

# ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΣΗΡΑΓΓΟΠΟΙΑ

Παναγιώτα Κατσκογιάννη  
*Μηχανικός Μεταλλείων, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ*

Πάυλος Π. Νομικός  
*Λέκτορας, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ*

Guy Perrier d' Auxion  
*ΕΤΑΛ ΑΕ-Ομίλος ΣΙΔΕΝΟΡ, Διευθύνων Σύμβουλος*

Μάνος Μιχαηλίδης  
*Χημικός Μηχανικός*

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός  
*Καθηγητής, Τομέας Μεταλλευτικής ΕΜΠ*

*Λέξεις κλειδιά: ίνες, σκυρόδεμα, ποιοτικός έλεγχος*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα έχει τύχει ευρείας εφαρμογής ως μέσον αντιστήριξης του πετρώματος στη σηραγγοποιία. Η μηχανική του συμπεριφορά εξαρτάται, μεταξύ άλλων, και από την περιεκτικότητα του σε ίνες, και αξιολογείται σήμερα με δοκιμές που συμπεριλαμβάνονται στα διεθνή και εθνικά πρότυπα. Εντούτοις, στον Ελλαδικό χώρο ο έλεγχος του ινοπλισμένου σκυροδέματος επί τόπου περιορίζεται, γενικά, στην ποσότητα των τοποθετούμενων ινών. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία σειρά δοκιμών σε δοκίμια πλακών ινοπλισμένου σκυροδέματος, προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των ινών και η επίδρασή τους στην απαιτούμενη επιτελεστικότητα του τελικού προϊόντος.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο καθιερωμένος διεθνώς, πλέον, ορισμός του ινοπλισμένου σκυροδέματος (Fiber Reinforced Concrete ή FRC) δίνεται, από το πρότυπο ACI 116R-00 (2000) του Αμερικανικού Ινστιτούτου Σκυροδέματος (ACI), στο σκυρόδεμα το οποίο περιέχει διάσπαρτες ίνες με τυχαίο προσανατολισμό. Στη σηραγγοποιία τυγχάνει ευρείας χρήσης το ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (FRS), το οποίο ψεκάζεται από ένα ακροφύσιο υπό την πίεση αέρα με μεγάλη ταχύτητα πάνω σε επιφάνεια. Η πρώτη χρήση εκτοξευόμενου σκυροδέματος έγινε στην Pennsylvania, των Η.Π.Α, το 1907. Η επέκταση της χρήσης του ινοπλισμένου εκτοξευμένου

σκυροδέματος οφείλεται τόσο στη ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας παραγωγής σκυροδέματος υψηλών προδιαγραφών όσο και σ' αυτήν των μέσων εφαρμογής.

Η προσθήκη ινών μέσα στο κονίαμα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του, κυρίως της αντοχής σε εφελκυσμό και της ικανότητας παραμόρφωσης, είναι πολύ παλιά (μπαγδατί = ασβεστοκονίαμα ενισχυμένο με λεπτοκομμένα άχυρα).

Οι σύγχρονες ίνες του ινοπλισμένου σκυροδέματος μπορεί να είναι από ύαλο, πολυμερή ή χάλυβα. Οι μεταλλικές ίνες που χρησιμοποιούνται έχουν διάμετρο περίπου 0.2 έως 1.0 mm, και χρησιμοποιούνται περισσότερο για τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων. Η πιο χαρακτηριστική τέτοια βελτίωση, είναι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν την αστοχία, σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, που όμως πραγματοποιείται μετά το άνοιγμα των ρωγμών και μετά από κάποια παραμόρφωση του υλικού. Μετά τη ρωγμάτωση οι ίνες εξακολουθούν να αναλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις και έτσι προσδίδουν στο υλικό πλαστιμότητα. Η τυχαία διάταξη των ινών μέσα στο σκυρόδεμα, του προσδίδει, εκτός των άλλων, ομοιογένεια και ισότροπη συμπεριφορά.

