

## Νέα γενιά συνθέτων υλικών ανόργανης μήτρας (TRM) για την ενίσχυση κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος

Αθ. Χ. Τριανταφύλλου

*Καθηγητής. Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών.*

Αικ. Γ. Παπανικολάου

*Λέκτορας. Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών.*

Δ. Μπουρνάς & Π. Λόντου

*Μεταπτυχιακοί φοιτητές. Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών.*

*Λέξεις κλειδιά:* Ενισχύσεις, ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα, οπλισμένο σκυρόδεμα, σύνθετα υλικά

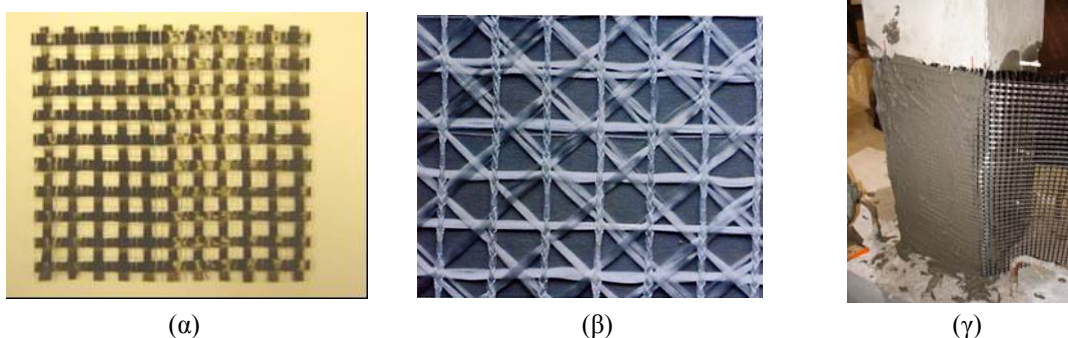
**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην εργασία αναπτύσσεται μια νέα τεχνική ενίσχυσης δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Η τεχνική βασίζεται στη χρήση συνθέτων υλικών, τα οποία αποτελούνται από ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (π.χ. κονίαμα με βάση το τσιμέντο), αποσκοπώντας στην επίλυση προβλημάτων που χαρακτηρίζουν τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) σχετικά με την χρήση εποξειδικών ρητινών. Τα ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (textile-reinforced mortars – TRM) δοκιμάζονται στη μορφή μανδύα για την ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος με στόχο την περισφιγξη, την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων, την ενίσχυση έναντι τέμνουσας και την ενίσχυση έναντι κάμψης. Καταδεικνύεται ότι η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM είναι υψηλή και γενικώς παρόμοια με αυτήν των μανδύων ΙΟΠ.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βλάβες που προκαλούνται από σεισμούς σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος, η προσεισμική ενίσχυση, η γήρανση και φθορά των κατασκευών (π.χ. λόγω διάβρωσης των οπλισμών) και η αλλαγή χρήσης οδηγούν ολοένα και περισσότερο προς την αναζήτηση νέων υλικών και τεχνικών επεμβάσεων οι οποίες να εξασφαλίζουν αποτελεσματικότητα, ταχύτητα και ευκολία στην εφαρμογή, διατήρηση της γεωμετρίας των δομικών στοιχείων καθώς και μείωση του κόστους. Προς την κατεύθυνση αυτή αναπτύχθηκε τα τελευταία 20 έτη περίπου η τεχνική επεμβάσεων με ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ), η οποία αξιοποιεί ιδιότητες των υλικών αυτών όπως είναι η εξαιρετικά υψηλή εφελκυστική αντοχή, η ανθεκτικότητα στο χρόνο, το χαμηλό βάρος και η ικανοποιητική παραμορφωσιμότητα. Έτσι, τόσο διεθνώς όσο και στη χώρα μας, ο αριθμός επεμβάσεων σε υφιστάμενα δομήματα όπου γίνεται χρήση ΙΟΠ αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς. Προς την κατεύθυνση αυτή έχει βοηθήσει σημαντικά και η πλούσια διεθνής βιβλιογραφία, η οποία έχει φωτίσει πάρα πολλές πτυχές του πεδίου των επεμβάσεων με ΙΟΠ. Παρόλα τα πλεονεκτήματά της, η τεχνική των ινοπλισμένων πολυμερών έχει ορισμένες εγγενείς αδυναμίες, οι οποίες ουσιαστικά οφείλονται στην χρήση ρητινών (κατά κανόνα εποξειδικών). Εν περιλήψει οι αδυναμίες αυτές αφορούν: (α) στην πτωχή συμπεριφορά (απώλεια αντοχής) των ρητινών σε θερμοκρασίες πάνω από την θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (της τάξης των 70-80° C), (β) στο σχετικά υψηλό κόστος των ρητινών, (γ) στην αδυναμία εφαρμογής σε υγρές επιφάνειες (εκτός

αν γίνει χρήση ρητινών ειδικού τύπου), (δ) στον περιορισμό της ικανότητας “αναπνοής” των δομικών στοιχείων που καλύπτονται από μανδύες ΙΟΠ, (ε) στην ασυμβατότητα ρητινών με υλικά ιστορικών κατασκευών και (στ) στην δυσκολία διεξαγωγής μη καταστροφικής αποτίμησης πιθανών βλαβών “πίσω” από μανδύες ΙΟΠ μετά από σεισμούς.

Μια εκ πρώτης όψεως λογικοφανής λύση στα παραπάνω προβλήματα θα μπορούσε να είναι η αντικατάσταση της ρητίνης, η οποία αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των συνεχών ινών, δηλαδή την “μήτρα”, με πολύ λεπτόκοκκο υλικό ανόργανης σύστασης, π.χ. τύπου κονιάματος με βάση το τσιμέντο. Τέτοιες λύσεις έχουν δοκιμασθεί τα τελευταία χρόνια χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία, διότι η κοκκομετρία των κονιαμάτων, ακόμα και των εξαιρετικά λεπτόκοκκων, δεν επιτρέπει τον πλήρη εμποτισμό των ινών, με αποτέλεσμα την εμφάνιση πτωχών χαρακτηριστικών συνάφειας μεταξύ των ινών και του μητρικού υλικού (κονίαμα). Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική πρόταση, η οποία αναπτύσσεται και μελετάται συστηματικά τα τελευταία τέσσερα χρόνια περίπου στο Εργαστήριο Μηχανικής & Τεχνολογίας Υλικών, είναι αυτή της αντικατάστασης των “συμβατικών” υφασμάτων συνεχών ινών (συνήθως) μίας διεύθυνσης με υφάσματα ινών σε μορφή πλέγματος (textile) με βροχιδές. Τα πλέγματα αυτά μπορούν να κατασκευάζονται από δέσμες ινών ανά αποστάσεις σε δύο ή περισσότερες διευθύνσεις (π.χ. Σχήμα 1α,β), έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η καλή συνεργασία ινών – μητρικού υλικού (δηλαδή κονιάματος) κυρίως μέσω μηχανικής εμπλοκής του κονιάματος στα κενά μεταξύ των δεσμών (Σχήμα 1γ). Ο όρος που έχει προταθεί από τους συγγραφείς στην διεθνή βιβλιογραφία για τα “νέα” αυτά σύνθετα υλικά μανδύων ενίσχυσης είναι Textile-Reinforced Mortars (TRM), που στην Ελληνική γλώσσα θα μπορούσε να αποδοθεί ως Ινοπλέγματα σε Ανόργανη Μήτρα (IAM). Τα πλέγματα αυτά παρασκευάζονται από συνήθεις ίνες άνθρακα, υάλου κλπ. Σημειώνεται πάντως ότι στην περίπτωση πλεγμάτων από ίνες υάλου θα πρέπει να γίνεται είτε χρήση υάλου τύπου AR (alkali-resistant) είτε προεμποτισμός των δεσμών με κάποιο πολυμερές χαμηλού κόστους, ώστε να αποφεύγεται η πρόωμη φθορά των ινών λόγω της υψηλής αλκαλικότητας των κονιαμάτων.



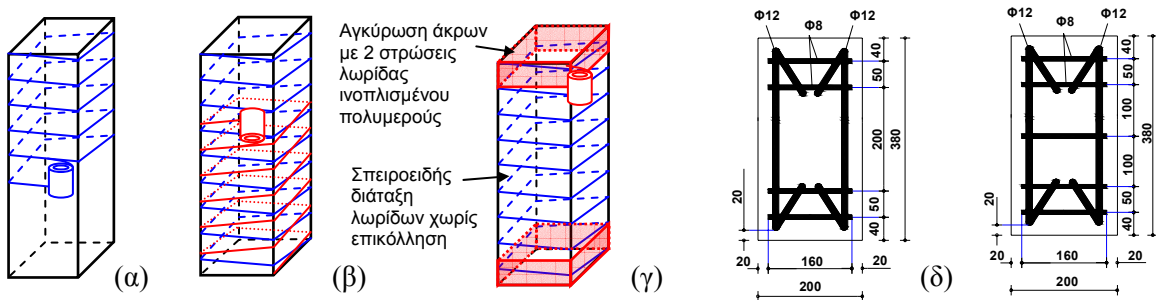
Σχήμα 1. Πλέγματα ινών (α) δύο διευθύνσεων και (β) τεσσάρων διευθύνσεων. (γ) Εφαρμογή ινοπλεγμάτων σε κονίαμα στη βάση υποστυλώματος.

