

## **ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑΙΝΕΣ ΙΝΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟ ΜΕ ΟΔΟΣΤΡΩΤΗΡΑ ΓΙΑ ΟΔΟΠΟΙΑ**

Χάρης Αγγελακόπουλος  
*PhD Student*

Κυριάκος Νεοκλέους  
*Senior Research Fellow*

Κύπρος Πηλακούτας  
*Professor*

*Centre for Cement & Concrete, Department of Civil & Structural Engineering, The  
University of Sheffield, UK*

*Λέξεις κλειδιά: Σκυρόδεμα συμπίεσμένο με οδοστρωτήρα, Ινοπλισμένο σκυρόδεμα,  
Ανακυκλωμένα υλικά*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εισήγηση περιγράφει τη χρήση χαλύβδινων ινών ενσωματωμένων σε σκυρόδεμα συμπίεσμένο με οδοστρωτήρα (ΣΣΟ), με σκοπό τη κατασκευή οδοστρωμάτων. Αυτή η εργασία είναι μέρος του χρηματοδοτημένου από την ΕΕ προγράμματος, «Ecolanes», το οποίο αποβλέπει στην ανάπτυξη δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με παρατεταμένη διάρκεια «ζωής». Αρχικά, παρέχονται πληροφορίες για τον προτεινόμενο τύπο σκυροδέματος και οδοστρώματος, με επιχειρήματα που επισημαίνουν τα πλεονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση του ΣΣΟ. Ο στόχος του συγκεκριμένου μέρους της εργασίας που παρουσιάζεται, είναι να εξεταστεί η επίδραση της ενσωμάτωσης ινών σε ΣΣΟ από δομική σκοπιά, και να συζητηθεί η βελτίωση της αντοχής σε κάμψη, όπως και να γίνει σχολιασμός της επιδράσεως που έχουν οι διαφορετικοί τύποι ίνας ως οπλισμός σκυροδέματος. Η ιδιαίτερη σημασία της γεωμετρίας της ίνας στην αντοχή κάμψης του ινοπλισμένου με χάλυβα ΣΣΟ καταδεικνύεται. Το ΣΣΟ που ενισχύθηκε με ίνες προερχόμενες από βιομηχανικές πηγές έδειξε καλύτερη συμπεριφορά σε κάμψη, έναντι του ΣΣΟ που ενισχύθηκε με ίνες που ανακτήθηκαν από ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων, σε ισοδύναμες αναλογίες ινών. Εντούτοις, αποδεικνύεται ότι οι ανακυκλωμένες ίνες θα μπορούσαν να είναι μια εναλλακτική και βιώσιμη λύση εάν χρησιμοποιηθούν σε υψηλότερες δοσολογίες.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια σημαντική και στοχοθετημένη επένδυση (περίπου 600 δισεκατομμύρια ευρώ μέχρι το 2010) απαιτείται για την αποκατάσταση και την επέκταση της υποδομής των επίγειων ευρωπαϊκών μεταφορών, που θα προβλέπει ένα επαρκές σύστημα, ικανό να ανταποκριθεί στις ανάγκες της διευρυμένης Ευρωπαϊκής Ένωσης, προς όφελος της ενιαίας αγοράς και κοινωνικό-οικονομικής ολοκλήρωσης (Calvet M. T., 2004 & ECTP, 2005). Το βασικό στοιχείο των επίγειων μεταφορικών υποδομών είναι το οδόστρωμα, το οποίο μπορεί να είναι εύκαμπτο ή δύσκαμπτο. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα συνήθως κατασκευάζονται από άσφαλτο, ενώ το κύριο υλικό που χρησιμοποιείται στα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι το σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland και ενίσχυση με συμβατικό πλέγμα.

Με την ταχεία κλιμάκωση των τιμών του πετρελαιο, το μέλλον των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, που απαιτούν βαθιές θεμελιώσεις και παχιά στρώματα ασφάλτου (150-450mm), γίνεται σταδιακά όλο και πιο αβέβαιο λόγω των αυξημένων δαπανών, καθώς και της δυσμενούς πολιτικής και περιβαλλοντικής καταστάσεως. Παρόλο που τα συμβατικά δύσκαμπτα οδοστρώματα (150-300mm) μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα απαιτούμενα στρώματα θεμελίωσης, να ελαττώσουν ή να αποβάλουν το κάλυμμα ασφάλτου και να μειώσουν τις απαιτήσεις σε συντήρηση, προς το παρόν συνδέονται με υψηλότερες δαπάνες και μεγαλύτερη κατασκευαστική πολυπλοκότητα λόγω της χρήσεως συμβατικού πλέγματος. Το ινοπλισμένο με χάλυβα σκυρόδεμα (ΙΧΣ) θα μπορούσε να επιφέρει αποδέσμευση από τη χρήση συμβατικού πλέγματος επιτρέποντας τη λειτουργία της μεθόδου συμπίεσης με οδοστρωτήρα για τη κατασκευή οδοστρωμάτων, επιφέροντας σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και χρημάτων. Εντούτοις, προκειμένου να προβλεφθεί μια πραγματικά οικονομική και βιώσιμη λύση για δύσκαμπτα οδοστρώματα, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν ανακυκλωμένα υλικά και να αξιολογηθούν προσεκτικά οι ενεργειακές ανάγκες καθώς επίσης και το κόστος συντήρησης.

