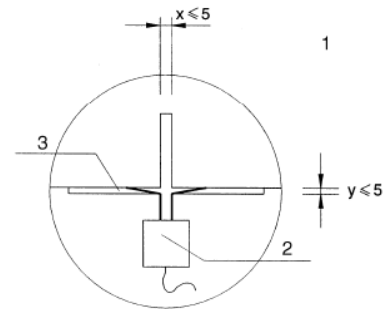
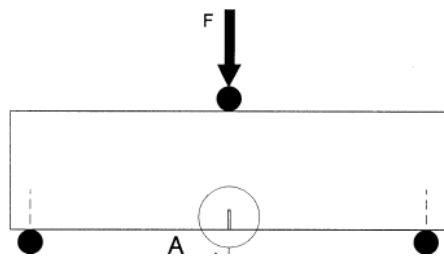
Σχήμα 2.6 Σχηματική απεικόνιση και ορισμός του δείκτη δυσθραυστότητας μέσω της γενικευμένης δοκιμής Barcelona.

2.3.3 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων – λυγισμού

Η δοκιμή κάμψης αποτελεί την πιο διαδεδομένη δοκιμή για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το βρετανικό πρότυπο BS EN 14651:2005+A1:2007 για τον προσδιορισμό της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής μέσω κάμψης αλλά και του ορίου της αναλογικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είναι πρισματικά διαστάσεων 100x100x500 mm. Σύμφωνα με το πρότυπο σε όλα τα δοκίμια έγινε μια εγκοπή στο μέσο τους με τη χρήση δισκοτόμου. Το βάθος της εγκοπής ορίζεται στα 25 mm ± 1 mm για δοκίμια ύψους 150 mm. Κατ' αναλογία το βάθος στα δοκίμια ύψους 100 mm ορίζεται στα 16 mm ± 1 mm. Το πλάτος της εγκοπής είναι σταθερό στα 4 mm. Για τη μέτρηση του ανοίγματος της ρωγμής χρησιμοποιείται ειδικό μηκυσιόμετρο τοποθετημένο έως και 5 mm από το άνω πέρας της εγκοπής. Στο **σχήμα 2.7** παρουσιάζεται αναλυτικά η διάταξη της δοκιμής σύμφωνα με το πρότυπο.

Η δοκιμή εκτελείται με σταθερό ρυθμό αύξησης του ανοίγματος της ρωγμής (CMOD) στα 0.05 mm/min και τελειώνει όταν το άνοιγμα της ρωγμής (CMOD) φτάσει τα 4 mm. Καθ' όλη τη διάρκεια καταγράφονται το επιβαλλόμενο φορτίο και το εύρος της ρωγμής.



Σχήμα 2.7 Γεωμετρία, διάταξη και εκτέλεση της δοκιμής κάμψης τριών σημείων.

Η παραμένουσα εφελκυστική τάση λόγω κάμψης υπολογίζεται για δεδομένο άνοιγμα ρωγμής ως:

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.3)$$

Όπου:

$f_{R,j}$ η παραμένουσα εφελκυστική αντοχή για δεδομένη $CMOD_j$

F_j το φορτίο στη δεδομένη $CMOD_j$

l το άνοιγμα του δοκιμίου μεταξύ των στηρίξεων

h_{sp} το ύψος του δοκιμίου μείον το βάθος της εγκοπής.

b το πλάτος του δοκιμίου

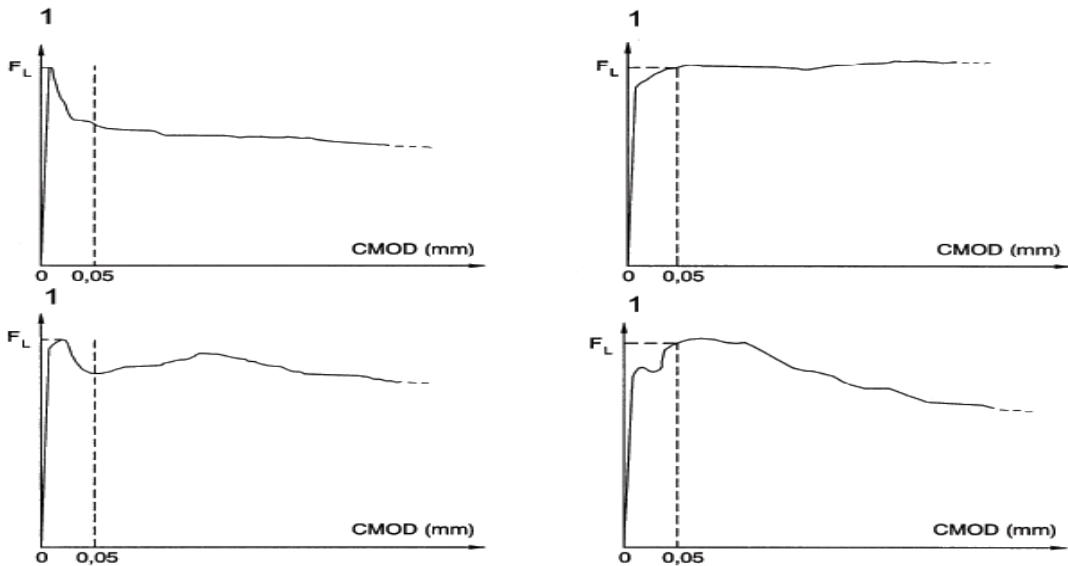
Το όριο της αναλογικότητας υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_{ct,L}^f = \frac{6 \cdot M_L}{b \cdot h_{sp}^2} = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (2.4)$$

Όπου:

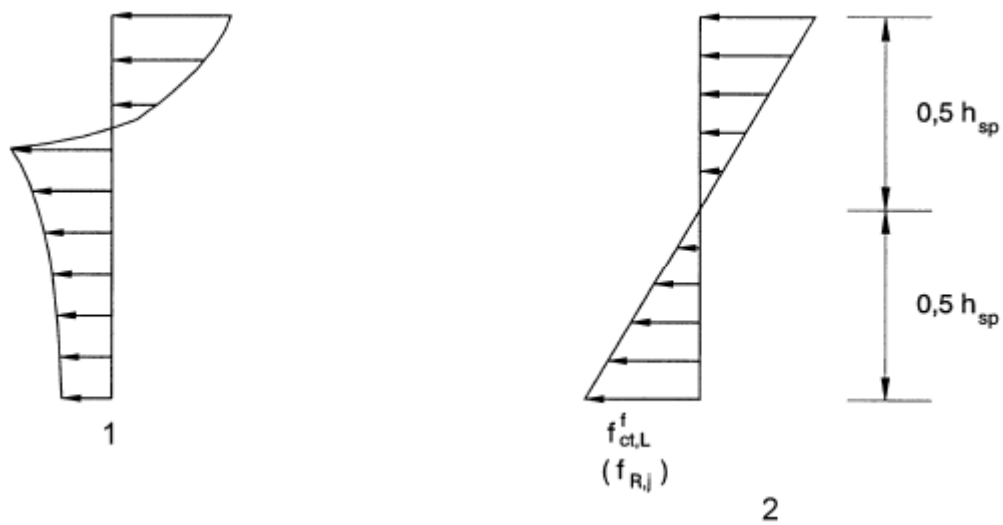
F_L το φορτίο που αντιστοιχεί στο όριο της αναλογικότητας και λαμβάνεται εκ του διαγράμματος, ως η μέγιστη τιμή του φορτίου έως τα 0.05 mm της CMOD, όπως φαίνεται στο **σχήμα 2.8**

M_L η ροπή που αντιστοιχεί στο φορτίο στο όριο της αναλογικότητας



Σχήμα 2.8 Διάγραμμα Φορτίου – CMOD και λήψη της μέγιστης τιμής F_L .

Οι σχέσεις (2.3) και (2.4) προκύπτουν θεωρώντας γραμμική κατανομή των τάσεων καθ' ύψος της διατομής του δοκιμίου, σύμφωνα με το **σχήμα 2.9**.



Σχήμα 2.9 1) Πραγματική κατανομή τάσεων καθ' ύψος της διατομής 2) Γραμμική κατανομή χρησιμοποιούμενη στις σχέσεις 2.3 και 2.4.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Αποτελέσματα νωπού σκυροδέματος

Μετά την ανάμειξη κάθε σύνθεσης, μετρήθηκαν τα χαρακτηριστικά του ελαφροσκυροδέματος κατά τη νωπή του φάση. Συγκεκριμένα μετρήθηκε το μοναδιαίο βάρος, η κάθιση του σκυροδέματος και υπολογίστηκε η απόδοση. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον **πίνακα 3.1**.

Πίνακας 3.1 Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Σύνθεση Ιδιότητα	LC1	LC2	LCSF 60-0.5	LCSF 60-1	LCSF 36-0.5	LCSF 36-1	LCSF 30-0.5	LCSF 30-1	LCPF- 0.5	LCPF - 1
Μοναδιαίο βάρος (kg/m ³)	1775	1795	1829	1807	1832	1841	1803	1805	1712	1708
Κάθιση (mm)	50	50	100	100	90	60	120	190	50	70
Απόδοση %	98	95	97	97	97	98	76	98	98	100

Σύμφωνα με το EN 206, οι συνθέσεις LC1, LC2, LCSF36-1, LCPF-0.5 και LCPF-1 ανήκουν στην κατηγορία S2 (50 – 90 mm), οι συνθέσεις LCSF60-0.5, LCSF60-1, LCSF30-0.5 ανήκουν στην κατηγορία S3 (100 – 150 mm) και η σύνθεση LCSF30-1 στην κατηγορία S4 (160 -210 mm). Σύμφωνα με τον **πίνακα 2.3**, συγκριτικά με τις συνθέσεις αναφοράς LC1 και LC2, οι συνθέσεις που περιείχαν ίνες απαίτησαν μεγαλύτερο ποσοστό ρευστοποιητή. Επιπλέον 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 τις συνθέσεις αναφοράς. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι οι συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου (LCPF-0.5 και LCPF-1) έχουν πολύ χαμηλή κάθιση σε σχέση με τις χαλύβδινες ίνες, με μετρήσεις κοντά σε αυτές των συνθέσεων αναφοράς (LC1 και LC2) παρά την διαφορά τους στο ποσοστό χρησιμοποιούμενου ρευστοποιητή (βλ. **πίνακα 2.3**). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο αφού οι συγκεκριμένες ίνες είναι ιδιαίτερα εύκαμπτες με αποτέλεσμα να μην επιδρούν σημαντικά στην ομοιογένεια του σκυροδέματος.

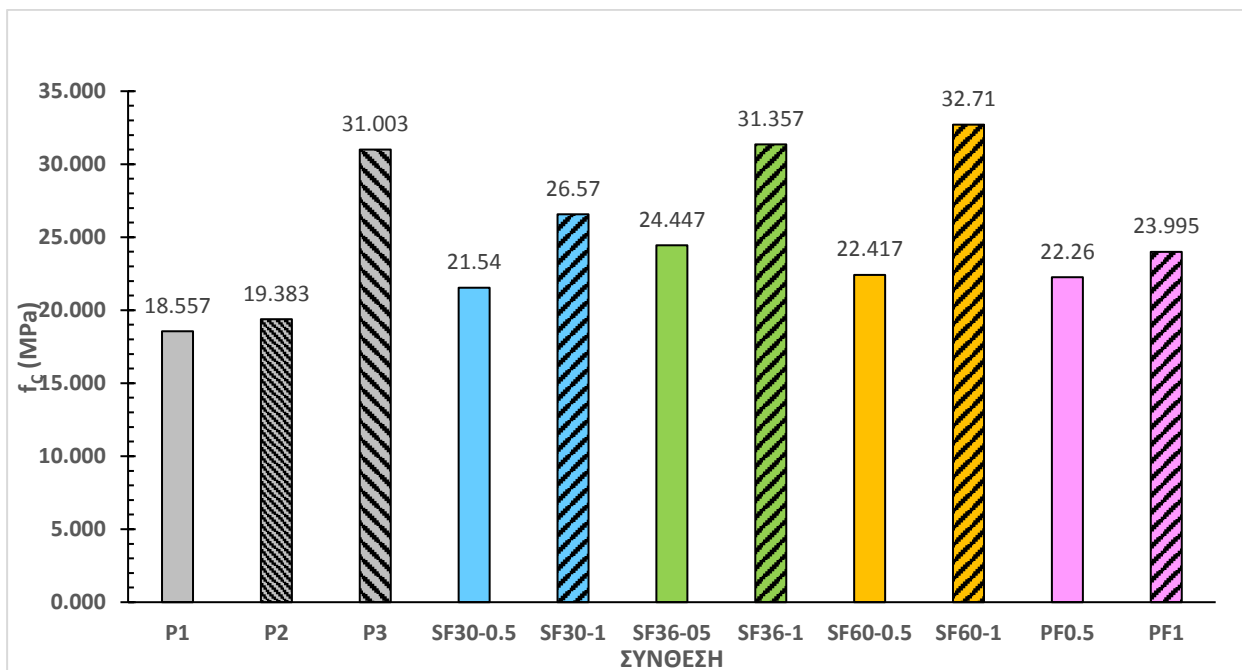
Όσον αφορά το μοναδιαίο βάρος, διαπιστώνεται πως η αντικατάσταση του χονδρόκοκκου κλάσματος με ελαφρύ αδρανές είναι αρκετή για να χαρακτηριστεί το υλικό ως ελαφροσκυρόδεμα (κατά βάση στην κατηγορία D2,0 σύμφωνα με το EN206, μοναδιαίο βάρος < 1800 - 2000 kg/m³). Αναφορικά με τις ίνες, η προσθήκη χαλύβδινων ινών οδηγεί σε αύξηση του μοναδιαίου βάρους του ελαφροσκυροδέματος, ενώ η προσθήκη ινών πολυπροπυλενίου σε μείωση.

3.2 Αποτελέσματα δοκιμών στο σκληρωμένο σκυρόδεμα

3.2.1 Θλιπτική αντοχή

Κατά την εκτέλεση της δοκιμής θλίψης σε κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου $d = 150$ mm και ύψους $h = 300$ mm, για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας και του Λόγου Poisson, μετρήθηκε επίσης και η θλιπτική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος. Στον **πίνακα 3.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας κάθε σύνθεσης. Τρία δοκίμια της δεύτερης σύνθεσης αναφοράς έχουν λειανθεί και στον **πίνακα 3.2** παρουσιάζονται ξεχωριστά ως LC3.

Τα αποτελέσματα ανά σύνθεση είναι ομοιογενή, με το συντελεστή μεταβλητότητας να μην ξεπερνά το 8.57%. Εξαιρέση αποτελούν οι συνθέσεις LCSF30-1 και LCSF36-0.5 που παρουσιάζουν συντελεστή μεταβλητότητας 14.01% και 15.29% αντίστοιχα. Η απόκλιση αυτή μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι σε δείγμα τριών δοκιμών είναι αρκετά πιθανό να ληφθούν μέγιστες και ελάχιστες τιμές. Μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής λαμβάνει η σύνθεση LCSF60-1, ενώ ελάχιστη οι συνθέσεις αναφοράς LC1 και LC2. Μια εποπτική παρουσίαση της μεταβολής της θλιπτικής αντοχής γίνεται στο **σχήμα 3.1**, όπου αποτυπώνεται η μέση θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων υπό μορφή ραβδογράμματος.



Σχήμα 3.1 Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις άοπλου σκυροδέματος LC1, LC2 και LC3, παρατηρείται η επίδραση της μεθόδου εξομάλυνσης της άνω επιφάνειας του κυλινδρικού δοκιμίου. Οι συνθέσεις LC1 και LC2, στις οποίες η άνω επιφάνεια έχει εξομαλυνθεί μέσω λεπτής στρώσης κονιάματος, έχουν παραπλήσιες μέσες θλιπτικές αντοχές 18.55 και 19.38 MPa αντίστοιχα, ενώ η σύνθεση LC3, όπου η άνω επιφάνεια έχει λειανθεί με τριβείο, η μέση θλιπτική αντοχή είναι 31.00 MPa. Μπορεί λοιπόν να θεωρηθεί πως η λεπτή στρώση κονιάματος επηρεάζει τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής, με αποτέλεσμα να μετρώνται μειωμένες κατά 30% τιμές.

Σε σχέση με τις άοπλες συνθέσεις LC1 και LC2, 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 και 11 – 41% σε σχέση με την LC2. 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. Αντίστοιχο φαινόμενο είναι η περίσφιξη του σκυροδέματος στους συμβατικούς φορείς.

Συγκρίνοντας συνθέσεις με τον ίδιο τύπο ίνας, φαίνεται η επίδραση του περιεχόμενου ποσοστού ινών κατ' όγκο, συνεπώς και της συνολικής επιφάνειας οπλισμού στην θλιπτική αντοχή. Για κάθε τύπο ίνας, η σύνθεση με 0.5% έδωσε σαφώς μικρότερη θλιπτική αντοχή.

Ανάμεσα στις συνθέσεις με ποσοστό ινών 0.5% μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή έχει η LCSF36-0.5 η οποία όμως παρουσίασε και το μεγαλύτερο συντελεστή μεταβλητότητας 15.29%. Ελάχιστη θλιπτική αντοχή έχει η σύνθεση LCSF30-0.5. Αντίστοιχα για τις συνθέσεις με 1% περιεχόμενες ίνες, μέγιστη αντοχή έδωσε η LCSF60-1, ενώ ελάχιστη η LCPF-1.

Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα κάθε σύνθεσης δίνονται στο **Παράρτημα Α**.

Πίνακας 3.2 Θλιπτική Αντοχή (MPa) κυλινδρικών δοκιμίων, Μέση τιμή (AVG – MPa), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV %).

	LC1	LC2	LC3	LCSF 30-0.5	LCSF 30-1	LCSF 36-05	LCSF 36-1	LCSF 60-0.5	LCSF 60-1	LCPF 0.5	LCPF 1
A	17.68	20.64	29.55	19.71	22.27	20.17	31.15	22.64	31.27	21.86	23.86
B	20.07	20.01	31.66	22.83	28.65	27.09	32.98	20.74	31.07	21.92	24.13
C	17.92	17.50	31.80	22.08	28.79	26.08	29.94	23.87	35.79	23.00	
AVG	18.55	19.38	31.00	21.54	26.57	24.44	31.35	22.41	32.71	22.26	23.99
STDV	1.31	1.66	1.26	1.62	3.72	3.73	1.53	1.57	2.66	0.64	0.19
CV%	7.09	8.57	4.06	7.56	14.01	15.29	4.88	7.03	8.16	2.88	0.79

3.2.2 Μέτρο Ελαστικότητας

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού του Μέτρου Ελαστικότητας για κάθε δοκίμιο, καθώς και η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας ανά σύνθεση δίνονται στον **πίνακα 3.3**. Όλες οι συνθέσεις παρουσιάζουν πρακτικά κοινό μέτρο ελαστικότητας, καθώς η προσθήκη ινών επηρεάζει ελάχιστα την καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων στο διάστημα τιμών που αυτό υπολογίζεται (τάση < 40% f_c).