Οι πρώτες εργασίες όπου ινοπλέγματα συνδυάστηκαν με κονιάματα για την ενίσχυση δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος ήταν αυτές των Curbach & Brueckner (2003) και Curbach & Ortler (2003). Στις εργασίες αυτές γίνονται μελέτες συνάφειας ινοπλεγμάτων ανόργανης μήτρας – σκυροδέματος και παρουσιάζονται αποτελέσματα δοκιμών κάμψης επί δοκών ενισχυμένων με υαλοπλέγματα σε τσιμεντοκονίαμα. Η χρήση των ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα για την κατασκευή μανδύων με στόχο την περίσφιξη σκυροδέματος και την ενίσχυση έναντι τέμνουσας παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στις εργασίες των Triantafyllou & Papanicolaou (2005), Triantafyllou et al. (2006) και Triantafyllou & Papanicolaou (2006). Στην παρούσα εργασία γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων από ορισμένες δοκιμές όπου έγινε χρήση μανδύων ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα, αλλά και σύγκριση αυτών με ισοδύναμους μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, με στόχο: (α) Την περίσφιξη άοπλου και οπλισμένου

σκυροδέματος υπό αξονική θλίψη. (β) Την αύξηση της πλαστιμότητας υποστρωμάτων μέσω περισφιγξης στα άκρα. (γ) Την ενίσχυση δομικών στοιχείων έναντι τέμνουσας. (δ) Την ενίσχυση στοιχείων τύπου δοκού έναντι κάμψης. Εκ των αποτελεσμάτων συνάγεται ότι η προτεινόμενη τεχνική είναι εξαιρετικής αποτελεσματικότητας, η οποία είναι συγκρίσιμη αυτής των ινοπλισμένων πολυμερών.

## 2 ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗ ΑΟΠΛΩΝ ΚΑΙ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την μελέτη της περισφιγξης σκυροδέματος με μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (TRM) διεξήχθη πειραματικό πρόγραμμα το οποίο περιελάμβανε δοκιμές κεντρικής θλίψης σε τέσσερις ομάδες δοκιμών. Κύριοι στόχοι του πειραματικού προγράμματος ήταν να μελετηθούν: (1) Ο ρόλος της αντοχής του κονιάματος στα χαρακτηριστικά περισφιγξης του άοπλου σκυροδέματος (Ομάδα Α). (2) Η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM συγκριτικά με αυτήν των μανδύων ΙΟΠ ως προς την περισφιγξη άοπλου σκυροδέματος (Ομάδες Β και C). (3) Ο ρόλος του αριθμού των στρώσεων μανδύων TRM στην περισφιγξη άοπλου σκυροδέματος (Ομάδες Α, Β και C). (4) Η αποτελεσματικότητα μιας νέας τεχνικής, βάσει της οποίας η περισφιγξη επιβάλλεται μέσω λωρίδων σε σπειροειδή διάταξη χωρίς επικόλληση (Σχ. 2α-γ), με εξαίρεση στα άκρα (Ομάδα C). (5) Η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM συγκριτικά με αυτήν των μανδύων ΙΟΠ ως προς την περισφιγξη οπλισμένου σκυροδέματος για διαφορετικές αποστάσεις συνδετήρων (Ομάδα D).



Σχήμα 2. Γεωμετρικές λεπτομέρειες δοκιμών. (α)-(γ) Εφαρμογή λωρίδων σε σπειροειδή διάταξη χωρίς επικόλληση (Ομάδα C). (δ) Πρισματικά δοκίμια Ομάδας D.

Για την πειραματική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν: (α) Άοπλα κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm (Ομάδες Α και Β). (β) Άοπλα πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής 250×250 mm και ύψους 700 mm (Ομάδα C). (γ) Οπλισμένα πρισματικά δοκίμια τετραγωνικής διατομής 200×200 mm και ύψους 700 mm (Ομάδα D). Τα δοκίμια κάθε ομάδας παρασκευάστηκαν από εργοστασιακό σκυρόδεμα, το οποίο ήταν το ίδιο για κάθε ομάδα αλλά ελαφρώς διαφορετικό μεταξύ ομάδων, λόγω σκυροδετήσεων σε διαφορετικές ημέρες. Τα δοκίμια της Ομάδας D ήταν οπλισμένα με κλωβούς οπλισμών που αποτελούνταν από τέσσερις διαμήκεις ράβδους Φ12 και από συνδετήρες Φ8 σε αραιή (ανά 200 mm) ή πυκνή (ανά 100 mm) διάταξη κατηγορίας S500 με τάση διαρροής 560 N/mm<sup>2</sup>. Όλες οι γεωμετρικές λεπτομέρειες των δοκιμών της Ομάδας D απεικονίζονται στο Σχήμα 2δ. Σημειώνεται ότι κατά την σκυροδέτηση των πρισματικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν τεταρτοκύκλια πλαστικού σωλήνα στους μεταλοτύπους για καμπύλωση των γωνιών της διατομής με ακτίνα καμπυλότητας 15 mm και 25 mm για τα δοκίμια των Ομάδων C και D, αντιστοίχως, ώστε να αποφευχθεί πρόωμη αστοχία του μανδύα συνθέτων υλικών λόγω συγκέντρωσης τάσεων.

Η σήμανση των δοκιμών (Πίνακας 1) δίνεται ως Y\_XN<sub>Z</sub>, όπου:

- Y δηλώνει τον κωδικό της ομάδας (A, B, C, D).

- X δηλώνει τον τύπο μανδύα [C για δοκίμια αναφοράς, δηλ. χωρίς μανδύα, M για δοκίμια με μανδύα κονιάματος, M1 και M2 για δοκίμια με μανδύα κονιάματος Τύπου I και II, αντιστοίχως (το κονίαμα I είχε μικρότερη αντοχή σε σχέση με το II), R για δοκίμια με μανδύα όπου η μήτρα των συνθέτων υλικών είναι ρητίνη και A για δοκίμια όπου ο μανδύας κατασκευάζεται μέσω λωρίδων σε σπειροειδή διάταξη χωρίς επικόλληση, με εξαίρεση στα άκρα].
- N δηλώνει τον αριθμό των στρώσεων.
- Ο υποδείκτης z (στα δοκίμια της Ομάδας D μόνον) δηλώνει την ύπαρξη ή όχι συνδετήρων καθώς και την απόσταση αυτών ( $l_U$  για άοπλα δοκίμια,  $s_{20}$  για δοκίμια με απόσταση συνδετήρων 200 mm και  $s_{10}$  για δοκίμια με απόσταση συνδετήρων 100 mm).

Με εξαίρεση εκείνα τα δοκίμια της Ομάδας D στα οποία εφαρμόστηκαν μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, η ενίσχυση των δοκιμίων έγινε με πλέγματα συνεχών ινών (textiles) δύο διευθύνσεων. Τα πλέγματα αποτελούνταν από δέσμες ινών άνθρακα σε απόσταση 10 mm (από άξονα σε άξονα) και είχαν μάζα  $168 \text{ g/m}^2$  και ονομαστικό πάχος 0.047 mm (υπολογισμένο βάσει ισοδύναμης κατανομής των ινών σε ομοιόμορφη διάταξη ανά διεύθυνση – smeared distribution, δηλαδή χωρίς τα κενά των βροχίδων) για τα δοκίμια των Ομάδων A, B και C (Tex1), ενώ οι αντίστοιχες τιμές για το πλέγμα της Ομάδας D (Tex2) ήταν διπλάσιες. Σημειώνεται ότι στο πλέγμα των Ομάδων A, B και C οι ίνες ήταν σε “ξηρή” κατάσταση, δηλαδή μη εμποτισμένες, ενώ στο πλέγμα της ομάδας D οι ίνες ήταν εμποτισμένες με πολυμερές χαμηλής αντοχής. Η εγγυημένη εφελκυστική αντοχή των ινών σε κάθε μία από τις δύο κύριες διευθύνσεις ήταν  $3350 \text{ N/mm}^2$  για το Tex1 και  $3545 \text{ N/mm}^2$  για το Tex2. Στα δοκίμια της Ομάδας D ( $D_{RNz}$ ) που κατασκευάστηκαν μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών χρησιμοποιήθηκαν υφάσματα ινών άνθρακα μιας διεύθυνσης με μάζα  $300 \text{ g/m}^2$ , ονομαστικό πάχος 0.17 mm και εφελκυστική αντοχή  $3790 \text{ N/mm}^2$ . Το μέτρο ελαστικότητας των ινών στα πλέγματα και στο ύφασμα ήταν περίπου  $225\text{-}230 \text{ kN/mm}^2$ . Τα κονιάματα M1 και M2 είχαν ως βάση το τσιμέντο και περιείχαν πολυμερή σε ποσοστό έως 10% κ.β. επί του συνολικού βάρους της κονιάς σε ξηρή μορφή. Το κονίαμα M1 είχε μέση αντοχή 28 ημερών  $8.6 \text{ N/mm}^2$  σε θλίψη και  $3.3 \text{ N/mm}^2$  σε εφελκυσμό από κάμψη. Οι αντίστοιχες τιμές για το κονίαμα M2 ήταν  $30.6 \text{ N/mm}^2$  και  $4.3 \text{ N/mm}^2$ . Τέλος, το κονίαμα που χρησιμοποιήθηκε στους μανδύες της Ομάδας D (δοκίμια  $D_{M4z}$  και  $D_{M6z}$ ) είχε μέση αντοχή 28 ημερών  $22.1 \text{ N/mm}^2$  σε θλίψη και  $6.8 \text{ N/mm}^2$  σε εφελκυσμό από κάμψη.