Στις επόμενες ενότητες γίνεται επισκόπηση του προτεινόμενου τύπου σκυροδέματος και οδοστρώματος, με επιχειρήματα που επισημαίνουν τα πλεονεκτήματα που συνδέονται με τη χρήση του ΣΣΟ. Επίσης παρατίθεται εκτενής περιγραφή των δοκιμών κάμψης που επιχειρήθηκαν, με σχετική αναφορά στους διαφορετικούς τύπους ινοπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν. Τέλος ακολουθεί συζήτηση πάνω στα βασικά συμπεράσματα που συνάχθηκαν από τις δοκιμές κάμψης στα ινοπλισμένα με χάλυβα ΣΣΟ (ΙΧΣΣΟ) δοκίμια.

## 2. ΤΥΠΟΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 2.1 Δύσκαμπτο ή εύκαμπτο οδόστρωμα;

Βασικό χαρακτηριστικό των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η εκτεταμένη διάρκεια «ζωής» (περ. 40 έτη) που ξεπερνά τα εύκαμπτα υλικά κατά περίπου 20 έτη. Επίσης οι απαιτήσεις σε συντήρηση είναι μικρότερες, ενώ όταν επισκευές είναι απαραίτητες αυτές είναι συνήθως περιορισμένης έκτασης (Embacher R A, 2001). Η διέλευση βαρέων οχημάτων υποβάλλει τα εύκαμπτα οδοστρώματα σε μεγαλύτερες παραμορφώσεις έναντι αυτών των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση στην κατανάλωση καύσιμου, της τάξεως του 11% (National Research Council of Canada, 2000). Η ομαλότητα της επιφάνειας των εύκαμπτων οδοστρωμάτων επηρεάζεται σημαντικά από τις κλιματικές αλλαγές, συμβάλλοντας σε υψηλότερη κατανάλωση καύσιμου. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα λόγω της ακαμψίας τους μπορούν να αντέξουν μεγάλα φορτία χωρίς να υποστούν καταπονήσεις (rutting, shoving κτλ) συνήθεις με τα εύκαμπτα οδοστρώματα. Επιπλέον, τα δύσκαμπτα οδοστρώματα ολοένα και αυξάνουν την αντοχή τους (με το πέρας του χρόνου), και αρκετά συχνά υπερβαίνουν την προσχεδιασμένη διάρκεια «ζωής» τους καθώς επίσης και τα αναμενόμενα φορτία κυκλοφορίας. Επιπλέον, οι τεχνικές αποκατάστασης μπορούν να επεκτείνουν τη ζωή των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων μέχρι και εννέα φορές (Embacher R A, 2001 & Tighe S, 2001).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι το ότι δέχονται οπλισμό (για έλεγχο της ρωγμάτωσης), που σε συνδυασμό με την υψηλή ακαμψία τους, φέρουν με επιτυχία τα αναμενόμενα φορτία κυκλοφορίας με μικρότερο πάχος οδόστρωσης. Σε πολλές περιπτώσεις, η κατασκευή τους μπορεί να επιτευχθεί ενιαία (με μια μόνο στρώση).

Όσον αφορά το κόστος, τα τελευταία έτη παρατηρείται μια σταθερά ανοδική τάση στη τιμή της ασφάλτου, ενώ η τιμή του τσιμέντου Portland έχει παραμείνει σχετικά σταθερή (η τάση αυτή αναμένεται να συνεχιστεί). Ειδικότερα, ο δείκτης τιμών παραγωγού (PPI) για την υγρή ασφαλτο στις εγκαταστάσεις καθαρισμού (όπως δηλώνεται από το Γραφείο Στατιστικών Εργασίας των ΗΠΑ) αυξήθηκε κατά 37% τους τελευταίους 12 μήνες μέχρι τον Φεβρουάριο του 2007, έναντι σχεδόν 6% για το τσιμέντο. Το PPI για τα μίγματα επίστρωσης με ασφαλτο αυξήθηκε περισσότερο από 27% στους 12 μήνες που τελείωσαν το Δεκέμβρη του 2006, ενώ το έτοιμο σκυρόδεμα αυξήθηκε σχεδόν 10% (Kuennen T, 2007).

Οι κυριότεροι περιορισμοί που συνδέονται με τα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι η ολισθηρότητα επιφάνειας, ο θόρυβος που παράγεται από την κυκλοφορία και το σχετικά υψηλό κόστος τους (Thomas B, 2005). Εντούτοις, ο συνδυασμός δύσκαμπτου οδοστρώματος με μια αρκετά λεπτή επικάλυψη ασφάλτου μπορεί να βελτιώσει την ολισθηρότητα, ενώ

ταυτοχρόνως περιορίζονται τα προβλήματα που παραδοσιακά συνδέονται με τις βαθιές ασφαλτοστρώσεις. Παρά τις ανοδικές τιμές της ασφάλτου, το κόστος των δύσκαμπτων οδοστρώματων μπορεί ακόμα να είναι υψηλότερο από αυτό των εύκαμπτων και, ως εκ τούτου, μια οικονομική και βιώσιμη λύση για δύσκαμπτα οδοστρώματα, θα μπορούσε να παραχθεί μέσω της χρησιμοποίησης υλικών χαμηλού κόστους (ανακυκλωμένα υλικά) και με την υιοθέτηση πρακτικών (π.χ. συμπίεση με οδοστρωτήρα) που είναι ταχείς και οικονομικές.