Η ποσότητα τους μετρείται σε ποσοστό κατά βάρος ή όγκο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους αφορούν όρια για το λόγο μορφής, το σχήμα, και την επιφανειακή υφή των ινών. Για μεγάλη ποσότητα ινών (>60 kg/m<sup>3</sup>) το εργάσιμο γίνεται προβληματικό ενώ για μικρή (π.χ. <25kg/m<sup>3</sup>, 1% κ.β ή 0.33% κ.ο.), το αποτέλεσμα των ινών στις μηχανικές ιδιότητες είναι απρόβλεπτο και συχνά ανεπαίσθητο. Επιθυμητός είναι επίσης ο μεγάλος λόγος μορφής, που όμως δημιουργεί προβλήματα στην ανάμιξη. Γι' αυτό, συνήθως επιλέγεται λόγος μορφής μεταξύ 50 και 100 που αντιστοιχεί σε υποκρίσιμο μήκος.

Η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, που ξεκινούν από τα υλικά και καταλήγουν στην εκτέλεση της εργασίας και στη συντήρηση. Στα έργα, προδιαγράφονται συνήθως η απαιτούμενη ποσότητα των ινών, η αντοχή τους και τα γενικά γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, ευελπιστώντας ότι κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιζητούμενη μηχανική συμπεριφορά του υλικού του φορέα. Οι διεθνείς, εν τούτοις, προδιαγραφές απαιτούν τον έλεγχο της μηχανικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με σκοπό την αποτίμηση της ικανότητας του επί τόπου υλικού να ανταποκριθεί στο σκοπό της τοποθέτησής του. Παρόλα αυτά, στον Ελλαδικό χώρο ο έλεγχος του ινοπλισμένου σκυροδέματος επί τόπου περιορίζεται, γενικά, στην ποσότητα των τοποθετούμενων ινών.

Προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα των ινών και η επίδρασή τους στην απαιτούμενη επιτελεστικότητα του τελικού προϊόντος, εκτελέσθηκε σειρά πρότυπων εργαστηριακών δοκιμών σε δοκίμια πλακών ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι ίνες ήταν ενός συγκεκριμένου κατασκευαστή, και κρίθηκε ότι όλες θα ικανοποιούσαν τα γενικά κριτήρια

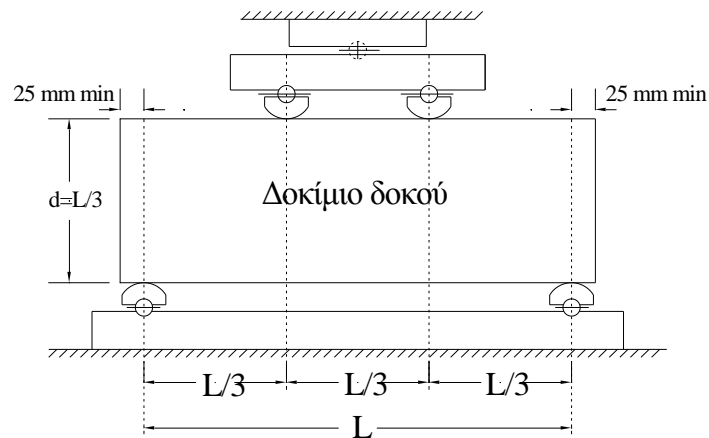
αποδοχής της χρήσης τους, σύμφωνα με τη σημερινή πρακτική στα έργα της σιραγωγποιάας.

## 2. ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΥΣΘΡΑΥΣΤΟΤΗΤΑΣ

Όλα τα σύγχρονα πρότυπα αναγνωρίζουν την προσφορά των ινών στη δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος, δηλ. στην ικανότητά του να αναλαμβάνει φορτίο πέραν της καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Ο έλεγχος της δυσθραυστότητας πραγματοποιείται συνήθως με δοκιμές κάμψης σε δοκίμια δοκών ή με κεντρική φόρτιση μικρών πλακών κατά τις οποίες το ινοπλισμένο σκυρόδεμα υφίσταται κάμψη-διείσδυση. Τα συνήθως χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι της ASTM, της EFNARC, τα Ιαπωνικά και τα Γαλλικά.