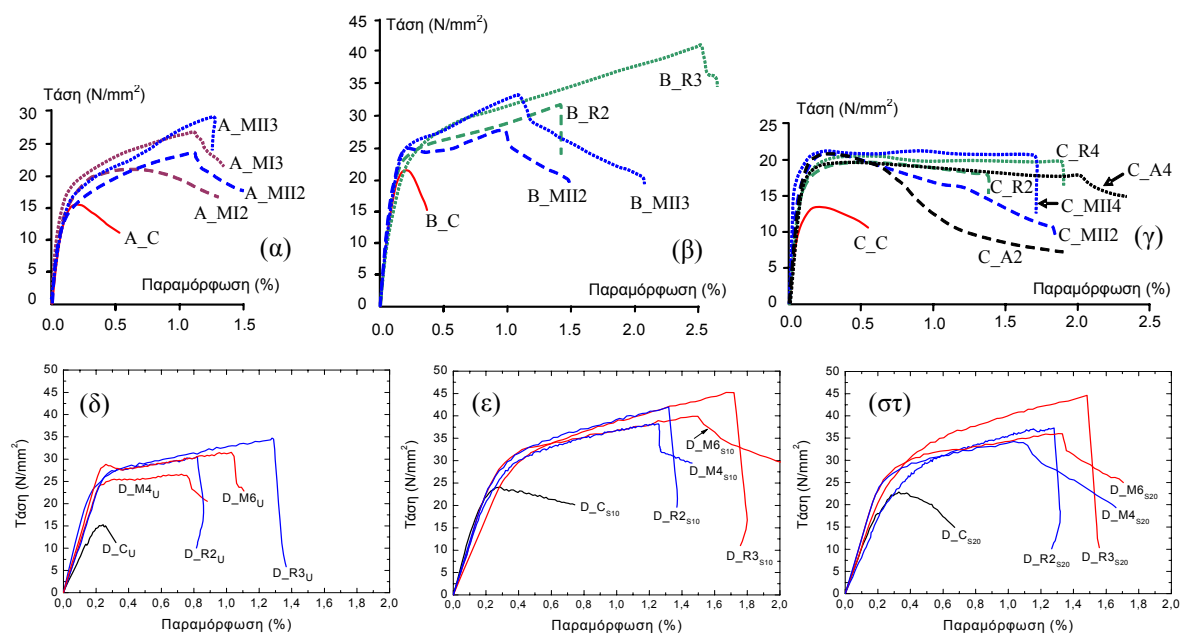
Όλα τα δοκίμια υπεβλήθησαν σε μονοτονική θλιπτική καταπόνηση επιβαλλόμενης μετατόπισης με ταχύτητα  $0.01 \text{ mm/s}$  και  $0.05 \text{ mm/s}$  για τις Ομάδες A-C και D, αντιστοίχως, μέσω μηχανής θλίψης δυναμικότητας 4000 kN. Τα φορτία μετρούνταν μέσω της δυναμοκυψέλης και οι αξονικές παραμορφώσεις μέσω ηλεκτρομηκυσιομέτρων στις απέναντι πλευρές κάθε δοκιμίου. Ενδεικτικά αποτελέσματα σε μορφή καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης δίνονται στο Σχήμα 3 και οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων για την αντοχή ( $f_{cc}$ ), την οριακή παραμόρφωση ( $\epsilon_{ccu}$ ) και τους λόγους αντοχής και οριακής παραμόρφωσης περισφιγμένου σκυροδέματος προς τις αντίστοιχες τιμές για το απερίσφιγκτο δίνονται στον Πίνακα 1.

Τονίζεται ότι ανά ζεύγη (TRM και IOΠ) τα δοκίμια ήταν ενισχυμένα με μανδύες ίσης δυστένειας, ώστε να είναι εύκολη η άμεση σύγκριση της αποτελεσματικότητας των μανδύων TRM (ανόργανης μήτρας) ως προς αυτήν των αντιστοιχών IOΠ (πολυμερικής μήτρας). Για τις Ομάδες A-C τούτο επετεύχθη χρησιμοποιώντας το ίδιο πλέγμα ινών στους μανδύες TRM και IOΠ, ενώ για την Ομάδα D οι μανδύες TRM αποτελούνταν από περισσότερες στρώσεις των αντιστοιχών IOΠ, ώστε να διατηρείται σταθερό το γινόμενο του αριθμού των στρώσεων επί το πάχος κάθε στρώσης (οι ίνες ήταν ίδιες). Έτσι, τα εξής ζεύγη δοκιμίων είναι ισοδύναμα ως προς την δυστένεια των μανδύων: B\_R2 με B\_M12, B\_R3 με B\_M13, C\_R2 με C\_M12, C\_R4 με C\_M14, D\_R2z με D\_M4z, D\_R3z με D\_M6z.

Πίνακας 1. Αντοχή και οριακή παραμόρφωση δοκιμίων θλίψης \*

Σήμανση δοκιμίων	Αντοχή $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Οριακή παραμ/ση $\varepsilon_{ccu}$ (%)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{co}}$	Σήμανση δοκιμίων	Αντοχή $f_{cc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	Οριακή παραμ/ση $\varepsilon_{ccu}$ (%)	$\frac{f_{cc}}{f_{co}}$	$\frac{\varepsilon_{ccu}}{\varepsilon_{co}}$
<b>Ομάδα A</b>					<b>Ομάδα D</b>				
A_C	15.24	0.20	1.00	1.00	D_C <sub>U</sub>	15.28	0.24	1.00	1.00
A_MI2	20.77	0.96	1.36	4.80	D_R2 <sub>U</sub>	30.59	0.82	2.00	3.42
A_MII2	23.88	1.08	1.57	5.40	D_R3 <sub>U</sub>	34.71	1.28	2.27	5.33
A_MI3	26.50	1.13	1.74	5.65	D_M4 <sub>U</sub>	26.60	0.76	1.74	3.17
A_MII3	27.00	1.22	1.77	6.10	D_M6 <sub>U</sub>	31.55	1.06	2.07	4.42
<b>Ομάδα B</b>					<b>Ομάδα D</b>				
B_C	21.81	0.20	1.00	1.00	D_C <sub>S10</sub>	24.11	0.29	1.00	1.00
B_R2	33.47	1.67	1.53	8.35	D_R2 <sub>S10</sub>	41.97	1.32	1.74	4.55
B_MII2	27.36	0.98	1.25	4.90	D_R3 <sub>S10</sub>	45.23	1.72	1.88	5.93
B_R3	41.94	2.55	1.92	12.75	D_M4 <sub>S10</sub>	38.28	1.26	1.59	4.34
B_MII3	32.44	1.08	1.49	5.40	D_M6 <sub>S10</sub>	39.91	1.50	1.66	5.17
<b>Ομάδα C</b>					<b>Ομάδα D</b>				
C_C	14.25	0.20	1.00	1.00	D_C <sub>S20</sub>	22.89	0.33	1.00	1.00
C_R2	18.41	1.24	1.29	6.20	D_R2 <sub>S20</sub>	37.27	1.28	1.63	3.88
C_MII2	20.00	1.18	1.40	5.90	D_R3 <sub>S20</sub>	44.65	1.48	1.95	4.48
C_A2	19.86	0.79	1.39	3.95	D_M4 <sub>S20</sub>	34.24	1.12	1.50	3.39
C_R4	20.97	2.03	1.47	10.15	D_M6 <sub>S20</sub>	36.03	1.33	1.57	4.03
C_MII4	21.56	1.76	1.51	8.80					
C_A4	20.64	1.76	1.45	8.80					

\* Οι τιμές του Πίνακα είναι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων τριών δοκιμίων για τις Ομάδες A-B και δύο δοκιμίων για την Ομάδα C. Τα δοκίμια της Ομάδας D ήταν ένα ανά κατηγορία.  $f_{co}$  και  $\varepsilon_{co}$  είναι η αντοχή και η αντίστοιχη παραμόρφωση των δοκιμίων αναφοράς. Η  $\varepsilon_{co}$  για τα δοκίμια των Ομάδων A-C ελήφθη ίση με 0.2% (τιμή πολύ κοντά στην μετρηθείσα) ενώ για τα δοκίμια της Ομάδας D ελήφθη όπως ακριβώς μετρήθηκε. Η  $\varepsilon_{ccu}$  ορίζεται στο σημείο της καμπύλης όπου είτε καταγράφεται σαφής πτώση του φορτίου (λόγω θραύσης τμήματος του μανδύα) είτε το φορτίο έχει μειωθεί κατά 20% σε σχέση με την μέγιστη τιμή του. Εξαιρέση αποτελούν τα δοκίμια αναφοράς, για τα οποία ελήφθη  $\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{co}$ .



