



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΔΗΜΗΤΡΑ ΣΟΥΛΙΩΤΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2014



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΥΛΙΚΩΝ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΙΝΩΝ ΣΤΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΔΗΜΗΤΡΑ ΣΟΥΛΙΩΤΗ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2014

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών της Σχολής Θετικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2».

Ημερομηνία αίτησης της κ. ΣΟΥΛΙΩΤΗ ΔΗΜΗΤΡΑΣ: 23/11/2005

Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 01/12/2005

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων: Ματίκας Θεόδωρος, Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι.

Μέλη: Χαραλαμπόπουλος Αντώνιος, Αν. Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ
Χαραλαμπάκης Νικόλαος, Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 01/12/2005

«Μελέτη της Μηχανικής Συμπεριφοράς Οπλισμένου Σκυροδέματος με τη χρήση Πρωτότυπων Δοκιμίων Σύνθετων Υλικών»

Αλλαγή τίτλου: 27/3/2007

«Μελέτη της Επίδρασης των Ινών στη Μηχανική Συμπεριφορά του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος»

ΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ : 20/12/2012

| | |
|------------------------------------|------------------------------------------------|
| Ματίκας Θεόδωρος | Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι. |
| Χαραλαμπόπουλος Αντώνιος | Αν. Καθηγητής ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ |
| Χαραλαμπάκης Νικόλαος | Καθηγητής, Τμ. Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ |
| Μοροπούλου Αντωνία | Καθηγήτρια Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ |
| Παϊπέτης Αλκιβιάδης | Αν. Καθηγητής Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι. |
| Μπάρκουλα Νεκταρία-Μαριάνθη | Επ. Καθηγήτρια Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι. |
| Δάσιος Κωνσταντίνος | Λέκτορας Τ.Μ.Ε.Υ. του Π.Ι. |

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 20/5/2013

Ο Πρόεδρος του Τμήματος

**Καρακασίδης Μιχαήλ
Καθηγητής**

Η Γραμματέας του Τμήματος



Ξανθή Τουτουτζόγλου

*Αφιερωμένο στη μικρή μου ανιψούλα,
Το πιο υπέροχο πλασματάκι στον κόσμο...*

Περίληψη

Στη σημερινή εποχή υπάρχει μία συνεχής ανάγκη για τη δημιουργία και ανάπτυξη νέων υλικών. Επιπλέον, η ενίσχυση και η διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους αποτελεί επιτακτική ανάγκη του σύγχρονου τεχνολογικού κόσμου, λόγω των αυξημένων απαιτήσεων των εξελιγμένων και σύνθετων εφαρμογών. Για το λόγο αυτό, υλικά που είναι ευρέως διαδεδομένα στον κατασκευαστικό τομέα, όπως το σκυρόδεμα, συνεχίζουν να αναπτύσσονται και να εξελίσσονται, ώστε να καλύπτουν τις όλο και αυξανόμενες ανάγκες και εφαρμογές. Η ανάπτυξη, λοιπόν, του ινοπλισμένου σκυροδέματος καλύπτει αρκετές απαιτήσεις των σύγχρονων κατασκευών, καθώς οι ίνες βελτιώνουν κάποιες από τις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Αντικείμενο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελεί η μελέτη της επίδρασης των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Ως εκ τούτου, διερευνήθηκε η διεπιφάνεια ίνας/μήτρας και μελετήθηκαν οι θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, η μελέτη της διεπιφάνειας ίνας/μήτρας που πραγματοποιήθηκε μέσω δοκιμών εξόλκευσης, αφορά την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών, της χημικής τροποποίησης με φωσφορικό ψευδάργυρο σε ίνες διαφορετικών γεωμετριών και της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης.

Σχετικά με τη διερεύνηση των θλιπτικών και καμπτικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος μελετήθηκε η επιρροή της ποιότητας της μήτρας μέσω της διαφοροποίησης του λόγου N/T και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες ιδιότητες του άοπλου σκυροδέματος. Επίσης, ερευνήθηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών, όπως το μήκος, η διάμετρος, το σχήμα και ο λόγος μορφής τους στις συγκεκριμένες ιδιότητες. Επιπλέον, η κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών, καθώς και η χημική τροποποίησή τους αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης αναφορικά με τις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η επίδραση των δύο συγκεκριμένων παραγόντων αποτιμήθηκε και με τη μη καταστροφική μέθοδο της Ακουστικής Εκπομπής. Επιπρόσθετα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών συνδυάστηκαν σε μία παράμετρο, την επιφάνεια επαφής, η οποία συσχετίστηκε με την κανονικοποιημένη παραμένουσα αντοχή και την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα. Βάσει αυτού μπορεί να εξαχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο για τη βέλτιστη δυσθραυστότητα.

Abstract

Nowadays, there is a continuing need for the production and development of new materials. Furthermore, the enhancement and investigation of mechanical properties comprises an imperative need for the modern technological world, due to the increased demands of sophisticated and complex applications. For this reason, materials, such as concrete, that are widely used in construction are continuously developed and evolved to fulfill the increasing demands and applications. Thus, the development of fiber reinforced concrete covers several requirements of modern construction, due to the fact that some of the mechanical properties of concrete are improved by the addition of fibers.

The objective of this thesis is the study of the effect of fibers on the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete. Therefore, the fiber/matrix interface was investigated and the compressive and flexural properties of fiber reinforced concrete were studied. Specifically, the fiber/matrix interface was studied by fiber pullout testing in order to investigate the influence of fiber geometrical characteristics, the effect of zinc phosphate chemical treatment of fibers with different geometry, and the impact of fiber volume fraction on the pullout behavior.

Concerning the compressive and flexural properties of fiber reinforced concrete, the influence of matrix quality, through modification of the w/c ratio was studied and compared with the properties of plain concrete. The effect of the fiber geometrical characteristics, such as length, diameter, shape and aspect ratio on these properties was also investigated. Moreover, the fiber volume fraction and the chemical treatment have been studied with respect to compressive and flexural properties of fiber reinforced concrete. The effect of these two factors was evaluated by the nondestructive method of Acoustic Emission. Additionally, the geometrical characteristics of the treated and as received fibers were unified into one parameter, the contact area, which is associated with the normalized residual strength and normalized toughness. This enables the determination of an optimal combination of contact area and number of fibers in the specimen for obtaining an optimum value of toughness.

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή αποτελεί ένα συλλογικό έργο και για το λόγο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα όλους όσους πίστεψαν σε εμένα και με βοήθησαν για την περάτωσή της.

Θα ήθελα, λοιπόν, να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Ματίκα Θεόδωρο, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων, για τη βοήθειά του και την αμέριστη αγάπη με την οποία στήριξε την παρούσα διατριβή όλα αυτά τα χρόνια. Η συμβολή του ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης έρευνας, μέσω της διαρκούς ενθάρρυνσής του, της συνεισφοράς των γνώσεων του και της συνεχούς καθοδήγησής του. Η διαρκής γέννηση ερευνητικών ιδεών και η «ακούραστη» ανάγκη του για έρευνα αποτέλεσαν και αποτελούν έμπνευση για εμένα.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Χαραλαμπόπουλο Αντώνιο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. του Ε.Μ.Π. για το αμέριστο ενδιαφέρον που έδειξε και την υποστήριξή του όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και την τιμή που μου έκανε να είναι μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χαραλαμπάκη Νικόλαο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Α.Π.Θ. για την υποστήριξη του και τη βοήθειά του σε όλα τα στάδια της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Με τιμά ιδιαίτερα το γεγονός ότι αποτελεί μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου.

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω εξαιρετικά την κ. Μπάρκουλα Νεκταρία-Μαριάνθη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για τη σημαντικότερη συνεισφορά της και την άριστη συνεργασία μας όλα αυτά τα χρόνια. Τόσο με τις γνώσεις της και την εμπειρία της, όσο και με την υπομονή της και την αγάπη που μου πρόσφερε ανεπιφύλακτα από την πρώτη στιγμή της γνωριμίας μας, με βοήθησε να ξεπεράσω τις δυσκολίες και να φέρω εις πέρας αυτή τη διατριβή.

Θα ήταν μεγάλη παράλειψη μου να μην ευχαριστήσω ιδιαίτερώς τον κ. Παϊπέτη Αλκιβιάδη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων, τόσο για τις πολύτιμες υποδείξεις που μου παρείχε, όσο και για την άψογη συνεργασία που είχαμε, καθώς και για τη γενικότερη συμβολή του στην παρούσα διδακτορική διατριβή όλα αυτά τα χρόνια.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Μοροπούλου Αντωνία, Καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και Αντιπρύτανη Ακαδημαϊκών Υποθέσεων και Προσωπικού του Ε.Μ.Π., καθώς και τον κ. Δάσιο Κωνσταντίνο, Λέκτορα του Τμήματος Μηχανικών Επιστήμης Υλικών του Παν/μίου Ιωαννίνων για την υποστήριξή τους και τη συμβολή τους στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

Ευχαριστώ, επίσης, πολύ τον κ. Αγγέλη Δημήτριο, Ερευνητή του Vrije Universiteit Brussel (VUB) για τη συμβολή του και τη συνεργασία που είχαμε σχετικά με τα πειράματα της μεθόδου της Ακουστικής Εκπομπής.

Δεν βρίσκω τα κατάλληλα λόγια να ευχαριστήσω τον κ. Ευάγγελο Κορδάτο, Διδάκτορα του ΤΜΕΥ, για τη σημαντική του συνεισφορά τόσα χρόνια. Τόσο με την ερευνητική του βοήθεια, αλλά και σημαντικότερα με την ψυχολογική του υποστήριξη συνέβαλλε στο να βρώ τη δύναμη να ολοκληρώσω την παρούσα διατριβή. Η συνάντησή μας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα γεγονότα της ζωής μου.

Καθοριστική ήταν επίσης η συνεισφορά του Κουτσιανόπουλου Φώτη, Υποψήφιου Διδάκτορα του Τμήματος Χημείας του Παν/μίου Ιωαννίνων, σχετικά με τη χημική τροποποίηση των ινών και θα ήθελα να τον ευχαριστήσω γι' αυτό ιδιαίτερα.

Να ευχαριστήσω πολύ, επίσης, τη GEOTEST και ιδιαίτερα τον κ. Ζωΐδη Νικόλαο, τόσο για τις πολύτιμες πρακτικές συμβουλές όσο και για τη βοήθεια όποτε τη χρειάστηκα, καθώς ένα μέρος των πειραμάτων έχει πραγματοποιηθεί στο εργαστήριό του.

Επίσης, ευχαριστώ πολύ τις εταιρείες CHIRCU PROD-IMPEX COMPANY SRL (Ρουμανία) για τις ίνες ($l/d= 62.5, 60, 50, 42.9, 41.7$), ΕΤΑΛ Α.Ε. για τις ίνες, TITAN Α.Ε. για το τσιμέντο, ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΛΑΤΟΜΕΙΑ Α.Ε. για τα αδρανή και BASF ΕΛΛΑΣ Α.Β.Ε.Ε για τον υπερρευστοποιητή που προσέφεραν.

Ευχαριστώ θερμά το Δημήτρη Έξαρχο, Υποψήφιο Διδάκτορα του ΤΜΕΥ για τη βοήθεια και την ψυχολογική ενίσχυση με το δικό του εναλλακτικό τρόπο, καθώς και τη Θεοδότη Κορδάτου, Υποψήφια Διδάκτορα του ΤΜΕΥ που με άντεξε και με βοήθησε πολύ το τελευταίο διάστημα.

Επίσης, δεν μπορώ να ξεχάσω τους συνεργάτες και φίλους Τάσο Μπαλάσκα, Θύμιο Τάτση, Σωτήρη Γραμματικό, Γιώργο Γκίκα, Δημήτρη Μυριούνη και Μιχάλη Ντόβα που με στήριξαν, καθώς και όλα τα μέλη του Εργαστηρίου Μηχανικής, Ευφυών Αισθητήρων και Μη Καταστροφικής Αξιολόγησης Υλικών για τη βοήθειά τους.

Ακόμη, δεν μπορώ να μην αναφέρω τη βοήθεια των φίλων μου που μου συμπαραστέκονται τόσα χρόνια είτε από κοντά είτε από πιο μακριά.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τον πατέρα μου Βασίλη, τη μητέρα μου Πηνελόπη και τα αδέρφια μου Ευαγγελία και Δημήτρη, για τη συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, η οποία εκτός από ψυχολογική και οικονομική, ήταν ακόμα και χειρωνακτική. Πρωτίστως όμως, θα ήθελα να ευχαριστήσω το πιο μικρό μέλος της οικογένειας μου, τη μικρή μου ανιψούλα και να της αφιερώσω αυτή τη διατριβή, διότι αν και μόνο λίγων μηνών κάθε χαμόγελό της μου έδινε δύναμη να συνεχίζω. Μακάρι μια μέρα να είναι περήφανη για τη θεία της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ | 35 |
| 1.1. Σκοπός της Διδακτορικής Διατριβής | 35 |
| 1.2. Ανάπτυξη της Εργασίας | 36 |
| 1.3. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου | 39 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ | 43 |
| 2.1. Σκυρόδεμα | 43 |
| 2.2. Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα | 44 |
| 2.2.1. Ιστορική αναδρομή | 44 |
| 2.2.2. Κατηγορίες ινών | 45 |
| 2.2.3. Εφαρμογές των ινών | 45 |
| 2.2.4. Ρόλος των ινών | 47 |
| 2.2.5. Σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα | 48 |
| 2.2.5.1. Σχήμα Ινών..... | 48 |
| 2.2.5.2. Λόγος Μορφής (<i>Aspect Ratio</i>) των Ινών | 49 |
| 2.2.5.3. Ποσοστό Όγκου Ινών | 49 |
| 2.2.6. Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος με ίνες χάλυβα | 50 |
| 2.2.6.1. Θλιπτική Αντοχή..... | 51 |
| 2.2.6.2. Εφελκυστική Αντοχή..... | 51 |
| 2.2.6.3. Διάτμηση και Στρέψη..... | 51 |
| 2.2.6.4. Κόπωση..... | 52 |
| 2.2.6.5. Καμπτική Αντοχή - Καμπτική Δυσθραυστότητα..... | 53 |
| 2.3. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου | 55 |
| | |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ ΙΝΑΣ/ΜΗΤΡΑΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ | 61 |
| 3.1. Στόχος – Αντικείμενο | 61 |
| 3.2. Εισαγωγή | 62 |
| 3.3. Μελέτη της Επίδρασης της Γεωμετρίας των Ινών και της Χημικής Τροποποίησης στη Συμπεριφορά Εξόλκευσης | 64 |
| 3.3.1. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων..... | 64 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.3.2. Συντήρηση των δοκιμίων | 68 |
| 3.3.3. Δοκιμές θλίψης..... | 68 |
| 3.3.3.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης..... | 68 |
| 3.3.3.2. Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης..... | 70 |
| 3.3.4. Δοκιμές εξόλκευσης..... | 70 |
| 3.3.4.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Εξόλκευσης..... | 70 |
| 3.3.4.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Εξόλκευσης..... | 73 |
| 3.4. Επίδραση του Οπλισμού της Μήτρας στη Συμπεριφορά Εξόλκευσης | 86 |
| 3.4.1. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων | 86 |
| 3.4.2. Συντήρηση των δοκιμίων | 88 |
| 3.4.3. Δοκιμές θλίψης | 88 |
| 3.4.3.1 Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης..... | 88 |
| 3.4.3.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης | 88 |
| 3.4.4 Δοκιμές εξόλκευσης..... | 89 |
| 3.4.4.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Εξόλκευσης | 89 |
| 3.4.4.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Εξόλκευσης..... | 89 |
| 3.5. Συμπεράσματα Κεφαλαίου | 93 |
| 3.6. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου..... | 95 |

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ..... 101

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος..... | 101 |
| 4.1.1. Στόχος – Αντικείμενο..... | 101 |
| 4.1.2. Εισαγωγή..... | 101 |
| 4.1.3. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων | 105 |
| 4.1.4. Συντήρηση των δοκιμίων | 108 |
| 4.1.5. Ιδιότητες νεπού σκυροδέματος | 109 |
| 4.1.6. Δοκιμές θλίψης..... | 110 |
| 4.1.6.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης..... | 110 |
| 4.1.6.2. Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης | 110 |
| 4.1.7. Δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων | 113 |
| 4.1.7.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Κάμψης..... | 113 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.7.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης | 119 |
| 4.1.8. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου | 130 |
| 4.1.9. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου | 131 |
| 4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος | 135 |
| 4.2.1. Στόχος – Αντικείμενο | 135 |
| 4.2.2. Εισαγωγή | 136 |
| 4.2.3. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων | 138 |
| 4.2.4. Συντήρηση των δοκιμίων | 140 |
| 4.2.5. Ιδιότητες νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος | 140 |
| 4.2.6. Δοκιμές θλίψης | 142 |
| 4.2.6.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης | 142 |
| 4.2.6.2. Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης | 142 |
| 4.2.7. Δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων | 144 |
| 4.2.7.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Κάμψης | 144 |
| 4.2.7.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης | 145 |
| 4.2.8. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου | 159 |
| 4.2.9. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου | 161 |
| 4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος | 165 |
| 4.3.1. Στόχος – Αντικείμενο | 165 |
| 4.3.2. Εισαγωγή | 166 |
| 4.3.3. Ίνες με l/d 33.3 και ποσοστά ενίσχυσης έως 1.5% | 169 |
| 4.3.3.1 Υλικά και Σύνθεση Δοκιμίων | 169 |
| 4.3.3.2. Συντήρηση των Δοκιμίων | 171 |
| 4.3.3.3. Ιδιότητες Νωπού Σκυροδέματος | 171 |
| 4.3.3.4. Θλιπτική Αντοχή | 173 |
| 4.3.3.4.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία θλίψης | 173 |
| 4.3.3.4.2. Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης | 173 |
| 4.3.3.5. Δοκιμές Κάμψης Τεσσάρων Σημείων | 175 |
| 4.3.3.5.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία δοκιμών κάμψης | 175 |
| 4.3.3.5.2. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης | 176 |
| 4.3.3.6. Ακουστική Εκπομπή | 184 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.3.6.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία Ακουστικής Εκπομπής | 184 |
| 4.3.3.6.2. Αποτελέσματα Ακουστικής Εκπομπής | 185 |
| 4.3.4. Ίνες κυματοειδείς l/d 42.9 και ευθείες l/d 62.5 με ποσοστά ενίσχυσης έως 2.5% | 188 |
| 4.3.4.1. Υλικά και Σύνθεση Δοκιμίων | 188 |
| 4.3.4.2. Συντήρηση των Δοκιμίων | 190 |
| 4.3.4.3. Ιδιότητες Νωπού Ινοπλισμένου Σκυροδέματος | 191 |
| 4.3.4.4. Θλιπτική Αντοχή | 192 |
| 4.3.4.4.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία θλίψης | 192 |
| 4.3.4.4.2. Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης | 192 |
| 4.3.4.5. Δοκιμές Κάμψης Τεσσάρων Σημείων | 195 |
| 4.3.4.5.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία δοκιμών κάμψης | 195 |
| 4.3.4.5.2. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης | 195 |
| 4.3.5. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου | 209 |
| 4.3.6. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου | 211 |
| 4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος..... | 217 |
| 4.4.1. Στόχος – Αντικείμενο..... | 217 |
| 4.4.2. Εισαγωγή..... | 218 |
| 4.4.3. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων | 221 |
| 4.4.4. Συντήρηση των δοκιμίων | 223 |
| 4.4.5. Ιδιότητες νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος με τροποποιημένες ίνες..... | 223 |
| 4.4.6. Δοκιμές θλίψης..... | 224 |
| 4.4.6.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης | 224 |
| 4.4.6.2. Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης..... | 225 |
| 4.4.7. Δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων | 227 |
| 4.4.7.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Κάμψης | 227 |
| 4.4.7.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης..... | 227 |
| 4.4.8. Ακουστική Εκπομπή | 239 |
| 4.4.8.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Ακουστικής Εκπομπής | 239 |
| 4.4.8.2. Αποτελέσματα Ακουστικής Εκπομπής | 239 |
| 4.4.9. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου | 242 |
| 4.4.10. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου | 244 |

| | |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 249 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ/ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ | 257 |
| 6.1. Λίστα Δημοσιεύσεων σε Επιστημονικά Περιοδικά..... | 257 |
| 6.2. Λίστα Δημοσιεύσεων/Ανακοινώσεων Συνεδρίων..... | 258 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ | 263 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 2.1. (α) Τυπικά είδη χαλύβδινων ινών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα, (β) Ίνες κλειστού βρόχου | 48 |
| Εικόνα 3.1. Ίνες α) ευθείες, β) κυματοειδείς, γ) με κεκαμένα άκρα | 66 |
| Εικόνα 3.2. Διαδικασία τροποποίησης ινών διαφόρων γεωμετριών | 67 |
| Εικόνα 3.3. Μηχανή θλίψης | 69 |
| Εικόνα 3.4. Δοκίμιο θλίψης | 69 |
| Εικόνα 3.5. Πειραματική διάταξη εμβάπτισης ινών | 71 |
| Εικόνα 3.6. Πειραματική διάταξη δοκιμής εξόλκευσης ινών | 71 |
| Εικόνα 3.7. Προσδιορισμός ενέργειας εξόλκευσης (G) | 72 |
| Εικόνα 3.8. Μέγιστα φορτία για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες | 74 |
| Εικόνα 3.9. Τυπικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών (α) U07.30, β) U05.30, (γ) H07.30, (δ) H06.30, (ε) H06.25, (στ) S04.25 | 75 |
| Εικόνα 3.10. Αύξηση του μέγιστου φορτίου λόγω της τροποποίησης σε σχέση με το μέγιστο φορτίο των μη τροποποιημένων ινών | 76 |
| Εικόνα 3.11. Μέγιστο φορτίο σε σχέση με τη διάμετρο τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών | 77 |
| Εικόνα 3.12. Μεταβολή του μέγιστου φορτίου σε σχέση με το μήκος εξόλκευσης ινών με διάμετρο 0.6 mm | 78 |
| Εικόνα 3.13. Διεπιφανειακή διατμητική αντοχή για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες | 79 |
| Εικόνα 3.14. Ενέργεια εξόλκευσης για όλα τα είδη των ινών | 80 |
| Εικόνα 3.15. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με τη διάμετρο των ινών | 80 |
| Εικόνα 3.16. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με μήκος εξόλκευσης ινών διαμέτρου 0.6 mm | 81 |
| Εικόνα 3.17. (α) Φορτίο εξόλκευσης σε σχέση με το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής ινών, (β) ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής ινών..... | 82 |
| Εικόνα 3.18. (α) Ευθεία ίνα, (β) ίνα με κεκαμένα άκρα, (γ) κυματοειδής ίνα, μετά τη δοκιμή εξόλκευσης | 83 |
| Εικόνα 3.19. Ίνα κεκαμένων άκρων (α) τροποποιημένη (x200), β) μη τροποποιημένη (x200), γ) τροποποιημένη (x500), δ) μη τροποποιημένη (x500), ε) τροποποιημένη (x1000), στ) μη τροποποιημένη (x1000) | 85 |
| Εικόνα 3.20. Νωπό ανάμιγμα με ευθείες ίνες 5.0% | 87 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 3.21. Μέγιστο φορτίο εξόλκευσης σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 90 |
| Εικόνα 3.22. Διεπιφανειακή διατμητική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 91 |
| Εικόνα 3.23. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 92 |
| Εικόνα 4.1.1. Σχέση μεταξύ του λόγου N/T και της διαπερατότητας | 102 |
| Εικόνα 4.1.2. Διαγραμματική απεικόνιση νωπής τσιμεντόπαστας με N/T 0.65 και 0.25 | 103 |
| Εικόνα 4.1.3. α) Κυματοειδείς ίνες λόγου μορφής 33.3 και β) ίνες με κεκαμμένα άκρα λόγου μορφής 40.0 | 107 |
| Εικόνα 4.1.4. Επίδραση του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή άοπλων και ινοπλισμένων σκυροδεμάτων | 111 |
| Εικόνα 4.1.5. Διαστάσεις δοκιμίου κάμψης τεσσάρων σημείων | 113 |
| Εικόνα 4.1.6. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης | 114 |
| Εικόνα 4.1.7. Σχηματική απεικόνιση φόρτισης δοκιμής κάμψης | 115 |
| Εικόνα 4.1.8. Συσκευή δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων | 115 |
| Εικόνα 4.1.9. Γραφική απεικόνιση καμπτικών παραμέτρων όταν $P_p = P_1$ | 117 |
| Εικόνα 4.1.10. Γραφική απεικόνιση καμπτικών παραμέτρων όταν $P_p > P_1$ | 117 |
| Εικόνα 4.1.11. Προσδιορισμός δυσθραυστότητας $T_{100,2.0}$ | 119 |
| Εικόνα 4.1.12. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με λόγο N/T (α) 0.5, (β) 0.6, (γ) 0.7 | 121 |
| Εικόνα 4.1.13. Επίδραση του λόγου N/T στη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής του ινοπλισμένου και του άοπλου σκυροδέματος | 122 |
| Εικόνα 4.1.14. Επίδραση του λόγου N/T στις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ | 126 |
| Εικόνα 4.1.15. Επίδραση του λόγου N/T στη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ | 127 |
| Εικόνα 4.1.16. Δοκίμια με λόγο N/T = 0.7 μετά τη δοκιμή κάμψης α) χωρίς ίνες, και ινοπλισμένα με ίνες β) με κεκαμμένα άκρα και γ) με κυματοειδείς | 129 |
| Εικόνα 4.2.1. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων 1.0% κ.ό σκυροδεμάτων | 143 |
| Εικόνα 4.2.2. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης | 144 |
| Εικόνα 4.2.3. Συσκευή δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων | 145 |
| Εικόνα 4.2.4. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με ίνες 1.0% (α) U07.30, (β) U05.30, (γ) H06.30, (δ) H07.30, (ε) H06.25 και (στ) S04.25 | 146 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 4.2.5. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και μέγιστη καμπτική αντοχή για τα 1.0% ινοπλισμένα αναμίγματα | 148 |
| Εικόνα 4.2.6. Παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με το μήκος των ινών | 149 |
| Εικόνα 4.2.7. Παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με τη διάμετρο των ινών | 150 |
| Εικόνα 4.2.8. Παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με το λόγο μορφής των ινών | 151 |
| Εικόνα 4.2.9. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με το μήκος των ινών | 152 |
| Εικόνα 4.2.10. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με τη διάμετρο των ινών | 153 |
| Εικόνα 4.2.11. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με το λόγο μορφής των ινών | 154 |
| Εικόνα 4.2.12. Επιφάνεια επαφής ινών σε σχέση με τους κανονικοποιημένους συντελεστές $T_{100,2.0}$, $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ | 156 |
| Εικόνα 4.2.13. Ενέργεια εξόλκευσης ινών σε σχέση με την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ | 156 |
| Εικόνα 4.2.14. Δοκίμια μετά τη δοκιμή κάμψης με α) ευθείες, β) κεκαμμένα άκρα, γ) κυματοειδείς ίνες | 158 |
| Εικόνα 4.3.1. Μηχανή θλίψης | 173 |
| Εικόνα 4.3.2. Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων με 0.0% - 1.5% ίνες | 174 |
| Εικόνα 4.3.3. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης | 176 |
| Εικόνα 4.3.4. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για το άοπλο σκυρόδεμα και τα σκυροδέματα με 0.5%, 1.0%, 1.5% κυματοειδείς ίνες | 177 |
| Εικόνα 4.3.5. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 179 |
| Εικόνα 4.3.6. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,0.50}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 180 |
| Εικόνα 4.3.7. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 181 |
| Εικόνα 4.3.8. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 182 |
| Εικόνα 4.3.9. Δοκίμια μετά τη δοκιμή κάμψης άοπλου σκυροδέματος (α) και κυματοειδείς ίνες σε ποσοστό β) 0.5%, γ) 1.0%, δ) 1.5% | 183 |
| Εικόνα 4.3.10. Παράμετροι Ακουστικής Εκπομπής | 185 |
| Εικόνα 4.3.11. Διαγράμματα συσσωρευμένων σημάτων ακουστικής εκπομπής και φορτίου σε σχέση με το χρόνο για (α) 1.5% ίνες και (β) άοπλο σκυρόδεμα | 186 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 4.3.12. Συνολικός αριθμός των σημάτων της ΑΕ σε σχέση (α) με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών και (β) με την καμπτική δυσθραυστότητα | 186 |
| Εικόνα 4.3.13. Διάγραμμα μέσης τιμής RA σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 187 |
| Εικόνα 4.3.14. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με 0.5 - 2.5 % ίνες | 194 |
| Εικόνα 4.3.15. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με ευθείες ίνες 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% | 196 |
| Εικόνα 4.3.16. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με κυματοειδείς ίνες 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% | 197 |
| Εικόνα 4.3.17. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 201 |
| Εικόνα 4.3.18. Μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 201 |
| Εικόνα 4.3.19. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,0.50}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 203 |
| Εικόνα 4.3.20. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 203 |
| Εικόνα 4.3.21. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών | 205 |
| Εικόνα 4.3.22. Δοκίμια μετά τη δοκιμή κάμψης με ευθείες ίνες σε ποσοστό α) 0.5%, γ) 1.0%, ε) 1.5%, ζ) 2.0%, θ) 2.5% και κυματοειδείς ίνες σε ποσοστό β) 0.5%, δ) 1.0%, στ) 1.5%, η) 2.0%, ι) 2.5% | 207 |
| Εικόνα 4.3.23. $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα όλων των γεωμετριών των ινών | 208 |
| Εικόνα 4.4.1. Θλιπτική αντοχή τροποποιημένων ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων | 226 |
| Εικόνα 4.4.2. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με τροποποιημένες ίνες 1.0% (α) cU07.30, (β) cU05.30, (γ) cH06.30, (δ) cH07.30, (ε) cH06.25, (στ) cS04.25 | 228 |
| Εικόνα 4.4.3. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής για τα αναμίγματα τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών | 230 |
| Εικόνα 4.4.4. Μέγιστη καμπτική αντοχή για τα αναμίγματα τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών | 231 |
| Εικόνα 4.4.5. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,0.50}$ σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες | 232 |
| Εικόνα 4.4.6. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$ σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες | 232 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 4.4.7. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες | 233 |
| Εικόνα 4.4.8. Επιφάνεια επαφής τροποποιημένων ινών σε σχέση με τους κανονικοποιημένους συντελεστές $T_{100,2.0}$, $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ | 236 |
| Εικόνα 4.4.9. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες | 236 |
| Εικόνα 4.4.10. Δοκίμια μετά από τη δοκιμή κάμψης με α) ευθείες, β) κεκαμμένα άκρα, γ) κυματοειδείς τροποποιημένες ίνες | 238 |
| Εικόνα 4.4.11. Παράμετρος RA σε σχέση με το χρόνο για (α) ευθείες και (β) κυματοειδείς ίνες | 240 |
| Εικόνα 4.4.12. Παράμετρος RA για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες διαφορετικής γεωμετρίας για τη χρονική περίοδο μετά τη ρωγμάτωση..... | 241 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 2.1. Ποσοστά όγκου ινών για τυπικά ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο | 50 |
| Πίνακας 3.1. Κωδικοποίηση δοκιμών και ιδιότητες ινών | 65 |
| Πίνακας 3.2. Αναλογίες και ιδιότητες αναμίγματος | 68 |
| Πίνακας 3.3. Θλιπτική αντοχή | 70 |
| Πίνακας 3.4. Αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης μη τροποποιημένων ινών | 73 |
| Πίνακας 3.5. Αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης τροποποιημένων ινών | 73 |
| Πίνακας 3.6. Κωδικοποίηση δοκιμών και ιδιότητες ινών | 86 |
| Πίνακας 3.7. Αναλογίες και ιδιότητες αναμίγματος | 87 |
| Πίνακας 3.8. Θλιπτική αντοχή | 88 |
| Πίνακας 3.9. Αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης | 89 |
| Πίνακας 4.1.1. Κωδικοποίηση δοκιμών και χαρακτηριστικά ινών | 106 |
| Πίνακας 4.1.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3) | 108 |
| Πίνακας 4.1.3. Αποτελέσματα δοκιμών νωπών σκυροδεμάτων | 109 |
| Πίνακας 4.1.4. Επίδραση του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή και συσχέτιση με την % μεταβολή από την τιμή αναφοράς | 112 |
| Πίνακας 4.1.5. Επίδραση του λόγου N/T στη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και συσχέτιση με την % μεταβολή από την τιμή αναφοράς | 123 |
| Πίνακας 4.1.6. Επίδραση του λόγου N/T στις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ | 125 |
| Πίνακας 4.1.7. Επίδραση του λόγου N/T στη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ και συσχέτιση με την % μεταβολή από την τιμή αναφοράς | 128 |
| Πίνακας 4.2.1. Κωδικοποίηση δοκιμών και ιδιότητες ινών | 138 |
| Πίνακας 4.2.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3) | 139 |
| Πίνακας 4.2.3. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη | 140 |
| Πίνακας 4.2.4. Αποτελέσματα δοκιμών νωπών ινοπλισμένων σκυροδεμάτων | 141 |
| Πίνακας 4.2.5. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων | 142 |
| Πίνακας 4.2.6. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με 1.0% κ.ό. ίνες | 147 |
| Πίνακας 4.3.1. Κωδικοποίηση και ιδιότητες ινών | 169 |
| Πίνακας 4.3.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3) | 170 |
| Πίνακας 4.3.3. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη | 171 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 4.3.4. Ιδιότητες νωπών σκυροδεμάτων με ίνες διαφορετικών ποσοτήτων | 172 |
| Πίνακας 4.3.5. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων διαφορετικής κατ' όγκον περιεκτικότητας ινών | 174 |
| Πίνακας 4.3.6. Καμπτικές ιδιότητες άοπλου σκυροδέματος και σκυροδεμάτων με κυματοειδείς ίνες | 178 |
| Πίνακας 4.3.7. Κωδικοποίηση και ιδιότητες ινών | 188 |
| Πίνακας 4.3.8. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3) | 189 |
| Πίνακας 4.3.9. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη | 190 |
| Πίνακας 4.3.10. Ιδιότητες νωπών σκυροδεμάτων με ίνες διαφορετικών ποσοτήτων | 191 |
| Πίνακας 4.3.11. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων διαφορετικής κατ' όγκον περιεκτικότητας ινών | 193 |
| Πίνακας 4.3.12. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με ευθείες ίνες | 198 |
| Πίνακας 4.3.13. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με κυματοειδείς ίνες | 199 |
| Πίνακας 4.4.1. Κωδικοποίηση δοκιμών και ιδιότητες ινών | 221 |
| Πίνακας 4.4.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3) | 222 |
| Πίνακας 4.4.3. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη | 223 |
| Πίνακας 4.4.4. Αποτελέσματα δοκιμών νωπών ινοπλισμένων σκυροδεμάτων | 224 |
| Πίνακας 4.4.5. Θλιπτική αντοχή τροποποιημένων ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων | 225 |
| Πίνακας 4.4.6. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με 1.0% κ.ό. τροποποιημένες ίνες | 229 |

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η δημιουργία και ανάπτυξη νέων υλικών, καθώς και η ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων τους αποτελεί μία συνεχή ανάγκη του σημερινού τεχνολογικού κόσμου. Αναπτύσσονται, λοιπόν, σε όλους τους τομείς καινοτόμα υλικά που βελτιώνουν μία ή και περισσότερες μηχανικές ιδιότητες των ήδη υπάρχουσών υλικών καλύπτοντας τις όλο και αυξανόμενες ανάγκες και εφαρμογές.

Το σκυρόδεμα είναι ευρέως γνωστό ότι χρησιμοποιείται πολλά χρόνια ως κατασκευαστικό υλικό. Όμως, το συμβατικό σκυρόδεμα εμφανίζει αδυναμίες σχετικά με την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζουν οι πιο εξελιγμένες κατασκευές της σημερινής εποχής. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί ειδικοί τύποι σκυροδέματος, όπως είναι το ινοπλισμένο σκυρόδεμα [1]. Σημαντική έρευνα πραγματοποιείται για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα σε όλο τον κόσμο, ενώ το βιομηχανικό ενδιαφέρον αποδεικνύεται από τις συνεχείς και νέες εξελίξεις στα ινοπλισμένα κατασκευαστικά υλικά. Σχετικά με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα, όλο και περισσότερες εφαρμογές γίνονται αποδεκτές από τους μηχανικούς, καθώς αναπτύσσεται περαιτέρω η έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο [2]. Ο κύριος ρόλος των ινών είναι να ελέγξουν τη ρωγμάτωση και να διαφοροποιήσουν την ψαθυρή συμπεριφορά του σκυροδέματος προσδίδοντας του ολκιμότητα μετά τη ρωγμάτωση, καθώς έχουν τη δυνατότητα να γεφυρώνουν τις ρωγμές [3].

1.1. Σκοπός της Διδακτορικής Διατριβής

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης των χαλύβδινων ινών στις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Για να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος σκοπός, μελετώνται η διεπιφάνεια ίνας/μήτρας, καθώς και οι θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Σχετικά με τη μελέτη της διεπιφάνειας μεταξύ της χαλύβδινης ίνας και της μήτρας κονιάματος στόχο αποτελεί η έρευνα της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας, αλλά και η διερεύνηση της επίδρασης της χημικής τροποποίησης σε ίνες διαφορετικών διαμέτρων, μηκών εξόλκευσης και σχημάτων.

Επιπλέον στόχο αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης. Επίσης, αναφορικά με τις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, στόχος είναι η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων, όπως η ποιότητα της μήτρας, μέσω της διαφοροποίησης του λόγου N/T, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών, καθώς και της χημικής τροποποίησης τους.

1.2. Ανάπτυξη της Εργασίας

Συνολικά, η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από έξι Κεφάλαια και το Παράρτημα.

Στο πρώτο Κεφάλαιο παρατίθεται μία εισαγωγική προσέγγιση σχετικά με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Επιπλέον, παρουσιάζεται ο σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής και αναφέρεται με συντομία το αντικείμενο που πραγματεύεται και μελετάται σε κάθε Κεφάλαιό της ξεχωριστά.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρεται ο ορισμός του σκυροδέματος, η ιστορική του αναδρομή, κάποιοι από τους βασικούς λόγους που το καθιστούν το κυριότερο κατασκευαστικό υλικό, καθώς και κάποιες από τις αδυναμίες του. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται εκτεταμένη αναφορά στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η ιστορική του αναδρομή, οι κατηγορίες και οι εφαρμογές των ινών, καθώς και ο ρόλος τους. Λόγω του γεγονότος ότι το βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής αφορά το σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα, αναφέρονται βασικά σχήματα, λόγοι μορφής και ποσοστά κ.ό. ινών. Επιπλέον, αναλύεται η επιρροή των χαλύβδινων ινών σε κάποιες από τις σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Στο Κεφάλαιο 3 μελετάται η διεπιφάνεια μεταξύ χαλύβδινης ίνας και μήτρας κονιάματος. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιούνται δοκιμές εξόλκευσης σε διαφορετικές γεωμετρίες ινών από μία μήτρα κονιάματος, τροποποιημένων με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου για να ενισχυθεί η συνάφεια ίνας / μήτρας και μη τροποποιημένων ινών. Επίσης, ερευνάται η επιφάνεια των τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών με οπτική μικροσκοπία.

Προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο ρόλος των ποικίλων παραμέτρων στη συμπεριφορά εξόλκευσης ίνας/μήτρας, συσχετίζεται το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής της ίνας με το μέγιστο φορτίο και την ενέργεια εξόλκευσης.

Για να μελετηθεί η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης σε ινοπλισμένα δοκίμια με ευθείες και κυματοειδείς ίνες σε διαφορετικά ποσοστά κ.ό.

Στο Κεφάλαιο 4 ερευνώνται οι θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες, καθώς και οι ιδιότητες του νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, στο Υποκεφάλαιο 4.1 μελετάται η επίδραση της ποιότητας της μήτρας στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες σκυροδέματος οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες. Διερευνώνται, λοιπόν, τρεις διαφορετικοί ολικοί λόγοι N/T και δύο διαφορετικές γεωμετρίες ινών, σε ποσοστό 1.0% κ.ό σκυροδέματος. Επιπλέον, παρασκευάστηκαν και άοπλες συνθέσεις σκυροδέματος, ώστε να αξιολογηθεί η προσθήκη των ινών στο σκυρόδεμα για κάθε λόγο N/T.

Το Υποκεφάλαιο 4.2 ασχολείται με τη μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών, όπως της διαμέτρου, του μήκους, του λόγου μορφής και του σχήματος, στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες, καθώς και τις ιδιότητες του νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος. Πραγματοποιείται λεπτομερής έρευνα με τη χρήση συνολικά έξι διαφορετικών γεωμετριών ινών σε ποσοστό 1.0% κ.ό. σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτείνεται στην κανονικοποίηση των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας και τη συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με την επιφάνεια επαφής κάθε ίνας, ενοποιώντας τα αποτελέσματα με τη χρήση μίας μεμονωμένης γεωμετρικής παραμέτρου. Επιπροσθέτως, συσχετίζεται η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα με την ενέργεια εξόλκευσης κάθε ίνας.

Στο Υποκεφάλαιο 4.3 πραγματοποιείται μία συστηματική μελέτη της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, συναρτήσει και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών. Αρχικά χρησιμοποιούνται κυματοειδείς ίνες ($l/d=33.3$) σε ποσοστά 0.5%, 1.0% και 1.5% κ.ό. σκυροδέματος και συγκρίνονται οι ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με τις αντίστοιχες ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου άοπλου σκυροδέματος. Επίσης, εφαρμόζεται και η μη καταστροφική μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ) για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη θραύση του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτείνεται και σε ίνες ευθείες ($l/d=62.5$) και κυματοειδείς ($l/d=42.9$) σε ποσοστό ενίσχυσης έως και 2.5% κ.ό. σκυροδέματος, ώστε να προσδιοριστεί εκείνη η περιεκτικότητα των ινών κ.ό., με τη χρήση της οποίας μπορούν να επιτευχθούν παρόμοιες παραμένουσες αντοχές και καμπτική δυσθραυστότητα με τις κυματοειδείς ίνες ($l/d=60$), που απέδωσαν τις καλύτερες τιμές στις ιδιότητες αυτές σε ποσοστό 1.0%.

Το Υποκεφάλαιο 4.4 μελετά την επίδραση της χημικής τροποποίησης των ινών στη συνάφεια ίνας/μήτρας και κατ' επέκταση στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Για την επίτευξη του εν λόγω σκοπού, η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιείται συνολικά σε έξι τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε ποσοστό 1.0% κ.ό. σκυροδέματος. Επιπλέον, ερευνάται η επιρροή της τροποποίησης των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος.

Επίσης, η επίδραση της χημικής τροποποίησης των ινών στη θραύση του σκυροδέματος ερευνάται και με τη μέθοδο της Ακουστικής Εκπομπής, η οποία εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των δοκιμών κάμψης.

Με σκοπό την επιλογή του ιδανικότερου συνδυασμού επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο για βέλτιστη δυσθραυστότητα, πραγματοποιείται κανονικοποίηση των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας και συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με την επιφάνεια επαφής κάθε τροποποιημένης ίνας. Η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα των τροποποιημένων ινών συσχετίζεται με την ενέργεια εξόλκευσης κάθε ίνας και πραγματοποιείται σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για μη τροποποιημένες ίνες.

Επιπλέον, στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται μία βασική σύνοψη των αποτελεσμάτων της διδακτορικής διατριβής. Ως εκ τούτου, παρατίθενται τα συνολικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Τέλος, το Κεφάλαιο 6 αφορά τις δημοσιεύσεις/ανακοινώσεις που προέκυψαν στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, ενώ στο Παράρτημα παρατίθενται πίνακες με ιδιότητες των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των αναμιγμάτων.

1.3. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

1. Mehta PK, Monteiro PJM (2009) Σκυρόδεμα - Μικροδομή, ιδιότητες, και υλικά (trans: Παπαγιάννη Ι), Τρίτη αμερικάνικη έκδοση. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Αθήνα
2. ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002) Report on Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
3. Bentur A, Mindess S (2006) Fibre reinforced cementitious composites. 2nd edn. Taylor & Francis

Κεφάλαιο 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1. Σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα, με την ευρεία έννοια, είναι ένα προϊόν ή μάζα που παρασκευάζεται με τη χρήση ενός τσιμεντοειδούς μέσου, το οποίο είναι γενικά το προϊόν της αντίδρασης του υδραυλικού τσιμέντου με το νερό. Οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν το σκυρόδεμα βασισμένο στο υδραυλικό τσιμέντο ήταν πιθανότατα οι αρχαίοι Ρωμαίοι [1], ενώ το 1824 ο Joseph Aspdin σε πατέντα του εφάρμοσε για πρώτη φορά τον όρο «τσιμέντο Πόρτλαντ» [2]. Σήμερα, το σκυρόδεμα παρασκευάζεται με ποικίλους τύπους τσιμέντου και μπορεί να περιέχει επιπλέον ιπτάμενη τέφρα, ποζολάνη, σκωρία υψικαμίνου, πρόσμικτα κτλ. [1].

Στη σημερινή εποχή, το σκυρόδεμα με τσιμέντο Πόρτλαντ αποτελεί το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό και εκτιμάται ότι καταναλώνονται ετήσια 11 δισεκατομμύρια μετρικοί τόνοι παγκοσμίως. Παρόλο που δεν έχει κάποιες από τις ιδιότητες του χάλυβα (π.χ. τη σκληρότητα του), υπάρχουν βασικοί λόγοι που το καθιστούν το κυριότερο κατασκευαστικό υλικό. Ένας από τους λόγους αποτελεί η πολύ σημαντική του αντίσταση στην επίδραση του νερού, ιδιότητα που δεν χαρακτηρίζει τον συνήθη χάλυβα και το ξύλο. Επιπλέον, έχει τη δυνατότητα να διαμορφώνεται σε δομικά στοιχεία ποικίλων σχημάτων και μεγεθών, αφού στη νωπή του κατάσταση χαρακτηρίζεται από πλαστικότητα. Ένας ακόμη λόγος είναι η εύκολη και φθηνή απόκτηση των κύριων συστατικών που το αποτελούν και καθιστούν στις περισσότερες περιπτώσεις το υλικό αυτό ως το πιο φθινό και τάχιστα διαθέσιμο [3].

Όμως, το άοπλο σκυρόδεμα εμφανίζει αδυναμίες, όπως είναι η χαμηλή εφελκυστική του αντοχή και η μικρή του ικανότητα παραμόρφωσης στη θραύση [4]. Οι ίνες προστίθενται, λοιπόν, στο σκυρόδεμα για να βελτιώσουν τη δυσθραυστότητά του και με την ικανότητα τους να καθυστερούν την ανάπτυξη των ρωγμών να οδηγήσουν σε αύξηση της εφελκυστικής του αντοχής [1].

2.2. Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα αποτελείται κυρίως από υδραυλικό τσιμέντο, αδρανή και διακριτές ίνες [4]. Μπορεί επιπλέον να περιλαμβάνει και άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται στο συμβατικό σκυρόδεμα, όπως ποζολάνες και άλλα πρόσμικτα [3].

2.2.1. Ιστορική αναδρομή

Οι ίνες χρησιμοποιούνται για τον οπλισμό ψαθυρών υλικών από τα αρχαία χρόνια. Χρησιμοποιούνταν ως ενίσχυση σε πλίνθους ψημένους στον ήλιο άχυρα, ενώ τρίχες αλόγου ενσωματώνονταν σε κονιάματα και γυψοκονιάματα. Παράδειγμα εφαρμογής των ινών από άχυρο αποτελεί ένα ινδιάνικο σπίτι, ίσως το παλαιότερο στις Ηνωμένες Πολιτείες που χρονολογείται περίπου στο 1540. Το 1898, με την εφεύρεση της διαδικασίας του Hatschek εισήχθηκε στον τομέα των κατασκευών η εμπορική χρήση των ινών από άσβεστο σε μήτρα τσιμεντόπαστας. Εξαιτίας όμως ότι η χρήση των συγκεκριμένων ινών αποδείχτηκε ότι είναι επιβλαβής για την υγεία, εισήχθησαν και άλλα είδη ινών [4].

Από το 1910 χρονολογούνται πειραματικές δοκιμές και πατέντες που σχετίζονται με τη βελτίωση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος ενσωματώνοντας διάφορα ασυνεχή χαλύβδινα στοιχεία, όπως συρμάτινα τεμάχια και καρφιά για οπλισμό [[5] όπως αναφ. στο [4]].

Ένα άλλο είδος ινών, οι ίνες από γυαλί, χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά στα τέλη της δεκαετίας του 1950 στη Σοβιετική ένωση [[6] όπως αναφ. στο [4]]. Λόγω της αλκαλικότητας του τσιμέντου δημιουργήθηκαν νέα είδη ινών γυαλιού ανθεκτικά στην αλκαλικότητα που περιέχουν ζirkονία [[7] όπως αναφ. στο [4]]. Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής, η πιο ευρεία εφαρμογή του σκυροδέματος οπλισμένου με ίνες γυαλιού είναι η παραγωγή εξωτερικών αρχιτεκτονικών πάνελ επένδυσης [4].

Οι συνθετικές ίνες (πολυπροπυλένιο και νάιλον), αρχικά δεν είχαν την επιτυχία των ινών χάλυβα και γυαλιού [[8,9] όπως αναφ. στο [4]]. Ωστόσο, οι συνθετικές και οι φυσικές ίνες χρησιμοποιούνται με επιτυχία στο σκυρόδεμα, λόγω των νέων μεθόδων κατασκευής

τους, την παρασκευή νέων ειδών τους και την καλύτερη κατανόηση των μηχανισμών σχετικά με τη χρήση των ινών ως οπλισμό [[10,11] όπως αναφ. στο [4]].

Η πρώτη μεγάλη έρευνα για την αξιολόγηση της χρήσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, πραγματοποιήθηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής στις αρχές της δεκαετίας του 1960 [[12] όπως αναφ. στο [4]].

2.2.2. Κατηγορίες ινών

Υπάρχει μεγάλη ποικιλία ινών διαθέσιμη για διάφορες χρήσεις. Οι βασικές κατηγορίες τους είναι οι εξής [4]:

- Ίνες γυαλιού (π.χ τύπου “AR-glass”, τύπου “E-glass”)
- Ίνες συνθετικές (π.χ. ακρυλικές, άνθρακα, αραμιδίου, πολυαιθυλενίου, νάιλον, πολυπροπυλενίου, πολυεστέρα)
- Ίνες από φυσικά υλικά (π.χ. καρύδα, μπανάνα Αντιλλών, υπολείμματα ζαχαροκάλαμου, φοίνικα)
- Ίνες χάλυβα

2.2.3. Εφαρμογές των ινών

Η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος αυξάνεται συνεχώς από τη στιγμή που εμφανίστηκε. Για παράδειγμα, το 2001 παράχθηκαν περίπου 80 εκατομμύρια κυβικά μέτρα ινοπλισμένου σκυροδέματος και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για πλάκες εδάφους, για εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και προκατασκευασμένα στοιχεία [13]. Σύμφωνα με τους Bentur και Mindess [13] χρησιμοποιείται γενικά ελάχιστη ποσότητα ινών για κατασκευαστικές εφαρμογές παρά τις ενισχυμένες ιδιότητες τους.

Κάποιες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος με ίνες γυαλιού (π.χ. ελαφροβαρές, οικονομικό, κ.ά.) οδήγησαν στην εκτενή χρήση του σε εξωτερικά αρχιτεκτονικά πάνελ επένδυσης. Χρησιμοποιείται επιπλέον για την αποκατάσταση κτιρίων και την αντικατάσταση περίτεχνων πλακιδίων πρόσοψης και υφιστάμενης τοιχοποιίας, λόγω ότι είναι ένα ελαφρύ υλικό με ευπροσάρμοστο σχήμα [4]. Τα προβλήματα, όμως, που

παρουσιάζουν οι ίνες γυαλιού σε σχέση με την ανθεκτικότητα, συντέλεσαν στην επιβράδυνση της εξάπλωσής τους [14].

Οι συνθετικές ίνες είναι τεχνητές ίνες και είναι απόρροια της ανάπτυξης και της έρευνας κλωστοϋφαντουργικών και πετροχημικών βιομηχανιών. Οι συγκεκριμένες ίνες που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα υπάρχουν σε πολλές τυποποιήσεις και προέρχονται από οργανικά πολυμερή. Οι πιο διαδεδομένες εφαρμογές τους είναι σε πλάκες δαπέδων, σε πλάκες εδάφους (slabs on grade) και σε μόνιμες δομές (stay-in-place) πολυώροφων κτιρίων. Πιο πρόσφατες έρευνες σχετικά με τις ίνες και τα σύνθετα υλικά έχουν οδηγήσει σε νέους δρόμους για την εφαρμογή τους σε κατασκευαστικά στοιχεία. Οι συνθετικές ίνες μπορούν να δημιουργήσουν προϊόντα λεπτού πάχους, τα οποία να χαρακτηρίζονται από υψηλή ολκιμότητα και να διατηρούν την ακεραιότητά τους [4].

Όμως, το σκυρόδεμα με τσιμέντο Πόρτλαντ μπορεί να ενισχυθεί αποτελεσματικά και με φυσικά υλικά και να είναι κατάλληλο για χαμηλού κόστους κατασκευές [4]. Μπορεί να μην είναι κατάλληλες οι φυσικές φυτικές ίνες για δομικό σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης, εφαρμόζονται, όμως, σε κοινά σκυροδέματα [15]. Οι συγκεκριμένες ίνες, λοιπόν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από συμβατικά χυτεύσιμο σκυρόδεμα σε σχετικά χαμηλό ποσοστό, μέχρι και σε πιο πολύπλοκες κατασκευές, όπως πλακίδια οροφών, σανίδες, σωλήνες κ.ά. [4].

Όλο και περισσότερες εφαρμογές σχετικά με το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα γίνονται αποδεκτές από τους μηχανικούς, καθώς αναπτύσσεται η έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο. Εφαρμόζεται αρκετά σε πλάκες εδάφους είτε σε μορφή βιομηχανικού δαπέδου ή οδοστρώματος. Επιπλέον, η χρήση του είναι ευρεία σε εφαρμογές σχετικές με το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όπως τη σταθεροποίηση βραχωδών πρανών, την υποστήριξη του εδάφους, επισκευές και τη διάνοιξη σηράγγων [4]. Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα μπορεί να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που οι επιφάνειες είναι ανώμαλες και να προσδώσει ένα σταθερού πάχους σκυρόδεμα με οπλισμό. Η λύση αυτή είναι αρκετά πιο οικονομική από την τοποθέτηση συμβατικού πλέγματος, καθώς η στρώση εκτοξευόμενου σκυροδέματος θα είναι λεπτότερη [16]. Επίσης, μία ακόμη εφαρμογή του αποτελεί η χρήση του για την υποστήριξη οροφών σε ορυχεία αντί των ξύλινων επενδύσεων [4]. Η χρήση των ανοξείδωτων χαλύβδινων ινών σε πυρίμαχο χυτεύσιμο σκυρόδεμα (μέχρι 1500 °C) αποτελεί μία από τις πιο επιτυχημένες εφαρμογές των ινών αυτών [17]. Ακόμη, οι ίνες χάλυβα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με χαλύβδινες ράβδους οπλισμού για την κατασκευή δομικών στοιχείων, όπως

κολώνες κτιρίων σε σειсмоγενείς περιοχές και κατασκευές που υποβάλλονται σε κόπωση και κρούση [15].

2.2.4. Ρόλος των ινών

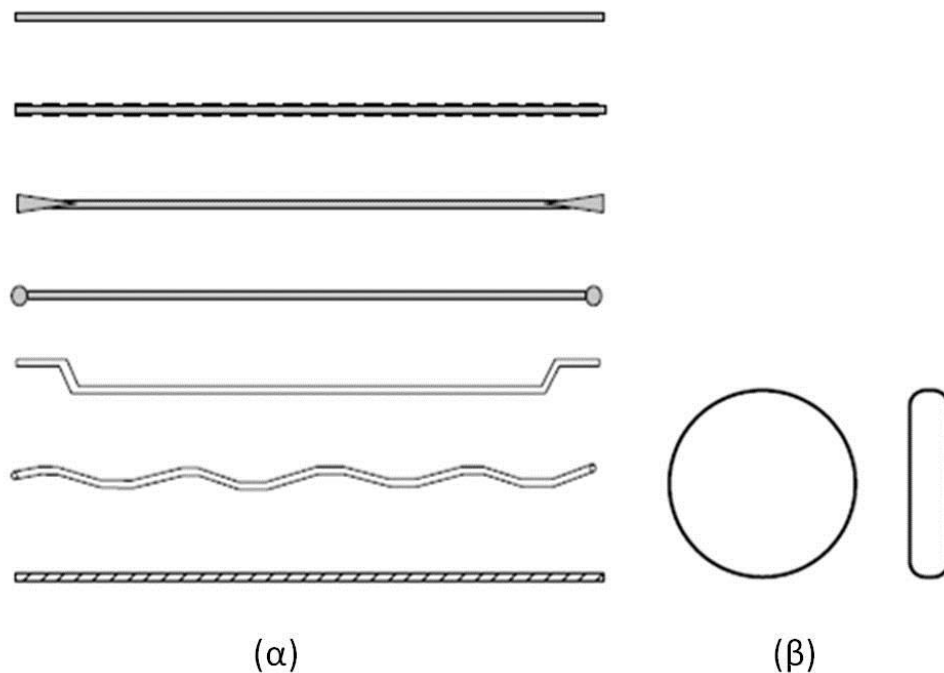
Είναι γεγονός ότι το άοπλο σκυρόδεμα είναι ένα υλικό με χαμηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή ικανότητα παραμόρφωσης στη θραύση [4]. Όταν τα φορτία, λοιπόν, που επιβάλλονται στο σκυρόδεμα προσεγγίσουν τα φορτία αστοχίας οι ρωγμές θα διαδοθούν και μερικές φορές με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Ο ρόλος των ινών είναι να αποτελέσουν το μέσο εκείνο που θα ελέγξει τη διάδοση των ρωγματώσεων. Μετά τη ρωγμάτωση της μήτρας είναι, συνεπώς, εμφανές το πραγματικό πλεονέκτημα της προσθήκης των ινών στο σκυρόδεμα. Όπου απαιτείται, λοιπόν, μεγάλη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας για να αποφευχθεί η αστοχία, τα ινοπλισμένα σκυροδέματα αποτελούν πολύ χρήσιμα υλικά [18].

Το ρόλο του οπλισμού στα υλικά με βάση το τσιμέντο τον κατέχουν ιστορικά οι συνεχείς ράβδοι οπλισμού, οι οποίοι τοποθετούνται σε κατάλληλα σημεία στη δομή, ώστε να φέρουν τις επιβληθείσες διατμητικές και εφελκυστικές τάσεις [13]. Οι ίνες, όμως, σε σχέση με τις ράβδους οπλισμού, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να κατανεμηθούν και να αναμειχθούν ομοιόμορφα όταν προστίθενται στο σκυρόδεμα [18]. Μπορεί να μην είναι τόσο αποτελεσματικές στο να φέρουν εφελκυστικές τάσεις σε σχέση με τις συμβατικές ράβδους οπλισμού, αλλά μπορούν να ελέγξουν καλύτερα τις ρωγματώσεις. Βεβαίως, οι ίνες δεν μπορούν γενικά να αντικαταστήσουν το συμβατικό οπλισμό. Αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιο αποτελεσματικά σε κάποιες εφαρμογές, όπως σε στοιχεία που φέρουν υψηλά τοπικά φορτία ή παραμορφώσεις (π.χ. επενδύσεις σηράγγων), σε στοιχεία λεπτότοιχων φύλλων που αποτελούν τον κύριο οπλισμό και ο συμβατικός οπλισμός δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε στοιχεία που αποτελούν συχνά τον δευτερεύον οπλισμό (π.χ. πλάκες) και ελέγχουν τις ρωγματώσεις που προκαλούνται λόγω των θερμοκρασιακών μεταβολών και της υγρασίας. Κάθε είδος, λοιπόν, οπλισμού (ίνες και συμβατικός οπλισμός) έχει το δικό του ρόλο, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις εφαρμογών που πρέπει να συνδυάζονται [13].

2.2.5. Σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα

2.2.5.1. Σχήμα Ινών

Υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός συνδυασμών γεωμετρικών παραμέτρων των ινών σχετικά με το μήκος τους, το σχήμα τους, τη διάμετρο ή την ισοδύναμη διάμετρο τους και την παραμόρφωση της επιφάνειάς τους. Η διατομή της ίνας μπορεί να ποικίλει από κυκλική, τετραγωνική, ορθογωνική, τριγωνική, διαμαντοειδής, επίπεδη, πολυγωνική, ή οποιοδήποτε άλλο πολυγωνικό σχήμα. Οι ίνες μπορεί να είναι λείες, παραμορφωμένες, με οδοντώσεις (indented), σπειροειδείς (coiled), με πτυχώσεις (crimped), με κεκαμένα άκρα, περιστρεμμένες (twisted) κτλ. Κάποιοι άλλοι τύποι ινών είναι οι κλειστού βρόγχου, όπως δακτύλιοι, δακτυλιοειδείς ή με μορφή συνδετήρων (Εικόνα 2.1) [19].



Εικόνα 2.1. (α) Τυπικά είδη χαλύβδινων ινών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα, (β) Ίνες κλειστού βρόγχου [19]

2.2.5.2. Λόγος Μορφής (Aspect Ratio) των Ινών

Ο λόγος μορφής είναι μία αριθμητική παράμετρος που χαρακτηρίζει τη γεωμετρία των ινών και ισοδυναμεί με το λόγο μήκους της ίνας προς τη διάμετρό της. Σε περίπτωση που η διατομή δεν είναι κυκλική, χρησιμοποιείται η διάμετρος κυκλικής διατομής ίδιου εμβαδού [20].

Τυπικές τιμές λόγου μορφής των ινών κυμαίνονται από περίπου 20 μέχρι 100 [4]. Το μήκος τους κυμαίνεται γενικά από 12.7 mm έως 63.5 mm [21], ενώ τυπικές τιμές των διαμέτρων τους κυμαίνονται μεταξύ 0.254 mm και 0.635 mm [22].

Ένας μεγάλος λόγος μορφής, για δεδομένο μήκος ίνας, έχει σχετιστεί με υψηλή αποτελεσματικότητα, και άρα θα έπρεπε η τιμή του να είναι αρκετά υψηλή, ώστε να φθάνουν οι ίνες την εφελκυστική τους αντοχή κατά την αστοχία του συνθέτου [20]. Όμως, η χρήση πολύ υψηλών λόγων μορφής ινών δεν είναι πρακτική. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι, εάν χρησιμοποιούνται οι συμβατικές μέθοδοι ανάμιξης, το σκυρόδεμα με ίνες λόγου μορφής μεγαλύτερου από 100 εμφανίζει συνήθως ανομοιόμορφη κατανομή των ινών, ανεπαρκή εργασιμότητα ή και τα δύο [[23] όπως αναφ. στο [20]].

2.2.5.3. Ποσοστό Όγκου Ινών

Συνήθως, το ποσοστό όγκου χαλύβδινων ινών κυμαίνεται μεταξύ 0.25% και 2%. Το μικρότερο ποσοστό χρησιμοποιείται σε πλάκες εδάφους που δέχονται χαμηλά φορτία, σε προκατασκευασμένες εφαρμογές κ.ά., ενώ το υψηλότερο ποσοστό χρησιμοποιείται συνήθως για εφαρμογές ασφαλείας, όπως θυρίδες ασφαλείας, χρηματοκιβώτια κ.ά. [21].

Το ποσοστό του όγκου των ινών σε τυπικές εφαρμογές ινοπλισμένου σκυροδέματος δίνεται από τον Naaman [19] στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1. Ποσοστά όγκου ινών για τυπικά ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο [19]

| Υλικό | Ποσοστό όγκου (V_f) | Παρατηρήσεις |
|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ινοπλισμένο σκυρόδεμα (FRC) | $V_f \leq 2 \%$ | Οι ίνες προαναμιγνύονται με τη μήτρα του σκυροδέματος. Μπορεί να απαιτηθούν πιο λεπτόκοκκα αδρανή. |
| Ινοπλισμένα σύνθετα υλικά με βάση το τσιμέντο υψηλής απόδοσης (HPFRCC) | $V_f \begin{cases} \geq \text{κρίσιμο } V_f \\ \geq 1 \% \end{cases}$ | Το κρίσιμο V_f μπορεί να είναι λιγότερο από 2% με κατάλληλο σχεδιασμό. |
| Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα (χαλύβδινες ίνες) | $V_f \leq 3 \%$ | Εφαρμογή σε επενδύσεις και επισκευές σηράγγων. |
| SIMCON (χαλύβδινες ίνες) | $4 \% \leq V_f \leq 6 \%$ | Σκυρόδεμα διηθημένου τσιμεντοπολτού με πλέγμα ινών. Απαιτείται προκατασκευασμένο πλέγμα ινών. |
| SIFCON (χαλύβδινες ίνες) | $4 \% \leq V_f \leq 15 \%$ | Ινοπλισμένο σκυρόδεμα με διηθημένο τσιμεντοπολτό. Οι ίνες είναι τοποθετημένες από πριν σε καλούπι και η διήθησή τους πραγματοποιείται με μία μήτρα λεπτόκοκκου τσιμεντοπολτού. |

2.2.6. Μηχανικές ιδιότητες σκυροδέματος με ίνες χάλυβα

Γενικά, η χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν περιορίζεται μόνο σε εφαρμογές μικρής κλίμακας αλλά και σε εφαρμογές πεδίου που απαιτούν ετησίως μεγάλες ποσότητες του ανά τον κόσμο. Ως εκ τούτου, υπάρχει ανάγκη αναθεώρησης των υφιστάμενων μεθόδων για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων του και ανάπτυξης νέων μεθοδολογιών [24].

Οι μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων με ίνες χάλυβα επηρεάζονται γενικά από πολλούς παράγοντες, όπως το λόγο μορφής της ίνας, τον τύπο της, την αντοχή της μήτρας, την ποσότητα των ινών, το μέγιστο κόκκο των αδρανών και τις διαστάσεις, τη μέθοδο παρασκευής και το σχήμα των δοκιμίων [20]. Η επιρροή των ινών σε κάποιες από τις σημαντικότερες μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος παρουσιάζεται στις παρακάτω ενότητες.

2.2.6.1. Θλιπτική Αντοχή

Γενικά, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος δεν αυξάνεται ιδιαίτερα από την προσθήκη χαλύβδινων ινών [21]. Παρόλο που οι ίνες επηρεάζουν τις ιδιότητες των σύνθετων υλικών με βάση το τσιμέντο σε όλους τους τύπους φόρτισης, δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές υπό θλιπτική φόρτιση [13]. Όμως, η συνεισφορά των ινών έγκειται στη βελτίωση της θλιπτικής παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο [21]. Η επίδραση των ινών στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος αναλύεται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4.