### 2.1 Έλεγχος σε πρισματικές δοκούς

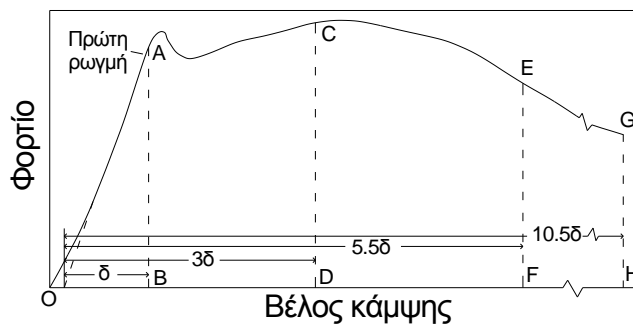
Σύμφωνα τόσο με το αμερικανικό πρότυπο ASTM C1018-97 (ASTM 1997) όσο και με το ιαπωνικό JSCE SF4 (JSCE 1984), η δυσθραυστότητα του ινοπλισμένου σκυροδέματος λαμβάνεται από δοκιμές κάμψης πρισματικών δοκών με φόρτιση τριών σημείων (third point loading method), όπως δείχεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Πρότυπη διάταξη δοκιμής κάμψης

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής καταγράφονται συνεχώς οι τιμές του φορτίου και του βέλους κάμψης και σχεδιάζεται το διάγραμμα της σχέσης τους (Σχήμα 2). Η καμπτική αντοχή ορίζεται στη θέση σχηματισμού της πρώτης ρωγμής.

Το αμερικανικό πρότυπο, καθορίζει δείκτες δυσθραυστότητας  $I_j$  ως τους λόγους της απορροφούμενης ενέργειας σε συγκεκριμένο βέλος κάμψης, προς την απορροφούμενη ενέργεια σε βέλος κάμψης που αντιστοιχεί στο σχηματισμό της πρώτης ρωγμής. Οι τυπικοί δείκτες είναι οι  $I_5$ ,  $I_{10}$ , και  $I_{20}$  και προσδιορίζονται από τους λόγους των εμβαδών της περιοχής της καμπύλης φορτίου-βέλους μέχρι βέλους κάμψης  $3\delta$ ,  $5.5\delta$  και  $10.5\delta$  προς το εμβαδόν της περιοχής έως το σχηματισμό της πρώτης ρωγμής, που αντιστοιχεί σε βέλος κάμψης  $\delta$  (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Τυπικό διάγραμμα φορτίου – βέλους, άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος, και οι δείκτες παραμόρφωσης

Οι δείκτες  $I_5$ ,  $I_{10}$ , και  $I_{20}$  έχουν μια ελάχιστη τιμή 1 για ελαστική – ψαθυρή συμπεριφορά του υλικού και τιμές  $I_5=5$ ,  $I_{10}=10$ ,  $I_{20}=20$  για ιδανική ελαστοπλαστική συμπεριφορά (Σχήμα 3). Για σκυρόδεμα που περιέχει ίνες με αυξημένη συνάφεια, τιμές δεικτών  $I_5=5$ ,  $I_{10}=10$  επιτυγχάνονται εύκολα με περιεκτικότητες ινών 1% ή λιγότερο. Οι δείκτες αυτοί χρησιμοποιούνται μόνο για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό της αντοχής του υλικού στην παραμόρφωση, επειδή δεν υπάρχει καμία γενικά αποδεκτή μέθοδος η οποία να χρησιμοποιεί τους δείκτες αυτούς για τη διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα.



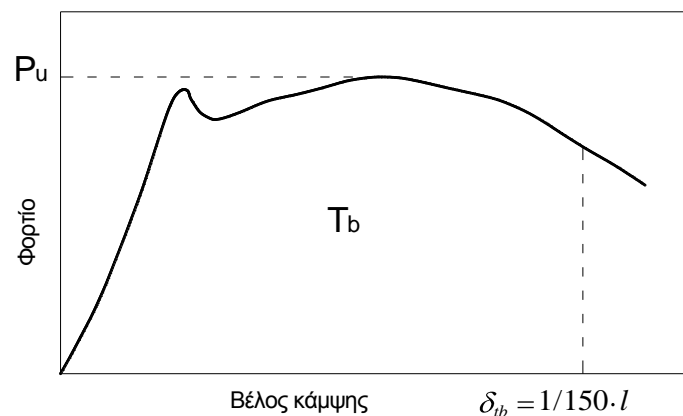
Σχήμα 3. Τυπικό διάγραμμα φορτίου – παραμόρφωσης για πλήρως ελαστοπλαστικό σώμα

Η δοκιμή παρουσιάζει δυσκολία στον προσδιορισμό της πρώτης ρωγμής, η οποία αν και έχει μικρή τιμή αποτελεί σημαντικό στοιχείο για το δείκτη της αντοχής στην παραμόρφωση και για το λόγο αυτό ζητείται η αντικατάσταση της από τους παραγωγούς ινοπλισμένου σκυροδέματος. Το πρότυπο αυτό είναι υπό αναθεώρηση, και σύντομα αναμένεται να προταθεί από την ASTM νέα μέθοδος ελέγχου.