Σχήμα 3. Τυπικές καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για δοκίμια (α) Ομάδας A (κύλινδροι), (β) Ομάδας B (κύλινδροι), (γ) Ομάδας C (άοπλα πρίσματα) και (δ)-(στ) Ομάδας D (οπλισμένα πρίσματα).

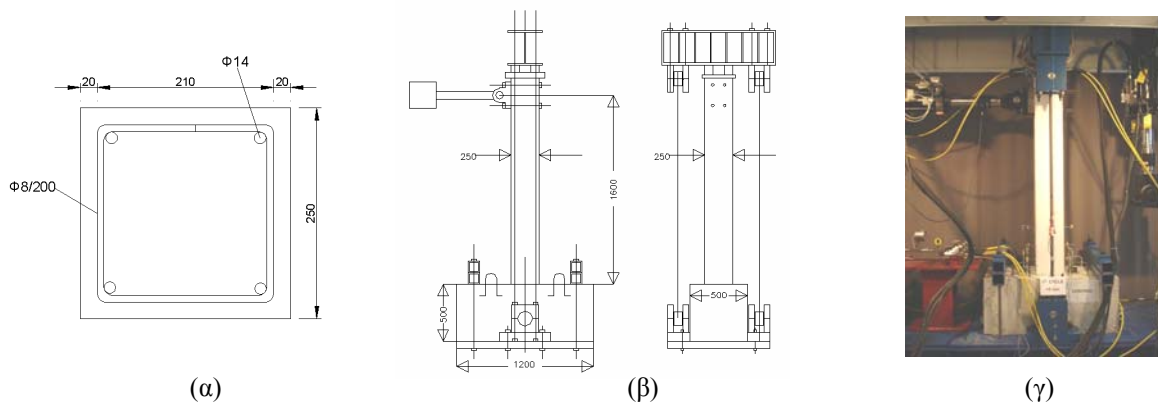
Από τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα συνάγονται τα εξής συμπεράσματα:

- Η αποτελεσματικότητα των μανδύων από ινοπλέγματα σε ανόργανη μήτρα (TRM) ως προς την αύξηση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας στοιχείων άοπλου ή οπλισμένου σκυροδέματος είναι γενικώς υψηλή και μόνον ελαφρώς μειωμένη ως προς την αντίστοιχη των μανδύων από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ). Η μείωση αυτή είναι εντονότερη στην περίπτωση περίσφιγξης άοπλων κυλινδρικών στοιχείων, αλλά εξαιρετικά περιορισμένη, της τάξης του 10%, στην περίπτωση οπλισμένων στοιχείων, όπου κύριος στόχος της περίσφιγξης είναι η καθυστέρηση του λυγισμού των διαμήκων ράβδων.
- Όπως και στην περίπτωση μανδύων ΙΟΠ, η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM αυξάνεται (μη αναλογικά) με τον αριθμό των στρώσεων.
- Η μορφή των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης σκυροδέματος περισφιγμένου με μανδύες TRM έχει την (γνώριμη) περίπου διγραμμική μορφή που παρατηρείται και στο σκυρόδεμα με μανδύες ΙΟΠ. Υπό την προϋπόθεση κατάλληλης επιλογής κονιάματος, οι μανδύες TRM εξαντλούν την εφελκυστική αντοχή τους, γεγονός που καταδεικνύει την πλήρη αξιοποίηση της υψηλής αντοχής των ινών.
- Η αστοχία των μανδύων TRM λόγω εγκάρσιας διάγκωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος είναι γενικώς βαθμιαία και όχι τόσο ξαφνική (και ψαθυρή) όπως στην περίπτωση των μανδύων ΙΟΠ, γεγονός που οφείλεται στην σταδιακή θραύση δεσμών ινών. Η θραύση αυτή επεκτείνεται σχετικά αργά σε γειτονικές δέσμες, ως αποτέλεσμα της μειωμένης ανακατανομής της έντασης που παρέχει η ανόργανη μήτρα (κονίαμα) σε σχέση με την πολυμερική (εποξειδική ρητίνη). Έτσι, η συμπεριφορά σκυροδέματος περισφιγμένου με TRM είναι περισσότερο πλαστική σε σχέση με το αντίστοιχο περισφιγμένο με ΙΟΠ.
- Η αναλυτική προσομοίωση για την περίσφιξη σκυροδέματος με TRM μπορεί να γίνει αξιοποιώντας υφιστάμενα προσομοιώματα περίσφιγξης με ΙΟΠ, στα οποία λαμβάνεται υπόψη η μειωμένη αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM μέσω κατάλληλων μειωτικών συντελεστών (π.χ. Triantafyllou et al. 2006).
- Η περίσφιξη μέσω λωρίδων σε ελικοειδή διάταξη και αγκύρωση μόνο στα άκρα των δομικών στοιχείων αποτελεί ενδιαφέρουσα τεχνική ικανοποιητικής αποτελεσματικότητας.

### 3 ΑΥΞΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Στην Ενότητα αυτή μελετάται η δυνατότητα χρήσης μανδύων TRM ως μέσου περίσφιγξης στις κρίσιμες περιοχές (πόδας και κορυφή) υποστυλωμάτων μη σεισμικά σχεδιασμένων παλαιών κατασκευών και γίνεται σύγκριση με μανδύες ίσης δυστένειας από ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ). Παρουσιάζονται προκαταρκτικά πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών ανακυκλιζόμενης φόρτισης επί τριών στοιχείων τύπου προβόλου (Σχήμα 4β), αναπαριστώντας σε πλήρη κλίμακα υποστυλώματα με ύψος ίσο με το μισό του ύψους τυπικού ορόφου (1.60 m). Τα δοκίμια είχαν τετραγωνική διατομή 250×250 mm με διαμήκη οπλισμό από τέσσερις γωνιακές λείες ράβδους Φ14 και εγκάρσιο οπλισμό συνδετήρων Φ8 σε αποστάσεις 200 mm, με τα άγκιστρα κεκαμμένα κατά 90° (Σχήμα 4α). Για την παρασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε έτοιμο σκυρόδεμα C16/20 με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με 25 N/mm<sup>2</sup>. Ο διαμήκης οπλισμός των δοκιμίων είχε τάση διαρροής 372 N/mm<sup>2</sup>, εφελκυστική αντοχή 433 N/mm<sup>2</sup> και παραμόρφωση θραύσης 17%, ενώ οι αντίστοιχες τιμές για τον εγκάρσιο οπλισμό ήταν 351 N/mm<sup>2</sup>, 444 N/mm<sup>2</sup> και 19.5%. Από τα τρία δοκίμια που περιγράφονται στην παρούσα εργασία ένα δοκιμάστηκε χωρίς ενίσχυση (δοκίμιο αναφοράς), ένα ενισχύθηκε στον πόδα με δύο στρώσεις μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών (δοκίμιο R2) και ένα ενισχύθηκε στον πόδα με τέσσερις στρώσεις μανδύα ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (δοκίμιο M4). Ο μανδύας κάλυπτε τον πόδα των υποστυλωμάτων σε ύψος 430 mm. Τα υλικά των μανδύων ήταν ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκίμια της Ομάδας D που

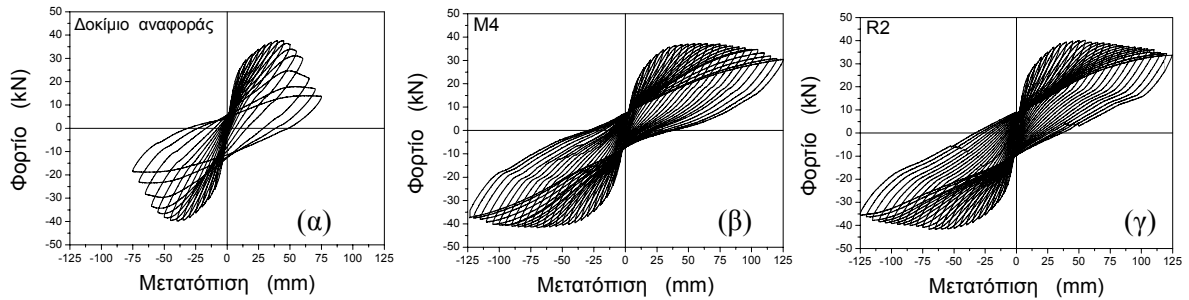
περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Σημειώνεται ότι οι δύο μανδύες (TRM και ΙΟΠ) αποτελούνταν από ίνες άνθρακα ίδιου τύπου και είχαν ίση δυστένεια.