## 2.2 Σκυρόδεμα συμπιεσμένο με οδοστρωτήρα

Στην Εικόνα 1, απεικονίζεται μια χαρακτηριστική σκηνή κατασκευής οδοστρώματος που χρησιμοποιείται σχεδόν σε κάθε οδό κάθε πόλης. Εντούτοις, μια προσεκτική επιθεώρηση της Εικόνας 1, επιβεβαιώνει ότι το υλικό που χρησιμοποιείται είναι γκρίζο σκυρόδεμα, και όχι άσφαλτος, αλλά ούτε συμβατικό σκυρόδεμα. Είναι ένα υλικό που αποκαλείται σκυρόδεμα συμπιεσμένο με οδοστρωτήρα (ΣΣΟ), και η ονομασία του προέρχεται από την τεχνική που χρησιμοποιείται κατά τη συμπίεση του.



(α)



(β)

Εικόνα 1. Επίστρωση οδοστρώματος και συμπίεση με οδοστρωτήρα

Το ΣΣΟ προέρχεται από τον συνδυασμό νερού, αδρανών και τσιμέντου. Αν και χρησιμοποιούνται συστατικά όμοια με αυτά του συμβατικού σκυροδέματος, στη προκειμένη περίπτωση η ανάμειξη τους γίνεται σε διαφορετικές αναλογίες με συνέπεια ένα υλικό με βελτιωμένες ιδιότητες και συμπεριφορά. Η ανάμειξη των συστατικών γίνεται σε κεντρικές εγκαταστάσεις ή σε κινητό αναμικτήρα, με στόχο την παραγωγή σκυροδέματος μηδενικής κάθισης (ACI 325.10R, 2002). Αυτό απαιτείται έτσι ώστε το σκυρόδεμα να είναι σε θέση να υποστηρίξει το βάρος του οδοστρωτήρα (περ. 10τόνοι) κατόπιν σκυροδέτησης με τρόπο παρόμοιο της ασφαλτόστρωσης. Μπορεί να ειπωθεί ότι η άσφαλτος είναι μια μορφή σκυροδέματος με τα ασφαλτούχα υλικά να αντικαθιστούν το τσιμέντο.

Τυπικές αναλογίες υλικών για τη παραγωγή του ΣΣΟ είναι: τσιμέντο 250-350kg/m<sup>3</sup> (10-15% ανά μάζα), αδρανή 2100-2200 kg/m<sup>3</sup> (75-85% ανα όγκο) και ο λόγος νερού/τσιμέντου κυμαίνεται από 0,5-0,8.

Το ΣΣΟ στοχεύει να προσφέρει την υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, στην οικονομία και την κατασκευαστική ταχύτητα που παραδοσιακά συνδέεται με την ασφάλτο. Αυτό το αρκετά ελκυστικό υλικό θα μπορούσε να ωφεληθεί περαιτέρω με την ενσωμάτωση ίνας.

### *2.3 Ινοπλισμένο σκυρόδεμα από χαλύβδινες ίνες*

Η ενσωμάτωση ίνας στο σκυρόδεμα προσφέρει ελεγχόμενη ρηγμάτωση, ενίσχυση της ανθεκτικότητας αλλά και βελτίωση των χαρακτηριστικών επιφάνειας. Ειδικότερα, η προσθήκη χαλύβδινων ινών προσφέρει υψηλή αντοχή κάμψης, βελτιωμένη αντοχή σε καταπόνηση, υψηλή αντοχή σε κρούση, αντίσταση σε συνεχείς κύκλους ψύξης-απόψυξης, καθώς και δυνατότητα να ασκηθεί φορτίο κατόπιν ρηγμάτωσης. Επίσης το ινοπλισμένο σκυρόδεμα ωφελείται από δυνατότητα μείωσης πάχους χωρίς τα προβλήματα (κύρτωση, στρέβλωση κτλ) που συναντώνται σε λεπτές πλάκες με υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο (Schrader E K, 1983).

Η χρήση των χαλύβδινων ινών μπορεί να εξαλείψει την ανάγκη συμβατικού οπλισμού και ως εκ τούτου, να οδηγήσει σε οικονομικότερες και ταχύτερες κατασκευές (Swamy R N, 1982 & 1986). Ειδικότερα στη περίπτωση ινοπλισμένου σκυροδέματος εγκάρσιοι αρμοί διαμορφώνονται κάθε 30m, σε αντιδιαστολή με την απόσταση 3,5-6m που απαιτείται για το άοπλο σκυρόδεμα, και 15m για το οπλισμένο σκυρόδεμα με μη συνεχές συμβατικό οπλισμό (U.S. Department of Transportation, 2006).