Σύμφωνα, εξάλλου, με το Ιαπωνικό πρότυπο JSCE SF4 (JSCE 1984), η τιμή της δυσθραυστότητας  $T_b$  υπολογίζεται από το εμβαδόν, που ορίζει η καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης, μέχρι τιμής του βέλους  $\delta_{tb}$  ίση με το 1/150 του ανοίγματος της δοκού (Σχήμα 4). Επιπλέον, εισάγεται ο συντελεστής δυσθραυστότητας  $f_e$  που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_e = \frac{T_b \cdot l}{\delta_{tb} \cdot b \cdot h^2} \quad (1)$$

όπου  $l$  = το μήκος του ανοίγματος της δοκιμής,  $b$  = το πλάτος του δοκιμίου, και  $h$  = το ύψος του δοκιμίου.



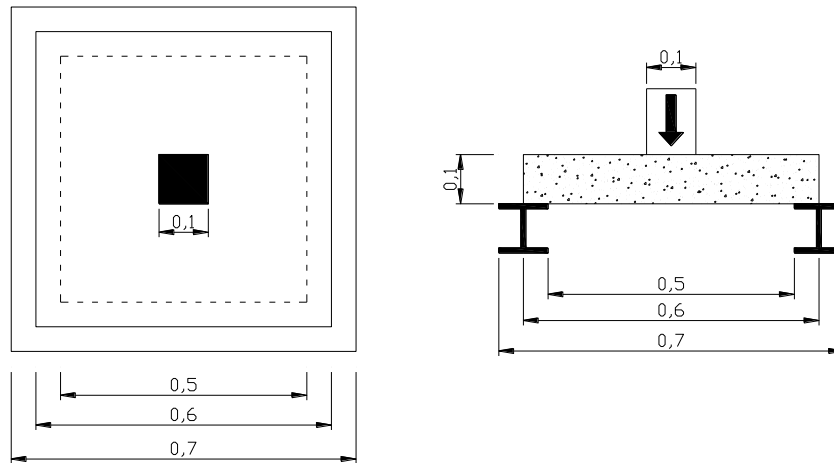
Σχήμα 4. Διάγραμμα φορτίου – βέλους

## 2.2 Έλεγχος σε τετράγωνες πλάκες

Ο έλεγχος της δυσθραυστότητας σε πλάκες γίνεται συνήθως με τη δοκιμή κάμψης-διείσδυσης τετραγωνικής πλάκας, η διάταξη της οποίας δείχνεται στο Σχήμα 5. Μία τετραέριστη τετραγωνική πλάκα πλευράς 600 mm και πάχους 100 mm φορτίζεται κεντρικά σε τετραγωνική επιφάνεια πλευράς 100 mm. Σχεδιάζεται η καμπύλη φορτίου – βέλους κάμψης και υπολογίζεται η απορροφούμενη ενέργεια μέχρι βέλους κάμψης 25 mm.

Η διαδοχική ρωγμάτωση της πλάκας, κατά τη φόρτιση, εξαναγκάζει την ενεργοποίηση των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών και την ανακατανομή

των τάσεων μέσα στην πλάκα. Η μορφή και η αντοχή των ινών καθορίζουν αν οι ίνες θα θραυστούν ή θα εξολκευτούν.



Σχήμα 5. Κάτοψη και κατακόρυφη τομή διάταξης δοκιμής τετραγωνικής πλάκας

Η δοκιμή αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρεία Γαλλικών σιδηροδρόμων και έτυχε διεθνούς αναγνώρισης ως μέθοδος κατάλληλη για την εκτίμηση της δυσθραυστότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Σύντομα ενσωματώθηκε στις οδηγίες της EFNARC (της Ευρωπαϊκής Ομοσπονδίας των Βιομηχανιών Ειδικών Χημικών των Κατασκευών και Συστημάτων Σκυροδέματος) ενώ περιλαμβάνεται στο προσχέδιο του ευρωπαϊκού πρότυπου CEN για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Σύμφωνα με την EFNARC (1996) διακρίνονται τρεις κατηγορίες ινοπλισμένου σκυροδέματος από πλευράς δυσθραυστότητας ανάλογα με την απορροφούμενη ενέργεια για βέλος κάμψης 25mm, σύμφωνα με τον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Κατάταξη ινοπλισμένου σκυροδέματος από πλευράς δυσθραυστότητας.