Σχήμα 4. (α) Διατομή δοκιμίων, (β) διάταξη δοκιμών και (γ) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.

Τα δοκίμια φορτίστηκαν με οριζόντια δύναμη σε ύψος 1.60 m από τη βάση, μέσω σερβοϋδραυλικού εμβόλου MTS αγκυρωμένου στην κεφαλή του στοιχείου (Σχ. 4γ). Η ιστορία φόρτισης αποτελούνταν από επαναλαμβανόμενους κύκλους μετατοπίσεων αυξανόμενου εύρους (κατά 5 mm) μέχρι είτε την αστοχία του δοκιμίου (δοκίμιο αναφοράς) είτε την επιβολή μεγάλης μετατόπισης (125 mm σε κάθε διεύθυνση) έως εξαντλήσεως της δυναμικότητας του εμβόλου (δοκίμια με μανδύες). Η ταχύτητα φόρτισης μεταβάλλονταν από 0.2 mm/s στους πρώτους κύκλους έως 1.1 mm/s στους τελευταίους. Τα δοκίμια φορτίζονταν ταυτόχρονα κατά τη διεύθυνση του άξονά τους με σταθερό αξονικό φορτίο 460 kN, το οποίο αντιστοιχεί στο 30% περίπου της θλιπτικής αντοχής των υποστυλωμάτων υπό κεντρική θλίψη. Το φορτίο ασκούνταν στην κεφαλή κάθε δοκιμίου μέσω τεσσάρων (συμμετρικά τοποθετημένων ως προς τον άξονα του δοκιμίου) εμβόλων, σύμφωνα με την διάταξη του Σχήματος 4β, η οποία εξασφαλίζει την συνεχή εφαρμογή του αξονικού φορτίου κατά την αξονική διεύθυνση του στοιχείου. Κατά την διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν η δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου, η πραγματική τιμή του αξονικού φορτίου (μέσω μηκυσιομέτρων στις δύο προεντεταμμένες ράβδους επιβολής του αξονικού φορτίου) καθώς και η στροφή και η κατακόρυφη (αξονική) μετατόπιση τριών διατομών, 130 mm, 260 mm και 450 mm πάνω από τη βάση των στοιχείων.

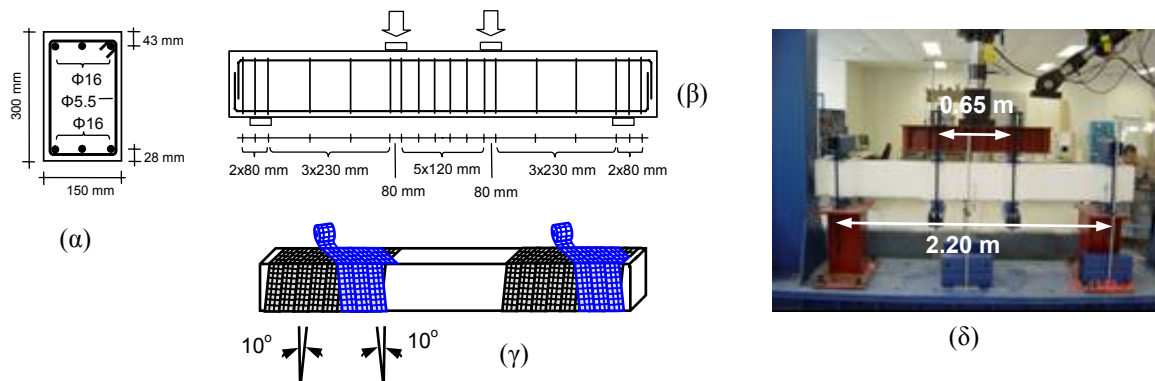
Τα αποτελέσματα των δοκιμών δίνονται στο Σχήμα 5. Κύριο χαρακτηριστικό της απόκρισης του δοκιμίου αναφοράς (Σχ. 5α) ήταν η διαρροή σε κάμψη, η οποία όμως ακολουθήθηκε από λυγισμό των διαμήκων ράβδων, λόγω του μεγάλου αστήρικτου μήκους από τους αραιά τοποθετημένους συνδετήρες, και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος πάνω από την βάση. Το δοκίμιο αυτό εμφάνισε σημαντική πτώση της αντοχής σε μετακίνηση περίπου ίση με 50 mm. Η απόκριση των ενισχυμένων υποστυλωμάτων (Σχ. 5β,γ) βελτιώθηκε σημαντικά λόγω της περίσφιγξης από τους μανδύες. Η αντοχή καθορίστηκε και πάλι από καμπτική διαρροή στη διατομή της βάσης στο ίδιο περίπου φορτίο, ωστόσο ο επακόλουθος λυγισμός των διαμήκων ράβδων ήταν σχετικά ελεγχόμενος, λόγω της περίσφιγξης μέσω των μανδύων. Έτσι κατέστη δυνατή η ανάπτυξη μεγάλης οριζόντιας μετατόπισης, η οποία συνοδεύτηκε από μικρή (μανδύας ΙΟΠ) έως οριακή (μανδύας TRM) πτώση του φορτίου. Σημειώνεται πάντως ότι σημαντικό ποσοστό της οριζόντιας μετατόπισης οφείλονταν στην ολίσθηση των διαμήκων ράβδων, λόγω των πτωχών συνθηκών συνάφειας με το περιβάλλον σκυροδέμα. Συμπερασματικά, η αποτελεσματικότητα του μανδύα ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα ως προς την καθυστέρηση των δυσμενών συνεπειών του λυγισμού των ράβδων ήταν τουλάχιστον ίση, αν όχι μεγαλύτερη, από αυτήν του μανδύα ινοπλισμένων πολυμερών ίσης δυστένειας.



Σχήμα 5. Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης: (α) δοκίμιο αναφοράς, (β) δοκίμιο με μανδύα TRM, (γ) δοκίμιο με μανδύα ΙΟΠ (ίσης δυστένειας).

#### 4 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΝΑΝΤΙ ΤΕΜΝΟΥΣΑΣ

Στην παρούσα Ενότητα μελετάται η χρήση μανδυών TRM ως μέσου ενίσχυσης κρίσιμων έναντι τέμνουσας περιοχών σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος. Η διερεύνηση έγινε μέσω δοκιμών μονοτονικής και ανακυκλιζόμενης κάμψης τεσσάρων σημείων επί έξι αμφοεπίστων στοιχείων ορθογωνικής διατομής  $150 \times 300$  mm και συνολικού μήκους 2.60 m. Το θεωρητικό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ήταν 2.20 m και η απόσταση μεταξύ των δύο συγκεντρωμένων φορτίων ήταν 0.65 m, δημιουργώντας έτσι μήκη διάτμησης 0.775 m. Τα δοκίμια ήταν σκοπίμως υπερδιαστασιολογημένα έναντι κάμψης και υποδιαστασιολογημένα (στα μήκη διάτμησης) έναντι τέμνουσας, ώστε η αστοχία πριν την ενίσχυση να οφείλεται σε διάτμηση. Είχαν διαμήκη οπλισμό από έξι ράβδους S500 διαμέτρου  $\Phi 14$  (τρεις ανά πέλμα) και εγκάρσιο οπλισμό συνδετήρων S220 διαμέτρου  $\Phi 5.5$  σε αποστάσεις 230 mm εντός του μήκους διάτμησης (Σχ. 6α,β). Για την κατασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με  $30.5 \text{ N/mm}^2$ . Η τάση διαρροής του διαμήκους οπλισμού ήταν  $575 \text{ N/mm}^2$  και του εγκάρσιου  $275 \text{ N/mm}^2$ .



Σχήμα 6. (α)-(β) Γεωμετρία δοκιμίων, (γ) ελικοειδής διάταξη λωρίδων μανδύα ενίσχυσης στο μήκος διάτμησης, (δ) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης.