Πίνακας 3.3 Μέτρο Ελαστικότητας (GPa), Μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

	LC1	LC2	LC3	LCSF 30-0.5	LCSF 30-1	LCSF 36-05	LCSF 36-1	LCSF 60-0.5	LCSF 60-1	LCPF 0.5	LCPF 1
A	17.17	17.26	15.93	19.24	17.45	22.81	19.77	18.81	18.50	15.88	17.42
B	20.17	19.15	18.30	15.63	20.30	17.72	20.05	17.67	18.38	18.57	17.06
C	16.91	19.21	19.12	20.10	17.29	17.82	18.28	18.38	18.88	16.67	
AVG	18.09	18.54	17.78	18.33	18.35	19.45	19.37	18.29	18.59	17.04	17.24
STDV	1.81	1.11	1.65	2.37	1.69	2.90	0.94	0.57	0.25	1.38	0.25
CV%	10.01	5.99	9.30	12.93	9.23	14.95	4.90	3.14	1.39	8.11	1.49

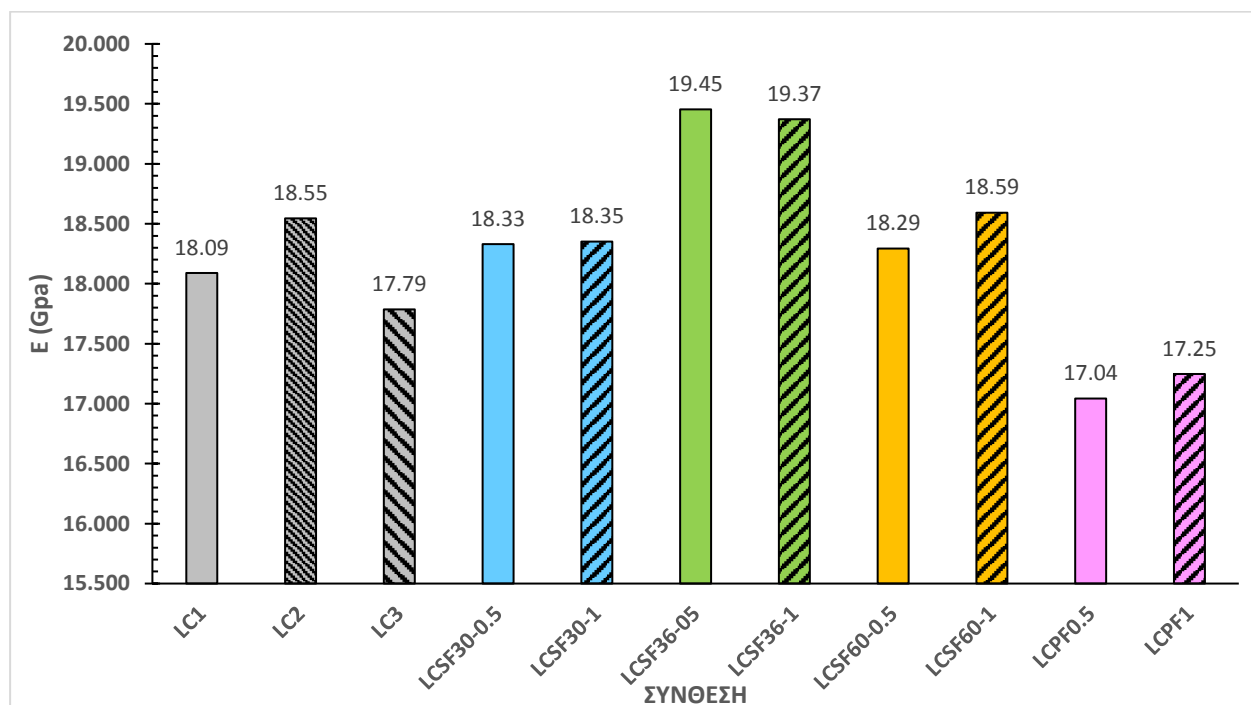
Τα αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ομοιογενή αφού ο συντελεστής μεταβλητότητας παρουσιάζει χαμηλές τιμές. Εξάριση αποτελούν οι συνθέσεις LCSF36-0.5 και LCSF30-0.5 με CV 14.95% και 12.93% αντίστοιχα. Στη σύνθεση LCSF36-0.5 καταγράφηκε μεγάλος συντελεστής μεταβλητότητας και για τις τιμές της θλιπτικής αντοχής, ενώ για τη σύνθεση LCSF30-0.5 οι τιμές της θλιπτικής αντοχής

παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή μεταβλητότητας. Τη μέγιστη τιμή Μέτρου Ελαστικότητας παρουσίασε η σύνθεση LCSF36-1, η οποία είχε και το μεγαλύτερο μοναδιαίο βάρος. Την ελάχιστη τιμή έδωσε η σύνθεση LCPF-0.5, η οποία έχει χαμηλό μοναδιαίο βάρος, όχι όμως το ελάχιστο.

Συγκρίνοντας τις συνθέσεις ανά τύπο ίνας ως προς το περιεχόμενο ποσοστό ινών, φαίνεται πως η μεταβολή του ποσοστού κατά 0.5% κ.ο. (από 0.5% σε 1.0%) δεν επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας, αφού για συνθέσεις με ίδιο τύπο ίνας η διαφορά είναι πρακτικά μηδενική.

Οι συνθέσεις LCP1, LCP2 και LCP3 έχουν μέσες τιμές E, 18.09, 18.54 και 17.78 GPa, αντίστοιχα. Με πρακτικά κοινό μέτρο ελαστικότητας, φαίνεται πως η μέθοδος εξομάλυνσης της άνω πλευράς του κυλινδρικού δοκιμίου δεν επιδρά στο εν λόγω τμήμα της καμπύλης τάσεων – παραμορφώσεων (0 – 40% f_c).

Από τις συνθέσεις με χαλύβδινες ίνες μέγιστη τιμή έχει η LCSF36-0.5 και ελάχιστη η LCSF30-0.5. Οι συνθέσεις LCPF-0.5 και LCPF-1 έχουν πρακτικά κοινό μέτρο ελαστικότητας, χαμηλότερο από όλες τις συνθέσεις ινοπλισμένου και άοπλου σκυροδέματος. Στο **σχήμα 3.2** παρουσιάζονται, υπό μορφή ραβδογράμματος, οι μέσες τιμές του μέτρου ελαστικότητας κάθε σύνθεσης.



Σχήμα 3.2 Μέση τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας ανά σύνθεση.

3.2.3 Λόγος Poisson

Τα αποτελέσματα του υπολογισμού του Λόγου Poisson ανά δοκίμιο, καθώς και η ανά σύνθεση μέση τιμή, τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας δίνονται στον **πίνακα 3.4**. Οι τιμές των συνθέσεων LC1, LC2, LC3, LCS30-0.5 και LCPF-1 παρουσιάζουν μεγάλη ανομοιογένεια, ενώ οι LCSF30-1, LCSF36-0.5, LCSF36-1, LCSF60-0.5, LCSF60-1 και LCPF-0.5 μπορούν να χαρακτηριστούν ομοιογενείς. Η σύνθεση LC1 έδωσε τη μέγιστη τιμή λόγου Poisson, ενώ η LCSF30-0.5 την ελάχιστη.

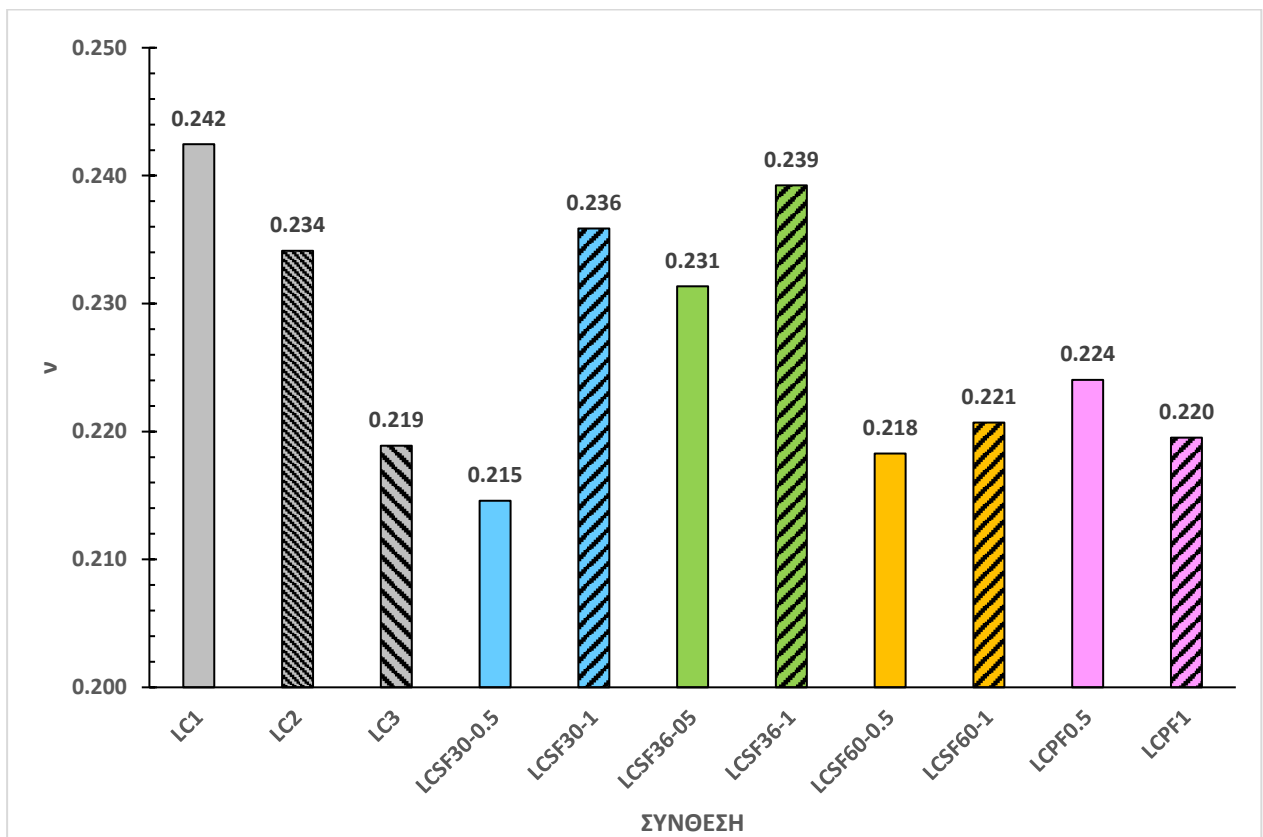
Πίνακας 3.4 Λόγος Poisson κυλινδρικών δοκιμίων, μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

	LC1	LC2	LC3	LCSF 30-0.5	LCSF 30-1	LCSF 36-05	LCSF 36-1	LCSF 60-0.5	LCSF 60-1	LCPF 0.5	LCPF 1
A		0.203	0.174	0.246	0.233	0.237	0.256	0.196	0.209	0.217	0.192
B	0.273	0.249	0.231	0.192	0.259	0.223	0.249	0.231	0.222	0.247	0.248
C	0.212	0.250	0.252	0.205	0.216	0.234	0.214	0.228	0.231	0.208	
AVG	0.242	0.234	0.219	0.215	0.236	0.231	0.239	0.218	0.221	0.224	0.220
STDV	0.044	0.027	0.041	0.028	0.022	0.007	0.022	0.019	0.011	0.020	0.040
CV%	18.06	11.54	18.52	13.14	9.28	3.08	9.37	8.68	5.08	9.13	18.04

Για την εποπτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παρατίθεται το **σχήμα 3.3**, όπου φαίνεται η μέση τιμή του λόγου παραμορφώσεων για κάθε σύνθεση. Οι συνθέσεις LC1, LC2 και LC3 παρουσιάζουν σημαντική διαφορά λόγου Poisson παρά τις παραπλήσιες τιμές του μέτρου ελαστικότητάς τους. Πρέπει να αναφερθεί βέβαια ότι αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο δοκίμιο LC3-A, για το οποίο

υπολογίστηκε λόγος Poisson 0.174. Τιμή που αποκλίνει σημαντικά των τιμών του λόγου Poisson των δοκιμίων LC3-B και LC3-C.

Συγκρίνοντας του διάφορους τύπους ινών και για ποσοστό 0.5% για τη σύνθεση LCSF36-0.5 καταγράφηκε η μέγιστη τιμή λόγου Poisson, ενώ για τη LCPF-0.5 ελάχιστη. Ομοίως και για ποσοστό περιεχόμενων ινών 1.0%. Μεταξύ των συνθέσεων με ίδιο τύπο ίνας, για όλες τις συνθέσεις με 1.0% χαλύβδινες ίνες καταγράφηκε μεγαλύτερος λόγος Poisson από τις αντίστοιχες με 0.5%. Αντίθετα, η σύνθεση LCPF-0.5 έχει μεγαλύτερο λόγο Poisson από την LCPF-1.



Σχήμα 3.3 Μέση τιμή Λόγου Poisson ανά σύνθεση.

3.2.4 Δοκιμή κάμψης τριών σημείων

Τα αποτελέσματα του μέγιστου φορτίου F_{LOP} , που αντιστοιχεί στο όριο της αναλογικότητας κατά τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων καθώς και η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας ανά σύνθεση δίνονται στον **πίνακα 3.5**.

Πίνακας 3.5 Μέγιστο φορτίο F_{LOP} (kN) πρισματικών δοκιμών κατά τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων, μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

	A	B	C	AVG	STDV	CV%
LC1	4.77	4.35		4.56	0.30	6.62
LCSF30-0.5	6.64	6.22	6.27	6.38	0.23	3.60
LCSF30-1	7.28	6.77	7.62	7.22	0.43	5.91
LCSF36-0.5	6.31	6.98	6.21	6.50	0.42	6.47
LCSF36-1	7.33	9.60	7.32	8.08	1.31	16.26
LCSF60-0.5	6.57	6.31	6.79	6.55	0.24	3.69
LCSF60-1	8.76	9.13	9.48	9.12	0.36	3.96
LCPF0.5	5.28	5.92	5.01	5.40	0.47	8.62
LCPF-1	6.57	5.65	5.60	5.94	0.54	9.15

Η σύνθεση LCSF36-1 παρουσίασε υψηλό συντελεστή μεταβλητότητας 16.26% αντίστοιχα. Οι τιμές των υπόλοιπων συνθέσεων είναι ομοιογενείς με μέγιστο συντελεστή μεταβλητότητας 9.15% για τη σύνθεση LCPF-1. Στη σύνθεση LC1 δοκιμάστηκαν σε κάμψη δύο δοκίμια. Το μέγιστο φορτίο αντιστοιχεί στη σύνθεση LCSF60-1 με 9.12 kN, ενώ ελάχιστο 4.56 kN έδωσε η σύνθεση άοπλου σκυροδέματος, όπως ήταν και αναμενόμενο.

Συγκριτικά με το άοπλο ελαφροσκυρόδεμα διαπιστώνεται ότι η προσθήκη ινών συνεπάγεται και αύξηση του ορίου της αναλογικότητας των δοκιμών. Η αύξηση αυτή είναι άμεσα εξαρτώμενη από το υλικό της ίνας (εφελκυστική αντοχή χάλυβα και πολυπροπυλενίου), το λόγο μορφής των ινών αλλά και το ποσοστό προσθήκης ινών κατ' όγκο.

Παρατηρώντας τις συνθέσεις χαλύβδινων ινών με σταθερό ποσοστό περιεχόμενων ινών κατ' όγκο 0.5%, παρατηρείται ότι η αύξηση του μέγιστου φορτίου είναι ανάλογη της αύξησης του λόγου

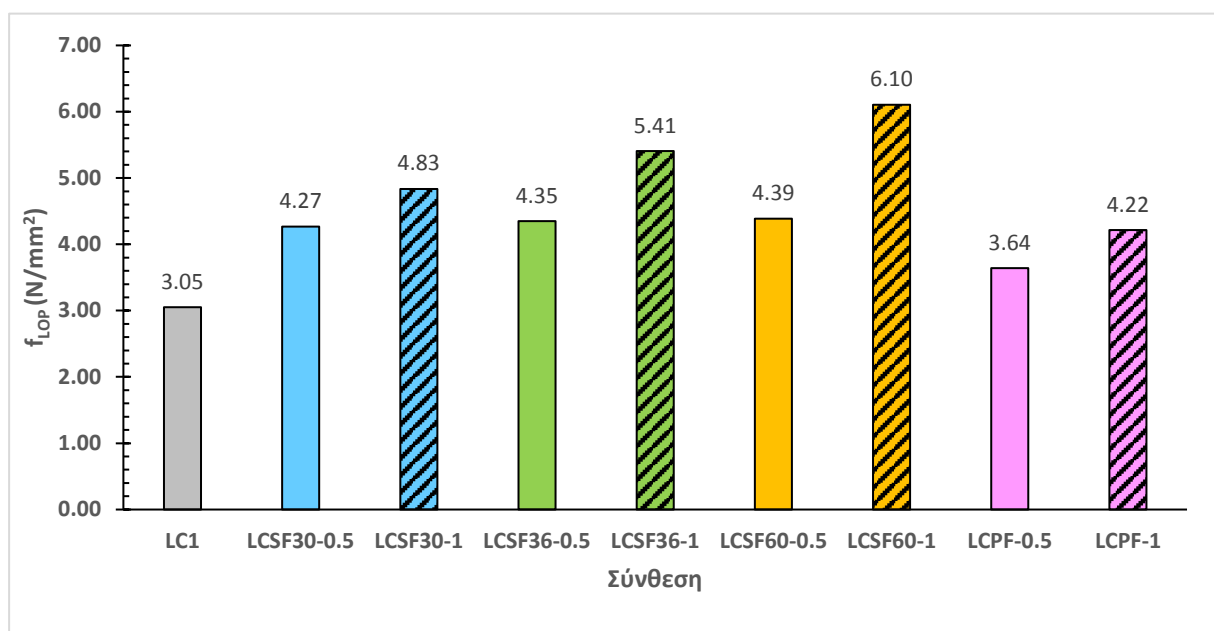
μορφής. Η σύνθεση LCSF30-0.5 με λόγο μορφής $l/d = 55$ έδωσε αντοχή 5.69 kN, η σύνθεση LCSF36-0.5 με παραπλήσιο λόγο μορφής $l/d = 57$ έδωσε αντοχή 5.03 kN και η σύνθεση LCSF60-0.5 με λόγο μορφής $l/d = 65$ έδωσε αντοχή 6.55 kN. Αντίστοιχη αυξητική τάση παρατηρείται συγκρίνοντας και τις συνθέσεις χαλύβδινων ινών σε ποσοστό 1.0%.