Κλάση	Ενέργεια (Joule)	Χρήση
A	500	Για υγιείς συνθήκες εδάφους/βράχου
B	700	Για μέτριες συνθήκες εδάφους/βράχου
Γ	1000	Για δύσκολες συνθήκες εδάφους/βράχου

Ο μηχανισμός αστοχίας της πλάκας είναι αντιπροσωπευτικός της συμπεριφοράς της επένδυσης μίας σήραγγας από ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Για διάνοιξη σήραγγας με τη νορβηγική μέθοδο (NMT), δίνεται σχετικό διάγραμμα απαίτησης για απορρόφηση ενέργειας, με βάση την ποιότητα της βραχομάζας και το μέγεθος του υπόγειου ανοίγματος.

### 2.3 Δοκιμή κυκλικής πλάκας (*Round Determinate Panel, RDP*)

Η δοκιμή κυκλική πλάκας αναπτύχθηκε από τον Bernard (1997) ως εναλλακτική μέθοδος για την εκτίμηση της δυσθραυστότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Το 2002 ενσωματώθηκε στους αμερικανικούς κανονισμούς με το πρότυπο ASTM C1550-02. Κατά τη δοκιμή αυτή κυκλική πλάκα διαμέτρου 800 mm και πάχους 75 mm φορτίζεται κεντρικά σε κυκλική επιφάνεια διαμέτρου 100 mm. Η πλάκα εδράζεται σε τρία σημεία περιφέρειας με διάμετρο 750 mm. Σχεδιάζεται το διάγραμμα φορτίου-βέλους κάμψης και υπολογίζεται η απορροφούμενη ενέργεια για βέλος κάμψης 40 mm. Τα αποτελέσματα της δοκιμής RDP μπορούν να συσχετισθούν με εκείνα της EFNARC σύμφωνα με τη σχέση

$$EFNARC_{25mm} (J) = 2.5 \times RDP_{40mm} (J) \quad (2)$$

## 3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΤΕΤΡΑΓΩΝΙΚΕΣ ΠΛΑΚΕΣ

Δοκίμια πλακών από ινοπλισμένο σκυρόδεμα, διαστάσεων 60x60 cm και πάχους 10 cm υποβάλλονται σε κάμψη με σκοπό τον προσδιορισμό της απορροφούμενης ενέργειας που αντιστοιχεί σε μετατόπιση του μέσου της πλάκας 25 mm (Κατσιογιάννη, 2004). Οι δοκιμές εκτελέστηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες της EFNARC ενώ η συντήρηση των δοκιμών γίνεται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ 303. Τα δοκίμια των πλακών έχουν στηρίξεις ελεύθερα στρεπτές σε απόσταση  $l=50$  cm και φορτίζονται κάθετα στο μέσον τους με καταναμημένο αξονικό φορτίο σε επιφάνεια 10x10 cm. Η τοποθέτηση των πλακών στη βάση έδρασης γίνεται με την ανώμαλη ελεύθερη επιφάνεια προς τα κάτω, δηλαδή, το φορτίο εφαρμόζεται αντίθετα από τη διεύθυνση χύτευσης.

Η δοκιμή εκτελείται με σταθερό ρυθμό αύξησης του βέλους κάμψης ίσο με 1.5 mm/min. Η δοκιμή συνεχίζεται έως ότου καταγραφεί μετατόπιση στο κέντρο της πλάκας 25 mm.

Εκτελέστηκαν τέσσερις σειρές δοκιμών με διαφοροποίηση της ποσότητας ή/και του είδους των ινών στα δοκίμια. Στον πίνακα 2 συνοψίζονται τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δοκιμών.



Σχήμα 1. Κάμψη και ρωγμάτωση πλακών

Πίνακας 2. Τύποι και δόσεις ινών στα πρισματικά δοκίμια.