Κύριοι στόχοι του πειραματικού προγράμματος ήταν να μελετηθούν: (α) Η αποτελεσματικότητα μανδύα TRM συγκριτικά με αυτήν του μανδύα ΙΟΠ ως προς την ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος έναντι τέμνουσας. (β) Ο ρόλος του αριθμού των στρώσεων μανδυών TRM στην ενίσχυση έναντι τέμνουσας. (γ) Η αποτελεσματικότητα μανδύα ο οποίος κατασκευάζεται με λωρίδες σε ελικοειδή διάταξη (Σχ. 6γ) συγκριτικά με τον “συμβατικό” μανδύα



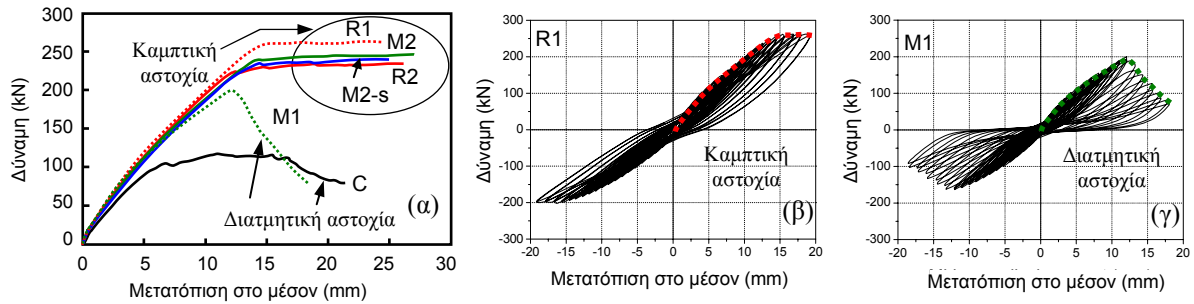
του μονού υφάσματος. Ως “συμβατικός” μανδύας μονού υφάσματος ορίζεται αυτός ο οποίος κατασκευάζεται με ύφασμα ινών πλάτους ίσου με το μήκος διάτμησης και εφαρμόζεται μέσω περιτύλιξης του υφάσματος τόσες φορές ώστε να επιτευχθεί ο επιθυμητός αριθμός στρώσεων. Αντιθέτως, στον μανδύα με ελικοειδώς τοποθετημένες λωρίδες, κάθε στρώση ενίσχυσης κατασκευάζεται με μία λωρίδα υφάσματος σχετικά μικρού πλάτους (150 mm στην παρούσα εργασία), η οποία ξεκινά από το ένα άκρο του μήκους διάτμησης και τερματίζει στο άλλο άκρο, ενώ κάθε επόμενη λωρίδα έχει αντίθετη φορά περιτύλιξης από την προηγούμενη. Η περιτύλιξη στην περίπτωση αυτή προϋποθέτει την εφαρμογή κάθε λωρίδας υπό γωνία ως προς την κάθετο στον άξονα του στοιχείου, που στην παρούσα εργασία ήταν ίση με  $10^\circ$ .

Από τα έξι δοκίμια που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία τα τέσσερα δοκιμάστηκαν σε μονοτονική φόρτιση και τα υπόλοιπα δύο σε ανακυκλιζόμενη. Εκ των τεσσάρων πρώτων, ένα ήταν δοκίμιο αναφοράς (C), δηλαδή χωρίς ενίσχυση, ένα ενισχύθηκε με δύο στρώσεις ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (TRM) με τρόπο συμβατικό (Δοκίμιο M2), ένα ενισχύθηκε με δύο στρώσεις του ίδιου ινοπλέγματος σε πολυμερική (εποξειδική) μήτρα (Δοκίμιο R2) και ένα ενισχύθηκε με δύο στρώσεις TRM οι οποίες κατασκευάστηκαν με δύο λωρίδες σε ελικοειδή διάταξη (Δοκίμιο M2-s, Σχ. 6γ). Επειδή, όπως περιγράφεται παρακάτω, όλοι οι προαναφερθέντες τύποι μανδύα μετέτρεψαν τον μηχανισμό αστοχίας από ψαθυρό - διατμητικού τύπου σε πλάστιμο – καμπτικού τύπου, τα επόμενα δύο δοκίμια ενισχύθηκαν με μία μόνο στρώση μανδύα, ώστε να καταστεί εφικτή η αστοχία των ενισχυμένων δοκιμίων και πάλι λόγω διάτμησης και με τον τρόπο αυτό να ποσοτικοποιηθεί η συμβολή του μανδύα στην ανάληψη τέμνουσας. Στο ένα εκ των δύο αυτών δοκιμίων ο μανδύας ήταν τύπου ινοπλέγματος σε ανόργανη μήτρα (Δοκίμιο M1) και στο άλλο (ιδίου ινοπλέγματος) σε εποξειδική μήτρα (Δοκίμιο R1).

Τα υλικά των μανδύων ήταν ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις Ομάδες B και C του πειραματικού προγράμματος περίσφιγξης (Tex1, δηλαδή ανθρακοπλέγματα ονομαστικού πάχους 0.047 mm, κονίαμα MII για τους μανδύες των M2, M2-s, M1, εποξειδική ρητίνη για τους μανδύες των R2 και R1). Επίσης σημειώνεται ότι στα δοκίμια TRM ή ΙΟΠ με τον ίδιο αριθμό στρώσεων (M2 και R2, M1 και R1) οι μανδύες είχαν ίση δυστένεα.

Η φόρτιση των Δοκιμίων C, M2, M2-s και R2 επεβλήθη μέσω μονοτονικής επιβαλλόμενης μετατόπισης σερβοϋδραυλικού εμβόλου MTS στις θέσεις εφαρμογής των συγκεντρωμένων φορτίων με ταχύτητα 0.01 mm/s. Η ιστορία φόρτισης για τα δοκίμια M1 και R1 αποτελούνταν από επαναλαμβανόμενους κύκλους μετατοπίσεων αυξανόμενου εύρους (κατά 1 mm) με ταχύτητα 0.2 mm/s μέχρι είτε την αστοχία του δοκιμίου (για το δοκίμιο M1, το οποίο αστόχησε διατμητικά) είτε την σαφή ένδειξη διαρροής (για το δοκίμιο R1, το οποίο αστόχησε καμπτικά). Κατά την διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν η δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου καθώς και η μετατόπιση στον μέσον του ανοίγματος (μέσω ηλεκτρικών μηχανομετρών).

Το δοκίμιο αναφοράς (C) αστόχησε διατμητικά μέσω της ανάπτυξης διαγώνιας ρωγμής σημαντικού εύρους στο μήκος διάτμησης σε τιμή του (συνολικού) φορτίου ίση με 116.5 kN. Η απόκριση των υπολοίπων τριών δοκιμίων (M2, M2-s, R2) που δοκιμάστηκαν μονοτονικά ήταν χαρακτηριστική καμπτικής αστοχίας λόγω διαρροής του διαμήκους οπλισμού, καταδεικνύοντας έτσι ότι και οι τρεις διατάξεις μανδύα δύο στρώσεων, ανεξαρτήτως τύπου μητρικού υλικού (ανόργανο κονίαμα ή ρητίνη) και τρόπου εφαρμογής (“συμβατικός” μανδύας δύο στρώσεων ή μανδύας με δύο λωρίδες σε ελικοειδή διάταξη) ήταν επαρκείς ώστε να αλλάξουν τον μηχανισμό αστοχίας από ψαθυρό – διατμητικού τύπου σε πλάστιμο – καμπτικού τύπου, μέσω της ανάληψης δύναμης από τις ίνες, κατ’ αναλογία προς τους εσωτερικούς συνδετήρες. Η μέγιστες τιμές φορτίου για τα δοκίμια M2, M2-s και R2 ήταν 243.8 kN, 237.7 kN και 233.4 kN, αντιστοίχως. Έτσι συμπεραίνεται ότι κάθε μανδύας, ονομαστικού πάχους πλέγματος μόλις 0.09 mm παρέλαβε τέμνουσα δύναμη με μέγεθος που έχει ως κάτω όριο περίπου ίσο με 60 kN (233.4/2 – 116.5/2). Τα αποτελέσματα των μονοτονικών δοκιμών σε μορφή καμπυλών συνολικής δύναμης – μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος δίνονται στο Σχήμα 7α (συνεχείς καμπύλες).



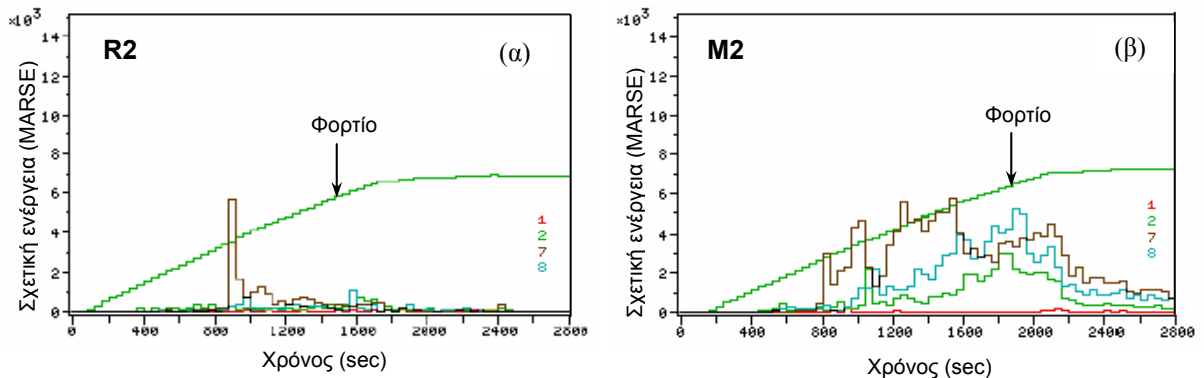
Σχήμα 7. Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης: (α) Καμπύλες μονοτονικών δοκιμών (συνεχείς γραμμές) και περιβάλλουσες ανακυκλιζόμενων δοκιμών (διακεκομμένες). (β) Απόκριση δοκιμίου με μανδύα ΙΟΠ (μια στρώση). (γ) Απόκριση δοκιμίου με μανδύα TRM (μια στρώση).