2.2.6.2. Εφελκυστική Αντοχή

Όσον αφορά την άμεση εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος, έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη ινών ευθυγραμμισμένων στη διεύθυνση της εφελκυστικής τάσης μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη αύξησή της, που κυμαίνεται έως και 133% για λείες και ευθείες χαλύβδινες ίνες 5% κ.ό. [[25] όπως αναφ. στο [13]]. Ωστόσο, η βελτίωση της αντοχής είναι πολύ μικρότερη για τυχαία κατανομή των ινών, κυμαινόμενη από μηδενική [[26] όπως αναφ. στο [13]] έως και σε ορισμένες περιπτώσεις πιθανόν 60%, ενώ σε πολλές άλλες έρευνες παρατηρήθηκαν ενδιάμεσες τιμές [[27] όπως αναφ. στο [13]]. Παρόμοια αποτελέσματα εμφάνισαν δοκιμές εφελκυσμού σε διάρρηξη [[28] όπως αναφ. στο [13]], αλλά με την προσθήκη χαλύβδινων ινών με κεκαμένα άκρα σε ποσοστό 1.5% κ.ό. σύμφωνα με τους Wafa και Ashour [[29] όπως αναφ. στο [13]] η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη αυξήθηκε κατά 160%.

2.2.6.3. Διάτμηση και Στρέψη

Σε γενικές γραμμές, η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα αυξάνει τη διατμητική αντοχή και την αντοχή στρέψης του [4]. Συνίσταται ευρέως για να βελτιώσουν τη διατμητική αντίσταση δομικών στοιχείων να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με το συμβατικό οπλισμό [13].

Υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα της αντικατάστασης ή της αύξησης των κατακόρυφων συνδετήρων με χαλύβδινες ίνες σε δοκούς [[30] όπως αναφ. στο [4]].

Κάποια από τα πλεονεκτήματα αφορούν το γεγονός ότι οι ίνες μπορούν να κατανεμηθούν τυχαία στο σκυρόδεμα σε πολύ μικρότερα κενά από ότι έχουν τη δυνατότητα πρακτικά ακόμα και οι πιο μικρές ράβδοι οπλισμού, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται κατανεμημένες ρωγματώσεις με μειωμένο μέγεθος, και επιπλέον ότι αυξάνουν την εφελκυστική αντοχή πρώτης ρωγμής και τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος [4].

2.2.6.4. Κόπωση

Πολλές κατασκευές υπόκεινται συχνά σε επαναλαμβανόμενα φορτία, όπως σε θαλάσσια κύματα, ανέμους, δονήσεις μηχανών, κυκλοφορία αυτοκινήτων κ.ά. Όταν οι κατασκευές υποβάλλονται σε τέτοιου είδους φορτίσεις, οδηγούνται σε μείωση της δυσκαμψίας τους και πιθανή αστοχία από κόπωση. Η διαδικασία προοδευτικών και μόνιμων εσωτερικών δομικών αλλαγών σε ένα υλικό υπό επαναλαμβανόμενη φόρτιση ορίζεται ως κόπωση. Η κατανόηση της αστοχίας από κόπωση στο σκυρόδεμα και ειδικά στο ινοπλισμένο υστερεί σε σχέση με τα σιδηρούχα υλικά [31].

Για τις δοκιμές κόπωσης σκυροδέματος χρησιμοποιούνται διαφορετικές διατάξεις φόρτισης, όπως εφελκυστικές, θλιπτικές και καμπτικές, με πιο συνηθισμένη την καμπτική κόπωση [31]. Γενικά, έχει παρατηρηθεί ότι τα ινοπλισμένα σκυροδέματα με χαλύβδινες ίνες που υπόκεινται σε καμπτική κόπωση παρουσιάζουν αυξημένη απόδοση σε σχέση με εκείνα χωρίς ίνες [[32-34] όπως αναφ. στο [31]]. Αρκετές έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς σε καμπτική κόπωση του σκυροδέματος με ίνες χάλυβα [35-37].

Σε γενικές γραμμές, η προσθήκη ινών σε σκυρόδεμα που υποβάλλεται σε θλιπτική κόπωση δεν βελτιώνει το χρόνο ζωής του, σε αντίθεση με την περίπτωση που το σκυρόδεμα υπόκειται σε καμπτική κόπωση. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην ικανότητα των ινών να γεφυρώνουν τις ρωγμές υπό εφελκυστικά φορτία [31].

2.2.6.5. Καμπτική Αντοχή - Καμπτική Δυσθραυστότητα

Η καμπτική αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζεται πολύ περισσότερο σε σχέση με τη θλιπτική και την άμεση εφελκυστική του αντοχή με την προσθήκη χαλύβδινων ινών [20]. Το ποσοστό όγκου ινών και ο λόγος μορφής τους επηρεάζει την καμπτική αντοχή και συγκεκριμένα, η προσθήκη ινών με μεγαλύτερο λόγο μορφής συντελεί σε υψηλότερες τιμές αντοχής. Για το λόγο αυτό ο όρος W/d , όπου W το ποσοστό των ινών κατά βάρος και d ο λόγος μορφής, σχετίζεται αρκετές φορές με την καμπτική αντοχή [13].

Τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος με ίνες χάλυβα σχετικά με την καμπτική συμπεριφορά δομικών στοιχείων είναι σύμφωνα με τον Craig [[38] όπως αναφ. στο [39]] τα παρακάτω:

- Αυξάνει την εφελκυστική αντοχή
- Αυξάνει την ικανότητα ανάληψης ροπής και τη ροπή θραύσης
- Συντελεί θετικά στον έλεγχο των ρωγματώσεων
- Βελτιώνει την ολκιμότητα
- Διατηρεί τη δομική ακεραιότητα δοκού που έχει υπερβεί το μέγιστο φορτίο
- Αυξάνει τη δυσκαμψία

Η δυσθραυστότητα χαρακτηρίζει την ικανότητα αντίστασης στην αστοχία ενός υλικού όταν υπόκειται σε δυναμικά ή κρουστικά φορτία ή σε στατικές παραμορφώσεις. Επιπλέον, είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός υλικού να απορροφά ενέργεια. Η αξιολόγησή της στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος δεν επιτυγχάνεται συνήθως με τις δοκιμές άμεσου εφελκυσμού, λόγω των δυσκολιών που αντιμετωπίζει η πραγματοποίηση των συγκεκριμένων δοκιμών. Αντιθέτως, η δοκιμή κάμψης αποτελεί μία πιο απλή μέθοδο, η οποία προσομοιώνει τις συνθήκες φόρτισης πολλών εφαρμογών του στην πράξη [24]. Είναι γεγονός, λοιπόν, ότι η μέθοδος που προτιμάται στο σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες για τον προσδιορισμό της δυσθραυστότητάς του είναι με καμπτική φόρτιση [4].

Η μέτρηση της δυσθραυστότητας του μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Στην κάμψη συνήθως, η δυσθραυστότητα προσδιορίζεται από το συνολικό εμβαδό της καμπύλης φορτίου – βέλους κάμψης [13].

Η προσθήκη των ινών στο σκυρόδεμα πραγματοποιείται πρωταρχικά για να αυξηθεί η δυσθραυστότητά του, ενώ δευτερεύουσας σημασίας είναι η οποιαδήποτε

βελτίωση της αντοχής του [13]. Μία δοκός άοπλου σκυροδέματος αστοχεί ξαφνικά σε μικρό βέλος κάμψης και διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Αντίθετα, όμοια δοκός με χαλύβδινες ίνες αυξάνοντας το βέλος κάμψης υπόκειται σε βλάβη με σταδιακή ανάπτυξη των ρωγματώσεων, ενώ έχει την ικανότητα να διατηρήσει ακόμα και σε μεγάλο βέλος κάμψης τη δομική της ακεραιότητα και τη μετα-ρωγματική της αντίσταση σε κάποιο βαθμό [4].

Η επίδραση των ινών στην καμπτική αντοχή και την καμπτική δυσθραυστότητα του σκυροδέματος, καθώς και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν αναλύονται εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 4.

2.3. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

1. Neville AM, Brooks JJ (1987 (Revised Edition - 2001 Standards Update)) Concrete technology. Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, UK
2. Newman J, Choo BS (2003) Advanced concrete technology 1: Constituent materials. vol 1. Elsevier Ltd.
3. Mehta PK, Monteiro PJM (2009) Σκυρόδεμα - Μικροδομή, ιδιότητες, και υλικά (trans: Παπαγιάννη Ι), Τρίτη αμερικάνικη έκδοση. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Αθήνα
4. ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002) Report on Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
5. Naaman AE (1985) Fiber reinforcement for concrete. Concrete International: Design and Construction 7 (3):21-25
6. Biryukovich KL, Yu DL (1965) Glass fiber reinforced cement (trans: Cairns GL). CERA Translation, Civil Engineering Research Association, London (12):41
7. Majumdar AJ (1976) Properties of fiber cement composites. In: RILEM Symposium, London, 1975. Construction Press, Lancaster 279-314
8. Goldfein S (1963) Plastic fibrous reinforcement for portland cement. Technical report No. 1757-TR, U.S. Army Research and Development Laboratories, Fort Belvoir 1-16
9. Monfore GE (1968) A review of fiber reinforced portland cement paste, mortar, and concrete, J. Res. Dev. Labs, Portland Cement Association 10 (3):36-42
10. Krenchel H, Shah S (1985) Applications of polypropylene fibers in Scandinavia. Concrete International
11. Naaman A, Shah S, Throne J (1982) Some developments in polypropylene fibers for concrete, SP-81. American Concrete Institute, Detroit 375-396
12. Romualdi JP, Batson GB (1963) Mechanics of crack arrest in concrete. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE 89 (EM3):147-168
13. Bentur A, Mindess S (2006) Fibre reinforced cementitious composites. 2nd edn. Taylor & Francis

14. Li VC (2002) Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering. *Journal of Applied Polymer Science* 83 (3):660-686
15. Brandt AM (2008) Fibre reinforced cement-based (FRC) Composites after over 40 years of development in building and civil engineering. *Composite Structures* 86 (1-3):3-9
16. Johnston CD (1982) Steel fibre-reinforced concrete - present and future in engineering construction. *Composites* 13 (2):113-121
17. Newman J, Choo BS (2003) *Advanced concrete technology 3: Processes*. vol 3. Elsevier Ltd.
18. Eldeen SAS, Taniguchi T (2006) Numerical study of strengthening concrete using short steel fibers. *Transactions of the Japan Society for Computational Engineering and Science* 20060003
19. Naaman AE (2003) Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology* 1 (3):241-252
20. ACI 544.4R-88 (Reapproved 1999) *Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*. American Concrete Institute
21. ACI 544.3R-93 (Reapproved 1998) *Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*. American Concrete Institute
22. Lankard DR (1972) Steel fibres in mortar and concrete. *Composites* 3 (2):65-70
23. Lankard DR (1972) Prediction of the flexural strength properties of steel fibrous concrete In: *CERL Conference on Fibrous Concrete*, Champaign, May 1972. *Construction Engineering Research Laboratory* 101-123
24. ACI 544.2R-89 (Reapproved 1999) *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*. American Concrete Institute
25. Shah S, Rangan BV (1971) Fibre reinforced concrete properties. *Journal of American Concrete Institute* 68 (2):126-135
26. Hughes BP (1981) Experimental test results for flexure and direct tension of fibre cement composites. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 3 (1):13-18

27. Johnston CD, Coleman RA (1974) Strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension In: Fiber Reinforced Concrete vol SP-44. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 177-193
28. Nanni A (1988) Splitting-tension test for fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal 85 (4):229-233
29. Wafa FF, Ashour SA (1992) Mechanical properties of high-strength fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal 89 (5):449-455
30. Williamson GR (1978) Steel fibers as web reinforcement in reinforced concrete. In: US Army Science Conference, West Point 3:363-377
31. Lee MK, Barr BIG (2004) An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. Cement and Concrete Composites 26 (4):299-305
32. Grzybowski M, Meyer C (1993) Damage accumulation in concrete with and without fiber reinforcement. ACI Materials Journal 90 (6):594-604
33. Johnston CD, Zemp RW (1991) Flexural fatigue performance of steel fiber reinforced concrete. Influence of fiber content, aspect ratio, and type. ACI Materials Journal 88 (4):374-383
34. Jun Z, Stang H (1998) Fatigue performance in flexure of fiber reinforced concrete. ACI Materials Journal 95 (1):58-67
35. Mailhot T, Bissonnette B, Saucier F, Pigeon M (2001) Flexural fatigue behavior of steel fibre reinforced concrete before and after cracking. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 34 (240):351-359
36. Singh SP, Kaushik SK (2003) Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure. Cement and Concrete Composites 25 (7):779-786
37. Singh SP, Mohammadi Y, Madan SK (2006) Flexural fatigue strength of steel fibrous concrete containing mixed steel fibres. Journal of Zhejiang University SCIENCE A 7 (8):1329-1335
38. Craig RJ (1984) Structural applications of reinforced fibrous concrete. Concrete International: Design & Construction 6 (12):28-32

39. Gencoglu M, Komur M, Taskin B (2002) Bending behavior of steel-fiber reinforced-concrete. In: Fourth GAP Engineering Congress, Sanlıyurfa, 06-08 June

Κεφάλαιο 3

**ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ
ΙΝΑΣ/ΜΗΤΡΑΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΗΣ ΙΝΑΣ/ΜΗΤΡΑΣ ΚΟΝΙΑΜΑΤΟΣ

3.1. Στόχος – Αντικείμενο

Το συγκεκριμένο Κεφάλαιο στοχεύει στη μελέτη της διεπιφάνειας μεταξύ της χαλύβδινης ίνας και της μήτρας κονιάματος. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης σε έξι διαφορετικές γεωμετρίες ινών (κεκαμμένα άκρα, κυματοειδείς και ευθείες) από μία μήτρα κονιάματος. Επιπλέον, επιτυγχάνεται η ενίσχυση της συνάφειας ίνας / μήτρας, διατηρώντας σταθερή τη σύνθεση της μήτρας και τροποποιώντας την ίνα με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου. Στόχος είναι να ερευνηθεί η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στη διεπιφάνεια ίνας / μήτρας, αλλά και να διερευνηθεί η επίδραση της τροποποίησης σε ίνες διαφορετικών διαμέτρων, μηκών εξόλκευσης και σχημάτων. Επίσης, μελετάται και η επιφάνεια των τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών με οπτική μικροσκοπία.

Προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο ρόλος των ποικίλων παραμέτρων στη συμπεριφορά εξόλκευσης ίνας/μήτρας, το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής της ίνας επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική γεωμετρική παράμετρος και συσχετίζεται με το μέγιστο φορτίο και την ενέργεια εξόλκευσης.

Για να αποκτηθεί μία ακόμη πιο ολοκληρωμένη εικόνα, πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές εξόλκευσης σε δοκίμια ινοπλισμένα με ευθείες και κυματοειδείς ίνες σε ποσοστό 2.0% και 5.0% κ.ό. και τα αποτελέσματα τους συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της άοπλης μήτρας. Στόχο αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης, δηλαδή η επίδραση της ύπαρξης ινών στην περιοχή εξόλκευσης μίας ίνας, γεγονός που δημιουργεί συνθήκες πλησιέστερα στις πραγματικές συνθήκες που υπάρχουν στις εφαρμογές του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

3.2. Εισαγωγή

Η προσθήκη των ινών σε ψαθυρά υλικά βελτιώνει τις μηχανικές τους ιδιότητες και για το λόγο αυτό, στη σημερινή εποχή ένα μεγάλο εύρος υλικών ενισχύονται με την ενσωμάτωση ινών στη μήτρα τους. Αξιοσημείωτη είναι, λοιπόν, η έρευνα που πραγματοποιείται διεθνώς για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα [1] σχετικά με τον προσδιορισμό των θλιπτικών και καμπτικών ιδιοτήτων, των ιδιοτήτων κόπωσης κ.ά. [2-6].

Η μακροσκοπική απόδοση ενός σύνθετου συστήματος εξαρτάται από τις ιδιοτήτων των ινών και της μήτρας, το ποσοστό όγκου ινών, τον προσανατολισμό των ινών κ.ά. [7]. Πολύ πρόσφατα, έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα στην επίδραση μικροδομών κυματοειδούς τύπου στη συνολική συμπεριφορά των συνθέτων [8]. Ωστόσο, όχι μόνο οι προαναφερθείσες παράμετροι, αλλά και η διεπιφανειακή συμπεριφορά του συνθέτου είναι καθοριστικής σημασίας. Συνεπώς, θεωρείται απαραίτητος ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων της διεπιφάνειας ίνας - μήτρας και η κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας της. Ο προσδιορισμός της συνάφειας ίνας / μήτρας πραγματοποιείται συνήθως με τη δοκιμή εξόλκευσης μεμονωμένης ίνας (single - fibre pull-out test) [7].

Οι δύο βασικοί τρόποι για τη βελτίωση της συνάφειας σε σύνθετα με βάση το τσιμέντο, είναι μέσω της τροποποίησης της χημικής ή μηχανικής πρόσφυσης μεταξύ μήτρας και ίνας. Οι περισσότερες έρευνες που πραγματοποιούνται σχετικά με το συγκεκριμένο αντικείμενο λαμβάνουν υπόψη τη χρήση των ινών με διαφορετικές γεωμετρίες, που οδηγεί σε διαφορετική μηχανική πρόσφυση, ενώ η ενίσχυση της χημικής συνάφειας επιτυγχάνεται μέσω μεταβολής της μήτρας ή τροποποίησης της ίνας [9-13].

Η επίδραση διαφόρων σχημάτων, διαμέτρων και μηκών εξόλκευσης χαλύβδινων ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης τους έχει αποκτήσει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον [10-12,14,15]. Αναφορικά με το σχήμα των ινών, έχει αναφερθεί ότι οι παραμορφωμένες (deformed) και οι ίνες με κεκαμένα άκρα προβάλλουν, λόγω της μηχανικής συνεισφοράς τους, μεγαλύτερη αντίσταση εξόλκευσης σε σχέση με τις λείες (smooth) ίνες [12]. Επιπλέον, έχει τεκμηριωθεί ότι αύξηση του μήκους εμβάπτισης οδηγεί σε βελτίωση του μέγιστου φορτίου και της ενέργειας εξόλκευσης, αλλά η επιρροή ήταν πιο εμφανής στις λείες ίνες [11].

Επιπροσθέτως, κάποιοι ερευνητές έχουν μελετήσει την επίδραση της γωνίας κλίσης των χαλύβδινων ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης τους [10,14-16]. Παρατηρήθηκε,

λοιπόν, ότι το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης αυξανόταν μέχρι γωνία κλίσης 30^0 και μειωνόταν για γωνία κλίσης 60^0 [10]. Επίσης, ορισμένες έρευνες έχουν ασχοληθεί με δοκιμές εξόλκευσης ινών από ινοπλισμένη μήτρα, με στόχο τη μελέτη της επίδρασης του ποσοστού όγκου ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης [12,17]. Συγκεκριμένα, οι Naaman και Najm [12] πραγματοποίησαν δοκιμές εξόλκευσης χαλύβδινων ινών από μήτρα κονιάματος που περιείχε με 0%, 1%, 2% και 3% ίνες κ.ό., καθώς και μία μήτρα τύπου «SIFCON», με περίπου 11% ίνες κ.ό. Παρατήρησαν ότι η επίδραση του ποσοστού ινών ήταν σχετικά ασήμαντη στη συμπεριφορά εξόλκευσης για λιγότερο από 3%, ενώ στην περίπτωση της μήτρας τύπου «SIFCON», η διεπιφανειακή αντοχή συνάφειας βελτιώθηκε αξιόλογα πριν και μετά την αποκόλληση. Το ερευνητικό ενδιαφέρον σχετικά με τη συμπεριφορά εξόλκευσης δεν περιορίζεται μόνο σε χαλύβδινες ίνες, αφού διάφοροι τύποι ινών ή ράβδων έχουν ερευνηθεί στο παρελθόν σε δοκιμές εξόλκευσης [18-23].

Ένας τεκμηριωμένος τρόπος για να ενισχυθεί η συνάφεια μεταξύ μήτρας και ινών είναι χρησιμοποιώντας μήτρες υψηλής αντοχής και/ή τροποποιώντας τη μήτρα [9,12,14,17,24-26]. Γενικά, η συνάφεια μεταξύ ίνας και μήτρας αυξάνεται όταν η αντοχή της μήτρας αυξάνεται. Κατά τους Chanvillard και Aïtcin [14] που μελέτησαν την επίδραση του μήκους εξόλκευσης, του προσανατολισμού των ινών και του λόγου N/T (νερό/τσιμέντο) στη συμπεριφορά εξόλκευσης, ο λόγος N/T, και κατά συνέπεια η αντοχή της μήτρας, έχει σημαντικό ρόλο στην τιμή του μέγιστου φορτίου, ενώ έχει δευτερεύων ρόλο κατά τη διάρκεια ολίσθησης. Επιπλέον, έχει μελετηθεί και η συμπεριφορά εξόλκευσης σε σχέση με την προσθήκη πυριτικής παιπάλης [9,25] και μετακαολίνης υψηλής δραστηριότητας (high reactivity metakaolin) στη μήτρα [9]. Αναφέρθηκε, λοιπόν, ότι η μετακαολίνη υψηλής δραστηριότητας και η πυριτική παιπάλη ήταν πολύ αποτελεσματικές στη βελτίωση της συμπεριφοράς συνάφειας – ολίσθησης. Ο συνδυασμός τους, ωστόσο, οδήγησε σε υπερβολική βελτίωση της συνάφειας, που κατέληξε σε ανεπιθύμητες αστοχίες ινών [9].

Μια αποτελεσματική εναλλακτική λύση για τη διαφοροποίηση της συνάφειας ίνας/μήτρας σε υλικά με βάση το τσιμέντο αποτελεί η τροποποίηση των ινών. Οι Sugama κ.ά. [13] και οι Sun κ.ά. [27] μελέτησαν τη διεπιφάνεια μεταξύ τροποποιημένων ινών χάλυβα με φωσφορικό ψευδάργυρο και μήτρας με βάση το τσιμέντο. Ανέφεραν ότι η αντοχή συνάφειας των τροποποιημένων ινών βελτιώθηκε κατά 40-50% σε σχέση με των μη τροποποιημένων. Επιπλέον, η συγκεκριμένη τροποποίηση παρείχε προστασία στις ίνες χάλυβα από τη διάβρωση.

Υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση της τροποποίησης της χαλύβδινης ίνας μέσω φωσφορικού ψευδαργύρου στη συνάφεια ίνας/μήτρας κονιάματος, ενώ η αλληλένδετη επίδραση της τροποποίησης και της γεωμετρίας των ινών δεν έχει διερευνηθεί διεξοδικά. Επιπλέον, η έρευνα σχετικά με τη συμπεριφορά εξόλκευσης χαλύβδινης ίνας από ινοπλισμένη μήτρα κονιάματος δεν είναι εκτεταμένη. Όλα τα παραπάνω οδήγησαν στην ανάγκη επίτευξης της έρευνας του παρόντος Κεφαλαίου, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εξόλκευσης με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες διαφόρων γεωμετριών από μήτρα κονιάματος, καθώς και δοκιμές εξόλκευσης ινών από μήτρα ινοπλισμένου κονιάματος διαφορετικής κατ'όγκον περιεκτικότητας ινών.

3.3. Μελέτη της Επίδρασης της Γεωμετρίας των Ινών και της Χημικής Τροποποίησης στη Συμπεριφορά Εξόλκευσης

3.3.1. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο παρουσιάζονται δοκιμές εξόλκευσης από μήτρα άοπλου κονιάματος, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε έξι διαφορετικές γεωμετρίες χαλύβδινων ινών (με κεκαμένα άκρα, κυματοειδείς και ευθείες), ώστε να ερευνηθεί εκτεταμένα η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στη διεπιφάνεια ίνας / μήτρας. Επιπλέον, η συνάφεια ίνας / μήτρας ενισχύθηκε με την τροποποίηση της ίνας με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου και διατηρώντας σταθερή τη σύνθεση της μήτρας και διερευνήθηκε η επίδραση της τροποποίησης σε συνδυασμό με τα διάφορα γεωμετρικά χαρακτηριστικά.

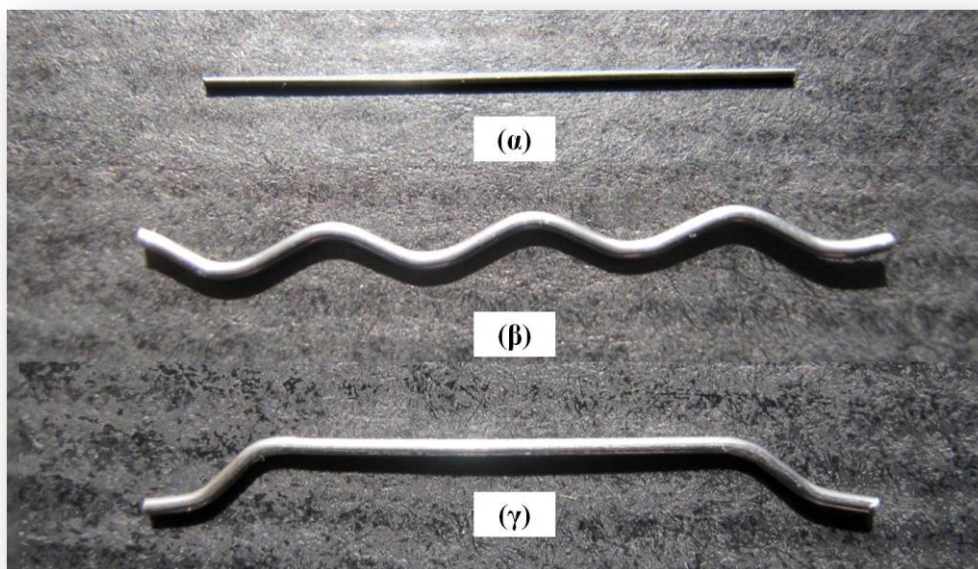
Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμίων που εξετάστηκαν και οι ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 3.1. Κωδικοποίηση δοκιμών και ιδιότητες ινών

| Κωδικός | Σχήμα ινών | Κατάσταση | l ¹ (mm) | d ¹ (mm) | l/d ¹ |
|---------|---------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|
| aS04.25 | Ευθείες | Μη τροποποιημένες | 25 | 0.4 | 62.5 |
| cS04.25 | Ευθείες | Τροποποιημένες | 25 | 0.4 | 62.5 |
| aH07.30 | Κεκαμένα άκρα | Μη τροποποιημένες | 30 | 0.7 | 42.9 |
| cH07.30 | Κεκαμένα άκρα | Τροποποιημένες | 30 | 0.7 | 42.9 |
| aH06.30 | Κεκαμένα άκρα | Μη τροποποιημένες | 30 | 0.6 | 50.0 |
| cH06.30 | Κεκαμένα άκρα | Τροποποιημένες | 30 | 0.6 | 50.0 |
| aH06.25 | Κεκαμένα άκρα | Μη τροποποιημένες | 25 | 0.6 | 41.7 |
| cH06.25 | Κεκαμένα άκρα | Τροποποιημένες | 25 | 0.6 | 41.7 |
| aU07.30 | Κυματοειδείς | Μη τροποποιημένες | 30 | 0.7 | 42.9 |
| cU07.30 | Κυματοειδείς | Τροποποιημένες | 30 | 0.7 | 42.9 |
| aU05.30 | Κυματοειδείς | Μη τροποποιημένες | 30 | 0.5 | 60.0 |
| cU05.30 | Κυματοειδείς | Τροποποιημένες | 30 | 0.5 | 60.0 |

¹l: Μήκος ίνας, d: διάμετρος, l/d: λόγος μορφής

Στην Εικόνα 3.1 (α-γ) απεικονίζονται ίνες με κεκαμένα άκρα, κυματοειδείς και ευθείες, που χρησιμοποιήθηκαν.



Εικόνα 3.1. Ίνες α) ευθείες, β) κυματοειδείς, γ) με κεκαμμένα άκρα

Οι ίνες τροποποιήθηκαν με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου που συνίσταται από 0.46 wt% διένυδρο ορθοφωσφορικό ψευδάργυρο (zinc orthophosphate dihydrate), 0.91 wt % 85% H_3PO_4 και 98.63 wt % νερό [13]. Η διαδικασία τροποποίησης που ακολουθήθηκε περιελάμβανε τον καθαρισμό της επιφάνειας των ινών με ακετόνη, τη βύθιση τους για 5 min στο διάλυμα στους $90^{\circ}C$, στη συνέχεια την έκπλυσή τους με νερό και τέλος την ξήρανσή τους για 10 min σε φούρνο στους $150^{\circ}C$, όπως προτάθηκε από τους Sugama κ.ά. [13]. Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η διαδικασία τροποποίησης ινών διαφόρων γεωμετριών.



Εικόνα 3.2. Διαδικασία τροποποίησης ιών διαφόρων γεωμετριών

Στον Πίνακα 3.2 απεικονίζονται οι αναλογίες του αναμίγματος και οι ιδιότητες του, όπως η περιεκτικότητα σε αέρα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 231 - 03 [28]. Το ειδικό βάρος και η απορροφητικότητα της άμμου προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [29] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος. Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση της άμμου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 136 - 01 [30]. Τα δοκίμια αποτελούνταν από μία άοπλη μήτρα κονιάματος με 0.5 λόγο N/T (λόγος νερό/τσιμέντο).

Πίνακας 3.2. Αναλογίες και ιδιότητες αναμίγματος

| Υλικά (kg/m ³) | Ποσότητες |
|----------------------------|-----------|
| Τσιμέντο τύπου Π 42.5 N | 440 |
| Νερό | 220 |
| Άμμος | 1591 |
| Υπερρευστοποιητής | 3.6 |
| Ιδιότητες | |
| Περιεκτικότητα σε αέρα (%) | 0.45-0.6 |
| | |

3.3.2. Συντήρηση των δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες μέχρι την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σε ειδικές δεξαμενές με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συνθήκες 23 ± 2 °C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [31].

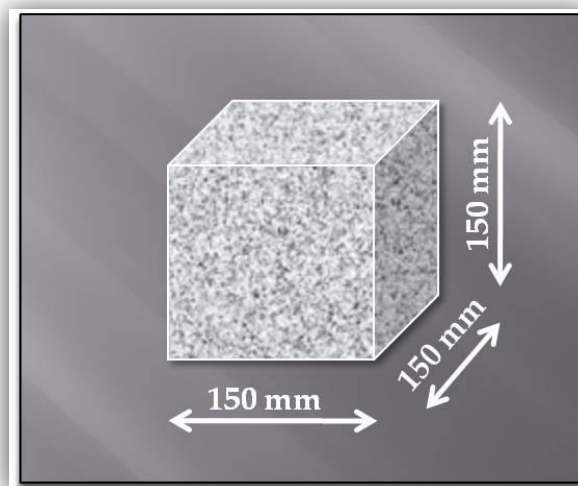
3.3.3. Δοκιμές θλίψης

3.3.3.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης

Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε Toni Technik μηχανή με μέγιστο φορτίο 3000 kN (Εικόνα 3.3) σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [32]. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 150x150x150 mm (Εικόνα 3.4) και η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 0.5 MPa/s.



Εικόνα 3.3. Μηχανή θλίψης



Εικόνα 3.4. Δοκίμιο θλίψης

Η θλιπτική αντοχή δίνεται από την εξίσωση [32]:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (3.1)$$

Όπου:

f_c = η θλιπτική αντοχή (MPa)

F = το μέγιστο φορτίο (N)

A_c = το εμβαδόν της επιφάνειας του δοκιμίου που εφαρμόζεται το θλιπτικό φορτίο (mm^2)

3.3.3.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

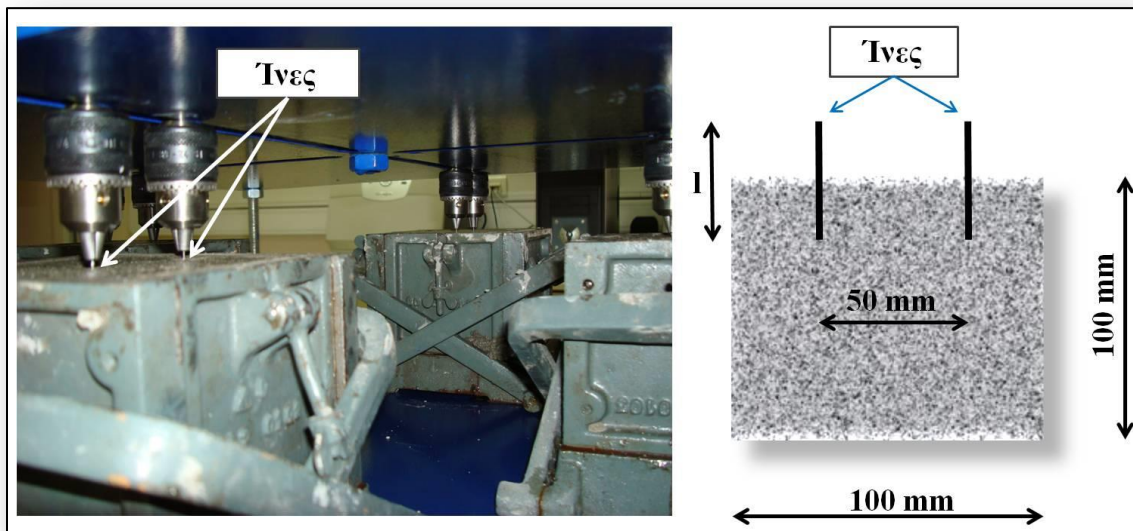
Πίνακας 3.3. Θλιπτική αντοχή

| Θλιπτική αντοχή (MPa) | STDEV ¹ (MPa) |
|-----------------------------------------------------|--------------------------|
| 42.90 | 3.87 |
| ¹ STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση | |

3.3.4. Δοκιμές εξόλκευσης

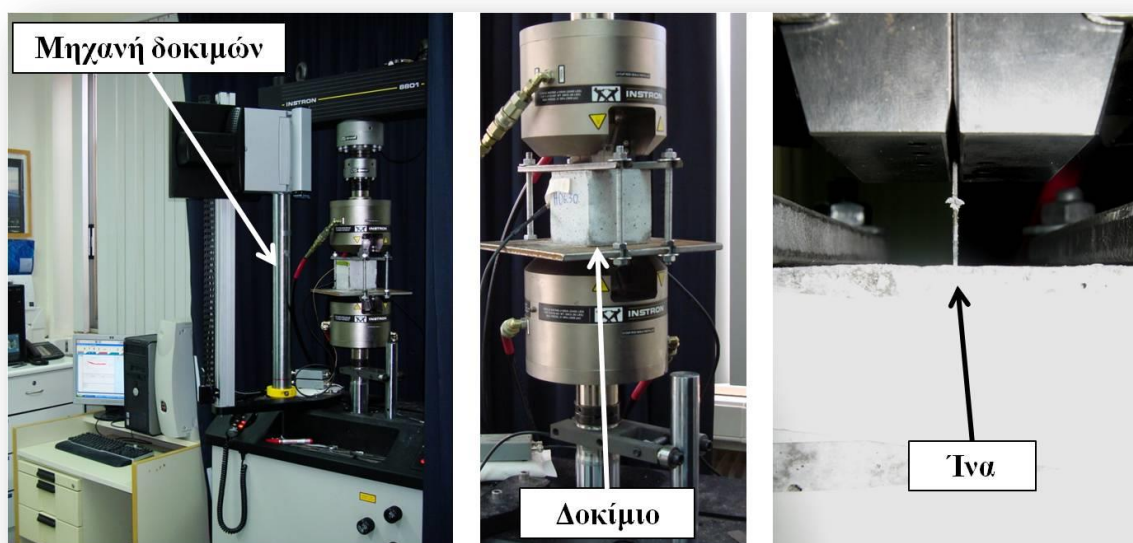
3.3.4.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Εξόλκευσης

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές εξόλκευσης ήταν κυβικά διαστάσεων 100x100x100 mm. Συνολικά, οι δοκιμές εξόλκευσης διεξήχθησαν σε οκτώ με δεκαέξι ίνες για κάθε τύπο ίνας. Ένα ειδικό πλαίσιο σχεδιάστηκε για την τοποθέτηση και τη στήριξη των ινών στο νωπό κονίαμα. Σε κάθε δοκίμιο κονιάματος τοποθετούνταν δύο ίνες, ενώ το μήκος εμφάπτισης επιλέχθηκε να είναι το μισό του μήκους κάθε ίνας (1/2) (Εικόνα 3.5).



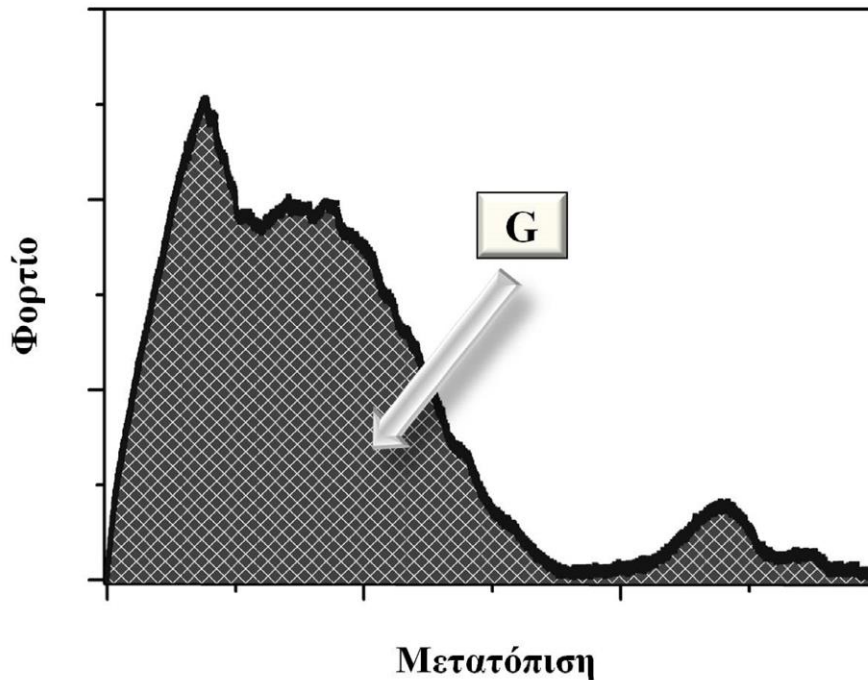
Εικόνα 3.5. Πειραματική διάταξη εμφάπτισης ινών

Οι δοκιμές εξόλκευσης διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας μία σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με ταχύτητα μετατόπισης 0.6 mm/min. Η πειραματική διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.6. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα δοκίμια κονιάματος τοποθετούνταν σε ένα ειδικό πλαίσιο που σχεδιάστηκε για να συγκρατεί τα δοκίμια σταθερά κατά τη διάρκεια του πειράματος και το οποίο στηριζόταν στο κάτω άκρο της μηχανής.



Εικόνα 3.6. Πειραματική διάταξη δοκιμής εξόλκευσης ινών

Η ενέργεια εξόλκευσης (G) υπολογίζεται ως το εμβαδόν της επιφάνειας της καμπύλης φορτίου – μετατόπισης (Εικόνα 3.7).



Εικόνα 3.7. Προσδιορισμός ενέργειας εξόλκευσης (G)

Η διεπιφανειακή διατμητική αντοχή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\tau_{\max} = \frac{P_{\max}}{l_e \pi d} \quad (3.2)$$

Όπου: τ_{\max} : η διεπιφανειακή διατμητική αντοχή (MPa),

P_{\max} : το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης (N),

l_e : το μήκος εξόλκευσης (mm)

d : η διάμετρος της ίνας (mm)

3.3.4.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Εξόλκευσης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.4 και 3.5.

Πίνακας 3.4. Αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης μη τροποποιημένων ινών

| Κωδικός | P_{\max} (N) | STDEV ¹ P_{\max} (N) | τ_{\max} (MPa) | STDEV ¹ τ_{\max} (MPa) | G (Joule) | STDEV ¹ G (Joule) | l_e (mm) |
|---------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------|
| aS04.25 | 23.78 | 4.08 | 1.51 | 0.26 | 0.11 | 0.03 | 12.5 |
| aH07.30 | 344.99 | 37.30 | 10.46 | 1.13 | 2.14 | 0.35 | 15.0 |
| aH06.30 | 271.45 | 30.43 | 9.60 | 1.08 | 1.77 | 0.28 | 15.0 |
| aH06.25 | 225.91 | 29.59 | 9.59 | 1.26 | 1.15 | 0.29 | 12.5 |
| aU07.30 | 473.72 | 29.30 | 14.36 | 0.89 | 2.49 | 0.28 | 15.0 |
| aU05.30 | 274.70 | 20.16 | 11.66 | 0.86 | 1.60 | 0.28 | 15.0 |

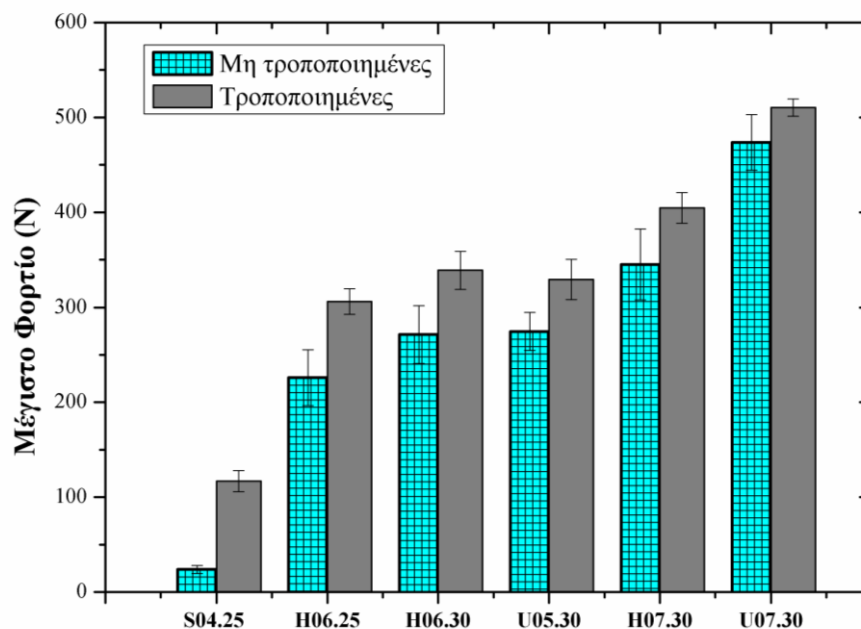
¹STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση

Πίνακας 3.5. Αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης τροποποιημένων ινών

| Κωδικός | P_{\max} (N) | STDEV ¹ P_{\max} (N) | τ_{\max} (MPa) | STDEV ¹ τ_{\max} (MPa) | G (Joule) | STDEV ¹ G (Joule) | l_e (mm) |
|---------|-------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|--------------|---------------------------------|---------------|
| cS04.25 | 116.83 | 11.03 | 7.44 | 0.70 | 0.14 | 0.03 | 12.5 |
| cH07.30 | 404.53 | 16.17 | 12.26 | 0.49 | 2.78 | 0.36 | 15.0 |
| cH06.30 | 338.78 | 20.02 | 11.98 | 0.71 | 2.19 | 0.39 | 15.0 |
| cH06.25 | 305.91 | 13.32 | 12.98 | 0.57 | 1.67 | 0.22 | 12.5 |
| cU07.30 | 510.38 | 9.07 | 15.47 | 0.27 | 3.29 | 0.08 | 15.0 |
| cU05.30 | 329.11 | 21.12 | 13.97 | 0.90 | 2.15 | 0.36 | 15.0 |

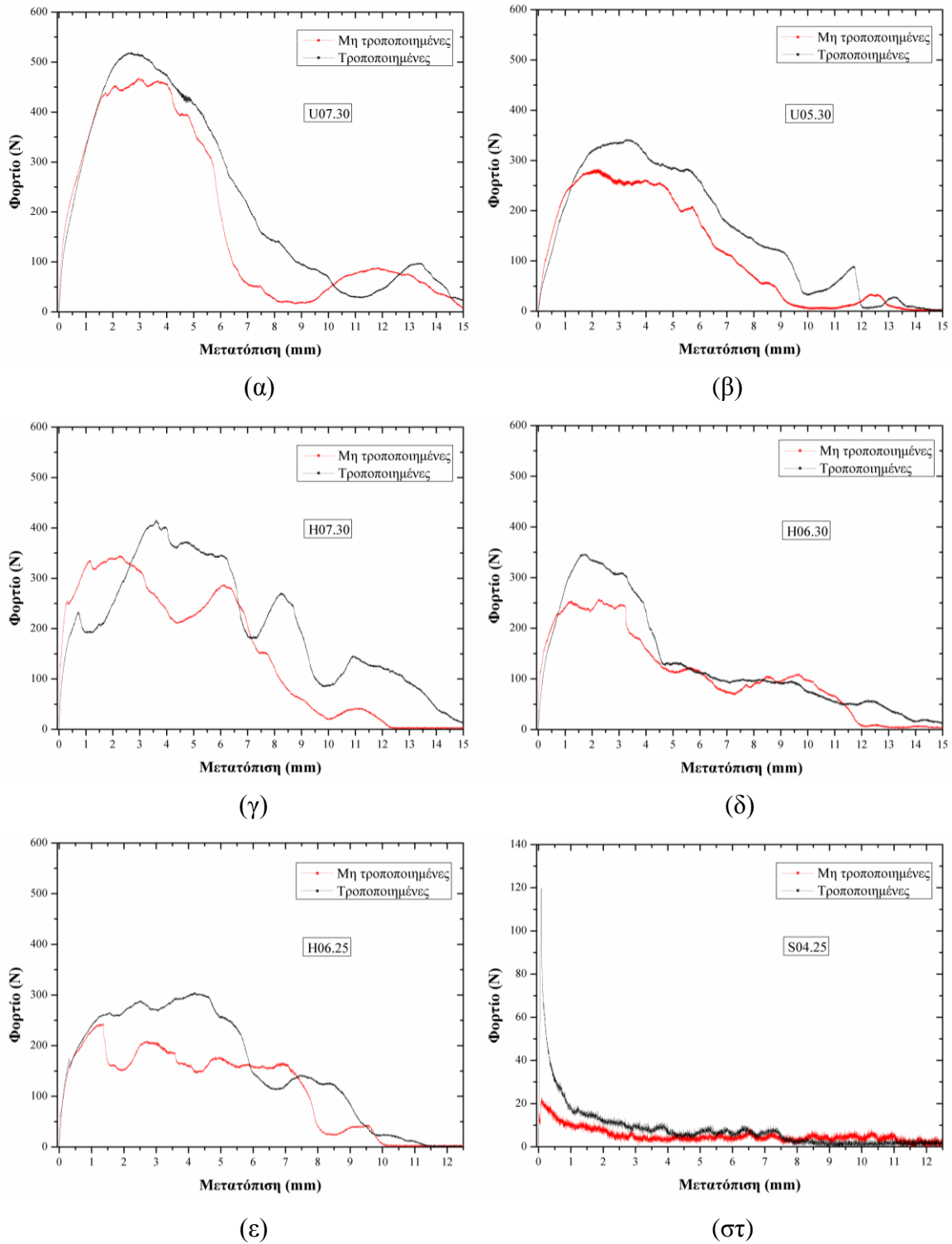
¹STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση

Στην Εικόνα 3.8 παρουσιάζεται το μέγιστο φορτίο όλων των δοκιμών που εξετάστηκαν (με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες). Οι ευθείες ίνες (S04.25) παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τιμή φορτίου και για τις δύο περιπτώσεις (τροποποιημένη και μη τροποποιημένη), το οποίο μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η ευθεία ίνα έχει τη μικρότερη διάμετρο (0.4 mm) και κοντό μήκος εξόλκευσης (12.5mm). Επιπλέον, το σχήμα της δεν προάγει τους μηχανισμούς μηχανικής πρόσφυσης (mechanical interlocking) με τη μήτρα κονιάματος. Εν αντιθέσει, οι κυματοειδείς ίνες και οι ίνες με κεκαμμένα άκρα, λόγω των σχημάτων τους, συνεισφέρουν σε μεγαλύτερη πρόσφυση με τη μήτρα και παρουσιάζουν μεγαλύτερα φορτία εξόλκευσης.



Εικόνα 3.8. Μέγιστα φορτία για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες

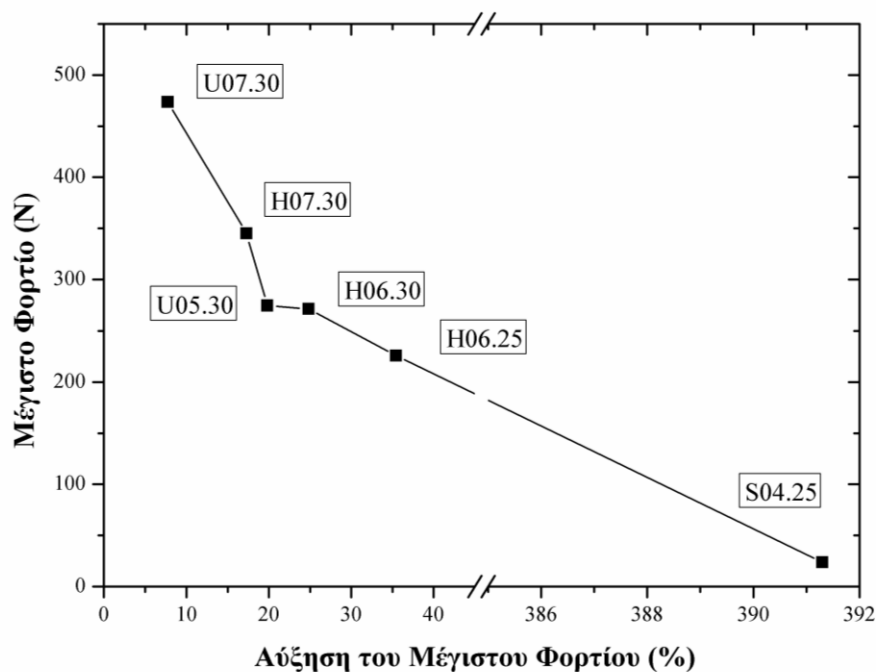
Το γεγονός αυτό είναι ορατό και στην Εικόνα 3.9 (α-στ), όπου απεικονίζονται τυπικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών για κάθε είδος που εξετάστηκε. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι το σχήμα από τις καμπύλες φορτίου - μετατόπισης εξαρτάται από το σχήμα των ινών. Στην περίπτωση των ευθειών ινών, εξαιτίας της έλλειψης αγκυρώσεων μετά το μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται μία απότομη πτώση, ενώ στην περίπτωση των ινών με κεκαμμένα άκρα και των κυματοειδών ινών, περισσότερα από ένα μέγιστα σημεία εμφανίζονται στις καμπύλες.



Εικόνα 3.9. Τυπικές καμπύλες φορτίου - μετατόπισης τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών (α) U07.30, (β) U05.30, (γ) H07.30, (δ) H06.30, (ε) H06.25, (στ) S04.25

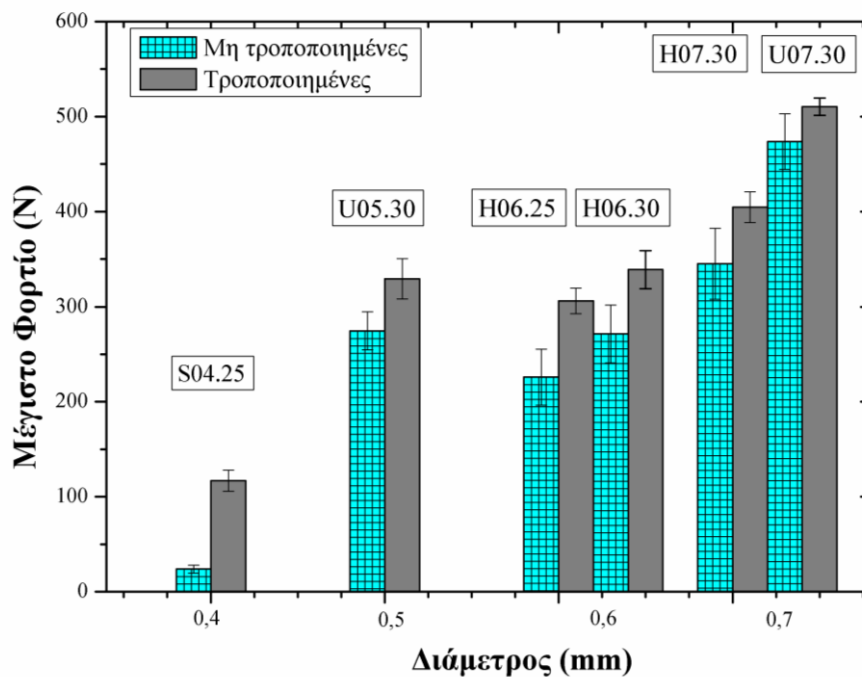
Συγκρίνοντας ίνες με την ίδια διάμετρο και μήκος εξόλκευσης, όπως τις κυματοειδείς ίνες U07.30 και τις ίνες με κεκαμμένα άκρα H07.30, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το κυματοειδές σχήμα είναι αποδοτικότερο (Εικόνα 3.8).

Όσον αφορά την επιρροή της χημικής τροποποίησης στις ίνες, μπορεί να παρατηρηθεί ότι όλες οι τροποποιημένες ίνες εμφανίζουν αυξημένο μέγιστο φορτίο σε σχέση με τις μη τροποποιημένες. Η αύξηση του μέγιστου φορτίου κυμαίνεται μεταξύ 8% και 390% για τις τροποποιημένες ίνες. Η πιο σημαντική βελτίωση παρατηρείται στην περίπτωση των ευθειών ινών, δεδομένου ότι στις συγκεκριμένες ίνες, λόγω της απουσίας της μηχανικής πρόσφυσης, η βελτίωση από την τροποποίηση είναι καίριας σημασίας. Αφετέρου, όταν υπάρχει μηχανική πρόσφυση (π.χ κυματοειδείς ίνες U07.30) η συνεισφορά της χημικής τροποποίησης είναι πιο περιορισμένη. Για την περαιτέρω κατανόηση η Εικόνα 3.10 παρουσιάζει την αύξηση του μέγιστου φορτίου λόγω της τροποποίησης ως συνάρτηση του μέγιστου φορτίου της ίδιας ίνας χωρίς τροποποίηση. Το συμπέρασμα που μπορεί να συναχθεί είναι ότι όσο πιο αδύναμη είναι η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας, τόσο πιο υψηλής σημασίας είναι η επίδραση της χημικής τροποποίησης.



Εικόνα 3.10. Αύξηση του μέγιστου φορτίου λόγω της τροποποίησης σε σχέση με το μέγιστο φορτίο των μη τροποποιημένων ινών

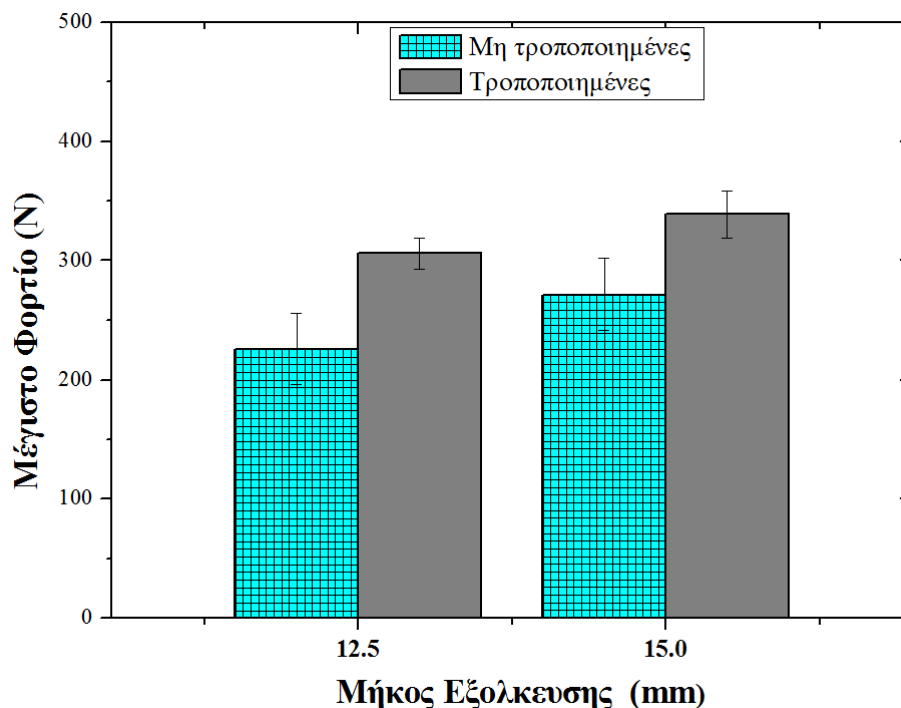
Η επίδραση της διαμέτρου των ινών στο μέγιστο φορτίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.11. Μία πρώτη παρατήρηση που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι αυξάνοντας τη διάμετρο ινών με ίδιο σχήμα, επιτυγχάνεται αύξηση των τιμών του μέγιστου φορτίου. Στις ίνες με κεκαμμένα άκρα αύξηση της διαμέτρου κατά 0.1 mm έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση του μέγιστου φορτίου κατά 19% (τροποποιημένες) και 27% (μη τροποποιημένες ίνες). Στις κυματοειδείς ίνες αυξάνοντας τη διάμετρο κατά 0.2 mm συντέλεσε σε βελτίωση του μέγιστου φορτίου κατά 55% και 72% για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες αντίστοιχα. Η επίδραση της διαμέτρου είναι πιο εμφανής στην περίπτωση των μη τροποποιημένων ινών και για τα δύο σχήματα ινών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν η χημική τροποποίηση είναι απύσχα, υπάρχει μεγαλύτερη ανάγκη για μηχανική συνάφεια η οποία προκύπτει από τον συνδυασμό γεωμετρίας και επιφάνειας επαφής μεταξύ ίνας και μήτρας.



Εικόνα 3.11. Μέγιστο φορτίο σε σχέση με τη διάμετρο τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών

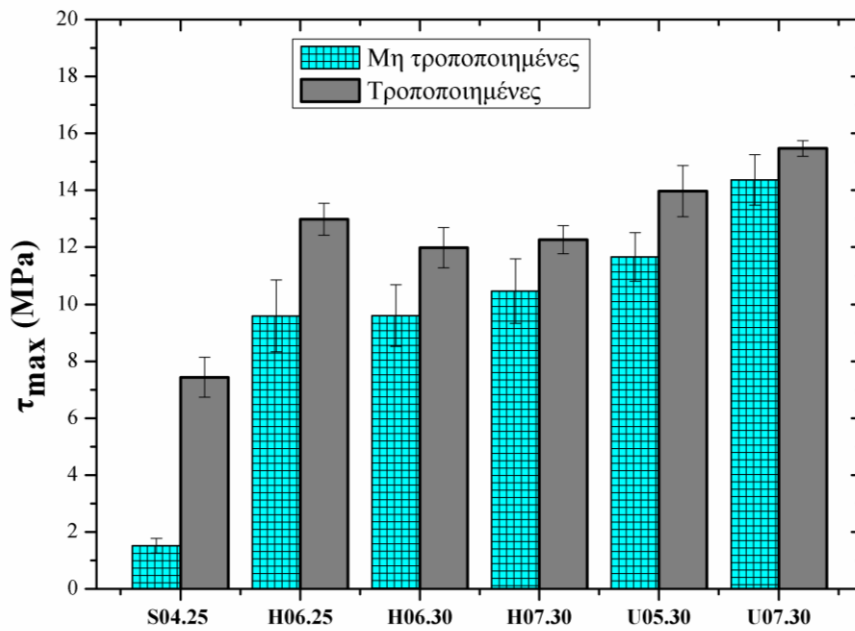
Η επίδραση του μήκους εξόλκευσης στο μέγιστο φορτίο των 0.6 mm διαμέτρου ινών παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.12. Όπως είναι εμφανές, μεγαλύτερο μήκος εξόλκευσης συντελεί σε υψηλότερες τιμές του μέγιστου φορτίου. Συγκεκριμένα, αύξηση

του μήκους εξόλκευσης της τάξης των 2.5 mm οδηγεί σε ενίσχυση του φορτίου κατά 20% στις μη τροποποιημένες και κατά 11% στις τροποποιημένες ίνες. Ομοίως με την επίδραση της διαμέτρου που προαναφέρθηκε, η επιρροή του μήκους εξόλκευσης είναι πιο εμφανής στην περίπτωση των μη τροποποιημένων ινών.



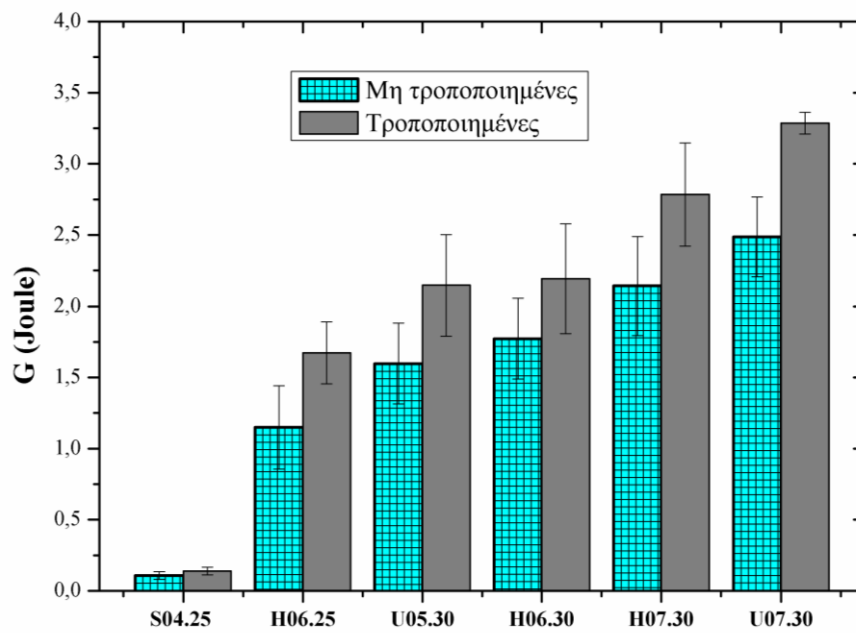
Εικόνα 3.12. Μεταβολή του μέγιστου φορτίου σε σχέση με το μήκος εξόλκευσης ινών με διάμετρο 0.6 mm

Η διεπιφανειακή διατμητική αντοχή (τ_{max}) για όλους τους τύπους των ινών απεικονίζεται στην Εικόνα 3.13. Το κυματοειδές σχήμα (U05.30, U07.30), όσον αφορά τη συνάφεια, εμφανίζεται το πιο αποτελεσματικό σε σχέση με τις ευθείες ίνες και τις ίνες με κεκαμένα άκρα. Οι ευθείες ίνες παρουσιάζουν συνολικά τις χαμηλότερες τιμές, παρότι με τη χημική τροποποίηση αυξήθηκε το τ_{max} σημαντικά. Όπως παρατηρήθηκε και με το μέγιστο φορτίο, αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε ενίσχυση της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής και για τις τροποποιημένες και τις μη τροποποιημένες ίνες, γεγονός που είναι πιο ορατό στις κυματοειδείς ίνες.

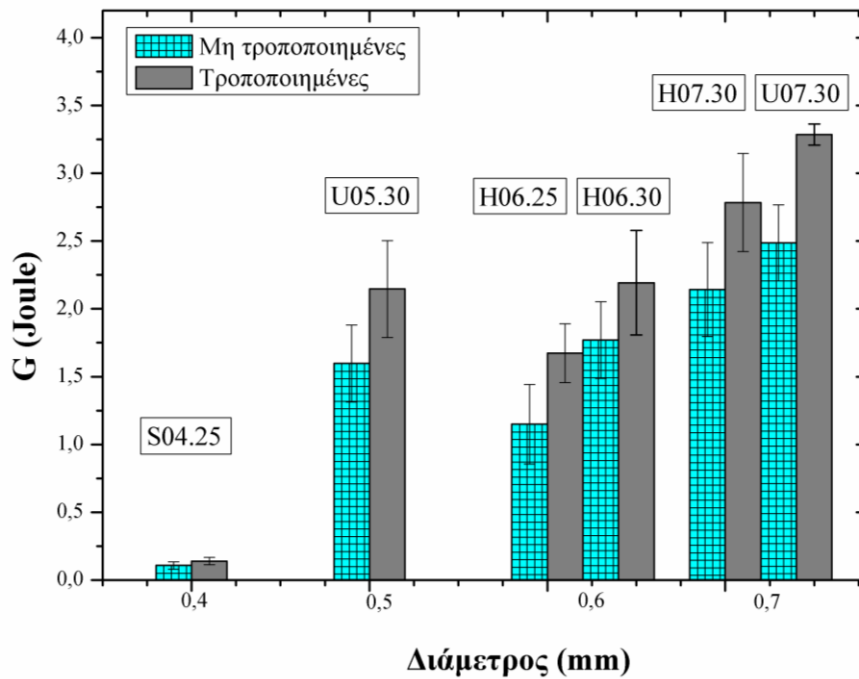


Εικόνα 3.13. Διεπιφανειακή διατμητική αντοχή για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες

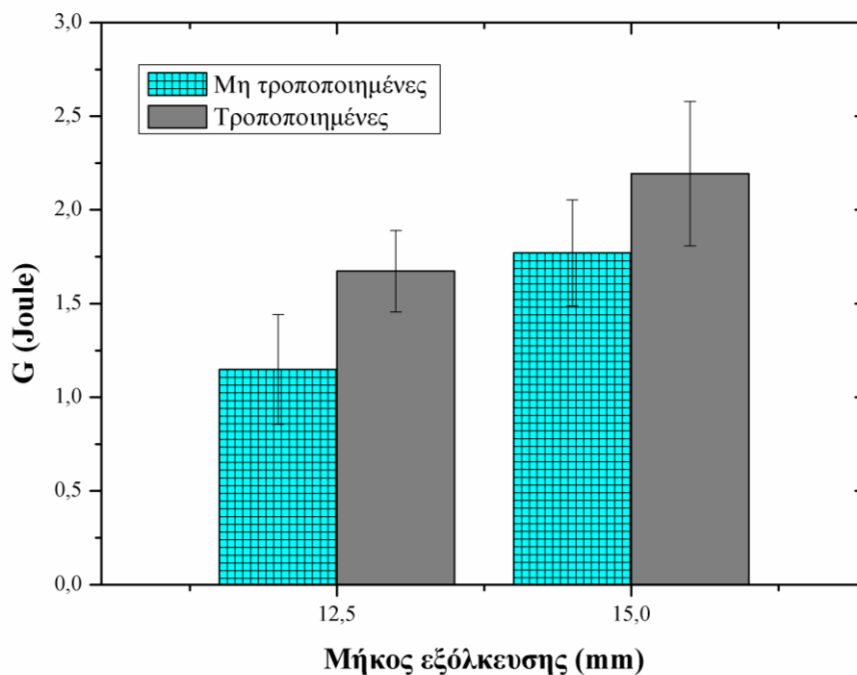
Η Εικόνα 3.14 απεικονίζει την ενέργεια εξόλκευσης (G) για όλα τα είδη των ινών. Γενικά, οι μεταβολές της ενέργειας εξόλκευσης ακολουθούν στις περισσότερες περιπτώσεις τις μεταβολές του μέγιστου φορτίου. Συνεπώς, οι κυματοειδείς ίνες είναι πιο αποτελεσματικές από τις ίνες με κεκαμένα άκρα (U07.30, H07.30), ενώ αύξηση της διαμέτρου και του μήκους εξόλκευσης συντελεί σε βελτίωσή της (Εικόνες 3.15, 3.16). Το κύριο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από την Εικόνα 3.14 είναι ότι η χημική τροποποίηση των ινών οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της ενέργειας που απαιτείται για να εξολκευθεί η ίνα από τη μήτρα.