Σειρά Δοκιμών	Τύπος ινών	Δόση ινών (kg/m <sup>3</sup> )
B	ΕΤΑΛ l=35mm, d=0.6mm, l/d=60, πλακίδια ινών με αγκυρώσεις	30
Γ	ΕΤΑΛ l=35mm, d=0.6mm, l/d=60, πλακίδια ινών με αγκυρώσεις	45
Δ	ΕΤΑΛ l=35mm, d=0.6mm, l/d=60, πλακίδια ινών με αγκυρώσεις	60
E	ΕΤΑΛ l=30mm, d=0.8mm, l/d=40, μεμονωμένες ίνες με αγκυρώσεις	45

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στον πίνακα 3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε τετραγωνικές πλάκες για τα τέσσερα δοκίμια. Στο Σχήμα 8 δίνονται τα διαγράμματα φορτίου – βέλους κάμψης στο κέντρο των δοκιμίων πλακών.

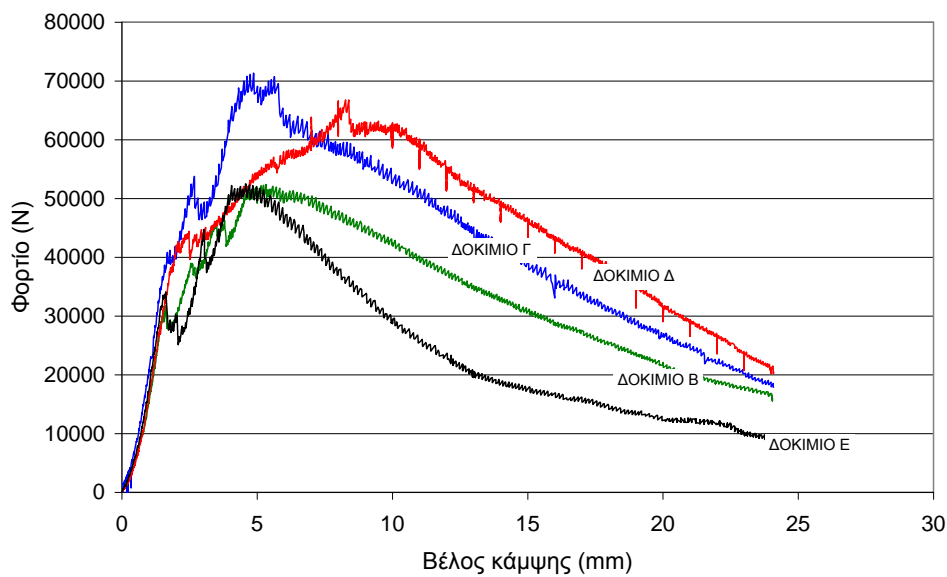
Όπως προκύπτει από τον πίνακα, για τον ίδιο τύπο ινών, η απόδοση των δοκιμίων αυξάνεται με την περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε ίνες. Το δοκίμιο B με τη μικρότερη περιεκτικότητα ινών (30 kg/m<sup>3</sup>) παρουσίασε τη μικρότερη αντοχή εμφανίζοντας την πρώτη ρωγμή για φορτίο 30 kN, ενώ το μέγιστο φορτίο αστοχίας ήταν περίπου 50 kN. Το φορτίο πρώτης ρωγμής για το δοκίμιο Γ (45 kg/m<sup>3</sup>) είναι περίπου 40 kN, ενώ το μέγιστο φορτίο αστοχίας περίπου 70 kN. Το δοκίμιο Δ (60 kg/m<sup>3</sup>) παρουσίασε την καλύτερη συμπεριφορά με φορτίο πρώτης ρωγμής 45 kN και μέγιστο



φορτίο αστοχίας 67 kN. Τέλος το φορτίο πρώτης ρωγμής για το δοκίμιο E ( $45 \text{ kg/m}^3$ ) είναι περίπου 34 kN και το μέγιστο φορτίο αστοχίας 51 kN.

Πίνακας 3. Τύποι και δόσεις ινών στα πρισματικά δοκίμια.

Δοκίμιο	Φορτίο πρώτης ρωγμής (kN)	Φορτίο αστοχίας (kN)	Ενέργεια (Joule)
B	30	50	791
Γ	40	70	1006
Δ	45	67	1052
E	34	51	597



Σχήμα 8. Διαγράμματα φορτίου-βέλους κάμψης των δοκιμίων πλακών που εξετάστηκαν.

Αν και είναι γενικά παραδεκτό ότι το φορτίο πρώτης ρωγμής δεν εξαρτάται από την περιεκτικότητα των ινών τα πειράματα δεικνύουν μία αύξηση αυτού με την αύξηση της περιεκτικότητας τους. Λόγω του περιορισμένου αριθμού δοκιμίων που εξετάστηκαν ενδέχεται η αύξηση που παρατηρείται να είναι στατιστικού χαρακτήρα.