Εκ των δύο δοκιμών που καταπονήθηκαν σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση το R1 (ενισχυμένο με μία στρώση μανδύα ΙΟΠ) υπέστη καμπτικού τύπου αστοχία η οποία εκδηλώθηκε με έντονες κατακόρυφες ρωγμές στην περιοχή μέγιστης ροπής. Το φορτίο στις δύο διευθύνσεις σταθεροποιήθηκε στις τιμές 261.9 kN (ώθηση) και 201.4 kN (έλξη), όπως δίνεται στο Σχήμα 7β. Εκτιμάται ότι η ασυμμετρία των βρόχων υστέρησης και η διαφορετική τιμή του φορτίου διαρροής ανά διεύθυνση οφείλονταν στις διαφορετικές τιμές του στατικού ύψους για τις ράβδους άνω και κάτω πέλματος, λόγω των διαφορετικών (εκ λάθους) επικαλύψεων (Σχ. 7α). Το δεύτερο δοκίμιο (M1, ενισχυμένο με μία στρώση μανδύα TRM) αστόχησε διατμητικά και ανέπτυξε έντονες λοξές (χιαστί) ρωγμές στο μήκος διάτμησης, οι οποίες μάλιστα ήταν εμφανείς στις εξωτερικές επιφάνειες του μανδύα. Το μέγιστο φορτίο στις δύο διευθύνσεις ήταν 200.1 kN (έλξη) και 162 kN (ώθηση). Χαρακτηριστικό της απόκρισης του δοκιμίου M1, σε αντίθεση με το R1, ήταν η έντονη πτώση του φορτίου μετά την μέγιστη τιμή (Σχ. 7γ). Επίσης, η θραύση του μανδύα (λόγω λοξής ρηγμάτωσης) έγινε σταδιακά: αρχικά ξεκίνησε από μια μικρή ομάδα δεσμών ινών και βαθμιαία επεκτάθηκε προς τις γειτονικές ίνες με τρόπο σχετικά ελεγχόμενο, γεγονός που δεν χαρακτηρίζει μανδύες ΙΟΠ, η θραύση των οποίων (όταν συμβαίνει) είναι συνήθως εκρηκτική.

Συγκρίνοντας την απόκριση του δοκιμίου M1 με αυτήν του δοκιμίου αναφοράς εκτιμάται ότι η μία στρώση μανδύα πάχους μόλις 0.047 mm παρέλαβε τέμνουσα δύναμη περίπου ίση με 42 kN (200.1/2 – 116.5/2). Με βάση την τιμή αυτή και από απλά προσομοιώματα για την συμβολή των συνθέτων υλικών στην ανάληψη τέμνουσας (π.χ. Τριανταφύλλου 2004) κατάλληλα τροποποιημένα ώστε να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη ινών σε διαφορετικές διευθύνσεις (Papanicolaou & Triantafyllou 2006) υπολογίζεται ότι η ενεργός παραμόρφωση του μανδύα κατά την διατμητική αστοχία του δοκιμίου M1 ήταν περίπου ίση με 0.8%, τιμή η οποία είναι αρκετά υψηλή. Βεβαίως αν συγκριθεί η απόκριση του δοκιμίου M1 με αυτήν του R1 συνάγεται ότι η αποτελεσματικότητα του μανδύα TRM ήταν μειωμένη σε σχέση με αυτήν του μανδύα ΙΟΠ: ο τελευταίος ανέπτυξε μεγαλύτερη ενεργό παραμόρφωση, κατ' ελάχιστον ίση με  $0.008 * [(261.9/2 - 116.5/2) / (200.1/2 - 116.5/2)] = 1.4\%$  και με άνω όριο την οριακή παραμόρφωση των ινών, περίπου ίση με 1.6-1.7%.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι σε ορισμένες εκ των δοκιμών (αυτές της μονοτονικής φόρτισης) έγινε εκτεταμένη χρήση αισθητήρων ακουστικής εκπομπής (14 αισθητήρες ανά δοκίμιο, έξι σε κάθε όψη και από ένας σε κάθε άκρο) με σκοπό την παρακολούθηση της εξέλιξης της βλάβης κατά την διάρκεια της φόρτισης. Οι λεπτομέρειες για την λήψη, καταγραφή και επεξεργασία των σημάτων ξεφεύγουν από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, αλλά εν περιλήψει μπορεί να αναφερθεί ότι η ενέργεια που “απελευθερώνεται” λόγω ρηγμάτωσης (ποσοτικοποιείται αθροίζοντας εντάσεις ακουστικών σημάτων στους αισθητήρες) στα δοκίμια με μανδύες TRM είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν στα αντίστοιχα με μανδύες ΙΟΠ (Σχ. 8 για M2 σε σύγκριση με R2). Πιθανό συμπέρασμα της παραπάνω παρατήρησης είναι ότι ο έλεγχος ρηγμάτωσης με μανδύες TRM είναι λιγότερο αποτελεσματικός σε σύγκριση με μανδύες ΙΟΠ, γεγονός που αποδίδεται στην

μειωμένη ικανότητα των κονιαμάτων, σε σύγκριση με τις ρητίνες, για ανακατανομή της έντασης μεταξύ των ινών, αλλά και στο γεγονός ότι τα κονιάματα υφίστανται και αυτά ρηγματώσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης.



Σχήμα 8. Διαγράμματα ενέργειας – χρόνου, όπως αυτά καταγράφονται για τέσσερις αισθητήρες ακουστικής εκπομπής που καλύπτουν την μια όψη ενός εκ των δύο μηκών διάτμησης για (α) το Δοκίμιο R2, (β) το Δοκίμιο M2.

Κύριο συμπέρασμα της ενότητας αυτής είναι ότι, με βάση τα σχετικά περιορισμένα πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, οι μανδύες ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα αποτελούν εξαιρετικά ενδιαφέρουσα πρόταση διατμητικής ενίσχυσης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, με αποτελεσματικότητα ενδεχομένως μικρότερη σε σχέση με τους μανδύες ινοπλισμένων πολυμερών, κάτι όμως που μπορεί να αντισταθμιστεί εύκολα μέσω της κατάλληλης επιλογής του αριθμού των στρώσεων.

## 5 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΝΑΝΤΙ ΚΑΜΨΗΣ

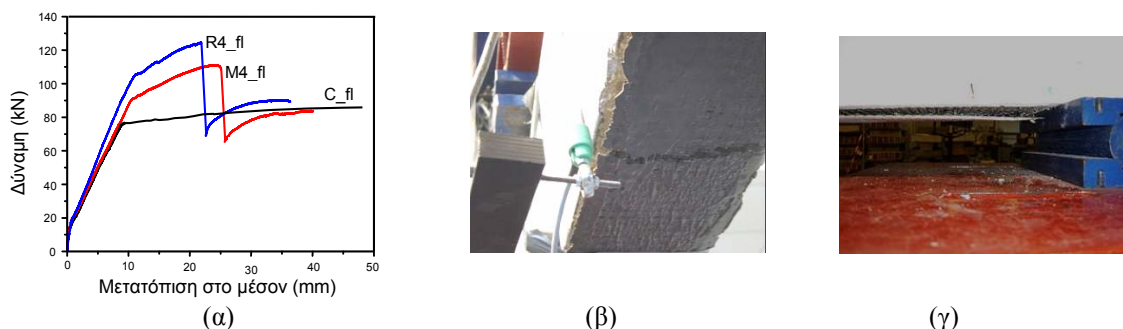
Στην τελευταία Ενότητα της εργασίας μελετάται η χρήση μανδύων TRM ως μέσου ενίσχυσης στοιχείων τύπου δοκού έναντι κάμψης. Η διερεύνηση έγινε μέσω δοκιμών μονοτονικής κάμψης τεσσάρων σημείων επί τριών αμφιερίστων δοκών ορθογωνικής διατομής  $150 \times 250$  mm και συνολικού μήκους 2.30 m. Το θεωρητικό άνοιγμα μεταξύ των στηρίξεων ήταν 2.0 m και η απόσταση μεταξύ των δύο συγκεντρωμένων φορτίων ήταν 0.50 m. Τα δοκίμια ήταν σκοπίμως υπερδιαστασιολογημένα έναντι τέμνουσας και υποδιαστασιολογημένα έναντι κάμψης, ώστε η αστοχία πριν την ενίσχυση να είναι καμπτικού τύπου. Είχαν διαμήκη οπλισμό από τέσσερις ράβδους S500 διαμέτρου  $\Phi 12$  (δύο ανά πέλμα) και εγκάρσιο οπλισμό πυκνών συνδετήρων S500 διαμέτρου  $\Phi 8$  σε αποστάσεις 100 mm. Για την κατασκευή των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, το οποίο παρασκευάστηκε στα πλαίσια ενός παράλληλου ερευνητικού προγράμματος, με θλιπτική αντοχή 28 ημερών ίση με  $34.5 \text{ N/mm}^2$ . Η τάση διαρροής του οπλισμού ήταν  $530 \text{ N/mm}^2$ .