Εικόνα 3.14. Ενέργεια εξόλκευσης για όλα τα είδη των ινών

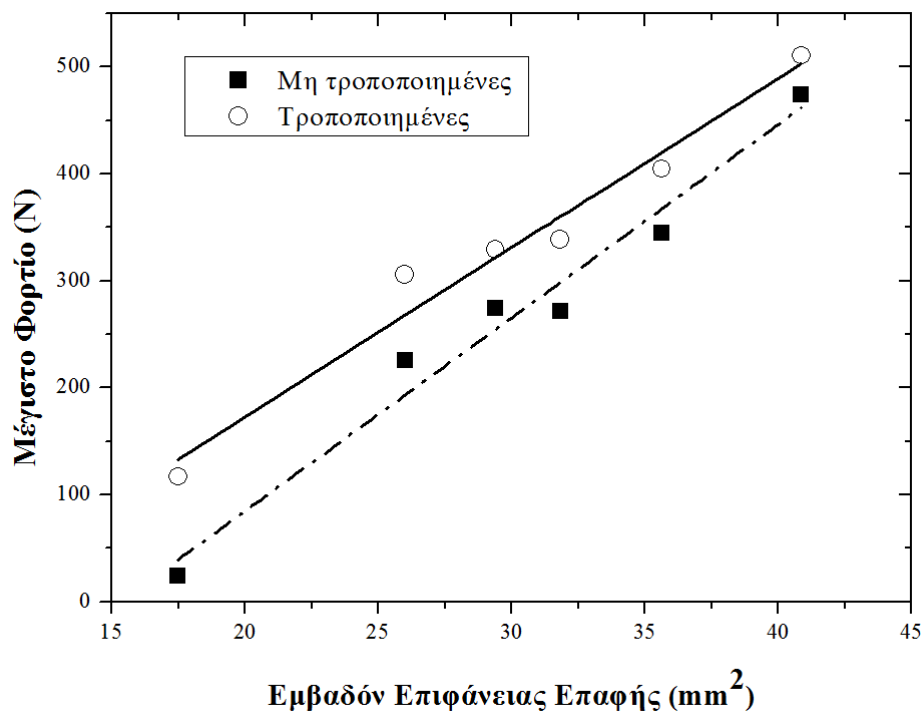


Εικόνα 3.15. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με τη διάμετρο των ινών

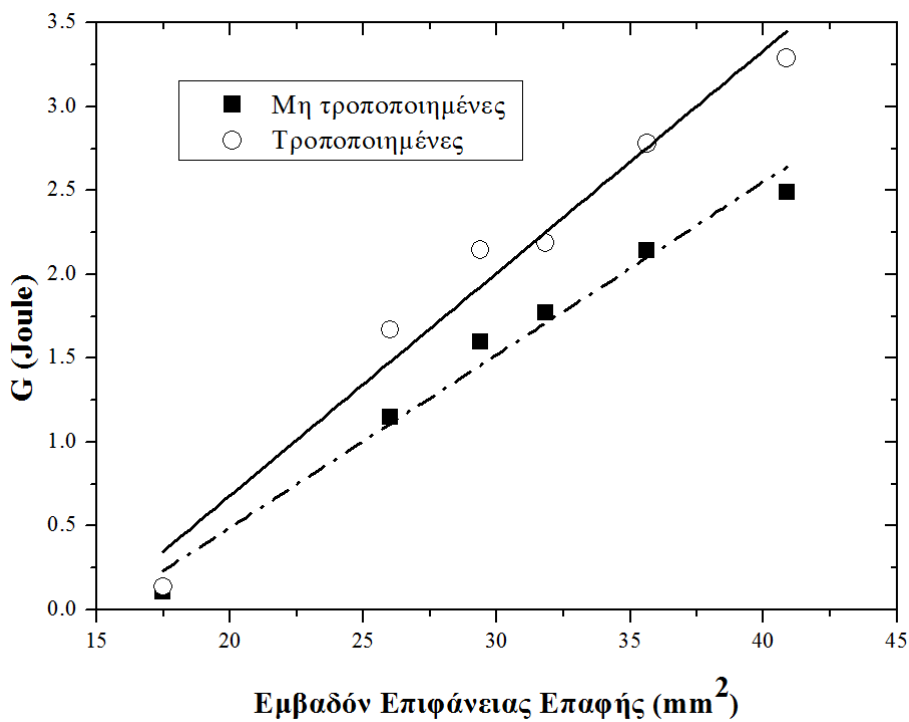


Εικόνα 3.16. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με μήκος εξόλκευσης ινών διαμέτρου 0.6 mm

Προκειμένου να αποσαφηνιστεί ο ρόλος των ποικίλων παραμέτρων στη συμπεριφορά εξόλκευσης ίνας/μήτρας, το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής της ίνας επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική γεωμετρική παράμετρος. Το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής της ίνας ενσωματώνει το μήκος εξόλκευσης, το σχήμα, τη διάμετρο και το λόγο μορφής (l/d) της σε μόνο μία παράμετρο και αντιπροσωπεύει την εμβαπτισμένη επιφάνεια της στη μήτρα κονιάματος. Η Εικόνα 3.17 (α, β) απεικονίζει το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης και την ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με την επιφάνεια επαφής των ινών αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στις προαναφερθείσες γραφικές παραστάσεις, αύξηση της συγκεκριμένης παραμέτρου συμβάλλει σε άνοδο των τιμών του φορτίου όπως και της ενέργειας εξόλκευσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι ανεξάρτητα από το σχήμα των ινών, υψηλότερο εμβαδόν επιφάνειας επαφής απαιτεί μεγαλύτερο φορτίο/ενέργεια ώστε να εξολκευθεί η εμβαπτισμένη ίνα από τη μήτρα. Οι παρακάτω, λοιπόν, γραφικές παραστάσεις υποδεικνύουν ότι η κατάλληλη ίνα μπορεί να επιλεγεί βάσει της επιφάνειας επαφής, ώστε να επιτευχθούν βέλτιστες αποδόσεις εξόλκευσης.



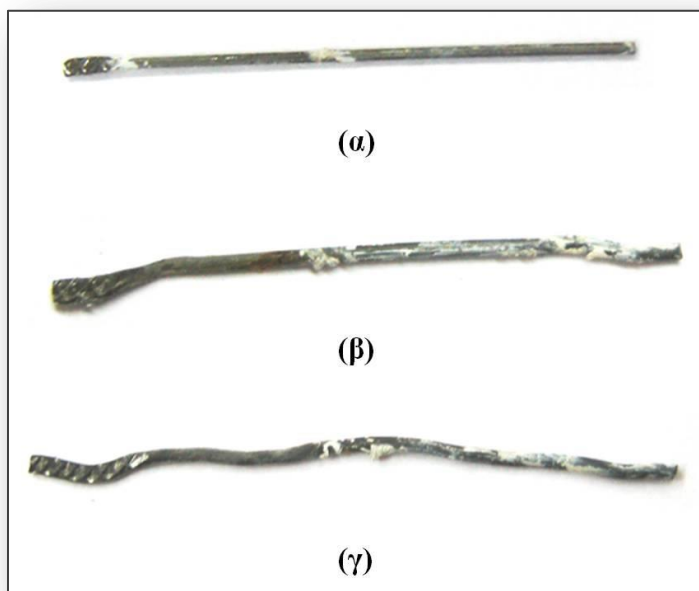
(α)



(β)

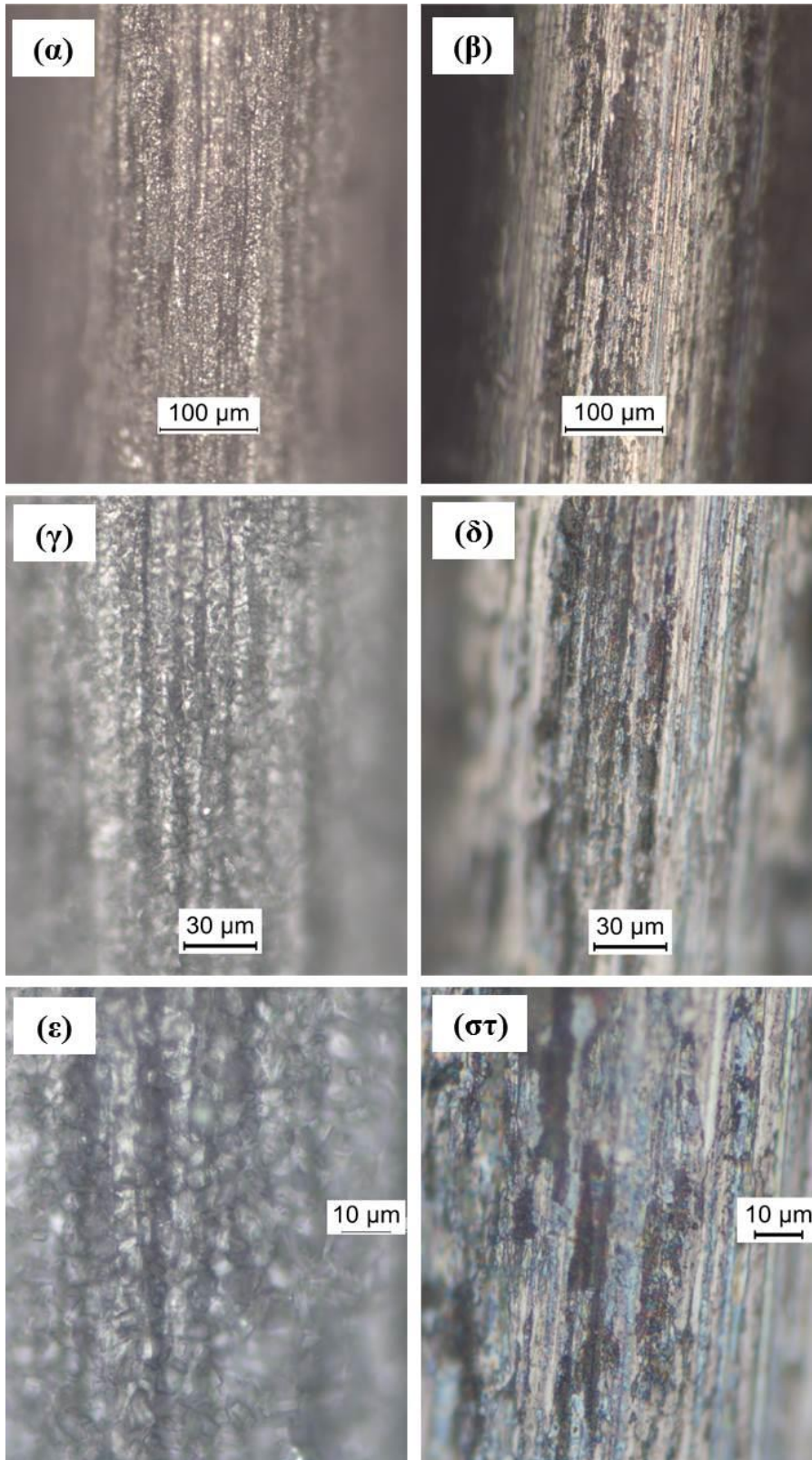
Εικόνα 3.17. (α) Φορτίο εξόλκευσης σε σχέση με το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής ινών, (β) ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με το εμβαδόν της επιφάνειας επαφής ινών

Η Εικόνα 3.18 (α-γ) παρουσιάζει ίνες με διαφορετικό σχήμα ύστερα από την εξόλκευσή τους από τη μήτρα κονιάματος. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι παραμορφωμένες ίνες (δηλαδή οι ίνες που έχουν αγκυρώσεις και καμπυλότητες) έχουν χάσει το αρχικό τους σχήμα και έχουν υποστεί σχετική ευθυγράμμιση. Η έκταση της βλάβης που επέβαλαν τα διαφορετικά σχήματα ινών στη μήτρα σχετίζεται άμεσα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών και κυρίως της διαμέτρου και των κυματώσεων/αγκυρώσεων των ινών. Όσο μεγαλύτερη η βλάβη, τόσο περισσότερη ενέργεια θα απορροφηθεί κατά τη διαδικασία εξόλκευσης. Το γεγονός αυτό μπορεί να στηριχθεί και από τα αποτελέσματα της Εικόνας 3.14, όπου η συνολική ενέργεια εξόλκευσης για τις U07.30 ίνες (μεγαλύτερη κυμάτωση και διάμετρος) είναι η υψηλότερη τόσο για τις τροποποιημένες όσο και τις μη τροποποιημένες ίνες.



Εικόνα 3.18. (α) Ευθεία ίνα, (β) ίνα με κεκαμένα άκρα, (γ) κυματοειδής ίνα, μετά τη δοκιμή εξόλκευσης

Στην Εικόνα 3.19 (α-στ) απεικονίζονται με οπτική μικροσκοπία (οπτικό μικροσκόπιο Leica DM-4000M) τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες, δίχως να έχουν υποστεί εξόλκευση. Όπως είναι εμφανές, οι μη τροποποιημένες ίνες παρουσιάζουν αυλακώσεις, οι οποίες προέρχονται από τη διαδικασία παραγωγής τους, καθώς και πιο λείες επιφάνειες από τις τροποποιημένες. Αντίθετα, η παρουσία κρυσταλλικής δομής στην επιφάνεια των τροποποιημένων ινών είναι έκδηλη, ενώ οι αυλακώσεις έχουν εξαφανιστεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην παρουσία της ανόργανης κρυσταλλικής επικάλυψης του φωσφορικού ψευδαργύρου. Προφανώς, η αρχική λεία επιφάνεια των χαλύβδινων ινών μετατράπηκε σε επιφάνεια με τραχεία τοπογραφικά χαρακτηριστικά, καθώς εμφανίστηκαν κατακρημνίσματα κρυστάλλων φωσφορικού ψευδαργύρου. Συνεπώς, η μορφολογία αυτή συνέβαλε σε βελτιωμένες ιδιότητες συνάφειας μεταξύ των ινών και της μήτρας κονιάματος, οδηγώντας στο σχηματισμό διεπιφανειακών χημικών δεσμών μεταξύ της τροποποιημένης ίνας και της μήτρας. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι σε συμφωνία με αποτελέσματα προηγούμενης έρευνας όπου η επιφάνεια των τροποποιημένων ινών εξετάστηκε με λεπτομέρεια με SEM [13].



Εικόνα 3.19. Ίνα κεκαμμένων άκρων (α) τροποποιημένη (x200), β) μη τροποποιημένη (x200), γ) τροποποιημένη (x500), δ) μη τροποποιημένη (x500), ε) τροποποιημένη (x1000), στ) μη τροποποιημένη (x1000)

3.4. Επίδραση του Οπλισμού της Μήτρας στη Συμπεριφορά Εξόλκευσης

3.4.1. Υλικά και σύνθεση δοκιμών

Στο Υποκεφάλαιο 3.4 παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης σε δύο διαφορετικές γεωμετρίες χαλύβδινων ινών, κυματοειδείς με λόγο μορφής 42.9 και ευθείες με λόγο μορφής 62.5 από μήτρα ινοπλισμένου κονιάματος με ποσοστά 2.0% και 5.0% ινών. Τα αποτελέσματά αυτά συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα του Υποκεφαλαίου 3.3, όπου η εξόλκευση των ινών πραγματοποιήθηκε από άοπλη μήτρα, ώστε να διερευνηθεί η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμών που εξετάστηκαν και οι ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 3.6. Κωδικοποίηση δοκιμών και ιδιότητες ινών

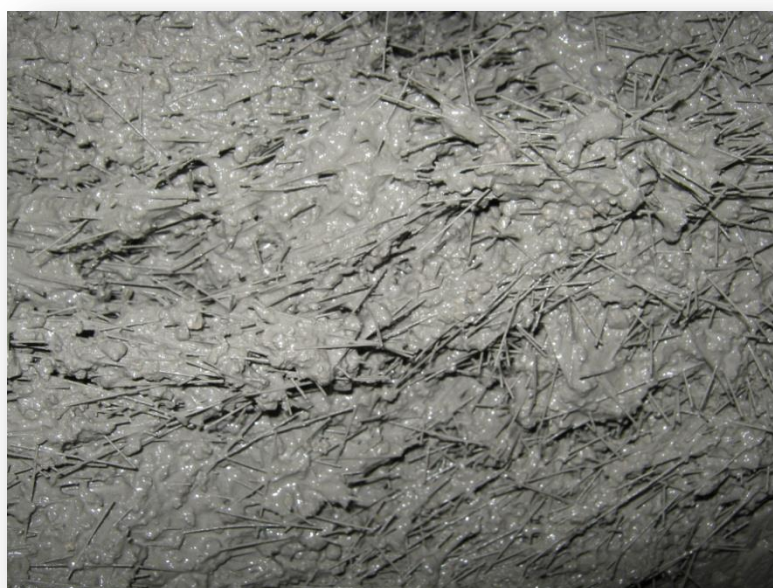
| Κωδικός | Σχήμα ινών | l^1 (mm) | d^1 (mm) | l/d^1 | % ποσοστό ινών |
|----------|--------------|------------|------------|---------|----------------|
| S04.25.2 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 2.0 |
| S04.25.5 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 5.0 |
| U07.30.2 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 2.0 |
| U07.30.5 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 5.0 |

¹*l*: Μήκος ίνας, *d*: διάμετρος, *l/d*: λόγος μορφής

Στον Πίνακα 3.7 απεικονίζονται οι αναλογίες του αναμίγματος και οι ιδιότητες του όπως η περιεκτικότητα σε αέρα σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 231 - 03 [28]. Ο λόγος N/T των δοκιμών ήταν 0.5. Το ειδικό βάρος και η απορροφητικότητα της άμμου προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [29] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος. Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση της άμμου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 136 - 01 [30]. Στην Εικόνα 3.20 απεικονίζεται το νοπό ανάμιγμα με 5.0% ευθείες ίνες.

Πίνακας 3.7. Αναλογίες και ιδιότητες αναμίγματος

| Υλικά (kg/m ³) | Ποσότητες | | | |
|----------------------------|-----------|----------|----------|----------|
| | S04.25.2 | S04.25.5 | U07.30.2 | U07.30.5 |
| Τσιμέντο τύπου ΙΙ 42.5 Ν | 440 | 440 | 440 | 440 |
| Νερό | 220 | 220 | 220 | 220 |
| Άμμος | 1535 | 1453 | 1535 | 1453 |
| Υπερρευστοποιητής | 4.5 | 5.5 | 4.5 | 5.5 |
| Ίνες | 157 | 392.5 | 157 | 392.5 |
| Ιδιότητες | | | | |
| Περιεκτικότητα σε αέρα (%) | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.9 |



Εικόνα 3.20. Νωπό ανάμγμα με ευθείες ίνες 5.0%

3.4.2. Συντήρηση των δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες μέχρι την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σε ειδικές δεξαμενές με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συνθήκες 23 ± 2 °C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [31].

3.4.3. Δοκιμές θλίψης

3.4.3.1 Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης

Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [32] σε δοκίμια διαστάσεων 150x150x150 mm. Η πειραματική διάταξη και η πειραματική διαδικασία της δοκιμής θλίψης αναλύονται εκτενέστερα στο Υποκεφάλαιο 3.3.3.1.

3.4.3.2 Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.8.

Πίνακας 3.8. Θλιπτική αντοχή

| | S04.25.2 | S04.25.5 | U07.30.2 | U07.30.5 |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Θλιπτική αντοχή (MPa) | 38.59 | 51.80 | 37.13 | 36.95 |
| STDEV¹ (MPa) | 0.74 | 1.83 | 0.94 | 2.41 |
| ¹ STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση | | | | |

Συγκριτικά με τα άοπλα δοκίμια κονιάματος, η θλιπτική αντοχή των ινοπλισμένων είναι πιο χαμηλή, λόγω των κενών που μπορεί να δημιουργήσει η προσθήκη των ινών στη μήτρα, με εξαίρεση την περίπτωση του αναμίγματος S04.25.5 που εμφανίζεται αρκετά

αυξημένη. Η επίδραση του ποσοστού όγκου ινών στη θλιπτική αντοχή αναλύεται εκτενώς στο Υποκεφάλαιο 4.3.

3.4.4 Δοκιμές εξόλκευσης

3.4.4.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Εξόλκευσης

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τις δοκιμές εξόλκευσης ήταν κυβικά διαστάσεων 100x100x100 mm. Σε κάθε δοκίμιο κονιάματος τοποθετούνταν δύο ίνες, ενώ το μήκος εμφύσησης επιλέχθηκε να είναι το μισό του μήκους κάθε ίνας. Η πειραματική διάταξη και η πειραματική διαδικασία των δοκιμών εξόλκευσης αναλύονται εκτενέστερα στο Υποκεφάλαιο 3.3.4.1.

3.4.4.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Εξόλκευσης

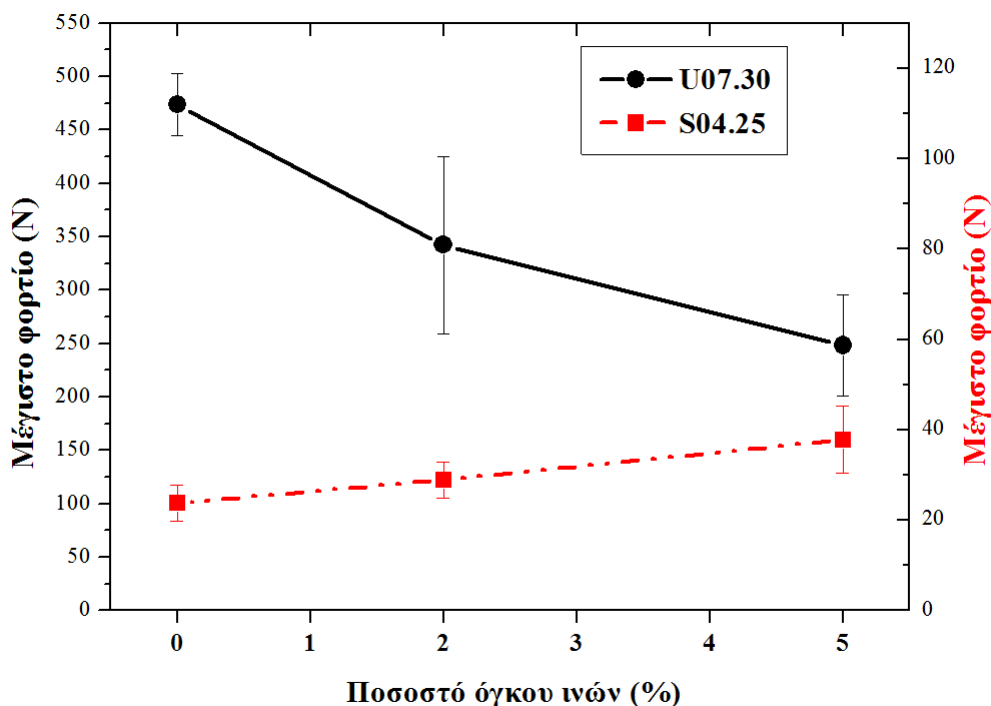
Τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.9 και στις Εικόνες 3.21 - 3.23.

Πίνακας 3.9. Αποτελέσματα δοκιμών εξόλκευσης

| Κωδικός | P_{max} (N) | $STDEV^1$ P_{max} (N) | τ_{max} (MPa) | $STDEV^1$ τ_{max} (MPa) | G (Joule) | $STDEV^1$ G (Joule) | l_e (mm) |
|----------|------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------------|--------------|------------------------|---------------|
| S04.25.2 | 28.90 | 4.01 | 1.84 | 0.26 | 0.12 | 0.04 | 12.5 |
| S04.25.5 | 37.77 | 7.45 | 2.40 | 0.47 | 0.17 | 0.03 | 12.5 |
| U07.30.2 | 342.29 | 82.86 | 10.38 | 2.51 | 1.79 | 0.46 | 15.0 |
| U07.30.5 | 248.39 | 47.41 | 7.53 | 1.44 | 1.17 | 0.23 | 15.0 |

¹STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση

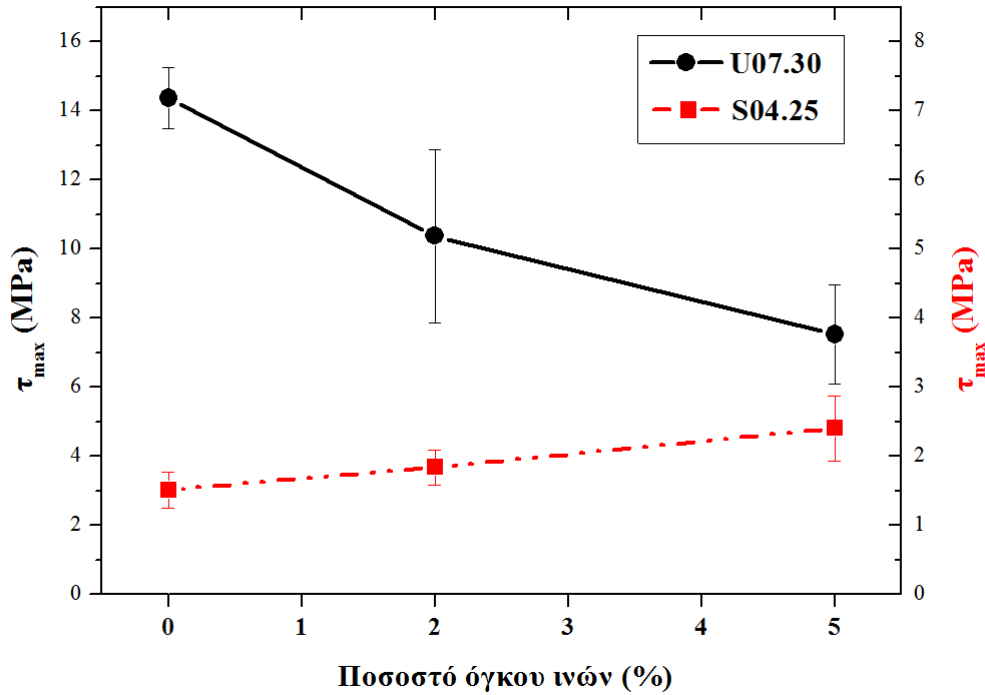
Στην Εικόνα 3.21 απεικονίζεται το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών και για τα δύο είδη ινών. Όπως παρατηρείται αύξηση του ποσοστού όγκου ινών στις κυματοειδείς ίνες οδήγησε σε αισθητή μείωση του μέγιστου φορτίου. Η ύπαρξη, λοιπόν, μεγάλων ποσοστών ινών κ.ό. συντέλεσε στην αύξηση των κενών στην περιοχή εξόλκευσης, με αποτέλεσμα τη μείωση της πρόσφυσης ίνας/μήτρας. Στην περίπτωση όμως των ευθειών ινών εμφανίζεται αύξηση του φορτίου εξόλκευσης και ειδικά για ποσοστό ινών 5.0% κ.ό, η οποία φθάνει έως και 59%. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη μικρότερη διάμετρο και μήκος που έχουν οι συγκεκριμένες ίνες, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μικρότερα κενά στην περιοχή εξόλκευσης, καθώς και στο μεγαλύτερο αριθμό τους μέσα στη μήτρα οδηγώντας στην ύπαρξη ενός πιο «πυκνού» πλέγματος και την αύξηση της πρόσφυσης. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα ενισχύεται και από τις τιμές που παρατηρήθηκαν στη θλιπτική αντοχή των αναμιγμάτων (Πίνακας 3.8), όπου η θλιπτική αντοχή του αναμίγματος S04.25.5 είναι πολύ αυξημένη.



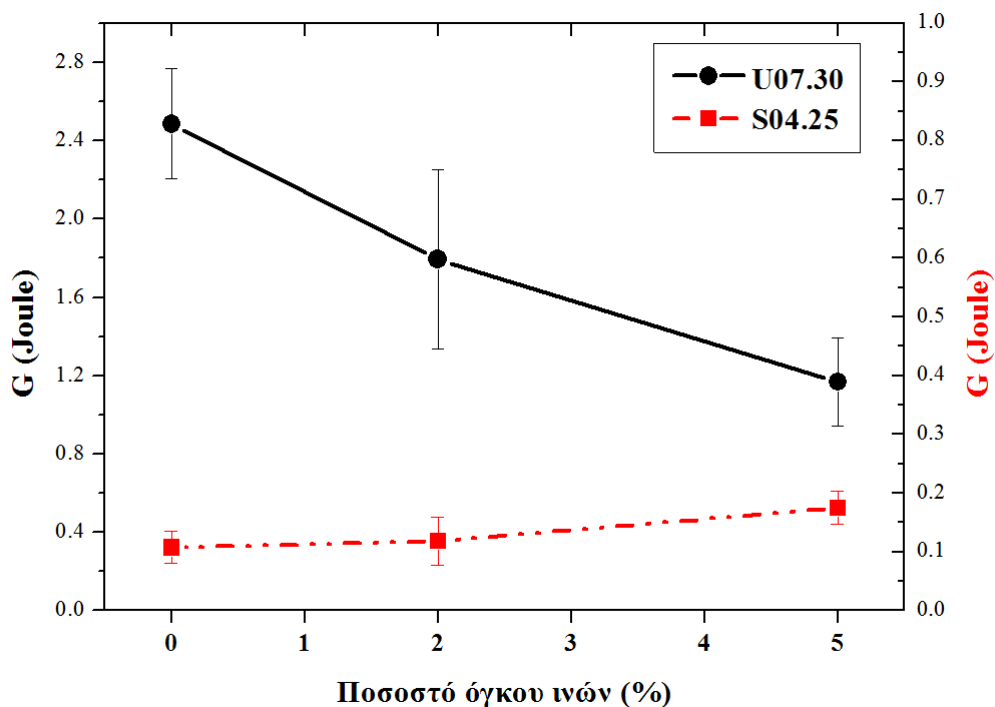
Εικόνα 3.21. Μέγιστο φορτίο εξόλκευσης σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

Αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στις Εικόνες 3.22 - 3.23, όπου απεικονίζονται η διεπιφανειακή διατμητική αντοχή και η ενέργεια εξόλκευσης σε

σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Όπως και στην περίπτωση του P_{max} , η τ_{max} και η G με αύξηση του ποσοστού ινών κ.ό. στην περίπτωση των κυματοειδών ινών μειώνονται και αυξάνονται στην περίπτωση των ευθειών ινών.



Εικόνα 3.22. Διεπιφανειακή διατμητική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών



Εικόνα 3.23. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να οδηγήσουν στη διαπίστωση ότι ίνες που σε πιο ιδανικές συνθήκες (π.χ. άοπλη μήτρα) είναι πολύ αποτελεσματικές, όπως δηλαδή οι U07.30, σε συνθήκες πιο πολύπλοκες, όπως για παράδειγμα την περίπτωση μίας ινοπλισμένης μήτρας που επιδρούν και άλλοι παράγοντες (π.χ. αριθμός ινών στη μήτρα, γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών, ύπαρξη κενών κ.τ.λ.) εμφανίζουν πιο μειωμένη αποτελεσματικότητα. Τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με του Υποκεφαλαίου 4.2, όπου οι ίνες U07.30 αποδείχθηκαν από τις λιγότερο αποδοτικές, καθώς και του Υποκεφαλαίου 4.3, όπου στα υψηλότερα ποσοστά ινών κ.ό. αποδείχθηκαν λιγότερο αποτελεσματικές από τις ευθείες.

3.5. Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης που είχαν ως στόχο τη μελέτη της διεπιφάνειας μεταξύ χαλύβδινης ίνας / μήτρας κονιάματος. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκαν ίνες διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και επιπλέον ενισχύθηκε η συνάφεια ίνας / μήτρας με χημική τροποποίηση των ιών με φωσφορικό ψευδάργυρο. Επιπροσθέτως, δοκιμές εξόλκευσης πραγματοποιήθηκαν και σε δοκίμια ινοπλισμένα με ευθείες και κυματοειδείς ίνες σε διαφορετικά ποσοστά ιών κ.ό., ώστε να μελετηθεί η επίδραση στη συμπεριφορά εξόλκευσης της ύπαρξης ιών στην περιοχή εξόλκευσης μίας ίνας.

Από τη συγκεκριμένη έρευνα διαπιστώθηκε ότι το μέγιστο φορτίο και η ενέργεια εξόλκευσης αυξάνει με την αύξηση της διαμέτρου και του μήκους εξόλκευσης των ιών. Εντούτοις, στην περίπτωση της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής, μόνο η σχέση με τη διάμετρο ήταν εφικτό να επιβεβαιωθεί για τροποποιημένες ή μη τροποποιημένες ίνες. Συνολικά το κυματοειδές σχήμα αποδείχτηκε το πιο αποδοτικό σε σχέση με τις ίνες με κεκαμένα άκρα και τις ευθείες ίνες.

Η χημική τροποποίηση των ιών με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ αποτελεσματική, ειδικά όταν η μηχανική πρόσφυση ήταν ανύπαρκτη (ευθείες ίνες). Όσο πιο αδύναμη, λοιπόν, είναι η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας, τόσο σημαντικότερη είναι η επίδραση της χημικής τροποποίησης. Με τη βοήθεια της οπτικής μικροσκοπίας επισημάνθηκε ότι η τροποποίηση με φωσφορικό ψευδάργυρο είχε ως αποτέλεσμα το σχηματισμό τραχείας τοπογραφικής μορφολογίας στην επιφάνεια της ίνας. Επιπλέον, η χημική τροποποίηση οδήγησε σε σημαντικές αυξήσεις στο μέγιστο φορτίο, τη διεπιφανειακή διατμητική αντοχή και την ενέργεια που απαιτήθηκε για να εξολκευθεί η ίνα από τη μήτρα.

Η βέλτιστη ίνα μπορεί να επιλεγθεί βάσει του εμβαδού της επιφάνειας επαφής, ώστε να επιτευχθούν μέγιστες αποδόσεις κατά την εξόλκευση, αφού και το μέγιστο φορτίο και η ενέργεια εξόλκευσης σχετίζονται άμεσα με αυτή την παράμετρο.

Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι το μέγιστο φορτίο, η διεπιφανειακή διατμητική αντοχή και η ενέργεια εξόλκευσης αυξάνονται, καθώς η κατ'όγκον περιεκτικότητα στις ευθείες ίνες μεγαλώνει, σε αντίθεση με την περίπτωση των κυματοειδών ιών. Η συγκεκριμένη συσχέτιση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ίνες που σε πιο ιδανικές συνθήκες είναι πολύ

αποτελεσματικές, σε συνθήκες που επιδρούν και άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα ο αριθμός των ινών στη μήτρα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών και η ύπαρξη κενών, εμφανίζουν πιο μειωμένη αποτελεσματικότητα.

3.6. Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

1. ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002) Report on Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
2. Banthia N, Sappakittipakorn M (2007) Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research* 37 (9):1366-1372
3. Johnston CD, Skarendahl Å (1992) Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters. *Materials and Structures* 25 (4):191-200
4. Mailhot T, Bissonnette B, Saucier F, Pigeon M (2001) Flexural fatigue behavior of steel fibre reinforced concrete before and after cracking. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 34 (240):351-359
5. Singh SP, Kaushik SK (2003) Fatigue strength of steel fibre reinforced concrete in flexure. *Cement and Concrete Composites* 25 (7):779-786
6. Yazıcı Ş, İnan G, Tabak V (2007) Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials* 21 (6):1250-1253
7. Yue CY, Cheung WL (1992) Interfacial properties of fibre-reinforced composites. *Journal of Materials Science* 27 (14):3843-3855
8. Khatam H, Pindera MJ (2010) Plasticity-triggered architectural effects in periodic multilayers with wavy microstructures. *International Journal of Plasticity* 26 (2):273-287
9. Banthia N, Yan C (1996) Bond-slip characteristics of steel fibers in high reactivity metakaolin (HRM) modified cement-based matrices. *Cement and Concrete Research* 26 (5):657-662
10. Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM (2010) Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22 (1):1-9

11. Hamoush S, Abu-Lebdeh T, Cummins T, Zornig B (2010) Pullout characterizations of various steel fibers embedded in very high-strength concrete. *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 3 (2):418-426
12. Naaman AE, Najm H (1991) Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete. *ACI Materials Journal* 88 (2):135-145
13. Sugama T, Carciello N, Kukacka LE, Gray G (1992) Interface between zinc phosphate-deposited steel fibres and cement paste. *Journal of Materials Science* 27 (11):2863-2872
14. Chanvillard G, Aïtcin P-C (1996) Pull-out behavior of corrugated steel fibers qualitative and statistical analysis. *Advanced Cement Based Materials* 4 (1):28-41
15. Robins P, Austin S, Jones P (2002) Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 35 (251):434-442
16. Lee Y, Kang S-T, Kim J-K (2010) Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix. *Construction and Building Materials* 24 (10):2030-2041
17. Shannag MJ, Brincker R, Hansen W (1997) Pullout behavior of steel fibers from cement-based composites. *Cement and Concrete Research* 27 (6):925-936
18. Badanoiu A, Holmgren J (2003) Cementitious composites reinforced with continuous carbon fibres for strengthening of concrete structures. *Cement and Concrete Composites* 25 (3):387-394
19. Baena M, Torres L, Turon A, Barris C (2009) Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composites Part B: Engineering* 40 (8):784-797
20. Fu X, Lu W, Chung DDL (1996) Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix. *Cement and Concrete Research* 26 (7):1007-1012
21. Grosse C, Reinhardt H-W Monitoring the steel-concrete interaction using acoustic emission techniques. In: R. Eligehausen, W. Fuchs, G. Genesio, P. Grosser (ed) 2nd Int. Symp. on Connections between Steel and Concrete, Stuttgart, Germany, 2007. *Ibidem Publ* 785-794

22. Lee J-Y, Kim T-Y, Kim T-J, Yi C-K, Park J-S, You Y-C, Park Y-H (2008) Interfacial bond strength of glass fiber reinforced polymer bars in high-strength concrete. *Composites Part B: Engineering* 39 (2):258-270
23. Li VC, Wang Y, Backer S (1990) Effect of inclining angle, bundling and surface treatment on synthetic fibre pull-out from a cement matrix. *Composites* 21 (2):132-140
24. Abu-Lebdeh T, Hamoush S, Heard W, Zornig B (2011) Effect of matrix strength on pullout behavior of steel fiber reinforced very-high strength concrete composites. *Construction and Building Materials* 25 (1):39-46
25. Chan Y-W, Chu S-H (2004) Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research* 34 (7):1167-1172
26. Gray RJ, Johnston CD (1984) The effect of matrix composition on fibre/matrix interfacial bond shear strength in fibre-reinforced mortar. *Cement and Concrete Research* 14 (2):285-296
27. Sun M, Wen D-J, Wang H-W (2012) Influence of corrosion on the interface between zinc phosphate steel fiber and cement. *Materials and Corrosion* 63 (1):67-72
28. ASTM Standard C 231 - 03 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
29. ASTM Standard C 128 - 01e1 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
30. ASTM Standard C 136 - 01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
31. ASTM Standard C 192/C 192M - 98 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (1998). ASTM International, West Conshohocken, PA
32. BS EN 12390-3:2002 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens (2002). British Standard Institution

Κεφάλαιο 4

**ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ
ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΘΛΙΠΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

4.1.1. Στόχος – Αντικείμενο

Στο παρόν Υποκεφάλαιο μελετάται η επίδραση της ποιότητας της μήτρας στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες σκυροδέματος οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες. Όπως θα αναλυθεί εκτενώς στο Υποκεφάλαιο 4.1.2, η ποιότητα της μήτρας του σκυροδέματος καθορίζεται σημαντικά από το λόγο νερού / τσιμέντο (N/T), ο οποίος επιδρά τόσο στην ποιότητα ενυδάτωσης όσο και στην εργασιμότητα, αλλά και στις μηχανικές ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό, ερευνούνται τρεις διαφορετικοί ολικοί λόγοι N/T (0.5, 0.6 και 0.7) και δύο διαφορετικές γεωμετρίες ινών (κυματοειδείς και ίνες με κεκαμένα άκρα). Το ποσοστό ινών που χρησιμοποιείται στα ινοπλισμένα σκυροδέματα είναι 1.0% κ.ό σκυροδέματος.

Συνολικά, παρασκευάστηκαν εννέα αναμίγματα που περιλαμβάνουν ινοπλισμένες και άοπλες συνθέσεις σκυροδέματος, ώστε να αξιολογηθεί επιπλέον και η προσθήκη των ινών στο σκυρόδεμα για κάθε λόγο N/T. Η αξιολόγηση των καμπτικών ιδιοτήτων πραγματοποιείται με την εφαρμογή του νέου προτύπου ASTM C 1609/C 1609M - 05 [1].

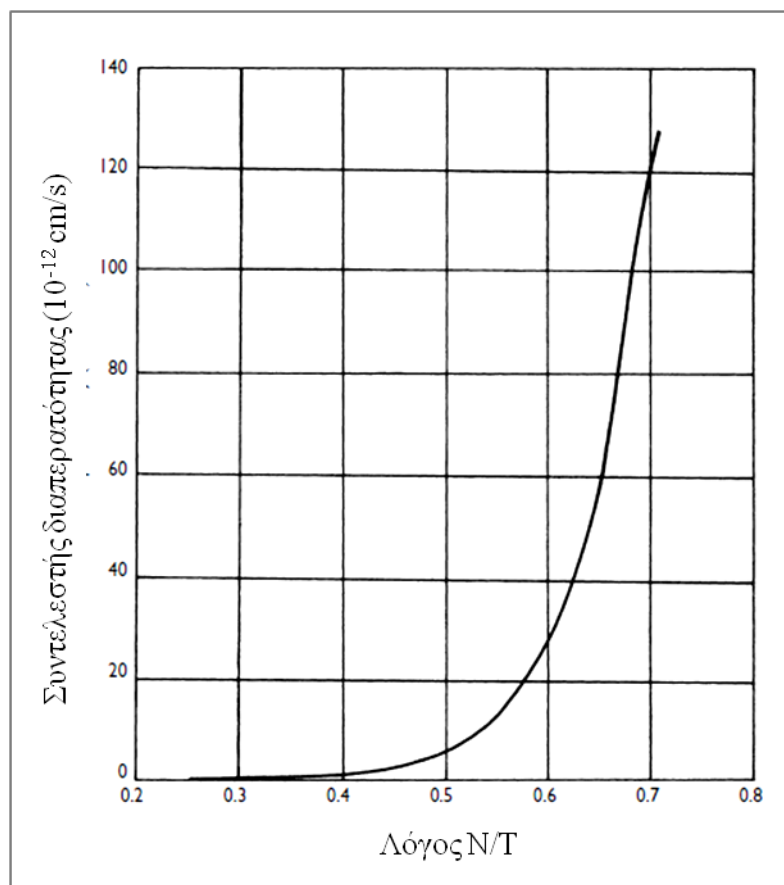
4.1.2. Εισαγωγή

Ο λόγος N/T αποτελεί μία από τις παλαιότερες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία σκυροδέματος. Το νερό συνιστά ένα βασικό συστατικό του σκυροδέματος απαραίτητο για να επιτραπεί η διεξαγωγή της ενυδάτωσης και να παραχθεί ένα εργάσιμο ανάμικτο [2]. Η αρχική ενυδάτωση καθορίζει τα σωματίδια τσιμέντου σε

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

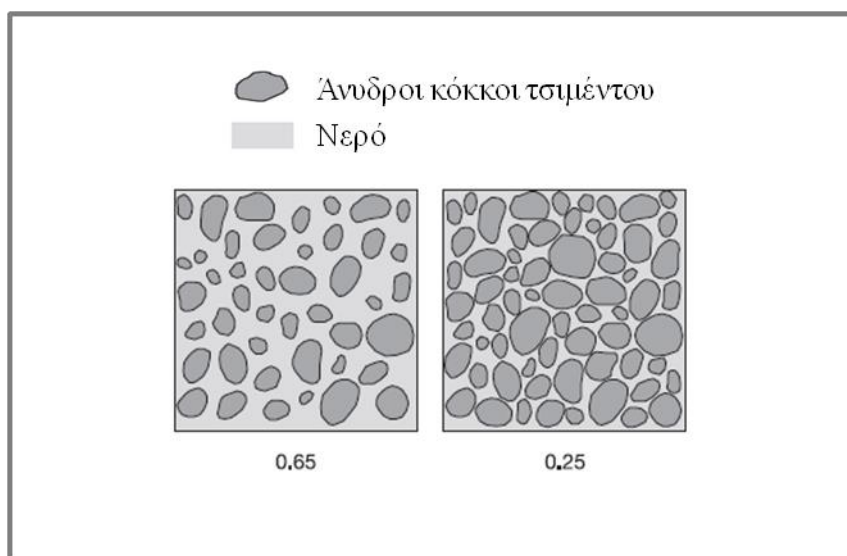
μία αδύναμη δομή που περιβάλλεται από χώρο πληρωμένο με νερό. Όσο υψηλότερη είναι η αρχική περιεκτικότητα σε νερό, τόσο μεγαλύτερα θα είναι τα διαστήματα μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου. Δεδομένου ότι το σκυρόδεμα δεν αφήνεται να ξηραθεί, με την πάροδο του χρόνου οι κόκκοι του τσιμέντου συνεχίζουν να ενυδατώνονται και πληρώνουν το διάστημα ανάμεσα τους με ένα μίγμα από πόρους και υδρίτες. Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική απόσταση μεταξύ των κόκκων τσιμέντου (δηλαδή όσο υψηλότερος ο λόγος N/T), τόσο περισσότεροι είναι οι πόροι ανά μονάδα όγκου και τόσο πιο αδύναμο είναι το τελικό σκυρόδεμα. Όπου ο αρχικός λόγος N/T είναι υψηλός, η τελική πορώδης δομή είναι διασυνδεδεμένη μέσα στους υδρίτες και συντελεί σε ένα σκυρόδεμα με χαμηλή ανθεκτικότητα, υψηλή διεισδυτικότητα και χαμηλή αντοχή [3].

Το νερό, λοιπόν, είναι το χειρότερο συστατικό του σκυροδέματος σχετικά με τη διαπερατότητα. Στην Εικόνα 4.1.1 παρουσιάζεται ο λόγος N/T σε σχέση με το συντελεστή διαπερατότητας [4].



Εικόνα 4.1.1. Σχέση μεταξύ του λόγου N/T και της διαπερατότητας [4]

Στην Εικόνα 4.1.2 απεικονίζεται μία οπτική εκτίμηση της διαφοράς των κενών των σωματιδίων τσιμέντου για τσιμεντόπαστα με N/T 0.65 και 0.25. Όπως είναι ορατό, στον υψηλό λόγο N/T, τα προϊόντα ενυδάτωσης είναι αναγκαίο για να δημιουργήσουν διασωματιδιακούς δεσμούς που δίνουν την αντοχή στο ενυδατωμένο τσιμέντο (και σκυροδέμα) να επεκταθούν σε αρκετή απόσταση. Οπότε, η ανάπτυξη δεσμών επηρεάζεται άμεσα από τον υψηλό λόγο N/T, καθυστερώντας την αύξηση της αντοχής και την τελική της τιμή [2].



Εικόνα 4.1.2. Διαγραμματική απεικόνιση νωπής τσιμεντόπαστας με N/T 0.65 και 0.25 [2]

Είναι γενικά γνωστή η σχέση μεταξύ του λόγου N/T και της θλιπτικής αντοχής, καθώς και ότι η παράμετρος N/T έχει πρωταρχική επιρροή στην αντοχή [2]. Ο Duff Abrams το 1918 ανακάλυψε μία σχέση μεταξύ της αντοχής του σκυροδέματος και του λόγου N/T (Abrams' law), η οποία δίνεται από την παρακάτω έκφραση [5]:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} \quad (4.1.1)$$

Όπου: k_1 και k_2 είναι εμπειρικές σταθερές
 w/c είναι ο λόγος N/T [5]

Σύμφωνα με το νόμο του Abrams, η αντοχή του σκυροδέματος είναι αντιστρόφως ανάλογη με το λόγο N/T υποθέτοντας ότι υπάρχει πλήρης συμύκνωση, σε δεδομένο χρόνο και κανονική θερμοκρασία. Ο νόμος του Abrams είναι μια ειδική περίπτωση ενός γενικευμένου κανόνα που διατυπώθηκε εμπειρικά από τον Feret [6]:

$$f_c = K \left[\frac{V_c}{V_c + V_w + a} \right]^2 \quad (4.1.2)$$

Όπου: f_c είναι η αντοχή του σκυροδέματος,

V_c , V_w και a είναι οι απόλυτοι όγκοι του τσιμέντου, του νερού και του εγκλωβισμένου αέρα,

K είναι σταθερά [6]

Η σημαντική επιρροή του λόγου N/T στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος και του κονιάματος είναι υψηλού ενδιαφέροντος για πολλά χρόνια. Πληθώρα ερευνών έχει πραγματοποιηθεί και συνεχίζει να πραγματοποιείται για την επιρροή της συγκεκριμένης παραμέτρου στις ιδιότητες ποικίλων ειδών σκυροδέματος και κονιάματος [7-20].

Πιο συγκεκριμένα, οι Ait-Aider κ.ά. [11] αναφέρουν ότι μπορεί σε κανονικές συνθήκες αύξηση του λόγου N/T να οδηγεί γενικά σε μείωση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, σε δυσμενείς, όμως, συνθήκες θερμού κλίματος αύξηση της συγκεκριμένης παραμέτρου εντός συγκεκριμένου ορίου δεν έχει αξιοσημείωτη επιρροή στην αντοχή του. Η πρόσθετη αυτή ποσότητα νερού μπορεί να έχει διπλή λειτουργία, που θα συνίσταται από τη διατήρηση της εργασιμότητας και επιπλέον αντιστάθμιση του νερού της ανάμιξης που εξατμίζεται.

Οι Alawode κ.ά. [21] μελέτησαν την επίδραση του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή και την εργασιμότητα του σκυροδέματος, καθώς και του σκυροδέματος με λατερίτη (lateritic concrete) και συμπέραναν ότι οι θλιπτικές τους αντοχές αύξαιναν με την ηλικία και μειωνόταν με την αύξηση του λόγου N/T. Στην περίπτωση όμως των λατεριτικών σκυροδεμάτων, παρατηρήθηκε μία πάρα πολύ σημαντική μείωση στη θλιπτική τους αντοχή όταν λόγος N/T υπερέβαινε την τιμή 0.65.

Οι Shamsai κ.ά. [22] ερεύνησαν το ρόλο του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή σκυροδέματος με νανοπυρίτιο (nano silica) σε 7, 28 και 91 ημέρες. Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της θλιπτικής αντοχής με μείωση του λόγου N/T.

Επιπλέον, οι Zhang κ.ά. [23] διερεύνησαν την επιρροή του λόγου N/T και της ηλικίας ωρίμανσης στην αντοχή του ανακυκλούμενου σκυροδέματος. Κατέληξαν ότι με την αύξηση της ηλικίας ωρίμανσης όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος N/T τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός ανάπτυξης της θλιπτικής αντοχής.

Κατά τους Mailhot κ.ά. [24] που ερεύνησαν την καμπτική συμπεριφορά σε κόπωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα με δύο διαφορετικούς λόγους N/T (0.45 and 0.35) και διαφορετική γεωμετρία ινών, η καμπτική απόκριση των ινοπλισμένων αναμιγμάτων είναι αρκετά μεταβαλλόμενη πριν και μετά τη ρωγμάτωση.

Επιπροσθέτως, οι Zhao κ.ά [25] διερεύνησαν διάφορες μηχανικές ιδιότητες ενός είδους σκυροδέματος μικρού ειδικού βάρους (Full Lightweight Concrete) με χαλύβδινες ίνες συμπεραίνοντας ότι επηρεάζονται λίγο από το λόγο N/T.

Επίσης, η παράμετρος N/T έχει προσεγγιστεί και με μη καταστροφικές μεθόδους [26,27]. Συγκεκριμένα, οι Philippidis και Aggelis [27] χρησιμοποίησαν μία μέθοδο ακουστο - υπερήχων για τον προσδιορισμό του λόγου N/T σε δοκίμια σκυροδέματος διάφορων ηλικιών από 2 έως 90 ημέρες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο λόγος N/T αποτελεί γενικά μία σημαντική παράμετρο σχετικά με τις ιδιότητες ποικίλων ειδών σκυροδέματος. Αναφορικά με το ινοπλισμένο σκυροδέμα, παρόλο που υπάρχουν μελέτες για διάφορες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με το λόγο N/T, η έρευνα που αφορά τις καμπτικές ιδιότητες και ιδίως την καμπτική δυσθραυστότητα σκυροδέματος με ίνες χάλυβα είναι περιορισμένη και ιδιαίτερα με το νέο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M [1]. Συνεπώς στο παρόν Κεφάλαιο θα μελετηθεί η επίδραση της συγκεκριμένης παραμέτρου στις ιδιότητες των νωπών ινοπλισμένων αναμιγμάτων με ίνες χάλυβα, καθώς και στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες τους.

4.1.3. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων

Στο Κεφάλαιο 4.1 μελετήθηκε η επίδραση του λόγου N/T στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Στον Πίνακα 4.1.1 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμίων που εξετάστηκαν και οι ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε είδος δοκιμίων. Στην Εικόνα 4.1.3 (α, β) απεικονίζονται οι κυματοειδείς και οι ίνες με κεκαμένα άκρα που χρησιμοποιήθηκαν. Οι ίνες με κεκαμένα

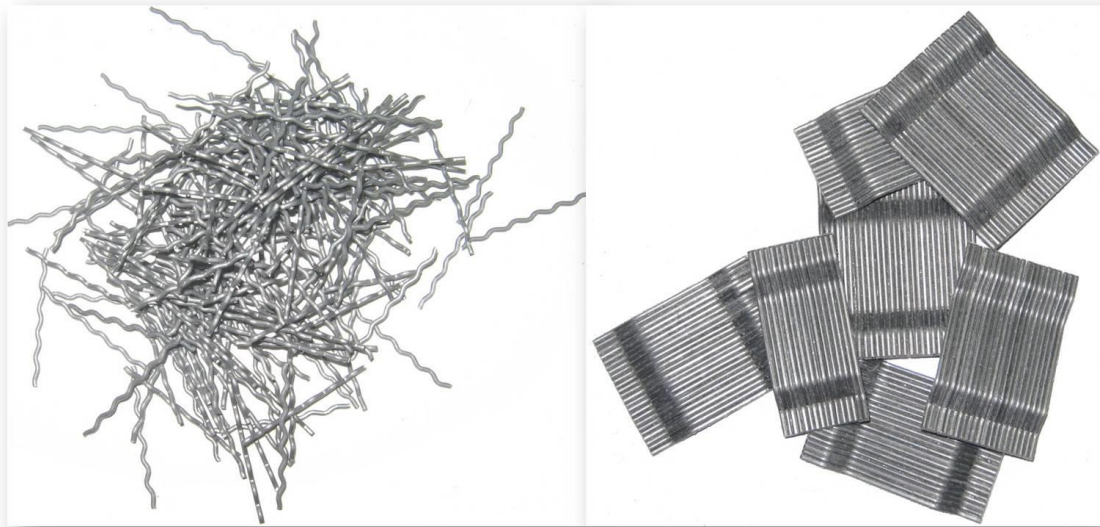
4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

άκρα ήταν ενωμένες σε δεσμίδες με υδροδιαλυτή κόλλα, οι οποίες κατά την ανάμιξη διαχωρίζονταν.

Πίνακας 4.1.1. Κωδικοποίηση δοκιμών και χαρακτηριστικά ινών

| Κωδικός | Σχήμα ινών | l^1 (mm) | d^1 (mm) | l/d^1 (1) | N/T |
|--------------|----------------|------------|------------|-------------|-----|
| Pwc05 | Άοπλο | - | - | - | 0.5 |
| Hwc05 | Κεκαμμένα άκρα | 30 | 0.75 | 40.0 | 0.5 |
| Wwc05 | Κυματοειδείς | 25 | 0.75 | 33.3 | 0.5 |
| Pwc06 | Άοπλο | - | - | - | 0.6 |
| Hwc06 | Κεκαμμένα άκρα | 30 | 0.75 | 40.0 | 0.6 |
| Wwc06 | Κυματοειδείς | 25 | 0.75 | 33.3 | 0.6 |
| Pwc07 | Άοπλο | - | - | - | 0.7 |
| Hwc07 | Κεκαμμένα άκρα | 30 | 0.75 | 40.0 | 0.7 |
| Wwc07 | Κυματοειδείς | 25 | 0.75 | 33.3 | 0.7 |

¹l: Μήκος ίνας, d: διάμετρος, l/d: λόγος μορφής



(α)

(β)

Εικόνα 4.1.3. α) Κυματοειδείς ίνες λόγω μορφής 33.3 και β) ίνες με κεκαμμένα άκρα λόγω μορφής 40.0

Στον Πίνακα 4.1.2 απεικονίζονται τα υλικά των αναμίξεων και οι ποσότητές τους. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1.0% κ.ό σκυροδέματος, ενώ η ποσότητα του υπερρευστοποιητή προσαρμόστηκε σε κάθε ανάμιγμα. Για τη συμπύκνωση των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε τράπεζα δόνησης. Τα ειδικά βάρη και η απορροφητικότητα της άμμου και της ψηφίδας προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [28] και ASTM C 127 - 01 [29] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος.

Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 136 - 01 [30]. Η άμμος αποτελεί το 75% της συνολικής ποσότητας των αδρανών και η ψηφίδα το 25%.

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.1.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3)

| ΥΛΙΚΑ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΩΝ (kg/m^3) | | | | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------|-----|--------------------------|----------------|--------------------------------|------|
| | | | | ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ | | | ΙΝΕΣ |
| Κωδικός | Τσιμέντο ¹ (kg) | Νερό (kg) | N/T | Θραυστή Άμμος (kg) | Ψηφίδα (kg) | Υπερρευστο- ποιητής (kg) | (kg) |
| Pwc05 | 440 | 220 | 0.5 | 1197 | 399 | 3.0 | 0.0 |
| Hwc05 | 440 | 220 | 0.5 | 1177 | 392 | 3.1 | 78.5 |
| Wwc05 | 440 | 220 | 0.5 | 1177 | 392 | 3.1 | 78.5 |
| Pwc06 | 440 | 264 | 0.6 | 1112 | 371 | 1.3 | 0.0 |
| Hwc06 | 440 | 264 | 0.6 | 1092 | 364 | 1.4 | 78.5 |
| Wwc06 | 440 | 264 | 0.6 | 1092 | 364 | 1.4 | 78.5 |
| Pwc07 | 440 | 308 | 0.7 | 1026 | 342 | - | 0.0 |
| Hwc07 | 440 | 308 | 0.7 | 1006 | 335 | - | 78.5 |
| Wwc07 | 440 | 308 | 0.7 | 1006 | 335 | - | 78.5 |

¹Τύπος τσιμέντου II42.5N

4.1.4. Συντήρηση των δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες μέχρι την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σε ειδικές δεξαμενές με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συνθήκες 23 ± 2 °C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [31].

4.1.5. Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος

Δοκιμές κάθισης, χρόνου Vebe και ποσοστού αέρα πραγματοποιήθηκαν σε όλα τα αναμίγματα, ώστε να μελετηθεί η επίδραση του λόγου N/T στην εργασιμότητα και την περιεκτικότητα των αναμιγμάτων σε αέρα. Για την κάθιση ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C 143/C 143M - 03 [32], για τη δοκιμή Vebe το πρότυπο BS EN 12350-3:2000 [33] και για το ποσοστό αέρα το πρότυπο ASTM C 231 - 03 [34]. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.3.

Πίνακας 4.1.3. Αποτελέσματα δοκιμών νωπών σκυροδεμάτων

| Κωδικός | Κάθιση (mm) | Vebe χρόνος (sec) | Ποσοστό αέρα (%) |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Pwc05 | 200 | - | 0.7 |
| Hwc05 | 65 | 3 | 0.65 |
| Wwc05 | 70 | 3 | 0.6 |
| Pwc06 | 180 | - | 0.6 |
| Hwc06 | 70 | 3 | 0.7 |
| Wwc06 | 75 | 3 | 0.6 |
| Pwc07 | 250 ¹ | - | 0.4 |
| Hwc07 | 230 | - | 0.5 |
| Wwc07 | 240 | - | 0.45 |
| ¹ Μετρήθηκε με χρονική καθυστέρηση διότι το ανάμιγμα ήταν πάρα πολύ ρευστό | | | |

Από τις δοκιμές κάθισης παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του λόγου N/T οδήγησε γενικά σε αύξηση της εργασιμότητας στα ινοπλισμένα αναμίγματα. Στους λόγους N/T 0.5 και 0.6 οι τιμές κάθισης όμως είναι παρόμοιες, ενώ στα αναμίγματα με τον υψηλότερο λόγο N/T παρουσιάστηκαν πολύ υψηλές τιμές κάθισης και για το λόγο αυτό δεν υπήρξε ανάγκη προσθήκης υπερρρευστοποιητή. Συμπεραίνεται ακόμη ότι η προσθήκη ινών μειώνει

την εργασιμότητα σε όλους τους N/T, παρόλο που αυξημένη ποσότητα υπερρευστοποιητή χρησιμοποιήθηκε στην περίπτωση τους. Σε όλους τους λόγους N/T, οι κυματοειδείς ίνες προσδίδουν στο νωπό ινοπλισμένο σκυρόδεμα ελαφρώς μεγαλύτερη εργασιμότητα, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στο μικρότερο μήκος τους.

Οι δοκιμές Vebe πραγματοποιήθηκαν μόνο στις Hwc05, Wwc05, Hwc06, Wwc06 συνθέσεις σκυροδέματος, λόγω ότι τα άοπλα σκυροδέματα και τα σκυροδέματα με λόγο N/T 0.7 παρουσίασαν πολύ υψηλή εργασιμότητα και η μέθοδος Vebe δεν ήταν εφαρμόσιμη. Τα προαναφερθέντα αναμίγματα που εφαρμόστηκε η δοκιμή είχαν πολύ καλή εργασιμότητα βάσει των πολύ μικρών χρόνων Vebe που εμφάνισαν.

Λόγω ότι η ποσότητα του υπερρευστοποιητή προσαρμόστηκε σε κάθε ανάμιγμα δεν εμφανίζονται ιδιαίτερες διακυμάνσεις στο ποσοστό αέρα. Μια γενική τάση που θα μπορούσε να παρατηρηθεί είναι ότι η αύξηση του λόγου N/T συντέλεσε σε μικρή μείωση του ποσοστού αέρα των αναμιγμάτων.

4.1.6. Δοκιμές θλίψης

4.1.6.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης

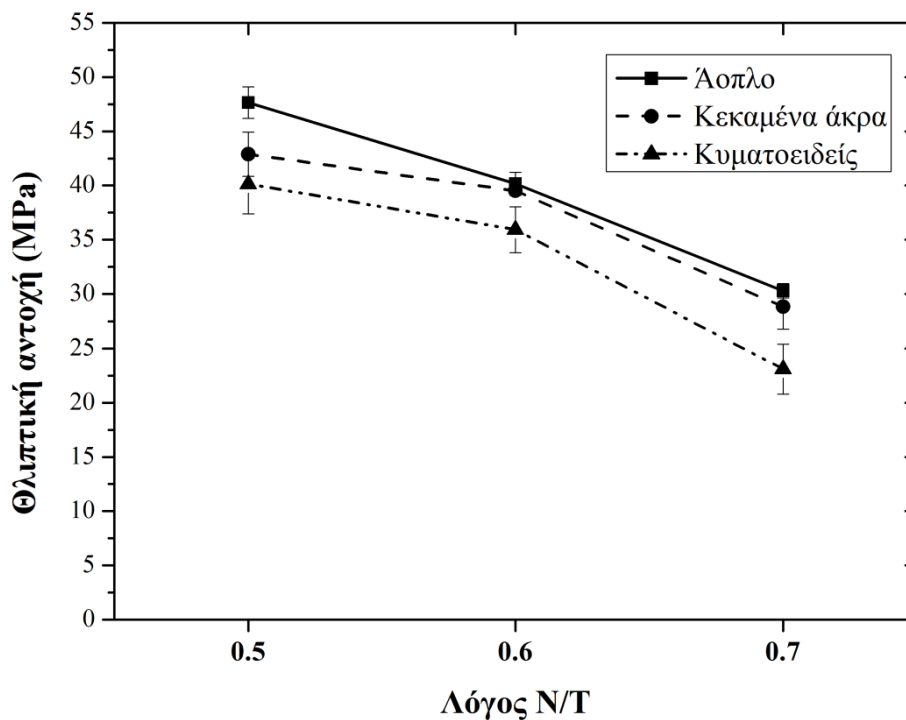
Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας μηχανή Toni Technik με μέγιστο φορτίο 3000 kN (Εικόνα 3.3) σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [35]. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 150x150x150 mm και η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 0.5 MPa/s. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις δοκιμές θλίψης αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.3.3.1.

4.1.6.2. Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης

Η θλιπτική αντοχή σε σχέση με το λόγο N/T παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.4. Αύξηση του λόγου N/T οδηγεί σε μείωση της θλιπτικής αντοχής σε όλα τα αναμίγματα. Στο άοπλο σκυρόδεμα η σχέση με το λόγο N/T είναι σχεδόν γραμμική, ενώ στο

ινοπλισμένο σκυρόδεμα η κλίση παρουσιάζεται να είναι αρχικά μικρότερη (λόγος $N/T = 0.6$), και στη συνέχεια να έχει μία απότομη πτώση στο λόγο $N/T = 0.7$.

Το άοπλο σκυρόδεμα ανεξαρτήτως λόγου N/T εμφανίζει τις υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής. Οι χαμηλότερες τιμές αντοχής των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων αποδίδονται στη συμπύκνωση των αναμιγμάτων, με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί περισσότερα κενά στη μήτρα.



Εικόνα 4.1.4. Επίδραση του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή άοπλων και ινοπλισμένων σκυροδεμάτων.

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.1.4. Επίδραση του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή και συσχέτιση με την % μεταβολή από την τιμή αναφοράς

| Κωδικός | Θλιπτική αντοχή (MPa) | STDEV ¹ (MPa) | Μεταβολή από τιμή αναφοράς (%) ² |
|--------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------------|
| Pwc05 | 47.64 | 1.45 | 0 |
| Pwc06 | 40.16 | 1.06 | -16 |
| Pwc07 | 30.29 | 0.67 | -36 |
| Hwc05 | 42.90 | 2.04 | 0 |
| Hwc06 | 39.51 | 0.24 | -8 |
| Hwc07 | 28.84 | 2.05 | -33 |
| Wwc05 | 40.13 | 2.74 | 0 |
| Wwc06 | 35.92 | 2.11 | -10 |
| Wwc07 | 23.10 | 2.31 | -42 |

¹STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση
²Τα δοκίμια με N/T 0.5 χρησιμοποιήθηκαν ως τιμή αναφοράς

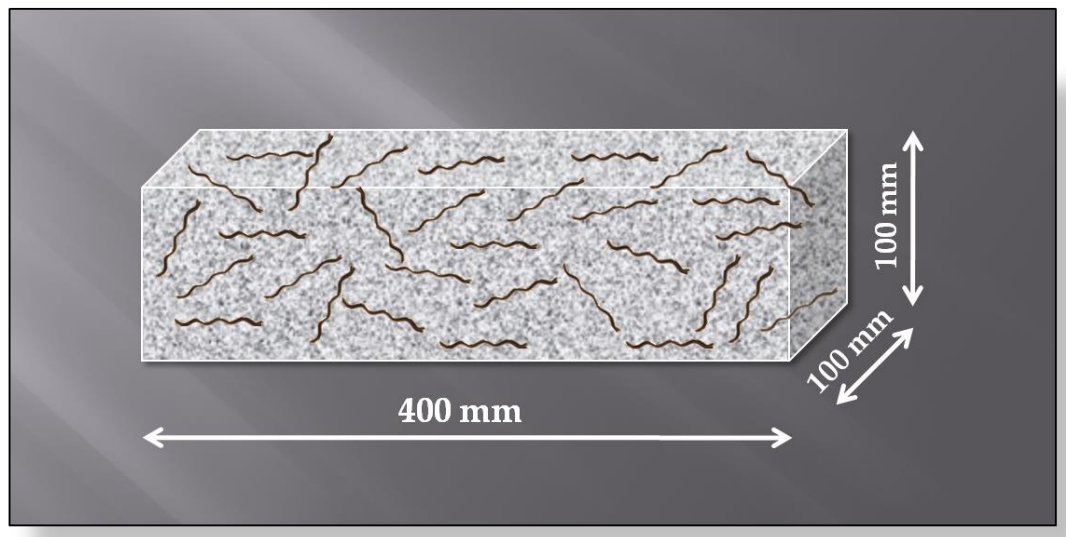
Με σκοπό την άμεση συσχέτιση της επιρροής του λόγου N/T στη θλιπτική αντοχή, οι τιμές του 0.5 λόγου N/T χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά για όλα τα υπόλοιπα αναμίγματα και η % μεταβολή από την τιμή του δοκιμίου αναφοράς υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.4. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι αύξηση του λόγου N/T από 0.5 σε 0.6 συντέλεσε σε μείωση 8 - 16% της θλιπτικής αντοχής, ανάλογα με την ύπαρξη και το είδος των ινών, ενώ αύξηση από 0.5 σε 0.7 στο λόγο N/T οδήγησε σε 33 - 42% μείωση στη θλιπτική αντοχή. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται στις συνθέσεις σκυροδέματος έχει πολύ σημαντική επιρροή

στη θλιπτική αντοχή, καθώς περίπου το 40% της αντοχής μπορεί να χαθεί από την περίσσεια του νερού.