Αναφορικά με τις συνθέσεις πολυπροπυλενίου, LCPF-0.5 και LCPF-1, η αύξηση του μέγιστου φορτίου σε σχέση με την LC1 είναι μικρή. Επιπλέον, τόσο σε ποσοστό 0.5% αλλά και 1.0% έδωσαν πρακτικά ίδιο μέγιστο φορτίο. Το γεγονός αυτό σχετίζεται άμεσα με την εφελκυστική αντοχή των ινών πολυπροπυλενίου, η οποία είναι σημαντικά χαμηλότερη αυτής του χάλυβα, οπότε αυτές αστοχούν σε πολύ χαμηλότερα φορτία.

Η μέγιστη εφελκυστική τάση λόγω κάμψης σε κάθε δοκίμιο καθώς και η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας για κάθε σύνθεση δίνονται στον **πίνακα 3.6**. Για την εποπτική αξιολόγηση των μέσων τιμών ανά σύνθεση δίνεται το **σχήμα 3.4**. Η μέγιστη εφελκυστική τάση f_{LOP} υπολογίζεται από το μέγιστο φορτίο F_{LOP} σύμφωνα με τη σχέση 2.4 (κεφάλαιο 2.3.3). Και τα δύο αυτά μεγέθη χαρακτηρίζουν το υλικό κατά τη μετάβαση του από την ελαστοπλαστική στην πλαστική συμπεριφορά.

Πίνακας 3.6 Μέγιστη εφελκυστική τάση (MPa) λόγω κάμψης πρισματικών δοκιμίων, μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

	A	B	C	AVG	STDV	CV%
LC1	3.19	2.91		3.05	0.202	6.62
SF30-0.5	4.44	4.16	4.20	4.27	0.154	3.60
SF30-1	4.87	4.53	5.10	4.83	0.286	5.91
SF36-0.5	4.22	4.67	4.16	4.35	0.281	6.47
SF36-1	4.90	6.42	4.90	5.41	0.879	16.26
SF60-0.5	4.39	4.22	4.54	4.39	0.162	3.69
SF60-1	5.86	6.11	6.34	6.10	0.241	3.96
PF0.5	3.62	3.87	3.44	3.64	0.215	5.90
PF1	4.29	4.16	4.20	4.22	0.066	1.57



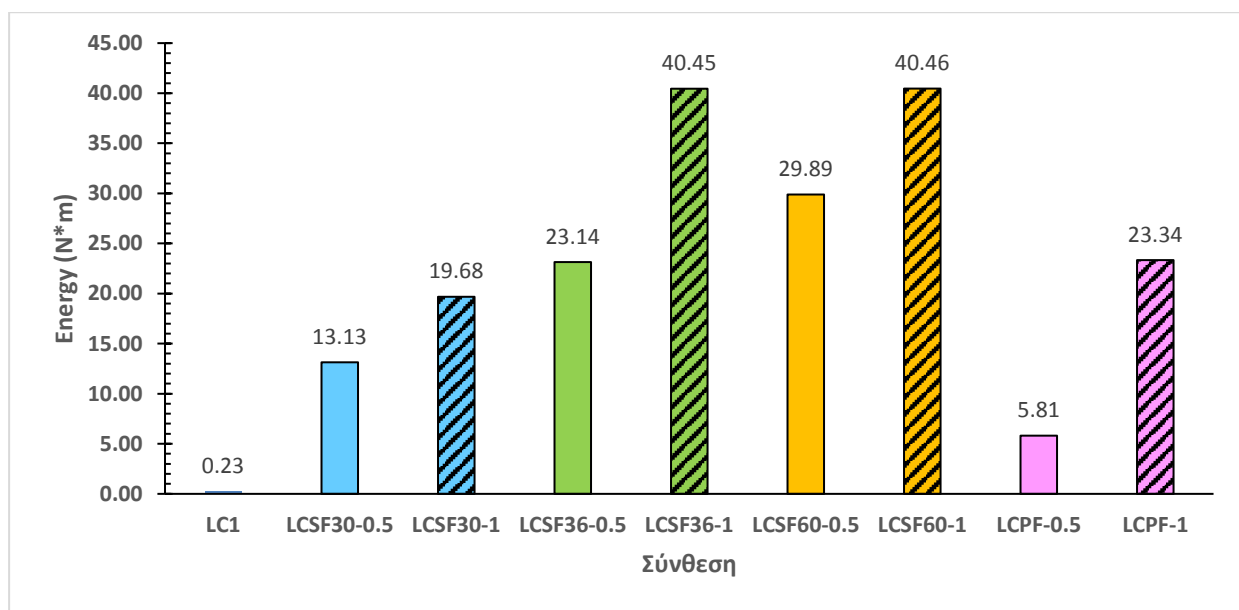
Σχήμα 3.4 Μέση τιμή της Μέγιστης Εφελκυστικής Τάσης λόγω κάμψης ανά σύνθεση.

Κατ' αντιστοιχία με το μέγιστο φορτίο F_{LOP} , οι τιμές της μέγιστης εφελκυστικής τάσης f_{LOP} για όλες τις συνθέσεις εκτός της LCSF36-1 για την οποία καταγράφεται συντελεστής μεταβλητότητας 16.26% (ίδιος με αυτόν για το μέγιστο φορτίο όπως είναι αναμενόμενο). Λόγω της άμεσης μαθηματικής συσχέτισης του μέγιστου φορτίου F_{LOP} και της μέγιστης εφελκυστικής τάσης λόγω κάμψης f_{LOP} , δεν κρίνεται αναγκαίος ο περαιτέρω σχολιασμός των αποτελεσμάτων που αφορούν στην f_{LOP} , καθώς τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις είναι ίδια.

Η απορροφούμενη ενέργεια (EA), που υπολογίζεται ως το εμβαδόν της καμπύλης φορτίου – CMOD, αποτελεί το πλέον ενδιαφέρον μέγεθος που προκύπτει από τη δοκιμή κάμψης τριών σημείων. Τόσο η ποσοτική αλλά και η ποιοτική εξέταση της καμπύλης παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση των ινών στο ελαφροσκυρόδεμα. Στον **πίνακα 3.7** δίνεται η απορροφούμενη ενέργεια (N*m) των πρισματικών δοκιμών κατά τη δοκιμή κάμψης καθώς και η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας ανά σύνθεση, έως τα 3500 μm CMOD. Επίσης για την άμεση σύγκριση των τιμών δίνεται και ραβδόγραμμα με τις μέσες τιμές στο **σχήμα 3.5**.

Πίνακας 3.7 Απορροφούμενη Ενέργεια (N*m) πρισματικών δοκιμών στα 3500 μm CMOD, μέση τιμή σύνθεσης (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

	A	B	C	AVG	STDV	CV%
LC1	0.07	0.40		0.23	0.228	97.10
LCSF30-0.5	16.73	10.53	12.14	13.13	3.214	24.47
LCSF30-1	19.82	21.57	17.63	19.68	1.977	10.05
LCSF36-0.5	22.63	21.36	25.43	23.14	2.086	9.01
LCSF36-1	33.95	55.86	31.54	40.45	13.398	33.12
LCSF60-0.5	25.06	34.75	29.85	29.89	4.847	16.22
LCSF60-1	36.42	42.85	42.12	40.46	3.521	8.70
LCPF-0.5	3.70	8.63	5.10	5.81	2.543	43.76
LCPF-1	25.36	24.43	20.22	23.34	2.739	11.74



Σχήμα 3.5 Μέσες τιμές απορροφούμενης ενέργειας πρισματικών δοκιμών ανά σύνθεση.

Οι τιμές της EA για τα δοκίμια LC1-A και LC1-B φαίνονται έντονα ανομοιογενείς. Η απορροφούμενη ενέργεια και για τα δύο δοκίμια είναι πρακτικά μηδενική με τη διαφορά στο μέγεθος να οφείλεται στην μέθοδο εκτέλεσης και καταγραφής των δεδομένων της δοκιμής. Η σύνθεση LCSF36-1

παρουσιάζει συντελεστή μεταβλητότητας 35.12% και συμβαδίζει με τον υψηλό συντελεστή μεταβλητότητας της εν λόγω σύνθεσης και στα υπόλοιπα μεγέθη. Το δοκίμιο LCPF0.5-A αστόχησε πριν την ολοκλήρωση της δοκιμής και συγκεκριμένα στα 1655 μm οπότε και έχει πολύ μικρότερη ενέργεια σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια της ίδιας σύνθεσης. Ο συντελεστής μεταβλητότητας και των υπόλοιπων συνθέσεων παρουσιάζει σημαντικές τιμές. Αυτό είναι αποτέλεσμα της φύσης της δοκιμής, αφού η εγκοπή στο μέσο του ανοίγματος συγκεντρώνει τις τάσεις στο συγκεκριμένο σημείο και καθιστά τις μετρήσεις ιδιαίτερα ευαίσθητες στη συγκέντρωση και τον προσανατολισμό των ινών κοντά στην περιοχή της εγκοπής.

Παρατηρώντας τις μέσες τιμές ανά σύνθεση φαίνεται και η κύρια επίδραση των ινών στο ελαφροσκυρόδεμα. Ενώ η διαφοροποίηση στο μέγιστο φορτίο και στην εφελκυστική τάση ανάμεσα στη σύνθεση LC1 και τις συνθέσεις ινοπλισμένου είναι μικρή, δεν ισχύει το ίδιο και για την απορροφούμενη ενέργεια. Η σύνθεση LC1 έδωσε την ελάχιστη μέση τιμή 0.23 $\text{N}\cdot\text{m}$ και η σύνθεση LCSF60-1 έδωσε τη μέγιστη μέση τιμή 40.46 $\text{N}\cdot\text{m}$.

Μεταξύ των συνθέσεων με σταθερό ποσοστό ινών, για 0.5% κατ' όγκο, η σύνθεση LCPF-0.5 έλαβε την ελάχιστη τιμή EA, ενώ η LCSF60-0.5 τη μέγιστη. Για τις συνθέσεις με 1.0% ελάχιστη τιμή έλαβε η LCSF30-1 και μέγιστη η LCSF60-1.

Στις συνθέσεις με χαλύβδινες ίνες παρατηρείται η άμεση συσχέτιση της απορροφούμενης ενέργειας με το μήκος της ίνας και κατά συνέπεια με τον λόγο μορφής. Αύξηση του λόγου μορφής l/d συνεπάγεται και αύξηση του εμβαδού της καμπύλης $P - \text{CMOD}$. Εξαίρεση αποτελούν οι συνθέσεις LCSF36-1 και LCSF60-1 με λόγους μορφής 57 και 65 αντίστοιχα, για τις οποίες καταγράφονται πανομοιότυπες τιμές απορροφούμενης ενέργειας.

Οι ίνες πολυπροπυλενίου όντας ευθύγραμμες, χωρίς άγκιστρα και έχοντας μικρότερη εφελκυστική αντοχή έδωσαν μικρότερη μέση τιμή από τις χαλύβδινες για ποσοστό 0.5%. Για ποσοστό 1.0% η σύνθεση LCPF-1 έδωσε μέση τιμή 23.34 $\text{N}\cdot\text{m}$, οριακά μεγαλύτερη μόνο από την σύνθεση με χαλύβδινες ίνες LCSF30-1 (23.14 $\text{N}\cdot\text{m}$).

Η συμπεριφορά των ινών στην πλαστική περιοχή μπορεί εύκολα να φανεί από τα διαγράμματα φορτίου – ανοίγματος ρωγμής (CMOD). Στο **Παράρτημα Β** δίνονται τα αντιπροσωπευτικά διαγράμματα για κάθε σύνθεση. Η περιγραφή των μηχανισμών γίνεται στο **κεφάλαιο 1.4**.

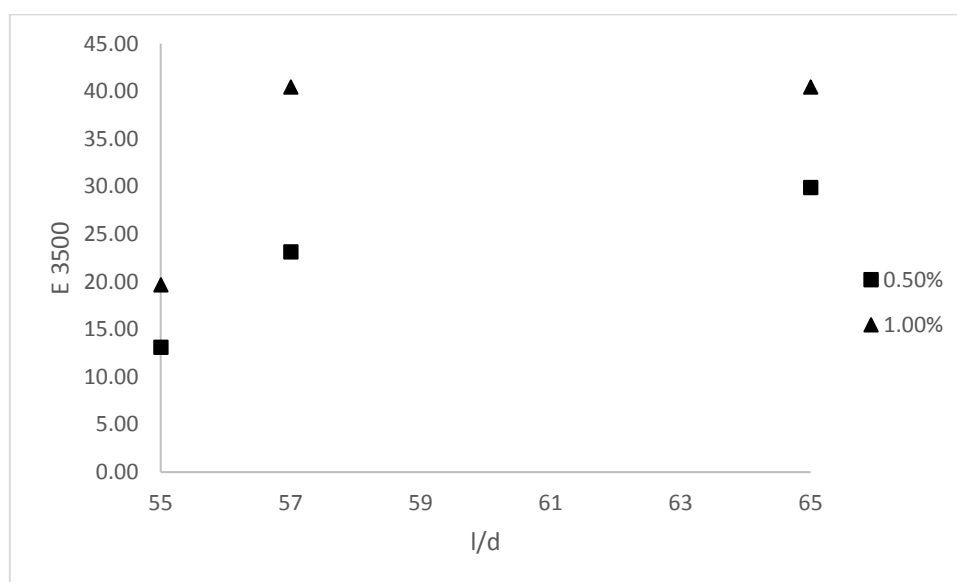
Στις συνθέσεις με χαλύβδινες ίνες μετά τη μέγιστη τιμή του φορτίου οι καμπύλες λαμβάνουν ανοδική κλίση έως περίπου τα 500 μm της CMOD. Στο διάστημα αυτό οι ίνες εντείνονται μεταφέροντας την τάση μεταξύ των ρωγμών. Ακολουθεί η πτωτική πορεία του διαγράμματος, όπου οι ίνες παραμορφώνονται πλαστικά και εξολκεύονται. Η παραμένουσα τάση φαίνεται να αυξάνεται

ανάλογα με την συνολική επιφάνεια σπλισμού (ποσοστό ινών κατ' όγκο) αλλά και με το λόγο μορφής των ινών. Συγκεκριμένα η αύξηση του λόγου μορφής και του ποσοστού των ινών συνεπάγεται και αύξηση της παραμένουσας τάσης τόσο στο ανοδικό όσο και το καθοδικό τμήμα του διαγράμματος.

Στις συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου, το διάγραμμα ακολουθεί ασθενή ανοδική κλίση σε όλη τη διάρκεια εκτέλεσης της δοκιμής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη γεωμετρία και την ευκαμψία των ινών. Παρότι το πολυπροπυλένιο έχει χαμηλή εφελκυστική αντοχή, οι ίνες κατανέμονται καλύτερα και καμπυλώνονται στον όγκο του ελαφροσκυροδέματος. Με αυτόν τον τρόπο η συνάφεια μεταξύ της διεπιφάνειας ινών και σκυροδέματος είναι ισχυρότερη. Έτσι, οι ίνες δεν αστοχούν σε συνάφεια με τη μήτρα αλλά εντείνονται εφελκυστικά καθ' όλη την εξέλιξη της δοκιμής..

Τέλος συγκρίνοντας τις συνθέσεις με ίνες χάλυβα και πολυπροπυλενίου φαίνεται ο ρόλος των ακρίστρων στην ανάπτυξη της παραμένουσας τάσης του ελαφροσκυροδέματος.

Για τη διερεύνηση της συσχέτισης του λόγου μορφής l/d και ενέργειας EA δίνεται το **σχήμα 3.6** όπου γίνεται αντιστοίχιση του λόγου μορφής και ενέργειας EA για τα δύο διαφορετικά ποσοστά περιεχόμενων μεταλλικών ινών. Επιβεβαιώνεται η αναμενόμενη θεωρητικά συσχέτιση των δυο μεγεθών, ωστόσο πρέπει να σημειωθεί η διαφορετική γεωμετρία των ινών.



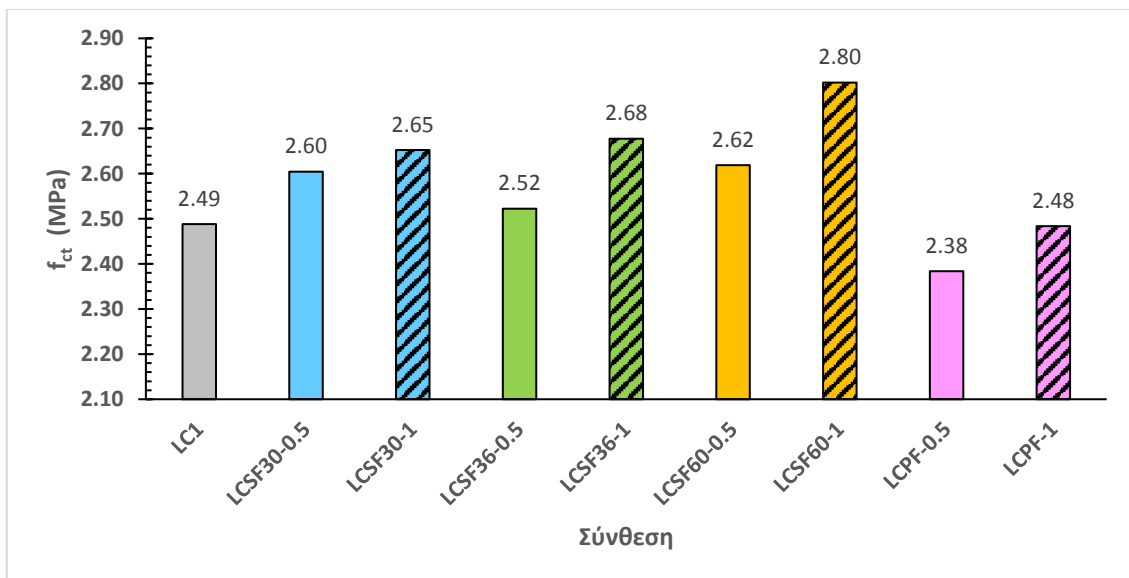
Σχήμα 3.6 Συσχέτιση λόγου μορφής l/d και ενέργειας EA στα 3500 μm της δοκιμής κάμψης.