Από την περαιτέρω επεξεργασία των μετρήσεων προέκυψε η απορρόφηση ενέργειας για μετατόπιση 25 mm, ίση με 791 Joule, 1006 Joule, 1052 Joule και 597 Joule για τα δοκίμια Β, Γ, Δ και Ε αντίστοιχα.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμίων Γ και Ε, τα οποία περιέχουν ίδιο ποσοστό ινών αλλά διαφορετικής

ποιότητας. Είναι εμφανές ότι το σκυρόδεμα με λεπτές και μακριές ίνες (δοκίμιο Γ) παρουσιάζει καλύτερη απόδοση διότι αυξάνεται το μήκος αγκύρωσης των ινών στη μήτρα του σκυροδέματος. Επομένως, το δοκίμιο Γ αστοχεί σε διαρροή και στη συνέχεια επέρχεται θραύση, ενώ στο δοκίμιο Ε η αστοχία της αντοχής του ινοσκυροδέματος οφείλεται κυρίως στην εξόλκευση των ινών. Χαρακτηριστική είναι και η σύγκριση της δυσθραυστότητας. Παρατηρούμε ότι η απορροφούμενη ενέργεια του δοκιμίου Ε (597 Joule) είναι σχεδόν η μισή της ενέργειας που απορροφάται από το δοκίμιο Γ (1006 Joule).

Συγκρίνοντας τα δοκίμια Β και Ε, προκύπτει ότι είναι προτιμητέο να χρησιμοποιούνται μικρότερες ποσότητες ινών με μικρή διάμετρο και μεγάλο μήκος παρά υψηλές περιεκτικότητες με μεγαλύτερες διαμέτρους και μικρότερα μήκη. Το γεγονός αυτό δεν διευκολύνει μόνο τη διαδικασία παραγωγής του ινοσκυροδέματος, αλλά εξασφαλίζει και υψηλότερη απόδοση του τελικού προϊόντος.

Το ινοσκυρόδεμα του δοκιμίου Β, με απορρόφηση ενέργειας 791 Joule, για 25 mm βέλος κάμψης, κατατάσσεται στη Β κατηγορία δυσθραυστότητας του πίνακα 1 και η χρήση του ενδείκνυται για μέτριες συνθήκες εδάφους/βράχου. Το ινοσκυρόδεμα του δοκιμίου Γ με απορρόφηση ενέργειας 1006 Joule, κατατάσσεται στη Γ κατηγορία δυσθραυστότητας και η χρήση του ενδείκνυται για δύσκολες συνθήκες εδάφους/βράχου. Ομοίως και το ινοσκυρόδεμα του δοκιμίου Δ με απορρόφηση ενέργειας 1052 Joule. Τέλος το ινοσκυρόδεμα του δοκιμίου Ε με απορρόφηση ενέργειας 597 Joule κατατάσσεται στην Α κατηγορία δυσθραυστότητας και είναι κατάλληλο για υγιείς συνθήκες εδάφους/βράχου.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μηχανική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος επί τόπου εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, που ξεκινούν από τα υλικά και καταλήγουν στην εκτέλεση της εργασίας και στη συντήρηση. Στα έργα, προδιαγράφονται συνήθως η απαιτούμενη ποσότητα των ινών και τα γενικά γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά, ευελπιστώντας ότι κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η επιζητούμενη μηχανική συμπεριφορά του υλικού του φορέα, κάτι που όμως είναι μεγάλο και αδιαμφισβήτητο λάθος. Η ποσότητα τους μετριέται συνήθως σε ποσοστό κατά βάρος ή όγκο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους αφορούν όρια για το λόγο μορφής, το σχήμα, και την επιφανειακή υφή των ινών. Για μεγάλη (>60 kg/m<sup>3</sup>) ποσότητα ινών το εργάσιμο γίνεται προβληματικό ενώ για μικρή, π.χ. <25kg/m<sup>3</sup> (1% κ.β ή

0.33% κ.ο.), το αποτέλεσμα των ινών στις μηχανικές ιδιότητες είναι απρόβλεπτο και συχνά ανεπαίσθητο. Επιθυμητός είναι επίσης ο μεγάλος λόγος μορφής, που όμως δημιουργεί προβλήματα στην ανάμιξη. Γι' αυτό, συνήθως επιλέγεται λόγος μορφής μεταξύ 50 και 100 που αντιστοιχεί σε υποκρίσιμο μήκος.