4.1.7. Δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων

4.1.7.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Κάμψης

Οι διαστάσεις των δοκιμών που υποβλήθηκαν σε κάμψη τεσσάρων σημείων (four point bending) ήταν 100x100x400 mm και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.1.5.



Εικόνα 4.1.5. Διαστάσεις δοκιμίου κάμψης τεσσάρων σημείων

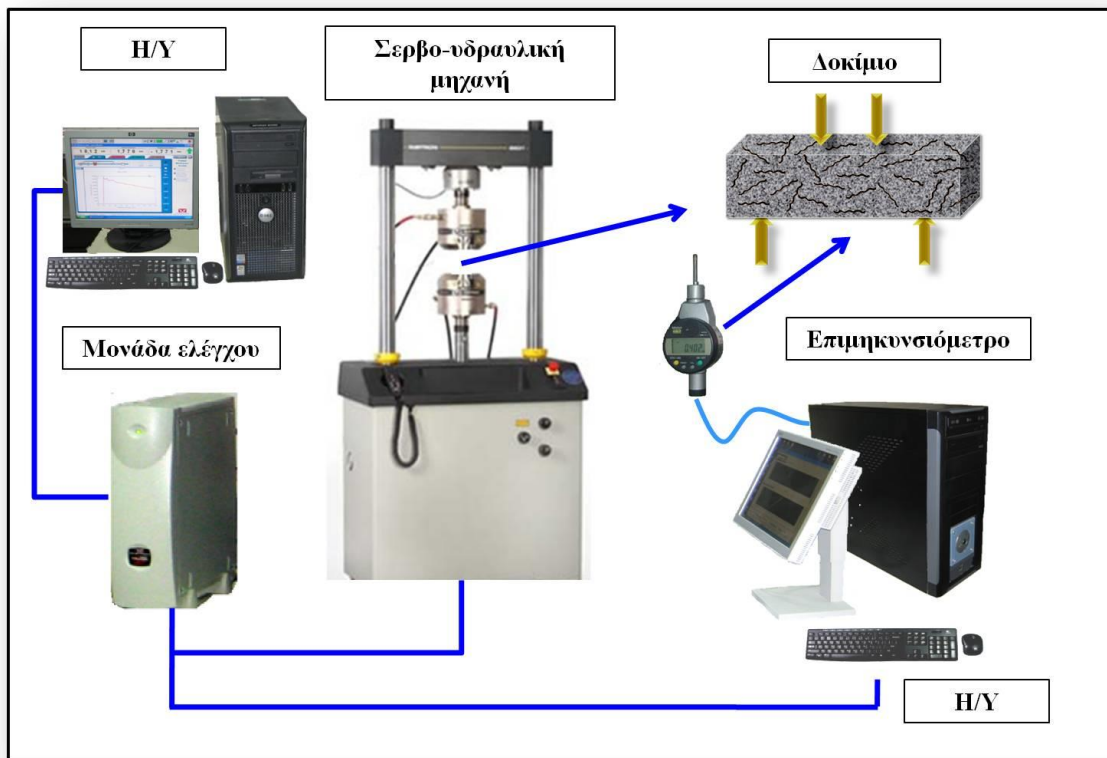
Οι συγκεκριμένες διαστάσεις των δοκιμών επιλέχθηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M - 05 [1], ώστε να ισχύουν οι παρακάτω απαιτήσεις:

- Το μήκος των δοκιμών να είναι τουλάχιστον 50mm μεγαλύτερο από το τριπλάσιο του βάθους (d) και σε καμία περίπτωση μικρότερο από 350mm.
- Το μήκος του δοκιμίου να μην είναι μεγαλύτερο από το άνοιγμά του (L), περισσότερο από το διπλάσιο του βάθους.
- Το πλάτος (b) και το βάθος (d) του να είναι τουλάχιστον τρεις φορές το μέγιστο μήκος της ίνας (L_f).

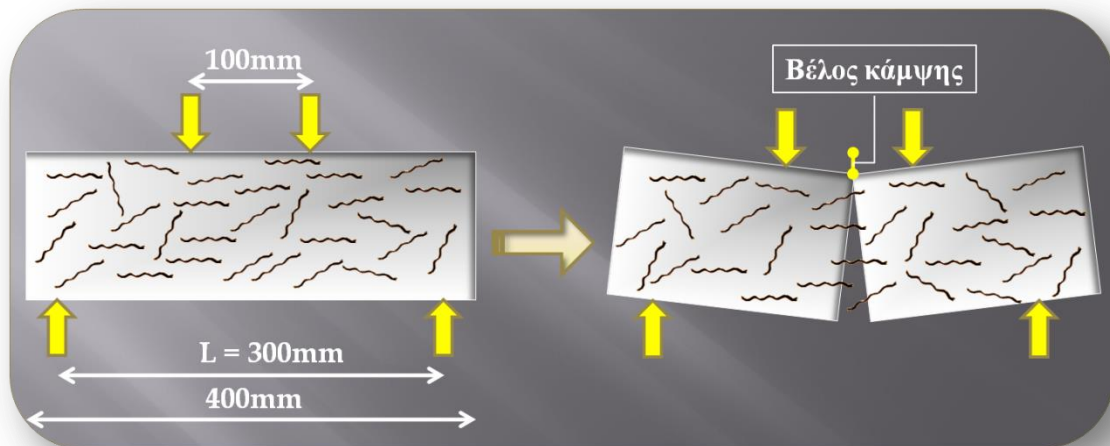
4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

- Το μήκος του ανοίγματος (L) να είναι η μεγαλύτερη τιμή μεταξύ του 300mm και του τριπλάσιου του βάθους του δοκιμίου (βλ. Εικόνα 4.1.6.).

Η πειραματική διάταξη της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1.6 και η σχηματική απεικόνιση της φόρτισης της δοκιμής στην Εικόνα 4.1.7. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστη πίεση υδραυλικού συστήματος 207 bar και μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN.

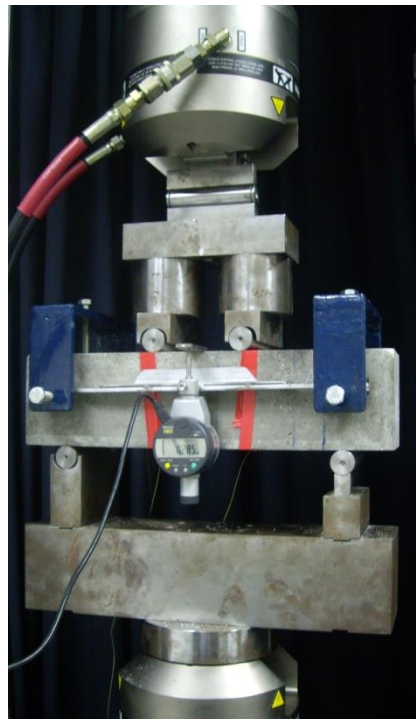


Εικόνα 4.1.6. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης



Εικόνα 4.1.7. Σχηματική απεικόνιση φόρτισης δοκιμής κάμψης

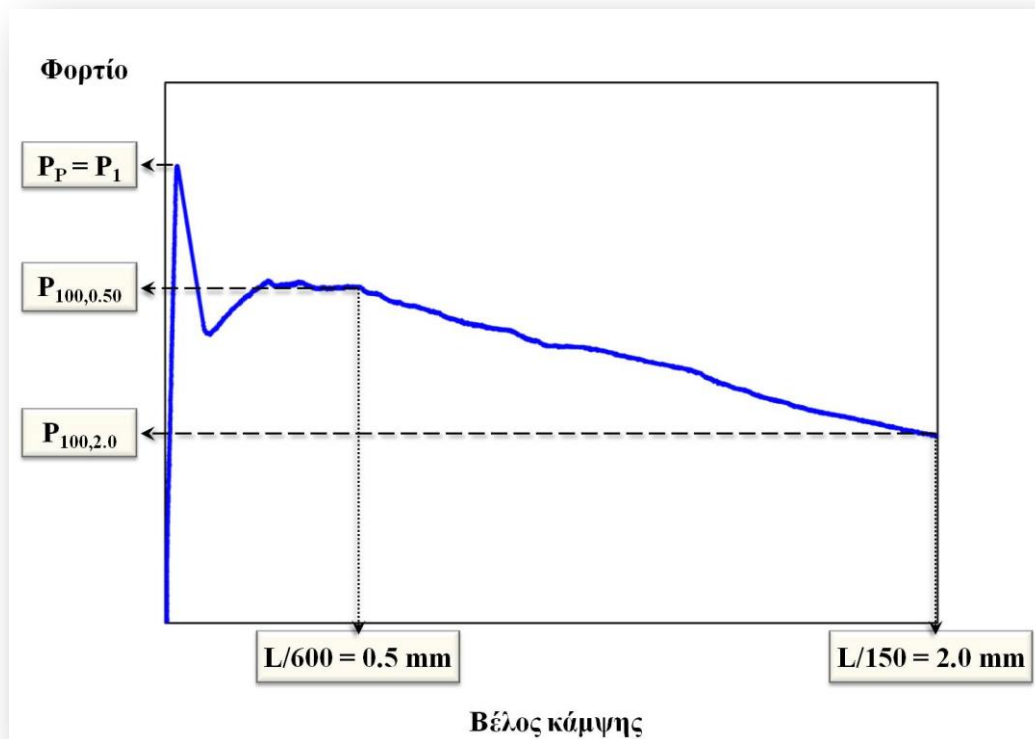
Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων κάμψης τεσσάρων σημείων σχεδιάστηκε κατάλληλη ιδιοσυσκευή σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 78 - 02 [36] και τις διαστάσεις των δοκιμίων. Η ταχύτητα μετατόπισης της δοκιμής ήταν 0.08 mm/min, ενώ για τη μέτρηση του βέλους κάμψης, χρησιμοποιήθηκε ένα επιμηκυσιόμετρο Mitutoyo 543-450B εύρους 25.4 mm το οποίο τοποθετήθηκε σε ένα ζυγό (yoke) (Εικόνα 4.1.8).



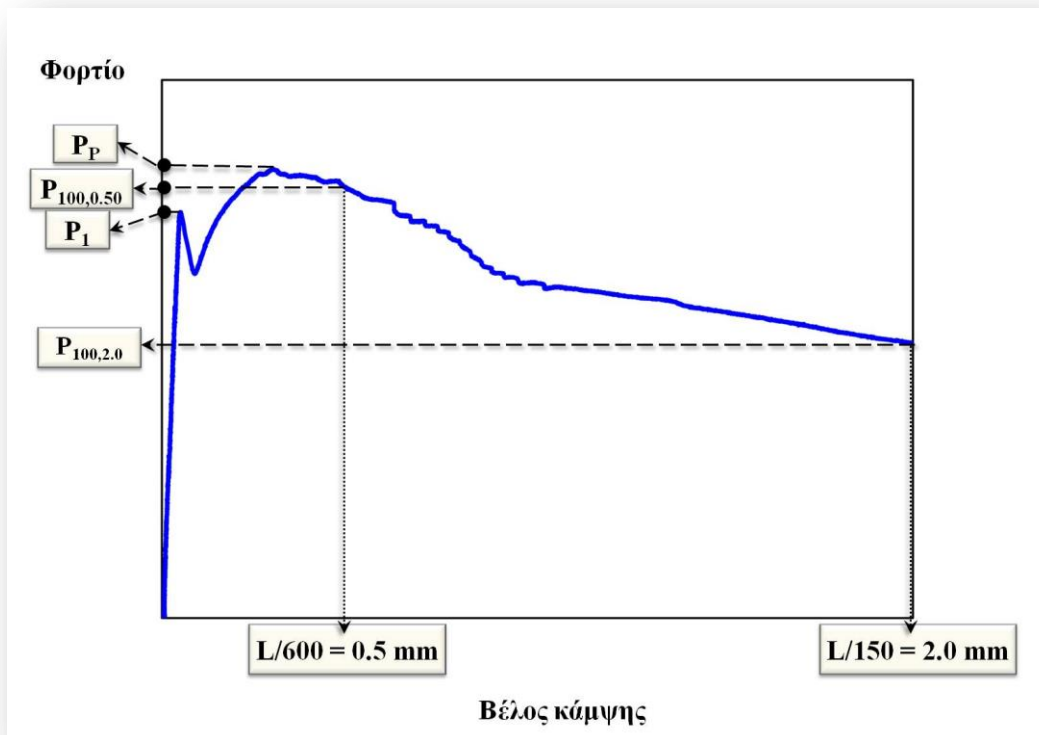
Εικόνα 4.1.8. Συσκευή δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων

Για την αποτίμηση των καμπτικών ιδιοτήτων των δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M - 05 [1]. Σύμφωνα με το συγκεκριμένο πρότυπο προσδιορίζονται οι παρακάτω παράμετροι που απεικονίζονται γραφικά στις Εικόνες 4.1.9 – 4.1.10 [1]:

- **Μέγιστο φορτίο αιχμής (First-peak load), P_1** : ως το φορτίο που αντιστοιχεί στο πρώτο σημείο της καμπύλης φορτίου - βέλους κάμψης όπου η κλίση είναι ίση με μηδέν
- **Μέγιστο φορτίο (Peak load), P_p** : ως το μέγιστο φορτίο στην καμπύλη φορτίου - βέλους κάμψης
- **Παραμένον φορτίο (Residual load), $P_{100,0.50}$** : δηλαδή το φορτίο που αντιστοιχεί σε βέλος κάμψης ίσο με το 1/600 του ανοίγματος του δοκιμίου (για δοκίμιο βάθους 100mm)
- **Παραμένον φορτίο (Residual load), $P_{100,2.0}$** : δηλαδή το φορτίο που αντιστοιχεί σε βέλος κάμψης ίσο με το 1/150 του ανοίγματος του δοκιμίου (για δοκίμιο βάθους 100mm)



Εικόνα 4.1.9. Γραφική απεικόνιση καμπτικών παραμέτρων όταν $P_p = P_1$



Εικόνα 4.1.10. Γραφική απεικόνιση καμπτικών παραμέτρων όταν $P_p > P_1$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται η μέγιστη αντοχή αιχμής (first-peak strength) f_1 και η μέγιστη καμπτική αντοχή (peak strength) f_p χρησιμοποιώντας το μέγιστο φορτίο αιχμής P_1 και το μέγιστο φορτίο P_p αντίστοιχα και την εξίσωση 4.1.2 [1]:

$$f = \frac{PL}{bd^2} \quad (4.1.2)$$

Όπου:

f = η αντοχή (MPa)

P = το φορτίο (N)

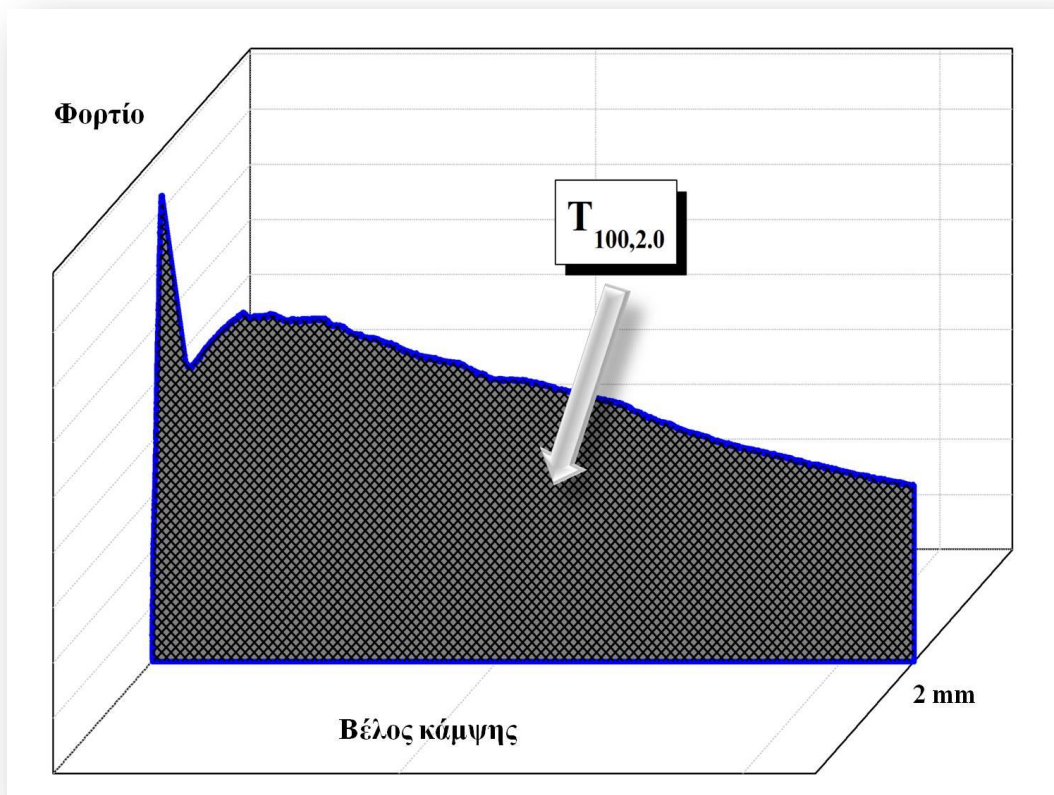
L = το άνοιγμα του δοκιμίου (mm)

b = το μέσο πλάτος του δοκιμίου στη θραύση (mm)

d = το μέσο βάθος του δοκιμίου στη θραύση (mm)

Στη συγκεκριμένη πειραματική μέθοδο [1] υπολογίζονται οι παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ χρησιμοποιώντας τα παραμένοντα φορτία $P_{100,0.50}$ και $P_{100,2.0}$ αντίστοιχα και την εξίσωση 4.1.2. Οι παραμένουσες αντοχές σε καθορισμένα βέλη κάμψης χαρακτηρίζουν την παραμένουσα ικανότητα μετά τη ρωγμάτωση [1].

Η δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$, η οποία προσδιορίζεται ως η ενέργεια που είναι ισοδύναμη με την επιφάνεια κάτω από την καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης μέχρι το βέλος κάμψης να φθάσει το 1/150 του ανοίγματος του δοκιμίου (2 mm) για δοκίμιο βάθους 100mm, είναι ένα μέτρο της ικανότητας του δοκιμίου να απορροφά ενέργεια (Εικόνα 4.1.11). Η δοκιμή τερματίζει, όταν το βέλος κάμψης φθάσει τουλάχιστον το 1/150 του ανοίγματος του δοκιμίου, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση τα 2 mm [1].

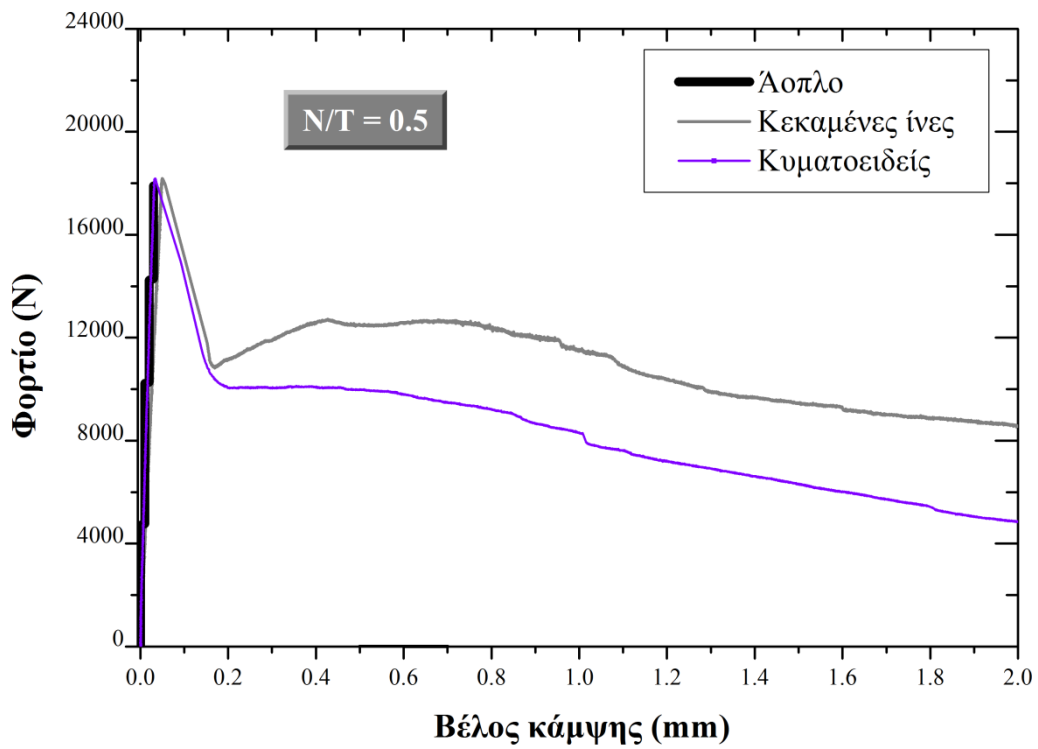


Εικόνα 4.1.11. Προσδιορισμός δυσθραυστότητας $T_{100,2.0}$

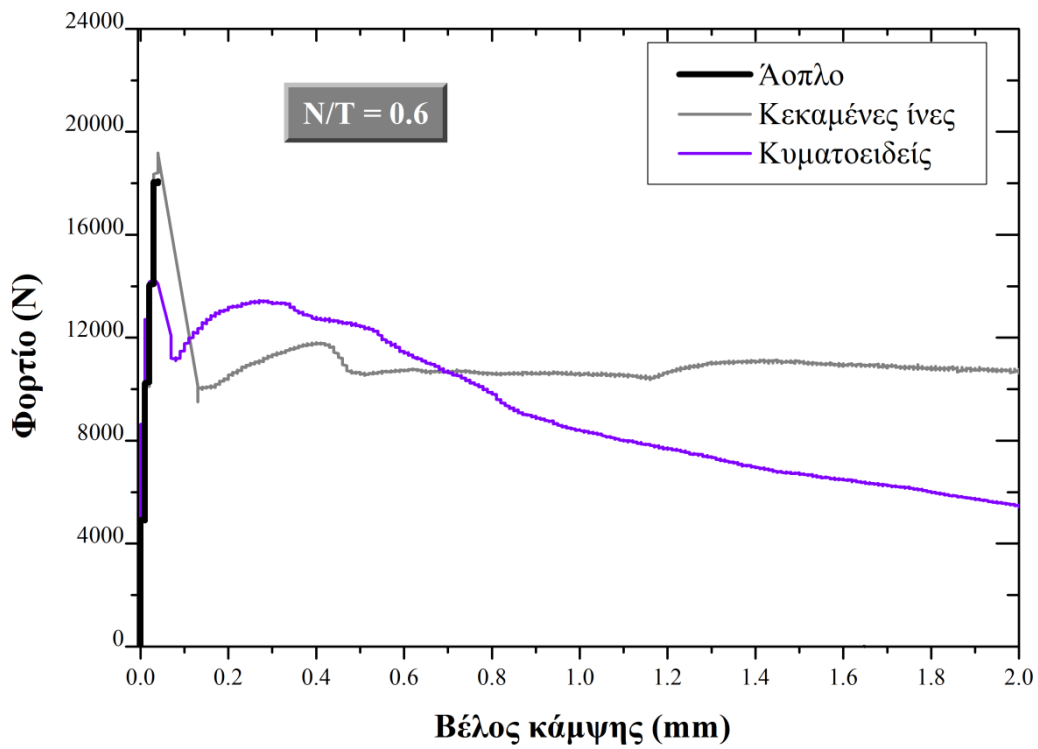
4.1.7.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης

Στην Εικόνα 4.1.12 (α-γ) απεικονίζονται τυπικές καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης για όλα τα αναμίγματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί σε όλους τους λόγους N/T, τα άοπλα δοκίμια μετά το μέγιστο φορτίο δεν μπορούν να φέρουν φορτία σε αντίθεση με τα ινοπλισμένα. Τα αποτελέσματα των καμπτικών ιδιοτήτων παρουσιάζονται στους Πίνακες και τις Εικόνες που ακολουθούν.

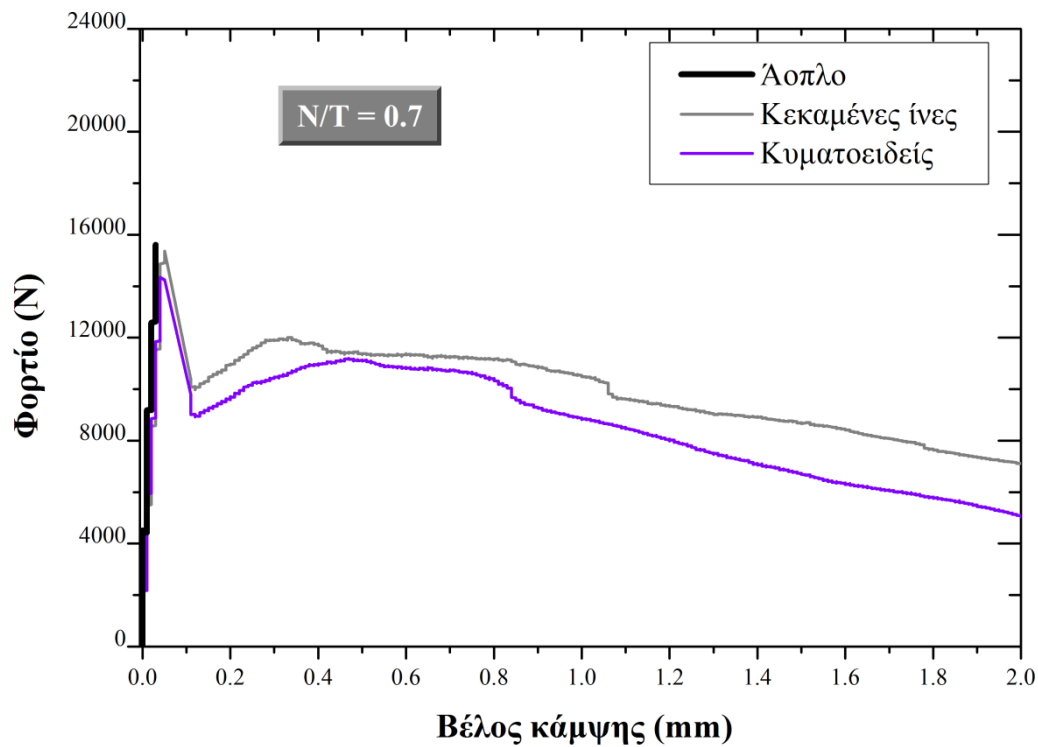
4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



(α)



(β)

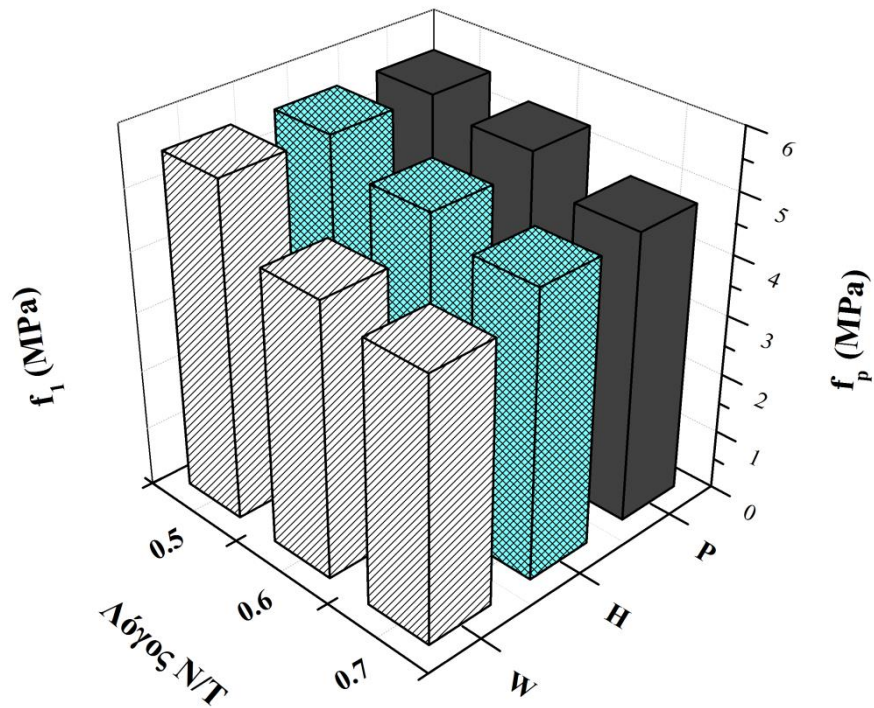


(γ)

Εικόνα 4.1.12. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με λόγο N/T (α) 0.5, (β) 0.6, (γ) 0.7

Η επιρροή του λόγου N/T στη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής απεικονίζεται στην Εικόνα 4.1.13, οι τιμές των οποίων συμπίπτουν σε όλα τα αναμίγματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι τιμές f_1 και f_p μειώνονται με αύξηση του λόγου N/T για όλα τα αναμίγματα ανεξαρτήτως από την ύπαρξη ινών. Όπως στην περίπτωση της θλιπτικής αντοχής, πραγματοποιήθηκε μία άμεση σύγκριση της επίδρασης του λόγου N/T στη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής χρησιμοποιώντας το λόγο N/T 0.5 ως αναφορά για όλα τα αναμίγματα. Η % μεταβολή από τις τιμές των f_1 και f_p για τα δοκίμια αναφοράς υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.5.

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.1.13. Επίδραση του λόγου N/T στη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής του ινοπλισμένου και του άοπλου σκυροδέματος

Πίνακας 4.1.5. Επίδραση του λόγου N/T στη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και συσχέτιση με την % μεταβολή από την τιμή αναφοράς

| Κωδικός | P ₁ (kN) | P _P (kN) | STDEV ¹ (kN) | f ₁ (MPa) | f _p (MPa) | STDEV ¹ (MPa) | Μεταβολή από τιμή αναφοράς (%) ² |
|---------|------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------------|
| Pwc05 | 17.98 | 17.98 | 0.32 | 5.56 | 5.56 | 0.10 | 0 |
| Pwc06 | 18.30 | 18.30 | 0.32 | 5.33 | 5.33 | 0.09 | -4 |
| Pwc07 | 15.64 | 15.64 | 1.55 | 4.81 | 4.81 | 0.52 | -13 |
| Hwc05 | 18.18 | 18.18 | 0.01 | 5.57 | 5.57 | 0.003 | 0 |
| Hwc06 | 17.19 | 17.19 | 2.81 | 5.09 | 5.09 | 0.94 | -9 |
| Hwc07 | 16.29 | 16.29 | 1.45 | 4.75 | 4.75 | 0.41 | -15 |
| Wwc05 | 18.17 | 18.17 | 0.01 | 5.59 | 5.59 | 0.04 | 0 |
| Wwc06 | 15.07 | 15.07 | 1.03 | 4.55 | 4.55 | 0.29 | -19 |
| Wwc07 | 14.90 | 14.90 | 0.51 | 4.34 | 4.34 | 0.15 | -22 |

¹STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση
²Τα δοκίμια με N/T 0.5 χρησιμοποιήθηκαν ως τιμή αναφοράς

Στα άοπλα σκυροδέματα η μείωση των f₁ και f_p είναι 4% και 13% για Pwc06 και Pwc07 σε σχέση με το Pwc05. Σχετικά με τα αναμίγματα των ινών με κεκαμένα άκρα, η μείωση που παρατηρήθηκε κυμαίνεται μεταξύ 9% (Hwc06) και 15% (Hwc07), ενώ στις κυματοειδείς η μείωση κυμαίνεται μεταξύ 19% (Wwc06) και 22% (Wwc07). Συγκριτικά με τη θλιπτική αντοχή, η επιρροή του λόγου N/T στην περίπτωση των f₁ και f_p δεν είναι τόσο έντονη, αφού αύξηση του από 0.5 σε 0.7 οδήγησε σε περίπου 20% απώλεια της καμπτικής αντοχής και της καμπτικής αντοχής αιχμής σε σχέση με το αντίστοιχο 40% που καταγράφηκε στη θλιπτική αντοχή.

Συγκριτικά με τη γεωμετρία των ινών, στους μεγάλους λόγους N/T οι ίνες με κεκαμμένα άκρα εμφανίζουν υψηλότερες τιμές f_1 και f_p σε σχέση με τις κυματοειδείς ίνες, οι οποίες παρουσίασαν τη μεγαλύτερη υποβάθμιση στις ιδιότητες των αναμιγμάτων. Οι παρατηρήσεις αυτές είναι αντίστοιχες και στην περίπτωση της θλιπτικής αντοχής, όπου η υποβάθμιση των ιδιοτήτων των αναμιγμάτων με κυματοειδείς ίνες είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τις ίνες με κεκαμμένα άκρα για λόγους N/T 0.6 και 0.7.

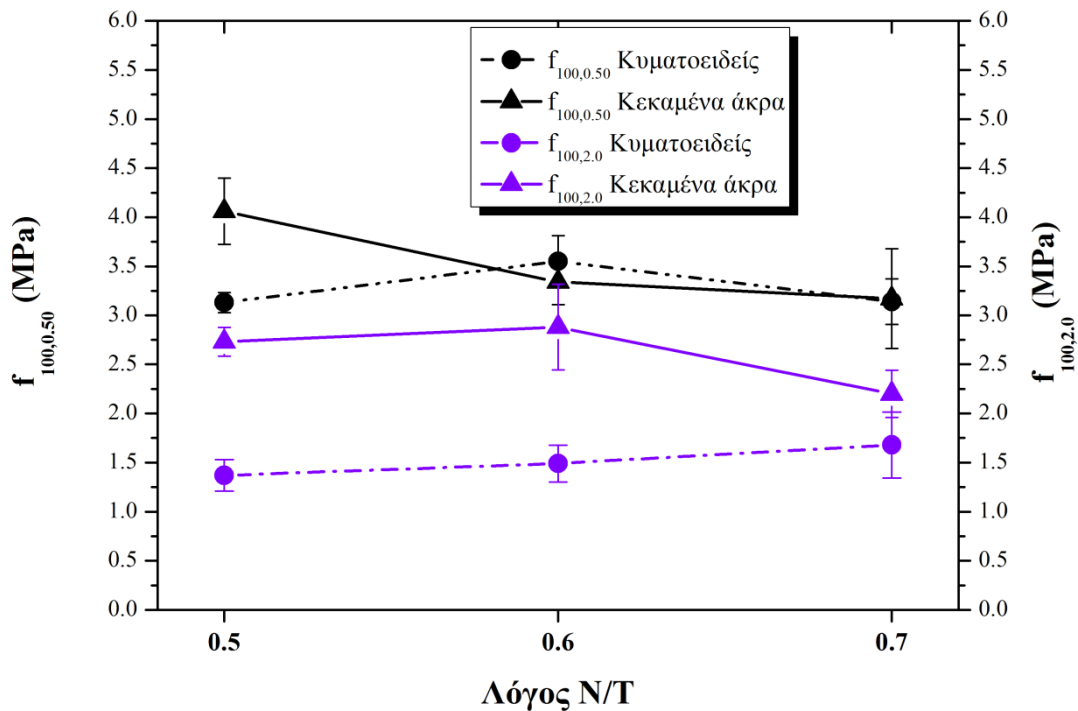
Η επιρροή του λόγου N/T στις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ για τα ινοπλισμένα σκυροδέματα εμφανίζεται στον Πίνακα 4.1.6 και απεικονίζεται γραφικά στην Εικόνα 4.1.14. Τα άοπλα σκυροδέματα δεν εμφανίζουν παραμένουσα αντοχή σε βέλος κάμψης 0.5 mm και 2 mm, λόγω ότι έχουν ήδη αστοχήσει μετά το μέγιστό τους φορτίο. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 4.1.14, οι παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ στις περισσότερες περιπτώσεις δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το λόγο N/T ή οι μεταβολές τους είναι στο περιθώριο της τυπικής απόκλισης. Επιπλέον, συγκριτικά με τη γεωμετρία, τα αναμίγματα με ίνες με κεκαμμένα άκρα υπερέχουν έναντι των αντίστοιχων κυματοειδών, ειδικά για βέλος κάμψης 2 mm, λόγω του μεγαλύτερου μήκους τους, με αποτέλεσμα να γεφυρώνουν αποτελεσματικότερα τις ρωγμές.

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.1.6. Επίδραση του λόγου N/T στις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$

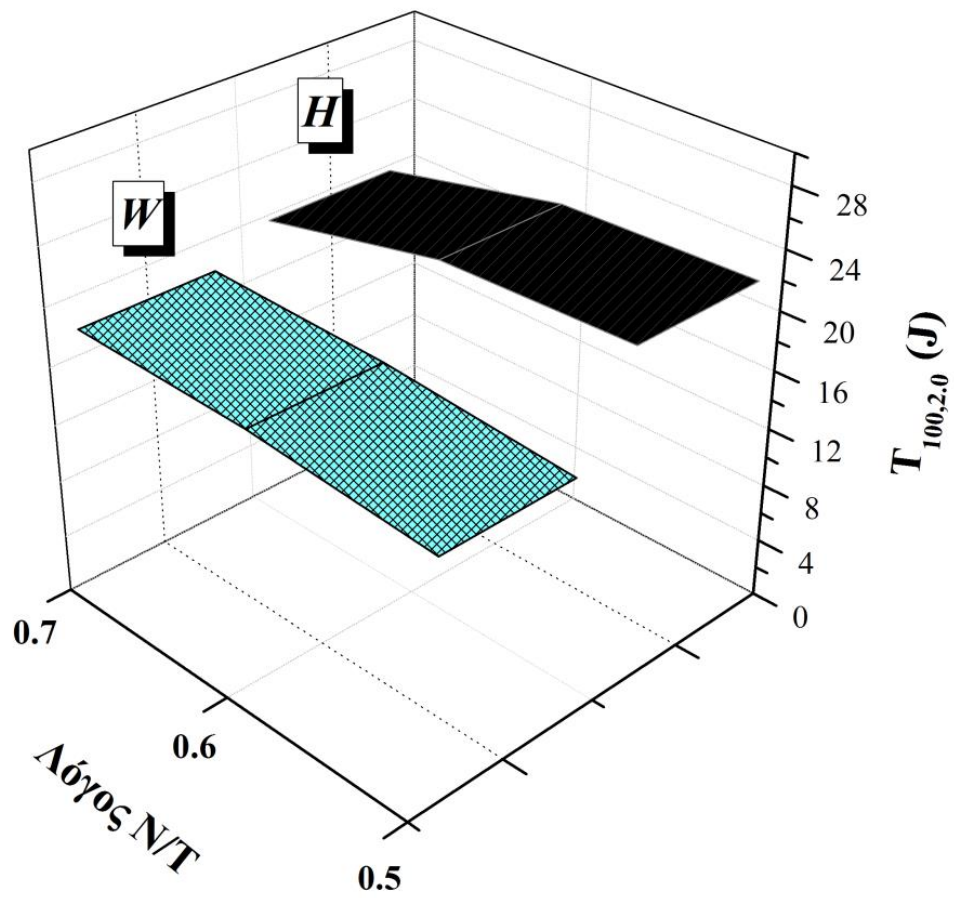
| Κωδικός | Pwc05 | Pwc06 | Pwc07 | Hwc05 | Hwc06 | Hwc07 | Wwc05 | Wwc06 | Wwc07 |
|-----------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| P_{100,0.50} (kN) | - | - | - | 13.27 | 11.32 | 10.88 | 10.16 | 11.73 | 10.79 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | - | - | - | 1.10 | 1.03 | 1.76 | 0.26 | 1.03 | 0.79 |
| P_{100,2.0} (kN) | - | - | - | 8.91 | 9.73 | 7.55 | 4.45 | 4.94 | 5.78 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | - | - | - | 0.48 | 1.27 | 0.82 | 0.55 | 0.69 | 1.15 |
| f_{100,0.50} (MPa) | - | - | - | 4.06 | 3.34 | 3.17 | 3.13 | 3.55 | 3.14 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | - | - | - | 0.34 | 0.23 | 0.51 | 0.10 | 0.26 | 0.23 |
| f_{100,2.0} (MPa) | - | - | - | 2.73 | 2.88 | 2.20 | 1.37 | 1.49 | 1.68 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | - | - | - | 0.15 | 0.44 | 0.24 | 0.16 | 0.19 | 0.34 |
| ¹ STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση | | | | | | | | | |

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.1.14. Επίδραση του λόγου N/T στις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$

Στην Εικόνα 4.1.15 απεικονίζεται η σχέση του λόγου N/T με την καμπτική δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$. Όπως και στην περίπτωση των παραμενουσών αντοχών τιμές $T_{100,2.0}$ δεν είναι δυνατόν να αποκτηθούν για τα δοκίμια άοπλου σκυροδέματος, διότι έχουν ήδη αστοχήσει μετά το μέγιστό τους φορτίο. Για τα ινοπλισμένα δοκίμια σκυροδέματος, η καμπτική δυσθραυστότητα παρέμεινε σχεδόν ανεπηρέαστη από το λόγο N/T και σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και αυξήθηκε ελαφρώς. Για άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων, οι τιμές των αναμιγμάτων με 0.5 N/T χρησιμοποιήθηκαν ως αναφορά και η % μεταβολή από τις τιμές δυσθραυστότητας των δοκιμίων αναφοράς υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.7.



Εικόνα 4.1.15. Επίδραση του λόγου N/T στη δυσθραυστότητα $T_{100,2,0}$

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.1.7. Επίδραση του λόγου N/T στη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ και συσχέτιση με την % μεταβολή από την τιμή αναφοράς

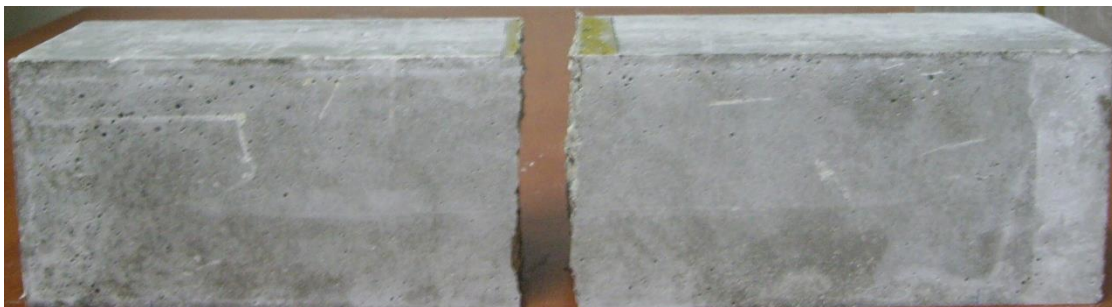
| Κωδικός | $T_{100,2.0}$ (J) | $STDEV^1$ (J) | Μεταβολή από τιμή αναφοράς (%) ² |
|----------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------|---------------------------------------------------|
| Pwc05 | - | - | - |
| Pwc06 | - | - | - |
| Pwc07 | - | - | - |
| Hwc05 | 22.8 | 1.15 | 0 |
| Hwc06 | 22.4 | 0.53 | -2 |
| Hwc07 | 19.6 | 2.70 | -14 |
| Wwc05 | 16.4 | 0.29 | 0 |
| Wwc06 | 17.4 | 1.38 | 6 |
| Wwc07 | 17.7 | 1.82 | 8 |
| ¹ STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση | | | |
| ² Τα δοκίμια με N/T 0.5 χρησιμοποιήθηκαν ως τιμή αναφοράς | | | |

Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων, τα δοκίμια με τις ίνες με κεκαμένα άκρα εμφανίζουν μία μικρή υποβάθμιση στις τιμές δυσθραυστότητας με αύξηση του λόγου N/T. Ενώ στην περίπτωση του 0.6 λόγου N/T είναι αμελητέα, στην περίπτωση του 0.7 λόγου N/T παρατηρείται μείωση της τάξης του 14%. Η σχετική μείωση της δυσθραυστότητας στο συγκεκριμένο ανάμιγμα μπορεί να αποδοθεί στην τυπική του απόκλιση, η οποία είναι υψηλότερη από των υπόλοιπων αναμιγμάτων (βλ. Πίνακα 4.1.7). Στην περίπτωση των κυματοειδών ινών παρατηρήθηκε μία μικρή αύξηση έως 8% στη δυσθραυστότητα.

4.1. Επίδραση της Ποιότητας της Μήτρας στις Θλιπτικές και Καμπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Όπως είναι εμφανές από τα παραπάνω συμπεράσματα η καμπτική δυσθραυστότητα εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες των ινών και όχι από την ποιότητα της μήτρας. Ακόμα και στους πολύ υψηλούς λόγους N/T τα ινοπλισμένα δοκίμια κατόρθωσαν να διατηρήσουν τη δυσθραυστότητά τους.

Η Εικόνα 4.1.16 παρουσιάζει τυπικά δοκίμια μετά το τέλος της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων για άοπλο σκυρόδεμα και σκυροδέματα με ίνες με κεκαμένα άκρα και κυματοειδείς ίνες για λόγο N/T 0.7.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 4.1.16. Δοκίμια με λόγο N/T = 0.7 μετά τη δοκιμή κάμψης α) χωρίς ίνες, και ινοπλισμένα με ίνες β) με κεκαμένα άκρα και γ) με κυματοειδείς

4.1.8. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου

Στο παρόν Υποκεφάλαιο μελετήθηκε η επιρροή του λόγου N/T στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα σε ποσοστό 1.0% κ.ό σκυροδέματος, καθώς και του άοπλου σκυροδέματος. Επιπλέον, εκτός από τις μηχανικές ιδιότητες των σκληρυμένων σκυροδεμάτων, ανιχνεύτηκε και η επίδραση του λόγου N/T στις ιδιότητες των νωπών σκυροδεμάτων, όπως στην εργασιμότητα και την περιεκτικότητα των αναμιγμάτων σε αέρα.

Παρατηρήθηκε, ότι η αύξηση του λόγου N/T οδήγησε γενικά σε αύξηση της εργασιμότητας στα ινοπλισμένα αναμίγματα στις δοκιμές κάθισης και σε μικρή μείωση του ποσοστού αέρα των αναμιγμάτων.

Επιπλέον, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται στις συνθέσεις σκυροδέματος έχει πολύ σημαντική επιρροή στη θλιπτική αντοχή, καθώς αύξηση του λόγου N/T μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μείωση της θλιπτικής αντοχής και στα άοπλα και στα ινοπλισμένα αναμίγματα.

Η μέγιστη καμπτική αντοχή και η μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής μειώνονται με αύξηση του λόγου N/T για όλα τα αναμίγματα ανεξάρτητα από την ύπαρξη ινών. Η επιρροή, όμως, του λόγου N/T στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι τόσο έντονη συγκριτικά με την επίδραση στη θλιπτική αντοχή.

Σε γενικές γραμμές, οι παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το λόγο N/T.

Η καμπτική δυσθραυστότητα δεν επηρεάζεται από το λόγο N/T, γεγονός που σημαίνει ότι εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες των ινών και όχι τόσο από την ποιότητα της μήτρας, αφού ακόμα και στους πολύ υψηλούς λόγους N/T τα ινοπλισμένα δοκίμια κατόρθωσαν να διατηρήσουν τις τιμές της δυσθραυστότητας.

4.1.9. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου

1. ASTM Standard C 1609/C 1609M - 05. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (2006). ASTM International, West Conshohocken, PA
2. Neville A (2006) Concrete: Neville's insights and issues. Thomas Telford Ltd
3. Newman J, Choo BS (2003) Advanced Concrete Technology 2: Concrete Properties. vol 2. Elsevier Ltd
4. Day KW (2006) Concrete Mix Design, Quality Control and Specification. 3rd Edition, Taylor & Francis
5. Mehta PK, Monteiro PJM (2009) Σκυρόδεμα - Μικροδομή, ιδιότητες, και υλικά (trans: Παπαγιάννη Ι), Τρίτη αμερικάνικη έκδοση. ΚΛΕΙΔΑΡΙΘΜΟΣ, Αθήνα
6. Neville AM, Brooks JJ (1987 (Revised Edition - 2001 Standards Update)) Concrete technology. Longman Scientific & Technical, Harlow, Essex, UK
7. Prokopski G (1991) Influence of water-cement ratio on micro-cracking of ordinary concrete. Journal of Materials Science 26 (23):6352-6356
8. Prokopski G, Langier B (2000) Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. Cement and Concrete Research 30 (9):1427-1433
9. Behnood A, Ziari H (2008) Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. Cement and Concrete Composites 30 (2):106-112
10. Felekoğlu B, Türkel S, Baradan B (2007) Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. Building and Environment 42 (4):1795-1802
11. Ait-Aider H, Hannachi NE, Mouret M (2007) Importance of W/C ratio on compressive strength of concrete in hot climate conditions. Building and Environment 42 (6):2461-2465

12. Schulze J (1999) Influence of water-cement ratio and cement content on the properties of polymer-modified mortars. *Cement and Concrete Research* 29 (6):909-915
13. Sideris KK, Konsta-Gdoutos M (1996) Influence of the water to cement ratio W/C on the compressive strength of concrete — An application of the cement hydration equation to concrete. *Applied Composite Materials* 3 (5):335-343
14. Nóbrega AF Da, Torres SM, Azeredo GA De, Barbosa NP (2009) Influence of water/cement ratio in mortars constituted by kaolin wastes. In: 11th International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (NOCMAT 2009), Bath, UK, 6-9 September 2009
15. Bentz D, Peltz M, Winpigler J (2009) Early-Age Properties of Cement-Based Materials. II: Influence of Water-to-Cement Ratio. *Journal of Materials in Civil Engineering* 21 (9):512-517
16. Ghaly AM, Cahill IV JD (2005) Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 32 (6):1075-1081
17. Falade F (1994) Influence of water/cement ratios and mix proportions on workability and characteristic strength of concrete containing laterite fine aggregate. *Building and Environment* 29 (2):237-240
18. Yaşar E, Erdoğan Y, Kılıç A (2004) Effect of limestone aggregate type and water–cement ratio on concrete strength. *Materials Letters* 58 (5):772-777
19. Carpinteri A, Brighenti R (2010) Fracture behaviour of plain and fiber-reinforced concrete with different water content under mixed mode loading. *Materials & Design* 31 (4):2032-2042
20. Chanvillard G, Aïtcin P-C (1996) Pull-out behavior of corrugated steel fibers qualitative and statistical analysis. *Advanced Cement Based Materials* 4 (1):28-41
21. Alawode O, Idowu OI (2011) Effects of water-cement ratios on the compressive strength and workability of concrete and lateritic concrete mixes. *Pacific Journal of Science and Technology* 12 (2):99-105

22. Shamsai A, Rahmani K, Peroti S, Rahemi L (2012) The effect of water-cement ratio in compressive and abrasion strength of the nano silica concretes. *World Applied Sciences Journal* 17 (4):540-545
23. Zhang X-B, Kuang C-G, Fang Z (2011) The effect of water-cement ratio and curing age on the strength of recycled concrete. *Advanced Materials Research* 217-218:740-745
24. Mailhot T, Bissonnette B, Saucier F, Pigeon M (2001) Flexural fatigue behavior of steel fibre reinforced concrete before and after cracking. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 34 (240):351-359
25. Zhao S, Li C, Qian X Experimental study on mechanical properties of steel fiber reinforced full lightweight concrete. *Pavements and Materials* 233-239
26. Popovics S, Popovics JS (1998) Ultrasonic testing to determine water-cement ratio for freshly mixed concrete. *Cement, Concrete and Aggregates* 20 (2):262-268
27. Philippidis TP, Aggelis DG (2003) An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. *Cement and Concrete Research* 33 (4):525-538
28. ASTM Standard C 128 - 01e1 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
29. ASTM Standard C 127 - 01 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
30. ASTM Standard C 136 - 01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
31. ASTM Standard C 192/C 192M - 98 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (1998). ASTM International, West Conshohocken, PA
32. ASTM Standard C 143/C 143M - 03 Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA

33. BS EN 12350-3:2000 Testing Fresh Concrete - Part 3: Vebe Test (2000). British Standards Institution
34. ASTM Standard C 231 - 03 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
35. BS EN 12390-3:2002 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens (2002). British Standard Institution
36. ASTM Standard C 78 - 02 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) (2002). ASTM International, West Conshohocken, PA

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

4.2.1. Στόχος – Αντικείμενο

Στόχος του συγκεκριμένου Υποκεφαλαίου είναι η μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών, όπως είναι η διάμετρος, το μήκος, ο λόγος μορφής και το σχήμα, στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Λαμβανομένου υπόψη του γεγονότος ότι η επίδραση των παραπάνω ιδιοτήτων στη μηχανική απόκριση είναι αλληλένδετη και είναι δύσκολο να απομονωθεί η ανεξάρτητη επιρροή μίας μοναδικής ιδιότητας, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής έρευνα με τη χρήση συνολικά έξι διαφορετικών ινών (ευθειών, κυματοειδών και με κεκαμένα άκρα).

Στο παρόν, λοιπόν, Υποκεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών θλίψης και κάμψης τεσσάρων σημείων επαφής σε ινοπλισμένα δοκίμια με διαφορετική γεωμετρία ινών σε ποσοστό 1.0% κ.ό. σκυροδέματος. Για τον προσδιορισμό των καμπτικών ιδιοτήτων χρησιμοποιήθηκε το νέο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M [1]. Επιπλέον, αξιολογείται η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, μέσω των δοκιμών Vebe, κάθισης και περιεκτικότητας σε αέρα.

Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτείνεται στην κανονικοποίηση των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας και τη συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με την επιφάνεια επαφής κάθε ίνας. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ενοποιεί τα αποτελέσματα με τη χρήση μίας μεμονωμένης γεωμετρικής παραμέτρου. Επιπροσθέτως, συσχετίζεται η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα με την ενέργεια εξόλκευσης (G) κάθε ίνας. Μέσω της παραπάνω διαδικασίας είναι δυνατή η επιλογή βέλτιστου συνδυασμού επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο για βέλτιστη δυσθραυστότητα.

4.2.2. Εισαγωγή

Υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον για την αξιολόγηση των μηχανικών ιδιοτήτων ινοπλισμένου σκυροδέματος και κονιάματος [2-18]. Έχει αναφερθεί ότι η καμπτική αντοχή, η αντοχή κόπωσης, η ικανότητα αντίστασης στη ρωγμάτωση και ιδιαίτερα η δυσθραυστότητα του σκυροδέματος ενισχύεται με τη προσθήκη ινών [19]. Οι παράμετροι που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι το είδος και η ποσότητα των ινών, ο λόγος μορφής της ίνας (μήκος / διάμετρο), η αντοχή της μήτρας, το μέγεθος και το σχήμα των δοκιμίων, η μέθοδος παρασκευής και το μέγεθος των αδρανών [20]. Τα τελευταία χρόνια, έχει αποδειχθεί ότι η επιρροή του σχήματος και του λόγου μορφής των ινών στις καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι πολύ σημαντική [5-9].

Συγκεκριμένα, οι Johnston και Skarendahl [3] μελέτησαν την καμπτική απόδοση ινοπλισμένων δοκιμίων με ίνες χάλυβα διαφορετικού είδους και ποικίλων ποσοτήτων από 30 έως 105 kg/m³. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά τους, η αντοχή πρώτης ρωγμής (first-crack strength) εξαρτάται ελάχιστα από τις ιδιότητες των ινών, και επηρεάζεται κυρίως από τα χαρακτηριστικά της μήτρας που επηρεάζουν την αντοχή τους, όπως το λόγο N/T και το βαθμό συμπύκνωσης. Αντιθέτως, οι συντελεστές παραμένουσας αντοχής και οι δείκτες δυσθραυστότητας, ιδιαίτερα εκείνοι που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βέλη κάμψης, εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την ποσότητα των ινών, τον τύπο τους και από το λόγο μορφή τους για γεωμετρικά ίδιες ίνες. Επιπλέον, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για να διαχωριστεί πλήρως η επίδραση που σχετίζεται με τον τύπο των ινών, την ποσότητα και το μέγεθός τους, θα ήταν επιθυμητό να υπολογίζονται οι δείκτες δυσθραυστότητας που αντιστοιχούν σε όσο το δυνατόν υψηλότερα βέλη κάμψης.

Οι Choi και Lee [5] μελέτησαν ινοπλισμένο σκυρόδεμα με ίνες χάλυβα σε σχήμα δακτυλίου (ring type). Χρησιμοποίησαν πέντε διαφορετικές διαμέτρους δακτυλίου (20, 30, 40, 50, and 60 mm) και τέσσερις διαμέτρους ινών (0.4, 0.5, 0.8 και 1.2 mm) και παρατήρησαν ότι η διάμετρος του δακτυλίου και της ίνας, καθώς και το ποσοστό όγκου ινών ήταν παράγοντες που επηρέασαν την καμπτική δυσθραυστότητα.

Σύμφωνα με τους Banthia και Sappakittipakorn [21] οι κυματοειδείς ίνες (crimped fibers) μεγάλων διαμέτρων είναι χαμηλού κόστους, δεν μειώνουν υπερβολικά την εργασιμότητα του σκυροδέματος και διασπείρονται εύκολα, όμως, η δυσθραυστότητα που

αποδίδουν στο σκυρόδεμα είναι χαμηλή. Για το λόγο αυτό, ερεύνησαν εάν η δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος με κυματοειδείς ίνες μεγάλης διαμέτρου μπορεί να βελτιωθεί με αντίστοιχες ίνες μικρότερων διαμέτρων μέσω υβριδισμού, διατηρώντας το χαμηλό κόστος, τη διασπορά των ινών και την εργασιμότητα. Κατέληξαν ότι αντικαθιστώντας μέρος των ινών μεγάλης διαμέτρου με ίνες μικρότερης διαμέτρου αυξάνεται η δυσθραυστότητα, χωρίς όμως να φθάνει τα επίπεδα δυσθραυστότητας που προσδίδουν οι ίνες μικρής διαμέτρου αν χρησιμοποιηθούν μεμονωμένα. Αντίστοιχα, οι Mohammadi κ.ά. [22] χρησιμοποίησαν χαλύβδινες ίνες με ανάμικτο λόγο μορφής και μελέτησαν τις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος. Τα δοκίμια περιείχαν για κάθε ποσοστό ινών κ.ό. που μελετήθηκε, δύο λόγους μορφής ινών με αυλακώσεις (corrugated) σε διαφορετικές αναλογίες βάρους. Εκτίμησαν ότι ο συνδυασμός 65% από τις μακρύτερες και 35% από τις κοντύτερες ίνες είναι πιο κατάλληλος για την καμπτική αντοχή, την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη και τη θλιπτική αντοχή. Παρατηρήθηκε, ακόμη, ότι όσο αυξανόταν το ποσοστό κοντύτερων ινών στο ανάμιγμα η εργασιμότητα βελτιωνόταν.

Οι Khaloo και Afshari [23] διερεύνησαν την καμπτική συμπεριφορά μικρών ινοπλισμένων πλακών με χαλύβδινες ίνες. Συμπέραναν ότι οι ίνες δεν αυξάνουν σημαντικά τη μέγιστη καμπτική αντοχή των πλακών, αλλά βελτιώνουν την ικανότητα τους να απορροφούν ενέργεια. Επιπλέον, κατέληξαν ότι μεγαλύτερο μήκος ίνας προσδίδει υψηλότερες τιμές απορρόφησης ενέργειας.

Οι Banthia και Armelin [24] μελέτησαν ένα καινούργιο τύπο ίνας που αναπτύχθηκε για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα και ονομάζεται ίνα διπλής αγκύρωσης (double anchorage fiber). Η συγκεκριμένη ίνα βασίζεται σε μια αρχή διπλής αγκύρωσης και βελτιστοποιήθηκε για υψηλή δυσθραυστότητα, καθώς και για μειωμένη αναπήδηση στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

Οι Köksal κ.ά. [7] ερεύνησαν την επίδραση των ινών σε συνδυασμό με την πυριτική παιπάλη στις μηχανικές ιδιότητες σκυροδεμάτων υψηλούς αντοχής. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν χαλύβδινες ίνες με λόγο μορφής 65 και 80 και ποσοστά ινών 0.5% και 1%, ενώ η προσθήκη της πυριτικής παιπάλης ήταν 0%, 5%, 10% και 15% κατά βάρος τσιμέντου. Διαπίστωσαν ότι μεγαλύτεροι λόγοι μορφής ινών αποδίδουν μεγαλύτερες τιμές δυσθραυστότητας. Επιπλέον, συμπέραναν ότι η δυσθραυστότητα των ινοπλισμένων

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής εξαρτάται από το λόγο μορφής των ινών, την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών και την περιεκτικότητα σε πυριτική παιπάλη.

Από τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ίνας στη μηχανική απόκριση του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι πολύ σημαντική. Ως εκ τούτου, απαιτείται εκτεταμένη μελέτη για την επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών σχετικά με τη βέλτιστη γεωμετρία ινών. Λόγω των παραπάνω, ο βασικός στόχος του παρόντος Υποκεφαλαίου είναι η συστηματική μελέτη της επίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών (μήκος, διάμετρος, λόγος μορφής, σχήμα) στις μηχανικές ιδιότητες με απώτερο σκοπό το διαχωρισμό των πιο σημαντικών παραμέτρων ανάμεσα στα ποικίλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους, ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων.

4.2.3. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Στον Πίνακα 4.2.1 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμίων που εξετάστηκαν και οι ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε είδος δοκιμίων.

Πίνακας 4.2.1. Κωδικοποίηση δοκιμίων και ιδιότητες ινών

| Κωδικός | Σχήμα ινών | l^1 (mm) | d^1 (mm) | l/d^1 (1) |
|---------|---------------|------------|------------|-------------|
| S04.25 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 |
| H07.30 | Κεκαμένα άκρα | 30 | 0.7 | 42.9 |
| H06.30 | Κεκαμένα άκρα | 30 | 0.6 | 50.0 |
| H06.25 | Κεκαμένα άκρα | 25 | 0.6 | 41.7 |
| U07.30 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 |
| U05.30 | Κυματοειδείς | 30 | 0.5 | 60.0 |

¹*l*: Μήκος ίνας, *d*: διάμετρος, *l/d*: λόγος μορφής

Στον Πίνακα 4.2.2 απεικονίζονται τα υλικά των αναμίξεων και οι ποσότητές τους. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Υποκεφαλαίου 4.1 ο λόγος N/T επιλέχθηκε ως 0.5 και διατηρήθηκε σταθερός σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1.0% κ.ό σκυροδέματος σε όλα τα αναμίγματα, ενώ η συμπύκνωση των αναμιγμάτων πραγματοποιήθηκε με τράπεζα δόνησης.

Πίνακας 4.2.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3)

| Υλικά | Ποσότητες (kg/m^3) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Τσιμέντο τύπου II 42.5 N | 440 |
| Νερό | 220 |
| Θραυστή Άμμος | 1177 |
| Ψηφίδα | 392 |
| Υπερρευστοποιητής | 3.1 |
| Ίνες | 78.5 |
| Άθροισμα | 2311 |

Τα ειδικά βάρη και η απορροφητικότητα της άμμου και της ψηφίδας προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [25] και ASTM C 127 - 01 [26] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος.

Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 136 - 01 [27]. Η άμμος αποτελεί το 75% της συνολικής ποσότητας των αδρανών και η ψηφίδα το 25%.

Στον Πίνακα 4.2.3 παρουσιάζονται οι ποσότητες των υλικών που απαιτούσε κάθε ανάμιξη, ώστε να παρασκευαστούν 4 δοκίμια κάμψης, 3 δοκίμια θλίψης και να επιτευχθούν οι δοκιμές νωπού σκυροδέματος.

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.2.3. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη

| Υλικά | Ποσότητες (kg) |
|-------------------------|----------------|
| Τσιμέντο τύπου Π 42.5 N | 17.776 |
| Νερό | 8.888 |
| Θραυστή Άμμος | 47.539 |
| Ψηφίδα | 15.846 |
| Υπερρευστοποιητής | 0.125 |
| Ένες | 3.171 |
| Άθροισμα | 93.346 |

4.2.4. Συντήρηση των δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες μέχρι την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σε ειδικές δεξαμενές με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συνθήκες 23 ± 2 °C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [28].

4.2.5. Ιδιότητες νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η κάθιση και ο χρόνος Vebe όλων των νωπών ινοπλισμένων αναμιγμάτων μετρήθηκε για να ερευνηθεί η επιρροή της προσθήκης ινών στην εργασιμότητα των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Επιπλέον, σε όλα τα αναμίγματα προσδιορίστηκε και το ποσοστό αέρα τους. Για την κάθιση ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C 143/C 143M - 03 [29], για τη δοκιμή Vebe το πρότυπο BS EN 12350-3:2000 [30] και για το ποσοστό αέρα το πρότυπο ASTM C 231 - 03 [31]. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.4.

Πίνακας 4.2.4. Αποτελέσματα δοκιμών νωπών ινοπλισμένων σκυροδεμάτων

| Κωδικός | Κάθιση (mm) | Vebe χρόνος (sec) | Ποσοστό αέρα (%) |
|---------|-------------|-------------------|------------------|
| S04.25 | 100 | 3 | 0.45 |
| H07.30 | 65 | 2 | 0.95 |
| H06.30 | 60 | 2 | 0.85 |
| H06.25 | 95 | 3 | 0.5 |
| U07.30 | 50 | 2 | 0.6 |
| U05.30 | 50 | 2 | 0.8 |

Οι μικροί χρόνοι Vebe (2-3 sec) που παρατηρούνται στον Πίνακα 4.2.4, υποδεικνύουν ότι όλα τα αναμίγματα παρουσιάζουν υψηλή εργασιμότητα δίχως αξιοσημείωτες μεταβολές. Σύμφωνα με τη δοκιμή κάθισης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα μίγματα με τις ευθείες ίνες παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη εργασιμότητα, ακολουθούν τα μίγματα με τις κεκαμμένες ίνες και τη μικρότερη εργασιμότητα τα μίγματα με τις κυματοειδείς ίνες. Επίσης, διαφορετικές τιμές κάθισης εμφανίζουν και τα αναμίγματα με ίνες ίδιας διαμέτρου και μήκους (H07.30, U07.30), υποδηλώνοντας ότι το σχήμα των ινών επηρεάζει την εργασιμότητα. Τα αποτελέσματα κάθισης υποδεικνύουν ότι αύξηση του μήκους της ίνας συμβάλλει σε μείωση της εργασιμότητας, ενώ η διάμετρος δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Για παράδειγμα, τα H07.30 και H06.30 αναμίγματα παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές κάθισης, ενώ αναμίγματα με πιο κοντές ίνες εμφανίζουν αισθητά μεγαλύτερες τιμές (H06.25).