## **3. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΤΟΥ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ ΣΣΟ**

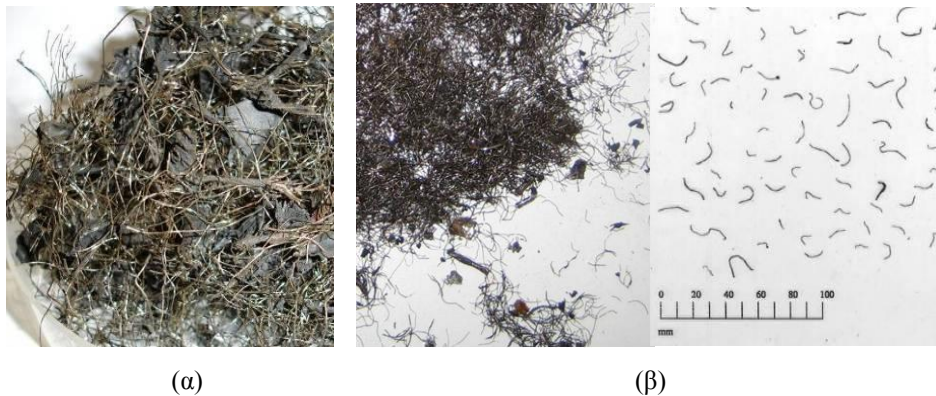
Ορθογώνια πρίσματα χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της αντοχής σε κάμψη του ΙΧΣΣΟ. Στις επόμενες υποενότητες παρατίθεται περιγραφή του ινοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε, της τεχνικής που ακολουθήθηκε για τη προετοιμασία των δοκιμίων, των δοκιμών που εκτελέστηκαν, όπως και των αποτελεσμάτων τους.

### *3.1 Χαλύβδινες ίνες προερχόμενες από ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων*

Οι ίνες χάλυβα που προέρχονται από μηχανική επεξεργασία (π.χ. τεμαχισμός και κοκκιοποίηση) ελαστικών (από οχήματα), έχουν υψηλή μεταβλητότητα σε μήκος και διάμετρο και συνήθως περιέχουν σημαντικές ποσότητες λαστιχένιων σωματιδίων στην επιφάνειά τους, Εικόνα 2α.

Ένα από τα κύρια προβλήματα, που παρατηρείται κατά τη μίξη των ινών αυτών στο σκυρόδεμα, είναι η τάση τους να συμμαζεύονται και να σχηματίζουν σφαίρες από ίνες, οι οποίες δημιουργούν κενά στο σκυρόδεμα

(Pilakoutas K, 2004). Για να αποφευχθεί ο σχηματισμός σφαιρών και για να βελτιστοποιηθεί η χρήση τέτοιων ινών στο σκυρόδεμα, οι ίνες απαιτούν ειδική επεξεργασία κατά την οποία αφαιρούνται τα λαστιχένια σωματίδια και ελαχιστοποιείται η γεωμετρική ανομοιογένεια (Tlemat H, 2006), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2β.



Εικόνα 2. (α) Ίνες χάλυβα από μηχανικά τεμαχισμένα ελαστικά οχημάτων; (β) Κατεργασμένες ίνες χάλυβα από ελαστικά οχημάτων

Δύο τύποι ανακυκλωμένης ίνας, με διαφορετικές κατανομές μήκους, εξετάστηκαν σε αυτήν τη φάση της έρευνας. Ο τύπος Α είχε μήκος που κυμαινόταν μεταξύ 5-20mm, ενώ ο τύπος Β κυμάνθηκε μεταξύ 15-30mm. Και οι δύο τύποι ίνας είχαν μέση τιμή διαμέτρου ίση με 0.23mm και αντοχή σε εφελκυσμό γύρω στα 2000MPa.

### 3.2 Χαλύβδινες ίνες προερχόμενες από τη βιομηχανία

Οι δύο διαφορετικοί τύποι βιομηχανικής ίνας χάλυβα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την μελέτη ήταν η HE1/50 και η TWINCONE1/54. Η HE1/50, είναι ίνα από σύρμα συρματοποιημένο εν ψυχρό, με αγκυρωμένα άκρα (Εικόνα 3α). Αυτός ο τύπος ίνας προέρχεται από καλώδιο, που παραμορφώνεται και κόβεται σε συγκεκριμένα μήκη, για την ενίσχυση σκυροδέματος. Οι γεωμετρικές ιδιότητες της ίνας είναι 50mm σε μήκος, 1.0mm σε διάμετρο, και παρουσιάζει εφελκυστική αντοχή γύρω στα 1100MPa. Η TWINCONE1/54 ίνα, έχει τις ίδιες ιδιότητες όπως η ίνα HE1/50 με τη μόνη διαφοροποίηση να εστιάζεται επιπλέον μήκος (54mm) και στα κωνικά άκρα της, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3β.



Εικόνα 3. Χαλύβδινες βιομηχανικές ίνες (α) HE1/50; (β) TWINCONE1/50

### 3.3 Προετοιμασία ΙΧΣΣΟ δοκιμίων

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων ήταν 150mm σε ύψος, 150mm σε πλάτος και 550mm σε μήκος. Χαλύβδινα καλούπια χρησιμοποιήθηκαν για να αποτραπούν παραμορφώσεις, που θα μπορούσαν να προκληθούν από την σφοδρή δράση της εξωτερικής συμπίεσης που χρησιμοποιήθηκε. Η σκυροδέτηση των δοκιμίων έγινε σε τρία στρώματα και η συμπίεσή τους επιτεύχθηκε με κατάλληλο δονητικό σφυρί τύπου «kango».