Από τα τρία δοκίμια που περιγράφονται στην παρούσα εργασία ένα δοκιμάστηκε χωρίς ενίσχυση (δοκίμιο αναφοράς C\_fl), ένα ενισχύθηκε στο εφελκόμενο πέλμα με τέσσερις στρώσεις ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα (δοκίμιο M4\_fl) και ένα ενισχύθηκε με τον ίδιο τρόπο, κάνοντας όμως χρήση εποξειδικής ρητίνης αντί κονιαμάτων (δοκίμιο R4\_fl). Ο οπλισμός ενίσχυσης είχε πλάτος 190 mm και επικολλήθηκε σε μήκος 1.90 m, δηλαδή σε όλο σχεδόν το μήκος του εφελκόμενου πέλματος. Τα υλικά ενίσχυσης ήταν ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις Ομάδες B και C του πειραματικού προγράμματος περίσφιγξης (Tex1, δηλαδή ανθρακοπλέγματα ονομαστικού πάχους 0.047 mm, κονίαμα MΠ για το Δοκίμιο M4\_fl, εποξειδική ρητίνη για το

Δοκίμιο R4\_fl). Επίσης σημειώνεται ότι και στα δύο ενισχυμένα δοκίμια οι οπλισμοί ενίσχυσης είχαν (περίπου) ίση δυστένεια.

Η φόρτιση των δοκών επεβλήθη μέσω μονοτονικής επιβαλλόμενης μετατόπισης σερβοϋδραυλικού εμβόλου MTS στις θέσεις εφαρμογής των συγκεντρωμένων φορτίων με ταχύτητα 0.01 mm/s. Κατά την διάρκεια των δοκιμών καταγράφονταν η δύναμη και η μετατόπιση του εμβόλου καθώς και η μετατόπιση στον μέσον του ανοίγματος (μέσω ηλεκτρικών μηχανομητρών).

Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μορφή καμπυλών συνολικής δύναμης – μετατόπισης στο μέσον του ανοίγματος δίνονται στο Σχήμα 9α. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η απόκριση του δοκιμίου αναφοράς (C\_fl) ήταν η χαρακτηριστική διγραμμική με σχεδόν οριζόντιο δεύτερο κλάδο, χαρακτηριστική υπο-οπλισμένης δοκού. Περίπου διγραμμική ήταν και η απόκριση των ενισχυμένων δοκιμίων, με αλλαγή κλίσης στο φορτίο που αντιστοιχεί στην διαρροή των εσωτερικών οπλισμών και μέγιστο φορτίο που καθορίστηκε από την αστοχία του εξωτερικού οπλισμού ενίσχυσης. Πιο συγκεκριμένα, για το Δοκίμιο R4\_fl η αστοχία επήλθε μέσω εφελκυστικής θραύσης των ινών περίπου στο μέσον του ανοίγματος (Σχ. 9β), ενώ το Δοκίμιο M4\_fl αστόχησε λόγω αποκόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης στο ένα άκρο (Σχ. 9γ). Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι η αποκόλληση αυτή έγινε δια μέσου του κονιάματος στην διεπιφάνεια μεταξύ δύο στρώσεων ινοπλεγμάτων (“διαστρωματική απόσχιση” – interlaminar shearing) και όχι ως συνήθως (στην περίπτωση οπλισμών ενίσχυσης ΙΟΠ), δηλαδή δια μέσου του σκυροδέματος κοντά στην διεπιφάνεια σκυροδέματος – οπλισμών ενίσχυσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην σχετικά χαμηλή διατμητική αντοχή του κονιάματος (μεταξύ των ινοπλεγμάτων), η οποία ήταν συγκρίσιμη με αυτήν του σκυροδέματος των δοκών. Ενδεχομένως, αν το κονίαμα του οπλισμού ενίσχυσης TRM ήταν υψηλότερης αντοχής (αλλά και δυσθραυστότητας – fracture toughness), ο τύπος αστοχίας του οπλισμού ενίσχυσης TRM να ήταν ίδιος με αυτόν του οπλισμού ΙΟΠ. Άλλα χαρακτηριστικά της απόκρισης του Δοκιμίου M4\_fl συγκριτικά με το Δοκίμιο R4\_fl είναι η μικρότερη τιμή φορτίου διαρροής, η μικρότερη δυσκαμψία μετά την διαρροή (κλίση του δεύτερου κλάδου της απόκρισης) αλλά και η μεγαλύτερη παραμορφωσιμότητα κατά την αστοχία. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποδίδονται στην μειωμένη δυστημψία (shear stiffness) του οπλισμού TRM σχετικά με τον οπλισμό ΙΟΠ, με αποτέλεσμα την ελαφρά μειωμένη διατμητική συνεργασία μεταξύ εξωτερικών οπλισμών και σκυροδέματος.



Σχήμα 9. (α) Διαγράμματα δύναμης – μετατόπισης. (β) Αστοχία οπλισμού ενίσχυσης στο Δοκίμιο R4\_fl λόγω εφελκυστικής θραύσης των ινών. (γ) Αστοχία λόγω αποκόλλησης του οπλισμού ενίσχυσης στο Δοκίμιο M4.

Πάντως, παρόλη την ικανοποιητική συμπεριφορά των οπλισμών ενίσχυσης ινοπλεγμάτων σε ανόργανη μήτρα συγκριτικά με τους οπλισμούς σε πολυμερική μήτρα, άποψη των συγγραφέων είναι ότι η τεχνική αυτή θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω για την καμπτική ενίσχυση στοιχείων

τύπου πλάκας (και όχι δοκού), ώστε να γίνεται πλήρης αξιοποίηση των ινών και στις δύο διευθύνσεις των πλεγμάτων.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αναπτύσσεται μια νέα τεχνική ενίσχυσης δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Η τεχνική βασίζεται στη χρήση συνθέτων υλικών τα οποία αποτελούνται από ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (π.χ. κονίαμα με βάση το τσιμέντο), αποσκοπώντας στην επίλυση προβλημάτων που χαρακτηρίζουν τα ινοπλισμένα πολυμερή (ΙΟΠ) σχετικά με την χρήση εποξειδικών ρητινών. Τα ινοπλέγματα ινών σε ανόργανη μήτρα (textile-reinforced mortars – TRM) δοκιμάζονται στη μορφή μανδύα για την ενίσχυση οπλισμένου σκυροδέματος με στόχο την περίσφιξη, την αύξηση της πλαστιμότητας υποστυλωμάτων, την ενίσχυση έναντι τέμνουσας και την ενίσχυση δοκών έναντι κάμψης. Βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων καταδεικνύεται ότι η αποτελεσματικότητα των μανδύων TRM είναι υψηλή και γενικώς παρόμοια με αυτήν των μανδύων ΙΟΠ (σε κάποιες περιπτώσεις είναι ελάχιστα μειωμένη ως προς την αντίστοιχη των ΙΟΠ). Αναμένεται ότι, όπως η τεχνική των ΙΟΠ, έτσι και η τεχνική των TRM, στο εγγύς μέλλον θα αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρόταση για την αναβάθμιση των κατασκευών.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος “Αποτίμηση Σεισμικής Τρωτότητας Υφισταμένων Κτιρίων και Ανάπτυξη Προηγμένων Υλικών/Τεχνικών Ενίσχυσης” – ΑΡΙΣΤΙΩΝ ([www.aristion.gr](http://www.aristion.gr)), το οποίο χρηματοδοτείται από την ΓΓΕΤ μέσω του προγράμματος ΕΠΑΝ “Δομημένο Περιβάλλον και Διαχείριση Σεισμικού Κινδύνου”. Στην υλοποίηση της εργασίας έχουν συμβάλει οι πρώην μεταπτυχιακοί φοιτητές Π. Ζησιμόπουλος και Α. Λαουρδέκης, καθώς και μεγάλος αριθμός προπτυχιακών φοιτητών στα πλαίσια εκπόνησης διπλωματικών εργασιών.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Curbach, M. & Brueckner, A. 2003. Textile Strukturen zur Querkraftverstaerkung von Stahlbetonbauteilen. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Colloquium on Textile Reinforced Structures, Curbach M (ed.), Dresden, 347-360 (in German).
- Curbach, M. & Ortlepp, R. 2003. Besonderheiten des Verbundverhaltens von Verstaerkungsschichten aus textilbewehrtem. Proceedings of 2<sup>nd</sup> Colloquium on Textile Reinforced Structures, Curbach M (ed.), Dresden, 361-374 (in German).
- Triantafillou, T. C. & Papanicolaou, C. G. 2005. Textile Reinforced Mortars (TRM) versus Fiber Reinforced Polymers (FRP) as Strengthening Materials of Concrete Structures. 7<sup>th</sup> International Conference on Fiber-Reinforced Polymers in Reinforced Concrete Structures – FRPRCS7, Kansas City, USA, November 7-10. ACI SP-230.
- Triantafillou, T. C. & Papanicolaou, C. G. 2006. Shear Strengthening of RC Members with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets. *Materials and Structures, RILEM*, in press.
- Triantafillou, T. C., Papanicolaou, C. G., Zisimopoulos, P. and Laourdekis, T. 2006. Concrete Confinement with Textile Reinforced Mortar (TRM) Jackets. *ACI Structural Journal*, 103(1), 28-37.