Επιπροσθέτως, το ποσοστό αέρα αυξάνει με αύξηση του μήκους της ίνας. Αναμίγματα με 30mm μήκος ίνας (H07.30, H06.30, U07.30 και U05.30) παρουσιάζουν πιο υψηλά ποσοστά αέρα σε σχέση με μίγματα με 25mm μήκος ίνας (S04.25, H06.25), γεγονός αναμενόμενο, αφού μεγαλύτερο μήκος ίνας συμβάλλει σε μεγαλύτερα κενά μέσα στο σκυροδέμα. Επιπλέον, το ποσοστό αέρα επηρεάζεται και από το σχήμα των ινών, καθώς ίνες ίδιας διαμέτρου και μήκους (H07.30, U07.30) εμφανίζουν διαφορετικά ποσοστά αέρα.

4.2.6. Δοκιμές θλίψης

4.2.6.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης

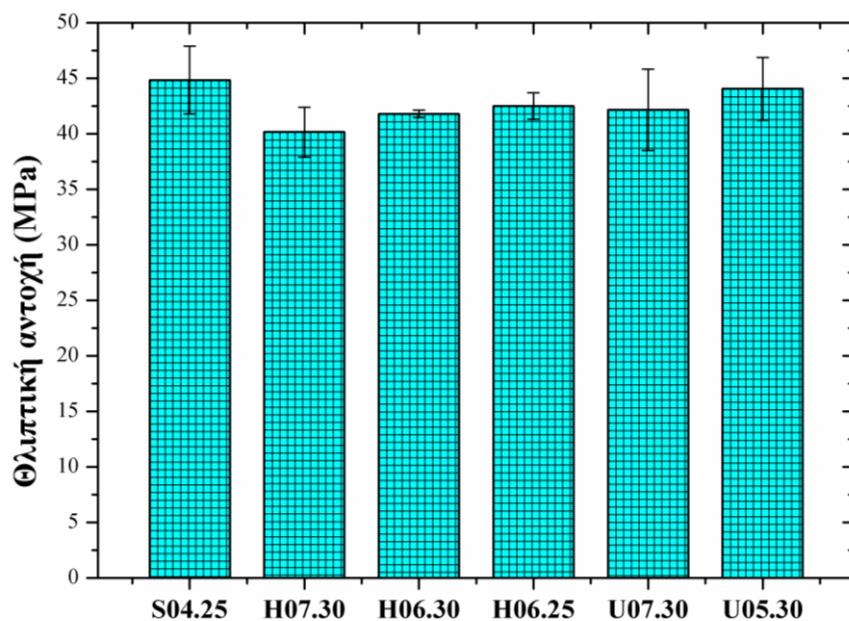
Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε Topi Technik μηχανή με μέγιστο φορτίο 3000 kN (Εικόνα 3.3) σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [32]. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 150x150x150 mm και η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 0.5 MPa/s. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις δοκιμές θλίψης αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3.3.3.1.

4.2.6.2. Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης απεικονίζονται στην Εικόνα 4.2.1 και παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στον Πίνακα 4.2.5.

Πίνακας 4.2.5. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων

| Κωδικός | Θλιπτική αντοχή (MPa) | STDEV* (MPa) |
|-----------------------------------------|-----------------------|--------------|
| S04.25 | 44.84 | 3.04 |
| H07.30 | 40.15 | 2.25 |
| H06.30 | 41.79 | 0.33 |
| H06.25 | 42.50 | 1.20 |
| U07.30 | 42.16 | 3.67 |
| U05.30 | 44.04 | 2.83 |
| *STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση | | |



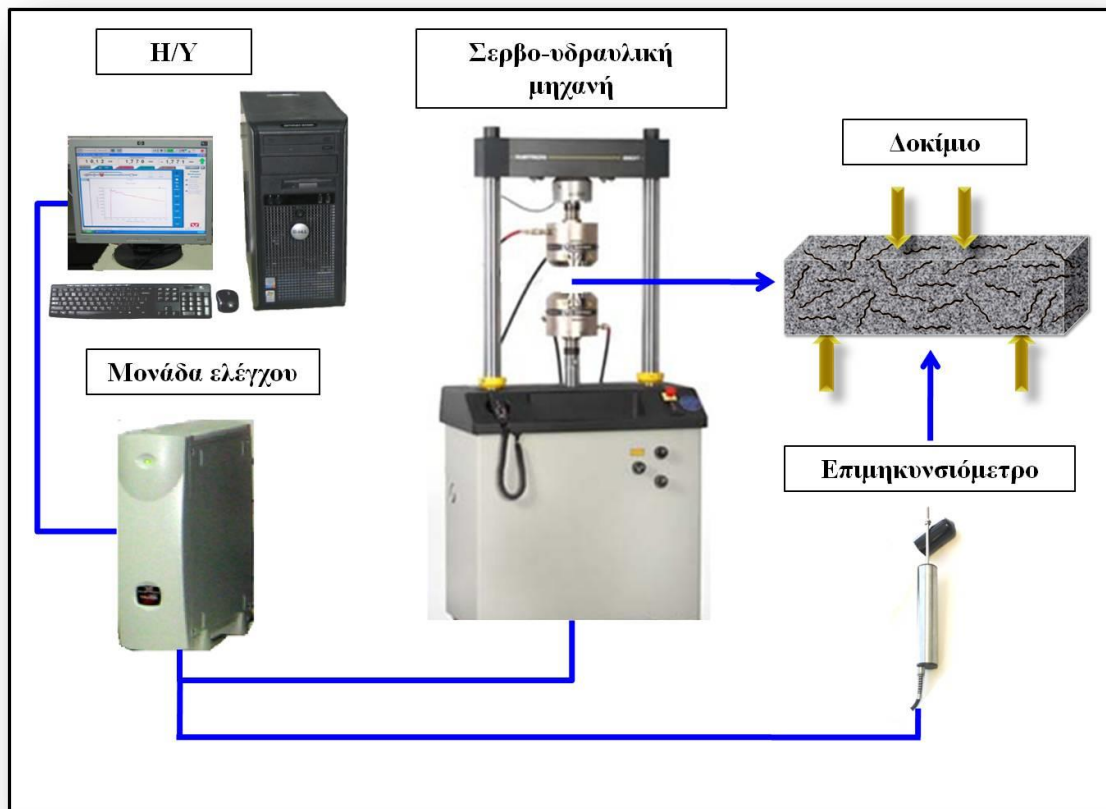
Εικόνα 4.2.1. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 4.2.1, η ολική επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στη θλιπτική αντοχή των διαφορετικών αναμιγμάτων δεν είναι σημαντική, αφού όλες οι τιμές είναι πολύ κοντινές και οι διαφορές στις περισσότερες περιπτώσεις βρίσκονται μέσα στο πειραματικό σφάλμα. Μια τάση που θα μπορούσε να παρατηρηθεί είναι ότι μείωση του μήκους της ίνας και της διαμέτρου οδηγεί σε μία μικρή βελτίωση της θλιπτικής αντοχής στην περίπτωση των αναμιγμάτων με κυματοειδείς και ίνες με κεκαμμένα άκρα. Η συγκεκριμένη ένδειξη θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι μεγαλύτερες διαμέτροι και μήκη ινών δημιουργούν πιο μεγάλα κενά στο υλικό της μήτρας και συνεπώς συμβάλλουν σε χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές. Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις μπορούν να υποστηριχθούν και από το γεγονός ότι η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι μία ιδιότητα που επηρεάζεται κυρίως από τη μήτρα και όχι τόσο από την ίνα. Όπως έχει αναφερθεί και στο παρελθόν, η θλιπτική αντοχή μπορεί να επηρεαστεί από τις ίνες, αν επηρεάζουν το βαθμό συμπύκνωσης της μήτρας [3].

4.2.7. Δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων

4.2.7.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Κάμψης

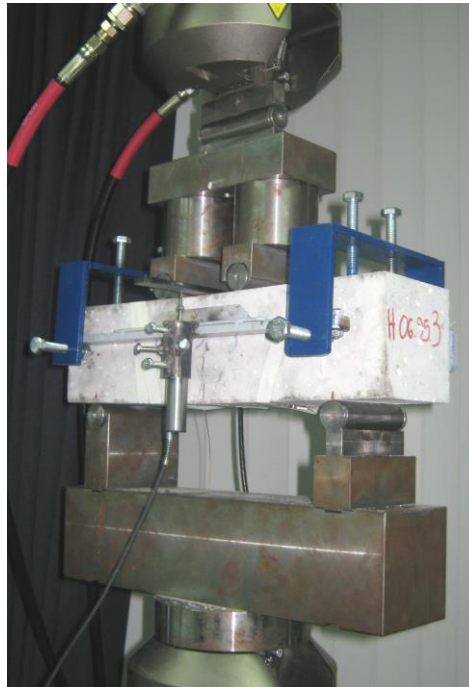
Η πειραματική διάταξη της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2.2. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστη πίεση υδραυλικού συστήματος 207 bar και μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN.



Εικόνα 4.2.2. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης

Η ταχύτητα μετατόπισης της δοκιμής ήταν 0.08 mm/min, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα επιμηκυνσιόμετρο Instron με εύρος ± 15 mm, το οποίο τοποθετήθηκε σε ένα ζυγό (yoke) (Εικόνα 4.2.3). Για την αποτίμηση των καμπτικών ιδιοτήτων των δοκιμών ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M - 05 [1]. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη γεωμετρία

των δοκιμών, την πειραματική διάταξη και την πειραματική διαδικασία αναφέρονται στο Κεφάλαιο 4.1.7.1.

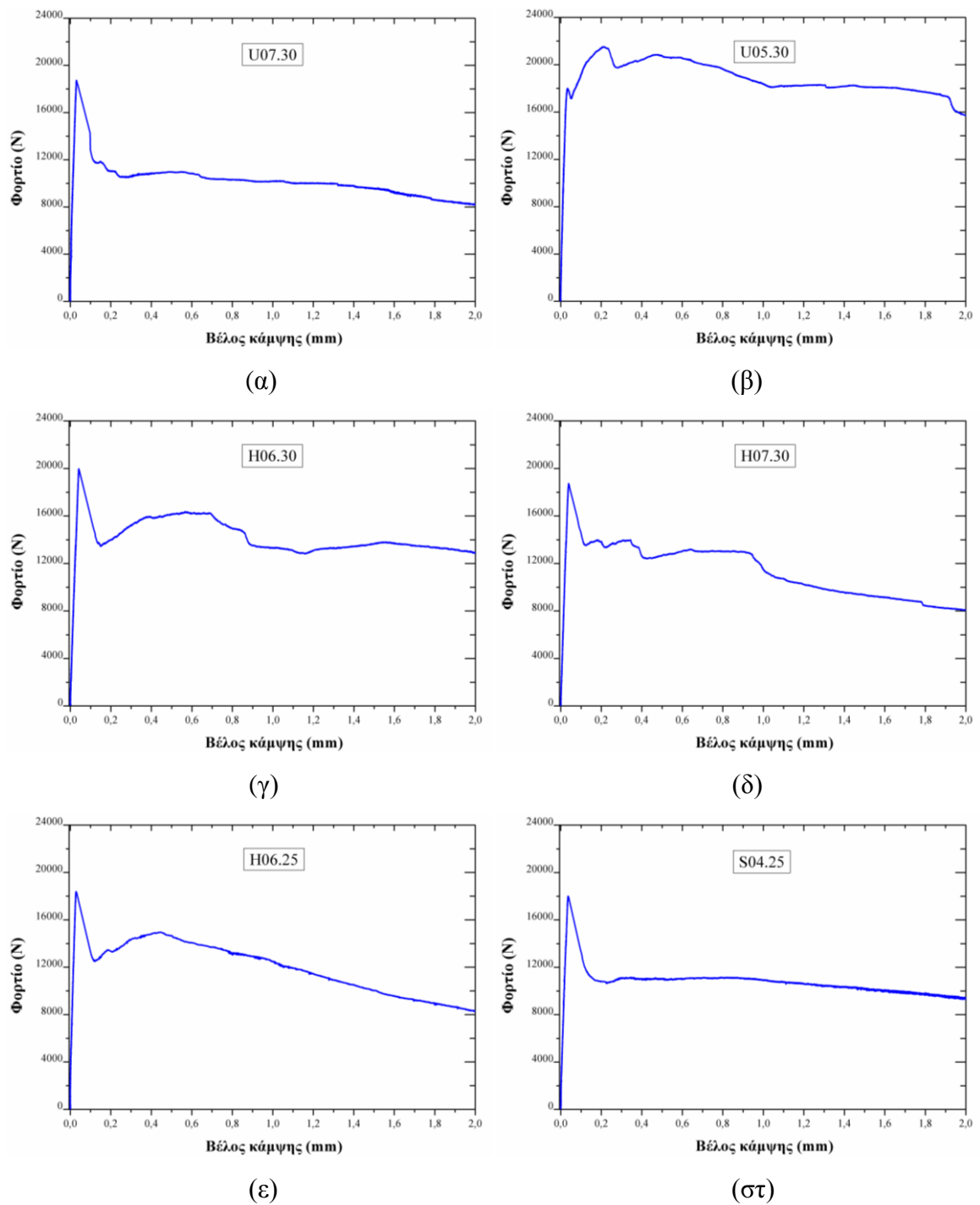


Εικόνα 4.2.3. Συσκευή δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων

4.2.7.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης

Στην Εικόνα 4.2.4 (α-στ) απεικονίζονται τυπικές καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης για όλα τα αναμίγματα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η γεωμετρία της ίνας δεν επηρεάζει σημαντικά την καμπτική απόκριση μέχρι το σημείο αιχμής (first peak) (P1). Η απόκριση ωστόσο από το σημείο αυτό και μετά είναι αρκετά διαφορετική και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών. Τα αποτελέσματα των καμπτικών ιδιοτήτων των ινοπλισμένων δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.6, ενώ η επίδραση κάθε παραμέτρου στις καμπτικές ιδιότητες απεικονίζεται ξεχωριστά στα διαγράμματα των Εικόνων 4.2.5 - 4.2.11.

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.2.4. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με ίνες 1.0% (α) U07.30, (β) U05.30, (γ) H06.30, (δ) H07.30, (ε) H06.25 και (στ) S04.25

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

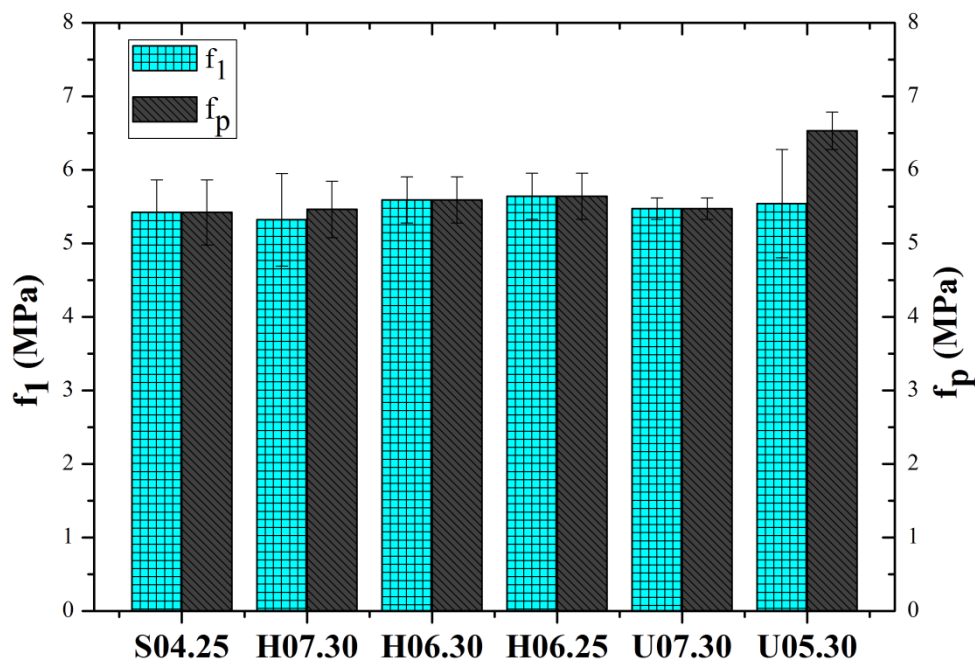
Πίνακας 4.2.6. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με 1.0% κ.ό. ίνες

| Κωδικός | S04.25 | H07.30 | H06.30 | H06.25 | U07.30 | U05.30 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P₁ (kN) | 18.54 | 17.19 | 19.21 | 18.59 | 18.41 | 18.10 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 1.57 | 2.03 | 1.08 | 1.32 | 0.55 | 2.03 |
| P_P (kN) | 18.54 | 17.66 | 19.21 | 18.59 | 18.41 | 21.41 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 1.57 | 1.25 | 1.08 | 1.32 | 0.55 | 1.00 |
| P_{100,0.50} (kN) | 9.77 | 13.25 | 16.53 | 13.09 | 11.26 | 19.30 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 0.95 | 1.92 | 0.55 | 1.39 | 0.27 | 1.25 |
| P_{100,2.0} (kN) | 8.33 | 8.95 | 13.52 | 7.42 | 8.92 | 14.77 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 0.95 | 1.24 | 0.88 | 1.83 | 0.92 | 2.72 |
| f₁ (MPa) | 5.42 | 5.32 | 5.59 | 5.64 | 5.47 | 5.54 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.44 | 0.63 | 0.31 | 0.31 | 0.14 | 0.73 |
| f_P (MPa) | 5.42 | 5.46 | 5.59 | 5.64 | 5.47 | 6.53 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.44 | 0.39 | 0.31 | 0.31 | 0.14 | 0.25 |
| f_{100,0.50} (MPa) | 2.86 | 4.10 | 4.81 | 3.97 | 3.35 | 5.89 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.29 | 0.59 | 0.16 | 0.37 | 0.13 | 0.37 |
| f_{100,2.0} (MPa) | 2.44 | 2.77 | 3.94 | 2.25 | 2.65 | 4.50 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.29 | 0.38 | 0.26 | 0.51 | 0.31 | 0.74 |
| T_{100,2.0} (J) | 19.0 | 24.3 | 29.4 | 21.8 | 21.8 | 34.8 |
| <i>STDEV*</i> (J) | 2.00 | 2.28 | 1.42 | 2.53 | 1.16 | 3.79 |

* *STDEV* αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνων στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

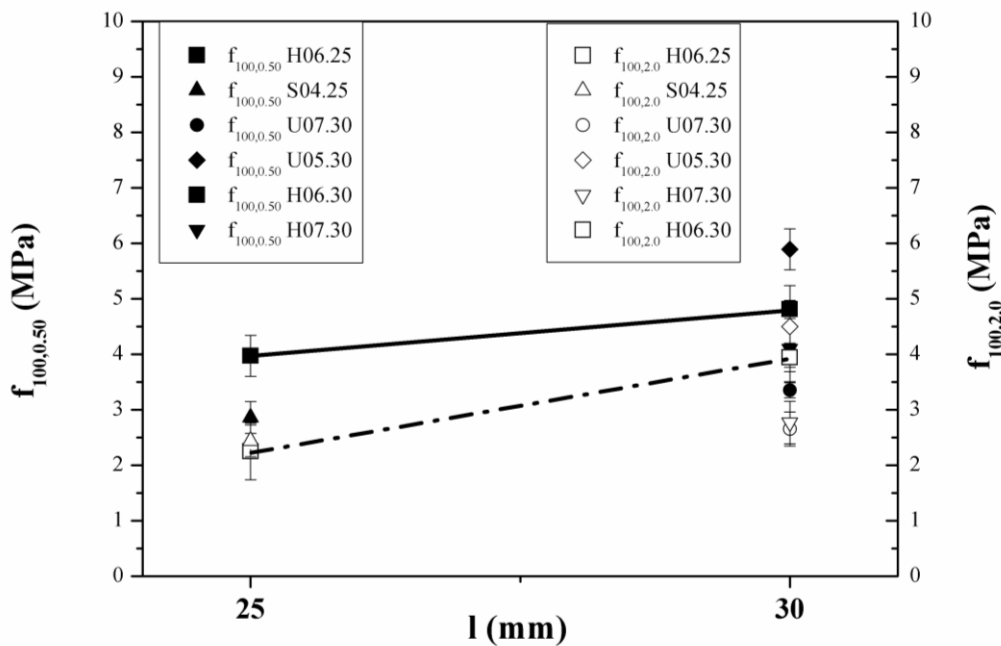
Η Εικόνα 4.2.5 απεικονίζει τα αποτελέσματα της μέγιστης καμπτικής αντοχής αιχμής (f_1) και μέγιστης καμπτικής αντοχής για όλα τα αναμίγματα που εξετάστηκαν. Όλες οι τιμές της f_1 είναι σχεδόν ίδιες και οι μόνες διαφορές που εντοπίζονται βρίσκονται στο εύρος της τυπικής απόκλισης. Ομοίως με τη συμπεριφορά της μέγιστης καμπτικής αντοχής αιχμής, στις περισσότερες περιπτώσεις η μέγιστη καμπτική αντοχή (f_p) δεν εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας (βλ. Εικόνα 4.2.5). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν, επιπλέον, ότι το σχήμα της ίνας δεν είναι κρίσιμος παράγοντας που επηρεάζει τη μέγιστη καμπτική αντοχή, αφού παρόμοιες τιμές f_p παρατηρούνται όταν χρησιμοποιούνται ίνες με διαφορετικό σχήμα και με ίδια διάμετρο και μήκος (H07.30, U07.30).



Εικόνα 4.2.5. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και μέγιστη καμπτική αντοχή για τα 1.0% ινοπλισμένα αναμίγματα

Η συμπεριφορά των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων όσον αφορά τις παραμένουσες αντοχές σε σχέση με το μήκος της ίνας, απεικονίζεται στην Εικόνα 4.2.6. Οι γραμμές ενώνουν ίνες με το ίδιο σχήμα και διάμετρο. Για λόγους σύγκρισης τα αποτελέσματα από όλες τις υπόλοιπες ίνες σχεδιάστηκαν στο διάγραμμα ως μεμονωμένα σημεία.

Συγκρίνοντας τα αναμίγματα H06.30 και H06.25, μπορεί να διαπιστωθεί ότι αυξάνοντας το μήκος της ίνας και οι δύο παραμένουσες αντοχές βελτιώνονται. Είναι γεγονός ότι το μεγαλύτερο μήκος ίνας έχει τη δυνατότητα να γεφυρώνει πιο αποτελεσματικά τις ρωγμές με αποτέλεσμα να αυξάνει την ικανότητα των δοκιμίων να φέρουν μεγαλύτερα φορτία μετά τη ρωγμάτωση. Συγκεκριμένα, αύξηση του μήκους κατά 5 mm συνεπάγεται βελτίωση στην $f_{100,0.50}$ κατά 21% και κατά 75% στην $f_{100,2.0}$. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι τα S04.25, H06.25, H07.30 και U07.30 αναμίγματα παρουσιάζουν πολύ κοντινές τιμές στην παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$, υποδεικνύοντας ότι το μήκος της ίνας από μόνο του δεν είναι τόσο καθοριστικός παράγοντας.

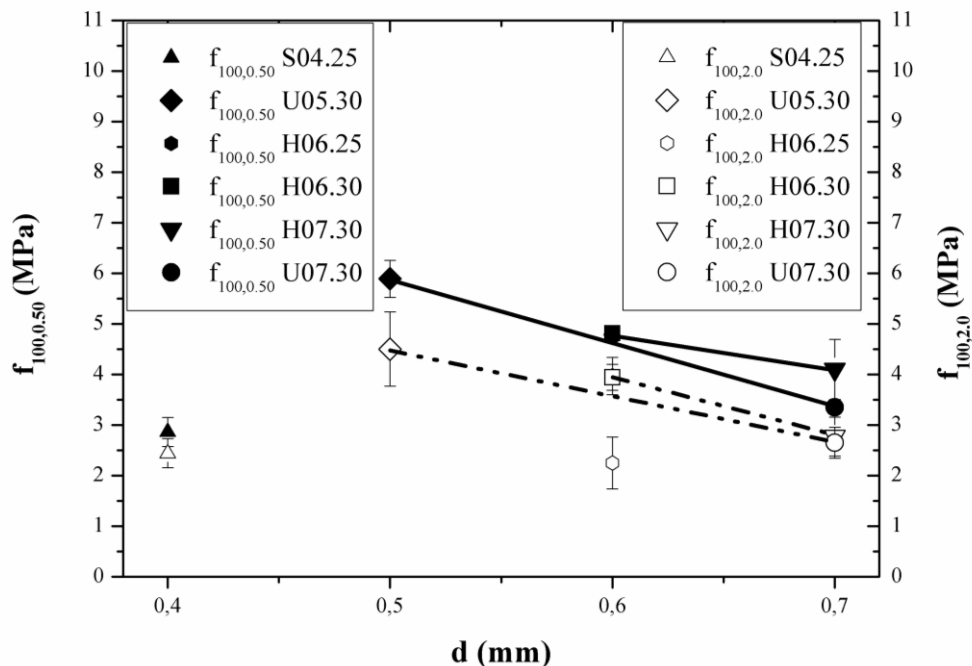


Εικόνα 4.2.6. Παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με το μήκος των ινών

Η επίδραση της διαμέτρου των ινών στις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ όλων των αναμιγμάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.2.7. Ως γενική τάση παρατηρείται ότι η μείωση της διαμέτρου των ινών συνεισφέρει σε αύξηση των παραμενουσών αντοχών. Το γεγονός αυτό είναι πολύ εμφανές ιδιαίτερα για τις κυματοειδείς ίνες. Μείωση της διαμέτρου των κυματοειδών ινών κατά 0.2 mm οδηγεί στη βελτίωση των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ κατά 76% και 70% αντίστοιχα. Στις ίνες με κεκαμμένα άκρα η μείωση της διαμέτρου

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

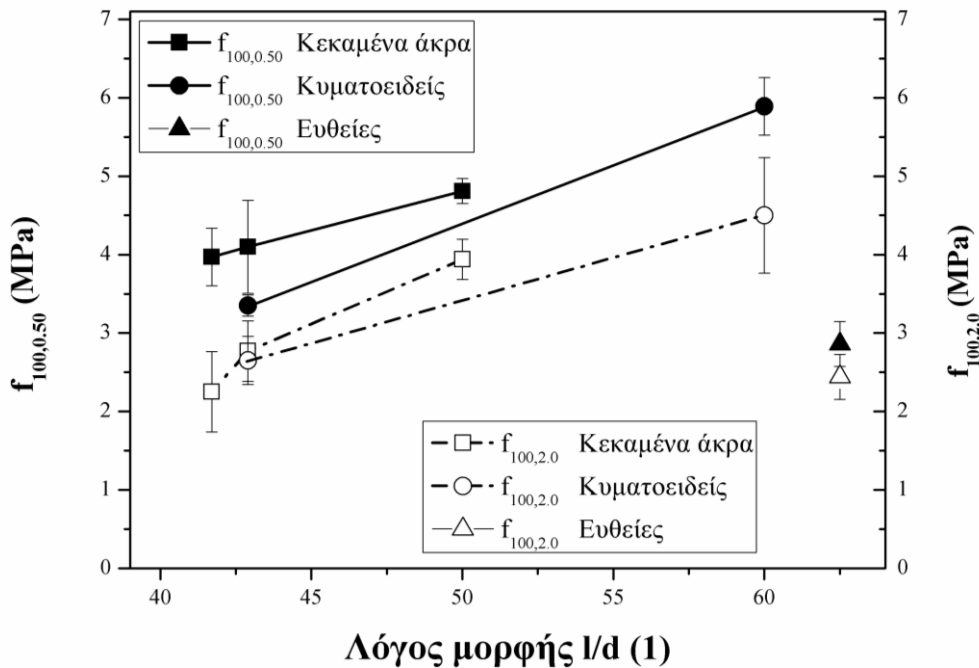
των ινών κατά 0.1 mm συντέλεσε σε 17% και 42% βελτίωση των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ αντίστοιχα. Η επιρροή της διαμέτρου μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι λεπτότερες ίνες ζυγίζουν λιγότερο, οπότε σε κάθε δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος ενσωματώνεται μεγαλύτερος αριθμός ινών. Αντιθέτως, οι ευθείες ίνες παρόλο που έχουν τη μικρότερη διάμετρο και βάρος, λόγω του σχήματος τους, συμβάλλουν σε χαμηλές παραμένουσες αντοχές.



Εικόνα 4.2.7. Παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με τη διάμετρο των ινών

Συνεπώς, βάσει των παραπάνω συμπερασμάτων η επιρροή της διαμέτρου και του μήκους των ινών είναι αλληλένδετη και δεν μπορεί να συζητηθεί ανεξάρτητα. Για το λόγο αυτό, οι παραμένουσες αντοχές απεικονίζονται στην Εικόνα 4.2.8 ως συνάρτηση του λόγου μορφής (l/d) που λαμβάνει υπόψη την ταυτόχρονη επιρροή και των δύο παραμέτρων. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, αύξηση της τιμής l/d οδηγεί σε βελτίωση των παραμενουσών αντοχών. Όμως, το γεγονός αυτό δεν ισχύει για τις ίνες S04.25, παρόλο που έχουν το μεγαλύτερο λόγο μορφής (62.5). Το σχήμα των ευθειών ινών δεν ευνοεί τη μηχανική πρόσφυση μεταξύ της μήτρας σκυροδέματος και της ίνας κατά την εξόλκευση και για το λόγο αυτό δεν μπορούν να συνεισφέρουν στις παραμένουσες αντοχές όσο οι

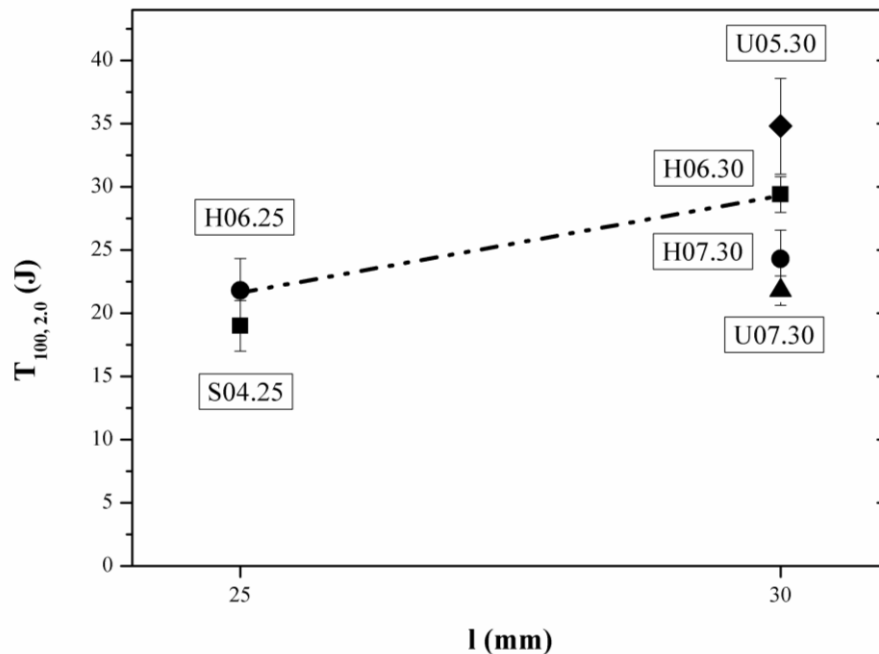
παραμορφωμένες ίνες. Ο λόγος μορφής, λοιπόν, θα πρέπει να εξετάζεται συναρτήσει του σχήματος της ίνας. Επιπλέον, οι ίνες με κεκαμμένα άκρα είναι πιο αποτελεσματικές από τις κυματοειδείς, συγκρίνοντας ίνες που διαφέρουν μόνο στο σχήμα (H07.30, U07.30).



Εικόνα 4.2.8. Παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με το λόγο μορφής των ινών

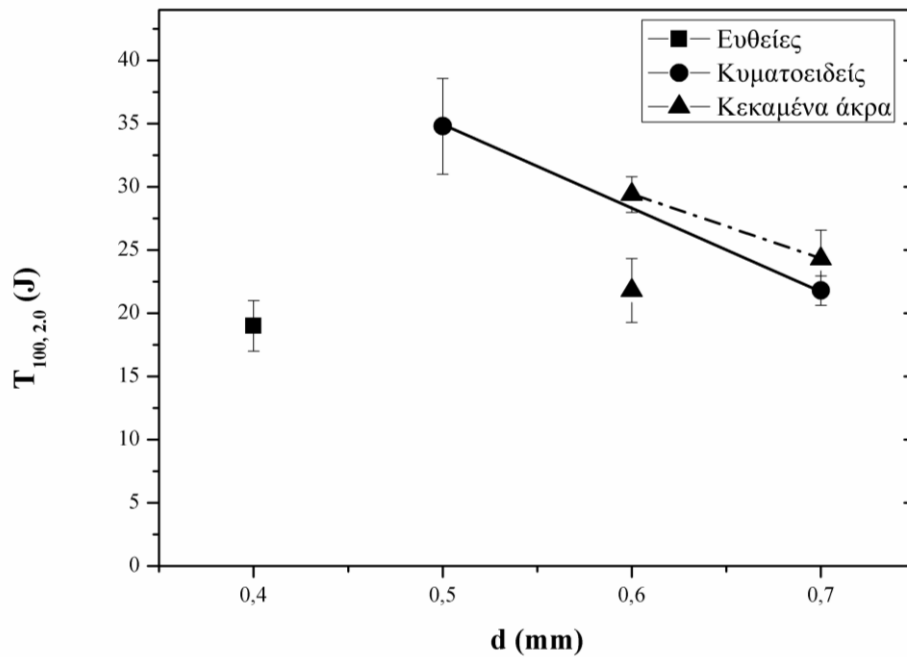
Στις Εικόνες 4.2.9 - 4.2.11 απεικονίζεται η συμπεριφορά των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με 1.0% ίνες, όσον αφορά τη δυσθραυστότητα σε σχέση με το μήκος, τη διάμετρο και το λόγο μορφής των ινών. Συγκεκριμένα, στην Εικόνα 4.2.9 για λόγους σύγκρισης απεικονίζονται τα αποτελέσματα δυσθραυστότητας όλων των ινοπλισμένων αναμιγμάτων, ενώ η γραμμή ενώνει τα αποτελέσματα των ινών που διαφέρουν μόνο στο μήκος. Όπως και στις παραμένουσες αντοχές, παρατηρείται ότι αυξάνοντας το μήκος της ίνας η $T_{100,2.0}$ αυξάνεται, λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας της πιο μακριάς ίνας να γεφυρώνει πιο αποτελεσματικά τις ρωγμές. Η αύξηση της δυσθραυστότητας για αύξηση του μήκους της ίνας κατά 5mm είναι της τάξης του 35%. Όμως, το γεγονός ότι τα αναμίγματα με διαφορετικό μήκος παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές (π.χ. H06.25 και

U07.30), υποδηλώνει ότι το μήκος της ίνας δεν είναι τόσο καθοριστικός παράγοντας και στη δυσθραυστότητα.



Εικόνα 4.2.9. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με το μήκος των ινών

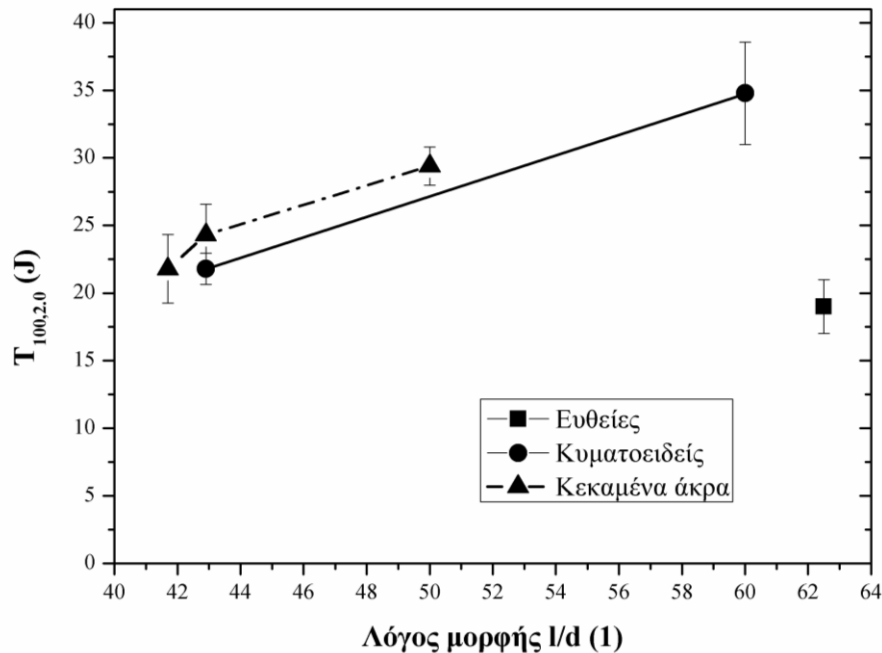
Η επίδραση της διαμέτρου της ίνας στη δυσθραυστότητα είναι αντίστοιχη με την επιρροή της στις παραμένουσες αντοχές (βλ. Εικόνα 4.2.10). Συνεπώς, μείωση της διαμέτρου οδηγεί σε αύξηση της $T_{100,2.0}$. Στις κυματοειδείς ίνες (U07.30, U05.30) μείωση της διαμέτρου κατά 0.2 mm οδηγεί σε 60% αύξηση της παραμέτρου, ενώ στις ίνες με κεκαμμένα άκρα (H07.30, H06.30) μείωση κατά 0.1 mm της διαμέτρου οδηγεί σε 21% αύξηση της $T_{100,2.0}$. Η επίδραση της διαμέτρου στη δυσθραυστότητα έγκειται στο γεγονός ότι οι πιο λεπτές ίνες ζυγίζουν λιγότερο και επομένως σε κάθε δοκίμιο αντιστοιχεί μεγαλύτερος αριθμός ινών που εμποδίζει τη διάδοση της ρωγμής. Αντιθέτως, οι ευθείες ίνες παρόλο που έχουν το μικρότερο βάρος και τη μικρότερη διάμετρο συμβάλλουν στη χαμηλότερη τιμή δυσθραυστότητας, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι και η διάμετρος δεν αποτελεί αποκλειστικό παράγοντα επίδρασης.



Εικόνα 4.2.10. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με τη διάμετρο των ινών

Στην Εικόνα 4.2.11 απεικονίζεται η μεταβολή της δυσθραυστότητας συναρτήσει του λόγου μορφής, ο οποίος συμπεριλαμβάνει την επιρροή και των δύο παραπάνω παραμέτρων (μήκους, διαμέτρου). Όπως είναι φανερό, αύξηση του λόγου μορφής προκαλεί σημαντική άνοδο στην τιμή της δυσθραυστότητας. Γενικά, η δυσθραυστότητα των ινοπλισμένων αναμιγμάτων αυξάνεται σταθερά με το λόγο μορφής. Παρόμοιες καμπύλες λαμβάνονται και για τις κυματοειδείς και για τις ίνες με κεκαμμένα άκρα. Αντιθέτως, τα αναμίγματα με ευθείες ίνες εμφανίζουν τις μικρότερες τιμές $T_{100,2.0}$, παρόλο που έχουν το μεγαλύτερο λόγο μορφής και το μέγιστο αριθμό ινών (μικρότερο βάρος ίνας). Όπως και στις παραμέτρους παραμένουσας αντοχής, το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στην απουσία μηχανισμών μηχανικής πρόσφυσης στην περίπτωση των ευθειών ινών. Επιπλέον, οι ίνες με κεκαμμένα άκρα προκαλούν λίγο υψηλότερες τιμές καμπτικής δυσθραυστότητας σε σχέση με τις κυματοειδείς ίνες ίδιου μήκους και διαμέτρου. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι και ο λόγος μορφής είναι αλληλένδετος συντελεστής με το σχήμα των ινών και στη δυσθραυστότητα.

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.2.11. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με το λόγο μορφής των ινών

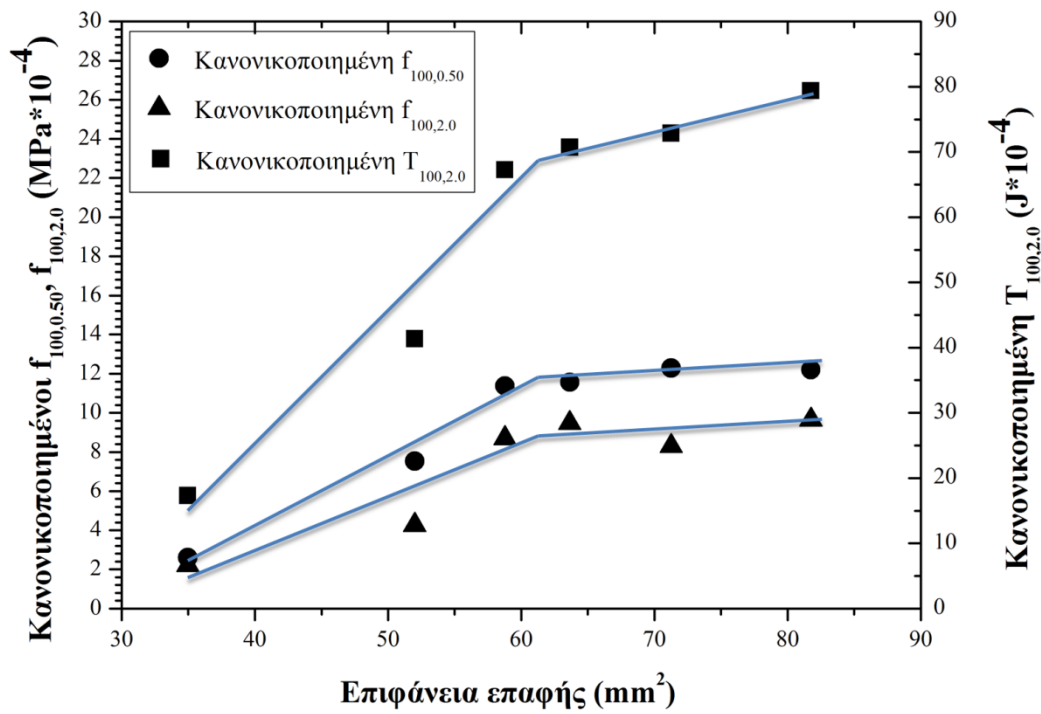
Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση, πολλές παράμετροι επηρεάζουν τη δυσθραυστότητα και την παραμένουσα αντοχή, όπως το μήκος της ίνας, η διάμετρος, ο λόγος μορφής και το σχήμα της. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι είναι δύσκολο να εξαχθεί ένα σαφές συμπέρασμα, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να ληφθεί υπόψη η ανεξάρτητη επιρροή μίας μεμονωμένης ιδιότητας των ινών.

Στην Εικόνα 4.2.12 παρουσιάζεται μία προσέγγιση που ενοποιεί τα παραπάνω αποτελέσματα. Στη γραφική παράσταση ο αριστερός άξονας απεικονίζει τις κανονικοποιημένες παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$, ενώ ο δεξιό άξονας την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα για όλα τα αναμίγματα. Η κανονικοποίηση του y άξονα πραγματοποιήθηκε με τον συνολικό αριθμό των ινών (N) που ενσωματώνονται σε κάθε δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ και $T_{100,2.0}$ διαιρέθηκαν με τον αντίστοιχο αριθμό ινών κάθε δοκιμίου. Ο άξονας x αντιστοιχεί στην επιφάνεια επαφής των μεμονωμένων ινών που ενσωματώνονται στο δοκίμιο. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η επιφάνεια επαφής συνδυάζει τις προαναφερθείσες παραμέτρους, οι παράγοντες που εξετάζονται και επηρεάζουν την καμπτική δυσθραυστότητα και τις παραμένουσες αντοχές μπορούν να περιοριστούν μόνο σε μία.

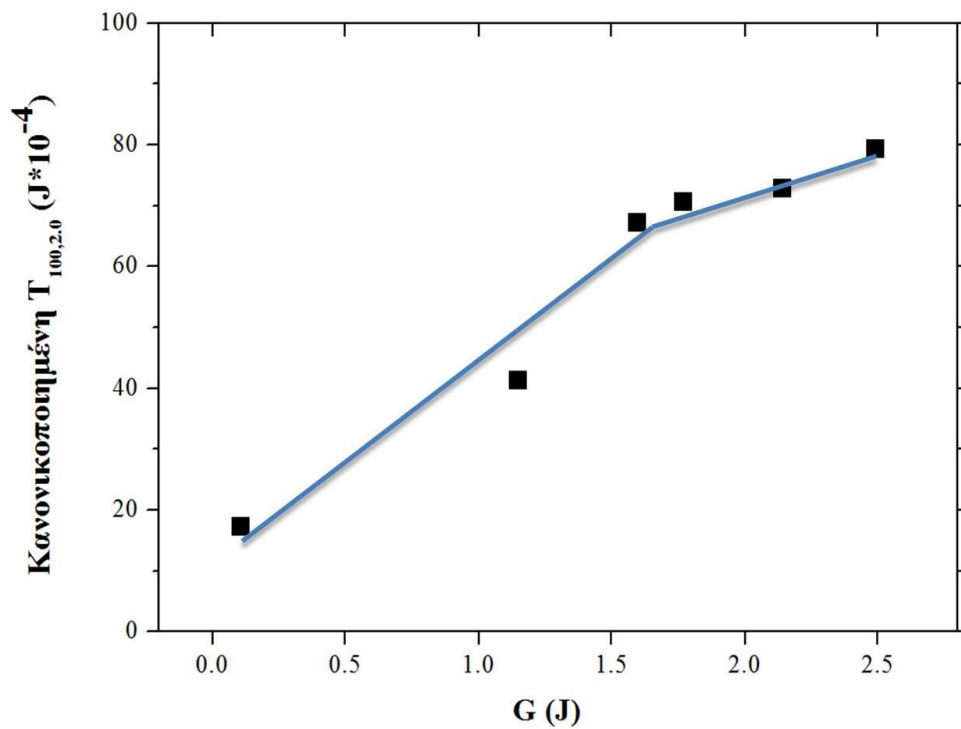
Βάσει της γραφικής, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η κανονικοποιημένη παραμένουσα αντοχή αυξάνεται μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο, πάνω από το οποίο εμφανίζεται σχεδόν σταθερή, υποδηλώνοντας ότι η επιφάνεια επαφής, η οποία είναι άμεσο μέτρο της διεπιφάνειας ίνας/μήτρας, είναι κρίσιμη κάτω από κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Οι τιμές αυτές υπαγορεύουν επαρκή μεταφορά τάσης από τη μήτρα στην ίνα. Όταν η κρίσιμη τάση επιτευχθεί, περαιτέρω αύξηση στην επιφάνεια επαφής της ίνας δεν προωθεί σημαντική αύξηση των τιμών αντοχής. Αντιθέτως, στην περίπτωση της δυσθραυστότητας, η απόκριση σε σχέση με την επιφάνεια επαφής περιγράφεται από δύο κεκλιμένες ευθείες διαφορετικών κλίσεων. Αρχικά, η δυσθραυστότητα αυξάνεται με την άνοδο της επιφάνειας επαφής μέχρι ένα συγκεκριμένο σημείο, η τιμή του οποίου συμπίπτει με εκείνου του σημείου που παρατηρήθηκε στις παραμένουσες αντοχές. Από το σημείο αυτό και μετά η δυσθραυστότητα εξακολουθεί να αυξάνει με την επιφάνεια επαφής, αλλά η κλίση της ευθείας είναι χαμηλότερη από προηγούμενων. Οι δύο διαφορετικές κλίσεις που παρατηρούνται υποδεικνύουν την ύπαρξη δύο μηχανισμών που επηρεάζουν τη δυσθραυστότητα. Οι δύο μηχανισμοί είναι αυτός της εξόλκευσης της ίνας, και αυτός της γεφύρωσης των ρωγμών λόγω αλληλεπίδρασης των ινών. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ενώ το γράφημα αποδίδει κανονικοποιημένες τιμές, τα αποτελέσματα προέρχονται από πειράματα με μεγάλο αριθμό ινών. Αρχικά λόγω του μεγάλου αριθμού ινών στο δοκίμιο επικρατούν και οι δύο μηχανισμοί, ενώ καθώς η επιφάνεια επαφής των ινών αυξάνει μειώνεται ο αριθμός τους, άρα μεγαλώνει η απόστασή τους. Αυτό οδηγεί σε μείωση της αλληλεπίδρασης των ινών και της αποτελεσματικότητας γεφύρωσης ρωγμών. Το σημείο τομής των δύο ευθειών καταδεικνύει λοιπόν το βέλτιστο συνδυασμό επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο.

Τα συμπεράσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης, όπου η ενέργεια εξόλκευσης σχετίζεται άμεσα με την εμβαπτισμένη επιφάνεια επαφής. Όπως είναι ορατό στην Εικόνα 4.2.13, όπου απεικονίζεται η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την ενέργεια εξόλκευσης κάθε ίνας επικρατούν και εδώ δύο κλίσεις. Είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται η ενέργεια εξόλκευσης, αυξάνεται και η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα μέχρι του σημείου όπου η δυσθραυστότητα αλλάζει κλίση σε σχέση με την ενέργεια. Το σημείο αυτό καταδεικνύει όπως και προηγούμενως τους δύο μηχανισμούς οι οποίοι δρουν συνεργατικά, αυτόν της εξόλκευσης και αυτόν της αλληλεπίδρασης των ινών.

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.2.12. Επιφάνεια επαφής ινών σε σχέση με τους κανονικοποιημένους συντελεστές $T_{100,2.0}$, $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$.



Εικόνα 4.2.13. Ενέργεια εξόλκευσης ινών σε σχέση με την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$.

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Η Εικόνα 4.2.14 (α-γ) παρουσιάζει τυπικά δοκίμια μετά το τέλος της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων για ευθείες, κυματοειδείς και ίνες με κεκαμμένα άκρα. Όπως είναι εμφανές, στα δοκίμια με κυματοειδείς και ίνες με κεκαμμένα άκρα η κύρια ρωγμή συνοδεύεται και από δευτερεύουσες ρωγμές, σε αντίθεση με τα δοκίμια με ευθείες ίνες.



(α)



(β)

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ίνών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



(γ)

Εικόνα 4.2.14. Δοκίμια μετά τη δοκιμή κάμψης με α) ευθείες, β) κεκαμένα άκρα, γ) κυματοειδείς ίνες

4.2.8. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο μελετήθηκε ο ρόλος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (δηλ. μήκος, διάμετρος, λόγος μορφής και σχήμα ίνας) στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες σκυροδέματος με 1.0% ίνες. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν τη σημαντική επιρροή αυτών των παραμέτρων στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Από τις δοκιμές κάθισης συμπεραίνεται ότι η εργασιμότητα επηρεάζεται από το σχήμα και το μήκος της ίνας, ενώ η διάμετρος δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Το μήκος και το σχήμα των ινών επηρεάζει και την περιεκτικότητα των αναμιγμάτων σε αέρα.

Συμπεραίνεται, ακόμη, ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών δεν έχουν σημαντική επιρροή στη θλιπτική αντοχή και στη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής των ινοπλισμένων αναμιγμάτων, λόγω του γεγονότος ότι οι συγκεκριμένες ιδιότητες επηρεάζονται κυρίως από την ποιότητα της μήτρας. Υπό την έννοια αυτή, οι διακυμάνσεις της θλιπτικής αντοχής σχετίζονται με την ποσότητα/μέγεθος των κενών που δημιουργούνται στη μήτρα σκυροδέματος με την εισαγωγή των ινών.

Η καμπτική δυσθραυστότητα και η παραμένουσα αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών με παρόμοιο τρόπο. Γενικά, μείωση της διαμέτρου της ίνας, αναφορικά με ίνες ίδιου σχήματος και μήκους, συντέλεσε σε αύξηση της δυσθραυστότητας και της παραμένουσας αντοχής. Ομοίως, αύξηση του μήκους της ίνας οδήγησε σε βελτίωσή τους για ίνες ίδιου σχήματος και διαμέτρου. Επιπλέον, αύξηση του λόγου μορφής των παραμορφωμένων ινών συνέβαλλε σε σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας και της παραμένουσας αντοχής.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι είναι δύσκολο να εξαχθεί ένα σαφές συμπέρασμα σχετικά με την επίδραση των γεωμετρικών παραμέτρων, αφού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι δύσκολο να ληφθεί υπόψη η ανεξάρτητη επιρροή μίας μεμονωμένης ιδιότητας των ινών. Ως εκ τούτου, η επιφάνεια επαφής της ίνας σχετίστηκε με την κανονικοποιημένη παραμένουσα αντοχή και κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα. Η επιφάνεια επαφής είναι άμεσο μέτρο της διεπιφάνειας ίνας/μήτρας και είναι καθοριστικός παράγοντας και για τις δύο μηχανικές ιδιότητες, αφού επηρεάζει τη διαδικασία εξόλκευσης. Ταυτόχρονα, κατέστη εμφανές ότι εκτός από την εξόλκευση ινών επικρατεί

4.2. Επίδραση των Γεωμετρικών Χαρακτηριστικών των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

και άλλος ένας μηχανισμός, αυτός της αλληλεπίδρασης των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών, που διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη δυσθραυστότητα των δοκιμίων. Βάσει αυτού εξήχθη βέλτιστος συνδυασμός επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο για βέλτιστη δυσθραυστότητα.

4.2.9. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου

1. ASTM Standard C 1609/C 1609M - 05. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (2006). ASTM International, West Conshohocken, PA
2. Kim DJ, Naaman AE, El-Tawil S (2008) Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites* 30 (10):917-928
3. Johnston CD, Skarendahl Å (1992) Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters. *Materials and Structures* 25 (4):191-200
4. Gao J, Sun W, Morino K (1997) Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites* 19 (4):307-313
5. Choi OC, Lee C (2003) Flexural performance of ring-type steel fiber-reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* 33 (6):841-849
6. Yazıcı Ş, İnan G, Tabak V (2007) Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials* 21 (6):1250-1253
7. Köksal F, Altun F, Yiğit İ, Şahin Y (2008) Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *Construction and Building Materials* 22 (8):1874-1880
8. Uygunoğlu T (2008) Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. *Materials and Structures* 41 (8):1441-1449
9. Naaman AE (2003) Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology* 1 (3):241-252
10. Düzgün OA, Gül R, Aydın AC (2005) Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Materials Letters* 59 (27):3357-3363

11. Holschemacher K, Mueller T, Ribakov Y (2010) Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete. *Materials and Design* 31 (5):2604-2615
12. Jeng F, Lin M-L, Yuan S-C (2002) Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete. *Tunnelling and Underground Space Technology* 17 (1):69-82
13. Kayali O, Haque MN, Zhu B (2003) Some characteristics of high strength fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites* 25 (2):207-213
14. Nataraja MC, Dhang N, Gupta AP (1999) Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression. *Cement and Concrete Composites* 21 (5-6):383-390
15. Nataraja MC, Dhang N, Gupta AP (2000) Toughness characterization of steel fiber-reinforced concrete by JSCE approach. *Cement and Concrete Research* 30 (4):593-597
16. Skazlić M, Bjegović D (2009) Toughness testing of ultra high performance fibre reinforced concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 42 (8):1025-1038
17. Song PS, Hwang S (2004) Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 18 (9):669-673
18. Sukontasukkul P (2004) Toughness evaluation of steel and polypropylene fibre reinforced concrete beams under bending. *Thammasat International Journal of Science and Technology* 9 (3):35-41
19. ACI 544.3R-93 (Reapproved 1998) Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
20. ACI 544.4R-88 (Reapproved 1999) Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
21. Banthia N, Sappakittipakorn M (2007) Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research* 37 (9):1366-1372

22. Mohammadi Y, Singh SP, Kaushik SK (2008) Properties of steel fibrous concrete containing mixed fibres in fresh and hardened state. *Construction and Building Materials* 22 (5):956-965
23. Khaloo AR, Afshari M (2005) Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. *Cement and Concrete Composites* 27 (1):141-149
24. Banthia N, Armelin H (2002) A novel double anchored steel fiber for shotcrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 29 (1):58-63
25. ASTM Standard C 128 - 01e1 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
26. ASTM Standard C 127 - 01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
27. ASTM Standard C 136 - 01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
28. ASTM Standard C 192/C 192M - 98. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (1998). ASTM International, West Conshohocken, PA
29. ASTM Standard C 143/C 143M - 03. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
30. BS EN 12350-3:2000 Testing Fresh Concrete - Part 3: Vebe Test (2000). British Standards Institution
31. ASTM Standard C 231 - 03 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
32. BS EN 12390-3:2002 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens (2002). British Standard Institution

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

4.3.1. Στόχος – Αντικείμενο

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο πραγματοποιείται μία συστηματική μελέτη της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στις ιδιότητες του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, συναρτήσει και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών. Για το λόγο αυτό, αρχικά χρησιμοποιούνται κυματοειδείς ίνες με λόγο μορφής 33.3 σε ποσοστά 0.5%, 1.0% και 1.5% κ.ό. σκυροδέματος. Στόχος είναι να μελετηθεί η επίδραση της προσθήκης ινών με σχετικά χαμηλό λόγο μορφής και σε ένα τυπικό εύρος της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στο σκυρόδεμα, καθώς και να συγκριθούν οι ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με τις αντίστοιχες ιδιότητες του νωπού και του σκληρυμένου άοπλου σκυροδέματος. Τα μικρότερα ποσοστά ενίσχυσης αποτελούν στόχο για τη βιομηχανία σκυροδέματος, καθώς οδηγούν σε οικονομικότερα αναμίγματα, με αποτέλεσμα η γνώση της μηχανικής τους απόκρισης να είναι πολύ σημαντική.

Για την καλύτερη κατανόηση της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών εφαρμόστηκε και η μη καταστροφική μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής (ΑΕ). Συγκεκριμένα, η ΑΕ εφαρμόζεται σε ινοπλισμένα δοκίμια με κυματοειδείς ίνες και σε άοπλα δοκίμια που υπόκεινται σε κάμψη τεσσάρων σημείων. Οι παράμετροι της ΑΕ συσχετίζονται τόσο με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών όσο και με την καμπτική δυσθραυστότητα των αναμιγμάτων.

Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτείνεται και σε ίνες με μεγαλύτερους λόγους μορφής, ευθείες ($l/d=62.5$) και κυματοειδείς ($l/d=42.9$) και σε ποσοστό ενίσχυσης έως και 2.5% κ.ό. σκυροδέματος. Αποτελεί ενδιαφέρον να εξεταστεί εάν ίνες διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών και σε μεγάλα ποσοστά ενίσχυσης έχουν την ικανότητα περαιτέρω βελτίωσης των μηχανικών ιδιοτήτων των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 4.2, οι συγκεκριμένες ίνες απέδωσαν τη χαμηλότερη καμπτική δυσθραυστότητα και παραμένουσες αντοχές για ποσοστό 1.0% κ.ό. σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, επιπλέον στόχο του συγκεκριμένου Υποκεφαλαίου αποτελεί η εύρεση εκείνης της περιεκτικότητας

των ινών κ.ό., με τη χρήση του οποίου μπορούν να επιτευχθούν παρόμοιες παραμένουσες αντοχές και καμπτική δυσθραυστότητα με τις ίνες U05.30, οι οποίες απέδωσαν τις καλύτερες τιμές στις ιδιότητες αυτές σε ποσοστό 1.0%. Τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά ποσοστά, λοιπόν, συγκρίνονται με εκείνα του Υποκεφαλαίου 4.2 για δοκίμια με ενίσχυση 1.0% κ.ό. σκυροδέματος. Η γνώση των κατάλληλων ποσοτήτων ινών που πρέπει να επιλεγθούν για την επίτευξη των καλύτερων μηχανικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι αναγκαία, διότι μπορεί να μειώσει κατά πολύ τον οικονομικό προϋπολογισμό μίας κατασκευής.

4.3.2. Εισαγωγή

Τα ψαθυρά υλικά δεν έχουν σημαντική ολκιμότητα μετά τη ρωγμάτωση. Τα ινοπλισμένα υλικά, λοιπόν, αναπτύσσονται για να βελτιώσουν τις μηχανικές ιδιότητες των ψαθυρών υλικών. Το άοπλο σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που έχει χαμηλή εφελκυστική αντοχή και μικρή ικανότητα παραμόρφωσης στη θραύση. Η προσθήκη των ινών στο σκυρόδεμα συντελεί σε αλλαγές στη μετελαστική του συμπεριφορά, οι οποίες ποικίλουν από ανεπαίσθητες σε ουσιώδεις, ανάλογα με αρκετούς παράγοντες, όπως ο τύπος της ίνας, η περιεκτικότητα σε ίνες, η αντοχή της μήτρας, ο λόγος μορφής της ίνας, ο προσανατολισμός τους κ.ά. [1].

Η επίδραση, λοιπόν, της περιεκτικότητας των ινών στις ιδιότητες διαφόρων ειδών σκυροδέματος έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια [2-14], ακόμη και με τη χρήση μη καταστροφικών μεθόδων, όπως η Ακουστική Εκπομπή [15,16]. Μία από τις μηχανικές ιδιότητες που έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης, όσον αφορά την επιρροή των ινών, είναι η θλιπτική αντοχή. Γενικά, η προσθήκη χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα δεν αυξάνει τη θλιπτική αντοχή σημαντικά, αλλά όμως αυξάνει τη θλιπτική παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο [17]. Η επιρροή, όμως, των χαλύβδινων ινών στην καμπτική αντοχή κονιαμάτων και σκυροδεμάτων είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τη θλιπτική αντοχή τους [18].

Επιπλέον, η ικανότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος να απορροφά ενέργεια έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα πιο σημαντικά οφέλη της προσθήκης στο άοπλο σκυρόδεμα των ινών [19]. Μία ινοπλισμένη δοκός σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες υφίσταται βλάβη,

με την αύξηση του βέλους κάμψης, με σταδιακή ανάπτυξη μίας μεμονωμένης ρωγμής ή πολλαπλών ρωγμών, αλλά διατηρεί σε κάποιο βαθμό τη δομική της ακεραιότητα ακόμα και σε ένα σημαντικό βέλος κάμψης. Μία όμοια δοκός χωρίς την προσθήκη χαλύβδινων ινών αστοχεί ξαφνικά με το διαχωρισμό της σε δύο κομμάτια σε μικρό βέλος κάμψης [1]. Πειραματικές έρευνες έχουν δείξει ότι αύξηση του ποσοστού όγκου χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα συντέλεσε σε βελτίωση της ικανότητας του να απορροφά ενέργεια [8,9,20,21].

Πιο συγκεκριμένα, οι Μίαιο κ.ά. [9] μελέτησαν την επίδραση της περιεκτικότητας των ινών στις ιδιότητες του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος. Χρησιμοποίησαν χαλύβδινες ίνες με κεκαμένα άκρα μήκους 30 mm και διαμέτρου 0.5 mm. Απέδειξαν ότι αύξηση της περιεκτικότητας των ινών αυξάνει τη δυσθραυστότητα και την καμπτική αντοχή του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, παρόλο που, λόγω της αύξησης του περιεχόμενου αέρα, η θλιπτική αντοχή μπορεί να μειωθεί. Με το ινοπλισμένο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ασχολήθηκαν και οι Gencil κ.ά. [22], οι οποίοι ερεύνησαν την εργασιμότητα και τη μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας χαλύβδινες ίνες με κεκαμένα άκρα, λόγω μορφής 60 και σε ποσοότητες 0%, 0.2%, 0.4%, 0.6% και 0.8% κ.ό.

Οι Kan κ.ά. [8] παρουσίασαν μία πειραματική μελέτη που αφορούσε σκυρόδεμα μεγάλου ειδικού βάρους (heavy concrete) με ίνες με κεκαμένα άκρα σε ποσοστό 0%, 0.5%, 1.0% και 1.5% κ.ό. Κατέληξαν ότι η καμπτική δυσθραυστότητα του σκυροδέματος μεγάλου ειδικού βάρους βελτιώθηκε με την αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών, σε αντίθεση με τη θλιπτική αντοχή που εμφανίστηκε ελαφρώς μειωμένη.

Επιπλέον, οι Wegian κ.ά. [23] μελέτησαν την επιρροή στη θλιπτική και καμπτική αντοχή του σκυροδέματος διαφόρων ποσοτήτων ιπτάμενης τέφρας και χαλύβδινων ινών με κεκαμένα άκρα. Ανέφεραν ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζεται ελάχιστα από την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Σχετικά όμως με την καμπτική του αντοχή, αναφέρουν ότι οι χαλύβδινες ίνες μπορούν να την αυξήσουν σημαντικά, όταν υπερβούν ένα ελάχιστο ποσοστό όγκου που απαιτείται για να αποτραπεί η ψαθυρή αστοχία στη μήτρα σκυροδέματος.

Ο Wafa [24] πραγματοποίησε έρευνα σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος χρησιμοποιώντας ίνες με κεκαμένα άκρα και ευθείες ίνες και συμπέρανε ότι η προσθήκη ινών βελτιώνει την ικανότητα του σκυροδέματος να φέρει φορτία μετά τη ρωγμάτωση, καθώς και την ολκιμότητά του.

Ακόμη, οι Johnston και Skarendahl [25] μελετώντας την καμπτική απόδοση ινοπλισμένων δοκιμίων με ίνες χάλυβα διαφορετικού είδους και ποικίλων ποσοτήτων, παρατήρησαν ότι οι συντελεστές παραμένουσας αντοχής και οι δείκτες δυσθραυστότητας εξαρτώνται και από την ποσότητα των ινών που χρησιμοποιήθηκε, εκτός από το είδος των ινών και το λόγο μορφής τους (για γεωμετρικά ίδιες ίνες).

Επιπροσθέτως, η καμπτική συμπεριφορά και η μικροδομή του ινοπλισμένου σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες διάφορων ποσοστών όγκου μελετήθηκε από τον Uygunoğlu [26]. Χρησιμοποίησε δύο διαφορετικές ίνες με κεκαμένα άκρα με λόγους μορφής 60 και 80 σε ποσοστά 0%, 0.2%, 0.4%, 0.6% και 0.8% κ.ό σκυροδέματος. Διαπίστωσε ότι η καμπτική αντοχή των ινοπλισμένων δοκιμίων αυξήθηκε με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών, καθώς και την ηλικία των σκυροδεμάτων.

Οι Song και Hwang [21] διερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος υψηλούς αντοχής με χαλύβδινες ίνες σε ποσοστά 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% και 2.0% κ.ό. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η θλιπτική αντοχή του αυξάνεται με την προσθήκη των ινών σε διάφορα ποσοστά όγκου, αποκτώντας τη μέγιστη τιμή της για ποσοστό ινών 1.5%. Επιπλέον, η καμπτική αντοχή και οι δείκτες δυσθραυστότητας βελτιώθηκαν με την αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών.

Οι Aruntas κ.ά [27] μελέτησαν την επιρροή των συνθηκών ωρίμανσης και του υπερρευστοποιητή στις ιδιότητες σκυροδέματος με ή χωρίς την προσθήκη χαλύβδινων ινών. Παρατήρησαν ότι η προσθήκη του υπερρευστοποιητή αύξησε σημαντικά την εργασιμότητα του ινοπλισμένου και του άοπλου σκυροδέματος. Επιπλέον, το ινοπλισμένο σκυροδέμα εμφάνισε καλύτερη καμπτική και θλιπτική αντοχή σε όλες τις συνθήκες ωρίμανσης και σε όλες τις ηλικίες σε σχέση με το άοπλο.