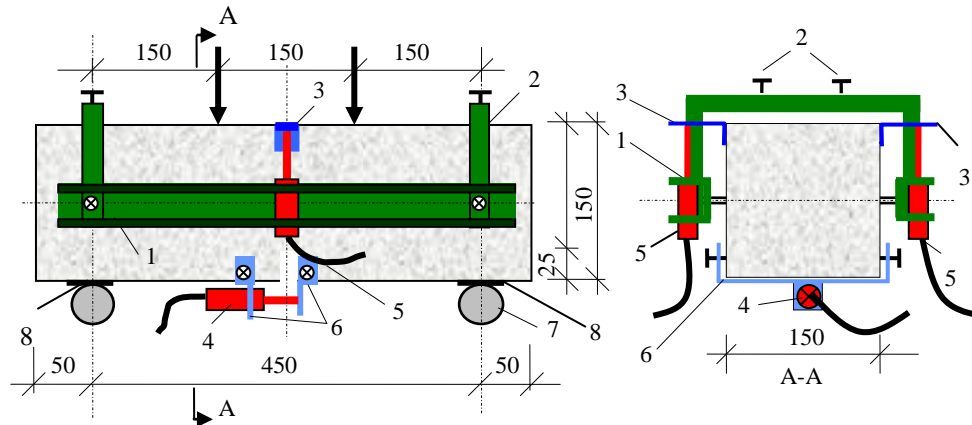
Μια ημέρα κατόπιν σκυροδετήσεως, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε θάλαμο συντήρησης (+20°C και RH≥95) μέχρι και την ημέρα των δοκιμών, ακολουθώντας τις συστάσεις για δοκιμές κάμψης της RILEM (RILEM TC 162-TDF, 2002). Την ημέρα των δοκιμών, μια εγκοπή (25mm σε ύψος και 5mm σε πάχος) δημιουργήθηκε στο μέσο του μήκους του δοκιμίου και στην επιφάνεια εφελκυσμού του (υπό γωνία 90° στα στρώματα του ΣΣΟ), χρησιμοποιώντας περιστρεφόμενες αδαμάντινες λεπίδες. Ο σκοπός της εγκοπής ήταν να ενεργήσει ως επαγωγέας ρωγμής (Tlemat H, 2006).

### 3.4 Διαδικασία δοκιμών

Οι δοκιμές στα ορθογώνια πρίσματα πραγματοποιήθηκαν ακολουθώντας τις συστάσεις για δοκιμές κάμψης της RILEM (RILEM TC 162-TDF, 2002). Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός φορτίων τεσσάρων σημείων αντί του τριών σημείων φόρτισης που συστήνεται από τη RILEM. Η χρήση του συνδυασμού φόρτισης τεσσάρων σημείων δημιουργεί μια περιοχή σταθερής ροπής και, ως εκ τούτου, ελαχιστοποιεί την υπερεκτίμηση της αντοχής σε κάμψη, που προκαλείται στο σημείο εφαρμογής των φορτίων από την επίδραση της εξάπλωσης του φορτίου (Timoshenko S P, 1970). Οι δύο στηρίξεις και η διάταξη για την άσκηση του φορτίου αποτελούνται από κύλινδρους χάλυβα με διάμετρο 30mm. Δύο κύλινδροι (ένας στην υποστήριξη και ένας στη συσκευή που επιφέρει την παραμόρφωση) είναι σε θέση να περιστρέφονται ελεύθερα γύρω από τον άξονά τους όπως και το διαμήκη άξονα του δοκιμίου (RILEM TC 162-TDF, 2002). Όλοι οι κύλινδροι συνδέθηκαν με πλάκες χάλυβα (5mm σε πάχος) για να αποφευχθεί τοπική αστοχία του σκυροδέματος.

Καθώς τα αποτελέσματα των δοκιμών κάμψης στα συγκεκριμένα πρίσματα είναι επιρρεπή σε σημαντικά πειραματικά λάθη (λόγω των «ψευδών» μετατοπίσεων υποστήριξης, της δυσκαμψίας των μηχανών και του ρυθμού φόρτισης), ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται για τη καταγραφή μετρήσεων των βελών κάμψεως με ακρίβεια (Copalaratnam V S, 1995). Για την αποφυγή τέτοιων λαθών αλλά και την επίδραση της ροπής στρέψης στις μετρήσεις των βελών κάμψης, χρησιμοποιήθηκε ένα πλαίσιο αλουμινίου όπως συνίσταται από την Japan Society of Civil Engineers (Japan Society of Civil Engineers, 1994).

Τα βέλη κάμψης μετρήθηκαν και στις δύο πλευρές των δοκιμίων χρησιμοποιώντας δύο γραμμικά μεταβλητούς διαφορικούς μετασχηματιστές που στηρίχτηκαν στο πλαίσιο (LVDT5) και, ως εκ τούτου, αποφεύχθηκε οποιαδήποτε επίδραση των ροπών στρέψης. Ένας γραμμικά μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής (LVDT4) τοποθετήθηκε εγκάρσια της εγκοπής για τη καταγραφή της μετατοπίσεως στη ρωγμής (CMOD). Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές κάμψης, απεικονίζεται στην Εικόνα 4.