3.2.5 Δοκιμή Barcelona

Τα αποτελέσματα της μέγιστης εφελκυστικής τάσης κατά τη δοκιμή Barcelona παρουσιάζονται στον **πίνακα 3.8**. Μαζί δίνονται η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας ανά σύνθεση. Η μέση τιμή κάθε σύνθεσης παρουσιάζεται εποπτικά και υπό τη μορφή ραβδογράμματος στο **σχήμα 3.7**.

Πίνακας 3.8 Εφελκυστική αντοχή δοκιμίων (MPa), μέση τιμή (AVG), τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

ΣΥΝΘΕΣΗ	ΔΟΚΙΜΙΟ			AVG	STDV	CV%
	A	B	C			
LC1	2.39	2.59	2.49	2.49	0.100	4.03
LCSF30-0.5	2.72	2.65	2.44	2.60	0.150	5.75
LCSF30-1	2.59	2.65	2.72	2.65	0.065	2.44
LCSF36-0.5	2.40	2.72	2.45	2.52	0.174	6.90
LCSF36-1	2.63	2.78	2.63	2.68	0.085	3.16
LCSF60-0.5	2.91	2.21	2.74	2.62	0.363	13.85
LCSF60-1	2.52	3.09	2.79	2.80	0.285	10.18
LCPF-0.5	2.31	2.57	2.27	2.38	0.158	6.64
LCPF-1	2.35	2.63	2.48	2.48	0.140	5.65



Σχήμα 3.7 Μέση τιμή εφελκυστικής τάσης ανά σύνθεση.

Όλες οι συνθέσεις με εξαίρεση τις LCSF60-0.5 και LCSF60-0.5 χαρακτηρίζονται ως ομοιογενείς με ιδιαίτερα χαμηλό συντελεστής μεταβλητότητας. Αυτό αποτελεί και ένα από τα πλεονεκτήματα της δοκιμής σε σχέση με την δοκιμή κάμψης.

Σε σχέση με τη σύνθεση LC1 φαίνεται πως η προσθήκη ινών δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την εφελκυστική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος. Η σύνθεση LC1 έχει 2.49 MPa, μέγιστη η LCSF60-1 με 2.80 MPa, ενώ την ελάχιστη τιμή έχει η LCPF-0.5 με 2.38 MPa. Οι συνθέσεις LCPF-0.5 και LCPF-1 ανέπτυξαν μικρότερη μέγιστη αντοχή από τη σύνθεση άοπλου ελαφροσκυροδέματος LC1 χωρίς ίνες.

Μεταξύ των συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες με ποσοστό ινών 0.5% κατ' όγκο, μέγιστη αντοχή παρουσίασε η LCSF60-0.5 ενώ ελάχιστη η LCSF36-0.5. Για ποσοστό ινών 1.0% μέγιστη αντοχή έδωσε η LCSF60-1 και ελάχιστη η LCSF30-1. Αυξανόμενου του μήκους και του λόγου μορφής, οι ίνες αναλαμβάνουν μεγαλύτερο μέρος εφελκυστικών τάσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση (1.0% έως 12%) της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής.

Κατ' αναλογία, συγκρίνοντας τις συνθέσεις ανά τύπο ίνας, φαίνεται πως η αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού ινών δηλαδή της επιφάνειας οπλισμού, οδηγεί στην αύξηση της εφελκυστικής αντοχής.

Στους πίνακες **3.9**, **3.10**, **3.11** και **3.12** δίνεται η απορροφούμενη ενέργεια E(TCOD) κατά τη δοκιμή ως προς την περιμετρική μετατόπιση (TCOD) και η δυσθραυστότητα για διάφορες τιμές κατακόρυφης μετατόπισης αντίστοιχα. Επιπλέον παρέχονται και τα σχήματα **3.8** και **3.9** όπου παρουσιάζονται η μέση τιμή των παραπάνω μεγεθών ανά σύνθεση.

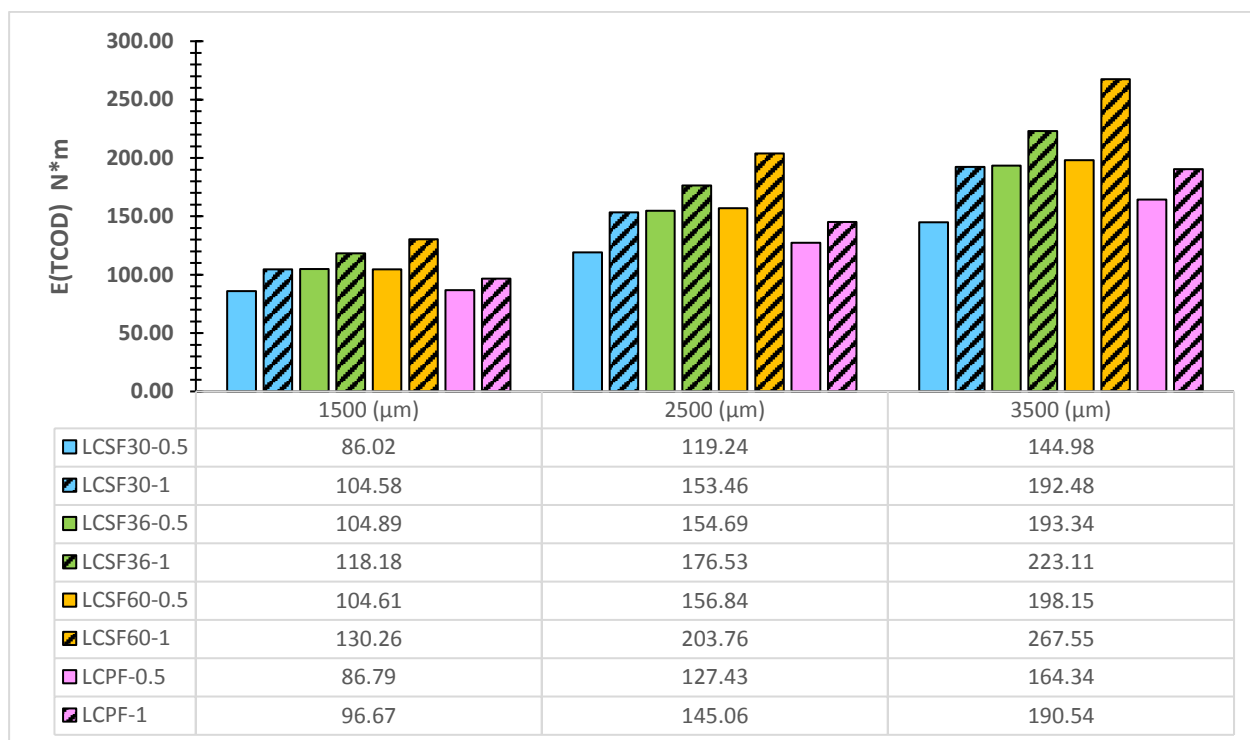
Στα σχήματα 3.10 και 3.11 γίνεται αντιστοίχιση του λόγου μορφής l/d των χαλύβδινων ινών με την E(TCOD) και τη δυσθραυστότητα T στα 3500 μm περιμετρικής και κατακόρυφης μετατόπισης αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις φαίνεται ότι η αύξηση του λόγου μορφής οδηγεί και σε μεγαλύτερα μεγέθη E(TCOD) και T. Επιβεβαιώνεται με τα αποτελέσματα και αυτής της δοκιμής η αναμενόμενη θεωρητικά συσχέτιση των δύο μεγεθών, ωστόσο πρέπει να σημειωθεί η διαφορετική γεωμετρία των ινών.

Πίνακας 3.9 Απορροφούμενη Ενέργεια E(TCOD) (N*m) των δοκιμών σε χαρακτηριστικές τιμές TCOD.

ΣΥΝΘΕΣΗ	1500 (μm)			2500 (μm)			3500 (μm)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
LCP1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LCSF30-0.5	97.66	88.15	72.25	137.59	121.69	98.45	169.94	147.02	117.99
LCSF30-1	94.84	99.32	119.58	135.37	143.87	181.15	170.19	177.71	229.55
LCSF36-0.5	112.19	98.38	104.10	172.97	139.19	151.91	221.83	170.08	188.12
LCSF36-1	102.63	125.94	125.98	148.79	188.82	191.98	184.73	238.69	245.92
LCSF60-0.5	111.91	83.54	118.37	162.26	127.01	181.25	200.47	167.23	226.76
LCSF60-1	119.19	145.34	126.25	191.71	224.94	194.63	259.36	292.22	251.06
LCPF-0.5	87.91	91.53	80.93	130.15	133.54	118.62	169.68	171.08	152.25
LCPF-1	92.64	99.01	98.35	140.29	143.70	151.20	185.80	183.66	202.17

Πίνακας 3.10 Μέση τιμή E(TCOD) (N*m) ανά σύνθεση σε χαρακτηριστικές τιμές TCOD.

ΣΥΝΘΕΣΗ	1500 (μm)			2500 (μm)			3500 (μm)		
	AVG	STDV	CV%	AVG	STDV	CV%	AVG	STDV	CV%
LCP1									
LCSF30-0.5	86.02	12.84	14.93	119.24	19.68	16.51	144.98	26.03	17.96
LCSF30-1	104.58	13.19	12.61	153.46	24.35	15.87	192.48	32.32	16.79
LCSF36-0.5	104.89	6.94	6.62	154.69	17.06	11.03	193.34	26.27	13.59
LCSF36-1	118.18	13.47	11.40	176.53	24.08	13.64	223.11	33.43	14.99
LCSF60-0.5	104.61	18.53	17.71	156.84	27.52	17.55	198.15	29.83	15.06
LCSF60-1	130.26	13.53	10.38	203.76	18.40	9.03	267.55	21.76	8.13
LCPF-0.5	86.79	5.39	6.21	127.43	7.82	6.14	164.34	10.49	6.38
LCPF-1	96.67	3.50	3.63	145.06	5.58	3.85	190.54	10.13	5.31



Σχήμα 3.8 Μέση τιμή $E(TCOD)$ ανά σύνθεση για δεδομένη TCOD.

Λόγω της φύσης της δοκιμής, αγνοούνται οι τιμές πριν την ρωγμάτωση, συνεπώς και δεν εμφανίζονται τιμές ενέργειας για τη σύνθεση LC1.

Ανάμεσα στις συνθέσεις με 0.5% ποσοστό περιεχόμενων ινών ελάχιστη ενέργεια απορροφήθηκε από τη LCSF30-0.5 ενώ μέγιστη από τη LCSF60-0.5. Μεταξύ των χαλύβδινων ινών παρατηρείται αύξηση της $E(TCOD)$ με την αύξηση του λόγου μορφής. Μάλιστα η τάση αυτή παραμένει και στα τρία διαφορετικά διαστήματα TCOD.

Μεταξύ των συνθέσεων 1.0%, χαμηλότερη τιμή έδωσε η LCPF-1, ενώ υψηλότερη η LCSF60-1. Όπως και στις συνθέσεις με 0.5% η τάση αυτή παραμένει και για τα τρία διαφορετικά διαστήματα TCOD. Τέλος εξετάζοντας τις συνθέσεις ανά τύπο ίνας φαίνεται η επίδραση της συνολικής επιφάνειας των ινών (ποσοστό ινών) στην απορροφούμενη ενέργεια. Για κάθε τύπο ίνας στη σύνθεση με 0.5% απορροφήθηκαν χαμηλότερες τιμές ενέργειας από ότι στη σύνθεση με 1.0%.

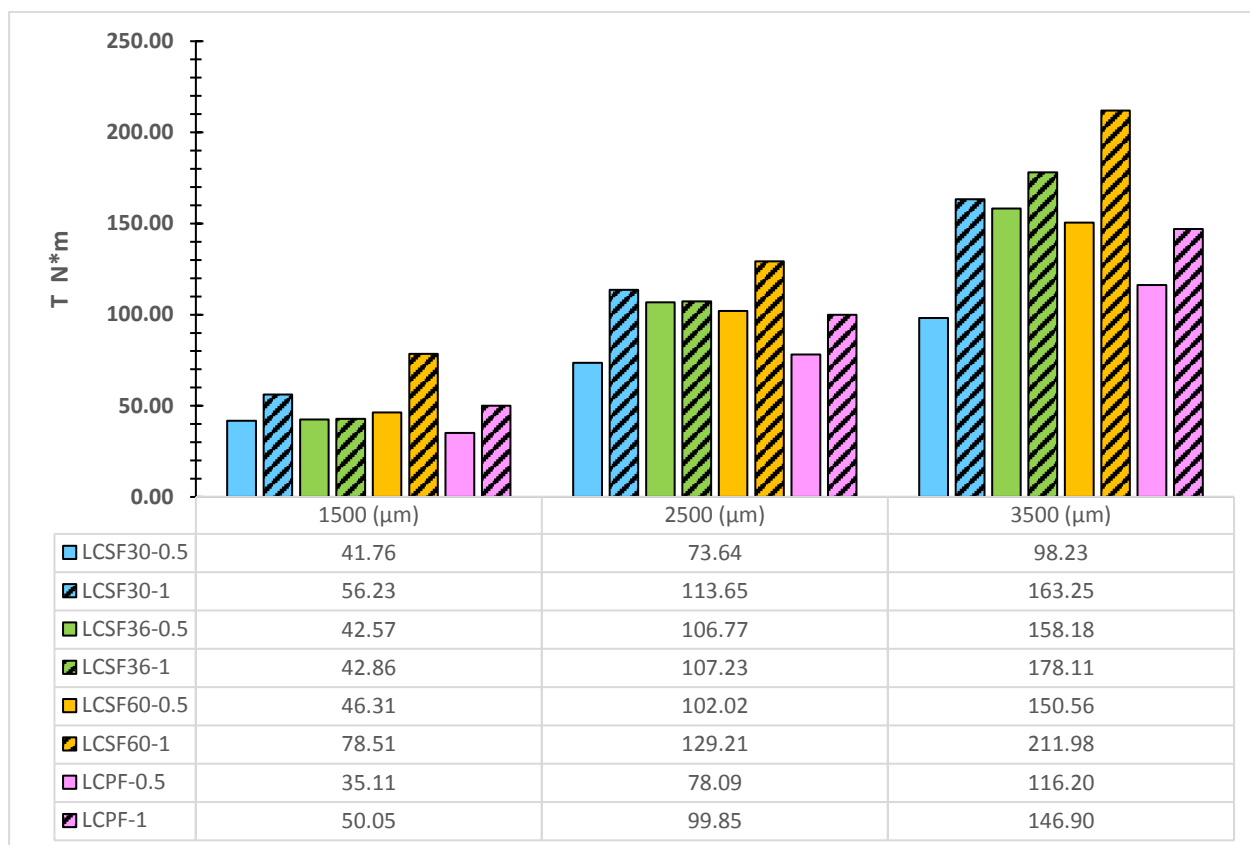
Στον **πίνακα 3.11** παρουσιάζεται η δυσθραυστότητα ως το έργο της αξονικής μετατόπισης κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Η μέση τιμή δίνεται και σε μορφή ραβδογράμματος στο **σχήμα 3.9**.

Πίνακας 3.11 Δυσθραυστότητα T (N*m) δοκιμών σε χαρακτηριστικές τιμές κατακόρυφης μετατόπισης.

ΣΥΝΘΕΣΗ	1500 (μm)			2500 (μm)			3500 (μm)		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
LCP1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LCSF30-0.5	48.19	48.55	28.55	84.26	82.24	54.44	113.93	106.93	73.83
LCSF30-1	65.79	63.65	39.24	105.16	111.72	124.07	138.02	147.57	204.16
LCSF36-0.5	14.58	68.61	44.51	93.52	118.10	108.70	165.17	155.07	154.29
LCSF36-1	59.68	26.04		111.58	117.99	92.13	153.94	201.36	179.03
LCSF60-0.5	62.34	34.53	42.05	106.02	82.87	117.15	142.13	126.31	183.24
LCSF60-1		76.10	80.93	55.21	170.10	162.32	139.32	256.89	239.74
LCPF-0.5	19.20	50.08	36.05	66.80	91.11	76.35	108.32	129.06	111.20
LCPF-1	40.66	62.57	46.90	90.45	108.23	100.86	137.37	149.93	153.40

Πίνακας 3.12 Μέση τιμή (AVG) δυσθραυστότητας T (N*m), ανά σύνθεση, τυπική απόκλιση (STDV) και συντελεστής μεταβλητότητας (CV%).