Οι Gao κ.ά. [28] ερεύνησαν τις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος μικρού ειδικού βάρους και υψηλής αντοχής. Οι ίνες που εισήγαγαν στο σκυροδέμα ήταν χαλύβδινες σε ποσοστά 0%, 0.6%, 1.0%, 1.5%, 2.0% κ.ό. Κατέληξαν ότι η επιρροή της κατ' όγκον περιεκτικότητας και του λόγου μορφής των ινών στη δυσθραυστότητα και την καμπτική αντοχή είναι πολύ σημαντική, ενώ η θλιπτική αντοχή βελτιώνεται ελάχιστα.

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο, λοιπόν, θα παρουσιαστεί η μελέτη της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, καθώς και στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες άοπλων και ινοπλισμένων δοκιμίων με διαφορετική ποσότητα και είδος ινών.

4.3.3. Ίνες με l/d 33.3 και ποσοστά ενίσχυσης έως 1.5%

4.3.3.1 Υλικά και Σύνθεση Δοκιμίων

Στο Υποκεφάλαιο 4.3.3 μελετάται η επίδραση της προσθήκης των ινών σε διαφορετικές ποσότητες (0.0%, 0.5%, 1.0% και 1.5%) στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, καθώς και στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν ίνες κυματοειδείς με λόγο μορφής 33.3. Στον Πίνακα 4.3.1 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμίων που εξετάζονται, οι ιδιότητες τους και η ποσότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται.

Πίνακας 4.3.1. Κωδικοποίηση και ιδιότητες ινών

| Κωδικός | Σχήμα ινών | l^1 (mm) | d^1 (mm) | l/d^1 (1) | Ποσότητα (%) |
|---------|--------------|---------------|---------------|-------------|-----------------|
| Άοπλο | - | - | - | - | 0.0 |
| W05 | Κυματοειδείς | 25 | 0.75 | 33.3 | 0.5 |
| W1 | Κυματοειδείς | 25 | 0.75 | 33.3 | 1.0 |
| W15 | Κυματοειδείς | 25 | 0.75 | 33.3 | 1.5 |

¹l: Μήκος ίνας, d: διάμετρος, l/d: λόγος μορφής

Στον Πίνακα 4.3.2 απεικονίζονται οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η κωδικοποίηση των αναμιγμάτων. Για να επιτευχθεί ικανοποιητική εργασιμότητα σε όλα τα αναμίγματα, η ποσότητα του υπερρευστοποιητή διαμορφώθηκε σε κάθε ανάμιγμα. Ο λόγος N/T ισούται με 0.5 και διατηρήθηκε σταθερός σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος ενώ η συμπύκνωση των αναμιγμάτων πραγματοποιήθηκε με ραβδισμό.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.3.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3)

| ΥΛΙΚΑ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΩΝ (kg/m^3) | | | | | | | |
|---------------------------------------|--------------------|--------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|-------|-----|
| | | ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ | | | ΙΝΕΣ | | |
| Κωδικός | Τσιμέντο * (kg) | Νερό (kg) | Θραυστή Άμμος (kg) | Ψηφίδα (kg) | Υπερρευ- στοποιητής (kg) | (kg) | (%) |
| Αοπλο | 440 | 220 | 1225 | 366 | 3.0 | 0.0 | 0.0 |
| W05 | 440 | 220 | 1215 | 363 | 3.2 | 39.3 | 0.5 |
| W1 | 440 | 220 | 1205 | 360 | 3.7 | 78.5 | 1.0 |
| W15 | 440 | 220 | 1193 | 356 | 4.0 | 117.8 | 1.5 |
| *Τύπος τσιμέντου Π 42.5 N | | | | | | | |

Τα ειδικά βάρη και η απορροφητικότητα της άμμου και της ψηφίδας ακολουθούν τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [29] και ASTM C 127 - 01 [30] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 του Παραρτήματος.

Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 136 - 01 [31]. Η άμμος αποτελεί το 77% της συνολικής ποσότητας των αδρανών και η ψηφίδα το 23%. Η φυσική υγρασία των αδρανών παρατίθεται στον Πίνακα 3 του Παραρτήματος.

Στον Πίνακα 4.3.3 παρουσιάζονται οι ποσότητες των υλικών που απαιτεί κάθε ανάμιξη, ώστε να παρασκευαστούν 3 δοκίμια κάμψης, 3 δοκίμια θλίψης και να επιτευχθούν οι δοκιμές νεπού σκυροδέματος.

Πίνακας 4.3.3. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη

| ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ/ΑΝΑΜΙΞΗ | | | | | | | |
|--------------------------|---------------|--------------|--------------------|-------------|------------------------|--------|--------|
| | | ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ | | | ΙΝΕΣ | ΣΥΝΟΛΟ | |
| Κωδικός | Τσιμέντο (kg) | Νερό (kg) | Θραυστή Άμμος (kg) | Ψηφίδα (kg) | Υπερρευστοποιητής (gr) | (kg) | (kg) |
| Αοπλο | 14.960 | 7.249 | 41.872 | 12.466 | 102.0 | - | 76.649 |
| W05 | 14.960 | 7.164 | 41.474 | 12.489 | 108.8 | 1.335 | 77.531 |
| W1 | 14.960 | 7.051 | 41.259 | 12.324 | 125.8 | 2.669 | 78.389 |
| W15 | 14.960 | 7.305 | 40.717 | 12.136 | 136.0 | 4.004 | 79.258 |

4.3.3.2. Συντήρηση των Δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε θάλαμο με ειδικές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας για 28 ημέρες έως την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [32].

4.3.3.3. Ιδιότητες Νωπού Σκυροδέματος

Τα αποτελέσματα των δοκιμών νωπού σκυροδέματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.4. Μετρήθηκε η κάθιση για τον καθορισμό της εργασιμότητας, καθώς και το ποσοστό αέρα όλων των νωπών ινοπλισμένων αναμιγμάτων. Για την κάθιση ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C 143/C 143M - 98 [33] και για την περιεκτικότητα σε αέρα το πρότυπο ASTM C 231 - 97 [34].

Πίνακας 4.3.4. Ιδιότητες νωπών σκυροδεμάτων με ίνες διαφορετικών ποσοτήτων

| Ιδιότητες νωπών σκυροδεμάτων | | |
|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Κωδικός | Κάθιση (mm) | Ποσοστό αέρα (%) |
| Άοπλο | 140 | 2.9 |
| W05 | 75 | 2.7 |
| W1 | 75 | 3.2 |
| W15 | 70 | 3.6 |

Όσον αφορά τη δοκιμή κάθισης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η προσθήκη των χαλύβδινων ινών στο σκυρόδεμα μειώνει την τιμή της κάθισης σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Η κάθιση στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ 70 - 75 mm, ενώ στο άοπλο είναι 140mm, υποδηλώνοντας μείωση περίπου 50%. Λόγω των μοναδικών ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα, οι μετρήσεις εργασιμότητας είναι διαφορετικές σε σχέση με εκείνες του τυπικού σκυροδέματος [17].

Εξαιτίας του γεγονότος ότι η ποσότητα του υπερρευστοποιητή διαμορφώθηκε σε κάθε ανάμιγμα για την επίτευξη επαρκούς εργασιμότητας, δεν εμφανίζονται έντονες αποκλίσεις στα ινοπλισμένα σκυροδέματα σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών.

Το ποσοστό αέρα παρουσιάζεται πιο αυξημένο στα σκυροδέματα με μεγαλύτερα ποσοστά ινών. Συγκεκριμένα, στα αναμίγματα με ποσοστά 1.0% και 1.5% εμφανίζονται τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 3.2 - 3.6 %, σε αντίθεση με το άοπλο και το σκυρόδεμα με 0.5% ποσοστό ινών που εμφανίζουν τιμές μεταξύ 2.7 - 2.9 %.

4.3.3.4. Θλιπτική Αντοχή

4.3.3.4.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία θλίψης

Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε Tecnotest μηχανή με μέγιστο φορτίο 2000 kN (Εικόνα 4.3.1) σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [35]. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 150x150x150 mm. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την πειραματική διαδικασία αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 3.3.3.1.



Εικόνα 4.3.1. Μηχανή θλίψης

4.3.3.4.2. Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης

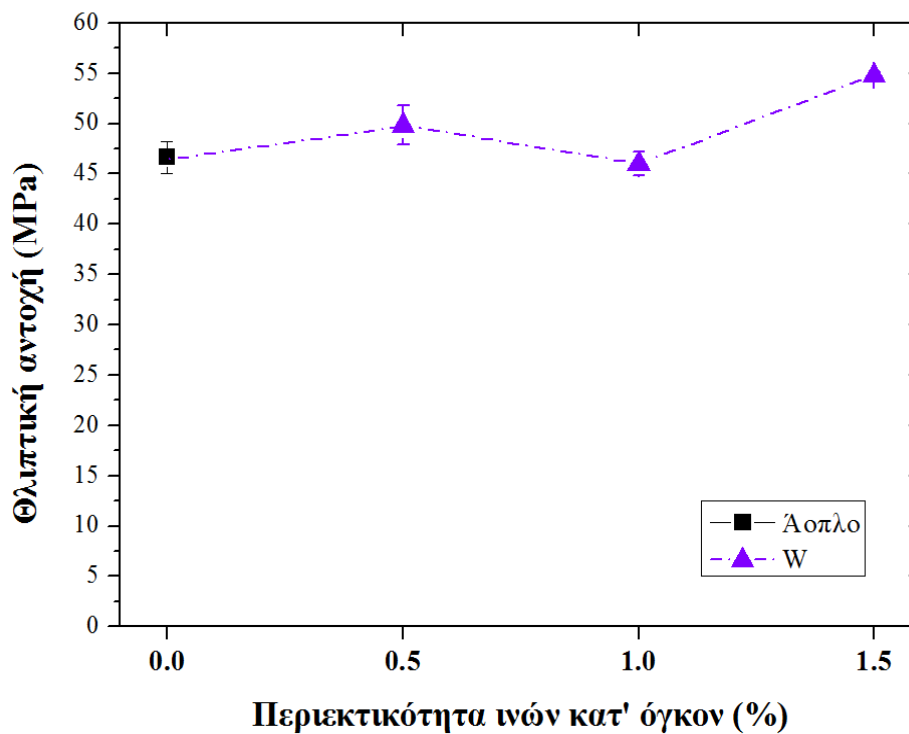
Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.5 και απεικονίζονται στην Εικόνα 4.3.2.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.3.5. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων διαφορετικής κατ' όγκον περιεκτικότητας ινών

| Κωδικός | Θλιπτική αντοχή (MPa) | STDEV* (MPa) |
|---------|-----------------------|--------------|
| Άοπλο | 46.63 | 1.59 |
| W05 | 49.83 | 1.91 |
| W1 | 46.00 | 1.21 |
| W15 | 54.83 | 0.25 |

*STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση



Εικόνα 4.3.2. Θλιπτική αντοχή σκυροδεμάτων με 0.0% - 1.5% ίνες

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 4.3.2, η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα σε ποσοστά 0.5% και 1.5% προσδίδει πιο αυξημένες τιμές θλιπτικής αντοχής

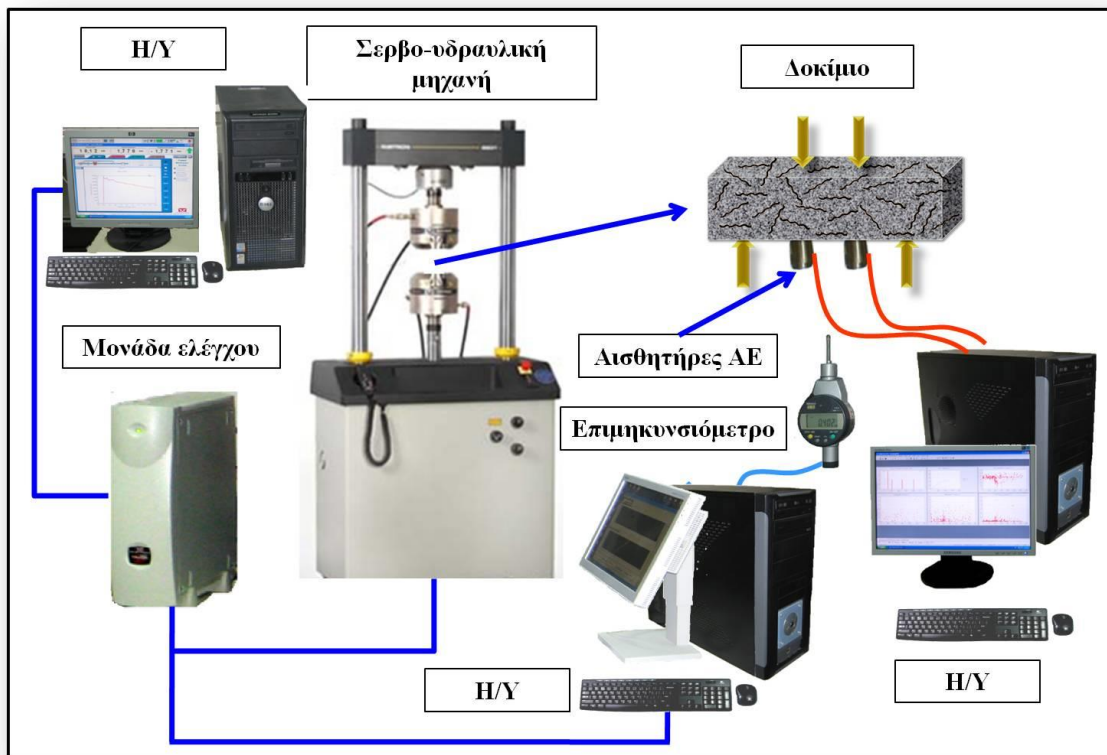
και για τις δύο γεωμετρίες ινών σε σχέση με το άοπλο. Αντιθέτως, η θλιπτική αντοχή των σκυροδεμάτων με 1.0% ίνες εμφανίζεται στα ίδια επίπεδα με το άοπλο. Η κατάσταση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η ενσωμάτωση ινών στα αναμίγματα καθιστά τη συμπίκνωση πιο δύσκολη, οδηγώντας σε αύξηση του εγκλωβισμένου αέρα. Όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 4.3.4, το ποσοστό αέρα του 1% ινοπλισμένου αναμίγματος, είναι υψηλότερο από την τιμή του 0.5% ινοπλισμένου αναμίγματος καθώς και του άοπλου σκυροδέματος. Περαιτέρω ενίσχυση οδηγεί σε βελτίωση των τιμών καθώς ο μηχανισμός ενίσχυσης που προκύπτει από το μεγάλο ποσοστό ινών υπερνικά τη μείωση που προκύπτει λόγω του εγκλωβισμένου αέρα.

4.3.3.5. Δοκιμές Κάμψης Τεσσάρων Σημείων

4.3.3.5.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία δοκιμών κάμψης

Η πειραματική διάταξη της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.3.3. Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστη πίεση υδραυλικού συστήματος 207 bar και μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.3.3. Πειραματική διάταξη δοκιμής κάμψης

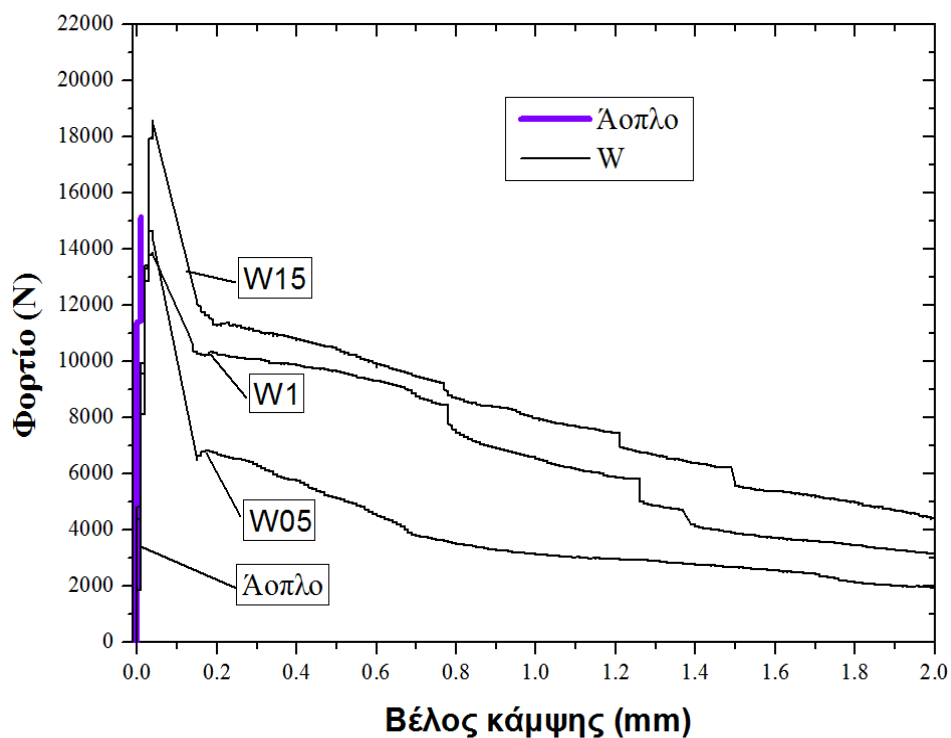
Η ταχύτητα μετατόπισης της δοκιμής ήταν 0.08 mm/min, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα επιμηκυνσιόμετρο Mitutoyo 543-450B εύρους 25.4 mm.

Για την αποτίμηση των καμπτικών ιδιοτήτων των δοκιμών ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M - 05 [36]. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη γεωμετρία των δοκιμών, την πειραματική διάταξη και την πειραματική διαδικασία αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 4.1.7.1.

4.3.3.5.2. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Στην Εικόνα 4.3.4 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης των δοκιμών κάμψης για τα σκυροδέματα με 0.5%, 1.0%, 1.5% ίνες και το άοπλο σκυροδέμα. Είναι εμφανές ότι η αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών επιδρά σημαντικά στις καμπτικές ιδιότητες και ιδιαίτερα στη δυσθραυστότητα. Αξιοσημείωτη είναι, όμως, η σύγκριση των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος με το άοπλο και

ιδιαίτερα της ικανότητας του να απορροφά ενέργεια, ακόμα και στο χαμηλότερο ποσοστό των 0.5% ινών κ.ό.



Εικόνα 4.3.4. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για το άοπλο σκυρόδεμα και τα σκυροδέματα με 0.5%, 1.0%, 1.5% κυματοειδείς ίνες

Στον Πίνακα 4.3.6 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των καμπτικών ιδιοτήτων των ινοπλισμένων δοκιμών με 0.0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% ίνες. Επιπλέον, στα διαγράμματα των Εικόνων 4.3.5 - 4.3.8, απεικονίζεται ξεχωριστά η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών σε κάθε παράμετρο.

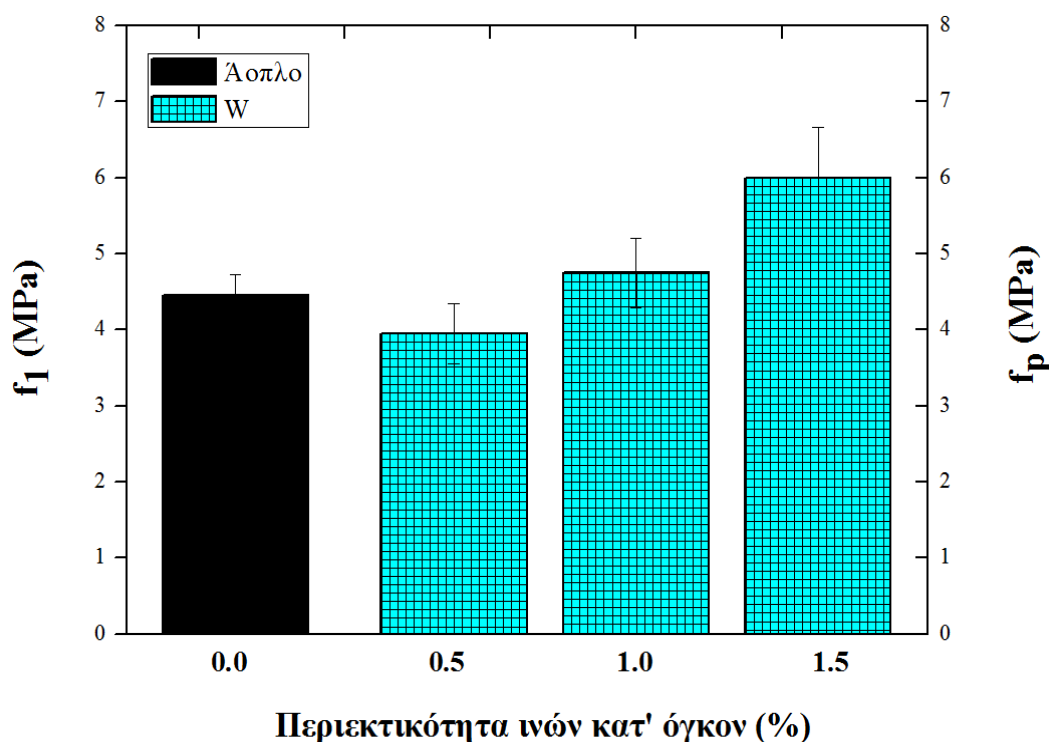
4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.3.6. Καμπτικές ιδιότητες άοπλου σκυροδέματος και σκυροδεμάτων με κυματοειδείς ίνες

| Κωδικός | Άοπλο | W05 | W1 | W15 |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| P₁ (kN) | 14.87 | 13.24 | 15.77 | 19.93 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | 0.93 | 1.33 | 1.65 | 2.21 |
| P_P (kN) | 14.87 | 13.24 | 15.77 | 19.93 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | 0.93 | 1.33 | 1.65 | 2.21 |
| P_{100,0.50} (kN) | - | 3.83 | 9.56 | 10.95 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | - | 1.12 | 0.14 | 0.75 |
| P_{100,2.0} (kN) | - | 1.50 | 4.35 | 3.96 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | - | 0.49 | 1.07 | 0.40 |
| f₁ (MPa) | 4.45 | 3.95 | 4.75 | 6.00 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | 0.28 | 0.40 | 0.46 | 0.66 |
| f_P (MPa) | 4.45 | 3.95 | 4.75 | 6.00 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | 0.28 | 0.40 | 0.46 | 0.66 |
| f_{100,0.50} (MPa) | - | 1.15 | 2.85 | 3.30 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | - | 0.34 | 0.06 | 0.23 |
| f_{100,2.0} (MPa) | - | 0.45 | 1.30 | 1.20 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | - | 0.15 | 0.36 | 0.12 |
| T_{100,2.0} (J) | - | 7 | 15 | 17 |
| <i>STDEV* (J)</i> | - | 1.00 | 1.15 | 0.58 |
| * <i>STDEV</i> αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση | | | | |

Στην Εικόνα 4.3.5 παρουσιάζονται η μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και η μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών για τα ινοπλισμένα αναμίγματα, καθώς και το άοπλο σκυρόδεμα. Συγκρίνοντας το άοπλο σκυρόδεμα με τα ινοπλισμένα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι στο χαμηλό ποσοστό ινών το

ινοπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζει μικρή πτώση της μέγιστης καμπτικής αντοχής αιχμής και της μέγιστης καμπτικής αντοχής, σε ποσοστό 1.0% είναι στα ίδια επίπεδα, ενώ στο υψηλότερο ποσοστό (1.5%) εμφανίζεται αύξηση. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με εκείνα των θλιπτικών αντοχών και καταδεικνύουν ότι το ποσοστό ενίσχυσης 1.5% είναι το κατώφλι όπου μηχανισμοί μηχανικής ενίσχυσης υπερτερούν έναντι μηχανισμών υποβάθμισης λόγω αέρα και δυσκολίας στη συμπίκνωση.

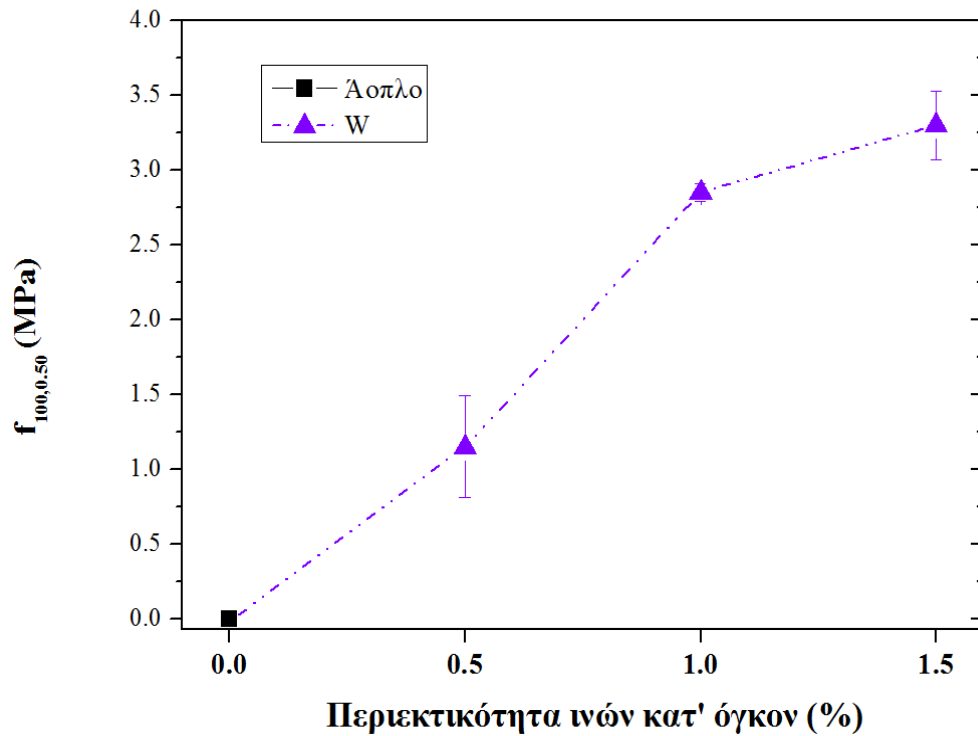


Εικόνα 4.3.5. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

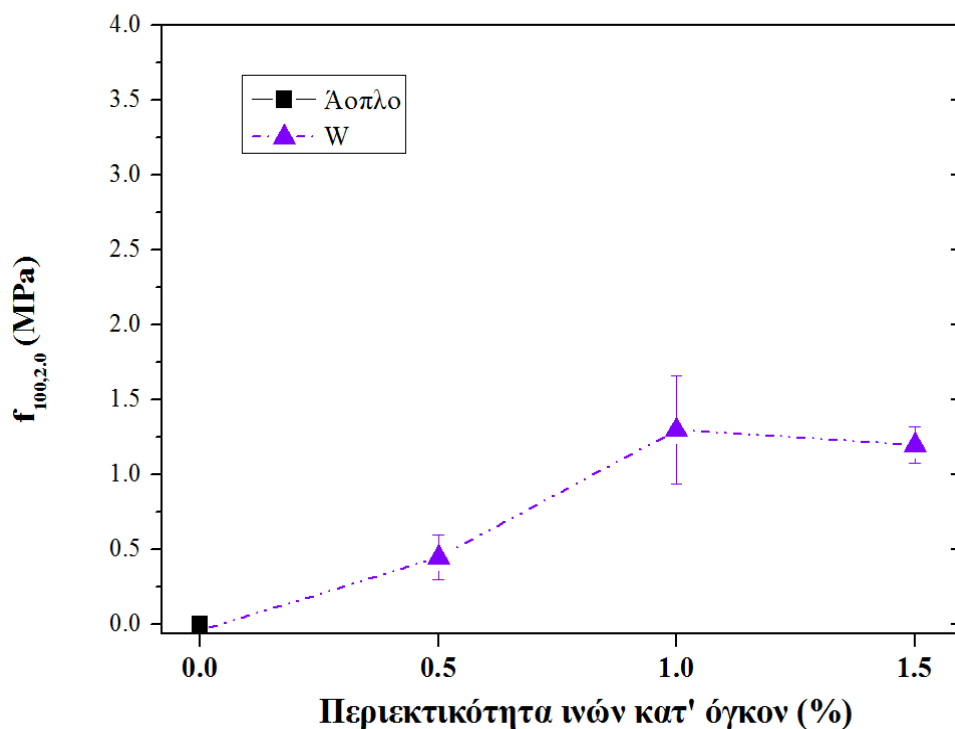
Στις Εικόνες 4.3.6 – 4.3.7 αποτυπώνονται οι παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Η γενική τάση που παρατηρείται είναι η αύξηση των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Το άοπλο σκυρόδεμα έχει μηδενική ικανότητα να φέρει φορτία σε βέλος κάμψης 0.5 mm και 2 mm, αφού μετά το μέγιστο φορτίο διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Η βελτίωση είναι ορατή μέχρι το 1.0%, ενώ στο 1.5% οι παραμένουσες αντοχές κυμαίνονται σε

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

κοντινά επίπεδα. Το 1.0% για τη συγκεκριμένη γεωμετρία κυματοειδών ινών αποτελεί την κρίσιμη/οριακή τιμή πάνω από την οποία δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση της παραμένουσας αντοχής.

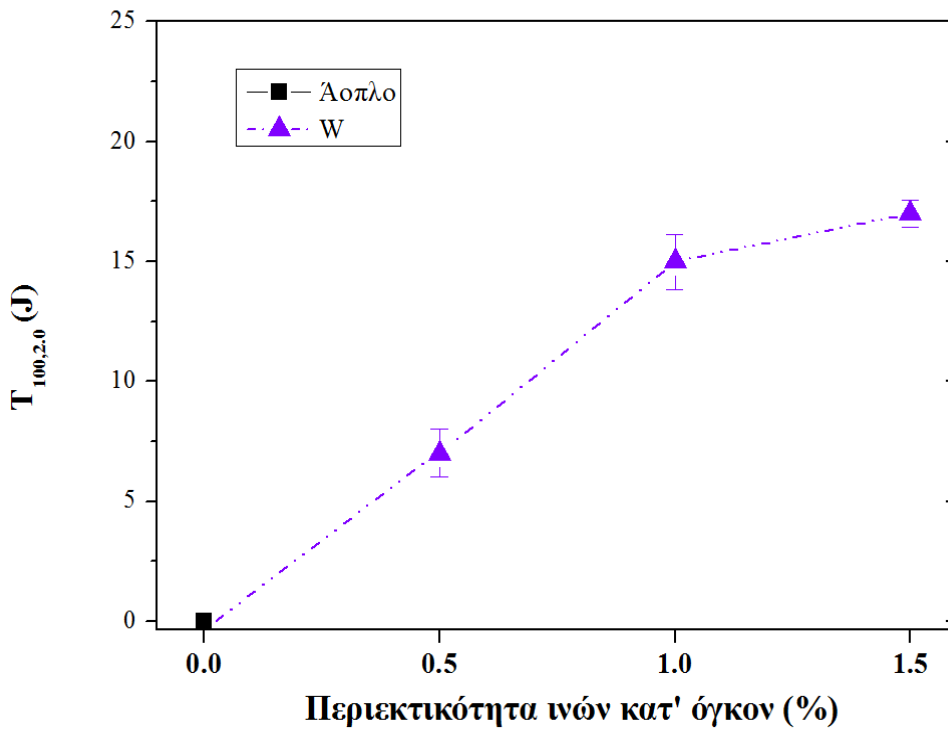


Εικόνα 4.3.6. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,0.50}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών



Εικόνα 4.3.7. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

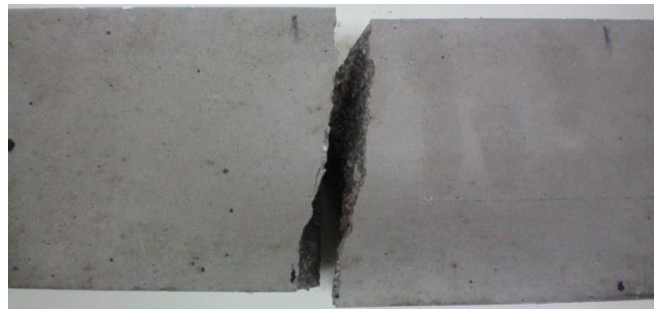
Στην Εικόνα 4.3.8 αποτυπώνεται η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$. Γενικά, η αύξηση της ποσότητας των ινών συντελεί σε βελτίωση των τιμών της δυσθραυστότητας. Όπως και στην περίπτωση των παραμενουσών αντοχών, η επίδραση είναι πιο εμφανής μέχρι το ποσοστό 1.0%, γεγονός που υποδεικνύει ότι η ποσότητα αυτή αποτελεί μία κρίσιμη, οριακή τιμή, πάνω από την οποία δεν υπάρχει σημαντική ικανότητα βελτίωσης τόσο της παραμένουσας αντοχής όσο και της απορρόφησης ενέργειας.



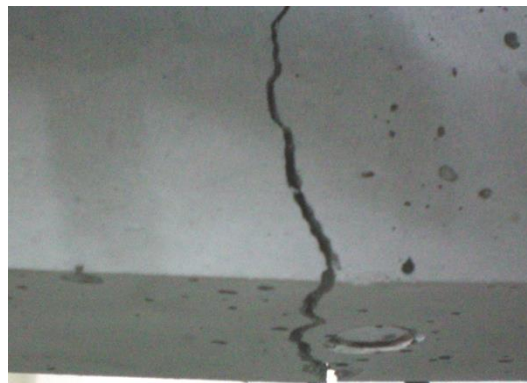
Εικόνα 4.3.8. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

Η Εικόνα 4.3.9 απεικονίζει τυπικά δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων για όλα τα ποσοστά των ινών, καθώς και το άοπλο σκυρόδεμα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οπτικά, οι ρωγμές των δοκιμίων με τα μεγαλύτερα ποσοστά ινών έχουν μικρότερο εύρος και περισσότερες διακλαδώσεις σε σχέση με τα μικρότερα ποσοστά ινών. Αντιθέτως, το άοπλο σκυρόδεμα που δεν μπορεί να φέρει φορτία μετά το μέγιστο φορτίο, έχει διαχωριστεί σε δύο κομμάτια.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



(α)



(β)



(γ)



(δ)

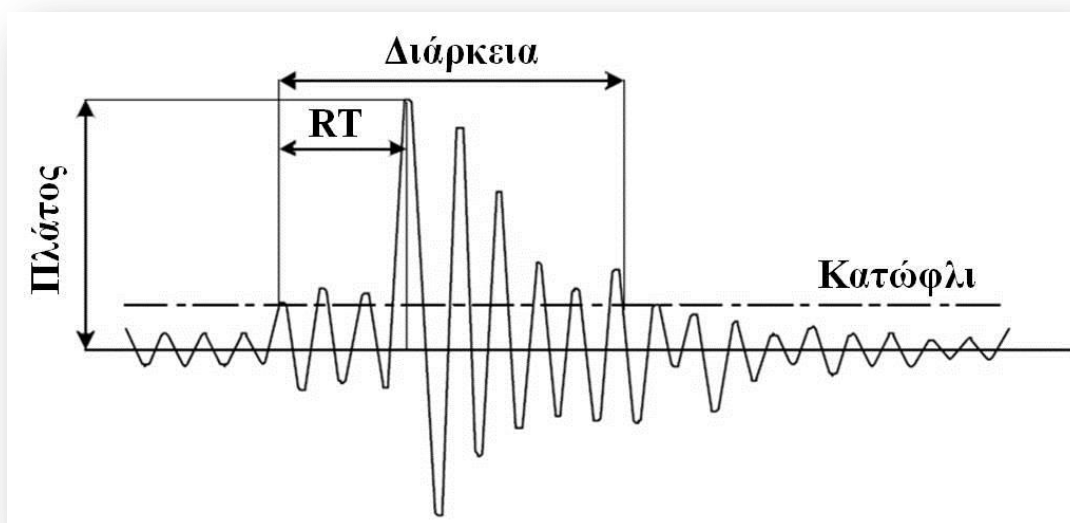
Εικόνα 4.3.9. Δοκίμια μετά τη δοκιμή κάμψης άοπλου σκυροδέματος (α) και με κυματοειδείς ίνες σε ποσοστό β) 0.5%, γ) 1.0%, δ) 1.5%

4.3.3.6. Ακουστική Εκπομπή

4.3.3.6.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία Ακουστικής Εκπομπής

Κατά τη δοκιμή της κάμψης τεσσάρων σημείων εφαρμόστηκε η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής σε ινοπλισμένα δοκίμια με κυματοειδείς ίνες και σε άοπλα δοκίμια. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν δύο πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ακουστικής εκπομπής, με κεντρική συχνότητα 150 kHz τύπου R15 της εταιρείας Physical Acoustics Corp. (PAC), στο κάτω μέρος των δοκιμίων σε απόσταση 50 mm εκατέρωθεν από το κέντρο του δοκιμίου (Εικόνα 4.3.3). Η χρήση ενός ή δύο αισθητήρων είναι συνήθης σε εργαστηριακές συνθήκες για την παρακολούθηση του ρυθμού των ακουστικών σημάτων και άλλων σημαντικών παραμέτρων της ΑΕ [37-41]. Τα ακουστικά σήματα προενισχύθηκαν κατά 40 dB και για την αποφυγή περιβαλλοντικού ή ηλεκτρονικού θορύβου το κατώφλι ορίστηκε, επίσης, στα 40 dB. Τα σήματα καταγράφηκαν από μία ηλεκτρονική κάρτα δύο καναλιών (PCI-2, PAC) και ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 5 MHz.

Στην Εικόνα 4.3.10 παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι της Ακουστικής Εκπομπής. Η διάρκεια (duration) είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που η κυματομορφή ξεπερνά για πρώτη φορά το κατώφλι έως την εξαφάνιση της, ενώ ο χρόνος ανόδου (Rise time, RT) είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της πρώτης διέλευσης της κυματομορφής από το κατώφλι έως τη μεγιστοποίηση του πλάτους της. Επίσης, η παράμετρος RA ορίζεται ως ο λόγος του RT προς το μέγιστο πλάτος (A) [42].

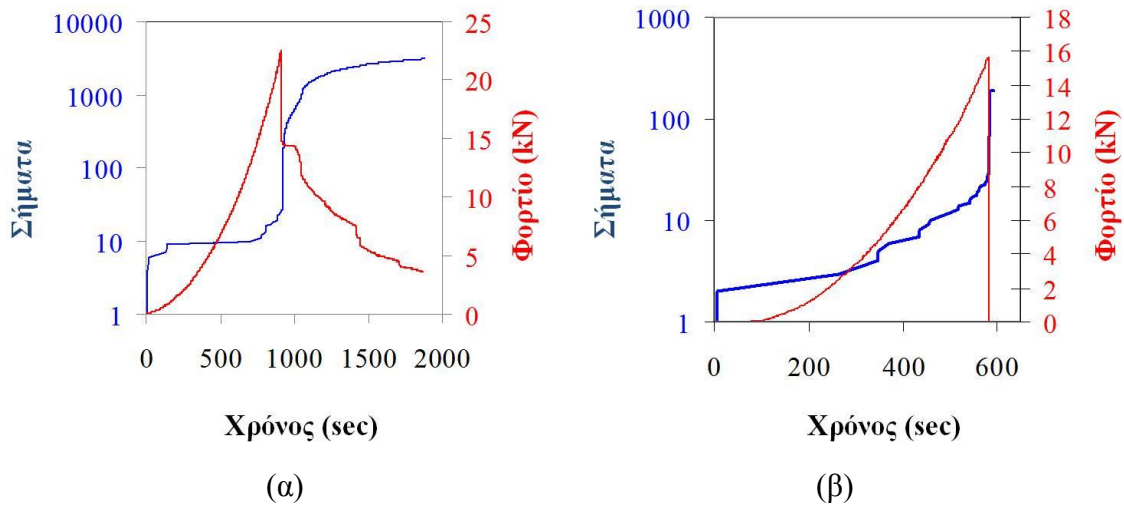


Εικόνα 4.3.10. Παράμετροι Ακουστικής Εκπομπής [42]

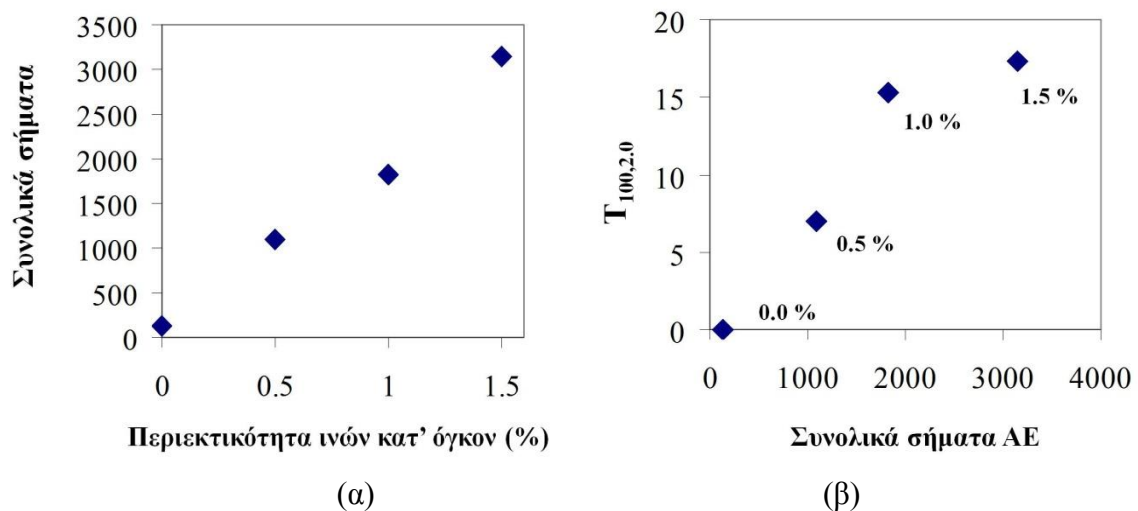
4.3.3.6.2. Αποτελέσματα Ακουστικής Εκπομπής

Στην Εικόνα 4.3.11 (α – β) απεικονίζονται διαγράμματα των συσσωρευμένων σημάτων ακουστικής εκπομπής και του φορτίου σε σχέση με το χρόνο, για δοκίμιο με 1.5% ίνες (Εικόνα 4.3.11 (α)) και για άοπλο σκυρόδεμα (Εικόνα 4.3.11 (β)). Στην περίπτωση του ινοπλισμένου δοκιμίου, παρατηρείται αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας περίπου στο 70% του μέγιστου φορτίου και μεγιστοποίηση του ρυθμού των σημάτων τη στιγμή εμφάνισης της ρωγμής. Ο συνολικός αριθμός των σημάτων κυμαίνεται μεταξύ 3000 – 4000 (Εικόνα 4.3.11 (α)), ενώ στην περίπτωση του άοπλου σκυροδέματος, καταγράφηκε ένας σημαντικά μικρότερος αριθμός σημάτων (Εικόνα 4.3.11 (β)). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το άοπλο δοκίμιο αστοχεί καταστροφικά μετά το μέγιστο φορτίο.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.3.11. Διαγράμματα συσσωρευμένων σημάτων ακουστικής εκπομπής και φορτίου σε σχέση με το χρόνο για (α) 1.5% ίνες και (β) άοπλο σκυροδέμα

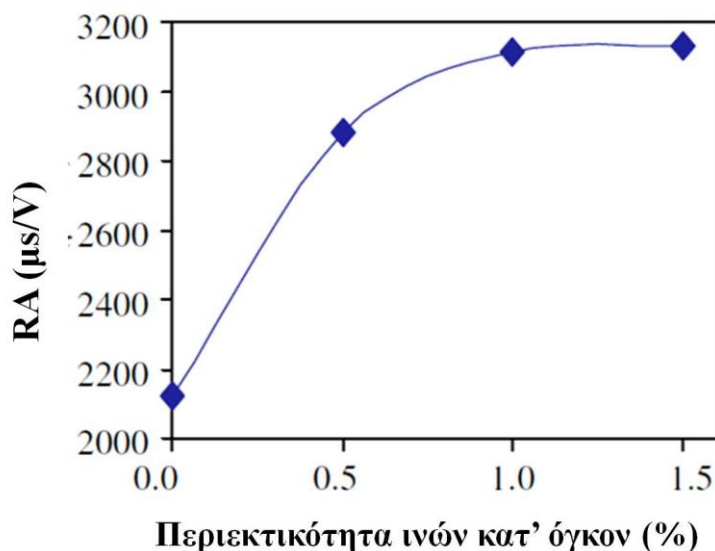


Εικόνα 4.3.12. Συνολικός αριθμός των σημάτων της ΑΕ σε σχέση (α) με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών και (β) με την καμπτική δυσθραυστότητα

Επιπλέον, στην Εικόνα 4.3.12 (α) συσχετίστηκε ο συνολικός αριθμός των σημάτων της ΑΕ με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Συγκεκριμένα, στο διάγραμμα για κάθε κατ' όγκον περιεκτικότητα ινών αντιστοιχεί ένα σημείο που αντιπροσωπεύει το μέσο όρο των συνολικών σημάτων τριών δοκιμίων. Όπως παρατηρείται, η σχέση μεταξύ των συνολικών σημάτων και της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών είναι σχεδόν γραμμική. Η διαπίστωση αυτή μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι η εξόλκευση κάθε ίνας μπορεί

να συντελέσει σε ακουστική δραστηριότητα και συνεπώς μεγαλύτερη ποσότητα ινών (δηλαδή μεγαλύτερος αριθμός εξόλκευσης ινών) αντιστοιχεί σε πιο αυξημένο αριθμό σημάτων. Αντίστοιχα, συσχετίστηκε, λοιπόν, στην Εικόνα 4.3.12 (β) η καμπτική δυσθραυστότητα με τα συνολικά σήματα της ΑΕ για κάθε ποσοστό ενίσχυσης και εξάγεται το συμπέρασμα ότι καθώς βελτιώνεται η δυσθραυστότητα, παρατηρείται αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας.

Στην Εικόνα 4.3.13 παρουσιάζεται η μέση τιμή RA σε σχέση με τις διαφορετικές κατ' όγκον περιεκτικότητες των ινών. Το άοπλο σκυρόδεμα εμφανίζει τη χαμηλότερη τιμή RA, ενώ η προσθήκη των ινών, ακόμα και σε ποσοστό 0.5% κ.ό. σκυροδέματος οδηγεί σε σημαντική αύξησή της. Περαιτέρω αύξηση της περιεκτικότητας των ινών έχει μικρή επιρροή στην τιμή RA, ενώ μεταξύ 1.0% και 1.5% κ.ό. ίνες υπάρχει εμφάνιση πλατό, το οποίο είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της δυσθραυστότητας (βλ. Εικόνα 4.3.8). Η αύξηση της τιμής RA δείχνει την εμφάνιση περισσότερων διατμητικών «συμβάντων». Έχει παρατηρηθεί στη βιβλιογραφία ότι χαμηλότερες τιμές RA υποδεικνύουν περισσότερο την εφελκυστική φύση των συμβάντων [43,44].



Εικόνα 4.3.13. Διάγραμμα μέσης τιμής RA σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

4.3.4. Ίνες κυματοειδείς l/d 42.9 και ευθείες l/d 62.5 με ποσοστά ενίσχυσης έως 2.5%

4.3.4.1. Υλικά και Σύνθεση Δοκιμίων

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση μεγαλύτερων λόγων μορφής (ευθείες $l/d=62.5$ και κυματοειδείς $l/d=42.9$) και ποσοστών ενίσχυσης (έως 2.5% κ.ό. σκυροδέματος). Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα του Υποκεφαλαίου 4.2 που χρησιμοποιούνται ίνες σε ποσότητα 1.0%. Στον Πίνακα 4.3.7 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμίων που εξετάστηκαν, οι ιδιότητες τους και η ποσότητα που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 4.3.7. Κωδικοποίηση και ιδιότητες ινών

| Κωδικός | Σχήμα ινών | l^1 (mm) | d^1 (mm) | l/d^1 (1) | Ποσότητα (%) |
|---------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------|------------|-------------|--------------|
| S04.25.05 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 0.5 |
| S04.25.1 ² | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 1.0 |
| S04.25.15 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 1.5 |
| S04.25.2 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 2.0 |
| S04.25.25 | Ευθείες | 25 | 0.4 | 62.5 | 2.5 |
| U07.30.05 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 0.5 |
| U07.30.1 ² | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 1.0 |
| U07.30.15 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 1.5 |
| U07.30.2 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 2.0 |
| U07.30.25 | Κυματοειδείς | 30 | 0.7 | 42.9 | 2.5 |
| ¹ l: Μήκος ίνας, d: διάμετρος, l/d: λόγος μορφής | | | | | |
| ² Αντιστοιχούν στα αναμίγματα S04.25 και U07.30 του Υποκεφαλαίου 4.2 | | | | | |

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Στον Πίνακα 4.3.8 απεικονίζονται τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στις αναμίξεις και οι ποσότητες τους. Η ποσότητα του υπερρρευστοποιητή διαμορφώθηκε σε κάθε ανάμιγμα ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική εργασιμότητα σε όλα τα αναμίγματα. Ο λόγος N/T ισούται με 0.5 και διατηρήθηκε σταθερός σε όλες τις συνθέσεις σκυροδέματος, ενώ η συμπύκνωση των αναμιγμάτων πραγματοποιήθηκε με τράπεζα δόνησης.

Πίνακας 4.3.8. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m³)

| ΥΛΙΚΑ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΩΝ (kg/m ³) | | | | | | | |
|----------------------------------------|----------------|--------------|--------------------|-------------|-------------------------|-------|-----|
| | | ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ | | | ΙΝΕΣ | | |
| Κωδικός | Τσιμέντο* (kg) | Νερό (kg) | Θραυστή Άμμος (kg) | Ψηφίδα (kg) | Υπερρρευστοποιητής (kg) | (kg) | (%) |
| S04.25.05 | 440 | 220 | 1187 | 396 | 3.0 | 39.3 | 0.5 |
| S04.25.15 | 440 | 220 | 1166 | 389 | 3.3 | 117.8 | 1.5 |
| S04.25.2 | 440 | 220 | 1156 | 385 | 3.5 | 157.0 | 2.0 |
| S04.25.25 | 440 | 220 | 1146 | 382 | 3.6 | 196.3 | 2.5 |
| U07.30.05 | 440 | 220 | 1187 | 396 | 3.0 | 39.3 | 0.5 |
| U07.30.15 | 440 | 220 | 1166 | 389 | 3.3 | 117.8 | 1.5 |
| U07.30.2 | 440 | 220 | 1156 | 385 | 3.5 | 157.0 | 2.0 |
| U07.30.25 | 440 | 220 | 1146 | 382 | 3.6 | 196.3 | 2.5 |

*Τύπος τσιμέντου Π 42.5 N

Τα ειδικά βάρη και η απορροφητικότητα της άμμου και της ψηφίδας προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [29] και ASTM C 127 - 01 [30] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος.

Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 136 - 01 [31]. Η άμμος αποτελεί το 75% της συνολικής ποσότητας των αδρανών και η ψηφίδα το 25%.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Στον Πίνακα 4.3.9 παρουσιάζονται οι ποσότητες των υλικών που απαιτούσε κάθε ανάμιξη, ώστε να παρασκευαστούν 4 δοκίμια κάμψης, 3 δοκίμια θλίψης και να επιτευχθούν οι δοκιμές ναπού σκυροδέματος.

Πίνακας 4.3.9. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη

| ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ/ΑΝΑΜΙΞΗ | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------|------------------------|
| Κωδικός | Τσιμέντο (kg) | Νερό (kg) | Αδρανή Υλικά | | Υπερρε- στοποιητής (gr) | Ίνες (kg) | ΣΥΝΟΛΟ (kg) |
| | | | Θραυστή Άμμος (kg) | Ψηφίδα (kg) | | | |
| S04.25.05 | 17.776 | 8.888 | 47.952 | 15.984 | 121.2 | 1.586 | 92.307 |
| S04.25.15 | 17.776 | 8.888 | 47.119 | 15.706 | 133.3 | 4.757 | 94.380 |
| S04.25.2 | 17.776 | 8.888 | 46.706 | 15.569 | 141.4 | 6.343 | 95.423 |
| S04.25.25 | 17.776 | 8.888 | 46.293 | 15.431 | 145.4 | 7.929 | 96.462 |
| U07.30.05 | 17.776 | 8.888 | 47.952 | 15.984 | 121.2 | 1.586 | 92.307 |
| U07.30.15 | 17.776 | 8.888 | 47.119 | 15.706 | 133.3 | 4.757 | 94.380 |
| U07.30.2 | 17.776 | 8.888 | 46.706 | 15.569 | 141.4 | 6.343 | 95.423 |
| U07.30.25 | 17.776 | 8.888 | 46.293 | 15.431 | 145.4 | 7.929 | 96.462 |

4.3.4.2. Συντήρηση των Δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες μέχρι την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σε ειδικές δεξαμενές με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συνθήκες 23 ± 2 °C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [32].

4.3.4.3. Ιδιότητες Νωπού Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Τα αποτελέσματα των δοκιμών των νωπών αναμιγμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.10. Μετρήθηκε η κάθιση και ο χρόνος Vebe όλων των νωπών ινοπλισμένων αναμιγμάτων για τον καθορισμό της εργασιμότητας τους, καθώς και το ποσοστό αέρα τους. Για την κάθιση ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C 143/C 143M - 03 [45], για τη δοκιμή Vebe το πρότυπο BS EN 12350-3:2000 [46] και για το ποσοστό αέρα το πρότυπο ASTM C 231 - 03 [47].

Πίνακας 4.3.10. Ιδιότητες νωπών σκυροδεμάτων με ίνες διαφορετικών ποσοτήτων

| Ιδιότητες νωπών ινοπλισμένων σκυροδεμάτων | | | |
|--------------------------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|
| Κωδικός | Κάθιση (mm) | Vebe χρόνος (sec) | Ποσοστό αέρα (%) |
| S04.25.05 | 90 | 2 | 1.1 |
| S04.25.1 | 100 | 3 | 0.45 |
| S04.25.15 | 80 | 3 | 0.9 |
| S04.25.2 | 70 | 3 | 1.0 |
| S04.25.25 | 65 | 3 | 1.2 |
| U07.30.05 | 100 | 2 | 1.1 |
| U07.30.1 | 50 | 2 | 0.6 |
| U07.30.15 | 70 | 3 | 1.1 |
| U07.30.2 | 60 | 3 | 1.3 |
| U07.30.25 | 70 | 3 | 1.3 |

Όσον αφορά τις δοκιμές του νωπού σκυροδέματος δεν υπάρχει κάποια σαφής τάση για την επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαμόρφωση του υπερρευστοποιητή που πραγματοποιήθηκε σε κάθε ανάμιξη με διαφορετικό ποσοστό ινών, ώστε να επιτευχθεί σε όλα τα αναμίγματα ικανοποιητική εργασιμότητα και χαμηλά ποσοστά αέρα. Ιδιαίτερα οι μικροί χρόνοι Vebe δείχνουν ότι όλα τα αναμίγματα έχουν πολύ καλή εργασιμότητα χωρίς ιδιαίτερες μεταβολές.

4.3.4.4. Θλιπτική Αντοχή

4.3.4.4.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία θλίψης

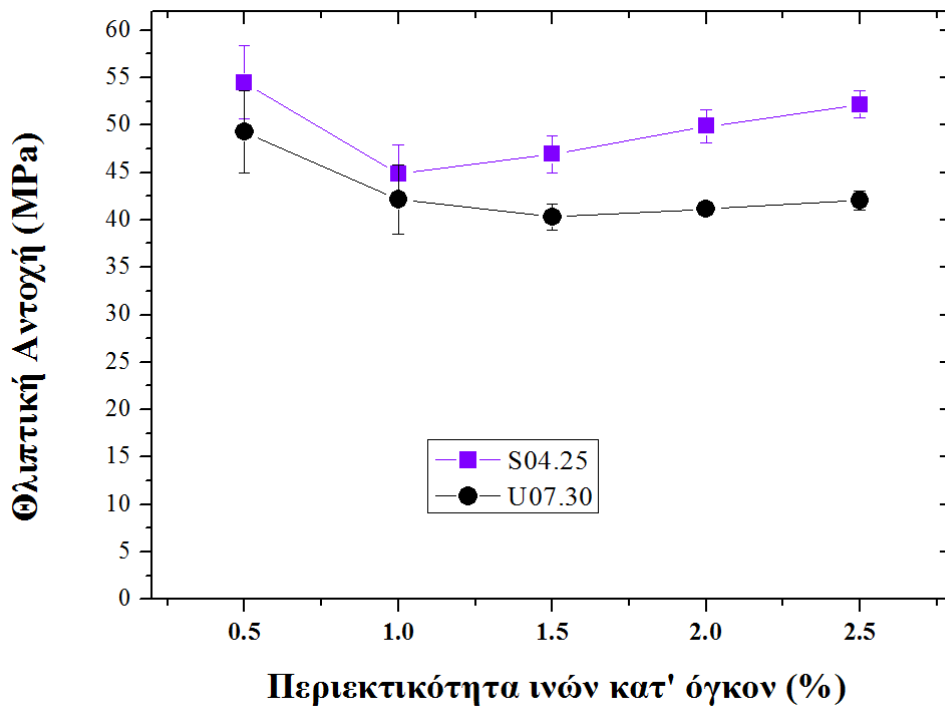
Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε Toni Technik μηχανή με μέγιστο φορτίο 3000 kN σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [35]. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 150x150x150 mm και η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 0.5 MPa/s. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις δοκιμές θλίψης αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 3.3.3.1.

4.3.4.4.2. Αποτελέσματα δοκιμής θλίψης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.11 και απεικονίζονται στην Εικόνα 4.3.14. Στη γραφική παράσταση της Εικόνας 4.3.14 έχουν συμπεριληφθεί και τα αποτελέσματα των δοκιμών με 1.0% ίνες του Υποκεφαλαίου 4.2 για λόγους σύγκρισης.

Πίνακας 4.3.11. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων διαφορετικής κατ' όγκον περιεκτικότητας ινών

| Κωδικός | Θλιπτική αντοχή (MPa) | STDEV* (MPa) |
|------------------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| S04.25.05 | 54.51 | 3.88 |
| S04.25.1 | 44.84 | 3.04 |
| S04.25.15 | 46.92 | 1.96 |
| S04.25.2 | 49.88 | 1.70 |
| S04.25.25 | 52.17 | 1.42 |
| U07.30.05 | 49.28 | 4.33 |
| U07.30.1 | 42.16 | 3.67 |
| U07.30.15 | 40.32 | 1.34 |
| U07.30.2 | 41.15 | 0.48 |
| U07.30.25 | 42.06 | 0.99 |
| <i>*STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση</i> | | |



Εικόνα 4.3.14. Θλιπτική αντοχή ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με 0.5 - 2.5 % ίνες

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την Εικόνα 4.3.14, τα αναμίγματα με ευθείες ίνες παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές από τις κυματοειδείς ίνες για όλες τις κατ' όγκον περιεκτικότητες των ινών. Η υπεροχή των ευθειών ινών έναντι των κυματοειδών κυμαίνεται από 6 – 24 %. Όπως αναλύθηκε και εκτενέστερα στο Υποκεφάλαιο 4.2 μεγαλύτερες διαμέτροι και μήκη ινών δημιουργούν πιο μεγάλα κενά στο υλικό της μήτρας συμβάλλοντας σε χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές. Γενικά δεν υπάρχει κάποια ιδιαίτερα εμφανής τάση στην επίδραση του ποσοστού ινών στη θλιπτική αντοχή. Εξάλλου, όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως (Υποκεφάλαιο 4.2), η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να επηρεαστεί από τις ίνες, αν επηρεάζουν το βαθμό συμπύκνωσης της μήτρας [25]. Η τάση που ίσως θα μπορούσε να εξαχθεί και για τα δύο είδη ινών είναι ότι για μικρά ποσοστά ινών εμφανίζονται υψηλές τιμές θλιπτικής αντοχής, στη συνέχεια μειώνονται και με περαιτέρω αύξηση της ποσότητας των ινών οι τιμές παρουσιάζουν μία ανοδική πορεία, η οποία είναι πιο εμφανής στις ευθείες ίνες. Οι ευθείες ίνες παρουσιάζουν τη χαμηλότερη τιμή τους στο 1.0%, ενώ οι κυματοειδείς στο 1.5%. Είναι γεγονός ότι μικρότερο ποσοστό ινών δημιουργεί μικρότερα κενά στο ανάμιγμα συμβάλλοντας στις υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σε ποσοστά 0.5%.

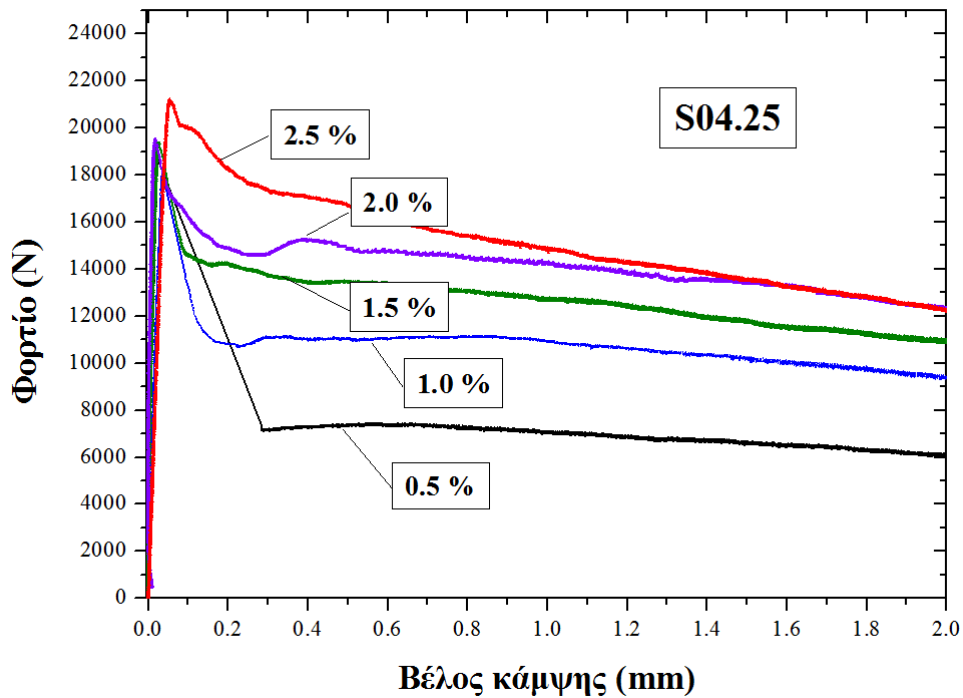
4.3.4.5. Δοκιμές Κάμψης Τεσσάρων Σημείων

4.3.4.5.1. Πειραματική διάταξη - Διαδικασία δοκιμών κάμψης

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστη πίεση υδραυλικών συστήματος 207 bar και μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN. Η ταχύτητα μετατόπισης της δοκιμής ήταν 0.08 mm/min, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα επιμηκυνσιόμετρο Instron με εύρος ± 15 mm, το οποίο τοποθετήθηκε σε ένα ζυγό (yoke) (βλ. Εικόνα 4.2.2.). Για την αποτίμηση των καμπτικών ιδιοτήτων των δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M - 05 [36]. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη γεωμετρία των δοκιμίων, την πειραματική διάταξη και την πειραματική διαδικασία αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 4.1.7.1.

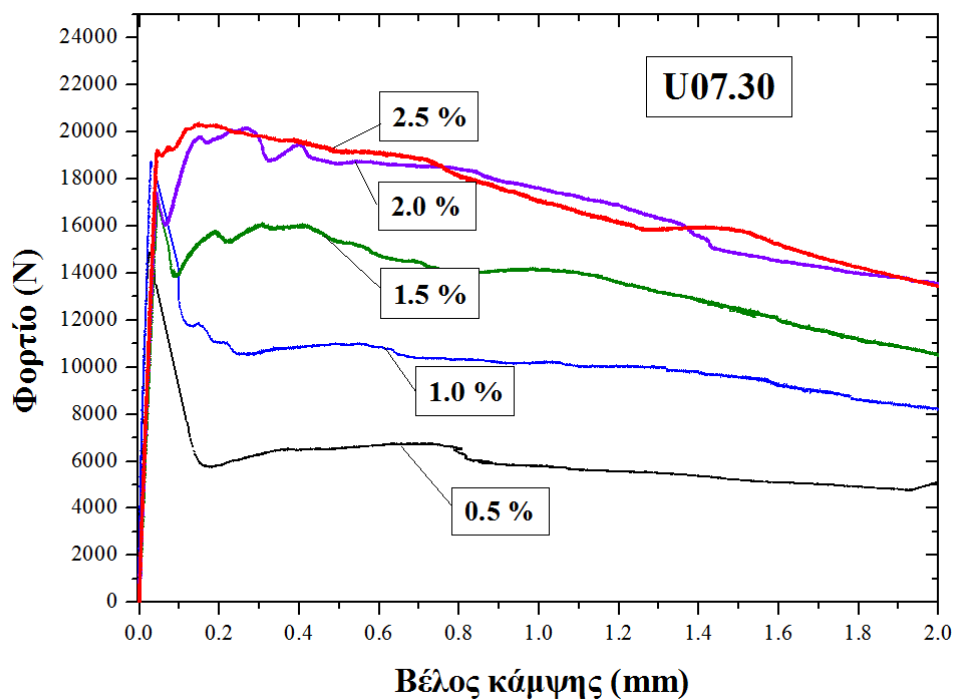
4.3.4.5.2. Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Στην Εικόνα 4.3.15 παρουσιάζονται τυπικές καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης των δοκιμών κάμψης για τα σκυροδέματα με 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% και 2.5% ευθείες ίνες. Όπως είναι εμφανές, η αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών επιδρά σημαντικά στις καμπτικές ιδιότητες και ιδιαίτερα στη δυσθραυστότητα, δηλαδή το εμβαδό της γραφικής παράστασης φορτίου - βέλους κάμψης.



Εικόνα 4.3.15. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με ευθείες ίνες 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%

Στην Εικόνα 4.3.16 απεικονίζονται τυπικές καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης των δοκιμών κάμψης για τα σκυροδέματα με 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% και 2.5% κυματοειδείς ίνες. Αντίστοιχα με την περίπτωση των ευθειών ινών, ορατή είναι η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των κυματοειδών ινών στις καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων.