1- Πλαίσιο αλουμινίου; 2- Βιδωτοί σφικτήρες; 3- Χαλύβδινες πλάκες (επικολλημένες στα δοκίμια); 4 - LVDT4; 5 - LVDT5; 6- Βάση LVDT; 7- Υποστηρίξεις, 8 - Χαλύβδινες πλάκες υποστήριξης

Εικόνα 4. Διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές κάμψης

Τα δοκίμια ΙΧΣΣΟ εξετάστηκαν σε σερβουδραυλική μηχανή (100 kN) με φόρτιση ελεγχόμενη από τη μετατόπιση της εγκάρσιας ρωγμής (CMOD) στο μέσο του κάτω μέρους του δοκιμίου. Η μηχανή χρησιμοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε το CMOD να αυξηθεί με σταθερό ρυθμό 60μm/min για CMOD κυμαινόμενο μεταξύ 0-0.1mm και με ρυθμό 0.2mm/min για CMOD από 0.1mm μέχρι και το τέλος της δοκιμής (RILEM TC 162-TDF, 2002).

### 3.5 Αποτελέσματα δοκιμών κάμψης

Η επίδραση του όγκου ίνας στην συμπεριφορά κάμψης των ΙΧΣΣΟ δοκιμίων παρουσιάζεται στις Εικόνες 5 & 6. Η εικόνα 6 αναφέρεται στη συμπεριφορά κάμψης δοκιμίων που ενισχύθηκαν με βιομηχανικές ίνες χάλυβα ενώ, η Εικόνα 7 παρουσιάζει τη συμπεριφορά κάμψης δοκιμίων που ενισχύθηκαν με ανακυκλωμένες ίνες από ελαστικά οχημάτων. Είναι προφανές ότι η αύξηση του όγκου ίνας, βελτιώνει την αντοχή σε κάμψη καθώς και την αντοχή μετά την πρώτη ρηγμάτωση. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε για όλους τους διαφορετικούς τύπους ίνας που εξετάστηκαν,



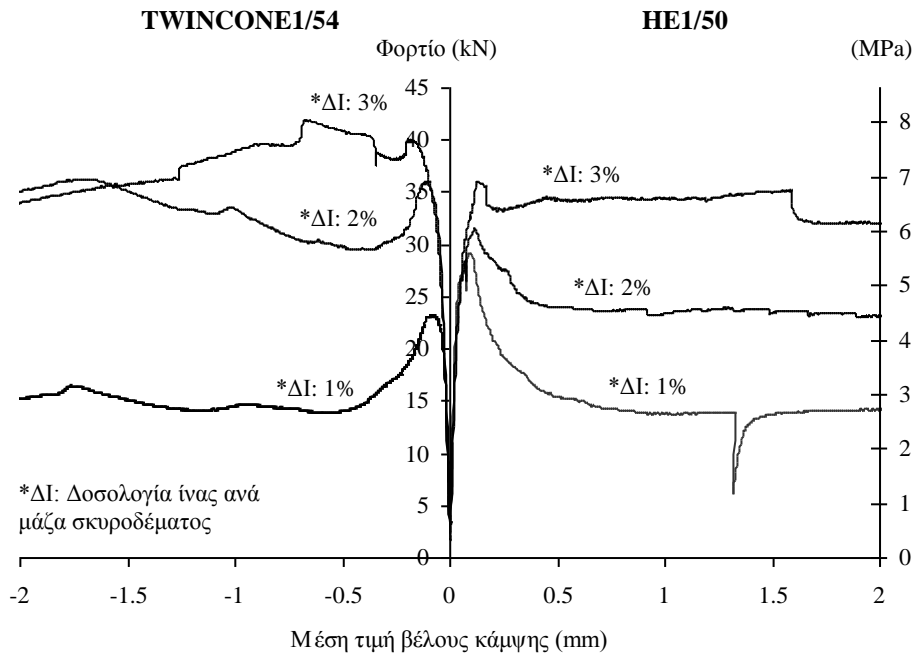
με τις βιομηχανικές ίνες να παρουσιάζονται αποτελεσματικότερες, σε αντίστοιχες δΟΣΟΛΟΓΙΕΣ.

Στην Εικόνα 5 μπορεί επίσης να παρατηρηθεί η επίδραση της μορφής της ίνας στην αντοχή θραύσης. Τα δοκίμια που ενισχύθηκαν με τις βιομηχανικές ίνες χάλυβα παρουσίασαν υψηλότερη αντοχή σε κάμψη και καλύτερη συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση. Αυτό αποδίδεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην ευεργετική επίδραση που έχουν οι παραμορφωμένες άκρες των συγκεκριμένων ινών στη μηχανική συνάφεια, που αυξάνει την πλαστιμότητα των ΙΧΣΣΟ. Αστοχία σε κάμψη των δοκιμίων εμφανίστηκε κυρίως λόγω εξόλκευσης των ινών. Διαπιστώνεται ότι, στα δείγματα που ενισχύθηκαν με ίνα TWINCONE1/54, παρατηρήθηκε αστοχία στα άκρα της πριν από την εξόλκευσή της, σε ποσοστό 50%, αυξάνοντας σημαντικά την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των δοκιμίων που ενίσχυσε. Η αστοχία του συγκεκριμένου τύπου ίνας είναι ένδειξη της υψηλής συνεισφοράς της, που καταδεικνύεται από τη συμπεριφορά «κράτυνσης» που παρατηρήθηκε, σε αναλογίες ίνας υψηλότερες από 2% ανα μάζα σκυροδέματος ( $45\text{kg/m}^3$ ).