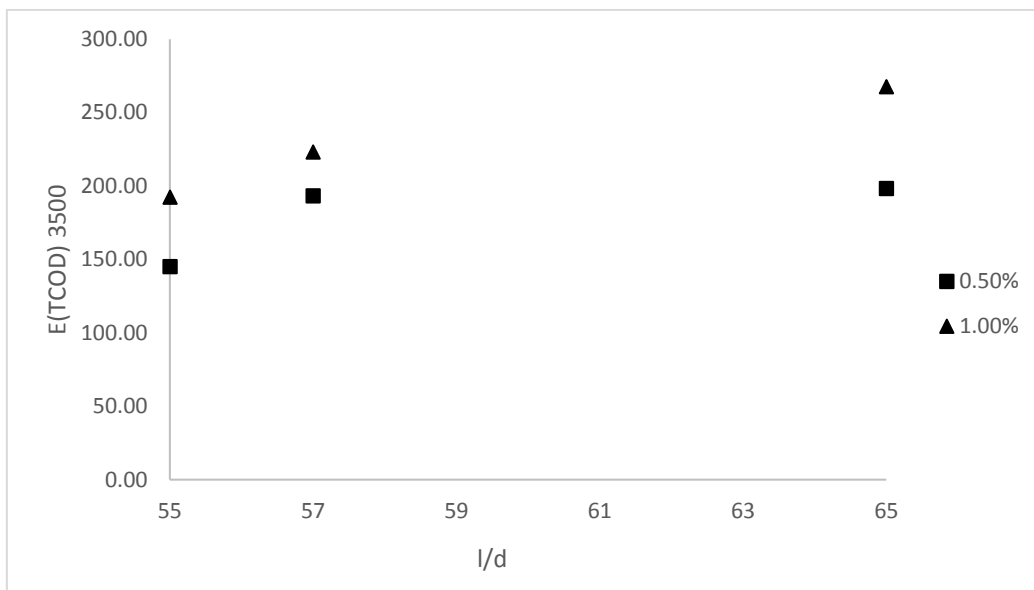
ΣΥΝΘΕΣΗ	1500 (μm)			2500 (μm)			3500 (μm)		
	AVG	STDV	CV%	AVG	STDV	CV%	AVG	STDV	CV%
LCP1									
LCSF30-0.5	41.76	11.44	27.39	73.64	16.66	22.63	98.23	21.42	21.80
LCSF30-1	56.23	14.75	26.23	113.65	9.60	8.44	163.25	35.75	21.90
LCSF36-0.5	42.57	27.07	63.59	106.77	12.40	11.61	158.18	6.07	3.83
LCSF36-1	42.86	23.79	55.50	107.23	13.47	12.56	178.11	23.73	13.32
LCSF60-0.5	46.31	14.38	31.06	102.02	17.49	17.14	150.56	29.39	19.52
LCSF60-1	78.51	3.42	4.35	129.21	64.21	49.69	211.98	63.51	29.96
LCPF-0.5	35.11	15.46	44.04	78.09	12.25	15.69	116.20	11.24	9.67
LCPF-1	50.05	11.29	22.56	99.85	8.94	8.95	146.90	8.43	5.74



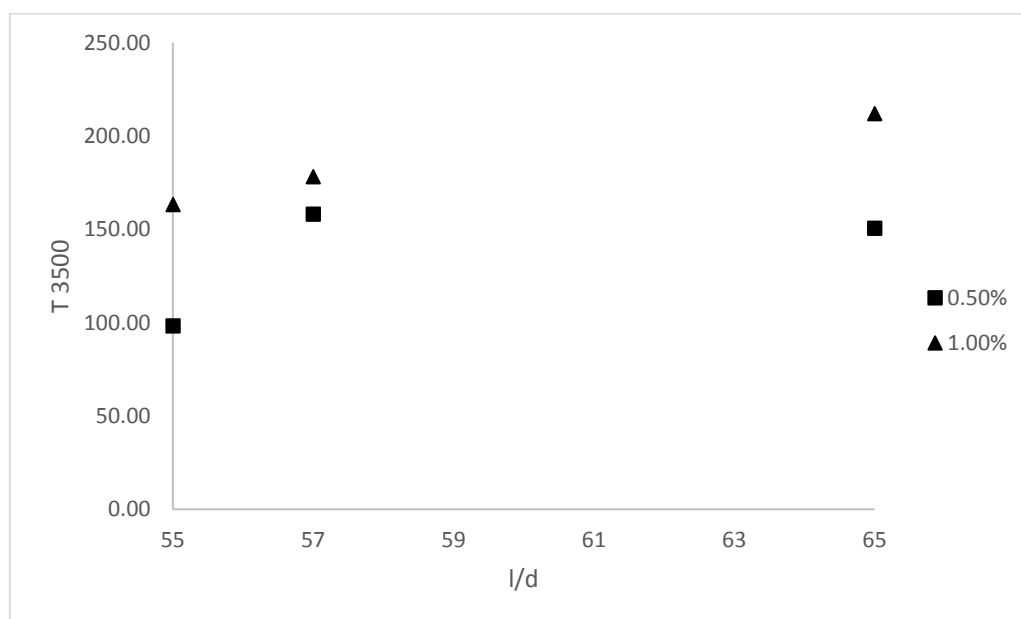
Σχήμα 3.9 Μέση τιμή δυσθραυστότητας T (N*m) ανά σύνθεση.

Για κάθε τιμή κατακόρυφης μετατόπισης και για ποσοστό ιών 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 ιών 1.0%. Με την αύξηση του περιεχόμενου ποσοστού ιών σημειώνεται και σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας. Εξάιρεση 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 παρουσιάζει μικρότερη δυσθραυστότητα και από την LCS30-1.

Αντιπροσωπευτικά διαγράμματα της δοκιμής Barcelona για κάθε σύνθεση δίνονται στο **Παράρτημα Γ**.



Σχήμα 3.10 Συσχέτιση λόγου μορφής l/d χαλύβδινων ινών με την $E(TCOD)$ στα 3500 μm περιμετρικής μετατόπισης.



Σχήμα 3.11 Συσχέτιση λόγου μορφής l/d χαλύβδινων ινών με τη δυσθραυστότητα T στα 3500 μm κατακόρυφης μετατόπισης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

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

- Η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο ελαφροσκυρόδεμα οδηγεί στην αύξηση του μοναδιαίου βάρους σε σχέση με τις συνθέσεις αναφοράς, ενώ οι ίνες πολυπροπυλενίου σε μειωμένο. Οριακά οι συνθέσεις με ίνες χάλυβα εντάσσονται στην κατηγορία D2.0, ενώ οι υπόλοιπες συνθέσεις σε D1.8 κατά το πρότυπο EN206.
- Η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη ινών και απαιτείται η προσθήκη ικανοποιητικών ποσοτήτων υπερρρευστοποιητών.
- Η χρήση λεπτής στρώσης κονιάματος για την εξομάλυνση της άνω επιφάνειας των κυλινδρικών δοκιμίων φαίνεται να επηρεάζει τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής, με αποτέλεσμα αυτή να καταγράφεται μειωμένη κατά 30% σε σχέση με τα δοκίμια με λειασμένη άνω επιφάνεια.
- Η προσθήκη ινών αυξάνει τη θλιπτική αντοχή από 11% έως 41%. Καθοριστικό ρόλο έχουν το υλικό των ινών, η συνολική επιφάνεια οπλισμού (ποσοστό περιεχομένων ινών κ.ο.) και ο λόγος μορφής l/d .
- Το Μέτρο Ελαστικότητας δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη ινών στο ελαφροσκυρόδεμα. Σε όλες τις συνθέσεις το Μέτρο Ελαστικότητας ήταν της τάξης των 18 GPa, με τις διαφορές να είναι της τάξης του 1.5 GPa.
- Η αύξηση του ποσοστού των περιεχομένων ινών κατά 0.5% (από 0.5 σε 1.0%) επίσης δεν επιδρά στην τιμή του Μέρου Ελαστικότητας.
- Η προσθήκη ινών δεν επιδρά ουσιαστικά στο μετρούμενο Λόγο Poisson. Όλες οι συνθέσεις έχουν Λόγο Poisson τάξης μεγέθους 0.22.
- Στο ινοπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα μετρήθηκε μεγαλύτερη μέγιστη καμπτική εφελκυστική τάση f_{lOP} σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς. Αύξηση του λόγου μορφής l/d , της επιφάνειας οπλισμού, αλλά και της εφελκυστικής αντοχής των ινών συνεπάγεται και μεγαλύτερη μέγιστη εφελκυστική τάση.
- Η παραμένουσα τάση $f_{R,j}$ των δοκιμίων, κατά τη δοκιμή κάμψης, επηρεάζεται από το υλικό, το περιεχόμενο ποσοστό κ.ο. και το λόγο μορφής l/d των ινών. Τα δοκίμια με χαλύβδινες ίνες παρουσιάζουν μεγαλύτερη παραμένουσα αντοχή από αυτά με ίνες πολυπροπυλενίου καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής.

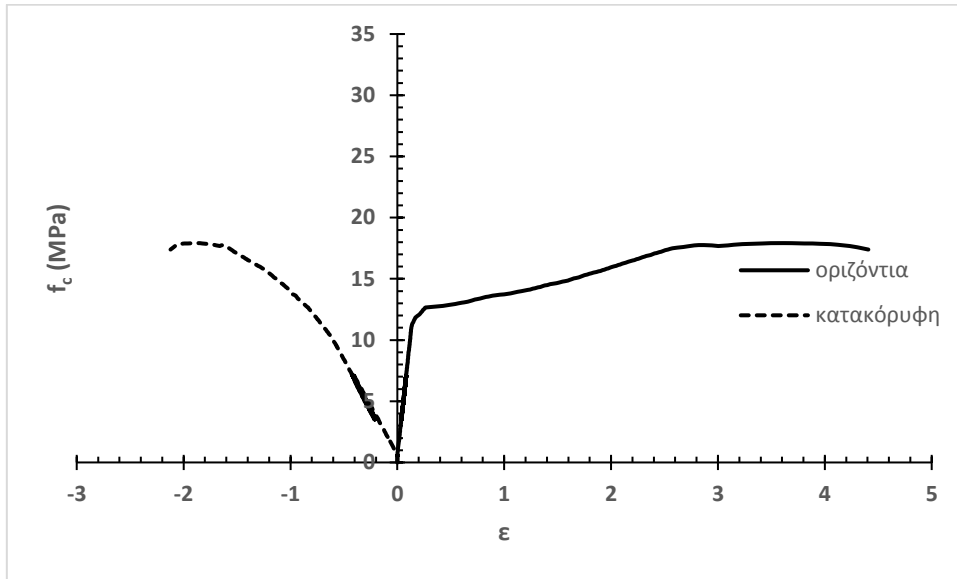
- Τα δύο είδη ινών συμπεριφέρονται διαφορετικά κατά τη δοκιμή κάμψης. Οι χαλύβδινες ίνες αστοχούν ως προς τη συνάφειά τους με το σκυρόδεμα, ενώ οι ίνες πολυπροπυλενίου εφελκυστικά.
- Τα αποτελέσματα της δοκιμής Barcelona παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή μεταβλητότητας.
- Η μέγιστη εφελκυστική τάση f_{ct} των δοκιμίων, κατά τη δοκιμή Barcelona, δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη ινών.
- Η παραμένουσα τάση f_{ctrx} , κατά τη δοκιμή Barcelona, επηρεάζεται από το είδος, το ποσοστό κ.ο και το λόγο μορφής των ινών. Αύξηση της επιφάνειας οπλισμού και του λόγου l/d οδηγεί σε μεγαλύτερη f_{ctrx} με την επίδραση να είναι ιδιαίτερα προφανής για μεγαλύτερες τιμές αξονικής μετατόπισης. Οι ίνες πολυπροπυλενίου έδωσαν κατά κανόνα μικρότερη παραμένουσα τάση από όλες τις χαλύβδινες εκτός τις SF30.
- Τόσο η ενέργεια της περιφερειακής μετατόπισης $E(TCOD)$, όσο και η δυσθραυστότητα T , που μετρήθηκαν στη δοκιμή Barcelona, αυξάνονται για μεγαλύτερο ποσοστό περιεχομένων ινών, αλλά με την αύξηση του λόγου l/d ειδικά για τις χαλύβδινες ίνες.

Βιβλιογραφία

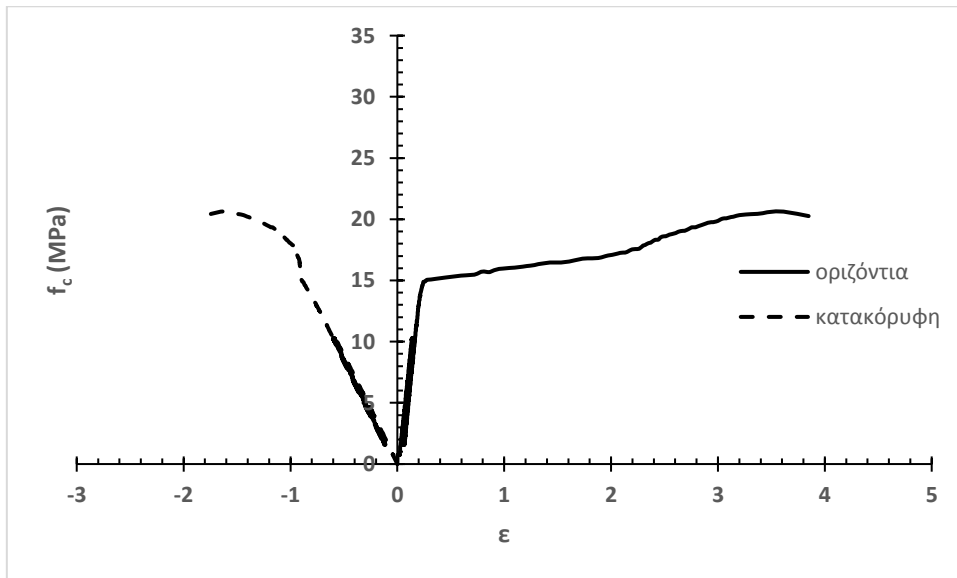
- [1] A. Bentur και S. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, Taylor & Francis, 2007.
- [2] R. F. Zolo, «Fiber-Reinforced Concrete: An Overview after 30 Years of Development,» Elsevier Science Ltd, 1997.
- [3] H. Cox, «The elasticity and strength of paper and other fibrous materials,» *British journal of applied physics*, τόμ. III, αρ. III, 1981.
- [4] B. Weiler, C. Grosse και H. Reinhardt, «Debonding behavior of steel fibres with hooked ends,» σε *Proceedings of the Third International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Bagnaux, 1999.
- [5] J. Alwan, A. Naaman και P. Guerrero, «Effect of mechanical clamping on pull-out response of hooked steel fibers embedded in cementitious matrices,» *Concrete Science and Engineering*, τόμ. 1, 1999.
- [6] O. A. Düzgün, R. Gül και A. C. Aydin, «Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete,» *Materials Letters*, τόμ. 59, αρ. 27, p. 3357–3363, 2005.
- [7] P. Song και S. Hwang, «Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, τόμ. 18, p. 669–673, 2004.
- [8] S. Yazici, G. Inan και V. Tabak, «Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC,» *Construction and Building Materials*, τόμ. 21, p. 1250–1253, 2007.
- [9] A. M. Alhozaimy, P. Soroushian και F. Mirza, «Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced concrete and the effects of pozzolanic materials,» *Cement & Concrete Composites*, τόμ. 18, pp. 85-92, 1996.
- [10] Κ. ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ και Μ. ΚΑΦΦΕΤΖΑΚΗΣ, «Αυτοσυμπυκνούμενο κισσηρόδεμα,» σε *16ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Πάφος, Κύπρος, 2009.*

- [11] N. Banthia και J. Trottier, «Concrete reinforced deformed steel fibbers, part 1: Bond-slip mechanisms,» *ACI Material Journal*, τόμ. 91, pp. 435-446, 1994.
- [12] P. Balaguru και V. Ramakrishnan, «Properties of lightweight fiber reinforced concrete,» σε *Fiber Reinforced Concrete - Properties and Applications*, Michigan, American Concrete Institute, 1987, pp. 305-322.
- [13] G. Campione, S. Mindess και G. Zingone, «Compressive stress-strain behavior of normal and high-strength carbone-fiber concrete reinforced with steel spirals,» *ACI Materials Journal*, τόμ. 96, pp. 27-34, 1999.
- [14] G. Campione, C. Calogero, L. La Mendolaand και M. Papia, «Experimental investigation on local bond-slip behavior in lightweight fiber reinforced concrete under cyclic actions,» σε *13th World conference on earthquake Engineering*, Vancouver, 2004.
- [15] S. Mindess, J. Young και D. Darwin, «Concrete,» Prentice hall, Upper Saddle River, NJ, 2003.
- [16] C. Molins, A. Aguado και S. Saludes, «Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test),» *Materials and Structures*, τόμ. 42, αρ. 4, pp. 415-425, 2009.
- [17] W. Chen, «Double punch test for tensile strength of concrete,» *ACI-Mater J*, 1970.
- [18] S. Carmona, A. Aguado και C. Molins, «Characterization of the properties of steel fiber reinforced concrete by means of the generalized Barcelona test,» *Construction and Building Materials, Elsevier Ltd.*, τόμ. 48, pp. 592-600, 2013.
- [19] N. Sivalinga Rao, Y. Radha Ratna Kumari, V. Bhaskar Desai και B. Swami, «Fibre Reinforced Light Weight Aggregate (Natural Pumice Stone) Concrete,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, τόμ. 4, αρ. 5, 2013.
- [20] L. Gündüz, «The effects of pumice aggregate/cement ratios on the low-strength concrete properties,» Elsevier Science Ltd, 2007.

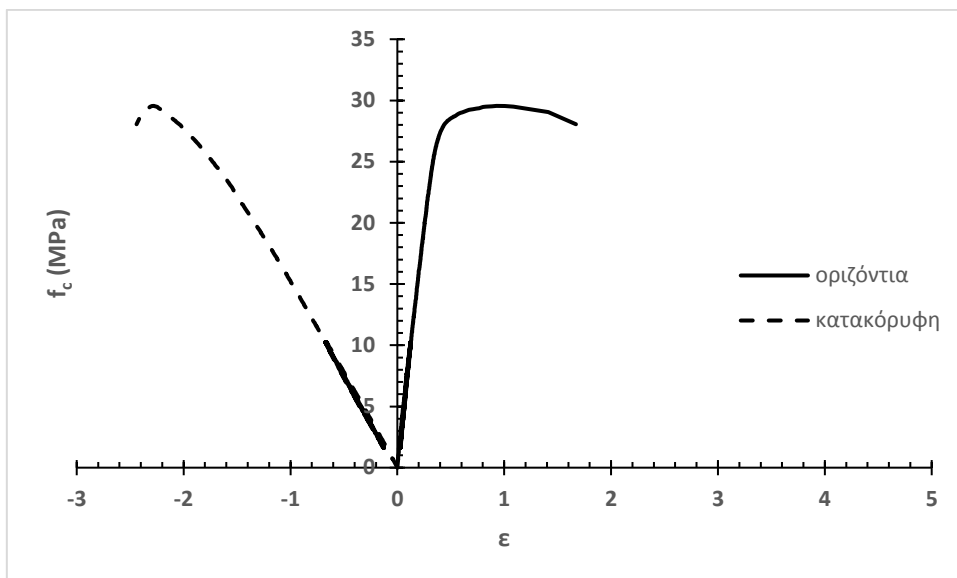
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α Διαγράμματα δοκιμών θλίψης



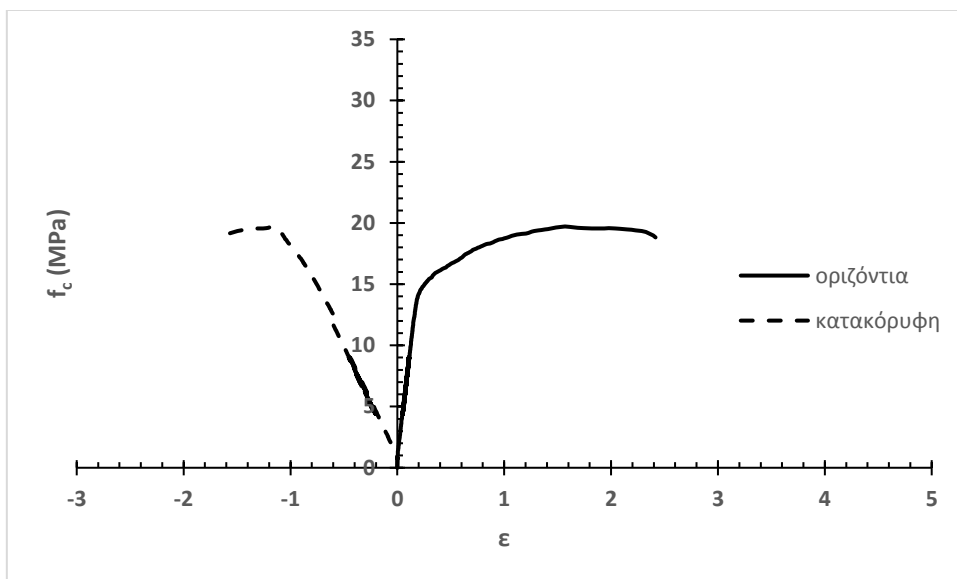
Σχήμα Α¹ Σύνθεση LC1.