Δεδομένης της πολυπλοκότητας των υπεισερχόμενων παραγόντων στην ποιότητα του ινοπλισμένου εκτοξευόμενου σκυροδέματος, κρίθηκε ότι είναι απαραίτητος ο εργαστηριακός ποιοτικός έλεγχος προκειμένου να εκτιμηθεί το ποσοστό ινών που θα εξασφαλίζει τις απαιτούμενες βελτιωτικές ιδιότητές του. Η πιο χαρακτηριστική τέτοια βελτίωση, είναι η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας πριν τη θραύση, σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, που όμως πραγματοποιείται μετά το άνοιγμα των ρωγμών και μετά από κάποια παραμόρφωση του υλικού. Μετά τη ρωγμάτωση όμως, οι ίνες εξακολουθούν να αναλαμβάνουν εφελκυστικές δυνάμεις και έτσι προσδίδουν στο υλικό πλαστιμότητα.

Οι δοκιμές δυσθραυστότητας σε πλάκες χαρακτηρίζονται ως αξιόπιστες και αντιπροσωπευτικές, διότι προσομοιώνουν την επένδυση μιας σήραγγας από ινοπλισμένο σκυρόδεμα, η οποία είναι ηλωμένη στο πέτρωμα. Η στήριξη των πλακών κατά τη δοκιμή σε 4 άκρες μιμείται τη συνέχεια της επένδυσης κατά μήκος και εγκάρσια στον άξονα της σήραγγας. Αντίστοιχα, στα πραγματικά στοιχεία η ανάληψη τάσεων πραγματοποιείται στον επιφανειακό φορέα της επένδυσης και όχι σε μία κατεύθυνση όπως στα πρισματικά δοκίμια. Επιπλέον, η φορτιζόμενη πλάκα είναι υπερστατικός φορέας, με αποτέλεσμα μετά τη διαρροή της να ανακατανέμει τις τάσεις προς ανθεκτικότερες περιοχές του επιφανειακού φορέα. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα η δοκιμή φόρτισης πλακός να προσομοιώνει σε πολλές περιπτώσεις αξιόπιστα την πραγματική συμπεριφορά της επένδυσης από ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Η απόδοση ινών που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα και η σχέση της ποσότητάς τους με την αποτελεσματικότητά τους, ελέγχθηκε στο εργαστήριο πειραματικά σε πρότυπες ινοπλισμένες πλάκες σκυροδέματος. Τα πειράματα, μολονότι λίγα, απέδειξαν ότι ο καθορισμός της ποσότητας των ινών σαφώς δεν αρκεί για τον έλεγχο της μηχανικής συμπεριφοράς του υλικού. Ο εργαστηριακός ποιοτικός έλεγχος του ινοπλισμένου σκυροδέματος αποτελεί το μόνο τρόπο προσδιορισμού και επιβεβαίωσης του ακριβούς ποσοστού ινών που θα εξασφαλίζει τις απαιτούμενες ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος στη σηραγγοποιία.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ACI Cement and Concrete Terminology, ACI Standard 116R-00, (2000).
- ACI Guide to Shotcrete, ACI Standard 506R-90, (1995).
- ASTM Standard specification for steel fibers for fiber reinforced concrete, ASTM A820M-06 (2006).
- ASTM Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete, ASTM C1018-97 (1997).
- ASTM Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel), ASTM C1550-03 (2003).
- ASTM Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM C78-02 (2002).
- DBV 211. "Bemessung von Stahlfaserbeton im Tunnelbau", Bochum (1999)
- EFNARC European Specification for Sprayed Concrete (1996).
- ΚΕΔΕ Σχέδιο Προδιαγραφής για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, Αθήνα (2000)
- JSCE Methods of tests for flexural strength and flexural toughness of fibre reinforced concrete, JSCE Standard, SF4-84 (1984).
- Κατσιογιάννη, Π.Γ. «Ινοπλισμένο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα – Εφαρμογές στην Ελλάδα», Διπλωματική Εργασία (υπό την επίβλεψη του Καθ. Α. Σοφιανού), Σχολή Μηχ. Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Ε.Μ.Π., Αθήνα (2004).