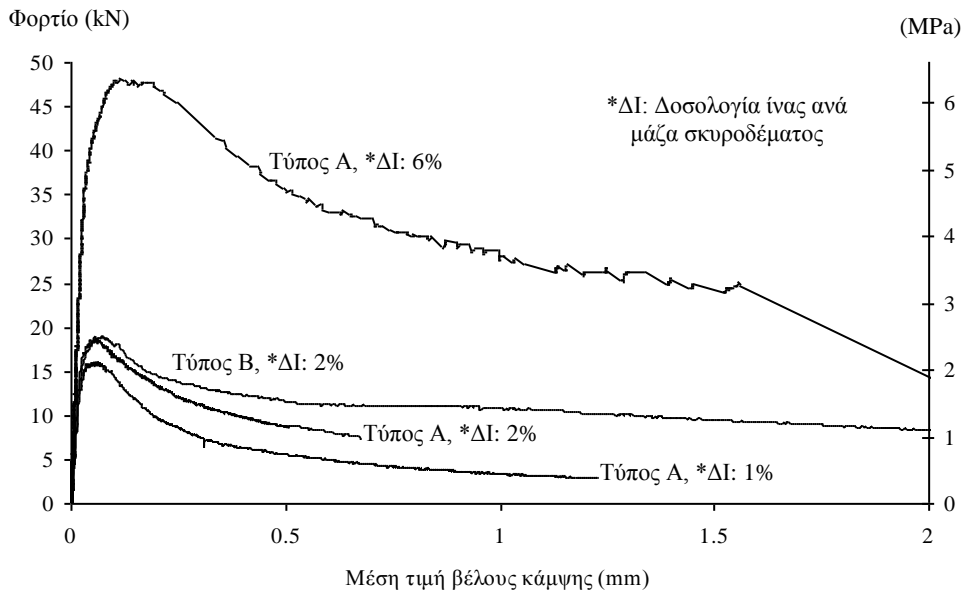
Κατόπιν συγκρίσεως των Εικόνων 5 & 6 καταδεικνύεται η θετική επίδραση στη συμπεριφορά κάμψης, πέραν της ρηγμάτωσης, που προσδίδει το αυξημένο μήκος ίνας. Δοκίμια που περιείχαν ίνες με μήκος 50 και 54mm, παρουσίασαν εκτεταμένη και σταθερή συμπεριφορά δύναμη-βέλος κάμψης, αντίθετα με την περιορισμένη συμπεριφορά των δοκιμίων που ενισχύθηκαν με ίνες μήκους 5-20mm και 15-30mm (σε χαμηλές δΟΣΟΛΟΓΙΕΣ ινών). Σύγκριση των δύο ανακυκλωμένων τύπων ινών (τύποι Α και Β) ενισχύει περαιτέρω αυτήν την παρατήρηση δεδομένου ότι οι ίνες μεγαλύτερου μήκους (τύπος Β) παρουσίασαν καλύτερη συμπεριφορά μετά τη ρηγμάτωση.

Οι ανακυκλωμένες ίνες όταν χρησιμοποιούνται σε υψηλές δΟΣΟΛΟΓΙΕΣ, προσδίδουν στο σκυρόδεμα ιδιότητες που είναι εφάμιλλες του ινοπλισμένου σκυροδέματος με βιομηχανικές ίνες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6. Παρόλο που η αποδοτικότητα των ινών αυτών είναι περίπου 50% μικρότερη σε σύγκριση με τις βιομηχανικές, το σημαντικά χαμηλότερο κόστος τους (ανακυκλωμένες ίνες €50 έως €150 ανά τόνο, βιομηχανικές €700 έως €15.000 ανά τόνο), μπορεί να δικαιολογήσει τη χρήση τους. Επιπλέον το γεγονός του ότι παράλληλα αντιμετωπίζεται ένα περιβαλλοντολογικό πρόβλημα κάνει τις ίνες αυτές ιδιαίτερα ελκυστικές ως οπλισμό σκυροδέματος.

Σημειώνεται ότι οι καμπύλες των εικόνων 5 και 6, εξήχθησαν από ένα δοκίμιο για κάθε περίπτωση δοκιμής κάμψεως, το οποίο επιλέχτηκε ως αντιπροσωπευτικό, κατόπιν εξέτασης των ινών κατά μήκος της ρωγμής. Συγκεκριμένα έγινε καταμέτρηση του ακριβή αριθμού ινών και θεώρηση της γωνίας υπό την οποία οι ίνες «γεφύρωναν» τη ρωγμή για κάθε περίπτωση που εξετάστηκε.