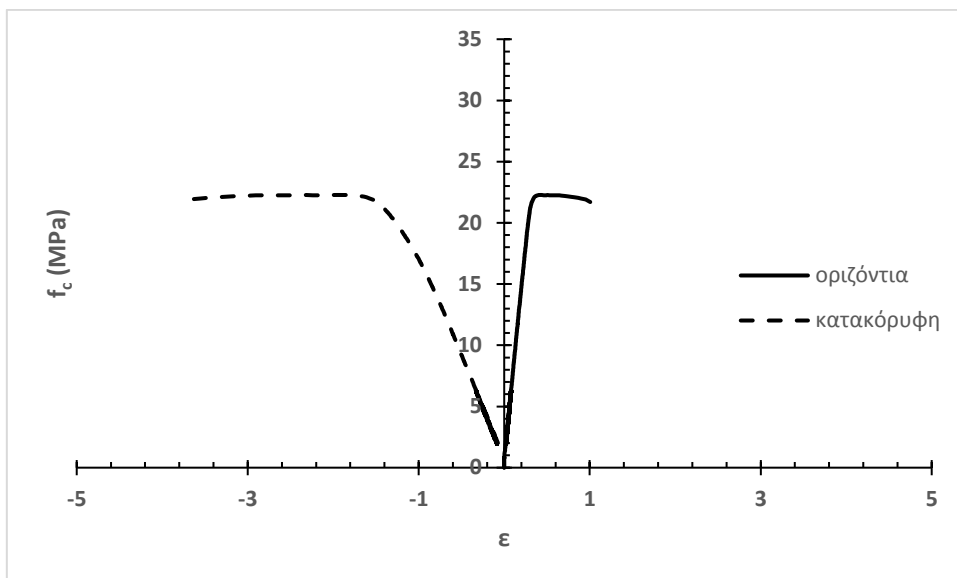
Σχήμα Α² Σύνθεση LC2.



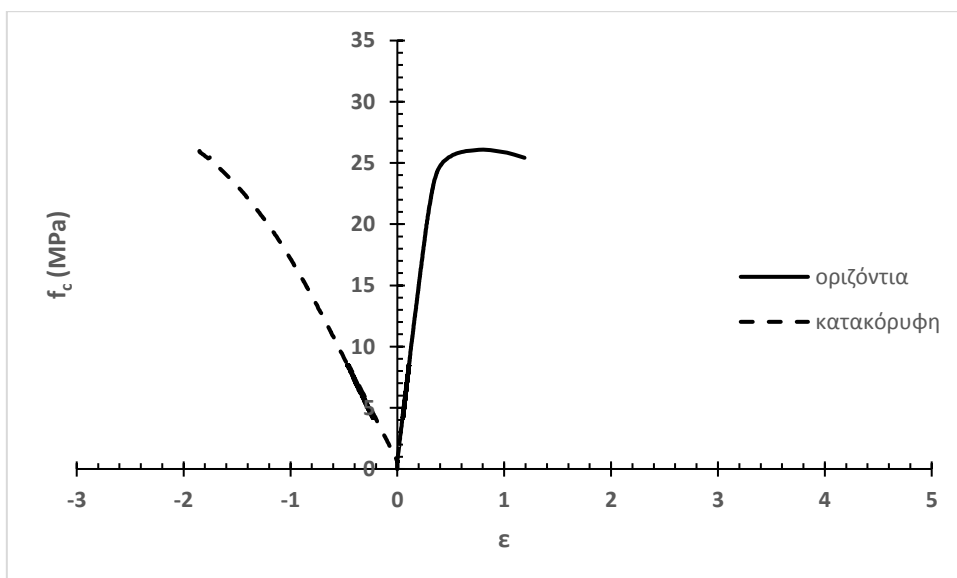
Σχήμα A³ Σύνθεση LC3.



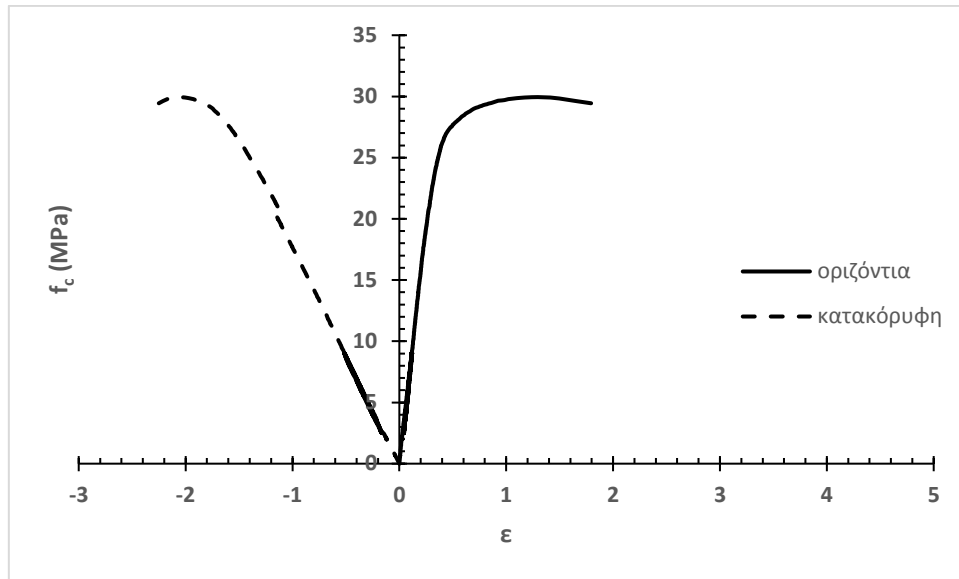
Σχήμα A⁴ Σύνθεση LCSF30-0.5.



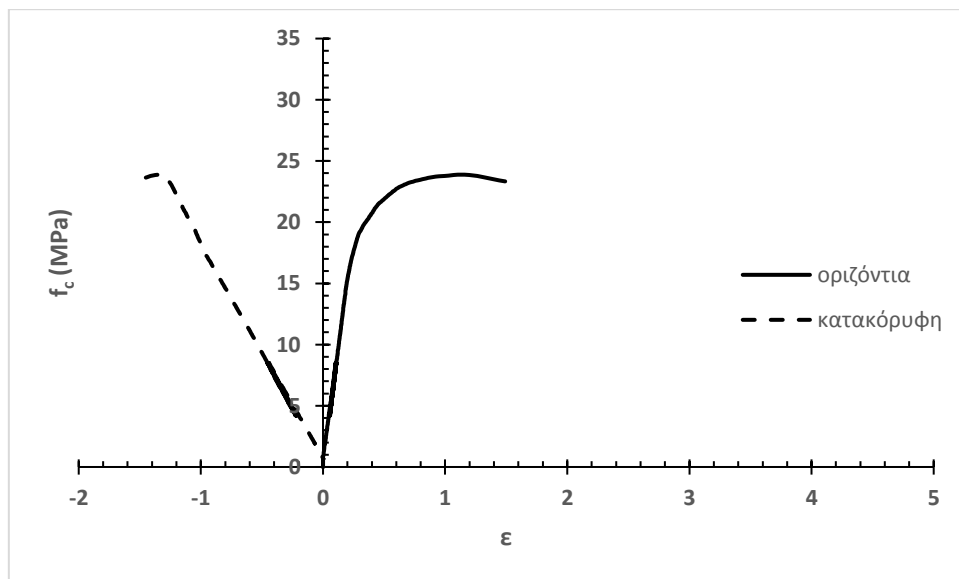
Σχήμα Α⁵ Σύνθεση LCSF30-1.



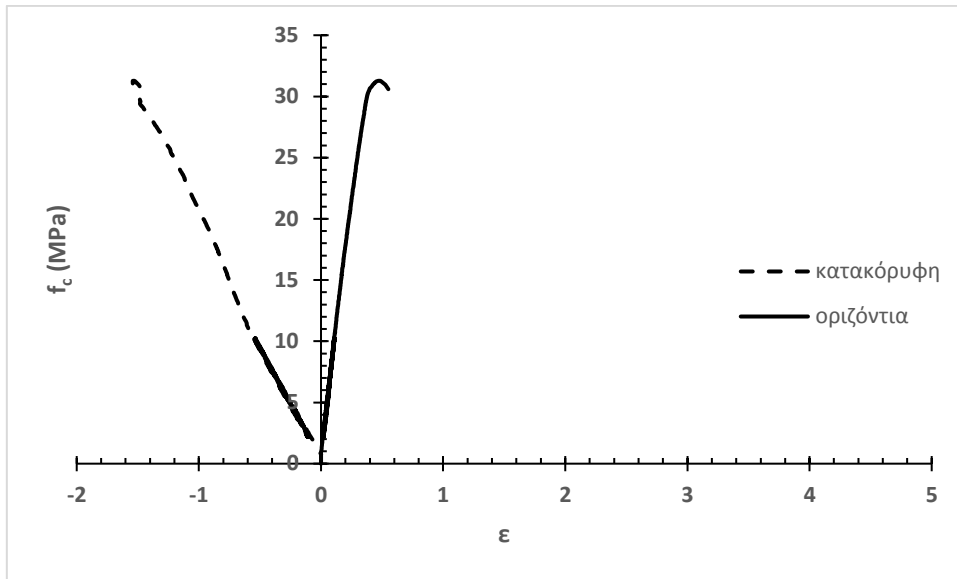
Σχήμα Α⁶ Σύνθεση LCSF36-0.5.



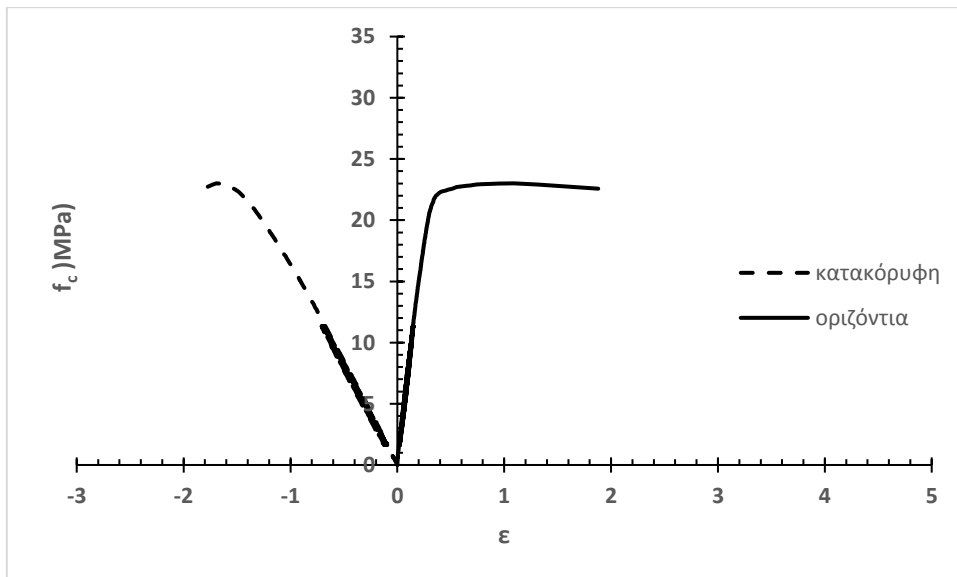
Σχήμα Α⁷ Σύνθεση LCSF36-1.



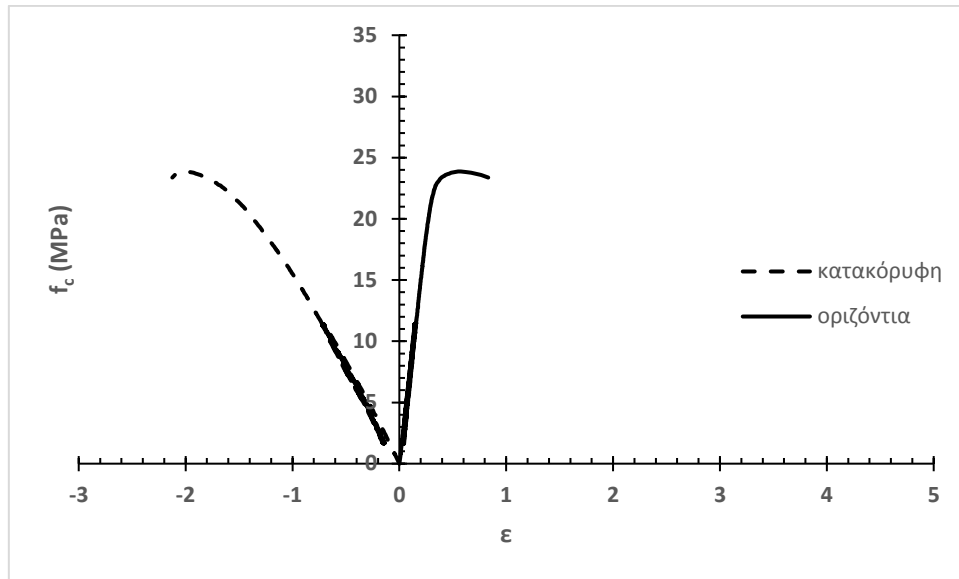
Σχήμα Α⁸ Σύνθεση LCSF60-0.5.



Σχήμα A⁹ Σύνθεση LCSF60-1.

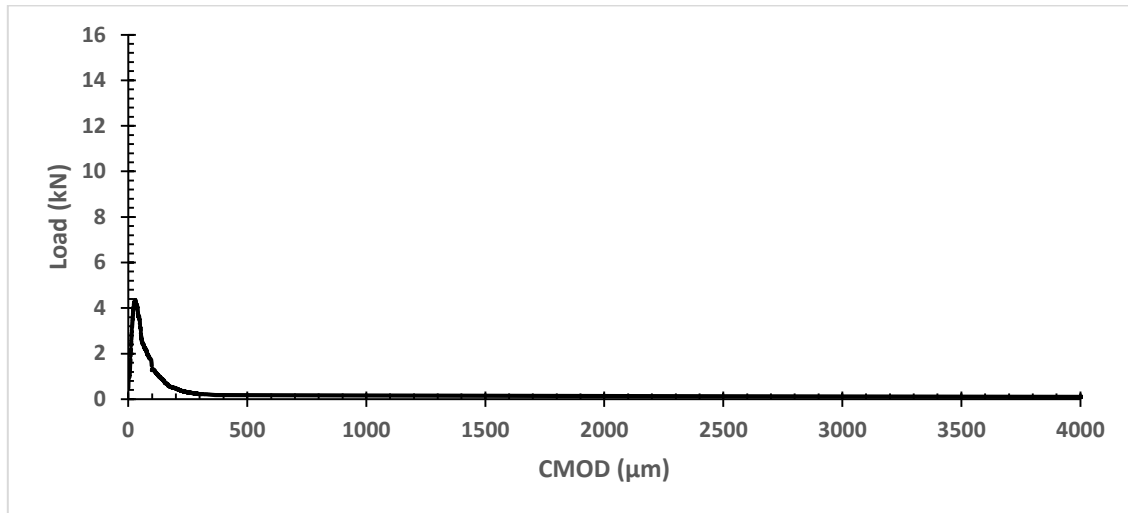


Σχήμα A¹⁰ Σύνθεση LCPF-0.5.

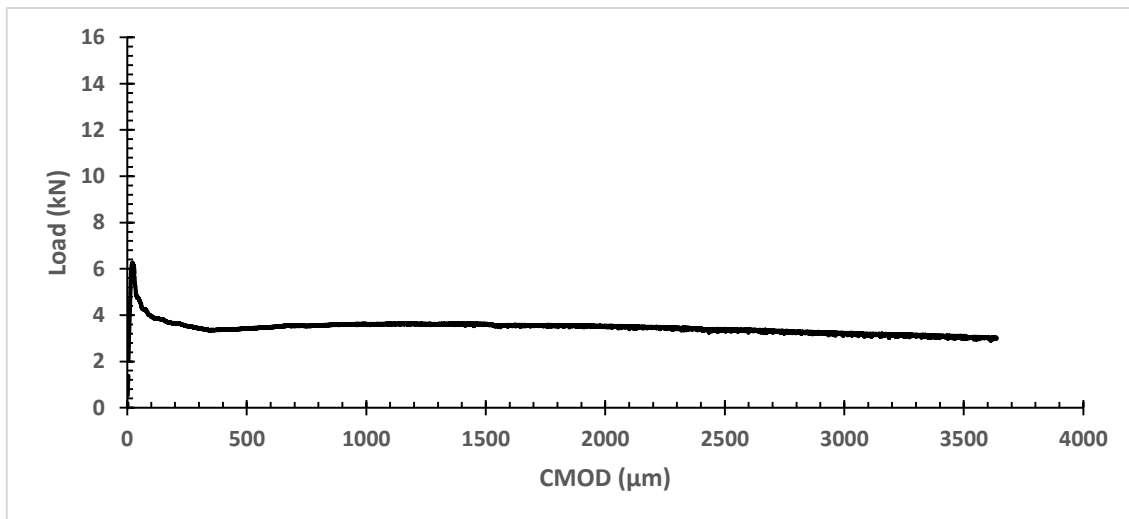


Σχήμα Α¹¹ Σύνθεση LCPF-1.