Εικόνα 4.3.16. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με κυματοειδείς ίνες 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5%

Στους Πίνακες 4.3.12 και 4.3.13 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των καμπτικών ιδιοτήτων των ινοπλισμένων δοκιμών με 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, 2.5% ίνες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών με 1.0% ίνες του Υποκεφαλαίου 4.2 συμπεριλαμβάνονται για λόγους σύγκρισης. Επιπλέον, στα διαγράμματα των Εικόνων 4.3.17 - 4.3.21, απεικονίζεται ξεχωριστά η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών σε κάθε παράμετρο των καμπτικών ιδιοτήτων.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.3.12. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με ευθείες ίνες

| Κωδικός | S04.25.05 | S04.25.1 | S04.25.15 | S04.25.2 | S04.25.25 |
|------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P₁ (kN) | 18.52 | 18.54 | 18.98 | 20.26 | 21.61 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>0.56</i> | <i>1.57</i> | <i>0.61</i> | <i>1.13</i> | <i>3.21</i> |
| P_P (kN) | 18.52 | 18.54 | 18.98 | 20.64 | 22.21 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>0.56</i> | <i>1.57</i> | <i>0.61</i> | <i>0.92</i> | <i>3.88</i> |
| P_{100,0.50} (kN) | 6.23 | 9.77 | 13.32 | 17.64 | 19.15 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>1.27</i> | <i>0.95</i> | <i>0.70</i> | <i>2.35</i> | <i>4.69</i> |
| P_{100,2.0} (kN) | 5.56 | 8.33 | 11.59 | 14.93 | 15.16 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>0.83</i> | <i>0.95</i> | <i>1.06</i> | <i>2.34</i> | <i>4.32</i> |
| f₁ (MPa) | 5.61 | 5.42 | 5.60 | 6.07 | 6.53 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.07</i> | <i>0.44</i> | <i>0.20</i> | <i>0.38</i> | <i>0.76</i> |
| f_P (MPa) | 5.61 | 5.42 | 5.60 | 6.18 | 6.71 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.07</i> | <i>0.44</i> | <i>0.20</i> | <i>0.26</i> | <i>0.94</i> |
| f_{100,0.50} (MPa) | 1.88 | 2.86 | 3.93 | 5.27 | 5.77 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.36</i> | <i>0.29</i> | <i>0.21</i> | <i>0.58</i> | <i>1.19</i> |
| f_{100,2.0} (MPa) | 1.68 | 2.44 | 3.42 | 4.46 | 4.57 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.22</i> | <i>0.29</i> | <i>0.30</i> | <i>0.58</i> | <i>1.13</i> |
| T_{100,2.0} (J) | 13.4 | 19.0 | 25.3 | 33.5 | 35.1 |
| <i>STDEV* (J)</i> | <i>2.38</i> | <i>2.00</i> | <i>1.37</i> | <i>4.51</i> | <i>8.99</i> |
| <i>*STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση</i> | | | | | |

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

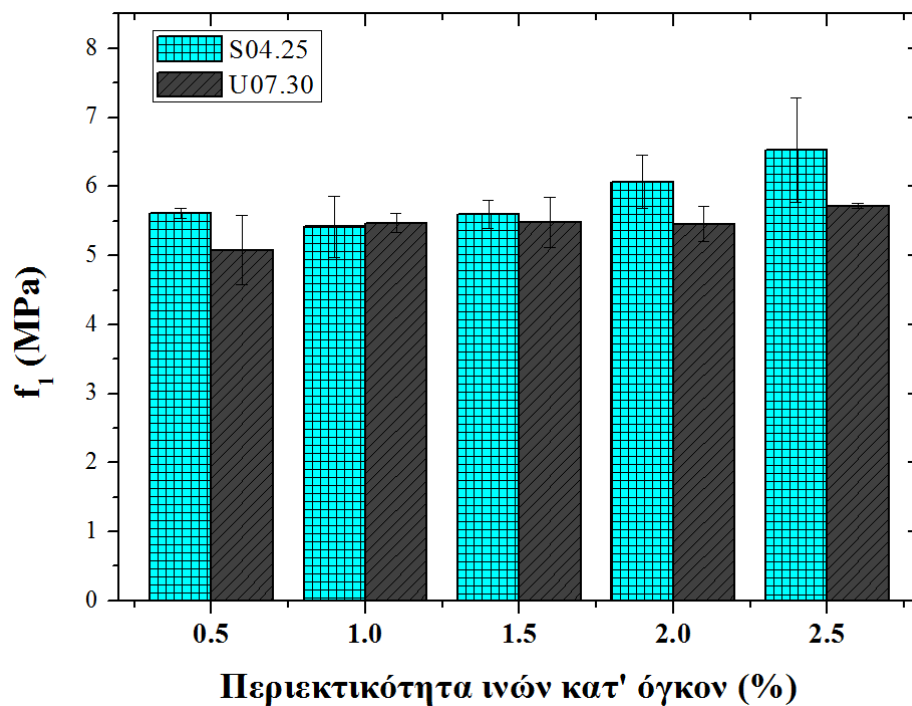
Πίνακας 4.3.13. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με κυματοειδείς ίνες

| Κωδικός | U07.30.05 | U07.30.1 | U07.30.15 | U07.30.2 | U07.30.25 |
|------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| P₁ (kN) | 16.44 | 18.41 | 17.99 | 18.23 | 18.88 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>1.60</i> | <i>0.55</i> | <i>1.22</i> | <i>0.59</i> | <i>0.41</i> |
| P_P (kN) | 16.44 | 18.41 | 17.99 | 19.41 | 21.48 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>1.60</i> | <i>0.55</i> | <i>1.22</i> | <i>1.31</i> | <i>1.01</i> |
| P_{100,0.50} (kN) | 6.89 | 11.26 | 15.41 | 17.29 | 17.77 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>0.45</i> | <i>0.27</i> | <i>0.64</i> | <i>2.36</i> | <i>1.41</i> |
| P_{100,2.0} (kN) | 5.57 | 8.92 | 9.82 | 12.17 | 12.61 |
| <i>STDEV* (kN)</i> | <i>0.46</i> | <i>0.92</i> | <i>1.65</i> | <i>1.21</i> | <i>0.73</i> |
| f₁ (MPa) | 5.08 | 5.47 | 5.48 | 5.46 | 5.72 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.50</i> | <i>0.14</i> | <i>0.36</i> | <i>0.26</i> | <i>0.04</i> |
| f_P (MPa) | 5.08 | 5.47 | 5.48 | 5.80 | 6.51 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.50</i> | <i>0.14</i> | <i>0.36</i> | <i>0.22</i> | <i>0.40</i> |
| f_{100,0.50} (MPa) | 2.13 | 3.35 | 4.69 | 5.16 | 5.38 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.14</i> | <i>0.13</i> | <i>0.15</i> | <i>0.55</i> | <i>0.35</i> |
| f_{100,2.0} (MPa) | 1.72 | 2.65 | 2.98 | 3.64 | 3.82 |
| <i>STDEV* (MPa)</i> | <i>0.14</i> | <i>0.31</i> | <i>0.44</i> | <i>0.26</i> | <i>0.18</i> |
| T_{100,2.0} (J) | 13.9 | 21.8 | 26.4 | 30.1 | 32.0 |
| <i>STDEV* (J)</i> | <i>1.57</i> | <i>1.16</i> | <i>2.06</i> | <i>3.38</i> | <i>2.03</i> |
| <i>*STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση</i> | | | | | |

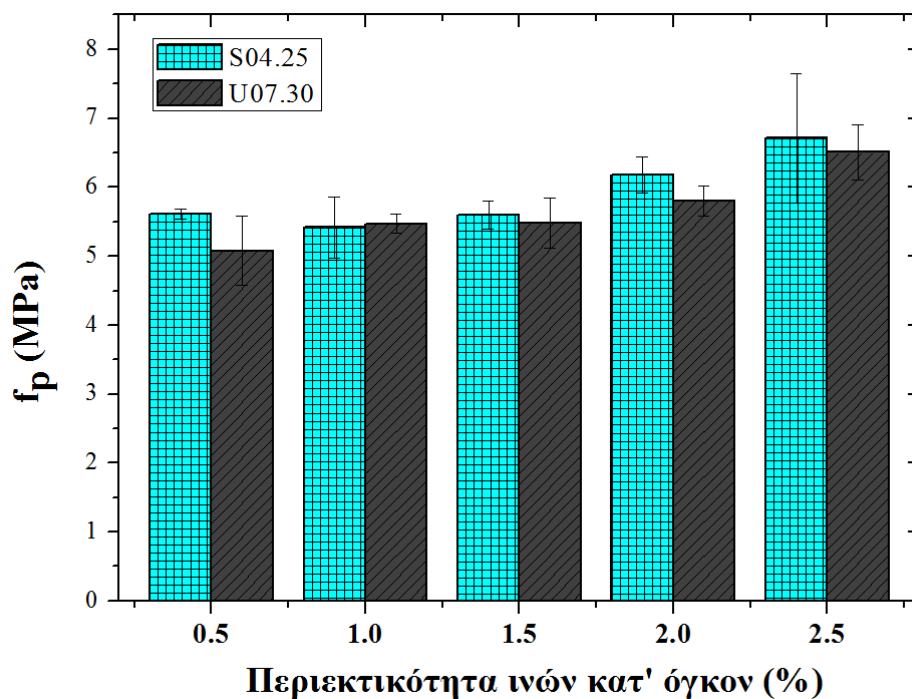
Στις Εικόνες 4.3.17 - 4.3.18 απεικονίζονται η μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και η μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών και για τα δύο είδη ινών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών επηρεάζει τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής κυρίως των αναμιγμάτων με τις ευθείες ίνες στα υψηλά ποσοστά (2.0% και 2.5%), όπου συντελεί σε αύξηση των τιμών. Αντίθετα, τα σκυροδέματα με τις κυματοειδείς ίνες δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες μεταβολές με την αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών και οι τιμές τους κυμαίνονται σε κοντινά επίπεδα και στο περιθώριο της τυπικής απόκλισης. Η κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών επηρεάζει τη μέγιστη καμπτική αντοχή στα υψηλά ποσοστά (2.0% και 2.5%) και των δύο ινών.

Επιπλέον, σε κάθε ποσοστό ινών συγκρίνοντας τα αναμίγματα με ευθείες και κυματοειδείς ίνες, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η f_1 και η f_p των αναμιγμάτων με ευθείες ίνες υπερέχουν έναντι των κυματοειδών. Στην περίπτωση της f_1 το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στο μεγαλύτερο μήκος και τη μεγαλύτερη διάμετρο που έχουν οι κυματοειδείς σε σχέση με τις ευθείες ίνες, με αποτέλεσμα ειδικά σε περισσότερες ποσότητες να δημιουργούν μεγαλύτερα κενά μέσα στη μήτρα. Στην περίπτωση της f_p , η οποία στις περιπτώσεις των ποσοστών 2.0% και 2.5% δεν συμπίπτει με την f_1 και αντιστοιχεί στη «μετα-ρωγματική» κατάσταση, μπορεί να αποδοθεί στην ικανότητα που προσδίδουν οι ευθείες ίνες στα δοκίμια να φέρουν μεγαλύτερα φορτία σε σχέση με τις κυματοειδείς στη συγκεκριμένη κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών (βλ. Εικόνες 4.3.19-4.3.20).

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.3.17. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών



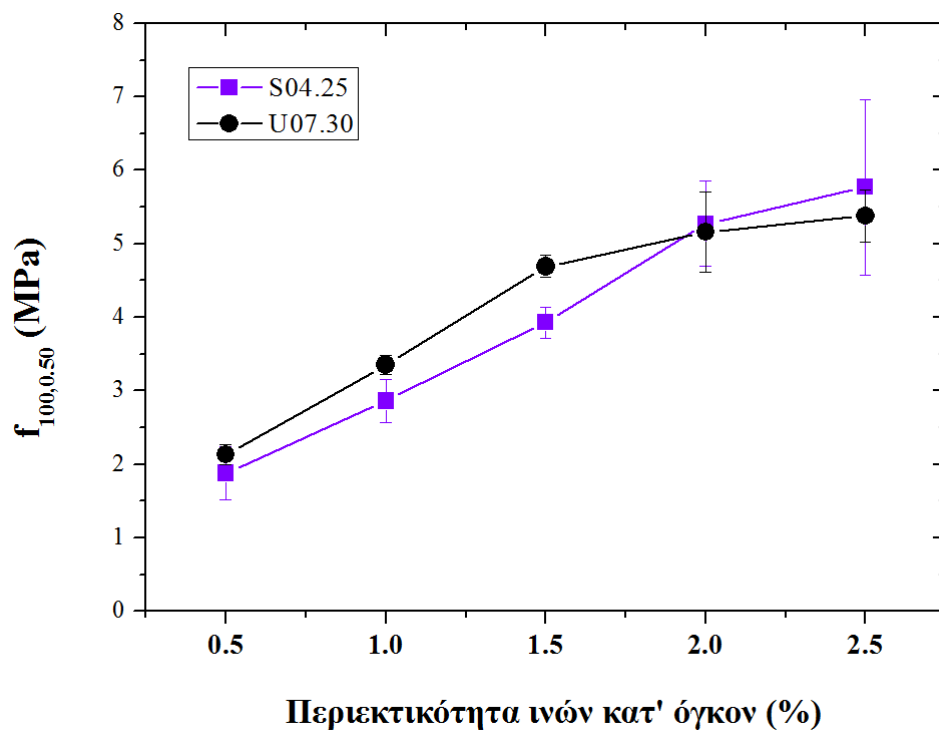
Εικόνα 4.3.18. Μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

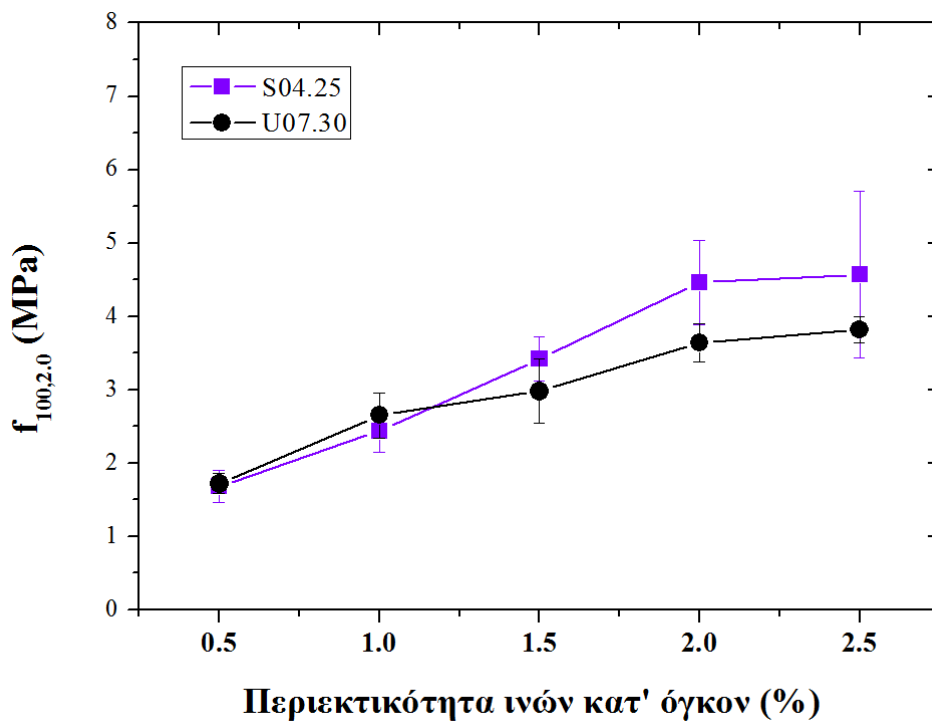
Στις Εικόνες 4.3.19 - 4.3.20 αποτυπώνονται οι παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Όπως είναι εμφανές, οι $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ βελτιώνονται με το ποσοστό ινών και για τα δύο είδη ινών. Η βελτίωση είναι πιο εμφανής μέχρι το ποσοστό 2.0%, ενώ από το 2.0% έως το 2.5%, η κλίση των γραφικών παραστάσεων αλλάζει και υπάρχει εμφάνιση πλατό. Υπάρχει ένδειξη, λοιπόν, ότι το ποσοστό 2.0% αποτελεί την κρίσιμη/οριακή τιμή, λοιπόν, πάνω από την οποία δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση στην παραμένουσα αντοχή των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων.

Αρχικά, οι ευθείες ίνες προσδίδουν χαμηλότερες ή στο ίδιο επίπεδο παραμένουσες αντοχές σε σχέση με τις κυματοειδείς. Όμως στο 2.0% στην $f_{100,0.50}$ και στο 1.5% στην $f_{100,2.0}$ αρχίζουν τα σκυροδέματα με τις ευθείες ίνες να εμφανίζουν υψηλότερες τιμές. Συγκεκριμένα, σε ποσοστό 2% οι ευθείες ίνες προσδίδουν 2% και 23% πιο βελτιωμένες τιμές σε σχέση με τις κυματοειδείς στην $f_{100,0.50}$ και στην $f_{100,2.0}$ αντίστοιχα. Επιπλέον, σε ποσοστό 2.5% οι ευθείες προσδίδουν 7% και 20% πιο βελτιωμένες τιμές σε σχέση με τις κυματοειδείς ίνες στην $f_{100,0.50}$ και στην $f_{100,2.0}$ αντίστοιχα. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι σε τόσο μεγάλα ποσοστά ινών κ.ό., ο αριθμός των ευθειών ινών έναντι των κυματοειδών σε κάθε δοκίμιο είναι κατά πολύ μεγαλύτερος, με αποτέλεσμα, αν και έχουν μικρότερο μήκος, να δημιουργούν ένα πολύ «πυκνότερο» πλέγμα οπλισμού από τις κυματοειδείς ίνες. Τα συγκεκριμένα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με εκείνα του Υποκεφαλαίου 3.4 όπου μελετήθηκε η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας ευθειών και κυματοειδών ινών μέσω δοκιμών εξόλκευσης από ινοπλισμένη μήτρα.

Όπως παρατηρείται, όμως, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν 2.0 - 2.5 % ευθείες και τουλάχιστον 2.5% κυματοειδείς ίνες, για να επιτευχθεί ο στόχος των παραμενουσών αντοχών της U05.30 σε 1.0% ποσοστό (Υποκεφάλαιο 4.2). Δηλαδή, εάν χρησιμοποιηθούν κυματοειδείς ίνες με μόνο 0.2 mm μικρότερη διάμετρο (U05.30 έναντι U07.30) θα χρειαστούν τουλάχιστον 118 kg/m³ λιγότερες ίνες για την επίτευξη παρόμοιας παραμένουσας αντοχής.



Εικόνα 4.3.19. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,0.50}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

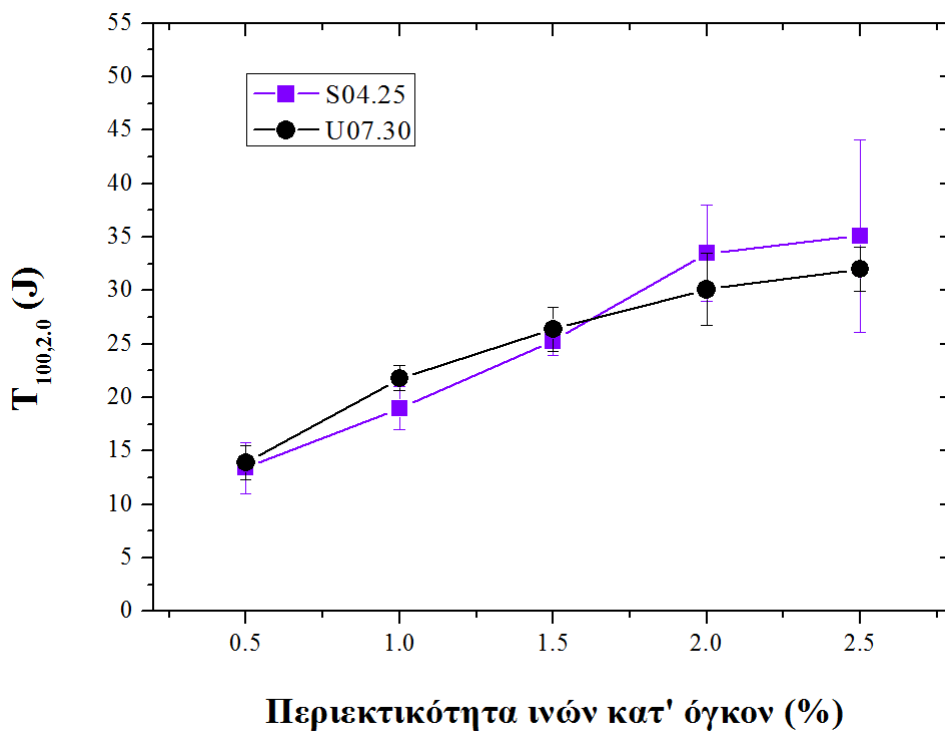


Εικόνα 4.3.20. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

Στην Εικόνα 4.3.21 αποτυπώνεται η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στην καμπτική δυσθραυστότητα. Αύξηση του ποσοστού ινών κ.ό. συμβάλλει στη βελτίωση των τιμών της δυσθραυστότητας και για τα δύο είδη ινών. Όπως και στην περίπτωση των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$, η επίδραση είναι πιο εμφανής μέχρι το ποσοστό 2.0%, γεγονός που υποδεικνύει ότι η συγκεκριμένη ποσότητα αποτελεί μία κρίσιμη, οριακή τιμή, πάνω από την οποία δεν υπάρχει περαιτέρω ιδιαίτερη ικανότητα απορρόφησης ενέργειας.

Οι ευθείες ίνες για ποσότητα μέχρι το 1.5% κ.ό σκυροδέματος προσδίδουν χαμηλότερη ή σε παρόμοια επίπεδα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με τις κυματοειδείς. Σε ποσοστό 2.0% και 2.5%, όμως, συνεισφέρουν 11% και 10% πιο βελτιωμένες $T_{100,2.0}$ σε σχέση με τις κυματοειδείς. Δεδομένου ότι οι ευθείες ίνες δεν εμφανίζουν αγκυρώσεις, η βελτίωση έναντι των κυματοειδών αποδίδεται στον κατά πολύ μεγαλύτερο αριθμό τους που αντιστοιχεί σε ένα ινοπλισμένο δοκίμιο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στην περίπτωση των παραμενουσών αντοχών (βλ. Υποκεφάλαιο 3.4).

Αντίστοιχα με τις παραμένουσες αντοχές, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν 2.0-2.5% ευθείες και τουλάχιστον 2.5% κυματοειδείς ίνες, για να επιτευχθεί η δυσθραυστότητα της U05.30 σε 1.0% ποσοστό (Υποκεφάλαιο 4.2). Συγκρίνοντας τις κυματοειδείς ίνες, εάν χρησιμοποιηθούν, λοιπόν, ίνες με μόνο 0.2 mm μικρότερη διάμετρο θα χρειαστούν τουλάχιστον 118 kg/m^3 λιγότερες ίνες για την επίτευξη παρόμοιας δυσθραυστότητας, γεγονός που συντελεί σε σημαντική μείωση του οικονομικού προϋπολογισμού μίας ινοπλισμένης κατασκευής.



Εικόνα 4.3.21. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών

Η Εικόνα 4.3.22 (α – ι) απεικονίζει τυπικά δοκίμια μετά το πέρας της δοκιμής κάμψης τεσσάρων σημείων για όλα τα ποσοστά ευθειών και κυματοειδών ινών. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι ρωγμές των δοκιμίων με τα μεγαλύτερα ποσοστά ινών διακλαδίζονται περισσότερο και έχουν μικρότερο εύρος σε σχέση με τα μικρότερα ποσοστά ινών.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



(α)



(β)



(γ)



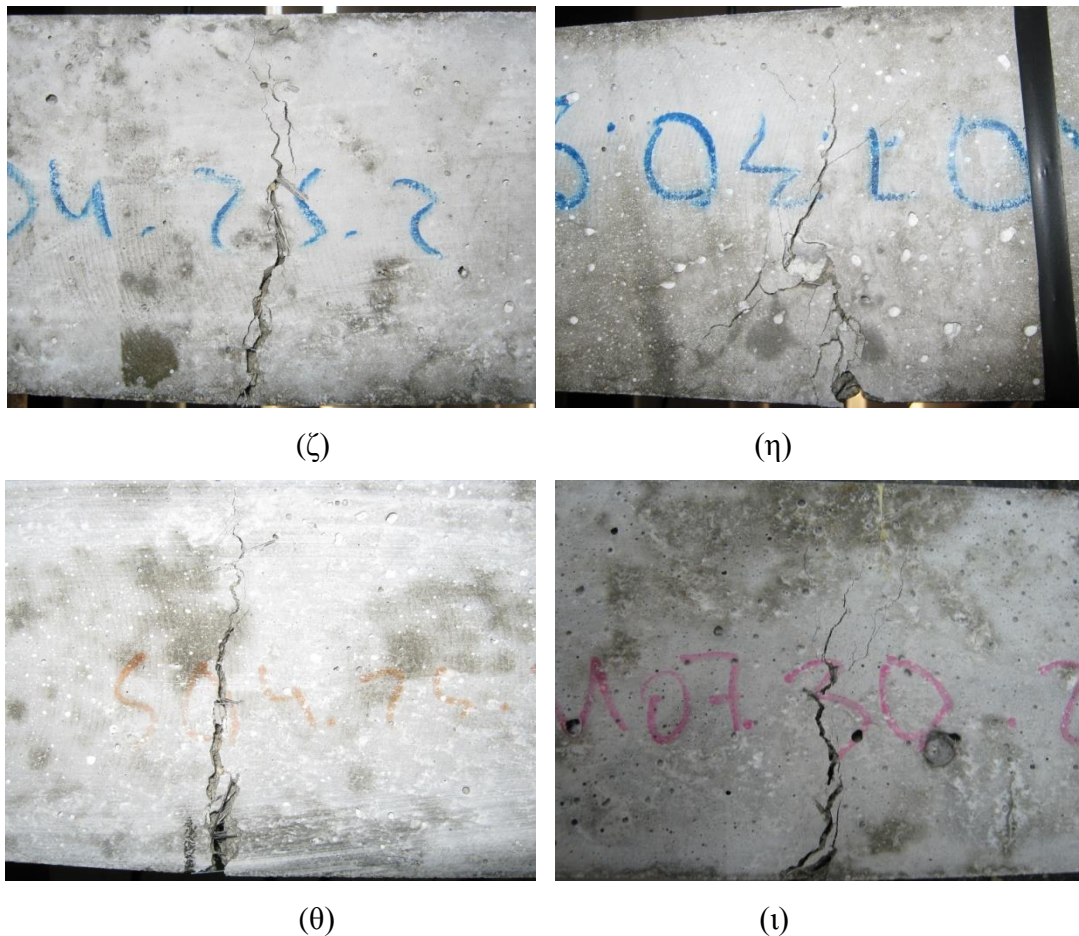
(δ)



(ε)



(στ)

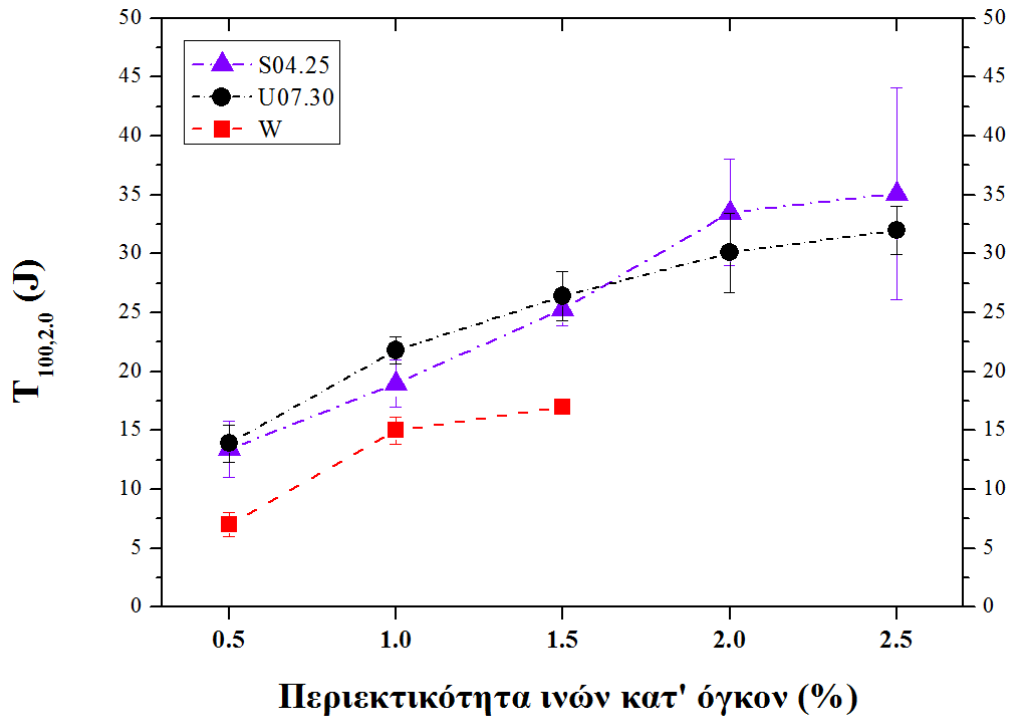


Εικόνα 4.3.22. Δοκίμια μετά τη δοκιμή κάμψης με ευθείες ίνες σε ποσοστό α) 0.5%, γ) 1.0%, ε) 1.5%, ζ) 2.0%, θ) 2.5% και κυματοειδείς ίνες σε ποσοστό β) 0.5%, δ) 1.0%, στ) 1.5%, η) 2.0%, ι) 2.5%

Όπως παρατηρείται με βάση τα αποτελέσματα των ενοτήτων 4.3.3 και 4.3.4, το οριακό ποσοστό για επίτευξη βελτιωμένων μηχανικών ιδιοτήτων δεν είναι το ίδιο σε όλες τις περιπτώσεις. Στις κυματοειδείς ίνες με l/d 33.3 είναι το 1.0%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για τις ευθείες ίνες με l/d 62.5 και τις κυματοειδείς με l/d 42.9 είναι περίπου 2.0%. Μπορεί κανείς να συμπεράνει βάσει των αποτελεσμάτων αυτών ότι αυτό μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετική γεωμετρία των ινών. Για να πραγματοποιηθεί μία ευθεία σύγκριση στην Εικόνα 4.3.23 απεικονίζεται η συσχέτιση της καμπτικής δυσθραυστότητας $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα όλων των γεωμετριών των ινών που παρουσιάστηκαν στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο. Η τάση που μπορεί να εξαχθεί από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι ότι η καμπτική δυσθραυστότητα αυξάνεται με την αύξηση της % περιεκτικότητας των ινών ανεξαρτήτου γεωμετρίας και ανεξαρτήτου διαδικασίας

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

παρασκευής και υλικών των αναμιγμάτων. Επιπλέον, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, σε γενικές γραμμές, μετά από ένα ποσοστό ινών κ.ό. η ικανότητα των ινοπλισμένων αναμιγμάτων να απορροφούν ενέργεια δεν βελτιώνεται περαιτέρω.



Εικόνα 4.3.23. $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την κατ' όγκον περιεκτικότητα όλων των γεωμετριών των ινών

4.3.5. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο μελετήθηκε η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος. Επιπλέον, αξιολογήθηκε η επίδραση του ποσοστού ινών κ.ό. στη νωπή κατάσταση του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι το ποσοστό όγκου ινών αποτελεί καθοριστικό παράγοντα ιδιαίτερα για τις καμπτικές ιδιότητες.

Σε σχέση με το νωπό σκυρόδεμα παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη των χαλύβδινων ινών μειώνει την τιμή της κάθισης σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η ποσότητα του υπερρευστοποιητή διαμορφώθηκε ανάλογα, όλα τα ινοπλισμένα αναμίγματα παρουσίασαν ικανοποιητική εργασιμότητα και δεν υπάρχει κάποια σαφής τάση για την επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών.

Δεν υπάρχει εμφανής τάση από τη μεταβολή της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη θλιπτική αντοχή. Οι διακυμάνσεις εξαρτώνται από τα κενά που δημιουργούν οι ίνες στη μήτρα. Για το λόγο αυτό παρατηρείται ότι ίνες με μικρότερο μήκος και διάμετρο προσδίδουν υψηλότερες θλιπτικές αντοχές, ανεξαρτήτως του ποσοστού ινών.

Σε υψηλά ποσοστά οι ίνες επηρεάζουν θετικά τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και τη μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, ενώ στα πιο χαμηλά ποσοστά μπορούν να μην επηρεάσουν καθόλου ή και να εμφανιστεί μικρή πτώση των τιμών. Η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στις συγκεκριμένες ιδιότητες εξαρτάται από την κατάσταση που θα δημιουργήσουν μέσα στην μήτρα οι ίνες (π.χ. κενά), καθώς και από την ικανότητα που μπορούν να προσδώσουν μετά τη ρωγμάτωση στο σκυρόδεμα να φέρει ή όχι μεγαλύτερα φορτία.

Ως γενική τάση παρατηρείται αύξηση των παραμενουσών αντοχών των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων ανάλογα με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Αντιθέτως, το άοπλο σκυρόδεμα έχει μηδενική ικανότητα να φέρει φορτία σε βέλος κάμψης 0.5mm και 2 mm, αφού μετά το μέγιστο φορτίο διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Επίσης, μετά από ένα κρίσιμο σημείο δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση των παραμενουσών αντοχών με επιπλέον αύξηση του ποσοστού ινών κ.ό. Επιπλέον, ίνες οι οποίες σε μικρότερα ποσοστά ήταν λιγότερο αποτελεσματικές σε σχέση με άλλες, σε υψηλότερα ποσοστά αποδεικνύονται πιο αποδοτικές.

4.3. Επίδραση της Κατ' όγκον Περιεκτικότητας Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Γενικά, η αύξηση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών συντελεί στη βελτίωση των τιμών της δυσθραυστότητας για όλα τα είδη ινών. Αντίστοιχα με τις παραμένουσες αντοχές, μετά από ένα κρίσιμο σημείο οι ίνες δεν συντελούν σε περαιτέρω απορρόφηση ενέργειας με επιπρόσθετη αύξηση του ποσοστού ινών. Επιπλέον, ίνες οι οποίες σε μικρότερα ποσοστά ήταν λιγότερο αποτελεσματικές σε σχέση με άλλες, όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας, σε υψηλότερα ποσοστά έχουν αποβεί αποδοτικότερες.

Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η ακουστική δραστηριότητα ήταν ανάλογη με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών και την καμπτική δυσθραυστότητα. Η ανάλυση της παραμέτρου RA οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του ποσοστού ινών κ.ό. συντελεί στην εμφάνιση περισσότερων διατμητικών «συμβάντων».

Επιπλέον, ενισχύεται το συμπέρασμα του Υποκεφαλαίου 4.2 που αφορά τη σημαντική επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στην παραμένουσα αντοχή και τη δυσθραυστότητα των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, αφού θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ευθειών και κυματοειδών ινών για να επιτευχθούν οι τιμές των ιδιοτήτων της ίνας που απέδωσε τις καλύτερες τιμές σε ποσοστό 1.0%. Η γνώση, λοιπόν, των παραγόντων και του τρόπου που επηρεάζουν οι ίνες τις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να μειώσει κατά πολύ τον οικονομικό προϋπολογισμό μίας κατασκευής.

4.3.6. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου

1. ACI 544.1R-96 (Reapproved 2002) Report on Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
2. Altun F, Haktanir T, Ari K (2007) Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and Building Materials* 21 (3):654-661
3. Kumutha R, Vijai K (2010) Effect of steel fibers on the properties of concrete. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29 (4):531-538
4. Barros JAO, Sena Cruz J (2001) Fracture energy of steel fiber-reinforced concrete. *Mechanics of Composite Materials and Structures* 8 (1):29-45
5. Bayramov F, Taşdemir C, Taşdemir MA (2004) Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method. *Cement and Concrete Composites* 26 (6):665-675
6. Düzgün OA, Gül R, Aydin AC (2005) Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete. *Materials Letters* 59 (27):3357-3363
7. Eswari S, Raghunath PN, Suguna K (2008) Ductility performance of concrete with dramix steel micro-reinforcement. *Advances in Natural and Applied Sciences* 2 (3):243-248
8. Kan Y-C, Pei K-C, Yang H-C (2003) An investigation on toughness of steel fiber reinforced heavy concrete. In: *Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 17)*, Prague, Czech Republic, 17 – 22 August 2003
9. Miao B, Chern J-C, Yang C-A (2003) Influences of fiber content on properties of self-compacting steel fiber reinforced concrete. *Journal of the Chinese Institute of Engineers* 26 (4):523-530

10. Nili M, Afroughsabet V (2010) Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *International Journal of Impact Engineering* 37 (8):879-886
11. Sukontasukkul P, Pomchiengpin W, Songpiriyakij S (2010) Post-crack (or post-peak) flexural response and toughness of fiber reinforced concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials* 24 (10):1967-1974
12. Yazıcı Ş, İnan G, Tabak V (2007) Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC. *Construction and Building Materials* 21 (6):1250-1253
13. Κατσκογιάννη Π, Νομικός ΠΠ, Guy Perrier d' Auxion, Μιχαηλίδης Μ, Σοφιανός ΑΙ (2008) Ποιοτικός έλεγχος ινοπλισμένου σκυροδέματος στη σηραγγοποιία. In: 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων ΤΕΕ, Αθήνα, 21-23 Μαΐου 2008
14. Σακελλαρίου ΑΓ (2006) Σύγκριση ιδιοτήτων άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Επίδραση της ποσότητας των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος. In: 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου 2006
15. Shah HR, Hossain AB, Weiss J (2004) Using the restrained ring test in conjunction with passive acoustic emission to quantify the role of steel fiber reinforcement in shrinkage cracking mitigation In: Conference on Fiber Composites, High Performance Concretes and Smart Materials, Organized by ICFRC, Chennai, India, 8–10 January 2004
16. Wang Y, Wang Y, Xuan WH, Zheng G, Chen YZ (2012) Experimental study on strength and AE characteristics for PFRC with different fiber content. *Advanced Materials Research* 446-449:297-302
17. ACI 544.3R-93 (Reapproved 1998) Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute
18. ACI 544.4R-88 (Reapproved 1999) Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete. American Concrete Institute

19. Gopalaratnam VS, Gettu R (1995) On the characterization of flexural toughness in fiber reinforced concretes. *Cement and Concrete Composites* 17 (3):239-254
20. Khaloo AR, Afshari M (2005) Flexural behaviour of small steel fibre reinforced concrete slabs. *Cement and Concrete Composites* 27 (1):141-149
21. Song PS, Hwang S (2004) Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 18 (9):669-673
22. Gencil O, Brostow W, Datashvili T, Thedford M (2011) Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite Interfaces* 18 (2):169-184
23. Wegian FM, Alanki AA, Alsaeid HM, Alotaibi FA, Al-Mitairi MS, Kandari FA (2011) Influence of fly ash on behavior of fibres reinforced concrete structures. *Journal of Applied Sciences* 11 (17):3185-3191
24. Wafa FF (1990) Properties and Applications of Fiber Reinforced Concrete. *JKAU: Eng Sci* 2:49-63
25. Johnston CD, Skarendahl Å (1992) Comparative flexural performance evaluation of steel fibre-reinforced concretes according to ASTM C1018 shows importance of fibre parameters. *Materials and Structures* 25 (4):191-200
26. Uygunoğlu T (2008) Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete. *Materials and Structures* 41 (8):1441-1449
27. Aruntaş HY, Cemalgil S, Şimşek O, Durmuş G, Erdal M (2008) Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber. *Materials Letters* 62 (19):3441-3443
28. Gao J, Sun W, Morino K (1997) Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites* 19 (4):307-313
29. ASTM Standard C 128 - 01e1 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA

30. ASTM Standard C 127 - 01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken
31. ASTM Standard C 136 - 01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
32. ASTM Standard C 192/C 192M - 98. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (1998). ASTM International, West Conshohocken, PA
33. ASTM Standard C 143/C 143M - 98. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (1999). ASTM International, West Conshohocken, PA
34. ASTM Standard C 231 - 97 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (1997). ASTM International, West Conshohocken, PA
35. BS EN 12390-3:2002 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens (2002). British Standard Institution
36. ASTM Standard C 1609/C 1609M - 05. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (2006). ASTM International, West Conshohocken, PA
37. Chen B, Liu J (2008) Damage in carbon fiber-reinforced concrete, monitored by both electrical resistance measurement and acoustic emission analysis. *Construction and Building Materials* 22 (11):2196-2201
38. Ohtsu M, Watanabe H (2001) Quantitative damage estimation of concrete by acoustic emission. *Construction and Building Materials* 15 (5–6):217-224
39. Wu K, Chen B, Yao W (2000) Study on the AE characteristics of fracture process of mortar, concrete and steel-fiber-reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Research* 30 (9):1495-1500
40. Wu K, Chen B, Yao W (2001) Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique. *Cement and Concrete Research* 31 (6):919-923

41. Suzuki T, Ohtsu M (2004) Quantitative damage evaluation of structural concrete by a compression test based on AE rate process analysis. *Construction and Building Materials* 18 (3):197-202
42. Grosse CU, Ohtsu M (2008) *Acoustic Emission Testing*. Springer
43. Ohtsu M, Okamoto T, Yuyama S (1998) Moment tensor analysis of AE for cracking mechanisms in concrete. *ACI Structural Journal* 95 (2):87-95
44. Shiotani T, Ohtsu M, Ikeda K (2001) Detection and evaluation of AE waves due to rock deformation. *Construction and Building Materials* 15 (5–6):235-246
45. ASTM Standard C 143/C 143M - 03. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
46. BS EN 12350-3:2000 Testing Fresh Concrete - Part 3: Vebe Test (2000). British Standards Institution
47. ASTM Standard C 231 - 03 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

4.4.1. Στόχος – Αντικείμενο

Το συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο μελετά την επίδραση της χημικής τροποποίησης των ινών στη συνάφεια ίνας/μήτρας και κατ' επέκταση στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Η τροποποίηση της ίνας πραγματοποιείται με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου. Η επίδραση της συγκεκριμένης τροποποίησης στις διεπιφανειακές ιδιότητες παρουσιάστηκε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Το παρόν Υποκεφάλαιο συσχετίζει τα αποτελέσματα των καμπτικών και θλιπτικών ιδιοτήτων μετά τη χημική τροποποίηση με τις διεπιφανειακές ιδιότητες και τα συγκρίνει με τα αντίστοιχα των μη τροποποιημένων ινών του Υποκεφαλαίου 4.2. Για την επίτευξη του εν λόγω σκοπού, η συγκεκριμένη μελέτη πραγματοποιείται συνολικά σε έξι είδη ινών διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών σε ποσοστό 1.0% κ.ό. σκυροδέματος. Για τον προσδιορισμό των καμπτικών ιδιοτήτων χρησιμοποιείται το νέο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M [1].

Επιπλέον, ερευνάται η επιρροή της τροποποίησης των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, παρουσιάζονται αποτελέσματα των μετρήσεων της εργασιμότητας (δοκιμή κάθισης, δοκιμή Vebe) και της περιεκτικότητας των αναμιγμάτων σε αέρα και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα των μη τροποποιημένων ινών.

Επιπλέον, η επίδραση της τροποποίησης των ινών ερευνάται και με τη μέθοδο της Ακουστικής Εκπομπής, η οποία εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια των δοκιμών κάμψης σε δοκίμια με ίνες διαφορετικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Σε συνέχεια του Υποκεφαλαίου 4.2, πραγματοποιείται κανονικοποίηση των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας και συσχέτιση των παραμέτρων αυτών με την επιφάνεια επαφής κάθε τροποποιημένης ίνας. Η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα των τροποποιημένων ινών συσχετίζεται με την ενέργεια εξόλκευσης (G) κάθε ίνας και πραγματοποιείται σύγκριση με τα αντίστοιχα μεγέθη για μη τροποποιημένες ίνες. Η συγκεκριμένη διαδικασία καθιστά δυνατή την επιλογή του ιδανικότερου

συνδυασμού επιφάνειας επαφής και αριθμού τροποποιημένων ινών στο δοκίμιο για βέλτιστη δυσθραυστότητα.

4.4.2. Εισαγωγή

Στις προηγούμενες ενότητες της παρούσας διατριβής μελετήθηκε διεξοδικά πως επιδρούν στις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος κάποιοι σημαντικοί παράγοντες, όπως η χρήση των διαφορετικών γεωμετριών ινών και ποσοστών ινών κ.ό., καθώς και η αλλαγή της ποιότητας της μήτρας μέσω διαφορετικών λόγων N/T. Επιπλέον, ένας ακόμη παράγοντας που επιδρά στις μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένων σκυροδεμάτων και κονιαμάτων είναι η διαφοροποίηση της σύστασης της μήτρας με την προσθήκη υλικών, όπως π.χ. η πυριτική παιπάλη, η ιπτάμενη τέφρα, κ.ά., με αποτέλεσμα πολλοί ερευνητές να προβαίνουν στη μελέτη της επίδρασης τους στις μηχανικές ιδιότητες των ινοπλισμένων υλικών [2-11].

Συγκεκριμένα, οι Köksal κ.ά. [4] ερεύνησαν την επίδραση των χαλύβδινων ινών σε συνδυασμό με την πυριτική παιπάλη στις μηχανικές ιδιότητες του σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Για το λόγο αυτό χρησιμοποίησαν πυριτική παιπάλη σε ποσότητες 0%, 5%, 10% και 15% κατά βάρος της ποσότητας του τσιμέντου και πραγματοποίησαν δοκιμές κάμψης, θλίψης και εφελκυσμού σε διάρρηξη. Παρατήρησαν ότι οι τιμές των θλιπτικών αντοχών των σκυροδεμάτων που περιείχαν πυριτική παιπάλη και ίνες ήταν υψηλότερες από τις τιμές των θλιπτικών αντοχών των αναμιγμάτων που περιείχαν μόνο πυριτική παιπάλη. Στην περίπτωση των καμπτικών και εφελκυστικών σε διάρρηξη αντοχών, σημαντική αύξηση παρατηρήθηκε όταν χρησιμοποιήθηκαν οι χαλύβδινες ίνες μαζί με την πυριτική παιπάλη.

Επιπλέον, οι Nili και Afroughsabet [5] μελέτησαν την αντοχή σε κρούση και μηχανικές ιδιότητες άοπλων και ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με ή χωρίς τη χρήση πυριτικής παιπάλης. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν χαλύβδινες ίνες λόγου μορφής 80 και μήκους 60 mm σε ποσοστά όγκου ινών 0%, 0.5% και 1%. Κατέληξαν ότι η προσθήκη χαλύβδινων ινών σε συνδυασμό με τη χρήση πυριτικής παιπάλης στο σκυρόδεμα, αυξάνει σημαντικά την ολκιμότητα και την αντοχή του σε κρούση.

Την πυριτική παιπάλη χρησιμοποίησαν και οι Yan κ.ά. [11] σε συνδυασμό με χαλύβδινες ίνες για να ερευνήσουν τη δυναμική μηχανική συμπεριφορά σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Συμπέραναν ότι ο συνδυασμός τους έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση σε κόπωση και κρούση του σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Η ιπτάμενη τέφρα χρησιμοποιήθηκε από τους Wegian κ.ά. [10], οι οποίοι παρουσίασαν μία έρευνα σχετικά με τη θλιπτική και την καμπτική αντοχή ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικές ποσότητες ινών και ιπτάμενης τέφρας.

Οι Wang κ.ά. [9] ερεύνησαν τις ιδιότητες του σκυροδέματος με χαλύβδινες ίνες σε συνδυασμό με ένα πρόσθετο διόγκωσης τύπου MgO (MgO-type expansive agent). Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η εφελκυστική αντοχή διάρρηξης και η θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος που περιέχει το πρόσθετο διόγκωσης αυξάνεται σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα.

Επιπροσθέτως, εκτός από τους προαναφερόμενους παράγοντες, οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να επηρεαστούν και από τη διαφοροποίηση της διεπιφάνειας μήτρας – ίνας, με τροποποίηση των ινών. Ως εκ τούτου, κάποιιοι ερευνητές, ασχολήθηκαν, με διάφορους τρόπους τροποποίησης των ινών για τη βελτίωση της συνάφειας ίνας και μήτρας σκυροδέματος, κονιάματος ή τσιμεντόπαστας [12-16].

Πιο συγκεκριμένα, οι Xu και Chung [16], μελέτησαν την εφελκυστική συμπεριφορά ινοπλισμένης τσιμεντόπαστας με ίνες άνθρακα, πραγματοποιώντας τροποποιήσεις της επιφάνειας των ινών με όζον, διχρωμικό κάλιο και σιλάνιο. Συμπέραναν ότι η εφελκυστική αντοχή, η ολκιμότητα και το μέτρο ελαστικότητας της ινοπλισμένης τσιμεντόπαστας αυξήθηκε όταν οι ίνες ήταν τροποποιημένες. Η επίδραση της τροποποίησης του σιλανίου ήταν η πιο αποτελεσματική, ενώ η λιγότερο αποτελεσματική αποδείχτηκε η τροποποίηση με όζον.

Οι Lu κ.ά. [17] αναφέρουν ότι η καλή συνάφεια μήτρας με βάση το τσιμέντο και οπλισμού, εξαρτάται από τη διαβρεξιμότητα (wettability) του οπλισμού από νερό, καθώς η τσιμεντόπαστα είναι βασισμένη σε νερό. Ως εκ τούτου, ερεύνησαν τη διαβρεξιμότητα από νερό τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών χάλυβα, πολυαιθυλενίου και άνθρακα. Στην περίπτωση των χαλύβδινων ινών, η επιφάνειά τους τροποποιήθηκε με χρήση ακετόνης, με αέριο όζον και με συνδυασμό τροποποίησης με ακετόνη αρχικά και στη συνέχεια με όζον.

Οι Fu κ.ά [12] διερεύνησαν τη συνάφεια μεταξύ τσιμεντόπαστας και ινών άνθρακα τροποποιώντας την επιφάνεια των ινών με διάφορες οξειδωτικές, χημικές τροποποιήσεις, καθώς και εισάγοντας πολυμερή μέσα στο μίγμα τσιμέντου. Απέδειξαν ότι η αντοχή συνάφειας τσιμεντόπαστας - ίνας άνθρακα βελτιώθηκε με την τροποποίηση των ινών και ιδιαίτερα με την τροποποίηση με όζον. Επιπλέον, η αντοχή συνάφειας αυξήθηκε και με την προσθήκη πολυμερικών προσμίκτων, αλλά η τροποποίηση με όζον αποδείχτηκε πιο αποτελεσματική.

Ο Maage [18] μελέτησε την επίδραση της τροποποιημένης επιφάνειας χαλύβδινων ινών στη συνάφεια μεταξύ ινών και μήτρας με βάση το τσιμέντο. Τα αποτελέσματα των τροποποιημένων ινών, όμως, έδειξαν ασήμαντες βελτιώσεις σε σχέση με τις μη τροποποιημένες. Οι τροποποιήσεις της επιφάνειας των ινών πραγματοποιήθηκαν με επικάλυψη Cu-Pb, επικάλυψη Na_2SiO_3 , καθαρισμό σε τριχλωροαιθυλένιο, επικάλυψη με Zn-SiO_2 , ηλεκτρο-γαλβανισμό, εν θερμώ γαλβανισμό και οξείδωση στους 600 °C.

Επίσης, οι Lovata και Fahmy [13] ερεύνησαν την επίδραση της χημικής τροποποίησης της επιφάνειας ινών πολυπροπυλενίου στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, πραγματοποιώντας τροποποιήσεις της επιφάνειας των ινών με ένα βασικό διάλυμα και με ένα ήπιο οργανικό οξύ. Ως εκ τούτου, συμπέραναν ότι η χημική τροποποίηση των ινών συνέβαλλε σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Οι Sugama κ.ά. [14] και οι Sun κ.ά. (2012) [15] διερεύνησαν τη διεπιφάνεια μεταξύ χαλύβδινων ινών με τροποποιημένη επιφάνεια και μήτρας με βάση το τσιμέντο. Για την τροποποίηση των χαλύβδινων ινών χρησιμοποίησαν ένα διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου, το οποίο όχι μόνο αύξησε τη συνάφεια σε σχέση με τις μη τροποποιημένες σε δοκιμή εξόλκευσης, αλλά προστάτευσε και τις χαλύβδινες ίνες από τη διάβρωση. Επιπλέον, χαλύβδινες ίνες με τροποποίηση φωσφορικού ψευδαργύρου χρησιμοποίησαν στην έρευνα τους οι Sun κ.ά. (2011) [19], οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση της διάβρωσης στην καμπτική δυσθραυστότητα του σκυροδέματος με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν διάλυμα 5% NaCl και κατέληξαν ότι το διαβρωτικό περιβάλλον υποβαθμίζει τη δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος (μη τροποποιημένες ίνες), ενώ το σκυρόδεμα με τροποποιημένες ίνες έμεινε σχεδόν ανεπηρέαστο.

Η περιορισμένη βιβλιογραφία που υπάρχει σχετικά με την επίδραση της ενίσχυσης της διεπιφάνειας χαλύβδινης ίνας/μήτρας σκυροδέματος με τροποποίηση της επιφάνειας της ίνας με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου στις μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος και ειδικότερα στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες του, οδήγησαν στην έρευνα του συγκεκριμένου Υποκεφαλαίου. Το παρόν Υποκεφάλαιο, πραγματεύεται την επίδραση της χημικής τροποποίησης των ινών στη θλιπτική αντοχή, τη μέγιστη καμπτική αντοχή και τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής, την παραμένουσα αντοχή σε κάμψη και την καμπτική δυσθραυστότητα των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αυτά που προέκυψαν από τη χρήση μη τροποποιημένων ινών.

4.4.3. Υλικά και σύνθεση δοκιμίων

Στον Πίνακα 4.4.1 παρουσιάζεται η κωδικοποίηση των δοκιμίων που εξετάστηκαν, καθώς και οι ιδιότητες των ινών που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε είδος δοκιμίων.

Πίνακας 4.4.1. Κωδικοποίηση δοκιμίων και ιδιότητες ινών

| Κωδικός | Σχήμα ινών | Κατάσταση επιφανείας ινών | l^1 (mm) | d^1 (mm) | l/d^1 (1) |
|---------|---------------|---------------------------|------------|------------|-------------|
| cS04.25 | Ευθείες | Τροποποιημένες | 25 | 0.4 | 62.5 |
| cH07.30 | Κεκαμένα άκρα | Τροποποιημένες | 30 | 0.7 | 42.9 |
| cH06.30 | Κεκαμένα άκρα | Τροποποιημένες | 30 | 0.6 | 50.0 |
| cH06.25 | Κεκαμένα άκρα | Τροποποιημένες | 25 | 0.6 | 41.7 |
| cU07.30 | Κυματοειδείς | Τροποποιημένες | 30 | 0.7 | 42.9 |
| cU05.30 | Κυματοειδείς | Τροποποιημένες | 30 | 0.5 | 60.0 |

¹l: Μήκος ίνας, d: διάμετρος, l/d: λόγος μορφής

Στον Πίνακα 4.4.2 απεικονίζονται τα υλικά των αναμίξεων και οι ποσότητες τους, τα οποία είναι όμοια με τα αντίστοιχα του Υποκεφαλαίου 4.2, ώστε να επιτευχθεί η

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ίνων στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

σύγκριση των ιδιοτήτων των αναμιγμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες. Οι ίνες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1.0% κ.ό σκυροδέματος και τροποποιήθηκαν με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου όπως προτάθηκε από τους Sugama κ.ά. [14]. Περισσότερες λεπτομέρειες για το διάλυμα και τον τρόπο παρασκευής του παρουσιάστηκαν στο Υποκεφάλαιο 3.3.

Πίνακας 4.4.2. Υλικά και ποσότητες αναμιγμάτων (kg/m^3)

| Υλικά | Ποσότητες (kg/m^3) |
|--------------------------|-------------------------------|
| Τσιμέντο τύπου II 42.5 N | 440 |
| Νερό | 220 |
| Θραυστή Άμμος | 1177 |
| Ψηφίδα | 392 |
| Υπερρυστοποιητής | 3.1 |
| Ίνες | 78.5 |
| Αθροισμα | 2311 |

Τα ειδικά βάρη και η απορροφητικότητα της άμμου και της ψηφίδας προσδιορίστηκαν σύμφωνα με τα πρότυπα ASTM C 128 - 01e1 [20] και ASTM C 127 - 01 [21] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 1 του Παραρτήματος.

Επιπλέον, η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 136 - 01 [22]. Η άμμος αποτελεί το 75% της συνολικής ποσότητας των αδρανών και η ψηφίδα το 25%.

Στον Πίνακα 4.4.3 παρουσιάζονται οι ποσότητες των υλικών που απαιτούσε κάθε ανάμιξη, ώστε να παρασκευαστούν 4 δοκίμια κάμψης, 3 δοκίμια θλίψης και να επιτευχθούν οι δοκιμές νεπού σκυροδέματος.

Πίνακας 4.4.3. Ποσότητες υλικών/ανάμιξη

| Υλικά | Ποσότητες (kg) |
|-------------------------|----------------|
| Τσιμέντο τύπου Π 42.5 N | 17.776 |
| Νερό | 8.888 |
| Θραυστή Άμμος | 47.539 |
| Ψηφίδα | 15.846 |
| Υπερρευστοποιητής | 0.125 |
| Ίνες | 3.171 |
| Άθροισμα | 93.346 |

4.4.4. Συντήρηση των δοκιμίων

Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για 28 ημέρες μέχρι την πραγματοποίηση των μηχανικών δοκιμών σε ειδικές δεξαμενές με νερό και υδροξείδιο του ασβεστίου σε συνθήκες 23 ± 2 °C σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 192/C 192M - 98 [23].

4.4.5. Ιδιότητες νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος με τροποποιημένες ίνες

Η κάθιση, ο χρόνος Vebe και το ποσοστό αέρα όλων των νωπών τροποποιημένων ινοπλισμένων αναμιγμάτων εμφανίζονται στον Πίνακα 4.4.4. Για την κάθιση ακολουθήθηκε το πρότυπο ASTM C 143/C 143M - 03 [24], για τη δοκιμή Vebe το πρότυπο BS EN 12350-3:2000 [25], και για το ποσοστό αέρα το πρότυπο ASTM C 231 - 03 [26].

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.4.4. Αποτελέσματα δοκιμών νωπών ινοπλισμένων σκυροδεμάτων

| Κωδικός | Κάθιση (mm) | Vebe χρόνος (sec) | Ποσοστό αέρα (%) |
|---------|-------------|-------------------|------------------|
| cS04.25 | 90 | 3 | 0.8 |
| cH07.30 | 60 | 2 | 1.2 |
| cH06.30 | 60 | 3 | 0.9 |
| cH06.25 | 80 | 3 | 0.8 |
| cU07.30 | 50 | 2 | 0.85 |
| cU05.30 | 45 | 3 | 1.1 |

Συγκρίνοντας την επίδραση της τροποποίησης των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (βλ. Πίνακες 4.4.4 και 4.2.4) δεν υπάρχει μια σαφής επιρροή. Μία τάση που ίσως θα μπορούσε να παρατηρηθεί είναι ότι τα αναμίγματα με μη τροποποιημένες ίνες εμφανίζουν σύμφωνα με τις δοκιμές κάθισης λίγο πιο βελτιωμένη εργασιμότητα, καθώς και ελαφρώς μικρότερα ποσοστά αέρα.

Σε γενικές γραμμές, η επίδραση του συνδυασμού της τροποποίησης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος εμφανίζει τις ίδιες τάσεις με την περίπτωση των μη τροποποιημένων ινών.

4.4.6. Δοκιμές θλίψης

4.4.6.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Θλίψης

Οι δοκιμές θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε Toni Technik μηχανή με μέγιστο φορτίο 3000 kN (Εικόνα 3.3) σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-3:2002 [27]. Τα δοκίμια ήταν κυβικά διαστάσεων 150x150x150 mm και η ταχύτητα της δοκιμής ήταν 0.5 MPa/s. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις δοκιμές θλίψης αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 3.3.3.1.

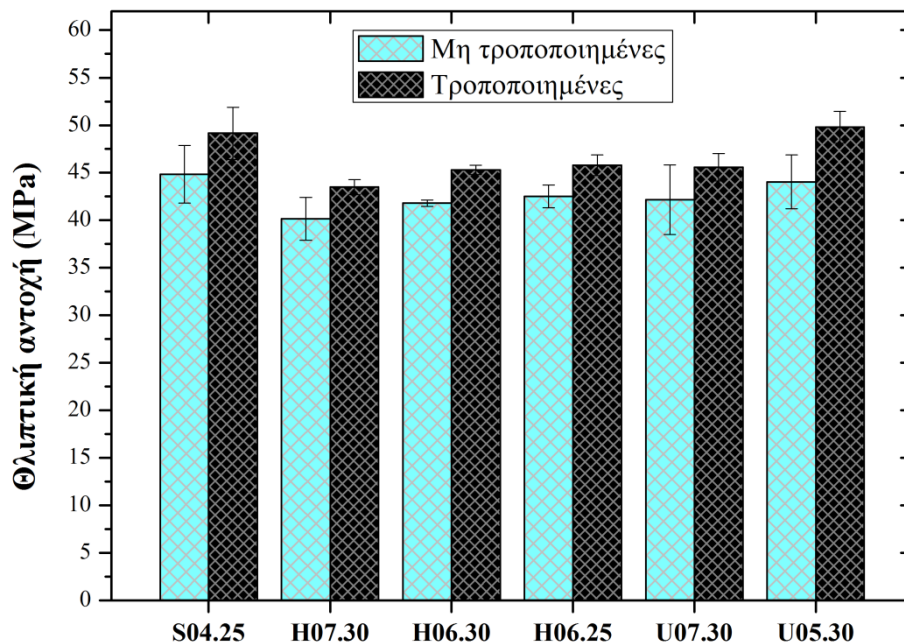
4.4.6.2. Αποτελέσματα Δοκιμής Θλίψης

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.5 και απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 4.4.1.

Πίνακας 4.4.5. Θλιπτική αντοχή τροποποιημένων ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων

| Κωδικός | Θλιπτική αντοχή (MPa) | STDEV* (MPa) |
|------------------------------------------------|------------------------------|---------------------|
| cS04.25 | 49.15 | 2.75 |
| cH07.30 | 43.49 | 0.79 |
| cH06.30 | 45.29 | 0.51 |
| cH06.25 | 45.79 | 1.09 |
| cU07.30 | 45.57 | 1.45 |
| cU05.30 | 49.79 | 1.68 |
| <i>*STDEV αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση</i> | | |

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.4.1. Θλιπτική αντοχή τροποποιημένων ινοπλισμένων 1.0% κ.ό. σκυροδεμάτων

Στην Εικόνα 4.4.1 απεικονίζεται η θλιπτική αντοχή των αναμιγμάτων με τροποποιημένες ίνες, καθώς και των αναμιγμάτων με μη τροποποιημένες του Υποκεφαλαίου 4.2 για λόγους σύγκρισης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τα τροποποιημένα ινοπλισμένα αναμίγματα παρουσιάζουν γενικά υψηλότερες θλιπτικές αντοχές σε σχέση με τα μη τροποποιημένα. Η υπεροχή των τροποποιημένων ινών έναντι των μη τροποποιημένων είναι της τάξης του 8% - 13%. Η αυξημένη θλιπτική αντοχή οφείλεται στην καλύτερη πρόσφυση των τροποποιημένων ινών με τη μήτρα. Όπως διαπιστώθηκε και στο Υποκεφάλαιο 3.3 που μελετήθηκε η ενίσχυση της διεπιφάνειας μεταξύ των συγκεκριμένων χαλύβδινων ινών και μήτρας μέσω της δοκιμής εξόλκευσης, όλες οι ίνες με την τροποποίηση αύξησαν το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης κατά 8 - 390 %. Ο μηχανισμός αστοχίας δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη ελέγχεται κατά πολύ από τη διεπιφάνεια ίνας/μήτρας, γεγονός που εξηγεί τη σταθερή βελτίωση των τιμών θλιπτικής αντοχής και στις περιπτώσεις με μικρή βελτίωση της διεπιφανειακής αντοχής.

Επιπροσθέτως, η επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στη θλιπτική αντοχή των τροποποιημένων αναμιγμάτων είναι αντίστοιχη με εκείνη των μη τροποποιημένων ινών.

4.4.7. Δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων

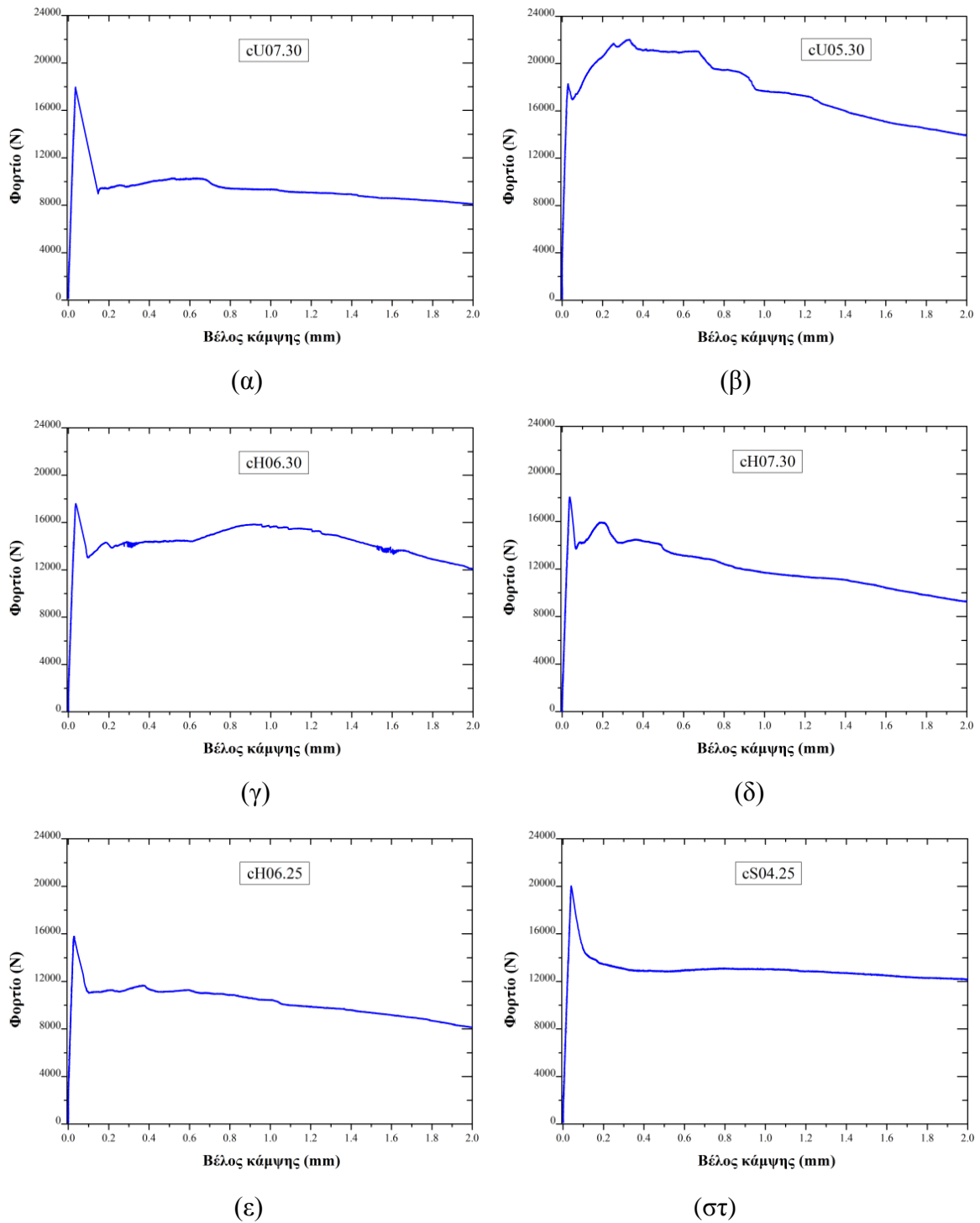
4.4.7.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Δοκιμών Κάμψης

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε είναι σερβο-υδραυλική μηχανή Instron 8801 με μέγιστη πίεση υδραυλικού συστήματος 207 bar και μέγιστο στατικό και δυναμικό φορτίο ± 100 kN. Η ταχύτητα μετατόπισης της δοκιμής ήταν 0.08 mm/min, ενώ στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα επιμηκυνσιόμετρο Instron με εύρος ± 15 mm, το οποίο τοποθετήθηκε σε ένα ζυγό (yoke) (βλ. Εικόνα 4.2.2.). Για την αποτίμηση των καμπτικών ιδιοτήτων των δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο ASTM C 1609/C 1609M - 05 [1]. Περισσότερες λεπτομέρειες αναφορικά με τη γεωμετρία των δοκιμίων, την πειραματική διάταξη και την πειραματική διαδικασία αναφέρονται στο Υποκεφάλαιο 4.1.7.1.