Εικόνα 5. Συμπεριφορά σε κάμψη ΙΧΣΣΟ δοκιμίων με βιομηχανικές ίνες (δοκιμές τριών ημερών)



Εικόνα 6. Συμπεριφορά σε κάμψη ΙΧΣΣΟ δοκιμίων με ανακυκλωμένες ίνες (δοκιμές τριών ημερών)

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για την υιοθέτηση καινοτόμων, βιώσιμων καθώς και οικονομικά αποδοτικών μεθόδων δόμησης οδηγεί στην ευρύτερη χρήση των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα. Το ΣΣΟ έχει τη δυνατότητα να προσφέρει την υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, στην οικονομία και την ταχύτητα κατασκευής που παραδοσιακά συνδέεται με την άσφαλτο. Η χρήση ινοπλισμού επιφέρει σημαντικά οφέλη στις μεθόδους κατασκευής και βελτιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά ολκιμότητας όπως και τη συμπεριφορά κάμψης που είναι βασική παράμετρος στο σχεδιασμό οδοστρώματος.

Η γεωμετρία της ίνας στην συμπεριφορά κάμψης των ΙΧΣΣΟ είναι καταλυτική, με το μήκος και το σχήμα να έχουν σημαντική επίδραση. Οι βιομηχανικές ίνες που εξετάστηκαν, οδήγησαν σε συνολικά καλύτερη συμπεριφορά έναντι των ινών που ανακτήθηκαν από ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων, σε ισοδύναμες δοσολογίες ίνας. Η TWINCONE1/54 ίνα παρουσίασε ανώτερη συμπεριφορά κάμψης συγκριτικά με την HE1/50 ίνα, δείχνοντας συμπεριφορά «κράτυνσης» σε δοσολογίες ίνας υψηλότερης του 2% ανά μάζα σκυροδέματος ( $45\text{kg/m}^3$ ). Αυτό αποδίδεται κατά ένα μεγάλο μέρος στη βελτιωμένη μηχανική συνάφεια που προκαλείται από τα κωνικά άκρα της συγκεκριμένης ίνας.

Παρόλο που οι ανακτημένες από ανακυκλωμένα ελαστικά οχημάτων ίνες, παρουσίασαν κατώτερη συμπεριφορά έναντι των βιομηχανικών ινών σε ανάλογες δοσολογίες, η ανάμειξή τους σε υψηλότερες δοσολογίες ίνας τις καθιστά βιώσιμο εναλλακτικό οπλισμό σκυροδέματος.

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η έρευνα (μέρος του προγράμματος EcoLanes) χρηματοδοτήθηκε από το 6ο πρόγραμμα-πλαίσιο της ΕΕ, στο πλαίσιο της σύμβασης με αριθμό 031530.

#### 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Calvet M. T., "Preventing the collapse of Europe", Revista de obras Publicas, Vol. 15 (3442), pp 53-57, (2004).

ECTP, "Strategic research agenda for the European Construction sector – Achieving a sustainable and competitive construction sector by 2030", European Construction Technology Platform, <http://www.ectp.org>, draft report, pp 44, (2005).

Embacher R. A. and Snyder M. B., "Life-cycle cost comparison of asphalt and concrete pavements on low-volume roads case study comparisons", Transportation Research Record, No. 1749, pp 28-37, (2001).

National Research Council of Canada, "Effect of Pavement Surface on Fuel Consumption -Phase 2, Seasonal Tests", National Research Council of Canada, Centre for Surface Transportation Technology, Ottawa, Ontario, (2000).

Tighe S., Fung R. and Smith T., "Concrete pavements in Canada: State-of-the-art practice", 7th International conference on Concrete Pavements, Orlando USA, September 9-13, 15p, (2001).

Kuennen T, "RCC promotion work takes aim at asphalt", Sep 1, 2007, Web site: <http://concreteproducts.com>

Thomas B., Hanson D., Maher A. and Vitillo N., "Influence of pavement surface type on tire/pavement generated noise", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 33 (2), pp 94-100, (2005).

ACI 325.10R, "Roller-Compacted concrete pavements", Report by ACI Committee 325, American Concrete Institute, pp. 2, (2002)

Schrader, E K, and Lankard, D R, "Inspection and analysis of curl in Steel Fibre Reinforced Concrete airfield pavements", Bekaert Steel Wire Corporation, Pittsburgh, pp. 230, (1983)

Swamy R. N., "Steel fibre concrete for bridge deck and building applications", Structural Engineer, Part A, Vol. 64A (6), pp 149-157, (1986).

Swamy R. N. and Jojagha A. H, "Impact resistance of steel fibres reinforced lightweight concrete", Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol. 4 (4), pp 209-220, (1982).

U.S. Department of Transportation FHA, "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A state-of-the-Practice Manual", FHWA Publication No. HIF-07-004, pp 8-9, (2006).

Pilakoutas K, Neocleous K, Tlemat H, "Reuse of steel fibres as concrete reinforcement", Engineering Sustainability, September, pp. 135, (2004).

Tlemat H., Pilakoutas K. and Neocleous K., "Stress-strain characteristic of SFRC using recycled fibres", Materials and Structures, Vol. 39 (3), pp 365-377, (2006).

RILEM TC 162-TDF, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete: bending test", Materials and Structures, Vol. 35 (253), pp. 579-582, (2002).

Timoshenko S P, and Goodier J N, Theory of Elasticity. 3rd Edition, McGraw Hill, New York, (1970).

Copalaratnam, V S, and Gettu R, "On the characterisation of flexural toughness in FRC". Cement Concrete Composites, Vol. 17, pp 249-254, (1995)

Japan Society of Civil Engineers, Methods of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fibre reinforced concrete. Concrete Library of JSCE, SF4, pp 58-61, (1994).