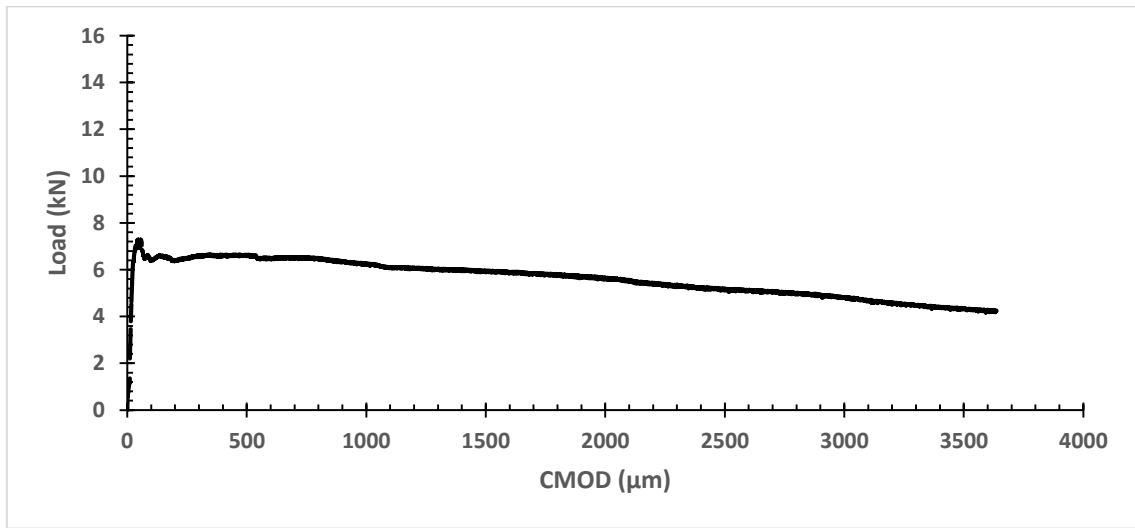
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β Διαγράμματα Φορτίου – CMOD



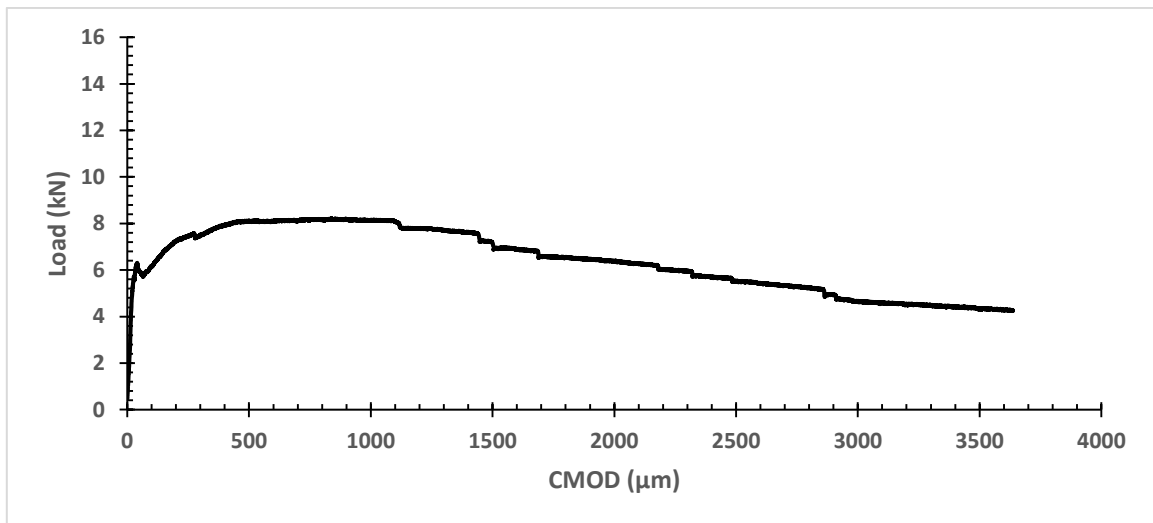
Σχήμα Β¹ Καμπύλη Φορτίου – ανοίγματος ρωγμής LC1.



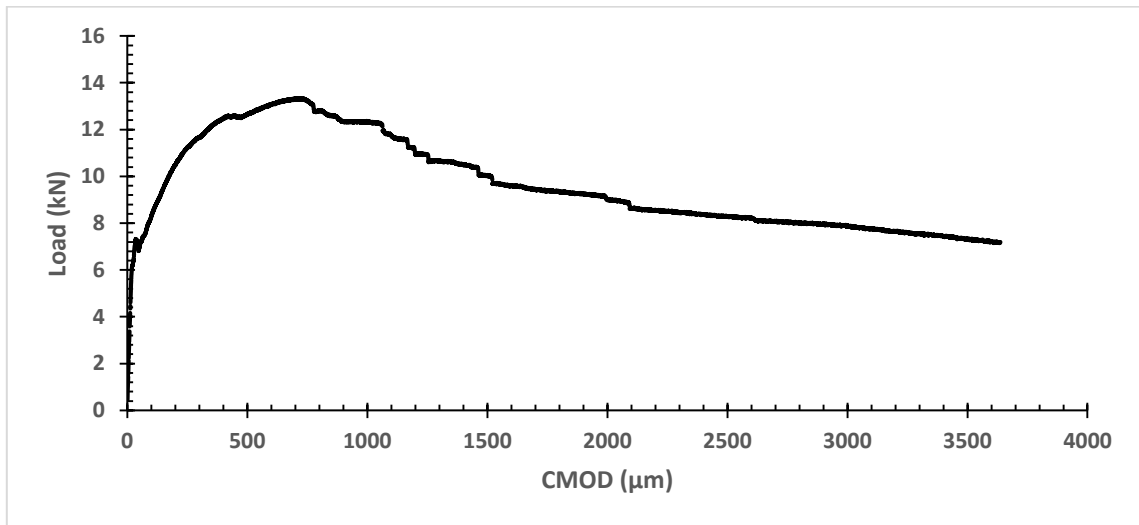
Σχήμα Β² Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCSF30-0.5.



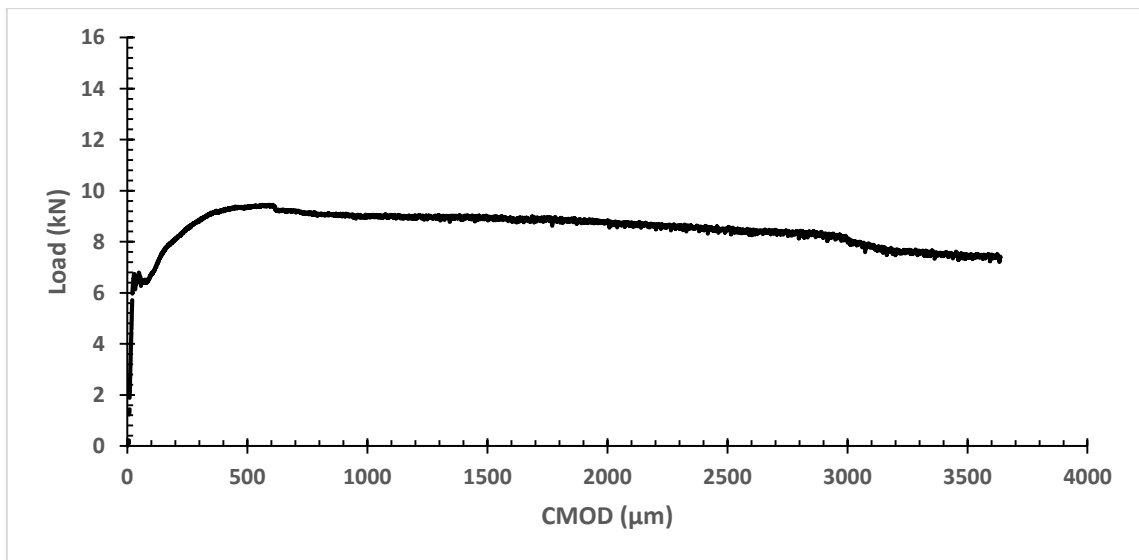
Σχήμα Β³ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCSF30-1.



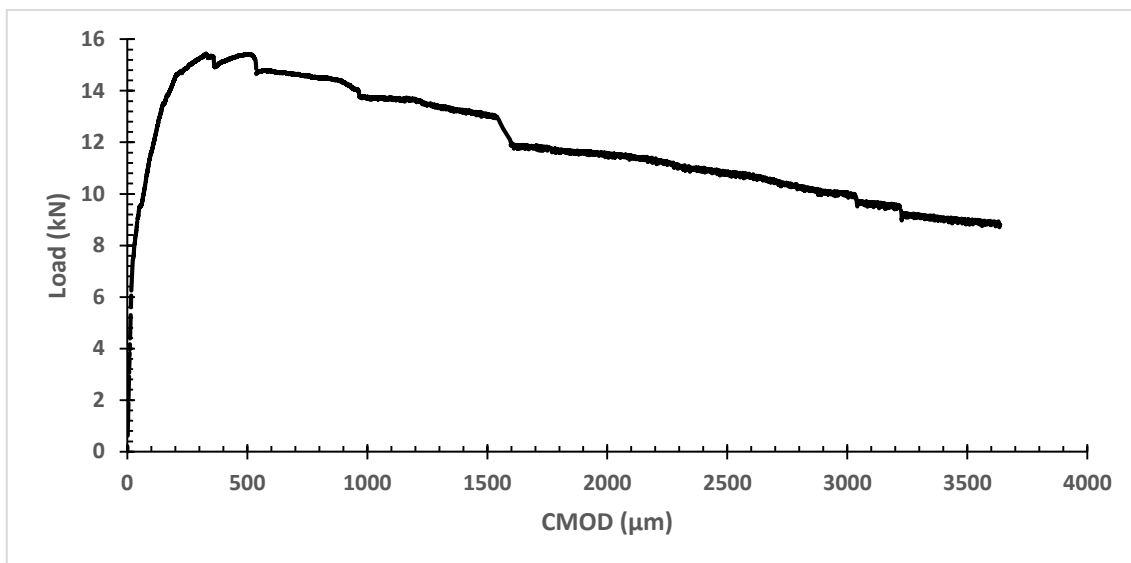
Σχήμα Β⁴ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCSF36-0.5.



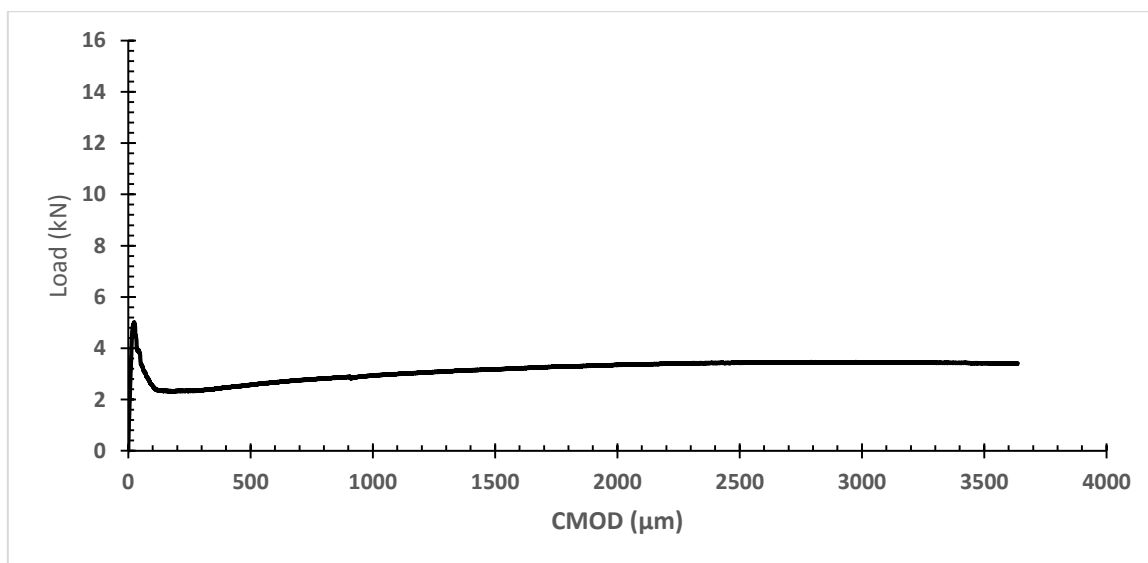
Σχήμα Β⁵ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCSF36-1.



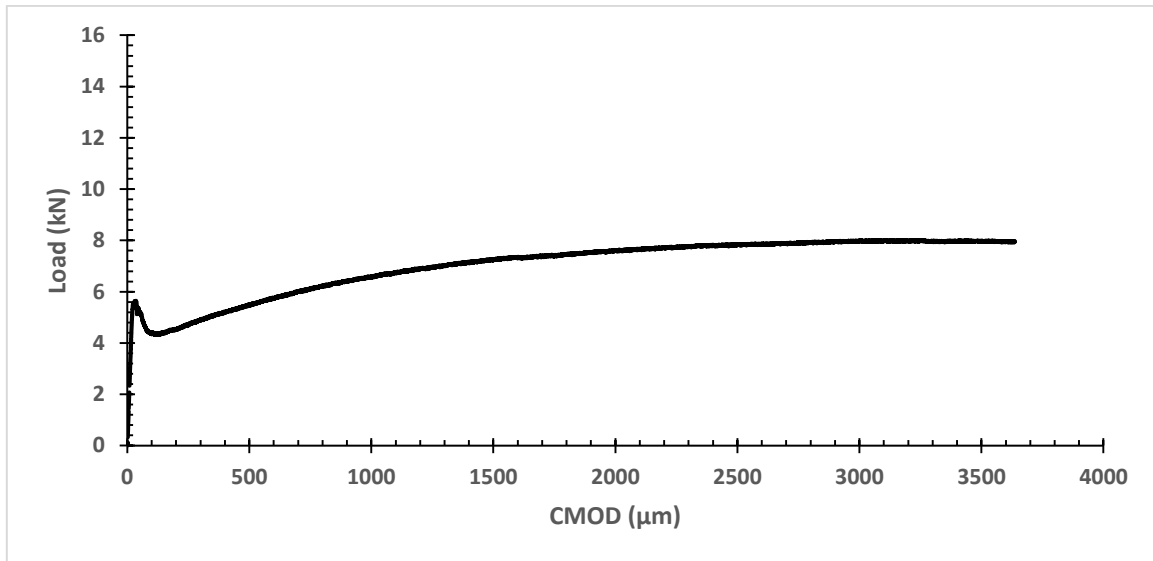
Σχήμα Β⁶ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCSF60-0.5.



Σχήμα Β⁷ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCSF60-1.

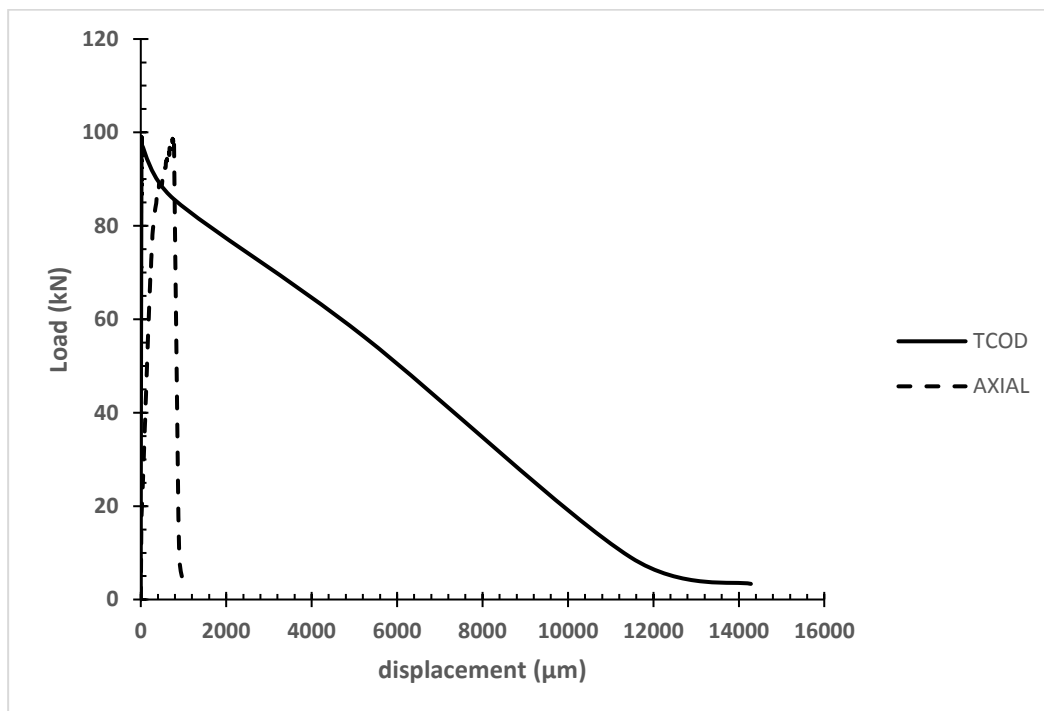


Σχήμα Β⁸ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCPF-0.5.

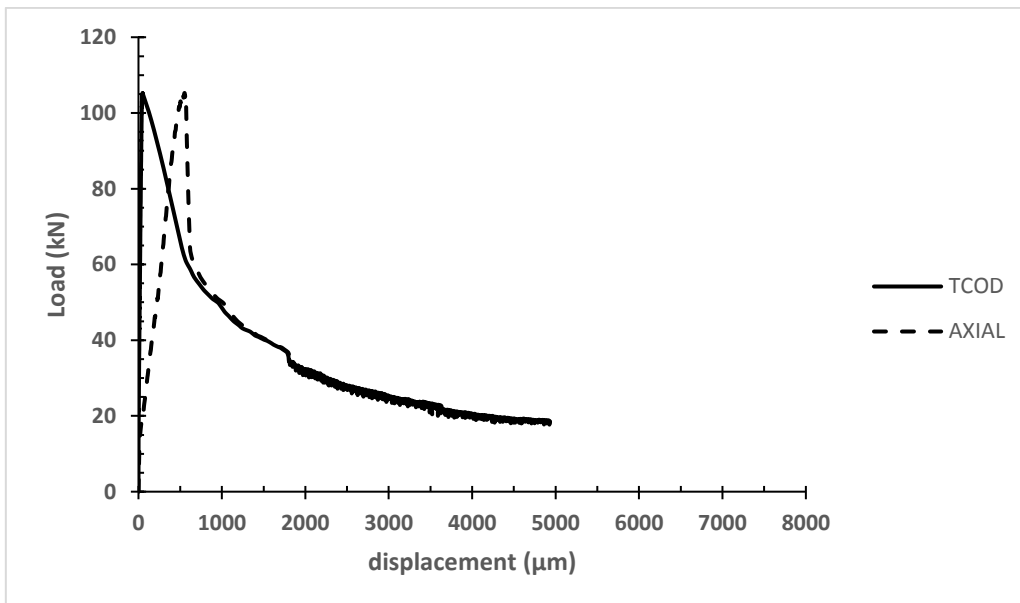


Σχήμα Β⁹ Καμπύλη Φορτίου – CMOD LCPF-1.