4.4.7.2. Αποτελέσματα Δοκιμών Κάμψης

Στην Εικόνα 4.4.2 απεικονίζονται τυπικές καμπύλες φορτίου – βέλους κάμψης για όλα τα αναμίγματα. Αντίστοιχα με τις γραφικές παραστάσεις των μη τροποποιημένων ινών, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η γεωμετρία της ίνας δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την καμπτική απόκριση μέχρι το σημείο αιχμής (P_1). Από το P_1 και έπειτα είναι όμως αρκετά διαφορετική και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών. Τα αποτελέσματα των καμπτικών ιδιοτήτων των ινοπλισμένων δοκιμίων συνοψίζονται στον Πίνακα 4.4.6. Η επίδραση της τροποποιημένης επιφάνειας των ινών, καθώς και η ταυτόχρονη επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους στις καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων απεικονίζεται ξεχωριστά στα διαγράμματα των Εικόνων 4.4.3 - 4.4.7.

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.4.2. Τυπικά διαγράμματα φορτίου - βέλους κάμψης για σκυροδέματα με τροποποιημένες ίνες 1.0% (α) cU07.30, (β) cU05.30, (γ) cH06.30, (δ) cH07.30, (ε) cH06.25, (στ) cS04.25

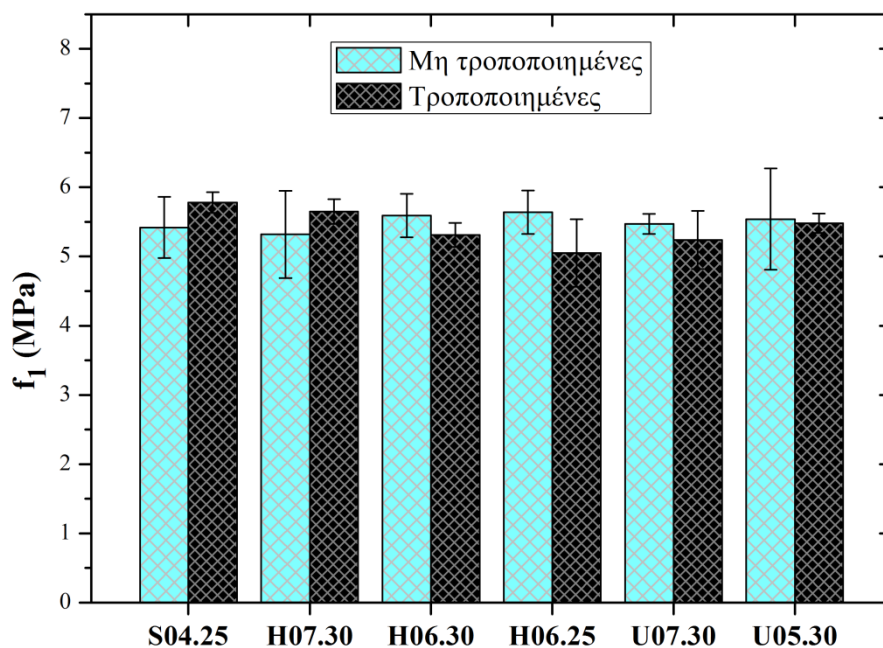
4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Πίνακας 4.4.6. Καμπτικές ιδιότητες σκυροδεμάτων με 1.0% κ.ό. τροποποιημένες ίνες

| Κωδικός | cS04.25 | cH07.30 | cH06.30 | cH06.25 | cU07.30 | cU05.30 |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| P₁ (kN) | 19.29 | 18.50 | 17.19 | 16.35 | 17.29 | 17.78 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 1.05 | 0.67 | 0.56 | 1.58 | 1.61 | 0.51 |
| P_P (kN) | 19.29 | 18.50 | 17.19 | 16.76 | 17.29 | 19.58 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 1.05 | 0.67 | 0.56 | 1.36 | 1.61 | 2.44 |
| P_{100,0.50} (kN) | 13.07 | 13.71 | 14.96 | 12.55 | 11.39 | 17.80 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 0.34 | 0.37 | 0.77 | 2.58 | 2.10 | 2.93 |
| P_{100,2.0} (kN) | 11.75 | 9.50 | 11.04 | 8.93 | 8.03 | 13.54 |
| <i>STDEV*</i> (kN) | 0.55 | 1.31 | 1.46 | 0.61 | 0.21 | 0.42 |
| f₁ (MPa) | 5.78 | 5.65 | 5.31 | 5.05 | 5.24 | 5.48 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.15 | 0.18 | 0.17 | 0.49 | 0.42 | 0.14 |
| f_P (MPa) | 5.78 | 5.65 | 5.31 | 5.18 | 5.24 | 6.04 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.15 | 0.18 | 0.17 | 0.42 | 0.42 | 0.73 |
| f_{100,0.50} (MPa) | 3.92 | 4.19 | 4.63 | 3.88 | 3.45 | 5.49 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.21 | 0.16 | 0.24 | 0.80 | 0.62 | 0.88 |
| f_{100,2.0} (MPa) | 3.52 | 2.90 | 3.41 | 2.76 | 2.43 | 4.18 |
| <i>STDEV*</i> (MPa) | 0.07 | 0.43 | 0.45 | 0.19 | 0.08 | 0.12 |
| T_{100,2.0} (J) | 25.6 | 24.5 | 27.6 | 22.3 | 20.5 | 32.2 |
| <i>STDEV*</i> (J) | 0.37 | 1.32 | 1.56 | 3.19 | 2.57 | 2.99 |

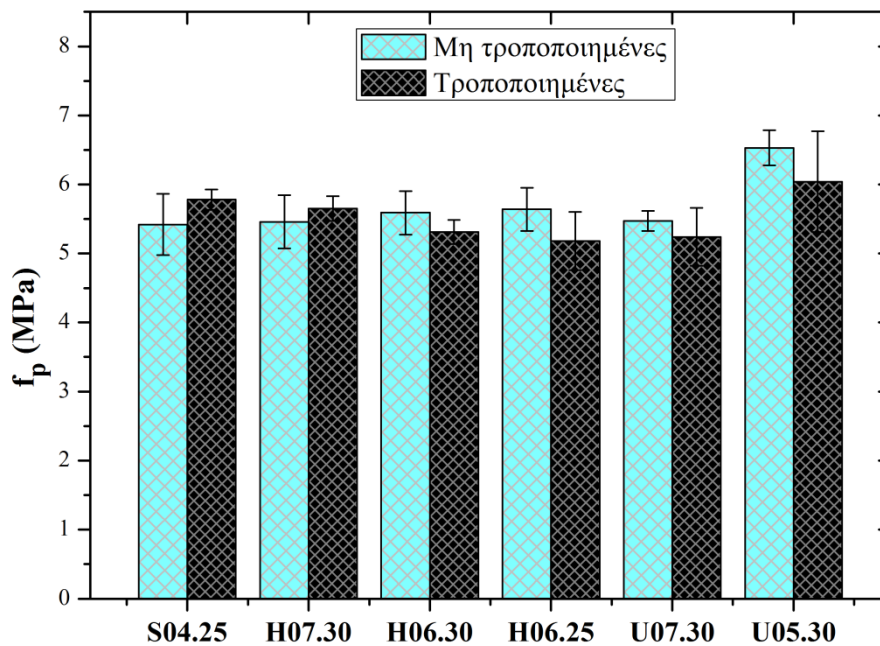
* *STDEV* αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση

Στην Εικόνα 4.4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέγιστης καμπτικής αντοχής αιχμής (f_1) για αναμίγματα τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί, όλα τα αναμίγματα εμφανίζουν κοντινές τιμές χωρίς αξιοσημείωτες διαφορές. Η τροποποίηση δεν έχει λοιπόν εμφανή επιρροή στη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής. Επιπλέον, όπως και στην περίπτωση των μη τροποποιημένων ινών, η επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στην f_1 είναι αμελητέα, αφού οι τιμές κυμαίνονται σε κοντινά επίπεδα και μέσα στο περιθώριο της τυπικής απόκλισης.



Εικόνα 4.4.3. Μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής για τα αναμίγματα τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών.

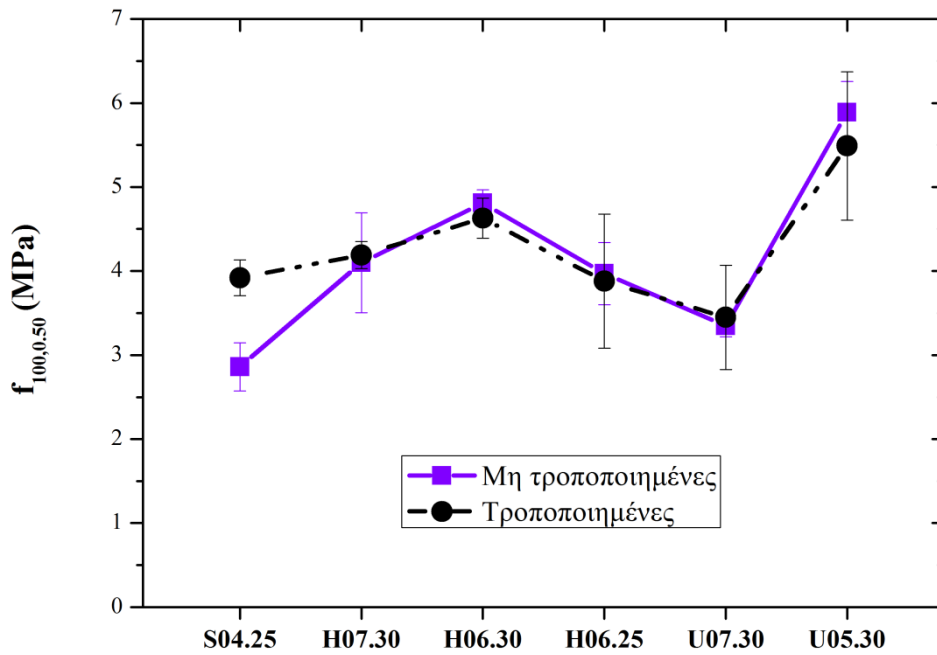
Αντίστοιχα αποτελέσματα εξάγονται και από τη μέγιστη καμπτική αντοχή (f_p) που απεικονίζεται στην Εικόνα 4.4.4. Η τροποποίηση των ινών δεν επηρεάζει εμφανώς τις τιμές (f_p) και οι όποιες αυξομειώσεις είναι στο περιθώριο της τυπικής απόκλισης. Ομοίως με τη συμπεριφορά της μέγιστης καμπτικής αντοχής των μη τροποποιημένων ινών, στις περισσότερες περιπτώσεις η μέγιστη καμπτική αντοχή (f_p) δεν εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ίνας.



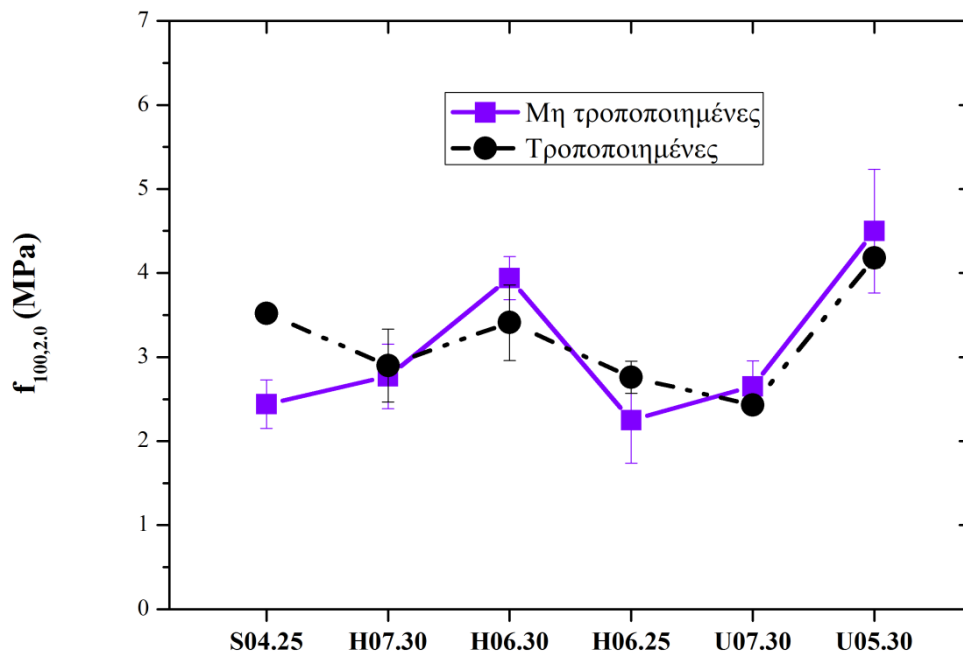
Εικόνα 4.4.4. Μέγιστη καμπτική αντοχή για τα αναμίγματα τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών.

Στις Εικόνες 4.4.5 – 4.4.6 παρουσιάζονται οι παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ των σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες. Όπως είναι ορατό, η τροποποίηση της επιφάνειας των ινών βελτίωσε τις $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ μόνο των αναμιγμάτων με ευθείες ίνες. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις ινών δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφορές και οι όποιες αυξομειώσεις υπόκεινται στο εύρος της τυπικής απόκλισης. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να συσχετισθεί με τα αποτελέσματα εξόλκευσης τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών του Υποκεφαλαίου 3.3, όπου η αύξηση του μέγιστου φορτίου εξόλκευσης ήταν της τάξης του 390% για τις ευθείες ίνες, ενώ στις υπόλοιπες ίνες κυμαινόταν από 8% - 35%. Όπως και στις δοκιμές εξόλκευσης, το συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί και για τις παραμένουσες αντοχές είναι ότι η επίδραση της χημικής τροποποίησης είναι πολύ σημαντική όπου η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας είναι απύσχα. Η βελτίωση των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ στην περίπτωση των ευθειών ινών είναι της τάξης του 37% και 44% αντίστοιχα. Η πολύ σημαντική βελτίωση των συγκεκριμένων ιδιοτήτων οδήγησε τις ευθείες ίνες να αποδίδουν την τέταρτη καλύτερη $f_{100,0.50}$ και την δεύτερη καλύτερη $f_{100,2.0}$ σε σχέση με τις υπόλοιπες ίνες.

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ίνων στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

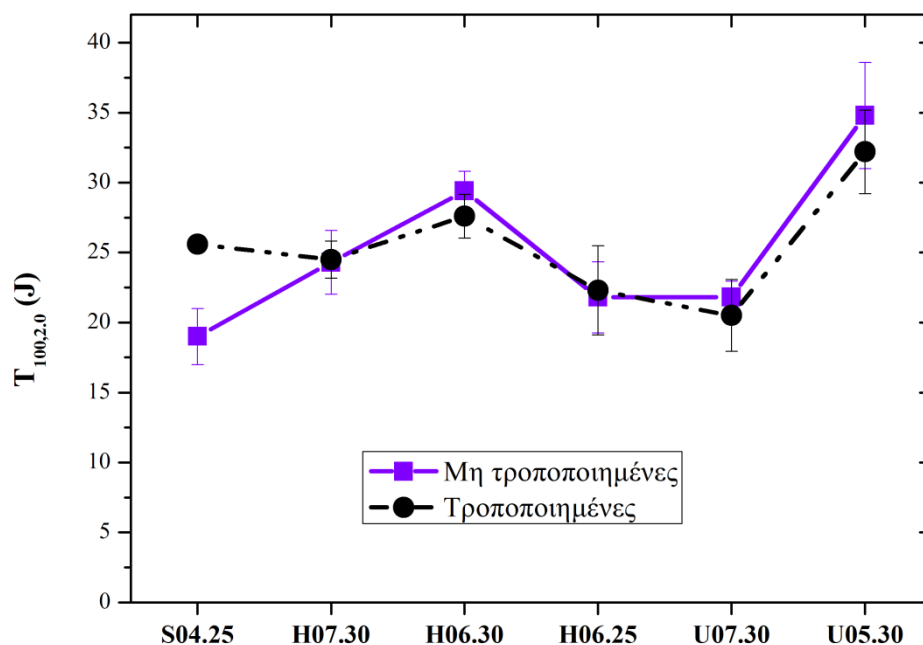


Εικόνα 4.4.5. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,0.50}$ σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες



Εικόνα 4.4.6. Παραμένουσα αντοχή $f_{100,2.0}$ σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες

Στην Εικόνα 4.4.7 απεικονίζεται η δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ των σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες. Είναι εμφανής η βελτίωση των σκυροδεμάτων με ευθείες ίνες στην ικανότητα να απορροφούν ενέργεια λόγω της χημικής τροποποίησής τους. Η αύξηση είναι της τάξης του 35% και οδήγησε τις ευθείες ίνες να αποδίδουν την τρίτη καλύτερη $T_{100,2.0}$ σε σχέση με τις υπόλοιπες ίνες. Αντιθέτως, στις υπόλοιπες περιπτώσεις ινών δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφορές και οι όποιες αυξομειώσεις έγκεινται στο εύρος της τυπικής απόκλισης. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση των παραμενουσών αντοχών, το συμπέρασμα αυτό μπορεί να συσχετισθεί άμεσα με τα συμπεράσματα του Υποκεφαλαίου 3.3, όπου διαπιστώθηκε ότι η επίδραση της χημικής τροποποίησης είναι πιο ενισχυμένη όταν η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας είναι πιο αδύναμη. Ο μηχανισμός εξόλκευσης, όπως προέκυψε και από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα του Υποκεφαλαίου 4.2 και επιβεβαιώνεται στη συνέχεια, δεν είναι ο μόνος μηχανισμός που λαμβάνει χώρα κατά την κάμψη ινοπλισμένων σκυροδεμάτων.



Εικόνα 4.4.7. Δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σκυροδεμάτων με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες

Στην Εικόνα 4.4.8 μελετάται η αλληλεπίδραση μεταξύ χημικής τροποποίησης και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών, ενώ στην Εικόνα 4.4.9 γίνεται μία προσπάθεια σύγκρισης της αλληλεπίδρασης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με την ποιότητα της διεπιφάνειας για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες. Σύμφωνα με την ανάλυση που έχει προηγηθεί (βλ. και Υποκεφάλαιο 4.2), οι παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά τη δυσθραυστότητα και την παραμένουσα αντοχή των ινών είναι το μήκος, η διάμετρος, ο λόγος μορφής, το σχήμα και η τροποποίησή τους. Η προσέγγιση που εφαρμόζεται τόσο στην περίπτωση των μη τροποποιημένων ινών όσο και στην περίπτωση των τροποποιημένων ινών είναι σημαντική διότι ενοποιεί την επιρροή όλων των γεωμετρικών παραμέτρων σε μόνο μία παράμετρο, την επιφάνεια επαφής των ινών.

Στην Εικόνα 4.4.8 ο αριστερός άξονας απεικονίζει τις κανονικοποιημένες παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ και ο δεξιά άξονας την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα για όλα τα αναμίγματα. Η κανονικοποίηση πραγματοποιήθηκε, όπως και στην περίπτωση των μη τροποποιημένων ινών, διαιρώντας τις τιμές των $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ και $T_{100,2.0}$ με τον αντίστοιχο αριθμό ινών (N) κάθε δοκιμίου. Ο άξονας x αντιστοιχεί στην επιφάνεια επαφής των ινών που ενσωματώνονται στο δοκίμιο. Όπως είναι ορατό από το διάγραμμα, η κανονικοποιημένη παραμένουσα αντοχή αυξάνεται έως ένα συγκεκριμένο σημείο, ενώ μετά από το σημείο αυτό παρουσιάζεται ένα πλατό. Το σημείο αυτό αποτελεί κρίσιμο σημείο για την επιφάνεια επαφής, περαιτέρω αύξηση της οποίας δεν προωθεί επιπλέον αύξηση της παραμένουσας αντοχής. Το γεγονός αυτό ισχύει και για τους δύο κανονικοποιημένους συντελεστές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$.

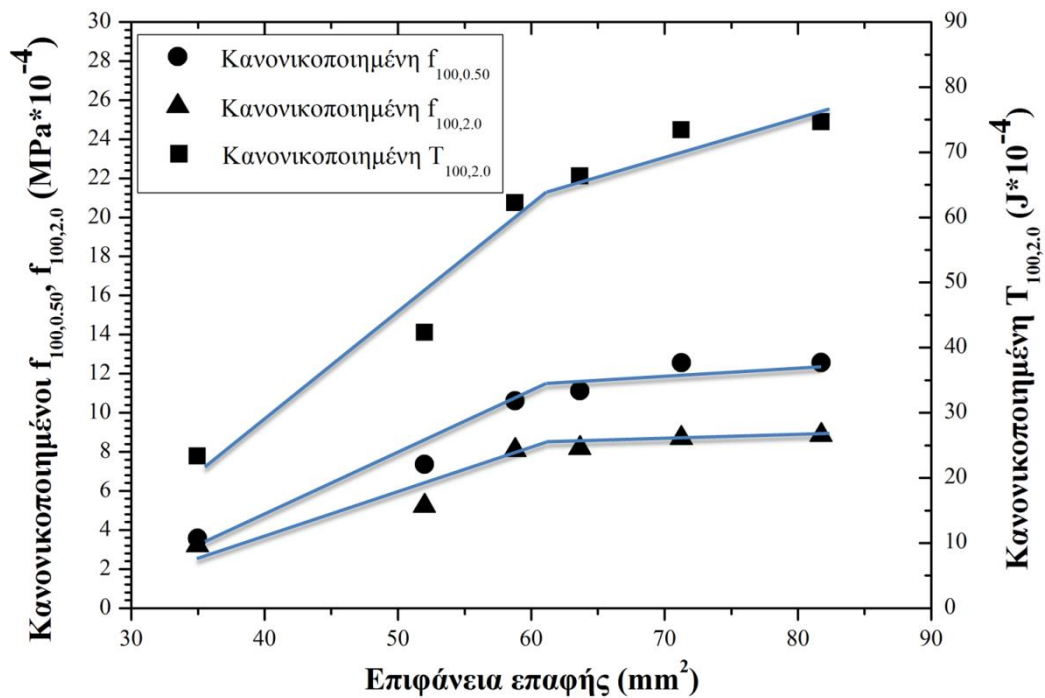
Η σχέση της κανονικοποιημένης δυσθραυστότητας με την επιφάνεια επαφής περιγράφεται από δύο κεκλιμένες ευθείες διαφορετικών κλίσεων. Η δυσθραυστότητα αυξάνεται με την επιφάνεια επαφής μέχρι ένα σημείο, από το οποίο και έπειτα αυξάνεται με την επιφάνεια επαφής, αλλά η κλίση της ευθείας είναι πιο μικρή σε σχέση με προηγουμένως. Το σημείο αυτό συμπίπτει με εκείνο που παρατηρήθηκε στις παραμένουσες αντοχές, αλλά και με το σημείο που παρατηρήθηκε στις μη τροποποιημένες ίνες (βλ. Εικόνα 4.2.12). Οι δύο διαφορετικές κλίσεις, λοιπόν, που παρατηρούνται υποδεικνύουν την ύπαρξη δύο μηχανισμών που επηρεάζουν τη δυσθραυστότητα. Οι δύο μηχανισμοί είναι αυτός της εξόλκευσης της ίνας, και αυτός της γεφύρωσης των ρωγμών λόγω αλληλεπίδρασης των ινών. Αρχικά, λόγω του μεγάλου αριθμού ινών στο δοκίμιο επικρατούν και οι δύο μηχανισμοί, ενώ καθώς η επιφάνεια επαφής των ινών αυξάνει

μειώνεται ο αριθμός τους, άρα μεγαλώνει η απόστασή τους. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μείωση της αλληλεπίδρασης των ινών και της αποτελεσματικότητας γεφύρωσης ρωγμών. Το σημείο τομής των δύο ευθειών καταδεικνύει λοιπόν το βέλτιστο συνδυασμό επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο.

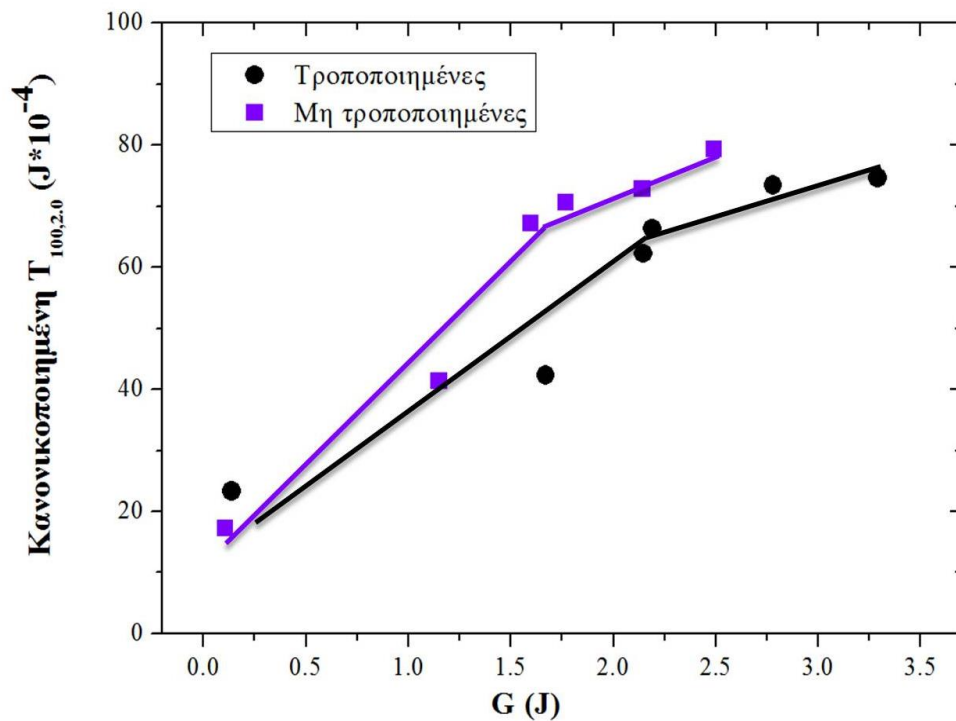
Η συμπεριφορά των κανονικοποιημένων συντελεστών $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ και της κανονικοποιημένης δυσθραυστότητας σε σχέση με την επιφάνεια επαφής είναι όμοια τόσο στην περίπτωση των τροποποιημένων όσο και των μη τροποποιημένων ινών (βλ. Υποκεφάλαιο 4.2). Το συγκεκριμένο γεγονός καταδεικνύει τη σημαντικότητα της παραμέτρου της επιφάνειας επαφής, καθώς και την έντονη επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στις καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων.

Τα συμπεράσματα που εξήχθησαν είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης των τροποποιημένων ινών, όπου η ενέργεια εξόλκευσης σχετίζεται άμεσα με την εμβαπτισμένη επιφάνεια επαφής (βλ. Υποκεφάλαιο 3.3). Όπως είναι εμφανές στην Εικόνα 4.4.9, όπου απεικονίζεται η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ σε σχέση με την ενέργεια εξόλκευσης για τις τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες, επικρατούν και στις δύο περιπτώσεις δύο κλίσεις. Είναι ορατό ότι όσο αυξάνεται η ενέργεια εξόλκευσης, αυξάνεται και η κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα, μέχρι το σημείο εκείνο όπου η δυσθραυστότητα αλλάζει κλίση σε σχέση με την ενέργεια. Το σημείο αυτό καταδεικνύει όπως και προηγουμένως τους δύο μηχανισμούς, της εξόλκευσης και της αλληλεπίδρασης των ινών, οι οποίοι δρουν συνεργατικά. Η ίδια τάση εμφανίζεται και στις δύο περιπτώσεις ινών, γεγονός που υποδεικνύει την έντονη επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών.

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



Εικόνα 4.4.8. Επιφάνεια επαφής τροποποιημένων ινών σε σχέση με τους κανονικοποιημένους συντελεστές $T_{100,2.0}$, $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$



Εικόνα 4.4.9. Ενέργεια εξόλκευσης σε σχέση με την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα $T_{100,2.0}$ για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες

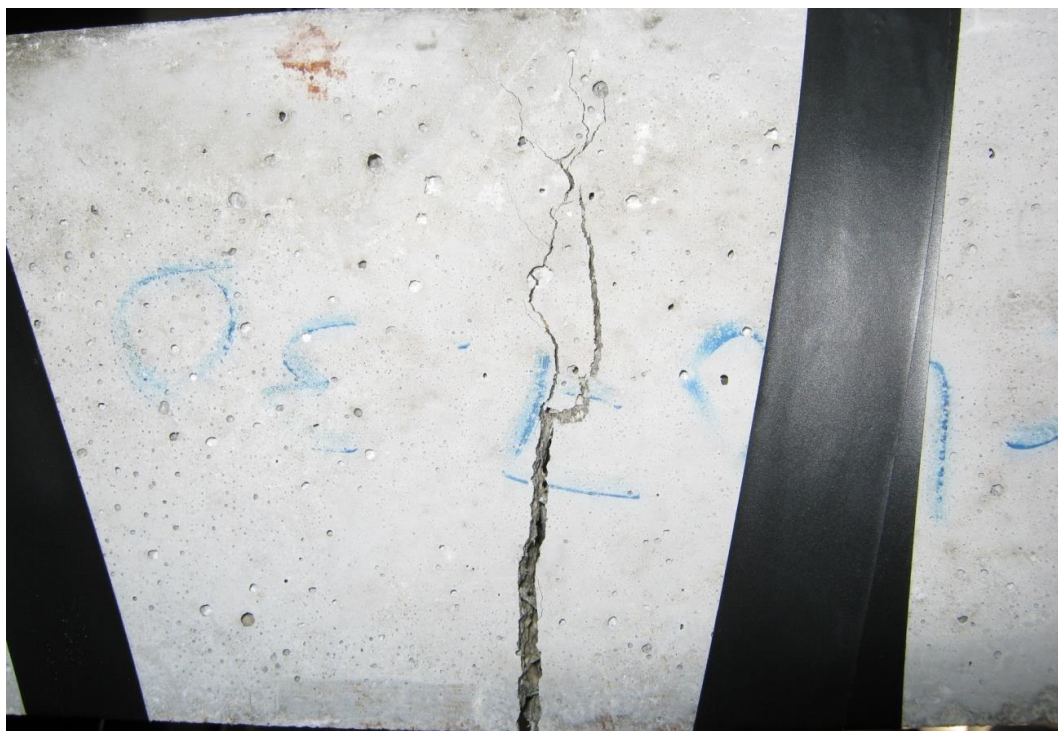
4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

Στην Εικόνα 4.4.10 παρουσιάζονται δοκίμια με τροποποιημένες ευθείες, με κεκαμένα άκρα και κυματοειδείς ίνες μετά από τη δοκιμή κάμψης. Από οπτική παρατήρηση των δοκιμίων, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι στα δοκίμια με ευθείες ίνες η κύρια ρωγμή δεν συνοδεύεται από δευτερεύουσες ρωγμές, όπως ισχύει στην περίπτωση των υπόλοιπων ινών, γεγονός που συνάδει άμεσα με τη γεωμετρία τους, αφού το ίδιο έχει παρατηρηθεί και στα δοκίμια με μη τροποποιημένες ίνες.



(α)

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος



(β)



(γ)

Εικόνα 4.4.10. Δοκίμια μετά από τη δοκιμή κάμψης με α) ευθείες, β) κεκαμμένα άκρα, γ) κυματοειδείς τροποποιημένες ίνες

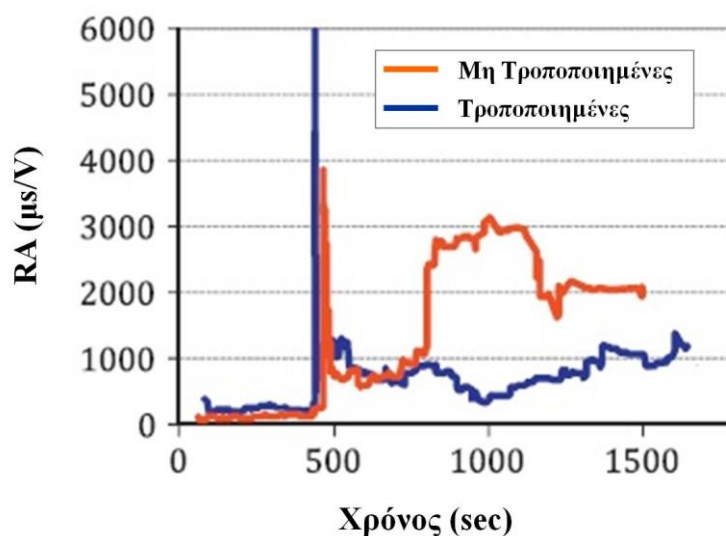
4.4.8. Ακουστική Εκπομπή

4.4.8.1. Πειραματική Διάταξη - Διαδικασία Ακουστικής Εκπομπής

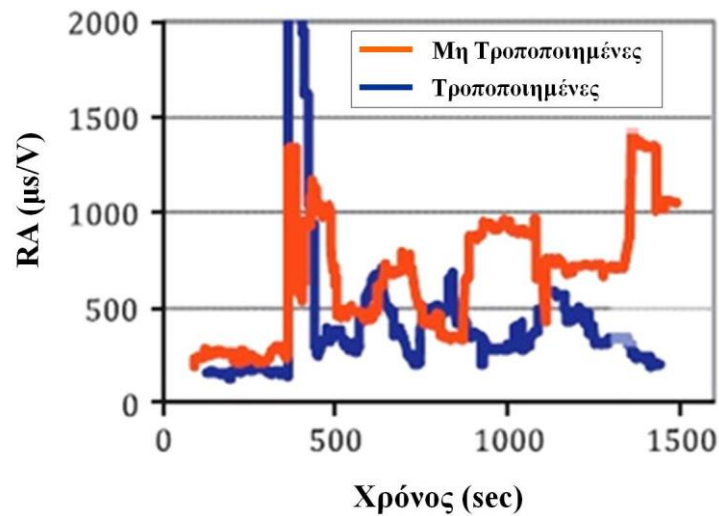
Παράλληλα με τις δοκιμές κάμψης εφαρμόστηκε και η μέθοδος της ΑΕ. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δύο αισθητήρες ΑΕ (Pico, PAC) ευρείας ζώνης (broadband), οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην κάτω πλευρά του δοκιμίου (βλ Εικόνα 4.2.2). Τα ακουστικά σήματα καταγράφηκαν από μία ηλεκτρονική κάρτα δύο καναλιών (PCI-2, PAC) και ο ρυθμός δειγματοληψίας ορίστηκε στα 5 MHz.

4.4.8.2. Αποτελέσματα Ακουστικής Εκπομπής

Στην Εικόνα 4.4.11 (α, β) απεικονίζεται η παράμετρος RA σε σχέση με το χρόνο για δοκίμια με τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ευθείες ($l/d=62.5$) και κυματοειδείς ίνες ($l/d=42.9$). Σημαντικές διαφορές στην παράμετρο RA παρατηρούνται στην Εικόνα 4.4.11 (α), όπου μετά τη ρωγή οι τιμές της RA στις μη τροποποιημένες ίνες εμφανίζονται πολύ υψηλότερες σε σχέση με τις τροποποιημένες. Αντίθετα, στις κυματοειδείς ίνες οι τιμές RA, ενώ εμφανίζονται κάπως πιο αυξημένες από τις αντίστοιχες των τροποποιημένων, δεν παρουσιάζουν τόσο διακριτή διαφορά (Εικόνα 4.4.11 (β)).



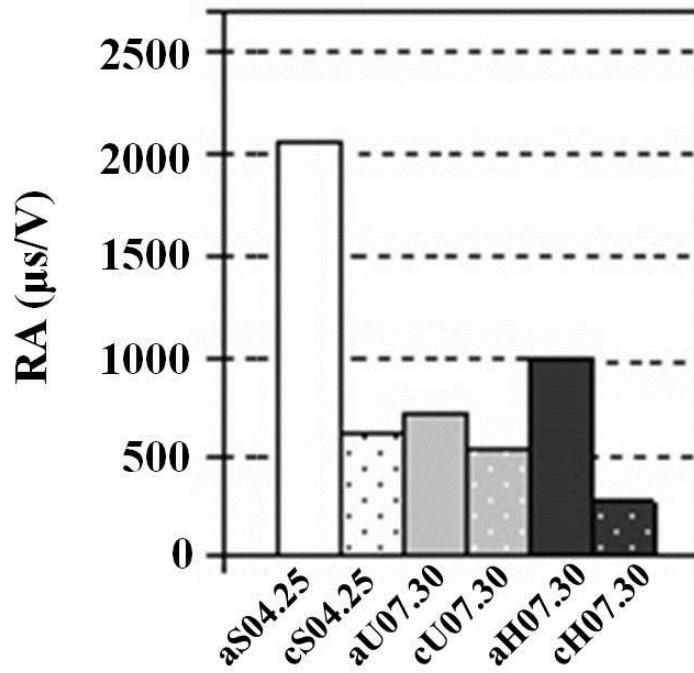
(α)



(β)

Εικόνα 4.4.11. Παράμετρος RA σε σχέση με το χρόνο για (α) ευθείες και (β) κυματοειδείς ίνες

Στην Εικόνα 4.4.12 απεικονίζεται η τιμή RA των τριών διαφορετικών σχημάτων των τροποποιημένων και μη τροποποιημένων ινών (ευθείες, κυματοειδείς και με κεκαμένα άκρα) για τη χρονική περίοδο μετά τη ρωγμάτωση. Όπως είναι ορατό, οι τροποποιημένες ίνες εμφανίζουν διαφορές στις τιμές RA σε σχέση με τις μη τροποποιημένες, στην περίπτωση, όμως, των ευθειών ινών η διαφορά είναι πολύ πιο έντονη σε σχέση με τις υπόλοιπες ίνες. Η μείωση της τιμής RA στις τροποποιημένες ίνες μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η συνάφεια μεταξύ ίνας/μήτρας είναι πιο ενισχυμένη λόγω της τροποποίησης. Η μικρότερη διαφορά παρουσιάζεται στην περίπτωση των κυματοειδών ινών. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του Υποκεφαλαίου 3.3 και του Υποκεφαλαίου 4.4.7. Πιο συγκεκριμένα, στις δοκιμές εξόλκευσης οι ευθείες ίνες με την επίδραση της τροποποίησης του φωσφορικού ψευδαργύρου εμφάνισαν τη μεγαλύτερη αύξηση στο φορτίο εξόλκευσης, ενώ οι κυματοειδείς (U07.30) τη μικρότερη βελτίωση. Αντίστοιχα στο Υποκεφάλαιο 4.4.7, οι παραμένουσες αντοχές και η καμπτική δυσθραυστότητα βελτιώθηκαν μόνο στα αναμίγματα με ευθείες ίνες.



Εικόνα 4.4.12. Παράμετρος RA για τροποποιημένες και μη τροποποιημένες ίνες διαφορετικής γεωμετρίας για τη χρονική περίοδο μετά τη ρωγμάτωση

4.4.9. Συμπεράσματα Υποκεφαλαίου

Στο συγκεκριμένο Υποκεφάλαιο ερευνάται η επίδραση της τροποποίησης των ινών στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων. Επιπλέον, μελετάται και η επίδραση της τροποποίησης των ινών και στις δοκιμές του νωπού σκυροδέματος, όπως ερευνήθηκε μέσω της δοκιμής κάθισης, της δοκιμής Vebe και της δοκιμής περιεκτικότητας του αναμίγματος σε αέρα.

Αναφορικά με τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, δεν υπάρχει ιδιαίτερη επιρροή της τροποποίησης των ινών, με τα αναμίγματα με μη τροποποιημένες ίνες να εμφανίζουν λίγο πιο βελτιωμένη εργασιμότητα, καθώς και ελαφρώς μικρότερα ποσοστά αέρα σε σχέση με τα αναμίγματα με τροποποιημένες ίνες.

Σχετικά με τη θλιπτική αντοχή, οι τροποποιημένες ίνες προσδίδουν λίγο υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις μη τροποποιημένες, λόγω της καλύτερης πρόσφυσης των τροποποιημένων ινών με τη μήτρα και του ρόλου της διεπιφάνειας στη θλιπτική αστοχία.

Η τροποποίηση δεν έχει εμφανή επίδραση στη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και στη μέγιστη καμπτική αντοχή όλων των αναμιγμάτων. Στην περίπτωση, όμως, των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας, όπου η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας είναι απύσα (ευθείες ίνες), η επίδραση της χημικής τροποποίησης είναι πολύ σημαντική. Η σημαντική αυτή επίδραση της τροποποίησης στις ευθείες ίνες επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της Ακουστικής Εκπομπής.

Το γεγονός ότι η συμπεριφορά των κανονικοποιημένων συντελεστών $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ και της κανονικοποιημένης δυσθραυστότητας σε σχέση με την επιφάνεια επαφής είναι όμοια τόσο στην περίπτωση των τροποποιημένων όσο και των μη τροποποιημένων ινών, καταδεικνύει τη σημαντικότητα της παραμέτρου της επιφάνειας επαφής, καθώς και την έντονη επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών στις καμπτικές ιδιότητες των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων.

Οι κανονικοποιημένες τιμές της παραμένουσας αντοχής και δυσθραυστότητας ως συνάρτηση της επιφάνειας επαφής επιβεβαίωσαν, όπως και στο Υποκεφάλαιο 4.2, ότι εκτός από την εξόλκευση ινών επικρατεί και ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών και βάσει αυτού μπορεί να εξαχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός επιφάνειας επαφής και αριθμού τροποποιημένων ινών στο δοκίμιο για βέλτιστη

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

δυσθραυστότητα. Οι δύο αυτοί μηχανισμοί καταδεικνύονται, επίσης, και από τη συσχέτιση της κανονικοποιημένης δυσθραυστότητας με την ενέργεια εξόλκευσης κάθε τροποποιημένης και μη τροποποιημένης ίνας.

4.4.10. Βιβλιογραφία Υποκεφαλαίου

1. ASTM Standard C 1609/C 1609M - 05. Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading) (2006). ASTM International, West Conshohocken, PA
2. Jalal M (2012) Compressive strength enhancement of concrete reinforced by waste steel fibers utilizing nano SiO₂. Middle-East Journal of Scientific Research 12 (3):382-391
3. Kayali O (2004) Effect of high volume fly ash on mechanical properties of fiber reinforced concrete. Materials and Structures 37 (5):318-327
4. Köksal F, Altun F, Yiğit İ, Şahin Y (2008) Combined effect of silica fume and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. Construction and Building Materials 22 (8):1874-1880
5. Nili M, Afroughsabet V (2010) Combined effect of silica fume and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. International Journal of Impact Engineering 37 (8):879-886
6. Patel I, Modhera CD (2010) Study basic properties of fiber reinforced high volume fly ash concrete. Journal of Engineering Research and Studies I (I):60-70
7. Pawade PY, Nagarnaik PB, Pande AM (2011) Performance of steel fiber on standard strength concrete in compression. International Journal of Civil & Structural Engineering 2 (2):483-492
8. Sounthararajan VM, Sivakumar A (2012) The Effect of Accelerators and Mix Constituents on the High Early Strength Concrete Properties. ISRN Civil Engineering 2012:7 pages
9. Wang A, Deng M, Sun D, Mo L, Wang J, Tang M (2011) Effect of combination of steel fiber and MgO-type expansive agent on properties of concrete. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed. 26 (4):786-790

10. Wegian FM, Alanki AA, Alsaeid HM, Alotaibi FA, Al-Mitairi MS, Kandari FA (2011) Influence of fly ash on behavior of fibres reinforced concrete structures. *Journal of Applied Sciences* 11 (17):3185-3191
11. Yan H, Sun W, Chen H (1999) The effect of silica fume and steel fiber on the dynamic mechanical performance of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research* 29 (3):423-426
12. Fu X, Lu W, Chung DDL (1996) Improving the bond strength between carbon fiber and cement by fiber surface treatment and polymer addition to cement mix. *Cement and Concrete Research* 26 (7):1007-1012
13. Lovata NL, Fahmy MF (1987) Interfacial bond study of a chemically treated polypropylene fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 1 (2):83-87
14. Sugama T, Carciello N, Kukacka LE, Gray G (1992) Interface between zinc phosphate-deposited steel fibres and cement paste. *Journal of Materials Science* 27 (11):2863-2872
15. Sun M, Wen D-J, Wang H-W (2012) Influence of corrosion on the interface between zinc phosphate steel fiber and cement. *Materials and Corrosion* 63 (1):67-72
16. Xu Y, Chung DDL (1999) Carbon fiber reinforced cement improved by using silane-treated carbon fibers. *Cement and Concrete Research* 29 (5):773-776
17. Lu W, Fu X, Chung DDL (1998) A comparative study of the wettability of steel, carbon, and polyethylene fibers by water. *Cement and Concrete Research* 28 (6):783-786
18. Maage M (1977) Steel fiber bond strengths in cement-based matrixes influenced by surface treatments. *Cement and Concrete Research* 7 (6):703-709
19. Sun M, Wen DJ, Xie P (2011) Bending toughness of zinc phosphate steel fiber reinforced concrete before and after corrosion. *Advanced Materials Research* 168-170:1762-1766

4.4. Επίδραση της Χημικής Τροποποίησης των Ινών στις Καμπτικές και Θλιπτικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

20. ASTM Standard C 128 - 01e1 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
21. ASTM Standard C 127 - 01. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
22. ASTM Standard C 136 - 01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (2001). ASTM International, West Conshohocken, PA
23. ASTM Standard C 192/C 192M - 98. Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory (1998). ASTM International, West Conshohocken, PA
24. ASTM Standard C 143/C 143M - 03. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
25. BS EN 12350-3:2000 Testing Fresh Concrete - Part 3: Vebe Test (2000). British Standards Institution
26. ASTM Standard C 231 - 03 Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method (2003). ASTM International, West Conshohocken, PA
27. BS EN 12390-3:2002 Testing Hardened Concrete - Part 3: Compressive Strength of Test Specimens (2002). British Standard Institution

Κεφάλαιο 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή μελετήθηκαν οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με ίνες χάλυβα. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού, αρχικά ερευνήθηκε η διεπιφάνεια ίνας/μήτρας κονιάματος μέσω δοκιμών εξόλκευσης χρησιμοποιώντας ίνες διαφόρων γεωμετριών, τροποποιημένων με διάλυμα φωσφορικού ψευδαργύρου και μη τροποποιημένων. Επιπλέον στόχο αποτέλεσε και η μελέτη της επίδρασης της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στη συμπεριφορά εξόλκευσης. Στη συνέχεια, διερευνήθηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες του σκληρυμένου ινοπλισμένου σκυροδέματος, καθώς και στις ιδιότητες του νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, μελετήθηκε η επίδραση της ποιότητας της μήτρας, μέσω της διαφοροποίησης του λόγου N/T, των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών, καθώς και της χημικής τροποποίησης τους.

Συγκεκριμένα, στο Κεφάλαιο 3 που παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εξόλκευσης, εξάχθηκε το συμπέρασμα ότι το μέγιστο φορτίο και η ενέργεια εξόλκευσης βελτιώνεται με την αύξηση του μήκους εξόλκευσης και της διαμέτρου των ινών. Επιπλέον, το κυματοειδές σχήμα αποδείχτηκε το αποδοτικότερο σε σχέση με τις ευθείες και τις ίνες με κεκαμένα άκρα.

Σχετικά με τη χημική τροποποίηση διαπιστώθηκε ότι όσο πιο αδύναμη είναι η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της χημικής συνάφειας και ως εκ τούτου, ειδικά στην περίπτωση των ευθειών ινών, αποδείχθηκε εξαιρετικά αποτελεσματική. Επίσης, οδήγησε σε σημαντική αύξηση του μέγιστου φορτίου, της διεπιφανειακής διατμητικής αντοχής, καθώς και της ενέργειας που απαιτήθηκε για την εξόλκευση της ίνας από τη μήτρα.

Με στόχο την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης κατά την εξόλκευση, ο βέλτιστος τύπος ίνας μπορεί να επιλεγεί βάσει του εμβαδού της επιφάνειας επαφής, δεδομένου ότι το μέγιστο φορτίο και η ενέργεια εξόλκευσης σχετίζονται άμεσα με αυτή την παράμετρο.

Παρατηρήθηκε επίσης ότι ίνες που σε πιο ιδανικές συνθήκες είναι πολύ αποτελεσματικές, σε συνθήκες που επιδρούν και άλλοι παράγοντες, όπως ο αριθμός των ινών στη μήτρα, εμφανίζουν πιο μειωμένη αποτελεσματικότητα.

Στο Υποκεφάλαιο 4.1, που μελετήθηκε η επιρροή του λόγου N/T στις ιδιότητες του σκυροδέματος με 1.0% ίνες και του άοπλου σκυροδέματος, διαπιστώθηκε γενικά αύξηση

της εργασιμότητας στα ινοπλισμένα αναμίγματα στις δοκιμές κάθισης και μικρή μείωση του ποσοστού αέρα των αναμιγμάτων, με την αύξηση του λόγου N/T.

Παρατηρήθηκε, επιπλέον, ότι η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται στις συνθέσεις άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος έχει πολύ σημαντική επίδραση στη θλιπτική αντοχή, καθώς αύξηση του λόγου N/T μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη μείωση της. Αύξηση του λόγου N/T συντέλεσε σε μείωση της μέγιστης καμπτικής αντοχής αιχμής και της μέγιστης καμπτικής αντοχής των αναμιγμάτων, ανεξαρτήτως ύπαρξης ινών, αλλά η επίδραση δεν είναι τόσο έντονη συγκριτικά με την περίπτωση της θλιπτικής αντοχής.

Σε γενικές γραμμές, ο λόγος N/T δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τις παραμένουσες αντοχές $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$. Η καμπτική δυσθραυστότητα, επίσης, δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από το λόγο N/T, γεγονός που υποδεικνύει ότι εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες των ινών και όχι τόσο από την ποιότητα της μήτρας, δεδομένου ότι τα δοκίμια με ίνες κατόρθωσαν να διατηρήσουν τις τιμές της ακόμα και στους πολύ υψηλούς λόγους N/T.

Στο Υποκεφάλαιο 4.2 ερευνήθηκε ο ρόλος των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στις θλιπτικές και καμπτικές ιδιότητες και στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος με 1.0% ίνες. Από τις δοκιμές κάθισης παρατηρήθηκε ότι η εργασιμότητα επηρεάζεται από το σχήμα και το μήκος της ίνας, ενώ η διάμετρός της δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των αναμιγμάτων σε αέρα επηρεάζεται από το μήκος και το σχήμα των ινών.

Εξάχθηκε ακόμη το συμπέρασμα ότι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών δεν έχουν σημαντική επιρροή στη θλιπτική αντοχή και στη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής των ινοπλισμένων αναμιγμάτων. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένες ιδιότητες επηρεάζονται επί το πλείστον από την ποιότητα της μήτρας.

Η καμπτική δυσθραυστότητα και η παραμένουσα αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος διαπιστώθηκε ότι εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ινών με παρόμοιο τρόπο. Γενικά, αναφορικά με ίνες ίδιου σχήματος και μήκους, μείωση της διαμέτρου της ίνας οδήγησε σε αύξηση της δυσθραυστότητας και της παραμένουσας αντοχής. Επίσης, αύξηση του μήκους της ίνας (για ίνες ίδιου σχήματος και διαμέτρου) συνέβαλλε σε βελτίωση των τιμών των παραμέτρων αυτών. Επιπλέον, σημαντική αύξηση της δυσθραυστότητας και της παραμένουσας αντοχής παρατηρήθηκε με αύξηση του λόγου μορφής των παραμορφωμένων ινών.

Από τη συσχέτιση της επιφάνειας επαφής της ίνας με την κανονικοποιημένη παραμένουσα αντοχή και την κανονικοποιημένη δυσθραυστότητα, κατέστη εμφανές ότι

εκτός από την εξόλκευση ινών επικρατεί και ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών. Βάσει αυτού μπορεί να εξαχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός επιφάνειας επαφής και αριθμού ινών στο δοκίμιο για βέλτιστη δυσθραυστότητα.

Στο Υποκεφάλαιο 4.3 μελετήθηκε η επίδραση της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών στις μηχανικές ιδιότητες και στη νωπή κατάσταση του σκυροδέματος. Αναφορικά με το νωπό σκυρόδεμα, διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη των χαλύβδινων ινών μείωσε την τιμή της κάθισης σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Όλα τα ινοπλισμένα αναμίγματα παρουσίασαν ικανοποιητική εργασιμότητα, δίχως να υπάρχει κάποια σαφής τάση για την επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα, λόγω του γεγονότος ότι η ποσότητα του υπερρευστοποιητή διαμορφώθηκε ανάλογα.

Επιπλέον, συμπεραίνεται ότι δεν υπάρχει εμφανής τάση στη θλιπτική αντοχή από τη μεταβολή της κατ' όγκον περιεκτικότητας των ινών, με τις διακυμάνσεις να αποδίδονται στα κενά που δημιουργούνται στη μήτρα, λόγω συμπύκνωσης. Για το λόγο αυτό, παρατηρήθηκε ότι ανεξαρτήτως του ποσοστού ινών, ίνες με μικρότερο μήκος και διάμετρο προσδίδουν υψηλότερες θλιπτικές αντοχές.

Διαπιστώθηκε ακόμη ότι οι ίνες σε υψηλά ποσοστά κ.ό. επηρεάζουν θετικά τη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και τη μέγιστη καμπτική αντοχή σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, ενώ σε χαμηλότερα ποσοστά μπορούν να μην επηρεάσουν τις τιμές τους καθόλου ή και να παρουσιαστεί μικρή πτώση τους.

Επισημάνθηκε, ως γενική τάση, αύξηση των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων με την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών. Αντιθέτως, το άοπλο σκυρόδεμα μετά το μέγιστο φορτίο διαχωρίζεται σε δύο κομμάτια. Επιπλέον, δεν υπάρχει ιδιαίτερη βελτίωση των παραμενουσών αντοχών και της δυσθραυστότητας με επιπλέον αύξηση του ποσοστού ινών κ.ό. μετά από ένα κρίσιμο σημείο. Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι ίνες που αποδεικνύονται αποδοτικότερες σε υψηλότερα ποσοστά σε σχέση με άλλες, σε μικρότερα ποσοστά ήταν λιγότερο αποτελεσματικές.

Σχετικά με την εφαρμογή της μεθόδου της Ακουστικής Εκπομπής, παρατηρήθηκε ότι η ακουστική δραστηριότητα ήταν ανάλογη με την καμπτική δυσθραυστότητα και την κατ' όγκον περιεκτικότητα των ινών, ενώ σύμφωνα με την παράμετρο RA, συμπεραίνεται ότι αύξηση του ποσοστού ινών κ.ό. οδηγεί στην εμφάνιση περισσότερων διατμητικών «συμβάντων».

Ακόμη, διαπιστώθηκε περαιτέρω, η πολύ σημαντική επιρροή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στην παραμένουσα αντοχή και τη δυσθραυστότητα των ινοπλισμένων σκυροδεμάτων, καθώς και ότι η γνώση των παραγόντων και του τρόπου που επηρεάζονται οι μηχανικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος από τις ίνες μπορεί να μειώσει πολύ τον οικονομικό προϋπολογισμό μίας κατασκευής, δεδομένου ότι διαφορετικά θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατά πολύ μεγαλύτερες ποσότητες ινών για να επιτευχθούν οι επιθυμητές τιμές των ιδιοτήτων.

Στο Υποκεφάλαιο 4.4 ερευνήθηκε η επίδραση της τροποποίησης των ινών στις καμπτικές και θλιπτικές ιδιότητες, καθώς και στις ιδιότητες του νωπού ινοπλισμένου σκυροδέματος. Δεν υπάρχει ιδιαίτερη επιρροή της τροποποίησης των ινών στις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, με τα αναμίγματα των μη τροποποιημένων ινών να παρουσιάζουν λίγο πιο βελτιωμένη εργασιμότητα, καθώς και ελαφρώς μικρότερα ποσοστά αέρα σε σχέση με τα αναμίγματα των τροποποιημένων ινών.

Οι τροποποιημένες ίνες προσδίδουν ελαφρώς υψηλότερες τιμές θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τις μη τροποποιημένες, λόγω της καλύτερης πρόσφυσης των τροποποιημένων ινών με τη μήτρα και του ρόλου της διεπιφάνειας στη θλιπτική αστοχία.

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η τροποποίηση δεν έχει εμφανή επίδραση στη μέγιστη καμπτική αντοχή αιχμής και στη μέγιστη καμπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Όμως, αναφορικά με τις παραμένουσες αντοχές και την καμπτική δυσθραυστότητα, όπου είναι ανύπαρκτη η μηχανική πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας (ευθείες ίνες), η επίδραση της χημικής τροποποίησης είναι πολύ σημαντική. Τα αποτελέσματα της Ακουστικής Εκπομπής επιβεβαιώνουν αυτή τη σημαντική επίδραση της τροποποίησης στις συγκεκριμένες ίνες.

Η έντονη επίδραση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των ινών στις καμπτικές ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος, καθώς και η σπουδαιότητα της παραμέτρου της επιφάνειας επαφής, καταδεικνύεται και από την όμοια συμπεριφορά των κανονικοποιημένων συντελεστών $f_{100,0.50}$ και $f_{100,2.0}$ και της κανονικοποιημένης δυσθραυστότητας σε σχέση με την επιφάνεια επαφής τόσο στην περίπτωση των τροποποιημένων όσο και των μη τροποποιημένων ινών.

Από την κανονικοποίηση των τιμών της παραμένουσας αντοχής και της δυσθραυστότητας συναρτήσεως της επιφάνειας επαφής υποδεικνύεται ότι εκτός από την εξόλκευση ινών υπάρχει και ο μηχανισμός της αλληλεπίδρασης των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών. Βάσει αυτού μπορεί να εξαχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός αριθμού

τροποποιημένων ινών στο δοκίμιο και επιφάνειας επαφής, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη δυσθραυστότητα. Η ύπαρξη των δύο μηχανισμών καταδείχθηκε επίσης και από τη συσχέτιση της κανονικοποιημένης δυσθραυστότητας με την ενέργεια εξόλκευσης κάθε ίνας.

Κεφάλαιο 6

ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ/ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ/ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΕΙΣ

6.1. Λίστα Δημοσιεύσεων σε Επιστημονικά Περιοδικά

1. "The Effect of Fibre Chemical Treatment on the Steel Fibre/Cementitious Matrix Interface".
D.V. Soulioti, N.-M. Barkoula, F. Koutsianopoulos, N. Charalambakis, T. E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol. 40, pp. 77-83, (2013).
2. "Monitoring of the Mechanical Behavior of Concrete with Chemically Treated Steel Fibers by Acoustic Emission".
D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, E. Gatselou, N.-M. Barkoula, T.E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol 48, pp. 1255-1260, (2013).
3. "Influence of Fiber Chemical Coating on the Acoustic Emission Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete".
D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, *Cement and Concrete Composites*, vol. 34(1), pp. 62–67 (2012).
4. "Effects of Fibre Geometry and Volume Fraction on the Flexural Behaviour of Steel-Fibre Reinforced Concrete".
D.V. Soulioti, N.M. Barkoula, A. Paipetis, T.E. Matikas, *Strain*, vol. 47(SUPPL. 1), pp. e535-e541, (2011).
5. "Acoustic Emission Characterization of the Fracture Process in Fibre Reinforced Concrete".
D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, N. Sapouridis, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol. 25(11), pp. 4126-4131, (2011).
6. "NDT Approach for Characterization of Subsurface Cracks in Concrete".
D.G. Aggelis, E.Z. Kordatos, M. Strantza, **D.V. Soulioti**, T.E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol. 25(7), pp. 3089-3097, (2011).
7. "Acoustic Emission Monitoring of Steel-Fiber Reinforced Concrete Beams under Bending".
D.G. Aggelis, **D. Soulioti**, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, T. Shiotani, *Journal of Acoustic Emission*, vol. 28, pp. 32-40, (2010).
8. "Combined Use of Thermography and Ultrasound for the Characterization of Subsurface Cracks in Concrete".

- D.G. Aggelis, E.Z. Kordatos, **D.V. Soulioti**, T.E. Matikas, *Construction and Building Materials*, vol. 24(10), pp. 1888-1897, (2010).
9. "Acoustic Emission Behavior of Steel Fibre Reinforced Concrete under Bending". **D. Soulioti**, N.M. Barkoula, A. Paipetis, T.E. Matikas, T. Shiotani, D.G. Aggelis, *Construction and Building Materials*, vol. 23(12), pp. 3532-3536, (2009).
10. "Dependence of SFRC mechanical properties on the fiber geometrical characteristics".
D.V. Soulioti, A. Elka, N.-M. Barkoula, T.E. Matikas, Under submission.

6.2 Λίστα Δημοσιεύσεων/Ανακοινώσεων Συνεδρίων

11. "Combined NDT Methods for Characterization of Subsurface Cracks in Concrete". E.Z. Kordatos, M. Strantza, **D.V. Soulioti**, T.E. Matikas, D.G. Aggelis, *Proc. of the SPIE Conference on Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems*, vol. 7982, Article number 7982-33, DOI: 10.1117/12.881025, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2011).
12. "Thermography and Ultrasound for Characterizing Subsurface Defects in Concrete". E.Z. Kordatos, **D.V. Soulioti**, M. Strantza, T.E. Matikas, D.G. Aggelis, *Proc. of the NDTMS-2011*, (Istanbul, 15-18 May 2011).
13. "Effect of Fiber Surface Conditioning on the Acoustic Emission Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete". D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, E. Gatselou, N.M. Barkoula, A. Paipetis, T.E. Matikas, *Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security*, vol. 7983, Article number 7983-28, DOI: 10.1117/12.880354, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2011).
14. "Influence of the Fiber Chemical Coating on the Fracture Behavior of Steel Fiber Concrete Measured by Acoustic Emission". D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, *Proc. of the 5th International Conference on Emerging Technologies in Non-Destructive Testing (ETNDT5)*, pp 111-115, (Ioannina, Greece, September 19-21 2011).
15. "Characterization of the Damage Process in Fibre Reinforced Concrete Using Acoustic Emission Parameters".

- D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, N. Sapouridis, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, Proc. of 4th International Conference on Structural Faults & Repair-2010, (Edinburgh, UK, 15–17 June 2010).
16. "Acoustic Emission Characterization of Steel Fibre Reinforced Concrete During Bending".
D.G. Aggelis, **D.V. Soulioti**, N. Sapouridis, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, vol. 7649, Article number 764912, DOI: 10.1117/12.847396, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2010).
17. "Fracture of Fibre Reinforced Concrete Monitored by Acoustic Emission".
D.G. Aggelis, **D. Soulioti**, N. Sapouridis, N.M. Barkoula, T.E. Matikas, A. Paipetis, Proc. of the First Greek-Ukrainian Conference on Fracture Mechanics of Materials and Structures, (Xanthi, 20-23 October 2010).
18. "Χαρακτηρισμός της Θραύσης Ινοπλισμένου Σκυροδέματος με Ακουστική Εκπομπή".
Ε. Γατσέλου, Δ.Γ. Αγγέλης, **Δ.Β. Σουλιώτη**, N.M. Μπάρκουλα, Α. Παϊπέτης, Θ.Ε. Ματίκας, 7^ο Εθνικό συνέδριο ΜΚΕ της ΕΛΕΜΚΕ, (Αθήνα, 15-17 Οκτωβρίου 2010).
19. "Χρήση Θερμογραφίας και Υπερήχων για τον Χαρακτηρισμό Υπο-επιφανειακών Ρωγμών σε Σκυρόδεμα".
Μ.Α. Στράντζα, Ε.Ζ. Κορδάτος, **Δ.Β. Σουλιώτη**, Θ.Ε. Ματίκας, Δ.Γ. Αγγέλης, 7^ο Εθνικό συνέδριο ΜΚΕ της ΕΛΕΜΚΕ, (Αθήνα, 15-17 Οκτωβρίου 2010).
20. "Acoustic Emission of Steel-Fiber Concrete under Four-Point Bending".
D.G. Aggelis, **D. Soulioti**, N.M. Barkoula, A.S. Paipetis, T.E. Matikas, T. Shiotani, Proc. of the SPIE Conference on Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security, vol. 7294, Article number 729407, DOI: 10.1117/12.815202, (SPIE - The International Society for Optical Engineering, San Diego, CA, 2009).
21. "Επίδραση των Χαλύβδινων Ινών στις Μηχανικές Ιδιότητες του Ινοπλισμένου Σκυροδέματος".
Δ.Β. Σουλιώτη, Θ.Ε. Ματίκας, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, (Πάφος, Κύπρος 21-23 Οκτωβρίου 2009).
22. "Acoustic Emission Monitoring of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams under Bending Load".

- D. Soulioti**, D.G. Aggelis, N.M. Barkoula, A. Paipetis, T.E. Matikas, T. Shiotani, Proc. of the 19th Acoustic Emission Symposium (IAES-19), M. Enoki, T. Shiotani, S. Yuyama, M. Ohtsu (eds.), pp. 287-294, (Progress in Acoustic Emission XIV, Kyoto, Japan, December 9-12, 2008).
23. "Προσδιορισμός Δυσθραυστότητας και Καμπτικής Αντοχής Ινοπλισμένου Σκυροδέματος: Σύγκριση Προτύπων ASTM C1018, ASTM C1609/C1609M, JCI-SF4".
Δ. Σουλιώτη, Ν. Ζωίδης, Θ. Ματίκας, Ημερίδα «Οι Μη Καταστροφικές Μέθοδοι – Εργαλείο για τον Έλεγχο Ποιότητας των Έργων», Αναρτημένη Ανακοίνωση, (Ιωάννινα 12/12/2008).
24. "Μηχανικές ιδιότητες ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετική γεωμετρία και ποσότητα χαλύβδινων ινών".
Δ. Σουλιώτη, Θ. Ματίκας, 1^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, (ΤΕΕ, Αθήνα 21-23/5/2008).
25. "Προσδιορισμός Δυσθραυστότητας και Καμπτικής Αντοχής Ινοπλισμένου Σκυροδέματος: Σύγκριση Προτύπων ASTM C1018, ASTM C1609/C1609M, JCI-SF4".
Δ. Σουλιώτη, Θ. Ματίκας, Ημερίδα Έλεγχος Ποιότητας Σκυροδέματος με Μη Καταστροφικές Τεχνικές, (Ιωάννινα 28/11/2008).

Παράρτημα

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 1. Ειδικά βάρη και απορροφητικότητα αδρανών

| Υλικά | Ειδικά Βάρη | Απορροφητικότητα (%) |
|---------------|-------------|----------------------|
| Θραυστή Άμμος | 2.50 | 2.44 |
| Ψηφίδα | 2.61 | 1.05 |

Πίνακας 2. Ειδικά βάρη και απορροφητικότητα αδρανών

| Υλικά | Ειδικά Βάρη | Απορροφητικότητα (%) |
|---------------|-------------|----------------------|
| Θραυστή Άμμος | 2.36 | 3.96 |
| Ψηφίδα | 2.60 | 1.97 |

*Αδρανή Κεφαλαίου 4.3.3

Πίνακας 3. Φυσική υγρασία αδρανών

| Κωδικός | Φυσική Υγρασία (%) | |
|---------|--------------------|--------|
| | Θραυστή Άμμος | Ψηφίδα |
| Άοπλο | 0.5 | 0.2 |
| W05 | 0.4 | 1.2 |
| W1 | 0.8 | 0.8 |
| W15 | 0.4 | 0.2 |

*Αδρανή Κεφαλαίου 4.3.3