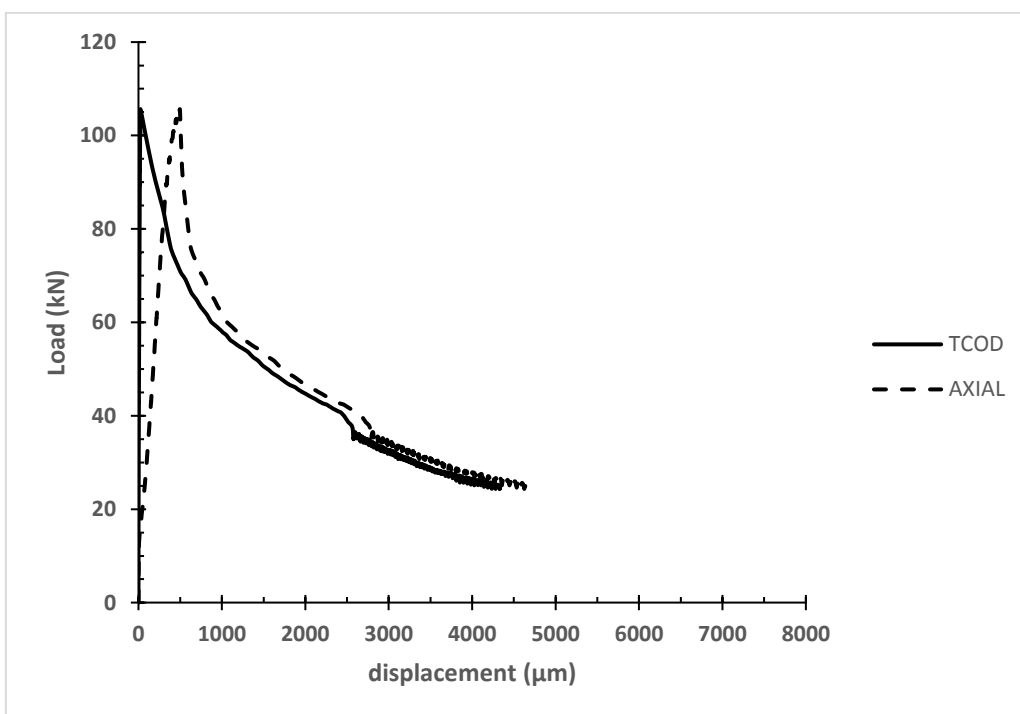
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ Διαγράμματα φορτίου - κατακόρυφης και φορτίου - οριζόντιας μετατόπισης δοκιμής Barcelona



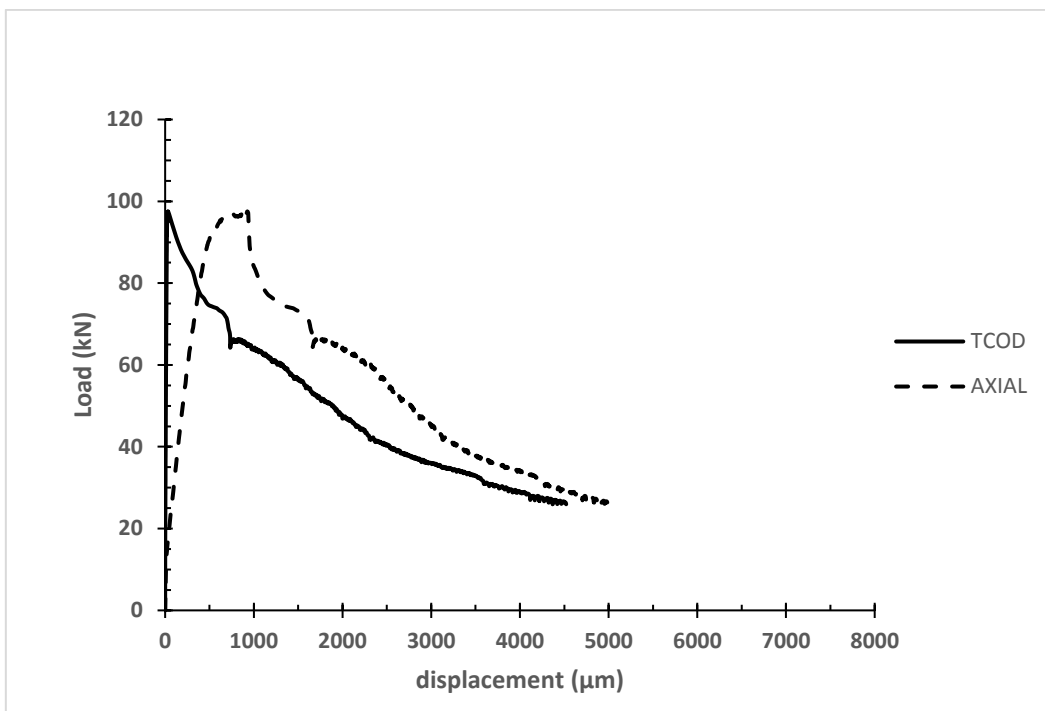
Σχήμα Γ¹ Σύνθεση LC1.



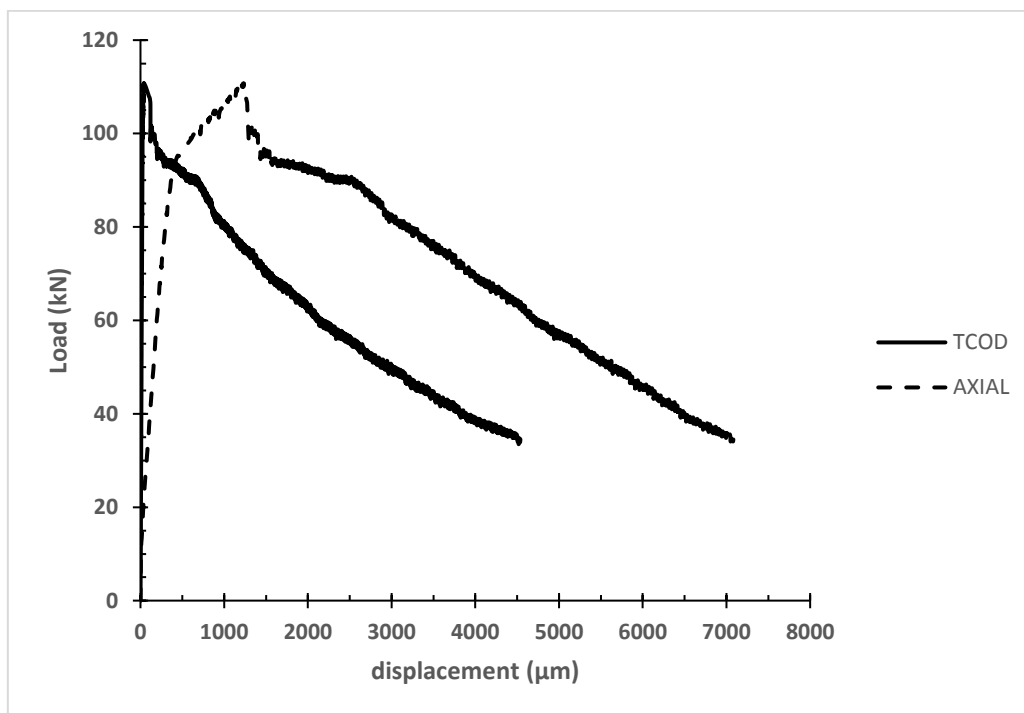
Σχήμα Γ² Σύνθεση LCSF30-0.5.



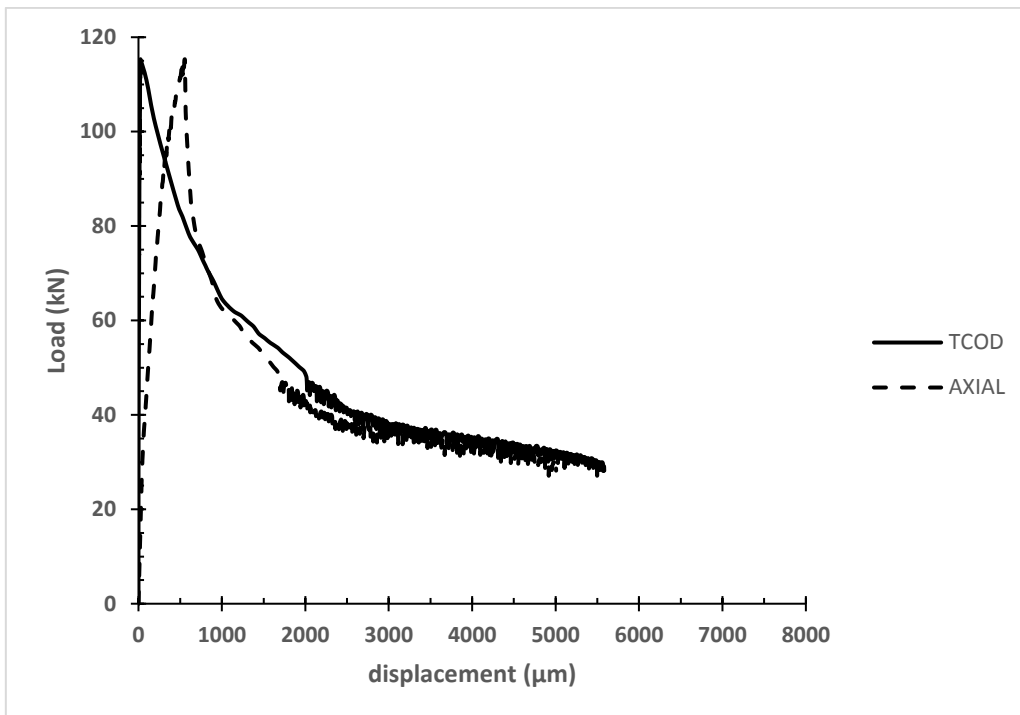
Σχήμα Γ³ Σύνθεση LCSF30-1.



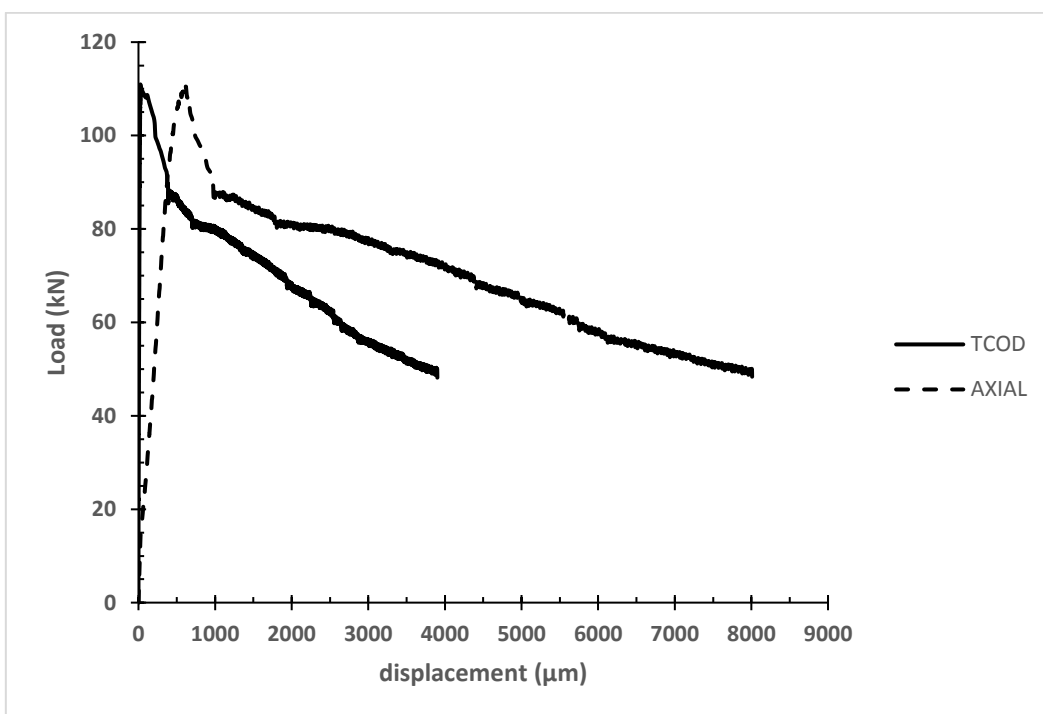
Σχήμα Γ⁴ Σύνθεση LCSF36-0.5.



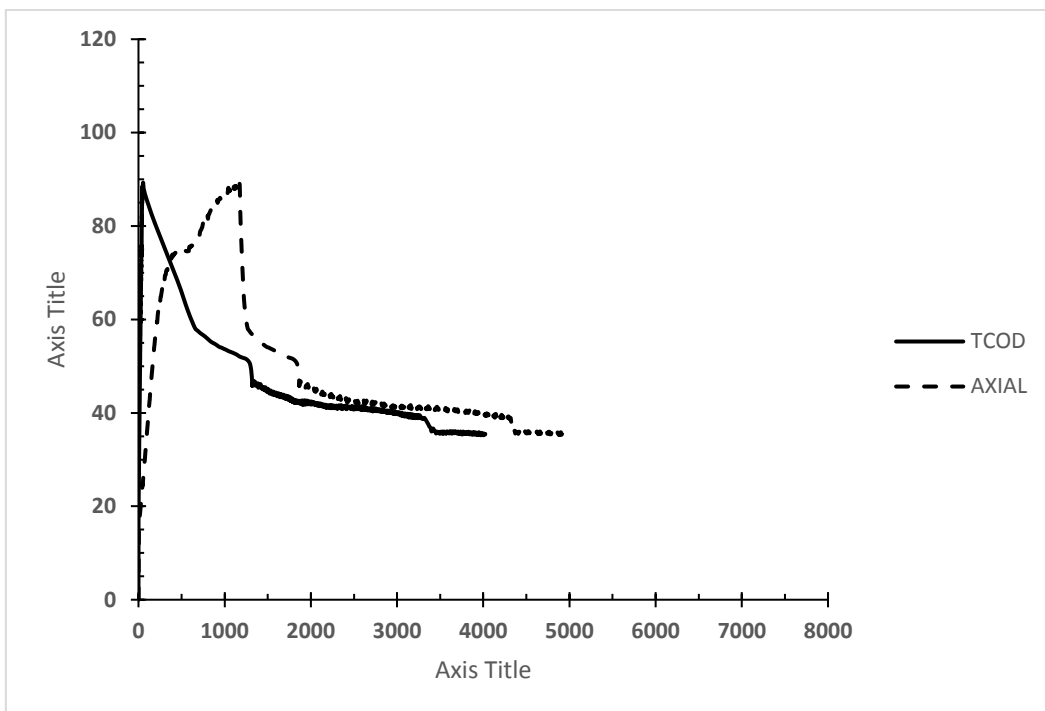
Σχήμα Γ⁵ Σύνθεση LCSF36-1.



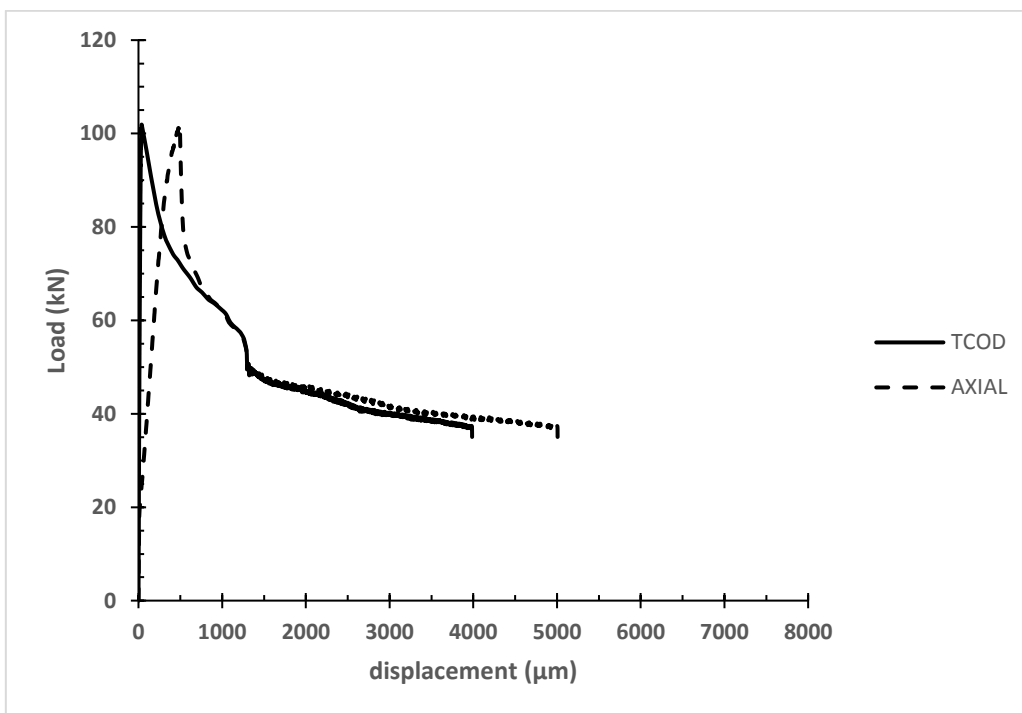
Σχήμα Γ⁶ Σύνθεση LCSF60-0.5.



Σχήμα Γ⁷ Σύνθεση LCSF60-1.



Σχήμα Γ⁸ Σύνθεση LCPF-0.5.



Σχήμα Γ⁹ Σύνθεση LCPF-1.